발간등록번호
11-1721000-000719-10

2022

양자정보기술 백서

QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

과학기술정보통신부 NIA 한국지능정보사회진흥원 미래양자융합포럼 Future Quantum Convergence Forum

2022 양자정보기술 백서
QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

과학기술정보통신부 NIA 한국지능정보사회진흥원 미래양자융합포럼 Future Quantum Convergence Forum

비매품/무료
95560
9 788984 837379
ISBN 978-89-8483-737-9 (PDF)

양자 정보 기술 백서

QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

발간사

『양자정보기술 백서』가
양자정보기술을 발전시키고
산업 혁신을 촉진하는 데 귀중한 자료로
활용되기를 기대합니다.



양자정보기술은 의료, 금융, 국방, 제조 등 주요 산업 분야에 접목 및 융합돼 국가 경제발전 및 사회 전반에 혁신을 가져올 게임체인저로 불리며, 머지않은 미래에 관련 시장이 크게 성장하리라 전망되고 있습니다. 세계 각국은 이러한 양자정보기술을 국가 전략기술로 분류하고 글로벌 기술 경쟁의 주도권을 확보하고자 연구개발과 상용화에 지속적인 투자와 정책적 지원을 아끼지 않고 있습니다. 우리 정부도 양자정보기술의 전략적 중요성을 인지해 12대 국가 필수전략기술로 지정했고, 연구개발 투자와 함께 양자 산업생태계 활성화를 위한 투자를 본격적으로 확대하고 있습니다.

이에 한국지능정보사회진흥원은 과학기술정보통신부와 함께 2020년부터 양자암호통신 인프라 구축 사업을 통해 대·중·소기업의 상생협력과 33개 공공·민간 분야 적용사례를 도출해 국내 양자암호통신 상용화를 적극적으로 추진했습니다. 그 결과 국내 양자암호통신 기반 전용회선 서비스 출시 및 보안제도 마련 등 양자통신 분야 상용화 기반을 다지고 초기시장을 창출하는 성과를 거두었습니다. 또한 2022년 1월에는 양자산업생태계지원센터를 개소해 양자정보기술의 연구개발과 산업화를 연계하는 선순환 구조를 구축하고 양자 산업생태계 조성 및 경쟁력 제고를 위해 노력하고 있으며, 미래양자융합포럼과 함께 산업계의 관심과 연계를 확대하면서 산업 분야별 양자정보기술의 활용사례와 비즈니스 모델 발굴은 물론 글로벌 협의체 및 해외 양자 산·학·연 기관들과의 교류·협력도 확대하고 있습니다.

올해 최초 발간하는 본 『양자정보기술 백서』는 국내 전문가 70여 명이 참여해 '양자산업 생태계 조성'의 일환으로 양자통신과 양자센서, 양자컴퓨팅 전 분야를 포괄하는 양자산업 생태계 정보를 통합·집대성했습니다. 본 백서에는 국내외 시장, 정책, 투자, 표준화, 특허 등 양자정보기술 동향과 분야별 R&D 동향을 종합적으로 정리했고, 각 산업 분야별 활용모델을 소개함으로써 미래 양자정보기술의 산업화를 위한 방향을 제시했습니다. 마지막으로 양자산업 저변 확대에 필수적인 양자정보기술 전문인력 양성을 위한 국내외 인력양성정책 및 교육정보, 양자 전문인력 현황, 글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체에 대한 내용을 담았습니다.

『양자정보기술 백서』 발간을 위해 백서 내용을 감수하고 발간 방향을 자문해 주신 편찬위원장님과 편찬위원님들, 백서 집필에 헌신적인 노고를 아끼지 않으신 집필진분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 기획과 편집 등 보이지 않는 곳에서 백서 발간을 위해 애써주신 모든 분께도 감사를 드립니다. 『양자정보기술 백서』가 양자정보기술을 발전시키고 산업 혁신을 촉진하는 데 귀중한 자료로 활용되기를 기대합니다.

한국지능정보사회진흥원 원장 황종성

추천사

많은 전문가의 협력을 통해
오랜 기간 공들여 제작된 『양자정보기술 백서』가
널리 활용되기를 바랍니다.



1900년, 막스 플랑크가 빛 에너지 양(量, quantity)의 가장 작은 단위로 에너지 퀀텀(quantum)을 제안함으로써 양자(量子, quantum)물리학이 시작됐습니다. 이후 다양한 물리량(量)이 연속적이지 않고 이산적(離散的)이라는 것이 밝혀지고 아인슈타인, 보어, 하이젠베르크, 슈뢰딩거, 디랙 등 뛰어난 물리학자들의 노력을 거치면서, 양자물리학은 자연의 궁극적 원리로 자리매김했습니다. 반도체소자와 레이저 등의 정보통신혁명을 비롯한 20세기 물질문명의 기초는 양자물리학의 원리로 만들어진 결과물입니다.

초기 양자물리학의 활용은 하드웨어, 즉 물질 부분에만 국한됨으로써 소프트웨어나 운영체제에서의 역할은 뚜렷한 한계를 보여줬습니다. 그러나 이제 21세기 정보통신기술의 패러다임은 하드웨어뿐만 아니라 소프트웨어와 운영체제까지 양자물리학의 원리가 폭넓게 쓰이는 '양자정보기술'로 옮겨 가고 있습니다.

양자정보기술은 초신뢰 보안연결이 가능한 '양자통신', 초정밀 계측이 가능한 '양자센서', 초고속연산이 가능한 '양자컴퓨팅' 등으로 나눌 수 있습니다. 각각의 기술은 개별 적용 및 융합을 통해 국방, 금융, 의료, 경제 등 다양한 산업에 접목돼 우리 사회에 큰 혁신을 가져올 것으로 기대하고 있습니다.

이에 선진국들은 양자기술에 대한 과감한 투자뿐만 아니라 양자산업 생태계 구축에도 관심을 쏟고 있습니다. 미국은 양자경제개발컨소시엄(QED-C = Quantum Economic Development Consortium), 캐나다는 캐나다양자산업협회(QIC = Quantum Industry Canada) 등을 설립해 운영하고 있습니다. 우리 정부도 2021년, 양자산업 활성화의 한 축을 담당할 국내 산·학·연 협의체인 '미래양자융합포럼'(FQCF = Future Quantum Convergence Forum)을 출범시키며 양자산업 생태계 조성 및 연구개발의 선순환구조를 구축했습니다.

미래양자융합포럼이 발간에 참여한 이번 백서는 양자산업 관련 다양하고 방대한 사안들을 집대성한 대한민국 최초의 양자산업 통합 백서로써, 우리 양자산업 발전의 기틀을 세우는 데 크게 이바지할 것으로 기대됩니다. 특히, 『양자정보기술 백서』는 산업의 현황 및 전망, 성과 등을 담아 다른 백서들과는 차별적이며, 양자기술 관련 종사자들에게 도움이 될 수 있게끔 국내 양자 전문인력 현황 및 수급전망, 글로벌 양자관련 협의체 정보까지 포함하고 있습니다.

많은 전문가의 협력을 통해 오랜 기간 공들여 제작된 『양자정보기술 백서』가 널리 활용되기를 바라며, 마지막으로, 『양자정보기술 백서』가 발간되기까지 고생하신 관계자분들께 깊은 감사의 말씀 올립니다.

미래양자융합포럼 공동의장 김재완

목차

들어가며

발간사 2
추천사 3

Ⅰ. 양자기술 동향

1장. 국내외 시장동향 28
2장. 국내외 정책동향 48
3장. 국내외 투자동향 86
4장. 국내외 표준화동향 104
5장. 국내외 특허동향 122
참고문헌 166

Ⅱ. 양자기술 R&D 동향

1장. 국내외 양자통신 R&D 동향 164
2장. 국내외 양자센서 R&D 동향 250
3장. 국내외 양자컴퓨팅 R&D 동향 308
참고문헌 406

Ⅲ. 양자기술 산업화 모델

1장. 산업영역별 산업화 모델 430
2장. 양자통신분야 산업화 모델 474
3장. 양자센서분야 산업화 모델 498
4장. 양자컴퓨팅분야 산업화 모델 520
5장. 산업화 모델 시사점 546
참고문헌 552

Ⅵ. 양자기술 전문인력 교육 정보 및 현황

1장. 국내외 양자기술 인력양성정책 558
2장. 국내외 양자기술 인력양성 전문 교육 정보 584
3장. 국내 양자기술 전문인력 현황 및 수급전망 612
참고문헌 632

Ⅴ. 글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체 현황

1장. 미국 QED-C 640
2장. EU Quantum Flagship 666
3장. 기타 국가(캐나다 QIC, 일본 Q-STAR) 688
참고문헌 700

부록

편찬위원회 704
집필전문가 705

그림 목차

Ⅰ 양자기술 동향

1장
그림 Ⅰ-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망 24
그림 Ⅰ-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비 25
그림 Ⅰ-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비 26
그림 Ⅰ-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망 27
그림 Ⅰ-1-5 국내 양자통신 시장 전망 28
그림 Ⅰ-1-6 수요산업별 글로벌 양자암호통신 시장 전망 30
그림 Ⅰ-1-7 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망 31
그림 Ⅰ-1-8 주요국 및 지역의 양자센서 시장 전망 33
그림 Ⅰ-1-9 부문별 글로벌 양자센서 시장 전망 34
그림 Ⅰ-1-10 글로벌 양자자기센서 시장 전망 35
그림 Ⅰ-1-11 수요산업별 글로벌 양자센서 시장 전망 36
그림 Ⅰ-1-12 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장 37
그림 Ⅰ-1-13 국내 양자컴퓨팅 시장 전망 38
그림 Ⅰ-1-14 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 39
그림 Ⅰ-1-15 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 40
그림 Ⅰ-1-16 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 41

2장
그림 Ⅰ-2-1 주요국 양자분야 정책 및 입법 현황 43
그림 Ⅰ-2-2 미국 양자 이니셔티브 추진 타임라인(2017~2021) 46
그림 Ⅰ-2-3 미국 내 양자인터넷 설계 51
그림 Ⅰ-2-4 양자선언문의 기술개발 로드맵 51
그림 Ⅰ-2-5 5대 전략적 연구 어젠다 53
그림 Ⅰ-2-6 EU 양자지원 계획 및 정책의 흐름 55
그림 Ⅰ-2-7 영국 NQTP 거버넌스 체계 및 투자 56
그림 Ⅰ-2-8 6개 이니셔티브 추진내용 58
그림 Ⅰ-2-9 캐나다 BC주 CREATE 프로그램 62
그림 Ⅰ-2-10 중국 양자기술 연구 관련 주요기관 현황 64
그림 Ⅰ-2-11 일본, 양자 미래사회 비전 실현을 향한 개관 69
그림 Ⅰ-2-12 양자기술 연구개발 투자전략 74
그림 Ⅰ-2-13 미래양자융합포럼 조직도 77
그림 Ⅰ-2-14 양자정보통신 관련 정보통신융합법 79

3장
그림 Ⅰ-3-1 세계 주요국 양자산업 투자 규모 82
그림 Ⅰ-3-2 미국 양자정보과학 R&D 예산 83
그림 Ⅰ-3-3 미국 양자정보과학 R&D 예산(NQI 프로그램별) 84
그림 Ⅰ-3-4 미국 양자정보과학(QIS) R&D 예산(NQI 기관별) 84
그림 Ⅰ-3-5 NSF 양자정보과학 R&D 예산(2022) 구성 비율 85
그림 Ⅰ-3-6 NSF QLCI 프로그램 참여 기관 분포도 86
그림 Ⅰ-3-7 DOE 양자정보과학 연구센터 구성 기관 분포도 87
그림 Ⅰ-3-8 EU 양자플래그십 프로젝트별 투자 구조 88
그림 Ⅰ-3-9 EU 양자플래그십 1단계 과제 연구개발비 구성 비율 89
그림 Ⅰ-3-10 영국 국가양자기술프로그램 허브 네트워크 90
그림 Ⅰ-3-11 영국 국가양자기술프로그램 투자 현황 91
그림 Ⅰ-3-12 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산 구성 비율 93
그림 Ⅰ-3-13 한국 양자기술 투자 추이 96

4장
그림 Ⅰ-4-1 ITU 조직구조 100
그림 Ⅰ-4-2 ITU-T 양자기술 표준화 연구그룹 관계 101
그림 Ⅰ-4-3 ITU-T 연구그룹별 주요 표준화 내용 102
그림 Ⅰ-4-4 양자 키 분배 네트워크 개요 102
그림 Ⅰ-4-5 ETSI 조직구조 106
그림 Ⅰ-4-6 ISO/IEC JTC1 조직구조 108
그림 Ⅰ-4-7 IEEE 조직구조 109
그림 Ⅰ-4-8 TTA 표준화위원회 조직구조 111

5장
그림 Ⅰ-5-1 양자기술 분야 IP5 국가별 출원 특허 수 118
그림 Ⅰ-5-2 양자기술 IP5 국가별 총출원 특허 수 및 연평균 증가율 119
그림 Ⅰ-5-3 세부 기술 분야별 IP5의 연도별 출원 특허 수 119
그림 Ⅰ-5-4 세부 기술 분야별, 국가별 특허 분석(2010~2019년) 120
그림 Ⅰ-5-5 양자기술 분야 국가별 출원 특허 수(2014~2020년) 121
그림 Ⅰ-5-6 양자기술 분야 출원인별 국내외 출원 특허 수(2014년~2020년) 122
그림 Ⅰ-5-7 양자통신 분야 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율(2010~2019년) 123
그림 Ⅰ-5-8 양자통신 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율 124
그림 Ⅰ-5-9 양자통신 분야 국가별 특허 증가율 125
그림 Ⅰ-5-10 양자통신 분야 국가별 특허 점유율 125
그림 Ⅰ-5-11 양자통신 분야 국가별 외국인 출원 비중 126
그림 Ⅰ-5-12 양자통신 분야 국가별 IP4 출원 비중 126
그림 Ⅰ-5-13 양자통신 분야 국가별 HHI(2010~2019년) 127
그림 Ⅰ-5-14 양자통신 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년) 128
그림 Ⅰ-5-15 양자통신 분야 기술시장 성장단계(2010~2019년) 129
그림 Ⅰ-5-16 양자통신 분야 출원 특허 수(2014~2020년) 130
그림 Ⅰ-5-17 양자통신 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수 136
그림 Ⅰ-5-18 양자통신 분야 주요 출원인 및 출원 건수(2010~2019년) 133
그림 Ⅰ-5-19 양자통신 세부 분야 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년) 134
그림 Ⅰ-5-20 양자통신 분야 국내 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년) 134
그림 Ⅰ-5-21 양자센서 분야 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율(2010~2019년) 135
그림 Ⅰ-5-22 양자센서 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율 136
그림 Ⅰ-5-23 양자센서 분야 국가별 특허 증가율 137
그림 Ⅰ-5-24 양자센서 분야 국가별 특허 점유율 137
그림 Ⅰ-5-25 양자센서 분야 국가별 외국인 출원 비중 138
그림 Ⅰ-5-26 양자센서 분야 국가별 IP4 출원 비중 138
그림 Ⅰ-5-27 양자센서 분야 국가별 HHI(2010~2019년) 139
그림 Ⅰ-5-28 양자센서 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년) 139
그림 Ⅰ-5-29 양자센서 분야 기술시장 성장단계(2010~2019년) 140
그림 Ⅰ-5-30 양자센서 분야 출원 특허 수(2014~2020년) 141
그림 Ⅰ-5-31 양자센서 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수 142
그림 Ⅰ-5-32 양자센서 분야 주요 출원인 및 출원 건수(2010~2019년) 143
그림 Ⅰ-5-33 양자센서 분야의 세부 분야 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년) 144
그림 Ⅰ-5-34 양자컴퓨팅 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율(2010~2019년) 146
그림 Ⅰ-5-35 양자컴퓨팅 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율 147
그림 Ⅰ-5-36 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 증가율 148
그림 Ⅰ-5-37 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 점유율 148

그림 I-5-38 양자컴퓨팅 분야 국가별 외국인 출원 비중 149
그림 I-5-39 양자컴퓨팅 분야 국가별 IP4 출원 비중 149
그림 I-5-40 양자컴퓨팅 분야 국가별 HHI(2010~2019년) 150
그림 I-5-41 양자컴퓨팅 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년) 150
그림 I-5-42 양자컴퓨팅 분야 기술시장 성장단계(2010~2019년) 151
그림 I-5-43 양자컴퓨팅 분야 출원 특허 수(2014~2020년) 152
그림 I-5-44 양자컴퓨팅 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수 153
그림 I-5-45 양자컴퓨팅 분야 주요 출원인 및 출원 건수(2010~2019년) 155
그림 I-5-46 양자컴퓨팅 세부 분야 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년) 156

II 양자기술 R&D 동향

1장 **그림 II-1-1** LuxQuanta의 상용 CV-QKD 모듈 169
그림 II-1-2 Transmitted Local Oscillator(TLO)-CV-QKD 171
그림 II-1-3 에너지-시간 얽힘광자쌍을 이용한 고차원 QKD 실험 구성도 174
그림 II-1-4 기기무관 QKD 178
그림 II-1-5 SD-QKD 네트워크 모델 및 인터페이스 기능 정의 182
그림 II-1-6 양자키 전달 방안 183
그림 II-1-7 DARPA QKD 네트워크 구성도 185
그림 II-1-8 SECOQC 양자 키 분배 네트워크 구성도 186
그림 II-1-9 Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크 구성도 187
그림 II-1-10 Madrid 양자 키 분배 네트워크 구성도 188
그림 II-1-11 드론을 이용한 양자 키 분배 실험 193
그림 II-1-12 빔 스플리터 기반 양자 난수 생성기 개요 195
그림 II-1-13 (왼쪽) OpenQKD 베를린, (오른쪽) 마드리드 테스트베드 202
그림 II-1-14 Beijing-Shanghai 구간 설치된 백본 네트워크 개요도 204
그림 II-1-15 오스트리아-중국 간 QKD 링크 구현 205
그림 II-1-16 ISO/IEC 23837-2 구성 209
그림 II-1-17 ISO/IEC 23837 표준화 진행 형황 210
그림 II-1-18 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 개요도 214
그림 II-1-19 간섭계 안정화를 적용한 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 구성도 215
그림 II-1-20 Plug&Play BB84 QKD 시스템의 실험 구성도 216
그림 II-1-21 COW-QKD 시스템의 구조 218
그림 II-1-22 DPS-QKD 프로토콜 실험 개요도 218
그림 II-1-23 RRDPS-QKD의 실험 개요도 219
그림 II-1-24 RRDPS QKD 실험 구성도 219
그림 II-1-25 MDI-QKD의 실험 개요도 221
그림 II-1-26 MDI-QKD 실험 구성도 222
그림 II-1-27 TF-QKD 실험 개요도 223
그림 II-1-28 광섬유 기반 MDI-QKD 시스템 225
그림 II-1-29 Plug&Play TF-QKD 네트워크 실험 개요도 226
그림 II-1-30 양자 얽힘 226
그림 II-1-31 BBM92 프로토콜 227
그림 II-1-32 위성 QKD 234
그림 II-1-33 IDQ 양자 난수 생성기 난수 생성 원리 236
그림 II-1-34 IDQ QRNG 제품과 고전적 TRNG의 성능 비교 235
그림 II-1-35 EYL QRNG 난수생성 원리 237
그림 II-1-36 양자중계기 동작 방식 239
그림 II-1-37 양자 암호기술과 암호서비스의 상관관계 243
그림 II-1-38 GHZ 양자상태 244

2장 **그림 II-2-1** 스탠포드 대학교의 양자중력계 254
그림 II-2-2 (왼쪽) 버밍엄 대학에서 개발 중인 양자중력센서, (오른쪽) 양자센서 로드맵 255
그림 II-2-3 중력지도 제작을 위한 양자센서연구 256
그림 II-2-4 SYRTE의 양자중력계 256
그림 II-2-5 ONERA와 Shom이 공동 개발한 양자중력센서 257
그림 II-2-6 양자중력센서로 측정된 중력이상모델 257
그림 II-2-7 하노버 대학에서 연구한 원자칩 기반 중력계 상상도 258
그림 II-2-8 홈볼트대에서 개발한 이동형 양자중력계 258
그림 II-2-9 휴대용 양자센서 개발 로드맵과 휴대용 원자간섭계의 활용 예시(1) 259
그림 II-2-10 휴대용 양자센서 개발 로드맵과 휴대용 원자간섭계의 활용 예시(2) 260
그림 II-2-11 현실 세계의 중력지도 제작 261
그림 II-2-12 버클리대에서 수행한 버클리힐즈의 중력 실증 조사 261
그림 II-2-13 에트나 화산 정상 분화구 지역에 배치한 양자중력계 사진과 시간에 따른 중력 변화 측정 결과 262
그림 II-2-14 (왼쪽) Phase I 데모 개략도, (오른쪽) Phase I 데모 실험 장치 263
그림 II-2-15 Phase II 프로토타입 개략도 264
그림 II-2-16 (왼쪽) 가속도계의 개략도 및 광섬유가 결합된 캐비티 프로토타입
(오른쪽) 광기계 가속도계의 그림 264
그림 II-2-17 Demonstration of Diamond Nuclear Spin Gyroscope 265
그림 II-2-18 Northrop Grumann에서 개발한 항법급 원자스핀 자이로 265
그림 II-2-19 원자스핀 자이로 개념도 266
그림 II-2-20 Imperial College London과 M Squared가 시연한 항법용 양자가속도계 267
그림 II-2-21 프랑스에서 수행 중인 원자간섭계 연구 267
그림 II-2-22 NIST에서 개발한 CSAC 기술 268
그림 II-2-23 NIST에서 커피콩 크기로 만든 차세대 소형 원자시계 269
그림 II-2-24 유럽에서 발간된 Quantum Manifesto의 양자기술 개발을 위한 타임라인 270
그림 II-2-25 독일에서 발표한 양자기술 로드맵 271
그림 II-2-26 레벨 다이어그램 및 실험 개략도 273
그림 II-2-27 GRIN 렌즈, 광섬유 페룰, Cs 원자증기셀 및 슬리브를 이용한 광섬유 결합형 원자증기셀 273
그림 II-2-28 광섬유 연결형 원자증기셀을 이용한 전기장 측정 실험 사진 274
그림 II-2-29 (왼쪽) 양자전기장 센서와 믹서를 이용한 위상 측정 장치도 (오른쪽) 광검출기 감지 신호 274
그림 II-2-30 (왼쪽) 양자전기장 센서 기반 방향탐지 기술 개념도 (오른쪽) 실제 방향탐지 실험 사진 275
그림 II-2-31 전자파 방향탐지 측정 결과 275
그림 II-2-32 DARPA에서 연구 중인 고감도 광대역 무선 주파수 양자수신기의 QA 프로그램 개념도 275
그림 II-2-33 적설량, 빙상 역학, 강수량 등 지구 수자원 관측을 위한 위성탑재 리드버그 레이더 개념도 276
그림 II-2-34 원자광학 형광을 사용한 실시간 근거리 테라헤르츠 이미징 277
그림 II-2-35 초고속 THz 비디오 278
그림 II-2-36 기존 수신기와 비교한 양자전기장 센서의 장점 및 한계 279
그림 II-2-37 주파수에 따른 양자전기장 센서 측정 감도와 수신부 크기 비교 279
그림 II-2-38 'Army scientists create innovative quantum sensor' 제목의 보도자료 사진 280
그림 II-2-39 미국 Rydberg Technologies사 홈페이지 공개 내용 281
그림 II-2-40 미국 기업들이 판매 중인 소형 상용 원자자력계 283
그림 II-2-41 다이아몬드 NV 센터 기반의 소형 양자자기장 센서 283
그림 II-2-42 소형 양자자력계를 이용한 Wearable 뇌자도 이미징 시스템 개발 발전상 283
그림 II-2-43 스위스 Qnami, Qzabre에서 제작 및 판매 중인 다이아몬드 스캐닝 프로브와
나노 자기장 이미징 스캐너 284
그림 II-2-44 원자자력계를 이용한 무인 드론 기반 지뢰 탐지 연구 285
그림 II-2-45 중국 CIQTEK의 다이아몬드 NV 센터 기반 나노 자기장 이미징 스캐너 285

그림 II-2-46 나노/마이크로미터 양자 MRI 개념도 286
그림 II-2-47 양자자력계의 국방 분야 활용 예시 286
그림 II-2-48 고분해능 양자자기장 이미징을 통해 반도체와 배터리의 결함 분석 및 첨단 산업 활용 예시 287
그림 II-2-49 양자 고스트 이미징 기술 287
그림 II-2-50 (a) 양자비선형 간섭계 실험 장치도, (b) 근적외선광과 중적외선광의 간섭 이미지 288
그림 II-2-51 (왼쪽) 실험적 이미지, (오른쪽) 실험 장치도 288
그림 II-2-52 단일 방출체 기반 양자이미징 기술 289
그림 II-2-53 China Says It's Building a 'Ghost Imaging' Satellite to Detect Stealth Jets 289
그림 II-2-54 양자 상관관계 기반 이미징 기술 290
그림 II-2-55 양자현미경을 통한 생체 시료 센싱 기술 290
그림 II-2-56 양자조명 대상 물체 이미지 291
그림 II-2-57 KRISS에서 개발 중인 양자중력센서 293
그림 II-2-58 KRISS의 양자중력센서 성능 비교표 293
그림 II-2-59 양자중력센서 소형화 핵심기술 개념도 294
그림 II-2-60 양자중력센서 적용 분야 294
그림 II-2-61 KRISS에서 개발한 원자시계 297
그림 II-2-62 개발된 초소형 Chip-Scale 원자시계 298
그림 II-2-63 Chip-Scale 원자시계 기술의 파급 분야 299
그림 II-2-64 KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 개발한 소형 고정밀 원자시계 300
그림 II-2-65 양자자기장 센서의 대표적인 예 302
그림 II-2-66 양자자기장 센서 활용 예시 304

3장
그림 II-3-1 (왼쪽) Google의 Sycamore 프로세서 (오른쪽) IBM의 Eagle 프로세서 큐비트 레이아웃 313
그림 II-3-2 (위) 트랜스몬 큐비트 회로도 및 이미지 (아래) 플럭소니움 큐비트 회로도 및 이미지 316
그림 II-3-3 오류정정 코드 크기에 따른 논리 큐비트의 오류 발생률 감소 322
그림 II-3-4 확장형 실리콘 큐비트를 위한 Intel – QuTech 투자 협약 327
그림 II-3-5 양자게이트의 물리적 구현을 위한 제어신호 예시 329
그림 II-3-6 학계연구소 커스텀 공정을 이용한 반도체 스핀 큐비트 소자 331
그림 II-3-7 프랑스 CEA 중심의 유럽 연구소 컨소시엄의 확장형 반도체 양자프로세서 로드맵 332
그림 II-3-8 마이크로 포획 장치 336
그림 II-3-9 클라우드 양자컴퓨터를 이용한 다양한 양자알고리듬 구현 신뢰도 비교 337
그림 II-3-10 양자컴퓨터의 확장을 위한 다양한 큐비트 개별 제어 방법 339
그림 II-3-11 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 확장 아이디어 340
그림 II-3-12 양자컴퓨터의 활용이 예상되는 분야와 그 내용 341
그림 II-3-13 양자광원의 분류에 따른 인코딩 방법과 주요 성능 지표 342
그림 II-3-14 (왼쪽) AlN 비선형 물질로 나노 공진기를 제작해 광자쌍을 생성한 결과 343
(오른쪽) $LiNbO_3$ 비선형 물질로 제작한 나노 공진기
그림 II-3-15 (왼쪽) 프랑스 CNRS 연구소에서 개발한 양자점 기반 단일광자 광원 344
(오른쪽) 독일 막스 플랑크 연구소에서 개발한 15dB 압축광 생성 및 측정 장치
그림 II-3-16 미국 NIST에서 개발한 검출 효율 98%의 초전도 나노와이어 단일광자 검출기 345
그림 II-3-17 (왼쪽) 미국 예일대학교, (오른쪽) 독일 Munster 대학교에서 개발한 346
나노포토닉스에 집적화한 초전도 나노와이어 단일광자 검출기
그림 II-3-18 이탈리아 CNR 연구소와 네덜란드 Eindhoven University of Technology에서 346
공동으로 개발한, 24개 단일광자를 검출할 수 있는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기
그림 II-3-19 최고 수준 초전도 단일광자 검출기의 광자 개수 검출 성능 비교 347
그림 II-3-20 한국표준과학연구원의 6 광자 양자정보 실험 장치 348
그림 II-3-21 (위) 중국 USTC의 12 광자 양자얽힘 생성 실험 장치 349
(아래) 중국 USTC의 6 광자 18 큐비트 양자얽힘 생성 실험 장치
그림 II-3-22 (위) 중국 USTC의 양자점 단일광자를 이용한 20 광자 인풋 14 광자 보존 샘플링 실험 장치 350
(아래) 일본 동경대의 Time-Domain-Multiplexing 기반 연속변수 양자연산공간 확장 실험 장치
그림 II-3-23 4광자를 이용해 분자의 진동스펙트럼을 시뮬레이션하는 실험 장치와 실험 결과 351
그림 II-3-24 (왼쪽) 중국 USTC의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치 352
(오른쪽) 캐나다 Xanadu의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치
그림 II-3-25 단일 스핀들의 ^{12}C 농도에 따른 결맞음 시간 비교 353
그림 II-3-26 이온 주입 후 Praseodymium Color Center Array의 형광 이미지 354
그림 II-3-27 Dynamical Decoupling 펄스 개수에 따른 결맞음 특성 변화 그래프 355
그림 II-3-28 시간에 따른 핵스핀 메모리 신뢰성 그래프 356
그림 II-3-29 상온 Single Shot Readout 측정 방법 및 실시간 핵스핀 상태 변화 그래프 357
그림 II-3-30 레이저 주파수에 따른 형광 스펙트럼과 시간에 따른 변화 그래프 358
그림 II-3-31 NV-이온화와 회복 프로세스를 통한 Charge-Carrier 생성 과정 모식도 358
그림 II-3-32 NV 센터 Pair 모식도 359
그림 II-3-33 NV 센터와 주변 ^{13}C 원자핵스핀 간 상호작용 모식도 360
그림 II-3-34 두 개의 NV 센터 큐비트를 이용한 장거리 양자얽힘 생성 실험 모식도 361
그림 II-3-35 (a) 주파수 조정 가능한 트랜스몬의 SEM 이미지 366
(b) 공진기 주파수와 트랜스몬 주파수 차이에 따른 T_1 결맞음 시간 변화
그림 II-3-36 4K 극저온 양자제어 칩 367
그림 II-3-37 스핀 큐비트용 주요 반도체 소재의 단면도 369
그림 II-3-38 반도체 스핀 큐비트 소자의 모식도 371
그림 II-3-39 반도체 스핀 큐비트 소장 공정 흐름도 372
그림 II-3-40 (왼쪽) 양자점 소자 배열의 광학현미경 사진 372
(가운데) GaAs Depletion-mode형 양자점 소자 + 마이크로 마그넷 구조 전자현미경 사진
(오른쪽) 완성된 Si Accumulation-mode형 다층 게이트 소자의 전자 현미경 사진
그림 II-3-41 대표적인 양자소자용 재료의 thermal budget 373
그림 II-3-42 금속/반도체 계면의 팽창계수 차이에 따른 스트레인의 모식도 373
그림 II-3-43 양자컴퓨터 계층별 인터페이스와 IBM의 양자컴퓨터 376
그림 II-3-44 기존 마이크로 프로세서와 양자프로세서의 소자 수와 외부 I/O핀 수 비교 377
그림 II-3-45 (a),(b) Paul 포획 장치의 예시 (c),(d) 다중 전극들을 가지며 표면 위에서 포획하는 장치 379
그림 II-3-46 국내에서 사용 중인 매크로 포획 장치들 380
그림 II-3-47 (a) 서울대에서 개발한 반도체 칩 기반의 이온 포획 장치 사진 380
(b) 다중 전극을 가지는 칩 포획 장치의 확대 사진
그림 II-3-48 (왼쪽) KRISS와 (오른쪽) 미국 일리노이 주립대학에서 개발한 시간 383
다중화(Time-Multiplexing) 기반의 확정적 단일광자 생성 실험 장치
그림 II-3-49 (왼쪽) 고려대에서 개발한 양자점 기반 단광자 광원 384
(오른쪽) KIST에서 개발한 다이아몬드 점결함 기반 단광자 광원
그림 II-3-50 ㈜우리로에서 상용화에 성공한 InGaAs APD 기반 단일광자 검출 소자 385
그림 II-3-51 KIST에서 구현한 집적광학계 기반 양자간섭 실험 386
그림 II-3-52 KIST에서 구현한 양자광학 양자 시뮬레이터와 이원자 분자의 바닥에너지 계산 결과 386
그림 II-3-53 한국공학대학교가 보유한 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비 387
그림 II-3-54 구축 중인 초고진공 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비 388
그림 II-3-55 KIST에서 개발한 다이아몬드 나노구조물을 이용한 NV 센터 광자 포집효율 증대 구조물 389
그림 II-3-56 2021년 과학기술대전에서 공개한 2큐비트 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 390
그림 II-3-57 공초점 현미경 시스템 모식도와 실물 사진 391
그림 II-3-58 초점 현미경의 다이아몬드 샘플과 자기장 및 마이크로웨이브 인가 방법 391
그림 II-3-59 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 제어 프로그램 392
그림 II-3-60 다이아몬드 NV 센터 부근 질소 및 탄소동위체를 포함한 격자 모형 393
그림 II-3-61 다이나믹 디커플링 시퀀스와 반복 주기에 따른 중첩 시간 증가 확인 그래프 393
그림 II-3-62 다이나믹 디커플링 결과 394
그림 II-3-63 핵스핀 초기화 전후 NV 센터의 Ramsey 신호 변화 394
그림 II-3-64 근접한 두 개의 NV 센터 간의 결합 모식도 396
그림 II-3-65 NV 센터 주변의 핵스핀 모식도 396
그림 II-3-66 광자를 이용한 큐비트 시스템의 확장 397

III 양자기술 산업화 모델

1장
그림 III-1-1 분야별 산업 현황 431
그림 III-1-2 다양한 양자기술 시스템을 활용한 양자 전쟁 묘사도 436
그림 III-1-3 양자 레이다 원리 및 스텔라 탐지 모식도와 영상 439
그림 III-1-4 전 세계 우주 감시 네트워크 440
그림 III-1-5 얽힘 기반 양자네트워크 환경 (NASA) 441
그림 III-1-6 양자기술 적용 제조 분야 444
그림 III-1-7 양자컴퓨팅 활용 (Airbus) 446
그림 III-1-8 제조 영역, 응용 분야 및 양자기술 간 주요 연결 446
그림 III-1-9 양자컴퓨팅 활용(의료·제약·소재) 449
그림 III-1-10 양자역학 계산을 활용한 촉매 설계 450
그림 III-1-11 화학산업의 양자컴퓨팅 적용 단계 451
그림 III-1-12 의료 분야 응용(QpiDHDE) 453
그림 III-1-13 양자 MRI 응용 예 454
그림 III-1-14 맞춤 의료의 포괄적 및 정확성에 근거한 접근방식 456
그림 III-1-15 게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역 457
그림 III-1-16 은행과 금융서비스에서 양자컴퓨팅의 잠재적 적용 459
그림 III-1-17 양자기술 적용 금융서비스 개발 기업 461
그림 III-1-18 블록체인과 양자컴퓨팅 비교 463
그림 III-1-19 게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역 465
그림 III-1-20 양자컴퓨팅의 전형적인 사용 사례 466
그림 III-1-21 일본 Denso와 Toyoda Tsusho의 양자컴퓨팅 응용 466
그림 III-1-22 디지털 어닐러를 이용한 물류 자원 최적화 프로세스 467
그림 III-1-23 일본 Fujitsu의 문제 해결 기술 468
그림 III-1-24 항공 화물 적재 최적화 469
그림 III-1-25 항공 운항 시스템 최적화 470
그림 III-1-26 항공 시스템 모니터링 및 유지보수 473

2장
그림 III-2-1 양자보안 솔루션 53개 기업 477
그림 III-2-2 DARPA와 SECOQC 양자네트워크 478
그림 III-2-3 중국 양자 백본 네트워크 및 유무선 양자암호 시험망 479
그림 III-2-4 국내 양자통신 현황(KT, SK텔레콤) 480
그림 III-2-5 양자암호통신 테스트베드 구축현황 481
그림 III-2-6 중국의 묵자(Micius)호 무선 양자통신 및 과정 482
그림 III-2-7 양자암호 적용 사례(LG유플러스) 484
그림 III-2-8 드론용 양자암호화 모듈(케이씨에스) 485
그림 III-2-9 국내외 상용 양자 키 분배 시스템 소형화 동향 486
그림 III-2-10 EYL 개발 초소형 암호칩과 퀀텀크립토칩 486
그림 III-2-11 양자암호통신을 포함한 양자인터넷 개념도 487
그림 III-2-12 양자인터넷의 네트워크 계층 488
그림 III-2-13 양자가 가져올 미래 공장 490
그림 III-2-14 실시간 압연기 스핀들 응력 모니터링 체계(포스코) 491
그림 III-2-15 양자암호통신 클라우드 의료서비스 구성도 493
그림 III-2-16 미국 금융망 양자통신 적용 사례 495
그림 III-2-17 미국 아마존 배송 드론 및 로봇 496
그림 III-2-18 한국 물류 사각지대 운영 드론 서비스 모델 497

3장
그림 III-3-1 양자센서의 주요 산업 적용 영역 499
그림 III-3-2 영국 양자기술 산업 생태계 관련 주요기업 501
그림 III-3-3 양자센서의 산업화 동향 501
그림 III-3-4 자기장과 온도를 정밀측정할 수 있는 다이아몬드 양자센서 505
그림 III-3-5 양자센싱 기술 응용(배터리/반도체 검사) 505
그림 III-3-6 양자기반 가스 누출 영상화 장비(한국 퀀텀센싱) 507
그림 III-3-7 한국 양자기반 가스센싱 기술 507
그림 III-3-8 뇌자도 측정장치(영국 노팅엄대학교, KRISS) 509
그림 III-3-9 뇌자도 측정장치(KAIST) 510
그림 III-3-10 양자현미경(호주 퀸즈랜드대학교) 511
그림 III-3-11 수소 분자의 양자센서 전환 시연(미국 캘리포니아대학교) 511
그림 III-3-12 양자 MRI를 통한 미세암 진단 512
그림 III-3-13 고스트이미징 측정 방법 514
그림 III-3-14 지하통신시설물 피해 현장 515
그림 III-3-15 지하시설물 모니터링 기술 516
그림 III-3-16 칩 스케일 원자시계(미국 NIST) 518
그림 III-3-17 양자센서의 에너지 응용 분야 519

4장
그림 III-4-1 양자컴퓨팅 산업계 연간 성장률 521
그림 III-4-2 양자컴퓨팅 시장지도 523
그림 III-4-3 양자컴퓨팅 개발 주요 스타트업 523
그림 III-4-4 양자컴퓨팅 스타트업 분석 525
그림 III-4-5 양자컴퓨터 활용이 기대되는 분야 526
그림 III-4-6 스핀 큐비트 양자컴퓨터(서울대학교) 531
그림 III-4-7 CODEX 다중 조직 영상화 이미지(미국 스탠포드 의과대학교) 531
그림 III-4-8 CyTOF 실험 방법 및 데이터 클러스터 532
그림 III-4-9 양자컴퓨터 적용 사례 : 암치료 접근 방법 (미국 텍사스대학교) 533
그림 III-4-10 양자컴퓨터 적용 사례(신약 개발) 533
그림 III-4-11 고전-양자 하이브리드 컴퓨팅 이용 분자 구조 계산 개념도 535
그림 III-4-12 양자컴퓨터 적용 사례(독일 Daimler AG) 538
그림 III-4-13 JP Morgan Chase, Toshiba, Ciena의 블록체인 보호 사례 540
그림 III-4-14 양자컴퓨터 적용 사례(Volksagen) 541
그림 III-4-15 양자컴퓨터 적용 사례(Airbus) 542
그림 III-4-16 양자컴퓨터의 에너지 분야 응용 544

5장
그림 III-5-1 양자 시뮬레이션의 서비스 분야 548
그림 III-5-2 국내 양자기술 분야 발전 방향 548
그림 III-5-3 양자기술이 가져올 미래상 549
그림 III-5-4 양자 가치 사슬 550

Ⅳ 양자기술 전문인력 교육 정보 및 현황

1장
그림 Ⅳ-1-1 57개 기업 중 향후 2년(파란색) 또는 향후 3~5년(주황색)에 해당 직종을 고용할 것이라고 응답한 기업의 수 560
그림 Ⅳ-1-2 각 직업 유형에 필요한 중요한 양자(파란색) 및 비양자(주황색) 기술의 수 561
그림 Ⅳ-1-3 양자산업에서 다양한 직무 역할에 필요한 학위 분포 561
그림 Ⅳ-1-4 양자 직업 시장의 다양한 부문에 대한 예상 직위의 상대적 수와 각각에 대한 양자 교육의 필수 수준 563
그림 Ⅳ-1-5 (a) 전 세계, (b) 미국/캐나다, (c) 유럽/기타 국가의 다양한 양자 시장 구인에 대한 학위 요건 563
그림 Ⅳ-1-6 전 세계적으로 제공되는 다양한 일자리에 대한 학위 외에 최소 전문 경험 요건 564
그림 Ⅳ-1-7 어린 학생들을 양자정보과학에 연결하기 위한 연방 정부, 업계, 전문 협회 및 교육 커뮤니티 간 교육 파트너십 565
그림 Ⅳ-1-8 QTEdu 현황 570
그림 Ⅳ-1-9 미래 양자 인력에게 원하는 능력의 범주 571
그림 Ⅳ-1-10 프로그램별 필요 능력 수준 구분 571
그림 Ⅳ-1-11 Quantum Technologies 버전 1.0을 위한 유럽 역량 프레임워크의 구조 572
그림 Ⅳ-1-12 프레임워크 구조의 항목별 자세한 사항 중 1. concept of quantum physics에 대한 세부정보 573

2장
그림 Ⅳ-2-1 양자기술에 집중한 석사 학위 프로그램의 지역별 개수 588
그림 Ⅳ-2-2 현재 및 미래 인력 개발에 사용할 수 있는 글로벌 교육 및 훈련 리소스 개요 596

3장
그림 Ⅳ-3-1 기관유형별 2022년 국내 전체 양자기술 전문인력 현황 616
그림 Ⅳ-3-2 기관유형별 2022년 국내 전체 양자기술 핵심인력 현황 616
그림 Ⅳ-3-3 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 616
그림 Ⅳ-3-4 기관유형별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 617
그림 Ⅳ-3-5 학위별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 617
그림 Ⅳ-3-6 2022년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 618
그림 Ⅳ-3-7 기관유형별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 618
그림 Ⅳ-3-8 학위별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 618
그림 Ⅳ-3-9 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 619
그림 Ⅳ-3-10 학위별 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 619
그림 Ⅳ-3-11 양자기술 분야별 국내 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) (종합) 620
그림 Ⅳ-3-12 양자기술 분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 622
그림 Ⅳ-3-13 양자기술 분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율 622
그림 Ⅳ-3-14 학위별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율 622
그림 Ⅳ-3-15 양자기술 분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 학위별 비율 623
그림 Ⅳ-3-16 양자기술 분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 625
그림 Ⅳ-3-17 양자기술 분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율 625
그림 Ⅳ-3-18 학위별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율 626
그림 Ⅳ-3-19 양자기술 분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 학위별 비율 626
그림 Ⅳ-3-20 향후 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망 627
그림 Ⅳ-3-21 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망(석사/박사) 628

Ⅴ 글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체 현황

1장
그림 Ⅴ-1-1 양자정보과학기술(QIST) 현황 및 QED-C 목표 642
그림 Ⅴ-1-2 QED-C 조직도 642
그림 Ⅴ-1-3 QED-C 참여 기관 현황 643
그림 Ⅴ-1-4 QED-C 양자시장 대분류 및 소분류 643
그림 Ⅴ-1-5 응용/시스템 분야의 소분류 및 관련 기업명 644
그림 Ⅴ-1-6 하드웨어 분야의 소분류 및 관련 기업명 644
그림 Ⅴ-1-7 서비스 분야의 소분류 및 관련 기업명 645
그림 Ⅴ-1-8 소프트웨어 및 실수요자 분야의 소분류 및 관련 기업명 645
그림 Ⅴ-1-9 QED-C 참여 대학교 658
그림 Ⅴ-1-10 QED-C 정부 파트너 및 연방 자금 지원 R&D 센터 회원 661
그림 Ⅴ-1-11 페르미 국립연구소 양자연구소 협력 기관 662
그림 Ⅴ-1-12 로렌스 버클리 국립 연구소 양자기술 관련 연구 그룹 663
그림 Ⅴ-1-13 샌디아 국립 연구소 양자기술 연구 분야 665

2장
그림 Ⅴ-2-1 양자기술 Flagship의 Ramp-up 단계 개요 및 20개 프로젝트 분야 667
그림 Ⅴ-2-2 양자기술 Flagship 지배 구조 668
그림 Ⅴ-2-3 양자기술 Flagship 프로젝트 간 기존 및 잠재적 시너지 효과 668
그림 Ⅴ-2-4 Qflag 회원 국가별 및 분야별 분포 670
그림 Ⅴ-2-5 Qflag 기업 회원 국가별 분포 671
그림 Ⅴ-2-6 Qflag 국가별 기업 회원 671
그림 Ⅴ-2-7 Qflag 회원 대학교와 연구소 681

3장
그림 Ⅴ-3-1 캐나다 QIC 활동 목표 689
그림 Ⅴ-3-2 QIC-OCI 파트너십 체결(2022) 691
그림 Ⅴ-3-3 일본 Q-STAR 활동 범위 695
그림 Ⅴ-3-4 일본 Q-STAR 조직도 696

표 목차

Ⅰ 양자기술 동향

1장
표 Ⅰ-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망 24
표 Ⅰ-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비 25
표 Ⅰ-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비 26
표 Ⅰ-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망 27
표 Ⅰ-1-5 수요산업별 글로벌 양자암호통신 시장 전망 30
표 Ⅰ-1-6 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망 31
표 Ⅰ-1-7 주요국 및 지역의 양자센서 시장 전망 33
표 Ⅰ-1-8 부문별 글로벌 양자센서 시장 전망 34
표 Ⅰ-1-9 수요산업별 글로벌 양자센서 시장 전망 36
표 Ⅰ-1-10 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장 37
표 Ⅰ-1-11 국내 양자컴퓨팅 시장 전망 38
표 Ⅰ-1-12 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 39
표 Ⅰ-1-13 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 40
표 Ⅰ-1-14 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망 41

2장
표 Ⅰ-2-1 주요국 양자분야 정책 45
표 Ⅰ-2-2 미국 양자이니셔티브 프로그램 구성요소 47
표 Ⅰ-2-3 미국 양자정보과학 네트워크 전략 비전의 장단기 목표 48
표 Ⅰ-2-4 연방기관별 양자기술 연구개발 현황 49
표 Ⅰ-2-5 미국 주요 양자정보과학(QIS) 연구센터 현황 50
표 Ⅰ-2-6 미국 양자인터넷 로드맵 5단계 50
표 Ⅰ-2-7 양자 선언문의 분야별 기술적 목표 52
표 Ⅰ-2-8 유럽 양자기술 발전 단기 · 중장기 로드맵 53
표 Ⅰ-2-9 2030 Digital Compass 목표 54
표 Ⅰ-2-10 영국의 NQTP 사업별 추진동향 57
표 Ⅰ-2-11 프랑스 국가 양자기술 전략의 6개 기술 축과 1개 보조 축 60
표 Ⅰ-2-12 프랑스 PEPR의 10대 우선과제 61
표 Ⅰ-2-13 캐나다에서 추진 중인 양자 R&D 프로젝트 63
표 Ⅰ-2-14 일본의 양자기술 혁신 실현을 위한 5대 전략 주요내용 67
표 Ⅰ-2-15 일본의 양자기술 혁신로드맵 구성 및 예시 68
표 Ⅰ-2-16 2020년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관 72
표 Ⅰ-2-17 2021년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관 73
표 Ⅰ-2-18 양자기술 R&D 투자전략의 단계별 추진 목표 74
표 Ⅰ-2-19 양자센서 기술목표 75
표 Ⅰ-2-20 양자팹 구축 사업 개요 75
표 Ⅰ-2-21 미래양자융합포럼 위원회 및 분과별 역할 76

3장
표 Ⅰ-3-1 국가별 양자기술의 공공·민간 투자 규모(2001~2021) 82
표 Ⅰ-3-2 NSF 연도별 양자정보과학 R&D 예산 85
표 Ⅰ-3-3 DOE 연도별 양자정보과학 R&D 예산 87
표 Ⅰ-3-4 EU 양자플래그십 1단계 과제 89
표 Ⅰ-3-5 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산 92
표 Ⅰ-3-6 양자제어 국가중대과학연구프로그램 중앙재정 조달 자금(2008~2017) 94
표 Ⅰ-3-7 '양자제어 및 양자정보' 중점전문프로젝트 중앙재정 조달 자금(2016~2020 94
표 Ⅰ-3-8 국내 양자정보통신 사업 현황(2022) 97

4장
표 Ⅰ-4-1 ITU-T 연구그룹(Study Group, SG) 구조 101
표 Ⅰ-4-2 ITU-T SG13 표준개발 현황 103
표 Ⅰ-4-3 ITU-T SG17 표준개발 현황 104
표 Ⅰ-4-4 ITU-T FG QIT4N 표준개발 현황 105
표 Ⅰ-4-5 ITU-T SG11 표준개발 현황 105
표 Ⅰ-4-6 ETSI QKD ISG 표준개발 현황 107
표 Ⅰ-4-7 ISO/IEC JTC1 SC27 표준개발 현황 108
표 Ⅰ-4-8 ISO/IEC JTC1 WG14 표준개발 현황 109
표 Ⅰ-4-9 IEEE SA 표준개발 현황 110
표 Ⅰ-4-10 IRTF QIRG 표준개발 현황 110
표 Ⅰ-4-11 TTA PG201 표준개발 현황 112
표 Ⅰ-4-12 TTA PG501 표준개발 현황 112
표 Ⅰ-4-13 TTA PG503 표준개발 현황 113
표 Ⅰ-4-14 TTA PG504 표준개발 현황 113

5장
표 Ⅰ-5-1 양자기술 분야 연도별 출원 특허 수 121
표 Ⅰ-5-2 양자기술 분야 상위 10위 출원인 국적별 출원 특허 수(2014~2020년) 121
표 Ⅰ-5-3 HHI 범위에 따른 집중 수준 127
표 Ⅰ-5-4 양자통신 분야 국가별 출원 특허 수(2014~2020년) 132
표 Ⅰ-5-5 양자센서 분야 국가별 출원 특허 수(2014~2020년) 143
표 Ⅰ-5-6 양자컴퓨팅 분야 국가별 출원 특허 수(2014~2020년) 154

Ⅱ 양자기술 R&D 동향

1장
표 Ⅱ-1-1 디코이 상태 QKD 실험과 성능 목록 175
표 Ⅱ-1-2 현재까지 알려진 공격 방법 208
표 Ⅱ-1-3 단일광자의 편광 상태를 이용한 BB84 QKD 프로토콜의 과정 212
표 Ⅱ-1-4 2020년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목 231
표 Ⅱ-1-5 2021년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목 232

3장
표 Ⅱ-3-1 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 세부 사항에 대한 기록 334
표 Ⅱ-3-2 이온 주입 시점에 따른 장단점 388

III 양자기술 산업화 모델

1장 **표 III-1-1** 주요 분야별 산업화 모델 개요 432
표 III-1-2 주요 분야별 단기 산업화 모델(단기 산업화 검토 대상) 434
표 III-1-3 주요 분야별 중장기 산업화 모델(중장기 산업화 검토 대상) 435
표 III-1-4 주요 국방·안보 분야 양자기술 산업화 모델 개요 437

2장 **표 III-2-1** 양자통신 주요 분야별 산업화 모델 개요 475
표 III-2-2 글로벌 양자통신 기업 동향 476

3장 **표 III-3-1** 양자센서 주요 분야별 산업화 모델 개요 500

4장 **표 III-4-1** 양자컴퓨터 주요 분야별 산업화 모델 개요 522
주요 양자컴퓨터 기업 동향 524

IV 양자기술 전문인력 교육 정보 및 현황

1장 **표 IV-1-1** 미국의 양자 인력 관련 행동전략 562
표 IV-1-2 유럽의 양자기술 역량 프레임워크 주요 분야 569
표 IV-1-3 유럽의 양자기술 역량 프레임워크 Pilot Program 주요 활동 570
표 IV-1-4 Junior Research Group Leader 지원 사업 576
표 IV-1-5 일본의 양자 인재 육성 방안 578
표 IV-1-6 ITRC 양자 연구 인력 현황 580

2장 **표 IV-2-1** 하버드대학과 양자 프로그램 589
표 IV-2-2 양자 관련 컨퍼런스 및 학회 593
표 IV-2-3 양자 상업화 관련 컨퍼런스 593
표 IV-2-4 양자 관련 지역 커뮤니티 594
표 IV-2-5 양자 관련 해커톤 594
표 IV-2-6 미국 양자기술 인력양성 교육 프로그램 600
표 IV-2-7 양자기술 인력양성 교육 프로그램 602
표 IV-2-8 국내 양자기술 인력양성 교육 프로그램 603
표 IV-2-9 양자기술 인력양성 교육 프로그램(안) 606

3장 **표 IV-3-1** 2022년 국내 양자기술 전문인력 현황(종합) 615
표 IV-3-2 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황 616
표 IV-3-3 2022년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황 617
표 IV-3-4 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황 619
표 IV-3-5 향후 11년간 국내 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)(종합) 620
표 IV-3-6 향후 11년간 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 621
표 IV-3-7 향후 11년간 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 624
표 IV-3-8 향후 11년간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망(누적) 627
표 IV-3-9 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망 628

V 글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체 현황

1장 **표 V-1-1** QED-C 회원 기업 소개 646
표 V-1-2 QED-C 회원 대학교 내 양자 관련 기관 658

2장 **표 V-2-1** Qflag 회원 기업 소개 672
표 V-2-2 Qflag 회원 대학교와 연구소 내 양자 관련 기관 682
표 V-2-3 Qflag 회원 연구소 685
표 V-2-4 Qflag 회원 기타 기관 687

3장 **표 V-3-1** 캐나다 QIC 이사회 개요 690
표 V-3-2 QIC 양자통신 기업 개요 691
표 V-3-3 QIC 양자센서 기업 개요 692
표 V-3-4 QIC 양자컴퓨팅 기업 개요 693
표 V-3-5 QIC 양자소재·부품·장비 기업 개요 694
표 V-3-6 Q-STAR 주요 특별 회원(Special Member) 개요 696
표 V-3-7 Q-STAR 주요 기업회원(Corporate Member) 개요 698
표 V-3-8 Q-STAR 주요 준회원(Associate Member) 개요 698
표 V-3-9 Q-STAR 주요 중소기업 및 스타트업(Small and Medium/Start-up Member) 개요 699
표 V-3-10 Q-STAR 학계 회원 개요 699

Ⅰ 양자기술 동향

제1장 국내외 시장동향

제2장 국내외 정책동향

제3장 국내외 투자동향

제4장 국내외 표준화동향

제5장 국내외 특허동향

제1장 국내외 시장 동향

제1절 개요

양자기술은 새로운 시대의 게임체인저로 부상하고 있는 기술로, 높은 진입 장벽에도 불구하고 향후 시장에 미칠 영향이 큰 까닭에 각국 정부가 주목하는 분야이기도 하다. 맥킨지 보고서의 분석에 따르면, 양자통신과 양자센서는 가까운 미래에 상용화 가능성이 크며, 양자컴퓨팅은 양자통신, 양자센서와 상호 연관성을 가지고 차츰 시장을 형성해 결국 모든 산업에 걸쳐 양자기술이 큰 파급효과를 불러올 것으로 예측했다.[1] 다른 글로벌 시장조사 전문기관들의 보고서에서도 수치 차이는 다소 있으나 머지않은 미래에 양자기술 시장이 본격적으로 열리며 폭발적으로 성장할 것이라는 전망에는 이견이 없다.

본 백서는 해외 주요국 및 국내 양자기술의 2022~2030년 시장 규모를 양자통신·센서·컴퓨팅 3개 분야로 구분해 전체시장과 분야별로 전망했다. 각 시장 규모를 추정하기 위해 글로벌 시장보고서를 주로 활용했으나 양자기술 시장은 기존 국가 통계에는 존재하지 않는 새로운 시장 영역이고, 스타트업 회사의 진입이 전 세계적으로 활발하게 일어나는 특성으로 인해, 자료 수집 시점과 측정 방법론에 따라 수치의 차이가 존재할 수밖에 없다. 따라서 본 백서는 하나의 보고서에만 의존하지 않고, 여러 회사의 시장보고서를 참고해 시장 규모와 성장률의 변화를 재구성했다.

전 세계 양자기술 시장의 총규모는 2022년 8조 6,656억 원이며, 연평균 36.0%의 높은 성장률을 지속해 2030년에는 101조 2,414억 원으로 커질 것으로 전망된다. 부문별로 살펴보면 양자통신 시장은 2022년 1조 6,886억 원에서 연평균 39.8% 성장해 2030년 24조 5,793억 원으로 커질 전망이다. 양자센서는 2022년 1조 9,111억 원에서 연평균 16.6% 성장해 2030년 6조 5,450억 원으로 확대될 예정이다. 한편 양자컴퓨터는 2022년 5조 658억 원에서 연평균 38.9% 성장해 2030년 70조 1,171억 원을 기록할 것으로 보인다. 이처럼 양자통신과 양자컴퓨팅은 무척 빠르게 성장할 예정이며, 양자센서는 통신과 컴퓨팅보다 규모는 작지만 산업화 과정이 비교적 일찍 진행될 것으로 전망된다.[2]

1) McKinsey (2021)
2) NSTC (2022)

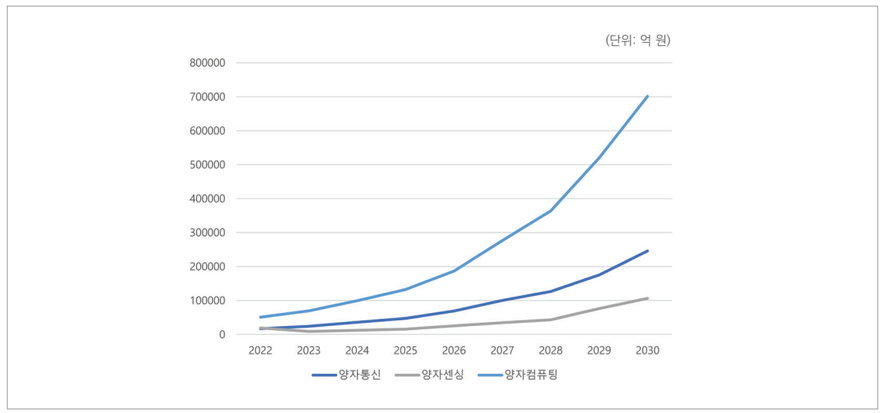
표 I-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
양자통신	16,886	24,086	35,998	47,255	69,115	100,400	126,319	175,130	245,793	39.8%
양자센서	19,111	21,596	24,511	27,845	31,660	36,029	41,073	47,028	65,450	16.6%
양자컴퓨팅	50,658	69,377	99,484	132,471	186,533	276,723	363,640	519,725	701,171	38.9%
합계[3]	**86,656**	**115,058**	**159,993**	**207,571**	**287,307**	**413,152**	**531,031**	**741,883**	**1,012,414**	**36.0%**

※ McKinsey (2021) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-1 글로벌 양자기술 분야별 시장 전망



※ McKinsey (2021) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

양자기술은 다양한 산업 부문에서 활용될 것으로 기대된다. 특히 양자기술에 기반을 둔 항공·우주 분야의 매출이 가장 크게 발생하리라 예상하는데, 〈표 I-1-2〉에서 보듯이 2022~2030년 동안 전체 산업에서 차지하는 비율이 30%를 상회할 것으로 보인다. 국방 및 에너지·석유 분야도 양자기술의 산업 기여 효과가 클 것으로 보이며, 2022~2030년 동안 전체 산업에서 차지하는 비율이 각각 평균 24.2%, 21.6%일 것으로 전망된다. 동기간 금융·보험 분야는 10.4%, 물류·유통 분야는 4.5%, 그리고 보건·의료는 2.7% 정도를 차지할 것으로 보이며, 특히 보건·의료 분야는 양자기술 기반의 매출성장률이 2022~2030년 동안 35.9%를 기록해 가장 클 것으로 예상된다.

3) 반올림으로 인해 세부항목 합계와 총계가 일치하지 않을 수 있음 (본 백서의 모든 표에 적용됨)

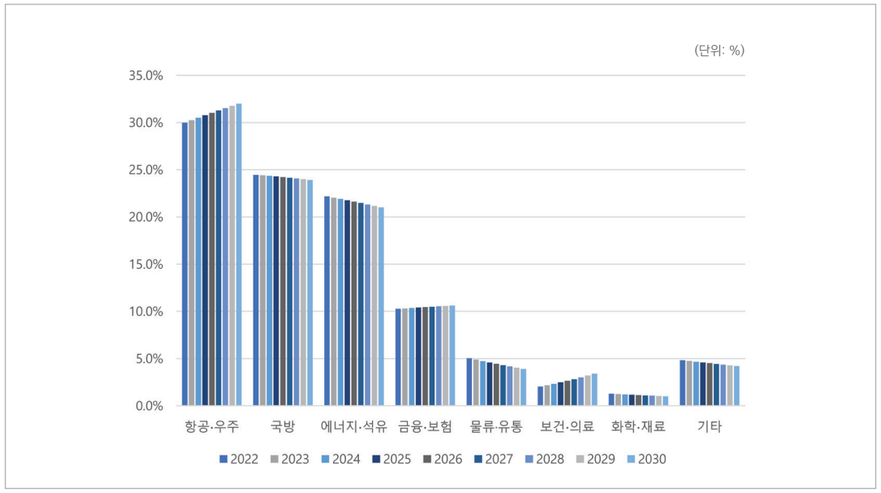
표 I-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비

(단위: %)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
항공·우주	30.0	30.2	30.5	30.8	31.0	31.3	31.5	31.8	32.0
국방	24.5	24.4	24.3	24.3	24.2	24.1	24.1	24.0	23.9
에너지·석유	22.2	22.0	21.9	21.8	21.6	21.5	21.3	21.2	21.0
금융·보험	10.3	10.3	10.4	10.4	10.4	10.5	10.5	10.6	10.6
물류·유통	5.0	4.9	4.7	4.6	4.4	4.3	4.2	4.0	3.9
보건·의료	2.0	2.2	2.3	2.5	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
화학·재료	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
기타	4.8	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.3	4.2
합계	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-2 양자기술 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비



※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

양자기술 기반의 제품 종류를 크게 하드웨어, 소프트웨어, 서비스로 나눌 수 있다. 현재는 양자기술 하드웨어 제품의 매출이 가장 큰 비율을 차지하고 있으나, 소프트웨어 및 서비스 제품의 매출 비중이 꾸준하게 상승할 것으로 보인다. 〈표 I-1-3〉에서 보듯이 2022년 하드웨어 기반의 매출 비중은 77.2% 정도로 높지만 2030년은 32.4% 정도로 줄어든다. 반면 2022년 소프트웨어와 서비스 매출 비중은 각각 13.9%와 8.9%였으나, 2030년에 33.1%와 34.5%로 비중이 커진다. 2021년 기준 정부의 양자기술

관련 하드웨어 제품 투자는 1조 원에 육박하나, 소프트웨어와 서비스 제품 투자는 각각 1,500억 원 정도에 머물고 있다.[4] 이처럼 현재 정부 및 민간 투자 대부분은 하드웨어에 초점을 맞추고 있지만, 소프트웨어 및 서비스 시장이 2030년까지 연평균 14.3% 성장할 것으로 전망되므로 이를 고려한 균형 잡힌 투자가 필요한 시점이다.

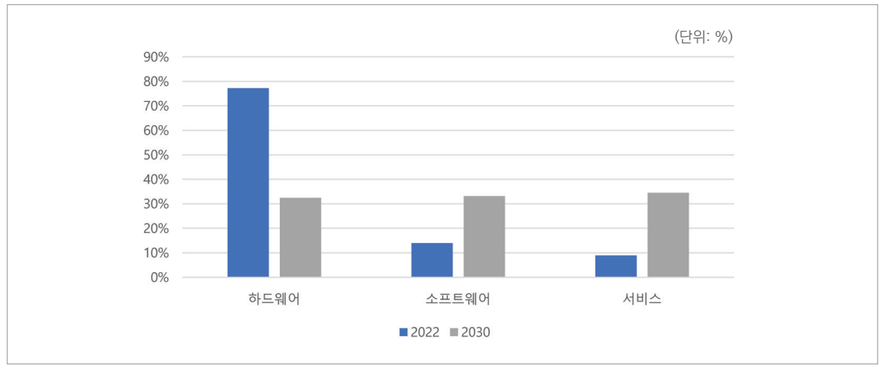
표 I-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비

(단위: %)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
하드웨어	77.2	74.0	70.2	65.9	61.0	55.4	48.7	41.2	32.4
소프트웨어	13.9	15.5	17.3	19.3	21.5	23.9	26.7	29.7	33.1
서비스	8.9	10.5	12.5	14.8	17.5	20.7	24.6	29.1	34.5
합계	100	100	100	100	100	100	100	100	100

※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-3 양자기술 기반 글로벌 매출의 제품 종류별 구성비



※ IQ4I (2022) 집필진 재구성

4) IQ4I (2022)

제2절 양자통신 시장동향

1. 국내외 시장

글로벌 시장조사 전문기관 Mind Commerce에 따르면, 글로벌 양자통신 시장 규모는 2022년 말 1조 6,886억 원 정도로 추정되며 이후 빠른 성장이 예상된다. 〈표 I-1-4〉에서 보듯이 향후 5년 후 글로벌 양자통신 시장 매출액은 10조 원을 초과하고, 연평균 39.8% 성장해 2030년에는 24조 5,793억 원 규모가 될 것으로 전망하고 있다. 그 중 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD) 시장은 5,236억 원 정도이며, 연평균 50.0% 성장해 2030년에 13조 4,168억 원 규모가 될 것으로 예상된다.

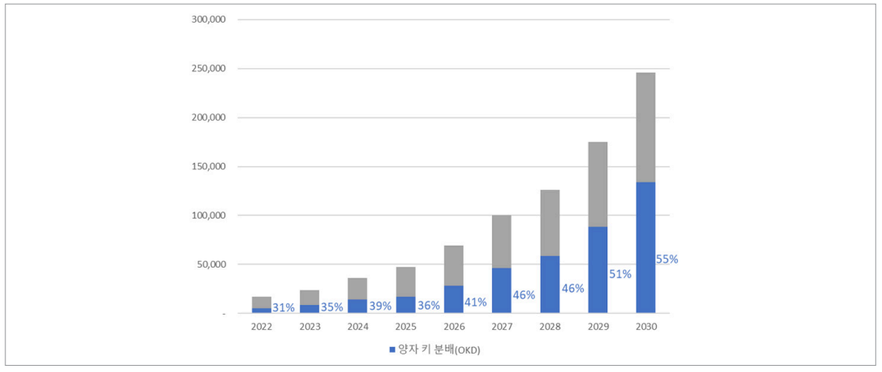
표 I-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
양자통신 시장	16,886	24,086	35,998	47,255	69,115	100,400	126,319	175,130	245,793	39.8%
QKD 시장	5,236	8,509	14,006	17,148	28,405	46,208	58,643	88,561	134,168	50.0%

※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

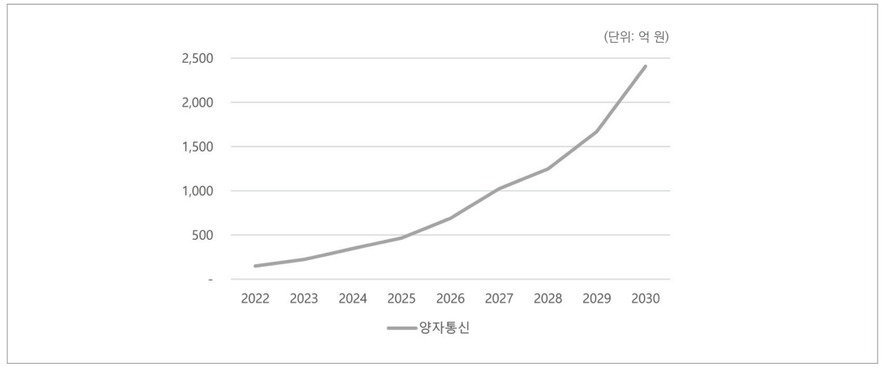
그림 I-1-4 글로벌 양자통신 부문별 시장 전망



※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

우리나라 양자통신 시장은 2022년 말 약 150억 원 규모로 추정된다.[5] 다만 기술 분야마다 상용화 정도의 수준 차이가 있고 특정 영역은 상용화가 본격적으로 이뤄지지 않은 상태이므로, 정부가 시범사업을 위해 출연금을 지원하고 이후 국내 통신사들의 투자가 발생한다면, 이러한 투자 유발 금액으로 인해 추정치는 달라질 수 있다. [그림 I-1-5]에서 보듯이 우리나라는 해마다 평균 41.4% 성장률을 기록해 2030년에는 2,407억 원 정도의 양자통신 시장을 기대하고 있다. 현재 우리나라가 글로벌 양자통신 시장에서 차지하는 비율은 0.1% 정도로 추정되나, 향후 성장 속도에 따라 2030년에는 1.0%까지 시장 점유율을 확대할 것으로 기대하고 있다.[6] 한편 일본과 중국의 2030년 글로벌 양자통신 시장점유율은 각각 1.72%, 13.3% 정도로 전망하고 있다.[7]

그림 I-1-5 국내 양자통신 시장 전망



※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

양자통신 산업은 우리나라 양자산업에서 가장 활발하게 상용화 전략을 펼치고 있는 부문이다. 우리나라 주요 통신회사들은 지금까지 양자암호통신 시범사업을 통한 지식과 경험을 축적하고 있으며 양자암호 기술의 고도화에 힘을 쏟고 있다.[8] 2022년 4월에 LGU+는 양자내성암호(PQC) 전용회선 서비스를 세계 최초 출시했고,[9] SKT도 QKD 및 양자내성암호 상용화를 완료해 서비스를 출시했으며,[10] 2022년 7월에 KT는 기업간거래(B2B) 양자암호 전용회선 서비스를 세계 최초로 제공한 바 있다.[11]

5) IQ4I (2022)
6) IQ4I (2022)
7) IQ4I (2022)
8) 강소현 (2022)
9) 박종진 (2022)
10) 이종현 (2022)
11) KT (2022)

또한 2022년 5월 한국과학기술연구원은 SKT와 협력을 강화해 QKD 기반의 양자암호통신 기기 사업화를 위해 노력하고 있으며,[12] KT는 Toshiba Group과 QKD 시범 프로젝트를 진행하기로 했다.[13]

현재 양자통신 기술에 대한 수요는 보안 통신을 적용하는 산업 분야에 한정돼 있고, 이에 적용된 양자통신 소프트웨어의 대부분은 이메일, 은행 이체 등을 위한 양자암호 솔루션이라고 볼 수 있다. 이처럼 양자통신 상용화가 본격적으로 이뤄지지 않은 상태에서 추정하는 현재의 매출액 규모는 매우 가변적이며, 기술적 난제들을 해결함으로써 시장의 빠른 성장을 기대할 수 있다. 예를 들어 양자컴퓨팅 능력은 양자통신 시장에 큰 영향을 주는 근본적 요인인데, 복수의 물리적 거리에 있는 노드 간 수많은 양자프로세싱을 병렬적으로 수행하기 위해 고성능 양자컴퓨팅 능력을 요구하기 때문이다. 즉 양자컴퓨팅의 기술적 발전은 양자통신 시장의 성장과도 직결되는 것이다. 그렇기에 양자통신 하드웨어 시장이 성숙화된 이후 양자통신 소프트웨어 시장 또한 열리게 될 것이라는 관측도 있다.[14]

2. 수요산업별 글로벌 양자통신 시장

가. 양자암호통신 시장

양자암호통신은 보건·의료, 은행·금융·보험 같은 일상생활뿐 아니라 자동차, 국방, 공공안전 등 매우 다양한 분야에서 수요가 존재한다. 〈표 I-1-5〉에서 보듯이 보건·의료 분야는 2022년 2,382억 원으로 가장 큰 산업 수요를 보여주고 있으며, 은행·금융·보험 분야는 조금 낮은 2,173억 원의 시장을 형성하고 있다. 그러나 은행·금융·보험 분야는 연평균 37.0% 성장률로 보건·의료(29.5%) 분야보다 빠르게 성장할 것이며, 정부·공공안전(36.0%), 에너지(35.1%), 자동차·운송(39.8%) 제조·공급망(37.2%) 등도 연평균 30% 이상의 높은 성장을 할 것으로 추정된다. 높은 성장률에 힘입은 은행·금융·보험 분야는 2030년 2조 7,004억 원으로 성장해, 가장 큰 산업 시장을 형성할 것으로 보인다.

12) Kovacs (2022)
13) Toshiba (2022)
14) McKinsey (2021)

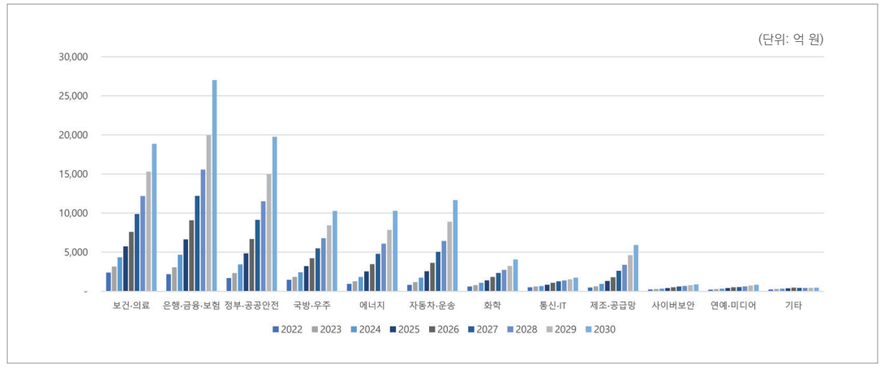
표 I-1-5 수요산업별 글로벌 양자암호통신 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
보건·의료	2,382	3,155	4,333	5,733	7,579	9,870	12,174	15,287	18,854	29.5%
은행·금융·보험	2,173	3,050	4,660	6,624	9,071	12,187	15,564	19,938	27,004	37.0%
정부·공공안전	1,689	2,317	3,430	4,843	6,676	9,111	11,506	14,972	19,753	36.0%
국방·우주	1,453	1,833	2,422	3,194	4,202	5,485	6,781	8,419	10,267	27.7%
에너지	929	1,270	1,820	2,539	3,456	4,778	6,087	7,852	10,291	35.1%
자동차·운송	798	1,139	1,728	2,553	3,626	5,040	6,427	8,885	11,651	39.8%
화학	602	772	1,060	1,388	1,820	2,330	2,710	3,214	4,057	26.9%
통신·IT	497	589	641	812	1,060	1,244	1,361	1,512	1,727	16.8%
제조·공급망	471	628	929	1,296	1,780	2,592	3,377	4,600	5,902	37.2%
사이버보안	236	275	327	393	497	589	668	756	858	17.5%
연예·미디어	196	262	327	393	497	537	615	706	816	19.5%
기타	223	275	327	367	445	432	406	428	446	9.1%
합계	**11,650**	**15,564**	**22,004**	**30,133**	**40,710**	**54,193**	**67,675**	**86,569**	**111,625**	**32.6%**

※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-6 수요산업별 글로벌 양자암호통신 시장 전망



※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

나. 양자 키 분배(QKD) 시장

글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장은 향후 2030년까지 연평균 50%의 높은 성장률을 기록해 13조 원 이상의 시장이 펼쳐질 것으로 전망된다. 그 중 은행·금융·보험 분야는 2030년에 2조 5,186억 원으로 가장 큰 QKD 수요를 형성할 것이며, 두 번째로 큰 QKD 수요산업은 비즈니스 통신으로 2030년 1조 9,043억 원의 시장으로 성장하리라 기대하고 있다. 특히 군사, 국가안보, 정부 분야는 연평균 52.2%~56.2% 정도의 높은 성장률을 보여줄 것으로 예상된다.

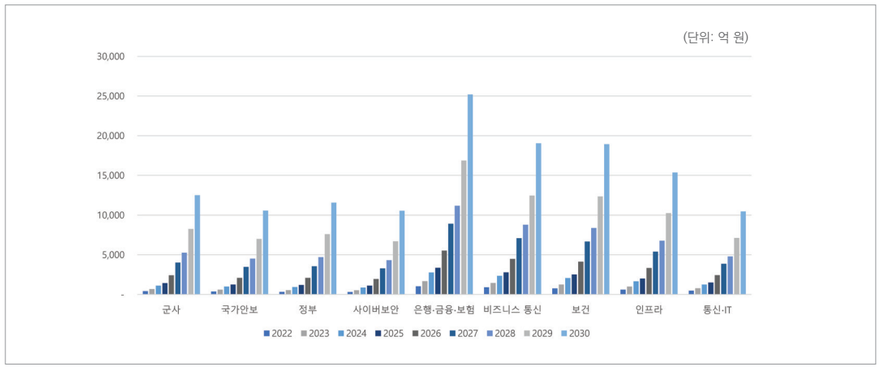
표 I-1-6 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
군사	419	681	1,113	1,414	2,409	4,019	5,249	8,249	12,501	52.9%
국가안보	367	602	995	1,244	2,081	3,469	4,503	6,992	10,568	52.2%
정부	327	550	942	1,204	2,081	3,547	4,686	7,594	11,567	56.2%
사이버보안	314	524	877	1,113	1,937	3,286	4,320	6,698	10,541	55.1%
은행·금융·보험	1,034	1,676	2,762	3,364	5,524	8,901	11,166	16,873	25,186	49.0%
비즈니스 통신	903	1,440	2,343	2,788	4,477	7,082	8,770	12,461	19,043	46.4%
보건	759	1,244	2,068	2,513	4,136	6,663	8,378	12,340	18,936	49.5%
인프라	615	995	1,649	2,003	3,325	5,393	6,781	10,241	15,365	49.5%
통신·IT	484	785	1,257	1,505	2,422	3,862	4,791	7,113	10,461	46.8%
합계	**5,223**	**8,495**	**14,006**	**17,148**	**28,392**	**46,221**	**58,643**	**88,561**	**134,168**	**50.0%**

※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-7 수요산업별 글로벌 양자 키 분배(QKD) 시장 전망



※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

제3절 양자센서 시장동향

1. 국내외 시장

앞서 글로벌 양자센서 시장 규모는 2022년 말 1조 9,111억 원을 형성하고, 연평균 16.6% 성장해 2030년에 6조 5,450억 원의 매출액을 거둘 것이라 밝힌 바 있다. 양자센서 시장은 공학의 토대에서 기존 시스템을 통합하며 하드웨어 위주로 상용화가 진행되는 특성이 있어, 초기 양자기술 수준으로 양자센서 시장이 형성될 것으로 보인다. 따라서 위에 언급한 수치는 센서 시장이 통신 및 컴퓨팅 부문보다 상용화 단계에 먼저 접어든다는 시나리오에 무게를 두고 추산한 것이다. 그러나 양자센서 시장이 양자컴퓨팅 기초이론 및 시장, 양자통신 및 암호 시장 등의 발전에 의존 혹은 연계되는 측면도 존재하기 때문에,[15] 본 장에서는 양자센서의 초기 상용화 규모와 성장률을 다소 보수적으로 전망한 시장보고서를 활용했다.

Inside Quantum Technology (2022) 시장보고서에 의하면, 글로벌 양자센서 시장은 2022년 말 5,885억 원으로 추정되며, 연평균 11.8% 성장해 2030년 1조 4,336억 원의 매출액을 거둘 것으로 전망된다.[16] 지역별로 살펴보면, 가장 큰 시장인 서유럽은 2022년 2,236억 원을 시점으로 연평균 8.4% 성장해 2030년 4,270억 원에 이를 것이며, 북미는 2022년 1,589억 원의 매출을 거두고 연평균 10.7% 성장해 2030년 3,572억 원으로 성장하리라 예측된다. 한편 한국, 일본, 중국 동아시아 3개국은 2022년 합계 1,354억 원의 매출로 서유럽과 북미보다 작지만, 향후 연평균 15.6% 성장률로 서유럽과 북미보다 빠르게 성장해 2030년엔 4,316억 원으로 가장 큰 지역 시장을 형성할 것으로 전망된다.

우리나라의 양자센서 시장은 2022년 약 118억 원 규모로 추정되며, 연평균 14.0% 성장해 2030년에는 336억 원에 이를 것으로 보인다. 일본은 우리나라보다 약 2.5배 규모로 추정되며, 연평균 성장률도 우리와 비슷한 14.0% 수준으로 전망하고 있다. 한편 중국은 2022년 941억 원이지만 2030년까지 연평균 16.2% 성장률로 서유럽(8.4%), 북미(10.7%), 우리나라(14.0%), 일본(14.0%)보다 빠르게 성장해, 2030년에는 3,139억 원 규모의 가장 큰 양자센서 시장을 형성할 것으로 보인다.

15) EU (2020)
16) Inside Quantum Technology (2022)

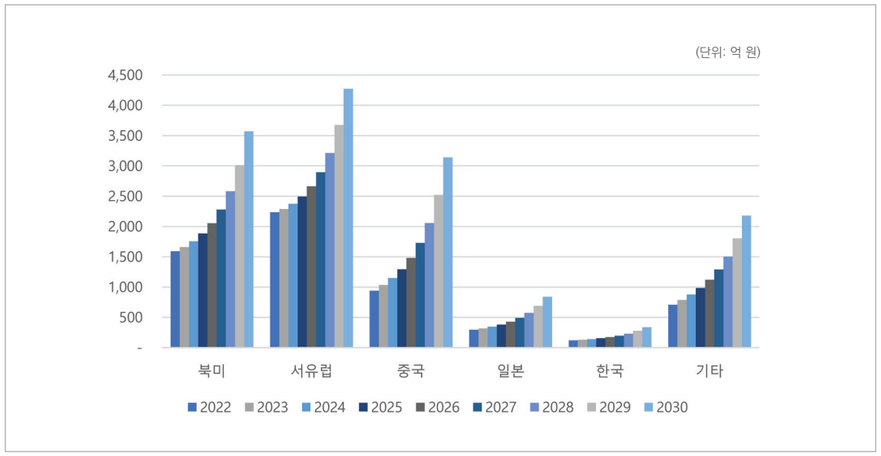
표 I-1-7 주요국 및 지역의 양자센서 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
북미	1,589	1,660	1,755	1,884	2,051	2,279	2,579	3,012	3,572	10.7%
서유럽	2,236	2,288	2,372	2,492	2,661	2,896	3,212	3,674	4,270	8.4%
중국	941	1,033	1,148	1,293	1,480	1,728	2,054	2,520	3,139	16.2%
일본	295	317	346	381	428	490	571	687	840	14.0%
한국	118	127	137	153	171	196	229	275	336	14.0%
기타	706	784	876	984	1,118	1,287	1,501	1,800	2,179	15.1%
합계	**5,885**	**6,207**	**6,634**	**7,188**	**7,910**	**8,874**	**10,146**	**11,968**	**14,336**	**11.8%**

※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-8 주요국 및 지역의 양자센서 시장 전망



※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

2. 부문별 글로벌 양자센서 시장

양자센서의 부문별 시장을 살펴보면 양자자기센서(Quantum Magnetic Sensors)가 가장 큰 시장을 형성하고 있다. 양자자기센서는 2022년 말 5,451억 원으로 전 세계 센서 시장의 92.6% 정도를 차지하고 있다. 그 외 칩스케일 원자시계(CSACs), 단일광자 검출기(Single Photon Detectors), 양자중력계(Quantum Gravitometers), 양자라이더(Quantum Lidar)가 있으며 2022년 기준 총합 6.3% 규모에 머무를 것으로 보인다. 그러나 칩스케일 원자시계, 양자중력계, 양자라이더 등은 연평균 33.0~39.2%로 비교적 빠르게 성장해, 2030년 칩스케일 원자시계는 1,792억 원, 양자중력계는 808억 원, 양자라이더는 833억 원의 시장으로 성장하리라 예상한다.

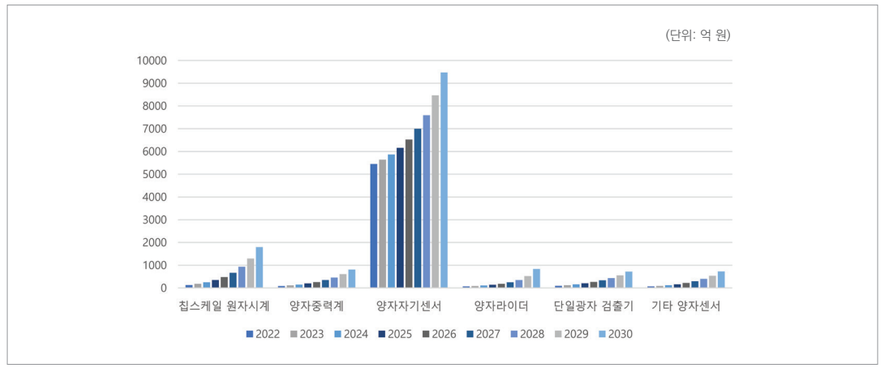
표 I-1-8 부문별 글로벌 양자센서 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
칩스케일 원자시계	127	177	246	343	478	665	925	1,288	1,792	39.2%
양자중력계	82	110	145	194	258	343	457	607	808	33.0%
양자자기센서	5,451	5,633	5,862	6,152	6,521	6,991	7,592	8,464	9,468	7.1%
양자라이더	65	79	105	136	177	247	347	520	833	37.4%
단일광자 검출기	94	122	156	202	259	334	431	554	713	28.8%
기타 양자센서	65	89	119	161	217	293	397	535	723	35.0%
합계	**5,885**	**6,209**	**6,633**	**7,188**	**7,910**	**8,874**	**10,149**	**11,968**	**14,336**	**11.8%**

※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-9 부문별 글로벌 양자센서 시장 전망

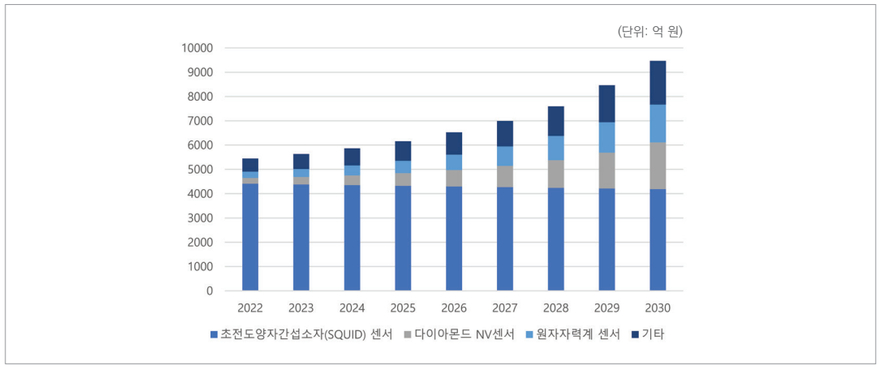


※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

한편 양자자기센서는 초전도양자간섭소자(SQUID, Superconducting Quantum Interference Device), 고체 불순물(다이아몬드 NV(Nitrogen-Vacancy) 방식 포함), 원자자력계 등 다양한 형태로 개발할 수 있다. 그 중 초전도양자간섭소자 센서는 시장성숙도가 가장 높은 양자센서로, 마이크로파 원자시계와 더불어 제1세대 양자센서 기술을 형성하고 있다.[17] 제2세대 양자센서로는 중력센서, 다이아몬드 NV센서 등이 포함되며 바이오이미징, 통신, 항해, 환경 모니터링, 인프라 모니터링, 지리 측량, 고에너지 물리학, 기초과학 등의 분야에 활용할 수 있다.[18] 2022년 기준 제1세대 양자센서인 초전도양자간섭소자 센서는 양자자기센서 시장의 80% 이상을 차지하고 있지만 2030년 40% 대로 줄어든다. 반면, 제2세대 양자센서인 다이아몬드 NV센서 및 원자자력계 센서는 2022~2030년 동안 각각 연평균 30.0%, 25.0% 성장하면서 양자자기센서 시장을 주도할 것으로 보인다.

17) McKinsey (2021)
18) McKinsey (2021)

그림 I-1-10 글로벌 양자자기센서 시장 전망



※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

3. 수요산업별 글로벌 양자센서 시장

양자센서를 수요자 부문별로 살펴보면 의료산업이 가장 큰 수요자로서, 2022년 글로벌 센서 시장에서 점유율 70%로 4,088억 원의 매출을 형성할 것으로 보인다. 두 번째로 큰 수요인 연구개발(R&D) 분야는 전체시장 내 10% 규모인 576억 원의 매출을 예상하며, 그 외 국방(6%), 정유·가스(3.1%), 항해·운송(1.7%), 건설(0.7%)도 양자센서의 주요 활용 부문으로 자리 잡고 있다. 지금은 의료산업의 비중이 가장 크지만 향후 8년 동안 연평균 3% 미만의 성장이 예상되는데, 이는 전체평균인 11.8%보다 매우 낮은 수치이다. 반면 국방(17.2%), 정유·가스(26.8%), 항해·운송(41.1%), 건설(43.2%) 부문은 높은 성장률을 지속해, 해당 분야의 양자센서 수요가 비교적 빠르게 늘어날 것으로 전망한다.

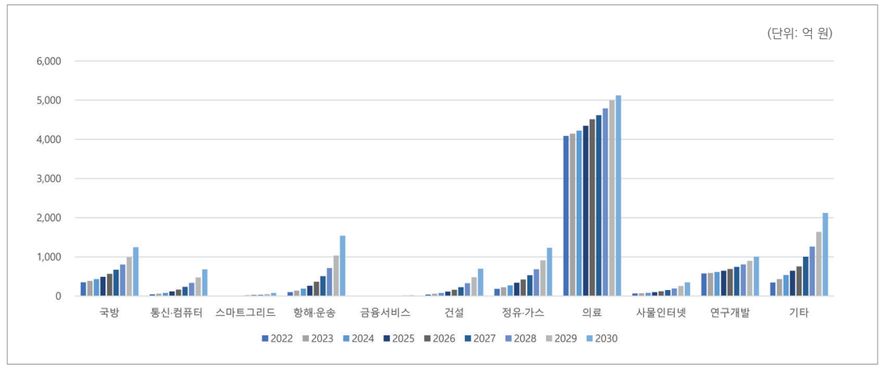
표 Ⅰ-1-9 수요산업별 글로벌 양자센서 시장 전망

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
국방	351	386	431	488	564	668	802	992	1,247	17.2%
통신·컴퓨터	41	58	81	115	165	234	334	476	678	42.2%
스마트그리드	3	4	7	9	14	21	33	50	77	52.7%
항해·운송	98	135	187	259	363	505	713	1,031	1,539	41.1%
금융서비스	1	1	3	4	5	7	9	13	18	39.1%
건설	39	55	77	110	156	225	326	478	695	43.2%
정유·가스	185	223	272	335	418	530	683	910	1,232	26.8%
의료	4,088	4,142	4,224	4,345	4,513	4,617	4,787	4,999	5,119	2.9%
사물인터넷	62	71	81	97	118	149	192	255	348	24.2%
연구개발	576	590	614	644	685	740	806	898	1,001	7.8%
기타	342	435	537	643	754	1,001	1,261	1,639	2,119	25.6%
합계	**5,885**	**6,207**	**6,634**	**7,188**	**7,910**	**8,874**	**10,146**	**11,968**	**14,336**	**11.8%**

※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-11 수요산업별 글로벌 양자센서 시장 전망



※ Inside Quantum Technology (2022) 집필진 재구성

제4절 양자컴퓨팅 시장동향

1. 국내외 시장

글로벌 양자컴퓨팅 시장 규모는 2022년 말 5조 658억 원으로 추정하며, 연평균 38.9% 성장을 지속해 2030년 70조 1,171억 원으로 늘어날 것으로 전망된다.[19] 〈표 Ⅰ-1-10〉에서 보듯이 현재 양자컴퓨팅 시장에서 하드웨어는 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 2022년 하드웨어는 3조 9,430억 원으로 전체 양자컴퓨팅 시장에서 78% 정도를 점유하며, 응용 소프트웨어는 9,401억 원으로 19%, 양자컴퓨팅 서비스(Quantum Computing as a Service, QCaaS)는 4% 정도의 점유율을 차지할 것으로 보인다. 그러나 응용 소프트웨어는 연평균 51.7% 성장을 지속하며 하드웨어(32.5%)보다 빠르게 성장해, 2030년엔 26조 3,916억 원으로 하드웨어(37조 4,095억 원)와 점유율 격차를 크게 줄일 것으로 전망된다.

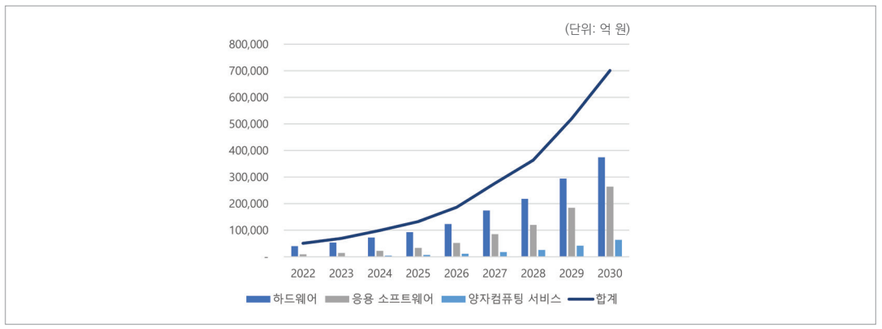
표 Ⅰ-1-10 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장

(단위: 억 원)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
하드웨어	39,430	53,459	72,650	92,677	123,091	174,359	218,210	294,034	374,095	32.5%
응용 소프트웨어	9,401	14,061	22,253	32,856	52,192	84,692	120,035	184,102	263,916	51.7%
양자컴퓨팅 서비스	1,828	1,857	4,582	6,938	11,250	17,672	25,395	41,589	63,160	55.7%
합계	**50,658**	**69,377**	**99,484**	**132,471**	**186,533**	**276,723**	**363,640**	**519,725**	**701,171**	**38.9%**

※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 Ⅰ-1-12 글로벌 양자컴퓨팅 분야별 시장



※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

19) Fortune Business Insights (2021) & IQ4I (2022) & Marketsandmarkets (2022)

한편 국내 양자컴퓨팅 시장은 2022년 451억 원 정도로 추정하고 있다.[20] 국내 양자컴퓨팅 시장은 연평균 40.5% 성장을 지속해 2030년엔 6,866억 원에 이를 것으로 전망된다.

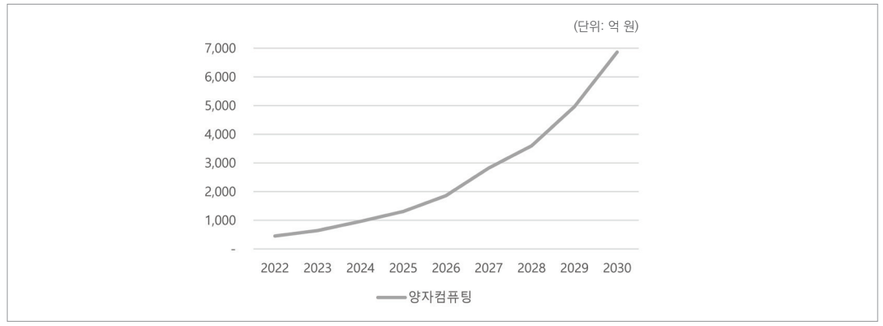
표 I-1-11 국내 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

연도	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
우리나라	451	645	958	1,306	1,861	2,823	3,593	4,957	6,866	40.5%

※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-13 국내 양자컴퓨팅 시장 전망



※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

2. 부문별 글로벌 양자컴퓨팅 시장

글로벌 양자컴퓨팅 시장은 구축방식에 따라서 크게 온프레미스(On-Premise)와 클라우드로 구분할 수 있다.[21] 2022년 온프레미스 방식은 5,167억 원 규모이며, 해마다 35.8% 증가해 2030년에는 5조 9,600억 원으로 성장할 것으로 보인다. 한편 클라우드 방식은 2022년 4조 5,491억 원 규모이며, 연평균 39.2% 성장해 2030년 약 64조 원의 시장을 형성할 것으로 전망돼, 온프레미스 방식보다 10배 정도 큰 규모로 예측된다. 온프레미스는 컴퓨터 구매부터 하드웨어·소프트웨어 업그레이드, 신뢰성(Reliability) 문제, 부품 조달 등의 비용이 발생하는 단점이 있고, 클라우드는 보안·개인정보 등을 원격 사용자의 요구사항대로 통제하기 어렵고, 양자알고리듬이 클라우드 공급업체에 무방비로 노출될 수 있다는 단점이 있다. 결국 각 구축방식의 경제적 효용성은 사용자의 판단 영역이다. 예를 들어 온프레미스 방식을 선택할 경우, 양자컴퓨팅 관련 내부 인력을 구축함으로써 자신들의 요구사항을 좀 더 정확히 파악하고 적용할 수 있는 혁신적 사용자가 되는 것이다.[22] 향후 사용자들이 양자컴퓨팅을 도입하는 경우 각각의 장단점을 고려하게 될 것이며, 이러한 구축방식이 산업 분야마다 어떤 식으로 확산할 것인지에 관심을 둬야 할 때이다.

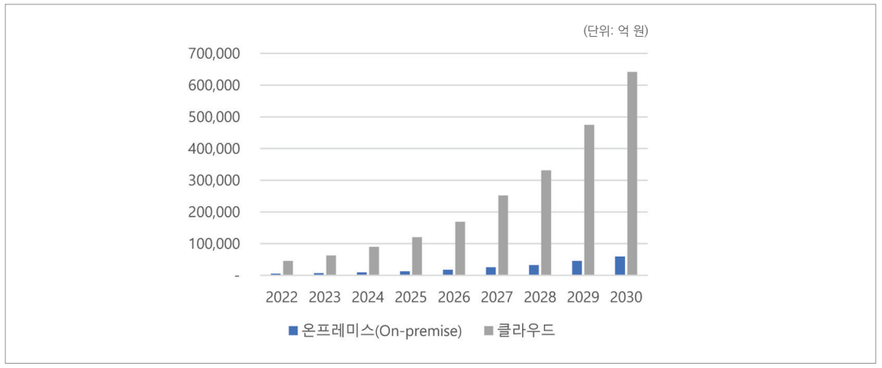
표 I-1-12 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

국가	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
온프레미스 (On-premise)	5,167	6,868	9,650	12,585	17,348	25,182	32,364	45,216	59,600	35.8%
클라우드	45,491	62,509	89,834	119,886	169,185	251,541	331,276	474,509	641,571	39.2%
합계	**50,658**	**69,377**	**99,484**	**132,471**	**186,533**	**276,723**	**363,640**	**519,725**	**701,171**	**38.9%**

※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-14 구축방식별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망



※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

양자컴퓨팅의 애플리케이션은 기계학습, 최적화, 시뮬레이션으로 구분할 수 있다. 2022년 기준 기계학습과 시뮬레이션 기반 양자컴퓨팅 시장은 각각 1조 4,944억 원, 1조 4,083억 원 정도로 비슷한 규모이나, 시뮬레이션이 기계학습보다 더 높은 연평균 성장률을 지속해 2030년 22조 869억 원의 시장으로 확대될 전망이다. 한편 최적화 기반 양자컴퓨팅은 가장 큰 애플리케이션 시장으로서, 2022년 2조 1,631억 원으로 추정되며, 연평균 38.5% 성장해 2030년 29조 2,388억 원 규모를 형성할 것으로 예상된다.

20) IQ4I (2022)

21) 온프레미스(On-Premise)란 하드웨어, 소프트웨어 등을 원격 환경이 아닌 자체 보유 공간에서 직접 운영하는 방식을 의미함

22) Swinhoe (2021)

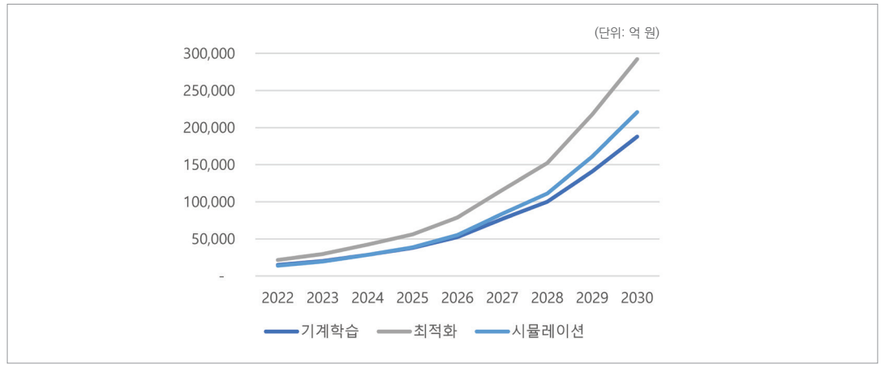
표 I-1-13 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

국가	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
기계학습	14,944	20,258	28,651	37,754	52,416	76,929	100,001	140,845	187,914	37.2%
최적화	21,631	29,485	42,281	56,035	78,903	115,947	152,365	217,765	292,388	38.5%
시뮬레이션	14,083	19,634	28,552	38,681	55,214	83,847	111,274	161,115	220,869	41.1%
합계	**50,658**	**69,377**	**99,484**	**132,471**	**186,533**	**276,723**	**363,640**	**519,725**	**701,171**	**38.9%**

※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-15 애플리케이션별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망



※ IQ4I (2022) & Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

3. 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장

양자컴퓨팅 기술에 대한 산업 수요는 매우 다양하다. 현재 보건·의료, 은행·금융·보험, 공공안전 및 국방 등은 양자컴퓨팅 기술에 대한 수요가 가장 큰 산업 부문들이다. 보건·의료는 2022년 1조 445억 원의 관련 매출이 발생할 예정이며, 연평균 35.5% 성장해 2030년 11조 8,886억 원에 이를 것으로 전망된다. 은행·금융·보험은 2022년 9,531억 원이며 연평균 43.3%의 높은 성장률을 지속해 2030년 16조 9,656억 원의 가장 큰 시장을 형성할 것으로 보인다. 정부·공공안전 및 국방·우주 분야도 양자컴퓨팅에 대한 수요가 매우 클 것으로 보여, 2030년 두 부문에서만 총 20조 규모의 매출을 기대하고 있다. 에너지와 자동차·운송은 각각 연평균 41.0%, 45.0% 성장해 2030년 둘 다 6조 이상의 시장을 형성할 것으로 예측되며, 제조·공급망 분야도 꾸준한 기술 수요로 인해 연평균 44%의 높은 성장률을 지속할 것으로 기대하고 있다.

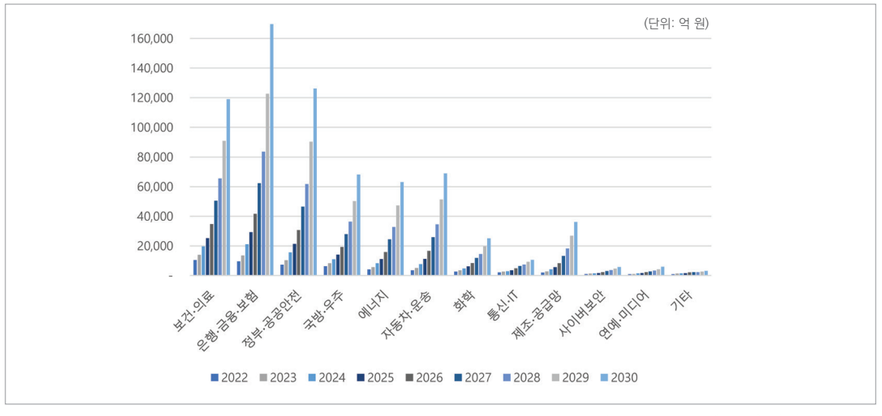
표 I-1-14 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망

(단위: 억 원)

국가	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR
보건·의료	10,445	14,006	19,661	25,158	34,664	50,397	65,426	90,794	118,886	35.5%
은행·금융·보험	9,531	13,483	21,103	29,220	41,597	62,308	83,615	122,706	169,656	43.3%
정부·공공안전	7,312	10,341	15,598	21,358	30,609	46,470	61,763	90,292	126,235	42.8%
국방·우주	6,267	8,247	11,010	14,020	19,229	27,882	36,377	50,186	68,052	34.7%
에너지	4,047	5,629	8,258	11,138	15,828	24,347	32,713	47,217	63,085	41.0%
자동차·운송	3,525	5,105	7,733	11,269	16,613	25,787	34,545	51,288	68,859	45.0%
화학	2,611	3,534	4,719	6,158	8,372	11,912	14,525	19,725	24,997	32.6%
통신·IT	2,089	2,618	2,884	3,538	4,840	6,414	7,328	9,187	10,550	22.4%
제조·공급망	1,958	2,749	4,194	5,634	8,241	13,221	18,189	26,815	36,164	44.0%
사이버보안	1,045	1,309	1,442	1,703	2,224	3,011	3,664	4,639	5,710	23.7%
연예·미디어	914	1,047	1,442	1,703	2,224	2,749	3,271	4,229	5,898	26.2%
기타	914	1,309	1,442	1,572	2,093	2,225	2,224	2,648	3,053	16.3%
합계	**50,658**	**69,377**	**99,484**	**132,471**	**186,533**	**276,723**	**363,640**	**519,725**	**701,171**	**38.9%**

※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

그림 I-1-16 수요산업별 글로벌 양자컴퓨팅 시장 전망



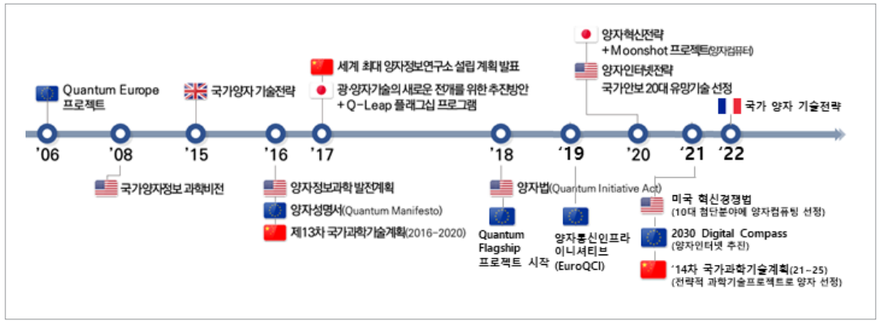
※ Mind Commerce (2022) 집필진 재구성

제2장 국내외 정책 동향

제1절 개요

해외 주요국들은 양자분야 활성화를 위해 정부 주도로 법·제도적 기반 마련과 함께 국가 양자기술 확보 정책 및 로드맵 수립에 나서고 있다. 이를 기반으로 대규모 예산을 장기적으로 투입해 기초연구를 지원하고, 산업적 응용 가능성이 높은 분야를 중심으로 산업화를 촉진하고 있다.

그림 Ⅰ-2-1 주요국 양자분야 정책 및 입법 현황



※ IITP (2022)

미국에서는 2020년 7월 네트워크 전략비전을 수립해 향후 10년 내 양자네트워크를 전국적으로 구현한다는 방침을 제시했다.[23] 단기적으로는 2025년까지 양자 상호연결과 양자중계기, 양자메모리 개발 등에 역점을 둔다는 계획이며, 장기적으로는 2040년까지 국가 차원에서 양자네트워크를 통합한다는 전략이다. 양자센서 분야의 밑그림은 2022년 3월 백악관 국가과학기술심의회 양자정보과학 소위원회를 통해 제시됐다. 그 내용을 들여다보면 양자센서는 양자컴퓨팅 및 양자통신에 비해 비교적 성숙시장이나, 전체적으로는 아직 초기단계에 불과하고 향후 다양한 산업영역에서의 활용이 기대되므로 지속적 투자를 통한 단기적 산업 활성화가 필요하다는 방향성을 담고 있었다.

23) The White House National Quantum Coordination Office (2022.02)

유럽은 '양자 선언문(Quantum Manifesto)'에 근거한 10억 유로(약 1조 3,500억 원) 규모의 연구개발 투자가 진행 중에 있다. 과학 연구와 산업경쟁력을 강화해 '제2의 양자 혁명'에 불을 붙이는 것이 목적으로 영국, 독일, 네덜란드 등의 국가에서는 독자적인 양자기술 전략과 정부 투자도 준비하고 있다.

중국은 국가적으로 양자기술에 주력하고 있다. 특히 양자통신 분야에서의 기술이 눈에 띄게 발전 중인데, 베이징과 상하이를 연결하는 총 2,000km가 넘는 양자통신 간선 네트워크를 구축했고 인공위성 '묵자'에 의해 양자암호키를 분배하고 양자 텔레포테이션 실험에 성공하는 등 대표적인 성과들을 내놓고 있다. 양자컴퓨터 분야에서도 '지우장(九章) 2호', '쭈충즈(祖沖之) 2호'를 통해 양자초월 실험을 검증하는 등 매우 적극적으로 연구개발을 진행하고 있다.

일본은 2017년 8월 문부과학성이 '양자과학기술(광·양자기술)의 새로운 추진 방책'을 발표하며 양자기술 육성의 신호탄을 쐈다. 이어 2018년 12월에는 내각부가 "향후 이노베이션을 추진하는데 있어 중요한 3가지 분야"로 AI, 바이오와 더불어 '광·양자'를 언급했다. 또 2020년 1월에는 일본 최초의 양자기술에 관한 통합 전략인 '양자기술 이노베이션 전략'을 발표하며, 양자기술 개발에 대한 글로벌 트렌드에 합류하기 시작했다.

우리나라의 경우 출발이 상대적으로 늦은 탓에 다른 나라에 비해 큰 기술격차를 보이고 있다. 이에 과학기술정보통신부에서는 2019년부터 양자센서 분야·양자컴퓨터 분야·양자암호통신 분야 신규사업 지원을 확대하고 있다. 구체적으로 대학, 연구소 등 연구조직을 강화하고, 양자암호통신인프라 시범사업을 추진 중에 있으며, 산업 생태계 활성화를 위한 다양한 노력을 기울이고 있다.

표 I-2-1 주요국 양자분야 정책

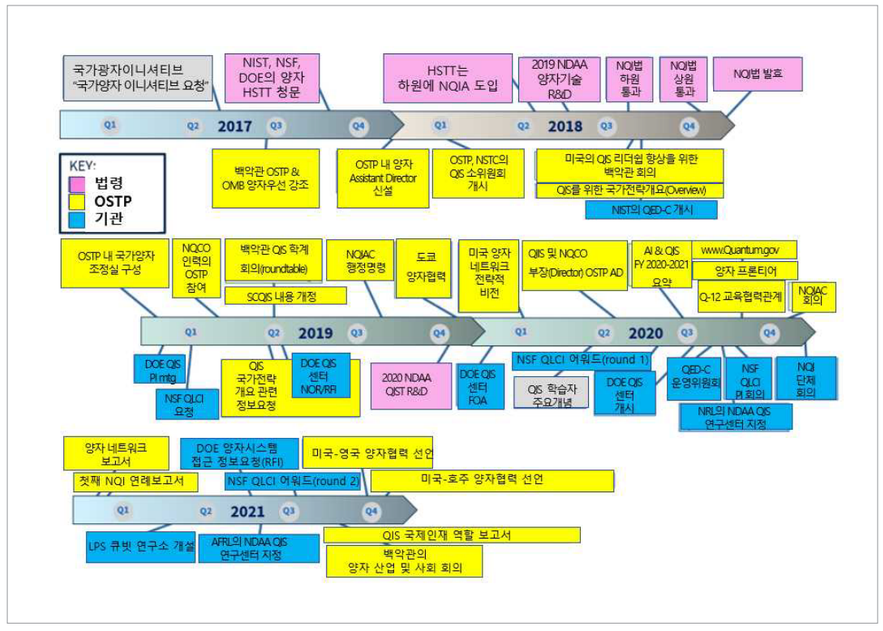
국가		주요 내용	예산
미국		• 세계 최초 '국가 양자 이니셔티브 법' 제정(2018.12)으로 10년간 양자 연구개발 지원, 백악관 주도 범부처 계획 조정 및 연방기관 간 활동 연계, 민관 협력 지원 • '미국 양자네트워크 전략적 비전' 발표(2020.02, 2020.07)로 10년 내 양자네트워크의 전국적 구현으로 국가 차원에서 양자정보네트워크 통합 • 혁신경쟁법 내 10대 첨단기술 분야 중 하나로 양자컴퓨팅을 포함(2021.06) • 'Bringing Quantum Sensors to Fruition(2022.03)'을 통한 양자센서 산업화의 단기 목표 설정	국가 양자 이니셔티브 법 예산 2019-2023년 최대 12억 달러
유럽	EU	• 중장기 양자기술 로드맵 하에서 10년간 10억 유로를 투입하는 '양자기술 플래그십' 프로젝트 운영 • '2030 Digital Compass'에서 25년까지 유럽 최초의 양자컴퓨터 개발 목표 제시(2021.03)	양자 플래그십 예산 2018-2027년 10억 유로
	영국	• 장기적 양자기술 R&D 투자 유도를 위한 '양자기술 국가전략' 발표 • 양자컴퓨팅 상용화 및 사업화 지원(2019.06) 및 양자분야 산업화를 위해 38개 과제 투자 발표	국가 양자기술 프로그램 허브 구축 예산 2014-2018년 2.7억 파운드
	독일	• 연방정부 차원의 양자기술 관련 프레임워크 프로그램을 마련하여 연구 환경, 산업경쟁력 등을 개선	연방정부 프레임워크 프로그램 예산 2018-2022년 6.5억 유로
	프랑스	• 양자기술 국가전략 수립과 연구개발 프로젝트 선정	-
캐나다		• 우주항공·국방·보안 등 양자기술 적용으로 시너지 효과 창출이 예상되는 분야에 연구 집중 • 대학을 양자분야 혁신거점으로 육성하기 위해 전폭 지원	연방정부 연간 1억 달러 수준의 예산 투입
중국		• 양자제어·양자정보를 국가전략 분야로 격상시키고 세계 최대 규모의 연구소 설립 등을 통해 양자기술 강국 도약 준비 • 지방정부 단위에서 생태계 구축을 목표로 한 양자산업 클러스터 조성 • 2014.5 규획에서 전략적 과학기술 프로젝트로 '양자정보' 선정(2020.10)	양자정보과학국가연구소 사업 예산 2018-2022년 1,000억 위안
일본		• 첨단 연구 프로그램에서 수행된 기초연구 성과를 토대로 사업화·산업화 촉진. '양자기술 이노베이션 전략' 수립(2020.01) • 소사이어티 5.0 실현 목표 하에 자국 강점분야뿐만 아니라 주변기술까지 대상을 확대해 지원	Q-Leap 프로그램 예산 2018년 22억 엔, 2019년 22억 엔
호주		• 양자산업 육성을 위한 투자 확대 추진 중	호주연구위원회 예산 1.3억 호주달러
한국		• 양자기술 연구개발 투자전략 수립을 통한 투자의 확대와 양자암호통신인프라 시범사업 등 양자정보통신 저변 확대 및 산업 전반 활성화를 노력 중	2022년 양자분야 정부지원 규모 790억 원 수준 (실제 예산 지원금액 약 818억 원)

※ IITP (2019) 집필진 재구성

1. 미국

미국은 양자기술 분야의 글로벌 리더십 확보를 가속화하기 위해 2018년 12월 세계 최초로 '국가 양자이니셔티브(National Quantum Initiative Act, NQI) 법'을 제정했다. 해당 법령의 현실화를 위해 이후 범정부적 양자 관련 거버넌스 추진체계[24]를 구성하고 연구센터 설립, 지원 법률 제정, 국제적인 협력 강화 등 다양한 정책을 펼쳐 나갔다.

그림 I-2-2 미국 양자 이니셔티브 추진 타임라인(2017~2021)



※ NSTC (2021) IITP (2022)

국가 양자이니셔티브(NQI) 연구개발 프로그램은 양자컴퓨터, 양자통신, 양자센서를 모두 포괄한다. 양자기술의 기반을 이루는 과학기술에 대한 종합적인 연구 수행 프로그램인 것이다.

24) 백악관 직속 국가양자조정실(National Quantum Coordination Office, NQCO), 국가과학기술자문위원회(National Science and Technology Council, NSTC) 산하 양자정보과학소위원회(Subcommittee on Quantum Information Science, SCQIS) 신설을 통해 양자정보과학(Quntum Information Science) 전략계획 수립

표 I-2-2 미국 양자이니셔티브 프로그램 구성요소

연구개발 분야		주요 연구내용
센서	QSENS (Quantum Sensing and Metrology)	양자 중첩 및 얽힘, 비고전적인 빛 상태, 새로운 계측 체계 또는 양식, 원자시계 등 양자제어로 가능해진 정확성 및 정밀도 향상 과업의 실현을 위한 제반 연구들
컴퓨터	QCOMP (Quantum Computing)	양자 비트(큐비트) 및 얽힘 게이트(gate), 양자 알고리듬 및 소프트웨어, 프로그래밍 가능한 양자장치를 사용한 디지털 및 아날로그 양자 시뮬레이터, 양자 컴퓨터 및 프로토타입, 양자+고전 컴퓨팅 시스템 개발 등
통신	QNET (Quantum Networking)	새로운 정보기술 응용 및 기초 과학을 위해 얽힌 양자 상태(장거리에 걸쳐 분산되고 여러 당사자가 공유)를 생성 및 이용, 고전적 컴퓨팅 능력을 뛰어넘는 향상된 중간 규모 양자 컴퓨터(모듈)의 네트워킹 연구 등
기반 과학 기술	QADV (QIS for Advancing Fundamental Science)	다른 학문 분야의 기본 지식을 확장하기 위해 양자 장치 및 QIS 이론을 적용하기 위한 연구를 수행하며 생물학, 화학, 계산, 우주론, 에너지 과학, 공학, 재료, 핵 물질 등 기타 기초과학 측면에 대한 이해를 향상
	QT (Quantum Technology)	다양한 주제에 걸쳐 연구를 수행 - 최종 이용자와 협력해 현장에서 양자기술을 배포하고 사용 사례를 개발 - 전자 · 광학 · 극저온을 위한 기반 시설 및 제조 기술 등 양자 과학 · 공학 지원을 위한 기초연구 - 양자기술(예: 양자 후 암호화)에 의해 발생하는 위험을 이해하고 완화

※ NSTC (2021) IITP (2022)

미·중 패권 경쟁에서의 안보 우위를 점하고자 2019년에는 양자정보과학을 5G, AI, 빅데이터, 로봇, 항공우주와 함께 우선순위 집중투자 대상으로 선정했다.[25] 같은 해 12월에는 백악관 과학기술정책실(Office of Science and Technology Policy, OSTP)에서 국가 최상위 사이버보안 연구개발 4개년 전략계획 보고서를 발표했으며, 사이버 보안 6대 중점 분야로 양자정보과학을 선정했다. 세부적으로 양자 소프트웨어 및 하드웨어 안정성 강화, 효율적 양자 암호화 프로토콜 개발, 양자정보과학 기반 사이버 공격 예측 및 대응 등이 중점분야로 지정되었다.

또한 백악관 과학기술정책실 국가양자과학정책처에서는 2020년 2월과 7월 '국가 양자정보과학(Quntum Information Science) 네트워크 전략 비전'을 발표했다. 단기적으로는 2025년까지 양자 상호연결과 양자중계기, 양자메모리 개발 등에 역점을 둔다는 계획이며, 장기적으로는 2040년까지 국가 차원에서 양자네트워크를 통합한다는 전략을 제시했다.

25) 미국 안보 우위를 위한 20대 핵심유망기술로 '양자정보과학'을 선정 (미국 NSC, 2020.10)

표 Ⅰ-2-3 미국 양자정보과학 네트워크 전략 비전의 장단기 목표

기간	기간별 목표
단기 5년 (2020~2025년)	양자정보과학(QIS) 분야의 기초과학 지식과 핵심기술 발전을 통해 기존의 양자연결명(Interconnects), 양자순환기(Repeaters) 및 양자메모리(Memories)로부터 새로운 고성능 양자채널(High-throughput Quantum Channels) 및 효율적 장거리 연결망 재배치로의 대대적 전환 추진
	국가안보 강화, 보건복지 증진, 경제적 수익 창출 및 과학적 진보를 위해 새로운 고성능 양자채널과 장거리 연결망 재배치로 인한 파급효과의 새로운 응용 가능성 규명
장기 20년 (2020~2040년)	단기 5년 목표를 통해 구축된 새로운 양자정보 네트워크를 바탕으로 기존의 전통적 정보통신 네트워크에서 실현하지 못한 초고속 고성능 업무와 정보처리 추진
	국가 차원의 양자정보 네트워크 통합의 파급효과와 그 한계점 및 개선 가능성 파악

※ KISTEP (2021a)

2022년 3월 미국 백악관 국가과학기술자문위원회(NSTC)의 양자정보과학 소위원회(SCQIS)는 정부기관이 사용자와 파트너십을 형성하는 '양자센서 산업화 정책'을 추진 중에 있다. 양자센서 산업화 정책은 정부기관, 산업계, 학계 모두 잠재적 최종 소비자로 인식하며 센싱 기술을 사용하는 기관들의 자발적인 파트너십 형성을 추구한다. 구체적으로 사용자로서 양자기술 연구개발 커뮤니티와 협력해 연구보고서 발간을 비롯한 지식공유 행위뿐 아니라, 양자기술 상용화에 필요한 기술 시스템 및 인프라[26] 관련 R&D 지원에 집중하고 있다.

또한 NIST, NSF, DOE 등 연방 정부기관들은 양자기술 분야 중 양자 컴퓨터·통신·센서·기반기술 등의 부문에서 다각적인 연구개발을 추진하고 있다.

26) 특수재료, 제조시설, 집적광자기술, 레이저, 진공시스템 등

표 Ⅰ-2-4 연방기관별 양자기술 연구개발 현황

기관	주요 연구내용
NIST	• 양자시대(Post-quantum) 이후 암호기술 표준화 작업 진행 중 – 양자기술의 고전 암호에 대한 영향, 차세대 암호 전이계획 등을 담은 포스트 퀀텀 암호 준비(Getting Ready for Post Quantum Cryptography) 보고서 발표(2021.04)
NSF	• 미래 10대 Big Idea 중 하나로 "양자도약(Quantum Leap)"을 제시하고, 퀀텀 도약을 위한 연구과제 추진(광자를 이용한 양자 머신러닝 등 40여 과제 추진 중) • 2022 회계연도는 다음 3개 목표를 중점으로 연구과제 추진 (1) 양자 현상 및 체계에 대한 근본적인 이해와 그 기본 지식을 기술 응용으로 변환 촉진 (2) 입증 가능한 양자 이점을 가진 개념 증명의 기기, 어플리케이션, 도구 또는 시스템 제공 (3) NSF가 접근할 수 있는 모든 역량을 강화하고, 양자기술의 혁신을 구현할 양자 지식인력을 양성
DoE	• 2020년 5개의 국가양자정보과학연구센터(Q-Next, C2QA, SQMS, QSA, QSC)를 설립하고, 산학협력에 기반을 둔 양자연구 수행 • 고등양자과학기술 관련 재료 및 화학 연구에 7,300만 달러 투입 발표(2021.07)
DoD	• 양자기술을 국방부의 11개 우선순위 중 하나로 선택하고 국방과학연구소(DARPA), 육해군 연구소(ARL, NRL, AFRL) 등을 통해 연구를 수행 – 국방 분야 활용 가능한 선도적인 원자시계, 양자센서, 양자컴퓨터, 양자네트워크 등에 대한 포괄적인 연구 수행
NASA	• 지식, 교육, 혁신, 경제적 활력 및 지구 관리를 강화하기 위해 양자과학 기술그룹, 연구센터들(Glenn, Ames, Goddard Space Flight) 등을 운영해 항공우주 관련 양자연구 수행
NSA	• 물리과학연구소(LPS)를 통해 양자기술과 활용기술을 연구하고, 대학들의 연구를 지원 – 고성능 큐비트 시스템 프로그램(SHiFT), 중간 규모 시스템의 양자특성 프로그램(QCISS), 신흥 큐비트 과학기술(NEQST), 교차 양자기술 프로그램(CQTS) 등을 통해 연구 수행
IARPA	• 정보기관과 연방정부에 혁신적인 기술을 제공하기 위해 고위험 · 고혜택 R&D 후원 – 최근 양자 어닐링에 대한 QEO(Quantum Enhanced Optimization) 및 논리 큐비트 개발을 위한 LogiQ 프로그램 개발 추진

※ NSTC (2021) IITP (2022)

에너지부(DoE)는 연구소, 대학, 민간기업과 파트너십을 통해 5개의 국가양자기술연구센터(Q-NEXT, C2QA, SQMS, QSA, QSC)를 구축했다. 국가양자기술연구센터에서는 강력한 양자컴퓨터, 해킹할 수 없는 통신 네트워크, 초고감도 기기 및 센서, 획기적인 신소재 분야 등에 대한 집중적인 연구개발을 수행 중에 있다.

표 I-2-5 미국 주요 양자정보과학(QIS) 연구센터 현황

연구센터명	주관기관	주요 연구내용
차세대 양자과학 및 공학 (Next Generation Quantum Science and Engineering, Q-NEXT)	Argonne 국가연구소	• 양자 상호연결 제공, 통신 링크, 센서 네트워크 및 시뮬레이션 테스트베드를 시연하기 위한 집중적이고 상호 연결된 생태계 조성 • 양자 스마트 인력을 구축하고, 국가 양자장치 데이터베이스를 구축하여 양자표준 개발 • 신생기업에 대한 인센티브 제공 등을 통해 양자기술의 실질적인 상업화 경로 제공
양자이점을 위한 공동설계 센터 (Co-design Center for Quantum Advantage, C2QA)	Brookhaven 국가연구소	• 고에너지 · 핵 · 화학 · 응집 물질 물리학의 과학적 계산을 위한 양자 이점 달성을 위해 오늘날 잡음이 많은 중간 규모 양자(NISQ) 컴퓨터 시스템의 한계 극복 • 연구소 통합 5개년 목표는 소프트웨어 최적화, 기본재료 개발 및 장치 속성 정립, 양자 오류 수정 등이며 각 분야별로 10배 개선을 달성하고 이러한 분야별 개선사항을 결합해 1,000배 개선 제공
초전도 양자재료 및 시스템 센터 (Superconducting Quantum Materials and Systems Center, SQMS)	Fermi 국가가속기 연구소	• 컴퓨팅 및 센서 기술 수준이 우수한 양자 시스템 구축과 보급을 위해 초전도 2D 및 3D 장치의 문제점을 개선하고, 주요 융합과제에서 혁신적인 발전 실현 • 국가 양자기술 생태계에 광범위하게 기여할 수 있는 재료, 물리학, 알고리듬 및 시뮬레이션 등의 현실화를 위한 고유한 파운드리 기능을 실현하고 양자 테스트베드 형태의 유형 결과물을 생성
양자시스템 가속기 (Quantum Systems Accelerator, QSA)	Lawrence Berkeley 국가연구소	• 과학적인 응용 분야에서 인증된 양자 이점 제공에 필요한 알고리듬, 양자장치 및 엔지니어링 솔루션 공동 설계 • 양자기술 프로토타입을 제공해 상업기술의 성숙을 가속화하기 위한 기초과학 기반 마련
양자과학센터 (Quantum Science Center, QSC)	Oak Ridge 국가연구소	• 양자기술의 양자상태 복원력과 제어 가능성을 향상시키고 궁극적으로 확장성의 주요 장애물을 극복하기 위해 혁신적인 토폴로지 양자물질과 알고리듬 및 센서를 발견 · 설계 · 시연하고 혁신적인 기술개발을 촉진 • 새로운 양자기술 응용 프로그램을 민간 부문으로 전환하기 위해 업계와 긴밀한 협력 속에 차세대 양자기술 인력 양성

※ DOE(National QIS Research Centers) IITP (2022)

또한 에너지부 고등과학컴퓨팅연구실은 2020년 2월 양자인터넷 청사진(Quantum Internet Blueprint) 워크숍에서 5개 단계로 구분된 미국 최초의 양자인터넷 로드맵을 제시했는데 그 내용은 〈표 I-2-6〉과 같다.

표 I-2-6 미국 양자인터넷 로드맵 5단계

단계	주요 실행과업
마일스톤1	광 네트워크 상에서 안전한 양자프로토콜 검증
마일스톤2	인프라 캠퍼스 및 시티의 얽힘(Entanglement) 분산
마일스톤3	얽힘 스와핑(Swapping)을 이용한 각 주 간(Intercity)의 양자통신 실현
마일스톤4	양자리피터(Repeater)를 이용한 주 내(Intrastate) 양자얽힘 분산
마일스톤5	실증에서 운영 인프라로 전이하기 위해 기관(연구소, 대학, 산업계) 간 생태계 구축

※ DOE (2020b) IITP (2022) 집필진 재구성

그림 I-2-3 미국 내 양자인터넷 설계

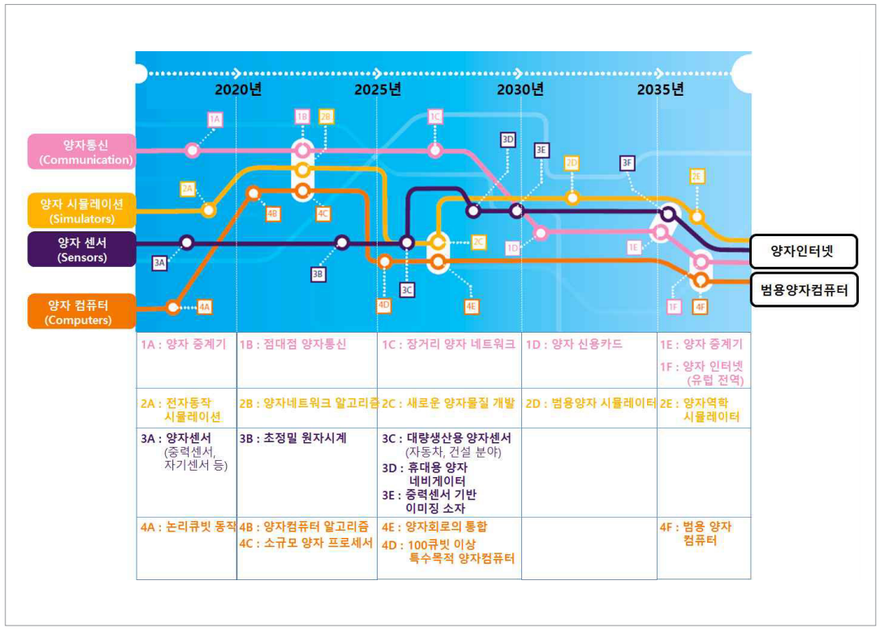


※ Brookhaven National Laboratory 웹사이트

2. 유럽연합(EU)

EU는 양자 R&D 투자 촉구를 위해 2016년 5월 '양자선언문(Quantum Manifesto)'을 발표했다. EU 내 3,400개 이상 양자 물리학자와 기업들을 비롯해 산업계와 학계, 그리고 정부 측이 모두 참여해 작성한 선언문으로 이를 통해 단기·중기·장기 양자기술 로드맵과 분야별 목표를 제시했다.

그림 I-2-4 양자선언문의 기술개발 로드맵



※ IITP (2022)

표 I-2-7 양자 선언문의 분야별 기술적 목표

구분	최종 목표	정의 및 범위
양자통신	양자인터넷	기존 정보 및 보안 수단과 양자정보기술을 결합한 양자인터넷 기술
양자센서	양자센서 기반의 새로운 응용기술	양자 중첩과 얽힘을 활용해 감도 및 해상도를 향상한 센서
양자 시뮬레이션 및 양자컴퓨터	범용 양자컴퓨터	전통 방식 컴퓨터 성능을 넘어서는 계산 능력을 갖춘 양자컴퓨터

※ IITP (2022)

이후 IT분야 내 새로운 아이디어와 주제를 탐색하고 관련 연구를 촉진하기 위한 장기 R&D 지원 프로그램인 '미래신흥기술(FET) 프로그램[27]'의 일환으로, 2018년 10월 5개 영역[28]으로 구성된 '양자 플래그십(Quantum Flagship, QF)[29] 프로젝트'를 시작했다. EU집행위원회 및 회원국이 각각 5,000만 유로를 부담해 10년에 걸쳐 10억 유로를 투입한다는 계획이다.

양자 플래그십은 양자 컴퓨터·시뮬레이터·센서의 양자네트워크를 통한 상호 연결과 얽힘 등 고유 특성을 활용해 양자 자원을 분산하는 '양자웹(Quantum Web)'을 중장기 비전으로 제시했다. 또 혁신적인 양자기술 연구를 전개해 관련 산업 발전을 촉진하고, 양자기술 분야에서 국제적인 리더십을 확보하며, 이를 통해 유럽이 양자기술 분야 연구·사업·투자를 이끌어 내는 활동적이고 매력적 지역으로 도약하는 것을 목표로 설정했다.

유럽 전역 전문가 2,000여명이 참여해 18개월에 걸쳐 연구를 진행한 끝에, 2020년 2월에는 '전략적 연구 어젠다(Strategic Research Agenda)' 5대 방향을 설정했다. 세부적으로 양자기술 응용 유형(통신, 컴퓨팅 등), 교차(Cross-cutting) 영역(공학, 교육, SW 등)을 고려해 9대 영역[30]을 설정하고, 영역별 연구과제를 제시했다.

27) https://ec.europa.eu/futurium/en/content/fet-flagships.html
28) ① 양자컴퓨팅, ② 양자 시뮬레이션, ③ 양자센싱과 측정학, ④ 양자통신, ⑤ 기초 양자과학
29) European Commission (2020)
30) 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자시뮬레이션, 양자센싱과 계측, 과학기술자원, 혁신, 국제협력, 양성평등, 교육훈련

그림 I-2-5 5대 전략적 연구 어젠다



※ European Commission (2020)

양자기술 발전을 위한 3년 단기 목표와 6~10년 중장기 로드맵은 〈표 I-2-8〉과 같다.

표 I-2-8 유럽 양자기술 발전 단기·중장기 로드맵

목표	주요 내용
단기 목표 (~3년)	• 효율적이고 확장 가능한 양자네트워크 하드웨어 개발 • 암호 키 처리 및 사용 인터페이스를 포함한 소프트웨어 개발 • 위성 기반 양자네트워크 구축을 위한 핵심기술 개발 및 시연 • QKD 및 QRNG 기술 성능평가를 위한 인증기준 마련 • IoT와 5G기술에 적용하기 위한 QKD 및 QRNG 시스템 단순화 및 성능 개선 • 소규모 양자중계기 기술 시연
중·장기 목표 (6~10년)	• 양자중계기 망을 이용한 800km 이상 양자통신 시연 • 최소 20개 큐비트가 연결된 양자네트워크 시연 • 인공위성을 이용한 원거리 양자얽힘 생성 시연 • 양자네트워크 기술을 위한 산업 공급망 구축

※ European Commission (2020) IITP (2022)

27개국이 참여했고 2019년 6월 발표된 '양자통신 인프라 이니셔티브 선언(EuroQCI)'을 근거로 유럽뿐 아니라 세계 곳곳에 유선·무선·위성을 활용해 안전한 양자인터넷 인프라를 구축하는 사업이 2021년부터 추진되기 시작했다. Digital Europe 프로그램 재원을 통해 추진된 이 사업은 2027년 1단계 개발 완료를 목표로 진행 중에 있다.

구체적으로 4개 양자컴퓨터 노드를 양자중계기(얽힘, 텔레포트)로 연결하는 다중 양자네트워크 기술 및 양자인터넷용 소프트웨어 프로토콜 스택 등이 개발 중이며, 각 회원국은 개별적인 정책 추진보다 EU 양자 플래그십 차원에서 양자 R&D 투자 및 산업화를 지원하고 있다.

한편 EU는 2020년 2월 발표된 '유럽 디지털 미래 준비 전략(Shaping Europe's Digital Future)[31]'을 통해 인간의 삶을 풍요롭게 할 수 있는 기술로 5G, AI와 함께 양자기술을 선정했다. 또 2021년 3월 수립된 '디지털 컴퍼스 전략'을 통해 미래 전략 구현을 위한 한 축으로 양자컴퓨팅을 설정하고 개발 선도의지를 명확히 표명했다. 2030년까지 최첨단 양자역량을 확보하고 2025년에는 최초의 양자컴퓨터를 유럽이 보유한다는 것이 세부 목표였고, 동시에 유럽 전역을 대상으로 한 초안전(Ultra-Secure) 양자통신 인프라 개발 및 보급을 지향점으로 삼았다.

표 I-2-9 2030 Digital Compass 목표

4대 방향	2030 Digital Compass (2030년 기준 목표)
숙련된 디지털 인재 양성	• 모든 성인 80% 이상 디지털 교육 • 2,000만 명 ICT 전문가 확보(현재 780만 명)
디지털 인프라	• (양자) 양자컴퓨터 개발(~2025), (클라우드) 1만 개 에지노드 • (연결) 모든 가정 기가비트, (반도체) 세계 생산량 20% 달성
디지털 비즈니스 전환	• 기업 75% 클라우드 컴퓨팅 서비스, 빅데이터·AI 사용
공공서비스 디지털화	• 공공서비스 100% 온라인화, 모든 시민 전자의료 기록 등록

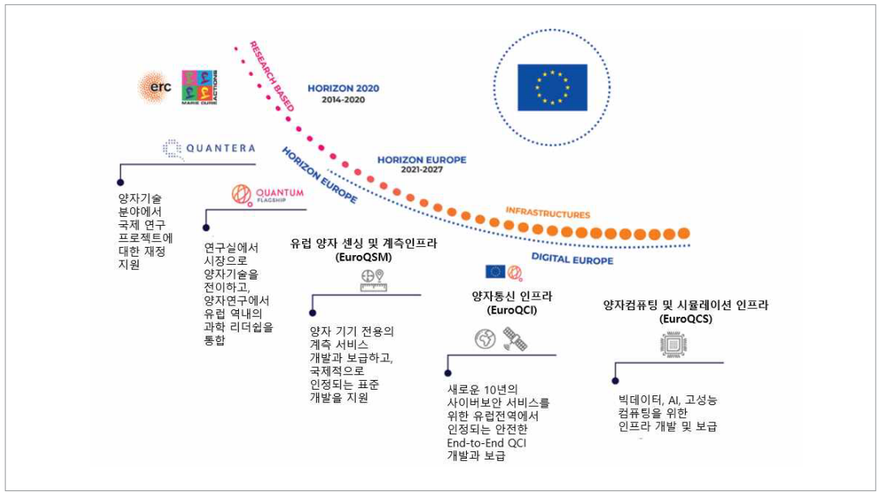
※ European Commission (2021)

'디지털 컴퍼스 전략' 내 최대 연구개발 프로젝트인 'Horizon 2020', 'Horizon Europe' 등과 EU 회원국 간 긴밀한 협력을 통해 국가 간 양자네트워크 인프라 구축사업을 전개하고 있다. 또 통신보안 측면의 양자 키 분배(Quantum Key Distribution) 기술을 넘어 양자시스템을 상호 연결하는 양자인터넷 연구도 지속적으로 추진하고 있다.

나아가 2022년 4월에는 양자기술 관련 KPI(Key Performance Indicator)를 제시함으로써 양자통신(성능, 유럽 기술 리더십, 도입률 등)과 양자컴퓨팅(유럽 영향 리더십 등), 양자센서 및 계측 분야를 넘어 양자시뮬레이션과 생태계(투자, 연구의 상용화 등) 구축을 포괄하는 체계적인 목표관리 수단을 정립하기도 했다.

31) European Commission, Shaping Europe's Digital Future, 2022.2

그림 I-2-6 EU 양자지원 계획 및 정책의 흐름



※ European Commission (2020) IITP (2022)

3. 영국

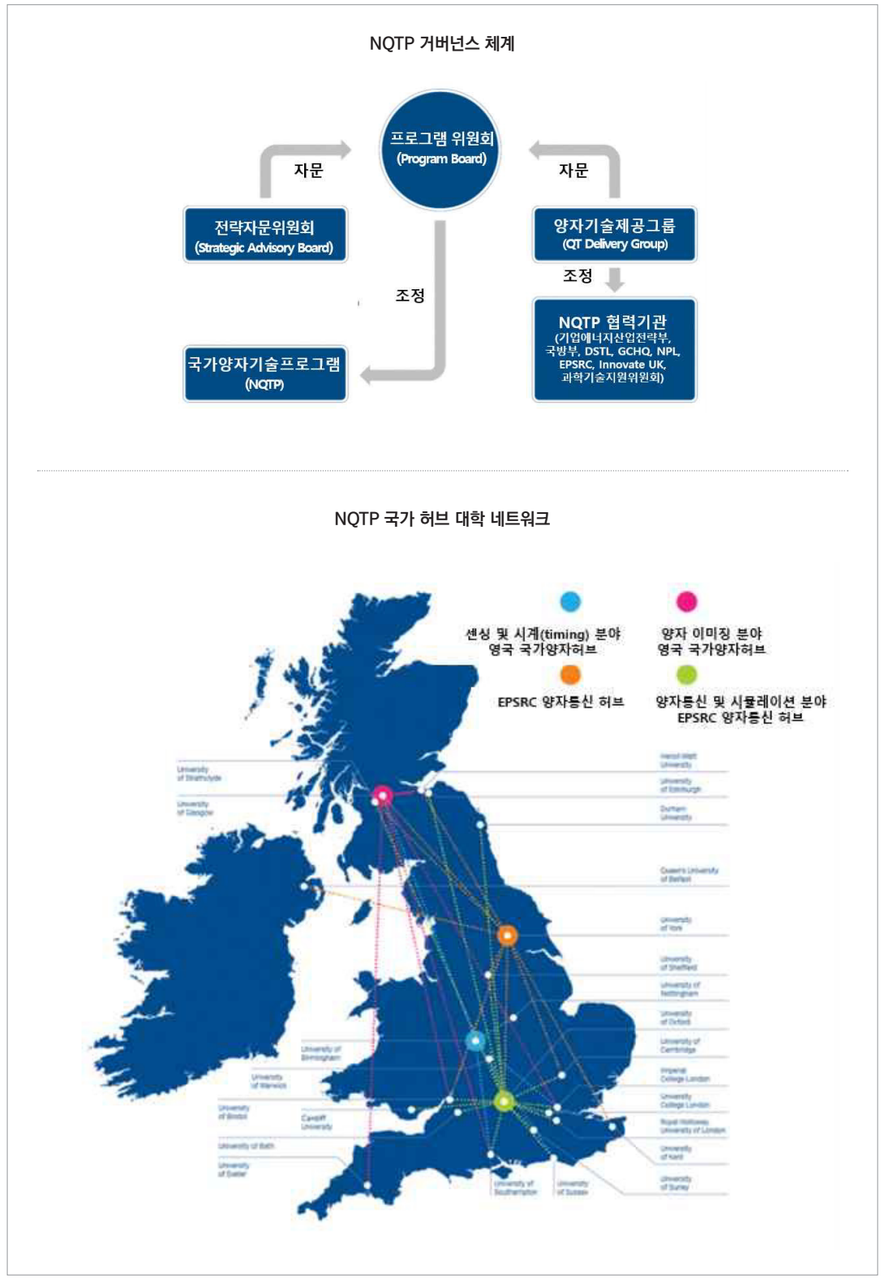
영국은 2013년부터 양자기술 리더의 위상 확보와 세계시장 주도를 목표로 10년간 정부 및 민간이 10억 파운드 이상을 투자하는 '국가 양자기술 프로그램(UK National Quantum Technologies Programme, NQTP)'을 추진 중에 있다.

NQTP는 5개 분야를 중심으로 사업을 추진하고 있다. 우선 양자기술에 관한 국가역량 강화를 목표로 삼고 있으며, 둘째로 관련 연구개발 수준 향상을 꾀하고 있다. 또한 세계 최고 수준 인재 육성 및 확보를 목표로 설정하고 있고, 양자기술의 상업화 및 산업화에 초점을 두고 있다. 마지막으로 주요 참여기관은 BEIS, EPSRC, NPL, GCHQ, DSTL 등[32]인데, 4개 양자기술 허브를 중심으로 사업을 추진 중에 있다.

영국 정부는 이 계획에 따라 2014년부터 2019년까지 양자기술 허브 구축, 인력 양성, 10개 스타트업 창출 등에 약 4억 파운드를 지원했다. 2020년부터 시작돼 2024년까지 이어질 2단계 과정을 통해서는 추가로 약 10억 파운드의 지원이 이뤄질 것으로 예상되고 있다. 2022년 6월 기준 NQTP를 통해 투자된 금액의 세부를 살펴보면 산업전략챌리지기금 1.47억 파운드, 국가양자컴퓨팅센터 0.93억 파운드, 양자기술허브 2.14억 파운드, 기반물리를 위한 양자기술 0.4억 파운드 등으로 집계되고 있다.

32) https://thequantuminsider.com (2022.07)

그림 I-2-7 영국 NQTP 거버넌스 체계 및 투자



※ Global Advantage (2022) IITP (2022)

표 I-2-10 영국의 NQTP 사업별 추진동향

기관	주요 연구내용
4대 양자기술 허브 운영	• 양자컴퓨팅 및 시뮬레이션 허브(Quantum Computing and Simulation Hub, QCS) – 애플리케이션, 알고리듬, 아키텍처, 양자 고전 인터페이스, 양자 하드웨어 관련 연구 • 양자통신 허브(Quantum Communications Hub) – 양자통신보안, 네트워크, 양자 키 분배(QKD), 우주 및 위성통신, 양자인터넷, 칩 기반 기술, 양자후 암호화, 표준, 차세대 기술 등 연구 • 영국양자기술센서시계허브(UK Quantum Technology Sensors and Timing Hub) – 의료, 에너지, 운송, 토목, 제조, 국방, 측량용 중력 센서, 항법 위성 시스템용 양자시계 등 연구 • QuantIC(The UK Quantum Technology Hub in Quantum Enhanced Imaging) – 단일광자 카메라, 단일 픽셀 카메라, 극한시간 분해능 이미징, 3D 프로파일링, 초분광 · 초저속 조명, 국부 중력장의 이미징 등 연구
국가역량 강화	• 국가양자컴퓨팅센터(National Quantum Computing Centre, NQCC) 설립 추진(2023년 완료 예정) – 산업계, 정부, 연구 커뮤니티 전반의 파트너와 협력해 새로운 시설 운영 모색 – 기술 프로그램 조정 및 제공 통해 필요한 R&D 수행 계획 • NPT 양자계측연구소(Quantum Metrology Institute at NPL) 운영(2015년 설립) – 양자시계, 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자센서 및 양자재료를 포함한 여러 과학 분야에서 전국의 산업 및 학계 파트너와 협력 • SPEQTRE(Space Photon Entanglement Quantum Technology Readiness Experiment) – 영국과 싱가포르 간의 양자 키 분야 프로그램에 1,000만 파운드 투입 예정
연구	• 기반물리를 위한 양자기술(QTFP) – 4,000만 파운드의 전략우선펀드(ISPF) 투입해 우주 및 진화 연구 접근법 혁신
상업화 및 산업화 촉진	• 산업전략도전펀드(Industrial Strategy Challenge Fund, ISCF) – NQTP를 뒷받침하는 가치 제공 – 관련 기업에 멘토링 및 사업기회를 제공함으로써 상업화 촉진 – ISCF가 지원하는 1억 5,300만 파운드의 사업체는 프로그램 시작 이후 민간 부문 자금조달로 4억 2,500만 파운드 모금(민간부문 지원의 경우 2025년까지 7억 1,500만 파운드 모금 예상) – 미국 Rigetti와 같은 해외 기업이 영국에 투자하고 협력하도록 독려하는 데 성공 • UK-캐나다 협업 프로그램 – 양자기술 신제품 · 프로세스 · 서비스로 상용화와 관련해 Innovate UK와 NSERC(캐나다 국립 과학 공학 연구 위원회) 간 양자 합의 도출(2020년) – UKRI로부터 200만 파운드의 보조금 지원 실현, 캐나다로부터 440만 캐나다 달러의 투자 유치

※ IITP (2022)

영국 정부는 2022년 2월 양자분야 기술혁신 중요성과 사회경제적 편익의 잠재력을 고려해 국가 차원의 '양자전략(UK Quantum Strategy)' 개발에 착수했다. 그 결과 영국의 양자전략 관련 비전('Quantum Enabled Economy')을 구상하고 실행 3대 목표를 제시했는데, 지속가능한 양자산업 육성 및 유지를 통한 사회·경제적 이익 제공, 영국 강점분야에 대한 전략적인 이점 지원, 양자기술을 이용한 광범위한 사회·경제적 기회 확대와 위험 완화 등이 그 내용이었다.

4. 독일

독일은 오랫동안 학계와 연구계가 양자물리학의 기초과학 업적을 이뤄 왔으며 중소기업화, 전문화, 소규모 생산이라는 특징을 지니고 있었다.

EU의 '양자기술 플래그십 이니셔티브' 대응 차원에서 독일 내 양자기술 이니셔티브 수립을 결정한 것은 2017년 1월이었다. 이후 2018년 9월에 들어 양자기술 연구 중심 국가로의 성장을 목표로 연방정부 차원의 양자기술 프레임워크인 '양자기술-기초에서 시장까지'를 마련하고, 이를 바탕으로 2018년에서 2022년까지 양자컴퓨터, 양자통신, 양자기반 측정기술, 양자시스템 기술 등을 중심으로 6개 이니셔티브를 추진 중이다.

그림 I-2-8 6개 이니셔티브 추진내용

1 양자기술 연구환경 발전	4 보안 및 기술 우위 확보
2 신규 애플리케이션을 위한 연구 네트워크 구축	5 국제협력 조성
3 선도 프로젝트를 통한 산업 경쟁력 강화	6 독일 시민의 참여 확대

연방교육연구부(BMBF), 연방경제에너지부(BMWi), 연방국방부(BMVg), 연방내무부(BMI) 등 다양한 연방정부의 주체는 여러 산업군의 기업들이 양자기술에 관심을 가지고 민간 주도의 협력연구를 수행할 수 있도록 프로젝트를 추진했다. 특히 독일국가측정연구소 내 '양자기술우수센터'는 산업 지원과 연구결과의 애플리케이션 전환을 주도하는 역할을 수행했다. 또 연방정부는 스타트업 지원(EXIST, INVEST, High-Tech Gruenderfonds 등), 중간 단계로 성장한 벤처기업 지원(European Recovery Programme), 이종 산업간 연구개발 제휴(WIPANO, IGF, INNOKOM 등), 시장에 초점을 둔 연구개발 지원(ZIM 등), 혁신 및 디지털화 프로젝트(ERP 디지털 혁신 신용 프로그램 등) 등에 다양한 펀딩 소스 소개 등을 시행했고, 이러한 프로젝트들의 주요 수혜자는 중소기업이었다.

총 6.5억 유로가 투입된 이니셔티브의 예산은 독일연구재단(DFG), 프라운호퍼연구소(Fraunhofer-Gesellschaft) 등 공공 연구기관을 통해 집행된다. DFG는 현재 양자 관련 초점을 가진 양자정보 물질과 광(ML4Q), 뮌헨 양자과학기술(MCQST), 양자프론티어(Quantum Frontiers), 양자 복잡성과 토폴로지 재료(CT.QMAT), 물질 이미징(CUI) 구조(STRUCTURES), 대규모 적대자 대처 사이버보안(CASA) 등 7개 우수 클러스터에 자금을 지원 중이다.

연방교육연구부(BMBF)·프라운호퍼연구소·막스플라크연구소(Max Planck Institute)·독일항공센터(German Aerospace Center)는 독일 및 유럽 데이터 공간에 양자통신을 위한 중앙 플랫폼을 설계하기 위해 QuNET 관련 협력을 진행하고 있다.

2020년 1월에는 양자컴퓨터 분야 전략시책을 펼쳐 3억 유로의 추가 투자를 발표했다. 이어 2020년 7월에는 해당 프로그램에 20억 유로의 미래 패키지[33]를 추가 투자하는 계획도 발표했다. 이에 따라 2020년에서 2025년까지 11억 유로가 양자컴퓨팅 분야에, 8.78억 유로가 실용 응용분야에 투입된다.

한편 2020년 3월 프라운호퍼 연구소는 IBM과 공동으로 독일 양자컴퓨팅 개발 추진에 합의하고, 2021년 6월 양자컴퓨터 'Quantum System One'을 설치했다.

5. 프랑스

프랑스는 2021년 1월 일반 양자컴퓨터 개발을 통한 기술 주권 보장과 전략적 우위 성취를 목표로, '프랑스 양자 전략계획'을 개시했다. 2023년까지 일반 양자컴퓨터 프로토타입을 최초로 개발하는 것이 제1 목표였다. 이를 위해 양자 가속기 및 시뮬레이터, 대규모 양자 컴퓨터 및 소프트웨어, 센서, 커뮤니케이션, 암호 등 5대 전략기술 영역의 전문성 확보에 돌입한 상황이다.

프랑스는 코로나 회복 자금의 일부를 양자기술 분야에 투자할 계획이다. 구체적으로 정부 10억 유로, 민간기업 5억 유로, EU기금 2억 유로, 스타트업 투자자들 1억 유로 등 총 18억 유로의 자금을 해당 분야에 투자할 설계도를 세워놓고 있다. 프랑스 정부는 구체적인 양자기술 전략계획을 제시하기에 앞서 그 사회·경제적 영향을 면밀히 정리했으며, 이를 바탕으로 '양자기술'을 미래가 유망한 차세대 기술로 확인했다.

국가 양자기술 전략은 6개 기술 축과 1개 보조 축 등 총 7개 축으로 구성됐다. 2030년까지 1만 6,000개의 일자리를 창출하고, 양자기술 관련 과학자·엔지니어·의학자 등 5,000명의 새로운 인재를 양성하는 것을 목표로 잡았다. 또 2025년까지 연간 200개의 새로운 논문 및 자료를 산출하는 것을 목표로 약 1,700명의 젊은 연구자를 적극 지원하고, 스타트업 전용 펀드 형태로 최대 1억 2,000만 유로를 기업가에 제공하며, 산업 생태계 구축 및 혁신을 선도하겠다는 계획이다.

33) 포스트 코로나 보정 예산 패키지 및 2020년 1월의 전략적 시책 포함

표 Ⅰ-2-11 프랑스 국가 양자기술 전략의 6개 기술 축과 1개 보조 축

구분	프로젝트	추진 내용
기술	NISQ 시뮬레이터와 양자 가속기 개발 및 보급	• 양자가속기, 시뮬레이터 및 컴퓨터, 양자 컴퓨팅용 소프트웨어 · 센서 · 통신 시스템을 포함해 결정적인 기술적 이점을 제공하는 양자기술 마스터 • LSQ 양자컴퓨터가 도래하기를 기다리는 동안 NISQ 시뮬레이터와 컴퓨터는 이미 현실이 되었으며, 상업적으로도 이용 가능한 수준
	LSQ로 확장된 양자 컴퓨터 개발	• 2023년부터 1세대 양자컴퓨터 통합 프로토타입을 보유한 최초 국가로 성장 • LSQ가 가능한 양자컴퓨터 개발을 통해 슈퍼컴퓨터로 처리할 수 있는 것보다 더 복잡성 높은 계산을 수행하는 것을 목표로 NISQ 큐비트 가속화
	양자센서의 기술과 응용 프로그램 개발	• 양자센서는 지구 관측, 지질학 등 다양한 응용분야에 활용되고 있으나 복잡한 구현으로 인해 산업적 활용성이 낮은 상태. 이를 개선하기 위해 시장 및 응용 분야 모두에서 기술적 성장이 동반되어야 하는 필요성과 시스템 통합 촉진의 당위성 인식 – 저온 원자센서 관련해 차세대 관성 센서, 자기 센서 개발을 목표로 설정
	포스트 양자암호 개발	• 포스트 양자 암호화를 향한 마이그레이션(migration) 구성과 성능 및 보안성을 확보할 수 있는 하드웨어 구현을 위해 알고리듬 개발 하드웨어 구현과 실험 검증 영역에 집중 • 갑작스러운 포스트 양자알고리듬 전환보다 포스트 양자알고리듬과 현재 메커니즘이 공존하는 '과도기' 필요함을 인지
	양자통신 시스템 개발	• 양자통신의 실제 사용은 특별한 배치 없이 기존 통신 인프라에 통합 가능한 양자 및 광자 구성 요소를 개발하는 능력을 기반으로 하고 있으며, 이 분야의 활동방향을 확립하는 것에 중점을 두고 실행 • 기존 광섬유 통신 네트워크에서 양자 구성요소의 배치에 대한 실험 및 평가와 관련해 3가지 측면(속도, 거리, 보안기준)을 강조 – 니스 지역과 일드프랑스 지역의 광섬유 통신 네트워크를 통해 새로운 통신 구성요소와 프로토콜을 실제 조건에서 테스트하고 최적화
	경쟁력 있는 기반 기술 제공 및 개발	• 극저온 환경에서도 양자프로세서 당 큐비트 수를 늘려야 하는 필요성 가중. 배선 및 전자 장치를 포함해 대용량 냉각에 필요한 전력 상태를 유지 – 양자컴퓨터 규모 확장의 전제조건으로 큐비트 온도 허용 오차와 극저온 기술의 성능 사이에서 최적 균형점을 찾는 것에 집중 – 원자 냉각 처리를 위한 새로운 레이저 기술과 유망한 양자특성을 가진 컴퓨팅을 위한 레이저 기술 개발을 지원
보조	산업 생태계의 수평적인 구조화	• 과학 및 기술 사업 지원과 지속적인 경쟁력 유지를 위해 지속적인 훈련과 기술 인프라 강화 통한 기술·인적자본의 개발이 요구되는 상황. 기업가 정신과 기술 이전에 대한 관심을 높이는 데 도움되는 환경을 조성

※ 국가나노기술정책센터 (2022) 집필진 재구성

2022년 3월에는 양자분야에서 우선적인 연구개발 프로그램과 장비개발 프로그램(Priority Research Programs and Equipment, PEPR, 1억 5천만 유로)에 착수하며 일차적으로 4대 영역, 10개 프로젝트를 개시했다.

표 Ⅰ-2-12 프랑스 PEPR의 10대 우선과제

분야	프로젝트	추진 내용
양자컴퓨팅을 위한 솔리드(Solid) 상태의 강력한 큐비트 개발	PRESQUILE	• 정립된 CMOS 기술에서 스핀(Spin) 큐비트의 통합에 대한 과학적 · 기술적 장애물을 식별하고 제거
	RobustSuperQ	• 초전도 및 하이브리드 큐비트에 대한 R&D 가속화(5년 내 제어 가능하고 측정 가능한 고충실도 양자프로세서 시연)
저온 원자 기반 큐비트 및 센서 개발	QubitAF	• 처리 양자 수 증가와 이러한 결과를 인증할 수 있는 플랫폼 성능의 향상을 도모하는 방향으로 양자 시뮬레이션 위한 저온 원자 플랫폼 개선
	QAFCA	• 기후 변화 분석 및 자연재해 예측, 토목 공학 또는 CO_2 저장에 응용하여 중력장을 측정하기 위한 소형의 이동 가능한 저온 원자 센서를 개발
오류 수정 코드, 양자 알고리듬 및 양자 후 암호화 솔루션의 개발	NISQ2LSQ	• 내결함성 양자컴퓨터를 구현하는 데 필요한 새로운 오류 수정 전략을 개선하고 개발
	EpiQ	• 양자프로세서의 기능(컴파일, 조작, 최적화, 중간 언어, 인증 등)에 필요한 소프트웨어를 정의하고 기계학습, 최적화 등의 영역에서 새로운 양자알고리듬을 개발하며, 현재 기계의 작동에 대한 이해를 개선하는 시뮬레이션 촉진
	PQ-TLS	• 양자 기반의 다양한 접근방식 통해 새로운 암호화 및 서명 체계 개발
양자통신	DIQKD	• "블랙박스" 유형 키의 양자분포를 적용한 장치가 부분적으로 특성화되지 않은 경우에도 통신보안 보장
	Qmemo	• 장거리에 양자네트워크를 배포하는 데 중요한 요소인 양자메모리의 성능 최적화
	QcommTestbed	• 양자통신 응용 프로그램의 시연에 사용되는, 국가적 규모로 조정된 테스트 플랫폼 구축

※ L'USINENOUVELLE IITP (2022)

6. 캐나다

캐나다는 양자 과학 및 기술 연구를 지원하고 이제 막 형성되기 시작한 양자산업의 강화와 연결을 위해 '국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)[34]을 발표했다. 7년간 3.6억 캐나다달러[35](약 3,500억 원)를 투자하는 대규모 계획이었다. 캐나다는 미국·중국·영국 등이 대규모 투자에 나서기 전인 2002년부터 '양자컴퓨팅연구소(Institute for Quantum Computing, IQC)'를 워털루 대학에 설립하고, 양자 연구개발에 대한 투자와 양자기술 산업 육성에 주력해온 터였다.

혁신과학경제부(Innovation, Science and Economic Development Canada, ISED)는 국가양자전략 수립과 시행을 위해 다양한 이해관계자와 일련의 원탁회의를 개최했다. 이 자리에서는 양자기술 연구 및 상용화, 인재 양성, 보안, 국제협력 등에 대한 집중적 논의가 이뤄졌고 이를 통해 양자연구 역량 강화, 양자기술 개발, 관련 기업 및 인재의 육성, 양자기술 분야 글로벌 리더십 강화 등을 목표로 7년간 중장기 예산을 배정하는 모멘텀이 만들어질 수 있었다.

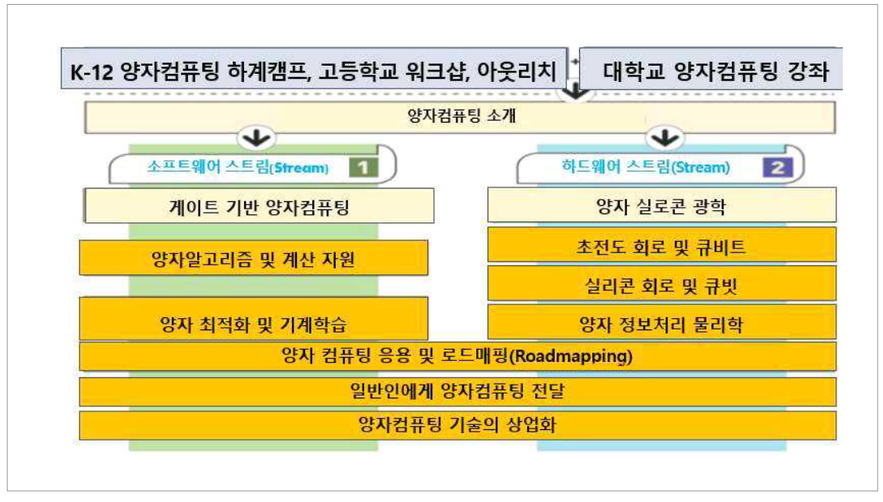
34) https://qmi.ubc.ca (2021.04), https://ised-isde.canada.ca
35) https://ised-isde.canada.ca

양자기술 개발 가속화를 위해 2019년 12월 브리티시컬럼비아(BC) 주정부는 사이먼프레이저대학(Simon Fraser University, SFU)에 '양자 알고리듬 연구소(Quantum Algorithms Institute)'를 설립했다. 2020년 9월 캐나다 국가연구위원회(NRC, National Research Council of Canada)는 환경, 천연자원, 의료 및 국방 분야에 적용할 양자센서 개발을 목적으로 '양자센서 챌린지 프로그램'을 개시하며 본격적인 연구기반 확충에 나섰다.

캐나다과학공학연구회(NSERC)와 영국연구혁신기구(UK Research and Innovation, UKRI)는 2020년 11월 양자기술 개발을 위한 8개 영국-캐나다 산학 컨소시엄 프로젝트[36](양자기술 개발 가속화 등)를 개시했다. 한편 NRC, 국방부 내 국방연구개발조직(DRDC), 공공안전부 내 통신보안원(CSE)은 '양자보안기술접근센터(QSTAC)'를 운영하며 양자연구 관련 정부정책의 조정자 역할을 수행하고 있다.

또한, 2020년에 들어 브리티시컬럼비아주 내 종합대학(UBC, SFU, UVic)들은 공동으로 양자컴퓨팅 대학원 프로그램인 'CREATE'를 신설해 운영하기 시작했다. 캐나다 기반 양자컴퓨터 기업인 D-Wave를 포함해 Microsoft, Google, Quantum Silicon 등과 같은 글로벌 기업들이 해당 프로그램에 대한 협력과 지원을 아끼지 않고 있으며, 이를 통해 관련 석·박사 학생들에게 연구개발 및 교육 기회와 산업계 인턴십 등의 특전을 제공하고 있다.

그림 I-2-9 캐나다 BC주 CREATE 프로그램



※ quantum-bc.ca (2020)

36) https://www.ukri.org

표 I-2-13 캐나다에서 추진 중인 양자 R&D 프로젝트

프로젝트명	내 용
QVIL	• 양자 연구자, 엔지니어 및 기술전문가로 구성된 전담팀 구성 • 양자센서, 내비게이션, 보안, 암호화 및 컴퓨터 분야에서 새로운 혁신기술 개발 • 비영리 자선단체인 QVIL이 새로운 양자 관련 제품 및 비즈니스를 창출할 독특한 시설을 개발하기 위해 2,000만 캐나다달러 지원
High Q	• 양자기술 활용해 낭성 섬유증과 같은 질병에 대한 새로운 치료기술 개발 • High Q Technologies가 650만 캐나다달러 지원
ISARA	• 양자시대에 중요한 데이터, IT 인프라 및 네트워크를 보호하기 위해 양자 안전 · 보안에 대한 새로운 접근방식 개발 • 쉽게 구현 가능하고 실질적이며 표준화된 양자 암호화 도구 및 솔루션 개발 • ISARA Corporation이 730만 캐나다달러 지원

※ IITP (2022)

7. 중국

중국은 2015년 5월 제조강국으로 발돋움하기 위한 연구개발 장려와 산업구조 재편을 내용으로 '중국제조 2025'를 발표하며, 차세대 기술인 양자기술 개발에 대한 의지를 천명했다. '양자굴기'를 국가 중대과제로 삼아 적극 추진한다는 방침이었다. 이후 중국 정부는 5년 단위로 양자기술 연구개발 활성화를 위한 전략을 제시했다. 이후 중국제조 2025 계획과 5개년 계획에서 제시된 연구개발 정책과제들을 포함해, 관련 정책들을 지속적으로 추진하기 시작했다. 2016년에서 2020년까지 진행된 제13차 국가과학기술혁신계획에서는 양자 통신 및 컴퓨터를 2030년까지 추진할 중대 과학기술 프로젝트로 규정하고, 2016년 6월부터 양자통신기술, 양자 시뮬레이터 등의 연구개발에 착수했다.

이어 2021년부터 2025년까지 추진될 제14차 계획 및 2035 중장기 목표에서는 과학기술 이노베이션과 관련해 연구개발의 장 마련, 최첨단 과학기술 연구 강화 등을 지향했다. 또 산업 및 경제 기반 강화와 관련해 전략적 신흥기업의 발전과 성장을 목표로 내걸었다. 나아가 디지털 중국 건설을 위해 디지털 기술이 적용된 혁신 애플리케이션 개발 강화를 중점 추진사항으로 설정하기도 했다. 그리고 국방 및 군대와 관련된 '군민 공동개발 지속' 항목의 현실화를 위해 양자정보·양자컴퓨팅·양자통신 등 양자기술 도입을 결정하고 연구개발을 넘어 관련 산업의 육성과 사회 변혁, 안전 보장 등에 대해서도 규정했다. 계획 제시 이후에는 연구개발비를 매년 7% 이상 증액하며, 양자기술 육성에 주력하고 있다.

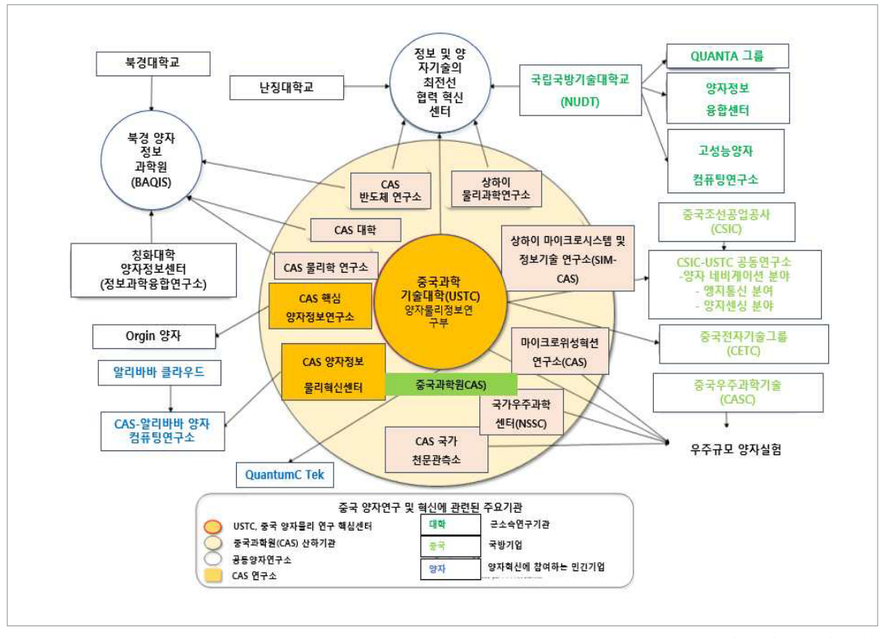
중국 과기부는 2018년 8월 발표된 '2019년도 국가중점연구개발계획'에서 양자 전자시스템, 소형 양자시스템, 양자 컴퓨팅 및 시뮬레이션, 양자정밀계측 등 양자제어와 양자정보 관련 4개 프로젝트에 1.6억 위안의 예산을 책정했다.

시진핑 주석은 2010년 10월 중앙공산당 연설에서 국가발전을 촉진하고 국가안전을 보장하기 위해 양자과학기술의 발전이 가속화될 필요가 있음을 역설했고 이 뜻을 이어 중국 정부는 양자기술 연구개발 및 전략산업 육성에 주력하고, 정책 지원 및 투자를 확대하며, 양자 관련 과학기술 프로젝트 추진에 본격적으로 시동을 걸었다. 또한 핵심기술 혁신과 공급망 안정성 확보, 그리고 인재 육성 활성화와 산학연 협력 촉진에도 힘을 기울여 나갔다.

중국 정부는 2022년 1월 열린 '국가과학기술 고용대회'에서도 국가 위업 성취에서 기술혁신이 갖는 전략적 중요성을 재차 강조하며, 특히 양자과학기술 혁신, 양자 우위 달성 등에 관한 기초연구촉진 의지를 밝혔다.

한편 중국과학원(Chinese Academy of Sciences, CAS)은 산하 대학 및 연구소를 통해 기업과 협력하며 양자 컴퓨터·통신·시뮬레이션·계측 등 양자 기반 기술에 관한 종합적인 연구를 수행하고 있다. 그 중 과학기술대학(USTC)의 '양자물리 및 양자정보연구소'에서는 양자물리 및 양자통신 기반 기술, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션, 양자정밀계측, 양자이론 등을 연구하고 있다. 또 같은 대학 내의 '양자혁신연구소'에서는 특수 양자컴퓨팅 및 시뮬레이터를 개발하고 일반 양자컴퓨터의 실현 가능성을 연구 중에 있으며, '양자정보핵심연구소'에서는 양자정보 분야 최초의 성·부처급 핵심 실험실을 마련하고 양자통신과 양자컴퓨팅에 대한 이론 및 실험 연구를 진행 중에 있다.

그림 I-2-10 중국 양자기술 연구 관련 주요기관 현황



※ ifrI (2022) IITP (2022)

지방정부 차원에서도 양자강국 도약을 위한 다양한 개별 프로그램을 추진하고 있다. 안후이성은 2017년 12월 '양자과학 산업발전기금'으로 명명한 100억 위안 규모 양자 컴퓨팅 및 측정 분야 기금 조성계획을 발표했다. 이후 2018년도부터는 허페이시에서 5년간 1,000억 위안을 투입해 세계 최대 규모 '양자정보과학국가연구소' 본원을 짓는 사업을 진행 중이고 양자 컴퓨터·통신·측정 등 제 분야에 걸쳐 종합적인 연구를 수행하고 있으며, 최고 수준의 양자컴퓨터 개발을 위한 프로젝트도 전개하고 있다.

2018년 3월에는 산둥성이 '양자 기술혁신 및 개발계획'을 발표했다. 이어 같은 해 5월에는 수도인 지난시를 양자기술 생태계의 새로운 중심지로 부상시킨다는 목표 아래, 100억 위안 규모 산업클러스터를 건설하는 '지난양자밸리(济南量子谷) 조성계획'을 발표했다. 1단계에선 양자정보과학국가연구소의 지난 분원을 유치하고, 2단계에는 인큐베이터를, 3단계로는 엑셀러레이터를 중점 구축하는 계획이었다. 이후 지난시는 2019년 3월 양자통신 실험망을 보유했을 뿐 아니라 지역산업 규모도 큰 여러 이점들을 활용하기 위해 '양자 플러스 응용 시범구역' 신설을 핵심으로 하는 양자산업 발전계획을 수립하기도 했다.

8. 일본

일본은 2008년부터 문부과학성 주관으로 10년에 걸친 장기 지원사업인 '최첨단 광 실현을 목표로 하는 네트워크 연구거점 프로그램'과 '광·양자 융합연계 개발 프로그램'을 추진하기 시작했다.

2009년부터 2013년까지는 양자신경망, 양자 시뮬레이션, 양자컴퓨팅, 양자통신 등에 관한 30개 프로젝트를 추진했다. 이는 양자기술의 실제 적용에 특별히 중점을 두었던 'ImPACT(Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program) 프로그램'으로 이어졌다. 이 프로그램에서는 다양한 최적화 문제를 해결하기 위한 4개 양자 광학시스템이 양자신경망(QNN)을 구성했다. 또한 국가 기밀, 의료 및 게놈 정보 등을 안전하게 전송하기 위한 양자보안 네트워크 개발계획을 포함하고 있었다.

다양한 물리적 시스템에서 양자 상태의 일관된 제어와 유지, 전송을 실현할 수 있는 연구들을 지원한 '양자 사이버네틱스 프로그램'은 2009년에서 2014년까지 진행되었다. 이는 2015년에서 2020년까지 이어진 '하이브리드 양자시스템 과학(Science of Hybrid Quantum Systems) 프로그램'으로 계승되기도 했다. 또 2010년부터는 일본 정보통신기술연구소(National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 주도로 도쿄에 양자암호 시험망을 구축하며 양자정보통신 기술 개발을 시작했고, 2040년까지 기밀성이 보장된 로드맵에 따라 기술 개발에 착수했으며, 4년간에 걸쳐 430억 원이 투입된 '퍼스트(FIRST) 프로그램'을 진행하기도 했다.

2016년에는 본격적인 기술 개발을 위해 양자과학기술을 총괄할 연구법인인 '양자과학기술연구개발기구(QST)'를 설립했다. 이후 제5기 과학기술 기본계획을 발표하며 양자기술을 우선순위 과제로 포함시켰고, 별도의 양자지원법을 마련하는 대신 2021년 4월부터 시행에 들어간 개정 '과학기술혁신기본법'을 통해 연구개발 지원책을 보강했다.

2016년 3월에는 문부과학성에서 과학기술진흥원(Japan Science and Technology Agency, JST)의 전략적 창조연구 추진사업의 전략목표에 '양자상태의 고도제어를 통한 새로운 생물·정보과학 프론티어 개척'을 포함시켰다. 현재 이러한 전략목표에 입각해 관련 기초연구[37]를 활발히 추진 중에 있다.

이후 일본 정부는 2017년 2월 '양자과학기술의 새로운 전개방안', 2018년 '광·양자 퀀텀 도약 플래그십(Q-LEAP)', 2020년 1월 '양자기술 이노베이션 전략', 2020년 2월 '문샷 프로그램' 등을 잇달아 발표하며 범용 양자컴퓨터 확보를 비롯한 다양한 목표를 제시하고 해당 분야에 대한 연구개발을 진행하고 있다. 이 중 양자기술 이노베이션 전략의 경우 수상 관저에서 직접 통합혁신 전략회의를 개최한 뒤에 수립한, 향후 20년 성장을 내다 본 양자기술에 관한 새로운 전략이었다. 그간 부처별[38]로 각자 진행해 오던 단위 사업들을 국가 차원의 중장기 로드맵으로 확장시킨 전략이기도 했다. 이를 통해 일본은 양자기술 혁신 실현을 위한 5대 전략을 정립하고, 슈퍼컴퓨터 성능보다 훨씬 뛰어난 양자컴퓨터의 현실화를 목표로 4대 중점분야를 설정할 수 있었다.

이처럼 일본은 지난 30년간 꾸준히 양자기술 관련 투자를 이어오고 있으며 후반 15년 동안에는 일본 정부를 포함해 과학기술진흥원(JST), 일본 정보통신기술연구소(NICT), 일본 과학진흥회(Japan Society for the Promotion of Science, JSPS) 등에서 지원한 총 투자액이 2억 5,000만 달러를 기록하고 있다. 비록 미국, 중국 등에 비해 연간 규모는 크지 않으나, 그 기간이 긴데다 민간부문에서도 비슷한 규모의 투자가 이뤄지고 있는 것으로 추정하고 있다.[39] 특히 2019년 12월에는 미국과의 기술동맹을 크게 강화하며 '미·일 양자협력에 관한 도쿄 성명'을 발표하고 양자 연구거점 정비에 대한 125억 엔 규모 투자를 결정함으로써 양자강국 도약을 위한 발판을 놓을 수 있었다.

37) 일본 과학기술진흥기구의 연구조성 사업
38) 내각부, 총무부, 문부성, 경제산업성
39) https://iopscience.iop.org

표 I-2-14 일본의 양자기술 혁신 실현을 위한 5대 전략 주요내용

분 야	주요 내용
기술개발	• 4대 주요 기술영역별(양자 컴퓨터·시뮬레이션, 양자 측정·센싱, 양자 통신·암호, 양자재료 중점기술 및 기초 기반기술) 과제 도출 – (양자 컴퓨터·시뮬레이션) 실용화까지 이르는 20~30년 후를 조망하며, 지배기술 부재를 극복하기 위한 연구 시행 – (양자 측정·감지) 실온에서 사용 가능한 고체 양자센서의 경쟁이 치열하므로 중단기적으로 실용화 및 사업화를 추진 – (양자 통신·암호) 양자암호통신은 실용화·사업화 단계이므로 연구개발 이외에도 정부가 관여해 산업 형성을 촉진, 양자위성은 안보 중요성을 고려해 전략적으로 추진 – (양자재료) 소재·재료는 일본이 세계적으로도 강점을 가진 분야이므로, 경쟁력을 계속 유지하기 위한 기초 연구과제 추진 • 타 분야와의 융합(양자AI, 양자바이오, 양자암호화)을 촉진하고, 민간투자를 유도하며, 대규모 산학협력 연구를 지원 • 기술·인력 생태계를 안착시킬 수 있는 중장기적 기초 기반연구 추진
국제협력	• 미국, 영국, 독일 등과 정부 차원 협력관계 강화 • 해외 선진국 규제에 맞춰 안정보장 무역관리 추진 및 체제 정비
산업혁신	• 5년간 5개 이상 양자기술 혁신거점(국제 허브) 운영 • 양자AI, 양자바이오, 양자재료, 관성센서, 보안 분야에서 거점을 설치하고 재정 및 세제 지원 • 특정 기술 영역별 대학·연구소·기업 등을 묶어 '양자기술 혁신 협의회(가칭)' 창설 • 국가에서 양자기술 활용한 제품 및 서비스의 선행적인 도입 추진
지적재산권 및 표준화	• 지적재산 전략으로 권리화 및 활용 등 추진 • 일본이 강점을 가진 경제적 파급효과 높은 영역을 중심으로 국제표준화 지원
인재	• 젊은 연구자들 대상으로 양자기술 습득 기회 확대, 대학·대학원 전공과 강좌 개설 및 개편 지원 • 양자기술 혁신거점을 통해 국내외 최고 수준의 연구자 확보, 신진연구자(학생 포함)의 해외 연수 기회 확대 • 고등학교와 고등 전문학교 등의 학생들을 대상으로 학습 기회 제공하고 폭넓은 과학 커뮤니케이션 활동 지원

※ 일본 총리실 IITP (2022)

일본의 내각부는 2022년 4월 제11차 통합혁신추진회의에서 양자기술 및 융합영역별로 2040년까지의 혁신 과정을 담은 '양자기술 혁신전략 로드맵'을 발표했다. 해당 로드맵은 양자기술 영역별로 그 경제·사회적 임팩트, 기술 발전 전망, 각 기술을 지원하는 주변 기술 진전 등을 기술하고 있다. 또 기술 및 융합 영역별로는 양자 컴퓨터·시뮬레이션, 양자 계측·센싱, 양자 통신·암호 등 3개 분야로 구분하고 각각에 관해 세부기술별 로드맵을 제시하고 있다.

표 Ⅰ-2-15 일본의 양자기술 혁신로드맵 구성 및 예시

기술 분류	기술 로드맵	양자 컴퓨터 · 시뮬레이션	① 양자컴퓨터(초전도 큐비트) ② 양자 소프트웨어(게이트형) ③ 양자 소프트웨어(어닐링형) ④ 양자 시뮬레이션(냉각 원자) ⑤ 양자 어닐링 머신(초전도 큐비트) ⑥ 양자컴퓨터(이온 트랩 큐비트) ⑦ 양자컴퓨터(실리콘 큐비트) ⑧ 양자컴퓨터(광 큐비트)
		양자 계측·센싱	⑨ 고체 양자센서(다이아몬드 NV 중심 등) ⑩ 양자 관성 센서 ⑪ 광 격자 시계 ⑫ 양자 얽힌 광 센서 ⑬ 양자 스핀 트로닉스 센서
		양자 통신·암호	⑭ 양자 통신·암호 링크 기술 ⑮ 양자 중계 기술(양자 메모리·얽힘 등) ⑯ 네트워크화 기술(구축, 운용, 보수 등)
	융합 영역	양자 컴퓨터 · 시뮬레이션	① 양자 AI 기술
		양자 계측·센싱	② 양자생명과학(생체 나노 양자센서) ③ 양자생명과학(양자기술을 이용한 초고감도 MRI/NMR) ④ 양자생명 학(양자론적 생명현상의 해명·모방)
		양자 통신·암호	⑤ 양자보안기술
로드맵 예시 양자 컴퓨터 (초전도 큐비트)			

※ 일본 내각부 (2022) IITP (2022)

2022년 3월에는 '신자본주의 실현회의'를 개최하고, 과학기술 분야의 성장 전략을 논의한 끝에 AI와 양자기술 등 첨단기술에 관한 국가전략을 표명했다. 국가전략의 실행계획에 담긴 첨단기술 중점분야로는 AI, 양자기술 외에 바이오기술을 활용한 제조, 차세대 의료, 청정에너지 등 5개 기술분야를 제시하고 있다. 같은 해 4월에는 양자컴퓨터의 국제경쟁 격화, 코로나19 사태로 인한 디지털 변혁의 급속한 진전, 탄소 중립 등 급격한 환경 변화에 대처하기 위해 '양자 미래사회 비전'을 발표했다. 양자기술을 경제안보 측면의 전략기술이자 국제경쟁력 확보 수단, 산업 성장의 새로운 기회, 탄소중립을 포함한 떠오르는 사회적 이슈의 해결책 등으로 보고, 이를 바탕으로 수립한 미래사회 비전과 전략을 담고 있었다.

그림 Ⅰ-2-11 일본, 양자 미래사회 비전 실현을 향한 개관



※ 일본 내각부 (2022) IITP (2022)

9. 호주

호주 정부의 호주연구위원회(Australian Research Council, ARC)는 2015년 2월 '국가 혁신 및 과학 의제(National Innovation and Seicnce Agenda, NISA)'의 일부로 5년간 26억 달러(약 230억 원)를 투입해 양자컴퓨팅 기술개발 계획을 발표했다. 또한 해당 위원회는 2017년에서 2024년까지 양자기술 중심의 4개 산학기반 혁신센터(Centre of Excellence, CoE)에 약 1.3억 호주 달러를 투자할 계획이다. 특히 양자정보과학 연구 전략의 측면에서 타 국가와 차별화를 두며, 실리콘 칩 기반의 양자컴퓨터 개발을 추진 중이다.

2003년에 설립된 호주연구위원회(ARC) 산하 '양자컴퓨팅 및 통신기술 연구센터(Centre for Quantum Computation and Communication Technology, CQC2T)[40]는 전 세계 파트너와 공동 연구를 수행하며 호주의 양자정보과학 발전을 주도하고 있다. 2017년에는 우수센터로 지정되어 3,300만 호주달러를 추가로 지원 받았으며, 현재 산학연 32개 파트너가 참여 중이고 이를 지속적으로 확대해 나가고 있다.

호주 국방부는 2017년부터 양자 키 분배(QKD) 기술개발을 위해 '국방혁신허브(Defence Innovation Hub)' 구축에 투자하고 있고, 국방 분야 양자기술 활용을 위해 2018년부터 차세대 양자기술 개발과제 제안 요청을 시작했다.

2019년에는 차세대 양자 과학자 및 엔지니어를 양성하기 위해 4개 대학이 파트너십을 맺어 '시드니 양자 아카데미(Sydney Quantum Academy, SQA)'를 설립했다. 출범 이후 대학 및 석박사 장학금 수여, 학자를 위한 펠로우십 진행, 창업 지원 및 지역사회 지원 등의 활동을 추진하고 있다.

호주 국립과학연구기관(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)은 2020년 5월 양자기술 R&D 및 산업 육성을 위한 '호주 양자기술 산업육성(Growing Australia's Quantum Technology Industry) 로드맵[41]'을 발표했다. 이 로드맵에서는 양자기술 산업 전반의 협력 및 투자 확대를 통해 2040년까지 40조 달러 이상의 사업과 1만 6,000개 이상의 일자리 창출을 예상하고 있었다. 이를 위해 국가 차원의 양자전략 개발, 양자기술 실증 및 사업화 추진, 관련 인력 양성, 산업기반 및 양자 생태계 구축 등에 대한 정부와 이용자의 적극적인 참여를 권고하고 있다.

한편 2021년 5월 호주 전략 정책 연구소(Australian Strategic Policy Institute, ASPI)는 코로나에 대한 대책 중 하나로 '양자혁명을 위한 국가 전략안'을 제시하고 30억~40억 호주달러 규모의 자금을 양자기술에 사용할 것을 제언하고 있다.[42]

40) www.cqc2t.org
41) CSIRO (2020.05)
42) www.aspi.org.au/report/australian-strategy-quantum-revolution

제3절 국내 정책 동향

1. 양자정보통신 중장기 추진전략(2014) 및 네트워크 구축전략(2017) 수립

국내에서는 2005년 일부 기업과 대학, 출연연을 중심으로 양자정보통신과 관련된 기초연구가 시작됐다. 기술개발 촉진을 위한 정부의 정책적 노력에 시동이 걸린 건 2010년대 초반이었다. 우선 2012년 4월 지식경제부의 '2020 IT 최강국을 위한 IT 10대 핵심기술'에 양자정보통신 시스템이 선정됐다. 2013년 3월에는 '국가 초고성능 컴퓨팅 활용 및 육성에 관한 법률'이 제정되며 양자컴퓨팅 기술개발의 근거가 마련됐다. 또 같은 해 7월에는 미래창조과학부에서 수립한 '정보보호산업 발전 종합대책' 중 정보보호 핵심기술 개발분야에 양자암호기술이 포함됐고, 2014년 2월 한국과학기술평가원이 선정한 '미래 10대 유망기술'에 양자정보통신 기술이 꼽히기도 했다.

2014년은 국가 차원의 양자정보통신 발전에 획기적인 전기가 마련된 한 해였다. 그해 1월부터 관련 기술 개발 및 정책 지원을 위한 관계부처 과장급 회의가 개최됐고, 2월에서 10월까지는 산학연 전문가 30여명으로 구성된 TF팀이 꾸려져 중장기 추진전략 수립을 위한 작업이 전개되었다. 그 결과 같은 해 12월에는 미래창조과학부에 의해 '양자정보통신 중장기 추진전략'이 수립돼, 국가 차원의 기술 개발 및 인력 양성, 기반 조성 노력의 필요성을 강조할 수 있었다.

한편 2015년 7월에는 KAIST를 중심으로 진행된 '초고성능 컴퓨팅 발전 포럼'을 통해 양자컴퓨팅 기술개발 방안이 마련됐다. 이어진 2016년은 투자 확대를 위한 끊임없는 노력이 현실의 높은 벽에 부딪혀 좌절된 한 해였다. 그해 5월 'K-ICT 전략 2016'에 양자정보통신을 포함한 ICT 유망분야에 대한 투자 확대 의견이 개진됐다. 탄력을 받아 같은 해 7월 과학기술정보통신부는 '양자정보통신 중장기 기술개발사업'을 위한 예비타당성 조사를 신청했으나 통과에 실패했다. 굴하지 않고 다음 달 양자 수요기술을 조사해 그 결과를 바탕으로 양자암호통신, 양자소자 등 총 12개 핵심과제를 도출하고 변경 기획안을 다시 제출했으나 이번에도 현실의 관문을 넘는 데는 실패하고 말았다.

투자 확대의 계기가 마련된 건 2017년이었다. 이해 1월 '양자정보통신기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안'이 발의됐고, 같은 해 12월 과학기술정보통신부에 의해 '4차 산업혁명 대비 초연결 지능형 네트워크 구축전략'이 발표되며 분위기가 무르익기 시작했다.

이와 같은 노력을 거쳐 2019년 과학기술정보통신부는 양자컴퓨팅 부문에 대한 예산 60억 원을 배정받았다. 이에 그해에는 양자정보통신 진흥을 위한 종합계획 수립을 위해 통신 3사와 장비제조사, 대학, 연구기관 등의 약 30명 전문가로 작업반을 구성하고, 관련 산업 육성을 위한 인프라 및 제도 지원

방안과 인력 양성 전략에 대해 논의했다. 2020년에는 양자 R&D 생태계 조성, 슈퍼컴퓨터 자체 개발 등 미래컴퓨팅 신규분야 사업에 317억 원의 예산을 확보했다. 세부적으로 슈퍼컴퓨터 개발 선도에 120억 원, 양자정보과학 연구개발 생태계 조성에 64억 원, 양자컴퓨팅 기술개발에 84억 원, 양자암호통신 집적화 및 전송기술 고도화에 49억 원이 편성되었다.

2. 양자암호통신 시범사업(2020~2022) 추진

과학기술정보통신부는 미래 핵심기술인 양자 정보통신기술(ICT) 산업의 초석을 다지고 양자암호통신 활용사례를 발굴하기 위해 2020년 9월 약 150억 원, 2021년 5월 약 140억 원, 2022년 약 70억 원을 투입해 '양자암호통신 구축 시범사업'을 진행했다. 연도 및 분야별 과제 수행기관은 다음과 같다.

표 Ⅰ-2-16 2020년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (4개구간)	KT	전남도청(해군3함대사령부)	비화통신
		강원도청(춘천시청)	CCTV 데이터 저장
	SKB/ SKT	광주광역시청(CCTV센터, 교통정보센터)	CCTV 패스워드 관리,
			차량 정보 관리
의료분야 (6개구간)	SKB/ SKT	세브란스병원(신촌·강남·용인)	블록체인 실손보험청구
			의료 빅데이터 전송
			사고예방 알림 시스템
	KT	성모병원(서울·은평)	AI음성인식 진료기록 시스템
			의료기록 데이터 저장
	LGU+	을지대병원(노원·대전)	의료 데이터 전송
산업분야 (6개구간)	SKB/ SKT	한화시스템(본사·데이터센터)	스마트 오피스 시스템
		우리은행(콜센터·전산센터)	비대면 생체정보(안면인식) 측정
		CJ ICD 센터	VPN 서비스
	KT	현대중공업	산업기밀 데이터 전송
			AR 원격시설 점검
	LGU+	LG이노텍(평택·부산)	산업기밀 데이터 관리

※ 과학기술정보통신부(2021c)

표 Ⅰ-2-17 2021년 양자암호통신 시범사업 분야별 과제 수행기관

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (7개구간)	SKB/ SKT	대전상수도사업본부(송촌사업소, 대전광역시)	AI 실시간 얼굴인식 통제
			USB 보안토큰
		광주보건환경연구원(북구보건소)	Quatum-스마트폰
		한국수력원자력발전소(새울-고리)	-
	KT	강원도청(2군단사령부)	Quatum-액화수소드론
		제주도청(교통안전체험관)	Quatum-자율주행차
	LGU+	충남도청(공무원교육원)	DB 암호화 및 IC카드
민간분야 (10개구간)	SKB/ SKT	대구계명대병원 (성서-중구)	자율주행 로봇(지정맥인증)
			IoT 스마트 빌딩 관리 시스템
		ADT 캡스 (보라매, 장안, 삼성)	무인센서 보안시스템
			보안 출입ID카드
			USB 보안토큰
		고려대병원(안암-K-Bio)	클라우드 병원시스템
		평화홀딩스	수소차 설계도 PDF 암호화
	KT	순천향대병원(서울-부천)	Quatum-원격의료협진
		현대로보틱스	Quatum-IoT 로봇관제
		블록체인컴퍼니	Quatum-비트코인거래
	LGU+	빅히트엔터테인먼트	USIM
		GS EPS	안면인식 출입보안

※ 과학기술정보통신부 보도자료(2021c)

3. 양자기술 연구개발 투자전략(2021) 수립

2021년 4월 과학기술정보통신부는 '양자기술 연구개발 투자전략'을 발표했다. '디지털을 넘어 퀀텀의 시대로'를 비전으로, '2030년대 양자기술 4대 강국 진입(全 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화)'을 목표로 한다. 이러한 이상의 현실을 위해 4대 중점전략도 수립했는데 도전적 원천연구 강화, 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축, 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화, 양자기술 활용 및 산업혁신 촉진 등이 그 내용이었다.

그림 I-2-12 양자기술 연구개발 투자전략



※ 과학기술정보통신부 (2021b)

표 I-2-18 양자기술 R&D 투자전략의 단계별 추진 목표

단계	목표	주요 내용
1단계 ('21~'24)	인력 양성, 요소기술 개발 등 기반 마련	50큐비트급 양자프로세서 확보
		초소형 유선 양자암호통신 확보
		요소기술(공간해상도, 정밀도 등) 고도화 및 소형화
2단계 ('25~'30)	학문적, 산업적 활용 가능성(성공사례) 입증	NISQ 양자컴퓨팅 시스템 확보
		초고속·정밀 무선 양자암호통신 (양자 드론·항공기) 확보
		양자센서 산업(반도체, 의료) 활용
3단계 ('31~'35)	양자기술 상용화 본격 추진	오류정정 범용 양자컴퓨터 확보
		양자인터넷 기술 확보
		양자센서 응용 영역 확대 (초장거리 망원경, 양자현미경 등)

※ 과학기술정보통신부 (2021b)

4대 중점전략 중 '도전적 원천연구 강화' 부문에서는 양자컴퓨터 상용화에 필요한 양자프로세서, 알고리듬, 오류 보정, 응용 SW 등 4대 핵심 요소기술에 집중 투자하는 세부전략을 수립했다. 특히 유선 양자암호통신 분야에선 성능 고도화 및 국제표준 선점 등 시장성 강화를 통해 기술우위를 확보하고, 무선 양자암호통신 분야에선 유선 양자통신의 한계를 넘어 커버리지를 확장하는 방향으로 기술개발을 지원하는 전략을 수립했다. 또 양자센서 분야의 경우 국내 수요가 분명하다 판단해 수요 연계형 연구개발을 통한 이른 상용화에 방점을 찍었으며, 연구 및 산업의 선순환 고리를 확보하는 방향으로 세부전략을 수립했다.

표 I-2-19 양자센서 기술목표

구분	자기장 센서	관성 센서	이미징 센서
개발 목표	기존 센서 대비 100배 이상 공간분해능의 자기장 측정센서 개발	기존 센서 대비 10배 이상 정밀도를 가진 가속도 측정센서 개발	광학현미경 대비 10배 이상 분해능 확보, 가시적 관찰이 불가능한 대상 센싱
활용 분야	반도체 소자 누설전류 측정 미세암·뇌질환 검진	양자콤파스와 중력 지도를 이용한 無GPS 항법, 자원탐사, 자연재해 예측시스템 등	반도체 설계, 의료·미생물용 양자현미경, 초장거리 이미지(양자라이다) 등

※ 과학기술정보통신부 (2021b)

'전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축' 부문에서는 양자 특화 핵심인력을 중점 육성하고 국내외 협력 생태계를 구축하기 위한 세부전략을 수립했다. 2030년까지 양자 핵심인력 1,000명 확보를 목표로 설정했으며 이론과 실습, 그리고 기업 프로젝트를 통합 제공하는 박사급 전문과정의 개설 및 운영을 내용에 반영했다.

'특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화'에서는 양자연구 인프라를 확충하고 단계적 고도화를 추진하는 방향으로 세부전략을 수립했다. 양자 전용 팹(파운드리)을 신속히 구축해 산학연 공동 활용을 지원하고, 알고리듬에 대한 연구검증 지원을 위해 양자컴퓨터를 모사하는 양자가상머신을 구축 및 제공한다는 내용을 포함시켰다.

표 I-2-20 양자팹 구축 사업 개요

구분	개요
기간	2020년 ~ 2024년
예산	총 235억 원
위치	한국나노기술원(KANC) 및 성균관대(수원) 내
규모	약 470㎡ 규모
주요장비	증착, 노광, 식각, 후처리 장비 등 공동 활용 지원 * 초전도 박막증착 스퍼터, 전자빔 증착기, 광학적 접촉 노광 장비, 고속 전자빔 리소그래피 등

※ 과학기술정보통신부 (2021b)

'양자기술의 활용 및 산업혁신 촉진' 부문에는 양자기술을 활용한 산업 혁신 및 공공난제 해결을 목표로 하는 'Q-플래그쉽 프로젝트'를 통해 경제·사회적으로 유용한 성과 사례를 창출하도록 적극 지원한다는 내용이 포함됐다. 또 국제 표준화 그룹의 활동 등에 참여함으로써 국제 표준화를 전략적으로 지원한다는 계획도 내용에 반영했다.

4. 미래양자융합포럼 및 양자생태계 활성화 추진

가. 미래양자융합포럼

과학기술정보통신부에서는 2021년 6월 국내 산·학·연·관의 대표적 전문기관 및 전문가로 구성된 '미래양자융합포럼'을 민·관 합동으로 출범시켰다. 미래양자융합포럼은 그동안 연구개발에만 초점을 맞춰왔던 양자기술 분야에서 폭넓은 산업계 참여를 이끌며 연구개발 분야와 산업계 사이 활발한 연계가 이뤄질 수 있도록 관련 역할을 수행하고 있다. 양자통신·센서·컴퓨팅을 아우르고 있으며 대·중·소 기업 등 산업계 및 수요기관과 학계, 연구계 등의 대표적 기관 및 전문가를 대상으로 하고 있다.

미래양자융합포럼이 하는 역할은 산업 초기 단계인 양자분야의 산·학·연 교류를 통해 양자기술 기술 교류 및 자문, 산업화 모델 발굴 및 지원 협력 체계 구축, 산업 수요와 연계된 학계·연구계의 활성화 기획, 산·학·연 연계 공동 인력양성 및 연구과제 발굴 지원 등의 역할을 수행하고 있다.

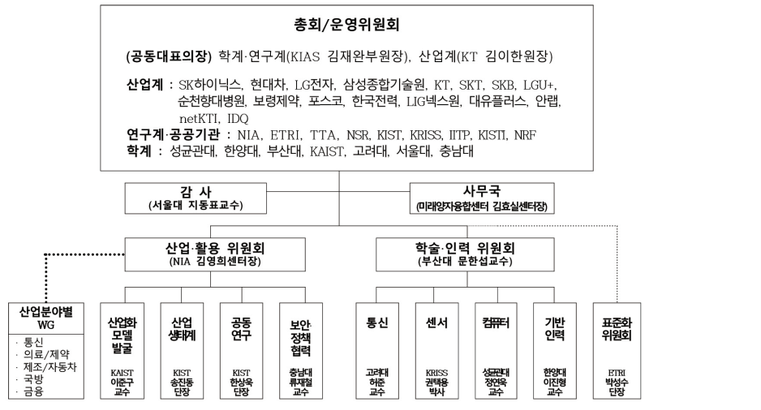
포럼 창립 당시 25개 대·중·소 기업, 27개 대학, 12개 출연연·공공기관 등 64개 기관 162명이 참여했고, 2022년 1월 현재 83개 기관, 316명까지 확대됐으며, 특히 산업계 참여가 활성화됨에 따라 양자분야 연구결과의 산업적 활용을 견인하며 양자산업 생태계 구축에 기여할 수 있도록 노력하고 있다.

표 Ⅰ-2-21 미래양자융합포럼 위원회 및 분과별 역할

위원회	분과	주요 역할
산업활용위원회	산업화모델발굴	• 양자기술관련 서비스 및 상용화 모델 발굴, 시장창출 정책
	산업생태계	• 양자기술관련 산·학·연 생태계 활성화 방안
	공동연구	• 양자기술의 산·학·연 공동연구과제 발굴
	보안정책협력	• 양자기술 기반의 보안 및 암호화 협력 및 상용화 방안
학술인력위원회	통신	• 양자통신 원천기술분야 관련기술 자문
	센서	• 양자센서 원천기술분야 관련기술 자문
	컴퓨터	• 양자컴퓨터 원천기술분야 관련기술 자문
	기반인력	• 양자 전문인력 선순환 및 산·학·연 전문인력 연계 방안
표준화위원회		• 국내외 표준화 활동 및 표준화 전문가 연계·협력

※ 미래양자융합포럼

그림 Ⅰ-2-13 미래양자융합포럼 조직도



※ 미래양자융합포럼

나. 양자산업생태계지원센터

과학기술정보통신부와 한국지능정보사회진흥원은 경기도 판교 기업지원허브에 양자 기술의 산업화를 집중 지원하고 양자 기술·산업을 잇는 산학연 협력의 구심점 역할을 수행할 양자산업생태계지원센터를 2022년 1월에 개소하였다.

양자산업생태계지원센터의 역할은 우선, 양자 기술의 사업화를 추진하고 양자기술 기반의 혁신기업을 육성하는 것이다. 양자기술이 사장되지 않고 시장에 활용되기 위해 기술사업화를 추진하고, 양자기술을 연구·개발하는 혁신기업을 육성하려는 목적으로 설립되었다. 둘째로는, 양자정보통신 테스트베드를 구축하고 테스트베드 기반에서 양자 시험 및 검증을 추진하고자 한다. 양자정보통신 테스트베드를 통해 양자관련 기업의 기술개발과 성장의 기반을 마련하려 하는 것이다. 셋째로는, 국내외 양자정보통신관련 동향과 소·부·장 공급망 정보를 제공하고자 한다. 양자관련 다양한 국내외 동향 정보와 국가 및 기업의 정보를 공유하고, 소부장 공급망 정보를 제공해 기업의 글로벌 진출 및 산·학·연 협력을 강화하고자 한다. 넷째로, 수요기관과 산업계에서 필요로 하는 양자기술 핵심·지원 인력을 양성하는 것이다. 산업계의 수요는 많으나 부족한 양자산업 전문인력확보를 위해 양자 관련 다양한 교육프로그램 제공 등의 역할을 수행하게 될 것이다.

다. 양자정보연구지원센터

과학기술정보통신부에서는 '양자정보과학 연구개발생태계 조성사업'에 따라 국내 양자정보과학 분야 연구활동을 지원하기 위해 성균관대학교에 양자정보연구지원센터를 2020년 8월에 개소하였다.

양자정보연구지원센터의 역할은 우선, 해외 연수 및 교육프로그램을 제공하는 것이다. 선진연구인력에게 새로운 지식과 정보를 제공하기 위해 해외 연수를 지원하고 폭넓은 신규 인재 유입을 위한 교육프로그램을 제공하는 것이다. 이를 통해 양자정보분야의 신진 연구인력을 양성하고 저변확대를 위한 국내 생태계를 구축하는 것이 목적이다. 둘째, 양자팹 공정 활용지원과 양자 컴퓨터 클라우드 활용지원을 확대하는 것이다. 양자소자에 전문화된 양자팹을 구축하여 양자소자공정을 지원하며, IonQ클라우드, IBM클라우드, D-Wave 클라우드 등 양자컴퓨터 클라우드의 활용을 지원하고자 한다. 또한 양자팹(파운드리) 구축을 통해 양자 팹을 통한 양자소자공정 인프라(파운드리 구축) 및 공정 서비스를 제공하자고 한다.

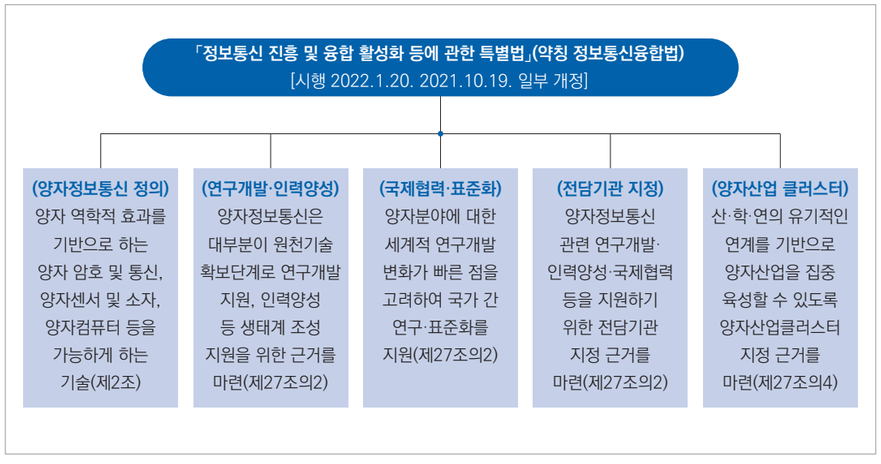
라. 양자정보과학기술연구회 (한국양자정보학회)

양자정보과학기술은 수학, 물리학, 화학 등 기초과학 전문가 뿐만 아니라 컴퓨터공학을 비롯한 다양한 공학 기술 전문가들 사이의 긴밀한 협력이 있어야 발전할 수 있다. 우리나라에서는 한국물리학회(KPS)의 '원자 및 분자물리 분과'와 한국광학회(OSK)의 '양자광학 및 양자정보 분과', '양자암호포럼' 등을 나누어져 있던 양자정보과학기술 연구생태계를 다학제적으로 심화발전시키기 위하여 2019년 '양자정보과학기술연구회(The Korean Association of Quantum Information Science and Technology, QuIST)'가 출범하였다. 연구회는 ICQC(International Conference on Quantum Computing), 정기세미나 및 워크샵, 계절학교 등을 개최하여 국내외 학계, 연구계, 산업계 연구주체들의 연구 교류를 활성화하고 학생들과 이 분야에 새로 진입하는 연구자들에게 기회를 제공하는 역할을 해 왔다. 또한 '양자기술백서'를 발간하여 양자기술의 개념과 용어를 쉽게 이해하도록 알리는 데에 도움을 주었다. 연구회는 양자정보과학기술 분야 학술단체로서의 역할을 공고히 하기 위하여 2022년 10월 '한국양자정보학회(Quantum Information Society of Korea, QisK)'로 사단법인화하였다.

마. 정보통신 진흥 및 융합 활성화 등에 관한 특별법

2020년 6월 국내 양자산업의 체계적 육성과 활성화 기반 조성을 위해 '정보통신 진흥 및 융합 활성화 등에 관한 특별법'(이하 정보통신융합법)이 개정됐다. 이 개정을 통해 해당 법령 내에 양자정보통신 정의, 연구개발 및 인력양성, 국제협력 및 표준화 등에 관한 내용이 기술되었다.

그림 I-2-14 양자정보통신 관련 정보통신융합법



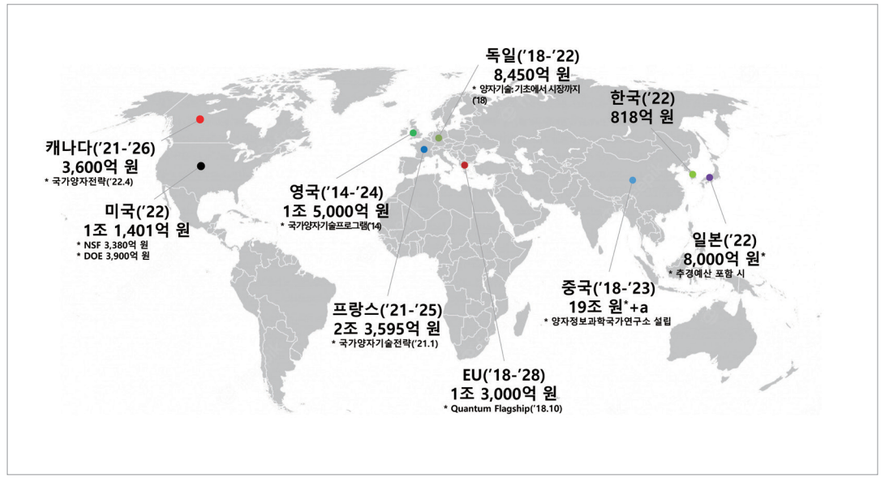
제3장 국내외 투자 동향

제1절 개요

해외 주요국은 양자시장을 초기 선점하기 위해, 경쟁적으로 대규모 관련 예산을 편성하고 장기적 관점에서 투자를 확대하고 있다. 미국, 중국 등 선진국 간 패권 경쟁에 의한 국가 차원의 투자는 물론이고, 민간 차원의 투자 규모도 대폭 늘어나는 추세이다.

현재 세계 주요국의 양자분야 투자 규모를 간략히 살펴보면 다음과 같다. 미국은 2022년 미국 연방정부 및 각 기관으로부터 요청된 관련 예산 총합이 8억 7,700만 달러(약 1조 1,401억 원) 규모이며, 향후 지속적 증가 추세를 보일 전망이다. 유럽연합(EU)은 2018년 10월 양자플래그십(Quantum Flagship)을 출범시키고, 이를 통해 2018년부터 향후 10년간 양자기술에 10억 유로(약 1조 3,000억 원)의 예산 투입 계획을 밝히고, 현재 활발한 투자를 진행하고 있다. 영국의 경우, 2024년까지 향후 10년 동안 민관 공동으로 10억 파운드(약 1조 5,000억 원)의 투자를 발표했다. 독일은 양자기술-기초에서 시장까지(Quantum technologies-from basic research to market)라는 이름의 프레임워크 프로그램을 통해 2018년부터 2022년까지 양자기술 R&D에 6억 5,000만 유로(약 8,450억 원)를 투자하고, 2028년까지 투자 연장 가능성을 밝혔다. 프랑스는 2021년 국가양자기술전략(Stratégie nationale sur les technologies quantiques)을 발표하면서 2025년까지 5년 동안 양자기술에 18억 1,500만 유로(약 2조 3,595억 원)를 투자할 것이라고 밝혔다. 캐나다의 경우, 2021년 4월 국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)을 수립하며, 향후 7년간 양자기술에 3억 6,000만 캐나다 달러(약 3,600억 원)의 투자를 발표했다. 중국은 제14차 5개년 계획(2021~2025) 및 2035 중장기 목표를 발표하며 양자통신과 양자컴퓨터에 투입되는 연구개발비를 매년 7% 이상 증액하겠다고 밝혔다. 일본은 양자기술 이노베이션 전략을 수립하며 추경 예산을 통해 양자기술에 대한 예산을 증액했고, 2022 회계연도 예산은 추경 예산까지 포함된다면 기존 대비 2배 이상 확대된 800억 엔(약 8,000억 원)이 투입될 예정이다. 한국의 경우, 과학기술정보통신부의 양자 관련 예산은 2021년 486억 원에서 2022년 818억 원으로 전년의 68.3%인 332억 원이 증가했다.

그림 Ⅰ-3-1 세계 주요국 양자산업 투자 규모



※ 집필진 작성

지난 20년간 양자기술에 대한 공공과 민간 부문의 투자를 살펴보면, 미국은 약 2조 7천억 원으로 가장 많은 투자를 했고, 영국(약 1조 2,238억 원), 캐나다(약 8,225억 원) 등이 각각 미국의 뒤를 이었다.[43] 지난 20년간 양자기술 분야 투자의 대부분은 민간에서 유치됐다.

표 Ⅰ-3-1 국가별 양자기술의 공공·민간 투자 규모(2001~2021)

(단위: 억 원)

국가	공공	민간	기업의 외부 투자	특수	합계
미국	913	22,563	3,588	-	27,063
영국	88	7,988	413	3,750	12,238
캐나다	738	6,625	863	-	8,225
유럽	488	2,825	363	-	3,675
중국	-	3,313	-	-	3,313
기타	413	2,613	575	-	3,600
합계	**2,638**	**45,925**	**5,800**	**3,750**	**58,113**

※ McKinsey (2022)

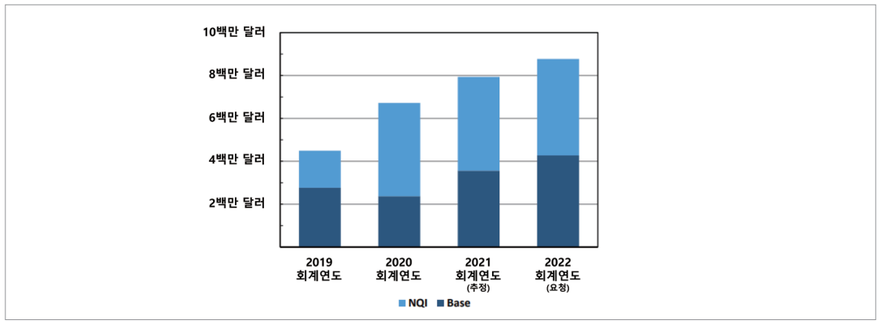
43) McKinsey (2022)

제2절 해외 투자 동향

1. 미국

미국은 양자정보과학(Quantum Information Science, QIS) 연도별 R&D 예산으로 2019년에 4억 4,900만 달러(약 5,837억 원), 2020년에 6억 7,200만 달러(약 8,736억 원)를 투입했으며, 2021년에는 7억 9,300만 달러(약 1조 309억 원)를 투입한 것으로 추정된다. 2022년 미국 연방정부 및 각 기관으로부터 요청된 예산 총합은 8억 7,700만 달러(약 1조 1,401억 원)로 미국의 양자정보과학 관련 투자 예산은 계속 증가할 전망이다.[44]

그림 Ⅰ-3-2 미국 양자정보과학 R&D 예산

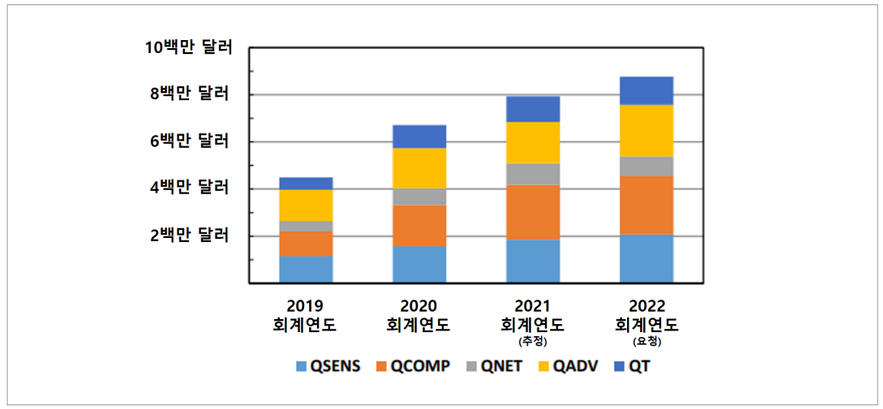


※ SCQIS (2021)

해당 예산을 국가양자이니셔티브(National Quantum Initiative, NQI) 프로그램별로 구분하자면 양자센싱 및 계측(Quantum Sensing and Metrology, QSENS), 양자컴퓨팅(Quantum Computing, QCOMP), 양자네트워크 및 통신(Quantum Networks and Communications, QNET), 기초양자정보과학(Foundational Quantum Information Science Advances, QADV), 양자기술(Quantum Technology, QT) 등으로 나눌 수 있다. 이 중 양자기술(QT)은 미래 애플리케이션(Future Application, QTAPP), 위험 관리(Risk Mitigation, QTRM), 지원 기술(Supporting Technology, QTSUP)로 세분화할 수 있다. 프로그램별 정확한 투자 예산 수치는 발표된 바 없지만, 그래프를 통해 꾸준히 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 양자센싱 및 계측과 양자컴퓨팅에 투입되는 예산 비중이 균등하게 증가함을 파악할 수 있다.[44]

44) SCQIS (2021)

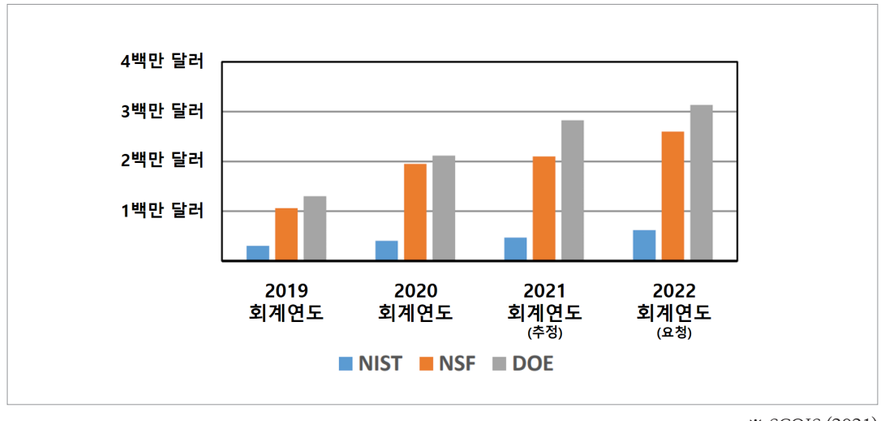
그림 I-3-3 미국 양자정보과학 R&D 예산(NQI 프로그램별)



※ SCQIS (2021)

현재 미국은 21개 연방기관을 통해 양자정보과학에 전방위적 투자를 이어가고 있으며, 미국 국립과학재단(National Science Foundation, NSF), 미국 에너지부(Department of Energy, DOE), 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST) 세 기관을 NQI 법안 기관(NQI Act Agency)으로 지정해 관련 예산을 집행 중이다. 세 곳의 양자정보과학 R&D 예산은 2019년 이후 꾸준히 늘어 2022년까지 약 두 배 이상 증가했다.[44]

그림 I-3-4 미국 양자정보과학(QIS) R&D 예산(NQI 기관별)



※ SCQIS (2021)

가. 미국 국립과학재단(National Science Foundation, NSF)

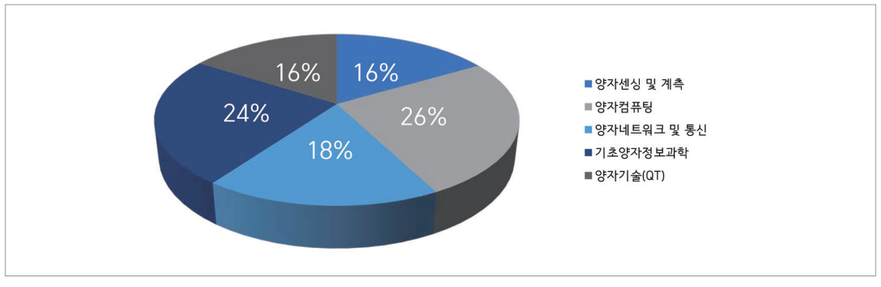
먼저 NSF의 국가양자이니셔티브(NQI) 프로그램별 양자정보과학 R&D 예산을 아래 표를 통해 파악할 수 있다. 표에서 보듯이 2020년 대비 2022년 예산의 증가 폭이 가장 큰 분야는 약 1,600만 달러(약 208억 원) 증가한 양자컴퓨팅이다. 다음으로 기초양자 정보과학과 양자네트워크 및 통신 분야가 각각 약 1,500만 달러(약 195억 원)와 약 1,300만 달러(약 169억 원)로 2위와 3위를 차지했다. 하지만 증가율 측면에서는 미래 애플리케이션이 2020년 대비 2022년에 약 91% 증가해 가장 큰 증가율을 보여줬다. 이는 미국이 양자기술 상용화에 주목하고 있음을 알려주는 단서가 될 수 있다. 또한, 증가율 측면에서 눈여겨볼 점은 양자컴퓨팅 분야 증가율이 약 31%인 것에 반해 양자네트워크 및 통신 분야 증가율이 약 40%에 달한다는 것이다.[45]

표 I-3-2 NSF 연도별 양자정보과학 R&D 예산

(Dollars in Thousands)	2020 회계연도 (a)	2021 회계연도(추정)	2022 회계연도 (b)(요청)	(b) vs (a)
양자센싱 및 계측(QSENS)	37,090	40,420	43,070	5,980
양자컴퓨팅(QCOMP)	51,180	56,950	67,050	15,870
양자네트워크 및 통신(QNET)	32,710	35,870	45,850	13,140
기초양자 정보과학(QADV)	47,650	49,040	62,620	14,970
미래 애플리케이션(QTAPP)	13,030	14,280	24,900	11,870
위험 관리(QTRM)	7,090	9,390	11,480	4,390
지원 기술(QTSUP)	5,770	4,050	5,030	-740
합계	194,520	210,000	260,000	65,480

※ NSF (2022) 집필진 재구성

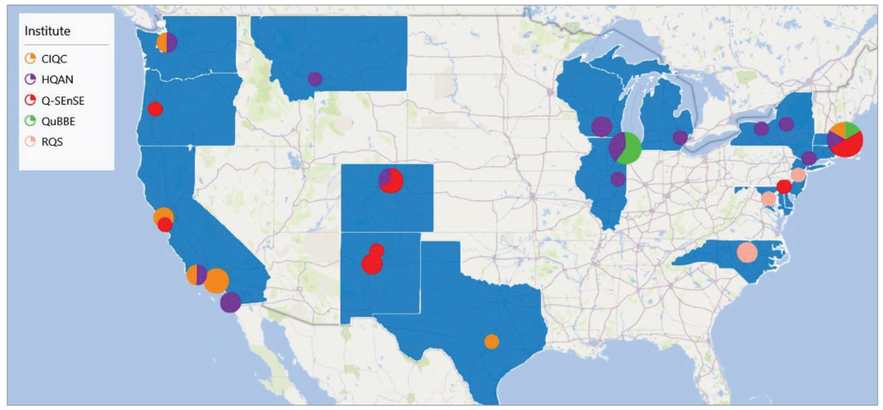
그림 I-3-5 NSF 양자정보과학 R&D 예산(2022) 구성 비율



45) NSF (2022)

NSF의 양자정보과학 R&D 주요 프로그램 중 하나로 양자도약과제연구소(Quantum Leap Challenge Institutes, QLCI)를 꼽을 수 있다. NSF는 5개의 연구소를 통해 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션 등 양자기술 전반에 걸쳐 연구를 진행하고 있으며, 해당 프로그램에는 17개 대학, 10개 기업, 5개 국립 연구소, 1개 R&D 연방기관이 참여한다. 다음은 NSF의 양자도약과제연구소(QLCI) 프로그램 파트너 기관의 분포를 보여주는 그림이다.[44]

그림 I-3-6 NSF QLCI 프로그램 참여 기관 분포도



※ SCQIS (2021)

나. 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)

NSF, DOE, NIST 중 가장 많은 예산을 투자하고 있는 DOE의 연도별 양자정보과학 R&D 예산은 다음과 같다. 이중 양자센서와 관련된 연구 분야는 바이오&환경 연구, 융합에너지과학, 고에너지물리학, 핵물리학 등이고, 주요 연구 내용으로는 바이오센서 및 바이오이미징 애플리케이션, 차세대 검출기 및 특성화 도구 제작, 플라즈마 및 융합과학을 위한 진단 능력 향상, 현대물리학 및 암흑 우주 탐구 실험 등이 있다. 양자컴퓨팅의 경우, 고급과학컴퓨팅 연구와 더불어 다양한 분야에서 알고리듬, 소프트웨어, 하드웨어, 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이터 애플리케이션에 관련된 연구가 진행되고 있다. 양자네크워크 및 통신 연구는 얽힘 분배, 양자전송, 양자센서 네트워크, 양자네트워크 애플리케이션 및 테스트베드 구축 등을 포함한다. 마지막으로 지원기술의 경우, 동위원소 연구개발 및 생산과 관련된 연구가 진행되고 있다.[46]

46) DOE (2021a), DOE (2022)

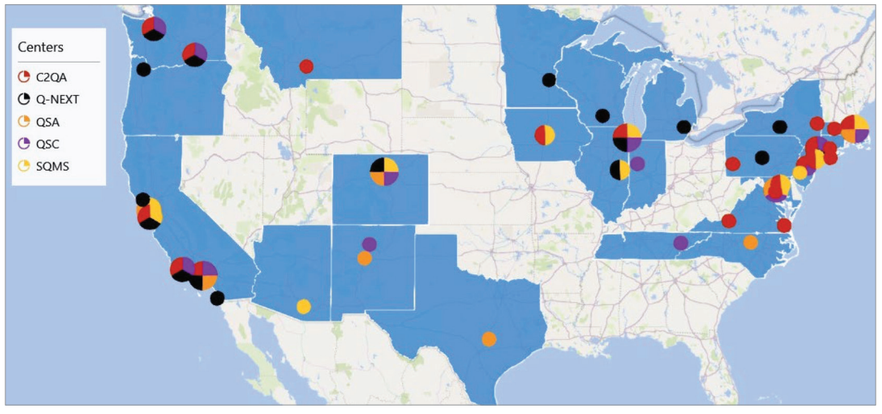
표 I-3-3 DOE 연도별 양자정보과학 R&D 예산

(Dollars in Thousands)	2019 회계연도	2020 회계연도	2021 회계연도	2022 회계연도(요청)
고급과학컴퓨팅 연구 (Advanced Scientific Computing Research)	33,666	54,680	98,402	107,649
기초에너지과학(Basic Energy Sciences)	49,517	72,270	92,050	102,000
바이오&환경 연구 (Biological and Environmental Research)	4,500	12,000	12,000	14,500
융합에너지과학(Fusion Energy Sciences)	-	7,250	9,520	10,000
고에너지물리학(High Energy Physics)	27,500	38,500	45,072	51,566
핵물리학(Nuclear Physics)	8,300	10,300	13,347	10,866
동위원소 연구개발 및 생산 (Isotope R&D and Production)	-	-	-	4,300
합계	**123,483**	**195,000**	**270,391**	**300,881**

※ DOE (2021a), DOE (2022) 집필진 재구성

DOE가 2020년에 설립한 5개의 양자정보과학 연구센터는 국립 연구소에 의해 운영되며, 미국뿐만 아니라 캐나다, 독일 등의 총 69개 산학연 기관으로 구성된다. [그림 I-3-7]은 DOE의 양자정보과학 연구센터를 구성하는 38개 대학, 15개 기업, 12개 국립 연구소, 2개 연방 R&D 기관의 분포도이다.

그림 I-3-7 DOE 양자정보과학 연구센터 구성 기관 분포도



※ SCQIS (2021)

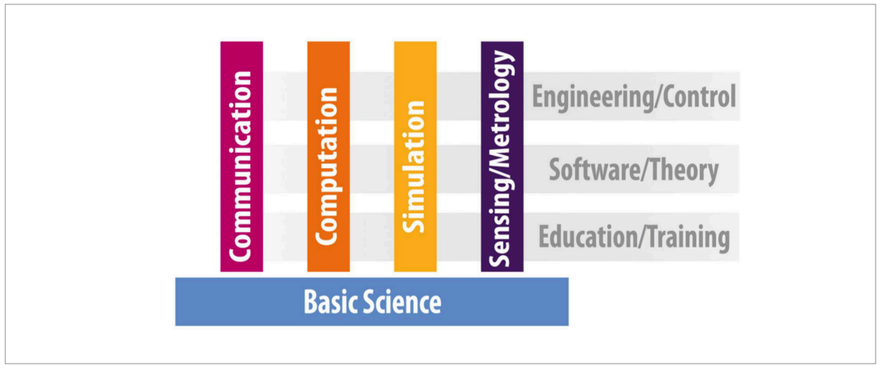
다. 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)

NIST는 양자정보과학 전 분야에 걸쳐 연구를 진행 중임에도 불구하고, 앞서 언급한 두 기관과 다르게 분야별 투자 예산 규모를 가늠하기 어렵다. 다만, NIST가 양자정보과학 R&D에 투입하는 예산이 2019년 이후 꾸준한 증가 추세이며, 2022년의 투자액 요청 규모가 2021년 예산 대비 1,500만 달러(약 225억 원) 증가했다.[47)]

2. 유럽연합(EU)

EU는 2018년 10월 양자플래그십(Quantum Flagship)을 출범시키고, 이를 통해 2018년부터 향후 10년간 양자기술에 10억 유로(약 1조 3,000억 원)의 예산 투입 계획을 밝혔다. 양자플래그십의 주요 목표는 유럽이 차세대 양자정보기술 산업을 주도할 수 있도록 발판을 마련해, 향후 양자정보기술 분야의 메카로 군림하게끔 만드는 것이다.

그림 I-3-8 EU 양자플래그십 프로젝트별 투자 구조



※ High-Level Steering Committee (2017)

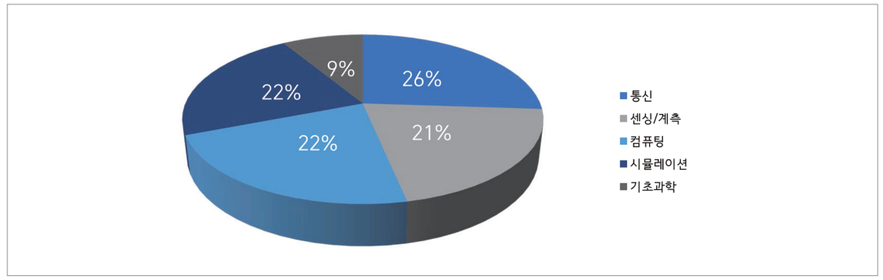
양자플래그십 첫 번째 단계(Ramp-Up Phase)는 2018년 10월부터 본격적으로 시작되어 2021년 9월까지 3년간 1억 3,200만 유로(약 1,716억 원)의 예산이 투입됐다. 총 140개의 기술 수요 중에서 선정된 20개의 프로젝트는 분야별로 양자통신 4개, 양자센싱/계측 3개, 양자컴퓨팅 5개, 양자 시뮬레이션 3개, 기초과학 5개 프로젝트로 구성된다. 〈표 I-3-4〉를 통해 분야별 개별과제에 대한 연구개발비 내역을 확인할 수 있다.

표 I-3-4 EU 양자플래그십 1단계 과제

영역	과제명	연구비(억 원)	영역	과제명	연구비(억 원)
통신	CiViQ	129	컴퓨팅	OpenSuperQ	133
	QIA	134		AQTION	124
	QRANGE	42		2D SIPC	39
	UNIQORN	130		S2QUIP	39
시뮬레이션	Qombs	121		QMiCS	39
	PASQuanSiqClock	120	기초과학	SQUARE	39
	iqClock	130		PhoG	36
센싱/계측	MetaboliQs	86		PhoQuS	39
	macQsimal	133		MicroQC	31
	ASTERIQS	126	과제지원	QFLAG	46

※ ETRI (2019) 집필진 재구성

그림 I-3-9 EU 양자플래그십 1단계 과제 연구개발비 구성 비율



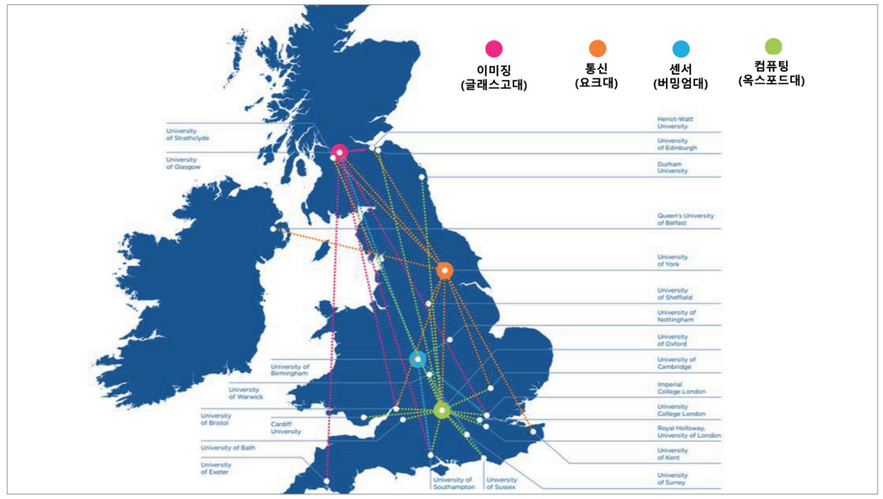
3. 영국

영국은 2014년에 국가양자기술프로그램(UK National Quantum Technologies Programme, UKNQTP)을 도입하고, 2024년까지 향후 10년 동안 민관 공동으로 10억 파운드(약 1조 5,000억 원) 투자를 발표했다. 지난 5년 동안 진행된 국가양자기술프로그램의 첫 번째 단계(2014~2019년)에서는 본래 편성된 2억 7,000만 파운드(약 4,050억 원)를 훌쩍 넘는 4억 파운드(약 6,000억 원)의 투자가 이뤄졌다. 해당 프로그램의 주요 축으로 총 214만 파운드(약 32억 1,000만 원)의 정부자금이 투입된 4개의 양자기술허브는 각각 통신(요크대), 센서(버밍엄대), 이미징(글래스고대), 컴퓨팅(옥스포드대)에 대한 연구를 진행하고 있다.[48)]

47) NIST (2021)

48) UKNQTP (2019)

그림 I-3-10 영국 국가양자기술프로그램 허브 네트워크

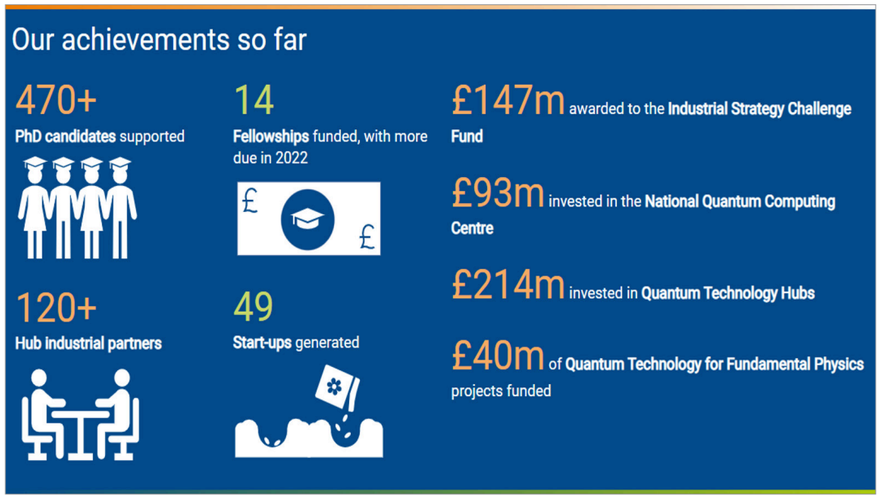


※ UKNQTP (2019)

2018년에는 영국과학공학연구위원회(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)가 박사급 교육센터 75곳에 총 4억 4,000만 파운드(약 6,600억 원)를 투자하고, 교육 및 기술 허브 3곳에 초기 단계 필요자금 1,160만 파운드(약 174억 원)를 지원했다. 그리고 2020년에는 영국연구혁신기구(UK Research and Innovation, UKRI)가 9,300만 유로(약 1,395억 원)를 투자해, 2023년 초 완공을 목표로 국가양자컴퓨팅센터(National Quantum Computing Centre, NQCC)를 짓고 있다.[49] 2021년에는 양자산업 프로젝트에 5,000만 파운드(약 750억 원)의 자금 지원을 발표했으며, 이는 기존에 진행 중이던 1억 7,000만 파운드(약 2,550억 원) 규모 양자기술 상용화 프로젝트의 일부이다.[50] 2022년 8월을 기준으로 그동안의 국가양자기술프로그램 투자액을 분류하면 산업전략챌린지기금에 1억 4,700만 파운드, 국가양자컴퓨팅센터에 9,300만 파운드, 양자기술허브에 2억 1,400만 파운드, 기반물리를 위한 양자기술에 4,000만 파운드가 투입됐음을 알 수 있다.[51]

49) National Quantum Computing Centre (2021)
50) 과학기술정보통신부 (2021a)
51) https://uknqt.ukri.org/

그림 I-3-11 영국 국가양자기술프로그램 투자 현황



※ UKNQTP (2022)

영국 정부는 2022년 2월에 양자분야 기술 혁신의 중요성과 사회경제적 편익의 잠재력을 다시금 확인하며, 국가 차원의 양자전략(UK Quantum Strategy) 개발에 착수했다. 해당 전략으로 지식 공급망이나 혁신 생태계, 인력, 기술 도입, 규제 환경 등 다양한 측면의 의견을 수렴하고, 또한 비전으로 제시한 '지속 가능한 양자산업 육성 및 유지를 통해 영국에 사회경제적 이익 제공', '영국의 역량과 선도적 글로벌 위치 강화 및 유지를 통해 강점 분야의 전략적 이점 지원', '양자기술 이용으로 광범위한 사회경제적 기회 확대 및 위험 완화'라는 3대 목표를 실현하겠다는 계획이다.[51]

4. 독일

독일 연방정부는 2006년 하이테크 전략 수립을 시작으로 꾸준히 하이테크 전략 2020(2010), 신하이테크 전략(2014)을 발표하며 글로벌 기술 선도국인 독일의 위상 유지를 위해 힘써왔다. 2018년 수립된 하이테크전략 2025에는 양자통신·센서 분야의 잠재력 극대화를 위한 예산 지원 확대 필요성이 포함되기도 했다.[52] 이런 흐름 속에서 독일 연방교육연구부(Federal Ministry of Education and Research, BMBF)는 2018년 정책 보고서를 발표하며 양자기술: 기초에서 시장까지(Quantum technologies-from basic research to market)라는 이름의 프레임워크 프로그램을 발표했다. 독일은 해당 프로그램을 통해 2018년부터 2022년까지 양자기술 R&D에 6억 5,000만 유로(약 8,450억 원)

52) 과학기술정보통신부 (2018)

를 투자하고, 2028년까지의 투자 연장 가능성을 시사했다.[53] 또한 양자기술 분야의 상용화 가능성을 긍정적으로 검토하고, 독일 산업계를 전략적 세력으로 변화시키기 위한 일환으로 양자통신과 양자컴퓨터 분야에서 각 1개의 주요 프로젝트를 예고했다.

2019년 5월 독일 연방교육연구부는 양자통신 상용화를 목표로 QuNET 이니셔티브를 출범했고, 총 1억 6,500만 유로(약 2,145억 원)의 예산을 지원하며 7년간 3단계로 나누어 진행할 것을 발표했다. QuNET 이니셔티브는 유럽 내의 연구개발을 촉진하고, 미래 양자인터넷 개발의 기초를 제공할 것으로 기대되며, 2년 동안 진행된 1단계에는 2,500만 유로(약 325억 원)가 투입됐다. 2021년 7월에는 독일 연방교육연구부와 연방경제에너지부(Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, BMWi)가 2025년까지 5년간 양자기술 분야 연구개발에 각 11억 유로(약 1조 4,500억 원)와 8억 7,800만 유로(약 1조 1,414억 원) 규모의 투자계획을 발표했다.

5. 프랑스

프랑스는 2021년 1월 국가양자기술전략(Stratégie Nationale Sur Les Technologies Quantiques)을 발표하며 2021년부터 2025년까지 5년 동안 양자기술에 18억 1,500만 유로(약 2조 3,595억 원)를 투자할 것이라고 밝혔다. 해당 예산은 정부자금 약 10억 5,000만 유로(약 1조 3,650억 원)와 민간자금 약 5억 5,000만 유로(약 7,150억 원), EU 기금 약 2억 유로(약 2,600억 원)로 구성된다. 이를 분야별로 구분하면 양자통신에 4억 8,100만 유로(약 6,253억 원), 양자센서에 2억 5,800만 유로(약 3,354억 원), 양자컴퓨터에 7억 8,400만 유로(약 1조 1,920억 원), 지원기술에 2억 9,200만 유로(약 3,796억 원)가 투자됨을 확인할 수 있다.[54]

표 I-3-5 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산

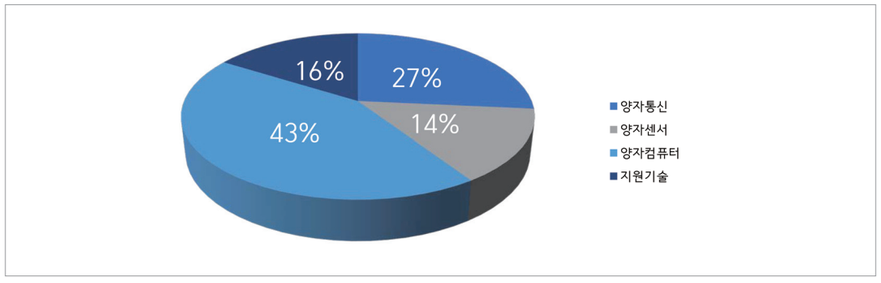
(단위: 억 유로)

구분	양자통신		양자센서	양자컴퓨터		지원기술	합계
	양자통신	양자내성암호		소규모(NISQ) 양자컴퓨터	대규모(LSQ) 양자컴퓨터		
예산	3.25	1.56	2.58	3.52	4.32	2.92	**18.15**

※ 프랑스 정부 (2021) 집필진 재구성

53) www.iof.fraunhofer.de/en/News/BMBF-promotes-quantum-research.html
54) 프랑스 정부 (2021)

그림 I-3-12 프랑스 국가양자기술전략 투자 예산 구성 비율



6. 캐나다

캐나다는 2021년 4월에 국가양자전략(National Quantum Strategy, NQS)을 수립하며, 향후 7년간 양자기술에 3억 6,000만 캐나다 달러(약 3,600억 원) 투자를 발표했다.[55] 이는 앞서 언급된 미국, EU 등에 비해 적은 수치지만, 캐나다는 이미 2009년부터 2020년까지 지난 10년간 양자기술에 10억 캐나다 달러(약 1조 원) 이상을 투자한 바 있다.[56] 그 중 주요한 국가적 지원으로 다음 세 가지를 열거할 수 있다. 먼저 캐나다는 학계 기반의 연구 혁신과 산·학 협력 네트워크 구축을 위해 2006년부터 2015년까지 9년간 캐나다 자연과학·공학 연구위원회(Natural Science and Engineering Research Council of Canada, NSERC)에 2억 6,700만 캐나다 달러(약 2,670억 원)를 투자했다. 다음으로 캐나다 혁신재단(Canada Foundation for Innovation, CFI)에 1억 달러(약 1,000억 원) 이상을 투자해 양자 관련 연구 인프라를 구축함으로써, 양자분야 최고 전문가 확보 및 유지를 위해 노력했다. 마지막으로 CFREF(Canada First Research Excellence Fund) 펀드를 조성하고 셔브룩대학의 IQ(Institut Quantique)에 3,350만 캐나다 달러(약 335억 원), 브리티시컬럼비아대학의 QMI(Quantum Matter Institute)에 6,650만 캐나다 달러(약 665억 원), 워털루대학의 TQT(Transformative Quantum Technologies)에 7,600만 캐나다 달러(약 760억 원), 총합 1억 7,600만 캐나다 달러(약 1,760억 원)를 투자했다.

55) 캐나다 정부 (2021)
56) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab029d

7. 중국

중국 국무원은 2006년에 국가 중장기 과학기술 발전계획 요강(2006~2020)을 발표하며 국가전략 6대 분야 중 하나로 양자 연구를 선정했고, 이에 연간 약 17억 1,700만 위안(약 3,262억 원)을 투자했다. 중국 과학기술부는 양자암호의 상용화와 양자통신기술 선도를 위해 양자제어연구 국가중대과학연구프로그램 12차 5개년 특별규획을 제정 및 실시하며, 중앙재정 조달을 통해 양자정보 분야에 지속적인 연구개발을 지원해왔다. 해당 프로그램은 '양자정보', '소규모 양자시스템', '강상관성 전자시스템', '인공갭시스템' 4대 임무로 구성돼 있다. 한편 2008년부터 2017년까지 중국 과학기술부가 양자정보 분야 연구에 투입한 투자 예산은 총 16억 4,595만 위안(약 3,127억 원)에 달하며, 〈표 I-3-6〉을 통해 연도별 투자액을 확인할 수 있다.[57]

표 I-3-6 양자제어 국가중대과학연구프로그램 중앙재정 조달 자금(2008~2017)

(단위: 만 위안)

연도	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	합계
중앙재정	8,622	12,499	15,876	21,694	18,697	19,085	18,944	26,954	15,897	6,327	**164,595**

※ 한중과학기술협력센터 (2020)

13차 5개년 기간 국가중점연구개발계획에서는 '양자제어 및 양자정보' 중점전문프로젝트 실시를 위한 방안을 편성 및 지원했다. 해당 계획에서 주목할 부분은 지난 프로그램의 4대 임무 중 하나인 양자정보를 양자통신, 양자컴퓨팅, 양자정밀측정으로 세분화해 총 6대 추진 분야로 구성됐다.[57]

표 I-3-7 '양자제어 및 양자정보' 중점전문프로젝트 중앙재정 조달 자금(2016~2020)

(단위: 만 위안)

연도	2016	2017	2018	2019	2020	합계
예산	-	87,747	32,222	11,000	9,138	**140,107**

※ 한중과학기술협력센터 (2020)

중국 과학기술부는 2018년에 2019년도 국가 중점 연구개발 계획을 발표하며, 양자제어 및 양자정보와 관련된 '양자전자시스템', '소형양자시스템', '양자컴퓨팅 및 시뮬레이션', '양자정밀계측' 4개의 프로젝트에 1억 6,000만 위안(약 304억 원)을 예산으로 책정한 바 있다. 또한 중국 정부는 2018년부터 5년간 1,000억 위안(약 19조 원)을 투입해 양자정보과학국가연구소를 설립하고, 원거리 양자통신망 구축과 양자컴퓨터 개발에 집중하고 있다.[58] 가장 최근에 발표된 제14차 5개년 계획(2021~2025) 및 2035 중장기 목표에서는 전략적으로 육성할 7대 분야에 양자통신과 양자컴퓨터를 추가하고, 연구개발비를 매년 7% 이상 증액해 양자기술 분야를 집중적으로 양성할 계획임을 밝혔다.[59]

57) 한중과학기술협력센터 (2020)
58) 한중과학기술협력센터 (2019)

8. 일본

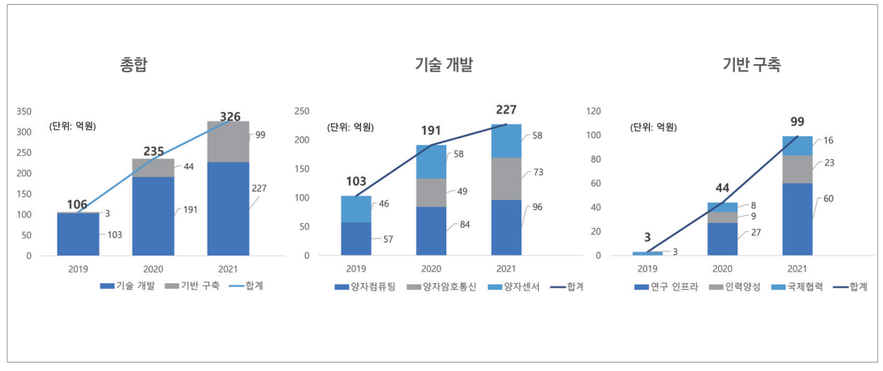
양자기술에 대한 일본의 투자전략은 2020년 1월을 기점으로 차이를 보인다.[60] 2020년 이전에는 부처별로 양자기술에 개별 투자하는 전략 방식을 취했었다. 예를 들어 2018년 문부과학성(Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, MEXT)은 광양자도약 플래그십 프로그램(Quantum Leap Flagship Program, Q-LEAP)을 통해 향후 10년 동안 양자 시뮬레이터 및 컴퓨터, 양자센싱 및 계측에 220억 엔(약 2,200억 원) 규모의 투자를 발표했는데, 같은 해 총무성(Ministry of Internal Affairs and Communications, MIC)과 내각부(Cabinet Office, CAO)도 향후 5년 동안 각각 위성양자암호기술(Satellite Quantum Crypto-technology)과 양자암호 관련 전략혁신 창조프로그램(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, SIP)에 투자할 것임을 발표했다. 그러나 2018년부터 시작된 양자기술 관련 전문가 회의를 통해 2020년 1월 양자기술 이노베이션 전략을 수립한 이후에는, 국가 차원의 중장기 양자기술 전략 방식으로 전환했다. 해당 전략 발표 이전에 160억 엔(약 1,600억 원)이 양자기술 예산으로 배정됐으나, 발표 후 추경 예산으로 2019년에 330억 엔(약 3,300억 원)이 지원됐으며, 2020년에도 330억 엔(약 3,300억 원) 투입을 예고했다. 그 후로도 투자는 계속 늘어나, 2020년 추경 예산과 2021년 예산으로 352억 엔(약 3,520억 원)이 편성됐고,[61] 2022 회계연도 예산은 추경 예산까지 포함된다면 기존 대비 2배 이상 확대된 800억 엔(약 8,000억 원)이 투입될 예정이다.[62]

59) IITP (2022) & ICT SPOT ISSUE (2022)
60) https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab0077
61) https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01901/00004/
62) IITP (2022) & ICT SPOT ISSUE (2022), https://sj.jst.go.jp/news/202205/n0523-03k.html

제3절 국내 투자동향

2019년 이전까지 국내 양자기술 R&D는 기초 연구나 출연(연) 사업 등 소액과제 위주로 추진됐기에, 선도국과 비교하면 연구과제 개수와 관련 예산액 모두 현저히 낮은 수준이었다. 하지만 2019년을 기점으로 전용 사업이 다수 신설되며 전용 사업 예산은 2019년 106억 원에서 연평균 75.4% 증가해 2021년에는 326억 원으로 대폭 증액됐다. 전용 사업은 기술 개발과 기반 구축으로 구분되는데 3년간 기술 개발에는 522억 원, 기반 구축에는 146억 원이 투입돼 총 668억 원이 투자됐다. 기술 개발은 다시 양자암호통신, 양자센서, 양자컴퓨팅으로 나뉜다. 양자암호통신은 122억 원이 투입됐고, 세부적으로는 유선 양자암호통신 상용화와 원천기술 고도화에 투자됐다. 양자센서는 관성 센서와 이미징 센서, 자기장 센서 등의 개발에 161억 원이 투입됐다. 양자컴퓨팅은 양자소자, 양자 시뮬레이터, SW 및 알고리듬 등에 총예산액의 절반에 달하는 238억 원이 배분됐다. 기반 구축은 [그림 I-3-13]과 같이 크게 인력양성, 연구인프라 구축, 국제협력 3가지로 구분되며, 이 중 연구인프라 구축에 절반 이상의 예산이 투입됐다.[63] 다만 [그림 I-3-13]에는 한국지능정보사회진흥원(NIA)의 양자암호통신 인프라 구축 사업(2020~2022) 예산이 미포함돼있다.[64]

그림 I-3-13 한국 양자기술 투자 추이



※ 과학기술정보통신부(2021) 집필진 재구성

정부는 2021년 4월 양자기술 연구개발 투자전략을 마련하고, 본격적으로 투자를 확대했다. 우선 양자통신 분야는 2022년부터 2026년까지 약 478억 원을 투자할 예정이다. 이미 선도국 수준의 경쟁력을 갖춘 유선 양자암호통신 성능을 고도화시켜 국제표준 선점과 시장 확대에 주력하고, 이를 바탕으로 무선 양자암호통신 기술력을 확보해, 향후 양자기기 간 연결을 통한 양자인터넷 구현을 목표로 삼고 있다. 다음으로 양자센서 분야는 국내 수요가 분명한 센서에 대해서는 수요연계형 R&D를 추진해 상용화를 서두르고, 연구·산업의 선순환 고리를 확보해 나갈 계획으로 2022~2025년까지 100억 원을 투자해 첨단산업 수요 타겟형 양자감지 기술을 개발하고자 한다. 마지막으로 양자컴퓨팅 분야는 2030년대 후반 범용 양자컴퓨터 상용화에 대비해 양자처리기, 오류보정, 알고리듬, 응용 소프트웨어, 시스템화 기술 등 핵심요소기술 확보를 위한 연구개발을 강화한다. 50큐비트급 한국형 양자컴퓨팅 시스템(Korea Quantum Innovation Platform, KQIP)을 조기 구축(2022~2026년, 총 490억 원)하고 독자 개발 양자프로세서와 연계해 단계적으로 고도화할 예정이며, 2026~2028년까지 국내 주력 소자 기반 시스템을 구축하고, 2023~2027년까지 혁신 도전 프로젝트로 신소재 개발 양자 시뮬레이터 연구를 추진할 계획이다.[64] 2022년 국내 양자정보통신 사업 예산의 경우, 전년 대비 약 323억 원이 증액된 790억 원이 투자될 예정이었으며, 실제 818억 원이 투자됐다.

표 I-3-8 국내 양자정보통신 사업 현황(2022)

(단위: 백만 원)

분야	사업명	2021년	2022년
센서	양자센서 핵심 원천기술 개발	5,800	8,500
통신	(신규) 양자인터넷 핵심 원천기술 개발	-	7,200
	양자암호통신 집적화 및 전송 기술 고도화	7,300	7,600
컴퓨팅	양자컴퓨팅 기술 개발	9,634	11,409
	(신규) 양자컴퓨팅 연구인프라 구축	-	10,000
인프라	양자 연구개발생태계 조성	5,977	11,200
	양자암호통신 인프라 구축	14,000	10,000
국제협력	(신규) 국가 간 협력 기반 조성(양자기술 협력)	-	6,000
인력양성	과기혁신 인재 양성(양자 인적 기반 조성)	3,875	7,050
합계		**46,586**	**78,959**

* (미포함 사업) ITRC(양자통신, 양자센서, 양자컴퓨팅, 2022 기준 24억 원),
기초연구사업(2020 기준 약 20억 원), 출연연 고유 사업(2022 기준 약 200억 원) 등 과제 단위 지원사업

63) IITP (2022) & ICT SPOT ISSUE (2022)
64) 과학기술정보통신부 (2021b)

제4장 국내외 표준화 동향

제1절 개요

양자기술은 크게 양자통신, 양자센서, 양자컴퓨팅 세 분야로 구분할 수 있다. 그 중 국내외 표준화가 가장 활발한 분야는 양자통신(양자암호통신/양자 키 분배 중심)이며, 다음으로 양자컴퓨팅과 양자센서 순으로 활성화가 예상된다. 이와 동시에 세 분야의 양자디바이스를 네트워크 형태로 묶기 위한 양자네트워크 혹은 양자인터넷도 표준화 시도가 한창이다. 본 백서에서는 초기 단계이나마 현재까지의 진행현황과 앞으로의 동향을 살펴, 국가 양자기술 표준화의 방향성을 제시하고자 한다.

양자암호통신은 2008년 ETSI(유럽전기통신표준화기구, European Telecommunication Standard Institute)에서 QKD ISG(Quantum Key Distribution Industry Specification Group)가 설립되면서 표준화가 시작됐다. 주로 양자암호통신 시스템 구현을 위한 표준기술이 연구됐으며, 장비 제조사와 대학 및 연구기관들이 주로 참여했다. 반면 ITU(국제전기통신연합, International Telecommunication Union)에서는 2018년 한국의 KT 및 SKT가 각각 양자암호 네트워크 표준 및 양자암호 보안 표준화 제안이 착수됐다. 그동안 ETSI 표준이 제공하지 못하던, 비용효율적인 양자암호 인프라 구축과 서비스를 위한 기술 표준개발이 시작된 것이다. 현재 ETSI는 20여 개의 산업규격 문서를 발간했고, ITU는 30여 개의 권고안을 개발하는 등 국제표준 기반 상용화가 어느 정도 준비된 것으로 여겨지고 있다. 특히 ITU의 양자암호 네트워크 국제 표준화는 한국이 선도하고 있다.

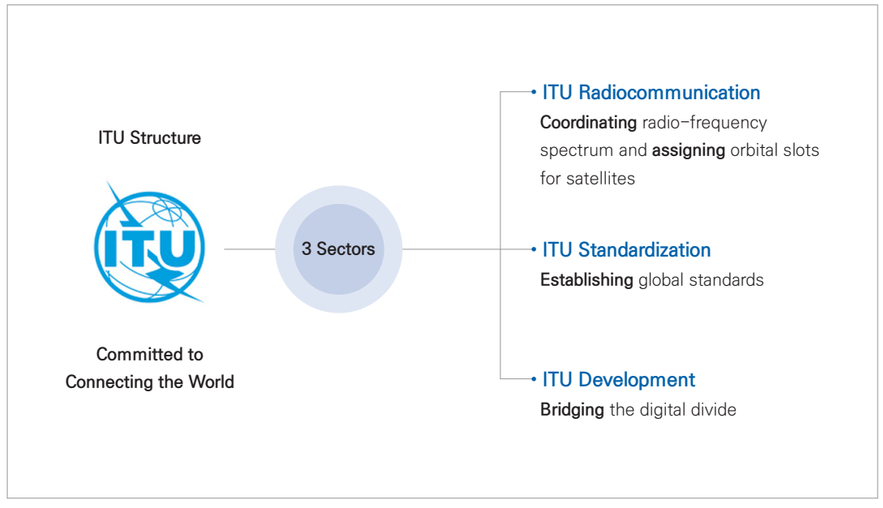
양자컴퓨팅은 ISO/IEC(국제표준화기구, International Organization for Standardization/국제전기기술위원회, International Electronical Commission) 중심으로 표준화를 준비하고 있으나, 실질적인 표준 문서의 개발은 미진한 상황이다. 최근 IEC에서 한국 주도하에 Quantum SEG(Standardization Evaluation Group)가 설립됐기에, 향후 해당 분야의 국제 표준화 과정에서 한국의 활약이 기대된다. 한편 양자디바이스(양자컴퓨터, 양자센서, 양자 키 분배 시스템 등) 간 정보를 양자상태로 교환할 수 있는 양자네트워크 혹은 양자인터넷에 대한 국제표준화도 ITU와 IETF/IRTF(인터넷 기술 전문위원회, Internet Engineering Task Force/인터넷 연구 전문위원회, Internet Research Task Force)에서 착수에 들어가 주요 표준화 경쟁 이슈로 대두하고 있다.

제2절 해외 표준화 기구

1. ITU-T

ITU(국제전기통신연합, International Telecommunication Union)[65]는 국제연합의 14개 전문기구 중 하나로 전기통신 관련 세계 최고 국제기구이며, 국제전기통신과 국가별 통신 정책의 조화를 위해 회원국 상호 간 국제 협력·규제·표준화 및 개발도상국에 대한 지원업무를 수행하고 있다. ITU는 산하에 전기통신 부문(ITU-T, International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector), 전파통신 부문(ITU-R, International Telecommunication Union – Radiocommunication Secotr), 개발 부문(ITU-D, International Telecommunication Union – Telecommunication Development Sector)을 두고, 전기통신 표준화, 주파수 스펙트럼 배분 및 주파수 할당 등록, 회원국 간 협력을 통한 적정요금의 통신서비스 제공 촉진, 개발도상국에 대한 기술 협력, 제반 규칙 제정, 관련 정보의 수집 및 발표 등 많은 역할을 담당하고 있다.

그림 Ⅰ-4-1 ITU 조직구조



※ 집필진 작성

65) www.itu.int

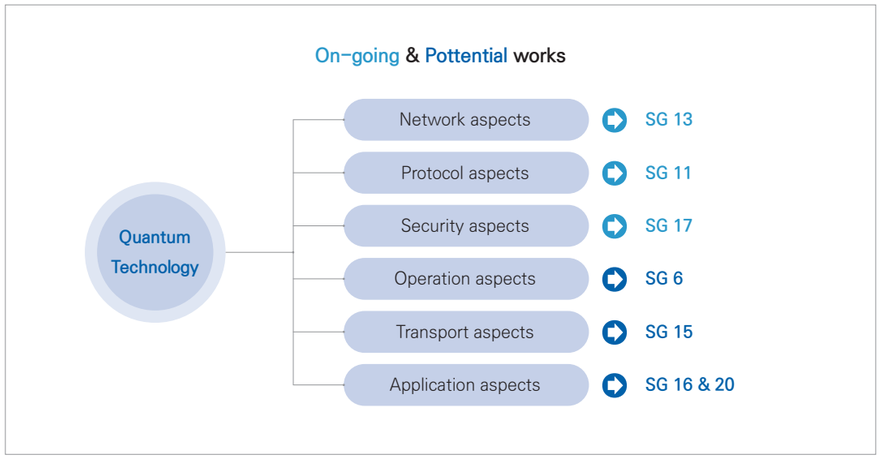
ITU 내 양자기술 관련 표준화는 ITU-T에서 담당하고 있으며, ITU-T는 표준화 주제별로 SG(Study Group)2에서 SG20에 이르기까지 11개 연구그룹으로 나뉘어 있다. 이 중 양자 관련 표준화 연구는 ITU-T TSAG(Telecommunication Standardization Advisory Group), SG11, SG13, SG17에서 담당하고 있다. 그 중 SG11은 프로토콜 및 시험평가 기술 표준화를 담당하고 있고, SG13은 미래 통신망과 클라우드 분야를, SG17은 보안 분야 표준화를 맡고 있다. 예를 들어 SG13은 양자 키 분배 네트워크(Quantum Key Distribution Networks, QKDN) 표준을, SG17은 양자 키 분배 보안 표준을, SG11은 양자 키 분배 네트워크 인터페이스 프로토콜을 개발하는 구조로 진행되고 있다.

표 Ⅰ-4-1 ITU-T 연구그룹(Study Group, SG) 구조

연구그룹	주관 표준화 분야
SG 2	Operational aspects
SG 3	Economic & policy issues
SG 5	Environment, EMF & circular economy
SG 9	Broadbandcable & TV
SG 11	Protocols, testing & combating counterfeiting
SG 12	Performance, QoS& QoE
SG 13	Future networks
SG 15	Transport, access & home
SG 16	Multimedia & digital technologies
SG 17	Security
SG 20	IoT, smart cities & communities

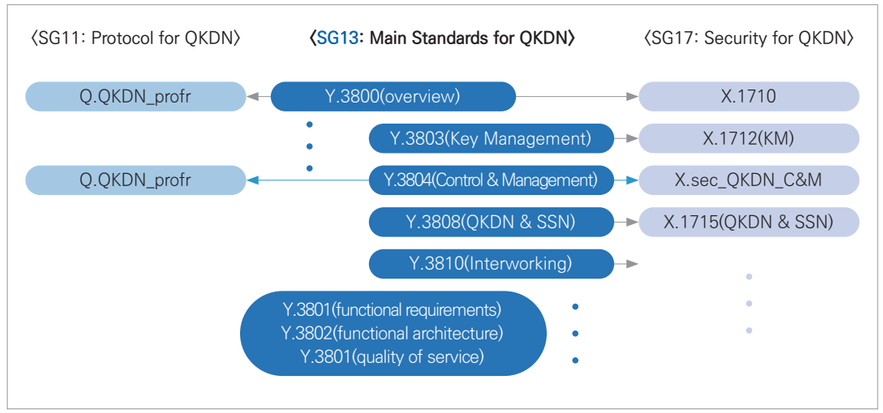
※ 집필진 작성

그림 Ⅰ-4-2 ITU-T 양자기술 표준화 연구그룹 관계



※ 집필진 작성

그림 I-4-3 ITU-T 연구그룹별 주요 표준화 내용

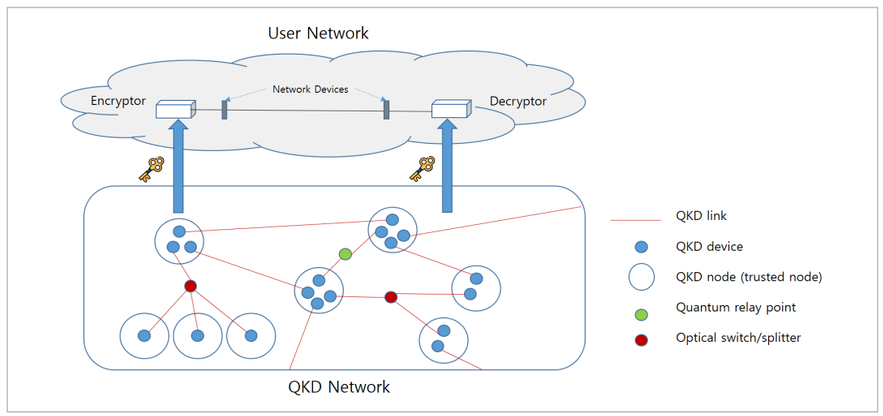


※ 집필진 작성

가. SG13

ITU-T SG13은 미래 통신망(Future Networks) 분야 표준화를 담당하는 그룹으로 IMT-2020 and beyond(5G 및 6G), 클라우드와 빅데이터, 신뢰 네트워크와 양자암호 네트워크를 주요 표준화 분야로 수행하고 있다. 양자분야 표준화는 2018년 Working Party 3의 Question 16에서 한국 KT가 양자암호 네트워크 표준화를 처음 제안해 채택됐다. 이후 Question 6에서의 양자암호 서비스 품질 표준화와 함께 현재까지 약 30여 편의 표준 문서를 개발하고 있다. 또한 KT가 2021년 말 제안한 미래양자통신망(Quantum Enabled Future Network, QEFN)을 주제로 양자인터넷 표준개발에 착수하는 등 한국이 주도적으로 표준화를 이끌어가고 있다.

그림 I-4-4 양자 키 분배 네트워크 개요



※ 집필진 작성

한국은 SG13 부의장, Working Party 1 의장, Working Party 3 의장, Q.6 라포타, Q.16 라포타를 비롯하여 양자암호 네트워크 표준 문서 10여 건의 에디터를 맡아 표준개발을 선도하고 있다.

표 I-4-2 ITU-T SG13 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	Y.QKDN-qos-iw-req, Requirements of QoS assurance for QKDN interworking (양자 키 분배 네트워크 간 연동을 위한 서비스 품질 보장 요구사항)	2023
2	Y.QKDN-qos-mmq, Quantum key distribution Networks – Measurement methodology for QoS parameters (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 파라미터 측정 방법)	2023
3	Y.QKDN-iwac, Quantum key distribution networks interworking – architecture (양자 키 분배 네트워크 연동 – 구조)	2023
4	Y.QKDNf-fr, Framework of Quantum Key Distribution Network Federation (양자 키 분배 네트워크 페더레이션 기본구조)	2023
5	Y.QKDNi-SDNC, Quantum Key Distribution Network Interworking – Software Defined Networking Control (양자 키 분배 네트워크 연동 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어)	2023
6	Y.supp.QKDN-roadmap, Standardization roadmap on Quantum Key Distribution Networks (양자 키 분배 네트워크 표준 로드맵)	2023
7	Y.3807, Quantum key distribution networks – Quality of service parameters (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 파라미터)	2022
8	Y.3808, Framework for integration of quantum key distribution network and secure storage network (양자 키 분배 네트워크 및 보안 저장 네트워크 통합 기본구조)	2022
9	Y.3809, A role-based model in quantum key distribution networks deployment (양자 키 분배 네트워크 전개 시 역할기반 모델)	2022
10	Y.3810, Quantum key distribution network interworking-framework (양자 키 분배 네트워크 연동 – 기본구조)	2022
11	Y.3811, Quantum key distribution network – Functional architecture for quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 보장 기능 구조)	2022
12	Y.3812, Quantum key distribution network – Requirements for machine learning based quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 머신러닝 기반 서비스 품질보장 요구사항)	2022
13	Y.QKDN-iwrq, Quantum key distribution networks interworking – functional requirements (양자 키 분배 네트워크 연동 – 기능 요구사항)	2022
14	Y.QKDN-ml-fra, Quantum key distribution networks – functional requirements and architecture to enable machine learning (양자 키 분배 네트워크 – 머신러닝 기반 기능 요구사항 및 구조)	2022
15	Y.QKDN-rsfr, Framework of quantum key distribution network resilience (양자 키 분배 네트워크 신뢰성 기본구조)	2022
16	TR-QEFN, ITU-T's Views for Quantum-Enabled Future Networks (양자기반 미래 통신망)	2022
17	Y.3805, Quantum key distribution networks – Software-defined networking control (양자 키 분배 네트워크 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어)	2021
18	Y.3806, Quantum key distribution networks – Requirements for quality of service assurance (양자 키 분배 네트워크 – 서비스 품질 보장 요구사항)	2021
19	Y.3801, Functional requirements for quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크 기능 요구사항)	2020
20	Y.3802, Quantum key distribution networks – Functional architecture (양자 키 분배 네트워크 – 기능 구조)	2020
21	Y.3803, Quantum key distribution networks – Key management (양자 키 분배 네트워크 – 키 관리)	2020
22	Y.3804, Quantum key distribution networks – Control and management (양자 키 분배 네트워크 – 제어 및 관리)	2020
23	Y.3800, Overview on networks supporting quantum key distribution (양자 키 분배 네트워크 개요)	2019

※ ITU-T

나. SG17

SG17은 ITU-T에서 보안 분야 표준화를 담당하는 그룹으로 Question 15에서 양자 키 분배(Quntum Key Distribution, QKD) 및 양자 난수 발생기(Quantum Random Number Generator, QRNG)에 대한 표준화를 진행하고 있다. SG17은 보안 영역 전반을 다루고 있으며, 특히 양자 키 분배 네트워크 보안 요구사항, 키 관리 보안 요구사항, QRNG 구조, 양자 키와 현대암호키를 결합하는 하이브리드 키 교환 등에 대한 표준화를 완료했다. 그리고 현재는 양자 키 분배 네트워크 내부 인증 및 허가, 관리 기능 영역의 보안 요구사항과 신뢰 노드에 대한 보안 요구사항 표준화를 진행하고 있다. 한국은 Q.15 라포타 및 부라포타를 비롯해 다수의 양자암호 네트워크 보안표준 에디터를 맡았으며, SG17 내에서 표준개발을 이끌어가고 있다.

표 I-4-3 ITU-T SG17 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	X.sec_QKDN_AA, Authentication and authorization in QKDN using quantum safe cryptography (양자 보안 암호를 사용하는 양자 키 분배 네트워크에서 인증)	2023
2	X.sec_QKDN_CM, Security requirements and measures for quantum key distribution networks – control and management (양자 키 분배 네트워크를 위한 보안 요구사항 및 측정 – 제어 및 관리)	2023
3	X.sec_QKDN_tn, Security requirements and designs for quantum key distribution networks – trusted node (양자 키 분배 네트워크	2023
4	TR.hyb-qkd, Overview of hybrid approaches for key exchange with QKD (양자 키 분배 기반 복합 키 교환 개요)	2022
5	X.1710, Security framework for quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크 보안 기본구조)	2021
6	X.1712, Security requirements and measures for QKD networks – key management (양자 키 분배 네트워크 보안 요구사항 및 측정 – 키 관리)	2021
7	X.1714, Key combination and confidential key supply for quantum key distribution networks (양자 키 분배 네트워크를 위한 키 혼합 및 키 공급)	2021
8	TR.SEC-QKD, Security considerations for quantum key distribution network (양자 키 분배 네트워크를 위한 보안 고려사항)	2020

※ ITU-T

다. FG-QIT4N

TSAG(Telecommunication Standardization Advisory Group)은 ITU-T의 조직과 활동에 대한 자문그룹으로, 연구그룹 간 혹은 다른 표준개발조직(SDO)과의 협력을 총괄 담당하고 있다. 예를 들어 특정 SG 단독으로 수행하기 어렵거나 표준화를 위해 여러 SG의 협력이 필요한 상황에서, TSAG 산하에 Focus Group을 설립해 해당 표준화를 진행하기도 한다. 즉 SG는 4년마다 진행되는 ITU-T 총회에서 회원국의 승인을 받아 운용되는 정기 조직인 반면, Focus Group은 특정 주제로 제한된 기간(평균 2년)만 운용되는 임시 조직이다. 양자네트워크와 관련해서는 지난 2019년 한국의 KT가 중국 산업계와 공동으로 신규 설립을 제안한 ITU-T Focus Group on QIT4N(Quantum Information Technology for Networks)을 예로 들 수 있다. Focus Group의 연구 결과물은 공식 표준으로 인정되지 않지만, SG로 이관해 추가 개발 혹은 즉시 승인 과정을 통해 정식 표준으로 인정받기도 한다. 이와 관련해 한국은 2명의 부의장을 배출하며 선행표준 개발을 이끌어왔다.

표 I-4-4 ITU-T FG QIT4N 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	Quantum information technology for networks terminology: Network aspects of quantum information technologies (양자정보기술 네트워크 용어: 양자정보기술의 네트워크 측면)	2021
2	Quantum information technology for networks use cases: Network aspects of quantum information technologies (양자정보기술 네트워크 유즈 케이스: 양자정보기술의 네트워크 측면)	2021
3	Standardization outlook and technology maturity: Network aspects of quantum information technologies (표준화 개요 및 기술성숙도: 양자정보기술 네트워크 측면)	2021
4	Quantum information technology for networks terminology: QKDN (양자정보기술 네트워크 용어: 양자 키 분배 네트워크)	2021
5	Quantum information technology for networks use cases: QKDN (양자정보기술 네트워크 유즈 케이스: 양자 키 분배 네트워크)	2021
6	Quantum key distribution network protocols: Quantum layer (양자 키 분배 네트워크 프로토콜: 양자계층)	2021
7	Quantum key distribution network protocols: Key management layer, QKDN control layer and QKDN management layer (양자 키 분배 네트워크 프로토콜: 키 관리 계층, 양자 키 분배 네트워크 제어계층, 양자 키 분배 네트워크 관리 계층)	2021
8	Quantum key distribution network transport technologies (양자 키 분배 네트워크 전송 기술)	2021
9	Standardization outlook and technology maturity: Quantum key distribution network (표준화 개요 및 기술성숙도: 양자 키 분배 네트워크)	2021

※ ITU-T

라. SG11

SG11은 ITU-T에서 신호 방식을 위한 프로토콜 구조 및 응용제어, 세션 및 접속제어, 신호처리, 적합성 및 상호운용성 시험 분야를 연구하고 있다. SG13에서 시작한 양자 키 분배 네크워크 구조 및 기능 요구사항에서 정의된 양자 키 분배 네트워크 구현에 필요한 계층 혹은 기능 간 인터페이스별 세부 프로토콜을 표준화하고 있으며, 현재 5개의 표준 문서를 개발하고 있다.

표 I-4-5 ITU-T SG11 표준개발 현황

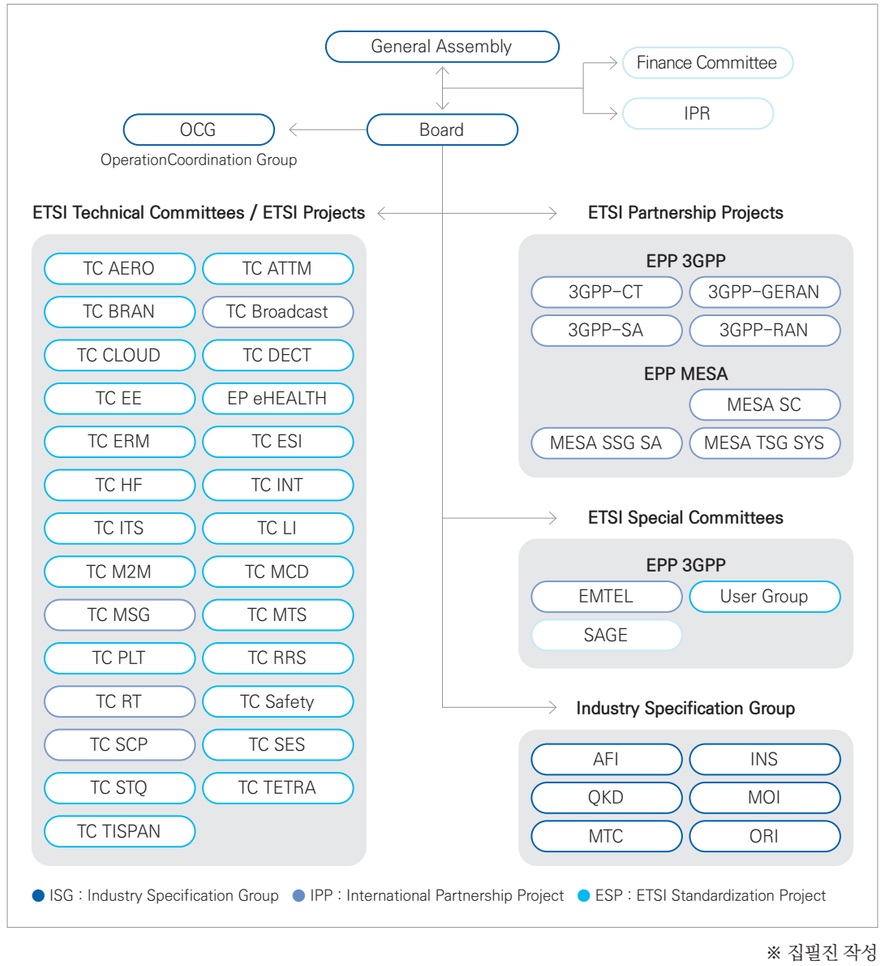
구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	Q.QKDN_profr, Quantum key distribution networks – Protocol framework (양자 키 분배 네트워크 – 프로토콜 기본구조)	2022
2	Q.QKDN_Ak, Protocols for Ak interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Ak 인터페이스 프로토콜)	2022
3	Q.QKDN_Ck, Protocols for Ck interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Ck 인터페이스 프로토콜)	2022
4	Q.QKDN_Kq-1, Protocols for Kq-1 interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Kq-1 인터페이스 프로토콜)	2022
5	Q.QKDN_Kx, Protocols for Kx interface for QKDN (양자 키 분배 네트워크를 위한 Kx 인터페이스 프로토콜)	2022

※ ITU-T

2. ETSI

ETSI(유럽전기통신표준화기구, European Telecommunications Standards Institute)[66]는 1987년 CEPT(유럽우편전기통신주관청회의, European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) 회의에서 설립이 결정됐고, 이후 1988년 1월 런던회의에서 유럽의 표준만을 전담할 기구로서 ETSI 설립을 공식 승인받았다. ETSI는 전기통신 분야뿐만 아니라 전기통신과 정보기술의 공통 분야, 전기통신과 방송의 공통 분야에서 유럽통신표준을 제정하고 있다. ETSI의 목적은 회원국들이 요구하는 기술 표준을 제정하고 유지하는 것이며, 또한 다른 유럽 표준화 기구와의 협력을 유지하면서 정보통신 분야의 기술적 조화를 구현하는 것이다.

그림 I-4-5 ETSI 조직구조



※ 집필진 작성

가. QKD ISG(Quantum Key Distribution Industry Specification Group)

QKD ISG는 2008년 창설된 ETSI의 산업규격 그룹이며, 양자암호통신 장비 제조사, 통신사업자, 대학과 연구기관들 대부분이 참여하고 있다. 이 그룹을 통해 양자 키 분배 시스템을 구현하기 위한 기능, 인터페이스, 보안 요구사항 등이 개발됐다. 지금까지 양자 키 분배 기술 및 시스템에 대해 20개가 넘는 산업규격 문서를 발간했으며, 업계에서 통용되고 있다.

표 I-4-6 ETSI QKD ISG 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	GS QKD 018, Quantum Key Distribution; Ochestration Interface for Software Devfined Networks (양자 키 분배; 소프트웨어 정의 네트워크용 오케스트레이션 인터페이스)	2022
2	GS QKD 015, Quantum Key Distribution; Control Interface for Software Defined Networks (양자 키 분배; 소프트웨어 정의 네트워크용 제어 인터페이스)	2022
3	GS QKD 004, Quantum Key Distribution; Application Interface (양자 키 분배; 응용 인터페이스)	2020
4	GS QKD 014, Quantum Key Distribution; Protocol and data format of REST-based key delivery API (양자 키 분배; REST 기반 키 전달 API의 프로토콜과 데이터 포맷)	2019
5	GS QKD 012, Quantum Key Distribution; Device and Communication Channel Parameters for QKD Deployment (양자 키 분배; 양자 키 분배 전개를 위한 디바이스 및 통신 채널 파라미터)	2019
6	GR QKD 007, Quantum Key Distribution; Vocabulary (양자 키 분배; 용어)	2018
7	GS QKD 003, Quantum Key Distribution; Components and Internal Interfaces (양자 키 분배; 요소 및 내부 인터페이스)	2018
8	GS QKD 011, Quantum Key Distribution; Component Characterization: Characterizing optical components for QKD systems (양자 키 분배; 요소 특성, 양자 키 분배 시스템을 위한 광학 요소 특성)	2016
9	GS QKD 008, Quantum Key Distribution; QKD Module Security Specification (양자 키 분배; 양자 키 분배 모듈 보안 규격)	2010
10	GS QKD 005, Quantum Key Distribution; Security Proofs (양자 키 분배; 보안 검증)	2010
11	GS QKD 002, Quantum Key Distribution; Use Cases (양자 키 분배; 유즈 케이스)	2010

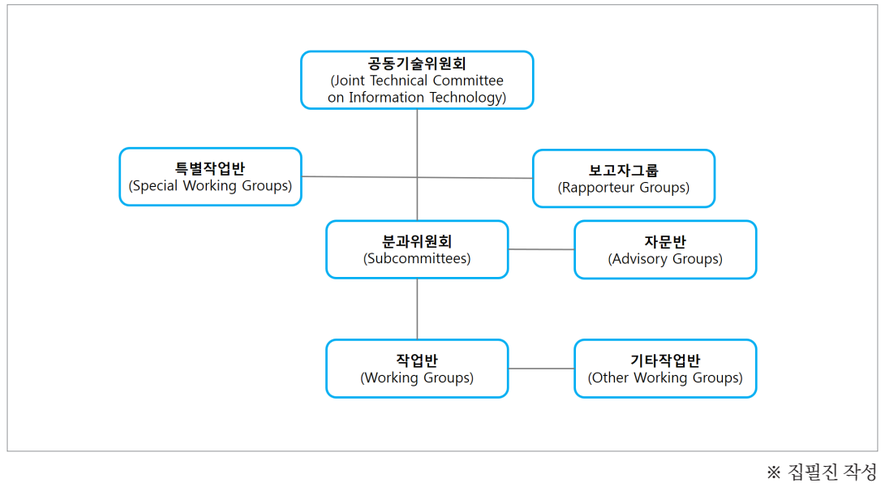
※ ETSI

3. ISO/IEC JTC1

ISO/IEC JTC1(ISO/IEC 공동기술위원회, Joint Technology Committee 1)[67]은 정보처리시스템에 대한 국제 표준화 기구(ISO/TC97)와 정보기기에 대한 국제전기기술위원회(IEC/TC83)를 통합해 1987년 설립한 공동기술위원회다. JTC1은 정보기술에 대한 국제 표준화를 목표로 하며, IT시스템과 툴의 설계 및 개발, IT 제품과 시스템의 품질과 성능, IT시스템과 정보의 보안성, IT 제품과 시스템의 상호운용성 확보, 단일화된 툴과 시스템 환경 구축, IT에 관련된 어휘의 조화, 친숙한 사용자 인터페이스와 관련된 업무를 수행한다. JTC1은 20개의 분과위원회(Subcommittee, SC)와 8개의 특별작업반(Special Working Groups, SWG)으로 구성돼 있다.

66) www.etsi.org
67) www.iso.org

그림 I-4-6 ISO/IEC JTC1 조직구조



※ 집필진 작성

가. SC27

SC27(Subcommittee 27)은 정보보호, 사이버보안, 개인정보보호 관련 표준을 개발하는 그룹이다. 세부적으로는 정보 및 ICT 보안 관리, 정보 암호화 및 기타 보안 메커니즘, 보안 관리 지침, 신원 관리, 정보보안 시스템 적합성 평가 및 평가 방법론 등의 표준들을 개발하고 있다. JTC1 SC27 산하 WG3(Working Group 3)에서는 보안 평가 방법, 테스트 방법 및 명세서 정의 표준을 개발하고 있다. 양자분야와 관련해서는 CC(공통평가기준, Common Criteria)를 기반으로, 양자 키 분배 장치의 보안 요구사항과 시험평가 방법에 대한 표준개발을 진행하고 있다.

표 I-4-7 ISO/IEC JTC1 SC27 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	ISO/IEC 23837-1, Information technology security techniques - Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution - Part 12: Requirements (정보기술 보안기술 – 양자 키 분배 보안 요구사항, 시험, 평가 방법 – 요구사항)	2023
2	ISO/IEC 23837-2, Information technology security techniques - Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution - Part 2: Evaluation and testing methods (정보기술 보안기술 – 양자 키 분배 보안 요구사항, 시험, 평가 방법 – 평가 및 시험 방법)	2023

나. WG14

WG14(Working Group 14)는 양자컴퓨팅 표준화를 위해 설립됐다. 양자컴퓨팅의 격차를 확인하고 그것과 관련된 결과물을 개발하는 것을 목표로 삼고 있으며, 양자컴퓨팅 용어 정의에 관한 표준화 작업을 진행하고 있다.

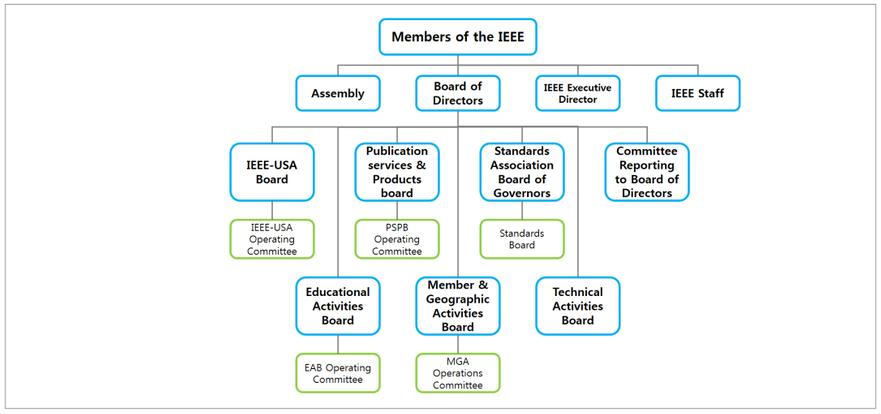
표 I-4-8 ISO/IEC JTC1 WG14 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	ISO/IEC CD 4879, Quantum computing – Terminology and vocabulary (양자컴퓨팅 – 용어 및 단어)	2023

4. IEEE

IEEE(미국전기전자학회, Institute of Electrical and Electronics Engineers)[68]는 IRE(전파공학자협회, Institute of Radio Engineers)와 AIEE(미국전기공학자협회, American Institute of Electrical Engineers)를 통합해 설립된 전기전자공학 전문가들의 국제조직이다. IEEE는 전기통신공학부터 전력, 항공우주, 소비전자공학, 컴퓨터 엔지니어링, 생물의학 기술까지 다양한 기술들을 다룬다. 이와 관련된 기술적 출판물, 학회 및 전기공학, 컴퓨터 및 제어 기술 분야 전 세계 출판물의 30%를 제작하고, 연간 300개 이상의 주요 학회를 주관하고 있다.

그림 I-4-7 IEEE 조직구조



※ 집필진 작성

68) www.ieee.org

가. IEEE SA

IEEE SA(표준협회, Standards Association)에서는 현재 약 1,500여 개의 표준을 개발 중이다. 전기와 정보기술 및 인류번영과 전문 분야에 대한 지식을 창조, 개발, 통합, 공유하고 실제로 적용해 엔지니어링 과정을 촉진하는 것이 목적이다. 이를 통해 IEEE는 향후 양자컴퓨팅 관련 기술 표준 및 산업 솔루션 개발 과정에서, 사람들이 함께 일할 수 있도록 전 세계적으로 합의된 개방형 플랫폼을 제공하고자 한다. 양자컴퓨팅 용어, 성능지표 및 벤치마크, 시스템 아키텍처, 알고리듬 개발, 시뮬레이터 등에 관한 표준화 작업을 진행하고 있다.

표 I-4-9 IEEE SA 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	IEEE P7130, Standard for Quantum Technologies Definitions (양자기술 정의 표준)	2023

5. IETF/IRTF[69]

IETF(인터넷 기술 전문위원회, Internet Engineering Task Force)는 인터넷 관련 엔지니어링과 표준화에 집중하고 있다. 반면 IRTF(인터넷 연구 전문위원회, Internet Research Task Force)는 상대적으로 장기간이 예상되는 연구주제에 집중하고 있는데, 산하에 QIRG(양자인터넷 연구그룹, Quantum Internet Research Group)을 구성하고, 양자인터넷 표준화를 위한 연구 및 선행 표준화를 진행하고 있다. 해당 그룹에서 2019년 3월부터 개발하기 시작한 양자인터넷 구조원리(Architecture Principle for a Quantum Internet)와 양자인터넷 응용시나리오(Application Scenarios for the Quantum Internet) 표준 문서는 본격적인 양자인터넷 표준화 이전에 양자물리학을 포함한 기초기술에 대한 이해도를 높이고 공유하는 것을 목표로 삼고 있다.

표 I-4-10 IRTF QIRG 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	draft-irtf-qirg-principles, Architecture Principle for a Quantum Internet	2023
2	draft-irtf-qirg-quantum-internet-use-cases, Application Scenarios for the Quantum Internet	2022

※ IRTF

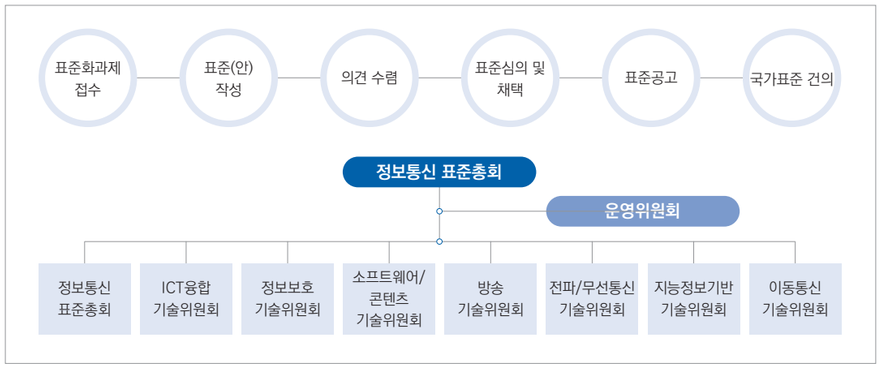
69) https://www.ietf.org/about/groups/irtf/

제3절 국내 표준화 기구

1. TTA

1988년 12월에 설립된 재단법인 TTA(한국통신기술협회, Telecommunications Technology Association)[70]는 통신사업자, 산업체, 학계, 연구기관 및 단체 등의 상호협력과 유대를 강화하는 것이 목적이다. 더불어 국내외 정보통신 분야의 최신 기술 및 표준에 관한 각종 정보를 수집·연구해 이를 보급·활용하게 하며, 효율적인 표준화를 추진함으로써 정보통신 산업 및 국민경제 발전에 이바지하고자 한다. 표준제정은 시장 선점을 위한 핵심 요소로, 해당 기술·표준을 가진 개인이나 단체는 누구든지 TTA 표준으로 제안할 수 있다. 표준(안) 제안 시 제안자의 특허(IPR)가 인정되며, 표준제정에는 평균 약 6~12개월이 소요된다.

그림 I-4-8 TTA 표준화위원회 조직구조



※ TTA

가. TTA 광전송 프로젝트 그룹(PG201)

PG201은 광전송 기술에 대한 표준화를 진행하는 프로젝트 그룹으로, 전달망 구조 기술, 액세스망 기술, 광소자 및 광케이블 기술 같은 물리 인프라 기술의 표준화를 추진하고 있다. 양자암호통신 네트워크 관련 ITU-T SG13, ETSI QKD ISG에서 개발된 국제표준의 영문 준용 표준과, KT에서 자체 개발한 양자암호 전달 네트워크 기능 구조 표준 등 총 15건의 표준이 개발 완료됐다. 현재는 양자암호통신 소프트웨어의 정의·네트워킹·제어 관련 3건의 표준을 개발하고 있다.

70) 한국정보통신기술협회 홈페이지 (www.tta.or.kr).

표 I-4-11 TTA PG201 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	2019-1309, 양자 키 분배-REST 기반의 키 전달 응용 프로토콜과 데이터 형식	2023
2	2022-0616, 양자 키 분배(QKD): 소프트웨어 정의 네트워킹을 위한 오케스트레이션 인터페이스	2023
3	TTAE.IT-Y.3806, 양자 키 분배망 – 서비스 품질 보장 요구사항	2022
4	TTAE.IT-Y.3807, 양자 키 분배망 – 서비스 품질 파라미터	2022
5	2021-2357, 양자 키 분배망 – 소프트웨어 정의 네트워킹 제어	2022
6	TTAE.IT-Y.3801, 양자 키 분배망 기능적 요구사항	2021
7	TTAE.IT-Y.3802, 양자 키 분배망 – 기능 구조	2021
8	TTAE.IT-Y.3804, 양자 키 분배망 – 제어 및 관리	2021
9	TTAR-01.0021, 머신러닝 기반 양자암호 분배 네트워크 (QKDN) 상호운용 (Interworking) 제어 및 관리를 위한 유스 케이스(기술보고서)	2021
10	TTAR-01-0022, 양자암호 네트워크의 유스 케이스(기술보고서)	2021
11	TTAK.KO-01.0230, 양자 키 분배(QKD) 용어 정의	2021
12	TTAK.KO-01.0214/R1, 양자암호 전달 네트워크의 기능 구조	2021
13	TTAK.KO-01.0225/R1, QKD 네트워크 (QKDN); QKD 시스템과 양자 암호키 관리 시스템 간 인터페이스 및 YANG 데이터 모델	2021
14	TTAE.IT-Y.3800, 양자 키 분배망 개요	2020
15	TTAE.ET-GS QKD 011, 양자 키 분배(QKD): 구성 요소 특성화: QKD 시스템의 광학 구성 요소 특성화	2018
16	TTAE.ET-GS QKD 008, 양자 키 분배(QKD): 모듈 보안 규격	2018
17	TTAE.ET-GS QKD 003, 양자 키 분배: 구성 요소 및 내부 인터페이스	2017
18	TTAE.ET-GS QKD 004, 양자 키 분배망: 응용 인터페이스	2017

※ TTA

나. TTA 정보보호 기반 프로젝트 그룹(PG501)

PG501은 암호 기술에 대한 표준화를 진행하는 프로젝트 그룹으로, 암호알고리듬/프로토콜, 양자 정보통신의 암호키 관리, 암호 응용 기술, PKI 시스템, OTP 기술, 인증/접근제어 및 권한관리 기술 등의 표준화를 진행하고 있다. 2018년에 양자 키 분배 기술에 대해 일반적인 모델과 절차를 제시하고, 대표적인 양자 키 분배 프로토콜인 BB84 프로토콜에 대한 절차를 제시하는 2개의 표준을 완성했다.

표 I-4-12 TTA PG501 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	TTAK.KO-12.0329-Part1, 양자 키 분배 – 제1부: 일반	2018
2	TTAK.KO-12.0329-Part2, 양자 키 분배 – 제2부: BB84 프로토콜	2018

※ TTA

다. TTA 사이버보안 프로젝트 그룹(PG503)

PG503은 사이버보안 기술 관련 표준화를 진행하는 프로젝트 그룹으로, 클라우드 컴퓨팅, 미래인터넷, 스마트 모바일 네트워크 보안, 사이버보안 기술, 사이버 범죄 대응 기술(디지털 포렌식) 등의 표준화를 진행하고 있다. 네트워크 보안을 위해 개발된 IPsec(IP 보안프로토콜) 장비에 양자 키 분배 장치에서 제공하는 양자암호키를 적용하기 위한 표준 1건이 개발 중이다.

표 I-4-13 TTA PG503 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	2019-1114, IP 보안프로토콜(IPsec)과 양자암호키 분배 장비 간 연동 규격	2023

※ TTA

라. TTA 응용 보안/평가인증 프로젝트 그룹(PG504)

PG504는 금융보안, IoT, 클라우드 컴퓨팅, 스마트그리드, 스마트 워크, 디지털 저작권 보호 기술 등 응용/융합 보안기술과 그것을 지원하는 구현/관리 지침, 정보보호 관리체계(ISMS), 공통평가기준(CC), 암호모듈 검증(CMVP) 등 보안성 인증 및 평가기술에 대한 표준화를 진행하고 있다. 양자 키 분배 시스템의 안전성을 보장하기 위한 요구사항 표준이 완성돼있고, 2023년도에 양자 키 분배 시험요구사항 표준에 대한 과제 제안이 진행될 예정이다.

표 I-4-14 TTA PG504 표준개발 현황

구분	표준 문서	완료(예정) 연도
1	TTAK.KO-12.0356, 양자 키 분배 보안 요구사항	2019

※ TTA

제4절 시사점

양자기술 관련 표준화 경향을 국내외 기구별로 분석해 보면 다음과 같다. 첫째, ITU-T 기구이다. ITU-T는 ETSI 대비 국제 표준화 착수가 늦었으나, 양자 키 분배 기술의 네트워크 구조로 표준화 연구를 착수하고 상용화를 위한 기술 표준을 꾸준히 개발한 결과, 양자암호 기술 표준화 분야에서 활발한 표준화 활동을 진행 중이다. 여기에서 한국은 양자암호 네트워크 구조와 양자암호 보안 표준을 비롯해 양자암호 서비스 품질, 양자암호 네트워크 연동과 같은 핵심 표준 의제를 지속 제시함으로써, ITU의 양자기술 표준화를 실질적으로 이끌고 있다. 그뿐만 아니라 세계 최초 양자암호 네트워크 국제표준 Y.3800을 필두로 20여 건의 양자암호 표준을 직접 개발하고 있어, 보유 역량과 리더십을 바탕으로 향후 양자컴퓨터, 양자센서, 양자네트워크, 양자인터넷 등의 후속 국제 표준화에서도 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

둘째, ETSI 기구에 관한 것이다. 유럽 회원사들을 중심으로 가장 먼저 양자암호, 특히 양자 키 분배 기술에 대한 국제 표준화에 착수했고, 시스템 기능과 시스템 간 인터페이스를 비롯해 장비 구현을 위한 표준을 충실히 개발해왔다. 유럽, 한국, 일본, 미국, 캐나다 등 양자암호 분야에서 활발한 활동을 진행 중인 국가들이 참여하고 있다.

셋째, ISO/IEC JTC1 기구이다. CC(공통평가기준, Common Criteria)를 비롯한 전통적인 보안성 시험평가 표준을 개발하는 국제기구이나, 최근 미·중 간 기술 패권 경쟁의 영향으로 양자암호 시험평가 표준개발이 느리게 진행되는 것으로 간주하고 있다. 따라서 본 표준을 참조는 하되 자체적인 시험평가 체계 확보가 유용할 것으로 보인다.

넷째, 국내 TTA 기구에 관한 것이다. 양자기술 분야 국내표준화는 ITU와 ETSI 표준의 국내 부합화 위주로 진행됐으며, 그로 인해 TTA 표준화위원회 내 여러 프로젝트 그룹에서 분산 수행된 파편적 결과에 머무르는 모습을 보여주고 있다. ITU 같은 국제표준화기구에서 양자암호 분야 표준의 선제적 제안과 개발을 한국이 주도하는 현황을 반영한다면, 국내에서 선 표준화 후 국제표준으로 제안하는 방식도 기대된다. 양자기술은 양자암호, 양자컴퓨터, 양자센서 간에 비슷한 혹은 같은 물리적 특성을 공유하고 있고, 향후 양자네트워크, 양자인터넷으로 통합되는 방향성까지 고려할 때, 이를 총괄해 수행하는 별도의 프로젝트 그룹 신설을 검토할 필요가 있다.

지금까지 양자기술에 관한 표준화는 ITU 및 ETSI 등의 국제 표준화 기구에서 먼저 진행한 후, 그 결과물을 국내 표준으로 부합화하는 순서로 진행돼왔다. 이는 국내 산학연이 국내 표준보다 국제 표준을 선제적으로 수행한 방법론에 기인하는데, 이러한 현상은 양자암호, 양자 키 분배 기술의 기술성숙도 차이와 연관이 있다. 다만 국제표준화기구에서도 양자컴퓨터나 양자센서의 경우, 이제야 표준화 방향성을 고민하는 수준에 그치고 있음을 고려할 필요가 있다. 즉 양자기술 분야별 기술성숙도의 차이로 인해, 양자암호 표준화는 ITU와 ETSI가 주도하고 있으나, 양자컴퓨터와 양자센서는 ISO/IEC JTC1과 IEEE에서 착수 준비 중이며, IRTF와 ITU는 양자인터넷 표준화를 시작하는 등 기술과 국제표준화기구에 따라 개별적으로 진행되고 있다는 점이다.

이 같은 상황은 국내 표준화를 선행한 후 국제 표준화를 실행하기에 적합한 환경으로 고려된다. 우선 양자기술을 아우르는 국내 표준화 그룹을 신설하고, 국내 전문가 간 협업을 통해 통합적 관점에서 양자기술 전반(양자컴퓨팅, 양자센서, 양자 키 분배, 양자네트워크 등)을 표준화함으로써, 국제표준화기구들보다 먼저 포괄적 범위의 양자기술 표준화를 주도할 수 있을 것이다. 물론 기존 국제표준 리더십 지속 강화를 위한 양자암호 기술 고도화 표준, 실증사업을 통한 시장요구사항 연계 양자암호 표준의 강화도 병행돼야 할 것이다. 이를 위해선 중장기 표준화 로드맵이 선결돼야 함을 주지하고, 실행을 위한 전문인력 양성과 국내외 협력 네트워크의 구축 및 운용, 그리고 국제 표준화 회의의 국내 유치를 통한 국내 산학연 생태계의 관심 제고와 정부의 지속적 지원이 요구된다.

제5장 국내외 특허 동향

양자기술 관련 국내외 특허를 분석하기 위해 총 세 가지 자료를 기반으로 재분석을 수행했다. 자료의 목록은 2021년 4월 1일 특허청에서 발표한 보도자료[71], 2021년 발표된 한국과학기술정보연구원(KISTI) Rnl Report 양자기술 보고서[72], 정보통신기획평가원(IITP)이 2021년에 발표한 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)[73]이다. 각 분석 자료의 분석 기간, 방법 및 관점이 다른 탓에 연관 있는 내용은 통합했고, 연관성이 없는 경우는 원본 데이터를 그대로 활용했다. 각 자료에 대한 조사 기준은 다음과 같다.

❶ 특허청 보도자료

특허출원 동향 분석은 특허청 심사관용 검색시스템의 국내 출원 통계와 미국 클래리베이트(Clarivate) 검색시스템의 주요국 출원 통계로부터, 2010년에서 2019년까지 전 세계 특허출원의 약 80%를 차지하고 있는 IP5(한국, 미국, 중국, 유럽(EPO), 일본)에서 출원된 양자기술 관련 특허 총 6,777건(국내 : 미공개건 포함, 해외 : 미공개건 불포함)을 추출해 분석했다. 표시된 연평균 증가율은 모든 출원이 공개된 2010년부터 2018년까지 8년간을 대상으로 분석했다.

❷ KISTI Rnl Report 양자기술 보고서

KISTI의 특허 분석은 전 세계 특허를 제공하는 LexisNexis 데이터(gpass.kisti.re.kr 활용)에서 특허 심사국 기준으로 2014년부터 2020년까지 출원된 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, 세계지식재산권기구(World Intellectual Property Organization, WIPO)의 출원 및 등록된 특허를 대상으로 분석했다. 특허를 분석하기 위해 다음과 같은 기준으로 접근했다. 우선권 번호가 통일한 특허는 하나의 특허로 집계, 양자분야 11개 세부 분야별(양자암호, 양자전송, 양자네트워크, 양자관성센서, 양자시간 측정센서, 양자자기장·전기장센서, 양자광학센서, 양자시뮬레이터, 물리양자비트, 논리양자비트, 양자알고리듬 및 SW)로 연도별·국가별·출원인별로 분석, 세부 분야별 양적 수준(건수) 및 질적 수준(평균 패밀리 특허 수)으로 산출했다. 자국에서 출원한 특허를 기초로 해외 여러 국가에 출원한 패밀리 특허 수는, 특허에 대한 시장 관점의 질적 수준 분석에 활용하기 적합하다. 또한 출원인별 분석은 건수 기준 상위 10대 출원인을 추출하고 한국의 주요 출원인은 별도로 추출했다.

❸ 정보통신기획평가원 2021년 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)

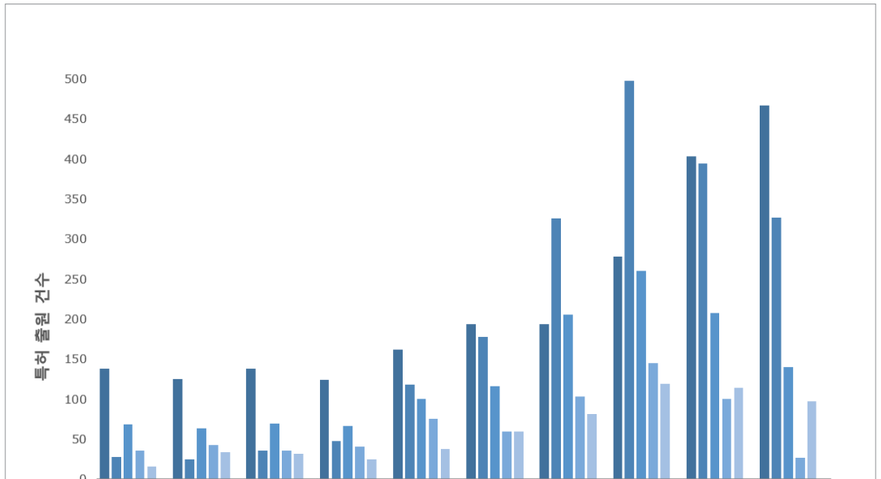
양자분야의 요소기술을 기반으로 핵심 키워드를 도출했고, 이를 바탕으로 분석 특허 모집을 위한 검색식을 작성했다. 분석 대상 특허는 2010년부터 2019년까지 출원된 한국, 미국, 일본, 유럽, 중국 특허를 대상으로 했으며, 모집단 대비 유효 특허는 39.9% 선별됐다. 특허 검색은 정보통신기획평가원이 보유하고 있는 Wintelips DB(www.wintelips.com)를 활용 검색했다.

71) 특허청 (2021)
72) KISTI (2021)
73) IITP (2021)

제1절 분석 개요

특허청의 2021년 4월 1일 보도자료에 의하면, [그림 I-5-1]과 [그림 I-5-2]에 표현한 것처럼 IP5 국가 양자기술 분야의 총출원 특허 수는 2010년 286건에서 2018년 1,219건으로 약 4배 증가했으며, 연평균 증가율은 약 19.9% 달하는 것으로 나타나고 있다. 2010~2019년까지 한국은 615건(9%)으로 미국 2,223건(33%), 중국 1,978건(29%), 유럽 1,296건(19%)과 비교했을 때 큰 격차가 났지만, 일본 665건(10%)과 비교하면 50건 정도 적은 출원 특허 수를 보였다. 한편 연평균 증가율을 살펴보면 중국과 한국의 약진이 두드러진다. 중국은 매년 약 39% 이상, 한국도 약 27% 이상의 연평균 증가율을 보이고 있는데 이는 일본과 비교 시 2배 이상의 수치다.

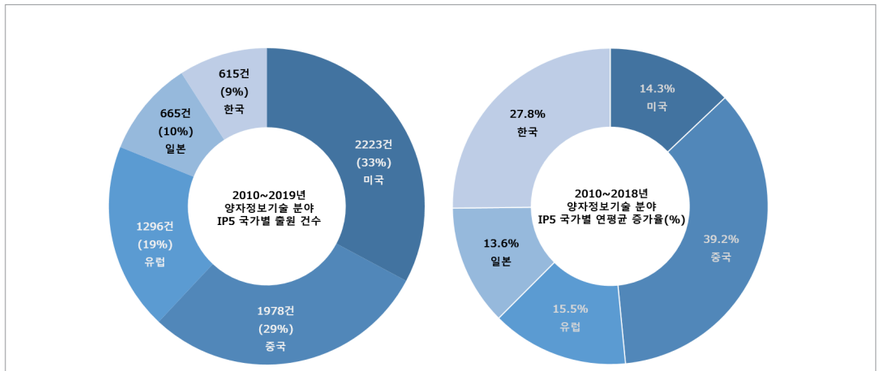
그림 I-5-1 양자기술 분야 IP5 국가별 출원 특허 수



	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
미국	138	125	138	124	162	194	194	278	403	467
중국	28	25	36	48	118	178	326	498	394	327
유럽	68	63	69	66	100	116	206	260	208	140
일본	36	43	36	41	75	59	103	145	100	27
한국	16	34	32	25	38	59	81	119	114	97
합계	286	290	311	304	493	606	910	1300	1219	1058

※ 특허청 (2021) 집필진 재구성

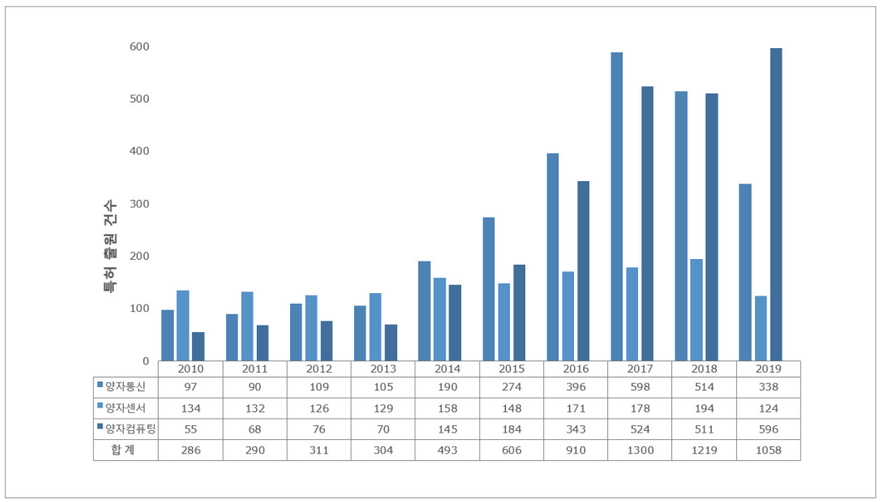
그림 I-5-2 양자기술 IP5 국가별 총출원 특허 수 및 연평균 증가율



※ 집필진 재구성

[그림 I-5-3]처럼 IP5의 2010~2019년까지 출원한 특허를 세부 기술별로 살펴보면 양자통신 2,711건, 양자컴퓨팅 2,572건, 양자센서 1,494건 순이다. 양자통신과 양자컴퓨팅 분야에 대한 특허출원이 비교적 많은 편인데, 특히 양자컴퓨팅 관련 특허출원은 매년 30% 이상 가파르게 증가하고 있다. 양자통신 분야는 2017년 이후 특허출원 수가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 특허 보호와 보안 차원에서 공개하지 않는 경우가 많은 까닭으로 추측된다. 한편 양자센서 분야는 매년 비슷한 수준의 특허출원 수를 보여주고 있다.

그림 I-5-3 세부 기술 분야별 IP5의 연도별 출원 특허 수

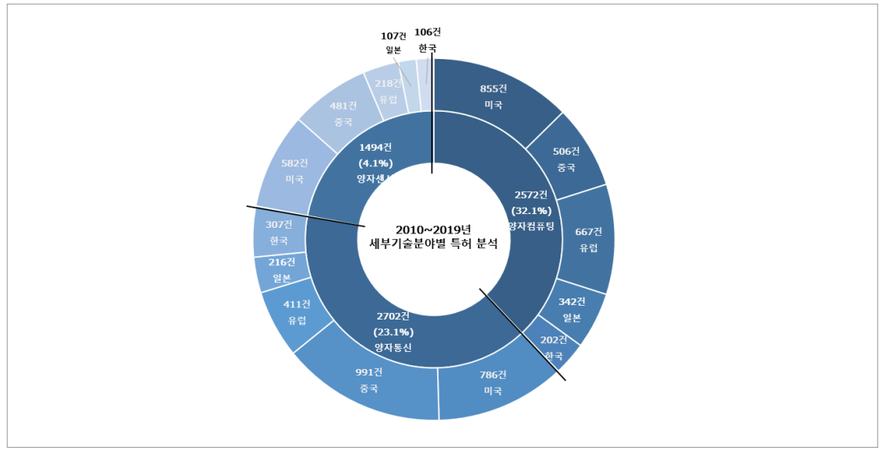


	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
양자통신	97	90	109	105	190	274	396	598	514	338
양자센서	134	132	126	129	158	148	171	178	194	124
양자컴퓨팅	55	68	76	70	145	184	343	524	511	596
합 계	286	290	311	304	493	606	910	1300	1219	1058

※ 특허청 (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-4]는 2010~2019년까지 세부 기술에 따른 국가별 특허출원 수를 보여주고 있다. 이에 따르면 2,572건(32.1%)으로 특허가 가장 많이 출원된 양자컴퓨팅 분야의 경우, 미국 855건, 유럽 667건으로 전체의 56.1%를 차지하고, 뒤를 이어 중국 506건, 일본 342건, 한국 202건으로, 같은 기간 동안 양자컴퓨팅 분야에서는 한국이 가장 적은 수의 특허를 출원했다.

그림 I-5-4 세부 기술 분야별, 국가별 특허 분석(2010~2019년)



※ 특허청 (2021) 집필진 재구성

양자통신 분야는 전체 출원의 약 23.1%(2,711건)를 차지하고 있다. 중국과 미국이 각각 991건과 786건으로 전체의 약 65.6%를 점유하고 있으며, 유럽 411건, 한국 307건, 일본 216건으로 한국이 일본보다 91건 더 출원한 것으로 분석된다. 동일 기간 1,494건(4.1%)으로 가장 적은 특허가 출원된 양자센서 분야도 앞의 두 경우와 마찬가지로 미국 582건, 중국 481건으로 전체의 61.2%를 차지하고 있으며, 유럽 218건, 일본 107건, 한국 106건으로 뒤를 따르고 있다.

KISTI의 양자기술보고서[74]는 특허청과 다른 분석 방법을 적용하고 있다. 〈표 I-5-1〉에서처럼 2014~2020년까지 양자기술 연도별 특허출원 수에 대해 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO는 총 2,817건으로, 2014년 128건에서 2019년 726건으로 연평균 약 41%씩 증가하는 것으로 분석된다. 다만 2020년은 특허출원 후 공개되기까지 보통 1.5년이 걸리고 의도적으로 공개를 지연하는 사례도 있으므로, 다른 해에 비해 상대적으로 특허출원 수가 적은 것으로 보인다.

74) KISTI (2021)

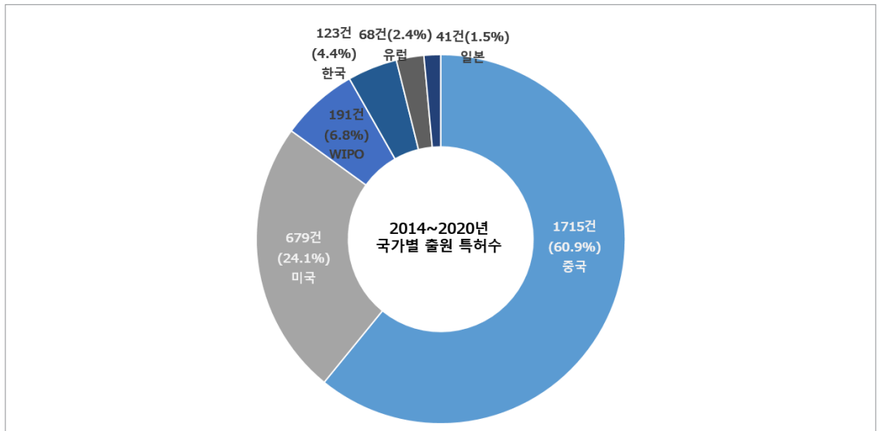
표 I-5-1 양자기술 분야 연도별 출원 특허 수

년도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
건수	128	117	256	451	674	726	405	2,817

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-5]는 2014~2020년까지 양자기술 분야 출원 특허 수를 국가별로 분석한 것이다. 이에 따르면 중국 1,715건으로 전체 출원 특허 수의 60.9%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 이어 미국이 679건으로 뒤를 따르고 있다. 중국과 미국의 출원 특허 수가 전체의 85%를 차지해, 다른 4개국 출원 수의 약 4.4배 이상으로 압도적인 비중을 보여주고 있다. 〈표 I-5-2〉처럼, 같은 기간 출원 특허 수의 상위 10위 출원인 국적을 확인해보면, [그림 I-5-5]에서처럼 중국이 미국의 약 2.5배 규모이며 한국에 비해서도 10배 이상인 것을 확인할 수 있다.

그림 I-5-5 양자기술 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

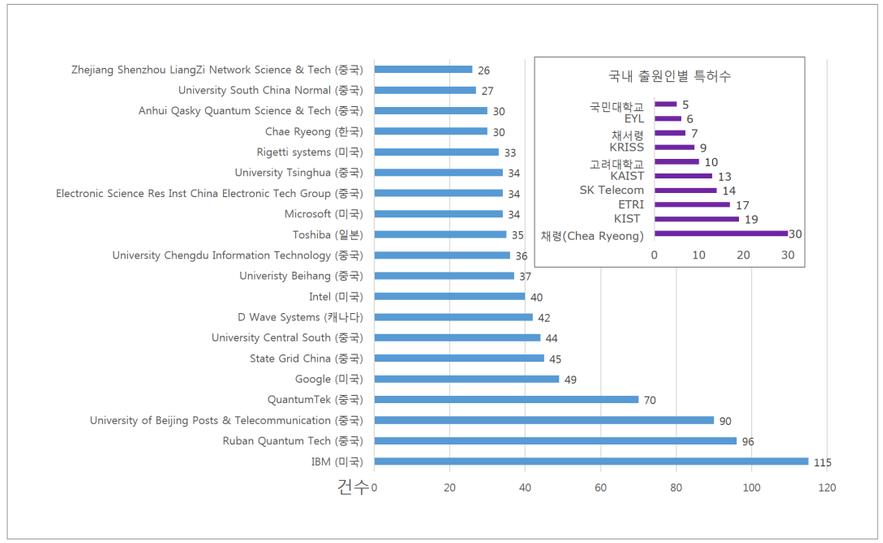
표 I-5-2 양자기술 분야 상위 10위 출원인 국적별 출원 특허 수(2014~2020년)

국가	중국	미국	한국	일본	캐나다	독일	영국	프랑스	스위스	호주
건수	2,042	632	184	105	66	34	32	24	16	10

※ KISTI (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-6]은 2014~2020년까지 양자기술 출원인별 특허 수를 보여주고 있다. 국내외 상위 20위의 출원인 중 미국 IBM 115건, 중국 Ruban Quantum Tech 96건, University of Beijing Posts & Telecommunication 90건 순으로 나타나며, 상위 20대 출원인에 한국의 개인으로 추정되는 채령이 30건의 특허를 출원했다. 국내 출원인 상위 10위 중에서는 KIST, ETRI, SK Telecom이 뒤를 이어 각각 19건, 17건, 14건의 출원 특허 수를 기록했다.

그림 I-5-6 양자기술 분야 출원인별 국내외 출원 특허 수 (2014년~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

특허청과 KISTI의 특허 분석 결과를 비교하면, 두 기관의 분석 기준에 따라 출원 수나 출원국의 순위에 다소 변동이 있다. 하지만 중국 특허 수의 급격한 연평균 증가율과 전체 특허의 과반이 미국과 중국으로부터 출원되고 있음은 공통으로 나타나고 있다. KISTI의 분석 결과를 바탕으로 한국이 출원한 특허의 세부 분야별 특징을 살펴보면, 양자 시간 측정센서 분야에서는 특허 수(0.44)가 많아 1등 국가 대비 양적 수준이 비교적 우수한 편이었고, 질적 수준을 의미하는 평균 패밀리 특허 수에서도 한국이 1등이었지만, 그 외 다른 분야는 대부분 취약한 것으로 나타났다. 다만 질적 수준에서는 양자알고리듬 및 SW, 양자네트워크, 양자시뮬레이터, 양자 시간 측정센서, 양자전송, 양자광학센서 분야에서 1등 국가 대비 0.5 이상의 값을 보여 상대적으로 우수한 분야로 확인됐다.[75)]

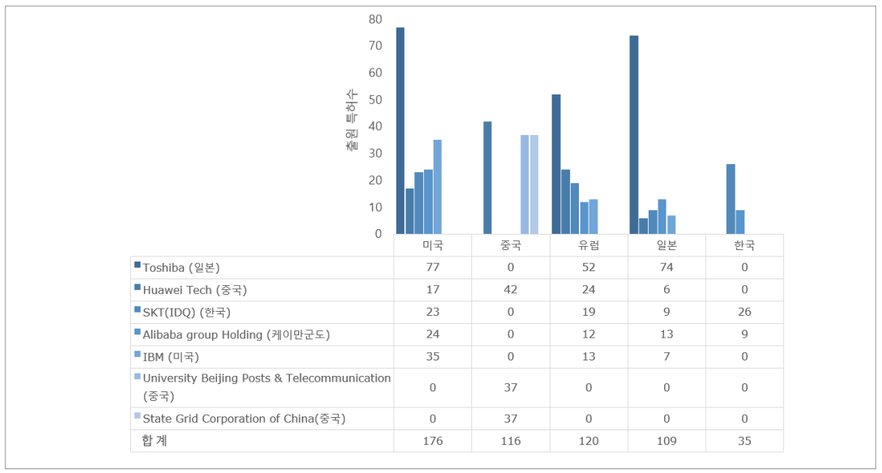
75) KISTI (2021)

제2절 양자통신 분야

양자통신은 송신자와 수신자 사이에 단일 광자 또는 공유된 얽힘(Entanglement)에서, 고전 통신 기술의 도움으로 광자 또는 원자의 상태와 같은 양자정보를 전달하는 기술을 의미한다. 양자통신 세부 분야로는 양자암호, 양자전송, 양자네트워크를 꼽을 수 있다.[76)] 특허청의 경우 양자통신 분야를 양자암호통신 분야로 정의하고 출원 특허에 대한 분석을 수행했다.[77)]

[그림 I-5-3]처럼 2010~2019년까지 IP5의 양자(암호)통신 분야 총 출원 특허 수는 2,711건으로 중국 991건, 미국 786건, 유럽 411건, 한국 307건, 일본 216건이다. [그림 I-5-7]은 주요 출원인과 그 점유율을 비교해 나타냈다. 이에 따르면, 일본 Toshiba가 총특허 수 203건(7.4%)으로 가장 높은 점유율을 기록했으며, 이어 중국 Huawei Tech 89건(3.2%), 한국 SKT(IDQ) 77건(2.8%), 케이만군도 Alibaba group Holding 58건(2.1%), 미국 IBM 55건(1.9%), 중국 University Beijing Posts & Telecommunication와 State Grid Corporation of China가 각각 37건(1.3%)씩 특허를 출원하고 있다. 상위 7개 기업의 총출원 특허 수는 556건으로 양자(암호)통신 분야의 20.6%를 차지하고 있다. 또한 주요 출원인의 출원 동향과 점유율을 비교하면, Toshiba는 미국과 일본에서, Huawei Tech는 중국, SKT(IDQ)는 미국과 한국, Alibaba group Holding은 미국에 주로 출원하고 있음을 알 수 있다.

그림 I-5-7 양자통신 분야 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율(2010~2019년)



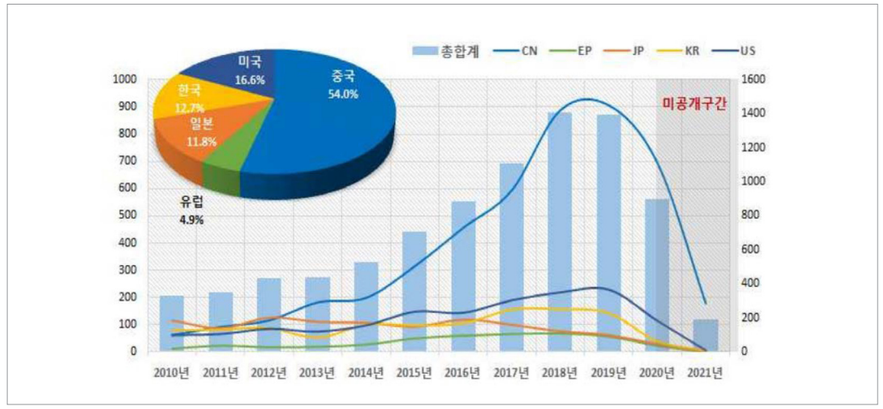
	미국	중국	유럽	일본	한국
Toshiba (일본)	77	0	52	74	0
Huawei Tech (중국)	17	42	24	6	0
SKT(IDQ) (한국)	23	0	19	9	26
Alibaba group Holding (케이만군도)	24	0	12	13	9
IBM (미국)	35	0	13	7	0
University Beijing Posts & Telecommunication (중국)	0	37	0	0	0
State Grid Corporation of China(중국)	0	37	0	0	0
합 계	176	116	120	109	35

※ 특허청 (2021) 집필진 재구성

76) KISTI (2021)
77) 특허청 (2021)

정보통신기획평가원의 양자통신 분야 특허 조사는 2010년부터 2021년까지 진행됐으며, 출원된 유효 특허는 총 8,674건이다.[78] 다만 특허 분석을 위해 전체 기간을 2010~2014년까지 구간과 2015~2019년까지의 두 구간으로 나눴다. 특허출원까지 평균 1.5년 정도 소요되는 것을 고려하면 2020년과 2021년의 출원 특허 수는 실제와 차이가 있을 수 있으므로, 미공개 구간으로 구분해 총 출원 특허 수를 제외한 전체 분석에서는 배제했다. 정보통신기획평가원에서 제공한 [그림 I-5-8]을 보면, 중국 특허의 비중이 54.0%를 차지하며 2018년까지 증가하다가 2019년부터는 감소하는 경향을 보인다. 미국 16.6%, 한국 12.7%, 유럽 4.9%의 점유율을 보이며 2019년까지 꾸준한 증가 추세지만, 점유율 11.8%의 일본은 2016년 이후로 출원 특허 수가 감소하는 것으로 나타났다.

그림 I-5-8 양자통신 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율



※ IITP (2021)

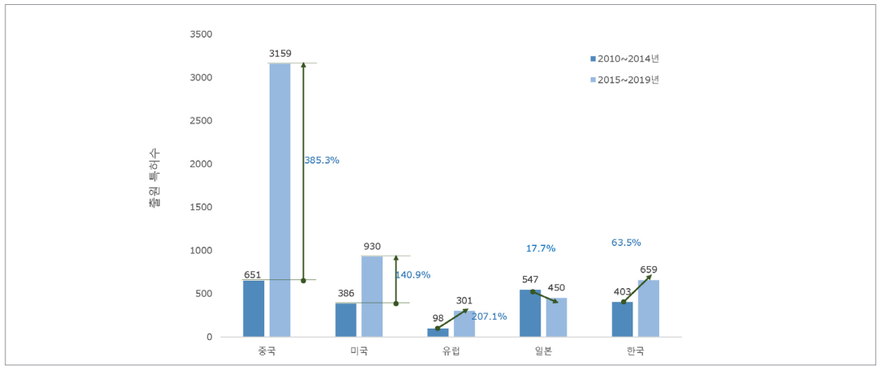
특히 양자통신 분야의 출원 특허 수는 양자분야 전체의 약 59.5%를 차지할 정도로 많으며, 2010~2014년까지 53.5%였던 점유율이 2015~2019년에 62.1%로 약 8.6% 증가해 양자통신 분야의 특허출원이 비교적 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

[그림 I-5-9]는 특허출원 증가율을 2010~2014년과 2015~2019년의 기간 동안 비교한 결과를 보여준다. 이에 따르면 2010~2014년 대비 2015~2019년 특허출원 수가 2,085건에서 5,499건으로 약 163.7%의 증가율을 보이며, 국가별로는 중국 특허의 증가율이 385.3%, 유럽 특허가 207.1%를 기록해 큰 폭으로 늘어난 것이 확인된다.[79] 같은 기간 미국과 한국도 각각 140.9%, 63.5%의 증가율을 보여줬는데, 반면 일본은 오히려 감소율 17.7%를 나타내고 있다. 전체 특허 수의 50.5%를 차지하는 중국은

78) IITP (2021)
79) IITP (2021)

2015~2019년까지 양자통신 분야에 상당수의 특허를 출원해 관련 분야에 연구를 집중하고 있는 것으로 보인다.

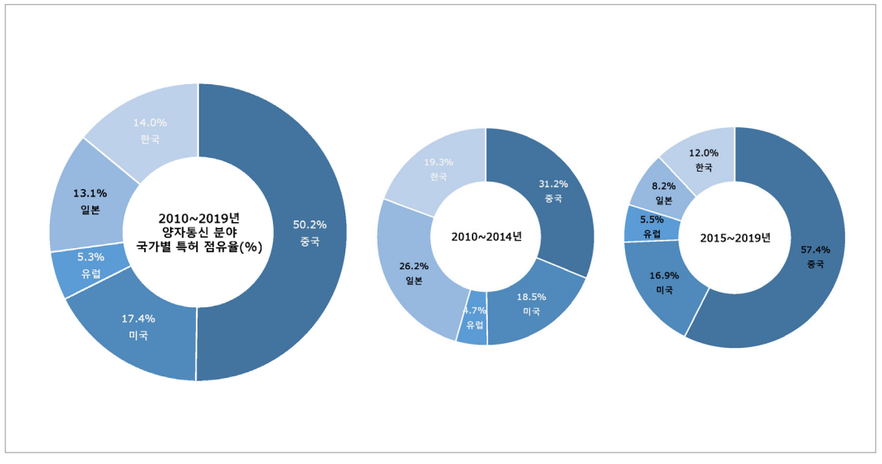
그림 I-5-9 양자통신 분야 국가별 특허 증가율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-10]에서처럼, 국가별 특허 점유율을 살펴보면 중국이 큰 비중을 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 2010~2014년 특허출원 비중을 보면 중국 31.2%, 일본 26.2%, 한국 19.3%, 미국 18.5%, 유럽 4.7%의 점유율을 나타냈으며, 2015~2019년 특허출원 비중에선 중국이 57.4%를 차지해 최근 양자통신 분야의 특허출원을 중국이 주도하고 있는 것으로 나타났다.

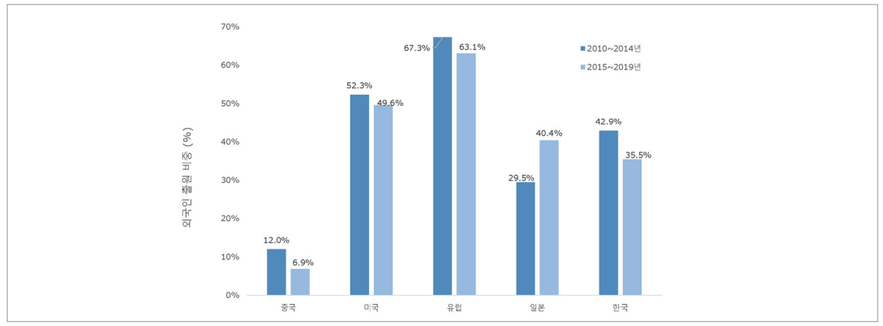
그림 I-5-10 양자통신 분야 국가별 특허 점유율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

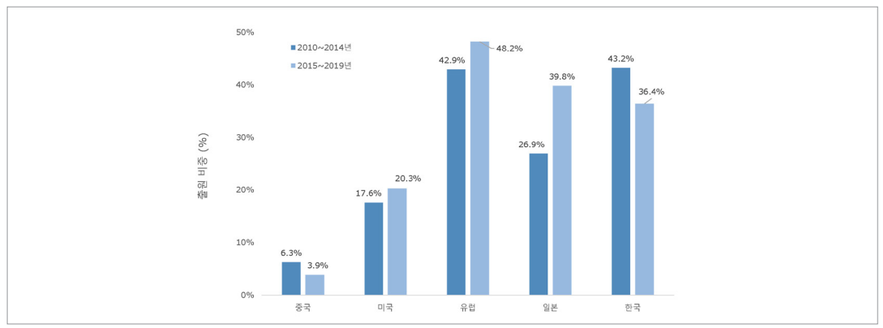
정보통신기획평가원은 시장 확보력을 살펴보기 위해 외국인 출원 비중 분석을 활용하고 있다. [그림 I-5-11]에 의하면 한국, 미국, 유럽, 중국은 2010~2014년에 외국인 출원 비중이 높았고, 반대로 일본은 2015~2019년에 외국인 출원 비중이 높은 것으로 나타나고 있다. [그림 I-5-12]가 표현한 것처럼, 양자통신 분야 IP5 각국에서 자국을 제외한 다른 IP4가 확보한 특허 현황을 살펴보면, 한국과 중국은 2010~2014년에 IP4의 특허 비중이 높았고, 미국, 일본, 유럽은 2015~2019년에 IP4의 특허 비중이 높은 것으로 나타났다.[80] 특히 유럽에서 IP4 특허 비중이 높아 중국, 미국, 일본, 한국이 특허를 많이 출원하고 있는 것으로 보이고, 중국에서는 IP4 특허 비중이 매우 낮아 유럽, 미국, 일본, 한국의 중국 내 특허 비중이 높지 않은 것으로 보인다. 즉, 양자통신 분야에서 높은 특허 점유율을 가진 중국의 경우, 자국 내 출원 특허 비중이 대다수를 차지하고 있음을 알 수 있다.

그림 I-5-11 양자통신 분야 국가별 외국인 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

그림 I-5-12 양자통신 분야 국가별 IP4 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

80) IITP (2021)

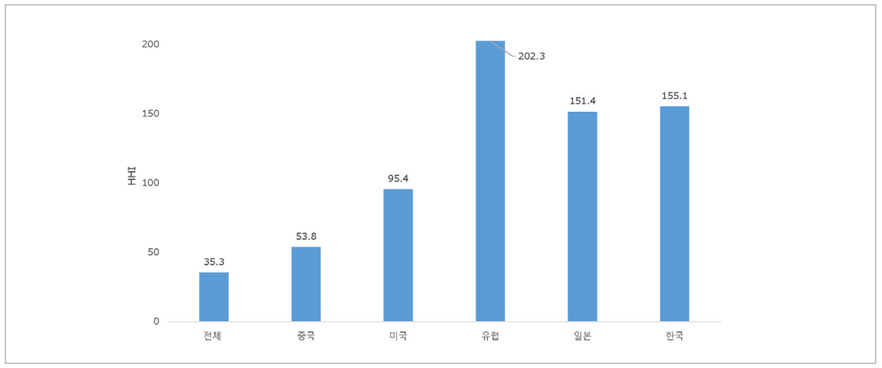
산업에서 시장 집중 정도를 측정하는 대표적인 지수 중 하나인 HHI(Herfindahl- Hirschman Index)는 〈표 I-5-3〉에서처럼 범위에 따라 집중 수준을 나눌 수 있다. 양자통신 분야의 HHI는 [그림 I-5-13]에서처럼 전체가 35.3으로 집중 수준이 매우 낮은 완전 자유경쟁 시장으로 분석된다. 국가별 HHI를 살펴보면 미국, 중국은 100 미만으로 완전 자유경쟁 시장에 해당해 시장진입 용이성이 매우 높고, 한국과 일본 그리고 유럽은 HHI가 100~1,000으로 집중화 정도가 거의 없는 시장에 해당해 시장진입 용이성이 높은 편으로 분석되고 있다.

표 I-5-3 HHI 범위에 따른 집중 수준

분석항목	HHI 범위	경쟁 강도	집중 수준(시장진입 용이성)
완전 자유경쟁 시장	0~100	이론상에만 존재	매우 낮음(매우 높음)
집중화 정도가 거의 없는 시장	100~1,000	구매자 우위의 높은 경쟁 강도	중간~낮음(높음)
경쟁적 시장	1,000~1,800	규제당국이 목표로 하는 경쟁 강도	보통(보통)
과점적 시장	1,800~4,000	공급자 우위의 낮은 경쟁 강도	중간~높음(낮음)
독점적 시장	4,000 이상	독점적 경쟁우위 출현	매우 높음(매우 낮음)

※ IITP (2021) 집필진 재구성

그림 I-5-13 양자통신 분야 국가별 HHI(2010~2019년)

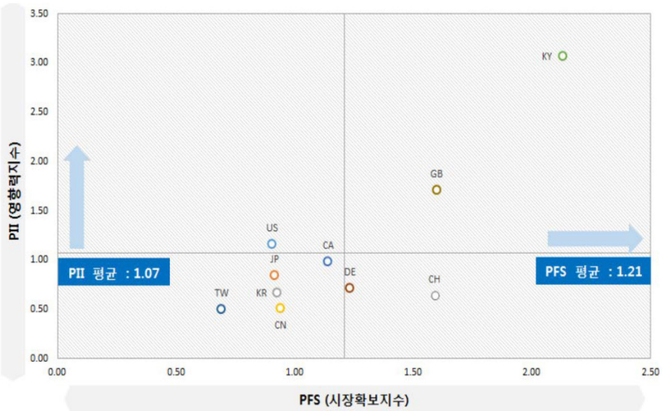


※ IITP (2021) 집필진 재구성

출원인 국적별 포트폴리오는 영향력지수(PII)와 시장확보지수(PFS)의 국적별 수치를 검토해, 국적별 기술 영향력 및 시장 확보력을 종합적으로 분석하는 방법이다. 이때 PII는 미국 등록 특허를 대상으로 분석해 특정 주체의 피인용도지수(CPP)를 전체 등록 특허의 피인용도로 나눈 값, PFS는 미국 등록 특허를 대상으로 분석해 특정 주체의 평균 패밀리 국가 수를 전체평균 패밀리 국가 수로 나눈 값으로

정의한다.[81] [그림 I-5-14]에서 보듯이 양자통신 분야에서 특허출원인의 국적 상위 10개를 기준으로, PII가 평균 이상으로 높은 곳은 케이만군도, 영국, 미국이며, PFS가 평균 이상으로 높은 곳은 스위스와 독일이다. 종합적으로 보면, 케이만군도와 영국 국적 출원인 특허의 PII, PFS가 모두 평균보다 높은 것으로 나타나 기술 영향력 및 시장 확보력을 모두 갖췄다고 볼 수 있다. 대만, 중국, 한국, 일본, 캐나다 국적의 출원인 특허는 PII와 PFS가 모두 평균보다 낮아 기술 영향력과 시장 확보력이 미비한 것으로 보인다.

그림 I-5-14 양자통신 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년)



CA : 캐나다, CH :스위스, CN : 중국, DE : 독일, GB : 영국, JP : 일본, KR : 한국,
KY : 케이만 군도, TW : 대만, US : 미국

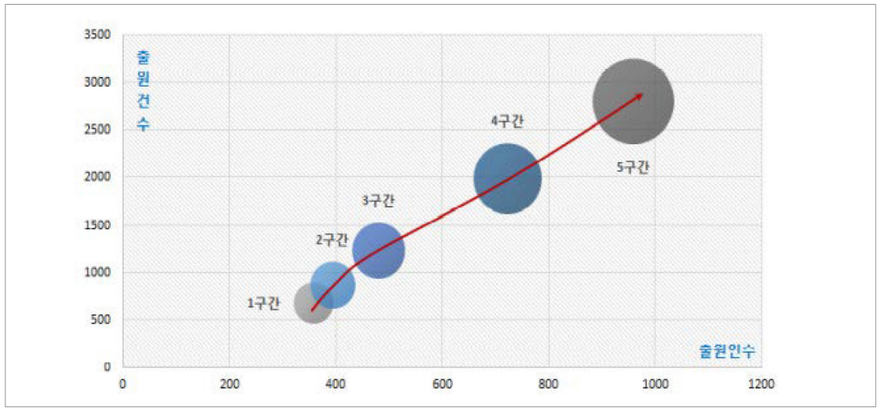
※ IITP (2021)

정보통신기획평가원의 분석 결과에 의하면, 양자통신 분야 미국 특허 기반의 2010~2014년과 2015~2019년 청구항을 기준으로 주요 키워드를 추출한 결과, 양자 상태(Quantum State), 광원(Light Source), 양자점(Quantum Dot) 등의 키워드는 전 기간에 걸쳐 모두 주요 키워드로 도출됐다. 양자 키 분배(Quantum Key Distribution), 양자프로세스(Quantum Process), 조지프슨 접합(Josephson Junction) 등의 키워드는 2014년까지 드러나지 않다가 2015년 이후 주목받는 것으로 보인다. 양자통신 분야는 양자역학적 특성을 통신에 적용하기 위해 양자상태를 생성, 제어, 측정 및 분석하는 다양한 기술 요소가 기본이라고 볼 수 있으며, 최근에는 양자 키 분배, 양자암호기술, 양자프로세스, 접합 방법 등의 기술이 좀 더 주목받고 있다.

81) IITP (2021)

[그림 I-5-15]에서처럼 양자통신 분야의 전체 특허를 2년씩 출원 구간 기준(1구간 : 2010~2011년, 2구간 : 2012~2013년, 3구간 : 2014~2015년, 4구간 : 2016~2017년, 5구간 : 2018~2019년)으로 나눠 출원 건수 및 출원인 수를 살펴보면, 전 구간에 걸쳐 출원인 수와 출원 건수가 모두 증가하고 있어 성장기 단계에 있는 것으로 보인다. 이러한 성장기 단계의 특징으로는, 출원 특허 건수와 출원인 수의 빠른 증가 외에 해당 분야 R&D의 급격한 증가, 경쟁의 격화를 들 수 있다.

그림 I-5-15 양자통신 분야 기술시장 성장단계(2010~2019년)



※ IITP (2021)

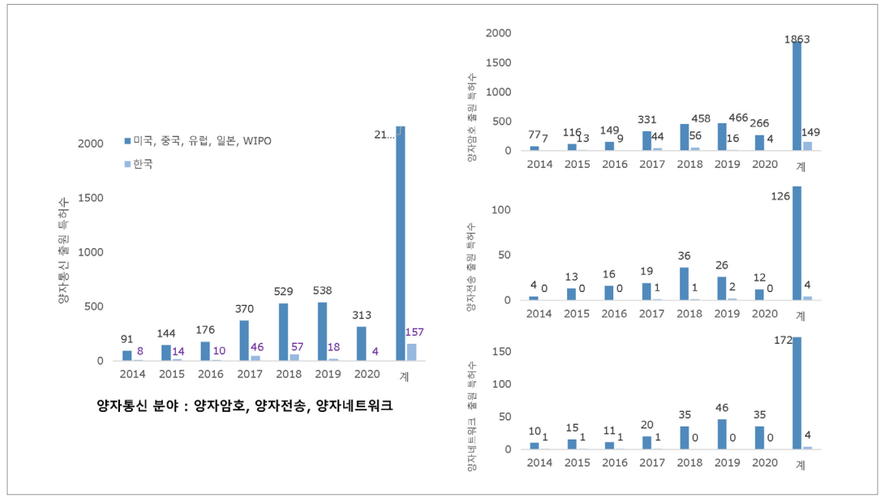
2014년부터 2020년까지의 특허를 분석한 KISTI의 2021년 양자기술 보고서는, 한국에서 출원된 총 157건 및 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO에서 출원된 양자통신 분야 관련 특허를 연도별 그리고 특허출원 수 상위 5개의 국가별로 분석하고 있다.[82] [그림 I-5-16]은 2014~2020년까지 양자통신 분야에서 출원된 특허 수 총 2,318건 중 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 2,161건과 한국 157건의 연도별 출원 추이를 나타내고 있다. 또한 KISTI는 양자통신 분야를 양자암호, 양자전송, 양자네트워크로 나눠 각각 출원 특허 수를 조사했다. 다만 보고서 출판일이 2021년임을 고려해 2020년 출원 특허 수 317건은 전체 추이 분석 결과에서 제외했다.

분석 결과에 의하면, 2019년까지 양자통신 분야에서 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 한국의 경우 2018년까지 증가하다가 2019년에는 전년 대비 1/3로 감소한 것을 알 수 있다. 양자통신 세부 분야별 출원 특허 추이를 보면, 양자암호 분야가 전체 2,012건으로 93%를 차지했고, 양자네트워크 분야는 176건, 양자전송 분야는 130건을 각각 출원했

82) KISTI (2021)

다. 양자암호와 양자네트워크의 출원 특허 수는 2019년까지 증가하는 경향을 보이지만, 양자전송은 2018년 대비 27% 감소하는 것으로 나타났다. 한국은 양자암호 분야에서 꾸준히 특허를 출원하고 있으나, 2019년엔 16건으로 2018년 대비 40건 감소했으며, 양자전송과 양자네트워크 분야는 연간 1건 내외로 출원하고 있으나 미출원한 해도 확인된다. 또한 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO 대비 출원 수가 급격히 감소했음을 알 수 있다.

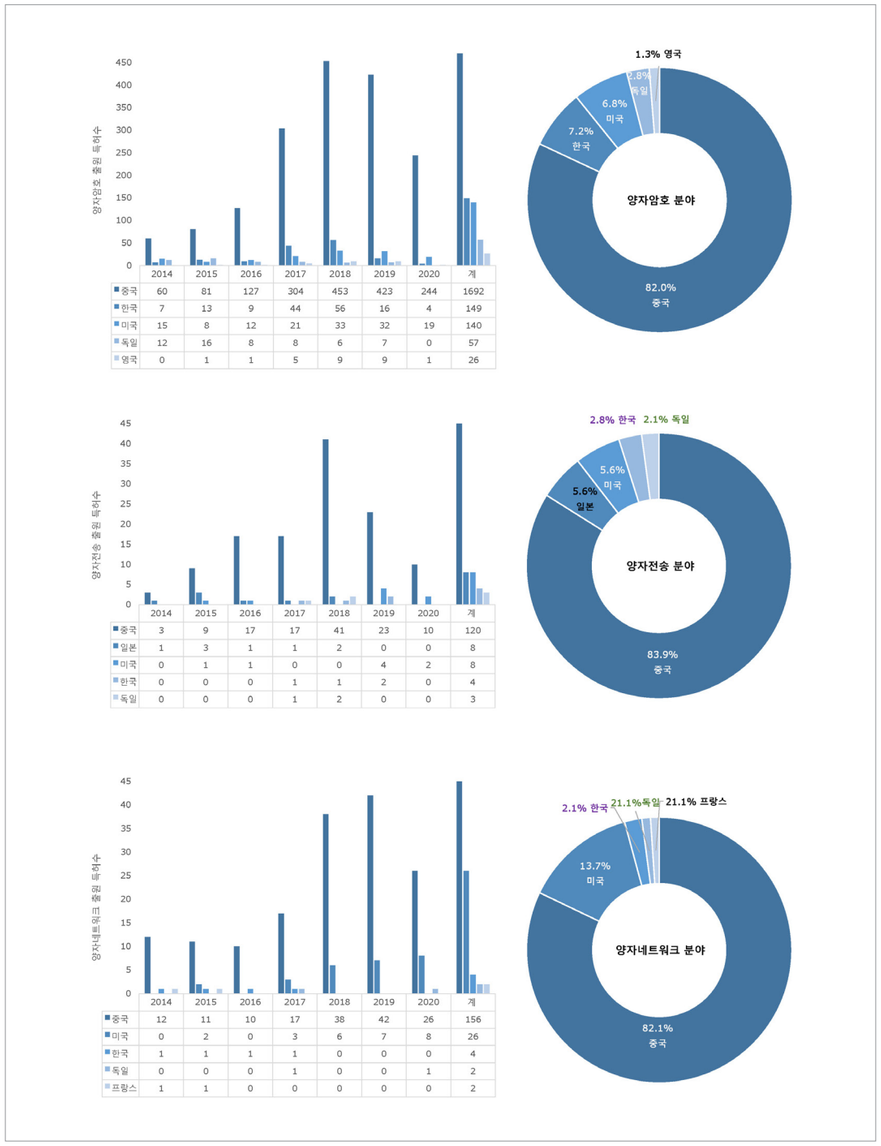
그림 I-5-16 양자통신 분야 출원 특허 수(2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

분야별 출원 특허 수 상위 5개국의 연도별 추이를 살펴보면 [그림 I-5-17]과 같이 나타낼 수 있다. 2014~2019년까지 양자통신 전 분야에 걸쳐 중국의 특허출원 비율은 80% 이상으로, 중국 외 상위 4개국의 총출원 특허 수보다 월등히 많은 것을 알 수 있다. 한국, 미국, 중국은 2014년부터 2018년까지 출원 특허 수가 지속 증가하는 양상을 보이다가 2019년에는 전체적으로 감소 추세를 나타내고 있다. 이는 두 가지 경우로 추측 가능한데, 기술 유출 방지를 위해 특허를 미공개하는 경우와 심사를 받느라 미처 공개하지 못한 경우로 해석된다. 따라서 2019년 특허 추이를 정확히 확인하기 위해서는 2022년 기준으로 다시 분석할 필요가 있다. 한편 중국의 경우, 양자기술 분야에서 특허 확보를 위해 지속적인 노력을 하고 있다는 것을 분석 결과를 통해 확인 가능하며, 이는 정보통신기획평가원에서 분석한 것과 유사한 결과이다.

그림 I-5-17 양자통신 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

특허의 질적 수준 평가 기준이 되는 패밀리 특허 수는 〈표 I-5-4〉를 통해서 확인할 수 있다. 평균 패밀리 특허 수가 가장 높은 나라는 일본으로 전 분야에 걸쳐 높게 나타나며, 중국은 양자암호, 한국과 독일은 양자네트워크, 미국은 양자전송 분야에서 각각 높은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다.

표 I-5-4 양자통신 분야 국가별 출원 특허 수 (2014~2020년)

국가	합계		양자암호		양자전송		양자네트워크	
	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수
중국	1,970	2.7	1,694	2.9	120	1.6	156	1.5
한국	174	2.5	140	2.6	8	1.6	26	2.7
미국	157	2.1	149	2.1	4	2.5	4	1.2
일본	67	3.3	57	3.1	8	4	2	5.5
독일	31	1.6	26	1.6	3	1.3	2	2

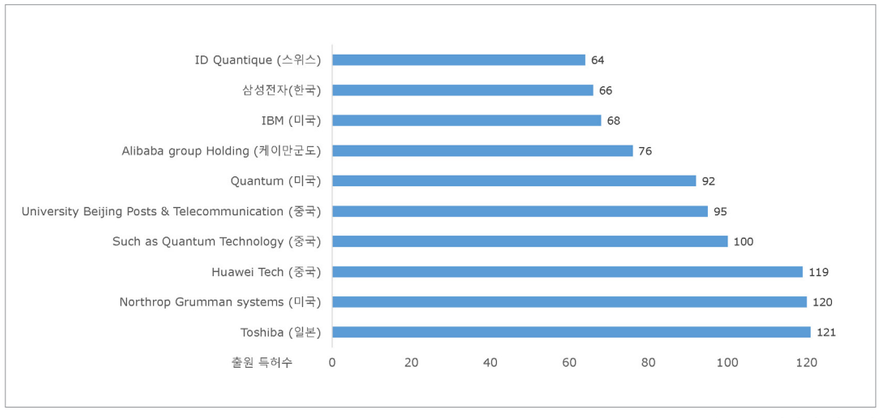
※ KISTI (2021)

양자통신 분야의 출원인별 분석은 통계청, 정보통신기획평가원, KISTI의 분석 결과로부터 확인할 수 있다. 서두에서 언급한 것처럼, 각 기관의 분석 과정에서 쓰인 기준이 상이하므로 분석 결과도 서로 조금씩 다르게 나타난다. [그림 I-5-7]의 통계청 자료에 의하면,[83] 2010~2019년까지 양자(암호)통신 분야의 주요 출원인은 일본 Toshiba 203건(7.4%), 중국 Huawei Tech 89건(3.2%), 한국 SKT(IDQ) 77건(2.8%), 케이만군도 Alibaba group Holding 58건(2.1%) 등으로 이들 4개 기업이 전체 출원의 15.5%를 차지하고 있으며, 특히 Toshiba는 미국, 유럽, 일본에 가장 많은 특허를 출원했고, 한국에서는 SKT(IDQ)가 가장 많은 특허를 출원했다.

[그림 I-5-18]의 정보통신기획평가원 분석 결과에 의하면, 2010~2019년까지 주요 출원인으로 일본 Toshiba(121건), 미국 Northrop Grumman systems(120건), 중국 Huawei Tech(119건)를 들 수 있으며, 한국은 삼성전자(66건)가 상위 10위권 출원인에 이름을 올렸다. Toshiba는 2010~2014년에 양자통신 디바이스, 양자통신 방법, 양자통신 시스템 등에 대해, 2015~2019년에는 양자 키 분배 디바이스, 양자 키 분배 시스템, 양자 키 분배 방식 등에 대해 출원했다.[84] 특허청과 정보통신기획평가원의 조사 결과에 의하면, 수치는 다소 상이하나 Toshiba가 양자통신 분야에서 제일 많은 특허를 출원하고 있음을 알 수 있으며, Huawei Tech와 Alibaba group Holding도 상위 10위권에서 공통으로 나타나고 있다. 한국의 경우, 특허청은 SKT(IDQ)가 77건으로 상위 출원자에 포함돼 있지만, 정보통신기획평가원은 삼성전자만 66건으로 나타내고 있어, 한국 상위 출원인을 분석한 결과는 서로 다르게 나타났다.

83) 특허청 (2021)
84) IITP (2021)

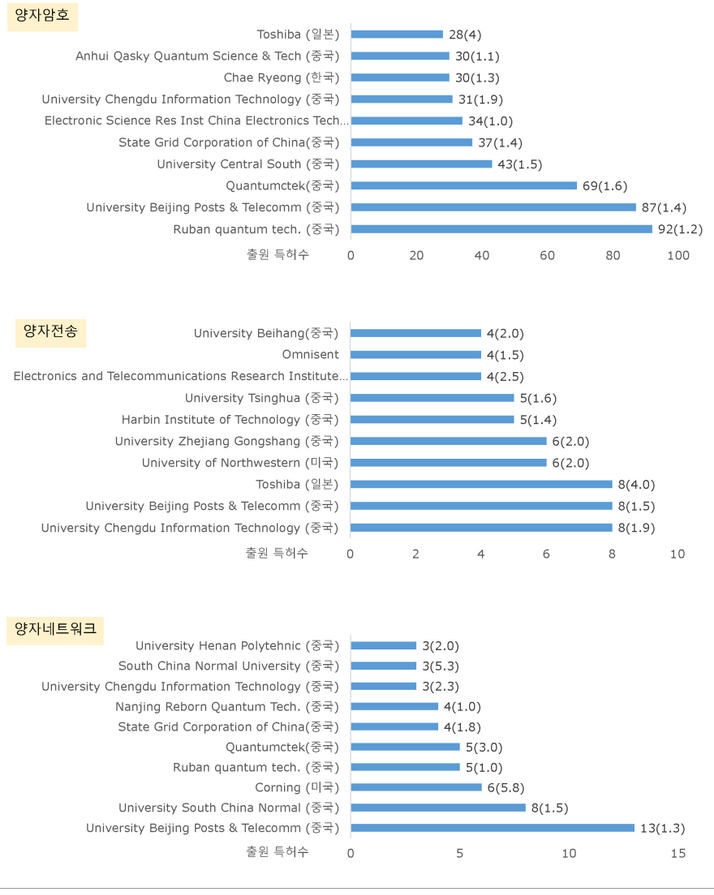
그림 I-5-18 양자통신 분야 주요 출원인 및 출원 건수(2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

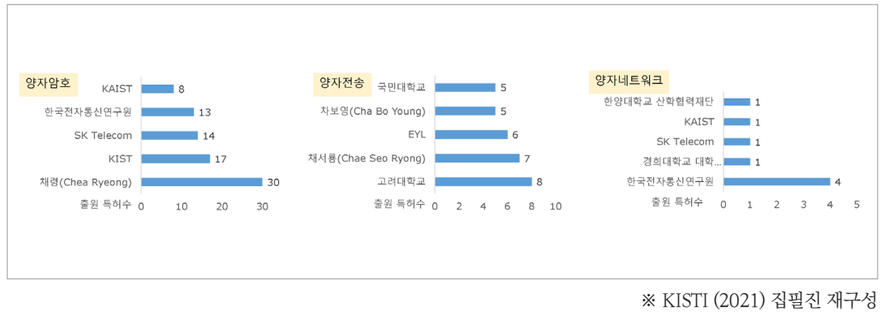
KISTI는 2014~2020년까지 양자통신 전 분야에 대한 출원인별 분석 대신, 세부 분야 출원인별 분석 결과를 제공했다. [그림 I-5-19]에서 보는 것처럼 세부 분야 출원인별 특허에 대해서 분석했고, 각 숫자는 출원 특허의 개수이며 괄호 안의 숫자는 패밀리 특허 수를 나타낸다. 분석 결과에 의하면, 각 세부 분야별로 출원인의 국적이 중국인 경우가 대다수임을 알 수 있다. 이 분석 결과는 앞서 살펴본 특허청과 정보통신기획평가원의 분석 결과와 다름을 알 수 있다. Toshiba의 양자암호와 양자전송 특허 수는 상위 10위 안에 포함돼 있으나, 그 수는 2010~2019년의 기간에 비해 적고 상대적으로 중국이 차지하는 비율은 더 큰 것으로 확인된다. 한국은 개인으로 판단되는 채령(Chae Ryeong)이 양자암호 분야에서 상위 10위 안에 포함됐으며, 2022년까지도 특허출원을 지속하고 있다. 그 외에 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI)이 양자전송 분야에서 4건의 특허를 출원하고 있다. 양자전송 분야 Omnisent의 경우 출원인의 국적이 확인되지 않는다. 양자통신 분야의 국내 출원인별 세부 분야 출원 특허 수를 보면, [그림 I-5-20]에 묘사한 것처럼 출원인 중 일부는 상위 10위 안에 속하는 출원 특허 수를 보유하고 있으나, [그림 I-5-18]에서는 명시돼 있지 않다. 또한 양자전송 분야에서 고려대학교가 다수의 특허를 출원하고 있으며, 채서룡과 차보영이라는 개인도 다수의 특허를 출원하고 있다.

그림 I-5-19 양자통신 세부 분야 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

그림 I-5-20 양자통신 분야 국내 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년)



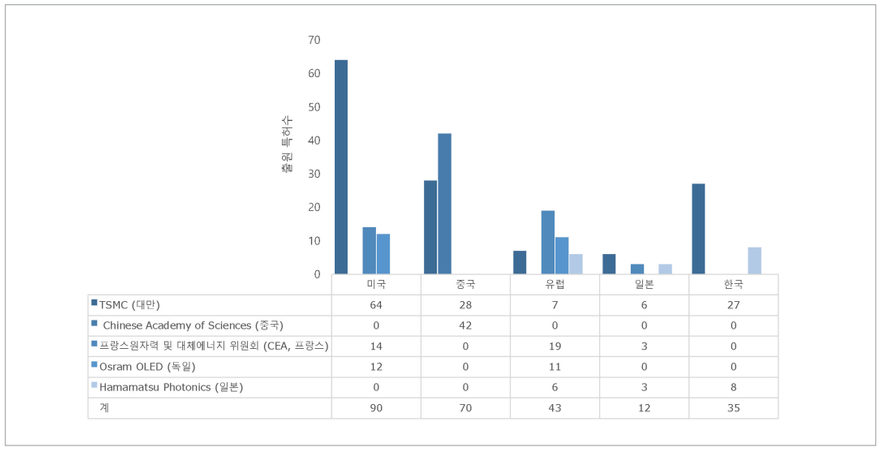
※ KISTI (2021) 집필진 재구성

제3절 양자센서 분야

양자센서 분야는 양자원리를 활용함으로써 고전 시스템을 사용한 센서 기술의 분해능, 민간도, 측정영역의 한계를 극복하는 기술 분야로, 양자관성센서, 시간측정 센서, 자기장·전기장 센서, 광학 센서 등을 포함하고 있다.[85)]

[그림 I-5-3]과 [그림 I-5-4]처럼 2010~2019년까지 IP5의 양자센서 분야 총출원 특허 수는 1,494건으로 미국 582건, 중국 481건, 유럽 218건, 일본 107건, 한국 106건이다. [그림 I-5-21]은 주요 출원인과 그 점유율을 비교해 나타냈다. 이에 따르면, 파운드리 반도체 선도 기업인 대만 TSMC가 총특허 수 132건(8.8%)으로 가장 높은 점유율을 보여주고 있으며, 이어 중국 Chinese Academy of Sciences 24건(2.8%), 프랑스 CEA 36건(2.4%), 독일 Osram OLED 23건(1.5%), 일본 Hamamatsu Photonics 17건(1.1%)으로 특허를 출원하고 있다. 상위 5개 기업이 출원한 총특허 수는 250건으로 양자센서 분야의 20.0%를 차지하고 있다. 또한 주요 출원인의 출원 동향과 점유율을 비교하면, TSMC는 미국·중국·한국에서, Chinese Academy of Sciences는 중국, CEA는 미국·유럽·일본, Osram OLED는 미국·유럽, Hamamatsu Photonics는 유럽·일본·한국에서 주로 출원하고 있다.

그림 I-5-21 양자센서 분야 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율(2010~2019년)



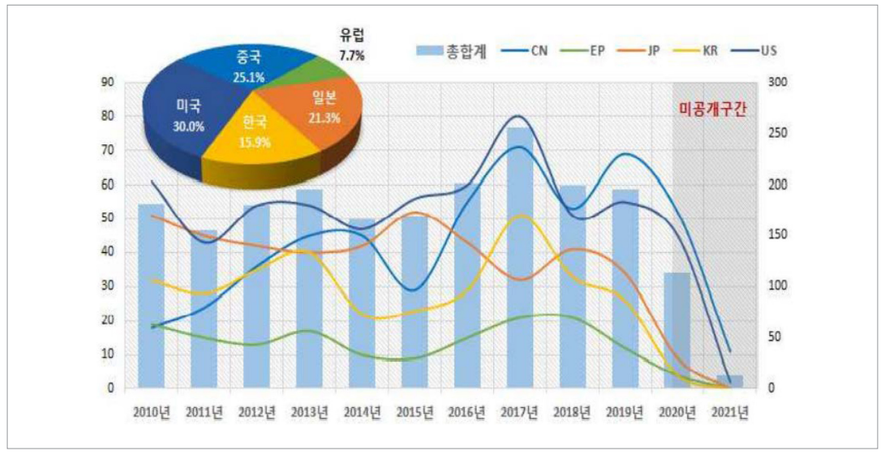
	미국	중국	유럽	일본	한국
TSMC (대만)	64	28	7	6	27
Chinese Academy of Sciences (중국)	0	42	0	0	0
프랑스원자력 및 대체에너지 위원회 (CEA, 프랑스)	14	0	19	3	0
Osram OLED (독일)	12	0	11	0	0
Hamamatsu Photonics (일본)	0	0	6	3	8
계	90	70	43	12	35

※ 특허청 (2021) 집필진 재구성

85) KISTI (2021)

정보통신기획평가원에서 실시한 양자센서 분야의 특허 조사는 2010년부터 2021년까지 진행됐으며, 출원된 유효 특허는 총 2,026건이다.[86] 정보통신기획평가원에서 제공한 [그림 I-5-22]에 의하면, 미국의 특허 비중이 30%, 중국 25.1%, 일본 21.3%, 한국 15.9%, 유럽 7.7%이며, 양자통신 분야와는 다르게 매년 증가하는 경향보다는 연간 200건 내외로 출원 특허 수가 유지되고 있다. 또한 각국의 연간 특허 추이도 유사한 경향을 나타낸다.

그림 I-5-22 양자센서 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율

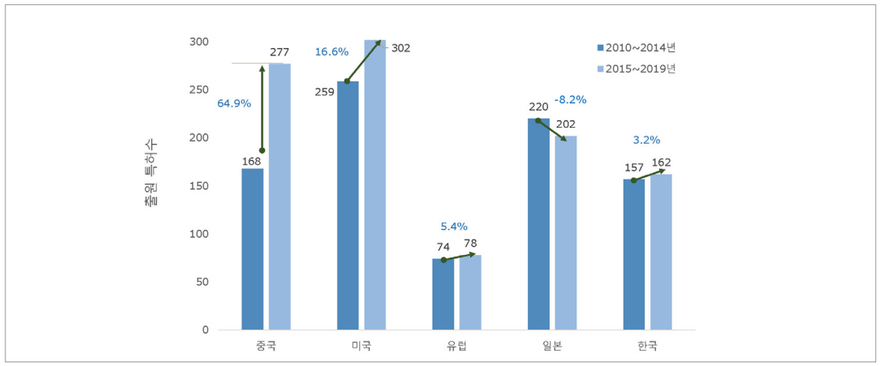


※ IITP (2021)

[그림 I-5-23]에서 보는 것처럼 양자센서 분야의 특허 증가율을 살펴보면, 2010~2014년 대비 2015~2019년의 증가율이 16.3%이고, 중국과 미국의 특허 증가율이 각각 64.9%와 16.6%로 크게 높아진 것으로 확인된다. 한국과 유럽은 각각 3.2%와 5.4%로 미비한 증가율을 보였고, 반면 일본은 8.2% 감소한 것으로 나타났다. 양자센서 분야의 출원 특허 수는 양자 분야 전체의 약 14.9%를 차지하고 있으며, 2010~2014년 22.5%보다 2015~2019년에 11.5%로 약 11% 감소하고 있어 다른 분야에 비해 비율이 줄어들고 있는 것으로 확인된다. [그림 I-5-23]에서처럼, 전체 특허 비중을 살펴보면, 미국, 중국, 일본, 한국이 거의 비슷한 점유율을 보이고 있지만, 일본은 2010~2014년 25.1% 대비 2015~2019년에 19.8%로 감소했고, 중국은 19.1%에서 27.1%로 증가해, 중국의 경우 최근 활발한 특허출원을 지속하고 있는 것으로 나타났다.

86) IITP (2021)

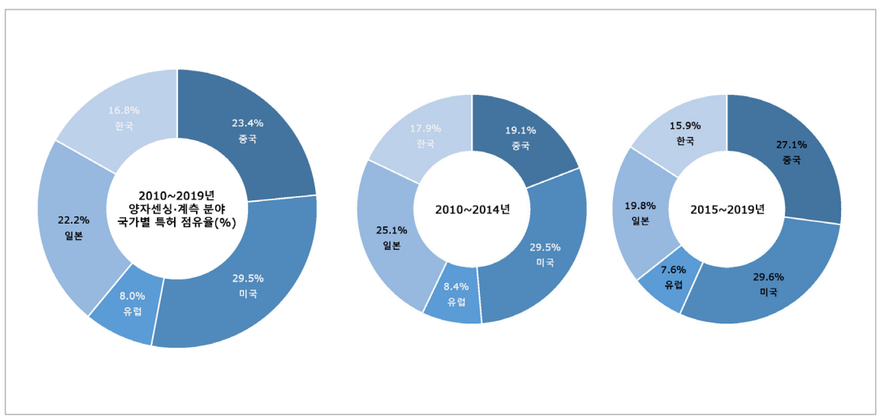
그림 I-5-23 양자센서 분야 국가별 특허 증가율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

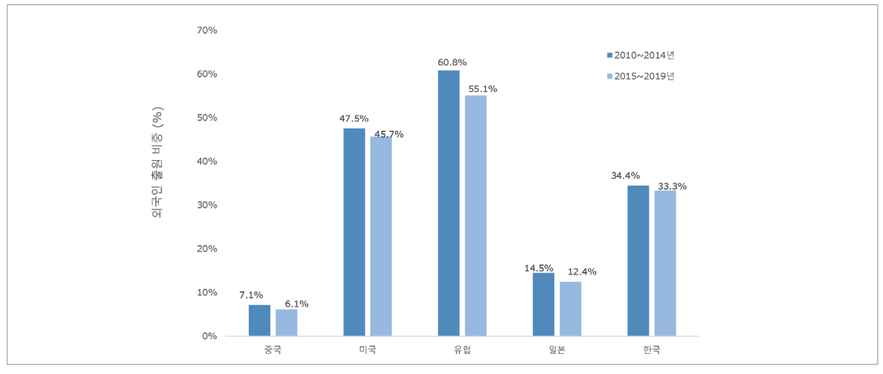
[그림 I-5-24]처럼 양자센서 분야의 전체 특허 비중을 살펴보면 미국이 29.5%로 가장 높으며, 중국 23.4%, 일본 22.2% 순이다. 2010~2014년의 특허출원 비중을 보면 미국 29.5%, 일본 25.1%, 중국 19.1%, 한국, 17.9%, 유럽 8.4%의 점유율을 나타냈고, 2015~2019년의 특허출원 비중은 미국 29.6%, 중국 27.1%, 일본 19.8%, 한국 15.9%, 유럽 7.6%로 2010~2014년과 비교했을 때, 미국은 유사한 수준을 유지하고 있으며, 중국은 약 8%의 점유율이 증가했고, 일본과 한국 그리고 유럽은 상대적으로 점유율이 감소한 것으로 확인된다. 정보통신기획평가원은 시장 확보력을 살펴보기 위해 외국인 출원 비중 분석을 활용하고 있다. [그림 I-5-25]에 의하면 모든 국가가 2010~2014년 대비 2015~2019년에 외국인의 출원 비중이 낮은 것으로 나타났다. 이는 이 분야 출원 특허 수의 감소와 관련 있는 것으로 추측할 수 있다.

그림 I-5-24 양자센서 분야 국가별 특허 점유율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

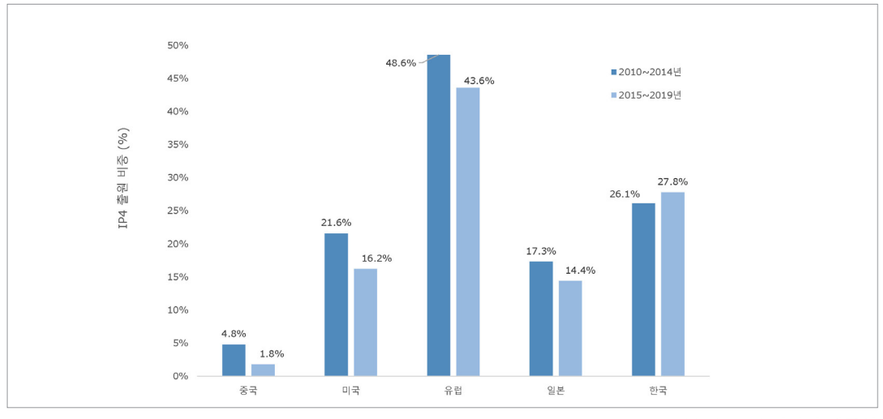
그림 I-5-25 양자센서 분야 국가별 외국인 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-26]의 양자센서 분야 국가별 IP4 특허 확보 현황을 살펴보면, 한국을 제외한 나머지 국가는 2010~2014년에 IP4 특허 비중이 높은 것으로 나타났다. 유럽에서는 한국, 미국, 일본, 중국의 특허 비중이 50%에 육박하는 것으로 보이고, 중국에서는 한국, 미국, 일본, 유럽의 특허 비중이 낮은 것으로 나타난다. 특히 2015~2019년은 중국의 특허 비중이 증가하고 출원 특허 수가 많았음에도 불구하고 IP4 특허 비중이 낮은 것으로 보아, 주로 자국 출원인에 의한 특허출원 위주였던 것으로 판단된다.

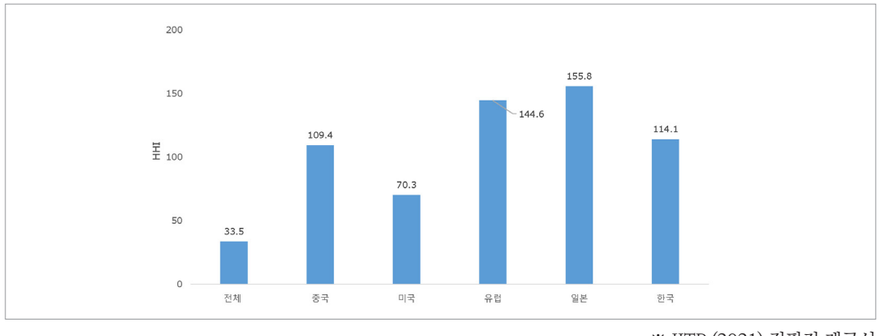
그림 I-5-26 양자센서 분야 국가별 IP4 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

양자센서 분야의 특허 시장 집중 수준에 대해 살펴보면, [그림 I-5-27]처럼 전체 HHI가 33.5로 완전 자유경쟁 시장으로 분석된다. 국가별 HHI를 살펴보면 미국은 전체 특허와 비슷한 수준으로 분석돼 집중 수준이 매우 낮고, 한국, 일본, 유럽, 중국의 경우는 HHI 100 이상의 집중화 정도가 거의 없는 시장에 해당해, 집중 수준이 낮음에서 중간 수준으로 시장진입 용이성이 높은 것으로 분석된다.[87]

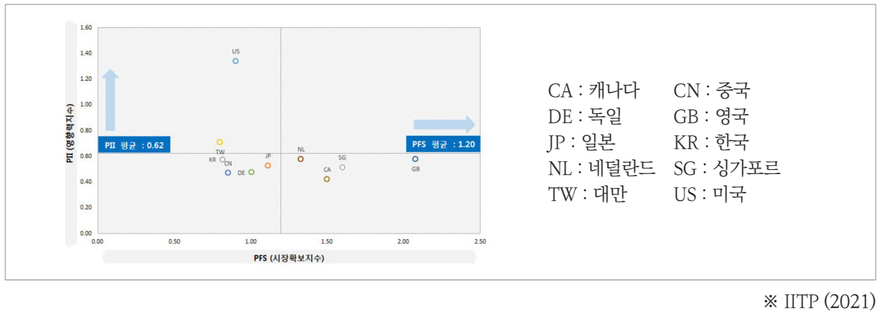
그림 I-5-27 양자센서 분야 국가별 HHI(2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-28]에서 보듯이 양자센서 분야에서 특허출원인의 국적 상위 10개를 기준으로 PII와 PFS를 살펴보면, 미국과 대만 국적 출원인들의 특허는 PII가 평균보다 높은 것으로 분석되고, PFS 측면에서는 영국, 싱가포르, 캐나다, 네덜란드 국적 출원인들의 특허가 평균보다 높은 수준으로 분석됐다. PII, PFS가 모두 평균보다 높은 출원인 국적은 나타나지 않아 기술 영향력과 시장 확보력을 함께 갖춘 국가는 없었다. 한국, 중국, 독일, 일본 국적의 출원인 특허는 PII와 PFS가 모두 평균보다 낮아 기술 영향력과 시장 확보력이 미비한 것으로 보인다.

그림 I-5-28 양자센서 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년)



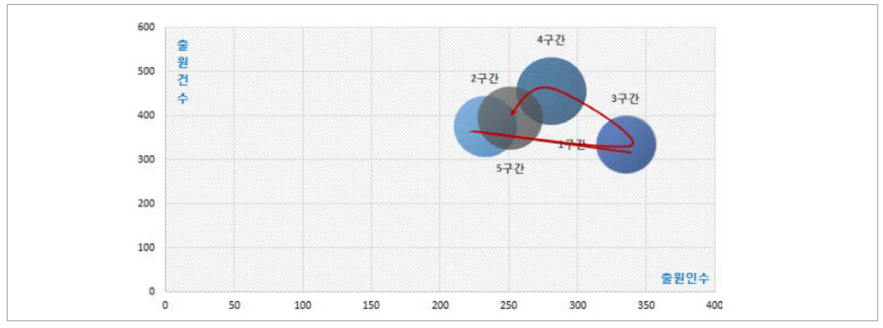
※ IITP (2021)

87) IITP (2021)

정보통신기획평가원의 분석 결과에 의하면, 양자센서 분야 미국 특허 기반의 2010~2014년과 2015~2019년 청구항을 기준으로 주요 키워드를 추출한 결과, 양자점(Quantum Dot), 이미지 센서(Image Sensor), 선택된 재료(Material Selected) 등의 키워드는 전 기간에 걸쳐 모두 주요 키워드로 도출됐다. 스퀴드 센서(Squid Sensor), 자기 센서(Magnetic Sensor), 마이크로전자 센서(Microelectronic Sensor) 등의 키워드는 2015년 이후 주목받는 것으로 보인다. 즉 양자역학적 특성을 이용해 계측하고 감지하는 것과 관련된 다양한 기술 요소가 기본이라고 볼 수 있으며, 최근에는 이미지 센서 이외에도 다양한 센서에 관한 기술들이 새롭게 주목받고 있다. 이 분야의 주요 특허로 선정된 기술들을 살펴보면, 가시광선 및 적외선에 양자점 감도를 결합한 이미지 센서, 온도센서와 의료장치, 양자효율 측정 포스 센서 등 다양한 센서 기술 관련 내용이 주류를 이루고 있다.

[그림 I-5-29]에서처럼 양자센서 분야의 전체 특허를 2년씩 출원 구간 기준(1구간 : 2010~2011년, 2구간 : 2012~2013년, 3구간 : 2014~ 2015년, 4구간 : 2016~2017년, 5구간 : 2018~2019년)으로 나눠 출원 건수 및 출원인 수를 살펴보면, 3~4구간은 출원 건수는 증가하고 출원인 수는 감소하는 성숙기에 해당하고, 4~5구간은 출원 건수와 출원인 수가 모두 감소하는 쇠퇴기의 단계에 있다. 이 분야는 연구개발 활동이 지속해서 이어지고 있어, 연간 특허출원이 200건 내외로 유지되고 있으나 특허출원인 수는 감소해 성숙기 단계로 분석됐다.

그림 I-5-29 양자센서 분야 기술시장 성장단계(2010~2019년)



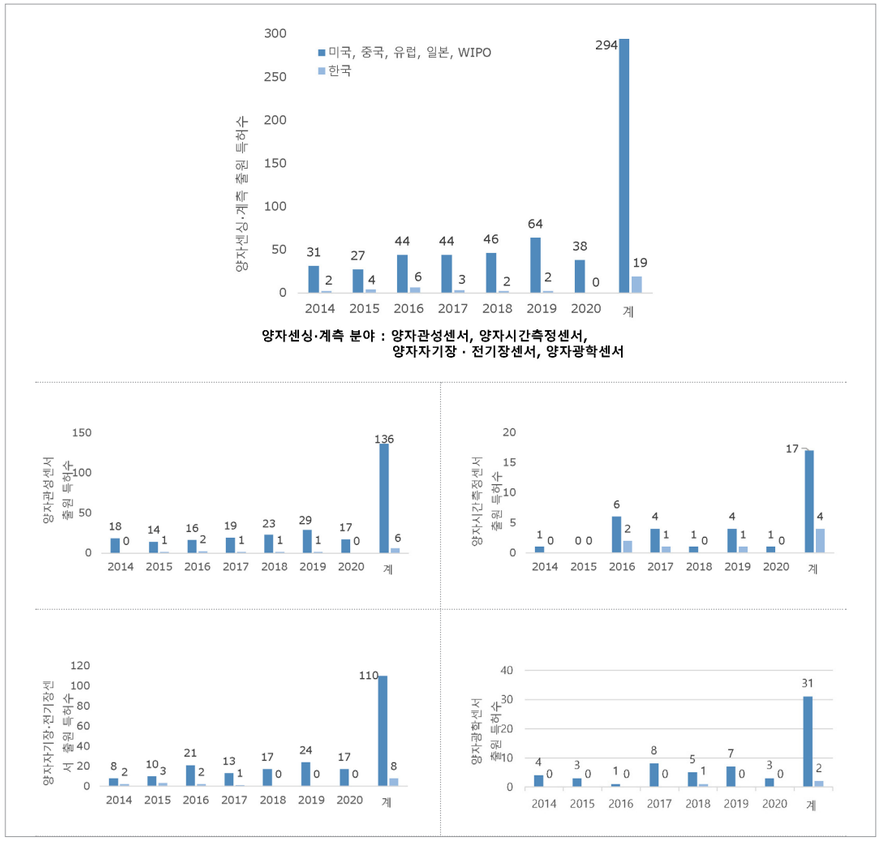
※ IITP (2021)

2014년부터 2020년까지의 특허를 분석한 KISTI의 2021년 양자기술 보고서는, 한국에서 출원된 총 19건 및 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO에서 출원된 양자센서 분야 관련 특허를 연도별 및 특허출원 수 상위 5개의 국가별로 분석하고 있다.[88] [그림 I-5-30]은 2014~2020년까지 양자센서 분야에서 총출원된 특

88) KISTI (2021)

허 수 313건 중 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 294건과 한국 19건의 연도별 출원 추이를 나타내고 있다. 또한 KISTI는 양자센서 분야를 양자관성센서, 양자시간 측정센서, 양자자기장·전기장센서, 양자광학센서로 나눠 각각 출원 특허 수를 조사했다. 다만 양자통신 분야와 마찬가지로 보고서 출판일이 2021년임을 고려해 2020년 출원 특허 수 38건은 전체 추이 분석 결과에서 제외했다.

그림 I-5-30 양자센서 분야 출원 특허 수(2014~2020년)



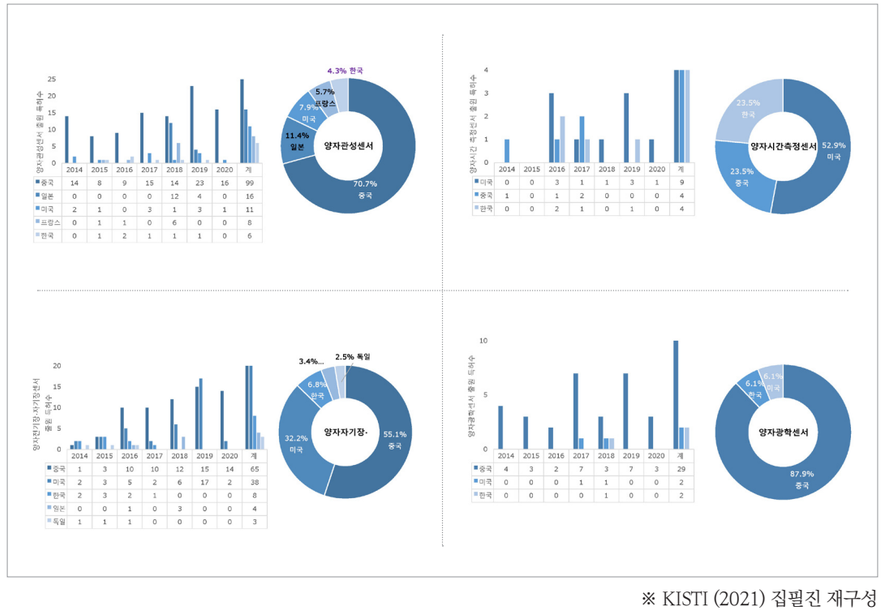
※ KISTI (2021) 집필진 재구성

분석 결과에 의하면, 2019년까지 양자센서 분야에서 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 한국은 한 자릿수의 특허를 지속 출원하고 있으나 그 수는 매우 적은 것으로 확인된다. 양자센서 세부 분야별 출원 특허 추이를 보면, 양자관성센서 분야가 전체 142건으로 45.4%를 차지했고, 양자 시간 측정센서 분야는 21건, 양자자기장·전기장센서 분야는 118건, 양자광학센서 분야는 33건을 각각 출원했다. 양자관성센서와 양자자기장·전기장센서 분야는

미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO가 매년 유사한 수준의 특허를 출원하고 있으며 2019년에는 증가하는 경향을 보이지만, 양자 시간 측정센서와 양자광학센서 분야는 특허출원 자체가 미비하다. 한국은 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO와 비교했을 때 전체적으로 감소하거나 아예 없는 경우도 보인다.

분야별 출원 특허 수 상위 5개국의 연도별 추이를 살펴보면 [그림 I-5-31]과 같이 나타낼 수 있다. 2014~2019년까지 양자센서 분야 중 양자 시간 측정센서를 제외하고 중국의 특허출원 비율이 55~88%를 차지하고 있으며, 특히 양자관성센서와 양자광학센서 분야에선 두드러진 특허출원 수를 나타냈다. 한편 한국은 미국, 중국과 함께 전 분야에 걸쳐 상위 5개국에 모두 포함됐다. 양자관성센서의 경우 중국은 지속해서 특허를 출원하는 반면, 다른 국가들은 비교적 적은 수의 특허를 출원하고 있으며, 일본은 2018년에 집중적으로 이 분야의 특허를 출원했다. 양자 시간 측정센서는 미국이 전체의 52.9%를 차지하고 있지만, 그 수는 매년 3건 이하로 저조한 편이다. 양자전기장·자기장센서의 경우, 중국과 미국은 2019년까지 증가 추세지만 한국, 일본, 독일은 특정 해에만 출원하는 경향을 보인다. 양자광학센서도 중국은 지속해서 출원 특허 수를 유지하는 반면, 한국과 미국은 특정 해에만 출원하고 있는 것으로 나타났다. KISTI의 특허출원 분석 자료를 재분석한 결과, 양자통신 분야와 마찬가지로 중국의 출원 특허 수가 상당히 많음을 알 수 있다.

그림 I-5-31 양자센서 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

〈표 I-5-5〉는 특허의 질적 수준 평가 기준이 되는 패밀리 특허 수를 나타내고 있다. 평균 패밀리 특허 수가 가장 높은 나라는 미국으로 양자관성센서와 양자자기장·전기장센서 분야에서 매우 높게 나타나며, 일본은 양자관성센서에서, 한국은 양자자기장·전기장센서 분야에서 높은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다. 반면 중국은 전 분야에 걸쳐 상대적으로 낮은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다.

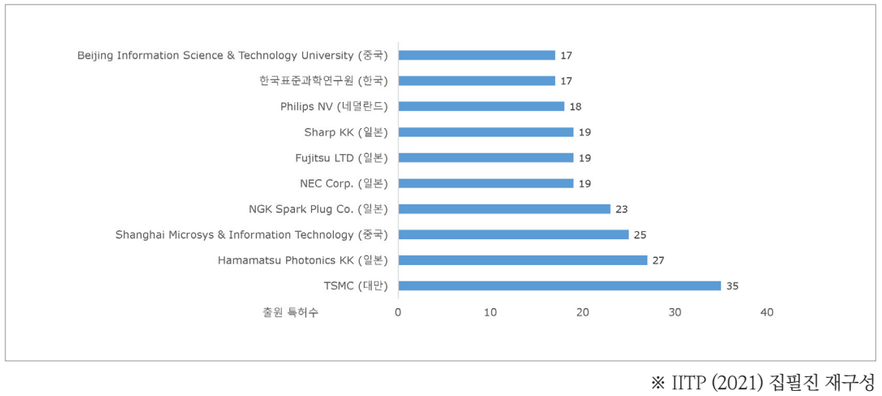
표 I-5-5 양자센서 분야 국가별 출원 특허 수(2014~2020년)

국가	합계		양자관성센서		양자 시간 측정센서		양자자기장 ·전기장센서		양자광학센서	
	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수
중국	197	1.5	99	1.5	4	2.2.	64	1.6	29	1.3
미국	60	9.9	11	4.3	9	2.7	38	13.6	2	2
일본	20	4.5	16	4.7	0	0	4	3.2	0	0
한국	19	3.1	6	1.5	4	4.2	8	3.8	1	1

※ KISTI (2021)

양자센서 분야의 출원인별 분석도 통계청, 정보통신기획평가원, KISTI의 분석 결과로부터 확인할 수 있다. 앞서와 마찬가지로, 각 기관의 분석 과정에서 쓰인 기준이 상이하므로 서로 다른 분석 결과를 보여주고 있다. 양자센서 분야에 대한 주요 출원인과 점유율을 비교한 [그림 I-5-21]의 통계청 자료를 참조해, 양자센서 분야의 주요 출원인을 보여주는 [그림 I-5-32]의 정보통신기획평가원 분석 결과와 비교하면 서로 다른 점을 확인할 수 있다.

그림 I-5-32 양자센서 분야 주요 출원인 및 출원 건수(2010~2019년)

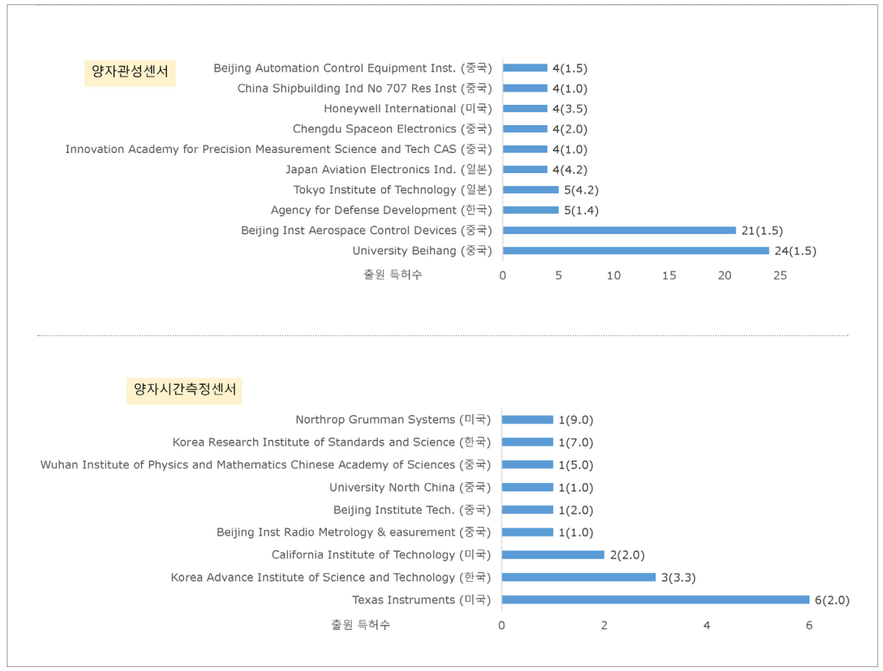


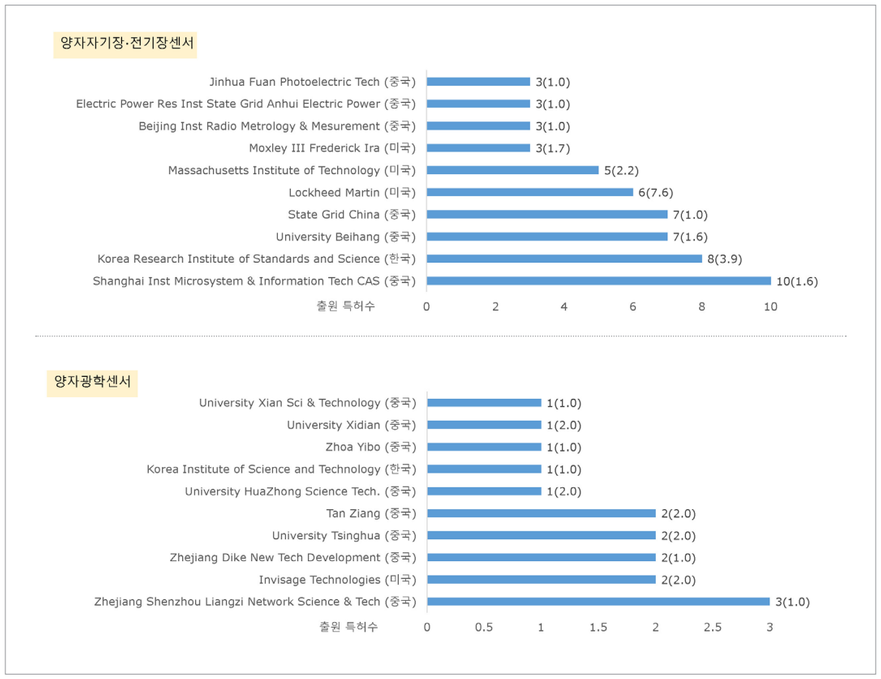
※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-32]의 정보통신기획평가원 분석 결과에 의하면, 2010~2019년까지 주요 출원인은 대만 TSMC로 35건의 가장 많은 특허를 출원했으며, 2010~2014년까지는 이미지 센서 및 영상센서 구조 등에 대해, 2015~2019년에는 높은 흡수 파장을 가진 이미지 센서에 대해 출원하고 있다.[89] 이는 출원 특허 수에서 조금 차이가 있지만, 특허청 분석 자료와도 유사하다. 특허출원 건수 상위 10위 내 출원인을 살펴보면, 대만 1개, 중국 2개, 네덜란드 1개, 한국 1개이며 나머지는 일본 국적임을 알 수 있다. 중국 내에서 이 분야에 대해 가장 많은 특허를 출원한 출원인은 Shanghai Microsys & Information Technology로 25건의 특허를 출원하고 있다. 양자센서 분야에서 중국의 출원 수는 월등히 높은 편이지만, 출원인을 기준으로 분석하면 일본이 이 분야에서 다수의 특허를 보유하고 있음을 알 수 있다.

KISTI의 경우, 2014~2020년 양자센서 분야의 세부 분야 출원인별 분석 결과를 [그림 I-5-33]에서 확인할 수 있다. 각 숫자는 출원 특허 개수이며 괄호 안의 숫자는 패밀리 특허 수를 나타낸다. 양자관성센서 분야에서 상위 10위 내 출원인을 보면 중국 6개, 일본 2개, 한국 1개, 미국 1개이고 중국 University of Beihang이 24건으로 가장 많은 출원 특허 수를 보여주고 있다.

그림 I-5-33 양자센서 분야의 세부 분야 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년)





※ KISTI (2021) 집필진 재구성

이러한 특징은 양자자기장·전기장센서와 양자광학센서 분야에서도 유사하게 나타난다. 특허를 가장 많이 출원한 출원인은 모두 중국 국적이고, 상위 10위 내 출원인 중에 한국과 미국의 일부 기업이 포함돼 있다. 하지만 양자 시간 측정센서 분야의 경우, 미국 Texas Instruments가 6건으로 가장 많은 출원 특허 수를 가지고 있으며, 미국은 총 3개 출원인이 9건의 특허를 출원한 것으로 나타났다. 한편 한국은 2개 출원인이 4건의 특허를, 중국은 4개 출원인이 4건의 특허를 출원했다. 특이한 출원인도 확인되는데, 양자자기장·전기장센서 분야의 Moxley III Frederick Ira와 양자광학센서 분야의 Zhoa Yibo, Tan Ziang이며 셋은 개인으로 추정된다. 일본은 양자관성센서 분야에서만 특허출원을 하고 있으며, 유럽은 2014~2020년까지 상위 10위 내 출원인으로 전혀 포함되지 못했다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 특허출원을 보류하고 있거나, 현재 심사 중인 탓으로 보인다. 그 외 출원인으로는 양자관성센서 분야에서 부산대가 1건을 출원한 것으로 확인된다.

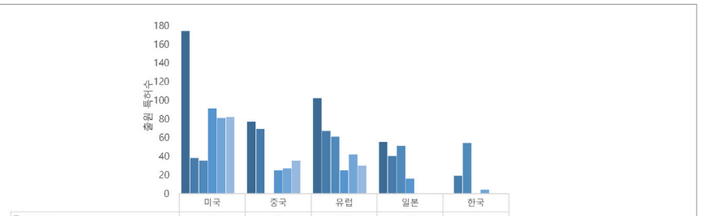
89) IITP (2021)

제4절 양자컴퓨팅 분야

양자컴퓨팅은 상호작용하는 양자비트(Quantum Bit, 이하 큐비트)를 기반으로, 양자얽힘이나 중첩 같은 양자역학적 현상을 연산 방법에 적용한 컴퓨팅 기술이다. 양자컴퓨팅의 세부 분야는 양자시뮬레이터, 물리양자비트, 논리양자비트, 양자알고리듬 및 SW로 나눌 수 있다.[90]

[그림 I-5-4]에서 묘사한 것처럼 2010~2019년까지 IP5의 양자컴퓨팅 분야 총 출원 특허 수는 2,572건으로 미국 855건, 유럽 667건, 중국 506건, 일본 342건, 한국 202건이다. 주요 출원인과 그 점유율을 비교한 [그림 I-5-34]에 따르면, 미국 IBM 408건(15.9%), Google 233건(9.1%), Northrop Grumman Systems 201건(7.8%), 캐나다 D-Wave 157건(6.1%), 미국 Microsoft 154건(5.9%), Intel 147건(5.7%) 등으로 상위 6개 기업의 출원 특허 수가 1,300건으로 전체 출원의 과반인 50.5%를 차지했다. 특히, IBM의 경우 한국을 제외한 모든 국가에 가장 많은 특허를 출원하며 특허 경쟁에서 앞서 나가고 있다. 다만 한국에서는 미국 군수 기업인 Northrop Grumman Systems가 가장 많이 출원했다.[91] 양자통신과 양자센서 분야와는 달리 양자컴퓨팅 분야에서 중국 기업은 506건의 특허를 출원했지만, 상위 6개 기업에는 이름을 올리지 못했다. 미국 상위 5개 기업의 자국 내 특허 수는 410건으로, 미국 총 출원 특허 수의 50%에 가까워 해당 기업들이 양자컴퓨팅 분야에서 상당한 우위에 있는 것을 알 수 있다.

그림 I-5-34 양자컴퓨팅 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율(2010~2019년)



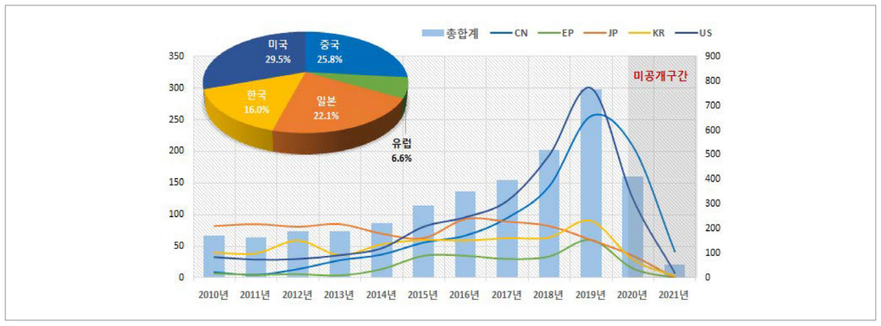
	미국	중국	유럽	일본	한국
IBM (미국)	174	77	102	55	0
Google (미국)	38	69	67	40	19
Northrop Grumman Systems (미국)	35	0	61	51	54
D-Wave (캐나다)	91	25	25	16	0
Microsoft (미국)	81	27	42	0	4
Intel (미국)	82	35	30	0	0
계	501	233	327	162	77

※ 특허청 (2021) 집필진 재구성

90) IITP (2021)
91) 특허청 (2021)

정보통신기획평가원의 양자컴퓨팅 분야 특허 조사는 2010년부터 2021년까지 진행됐으며, 출원된 유효 특허는 총 3,728건이다.[92] 다만 특허 분석을 위해 전체 기간을 2010~2014년까지 구간과 2015~2019년까지의 두 구간으로 나눴고, 2020년과 2021년은 미공개 구간으로 구분해 전체 분석에서는 제외했다. 정보통신기획평가원에서 제공한 [그림 I-5-35]을 보면 미국, 중국, 일본이 점유율 20%대로 비슷하고 한국 16%, 유럽 6.6% 순이며, 2019년까지 총출원 특허 수가 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 특히 미국과 중국은 2019년까지 유사한 증가율을 보이고, 한국과 유럽도 상대적인 증가율은 낮지만 지속해서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 반면 일본은 2016년까지 매년 유사한 수준의 특허를 출원했지만, 이후에는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이 같은 감소세가 다른 분야에서도 비슷한 것으로 보아, 2016년 이후로 양자정보통신 분야 전반에 걸쳐 일본의 특허출원 수가 감소하는 경향임을 알 수 있다. 양자컴퓨팅 분야의 출원 특허 수는 양자정보통신 분야 전체의 약 25.6%를 차지했고, 2010~2014년의 24.0%보다 2015~2019년에 26.3%로 약 2.3%의 증가함으로써 점유율이 증가 추세를 나타냈다.

그림 I-5-35 양자컴퓨팅 분야 연도별 특허출원 동향 및 국가별 특허 점유율

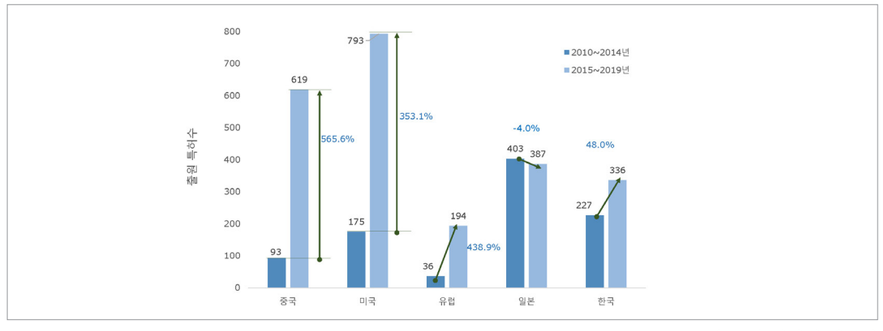


※ IITP (2021)

[그림 I-5-36]은 IP5의 출원 증가율을 2010~2014년과 2015~2019년으로 나눠서 비교한 결과를 보여준다. 이에 따르면 2010~2014년 대비 2015~2019년 출원 특허 수가 934건에서 2,329건으로 늘어나 149.4%의 증가율을 보이며, 국가별로는 중국 565.6%, 유럽 438.9%, 미국 353.1%의 증가율을 나타내 큰 폭으로 성장한 것을 알 수 있다. 한국은 48.0%로 미국, 유럽, 중국과 비교해 상대적으로 낮은 증가율을 보여줬고, 일본은 다른 나라들과는 달리 오히려 4.0% 감소했다.

92) IITP (2021)

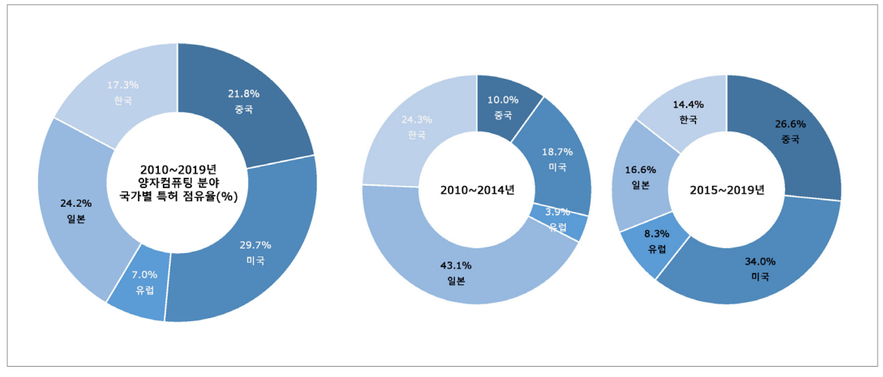
그림 I-5-36 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 증가율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-37]에서처럼, 전체 특허 비중을 살펴보면 미국, 중국, 일본이 유사한 수준을 나타내고 있다. 2010~2014년의 특허출원 비중을 보면 일본 43.1%, 한국 24.3%, 미국 18.7%, 중국 10.0%, 유럽 3.9%의 점유율을 나타냈으며, 2015~2019년의 특허출원 비중은 미국 34.0%, 중국 26.6%, 일본 16.6%, 한국 14.4%, 유럽 8.3%로 나타났다. 2010~2014년 대비 2015~2019년에 미국과 중국, 유럽은 비중이 커졌으나 한국과 일본은 감소했다.

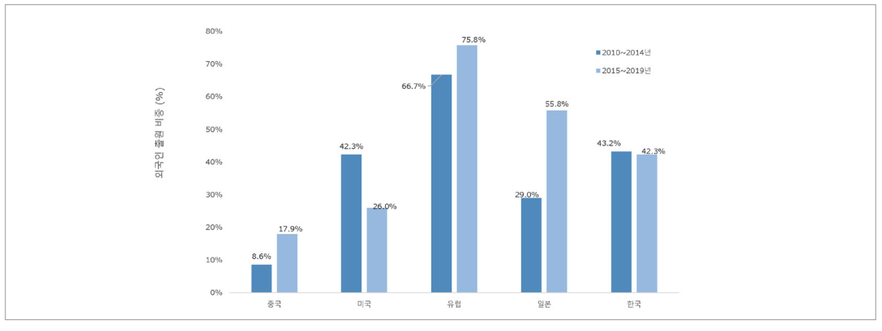
그림 I-5-37 양자컴퓨팅 분야 국가별 특허 점유율



※ IITP (2021) 집필진 재구성

정보통신기획평가원은 시장 확보력을 살펴보기 위해 외국인 출원 비중 분석을 활용하고 있다. [그림 I-5-38]에 의하면 한국과 미국은 2010~2014년에 외국인의 출원 비중이 높고, 중국과 일본 그리고 유럽은 2015~2019년에 외국인의 출원 비중이 높은 것으로 나타났다.

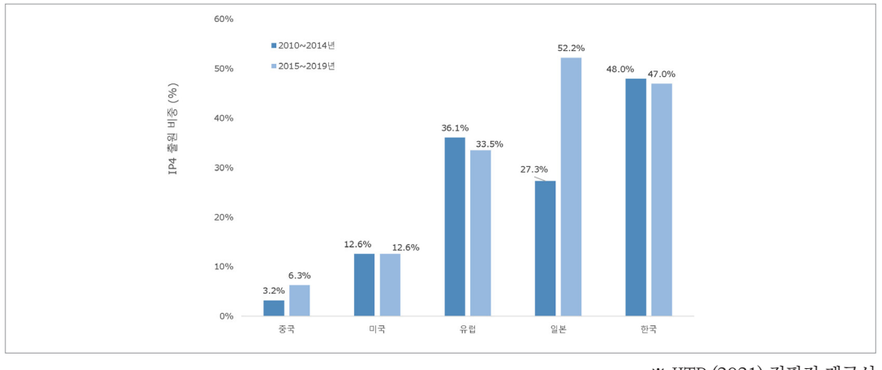
그림 I-5-38 양자컴퓨팅 분야 국가별 외국인 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-39]의 양자컴퓨팅 분야 국가별 IP4 특허 확보 현황을 살펴보면, 2010~2014년에 한국과 유럽의 IP4 특허 비중이 높은 것으로 나타났지만 2015~2019년과 비교해 큰 차이는 없었다. 일본에서는 2015~2019년에 한국, 미국, 유럽, 중국의 특허 비중이 급격히 늘어났는데, 2010~2014년 대비 특허 점유율이 감소했음에도 불구하고 IP4 출원 비중이 증가한 것으로 보아, 자국인의 특허출원 비중이 감소했을 것으로 보인다. 중국은 2010~2014년 대비 2015~2019년에 IP4 출원 비중이 증가했지만, 같은 기간 특허 점유율도 2배 이상 늘어나 자국인의 특허출원 비중이 여전히 높은 것으로 분석된다.

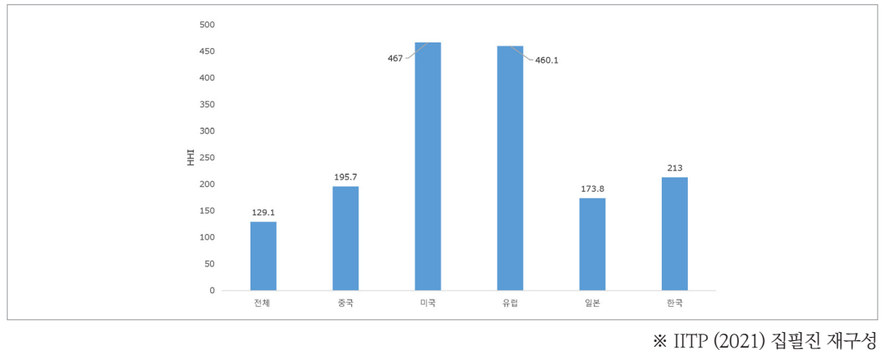
그림 I-5-39 양자컴퓨팅 분야 국가별 IP4 출원 비중



※ IITP (2021) 집필진 재구성

〈표 I-5-3〉의 HHI 범위를 참고해 [그림 I-5-40]의 양자컴퓨팅 분야 시장 집중 수준을 HHI로 분석하면, 129.1의 집중화 정도가 거의 없는 시장으로서 구매자 우위의 높은 경쟁 강도를 보이며, 다섯 나라 모두 같은 수준으로 분석된다. 국가별 HHI를 살펴보면 미국이 467.0, 유럽이 460.1로 다소 높고 한국, 중국, 일본은 유사한 수준으로 볼 수 있다.

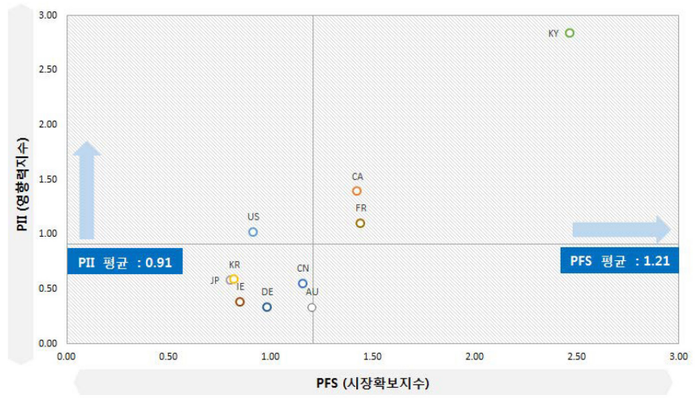
그림 I-5-40 양자컴퓨팅 분야 국가별 HHI(2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

[그림 I-5-41]에서 보듯이 양자컴퓨팅 분야에서 특허출원인의 국적 상위 10개를 기준으로 PII와 PFS를 살펴보면, 케이만군도, 캐나다, 프랑스, 미국 국적 출원인들의 특허는 PII가 평균보다 높은 것으로 분석되고, PFS 측면에서는 케이만군도, 캐나다, 프랑스 국적 출원인들의 특허가 평균보다 높은 수준으로 분석됐다. 종합적으로 보면 케이만군도, 캐나다, 프랑스 국적 출원인들의 특허가 PII, PFS 모두 평균보다 높은 것으로 나타나 기술 영향력과 시장 확보력을 둘 다 갖췄다고 볼 수 있다. 한국, 일본, 아일랜드, 독일, 중국, 호주 국적의 출원인 특허는 PII, PFS가 모두 평균보다 낮아 기술 영향력과 시장 확보력이 미비한 것으로 보인다.

그림 I-5-41 양자컴퓨팅 분야 출원인 국적별 PII 및 PFS(2010~2019년)



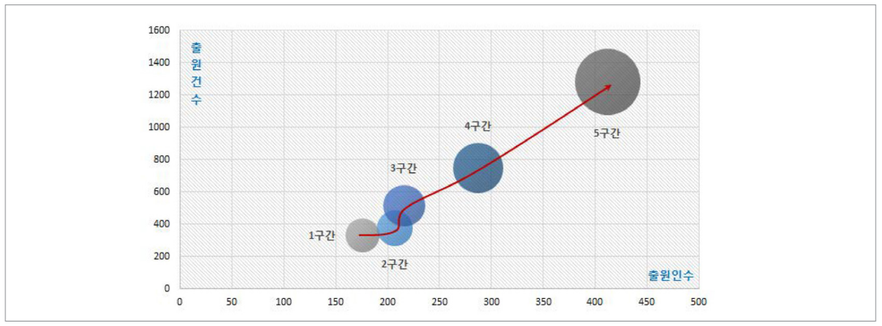
AU : 호주, CA : 캐나다, CN : 중국, DE : 독일, FR : 프랑스, IE : 아일랜드,
JP : 일본, KR : 한국, US : 미국

※ IITP (2021)

정보통신기획평가원의 분석 결과에 의하면, 양자컴퓨팅 분야 미국 특허 기반의 2010~2014년과 2015~2019년 청구항을 기준으로 주요 키워드를 추출한 결과, 양자프로세스(Quantum Processor), 양자컴퓨터(Quantum Computer), 양자상태(Quantum State) 등의 키워드는 전 기간에 걸쳐 모두 주요 키워드로 도출됐다. 조지프슨 접합(Josephson Junction), 큐비트 장치(Qubit Device), 큐비트 칩(Qubit Chip) 등의 키워드는 2014년까지 드러나지 않다가 2015년 이후 주목받는 것으로 보인다. 양자컴퓨팅 분야는 양자역학적 특성을 컴퓨터에 적용하기 위해 양자프로세서와 양자회로 등 다양한 양자기술을 기본 바탕으로 삼고 있으며, 최근에는 초전도 집적회로 제조, 양자비트를 기반으로 한 디바이스 및 칩 등의 기술이 좀 더 주목받고 있다.

[그림 I-5-42]에서처럼 양자컴퓨팅 분야의 전체 특허를 2년씩 출원 구간 기준(1구간 : 2010~2011년, 2구간 : 2012~2013년, 3구간 : 2014~2015년, 4구간 : 2016~2017년, 5구간 : 2018~2019년)으로 나눠 출원 건수 및 출원인 수를 살펴보면, 전 구간에 걸쳐 출원인 수와 출원 건수가 모두 증가하고 있어 성장기 단계에 있는 것으로 보인다. 이러한 성장기 단계의 특징으로는, 출원 특허 건수와 출원인 수의 빠른 증가 외에 해당 분야 R&D의 급격한 증가, 경쟁의 격화를 들 수 있다.

그림 I-5-42 양자컴퓨팅 분야 기술시장 성장단계(2010~2019년)



※ IITP (2021)

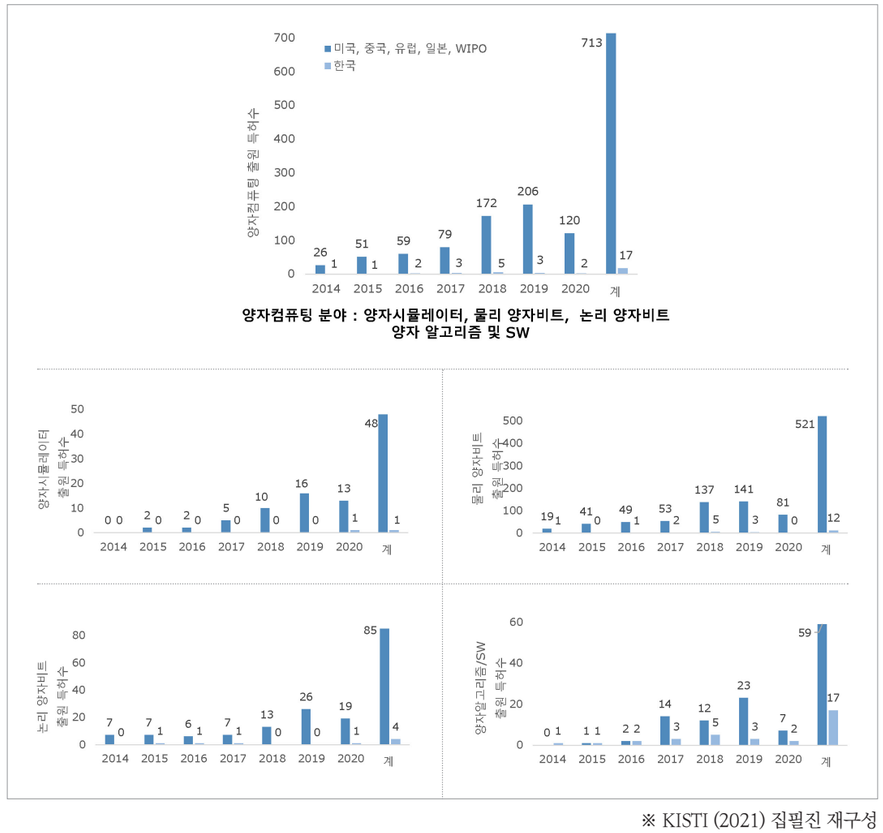
2014년부터 2020년까지의 특허를 분석한 KISTI의 2021년 양자기술 보고서는, 한국에서 출원된 총 17건 및 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO에서 출원된 양자컴퓨팅 분야 관련 특허를 연도별 그리고 특허출원 수 상위 5개의 국가별로 분석하고 있다.[93] [그림 I-5-43]은 2014~2020년까지 양자컴퓨팅 분야에서 총 출원된 특허 수 830건 중 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 713건과 한국 17건의 연도별 출원 추이를 나타내고 있다. 또한 KISTI는 양자컴퓨팅 분야를 양자시뮬레이터, 물리양자비트, 논리양자비

93) KISTI (2021)

트, 양자알고리듬 및 SW로 나눠 각각 출원 특허 수를 조사했다. 다만 보고서 출판일이 2021년임을 고려해 2020년 출원 특허 수 122건은 전체 추이 분석 결과에서 제외했다.

분석 결과에 의하면, 2019년까지 양자컴퓨팅 분야 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있으며, 한국의 경우 매년 한 자릿수의 특허출원 수를 유지하며 조금씩 증가하는 경향을 보여주고 있다. 양자컴퓨팅 세부 분야별 출원 특허 추이를 보면, 물리 양자비트 분야가 전체 533건으로 가장 많은 출원 특허 수를 차지했고, 논리 양자비트 분야는 89건, 양자알고리듬 및 SW 분야는 76건, 양자시뮬레이터 분야는 49건을 각각 출원했다. 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 2019년까지 전체적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 반해 한국은 2019년까지 양자시뮬레이터 분야에서 특허출원이 없다가 2020년에 1건을 출원했고, 논리 양자비트 분야는 2015~2017년과 2020년에 1건씩 출원했으나 출원이 아예 없는 기간도 확인된다. 그나마 가장 많은 출원 수를 보유한 물리 양자비트 분야에서도 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO 대비 5% 수준에 머무르고 있다. 다만 한국은 양자알고리듬 및 SW 분야에서 상대적으로 다수의 특허를 출원 중인 것으로 나타났다.

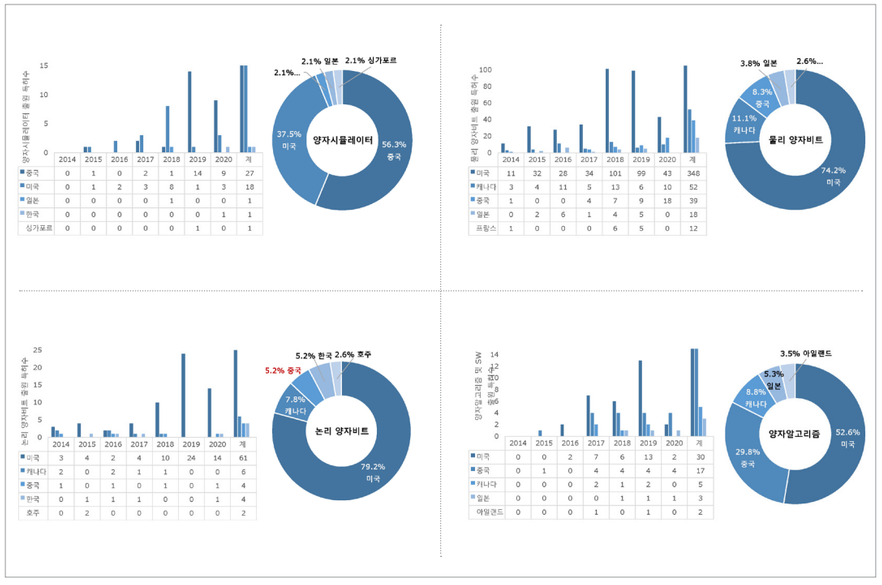
그림 I-5-43 양자컴퓨팅 분야 출원 특허 수(2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

분야별 출원 특허 수 상위 5개국의 연도별 추이를 살펴보면 [그림 I-5-44]와 같이 나타낼 수 있다. 2014~2019년까지 양자시뮬레이터를 제외한 세 분야에서 미국의 출원 특허 수가 가장 많았다. 양자통신과 양자센서 분야에서와는 달리, 캐나다가 세 분야에서 특허를 출원하고 있으며, 한국은 양자시뮬레이터와 논리 양자비트 분야에서만 상위 5개국에 포함됐다. 양자시뮬레이터 분야에서 미국과 중국은 매년 꾸준히 특허를 출원하고 있으며, 각각 2018년과 2019년에 가장 많은 수의 특허를 출원했다. 해당 분야에서는 중국이 가장 많은 특허를 출원하고 있다. 물리 양자비트, 논리 양자비트, 양자알고리듬 및 SW 분야에서는 미국이 다른 나라에 비해 압도적으로 많은 특허를 출원하고 있으며, 2018년과 2019년에 급격히 증가한 것으로 나타난다. 중국은 양자알고리듬 및 SW 분야에서 2017년 이후 매년 4건씩 꾸준히 특허를 출원하고 있다.

그림 I-5-44 양자컴퓨팅 분야 상위 5개국 연도별 출원 특허 수



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

특허의 질적 수준 평가 기준이 되는 패밀리 특허 수는 〈표 I-5-6〉을 통해서 확인할 수 있다. 평균 패밀리 특허 수가 가장 높은 나라는 호주로 물리 양자비트와 논리 양자비트에서 매우 높은 수치를 기록했으며, 중국을 제외한 다른 나라도 비교적 높은 패밀리 특허 수를 보여주고 있다. 한국은 물리 양자비트와 논리 양자비트 분야에서 2.0 이상의 패밀리 특허 수를 나타냈다. 양자컴퓨팅 분야의 출원 국가들이 다른 분야에 비해 비교적 높은 패밀리 특허 수를 나타내는 것을 봤을 때, 성장기 단계에 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

표 I-5-6 양자컴퓨팅 분야 국가별 출원 특허 수(2014~2020년)

국가	합계		양자시뮬레이터		물리양자비트		논리양자비트		양자알고리듬 및 SW	
	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수	건수	평균 패밀리 특허 수
미국	457	3.0	18	2.1	348	3.0	61	3.1	30	3.1
중국	87	1.2	27	1.3	39	1.1	4	1.3	17	1.3
캐나다	63	3.4	0	0	52	3.5	6	2.7	5	3.4
일본	24	3.6	1	7.0	18	3.8	2	1.5	3	2.3
한국	17	2.3	1	1.0	12	2.4	4	2.3	0	0
프랑스	13	4.8	0	0	12	4.7	1	7.0	0	0
호주	12	7.8	0	0	10	6.4	2	15.0	0	0
영국	10	3.2	0	0	9	3.2	0	0	1	3.0

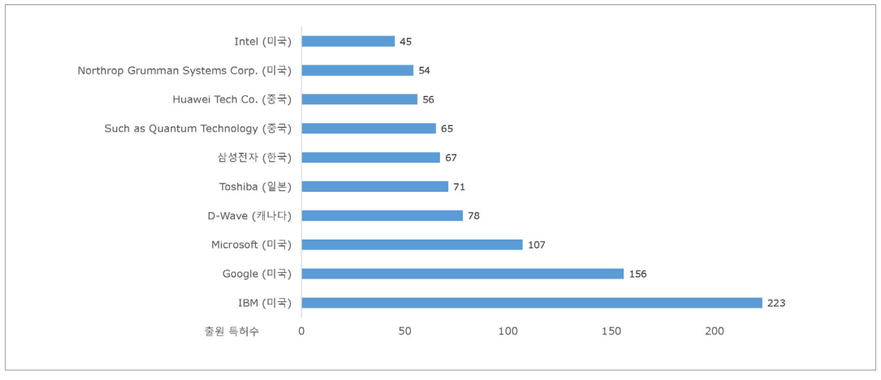
※ KISTI (2021)

양자컴퓨팅 분야의 출원인별 분석은 통계청, 정보통신기획평가원, KISTI의 분석 결과로부터 확인할 수 있다. 각 기관의 분석 과정에서 쓰인 기준이 상이하므로 분석 결과도 서로 조금씩 다르게 나타난다. 이 분야에 대한 주요 출원인과 점유율을 비교한 [그림 I-5-34]의 통계청 자료를 참조해, [그림 I-5-45]의 정보통신기획평가원의 분석 결과와 대조하면 서로 다른 점을 확인할 수 있다.

[그림 I-5-45]의 정보통신기획평가원 분석 결과에 의하면, 2010~2019년까지 주요 출원인으로 IBM(223건), Google(156건), Microsoft(107건)를 들 수 있는데 모두 미국 국적의 출원인이다. 한국은 삼성전자가 67건을 출원해 상위 10위권 출원인에 이름을 올렸다. IBM은 2010~2014년에 양자연산 시스템에 대해, 2015~2019년에는 양자연산 오차 보정, 양자논리회로 최적화 방법 등에 대해 출원했다.[94] 특허출원 건수 상위 10위권의 국적을 살펴보면, 캐나다 1개, 일본 1개, 한국 1개, 중국 2개이고 나머지 5개는 모두 미국으로 확인된다. 특허청과 정보통신기획평가원의 조사 결과에 의하면, 수치는 다소 상이하나 IBM이 양자컴퓨팅 분야에서 제일 많은 특허를 출원하고 있음을 알 수 있으며, 순위는 조금씩 다르지만 Google, Micorsoft, Intel, D-Wave, Northrop Grumman Systems가 모두 상위 출원인으로 나타나고 있다.

94) IITP (2021)

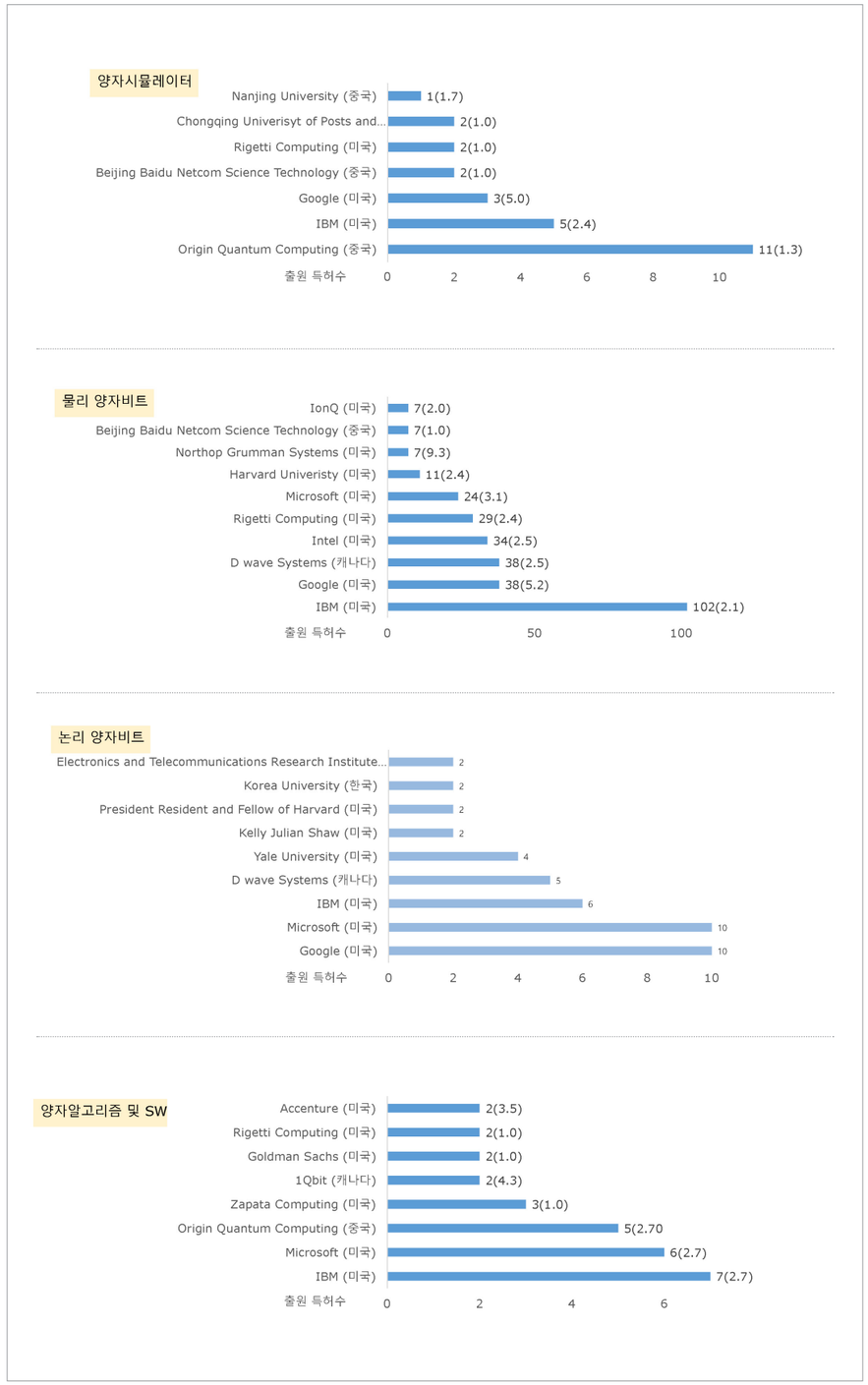
그림 I-5-45 양자컴퓨팅 분야 주요 출원인 및 출원 건수(2010~2019년)



※ IITP (2021) 집필진 재구성

KISTI가 제공한 2014~2020년 양자컴퓨팅 세부 분야 출원인별 분석 결과는 [그림 I-5-46]에서 확인할 수 있다. 각 숫자는 출원 특허 개수이며 괄호 안의 숫자는 패밀리 특허 수를 나타낸다. 양자시뮬레이터 분야는 상위 7개 출원인(중국 4개, 미국 3개)이 확인되며, 중국의 Origin Quantum Computing이 11건으로 가장 많은 출원 특허 수를 보유하고 있다. 물리 양자비트 분야는 상위 10위권 출원인 중 미국이 8개, 캐나다와 중국이 각각 1개이며, 특허 수는 IBM이 102건으로 가장 많고 Google과 D-Wave도 각각 38건을 출원했다. 논리 양자비트 분야는 미국 6개, 한국 2개, 캐나다 1개의 출원인이 확인되는데, 한국에서는 ETRI와 고려대학교가 각 2건씩 출원한 것으로 확인된다. 양자알고리듬 및 SW 분야는 미국 6개, 캐나다와 중국 각각 1개의 출원인이 명단에 이름을 올렸다. 특이한 출원인도 확인되는데, 논리 양자비트 분야의 Kelly Julian Shaw는 개인으로 추정된다. 논리 양자비트를 제외한 세부 분야별 국내 상위 출원인을 살펴보면, 양자시뮬레이터 분야에서 ETRI 1건, 물리 양자비트 분야에서 ETRI 3건, KAIST와 서울대학교가 각 2건을 출원한 것으로 확인된다. 삼성전자, KIST, 경희대학교, 포항공과대학교는 물리 양자비트 분야에서 각각 1건씩을 출원했다.

그림 I-5-46 양자컴퓨팅 세부 분야 출원인별 출원 특허 수(2014~2020년)



※ KISTI (2021) 집필진 재구성

제5절 시사점

양자기술 관련 국내외 특허를 다양한 관점에서 분석하기 위해, 분석 기간과 방법에서 관점 차이가 있는 여러 자료를 수집했다. 해당 자료는 특허청 보도자료, 2021년 KISTI Rnl Report 양자기술보고서, 정보통신기획평가원 2021년 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)이며 이 자료들을 기반으로 재분석을 수행하고 결과를 도출했다.

특허청 보도자료에 의하면, 2010~2019년까지 IP5의 양자정보통신 분야 출원 특허 수는 양자컴퓨팅 – 양자통신 – 양자센서(양자센서) 순으로 나타났다. 전체 분야에서 미국은 33%의 점유율을 차지했고 중국은 29%를 차지했다. 출원 특허 수의 연평균 증가율은 중국이 39%로 가장 높았고, 한국도 27%를 넘어 일본의 약 2배 이상으로 확인된다. 양자컴퓨팅 관련 출원 특허 수는 연간 30%씩 증가했고, 양자통신 분야는 2017년 이후 감소, 양자센서 분야는 매년 유사한 수준을 유지하고 있다.

KISTI 보고서에 의하면, 2014~2020년까지 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO의 출원 특허 수는 연평균 41% 증가했고, 중국이 60.9%로 가장 높은 증가율을 보여준다. 출원인별 출원 특허 수는 미국 IBM이 115건으로 가장 많고, 중국 Ruban Quantum Tech와 University of Beijing Posts & Telecommunication이 각각 96건, 90건을 출원하면서 뒤를 따르고 있다.

특허청과 KISTI의 분석 결과를 비교해보면, 중국이 출원한 특허 수의 연평균 증가율이 급격히 올라가는 추세인 점과 전체 출원 특허 수의 50% 이상이 미국과 중국으로부터 출원되고 있다는 점을 공통으로 발견할 수 있다.

양자통신 분야는 중국 특허가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 중국이 양자통신 분야를 주도하는 것으로 분석되나 주로 자국 출원 위주로 보인다. 주요 출원인으로는 일본 Toshiba가 최상위로 나타나고 있다. 한국의 경우, 2010~2019년까지 특허청은 SKT(IDQ) 77건, 정보통신기획평가원은 삼성전자 66건으로 최다 출원 특허 수를 보여주지만, 2014~2020년에는 개인으로 추정되는 채령이 30건을 출원해 최다 출원인으로 분석된다. 이 분야의 특허는 R&D의 급격한 증가 및 경쟁의 격화 단계인 성장기에 있는 것으로 분석된다.

양자센서 분야는 미국 특허가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 중국, 일본, 유럽, 한국은 유사한 비중을 차지하고 있으며, 중국의 경우 자국 출원 위주로 확인된다. 주요 출원인으로는 대만 TSMC가 최상위로 나타나고 있다. 한국의 경우, 2014~2019년에는 KAIST가 최다 출원인으로 분석된다. 이 분야

의 특허는 지속적인 연구개발 활동과 일부 업체의 도태, 특허 수의 정체와 특허출원인의 정체 또는 감소 추세인 성숙기에 있는 것으로 분석된다.

양자컴퓨팅 분야는 미국 특허가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 특허청은 유럽과 중국이 약 20% 수준, 일본이 약 12% 정도를 차지한다고 분석했지만, 정보통신기획평가원은 중국과 일본이 20% 이상의 비중을 차지하는 것으로 분석하고 있어, 일본에 대한 분석 결과가 다르게 나타난다. 주요 출원인으로는 미국 IBM이 최상위로 나타나고 있다. 한국의 경우, 2010~2019년에 삼성이 67건, 2014~2019년에는 ETRI가 4건으로 최다 출원인이 서로 다르게 나타난다. 이 분야의 특허는 R&D의 급격한 증가 및 경쟁의 격화 단계인 성장기에 있는 것으로 분석된다.

참고문헌

• 국내문헌

1	강소현(2022), “통신 3사, 올 하반기 양자사업 전략 키워드는?”, 디지털데일리.
2	과학기술정보통신부(2018), “과학기술&ICT 정책·기술 동향” 130호.
3	과학기술정보통신부(2021a), “과학기술&ICT 정책·기술 동향” 203호.
4	과학기술정보통신부(2021b), “양자기술 연구개발 투자전략”.
5	과학기술정보통신부(2021c), “한미정상회담 후속조치 이행을 위한 양자암호통신 시범사업 본격 착수“.
6	박종진(2022), “LG유플러스, 양자내성암호 전용회선 세계 첫 상용화”, 전자신문.
7	이종현(2022), “노르마-SKT, 손잡고 양자내성암호 상용화 추진”, 디지털데일리.
8	정보통신기획평가원(2019), “ICT의 새로운 진화, 양자정보통신을 향한 주요국의 도전”, ICT SPOT ISSUE.
9	정보통신기획평가원(2020), “ICT R&D 기술로드맵 2025, ICT 디바이스·양자”.
10	정보통신기획평가원(2021), “2021년 ICT R&D 특허·논문·경제성 분석(반도체 양자)”.
11	국가나노기술정책센터(2022.3), “글로벌 나노정책 및 기술동향” 50호.
12	정보통신기획평가원(2022), “주요국 양자기술 개발과 투자전략”, ICT SPOT ISSUE.
13	특허청(2021), “양자정보기술의 시대가 오고 있다. 지식재산 5대 강국(한, 미, 중, EU, 일) 특허출원, 10년간 4배 증가”.
14	한국과학기술기획평가원(2021a), “S&T GPS 글로벌 과학기술정책정보 서비스”.
15	한국과학기술정보연구원(2021b), “양자기술 과학·기술·산업 분석”, R&I Report.
16	한국전자통신연구원(2019), “양자정보기술 연구개발의 거대한 물결”.
17	한중과학기술협력센터(2019), “중국의 양자컴퓨팅 R&D 정책 동향”.
18	한중과학기술협력센터(2020), “중국의 양자정보 연구개발 동향”.
19	한중과학기술협력센터(2021), “중국의 양자정보 연구개발 동향”.
20	IRS Global(2022), “4차 산업혁명의 엔진, 양자기술 글로벌 혁신 기술 트렌드 및 향후 전망”.
21	KT(2022), “KT, 양자암호 전용회선 서비스 출시”.

• 해외문헌

1	Andrew Shipilov and Nathan Furr(2022), Making Quantum Computing a Reality, Harvard Business Review.
2	Austrian Institute of Technology(2022), New Applications of Quantum Communication for Europe, Austrian Institute of Technology News & Events.
3	DOE(2018), Quantum Networks for Open Science Workshop.
4	DOE(2020a), FY 2021 Congressional Budget Justification.
5	DOE(2021), FY 2022 Congressional Budget Justification.
6	DOE(2020b), Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop.
7	Economist Impact(2022), From qubits to profits: achieving near-term quantum advantage, Commercializing Quantum 2022 Conference at London, UK.
8	EU(2020), Midterm Report of The Quantum Technology Flagship.
9	EU(2022), Quantum Internet Alliance Project In EU Quantum Flagship.
10	European Commission(2020), Strategic Research Agenda.
11	European Commission(2021), 2030 Digital Compass: the European Way for the Digital Decade.
12	European Commission(2022), Shaping Europe’s Digital Future.
13	Federal Ministry of Education and Research(2018), “A Federal Government Framework Programme: Quantum technologies-from basic research to market”.
14	Fintan Burke(2020), Qubit to get ahead: Germany is racing to catch up with the quantum revolution, Science Business.
15	Fortune Business Insights(2021), Quantum Computing Market to Grow Exponentially; Increasing Product Applications to Generate Remunerative Market Opportunities.
16	Fraunhofer(2021), Curtain up: Fraunhofer and IBM to unveil quantum computer.
17	High-Level Steering Committee(2017), Quantum Technologies Flagship Intermediate Report.
18	IFRI(2022), The Chinese Quantum Dream.
19	Industry Research(2022), Global quantum sensors market insights: Forecast to 2028.
20	Inside Quantum Technology(2019), Quantum Sensors Markets.
21	Inside Quantum Technology(2022), Quantum Sensors: Market Evolution 2022 to 2031.
22	IQ4I(2022), Quantum Technologies Global Market.
23	Kagermann, H., Süssenguth F. et al.(2020), The Innovation Potential of Second-generation Quantum Technologies, Acatech.
24	Markets And Markets(2022), Research Quantum Computing Market by Offering(Systems and Services), Deployment(On Premises and Cloud Based), Application, Technology, End-use Industry and Region(2021-2026).
25	McKinsey & Company(2021), Shaping The Long Race In Quantum Communication and Quantum Sensing.
26	McKinsey(2022), Quantum Technology Monitor.
27	Natasha Kovacs(2022), Quantum Communication Technology Spurs Quantum Device Commercialization in Korea, Newswires.
28	National Quantum Computing Centre(2021), Annual Report 2021.
29	NIST(2021), NIST FY 2022 President’s Budget Request.
30	NQTP, UK National Quantum Technologies Programme.
31	NSF(2021a), FY 2022 Budget Request to Congress.
32	NSF(2021b), Enabling Quantum Leap: Quantum Interconnect Challenges for Transformational Advances in Quantum Systems.
33	NSTC(2020), A Strategic Vision for America’s Quantum Networks.

34	NSTC(2021), National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2022 Budget.
35	NSTC(2022), Bringing Quantum Sensors to Fruition. A Report by The Subcommittee On Quantum Information Science Committee on Science of the National Science & Technology Council.
36	Quantum Science and Technology(2019), Quantum information science and technology in Japan.
37	Quantum.Tech(2022), Driving quantum adoption across global enterprise, Quantum.Tech Boston Conference 2022 at Boston, MA.
38	Reuters Technology News(2021), Germany to support quantum computing with 2 billion euros.
39	SCQIS(2021), National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2022 budget.
40	Swinhoe, Dan(2021), Why Would You Want an On-Premise Quantum Computer? Data Center Dynamics.
41	TechUK(2022), Quantum commercialization: Positioning the UK for success.
42	The White House National Quantum Coordination Office(2022), A strategic vision for america's quantum networks.
43	Toshiba Digital Solutions Corporation(2022), Toshiba Group and KT Collaborate On Quantum Key Distribution Pilot Projects in South Korea, Toshiba News.
44	UK Quantum Strategy(2022), Department for Business, Energy and Industrial Strategy.
45	UKNQTP(2019), Strategic Intent.
46	일본 내각부(2022), 量子未来社会ビジョンについて.
47	캐나다 정부(2021), Budget 2021.
48	프랑스 정부(2021), Stratégie Nationale Sur Les Technologies Quantiques.

• 사이트

1	https://gov.uk/government/consultations/uk-quantum-strategy-call-for-evidence
2	https://iotworldtoday.com/2022/06/15/quantum-summit-2022-uk-government-invests-in-quantum-computing/
3	https://uknqt.ukri.org/
4	https://globaladvantageconsulting.com/the-united-kingdoms-quantum-technologies-ecosystem/
5	https://bnl.gov/instrumentation/quantum/research.php
6	https://kitchener.citynews.ca/local-news/feds-investing-20-million-in-waterloos-quantum-valley-ideas-lab-1382446
7	http://quantum-bc.ca/learn/quantum-computing-program/
8	https://usinenouvelle.com/article/pepr-quantique-cnrs-cea-et-inria-ont-voulu-couvrir-tous-les-domaines-du-secteur-et-mailler-tout-le-territoire-francais-temoigne-sebastien-tanzilli-cnrs.N1804702
9	http://quantumcas.ac.cn/yjyjj/list.htm
10	http://lqcc.ustc.edu.cn
11	https://science.osti.gov/-/media/QIS/pdf/QuantumBrochure2021.pdf
12	National QIS Research Centers, https://science.osti.gov/-/media/QIS/pdf/QuantumBrochure2021.pdf
13	https://nsf.gov/news/special_reports/big_ideas/quantum.jsp
14	https://beta.nsf.gov/funding/opportunities/enabling-quantum-leap-quantum-interconnect-challenges-transformational
15	https://m.dongascience.com/news.php?idx=54043
16	https://fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/june-2021/fraunhofer-and-ibm-to-unveil-quantum-computer.html
17	https://en.acatech.de/wp-content/uploads/sites/6/2020/07/acatech_IMPULS_Quantentechnologie_en_web.pdf
18	https://reuters.com/article/us-germany-quantumcomputer-idUSKBN2CS0W9
19	https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/european-quantum-internet-alliance/
20	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab0077
21	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ab029d
22	https://sj.jst.go.jp/news/202205/n0523-03k.html
23	https://iof.fraunhofer.de/en/News/BMBF-promotes-quantum-research.html
24	https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01901/00004/
25	https://itu.int
26	https://etsi.org
27	https://iso.org
28	https://ieee.org
29	https://ietf.org
30	https://tta.or.kr
31	https://wintelips.com

II

양자기술 R&D 동향



제1장 국내외 양자통신 R&D 동향

제2장 국내외 양자센서 R&D 동향

제3장 국내외 양자컴퓨팅 R&D 동향

제1장 국내외 양자통신 R&D 동향

제1절 개요

양자통신은 양자시스템을 이용해 정보를 전달하는 기술을 통칭한다. 통신에 활용되는 양자는 주로 빛 알갱이인 광자이다. 기존의 광통신기술은 빛 다발을 이용해 정보를 전달한다. 반면 양자통신은 빛 알갱이를 이용하기 때문에, 양자역학을 이용한 보안성 강화에 활용할 수 있고 전송하는 정보량을 늘릴 수 있는 장점이 있지만, 구현상 많은 제약이 존재한다. 양자통신은 양자 상태로부터 암호키를 추출하는 양자 키 분배 기술을 주로 구현하고 있으며, 거리를 확장하기 위한 중계기 기술들을 연구하고 있다.

구현 방법에 따라 전용 광라인이 필요한 유선, 대기중으로 송수신하는 무선 방법이 있는데, 국내외 기술은 유선과 무선에서 차이가 있다. 유선의 경우 국내 양자 키 분배 기술은 주요 선진국의 기술을 바짝 추격하고 있으며 최근 대기업 및 중소기업들이 양자 키 분배 장비를 생산하며 산업생태계도 활성화되었다. 2020년부터 양자암호통신을 공공 및 민간 분야 26개 기관에 시범 구축하여 실제망에서의 운용 레퍼런스를 확보함으로써 2023년에는 산업체가 개발한 양자 키 분배 장비를 국내 국가 공공망에 도입하기 위한 인증 제도가 세계 최초로 시행될 예정이다. 양자 키 분배 외에 양자를 이용한 보안 기술 제공을 위해서는 양자 인증 및 서명 등이 필요한데, 국내외 기술 수준은 연구 단계로서 실험실 수준에 머물러 있으나 양자 인증을 중심으로 점차 실증 단계에 접어들 것으로 예상된다. 무선의 경우 국내외 격차가 적지 않다. 국내 무선 양자통신은 2018년 한국전자통신연구원(ETRI)이 100 m 실험을 성공한 뒤 KT가 2022년에 1 km 실험에 성공한 것이 주목할 성과이다. 최근에는 드론을 이용한 양자통신 연구도 진행 중이나 아직은 가시적 성과를 나타내기엔 이르다. 반면 해외의 경우 중국을 중심으로 위성을 이용한 무선 양자암호통신이 상당한 성과를 보이고 있다. 최근에는 지상의 유선 양자통신과 결합하여 총 4,600 km의 양자암호통신에 성공하였다. 여기에 유럽, 일본, 캐나다 등의 주요 선진국들이 위성을 이용한 양자통신 계획을 수립하여 진행 중이다. 현재는 양자 키 분배를 넘어 양자인터넷으로 가기 위한 기술개발이 국내외에서 활발히 이루어지고 있다.

본 장에서는 양자통신 중에서 가장 활발하게 기술개발이 이루어지고 있는 유·무선 양자 키 분배, 양자암호 프로토콜 요소기술인 양자 난수 생성기, 양자인터넷의 핵심 요소인 양자중계기, 양자인터넷의 보안을 위한 양자보안기술, 양자통신 시험망 구축기술, 양자보안기술을 도입하기 위한 시험평가기술에 대한 국내외 R&D 현황을 살펴본다.

제2절 해외 양자통신 R&D 동향

1. 유선 양자 키 분배

가. 양자 키 분배

(1) 기술 동향

① 연속변수 QKD

단일광자광원과 단일광자검출기를 사용하지 않고 QKD를 할 수 있는 방법을 연속변수(Continuous Variable, CV) 기반 QKD라고 한다. (3절에서 설명하는 다양한 QKD 프로토콜들은 단일광자 양자상태 생성과 측정을 기반으로 한 불연속변수(Discrete Variable, DB) 기반 프로토콜이다.) CV-QKD는 빛, 즉 전자기장의 쿼드러처(Quadrature)라는 연속적인 변수 특성으로 암호화하고 코히어런트 검출(Coherent Detection)이라는 고전 광 검출 기술로 복호화하여 비밀키를 만들어낸다. 코히어런트 검출기는 단일광자검출기와 달리 별도의 냉각 과정 없이도 높은 검출 효율(90%)을 보이고, 현존하는 광통신 장치들과의 호환성이 좋기 때문에 기존 단일광자검출기보다 실용적이다. CV-QKD 프로토콜은 준비하는 양자상태의 종류, 신호 변조 방법, 검출 방법, 오류 정정 방법에 따라 여러 가지 항목으로 분류할 수 있다. 준비하는 양자상태는 크게 결맞음(Coherent) 상태와 압축(Squeezed) 상태가 있고, 신호 변조 방법에는 가우시안(Gaussian) 변조와 불연속적인 변조가 있으며, 검출 방법으로는 호모다인(Homodyne) 혹은 헤테로다인(Heterodyne) 방법이, 마지막으로 오류 정정 방법에는 직접 혹은 역방향 조정(Reconciliation) 방법 등이 있다.

CV-QKD의 이점은 기존의 고전 광통신 기술을 이용해 구현할 수 있다는 점 뿐만 아니라, 단일모드 필터 역할을 하는 국부진동자(Loscal Oscillator, LO) 특성 덕분에 배경잡음의 영향을 잘 받지 않는다는 점도 있다. 이 특성 때문에 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing)으로 고전 채널들과 다중화할 때 유용하며, 낮 시간에 자유공간(무선)에서 CV 통신을 하는 것도 가능하다. 그러나 CV-QKD는 일반적으로 광손실에 민감하기 때문에 보안 전송거리가 보통 100 km 정도로 제한된다. 그렇지만 단거리 전송의 경우 고차원(High Dimensionality) 특성을 통해 이론적으로 더 높은 키 생성률을 보여줄 수 있다. CV-QKD의 키 생성률을 더 높이기 위해서는 저잡음 호모다인 검출기, 효율적인 오류정정 코드, 정확한 매개변수 추정 등의 기술이 더 필요하며, 일반적인 도청 공격에 대한 보안성 증명도 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있다.

CV-QKD 기술 연구와 사업화는 유럽에서 활발하게 진행되고 있다. CiViQ라는 과제는 Quantum Flagship 프로젝트의 사업 중 하나로서 ICFO(스페인), AIT(오스트리아), Max Plank Institute(독일) 등 유럽 내 여러 연구기관과 통신 회사 등 총 24개 파트너들의 공동 연구로 진행되고 있다. 이들은 궁극적으로 칩 레벨 집적화를 통해 대량생산에 적합한 저가형 CV-QKD 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 그 예시로 관련 기관인 스페인의 ICFO 연구소에서 2021년에 LuxQuanta라는 회사를 창업하여 상용 CV-QKD 시스템을 판매하기 시작했다.

그림 II-1-1 LuxQuanta의 상용 CV-QKD 모듈



※ https://www.luxquanta.com/solutions

CV-QKD에서 보안성을 보장하는 두 연속변수는 결맞음 상태의 두 쿼드러처에 해당하는 전자기장의 실수 성분과 허수 성분이다. 송신부 Alice는 약한 결맞음 신호광(신호 하나당 광자 수 〈5)의 위상과 진폭을 가우시안 변조 혹은 불연속 변조를 이용하여 변조한다. 수신부 Bob에서 양자 채널을 통과하면서 감쇠된 신호는 국부 진동자(Local Oscillator, LO)라 불리는 강한 신호와 섞이게 되는데, 간섭계의 두 출력부는 광 다이오드(Photodiode)로 검출한다. 두 광 다이오드의 전류 차이는 두 광 입력부의 출력과 두 전자기파 사이의 위상차에 대응되는 양을 곱한 값의 제곱근에 비례하고, 이 특성 덕분에 측정하고자 하는 신호와 섞인 LO의 세기만큼 증폭되게 된다. 결맞음 상태에 존재하는 위상과 진폭 사이의 고유한 불확도는 광 다이오드에서 측정되는 '샷 잡음(Shot Noise)'으로써 정량화할 수 있다. 이 샷 잡음 한계를 넘어가는 추가적인 잡음 값을 추정하면 도청 공격을 감지할 수 있는데, DV-QKD에서 사용했던 양자 비트 오류율(Quantum Bit Error Rate, QBER)과 비슷한 기능을 한다고 생각하면 된다.

송신부에서 전자기장의 실/허수 성분은 '위상 기준(Phase Reference)'과 비교하여 정의된다. 이 위상 기준을 송·수신부 사이에서 동기화하는 방법은 송신부에서 강한 광신호인 "Transmitted Local Oscillator(TLO)"를 수신부에 직접 전송하는 방식과, 별도의 약한 신호를 양자 채널에서 전송하여 구내 레이저 소스 "Local Local Oscillator (LLO)"와 동기화하는 방식이 있다. TLO 방식에서는 전송된 강한 신호가 LO로써 코히어런트 검출기에 직접 사용되는 데 반해, LLO 방식은 수신단 내에 있는 동기화된 레이저가 LO로 사용된다.

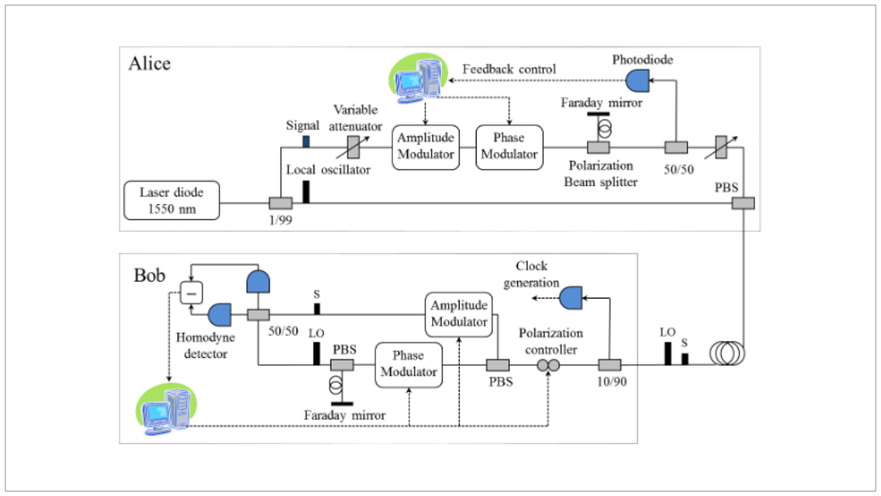
㉮ Transmitted Local Oscillator(TLO) CV-QKD

CV-QKD를 TLO 방식으로 설계하면 송신부가 위상 기준이 잘 정의된 LO와 신호 상태(Signal State) 펄스를 생성해야 하는데, 이는 같은 레이저 광원을 사용하면 된다. 펄스는 진폭을 변조하거나 다이오드 레이저에 펄스 형태의 전류를 인가하여 만들 수 있다. 실제 실험에서는 레이저 펄스를 99:1 혹은 90:10 광 커플러와 같이 결합비 불균형도가 높은(Highly Unbalanced) 광 커플러를 사용하여 나누어준 다음 광세기가 큰 쪽의 출력부를 LO 채널, 작은 쪽 출력부를 양자 신호 채널로 사용한다. 양자 신호는 변조된 다음 LO와 다중화되어 전송 채널을 통과한다. 예를 들어 시간다중화를 한다고 하면 다음 그림과 같이 두 채널 중 하나에 광섬유 지연선을 삽입하는데, 이 때 생긴 시간지연은 두 펄스의 폭보다는 훨씬 길어야 한다. 수신단에서는 역다중화를 해야 하는데, 이 과정에서 신호에 추가되는 잡음이 최소화될 수 있도록 구성해야 한다. 여기서 역다중화는 신호와 LO가 물리적으로 각각 분리된 채널로 결합되는 것으로, 간단하게는 비대칭 광 커플러를 이용하여 구현할 수 있다. 예를 들어 90:10 광 커플러를 이용하여 송신단의 경우와 반대로 입사광의 90%를 신호 채널에 결합하고 10%를 LO채널에 결합하면 된다. 그럼에도 불구하고 이 과정에서 신호 펄스에 10%의 잡음이 더해지고, TLO는 90%의 손실을 겪는다. 이와 같은 광 손실을 최소화하면서 양 채널을 효과적으로 분리하기 위한 대안으로 편광 다중화 방법을 활용할 수 있다. 송신단에서 편광 빔 분할기(Polarizing Beam Splitter, PBS)를 이용해 편광 방향이 서로 수직한 신호와 LO를 결합하여 전송한 다음 수신단 쪽에서 능동 편광조절기를 통해 펄스의 초기 편광상태를 복원할 수 있다. 그 다음 또 다른 PBS를 이용해 신호와 LO를 다시 분리하여 각각의 채널로 보내주면 된다. [그림 II-1-2]에서와 같이 총 시간지연이 T인 광섬유 지연선에 서큘레이터(OC, Optical Circulator)와 패러데이 거울(Faraday Rotation Mirror, FRM)을 삽입하면, 광 신호가 OC-지연선-FRM-지연선-OC 경로를 진행하면서 겪는 총 시간지연은 $2 \times T$가 된다. FRM에서 반사될 때 편광이 90도 회전하므로 처음 광섬유 지연선을 지나며 겪은 편광 변화가 반사 후 동일한 광섬유 지연선을 지나고 나서 보상되게 된다. 이렇게 시간, 편광을 둘 다 이용한 이중 다중화 방법으로 수신단에서 두 펄스를 효율적으로 결합할 수 있다.

LO와 신호 펄스를 다중화하지 않고 두 개의 광 채널을 이용하여 전송할 수도 있지만, 이러한 구성은 두 채널 사이의 서로 다른 위상 드리프트 때문에 두 펄스 사이의 위상 기준 동기화가 깨질 수 있다는 점을 고려해야 한다. 독립적인 채널을 두 개나 사용해야 한다는 점도 단점이다. 따라서 실제 실험에서는 두 펄스를 같은 전송 채널에서 다중화한다. 같은 광섬유를 통해 전파되면 신호와 LO가 같은 위상변화를 겪으므로 계속 같은 위상차를 유지할 수 있다.

송신부 레이저에 대한 위상 잡음은 이 디자인에서 크게 중요하지 않으나, 역다중화 단계에서 사용하는 간섭계는 반드시 안정되어 있어야 한다. LO 펄스와 신호 펄스가 역다중화되고 나서 간섭하기 위해서는 코히어런트 검출기에 동시에 도달해야 하기 때문이다. 이를 위해 먼저 도달한 펄스의 채널에 두 펄스 사이의 지연과 일치하는 광섬유 지연선을 연결해 준다. 마지막으로 두 펄스 사이의 간섭 신호를 샷잡음 제한(Shot-Noise Limited) 호모다인 검출기를 통해 측정하면, 세기(Intensity)가 신호와 LO사이의 위상차 ϕ에 대응하는 쿼드러처 x_ϕ에 비례하는 전기 신호를 얻을 수 있다. 사용하는 프로토콜에 따라 Bob은 x_0나 $x_{\pi/2}$중 하나를 랜덤하게 선택하여 측정하는데, LO 경로 쪽에 위상변조기를 통해 $\pi/2$의 위상을 랜덤하게 인가해주면 된다.

그림 II-1-2 Transmitted Local Oscillator(TLO)-CV-QKD



※ Grosshans, F. & Grangier, P. (2002)

㉯ Local Local Oscillator(LLO) CV-QKD

LLO 방식으로 CV-QKD를 설계하려면 송·수신단 모두에 각각 레이저가 있어야 한다. 송신단의 레이저로는 신호 상태를 만들고, 수신단에 위치한 구내(Local) 레이저로는 LO를 만든다. LO가 실제로도 'Local'하므로 완전한 의미의 LO라고 할 수 있다.

양 레이저 사이의 위상 변화를 모니터링하면서 능동적으로 조절해 주는 과정이 필요한데, 다만 조절을 위해서는 두 레이저의 위상 노이즈에 대한 조건이 TLO 방법에서와 달리 까다로워진다. 송신단은 연속발진 레이저를 IQ 변조기를 사용하여 변조함으로써 양자 신호를 만들고, 가변 광 감쇠기 VOA를 이용하여 감쇠한다. 수신단에서 (능동 편광변조기를 통해) 편광이 교정된 양자 신호는 LO 신호와 함께 섞여서 균형 호모다인 검출기를 통해 측정된다. DAC, ADC와 같은 전자 부품들은 디지털 신호 처리(DSP, Digital Signal Processing)를 위한 것인데, 이 DSP 과정은 두 레이저 사이의 위상 동기를 맞추기 위해 필요하다.

두 CW 레이저의 주파수를 잠그기 위해 일반적으로는 동기화 펄스 시퀀스를 사용한다. 이 동기화 펄스는 양자 정보와 상관없는 고전 광신호이고, 진폭이 양자신호보다 훨씬 크기 때문에 위상을 비교적 정확하게 결정할 수 있다. 또 다른 대안으로 수신단 쪽 CW 레이저의 파장과 위상을 조절하기 위한 피드백 루프를 구성하는 방법이 있는데, 파일럿 톤(Pilot Tone)의 편광을 양자 신호의 편광과 수직하도록 변조하여 전송하면 된다. 이를 위해서는 사용하는 IQ 변조기와 코히어런트 검출 시스템(Optical Hybrid)이 이중 편광을 지원하는 제품이어야 하고 파일럿 톤을 측정하기 위해 추가적인 검출기가 필요하다. 또 다른 주파수 잠금 방법으로 DSP를 이용해 두 레이저의 위상 드리프트를 직접 교정하는 방법이 있다.

㉠ 가우시안 변조 결맞음 상태(GMCS, Gaussian-Modulated Coherent-State) 프로토콜[1)]

처음 발표된 가우시안 연속 변조 프로토콜은 가우시안 변조된 압축 상태 프로토콜로, 여기서는 압축상태의 변위(Displacement)로 키를 암호화하는 것이었다. 이 과정에서 압축을 적용할 방향을 랜덤하게 선택하게 되는데, 이는 BB84 프로토콜의 기저 선택 과정과 유사하다. 이 프로토콜은 나중에 결맞음 상태를 이용한 GMCS 프로토콜로 확장되는데, 결맞음 상태가 압축 상태보다 실험적으로 구현하기에 용이하기 때문이다. 결맞음 상태를 이용한 CV-QKD 프로토콜이 DV-QKD 프로토콜과 다른 점은 사용되는 채널마다 양쪽 기저의 키 정보가 준비된 양자상태에 동시에 암호화된다는 점이다. 따라서 Bob의 측정 결과가 Alice의 기저들의 키와 상관관계를 가질 수 있는 것이다. GMCS 프로토콜에서의 광원은 쿼드러쳐 성분 x_j와 p_j로 구성된 결맞음 상태 $|\alpha_j\rangle = |x_j + ip_j\rangle$들이 혼합되어 있다. x_j와 p_j는 랜덤한 변수 집합 X와 P에서 각각 선택되는 것으로, 가우시안 분포 $N(0, V_m)$을 따른다. (V_m : 변조 분산) 가우시안 변조된 광원의 총 분산값은 결맞음 상태의 고유 쿼드러쳐 불확도인 V_s와 V_m의 합으로 표현된다. 현재 널리 쓰이는 가장 간단한 형태의 GMCS 프로토콜은 2002년에 Grosshans와 Grangierrk 제안한 GG02 프로토콜로, 전체 프로토콜의 단계별 설명은 다음과 같다.[2)]

- Alice가 고전 변수값 $\alpha_j = x_j + ip_j$를 빛의 결맞음 상태에 변조하여 암호화한다. 총 N개의 결맞음 상태 $|\alpha_1\rangle, |\alpha_2\rangle, \cdots, |\alpha_N\rangle$를 Bob에게 전송한다면, 평균 0, 분산 V인 가우시안 분포 내에서 랜덤한 2N개의 변수 값을 고르게 된다.
- Alice가 양자채널을 통해 변조된 상태의 신호를 전달한다. 이는 흔히 열 손실 채널로 기술할 수 있는데, 채널의 투과율과 열 잡음으로 채널의 특성이 결정된다.
- Bob이 입사된 신호에 대해 호모다인 혹은 헤테로다인 검출을 통해 고전 변수값 β_j를 측정한다. 예를 들어 호모다인 측정을 할 경우 신호와 LO의 위상 차이에 따라 x와 p 쿼드러쳐 중 하나를 선택할 수 있다.

1) Cerf, N. J. et al. (2001)
2) Grosshans, F. & Grangier, P. (2002)

- Alice와 Bob이 쿼드러처를 랜덤하게 바꿔 가면서 각각 상태 준비와 측정을 수행했다면, 고전 채널을 통해 기저 선택을 공유하고 같은 쿼드러처를 선택한 경우만 남겨준다.(Sifting)
- Alice와 Bob은 시프팅된 데이터를 공유하고 비교함으로써 매개변수 추정을 수행한다. 사전에 알고 있던 양자채널의 매개변수를 이용하여 Eve에게 새어나간 정보량의 최대값을 추정한다. 만약 이 정보량이 특정 보안 문턱값을 넘어가면, 프로토콜을 종료한다.
- Alice와 Bob이 오류정정과 비밀성증폭을 수행한다. Bob이 Alice의 변수를 추정하는 방식을 Direct Reconcillation, 반대로 Alice가 Bob의 변수를 추정하는 방식을 Reverse Reconciliation이라 부른다. (CV-QKD의 오류정정은 DV-QKD와 비교했을 때 훨씬 복잡하기 때문에 현재 시점에서 CV-QKD 프로토콜의 복잡도와 전체 시스템의 성능에 영향을 미치는 핵심 요인이라고 할 수 있으나, 아직 관련 연구가 많지 않은 상황이다.[3)]

신뢰할 수 있는 열 노이즈(Trusted Thermal Noise)와 혼합된 광원을 이용하는 GMCS 프로토콜도 있는데, 이 경우의 분산값은 열적 분산값을 추가로 더한 값인 $V = V_s + V_m + V_{th}$이다. 이런 프로토콜은 양자상태를 준비하는 과정의 비용이 상대적으로 적게 들고, 광 대역폭보다 긴 파장에서 QKD 구현이 가능하다는 점에서 널리 사용되고 있다. 복호화 과정은 빛의 전자기장의 쿼드러처를 코히어런트 검출을 이용해 측정함으로써 이루어진다. CV-QKD에는 호모다인과 헤테로다인 검출 방법을 주로 사용하는데, 호모다인 검출을 이용한 결맞음 상태 프로토콜은 헤테로다인 검출을 이용한 No-Switching 프로토콜로 변형할 경우 양쪽 쿼드러처 모두를 측정함으로써 키를 추출할 수 있다. GMCS 프로토콜이 현재까지 보안성과 적용 면에서 가장 잘 알려진 프로토콜로, 기존의 광통신 표준 기술만을 활용하므로 상대적으로 간단하게 구현이 가능하다.

㉡ 불연속변조 프로토콜

불연속변조 프로토콜은 광원으로 N개의 불연속적으로 랜덤화된 결맞음 상태의 혼합 광 $|\alpha_k\rangle = \|\alpha|e^{i2k\pi/N}\rangle$을 이용하고, 키는 이 결맞음 상태들의 랜덤한 위상으로 암호화된다. 사실 이 프로토콜은 가우시안 프로토콜보다 먼저 제안되었으나, 쓸만한 키 생성률을 확인할 수 있는 보안성 증명이 어렵다. 불연속변조 프로토콜은 N개의 결맞음 상태로 구성된 알파벳을 준비하는데, 위상값에 적용된 k값이 비밀키이다. Bob은 호모다인이나 헤테로다인 측정을 통해 k값을 추정한다. 실제로 완벽하게 가우시안 변조를 구현하는 게 불가능하고, 불연속 변조를 할 경우 오류정정의 주요 단계가 간단해지기 때문에 상태 개수 N에 대한 일반화된 보안성 증명 문제가 해결될 경우 실용적인 대안이 될 수 있다.

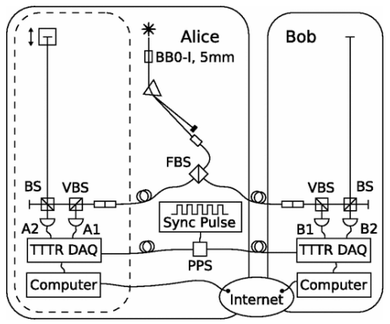
3) Gümüş, K. et al. (2021)

② 고차원(High-Dimensional) QKD

고차원 QKD(High-Dimensional QKD, HD-QKD)는 다중레벨 시스템으로 키를 인코딩하는 QKD를 지칭하며, 기존의 큐빗 기반 시스템보다 입자 하나당 더 높은 키 생성률을 보이며, 잡음 내성도 더 뛰어나다.[4] 2006년에 광자의 공간 자유도를 이용한 고차원 알파벳을 이용하여 처음 실험으로 구현되었고,[5] 2007년에는 에너지-시간 얽힘 광자쌍을 이용하여 구현되었다.[6]

[그림 II-1-3]에서 에너지-시간 얽힘 광자쌍을 이용한 실험 구성도를 확인할 수 있는데, 잡음이 많은 환경에서도 광자쌍 하나당 10비트가 넘는 정보가 담긴 알파벳 키를 생성하였다. 광자쌍 하나당 4비트의 정보를 전송할 경우 양자 비트 오류율(QBER)이 5%이고, 양자채널의 보안성은 Franson 간섭무늬의 가시도를 측정하여 결정할 수 있다. 2017년에는 타임 빈 큐비트(Qubit)를 이용한 고속 QKD가 보고된 바 있다.[7] 이런 시간-에너지 HD-QKD는 일정한 클록 주파수를 이용할 때 단일광자검출기의 시간 분해능이 높을 경우 더 많은 시간 슬롯(Slot)을 할애할 수 있다는 점에서 유용하나, 클록 주파수를 단일광자검출기의 대역폭 이상으로 확장할 경우에는 이야기가 달라진다. 하지만 광 각운동량(Optical Angular Momentum, OAM)과 같은 공간 모드를 이용하면 이런 문제를 해결할 수 있다. OAM을 이용한 HD-QKD는 2006년에 E91 프로토콜을 이용하여 처음 구현되었고,[8] 2013년에는 16개 차원으로 구현되었다.[9] 2019년에는 1.2 km 길이의 다중모드광섬유를 이용하여 전송에 성공했고, 다중코어(Multicore) 광섬유 기반 공간다중화를 이용하여 구현된 사례들도 있다.[10]

그림 II-1-3 에너지-시간 얽힘광자쌍을 이용한 고차원 QKD 실험 구성도



※ Ali-Khan, I. et al. (2007)

4) Bourennane, M. et al. (2001)
5) Walborn, S. et al. (2006)
6) Ali-Khan, I. et al. (2007)
7) 1. Islam, N. T. et al. (2017)
8) Simon Gröblacher et al. (2006)
9) Etcheverry, S. et al. (2013)
10) Ding, Y. et al. (2017)

(2) 연구 동향

QKD가 이론적으로는 물리법칙에 근거한 무조건적 안전성을 보장한다. 하지만, 실제 시스템에 적용할 때 사용되는 소자나 장치들이 100% 이상적으로 동작하지 않기 때문에 몇 가지 도청 공격(Quantum Hacking)의 위험에 노출될 수밖에 없다. 최근 QKD 연구는 시스템의 전체 효율을 개선하여 키 발생률과 전송거리를 늘리는 것 뿐 아니라, 이러한 도청 공격들로부터 안전한 새로운 프로토콜을 제안하고 실험으로 구현하는 방향으로도 계속 진행되고 있다. 예를 들어, 잘 알려진 도청 공격 중 하나로 광자수 분할(Photon Number Splitting, PNS) 공격이 있다. DV-QKD에서는 이상적인 단일광자 광원을 가정하지만, 실제로는 단일광자가 확률적으로 발생하고 두 개 이상의 광자가 발생할 확률도 존재한다. PNS 공격은 이 점을 이용한 것으로, Alice가 암호화하여 보낸 양자상태가 두 개 이상의 광자를 포함하고 있을 때 빔 분할기로 광자 일부를 이용, 탈취하여 양자 메모리에 보관하고 있다가 기저 공표 과정에서 알게 된 Alice의 암호화 기저를 이용해 측정하면 공격을 들키지 않고 정보를 얻을 수 있게 된다는 원리이다. 이러한 QKD의 광원 공격을 방지하기 위해 디코이 상태 프로토콜이 개발되었고, 이는 현재 유·무선 QKD 시스템의 성능 개선에 큰 기여를 하였다. 다음 표는 디코이 상태 프로토콜을 이용한 최근까지의 QKD 실험 결과를 요약한 것이다.

표 II-1-1 디코이 상태 QKD 실험과 성능 목록

저자	클록 주파수	암호화 방법	채널 종류	최대 전송거리	키 발생률 (bits/s)	발표 연도
Zhao et al.	5 MHz	위상	광섬유	60 km	422.5	2006
Peng et al.	2.5 MHz	편광	광섬유	102 km	8.1	2007
Rosenberg et al.	2.5 MHz	위상	광섬유	107 km	14.5	2007
Schmitt-Manderbach et al.	10 MHz	편광	자유공간	144 km	12.8	2007
Yuan et al.	7.1 MHz	위상	광섬유	25.3 km	5.5 K	2007
Yin et al.	1 MHz	위상	광섬유	123.6 km	1.0	2008
Wang et al.	0.65 MHz	위상	광섬유	25 km	0.9	2008
Dixon et al.	1 GHz	위상	광섬유	100.8 km	10.1 K	2008
Peev et al.	7 MHz	위상	광섬유 네트워크	33 km	3.1 K	2009
Rosenberg et al.	10 MHz	위상	광섬유	135 km	0.2	2009
Yuan et al.	1.036 GHz	위상	광섬유	100 km	10.1 K	2009
Chen et al.	4 MHz	위상	광섬유 네트워크	20 km	1.5 K	2009
Liu et al.	320 MHz	편광	광섬유	200 km	15.0	2010
Chen et al.	320 MHz	편광	광섬유 네트워크	130 km	0.2 K	2010
Sasaki et al.	1 GHz	위상	광섬유	45 km	304.0 K	2011
Wang et al.	100 MHz	편광	광섬유 네트워크	96 km	48.0	2013
Fröhlich et al.	125 MHz	위상	광섬유 네트워크	19.9 km	43.1 K	2013
Lucamarini et al.	1 GHz	위상	광섬유	80 km	120.0 K	2013
Fröhlich et al.	1 GHz	위상	광섬유	240 km	8.4	2017
Liao et al.	100 MHz	편광	자유공간	1200 km	1.1 K	2017
Yuan et al.	1 GHz	위상	광섬유	2 dB	13.7 M	2018
Boaron et al.	2.5 GHz	시간	광섬유	421 km	6.5	2018

그러나 광원 외 다른 소자들을 공격하는 해킹 방법들이 다양하게 제안되면서 디코이 상태를 이용하는 것만으로는 안전성을 보장하기 충분하지 않다고 밝혀지게 되었다. 특히 검출 시스템 공격에 대한 보안상의 허점을 제거할 수 있는 MDI 프로토콜이 등장하면서 비신뢰 릴레이가 있는 QKD 네트워크에서의 보안성을 강화할 수 있게 되었다. 현재까지 달성한 최대 전송거리는 2016년에 중국의 J. W. Pan 그룹이 달성한 404 km[11]이고, 연속변수를 이용한 구현,[12] 저가형 레이저와 FPGA 기반 하드웨어를 이용한 타임 빈(Time Bin) 기반 유선 MDI-QKD,[13] 실리콘 포토닉스 공정을 이용한 MDI-QKD 송수신기 칩,[14] RFI-MDI-QKD 시스템[15] 등 다양한 형태로 구현이 되고 있다.

국내에서는 아직까지 CV-QKD 관련 연구가 많이 이루어지지 않았지만, 유럽과 미국의 경우 활발하게 이루어지고 있다. CV-QKD 연구에는 크게 보안성 증명과 후처리 방법 개선과 같은 이론 연구와 실험 구현 연구가 있다. CV-QKD에서는 코히어런트 검출기를 사용하기 때문에 (단일광자검출기를 사용하는) DV-QKD에 대한 주요 도청 공격 중 하나인 “Detector Blinding Attack”에 대해 안전하긴 하지만, 위상 기준 신호인 LO 신호에 대한 공격에는 아직 취약하다. 또한 보안성도 무한 번의 통신 횟수를 가정한 점근적 한계(Asymptotic Limit)에서만 분석되어 있기 때문에 아직까지 완전한 보안성 증명은 이루어지지 않았다. 후처리의 경우 2003년에 역방향 Reconciliation 오류정정 방법이 적용되면서 GMCS 프로토콜 기반 CV-QKD 시스템이 3-dB 손실 제한을 극복할 수 있게 되었다.[16] 이후로 후처리 기술의 효율이 개선되어 전송거리가 지속적으로 확장되었고, 2016년에는 잡음을 통제함으로써 100 km의 일반 광섬유 채널로 전송하는 데 성공했다.[17] 초저손실 광섬유로는 2020년에 약 200 km까지 전송에 성공했으며,[18] 2019년에는 칩 기반 구현 결과도 발표되었다.[19] GMCS가 아닌 다른 프로토콜로는 2018년에 연속변수 얽힘상태를 이용한 50 km 전송 사례가 있다.[20]

11) Yin, H.-L. et al. (2016)
12) Pirandola, S. et al. (2015)
13) Valivarthi, R. et al.(2017)
14) Kejin Wei et al. (2020)
15) Wang, C. et al. (2015)
16) Grosshans, F. & P. Grangier. (2002)
17) Huang, D. et al. (2016)
18) Zhang, Y. et al. (2020)
19) Zeng, P. et al. (2019)
20) Wang, N. et al. (2018)

나. 얽힘 기반 양자 키 분배

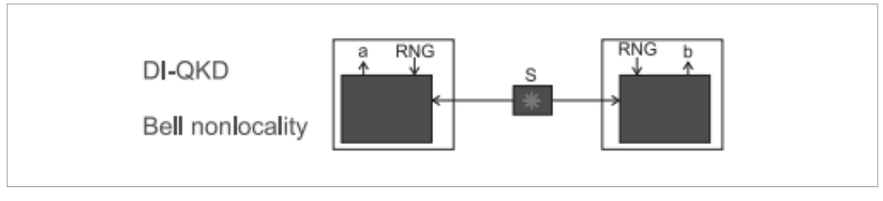
(1) 기술 동향

얽힘 기반 QKD에 대한 연구는 처음 1991년 Eckert에 의해 제안되었는데,[21] 이는 다음과 같은 방식이다. 먼저 Alice와 Bob이 얽힘 광원을 하나씩 나누어 가진 상태에서 각자 자신의 양자 상태를 무작위로 선택된 기저로 측정을 하게 된다. 충분한 측정결과가 모이면 Alice와 Bob의 측정결과의 일부분을 공개해서 양자 비국소성(non-locality)를 확인하는 벨 부등식[22] 위배를 확인한다. 만일 벨 부등식이 위배 되면 남은 측정결과를 통해 비밀키를 생성할 수 있다. 후에 이 방식은 BBM92 방식[23]과 거의 동일하다는 것이 밝혀졌다. 즉, Alice와 Bob이 BB84 프로토콜에서처럼 각각 2개의 랜덤 측정축을 선택해서 얽힘 광자 쌍 중 자신의 광자에 측정을 하고, 나중에 같은 축으로 측정하는 경우에 키를 남기게 된다. 이 경우에도 측정 결과의 일부를 벨 부등식의 하나인 CHSH 부등식[24]의 위배 여부 확인에 사용하게 되면 최종 생성되는 비밀키의 안전성을 보장 받을 수 있다. 얽힘을 활용한 QKD는 프로토콜의 안전성을 증명하는 데에도 이용될 수 있다. 이는 Lo와 Chau가 얽힘을 활용한 BBM92가 무조건적인 안전성을 가진다는 것을 증명할 때 다음과 같은 사실을 보임으로써 증명하였다.[25] 잡음이 섞인 여러개의 얽힘 광자쌍을 통해 키를 얻어내는 것이 얽힘 증류를 통해 완벽한 얽힘 광자쌍을 통해 키를 얻어낼 수 있는 방식으로 변형될 수 있다면, 즉, 잡음이 충분히 작다면, QKD는 무조건 적인 안전성을 가질 수 있다는 것이다. 후에 Shor와 Preskill 등에 의해 Lo와 Chau가 방식은 양자오류정정 부호 등을 통해 BB84 방식으로 환원될 수 있다는 것이 밝혀졌다.[26] 즉, 얽힘을 활용하여 QKD 하는 방식이 얽힘을 활용하지 않는 BB84 QKD로 환원될 수 있다는 것을 보인 것이다. 하지만 이는 어디까지나 안전성을 증명하는 수학적 도구일 뿐 벨 부등식의 위배 확인을 통한 QKD 구현의 장점을 보인 것은 아니다.

21) A. K. Ekert. (1991)
22) J. S. Bell. (1964)
23) C. H. Bennett et al. (1992)
24) J. F. Clauser et al. (1969)
25) H.-K. Lo & H. F. Chau.(1999)
26) P. W. Shor & J. Preskill. (2000)

이처럼 얽힘 광원을 키분배에 사용하는 것에서 필요한 것은 벨 부등식 위배 확인이 될 수 있다. 하지만 벨 부등식의 위배 확인을 위해서는 결함 없는(Loophole-Free) 벨 부등식 실험이 필수 인데, 이는 높은 충실도의 양자 얽힘 광원과 높은 측정효율의 측정기가 필요하므로 과거 기술력으로는 어려운 일이었다. 그래서 얽힘 광원을 활용하여 QKD를 하는 연구보다는 결함 없는 벨 부등식 위배에 대한 학문적인 연구들이 2000년 중반까지 진행되었지만 2007년 Acin 등에 의해 얽힘 광원을 활용하여 벨 부등식의 위배를 확인하는 QKD 방식이 기기무관(Device-Independent, DI) QKD에 활용될 수 있다는 것이 밝혀지면서[27] 다시금 큰 주목을 받기 시작했다.

그림 II-1-4 기기무관 QKD



위의 그림에서 보는 것처럼 Alice와 Bob이 사용하는 양자 광원 및 측정 장치들을 신뢰할 수 없을 때에도, 즉, 광원과 측정장치가 Black Box일 때에도, 벨 부등식의 위배만 확인할 수 있다면 항상 비밀키를 뽑아낼 수 있다는 것이다. 이는 다른 말로 하면 광원과 측정기를 도청자가 제공해도 Black Box의 입력, 출력 값을 통해 벨 부등식의 위배만 확인된다면 최종 비밀키를 추출할 수 있다는 말이다. 이는 광원, 양자채널, 측정 장치에 대한 어떠한 부채널 공격에도 안전한 QKD가 될 수 있다는 의미이기도 하다. 하지만 그럼에도 불구하고 DI-QKD가 안전하게 동작하기 위한 최소한의 가정들은 필요하다.

1. 양자역학은 옳은 이론이다.
2. 두명의 사용자는 인증된 고전채널을 사용한다.
3. 사용자들은 그들의 측정장치의 입력 값으로 신뢰할 수 있고, 비밀성이 유지되는 RNG를 사용한다.
4. Alice와 Bob은 결함없는 벨 부등식 테스트를 할 수 있어야 한다.

이러한 4가지 정도의 가정들은 다른 QKD 프로토콜들의 정보이론적 안전성을 증명하기 위한 가정들에 비해 굉장히 적은 개수의 가정들이다. 아직까지 DI-QKD의 기술적 성숙도는 구현의 관점에서는 막 시작하는 단계라 볼 수 있고, 이론적 안전성의 증명의 관점에서는 성숙하는 단계로 진입하는 중이라고 볼 수 있다. 물론 얽힘을 사용하는 모든 QKD 프로토콜의 구현이 시작하는 단계라고는 볼 수 없다. 최근에 BBM92 방식이 50km 정도의 실망에서 구현되었는데,[28] 키생성 속도 등은 최대 수 kbps 정도로 상당히 좋은 편이다. 하지만 안전성 측면에서는 DI-QKD와는 거리가 있다.

(2) 연구 동향

DI-QKD에 대한 연구는 크게 4가지 관점에서 진행되었다. 먼저 높은 충실도를 갖는 양자 얽힘을 의미 있는 거리까지 분배하는 것, 결함 없는 벨 부등식의 위배 확인, 안전성에 대한 이론연구, 그리고 DI-QKD 구현을 통한 비밀키의 생성이 그것들이다. 물론 각각 따로 연구되기도 하지만 복합적으로 연구되고 있기도 하다. 즉, 얽힘을 분배하여 결함 없는 벨 부등식의 위배를 확인한다거나 이론적으로 안전성을 확인하기 위해 결함 없는 벨 부등식의 위배를 어떠한 성능의 광원 및 측정기로 수행하는 것 등이다.

실제 DI-QKD의 구현은 아직 시작하는 단계이지만 최근 의미 있는 결과들이 중국 Jian-Wei Pan 그룹[29]과 독일의 H. Weinfurter 그룹[30]에서 진행되었다. 그들은 수백 미터 떨어진 두 지점에서 높은 충실도의 양자 얽힘을 분배하고, 그 양자 상태들에 대해 측정 축의 선택과 결과 값들을 통해 결함 없는 벨 부등식의 위배를 확인하였고, 남은 결과들을 통해 키를 생성해 낸 것이다. 하지만 수십 시간의 측정시간 등을 통해 키를 생성한 것이라 키생성 속도를 논의하는 것은 의미가 없다. 실제 키를 뽑아내는 것이 아닌 결함 없는 벨 부등식의 대한 실험은 꽤 많이 진행되었다(많이라는 것은 단순히 상대적인 것이지 실제로 실험 자체가 지극히 고 난이도이기 때문에 수천, 수만의 결과를 의미하지는 않는다). 이러한 실험들은 넓게 두 가지로 분류될 수 있다. 첫번째는 얽힌 상태가 모두 광자만으로 이루어진 경우이고, 다른 하나는 하나의 광자와 이온, 중성 원자, NV-센터 등 양자 상태가 오래 유지될 수 있는 시스템과의 얽힘을 이용하는 경우이다.

양자 얽힘 상태가 모두 광자만으로 이루어진 실험들[31] [32]의 경우는 대개 비선형 물질에 펌프 광을 보내서 나온 물리적 자유도가 얽힌 광자쌍을 이용한다. 생성된 광자쌍은 거리가 떨어져 있는 두 명의 사용자인 Alice와 Bob에게 가고 둘은 높은 측정효율의 SNSPD 측정기를 사용하여 측정한다. 광자만을 이용한 실험의 장점은 빠른 생성 속도 및 낮은 QBER을 들 수 있고, 단점은 광섬유를 통과할 때의 손실이 너무 크다는 점이다. 광자와 다른 물리적 시스템의 얽힘을 이용한 실험의 방법은 다음과 같다. 먼저 떨어진 두 지점에서 각각 하나의 광자의 물리적 자유도와 원자 등의 안정적인 시스템에서 하나의 자유도를 상호 작용을 통해 얽힌 상태로 만든다. 이제 각 떨어진 두 지점에서 중간으로 각각의 광자를 보내고, 중간에서 Bell 측정을 한다. 만일 Bell 측정이 성공적이라면 떨어진 두 지점의 안정적인 물리시스

27) A. Acin et al. (2007)

28) Y. Pelet et al. (2022)
29) W.-Z Liu et al. (2022)
30) W. Zhang et al. (2022)
31) M. Giustina et al. (2015)
32) L. K. Shalm et al. (2021)

템의 물리적 자유도는 얽힘 교환의 원리에 의해 얽힌 상태가 된다. 그리고 이 얽힌 시스템에 대한 측정을 통해 Bell 부등식의 위배를 확인하면 된다. 이러한 방법의 장점은 안정적인 시스템에 대한 측정효율이 자연적으로 매우 높다는 점이다. 물론 단점은 많은 구축비용과 느린 얽힘 생성 속도 등이 있을 수 있다.

DI-QKD에서 가장 많은 연구는 이론적 안전성에 대한 연구이다. 이 연구에서는 결함 없는 벨 부등식의 위배를 확인하기 위해 측정기의 문턱(Threshold) 효율, 광원의 충실도, 유한키 안전성 분석, 그리고 실제 키를 생성하기 위한 최소한의 가정들 등에 대한 연구가 주를 이룬다. 특히 최근에 유한키 안전성 분석법까지 적용된 많은 이론 연구들이 존재하는데 이는 논문[33]에 최신 연구 동향 등이 잘 정리되어 있다.

(3) 적용 분야

얽힘을 활용한 QKD 자체는 일반적인 레이저 빛을 사용하는 QKD에 비해 구현 비용이 많이 들고 기술의 구현도 어려운 편이다. 하지만 DI-QKD는 거의 대부분의 부채널 공격으로부터 안전한 비밀키 분배 방식이므로 극도의 안전성이 필요한 국방, 원자력, 국가 공공망 등에 적용될 수 있을 것이라 기대된다.

다. 양자 키 분배 네트워크

(1) 기술 동향

① 국제 표준화 기술 동향

양자 키 분배 네트워크와 관련하여 유럽전기통신표준협회(ETSI), 국제전기통신연합 전기통신표준화부문(ITU-T) 국제 표준화 그룹에서 QKD 네트워크 계층, 양자키 관리 계층, 서비스 계층으로 구성되는 양자암호통신망 구조 및 절차, 보안 요구사항 등에 대하여 활발하게 정의하고 있다.

㉮ ETSI

ETSI ISG-QKD(Industry Specification Group for QKD)는 QKD를 보편적으로 수용하기 위한 표준을 만들기 위한 포럼을 제공하고 QKD 연구, 기술 개발 및 비즈니스 적용을 위한 조정, 협력 및 수렴에 대한 상당한 레버리지 효과를 촉진하기 위하여 2008년에 설립되었다. ETSI ISG-QKD에서는 QKDN의 구성요소와 프로토콜의 상호 운용성을 보장하고 공통 인터페이스 정의를 통하여 QKD를 네트워크에 통합하고 상용화를 촉진하기 위한 표준을 제정 중에 있다.

33) Ernest Y.-Z. Tan. (2021)

현재까지 발간된 문서의 주제는 애플리케이션 인터페이스, 보안 증명, 모듈 사양, 구성 요소의 특성화, 애플리케이션에 핵심 자료를 제공하는 표준 인터페이스, QKD 배포를 위한 장치 및 통신 채널 매개변수이며, 현재 작업 중인 문서의 주제는 QKD 시스템용 보호 프로파일, 단방향 QKD 시스템에서 트로이 목마 공격 보호, QKD 송신기 모듈의 광 출력 특성화, 소프트웨어 정의 네트워킹을 위한 제어 인터페이스, 네트워크 아키텍처 검토, 새로운 네트워크 발전에 대응하는 API 등이다.

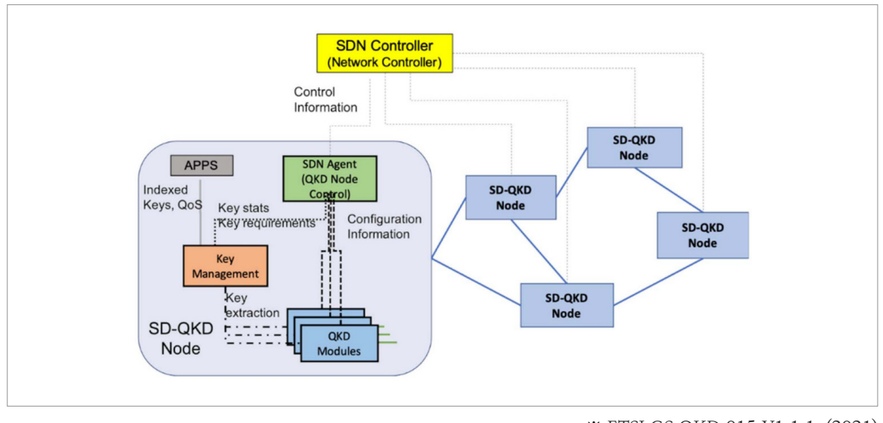
㉯ ITU-T

ITU-T SG13 산하 Q16과 Q6에서는 2018년도부터 양자암호 분배 네트워크 관련 기술 표준 제정 작업 중이며, 첫 번째 제정된 표준인 Y.3800(Overview on networks supporting quantum key distribution)에서 양자 키 분배 네트워크의 설계, 배치, 운용 및 관리에 대한 개념 구조, 계층 모델, 그리고 기본 기능을 정의하였다. 이 후 이를 기반으로 QKDN 기능 요구사항, QKDN 기능 구조, 키 관리, 그리고 QoS를 포함하는 QKDN 제어 및 관리 등의 표준으로 세분화하여 정의하는 작업을 진행 중이다. 마찬가지로 2018년도부터 시작된 ITU-T SG17 산하 Q15, Q4에서는 양자 키 분배 네트워크를 위한 보안 요구 사항에 대한 표준 제정 작업 중이며, X.1710 시리즈에서 양자 키 분배 네트워크 구성요소의 보안 위협, 보안 요구사항, 조치, 인증 등 전반적인 양자암호통신망 보안 프레임워크에 대하여 정의하는 작업을 진행 중이다.

② 소프트웨어 정의 네트워킹(SDN)

ETSI ISG-QKD에서는 양자 키 분배 네트워크에 SDN 기술을 적용하여 효율적인 네트워크 제어 및 관리를 수행하기 위하여 [그림 II-1-5]와 같은 네트워크 모델과 인터페이스를 정의하였다. 해당 표준에서는 다수의 QKD 모듈과 양자키 관리 시스템 그리고 SDN 에이전트를 동일한 물리적 위치에 배치하고, SDN 에이전트와 SDN 컨트롤러와의 인터페이스를 통하여 전체 양자 키 분배 네트워크의 정보 수집, 성능 장애 모니터링, 경로 설정, 네트워크 구성요소 제어, 노스바운드 인터페이스 기반 애플리케이션 서비스 개발 등을 가능케 한다. 또한, ETSI ISG-QKD에서 이기종 양자키 관리시스템을 연계하여 통합하기 위한 인터페이스 및 양자 키 분배 네트워크와 광 전달망을 통합 제어하기 위한 인터페이스에 대한 표준화도 진행 중에 있다.

그림 II-1-5 SD-QKD 네트워크 모델 및 인터페이스 기능 정의



※ ETSI GS QKD 015 V1.1.1. (2021)

한편, SDN 기반 QKDN 모델과 라우팅 방안이나, SDN 기반의 프로그래밍 가능한 양자 스위치를 사용하여 양자 채널 설정을 지원하는 양자 네트워크 스위칭 기술 등 SDN 기반의 네트워킹 기술 연구가 진행 중에 있다. 또한 양자 키 분배 기반의 암호화키 서비스 제공을 위한 QaaS(Quantum as a Service), KoD(Key on Demand)에 SDN 기술이 접목되어 유연하고 효율적인 암호화키 서비스 제공 기술이 연구 중에 있다.[34]

③ 자원 할당(Resource Allocation)

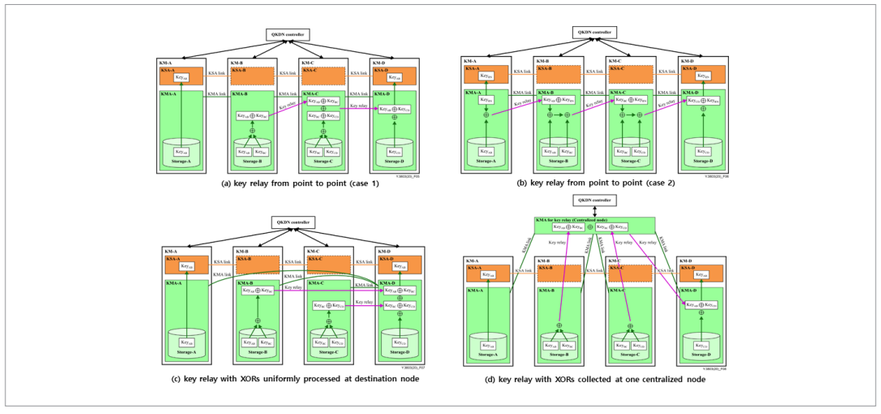
양자 키 분배 네트워크를 운영하기 위해서는 양자 채널, 일반 채널, 데이터 채널을 모두 고려해야 한다. 이에 따라, 다양한 네트워크 채널의 효율적인 자원 할당을 위한 파장 분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM), 시간 분할 다중화(Time Division Multiplexing, TDM), 공간 분할 다중화(Space Division Multiplexing, SDM) 등의 다중화 기술에 관한 연구가 추진되었다.

초기에는 QKD/WDM 네트워크에서 서로 다른 채널에 대해 한 쌍의 파장 할당 기술에 대한 연구가 시작되었으며,[35] 이후 양자 키 분배 네트워크를 일반 네트워크에 통합하여 네트워크 자원을 활용도를 향상시키기 위한 QKD/WDM 기술에 TDM 기술을 결합한 형태의 연구가 진행되었다.[36]

34) Cao, Y. et al. (2022)
35) Cao, Y. et al. (2019)
36) Zhao, Y. et al. (2018)

또한 최근에는 MCF(Multi-Core Fibers) 및 SDM 기술을 활용해 기존 SMF(Single Mode Fibers)의 용량 한계를 극복하고 주파수 슬롯의 수를 최소화하는 기술이 주목 받고 있다.[37]

그림 II-1-6 양자키 전달 방안



※ ITU-T Y3803 (2020)

한편, 양자 키 분배 네트워크에서 고유 자원인 양자키는 핵심 자원이기 때문에 효율적인 양자키 할당을 위한 다양한 연구가 추진 중에 있다. 대표적으로, 양자키를 할당함에 있어 보안 요구 사항을 적시에 충족하기 위한 KoD 기술이나 가상 광 네트워크(Virtualized Optical Network, VON), 수동 광 네트워크(Passive Optical Network, PON), 멀티캐스트 서비스를 보호하기 위한 양자키 할당 방안도 고안되었다.

④ 키 전달(Key Relay) 및 라우팅(Routing)

QKD는 단대단 양자 키 분배 기술이기 때문에 QKD 노드 사이에 직접적인 QKD 채널이 없을 경우, 네트워크 단위의 양자 키 분배를 위해서는 임의의 두 노드 간의 양자키 전달이 요구된다. 하지만 양자 특성에 의하여 보호되는 QKD 간 양자 키 분배와 달리 양자 키 분배 네트워크에서의 양자 키 분배는 디지털 영역에서 이뤄지기 때문에 암호학적으로 안전하다고 증명된 일회성 패드(One-Time Pad, OTP) 기반의 양자키 전달이 이뤄져야 한다.

ITU-T Y.3803에서는 Y.3800 양자 키 분배 네트워크 계층 구조 및 참조 모델 하에 양자키를 전달하는 방법으로 출발지부터 목적지까지 양자키를 단대단 방식으로 연속적으로 전달하는 방식, KMA(Key Management Agent) 링크를 이웃 노드와 연결하지 않고 목적지 KMA와 연결하는 방식,

37) Moghaddam, E. E. et al. (2021)

양자키 릴레이를 위한 KMA를 중앙 노드에 두는 방식 등을 제안하였다.

한편, 네트워크 단위의 양자 키 분배를 위한 양자키 관리 시스템이 별도로 존재하지 않는 경우 신뢰할 수 있는 양자암호통신 중계기(Trusted Repeater) 기반 양자 키 분배 네트워크 구성 및 양자키 전달을 위한 라우팅 프로토콜이 요구된다. 이와 관련하여 기 구축된 미국, 유럽, 일본, 중국 등의 양자 키 분배 네트워크에서는 최단 경로 우선 프로토콜(Open Shortest Path First, OSPF)을 기반으로 양자 키 분배 네트워크의 요구사항 및 특성을 반영하여 적용한 바 있다.[38)]

⑤ 서비스 연속성(Service Continuity)

일반적으로 단대단 QKD 시스템에서 달성 가능한 양자키 생성 속도는 QKD 프로토콜 및 거리에 따라 상이하겠지만 매우 낮기 때문에 충분한 양자키 암호화 서비스를 제공하기에 한계가 있다.[39)] 이에 따라, 희소한 양자키 자원을 효율적으로 활용해 양자키 암호화 서비스의 연속성을 보장하기 위한 키 풀링(Key Pooling) 기술이 연구되었다.

양자키 암호화 서비스의 연속성을 보장하기 위한 양자키 풀(Quantum Key Pool, QKP)은 각 QKD 도메인을 담당하는 QKMS에 관리되며, 불법적인 수단으로 접근 불가능하도록 물리적인 보안 경계 하에 보호되어야 한다. 또한 상응하는 타 도메인의 QKP과 동기화가 유지되어야 한다. 그리고 QKP에 저장되는 양자키의 생성, 저장, 중계, 공급, 파기 등 생애주기가 엄밀하게 관리되어야 한다. 이에 따라, QKP 관리 및 모니터링을 위한 다양한 키 풀링 기술이 제안된 바 있다.[40)]

양자키 암호화 서비스 연속성을 보장하기 위한 또 다른 주요 이슈는 양자암호통신망 보호와 복구이다. 양자암호통신망을 구성하는 노드 및 채널 등의 물리적인 인프라에 장애가 발생하더라도 양자 키 분배 네트워크가 중단 없이 정상적으로 운영되어야 하며 제공 중인 서비스에 영향을 주어서는 안 된다. 이와 관련하여 양자 키 분배 네트워크를 다중 경로로 구성하고 임의의 두 노드 간의 일반 경로 외에 보호 경로와 복구 경로를 선 지정하고 필요에 따라 선택하는 체계가 고안되었다.[41)] 또한 양자암호통신망 장애에 대응하기 위하여 양자 키 분배 네트워크의 채널 오류 원인 및 외부 공격에 따른 변화 등을 사전 분석하여 활용하는 기술에 대한 연구도 수행 중에 있다.[42)]

⑥ 비용 최적화(Cost Optimization)

양자암호통신망을 구축하고 운영함에 있어 주요 진입 장벽 중 하나는 많은 비용이 소요되는 QKD 장비와 이들을 연결하는 다크 파이버다. 특히 QKD 백본 네트워크 구축은 규모가 크고 고려해야 할 사항이 다양하기 때문에 비용 최적화가 더욱 요구된다.

38) Mehic, M. et al. (2020)
39) Boaron, A. et al. (2018)
40) Maeda, W. et al. (2009)
41) Wang, H. et al. (2019)
42) Hugues-Salas, E. et al. (2019)

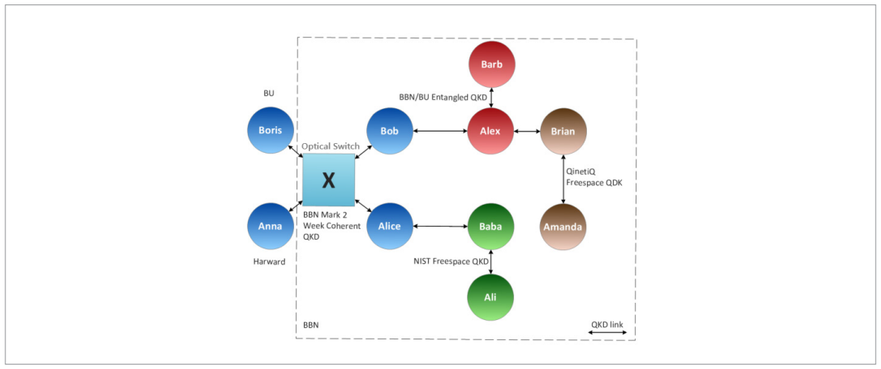
QKD 백본 네트워크가 신뢰할 수 있는 양자암호통신 중계기 기반으로 구축되는 모델의 경우 중계기를 어떻게 배치하는지에 따라 QKD 성능과 비용이 상이해진다. 이에 따라, 최소의 비용으로 양자암호통신망 사용자의 성능 요구사항을 충족하기 위한 중계기 노드 및 채널 배치 최적화 기술에 대한 연구가 추진되었다.[43)] 또한 최근에는 신뢰할 수 있는 양자암호통신 중계기와 비신뢰 노드가 함께 포함된 양자암호통신망 환경을 상정하여 양자 키 분배 네트워크의 최적화 배치 기술에 관한 연구가 수행되기도 하였다.[44)] 한편, 채널 다중화 기술 기반의 양자암호통신망 환경을 상정하고 QKD 노드 트랜시버, 네트워킹 장비, 다중화 채널 비용 등을 대상으로 양자 키 분배 네트워크 배치 최적화 기술 연구 또한 추진된 바 있다.[45)]

(2) 구축 사례

① DARPA 양자 키 분배 네트워크

DARPA 양자 키 분배 네트워크는 세계 최초의 양자 키 분배 네트워크로 2002년 12월 BBN 테크놀로지스와 하버드, 보스턴 대학교 연구진에 의해 공개되었다. DARPA는 하버드 대학교와 보스턴 대학교 사이의 광 스위치를 통하여 구성되었으며 최대 거리 29km, 최대 양자키 생성 속도는 400bps이다.[46)]

그림 II-1-7 DARPA QKD 네트워크 구성도



※ Mehic, M. et al. (2020)

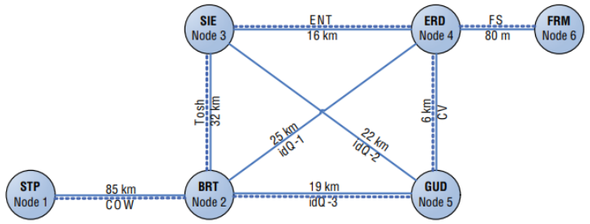
43) Alleaume, R. et al. (2009)
44) Cao, Y. et al. (2021)
45) Cao, Y. et al. (2019)
46) Elliott, C. et al. (2005)

DARPA는 QKD 시스템 간의 거리 한계를 극복하기 위하여 신뢰할 수 있는 양자암호통신 중계기와 스위칭 방식을 모두 활용하여 양자 키 분배 네트워크를 구축하였으며 키 중계기 프로토콜을 자체 개발하여 사용하였다. 또한 양자 키 분배 네트워크에서의 양자키 전달을 위하여 OSPF 프로토콜을 수정하여 활용하였다. 핵심 아이디어는 각 노드별 인접 노드와 특성 수의 비트를 교환하여 교환 비율과 교환된 총 비트 수를 측정하고 이를 OSPF 프로토콜 가중치에 반영하는 일이다.

② Secure Communication based on Quantum Cryptography(SECOQC) 양자 키 분배 네트워크

DARPA 양자 키 분배 네트워크는 2004년에 유럽 위원회(European Commission)의 FP6 프로젝트로 11개 유럽 연합 국가, 러시아, 스위스의 41개 연구 및 산업 파트너들이 참여했다. SECOQC 프로젝트의 주요 목표는 QKD 네트워크 프로토콜의 보안, 설계 및 아키텍처, 통신 프로토콜, 구현, 데모 및 테스트 운영을 포함하여 QKD 네트워크 문제를 체계적으로 정리하는 것이다.

그림 II-1-8 SECOQC 양자 키 분배 네트워크 구성도



※ Peev, M. et al. (2009)

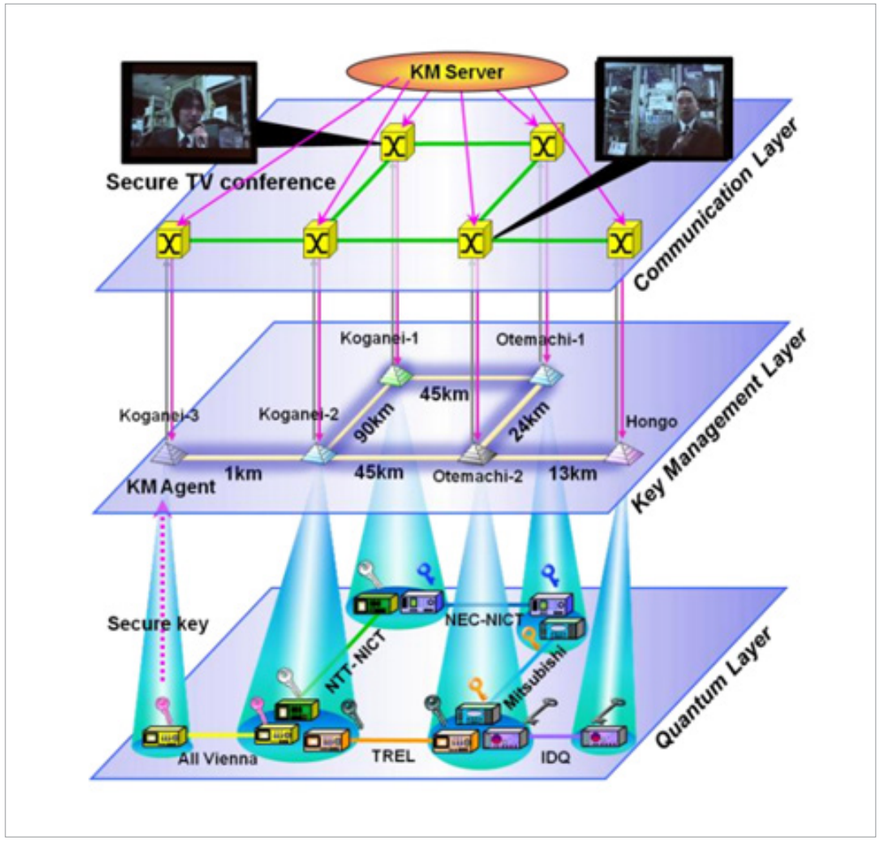
SECOQC는 신뢰할 수 있는 양자암호통신 중계기 기반 양자 키 분배 네트워크를 구축하였으며, QKD 네트워크 통신에 대하여 저장 및 전달의 Hop-by-Hop 메시지 전송 방식을 채택하였다. 또한 양자 키 분배 네트워크에서의 양자키 전달을 위하여 OSPFv2 프로토콜을 수정하여 활용하였다. SECOQC의 라우팅 프로토콜과 기존 OSPFv2와의 주요한 차이는 단일 최단 경로에 중점을 둔 OSPFv2와 달리 네트워크의 부하 분산과 보호 및 복구 등의 요구사항을 충족하기 위하여 다중 경로를 고려한 점이다.[47]

③ Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크

Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크는 2010년에 일본과 유럽 연합의 9개 기관이 참여한 NICT가 추진하는 Japan Gigabit Network 2 Plus 프로젝트 일환으로 추진된 테스트베드 네트워크이다.[48]

Tokyo UQCC는 SECOQC와 유사한 3-layer 구조를 사용하여 점대점 통신 백본망 형태로 구성하였다. 그러나 기존 양자 키 분배 네트워크와는 달리 중앙 집중식 관리를 위하여 양자키 관리 서버(KMS)를 처음으로 사용하였으며 KMS를 활용하여 양자키를 저장하고 망 운영 관리 데이터를 수집하였다.

그림 II-1-9 Tokyo UQCC 양자 키 분배 네트워크 구성도



※ Sasaki, M. et al. (2011)

47) Peev, M. et al. (2009)

48) Sasaki, M. et al. (2011)

④ 중국 위성-광섬유 통합 광대역 양자 키 분배 네트워크

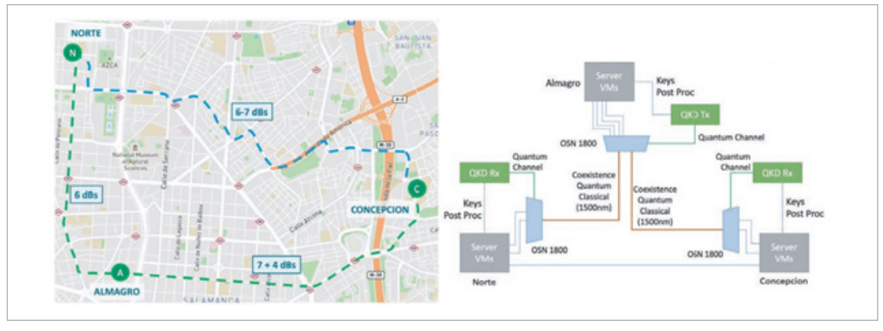
중국에서는 광섬유 기반 베이징~상하이 간 백본 양자 키 분배 네트워크, 허페이/지난/베이징/상하이 도시 내의 Metropolitan 규모 양자 키 분배 네트워크에 위성 네트워크를 통합한 총 4,600km 규모의 양자키 네트워크를 구축하여 QKD 전달 실험에 성공하였다.[49)]

중국 위성-광섬유 통합 광대역 양자 키 분배 네트워크는 5개 계층(Application, Classical Logical, Classical Physical, Quantum Logical, Quantum Physical)으로 네트워크를 구성하였다. 광섬유 구간의 양자 키 분배 네트워크의 라우팅을 위하여 중앙 제어 서버를 두고 각 네트워크 노드에 대한 라우팅 테이블을 관리하였으며, 클라이언트 서버 구조를 활용하여 채널 효율성을 높이고 사용자 요구(On-Demand)에 따른 양자키를 제공하였다.

⑤ Madrid 양자 키 분배 네트워크

스페인 Madrid 양자 키 분배 네트워크는 최초로 구축된 SDN 기반 양자 키 분배 네트워크이다. 해당 네트워크는 SDN 기술을 사용하여 양자 및 클래식 채널 간에 물리적 및 논리적 인프라를 공유하는 양자-고전 네트워크를 생성하고 시연함으로써 현재 네트워크 사업자 인프라에서 QKD 시스템의 통합 가능성을 보여주었다.[50)] Madrid 양자 키 분배 네트워크는 ETSI 표준에 따른 3 계층(QKD 계층, 양자 키 관리 계층, 서비스 계층) 구조에 따라 구성되었으며 네트워크에서 사용되는 SDN 지원 QKD 노드의 추상화 모델은 ETSI GS QKD 015 표준을 채택하였다.

그림 II-1-10 Madrid 양자 키 분배 네트워크 구성도



※ Aguado, A. et al. (2019)

49) Yin, J. et al. (2017)

50) Aguado, A. et al. (2019)

(3) 적용 분야

① 금융 산업

금융 산업은 자본주의 사회에서 매우 중요한 거래 및 개인 정보를 취급한다. 이에 따라, 다양한 양자 키 분배 네트워크에서 금융 산업을 주요 적용 분야로 보고 있다. 가령, 중국에서는 기 구축된 양자 키 분배 네트워크를 기반으로 많은 중국 은행이 QKD 보안 데이터 전송과 기업 사용자를 위한 온라인 뱅킹 및 거래를 구현하였다. 또한 2018년에 시작된 스타트업 퀀텀 엑스체인지(Quantum Xchange)는 미국 최초의 상용 양자 통신망 파이오(Phio)를 발표하였다. Phio는 월스트리트의 금융 시장과 뉴저지의 데이터 센터를 연결하는 링크를 포함하여 워싱턴 DC 및 뉴욕시에서 운영하는 양자 키 분배 네트워크이다.[51)] 스위스의 금융 기관도 재난 복구 목적의 네트워크 보안을 위해 상용 QKD 시스템을 사용하였으며, 스위스의 중요한 금융 거래를 보호하기 위해 IPsec 내에서 QKD를 사용하는 시나리오를 공개하기도 하였다.[52)]

② 정부 및 국방

정부와 국방 기관의 기밀 데이터는 장기간 보호되어야 하는 등 엄밀한 보안 요구사항을 지닌다. 양자 키 분배 네트워크는 이러한 정부 및 국방 기관의 보안 요구사항을 보장하고 데이터 주권을 확립하기 위하여 적용될 수 있다. 가령, 스위스 정부는 2007년 총선 개표 전용선 확보를 위해 양자 키 분배 네트워크를 적용하였으며,[53)] 호주 수도 캔버라에서는 정부 기관 간 통신 보안을 확보하기 위하여 양자 키 분배 네트워크를 구현 중에 있다. 또한 Quantum Xchange는 미국 기관 간의 국가 보안 통신을 암호화하기 위한 양자 키 분배 네트워크를 제안하기도 하였다.

③ 클라우드 및 데이터 센터

점점 더 많은 조직에서 클라우드와 데이터 센터를 사용하여 데이터를 백업, 저장 및 복구함에 따라 데이터 개인 정보 보호 및 보안을 보장하는 것이 중요해지고 있다. 기존 보안 솔루션이 양자 컴퓨팅이 제기하는 위협에 취약해짐을 감안할 때 양자 키 분배 네트워크는 클라우드 데이터 보호 및 데이터 센터 상호 연결의 보안을 강화하는 데 적용될 수 있다. 가령, 네덜란드에서는 헤이그와 로테르담에 있는 KPN 데이터 센터 간의 종단 간 양자 키 분배 네트워크를 구축하고 데이터 전송을 보호함을 입증한 바 있다.[54)] 중국의 Beijing-Shanghai QKD 네트워크가 베이징과 상하이 간의 데이터 센터 백업을 보호하는 데 사용되기도 하였다.[55)] 또한 기업 클라우드 보안 애플리케이션 분야에서도 Acronis 및 Alibaba와 같은 여러 회사도 퀀텀 세이프 암호화 기술을 클라우드 데이터 보호에 적용하고 있다.

51) https://www.idquantique.com/quantum-xchange-and-id-quantique-make-ultra-secure-quantum-networks-a-reality-for-leading-us-industries/

52) Ghernaouti-Hélie, S. & Sfaxi, M. A. (2005)

53) https://www.idquantique.com/idq-celebrates-10-year-anniversary-of-the-worlds-first-real-life-quantum-cryptography-installation/

54) https://www.overons.kpn/nieuws/en/kpn-to-implement-quantum-encrypted-connection-qkd

55) Zhang, Q. et al. (2019)

④ 국가 기반 시설

에너지, 운송 및 통신과 같은 국가 기반 시설은 사회를 뒷받침하는 필수 서비스를 지원하며, 해당 인프라에 가해지는 위협은 국가 및 기업 서비스에 지장을 주고 큰 경제적 피해를 초래할 수 있다. 양자 키 분배 네트워크는 이러한 국가 기반 시설 인프라의 데이터 보호 및 기밀성을 제공하기 위하여 활용될 수 있다. 가령, 중국의 State Grid Corp, Oak Ridge, Los Alamos National Labs 등의 기관에서는 에너지 그리드 보호를 위한 양자 키 분배 네트워크 적용을 연구 중이며, Quantum Xchange는 미국의 중요 기반 시설을 보호하고 침입 탐지하기 위한 양자 키 분배 네트워크를 제안하기도 하였다. 한편, 전 세계의 일부 통신 사업자 및 서비스 제공업체 (예: Telefónica, China Telecom, British Telecom 등)는 통신 네트워크를 통한 데이터 전송을 보호하기 위해 양자 키 분배 네트워크를 기존 광섬유 인프라와 통합하는 연구를 수행 중에 있다.

⑤ 의료

의료 기관은 환자 개인 정보 및 의료 기록과 같은 민감 정보를 다루기 때문에 매우 안정적인 네트워크가 필요한데 이에 양자 키 분배 네트워크가 적절한 대안이 될 수 있다. 가령, Toshiba와 ToMMo는 양자 키 분배 네트워크를 통하여 확보한 게놈 염기서열 데이터의 실시간 전송을 성공적으로 입증함으로써 QKD가 유전체 의학 분야에서 실제 적용될 수 있음을 보였으며,[56] 평생 보호되어야 하는 개인 의료 정보를 위하여 데이터 저장 수명이 탁월한 QKD 기반 저장 시스템이 제시되기도 하였다.[57]

2. 무선 양자 키 분배

가. 위성 양자 키 분배

(1) 기술 동향

무선 양자 키 분배에 대한 기술은 장거리 양자 키 분배에 대한 연구의 결실이다. 1989년, 처음으로 광학용 테이블 위에서 31cm 거리의 양자 키 분배를 구현[58]한 이래로 장거리 구현은 반드시 해결해야 하는 과제였다. 단대단 통신 사이 광채널에서 발생하는 광자 손실은 길이에 따라 심각하게 증가함에도 양자복제불가 이론에 제한되어 고전 통신에서처럼 양자 신호를 증폭할 수 없으므로 안전한 양자 키 분배는 수백 km 거리에 제한된다. 이러한 거리 제한을 극복하기 위한 해결책 중 하나로 양자얽힘 교환, 양자 순수화, 양자 메모리 등 차세대 양자 기술의 종합체인 양자중계기를 도입하는 것이나 현재는 실험

56) https://www.global.toshiba/ww/technology/corporate/rdc/rd/topics/20/2001-01.html
57) Sasaki, M. (2018)
58) Bennett, C. H. & Brassard, G. (1989)

실 수준 기술로 실제 기술로 활용되기까지는 적지 않은 연구와 시간이 필요하다. 반면 광채널이 아닌 자유공간, 특히 위성을 이용한 양자 키 분배는 양자중계기 없이도 수백 km 거리 제한을 벗어난 장거리 통신이 가능하다. 위성 양자 키 분배에서 위성과 지상국 사이의 거리 중 주요 광자 손실이 발생하는 구간인 대기권은 10km 내외에 불과하고 그 외 대부분의 구간이 비어있는 우주공간으로 광자 손실이 거의 발생하지 않으므로 국가의 경계를 넘어선 장거리 구현이 가능하다. 따라서 잡음의 영향을 받는 10km 내외의 대기권에서 안정적으로 광자를 전송하고 수신하는 기술을 개발하는 것이 위성 양자 키 분배의 핵심 과제이다. 다행히도 이 기술은 2004년, 대기권 내 13km 거리에서 양자얽힘 상태를 안정적으로 분배하는 소기의 목적을 달성[59]한 이래로 꾸준한 연구가 축적되어 상당한 기술 수준에 다다른 것으로 평가된다.

(2) 연구 동향

2016년 8월 16일, 세계 최초의 양자 전용 위성인 중국의 묵자호(Micius)가 주취안 위성발사센터에서 성공적으로 발사하여 성공하면서 위성 양자통신의 시대가 열렸다. 묵자호는 500km 상공을 선회하며 싱룽에 위치한 지상국과 1,200km 거리에서 양자 키 분배를 시연하였다.[60] 이 위성을 이용하여 2019년 9월에는 베이징에서 산둥성 지난과 안후이성 허페이를 거쳐 상하이를 연결하는 2,000km 거리의 양자통신 네트워크에 성공한다. 이어 2018년에는 허베이성 싱룽 기지국과 비엔나 그라츠 기지국이 묵자호를 이용하여 양자 키 분배로 75분 동안 화상 회의를 진행하였다. 2021년에는 지상의 광섬유 링크들과 양자 위성을 조합하여 4,600km의 양자암호통신에 성공한다. 중국은 위성을 이용한 양자통신을 연구에만 그치지 않고 국가 기간망에 도입하는 계획을 세웠다. 실제 2021년에는 에너지 분야에 양자통신 시스템을 적용하고 묵자호를 활용하여 대만의 푸젠성과 베이징의 국가비상지휘센터를 연결, 각종 해킹의 위협 하에서도 운영자가 2,200km 거리의 푸젠성 전력망을 안전하게 통제하는 모의 훈련에 성공하였다. 중국은 현재 양자기술 패권을 차지하기 위해 양자통신을 포함한 양자과학의 육성에 전력투구를 하는 모양새다.

중국의 양자위성에 자극받은 주요국들은 저마다 위성을 이용한 양자 키 분배 계획을 세워 충실히 추진 중이다. 그 주요 동향은 다음과 같다.

① 2016년 일본의 NICT는 고도 628km를 주회하는 저궤도위성과 NICT 코가네이 본부에 건조한 지상국 사이에서 위성-지상국 간에서의 양자통신의 실증실험을 했다. 사용된 위성 SOCRATES는 크기가 약 50㎤, 질량이 약 50kg정도의 초소형 위성이다. 최근 일본은 연구개발비 5억 엔을 별도로 편성하여 양자통신 전용위성 개발을 추진 중이다.
② 2016년 싱가포르는 양자통신을 위한 초소형 위성인 S-fifteen space system을 발사하였다.

59) Peng, C.-Z. et al. (2005)
60) Sheng-Kai Liao. et al. (2017)

③ 2017년 3월, 유럽우주기관이 주체로 되어 위성광통신의 국제프로젝트 ScyLight를 설립하였다. 14 개 국가가 참가하는 이 프로젝트에서 위성 양자 암호기술의 연구개발 및 시장개척에 장기적으로 대처할 계획을 담았다.

④ 2017년 싱가포르 국립대학의 양자기술센터에서 분할한 SpeQtral은 위성 방식의 QKD 솔루션을 개발하고 있다. 대륙 간 장거리 양자암호통신에 적용하기 위해 도시바와 협업 중이다.

⑤ 2019년 시작된 Euro QCI에서 27개 EU 국가가 참여하여 위성을 이용한 양자통신 네트워크 구축을 계획하여 진행 중이다.

⑥ 2021년 영국에 기반을 둔 Arqit은 2023년, 미국 국방 대기업 노스롭 그루먼과 영국 통신 업체 BT의 협력 아래 영국의 스페이스포트 콘월에서 두 개의 양자 키 분배 위성 발사 계획을 공개하였다.

⑦ 2021년 5월 캐나다와 영국의 연구팀은 2022년 이후 양자암호 및 과학 위성 QEYSSat에서 테스트할 실험적인 QKD 페이로드를 개발할 계획을 발표하였다. 이 계획은 대서양을 횡단하여 지상 간에 양자암호키를 전송하는 것을 목표로 한다.

(3) 적용 분야

위성을 이용한 양자 키 분배 기술은 연구성과를 넘어 온전한 실증 기술이다. 광섬유를 이용하는 경우 수백 km에 한정된 양자 키 분배 거리를 그 이상으로 확장하는 장거리 양자 키 분배 기술의 확실한 대안인 동시에 미래 네트워크 기술로 주목받는 양자 인터넷의 핵심 요소로 활용될 것이다.

광섬유를 이용한 양자 키 분배 기술은 연구가 지속적으로 진행 중인 양자중계기의 활용으로 그 거리를 원하는대로 확장할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 대양을 넘어 대륙 간 통신에 광섬유의 물리적 특성은 근본적인 한계로 작용한다. 따라서 초장거리 양자 키 분배의 실현은 양자중계기가 상용화 된 시점에서도 여전히 양자 위성은 초장거리 양자통신의 필수요소이다.

네트워크 또는 인터넷 상에서 양자를 전송하는 양자 인터넷 기술은 장거리 통신을 바탕으로 구상된다. 따라서 위성 양자 키 분배를 구성하는 양자 위성의 핵심 요소기술들이 대부분 양자 인터넷에서도 사용된다.

위성 양자 키 분배의 미래는 밝다. 양자 키 분배에서 장거리 구현은 반드시 해결해야 할 숙제였고 여기에 양자 위성은 가장 현실적이고 확실하게 그 해결책임을 증명하였다. 앞으로는 양자통신과 양자컴퓨팅을 연결하는 양자인터넷의 핵심 기술로 위성 양자 키 분배가 활용될 것으로 예상된다.

나. 드론 양자 키 분배

(1) 기술 동향

드론에 양자 키 분배 장치가 탑재되기 위해서는 경량화가 최우선 과제이다. 여기에 드론은 대기권에서 동작하므로 날씨로 인한 드론의 동작 환경이 수시로 변하는 조건과 자유공간에서의 광자 손실을 최소화하기 위한 기술들이 집결되어야 한다. 이를 위해 광 지시 정밀도, 정밀 광수신, 정교한 추적 기술 등이 균형적으로 적용되어야 한다. 양자 키 분배의 특성상 특정 드론은 그 역할이 정해지게 되는데 (양자의 송신단 또는 수신단) 드론 양자 키 분배 기술의 최고봉은 송·수신 드론을 이용한 완전 양자 키 분배 시스템의 구성이다.

(2) 연구 동향

드론을 이용한 양자 키 분배뿐 아니라 드론의 양자 교환 역할을 통해 양자 네트워크를 구성하는 실험들이 성과를 거두었다.[61) 62) 63)] 현재까지 드론을 이용한 양자 키 분배 실험들은 대부분 수십 미터의 통신 거리를 보인다.[64) 65)] 앞서 기술한 여러 어려움들로 인해 아직은 초보적 단계에 머물러 있으나 앞으로의 활용 분야가 많은 만큼 지속적인 연구가 이루어지고 있는 분야이다.

그림 II-1-11 드론을 이용한 양자 키 분배 실험



※ Free-Space Laser Communications XXXIII: 116780

61) M. Schirber (2021)
62) H.Y. Liu. et al. (2021)
63) L.D.F. de Parny. et al. (2022)
64) Samantha Isaac. et al. (2020)
65) Andrew Conrad. et al. (2021)

(3) 적용 분야

드론을 이용한 양자통신은 앞서의 위성을 이용한 양자통신과 다르게 짧은 거리의 자유공간에서 양자를 송·수신하는 영역을 담당한다. 위성을 이용한 통신은 고비용이 요구되고 지상의 동적인 상황에 유연한 대처가 어려워 대안 통신 체계가 검토되어야 하는데 드론을 이용한 양자통신이 주요 해결책이다.

드론의 유연성은 사적이거나 비공개 성격의 네트워크 구성을 가능하게 한다. 따라서 군사적 목적의 감시 체계, 소규모 개인 네트워크 등에 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

3. 양자 난수 생성기

(1) 기술 동향

① 광학 양자 난수 생성기

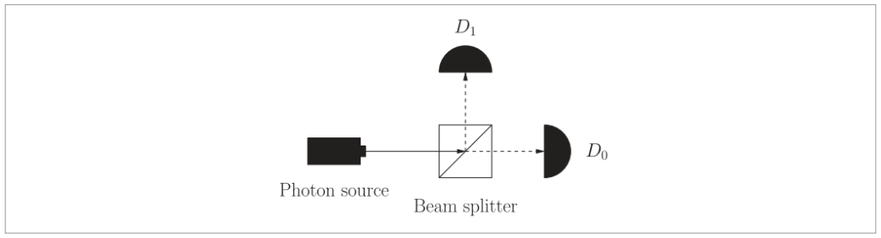
양자 난수 생성기는 방사능, 전기 회로 시스템의 무작위성에 기반한 양자 난수 생성기, 광학 양자 난수 생성기 등 다양한 방식으로 구현되고 있다. 이 중 광학 양자 난수 생성기는 가장 다양한 방식으로 활발히 연구 개발이 이루어지고 있는 구현 방식 중 하나이다. 대표적인 구현 방식 중 하나인 경로 분기(Branching Path) 방식에서는 다음과 같은 양자 상태에 대한 측정 결과의 무작위성을 활용한다.

$$\frac{|1\rangle_1|0\rangle_2+|0\rangle_1|1\rangle_2}{\sqrt{2}}$$

위의 양자 상태에서 아래첨자 1, 2는 경로를 나타낸다. 결과적으로 위 상태는 $|1\rangle,|0\rangle$ 상태가 각각 1, 2 경로에 있는 경우와 2, 1 경로에 있는 경우의 중첩 상태라 할 수 있다. 위와 같은 상태는 빔 스플리터, 간섭계와 같은 광학 장치로 구현할 수 있다. 위 상태에서 광자를 측정할 경우 각 경로 당 광자가 측정될 확률은 1/2로 무작위하게 주어진다. 이 같은 방식의 양자 난수 생성기는 1994년 초기 구현 방법이 제안된 후[66] 그 구현 방식이 지속적으로 발전하였다. 최근에는 36시간 동안 2GB의 난수를 생성한 결과가 보고된 바 있다.[67] 경로 분기 방식 외에도, 레이저의 노이즈, 자연 방출(Spontaneous Emission)을 이용한 방식 등 다양한 방식의 광학 양자 난수 생성기가 제안되고 있다.

66) John Rarity et al. (1994)
67) Joakim Argillander et al. (2022)

그림 II-1-12 빔 스플리터 기반 양자 난수 생성기 개요



※ Miguel Herrero-Collantes & Juan Carlos Garcia-Escartin (2017)

② 비광학 양자 난수 생성기

비광학 양자 난수 생성기의 대표적 구현 방식으로, 방사성 붕괴(Radioactive Decay)를 이용한 방식과 전기 회로의 잡음을 이용한 방식이 있다. 방사성 붕괴의 난수성을 이용한 방식은 최초의 양자 난수 생성기 개발을 위해 활용되었던 방식이다. 이 방식에서는 정해진 시간 동안 방사성 물질에서 펄스가 방출될 확률의 무작위성을 활용한다. 방사성 물질에서 방출된 입자가 만든 펄스의 도달 시간을 디지털 난수로 변환하는 방식에는 다양한 방식이 제안된 바 있다.[68] 전기 회로 잡음을 이용한 양자 난수성 구현 방식에서 주로 활용한 방식 중 하나는 Zener Diode에 기반한 방식이다. 이 방식에서는 잡음으로 인한 전압 섭동(Voltage Perturbation)을 증폭하는 방식으로 난수를 생성한다. 예컨대, 섭동으로 인해 전압이 임계치를 넘으면 1을 기록하고 넘지 않으면 0을 기록하는 방식이 가능하다. Zener Diode를 활용한 방식 외에도 Electrical Shot Noise를 이용한 방식도 양자 난수 생성기를 구현하는 방법 중 하나로 활용되고 있다.

(2) 연구 동향

① 고속 양자 난수 생성기 구현

양자 난수 생성기 구현에 있어 가장 중요한 성능 요소 중 하나는 난수 생성 속도이다. 2020년에는 Cambridge 연구 그룹에서 고속 양자 난수 생성기 실험을 보고하였다. 이 실험에서 특기할 점은 고차원 양자 시스템을 활용하여 QRNG의 난수 생성 속도를 높인 점이다. 구현한 난수 생성기의 난수성 생성 속도는 24Mbps로 보고되었다. 2021년에는 USTC Jian Wei Pan 연구그룹에서 광학 칩 방식으로 기존보다 비약적으로 난수 생성 속도를 높인 실험 결과를 보고하였다. 해당 결과의 양자 난수 생성 속도는 18.8Gbps로 알려져 있다. 이 같이 높은 속도의 난수 생성률을 얻기 위하여 최적화된 양자 난수성 추출(Randomness Extraction) 방식이 활용되었다.

68) Miguel Herrero-Collantes & Juan Carlos Garcia-Escartin. (2017)

② 기기 독립적 양자 난수성 확인

기기 독립적 양자 난수성 확인 연구는 양자 난수 생성기의 안전성을 높이기 위한 연구 분야 중 하나이다. 기기 독립적 양자 암호 프로토콜에 관한 연구는 1998년 개념적 제안이 이루어진 후, 지속적으로 이루어지고 있다.[69] 기기 독립적 양자 난수 생성기를 구현할 경우, 구현을 위해 사용된 기기를 신뢰할 필요없이 난수성이 보장된다. 기기 독립적 양자 난수성 확인을 위해서는 벨 테스트 실험 수행이 필수적이다. 2010년, CHSH 벨 부등식 테스트 실험을 활용한 최초의 양자 난수성 확인 연구 결과가 보고되었다.[70] 이후 주어진 Hilbert 공간 차원에서 확인되는 양자 난수성의 양을 이론적 최대치까지 높이기 위한 연구가 수행되었다. 2차원에서 두 큐비트 얽힘 상태를 활용할 경우, 확인 가능한 양자 난수성의 이론적 최대치인 2Bit의 난수성을 기기 독립적 방식으로 확인할 수 있는 방법을 제안한 연구 결과가 보고된 바 있다.[71] 최근에는 SIC-POVM(Symmetric Informationally Complete POVM)이 존재하는 임의의 d차원에서 기기와 무관한 방식으로 비트의 국소 양자 난수성 확인 방법을 제안한 연구 결과가 보고되었다.[72]

(3) 적용 분야

양자 난수 생성기는 다양한 암호화 프로토콜에서 활용될 수 있다. 가장 널리 활용되는 QKD 프로토콜인 BB84 프로토콜에서 측정 기저 선택 시 양자 난수 생성기가 활용되고 있다. 또한 차세대 양자 암호 프로토콜 구현 방식 중 하나인 기기 무관 양자 암호 프로토콜 구현을 위해서는 벨 테스트 실험이 필수적이며, 이를 위해서도 양자 난수 생성기가 필수적으로 활용된다. 이외에도 IPSec, TLS와 같은 암호화 프로토콜에도 양자 난수 생성기가 적용될 수 있을 것이다. 따라서 양자 난수 생성기는 상기 암호 프로토콜을 필요로 하는 다양한 보안 서비스와 모바일, 자동차, IoT 기기 보안 등에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

69) Dominic Mayers & Andrew Yao (1998)
70) Stefano Pironio et al. (2010)
71) Ole Andersson et al. (2018)
72) Armin Tavakoli et al. (2021)

4. 양자중계기

(1) 기술 동향

일찍부터 양자 기술에 많은 투자를 해온 해외 국가들은 양자중계기 기술도 상당히 앞서 있다. 메모리가 없는 양자중계기는 국내 동향에서 언급하였다 시피 양자 메모리가 있는 상황에 도달하기 위한 중간 단계 기술에 가깝다. 이러한 이유로 현재 앞선 양자 기술을 보유하고 있는 국가들에서는 메모리 없는 양자중계기 기술 보다는 양자 컴퓨터 및 양자 인터넷 기술 확보를 위한 양자 메모리 기술 개발에 더 집중하고 있다. 다만 얽힘의 장거리 분배 및 얽힘 교환 등은 메모리가 없는 경우에도 필요하고 구현 가능한 기술이기 때문에 이러한 연구들도 개별적으로 진행되고 있다. 오스트리아 Rupert Ursin 그룹은 이탈리아 Sicily 섬과 Malta 섬 사이에 연결된 해저 광케이블(96km 이상)을 이용해 양자얽힘 분배 실험 성공하였다.[73] 또한 중국의 Jian Wei Pan 그룹에서는 12.5km 떨어진 두 지점 사이에서 총 길이 103km의 광통신망을 이용하여 시간-빈 양자얽힘 교환 실험에 성공하였다.[74] 이 실험에서 Alice와 Charlie 사이 14.7km, Bob과 Charlie 사이 11.1km 구간은 실용 광통신망을 이용하였고, 나머지 77km는 연구실 내 광섬유 스풀을 이용하였다.

장거리 양자 통신 뿐 아니라 양자컴퓨터에도 응용될 수 있는 양자 메모리의 경우 다양한 국가에서 많은 기술 확보가 진행되고 있다. 예를 들어, 미국 Maryland 대학의 Monroe 교수 연구팀은 Yb이온을 양자 메모리로 사용하여 1m 떨어진 거리에서 평균 90%의 신뢰도로 1개 큐비트의 제한적인 형태의 양자정보 전송을 구현(2009)했다. 또 1m 떨어진 2개의 노드 사이의 얽힘 신뢰도 0.78을 가진 얽힌 상태를 초당 4.5개씩 생성하고 얽힌 상태를 1초 이상 보존(2015)에 성공하였다. 미국 Caltech의 Jeff Kimble 교수 연구팀은 중성원자 앙상블 기반의 양자 메모리 사이의 얽힘을 실험적으로 구현(2007) 하였다. 캐나다 Calgary대학 Tittel 교수 연구팀은 얽힘 광자쌍의 광자를 Er-doped 광섬유를 양자메모리로 활용하여 저장할 수 있음을 처음으로 실험적으로 선보였다(2015).

(2) 연구 동향

유럽, 미국, 중국의 양자통신 연구는 다양한 물리적 시스템의 양자메모리 기술이 포함된 양자중계기 실현과 수년 내 도시 간 양자중계기 네트워크 구현에 집중 투자하고 있다. 네덜란드 Delft 대학의 Hanson 교수 연구팀에 의해 다이아몬드 NV 센터를 양자메모리로 이용한 양자중계기 실용 가능성 검증 및 양자 원격 이동을 구현(2014)하고 두 양자 노드 사이의 양자 얽힘 실용성(Quantum Link Efficiency 〉 1) 검증(2018) 및 다중 노드 간 양자 얽힘을 구현(2021) 하였다. 중국 USTC의 경우 50km 광섬유로 연결된 2개의 중성원자 앙상블 기반의 양자 메모리간의 양자 얽힘을 실험적(신뢰도 72%, 얽힘 생성률 1.5 Hz)으로 구현하였다(2020). 영국 Oxford 대학교의 David Lucas 연구팀 연구

73) Soren Wengerowsky et al. (2019)
74) Qi-Chao Sun et al. (2017)

진들은 Sr이온을 활용하여 초당 182개의 얽힘 상태를 생성하고 94%의 얽힘 상태 신뢰도를 달성(2020) 하였다. 중국 칭화대 김기환 교수 연구팀은 2021년에 Yb이온을 이용하여 960초 동안의 측정 결과의 Exponential Decay Fit을 통해 양자 결맞음 시간이 5,500초인 실험 결과를 발표하였다. 독일 막스-플랑크 연구소의 Gerhard Rempe 교수 연구팀은 2021년에 2개의 Rb 중성 원자들 사이에 광자를 매개로 하여 88%의 신뢰도로 하나의 양자메모리에서 다른 양자메모리로 양자상태를 전달하는 연구를 진행 실험하였다. 네덜란드 Delft대학 Ronald Hanson 교수 연구팀은 2018년에는 두 양자 노드 사이 Quantum Link Efficiency가 약 8에 가까움으로써 양자 얽힘의 실용성을 검증하였고(2018), 2021년에는 다중 노드 간 양자 얽힘을 구현하였다. 미국 메릴랜드 대학 그룹은 공진기와 결합된 반도체 양자점을 이용하여 단일 광자 수준의 스핀-광자 인터페이스 구현이 가능함을 실험적으로 보였다(2020).

앞의 최신연구 동향에서 보는 것처럼 양자메모리의 대부분 연구결과는 양자메모리 효율을 높이는 것과 저장 시간을 증가시키는 연구에 집중하고 있다.

(3) 적용 분야

양자인터넷 환경에서 장거리 양자통신 및 얽힘 기반 양자 키 분배를 할 때 사용될 수 있고, 양자컴퓨터 구현의 핵심 기술로 활용될 수 있다.

5. 양자보안기술

가. 양자 인증/서명 기술

(1) 기술 동향

인증 및 전자서명은 양자인터넷에서 중요한 역할을 하는데, 현대 인증 및 전자서명 기술은 복잡도 기반의 안전성을 제공하기 때문에 양자컴퓨터 등 컴퓨팅의 발전에 따라 안전성이 저하된다. 양자 키 분배 기술이 1984년도에 개발되면서, 이를 이용한 양자 인증 및 양자 전자서명 기법이 1998년과 2001년에 처음 발표되었다. 이 기법들은 현대암호와 달리 정보이론적 안전성을 양자역학법칙에 기반하여 제공하는 것이 특징이라고 할 수 있다.

처음에 제안된 양자 전자서명은 장기간 사용할 수 있는 양자메모리를 필요로 하여 구현이 어려웠기 때문에, 후속 연구들은 실험적으로 구현이 가능하고, 성능을 높이는 방향으로 진행되었다.

최근 연구들은 양자 전자서명을 구현하는 복잡도를 양자 키 분배 구현 수준으로 낮추는 결과들을 내고 있다. 양자 상태도 단일광자 소스 대신 디코이 방법을 적용하여 구현하면 된다. 양자 전자서명과 양자 키 분배의 구현은 많은 면에서 유사한데, 차이점은 양자 전자서명은 양자 키 분배와 달리 에러보정과 비밀증폭을 하지 않아도 된다는 것이다. 그리고 2016년에는 양자 키 분배에서 필요로 했던 안전한 공개 채널이 필요로 하지 않는 방식의 실용적인 양자 전자서명이 발표되었다. 그리고 100km 정도 거리에서 실험실 수준으로 구현되는 결과와 측정기기무관 양자서명기법도 발표되었다. 2020년도에 들어서는 200km이상의 거리에서 실험실 수준의 실험결과도 발표되었다. 양자 인증은 초기에는 양자오류정정 기술로 발표되었는데, 이후에는 양자 키 분배, 양자비밀공유 프로토콜 등에서 사용되는 방법들을 이용하고 있다.

(2) 연구 동향

국외에서는 캐나다 Perimeter Institute, 영국 Heriot-Watt 대학 등에서 양자인증, 양자서명에 대한 이론 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 영국 Heriot-Watt 대학은 양자통신 허브기관의 하나로, 양자 디지털서명 기술을 실험적으로 구현한 바 있다.[75] 이들은 도시바 유럽 연구소와 함께 측정기기 무관 기술을 적용한 실험까지 확장하여 연구를 수행하였다.[76]

중국 난징대학은 TF 양자디지털서명 기술을,[77] 서북대학(Northwest Univ.)에서는 디코이 적용 TF-QKD를 이용하여 TF-QDS 프로토콜을 개발하였다.[78] 중국 난징대학은 양자 디지털서명 구현실험을 280km에서 성공한바 있다.[79]

2021년 발표된 보고서[80]에 따르면 양자 인증 및 서명과 직접 연계된 논문의 수는 2009년부터 2019년까지 10년 간 36건으로 확인된다. 양자 디지털 서명에서 서명이 메시지의 길이에 의존하거나 서명의 확인이 확률에 기반한 기술에 의존하는 프로토콜들이 다수로, 효율성이 떨어진다. 최근 양자 디지털 서명의 실험 결과 280km 거리를 달성하였다. 그러나 이 기술은 완전 양자 디지털 서명의 구현이 아닌 고전 전자 서명에 양자 키 분배 기술로 키를 분배하는 과정을 도입한 것으로 표명된 거리는 양자 키 분배 기술의 거리이다.

75) Patrick J. Clarke et al. (2012)
76) G. L. Roberts et al. (2017)
77) Chun-Hui Zhang et al. (2021)
78) Ming-Hui Zhang et al. (2022)
79) Hua-Jian Ding et al. (2020)
80) Ritajit Majumdar & Sanchari Das. (2021)

(3) 적용 분야

양자 인증 및 서명 기술은 우선 양자 키 분배 장치와 결합되어, 양자 키 분배 장치를 이용한 네트워크 구성에 활용될 수 있을 것이다.

미국 NSA(National Security Agency, 국가안보국)에서 양자 키 분배 장치가 국가기관에 도입될 때의 제약사항 중 하나로, 양자 키 분배 장치의 기능이 암호키 분배 기능에 국한되어, 다양한 보안기능을 제공하지 못한다고 발표하였다. 양자 인증 및 서명 기술의 적용을 통해 이러한 걸림돌을 해소하여 양자 키 분배 장치가 본격적으로 활용될 수 있는 기반을 제공할 수 있다. 또한, 현 인터넷을 이용한 데이터 송수신, 전자상거래의 보안에 암호기술이 핵심 역할을 하듯, 양자인터넷의 보안에는 양자를 이용한 양자암호기술이 핵심 역할을 할 수 있을 것이다.

나. 비밀분산

(1) 기술 동향

양자 비밀분산(Secret Sharing)은 양자 키 분배 기술 중 얽힘 쌍을 이용한 방법을 세 개 이상의 얽힘 상태로 확장한 기술이라고 볼 수 있다. 1998년에 M. Hillery, V. Bužek, A. Berthiaume에 의하여 비밀분산 방법으로 3개의 양자가 얽힌 상태인 GHZ(Greenberger–Horne–Zeilinger) 양자상태를 이용하는 방법이 제안되었다.[81] 이 방법을 기반으로 Shamir, Blakey가 제안한 기본적인 비밀분산기법에 적용하여, 사용자 n명 중 k명 이상이 동의해야 암호키를 복구할 수 방법으로 확장되기도 하였다.[82] [83]

양자 비밀분산기법은 도청과 비정상 사용자에 대한 정보이론적 안전성을 제공하는데, 이때 안전성은 No-Cloning Theorem에 기반을 두고 있다. 현대암호의 비밀공유 기법은 도청에 대한 안전성을 제공하지 못한다. 실험적 구현은 2001년에 접어들어 양자 광학의 발전으로 이루어졌는데, 초기에는 GHZ 상태 구현은 어려워 2개 양자의 얽힘을 이용한 실험들이 이루어졌다. 현재는 GHZ 상태를 구현하는 기반 연구가 주로 이루어지고 있다.

비밀분산(Secret Sharing)은 다중 사용자가 각각 암호키의 일부를 나누어 가지고 있으면서 일정 수 이상의 사용자가 합의하는 경우 암호키를 복원할 수 있게 하는 기법이다. 가장 널리 알려진 것은 Shamir의 Secret Sharing Scheme이다.[84] 이 방식은 정보이론적 안전성을 제공하는 방식으로, 어느 한 사용자가 정보를 독점하지 못하게 하는 용도로 사용한다. 최근에는 다중 사용자가 암호키 전부를 모르는 상태에서 연산을 수행한 다음 일정 수 이상의 사용자가 합의하여, 연산의 최종값에 대한 정보를 복원하는 용도로 사용한다. 최근, 분산 작업의 필요성이 증가함에 따라 비밀분산 기법 및 이를 활용하는 기법들의 ISO/IEC 표준화가 추진되었거나, 추진 중에 있다.

(2) 연구 동향

양자 비밀분산(Secret Sharing)은 다중 사용자가 각각 암호키의 일부를 나누어 가지고 있으면서 모두가 합의하는 경우 복호화를 할 수 있게 하는 비밀분산을, 양자적으로 얽힘큐빗을 활용하여 구현하는 기술이다. 다중 얽힘을 만들어야 하는 기술적인 어려움이 있어, 구현의 난이도가 높은 편이다. 양자 비밀분산 이론은 뉴욕시립대학교에서 처음 제안되었으며,[85] 스위스 제네바대학에서 실험적으로 구현한 바 있다.[86]

3개의 큐비트로 구성된 GHZ State(편광 얽힘상태)를 A노드에서 생성하고, A에서 각각 772m, 686m 떨어진 노드 B, C에 자유 공간을 통해 3광자 양자얽힘상태를 분배하여 양자 비국소성(Nonlocality) 측정에 성공하였다. 베이징 양자정보과학 아카데미의 J. Wang과 그 공동연구그룹은 실리콘 기반의 On Chip 환경에서 4-큐비트 GHZ 상태를 구현하고 양자얽힘 교환을 통하여 90%의 높은 충실도로 노드 간 양자얽힘을 집적 소자 상에서 구현하였다. 일본 오사카대학의 이모토 노부유키 그룹은 통신파장대역에서 3큐빗 GHZ State를 70%의 충실도로 구현하고, 양자얽힘 교환을 84% 충실도로 실험실 환경에서 구현하였다.

(3) 적용 분야

비밀 분산기법은 비밀을 분산 저장하여, 특정 사용자가 비밀을 독점하지 못하게 하거나, 특정 사용자가 공격당하더라도 비밀을 복원하지 못하게 하는 용도로 사용된다. 현대 암호의 비밀분산 기술은 계산적 복잡도에 안전성을 기반으로 하여 정보이론적 안전성을 보장하는 장점을 가지고 있다. 양자를 이용하는 양자 비밀분산 기술은 양자 머니, 양자 네트워크, 분산 양자 계산 등 양자 인터넷 시대에 적합한 비밀분산 기법이라고 할 수 있다.

81) Mark Hillery et al. (1998)
82) Richard Cleve et al. (1999)
83) Daniel Gottesman (2000)
84) Adi Shamir (1979)
85) Mark Hillery et al. (1998)
86) Wolfgang Tittel et al. (2001)

6. 양자통신 시험망

(1) 기술 동향

① OpenQKD

㉮ 베를린 테스트베드

2019년 9월, Horizon2020 지원 프로그램의 일환으로 유럽 내 양자통신 인프라 설치 목적의 OpenQKD 프로젝트가 시작되었다. OpenQKD는 유럽 산·학·연 38개 파트너가 참가하여 진행되는 프로젝트로서, 3년간 진행되어 2023년 3월 종료된다. OpenQKD의 주된 목적 중 하나는 QKD 네트워크 구축을 위한 다수의 테스트베드를 구축하는 것이다. 본 항목을 통하여 베를린, 마드리드, 포즈난, 비엔나에 위치한 주요 4개 테스트베드 중 베를린 테스트베드 구축 결과에 대하여 기술한다.

베를린 테스트베드는 Deutsche Telekom이 향후 QKD 산업에서 수행할 프로젝트를 지원하는 것을 목적으로 한다. 베를린 테스트베드의 QKD 네트워크는 Winterfeldtstrasse(WFD)에 위치한 중앙 노드로부터 Dark Fiber로 연결된 5개 노드로 구성돼 있다. 2020년 4월까지 노드 간 다양한 길이의 8개 이상 링크가 구현되었으며, 다양한 Topology가 구현 가능한 형태로 개발되고 있다. 각 네트워크 노드의 연구소에는 양자 광학 장비, 방화벽, 암호화 장비, 서버와 키 저장을 위한 하드웨어 보안 모듈(Hardware Security Module)이 19인치 규격 캐비닛 형태로 설치되어있다. 베를린 테스트베드에서는 향후 Use-Case 실현을 위한 자원에 접속하기 위한 완전-가상화된 서버 인프라 구현, 네트워크 자원의 동적 배정(Dynamic Assignment), QKD 시스템 내 모바일 네트워크 통합을 위한 5G 연결 등의 연구개발이 진행될 것으로 예상되고 있다.[87]

그림 II-1-13 (왼쪽) OpenQKD 베를린, (오른쪽) 마드리드 테스트베드



※ Hugo Zbinden (2020)

87) Francesco Vedovato et al. (2021)

㉯ 마드리드 테스트베드

마드리드 테스트베드는 중앙의 15km 길이 원형 'Telefonica Spain Production' 네트워크([그림 II-1-13] 오른쪽의 붉은색 선)와 나머지 마드리드 연구 네트워크, REDIMadrid([그림 II-1-13] 오른쪽의 푸른색, 녹색, 보라색 선)로 구성되어있다. 원형 네트워크는 다양한 제약 조건으로 인해 높은 기술 성숙도를 보이는 기술 구현에 적합하다. 한편, 이 네트워크는 양자 채널로 구성되어 새로운 양자 서비스를 제공하는데 활용될 가능성은 존재한다. 나머지 REDIMadrid 네트워크 상 노드들은 다양한 구현 방식에 열려있으므로, 낮은 기술 성숙도의 서비스 구현에 활용될 수 있다. 네트워크 상 연결은 양자-고전 채널 동시 운용 방식으로 구현되어 있다. 총 13개 네트워크 링크가 구현되어 있으며, 원형의 Production 네트워크 상에는 새로운 노드가 쉽게 추가될 수 있다.[88]

㉰ 포즈난 테스트베드

PSNC(Poznan Supercomputing and Networking Center) 네트워크는 OpenQKD의 일부로서 포즈난 지역에 기반하고 있다. 이 네트워크는 QKD 기술 구현을 목적으로 개발되어, 병원, 정부 기관 등 다양한 민간 시설과 연계한 서비스를 제공할 예정이다. 2020년까지 설치한 9개 링크 중 4개 링크가 구동될 준비를 마쳤다. 그 중 최장거리 링크는 71 km 길이로 구현되었으나, Dark Fiber로 구현되지 않았으며 25 dB의 Channel Loss가 존재한다. 이외 링크는 Dark Fiber 형태로 구현되어 있다.

㉱ 비엔나 테스트베드

비엔나 테스트베드는 다양한 길이의 7개 링크로 구현되어 있으며, IQOQI(Institute for Quantum Optics and Quantum Information)에 의해 운영된다. 네트워크 상 장거리 링크는 비엔나 도심과 St.Polten, Bratislava를 잇는 구간에 구현되어 있다. 비엔나 테스트베드에서는 양자 광원에 대한 기술력을 바탕으로 편광-얽힘 기반 BBM92 QKD 프로토콜을 운용하고 있다. 편광은 단일모드 광섬유를 통해 전달되며, 전달 시 편광 변화를 모니터링하고 보상하는 기술을 적용하고 있다.[89]

88) Ibid.

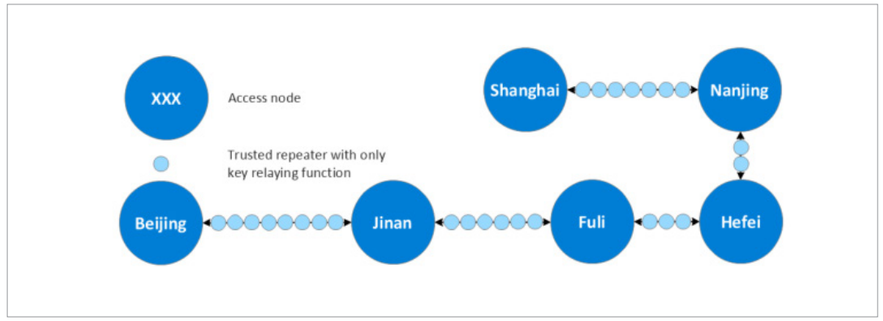
89) Hugo Zbinden (2020)

② 중국 양자 네트워크

㉮ 광섬유 네트워크

중국은 대규모 지상 광섬유 네트워크 상에 QKD 프로토콜을 구현하는 프로젝트를 추진해왔다. 광섬유 네트워크는 크게 베이징, 상하이를 잇는 백본(Backbone) 네트워크와 지난(Jinan), 우한(Wuhan) 등에 구성된 도시 규모 메트로폴리탄 네트워크로 구분할 수 있다. 2020년 이전까지 2,000km 거리 백본 네트워크 상에 32개 노드, 135개 링크를 구현하였으며, Jinan, Wuhan 네트워크 상에 각 32개, 71개 노드를 구현하였다. Jinan 네트워크에서는 최소 1.7km 최대 64.7km 거리의 QKD 링크를 구현하였다.[90] QKD 프로토콜은 주로 Decoy 상태 생성 기법을 적용한 BB84 프로토콜을 활용하였다. 네트워크 구축을 위해 필요한 광섬유는 중국의 QuantumCTek 사(社)가 공급하였다. 네트워크 구현 시 QKD의 후처리 정보를 전달하는 고전 채널과 양자 채널을 다중화하기 위하여 WDM 기술을 활용하였다. QKD의 암호화 장비는 양자키 공급 뿐 아니라 IPSec VPN 프로토콜과 연계하여 개발되었다.

그림 II-1-14 Beijing-Shanghai 구간 설치된 백본 네트워크 개요도



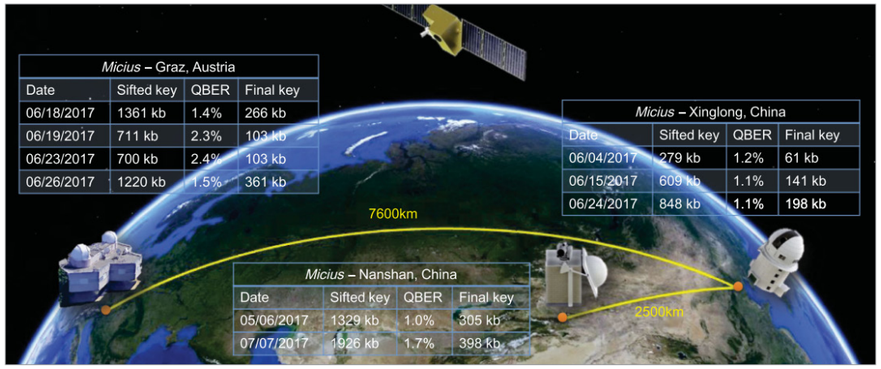
※ Miralem Mehic et al. (2020)

② Free-space 네트워크

중국은 지상 광섬유 QKD 네트워크 구현 외에도, Free-Space QKD 네트워크 구현에서도 높은 성취를 보이고 있다. 특히, 위성-기반 QKD 구현에 있어서는 오스트리아 IQOQI와 더불어 독보적인 기술력을 확보하고 있다. 위성을 활용할 경우 증폭되기 어려운 양자 신호를 멀리 보내는데 효과적이므로, 현재 기술력으로 대륙 규모 단-대-단 QKD 링크 구현이 가능하다. 2018년에는 중국 USTC의 Jian Wei Pan 연구그룹과 IQOQI, 비엔나대학 등의 협력으로 위성을 릴레이로 활용한 대륙 간 QKD 링크 구현 성공이 보고된 바 있다.[91] 해당 결과에서 지상 7,600km 거리의 오스트리아 Graz와 중국 Xinglong 구간이 위성 릴레이 기술을 통해 연결되었다. 850nm 광자를 활용한 편광 모드 기반 Decoy BB84 프로토콜이 구현되었으며, QKD 신호 보안이 적용된 대륙 간 화상회의가 시연되었다. 실험에서는 태양-동기화된 지구 저궤도(Low Earth Orbit) 위성을 활용하였으나, 추후 지구-동기화된 위성을 활용한 QKD 실험 계획을 밝힌 바 있다.

90) Ibid.
91) Sheng-Kai Liao et al. (2018)

그림 II-1-15 오스트리아-중국 간 QKD 링크 구현



※ Sheng-Kai Liao et al. (2018)

(2) 연구 동향

① OpenQKD

네트워크 상에서 QKD 서비스를 제공하기 위한 기술에 대한 연구가 OpenQKD 프로젝트를 통해 이루어지고 있다. 2020년 2월에는 Trusted Relay QKD 네트워크 상에서 QoS(Quality of Service) 기술을 제안한 연구 결과를 보고하였다. 같은 해 4월에는 마드리드 테스트베드 네트워크 상에서 노드에 전달되는 신호가 적절한 경로를 통하여 전달된 것인지 검증하는 OPoT(Ordered Proof-of-Transit) 기술을 제안한 결과가 보고되었다.[92] 2020년 9월에는, 네트워크 관점에서 QKD에 대한 기술 동향을 정리한 보고서가 OpenQKD 참여 연구진에 의해 발간되었다.[93]

② 중국 양자 네트워크

광섬유 기반 단-대-단 QKD는 Twin-field QKD와 같은 특수한 QKD 프로토콜을 활용할 경우 그 거리를 수백 km까지 늘릴 수 있기는 하나, 보통 100km 내외의 거리 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위하여 Trusted Repeater를 활용할 경우, 구현에 활용된 Trusted 노드가 보안상 허점이 될 수 있다. 이에 USTC의 Jian Wei Pan 그룹에서는 2020년, QKD 거리 한계를 극복하기 위하여 위성을 활용한

92) Alejandro Aguado et al. (2020)
93) Miralem Mehic et al. (2020)

장거리 얽힘-기반 QKD 구현 결과를 보고한 바 있다.[94] 해당 결과에서는 1,120km 거리의 단-대-단 QKD 링크에 BBM92 프로토콜이 구현되었다. 또한 분배된 얽힘을 활용한 CHSH 벨 부등식 테스트 실험이 수행되었다.

2021년에는 광섬유 기반 지상 QKD 네트워크와 위성 릴레이를 결합한 대륙 규모 통합 QKD 네트워크 구현이 보고되었다.[95] 해당 네트워크 상에서는 총 700개 QKD 링크가 지상 2,600km 거리 사이에서 구현되었다. 네트워크 구현을 위해, 2,000km 이상의 광섬유가 활용되었다. 또한 Nanshan과 Xinglong를 잇는 구간에는 지상-위성 간 2개의 고속 QKD 링크가 설치되었다. 지상-위성 간 평균 암호키 생성률은 47.8kbps 이었으며, 이는 지난 결과의 암호키 생성률을 40배 정도 개선한 결과로 알려져 있다.

(3) 적용 분야

① Open QKD

베를린 테스트베드에서는 Deutsche Telekom, IDQuantique, Toshiba 등 파트너를 중심으로 QKD 기반 암호체계를 무선 5G 서비스에까지 확장하는 Use-Case를 고려하고 있다. 구현을 위하여 Post-Quantum Cryptography(PQC) / Quantum-Resistant-Algorithms(QRA) 등 추가적 보안 수단을 QKD 시스템에 적용할 계획을 갖고있다. 마드리드 테스트베드에서도 산학연 협력을 통하여 5G 테스트베드를 구현할 계획을 갖고있다. 또한, 클라우드 데이터센터 구축에 QKD 보안체계를 적용하는 연구도 진행 중이다. 이외에 포즈난, 비엔나 테스트베드에서도 고성능 연산, 병원/정부기관 등 보안 필요 기관의 데이터 보안 등을 목적으로 하는 QKD 기반 Use-Case 발굴이 집중적으로 이루어지고 있다.

② 중국 양자 네트워크

중국의 대규모 통합 QKD 네트워크 구현 결과는 대도시 규모의 End-User에게 암호키를 전달하기 위한 목적, 장거리 단-대-단 QKD 링크 구현 목적 등에 활용될 수 있다. 2021년 구현 결과에서 고려한 백본 네트워크의 5계층 네트워크 구조는 최상단에 응용 네트워크 계층을 포함하고 있다. 해당 네트워크 구조는 응용 계층의 유저 컴퓨터에서 암호키를 요청하면, 하부의 4개 계층에서 암호키를 전달/생성/저장/관리하는 형태로 구성되어있다. 이같은 네트워크 구조를 기반으로 QKD 성능이 보다 발전한다면, 도시 규모 사용자에게 QKD 기반 암호 서비스를 제공하는 것을 현실적인 목표로서 고려할 수 있을 것이다.

94) Juan Yin et al. (2020)
95) Yu-Ao Chen et al. (2021)

7. 양자암호통신 시험 검증

(1) 기술 동향

양자 키 분배 장치는 이론적으로는 완벽한 안전성을 제공하지만 광학 요소기술들(광원생성, 광전송, 광자 측정 등)의 불완전성을 이용한 다양한 방식의 도청 공격이 가능할 수 있다. 미국 NSA에서는 고비용과 더불어 이러한 공격들에 대한 안전성이 성숙되지 않았다는 이유로 시험검증이 어렵고 이에 따라 국가기관 도입이 이르다는 입장을 내세우고 있다.[96] 양자 키 분배는 암호화장치에 필요한 암호키를 만드는 것이므로, 미국 연방정부의 암호정책을 총괄하는 NIST에서는 암호모듈검증(Cryptographic Module Validation Program, CMVP)의 일환으로 검증을 추진하는 것이 어떻겠냐는 의견을 내기도 하였다.

ISO/IEC에 시험/검증 표준화를 제안하였던 중국에서도 초기에는 암호모듈검증 입장에서 표준을 제안하였지만, 현재는 프로토콜 표준화를 담당하는 ISO/IEC에서 표준화 추진이 어렵게 되고, ETSI의 CC 타입 시험평가 방법론이 받아들여져서, CC 타입의 시험평가 표준화가 추진되고 있다. 이러한 움직임은 양자 키 분배 장치가 현재는 양자 네트워크 요소로 개발되고 있고, 주로 네트워크 장치 개념으로 개발되고 있어, 네트워크 장치에 대한 시험평가를 확장하는 개념으로 받아들여지고 있는 것으로 보인다.

(2) 연구 동향

양자 키 분배장치 구현에 대한 공격 방법은 다양하게 알려져 있으며, 2020년에는 캐나다 V. Makarov 그룹에서 스위스 ID Quantique Clavis 2 QKD 장치에 대한 공격 가능성을 제시하기도 하였다.[97] 현재까지 알려진 연구되어진 공격 방법들은 다음과 같다.

96) 미국 NSA의 양자 키 분배 및 양자암호 관련 홈페이지, https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/
97) Juan Carlos Garcia-Escartin et al. (2020)

표 II-1-2 현재까지 알려진 공격 방법

공격명	공격 기법	취약점
차단 재전송 공격	공격자가 중간에 광신호를 차단, 측정한 후, 측정된 결과에 따라 새로운 신호를 수신자에게 전송	사용자인증, 양자채널
광자수 분리 공격	실제 시스템에서는 평균 광자수가 0.1개로 감쇄된 레이저를 사용하게 됨. 따라서 한 신호에 두 개 이상의 광자가 존재할 확률이 존재함. 공격자가 각 신호의 광자수를 확인 후 단일광자 수준의 경우는 차단하고, 다중광자 수준인 경우는 광분할기를 이용하여 한 개의 광자를 분리하고 나머지는 수신자에게 전송	양자소스 부채널[98]
암전 공격	공격자가 강한 펄스 신호를 수신자에게 보내면 수신자의 검출기가 단일 광자를 측정할 수 없는 암전(blind) 상태가 됨. 이때 공격자가 더 강한 펄스를 조사하여 수신자의 검출기가 단일 광자가 도달한 것과 같은 신호를 생성함	광검출기 부채널
트로이 목마 공격	공격자가 강한 펄스 신호를 송신자에게 보냄. 송신자 시스템에 입사된 광신호는 시스템을 구성하는 광부품에서 반사되어 공격자에게 되돌아와 송신자 시스템의 구성을 유추할 수 있는 정보를 제공할 수 있음	양자소스, 광검출기 부채널
시간 전이 공격	광검출기들의 동작시간이 외부 환경의 영향으로 다른 동작시간을 가진다는 점을 이용하여 수신자의 측정 결과를 공격자가 선택하는 방법	광검출기 부채널
검출기 불감시간 공격	단일광자 검출기는 광자가 도달하여 측정이 끝난 후 일정시간 동안 검출기가 동작하지 않는 불감시간을 가짐. 이러한 검출기의 특성을 이용하여 공격자가 송신자의 신호보다 앞서 수신자에게 신호를 보내 수신자의 측정 결과를 제어할 수 있음	광검출기 부채널
검출기 불일치 공격	광이 입사하는 각도를 변화시키면 검출기의 최대 효율의 위치를 벗어남. 각 검출기의 정렬상태, 광학계의 효율 등에 따라서 광자의 입사각에 따라 효율이 다르게 나타남을 이용한 공격	광검출기 부채널
파장 의존형 빔분할기 공격	수신자의 빔분할기(BS)가 광의 파장에 의존하는 특성을 이용하는 공격 기법	빔분할기

이러한 광학계에 대한 공격을 막고, QKD를 네트워크 장치로 보았을 때, QKD를 구성하는 요소들의 안전성을 시험하고자 하는 기준의 표준화가 ISO/IEC의 JTC 1/SC 27(Information security, cybersecurity and privacy protection)의 WG 3(Security evaluation, testing and specification) 분과에서 2019년부터 시작되었다. 표준명은 "ISO/IEC 23837 Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution"로 Part 1: Requirements, Part 2: Evaluation and testing methods의 두 개의 파트로 나누어져 있다.

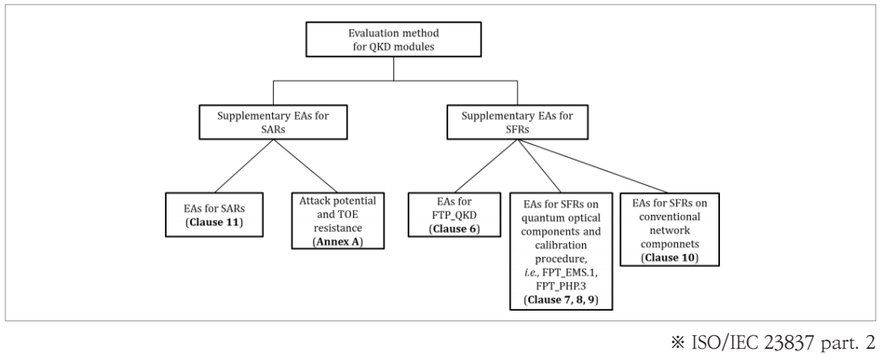
Part 1은 다음과 같은 사항으로 구성되어 있다.

- Theoretical aspects of QKD protocols: QKD 원리, 분류, 구조
- Implementation modules of QKD protocols: 외부 인터페인스, 내부 구조, TOE(Target of Evaluation) scope 등
- Security problems analysis of QKD modules: 안전성 가정, Asset 분석, 네트워크 컴포넌트에 대한 위협, 양자 광학 컴포넌트에 대한 위협
- Extended security functional components for QKD implementation
- Security functional requirements for QKD modules
- Conformance statement

Part 2는 다음과 같은 사항으로 구성되어 있다.

- Overview of the evaluation method for QKD modules: EA(Evaluation Activities),
- SFRs(Security Functional Requirements), SARs(Security Assurance Requirements)

그림 II-1-16 ISO/IEC 23837-2 구성



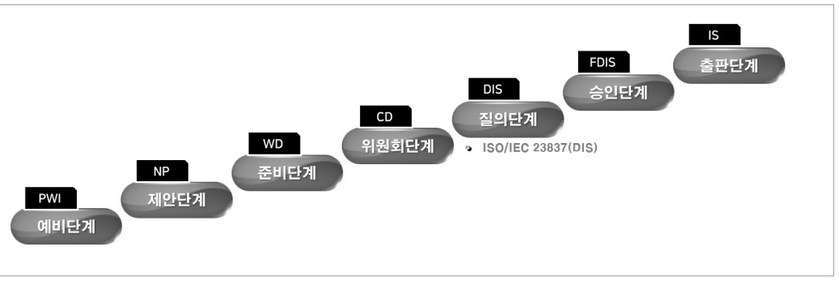
※ ISO/IEC 23837 part. 2

- Supplementary activities for the evaluation of FTP_QKD: 양자 키 분배에 과정에 대한 세부 시험평가
- Supplementary activities for the evaluation of quantum optical components in the transmitter module: 광자수 분포, 평균 광자수/광펄스 안정성, 광펄스 세기의 독립성, 인코딩 정확성, 인코딩 상태의 구별 불가능성 등에 대한 시험평가
- Supplementary activities for the evaluation of quantum optical components in the receiver module: 수신부의 탐지 확률에 대한 일치성, 수신부의 광학적 isolation degree 등
- Supplementary activities for the evaluation of parameter adjustment procedures
- Supplementary activities for the evaluation of SFRs on conventional network components
- Conformance statement

이 표준은 현재 위원회 단계를 거쳐 출판 단계에 근접한 DIS(Draft International Standard) 상태에 진입해 있다. 조만간 표준 승인 단계인 FDIS(Final Draft International Standard)로 진행하기 위한 투표를 진행할 예정이다.

98) A.R. Dixon et al. (2017)

그림 II-1-17 ISO/IEC 23837 표준화 진행 형황



유럽 표준협회 ETSI에서는 CC 평가에 활용하기 위한 양자 키 분배의 기능과 보증요구사항을 정의하기 위한 보호프로파일(Protection Profile, PP) “Quantum Key Distribution(QKD): Common Criteria Protection Profile Pair of Prepare and Measure Quantum Key Distribution Module” 작업을 2019년부터 진행하고 있다. 현재는 v0.7.1이 만들어진 단계이며, ISO/IEC 문서와는 일부 다른 부분이 존재한다.

(3) 적용 분야

ISO/IEC 및 ETSI의 양자 키 분배 시험평가 기준은 기존 보안제품의 시험평가 활용되어온 국제공통평가기준(Common Criteria, ISO/IEC 15408)에 맞추어 개발되고 있다. 공통평가기준은 보안 문제에 대한 인증을 하기 위한 제도이다. 양자통신에서 보안문제가 중요 요소인 기술은 우선 양자 키 분배인데, 이론적으로는 완벽한 안전성을 제공하지만 구현에 있어서는 다양한 공격 가능성이 제기되기도 하는 기술이다. 양자 키 분배를 보안 분야에 적용하기 위해서는 구현에 따른 보안 위협을 식별하고 개발된 제품이 이런 위협들에 대한 대응을 적절하게 하고 있는지 시험검증하는 절차가 필요하다. ISO/IEC 및 ETSI의 표준들은 이러한 시험검증에 활용될 수 있을 것이다.

제3절 국내 양자통신 R&D 동향

1. 유선 양자 키 분배 (Fiber-based Quantum Key Distribution)

유선 양자 키 분배 기술은 광섬유 선로를 전송 채널로 사용하는 QKD 기술을 의미한다. 1989년에 편광 인코딩 기반 BB84 프로토콜을 광학테이블 위 자유공간(Free Space)에서 처음 실험적으로 구현하였고,[99] 1993년 스위스 제네바 대학의 Gisin 그룹에서 1km 이상의 광섬유 스풀(Spool)을 통해 첫 유선 QKD 구현에 성공하였다.[100] 이후에 위상 인코딩 기반 BB84,[101] Coherent One Way(COW),[102] Differential Phase Shift(DPS),[103] Measurement Device Independent(MDI) 프로토콜,[104] Twin Field(TF)[105] 프로토콜 등 광섬유 시스템에 적용하기 용이한 새로운 프로토콜들이 등장하고, 단일광자 검출기의 효율 개선 및 광 신호 고속 변조, 광 간섭계 안정화 기술 등이 적용되면서 QKD의 전송 거리가 점점 증가하고 있다. 현 시점에서 양자중계기(Repeater) 없이 도달할 수 있는 최대 전송거리는 2022년에 중국에서 Twin-field 프로토콜로 구현한 833.80km[106]로 알려져 있다.

QKD에서 전송 거리만큼이나 중요한 요소는 여러 가지 도청 공격에 대한 보안성의 확보이다. 가장 널리 쓰이고 있는 BB84 프로토콜만 하더라도 정보이론적으로 보안성이 잘 증명되었지만 실제 시스템에 적용할 때는 광원, 광소자, 검출기 등의 불완전성으로 인해 여러 가지 부채널(Side-Channel) 공격에 취약해질 가능성이 있다. 따라서 장치의 불완전한 요소에 관계없이 안전하게 동작하는(Device-independent) QKD가 제안되었으나,[107] 현재 기술로 구현하기에 한계가 있기 때문에 보다 실용적인 대안인 측정 장치에 무관한(Measurement-Device-Independent, MDI) QKD 프로토콜이 제안되어 2013년 실험적으로 처음 구현되었고[108] 지금까지도 여러 플랫폼을 통해 활발히 연구되고 있다.

국내에서는 2000년대 중반부터 양자암호통신 요소기술을 연구하기 시작했고, 통신사 SK텔레콤, KT와 한국과학기술연구원(KIST), ETRI가 유선 QKD 기술 개발에 앞장서고 있다. 이 장에서는 현재까지 연구·개발된 유선 QKD 기술에 대해 설명하고자 한다. 국내 동향의 경우 QKD 시스템 전체에 대한 개발 경험

99) Charles H. Bennett & Gilles Brassard. (1989)
100) A. Muller et al. (1993)
101) P.D. Townsend (1994)
102) Stucki, D. et al. (2005)
103) Inoue, K. et al. (2002)
104) Lo, Hoi-Kwong et al. (2012)
105) Lucamarini, M. et al. (2018)
106) Wang, S. et al. (2022)
107) Barrett, J. et al. (2005)
108) A. Rubenok et al. (2013)

이 있는 업체와 연구소의 공개된 성과를 기준으로 작성하였으며, 단일광자광원이나 단일광자검출기 개발과 같이 QKD를 포함한 광자 기반 양자 통신 시스템을 구성하는 세부 요소 기술들은 포함하지 않았다.

가. 양자 키 분배 프로토콜

(1) 기술 동향

① BB84 QKD

1984년 Bennett과 Brassard가 처음으로 제안한 것으로, 광 채널을 통해 전송되는 단일광자들의 양자 상태를 이용한 키 분배 방법이다.

단일광자광원의 사용을 가정하고 있으며, 비트 정보를 서로 직교하지 않은 두 기저 $\{|0\rangle,|1\rangle\}$, $\{|+\rangle,|-\rangle\}$로 구성된 네 개의 상태 $\{|0\rangle,|1\rangle,|+\rangle,|-\rangle\}$에 암호화한다. 이 과정에서 주로 사용되는 물리량은 빛의 편광이나 두 펄스 사이의 상대적인 위상 차이이다. 아래 표와 같이, 송신자 Alice는 비트 값 하나와 기저를 비트 시퀀스 x_A,y_A로부터 랜덤하게 선택하여 단일광자 펄스에 암호화하며, 수신자 Bob은 복호화를 위해 측정 기저를 비트 시퀀스 y_B로부터 랜덤하게 선택하여 측정을 수행하고 그 결과 생긴 측정 비트 시퀀스(x_B)를 기록한다. 이 때 수신단에서는 전송 과정에서의 광 손실 등으로 인해 단일광자가 검출되지 않는 이벤트(Non-detection Event)도 존재하게 된다. 또한 검출 과정에서 단일광자가 유실되기 때문에 측정은 단 한 번만 가능하다. 광 펄스 송수신이 끝난 후 인증된 공개 채널을 통해 Alice와 Bob이 사용한 모든 기저 y_A,y_B를 공개하며, 수신자는 광자가 실제로 검출된 타임 슬롯도 공개한다. 이후에 Alice와 Bob은 단일광자가 검출된 이벤트 중에서 서로 같은 기저를 선택한 이벤트의 비트 값만 남기는데, 이 과정을 키 시프팅(Key Sifting)이라고 한다.

표 II-1-3 단일광자의 편광 상태를 이용한 BB84 QKD 프로토콜의 과정

단계	Alice	전송									Bob
1	비트 시퀀스 x_A	1	1	0	0	1	0	1	0	1	
	비트 시퀀스 y_A	1	0	0	0	0	1	1	1	1	
2	준비 기저	×	+	+	+	+	×	×	×	×	
	큐빗 시퀀스	A	V	H	H	V	D	A	D	A	
3		1	1	0	1	0	0	1	1	0	비트 시퀀스 y_B
		×	×	+	×	+	+	×	×	+	측정 기저
		1	1	0	1	1	1	1	0	1	측정된 비트 x_B
4	기저 비교 ($y_A = y_B$?)	○		○		○		○	○		기저 비교 ($y_A = y_B$?)
5	Sifted key x'_A	1	–	0	–	1	–	1	0	–	Sifted key $x'_B = x'_A$

* H: 수평 편광, V : 수직 편광, D : 45° (Diagonal) 편광, A : -45°(Antidiagonal) 편광

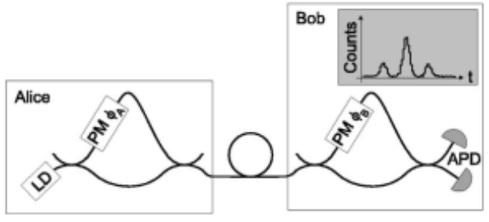
시프팅된 키의 일부를 인증된 공개 채널로 공개하여 매개 변수를 추정하고, 적절한 오류 정정 부호와 비밀성 증폭(Privacy Amplification)을 위한 해쉬 함수(Hash Function)를 선택한다. 이후 공개되지 않은 나머지 키를 앞서 선택한 오류정정부호화 해쉬함수를 사용하여 비밀키로 전환한다. 추정된 양자 비트 오류율(QBER)이 문턱값보다 작다면 분배된 키는 정보이론적으로 안전하게 된다. 초기 QKD 실험 구현은 1989년에 Bennett 등이 빛의 편광상태를 이용하여 32cm의 자유 공간(free space) 양자 채널을 통해 이루어졌고, 그로부터 4년 뒤 제네바 대학의 Gisin 그룹에서 1km 길이의 광섬유를 양자 채널로 사용하여 실험에 성공함으로써 유선 QKD 기술 개발의 시작을 알렸다.

㉠ 위상 인코딩 기반 BB84 QKD

빛의 편광 상태를 이용하여 인코딩할 경우 일반적인 단일 모드 광섬유 양자 채널로 전송하는 과정에서 편광 상태가 잘 유지되지 않고 광섬유의 꼬임이나 텐션(Tension) 등으로 유도된 복굴절(Birefringence)에 의해 계속 변화하게 된다. 특정 방향으로 빛의 편광을 정렬하여 입사시키면 편광 상태를 오랫동안 유지할 수 있는 편광 유지 광섬유(Polarization Maintaining Fiber)라는 특수 광섬유를 이용할 수도 있으나, 일반 광섬유에 비해서는 가격이 고가이기 때문에 수십 km 이상의 전송거리가 필요한 상황에서는 적절하지 않다. 편광 대신에 두 펄스 사이의 위상차를 이용하여 인코딩하면 광섬유 기반 광학계에서 상대적으로 쉽게 구현할 수 있는데, [그림 II-1-18]과 같이 송·수신단에 동일한 광섬유 마하젠더 간섭계가 각각 하나씩 있는 이중 비대칭 마하젠더 간섭계 구조를 이용한다. 이 마하젠더 간섭계는 50:50 광 커플러(Optical Coupler) 두 개와 위상 변조기(Phase Modulator), 광섬유 지연선로로 구성되어 있고, 두 경로의 길이차가 다르기 때문에 단일광자 펄스가 간섭계를 통과한 후 이 광 경로 차이에 해당하는 시간 지연을 가지는 두 개의 타임 슬롯 중 하나에 광자가 확률적으로 존재할 수 있게 된다. 다시 말해서, 광자가 간섭계의 짧은 경로를 통과하는 상태를 $|S\rangle$, 긴 경로를 통과하는 상태를 $|L\rangle$이라고 정의하면 간섭계 통과 후 단일광자의 양자상태는 $e^{i\phi_A}|S\rangle+|L\rangle$이 된다. Alice는 두 경로 중 하나에만 위상 변조기를 이용하여 $\{0,\pi/2,\pi,3\pi/2\}$ 네 값 중 하나를 랜덤하게 골라 위상 변화를 인가하고, Bob은 $\{0,\pi/2\}$ 중 하나를 골라 위상을 마찬가지로 랜덤하게 변조한 뒤 측정 결과를 기록한다. 수신단에서 Bob의 간섭계를 통과한 후 단일광자는 총 3개의 타임 슬롯($|SS\rangle,|SL\rangle+e^{i\Delta\phi}|LS\rangle,|LL\rangle$)에 존재할 수 있다. 실험적으로 Time-to-Amplitude Converter (TAC) 혹은 Time-Correlated Single Photon Counting (TCSPC) 시스템과 같이 검출된 광자의 도착 시간 간격을 분석할 수 있는 장비를 이용하여 시간에 대한 광자수 시간 분포를 측정할 경우, 총 3개의 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 중 가운데 피크에 해당하는 것이 단일광자 간섭이 발생할 수 있는 타임 슬롯이며, 양 옆의 피크는 단일광자 펄스가 각 간섭계에서 어떤 경로를 통과하였는지 확정할 수 있으므로 간섭과 관련이 없는 타임 슬롯이다. 따라서 측정 시간 윈도우를 가운데 피크(peak)의 영역에 맞추고 두 단일광자검출기(그림의 APD)의 검출 정보를 확인하면 수신단의 키 비트열을 만들어 낼 수 있다. 이 단계에서 단일 광자 간섭의 가시도가 높을수록, 즉 간섭이 이상적으로 일어날수록 낮은 양자 비트 오류율(QBER)을 얻을 수 있기 때문에 본격적인 QKD를 수행하기에 앞서 간섭계의 특성을 측정하고 최적화하는 작업이 꼭 필

요하다. 높은 가시도의 간섭무늬를 얻기 위해서는 간섭계의 경로차에 해당하는 시간지연이 광자의 결맞음 시간(Coherence Time)이나 펄스 폭, 단일광자검출기의 시간 불확도(Timing Jitter)보다 길어야 하고, 두 간섭계의 시간지연 차이가 결맞음 시간보다는 짧아야 하며, 두 간섭계의 상대적 위상 변화가 빛의 파장 범위 내에서 안정적으로 유지되어야 한다. 키 시프팅 과정은 편광 기반 BB84에서와 같이 각자 사용한 기저를 공개하고 같은 기저를 사용한 비트 정보만 남김으로써 이루어진다. $\{0,\pi\}$를 기저 0, $\{\pi/2,3\pi/2\}$를 기저 1로 정의하면 Bob은 $\{0,\pi/2\}$ 중 하나의 위상값을 적용함으로써 두 기저 중 하나를 선택할 수 있는데, 같은 기저를 선택한 경우 최종적으로 간섭하는 단일 광자 양자상태의 위상 차이가 0 또는 π이므로 어느 검출기를 클릭할지 확정적으로 알 수 있어 대칭 키를 만들어낼 수 있다.

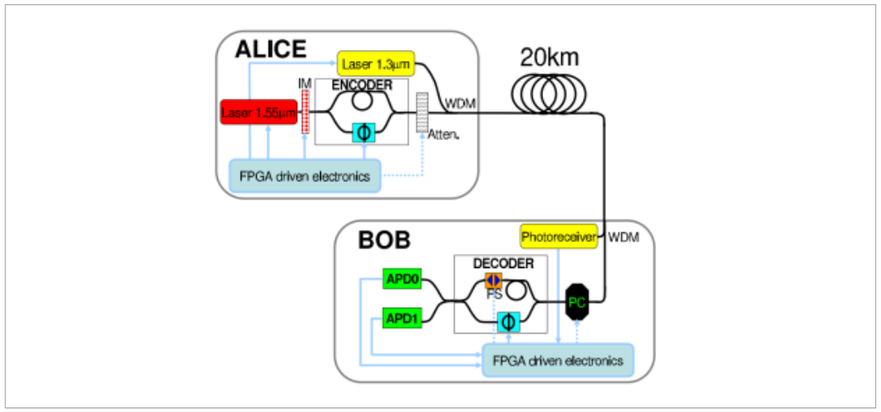
그림 II-1-18 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 개요도



※ Nicolas Gisin et al. (2002)

이 시스템에서 중요한 것은 키를 교환하는 과정에서 두 마하젠더 간섭계의 경로차와 편광상태를 안정적으로 유지하는 것이다. 온도나 압력, 진동 등 외부 환경 변화로 인해 광경로가 변하면 Alice와 Bob 사이 위상관계가 틀어지고 비트열에 오류를 일으키게 된다. 이를 방지하기 위하여 다음 그림과 같이 두 간섭계 중 하나를 선택하여 한 경로(Arm)에 Fiber Stretcher(FS)를 삽입하고 고전 광 특성을 가지는 레퍼런스 펄스의 간섭 신호를 이용하여 압전소자가 들어있는 FS에 피드백 해주면 광섬유의 길이를 자동으로 조절하여 장시간 동안 간섭계의 위상을 안정화할 수 있다. 위상과 마찬가지로 간섭계를 통과하는 빛의 편광상태도 시간에 따라 변화하면서 간섭 결과에 영향을 미치는데, 이를 안정화하기 위해 전기적으로 구동하는 편광 조절기를 이용한다. 두 단일광자검출기의 시간 당 검출 광자수(Count Rate)의 합을 피드백 신호로 하여 편광조절기의 축에 전압을 인가해 주면 편광 드리프트가 보상된다.

그림 II-1-19 간섭계 안정화를 적용한 위상 인코딩 기반 one-way BB84 QKD 실험 구성도



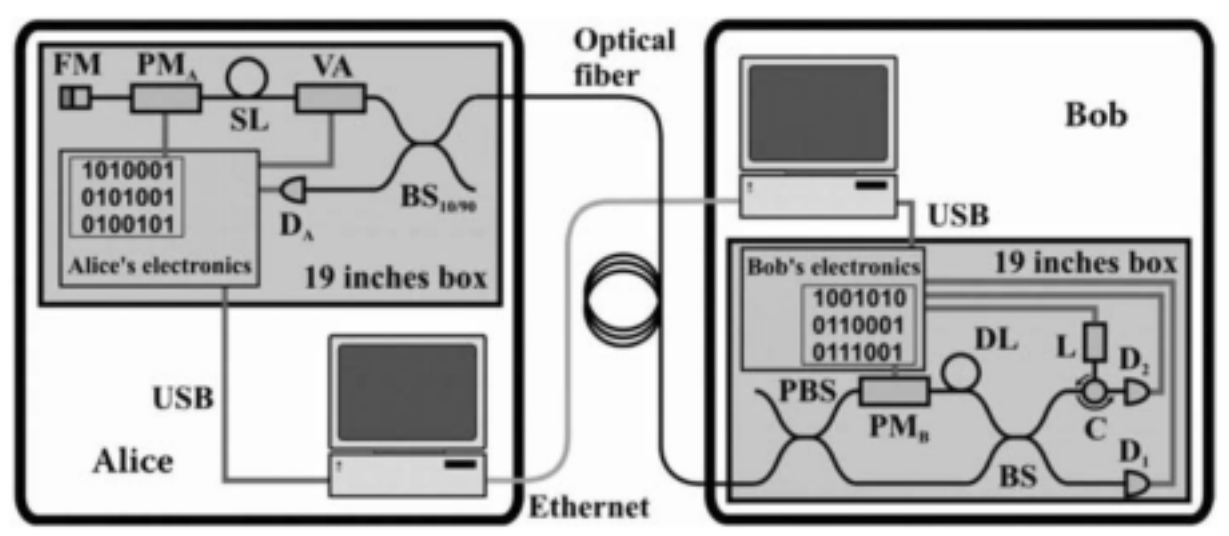
※ J. F. Dynes et al. (2007)

㉡ Two-way(Plug&Play) BB84 QKD

Plug&Play 방식 QKD는 기존의 위상 인코딩 기반 One-Way BB84 QKD 실험 구성을 변형한 것으로, 별도의 능동 안정화가 필요 없기 때문에 상대적으로 구현이 쉬운 프로토콜이다. 1997년에 Müller 등이 처음 제안하였고, 같은 해에 Zbinden 등에 의해 실험적으로 구현되었다. 이 시스템의 특징을 살펴보면 우선 수신단에만 레이저와 비대칭 마하젠더 간섭계, 단일광자검출기가 존재하며, 레이저와 단일광자검출기는 광 서큘레이터(Circulator)를 통해 서로 분리되어 있다. 또, 마하젠더 간섭계의 출(입)력부에 일반적인 광 커플러가 아닌 편광 빔 분할기(Polariz Beam Splitter, PBS)가 있어 서로 수직한 두 편광을 다중화/역다중화할 수 있다. 이 때 긴 경로와 짧은 경로를 통과하는 빛의 편광을 각각 조절하여 PBS를 통과할 때 생길 수 있는 광 손실(쓰지 않는 포트로 출력되는 광량)을 최소화하도록 한다. Bob의 광원에서 광 펄스를 생성한 후 간섭계를 통과하면(이 때 위상변조는 하지 않음) 간섭계 광경로 차이로 인한 시간 지연만큼 분리되어 있는 두 펄스가 생성된다. 이들을 양자채널을 통해 Alice에게 전송한다. Alice의 시스템 종단에 있는 패러데이 거울(Faraday Mirror)이 중요한 소자인데, 빛을 반사하여 Bob으로 다시 재전송하는 역할을 한다. 반사 과정에서 빛의 편광상태가 90도 만큼 변화하기 때문에 지나온 경로를 다시 통과하면서 광섬유 내 임의의 복굴절에 의한 편광 상태 변화가 보상되어 Bob의 시스템으로 다시 되돌아올 때의 편광 상태가 출발할 때와 서로 수직이 된다. 따라서 두 번째로 PBS를 통과할 때 이전에 지나온 경로와 다른 경로를 통과하므로 광 경로차가 자동으로 보상되어 하나의 타임 슬롯에서만 단일광자 간섭이 일어나게 된다. (One-Way 이중 간섭계 구조에서 관찰할 수 있었던 간섭과 관계없는 피크가 나타나지 않음.)

펄스들이 패러데이 거울에서 반사되고 나면 Alice는 광 감쇠기를 이용하여 단일광자 수준으로 출력을 낮추고, 나중에 도착한 펄스($|L\rangle$)에 자신이 가진 위상 변조기로 One-Way 방법과 같이 네 개의 위상 중 하나를 랜덤하게 골라 비트 정보를 인코딩하여 Bob에게 다시 전송한다. 나머지 과정은 One-Way 방식과 동일하다.

그림 II-1-20 Plug&Play BB84 QKD 시스템의 실험 구성도



※ Stucki, D et al. (2002)

② Distributed-phase-reference(DPR) 프로토콜

DPR 프로토콜은 서로 이웃한 약한 결맞음 펄스(Weak Coherent Pulse, WCP) 사이의 시간 혹은 위상에 비트 정보를 기록하는 방식으로, 인코딩 및 측정을 위해 랜덤한 기저 선택이 필요하지 않기 때문에 상대적으로 시스템 구성이 간편하다는 장점이 있다. 다만 프로토콜이 성립하기 위해서는 전송하는 광 펄스열 전체에 걸쳐서 일정한 위상관계를 가져야 한다는 가정이 있다. (예 : 모드 잠금(Mode-locked) 레이저) 인접한 펄스 사이에 결맞음이 유지되어야 간섭을 확인할 수 있으므로, 레이저의 선폭(결맞음 시간)과 광 펄스의 간격 등을 고려하여 실험을 설계해야 한다.

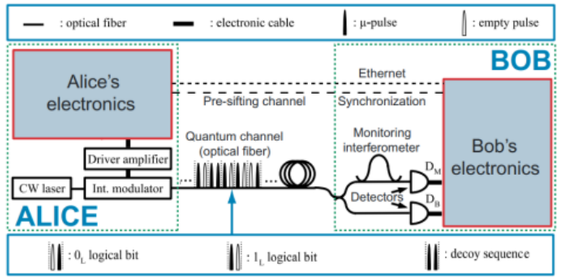
㉠ Coherent One-Way (COW) QKD

앞서 소개한 위상 인코딩 방식의 BB84 QKD 프로토콜은 Alice가 광자의 (타임 빈) 양자상태를 4개 중 하나로 변조하고, Bob이 기저를 선택하여 측정하는 방식이었기 때문에 대칭 키를 생성할 때 간섭이 일어나는 검출 시점과 그 때의 상대 위상 차이 정보를 같이 알아야 한다. 광자가 존재할 수 있는 두 타임 빈을 시간 순서대로 $|S\rangle, |L\rangle$이라 할 때 Alice는 $|S\rangle + e^{i\phi_A}|L\rangle (\phi_A \in 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2)$과 같이 양자상태를 인코딩하여 전송하고, Bob이 측정 기저(ϕ_B)를 선택하여 간섭계 출력 결과 기록할 때 실제 간섭에 관여한 양자상태는 $|SL\rangle + e^{i\Delta\phi}|LS\rangle (\Delta\phi = \phi_A - \phi_B)$으로 기술할 수 있다. 여기서 $|SL\rangle$은 앞 타임 빈에 존재하는 단일광자가 간섭계의 긴 경로(Long Arm)를 통과하는 상태를 의미하고, $|LS\rangle$는 반대로 뒤 타임 빈에 존재하는 단일광자가 간섭계의 짧은 경로(Short Arm)를 통과하는 상태를 의미한다. $\Delta\phi$는 Alice와 Bob이 인가한 위상의 차이이며, 둘의 준비/측정 기저가 동일할 경우 보강 혹은 상쇄 간섭을 확인할 수 있다. 만약 Alice가 처음부터 두 타임 빈에 대한 논리 큐비트($0 : |S\rangle|L\rangle, 1 : |L\rangle|S\rangle$)로 인코딩할 수 있다면, Bob은 광자의 도착 시간 정보만 측정해서 비트 정보를 알아낼 수 있으므로 전체 시스템이 간편해지고 외부 환경 변화에 대한 오류가 생길 가능성이 더 낮다. COW 프로토콜은 이 아이디어에서 출발한 것으로, 실제 시스템에서는 연속발진(Continous-Wave, CW) 레이저를 소광률이 높은 진폭 변조기(Intensity Modulator)로 변조하여 특정 타임 빈에 약한 세기의 광 펄스를 만들어주는 비트 정보 인코딩을 수행한다. 두 개의 타임 빈 중 하나에 약한 결맞음 펄스를 보내고, 나머지 타임 빈은 진공(Vacuum) 상태가 되도록 하여 논리 큐비트($0 : |S\rangle|L\rangle, 1 : |L\rangle|S\rangle$)를 만들어 낸다. 예를 들어 [그림 II-1-21]와 같이 첫 번째 타임 빈이 진공이고 두 번째 타임 빈에 펄스가 존재하면 비트 0, 반대로 첫 번째 타임 빈에만 펄스가 있고 두 번째에는 진공 상태이면 비트 1이 된다. 이렇게 인코딩된 상태들은 각 상태에 대해 간단한 도착 시간(Time Stamp) 측정을 함으로써 구분할 수 있다. 추가적으로 디코이(Decoy) 시퀀스라 불리는 세 번째 상태도 있는데, 여기서는 두 타임 빈 모두가 약한 결맞음 펄스를 포함하고 있으며 비트 상태들과 마찬가지로 랜덤하게 준비된다.

Alice는 CW 레이저의 진폭을 랜덤하게 변조하여 양자 상태를 만들고, 단일 광자 수준으로 감쇠하여 Bob에게 전송한다. Bob은 두 개의 단일 광자 검출기로 비트 정보(펄스의 도착 시간)를 읽고 결맞음의 정도를 모니터링(Monitoring) 한다. 검출기 하나는 펄스의 도착 시간을 측정하고, 나머지 검출기는 결맞음을 측정하는 광섬유 간섭계의 출력부에 위치하여 연속한 두 광 펄스 사이의 결맞음을 측정한다. 광 펄스가 인접한 타임 슬롯에 모두 존재하는 경우는 디코이 시퀀스, 1-0 비트 시퀀스가 있다. 둘 중 어느 경우에나 결맞음이 똑같이 존재하므로 도청자 Eve가 중간에 PNS 공격 등을 시도하여 결맞음이 깨지면 모니터링 간섭계 출력부의 검출 결과에 바로 영향을 주어 도청 공격 여부를 확인할 수 있다. 예를 들어 Bob이 $t = 2k_d$에서 디코이 시퀀스 펄스 사이의 간섭을 측정했을 때 [그림 II-1-21]의 모니터링 검출기 D_M에서 광자가 검출되면 결맞음이 깨진 것이다. Bob의 측정과 원본 키 생성이 끝난 후 Alice가 디코이 시퀀스의 인덱스 k_d를 공개하면, Bob은 디코이 시퀀스에 해당하는 키를 지운 다음(키 시프팅) D_M에서의 검출 여부를 확인하여 결맞음이 깨진 정도를 추정할 수 있다. 이후의 후처리 과정은 기존 프로토콜과 동일하게 수행하면 된다.

프로토콜의 전체 과정에서 알 수 있듯이 시프팅 과정에서 버려지는 키의 양이 작기 때문에 효율적이고, 기존에 기저 선택을 위해 필요했던 능동 소자(위상 변조기)들을 제거하고 수동 소자들로 수신부를 구성할 수 있기 때문에 광 손실이 작고 경제적이다. 또, 수신단에 도착하기 전까지 모든 광 펄스들이 하나의 광섬유 선로를 공유하기 때문에 별도의 편광 조절이 필요하지 않다는 점도 COW 프로토콜의 장점이다. 물론 수신부의 모니터링 간섭계도 온도 변화에 대한 안정화를 해야 하지만 기존의 One-Way BB84 QKD 시스템에서보다 훨씬 적은 빈도로 조정해 주어도 잘 동작하며, 펄스 반복률(클록 주파수)을 높이면 키 생성률을 높이면서 안정화하기도 더 용이해진다. 이러한 특징들로 인해 COW 프로토콜은 장거리 전송에 매우 유리하며, 현재 스위스의 QKD 장비 제조사 중 하나인 ID Quantique에서 COW 프로토콜을 이용한 제품을 생산하고 있다.

그림 II-1-21 COW-QKD 시스템의 구조

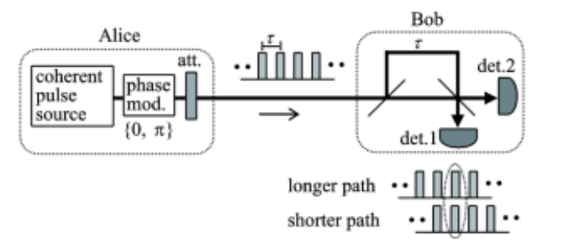


※ Stucki, D et al. (2009)

㉡ Differential Phase Shift QKD

Differential Phase Shift QKD는 두 펄스 사이의 상대 위상으로 비트 정보를 기록한다. 이를 위해 Alice는 결맞음 광 펄스열을 만들고, 각 펄스마다 랜덤하게 위상 변조를 수행하여 Bob에게 전송한다. 결맞음 광 펄스열은 선폭이 좁은 연속발진 레이저를 진폭변조기를 이용하여 펄스 형태로 변조하거나 모드잠금(Mode-locked) 레이저를 통해 구현할 수 있다. Bob은 비대칭 간섭계를 이용하여 Alice가 보낸 펄스열을 측정하는데, 간섭계의 경로차로 인한 시간 지연이 펄스열의 주기와 일치하기 때문에 이 측정을 통해 이웃한 펄스 사이의 위상 차이(비트 정보)를 알아낼 수 있다. Bob은 이 측정결과를 시프팅된 비트로 저장한다. Alice의 비트를 시프팅하기 위해 Bob은 그가 측정에 성공한 검출 시점(타임빈)을 공개한다. Alice는 해당 정보를 토대로 Bob이 측정에 성공한 시점의 비트열만 남기는 시프팅 과정을 거친다. 이후는 Alice와 Bob이 다른 QKD 과정과 마찬가지로 오류정정과 비밀성 증폭을 수행하여 비밀키를 생성한다.

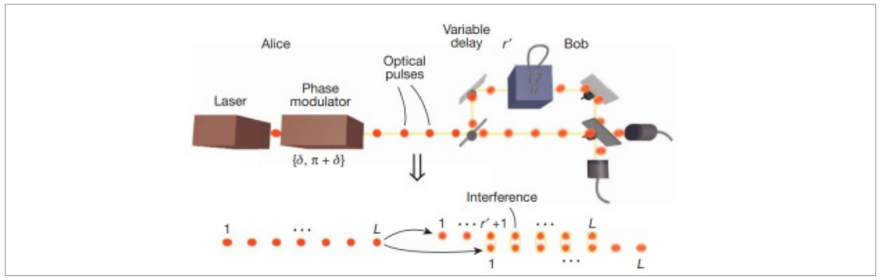
그림 II-1-22 DPS-QKD 프로토콜 실험 개요도



※ Kyo Inoue (2015)

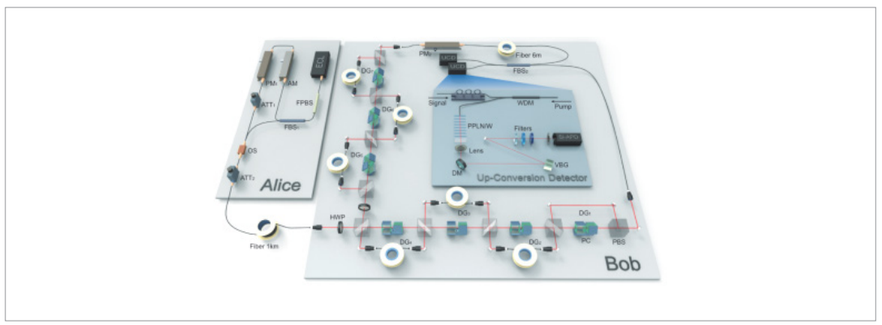
정통 DPS-QKD 프로토콜에서는 Bob이 가진 간섭계의 광 시간 지연이 펄스의 주기와 일치하기 때문에 이웃한 펄스들 사이의 위상 정보만을 인코딩할 수 있었다. 수신단의 간섭계에 광 스위치 같은 능동 소자를 추가하여 가변 광 지연선로(Variable Delay Line)를 구성하면 펄스열 중 임의의 두 펄스 사이의 위상차를 측정할 수 있다. Alice가 총 N개의 펄스를 보냈다고 가정했을 때, 펄스 주기 T만큼의 광경로차를 L이라고 하면 임의의 펄스 사이의 간섭을 측정하기 위해 Bob이 가진 가변 광 지연선로는 광경로의 길이를 $\{0, L, 2L, \cdots, (N-1)L\}$ 중 하나로 자유자재로 바꿀 수 있어야 한다. 예를 들어 i번째 펄스와 $i+r$번째 펄스 사이의 간섭을 측정할 때는 가변 광 지연선로의 길이를 rL로 구성한다. Bob은 r을 $\{0, 1, 2, \cdots, N-1\}$ 중 하나를 랜덤하게 선택하여 rT만큼의 시간차를 가진 펄스들의 간섭을 측정하고, 공개 채널을 통해 검출 시점 i와 r을 공개하여 Alice가 키 시프팅을 할 수 있도록 한다. 도청자는 이 상황에서 시퀀스 전체를 알아내기 어렵기 때문에 기존 DPS-QKD보다 보안성이 더 강화된다. 이를 Round-Robin DPS 프로토콜이라고 하며, 2014년에 일본의 Sasaki 등이 처음으로 제안하였고 2016년에 중국의 J. W. Pan 그룹에서 처음으로 구현하였다.

그림 II-1-23 RRDPS-QKD의 실험 개요도



※ Sasaki, Toshihiko et al. (2014)

그림 II-1-24 RRDPS QKD 실험 구성도



※ Li, Yu-Huai et al. (2006)

③ 측정 장치에 무관한 프로토콜

불연속변수(Discrete-Variable) 기반 양자 키 분배 시스템은 단일광자검출기 사용을 전제로 한다. 단일광자검출기는 검출 신호(펄스) 발생 유/무만 판단할 수 있기 때문에 광자수 상태를 정확히 구분할 수 없고, 불완전한 성질(검출효율<100%, 암계수(Dark Count) 존재) 때문에 QKD 시스템의 성능에 많은 영향을 미친다. 여기서 소개할 두 프로토콜은 검출 시스템에 대한 부채널 공격 요소를 제거하여 높은 보안성과 전송 거리를 달성할 수 있는 프로토콜이다.

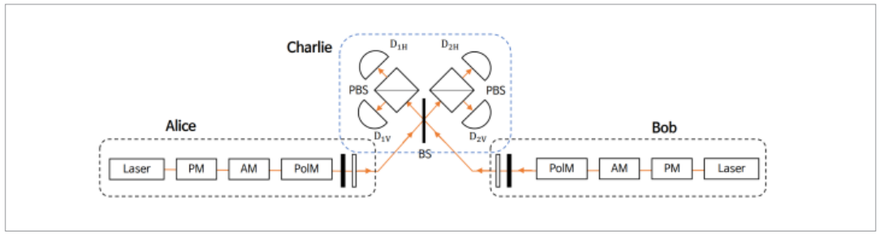
㉠ Measurement-Device-Independent QKD

기존 QKD 방법의 보안성이 이론적으로 잘 증명되어 있다고 하더라도, 실제 시스템을 구성하는 다양한 소자들이 부채널(Side-Chanel)을 갖고 있기 때문에 이에 대한 다양한 공격(Side-Channel Attack)에 노출될 수밖에 없다. 따라서 부채널을 이용한 QKD 시스템 해킹에 대한 연구가 많이 이루어졌고, 장치의 불완전한 요소에 관계 없이 안전하게 동작하는 QKD (Device-Independent QKD, DI-QKD)가 제안되었다. 이는 얽힘 광자의 측정 결과를 토대로 벨 부등식(Bell's Inequality)의 위배(Violation) 여부를 시험해야 하는데, 현재 기술로 구현하기에 한계가 있기 때문에 그 대안으로 측정 장치에 무관한 QKD(Measurement-Device-Independent QKD) 프로토콜이 제안되었다. 기존 QKD 시스템은 여러 가지 양자 해킹 공격 중 검출기에 대한 부채널 공격에 가장 취약한데, Eve가 중간에 채널을 제어하여 강한 광 펄스 같은 임의의 신호를 전송하면 Bob은 이를 수용할 수밖에 없고 필터를 사용하더라도 완벽하지 제거되지 않기 때문에 검출기에 대한 공격을 완전히 차단하기 어렵다. MDI-QKD는 신뢰할 수 있는 사용자인 Alice와 Bob이 각자 양자상태를 완벽하게 준비하여 양자채널을 통해 중앙의 수신자(릴레이)에게 전송한다는 상황을 가정한다. 중앙의 릴레이에는 검출기들이 존재하는데, 여기에는 어떤 가정도 하지 않으므로 실제로 도청자의 통제 하에 있을 수도 있다. 이 방법을 이용하면 검출기나 측정 장비의 신뢰도에 대해 더 이상 걱정하지 않아도 되므로 기존 QKD 프로토콜보다 높은 보안성을 가지면서, 효율이 낮은 검출기와 광손실이 많은 채널에서도 구현 가능하므로 현재까지 발표된 DI-QKD 프로토콜보다는 실용적이라고 할 수 있다.

[그림 II-1-25]은 MDI-QKD 프로토콜의 실험 구성 개요도이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존 QKD 프로토콜과 같이 Alice가 양자상태를 생성하여 Bob에게 전송하는 것이 아니라, Alice와 Bob이 독립적으로 양자상태를 인코딩하여 제3자인 Charlie에게 동시에 전송하고, Charlie는 벨 상태 측정(Bell State Measurement, BSM)을 수행하여 측정이 성공한 시점과 그 결과를 기록하고 Alice와 Bob에게 공표한다. 벨 상태 측정은 Alice와 Bob이 보낸 비트가 같은지 다른지 비교(Parity Check)하기 위해 필요하며, Charlie는 이 과정에서 둘의 정확한 비트값을 알 수 없다. 후처리를 제외한 프로토콜의 전체 과정은 다음과 같다.

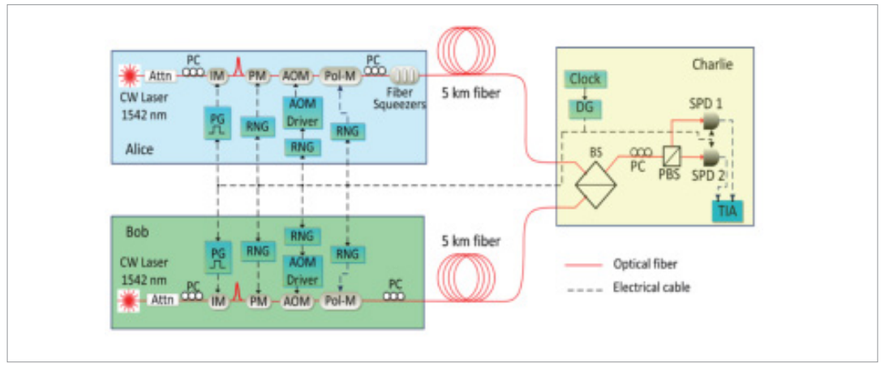
1. Alice와 Bob이 위상 랜덤화된 약한 결맞음 펄스 신호를 디코이 신호와 함께 4개의 편광 기반 BB84 상태 중 하나로 준비하고 Charlie에게 전송한다.
2. Charlie가 Alice와 Bob으로부터 동시에 도착한 광자에 대해 BSM을 수행한다. D_{1H}&D_{2V}혹은 D_{1V}&D_{2H}에서 광자가 동시에 검출될 경우는 벨 상태 중 $|\psi^{(-)}\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(|HV\rangle-|VH\rangle)$상태로 투영되어 Hong-Ou-Mandel (HOM) 간섭에 의해 peak가 나타나고, D_{1H}&D_{1V} 또는 D_{2H}&D_{2V}에서 광자가 동시에 검출될 경우는 $|\psi^{(+)}\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(|HH\rangle+|VV\rangle)$로 투영되어 HOM dip이 나타난다. 이들 외에 다른 형태의 검출은 실패한 경우로 간주한다.
3. Charlie가 BSM 결과를 인증된 고전 채널을 통해 발표한다.
4. Alice와 Bob이 3. 의 결과를 토대로 BSM이 성공한 시점의 비트열만 남기고 나머지는 버린다.
5. BB84의 sifting 프로토콜처럼 Alice와 Bob이 서로의 인코딩 기저를 공개하고 서로 같은 기저를 사용한 시점의 비트열만 남긴 다음, Charlie가 측정한 BSM 결과(패리티)에 따라 둘 중 한 명이 자신의 비트들을 플립하여 Bob의 키와 같도록 맞춰준다.

그림 II-1-25 MDI-QKD의 실험 개요도



MDI-QKD 프로토콜 구현의 핵심은 HOM 간섭 측정과 BSM의 분석이라고 할 수 있다. 실제 시스템에서 구현하기 위해서는 독립적인 광원으로부터 서로 구별할 수 없는(Indistinguishable) 동일한 광자들을 생성해야 하므로 이들을 구별할 수 있는 모든 요소(파형, 스펙트럼, 방출 시간 차이 등)들을 제거하고, 간섭계의 편광 등이 잘 유지되어야 한다. 또한 BSM의 성공률을 높이기 위해서는 PBS 같은 편광 의존 광소자들의 소광률이 높아야 하고 검출기들의 암계수가 낮아야 한다. [그림 II-1-26]은 2014년에 Z. Tang 등이 디코이 상태를 포함한 광 펄스의 랜덤한 편광 변조를 이용하여 MDI-QKD 실험을 구현한 것이다.

그림 II-1-26 MDI-QKD 실험 구성도



※ Tang, Zhiyuan et al. (2014)

㉡ Twin-Field QKD

2018년도에 도시바 유럽 연구소의 M. Lucamarini 등이 제안한 방법으로, 현 시점에서 중계기 없이 가장 먼 거리에서(>500 km) 양자 키 분배가 가능한 프로토콜로 알려져 있다. Twin이라는 용어는 두 광 필드(Field)의 위상이 간섭하기 위해 충분히 비슷해져야 한다는 점에서 유래했다.[109] 정확히 말하자면, Alice와 Bob이 각자 진폭을 랜덤하게 변조하여(decoy state 포함) 광 펄스를 생성하고 다음과 같이 위상을 인가하여 Charlie에게 전송한다.

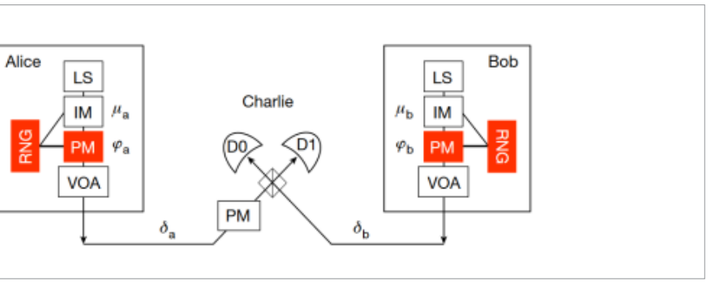
$$\psi_i = (\alpha_i + \beta_i + \delta_i) \oplus 2\pi, i = A, B$$

여기서 $\alpha_i \in \{0, \pi\}$는 비트 정보 인코딩을 위한 값이고 $\beta_i \in 0, \pi/2\}$는 기저를 결정하는 값이며, δ_i는 전체 위상 범위 $[0, 2\pi)$를 M개의 동일한 간격의 조각($\Delta_k = 2\pi k/M,\ k = 0, 1, \cdots, M-1$)으로 나눈 것 중 하나($k$)를 랜덤하게 선택한 것이다.

선택한 위상들이 충분히 가까운지 보장하기 위해 인증된 공개 채널을 통해 각자 선택한 기저와 위상 슬라이스를 공개하여 서로 같은 기저와 위상 슬라이스를 도입한 경우($\beta_A = \beta_B, \delta_A = \delta_B$)만 남긴다. 이때는 Alice와 Bob이 선택한 비트에 따라 Charlie의 시스템에서 펄스가 보강 혹은 상쇄 간섭을 하게 된다. Charile가 이 간섭 측정 결과를 공개하고 나면 Alice와 Bob은 상대방의 비트 정보를 알 수 있게 되므로 추후 특정 비트들을 플립(flip)하는 과정을 통해 대칭키를 생성할 수 있다. Charlie는 자신의 검출 결과로부터 Alice와 Bob이 보낸 비트가 같은지(00 또는 11) 혹은 다른지(01 또는 10)를 판단할 수 있지만 정확한 비트 정보는 알 수 없다. Alice와 Bob이 정보를 인코딩하여 전송하고 제3자가 측정을 한다는 점에서 측정 기기 무관 QKD와 구조가 유사한데, 이 구조 덕분에 측정부 도청 공격에 대한 보안성이 확보된다.

기존의 QKD 프로토콜에서 키 생성률이 전송채널의 투과율(Transmission(η), $\eta \ll 1$)에 선형 비례하는 데 반해 Twin-Field(TF) QKD에서는 투과율의 제곱근($\eta^{1/2}$)에 비례하므로 장거리를 전송하는 데 유리하고, 디코이 상태와 위상 랜덤화를 추가적으로 활용하면 전송거리를 더 확장할 수 있다. MDI-QKD도 디코이 상태 프로토콜을 적용하여 전송거리를 확장할 수 있지만, 사용자 두 명이 광자를 하나씩 Charlie에게 보내어 두 광자 간의 간섭, 즉 HOM 간섭을 관측해야 한다. 즉, 두 검출기의 동시 계수(Coincidence Count) 측정이 필요하다. 반면에 TF QKD는 단일광자가 확률적으로 존재하는 두 광 필드를 전송하여 단일광자 간섭을 측정한다. 단일광자 간섭의 경우 둘 중 하나의 검출기에서만 신호가 발생하므로 키 생성률이 단일 검출계수(Single Count)에 의존하는데, 덕분에 키 생성률이 전송채널의 투과율에 대한 영향을 상대적으로 적게 받아 같은 조건에서 MDI-QKD보다 더 높은 키 생성률을 가질 수 있다.

그림 II-1-27 TF-QKD 실험 개요도



※ Lucamarini, M. et al. (2018)

(2) 연구 동향

BB84 프로토콜을 이용한 QKD 시스템은 지금까지도 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 요즘에는 칩(Chip) 기반 송수신부 모듈을 집적 광학 기술을 이용해 제작한 연구 결과들이 많이 발표되고 있다.[110] 도파로 뿐 아니라 레이저 다이오드, 변조기, 검출기까지 한 칩에 집적 가능하기 때문에 기존 광섬유 기반 유선 QKD 시스템보다 부피가 작고 안정적이며, 저전력으로 구동 가능하다는 장점이 있다.[111] 또, 이득 스위칭(Gain Switching)과 주입 잠금(Injection Locking)과 같은 기존의 광통신 기

109) S. Pirandola et al. (2020)

110) Kwek, LC. et al. (2021)

111) Sibson, P. et all. (2017)

술을 결합하면 기존의 고속 진폭/위상 변조기 없이도 반도체 레이저를 직접 변조하여 안정적인(Chirp이 없는) 광 펄스를 만들고 다중 레벨 위상 인코딩을 구현하는 것이 가능하다. 이 점 때문에 BB84 뿐 아니라 COW, DPS 프로토콜의 송신부로도 활용할 수 있다.[112)]

특히 Plug&Play BB84 QKD 시스템은 One-Way 방식보다 상대적으로 구현이 간단하기 때문에 국내에서 유선 QKD 시스템을 연구하는 학계(KIST, ETRI, KISTI, 고려대 등) 및 산업체(SK텔레콤, KT, 우리넷, FISYS, 코위버 등) 대부분이 장비를 자체 개발하고 시험까지 진행하였다. 특히 KIST와 KT는 공동연구를 통해 QKD 시스템에 시간, 파장, 편광 다중화 기술을 도입하여 1×64 네트워크로 확장한 실험 결과를 발표하고 실제 설치된 망(Fiber)을 통해 1×4 네트워크를 일주일 넘게 운용한 결과를 발표하기도 했다.[113)]

DPR 프로토콜의 경우 국내에서는 ETRI 양자광학 연구실에서 광 집적 기술을 이용한 칩 기반 유선 QKD를 DPS 프로토콜로 구현한 바 있고, KISTI와 고려대학교 허준 교수 연구실에서도 광섬유 소자를 이용한 DPS-QKD 시스템 개발 연구를 진행하고 있다.

MDI-QKD 실험은 2013년 세 개의 그룹(캐나다, 중국, 브라질)에서 처음 구현된 이래로 발전을 거듭해 2016년에는 중국의 Jian-Wei Pan 그룹에서 초저손실 광섬유를 통한 전송거리 404km 달성에 성공하였다.[114)] 초전도 나노와이어 기반 단일광자검출기(Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD)가 상용화되면서 통신파장 광자의 검출 효율이 약 90% 까지 향상되고(기존 APD의 효율: 약 20%), 이 덕분에 MDI-QKD 뿐 아니라 다른 프로토콜을 사용한 유선 QKD 실험도 200km 이상의 장거리 전송 결과들이 많이 보고되고 있다. 대부분의 QKD 시스템은 사용자 간 같은 기준 프레임(Reference Frame)을 공유하는 것이 필수적인데, 환경 변화에 의해 기준 프레임이 시간에 따라 조금씩 변하므로 이를 능동적으로 정렬해주는 과정이 필요하다.[115)] 기준 프레임 틀어짐(Misalignment)의 발생 원인은 편광 기반 프로토콜을 사용하는 위성 기반 무선 QKD의 경우 편광 축 변화이고, 위상 기반 프로토콜의 경우에는 간섭계의 길이 변화에 의한 위상 드리프트이다. 기준 프레임 재정렬 과정은 전체 시스템을 느리고 복잡하게 만드는 요인이므로, 기준 프레임 교정 없이 구현 가능한 Reference-Frame-Independent(RFI) QKD 프로토콜에 대한 연구도 2010년 영국의 Jeremy L. O'Brien 그룹에서 처음 제안된 이후로 유, 무선 QKD 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 이 RFI 프로토콜을 MDI-QKD에 적용하면 전체 시스템의 복잡도를 줄이면서 키 발생률도 높일 수 있는데,[116)] 이를 RFI-MDI-QKD라 한다.

112) Paraïso, T. K. et al. (2019)
113) Byung Kwon Park et al. (2020)
114) Yin, H.-L. et al. (2016)
115) Yin, ZQ. et al. (2014)
116) Hongwei Liu et al. (2018)

기존 MDI-QKD는 기저 Z($\{|0\rangle,|1\rangle\}$), X($\{|+\rangle,|-\rangle\}$) 두 개를 활용하는데 비해 RFI-MDI-QKD는 Y 기저($\{|+i\rangle,|-i\rangle\}$)를 추가로 활용한다. 시프팅 과정에서 Alice와 Bob이 같은 기저를 사용한 경우만 남긴다는 과정은 기존 MDI 프로토콜과 같지만, 여기서는 추가적으로 서로 다른 기저를 사용한 경우에 대한 오류율(error rate) $e_{ij}(i,j=X,Y,Z)$도 이용하여 도청자 Eve의 정보량 I_E를 다음과 같이 계산한다.

$$I_E(e_{ZZ},c)=(1-e_{zz})H_2[(1+u)/2]+e_{zz}H_2[(1+v)/2],$$

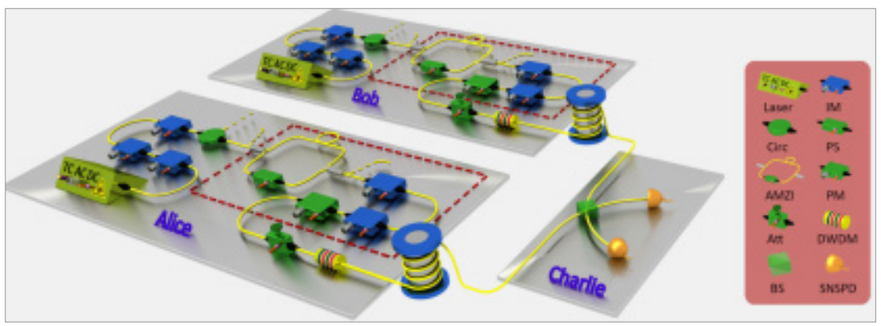
여기서 H_2는 Shannon의 바이너리(Binary) 엔트로피 함수이며, 사용한 매개변수 c,v,u는 다음과 같이 정의된다.

$$c=(1-2e_{XX})^2+(1-2e_{YY})^2+(1-2e_{XY})^2+(1-2e_{YX})^2,$$
$$v=\sqrt{c/2-(1-e_{zz})^2u^2}/e_{zz},u=\min\{\sqrt{c/2}/(1-e_{zz}),1\}$$

이 때 e_{zz}, c는 Alice와 Bob의 기준 프레임 변화에도 꽤 안정적인 값을 유지하므로, 이들의 함수인 I_E와 비밀키 생성률도 마찬가지로 기준 프레임 변화의 영향을 거의 받지 않게 되어 RFI-MDI QKD에서 능동 편광/위상 과정을 생략할 수 있는 것이다.

국내 연구진도 MDI-QKD 요소기술 및 시스템 구현 결과를 꾸준히 발표하고 있다. KIST 양자정보연구단은 2018년 Plug&Play 형태의 편광 다중화 기반 실용적인 MDI-QKD 시스템 구현 결과를 발표했고,[117)] 2020년에는 더 적은 개수(3개)의 양자상태를 활용한 RFI-MDI-QKD를 제안하고 개념 증명 실험 결과를 발표하였다.[118)]

그림 II-1-28 광섬유 기반 MDI-QKD 시스템

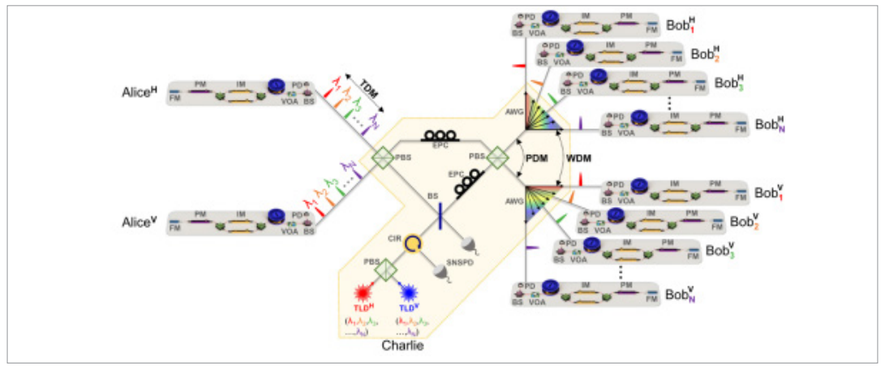


※ Yin, H.-L. et al. (2016)

117) Park, C. H. et al. (2018)
118) Donghwa Lee et al. (2020)

TF-QKD의 경우 멀리 떨어진 사용자들이 독립적인 채널을 통해 전송한 광자의 간섭 가시도를 장시간 동안 높은 수준으로 유지하는 것이 기술적으로 난이도가 높기 때문에 그동안은 중국과학기술대학(USTC) 그룹에서만 구현되었다. 그런데 최근 KIST에서 다음 그림과 같이 기존 프로토콜을 Plug&Play 형태로 변환하여 필요한 광원과 능동 소자들의 수를 줄임으로써 구현 난이도를 낮추고, 이전에 BB84 QKD 시스템을 통해 구현했던 다중화 기술을 적용하여 $2 \times N$ 네트워크로 확장한 결과를 발표하였다.[119]

그림 II-1-29 Plug&Play TF-QKD 네트워크 실험 개요도



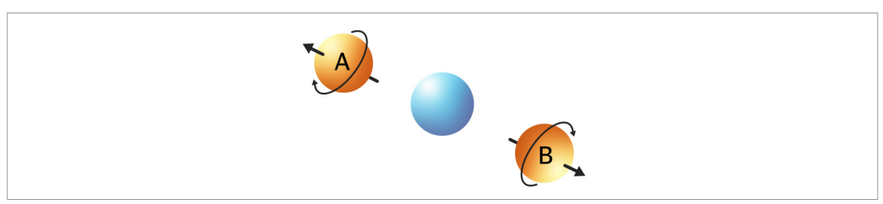
※ Park, C. H. et al. (2022)

나. 얽힘 기반 양자 키 분배

(1) 기술 동향

얽힘 기반 양자 키 분배는 얽힘쌍을 먼저 두 사용자 Alice와 Bob이 나누어 가진 후 측정을 하는 방식으로 광원을 전달하는 과정의 구현 안전성 관련 위협을 피할 수 있다.

그림 II-1-30 양자 얽힘

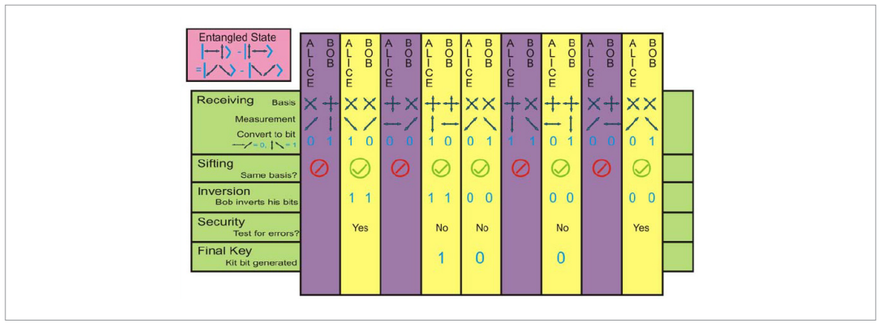


※ 삼성디스플레이 뉴스룸

119) Park, C. H. et al. (2022)

1991년에 Arthur Ekert에 의하여 처음 제안 되었다.[120] 두 사용자가 얽힘쌍을 나누어 가진 뒤, 한 쪽은 2개의 서로 다른 각도를, 다른 쪽은 3개의 다른 각도로 편광을 측정한 결과를 공개하여 키를 만드는 방식이다. 널리 사용되는 BB84 프로토콜도 얽힘기반 키분배로 구성할 수 있으며, 동일한 안전성을 제공할 수 있다는 것이 증명되었다. 이 프로토콜을 BBM92라고 한다.[121]

그림 II-1-31 BBM92 프로토콜



※ Chris Erven Thesis

얽힘을 먼저 나누는 방식은 제3자가 수행할 수도 있는데, 나누어주는 사용자는 어떠한 정보도 알 수 없기 때문에 광원에 대한 구현 공격에도 안전한 프로토콜을 구성할 수 있다. 또한 측정 결과를 사용하여 특정한 부등식의 위배를 확인하는 것으로 측정기기에 대한 도청에도 안전한 키를 생성할 수도 있는데 이러한 방식을 기기무관(Device-Independent, DI) 양자 키 분배 프로토콜이라고 한다.[122]

이 방식의 실용화에서 가장 중요한 부분은 높은 충실도의 얽힘쌍을 원하는 시간에 만들 수 있느냐와 높은 측정효율을 갖는 측정기의 사용으로 볼 수 있다. 충실도는 두 쌍이 얽혀있는 정도로 이해할 수 있고, 원하는 시간대에 생성하는 문제는 측정기의 활용하고 연결되어 있으며, 높은 측정효율은 특정한 부등식 위배 확인에 대한 데이터를 추출할 때, 생성되는 데이터에 대한 결함을 확인하는 것과 관련이 있다. 또한 측정효율을 정확히 추정하는 기술도 필요할 수 있다.

얽힘을 활용한 QKD도 안전한 키 생성 거리의 문제가 있는데, 거리를 늘리기 위해서는 추가적인 양자 메모리와, 얽힘쌍 간의 측정을 통한 얽힘 교환도 필요하다. 이 기술은 기본적으로 양자중계기의 역할이므로 이에 대한 것은 양자중계기 부분에서 다루도록 하겠다.

120) A. K. Ekert (1991)
121) C. H. Bennett et al. (1992)
122) A. Acin et al. (2007)

(2) 연구 동향

얽힘기반 양자 키 분배는 얽힘쌍을 만드는 것이 주요 이슈이므로, 이 과정에 연구들이 집중되어 있다. 얽힘쌍을 만드는 것은 양자컴퓨팅, 양자센서에서도 중요한 핵심기술이기도 하다.

국내에서는 양자통신을 위한 양자중계기 개발의 일환으로 얽힘쌍 만드는 연구과 양자센서를 위한 얽힘쌍 만드는 연구들이 진행되고 있고, 이는 양자중계기 부분에 기술되어 있다.

국내의 얽힘 기반 양자 키 분배 프로토콜 구현 연구는 초기 실험 단계로 최근 실험적으로 원리증명 연구 결과가 보고되었다.[123] 이 연구에서 타임-빈(Time-Bin) 얽힘을 생성해서 측정을 통해 두 광자 얽힘을 확인하였고, 두 광자 가시성(Visibility) 측정을 통해 CHSH(Clauser-Horne-Shimony-Holt) 부등식의 위배를 확인하였다.

현재 직접적인 DI-QKD에 대한 국내 연구 내용은 없으나 관련 연구로 한국표준과학연구원(KRISS)이 2016년부터 양자칸델라 실현을 위한 광자계수 검출기 검출효율 측정기술 연구를 시작하여 파장 250nm ~ 1,000nm에서 시연한 바 있으며,[124] 현재 1,000nm 이상 광통신 파장대역에서 활용되는 단일광자 검출기에 대한 성능 평가 기술도 개발하고 있다. 또한 국가보안기술연구소(NSR)와 함께 기기무관 양자 키 분배의 요소기술인 높은 충실도의 양자 상태 생성 및 광통신 영역 높은 측정율 측정기술 확보 및 높은 정확도의 검출기 검출효율 측정기술과 기기무관 양자 키 분배의 정보이론적 안전성 분석 기술에 대한 연구를 수행 중에 있다.

(3) 적용 분야

얽힘기반 양자 키 분배는 BB84 프로토콜이 적용하는 대상에 적용될 수 있으며, 기기무관(DI) 양자 키 분배에도 적용될 수 있다. 얽힘기반 양자 키 분배는 얽힘이 두 사용자의 양자채널로 이용되는 경우에는 언제든지 적용이 가능하다. 하지만 얽힌 양자 상태의 생성 및 고도의 측정기술이 요구되는 경우도 있을 수 있어 보안이 특히나 강하게 요구되는 국방, 국가 공공망 등에 적용될 것으로 보인다.

123) J.-H. Kim et al. (2022)
124) In-Ho Bae et al. (2019)

다. 양자 키 분배 네트워크

(1) 기술 동향

① 표준화 기술 동향

국내 양자암호통신 표준화는 한국정보통신기술협회(TTA)에서 주도하고 있으며, ETSI ISG-QKD, ITU-T SG13 양자 키 분배 네트워크 준용표준을 도입하고 네트워크 구조/인터페이스, 보안인증 규격을 고유표준으로 별도 제정 중에 있다.

국내 표준의 주요 방향은 효율적인 양자키 제공 및 전달, QKD 장치로의 직접 제어 방지 및 보안 방안, 개방화된 인터페이스, 멀티 벤더 상호운용성(Multi-Vendor Interoperability), 장애 검출 및 회복, QoS 및 과금 정책 제어 관리, P2P & MP2MP 등 다양한 토폴로지 및 장거리 네트워크 고려 등이다.

② 소프트웨어 정의 네트워킹(SDN)

SDN은 중앙집중형 방식의 SDN 컨트롤러에서 전체 네트워크의 유연하고 프로그래밍 가능한 구성을 통하여 효율적인 네트워크 제어 및 관리를 수행한다. 또한 SDN은 이기종 장비, 시스템, 네트워크를 연계하여 통합하는 것을 단순화할 수 있는 방안을 제공한다.

SK텔레콤, KT, KISTI는 양자암호 네트워크를 중앙에서 통합·제어할 수 있는 소프트웨어 정의 기반 자동화 솔루션(Quantum-Software Defined Network, Q-SDN)을 개발했다. Q-SDN을 통하여 양자키가 부족한 구간에 양자키 경로를 실시간 재설정하거나 해킹이 발생했을 때 빠르게 원인을 파악해 키 삭제 혹은 해킹 구간 우회 제어 등 보안 조치를 할 수 있다.[125] 또한 KT와 SK텔레콤은 세계 최초로 국가 통합 연구시험망인 코렌(KOREN) 망에서 서로 다른 통신사 장비 간 Q-SDN 연동 실증을 추진하였다.[126]

③ 멀티 벤더 상호운용성(Multi-Vendor Interoperability)

SK텔레콤과 KT는 이종 QKD 간의 원활한 서비스 연동과 제어를 위해서 Q-SDN 및 오케스트레이션 인터페이스 규격과 구현을 통해서 양자키 기반의 인터넷 서비스가 가능하도록 기술 개발을 추진하였다. IDQ와 도시바가 제안한 이기종 QKD 간 양자키 관리 시스템(QKMS)을 이용한 연동방안이 ETSI GS QKD 020(Draft)으로 표준화가 진행되고 있으며, 디지털 뉴딜사업에서 IDQ와 KT 간에 연동을 성공적으로 수행한 바 있다.[127]

125) 최호 (2021)
126) 신희강 (2022)
127) 정예린 (2021)

④ 양자키 서비스(Quantum Key Service)

SK텔레콤은 2016년 2월 Wifi Backhaul에 상용 양자암호통신망을 적용하고 성수국사~분당국사 구간에 외부 온도환경과 진동에 대한 안정화 검증을 추진한 바 있다.

KT는 양자가 전달되는 채널을 이중화된 구조로 만들어 장애가 발생하거나 해킹 시도가 인지되는 즉시 기존 회선 대신 백업 회선에서 새로운 양자키를 만들어 공급하는, 서비스 중단 없는 양자암호 기술을 개발하였다. 이는 양자암호통신 네트워크 제어 및 관리(ITU-T Y.3804) 표준을 기술로 구현한 사례이다.[128)]

KT는 양자 키 분배 네트워크가 제공하는 양자키를 기반으로 한 서비스 품질을 측정하기 위하여 ITU-T Y.3807 QKDN QoS parameters를 제안하였고 국제 표준으로 채택되었다. 해당 표준에서는 양자암호 서비스 관점에서의 처리율, 응답 지연, 지연 변이, 오류율, 손실율, 가용도 등을 제시하였다. 또한 서울-부산 구간 490km의 양자암호통신망을 구축하고 품질평가를 추진 중에 있다.[129)]

KISTI는 안정적인 양자암호통신망 운영을 위하여 QKMS 이중화 구조를 채택하였다. 이는 DRDB를 이용하여 예비 노드와 자동 동기화하고 장애 발생 시 자동으로 주 노드에서 예비 노드로 설정 변경을 수행한다. 또한 양자암호통신망에서 양자키 보유량이 일정 수준 이상으로 상시 유지되도록 하여 QKD 기반의 양자암호통신 서비스에서 양자키의 부족으로 인해 발생할 수 있는 장애를 방지한다.[130)]

⑤ 비용 최적화(Cost Optimization)

SK텔레콤은 IDQ와 함께 QKD 분야에서 최대 120km까지 전송할 수 있는 기술과 파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 기술을 개발해 시범 인프라에 적용할 계획이다. 기존 양자암호시스템은 양자신호를 별도의 파이버로 보내어 구축비용이 증가하고 기존신호와 양자신호를 MUX하여 보낼 경우 간섭으로 구축이 불가능하다. 양자신호 파장을 변경하여 간섭을 줄이고, 하나의 파이버로 전송하여 구축비용을 줄일 수 있다.

⑥ 인증(Certification)

국가정보원은 양자통신암호화장비(QENC), QKMS, QKD 세 종류에 대한 보안요구사항을 마련, 2022년도 TTA와 ETRI에서 보안적합성 검증을 시범 시행하고 2023년도부터 본격 시행할 예정이다.[131)]

128) 최호 (2020)
129) 조성흠 (2022)
130) 김영준 (2022)
131) 정예린 (2022)

QENC에 대해서는 공급기 요청과 수신·비밀키생성·하이브리드 키 조합 여부, QKMS에 대해서는 비밀키 수신·키 가공 및 동기화, QKD에 대해서는 KRISS의 양자특성시험성적과 이를 기반으로 ETRI와 TTA에서 난수생성기능, 양자상태 생성 등을 검증받는 것이 요구사항으로 제시되었다.

(2) 적용 분야

① 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 적용 사례

양자암호통신 인프라 시범구축 사업은 양자암호통신과 양자 난수 생성기, 양자 내성 암호 등 양자 관련 기술을 민간·공공 영역에서 실증하고 시장 활성화를 위한 응용서비스 발굴을 위해 작년 2020년부터 2021년까지 총 290억 원이 투자된 대규모 사업이다. 시범구축 사업에서는 거점들을 QKD로 연결한 후, QKD로 생성한 암호키(양자키)를 다양한 서비스에 적용하는 방법과 기존 난수발생기를 양자 난수 생성기로 대체하여 적용하는 방법들이 주로 적용되었다.

2020년에는 군·관 협력용 비화통신서비스(해군3함대, 전남도청), 실손 보험처리를 위한 환자의료정보 전달 서비스(연세의료원 등) 등 16개 분야에 적용하여 실증 사례를 확보하고 기존 서비스와 연계한 응용서비스를 발굴했다. 2021년에는 공공기관 행정·시설보안(대전시청, 대전상수도사업본부, 정수사업소), 의료기관 간 원격협진(순천향대병원 서울·부천) 등 15개의 수요기관에 19개의 서비스를 개발 및 실험하였다.

표 II-1-4 2020년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목

분야	수행기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (4개구간)	KT	전남도청(해군3함대사령부)	비화통신
		강원도청(춘천시청)	폐쇄회로텔레비전(CCTV) 데이터 저장
	SKB	광주광역시청 (CCTV센터, 교통정보센터)	폐쇄회로텔레비전(CCTV) 비밀번호(패스워드) 관리
			차량 정보 관리
의료분야 (6개구간)	SKB	세브란스병원(신촌·강남·용인)	블록체인 실손보험청구
			의료 빅데이터 전송
			사고예방 알림 시스템
	KT	성모병원(서울·은평)	인공지능음성인식 진료기록 기록 시스템
			의료기록 데이터 저장
	LGU+	을지대병원(노원·대전)	의료 데이터 전송
산업분야 (6개구간)	SKB	한화시스템(본사·데이터센터)	스마트 오피스 시스템
		우리은행(콜센터·전산센터)	비대면 생체정보(안면인식) 측정
		CJ ICD 센터	가상사설망(VPN) 서비스
	KT	현대중공업	산업기밀 데이터 전송
			증강현실(AR) 원격시설 점검
	LGU+	LG이노텍(평택·부산)	산업기밀 데이터 관리

※ 과학기술정보통신부 (2021)

표 II-1-5 2021년 양자암호통신 인프라 시범구축 사업 세부 항목

분야	수행 기관	수요기관	응용서비스
공공분야 (7개구간)	SKB	대전상수도사업본부 (송촌사업소, 대전광역시)	인공지능 실시간 얼굴인식 통제
			범용직렬버스(USB) 보안토큰
		광주보건환경연구원(북구보건소)	양자(Quantum)-스마트폰
		한국수력원자력발전소(새울-고리)	-
	KT	강원도청(2군단사령부)	양자(Quantum)-액화수소드론
		제주도청(교통안전체험관)	양자(Quantum)-자율주행차
	LGU+	충남도청(공무원교육원)	데이터베이스(DB) 암호화 및 IC카드
민간분야 (10개구간)	SKB	대구계명대병원(성서-중구)	자율주행 로봇(지정맥인증)
			사물인터넷(IoT) 스마트 빌딩 관리 시스템
		ADT 캡스(보라매, 장안, 삼성)	무인센서 보안시스템
			보안 출입ID카드
			USB 보안토큰
		고려대병원(안암-K-Bio)	클라우드 병원시스템
		평화홀딩스	수소차 설계도 PDF 암호화
	KT	순천향대병원(서울-부천)	양자(Quantum)-원격의료협진
		현대로보틱스	양자(Quantum)-사물인터넷(IoT) 로봇관제
		블록체인컴퍼니	양자(Quantum)-비트코인거래
	LGU+	빅히트엔터테인먼트	유심(USIM)
		GS EPS	안면인식 출입보안

※ 과학기술정보통신부 (2021)

2. 무선 양자 키 분배

가. 고정형 양자 키 분배

(1) 기술 동향

무선 양자 키 분배는 전용 광네트워크 라인이 필요한 유선 키분배와 달리 대기 중으로 광자를 보내고 받는 기술이다. 미리 설치된 광네트워크 라인이 필요하지 않아, 광네트워크 라인 설치가 어려운 환경에도 적용될 수 있으며, 거리 제한이 있는 유선 양자 키 분배와 달리 위성과 연결하면 광범위한 영역으로 키분배가 가능하다. 무선 양자 키 분배는 송신부와 수신부를 고정시키고 운용하는 고정형과 어느 한쪽 또는 모든 쪽이 움직이는 이동형으로 나눌 수 있다.

세부적인 프로토콜은 유선과 크게 다르지 않다. 무선 양자 키 분배의 조건은 송신부와 수신부가 서로 보이는 위치(Line-of-Sight)에 있어야 한다는 것이다.

무선 양자 키 분배는 유선과 달리 광자의 변형은 적지만, 대기에 의한 산란, 흡수 및 날씨의 영향을 받는다. 유선은 1550nm 파장대를 주로 이용하지만, 무선에서는 대기 중에서의 전파 특성 및 측정기의 양자효율을 고려하여 850nm 주변의 파장대를 이용한 실험이 많이 이루어졌다. 그런데, 최근에는 유선과 연결성 등을 고려하여 1550nm 파장대로도 많은 실험이 진행되고 있다.

무선 양자 키 분배의 큰 특징은 수신부에 있다고 할 수 있다. 단일 광자 수준의 광자를 받기 위해서는 망원경이 필요한데, 거리를 늘리기 위해서는 고성능 망원경이 요구된다. 이런 이유로 천문대 등에서 지상 무선 양자 키 분배 실험이 이루어졌다.

(2) 연구 동향

현재의 기존 통신기술은 대용량 데이터 전송에 유리한 유선 연결을 기반으로 하고, 유선통신의 끝단에서는 무선통신을 통해 개별 장비의 자유로운 연결을 지원하는 방향으로 발전하고 있다. 양자 키 분배 기술 역시 국내에서는 주로 유선 양자 키 분배 중심으로 연구개발이 진행되고 있다. 기존에 깔려있는 광네트워크를 이용할 수 있어, 통신사업자들이 사업에 적용하기 유리하기 때문이다. 양자 키 분배 연구가 초기 유선 중심으로 진행되었다고 해도, 서비스의 확장에 유리한 무선 양자 키 분배 기술은 매우 중요한 연구분야라 할 수 있다.

국내에서는 2007년 포항공대에서 무선 양자 키 분배의 구현을 처음 발표했다.[132] 2018년 ETRI가 연구원 내에서 100m 무선 양자암호통신 실험을 성공했다고 발표했다.[133] 2022년에는 KT가 서울에서 1km 실험에 성공했다고 발표했다.

한편, 국내의 무선 양자 키 분배 기술개발 프로젝트는 기본적인 고정형 대상에서, 드론 등을 이용한 이동형 무선 양자 키 분배 기술개발 방향으로 확대되고 있다. 특히, ETRI는 미래 유망기술 개발의 일환으로, 무선 양자암호통신 시스템 및 이를 위한 양자통신용 광학 부품의 소형화 연구개발 과제를 통해 무선 양자 키 분배 핵심기술 개발을 수행하고 있다.[134]

132) Y.-S. Kim et al. (2008)
133) Heasin Ko et al. (2018)
134) Chun Ju Youn et al. (2018)

(3) 적용 분야

고정형 무선 양자 키 분배는 적용처가 넓지는 않다. 송신부와 수신부가 서로 보이는 위치에 있어야 하며, 산란 효과 등에 의해 대기중에서의 전파특성이 100km를 넘기기 어려운 면은 제약사항이라 볼 수 있다. 유선과 무선 이동통신 등과 결합을 고려하면, 이동형이 활용성이 더 높다고 할 수 있다. 따라서, 고정형 무선 양자 키 분배는 이동형, 위성으로 가기 위한 전단계 연구라고 볼 수 있다.

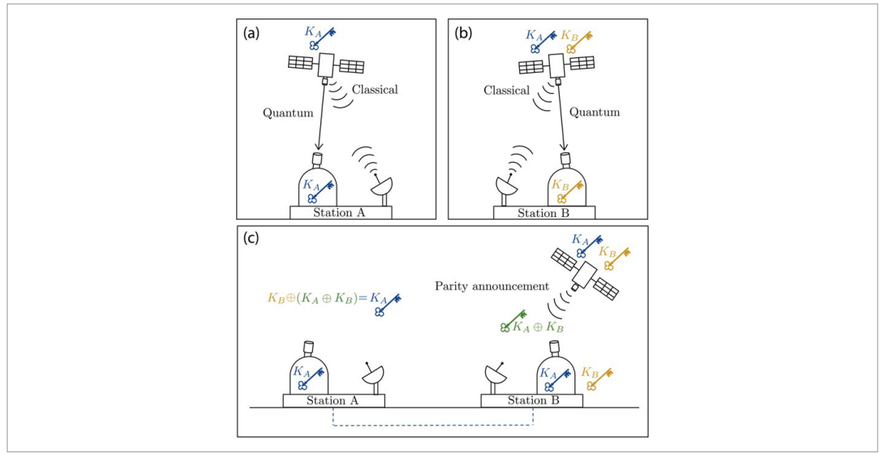
나. 드론, 위성 활용 무선 양자 키 분배

(1) 기술 동향

드론, 위성을 이용한 무선 양자 키 분배는 유선 양자 키 분배의 거리 제한 문제를 해결할 수 있는 방법으로 연구되고 있다. 위성을 신뢰 노드로 이용하여 중계하는 방식을 사용할 수 있는데 이 경우의 가장 큰 걸림돌은 광원의 트래킹과 수신부 망원경의 크기 제한이다.

드론, 위성과의 양자암호통신 구성은 송수신 모델에 따라 다양할 수 있다. BB84 프로토콜 기반으로 하면, 위성/드론과 지상 모두 송수신이 가능할 수 있다. 일반적으로는 위성/드론이 가벼운 광원을 가지고 있고, 지상국에서 수신하는 형태이나, 위성/드론간의 양자암호통신도 고려한다면, 송수신 모두 위성/드론에서 가능하도록 구현해야 한다. 양자 얽힘쌍을 이용하는 BBM92, E91 프로토콜을 적용하면, 위성/드론에서 얽힘 광자쌍을 생성해서 전송만 하면 되기 때문에 드론/위성에는 망원경이 필요하지 않다. 이런 방식들에서 또 하나의 중요한 것은 위성/드론에 탑재체의 크기/무게 문제를 해결하기 위한 경량화 연구이다.

그림 II-1-32 위성 QKD



※ Nature, Progress in satellite quantum key distribution

(2) 연구 동향

국내에서는 소형 무인기(드론, 기구, 비행체 등)를 이용해 무선으로 양자얽힘을 분배하는 양자중계 플랫폼 개발이 2022년부터 ETRI와 한림대 공동으로 진행되고 있다. 강원 미래과학포럼을 통해 양자정보통신에 대한 관심을 보이던 강원도가 ETRI, ADD 등과 협력하여 추진하는 무선 양자통신 기술의 실증연구 중 하나이다.[135) 136)]

이 연구의 주요 내용은 소형 무인기(드론, 기구, 비행체 등) 기반 무선 양자중계기 플랫폼 기술 개발과 지상국용 무선 양자송수신 플랫폼 기술 개발로 구성되어 있다. 양자얽힘 광원 모듈, 고정밀 빔트래킹 기술, 노이즈 저감기술 등을 ETRI가 추진하며, 한림대는 무선 양자 키 분배 모듈을 탑재할 액화수소드론의 연구개발을 진행하고 있다.

KT에서는 고정형 무선 QKD를 야간 1km 거리에서 성공하였다고 발표하였으며,[137)] 한화시스템과 협력하여 인공위성 탑재용 QKD모듈 개발로 확장 추진하고 있다.[138)]

(3) 적용 분야

이동형 무선 양자 키 분배는 격오지와의 통신, 위성을 통한 글로벌 양자암호통신망 구축 등에 활용할 수 있다. 6G 무선 이동통신 등과의 결합 역시 고려할 수 있는 적용 분야이다.

3. 양자 난수 생성기

(1) 기술 동향

① ID Quantique - SK텔레콤

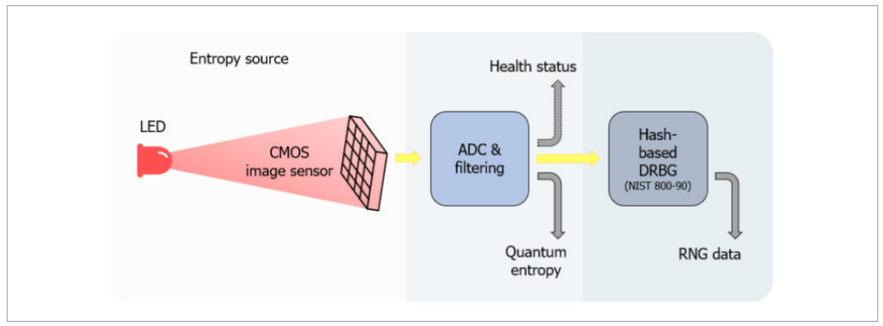
2001년 제네바 대학 과학자들에 의해 설립된 ID Quantique(IDQ)는 설립 후 최초의 상업용 양자 난수 생성기 개발에 성공하였다. 2009년에는 빔 스플리터에 기반한 방식이 아닌, 광자의 공간적 불확정성에 기반하여 양자 난수를 생성하는 방법을 고안하여 특허를 출원한 바 있다.[139)] 2016년 SK텔레콤으로부터 투자받은 후 인수되었으며 스위스 제네바에 본사를 두고 영국 브리스톨, 미국 보스턴, 서울에 영업 사무소 및 엔지니어링 개발 연구소에서 기술 개발 중에 있다. 2017년 경로 분기(Path Branching) 방식의 Quantis 양자 난수 생성기 제품을 개발하였다. 해당 제품은 AIS31 표준을 만족

135) 장경일 (2020)
136) 최기영 (2021)
137) 선한결 (2022)
138) 변윤재 (2022)
139) Ribordy, G. et al. (2009)

하는 후처리 방식을 적용한 것으로 알려져 있다.[140] 현재는, 모바일 헤드셋, IoT 기기 등에 적용하기 위해 설계된 최초의 소형 양자 난수 생성기 ICQ250C와 차량에 활용 가능한 IDQ6MC1 등 다양한 제품군의 양자 난수 생성기를 개발하여 판매하고 있다.

IDQ 양자 난수 생성기의 양자 난수 생성 과정은 다음과 같다. QRNG(Quantum Random Number Generator) 내부 칩에는 광자를 측정할 수 있는 픽셀 배열이 들어 있다. 해당 픽셀 배열에 빛을 조사할 경우, 각 픽셀 당 도달 광자수는 양자역학적으로 정확히 결정되지 않으며 Poisson 분포를 따른다. 각 픽셀로부터 발생한 신호는 Analog-Digital Converter(ADC)를 통해 디지털 신호로 전환되기 때문에 이를 통과하면 픽셀 당 측정된 광자수를 알 수 있다. 결과적으로 광원의 양자 난수성은 ADC를 통과하여 디지털 비트 형태의 양자 난수로 전환된다.[141] [그림 II-1-33]의 양자 난수 생성기는 생성된 광원의 광자수 요동(Fluctuation) 현상인 이른바 "양자 샷 노이즈(Quantum Shot Noise)"에 기반한다. 광자수 요동은 조사하는 빛 세기 제곱근에 비례하므로, 빛 세기를 적절히 조절하는 기능이 필요하다. IDQ에서는 내부에 해당 기능을 구현한 QRNG를 개발한 바 있다.

그림 II-1-33 IDQ 양자 난수 생성기 난수 생성 원리



※ https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

상용 QRNG의 성능과 안전과 관련된 다양한 인증이 존재한다. IDQ 칩은 NIST SP 800-90B의 IID 테스트 묶음(Test Suite)을 통과했다고 알려져 있다. 기존의 고전적 TRNG(True Random Number Generator)와 달리, 난수성을 높이기 위한 후처리 없이도 NIST의 non-IID 테스트 묶음을 통과한 바 있다. IDQ6MC1과 IDQ20MC1 제품을 통해 built-in 방식 후처리 기능을 구현하였으며, 현재는 NIST SP 800-90A/B/C 와 AIS 31 PTG.3 인증을 획득한 것으로 알려져 있다.[142]

140) Miguel Herrero-Collantes & Juan Carlos Garcia-Escartin (2017)
141) https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/
142) 〈ID Quantique〉 https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

그림 II-1-34 IDQ QRNG 제품과 고전적 TRNG의 성능 비교

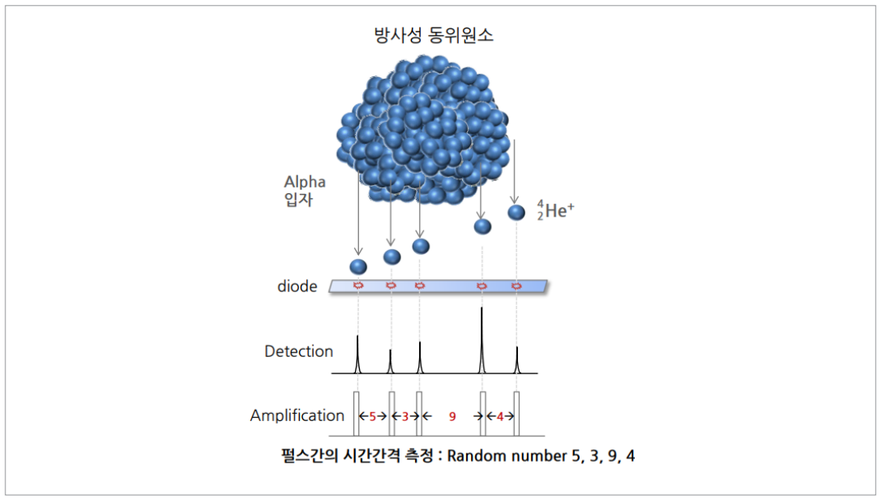
ES	Type of TRNG	Using conditioning for the test	# of tests	Non-IID Entropy (per byte)
IDQ Quantis	QRNG	No	200	7.4612
IDQ250C2	QRNG	No	175	7.4648
IDQ6MC1	QRNG	No	52	7.4692
IDQ20MC1	QRNG	No	1000	7.4721
IDQ PCIe-12	QRNG	No	320	7.4175
Random.org	Classical TRNG	Yes	173	7.4543
ComScire	Classical TRNG	Yes	400	7.4606
Intel DRNG	Classical TRNG	Yes	1049	7.4489
RPi4-hwrng	Classical TRNG	Yes	218	7.4534
/dev/urandom	PRNG	Yes	20	7.4710

※ https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/

② EYL

EYL의 양자 난수 생성기는 방사성 동위원소에서 반감기 동안 방출하는 알파입자 생성의 난수성을 활용한다. 알파입자가 생성되면 다이오드에 충돌하여 펄스를 생성하고, 펄스 간의 시간 간격을 측정하는 방식으로 양자 난수가 생성된다. EYL은 이러한 양자 난수 생성 방식을 기반으로, IoT 기기에 활용 가능한 소형, 저가의 양자 난수 생성기를 상용화하였다. 개발한 제품이 통계 테스트 묶음 NIST SP800-22와 NIST SP 800-90B, AIS.31 등을 통과했다고 알려져 있다.

그림 II-1-35 EYL QRNG 난수생성 원리



※ https://www.etnews.com/20150807000064

(2) 연구 동향

2009년, 포항공과대학 양자광학 실험 그룹에서 양자수-경로 얽힘 상태를 활용한 양자 난수 생성 실험 결과를 보고하였다. 해당 실험은 광자수-경로 얽힘상태를 준비하고, 광자 수 측정을 통해 난수를 생성하는 방식으로 진행되었다. 실험 결과로 총 3개의 1 Mbit 길이 난수가 생성되었고, 생성된 난수의 난수성은 NIST STS(Statistical Test Suite)를 통하여 테스트되었다.[143] 2021년에는 KAIST, TUD(Technical University of Denmark) 간 협력 연구를 통해, 양자와 비문맥적(Non-Contextual) 방식에 기반한 Semi-DI(Semi Device-Independent) 난수성 확인 프로토콜을 비교한 연구 결과가 발표된 바 있다.[144]

(3) 적용 분야

현재 QRNG가 적용될 것이라고 예상되는 분야는 다음과 같다. 가장 우선적으로 암호화 알고리즘 및 프로토콜에 적용 가능할 것이다. 다양한 고전 암호, 양자 암호 분야에서 난수가 활용되고 있으며, QRNG가 제공하는 난수의 높은 안전성은 암호 프로토콜의 안전성을 높일 것이라고 기대되고 있다. 예컨대, 현재까지 가장 많이 활용되고 있는 양자 키 분배 프로토콜인 BB84 프로토콜의 수행 과정의 기저 선택 시 난수의 활용이 필수적이다. 또한 차세대 양자 키 분배 프로토콜 중 하나인 DIQKD 수행 시 Bell test 실험이 필수적이며, 해당 실험 수행 시 측정선택을 위한 난수 생성의 필요성이 알려져 있다.

이 밖에도 과학적 모델링, 시뮬레이션에 양자 난수 생성기가 활용될 수 있다. 잘 알려진 Monte-Carlo 시뮬레이션 등 시뮬레이션 구현 시 무작위 표본추출 과정이 필요하다. 이때 추출의 무작위성을 높여 시뮬레이션 성능을 높이는 응용이 가능할 것이다. 양자 난수 생성기의 보다 일상적 응용 분야로서 자동차 보안, IoT 통신보안, 금융거래 보안에 대한 적용을 고려할 수 있다.

143) Osung Kwon et al. (2009)
144) Carles Roch I Carceller et al. (2021)

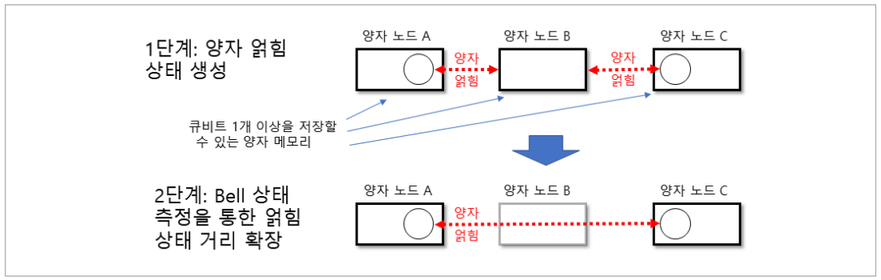
4. 양자중계기

가. 비메모리 기반

(1) 기술 동향

양자전송은 거리의 제약이 있어서 장거리 전송에는 일반적인 광통신에서와 같이 중계기가 필요하다. 보통의 광통신에서 중계기는 약해진 신호를 증폭시키는 역할을 하지만 양자 상태는 복제 불가능성의 원리에 의해 증폭될 수 없다. 그래서 흔히 말하는 양자중계기의 역할은 일반적인 통신에서 말하는 중계기와 다르게 멀리 떨어진 두 (혹은 그 이상) 사용자가 충실도가 높은 양자 얽힌 상태를 공유하게 하는 것이다.

그림 II-1-36 양자중계기 동작 방식



위의 그림은 양자중계기의 대략적인 동작 방식을 묘사한다. 멀리 떨어진 양자 노드 A와 양자 노드 D사이에 얽힘을 분배하는 것이 목적이다. 노드 A와 C 사이에서 얽힘을 만들어 분배한다면 먼거리를 이동하는 동안 양자 상태는 채널의 잡음 및 손실 등에 의해 원래 상태와의 충실도(유사도)가 현저히 떨어질 것이다. 그러나 중간에 양자 노드 B가 있어서 두 쌍의 양자 얽힘을 만들어 각각 하나의 양자 상태를 A와 C에 보내고, 남은 각각의 양자 상태들에 대해 노드 B에서 Bell 측정을 하면 양자교환 원리에 의해 노드 A와 C사이에 얽힘이 생성된다. 양자 상태는 짧은 거리만을 이동하기 때문에 잡음 등에 의해 충실도 손상도 적다. 그러나 이것이 성립되기 위해서는 양자 상태가 각각 A와 C에 도달해야 한다. 즉, 한쪽에 도달하지 않으면 쓸 수 없다. 그렇기 때문에 양자 상태를 저장하는 양자 메모리가 노드 A와 C에 있어야 하고, 만일 노드의 숫자가 많아진다면 양자 노드 B에도 역시 양자 메모리가 있어야 한다.

그렇지만 양자상태 저장은 난이도가 높아 양자메모리 연구가 활발히 이루어지고 있음에도 아직 실용적으로 사용하기에는 부족한 상황이다. 메모리를 사용하지 않고 거리를 늘릴 수 있는 방법은 한 사용

자가 양자 얽힘을 생성하여 다른 두 사용자에게 분배한 후, 손실이 없는 딜레이 라인(흔히 사냑(Sagnac) 간섭계 등)을 활용하여 메모리 역할을 하게 하는 것이다. 그러면 자신이 소유하고 있는 양자들에 대한 Bell 측정을 수행하여 유효한 측정결과를 얻으면, 다른 두 사용자끼리 양자 얽힘을 공유하게 되는 효과를 가지게 된다. 물론 이때 상대 노드에 양자 상태가 도달하지 않을 수도 있으니 이때도 각각 딜레이 라인을 활용하여 시간을 늦추는 효과를 사용해야 한다. 이러한 메모리 없는 양자중계기 기술을 확보하기 위해서는 높은 충실도의 양자 상태 생성, 3노드 이상의 양자 상태 분배, 측정, 손실이 적은 딜레이 라인 확보 등의 기술들이 필요하다.

(2) 연구 동향

국내에서는 ETRI가 주관하는 양자인터넷 구현을 위한 유선 양자중계기 개발 사업을 2022년부터 진행하고 있다. 이 과제에서는 다중 노드 간 양자 얽힘 분배 시스템 개발하였고, 유선 채널을 통한 50km 이상 두 노드 간 양자 얽힘 분배 및 20km 이상 다중 노드 간 양자얽힘 분배를 구현한 바 있다. 이 외에도 50km 이상 장거리 양자원격전송 시스템, 30km 이상 실환경을 포함하는 양자중계기 기반 장거리 얽힘분배 시스템 개발을 진행하고 있다. 과제의 최종 목표는 다중 노드 원거리(총거리 합 100km 이상) 양자 얽힘 네트워크 통신이 가능한 메모리 없는 양자중계기의 개발이다.

(3) 적용 분야

양자네트워크가 형성된 가운데 상대적으로 고가인 양자메모리가 없는 부분에서 양자얽힘의 분배에 활용될 수 있다. 다만 이 기술은 양자메모리 기술이 충분히 성숙되어 완전한 양자 인터넷이 가능한 상황에 도달하기 위한 중간 기술일 수도 있다.

나. 메모리 기반

(1) 기술 동향

장거리 얽힘 분배를 위한 양자중계기를 만들기 위해서는 양자얽힘을 저장하고 다시 정보를 빼낼 수 있는 양자메모리가 필요하다. 양자얽힘을 분배하길 원하는 노드의 거리가 멀수록 충실도가 높은 양자얽힘의 분배를 위해서는 중간에 양자 노드의 수가 많아야 한다. 이때 각 노드에서 양자얽힘이 만들어지는 시간이 상이할 수 있어서, 시간에 맞는 Bell 측정을 위해서 양자 상태를 저장하고, 다시 복원할 수 있어야 한다. 양자메모리는 그 자체로 굉장히 안정적으로 양자 상태를 유지할 수 있어야 하므로 주로 안정 유지시간이 긴 원자, 이온 덫, 고체 등의 물리시스템을 이용하여 구현된다. 하지만 이러한 물리시스템에 양자 상태의 저장 및 복원하는 양자메모리 기술은 구현하기 어렵기 때문에 국내의 양자메모리 기술은 상당히 초보적인 단계라고 볼 수 있다.

(2) 연구 동향

정보통신기획평가원(IITP)에서 2022년부터 기획한 양자 인터넷시대를 위한 양자메모리 연구개발에 대한 사업을 시작하였다. 고려되는 물리시스템은 단일이온이나 단일중성원자, 원자앙상블, 고체 소재(색중심, 양자점, 희토류 도핑 이온 등) 또는 초전도 소재들이다. 이들 물리시스템은 각각의 장, 단점이 존재하지만 광자에 담긴 양자 상태의 정보를 안정적으로 저장, 복원할 수 있다는 공통점이 있다.

부산대에서는 원자 증기 셀을 이용한 원자앙상블에서 고품질 양자얽힘 광원 개발(2016) 및 시간-주파수 양자얽힘과 편광 얽힘 상태 구현하고(2018), 원자앙상블 기반 양자메모리를 구현(2020)하였다. 포항공대에서는 냉각된 원자앙상블에서 광자쌍 광원을 개발하고(2014), 냉각된 원자매질에서의 양자메모리를 구현(2018) 하였다. GIST와 KIST는 공동 연구를 통해 반도체 점결함을 이용한 고신뢰도(97%) 스핀-광자 전환 구현(2019)에 성공하였다.

(3) 적용 분야

양자네트워크 구조에서 장거리 양자통신 및 얽힘 기반 양자 키 분배를 할 때 사용될 수 있고, 양자컴퓨터에도 활용될 수 있다.

5. 양자보안기술

가. 양자 인증/서명 기술

(1) 기술 동향

최근 개발이 활발한 양자 키 분배는 다양한 암호기능 중, 두 사용자가 암호키를 나누어가지는 기능을 제공하는 기술이다. 계산적 복잡도를 기반으로 하는 안전성의 현대암호와 달리 정보이론적 안전성을 가진다는 장점을 가진다.

암호시스템에서 암호키를 나누는 것은 하나의 구성요소이다. 암호시스템이 안전하기 위해서는 두 사용자를 식별할 수 있는 인증기술, 사용자 간 주고 받는 데이터의 변조를 막고 데이터 생성자를 나타낼 수 있는 서명기술도 필요하다. 인증 및 서명은 현대 정보보안에서 사용자들을 연결하는 네트워크 암호인프라를 구성하는 역할을 한다. 초창기에는 비밀키 방식의 인증, 서명을 양자 프로토콜로 변환하는 방식이 연구되었으나, 점차 단일광자 혹은 얽힘광자와 같은 양자매개체의 특성을 활용하는 방식으로 연구가 진행되고 있으며, 특히 기기무관성 개념이 양자 키 분배에 적용되면서, 인증, 서명 등의 연구 역시 기기무관 특성을 반영하는 방향으로 확장되고 있다.

양자 키 분배 장치의 정보이론적 안전성이 확보되려면, 키분배 프로토콜뿐만 아니라, 사용자 간의 양자 인증, 양자 서명이 동반되어야 하나, 현재 수준이 논문, 실험실 수준이라서 양자 키 분배 장치에 구현하기에는 아직 어려움이 있다. 현재 개발되는 양자 키 분배 장치들은 인증 및 네트워크 구성을 위하여 현대암호를 도입하는 경우들도 있다. 현대암호 중에서 인프라를 구성하는 것은 공개키암호이다. 기존 공개키암호는 양자컴퓨터로 인한 공격에 약하지만, 현재 개발되는 공개키암호는 양자컴퓨터를 이용한 공격에도 (계산복잡도 기반) 안전성을 제공할 수 있어, 이를 양자 키 분배 장치들의 네트워크 구성에 적용하는 시도도 이루어지고 있다.

양자 키 분배 네트워크를 넘어 양자통신 네트워크로 발전될 경우, 제대로 된 보안기능을 갖추기 위해서는 통신수단으로 양자가 활용될 것이기 때문에, 정보이론적 안전성 제공의 특성이 아니더라도 네트워크 특성상 양자를 이용하여 인증 및 전자서명을 제공하는 것이 필요하다.

(2) 연구 동향

양자 인증 및 서명에 대한 국내 연구는 2000년 초반부터 일부 국내 대학 연구실(고려대, 국민대 등)에서 소규모로 진행되어 왔는데, 대부분의 연구 결과가 실용성을 고려하지 않은 이론적 수준이라고 할 수 있다. 최근 10년간 국가 주도의 양자 인증 및 서명에 대한 연구·투자는 이루어지지 않고 있었으며, 주로 소규모의 투자가 대학 연구실을 중심으로 진행되었다. 양자 키 분배에 대한 투자는 최근에야 활발해졌다.

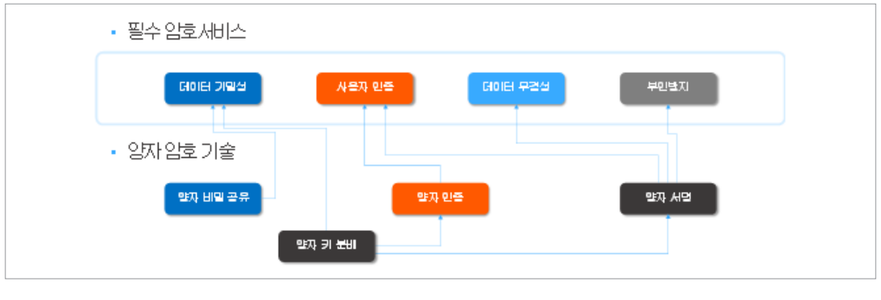
연구소에서는 KIST가 단일광자 및 양자얽힘을 이용하는 양자 인증 프로토콜 기술을 보유하고, 양자 메시지 인증에 대한 시험을 수행한 바 있다.[145) 146)] 국내 연구진의 학문적 성과는 국내 논문 포함 논문 10건 이상, 국내특허 12건으로 연구 투자 대비 준수한 연구력을 보유하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 실질적 네트워크 상황을 고려하지 않은 이상적 설계로 인해 양자통신기술의 발전을 고려하여도 실제 적용이 불가능한 프로토콜들이다.

NSR이 KRISS와 창의형 융합연구과제(NST, 2016 ~ 2021년)를 통해 양자직접통신의 실망 구현시험을 수행하였고, 이 때, 양자 개체인증을 구현한 바 있다. 2017년, 2020년 NSR 연구진에 의해 기존 기술 대비 구현성을 높인 양자 인증 프로토콜과 양자네트워크에서 양자 디지털 서명의 가능성을 증명한 학문적 성과를 거두기도 하였다. 또한 양자인증, 양자서명 프로토콜 및 구현기술에 대한 특허를 보유하고 있다.[147) 148)]

145) Min-Sung Kang et al. (2018)
146) Min-Sung Kang et al. (2021)
147) Chang Ho Hong et al. (2017)
148) Chang Ho Hong et al. (2020)

2022년에 접어들어 양자인터넷에 대한 연구개발이 5년 500억 규모로 시작됨에 따라, 양자인터넷 보안을 위한 양자 인증/서명 기술개발 추진의 필요성도 높아졌다. 이에 따라, “양자사이버보안 솔루션 개발을 위한 양자 원천기술 및 암호 응용기술 개발” 과제를 2022년 6월에 착수하였다. 해당 과제는 NSR을 중심으로 양자인터넷에 도입할 수 있는 양자얽힘을 활용한 양자암호 원천기술 프로토콜을 개발하고, KRISS를 중심으로 프로토콜의 실환경 구현을 위한 고품질 양자상태 생성장치와 고효율 측정장치, 양자큐비트 측정기술을 개발하며, KISTI와 공동으로 실망에 적용시험하는 내용으로 진행될 예정이다.

그림 II-1-37 양자 암호기술과 암호서비스의 상관관계



(3) 적용 분야

양자 인증 및 서명 기술은 우선 양자 키 분배 장치에 적용하여, 양자 키 분배 장치를 이용한 네트워크 구성에 활용될 수 있을 것이다. 미국 NSA에서도 기능이 암호키분배로 제한된다는 것을 양자 키 분배장치의 국가기관 도입의 제약사항 중 하나로 들었는데, 이러한 걸림돌을 해소하여 양자 키 분배 장치가 본격적으로 활용될 수 있는 기반을 제공할 수 있다. 또한, 현재 기초연구가 진행 중인 양자인터넷의 핵심 보안프로토콜로 활용할 수 있다. 6G 등의 무선 이동통신 등과의 결합시 양자채널에 대한 보안을 담당할 수 있다.

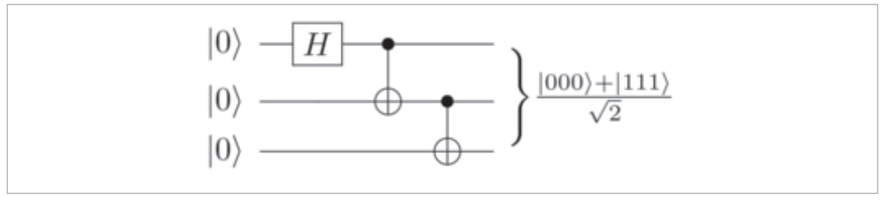
나. 비밀분산

(1) 기술 동향

비밀분산(Secret Sharing)은 다중 사용자가 각각 암호키의 일부를 나누어 가지고 있으면서 일정 수 이상의 사용자가 합의하는 경우 암호키를 복원할 수 있게 하는 기법이다.

가장 기본은 1979년에 독립적으로 발표된 Shamir[149]와 Blakley[150]의 기법이다. 이 방식은 정보이론적 안전성을 제공하는 방식으로, 어느 한 사용자가 정보를 독점하지 못하게 하는 용도로 사용하거나, 최근에는 다중 사용자가 암호키 전부를 모르는 상태에서 연산을 수행한 다음 일정 수 이상의 사용자가 합의하여, 연산의 최종 값에 대한 정보를 복원하는 용도로 사용한다. 이러한 기법들은 어떻게 암호키의 일부를 상대방에게 나누어주느냐는 측면에서 보면, 완벽한 안전성을 가진다고 할 수 없다. 양자 비밀분산은 암호키의 일부를 상대방에게 나누어주는 과정에 대한 정보이론적 안전성을 제공하기 위하여 고안된 방법으로 양자 키 분배 기법을 확장하여 안전한 통신을 제공하기 위하여 얽힘큐빗을 활용하는 방법들이 제안되고 있다. 이를 위해서는 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger) 타입의 다중 얽힘을 만들어야 하는 기술적인 어려움이 있어, 구현의 난이도가 높은 편이다.

그림 II-1-38 GHZ 양자상태



※ WIKIPEDIA

(2) 연구 동향

국내에서는 많은 연구가 이루어지고 있지는 않고 있으며, 이를 위한 기반 연구가 연구소와 학계에서 일부 진행되고 있다. KRISS는 2번의 SPDC 과정을 이용한 (가시광 영역) 4-광자 GHZ State를 생성하였는데 4-광자 동시계수가 약 1.5Hz, 4.5Hz일 때 각각 83%, 73%의 양자충실도를 달성하였다. KIST는 얽힘 광자를 통한 고차원 다중 노드 간 W state를 형성할 수 있는 프로토콜을 구축하였고, 3노드 다중 양자얽힘 분배를 시행하는 데 필수적인 GHZ state와 W state를 구현하였다. 이를 활용하여 3노드로 구성된 구성원 간 정보 불균형이 발생하지 않는 양자정보 통신을 구현하였다. 부산대와 NSR은 통신파장대역으로 생성된 편광얽힘 광자쌍 광원을 발표하였다. 포항공대는 광대역 양자통신 네트워크 기반 효율적인 양자얽힘쌍 분배를 위해 타임-빈(Tme-Bin) 양자얽힘과 분할 다중화 기술을 이용하여 양자네트워크를 구성하고, 60km 광섬유로 분리된 3명의 사용자에게 얽힘 양자키를 배포하는 시연을 성공하였다.

149) Adi. Shamir (1979)
150) G. R. Blakley (1979)

NSR과 KRISS, KISTI는 그간의 확보된 기반기술을 활용하여, 2022년부터 국가과학기술연구회 창의형 융합연구 “양자사이버보안 솔루션을 위한 양자 원천기술 및 암호 응용기술 개발”의 주요 항목 중의 하나로 실통신망에 적용가능한 양자 다중 비밀공유 원천기술 개발 확보에 나섰다. 주요 개발 항목은 다음과 같다.

- 정보 이론적 안전성을 보장하는 양자 다중 비밀공유 프로토콜의 개발
- 실통신망(손실율, 오류비율 등) 환경에서 안전성 확인 가능한 프로토콜 개발
- 파장 대역의 고통신 품질 쌍광자 양자얽힘 광원을 사용하여 3노드 이상의 다중 비밀공유 프로토콜을 위한 다중 얽힘상태 구현

(3) 적용 분야

비밀 분산기법은 비밀을 분산 저장하여, 특정 사용자가 비밀을 독점하지 못하게 하거나, 특정 사용자가 공격당하더라도 비밀을 복원하지 못하게 하는 용도로 사용된다. 양자 비밀분산 기술은 현대 암호의 비밀분산 기술이 계산적 복잡도에 안전성을 기반하는 반면 정보이론적 안전성을 보장하는 장점을 가지고 있으며, 양자를 이용하므로 양자 인터넷 시대에 적합한 비밀분산 기법이라고 할 수 있다.

6. 양자암호통신 시험 검증

(1) 기술 동향

양자 키 분배 기술 개발은 2010년대 들어 산업체를 중심으로 활발하게 진행됨에 따라, 이를 활용하기 위한 시험검증 기술 개발 및 시험망 운영이 2015년부터 진행되었다.

양자 키 분배 도입을 위한 제도는 아직 전 세계적으로 마련되지 않은 상태였다. 그러다 2020년에 시작된 과기정통부의 디지털 뉴딜 사업을 계기로, 사업에 참여한 국내 통신업체 개발 양자 키 분배 및 운용 장치를 대상으로 한 제도 마련을 위한 시범검증이 진행되고 있다. 국내에서는 양자암호통신장치 시험검증 대상을 양자 키 분배 장치, 양자 키 분배로 생성된 암호키 관리 장치, 양자 키 분배 장치와 양자내성암호로 생성된 암호키를 암호화 장치에 활용하는 방법을 대상으로 하고 있다.

세 가지 대상 중 암호키 관리 장치, 암호화 장치는 KCMVP 검증을 획득한 암호모듈 적용을 기반으로 하고 있다. 양자 키 분배 장치의 경우에는 양자 키 분배 특성을 반영하고, 시스템적인 측면은 네트워크 장치에 대한 시험검증 기준을 기반으로 개발되고 있다.

(2) 연구 동향

양자 키 분배 장치의 상용화를 위한 양자 키 분배 네트워크 및 규격, 보안요구사항 등에 대한 표준화가 진행되었으나, 양자 키 분배 장치의 암호 안전성 및 시스템 보안성 검증 방법에 대한 연구는 미비하다. QKD를 구성하는 광학 기기들의 다른 성능(평균 광자수, Decoy 상태의 개수, 측정 효율 등) 및 서로 다른 구현방식 등(One-Way, Two-Way 등)에 대해 통일된 방식의 시험/평가기술 개발도 미흡하다. 국가망에 도입되는 상용 QKD 장치에 대한 안전성 평가를 위해서는 QKD 장치를 구성하는 다양한 요소기능의 성능 및 구현방식 등에 적합한 안전성 검증기술과 CMVP 수준의 검증체계가 필요하다. NSR에서는 양자 키 분배 시험을 위한 양자 키 분배 규격 및 보안 요구사항을 개발하여 2018, 2019년에 국내 표준화를 진행하였다.

- TTAK.KO-12.0329-1 양자 키 분배 – 일반
- TTAK.KO-12.0329-2 양자 키 분배 – BB84프로토콜
- TTAK.KO-12.0356 양자 키 분배 보안 요구사항

2020년부터는 디지털 뉴딜사업의 양자암호통신에 참여한 SK텔레콤, KT 장비를 대상으로 시범검증을 수행하면서, NSR, ETRI, TTA가 양자암호통신장비 제품군에 대한 국가용 보안요구사항을 도출하는 작업을 진행하였다. 2022년 6월에 국가정보원에서는 시범검증 결과를 기반으로 양자키관리장비, 양자 키 분배장비, 양자통신암호화장비 3종에 대한 국가용 보안요구사항(안)을 발표하였다.

양자키관리 장비 보안요구사항에는 다음과 같은 항목들이 포함되어 있다.

- 키 관리 기능: 양자 키 분배 장치로부터 받은 암호키의 관리
- 키 공급 기능: 양자통신암호화장비에 키 공급
- 장비 관리 기능: 장비 내의 기능적 구성요소에 대한 제어 및 관리 등

양자 키 분배 장비 보안요구사항에는 다음과 같은 항목들이 포함되어 있다.

- 양자 비밀키 관리: 양자 키 분배 장치를 이용한 비밀키 생성 및 저장 등
- 광학계 및 후처리: 난수생성기능, 광학계 기능, 후처리 기능 등
- 식별 및 인증: 양자 키 분배 장치에 접근하는 관리자에 대한 식별 및 인증 기능
- 보안관리: 인가된 관리자에게 안전하게 보안 관리를 수행할 수 있는 기능 제공
- 전송 데이터 보호: 양자 키 분배장치 네트워크의 통신상대 간의 전송되는 데이터 보호
- 저장 데이터 보호: 양자 키 분배장치에 저장되는 데이터 보호

양자통신암호화장비 보안요구사항은 암호화장비에서 양자 키 분배 장치 또는 양자내성암호로 생성된 암호키를 기존 암호화장비에 활용할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 이러한 방법은 계속적으로 개선될 필요가 있는데, NSR에서는 지속적으로 양자 키 분배 안전성 시험/평가 기술을 다음과 같은 목적으로 진행하고 있다.

- 양자 키 분배 장치의 광학 모듈 작동방식에 대한 분석을 통한 불완전한 광학계 성능 파악
- 불완전 광학 모듈에 대한 양자 해킹 방법 연구를 통해 취약점에 대한 양자 해킹 대응방법 개발
  - 양자 키 분배 장치 광학계를 개발하여 실제 양자 키 분배 장치 동작방식의 특징을 이용한 양자 해킹 가능성 확인 및 양자 키 분배 안전성/신뢰성 실험
  - 양자 키 분배 시스템의 암호 안전성 보장 방법론 개발은 ①양자 키 분배 시스템의 암호 안전성 시험방법론 개발과 ②시험방법론의 안전성/보안성 확인 및 ③절차의 타당성 검증으로 구성
  - 양자 키 분배 시스템 안전성 분석기술 적용을 위한 안전성 시험도구 설계를 통해 안전성 시험/평가기술 적용된 양자 키 분배 시험도구 개발
- 양자 키 분배 시험도구 시나리오 개발 및 광학계 적용 시험 수행

(3) 적용 분야

양자암호통신장비 제품군에 대한 시험검증 기준은 우선적으로 국가공공기관에 도입되는 양자암호통신장비 제품의 시험검증에 활용될 예정이다. 양자 키 분배 시스템 안전성 분석기술은 시험검증 기준의 성숙도를 높이는데 활용될 수 있을 것이며, ISO/IEC에서 진행되는 표준의 향후 개정에도 기여할 수 있을 것이다. 광학계에 대한 시험검증 기술은 광학적 요소들의 구현에 있어서, 어떤 문제점들이 있을 것이며, 어떤 것들을 시험해야 하는지를 도출하고 있다. 이러한 요소들은 향후 양자 인터넷에서 보안기능을 구현할 때, 이의 시험검증에도 활용될 수 있을 것이다.

제 4 절 시사점

그동안 국내·외를 불문하고 양자통신에 대한 대규모 투자가 상당한 성과와 연결되었다. 국내에서는 2014년 양자정보통신 중장기 추진전략을 시작으로 2021년에는 양자기술 4대 강국 진입을 위한 양자기술 연구개발 투자전략이 수립되면서 국가적인 지원 아래 양자통신에 대한 투자가 이루어지고 있다. 이러한 여러 정책적 지원 아래 산업생태계 활성화를 위한 방안 중 하나로 유선 양자암호통신에 대한 시험검증제도가 세계 최초로 2023년부터 시행될 예정이다. 여기에는 SK텔레콤의 IDQ Korea와 KT로부터 양자 키 분배 기술이전을 받은 우리넷, 코위버 등의 산업체가 양자암호통신 인프라 시범사업에 참여하여 레퍼런스를 제공하면서 산학연의 공동 협조 아래 검증정책이 구성된 모범적 사례이다.

국내 유선 양자통신에 대한 주요 성과와 비교해 무선 양자통신은 해외 기술 수준과의 격차가 뚜렷하게 벌어져 있다. 특히 중국은 2016년 제 13차 중국 5개년 계획에서 양자기술을 국가 중대프로젝트로 규정하여 무려 19조원의 투자가 이루어졌다. 그 결과 세계 최초의 양자 전용 인공위성인 묵자호 발사에 성공하고 이를 통해 지상국과 1,200 km 거리의 무선 양자 키 분배를 시연해 보이는 것을 시작으로 최근에는 국가비상망에 무선 양자암호통신을 활용하고 있다. 한편, 이같이 위성과 광역 유선 네트워크를 활용하여 양자통신 네트워크 영역을 넓히는 실험 외에 기존의 양자통신 네트워크를 얽힘 분배에 기반한 네트워크로 기능적으로 발전시키기 위한 노력도 양자기술 선도국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

향후 양자통신의 발전 방향이 양자컴퓨터를 통합하는 양자인터넷인 만큼 장거리 양자통신의 기반인 양자중계기와 무선 양자통신 기술에 대한 연구, 양자 키 분배/얽힘분배 네트워크 연구 및 이외에도 양자 인증 및 서명과 양자비밀공유 등 현대 인터넷의 보안 서비스를 양자를 기반으로 하는 프로토콜 구현에 적극적 연구와 투자가 요구된다.

제2장 국내외 양자센서 R&D 동향

제1절 개요

양자센서는 특정 물리량의 측정을 위해 필요한 양자시스템 또는 양자현상을 활용한 센서를 의미한다. 이를 측정 물리량으로 구분 시 대표적으로 양자관성센서, 양자시간센서, 양자 전기장·자기장 센서, 양자광학센서 등으로 나눌 수 있다.[151)]

양자관성센서의 경우 물리량에 따라서 중력, 가속도, 회전 등의 측정을 위해 원자, 물질파, 광역학계 등의 양자특성을 이용하고 있으며, 최근 양자중력 및 항법 기술의 수요로 소형화 연구가 활발히 진행 중이다. 양자중력센서의 경우 소형화를 실현해 운송 수단에 탑재하면 해양 및 지질 자원 탐사 등에 유망할 전망이고, 지층의 변화와 지진 탐지 및 구조물 매핑 등에 활용하면 재난 사고를 예방하기 위한 센서가 될 것으로 바라보고 있다. 양자항법센서는 기존의 외부 신호에 의존하지 않고 위치, 탐색 및 타이밍(Positioning Navigation and Timing, PNT)이 가능한 관성센서 개발 및 소형화 연구가 진행 중이다.

양자시간센서의 경우 기존 전기신호 기반의 시계를 벗어나 빛의 주파수에서 해당 주파수에 공진하는 원자의 양자상태를 측정하고, 이때 나타나는 중첩과 간섭을 이용해 정확도를 높이는 기술로 알려져 있다. 특히 양자항법센서와 함께 원자시계를 통신, 지질학, 천문학 등의 분야에 활용하기 위해 미국 국방고등연구계획국(Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA) 등에서 소형화 연구를 활발히 진행하고 있다.

양자전기장 센서는 비교적 근래에 주목받고 있는 양자센서이다. 전기장의 측정 감도를 고전 기술 이상으로 극복함과 동시에, DC부터 THz 대역까지 광대역 주파수에서 전기장의 측정이 가능한 기술로 알려져 있다. 최근 리드버그 원자를 구현할 수 있는 요소 기술들이 개발되면서 활발히 연구가 진행되고 있으며, 특히 국방 분야와 통신 분야에서 유망한 기술로 알려져 있다. 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)와 콜로라도 대학이 통신 분야의 연구를 주도하고 있으며, 유럽의 경우 이미징 기술 연구를 진행하고 있다. 또한 광대역 주파수에 해당하는 전기장을 안테나 크기와 무관하게 단일 센서로 측정할 수 있어, 지상 관측을 목적으로 위성에 탑재하는 연구도 NASA(National Aeronautics and Space Administration, 미국항공우주국)에서 시작됐다.

양자자기장 센서의 경우 원자, 점결함 스핀 큐비트의 Zeeman 효과를 이용해 자기장을 정밀하게 측정함으로써, 고전적인 자기장 측정 방법의 한계를 극복하는 기술로 알려져 있다. DC에서 AC까지 넓

151) IITP(2020)

은 주파수 영역의 자기장을 측정하고, 측정 대상도 단일 스핀, 자성 물질, 전류 소자, 바이오 활성, 지구 자기장 왜곡 등 다양하므로 기초물리, 생명 분야에서부터 공학, 산업, 의료, 국방에 이르기까지 활용 분야가 넓다. 대표적인 플랫폼으로는 원자증기 기반의 원자자력계와 다이아몬드 NV(Nitrogen-Vacancy) 센터로 대표되는 고체 점결함 기반 자력계가 있다.

양자광학센서는 얽힘 상태 등의 양자광원을 이용해 고전적인 측정의 한계를 돌파하는 기술이다. 최근 양자조명, 양자라이다, 양자레이다, 양자이미징, 양자가스센싱 등의 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 고전 광원 기반 이미징은 근본적으로 분해능(Rayleigh) 한계, 감도(Shot-Noise) 한계 이상의 계측이 불가능한데, 양자광원의 양자이득을 이용해 분해능 한계를 극복하거나, 샷노이즈 이하의 고감도 측정이 가능하다. 그뿐만 아니라 양자광원을 이용해 피사체와 상호작용 없이 측정이 가능한 고스트 이미징(Ghost Imaging) 등의 양자광학센서 기술이 존재한다. 양자광학센서는 기본적으로 양자광원기술이 선행돼야 하며, 양자광원의 상관관계 특성, 얽힘 특성 등을 이용해 배경 잡음 환경 또는 약한 조명에서 측정하는 연구들에 응용되고 있다. 이 때문에 낮은 광량을 요구하는 바이오 분야에 적용할 수 있으며, 양자레이더와 같이 탐지 회피를 시도하는 스텔스 비행기에 대응하는 기술로도 주목받고 있다.

근대에 들어 눈부신 과학기술의 발전으로 이미 수많은 센서가 발명됐고 일상생활부터 첨단과학 분야까지 널리 사용되고 있다. 그러나 국방, 우주, 반도체, 바이오, 원자력, 기후 변화, 자율주행, 전기차, 로봇 등 첨단과학 기술의 발전과 함께 새로운 센서의 개발도 끊임없이 요구되고 있다. 최근 우리는 코로나로 인한 전 세계적 팬데믹 현상을 통해 사회가 요구하는 새로운 센서의 개발 필요성과 이와 연관된 산업의 발전을 볼 수 있었다. 다가온 양자혁명 2.0 시대를 맞이해 미래를 대비하고 새로운 수요에 대응하려면, 우리도 양자센서기술에 대한 집중 투자와 개발을 서둘러야 할 것이다.

제2절 해외 양자센서 R&D 동향

1. 양자관성센서

가. 양자중력센서

(1) 기술 동향

중력가속도를 측정할 수 있는 장치로 알려진 중력계는 이미 50년 이상의 연구가 진행된 기술이지만, 최근 양자중력센서를 이용해 중력계를 개발하려는 연구가 주목받고 있다. 해외의 경우 미국, 유럽, 중국 위주로 연구가 진행 중이다. 근래에는 양자중력센서를 소형화해 선박, 비행기, 잠수함 등 이동이 가능한 운송 수단에 탑재시킨 후, 해양 및 지질 자원 탐사 등에 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 센서를 지층 변화, 지진 탐지 및 지하 구조물 매핑 등에 활용할 시, 재난 및 사고 등의 예방이 가능해질 것으로 예상된다.

(2) 연구 동향

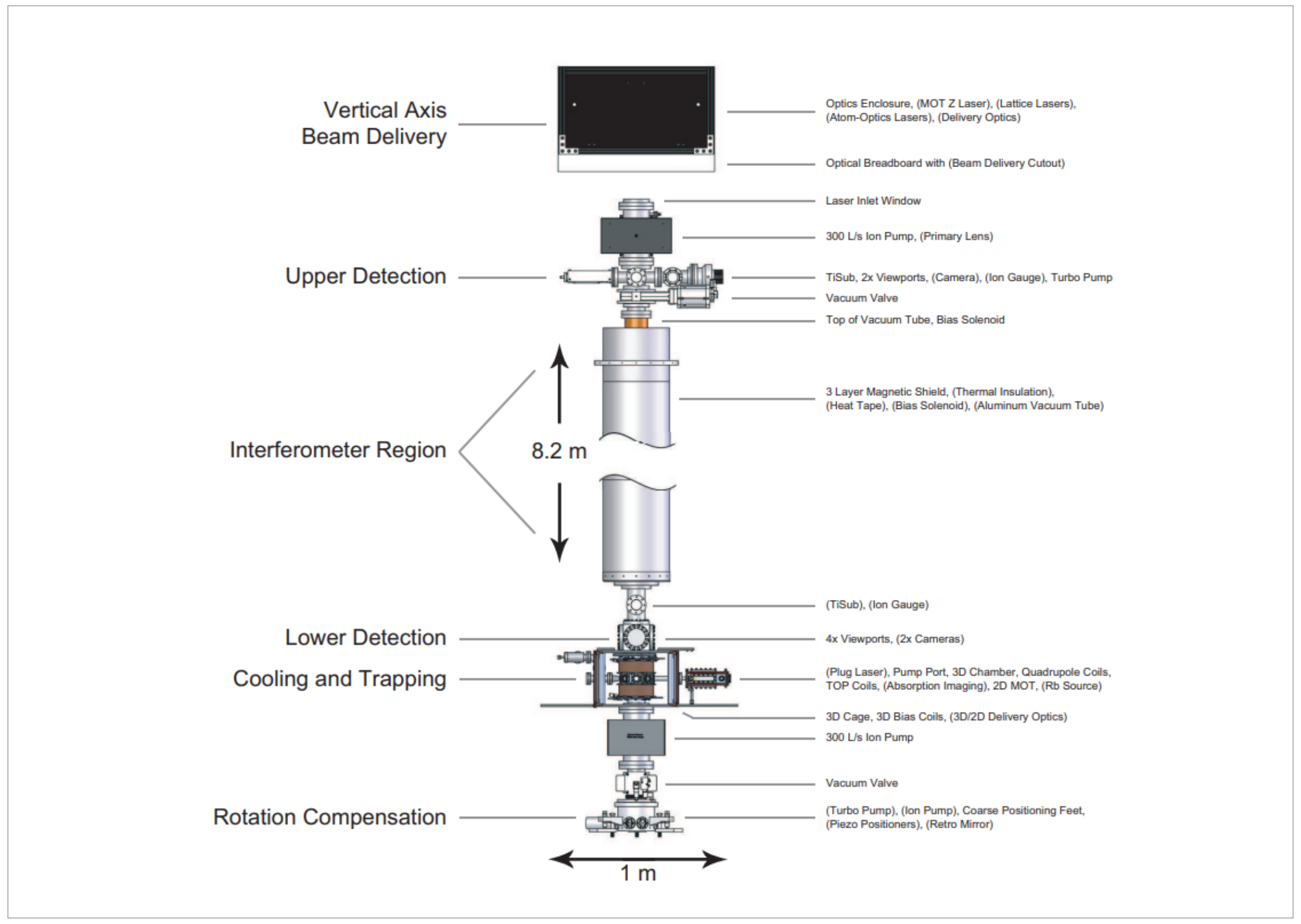
1) 미국

① NIST(미국 국립표준기술연구소), NASA(미국항공우주국), DARPA(방위고등연구계획국), JPL(제트추진연구소), Sandia National Lab., 스탠포드 대학교, 버클리 대학교, 워싱턴 대학교, 메릴랜드 대학교 등에서는 원자간섭계에 기반해 중력 및 관성을 측정하는 연구를 수행하고 있다.

② 스탠포드 대학에서는 2001년에 감도 면에서 고전 절대중력계(FG5)보다 우수한, 레이저 냉각된 세슘 원자간섭계 결과를 발표했고,[152] DTRA(국방위협감소국)와 Navy(해군)의 지원을 받아 두 동위원소 ^{87}Rb, ^{85}Rb 원자를 동시에 냉각시켜 10m 높이에서 떨어뜨릴 수 있는 양자중력계를 개발하고 있다. 이를 통해 일반상대성 및 양자역학 이론을 검증하기 위한 연구를 수행 중인 것으로 알려져 있다.[153]

152) Peters et al. (2001)
153) https://purl.stanford.edu/kd753jv6128

그림 II-2-1 스탠포드 대학교의 양자중력계



※ Alexander Franz Sugarbaker, Stanford Univ. (2014)

③ 버클리대에서는 JPL, NSF(미국 국립과학재단) 등의 지원을 통해 물리 이론 검증 및 물리상수 측정을 위한 원자간섭계를 개발했으며, 초미세구조 상수를 측정했다.[154]

④ NASA는 Planetary Science Division에서 진행 중인 우주와 지구 탐사를 위한 PIDDP (Planetary Instrument Definition and Development Program)의 지원을 받아 탑재형 원자중력계를 개발하고 있다.

⑤ JPL, Sandia National Lab, NIST, NASA 등 국가연구소에서는 항법과 지구물리 측정을 위해 현장 적용이 가능한 양자관성센서를 개발하고 있다.

2) 유럽

① 2차 양자혁명을 주도하기 위해 Quantum Flagship 프로그램을 진행 중이며, 양자센서의 주제 안에 원자간섭계가 포함돼 있다.[155]

② 실제 응용 분야에 적용하기 위한, 칩 크기의 차세대 양자센서 개발을 목표로 하는 IQS(Joint Lab Integrated Quantum Sensors) 프로젝트를 수행 중이다.

154) Yu et al. (2019)

155) https://qt.eu/

③ 유럽 31개국의 39개 연구 기금 조직으로 구성된 QuantERA 프로그램 내에서, 광학격자에 갇힌 극저온원자에 기반한 원자간섭계 측정으로 기존 중력 및 관성센서의 한계를 극복하기 위한 TAIOL(Trapped Atom Interferometers in Optical Lattices) 프로젝트가 수행 중이다.[156]

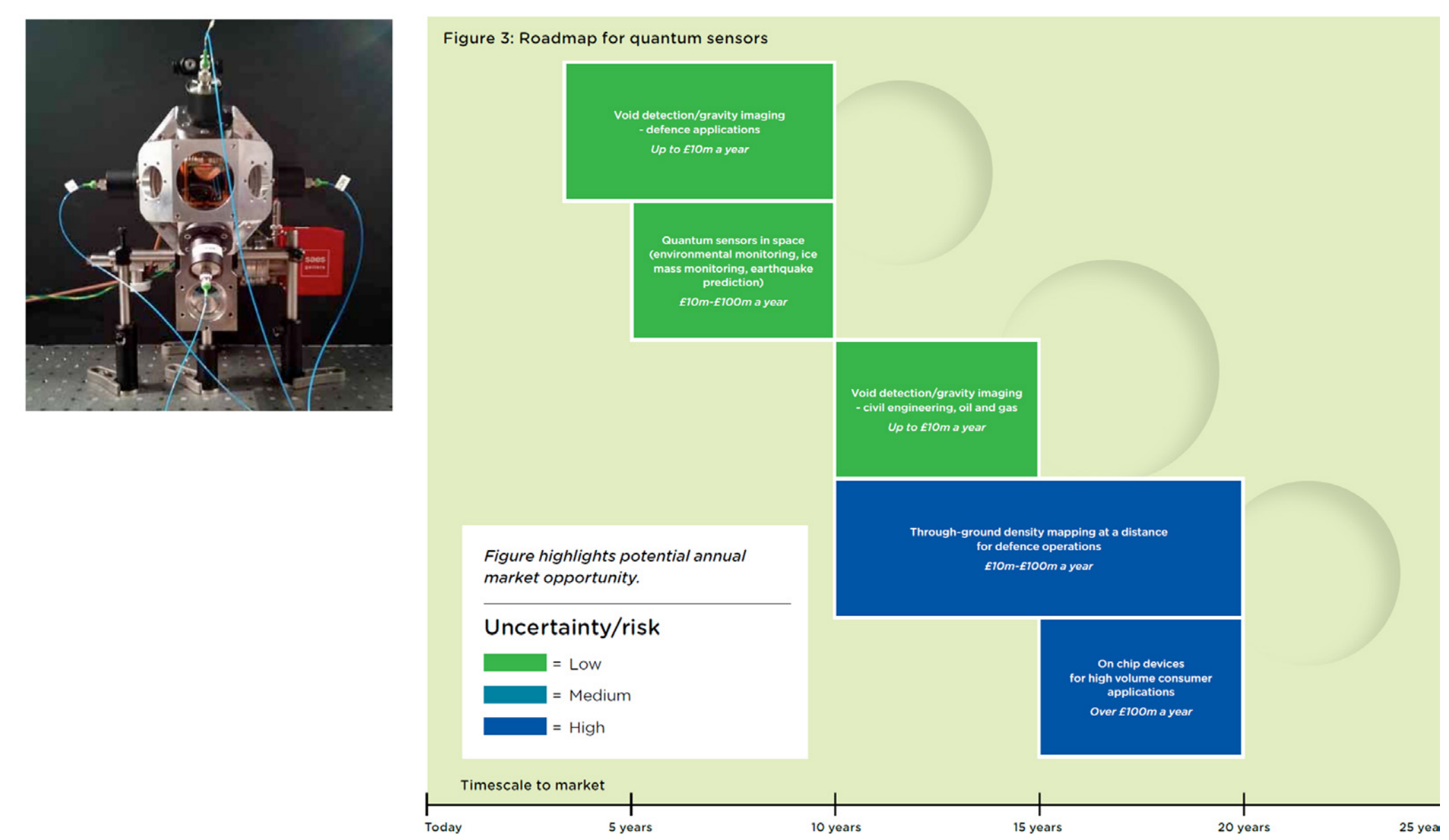
3) 영국

① 양자기술 상업화를 목표로 산업계, 학계 및 정부가 참여하는 1억 파운드 규모의 NQTP (National Quantum Technologies Programme)가 진행 중이다. 그중 버밍엄 대학을 UK Quantum Technology Sensors and Timing Hub로 지정하고 영국 기업이 상용화할 수 있는 다양한 양자센서 및 측정 기술을 개발 중인 것으로 확인된다.[157]

② NTQP에서 발간한 'A Roadmap For Quantum Technologies In The UK' 문서에 따르면 양자기술을 활용해 산업을 선점하고 국방을 지원하기 위한 로드맵이 작성돼 있으며, 여기에는 양자관성센서도 포함된 것으로 알려져 있다.[158]

③ 버밍엄 대학에서는 원자간섭계 기반 양자 중력구배센서를 활용해 지하의 구조물, 지하수층 등에 대한 중력지도를 작성했으며, 실제 도심에서 지하 터널을 감지한 측정 데이터를 제시했다.[159]

그림 II-2-2 (왼쪽) 버밍엄 대학에서 개발 중인 양자중력센서, (오른쪽) 양자센서 로드맵



※ UK National Quantum Technologies (2015)

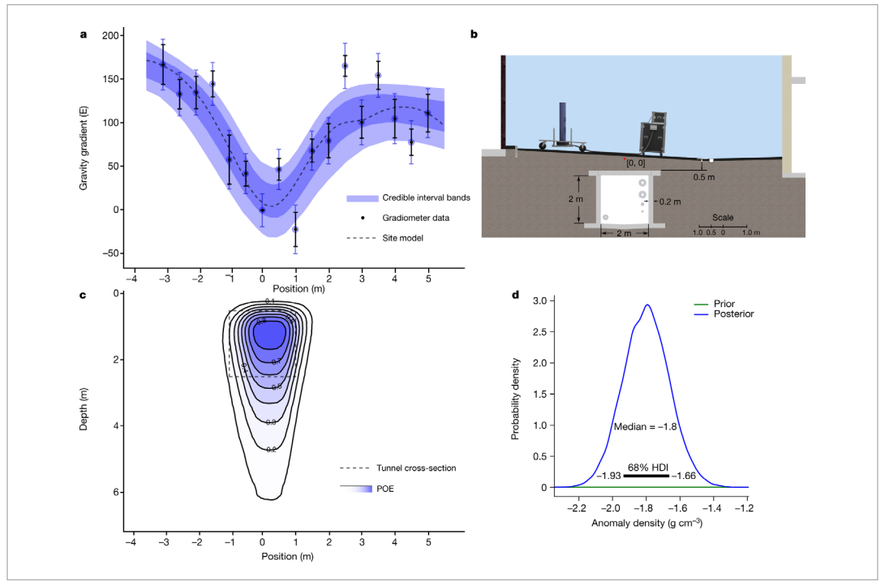
156) https://quantera.eu/taiol/

157) https://uknqt.ukri.org/

158) https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf

159) Ben Stray et al. Nature 602, 590 (2022)

그림 II-2-3 중력지도 제작을 위한 양자센서연구



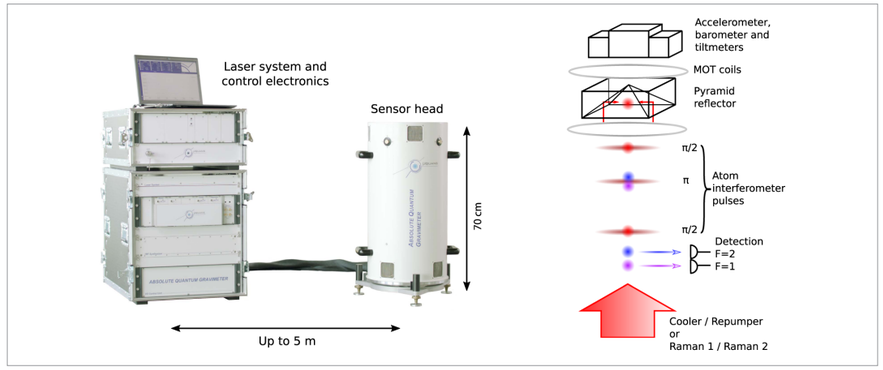
* 터널의 치수와 위치를 나타냄

※ Nature 602, 590 (2022)

4) 프랑스

① SYRTE는 고전중력계(FG5) 보다 성능이 뛰어난 양자중력계를 개발하고, Muquans를 설립해 세계 최초로 상업용 양자중력계를 개발했다.[160)]

그림 II-2-4 SYRTE의 양자중력계

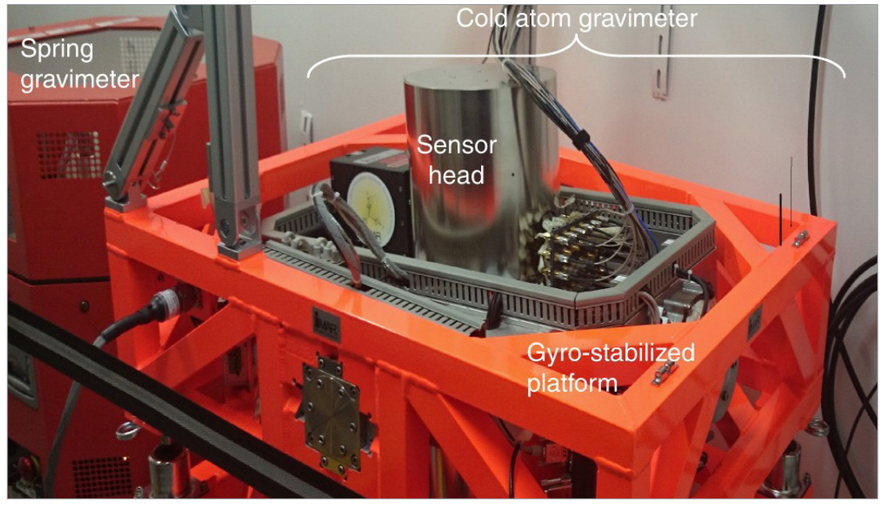


* (왼쪽) 휴대가능 양자중력계, (오른쪽) 측정 원리

160) Ménoret et al. (2018), https://www.muquans.com/

② 프랑스항공우주연구원(ONERA)과 수산해양연구소(Shom)는 측지학, 지구물리학, 광물 및 탄화수소 탐사, 항해 등에 활용할 수 있는 양자중력센서를 개발했다.[161)]

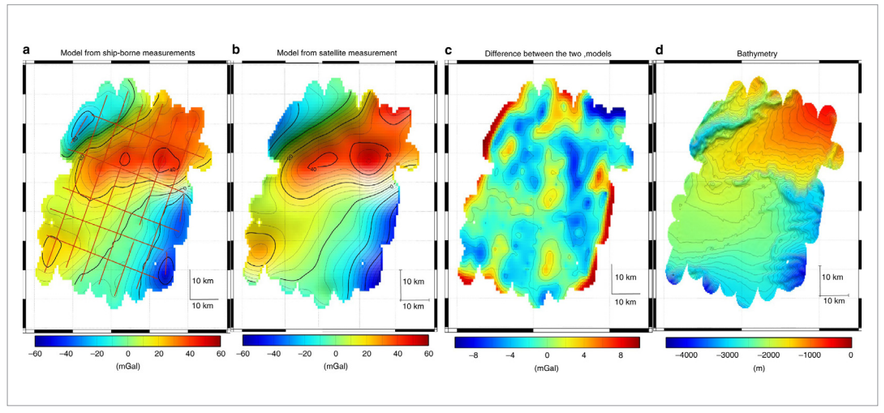
그림 II-2-5 ONERA와 Shom이 공동 개발한 양자중력센서



* 선박에 설치된 저온 원자중력계의 사진

※ Nature Communications 9, 627 (2018)

그림 II-2-6 양자중력센서로 측정된 중력이상모델



(a) 선박 탑재 원자중력계 측정에서 얻은 모델
(b) 위성 측정에서 얻은 모델
(c) 선박 탑재 모델과 위성 모델의 차이점
(d) 중력 이상과의 비교를 위한 수심 측량

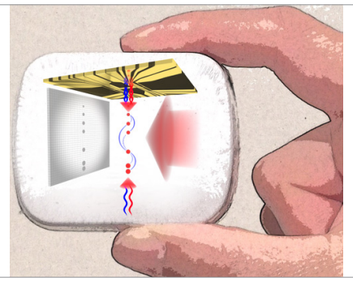
※ Nature Communications 9, 627 (2018)

161) Bidel et al. (2018)

5) 독일

① 하노버 대학에서는 10m 길이의 원자간섭계를 개발하고 측정 결과를 보고했고,[162] 양자중력계를 원자칩 기반으로 개발하려는 'Atom-Chip Fountain Gravimeter' 연구를 수행한 바 있다.[163]

그림 II-2-7 하노버 대학에서 연구한 원자칩 기반 중력계 상상도



② 훔볼트대(베를린)에서는 이동형 양자중력계 개발 연구를 수행했다.[164]

그림 II-2-8 훔볼트대에서 개발한 이동형 양자중력계



※ Applied Physics B 113, 49 (2013)

162) Schilling et al. (2020)
163) Abend et al. (2016)
164) Hauth et al. (2013), Freier et al. (2016)

6) 중국

NIM(National Institute of Metrology), CNS(Chinese Academy of Sciences), 화중과기대학교, 지량대학교 등에서 양자중력계 연구를 수행 중이다.

(3) 적용 분야

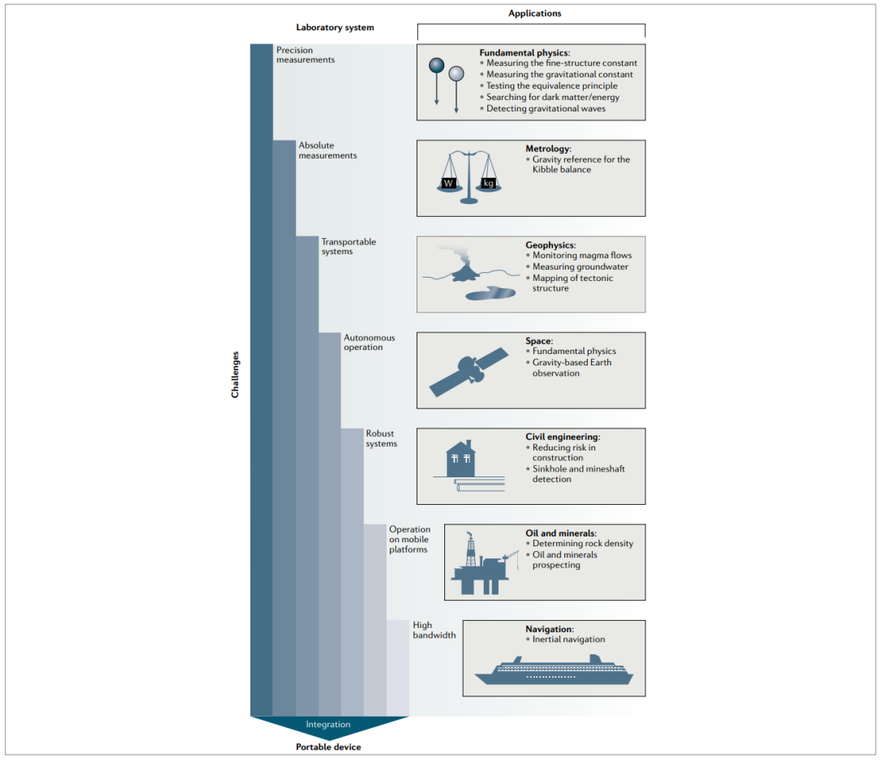
① AOSense와 ColdQuanta는 DARPA, Air Force, Army, Navy, NASA, NSF, DTRA 등의 지원으로 우주 및 국방 분야에 활용할 수 있는 항법용 양자중력계 센서를 개발했다.

② 우주 및 행성 관측, 도심 지하 구조물 및 수층 파악, 원유, 가스 및 광물 자원 탐사, 항법, 기후 변화, 수자원 관리, 국방 등의 광범위한 분야에 활용할 수 있다.

③ 선박, 비행기, 잠수함 등 이동이 가능한 운송 수단에 탑재시켜 국방, 자원탐사 등에 이용하기 위해서는 저렴한 소형 절대중력계의 개발이 필요하다.

④ 양자중력계 기술의 발전 로드맵과 응용 분야는 [그림 II-2-9]에서 확인할 수 있다.[165]

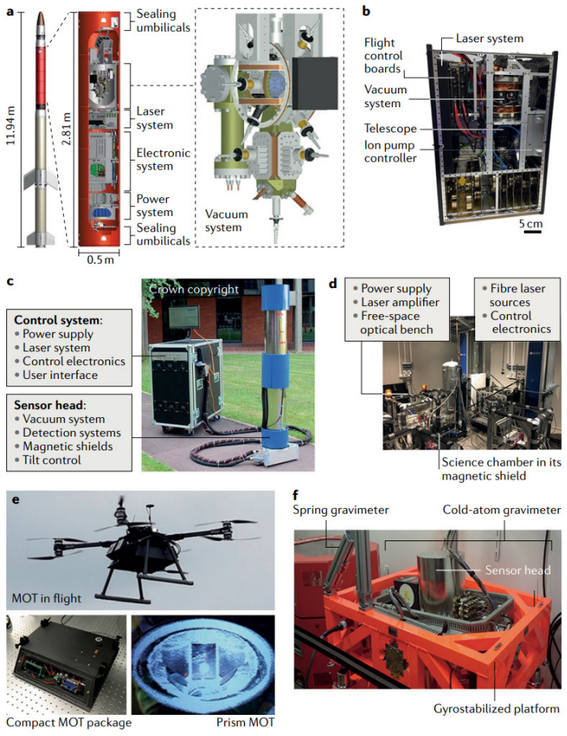
그림 II-2-9 휴대용 양자센서 개발 로드맵과 휴대용 원자간섭계의 활용 예시(1)



※ Nature Reviews Physics 1, 731 (2019)

165) Bongs et al. (2019)

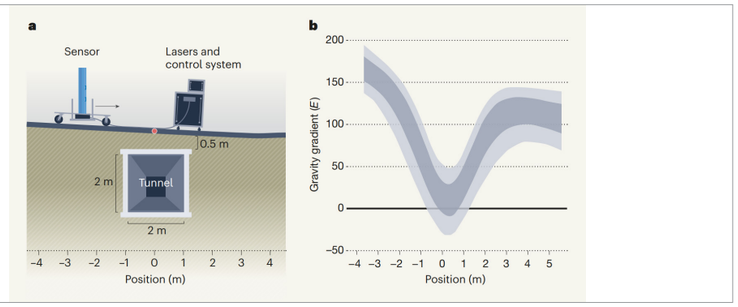
그림 II-2-10 휴대용 양자센서 개발 로드맵과 휴대용 원자간섭계의 활용 예시(2)



※ Nature Reviews Physics 1, 731 (2019)

⑤ 버밍엄 대학의 발표에 따르면 양자중력센서를 활용 시, 지표 아래 밀도의 불균일성 측정이 고감도로 신속하게 가능하며 싱크홀, 광산, 터널, 도심 공동구 등의 지하 구조물에 의한 중력 구배 변화 감지도 가능할 것으로 기대한다고 밝혔다.

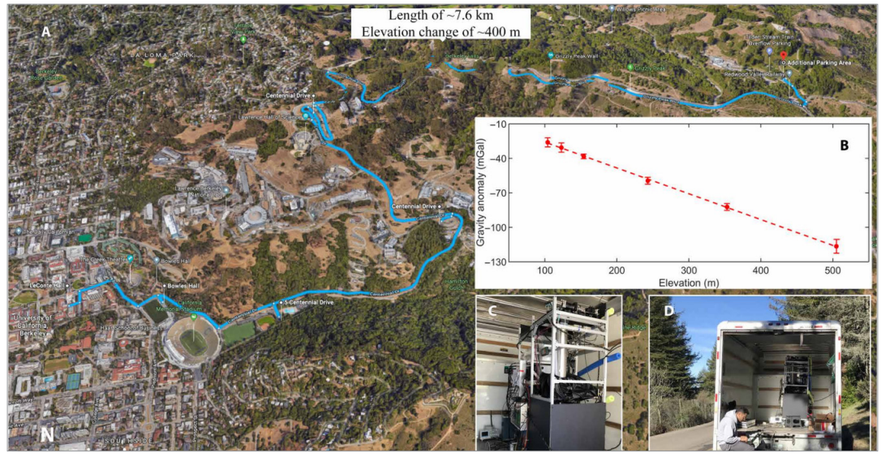
그림 II-2-11 현실 세계의 중력지도 제작[166]



※ Nature (2022)

⑥ 버클리대는 차량에 양자중력센서를 탑재해 버클리힐즈의 중력 실증을 수행했다.[167]

그림 II-2-12 버클리대에서 수행한 버클리힐즈의 중력 실증 조사

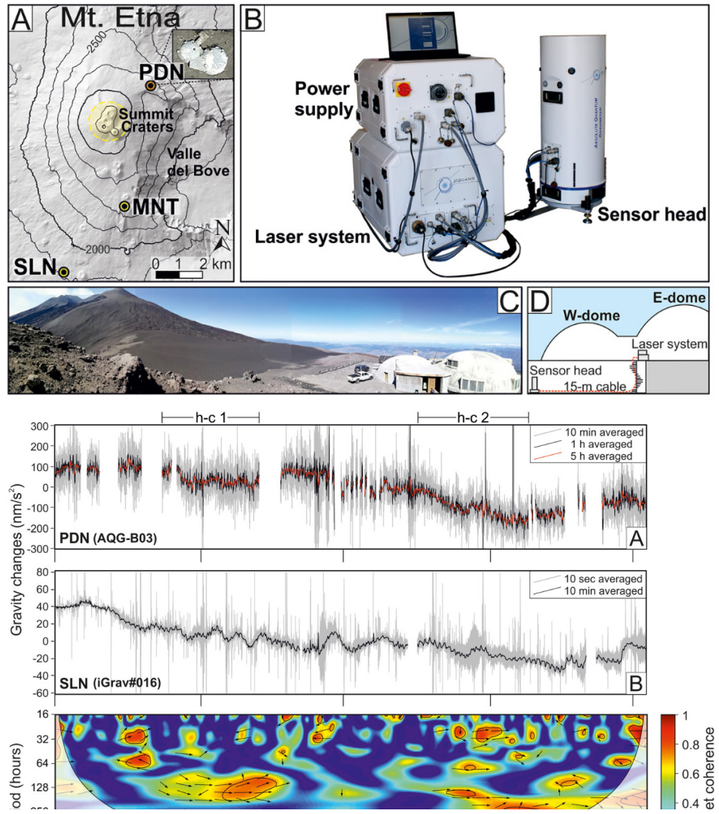


※ Science Advances 5, eaax0800 (2019)

⑦ 프랑스는 에트나 화산 주변의 중력측정을 수행해 화산활동을 감지하는 연구를 진행 중이다.[168]

166) Nature (2022)
167) Wu et al. (2019)
168) Antoni-Micollier et al. (2022)

그림 II-2-13 에트나 화산 정상 분화구 지역에 배치한 양자중력계 사진과 시간에 따른 중력 변화 측정 결과



※ Geophysical Research Letters 49(13) (2022)

나. 양자항법센서

(1) 기술 동향

양자항법센서의 경우 중력가속도, 회전, 가속도, 각속도 등의 측정을 구현하기 위한 센서이며, 플랫폼에 따라서 원자간섭계, 광역학계, 고체 점결함, 양자자이로 등으로 나뉜다. 외부 신호에 의존하던 고전항법센서의 한계를 돌파해 더 안전하며 수중, 우주, 사이버 공격, 대기 반사 등의 외부 영향을 대비할 수 있는 기술로 알려져 있다.

(2) 연구 동향

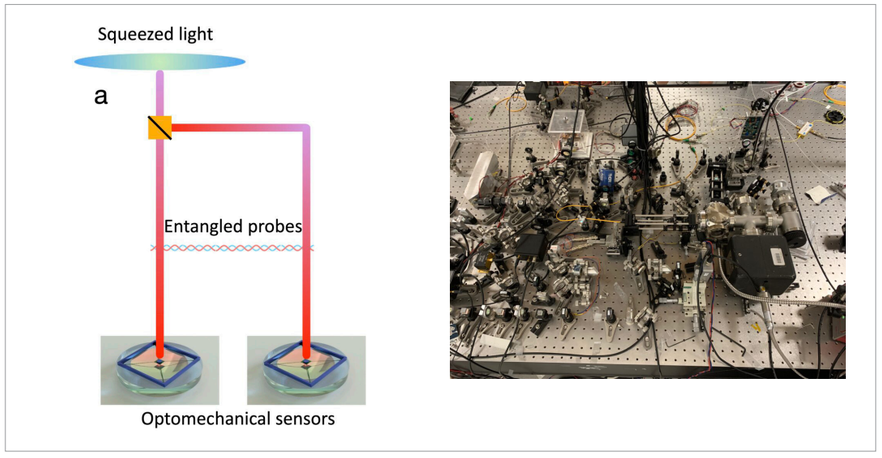
1) 미국

① DARPA에서는 ANS(Adaptable Navigation Systems), Micro-PNT, QuASAR(Quantum-Assisted Sensing And Readout), PULSE(The Program in Ultrafast Laser Science and Engineering), STOIC(Spatial, Temporal and Orientation Information in Contested Environments) 프로젝트를 통해 양자항법센서를 개발 중이다.[169)]

② 미국국립과학재단(National Science Foundation)의 지원으로 관성계의 정밀도 향상을 위한 양자기술 적용 및 광역학계 기반 관성 측정소자 개발을 위한 양자-강화 광역학 가속도계(Quantum-Enhanced Opto-mechanical Accelerometers) 연구가 2020년부터 2023년까지 수행 중이다.[170)]

③ 애리조나 대학에서는 NSF Convergence Accelerator(Quantum-Interconnected Sensors Enhanced by Entanglement) 프로젝트의 지원으로 양자광자학 백본플랫폼을 통해 광학 인터페이스와 다양한 센서를 연결하는 양자센서 아키텍처를 구축해, 얽힘센서 네트워크를 구현하는 연구를 수행 중이다. 얽힘-강화 센서는 과학적 측정, 관성 항법, 우주 제어 및 행성 탐사, 의료 영상을 포함한 다양한 분야에 도움을 줄 수 있다.[171)]

그림 II-2-14 (왼쪽) Phase I 데모 개략도, (오른쪽) Phase I 데모 실험 장치

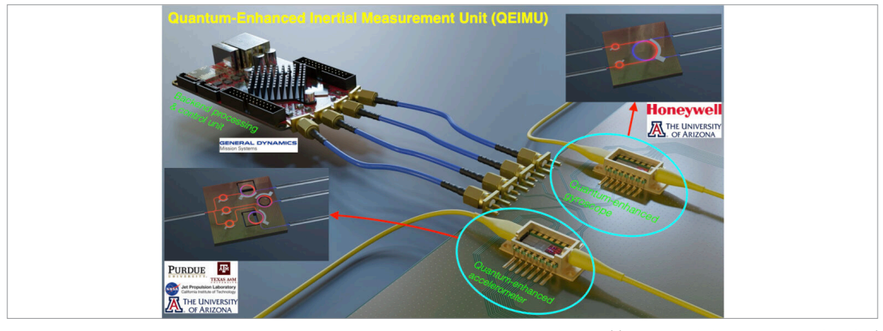


※ https://quantumlab.engin.umich.edu/

169) https://www.darpa.mil/news-events/2014-07-24
170) https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1945832
171) https://quantumlab.engin.umich.edu/projects/

④ 애리조나 대학에서는 Convergence Accelerator 프로젝트의 2단계를 통해 최첨단 관성센서의 성능을 훨씬 능가하는 항법용 양자강화 관성측정장치(QEIMU)를 개발하려는 목표를 갖고 있다. 이를 통해 항공우주 항법, 자율주행차, 우주 탐사와 같은 다양한 영역에서 활용할 계획이다.

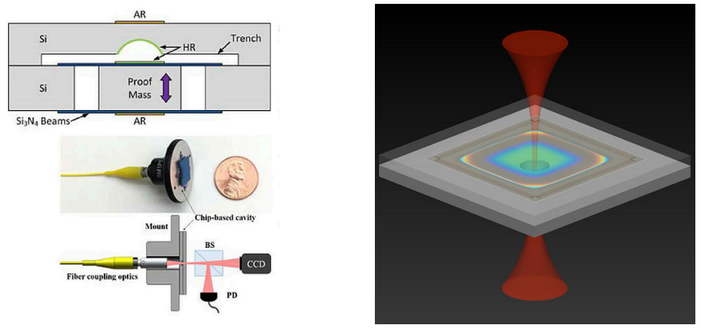
그림 II-2-15 Phase II 프로토타입 개략도



※ https://quantumlab.engin.umich.edu/

⑤ DARPA에서는 GPS가 불가능한 환경에서 위치, 탐색 및 타이밍(PNT)을 가능하게 하는 관성센서 기술을 개발하기 위해 PRIGM(Precise Robust Inertial Guidance for Munions) 프로그램을 시작했다. PRIGM은 MEMS(Micro-Electromechanical Systems) 플랫폼을 기반으로 하는 항법 등급 특성 장치(Navigation-Grade Inertial Measurement Unit, NGIMU)의 개발과 첨단 관성 마이크로센서(AIMS) 기술의 연구라는 두 가지 기초 연구로 구성돼 있다.

그림 II-2-16 (왼쪽) 가속도계의 개략도 및 광섬유가 결합된 캐비티 프로토타입 (오른쪽) 광기계 가속도계의 그림[172) 173)]

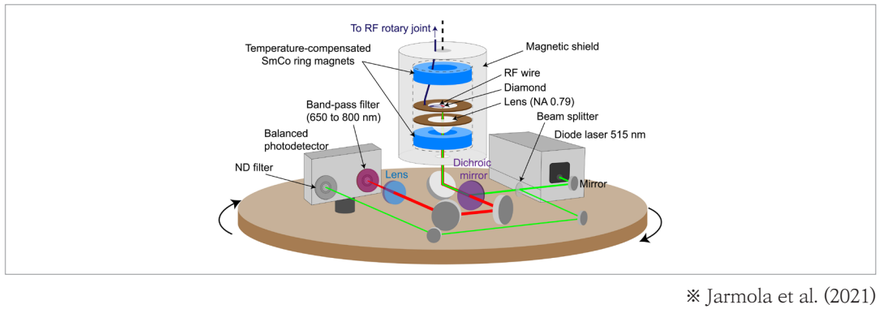


172) https://www.nist.gov/noac/technology/mass-force-and-acceleration/optomechanical-accelerometers
173) https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/better-way-measure-acceleration

⑥ 예일대-컬럼비아대 팀은 DARPA에서 ORCHID(Optical Radiation Cooling and Heating In Integrated Devices) 프로그램을 지원받아, 2010년부터 2015년까지 실리콘 플랫폼 기반 회로 통합형 칩 규모의 광역학계 개발 연구를 수행했다.

⑦ 버클리 대학은 National Science Foundation, National Institute of General Medical Sciences, U.S. Army Research Laboratory 등의 지원을 받아 다이아몬드의 NV 색-중심 물리계를 기반으로 하는 회전센서를 시연한 바 있다.

그림 II-2-17 Demonstration of Diamond Nuclear Spin Gyroscope[174)]



※ Jarmola et al. (2021)

⑧ Northrop Grumann은 DARPA의 지원을 받아 원자스핀 자이로(Atom Spin Gyroscope) 시제품을 개발했다. 제논가스가 들어있는 원자증기셀을 기반으로 부피가 100cc 이하인 항법급 초소형 자이로를 개발했으며, 현재 시험평가 중인 것으로 알려져 있다.[175)]

그림 II-2-18 Northrop Grumann에서 개발한 항법급 원자스핀 자이로



※ Lasen et al. (2014)

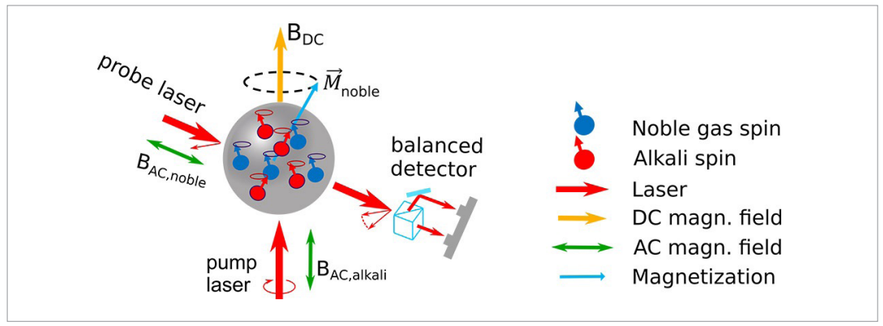
174) Jarmola et al. (2021)
175) Larsen et al. (2012)

⑨ 위스콘신 대학의 T.G Walker 그룹에서는 NSF와 DARPA 지원을 받아 원자스핀을 이용한 자이로 개발을 진행하고 있다.[176]

2) 유럽

유럽연합은 2020년부터 macQsimal(Miniature Atomic vapor-Cells Quantum devices for SensIng and Metrology AppLications) 프로젝트를 추진하고 있다. Miniature Atomic Gyroscopes 프로젝트가 포함돼 있으며, 원자증기셀 안에 들어있는 원자스핀의 세차운동을 이용한 자이로스코프 개발 계획을 세웠다.

그림 II-2-19 원자스핀 자이로 개념도



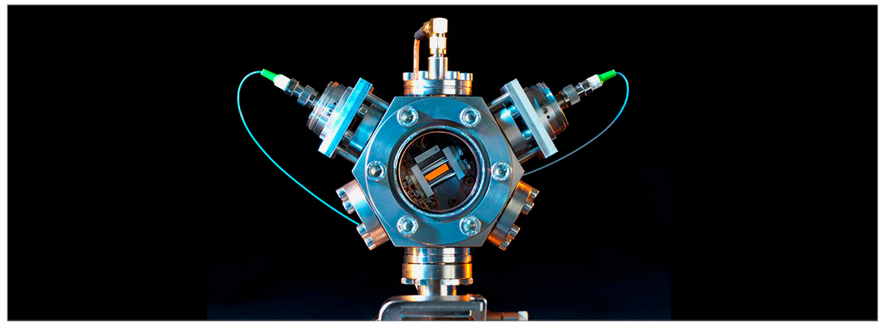
※ Sorensen et al. (2020)

3) 영국

① 현재보다 더 안전한 항법시스템을 개발하고 상업화하기 위한 High-BIAS2(High Bandwidth Inertial Atom Source) 프로젝트를 시작했다. 이를 통해 GPS(Global Positioning System) 또는 GNSS(Global Navigation Satellite System) 신호 없이 차량 항법을 가능하게 하는 저온 원자 기반 양자 항법시스템(QPS)의 개발을 진행 중이다. 이는 GPS 및 GNSS 기술에 대한 의존도를 줄이고, 수중이나 우주와 같은 극한 환경, 사이버 공격, 대기 반사 등의 외부 영향에 대비하기 위함이다. 본 프로젝트는 영국 정부 주도로 National Quantum Technologies Programme의 지원을 받고 있으며, 양자과학기술 분야에서 시장을 선점하고 상업화하기 위한 연구를 지속하고 있다.

② 외부 신호에 의존하지 않고 물체의 속도 변화 측정이 가능한, 초저온원자 기반의 항법용 양자가속도계가 Imperial College London과 M Squared 연구팀에 의해 시연됐다. 또한 영국 국립양자기술 프로그램(UK National Quantum Technologies Program)은 기술적 진보를 보여주는 행사인 National Quantum Technologies Showcase에서 이동이 가능한 독립형 양자가속도계를 최초로 시연했다.

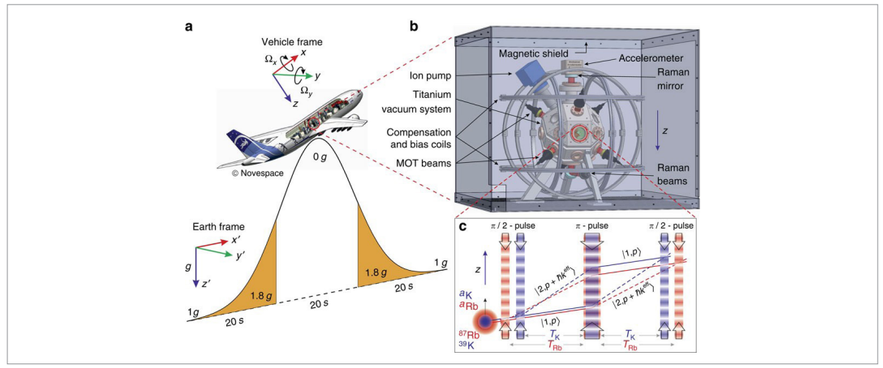
그림 II-2-20 Imperial College London과 M Squared가 시연한 항법용 양자가속도계[177]



4) 프랑스

프랑스에서는 이종의 두 원자를 냉각시켜 ^{87}Rb–^{39}K 간섭계를 실현하고, 자유낙하 상태에서의 감도 측정을 위해 포물선으로 움직이는 비행기에서 원자간섭계 연구를 수행하고 있다. 이 결과를 관성항법에 적용하고, 미래 우주 임무를 위한 위성 연구 등으로 확장될 수 있다고 발표했다.

그림 II-2-21 프랑스에서 수행 중인 원자간섭계 연구



* (a) 포물선 비행 중인 비행체,
(b) 항공기 탑재 냉각 원자가속도계 시스템,
(c) 동시 이종 간섭계

※ AVS Quantum Sci. 4, 014401 (2022)

176) Sorensen et al. (2020)

177) www.i-micronews.com/quantum-compass-could-allow-navigation-without-relying-on-satellites/

(3) 적용 분야

수중, 우주, 사이버 공격, 대기 반사 등의 외부 영향에 구애받지 않는 양자항법센서의 특성을 활용한다면, 앞으로 다양한 분야에서 쓰일 것으로 예상된다. 우주, 국방, 의료, 자율주행, 드론 등에 적용할 수 있으며 GPS를 활용하지 않아 활동 시간을 늘릴 수 있다.

2. 양자시간센서

(1) 기술 동향

양자시간센서 분야에서는 고전적인 시간센서를 초소형 원자시계 및 Chip-Scale 원자시계 등으로 개발하기 위한 연구가 진행 중이다. 향후 다양한 분야에서 활용이 가능한 기술로 주목받고 있다.

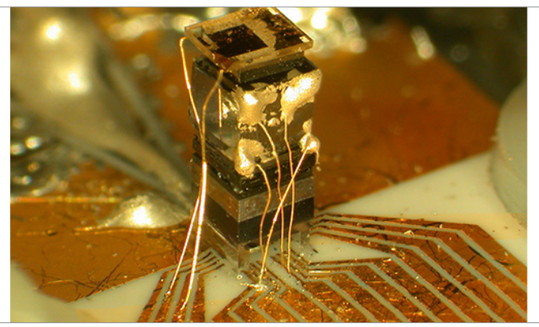
(2) 연구 동향

1) 미국

① DARPA에서 진행 중인 QuASAR(Quantum-Assisted Sensing and Readout) 프로젝트를 통해 양자시간센서 원천기술을 개발 중이다.[178)]

② NIST는 2001년에서 2009년까지 DARPA로부터 CSAC(Chip-Scale Atomic Clock) 프로그램을 지원받아 기존 원자시계의 1/100 크기지만, 전력 소비는 1/50로 감소한 CSAC 기술을 개발했다.[179)]

그림 II-2-22 NIST에서 개발한 CSAC 기술



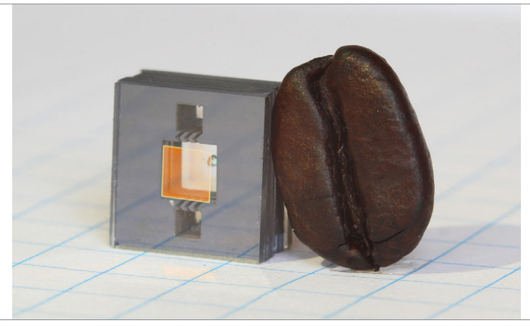
※ www.darpa.mil (2005)

178) www.darpa.mil/program/quantum-assisted-sensing-and-readout
179) www.darpa.mil/about-us/timeline/chip-scale-atomic-clock

③ 기존의 DARPA CSAC 연구를 기반으로 핵심 성능을 1,000배 향상한 배터리 구동형 CSAC를 개발하는 것을 목표로, 2016년부터 ACES(Atomic Clock with Enhanced Stability) 프로그램이 시작됐다. 또한 DARPA의 A-PhI(Atomic-Photonic Integration) 프로그램은, QuASAR 프로그램의 지원으로 개발된 원자시계 및 광학 자이로스코프를 축소하기 위해 광자집적회로를 개발하고 있다.[180)]

④ NIST는 원자시계 소형화 개발에 대한 성공담을 NIST-on-a-Chip 홈페이지에 게재했으며, 차세대 소형 원자시계의 핵심으로 MEMS 기반 증기셀을 소개하고 있다.[181)]

그림 II-2-23 NIST에서 커피콩 크기로 만든 차세대 소형 원자시계



※ www.nist.gov (2019)

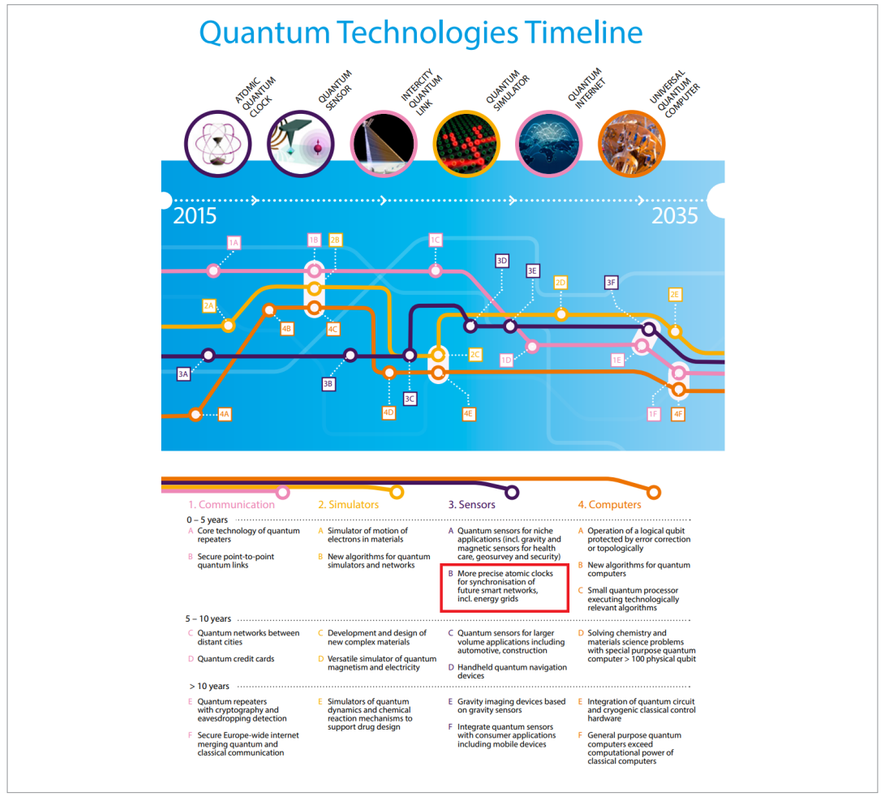
⑤ NIST, Caltech, EPFL, HRL, Aurrion Inc., UC Santa Barbara, Yale 대학 등으로 구성된 연구그룹은 광주파수 빗(Optical Frequency Comb)과 원자분광 시스템을 칩스케일로 소형화하기 위한 연구를 함께 수행한 바 있다.

2) 유럽

① 유럽은 2차 양자혁명을 주도하기 위해 전략적인 투자로 경쟁력 있는 산업을 창출하겠다는 선언문인 'Quantum Manifesto'를 발간하며, 양자시간센서를 포함해 다양한 양자기술을 개발하기 위한 시간표를 제시했다. 단기목표는 에너지 및 통신과 같은 미래 스마트 네트워크에 사용할 수 있는 정밀한 양자시간센서를 개발하는 것이고, 장기적으로는 휴대 전화에 적용할 수 있게끔 On-Chip 형태로 만들어 다수의 사용자에게 양자센서를 제공하는 것이 목표이다.[182)]

180) www.darpa.mil/attachments/QuantumSensingLayout2.pdf
181) www.nist.gov/noac/success-story-chip-scale-atomic-clock
182) https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf

그림 II-2-24 유럽에서 발간된 Quantum Manifesto의 양자기술 개발을 위한 타임라인



※ De Touzalin et al. (2016)

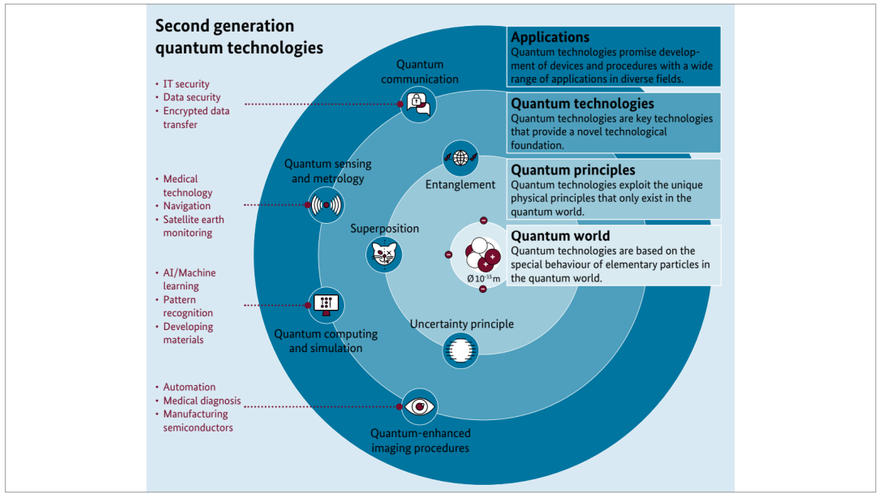
② 실험실에서 쓰이는 원자시계를 통신(예: 네트워크 동기화, 트래픽 대역폭, GPS free 내비게이션), 지질학(예: 지하 탐사, 지하수 또는 빙상 모니터링), 천문학(예: 저주파 중력파 탐지, 전파망원경 동기화) 등의 분야에 활용할 수 있도록 작은 형태의 원자시계로 만들기 위해 Quantum Flagship iqClock 컨소시엄을 설립했다.

③ macQsimal은 EU의 자금 지원을 받아 자기장, 시각, 회전, 전자기 방사선, 가스 다섯 가지 핵심 분야에 적용할 수 있는 양자센서를 개발하고, 소형화 및 통합화하기 위한 Horizon 2020 연구 프로젝트를 시작했다.

④ 영국은 양자과학을 기반으로 새로운 제품과 기술을 개발하기 위해 산업계로부터 2억 500만 파운드의 투자를 지원받고 UK Quantum Technologies Challenge 과제를 시작했다. 여기에 포함된 주제인 'Compact Optics for High Performance Portable Atomic Timing and Quantum Sensors'를 구현하기 위해 통신, 금융 거래, 내비게이션 시스템뿐만 아니라 통신 프로토콜, 자율 운송 네트워크 및 기후 변화 모니터링에도 적용이 가능한 지구 관측용 소형 원자시계를 연구하고 있다.[183]

⑤ 독일은 Quantum Technologies-from Basic Research to Market 프로그램을 통해서 주요 양자기술에 대한 로드맵을 발표했다.

그림 II-2-25 독일에서 발표한 양자기술 로드맵



※ Federal Ministry of Education and Research(BMBF) (2018)

(3) 적용 분야

양자시간센서는 통신, 지질학, 천문학, 자율주행 등 다양한 분야에 활용할 수 있는 기술이다.

183) www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/09/UKRI-280921-UKQuantumTechnologiesChallengeTheDirectory.pdf

3. 양자 전기장·자기장 센서

가. 양자전기장 센서

(1) 기술 동향

양자전기장 센서 기술은 주로 미국 및 유럽연합에서 관련 연구를 수행하고 있으며, 국내와 비교해 압도적으로 앞선 기술 수준을 보여주고 있다. 해당 기술은 주로 큰 쌍극자 값을 가진 리드버그 원자를 이용해서 많은 연구가 수행됐으며, 전자파의 전기장 측정 시 감도를 높일 수 있는 장점으로 주목받았다. 또한 고분해 분광에 의한 전자기 유도 투과 신호의 분리 주파수로 측정하기 때문에 매우 정밀한 측정이 가능하다는 장점도 있다.

양자전기장 센서 관련 기술은 2000년대 초반부터 현재까지 미국 표준기관인 NIST와 콜로라도 대학이 주도하고 있다. 주로 100GHz 근방의 통신주파수에서 수행되고 있지만 최근 들어 THz 및 저주파(GHz부터 DC) 대역에서 수행된 관련 연구 결과들도 보고되기 시작했다. 또한 절대 전기장 측정, 위상 측정, 6G 전파 환경 측정 및 방향탐지 등 통신 관련분야에서 주목받고 있다. DARPA에서는 2021년부터 QA(Quantum Apertures) 프로그램을 추진해 양자조리개에 기반한 양자수신 안테나 기술을 개발하기 위한 프로젝트를 시작했다. 유럽의 경우 2020년부터 시작된 'macQsimal' 프로젝트에 2개 연구소, 3개의 산업체, 7개국 8개의 대학이 참여해 원자 기반 자력계, 원자시계, 원자 자이로스코프, 원자기반 GHz/THz 센서 및 이미저(양자전기장 센서), 리드버그 원자 기반 가스센서 등을 개발하는 연구를 시작했다. 그중 양자전기장 센서는 전기장 측정 이미징 기술과 관련된 연구가 포함됐고, 주로 Rb과 Cs 원자를 포함한 알칼리 계열 원자에서 연구를 수행하고 있다.

(2) 연구 동향

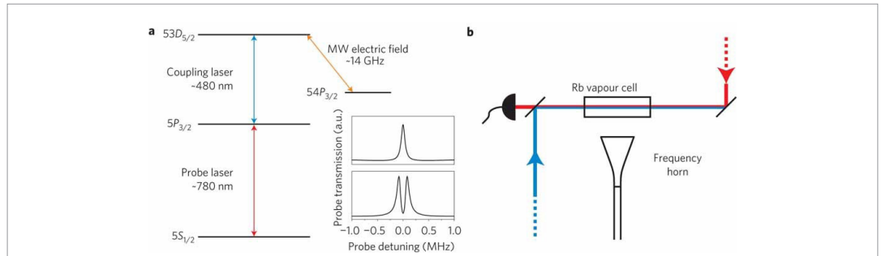
1) 미국

① 오클라호마 대학의 James P. Shaffer 교수 연구그룹에서 리드버드 원자 기반 전자기 유도 투과 현상을 이용해 Microwave Electrometry를 개발하기 위한 연구를 수행하고, 그 결과를 2012년 Nature Physics에 발표했다.[184)]

② 2013년도에는 Atom-Based Vector Microwave Electrometry에 대한 연구 결과를 발표했다.[185)]

184) Sedlacek et al.. (2012)
185) Sedlacek et al.. (2013)

그림 II-2-26 레벨 다이어그램 및 실험 개략도



* (a) 실험에 사용된 4 준위 에너지 다이어그램
(b) Microwave Electrometry 실험 장치도

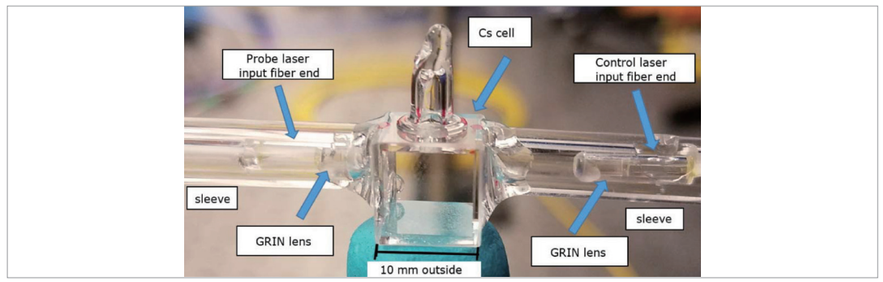
※ Nature Pysics 8, 819 (2012)

③ 2014년 NIST와 콜로라도 대학은 공동으로 'Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe for SI-Traceable, Self-Calibrated Measurements'라는 연구 결과를 발표하며, 양자전기장 센서를 이용한 소급성 있는 전기장 측정 가능성을 제시했다.[186)]

④ 2016년 오클라호마 대학은 불확도에 큰 영향을 미치는, 유리 재질 원자셀에서 발생하는 전자파 반사에 의한 간섭 효과를 최소화하기 위한 연구 결과를 발표했다.[187)]

⑤ 2018년에는 NIST와 콜로라도대 공동으로 광섬유 결합형 소형 원자증기셀에 기반한 양자전기장 센서를 개발하고, 이를 이용해 차폐된 장소에서 전자파의 전기장을 측정하는 연구를 수행했다.[188)]

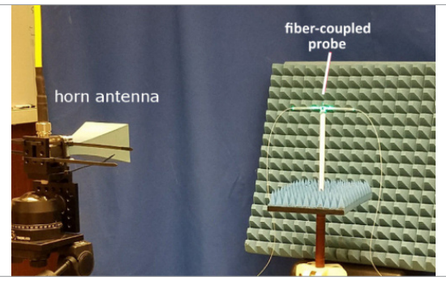
그림 II-2-27 GRIN 렌즈, 광섬유 페룰, Cs 원자증기셀 및 슬리브를 이용한 광섬유 결합형 원자증기셀



※ Applied Optics 57(22) (2018)

186) Holloway et al. (2014)
187) Kumar et al. (2016)
188) Simons et al. (2018)

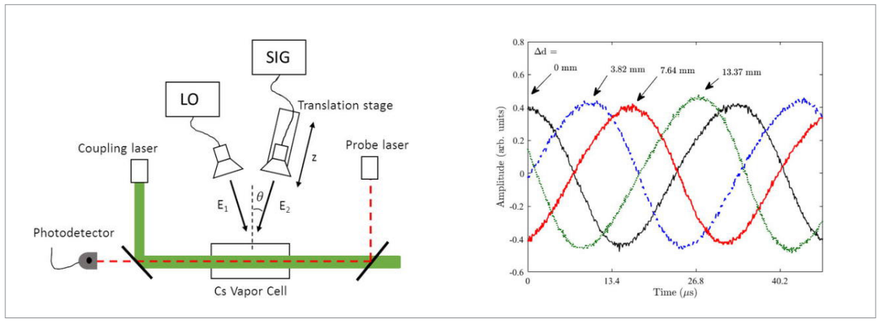
그림 II-2-28 광섬유 연결형 원자증기셀을 이용한 전기장 측정 실험 사진



※ Applied Optics 57(22) (2018)

⑥ 2019년 NIST와 콜로라도대 공동연구팀은 양자전기장 센서와 믹서를 결합해 20GHz의 RF를 kHz 정도의 중간 주파수로 하향 변환시키고, RF의 위상을 측정하는 연구를 수행했다.[189]

그림 II-2-29 (왼쪽) 양자전기장 센서와 믹서를 이용한 위상 측정 장치도(오른쪽) 광검출기 감지 신호

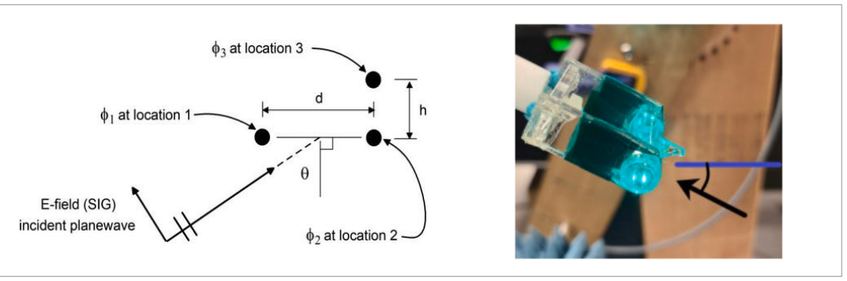


※ Applied Physics Letters 114, 114101 (2019)

⑦ 2021년 NIST와 콜로라도 대학 공동연구팀에서 양자전기장 센서에 기반한 방향탐지 기술을 발표했고, 다음 주제로 전파 환경 측정에 관한 연구를 선정하고 연구를 진행 중이다.[190]

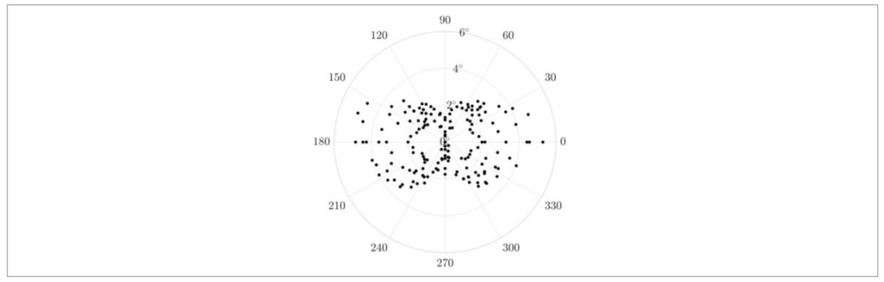
189) Simons et al. (2019)
190) Appl & Phys (2021), Measurement (2021)

그림 II-2-30 (왼쪽) 양자전기장 센서 기반 방향탐지 기술 개념도 (오른쪽) 실제 방향탐지 실험 사진



※ Measurment: Sensors 18, 100273 (2021)

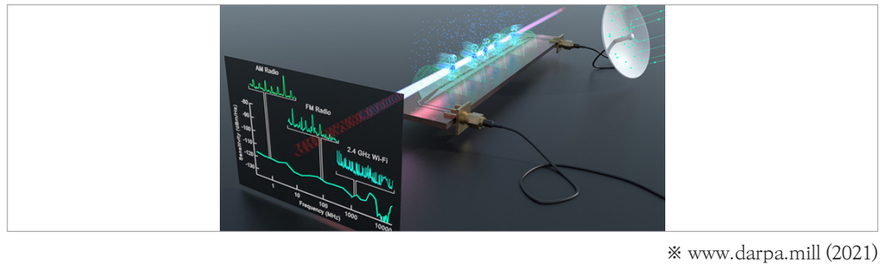
그림 II-2-31 전자파 방향탐지 측정 결과



※ Measurment: Sensors 18, 100273 (2021)

⑧ DARPA에서는 2021년부터 QA(Quantum Apertures) 프로그램을 추진해 양자수신기 기술로 사용할 목적으로, 양자기술 기반 RF 센서(전기장 센서)의 성능 향상 연구에 착수했다.

그림 II-2-32 DARPA에서 연구 중인 고감도 광대역 무선 주파수 양자수신기의 QA 프로그램 개념도[191]

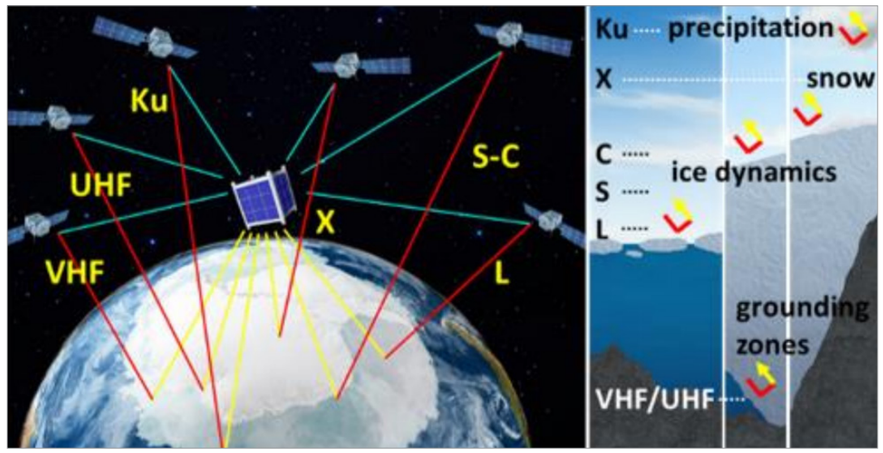


※ www.darpa.mill (2021)

191) www.darpa.mil/news-events/2021-08-04

⑨ 2022년부터 NASA는 VHF부터 Ku밴드까지 측정이 가능한 양자전기장 센서를 개발하고 위성에 탑재시켜 적설량, 빙상 역학, 강수량 등을 관측하기 위한 'Cryospheric Rydberg Radar' 프로젝트 연구를 시작했다.[192)]

그림 II-2-33 적설량, 빙상 역학, 강수량 등 지구 수자원 관측을 위한 위성탑재 리드버그 레이더 개념도



※ www.nasa.gov (2022)

⑩ NIST 자료에 따르면, 양자전기장 센서의 핵심 소자인 원자증기셀이 기존 안테나보다 전파의 반사가 적어 자체적인 스텔스 효과가 있는 양자수신기로써 가능성이 있다고 발표했다.[193)]

2) 유럽

① 유럽은 양자전기장 센서 기반의 비파괴 대역 전기장 이미징 기술과 관련된 연구를 진행해오고 있으며, 특히 2020년부터 시작된 macQsimal 프로젝트에 연구소 2개, 산업체 3개, 7개국 8개의 대학이 참여해 관련 연구를 활발히 진행 중이다.

② 2007년 C. J. Adams 교수 연구그룹이 리드버그 원자의 전자기 유도 투과 현상을 관측해 전기장 측정 연구 결과를 보고하면서, 리드버그 원자에서의 결맞음 분광 연구가 주목받았다.[194)]

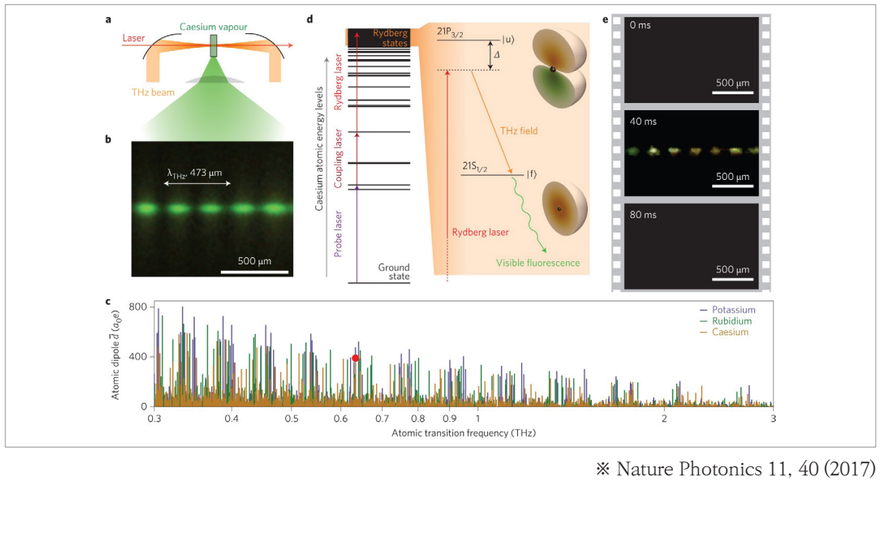
③ Durham 대학에서 리드버그 원자의 전자기 유도 투과 신호에 레이저 주파수 안정화 기술을 적용해, 두 대의 독립적인 레이저 간 상대 선폭을 100μs 동안 약 280kHz로 축소하는 응용연구가 수행됐다.[195)]

④ 영국 리즈대와 독일 막스플랑크 연구소 공동연구팀은 Rb 원자를 3단계 여기광을 이용해 리드버그 원자 상태로 만들고, 각각의 주파수를 절대적으로 측정하는 연구를 수행했다.[196)]

⑤ 독일의 T. Pfau 연구그룹은 루비듐 원자의 리드버그 상태에서 ns펄스를 이용해 Rabi Oscillation을 관측하고, 양자소자로의 가능성에 관한 연구 결과를 발표했다.[197)]

⑥ Durham 대학에서 리드버그 원자 기반 양자전기장 센서를 이용해 THz 이미지를 측정했다.[198)]

그림 II-2-34 원자광학 형광을 사용한 실시간 근거리 테라헤르츠 이미징

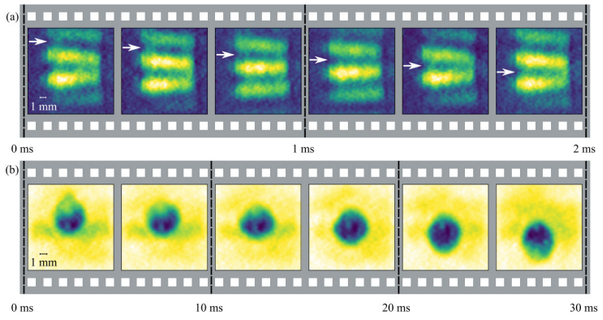


※ Nature Photonics 11, 40 (2017)

⑦ Durham 대학에서 리드버그 원자에 THz 근방의 비파괴 대역 전자기파를 입사 시 발생하는 원자증기셀의 형광으로부터, 기존 THz 이미지 센서의 50Hz 수준을 훨씬 뛰어넘는 kHz 수준의 영상 이미지를 획득했다. 이론적으로 1MHz 수준까지 도달할 수 있을 것으로 예상한다.[199)]

192) www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2022/Cryospheric_Rydberg_Radar/
193) Artusio-Glimpse et al. (2022)
194) Mohapatra et al. (2007)
195) Abel et al.. (2009)
196) Johnson et al. (2010))
197) Huber et al. (2011))
198) Wade et al. (2017)
199) Downes et al. (2020)

그림 II-2-35 초고속 THz 비디오[200)]



* (a) 700rpm으로 회전하는 광학 초퍼휠의 THz 비디오 프레임
(b) 자유낙하 하는 물방울 영상 포착

※ Physical Review X 10, 011027 (2020)

3) 기타

① 2020년부터 일본표준연구소(NMIJ)는 기존 RF전력센서 기술을 바탕으로 리드버그 기반 전기장 센서 기술을 개발 중이다.

② 대만은 Chin-Chun Tsai 그룹이 Cs 원자의 리드버그 상태에서 EIT와 Raman 흡수와의 관계에 관한 결과를 발표했다.[201)]

③ 독일의 T. Pfau 그룹에서 리드버그 원자 기반 양자전기장 센서 분광 기술을 2012년과 2016년에 보고했고, 중국의 Yanpeng Zhang 그룹은 2013년 Autler-Townes 분리에 관해 보고한 바 있다.

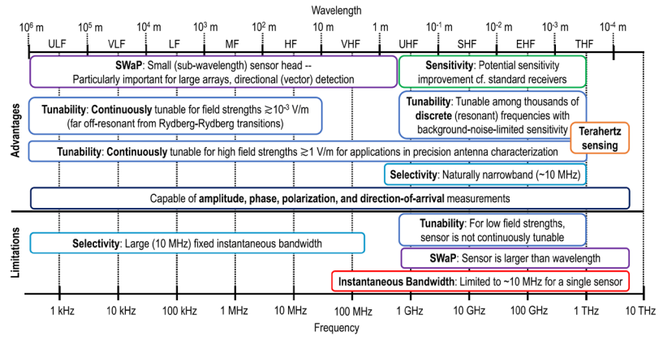
④ 중국 NIM에서는 변조된 신호 측정을 위한 양자전기장 센서를 제시했다.[202)]

(3) 적용 분야

① MITRE는 2021년 출판한 리포트에서, DC부터 THz까지 광대역 측정이 가능한 양자전기장 센서의 구현이 가능하다고 발표했다.[203)]

200) https://physics.aps.org/articles/v13/15
201) Chang et al. (2010)
202) Song et al. (2019)
203) Fancher et al. (2021)

그림 II-2-36 기존 수신기와 비교한 양자전기장 센서의 장점 및 한계



※ IEEE Transactions on Quantum Engineering 2 (2021)

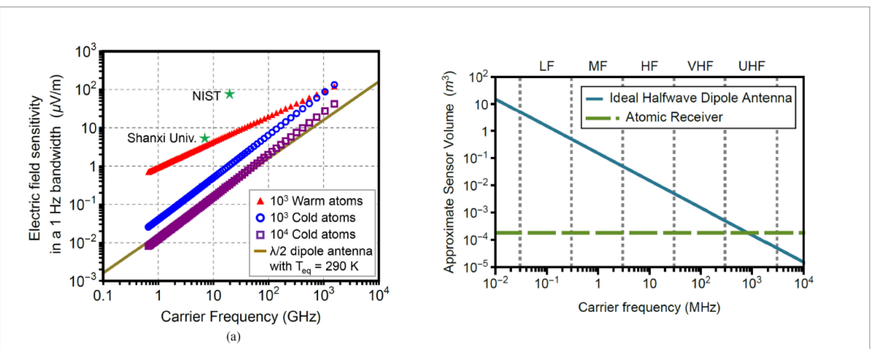
② 0.1THz 이상 고주파 대역에서 고감도 전기장 측정이 가능하며, 위상 측정 기술 개발 시 테라헤르츠 통신을 위한 전파특성 측정기준을 제공함으로써, 향후 6G 이동통신용 센서와 장비 분석 등에 활용할 수 있다.

③ 수분흡수 대역의 THz 측정이 가능해 산업 안전 검사, 비파괴 검사, 구조물 안전 검사 등 기존 THz 측정 분야에서 고전 센서의 한계로 기술 개발에 제약이 있었던 문제들을 해결할 수 있다.

④ 유럽은 macQsimal 프로젝트를 통해 양자전기장 센서 기반 THz 영상 측정 기술을 개발 중이다.

⑤ 수신부를 소형화해 단일 센서로 측정할 수 있다는 장점이 있어, 저주파 대역의 안테나를 대체함으로써 위성통신 및 민수/방산용 안테나 기술에 크게 이바지할 수 있다.

그림 II-2-37 주파수에 따른 양자전기장 센서 측정 감도와 수신부 크기 비교

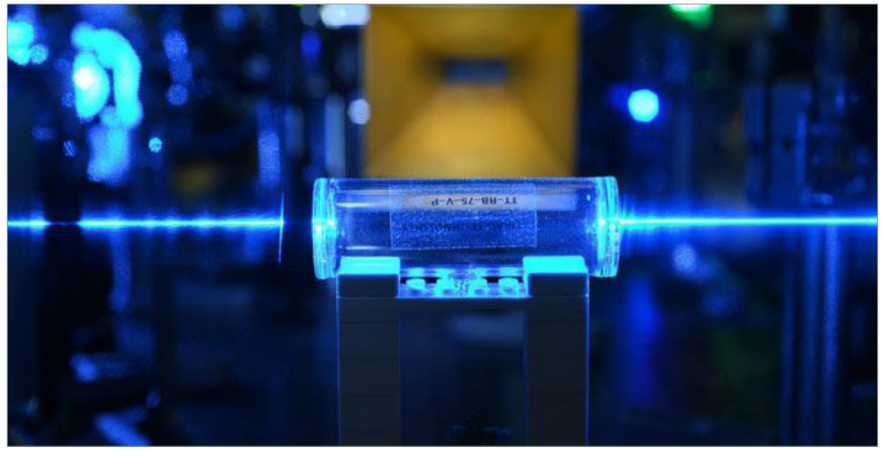


※ IEEE Transactions on Quantum Engineering 2 (2021)

⑥ 남북한 관계뿐만 아니라 러시아/우크라이나 전쟁으로 고조된 전 세계적인 갈등 상황 속에서 국방 분야의 고성능 RF 장비 수요가 증가하게 되면, 양자전기장 센서 시장이 급성장할 수 있다.

⑦ 미국은 국방 및 위성 분야에 사용할 양자전기장 센서를 개발하기 위해 2021년부터 관련 프로젝트의 가동을 시작했다.

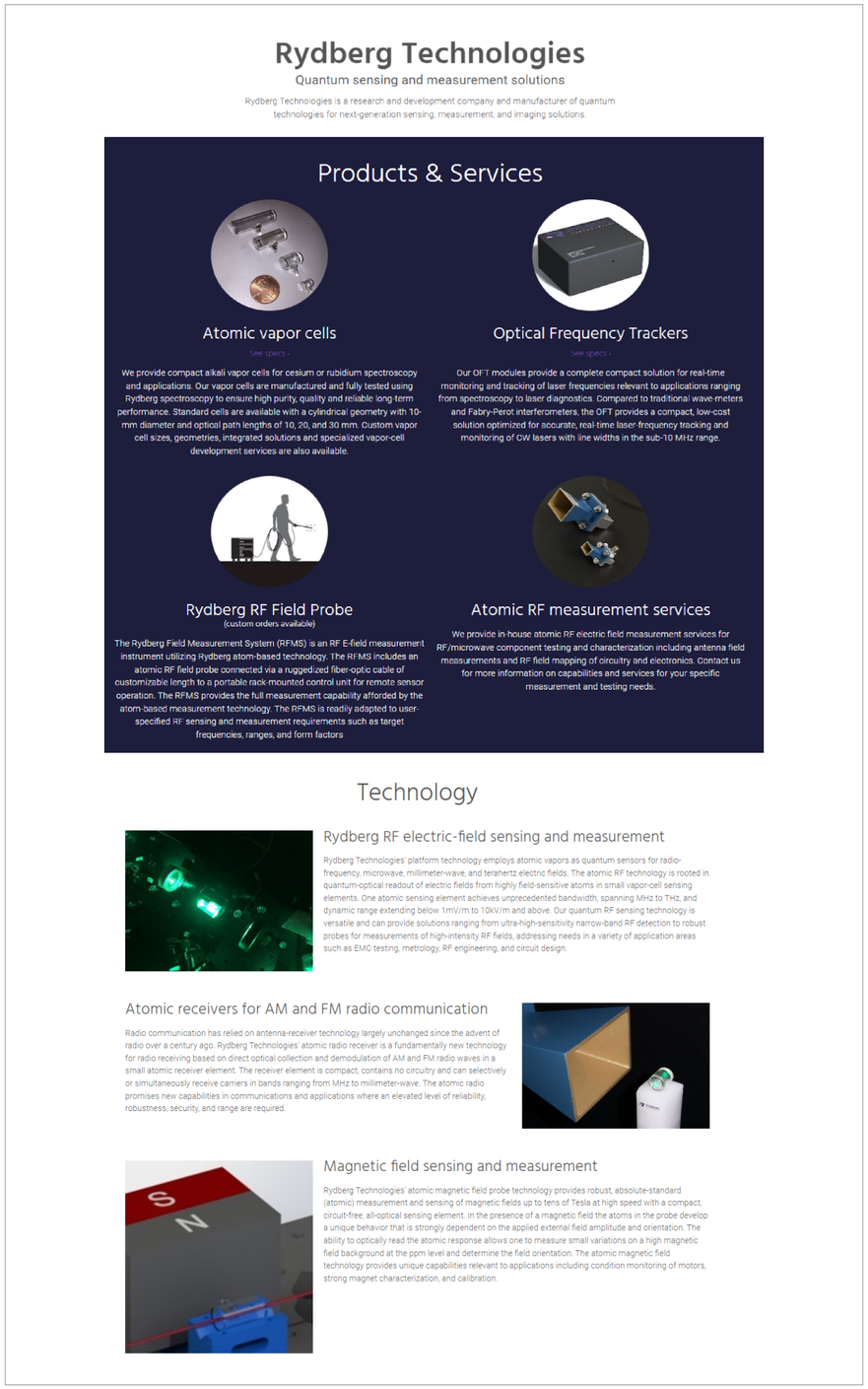
그림 II-2-38 'Army scientists create innovative quantum sensor' 제목의 보도자료 사진[204)]



※ www.army.mil (2020)

⑧ 미국에서는 양자전기장 센서 기술의 상업화를 위해 Rydberg Technologies가 창업했으며, 광섬유 결합 Rb 원자증기셀 등의 관련 부품을 이미 판매 중이다.

그림 II-2-39 미국 Rydberg Technologies사 홈페이지 공개 내용



※ rydbergtechnologies.com

204) www.army.mil/article/233809/army_scientists_create_innovative_quantum_sensor

나. 양자자기장 센서

(1) 기술 동향

그동안 자기장을 정밀 측정하기 위해선 Flux Gate, MEMS 등의 고전 자력계를 활용해야만 했다. 하지만 최근 들어 원자증기셀, 고체 점결함 등의 양자자기장 센서에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 실제 구현 시 상온에서 구동되며, 소형으로 제작할 수 있다는 장점으로 인해 국방, 산업, 의료 등 다양한 분야에서 활용하고자 하는 움직임이 늘고 있다. 양자자기장 센서는 지구자기장 왜곡 측정, 표적 자기장 정밀 측정 등의 국방 분야에서부터 Wearable 뇌자도 이미징시스템, 3차원 MRI 등 바이오, 의료 산업 분야에 이르기까지 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대를 모으고 있다. 해외에서는 미국, 유럽, 중국을 중심으로 기초 연구를 넘어 산업화를 위한 시도들이 진행 중이다. 특히 대기업보다는 대학 연구팀에서 파생된 중소기업과 스타트업을 중심으로 다양한 산업화 연구가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

1) 미국

① 하버드, MIT, 프린스턴, UCSB, IBM, NIST 등 다양한 대학과 연구소에서 원자자력계, 다이아몬드 NV 센터를 이용한 양자자기장 센싱 및 이미징 연구를 수행 중이다.

② 프린스턴 대학은 고압의 버퍼가스 원자증기셀을 이용해 sub-fT 수준의 고감도 원자자기장 양자센싱 기술을 최초로 구현했다. 이를 통해 SQUID센서를 넘어서는 초고감도 자기장 측정 기술을 확보함으로써 뇌자도 측정, 내비게이션 수준의 원자자이로, 폭발물 및 금속 탐지 등의 다양한 연구를 진행하고 있다.

③ NIST는 MEMS 기반 원자증기셀을 이용한 Chip-Scale Atomic Devices로 원자자력계 개발 및 생체자기 측정, 금속 탐지 등 다양한 연구를 진행 중이며, Wearable 뇌자도 시스템 개발의 세계적인 선도 그룹이다.

④ MIT는 다이아몬드 NV 센터를 이용해 다양한 자기장 센싱, 뇌자도가 가능한 소형 NV 자력계 연구를 수행 중이다.

⑤ 하버드 대학은 다이아몬드 NV 센터를 이용해 30nm 수준의 MRI 공간분해능이 가능하다는 연구 결과를 발표했다. 또한 기존 수십 kHz 자기공명(NMR) 분해능을 1Hz 이하로 개선하는 기술과 NMR 신호를 수백 배 이상 증대시킬 수 있는 초분극 기술을 개발했다.

⑥ IBM은 다이아몬드 NV 센터를 이용해 12nm 수준의 공간분해능을 갖는 2차원 MRI 영상 기술을 선보였다.

⑦ Twinleaf는 소형 상용 원자자력계를 개발해 판매 중이다.

⑧ Quspin은 NIST에서 파생된 기업으로, 소형 원자자력계 모듈을 생산 및 판매 중이며 Wearable 뇌자도 시스템 개발에 활용하는 연구를 수행하고 있다.

⑨ Fieldline은 Twinleaf와 Quspin의 경쟁 기업으로 소형 원자자력계 모듈을 생산 및 판매 중이고, MEG 시스템도 판매하고 있다.

⑩ Quantum Diamond Technology는 다이아몬드 NV 센터 기반의 자력계를 이용해 고속으로 바이오 샘플을 검출하는 바이오마커 기술을 개발해 시제품을 선보였다.

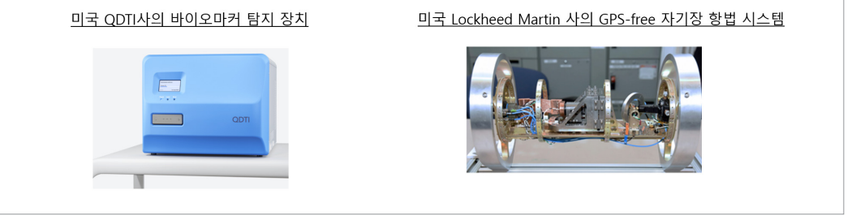
⑪ Lockheed Martin은 다이아몬드 NV 센터 자력계를 이용해 GPS-Free 항법용 자기장 시스템을 개발하고 있다.

그림 II-2-40 미국 기업들이 판매 중인 소형 상용 원자자력계



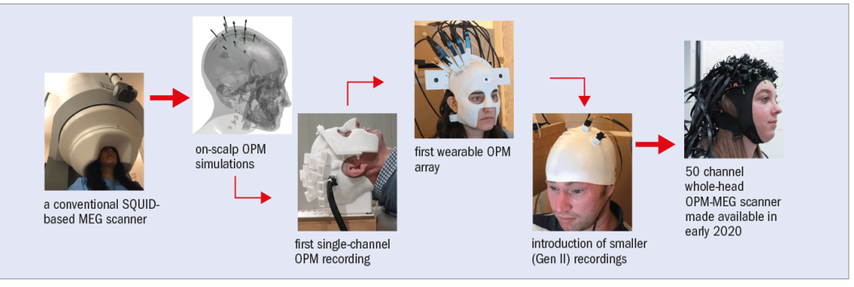
※ quspin.com, twinleaf.com, fieldlineinc.com

그림 II-2-41 다이아몬드 NV 센터 기반의 소형 양자자기장 센서



※ qdti.com, lockheedmartin.com

그림 II-2-42 소형 양자자력계를 이용한 Wearable 뇌자도 이미징 시스템 개발 발전상



※ physicsworld.com (2021)

2) 유럽

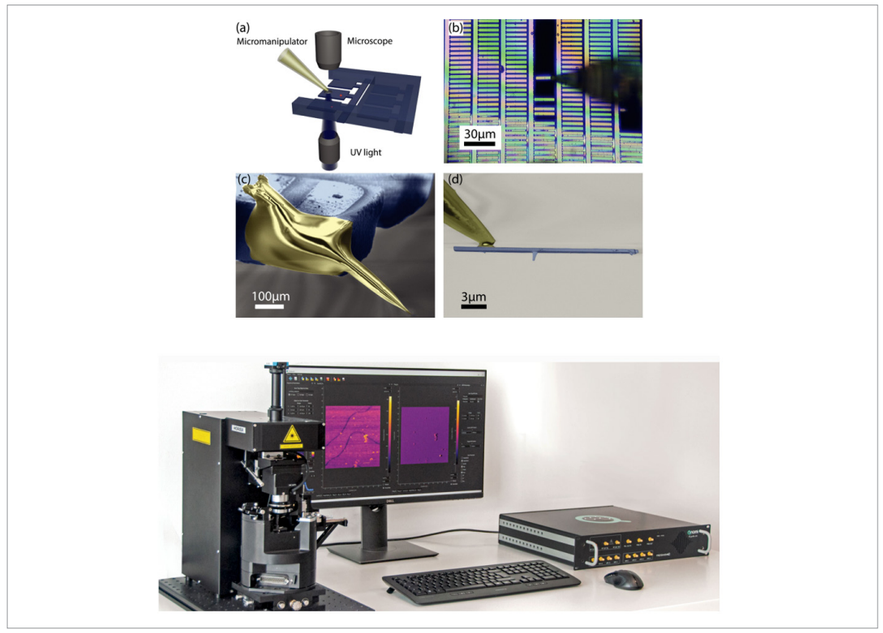
① 영국 Colledge London 대학은 원자증기셀 기반의 자력계를 이용해 능동적 잠수함, 지뢰, 불발탄 탐지 관련 연구를 수행하고 있다.

② 독일 Stuttgart 대학은 단일/앙상블 NV 센터를 이용해 다양한 자기장 센싱 및 이미징 연구를 진행 중이며, 다중 큐비트를 이용한 양자얽힘 및 양자메모리 연구를 수행하고 있는 양자자기장 센싱 분야의 세계적인 그룹이다. 또한 다이아몬드 NV 센터를 이용해 바이오 세포를 수백 nm 수준의 분해능으로 MRI 영상화하는 데 성공했다.

③ 영국 Element Six는 고순도 다이아몬드 생성 및 고감도 NV 센터를 제작해 전 세계에 공급하고 있다.

④ 스위스 Qnami와 Qzabre는 다이아몬드 기반 스캐너 프로브를 제작 및 판매 중이며, 상온에서 구동하는 나노 자기장 이미징 스캐너도 제작해 판매하고 있다.

그림 II-2-43 스위스 Qnami, Qzabre에서 제작 및 판매 중인 다이아몬드 스캐닝 프로브와 나노 자기장 이미징 스캐너



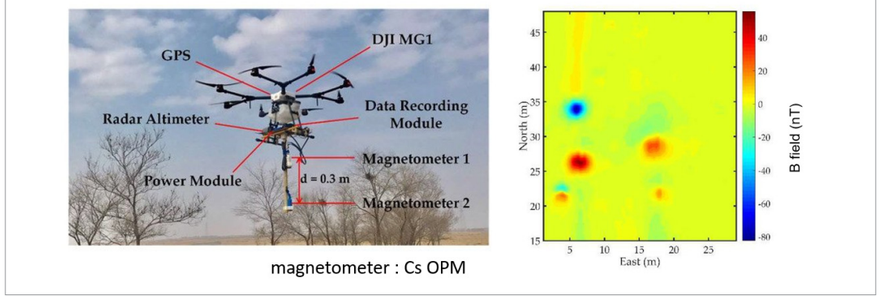
※ qnami.ch

3) 중국

① CAS Key Lab은 다이아몬드 NV 센터를 이용한 민감도 개선, 면역 검정 현미경 등 NV 센터의 자기장 센싱 활용 방법을 연구 중이며, 다양한 양자자기장 센싱 및 이미징 연구를 수행하고 있다. 또한 원자증기셀 기반의 자력계를 이용해 원거리 자기장 탐지, 무인 드론 기반 지뢰 탐지 등을 연구하고 있다.

② CiQTEK은 다이아몬드 NV 센터를 이용해 상온에서 구동하는 나노 자기장 이미징 스캐너를 제작 및 판매 중이다.

그림 II-2-44 원자자력계를 이용한 무인 드론 기반 지뢰 탐지 연구



※ Remote Sensing 12(3), 452 (2020)

그림 II-2-45 중국 CIQTEK의 다이아몬드 NV 센터 기반 나노 자기장 이미징 스캐너

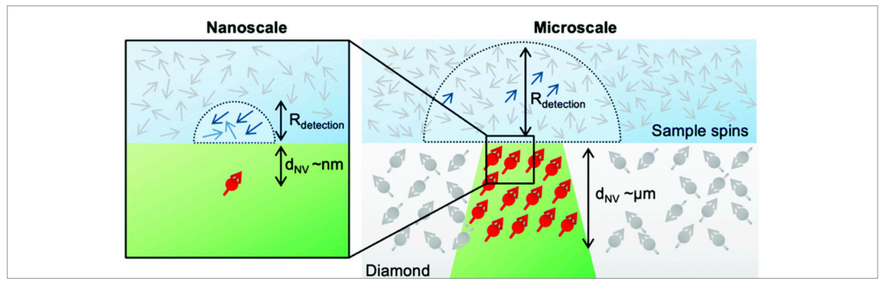


※ en.ciqtek.com

(3) 적용 분야

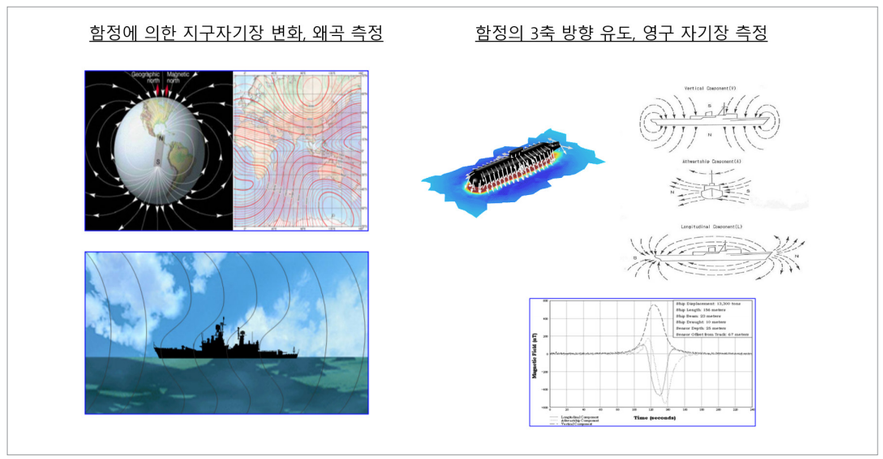
① 원자증기셀 및 다이아몬드 NV 센터 기반의 소형 상온 자력계를 개발해 Wearable 뇌자도 이미징 시스템을 제작하고 이를 의료와 산업 분야에 활용할 수 있다.
② 기존 MRI로 영상화(100μm 수준)가 불가능한 세포·분자의 직접적인 이미징으로 단백질 구조를 영상화할 수 있고, 신약 개발이 가능한 나노/마이크로미터 MRI 연구에 활용할 수 있다.
③ 지구자기장의 왜곡을 측정하고, 표적 자기장 정밀 측정을 통해 국방 분야에 활용할 수 있다.
④ 초정밀, 고분해능 자기장 이미징을 통한 세포 이미징, 바이러스 조기 진단, 바이오마커 탐지 등 다양한 바이오 및 의료 분야에 활용할 수 있다. 또한 반도체와 배터리의 결함 분석 및 소재 특성 파악을 통해 첨단 산업 분야에도 활용할 수 있다.

그림 II-2-46 나노/마이크로미터 양자 MRI 개념도



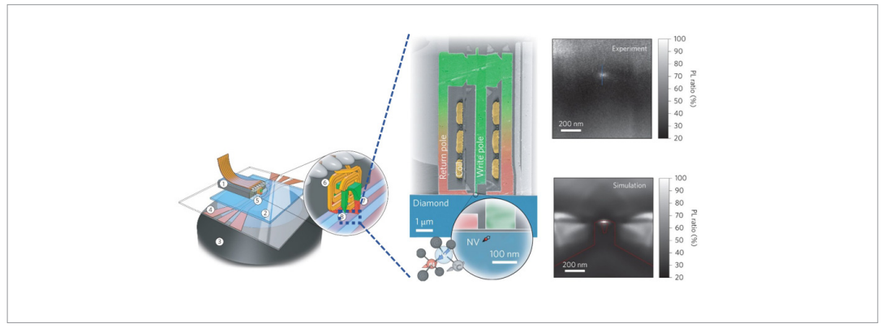
※ Chemical Communications 58, p.8165 (2022)

그림 II-2-47 양자자력계의 국방 분야 활용 예시



※ 한국정보통신학회 18(12), p.3069-3078 (2014), 한국정보통신학회 17(5), p.1253-1258 (2013)

그림 II-2-48 고분해능 양자자기장 이미징을 통해 반도체와 배터리의 결함 분석 및 첨단 산업 활용 예시



※ Nature Nanotechnology 12, p.67 (2017)

4. 양자광학센서

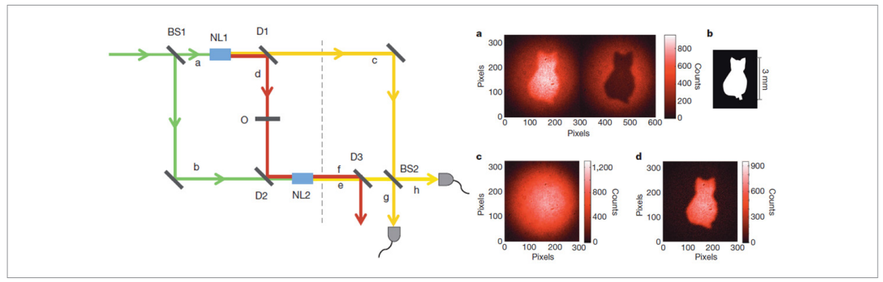
(1) 기술 동향

양자광학센서는 광학적 측정 감도의 한계를 돌파하기 위해 빛의 양자적 성질, 즉 광자의 양자상태 조작 등을 이용한 차세대 기술로써 주목받고 있다. 해당 연구를 기반으로 양자이미지, 양자현미경, 양자 고스트 이미지, 양자OCT 등의 기술로도 응용 연구가 활발히 진행 중이다.

(2) 연구 동향

① 오스트리아 비엔나 대학에서 'Quantum imaging with undetected photons'라는 제목으로 피사체를 투과하지 않은 광자를 이용한 양자이미징 기술을 발표해 많은 관심을 받고 있다.[205)]

그림 II-2-49 양자 고스트 이미징 기술[206)]



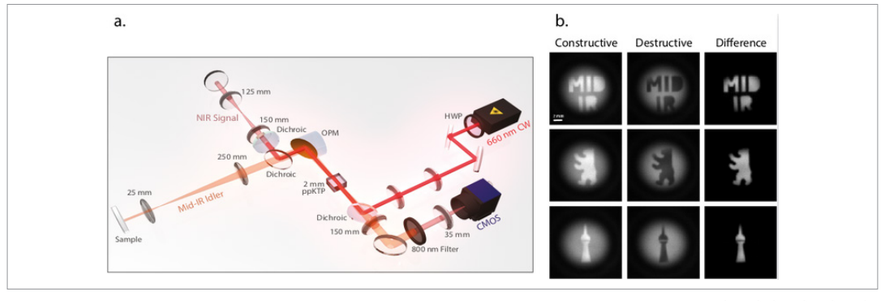
※ Nature 512, 409 (2014)

205) www.nature.com/articles/nature13586
206) Nature (2014)

② 오스트리아 과학기술 연구소는 얽힌 마이크로파를 사용해 세계 최초의 양자레이더 시스템을 개발 중이라고 발표했다. 양자얽힘 원리에 따라 생성된 광자쌍을 이용한 양자조명이라는 프로세스에 의해 거리와 상관없이 정보 획득이 가능하다고 알려져 있다.[207]

③ 독일의 홈볼트 대학은 양자비선형 간섭계 기반 중적외선 영역에서의 이미징에 대한 연구를 수행 중이다.[208]

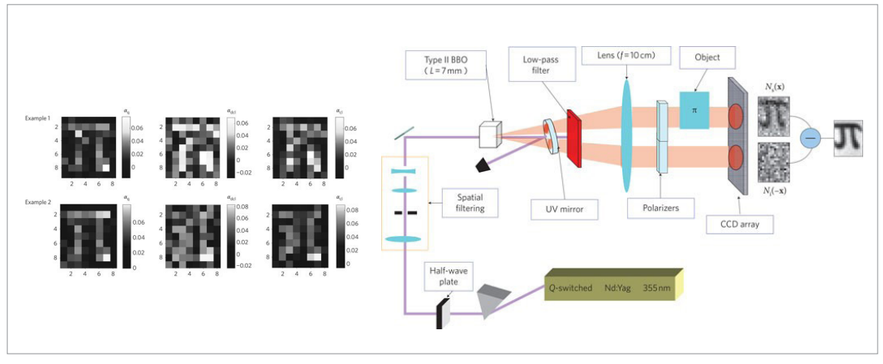
그림 II-2-50 (a) 양자비선형 간섭계 실험 장치도, (b) 근적외선광과 중적외선광의 간섭 이미지



※ physik.hu-berlin.de

④ 이탈리아 INRIM에서 파라메트릭 하향 변환 광원 사이의 양자 상관관계를 활용해 약한 흡수 물체의 서브샷(Sub-Shot) 노이즈 이미징을 실현하는 연구 결과를 2010년에 발표했다. 기존 이미징 방법보다 더 큰 신호 대 잡음비를 달성할 수 있어, 낮은 광자 플럭스 조건의 응용 분야에 이바지할 것으로 예상한다.[209]

그림 II-2-51 (왼쪽) 실험적 이미지, (오른쪽) 실험 장치도

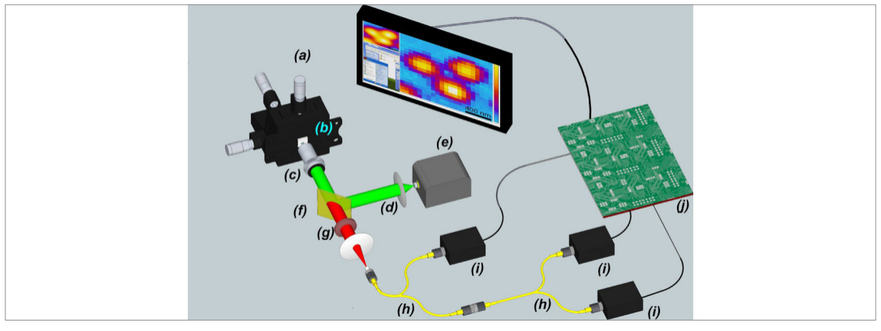


※ Nature Photonics 4, 227 (2010)

207) www.militaryaerospace.com/sensors/article/14039298/quantum-radar-stealth-detailed-image
208) www.physik.hu-berlin.de/en/niqo/research/quantum-imaging
209) Nature Photonics (2010)

⑤ 이탈리아 토리노 대학은 단일 방출체를 피사체로 하는 이미징 시 단일 광자의 상관관계 특성을 이용해 측정시스템을 개발했으며, 이를 통해 2차 상관관계 기반의 이미징을 할 경우, 반치폭이 72% 감소해 분해능이 1.39배 증가할 수 있음을 보여줬다.

그림 II-2-52 단일 방출체 기반 양자이미징 기술[210]



※ Phys & Rev (2014)

⑥ 중국은 우주에서 스텔스 비행기를 탐지할 수 있는 스파이 위성을 만들기 위해 노력하고 있다. 2017년 11월 26일 사우스차이나 모닝포스트에 따르면, 중국과학원 양자광학 핵심연구소 연구국이 위성에서 작동할 고스트 이미징(Ghost Imaging) 센서를 연구하고 있다고 보고했으며, 우주에서 2025년까지 테스트한 후 2030년경에 운영 준비가 될 것으로 기대한다고 발표했다.

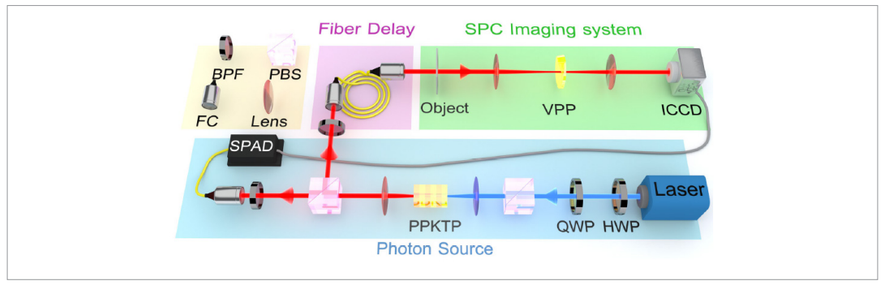
그림 II-2-53 China Says It's Building a 'Ghost Imaging' Satellite to Detect Stealth Jets[211]



210) Phys & Rev (2014)
211) www.thedrive.com/the-war-zone/16488/china-says-its-building-a-ghost-imaging-satellite-to-detect-stealth-jets

⑦ 중국 University of Science and Technology of China 연구그룹은 양자광자쌍 기반 Heralding 이미징 기술을 통해 고전적 광원 대비 53.5% 향상된 이미징 기술을 구현했다.

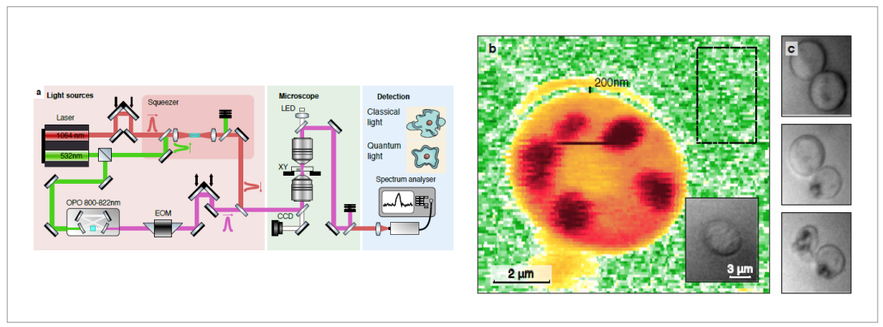
그림 II-2-54 양자 상관관계 기반 이미징 기술[212)]



※ Optics express (2020)

⑧ 호주 퀸즈랜드 대학은 양자압축광을 이용해 샷노이즈 이하의 양자이미징을 구현했다. 양자현미경 이미징 기술을 통해 35% 향상된 신호 대 잡음비를 구현했고, 특히 집속된 높은 광량에 의해 파괴되는 생체 시료 관측에 있어 양자현미경 기술의 중요성을 시사했다.

그림 II-2-55 양자현미경을 통한 생체 시료 센싱 기술[213)]

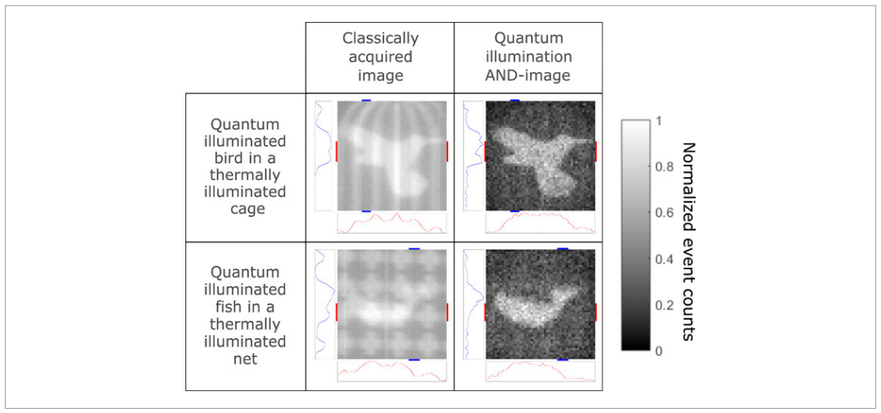


※ Nature (2021)

⑨ 미국의 Air Force Research Laboratory(AFRL)는 광원의 얽힘을 이용해 양자 라이다 기술을 발표했다.[214)]

⑩ 영국 글래스고 대학은 배경 조명 및 센서 노이즈로 인해 발생하는 이미지 대비도 저하를 광자쌍 간의 공간적 상관관계를 이용해 극복하는 양자조명 프로토콜을 제시하며, 양자조명을 사용하는 필드 이미징 시스템을 보고했다. 낮은 광자 플럭스 및 양자 LIDAR에서의 이미징과 같이 배경광 및 노이즈 억제가 중요한 양자이미징에 적용할 수 있다고 밝혔다.[215)]

그림 II-2-56 양자조명 대상 물체 이미지



※ Science Advances 6(6) (2020)

(3) 적용 분야

양자광학센서는 고전적 기술로 구현한 이미지의 해상도를 높여주는 기술이며, 큰 잠재력을 보여주고 있다. 양자라이다와 양자레이더는 원격 물체 탐지 성능을 획기적으로 늘려줌으로써 국방 분야에 유용하게 쓰일 수 있고, 양자가스센싱 기술은 고감도 가스검출이 가능해 산업 안전 분야에 적용할 수 있다. 또한 양자이미징 및 양자현미경 기술은 생체 시료의 고감도, 고분해능 측정이 가능해 의료 분야 및 제약 분야에서의 다양한 활용이 기대된다.

212) Optics express (2020)
213) Nature (2021)
214) Air Force Research Laboratory (2009)
215) T Gregory et al. (2020)

제3절 국내 양자센서 R&D 동향

1. 양자관성센서

가. 양자중력센서

(1) 기술 동향

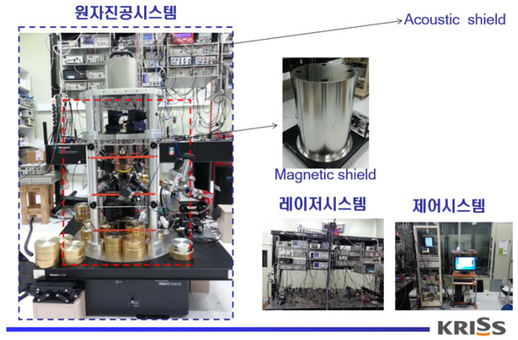
국내에서는 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)을 중심으로 세계 최고 수준의 원자간섭계 기반 양자중력센서 연구가 수행되고 있다. KRISS, KIST, 나노종합기술원, 전남대 등의 연구팀은 세계 최고 수준의 고감도 양자중력센서를 개발하는 연구수행 중이며, 여러 분야에서의 활용도를 높이기 위해 양자중력센서 소형화 연구도 함께 진행하고 있다. 중력지도 작성 및 중력 항법, 자원 탐사 등을 위한 '탑재형 양자중력센서' 개발, 화산 및 지진 감지를 목적으로 야외 현장에 적용할 수 있는 '현장용 양자중력센서' 개발을 위해 집중적인 투자와 독려가 필요한 실정이다. 한편 최근에는 원자간섭계 기반의 양자중력구배 센서 연구도 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 양자중력구배 센서를 중력센서와 같이 사용할 경우, 중력지도 및 중력 항법, 지하 구조물 및 자원 탐사 등의 정확도를 높일 수 있기 때문이다. 또한 도심 지하 구조물의 위치 및 변형, 지하수 변화 및 이로 인한 싱크홀 발생 등의 감지에 활용도가 높아, 국내에서도 양자중력구배 센서 개발 연구의 필요성이 날로 커지고 있다.

(2) 연구 동향

① 2009년부터 2014년까지 KRISS, 국방과학연구소(Agency for Defense Development, ADD), 명지대, 교원대, 고려대 등에서는 양자관성센서를 위한 원자간섭계 기초 연구 및 관련 연구를 수행했다.

② KRISS는 2011년부터 원자간섭계 기반 양자중력센서의 개발 연구를 시작했다. 또한 2019년부터 2022년까지 지원된 '양자센서 핵심 원천기술 개발 사업'을 통해, 이동이 가능한 양자중력센서 구현을 위한 핵심기술과 소형화를 위한 기초 원천기술 연구를 수행하고 있다. 이를 통해 KRISS가 개발 중인 양자중력센서는 세계 최고 수준의 성능을 보여주고 있다.

그림 II-2-57 KRISS에서 개발 중인 양자중력센서



※ kriss.re.kr

그림 II-2-58 KRISS의 양자중력센서 성능 비교표

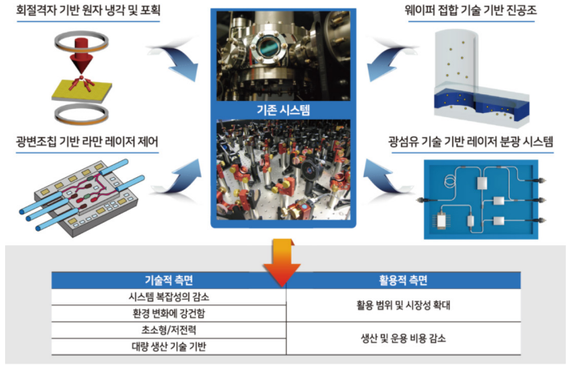
항목 (단위)	프랑스 (SYRTE)	독일 (훔볼트)	미국 (Stanford)	중국 (NIM)	중국 (CNS)	한국 (KRISS)
정확도 (nm/s^2)	50 wavefront	△30 wavefront	30 No wave	△50 wavefront	N/A	<50* wavefront
감도 ($nm/(s^2\ Hz^{1/2})$)	60 vibration	100 vibration	80 vibration	440 vibration	40 detection	67 vibration
정밀도	2 nm/s^2 @1000s	0.5 nm/s^2 @100000s	N/A	2 nm/s^2 @30000s	3nm/s^2 @200s	2 nm/s^2 @1000s
간섭시간 T (ms)	80	260	160	70	300	80
반복률 (Hz)	3	0.7	0.8	1	1	2
방식	자유낙하	원자분수	원자분수	자유낙하	원자분수	자유낙하

* Coriolis effect: 불확도 평가 진행중, 불확도 10 nm/s^2 미만으로 예상

※ kriss.re.kr

③ 양자중력센서의 소형화를 위한 핵심기술 개발 연구를 KRISS, 나노종합기술원, KIST, 전남대에서 공동으로 수행하고 있다. 우선 KRISS와 나노종합기술원은 레이저 냉각시스템의 소형화를 위해 자기-광 포획(grating Magnetic-Optical Trap, gMOT) 연구를 수행했다. 나노종합기술원에서 MEMS 공정을 이용해 Grating을 제작하면, KRISS에서 Grating 평가 및 gMOT 연구를 수행하는 방식이었다. 또한 두 기관은 진공조 소형화를 위해 웨이퍼 접합 기술 기반의 진공조 개발 연구를 함께 수행하고 있다. 한편 KIST와 KRISS는 원자간섭계에 필수적인 라만레이저 시스템의 소형화를 위해 광변조칩 기반의 라만레이저 연구를 공동으로 수행하고 있으며, 전체 레이저시스템 소형화를 위한 광섬유 기반 레이저 분광시스템 개발 연구는 전남대와 KRISS가 함께 수행하고 있다.

그림 II-2-59 양자중력센서 소형화 핵심기술 개념도

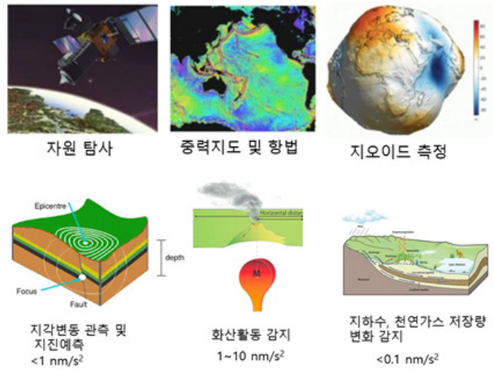


※ kriss.re.kr

(3) 적용 분야

양자중력센서는 주로 우주·국방 분야에 활용할 수 있는 관성항법에 적용이 가능하며, 도심 내 지하 구조물 및 수층 파악과 같은 안전 분야, 화산 및 지진 등의 사전 감지를 통한 자연재해 대비, 위성이나 항공기 또는 선박 등의 운송 수단에 탑재해 자원탐사 등의 광범위한 분야에 활용할 수 있다.

그림 II-2-60 양자중력센서 적용 분야



※ wikipedia.org, asu.cas.cz 등 집필진 작성

나. 양자 가속도센서

(1) 기술 동향

관성항법에 필요한 양자 가속도센서는 원자간섭계 기반의 고정밀 가속도센서와 비교적 정밀도가 높으면서도 소형인 광역학계 기반의 양자 가속도센서로 크게 나눌 수 있다. 원자간섭계를 기반으로 중력, 가속도, 회전속도 등을 측정할 수 있는데, 측정하고자 하는 물리량에 따라 원자간섭계의 구성 및 동작을 다르게 조절한다. 원자간섭계를 적절히 구성해 동작하면 가속도와 회전속도를 동시에 측정할 수 있으며, 이렇게 두 물리량을 동시에 측정할 수 있도록 개발된 양자센서를 양자나침반(Quantum Compass)이라고 부른다. 원자간섭계 기반의 고정밀 가속도센서는 레이저 냉각된 원자를 이용하기 때문에 비교적 크기가 크다. 따라서 위성, 잠수함, 항공기, 선박 등에 탑재해 관성항법용으로 사용하는 것이 주목적이다. 반면 소형의 광역학계 기반 양자 가속도센서는 자동차 같은 비교적 작은 운송 수단에 탑재하거나 휴대해서 사용하기 위한 목적으로 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① 서울과학기술대학교는 기존 MEMS 기반 3축 가속도센서의 노이즈 저감법에 관한 연구를 수행 중이며, ㈜마이크로인피니티는 2021년부터 실리콘 MEMS에 기반한 가속도계 관련 기술 개발을 위해 민군기술협력사업의 지원을 받고 있다. 한편 ㈜유비트로닉스와 나노종합기술원은 무인기에 적용할 수 있는 MEMS 기반 관성센서 소자 기술을 공동으로 개발하고 있다.

② 양자 가속도센서 개발을 위한 양자기여 광역학계의 설계 및 제작 기술 연구는 시작 단계이며, KRISS 등의 출연연과 고려대, 서울대, 건국대 등의 대학이 기초기술 확보를 위해 연구하고 있다.

③ ADD, 고려대, KRISS는 2010년대 초기부터 원자간섭계에 기반한 자이로 개발을 연구 중이다.

④ MEMS 기반의 가속도센서를 활용한 무인 운항체의 관성항법계를 개발하기 위해, 2016년 ㈜파이버프로에서 민군기술협력사업의 지원을 받아 광섬유 기반 자이로스코프 연구를 진행했다.

(3) 적용 분야

양자 가속도센서를 사용함으로써 외부 신호에 대한 의존도를 줄이고 우주, 수중, 사이버 공격, 대기 반사 등의 외부 영향으로 인해 발생할 수 있는 사고를 방지할 수 있다. 향후 항공우주항법, 자율주행, 행성 탐사, 의료 등의 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 보인다.

다. 양자회전센서

(1) 기술 동향

관성항법에 필요한 양자회전센서는 원자간섭계 기반의 고정밀 회전센서(자이로)와 비교적 정밀도가 높으면서도 소형인 양자회전센서로 크게 나눌 수 있다. 앞서 양자 가속도센서 항목에서 기술했듯이, 원자간섭계를 기반으로 가속도와 회전을 동시에 측정할 수 있게 만들면 양자나침반이 된다. 원자간섭계 기반의 고정밀 양자회전센서는 레이저 냉각된 원자를 이용하기 때문에 비교적 크기가 크다. 따라서 위성, 잠수함, 항공기, 선박 등에 탑재해 관성항법용으로 사용하는 것이 주목적이다. 반면 소형의 양자회전센서 중 하나인 원자스핀 자이로(Atomic Spin Gyroscope)는 자동차 같은 비교적 작은 운송 수단에 탑재하거나 휴대해서 사용하기 위한 목적으로 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① 2010년대 초기에 ADD, 고려대, KRISS에서 원자간섭계 기반의 자이로(Gyro, Gyroscope) 개발을 위한 연구가 수행됐으며, 2014년에는 자이로를 구현해 회전속도 측정을 시도했다. 그러나 그 이후부터 현재까지 원자간섭계 기반의 양자회전센서에 대한 후속 연구는 진행되지 않고 있다.

② 2014년부터 ADD를 중심으로 KRISS, 부산대 등에서 원자스핀 자이로 연구를 수행하고 있으며, 바이어스 안정도가 0.2 deg/h인 자이로 시작품을 개발했다. ADD는 자이로의 핵심부품인 제논이 들어간 원자증기셀을 직접 제작하고 있다.[216)]

(3) 적용 분야

양자회전센서를 사용함으로써 외부 신호에 대한 의존도를 줄이고 우주, 수중, 사이버 공격, 대기 반사 등의 외부 영향으로 인해 발생할 수 있는 사고를 방지할 수 있다. 향후 항공우주항법, 자율주행, 행성 탐사, 의료 등의 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

216) Lee et al. (2021), Yim et al. (2022)

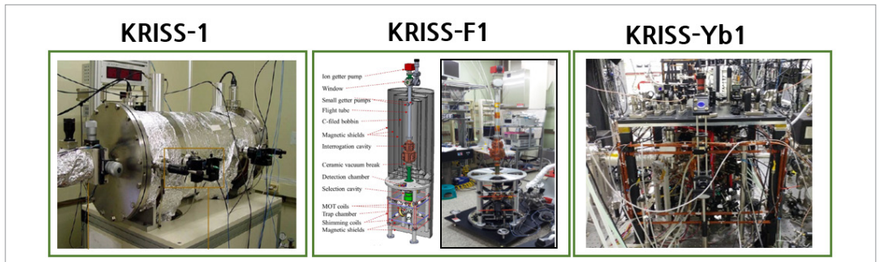
2. 양자시간센서

가. 양자시간센서

(1) 기술 동향

양자시간센서 중 정확도(불확도)가 10^{-14}~10^{-18}인 원자시계를 초고정밀 원자시계로 분류한다. 초고정밀 원자시계는 실험실에서 운영되므로 크기나 소모 전력보다는 높은 정확도를 최우선으로 개발되고 있다. 시간의 정의인 초의 정의 실현, 국가 시간 표준, 기초 연구 등의 목적으로 주로 활용되며, 간접적으로는 우주, 통신, 방송 등의 산업체에서 사용 중인 원자시계들을 교정하는 데 활용하고 있다. 국내에서는 KRISS를 중심으로 전국의 대학들이 협력하며 연구를 진행하고 있다.

그림 II-2-61 KRISS에서 개발한 원자시계



(왼쪽) KRISS의 광펌핑원자시계 KRISS-1, (가운데) 원자분수시계 KRISS-F1, (오른쪽) 광시계 KRISS-Yb1 ※ KRISS

(2) 연구 동향

① KRISS는 30년 이상 원자시계 개발 연구를 수행하고 있으며 광펌핑원자시계, 원자분수시계, 광시계 등을 개발하고 있다.

② 광펌핑원자시계는 1980년대부터 기초 연구를 시작해 2009년 성능평가(불확도 평가)까지 완료했고, 2009년 BIPM(국제도량형국)에 1차 주파수표준기(KRISS-1으로 명명)로 보고했다. 보고된 KRISS-1의 정확도는 1×10^{-14}였으며 주파수안정도 1×10^{-15} @ 1d를 기록했다.

③ 원자분수시계는 레이저 냉각된 원자를 이용하며, 원자의 레이저 냉각 기술은 1990년대부터 KRISS를 중심으로 서울대, 고려대, 부산대, 전남대 등에서 연구하고 있다. 현재 KRISS의 원자분수시계인 KRISS-F1의 정확도는 약 2×10^{-16} 수준이다. 한편 2022년부터는 한국형 항법위성 시스템(KPS)을 위한 원자분수시계 개발 연구에 착수했다.

④ 광시계 연구는 2000년대 초반부터 KRISS를 중심으로 전국의 대학들이 협력해 진행되고 있다. 2021년 KRISS는 정확도 2×10^{-17} 수준의 이터븀 광시계인 KRISS-Yb1을 개발하고 BIPM에 초의 2차 표현 주파수표준기로 보고했다. 광시계 연구는 정확도 10^{-18} 달성을 목표로 계속 진행 중이며, 2022년에는 관성항법 등에 적용할 수 있는 이동형 광시계에 대한 기초 연구가 시작됐다.

(3) 적용 분야

초고정밀 원자시계는 국가 시간 표준, 우주 측지, 지오이드 측정 등의 기초 과학연구에 적용할 수 있다. 또한 우주, 방송, 통신 등의 산업체에서 사용 중인 원자시계들을 교정하기 위해 활용되기도 하며, 한국형 항법위성시스템(KPS)의 지상국 시각시스템 운영에도 적용된다. 한편 이동형 초고정밀 원자시계는 초정밀 관성항법에 필수적인 시각 및 주파수 공급원으로 사용될 수 있다. 이를 활용해 에너지 및 통신과 같은 미래 스마트 네트워크부터 기후 변화 모니터링과 휴대 전화에 이르기까지, 다수의 사용자에게 양자센서 서비스를 제공할 것으로 전망된다.

나. 초소형 원자시계

(1) 기술 동향

양자시간센서 중 크기나 소모 전력이 매우 작아서 다양하게 활용될 수 있는 원자시계를 초소형 원자시계로 분류한다. 초소형 원자시계에는 MMES 기술을 이용한 원자증기셀 및 물리부 제작 기술과 고집적 회로 기술 등이 적용된다. KRISS, 나노종합기술원, ㈜넵코어스 등에서 연구 및 개발됐으며, 최근 KAIST와 KRISS는 초소형 이광자 원자시계와 결합한 On-Chip 기반의 광주파수 합성기를 개발하기 위해 활발한 연구를 진행 중이다.

(2) 연구 동향

① 2014년부터 2020년까지 민군겸용기술개발 과제로 KRISS, 나노종합기술원, ㈜넵코어스 공동으로 초소형 Chip-Scale 원자시계에 대한 개발 연구를 수행했다.

그림 II-2-62 개발된 초소형 Chip-Scale 원자시계

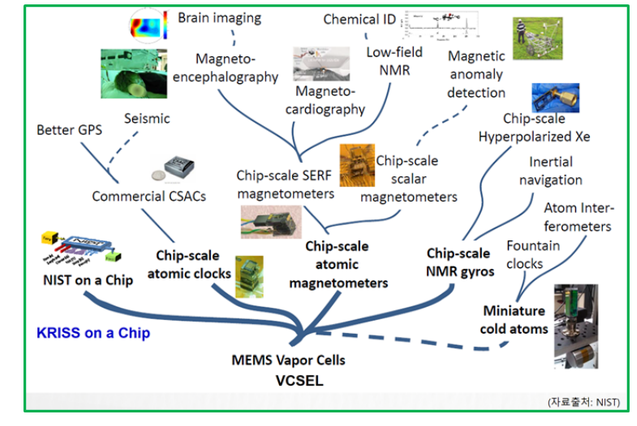


크기 25 cm³, 소모전력 370 mW

※ KRISS, 나노종합기술원, (주)넵코어스

② MEMS 기술을 이용한 초소형 원자증기셀 기술과 VCSEL 기술을 적용했다. 이 기술들은 초소형 자기장, 전기장 등 여러 센서에 적용할 수 있으며, 국내에서 처음 연구해 핵심기술을 확보했다. 이러한 기술들은 국내의 초소형 자기장 센서, 초소형 광파수 합성 기술 연구 등에 활용되고 있다.

그림 II-2-63 Chip-Scale 원자시계 기술의 파급 분야



※ NIST

③ 2019년부터 KAIST와 KRISS의 공동연구팀은 과학기술정보통신부의 과제로서, 고신뢰성 양자센서를 위한 이광자 원자시계와 초소형 광주파수 합성기를 개발 및 연구하고 있다.

(3) 적용 분야

방송, 통신, 자동차, 항법 등 거의 모든 첨단 장비에는 기본적으로 기준 시각 및 주파수 공급원이 내장돼 있으며, 지금까지는 주로 수정발진기나 소형의 고정밀 원자시계가 사용돼왔다. 그러나 크기와 소모 전력을 크게 줄인 초소형 원자시계의 성능이 고정밀 원자시계에 근접함으로써, 최근 수정발진기와 소형 원자시계를 조금씩 대체해 나가고 있다. 한편 산업용 장비, 계측 장비 등에는 여러 가지 센서들이 사용되고 있는데, 이러한 센서들은 주기적으로 교정을 받아야 한다. 이런 경우 이광자 원자시계 기반의 광주파수 합성기 센서를 이용한다면, 자체 교정이 가능할 뿐만 아니라 측정 신뢰도를 높일 수 있다는 큰 장점이 있다.

다. 소형 고정밀 원자시계(위성탑재형 원자시계)

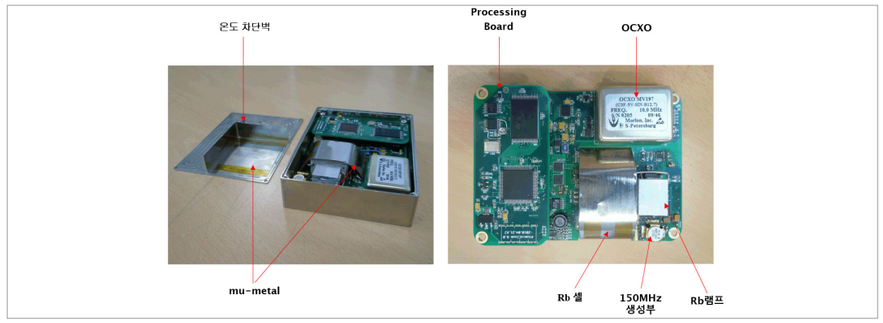
(1) 기술 동향

양자시간센서 중 정밀 장비에 내장하거나 단독 이동이 가능한 크기로 정확도가 10^{-11}~10^{-12} 수준인 원자시계를 소형 원자시계로 분류한다. 소형 원자시계는 1~9cm 크기의 원자증기셀을 이용하며, 광원으로는 원자램프나 다이오드 레이저가 사용된다. KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 소형 고정밀 원자시계 개발 연구를 수행했으며, 최근 KRISS와 ADD는 한국형 항법위성시스템(KPS)의 위성탑재용 고정밀 원자시계 개발 연구를 함께 수행 중이다.

(2) 연구 동향

① 2006년부터 2010년까지 민군겸용기술개발 과제로 KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 소형 고정밀 원자시계 개발 연구를 수행했다.

그림 II-2-64 KRISS와 ㈜넵코어스가 공동으로 개발한 소형 고정밀 원자시계



※ KRISS, (주)넵코어스

② KRISS는 2010년대부터 위성탑재형 원자시계 개발을 위한 기초 및 응용 연구를 수행 중이다.

③ 2022년부터 KPS 위성탑재형 원자시계 개발을 위해 KRISS를 중심으로 ADD 등이 협력해 연구를 수행하고 있다. 원자증기셀 제작은 ADD에서, 전자회로 제작은 산업체에서 담당하고 있다.

④ KRISS는 차세대 위성탑재용 원자시계 개발을 위한 기초 연구를 수행하고 있다.

(3) 적용 분야

방송, 통신, 항법 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있으며, 항법 위성시스템의 위성탑재용으로 활용되고 있다. 우주 산업이 활성화됨에 따라, 우주 분야에서도 고정밀 원자시계에 대한 필요성 및 수요가 증가할 것으로 보인다.

3. 양자 전기장·자기장 센서

가. 양자전기장 센서

(1) 기술 동향

양자전기장 센서의 경우 주로 리드버그 원자 기반의 측정 기술이 개발되고 있으나, 아직 국내에서는 관련된 연구 결과가 거의 없다. 그러나 최근 들어 양자전기장 센서의 중요성이 점점 높아지면서 한국물리학회가 Rydberg Focus 세션을 만들고, 한국센서학회도 양자센서 분과를 만드는 등 관련분야에 많은 관심이 쏟아지고 있다.

(2) 연구 동향

① KRISS와 부산대는 2015년부터 2017년까지 리드버그 원자에 기반한 전자기유도투과 현상을 관측했으며, 마이크로파 대역 및 밀리미터파 대역 RF 전기장의 크기 측정 연구를 수행했다.

② 6G 시대를 대비하기 위한 100GHz 이상 고주파 대역 양자전기장 센서 기반의 전자파 측정연구가 KRISS, ETRI, 부산대 공동연구팀에 의해 2021년 시작됐다.

③ 2016년 부산대학교는 리드버그 원자 분광시스템에서 전자기유도투과 현상 및 Autler-Townes Splitting 주파수를 측정한 결과를 보고한 바 있다.[217)]

(3) 적용 분야

자율주행, IoT, 인공지능 등의 기술을 바탕으로 하는 초연결 시대를 대비하기 위한 고주파 대역의 전기장 측정 기술이며, 관련 시장의 개화 시 급격히 증가하는 무선 통신 시장을 선점할 수 있을 것으로 예상된다. 단일 센서로 광대역의 측정이 가능하고 DC부터 GHz 이하 저주파 대역까지 측정할 수 있어 기존의 대형 안테나 시장을 대체하기 위한 소형화 기술로도 주목받고 있다.

나. 양자자기장 센서

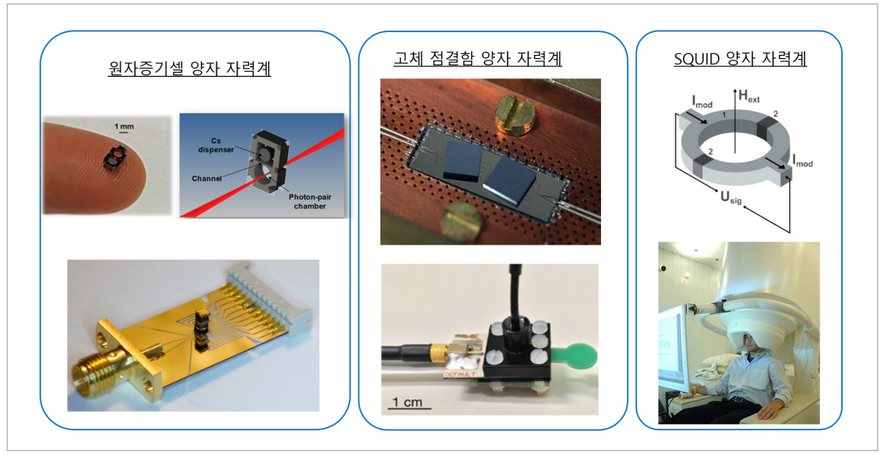
(1) 기술 동향

양자자기장 센서는 서울대, 부산대, GIST, UNIST, 고려대, 한양대 등의 대학교와 KIST, KRISS, ADD 등의 정부출연연구기관을 중심으로 원자자력계, 고체 점결함 자력계, SQUID 등이 활발히 연구되고 있다. 원자증기셀 기반 자력계의 경우 부산대, KRISS, ADD 등이 대표적인 연구기관으로 국방, 산업 분야 등에 자기장 센서를 활용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. pT/√Hz 이하의 높은 민감도

217) Kwak et al. (2016)

를 보여주고 있고, 최근 칩스케일 원자증기셀 제작에 관한 연구도 수행하고 있다. 다이아몬드 NV 센터 기반 자력계의 경우 고려대, 서울대, KRISS, KIST 등이 대표적인 연구기관이며, 단일 NV 센터와 앙상블 NV 센터를 이용해 DC 및 AC 자기장을 정밀 측정하는 연구가 진행 중이다. 단일 NV 센터로는 수십 nT/√Hz 수준, 앙상블 NV 센터로는 수십 pT/√Hz 정도의 민감도를 보여 세계 최고 수준에 근접해 있으며, 최근 소형 자력계 개발 연구도 활발히 진행하고 있다. SQUID의 경우 오랜 연구를 바탕으로 뇌자도/심자도 측정 기술을 기업에 이전할 정도로 높은 수준의 기술력을 보유하고 있으며, SQUID를 활용해 나노미터, 마이크로미터에서 자기장을 이미징하기 위한 연구가 진행 중이다.

그림 II-2-65 양자자기장 센서의 대표적인 예



※ TU Wien, J.Kitching NIST, Felix M et al.(2021), MeSH

(2) 연구 동향

① 원자증기 기반 양자자기장 센서의 경우 국내에서는 KRISS, ADD 등의 정부출연연구기관과 서울대, 고려대, 부산대 등의 대학을 중심으로 10~15년 이상 연구가 진행돼왔다. 다이아몬드 NV 센터 고체 점결함 기반의 양자자기장 센서의 경우 국내에서는 KRISS, KIST 등의 연구기관과 고려대, 서울대, GIST, UNIST 등의 대학을 중심으로 5년가량 연구가 진행되고 있다.

② 원자증기셀을 기반으로 다양한 방식의 원자자력계 개발과 이를 이용한 생체자기 측정, 자기장 통신 등의 연구가 부산대, KRISS, ADD, ETRI를 중심으로 진행되고 있다.

③ 국내 기술 수준은 NV 민감도를 기준으로 봤을 때 많은 발전을 이뤘지만, 다이아몬드 성장, Decoherence, Micro-Fabrication 등의 다양한 연구가 진행되지 못하는 한계를 갖고 있다.

④ 부산대는 민감도 200 $fT/Hz^{0.5}$ 수준의 원자자력계 기술을 확보하고, ETRI와 함께 원자자력계를 이용한 자기장 통신 연구를 진행하고 있다.

⑤ 부산대, KRISS, ADD 등에서는 초자, MEMS 기반의 소형 원자증기셀 제작을 진행 중이며, 이를 통해 산업화가 가능한 소형 자력계를 개발하고자 연구하고 있다.

⑥ KRISS는 2x2x1.5mm^3 수준의 칩스케일 원자증기셀 제작 기술을 확보했고, 이때 민감도는 300 $pT/Hz^{0.5}$ 수준이다.

⑦ 고려대는 단일 NV 센터와 앙상블 NV 센터를 이용해 나노미터에서 마이크로미터까지 자기장 이미징 연구를 수행하고 있다. 단일 NV 센터 기반 수십 nT/√Hz 수준의 자기장 민감도를 보여줬고, 최근에는 다중 스핀 큐비트를 활용한 민감도 극대화 연구를 진행하고 있다. 한편 앙상블 NV 센터를 이용해 cm 크기의 소형 자력계를 개발했고, LG전자와의 협업을 통해 이를 산업 및 의료 분야에 활용할 수 있는 연구를 진행하고 있다.

⑧ KRISS는 다이아몬드 NV 센터를 이용해 DC-자기장 민감도를 60 pT/√Hz 또는 30 nT/√Hz·㎛²으로 보여줌으로써 세계 최고 수준의 기술력에 근접했음을 알 수 있다.

⑨ GIST, UNIST는 다이아몬드 NV 센터뿐만 아니라 SiC 내 점결함을 이용한 양자자기장 센싱 연구를 수행하고 있다.

⑩ 한국산업기술대학교는 다이아몬드 소재의 국내 개발을 위한 연구를 진행 중이다.

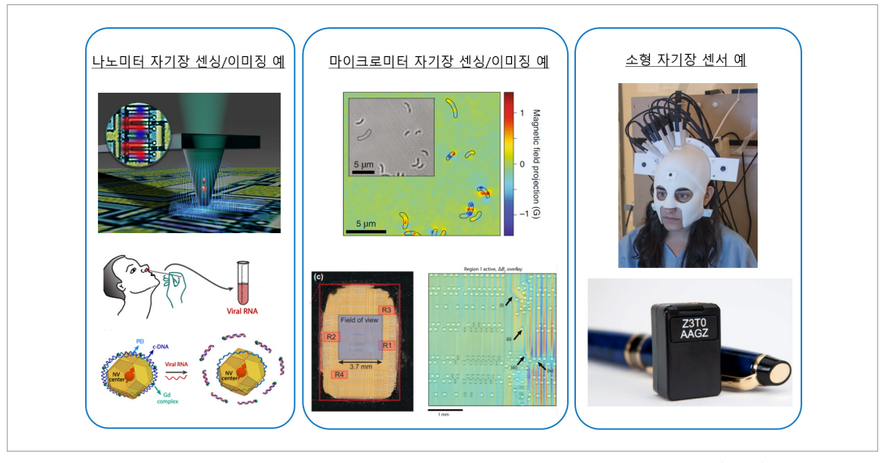
⑪ 원자력연구소는 고체 점결함 생성을 위한 다양한 이온 주입 연구를 진행하고 있다.

⑫ KRISS의 SQUID 기반 뇌자도/심자도 측정시스템을 해외(호주 Compumedics) 및 국내업체(AMCG) 등에 기술이전 해줄 정도로 매우 높은 수준의 기술력을 보유하고 있다.

(3) 적용 분야

정밀 자력계를 이용해 표적에 의한 지구자기장 왜곡이나 표적에서 발생하는 미세 자기장을 측정함으로써, 국방탐지 분야에서부터 산업 안전 분야에 이르기까지 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 예상된다. 또한 소형 상온 자기장 센서 어레이를 제작해 헬멧 형태의 Wearable 뇌자도 이미징 디바이스로 만들면 뇌 진단 같은 의료 분야에서부터 가상현실 등의 BCI(Brain Computer Interface)를 활용한 다양한 산업 분야에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 고민감도, 고분해능 자기장 이미징이 가능한 고체 점결함 기반의 자력계를 활용해 나노미터, 마이크로미터 영역에서 발생하는 미세 자기장 신호를 이미징할 수 있다. 이를 통해 극소량의 샘플만으로도 바이러스, RNA를 측정해 질병 및 감염의 조기 진단을 가능하게 하고, 단백질의 3차원 구조분석 및 나노/마이크로미터 수준의 NMR 측정과 MRI 이미징을 가능하게 하는 등 다양한 바이오 및 의료 분야의 기초 연구에 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 그뿐만 아니라 고분해능 자기장 이미징은 첨단 산업의 결함 분석 및 소재/물성 특성 파악에 활용할 수 있다. 예를 들어 반도체나 배터리의 미세 영역에서 발생하는 결함을 정밀 진단해 공정 수율을 높이는 등 첨단 산업에서의 활용도 기대하고 있다.

그림 II-2-66 양자자기장 센서 활용 예시



※ Fraunhofer IAF, Sage et al. (2013), quspin.com

4. 양자광학센서

(1) 기술 동향

양자광학센서는 양자광원의 양자이득 특성을 이용한 센싱 기술이며 양자이미징, 양자현미경, 양자분광학, 양자가스센싱, 양자라이다 등 다양한 분야에서 활발한 연구가 이뤄지고 있다. 기존의 광학센서는 고전 광원을 이용하기 때문에 분해능 한계, 감도(Shot-Noise) 한계가 근본적으로 존재하는 반면, 양자광학센서는 고전 계측 기술의 한계를 뛰어넘는 고분해능, 고감도 계측을 가능케 한다. 양자광학센서는 양자광원을 이용하기 때문에 고품질의 양자광원 생성 및 제어 등 양자광원 기술 파트와 양자이미징, 양자현미경 등 센싱 시스템 기술 파트로 나눌 수 있다. 양자광원 기술의 경우 자발매개하향변환, 자발사광자혼합 등 비선형 기반 양자광자쌍 기술은 KRISS, ADD, ETRI, 포항공대, 부산대 등이 광원 생성 기술을 갖고 있으며, 이를 활용한 양자광학 연구를 활발히 진행 중이다. 원자증기셀 기반의 양자광원 기술은 부산대, KRISS가 대표적인 연구기관이며, 단일 방출체 기반의 양자광원 기술은 UNIST, ETRI, KIST, KAIST에서 반도체 양자점, 점결함을 이용한 확정적 양자광원 생성, 광섬유 결합을 통한 고효율 광원을 확보하기 위해 활발히 연구하고 있다. 국내 연구기관에서 다양한 플랫폼으로 양자광원의 기술 개발이 이뤄지고 있는 것에 반해, 양자광학센싱 시스템 기술은 상대적으로 뒤처지는 상황이다. 최근에는 비선형 기반 양자광원 기술을 이용해 고전적 감도 한계 이상의 특성을 가지는 양자현미경, 양자 고스트 이미징 기술 등의 시도가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

① 부산대는 원자앙상블에서 생성된 고품질 양자얽힘 광원 개발에 성공해, 독보적인 플랫폼을 확보했다. 고품질 양자광원을 이용한 양자얽힘 교환 실험에 성공함으로써 장거리 양자통신의 가능성을 보여줬으며, 원자앙상블에 기반한 양자광원으로 유도 결맞음 연구를 수행하고 최초로 구현한 바 있다. 이 결과는 향후 양자이미징, 분광 기술 개발에 활용될 것으로 기대되고 있다.

② ETRI는 단일 방출체 기반의 양자광원 기술, 비선형 기반 양자광자쌍 기술 등을 확보하고 있다. 최근 정부 연구과제를 통해 양자이미징 및 양자현미경 연구를 수행 중이며, 비선형 기반 양자광원 모듈 연구와 함께, 고전 광학 감도(Shot-Noise) 한계를 뛰어넘는 계측이 가능한 양자이미징 연구를 수행하고 있다. 생체 조직 측정 등 실제로 활용이 가능한 양자현미경 개발 연구를 수행 중이다.

③ UNIST, KIST, ETRI, KAIST 공동연구 그룹은 반도체 양자점을 이용한 단일 방출체 기반 양자광원 연구를 수행하고 있다. 최근 정부 주관 연구과제를 통해 가시광 파장뿐만 아니라 통신대역 적외선 파장 대역에서 고효율의 확정적 양자광원 생성 연구를 수행하고 있으며, 다양한 양자기술에 활용이 가능하도록 소자 모듈화를 위한 연구를 수행하고 있다.

④ 양자광원의 하나인 압축광을 활용해 고전 광학의 한계를 뛰어넘는 고감도 중력파 검출이 가능함이 알려져 있다. KAIST와 한국천문연구원에서 양자광원을 이용해 중력파를 검출하기 위한 기초 연구를 수행 중이다.

⑤ ADD는 양자 원격 탐지 관련 양자레이더 개발 및 얽힌 광자의 송수신에 관한 연구를 수행하고 있다. 원격 물체 탐지를 위해 광학 레이더를 위한 양자조명 연구, 광원 파장 변환 연구, 고스트 이미징 연구 등을 수행 중이다.

(3) 적용 분야

양자광학센서는 양자이미징, 양자현미경, 양자분광학, 양자가스센싱, 양자라이다 등 다양한 분야에서 활용할 수 있다. 고감도, 고분해능 측정이 가능한 양자현미경 기술은 생체 시료 측정 등 의료 및 제약 분야에 적용할 수 있으며, 반도체 결함 검사 등 산업 분야에도 적용할 수 있다. 양자가스센싱 기술은 고감도 가스 누출 탐지가 가능해 산업 안전 분야에 적용할 수 있다. 원격 물체 탐지 특성 향상이 가능한 양자 고스트 이미징, 양자라이다 기술은 국방 분야에 적용이 기대된다. 한편 양자광학센서를 구현하기 위한 양자광원을 확보하기 위해서는 관련 검출기 기술이 필요한데, 검출기 기술은 극미량의 광자를 측정하기 위한 시장으로 응용될 수 있다. 현재 양자광학센서 기술은 실험실 수준에서 구현된 초기 연구 단계에 있으며, 최근 해당 기술들이 빠르게 성숙함에 따라 의료, 산업, 안전, 국방 분야 등에서 다양하게 적용될 것으로 전망된다.

제4절 시사점

최근 국가적으로 양자센서에 대한 정의 및 분류 작업을 하는 동시에, 국가적인 양자기술 로드맵을 작성하고 있다. 이전에도 양자기술에 대한 로드맵이 작성된 적이 있지만, 당시와는 달리 국가 전략기술 확보 및 첨단 양자산업의 경쟁력 확보 차원에서 광범위하고도 체계적으로 이뤄지고 있다. 예를 들어 양자이미징 기술은 아직 실험실 수준에서 개념 구현 단계에 머물러 있지만, 최근 들어 세계 여러 연구그룹에서 실용적인 고스트 이미징 기술과 양자현미경 기술 등을 발표하고 있어 점차 실용적 양자광학센서가 가시화되고 있다. 이에 반해 국내 연구그룹은 다양한 플랫폼 기반의 양자광원 기술을 많이 발전시켰으나, 양자이미징과 양자광학센서에 대한 연구는 상당히 부족한 상황이다. 이처럼 세계적인 흐름과 국내 실정을 제대로 파악해 이상적인 로드맵을 작성함으로써, 양자산업에서의 국가 경쟁력 확보에 이바지할 수 있다.

양자센서 R&D 동향 관련 몇 가지 시사점을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 세계 각국은 양자센서 기술을 국가 전략기술로 보호하고 세계 시장에서의 독점력 확보를 위해 노력하고 있다. 이러한 국제 환경을 고려할 때 양자센서 기술 확보는 국가의 미래를 좌우하는 매우 중요한 요소이므로, 국가 차원에서 체계적으로 양자센서 기술 연구를 지원해야 한다. 둘째, 세계 주요국에서 진행하고 있는 양자센서 관련 R&D와 비교하면, 국내 양자센서 관련 연구비 규모나 연구 분야가 매우 부족한 상황임을 알 수 있다. 국가의 장기적인 안목으로 양자센서 기술을 위한 체계적인 연구지원, 인력 양성 등의 시스템 구축이 필요하다. 셋째, 양자센서 기술은 기존 한계를 극복하기 위한 새로운 기초 연구와 더불어 고난도의 축적된 양자기술이 요구된다. 이러한 축적된 양자기술들은 단기간에 획득할 수 없으며 오랜 기간의 연구와 경험이 필요하다. 이를 위해서는 단발성의 양자센서 과제 지원이 아닌 장기적인 일련의 다단계 양자센서 사업이 요구된다. 넷째, 양자산업화에 필요한 다양한 부품 공급망 및 양자지원기술에 대한 기업들의 요구사항을 고려할 때, 반도체 기술, 레이저 기술, 소재 기술, 전자측정 기술 등 다양한 기존 기술의 고도화가 필요하다. 마지막으로 양자센서 산업 활성화를 위해서는 산·학·연 간의 공동연구, 기술 및 정보 교류, 인력 교류 등이 활발해질 수 있도록 적절한 환경 조성이 필요하다. 이러한 점들을 장기적으로 기획해 제대로 실행한다면 의료 제약, 산업 안전, 국방 분야 등에 다양하게 적용돼 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 전망된다.

제3장 국내외 양자컴퓨팅 R&D 동향

제1절 개요

기존 컴퓨터 시스템에서 통용되던 무어의 법칙(Moore's law)은 한계에 도달했고, 양자컴퓨팅은 그 한계를 넘어서는 새로운 컴퓨팅 방식을 우리에게 제시하고 있다. 양자컴퓨팅은 양자이론의 법칙을 따르는 미시세계의 물리시스템을 활용해 실제 구현할 수 있으며, 양자원리를 바탕으로 계산을 수행함으로써 기존 컴퓨팅에서 불가능하다고 여겨졌던 연산을 수행할 수 있다. 대표적인 예로 현재 컴퓨팅에서 어렵다고 여겨지는 소인수분해 문제를 양자컴퓨팅은 손쉽게 해결한다. 이러한 양자컴퓨팅 능력을 잘 활용한다면 국방, 금융, 의료, 인공지능 등 다양한 첨단산업에서 엄청난 경제·사회적 효과를 기대할 수 있다. 따라서 세계 주요 국가들은 정부 주도의 R&D 투자를 통해 발 빠르게 대응 중이며, 민간 부문 투자와 산·학·연의 연구개발도 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 본 백서는 이러한 양자컴퓨팅 R&D 현황에 대한 이해를 돕기 위해 양자컴퓨팅을 구현하는 하드웨어 기술을 중심으로 국내외 R&D 동향을 살펴보고자 한다.

양자컴퓨팅은 큐비트(Qubit)의 물리적 근원에 따라 다양한 플랫폼 영역에서 구현되며, 양자컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어는 양자중첩상태를 유지하는 결맞음 시간(Coherence Time) 내에 연산 가능 횟수를 증대시키는 방향으로 발전하고 있다. 또한 양자컴퓨팅의 역사는 수십 년간 지속된 이론적 검증과 실험적 증명을 거쳐 명확한 목표를 가진 실용화 및 범용화 단계에 이르렀고, 이를 구체화한 '확장형 양자컴퓨터'를 개발하려는 노력이 전 세계적으로 진행 중이다. 현재 개발 중인 양자컴퓨팅은 플랫폼에 따라 각각의 특성이 명확하며, 다음과 같이 크게 여섯 종류로 구분할 수 있다.

첫째, 초전도 큐비트 기반의 양자컴퓨팅 플랫폼이다. 초전도는 전자빔 및 포토리소그래피, 식각 공정 등과 같은 기존에 확립된 반도체 공정을 이용해 제작할 수 있어, 확장성이 높아 현재 가장 주목받는 양자컴퓨팅 플랫폼이다. 다른 플랫폼이 이온, 원자 등의 에너지 준위가 정해진 순수한 양자상태를 이용하는 것과 달리, 초전도 큐비트는 양자상태의 에너지 준위를 '설계'할 수 있어 원하는 작동 주파수 대역을 정의 가능한 장점이 있다. 초전도 큐비트는 회로의 구성 요소 및 배열에 따라 전하(Charge) 큐비트, 위상(Phase) 큐비트, 플럭스(Flux) 큐비트, 트랜스몬(Transmon) 큐비트, 플럭소니움(Fluxonium) 큐비트 등 다양하게 구분되며, 각각의 장단점이 명확하므로 개발에 참여한 기업들도 저마다 다른 플랫폼을 채택해 양자컴퓨터를 구축하고 있다.

두 번째로 소개할 양자컴퓨팅 플랫폼은 반도체 양자점이다. 전계효과 트랜지스터와 흡사한 반도체 소자의 게이트 구조로 에너지 우물을 형성하고, 그곳에 갇힌 전자나 홀 같은 입자의 스핀 상태를 큐비트 에너지 준위로 사용하는 방법이다. 스핀 자유도와 전하 자유도의 혼합 정도에 따라 단일전자 스핀

큐비트(큐비트당 1개 양자점), 싱글렛-트리플렛 큐비트(큐비트당 2개 양자점), 교환 상호작용 큐비트(큐비트당 3개 양자점) 등으로 구분할 수 있다. 높은 게이트 충실도를 시연하기까지 다른 플랫폼에 비해 오랜 기간이 소요됐지만, 최근 스핀 잡음을 최소화한 동위원소 정제형 실리콘 기판의 개발과 함께 급격히 발전하고 있는 플랫폼이다. 실리콘 내부 스핀의 높은 결맞음 시간뿐 아니라 높은 충실도의 단발 측정이 가능하고, 큐비트 계의 양자제어를 위한 파라미터를 게이트 전압으로 쉽게 조절할 수 있는 특징을 가진다. 특히 모든 플랫폼 중 현대 반도체 산업의 상보성 금속산화물 반도체(Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) 공정과 가장 높은 호환성을 보여, 향후 대규모 집적형 양자프로세서 제작 과정에서 70년 이상 발전해온 실리콘 산업공정을 그대로 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다.

셋째, 이온 트랩 기술이다. 이온 트랩은 레이저 쿨링 및 전자기적인 포텐셜을 이용해 초고진공하에서 개별 이온들을 포획하는 방법으로, 포획된 이온들의 잘 정의된 양자상태를 큐비트로 규정하고, 외부에서 레이저나 라디오파로 큐비트를 조작해 양자계산을 구현하는 기술이다. 포획된 개별 이온들은 외부 환경과 잘 분리되어 있으므로 긴 양자결맞음 시간을 가지며 초기화, 측정, 양자게이트 각각에 대한 높은 신뢰도를 보여주는 장점이 있다. 또한 포획된 이온 간에 공유하는 양자운동을 활용해, 임의의 두 큐비트 간 고신뢰도 양자얽힘도 가능하므로 상호 연결성이 높으며, 이는 이온 트랩 기반의 양자컴퓨터가 가지는 중요한 장점이다.

넷째, 양자광학에 기반한 컴퓨팅이다. 양자광학은 빛을 구성하는 근본적 단위인 광자를 이용해 광학 현상을 설명하는 이론이며, 광자는 한자리에 고정된 다른 물리계와 달리 멀리 보낼 수 있어 흔히 플라잉(Flying) 큐비트라고 부른다. 이러한 특성은 양자통신이나 양자네트워크에 적합해, 이를 이용한 양자컴퓨터/양자 시뮬레이터의 확장성 제고에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다. 또한 광자시스템 자체를 양자컴퓨터나 양자 시뮬레이터에 이용할 수 있는데, 이 경우 주변환경과의 상호작용으로 인한 결잃음(Decoherence)에 강인한 특성이 큰 장점이 된다. 이러한 양자광학 기반의 양자컴퓨터를 구성하기 위해선 양자광원의 생성, 제어, 검출이 필요하다. 이와 관련된 기술은 지난 수십 년간 크게 발전했으며, 최근에는 기존 슈퍼컴퓨터로 불가능했던 연산을 양자광학 기반 양자 시뮬레이터를 이용해 가능케 한, 이른바 '양자이득 실험'을 성공하기에 이르렀다. 이처럼 급격하게 발전하는 집적광학 기술을 양자컴퓨터/양자 시뮬레이터에 적용하기 위한 연구가 널리 진행되고 있으며, 이는 양자컴퓨터의 실용성을 크게 높일 것으로 기대한다.

다섯째, 다이아몬드 Nitrogen Vacancy(NV) 센터이다. 긴 결맞음 시간과 잘 정의된 광학 특성으로 인해 양자정보 기술 분야에서 주목받는 소재로 떠올랐다. 다이아몬드 NV 센터를 이용한 컴퓨팅 개발은 소재, 공정, 전자기 신호 처리 및 제어, 광학 회로설계 및 구성과 같이 다양한 분야의 기술들이 접목돼 있다. 먼저 다이아몬드 소재를 양자현상 관찰에 적합한 수준으로 성장시키고, 성장한 다이아몬드 기판의 원하는 위치에 NV 센터를 형성할 수 있어야 한다. NV 센터의 전자스핀과 주변 핵스핀들을 연산에 활용하기 위해 스핀들의 상태를 읽고, 제어하고, 작업에 필요한 시간을 충분히 확보할 수 있도록 결맞음 시간을 확장하는 기술이 필요하다. 덧붙여, 활용 가능한 큐비트의 개수를 늘리고 서로 연결이 가능하게끔 만들어 시스템의 확장성을 늘릴 필요가 있다.

마지막으로 리드버그(Rydberg) 기반의 양자컴퓨팅을 들 수 있다. 중성원자의 리드버그 원자 상태(마이크로미터 크기의 원자 상태)를 이용해 기존 컴퓨터로는 불가능한 고난도 계산을 수행할 것으로 기대된다. 중성원자를 수 마이크로미터 간격으로 이동 배치해 임의의 큐비트 연결 구조로 만드는 기술이 개발되면서 빠른 발전을 보여주고 있다. 양자단열형(또는 양자회로형과 결합한 혼합형) 양자컴퓨팅 방식으로 NP(비결정적 다항)-완전 문제를 계산하는 개념증명 실험이 완료됐고, 상업적 활용을 위한 개발 연구가 본격적으로 이뤄지고 있다.

본 장에서는 앞서 살펴본 양자컴퓨팅의 6개 플랫폼에 대한 R&D 동향을, 해외 및 국내로 각각 구분해 차례대로 서술하고자 한다. 내용 중 해외 R&D 동향을 종합적으로 이해하기 위해 플랫폼의 기술적 측면, 연구개발 현황, 실제 적용 가능한 산업 분야도 아울러 살펴볼 것이며, 국내 R&D 동향도 마찬가지로 기술 동향, 연구개발 및 적용 분야에 대한 분석을 제공하고자 한다.

제2절 해외 양자컴퓨팅 R&D 동향

1. 초전도 양자컴퓨팅

가. 초전도 큐비트

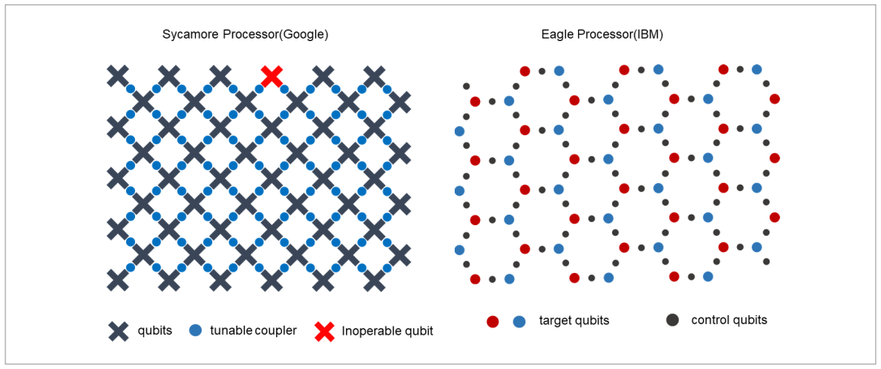
현재 초전도 양자컴퓨터를 개발하는 기업에서 채택한 큐비트 타입은 트랜스몬 큐비트(Transmon Qubit)로, 조셉슨 접합(Josephson Junction)의 에너지 E_J가 축전 에너지 E_C에 비해 50배 이상 크도록 설계돼 전하 잡음에 대한 민감도를 최소화한 큐비트 디자인이다.[218] 작은 축전 에너지를 만들기 위해서는 큰 축전 용량이 있어야 하는데, 이에 따라 축전기의 크기는 조셉슨 접합 전극보다 수십-수백 배가 큰 면적을 차지한다. 트랜스몬 큐비트에서 재미있는 점은 연구그룹마다 다른 축전기 형상을 사용한다는 것이다.

(1) 기술 동향

Google에서 사용하는 큐비트는 존 마티니(John Martinis) 교수가 UC Santa Barbara(UCSB)에 재직하던 시기에 개발된 X-mon이며,[219] 십자가 축전기 형태로 인해 2차원 사각 격자배열로 확장이 쉬워 현재 Google의 시카모어(Sycamore) 양자프로세서에 쓰이고 있다.[220] 이 X-mon은 조셉슨 접합 두 개를 이용해 Superconducting Quantum Interference Device(SQUID)라고 불리는 초전도양자간섭소자를 십자가 형태의 축전기에 연결하는데, 외부에서 수십~수백 ns의 전류 펄스를 인가함으로써, 회로에 자기 플럭스를 국소적으로 변화시켜 큐비트의 작동 주파수를 조절할 수 있는 특징이 있다. 이를 이용하면 이중 큐비트 게이트 구현 시, 인접한 큐비트 중 연산을 원하는 큐비트 두 개만 같은 주파수에 위치시켜 결합을 형성하고 양자연산을 실행하게 해주며, 이 경우 양자프로세서 회로의 레이아웃이 격자 구조로 간단해진다는 장점이 있지만, 각 큐비트 주파수의 국소적 제어를 구현해야 하므로 마이크로파 입력 단자의 수가 많이 필요하다는 단점도 있다.

이와 달리 현재 IBM의 양자프로세서는, 전기적으로 플로팅 된 두 개의 전극이 축전기를 형성하고 둘 사이에 하나의 조셉슨 접합이 위치하는 큐비트 형태를 채택했다.[221] 이 큐비트는 SQUID의 부재로 인해, 내외부 자기장 잡음에 민감하지 않다는 장점과 모든 큐비트의 주파수를 똑같게 만들 수 없다는 단점을 동시에 지녔다. 이러한 주파수가 다른 큐비트 간 양자게이트를 구현하는 방식을 Cross Resonance(CR) 게이트라고 부른다.[222] 이 CR 게이트를 효율적으로 적용하기 위해서는 양자프로세서 내 큐비트 레이아웃 설계가 매우 중요한데, 이를 고려해 IBM은 Heavy Hexagonal Lattice 구조를 채택하고 있다. 이러한 CR 게이트 방식은 큐비트 주파수 조절이 필요 없고, 여러 큐비트의 주파수 조합을 이용해 이중 큐비트 양자게이트를 구현하기 때문에 적은 마이크로파 채널 수로 다수의 큐비트를 제어할 수 있다는 큰 장점을 갖고 있다. 즉 Google의 Sycamore와 같은 마이크로파 채널 수로 Sycamore보다 더 많은 큐비트를 제어할 수 있어 규모 확장성이 좋다. 다만 큐비트 주파수와 공진기의 주파수를 적절히 분포시켜 원하지 않는 큐비트 간 상호작용을 최소화하는 것이 중요하다. 이것은 제작공정에서 발생하는 오차로 인해 실제 작동 주파수와 설계주파수가 다른 탓에 나타나는 현상인데, 최근 IBM은 이 차이를 상쇄하기 위해서 레이저 어닐링(Laser Annealing)을 이용해 조셉슨 접합의 성질을 변화시켜, 제작된 큐비트의 주파수를 설계주파수와 같아지도록 만드는 기술을 개발했다.[223]

그림 II-3-1 (왼쪽) Google의 Sycamore 프로세서 (오른쪽) IBM의 Eagle 프로세서 큐비트 레이아웃



218) Koch (2007)
219) Barends (2013), Chen (2014)
220) Arute (2019)
221) Kandala (2017)
222) Chow (2011)
223) Hertzberg (2021)

(2) 연구 동향

① 트랜스몬 큐비트 성능 향상을 위한 공정 개발 연구

초전도 양자컴퓨팅의 상용화를 위해선 지속적인 성능 향상이 필요하다. 이를 위한 가장 기본적인 방법은 초전도 큐비트 자체의 성능을 향상하는 것이며, 크게 두 가지 방향으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 현시점 초전도 양자컴퓨팅의 대표적 큐비트 플랫폼인 트랜스몬 큐비트 자체의 성능 향상이고, 두 번째는 트랜스몬 큐비트를 넘어선 신개념 큐비트의 개발이다.

초전도 큐비트의 대표적인 성능지표는 결맞음 시간(Coherence Time)이며, 이는 큐비트의 양자상태가 잘 정의된 위상을 유지할 수 있는 시간을 뜻한다. 그렇기에 큐비트의 성능이 좋다는 것은 곧 결맞음 시간이 길다는 것을 의미한다. 결맞음 시간은 큐비트가 들뜬 상태에서 기저 상태로 돌아오는 완화시간(Relaxation Time)을 나타내는 T_1, 결맞음 시간과 큐비트의 결맞음 깨짐 정보를 가진 T_2 두 가지로 구분된다. 트랜스몬 큐비트의 결맞음 시간은 양자프로세서에 쓰이는 기판의 마이크로파 손실 특성, 초전도 물질의 결정 구조 및 결함 특성, 조셉슨 접합 산화막의 화학적 조성 및 접합의 표면 성질 등과 밀접한 연관이 있다. 이러한 특성들은 시스템의 이준위계(Two Level Systems, TLS) 및 초전도 물질의 준입자(Quasiparticles) 등의 거동과 관련이 있다.

단일, 이중 큐비트 및 양자게이트 관련 기초연구 결과들이 보고된 후, 트랜스몬 큐비트의 결맞음 시간 향상을 위한 물질 기반 연구가 활발히 진행되기 시작했다. 질화티타늄(Titanium Nitride, TiN)은 트랜스몬 큐비트의 결맞음 시간을 획기적으로 늘려준 대표적인 물질이다. 질화티타늄은 반응 스퍼터링(Reactive Sputtering) 공정을 이용해 티타늄을 질소와 반응시켜 증착할 수 있게 만들었다. 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST) 및 IBM 연구진은 질화티타늄을 기반으로 마이크로파 공진기를 제작해 100만 이상의 공진기 품위값(Quality Factor)을 구현했고,[224] 공진기 및 큐비트의 축전기 모두 질화티타늄으로 제작된 소자를 이용해 60 μs에 가까운 T_1과 T_2 결맞음 시간을 보고했다.[225] 질화티타늄으로 만든 소자는 알루미늄 소자와 비교했을 때, 메탈-공기층 접합에서 일어나는 유전손실(Dielectric Loss)이 10배 이상 낮다고 보고된 바 있다.[226]

초전도 양자프로세서 제작에 사용되는 대표적인 초전도 물질은 니오븀(Niobium, Nb)으로, 알루미늄과 비교해 높은 임계온도와 임계자기장 값을 갖고 있다. 또한 불소 기반 가스(SF_6, C_4F_8 등)를 이용해 쉽게 건식각 공정이 가능하다는 장점도 있다. 최근 니오븀 양자프로세서의 성능 향상을 위해 니오븀-공기 접합, 니오븀-기판 접합, 니오븀-알루미늄 접합과 같은 소자 내 물질들이 형성하는 접합 면의 표면 특성을 분석하고, 표면에 존재하는 결함을 최소화하기 위한 연구들이 활발하게 진행 중이다.

224) Vissers (2010)
225) Chang (2013)
226) Melville (2020)

2019년 Rigetti는 초전도 양자프로세서 제작공정에서 위에 언급된 다양한 공정을 테스트하고 최적화를 수행한 결과, 평판 회로 구조에서 최대 110μs의 T_1 결맞음 시간을 기록했다고 보고한 바 있다.[227] 초전도 큐비트의 결맞음 시간에 향상을 준 공정은 실리콘 기판을 헥사메틸디실라잔(Hexamethyldisilazane, HMDS)에 노출하는 것(니오븀-기판 접합 성질 향상), 경사진(Tapered) 니오븀-실리콘 에칭 형상(니오븀-공기, 기판-공기 접합 성질 향상), 조셉슨 접합 알루미늄과 니오븀 축전기 전극 간 공통접합 면의 크기 조절(니오븀-알루미늄 접합) 등이 있다. 최근에는 니오븀-공기 접합 면에 존재하는 니오븀 산화막을 다양한 표면 분석 기법을 이용해 조사하고, 표면 특성과 큐비트, 공진기 성능을 분석하는 기초 연구도 학계에서 활발히 진행 중이다.[228]

한편, 초전도 양자컴퓨팅 분야에서 최근에 주목받기 시작한 대표적인 물질로 탄탈륨(Tantalum, Ta)을 들 수 있다. 2021년 프린스턴대학교가 발표한 연구에서는 탄탈륨을 이용해 최대 300 μs, 평균 230 μs의 T_1 결맞음 시간을 기록했다고 보고된 바 있다.[229] 이는 니오븀 기반 트랜스몬 큐비트와 비교해 최대 10배에 달하는 큰 값이며, 최근 북경양자정보과학원이 제작한 탄탈륨 기반 트랜스몬 큐비트에서 500 μs T_1 결맞음 시간이 측정됨으로서 더 큰 신뢰를 얻고 있다.[230]

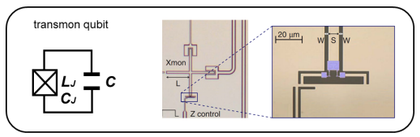
② 신개념 큐비트 연구개발

초전도 큐비트는 회로의 구성에 따라 물리적 특성이 달라지며 저마다의 장단점을 갖고 있다. 현재 초전도 양자컴퓨팅에서 대표적으로 사용되는 트랜스몬은 초전도 큐비트의 시초인 전하 큐비트(Charge Qubit)[231]에서 파생된 형태로, 회로 내 축전 용량이 큰 축전기 사이에 큐비트를 배치해 전하 잡음을 최소화한 형태이다.[232] 전하 큐비트에 대응되는 형태로 플럭스 큐비트(Flux Qubit)가 있는데, 이 플럭스 큐비트는 회로 내에서 시계 방향과 반시계 방향으로 흐르는 전류 상태를 각각 비트로 사용하는 형태이다.[233] 이 플럭스 큐비트는 높은 비선형성과 결맞음 시간을 갖지만, 소자 제작공정의 재현성이 낮아 트랜스몬에 비해 많은 관심을 받지 못했다. 최근 연구에서는 이 플럭스 큐비트를 축전 용량이 큰 축전기 사이에 배치해 비선형성을 줄이고 소자 재현성을 높인 CSFQ(Capacitively Shunted Flux Qubit)를 구현해 50~100 μs의 결맞음 시간을 보고했다.[234] 플럭스 큐비트를 이용해 양자컴퓨팅을 구현하는 기업으로는 양자어닐링 기법을 활용하는 캐나다의 D-Wave가 대표적이다.

227) Nersisyan (2019)
228) Premkumar (2021), Altoe (2022)
229) Place (2021)
230) Wang (2022)
231) Nakamura (1999), Wallraff (2004)
232) Koch (2007)
233) Chiorescu (2003)
234) Yan (2016)

최근 많은 관심을 받는 큐비트 형태는 플럭소니움(Fluxonium)[235] 큐비트로, 현재 트랜스몬 큐비트의 가장 큰 단점인 비선형성을 향상하는 동시에 100 μs 가량의 높은 T_1 결맞음 시간을 달성했다.[236] 플럭소니움 큐비트는 작은 면적의 조셉슨 접합 한 개가 다수의 큰 면적을 가진 조셉슨 접합 배열과 병렬로 만들어진 형태이다. 트랜스몬 큐비트가 큰 축전기와 작은 조셉슨 접합의 조합이라면, 플럭소니움 큐비트는 큰 인덕터와 작은 조셉슨 접합의 조합이라고 볼 수 있다. 이 큰 인덕터를 조셉슨 접합의 배열로 구현해야 하기에 플럭소니움 큐비트는 설계와 제작이 까다롭고, 높은 인덕턴스로 인해 1GHz 정도의 낮은 작동 주파수를 갖고 있지만, 높은 결맞음 시간과 플럭스 잡음의 감소 효과 덕분에 차세대 초전도 양자컴퓨팅 플랫폼으로 주목받고 있다. 최근 연구 결과에서는 3차원 마이크로파 공진기 구조에서 최대 400 μs의 T_2 결맞음 시간이 보고된 바 있다.[237] 2차원 양자회로 구조에서 헤비 플럭소니움(Heavy-Fluxonium) 큐비트를 이용한 단일 큐비트 측정제어 연구 결과도 최근 보고됐는데, 14MHz의 전이 주파수를 갖는 이 큐비트에서 300 μs의 T_1, T_2 결맞음 시간, 97%의 초기화 충실도, 그리고 무작위 벤치마킹 기법을 통해 99.8%의 단일 큐비트 충실도를 기록했다.[238] 축전기로 결합한 이중 플럭소니움 큐비트 소자(72.3, 136.3 MHz의 전이 주파수)에서 이중 큐비트 양자게이트 중 하나인 Controlled-Z(CZ) 게이트의 구현 연구 결과를 매릴랜드 대학 소속 연구그룹에서 발표하며, 99.2%의 CZ 게이트 충실도를 보고함으로써 플럭소니움 기반 양자프로세서 상용화에 한 걸음 더 다가섰다.[239] 해외 기업 중에서는 중국 Alibaba와 미국 Atlantic Quantum이 플럭소니움 큐비트 기반 양자컴퓨터를 개발하기 시작했고, 최근 Alibaba에서 1GHz 정도의 작동 주파수를 가진 플럭소니움 큐비트로 80 μs의 T_1 결맞음 시간, 30 μs의 T_2 결맞음 시간, 99.97%의 단일 큐비트 충실도, 99.72%의 이중 큐비트 충실도를 보고한 바 있다.[240]

그림 II-3-2 (위) 트랜스몬 큐비트 회로도 및 이미지 (아래) 플럭소니움 큐비트 회로도 및 이미지



※ Barends (2013), Nguyen (2019)

235) Manucharyan (2009)
236) Kou (2018)
237) Nguyen (2019)
238) Zhang (2021)
239) Ficheux (2021)
240) Bao (2022)

나. 초전도 양자게이트

(1) 기술 동향

양자게이트는 양자회로를 구성하는 최소한의 연산 단위이다. 만능 논리게이트인 NAND 게이트를 조합해 임의의 논리연산을 구현하는 것처럼, 만능 양자게이트를 조합해 임의의 양자논리연산을 구현할 수 있다. 초전도 양자컴퓨터에서는 만능 양자게이트 세트로 Sqrt-X, PHASE, CNOT, CPHASE, iSWAP 게이트 등을 사용한다.

단일 큐비트 게이트인 Sqrt-X와 PHASE 게이트는 큐비트 주파수 마이크로파의 진폭과 위상 등을 교정해 구동되며, 두 게이트를 조합하면 임의의 단일 큐비트 게이트를 구현할 수 있다. 단일 큐비트 게이트는 대부분의 양자프로세서에서 구현 시, 99.9% 이상의 신뢰도를 보여준다.

2-큐비트 게이트는 큐비트의 주파수 조정 가능 여부에 따라 구현 방식이 다르다. IBM으로 대표되는 고정 주파수 큐비트는 교차 공진(Cross-Resonance) 효과를 기반으로 한 CNOT 게이트와[241] AC Stark-Shift 효과를 기반으로 한 CPHASE 게이트를 주로 사용한다.[242] 이러한 방식으로 구현한 2-큐비트 게이트 신뢰도는 최근 99.81%까지 보고됐다.[243] 한편 Google로 대표되는 주파수 변환 큐비트는 하나의 큐비트 에너지 레벨을 다른 큐비트의 에너지 레벨과 일치시키는 방식으로 iSWAP과 CPHASE 게이트를 구현한다.[244] 큐비트 주파수 변환이 가능한 양자프로세서는 일반적으로 큐비트 간 상호작용의 세기 또한 조작할 수 있도록 제작되며, 2-큐비트 게이트에 적용 시 상호작용의 세기를 일시적으로 강하게 설정함으로써 짧은 시간 내에 구동할 수 있다. 최근 30ns 길이의 iSWAP 게이트를 99.87% 신뢰도, 60ns 길이의 CZ 게이트를 99.76% 신뢰도로 구현한 실험 결과가 보고됐다.[245] 이 외에도 파라메트릭 게이트,[246] 비인접 큐비트 간의 게이트[247] 등 다양한 종류의 양자게이트가 활발히 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① 고성능 양자게이트

초전도 양자게이트의 신뢰도는 큐비트의 결잃음, 원치 않는 상호작용 등에 의해서 제한된다. 만약 큐비트 간의 상호작용 세기를 늘리면 2-큐비트 게이트의 구동 시간을 줄일 수 있어, 큐비트 결잃음의 정도를 감소시킬 수 있다. 하지만 상호작용 세기의 증가는 원치 않는 상호작용의 세기 또한 증가시키므

241) Chow (2011)
242) Mitchell (2021)
243) Wei (2022)
244) Arute (2019)
245) Sung (2021)
246) Reagor (2018)
247) Yariv (2022)

로 양자게이트 성능 향상에 항상 도움이 되진 않는다. 최근에는 이러한 트레이드-오프 관계를 넘어선 고성능 양자게이트를 구현하기 위한 연구들이 다양하게 진행되고 있다. 그중 가장 큰 주목을 받은 연구 결과는 초전도 큐비트 간의 상호작용을 여러 경로로 구현하는 다경로 커플링(Multi-path Coupling) 기법이다. 이 방법을 적용하면 큐비트 간 상호작용의 세기는 강하게 유지한 채 원치 않는 상호작용만 세기를 줄일 수 있어, 최근 2-큐비트 초전도 양자게이트의 신뢰도가 99.8% 이상으로 향상된 결과를 보여준 바 있다.[248]

② 다중큐비트 양자게이트

단일 큐비트 게이트와 2-큐비트 게이트의 조합만으로도 임의의 양자연산을 구현할 수 있지만, 만약 Toffoli, Fredkin 게이트로 대표되는 다중 큐비트 양자게이트를 활용할 수 있다면 양자회로의 깊이를 상당히 줄일 수 있다. 양자연산을 올바르게 수행할 수 있는 시간이 큐비트의 결맞음 시간으로 제한되는 만큼, 양자회로의 깊이를 줄임으로써 복잡한 양자알고리듬을 구현할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 까닭에 다중 큐비트 양자게이트를 구현하기 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 최근 큐비트의 고에너지 레벨을 활용해 87.1% 신뢰도의 3-큐비트 CCPHASE 게이트가 구현됐고,[249] 2-큐비트 게이트의 상호작용을 3개 큐비트에 동시 적용하는 방법을 사용해 98.3% 신뢰도의 3-큐비트 iToffoli 게이트가 구현됐다.[250]

③ 고차원 양자게이트

초전도 큐비트는 초전도 회로의 에너지가 기저 상태에 있을 때 0을, 첫 번째 들뜬 상태에 있을 때는 1을 표현한다. 만약 초전도 회로의 더 높은 에너지 레벨을 양자정보를 표현하기 위해 사용한다면 하나의 초전도 회로로 더 많은 정보를 담아낼 수 있다. 최근 들어 3개의 에너지 레벨로 양자정보를 표현하는 큐트리트(Qutrit)를 위한 양자게이트가 활발히 연구되고 있다. 단일 큐트리트 게이트의 경우, 단일 큐비트 게이트와 유사하게 에너지 레벨 간의 전이 주파수로 마이크로파를 구동하면 쉽게 구현할 수 있다. 하지만 2-큐트리트 게이트는 복잡한 시스템 때문에 다양한 게이트를 구현하지 못했는데, 구현된 한 가지 예로는 비-공진 주파수로 초전도 회로를 구동해 97.3%의 신뢰도를 보여준 큐트리트 CZ 게이트가 있다.[251] 최근에는 큐비트 게이트의 신뢰도를 검증하는 무작위 벤치마킹(Randomized Benchmarking) 기술을 확장해 큐트리트 게이트의 신뢰도를 검증하는 기술도 개발됐다.[252]

248) Wei (2022), Sung (2021)
249) Hill (2021)
250) Kim (2022)
251) Goss (2022)
252) Morvan (2021)

다. 초전도 양자컴퓨터의 응용 기술

(1) 기술 동향

현재 공개된 초전도 양자프로세서 중 IBM Eagle이 127큐비트로 가장 많은 큐비트 수를 가지고 있다.[253] 고전 컴퓨터의 비트 수와 비교했을 때 상당히 초라한 숫자로 볼 수 있지만, 이렇게 적은 수의 큐비트만으로도 슈퍼컴퓨터의 연산 능력을 넘어설 수 있음을 증명하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 미국의 Google은 53-큐비트 Sycamore 양자프로세서를,[254] 중국의 USTC는 66-큐비트 Zuchongzhi 양자프로세서를[255] 활용해 "Ramdom Quantum Cirucit Sampling"이라는 특정 문제에 대해 슈퍼컴퓨터보다 더 빠른 연산이 가능함을 시연했다. 이와 동시에 양자컴퓨터가 아직은 고전 컴퓨터를 뛰어넘지 못했다는 것을 보이기 위한 고전 알고리듬도 지속 발전했고, "Ramdom Quantum Cirucit Sampling" 문제에 대해 Sycamore 양자프로세서의 연산속도를 따라잡을 수 있는 고전 알고리듬이 최근 공개된 바 있다.[256]

한편, 가까운 시일 내에 양자컴퓨터가 유용하게 응용될 수 있을지도 중요한 화두이다. 가장 주목받고 있는 양자컴퓨터의 응용 중 하나인 쇼어의 소인수분해 알고리듬을 큰 규모로 시연하기 위해서는 오류정정 기술이 필요하며 상당히 많은 수의 큐비트가 필요하다.[257] 따라서 현재는 온전히 양자컴퓨터만을 사용하는 연산 대신 고전 컴퓨터와 함께 상호보완적으로 연산하는 방식이 주로 연구되고 있다. 대표적인 응용 사례로 함수의 연산은 양자컴퓨터로 수행하고, 파라미터 최적화는 고전 컴퓨터가 수행하며 분자의 기저 에너지를 계산할 수 있는 Variational Quantum Eigensolver(VQE),[258] Quantum Approximate Optimization Algorithm(QAOA)[259] 등이 있다. 이 외에 여러 양자프로세서를 동시에 활용함으로써 보다 큰 규모의 양자컴퓨팅을 수행하는 방법도 제안됐다.[260]

(2) 연구 동향

① Variational Quantum Eigensolver(VQE) 성능 개선

현재 가장 주목받는 양자컴퓨터의 응용 중 하나는 양자화학 계산이다. Variational Quantum Eigensolver(VQE) 알고리듬을 활용하면 분자가 가장 안정화된 기저 상태의 분자구조와 기저 에너지를 구할 수 있다. VQE는 분자 상태 변수에 따른 에너지를 계산하는 양자컴퓨팅 단계와 분자 에너지를

253) Chow (2021)
254) Arute (2019)
255) Wu (2021)
256) Pan (2022)
257) Gouzien 2021
258) Kandala (2017)
259) Harrigan (2021)
260) Eddins (2022)

최소화하는 변수를 찾는 고전 컴퓨팅 단계로 구성된다. 분자의 크기가 커질수록 분자 상태 변수가 증가하고, 고전 컴퓨터를 이용한 변수 최적화는 점점 어려워진다. 이러한 문제를 Barren Plateaus라고 하는데 VQE의 성능을 제한하는 가장 큰 문제로 지목되고 있다.[261] 최근에는 이 문제를 해결하기 위해 분자가 가진 대칭성을 활용해서 분자 상태 변수의 수를 줄이는 방법,[262] 이전의 연산 결과를 기반으로 양자회로를 적응형으로 수정하는 방법,[263] 변수 공간의 추가적인 정보를 얻어 Barren Plateaus를 완화하는 방법[264] 등 다양한 방법들이 연구되고 있다.

② 다체 양자시스템 시뮬레이션

고전 컴퓨터로 양자시스템을 시뮬레이션하기 위해서는 시스템 규모에 따라 기하급수적인 용량의 메모리가 필요하다. 예를 들어 32-큐비트로 표현되는 양자상태를 고전 비트로 표현하기 위해서는 10기가바이트 정도의 메모리가 필요하며, 시간에 따른 양자상태의 변화를 시뮬레이션하기 위해서는 무려 3엑사바이트라는 엄청난 메모리가 요구된다.[265] 이렇듯 다체 양자시스템의 동역학은 고전 컴퓨터로 시뮬레이션이 거의 불가능한 문제이다. 최근 수십 개 큐비트 규모의 양자프로세서를 활용한 다체 양자시스템의 상변화, 타임 크리스탈의 상변화 등이 연구되기 시작했다. 매시간 양자작용을 게이트로 분해하는 디지털 양자 시뮬레이션 방법,[266] 또는 시뮬레이션 대상 양자작용을 초전도 프로세서 내에 직접 구현해 시간에 따른 양자상태의 변화를 관측하는 아날로그 양자 시뮬레이션 방법[267]을 활용한다. 디지털 양자 시뮬레이터는 범용성이 뛰어나고, 아날로그 양자 시뮬레이터는 확장성이 뛰어나다는 특장점이 있다.

③ 양자오류완화 기술

오류정정이 불가능한 양자컴퓨터는 많은 연산을 수행할수록 많은 오류가 누적되므로 연산의 결과를 신뢰하기 어려워진다. 하지만 이 문제를 해결할 수 있는 안정적인 양자오류정정 기술이 언제쯤 구현될지는 아직 불확실하다. 따라서 현재의 불완전한 양자컴퓨터에서 발생하는 오류를 완화해 연산 결과의 신뢰성을 높이는 방향으로 활발한 연구가 진행 중이다. 대표적인 방법으로는 회로의 깊이가 깊어질수록 오류가 누적되는 점에 착안한 Zero-noise Extrapolation Method가 있다. 똑같은 연산을 수행하는 양자회로의 깊이를 바꿔가며 연산 결과를 얻고, 깊이에 따른 연산 결과를 바탕으로 오류가 없었을 때의 연산 결과를 역추적하는 방법이다. 이 방법을 적용하면 오류가 많은 양자프로세서를 사용하더라도 높은 수준의 정확도로 H_2와 LiH 분자의 에너지를 계산할 수 있음을 실험적으로 시연했다.[268] 또

261) Wang (2021)
262) Kandala (2017)
263) Grimsley (2019)
264) Sack (2022)
265) Guo (2021a)
266) Mi (2022), Frey (2022), Alexis (2022)
267) Guo (2021a), Guo (2021b), Zhang (2022)
268) Kandala (2019)

다른 방법으로는 양자게이트를 파울리 게이트로 감싸서 오류의 종류를 후처리하기 쉬운 결잃음 오류로 바꾸는 Randomized Compiling이 있다. 결잃음 오류는 양자게이트가 적용될 때마다 산술적으로 누적되기 때문에, 양자게이트의 오류를 사전에 측정함으로써 연산에서 발생하는 오류를 높은 정확도로 추정할 수 있다. 최근에는 이 방법을 적용해 큐비트 수 26, 회로 깊이 60, CNOT 게이트 1,080개가 사용된 양자 시뮬레이션을 성공적으로 수행한 연구 결과가 발표됐다.[269]

라. 양자오류정정 기술

(1) 기술 동향

현재의 상용 컴퓨터는 오류 발생률이 매우 낮아져 별다른 오류정정 없이도 안정적인 연산이 가능하다. 하지만 양자컴퓨터는 큐비트의 결맞음 시간이 유한해 필연적으로 오류가 발생하기에 안정적인 오류정정 기술이 필요하다. 지금까지 다양한 양자오류정정 코드가 개발됐지만, 초전도 양자컴퓨팅에서는 2차원 격자 모양으로 물리 큐비트를 배치하는 표면 코드(Surface Code)가 최적의 양자오류정정 코드로 평가받고 있다.[270] 양자오류정정 코드로 구현한 논리 큐비트의 오류 발생률은 코드를 구성하는 물리 큐비트의 오류 발생률이 낮을수록, 물리 큐비트의 수가 많을수록 낮아진다. 현재의 물리 큐비트 오류 발생률을 고려했을 때 1개의 안정적인 논리 큐비트를 구현하는데 1,000~10,000개 정도의 물리 큐비트가 필요할 것으로 예측된다. 따라서 이른 시일 내에 오류정정이 가능한 논리 큐비트를 구현하기 위해서는, 양자프로세서 내의 물리 큐비트 수를 늘리는 것과 동시에 양자게이트 및 상태 측정의 신뢰도를 높이는 연구가 필요하다.

(2) 연구 동향

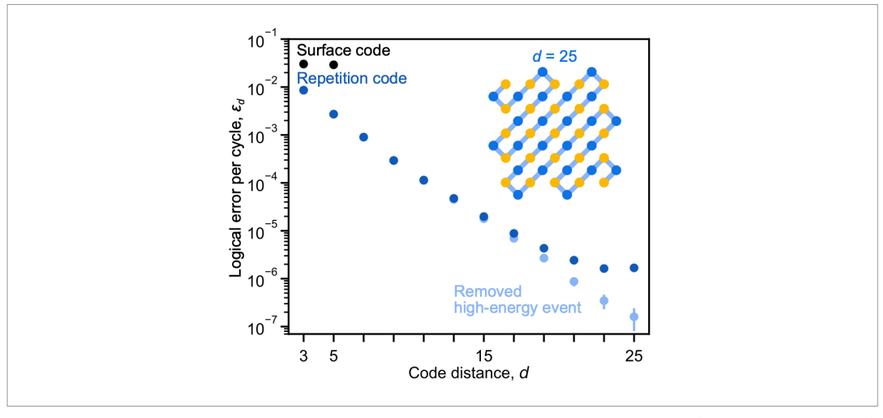
① 양자오류정정 기술 시연

현재의 초전도 양자프로세서 큐비트 수, 양자게이트 신뢰도, 상태 측정 신뢰도, 고속 피드백 기술 등은 안정적인 양자오류정정 기술을 구현하는데 부족한 점이 많다. 따라서 현재로서는 작은 규모의 오류정정 코드를 실험적으로 구현해 오류정정을 시연하고, 그것이 실제로 오류 발생률을 낮출 수 있음을 보이고자 한다. 최근 알려진 중요한 연구성과 중 하나로서 7개의 물리 큐비트로 구성된 거리-2 표면 코드의 상태 초기화, 단일 큐비트 게이트, 상태 측정이 성공적으로 시연됐다.[271] 또한 오류정정 코드의 크기가 커짐에 따라 오류 발생률을 감소시킬 수 있음을 실험적으로 시연했다.[272] 구현이 상대적으로 쉬운 반복 코드(Repetition Code) 크기를 3부터 25까지 늘려가면서 오류 발생률이 기하급수적으로 감소

269) Kim (2021)
270) Fowler (2012)
271) Andersen (2020), Marques (2022)
272) Google Quantum AI (2022)

하는 것을 확인했고, 거리-5 표면 코드를 사용하면 거리-3 표면 코드를 사용한 것에 비해 오류 발생률을 낮출 수 있음을 최초로 시연했다.

그림 II-3-3 오류정정 코드 크기에 따른 논리 큐비트의 오류 발생률 감소



※ Google Quantum AI (2022)

② 효율적인 양자오류정정을 위한 새로운 큐비트

마이크로파 공진기 내 광자의 양자상태로 양자정보를 표현하는 보조닉 큐비트(Bosonic Qubit)는 트랜스몬 같은 인공원자 방식의 초전도 큐비트에 비해 긴 결맞음 시간을 가진다. 결맞음 시간이 길수록 오류 발생률이 낮기에 보조닉 큐비트를 활용하면 적은 물리 큐비트 수로도 안정적인 오류정정 코드 구현이 가능할 것으로 기대된다. 그뿐만 아니라 보조닉 큐비트는 오류정정 코드 구현에 도움이 되는 특별한 성질들을 가지고 있다. 예를 들어 보조닉 큐비트는 일반적으로 비트플립(Bit Flip) 오류에 비해 페이즈플립(Phase Flip) 오류의 발생률이 상당히 낮다. 비트플립 오류정정에 특화된 코드[273]를 사용하면 더 적은 수의 물리 큐비트로도 낮은 오류 발생률의 논리 큐비트를 구현할 수 있기에, 이러한 치우침 오류 큐비트(Biased-Noise Qubit)를 구현하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적으로는 Kerr-Cat 큐비트가 최근 실험에서 구현됐다.[274] 보조닉 큐비트의 또 다른 특별한 성질은 오류 대부분이 광자 손실에서 기인한다는 것이다. 광자 손실 환경을 조절해서 광자의 손실률만큼 에너지를 공급해주면, 보조닉 큐비트에 발생하는 오류를 자동으로 정정할 수 있으며 오류 발생률 자체도 상당히 줄일 수 있다. 최근 이를 실험으로 구현해 130 μs의 결맞음 시간이 자동 오류정정을 통해서 288 μs로 늘어남을 확인했다.[275]

273) Ataides (2021)
274) Grimm (2020)
275) Gertler (2021)

마. 초전도 양자컴퓨터 규모 확장을 위한 요소기술

(1) 기술 동향

초전도 양자컴퓨팅의 실용화를 앞당기기 위한 가장 근본적인 방법은 양자프로세서 내에 존재하는 큐비트 수를 증가시키는 것이다. 큐비트 수의 증가는 힐버트 공간(Hilbert Space)의 확대를 의미하고, 이는 곧 양자컴퓨터 정보 처리 용량의 증가를 뜻한다. 하지만 물리적 장애물이 많은 탓에 규모 확장이 쉽지 않고, 이를 극복하는 것이 앞으로의 과제로 남아있다. 규모 확장을 위한 기술을 알아보기 위한 예시로 Google의 Sycamore 프로세서를 살펴보도록 하겠다.[276]

Sycamore 프로세서는 54개의 트랜스몬 큐비트가 2차원 사각격자 형태로 배열돼 있고, 인접한 큐비트 간의 상호작용을 매개하는 88개의 커플러(Coupler)가 존재한다. Google이 SQUID를 이용해 플럭스 조절이 가능한 트랜스몬 큐비트(또는 X-mom)를 채택하고 있는 점을 고려했을 때, 이 양자프로세서를 제어하기 위한 마이크로파 동축케이블의 수는 54 × 2 + 88 = 196개이다. 여기서 54는 큐비트의 수, 2는 각 큐비트당 XY 제어 및 Z 제어(플럭스 조절) 채널 수를 뜻하고, 88은 커플러의 조절을 위한 채널 수를 뜻한다. 큐비트의 측정을 위해선 이 제어 채널 외에도 더 많은 채널이 더 필요하다. Sycamore 프로세서는 큐비트 측정을 위해 각각 9개의 리드 아웃 신호 입출력 채널(총 18개)과 저잡음 양자증폭기 IMPA(Impedance Matched Lumped Element Josephson Parametric Amplifier)를 구동하기 위해 18개의 채널을 추가로 사용했다. 리드 아웃 입출력 채널 한 쌍이 6개의 큐비트 측정에 쓰이므로, 총 54개의 큐비트 측정에 9쌍이 사용됐다. 이 채널을 모두 더하면, Sycamore의 구동을 위해 총 196 + 36 = 232개의 마이크로파 동축케이블이 극저온 냉동기에 존재한다는 것을 예측할 수 있다. 이렇게 많은 수의 채널이 존재하면 케이블을 통해 상온으로부터 전달되는 열을 제어하기 위해 냉각성능이 좋은 극저온 냉동기가 필요하며, 많은 동축케이블 및 RF 부품들이 차지하는 부피로 인해 극저온 냉동기 내 넓은 공간확보가 필요하다. 또한 큐비트 수에 비례해 양자프로세서 측정제어에 사용되는 마이크로파 계측장비들의 수가 늘어나, 많은 공간을 차지하게 되는 문제점도 발생한다. 그러므로 양자컴퓨터의 규모 확장을 위해서는 양자프로세서 주변 요소기술의 발전이 필수라고 할 수 있다.

(2) 연구 동향

① 초전도 양자컴퓨팅을 위한 극저온 냉각 기술

초전도 양자컴퓨터의 구동을 위해서는 20 mK 정도의 극저온 환경을 만들어 주는 냉각기가 필수적이다. 초전도 큐비트의 기초 연구가 진행되던 시기에는 극저온 환경 구축을 위해 액체헬륨과 헬륨-3, 헬륨-4를 동시에 이용하는 냉각기를 사용했다. 이러한 냉각기는 액체헬륨의 소모가 많아 며칠 주기로 공급이 필요한 탓에 유지보수비용이 높고 실용적이지 않았다. 2010년대에 들어서며 Bluefors,

276) Arute (2019)

Oxford 등의 해외 기업에서 액체헬륨을 사용하지 않는 냉각기의 개발이 본격적으로 시작됐고, 현재 다수의 그룹이 이러한 무냉매 냉각기를 이용해 초전도 양자기술을 연구 중이다. 현재 대학과 연구소 수준에서 가장 많이 사용되는 Bluefors의 LD-400 또는 Oxford의 ProteoxMX 냉각기는 초전도 양자프로세서가 놓이는 극저온 판(plate)의 공간이 약 300mm 정도 지름을 갖고 있으며, 20 mK 온도에서 15 μW, 100 mK 온도에서 450 μW의 냉각파워를 갖는다. 위에 언급된 냉각기들은 약 30~50개 안팎의 SMA 마이크로파 동축케이블을 배치할 수 있다. 더 상위 모델인 Bluefors의 XLD-1000 또는 Oxford의 ProteoxLX 냉각기는 약 500mm 이상의 지름을 갖는 극저온 판과 20 mK 온도에서 30 μW, 100 mK 온도에서 1000 μW 정도의 냉각파워를 갖고 있다. 본 냉각기들은 약 150개 이상의 SMA 동축케이블 설치가 가능해 멀티 큐비트 양자프로세서의 구동이 가능하다. 최근 Bluefors에서는 고밀도 마이크로파 동축케이블 제품을 출시해 냉각기 한 대에 최대 약 1,000개의 동축케이블 설치가 가능해졌다. 이러한 극저온 냉각기 제조 기업들은 최근 규모를 더 확장하고, 관련 기업들과 협력해 초전도 양자컴퓨팅을 위한 극저온 기술들을 적극적으로 연구개발 중이다.

② 초전도 양자프로세서의 측정제어를 위한 하드웨어 기술

초전도 큐비트 및 공진기를 포함한 양자프로세서는 5~6GHz 정도의 마이크로파 주파수 대역에서 작동하는 것이 일반적이다. 이 주파수 대역은 현재 무선 통신에서 쓰이는 주파수 대역과 비슷해, 몇 큐비트만 존재하는 기존 양자프로세서의 초전도 큐비트 측정제어는 Keysight, Rohde & Schwarz, Tektronix 등의 유명 계측장비 기업에서 개발한 RF신호 생성기(RF Signal Generator), 네트워크분석기(Network Analyzer), 임의 파형 생성기(Arbitrary Waveform Generator), 디지타이저(Digitizer)와 같은 계측장비들과 Markimicrowave, Pasternack 등의 기업에서 개발한 IQ 변조기(IQ Mixer), 주파수 필터 등과 같은 RF 수동소자를 이용해 구현됐다. 하지만 이러한 장비들은 높은 범용성으로 인해 각각의 가격이 지나치게 높을 뿐만 아니라, 채널당 장비가 차지하는 공간이 커 규모 확장에 적절하지 않다.

최근 초전도 양자컴퓨터를 개발하는 기업의 수가 늘어남에 따라 양자컴퓨터의 구동을 위한 계측장비 기업의 수도 증가했다. 그러나 기존 계측장비 기업들은 통신, 반도체, 국방 등 다양한 응용 분야를 위한 범용적인 장비 개발에 집중해 양자컴퓨터 측정제어를 위한 하드웨어 개발은 미진했다. 현재 양자컴퓨팅용 계측장비의 개발은 해외 스타트업 기업에서 적극적으로 이뤄지고 있는데, 스위스 ETH Zurich에서 창업한 Zurich Instruments와 이스라엘 Weizmann 연구소에서 창업한 Quantum Machines가 대표적인 예이다. Zurich Instruments는 ETH Zurich 물리과 소속의 초전도 양자컴퓨팅 분야 세계 최고 연구그룹인 Andrea Wallraff 교수 연구그룹과 긴밀한 협력을 통해, 디지털 전자회로 기반의 양자컴퓨팅 측정제어 하드웨어를 개발 중이다. 개발 초기에 HDAWG 임의 파형 발생기 및 UHFQA 양자분석기를 출시하며 양자컴퓨팅 전용 계측장비 개발에 신호탄을 쐈지만, 당시의 초기 모델은 별도의 GHz 주파수 대역 신호 발생기 및 IQ 변조기가 필요해 초전도 양자컴퓨팅을 위한 전용 장비로 부르기에는 무리가 있었다. 그 후 이러한 점들을 보완한 8.5 GHz의 주파수 대역폭을 가진 SHFSG 신호 발생기와 SHFQA 양자분석기 등 새로운 계측장비들이 출시됐다. 이 두 장비는 더블 슈퍼헤테로다인(Double Super Heterodyne) 기술을 이용해 초전도 큐비트 제어를 위한 마이크로파 펄스를 생성하고 분석하는 것을 가능하게 해준다. 그리고 최근에는 두 가지 성능을 한 장비에 구현한 SHFQC 통합 큐비트 측정제어 장치가 출시됐고, 이를 이용해 최대 6개의 초전도 큐비트에 대한 신호 발생과 분석이 하나의 장비로 가능해졌다.

2018년 창립한 이스라엘의 Quantum Machines는 초전도 양자컴퓨팅 전용 계측장비 시장에서 빠른 속도로 점유율을 높이는 중이다. 이 회사는 Quantum Orchestration Platform으로 불리는 통합 측정제어 하드웨어 솔루션을 제공하며, 독립된 계측장비로 OPX plus와 Octave 두 개의 모델을 출시했다. OPX plus는 임의 파형 생성기와 디지타이저가 혼합된 형태로 별도의 마이크로파 신호 생성기와 IQ 변조기를 이용해 큐비트의 측정제어를 가능하게 해준다. 이는 Zurich Instruments의 초기 모델인 HDAWG와 UHFQA의 기능을 합친 형태로 판단된다. 별도의 신호 생성기가 필요하다는 점이 OPX plus의 약점이었으나, 최근 Octave라는 2~18GHz 대역폭의 신호 생성 기능과 IQ 변조기를 통합한 장비를 출시함으로써 자체 제품으로 초전도 큐비트의 측정제어를 구현했다. 특히 Quantum Machines는 적극적인 마케팅을 통해 전 세계 많은 연구그룹에 장비를 공급했고, 사용자들과 적극적으로 소통하며 새로운 계측장비를 개발 중이다. 이러한 양자컴퓨팅 전용 계측장비 기업의 등장은 초전도 양자컴퓨팅의 규모 확장을 더욱 가속할 것으로 예상된다.

③ 양자프로세서의 규모 확장을 위한 패키징 기술

Google의 Sycamore와 IBM의 Eagle은 양자프로세스 큐비트의 레이아웃이 2차원 배열로 이루어진 것을 볼 수 있다. 큐비트 한 개를 측정제어 하기 위해서는 2~3개의 마이크로파 채널이 큐비트 주위에 존재해야 하는데, 이러한 2차원 큐비트 구조에서는 같은 칩 평면에 존재하는 마이크로파 채널로 중심부의 큐비트에 접근하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 이 문제를 해결하기 위해 큐비트 및 기반 회로요소를 서로 다른 기판에 배치한 3차원 패키징 기술이 사용됐다.

Google의 Sycamore는 초전도 큐비트가 존재하는 칩과 공진기 및 마이크로파 채널이 존재하는 칩을 전기적으로 연결하는 플립칩 접합 공정을 이용해 프로세서를 제작했다.[277] 플립칩 접합에는 인듐 접합(Indium Bump Boding) 기술이 이용되는데 인듐은 큐비트 제작공정과 호환되며, 극저온에서 초전도 현상을 보이기 때문에 현재 양자프로세서의 3차원 집적공정에서 필수적으로 쓰이는 물질이다. 또한 인듐은 각 칩에 있는 알루미늄 전극과 접합되며, 이 과정에서 알루미늄과 인듐이 합금을 형성해 전기적인 성질에 영향을 준다. Google은 이 문제를 해결하기 위해 알루미늄 접합 부분에 질화티타늄

277) Arute (2019), Foxen (2017)

(TiN)을 증착시키는 방법으로 인듐과의 합금 형성을 방지했다.

IBM의 Eagle은 프로세서를 구성하는 층을 더 세분화하고 총 4개의 칩을 접합해 제작됐다. 첫 번째는 큐비트가 존재하는 층, 두 번째는 초전도 마이크로파 공진기가 존재하는 층, 세 번째는 마이크로파 채널 층, 네 번째는 인터포저(Interposer) 층이다. 각 층간 전기적 연결은 Through-Silicon-Via(TSV)라는 기술을 사용해 구현했다. TSV 기술은 수백 마이크론 두께의 실리콘을 Bosch 공정 또는 Deep Reactive Ion Etching(DRIE)이라는 식각공정을 이용해서 관통한 후, 이 관통된 부분에 금속을 채워 넣어 칩의 윗면과 아랫면을 전기적으로 연결한 기술이다. 이 기술의 핵심은 깊은 관통 면에 초전도 물질을 균일하게 증착시키는 것인데, 이를 위해 고품질 질화티타늄 막을 화학적 증착 과정에 이용한다.[278)]

2. 반도체 양자점 양자컴퓨팅

가. 스핀 큐비트 호스트 양자소재 성장 기술

(1) 기술 동향

스핀 큐비트용 양자소재의 성장은 해외 연구그룹이 선도하고 있으며, 대표적인 재료 성장 기술은 일본 Keio 대학의 Kohei Itoh 교수 그룹이 보유하고 있다. 이 그룹은 ^{28}Si 고체 원료를 기상 화학 증착용 Silane으로 가공해, Chemical Vapor Deposition(CVD) 방법으로 ^{28}Si/SiGe와 ^{28}Si-MOS 형태의 반도체 기판을 성장시키는 기술을 갖고 있다.

해당 소재는 호주 University of New South Wales 소속 Center for Quantum Computing and Communication Technology의 반도체 스핀 큐비트 그룹으로 공급돼, ^{28}Si-MOS, ^{28}Si-P donor 큐비트 연구에 사용되고 있다. 또한 서울대 반도체 스핀 큐비트 연구그룹과 소재 교환 협력을 체결해, 동위원소 정제형 스핀 큐비트 연구가 진행되고 있다.

미국은 동위원소 정제형 반도체 웨이퍼 소재 원천기술을 확보하기 위해 대규모 투자를 이어가고 있다. 미국의 국립표준과학연구소(National Insitute of Srandards and Technology)는 자연적 동위원소 순도의 Si 중 질량분석 기법을 통해 ^{28}Si를 선별 후, MBE 성장법으로 진공 챔버 내에서 분자선 소스로 사용하는 성장 장비를 개발했다. 한편 HRL 연구소는 CVD 방법으로 ^{28}Si/SiGe를 성장하는 기술을 보유하고 있다. 또한 Intel은 최근 Linde로부터 ^{28}Si 원료를 공급받아 12인치 ^{28}Si/SiGe 웨이퍼를 성장하는 기술을 확립했다. 해당 재료는 네덜란드 TuDelft와 Intel의 합작연구소인 QuTech에 공급돼 산업체 파운드리 호환형 스핀 큐비트를 연구하고 있다. TuDelft 내에는 4인치 ^{28}Si/SiGe 기판 성장을 연구하는 그룹이 존재한다.

그림 II-3-4 확장형 실리콘 큐비트를 위한 Intel – QuTech 투자 협약



※ https://qutech.nl/2015/09/03/qutechentersintocollaborationwithintel/

고이동도 Ge/SiGe 이종접합 구조 성장은 네덜란드 TuDelft의 Giordano Scapucci 그룹이 선도하고 있다. 본 소재를 사용하여 TuDelft의 M. Veldhorst 교수 그룹은 4큐비트 얽힘상태 생성을 시연한 바 있다.

(2) 연구 동향

동위원소 정제는 ^{28}Si 원료가 희귀하여 수급이 원활하지 않다. 또한 현재 수급 가능한 ^{28}Si도 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition)에 사용되는 SiH4 전구체(Precursor) 형태로 구할 수 없으며 고체 ^{28}Si결정, $^{28}SiO_2$결정 형태로 공급돼 2차 가공이 필요하다. 따라서 기상 증착법 외에 분자선 에피택시 방법과 스퍼터링 방법으로 박막을 성장하는 연구가 진행 중이다. 한편 현재 ^{28}Si를 이용한 스핀 큐비트에서 수백 마이크로초 이상의 결맞음 시간이 보고됐지만, 성장 기술의 완성도에 따라 편차가 크다. 특히 Si/SiGe 구조의 경우 주변의 정제되지 않은 Ge 원자핵스핀에 의해 결맞음 시간 증가가 제약된다는 결과도 보고돼, 재료 성장 기술의 발전이 필요한 상황이다.

실리콘의 양자소자 관점에서 최대 단점은 전도 밴드가 하나 이상인 밸리의 자유도를 가진다는 것으로. 이는 4족 반도체 대부분의 공통적인 특성이다. 이러한 밸리의 존재는 큐비트의 바닥 상태와 여기

278) Yost (2020)

상태 사이가 밸리-스플리팅(Valley-Splitting)으로 불리는 작은 에너지 차이에 의해 결정되게 하며, 양자연산 중 오류의 확률을 증가시키는 요인으로 작용한다. 또한 밸리-스플리팅은 큐비트 단발 측정의 충실도에 직접적인 영향을 주며, 궁극적으로 큐비트가 작동 가능한 온도의 상한선을 결정한다.

따라서 웨이퍼 전 영역에 균일하고 큰 밸리-스플리팅을 가지도록 하는 소재 공학의 발전이 중요하다. 이는 균일한 반도체/산화물 경계면에 생성되는 비교적 큰 구속 에너지에 의해 최대 1meV의 밸리-스플리팅을 유도할 수 있다는 것을 보인 Si-MOS에서 발전했는데, 이러한 Si-MOS 구조에서는 큰 에너지-스플리팅으로 인해 1K 정도의 비교적 높은 온도에서 Si 큐비트를 작동할 수 있다는 장점이 있다. 반면 Si/SiGe 대비 Si-MOS의 주요 단점으로는, 큐비트가 무질서도 높은 산화물 계면에 형성돼 전자이동도가 비교적 낮고(최대 ≈ 104cm²/Vs), 원하지 않는 영역에 양자점이 형성될 확률이 높다는 점을 들 수 있다.

Si/SiGe 구조는 양자점 형성에 사용하는 자유전자 층을, 인장력으로 Strain이 걸린 Si 양자우물과 Si1-xGex 사이의 인터페이스에 형성한다. 따라서 이러한 구조에서는 자유전자 층이 계면의 결함에서 떨어져 있어 Si-MOS보다 우수한 이동도를 지닌다. Si/SiGe는 Si와 Ge 사이의 격자 불일치가 4.2%에 이르기 때문에, 격자 불일치를 점진적으로 없애기 위해 SiGe 합금에서 Ge 농도를 점진적으로 증가시켜 얻은 SiGe 버퍼 기판을 준비해야 한다. 그리고 이러한 SiGe 버퍼 기판을 준비하는 과정에선 버퍼 층의 Dislocation 해소가 주요 관건이다.

Si/SiGe의 주요 난제는 Si-MOS 구조보다 작은 밸리-스플리팅(50-200μeV)에 있으며, 특히 기판의 위치마다 그 값이 다른데 이는 에피택시 Si/SiGe 계면의 인터페이스가 원자단위에서 균일하지 않기 때문이다. 밸리-스플리팅이 단원자 층의 두께 불균일도에도 민감하게 바뀌는 탓에, 소재 측면의 난제로 떠올라 최근에는 이를 완화할 수 있는 양자우물의 성장법을 개발 중이다. 예를 들어 기존의 일정한 두께를 가진 Si층을 양자우물 영역으로 성장하는 방법에서 탈피해, Ge의 농도를 일정 주기로 변화시킨 Oscillating Ge Concentration 법으로 밸리-스플리팅을 안정적으로 150μeV 이상 유도할 수 있는 성장법이 보고되기도 했다.

(3) 적용 분야

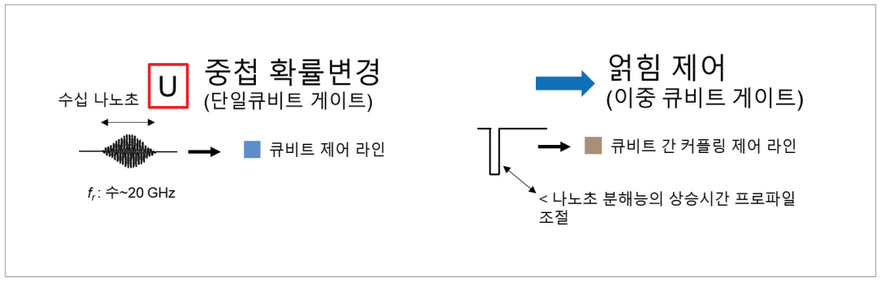
미래 첨단소재의 일차적인 응용은 스핀 큐비트 양자컴퓨팅 하드웨어로, 양자컴퓨터용 능동 소재와 직접적인 관계가 있다. 재료가 가진 최대한의 양자결맞음 시간을 확보할 수 있는 호스트 재료는, 확장형 스핀 큐비트 양자컴퓨팅을 구현하기 위한 원천기술이다. 또한 큐비트 소자 동작을 위해 필수적인 물성 요구치인 고주파 손실 최소화 및 전하 잡음 제어는, 고주파 송수신부용 단결정 기판 소재와 관련도가 높다.

나. 멀티 큐비트 제어 기술

(1) 기술 동향

다중 큐비트를 제어하는 기본적인 요소기술은 큐비트의 중첩상태를 변화시키고, 큐비트 간 상호작용을 이용해 양자조건부 게이트를 형성하는 것이다. 단일 큐비트 게이트란 각 큐비트의 중첩상태를 개별적으로 변화시키는 게이트이며, 반도체 스핀 큐비트는 통상적으로 큐비트 에너지 준위와 공명하는 주파수를 가진 외부 마이크로 펄스파를 이용해 Rabi Oscillation을 이용한다. 이중 큐비트 게이트는 제어 큐비트 상태에 조건부로 타겟 큐비트의 상태를 변화시키는 게이트로서, 반도체 스핀 큐비트는 스핀 간의 교환상호작용을 이용한다. 범용 게이트 집합은 단일 큐비트 게이트와 이중 큐비트 게이트의 조합으로 임의의 양자논리회로를 구성하는 것을 말한다(고전 컴퓨팅의 Universal NAND 게이트에 해당).

그림 II-3-5 양자게이트의 물리적 구현을 위한 제어신호 예시



큐비트 동작의 에러 요소 및 성능 검증은 크게 제어오류 및 결잃음(Decoherence)에 의한 오류로 구분되며, 제어오류는 제어 펄스의 주파수, 진폭, 위상 잡음에 의한 게이트 충실도 제한을 말한다. 또한 큐비트의 논리 상태를 벗어난 에너지 상태로의 Leakage 에러도 존재한다. 원천오류로서 큐비트의 양자정보는 제한된 결맞음 시간 내에서만 양자역학적으로 이용 가능하며, 크게 에너지 완화시간 (T_1 시간)과 위상 결맞음 시간(T_2 시간)으로 구별한다.

T_1 시간은 큐비트와 외부 환경 사이의 에너지 교환에 의한 상태 전이에 해당한다. T_1 시간은 전체 결맞음 시간에 영향을 줌과 동시에, 양자연산을 수행한 후 양자상태 측정 시 측정 신호를 에러 없이 포집할 수 있는 시간을 결정한다. 양자상태는 확률진폭의 크기와 위상(Phase)을 가지는데, T_2 시간은 큐비트 에너지에 의해 결정되는 큐비트 주파수의 외부 잡음에 의한 위상의 부정확도를 결정한다. 여기에서 T_2 시간은 잡음의 주파수 스펙트럼과 측정에 사용된 제어 펄스의 종류에 따라 다양하게 구분된다.(예: T_2*- Ramsey 펄스를 이용한 큐비트 위상의 자유 세차운동 시간 또는 불균일 결잃음 시간, T_2,

echo-Hahn echo 펄스를 이용한 정적 잡음이 제거된 결맞음 시간 또는 균일 결잃음 시간 등) 종합적으로 양자에러보정에 요구되는 물리적 큐비트의 성능은 결맞음 시간과 양자게이트 시간의 비율에 따라 결정된다.

(2) 연구 동향

상기한 멀티 큐비트 제어법을 적용해 반도체 스핀 큐비트 제어연구를 선도하는 그룹과 대표적인 결과는 다음과 같다.

GaAs 스핀 큐비트 분야는 미국 Harvard 대학의 Amir Yacoby 교수 그룹에서 99% 이상의 단일 큐비트 논리게이트, 93% 이상의 이중 큐비트 게이트를 시연했으며, 연구그룹은 GaAs의 단점인 높은 핵스핀 밀도에 의한 양자잡음을 고속 측정과 주파수 피드백으로 실시간 보정하는 기술을 개발했다.

Si 스핀 큐비트 분야는 호주 UNSW 대학의 Andrew Dzurak 교수 그룹과 네덜란드 QuTech의 Lieven Vandersypen 교수 연구그룹이 각각 실리콘 2큐비트 양자프로세싱을 구현하고,[279] 2큐비트 그로버 알고리듬(Grover's Algorithm)과 더치-조자 알고리듬(Deutsch-Jozsa Algorithm)의 실행에 성공했다. 미국 Princeton 대학의 Jason Petta 교수 그룹은 10개 양자점 형성 및 전하 상태 제어를 시연했으며,[280] 일본 RIKEN의 Seigo Tarucha 교수 그룹은 반도체 2큐비트 간 비파괴 양자측정을 시연했다.[281]

최근에는 UNSW, QuTech, RIKEN에서 실리콘 범용 논리게이트 집합 (단일 큐비트 게이트 + 이중 큐비트 게이트)의 평균 게이트 충실도가 99%를 상회하는 수준에 이르렀음을 동시에 발표했다. 이는 게이트 충실도가 양자오류정정이 가능한 수준으로 높아졌음을 시사하며 초전도, 이온 트랩 등 선도플랫폼과 함께 반도체 스핀 큐비트 플랫폼의 높은 잠재력을 시사한다.

2022년 현재 반도체 스핀 큐비트 연구 분야의 최대 관심사는 멀티 큐비트의 확장과 노이즈에 강한(Robust) 양자게이트 탐색, 고전 제어회로와 통합을 위한 고온 큐비트 구동 탐색 연구이다. 관련 내용은 아래에 기술한다.

(3) 적용 분야

멀티 큐비트 소자 공정 및 제어 기술은 반도체 기반 양자컴퓨팅 구현을 위해 필수적인 기술이다. 반도체 기반 큐비트 플랫폼은 극미량 전기신호 측정, 고주파와 저주파의 혼합신호 측정, 극저온 증폭기 등 현대 전자기기의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 기존 반도체 산업 구조에서 확보된 국내의 기술

279) Nature (2015)
280) Nature Comm (2019)
281) Nature Nanotech (2019)

인력 및 공정을 적극적으로 활용한다면 국제적인 경쟁력 확보에 있어 상대적으로 수월하다. 또한 성공적인 반도체 큐비트 집적화 기술이 실현될 경우, 양자컴퓨팅 관련 알고리듬과 소프트웨어 등이 다양한 산업에 광범위하게 활용돼 4차 산업 혁명을 주도할 가능성이 커 기존과 다른 새로운 산업군을 창출할 수 있다.

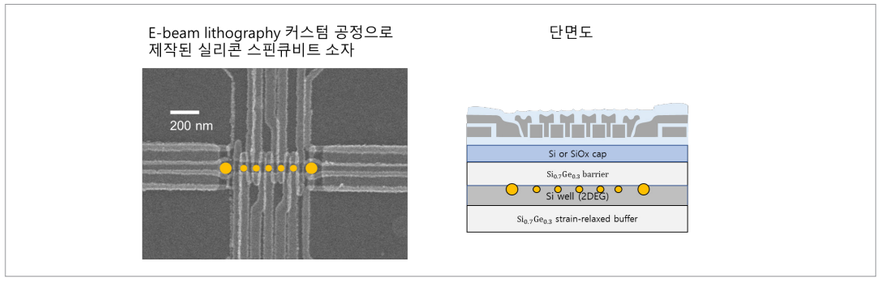
다. 확장 가능한 통합 양자프로세서 기술

(1) 기술 동향

반도체 스핀 큐비트 양자컴퓨팅 플랫폼의 장점에도 불구하고, 현재까지 해당 분야는 고성능 E-beam Lithography를 활용해 학계와 연구소의 커스텀 공정으로 제작된 소자의 성능 검증과 소규모 큐비트 집합의 얽힘상태를 시연하는 수준에 머물러 있다. 가장 큰 이유는 스핀 큐비트 동작 검증을 위한 네 가지 기본 요소(단일 전하 양자점 형성, 상태 초기화, 양자게이트 조작, 양자상태 측정) 과정에서, 외부 제어 가능한 소자 파라미터의 가변도를 극대화하기 위해 다양한 게이트 구조를 설계하고 검증하는 과정이 필요하기 때문이다.

이 과정에서 극단적으로 짧은 게이트 간 간격, 필요 이상의 제어라인 수, 모든 파라미터의 독립적인 조절 등이 요구되고, 커스텀 공정으로 제작한 스핀 큐비트 소자는 다음 그림과 같이 기존 파운드리 표준공정과는 다른 형태로 제작되고 있다.

그림 II-3-6 학계연구소 커스텀 공정을 이용한 반도체 스핀 큐비트 소자



※ 서울대 (2022)

세계적으로는 소수의 학·연 연구소를 중심으로 산업에 활용되고 있는 파운드리 공정을 그대로 사용해 스핀 큐비트 제작 및 제어 기술을 개발하려는 노력이 추진되고 있다. 이는 반도체플랫폼이 가진 확장성에 대한 진정한 잠재력을 가늠하는 지표가 된다. 현재 산업체 표준공정은 이미 DUV(Deep

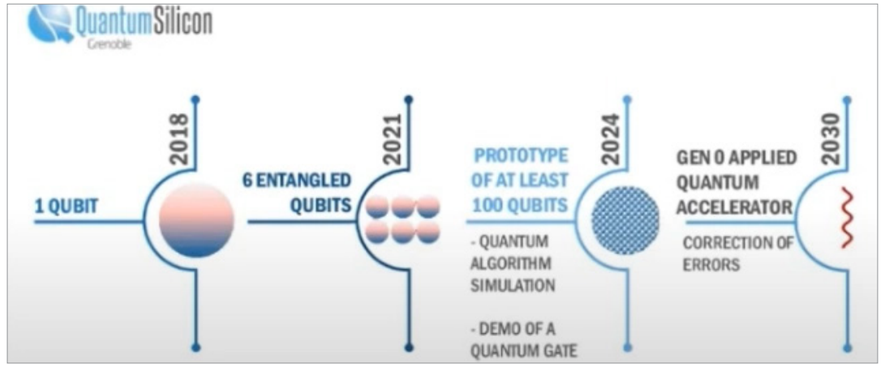
Ultra-Violet) 공정으로도 수십 나노미터 미만의 게이트 선폭을 제작하는 것이 가능하고, 게이트 간 간격도 100나노미터 미만이 가능한 수준에 이르렀다. 더군다나 EUV(Extreme Ultra-Violet)의 경우 수 나노미터까지 제작 가능해 파운드리 공정으로 큐비트를 제작하는 가능성이 커지는 추세이다.

이와 함께 큐비트의 규모가 확장될수록 큐비트 단과 제어회로 단을 하나의 칩으로 통합한 양자시스템 온 칩 (Quantum System On Chip)을 개발하려는 연구가 추진되고 있다. 확장형 양자프로세서 구현을 위해 필수적인 양자시스템 온 칩은, 그동안 mK에서만 동작하는 큐비트 단과 필연적인 전력 소모와 발열 때문에 수K에서 동작하는 고전 제어회로를 통합하려는 노력이다. 이를 위해 반도체 스핀 큐비트를 수K에서 동작하고 결맞음 시간을 유지하려는 소재, 전자, 양자공학적 연구가 추진 중이다.

(2) 연구 동향

2022년 현재 파운드리 공정과 호환되는 방법을 사용한 단일 스핀 큐비트의 동작은 보고된 바 있으며, 관련 연구는 프랑스 LETI-CEA의 학연연구소가 주도하고 있다. CEA는 최근 유럽의 양자컴퓨팅 관련 연구 기관과 컨소시엄을 형성해 2024년경 100 스핀 큐비트, 2030년경 실용적 양자컴퓨팅 프로세서를 발표한다는 로드맵을 제시했다. 그러나 가장 최근의 결과에서도 공정 중 가장 미세한 과정은 E-beam Lithography를 혼용하는 등 표준공정의 수정을 통해 스핀 큐비트 전용 공정을 개발함으로써 이루어졌다.

그림 II-3-7 프랑스 CEA 중심의 유럽 연구소 컨소시엄의 확장형 반도체 양자프로세서 로드맵



※ https://eetimes.eu/cea-leti-details-silicon-based-quantum-computing-roadmap/

파운드리 공정 중 FDSOI(Fully Depleted Silicon On Insultor) 28nm 공정은 기술적 완성도와 스핀 큐비트용 소자 구조와의 유사성을 바탕으로 양자소자 제작에 가장 많이 쓰이는 공정이다. LETI-CEA 연구소는 2015년 최초로 CMOS 파운드리 공정과 호환되는 FDSOI 기반 Si 나노와이어 공정(자연적 동위원소 순도)을 개발해 CMOS 스핀 큐비트의 단일 큐비트 동작을 시연했다. 가장 최근에는 CMOS 스핀 큐비트 중 홀-스핀을 이용한 P-type 소자에서 자연적 동위원소 순도의 Si임에도 불구하고 빠른 전기적 제어를 통해 ^{28}Si과 비등한 논리게이트 충실도를 보였으며, 특히 반도체 스핀 큐비트가 수K에서도 결맞음 시간을 유지할 수 있다는 결과를 발표했다. 현재까지 파운드리 공정으로 제작된 스핀 큐비트에서 높은 충실도의 이중 큐비트 논리게이트가 실증된 사례는 없으나, 꾸준한 공정과 제어 측면의 연구개발을 통해 앞으로 수년 안에 구현될 전망이다.

또한 Intel-TuDelft 합작연구소인 QuTech는 2020년 4K의 극저온에서 동작하며 초전도 큐비트와 반도체 스핀 큐비트 모두에 사용할 수 있는 고전 CMOS 제어회로를 개발했으며, 이 제어기는 논리게이트 펄스 생성과 양자상태 단발 측정을 수행할 수 있다. 아직 큐비트는 mK의 영역, 제어회로는 4K의 영역에 존재해 제어라인의 연결이 필요하다. 그렇기에 다른 연구그룹에서는 실증한 수K 온도에서 작동하는 스핀 큐비트를 제어회로와 통합해 하나의 칩에서 큐비트 구현, 제어, 측정의 전 과정을 수행하는 양자시스템 온 칩을 실험적으로 구현하기 위해 노력하고 있다.

3. 이온 트랩

세계적으로 이온 포획을 이용한 연구를 진행하는 그룹은 약 100여 곳이 있으며 양자컴퓨터 및 양자정보, 원자시계, 센싱, 시뮬레이션, 물리학 실험 등의 다양한 연구가 진행 중이다.[282] 양자컴퓨터 분야는 선두 그룹과 후발 그룹의 격차가 있는 상황이다. 예를 들어 2개의 양자얽힘 게이트를 구현한 그룹은 국내 서울대 연구진을 비롯해 전 세계적으로 10여 개 정도로 알려져 있다. 또한 5개 이상의 큐비트에서 개별 조작 구현에 성공했다고 발표한 그룹은 5개 이내이다. 현재 가장 앞서있는 그룹으로는 미국 IonQ(32개의 상호 연결된 큐비트 조작), Honeywell(이온 이동을 통한 QCCD 구현), 오스트리아 Innsbruck 대학(51개 이온 개별 조작), 중국 칭화대(5개 양자얽힘 구현) 등이 있다.

이온 포획 기반의 양자컴퓨터는 자연적으로 같은 에너지의 큐비트를 이용하며, 높은 신뢰도의 초기화, 측정, 게이트 조작 가능성, 긴 결맞음 시간, 확장 가능성 및 임의의 양자얽힘 쌍을 생성할 수 있다는 장점이 있으나 상대적으로 느린 계산시간, 많은 장비가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 연구 추세는 플랫폼의 장점을 극대화하는 연구, 양자컴퓨터의 성능 개발을 위한 큐비트 확장 및 개별 조작 성능을 증가시키는 연구, 단점을 보완하기 위한 장비의 소형화 및 집적화 연구 등의 방향으로 진행되고 있다.

282) https://quantumoptics.at/images/miscellaneous/IonTrappers.pdf

표 II-3-1 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 세부 사항에 대한 기록

구분	성능	연구기관	비고
결맞음 시간	50초	Oxford 대학[283]	
	10분	칭화 대학[284]	Dynamical Decoupling 사용
	1시간	칭화 대학[285]	10분의 측정 결과로 메모리 시간 예측
단일 양자게이트 신뢰도	99.9999 %	Oxford 대학[286]	마이크로파를 이용한 큐비트 조작
	99.996 %	NIST[287]	펄스 레이저를 이용한 큐비트 조작
양자얽힘 게이트 신뢰도	99.92 %	NIST[288]	MS 게이트
	99.9 %	Oxford 대학[289]	Phase 게이트
큐비트 개수	32개	IonQ[290]	완전히 상호 연결된 큐비트 개수
	51개	Innsbruck 대학[291]	개별 조작 가능한 큐비트 개수

가. 이온 선택 및 이온 포획 기술

양자컴퓨터를 위해 사용되는 이온은 $^{171}Yb^{+}$ 이 가장 많이 사용되고 있으며 Ca^{+}, Ba^{+} 등의 이온도 사용되고 있다. 초고진공에서 안정적으로 이온을 포획하는 기술은 안정적인 양자컴퓨터 구현을 가능하게 하며, 양자조작의 성능을 높이기 위한 시작점이다. 매크로 포획 장치는 양자컴퓨터의 큐비트 개수를 증가시키는 방향으로 사용되기는 어렵다. 상대적으로 제작이 쉽고 강한 포획 우물을 생성하며 레이저와 포획 장치의 빛 산란이 적고 안정적인 포획이 가능하다는 장점으로, 단일 또는 적은 수의 양자얽힘 게이트 구현 및 성능 개선 등의 연구가 주로 연구되고 있다. 한편 매크로 포획 장치의 한계를 극복하며 장점을 살리기 위해 구획이 구분된 블레이드 포획 장치를 이용하는 연구그룹이 늘어나고 있다. 마이크로 포획 장치는 제작공정 오차를 최소화해 가공할 수 있으며 작은 크기에 많은 이온을 포획할 수 있다는 장점이 있다. 주로 양자컴퓨터의 확장 및 개별 제어연구, 소형화 및 이온 이동(Shuttling) 연구에 사용되고 있다. 이외에도 다른 방향으로 양자컴퓨터의 확장 및 제어를 위한 포획 장치 개발이 이루어지고 있다. 예를 들어 2차원으로 이온 큐비트를 배열하는 포획 장치, 레이저를 통합하는 포획 장치 등이 있다.

283) T.P. Harty et al. (2014)
284) Ye Wang et al. (2017)
285) Pengfei Wang et al. (2021)
286) T.P. Harty et al. (2014)
287) J.P. Gaebleret al. (2016)
288) J.P. Gaebleret al. (2016)
289) C.J. Ballance et al. (2016)
290) https://ionq.com/news/october-01-2020-most-powerful-quantum-computer
291) Florian Kranzl et al. (2022)

(1) 기술 동향

① 이온 선택

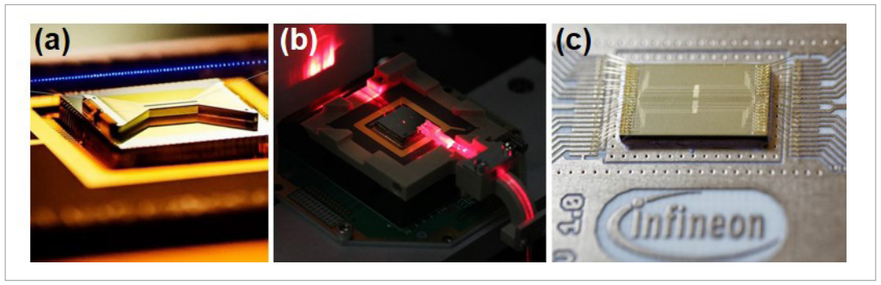
양자컴퓨터를 위해 가장 많이 사용되고 있는 이온은 $^{171}Yb+$이다. 기저 초미세구조(Hyperfine Structure)는 1차 지만 효과(Zeeman Effect)에 영향을 받지 않으며, 냉각, 초기화, 측정 등에 사용하는 레이저가 잘 개발되어 있다. 또한 IonQ를 비롯한 선두 그룹이 이미 많은 연구를 해놓아 초기 세팅 및 개발 로드맵이 잘 알려져 있다는 장점이 있다. 큐비트 조작도 마이크로파나 산업적으로 많이 사용하는 355nm 펄스 레이저를 사용해 상대적으로 쉽게 구현할 수 있다. 1차 지만 효과에 영향을 받지 않는 초미세구조를 가진 이온은 자연적으로 Yb(이터븀), Cd(카드뮴), Hg(수은) 이온이 전부이며 최근 방사성 동위원소인 $^{133}Ba^{+}$ 도 같은 구조를 가졌다는 것이 알려져 캘리포니아 대학[292], 옥스퍼드 대학[293] 등에서 사용 중이다. Innsbruck 대학에서는 $^{40}Ca^{+}$을 양자컴퓨터 연구에 사용하고 있으며 단일 레이저를 사용해 양자조작을 하고 있다. 원자의 선택은 레이저 및 장비 선정, 연구 방향과 밀접한 연관이 있으며 한 번 장비를 사들여 연구, 개발이 진행되면 변경이 거의 불가능하다. 또한 양자컴퓨터 연구가 국가의 중요 연구주제로 떠오르면서 원자의 공급 가능 여부도 중요한 요소인데, 선택적으로 동위원소만을 구하기가 쉽지 않으므로 각 국가 연구그룹의 원자 선택 및 기술 개발에도 영향을 미치고 있다. 한국의 경우 순수한 ^{171}Yb, ^{133}Ba 동위원소 구매가 거의 불가능하다.

② 이온 포획 장치

매크로 포획 장치는 대학 실험실 규모에서도 쉽게 제작할 수 있어 널리 사용되며, 일반적인 이온 포획을 이용한 다양한 연구에 쓰이고 있다. 마이크로 칩(Chip) 포획 장치는 반도체 공정 및 레이저 가공 등의 기술이 사용되며, 마이크로 포획 장치를 개발하고 제작해 포획에 성공한 곳은 5개 정도이다. 포획 장치 제작에 가장 앞서 있는 곳은 미국 Sandia로 자국의 이온 포획 그룹에 장치를 제공하고 있다. 한편 영국, 독일, 한국 등에서는 반도체 기술 기반 마이크로 포획 장치를 제작해 사용하고 있다. Sandia에서 개발한 포획 장치 [그림 II-3-8 (a)]는 IonQ를 비롯한 미국 연구진이 주로 사용하고 있으며, 이 포획 장치를 이용해 121개의 이온 포획에 성공했고 32개의 상호 연결된 양자조작에 성공했다. IonQ의 경우 하나의 마이크로 포획 장치 안에 다수의 이온 저장 영역과 계산 영역을 분리해, 필요한 개수의 이온을 수 초 안에 계산 영역으로 보내 포획하는 기술을 보유하고 있다. Honeywell은 Chip 포획 장치에서 Yb^{+}, Ba^{+} 이온을 포획한 후 이동을 통해 양자얽힘 게이트를 구현했다.[294] [그림 II-3-8 (b)]에서 보듯이 MIT 대학에서는 Chip 포획 장치에 광섬유와 웨이브 가이드를 통합시켜 포획 우물과 레이저의 집적화를 이루었다.[295] 옥스퍼드 대학은 Infineon과 협력하여 마이크로 포획 장치를 개발 및 제작해 사용하고 있다.

292) David Hucul et al. (2017)
293) https://www.physics.ox.ac.uk/research/group/ion-trap-quantum-computing/research-areas/abaqus
294) J. M. Pinot et al. (2021)
295) R. J. Niffenegger et al. (2020)

그림 II-3-8 마이크로 포획 장치[296]



(a) Sandia에서 개발하여 IonQ 등 많은 이온 포획 그룹에서 사용 중인 리본 모양 포획 장치
(b) 광섬유와 웨이브 가이드를 이용해 집적화를 이룬 MIT의 마이크로 포획 장치[297) 298)]
(C) 인피니온에서 개발해 영국 옥스퍼드 대학에서 사용 중인 마이크로 포획 장치[299)]

※ Physics 12(112) (2019), scitechdaily.com, Infineon

(2) 연구 동향

이온 포획 기반 양자컴퓨터를 제작하기 위해 많은 개수의 이온을 안정되게 포획하고 소형화, 집적화를 달성하는 방향으로 포획 장치를 개발하는 연구가 진행되고 있다. Duke 대학은 포획시스템과 광학시스템의 소형화를 연구하고 있으며, Cryostat을 이용해 동전 크기의 진공 챔버 및 포획 장치를 구현했고 작은 테이블 크기의 광학시스템을 구현했다.[300] Innsbruck 대학, AQT는 렉 2개 크기에 모든 시스템을 집적해 이온 포획 기반 양자컴퓨터를 제작했다.[301] Oxford 대학은 광학시스템을 하나의 렉에 설치해서 연구에 사용하고 있다.

(3) 적용 분야

전통적인 이온 포획 연구는 실험실 하나를 가득 채울 정도의 공간이 필요했으나 점점 그 크기가 줄어들고 있으며, 기존보다 안정된 포획 장치들이 제작되고 있다. 안정적인 포획 기술은 성능이 뛰어난 양자컴퓨터 제작의 시작점이 되며, 안정적으로 포획된 이온의 개수가 늘어날수록 양자컴퓨터의 계산 능력이 향상된다. 또한 소형화 및 집적화 속도가 빨라짐으로써 이동할 수 있거나 보급이 가능한 형태의 양자컴퓨터 제작에 가까워지고 있다. 지금은 클라우드 서비스를 이용한 양자알고리듬의 시험 가동 수준에서 양자컴퓨터를 사용하고 있지만, 앞으로는 필요한 기업, 학교, 연구소에서 구매해 사용이 가능한 수준으로 개발이 진행되고 있다.

296) Gabriel Popkin (2019)
297) R. J. Niffenegger et al. (2020)
298) I. Pogorelov et al. (2021)
299) https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2022/INFXX202207-098.html
300) Robert F. Spivey et al. (2021)
301) I. Pogorelov et al. (2021)

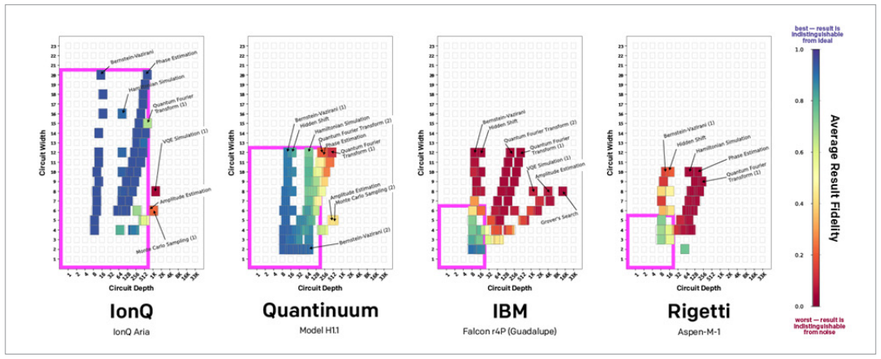
나. 양자게이트 및 양자알고리듬 구현

이온 큐비트를 이용한 양자게이트는 속도가 느리지만 긴 결맞음 시간으로 많은 양의 양자게이트를 사용할 수 있고, 임의의 양자얽힘을 구현할 수 있어, 다른 플랫폼에 비해 효율적인 양자알고리듬을 구현하며 높은 신뢰도를 달성하고 있다. 이온 포획 기반 양자컴퓨터를 이용해 쇼어 알고리듬, 양자화학 알고리듬, 물리학 모델링 등 다양한 양자알고리듬이 구현됐다.

(1) 기술 동향

단일 양자게이트 신뢰도는 마이크로파를 이용했을 때 99.9999%(옥스퍼드 대학[302]), 펄스 레이저를 이용한 라만 전이로 99.996%(NIST[303])를 달성했다. MS 게이트를 이용한 양자얽힘 게이트는 NIST에서 99.92%의 신뢰도를 달성했다.[304] 양자컴퓨터의 구현을 위해 다수의 큐비트 시스템에서 임의의 양자얽힘을 구현하는 것이 중요하며, IonQ에서는 2019년 11개의 큐비트에서 임의의 양자게이트를 구현했을 때 평균 97.5%의 신뢰도를 달성했다.[305] 다수의 이온 큐비트 양자얽힘을 구현하는 것은 빠른 양자알고리듬 구현을 가능하게 하며 GHZ 상태를 구현해 이를 달성할 수 있다. IonQ에서는 4개의 이온,[306] 칭화대학 역시 4개의 이온,[307] Innsbruck 대학에서는 24개 이온이 GHZ 상태를 달성했다.[308] 클라우드 시스템을 통한 양자알고리듬의 성능 비교가 많이 이루어지고 있으며, 임의의 큐비트 쌍을 이용하는 양자알고리듬을 수행할 때는 이온 포획 기반의 양자컴퓨터가 월등한 성능을 보여주고 있다.[309]

그림 II-3-9 클라우드 양자컴퓨터를 이용한 다양한 양자알고리듬 구현 신뢰도 비교



※ arxiv.org/abs/2110.03137

302) T. P. Harty et al. (2014)
303) J. P. Gaebler et al. (2016)
304) J. P. Gaebler et al. (2016)
305) K. Wright et al. (2019)
306) Caroline Figgatt et al. (2019)
307) Yao Lu et al. (2019)
308) I. Pogorelov et al. (2021)
309) I. Pogorelov et al. (2021)

(2) 연구 동향

MS 게이트는 양자알고리듬 구현에 많이 사용되는 양자얽힘 게이트이며 이온의 운동을 이용해 양자얽힘을 달성한다. 그러나 이온 큐비트의 개수가 증가하면 운동 값이 증가하므로, 게이트 펄스의 성형(Shaping)을 이용한 높은 신뢰도의 양자얽힘 게이트를 구현하는 것이 필수적이다. 그러므로 펄스의 세기, 주파수, 위상 등의 모양을 변형시켜 양자얽힘의 신뢰도를 높이는 연구가 활발히 진행 중이다. 펄스 변조를 통한 양자얽힘 게이트 구현에 있어 Maryland 대학과 IonQ는 세기 성형을 통해 준비된 11개의 모든 이온쌍에 대해 평균 97.5%의 양자얽힘 게이트 신뢰도를 달성했다.[310] 또한 주파수 성형(Duke 대학[311] 98.3%), 위상 성형(시드니 대학[312] 99.4%), 세기와 주파수 동시 성형(칭화 대학[313] 96.5%) 등의 연구가 진행되고 있다. 한편 IonQ, ATQ(Innsbruck 대학) 등에서는 이온 포획 양자컴퓨터를 이용한 다양한 알고리듬을 구현하고 있으며, 양자오류정정 알고리듬을 통해 신뢰도를 높여 완전한 양자컴퓨터를 완성하려는 연구가 진행되고 있다.

(3) 적용 분야

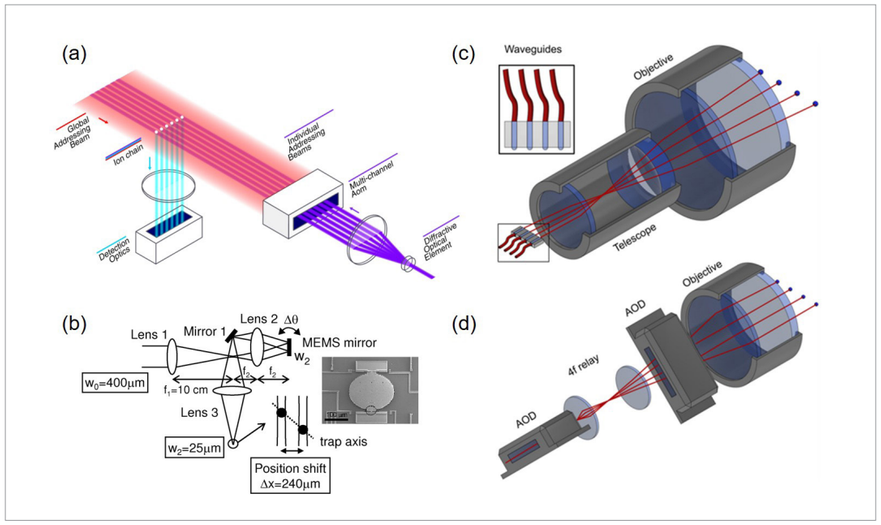
높은 신뢰도를 보여주는 양자게이트와 양자알고리듬의 구현은 실질적으로 양자컴퓨터를 활용할 수 있게 한다. 특히 이온 포획 기반의 양자컴퓨터는 높은 신뢰도와 함께 임의의 큐비트 쌍에서 양자얽힘이 가능하다는 장점으로, 양자알고리듬 결과에서도 높은 신뢰도를 보여주고 있다. 쇼어 알고리듬은 소인수분해를 이용한 암호 해독, 그로브 탐색 알고리듬은 빠른 정보 검색, VQE 등의 양자화학 알고리듬은 신약 및 신물질 개발 등에 사용할 수 있다. 양자알고리듬은 최적화 탐색에 강점을 보일 것으로 예상되며, 금융 최적화 포트폴리오 구성, 항공, 교통의 효율적인 경로 탐색, 일기 예보 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

다. 큐비트 확장

양자컴퓨터의 성능 향상을 위해서는 안정적으로 포획된 큐비트의 개수를 늘리는 것과 더불어 개별 조작 및 측정 기술의 개발이 필요하다. 레이저를 이용한 개별 큐비트 조작 연구가 많이 이루어지고 있으나 일부 마이크로파를 이용한 개별 큐비트 조작 연구도 이루어지고 있다. 레이저를 이용한 개별 큐비트 조작 방법으로는 다채널 음광학 변조기(Multi-channel Aucosto-Optic Modulator), AOD, MEMS를 이용한 기계적 거울 조작, 광섬유 배열을 이용한 방법 등이 사용되고 있다. Cryostat을 이용한 저온 시스템도 안정된 포획 환경을 제공해 시스템의 소형화를 위해 사용되며 IonQ, Duke 대학, Innsbruck 대학, Oxford 대학 등에서 마이크로 포획 장치와 함께 사용하고 있다.

310) K. Wright et al. (2019)
311) Pak Hong Leung et al. (2018)
312) Alistair R Milne et al. (2020)
313) Caroline Figgatt et al. (2019)

그림 II-3-10 양자컴퓨터의 확장을 위한 다양한 큐비트 개별 제어 방법



(a) 다채널 음광학 변조기를 이용한 개별 제어 방법 - IonQ에서 사용하고 있다.[314]
(b) Duke 대학에서 개발한 MEMS 마이크로 거울을 이용한 개별 제어 방법[315]
(c, d) AQT와 Innsbruck 대학에서 개발한 광섬유 배열과 AOD를 이용한 큐비트 개별 제어 방법[316]

(1) 기술 동향

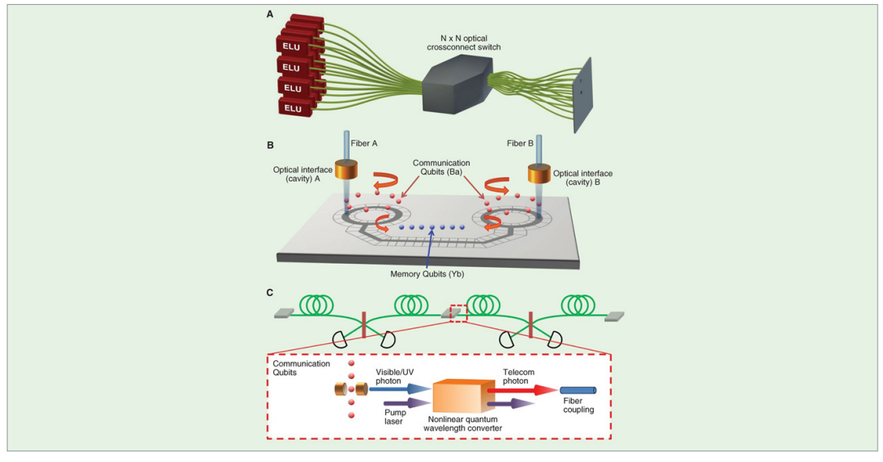
다채널 음광학 변조기를 이용한 연구는 IonQ를 비롯해 지금까지 많은 연구그룹에서 사용되고 있는 방법이다. IonQ에서는 약 70여 개 이온의 개별 조작이 가능하고, 32개의 상호 연결된 이온 큐비트를 제어할 수 있다. Innsbruck 대학은 AOD(Aucosto-Optic Deflector)를 이용해 51개 이온의 개별 조작에 성공했다. 또한 광섬유 배열에 의한 개별 이온 조작도 양자컴퓨터 소형화에 사용되고 있다.[317] Duke 대학에서는 MEMS를 이용한 마이크로 거울을 사용해 이온의 개별 조작 연구를 진행한 바 있다.[318] Sussex 대학에서는 자기장의 세기를 이용하는 서로 다른 지만큐비트(Zeeman Qubit) 에너지를 이용해 마이크로파로 개별 조작 및 양자얽힘을 구현했다.[319]

314) K. Wright et al. (2019)
315) Changsoon Kim et al. (2007)
316) I. Pogorelov et al. (2021)
317) Florian Kranzl et al. (2022)
318) Changsoon Kim et al. (2007)
319) Charles Neill et al. (2017)

(2) 연구 동향

IonQ를 비롯한 많은 그룹에 의해 다채널 음광학 변조기(Multi-channel AOM)를 이용한 개별 이온 큐비트 연구가 계속되고 있다. 빠른 스위칭이 가능하고, 상대적으로 설치가 쉽다는 장점이 있으나, 기술적으로 양자컴퓨터 확장에 어려움이 있고 조작 레이저의 간격 조절이 어렵다는 단점이 있다. Innsbruck 대학과 Duke 대학은 음광학 디플렉터(AOD)를 이용한 개별 이온 조작을 연구하고 있다. 레이저의 방향을 조작해 개별 이온을 조작하는 방법으로, 포획된 이온의 간격 변화와 상관없이 개별 이온을 높은 신뢰도로 조작할 수 있다는 장점을 갖고 있다. Innsbruck 대학과 MIT에서는 광섬유 배열을 이용한 개별 이온 조작을 연구하고 있고, Sussex 대학에서는 마이크로파를 이용하는 양자컴퓨터를 연구하고 있다. 마이크로파는 높은 신뢰도의 양자게이트를 구현할 수 있으나 개별 조작이 어렵다는 단점이 있었지만, 공간상으로 기울어진 자기장을 주어 개별 큐비트를 조작할 수 있게 만들었다. Honeywell에서는 포획 이온을 이동, 교환해 양자얽힘을 구현했다. 개별 이온을 각각 조작하는 것이 아닌, 필요한 이온만 이동시켜 양자얽힘과 양자게이트를 구현하는 연구를 진행 중이다.[320] 오류 보정을 포함해 완전한 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 1,000개의 큐비트가 필요할 것으로 예상된다. [그림 II-3-11]에서 보듯이 하나의 포획 장치에서 1,000개의 이온을 포획해 개별 조작하는 것은 어렵다고 알려져 있으므로, 서로 다른 포획 장치의 연결을 통한 확장을 연구하고 있다.[321] 또한 먼 거리의 양자얽힘 구현 및 양자정보 전달에 관한 연구가 진행되고 있다.

그림 II-3-11 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 확장 아이디어



(a) 개별 계산 유닛(ELU, Elementary Logic Unit)을 모아 하나의 양자컴퓨터를 완성한다.
(b) 광섬유를 통해 양자정보를 전달해 정보를 저장하고 통신을 수행한다.
(c) 이온 큐비트와 광자를 이용한 양자네트워크를 구현하는 아이디어[322]

※ Science 339(6124), 1164 (2013)

320) J. M. Pino et al. (2021)
321) Monroe, C. & Kim, J. (2013)
322) Monroe, C. & Kim, J. (2013)

(3) 적용 분야

큐비트 확장연구는 완전한 양자컴퓨터의 구현을 위해 꼭 필요하다. 그리고 먼 거리 이온 포획 기반 양자컴퓨터의 정보 전달 및 양자얽힘은, 광자와 광섬유를 통해 연결되므로 양자네트워크의 개발이 필수적이다. 이는 곧 양자통신에 사용할 수 있어 정보 보안 측면에서 해킹이 힘든 통신시스템을 구현할 수 있게 된다. 또한 큐비트의 확장을 통해 양자컴퓨터가 구현되면 다양한 양자알고리듬의 구현도 가능해져, 이를 통해 고전 컴퓨터로는 힘들거나 시간이 오래 걸리는 계산도 빠르게 처리돼 새로운 산업의 발생과 에너지 및 자원의 효율적인 사용이 가능할 것으로 예상된다.

그림 II-3-12 양자컴퓨터의 활용이 예상되는 분야와 그 내용



※ 집필진 작성

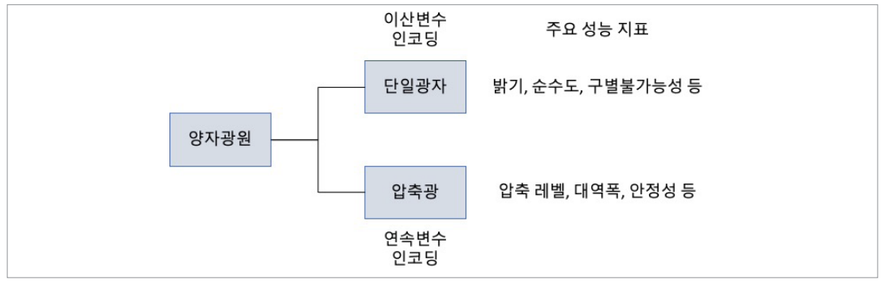
4. 양자광학 기반 양자컴퓨팅

가. 양자광 생성 기술

(1) 기술 동향

양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술은 단일광자나 압축광(Squeezed Light) 같은 양자광원에 정보를 인코딩해 연산에 활용하는 기술이다. 따라서 고효율, 고성능 양자광 생성 기술은 양자광학 기반 양자컴퓨팅 기술에 꼭 필요한 핵심 기술에 해당한다. 양자광원은 크게 단일광자와 압축광으로 나눌 수 있으며, 이들은 각각 이산변수(Discrete Variable)와 연속변수(Continuous Variable)로 양자정보를 인코딩한다. 단일광자는 일정한 시간에 하나의 광자만 존재하는 광원을 나타내며, 압축광은 위상공간에서 한 방향의 불확정성이 양자잡음 한계보다 작은 상태의 광원을 말한다. 단일광자 광원의 성능은 초당 얼마나 많은 개수의 단일광자가 발생하는지를 나타내는 '밝기', 광자 개수 분포에서 단일광자의 비율을 나타내는 '순수도', 다른 단일광자와의 '구별 불가능성' 등으로 평가한다. 압축광 광원의 성능은 압축 정도를 나타내는 '압축 레벨', 압축 용량을 나타내는 '대역폭', 장시간 안정적인 압축광 생성을 나타내는 지표인 '안정성' 등으로 평가한다.

그림 II-3-13 양자광원의 분류에 따른 인코딩 방법과 주요 성능 지표



※ 집필진 작성

단일광자 광원 기술은 크게 단광자 방출체 기반의 확정적 단일광자 생성 방식과 비선형 광학 기반의 광자쌍 생성 방식으로 구분된다. 단광자 방출체 기반의 단일광자 광원은 이론상 원하는 시간에 반드시 단일광자를 방출하는 확정적 단일광자 생성이 가능하며, 나노 공진기, 나노 안테나 등 나노포토닉스 구조를 결합해 '밝은' 단일광자 광원을 만들 수 있다. 단광자 방출체로는 주로 양자점이나 점결함 색중심(Color Center)이 널리 연구되고 있다. 여러 개의 단일광자를 생성하기 위해서는 다수의 단광자 방출체를 활용하거나 하나의 단광자 방출체에서 생성된 단일광자를 시공간적으로 나누는 방법이 있다. 다중 단일광자의 구별 불가능성을 확보하기 위해서는 보통 단광자 방출체를 극저온으로 냉각해 포논(Phonon)에 의한 잡음(Noise)을 최소화하는 방법을 사용한다. 그리고 다수의 단광자 방출체를 이용할 때는 별도의 온도, 전기장, 자기장, 물리적 변형(Strain) 등에 대한 미세조정이 필요하다.

비선형 광학의 자발방출(Spontaneous Emission)을 이용해 광자쌍을 만들어, 하나의 광자쌍 측정을 통해 반대편에 단일광자가 생성되었음을 알 수 있는, 예고된(Heralded) 단일광자 광원을 만들 수 있다. 이 방식은 실험 장치가 비교적 단순하고 상온에서 동작하며, 단일광자 간 구별 불가능성을 쉽게 충족할 수 있다는 장점이 있으나, 원리상 확정적 단일광자 생성이 불가능하다. 하지만 최근에는 광자쌍 광원을 시간 다중화 (Time-Multiplexing) 하여 확정적 단일광자를 만드는 연구가 진행되고 있다.

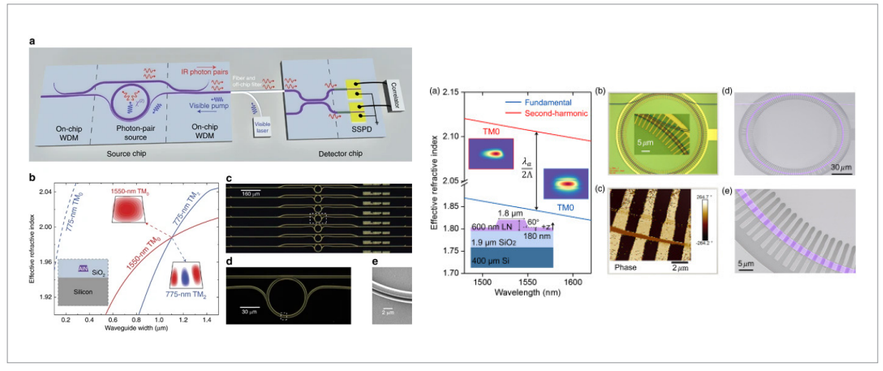
양자광학 기반 양자컴퓨팅을 위해서는 단일광자 간 양자얽힘을 만드는 '양자얽힘 광원'을 만드는 과정이 필요하며, 이를 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 양자얽힘 광원은 복수의 단일광자 간 양자간섭과 후선택(Post-Selection)을 이용해 생성할 수 있으며, 이를 위해서 단일광자 간 구별 불가능성이 확보돼야 한다. 우선 단일광자 간 상호작용을 이용하면 이론적으로 확정적인 양자얽힘 광원 생성이 가능하므로, 이 상호작용에 필요한 비선형성을 극대화하기 위해 원자 등 매질과 광공진기를 활용하는 연구가 진행되고 있다. 또한 단일광자를 만들 때 하나의 광자를 만드는 대신 광자쌍을 만들고, 이들 간의 양자얽힘을 생성함으로써 양자얽힘 광원을 효율적으로 만들 수 있다. 비선형 광학 기반의 광자쌍 생성 시 처음부터 양자얽힘 광자쌍을 만드는 기술은 이미 잘 정립돼 있으며, 양자점과 같은 단광자 방출체에서도 바이엑시톤(Biexiton)을 이용한 광자쌍 생성 기술이 연구되고 있다. 다만 후선택 과정에서 필연적으로 손실이 발생하므로, 이러한 양자얽힘 광원 생성 방식은 확률적인 측면에서 뚜렷한 한계가 존재한다.

압축광은 비선형 광학 과정을 통해 생성할 수 있으며, 매질로는 비선형 크리스털이나 원자시스템을 주로 이용하고 비선형성을 극대화하기 위해 종종 광공진기를 함께 이용하기도 한다. 현재 압축광의 압축 레벨을 높이기 위한 다양한 연구가 진행 중이며, 양자컴퓨팅 분야에서는 양자 시뮬레이터의 일종인 가우시안 보존 샘플링(Gaussian Boson Sampling)을 위한 광원으로 많이 활용한다.

(2) 연구 동향

해외 비선형 광학 기반 광자쌍 생성 기술은 중국, 미국, 유럽, 호주 등 기술 선진국을 중심으로 발전하고 있으며, 최근 전체 시스템 효율이 87.5%인 양자얽힘 광원이 보고됐다.[323] 미국 일리노이 주립대학은 광자쌍 광원에 시간 다중화(Time-Multiplexing)를 적용해 확정적 단일광자 광원을 만드는 연구를 주도하고 있으며, 67%의 예고도(Heralding) 효율을 달성했다.[324] 미국 예일대학교에서는 비선형 물질로 제작한 나노 공진기 기반 광자쌍 생성 연구 결과를 물질별로 보고했다.[325] [326]

그림 II-3-14 (왼쪽) AlN 비선형 물질로 나노 공진기를 제작해 광자쌍을 생성한 결과
(오른쪽) $LiNbO_3$ 비선형 물질로 제작한 나노 공진기



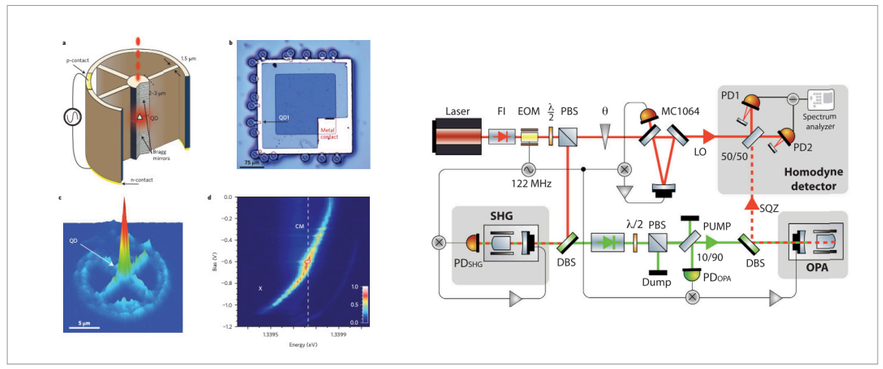
※ Guo (2016), Lu (2020)

323) Liu (2022)
324) Kaneda (2019)
325) Guo (2017)
326) J. Lu (2020)

양자점 단광자 방출체를 이용한 단일광자 생성 연구 역시 미국, 중국, 유럽 등을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 구별 불가능한 다수의 단일광자를 생성해 양자정보처리에 활용하는 수준으로, 국내와의 기술격차가 존재하는 것이 현실이다.[327) 328)]

압축광 양자광원은 유럽, 호주, 일본, 중국 등에서 기술 개발을 수행하고 있으며, 특히 유럽과 호주의 연구개발 기간은 20여 년이 넘을 정도로 오래돼 많은 노하우를 보유하고 있다. 세계 최고 수준의 압축 레벨은 15dB 수준으로, 연속변수 기반 양자컴퓨팅에 필요한 18dB에 근접한 수준이다.[329)]

그림 II-3-15 (왼쪽) 프랑스 CNRS 연구소에서 개발한 양자점 기반 단일광자 광원
(오른쪽) 독일 막스 플랑크 연구소에서 개발한 15dB 압축광 생성 및 측정 장치



※ Somaschi (2016), Vahlbruch (2016)

(3) 적용 분야

양자광원은 양자광학 기반 정보 처리의 기본 자원으로 양자통신, 양자네트워크, 양자센서, 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션에 다양하게 활용될 수 있다. 세계적으로는 양자광원 자체를 부품이나 장비로 개발해 상용화하는 사례가 생기고 있으나, 국내에서는 아직 상용화 사례가 없다. 최근 미국 광학 부품 회사인 Thorlabs와 프랑스 스타트업 회사인 Aurea에서 비선형 광학 기반 광자쌍 양자광원 장비를 상용화했으며, 덴마크 스타트업 회사인 Sparrow Quantum에서는 단일광자를 생성하는 양자점 소자를 상용화했다.

327) Somaschi (2016)
328) Arakawa (2020)
329) Vahlbrunch (2016)

나. 양자광 측정 기술

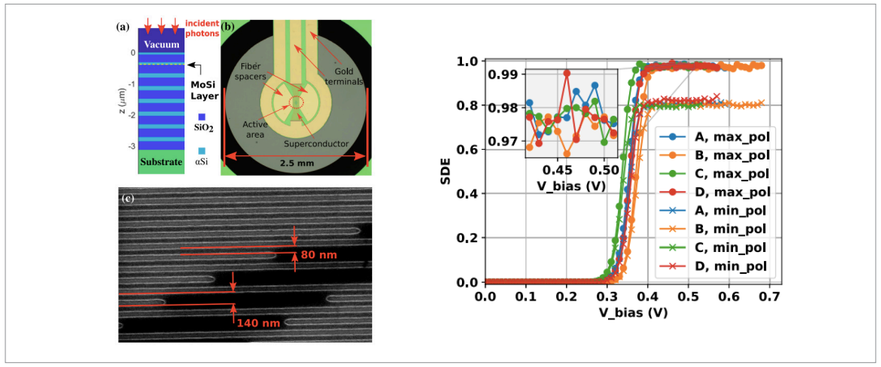
(1) 기술 동향

양자정보처리를 위해서는, 생성한 양자광원의 잡음을 최소화하며 효율적으로 측정하는 기술이 필수적이다. 단일광자는 보통 가이거 모드 광다이오드나 극저온에서 작동하는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기를 이용해 측정할 수 있지만, 이들은 단일광자의 유무만을 측정할 수 있으며 광자의 개수를 측정할 수는 없다. 광다이오드나 초전도 나노와이어 단일광자 검출기 Multiplexing을 통해 광자 개수를 검출할 수 있으나, 효율이나 비용에서 한계가 존재한다. 수십 mK 수준의 극저온에서 동작하는 Transition Edge Sensor(TES)를 이용해 수십 개 수준의 광자 개수를 측정할 수 있는 기술이 존재한다. 압축광 등 연속변수 기반 양자광원은 호모다인(Homodyne) 검출을 통해 측정할 수 있으며, 호모다인 측정 장치는 고효율 광다이오드와 아날로그/디지털 논리회로로 구성된다.

(2) 연구 동향

고효율 초전도 나노와이어 단일광자 검출기에 관한 연구가 미국 NIST 주도로 진행되고 있으며, 최근 98%의 단일광자 검출 효율을 달성한 결과를 보고했다.[330)] 미국 예일대학교에서는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기를 나노포토닉스에 접목해 집적회로에서 91%의 효율로 단일광자를 검출한 연구 결과도 발표했고,[331)] 이 결과를 독일 Karlsruhe, Munster 공대 등에서 발전시켜 연구 중이다.[332)]

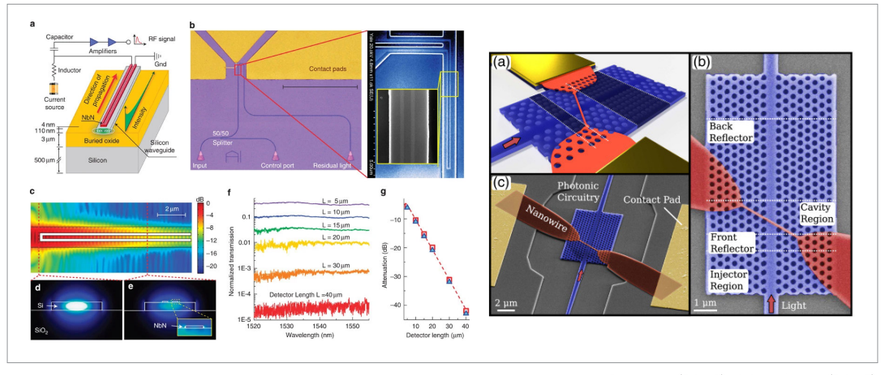
그림 II-3-16 미국 NIST에서 개발한 검출 효율 98%의 초전도 나노와이어 단일광자 검출기



※ Reddy (2020)

330) Reddy (2020)
331) Pernice (2012)
332) Munzberg (2018)

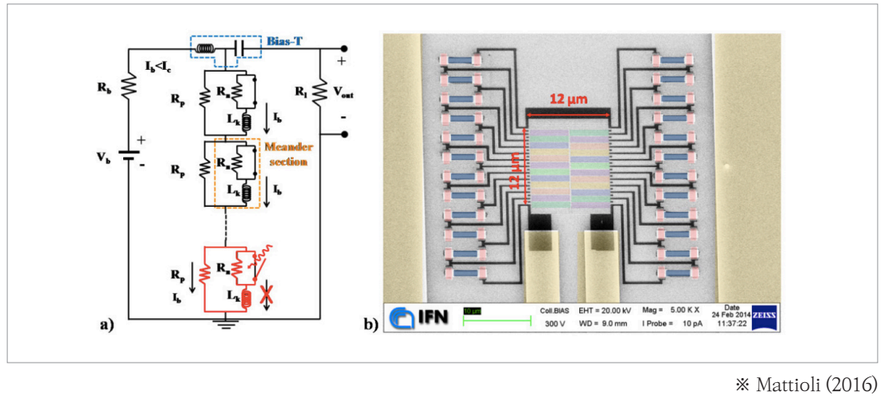
그림 II-3-17 (왼쪽) 미국 예일대학교, (오른쪽) 독일 Munster 대학교에서 개발한 나노포토닉스에 집적화한 초전도 나노와이어 단일광자 검출기



※ Pernice (2012), Munzberg (2018)

미국, 네덜란드, 러시아, 스위스 등에서 초전도 나노와이어 단일광자 검출기를 상용화하는 다양한 스타트업 회사가 설립되고 있다. 이들이 만드는 상용 초전도 나노와이어 단일광자 검출기의 사양은 대동소이하며, 최대 80~85% 수준의 단일광자 검출 효율을 보이는 수준이다. 초전도 나노와이어 단일광자 검출기는 광자의 개수를 검출할 수 없으나, Multiplexing을 통해 검출하려는 연구개발이 진행 중이며, 현재 최대 24개의 단일광자를 검출할 수 있다. 다만 이런 방식으로는 단일광자 검출 효율이 낮아지며, 24개의 단일광자를 검출한 경우에서도 단일광자 검출 효율이 1% 미만으로 측정된다.[333]

그림 II-3-18 이탈리아 CNR 연구소와 네덜란드 Eindhoven University of Technology에서 공동으로 개발한, 24개 단일광자를 검출할 수 있는 초전도 나노와이어 단일광자 검출기



※ Mattioli (2016)

그림 II-3-19 최고 수준 초전도 단일광자 검출기의 광자 개수 검출 성능 비교

Detector Type	Dynamic Range, n	Detection Efficiency	T_O	λ range	Count Rate
TES	1 to 16	95%@1550 nm	80 mK	Optical to infra-red	10 KHz
6-Pixel SNSPD [32]	1 to 6	68%@1550 nm	7.0 K	1100 to 2000 nm	300 MHz
24-Pixel SNSPD [33]	1 to 24	0.8%@1310 nm	1.6 K	Not specified	700 MHz

※ Morais (2020)

광자 개수를 검출할 수 있는 TES에 대한 연구개발 역시 미국, 유럽, 일본 등에서 진행되고 있으며, 수십 개의 광자 개수를 구분하는 수준의 기술을 보유하고 있다.[334] 압축광 등 연속변수 양자광원을 검출하기 위한 호모다인 검출기의 경우, 이미 광다이오드 양자효율이 거의 100%에 가까워 소자보다는 전체 시스템의 광손실과 잡음을 줄이는 방향으로 연구개발이 진행 중이다. 세계 최고 기록인 15dB 압축 레벨은 이러한 호모다인 검출기의 제작 노하우가 축적된 연구 결과이다.

(3) 적용 분야

양자광원 생성과 함께 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이션 등 양자광학 기반 정보처리 전 분야에 활용되는 필수 기술로, 미세한 빛을 측정하는 기술은 양자광원과 함께 이용하지 않더라도 라이다(LiDAR), 광통신 등 기존 광학 기술의 성능을 한 단계 높여줄 것으로 기대된다.

다. 양자연산공간 확장 기술

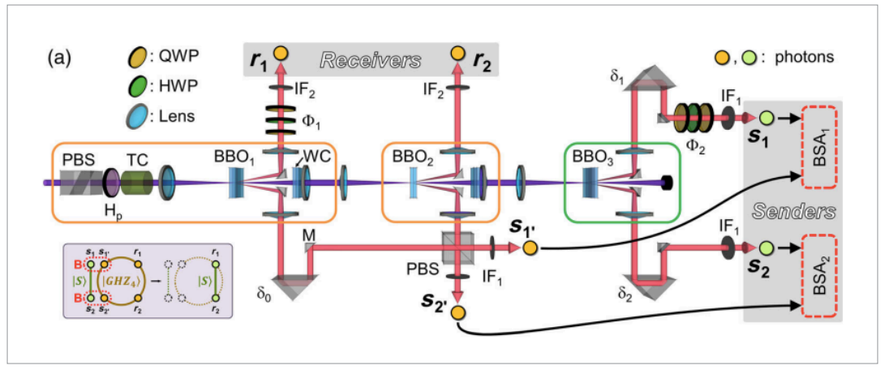
(1) 기술 동향

양자컴퓨팅의 성능을 향상하기 위해서는 양자광학으로 표현할 수 있는 양자연산공간을 확장하는 기술이 필수이다. 이산변수 기반 양자광학에서는 단일광자의 개수를 증가시키거나 단일광자가 가지고 있는 다양한 자유도를 동시에 이용함으로써, 표현할 수 있는 양자연산공간을 확장하는 방법이 주로 이용된다. 연속변수 기반 양자광학에서는 압축광의 모드를 확장함으로써 양자연산공간을 확장할 수 있다. 양자연산공간의 효율적인 확장을 위해서 집적광학계를 이용해 많은 광학 부품을 구현하고, 시스템 안정성을 높이는 연구가 널리 진행되고 있다.

333) Mattioli (2016)

334) Morais (2020)

그림 II-3-20 한국표준과학연구원의 6 광자 양자정보 실험 장치



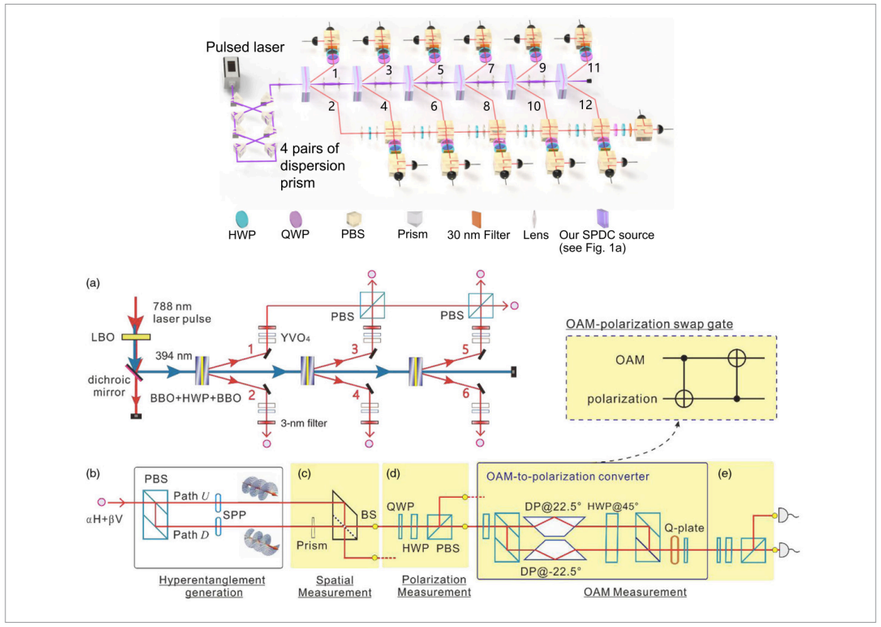
※ Lee (2020)

(2) 연구 동향

비선형 광학 기반 광자쌍을 이용해 다수의 단일광자를 생성하는 연구에서는, 중국 USTC가 12 광자 수준의 실험을 성공적으로 수행했다.[335] 다만 중국 USTC 외에는 최대 6 광자 수준의 실험에 머물러 있어, 1위와의 격차가 상당히 많이 벌어진 상황이다. 단일광자의 다양한 자유도를 이용해 양자연산공간을 확장하는 연구 역시 중국 USTC가 세계 최고 수준의 기술을 보유하고 있다. USTC는 2018년 하나의 단일광자에 3개의 큐비트를 인코딩한, 단일광자 6개를 생성하고 측정하는 것에 성공해 18 큐비트 양자얽힘을 구현했다.[336]

335) Zhong (2018)
336) Wang (2018)

그림 II-3-21 (위) 중국 USTC의 12 광자 양자얽힘 생성 실험 장치
(아래) 중국 USTC의 6 광자 18 큐비트 양자얽힘 생성 실험 장치



※Zhong (2018), Wang (2018)

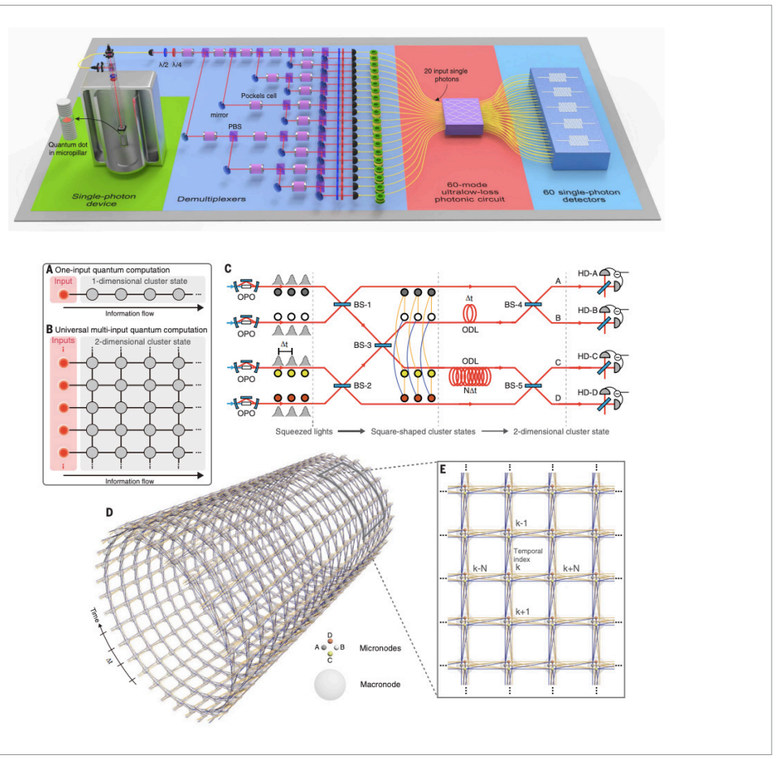
단일광자 방출체에서 구별 불가능한 다수의 단일광자를 생성하는 기술 역시 중국 USTC가 세계 최고 수준으로, 하나의 양자점에서 발생하는 단일광자를 20개 광경로로 나눠 최대 14 광자 양자 시뮬레이션 실험에 성공했다.[337] 연속변수 양자광학 기반 양자연산공간은 시간 영역 다중화(Time-Domain- Multiplexing)를 이용해 확장할 수 있으며, 일본에서 선도적인 연구를 수행하고 있다.[338] 집적광학계를 이용한 양자연산공간 확장 연구는 미국, 유럽, 호주 등이 치열하게 경쟁하고 있다.[339]

(3) 적용 분야

양자연산공간 확장은 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이터의 유용성을 높이기 위해 꼭 필요한 기술이다. 특히 집적광학계 기반 양자연산공간 확장 기술은 기존 집적광학계 기반 광기술을 이용할 수 있어, 양자컴퓨터를 포함한 양자정보 이외의 분야에서도 큰 파급효과를 가져올 것으로 기대한다.

337) Wang (2019)
338) Asavanant (2019)
339) Pelucchi (2022)

그림 II-3-22 (위) 중국 USTC의 양자점 단일광자를 이용한 20 광자 인풋 14 광자 보존 샘플링 실험 장치
(아래) 일본 동경대의 Time-Domain-Multiplexing 기반 연속변수 양자연산공간 확장 실험 장치



※ Wang (2019), Asavanant (2019)

라. 양자광학 기반 양자 시뮬레이터

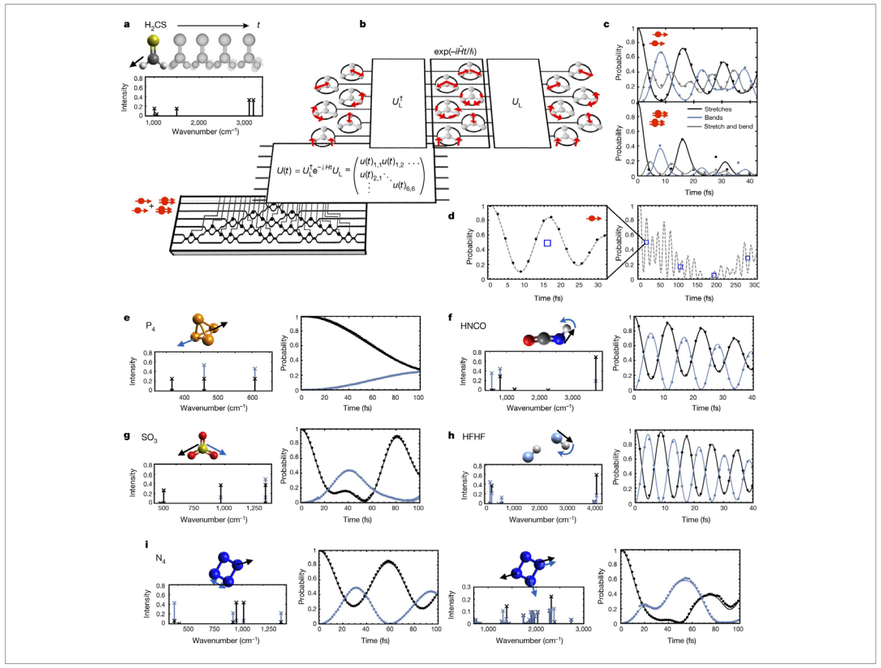
(1) 기술 동향

최근 양자컴퓨팅 및 양자 시뮬레이션 기술이 발전하면서 이를 양자정보처리에 활용할 수 있음을 증명하는 연구가 널리 진행되고 있다. 이것은 주로 유용한 양자알고리듬에 대한 원리검증(Proof-Of-Principle) 실험의 구현 연구와 실험적 양자이득을 달성하기 위한 연구로 나눌 수 있다. Shor 알고리듬, 양자화학, 양자머신러닝 등을 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터에 적용하는 연구로, 아직 그 성과가 디지털 컴퓨터를 넘어서진 못했지만, 후속 연구를 통해 양자컴퓨터가 유용한 분야에 적용될 수 있음을 보여주고 있다. 현존하는 디지털 컴퓨터로 풀 수 없는 문제의 해답을 양자광학 기반 기술을 이용해 구함으로써, 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터의 우월성을 증명하는 것이 연구의 목표이다.

(2) 연구 동향

양자컴퓨터를 계산화학이나 머신러닝에 적용해 유용성을 증명하려는 연구가 진행되고 있다.[340) 341)] 중국 USTC와 캐나다의 Xanadu는 광자 기반 양자 시뮬레이터를 이용해, 현재의 디지털 컴퓨터로는 풀 수 없는 문제의 정답을 도출하는 데 성공했다.[342) 343)] 이들이 해결한 문제는 가우시안 보존 샘플링으로 다중 모드 연속변수 양자광원을 단일광자 검출기로 측정하는, 이산변수-연속변수 하이브리드 양자 시뮬레이션에 해당한다. 이 연구 결과는 초전도 양자컴퓨터 기반의 무작위 회로 샘플링 연구 결과와 함께 실험적 양자이득 증명 결과로서 중요한 의미가 있다. 하지만 현재까지 성공한 두 양자이득 실험 결과는 모두 응용 분야가 알려지지 않아, 실용적인 응용 분야를 발굴하기 위한 노력은 계속 진행 중이다.

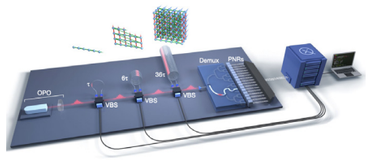
그림 II-3-23 4광자를 이용해 분자의 진동스펙트럼을 시뮬레이션하는 실험 장치와 실험 결과



※ Sparrow (2018)

340) Sparrow (2018)
341) Veruccio (2022)
342) Zhong (2020)
343) Madsen (2022)

그림 II-3-24 (왼쪽) 중국 USTC의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치
(오른쪽) 캐나다 Xanadu의 가우시안 보존 샘플링 실험 장치

※ Zhong (2020), Madsen (2022)

(3) 적용 분야

계산화학, 머신러닝 등 양자컴퓨터 전 분야에 활용할 수 있어, 궁극적으로 교통 체증 해결 같은 사회적 문제에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 이를 위해선 많은 수의 논리 큐비트와 그것보다도 훨씬 더 많은 수의 물리 큐비트가 필요해, 향후 실생활에 적용하기 위해선 많은 기술 발전이 필요하다.

5. 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨팅

가. 다이아몬드 성장 및 NV 센터 형성

(1) 기술 동향

양자컴퓨터의 공정 및 생산을 위해서는 기존 반도체 공정 기술이 다이아몬드 공정에 적용될 수 있도록 발전해야 한다. 즉 다이아몬드 성장에 관한 종합적인 품질 관리가 정의되고, 이온 주입과 다이아몬드 성장 기술들이 표준화돼야 할 것이다. 다이아몬드 큐비트 생산을 위한 주요 기술로는 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD), 이온 주입, 그리고 열처리 공정이 있다. 그 밖의 다른 대부분 공정에 대해서는 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 공정 기준 적용이 가능하다.

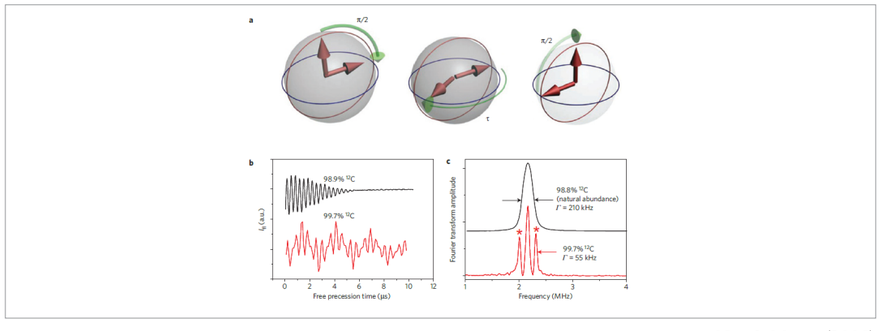
(2) 연구 동향

① 다이아몬드 성장 기술

양자역학이 공학의 영역에서 응용 기술로 발전하기 위해서는, 사용되는 재료 또한 Quantum Grade의 순도에 맞춰야 한다. 연구 결과 보고에 따르면 ^{13}C 동위원소의 양을 0.3%까지 낮추고, 다른

상자성 결함의 농도도 $10^{13}cm^{-3}$ 미만으로 낮춘 환경에서 다이아몬드 NV 센터를 성장했을 때, 결맞음 시간이 상온에서 1.8ms까지 증가하는 것을 확인했다.[344] FID(Free Induction Decay) 또한 ^{13}C의 농도가 옅어짐에 따라 스펙트럼 선폭이 55kHz까지 줄었다.

그림 II-3-25 단일 스핀들의 ^{12}C 농도에 따른 결맞음 시간 비교



※ Nat & Mater (2009)

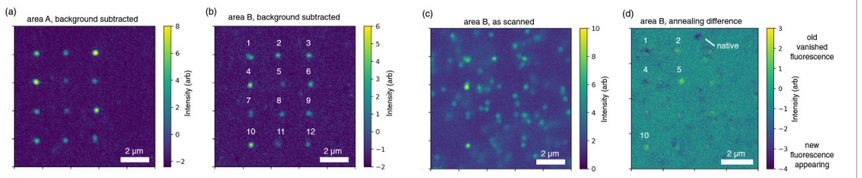
Element6 같은 회사들이 다이아몬드 성장에 관련된 다양한 파라미터가 제어된 제품을 개발하고 있음에도 불구하고, 여전히 실험에 영향을 줄 수 있는 수소 함량, 결함, 스트레스 등의 다른 변수들에 대한 표준화 작업이 진행되지 못했다.

② 이온 주입 기술

이온 주입 기술은 다이아몬드 내부에 첨가물(Dopant)을 주입하는 방법의 하나인데, 최근 비약적으로 발전하면서 나노미터 수준의 정확도를 가지고 원하는 위치에 이온 주입이 가능한 기술이 보고됐다.[345] Pr^{+} 이온 소스를 이용해 Yttrium-Aluminum-Garnet 기판에 Praseodymium Color Center Array 공정을 성공시켰다. 이 과정에서 공초점 현미경을 이용해 50% 수준의 활성화율과 34nm 수준의 위치 정확성을 확인했다. 다이아몬드를 성장하는 공정 중에 질소 이온을 넣고, 후에 열처리 공정을 통해 NV 센터를 형성시키는 방법이 있지만, 이 방법으로는 나노미터 수준의 정확성을 구현할 수 없다. 이온 주입 시 재료 내 전자뿐만 아니라 결정 내 원자핵과 충돌하는 이온 주입 원리 때문에, 다이아몬드 내부에서 예상된 경로를 벗어나는 것을 넘어 주변에 많은 결함을 초래할 수 있다. 이렇게 경로가 벗어나는 현상을 스트래글링(Straggling)이라고 부르는데, 나노미터 수준의 정확성을 확보하기 위해 이러한 스트래글링 현상을 제한하는 방향으로 주입 에너지를 최적화해야 한다.

344) Nat & Mater (2009)
345) Phys et al. (2019)

그림 II-3-26 이온 주입 후 Praseodymium Color Center Array의 형광 이미지



※ Phys et al. (2019)

③ 열처리 기술

NV 센터의 경우, 주입된 질소 원자로부터 NV 센터로의 전환은 열처리 공정을 통해 이루어진다. 동공들이 열처리 공정에 의해 주입된 질소 원자를 향해 확산하고, 주입 공정에 의해 생성된 결함들을 회복시킬 수 있다. NV 센터는 1,300도 정도에서 해리되기 시작하고, 1,000도 이하에서 NV 센터의 재방향(Re-Orientation)은 일어나지 않는다. 중성 공동(Neutral Vacancies)는 2.12 eV의 활성화 에너지를 가지고 1,000도에서 1.5nm^2/s 수준, 850도에서는 1.8nm^2/s의 확산 속도를 가지는 것으로 보고됐다.[346] 이러한 NV 센터 생성 공정은 V_2 또는 다른 복합물질을 형성시킬 수 있다. NV 센터로 변환되지 못한 질소 원자나 Divacancy는 NV 센터들의 결잃음(Decoherence) 원인이 된다.

(3) 적용 분야

다이아몬드 성장, 이온 주입, 열처리 기술은 양자현상 측정 및 제어를 할 수 있는 수준의 다이아몬드 기판을 제작할 때, 모든 공정에 적용할 수 있다.

나. 다이아몬드 NV 센터 전자스핀 및 핵스핀 제어

(1) 기술 동향

다이아몬드 NV 센터를 이용해 양자컴퓨팅 기술을 개발하는 가장 큰 이유 중 하나는 NV 센터가 안정된 양자상태를 유지하는 특성 때문이다. NV 센터에 묶여있는 전자들은 스핀 1 (S=1) 상태를 가지며, 스핀 버금준위(Sublevel)간의 중첩상태들은 상온에서도 오랫동안 결맞음 상태를 유지할 수 있다.

346) Phys et al. (2017), Phys et al. (2019)

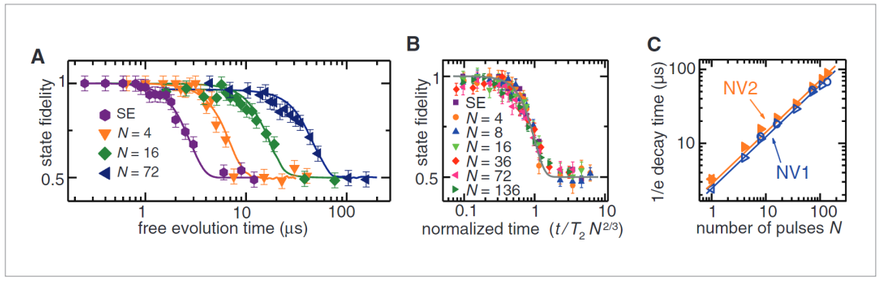
이것은 다이아몬드 재료의 특성상 스핀-궤도 결합(Spin-Orbit Coupling)이 작고, 자성을 갖는 원자핵이 거의 없기 때문이다. 하지만, 다이아몬드 NV 센터 전자스핀의 결맞음은 여전히 주변 전자스핀 또는 원자핵스핀들과의 자기적 상호작용 때문에 제한된다. 양자연산의 신뢰성을 높이고 연산 횟수를 획기적으로 늘리기 위해, 주변환경과의 자기적 상호작용을 최소화하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

(2) 연구 동향

① Dynamic decoupling

스핀의 상태를 주기적으로 반전시킴으로써 주변 스핀들의 노이즈를 상쇄시키는 방법이 개발됐다.[347] 스핀 상태가 뒤집히며 주변환경과의 상호작용이 반대로 이루어지는데, 이러한 메커니즘을 매우 빠르게 적용하면 천천히 변하는 주변 노이즈들을 효과적으로 제거할 수 있다. Dynamical Decoupling 기술이라고 불리는 이 방법을 이용하면 결맞음 시간을 스핀-격자 완화(Spin-Lattice Relaxation) 시간 정도까지 늘릴 수 있다.

그림 II-3-27 Dynamical Decoupling 펄스 개수에 따른 결맞음 특성 변화 그래프



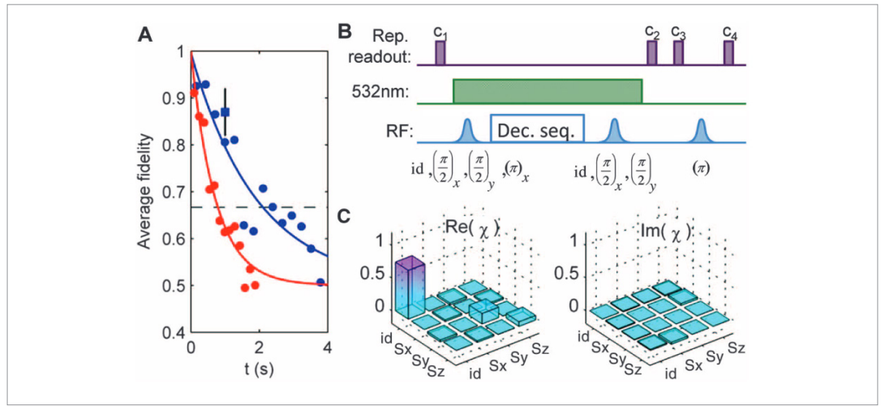
※ Science (2010)

② Quantum Memory

전자스핀 주변의 스핀들은 노이즈 소스가 되지만, 한편으로는 양자상태를 저장할 수 있는 자원으로 활용될 수 있다. 핵스핀들은 전자스핀과 비교해 훨씬 오래 양자상태를 유지할 수 있는데, 자기적 상호작용을 통해 NV 센터 전자스핀은 각각의 핵스핀 상태를 읽거나 제어할 수 있다. NV 센터 전자스핀과 근접한 ^{13}C 원자핵스핀을 사용한 실험에서 전자스핀을 이용해 핵스핀 상태를 원하는 상태로 초기화하고, Single Shot Readout 기술을 이용해 상태를 읽어냈다. Rf Decoupling 기술을 이용해 핵 큐비트 상태를 주변 전자스핀과 핵스핀들로부터 보호함으로써, 큐비트 메모리 저장 시간을 세 배 정도 늘릴 수 있었다.[348]

347) Science (2010)
348) Science (2012)

그림 II-3-28 시간에 따른 핵스핀 메모리 신뢰성 그래프



※ Science (2012)

③ 양자오류정정

양자컴퓨터를 구현하기 위해서 높은 신뢰도의 Readout과 제어할 수 있는 전자스핀, 높은 결맞음 특성을 갖고 잘 보호된 큐비트로 구성된 핵스핀 등의 다양한 관련 기술들이 제안됐다. 하지만 핵스핀도 주변 환경의 영향으로 인해 연산 오류를 일으키는 결잃음 상태가 될 수 있고, 양자상태의 작은 변화들도 오류 가능성을 높일 수 있으므로 오류정정기술의 적용이 필요하다. 그러나 오류정정기술이 고체 상태의 양자시스템에 적용된 사례는 많지 않은데, 이는 높은 정확도로 Non-Local 제어가 가능한 최소 세계 이상의 큐비트 구현이 어렵기 때문이다. NV 센터에 근접한 한 개의 ^{14}N 핵스핀, 두 개의 ^{13}C 핵스핀을 이용해 세 개 큐비트의 Phase-Flip 오류정정 실험이 보고된 바 있다.[349]

(3) 적용 분야

다이아몬드 NV 센터 전자스핀 및 핵스핀 제어 기술은 큐비트를 이용한 연산 과정뿐만 아니라, 큐비트 주변 노이즈를 효과적으로 제거하거나 정보 저장 시간을 효과적으로 연장함으로써, 양자컴퓨팅 결과의 정확성과 신뢰성 확보에 크게 이바지할 수 있다.

349) Nature (2014)

다. 큐비트 상태 측정

(1) 기술 동향

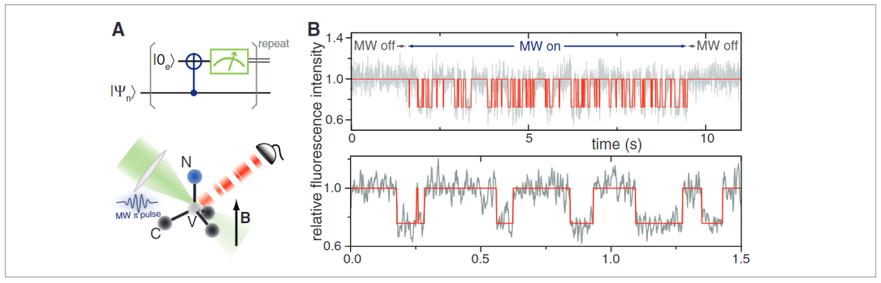
큐비트 측정 기술은 양자컴퓨터를 개발하는 기술 중 가장 중요한 분야이다. 큐비트의 상태 변화 없이 측정하는 방법을 Single-Shot Readout이라고 부른다. 큐비트 측정은 광학적 방법 또는 전기적 방법으로 가능한데, 두 방법 모두 큐비트의 상태 변화 없이 상태 측정이 가능하다.

(2) 연구 동향

① Optical Spin Readout

큐비트 측정 시, 가장 바람직한 방법은 타겟 큐비트와 주변 큐비트의 상태를 변화시키지 않는 것이다. 상온에서 처음 전자스핀 상태는 $|0_e\rangle$ 상태이고. 원자핵스핀은 $|1_n\rangle$ $|0_n\rangle$ $|-1_n\rangle$ 상태들이 혼합된 상태이다. 원자핵스핀 선택적인 마이크로파 π 펄스를 이용해 전자스핀 상태를 −1 상태로 바꾸면, 이것은 원자핵스핀 상태에 의해 결정되는 CNOT 게이트 같은 역할을 하게 된다. 즉 이 측정은 원자핵스핀 상태를 전자스핀 상태에 반영시킨다. 이러한 측정은 NV 센터의 긴 결맞음 시간과 뛰어난 초미세 구조(Hyperfine Structure) 분해능 덕분에 가능하다. 결과적으로 $|0_e\rangle$ 상태와 $|-1_e\rangle$ 상태의 형광 세기 차이 때문에 타겟 원자핵스핀 상태를 알 수 있게 된다. 이 측정은 전자스핀 상태는 변화시키지만 핵스핀 상태는 변화시키지 않기 때문에, 여러 번 측정이 가능하다.[350]

그림 II-3-29 상온 Single Shot Readout 측정 방법 및 실시간 핵스핀 상태 변화 그래프

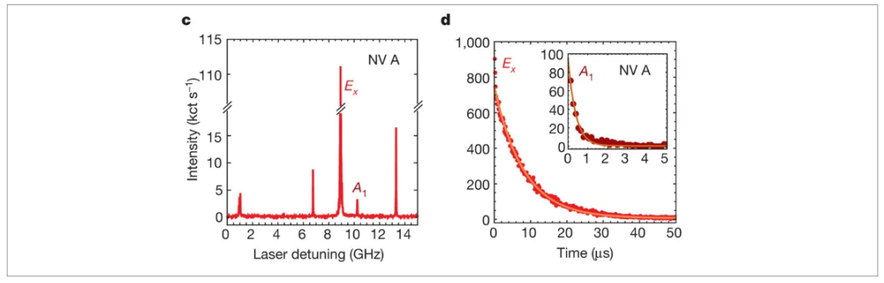


※ Science (2010)

저온 Single Shot Readout은 상온 측정에 비해 쉽다.[351] 특정 파장의 레이저를 이용해 $m_s = 0$ 상태만 여기시킬 수 있기 때문이다. 즉 마이크로파에 의해 상태가 바뀌지 않으면 스핀 상태는 $m_s = \pm 1$로 결정될 수 있다.

350) Science (2010)
351) Nature (2011)

그림 II-3-30 레이저 주파수에 따른 형광 스펙트럼과 시간에 따른 변화 그래프



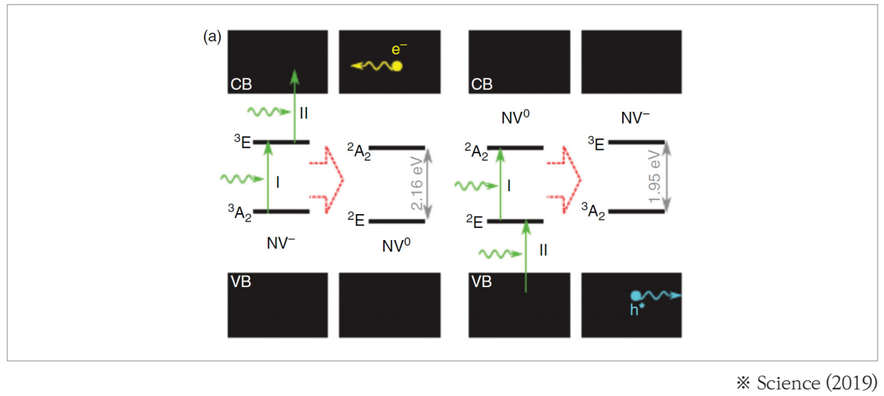
※ Nature (2011)

하지만, 이러한 Optical Spin Readout 방법들은 모두 레이저 파장 때문에 공간분해능이 제한된다.

② Electrical spin readout

NV 센터 전자스핀 상태 측정을 위해 광전자들이 사용될 수 있다. 이 방법은 NV 센터를 이온화시키기 위해 이광자 과정(Two-Photon Process)을 사용한다.[352] 적용되는 두 번째 레이저빔의 사용은 NV^0로부터 NV^-로 회복되는 속도를 증가시킨다. 이 과정이 반복되면 발생하는 광전자의 개수는 NV 센터 전자스핀 상태에 의해 결정된다. Optical Readout과 같은 방법으로 저온과 상온에서 핵스핀을 이용해 Single Shot Readout이 가능하다. 측정 시, 전자를 끌어당기기 위한 전압 형성을 위해 원하는 NV 센터 근처에 전극을 형성시켜야 한다.

그림 II-3-31 NV-이온화와 회복 프로세스를 통한 Charge-Carrier 생성 과정 모식도



※ Science (2019)

352) Science (2019)

(3) 적용 분야

큐비트 상태 측정 기술은 큐비트 간 연결 방법 결정에 영향을 끼칠 수 있다. 두 가지 방법 모두 Single Shot Readout이 가능함에 따라, 다중 큐비트의 집적화 및 장거리 큐비트 연결기술 개발에 적용될 수 있다.

라. 다중 큐비트 연결

(1) 기술 동향

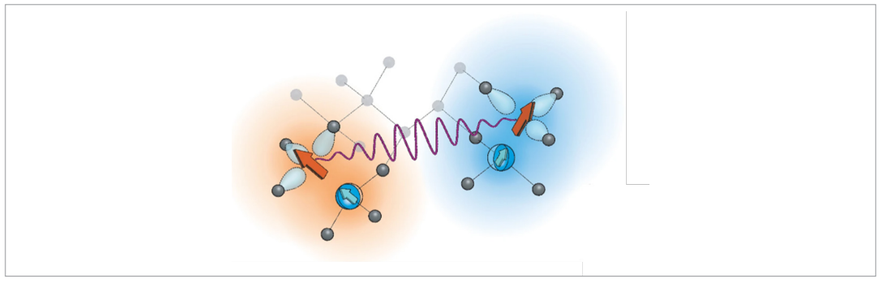
NV 센터 한 개의 전자스핀과 핵스핀들은 높은 결맞음 상태를 유지하며 제어 가능한 양자레지스터 기능을 수행할 수 있다. 하지만 현장에서 유용한 기능성을 확보하는 것에 있어, 한 개의 NV 센터 주변에 존재하는 몇 개의 큐비트를 활용하는 것은 부족하다. 이 문제를 해결하기 위해 멀리 떨어진 큐비트들을 연계시킬 수 있는, NV 센터 기반 양자레지스터들의 결맞음 네트워크 형성 방법이 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

① NV-NV 간 연결

첫 번째 방법은 NV 센터들 간의 자기적 상호작용을 이용하는 것이다. 전자스핀들의 쌍극성 결합(Dipolar Coupling)을 이용해 서로 다른 NV 센터들의 핵스핀 간 상호작용을 제어하는 것이다. 그리고 이러한 메커니즘은 다중 큐비트 연산을 위해 확장 가능한 플랫폼으로 발전할 수 있다. 수년 전 한 연구팀에 의해, 두 개의 근접한 NV 센터 스핀들의 양자얽힘 현상이 구현된 바 있다.[353]

그림 II-3-32 NV 센터 Pair 모식도



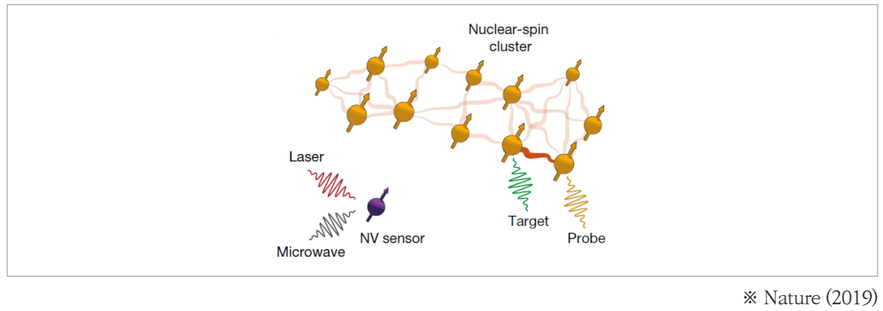
※ Nat & Phys (2013)

353) Nat & Phys (2013)

② NV-^{13}C 간 다중결합

저온에서 스펙트럼이 가늘어지고 결맞음 시간이 증가한다는 특성을 이용해, 27개의 원자핵스핀이 한 개의 NV 센터에 의해 측정되고 제어 가능하다는 결과가 보고됐다.[354] ^{13}C 원자핵들은 NV 센터로부터 모두 다른 곳에 있으므로 각각의 Hyperfine Coupling은 다르다. 따라서 각각의 ^{13}C 스핀들을 제어하는 것이 가능하다. 이 방법은 소수의 NV 센터들을 이용해 더 많은 수의 ^{13}C 핵스핀 기반 큐비트 제어를 가능케 함으로써 대규모 큐비트 확장 가능성을 보여준다.

그림 II-3-33 NV 센터와 주변 ^{13}C 원자핵스핀 간 상호작용 모식도



※ Nature (2019)

③ N-NV-Photon-Photon-NV-N 결합

광학 기반 채널은 장거리 또는 고밀도 네트워크 구성에 적합한 플랫폼을 제공할 수 있다. NV 센터는 광자(Photon)를 통한 스핀 상태 이동을 위해 광자들과 직접적으로 커플링 될 수 있는데, 이런 메커니즘으로 인해 큐비트는 Flying Qubit라고 말하는 개념에 근접하게 된다. 저온에서 NV 센터의 Spin-Dependent Optical Transition을 이용해 전자스핀과 광자를 양자얽힘(Quantum entanglement) 상태로 만들 수 있다. 두 개의 다른 NV 센터 전자스핀들을 각각의 광자들과 양자얽힘상태로 만들고 빔 분할기(Beam Splitter)를 이용해 간섭시키면, 측정을 통해 NV 센터 전자스핀들의 상태를 얽힘상태에 주사시킬 수 있다.

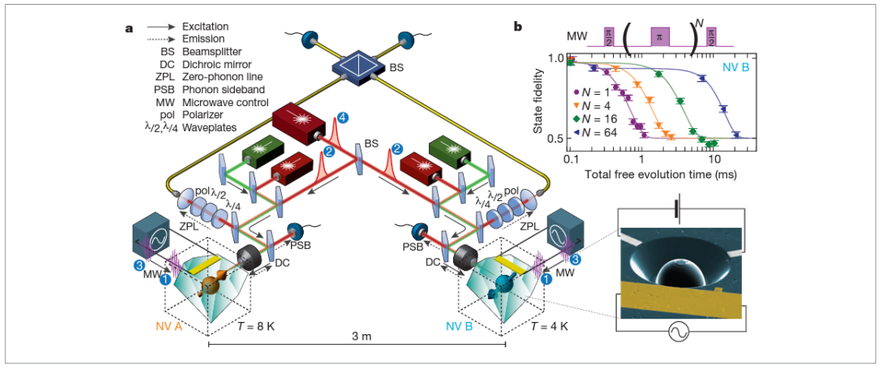
먼저 스핀-광자 양자얽힘상태는 NV 센터의 들뜬 상태(A2)가 ms=+-1 스핀 상태로 떨어질 때, 반대 원형 편광 상태를 가지게 되는 현상을 이용한다. 이 현상에 의해 아래 식으로 기술되는 양자얽힘상태가 생성되는데, 이것은 광자의 편광 특성이 마지막 스핀 상태와 고유한 상관관계를 가지기 때문이다.[355]

354) Nature (2019)
355) Nature (2010)

$$|\Psi> = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\sigma_- > |+1> + |\sigma_+ > |-1>)$$

NV 전자스핀 상태와 얻어진 광자 편광 상태 간 상관관계를 측정함으로써, 스핀-광자 간 양자얽힘 상태를 확인할 수 있다. 그리고 이후 스핀-광자 간 양자얽힘 현상과 이광자 양자간섭 현상[356]을 이용해 3m 떨어진 두 개의 NV 센터 간 양자얽힘상태를 확인하는 데 성공했다.[357]

그림 II-3-34 두 개의 NV 센터 큐비트를 이용한 장거리 양자얽힘 생성 실험 모식도



※ Nature (2010)

(3) 적용 분야

큐비트를 이용해 의미 있는 연산을 하기 위해서는 큐비트의 개수 증가가 절대적으로 요구된다. 따라서 큐비트의 개수를 늘릴 수 있는 확장성을 확보해야 한다. 자기적 상호작용 또는 스핀-광자 간 상관관계에 기반한 다중 큐비트 연결기술은 큐비트의 수를 획기적으로 늘리는 데 효과적으로 적용될 수 있다.

6. 리드버그 양자컴퓨팅

(1) 기술 동향

해외 리드버그 양자컴퓨터 기술 동향은, 관련 벤처 기업들의 창업과 원자시계형 리드버그 시스템의 개발로 요약할 수 있다. 현재 리드버그 양자컴퓨터를 개발하고 있는 벤처 기업은 총 네 곳인데 각각 살펴보자면, 우선 프랑스 Pasqal은 Ecole Polytechniqe 대학의 Browaye 교수 연구팀과 2차원 루비듐

356) Phys et al. (2012)
357) Nature (2013)

원자열을 이용하는 리드버그 양자컴퓨터를 개발하고 있다. 이를 통해 조합 최적화 등의 문제계산을 서비스할 계획이다. 다음으로 미국 Quera는 Harvard 대학의 Lukin 교수와 함께, 루비듐 원자 256을 활용하는 리드버그 양자컴퓨터의 구동 속도와 신뢰도를 높이는 기술을 개발하고 있다. 세 번째는 미국의 Cold Quanta이며 기존 보즈-아인슈타인 실험용 레이저 광포획 장치를 개발하는 전문회사이다. 최근에는 Wisconsin 대학의 Saffman 교수와 협력해 척력 광집게 트랩을 이용하는 리드버그 양자회로형 양자컴퓨터를 개발하고 있다. 마지막으로 미국의 Atom Computing은 NIST와 연계해 알칼리토류 스트론튬 원자를 이용하는 차세대 리드버그 양자컴퓨터를 개발하고 있으며, 성능 향상을 위한 레이저 구동 기술의 안정화, 자동화 및 새로운 기술 개발을 연구하고 있다.

현재 구동 중인 리드버그 양자컴퓨터는 주로 알칼리 원자인 루비듐 또는 세슘을 이용하고 있다. 그러나 양자 시뮬레이션 또는 양자컴퓨팅이 수행되는 시간 동안 광집게를 단절해야 해서, 계산시간이 100마이크로초 정도로 제한되는 단점이 있다. 척력 광집게 트랩을 사용하는 방식도 고려될 수 있으나, 이 경우에도 거리 대 거리오차 비율이 커지는 단점이 따른다. 따라서 이를 해결하기 위해 차세대 리드버그 양자컴퓨터는 원자시계형 원자인 알칼리토류 또는 희토류 원자를 이용해 개발되고 있다. 대표적으로는 알칼리토류인 스트론튬과 희토류인 이터븀이 고려되는데, 광격자 원자시계에 사용되는 이 두 원자는 안정된 광대역의 원자시계 준위를 가지고 있다. 미국의 Caltech 대학교, Princeton 대학교, Colorado 대학교, 오스트리아의 Innsbruck 대학교, Atom Computing에서 개발 중이며, 한국에서는 한국표준과학연구원이 이터븀을 이용하는 리드버그 양자컴퓨터를 개발할 계획이다.

(2) 연구 동향

해외의 리드버그 양자컴퓨팅 연구는 프랑스 Ecole Polytechnique 대학의 Browaye 교수와 연구팀이 창업한 Pasqal, 미국 Harvard 대학의 Lukin 교수와 연구팀이 창업한 Quera, 미국 Wisconsin 대학의 Saffman 교수와 연구팀이 관련된 Cold Quanta, 그리고 미국의 Atom Computing이 주도하고 있다. 참고로 Ecole Polytechnique 대학과 Harvard 대학은 KAIST와 거의 같은 시기인 2016년에 원자 재배치 기술을 각각 개발한 바 있다. 그 밖에 미국 Caltech 대학교, Princeton 대학교, MIT, Colorado 대학교 등에 새로운 연구그룹이 생겼으며, 독일과 오스트리아 및 일본과 중국에도 관련 연구팀이 생겼다. 아래에 학술지 논문을 중심으로 주요 연구 동향을 요약한다.

① 액체헬륨 리드버그 원자시스템 개발

현재의 200개 수준인 리드버그 원자 배열 개수를 제한하는 원자의 유효수명은 극저온 환경에서 연장될 수 있다. 광집게에 속박된 원자의 유효수명은 진공도에 의해 결정된다. 따라서 현재 리드버그 양자컴퓨터의 일반적인 진공도인 10^{-10} Torr에서 10^{-12} Torr 수준으로 진공도를 향상하면 원자의 유효수명은 100배 정도 향상될 수 있다. 프랑스 Ecole Polytechnique 대학 연구팀은 액체헬륨으로 리드버그 양자컴퓨터의 진공 챔버 자체 온도를 낮춰, 초고진공도(10^{-12} Torr)를 만들었다. 그리고 이를 이용해 광집게에 속박된 원자의 유효수명을 기존의 50초에서 6,000초로 향상했다. 따라서 광집게 내 유효수명이 6,000초인 원자 2,000개 정도를 재배치하는 리드버그 원자플랫폼을 만들 수 있을 것으로 예상된다.[358)]

② 중성원자 순차 재배치 기술

광집게로 포획한 원자는 함께 포획된 다른 원자와의 충돌로 인해 탈출하는 경우가 발생하므로, 개별 광집게가 단일 원자를 포획할 확률은 50% 정도에 불과하다. 이를 해결하기 위해 프랑스 Ecole Polytecnique 대학에서 중성원자 순차 재배치 기술을 개발했다. 우선 액정소자를 이용해 2차원 격자 모양의 광집게 2N개 만들고, 50% 확률로 포획한 약 N개의 중성원자 위치를 확인한다. 그 후 음광소자 2개를 고속으로 구동시켜, 확인된 원자를 하나씩 XY 방향으로 움직이는 방식으로, 원하는 모양의 원자열 N개를 생성한다. 이런 중성원자 순차 재배치 기술을 이용해 96%의 성공확률로 약 25개의 중성원자열을 만들어냈다. 이때 원자별 이동시간은 원자 간격 10마이크로미터당 1ms가 소요돼, 최대 배치 가능한 원자의 수는 수천 개 정도로 제한된다.[359)]

③ 반강자성 양자 시뮬레이션 연구

2차원에 생성한 100개 이상의 중성원자를 이용해 반강자성 양자 시뮬레이션을 수행했다. 레이저를 사용해 중성원자를 리드버그 원자로 만들 때, 리드버그 봉쇄 현상에 의해 인접한 중성원자는 동시에 리드버그 원자가 될 수 없고, 양자역학적 중첩상태가 된다. 이를 양자역학적 다체 해밀토니안으로는 아이징 모델로 근사할 수 있다. 따라서, 최대 147개 이상의 중성원자를 이용해, 아이징 해밀토니안의 반강자성 다체 기저에너지 스핀 상태를 계산했다. 더불어 4각 격자, 3각 격자, 벌집 격자 구조 등의 큐비트 배열 구조에 대한 반강자성 스핀 상관도를 측정했다.[360)]

④ 양자상전이의 반강자성 스핀 상관도 측정

2차원 리드버그 양자 시뮬레이터를 이용해, 상자성에서 반강자성으로 바뀌는 양자상전이 근처에서 스핀 상관도를 측정했다. 해밀토니안의 변수를 조절하며 스핀 상관도의 척도변화를 측정한 결과, 양자역학적 Kibble-Zurek 기재에 의해 이론적으로 예측된 값과 일치함을 보였다.[361)]

⑤ 척력 광집게 트랩

일반적인 광격자 또는 광집게 트랩은 원자의 공명주파수보다 작은 주파수의 레이저 빛을 사용해 원자가 레이저 빛의 초점에 속박되게 한다. 하지만 속박된 원자는 레이저 빛과의 상호작용 때문에 양자 시뮬레이션 또는 양자컴퓨팅 과정에서 광격자 또는 광집게를 단절해야 한다. 따라서 계산시간을 제한할

358) Schymik et al. (2021)
359) Barredo et al. (2016)
360) Scholl et al. (2021)
361) Ebadi et al. (2021)

수밖에 없는데, 이를 해결하기 위해 공명주파수보다 큰 주파수의 레이저 빛을 사용해 레이저 빛이 없는 위치에 원자를 속박하는 방식이 연구됐다. 하지만 이 방식도 원자 간 거리당 잡음의 비율이 커지는 문제가 있다.[362]

⑥ 이종 동위원소를 사용하는 리드버그 양자컴퓨팅

리드버그 양자컴퓨팅에 이종 동위원소의 원자를 사용하는 연구가 수행된 바 있다. 같은 동위원소의 원자를 사용하지 않고 두 가지 원자를 공간상 다르게 배치하면, 주변 원자에 영향을 주지 않고 개별 원자를 제어할 수 있다는 장점이 있다. 루비듐의 두 가지 동위원소인 Rb-85와 Rb-87을 사용하는 경우와 루비듐과 세슘을 함께 사용하는 경우 등이 연구됐다.[363]

⑦ 얽힘상태 원자의 이동 연구

양자컴퓨팅 도중에 큐비트의 위치를 변경하는 것은 많은 장점이 있다. 예를 들어 양자 시뮬레이션 또는 양자단열컴퓨팅과 같이 원자시스템 전체를 동시에 제어하는 경우, 개별 큐비트의 위치를 바꿔 큐비트 간의 연결성을 시간의 함수로 변경하는 것이 가능하다. 최근 연구에서 광집게로 얽힘상태인 원자들을 이동해 큐비트들의 연결 구조를 2차원 격자에서 원환체(Torus) 표면 연결 구조로 변화시키는 데 성공했다.[364]

⑧ 리드버그 양자회로형 양자컴퓨팅

양자회로형 양자컴퓨팅 방식으로 계산 깊이 25 정도의 리드버그 양자컴퓨팅이 수행됐다. 앞서 설명한 척력 광집게 트랩을 이용해 양자역학적 잡음을 최소화하고, 핵스핀 원자시계 상태를 이용해 결맞음 시간을 확보했다. 큐비트 6개의 GHZ 상태를 만들고, NP-완전문제의 하나인 최대 컷(Max-Cut) 문제를 계산하는 데 성공했다.[365]

⑨ 리드버그 GHZ-얽힘상태 생성

리드버그 원자열은 리드버그 봉쇄 현상을 이용해, 다체 양자얽힘상태의 하나인 W-상태를 만드는 것이 상대적으로 쉽다. 다른 양자얽힘상태의 종류인 GHZ-상태, 또는 슈뢰딩거 고양이 상태를 만들 수 있는지가 관건이다. 최근 양자단열 방식의 양자컴퓨팅으로 최대 20개의 원자를 이용해 GHZ-상태를 생성한 바 있다.[366]

362) Dutta et al. (2022)
363) Beterov et al. (2022)
364) Bluvstein et al. (2022)
365) Graham et al. (2022)
366) Omran et al. (2019), Wang et al. (2018), Monz et al. (2011), Song et al. (2019)

⑩ 알칼리토류 원자 리드버그 양자컴퓨팅

알칼리토류 원자는 핵스핀과 전자에너지 준위 간에 안정적인 광펌핑이 가능해 광격자 원자시계로 사용된다. 따라서 차세대 리드버그 원자플랫폼은 알칼리토류 원자를 이용해 개발되고 있다. 예를 들어 스트론튬-88 원자의 양자메모리 큐비트 상태를, 수명이 긴 삼중항 전자 에너지 준위로 펌핑할 수 있게 된 것이다. 또한 리드버그 원자의 검출 신뢰도는 광집게의 척력을 이용하는 방식에서 고속 측정이 가능한 오토-이온화(Auto-Ionization) 방식으로 변경됨으로써 크게 향상됐다. 이를 통한 얽힘상태 생성을 위한 밸상태 2Q 구동 신뢰도는 99% 이상으로 측정됐다.[367]

⑪ 희토류 원자 리드버그 양자컴퓨터

알칼리토류 원자의 기저 상태는 전자의 각운동량이 없다. 하지만 페르미온 희토류 원자의 핵스핀은 알칼리 원자와 같이 초미세 원자를 메모리 큐비트로 사용할 수 있다. 희토류 이터븀 동위원소인 Yb-171을 이용해, 10초의 긴 결맞음 시간을 가지며 자기장에 둔감한 리드버그 원자열을 생성하는 데 성공했다. 이것을 이용한 단일 큐비트 원자 게이트는 1Q 구동 신뢰도가 99.9%, 2Q 구동 신뢰도는 93%에 이르는 것으로 확인됐다.[368]

(3) 적용 분야

리드버그 양자컴퓨터는 조합 최적화 문제에 적용될 것으로 예상된다. 현재의 디지털 컴퓨팅이 효율적으로 계산할 수 없는 조합 최적화 문제를 해결함으로써 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등에 널리 활용될 것으로 예상된다.

367) Madjarov et al. (2020)
368) Barnes et al. (2022), Jenkins et al. (2022), Ma et al. (2022)

제3절 국내 양자컴퓨팅 R&D 동향

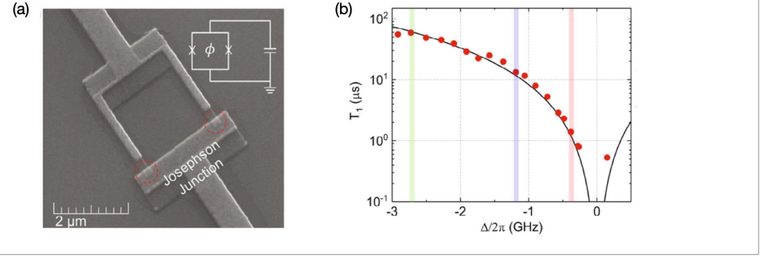
1. 초전도 양자컴퓨팅

가. 초전도 큐비트

(1) 주파수 조정 가능한 초전도 큐비트 개발

전하 잡음을 줄이기 위해 축전기 용량을 키운 초전도 큐비트를 통칭해서 트랜스몬(Transmon)이라고 한다. 상대적으로 제작이 쉽고 높은 결맞음 시간을 달성할 수 있어, 현재 전 세계에서 가장 많이 사용되는 큐비트 디자인이다. 한국표준과학연구원, 고려대, 성균관대 공동 연구진은 실리콘 기판 위에 주파수 조정 가능한 트랜스몬을 국내 최초로 개발했다.[369] 구리로 제작한 3차원 공진기를 사용해 큐비트 양자상태를 측정했고, 큐비트 주파수를 조정하며 공진기 주파수와의 차이에 따른 큐비트의 T_1 결맞음 시간을 연구했다. 그 결과 큐비트 주파수가 공진기 주파수와 멀어질수록 큐비트 결맞음 시간이 증가하는 것을 실험적으로 확인했고, 최대 84 μs의 T_1 결맞음 시간을 달성했다.

그림 II-3-35 (a) 주파수 조정 가능한 트랜스몬의 SEM 이미지
(b) 공진기 주파수와 트랜스몬 주파수 차이에 따른 T_1 결맞음 시간 변화



※ Park (2020)

(2) 5-큐비트 양자프로세서 개발

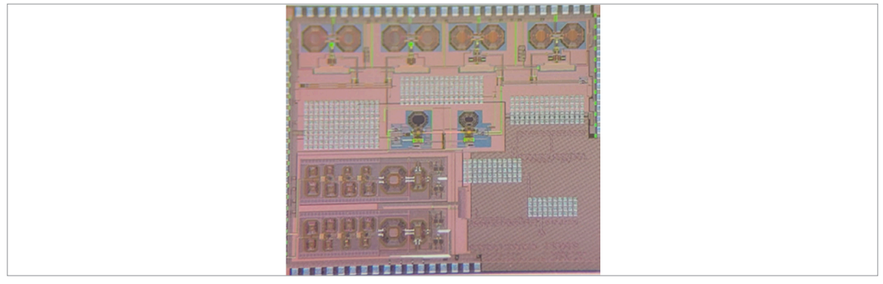
3차원 공진기의 시스템 크기가 2차원 공진기보다 큰 탓에 양자프로세서 확장성 측면에선 큰 걸림돌이 된다. 이에 한국표준과학연구원 연구진은 기존 3차원 공진기 기반의 디자인을 벗어나 2차원 기판 위에 트랜스몬 큐비트와 상태 측정 공진기를 설계해, 개별 큐비트의 제어측정이 가능한 5-큐비트 양자프로세서 소자를 개발했다.[370] 큐비트의 성능 지표인 결맞음 시간은 평균 T_1 ~ 20 μs, T_2^* ~ 10 μs으로 측정됐고, 무작위 벤치마킹 기법을 활용해 단일 큐비트 양자게이트의 신뢰도는 99.5% 이상, 2-큐비트 양자게이트의 신뢰도는 80% 이상임을 실험적으로 확인했다. 또한 강한 마이크로파 단발 측정 방법을 활용해 90% 이상의 양자상태 측정 신뢰도를 달성했다.

나. 초전도 양자컴퓨터 규모 확장을 위한 요소기술

(1) CMOS 기반 극저온 초전도 양자프로세서 제어시스템 기술 개발

초전도 양자프로세서는 열잡음에 취약하므로 희석 냉동장치(Dilution Refrigerator)를 사용해 10mK 온도 영역에서 동작한다. 큐비트 제어 및 측정은 상온에서 생성한 RF 신호를 10mK 온도에 있는 프로세서에 주사해 이뤄진다. RF 신호 전송 중에 발생하는 신호 감쇄는 냉동장치 내에 열을 발생시키는데, 냉각 출력 이상의 발열은 냉동장치 내 온도를 높여서 프로세서의 성능 저하를 유발한다. 포항공과대학교 연구팀은 이러한 문제를 해결하고자 4K 극저온에서 RF 신호를 생성하고 분석할 수 있는 CMOS 기반 양자프로세서 제어 칩을 개발했다.[371] 이 칩은 2개의 마이크로파 영역 주파수 고정루프, 4개의 직접 합성 방식의 펄스변조 채널, 2개의 광대역 수신 채널, 초전도 큐비트 얽힘 제어를 위한 4개의 DC Flux 바이어스 채널로 구성돼 있다.

그림 II-3-36 4K 극저온 양자제어 칩



※ Kang (2022)

369) Park (2020)
370) 이선경 (2022)
371) Kang (2022)

2. 반도체 양자점 양자컴퓨팅

가. 스핀 큐비트 호스트 양자소재 성장 기술

(1) 기술 동향

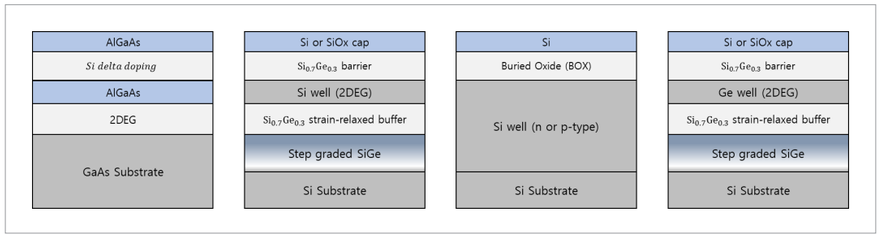
우수한 스핀 큐비트 성능을 위해 스핀 잡음(재료를 구성하는 원자핵의 스핀이 주는 양자잡음)이 최소화된 특수 양자소재가 필요하며, 주로 사용되는 재료는 III-V 족 GaAs/AlGaAs, InAs, InAb 등 고전자 이동도 Modulation Doping HEMT(High-Electron-Mobility Transistor, HEMT) 구조와 IV 족 Si 및 Ge 등이 있다. 최근에는 이를 2차원 물질, 예를 들어 그래핀과 같은 IV 족 탄소 원소로 이뤄진, 스핀 결맞음 시간이 높은 소재로 확장하기 위해 노력하고 있다.

특히 Si의 경우 자연적으로 핵스핀이 0인 ^{28}Si와 ^{30}Si가 약 95% 이상을 차지하고 큐비트에서 잡음 역할을 하는 ^{29}Si는 수 %에 불과해, 양자기술을 구현하는 잠재력이 높은 재료이다. 더군다나 동위원소 정제를 통해 ^{28}Si의 순도를 99.9% 이상으로 높인 기판을 제작할 수 있어, 스핀 큐비트 제작 시 스핀 잡음이 최소화된 재료로 사용된다. 그러나 Si의 경우 현재까지 전하 잡음이 GaAs와 같은 초고이동도 HEMT 구조에 미치지 못하며, 높은 전자 유효질량으로 양자점 형성을 위한 공정 요구 조건이 높다. 또한 Indirect Bandgap을 가져 광여기법에 의한 스핀 큐비트 조작이 불가능하며, 스핀 자유도뿐 아니라 Valley 자유도의 영향을 추가로 제어해야 하는 단점이 있다.

Ge는 실리콘처럼 핵스핀이 0인 동위원소를 정제할 수 있는 장점이 있으며, 추가로 P-type인 홀-스핀을 이용하려는 시도가 이뤄지고 있다. 밸런스 밴드에 존재하는 홀-스핀은 전자와 다른 파동함수의 공간분포로 인해 같은 핵스핀 밀도에도 스핀 잡음이 작은 장점이 있으며, Si보다 작은 유효질량을 가져 비교적 큰 선폭의 공정으로도 양자점 소자를 제작할 수 있다. 또한 전자보다 큰 스핀-궤도 상호작용(Spin-Orbit Coupling)을 가지고 있어 전기적으로 스핀 상태를 조작할 수 있다. 이는 양자상태 조작을 위해 고주파 자기장 또는 마이크로 마그넷과 같은 추가적인 구조물이 필요한 전자스핀과 대비된다. 그러나 스핀-궤도 상호작용은 동시에 큐비트의 전하 잡음에 대한 영향을 증대시키기 때문에 결맞음 시간 자체는 실리콘 전자스핀에 비해 작은 단점이 존재한다.

상기한 재료들은 동위원소 정제를 제외하면 국내에서도 기존 반도체 산업 공정을 이용해 성장할 수 있다. 실리콘의 경우 반도체 파운드리와 호환되는 Si-MOS 웨이퍼, Strained-Si/SiGe 이종 구조 HEMT 웨이퍼, Silicon-on-Insulator 웨이퍼 형태 모두 스핀 큐비트를 제작할 수 있다. 그러나 아직 국내에서 성장한 웨이퍼를 사용한 스핀 큐비트 동작의 실험적인 검증은 이뤄지지 않은 상태이다.

그림 II-3-37 스핀 큐비트용 주요 반도체 소재의 단면도



* 왼쪽에서부터 AlGaAs/GaAs, Si/SiGe, SOI, Ge/SiGe ※ 집필진 작성

^{28}Si 동위원소 정제 또는 스핀 큐비트용 Ge/SiGe HEMT 웨이퍼 성장과 관련된 국내기술은 극히 제한적으로 파악된다. 자기 영상 이미징용으로 ^{29}Si로 이뤄진 나노입자 형태의 성장 기술이 한국재료연구원 중심으로 보고됐으나, 양자컴퓨팅 소자를 위한 동위원소 정제연구가 미미하다. 현재 ^{28}Si 원재료는 Air Liquid 같은 해외 기업을 통해 수입할 수 있지만, 이를 이용한 기상 증착법 전구체인 ^{28}Si 기반 Silane 제작은 국내에서 이뤄지지 않고 있다.

(2) 연구 동향

반도체 스핀 큐비트 연구는 상기한 IV 족 원소 이외에도 GaAs와 같은 III-V 족 계열의 고이동도 기판을 사용해서도 이뤄지고 있으며, 세계적으로도 초기 스핀 큐비트 연구는 III-V 족 반도체로 수행됐다. GaAs 재료의 가장 큰 단점은 높은 핵스핀 밀도이며, 재료를 구성하는 Ga, As 원자의 특성상 자연적으로 안정한 동위원소는 둘 다 0이 아닌 핵스핀을 지니고 있어, 동위원소 정제가 원천적으로 불가능하다. 따라서 결맞음 시간은 핵스핀-전자스핀의 초미세 상호작용에 의한 큐비트 에너지 준위 교란으로 수십 ns로 제한된다. 다만 핵스핀의 영향은 시간상으로 느린 섭동에 해당해 고속 양자상태 측정 및 피드백으로 결맞음 시간을 수 마이크로초로 증대시키는 기술이 존재하며, 국내에선 서울대학교가 관련 기술을 보유하고 있다. 또한 GaAs는 매우 높은 전자 이동도와 작은 전자 유효질량을 가져 양자점을 형성하는데 이상적인 재료이며, 다이렉트 밴드갭을 가지고 있어 Indirect Bandgap을 가지는 실리콘에 비해 향후 스핀-광자 인터페이스를 제작할 수 있는 장점이 있으므로, 여전히 양자기술을 위한 좋은 양자재료 후보로 연구되고 있다.

국내 양자소재 연구 분야에선 한국과학기술연구원 광전소자 연구단이 양자소자 및 기반 기술 인프라와 노하우를 확보하고 있다. 9대의 분자선 에피택시(Molecular Beam Epitaxy, MBE) 시스템과 III-V족 공정 Fab 및 측정실을 보유하고 있으며, III-V족 기반 반도체 양자점을 양자광원으로 개발했고, 100만 cm^2/Vs 이상 전자이동도의 초고속 AlGaAs, InGaAs HEMT를 성장하고 있다. 현재 양자컴퓨팅 스핀 큐비트를 위한 Si 재료와 동위원소 정제형 Si 기판을 성장할 수 있는 MBE 시스템을 개발 중이다.

양자소재의 특성을 평가하고 표준화하는 기술 또한 소재 개발 못지않게 중요한 연구주제이다. 스핀 큐비트는 극저온에서 동작하며 중첩상태의 결맞음을 이용하는 소자이므로 이동도, 균일도, 응력, 등 재료와 소자의 특성을 극저온에서 평가하는 것이 필수이며, 결맞음 시간 평가를 위해 실제 큐비트 소자를 개발된 재료에 제작하고 논리 회로 충실도를 평가하는 기술 역시 필수이다. 주요 양자재료의 특성은 다음과 같은 측정법을 통해 분석한다.

극저온 이동도는 홀바소자 제작과 홀효과 측정으로 검증한다. Valley-Splitting을 극저온 Shubnikov-de-Haas Osillation으로 측정하거나, 양자점소자를 재료에 제작 후 Excited Level Tunneling Spectroscopy로 측정한다. 결맞음 시간의 경우 Inhomogeneous 결맞음 시간인 T_2*는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 Ramsey 진동 측정으로 분석하고, Homogeneous 결맞음 시간 T_2는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 스핀-에코 실험으로 측정한다. 또한 에너지 완화 시간 T_1은 큐비트 소자를 제작해 마이크로파를 이용한 NOT 게이트 인가 후 확률의 시간에 대한 완화 곡선을 측정해 분석하며, 제어 및 측정 충실도는 큐비트 소자 제작 후 Randomized Benchmarking, Gate Set Tomography, Quantum State Tomography 등으로 분석한다. 이와 같은 분석법은 양자컴퓨팅 플랫폼 전반(초전도, 이온 트랩, 반도체, 고체 결함 등)에 걸쳐 공통된 사항이며, 국내에서는 서울대, KIST, KAIST, 포항공대, KRISS 등이 양자소재 특성 평가기술을 보유하고 있다.

(3) 적용 분야

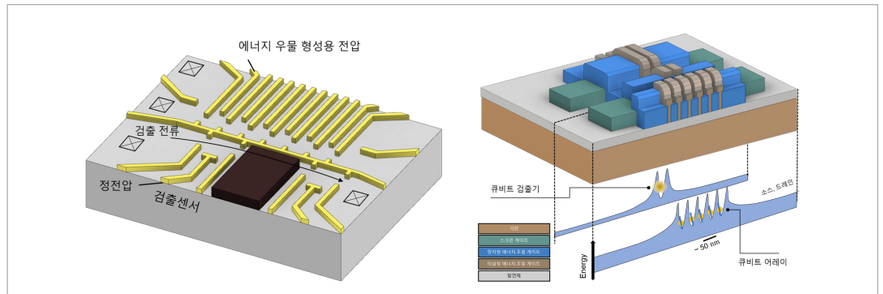
양자컴퓨팅용 양자소재 기술은 기존산업에서 요구되는 웨이퍼의 성능에 초고이동도, 동위원소 제어 등 추가 기술의 개발이 필요하다. 이러한 기술을 확보한다면 양자컴퓨팅 원천소재를 선점하는 것은 물론이고, 기존에 쓰이던 고전 전자회로의 특성을 높여줄 원재료로 이용할 수도 있다. 또한 대규모 반도체 스핀 큐비트 기반의 양자컴퓨팅 원천기술을 개발하는 것이 가능해지며, 양자컴퓨팅용 소재의 특성 평가 분야 표준화를 선점할 수 있고, 초전도 공진기 및 광집적회로 등 타 양자컴퓨팅 하드웨어 플랫폼에도 활용할 수 있다. 현재 양자컴퓨팅을 위한 국내 소재산업은 소수의 학연연구소를 중심으로 연구가 이뤄지고 있다.

나. 멀티 큐비트 제어 기술

(1) 기술 동향

스핀 큐비트는 반도체 기판을 이용하는 분야인 만큼 CMOS 공정으로 만들어진 나노 트랜지스터와 흡사하다. [그림 II-3-38]은 대표적으로 사용하는 두 가지 구동형태의 반도체 양자점 스핀 큐비트 칩의 모식도를 나타낸다.

그림 II-3-38 반도체 스핀 큐비트 소자의 모식도



(왼쪽) Depletion-mode 구동 방식의 양자점 소자
(오른쪽) Accumulation-mode 구동 방식의 양자점 소자

※ 재료연구소, 국가나노기술정책센터 (2020)

Depletion-mode 구동 방식이란 기판에 반도체 도핑으로 미리 형성된 자유전자 층을 준비하고, 에너지 우물 형성용 게이트에는 음의 전압을 이용해 게이트 하단의 자유전자를 없애는 방향으로 입자를 구속하는 방식이다. Depletion-mode 구동을 위해서는 HEMT 기술에서 쓰이는 모듈레이션 도핑형 재료 성장 기술이 필수이며, 도핑 이후에도 우수한 이동도 성질을 보여주는 GaAs 또는 InGaAs 재료 군에서 주로 사용된다. Accumulation-mode 구동 방식이란 도핑이 없는 반도체를 사용해 양의 게이트 정전압으로 에너지 우물을 형성하는 방식을 말하며, 불순물 도핑을 통해서는 비교적 높은 이동도를 확보하기 어려운 실리콘, Ge 등 4족 반도체에서 주로 사용하는 방식이다.

Depletion-mode의 장점은 음의 전압만을 가하는 게이트 한 층만으로도 양자점을 형성할 수 있으며, 게이트 전압이 걸리지 않은 곳의 자유전자를 이용해 전류를 흘려 큐비트 센서 구조를 쉽게 형성할 수 있다. 이 자유전자 층은 기생 정전용량이 매우 작은 장점이 있어 큐비트 상태의 고속 전하 측정이 쉽다. 그러나 이 방식은 게이트 전압 간의 누화(Cross-Talk)가 크고, 100nm 이상의 지름을 가진 양자점만을 형성할 수 있다는 단점이 있다. 이와는 달리 Accumulation-mode 구조는 에너지 우물과 전하 센서의 전류를 통과시킬 수 있는 소스-드레인 모두를 게이트 전압으로 형성해야 하므로, 3층 이상의 게이트-산화막-게이트 다층구조를 제작해야 하는 높은 공정조건이 단점이다. 또한 산화막-금속 다층구조는 필연적으로 높은 기생 정전용량을 가져 고속 측정에 불리하다. 그러나 이 방식은 성공적으로 제작됐을 경우 게이트 전압 간의 누화가 작고, 50nm 미만의 지름을 가진 밀도 높은 양자점을 형성할 수 있다는 장점이 있다.

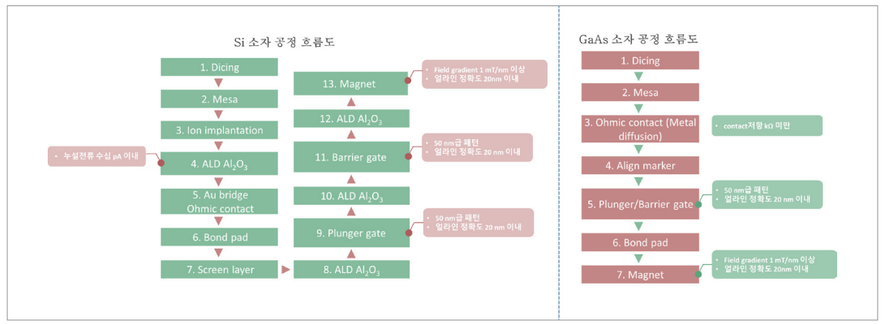
종합적으로 스핀 큐비트 소자는 정전압으로 형성된 에너지 우물과 그 안에 속박된 전자로 이뤄진 큐비트 배열, 큐비트 배열과 근거리(200nm 이내)에 위치해 큐비트 상태를 검출할 수 있는 전하 센서, 큐비트 또는 전하 센서의 소스-드레인 역할을 하는 옴 접합(Ohmic Contact) 구조로 이뤄진다. 또한

다중 큐비트 배열의 개별 큐비트 어드레싱을 위해, 자기장 구배 형성을 위한 소형 마이크로 마그넷 구조를 포함할 수 있다.

GaAs 소자는 Depletion-mode로 동작하므로 양자점 형성을 위해 30nm 선폭의 단일 게이트 레이어 제작으로 완성한다. Si 양자점 소자는 Accumulation-mode로 동작하고 Si의 비교적 큰 전자 유효질량을 고려해 평균 양자점 지름이 70nm 미만이어야 한다. 따라서 Si 게이트 디자인은 [그림 II-3-39]와 같이 Screen/Plunger/Barrier 3중 오버레이 구조를 가지며 양자점 간 거리를 50nm 수준으로 유지해 수 GHz 이상의 큐비트 간 상호작용 크기(터널링 에너지)를 유도한다.

멀티큐비트 소자 공정과 관련하여, GaAs, Si 소자의 공정 주안점은 설계의 상이함과 근간 재료의 상이함을 고려하는 것이며, 다음과 같은 과정을 통해 제작한다.

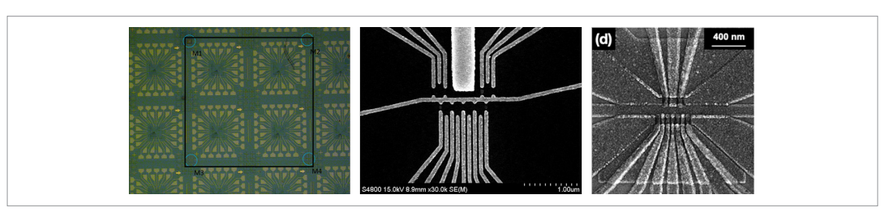
그림 II-3-39 반도체 스핀 큐비트 소장 공정 흐름도



※ 집필진 작성

완성된 GaAs 및 Si 소자의 외부 전극과 내부 게이트 구조의 예시는 다음과 같다.

그림 II-3-40 (왼쪽) 양자점 소자 배열의 광학현미경 사진
(가운데) GaAs Depletion-mode형 양자점 소자 + 마이크로 마그넷 구조 전자현미경 사진
(오른쪽) 완성된 Si Accumulation-mode형 다층 게이트 소자의 전자 현미경 사진



※ 집필진 작성

스핀 큐비트 소자 공정의 주안점은 다음과 같다. 옴 접합 형성의 경우, 상기한 공정에서 GaAs, Ge, Si는 각각 도핑 층(GaAs:Ge, Ge:Al) 증착과 이온 주입을 통해 도핑 원자를 도입하고, 급속 열처리 장비를 이용해 도핑 원자를 확산해 제작한다. 이때 도핑 원자의 활성화를 위해 매우 높은 온도가 요구되는 한편, HEMT 형식의 계면 구조가 열에 의해 변형되지 않아야 하므로, 열처리 온도를 최적화하는 것이 관건이다.

그림 II-3-41 대표적인 양자소자용 재료의 thermal budget

Temperature	SiMOS	Si/SiGe	Ge/SiGe
Thermal Budget	1000 °C	750 °C	500 °C

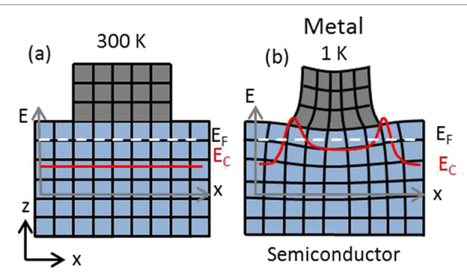
Ohmics	SiMOS	Si/SiGe	Ge/SiGe
Dopant	P^+	P^+	-
Metal	Ti:Pt	Ti:Pt	Al
Annealing	1000 °C, 30 s	700 °C, 30 s	300 °C, 1h

※ Appl et al. (2020)

특히 Accumulation-mode인 실리콘 양자소자의 경우 기생 정전용량을 최소화하기 위해 옴 접합을 양자점 어레이에 최대한 밀접하게 설계해야 하는데, 높은 공정온도로 도핑 원자가 장거리로 확산하는 것을 방지하기 위해 급속 열처리 장비 사용이 필수이다.

게이트/반도체 간 계면 스트레인 및 전하 잡음 요소 최소화와 관련하여, 반도체 양자소자는 극저온에서 동작하기 때문에 반도체 표면에 쌓은 서로 다른 재료의 열팽창 계수를 고려해야 한다. 극저온에서 흔히 발생하는 열팽창 계수 차이에 따른 스트레인이 만든 에너지 우물에서, 의도하지 않은 양자점을 형성할 수 있다. 이런 우연한 양자점 형성을 피하고자 금속층은 통상적으로 두께 30nm 미만으로 증착한다. 마이크로 마그넷 등 양자점 소자의 추가적인 구조물은 그 기능상 200nm 이상으로 증착하는 것이 불가피한데, 이로 인한 소자 층의 에너지 구조 영향을 최소화하기 위해 절연막 등 완충 층을 삽입하기도 한다.

그림 II-3-42 금속/반도체 계면의 팽창계수 차이에 따른 스트레인의 모식도



※ AIP advances (2015)

또한 금속 증착 시 계면에 흔히 유도될 수 있는 전하 트랩은 극저온에서 양자점 스핀 큐비트의 에너지 완화시간을 제약할 수 있는 요소가 되며, 이중 양자점 스핀 큐비트 등 전하-스핀의 자유도가 혼합된 스핀 큐비트에서 T_2 시간에 직접 영향을 줄 수 있다. 따라서 금속 증착 직전 계면의 클리닝을 위해 클리닝-증착을 In-Situ로 수행할 수 있는 장비 사용이 필수이며, 이는 금속의 부착성을 최대화하는 데도 도움을 주므로 양자점 소자 공정의 높은 수율을 위해 요구되고 있다.

고품질 절연막 형성과 관련하여, 절연막 공정이 따로 필요하지 않은 GaAs에 비해, Accumulation-mode를 주로 사용하는 4족 반도체 양자점 소자(Si, Ge 등)는 고품질 절연막 형성이 필수이다. 흔히 사용하는 원자층 증착시스템(Atomic-Layer Deposition)으로 Al_2O_3, HfO_2 등 절연막을 증착하며, Pinning Site 등 누설전류가 발생할 수 있는 불순물을 최소화하는 과정이 필요하다. 현재 연구소급 공정 설비로 제작하는 실리콘 양자점 소자의 공정 과정 중 제어가 가장 어려운 과정이다.

고난도 단일/다층 게이트 패턴과 관련하여, 양자점 소자는 50nm 미만의 선폭과 수십 nm의 간격을 패턴하는 것이 필수적이며, 이를 위해 연구소급 공정시설에서는 E-beam Lithography 장비를 사용한다. 특히 다층의 정렬된 게이트 스택을 만들어야 하는데, 이를 위해 수십 nm 미만의 오차로 정확한 얼라인 과정이 필요하다.

반도체 스핀 큐비트의 단일 게이트 동작은 전하 잡음에 영향을 받지 않지만, 교환상호작용을 이용하는 2큐비트 게이트는 원천적으로 전하 잡음에 대해 취약하다. 전하 잡음의 영향이 최소화될 수 있는 고주파 펄스 방법, Sweet Spot 연산 등의 기술 개발이 필요하다.

게이트 구조의 계면에 형성된 스핀 불순물 및 전하 트랩 등은 에너지 완화시간에 크게 영향을 주며, 게이트/기판의 열팽창 계수 차이에 의한 응력은 양자점 퍼텐셜 구조에 영향을 주어, 원하지 않는 양자점 형성을 유도한다. 또한 IV 족 반도체를 밸리 자유도 측면에서 보자면, 대표적으로 실리콘은 밸리 Degeneracy를 가지며 Indirect 밴드갭을 가지는 반도체이다. 스핀과 밸리 자유도의 혼합에 따른 양자정보의 간섭과 결맞음 시간 감소를 억제하기 위한 노력 필요하다. 특히 계면의 불균일성에 따른 밸리 에너지 크기 제어에 대한 기술 개발이 필요하다.

멀티큐비트 제어의 경우 단일 큐비트 게이트는 마이크로파를 이용한 Rabi Oscillation으로 구현하며, 이중 큐비트 게이트는 교환상호작용을 이용한 CPHASE 게이트로 구현한다. 결맞음 시간의 경우 Inhomogeneous 결맞음 시간인 T_2^* 는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 Ramsey 진동 측정으로 분석하고, Homogeneous 결맞음 시간 T_2 는 큐비트 소자 제작 후 마이크로파를 이용한 스핀-에코 실험으로 측정한다. 또한 에너지 완화시간 T_1은 큐비트 소자를 제작해 마이크로파를 이용한 NOT 게이트 인가 후 확률의 시간에 대한 완화곡선을 측정해 분석하며, 제어 및 측정 충실도는 큐비트 소자 제작 후 Randomized Benchmarking, Gate Set Tomography, Quantum State Tomography 등으로 분석한다. 이와 같은 분석법은 양자컴퓨팅 플랫폼 전반(초전도, 이온 트랩, 반도체, 고체 결함 등)에 걸쳐 공통된 사항이며 국내에서는 서울대, KIST, KAIST, 포항공대, 한국표준개발원 등에서 큐비트 측정기술을 보유하고 있다.

(2) 연구 동향

반도체 양자점 플랫폼은 전 세계적으로도 6큐비트 동작을 검증하는 단계에 있다. 따라서 스핀 큐비트의 잠재력에 비해 상대적으로 국내연구와의 격차가 작은 분야이며, 국내 멀티큐비트 소자 제작은 학계연구소를 중심으로 진행하고 있다. 2019년부터 한국연구재단에서 '반도체 양자점 프로그래머블 양자컴퓨팅 시스템' 과제를 진행 중이며, GaAs와 Si 소재를 기반으로 2024년까지 5큐비트급 단일 및 이중 큐비트 게이트 충실도를 99% 이상으로 확보하기 위해 노력하고 있다. 또한 이 과제에서는 극저온 스핀 큐비트 제어에 필요한 극저온 냉동기, 극저온 고주파 증폭기 등의 개발을 병행하고 있다.

2022년 현재 GaAs 스핀 큐비트의 경우 4큐비트의 개별 동작과 큐비트 간 CPHASE형 이중 큐비트 게이트 시연에 성공했으며, 네덜란드 QuTech로부터 ^{28}Si 재료를 공급받아 5큐비트 소자를 확보했다. 국내 연구진은 단일 큐비트 게이트 Randomized Benchmarking, 이중 큐비트 게이트 Randomized Benchmarking, Gate Set Tomography 등 멀티큐비트 제어의 충실도 평가기술을 보유하고 있으며, 향후 2차원 배열의 스핀 큐비트 소자와 양자점 소자 자동튜닝기술을 확보하기 위해 노력하고 있다.

(3) 적용 분야

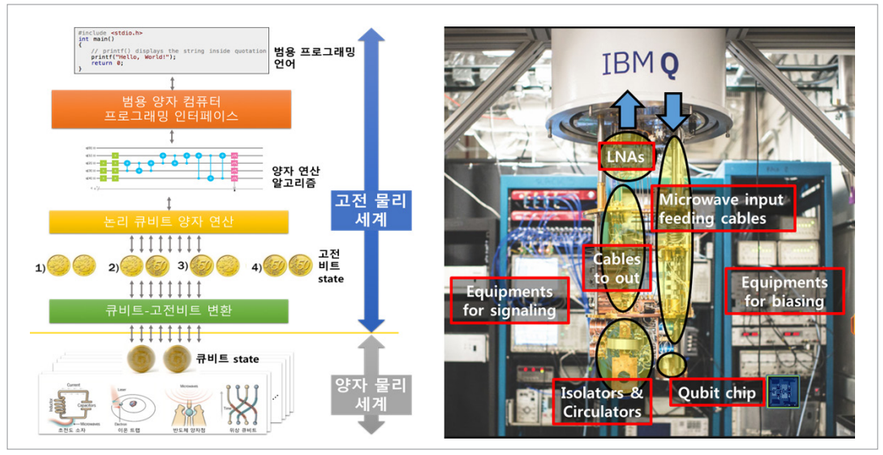
멀티큐비트 소자 공정 및 제어 기술은 반도체 기반 양자컴퓨팅 구현을 위해 필수적인 기술이다. 반도체 기반 큐비트 플랫폼은 극미량 전기신호 측정, 고주파 저주파 혼합신호 측정, 극저온 증폭기 등 현대 전자기기의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 기존 반도체 산업 구조에서 확보된 국내의 기술 인력 및 공정을 적극적으로 활용한다면 국제적인 경쟁력을 확보하는 것이 상대적으로 쉽다. 또한 반도체 큐비트 집적화 기술이 성공적으로 실현될 경우, 양자컴퓨팅 알고리듬과 관련 소프트웨어 개발산업이 다양한 산업에 광범위하게 활용될 수 있어, 4차 산업 혁명을 주도하며 기존과 다른 새로운 산업군을 창출할 것으로 기대된다.

다. 확장 가능한 통합 양자프로세서 기술

(1) 기술 동향

양자알고리듬과 큐비트만으로는 범용 양자컴퓨터를 구현할 수 없다. 소인수분해와 같은 거시세계의 문제를 양자세계의 법칙으로 풀기 위해서는, 두 세계 사이를 넘나들며 정보를 교환해줄 시스템 설계 기술이 꼭 필요하다. 양자컴퓨터에서 큐비트는 중첩(Superposition), 얽힘(Entanglement), 결맞음(Coherence) 등의 양자특성을 갖는 상태로 존재하는 반면, 사용자는 고전적인 비트 상태로 문제를 정의하고 해답을 기대하기 때문이다. [그림 II-3-43]은 확장형 양자컴퓨터를 위한 인터페이스 신호 체계도를 나타낸다.

그림 II-3-43 양자컴퓨터 계층별 인터페이스와 IBM의 양자컴퓨터



※ IBM. 집필진 작성

하드웨어적으로는 확장형 큐비트와 고전 비트 사이의 변환 기술이 중요하다. 양자컴퓨터에서는 양자에너지 상태를 큐비트로 치환해 표현하는데, 즉 큐비트의 읽기·쓰기는 양자에너지 상태를 측정/제어하는 것과 같고, 이 양자에너지 측정/제어는 물리 법칙에 따라 등가의 에너지를 가지는 전자기파로 가능하다. 따라서 큐비트 상태를 고전 비트 정보로 변환하는 과정에는 전자파 회로 혹은 RF 회로 기술이 기본으로 쓰인다. 하지만 외부 자극에 극도로 민감한 양자에너지 상태를 왜곡하지 않기 위해서는 RF 회로의 주파수, 진폭, 위상, 시간을 모두 수 ppm 이하 수준의 정확도로 제어해야 한다. 4~8GHz에 해당하는 양자에너지 상태를 가지는 트랜스몬 큐비트의 경우, 양자상태를 읽어내기 위한 LNA가 1~3K 이하의 잡음온도(Noise Temperature)를 유지해야 하고, 스핀 큐비트의 상태를 읽어내는 경우는 100pA 미만의 미세한 전류 차이를 최대한 빨리 구분해야 한다.

한편 물리 큐비트는 그 이론 방식에 따라 큐비트당 1~4개 이상의 물리적인 I/O 채널이 필요하다. 차세대 슈퍼컴퓨터로서 수천~수만의 큐비트급 양자컴퓨터를 가정하면, 수십만 개의 핀을 통한 물리적 I/O 채널이 필요한 것이므로 사실상 구현이 불가능하다. 특히 각각의 고전 비트 I/O는 초고성능·초저잡음 RF 회로를 통해 읽기/쓰기를 수행해야 함을 고려하면, 시스템의 규모와 함께 신뢰성도 담보하기가 어렵다. 따라서 큐비트 수의 증가에 유연하게 대응할 수 있는 확장형 큐비트-고전 비트 변환 아날로그/RF 회로 아키텍처가 필요하다.

그림 II-3-44 기존 마이크로 프로세서와 양자프로세서의 소자 수와 외부 I/O핀 수 비교



※ Intel

또한 양자컴퓨터는 다양한 알고리듬을 다룰 수 있게끔 범용성을 고려해, 최대한 다양한 문제를 쉬운 프로그램 변경으로 풀 수 있는 형태로 설계돼야 한다. 이렇듯 양자컴퓨터가 범용 컴퓨터로서 동작하기 위해 요구되는 기능의 단계는 다음과 같다. 우선 사용자가 High-Level 언어로 프로그램을 작성하면, 컴파일러를 통해 하드웨어가 인식할 수 있는 어셈블리 언어로 변환한다. 이렇게 변환된 어셈블리어의 Instruction은 논리 큐비트를 구동해 양자연산을 수행할 수 있게 된다. 연산 과정에서 논리 큐비트는 주어진 매핑을 통해 물리 큐비트를 구동하는데, 이때 아날로그 회로를 통해 큐비트 칩을 구동한다. 결국 사용자가 양자컴퓨터를 운용하기 위해서는 양자컴퓨터에 특화된 컴파일러와 논리 큐비트 Instruction 세트, 그리고 양자연산기를 구동하는 프로세서 아키텍처의 설계가 필요하다. 효율적 연산을 위한 코어 스케줄 관리, 메모리 시스템 관리, 큐비트 오류정정 등에서 기존 컴퓨터의 아키텍처와는 다른 형태로 고려돼야 하며, 하위 레벨의 큐비트와 아날로그 회로설계 층 연구도 병행해야 한다.

(2) 연구 동향

국내에서 확장형 양자프로세서 및 계층 간 신호 인터페이스의 하드웨어, 소프트웨어 연구는 극 초기 단계에 있다. 2019년 개시된 한국연구재단의 선도연구센터 지원사업 중 '확장형 양자컴퓨터 기술융합플랫폼 센터' 과제가 진행 중이다. 국내 멀티큐비트 소자 제작은 학계연구소를 중심으로 진행 중이며, 2019년 개시된 한국연구재단의 양자컴퓨팅 원천기술개발 사업 중 '반도체 양자점 프로그래머블 양자컴퓨팅 시스템' 과제가 진행 중이다.

2022년 현재 IBM의 Horse Ridge II 극저온 CMOS 양자제어 및 신호 분석기와 성능을 견줄 수 있는 극저온 CMOS 회로를 개발했으며, 국내 초전도 큐비트 연구그룹과 연계해 단일 큐비트 동작을 시연했다. 또한 제어회로의 동작 주파수를 18GHz급으로 향상해 초전도 큐비트와 반도체 스핀 큐비트를 한꺼번에 제어할 수 있는 회로를 개발하고 있다.

(3) 적용 분야

확장 가능한 통합 양자프로세서 기술은 원천소재 기술, 멀티큐비트 제어 기술과 함께 반도체 기반 양자컴퓨팅 구현을 위해 필수적인 기술이다. 반도체 기반 큐비트 플랫폼은 극미량 전기신호 측정, 고주파 저주파 혼합신호 측정, 극저온 증폭기 등 현대 전자기기의 정밀도와 밀접한 관련이 있다. 특히 기존 반도체 산업 구조에서 확보된 국내의 기술 인력 및 공정을 적극적으로 활용한다면, 국제적인 경쟁력을 확보하는 것이 상대적으로 쉽다. 또한 반도체 큐비트 집적화 기술이 성공적으로 실현될 경우, 양자컴퓨팅 알고리듬과 관련 소프트웨어 개발산업이 다양한 산업에 광범위하게 활용될 수 있어, 4차 산업 혁명을 주도하며 기존과 다른 새로운 산업군을 창출할 것으로 기대된다.

3. 이온 트랩

이온 포획 기반의 양자컴퓨터는 초고진공에서 포획한 이온의 양자상태를 큐비트로 정의하고, 레이저나 라디오파로 큐비트의 양자상태를 조작해 양자계산을 구현한다. 이론적으로 단일 양자게이트와 양자얽힘 게이트를 구현하게 되면 임의의 모든 양자알고리듬을 구현할 수 있으므로, 해당 양자게이트를 구현하는 것이 주요 기술 개발의 목표이다. 이온 큐비트는 외부 환경과 독립적으로 단절돼 있어 높은 양자게이트 신뢰도, 긴 결맞음 시간, 낮은 초기화 및 측정 오차 등의 장점이 있다. 또한 임의의 두 큐비트 사이의 양자얽힘이 가능한 상호 연결성은 이온 포획 기반 양자컴퓨터만이 가지는 중요한 장점이다. 실용적인 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 다량의 이온 큐비트를 포획하는 기술, 개별 이온의 양자상태 측정, 높은 신뢰도의 양자게이트 구현 및 양자큐비트의 확장이 필수적이다. 국내에서는 서울대, 이화여대, 성균관대, 포항공대가 이온 포획 기반 양자컴퓨터 구현을 목표로 연구 중이다.

가. 이온 선택 및 이온 포획 기술

이온 큐비트 기반의 양자컴퓨터는 초고진공에서 안정적으로 이온을 포획하는 것으로부터 시작된다. 다량의 이온을 안정적으로 포획하는 기술은 양자컴퓨팅을 위한 충분한 수의 큐비트들을 확보하는 기술과 동일하다.

(1) 기술 동향

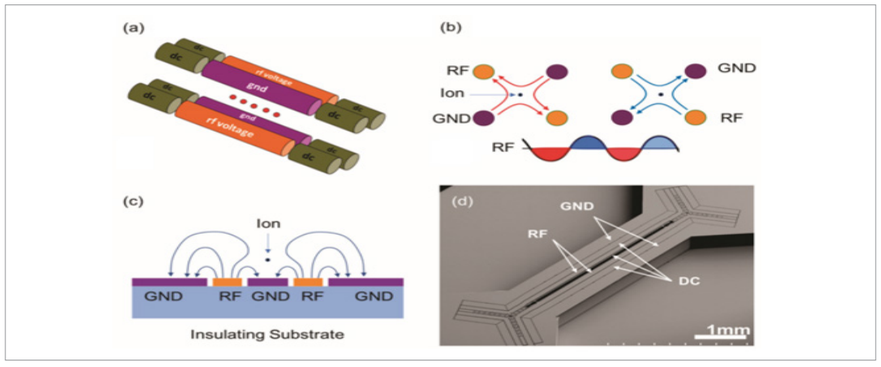
1950년대 Wolfgang Paul에 의해 라디오파를 이용한 이온 포획 방법이 고안됐다. 이 공로로 Wolfgang Paul은 1989년 노벨 물리학상을 받았다. 일반적으로 포획 우물을 발생시키는 장치의 크기에 따라 매크로(Macro-) 포획 장치와 마이크로(Micro-) 포획 장치로 구분한다. 국내에서 이온 포획을 이용한 연구는 서울대, 이화여대, 포항공대, 성균관대가 진행하고 있으며, 포획 장치를 독립적으로 제작해 실험에 활용하고 있다.

(2) 연구 동향

① 매크로 포획 장치

라디오파와 직류 전기장을 조합해 이온을 포획하며, 초창기에는 Penning 포획 장치, 링 포획 장치가 사용됐으나 양자컴퓨터 연구에는 다수의 이온을 포획하여 제어하기 쉬운 4-rods 포획 장치, 블레이드(Blade) 포획 장치가 2000년대 초반에 개발돼 주로 사용되고 있다. [그림 II-3-45]의 (a), (b)와 같이 2개의 고주파 전극, 2개의 고주파 접지 및 직류 전압을 가하는 전극으로 구성돼 있다. 이 장치에 포획된 이온은 쿨롱 반발력에 의해 선형으로 배열된다.

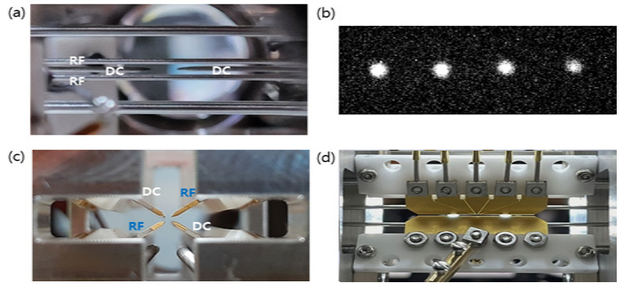
그림 II-3-45 (a),(b) Paul 포획 장치의 예시 (c),(d) 다중 전극들을 가지며 표면 위에서 포획하는 장치



※ Quantum Computing (2019)

해당 장치는 포획 구조물과 레이저빔의 광산란이 적기 때문에 높은 신뢰도의 양자게이트 구현 및 측정이 가능하다. 그러나 조화 우물에 포획된 이온의 개수가 증가하면 서로 간의 간격 및 포획 세기가 변하게 되므로, 개별 조작 및 양자게이트 구현에 어려움이 생긴다. 이러한 매크로 포획 장치의 어려움을 극복하기 위해 구획이 구분된(Segmented) 블레이드 포획 장치 등이 개발돼 사용되고 있다. 국내에서는 4-rods 포획 장치(이화여대, 성균관대), 블레이드 포획 장치(서울대), 구획이 구분된 블레이드 포획 장치(이화여대, 성균관대, 포항공대)가 개발 및 사용되고 있다.

그림 II-3-46 국내에서 사용 중인 매크로 포획 장치들

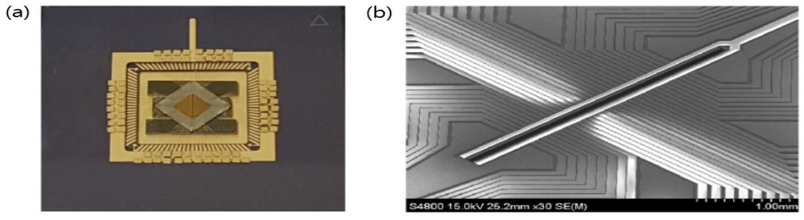


(a) 조립된 4-rod 포획 장치의 측면 사진(이화여대)
(b) 4-rod 포획 장치로 포획된 Yb174 이온들
(c, d) 조립된 블레이드 포획 장치 사진 (c:이화여대, d:포항공대)

② 마이크로 포획 장치

반도체 기술 및 공정을 활용해 작은 크기의 포획 장치를 제작할 수 있다. 정밀 가공을 통해 공정 오차를 줄일 수 있으며, 다중 전극의 설치가 가능하고 확장성 및 이온의 간격 조절, 이온 큐비트의 이동이 쉽다는 장점이 있다. 레이저와 금속 코팅이 되지 않은 실리콘 혹은 다른 물질과의 산란이 발생하면, 전하를 만들어 포획 우물을 변형시킬 수 있으며, 위쪽으로 약한 포획 우물이 형성돼 상대적으로 낮은 포획 안정성을 가지고 있다. 국내에서는 서울대가 독자적으로 칩 기반의 포획 장치를 개발해 사용하고 있으며 포항공대도 다층구조의 마이크로 포획 장치를 개발하고 있다.

그림 II-3-47 (a) 서울대에서 개발한 반도체 칩 기반의 이온 포획 장치 사진
(b) 다중 전극을 가지는 칩 포획 장치의 확대 사진



(3) 적용 분야

현재 매크로 포획 장치는 포획된 이온의 기본적인 양자조작 및 고신뢰도 양자게이트 구현에 중점을 두고 있으며, 칩 기반 포획 장치는 다수의 이온 큐비트 포획 및 안정화 등 시스템의 확장성에 중점을 두고 연구가 진행되고 있다. 국내의 포획 장치는 상업화보다는 시스템 개발 및 최적화에 초점을 맞추고 있으며, 해외와 비교해도 경쟁력 있는 안정적인 포획 장치 제작기술을 보유하고 있다.

나. 양자게이트 및 양자알고리듬 구현

양자컴퓨팅 알고리듬은 단일 양자게이트와 양자얽힘 게이트의 조합으로 구현할 수 있다. 단일 양자게이트는 하나의 이온 큐비트 내부 에너지 상태를 단일 레이저, 마이크로파, 펄스 레이저를 이용한 라만 전이 등을 사용해 조작 및 구현할 수 있다. 2개의 이온 큐비트를 이용하는 양자얽힘 게이트는 MS(Mølmer-Sørensen) 게이트, CZ(Cirac and Zoller) 게이트, Geometric Phase 게이트 등이 주로 사용되며, 이외에도 높은 신뢰도의 양자얽힘 게이트를 구현하기 위해 다양한 기술이 사용되고 있다.

(1) 기술 동향

국내 양자컴퓨터 연구는 원자량이 171인 이테르븀 동위원소의 초미세준위(Hyperfine)를 이용하고 있다. 공명주파수는 약 12.63GHz로 마이크로파와 펄스 레이저를 이용한 라만 전이를 이용해 이온 큐비트를 조작할 수 있다. 국내 연구진에 의해 발표된 펄스 레이저를 이용한 단일 양자게이트 신뢰도는 99.6 ± 0.2%를 기록한 바 있다. 서울대의 경우 마이크로파와 355nm의 펄스 레이저를 이용한 라만 전이로 단일 양자게이트 구현에 성공했으며, 펄스 레이저를 이용한 두 개의 이온 큐비트에 대한 MS 게이트로 양자얽힘을 구현하는 것도 성공했다.

(2) 연구 동향

단일 양자게이트의 신뢰도는 자기장, 진공도, 전자기적 가열과 같은 외부 잡음 제거, 조작 레이저의 안정적인 주파수 유지, 세기 고정 등과 밀접한 관련이 있다. 이를 위해 실험실 환경 유지, 레이저 안정화와 같은 기술적인 연구가 이뤄지고 있다. 양자얽힘의 경우, 두 개의 큐비트에 두 가지 주파수의 레이저를 동시에 조사하는 MS 게이트가 구현됐다. 높은 신뢰도의 MS 게이트를 구현하고, 향후 다수의 이온 중 임의의 두 개 큐비트의 양자얽힘 게이트 구현을 위해 레이저 펄스 모양 조작(Pulse Shaping)과 같은 기술적인 연구가 진행되고 있다. MS 게이트를 제외한 CZ 게이트와 Geometric Phase 게이트의 경우 개별 큐비트 조작이 필요하나, 국내에는 아직 개별 조작 기술이 없다. 따라서 게이트 조작 및 양자컴퓨터의 확장을 위해 개별 조작 연구, 이온 이동 등의 연구를 진행할 예정이다.

(3) 적용 분야

양자게이트 구현은 양자컴퓨팅을 위한 필수적인 부분으로, 높은 신뢰도의 양자게이트가 완성되면 양자알고리듬을 구현할 수 있다. 아직 국내 기술은 두 개 큐비트의 양자얽힘 구현에 막 성공한 수준이며, 의미 있는 양자알고리듬 구현보다는 이를 이용한 양자 시뮬레이션이나 간단한 물리 연구에 적용할 수 있다.

다. 큐비트 확장

양자컴퓨터의 성능을 나타내는 지표로 양자볼륨(Quantum Volume)을 사용하며, 구현 가능한 양자게이트 개수, 게이트 신뢰도 및 큐비트의 개수가 그 주요 지표이다. 양자컴퓨터의 성능을 높이는 방향 중 하나는 큐비트의 개수를 증가시키는 것이며, 단순히 포획된 이온의 개수만 증가시키는 것이 아닌 개별 이온의 조작, 측정 및 그 안에서 높은 신뢰도의 양자게이트를 구현하는 것이 필요하다.

(1) 기술 동향

국내에서는 큐비트 확장 기술을 개발할 단계에 이른 곳이 아직 없다. 과거 SK텔레콤이 떨어진 두 포획 장치의 이온에서 발생한 광자를 이용해 Hong-Ou-Mandel 간섭을 측정한 바 있다.

(2) 연구 동향

국내 각 연구그룹에서는 독자적인 아이디어를 가지고 양자컴퓨터의 확장을 연구하고 있다. 서울대와 성균관대의 경우, 하나의 포획 장치에서 다채널 음광학 변조기를 이용한 개별 조작 및 멀리 떨어진 다른 포획 장치 간의 양자얽힘을 목표로 연구가 진행 중이며, 이화여대는 이온 셔틀링을 통한 양자얽힘 및 확장을 연구하고 있다. 포항공대의 경우 광학적 공진기를 이용한 큐비트 조작 연구를 목표로 연구가 진행 중이다.

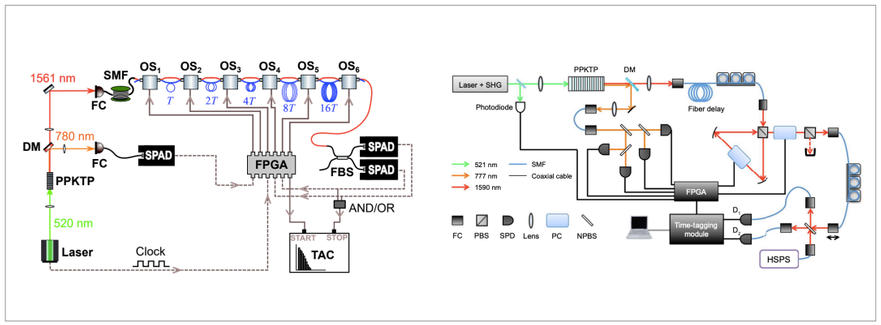
4. 양자광학 기반 양자컴퓨팅

가. 양자광 생성 기술

(1) 연구 동향

국내 비선형 광학 기반 광자쌍 생성 기술은 국제적인 경쟁력을 갖춘 것으로 평가받고 있으며, 이를 다양한 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센서 원천기술 및 응용 기술 개발에 적용하고 있다. KIST, KRISS 등 출연연과 포항공대, 부산대 등 대학에서 수행하고 있는 비선형 광학 기반 광자쌍 생성 및 양자정보 응용 연구는 20여 년의 역사를 가지고 있으며, 밝기나 순수도, 구별 불가능성 등 주요 성능 지표 역시 세계 최고 수준을 달성하고 있다. 가령 KIST는 최근 예고도(Heralding) 효율 61%의 단일광자 생성에 성공했는데, 이는 80% 수준인 단일광자 검출기의 측정효율을 고려하면 95% 이상의 예고 효율을 달성한 것이다.[372] 이는 세계적인 수준에 근접한 수치로, 단일광자 확장성 제고에 큰 역할을 해줄 것으로 기대된다. KRISS는 통신 파장 대역 단일광자에 광섬유 기반 시간 다중화(Time-Multiplexing) 기술을 접목해 확정적 단일광자를 생성하는 데 성공했다. 확정적 단일광자 생성 확률은 10%로 같은 방식의 세계 최고 수준인 67%에는 미치지 못하지만, 광섬유를 이용해 실험 장치가 간단하고 통신 파장 대역의 단일광자에 적용할 수 있다는 장점이 있다.[373] 집적광학계 기반 광자쌍 생성 연구 역시 KIST, ETRI, 포항공대 등에서 활발히 진행 중이다.

그림 II-3-48 (왼쪽) KRISS와 (오른쪽) 미국 일리노이 주립대학에서 개발한 시간 다중화 (Time-Multiplexing) 기반의 확정적 단일광자 생성 실험 장치



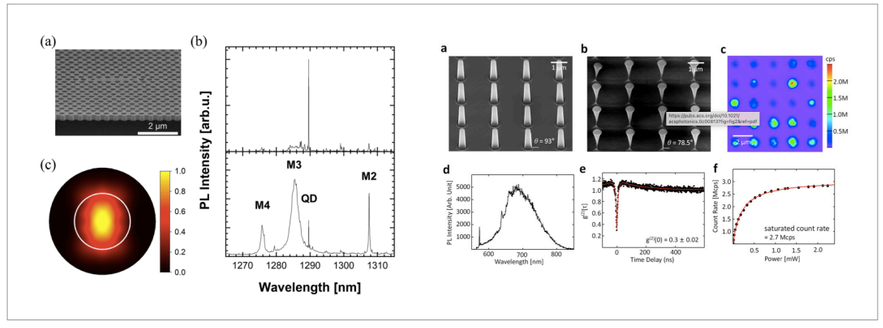
※ Lee (2019), Kaneda (2019)

국내 단광자 방출체 기반 단일광자 광원 연구는 해외에 비해 다소 낮은 수준의 기술을 가지고 있으나, 최근 신진 연구그룹이 많이 등장하면서 의미 있는 연구 결과를 도출하고 있다. 양자점 기반 단일광자 광원은 UNIST와 고려대 등에서 원천기술을 개발하고 있으며, 온도 미세조정을 이용한 구별불가능 단일광자 생성, 초미세 공진기를 이용한 매우 밝은 단일광자 생성 등의 연구를 수행하고 있다.[374] KIST와 KRISS 등 출연연은 다이아몬드 색중심 점결함 기반 단일광자 광원 연구를 수행하고 있으며, 특히 나노포토닉스를 이용한 단일광자 포획효율 증가에 관한 연구 등에서 두각을 드러내고 있다.[375]

372) Lee (2021)
373) Lee (2019)
374) Kim (2021)
375) Jeon & Lee (2020)

국내 압축광 생성 연구 역사는 매우 짧으며, 선진국과 비교해 걸음마 수준이라고 할 수 있다. 국내에서는 KAIST가 압축광을 양자정보에 응용하기 위한 연구를 2010년대 후반부터 수행하고 있으며, 최근 모드 어긋남에 강인한 압축광 생성 기법을 제안했다.[376]

그림 II-3-49 (왼쪽) 고려대에서 개발한 양자점 기반 단광자 광원
(오른쪽) KIST에서 개발한 다이아몬드 점결함 기반 단광자 광원



※ Kim (2021), Jeon & Lee (2020)

나. 양자광 측정 기술

(1) 연구 동향

국내 양자광 측정 연구는 양자광원 생성과 함께 양자정보처리 연구의 일부로 함께 연구되고 있다. 하지만 초전도 나노와이어 단일광자 검출기나 TES 등 양자광학 기반 양자컴퓨터 연구에 활용할 수 있는 최첨단 양자광원 측정장치에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 최근 국내 광부품 회사인 '㈜우리로'는 InGaAs 광다이오드 기반 단일광자 검출 부품의 상용화에 성공했다. 다만 InGaAs 광다이오드의 경우 검출 효율이 10~20% 수준으로 양자컴퓨터나 양자 시뮬레이터에 활용하기 어려우며, 양자 키 분배 시스템 등에 활용하고 있다.[377]

376) Roh et al. (2021)
377) http://wooriro.com/bbs/board.php?bo_table=product04

그림 II-3-50 ㈜우리로에서 상용화에 성공한 InGaAs APD 기반 단일광자 검출 소자



※ http://wooriro.com/

다. 양자연산공간 확장 기술

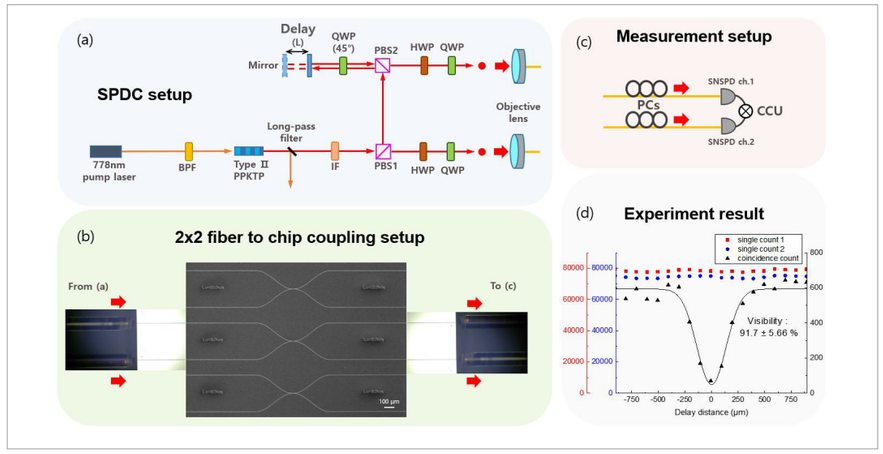
(1) 연구 동향

비선형 광학 기반 광자쌍을 이용해 다수의 단일광자를 생성하여 양자연산공간을 늘리기 위한 연구에 있어, 국내에서는 4~6 광자 수준의 양자정보 실험을 수행하는 수준이다.[378) 379)] 단일광자가 가지고 있는 다양한 자유도를 동시에 이용하거나, 높은 차원의 양자상태를 이용해 양자연산공간을 확장하는 연구 역시 널리 진행되고 있으며, 국내에서는 하나의 광자를 이용해 4차원 양자상태를 생성하고 측정하는 수준에 이르렀다.[380)]

단광자 방출체 기반 단일광자에 관한 활발한 연구에도 불구하고, 국내에서는 다수의 구별 불가능한 단일광자를 생성하는 연구가 아직 부족해, 양자컴퓨팅을 포함한 양자정보처리에 직접 활용하기에는 어려운 실정이다. 국내 압축광 기반 양자정보 연구의 경우, 압축광 실험 연구가 걸음마 단계에 머물러 양자연산공간의 확장성 제고를 논하기 어려운 상황이다. 양자광학 시스템을 집적화하는 연구는 KIST, ETRI, 포항공대 등을 중심으로 진행하고 있으며, 기본적인 양자간섭 현상을 집적광학계에서 측정하는 수준이다.[381)] 최근 기존 집적광학계 연구자들의 양자정보 연구 응용에 관한 관심이 커지면서, 관련 분야도 급속히 발전할 것으로 기대된다.

378) Lee et al. (2020)
379) Lee et al. (2022)
380) Yoo et al. (2018)
381) Jang et al. (2022)

그림 II-3-51 KIST에서 구현한 집적광학계 기반 양자간섭 실험



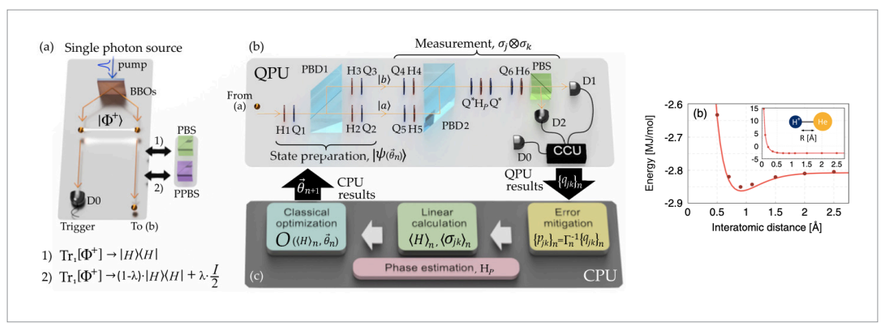
※ Jang (2022)

라. 양자광학 기반 양자 시뮬레이터

(1) 연구 동향

국내에서 양자광학 기술을 이용해 양자 시뮬레이터 또는 양자컴퓨터를 직접 구현하는 실험 연구는 사례를 찾아보기 어려우나, 최근 광자 기반 양자컴퓨터를 이용해 간단한 이원자 분자의 바닥상태 에너지를 계산하는 것에 성공했다.[382)]

그림 II-3-52 KIST에서 구현한 양자광학 양자 시뮬레이터와 이원자 분자의 바닥에너지 계산 결과



※ Lee (2022)

5. 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨팅

가. 다이아몬드 성장 및 NV 센터 형성

(1) 기술 동향

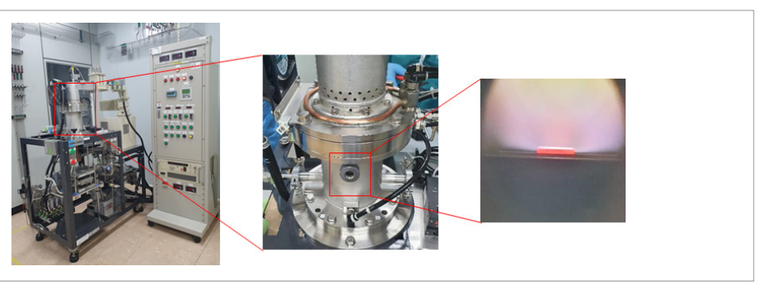
다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨터 구현을 위해서는 초고순도의 단결정 다이아몬드가 필요한데, 국내의 다이아몬드 성장 기술은 대부분 공업용 다이아몬드에 한정돼 있다. 따라서 현재 양자컴퓨터 연구에 사용되는 다이아몬드는 전량 수입에 의존하고 있지만, 국내에서도 다이아몬드 성장에 관한 연구가 진행되고 있고, 최근에는 고순도의 단결정을 성장하는 데 성공했다. 차세대 반도체 재료로써 Wide Bandgap 반도체에 관한 연구가 활발히 진행되면서, 반도체 소재 중 가장 밴드갭이 넓은(5.47eV) 다이아몬드에 관한 관심도 증가하고 있지만, 대면적 성장이 힘들고 가공이 어렵다는 한계에 부딪히고 있다. 한편 다이아몬드에 NV 센터를 형성하기 위해서는 질소 이온을 주입해야 한다. 이 공정은 실리콘 반도체에 도핑하는 과정과 동일하므로 국내에도 이온 주입이 가능한 기업과 연구소들이 있다. 하지만 질소를 극소량 주입하거나, 낮은 에너지로 주입하는 등의 특수한 이온 주입 조건을 충족하려면 해외 이온 주입 서비스를 이용할 수밖에 없다.

(2) 연구 동향

① 다이아몬드 성장 기술

한국공학대학교 연구팀은 국내에서 화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)을 이용해 단결정 다이아몬드를 성장할 수 있는 유일한 그룹이다.[383)] 최근 질소 함유량이 50ppb 이하의 고순도 다이아몬드를 성장하는 데 성공했고, 양자컴퓨터에 사용할 수 있도록 불순물 함유량을 수 ppb 이하로 낮추는 것을 목표로 연구 중이다. 또한 진공도를 10^{-8}Torr까지 낮출 수 있는 CVD 장비를 구축해 세계 최고 수준의 고순도 다이아몬드 성장 기술 확보를 목표하고 있다.

그림 II-3-53 한국공학대학교가 보유한 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비

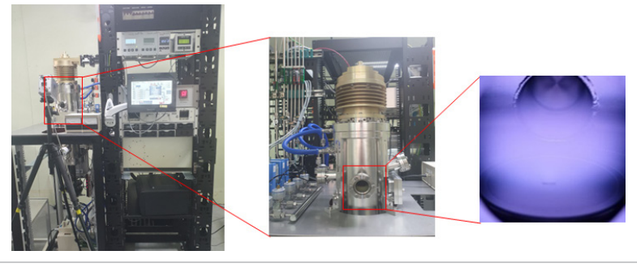


※ 한국공학대학교

382) Lee (2022)

383) Diam et al. (2021)

그림 II-3-54 구축 중인 초고진공 단결정 다이아몬드 성장용 CVD 장비



※ 한국공학대학교

② 이온 주입 및 열처리 기술

다이아몬드에 질소 이온을 주입하는 방법은 크게 이온을 주입하는 시점으로 나눌 수 있다. 다이아몬드를 성장할 때 기체 조성비를 조절해 질소 농도를 높임으로써 특정한 깊이에만 질소를 주입하거나, 다이아몬드 성장 후 이온가속기를 이용해 주입할 수도 있다. 각각의 방법은 다음과 같은 장단점이 존재한다.

표 II-3-2 이온 주입 시점에 따른 장단점

이온 주입 시점	장점	단점
다이아몬드 성장 중	1. 주변에 생성되는 결함을 최소화할 수 있다.	1. 이온이 생성되는 위치를 제어할 수 없다. 2. 불순물 농도 제어가 어렵다.
다이아몬드 성장 후	1. 이온 주입 마스크를 사용해 원하는 영역에 이온을 주입할 수 있다. 2. 농도 제어가 쉽다. 3. 다양한 이온을 주입할 수 있다.	1. 이온주입 과정에서 다이아몬드에 결함이 생긴다. 2. 추가 공정이 필요하다.

※ 집필진 작성

다이아몬드 성장 중 이온을 주입하는 대표적인 기술은 Delta-Doping이다. 이 기술을 이용하면 2nm 정도로 얕은 깊이에 이온층을 생성할 수 있고, NV 센터 주변의 결함을 최소화해 NV 센터의 양자품질을 극대화할 수 있다. 최근 한국공학대학교에서 이 기술을 개발하고 있다.

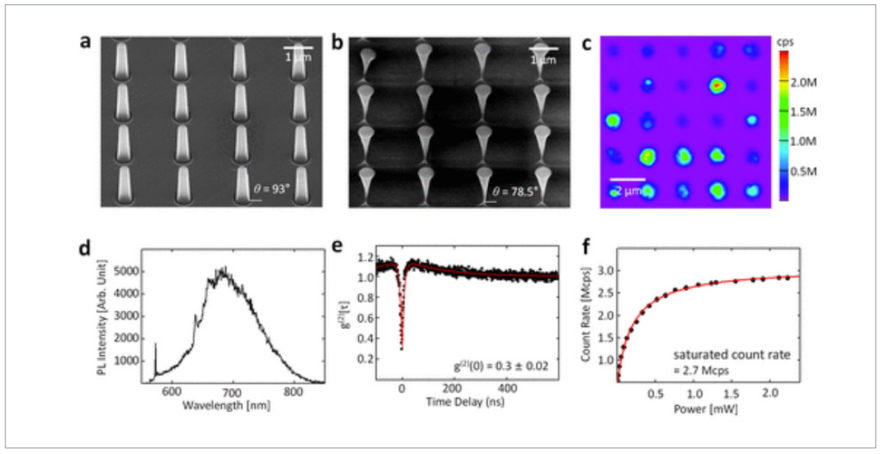
다이아몬드 성장 후에는 강한 에너지로 이온을 가속해 다이아몬드 표면을 통해 주입한다. 이온 주입 마스크를 사용해 원하는 곳에 주입할 수 있지만, 이온이 주입되는 과정에서 수많은 결함을 만들게 되어 NV 센터의 양자품질을 저해하는 요인이 된다. 결함을 줄이고 주입된 이온을 NV 센터로 변환하기 위해서 열처리 기술이 사용된다. 예를 들어 질소 이온을 NV 센터로 변환하기 위해서는 600도 이상의 고온에서 열처리를 진행해야 한다. 다이아몬드는 고온에서 산소와 반응을 잘하기 때문에, 열처리는 10^{-7} Torr 이하의 진공이나 질소나 아르곤 등의 불활성 기체를 채워둔 환경에서 열처리를 진행해야 한다.

열처리 후에는 다이아몬드 표면 결함이 증가하는데 표면에서 SP3 결합이 SP2 결합으로 전환되기 때문이다. 이러한 결함들로 인해서 NV 센터의 양자상태 제어가 어려워지므로, 고온의 혼합산으로 표면의 결함을 제거해줘야 한다. 고온의 혼합산을 이용하는 작업은 여러 환경 규제 때문에 국내에서 팹서비스를 이용하기 어려워 개인 연구실을 이용할 수밖에 없다.

③ 다이아몬드 반도체 공정 기술

다이아몬드의 NV 센터를 효율적으로 제어하기 위해서는 다이아몬드 나노구조물을 이용해야 한다. 다이아몬드도 반도체의 일종이기 때문에 CMOS 공정을 적용할 수 있다. 하지만 다이아몬드는 수 mm의 조각으로 판매되기 때문에 팹서비스를 일괄적으로 받기 어렵다. 따라서 개별 연구소 팹을 이용하거나, 국내 팹서비스 중 일정 교육 이수 후 장비 직접 사용 서비스를 이용해 다이아몬드 나노구조물 제작을 할 수 있다. 한편 아직 다이아몬드 반도체 공정조건이 확립되지 않았기 때문에 다이아몬드에 적용할 수 있는 반도체 공정조건을 찾아야 하는 어려움이 있다. 최근 KIST 양자정보연구단에서는 뒤집힌 콘 형태의 다이아몬드 나노구조물을 구현하는 것에 성공했고, 이를 통해 NV 센터에서 방출되는 광자의 포집률을 일반적인 기둥 구조보다 2배 증가시켰다.[384)]

그림 II-3-55 KIST에서 개발한 다이아몬드 나노구조물을 이용한 NV 센터 광자 포집효율 증대 구조물



※ Jeon & Lee (2020

384) ACS Photonics (2020)

(3) 적용 분야

다이아몬드의 성장, NV 센터의 생성 그리고 나노구조물의 제작기술은 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 연구에 있어서 반드시 보유해야 할 기술들이다. 지금은 대부분 해외 기술에 의존하고 있지만, 국내에서도 다이아몬드에 관련된 연구그룹이 증가하는 추세이다. 다이아몬드는 양자적 특성뿐만 아니라, 열적, 기계적으로도 연구 가치가 높은 재료이다. 양자분야로의 응용뿐만 아니라 광학, 센서 등의 분야에도 적용 가능하며, 위에 언급한 기술들 역시 다이아몬드가 사용되는 모든 분야에 응용할 수 있다.

나. 다이아몬드 NV 센터 전자스핀 제어

(1) 기술 동향

다이아몬드 NV 센터 전자스핀의 양자상태는 광학적으로 초기화할 수 있고, 마이크로파를 통해서 제어할 수 있다. 다이아몬드 NV 센터를 탐색하기 위해서는 고분해능의 공초점 현미경이 필요하고, 양자상태를 제어하기 위해서는 1~4GHz 대역의 마이크로파 생성 장치가 필요하다. 현재는 연구실 수준에서 여러 부품과 장비를 조합해서 구현한 실험을 이용해 연구를 진행하고 있다. NV 센터는 상온, 대기압에서 동작하기 때문에 진공 챔버와 냉동기가 필요 없어 측정시스템의 크기를 줄일 수 있다. 최근 KIST 양자정보연구단에서는 이동할 수 있는 2큐비트 양자컴퓨터를 공개했다.

그림 II-3-56 2021년 과학기술대전에서 공개한 2큐비트 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터



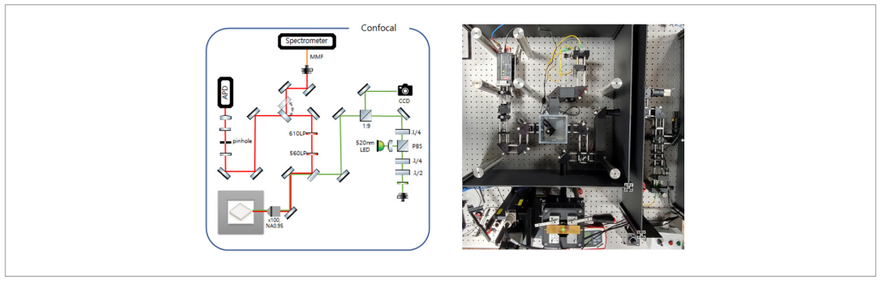
※ KIST 양자정보연구단

(2) 연구 동향

① 고분해능 공초점 현미경

다이아몬드의 NV 센터를 탐색하기 위해서는 고분해능의 공초점 현미경이 필요하다. KIST 양자정보연구단에서는 광축은 고정하고 다이아몬드의 위치만 조절할 수 있도록 현미경 시스템을 구성하고 있다. 해당 시스템에서는 다이아몬드의 위치를 서브 nm 범위로 조절할 수 있는 Piezo Stage와 다이아몬드 내부의 NV 센터에서 방출되는 빛을 최대한 포집하기 위해 높은 개구수의 대물렌즈를 사용한다. 532nm 파장의 레이저로 NV 센터의 전자를 여기하고, 이때 방출되는 637~800nm 대역의 빛을 단일광자 검출기를 통해서 검출한다.

그림 II-3-57 공초점 현미경 시스템 모식도와 실물 사진

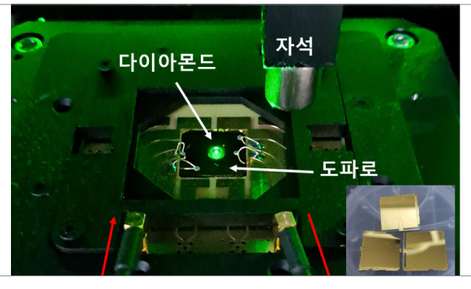


※ KIST 양자정보연구단

② 마이크로파 생성 및 제어 장비

다이아몬드 NV 센터의 양자상태를 제어하기 위해서는 전자스핀의 |0〉 상태와 |1〉의 공진 주파수에 맞는 마이크로파를 인가해야 한다. 주변 자기장에 따라 공진 주파수는 1~4GHz 정도의 대역에 위치한다. 전자스핀의 상태를 임의의 상태로 바꾸기 위해서는 마이크로파의 위상을 조절할 수 있어야 하므로, 벡터 신호 발생기를 사용하거나 임의의 파형을 생성할 수 있는 AWG(Arbitrary Waveform Generator)를 사용하기도 한다. 한편 마이크로파를 NV 센터에 효율적으로 전달하기 위한 도파로가 필요하며, 인가 주파수에서의 임피던스를 고려해 설계해야 한다.

그림 II-3-58 초점 현미경의 다이아몬드 샘플과 자기장 및 마이크로웨이브 인가 방법

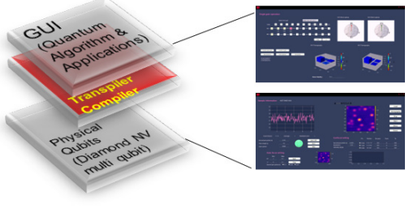


※ KIST 양자정보연구단

③ 양자컴퓨터 제어 프로그램

다이아몬드 NV 센터를 탐지하고 양자상태를 제어하기 위해 다양한 장비들이 사용된다. 이러한 장비들이 유기적으로 연동되기 위해서는 중앙에서 장비들을 제어할 수 있는 컨트롤러와 프로그램이 필요하다. 그뿐만 아니라 사용자가 NV 센터 제어를 쉽게 할 수 있도록 특정 양자게이트에 대한 신호를 변환하고, 장비들이 그 신호에 맞게 마이크로파 신호를 발생시킬 수도 있어야 한다. 양자의 원리를 이해하고 있는 사용자가 NV 센터를 이용해 중첩과 얽힘을 실험적으로 확인할 수 있는 환경이 구축돼야 한다.

그림 II-3-59 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 제어 프로그램



※ KIST 양자정보연구단

(3) 적용 분야

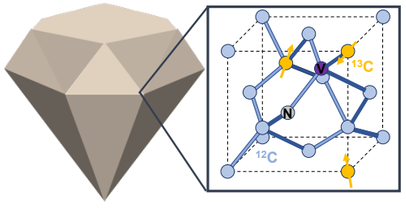
다이아몬드 NV 센터 전자스핀 제어 및 상태 측정을 하기 위한 시스템은, 양자컴퓨터뿐만이 아니라 NV 센터를 이용하는 센싱, 중계기 그리고 메모리와 같은 응용에서도 그대로 적용할 수 있고, 고체 점결함 연구에도 활용할 수 있다. 최근 KIST에서는 측정시스템의 크기를 최소화해 탁자 위에 올려두고 사용할 수 있을 정도로 작게 만드는 시도를 하고 있다. 궁극적으로는 모든 광학계를 광집적 소자로 대체해 칩만한 크기의 다이아몬드 기반의 양자컴퓨터를 구현할 수 있을 것이다.

다. 다이아몬드 핵스핀 제어

(1) 기술 동향

다이아몬드 내에는 NV 센터의 전자스핀(Electron Spin) 이외에 탄소동위원소인 ^{13}C의 핵스핀(Nuclear Spin)이 존재한다. 전자스핀과 핵스핀의 상호작용(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)은 일반적으로는 전자스핀의 양자상태를 파괴하는 잡음 신호로 여겨진다. 하지만 반대로 생각해보면 전자스핀과 핵스핀이 상호작용한다는 것은, 전자스핀을 통해서 핵스핀의 양자상태에 접근할 수 있다는 것을 의미한다. ^{13}C의 경우 자연적으로 다이아몬드 전 영역에 1.1%의 비율로 존재한다. 핵스핀은 주변 환경으로부터 영향을 거의 받지 않아 비교적 오랜 시간 동안 결맞음 양자상태를 유지할 수 있는 장점이 있는 만큼, 주변과의 상호작용이 어려워 ^{13}C 핵스핀을 단독으로 활용하기는 어렵다. 고려대학교 연구팀은 ^{13}C 핵스핀과 전자스핀의 초미세 결합(Hyperfine Coupling)을 이용해, NV 센터 주변에 존재하는 5개 이상의 ^{13}C 핵스핀을 동시에 제어하는 5큐비트급 양자레지스터를 개발했다고 발표했다.

그림 II-3-60 다이아몬드 NV 센터 부근 질소 및 탄소동위체를 포함한 격자 모형

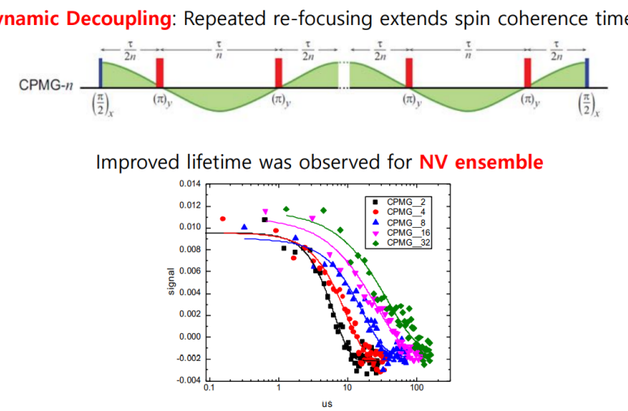


(2) 연구 동향

① 다이나믹 디커플링

전자스핀에서 발생하는 비균일한 위상 손실 효과는 Spin Echo 원리에 기반해, 스핀 방향을 반전시킴으로써 상쇄시킬 수 있다. 이러한 스핀 반전 효과를 주기적으로 반복하는 시퀀스를 활용해, 원하지 않는 주변 환경의 결합을 끊어주는 방법을 다이나믹 디커플링(Dynamic Decoupling)이라고 하며, NMR 분야에서 지속적으로 연구 및 활용되고 있다. 또한 다이나믹 디커플링 기술은 점결함 전자스핀에 존재하는 위상 손실을 없애, 중첩 시간을 증가시키는 효과도 있다.

그림 II-3-61 다이나믹 디커플링 시퀀스와 반복 주기에 따른 중첩 시간 증가 확인 그래프

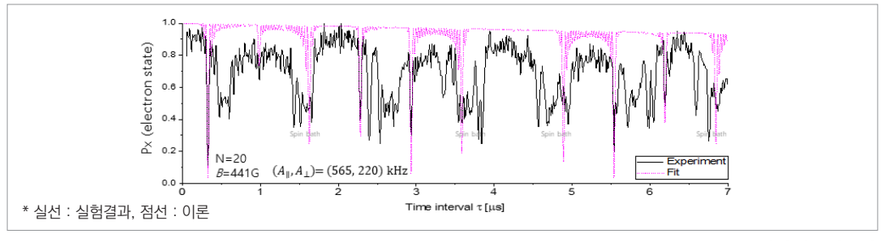


※ KIST 양자정보연구단

② 핵스핀의 탐색

다이나믹 디커플링 시퀀스에서 스핀 상태의 반전 주기가 전자스핀과 인근 핵스핀의 초미세 결합 강도와 공명(Resonance)을 일으킬 경우, 디커플링 효과가 아니라 오히려 강력한 상호작용을 유발하게 된다. 아래 그림은 반전 주기 Tau에 대한 전자스핀의 상태 변화를 나타낸 실험 결과이며, 특정 Tau에서 전자스핀의 공진 현상이 관찰된다.

그림 II-3-62 다이나믹 디커플링 결과



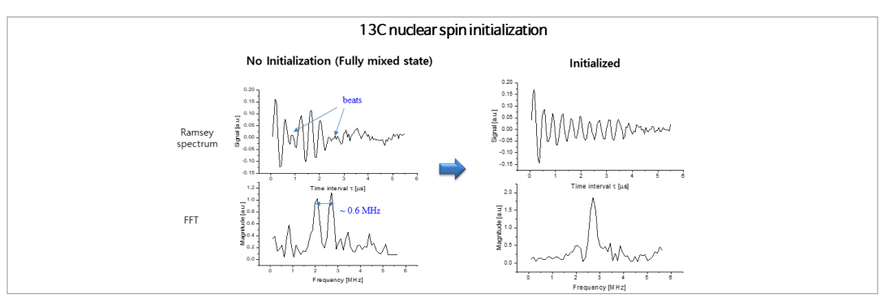
* 실선 : 실험결과, 점선 : 이론

※ KIST 양자정보연구단

③ 핵스핀의 초기화

핵스핀은 NV 센터의 전자스핀처럼 직접적으로 상태를 확인하거나 제어할 수 없다. 다만 주변의 NV 센터를 이용해 간접적으로 상태를 제어할 수 있다. 다이나믹 디커플링을 이용한 전자스핀의 반전 주기가 핵스핀의 결합 세기와 일치할 때, 특정 각도만큼 핵스핀을 회전시킬 수 있다. 이러한 원리를 이용하면 전자스핀의 반전 횟수를 조절해 핵스핀을 원하는 상태로 제어할 수 있다. 핵스핀의 상태를 읽는 것도 전자스핀을 통해서 이루어지는데, SWAP 게이트를 적용해 핵스핀의 상태를 전자스핀에 전달한다. 아래 그림은 핵스핀 초기화 전후의 전자스핀의 Ramsey 신호인데, 초기화 전에는 핵스핀의 여러 상태에 의해서 Ramsey 신호에 다양한 주파수 성분이 섞여 있지만, 핵스핀 초기화 후에는 하나의 주파수 성분만 검출되는 것을 확인할 수 있다. 여러 개의 핵스핀의 제어 역시 NV 센터를 이용해 순차적으로 진행할 수 있다.

그림 II-3-63 핵스핀 초기화 전후 NV 센터의 Ramsey 신호 변화



※ KIST 양자정보연구단

(3) 적용 분야

NV 센터를 이용해 다이아몬드 내부의 핵스핀을 탐지하고 제어하는 기술은 다이아몬드 외부의 핵스핀에도 똑같이 적용할 수 있다. 이를 이용하면 다이아몬드 주변의 나노 입자에 대한 센싱 및 이미징이 가능해질 것이며, 상대적으로 외부 잡음에 강한 NV 센터를 이용해서 양자정보를 핵스핀에 저장하는 메모리로도 활용할 수 있다.

라. 다중 큐비트 연결

(1) 기술 동향

NV 센터는 자기결합(Magnetic Coupling)을 통해 주변 요소와 상호작용이 가능하며, 주로 수십 nm 이내에서 유의미한 상호작용을 가질 수 있다. 현재 국내에서는 NV 센터 위치를 정밀하게 제어해 복수의 NV 센터를 직접 결합하는 다중 큐비트를 구현하는 방식과, 점결함 주변에 존재하는 여러 개의 핵스핀을 큐비트로 활용해 다중 큐비트를 구현하는 방식으로 연구가 진행되고 있다. 또한 이러한 접근이 현실적으로 가지는 큐비트 개수 확장의 한계를 극복하기 위해, 소수의 큐비트를 가지는 단일양자노드에서 광자를 거쳐 연결한 분산형 양자컴퓨터 구현 기술도 연구되고 있다.

(2) 연구 동향

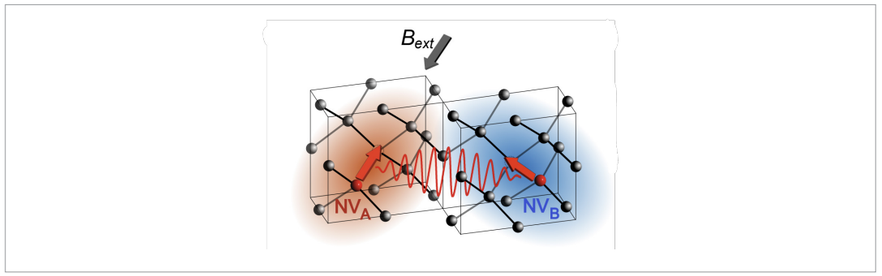
① 전자스핀-전자스핀

다수의 NV 센터를 수 nm에서 최대 30nm 이내의 간격으로 배치해 다중 큐비트를 구현하는 방법이다. 질소를 다수 포함한 분자를 이온 주입하는 방법으로 두 개 이상의 NV 센터가 근접한 다중 NV 센터 시스템을 구현할 수 있다. 국내에서는 미세 마스크 패턴을 이용해 10nm 이내로 정밀하게 NV 센터의 위치를 제어해 생성시킬 수 있는 기술을 개발한 바 있다.[385)]

이 밖에도 복수의 NV 센터를 활용한 다중 큐비트 시스템에서의 마이크로파 등을 활용한 큐비트 제어 기술 연구가 국내에서 진행되고 있으며, 순수 국내 기술로 NV 센터-NV 센터 형식의 2큐비트 시스템에서 양자얽힘 및 양자연산을 구현해냈다. 또한 NV 센터들이 빛의 파장보다 훨씬 가깝게 있어서 빛에 대한 공간적 크로스톡(Crosstalk)이 발생하는 어려움이 있는데, 상온에서 이러한 한계를 극복하는 연구도 진행되고 있다.[386)]

385) Nano Lett (2022)
386) Junghyun Lee (2022)

그림 II-3-64 근접한 두 개의 NV 센터 간의 결합 모식도

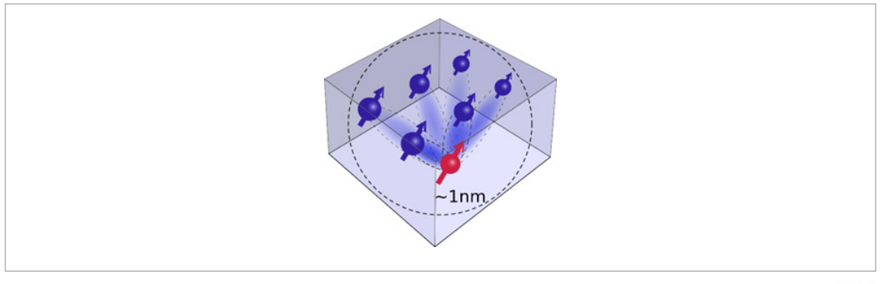


※ 집필진 작성

② 전자스핀-핵스핀

다이아몬드 내에 자연적으로 존재하는 1.1% 비율의 탄소동위체 ^{13}C를 다중 큐비트 구현에 활용하는 연구가 국내에서 진행 중이다. 이 ^{13}C의 핵스핀은 주변환경과의 상호작용이 아주 약한 것이 특징이며, 이로 인해 긴 결맞음 시간을 갖는다. 이러한 ^{13}C의 핵스핀이 NV 센터와 가깝게 위치할수록 더욱 강하게 NV 센터 전자스핀과 결합하며, 멀어질수록 느린 상호작용을 하게 된다. 전자스핀-핵스핀 결합과 공명(Resonance) 효과를 일으킬 수 있는 마이크로파 배열을 NV 센터에 인가함으로써, 핵스핀과 전자스핀의 상호작용을 일으키는 것이 가능하며, 물리적 설계를 통해 큐비트로써 활용하는 것이 가능하다. 각각의 탄소 핵스핀은 서로 다른 결합 강도를 갖기 때문에 개별적인 접근이 가능하며, 국내에서는 탄소 핵스핀 큐비트를 탐색해 다섯 개 이상의 탄소 핵스핀이 접근해 양자간섭을 할 수 있다는 것을 실험적으로 증명했다.

그림 II-3-65 NV 센터 주변의 핵스핀 모식도



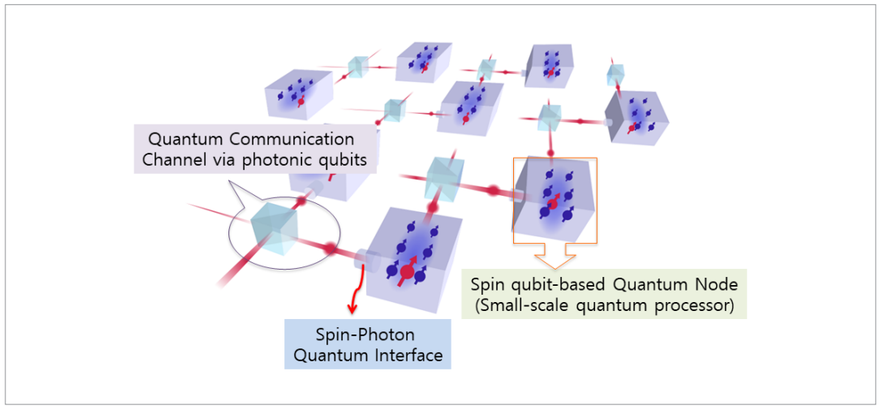
※ KIST

③ 전자스핀-광자

복수의 근접한 NV 센터를 활용한 다중 큐비트의 확장은 큐비트 개수 증가에 따라 기하급수적인 기술적 어려움이 예상된다. 또한 복수의 핵스핀을 활용한 큐비트 수 확장은 자연 다이아몬드에서는 실용적인 결합 크기를 가진 ^{13}C 핵스핀 개수의 제약이 있고 1개의 NV 센터를 통한 접근만 가능하므로, 큐비트 개수가 많아질수록 제어 효율성이 떨어지는 문제점이 있다.

NV 센터는 전자스핀-광자 간 양자얽힘을 구현할 수 있는 대표적 물리 플랫폼이다. NV 센터는 여기 후 방출되는 광자의 편광과 스핀 상태가 얽혀 있는 고유의 물리시스템을 가지고 있으며, 그 외에도 선택적 에너지 여기를 통해 광자의 유무-스핀 상태를 구현하는 방법도 있다. 광자는 멀리까지 이동이 가능하므로, 직접적으로 결합하지 않은 각각의 NV 센터 스핀과 얽혀 있는 광자를 빔스플리터를 통해 측정함으로써, NV 센터 간 원거리 얽힘 및 양자상태 전송이 가능할 것으로 예상된다. 이러한 원거리 스핀 얽힘은 위에서 언급한 전자스핀-전자스핀 시스템 혹은 복수의 핵스핀 시스템을 여러 개 연결한 분산형 양자컴퓨팅을 구현함으로써, 큐비트 수 확장의 한계를 극복하는 데 활용될 수 있다.

그림 II-3-66 광자를 이용한 큐비트 시스템의 확장



※ KIST

(3) 적용 분야

사용할 수 있는 큐비트 개수는 양자컴퓨터의 중요한 성능지표 중 하나이다. 현재 초전도 기반 큐비트의 경우 100개 정도의 큐비트를 구현할 수 있다고 알려져 있다. 그리고 최근 IBM에서는 수년 내에 수천 개의 큐비트를 구현하겠다고 발표했다. 현재 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨터 연구는 NV 센터를 이용해 주변 10개의 핵스핀 큐비트 제어가 가능한 수준이다. 향후 큐비트 확장을 위한 다양한 방법이 연구돼 수천 큐비트 제어가 가능한 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터의 등장을 기대하고 있다.

6. 리드버그 양자컴퓨팅

(1) 기술 동향

리드버그 양자컴퓨팅 연구는 국제적으로 한국이 선도하고 있는 분야이다. KAIST 물리학과 안재욱 교수 연구팀은 삼성미래기술 재단의 연구비 지원(10년, 총 약 80억)으로 2014년에 관련 연구를 개시해 중성원자 재배치 기술(2015년), 3차원 큐비트시스템(2016년), 원거리 리드버그 원자 게이트(2018년), 리드버그 양자선 기술(2021년)을 개발했다. 특히 중성원자 재배치기술은 리드버그 양자컴퓨팅 연구 분야의 빠른 발전을 촉발한 양대 핵심 기술 중 하나로 평가받고 있으며, 이 기술에 사용된 광집게 동시 이동기술을 다른 양자시스템(분자, 양자점 등)에도 활용 가능한지가 주목받고 있다. 3차원 큐비트시스템 기술은 기존의 양자컴퓨팅 플랫폼(초전도체와 이온 트랩 기반)에 없는 기술이고, 큐비트 개수 확장이 쉽다는 장점이 있다. 원거리 리드버그 원자 게이트는 기존의 리드버그 봉쇄 게이트와 다른 방식으로 큐비트 시스템의 크기를 확장할 수 있다. 리드버그 양자선 기술은 N큐비트 간의 임의 그래프 연결 구조를 만들 수 있어, 양자단열 컴퓨팅을 통한 NP-문제 계산을 가능하게 했다고 평가받는다.

① 중성원자 재배치 기술

광집게가 원자 하나를 포획하는 확률은 약 50% 정도이기 때문에, N개의 원자를 동시에 포획하는 확률은 $(1/2)^N$으로 매우 낮다. 따라서 10개의 원자를, 10개의 광집게로 포획하는 경우 보통 4~6개의 원자가 포획되는 편이며, 10개가 모두 포획되는 경우는 약 0.001의 낮은 확률로 발생한다. 따라서 다준위 원자의 광반응 등을 이용해 포획확률을 높이는 연구가 진행됐으나, N=4개 이상의 원자열을 효과적으로 생성하는 데 실패했다. 대안으로 2N개의 광집게를 이용해 약 N개의 원자를 포획한 후, 원자를 포획한 광집게를 선택적으로 재배치해 N개의 원자열을 생성하는 방법이 제안됐다. 하지만 홀로그램을 이용해 N개의 광집게를 동시에 이동한 경우, 광집게 간 간섭 현상이 발생했다. 이를 바탕으로 KAIST는 2014년 광집게 간 간섭이 없는 광집게 재배치 기술을 개발해 중성원자 재배치 기술을 증명했다. 이후 2016년에는 광집게 간 간섭을 최소화한 개량 기술을 이용해 총 49개의 중성원자를 3차원 공간에 재배치하는 데 성공했다. 한편 2016년에 Harvard와 프랑스 Ecole Polytechnique는 음광소자를 이용해 약 100개의 중성원자를 배치하는 기술을 개발했다. 현재는 최대 250개의 원자를 공간에 배치해 양자 시뮬레이션 또는 양자컴퓨팅 연구에 사용하고 있다. 참고로 중성원자 재배치 기술은 KAIST가 개발한 홀로그램을 이용하는 방식과 Harvard와 Ecole Polytechnique가 사용하는 음광소자를 이용하는 방식이 주로 사용되고 있으며, 그 외 디지털마이크로 거울을 사용하는 방식 등이 있다.

② 3차원 큐비트시스템

광집게를 이용하는 중성원자 재배치는 3차원 구조의 큐비트 시스템을 만들 수 있다. 다른 양자컴퓨팅 플랫폼(이온 트랩과 초전도체 기반)에서 큐비트의 배치가 1차원 또는 제한된 2차원임을 비교하면, 리드버그 원자시스템의 3차원 구조는 큐비트 수의 확장과 큐비트 간 연결성에서 장점이 있다. KAIST가 최초로 선보인 2층 큐비트 3차원 구조는 이후 프랙탈 구조, 초기하학적 구조 등으로 확장돼, 기존의 사각격자, 벌집 격자, 카고메 격자 등 단순한 2차원 구조에서 수행되던 양자 시뮬레이션 연구의 영역을 확장했다.

③ 원거리 리드버그 원자 게이트

광집게를 이용하는 중성원자 플랫폼은 거리 대비 거리오차를 최소화하는 장점이 있다. 이는 거리오차를 고정하면서 중성원자 간 거리를 임의로 변경할 수 있기 때문이다. 거리 대비 거리오차를 줄이면 큐비트 간 상호작용의 잡음을 최소화할 수 있다. 이는 큐비트 간의 상호작용이 거리의 함수(리드버그 원자는 거리의 마이너스 6제곱)로 주어지기 때문이다. 리드버그 양자컴퓨팅에서는 주로 10마이크로미터 거리에서 거리오차가 수십 나노미터급이어서, 상호작용 잡음을 1/1,000 정도로 작게 만들 수 있다. 이러한 장점 덕분에 원거리 리드버그 원자 게이트는, 기존에 사용되던 리드버그 봉쇄 현상에 기반한 게이트(Rydberg Blockade Gate)와 더불어 관련 연구에 사용되고 있다.

④ 리드버그 양자선 기술

물리적으로 배치된 큐비트 간의 연결성은 근거리 큐비트 간의 직접적인 연결과 원거리 큐비트 간의 간접적인 연결로 구성된다. 따라서 직접적으로 연결되는 큐비트의 수는 2차원 큐비트 구조에서는 일정 면적 내 큐비트의 수, 3차원 구조에서는 일정 체적 내 큐비트의 수로 제한된다. 간접적으로 연결된 큐비트 쌍은 양자회로 계산이 필요하므로 결맞음 시간의 제약을 받는다. 양자단열형 양자컴퓨팅에서는 직접적으로 연결된 큐비트가 많으면 많을수록 좋다. 이에 물리적으로 원거리에 있는 큐비트 간의 직접 연결을 위해 양자선 개념이 제안됐고, KAIST가 실험적으로 구현해 리드버그 양자선으로 명명하였다.

참고로 양자단열형 양자컴퓨팅은 많이 알려진 양자회로형(또는 양자디지털형) 양자컴퓨팅 방식, 측정기반 양자컴퓨팅 방식 등과 함께 범용양자컴퓨팅이다. 흔히 양자회로형만 범용양자컴퓨팅인 줄 오해하고 있으나, 다른 두 방식도 범용양자컴퓨팅이다. 양자회로형 양자컴퓨팅을 고려하는 다른 양자플랫폼(초전도체와 이온 트랩 기반) 연구에서 양자게이트(1Q, 2Q)의 구동 신뢰도가 발전을 가늠하는 중요한 지표로 사용되듯이, 리드버그 양자컴퓨팅에서 고려되는 양자단열형 양자컴퓨팅은 큐비트 간 연결성을 얼마나 쉽게 프로그램할 수 있는지와 시스템의 결맞음 시간이 주요한 성능지표가 된다. 이러한 점에서 D-wave의 초전도체 양자단열형 양자컴퓨터는 고정형 큐비트를 사용해 연결성이 제한된다는 점과 초전도 기반 양자컴퓨터의 결맞음 시간이 짧다는 점에서 제약을 받는다. 양자단열형 양자컴퓨팅에서 각각의 문제는 큐비트의 연결성으로 프로그램한다. 따라서 모든 문제를 프로그램하기 위해서는 모든

큐비트의 연결 구조(수학의 그래프에 해당)를 구현할 수 있어야 한다. 위에서 설명한 양자선은 주어진 큐비트 간의 모든 직접 연결 구조를 구현하는 도구이다. 결국 리드버그 양자선은 리드버그 큐비트 시스템의 모든 직접 연결 구조를 가능하게 한다.

⑤ NP-문제 계산

NP(비결정적 다항)-문제는 폰노이만식 컴퓨팅(현재의 디지털 컴퓨팅) 방식에서 계산복잡도가 높은 문제들이다. 계산 문제 중 결정문제는 계산복잡도에 따라 P(결정 다항)와 NP(비결정적 다항)로 분류되고, NP-문제들은 디지털컴퓨터의 알고리듬으로는 효율적인 계산을 할 수 없다. 따라서 현재 개발 중이거나 향후 개발될 양자컴퓨터들은 이러한 NP-문제를 효율적으로 계산할 수 있어야 한다. 특히 모든 P와 NP-문제들에 대한 다항 시간 환원성을 갖는 NP-완전문제들이 많은 관심을 받는다. 이는 NP-완전문제 하나를 효율적으로 계산할 수 있으면, 다른 문제들도 디지털 알고리듬의 환원(Reduction)을 통해 효율적으로 계산할 수 있기 때문이다. NP-문제의 양자역학적 계산을 위해서는 큐비트 간의 초연결성이 필요한데, 리드버그 원자플랫폼은 KAIST가 개발한 리드버그 양자선과 Harvard가 개발한 큐비트 이동기술에 의해 확보됐다고 보고 있다. KAIST는 리드버그 양자선을 이용해 임의의 그래프 구조를 구현했고, 최대독립집합으로 불리는 대표적인 NP-완전문제 계산이 가능함을 20큐비트급 실험에서 증명했다.

⑥ 리드버그 양자컴퓨터의 시스템 확장

현재 리드버그 양자시스템의 양적 한계는 원자 250개 정도이다. 위에서 설명한 NP-완전문제에 대한 양자우월성(디지털컴퓨터 대비 계산성능 우위)은 원자 약 5,000개 정도에서 확보될 것으로 예상한다. KAIST를 포함해 Harvard, Ecole Polytechniqe 등에서 개발해 구동 중인 리드버그 양자컴퓨터는 알칼리 원자(주로 루비듐)를 사용하므로 시스템 확장이 쉽지 않다. 따라서 리드버그 양자컴퓨터의 결맞음 시간을 확보하기 위해 광격자시계에 쓰이는 알칼리토류 원자의 사용이 고려되고 있다. 한국의 리드버그 양자컴퓨터 시스템 확장연구는 한국표준과학연구원에서 준비하고 있다. 한국표준과학연구원은 알칼리토류 원자인 이터븀을 이용하는 리드버그 양자컴퓨터 연구를 2022년 개시했다. 한국표준과학연구원은 한국의 시간 표준을 관리하는 전문 연구 기관으로서 각종 원자시계 기술에 관한 국제적인 연구경쟁력을 갖고 있으며, 특히 이터븀 광격자 원자시계 기술을 보유하고 있다. 따라서 관련 전문인력과 인프라를 활용해 알칼리토류 원자를 이용한 차세대 리드버그 양자컴퓨터를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

(2) 연구 동향

국내의 리드버그 양자컴퓨팅 연구는 현재 KAIST 물리학과에서 주로 수행하고 있으며, 한국표준과학연구원에서 알칼리토류 원자를 이용하는 연구를 시작했다. 그동안 수행된 주요 연구를 요약하면 다음과 같다.

① 중성원자 동시 재배치 연구

레이저 빔을 동적 홀로그램을 프로그램한 액정소자로 반사해, 위치 조절이 가능한 2N개의 광집게를 만들고, 이를 이용하여 N개의 루비듐 원자를 3차원 공간상에 재배치했다. 광집게 간 간섭 현상이 없거나 최소화해 확장 가능한 개수(현재 약 50개)의 원자를 공간상 임의의 구조로 배치할 수 있다.[387]

② 양자다체계의 열화 현상 연구

1차원 공간에 배치한 중성원자 최대 15개의 양자역학적 다체얽힘 동역학 현상을 관찰했다. 물리학에서 잘 알려진 아이징 모델로 근사해 분석한 결과, 리드버그 다체얽힘 동역학은 이후에 피보나치 그래프로 규명된 제한된 다체에너지 준위들로의 확산현상이며, 포커플랑크 고전 확산모델로 설명될 수 있음을 보여줬다.[388]

③ 3차원 및 프랙탈 차원의 리드버그 원자 배열의 양자 시뮬레이션

3차원 및 프랙탈 구조로 배치한 리드버그 원자들의 양자다체 기저에너지 상태를 양자 시뮬레이션으로 계산했다. 해밀토니안을 조절해 반강자성 아이징 스핀의 예상 결과와 일치함을 확인했다. 특히 리드버그 원자들의 그래프 구조를 변형해 구조간 다체에너지 준위 변화를 직접 관찰할 수 있었다.[389]

④ 약한 상호작용 조건의 리드버그 게이트 연구

리드버그 봉쇄 거리 이상에서, 리드버그 원자 게이트를, 리드버그 원자 간의 약한 상호작용을 이용해 구현했다. Ramsey 분광을 통해 관찰한 리드버그 위상 게이트는 근거리의 원자가 있는 상황에서도 적용 가능한 원거리 양자게이트임을 확인할 수 있었다.[390]

⑤ 원자시계 준위의 베리-위상 게이트 연구(Physical Review Research 2020.)

루비듐 핵스핀 준위 간의 베리-위상 게이트를 펨토초 레이저(Femtosecond Laser)를 이용해 구현했다. 기간 간격을 일정하게 준비한 레이저 펄스열을 이용해, 편광의 함수로 주어지는 루비듐 핵스핀 단일 큐비트 라비회전 게이트를 모두 구현할 수 있음을 보여줬다.[391]

387) Lee et al. (2016), Kim et al. (2016)
388) Kim et al. (2018)
389) Song et al. (2021), Kim et al. (2020)
390) Jo et al. (2020)
391) Song et al. (2020)

⑥ 3차원 원자 이미징 기술 연구

3차원에 배열된 원자 배열에서 방사하는 빛을 준-푸리어공간에 위치한 액정소자로 프로그램해 2차원 평면 카메라로 동시에 이미징했다. 일반적인 이미징에서는 불가능한 이미징 축에 정렬된 원자열 등, 임의의 3차원 원자 배열을 이미징할 수 있게 됐다.[392)]

⑦ 리드버그 양자선 및 최대독립집합 계산 연구(Nature Physics 2022.)

리드버그 원자 배열에서 직접 연결이 되지 않는 원자들을, 추가로 배치한 원자들(리드버그 원자선)을 이용해 직접 연결(양자역학적으로 동등)이 되도록 했다. 이를 이용해 비평면 그래프 구현을 위해 필수적인 쿠라토프스키 그래프 등을 구현함으로써, 비평면 그래프를 포함한 모든 그래프의 구현이 원리적으로 가능함을 보여줬다. 또한 이를 이용해 NP-완전문제의 하나인 최대독립집합의 해를 양자역학적으로 계산했다.[393)]

(3) 적용 분야

현재의 디지털 컴퓨팅으로는 효율적인 계산을 할 수 없는, 조합 최적화 문제에 리드버그 양자컴퓨터가 적용됨으로써 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등에 활용될 것으로 예상된다.

392) Sun et al. (2021)
393) Kim et al. (2022)

제4절 시사점

본 초전도 양자컴퓨팅 백서에서는 해외 및 국내 산학연에서 현재 개발되고 있는 다양한 양자컴퓨팅 기술 동향을 논의했다. 첫째, 초전도 컴퓨팅 측면에서는 미국, 일본, 유럽 등의 선진국은 20년 이상 초전도 양자컴퓨터 관련 원천기술을 꾸준히 연구해왔고, 이 축적된 기술을 바탕으로 양자컴퓨팅 산업계를 형성시키며 양자컴퓨팅 분야의 트렌드를 이끌고 있다. 후발 주자인 중국 역시 정부 주도의 적극적인 투자를 기반으로 최근 60큐비트 이상의 초전도 양자프로세서의 구현을 유수 저널에 보고함으로써 양자컴퓨팅 분야의 리더로 자리 잡았다. 현재 대한민국 역시 양자기술분야에 활발히 투자 중이나, 위에 언급된 선진국들이 달성한 기술 수준에는 10년 이상 뒤처지고 있다. 특히 초전도 양자컴퓨팅과 같은 고체 큐비트 기반 양자컴퓨팅 기술은 극저온 냉각기, 마이크로파 장비, 나노팹 인프라 등 기초 인프라 비용이 높으므로 학계에서는 쉽게 접근하기 어렵다. 따라서 현재까지는 한국표준과학연구원과 같은 정부출연연구소 중심으로 연구개발이 수행됐으나, 전문성을 가진 인력의 부족으로 인해 괄목할만한 성과를 이뤄내진 못했다. 하지만 훗날 초전도 양자컴퓨터가 가져올 광범위한 분야에서의 혁신을 고려한다면, 우리나라도 적극적인 해외 우수 인재 유치, 인력양성, 꾸준한 연구비 지원을 바탕으로 양자컴퓨팅 개발 레이스에 참여해 해외 선진국들과 어깨를 나란히 할 수 있도록 힘써야 할 것이다.

둘째, 양자정보처리를 위한 소자 제작을 위해서는 초고순도, 초고정밀도의 재료와 공정 기술이 필요하다. 하지만 고전 회로 기반의 반도체 산업에서는 이렇게까지 고성능이 필요한 경우가 제한적이기 때문에, 국내에서 자발적으로 본격적인 개발이 이뤄지기가 쉽지 않다. 그러나 긴 호흡을 가지고 반도체 양자점의 기술 개발을 준비해야 한다. 최근 일본의 對한국 수출규제에서 보듯 소재·부품 원천기술의 필요성은 몇 번을 강조해도 지나치지 않다. 따라서 양자 관련 원천·부품 기술 확보의 중요성도 절대 간과해서는 안 된다. 양자기술 소재·부품의 경우 진보된 나노기술을 대부분 포함하므로, 양자 외 타 분야에서도 활용할 수 있다는 점을 고려해 정책 및 투자 방향을 조율해야 한다. 이를 위해 최근 정책적으로 추진 중인 다양한 국내 양자정보과학 연구개발사업을 장기적으로 진행해야 한다. 이것을 토대로 양자정보 과학기술 관련 연구개발 생태계를 꾸준히 조성하고, 후속 사업으로 이어나가 양자시대를 대비해야 한다. 특히 반도체 스핀 큐비트의 잠재력은 산업체 파운드리 공정과 호환성이 높아 지금의 기술로도 대규모의 큐비트를 제작할 수 있다는 점인데, 아직 이것을 명확히 증명한 사례는 없으며, 소수의 그룹만이 파운드리 호환 공정으로 단일 큐비트를 시연했을 뿐이다. 산업체 반도체 공정 전문가와 국내 스핀 큐비트 전문가의 활발한 연계를 통해 대규모 반도체 스핀 큐비트 표준공정을 확립할 필요가 있다.

셋째, 이온 포획 기반 양자플랫폼은 높은 게이트 신뢰도, 긴 결맞음 시간, 확장 가능성과 함께 임의의 양자얽힘이 가능하다는 독특한 장점을 갖고 있어 양자컴퓨터 개발 가능성이 크다. 현재 30개 정도

의 완전한 양자컴퓨터 구현을 달성했으며 다양한 국가의 대학, 기업, 연구소에서 개발을 진행하고 있다. 아쉽게도 국내 연구그룹을 포함한 다른 그룹들과 선두 그룹의 격차는 상당히 벌어져 있다. 그러나 국내 이온 포획 연구진의 시작 시기와 경험을 생각하면 그 격차를 줄이는 것이 불가능은 아니다. 우선 앞서 있는 그룹의 연구 규모, 투자 인력 등을 살펴볼 필요가 있다. IonQ, Innsbruck 대학 등 앞선 그룹의 경우 많은 박사급 인력 및 전문 인력이 연구에 몰두하고 있으며, 연구비 지원도 많이 받고 있다. 국내 연구진이 세계적인 선두 그룹으로 올라서기 위해서는 비슷한 규모의 연구 자원을 투입할 필요가 있다. 또한 관련 부품, 소재, 장비의 개발 및 발전뿐만 아니라 국내로의 수입도 원활하게 진행될 필요가 있다. 양자컴퓨터에 사용하는 일부 핵심 소재, 장비의 경우 국내에선 구매조차 거의 불가능하기 때문이다. 자체 개발에는 많은 시간이 걸리고 기업의 이윤도 생각하지 않을 수 없기에 모든 것을 국내 개발에 의존하기보단, 단기간에는 수입이 원활히 이뤄질 수 있도록 관련 기관의 협조가 필요하며 국내 기술을 확보하는 것은 장기적으로 볼 필요가 있다.

넷째, 양자광학 기반 양자컴퓨터는 물질 큐비트를 이용한 양자컴퓨터와는 다른 방식으로 동작하므로, 양자컴퓨터 구현에 새로운 돌파구를 열어줄 것으로 기대한다. 전 세계적으로 다양한 물리계에서 양자컴퓨터를 구현하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으나 아직 시작 단계에 불과하며, 수많은 기술적 난관에 봉착해있다. 따라서 이러한 기술적 난관을 해결하기 위해 노력하는 한편, 이온 트랩, 양자광학, 고체점 결합, 양자점 등 다른 물리계에서 새로운 돌파구를 찾기 위한 연구를 꾸준히 해오고 있다. 특히 최근 양자이득 실험에 성공하면서 그 가능성을 보여주기도 했다. 우리나라는 세계적인 수준의 우수한 양자광학 인력과 기술을 구축하고 있으며, 기존의 숙련된 광기술을 이용할 수 있어, 적절한 지원만 뒷받침된다면 세계적인 경쟁력을 갖출 것으로 예상된다.

다섯째, 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨팅 관련 연구에서 해외 연구그룹과 국내 연구그룹의 기술격차는 5년 이상일 것으로 추측된다. 현재 대부분의 국내 연구들은 해외 연구성과를 배우고 재연하는 수준인데, 그 격차가 좀처럼 좁혀지지 않고 있다. 다이아몬드 NV 센터 기반의 양자컴퓨터 기술을 개발하기 위해서는 초고순도 다이아몬드 성장을 위한 재료공학 기술, NV 센터 생성 및 나노구조물 제작을 위한 반도체공학 기술, 광학적 특성 제어를 위한 광학 기술, 스핀 상태 제어를 위한 전자공학 기술, 그리고 양자상태의 이론적 분석을 위한 물리학까지 다양한 분야의 전문가가 필요하다. 따라서 관련 분야에서의 인력양성 지원과 다양한 분야의 사람들이 어우러져 일할 수 있는 연구 환경이 조성돼야 한다. NV 센터 기반 양자컴퓨터 연구에는 초고순도 다이아몬드 재료, 정밀 스테이지, 고품질 레이저, 단일광자 검출기, 광학계 부품, 마이크로파 생성기, RF 신호처리 부품 등의 다양한 소재, 부품, 장비들이 필요한데 대부분 수입품에 의존하는 실정이다. 특히 최근 반도체 대란과 더불어 다이아몬드 소재, 측정장비, 전자부품 수급이 어려워지면서 세계적으로 다이아몬드 연구 또한 어려움을 겪고 있다. 따라서 양자컴퓨터 연구 관련 소재, 부품, 장비들의 국산화를 위한 지속적인 연구와 지원이 필요하다. 한편 다이아몬드 NV 센터 기반 양자컴퓨터 기술은 양자메모리, 양자센서, 양자중계기 등 주변 양자기술들과 공유 가능한 핵심 기술들이 많다. NV 센터 기반의 양자컴퓨터 기술 발전이 주변의 다양한 양자기술 개발로 이어지고, 그러한 결과들이 양자기술 분야의 시장을 깨우고 새로운 산업을 일으키는 기회로 이어지길 기대해 본다.

리드버그 원자 기반의 양자컴퓨팅 부문에서는, 아직은 소형 큐비트급이지만 계산의 복잡도가 높은 비결정다항 등의 조합 최적화 문제를 해결하는 능력을 보여줌으로써 국내 기술 수준도 실험적 단계를 지나 개발 경쟁 단계에 접어들었다고 볼 수 있다. 중성원자의 재배치 기술, 3차원 리드버그 원자의 에너지 준위 시뮬레이션, 이미징 기술, 독립집합 계산 연구 등 다양한 후속 연구도 진행되고 있다. 리드버그 원자 기반의 양자컴퓨팅이 본격적으로 구현되면 물류, 생산관리, 네트워크 디자인 등 많은 분야에서 큰 경제적인 가치를 얻을 것으로 예상된다.

참고문헌

• 국내문헌

1	과학기술정보통신부(2021), "양자산업 생태계 활성화를 위한 양자암호통신 시범사업 본격 착수".
2	김영준(2022.07.12), "KISTI, 드림시큐리티에 양자암호통신망 표준 기반 양자 키 관리 기술 이전".
3	변윤재(2022.07.12), "KT-한화시스템, 무선 양자암호 상용화 나선다".
4	선한결(2022.05.17), "KT, 1㎞ 거리 무선 양자암호 통신 성공…"UAM에도 활용"".
5	신희강(2022.07.01), "SKT, '양자 12년' 양자암호통신 선도기업 자리매김".
6	심영석(2021.03.03), "표준연·국보연 공동연구 '양자직접통신' 구현 성공".
7	오현주(2022.06.10), "국정원 '양자암호 장비' 보안기준 발표…"프로토콜 정확성·안전 중요"".
8	이동화, 조영욱, 임향택, 정호중, 한상욱, 김용수(2021), "고효율 1550nm 양자광원 개발," 한국광학회 동계학술대회.
9	이선경, 최가현, 최지수, 최지만, 송운, 이용호, 박관열, 정연욱(2022), "5-큐비트급 초전도 양자컴퓨팅 시스템 구축", 한국표준과학연구원 제5회 양자정보학술대회 Tue-QA-19.
10	장경일(2020.10.27), "'양자정보기술에서 성장동력 찾는다'…강원 미래과학포럼 내일 개최".
11	정보통신기획평가원(2020), "ICT R&D 기술로드맵 2025".
12	정예린(2021.05.10), "양자암호 100㎞까지 전송…SKT·KT 장비 호환".
13	정예린(2022.06.12), "'양자암호통신장비' 공공시장 진입 길 열렸다".
14	정예린·최호(2022.06.12), "'양자암호통신장비' 공공시장 진입 길 열렸다".
15	조성흠(2022.03.28), "KT, 서울-부산 구간 양자암호통신 구축…국내 최장 490㎞".
16	최기영(2021.01.28), "道 '퀀텀밸리' 조성 KT 참여 가시화".
17	최아름(2022.6.10), "2026년까지 세계 세 번째로 50큐비트 양자컴퓨터 구축".
18	최호(2020.11.16), "KT, 서비스 중단 없는 양자암호 기술 개발".
19	최호(2021.07.22.), "KT, 양자암호 네트워크 통합·자동 관리 솔루션 개발".
20	한국과학기술기획평가원(2019), "범용 양자컴퓨터".
21	한국표준과학연구원(2018), 양자컴퓨팅 중장기 추진전략 기획연구".
22	S. Lee et. al JKPS (2021).

• 해외문헌

1	A. Acin et al.(2007), Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks, Phys. Rev. Lett. 98: 230501.
2	A. Artusio-Glimpse et al., (2022) Modern RF Measurements With Hot Atoms: A Technology Review of Rydberg Atom-Based Radio Frequency Field Sensors, IEEE Microwave Magazine, 23, 44-56.
3	A. Grimm, N. E. Frattini, S. Puri, S. O. Mundhada, S. Touzard, M. Mirrahimi, S. M. Girvin, S. Shankar, and M. H. Devoret(2020), Stabilization and operation of a Kerr-cat qubit, Nature 584:205-209
4	A. Jenkins, J. W. Lis, A. Senoo, W. F. McGrew, and A. M. Kaufman(2022), Ytterbium Nuclear-Spin Qubits in an Optical Tweezer Array, Phys. Rev. X 12, 021027.
5	A. K. Ekert(1991), Quantum Cryptography based on Bell's theorem, Phys. Rev. Lett. 67: 661.
6	A. K. Mohapatra et al., (2007) Coherent Optical Detection of Highly Excited Rydberg States Using Electromagnetically Induced Transparency, PHYSICAL REVIEW LETTERS 98, 113003.
7	A. Kou, W.C. Smith, U. Vool, I.M. Pop, K.M. Sliwa, M. Hatridge, L. Frunzio, and M.H. Devoret(2018), Simultaneous monitoring of fluxonium qubits in a waveguide. Physical Review Applied 9:064022.
8	A. Melville, G. Calusine, W. Woods, K. Serniak, E. Golden, B. M. Niedzielski, D. K. Kim, A. Sevi, J. L. Yoder, E. A. Dauler, and W. D. Oliver(2020), Comparison of dielectric loss in titanium nitride and aluminum superconducting resonators. Applied Physics Letters, 117: 124004.
9	A. Morvan, V. V. Ramasesh, M. S. Blok, J.M. Kreikebaum, K. O'Brien, L. Chen, B. K. Mitchell, R. K. Naik, D. I. Santiago, and I. Siddiqi(2021), Qutrit randomized benchmarking, Physical Review Letters 126:210504.
10	A. Muller, J. Breguet and N. Gisin(1993), Experimental Demonstration of Quantum Cryptography Using Polarized Photons in Optical Fibre over More than 1km, Europhysics Letters, 23(6): 383-388.
11	A. Omran, H. Levine, M. D. Lukin et al.(2019), Generation and manipulation of Schrodinger cat states in Rydberg atom arrays, Science 365(6453), 570-574.
12	A. Rubenok, J. A. Slater, P. Chan, I. Lucio-Martinez, and W. Tittel(2013), Real-world two-photon interference and proof-of-principle quantum key distribution immune to detector attacks, Physics Review Letters, 111: 130501.
13	A. Sipahigil et al.(2012), Quantum interference of single photons from remote nitrogen-vacancy centers in diamond, Phys. Rev. Lett. 108, 143601.
14	A. Tosato et al.(2021), A high-mobility hole bilayer in a germanium double quantum well, ArXiv: 2201.06862.
15	A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.- S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin and R. J. Schoelkopf(2004), Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics. Nature, 431: 162-167.
16	A.M.J. Zwerver et al.(2022), Qubits made by advanced semiconductor manufacturing, Nature Electronics 5, 184-190.
17	A.Peters, K.Y Chung, and S.Chu(2001), High-precision gravity measurements using atom interferometry, Metrologia, Vol.38(25).
18	Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Kristan Temme, Maika Takita, Markus Brink, Jerry M. Chow and Jay M. Gambetta(2017), Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. Nature, 549: 242-246.
19	Abhinav Kandala, Kristan temme, Antonio D. Co□rcoles, Antonio Mezzacapo, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta(2019), Error mitigation extends the computational reach of a noisy quantum processor, Nature 567: 491-495.
20	Adi Shamir(1979), How to share a secret, Communications of the ACM, 22(11): 612-613.
21	Aguado, A., Lopez, V., Lopez, D., Peev, M., Poppe, A., Pastor, A., & Martin, V.(2019), The engineering of software-defined quantum key distribution networks.IEEE Communications Magazine, 57(7), 20-26.
22	Air Force Research Laboratory Technical Report ADA502521 AFRL-RI-RS-TR-2009-180 (2009).

23	Alejandro Aguado et al.(2020), Quantum cryptography networks in support of path verification in service function chains, Journal of Optical Communications and Networking, 12(4), B9.
24	Alexander D. Hill, Mark J. Hodson, Nicolas Didier, and Matthew J. Reagor(2021), Realization of arbitrary doubly-controlled quantum phase gates, arXiv:2108.01652v1.
25	Alexander P. M. Place, Lila V. H. Rodgers, Pranav Mundada, Basil M. Smitham, Mattias Fitzpatrick, Zhaoqi Leng, Anjali Premkumar, Jacob Bryon, Andrei Vrajitoarea, Sara Sussman, Guangming Cheng, Trisha Madhavan, Harshvardhan K. Babla, Xuan Hoang Le, Youqi Gang, Berthold Jäck, András Gyenis, Nan Yao, Robert J. Cava, Nathalie P. de Leon and Andrew A. Houck(2021), New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds. Nature Communications, 12: 1779.
26	Ali-Khan, I., C. J. Broadbent, and J. C. Howell(2007), Large-Alphabet Quantum Key Distribution Using Energy-Time Entangled Bipartite States, Physical Review Letters, 98: 060503.
27	Alistair R Milne, Claire L Edmunds, Cornelius Hempel, Federico Roy, Sandeep Mavadia, Michael J Biercuk(2020), Phase-modulated entangling gates robust to static and time-varying errors, Physical Review Applied, 13(2), 024022.
28	Alleaume, R., Roueff, F., Diamanti, E., & Lutkenhaus, N.(2009), Topological optimization of quantum key distribution networks. New Journal of Physics, 11(7), 075002.
29	Amy K. Robinson et al., (2021) Determining the angle-of-arrival of a radio-frequency source with a Rydberg atom-based sensor, Appl. Phys. Lett. 118, 114001., Matthew T. Simons et al., (2021) Rydberg atom-based sensors for radio-frequency electric field metrology, sensing, and communications, Measurement: Sensors 18, 100273.
30	Andrew Conrad, Samantha Isaac, Roderick Cochran, Daniel Sanchez-Rosales, Brian Wilens, Akash Gutha, Tahereh Rezaei, Daniel J. Gauthier, Paul Kwiat(2021), Drone-based quantum key distribution, Free-Space Laser Communications XXXIII: 116780.
31	Andrew Eddins, Mario Motta, Tanvi P. Gujarati, Sergey Bravyi, Antonio Mezzacapo, Charles Hadfield, and Sarah Sheldon(2022), Doubling the size of quantum simulators by entanglement forging, PRX Quantum 3: 010309.
32	ANDREY JARMOLA, SEAN LOURETTE et al.(2021), Demonstration of diamond nuclear spin gyroscope, Science Advances 7(43).
33	Ani Nersisyan,Stefano Poletto,Nasser Alidoust,Riccardo Manenti,Russ Renzas, Cat-Vu Bui, Kim Vu, Tyler Whyland, Yuvraj Mohan, Eyob A. Sete, Sam Stanwyck, Andrew Bestwick, and Matthew Reagory(2019), Manufacturing low dissipation superconducting quantum processors. 2019 IEEE International Electron Devices Meeting(IEDM).
34	Anjali Premkumar, Conan Weiland, Sooyeon Hwang, Berthold Jäck, Alexander P. M. Place, Iradwikanari Waluyo, Adrian Hunt, Valentina Bisogni, Jonathan Pelliciari, Andi Barbour, Mike S. Miller, Paola Russo, Fernando Camino, Kim Kisslinger, Xiao Tong, Mark S. Hybertsen, Andrew A. Houck and Ignace Jarrige(2021), Microscopic relaxation channels in materials for superconducting qubits. Communication Materials, 2: 72.
35	Armin Tavakoli et al.(2021), Mutually unbiased bases and symmetric informationally complete measurements in Bell experiments Science Advances 7, 7.
36	Austin G. Fowler, Matteo Mariantoni, John M. Martinis, and Andrew N. Cleland(2012), Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation, Physical Review A 86:032324.
37	B. Foxen, J. Y. Mutus, E. Lucero, R. Graff, A. Megrant, Yu Chen, C. Quintana, B. Burkett, J. Kelly, E. Jeffrey, Yan Yang, Anthony Yu, K. Arya, R. Barends, Zijun Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, T. Huang, P. Klimov, M. Neeley, C. Neill, P. Roushan, D. Sank, A. Vainsencher, J. Wenner, T. C. White and John M Martinis(2017), Qubit compatible superconducting interconnects. Quantum Science and Technology, 3(1): 014005.
38	B. Huber et al., (2011) GHz Rabi Flopping to Rydberg States in Hot Atomic Vapor Cells, Physcal Reviews Letter 107, 243001.
39	Barrett, J., L. Hardy, and A. Kent(2005), No signaling and quantum key distribution, Physics Review Letters95, 010503.
40	Ben Stray, Andrew Lamb et al.(2022), Quantum sensing for gravity cartography, Nature 602, 590-594.
41	Bennett, C.H. & Brassard, G.(1989), Experimental quantum cryptography: the dawn of a new era for quantum cryptography: the experimental prototype is working, Sigact News 20: 78-80.
42	Boaron, A., Boso, G., Rusca, D., Vulliez, C., Autebert, C., Caloz, M., & Zbinden, H.(2018), Secure quantum key distribution over 42`1 km of optical fiber. Physical review letters,121(19), 190502.
43	Bourennane, M., A. Karlsson, and G. Bjork(2001), Quantum key distribution using multilevel encoding, Physical Review A, 64: 012306.
44	Bradley K. Mitchell, Ravi K. Naik, Alexis Morvan, Akel Hashim, John Mark Kreikebaum, Brian Marinelli, Wim Lavrijsen, Kasra Nowrouzi, David I. Santiago, and Irfan Siddiqi(2021), Hardware-Efficient Microwave-Activated Tunable Coupling between Superconducting Qubits, Phyiscal Review Letters 127:200502.
45	Byung Kwon Park, Min Ki Woo, Yong-Su Kim, Young-Wook Cho, Sung Moon, and Sang-Wook Han(2020), User-independent optical path length compensation scheme with sub-nanosecond timing resolution for a 1×N quantum key distribution network system, Photonics Research, 8: 296-302.
46	C. Freier, M. Hauth1 et al.(2016), Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability, Journal of Physics: Conference Series 723(012050).
47	C. G. Wade et al., (2017) Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence, Nature Photon 11.
48	C. H. Bennett et al.(1992), Quantum Cryptography without Bell's theorem, Phys. Rev. Lett. 68: 557.
49	C. L. Holloway et al., (2014) Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe: From Self-Calibrated Measurements to Sub-Wavelength Imaging, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 62(12).
50	C. Roh, G. Gwak, and Y.-S. Ra(2021), Robust squeezed light against mode mismatch using a self imaging optical parametric oscillator, Sci. Adv. 11, 18991.
51	C. Sheng, J. Hou, X. He, K. Wang, R. Guo, J. Zhuang, B. Mamat, P. Xu, . Liu, J. Wang, and M. Zhan(2022), Defect-Free Arbitrary-Geometry Assembly of Mixed-Species Atom Arrays, Phys. Rev. Lett. 128, 083202.
52	C. Song, K. Xu, H. Li, H. Fan, D. Zheng, H. Wang et al.(2019), Generation of multicomponent atomic Schrödinger cat states of up to 20 qubits, Science 365, 574.
53	C. Sparrow et al.(2018), Simulating the vibrational quantum dynamics of molecules using photonics, Nature 557, 660.
54	C. T. Fancher, et. al., (2021) Microwave-field sensing via electromagnetically induced absorption of Rb irradiated by three-color infrared lasers, IEEE Transactions on Quantum Engineering 2.
55	C. J. Ballance, T. P. Harty, N. M. Linke, M. A. Sepiol, and D. M. Lucas(2016), High-fidelity quantum logic gates using trapped-ion hyperfine qubits. Physical review letters, 117(6), 060504.
56	Cao, Y., Zhao, Y., Li, J., Lin, R., Zhang, J., & Chen, J.(2021), Hybrid trusted/untrusted relay-based quantum key distribution over optical backbone networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 39(9), 2701-2718.
57	Cao, Y., Zhao, Y., Wang, J., Yu, X., Ma, Z., & Zhang, J.(2019), Cost-efficient quantum key distribution (QKD) over WDM networks. Journal of Optical Communications and Networking, 11(6), 285-298.

58	Cao, Y., Zhao, Y., Wang, J., Yu, X., Ma, Z., & Zhang, J.(2019), KaaS: Key as a service over quantum key distribution integrated optical networks. IEEE Communications Magazine, 57(5), 152-159.
59	Cao, Y., Zhao, Y., Wang, Q., Zhang, J., Ng, S. X., & Hanzo, L.(2022), The evolution of quantum key distribution networks: On the road to the qinternet. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 24(2), 839-894.
60	Carles Roch I Carceller et al.(2021), Quantum vs. noncontextual semi-device-independent randomness certification, arXiv: 2112.09678[quant-ph].
61	Caroline Figgatt, Aaron Ostrander, Norbert M Linke, Kevin A Landsman, Daiwei Zhu, Dmitri Maslov, Christopher Monroe(2019), Parallel entangling operations on a universal ion-trap quantum computer. Nature, 572(7769), 368-372.
62	Catxere A. Casscio, Lars S. Madsen, et al., (2021) Quantum-enhanced nonlinear microscopy, Nature 594(201).
63	N. J. Cerf, M. Lévy, and G. Van Assche(2001), Quantum distribution of Gaussian keys using squeezed states, Physical Review A,63, 052311.
64	Chang Ho Hong, Jin Gak Jang, Jino Heo, Hyung-Jin Yang(2020), Quantum digital signature in a network, Quantum Information Processing 19: 18.
65	Chang Ho Hong, Jino Heo, Jin Gak Jang, Daesung Kwon(2017), Quantum identity authentication with single photon, Quantum Information Processing 16: 236.
66	Changhyun Jung, Woojun Lee, Junho Jeong, Minjae Lee, Yunjae Park, Taehyun Kim and Dong-Il "Dan" Cho(2021), A microfabricated ion trap chip with a sloped loading slot to minimize exposing trapped ions to stray charges, Quantum Science and Technology, 6(4), 044004.
67	Changsoon Kim, Caleb Knoernschild, Bin Liu, and Jungsang Kim(2007), Design and characterization of MEMS micromirrors for ion-trap quantum computation, IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 13(2), 322-329.
68	Charles H. Bennett and Gilles Brassard(1989), The dawn of new era for quantum cryptography : the experimental prototype is working. Sigact News, 20(4): 78-80.
69	Charles Neill, Pedran Roushan, K Kechedzhi, Sergio Boixo, Sergei V Isakov, V Smelyanskiy, A Megrant, B Chiaro, A Dunsworth, K Arya, Rami Barends, B Burkett, Y Chen, Z Chen, A Fowler, B Foxen, M Giustina, R Graff, E Jeffrey, T Huang, J Kelly, P Klimov, E Lucero, J Mutus, M Neeley, C Quintana, D Sank, A Vainsencher, J Wenner, TC White, Hartmut Neven, John M Martinis(2017), Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer. Science Advances, 3(2), e1601540.
70	Chenghui Yu, Weicheng Zhong, Brian Estey, Joyce Kwan, Richard H. Parker, Holger Müller(2019), Atom-interferometry measurement of the fine structure constant, Annalen der Physik 531(1800346).
71	Cheng-Zhi Peng, Tao Yang, Xiao-Hui Bao, Jun-Zhang, Xian-Min Jin, Fa-Yong Feng, Bin Yang, Jian Yang, Juan Yin, Qiang Zhang, Nan Li, Bao-Li Tian, Jian-Wei Pan(2005), Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13km: towards satellite-based global quantum communication, Phys. Rev. Lett. 94: 150501.
72	Chenlu Wang, Xuegang Li, Huikai Xu, Zhiyuan Li, Junhua Wang, Zhen Yang, Zhenyu Mi, Xuehui Liang, Tang Su, Chuhong Yang, Guangyue Wang, Wenyan Wang, Yongchao Li, Mo Chen, Chengyao Li, Kehuan Linghu, Jiaxiu Han, Yingshan Zhang, Yulong Feng, Yu Song, Teng Ma, Jingning Zhang, Ruixia Wang, Peng Zhao, Weiyang Liu, Guangming Xue, Yirong Jin and Haifeng Yu(2022), Towards practical quantum computers: transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds. npj Quantum Information, 8: 3.
73	Chiorescu, Y. Nakamura, C.J.P.M. Harmans and J.E. Mooij(2003), Coherent quantum dynamics of a superconducting flux qubit. Science, 299(5614): 1869-1871.
74	Choi, T., Debnath, S., Manning, T. A., Figgatt, C., Gong, Z. X., Duan, L. M., & Monroe, C. (2014), Optimal quantum control of multimode couplings between trapped ion qubits for scalable entanglement. Physical review letters, 112(19), 190502.
75	Christian Kraglund Andersen, Ants Remm, Stefania Lazar, Sebastian Krinner, Nathan Lacroix, Graham J. Norris, Mihai Gabureac, Christopher Eichler, and Andreas Wallraff(2020), Repeated quantum error detection in a surface code, Nature Physics 16:875-880.
76	Chun Ju Youn; Haesin Ko; Byung-Seok Choi; Joong-Seon Choe; Kap-Joong Kim; Jong-Hoi Kim; Yongsoon Baek(2018), Optical Components and System for Free-Space Quantum Key Distribution, The 23rd OptoElectronics and Communications Conference(OECC 2018) July 02-06, 2018, Jeju, Korea.
77	Chun-Hui Zhang, Xingyu Zhou, Chun-Mei Zhang, Jian Li, Qin Wang(2021), Twin-field quantum digital signatures, Opt. Lett. 46: 3757-3760.
78	D. Barredo, S. de Léséleuc, A. Browaeys, et al.(2016), An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary two-dimensional atomic arrays, Science 354(6315) 1021-1023.
79	D. Barredo, V. Lienhard, P. Scholl, S. de L´es´eleuc, T. Boulier, A. Browaeys, and T. Lahaye(2020), Three-Dimensional Trapping of Individual Rydberg Atoms in Ponderomotive Bottle Beam Traps, Phys. Rev. Lett. 124, 023201.
80	D. Bluvstein, M. D. Lukin et al.(2022), A quantum processor based on coherent transport of entangled atom arrays, Nature 604, 451.
81	D. D. Esposti et al.(2022), Wafer-scale low-disorder 2DEG in 28Si/SiGe passivated by dichlorosilane, ArXiv: 2202.08090.
82	D. Gatto Monticone et al., (2014) Beating the Abbe Diffraction Limit in Confocal Microscopy via Nonclassical Photon Statistics, Phyical Review Letters 113.
83	D. Lee, J. Lee, S. Hong, H.-T. Lim, Y.-W. Cho, S.-W. Han, H. Shin, J. Rehman, and Y.-S. Kim(2022), Error-mitigated photonic variational quantum eigensolver using a single-photon ququart, Optica 9, 88.
84	D. Lee, T. Pramanik, S. Hong, Y.-W. Cho, H.-T. Lim, S. Chin, and Y.-S. Kim(2022), Entangling three identical particles via spatial overlap, Opt. Express 30, 30525.
85	D. R. W. Yost, M. E. Schwartz, J. Mallek, D. Rosenberg, C. Stull, J. L. Yoder, G. Calusine, M. Cook, R. Das, A. L. Day, E. B. Golden, D. K. Kim, A. Melville, B. M. Niedzielski, W. Woods, A. J. Kerman and W. D. Oliver(2020), Solid-state qubits integrated with superconducting through-silicon vias. npj Quantum Information, 6: 59.
86	D. V. Reddy, R. R. Nerem, S. W. Nam, R. P. Mirin, and V. B. Verma(2020), Superconducting nanowire single-photon detectorswith 98% system detection efficiency at 1550nm, Optica 7, 1649.
87	D. Zajac(2018), Resonantly driven CNOT gate for electro spins, Science 359, 439~442.
88	Daniel Gottesman(2000), Theory of quantum secret sharing, Physical Review A, 61(4): 042311.
89	Daniel Gottesman, Isaac Chuang(2001), Quantum digital signatures, Preprint arXiv:quant-ph/0105032.
90	David Hucul, Justin E. Christensen, Eric R. Hudson, and Wesley C. Campbell(2017), Spectroscopy of a synthetic trapped ion qubit. Physical review letters, 119(10), 100501.
91	Ding, Y., D. Bacco, K. Dalgaard, X. Cai, X. Zhou, K. Rottwitt, and L. K. Oxenløwe(2017), High-dimensional quantum key distribution based on multicore fiber using silicon photonic integrated circuits, npj Quantum Information 3(250): 1-7.
92	Dominic Mayers and Andrew Yao(1998), Quantum cryptography with imperfect apparatus, Proceedings of the 39th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, FOCS '98 (IEEE Computer Society, Washington, DC) 503-509.

93	Donghwa Lee, Seongjin Hong, Young-Wook Cho, Hyang-Tag Lim, Sang-Wook Han, Hojoong Jung, Sung Moon, Kwang Jo Lee, and Yong-Su Kim(2020), Reference-frame-independent, measurement-device-independent quantum key distribution using fewer quantum states, Optics Letters, 45: 2624-2627.
94	E. Kaneda, and P. G. Kwiat(2019), High-efficiency single-photon generation via large-scale active time multiplexing, Sci. Adv. 5, eaaw8586.
95	E. Lee, S. M. Lee, and H. S. Park(2019), Relative time multiplexing of heralded telecom-band single-photon sources using switchable optical fiber delays, Opt. Express 27, 24545.
96	E. Pelucchi et al.(2022), The potential and global outlookof integrated photonics forquantum technologies, Nature Rev. Phys. 4, 194.
97	E. Togan et al.(2010), Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit," Nature 466, 730.
98	Élie Gouzien and Nicolas Sangouard(2021), Factoring 2048-bit RSA Integers in 177 Days with 13436 Qubits and a Multimode Memory, Physical Review Letters 127: 140503.
99	Elliott, C., Colvin, A., Pearson, D., Pikalo, O., Schlafer, J., & Yeh, H.(2005), Current status of the DARPA quantum network, In Quantum Information and computation III(Vol. 5815, pp. 138-149). SPIE.
100	Ernest Y.-Z. Tan(2021), Prospects for device-independent quantum key distribution, arXiv 2111.11769.
101	Etcheverry, S., Cañas, G., Gómez, E. et al.(2013), Quantum key distribution session with 16-dimensional photonic states, Scientific Report, 3: 2316.
102	F. Dolde et al.(2013), Room-temperature entanglement between single defect spins in diamond, Nat. Phys. 9, 139-143.
103	F. H. L. Koppens et al.(2006), Driven coherent oscillations of a single electron spin in a quantum dot, Nature 442, 766.
104	F. Mattioli, Z. Zhou, A. Gaggero, R. Gaudio, R. Leoni, and A. Fiore(2016), Photon-counting and analog operation of a 24-pixel photon number resolving detector based onsuperconducting nanowires, Opt. Express 24, 9067.
105	F. Vernuccio, A. Bresci, V. Cimini, A. Giuseppi, G. Cerullo, D Polli, and C. M. Valensise(2022), Artificial Intelligence in Classical and Quantum Photonics, Laser Photon. Rev. 16, 2100399.
106	Fei Yan, Simon Gustavsson, Archana Kamal, Jeffrey Birenbaum, Adam P Sears, David Hover, Ted J. Gudmundsen, Danna Rosenberg, Gabriel Samach, S Weber, Jonilyn L. Yoder, Terry P. Orlando, John Clarke, Andrew J. Kerman and William D. Oliver(2016), The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility. Nature Communications, 7: 12964.
107	Feng Bao, Hao Deng, Dawei Ding, Ran Gao, Xun Gao, Cupjin Huang, Xun Jiang, Hsiang-Sheng Ku, Zhisheng Li, Xizheng Ma, Xiaotong Ni, Jin Qin, Zhijun Song, Hantao Sun, Chengchun Tang, Tenghui Wang, Feng Wu, Tian Xia, Wenlong Yu, Fang Zhang, Gengyan Zhang, Xiaohang Zhang, Jingwei Zhou, Xing Zhu, Yaoyun Shi, Jianxin Chen, Hui-Hai Zhao, and Chunqing Deng(2022), Fluxonium: an alternative qubit platform for high-fidelity operations. Physical Review Letters 129: 010502.
108	Ferdinand Kuemmeth(2020), Hendrik Bluhm Roadmap for gallium arsenide spin qubits.
109	Florian Kranzl, Manoj K. Joshi, Christine Maier, Tiff Brydges, Johannes Franke, Rainer Blatt, and Christian F. Roos(2022), Controlling long ion strings for quantum simulation and precision measurements. Physical Review A, 105(5), 052426.
110	Francesco Vedovato et al.(2021), Report on testbed replicability and performance, University of Padova.
111	Frank Arute et al.(2019), Quantum Supremacy using a programmable superconducting processor, Nature 574:505-510.
112	Frank Arute, Kunal Arya et al.(2019), Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 574: 505-510.
113	G. Balasubramanian et al.(2009), Ultralong spin coherence time in isotopically engineered diamond, Nat. Mater. 8(5), 383-387.
114	G. Brida, M. Genovese, and I.Ruo Berchera. (2010) Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging, Nature Photonics 4.
115	G. De Lange et al.(2010), Universal dynamical decoupling of a single solid-state spin from a spin bath, Science 330, 60.
116	G. L. Roberts, M. Lucamarini, Z. L. Yuan, J. F. Dynes, L. C. Comandar, A. W. Sharpe, A. J. Shields, M. Curty, I. V. Puthoor, E. Andersson(2017), Experimental measurement-device-independent quantum digital signature, Nature Communication 8:1098.
117	G. R. Blakley(1979), Safeguarding Cryptographic Keys, 1979 International Workshop on Managing Requirements Knowledge(MARK), 48: 313-318.
118	G. Waldherr et al.(2014), Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register, Nature 506, 204.
119	Gabriel Popkin(2019), Waiting for the quantum simulation revolution. Physics, 12, 112.
120	Gabriela Barreto lemos et al., (2014) Quantum imaging with undetected photonsm, Nature 512(409).
121	Ghernaouti-Hélie, S., & Sfaxi, M. A.(2005), Guaranteerring security of financial transaction by using quantum cryptography in banking environment, In International Conference on E-Business and Telecommunication Networks(pp. 139-149), Springer, Berlin, Heidelberg.
122	Google Quantum AI and Collaborators(2022), Formation of robust bound states of interacting photons, arXiv:2206.06254.
123	Google Quantum AI(2022), Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, arXiv:2207.06431.
124	Grosshans, F., Grangier, P.(2002), Continuous Variable Quantum Cryptography Using Coherent States, Physical Review Letters, 88: 057902.
125	Gumu, K., Eriksson, T.A., Takeoka, M. et al.(2021), A novel error correction protocol for continuous variable quantum key distribution, Scientific Reports, 11: 10465.
126	Gwanyeol Park, Gahyun Choi, Jisoo Choi, Jiman Choi, Soon-Gul Lee, Kwan-Woo Lee, Woon Song, and Yonuk Chong(2020), Observation of a strongly enhanced relaxation time of an in-situ tunable transmon on a silicon substrate up to the purcell limit approaching 100 μs, Journal of the Korean Physical Society 76(11): 1029-1034.
127	H. Bernien et al.(2012), Two-photon quantum interference from separate nitrogen vacancy centers in diamond, Phys. Rev. Lett. 108, 043604.
128	H. Bernien et al.(2013), Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres, Nature 497, 86.
129	H. Jo, Y. Song, M. Kim, and J. Ahn(2020), Rydberg Atom Entanglements in the Weak Coupling Regime, Physical Review Letters 124, 033603.
130	H. Kim, W. Lee, H. Lee, H. Jo, Y. Song, and J. Ahn(2016), In situ single-atom array synthesis using dynamic holographic optical tweezers, Nature Communications 7, 13317.
131	H. Kim, Y. Park, K. Kim, H.-S. Sim, and J. Ahn(2018), Detailed balance of thermalization dynamics in Rydberg atom quantum simulators, Physical Review Letters 120, 180502.

132	H. Sun, Y. Song, A. Byun, H. Jeong, and J. Ahn(2021), Imaging three-dimensional single-atom arrays all at once, Optics Express 29(3), 4082-4090.
133	H. Vahlbruch, M. Mehmet, K. Danzmann, and R. Schnabel(2016), Detection of 15 dB Squeezed States of Light and their Application for the AbsoluteCalibration of Photoelectric Quantum Efficiency, Phys. Rev. Lett. 117, 110801.
134	H. Wang et al.(2019), Boson Sampling with 20 Input Photons and a 60-Mode Interferometer in a 1014-Dimensional Hilbert Space, Phys. Rev. Lett. 123, 250503.
135	H.-K. Lo and H. F. Chau(1999), Unconditional Security Of Quantum Key Distribution Over Arbitrarily Long Distances, Science 283: 2050.
136	H.-S. Zhong et al.(2018), 12-Photon Entanglement and Scalable Scattershot Boson Sampling with Optimal Entangled-Photon Pairs from Parametric Down-Conversion, Phys. Rev. Lett. 121, 250505.
137	H.-S. Zhong et al.(2020), Quantum computational advantage using photons, Science 370, 1460.
138	Hans Dehmelt(1990), Experiments with an isolated subatomic particle at rest. Reviews of modern physics, 62(3), 525.
139	Harper R. Grimsley, Sophia E. Economou, Edwin Barnes, and Nicholas J. Mayhall(2019), An adaptive variational algorithm for exact molecular simulations on a quantum computer, Nature Communications 10: 3007.
140	Heasin Ko, Kap-Joong Kim, Joong-Seon Choe, Byung-Seok Choi, Jong-Hoi Kim, Yongsoon Baek & Chun Ju Youn(2018), Experimental filtering effect on the daylight operation of a free-space quantum key distribution, Scientific Reports, 8: 15315.
141	Helin Zhang, Srivatsan Chakram, Tanay Roy, Nathan Earnest, Yao Lu, Ziwen Huang, D. K. Weiss, Jens Koch, and David I. Schuster(2021), Universal fast-flux control of a coherent, low-frequency qubit. Physical Review X, 11: 011010.
142	Honggi Jeon, Nojun Park, Jiyong Yu, Yeong-Dae Kwon, Dahyun Yum & Wonho Jhe(2021), Coherent control of 171 Yb+ ion qubit states and thermometry using motional decoherence, Journal of the Korean Physical Society, 78(4), 251-258.
143	Hongwei Liu, Jipeng Wang, Haiqiang Ma, and Shihai Sun(2018), Polarization-multiplexing-based measurement-device-independent quantum key distribution without phase reference calibration, Optica, 5: 902-909.
144	Howard Barnum, Claude Crepeau, Daniel Gottesman, Adam Smith, Alain Tapp(2002), Authentication of quantum messages, 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Proceedings. IEEE, 2002, pp. 449-458.
145	Hua-Jian Ding, Jing-Jing Chen, Liang Ji, Xing-Yu Zhou, Chun-Hui Zhang, Chun-Mei Zhang, and Qin Wang(2020), 280km experimental demonstration of a quantum digital signature with one decoy state, Opt. Lett. 45: 1711-1714.
146	Huang, D., P. Huang, D. Lin, and G. Zeng(2016), Long-distance continuous-variable quantum key distribution by controlling excess noise, Scientific Reports, 6; 19201.
147	Hua-Ying Liu, Xiao-Hui Tian, Changsheng Gu, Pengfei Fan, Xin Ni, Ran Yang, Ji-Ning Zhang, Mingzhe Hu, Jian Guo, Xun Cao, Xiaopeng Hu, Gang Zhao, Yan-Qing Lu, Yan-Xiao Gong, Zhenda Xie, and Shi-Ning Zhu(2021), Optical-relayed entanglement distribution using drones as mobile nodes, Phys. Rev. Lett. 126(2): 020503.
148	Hugo Zbinden(2020), Report on Testbed and Use-Case Demonstrator Deployment, University of Geneva.
149	Hugues-Salas, E., Ntavou, F., Gkounis, D., Kanellos, G. T., Nejabati, R., & Simeonidou, D.(2019), Monitoring and physical-layer attack mitigation in SDN-controlled quantum key distribution networks, Journal of Optical Communications and Networking, 11(2), A209-A218.
150	Hyeong-Soon Jang, Donghwa Lee, Hyungjun Heo, Yong-Su Kim, Hyang-Tag Lim, Seung-Woo Jeon, Sung Moon, Sangin Kim, Sang-Wook Han, Hojoong Jung(2022), Aluminum nitride waveguide beam splitters for integrated quantum photonic circuits, arXiv:2208.01377.
151	HyoMin Kwak, TaekJeong, Yoon-Seok Lee, and HanSeb Moon(2016), Microwave-induced three-photon coherence of Rydberg atomic states, Optics Communications, Vol. 380, pp. 168-173.
152	I. I. Beterov and M. Saffman(2015), Rydberg blockade, Forster resonances, and quantum state measurements with different atomic species, Phys. Rev. A 92, 042710.
153	I. L. Lawrie et al.(2020), Quantum dot arrays in silicon and germanium, Appl. Phys. Lett. 116, 080501.
154	I. Pogorelov, T. Feldker, Ch. D. Marciniak, L. Postler, G. Jacob, O. Krieglsteiner, V. Podlesnic, M. Meth, V. Negnevitsky, M. Stadler, B. Höfer, C. Wächter, K. Lakhmanskiy, R. Blatt, P. Schindler, and T. Monz(2021), Compact ion-trap quantum computing demonstrator, PRX Quantum, 2(2), 020343.
155	In-Ho Bae et al.(2019), Detection efficiency measurement of single photon avalanche photodiodes by using a focused monochromatic beam tunable from 250nm to 1000nm, Metrologia 56: 035003.
156	Inoue, K., E. Waks, and Y. Yamamoto(2002), Differential Phase Shift Quantum Key Distribution, Physics Review Letters, 89: 037902(1-3).
157	Islam, N. T., Lim, C. C. W., Cahall, C., Kim, J. & Gauthier, D. J.(2017), Provably secure and hih-rate quantum key distribution with time-bin qudits, Science Advance, 3: e1701491.
158	J. A. Sedlacek, A. Schwettmann, H. Kübler, and J. P. Shaffer(2013), Atom-Based Vector Microwave Electrometry Using Rubidium Rydberg Atoms in a Vapor Cell, PHYSICAL REVIEW LETTERS 111(063001),
159	J. Elzerman(2004), Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot, Nature 430, 431~435.
160	J. F. Clauser et al.(1969), Proposed experiment to test local hidden-variable theories, Phys. Rev. Lett. 23: 880.
161	J. F. Marques, B. M. Varbanov, M. S. Moreira, H. Ali, N. Muthusubramanian, C. Zachariadis, F. Battistel, M. Beekman, N. Haider, W. Vlothuizen, A. Bruno, B. M. Terhal, and L. DiCarlo(2022), Logical-qubit operations in an error-detecting surface code, Nature Physics 18:80-86.
162	J. Kahn(2018.11.14.), Why quantum computers will be super awesome, someday, Washington post.
163	J. Lee et al., "Dressed-state control of effective dipolar interaction between strongly-coupled solid-state spins," arXiv:2203.07610
164	J. Lu et al.(2020), Toward 1% single-photon anharmonicity with periodically poled lithium niobate microring resonators, Optica 12, 1654.
165	J. M. Pino, J. M. Dreiling, C. Figgatt, J. P. Gaebler, S. A. Moses, M. S. Allman, C. H. Baldwin, M. Foss-Feig, D. Hayes, K. Mayer, C. Ryan-Anderson & B. Neyenhuis(2021), Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture, Nature 592(7853), 209-213.
166	J. Pablo Bonilla Ataides, David K. Tuckett, Stephen D. Bartlett, Steven T. Flammia, and Benjamin J. Brown(2021), The XZZX surface code, Nature Communications 12:2172.
167	J. S. Bell(1964), On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox, Physics, 1: 195.
168	J. Yoneda(2018), A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9%, Nature Nanotechnology 13, 102~106.

169	J. Yoo, Y. Choi, Y.-W. Cho, S.-W. Han, S.-Y. Lee, S. Moon, K. Oh, Y.-S. Kim(2018), Experimental preparation and characterization of four-dimensional quantum states using polarization and time-bin modes of a single photon, Opt. Comm. 419, 30.
170	J.P. Gaebler, T.R. Tan, Y. Lin, Y. Wan, R. Bowler, A.C. Keith, S. Glancy, K. Coakley, E. Knill, D. Leibfried, and D.J. Wineland(2016), High-fidelity universal gate set for be 9+ ion qubits. Physical review letters, 117(6), 060505.
171	J.H. Kim et al.(2022), Long-range distribution of high-quality time-bin entangled photons for quantum communication, J. Korean Phys. Soc. 80: 203.
172	Jared B. Hertzberg, Eric J. Zhang, Sami Rosenblatt, Easwar Magesan, John A. Smolin, Jeng-Bang Yau, Vivekananda P. Adiga, Martin Sandberg, Markus Brink, Jerry M. Chow and Jason S. Orcutt(2021), Laser-annealing Josephson junction for yielding scaled-up superconducting quantum processors. npj Quantum Information, 7: 129.
173	Jeffrey M. Gertler, Brian Baker, Juliang Li, Shruti Shirol, Jens Koch, and Chen Wang(2021), Protecting a bosonic qubit with autonomous quantum error correction, Nature 590:243-248.
174	Jens Koch, M Yu Terri, Jay Gambetta, Andrew A Houck, David I Schuster, Johannes Majer, Alexandre Blais, Michel H Devoret, Steven M Girvin, Robert J Schoelkopf(2007), Charge-insensitive qubit design derived from the Copper pair box. Physical Review A, 76(4): 042319.
175	Jerry M. Chow, A. D. Córcoles, Jay M. Gambetta, Chad Rigetti, B. R. Johnson, John A. Smolin, J. R. Rozen, George A. Keefe, Mary B. Rothwell, Mark B. Ketchen, and M. Steffen(2011), Simple All-Microwave Entangling Gate for Fixed-Frequency Superconducting Qubits, Physical Review Letters 107:080502.
176	Jiwon Kim et al.(2021), 29Si Isotope-Enriched Silicon Nanoparticles for an Efficient Hyperpolarized Magnetic Resonance Imaging Probe, ACS Applied Materials and Interfaces, 13 56923.
177	Joakim Argillander et al.(2022), A tunable quantum random number generator based on a fiber-optical Sagnac interferometer Journal of Optics 24 064010.
178	John Rarity et al.(1994), Quantum random-number generation and key sharing, Journal of Modern Optics 41(12), 2435-2444.
179	Jonathon A. Sedlacek, Arne Schwettmann et al.(2012), Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances, Nature Physics 8, pp.819–824.
180	Joschka Roffe(2019), Quantum error correction: an introductory guide, Contemporary Physics, 62.
181	Josephine B. Chang, Michael R. Vissers, Antonio D. Corcoles, Martin Sandberg, Jiansong Gao, David W. Abraham, Jerry M. Chow, Jay M. Gambetta, Mary Beth Rothwell, George A. Keefe, Matthias Steffen, and David P. Pappas(2013), Improved superconducting qubit coherence using titanium nitride. Applied Physics Letters, 103: 012602.
182	Juan Carlos Garcia-Escartin, Shihan Sajeed, Vadim Makarov(2020), Attacking quantum key disribution by light injection via ventilation opening, PLoS ONE 15(8).
183	Juan Yin et al.(2020), Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120kilometres, Nature 582, 501-505.
184	Julian Münzberg, Andreas Vetter, Fabian Beutel, Wladick Hartmann, Simone Ferrari, Wolfram H. P. Pernice, and Carsten Rockstuhl(2018), Superconducting nanowire single-photon detector implemented in a 2D photonic crystal cavity, Optica 5, 658.
185	K. Barnes, B. J. Bloom, K. Kotru, M. McDonald et al.(2022), Assembly and coherent control of a register of nuclear spin qubits, Nat. Commun. 13, 2779.
186	K. Groot-Berning et al.(2019), Deterministic single-ion implantation of rare-earth ions for nanometer-resolution color-center generation, Phys. Rev. Lett. 123(10), 106802.
187	K. Itoh et al.(2014), Isotope engineering of silicon and diamond for quantum computing and sensing applications, MRS Communications 4, 143-157.
188	K. Singh, S. Anand, A. Pocklington, J. T. Kemp, and H. Bernien(2022), Dual-Element, Two-Dimensional Atom Array with Continuous-Mode Operation, Phys. Rev. X 12, 011040.
189	K. Takeda et al.(2021), Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon, Nature Nanotechnology 16, 965.
190	K. Wright, K. M. Beck, S. Debnath, J. M. Amini, Y. Nam, N. Grzesiak, J.-S. Chen, N. C. Pisenti, M. Chmielewski, C. Collins, K. M. Hudek, J. Mizrahi, J. D. Wong-Campos, S. Allen, J. Apisdorf, P. Solomon, M. Williams, A. M. Ducore, A. Blinov, S. M. Kreikemeier, V. Chaplin, M. Keesan, C. Monroe & J. Kim(2019), Benchmarking an 11-qubit quantum computer, Nature communications, 10(1), 1-6.
191	K. X. Wei, E. Magesan, I. Lauer, S. Srinivasan, D. F. Bogorin, S. Carnevale, G. A. Keefe, Y. Kim, D. Klaus, W. Landers, N. Sundaresan, C. Wang, E. J. Zhang, M. Steffen, O. E. Dial, D. C. McKay, and A. Kandala(2022). Hamiltonian Engineering with Multicolor Drives for Fast Entangling Gates and Quantum Crosstalk Cancellation, Physical Review Letters 129:060501.
192	K.-N. Schymik, A. Browaeys et al.(2021), Single Atoms with 6000-Second Trapping Lifetimes in Optical-Tweezer Arrays at Cryogenic Temperatures, Phys. Rev. Applied 16, 034013.
193	K.-Y. Kim, C. J. K. Richardson, E. Waks, and J.-H. Kim(2021), Temporal shaping of single photonsby engineering exciton dynamicsin a single quantum dot, APL Photonics 6, 080801.
194	Kai Bongs, Michael Holynski et al.(2019), Taking atom interferometric quantum sensors from the laboratory to real-world applications, Nature Reviews Physics 1, pp.731-739.
195	Kejin Wei, Wei Li, Hao Tan, Yang Li, Hao Min, Wei-Jun Zhang, Hao Li, Lixing You, Zhen Wang, Xiao Jiang, Teng-Yun Chen, Sheng-Kai Liao, Cheng-Zhi Peng, Feihu Xu, and Jian-Wei Pan(2020), High-Speed Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution with Integrated Silicon Photonics, Physical Review X, 10: 031030.
196	Keseo Kang, Donggyu Minn, Seunghun Bae, Jaeho Lee, Seongun Bae, Gichang Jung, Seokhyeong Kang, Moonjoo Lee, Ho-Jin Song, and Jae-Yoon Sim(2022), A cryo-CMOS controller IC with fully integrated frequency generators for superconducting qubits, 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC), 362-364.
197	Kevin A Landsman, Yukai Wu, Pak Hong Leung, Daiwei Zhu, Norbert M Linke, Kenneth R Brown, Luming Duan, C Monroe(2019), Two-qubit entangling gates within arbitrarily long chains of trapped ions, Physical Review A, 100(2), 022332.
198	Kwek, LC., Cao, L., Luo, W. et al.(2021), Chip-based quantum key distribution, AAPPS Bulletin, 31(15): 1-8.
199	L. A. Downes et al., (2020) Full-Field Terahertz Imaging at Kilohertz Frame Rates Using Atomic Vapor, PHYSICAL REVIEW X 10.
200	L. A. M. Johnson et al., (2010) Absolute frequency measurements of 85Rb n F7/2 Rydberg states using purely optical detection, New Journal of Physics 12, 063028.
201	L. A. Morais, T. Weinhold, M. P. de Almeida, J. Combes, A. Lita, T. Gerrits, S. W. Nam, A. G. White, and G. Gillett(2020), Precisely determining photon-number in real-time, arXiv: 2012.10158.
202	L. K. Shalm et al.(2021), Device-independent randomness expansion with entangled photons, Nature Physics 17: 452.
203	L. Petit et al.(2022), High-fidelity two-qubit gates in silicon above one Kelvin, Nature, 601, 343-347.
204	L. Robledo et al.(2011), High-fidelity projective read-out of a solid-state spin quantum register, Nature 477, 574.

205	L. S. Madsen et al.(2022), Quantum computational advantage with aprogrammable photonic processor, Nature 606, 75.
206	Laura Antoni-Micollier, Daniele Carbone et. al.(2022), Detecting Volcano-Related Underground Mass Changes With a Quantum Gravimeter, Geophysical Research Letters 49(13).
207	Laurent de Forges de Parny, Olivier Alibart, Julien Debaud, Sacha Gressani, Alek Lagarrigue, Anthony Martin, Alexandre Metrat, Matteo Schiavon, Tess Troisi, Eleni Diamanti, Patrick Gelard, Erik Kerstel, Sebastien Tanzilli, Mathias van Den Bossche(2022), Satellite-based quantum information networks: use cases, architecture, and roadmap, ArXiv 2202. 01817.
208	LMK Vandersypen, MA Eriksson(2019), Quantum computing with semiconductor spins, Physics Today, 72, 8, 38.
209	Lo, Hoi-Kwong, M. Curty, and B. Qi(2012), Physics Review Letters, 108: 130503(1-5).
210	Long B. Nguyen, Yen-Hsiang Lin, Aaron Somoroff, Raymond Mencia, Nicholas Grabon, and Vladimir E. Manucharyan(2019), High-coherence fluxonium qubit. Physical Review X, 9: 041041.
211	Lucamarini, M., Yuan, Z. L., Dynes, J. F. and Shields, A. J.(2018), Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters, Nature557: 400-403.
212	M. D. Shulman et al.(2013), Suppressing qubit dephasing using real-time Hamiltonian estimation, Nature Communications 5, 5156.
213	M. Giustina et al.(2015), Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons, Phys. Rev. Lett. 115: 250401.
214	M. H. Abobeih et al.(2019), Atomic-scale imaging of a 27-nuclear-spin cluster using a quantum sensor, Nature 576(7787), 411.
215	M. Hauth, C. Freier et. al.(2013), First gravity measurements using the mobile atom interferometer GAIN, Applied Physics B, Vol.113, pp.49-55.
216	M. Kim, K. Kim, J. Hwang, E.-G. Moon, and J. Ahn(2022), Rydberg Quantum Wires for Maximum Independent Set Problems, Nature Physics 18, 755-759.
217	M. Kim, Y. Song, J. Kim, and J. Ahn(2020), Quantum Ising Hamiltonian Programming in Trio, Quartet, and Sextet Qubit Systems, PRX Quantum 1, 020323.
218	M. Larsen et. al, ISISS (2012).
219	M. R. Vissers, J. Gao, D. S. Wisbey, D. A. Hite, C. C. Tsuei, A. D. Corcoles, M. Steffen, and D. P. Pappas(2010), Low loss superconducting titanium nitride coplanar waveguide. Applied Physics Letters, 97: 232509.
220	M. Reagor et al.(2018), Demonstration of Universal Parametric Entangling Gates on a Multi-Qubit Lattice, Science Advances 4(2):eaao3603.
221	M. T. Simons et al., (2018) Fiber-coupled vapor cell for a portable Rydberg atom-based radio frequency electric field sensor, Applied Optics, 57(22).
222	M. T. Simons et al., (2019) A Rydberg atom-based mixer: Measuring the phase of a radio frequency wave, AIP Appl. Phys. Lett. 114, 114101.
223	M. Virginia P. Altoé, Archan Banerjee, Cassidy Berk, Ahmed Hajr, Adam Schwartzberg, Chengyu Song, Mohammed Alghadeer, Shaul Aloni, Michael J. Elowson, John Mark Kreikebaum, Ed K. Wong, Sinéad M. Griffin, Saleem Rao, Alexander Weber-Bargioni, Andrew M. Minor, David I. Santiago, Stefano Cabrini, Irfan Siddiqi, and D. Frank Ogletree(2022), Localization and mitigation of loss in niobium superconducting circuits. PRX Quantum 3: 020312.
224	Maeda, W., Tanaka, A., Takahashi, S., Tajima, A., & Tomita, A.(2009), Technologies for quantum key distribution networks integrated with optical communication networks, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 15(6), 1591-1601.
225	Manuel Schilling, Étienne Wodey et. al.(2020), Gravity field modelling for the Hannover 10 m atom interferometer, Journal of Geodesy 94(122).
226	Mark Hillery, Vladimír Bužek, André Berthiaume(1998), Quantum Secret Sharing, Physical Review A. 59(3): 1829-1834.
227	Matthew P. Harrigan et al.(2021), Quantum approximate optimization of non-planargraph problems on a planar superconductingprocessor, Nature Physics 17:332-336.
228	Mehic, M., Niemiec, M., Rass, S., Ma, J., Peev, M., Aguado, A., Voznak, M.(2020), Quantum key distribution: a networking perspective. ACM Computing Surveys(CSUR), 53(5), 1-41.
229	Michael Schirber(2021), Quantum drones take flight, Physics 14: 7.
230	Miguel Herrero-Collantes and Juan Carlos Garcia-Escartin(2017), Quantum random number generators, Rev. Mod. Phys., 89, 1.
231	Ming-Hui Zhang, Jia-Hui Xie, Jia-Yao Wu, Lin-Yang Yue, Chen He, Zheng-Wen Cao, Jin-Ye Peng(2022), Practical long-distance twin-field quantum digital signatures, Quant. Inf. Process. 21: 150.
232	Min-Sung Kang, Yeon-Ho Choi, Yong-Su Kim, Young-Wook Cho, Sang-Yun Lee, Sang-Wook Han and Sung Moon(2018), Quantum message authentication scheme based on remote state preparation, Physica Scripta, 93:11.
233	Min-Sung Kang, Yong-Su Kim, Ji-Woong Choi, Hyung-Jin Yang and Sang-Wook Han(2021), Experimental Quantum Message Authentication with Single Qubit Unitary Operation, Appl. Sci. 2021, 11, 2653.
234	Miralem Mehic et al.(2020), Quantum Key Distribution, ACM Comput. Surv., 53(5).
235	Moghaddam, E. E., Beyranvand, H., & Salehi, J. A.(2021), Resource allocation in space division multiplexed elastic optical networks secured with quantum key distribution. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 39(9), 2688-2700.
236	Monroe, C., & Kim, J.(2013), Scaling the ion trap quantum processor. Science, 339(6124), 1164-1169.
237	Myunghun Kim, Keumhyun Kim, Jungsoo Hong, Hyegoo Lee, Youngil Moon, Wonchan Lee, Sehyun Kim, Taekyun Ha, Jae-Yoon Sim, Moonjoo Lee(2022), Ion trap with gold-plated alumina: substrate and surface characterization, arXiv preprint arXiv: 2207.06878.
238	N. De Leon et al.(2021), Materials challenges and opportunities for quantum computing hardware, Science 372, 6539.
239	N. Somaschi et al.(2016), Near-optimal single-photon sources in the solid state, Nature Photon. 10, 340.
240	National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine(2019), Quantum computing: progress and prospects.
241	Nico W. Hendrickx et al.(2021), A four-qubit germanium quantum processor, Nature 591, 580.
242	Nicola Poli, Roman Pašteka, and Pavol Zahorec(2022), Atomic changes can map subterranean structures, Nature 602, 579-580.
243	Noah Goss, Alexis Morvan, Brian Marinelli, Bradley K. Mitchell, Long B. Nguyen, Ravi K. Naik, Larry Chen, Christian Jünger, John Mark Kreikebaum, David I. Santiago, Joel J. Wallman, Irfan Siddiqi(2022), High-Fidelity Qutrit Entangling Gates for Superconducting Circuits, arXiv:2206.07216.
244	Ole Andersson, Piotr Badziag and Irina Dumitru(2018), Device-independent certification of two bits of randomness from one entangled bit and Gisin's elegant Bell inequality, Physical Review A 97, 012314.

245	Osung Kwon, Young-Wook Cho, and Yoon-Ho Kim(2009), Applied Optics 48, 9.
246	P. C. Maurer et al.(2012), Room-temperature quantum bit memory exceeding one second, Science 336, 1283.
247	P. Chojecki, Quantum advantage.
248	P. Huft, Y. Song, T. M. Graham, K. Jooya, S. Deshpande, C. Fang, M. Kats, and M. Saffman(2022), Simple, passive design for large optical trap arrays for single atoms, Phys. Rev. A 105, 063111.
249	P. Neumann et al.(2010),Single-shot readout of a single nuclear spin, Science 329(5991), 542-544.
250	P. Scholl, A. Browaeys et al.(2021), Quantum simulation of 2D antiferromagnets with hundreds of Rydberg atoms, Nature 595 (7866), 233-238.
251	P. Siyushev et al.(2019), Photoelectrical imaging and coherent spin-state readout of single nitrogen-vacancy centers in diamond, Science 363(6428), 728.
252	P. W. Shor and J. Preskill(2000), Simple Proof of Security of the BB84 Quantum Key Distribution Protocol, Phys. Rev. Lett. 85: 441.
253	P.D. Townsend(1994), Secure key distribution system based on quantum cryptography, Electronics Letters, 30(10): 809-811.
254	Pak Hong Leung, Kevin A Landsman, Caroline Figgatt, Norbert M Linke, Christopher Monroe, Kenneth R Brown(2018), Robust 2-qubit gates in a linear ion crystal using a frequency-modulated driving force, Physical review letters, 120(2), 020501.
255	Paraïso, T. K. et al.(2019), A modulator-free quantum key distribution transmitter chip, npj Quantum Information, 5(42): 1-6.
256	Park, C. H. et al.(2018), Practical Plug-and-Play Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution With Polarization Division Multiplexing, IEEE Access, 6: 58587-58593.
257	Park, C. H. et al.(2022), 2×N twin-field quantum key distribution network configuration based on polarization, wavelength, and time division multiplexing, NPJQuantum Information, 8, 48: 1-12.
258	Patrick J. Clarke, Robert J. Collins, Vedran Dunjko, Erika Andersson, John Jeffers, Gerald S. Buller(2012), Experimental demonstration of quantum digital signatures using phase-encoded coherent states of light, Nature Communication 3: 1174.
259	Peev M., Pacher C., Alléaume R., Barreiro C., Bouda J., Boxleitner W., & Zeilinger A.(2009), The SECOQC quantum key distribution network in Vienna, New Journal of Physics, 11(7), 075001.
260	Pengfei Wang, Chun-Yang Luan, Mu Qiao, Mark Um, Junhua Zhang, Ye Wang, Xiao Yuan, Mile Gu, Jingning Zhang & Kihwan Kim(2021), Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour, Nature communications, 12(1), 1-8.
261	Philipp Frey and Stephan Rachel(2022), Realization of a discrete time crystal on 57 qubits of a quantum computer, Science Advances 8(9): eabm7652.
262	Pirandola, S., C. Ottaviani, G. Spedalieri, C. Weedbrook, S. L. Braunstein, S. Lloyd, T. Gehring, C. S. Jacobsen, and U. L. Andersen(2015), High-rate measurement-device-independent quantum cryptography, Nature Photonics 9, 397.
263	Qi-Chao Sun, Yang-Fan Jiang, Ya-Limao, Li-Xing You, Wei Zhang, Wei-Jun Zhang, Xiao Jiang, Teng-Yun Chen, Hao Li, Yi-Dong Huang, Xian-Feng Chen, Zhen Wang, Jingyun Fan, Qiang Zhang, Jian-Wei Pani(2017), Entanglement swapping over 100km optical fiber with independent entangled photon-pair sources, Optica 4: 1214.
264	Qiujiang Guo, Chen Cheng, Hekang Li, Shibo Xu, Pengfei Zhang, Zhen Wang, Chao Song, Wuxin Liu, Wenhui Ren, Hang Dong, Rubem Mondaini, and H. Wang (2021a), Stark Many-Body Localization on a Superconducting Quantum Processor, Physical Reivew Letters 127: 240502.
265	Qiujiang Guo, Chen Cheng, Zheng-Hang Sun, Zixuan Song, Hekang Li, Zhen Wang, Wenhui Ren, Hang Dong, Dongning Zheng, Yu-Ran Zhang, Rubem Mondaini, Heng Fan, and H. Wang(2021b). Observation of energy-resolved many-bodylocalization, Nature Physics 17:234-239.
266	Quantum Flagship(2016), Quantum technologies roadmap.
267	Quentin Ficheux, Long B. Nguyen, Aaron Somoroff, Haonan Xiong, Konstantin N. Nesterov, Maxim G. Vavilov, and Vladimir E. Manucharyan(2021), Fast logic with slow qubits: microwave-activated controlled-Z gate on low-frequency fluxoniums. Physical Review X 11: 021026.
268	R. Barends, J. Kelly, A. Megrant, D. Sank, E. Jeffrey, Y. Chen, Y. Yin, B. Chiaro, J. Mutus, C. Neill, P. O'Malley, P. Roushan, J. Wenner, T. C. White, A. N. Cleland, and John M. Martinis(2013), Coherent Josephson Qubit Suitable for Scalable Quantum Integrated Circuits. Physical Review Letters, 111, 080502.
269	R. J. Niffenegger, J. Stuart, C. Sorace-Agaskar, D. Kharas, S. Bramhavar, C. D. Bruzewicz, W. Loh, R. T. Maxson, R. McConnell, D. Reens, G. N. West, J. M. Sage & J. Chiaverini(2020), Integrated multi-wavelength control of an ion qubit. Nature, 586(7830), 538-542.
270	R. P. Abel et al., (2009) Laser frequency stabilization to excited state transitions using electromagnetically induced transparency in a cascade system, Applied Physics Letters 94, 071107.
271	R.-Y. Chang et al., (2010) A narrow window of Rabi frequency for competition between electromagnetically induced transparency and Raman absorption, Journal of the Optical Society of America B 27.
272	Raeesh Muhammad et al.(2021), Exploiting the Specific Isotope-Selective Adsorption of Metal-Organic Framework for Hydrogen Isotope Separation, J. Am. Chem. Soc., 143, 22, 8232.
273	Reinhold Blümel, Nikodem Grzesiak, Neal Pisenti, Kenneth Wright & Yunseong Nam(2021), Power-optimal, stabilized entangling gate between trapped-ion qubits. npj Quantum Information, 7(1), 1-8.
274	Ribordy, G., O. Guinnard, and ID Quantique(2009), Method and apparatus for generating true random numbers by way of a quantum optics process, Patent US 7519641.
275	Richard Cleve, Daniel Gottesman, Hoi-Kwong Lo(1999), How to share a quantum secret, Physical Review Lett. 83(3): 648-651.
276	Ritajit Majumdar, Sanchari Das(2021), SOK: An evaluation of quantum authentication through systematic literature review, Proceedings of the workshop on Usable Security and Privacy.
277	Robert F. Spivey, Ismail V. Inlek, Zhubing Jia, Stephen Crain, Ke Sun, Junki Kim, Geert Vrijsen, Chao Fang, Colin Fitzgerald, Steffen Kross, Tom Noel and Jungsang Kim(2021), High-Stability Cryogenic System for Quantum Computing With Compact Packaged Ion Traps, IEEE Transactions on Quantum Engineering, 3, 1-11.
278	S Moss(2019), CES: IBM announces Q System One, a quantum computer in a 9ft cube, Data center dynamics.
279	S. Abend, M. Gebbe et al.(2016), Atom-Chip Fountain Gravimeter, PHYSICAL REVIEW LETTERS 117(203003).
280	S. De Franceschi et al.(2016), SOI technology for quantum information processing, IEEE International Electron Devices Meeting.
281	S. Ebadi, M. D. Lukin et al.(2021), Quantum phases of matter on a 256-atom programmable quantum simulator, Nature 595, 227-232.
282	S. K. Dutta, J. R. Guest, D. Feldbaum, A. Walz-Flannigan, and G. Raithel(2000), Ponderomotive optical lattice for Rydberg atoms, Phys. Rev. Lett. 85, 5551.

283	S. Kumar, et. al., (2018) Critical points for electron–Mg atom elastic scattering, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 51, 0325203: At. Mol. (2016) Collective state synthesis in an optical cavity using Rydberg atom dipole blockade, Journal of Physics B 49, 064014.
284	S. M. Lee, S.-W. Lee, H. Jeong, and H. S. Park(2020), Quantum Teleportation of Shared Quantum Secret, Phys. Rev. Lett. 124, 060501.
285	S. Ma, Alex P. Burgers, G. Liu, J. Wilson, B. Zhang, and J. D. Thompson(2022), Universal Gate Operations on Nuclear Spin Qubits in an Optical Tweezer Array of 171Yb Atoms, Phys. Rev. X 12, 021028.
286	S. Madjarov, M. Endres et al.(2020), High-fidelity entanglement and detection of alkaline-earth Rydberg atoms, Nature Physics 16, 857-861.
287	S. Onoda et al.(2017), Diffusion of vacancies created by high-energy heavy ion strike into diamond, Phys. Status Solidi A 214(11), 1700160.
288	S. Phillips et al.(2022), Universal control of a six-qubit quantum processor in silicon, arXiv: 2202.09252.
289	S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi, M. Berta, D. Bunandar, R. Colbeck, D. Englund, T. Gehring, C. Lupo, C. Ottaviani, J. L. Pereira, M. Razavi, J. Shamsul Shaari, M. Tomamichel, V. C. Usenko, G. Vallone, P. Villoresi, and P. Wallden(2020), Advances in quantum cryptography, Advances in Optics and Photonics, 12: 1012-1236.
290	S. T. Alsid et al.(2019), Photoluminescence decomposition analysis: A technique to characterize N-V creation in diamond, Phys. Rev. Appl. 12(4), 044003.
291	S. Zhang, F. Robicheaux, and M. Saffman(2011), Magic-wavelength optical traps for Rydberg atoms, Phys. Rev. A 84, 043408.
292	S. H. Yim, D. -Y. Lee, and M. M.Kim(2022), Experimental setup to fabricate Rb-Xe gas cells for atom spin gyroscopes. AIP Advances 12, 015025.
293	S.-W. Jeon et al.(2020), Bright nitrogen-vacancy centers in diamond inverted nanocones, ACS Photonics 7(10), 2739-2747.
294	S.-W. Jeon, J. Lee et al.(2020), Bright Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond Inverted Nanocones, ACS Photon. 7, 2739.
295	Samantha Isaac, Andrew Conrad, Alex Hill1, Kyle Herndon, Brian Wilens, Dalton Chaffee, Daniel Sanchez-Rosales, Roderick Cochran, Daniel Gauthier, Paul Kwiat(2020), Drone-Based Quantum Key Distribution, CLEO 2020.
296	Samson Wang, Enrico Fontana, M. Cerezo, Kunal Sharma, Akira SoneLukasz Cincio, and Patrick J. Coles(2021), Noise-induced barren plateaus in variationalquantum algorithms, Nature Communications 12:6961.
297	Sasaki, M.(2018), Quantum key distribution and its applications, IEEE Security & Privacy, 16(5), 42-48.
298	Sasaki, M., Fujiwara, M., Ishizuka, H., Klaus, W., Wakui, K., Takeoka, M., & Zeilinger, A.(2011), Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network. Optics express, 19(11), 10387-10409.
299	Shantanu Debnath, Norbert M Linke, Caroline Figgatt, Kevin A Landsman, Kevin Wright, Christopher Monroe(2016), Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits, Nature 536(7614), 63-66.
300	Sheng-Kai Liao et al.(2018), Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network, Phys. Rev. Lett. 120, 030501.
301	Sheng-Kai Liao, Wen-Qi Cai, Wei-Yue Liu, Liang Zhang, Yang Li, Ji-Gang Ren, Juan Yin, Qi Shen, Yuan Cao, Zheng-Ping Li, Feng-Zhi Li, Xia-Wei Chen, Li-Hua Sun, Jian-Jun Jia, Jin-Cai Wu, Xiao-Jun Jiang, Jian-Feng Wang, Yong-Mei Huang, Qiang Wang, Yi-Lin Zhou, Lei Deng, Tao Xi, Lu Ma, Tai Hu, Qiang Zhang, Yu-Ao Chen, Nai-Le Liu, Xiang-Bin Wang, Zhen-Cai Zhu, Chao-Yang Lu, Rong Shu, Cheng-Zhi Peng, Jian-Yu Wang, Jian-Wei Pan(2017), Satellite-to-ground quantum key distribution, Nature 549: 43-47.
302	Shi-Kai Liu, Yin-Hai Li, et al., (2020), Real-time quantum edge enhanced imaging, Optics express 28(24).
303	Sibson, P., Erven, C., Godfrey et all.(2017), Chip-based quantum key distribution, Nature Communications, 8, 13984.
304	Simon Gröblacher et al.(2006), Experimental quantum cryptography with qutrits, New Journal of Physics, 8(75): 1-8.
305	Soren Wengerowsky, Siddarth Koduru Joshi, Fabian Steinlechner, Julien R. Zichi, Sergiy M. Dobrovolskiy, Rene van der Molen, Johannes W. N. Los, Val Zwiller, Marijn A. M. Versteegh, Alberto Mura, Davide Calonico, Massimo Inguscio, Hannes Hubel, Liu Bo, Thomas Scheidl, Anton Zeilinger, Andre Xuereb, Rupert Ursin(2019), Entanglement distribution over a 96km long submarine optical fiber, PNAS 116: 6684.
306	Stefan H. Sack, Raimel A. Medina, Alexios A. Michailidis, Richard Kueng, and Maksym Serbyn(2022), Avoiding Barren Plateaus Using Classical Shadows, PRX Quantum 3: 020365.
307	Stefano Pironio et al.(2010), Random numbers certified by Bell's theorem Nature 464, 1021-1024.
308	Stucki, D., N. Brunner, N. Gisin, V. Scarani, and H. Zbinden(2005), Fast and simple one-way quantum key distribution, Applied Physics Letters, 87: 194108(1-3).
309	Susan S. Sorensen, Daniel A. Thrasher, and Thad G. Walker(2020), A Synchronous Spin-Exchange Optically Pumped NMR-Gyroscope, Applied Sciences 10(20).
310	T. Gregory, P.-A Amoreau, E. Toninell, and M. J. Padget, (2020) Imaging through noise with quantum illumination, Science Advances 6(6).
311	T. Kwak et al.(2021), Diamond Schottky barrier diodes fabricated on sapphire-based freestanding heteroepitaxial diamond substrate, Diam. Relat. Mater. 114, 108335(2021).
312	T. M. Graham, Y. Song, M. Saffman et al.(2022), Multi-qubit entanglement and algorithms on a neutral-atom quantum computer, Nature 604, 457.
313	T. McJunkin et al.(2021), SiGe quantum wells with oscillating Ge concentrations for quantum dot qubits, arXiv: 2112.09765.
314	T. Monz, R. Blatt et al.(2019), 14-Qubit Entanglement: Creation and Coherence, Phys. Rev. Lett. 106, 130506.
315	T. Thorbeck(2015), Niel M. Zimmerman Formation of strain-induced quantum dots in gated semiconductor nanostructures, AIP advances 5, 087107.
316	T. P. Harty, D. T. C. Allcock, C. J. Ballance, L. Guidoni, H. A. Janacek, N. M. Linke, D. N. Stacey, and D. M. Lucas(2014), High-fidelity preparation, gates, memory, and readout of a trapped-ion quantum bit. Physical review letters, 113(22), 220501.
317	T.-Y. Hwang et al.(2022), Sub-10nm precision engineering of solid-state defects via nanoscale aperature array mask, Nano Lett. 22(4) 1672-1679.
318	The national academies press(2019), Quantum computing: Progress and Prospects.
319	Valivarthi, R., Q. Zhou, C. John, F. Marsili, V. B. Verma, M. D. Shaw, S. W. Nam, D. Oblak, and W. Tittel(2017), A cost-effective measurement-device-independent quantum key distribution system for quantum networks, Quantum Science Technology, 2(4): LT01.
320	Vincent Ménoret, Pierre Vermeulen et al.(2018), Gravity measurements below 10-9 g with a transportable absolute quantum gravimeter, Scientific Reports 8(12300).
321	Vladimir E. Manucharyan, Jens Koch, Leonid I. Glazman and Michel H. Devoret(2009), Fluxonium: single Copper pair circuit free of charge offsets. Science, 326(5949): 113-116.
322	W. Asavanant et al.(2019), Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state, Science 366, 373.

323	W. Jang et al.(2021), Single-shot readout of driven hybrid qubit in GaAs double quantum dot, Nano Lett., 21, 12, 4999.
324	W. Lee, H. Kim, and J. Ahn(2016), Three-dimensional rearrangement of single atoms using actively controlled optical microtraps, Optics Express 24(9), 9816.
325	W. Pernice, C. Schuck, O. Minaeva, M. Li, G. Goltsman, A. Sergienko, H. Tang(2012), High speed travelling wave single-photon detectors with near-unity quantum efficiency, Nature Communications, 3, 1325.
326	W. Zhang et al.(2022), A device-independent quantum key distribution system for distant users, Nature 607: 687
327	W.-Z Liu et al.(2022), Toward a Photonic Demonstration of Device-Independent Quantum Key Distribution, Phys. Rev. Lett. 129: 050502.
328	W.-Z. Liu, Y.-Z. Zhang, Y.-Z. Zhen, M.-H. Li, Y. Liu, J. Fan, F. Xu, Q. Zhang, and J.-W. Pan(2022), Phys. Rev. Lett. 129, 050502.
329	Walborn, S., D. Lemelle, M. Almeida, and P. S. Ribeiro(2006), Quantum Key Distribution with Higher-Order Alphabets Using Spatially Encoded Qudits, Physical Review Letters 96: 090501.
330	Wang, C., X.-T. Song, Z.-Q. Yin, S. Wang, W. Chen, C.-M. Zhang, G.-C. Guo, and Z.-F. Han(2015), Phase Reference Free Experiment of Measurement Device Independent Quantum Key Distribution, Physical Review Letters 115: 160502.
331	Wang, H., Zhao, Y., Yu, X., Ma, Z., Wang, J., Nag, A., & Zhang, J.(2019), Protection schemes for key service in optical networks secured by quantum key distribution(QKD), Journal of Optical Communications and Networking, 11(3), 67-78.
332	Wang, N., S. Du, W. Liu, X. Wang, Y. Li, and K. Peng(2018), Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Entangled States, Physical Review Applied 10: 064028.
333	Wang, S. et al.(2022), Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre, Nature Photonics 16: 154-161.
334	Wolfgang Paul(1990), Electromagnetic traps for charged and neutral particles. Reviews of modern physics, 62(3), 531.
335	Wolfgang Tittel, Hugo Zbinden, Nicolas Gisin(2001), Experimental demonstration of quantum secret sharing, Phys. Rev. A. 63: 042301.
336	X. Guo et al.(2017), Parametric down-conversion photon-pair source on a nanophotonic chip, Light: Science & Applications, 6, 16249.
337	X.-L. Wang, J.-W. Pan et al.(2018), 18-Qubit Entanglement with Six Photons' Three Degrees of Freedom, Phys. Rev. Lett. 120, 260502.
338	Xiao Mi et al.(2022), Time-crystalline eigenstate order on aquantum processor, Nature 601: 531-536.
339	XUEJIAN WU, ZACHARY PAGEL et al.(2019), Gravity surveys using a mobile atom interferometer, Science Advances 5(9).
340	Xueyue Zhang, Eunjong Kim, Daniel K. Mark, Soonwon Choi, and Oskar Painter(2022), A scalable superconducting quantum simulator with long-range connectivity based on a photonic bandgap metamaterial, arXiv:2206.12803v1.
341	Y. Arakawa, and M. J. Holmes(2020), Progress in quantum-dot single photon sourcesfor quantum information technologies: A broadspectrum overview, Appl. Phys. Rev. 7, 021309.
342	Y. Bidel, N. Zahzam et al.(2018), Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry, Nature Communications 9(627).
343	Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin and J. S. Tsai(1999), Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Copper-pair box. Nature, 398: 786-788.
344	Y. Pelet et al.(2022), Operational entanglement-based quantum key distribution over 50km of real-field optical fibres, arXiv. 2207. 14707.
345	Y. Song, J. Lim, and J. Ahn(2020), Berry-phase gates for fast and robust control of atomic clock states, Physical Review Research 2, 023045.
346	Y. Song, M. Kim, H. Hwang, W. Lee, and J. Ahn(2021), Quantum simulation of Cayley-tree Ising Hamiltonians with three-dimensional Rydberg atoms, Physical Review Research 3, 013286.
347	Y. Zeng, P. Xu, X. He, Y. Liu, M. Liu, J. Wang, D. J. Papoular, G. V. Shlyapnikov, and M. Zhan(2017), Entangling Two Individual Atoms of Different Isotopes via Rydberg Blockade, Phys Rev. Lett. 119, 160502.
348	Y. -S. Kim, Y. -C. Jeong, and Y. -H. Kim(2008), Implementation of Polarization-Coded Free-Space BB84 Quantum Key Distribution, Laser Physics, Vol. 18, No. 6, pp. 810.
349	Yao Lu, Shuaining Zhang, Kuan Zhang, Wentao Chen, Yangchao Shen, Jialiang Zhang, Jing-Ning Zhang, Kihwan Kim(2019), Global entangling gates on arbitrary ion qubits. Nature, 572(7769), 363-367.
350	Yariv Yanay, Jochen Braumüller, Terry P. Orlando, Simon Gustavsson, Charles Tahan, and William D. Oliver(2022), Mediated Interactions beyond the Nearest Neighbor in an Array of Superconducting Qubits, Physical Review Applied 17:034060.
351	Ye Wang, Mark Um, Junhua Zhang, Shuoming An, Ming Lyu, Jing-Ning Zhang, L.-M. Duan, Dahyun Yum & Kihwan Kim(2017), Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time, Nature Photonics, 11(10), 646-650.
352	Yin, H.-L., Chen, T.-Y., Yu, Z.-W., Liu, H., You, L.-X., Zhou, Y.-H., ··· Pan, J.-W.(2016), Measurement-Device-Independent Quantum Key Distribution Over a 404 km Optical Fiber, Physical Review Letters, 117(19): 190501(1-5).
353	Yin, H.-L., et al.(2016), Measurement Device Independent Quantum Key Distribution Over a 404km Optical Fiber, Physical Review Letters, 117: 190501.
354	Yin, J., Cao, Y., Li, Y. H., Liao, S. K., Zhang, L., Ren, J. G., & Pan, J. W.(2017), Satellite-based entanglement distribution over 1,200kilometers, Science, 356(6343), 1140-1144.
355	Yin, ZQ., Wang, S., Chen, W. et al.(2014), Reference-free-independent quantum key distribution immune to detector side channel attacks, Quantum Information Processing 13: 1237-1244.
356	Yosep Kim, Alexis Morvan, Long B. Nguyen, Ravi K. Naik, Christian Jünger, Larry Chen, John Mark Kreikebaum, David I. Santiago, and Irfan Siddiqi(2022), High-fidelity three-qubit iToffoli gate for fixed-frequency superconducting qubits, Nature Physics 18: 783-788.
357	Yotam Shapira, Ravid Shaniv, Tom Manovitz, Nitzan Akerman, Roee Ozeri(2018), Robust entanglement gates for trapped-ion qubits. Physical review letters, 121(18), 180502.
358	Youngkyu Sung, Leon Ding, Jochen Braumüller, Antti Vepsäläinen, Bharath Kannan, Morten Kjaergaard, Ami Greene, Gabriel O Samach, Chris McNally, David Kim, Alexander Melville, Bethany M Niedzielski, Mollie E Schwartz, Jonilyn L Yoder, Terry P Orlando, Simon Gustavsson, William D Oliver(2021), Realization of High-Fidelity CZ and ZZ-Free iSWAP Gates with a Tunable Coupler, Physical Review X 11(2): 021058.
359	Youngseok Kim, Christopher J. Wood, Theodore J. Yoder, Seth T. Merkel, Jay M. Gambetta, Kristan Temme, and Abhinav Kandala(2021), Scalable error mitigation for noisy quantum circuits produces competitive expectationvalues, arXiv:2108.09197.

360	Yu Chen, C. Neill, P. Roushan, N. Leung, M. Fang, R. Barends, J. Kelly, B. Campbell, Z. Chen, B. Chiaro, A. Dunsworth, E. Jeffrey, A. Megrant, J.Y. Mutus, P.J.J. O'Malley, C.M. Quintana, D. Sank, A. Vainsencher, J. Wenner, T.C. White, Michael R. Geller, A.N. Cleland, and John M. Martinis(2014), Qubit Architecture with High Coherence and Fast Tunable Coupling. Physical Review Letters, 113, 220502.
361	Yu-Ao Chen et al.(2021), An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600kilometres, Nature 589, 214-219.
362	Yulin Wu et al.(2021), Strong Quantum Computational Advantage Using a Superconducting Quantum Processor, Physical Review Letters 127:180501.
363	Zeng, P., W. Wu, and X. Ma(2019), Symmetry-protected privacy: beating the rate-distance linear bound over a noisy channel, Physical Review Applied, 13: 064013.
364	Zhang, Q., Xu, F., Li, L., Liu, N. L., & Pan, J. W.(2019), Quantum information research in China. Quantum Science and Technology, 4(4), 040503.
365	Zhang, Y. et al.(2020), Long-Distance Continuous-Variable Quantum Key Distribution over 202.81km of Fiber. Physical Review Letters 125: 010502.
366	Zhao, Y., Cao, Y., Wang, W., Wang, H., Yu, X., Zhang, J., Mukherjee, B.(2018), Resource allocation in optical networks secured by quantum key distribution, IEEE Communications Magazine, 56(8), 130-137.
367	Zhenfei Song et al., (2019) Rydberg-atom-based digital communication using a continuously tunable radio-frequency carrier, Opt. Express 27(6).

• 사이트

1	https://idquantique.co.kr/quantis-qrng-chip/
2	https://www.idquantique.com/quantum-xchange-and-id-quantique-make-ultra-secure-quantum-networks-a-reality-for-leading-us-industries/
3	https://www.idquantique.com/idq-celebrates-10-year-anniversary-of-the-worlds-first-real-life-quantum-cryptography-installation/
4	https://www.overons.kpn/nieuws/en/kpn-to-implement-quantum-encrypted-connection-qkd
5	https://www.global.toshiba/ww/technology/corporate/rdc/rd/topics/20/2001-01.html
6	https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/
7	https://purl.stanford.edu/kd753jv6128
8	https://qt.eu/
9	https://uknqt.ukri.org/
10	https://uknqt.ukri.org/wp-content/uploads/2021/10/National-Quantum-Technologies-Roadmap.pdf
11	https://quantera.eu/taiol/
12	https://www.muquans.com/
13	https://www.darpa.mil/news-events/2014-07-24
14	https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1945832
15	https://quantumlab.engin.umich.edu/projects/
16	https://www.nist.gov/noac/technology/mass-force-and-acceleration/optomechanical-accelerometers
17	https://www.nist.gov/news-events/news/2021/03/better-way-measure-acceleration
18	www.i-micronews.com/quantum-compass-could-allow-navigation-without-relying-on-satellites/
19	www.darpa.mil/program/quantum-assisted-sensing-and-readout
20	www.darpa.mil/about-us/timeline/chip-scale-atomic-clock
21	www.darpa.mil/attachments/QuantumSensingLayout2.pdf
22	www.nist.gov/noac/success-story-chip-scale-atomic-clock
23	https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf
24	www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/09/UKRI-280921-UKQuantumTechnologiesChallengeTheDirectory.pdf
25	www.darpa.mil/news-events/2021-08-04
26	www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2022/Cryospheric_Rydberg_Radar/
27	https://physics.aps.org/articles/v13/15
28	www.army.mil/article/233809/army_scientists_create_innovative_quantum_sensor
29	www.nature.com/articles/nature13586
30	www.militaryaerospace.com/sensors/article/14039298/quantum-radar-stealth-detailed-image
31	www.physik.hu-berlin.de/en/niqo/research/quantum-imaging
32	www.thedrive.com/the-war-zone/16488/china-says-its-building-a-ghost-imaging-satellite-to-detect-stealth-jets
33	https://www.datacenterdynamics.com/news/ces-ibm-announces-q-system-one-quantum-computer-9ft-cube/
34	https://medium.com/@pchojecki/quantum-advantage-b3458646bd9
35	https://qt.eu/app/uploads/2018/04/QT-Roadmap-2016.pdf
36	https://arxiv.org/abs/2011.13907
37	http://www.wooriro.com/bbs/board.php?bo_table=product04
38	https://quantumoptics.at/images/miscellaneous/IonTrappers.pdf
39	https://ionq.com/news/october-01-2020-most-powerful-quantum-computer
40	https://www.physics.ox.ac.uk/research/group/ion-trap-quantum-computing/research-areas/abaqus
41	https://news.mit.edu/2020/lighting-ion-trap-1104
42	https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2022/INFXX202207-098.html

III 양자기술 산업화 모델

제1장 산업영역별 산업화 모델

제2장 양자통신분야 산업화 모델

제3장 양자센서분야 산업화 모델

제4장 양자컴퓨팅분야 산업화 모델

제5장 산업화 모델 시사점

III. 양자기술 산업화 모델

제1장 산업영역별 산업화 모델

제1절 개요

양자기술에 대한 산업계의 수요는 무궁무진하다. 이미 미국, 유럽, 중국, 일본, 한국 200여개 이상의 기업들이 양자기술 개발 및 상용화를 시작하고 있다. 양자통신 분야는 국내외 주요 통신사 간 선점 경쟁이 치열하다. 각 기업들이 테스트베드를 구축하고 상용서비스를 가속하고 있고, 양자센서 분야는 시제품 개발을 통한 초기 상용화를 서두르고 있으며, 양자컴퓨터 활용의 증가로 인해 배터리, 항공, 제약 등에서 양자컴퓨팅 클라우드 서비스가 본격화되고 있다.[1] 이 장에서는 각 산업분야별로 양자기술과 접목하여 진행되고 있는 R&D 또는 산업화 방향에 대해서 간략하게 소개하고자 한다.

그림 III-1-1 분야별 산업 현황



※ NIA (2021) 집필진 재구성

〈표 III-1-1〉에서 기술한 것처럼 각 주요 분야에서 양자기술을 적용한 기술 개발이 진행되고 있다. 국방과 안보 분야의 경우, 양자암호통신은 해킹이나 정보탈취를 원천 차단하여 고신뢰의 통신보안을 가능케 하고, 양자센서는 장거리나 초정밀 측정으로 다양한 군사적 활용이 가능하기 때문에 중요하게 다루어지고 있다. 반도체 또는 자동차와 같은 분야에서는 정확도가 향상된 센서 개발, 공정 프로세스 최적화, 구조 설계 개선이 중심이 되고 있고, 의료나 제약 분야에서는 신약 개발과 정밀 진단을 위해서 양자컴퓨팅이나 양자센서 활용에 대한 연구가 요구되고 있다. 〈표 III-1-1〉에서 기술된 내용을 포함한 여러 분야에서 검토되고 있는 국내외 양자기술 활용 방법 등에 대해 다음에서 소개하고자 한다.

1) NIA (2021)

양자통신·센서·컴퓨팅분야 등 양자산업 전반에 걸친 국방·안보, 의료 등 8개 산업분야, 총 64개의 산업화모델에 대해 소개한다.

표 III-1-1 주요 분야별 산업화 모델 개요

구분	산업화 모델
국방·안보	① 양자라이다, 양자레이더 ② 양자 전자전 ③ 양자 수중전 ④ 양자우주안보 및 양자위성 ⑤ 인공위성 양자 키 분배 네트워크 구현 서비스 ⑥ 양자통신과 현대암호 Post-Processing 알고리듬 ⑦ 드론용 양자암호모듈 ⑧ 암호체계 개발 ⑨ 암호해독 및 정보수집
통신 응용	① 유선 양자암호통신서비스 ② 무선 양자인터넷 구현 서비스 ③ 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스 ④ 양자 키 분배 시스템의 소형화 ⑤ 양자인터넷 서비스 ⑥ 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스 ⑦ 양자보안 기반 IP카메라 솔루션
제조·반도체	① 항공기 디자인 최적화 ② 차량용 배터리 개발 적용 ③ 스마트팩토리 양자암호통신 적용 ④ 양자센서 기반 배터리 불량 검출 ⑤ 양자센서 기반 가스센싱 기술 ⑥ 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 ⑦ 반도체 미세구조 설계 ⑧ 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화
의료·제약·소재	① 화학제품 적용(촉매 및 계면 활성제) ② 원료 운송, 정제, 제품시장 투입 프로세스의 최적화 ③ 저류층의 채굴량 확대 ④ 진단지원 서비스 ⑤ 보험료와 프라이싱(가격책정, Pricing) ⑥ 맞춤의료 서비스 ⑦ 신규 생물학적 제재 적용 ⑧ 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 ⑨ 의료 데이터 전송서비스 ⑩ 뇌자도 검사 및 심자도 측정 ⑪ 양자현미경 · 양자내시경 의료분야 접목 ⑫ 양자 MRI 의료진단 서비스 ⑬ 양자 이미징 플랫폼 서비스 ⑭ 암치료 접근방법 적용 ⑮ 신약물질탐색을 위한 양자시뮬레이터 ⑯ 단백질 구조 분석 ⑰ 신소재 개발 최적화
금융	① 타겟팅과 예측 ② 리스크 프로파일링 ③ 거래 최적화 ④ 양자 금융 서비스 ⑤ 블록체인기반 금융서비스 보안 ⑥ 결제시스템 연동 및 기밀정보 암호통신서비스 ⑦ 금융데이터 분석 보안서비스
교통·물류·항공	① 교통망 경로 최적화 ② 물류자원 및 에너지 활용 최적화 ③ 항공 운항 시스템 최적화 ④ 항공기 시스템 모니터링 향상 및 유지보수 감소 ⑤ 자율차용 양자 라이다 ⑥ 항공기 시각주기유도시스템 감지기술 ⑦ 자율주행배송서비스(배송로봇·드론)에 양자암호 적용 ⑧ 주행 정확도 및 안정성 개선
유틸리티 및 건설	① 양자중력센서 이용 지하통신시설물 위치 파악 ② 통신선로 단락 검출
기타 산업	① 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 ② 석유 및 가스 탐사 ③ 가스 파이프라인 감시 ④ 인공지능 ⑤ 기후변화 모델링 ⑥ 에너지

※ 본 3편의 2장(양자통신), 3장(양자센서), 4장(양자컴퓨팅)의 모델을 포함하여 종합적으로 산업화 모델 제시

상기의 산업화 모델을 단기(5년 내외 산업화 검토 대상)와 중장기(5년 이후 산업화 검토 대상)로 구분하면 다음 〈표 III-1-2〉와 〈표 III-1-3〉으로 나타낼 수 있다. 단기 산업화 모델의 경우, 5년 내외로 가시적인 성과를 도출할 기술과 집중적으로 개발되어야 하는 분야를 중심을 기술하였다. 중장기 산업화 모델의 경우, 기술적 숙련도, 산업화 정도, 인체에 대한 무해성, 보안 확보, 제도적 보완에 의해 5년 이후 산업화를 고려할 수 있는 분야로 구별하였다. 이는 기술 개발 진행 사항에 따라 서로 변경될 수 있다.

5년 내외로 단기적으로 산업화 가능성을 검토할 수 있는 산업화 모델은 〈표 III-1-2〉처럼 25개로 고려할 수 있다. 특히 통신 분야는 B2B요금제 출시 등 근래에 가시적인 결과들이 나타나고 있기 때문에 가장 단시간 내에 양자기술이 적용된 산업 분야가 될 것이다. 또한 양자컴퓨팅 분야가 적용되는 의료, 제약, 소재 분야에서도 산업화가 예상보다 앞당겨질 가능성이 높다. 특히 신약물질탐색을 위한 양자시뮬레이터의 개발은 COVID-19이후로 더욱 가속화되고 있기 때문에 그 가능성이 높다고 하겠다. 양자센서개발이 수반되어야 하는 제조, 반도체, 유틸리티 및 건설의 경우는 선진국들이 관련 양자센서 개발을 빠르게 진행하고 있기 때문에, 빠르게 진입해야 글로벌 시장에 영향력을 발휘할 수 있어 단기 내에 사업화가 시급하다고 할 수 있다.

표 III-1-2 주요 분야별 단기 산업화 모델(단기 산업화 검토 대상)

구분	산업화 모델
국방·안보	① 양자통신과 현대암호 Post-Processing 알고리듬 ② 드론용 양자암호모듈 ③ 암호체계 개발
통신 응용	① 유선 양자암호통신서비스 ② 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스 ③ 양자 키 분배 시스템의 소형화 ④ 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스 ⑤ 양자보안 기반 IP카메라 솔루션
제조·반도체	① 스마트팩토리 양자암호통신 적용 ② 양자센서 기반 배터리 불량 검출 ③ 양자센서 기반 가스센싱 기술 ④ 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화
의료·제약·소재	① 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 ② 의료 데이터 전송서비스 ③ 뇌자도 검사 및 심자도 측정 ④ 양자현미경 · 양자내시경 의료분야 접목 ⑤ 신약물질탐색을 위한 양자시뮬레이터 ⑥ 단백질 구조 분석
금융	① 블록체인기반 금융서비스 보안 ② 결제시스템 연동 및 기밀정보 암호통신서비스
교통·물류·항공	① 교통망 경로 최적화 ② 자율주행배송서비스(배송로봇·드론)에 양자암호 적용
유틸리티 및 건설	① 양자중력센서 이용 지하통신시설물 위치 파악 ② 통신선로 단락 검출
기타 산업	① 가스 파이프라인 감시

〈표 III-1-3〉의 39개 산업화 모델은 중장기적으로 집중해야 할 분야를 기술한 것이다. 다수의 분야는 단기 산업화 모델의 발전과 함께 성장가능한 분야로 특히 통신 분야의 경우는 관계성이 높을 것으로 보인다. 국방, 안보 분야의 경우는 중장기적으로 접근해야 하는 분야로, 양자센서 및 양자컴퓨팅 기술이 수반되는 경우 비약적인 발전이 가능한 분야로 복합적이고 다각적으로 검토가 필요할 것으로 보인다. 다른 분야도 마찬가지로 양자기술의 한 분야의 발전만으로는 산업화가 어렵고, 양자통신, 양자센서, 양자컴퓨팅 분야의 기술 개발이 동시에 이루어지는 경우에 산업화가 가능할 것이다.

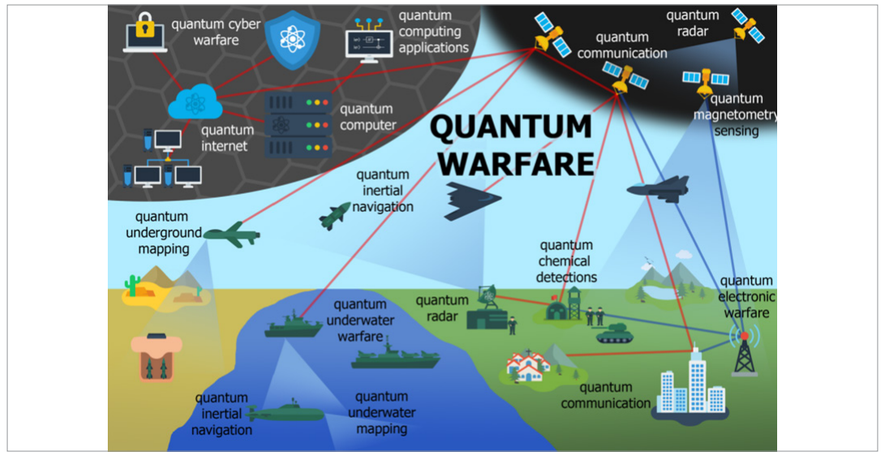
표 III-1-3 주요 분야별 중장기 산업화 모델(중장기 산업화 검토 대상)

구분	산업화 모델
국방·안보	① 양자라이다, 양자레이더 ② 양자 전자전 ③ 양자 수중전 ④ 양자우주안보 및 양자위성 ⑤ 인공위성 양자 키 분배 네트워크 구현 서비스 ⑥ 암호해독 및 정보수집
통신 응용	① 무선 양자인터넷 구현 서비스 ② 양자인터넷 서비스
제조·반도체	① 항공기 디자인 최적화 ② 차량용 배터리 개발 적용 ③ 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 ④ 반도체 미세구조 설계
의료·제약·소재	① 화학제품 적용(촉매 및 계면 활성제) ② 원료 운송, 정제, 제품시장 투입 프로세스의 최적화 ③ 저류층의 채굴량 확대 ④ 진단지원 서비스 ⑤ 보험료와 프라이싱(가격책정, Pricing) ⑥ 맞춤의료 서비스 ⑦ 신규 생물학적 제재 적용 ⑧ 양자 MRI 의료진단 서비스 ⑨ 양자 이미징 플랫폼 서비스 ⑩ 암치료 접근방법 적용 ⑪ 신소재 개발 최적화
금융	① 타겟팅과 예측 ② 리스크 프로파일링 ③ 거래 최적화 ④ 양자 금융 서비스 ⑤ 금융데이터 분석 보안서비스
교통·물류·항공	① 물류자원 및 에너지 활용 최적화 ② 항공 운항 시스템 최적화 ③ 항공기 시스템 모니터링 향상 및 유지보수 감소 ④ 자율차용 양자 라이다 ⑤ 항공기 시각주기유도시스템 감지기술 ⑥ 주행 정확도 및 안정성 개선
기타 산업	① 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 ② 석유 및 가스 탐사 ③ 인공지능 ④ 기후변화 모델링 ⑤ 에너지

제2절 국방·안보·통신

군사기술은 전장에 배치될 가능성을 고려하여 더 큰 주의를 필요로 하기 때문에 산업 또는 공공 응용분야보다 요구 사항이 더 까다롭다.[2] 쉽게 구현되고 더 간단하고 덜 위험하고 적합한 기술, 즉 기존 센서를 양자센서로 대체할 수 있는 기술을 고려하고 있다. QKD(Quantum Key Distribution, 양자 키 분배)는 이미 상용화되어 있지만, 많은 새로운 하드웨어, 시스템 및 현재 통신 시스템과의 상호 운용성과 군사 배치 측면에서 적용시에 심층적 고려가 필요할 수 있다. 그러나 장기적으로 SWaP(Size, Weight, and Power)를 낮추고 양자컴퓨터와 양자네트워크를 확장하는 이점을 기대할 수 있다. 각 국가나 군이 양자기술로 다른 국가나 군과 경쟁하기를 원하는 경우 배치를 더 쉽게 하는데 필요하게 될 것이다. [그림 Ⅲ-1-2]는 현대 전쟁의 다양한 측면에서 군사, 보안, 우주 및 정보를 위해 고려할 수 있는 다양한 양자기술 응용 분야, 기능과 성능을 제안할 수 있는 산업 응용에 대해 묘사한 것이다. 그림에 묘사된 대다수의 응용 분야는 현실적이기보다는 이론적이라는 점을 인지하는 것이 중요하다. 또한 양자기술을 군사 플랫폼에 통합하는 것이 매우 어렵다는 것 또한 인지해야 한다. 예를 들어 정밀 탐색에 대한 군사 수준의 요구 사항은 현재 양자 관성 센서에 대해 상당히 제한적일 수 있는 빠른 측정 속도를 필요로 하기 때문이다.

그림 Ⅲ-1-2 다양한 양자기술 시스템을 활용한 양자 전쟁 묘사도



※ Michal Krelina (2021)

2) Michal Krelina (2021)

1. 국방·안보 분야 양자기술 산업화 모델

국방·안보 분야의 양자기술 산업화 모델은 〈표 Ⅲ-1-4〉와 같이 양자암호통신, 양자통신 네트워크 등을 비롯하여 다양한 분야가 존재할 수 있다.

표 Ⅲ-1-4 주요 국방·안보 분야 양자기술 산업화 모델 개요

분야	개발 기술 핵심 및 산업화 모델 개요
양자 암호통신	· Shor의 알고리듬을 활용 : 양자 안전 암호화가 배포되기 전에 관심 데이터 수집 시작 · 양자 암호 민첩성 구현의 필요 : 포스트 양자 암호화 구현 필수 · 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스
양자 컴퓨팅	· 논리 큐비트의 수와 함께 증가 · 하이브리드 클라우드의 일부로 사용 가능 · 양자데이터용 소형 임베디드 양자컴퓨팅 시스템 : 자율주행 차량, 이동 지위센터 배치 · 양자 최적화, ML/AI 향상 및 더 빠른 수치를 위한 일반적인 용도의 시뮬레이션
양자통신 네트워크	· 다양한 보안 애플리케이션 : Measurement Device Independent(MDI-QKD)나 양자중계기 이용, 식별 및 인증, 디지털 서명, 위치 기반 양자 암호 · 양자 시계 동기화 · 양자인터넷 : 양자컴퓨터 및/또는 양자 클라우드 간 효과적인 통신 방법
양자 PNT*	· 매우 정밀한 양자 시계 : 타이밍 분배 및 클록 동기화를 위해 양자 인터넷에 연결 · 고정밀도 양자 관성 항법 : 양자 자이로스코프, 가속도계 및 원자/양자시계로 구성, 저드리프트 회전 센서 · 양자 증강 항법 : 양자 자기 또는 중력 매핑 · 지구 자기 이상 현상 기반 양자 탐색 : 자기 이상 지도 제작 * PNT : 위치, 항법, 시간
양자 ISTAR**	· 정보 수집 및 처리를 위한 양자 컴퓨팅 · 해저 작전을 위한 방대한 애플리케이션 · 새로운 유형의 3D, 저조도 또는 낮은 SNR 양자 비전 장치 : 헬리콥터 조정사가 시야 확보가 어려운 환경에서 착륙할 때의 양자거리 측정기 · 불확실한 해상도의 첨단 지하 감시 **ISTAR : 정보, 감시, 표적 획득 및 정찰
양자 전자전	· 더 작은 범용 양자 안테나 : 정확한 타이밍 및 고급 RF 스펙트럼 분석기에 의한 현재 전자전의 향상, Rydberg 원자에 기반 양자 안테나, 저주파 신호 차단의 경우 수 마이크로미터 양자 안테나로 충분함 · 양자 채널 감지 문제 : 낮은 신호 대 잡음비 사용하는 양자이미징 기술 · 양자 채널 현지화 : 메시지 가로채기, 트로이 목마, 산란광 수집 및 탐지 등 여러 유형의 공격 고려 및 개발
양자 레이다/라이다	· 장거리 감시 양자 레이다 : 극저온, 더 높은 온도에서 작동하는 RF 양자 방출기 또는 더 효율적인 극저온 냉각, 더 강력한 방출기 필요 · 양자 라이다 : 광학 영역에서 가능한 응용 프로그램, 근거리 표적 조명에 사용될 양자 라이다, 노이즈 필터링에 의한 양자 단위의 정밀 측정
양자 수중전	· 양자 관성 항법 적용 잠수함 : 대형 잠수함은 극저온 냉각을 포함한 더 큰 양자 장치 설치 가능 · 잠수함 및 수중 지뢰 탐지 가능 양자 자력계 : 해저 협곡, 빙산, 주름진 해저와 같은 환경 매핑 가능, SQUID 자력계의 소음 억제 개선 시 6km 떨어진 잠수함 탐지 가능
양자 우주 안보	· 장거리 양자통신 : 장거리에서 단기 통합 양자네트워크에 필수, MDI-QKD 프로토콜 적용 · 저궤도 양자 감지 및 이미징 기술 : 양자 중력계, 중력 경도 측정계 또는 자력계, 저전력 양자 중력 감지 장치, 양자 고스트 이미징 · 우주 배치용 양자 레이다/라이다 및 양자 전자 전쟁 기술 : 다른 위성, 우주 물체, 우주 쓰레기 및 유성체와 같은 작고 어둡고 빠른 물체 탐지 및 추적

분야	개발 기술 핵심 및 산업화 모델 개요
화학 및 생물학적 시뮬레이션 및 감지	· 화학 양자 시뮬레이션 연구 : 화학 무기 역할 가능 새로운 중소 분자의 구조 및 화학적 특성 설계 및 정밀 시뮬레이션 기법 이용 대응책 및 새로운 탐지 기술 개발 가능 · 공기 또는 샘플에서 화학물질 검출 : 양자 캐스케이드 레이저 사용 광음향 검출 · 폭발물 및 화학무기 탐지 : 비대칭 충돌에 사용되는 무기인 즉석 폭발 장치에 사용되는 TNT 및 트리아세톤 트리퍼옥사이드 요소 탐지, 아세톤 감지시스템 사용 항공기에 탑승한 폭발물이 있는 승객과 수하물 검색, 자율 드론이나 지상 차량에 탑재 · 생물학적 제제 탐지 : 단백질 접힘, DNA 및 RNA 탐색 이용
신소재 개발	· 실온에서 작동 가능한 고정밀 SQUID 자력계 : Josephson 접합 구축 (초전도 큐비트의 빌딩 블록으로 사용) · 위장, 스텔스, 초경도 장갑, 고온 내성 소재(방위산업용)
뇌영상 및 인간-기계 인터페이스	· 양지 지원 자기 뇌검사 : 부상 시 지속적이고 원격 의료 모니터링 및 진단을 위한 MEG(Magneto-encephalography) 스캐너 적용 군사 헬멧 · 인간-기계 인터페이스 : 기계 및 자율 시스템과의 실용적인 비간섭적인 인지 통신

※ Michal Krelina (2021) 집필진 재구성

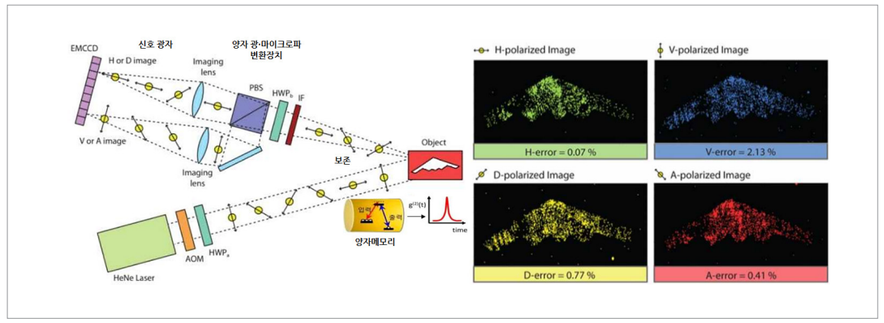
2. 양자라이다 및 양자레이더

〈표 Ⅲ-1-2〉에서 기술한 것처럼, 최근 미래 국방력 강화를 목적으로 양자라이다 또는 양자레이더의 국방 분야 접목의 필요성이 대두되고 있다. 특히 양자레이더는 양자의 입자 단위 측정을 위해 많은 양의 데이터 처리가 필요한데, 양자레이더로부터 파생된 데이터를 처리할 수 있는 방법론의 연구개발 필요성이 제기되고 있다. 양자레이더를 구현하기 위한 주요 핵심기술로는 양자정보를 생성하기 위한 양자 상태 생성, 생성된 양자정보저장, 장거리 양자 정보 송수신을 위한 광학적 광자와 마이크로 광자간의 양방향 변환 및 양자 상태 정밀 측정 기술이 있다. 기존 레이다는 표적에 전파를 쏘아 그 반사파를 보고 표적을 탐지하는 데 반해, 양자레이더는 섬유 커플러, 양자점 등을 사용해 얽힌 양자를 쏘아 표적을 탐지한다. 얽힌 양자가 표적에 반사되어 양자레이더로 되돌아오는데 걸리는 시간을 통해 표적의 위치, 레이다 반사 단면적, 속도, 방향, 기타 속성을 추론할 수 있다.[3)]

양자레이더 개발은 국가 차원에서 비밀리에 이루어지고 있어 설계기술 확보에 어려움이 많아 현재까지는 무기체계 적용이 미약한 수준에 머물고 있다. 그러나 양자 레이다는 기존 레이다에 비해 신호대 잡음비를 혁신적으로 증대할 수 있어 저피탐/스텔스 표적을 탐지하여 무력화할 수 있는 미래 신개념 기술이다. 또한, 얽힌 양자를 변조하거나 복제하려는 시도도 탐지할 수 있기 때문에 적의 기만책에 즉각적인 대응이 가능하다. 기존의 고성능 장거리 레이다, Passive 레이다 등이 스텔스 표적을 탐지할 수 있다고는 하나 주변 지형 및 운용환경에 따라 탐지가 제한되며 높은 표적식별 오인식률을 지닌다. 특히, 전자파 송출장비/기지국 부재 시 해당 레이다들은 아예 무용지물이 될 수도 있다. 따라서 세계 주요국은 양자레이더를 스텔스 표적탐지를 위한 핵심 무기체계로 인식하여 국가차원에서 비공개로 개발 중인 것으로 파악된다. 현재의 단일광자 이미지 검출 속도는 매우 느려 양자레이더와 양자라이더를 군사용으로 적용하기에 어려움이 크다. 실용화하기 위해서는 얽힘광자쌍 생성속도가 10^{10} 개/초 이상 되어야 하고 이를 달성하기 위해서는 장기간의 R&D 투자가 필요하다.

3) 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

그림 Ⅲ-1-3 양자 레이다 원리 및 스텔라 탐지 모식도와 영상



※ Mehul Malik et al. (2012) 집필진 재구성

3. 양자 우주 안보 및 양자 위성

오늘날 우주 영역은 그 중요성이 커지고 있고 선진국들이 사용하는 중요한 전장이 될 것으로 보인다. 위성은 항법, 지도 작성, 통신 및 감시를 위해 주로 사용되고 있으며, 종종 군사 목적으로도 이용되고 있다.[2)] 예를 들어, 레이저 무기를 장착한 위성이나 카미카제 위성이 지구 궤도에 배치되는 등 위성과의 전쟁이 병행되고 있다. 다른 급증하는 문제는 위성의 수를 추정한 우주 쓰레기의 양인데, 앞으로도 2,200개 이상의 위성이 발사될 예정이다. 이러한 상황에서 우주는 위성에 양자감지 및 통신 기술을 배치하고 우주 대책을 세우는 데 핵심이 될 것이다. 양자 중력계 또는 자력계와 같은 양자감지 기술을 지구 궤도의 위성, 특히 저궤도(LEO)에 배치하게 될 것으로 보인다. 현재 이를 위한 다양한 응용 프로그램이 개발 중인데, 자원을 정확하게 매핑하거나 자연 재해의 영향을 평가하는 데 도움을 주기 위해 저전력 양자 중력 감지 장치가 설치된 소형 위성을 우주 공간에 배치하는 것을 목표로 한다. 이 장치는 높은 공간 해상도가 필요하지 않은데, 이는 위성 기반 양자이미징에도 동일하게 적용된다. 양자 고스트 이미징은 흐리거나 안개가 낀 날씨 또는 야간에도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 현재 중국이 고스트 이미징 기술을 사용하는 첩보 위성의 개발을 주장하지만 어느 정도의 공간 해상도를 가지고 있는지는 확인되지 않는다.

양자통신을 위한 위성의 활용은 이미 실증된 바 있다. 위성 기반 양자통신은 장거리 통합 양자네트워크에 필수적으로 현재의 양자통신위성은 광섬유 채널에 대해 중계기와 동일한 문제를 겪고 있다.[2] 현재의 양자위성은 중앙 지점이 신뢰할 수 있는 중계기 또는 스위치로 작동되어 보안을 강화하고 있지만, 이것의 문제는 위성 제어 시스템에 대한 사이버 공격의 가능성을 열어두고 있다는 것이다. 더 나은 보안을 위해서는 안전한 영역에서 작동하고 나중에 양자 중계기로 작동하는 현재 시연된 MDI-QKD 프로토콜을 사용하는 것이다.

새로운 필수 군사 능력은 다른 위성, 우주 물체, 우주 쓰레기를 탐지하고 추적하는 기술인데 10cm 이하의 물체를 감시하고 다량의 우주 쓰레기를 감지하는 것이다. 예를 들어, 미국 우주 감시 네트워크(US Space Surveillance Network)의 일부인 Space Fence 프로젝트의 우주 감시 레이다는 최소 크기가 5cm 정도인 우주 쓰레기를 추적할 수 있는 것으로 알려져 있다. 보다 작은 크기와 대량의 우주쓰레기를 추적하기 위해서 기존 레이다 대신 광학 광자의 손실이 없는 양자레이더나 라이다가 대안으로 고려되고 있다. 시뮬레이션에 따르면 우주의 양자레이더는 Ground-based Electro-Optical Deep Space Surveillance(GEODSS)[4]와 비교하여 우주에서 최소 10배 더 높은 탐지 감도 및 물체 추적 감도를 제공할 수 있어 위성, 우주 쓰레기, 유성체와 같은 작고 어둡고 빠른 물체를 추적하는 데 매우 유용하다.

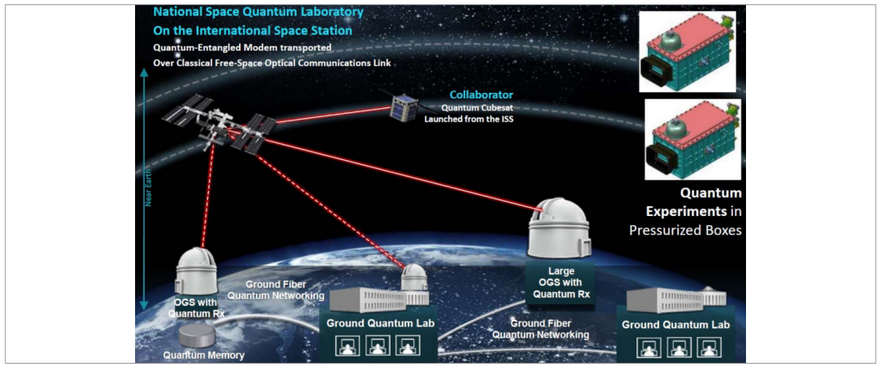
그림 III-1-4 전 세계 우주 감시 네트워크



※ Theresa Hitchenes (2019) 집필진 재구성

미국 NASA는 양자통신 인프라를 국제 우주 정거장에 배치하고 양자정보과학연구 커뮤니티와 협력하여, 새로운 양자기술을 특성화하고 장거리에서 분산된 양자상태에 의해 가능한 새로운 양자시스템 응용 프로그램을 평가하는 데 사용할 수 있는 National Space Quantum Laboratory(NSQL)를 제공하는 프로그램을 수행하고 있다.[5] 양자 자유공간 통신 링크에는 빔 포인팅, 수집 및 추적과 RF 또는 Lasercom 터미널 기술을 제공하는 기존 통신 채널도 필요하다. MIT-LL은 LEO-to-GEO(저궤도에서 정지궤도) 양방향 크로스링크 및 달 다운링크용 고속 통신을 시연하는 데 사용할 NASA용 차세대 Lasercom 터미널 하드웨어를 개발하고 있으며, 가까운 미래에 NASA의 자유 공간 Lasercom 패스파인더가 NASA의 첫 번째 우주 양자통신 링크를 시연하는 데 활용될 것이다. 2022년 내에 통합 레이저 통신 릴레이 데모(Laser Communication Relay Demonstration, LCRD)의 저궤도 사용자 모뎀 및 증폭기 터미널(ILLUMA-T) 프로그램은 국제 우주정거장에서 MIT-LL이 개발한 차세대 레이저 통신 터미널을 호스팅하게 될 것이다. 또한 양자모뎀과 통합된 ILLUMA-T Lasercom 터미널은 고속 공간-지상 얽힘 분포를 시연하고 이중 스팬 지상-접지 링크 및 소형 위성의 양자 교차 링크의 가능성을 탐색하는 데 사용할 수 있을 것이다.

그림 III-1-5 얽힘 기반 양자네트워크 환경 (NASA)



※ Hamilton et al. (2019)

4) Theresa Hitchens (2019)

5) Hamilton et al. (2019)

4. 무선 양자인터넷 구현 서비스

최근 광케이블을 설치하기 어려운 지역 또는 해양, 우주 등 각종 제약사항이 발생할 수 있는 공간에 대한 암호통신의 필요성이 대두됨에 따라, 무선 양자인터넷 구현 서비스가 통신섹터의 중장기 산업 니즈로 도출될 수 있다. 관련된 주요 동향으로, 2018년에 우리나라의 한국전자통신연구원(ETRI)에서 양자신호를 100m 떨어진 거리에 전송하는데 성공했다고 발표하였다. 이는 햇빛이 강한 야외에서 양자신호를 전송하고 복원하는 데 성공한 세계 첫 사례로 꼽히고 있다. 이로써, 해킹 또는 도청을 원천 차단하는 통신망 구축에 한걸음 더 다가선 성과로 평가될 수 있었다. 도출된 니즈를 만족시키기 위한 주요 방안으로는 초소형 휴대용 양자암호통신 집적화 칩의 개발, 초정밀·경량화·장거리 무선 양자암호통신 기술의 개발, 기존 인터넷과 연계 가능한 유무선 양자인터넷 초기모델 개발 및 서비스 구현 등이 도출될 수 있다. 예측할 수 있는 산업적 영향 및 파급효과로는 양자통신 드론, 항공기, 위성 등으로 점진적인 무선양자통신 실증과 실증의 완수에 의한 기술 선도국과의 격차의 최소화를 기대할 수 있다.

5. 하이브리드·멀티 클라우드 환경 양자암호통신 서비스

현대의 IT 인프라는 클라우드 환경이 대세가 되고 있으며, 최근에는 클라우드 운용법에 대한 인식이 더욱 고도화되어 퍼블릭 클라우드와 프라이빗 클라우드를 함께 쓰는 하이브리드 클라우드 환경 및 다양한 클라우드 서비스를 활용하는 멀티 클라우드 환경을 도입하는 기업이 늘고 있다. 인프라의 다양성을 늘릴수록 비용 효율, 위급 상황 발생 시 대처 역량 등이 올라가지만 그만큼 증가하는 보안에 대한 우려는 공공기관이나 금융기관 등 보안 민감도가 높은 기관이나 기업에서 클라우드가 가져오는 장점이 있음에도 도입을 하지 못하는 이유가 되고 있다. 최근 양자보안통신에 대한 관심도 증가에 맞추어 국가정보원, 한국지능정보사회진흥원(NIA), 국가보안기술연구소(NSR), 한국정보통신기술협회(TTA), 한국전자통신연구원(ETRI) 등에서 보안제도를 마련하여 내년부터 시행을 앞두고 있으며, 양자보안통신은 복잡해지는 IT 인프라의 보안 해결책이 될 것으로 기대를 받고 있다. 양자보안통신을 기반으로 외부 클라우드 환경도 기업의 내부 인프라망 같이 활용할 수 있게 만들어 데이터 관리, 머신러닝, 고성능컴퓨팅(High-Performance Computing, HPC) 등 클라우드 상의 다양한 기능을 원천적으로 해킹의 위험 없이 누릴 수 있게 하여 기업의 비용 절감은 물론 디지털 트랜스포메이션을 한 단계 더 고도화 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

6. 양자보안 기반 IP카메라 솔루션

최근 중국산 IP카메라 제품을 대상으로 은닉채널에 의한 해킹 문제가 발생함에 따라, IP카메라의 이미지 생성 단계부터 암호화된 영상 전송 단계까지 전단계 보호에 대한 필요성이 도출되고 있다. 이에 Photon Shot Noise 또는 Dark Shot Noise를 이용한 이미지센서 기반 양자난수 생성기술이 활발히 연구되고 있다. IP카메라는 고품질의 이미지센서가 존재하기 때문에 추가적인 하드웨어 없이 양자난수를 생성할 수 있는 Dark Shot Noise 기반의 난수 생성 방법을 적용하기에 적합하다. 이러한 난수 생성 방법이 적용된 IP카메라는 이미지·비디오 해킹에 대한 우려를 원천적으로 해결한다. 양자 난수 생성기(Quantum Random Number Generator, QRNG)가 탑재된 IP카메라 개발을 위해 한국과학기술연구원(KIST)은 보안 영상과 난수를 동시에 생성하는 CMOS 이미지센서 기반 양자난수 모듈을, 국민대학교는 KIST의 이미지센서 기반 난수로부터 엔트로피를 추출 및 양자난수기반 암호화 모듈을, 드림시큐리티는 IP카메라 적용 암호화 시스템 및 시연 시스템을, SDT는 영상 프로토콜과 Video Management System(VMS) 아키텍처를 설계한 후 양자 난수 발생기가 적용된 카메라를 개발하고 있다. 이렇게 개발된 QRNG 탑재 IP카메라는 과학기술정보통신부 및 경찰청에서 시행한 「과학치안 공공연구성과 실용화 촉진 시범사업」에 적용될 예정이다. 산업적 영향 및 파급효과로는 해외산 IP카메라의 보안 이슈를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 해외 제조사들이 주도하는 국내 IP카메라 시장의 주도권 회복 및 해외 수출을 기대할 수 있다.

제3절 제조

제조 산업은 여러 면에서 양자컴퓨팅의 이점을 누릴 수 있다. 제품 개발 및 설계, 제조 프로세스 및 공급망 최적화, 소프트웨어 성능 분석, 사이버 보안 개선 등에 도움이 될 수 있을 것으로 보인다.[6] 시나리오 기획을 통한 프로토타이핑 및 디자인 개발 가속화, 다양한 변수의 실시간 처리를 통한 공급망 문제 해결, 데이터 처리 속도의 기하급수적인 증가로 인한 가치 흐름 생산성 향상, 데이터 침해 위험을 완화하는 사이버 보안 강화, 강력한 데이터 처리로 자재 취급에 대한 투명성 제공 등의 이점이 있을 것으로 보인다. 즉 양자컴퓨팅은 제조업체에 보다 안전하고 간소화된 계산 프로세스를 제공하고 설계 및 개발에서 생산 및 품질 관리(QC)에 이르기까지 모든 것을 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

그림 III-1-6 양자기술 적용 제조 분야



※https://gesrepair.com/quantum-computing-and-its-role-in-the-future-of-manufacturing

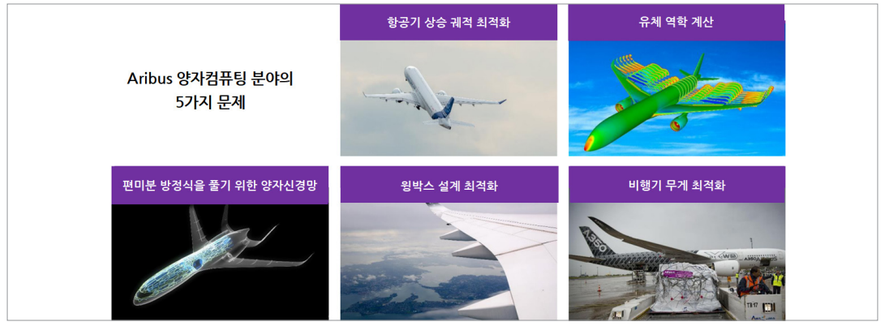
제조 영역에서 양자컴퓨팅의 예측 기능이 실현되면 자동차, 항공 우주 및 전자 산업은 더 유리한 강도 대 중량 비율을 가진 재료 개발, 더 높은 에너지 밀도를 제공하는 배터리 개발, 에너지 생성 및 탄소 포집에 도움이 될 수 있는 보다 효율적인 합성 및 촉매 공정에 대해 이점을 얻을 수 있다.[7] 실제로 오늘날 많은 제품이 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 설계되고 사전 테스트되고 있다. 자동차 및 항공 우주 하드웨어 구성 요소와 하위 구성 요소는 개별 엔지니어링 안전 마진을 이용하여 3D로 모델링을 하는데, 이러한 마진은 누적되어 지나치게 엔지니어링 되거나 중량이 초과되거나 필요한 것보다 더 높은 비용이 드는 제품으로 귀결되어 상업성을 저해할 수 있다. 그러나 양자컴퓨터는 복잡한 하드웨어 시스템 내에서 구성 요소 상호 작용을 시뮬레이션 하여 시스템 부하, 부하 경로, 소음 및 진동을 보다 정확하고 종합적으로 계산할 수 있을 것으로 예상된다. 이 통합 분석은 전체적인 시스템의 맥락에서 개별 구성요소의 제조를 최적화하고, 그로인해 개별 안전 마진(Safety Margin)의 누적되는 영향을 줄이고, 전체 시스템 성능의 감소 없이 비용을 개선할 수 있을 것이다. 제조의 최신 제어 프로세스는 기계학습을 사용하고 여러 변수를 분석할 때 고급 분석의 한계를 테스트하는데, 양자컴퓨팅은 데이터에서 새로운 상관관계를 찾고 패턴 인식을 향상시키며 기존 컴퓨팅의 기능을 넘어 분류를 발전시키는 데 도움이 될 수 있을 것이다. 양자컴퓨팅과 기계학습의 결합과 최적화에 대한 적용은 여러 영역에서 제조에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 반도체 칩 제조는 현재 기계학습과 간단한 다변수 분석을 사용하고 있지만 기존 컴퓨팅은 계산의 벽에 부딪혔고 더 복잡한 분석을 위한 요인의 수를 늘릴 수 없다. 이 문제점을 양자컴퓨팅을 적용하면 생산 수율을 높이기 위해 추가적인 상호 작용 요소와 프로세스를 분석할 수 있을 것이다. 자동차와 같은 제품의 생산 흐름과 로봇의 스케줄링은 매우 복잡하다. 시뮬레이션 및 최적화는 계산 집약적이므로 양자컴퓨팅을 적용하면 앞에서 언급한 것처럼 더 빠른 최적화 실행을 가능하게 하고 생산이 최적화를 보다 동적으로 수행할 수 있을 것이다. 또한 제품 기능이 점점 더 소프트웨어로 정의됨에 따라 소프트웨어 개발을 위한 품질 관리는 점진적으로 정교한 소프트웨어 검증 및 결함 분석에 의존하게 된다. 최신 고급 자동차에는 1억 줄의 코드가 있을 수 있으며, 이는 새로운 상용 여객기보다 훨씬 많다. 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터가 오늘날 평가할 수 있는 것보다 훨씬 더 복잡한 소프트웨어 시스템을 분석할 수 있어야 한다. 공급망은 개별적이고 순차적인 이벤트 중심 프로세스가 있는 선형 모델에서 진화하여 실시간 시장 요구와 주요 구성 요소의 최신 가용성을 기반으로 하는 보다 반응성이 뛰어난 유기적 모델로 전환하고 있다. 양자컴퓨팅을 인더스트리 4.0의 디지털 공급망 도구 상자에 추가하면 잠재적으로 의사 결정을 가속화하고 위험 관리를 강화하여 운영비용을 낮추고 품절 또는 단종 제품으로 인한 판매 손실을 줄일 수 있다. 또한 양자컴퓨팅은 공급업체의 주문을 최적화 할 수 있고, 변화하는 시장의 수요 기반의 근 실시간 의사결정을 통해 물류를 수반할 수 있다.

1. 항공기 디자인 최적화

네덜란드의 Airbus는 유체역학 양자 시뮬레이션이 항공기 디자인에 가장 비용이 많이 드는 물리적 프로토타이밍에 쓰이는 비용과 시간을 줄여줄 것으로 기대하고 있다.[3] 항공기 상승 궤적을 최적화하고 날개 박스의 구조적 안전성을 유지하면서 무게를 최적화하는 설계 과정을 시뮬레이션하기 위해 양자컴퓨터 도입을 검증 중에 있다. 독일 자동차의 거물인 Daimler는 전 세계에 퍼져 있는 생산 시설에서 내부적으로나 외부적으로 직면하고 있는 계산 문제를 해결하는 것을 계획하고 있는데, 이를 위해 Daimler가 Google과의 전략적 파트너십을 통해 Google의 양자컴퓨터를 사용하여 관련된 문제에 대한 최신 솔루션을 찾을 수 있을 것을 기대하고 있다.[8]

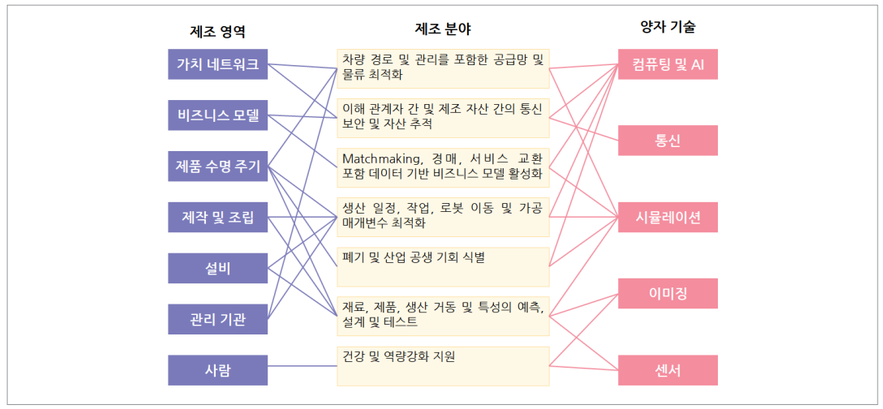
6) https://gesrepair.com/quantum-computing-and-its-role-in-the-future-of-manufacturing
7) https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantum-manufacturing
8) FutureBridge (2020)

그림 III-1-7 양자컴퓨팅 활용 (Airbus)



※ Airbus 홈페이지

그림 III-1-8 제조 영역, 응용 분야 및 양자기술 간 주요 연결



※ Tim van Erp & Bartlomiej Gladysz (2022) 집필진 재구성

2. 차량용 배터리 개발 적용

Daimler는 미국 IBM과 함께 배터리 셀, 자율주행차량 및 그 제공을 위한 새로운 재료를 이해하고 개발 등의 응용 프로그램에 맞는 문제에 대한 솔루션을 제공하기 위해 다양한 방식으로 양자컴퓨팅을 사용할 계획이다. 양자컴퓨터로 리튬 함유 분자를 시뮬레이션하여 오늘날 전기자동차의 리튬전지보다 용량, 지속시간, 가격 면에서 뛰어난 리튬황전지를 개발하고 있는 중이다. 독일의 Volkswagen도 양자 시뮬레이션을 통해 차량 배터리와 신소재 문제를 해결하고자 Google과 협약을 맺었다.[3] 제조 영역, 응용 분야와 양자기술 간 확인된 주요 링크를 요약하면 [그림 III-1-8]과 같이 묘사할 수 있다.[9]

3. 양자지원기술(Quantum Enabling Technology) 사업화

양자 우위 달성을 위해 전세계 연구기관에서 초전도·이온 트랩·다이아몬드 등 다양한 큐비트 제어 시스템을 경쟁적으로 연구개발하고 있다. 국내 여타 연구개발 현장과 마찬가지로 양자기술 분야에서도 미국, 유럽, 일본 등 기술 선진국에서 수입한 장비에 대한 의존도가 높다. 이 분야에서 활동하는 가장 대표적인 기업은 미국의 Tektronix와 Keysight가 있다. Keysight의 경우 초전도체와 이온 기반 양자 컴퓨팅 하드웨어 시스템을 구축하는 데 필요한 초고속 큐비트 제어장비와 양자 상태 측정에 필요한 초정밀 계측장비를 전문 소프트웨어 모듈과 패키지로 구축하여 전자공학이나 컴퓨터공학의 전문인력이 부족한 기업도 양자컴퓨터 개발에 적극적으로 참여할 수 있게 하고 있다. 특히 소프트웨어 모듈의 경우 안정적인 양자 컴퓨팅이 가능하도록 큐비트의 품질을 검사하는 기능, 오류를 보정하는 기능, 벤치마크 알고리듬을 시험하는 기능, 큐비트 제어를 자동화하는 기능 등 다양한 편의 솔루션을 제공한다.

국내에서도 본격적으로 양자지원기술의 장비개발이 진행되고 있다. 양자표준기술 기업인 SDT 주식회사의 경우 한국지능정보사회진흥원(NIA)의 '양자지원기술 기업발굴 및 육성 사업'에 선정되어 최대 20채널, 100 피코초 수준의 시간분해능을 가진 초정밀 복수의 단일광자(Single-Photon) 입력 신호의 동시계수기(Coincidence Counting Unit, CCU), 10Gsps 속도의 큐비트 제어장비, 1ps 분해능의 계측장비 등을 국산화 하고 있다. 계측과 제어장비 뿐만 아니라 초저온 환경 구축, 높은 수준의 안정성을 가진 레이저, 높은 전압/전류 안정성을 가진 전원공급장치(Power Supply) 등 다양한 장비가 시장에서 요구되고 있다. 국내에는 기반 기술과 제조역량을 가진 하드웨어 기업이 많기 때문에 국가기관에서 빠르게 발굴하고 양자지원기술을 빠르게 확보할 수 있도록 지원할 필요성이 있다. 앞으로 예측할 수 있는 산업적 영향 및 파급효과로 양자기술 연구 장비를 통한 '2030년 양자기술 4대 강국 진입'이라는 국가적 목표 달성과 연구 장비의 해외 수출을 기대할 수 있다.

9) Tim van Erp & Bartlomiej (2022)

제 4 절　의료·제약·소재

의료, 제약, 화학, 재료공학 분야에서 양자컴퓨터에 대한 수요가 증가하고 있다. 새로운 화학제품을 개발하려면 막대한 비용과 시간을 들여 연구해야 하는데, 현재 연구소 실험실에서 기존의 화학 시뮬레이션이 도움이 되고 있긴 하지만 분자 간 상호 작용이 복잡해짐에 따라 계산의 정밀도가 낮아진다는 문제점이 있다. 거대 분자를 양자역학적 계의 에너지 계산에서 전자의 움직임 등을 포함한 온갖 파라미터를 반영하려 하면, 고전 컴퓨터에서는 수용할 수 없게 되었기 때문에 분자의 모델링 정밀도가 낮아지거나 정확한 답을 얻는 데 오랜 시간이 걸린다. 하지만, 분자의 모델링 정밀도는 화학공업 및 재료공학 분야에서 매우 중요하기 때문에, 그 정확성이 아주 중요하다. 분자의 반응을 이해하는 데 꼭 필요한 분자의 전자 구조는 수소보다 분자량이 큰 분자에 대해서 전자 간 상호 작용 및 핵 양자 효과 등을 정확하게 파악해야 하는데, 분자를 수학적으로 기술하려고 하면 더욱 복잡해진다. 양자 간 상호작용의 완전한 계산을 기존 방식으로 수행하면, 알고리듬의 규모가 기하급수적으로 증대한다. 하지만 양자알고리듬을 사용하는 경우, 그 성질 때문에 화학 계산의 양이 다항식적으로 증가하게 될 것으로 예상된다.[3] 따라서 양자알고리듬은 현재로서는 실현되지 않은 정확한 분자 계산을 가능하게 만드는 방식으로 고려되고 있다. 예를 들어, 나프탈렌($C_{10}H_8$)은 116큐비트 이하에서 모델링할 수 있지만 고전 컴퓨터에서는 같은 처리를 하는 데 1034비트(2025년까지 전자적으로 보존될 것으로 예측되는 모든 데이터량인 175제타비트의 71억 배)가 필요하다.

양자컴퓨팅은 화학 물질 설계 방법 및 탄화수소 정제 방법, 석유 저장층의 발견 및 채굴 방법을 변혁시킬 가능성이 있다. 양자컴퓨팅에 의해 새로운 화학제품을 개발하여 시장에 투입하는 사이클이 단축되고, 엄격해지는 환경 규제에 대응하는 고도의 투자 전략을 실행할 수 있게 될 가능성이 있다. 여기에는 운송, 정제, 화학 플랜트의 프로세스 등 이익과 직결되는 복잡한 시스템의 최적화 등이 포함된다. 또한 양자컴퓨팅 기술에 의해 저류층 시뮬레이션 및 지진의 탐사도 가능해질 수 있다. 그렇게 되면 화학 및 석유 업계의 상황이 근본에서부터 바뀔 것이다.[3] 현재 전 세계 농업비료 제조에 현재 쓰이는 Haber-Bosch 공정으로 전세계 이산화탄소 1.44%, 온실가스 1%가 배출되고 있는데 Google은 양자컴퓨터를 사용하여 더 효율적이고 친환경적인 화학공법을 개발할 수 있다. 이러한 기능은 전력망 효율을 크게 높여주고 꿈의 물질이라 불리는 고온 초전도체를 연구개발 할 때에도 매우 유용하다.[3]

임상시험, 병상 등록, 전자 진료기록(EHR), 의료기기 등에 의한 정보와 같은 의료 데이터의 양은 연평균 36%의 성장률로 증가하고 있다.[3] 이 데이터는 의료의 4가지 목적인 건강 증진, 의료비용 절감, 환자 체험 향상, 의료 종사자의 노동 환경 개선에 관한 문제를 해결하는 데 크게 도움이 되고 있다. 의료계의 기존 기업과 신규 기업 모두 건강하고 예방적인 행동을 촉진하는 디지털 체험을 창출하기 위해 힘쓰고 있는데, 새로운 데이터가 많이 등장하고, 가능성이 기하급수적으로 증가함에 따라, 기존의 컴퓨팅 시스템의 기능은 한계를 맞이하게 되었다. 양자컴퓨팅을 도입하면 이러한 과제를 해결할 수 있지만, 양자기술을 도입하려면 개념, 스킬 세트, IT 아키텍처, 기업 전략 등에 있어 기존과는 전혀 다른 것들이 요구될 뿐만 아니라 데이터 프라이버시에 관한 책임이 크기 때문에 보안에도 즉각적으로 영향을 미치게 될 것이다. [그림 Ⅲ-1-9]에 기술한 것처럼 의료 업계에서 현재 이루어지고 있는 변혁을 이끄는 주요 양자컴퓨팅은 진단 지원, 맞춤 의료, 보험료와 프라이싱(Pricing), 생물학적 제제 개발 등에 활용이 가능할 것으로 보인다.

그림 Ⅲ-1-9　양자컴퓨팅 활용(의료·제약·소재)



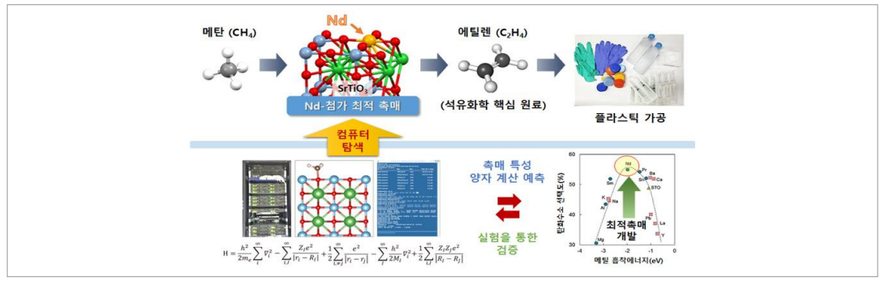
※ 집필진 작성

1. 화학제품 개발 : 촉매 및 계면활성제

화학 및 석유 기업이 양자컴퓨터를 사용하여 새로운 화학적 기법 및 화학 물질을 발견하고 개발하는 데 필요한 시간을 단축하고자 한다. 양자화학 시뮬레이션은 고전 컴퓨터를 병용하는 방법으로써, 이미 프로토타입이 구현되고 있다. 2017년 Nature지에 미국 IBM이 일반에 공개한 양자컴퓨터로 원자량이 작은 무기염류의 수소화리튬(LiH)과 수소화 베릴륨(BeH_2)을 모델링하는 사례가 소개되었다.[3] 2019년 한국 KIST는 [그림 Ⅲ-1-10]에 기술한 것처럼 양자컴퓨팅을 통해 메탄가스에서 에틸렌을 만드는 촉매를 발견하였는데, 이는 범밀도함수 계산법으로 메탄에서 화학제품으로 전환 가능한 촉매를 개발하는 방법으로, 양자컴퓨팅을 활용해 후보 물질을 추리기 때문에 수많은 반복 실험 시행착오를 크게 줄일 수 있었다.[10] 이와 같은 하이브리드법을 응용하면 배출량 감소에 도움이 되는 새로운 촉매나 회수량을 높이는 새로운 계면활성제를 발견하는 등 화학·석유 산업의 과제를 해명할 수 있을지 모른다.

10)　한국연구재단 보도자료 (2019)

그림 III-1-10 양자역학 계산을 활용한 촉매 설계



※ 한국연구재단 보도자료 (2019)

분자 설계 작업에 적용된 양자컴퓨팅의 향상된 예측 능력은 작물 보호 화학 물질의 개발 및 새로운 분자의 특성에 대한 정확한 예측이 개발 속도를 높이는 특수 화학 산업의 많은 부문에서 중요한 응용 프로그램이 될 수 있다.[11] 새로운 고체 상태 재료의 예를 들면, 양자컴퓨팅에 의해 열린 설계 잠재력은 배터리 재료, 반도체, 자석 및 초전도체와 같은 여러 첨단 부문의 신소재 개발에 도움이 될 수 있다. 이와 유사하게 OLED 디스플레이용 발광 분자를 사용하면, 새로운 분자를 만들기 전에 추구했던 색상의 밝기와 색조를 제공할 수 있는 새로운 분자를 높은 정밀도로 모델링하는 것이 가능할 수 있다. 또한 작은 기질의 도킹 에너지에 맞게 조정된 단백질과 가장 잘 상호 작용하는 분자 표적을 식별하고 설계하는 데 새로운 가능성이 열릴 것이다. 오늘날의 컴퓨터는 단백질 구조를 예측하는 능력이 제한적이다. 양자컴퓨팅의 힘을 사용하면 제약 산업뿐만 아니라, 작물 보호 화학물질, 살생물제 및 특수 화학산업의 특정 기타 부문의 개발에 중요한 응용 프로그램과 함께 이러한 종류의 표적 식별에 진전이 있을 수 있다.

양자컴퓨팅은 관련된 복잡한 분자 수준 프로세스에 대한 향상된 이해를 가능하게 하고 이러한 혼합물의 최적화를 지원하여 화학 물질이 지원하는 전체 응용 분야에 대해 보다 효과적인 제품을 만들 수 있도록 지원함으로써 혼합물의 공식화에 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 새로운 세척 제품 공식을 개발하는 것은 오늘날 기술자의 경험, 시행착오 실험 및 이론적 모델의 삼각 측량을 기반으로 한다. 양자컴퓨팅은 세제 분자가 섬유의 와인 얼룩과 상호 작용하는 방식을 정확히 이해하고 이를 제거하기 위한 최상의 활성 성분 및 제형을 식별하기 위한 최적화 계산을 통해 이 프로세스를 도울 수 있다. 즉 양자컴퓨터와 적절한 알고리듬을 사용하는 것은 필요한 계산 시간을 초 단위로 줄일 수 있다. 또한 복합재, 효과 안료 및 디스플레이용 광전자 장치와 같은 복잡한 어셈블리의 관련 영역에서 개발 작업을 도울 수 있다. 이를 위해서는 시뮬레이션, 최적화 및 인공 지능을 결합하여 사용할 최상의 재료(두께, 농도 및 구조)를 식별하는 하이브리드 접근 방식이 필요하다. 이 모든 것이 양자컴퓨팅에 의해 직접 매핑될 수 있다. 일부 화학 업체는 이미 이 분야에서 기존 컴퓨팅 방법을 사용하여 TV 및 스마트폰 디스플레이에 사용할 OLED 아키텍처를 개발하고 있다. 여기에서 양자컴퓨팅 기능을 활용하면 연구 프로세스를 상당히 가속화할 수 있을 것이다. 양자컴퓨팅 기반 시뮬레이션을 사용하여 반응 메커니즘을 더 잘 이해하고 개선된 촉매를 설계하며 공정 조건을 최적화할 수 있다. 확률적 양자컴퓨팅 기반 AI는 부산물 생성을 줄이고 수율을 최적화하기 위해 프로세스 조건을 미세 조정하는 데 도움이 되는 비직관적 데이터 상관관계를 찾는 데 사용할 수도 있다.[11]

그림 III-1-11 화학산업의 양자컴퓨팅 적용 단계

단계	화학 물질 설계[1]	제품 설계[2]	공급망	생산	마케팅
잠재적인 영향	Early killer application	Early killer application	성숙한 양자컴퓨팅	**잠재적인 조기 적용**	성숙한 양자컴퓨팅
사용되는 양자도구	• 양자시뮬레이션 • 최적화 • 양자 AI[3]	• 양자시뮬레이션 • 최적화 • 양자 AI[3]	• 최적화	• 양자시뮬레이션 • 최적화 • 양자 AI[3]	• 최적화
응용 예제	• 실험실 작업 감소 및 필요한 특성을 가진 분자 및 고체 재료 설계 • 더 나은 활성 성분 제작 위해 컴퓨터 사용한 단백질 모양 정의	• 어떻게 성분이 프로세스에 영향 미치는지, 복잡한 혼합물이 작용하는지 모델링하여 효과적인 제형 발견	• 비용 저감 위한 공급망 및 물류 센터 최적화 위해 양자컴퓨팅 사용	• 新 촉매제 발견 및 더 나은 반응 이해를 통한 수율 향상 및 부산물 발생 억제 • 열/질량 수송에서 복잡한 최적화 문제를 풀기 위한 양자 알고리즘 사용	• B2B/B2C 소비자 관계를 다루는 것을 돕기 위한 양자 AI 사용

1) 새로운 분자들, 2) 공식 및 복잡한 어셈블리, 3) Artificial Intelligence

※ Florian Budde & Daniel Volz (2019) 집필진 재구성

2. 원료 운송, 정제, 제품 시장 투입 프로세스의 최적화

분자 모델링에 채용되고 있는 해밀토니안(Hamiltonian) 기법은 운송, 공급체인의 로지스틱스, 투자 포트폴리오의 최적화 등 다양한 최적화 문제에도 적용가능하다. 예를 들어, 화학 및 석유 기업이 양자컴퓨팅을 통해 원료 운송, 정제, 제품 시장 투입 프로세스의 최적의 조합을 찾아냄으로써 그 이익을 확대할 수 있다. 정제에 대한 영향은 옥탄(Octane)가로 인한 추정 연간 사업 손실액으로 파악할 수 있는데, 옥탄 및 증기압이 규정된 수준을 넘으면서 생기는 연간 손실액은 미국이 49억 달러, EU은 42억 달러에 달하는 것으로 알려져 있다.[3]

11) Florian Budde & Daniel Volz (2019)

3. 저류층의 채굴량 확대

미국이 세계 최고의 에너지 산출국이 된 방법인 미생물 또는 나노입자를 유전 저류층의 공극에 주입하는 방식인 나노 공극을 사용하는 비재래형 저류층 개발에서는 양자컴퓨팅이 저류층에서의 분자 수준의 물리 특성을 탐색할 수 있게 함으로써, 지하를 이해하고 저류층 시뮬레이션의 신세대를 개척할 수 있게 한다. 비재래형 저류층에서는 액체 석유가 가스 등의 침투율이 높은 성질인 것처럼 움직이는데 거기서는 단쇄의 탄화수소가 우선적으로 회수되며, 장쇄의 탄화수소는 뒤에 남는다. 양자컴퓨터를 활용하여 석유, 물, 가스의 분자와 암석 표면의 상호 작용을 분자 수준으로 모델링하는 것은 다르시 유동과 비다르시 유동의 차이를 낳는 물리 특성을 해명하는 데 도움이 될 뿐만 아니라 만약 해명된다면, 상당한 이익이 창출될 것이다.[3] 예를 들어, 유정(油井)의 수를 10% 줄일 수 있으면, 비재래형 석유를 생산하는 미국의 상위 32개사의 온라인 현금 유통은 10억 달러의 순손실(2018년 1월~9월)에서 80억 달러의 흑자로 전환되게 될 것이다.

4. 진단지원 서비스

빠르고 효율적으로 정확한 진단을 할 수 있게 되면, 성과가 향상하고, 치료비용도 줄일 수 있다. 예를 들어, 결장암을 조기에 발견하게 되면 생존율이 9배 상승하며, 치료비는 4분의 1이 된다.[3] 하지만 다양한 증상을 대상으로 하는 현재의 진단 방법은 복잡하고 비용이 많이 들어가고, 한 번 진단이 확정된 후 5~20%는 오진일 것으로 추정된다. 방대한 양의 건강 매개변수, 유전 정보, 감각 데이터 및 기타 건강 정보가 제공되는 양자컴퓨터를 사용하여 조기에 정확하고 효율적으로 진단하면 환자의 미래 건강에 대한 포괄적인 예측을 제공할 수 있다.[12] 양자컴퓨팅을 통해 엣지 검출이나 화상 매칭과 같은 처리 순서의 한 부분에서 의료 화상 분석의 정밀도를 향상할 수 있을 가능성이 있다. 분석 정밀도가 개선되면 화상에 근거한 진단의 정확성이 크게 향상될 것이다. 또한 최신 진단 방법에는 싱글셀(Single Cell) 분석이 도입되기도 한다. 특히 유세포 분석과 싱글셀 시퀀스 데이터를 이용하여 다양한 기법을 통해 취득한 데이터 세트를 통합하는 경우에는 고도의 분석 방법이 필요하다.

그림 III-1-12 의료 분야 응용(QpiDHDE)



※ QpiDHDE (2021)

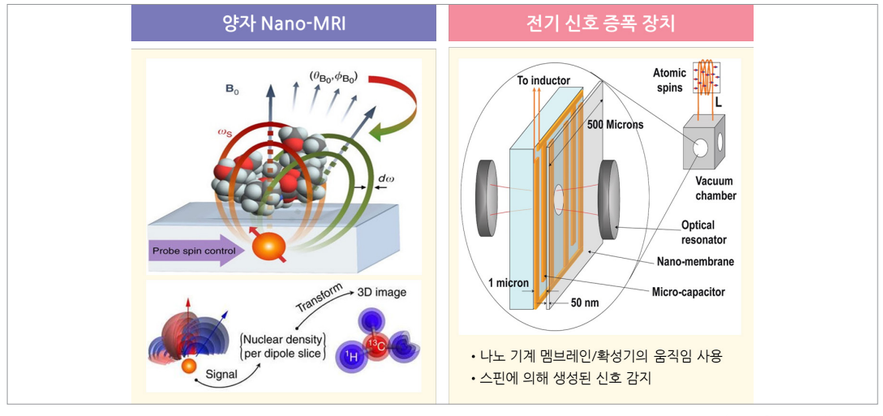
다수의 물리적 특성과 생화학적 특성에 근거하여 세포를 분류하는 경우가 있다(이러한 특성들에 의해 예측 인자가 존재하는 추상 공간인 특징 공간 고차원으로 커지게 된다). 이러한 분류는 암 세포를 정상 세포와 구별할 때 중요하다. 양자 서포트 벡터 머신 등의 양자컴퓨팅을 이용하는 기계학습 접근방식을 통해 분류 정밀도가 향상되면, 싱글셀 분석 진단 방식이 크게 발전할 것으로 기대된다. 또한 바이오 마커를 검출하고 동정할 때는 게노믹스, 전사체학, 프로테오믹스(Proteomics), 대사체학(Metabolomics)과 같은 복잡한 오믹스를 통해 데이터 세트를 분석해야 한다. 이러한 데이터 세트는 큰 특징 공간을 동반할 뿐 아니라 다수의 특징량의 상호 작용에 의해 기존 컴퓨팅 방식으로는 검출하기 어려운 상호 의존성, 상관성 및 패턴이 발생한다. 바이오 마커에 의한 지식을 개인 수준으로까지 적용하려면, 더욱 고도의 모델링이 필요하다. 이러한 특징은 양자컴퓨팅이 바이오 마커의 검출, 더 나아가 개인 수준의 검출에 도움을 줄 가능성이 있음을 시사한다. 양자컴퓨팅을 통해 의료 종사자의 진단 정밀도가 향상할 뿐 아니라 침습적 진단 검사를 반복할 필요가 없게 된다. 개인의 건강 상태를 지속적으로 관찰하고 분석할 수 있게 되면, 환자의 부담을 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 의료 보험 업자 및 의료 종사자는 조기 진단을 통해 치료비를 절감할 수 있다는 장점을 얻을 수 있다. 또한 메타 분석을 통해 더욱 정교한 진단 순서를 실현하여, 실시하는 진단의 내용과 타이밍을 판단할 수도 있게 된다. 이로 인해 의료비를 더욱 절감할 수 있으며, 의료 보험자와 행정기관은 현재보다 더욱 상세한 데이터를 바탕으로 의료 종사자와 환자를 위한 의사 결정을 내릴 수 있게 될 것이다.

또한 양자센싱 기술을 적용한 양자현미경 및 양자내시경 제작을 통해 진단 분석이 더욱 빠르고 용이해질 것으로 보인다. 현재의 광학현미경으로 가시적 관찰이 불가능한 대상을 센싱하기 위해 양자이미징 또는 자기장 센서 기반의 양자현미경 개발의 필요성이 대두되고 있다. 양자이미징 시스템은 현재의 광학현미경 대비 최소 10배 이상의 분해능이 확보될 수 있을 것으로 보기 때문에, 바이러스 단위의 반응을 동영상으로 촬영할 수 있는 해상도 수준의 구현이 가능할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 2021년 호주 퀸즈랜드대학교 연구팀은 세계 최초로 양자얽힘 기반 센서가 적용된 양자현미경 개발을 발표하였는데, 양자얽힘 현상을 활용하면 세포의 손상없이 뛰어난 선명도를 가질 수 있음을 확인되었다. 한국은 2019년까지 KIST에서 양자센서의 고신뢰도 동작을 위한 양자광원 기술 개발에 관한 연구가 진

12) QpiDHDE (2021)

행되고 이후 양자센서의 분해능과 효율을 높이기 위한 고효율의 단일광자광원 생성과 제어기술 및 신뢰성검증 플랫폼 개발로 추진되었다. 또한, ETRI에서는 바이러스 단위를 관찰할 수 있는 고해상도의 양자현미경에 관한 과제를 수주하여 연구를 시작하고 있다. 이러한 양자이미징 시스템은 내시경에 장착되어 있는 현미경을 대체함으로써, 셀 단위의 국소적인 부위를 관찰하는 정밀 의료행위의 구현을 기대할 수 있고 바이러스 단위의 현미경 영상 촬영 기술 구현과 의료분야의 검사장비에 양자이미지 센서의 적용을 통해 보다 정확한 진단을 할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 최고 수준의 성능 구현이 가능한 3T급 MRI의 경우 최소 2cm 크기의 미세암을 진단할 수 있는 해상도를 가지는 반면 양자기술이 접목된 MRI는 최소 5㎛ 크기의 미세암을 진단할 수 있는 해상도의 구현이 가능함에 따라, 질병의 조기진단이 가능하고, 기존의 PCR 과정을 통한 조직검사 및 시료분석을 거치지 않고 진단검사 의학적 결과의 확인이 가능할 것으로 기대된다. 캐나다 워털루대학교 양자컴퓨터 연구소(Institute for Quantum Computing, IQC)에서는 양자 프로세서로 다이아몬드 결함을 사용하는 형태의 새로운 MRI 기술을 연구개발 중이며, 한국표준과학연구원(KRISS)은 2019년부터 자기장 변화에 민감하게 반응하는 양자 스핀·초전도·원자 간섭효과를 이용하여 초고감도의 공간 분해능을 갖춘 자기장 센서 개발 연구를 진행 중이다. 양자 MRI의 도입으로 0.05mm 이하의 미세암 발견을 실현화하고, 이로써 기존 대비 100배 이상 정밀 의료행위의 구현을 기대할 수 있다.

그림 III-1-13 양자 MRI 응용 예



※ Lisa Zyga(2016), NIST(2012)

5. 보험료와 프라이싱(가격책정, Pricing)

의료보험료를 결정하기 위해서는 의료보험의 일반적인 가격 전략 구축 프로세스를 위해 여러 가지 복잡한 요소를 고려해야 한다.[3] 이러한 요소에는 집단의 건강 수준과 질병 위험, 치료의 적절성과 비용, 기업 전략과 규제에 근거한 의료 보험 위험 허용도 등이 있으며, 이들은 서로 복잡한 상호의존 관계를 갖는다. 의료보험 분야는 고전적인 데이터 사이언스 공법을 응용함으로써 발전해 왔는데, 불확실성을 더욱 절감하는 보다 입도가 조밀한 모델을 구축하는 일은 여전히 어려운 편이다. 보험위험 분석은 가격책정 최적화에 있어 양자컴퓨팅이 활용될 것으로 보이는 유력 분야 중 하나다. 집단 수준의 질병 위험에 관한 통찰을 양자 위험 모델과 조합하여, 경제적 위험을 더욱 효율적으로 계산함으로써 의료보험의 위험 모델과 가격책정 모델은 더욱 세련될 것으로 판단된다. 가격을 결정하는 데 기여하는 양자컴퓨팅의 또 한 가지 중요한 용도는 부정행위 감지이다. 현재 의료 사기로 인한 피해가 미국에서만도 수천억 달러에 달한다. 고전적인 데이터 마이닝 방법도 의료 사기를 검출하고 줄이는 데 도움을 주고 있지만, 계산 효율이 더 높은 방법이 필요해지고 있다. 양자 알고리듬은 일반적인 것과는 다른 행위를 찾아내고 의료비용의 부정 청구를 배제하기 위한 고도의 분류와 패턴 검출을 실현할 수 있게 될 가능성이 있다. 부정 청구로 인한 손실을 방지하는 체제가 강화되어 비용이 절감된다면, 의료보험은 가격 전략을 더욱 최적화하여 더욱 저렴한 보험료를 제시할 수 있게 될 것이다. 가격 계산 기능의 강화는 평균 보험료를 절감할 뿐 아니라 계약자 한 사람 한 사람에게 맞는 보험료를 선택할 수 있게 한다. 의료의 복잡성은 가격 전략을 알기 쉽게 해야 한다는 과제를 통해 드러난다. 투명성을 실현하고 평균 의료비용을 절감할 것이 요구되는 각종 새로운 규제에 의해, 가격책정 모델을 최적화하는 것의 중요성이 한층 높아지고 있다.

6. 맞춤 의료 서비스

맞춤 의료의 목적은 예방과 치료의 접근방식을 개인에 맞게 조정하는 것이다. 맞춤 의료에서는 인체 생물학의 복잡성에 더하여 표준 치료를 뛰어넘는 다양한 측면을 고려해야 한다.[3] 실제로 의료행위의 성과에 대한 상대 공헌도는 10~20%밖에 되지 않으며, 나머지 80~90%는 건강에 관한 행동, 사회 경제적 요인, 환경 요인이 차지한다. 이러한 다양한 기여 요인 간의 상호 의전성과 상관관계 때문에, 최적의 치료 효과를 계산하여 산출하는 것은 매우 어려운 일이다. 그 결과 기존의 치료는 대부분 개인차 때문에 의도한 결과를 달성하지 못하고 있다. 예를 들어, 항암제 치료는 3분의 1의 환자에게만 효과를 나타낸다. 또한 유럽에서만도 매년 20만 명의 환자가 의약품의 부작용으로 사망하는 등, 의약품 치료가 비참한 결과를 가져오기도 한다. 의료 접근방식을 조정할 때 중요한 것은 미래를 내다보는 예방적인 대응이다. 앞서 기술한 것처럼 양자컴퓨팅의 활용으로 조기 치료와 예방적 개입으로 인해 성과가 극적으로 개선되고 비용이 최적화될 수 있다. 기존의 기계학습에서도 다양한 환자 그룹의 장기적인 질병 위험을

전자건강기록(Electronic Health Record, EHR)에 근거하여 예측할 수 있을 가능성이 있음을 시사하고 있다. 그럼에도 여전히 여러 가지 노이즈, 관련된 특징 공간의 크기, 특징 간의 복잡한 상호 작용과 같은 EHR 및 그 밖의 의료 관련 데이터의 특성으로 인한 문제가 존재한다. 이것을 양자컴퓨팅을 이용하는 지도 기계학습과 비지도 기계학습의 기술을 통해 더욱 빠르게, 더욱 정확하고 자세하게 위험을 예측할 수 있을 가능성이 있다. 장기적으로는 개인의 데이터 스트림에 근거한 지속적인 가상 진단을 통해 특정한 증상에 대한 개인의 위험의 경시적 변화를 의료 종사자가 이해할 수 있는 도구도 생겨날 것이다. 하지만 개인의 질병 위험을 파악하는 것만으로는 부족하다. 대상이 되는 개인에게 효과적으로 의료 개입하는 방법을 아는 것도 또한 중요하다. 그 방법 중 하나가 세포 수준의 의약품 감수성 연구이다. 예를 들어, 암세포의 게놈 특징과 의약품의 화학적 특성을 고려하여 암 치료약의 효과를 디테일하게 예측하는 모델이 이미 연구되고 있다. 양자컴퓨팅을 사용하는 기계학습을 이용함으로써 이러한 분야의 연구를 비약적으로 가속화시켜, 최종적으로는 의약품의 인과관계를 추론하는 모델을 구축하게 될 가능성이 있다. 맞춤 의료는 개입과 치료, 성과의 관계를 특정하여 설명함으로써 개인 수준으로 차선의 의료 조처를 취한다는 매우 높은 목표를 내걸고 있다. 기존에 환자의 질병을 진단할 때는 주로 환자가 호소하는 증상을 바탕으로 진단이 이루어졌다. 그러려면 시간이 오래 걸리고, 포괄적인 진단과 치료를 하다 보니 실패하는 일이 있었다.

[그림 Ⅲ-1-14]처럼 현재는 의료 관련 데이터를 통한 지식을 추가로 취득하여, 정확한 건강 상태를 효율적으로 특정하고, 맞춤화된 개입을 하는 방법으로 전환되고 있다. 이것을 완전하게 실현하려면 아직 시간이 걸리지만, 양자컴퓨팅을 이용함으로써 새로운 틀에 맞는 진보를 가속화 할 수 있을 것으로 보인다. 그 틀이 실현되면, 의료기관은 지속적인 치료를 하면서 최적의 맞춤화된 의료 서비스를 제공할 수 있게 될 것이다. 또한 특정한 개인에 대한 차선의 의료행위에 관한 의사 결정에서는 규칙을 준수하고 환자와의 관계를 형성하는 일을 중요한 요인으로 고려해야 하는데, 고도의 컴퓨팅 모델에 의해 이러한 영역에도 대응할 수 있을 것으로 보인다. 예를 들어, 규칙 준수 데이터를 분석함으로써 개인에게 가장 알맞은 개입 타이밍을 도출할 수 있어 최종적으로는 이러한 수준의 건강관리를 집단적으로 수행할 수 있게 될 것이다.

그림 Ⅲ-1-14 맞춤 의료의 포괄적 및 정확성에 근거한 접근방식



※ 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

가. 게놈과 결과를 연결하여 맞춤 의료 실현

15년의 기간과 27억 달러의 투자를 통해 인간 게놈 배열을 정확하게 분석할 수 있게 되면서 게놈 배열을 분석하는 데 사용되는 비용이 줄어들게 되어 오믹스(Omics) 시대가 도래하게 되었다. 게놈의 일차 배열을 이해하는 것은 더이상 제약되지 않고, 더 나아가 새로운 계산 도구의 장점을 활용하여 게놈 배열이 기능하는 메커니즘을 더 깊이 이해하는 연구가 수행되고 있다. 하지만 약 30억 개의 DNA 염기쌍을 가지는 인간 게놈의 규모, 개체군 안에 존재하는 다양성, 건강 결과의 다양성으로 인해 기존의 접근방식을 통한 연구에는 한계가 발생했다. 이를 해결하기 위해 게노믹스와 양자컴퓨팅을 동시에 적용할 수 있는데 그 영역은 [그림 Ⅲ-1-15]와 같이 고려할 수 있다.[3] 약리 게노믹스 시험에서 유기체를 나타내는 디지털 트윈을 사용함으로써 특정한 의약품에 대한 개인의 경시적 반응을 예측하여, 환자의 증상에 맞는 치료가 가능한 정밀 의료의 발전을 촉진시킬 가능성이 있다.[3]

그림 Ⅲ-1-15 게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역

모티브 발견과 예측	게놈 와이드 관련 분석(GWAS)	De Novo 구조 예측
• 유전자 제어 메커니즘 해명 : DNA, RNA, 아미노산의 배열 속의 유전자 발현 활성화/억제 패턴 특정 • 양자 최적화 알고리즘 적용 : 전사 인자의 결합과 De Novo 게놈 어셈블리에 대한 이해 심화	• 특정한 형질/질병과 DNA 단일 변이와의 관련성 • 실험을 통한 검증이 필요한 유전자 후보 수 크게 간추릴 수 있음 • 전자 네트워크와 그래프 모델 발전 가능	• RNA 분자, 단백질, DNA 단백질 복합체 등의 구조 예측 정밀도 극적으로 향상

※ 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

나. 저분자 제약의 효율성 강화를 통해 환자의 결과 개선

저분자 의약품 설계와 저분자 제약은 언제나 복잡한 최적화를 필요로 하는 과정이다. 그 목표는 질병과 관련된 표적에 대한 활성을 가진 새로운 분자를 설계함과 동시에 체내의 수천 개에 달하는 다른 표적에 대한 활성을 절감함으로써 부작용과 위험한 독성을 피하고 환자의 결과를 개선하는 것이다.[3] 이러한 목표를 달성하기 위해 일반적으로는 106~200,000개 이상의 화합물이 실험 및 연산 작업 흐름에 의해 1차로 걸러지고, 수천 개의 화합물을 생산한 다음 필요한 시험 하나가 수행된다. 주로 이 영역에서는 선발과 분자 구조의 유사도 산출 및 분류 접근방식과 표적 기반 분자 화합물 설계에 활용되는 정교한 에너지 계산에서 장기간에 걸쳐 컴퓨팅이 이용되어 왔다. 양자컴퓨팅을 활용함으로써 평가 대상의 후보 분자 수가 증가할 것으로 기대된다. 예를 들어, 리드 화합물의 발견 및 오프타깃 스크리닝(Off Target Screening)에 적용되는 분류 방식을 사용하여 이러한 후보 분자를 더욱 정교하게 평가할 수 있다. 또한 리드 화합물을 발견하고 최적화할 때 오프타깃 모델링과 관련된 분류나 3D 단백질 구조 또는 최적의 모델을 이용할 수 있다면, 리드 화합물을 최적화할 때 실행되는 물리 기반 모델링에도 효

과를 줄 것으로 기대된다. 지금까지 과학 문헌에서 보고된 약 107 종류의 유기물질과 무기물질 외에 약리 활성을 가졌을 가능성이 있는 분자를 조사하는 것은 매우 중요하다. 실제로 생체에 가까운 분자량을 가진 것으로 보이는 탄소계 화합물은 총 1,060개 정도가 있다. 이처럼 방대한 미지의 화학적 영역이 탐색되지 않고 남아 있기 때문에 이 분야가 큰 가능성을 가지고 있음은 틀림없는 사실이다. 분자 화합물의 평가는 단백질 리간드 복합체의 분자 동력학 시뮬레이션을 통해 정교해진다. 이러한 영역에서 양자컴퓨팅은 양자역학 및 분자역학에 의한 하이브리드 접근방식과 고전 컴퓨터상에 존재하는 기본 파라미터의 도출을 위한 강력한 도구가 될 것이다. 이러한 발전은 리드 화합물의 최적화와 성장 분야인 계산 프로세스 화학 모두에 응용될 것으로 보인다.

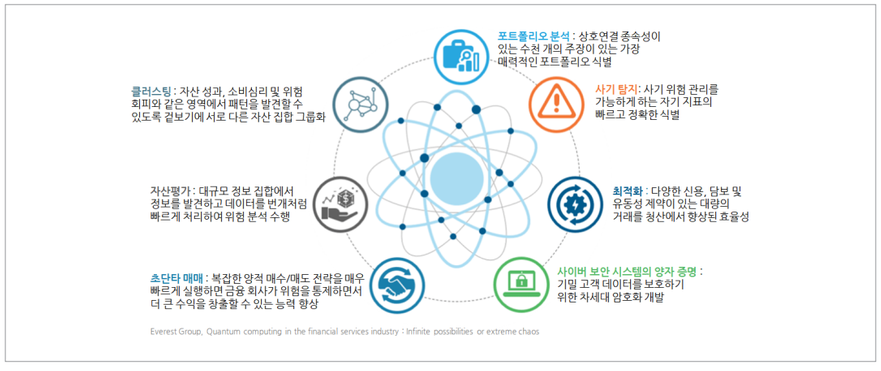
7. 새로운 생물학적 제재 개발

바이오 의약품에서는 단백질 등의 고분자가 의약품이 되는데, 항체, 인슐린, 수많은 백신과 같은 바이오 의약품이 수십 년에 걸쳐 사용되어 왔다. 최근에는 여러 가지 질병을 치료하고자, 바이오 의약품에 착안하는 제약회사가 증가하고 있고 바이오 의약품의 3D 구조 설계는 기능, 특이성 및 안정성에 있어 중요한 역할을 한다.[3] 레빈탈(Levinthal)의 역설에서 설명하는 것처럼 현실 세계의 단백질 모델링 케이스에서는 단백질 사슬의 길이에 따라 기하급수적으로 증가하는, 이론상 존재할 수 있는 방대한 수의 구조 단백질을 탐색해야 한다. 따라서 그 구조를 고전 컴퓨터상에서 특정하는 것은 어려운 일이다. 하나의 모델에서 20개의 아미노산 사슬과 100개의 아미노산 사슬에서 존재할 수 있는 구조는 각각 1,028개와 1,047개인데, 미국 FDA의 바이오 의약품의 정의에 따르면, 단백질은 40개 이상의 아미노산으로 구성되어야 한다. 대부분의 단백질은 이미 알려진 단백질 구조와의 유사성에 근거하여 정확하게 모델링할 수 있다. 양자컴퓨팅은 이론상 존재할 수 있는 방대한 구조 중에서 가장 정확도가 높은 구조를 특정하는 등 단백질 입체 구조 예측의 수많은 계산상의 과제를 극복할 가능성이 있다. 또한 최근 격자에 있는 2개의 일반적인 구조(α헬릭스와 β시트)의 펩타이드를 양자컴퓨팅에 의해 작성할 수 있음이 증명되며, 단백질 구조와 단백질의 역장 계산을 탐색하는 데 양자 알고리듬을 활용할 수 있다는 가능성을 보여주었다.

제5절 금융

안보와 국방 외에도 양자암호통신의 이론상 완벽한 보안에 제일 먼저 관심을 보이는 곳은 금융산업으로, 다양한 금융 관련 문제, 특히 불확실성 및 제약 조건부 최적화를 취급하는 문제에 대한 응용에 있어서 양자암호통신기술은 빠르게 도입한 금융기관이 선구적 이익을 얻을 것으로 보인다.[13] 금융산업은 고객의 개인식별 정보를 포함한 금융거래 데이터를 처리하기 때문에 보안을 최우선으로 삼는다. 재무 포트폴리오 최적화를 위해서는 최적의 자원 할당 및 경로 선택을 통해 목표의 최댓값 및 최솟값을 찾는 조합 최적화 기법을 적용하는 것이 유리하고 재무 위험관리나 마케팅과 고객 세분화를 위해서는 선형대수학을 이용하여 클러스터링, 패턴, 매칭 관련 기계학습을 적용하여야 하며, 암호해독을 위해 인수분해 기법을 적용해야 한다.[3] 현재 가장 가능성을 보이는 방법 중 하나는 양자컴퓨팅을 무작위 통계적 샘플링 기법인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)에 적용하는 것이다. 이는 관련 자산의 가격이 시간의 흐름에 의한 변동에 따라 금융자산의 가격을 결정하는 방식으로 운영되기 때문에, 다양한 옵션, 주식, 통화 및 상품에 내재된 위험을 복합적으로 고려해야하므로 처리 데이터가 많아질수록 정확도가 높아진다. 이처럼 양자컴퓨팅 기술은 복잡한 연산을 효율적으로 해결하는 방안을 통해 금융을 포함한 보험산업에서 포트폴리오 최적화, 위험 프로파일링 및 통합, 고객 타겟팅 및 상품추천, 사기 탐지 영역을 변화시킬 것으로 예상되고 있다. 광범위하게 상용화하기까지는 시간이 더 걸릴 것으로 보이지만, 양자컴퓨팅은 3~5년 안에 특정한 비즈니스의 문제를 해결할 수 있는 상품 및 서비스를 창출해낼 것으로 기대되고 있다.

그림 III-1-16 은행과 금융서비스에서 양자컴퓨팅의 잠재적 적용



※ Everest Group (2018) 집필진 재구성

13) IRS Global (2022)

기존 컴퓨터의 한계와 비용으로 인해 시장의 변동성을 반영하는 포트폴리오 재조정이 어려웠지만, 양자컴퓨팅으로 포트폴리오 최적화가 가능할 것으로 기대되고 있다. 미국 JP Morgan, Goldman Sachs 및 Wells Fargo 등 금융서비스 업체들은 은행 업무의 효율성을 개선하기 위해 양자컴퓨터의 잠재력을 적극적으로 분석하고 있다.[3] 미국 JP Morgan과 영국 Barclays 은행 등은 IBM과 파트너십을 맺어 양자컴퓨터 거래 전략, 포트폴리오 최적화, 자산 가격 결정, 위험 요인 분석 등을 포함해 금융 산업 전반에 양자컴퓨터 기술을 도입하기 위한 연구를 진행하고 있다. Goldman Sachs는 QC Ware, IonQ와 협력하여 양자 알고리듬을 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 시연하였는데 계산 속도를 최대 1,000배까지 증가시킬 수 있었다. 그러나 현재 사용되는 양자 프로세서의 오류 수준이 매우 높기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션을 효율적으로 실행하는 데 필요한 오류 수정 양자 하드웨어를 사용할 수 있기까지 10~20년이 걸릴 것으로 예상하고 있다. 또한 Basel III, Solvency II와 같은 자본건전성 규제를 준수함과 동시에 위험 관리를 위해 수행되는 정교한 시뮬레이션을 통해 위험 프로파일링과 통합 가능할 것으로 예측되고 있다.[3]

최근 독일 증권거래소도 양자컴퓨터를 도입해 기존에는 슈퍼컴퓨터로도 10년이 걸리던 각종 위험 분석 업무를 30분 이내로 줄이겠다는 방침을 밝혔다. 이들은 2018년 설립된 독일 양자컴퓨터 회사인 JoS Quantum과 공동으로 양자 알고리듬을 이용해 금리변화, 무역 분쟁 등 거시경제의 변화에 의한 금융시장의 충격을 예측하고 분석할 계획이다.[13] 고객 타겟팅 및 상품추천을 위해 양자컴퓨터를 이용한 머신러닝 알고리듬 훈련을 강화하여 고객의 행동데이터를 분석하고, 고객의 선호도 예측 및 정확한 타겟팅이 가능하다. 뿐만 아니라 금융사기 탐지 오탐률이 80%에 이르는 기존 컴퓨터 대신 양자컴퓨터를 이용하여 머신러닝의 신경망으로 패턴을 인식하고 보다 빠르게 자연어를 처리하면 사기 탐지율을 향상시킬 수 있을 것이다. 금융권은 양자기술이 언제 주류로 자리 잡을 것인가에 대해서는 논쟁의 여지가 있다고 하면서도 예상보다 빨리 변화가 일어날 수 있기 때문에 행동에 나서야 한다고 인지하고 있다. 사이버 범죄자들이 양자기술을 은행 시스템 공격 시 사용할 가능성도 있기 때문에 양자 안전 암호 인프라에 대한 투자도 필요할 것이다.[14]

또한 글로벌 보험산업은 펀딩 참여, IT기업과의 협력을 통해 양자컴퓨팅 기술 적용에 관심을 보이고 있으며 양자기술 준비 상태를 3~5년으로 잡고 IT 전략 로드맵에 통합하기 시작했다. 독일 AllianzX는 스코틀랜드왕립은행과 함께 시리즈B 펀딩 라운드에서 양자컴퓨터 스타트업 1Qubit에 4,500만 캐나다 달러를 투자하였고, 영국 다국적 보험 자문 회사인 Willis Towers Watson은 금융 서비스, 보험 및 투자 분야에서 위험 관리와 보험 고객을 위해 양자컴퓨터 기술의 잠재력을 개발하고자 미국 Microsoft와의 협력을 체결하였다.[3] [그림 Ⅲ-1-17]에 묘사한 것처럼, 현재 양자기술을 적용하여 금융서비스를 개발하는 대기업으로는 Amazon, IBM, Google, Honeywell, Microsoft, Mphasis, Willis Towers Watson이 있고, 스타트업으로는 Agnostiq, CQC, D-Wave, IDQ, IonQ, ISARA, 1Qbit, Multiverse, Post-Quantum, QCWare, Q→Nu, QuantiCor, Quantum Xchange, Quintessence Labs, Rigetti, Shield, Strangeworks, Xanadu, Zapata 등이 있다. 이들은 현재 금융서비스의 핵심기술 개발, AI & 리스트 모델링 및 보안기술 개발에 역량을 집중하고 있다.

그림 Ⅲ-1-17 양자기술 적용 금융서비스 개발 기업



※ AiteNovarica (2021), https://aite-novarica.com/report/quantum-technology-and-insurance

1. 타겟팅과 예측

오늘날 금융 서비스 시장의 고객은 그들의 니즈 및 행동 변화를 빠르게 예측하는 맞춤화 상품이나 서비스를 요구한다. 중소 금융기관의 25%가 고객 체험을 경시한 상품 및 서비스 때문에 고객을 잃고 있다. 고객의 행동 패턴은 복잡하며 그와 관련된 다양한 측면을 놓치게 되면, 금융기관이 최적의 특징을 선택하여 앞서나가는 상품을 제안할 수 없다. 이것은 기존 고객의 지출 점유율 확대 및 전 세계의 17억 명의 은행 계좌를 가지지 않은 성인에 대한 접근할 수 있는 기회를 잃게 만든다. 이러한 문제는 부정행위를 찾아내는 데에도 존재한다. 몇 가지 추산에 따르면, 금융기관은 불충분한 데이터 관리 방법에 의해 최대 연간 100억 달러의 수익을 잃고 있으며, 2020년에는 부정행위로 인한 손실액의 합계가 560억 달러에 달했다. 부정 감지 시스템은 여전히 매우 정확도가 낮으며, 오검출률이 약 80%이기 때문에, 금융기관이 위험을 회피하도록 만들고 있다. 신용 점수의 타당성을 확실히 하기 위해, 고객이 신규 등록하는 데 12주가 걸리는 곳도 있다. 디지털 시대인 오늘날 은행 거래의 70%가 디지털화되어 있으며, 고객은 그렇게 오래 기다리지 못한다. 신규 고객과의 관계성을 획득하는 데 시간이 너무 많이 걸리는 금융기관은 보다 민첩한 경쟁 업체에 고객을 빼앗기게 된다. 양자컴퓨팅은 고객 타겟팅과 예약 모델에 큰 변혁을 가져다줄 가능성이 있다. 양자컴퓨터의 데이터 모델링 기능은 데이터 구조의 복잡함이라는 과제 때문에 현재는 불가능한 패턴 검출, 분류 및 예측에 있어 우위성을 드러낼 것으로 기대된다.[3]

14) 강진규 (2022)

2. 리스크 프로파일링

금융기관에는 균형 잡힌 리스크 테이킹(Risk taking), 효과적인 헤지 거래, 그리고 광범위한 스트레스 테스트에 의한 규제 요건에 대해 더욱 더 준거할 것이 요구된다. 유동성 관리, 디리버티브 가격 설정, 그리고 위험 계측은 복잡하고 난해한 계산이 될 때가 있어, 거래 위험의 비용을 적절하게 관리하기 어렵다. 현재 몬테카를로 시뮬레이션은 금융 모델에서 위험 및 불확실성의 영향을 분석하는 데 많이 사용되는데, 추정 오차의 스크리닝에 대한 제약이 있다. 금융기관의 모든 위험을 시뮬레이션하려면 가외의 비용이 들어갈 가능성이 있으며, 선택지로서 수많은 포트폴리오를 포함하면 시뮬레이션을 완료하기 위해 다수의 샘플과 많은 시간이 필요하다. 향후 Basel III 및 재검토 등 규제, 지령 및 기준이 잇달아 개정될 것으로 보인다. 이로 인해 더 많은 위험 관리의 스트레스 시나리오가 필요해지게 된다. 결과적으로, 규제를 위반하는 경우의 벌금 및 시정 대응을 포함한 컴플라이언스 관련 비용이 몇 년 후면 2배 이상으로 증가할 것으로 예측된다. 금융기관은 더욱 고도의 위험 프로파일링 요구와 규제 강화에 직면해 있다. 양자컴퓨팅 기능에 대한 연구의 비약적인 발전이 이루어지면, 장시간이 필요한 위험 시나리오 시뮬레이션을 더욱 정확하고 짧은 시간 안에 실행하며, 더 많은 결과를 테스트할 수 있을 것으로 판단된다.[3)]

3. 거래 최적화

금융 시장의 트레이딩 활동은 점점 더 복잡해지고 있다. 예를 들어, 딜리버티브 평가 조정 모델인 X값 조정에는 현재 신용가치 조정, 차변 금액 조정, 펀딩 가치 조정, 자본 가치 조정, 여유 자금 조정이 포함되어 훨씬 복잡해졌다. 투명성에 관한 규제 요건이 강화됨에 따라 거래에 더욱 엄격한 검증 프로세스가 적용되어, 상대방의 신용 노출을 딜리버티브 포트폴리오의 신용 제한 이용 상황에 반영해야 하는 위험 관리 계산에도 영향을 미치고 있다. 또한 중요한 투자 프레임과 방법도 변화했다. 복잡한 거래 환경에서, 펀드 매니저는 시장의 주가변동성 및 고객의 라이프 이벤트의 변화와 같은 현실적인 제약 조건을 포트폴리오를 최적화하는 데 적용하는 일에 있어 고전을 겪고 있다. 그들이 기대 수익을 추산할 때는 수많은 가능성을 가진 시나리오와 투자의 선택지를 시뮬레이션하고, 감응성을 검증할 수 있어야 한다. 현재로서는 시장의 움직임에 뒤처지지 않고 대처하는 최적의 재조정 전략을 찾는 데 있어, 계산 능력의 한계와 거래 비용이 큰 제약이 되고 있다. 양자기술은 이러한 오늘날의 거래 환경의 복잡성을 타개할 수 있을지도 모른다. 펀드 매니저가 양자컴퓨팅의 조합 최적화 능력을 활용하게 되면, 포트폴리오를 분산 고도화하고, 더욱 정확하게 시장 상황 및 투자가의 목표에 대응하여 포트폴리오 투자를 재조정하며, 더 큰 포트폴리오 거래 결제 프로세스의 비용 효율을 향상시킬 수 있을 것이다.[3)]

4. 양자 금융 서비스

최근 중앙화폐시스템에 대한 불신과 새로운 가치저장수단에 대한 요구가 급증함에 따라, 블록체인 기술 기반[15)]의 암호화 화폐 등에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 그럼에도 불구하고, 여러 가지 보안 시스템을 적용하여 아직까지는 비교적 안전한 현재의 블록체인 기반 암호화 화폐는 해킹의 시도와 양자컴퓨팅 기술에 의한 현행 암호화 체계의 위협이 문제점으로 제기되고 있다.[3)] 또한 금융 시장에서 옵션 가격의 책정을 위한 컴퓨팅 연산의 한계점 문제가 대두되고 있다. 이에, 산업계에서 양자기술을 접목한 금융서비스의 니즈가 증대되고 있다. 블록체인에 양자기술을 적용하는 사례를 보면, 블록체인에서 쓰는 수학적 암호방식이 현재의 컴퓨터에서는 풀기 어렵지만, 양자컴퓨터는 어렵지 않게 풀 수 있다. 양자컴퓨터가 일반화되는 때가 되면 현재의 블록체인은 무력화될 수도 있다는 점을 인식할 필요도 있다. 암호 화폐는 거래내용이 전 세계의 장부에 동시에 공식적으로 기록되는 방식이지만, 양자컴퓨터는 그 순간을 이용해 공격을 가할 수 있으므로, 양자기술을 이용하여 현재의 블록체인을 보완해가는 방법도 필요할 것이다. 관련 업계에서는 양자 금융 시스템의 도입으로 현존하는 각종 금융 부패를 종식시킬 수 있을 것으로 전망하고 있다. 또한 글로벌 금융업계에서는 양자금융 시스템이 현재의 중앙제어 시스템을 글로벌 분산제어 방식으로 전환시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다.[3)]

그림 III-1-18 블록체인과 양자컴퓨팅 비교



※ 101Bockchains (2019) 집필진 재구성

15) 101 Blockchains (2019)

제6절 교통·물류·항공

항공사와 같이 비행 스케줄이 필요한 산업, 최적 수준에서 작동해야 하는 수많은 기계가 있는 제조 단위 또는 고객에 따라 포트폴리오에서 다양한 차량의 가격을 책정해야 하는 차량 제조업체의 복잡한 계산을 올바르게 수행하기 위해서는 엄청난 노력이 필요하다.[8] 자동차 산업은 교통 관리 또는 자율 주행 차량과 관련된 실제 문제를 해결하기 위해 양자컴퓨팅을 구현하는 몇 안 되는 핵심 산업 중 하나로 등장했다. 자율주행 차량은 처리, 무선통신, 자율주행 차량을 위한 최적화된 경로를 위해 엄청난 컴퓨팅 능력을 필요로 한다. 예를 들어, 광대한 도로가 수 km에 걸쳐 퍼져 있는 경우 엄청난 데이터 처리가 필요하므로 양자화할 필요가 있다. 양자컴퓨팅은 자율주행 차량의 성장에 도움이 될 뿐만 아니라 자동차가 스스로 통신할 수 있어 교통 신호의 필요성을 없애고 번거로움 없이 패키지 배송을 촉진하는 전체 모빌리티 부문에 혁명을 일으킬 것이다. 운송 및 물류와 같은 산업은 수익을 최적화하기 위해 운송 시간과 거리를 줄여야 하며, 이는 악천후 또는 차량 고장과 같은 다양한 문제에 직면할 수 있다.

양자컴퓨팅은 결과에 대해 이해하기 쉬운 복잡한 계산을 실행할 수 있고, 계산속도 향상, 데이터 구동에 의한 행동의 정밀도 향상, 새로운 알고리듬 및 시스템 기능 창출할 수 있으므로 이러한 산업이 중요한 결정을 쉽게 내리는 데 도움이 될 수 있다. 양자컴퓨팅은 현대적인 자동차 문제에 대한 솔루션을 고려할 때 정확하고 가장 관련성이 높은 전술이라 할 수 있다.

전 세계의 자동차 대기업들은 자동차 산업의 미래를 결정하는 데 도움이 될 수 있는 다양한 문제를 해결하기 위해, 신소재의 제조 및 합성에서 차량 교통 및 자율 차량 관리에 이르기까지 다양한 응용 분야에서 양자컴퓨팅을 사용할 수 있을 것으로 기대하고 이에 주목하고 있다. 주요 자동차 제조업체는 기존 화석 연료가 아닌 배터리로 작동하고 차량 자체를 조종하고 운전하는 과정에서 자동화를 가져오는 차량을 찾고 있는데, 화석 연료와 운전자 중심의 차량에서 배터리와 운전이 적은 차량 또는 자율 주행 차량으로의 급격한 변화는 매우 복잡하다. 많은 자율 주행 차량이 제조되고 여러 매개변수에 걸쳐 정기적으로 테스트되고 있지만 특정 영역에서만 실패하는 경우가 있다. 원활한 자율 주행 경험은 완전히 상업적이고 안전한 것과는 아직은 거리가 멀다. 이러한 차량이 개발되는 수준은 상당히 높고 앞으로 훨씬 더 복잡해질 것이기 때문에 양자컴퓨팅은 신뢰할 수 있는 자율 주행 경험을 얻을 수 있는 복잡한 계산 및 추정을 통해 자동차 회사에 개입하고 도움을 준다.[8]

항공사의 비즈니스와 관련된 복잡한 문제를 해결할 때에도 양자컴퓨팅이 가진 잠재 능력이 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.[3] 항공사의 운항 관리 최적화와 고객 체험 개선은 양자 우위성을 활용함으로써 기존과는 완전히 다른 양상을 띠게 될 수 있다. 다양한 운항 문제에 대응하여 운항 스케줄 및 인원 배치 등과 같은 운항 문제를 해소하고, 콘텍스트를 활용하여 맞춤화된 서비스를 확충할 수 있으며 항공사의 네트워크 계획을 포괄적으로 최적화할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

1. 교통망 경로 최적화

독일 Volkswagen은 미국 Google 및 캐나다 D-Wave Systems과 협력하여 교통 혼잡을 줄이기 위해 이미 양자컴퓨팅을 실제 응용 프로그램에 통합하기 위한 작은 단계를 시작했다.[8] 교통 데이터는 스마트폰과 차량 내부의 송신기의 도움으로 수집되고, 이 데이터는 비양자 알고리듬으로 처리되어 특정 지역의 교통 밀도와 통신매체가 필요한 고객 수를 결정한다. 그 결과를 양자알고리듬으로 쉽게 처리하여 통신 사업자를 필요로 하는 고객 수 대비 사용 가능한 통신 사업자 수를 최적화할 수 있다. 택시 또는 대중교통 서비스 회사를 초점 영역으로 적절하게 안내하여 최적화를 수행할 수 있다. 양자컴퓨팅의 측면은 이러한 차량이 특정 초점 영역으로 안내될 수 있거나 특히 교통량이 많은 상황에서 함께 그 영역을 피하도록 암시될 수 있는 가까운 미래의 자율 차량에 매우 잘 적용될 수 있다. 교통 관리, 전기 자동차용 고성능 배터리 구조 최적화 및 새로운 기계학습 프로세스 개발은 앞으로 자동차 업계와 컴퓨팅 개발 업계의 협업의 핵심이 될 영역이다. 실용적인 응용 프로그램은 이미 테스트되었거나 베이징 및 바르셀로나와 같은 대도시에서 사용할 계획으로 알려져 있다.[8] 일본 Denso와 Toyota Tsusho는 2017년 캐나다 D-Wave Systems의 클라우드 기반 양자컴퓨터를 이용하여 태국에서 약 1,300,000대의 상용차에 대한 이동 시간, 차량 위치에 관한 교통 데이터를 평가할 것을 제안했다. 이 기술은 초기 단계에 있음에도 불구하고 기술 회사와 자동차업체는 교통 데이터 평가, 생산 및 물류 유통 등과 같은 일상적인 상황에 이를 통합할 계획을 이미 수립했다.

그림 III-1-19 게놈믹스와 양자컴퓨팅 동시 적용 영역

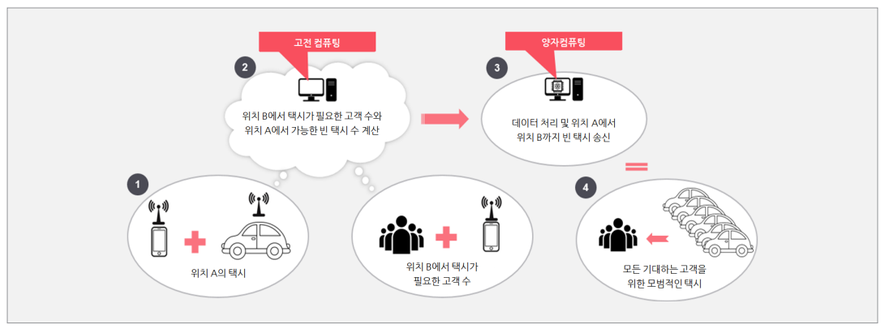


※ FutureBridge (2020) 집필진 재구성

2. 물류자원 및 에너지 활용 최적화

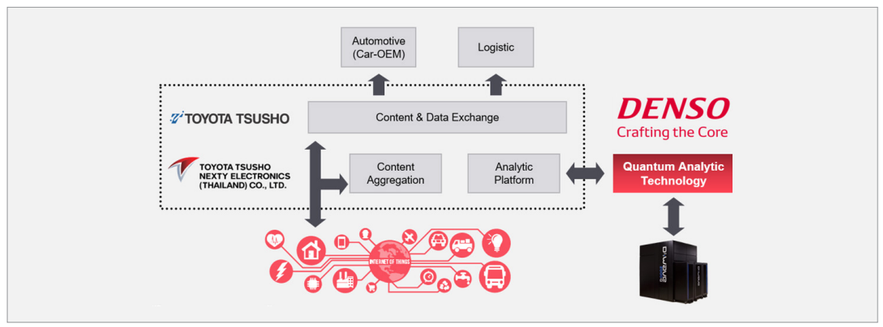
물류가 사회를 지원하는 기반 시설에서 점점 더 중요한 부분이 되고 있지만, 운전자 부족, 교통 혼잡, CO_2 배출량 증가 등의 요인은 물류 및 공급망 산업의 기업에 시급하고 지속적인 과제를 제시한다. 제조 공급망 관리는 효율성 개선 및 비용 절감을 위한 영역을 나타내며, 보다 근본적인 물류 및 환경 문제를 해결하는 데 기여할 수 있다. 그럼에도 불구하고 기존 기술은 규모와 복잡성으로 인해 이러한 문제를 해결하기에는 부적합하고 매개변수 조정 및 계산에 막대한 시간이 필요하다.[16)]

그림 III-1-20 양자컴퓨팅의 전형적인 사용 사례



※ FutureBridge (2020) 집필진 재구성

그림 III-1-21 일본 Denso와 Toyoda Tsusho의 양자컴퓨팅 응용

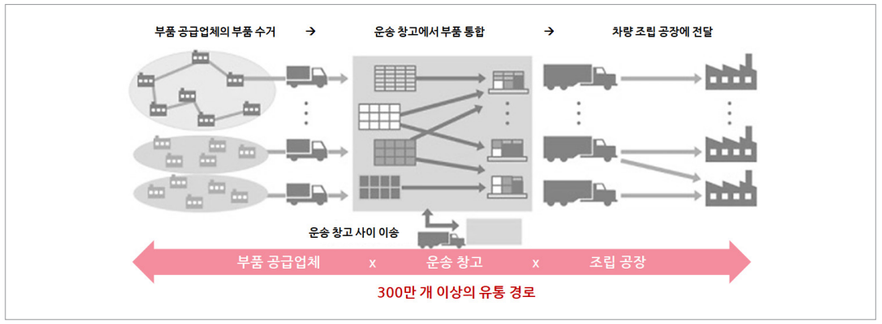


※ FutureBridge (2020)

16) HPC wire (2020)

양자컴퓨팅을 다양한 복잡한 문제의 솔루션으로 보고 있는 미국 자동차 제조업체인 Ford는 Ames Research Center에 위치한 NASA의 양자 인공지능 연구소와 협력하면서 NASA, Google 및 Universities Space Research Association이 공유하는 NASA의 양자어닐러를 사용하여 차량 소유자가 많은 차량의 자원과 에너지 활용을 최적화하는 것을 돕고자 한다.[8)] 차량 대 경로 매핑을 기반으로 하는 기준은 초점이 맞춰진 차량이 디젤 운송 차량인 경우에 설계되어야 하는데, 디젤 엔진은 최적의 차량 성능과 환경 준수를 위해 추적해야 하는 필터로 구성된다. 필터 요소는 그것이 속한 차량이 적절한 주행 주기를 가지고 있을 때 가장 좋은 방법으로 관리될 수 있다. 배달 차량이 하차해야 하는 여러 정거장이 있거나 엄청난 교통 상황에 직면하면 이 주행 주기가 중단된다. Ford는 정차하는 동안 차량이 따라야 하는 최적의 경로를 찾아 다른 여러 차량에 적용할 수 있다고 생각하고 있다. 여러 매개변수가 여러 차량에 누적되면 혼잡, 고장, 하차 및 픽업 시간, 위치, 고객 피드백 및 경험과 같은 복잡한 가능성 매트릭스가 작용한다. 기존 컴퓨터는 제한된 수의 차량 및 기타 병렬 매개변수 측면에서 유용할 수 있다. 이러한 매개변수가 증가함에 따라 기존 컴퓨팅은 적절함을 입증하는 데 필요한 화력이 부족하므로 이러한 시나리오에서 양자컴퓨팅을 활용할 수 있다. Ford는 이러한 문제를 큐비트로 인코딩하고 기존 컴퓨터에 비해 더 짧은 시간에 처리 가능한 양자컴퓨터를 사용하여 문제를 해결하려고 한다. 양자컴퓨팅은 물류계산에 큰 도움이 될 수 있다는 점 외에도 배터리 신소재 개발, 화학 최적화 등 다른 분야에도 응용할 수 있을 것으로 보고 있다.

그림 III-1-22 디지털 어닐러를 이용한 물류 자원 최적화 프로세스

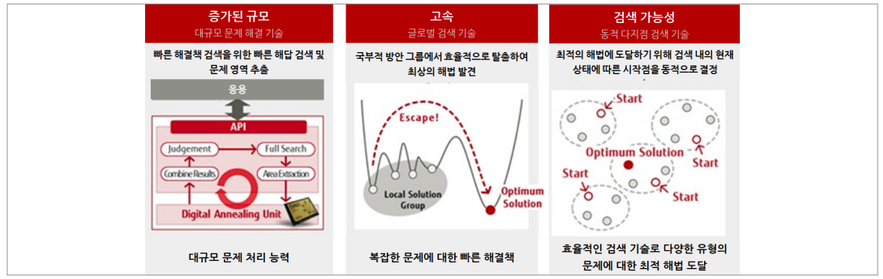


※ HPC wire (2020) 집필진 재구성

일본 Fujitsu Limited와 Toyota Systems Corporation은 Fujitsu의 Quantum-Inspired Digital Annealer 컴퓨팅 솔루션을 활용한 공동 시험에서 자동차 생산을 지원하는 데 필수적인 공급망 및 물류 네트워크 운영 최적화를 성공적으로 시연했다.[17)] 디지털 어닐러는 [그림 III-1-22]처럼 현재의 기존 컴퓨팅 기술로는 불가능한 속도로 복잡한 조합 최적화 문제를 해결하고 운송 트럭 수, 수십 개의 공장에 300만 개 이상의 배송 경로가 있는 부품 공급망 최적화 문제, 총 주행 거리 및 패키지 분류

작업을 포함한 변수를 신속하게 계산하는 데 사용되어 가장 비용 대비 효율적인 자동차 접근 방식을 결정하는 것이다. 30분 이내에 기존에 알려지지 않았던 효과적인 유통경로를 발굴해 물류비를 약 2~5% 절감할 수 있는 최적의 경로를 계산해 적재효율을 높이고 운송비를 합리화하는 것이 가능하다는 결론이 나왔다. 유통 비용은 트럭 대수, 총 이동 거리, 포장 부품 분류 작업량 등의 변수를 기반으로 계산되었다. Fujitsu와 양자컴퓨팅 사용에 대한 연구를 함께 수행한 Toyota Systems는 Toyota Motor Corporation의 기술 제품 개발 지원을 위한 IT 솔루션 회사로, 실제 공급망 및 물류 운영을 위해 솔루션을 상용화하는 것을 목표로 앞으로 솔루션을 더욱 검증하고 개선할 예정이다. [그림 Ⅲ-1-23]에 묘사한 것처럼 이 기술을 실제 작업에 적용하기 위해 Fujitsu Limited와 Fujitsu Laboratories이 이전에 개발한 대규모 문제 해결 기술을 통합하는 새로운 시스템이 개발되었으며, 국부적 방안에서 효율적으로 탈출하면서 가능한 다양한 해법을 검색하는 글로벌 검색 기술과 현재 검색 상태 및 중간 결과를 기반으로 검색 시작 지점을 동적으로 결정하는 동적 다지점 검색 기술로 확대하였다.

그림 Ⅲ-1-23 일본 Fujitsu의 문제 해결 기술

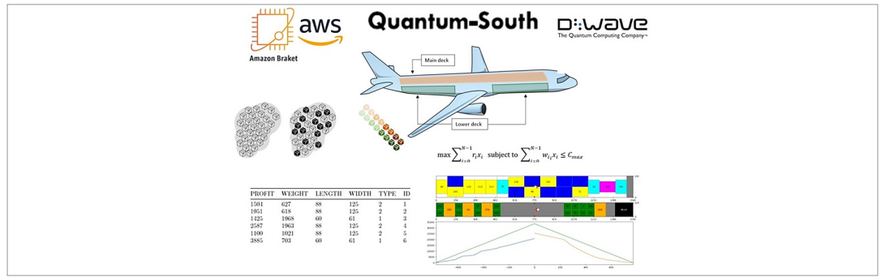


※ HPC wire (2020) 집필진 재구성

자동차 산업이 새로운 패러다임으로 발전함에 따라 연결성, 자율성, 공유성, 전동화는 모빌리티의 개념 자체는 재정의될 것이며, 유례없는 기술 혁신과 새로운 모빌리티 서비스 창출에 대한 요구가 대두되고 있다. Toyota Systems는 자동차 산업에서 양자기반 컴퓨팅 기능의 사용을 촉진하여 새로운 이동 서비스를 창출하고 사회 문제 해결에 기여하는 것을 목표로 하고 있다. Fujitsu는 디지털 어닐러 기술을 기반으로 하는 새로운 솔루션으로 이 영역에서 Toyota Systems를 지원하고 자동차 산업의 디지털 혁신에 더욱 기여하게 될 것이다. Fujitsu는 2020년 기존 Fujitsu 디지털 어닐러 클라우드 서비스의 일부로 이 시험에서 개발된 솔루션을 제공하였으며 적용 범위를 다양한 다른 산업 및 비즈니스 영역으로 확대하는 것을 목표로 하고 있다.

항공 화물의 경우 작업을 특히 어렵게 만드는 특정 특성이 나타난다. 예를 들어, 항공기의 동체는 원형 단면을 가지고 있어 단위 부하 장치(Unit Load Device, ULD)가 활용된 공간을 최대화하기 위해 특정 모양을 갖도록 하고 있다.[17] 항공기로 수송되는 모든 화물은 ULD로 통합되어야 하는데, 즉 특정 치수의 컨테이너 및 팔레트에 수용해야 한다. 다양한 유형의 ULD가 가능하지만 표준화되어 있으며, 각 ULD는 가중치, 너비 및 길이 치수, 관련 수익, 패키지 유형의 고유 식별자, 컨테이너가 나란히 이동할 수 있는지 또는 단일행으로만 이동할 수 있는지 여부를 나타내는 종류의 플래그라는 속성을 가지고 있다. 항공 화물의 주요 문제는 항공기 자체의 물리적 제약에 의해 주어진 일련의 제한에 대해 각 항공기에서 운송되는 수익을 최대화하는 운송할 ULD의 최적 선택을 식별하는 것이다. 미국 Amazon Braket과 캐나다의 D-Wave System과 함께 Quantum-South 라는 양자 응용 프로그램을 개발하였는데, 이는 ULD의 부하를 Airbus A330-200F 및 Boeing 747-400과 같은 대형 항공기의 전체 화물기 구성으로 해결할 수 있는 방법을 제안하였다.

그림 Ⅲ-1-24 항공 화물 적재 최적화



※ Rafael Sotelo (2022)

3. 항공 운항 시스템 최적화

항공사를 위한 양자기술은 운항 문제 해결, 개인을 위한 맞춤화된 서비스 확충, 네트워크 계획 및 스케줄링의 최적화 등이 있다.

가. 운항 문제 해소 (불규칙한 작업 관리(Irregular Operations, IRPOS))

항공사의 운항 스케줄과 인원 관리에 큰 혼란을 주는 원인은 세계적인 질병의 유행, 악천후, 지진, 작동 상의 문제, 기술적인 문제 등으로 다양하다. 이러한 운항 문제에 대응하여, 운항 스케줄 및 인원 배치를 어떻게 복구시킬지가 항공사가 대처해야 하는 가장 어려운 문제 중 하나다.[18] 현재 솔루션은 단편적이며, 운항 관련 정보의 비중이 높고, 이용률 및 이익의 최대화, 고객 서비스, 고객 만족도에 미치는

17) Rafael Sotelo (2022)
18) Katrin Granel (2022)

영향에 대해서는 크게 고려하지 못한다. 그저 운용상의 문제를 해결하는 데 있어서는 허용할 수 있는 수준의 알고리듬을 기존 고전 컴퓨터에서 실행하여 처리하고 있다.[3)]

그림 III-1-25 항공 운항 시스템 최적화



※ Katrin Granel (2022) 집필진 재구성

하지만 현재 컴퓨터의 처리 능력에는 한계가 있어, 승무원, 발착 가능 횟수, 기기 등은 순차적 및 개별적인 방법으로 관리되고 있다. 따라서 시스템 전체를 복구하는 데에 일주일 이상이 걸리는 경우도 있어, 승객의 만족도에 악영향을 미친다. 다른 항공편 및 공항에 미치는 이차적 영향은 항공사에 연간 최대 5억 달러의 비용이 더 증가하는 경우이다. 현재 IROPS 해결에 대한 기술적인 제약은 주로 운항 문제를 해결하는 데 도움이 되는 관련 데이터를 충분히 확보하지 못해 데이터가 가시화되지 않은 것과 IROPS 문제를 구성하는 다양한 요소(기체, 승무원, 승객, 장기적인 영향)마다 각각 서로 다른 도구 사용과 복잡한 방법으로 개별적으로 해결하고 있어 비효율적이며 부분적으로 최적화된 솔루션을 단편적으로 개발하고 있다는 것이다. 양자 알고리듬을 개선하고 오류 정정 방법이 실현된다면, 양자컴퓨팅은 IROPS로 대응해야 하는 넓은 범위와 수리 최적화를 시행할 때의 복잡한 계산으로 단시간에 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이다.[3)] 미래의 비행과 승객에 대한 솔루션의 효과를 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 하는, 시나리오 솔루션의 속도와 정밀도를 향상시켜, 운항 문제에 대응할 수 있는 시간 내에 실행할 수 있다. 고객 서비스 담당자 및 자동 고객 응대 시스템에서 양자 기계학습을 활용하여 IROPS에 관한 최적의 문제 해결 방법을 제안하는 어드바이스 도구를 제공하고 해당 도구를 자동 고객 관리 시스템에 도입할 수 있다. 예를 들어, 결항을 겪은 승객에 대한 보상을 정할 때 양자컴퓨팅 알고리듬을 사용하면, 현금, 숙박 시설, 업그레이드 등의 다양한 선택지 중에서 각각의 승객이 원하는 바에 따라 담당자에게 최적의 보상 방법을 제안할 수 있다.

나. 콘텍스트 활용 맞춤화된 서비스 확충

항공사는 각 승객에게 특화된 서비스를 제공하고, 서비스를 차별화하고, 고객 체험을 향상하여 수익을 증가시킬 수 있다. 고객과의 관계를 구축하고 서비스를 맞춤화하려면 고객 데이터 및 거래 데이터 등을 수집/추출, 데이터 엔지니어링을 실시하여 고객 데이터의 특성 구축, 고객 및 여객 등 상황 특성에 근거하여 고객 분류 모델 학습 및 개인의 여행 상황에 근거하여 최적의 서비스를 특정하고 점수를 매기는 4가지 단계가 필요하다.[3)] 맞춤 서비스를 제공하는 시스템은 이미 존재하지만, 고객을 분류하는 단계에서 제약이 있기 때문에 고객의 기대에 부응하는 서비스를 제공하고 있지는 못하다. 현재 분류 방법은 대부분 인구 통계 데이터나 구매 이력 데이터와 같은 기본적인 고객 특성을 이용하지만, 상황 데이터는 포함되지 않아 제안하는 서비스의 정확도가 낮을 수밖에 없다. 또한 다차원적인 분류를 하지 못하고, 여행자의 희망 조건, 목적, 행동에 대해 콘텍스트의 차이를 효과적으로 잡아내지 못하고 있다. 상황의 특성을 고려하지 않는 이유는 계산 능력과 확장성이 충분하지 않아 복잡한 분류 모델을 구축하기 위한 대량의 데이터 요소를 처리할 수 없기 때문이다. Segment of One(한 개인으로 대상 분류)은 대부분의 항공사가 추구하는 개인화 전략이지만 확장성이 가장 큰 과제이다.[19)] 양자적 이점이 달성되면 상황에 맞는 동적 개인화의 가능성을 여는 데 도움이 될 수 있다. 고도의 맞춤 프로세스를 실현하기 위해 양자컴퓨팅을 활용하면 고객 분류를 세분화하고, 더욱 복잡한 고객 특성을 도입함으로써 다차원적인 고객 분류를 가능하게 한다. 또한 세밀하게 상황 프로파일링을 실시하여 맞춤 서비스의 정확도를 높인다. 결과에 대한 통찰과 해석을 제공하는 기계학습 모델의 정확도를 높여, 고객 데이터와 고객 만족도의 인과관계를 담당자들이 더욱 정확하게 이해할 수 있게 한다. 기계학습 기능을 강화하여 식별 가능한 고객 분류의 수 등 기존의 고전 컴퓨터에서는 처리할 수 없는 수준으로까지 끌어올린다. 양자컴퓨팅을 통해 콘텍스트를 활용하는 동적인 맞춤화를 실현한다면, 항공사가 부가 서비스를 통한 수익 증가, 고객 체험의 질 향상, 서비스 차별화하는 데 기여할 수 있을 것이다.

다. 항공사의 네트워크 계획 최적화

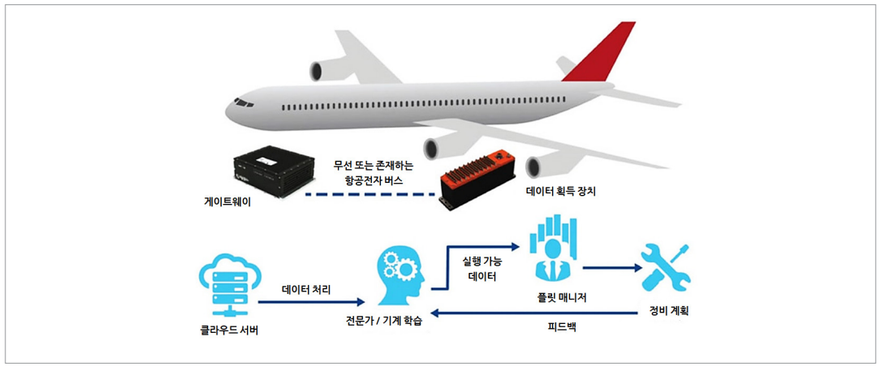
병렬 최적화 문자열을 실행하여 항공사 계획을 가속화하는 것은 중요한 경쟁 요소가 될 것이다. 항공사는 지리적 시장과 같이 변화하는 수요와 진화하는 위기 상황에 빠르게 적응해야 한다.[19)] 비행 계획 및 항공기 할당에서 승무원 일정에 이르기까지 네트워크 최적화는 항공사 운영의 핵심이며 모든 항공사의 운영비용에 큰 영향을 미친다. 이러한 프로세스를 합리화하기 위해 많은 노력을 기울이고 있음에도, 여전히 큰 제약이 존재한다. 주로 격리된 의사 결정 지원 도구와 함께 배포된 하위 프로세스의 국부적 최적화로 이어지는 단계별 접근 방식과 관련이 있다. 이러한 도구는 차선의 국소적이고 조정되지 않은 폐쇄적인 솔루션을 생성한다.[3)] 예를 들어, 비행경로 계획에 승무원의 일정이 포함되는 경우는 거의 없다. 마찬가지로 승무원의 일정에는 블록 타임이 포함되지 않으며, 블록 타임 계획에는 연료 계획이 고

려되지 않는다. 또한 네트워크 계획은 일반적으로 수익 관리(RM) 및 가격 책정과 솔루션 최적화를 조정하지 않는다. 그 결과 수익 최적화라는 동일한 목표로 매일 두 가지 주요 프로세스가 발생하지만 별도의 모델과 매개변수를 사용하게 된다. 연계되지 않는 이러한 접근방식에서는 총비용, 수익, 변화에 대한 적응까지 어떤 부면에서도 만족스러운 솔루션이 만들어지지 않고 있다. 뿐만 아니라 신형 항공기의 도입 및 새로운 항로의 개설 등 운항 상 중요한 변경이 이루어졌을 때에는, 이러한 것들이 혼란의 원인이 된다. 수익 관리 및 가격 설정의 관점에서, 스케줄, 수용 능력, 항공기 설계에 근거하여 서비스를 최적화하더라도, 네트워크 계획에 의해 수익의 최적화를 근거로 이러한 파라미터들이 변경되어버릴 수 있다. 항공사가 이처럼 문제를 분산하여 서로 다른 솔루션을 적용하는 방침을 채용하게 된 가장 큰 이유는 네트워크의 최적화에 관한 대역적인 문제를 단번에 해결하는 방법이 복잡하기 때문이다. 기존의 고전 컴퓨터만으로 이러한 문제를 해결하는 것은 사실상 불가능하다. 앞으로 양자컴퓨터와 고전컴퓨터가 연계되게 되면, 수익 관리, 가격 설정, 비용 목표, 매출, 고객 관계 관리를 고려하여 동적으로 조정하면서도 기체 할당, 스케줄, 블록/게이트, 승무원, 연료를 한 번에 최적화할 수 있을 것이다.

4. 항공기 시스템 모니터링 향상 및 유지보수 감소

항공기의 시스템 문제를 해결하고 수리하는 것은 힘들고 시간이 많이 소요될 수 있다. 세분화된 데이터가 없으면 유지 관리 담당자가 시스템의 어느 부분에 결함이 있는지 식별하기 어려울 수 있으며 문제를 찾을 때까지 시스템의 일부를 제거, 테스트 및 재설치하는 데 오랜 시간이 걸릴 수 있다.[19] 뿐만 아니라 항공기를 예기치 않게 접지시키는 장애가 발생하면 항공사에 심각한 혼란과 비용이 발생할 수 있다. 항공기에는 엄청난 양의 데이터가 있을 수 있지만 이것이 문제를 해결하는 데 올바른 데이터라는 의미는 아니다. 일반적으로 항공기에는 다른 시스템보다 더 문제가 많은 특정 시스템이 있지만 이러한 시스템에는 장애가 임박한 시기를 나타내거나 잠재적으로 큰 시스템에서 교체해야 하는 부분을 분리하는 데 도움이 되는 충분한 계기가 없을 수 있다. 즉 오늘날 상업 운영 중인 많은 항공기는 예측 유지보수를 지원하거나 유지보수 작업을 최적화하기에 충분한 데이터를 제공하지 않는다. [그림 Ⅲ-1-26]처럼 충분한 데이터를 획득 장치로부터 수집하여 클라이드 서버에 보관하여 이를 기계학습을 통해서 해석한 후, 플릿(Fleet) 매니저에게 제공하여 정비 계획을 수립하는 방식은 시간과 비용을 예전에 비해서 저감할 수 있지만, 여전히 빠른 속도로 처리가 불가능한 부분이 있다. 이것을 미연에 방지하기 위해서 주요 부위에 이미징센서 또는 자기장센서와 같은 양자센서를 설치하여 신호 변화를 빠르게 파악하거나, 양자컴퓨팅을 적용하여 기존의 장애 데이터를 활용해 장애를 발생하기 전 미리 예측을 할 수 있다면 유지보수에 대한 위험성을 미리 방지할 수 있을 것이다.

그림 Ⅲ-1-26 항공 시스템 모니터링 및 유지보수



※Tech Briefs (2022) 집필진 재구성

19) Tech Briefs (2022)

제2장 양자통신분야 산업화 모델

제1절 개요

양자암호, 양자전송, 양자네트워크를 포함하는 양자통신은 현재 암호기기의 메시지 암·복호화에 필수적인 비밀키 교환에 집중되고 있지만 향후 양자기기 간 양자상태 정보전송으로 확장될 것으로 보인다. 초기에는 단거리 응용 분야 적용을 위한 상용화 기술 개발을 통해 암호화가 필요한 금융, 의료, 연구, 행정, 국방망 등에 사용되어 점진적으로 시장을 확대하고, 궁극적으로는 양자중계기 기반 장거리 광섬유 및 위성 링크를 기반으로 하는 안전한 글로벌 양자통신 네트워크로 발전시키고자 하는 것이다. 또한 양자컴퓨터, 양자센서 등의 양자정보처리 노드 간 양자정보를 전송하고, 양자정보처리 자원(Resource)을 공유하고 분배하는 양자인터넷이 형성될 것으로 예상된다.[20)]

본 장에서는 양자통신 분야에서 국방, 의료, 금융 등 6개 산업영역으로부터 총 15개의 산업화 모델을 소개한다.

표 III-2-1 양자통신 주요 분야별 산업화 모델 개요

구분	산업화 모델
국방·안보	① 인공위성 양자 키 분배 네트워크 구현 서비스 ② 양자통신과 현대암호 Post-Processing 알고리듬 ③ 드론용 양자암호모듈 등
통신 응용	① 유선 양자암호통신 서비스 ② 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스 ③ 양자 키 분배 시스템의 소형화 ④ 양자인터넷 서비스 ⑤ 무선 양자인터넷 구현 서비스
제조	① 스마트팩토리 양자암호통신적용 등
의료	① 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스 ② 의료 데이터 전송 서비스 등
금융	① 블록체인 기반 금융서비스 보안 ② 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스 ③ 금융데이터 분석 및 보안 서비스 등
교통·물류	① 자율주행배송서비스(배송로봇·드론)에 양자암호 적용 등

※ 양자통신분야의 추가적인 산업화 모델은 본 3편의 1장(산업영역별 산업화 모델)을 참조

20) 정보통신기획평가원 (2020)

〈표 Ⅲ-2-2〉에 기술한 것처럼 미국 AT&T, 중국 Huawei, 스위스 IDQ, 영국 BT, 독일 Deutsche Telekom에서 추진하는 QKD 실증을 비롯해 EU에서는 QKD 오픈테스트베드를 구성해 상용화에 나서고 있다.[21)]

표 Ⅲ-2-2 글로벌 양자통신 기업 동향

구분	주요 서비스
ID Quantique(스위스)	양자 통신 부품 및 QKD 시스템 제공, 유럽 일대 다수의 금융정보 백업 및 클라우드 망에 양자암호통신 상용 시스템 적용
AT&T(미국)	업계, 학계, 정부기관을 포함한 양자경제개발컨소시엄 합류, 2020 회계 연도에 4억 4,000만 달러 투입 예정(양자통신, 센싱, 컴퓨터 총괄)
BT(영국)	UKQN(UK Quantum Network) 프로젝트로 125km 상용등급 양자네트워크 테스트베드 구축
Huawei(중국)	2018년 안전한 통신 서비스를 위해 상용 광통신망에 양자암호를 적용하는 필드 시험 수행
Deutsch Telekom(독일)	도이치텔레콤 네트워크 시험망에 양자암호통신 시스템 적용
Toshiba(영국)	Cambridge Research Laboratory 설립, 고성능 QKD 시스템, 양자소자 연구
Quintessence Lab(호주)	기업용 안전한 부호화 모듈, 진정 양자 난수 발생기 제공, 캘리포니아 일대의 NASA 연구망(560km)에 자사 기술로 QKD 네트워크 구축
QuantumCTek(중국)	양자암호통신장비, 양자신호생성 및 검출 관련 상용제품 개발, 자국 내 판매
Quantum XCHANGE(미국)	미국 뉴욕 금융망에 양자 보호화된 네트워크 기술 제공 발표
Qutools(독일)	광자 검출기 및 양자 난수 생성기 등 상용 제품 출시 및 QKD 상용 장비 개발

※ 정보통신기획평가원 (2020)

최근 해외의 사이버 보안 솔루션을 연구하는 양자암호화 분야의 떠오르는 신흥 강자인 스타트업을 [그림 Ⅲ-2-1]에 기술하였다.[22)] 영국에 기반을 둔 스타트업 KETS는 안전한 통신을 가능하게 하고 민감한 데이터를 보호하기 위해 저전력 QKD 칩을 개발하였다. 이 칩은 보안 통신시스템 또는 기존 배포에 통합되어 양자보안 데이터를 제공, 악의적인 제3자는 물론 기존의 해킹 및 양자공격으로부터 네트워크를 보호하게 될 것이다. 캐나다 스타트업 Quantum Numbers는 난수를 생성하는 혁신적인 양자터널링 솔루션을 제공한다. Quantum Numbers의 QNG2 칩은 사물인터넷(IoT) 통신, M2M(Machine-to-Machine) 연결, 네트워킹 장비, 모바일 및 인터넷 트랜잭션, 클라우드 기반 애플리케이션을 보호하기 위해 하드웨어 암호화를 사용하는 다양한 회로 제품을 가능하게 한다. 다양한 인증기관 및 공급업체와 협력하여 차세대 양자안전 알고리듬을 만드는 싱가포르 회사 Sixscape는 고객이 미래의 양자공격으로부터 안전하도록 양자 암호화 산업 플랫폼 전반에 걸쳐 양자 안전 기술을 제공하기 위해 디지털 인증서, 디지털 서명 및 암호화에 사용할 암호화 애자일(Agile) 솔루션을 제공한다. 프랑스 스타트업 CryptoNext는 키 캡슐화 메커니즘을 사용하여 양자 안전 서명 및 키 교환을 제공하는 암호화 라이브러리를 개발하고 있다. 라이브러리는 보안 프로토콜 또는 보안 제품에 쉽게 통합할 수 있는 C로 작성된 양자 안전 알고리듬의 결과로 이 솔루션을 사용하면 IETF(Internet Engineering Task Force) 표준에 따라 가장 유망한 양자 안전 알고리듬을 선택할 수 있으며 양자 후 표준화 프로세스를 지원할 수 있다. 마지막으로 IoT, 클라우드 서비스 및 빅 데이터에서 적응형 방어 기술을 보호하기 위해 양자 수준 암호화 솔루션을 만드는 대만 스타트업 FlipsCloud는 사이버 공격으로부터 대부분의 네트워크를 보호하는 양자수준 암호화 서비스를 제공하고 공개키 암호화 인프라를 배포하는 등 양자컴퓨팅에 저항하는 대응물을 구축하고 있다.

그림 Ⅲ-2-1 양자보안 솔루션 53개 기업



※ Research Blog (2022)

한국은 2020년부터 올해까지 양자암호통신 인프라 구축 사업을 진행하여 초기 레퍼런스 확보를 위해 공공·민간분야 실증을 추진했다. 그 결과를 바탕으로 2022년 4월 LG유플러스에서 양자내성암호 B2B 요금제를, 7월 KT와 SK브로드밴드에서 양자암호통신 B2B 요금제[23)]를 출시하여 상용화를 위한 초기 기반을 마련하였다. 우리로, EYL 등의 중소기업은 통신사와 협업하여 핵심부품 개발 및 수출을 진행하고 있다.

최근에는 양자암호통신 기술의 국가기관 및 공공기관 도입의 장벽이었던 보안제도를 국가정보원, 한국지능정보사회진흥원(NIA), 국가보안연구원(NSR), 한국전기통신기술협회(TTA), 한국전자통신연구원(ETRI)이 함께 마련해서 올해 시범 검증과 내년 시행을 앞두고 있다. 이에 국내 중소·벤처기업이 이 제도를 다양한 장비와 서비스에 활용하기 위해서는 보안제도에 대한 컨설팅 등 지원할 방안이 마련되어야 할 필요가 있다. 일부 유선구간 시범 서비스 기술은 확보하였지만 생산성, 기존 인프라 연동, 장거리 양자전송, 유무선 채널 등 추가 연구를 통한 시장 확대가 필요한 시점이다. 이에 산업 영역별 국내외 산업화 사례 소개를 통해 양자통신 분야의 산업 확장 가능한 분야에 대한 소개를 하고자 한다.

21) 박남수 (2021)
22) Research Blog (2022)
23) 서정윤 (2022)

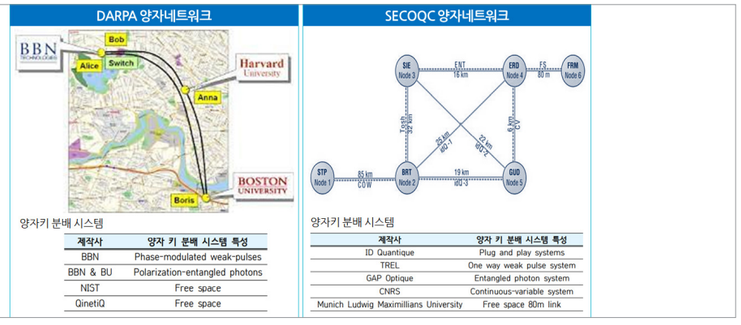
제2절 국방·안보·통신

1. 유무선 양자암호통신 구현 서비스

가. 유선 양자암호통신 서비스

양자암호 네트워크 분야에서는 양자암호시스템의 단대단을 넘어, 신뢰 연계점을 도심 중간에 배치하여 QKD를 통해 더 넓은 범위의 보안 통신망 구축을 위한 연구가 2000년대 초부터 연구되었다. 미국의 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency, 방위 고등 연구 계획국) 주도로 추진된 최초의 유선 기반 양자암호통신망 DARPA Quantum Network는 6개의 신뢰연계점인 하버드대학교, 보스턴대학교과 캠브릿지에 위치한 BBN Technologies에 이어 2004년에 시험 구동되었다. DARPA 양자네트워크는 총 10개의 QKD 시스템으로 구성되었으며, 서로 다른 4가지 종류의 QKD 분배 시스템이 사용되었다. 뒤이어 오스트리아에 구축된 양자암호통신 시험망인 SECOQC(Secure Communication based on Quantum Cryptography) 프로젝트는 세계 최초로 컴퓨터 네트워크를 보호하기 위한 목적으로 2004년부터 2008년까지 운영되었다. SECOQC 양자암호통신 시험망은 Vienna와 St. Poelten 사이에 6개의 노드로 구성되었으며, 각 노드는 전체 길이 200km인 총 8개의 Point-to-Point 양자 채널로 연결되었다. 8개의 신뢰연계점을 평균 20~30km로 연결하여 2008년에 컨퍼런스에서 전화, 화상통화를 시연하였다.

그림 III-2-2 DARPA와 SECOQC 양자네트워크



양자키 분배 시스템

제작사	양자 키 분배 시스템 특성
BBN	Phase-modulated weak-pulses
BBN & BU	Polarization-entangled photons
NIST	Free space
QinetiQ	Free space

양자키 분배 시스템

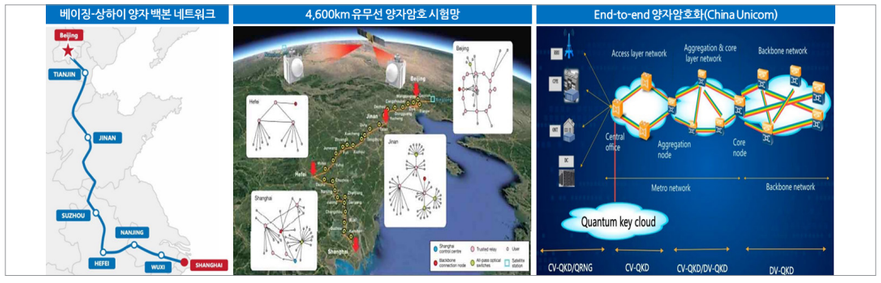
제작사	양자 키 분배 시스템 특성
ID Quantique	Plug and play systems
TREL	One way weak pulse system
GAP Optique	Entangled photon system
CNRS	Continuous-variable system
Munich Ludwig Maximillians University	Free space 80m link

※ 지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022)

스위스는 2009년부터 2011년 1월까지 ID Quantique의 QKD 장비로 프랑스에 위치한 유럽 입자물리학 연구소(CERN)와 제네바에 위치한 두 신뢰연계점을 연결하는 최초 장기적 국가 간 양자통신을 선보였다. 일본은 2010년에 총 6개의 신뢰연계점을 연결하고 각 신뢰연계점 간 다양한 양자암호 프로토콜로 QKD를 수행한 도쿄 양자암호 네트워크를 공개했는데 화상통화, 도청자감지, 신뢰연계점간 재구성을 시연하였다. 또한 국가정보통신기술연구소(NICT)를 통해서 실용적인 수준의 QKD 기술과 신규 네트워크 응용을 개발 중이다. 2017년 7월 NICT는 통신위성인 SOCRATES를 활용한 우주-지상간 QKD 실험에 성공하였다. SOCRATES에 실린 SOTA라는 양자암호통신 전송기에서 10Mbps 속도로 양자암호를 전송하였고, 이를 일본 코가네이에 위치한 지구국에서 수신에 성공하였다.

중국의 베이징-상하이 양자 백본의 경우, 2014년 2,000km 신뢰연계점 사이인 허페이, 우후시 도심에 각각 5개, 3개의 신뢰연계점을 배치하고 중간에 차오후시와 연결하는 총 9개의 신뢰연계점을 연결하였으며, 이후 베이징, 상하이, 허페이, 지난시의 정부, 군사, 금융, 전력 요충지에 다수의 신뢰연계점을 배치하였다. 최근에는 2016년 쏘아 올린 위성 기반 양자암호통신 구간을 포함하여 베이징과 상하이 간 2,000km 유선 구간과 싱룽와 난산을 잇는 2,600km의 무선 양자암호통신 구간으로 구성된 총 4,600km의 세계 최장 유무선 양자암호통신망을 운영 중에 있다. 중국과학기술대학에서는 2020년 2월 50km거리 광섬유 케이블로 메모리 간 양자얽힘 구현에 성공하였으며, 3월에는 509km TF-QKD로 장거리 양자암호통신 신기록을 갱신하였다.

그림 III-2-3 중국 양자 백본 네트워크 및 유무선 양자암호 시험망

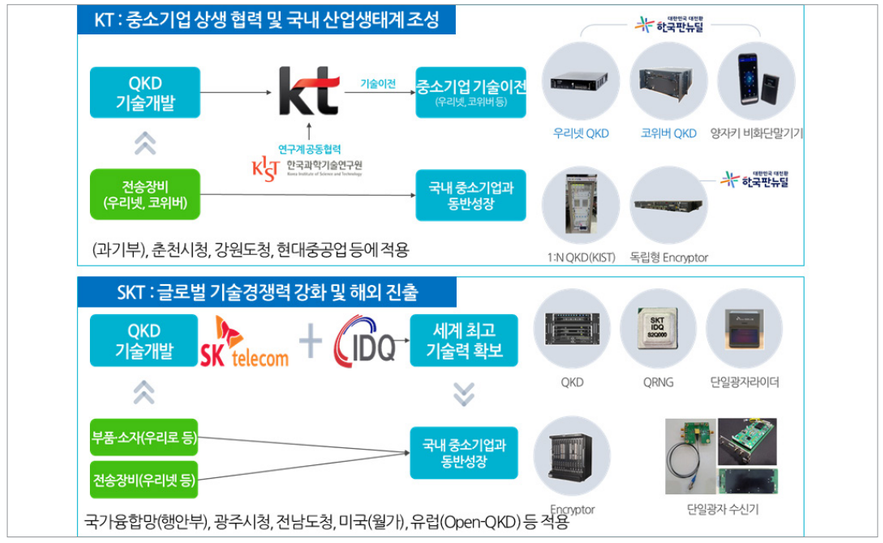


※지식산업정보원 R&D 정보센터 (2022) 집필진 재구성

한국은 이동통신사의 양자암호통신 기술개발, 상용화 및 서비스 출시가 가속되고 있다. 한·미 정상회담에서도 향후 양국 간 양자암호통신 기술개발 협력 및 인력교류를 확대하기로 하였으며, 이에 과학기술정보통신부는 양자암호통신 인프라 시범구축을 추진하였다. 이러한 이유로 유선 양자암호통신은 다른 양자기술 대비 빠른 시일 내에 상용화 기반이 마련되었으며, 국내 통신사는 이를 확장하는 계획을 준비하고 있다.

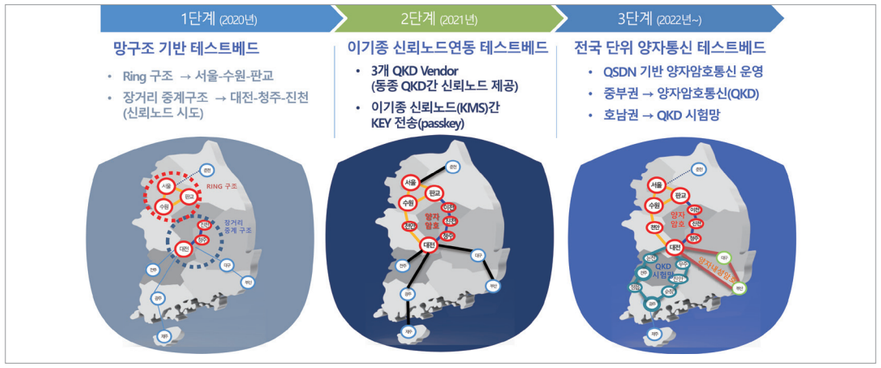
KT는 공공 통신망 양자암호통신 적용과 관련하여 2020년 한국지능정보사회진흥원(NIA)에서 발주한 초연결지능형연구개발망(KOREN) 사업에 양자암호통신망 구축 사업자로 선정돼 KIST와 공동연구를 통하여 서울 도심 반포, 강남, 서초, 양재와 우면동을 연결하는 QKD 네트워크망을 구성하였다. SK텔레콤은 2011년에 양자기술연구소인 퀀텀테크랩을 설립하였고, 2016년에는 QKD 장비를 활용하여 68km급 유선 QKD 국가시험망을 구현하였다. 2017년 2월에는 독일의 도이치텔레콤과 퀀텀얼라이언스를 결성하여 양자기술 개발을 도모하기도 하였다. 같은 해 5mm×5mm 크기의 초소형 양자난수 생성 칩과 양자를 통한 장거리 통신 중계장치를 개발하였다. 최근에는 양자암호통신의 핵심 기술인 QKD와 양자 난수 생성기 고도화에 집중하고 있는 추세이다. 2021년에는 기존의 5G 전송망을 활용한 QKD 암호화 기술 접목을 시도하였다. 2021년 5월 발표에 의하면 앞으로 SK텔레콤과 KT는 양자암호통신망을 혼용 구축해서 내부 양자암호 데이터를 서로 주고받을 수 있게 된다.[24] 서로 다른 이통사의 양자암호통신망을 혼용 구축하면 기술 개발 및 가격 경쟁을 유도할 수 있어 소비자 선택폭 또한 넓어질 것으로 전망되며 관리시스템도 통합되어 운영자가 다른 이통사의 양자암호통신망 장비를 한 번에 관리할 수 있게 돼 유지 보수가 쉬워질 수 있다.

그림 III-2-4 국내 양자통신 현황(KT, SK텔레콤)



※ NIA (2021) 집필진 재구성

그림 III-2-5 양자암호통신 테스트베드 구축현황



※ NIA (2022)

양자컴퓨터의 등장에 따른 보안 위협이 제기됨에 따라 양자기술을 활용한 QKD 뿐만 아니라 수학적 알고리듬에 기반을 둔 양자내성암호(Post-Quantum Cryptography, PQC) 또한 새로운 대응책으로 떠오르고 있다. 최근에는 QKD와 하이브리드 형태로 함께 이용하여 QKD와 PQC의 단점을 상호보완해야한다는 의견이 제시되고 있다. PQC 기술력을 보유한 LG유플러스는 2018년에 스페인 통신사업자인 텔레포니카와 양자암호통신과 데이터센터 망연동, 사업자 망간 연동, 소프트웨어 정의 네트워크(SDN)와 양자암호통신 접목 기술 연구 등 다양한 망연동 필드시험을 진행했다.[25] 2019년에는 서울대학교의 산업수학센터 및 크립토랩과 협약을 추진하였으며, 2020년에는 ICTK홀딩스, EYL, LG CNS와 협력하여 국내 최초로 IoT 단말용 양자보안칩 개발에 성공하였다.

한국전력은 한전 전력연구원, 송암시스콤, IDQ 등과 함께 2020년에 충남 안면 변전소부터 태안 변전소 간 40km 구간에 양자암호통신기술을 적용한 전력통신망 구축하였다. ETRI는 2005년 25km 유선 QKD 시스템을 시연한 후 요소 기술을 개발하고 있다. KIST에서는 2013년 Pug and Play QKD 시스템을 시연하고 1:N QKD 시스템에 대한 연구 개발을 진행 중이다. 고려대학교에서는 2015년 스마트 양자통신 연구센터를 중심으로 양자통신 채널 모델,양자통신기술 고도화 등의 연구를 수행 중이다. 서울시립대학교는 2017년 미국 공군연구소와 위성양자암호 과제를 3년간 진행하였다. 2020년에는 POSTECH, KAIST, KIST, ETRI에서 양자중계기 개발에 필요한 핵심기술인 단광자 광원 및 양자얽힘 광원 개발을 시작하였다. 같은 해 ETRI와 KIST에서 GHz급 광원 및 검출 소자 기반의 초소형 유선 QKD 칩/모듈 개발에 착수하였고, 같은 해 10월에는 ETRI에서 실리콘 및 질화규소를 이용한 광원소자와 집적회로 개발 및 이를 이용한 양자게이트(CNOT)의 구현에 성공하였다.

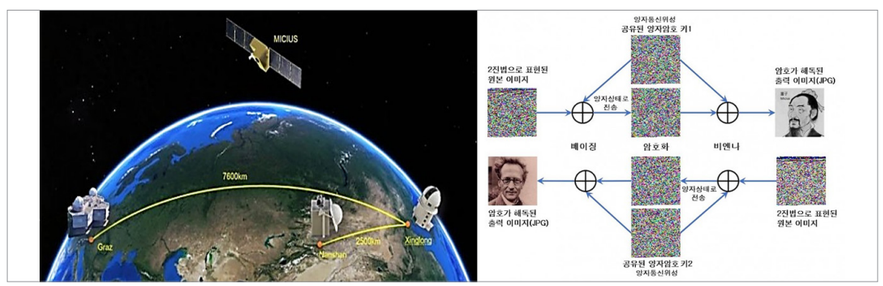
24) 전자신문 (2021)

25) LG유플러스 보도자료 (2018)

나. 인공위성 양자 키 분배 네트워크 구현 서비스

유선 기반 QKD의 통신 거리에 대한 한계와 기술 발전의 시간적 한계의 발생으로 인하여, QKD 네트워크를 글로벌하게 연결하기 위한 인공위성 QKD 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 2018년 위성을 신뢰 연계점으로 사용하여 중국과 오스트리아 총 7,600km 거리에서 양자 키 분배를 수행한 논문이 발표되었다.[26] 중국의 싱룽현, 난산구, 오스트리아 Graz에 지상국을 두고, 인공위성 Micious는 태양 동기궤도를 따라 회전하며 지상국과 QKD를 수행하였다. 날씨에 따라 1,000km에서 3kbps, 600km에서 9kbps의 양자키를 분배하였으며, 1~2.4%의 QBER의 결과를 얻었다고 발표했다.[13]

그림 III-2-6 중국의 묵자(Micius)호 무선 양자통신 및 과정



※ 동아사이언스 (2018)

영국에 기반을 둔 스타트업 Arqit는 2년 안에 위성을 발사해 전 세계에 양자네트워크 제공을 목표로 하고 있다.[27] 최근 미국 Northrop Grumman과 영국 BT와의 협력을 발표한 Arqit은 Virgin Orbit의 LauncherOne을 통해 2023년 영국의 스페이스포트 콘월에서 두 개의 QKD 위성을 발사하는 것을 목표로 하고 있다. 광섬유의 문제는 약 300km 이상에서 일부 양자 정보를 전송할 수 있지만 초당 약 1비트 미만으로 얻을 수 있어 초당 메가비트 또는 기가비트 단위 QKD를 수행하려면 유일한 해결책은 위성을 사용하는 것이다. 표준 구성 요소를 기반으로 설계된 Arqit의 약 300kg짜리 QKD 위성은 고도 700km에서 궤도에서 지구까지 양질의 전송을 제공할 수 있다. 또한 2021년 5월 캐나다와 영국의 연구팀은 2022년 이후 양자암호화 및 과학 위성(QEYSSat)에서 테스트 할 실험적인 QKD 페이로드를 개발한다고 발표했는데, 대서양을 사이에 두고 지상 간에 양자 암호화키를 전송하는 것을 목표로 하고 있다.

26) 동아사이언스 (2018)
27) David (2021)

한화시스템은 위성 간 링크의 주요 기술인 인공위성 초정밀 지향·추적 기술과 KT의 양자암호 기술을 접목, 레이저 통신 기반의 무선 양자암호통신 기술을 공동으로 개발할 계획이다.[28] 두 회사는 초정밀 지향·추적 기술을 통해 양자통신의 원거리 송수신 성공률을 획기적으로 높여 무선 양자암호통신의 실용화를 앞당길 것으로 기대하고 있다.

2018년에 ETRI는 양자신호를 100m 떨어진 거리에 전송하는데 성공했다고 발표하였다. 이는 햇빛이 강한 야외에서 양자신호를 전송하고 복원하는데 성공한 세계 첫 사례로 꼽히고 있다. 이로써, 해킹 또는 도청을 원천 차단하는 통신망 구축에 한걸음 더 다가선 성과로 평가될 수 있었다.

2. 보안 서비스를 위한 양자암호 시스템

가. 양자통신과 현대암호 Post-Processing 알고리듬

완전한 보안 서비스를 제공하기 위해서는 QKD 시스템만으로는 부족하다. 기본적으로 일반적인 암호시스템은 무결성, 기밀성, 인증, 부인방지를 반드시 제공해야 하는데, QKD는 이 중에 기밀성만을 제공한다. 즉, QKD와 함께 완전한 보안 서비스를 구축하려면 이 기능을 양자적인 안전성을 바탕으로 제공할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다. 따라서 인증, 부인방지를 위해 은행과 같은 신뢰할 수 있는 기관을 두고 양자의 얽힘 특성을 이용한 프로토콜이 제안되었으나, 얽힘 광자쌍을 많이 준비해야 할수록 실제 구현에서 난도가 증가하며, 효율로 인한 실용성이 떨어진다. 무결성, 인증, 부인방지를 양자키를 기반한 현대암호로 수행하고, QKD로 기밀성을 제공하는 방식이 이상적으로 사용될 수 있으나, 양자컴퓨터의 발현에서도 안전하게 사용될 수 있을지는 미지수다. 양자통신과 현대암호의 Post-Processing 알고리듬의 협력방안이 필요하다.[3]

나. 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스

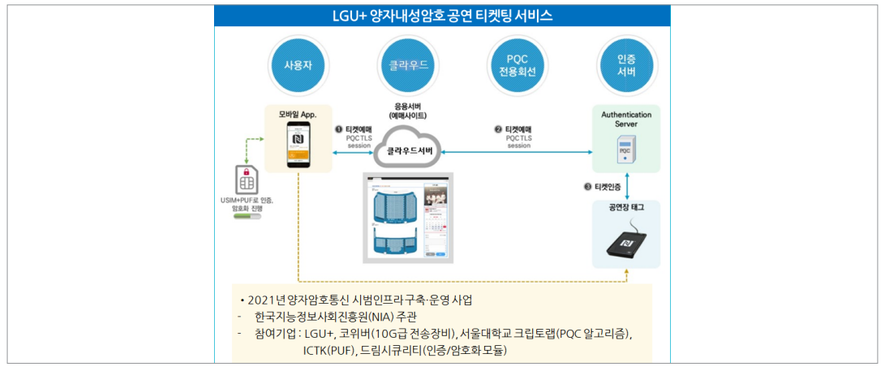
2021년 6월 LG유플러스는 양자암호통신 인프라 구축사업을 통해 양자보안체계를 업그레이드하고, 공연·엔터테인먼트 분야 응용 서비스에 양자보안을 확대 적용할 계획을 발표하였다.[29] 2020년 산업·의료 분야 전용회선에서 검증한 양자내성암호를 공연·엔터분야 응용서비스에도 확대 적용하는 것을 목적으로 하고 있다. 양자내성암호를 활용한 End-to-End 암호키교환 방식은 전송거리에 제약이 없고, 향후 해저케이블 구간에도 적용할 수 있다는 장점이 있으며 이미 구축한 전송망에 선로를 추가로 구성

28) 홍경표 (2022)
29) 천선우 (2021)

하거나 중계 노드를 만들 필요 없이 양단 구성만으로 보안을 구성할 수 있다. 이 때문에 데이터 전송의 전 계층과 국내외 고객전용망, 기간망, Access망, 모바일 코어망 등 각종 통신망, 비대면 국제회의/화상 수업 등 다양한 서비스에 적용할 수 있어 확장성도 뛰어난 것으로 평가받고 있다. 더불어 2020년에 USB에 넣었던 양자난수기반 물리복제방지칩(PUF)을 유심(USIM)과 IC카드에 탑재해 개인정보 데이터베이스 관리, 공연티켓 예매/구매자 인증 강화, 안면인식 활용 산업체 출입보안 등 응용서비스에 활용한다는 것이다. PUF-USIM은 복제가 불가능한 물리적 고유키를 이용해 인증서를 내장하는 PUF 칩이 USIM 안에 들어간 보안이 강화된 유심으로 소형 디바이스, IoT기기 등에도 적용할 수 있다.

[그림 Ⅲ-2-7]처럼 스마트폰을 통해 고객이 공연티켓을 예매하면 이 예매정보가 양자내성암호가 적용된 전용회선을 거쳐 LG유플러스의 인터넷데이터센터를 통해 구매정보 서버로 전달되고, 공연 전 고객이 티켓을 발권할 때는 양자보안이 적용된 PUF-USIM 인증기술을 통해 티켓 구매자임을 인증하게 돼 안전한 예매-발권이 가능해지는 것이다. 이는 티켓 구매 인증정보를 투명하게 처리해 암표거래도 방지할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

그림 Ⅲ-2-7 양자암호 적용 사례(LG유플러스)

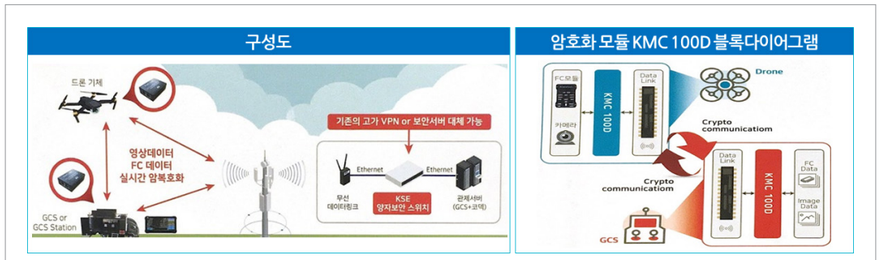


※ 천선우 (2021) 집필진 재구성

다. 드론용 양자암호모듈

2021년 7월 케이씨에스는 드론 전용 양자암호모듈 KMC 100D를 소개하였는데, 이는 실시간 영상 데이터 암·복화화, 기기인증 등 암호통신을 위한 다양한 보안 기능을 제공한다. 하드웨어 로직 기반의 암호 알고리듬이 탑재된 ASIC 암호칩을 활용하였으며, 텔레메트리 신호와 영상 신호의 암·복호화가 독립적으로 운영돼 성능을 최적화하여 실시간 수준으로 영상 암·복호화가 가능하다.[30]

그림 Ⅲ-2-8 드론용 양자암호화 모듈(케이씨에스)



※ 박재희 (2021) 집필진 재구성

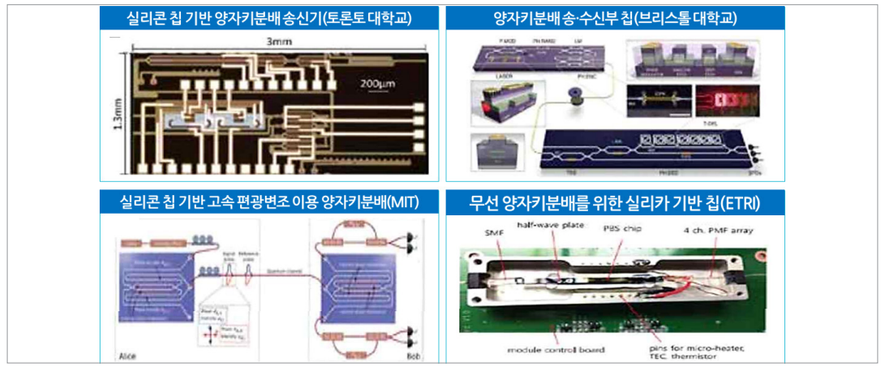
3. 양자 키 분배 시스템의 소형화

QKD 시스템의 상용화를 위해서는 경제적인 경쟁력이 뒷받침되어야 한다. 이를 위해서는 QKD 시스템의 소형화를 위한 칩 기반의 QKD 시스템의 연구가 필요하다.[31] 광 직접 소자를 이용한 QKD 소형화 연구는 2010년대부터 활발히 이루어졌다. [그림 Ⅲ-2-9]에서처럼 캐나다 토론토대학교 Lo 연구팀의 QKD를 위한 실리콘 칩은 표준 공정으로 제작되었으며 1.3mm×3mm의 크기에 펄스발생기, 강도변조기, 가변광감쇠기 및 편광변조기를 집적화하였다. 영국의 브리스톨대학교의 O'brien 연구팀은 InP 기반 QKD 송신기와 SiOxNy 기반 수신기를 공정하여 고속의 QKD를 수행하였는데, BB84를 포함하여 Coherent One Way, Differential Phase Shift 프로토콜의 QKD가 가능한 형태의 송·수신부 칩을 제안하였다. 미국 MIT의 Dirk Englund 연구팀은 실리콘 칩 기반 고속편광제어를 통해 QKD를 실제 환경에서 구동하여 도심 43km 거리에서 157kbps의 비밀키 생성 속도를 보였다고 발표했다. 이 외에도 덴마크, 중국에서 칩 기반의 QKD를 위해 연구 중이다.[30] 한국 ETRI에서 발표한 무선 QKD를 위한 SiO_2기반 편광 인코딩 칩 모듈은 편광빔분리기, 반파장판, 빔분리기를 하나의 칩으로 집적했는데, 무선 QKD를 위한 송신부로 사용될 수 있다. 이를 이용하여 낮 환경에서 성공적으로 QKD를 수행하였다. 한국 KIST에서는 $LiNbO_3$를 이용하여 QKD 필요한 능동, 수동 소자를 구현하는 연구를 진행 중에 있다.[30]

30) 박재희 (2021)

31) 박병권·한상욱 (2022)

그림 III-2-9 국내외 상용 양자 키 분배 시스템 소형화 동향



※ 박병권·한상욱 (2022) 집필진 재구성

한국 보안 스타트업인 EYL이 개발한 양자난수 기술 적용 초소형 암호칩이 미국 공군이 사용하는 드론 등 무인정찰기에 들어가고 있다.[32] EYL은 [그림 III-2-10]처럼 지난 2021년 5월에 양자 난수 생성기와 암호기능의 단일칩 형태로 집적한 암호칩인 양자보안칩(Quantum Crypto Chip, QCC) 자체개발에 성공했다.[33] QCC는 기존 양자 난수 생성기의 성능을 높여 다양한 암호 알고리듬을 처리할 수 있는 가속기술과 암호키를 안전하게 보관하는 HSM, eFlash 기술을 칩 하나에 구현해 기존 암호칩 대비 높은 보안성을 제공한다. ARM 코어텍스(Cortex)-M4 코어와 양자 난수 생성기로부터 발생되는 무작위 현상을 회로에 접목, 소비전력 분석 등을 통해 암호키를 외부로부터 해킹하는 부채널 방어기술도 포함하고 있다. QCC는 보안이 중요한 자율주행, 드론을 포함한 IoT 전 영역에 적용할 수 있는 칩으로 가격 경쟁력도 갖춰 활용처가 확대될 것으로 기대하고 되고 있다.

그림 III-2-10 EYL 개발 초소형 암호칩과 퀀텀크립토칩



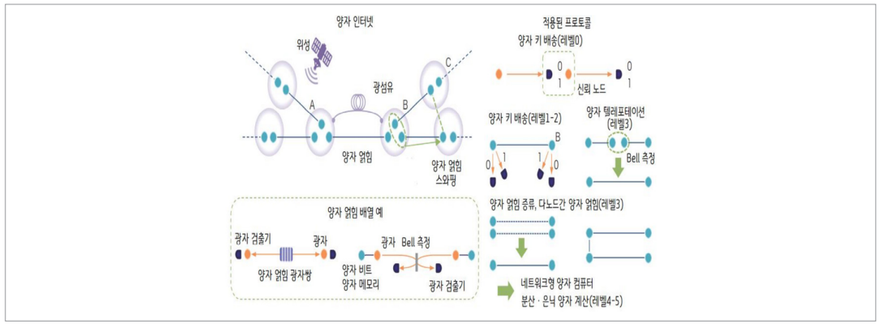
※ 전자신문 (2022), 최태우 (2021) 집필진 재구성

32) 전자신문 (2020)
33) 최태우 (2021)

4. 양자인터넷 서비스

양자인터넷의 최종 형태는 지금처럼 컴퓨터나 센서가 인터넷에 연결되어 작동하는 대규모 네트워크형 양자컴퓨터이다.[13] [그림 III-2-11]과 같이 인터넷상의 각 노드에 배치된 양자컴퓨터 및 양자센서 등은 양자얽힘에 의해 연결되고 양자통신에 의해 배포된다. 그래서 양자컴퓨터 안에 형성된 양자네트워크를 양자인터넷이라 부르기도 한다. 이처럼 양자얽힘에 의해 연결된 양자디바이스군으로 구성된 양자인터넷은 하나로 작동하며, 양자텔레포테이션을 사용하는 다양한 양자 프로토콜을 실현할 수 있는 만능성을 가진다. 네트워크상의 임의의 결절점 사이에서 QKD를 수행하는 것도 가능하다. 양자인터넷 구상에서는 자율주행과 마찬가지로 가능한 태스크에 따라, 필요로 하는 양자인터넷상의 각 노드의 기술 레벨에 따라 레벨 0~5로 나뉜다. 레벨이 높은 노드 기술은 레벨이 낮은 노드 기술을 포함하기 때문에, 기본적으로 레벨이 높은 인터넷은 레벨이 낮은 인터넷의 기능을 포함한다. 하지만 통신 속도 등의 다른 지표에서는 반드시 그렇지만은 않다.

그림 III-2-11 양자암호통신을 포함한 양자인터넷 개념도



※ IRS Global (2022)

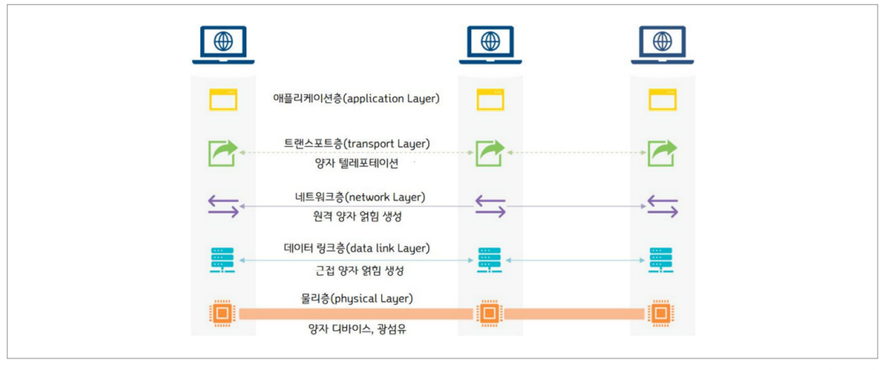
미국은 에너지부를 중심으로 2020년 양자인터넷 청사진 전략을 제시했는데, 향후 10년 안에 세계적인 규모의 양자인터넷의 프로토타입이 실현될 것을 염두에 두고 연구 방침을 정리하였으며, 각국의 프로젝트와도 보조를 맞추고 있다. 일본 총무성은 레벨 0을 중심으로 하는 양자보안통신 프로젝트를 보유하고 있고, 문부과학성에서는 양자컴퓨터 개발의 일부로 Moonshot형 연구개발 사업인 네트워크형 양자컴퓨터를 연구하고 있다.

양자인터넷의 네트워크 계층은 [그림 III-2-12]에서처럼 TCP/IP와 같이 최하위층에서부터 물리층, 데이터 링크층, 네트워크층, 트랜스포트층 및 애플리케이션층으로 구성되어 있다. 물리층은 모든 양자디바이스와 광섬유를 포함하며, 양자정보를 생성, 조작, 측정하고, 타이밍을 동기화한다. 데이터 링크층

은 물리층을 움직이는 역할을 하며, 서로 떨어진 양자 노드 간에 양자얽힘을 만들어낸다. 이 때 상위층에서 데이터 링크층으로 요구를 보낸다. 네트워크층은 광섬유 등에서 직접 연결되지 않은 노드 간을 양자 얽힘 스와핑함으로써 장거리 양자얽힘을 생성하는 역할을 한다. 트랜스포트층은 양자 텔레포테이션을 사용하여 양자비트를 확실하게 송신하는 역할을 한다. 애플리케이션층에서는 애플리케이션이 기존의 네트워크 기능과 양자네트워크 기능 모두를 이용할 수 있고, 임의의 양자암호 프로토콜, 분산 양자계산, 양자센서 네트워크 등의 프로토콜이 적용된다. 중위층은 양자컴퓨터 연구의 미들웨어 개발과 깊게 관련되어 있으며, 물리층과 애플리케이션층의 개발과 더불어 진행할 것으로 보인다.[13] 양자인터넷의 애플리케이션은 크게 다음과 같이 3가지로 나뉘며, 새로운 애플리케이션의 창출도 요구되고 있다.

- 양자센서 네트워크 : 원자시계 등의 양자시계 네트워크는 주목받는 연구 대상인 애플리케이션이다. 양자기술에 의한 망원경의 네트워크도 고정밀화에 기여한다.
- 네트워크형 양자컴퓨터 : 양자컴퓨터의 양자네트워킹은 고전 시스템을 중간에 두지 않는 네트워크형 양자컴퓨터를 실현한다. 또한 분산 양자 컴퓨팅은 양자네트워크를 통해 다수의 작은 양자컴퓨터를 연결하여, 단일 양자컴퓨터에서는 불가능한 규모의 계산 능력을 제공한다. 또한 은닉계산과 같은 임의의 양자알고리듬을 실현한다. 예를 들어, 블라인드 양자컴퓨팅에서는 은닉 양자계산이 가능하다.
- 양자암호 : 신뢰 노드가 없는 양자인터넷은 양자컴퓨터를 포함한 모든 도청 방법에 대해 보안통신을 실현하는 양자암호통신이 가능하며, 이른바 킬러 애플리케이션이 될 수 있다. 이것을 가장 빠르게 이용하는 것이 국가 안전 보장, 은행, 에너지 공급 인프라 등의 분야다. 또한 의료 서비스, 정부 서비스보안(선거), 게임 등도 포함된다.

그림 III-2-12 양자인터넷의 네트워크 계층



※ IRS Global (2022)

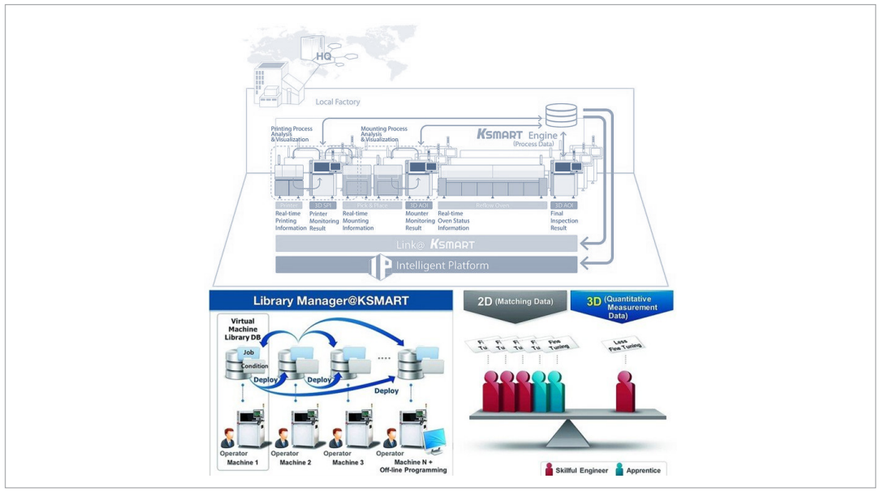
한국의 양자인터넷 기발 계획은 2022년부터 핵심원천기술개발을 시작으로 3단계에 걸쳐 실용화기술 개발까지 진행될 예정이다. 이를 위해서 1단계에 ETRI의 양자인터넷 구현을 위한 유선양자중계기 개발과 경량형 무선 양자중계기 플랫폼 기술개발, 서울대학교의 이온트랩 기반 양자메모리 개발 및 이를 이용한 양자네트워크 핵심 기술 개발, 연세대학교의 원자앙상블 기반 양자메모리, KRISS와 광주과학기술원(GIST)의 고체소재 기반 양자메모리 개발 등이 있다.

제3절 제조

1. 스마트팩토리

제조업 분야에서 효율적인 생산관리를 위해 대두되는 기술로 스마트팩토리[34]를 꼽을 수 있다. 4차 산업혁명으로 기존의 단순한 생산방식에서 벗어나 IoT, 빅데이터 등 정보통신기술과의 융합을 통해 생산과정의 최적화 및 생산성의 급격한 향상이 이루어질 것으로 전망된다. 스마트팩토리는 AI, IoT, 빅데이터 등 ICT 기술의 적용으로 데이터가 유기적으로 연결되고 이를 바탕으로 생산 공정이 스스로 제어된다. 그에 따라 제어시스템의 복잡도 증가로 발생한 취약점 대상 공격이 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 스마트팩토리 통신망에 양자암호통신을 적용하는 방안을 검토할 수 있다.

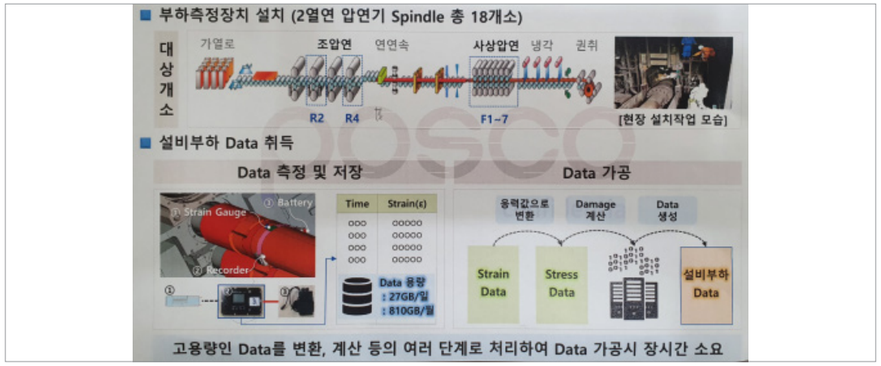
그림 III-2-13 양자가 가져올 미래 공장



※ Koh Young (2017)

한국 포스코의 경우 철강 생산라인에 적용되는 장치의 모니터링에 대한 데이터의 처리와 암호화에 관심을 갖고 있는 것으로 확인되었다. 포스코와 같은 철강 기업의 경우 공정라인의 지속적인 모니터링에 대한 수요가 있으며, 이는 운용되는 장비의 수명과 직결되어 중요한 사안으로 생산라인의 원활한 운용을 위해 처리되는 데이터의 보안도 중요하게 다루어질 수 있다. 데이터가 전송되는 구간은 두 가지로 나뉠 수 있는데 공정라인 장비에서 수집되는 정보를 분석서버로 전송하는 구간, 분석 서버에서 계산된 데이터가 저장되는 DB서버 사이의 구간이 있다. 이 구간에 양자암호통신을 적용하여 모니터링 데이터의 보안성을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.[35]

그림 III-2-14 실시간 압연기 스핀들 응력 모니터링 체계(포스코)



※ 포스코 (2021)

34) Koh Young (2017)

35) 한국지능정보사회진흥원 (2021)

제4절 의료

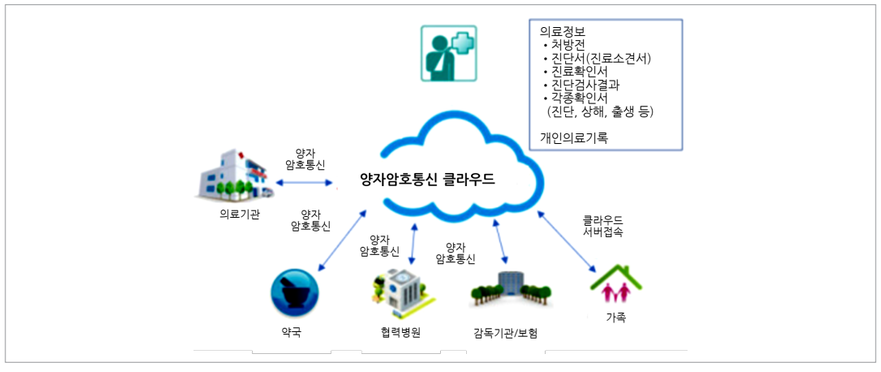
1. 양자암호통신기반 의료 클라우드 서비스

의료 클라우드 서비스는 의료기관에서 의료데이터 및 환자정보 등을 클라우드에 모아 인터넷을 통해 이용 가능한 서비스이다. 현재의 외래진료, 입원진료, 원무 등 다양한 병원 업무를 표준 모듈 단위로 제공하고 다양한 규모의 병원 수요에 신속하고 경제적 대응을 위해 대용량 의료 데이터의 보호가 필요하다. 특히 1,000 병상 이상 상급종합병원의 엔터프라이즈급 병원 정보시스템의 경우 클라우드로 제공하여 마치 하나의 병원처럼 의료 빅데이터를 제공하면서 보안의 필요성이 증가되고 있다. 이러한 보안이 필요한 대학병원이나 종합병원 등을 대상으로 보안성과 효율성이 높은 양자암호통신 기술을 활용한 클라우드 의료 시스템 서비스를 제공할 수 있으며, 병원과 데이터센터 사이에 양자암호통신기술을 적용하여 의료데이터를 보호할 수 있을 것이다. 아울러 의료기관과 약국 간, 협력병원 간, 감독기관/보험사간에 양자암호통신을 적용하는 것이 가능할 것이다. 양자암호통신기반 클라우드 의료서비스는 대표적으로 대학병원 등 대상으로 한 클라우드와 빅데이터 활용서비스, 맞춤형 환자 정밀 의료 서비스의 제공이 있을 수 있다. 통신사가 보유한 전국의 지역별 데이터센터에 양자암호통신기술을 적용을 확대할 수 있고, 대학병원·종합병원 등으로부터 수요기관 신청을 받아 체계적인 양자암호통신 기반 클라우드 서비스를 제공할 수 있다.[3)]

2. 의료 데이터 전송 서비스

Toshiba는 2019년 토호쿠대학교와 공동으로 개인정보에 해당하는 사람의 유전자 정보를 분석한 게놈 데이터에 양자암호를 걸어 통신하는 실증실험을 전개해 기존의 광섬유에서 통신할 수 있는 기술을 확립했다.[13)] 한국 넷케이티아이(netKTi)는 양자암호인프라 구축 실증사업 참여를 준비하고 있는 것으로 조사되었다. 특히, 의료분야를 중심으로 순천향대병원과 양자암호인프라 실증사업을 계획하고 있는데, 국내·국제 원격협진 시 수술영상 전송 등을 위한 양자암호통신을 적용하려 하고 있다. 시범인프라 사업을 통해 성모병원은 인공지능 음성인식 진료기록 시스템 및 의료 기록 데이터 저장에 대한 분야를, 순천향대병원은 양자 원격의료협진에 대한 연구를 개발하고 있다. 세브란스병원은 SK브로드밴드와 함께 블록체인 실손보험청구, 의료 빅데이터 전송 및 사고예방 알림 시스템에 대한 연구 개발을 진행하고 있으며, 을지대병원은 LG유플러스와 손을 잡고 PQC 기반의 의료 데이터 전송 시스템 구축을 수행하고 있다. 이외에 분당서울대병원도 양자적용방안에 대해 모색 중인 것으로 알려져 있다.

그림 III-2-15 양자암호통신 클라우드 의료서비스 구성도



※ SGA솔루션즈 (2016) 집필진 재구성

제5절 금융

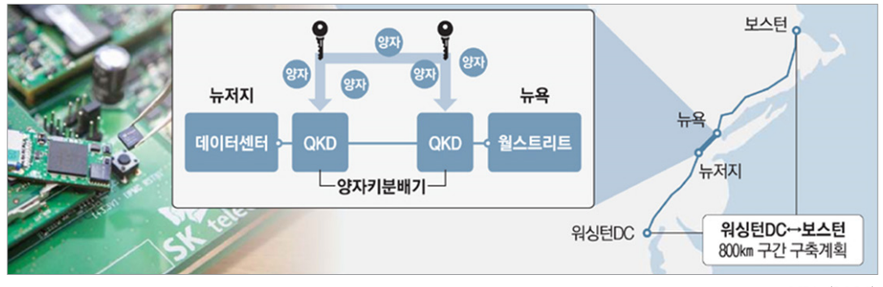
1. 블록체인 기반 금융서비스 보안 서비스

중앙화폐시스템에 대한 불신과 새로운 디지털 토큰, 중앙은행 디지털 화폐와 같은 가치저장수단에 대한 요구가 급증함에 따라, 블록체인 기술 기반의 암호화 화폐 등에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이와 관련하여 분사 ID는 분산원장기술을 기본으로 사용자 본인이 자신이 ID와 데이터를 소유 관리하는 탈중앙화된 자기주도형 디지털 신원증명 기술로 블록체인 기반 서비스를 이용하는데 있어 필수적이며, 이를 통해 각 서비스 제공기관마다 사용자의 개인정보를 보호할 수 있다. 또한 크립토앵커(Crypto-anchor), IoT 기반 비콘(Beacon) 등의 검증 도구를 활용하여 악성 및 허위 데이터 소스를 식별하고 블록체인 생태계의 신뢰성을 증대시키고 있다.[3)] 하지만, 현재의 블록체인 기반 암호화 화폐에 대한 해킹의 시도와 양자컴퓨팅 기술에 의한 현행 암호화 체계의 위협과 같은 문제점이 제기되고 있다. 또한 금융 시장에서 옵션 가격의 책정을 위한 컴퓨팅 연산의 한계점 문제가 대두되고 있다. 이에, 산업계에서 양자기술을 접목한 금융서비스의 니즈가 증대되고 있다. 관련 업계에서는 양자 금융 시스템의 도입으로 현존하는 각종 금융 부패를 종식시킬 수 있을 것으로 전망하고 있다. 또한 양자컴퓨터 개발 등에 따라서 가상화폐 등 블록체인 기반 금융서비스 위협에 대응할 수 있는 방안으로 블록체인 노드 간 통신채널에 대해 양자암호통신을 적용하는 방안을 검토할 수 있다. 또한 글로벌 금융업계에서는 양자 금융 시스템이 현재의 중앙제어 시스템을 글로벌 분산제어 방식으로 전환할 수 있을 것으로 기대하고 있다.[35)]

2. 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스

미국 Ripple Labs은 2009년 미국에서 간편 송금을 목적으로 개발된 결제 프로토콜 비즈니스로 시작한 후 2012년 암호화폐를 발행하고 현재까지 Bank of America, Standard Chartered Bank, UBS 등 세계 유수의 은행 및 금융사들과 협약을 맺고 송금 기술을 은행 고유의 송금시스템에 적용하기 위해 노력하고 있다.[3)] 2015년에 인터레저(Interledger) 기술개발을 시작하여 현재까지 개발 중에 있으며 이는 파편화된 은행이나 카드의 기존 결제시스템을 블록체인을 기반으로 연동할 수 있는 연동 기술을 개발하였다. 미국 R3는 분산원장을 통해 은행 및 금융기관들의 업무절차 최소화·효율화 서비스를 제공하는데 분산원장기술을 기반으로 인증, 스마트 컨트랙트, 보고자동화, 은행 간 조정 최소화, 업무 효율화 등 다양한 유관기술을 연구 중이다.[3)] Toshiba는 기밀 정보를 다루는 정부와 금융기관 등으로부터 암호통신 이용료를 받는 사업 방식으로 서비스를 제공하며[22)] 2020년부터 미국 금융기관을 대상으로 서비스에 착수하고 단계적으로 서비스 영역을 넓혀나가고 있다.[21)]

그림 III-2-16 미국 금융망 양자통신 적용 사례



※ NIA (2021)

3. 금융데이터 분석 및 보안 서비스

얽힘광자 기반 QKD의 은행 송금을 처리하기 위해 오스트리아의 대형 은행 본사와 빈 시청 사이에 QKD 시스템을 설치하여 도시 환경에서 1.45km 유리 섬유를 통해 비밀 키를 성공적으로 배포 가능하다는 것을 입증하였다.[3)] 중국 ANT financial은 신용분석, 마케팅 분석 및 은행데이터 결합분석 등을 위해 동형암호기술을 적용하고 있다. 독일 AllianzX는 스코틀랜드왕립은행과 함께 시리즈B 펀딩 라운드에서 양자컴퓨터 스타트업 1Qbit에 4,500만 캐나다 달러를 투자하였고, SAP는 2018년 동형암호를 핵심 요소기술로 소개한 후, SAP 이노베이션 센터 네트워크 전담조직을 통해 사업적 활용 방안 모색 및 블록체인, 벤치마킹 및 마케팅 서비스에 기술 적용을 진행하고 있다. 2020년 SK텔레콤은 SK브로드밴드 및 유알정보기술과 컨소시엄을 구성하여 양자암호통신 시범인프라 사업에 참여하였으며, 해당 사업에 수요기관으로는 광주광역시청, 연세의료원, 한화시스템, 우리은행, CJ올리브네트웍스 등이 참가하였다. 예를 들면 우리은행 40km 떨어진 우리은행 전자센터와 콜센터 사이에 양자암호통신망을 구성하고 콜센터의 근무자와 방문자를 대상으로 비대면 안면인식을 통해 측정된 민감 정보를 데이터 서버로 전송하는 기술 개발을 진행하였다.[3)]

1. 자율주행 배송 서비스(배송로봇·드론)에 양자암호 적용

미국의 아마존은 2019년 1월에는 자율주행 배송로봇 스카우트를 상용화하여 워싱턴을 비롯한 캘리포니아주, 조지아주 애틀랜타, 테네시주 프랭클린 지역으로 확장 중이다. 2020년 9월에는 배송용 드론 무인기 프라임에어에 대해 미국연방항공청에서 운항허가를 받아 서비스를 추진하고 있다.

그림 III-2-17 미국 아마존 배송 드론 및 로봇



※ 아마존 홈페이지

한국에서도 물류 효율화를 위한 배송로봇 도입에 관심이 늘고 있다. 코로나 사태로 택배 수요가 늘어나면서 20년 한 해 동안 국내 택배 이용 건은 33억7천만 건으로 2014년 대비 2배 이상 늘었다. 이러한 상황을 타개하기 위해 기획재정부에서는 미래형 운송수단 활용 물류서비스를 2021년 한걸음 모델 적용과제로 선정하여 배송로봇의 상용화에 박차를 가하고 있는 상황이다. 아울러 2021년 2월 화물배송용 드론사업자로 ㈜해양드론기술이 등록되면서 부산 남외항 부두에서 2km 이내 거리에 정박 중인 선박에 서류, 소독약 등 경량 물품을 드론으로 배송하는 서비스를 제공하였다. 이렇듯 국내 배송로봇·드론 시장이 점차 활성화 될 것으로 기대된다.[35)]

한편 보안적인 측면에서 국내 배송로봇·드론시장 활성화에 대해 우려하는 의견도 있다. 드론에 탑재되는 통신시스템의 취약점 노출로 인해 드론이 탈취되어 물품 분실·도난 등의 문제가 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 배송로봇·드론이 발전하는 만큼 보안성 향상의 필요는 필수불가결로 따라오게 된다. 2021년 양자암호 시범인프라 구축사업의 양자-드론 서비스는 산업계 요구와 부합한다. 양자-드론서비스는 지상에서 드론이 충전되는 동안 양자암호키를 저장하여, 드론 운행 중 전송되는 영상 및 제어신호 등의 데이터를 암호화하여 기밀성을 확보할 수 있다.

우정경영연구소는 [그림 III-2-18][36)]과 같이 드론을 활용한 물류서비스 모델을 제시하였다. 양자암호통신을 적용한다면 우체국·집중국 등에서 택배를 수령 및 드론 충전 시 QKD를 통해 양자암호키를 주입받아 무선통신망을 통해 운영관제시스템과의 양자암호통신 적용이 가능할 것이다.

그림 III-2-18 한국 물류 사각지대 운영 드론 서비스 모델



※ 정훈, 이헌규 (2015)

36) 정훈, 이헌규 (2015)

제3장 양자센서분야 산업화 모델

제1절 개요

양자센서는 양자관성센서, 양자시간측정센서, 양자자기장·전기장센서, 양자광학센서 등 다양한 센서 기술을 기반으로 여러 산업에 다양하게 적용할 수 있다. 양자센서 종류별 응용될 주요 사업군에 대해 [그림 Ⅲ-3-1]에 기술한 것처럼, 산업 및 농업, 의료, 석유 가스, 유틸리티 및 건설, 국방 및 안보, 로봇공학 등 다양하게 분포되어 있다.[37] 산업 및 농업 분야에서는 전력전송상태 모니터링, 추적자 감지, 공정제어, 가스감지, 네트워크 시간 분포 등, 의료분야에서는 신경감지, 새로운 MRI 시스템, 진단이미징 기술이 적용 가능한 것처럼 양자센서는 다양한 분야에서 양자이론을 기반으로 보다 정밀한 센싱을 통해서 원하는 정보를 제공하는 역할을 수행할 수 있는 것으로 보여진다.

그림 Ⅲ-3-1 양자센서의 주요 산업 적용 영역

	산업 및 농업	의료	석유 가스	유틸리티 및 건설	국방 및 안보	로봇 공학
중력 / 가속도			탐사 유정 조절	측량 매장된 자산	항해	
회전 감지			다운홀 조사		항해	항해
전기장	전력 전송 상태 모니터링				RF 감지	원격 감지
자기장	추적자 감지	신경 감지 새로운 MRI 시스템	측량 추적자	금속 탐자기	EOD 감지	
단일광자 감지기/ 분광기	공정 제어 가스 감지	진단 이미징	누출 감지	누출 감지	라이다 암호화	원격 감지
원자 시계	네트워크 시간 분포			측량 포지셔닝	항해 시간 분포	항해

※ Simon Jordan (2020) 집필진 재구성

이러한 아이디어를 기반으로 이미 해외 일부 국가에서는 상용화를 눈앞에 둔 기술들을 다수 보유하고 있으며 멀지 않은 미래에 적용 가능할 것으로 판단된다. 본 장에서는 양자센서 분야에서 의료, 국방, 금융 등 6개 산업영역으로부터 총 15개의 산업화 모델을 소개한다.

37) Simon Jordan (2020)

표 III-3-1 양자센서 주요 분야별 산업화 모델 개요

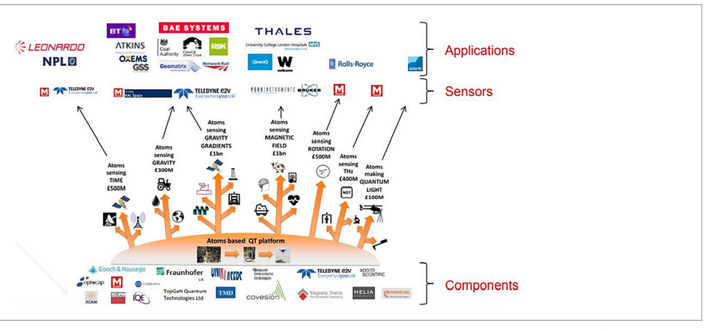
구분	산업화 모델
국방·안보	① 양자라이다, 양자레이더 등
제조·반도체	① 양자센서 기반 배터리 불량 검출 ② 양자센서 기반 가스센싱 기술 등
의료	① 뇌자도 검사 ② 심자도 측정 ③ 양자현미경·양자내시경 의료분야 접목 ④ 양자 MRI 의료진단 서비스 등
교통·물류·항공	① 항공기 시각주기유도 시스템 ② 자율자동차용 양자 라이다 ③ 주행 정확도 및 안정성 향상 등
유틸리티 및 건설	① 양자중력센서기반 지하통신시설물 위치 파악 ② 통신선로 단락 검출
기타 산업	① 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사 ② 석유 및 가스 탐사 ③ 가스 파이프라인 감시

※ 양자센서분야의 추가적인 산업화 모델은 본 3편의 1장(산업영역별 산업화 모델)을 참조

EU Flagship은 2018년부터 10년 동안 3,700만 달러를 투자하여 광기반 양자시계, 원자 증기셀 기반 각속도·자기장·시계, 다이아몬드 NV 중심 기반 MRI 이미징, 다이아몬드 NV 중심 기반 자기장·전기장·온도·압력센서 등의 총 4개 양자센싱 프로젝트를 지원하고 있다.[13] 각 프로젝트는 다이아몬드 NV 중심 기반 양자센서의 소재, 측정, 소자 기술(ASTERIQS), 다이몬드 NV 중심 기반 의료 이미징(MetaboliQs), 원자 광시계 응용 컨소시움(iqClock) 및 MEMS 원자 증기셀 기반 다목적 양자센서(macQsimal)를 개발하는 것이다.

영국은 퀀텀 기술 허브를 통해 2014년부터 10년 동안 총 4,000억 원 규모로 지원을 하고 있으며 중력계, 자력계, 자이로스코프, 원자시계, 양자이미징 등 총 12개의 양자센싱 프로젝트를 진행하고 있다.[13] 휴대 가능한 원자시계, 새로운 양자센싱 방식, 보안통신을 위한 양자기술은 표적 투자에 의해 산업화가 가속화될 수 있어 표시된 보수적 기간보다 먼저 상용제품으로 등장할 가능성이 있다. 양자센서의 부품을 개발하고, 이를 기반으로 센서 자체를 개발하여 응용하려는 다양한 기업들이 지속적으로 발굴되고 있다.

그림 III-3-2 영국 양자기술 산업 생태계 관련 주요기업



※ 권택용 (2022)

일본은 다이아몬드 NV 중심 등을 이용한 고체 양자센서 개발에 박차를 가하고 있다. 소형으로 강건성이 뛰어난 초감도 고체센서를 구현하여 의료 또는 헬스 케어 분야의 자기뇌파 측정, 극한 환경이나 생명 분야에 이용을 기대하고 있다. 5년 후에 10^{-12}T, 10년 후에는 10^{-14}T의 실온 상태의 미약한 자기장 관측하고 온도나 전류 동시 계측기술 등을 확립하려고 한다. 또한 센서 고감도화를 위해 고도의 양자상태 제어기술 개발과 센서 재료 고품질화를 추진하고 있다.

한국은 2019년 1조 원 가량인 양자센서 세계 시장 규모가 10년 후인 2028년에는 약 2.5조원 규모로 성장할 것으로 예측하고 있다.[13] 양자자력계, 원자시계 등이 양자센서 시장을 주도할 것으로 예상되는 가운데, 양자센서는 항해·운송, 의료 등을 중심으로 산업, 의료전반에 걸쳐 수요가 증가할 것으로 예상된다. 국방과학연구소는 원자 스핀 자이로 연구를 2016년부터 수행하고 있으며, 2016년에서 2019년까지 원자 스핀 자이로의 개념 파악 및 센서 개발을 수행하고 있다.

그림 III-3-3 양자센서의 산업화 동향

구분	주요 내용	구분	주요 내용
Lockheed Martin(미)	양자 레이더, 양자 자기장 센서 이용 항법 시스템 개발 중	GWR (영국)	초전도 기반 중력계 상용화
Bosch (독일)	휴대용 NV 기반 양자 자기장 센서 개발	M Squared (영국)	관성(가속도) 상용화 단일파장 레이저, 초고속 안정화 레이저, 3D 용량 이미징 등 상용화
Qnami (스위스)	나노스케일 이미징 시제품 상용화	Sparrow Quantum(덴)	단일광자 광원 상용화
MuQuans (프랑스)	레이저 냉각 원자시계, 양자중력계 상용화	Microsemi (미국)	초소형 원자시계, 소형 원자시계 상용화
AOSense (미국)	양자중력계 상용화	Teledyne (미국)	초소형 원자시계 상용화
Honeywell (미국)	초소형 원자 가속도계 개발중	Oscilloquartz (스위스)	네트워크 동기화 세슘 원자시계 상용화
QDTI (미국)	다이아몬드기반 면역분석 장치	SQUTEC (독일)	내시경과 결합한 양자자기장센서 -심사도 측정



※ 권택용 (2022)

제2절 국방·안보

중력변화 및 가속도를 측정하는 중력계, 회전 변화량 및 각속도를 측정하는 자이로스코프, 자기장 크기 및 방향을 측정하는 자력계, 원자시계 또는 단일광자 감지기와 분광기 등은 무기체계에 널리 이용될 수 있다. 아울러 국방 항법분야에 적용될 경우 초정밀 타격이 가능하며, 기존 광학식 기반 관성항법 장치 대비 부피 및 크기를 1/3 이하로 줄일 수 있어 무기체계 소형/경량화가 가능한 획기적인 기술이다.[38] 양자 자이로스코프는 항해, 항공, 무인자동차, 드론, 로봇 등 다양한 분야에서 활용 가능하며, 양자 자기장 센서는 잠수함 탐지를 위한 자기변화탐지기, 항만에서 함정 등의 출입을 감시하는 항만감시체계, 지하 및 수중에 매설된 위험물을 탐지하는 불발탄 탐지 무기체계 등에 널리 활용될 가능성이 높다.[38] 양자 원자간섭계가 중력 가속도에 민감한 것처럼 운동 가속도에도 민감하다. 마찬가지로 회전에 민감하게 만들 수 있으므로 가속도계 및 자이로스코프와 같은 관성 탐색에 필요한 센서에 혁명을 일으킬 수 있으며, GPS 또는 별 관측과 같은 외부 정보 없이 작동하는 유형의 탐색은 군대, 특히 잠수함에 필수적이다. 이미 분쟁 지역에서 GPS 공격이 의심되는 사례가 있기 때문에 이 기술을 숙달하는 것은 향후 몇 년 동안 해군에 필수적이다.[37]

중국 선박 집단 제724 연구원은 양자 검출을, 제717 연구소는 양자항법(내비게이션)을 연구하고 있다.[3] 중국과학원은 2017년 6월에 SQUID를 나열한 초전도 자기 이상 검출기 어레이 개발에 성공했다고 발표했다. 배경 잡음 등의 문제를 해결하고 미국의 잠수함을 검출하여 대잠수함 전투력을 향상하는 것을 목적으로 하고 있다. 양자관성 항법은 정밀 타격 능력과 관련되기 때문에, 중국 선박 집단에서는 원자 간섭계 자이로스코프 및 원자가속도계, 양자 중력경사계, 양자 기준 시각, 원자 스핀 자이로스콥의 고도화를 3~5년 이내에 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 중국 항천 과공 집단 제3 연구원의 제33 연구소에서는 핵자기 공명 자이로스코프를, 베이징 자동화 공제 설비 연구소에서는 자기 공명 스핀 자이로스코프를 개발하고 있다. 관성 기술 국방 중점 실험실, 신형 관성계기 및 항법 시스템 기술 국방 중점 과학 실험실, 양자 관성 항법과 정밀 측정에 대한 기술을 보유한 베이징항공항천대학교는 잠수함에서 더 높은 정밀도의 시각과 항법을 가능하게 하는 기술을 개발하기 위해 협업하고 있다.[13] 중국과학원 양자 광학 중점 실험실은 인공위성에서 사용을 염두에 둔 고스트 이미징 소자를 개발하고 있으며, 2011년에 실험에 성공한 후 2020년 프로토타입을 완성하고 2025년 우주에서의 테스트를 목표로 설정하였는데, 미국 B-2 스텔스 폭격기와 같은 보이지 않는 목표를 포착하는 것이 목적이다. 이외에도 중국 과학원 리모트 센싱 응용 연구소가 고해상도 리모트 센싱 장치 시험 제작에 성공하였고, 미사일, 로켓 등을 제조하는, 국영 기업인 중국 항천 과학기술 집단 제9 연구원의 제 13 연구소 및 제 5 연구원의 제 508 연구소는 양자광학을 응용하는 이미징 연구를 수행하였다.[3] 중국뿐만 아니라 미국, 캐나다 등에서 양자얽힘 광원을 이용한 기초 연구 및 이미징 기술을 이용한 응용연구가 활발하게 진행되고 있다.

1. 양자레이더 및 양자라이다

최근 양자레이더 설치에 관한 국방 응용기술이 캐나다와 중국을 중심으로 보다 활발하게 추진되고 있다.[13] 미국에서는 양자계측/이미징 기술을 군사기술에 활용하기 위한 다양한 시도를 추진 중이다. 양자측정/센싱/이미징 분야에서는 프랑스, 독일, 영국 등이 원천기술을 보유하고 있으며, 세계 최고기술을 선도하고 있는 것으로 평가되고 있다.[13]

미국 로체스터대학교 광학연구소는 2012년 국방부의 지원을 받아 최초로 양자레이더를 연구·개발하는데 성공하였고, F-22/F-35 스텔스 전투기 및 러시아 주변국 차세대 전투기에 대응하기 위한 광자 레이다 연구를 지속적으로 진행 중이다.[3] Lockheed Martin도 양자레이더에 대한 연구를 수행하고 있으며 DARPA는 양자레이더 관련 여러 과제가 진행 중이거나 계획 중인 것으로 보이나, 내용이 공개되지 않아 그 실체는 파악이 어렵다. 캐나다 국방연구소와 캐나다 워털루대학교 연구팀은 송수신거리 1m 이내의 양자레이더 프로토타입 제품을 발표하였다. 이탈리아 INRIM은 얽힌 양자 광원을 이용한 양자조명 실험을 수행 중이며, CNIT는 2019년 9월 이중대역(Dual-band) 광자 레이다 응용연구를 완료하고 항공기 표적을 대상으로 담지거리 5km 이내의 광자 레이다 야외 성능시험을 수행하였다. 오스트리아는 2020년 5월 13일 양자레이더 프로토타입, Pax Eurasia를 만들었다고 발표하였다. 한국은 국방과학연구소 주도로 광마이크로파 양자 상호변환, 양자상태보존, 양자 조명, 양자 고스트이미징 등 양자 원격탐지 기초 연구를 수행 중이며, 양자레이더를 위해 얽힌 광자를 야외 표적을 향해 자유공간상에서 전파하고 수신하는 자체과제를 수행하고 있다. 향후 10년 후 실제 전투체계에 양자레이더 접목이 가능할 것으로 보고 있다.

2016년 9월 중국 전자과기집단공사(제 14연구소)는 세계 최초로 광자 얽힘을 이용한 단광자 검출 기술에 기반을 둔 양자레이더 시스템을 개발했다. 실제 대기 환경에서 목표물 탐지 실험을 한 결과 양자레이더 탐지 범위는 100㎞급이었으며 탐지 정밀도가 기존 레이다보다 큰 폭으로 개선되는 등 연구에서 중대한 성과를 얻었다고 전하지만, 세계 주요국은 그 진위여부에 대해 의구심을 지니고 있다. 2017년 5월 중국 과학원 전자학 연구소에서는 마이크로파 광자 레이다의 개발을 발표하였는데, 이 때 비행체의 고속 이미징에 성공한 것으로 보인다. 또한 2018년 6월 칭화대학교의 장차오 교수는 스텔스 탐지 확률 95%인 양자레이더를 개발하여 높은 고도의 대기 중의 고속 비행체 감시, 즉 탄소 미사일 추적을 지원할 수 있다고 발표하였다.[3]

38) 김소연 등 (2021)

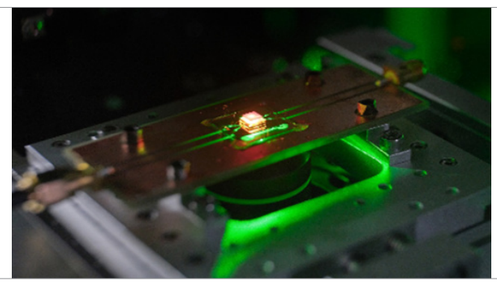
제3절 제조·반도체

의료 실험실 진단은 몇 개의 표지된 세포를 감지하는 데 의존하는데 이는 질병의 재발을 나타낼 수 있다. 세포에 자기 라벨을 붙일 수 있다면 이러한 불량 세포를 저렴한 비용으로 신속하게 감지할 수 있을 것이다. 기능화된 자성 입자의 가장 큰 장점은 자석으로 세포를 잡아당겨 세포를 분리하고 자화되면 감지하는 데 사용할 수 있다는 것이다. 이 접근 방식은 검출 문제뿐만 아니라 농식품 환경에서 어려운 농축 단계를 극복할 수 있고, 무엇보다도 자성 입자를 가두어 다시 사용할 수 있다.[37] 이처럼 자기장을 이용한다면 의료뿐만 아니라 공정에서의 불량이나 상태 추적이 가능하기 때문에 농업이나 산업 분야의 제조에서 확대할 수 있을 것으로 보인다. 이외에도 전기장을 이용하여 전력 전송상태 모니터링이 가능할 것이며, 단일광자 감지기/분광기의 경우, 공정제어나 가스 감지에 응용할 수 있으며, 원자시계는 산업과 농업에 관련된 시간 관리 부분에서 활용 가능할 것으로 보인다. 한국의 코리아스펙트랄프로덕츠(KSP)는 단일 공자 라만 센서와 고정밀 반도체 공정 진단용 광방출분광 시스템 개발을 진행하고 있다.

1. 배터리 불량검출 감지기

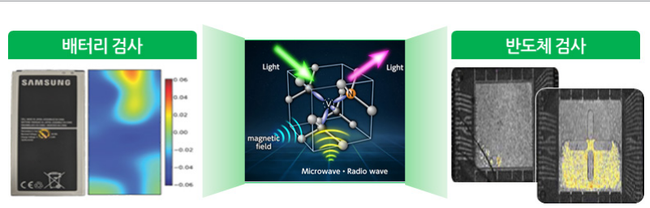
모바일기기, 전기차 등에 사용되는 2차전지에 대한 수요가 급증하는 동시에 2차전지를 제조하는 공정 중 발생하는 미세한 불량으로 인한 배터리 폭발 및 화재 사고가 빈번히 발생하고 있다. 현재의 배터리 불량검출보다 높은 해상도와 민감도를 구현할 수 있는 양자센서 기반의 배터리 불량검출 감지기술은 100배 이상의 민감도 및 공간분해능 구현이 가능한 다이아몬드 및 원자 증기셀 기반 양자 자기장 센서를 활용하는 것으로 가능할 것으로 보인다. 다이아몬드의 낮은 민감도 대비 높은 분해능 및 원자 증기셀의 높은 민감도 대비 낮은 분해능 등 각기 상이한 특성을 활용할 수 있을 것이다. 한국 KRISS는 자기장과 온도를 정밀 측정할 수 있는 다이아몬드 양자센서에 다중센싱 기술을 추가로 적용하면, 하나의 센서로부터 자기장과 온도의 변화를 동시에 감지할 수 있다고 2022년 3월 발표했다. 자기장과 온도의 변화가 복합적으로 일어나는 대상의 정밀 진단이 필요할 경우 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 즉 반도체 소자 또는 리튬이온 전지는 전자나 이온이 이동하면 자기장과 함께 열이 발생하게 되는데 외부에서 보이지 않는 배터리 분리막의 손상이나 그로 인한 발열을 조기에 감지하여 대형 사고의 발생을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.[39] 배터리의 화학적 원리 규명으로 성능을 개선하고, 초정밀 불량검출을 통한 배터리 안전성 개선 연구가 필요하다. 글로벌 이차전지 시장규모는 2020년 461억 달러에서 2030년 3,517억 달러로 성장할 것으로 보인다. 따라서 배터리 화재 및 폭발 사고를 저감할 수 있는 초정밀 배터리 불량검출 시스템의 수요 또한 대폭 증대될 것으로 기대된다. 이에, 양자기술을 접목한 초정밀 배터리 불량검출 시스템의 개발로 확대되는 차세대 이차전지 기술경쟁 시장에서 국내 기업이 우위를 점할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

그림 III-3-4 자기장과 온도를 정밀측정할 수 있는 다이아몬드 양자센서



※ KRISS (2022)

그림 III-3-5 양자센싱 기술 응용(배터리/반도체 검사)



※ NIA (2021) 집필진 재구성

2. 양자센서기반 가스센싱 기술

석유화학 플랜트 및 가스 시설물의 사고는 심각한 인적, 물적 피해를 유발시킨다. 최근 발생하는 가스 시설물의 대형 사고는 시설의 노후나 불량, 작업자의 조작 미숙 등 여러 가지 원인에 의해 발생하는 사고가 대다수이다. 특히 가스 수송 및 저장을 위한 가스 시설물은 항상 위험에 노출되어 있으며, 넓은 지역에 분포되어 있다. 이러한 가스 시설물의 효과적인 모니터링을 위해서는 전통적인 센싱 방법 외에 국부적, 전역적인 센싱을 위한 여러 방식을 혼합한 형식의 센싱 기술 및 산업용 통신 기술을 도입하여

39) KRISS (2022)

사고 대응 기술과 사고 예방 기술을 함께 적용한 안전관리 중심 기술로의 전환이 필수적이다.[40] 기존 접촉연소식 가스검지기의 경우 직접 가스와 접촉하여 가스누출을 감지하기에 넓은 면적에서는 효율적이지 않다. OGI 카메라는 IR CCD 기반으로 넓은 영역의 가스누출은 감지할 수 있으나, 누출농도 및 소량의 가스누출을 감지할 수 없어, 적용 대상이 제한적이다. 국가 산업단지나 가스 생산기지 같은 원거리의 넓은 면적을 모니터링하기 위해서는 새로운 솔루션 도입이 필요하다. 양자기반 가스누출 감지기는 이러한 산업계의 요구를 충족하는 솔루션으로서 원거리의 미세가스 누출을 측정할 수 있을 뿐만 아니라 영상화와 결합하여 시각적으로 가스누출의 위치를 쉽고 빠르게 알 수 있어 신속한 사고 대응을 할 수 있다. 검출기로는 기존 APD보다 감도가 좋은 단일광자 검출기와 같은 민감도가 뛰어난 검지기를 사용한다. SPAD는 브레이크 다운 전압 영역에서 작동한다. SPAD는 가이거 모드(Geiger Mode)로 동작하기 때문에 APD(Linear Mode)와 비교하여 광 민감도가 우수하다. 양자기반 가스누출 영상화 시스템은 반사형 가스 검출 시스템으로 광 송수신기가 있으며 가스가 있는 곳의 후방에 위치한 물체를 맞고 반사된 후방산란 빛을 감지하여 가스 농도를 검출하는 방식이다. 구성은 크게 가스 농도를 검출하는 양자가스 광학부와 영상화를 위한 카메라부, 시스템 운영 및 신호처리를 하는 제어부, 데이터 전송을 위한 통신부 그리고 가스누출을 모니터링할 수 있도록 하는 서버 및 UI 부분으로 이루어져 있다. 가스누출 영상화를 위해서 내부 스캐너 시스템과 외부 Pan Tilt Unit을 사용하여 광범위 영역을 정밀하게 스캔하도록 설계되어 있으며 방폭지역에서 사용 가능하도록 방폭 구조로 설계되었다. 영상화를 위해서는 빠른 반응속도를 내는 것이 핵심기술인데 이를 위해 고속 가스 농도 데이터 처리가 가능한 하드웨어 구조로 개발되었다.

양자기반 가스누출 감지 시스템으로 원거리 광역 미세누출 모니터링이 가능해짐에 따라 누출 위치와 정도를 신속히 파악하게 되어 사고 발생 시 신속하고 정확하게 대응할 수 있어 대규모 인명피해를 줄이는 등의 산업단지 및 국민의 안전에 크게 기여할 것으로 예상된다. 특히 개발된 양자기반 메탄가스 누출 감지 시스템은 가스공사 생산기지와 공급기지, LNG터미널, 석유화학플랜트와 같은 대단위 면적에 위치한 배관 및 탱크(압력용기)의 가스누출 여부 및 위치를 파악할 수 있어 도시가스 사용의 안전에 크게 기여할 것이다. 또한 광 센싱을 이용한 가스누출 감지 시스템은 광섬유가 설치된 전 영역의 모니터링을 가능하게 한다. 이는 분산 온도 감지를 이용한 가스누출 감지 시스템에서 1km 배관에 광섬유를 설치할 경우 분산 온도 감지 시스템의 분해능인 0.5m 간격으로 2,000개의 가스 센서를 설치한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 이는 신속한 가스누출 대응으로 인한 2차 사고를 막을 수 있을 뿐만 아니라 유지 보수 지점을 쉽게 발견하게 하여 생산효율을 향상시킬 수 있다.

40) 가스신문 (2021)

그림 III-3-6 양자기반 가스 누출 영상화 장비(한국 퀀텀센싱)



※ 가스신문 (2021)

양자기술은 광음향 검출을 사용하여 고체 물질의 음파를 양자화하는 준입자인 광자 수준까지 초정밀 사운드 감지에 사용할 수 있다. 미량 가스 감지에 적용 가능한 기술인 광음향 검출은 양자 캐스케이드 레이저(QCL)와 결합하여 가스 또는 일반 화학 검출에 사용할 수 있다. QCL은 중파 및 장파장 IR 대역에서 방출하는 반도체 레이저로, -70℃보다 훨씬 낮은 냉각이 필요하나 최근 개발로 인해 약 -23℃에서 작동하는 칩 수준 구현이 가능하여 휴대용 냉각 시스템으로 개발할 수 있다.[41]

한국가스안전공사, 가스안전연구원, SK텔레콤, 퀀텀센싱 등 기업들이 업무협약을 통해 양자센싱을 통한 차세대 가스안전솔루션의 상용화를 추진하고 있으며, 우주로는 ADP Chip(Avalanche Photo Diode)을 이용하여 메탄 가스센서 검출 모듈을 개발하고 있다. 산업화모델을 만족시키기 위한 주요 방안으로는 양자센서를 적용한 기존 대비 가스누출 탐지능력 향상 및 모니터링 기술의 적용, 양자 및 스캐닝 기술을 활용한 원거리 가스농도 측정 제공, 드론 탑재 솔루션으로 주택 외부 등의 배관 도시가스 누출 탐지가 있다.[35]

그림 III-3-7 한국 양자기반 가스센싱 기술



※ NIA (2021) 집필진 재구성

41) Scott E. Crawford et al. (2021)

제4절 의료

1. 뇌자도 검사 및 심자도 측정 장치

양자센서를 사용하면 뇌자도 측정장치(화학·의료 부분에서 자세히 설명될 것이다.)는 냉각 없이 필요한 감도에 도달할 수 있고 작은 패키지로 더 많은 센서를 환자의 머리에 놓을 수 있으며 환자가 훨씬 더 자유롭게 움직일 수 있다. 움직임이 자유로워진다는 것은 진단, 치료 및 응급 의료에 모두 가능하며 한 걸음 더 나아가, 언젠가 이 직접적인 두뇌 판독이 궁극적인 제로 UI, 컴퓨터의 직접적인 두뇌 제어를 가능하게 할 수 있다는 의미이다.[37]

초전도 양자간섭 디바이스(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)는 우수한 자기장 분해능을 가진 장치로 이것을 이용하면 사람 몸에서 발생하는 미약한 자기장을 검출할 수 있다.[42] 인간은 외부로부터 자극을 받으면 뇌에서 유발 뇌자장이라고 부르는 자기장이 발생하는데, 크기는 100fT 정도로 자기잡음의 크기 1nT 정도와 비교해서 매우 작지만 SQUID로 측정 가능한 수준이다. 박막 적층기술을 이용하여 자속이 입력되면 주기적으로 전압을 발생시키고, 이 주기함수의 기울기가 클수록 감도도 높아진다. 이 감도를 환산해 보면, 니오븀계의 초전도 소자를 이용한 것이 가장 우수한 자장 분해능을 나타내고, 자기잡음(Magnetic Interference)을 낮추기 위해서 가산평균기법을 이용하거나, 내부에 설치된 코일의 접속방식을 바꾸어서 해결한다. SQUID가 여러 개 배열된 모양으로 액체 헬륨 속에 설치된 뇌자계는 피험자의 머리를 둘러싸서 뇌자장의 분포를 측정하고 뇌 속의 전류 크기, 위치, 방향 등을 계산하여, 활동하고 있는 부위와 전류의 크기를 추정하는 원리를 적용한다.[43] 뇌자장을 측정할 때 자극을 주는 부위를 바꾸면 반응하는 대뇌 피질의 활동 부위가 변하는 것을 이용해서 뇌의 감각기능이나 운동기능이 어느 위치에 국한되어 있는지를 뇌자계로 확인할 수 있다. 이 현상을 이용하면 뇌에 대한 외과적 수술 전에 집점 부위를 정확히 파악할 수 있다. 또 자장에서 나오는 알파파는 눈을 뜨고 감을 때 머리 표면에서의 공간 분포가 다르기 때문에, 이 현상은 뇌전증, 자폐증, 조현병, 알츠하이머 환자를 조기 진단할 때 응용할 수 있다. 뇌 내의 신경 활동은 뇌파검사(EEG)에 의해 감지되는 전기적 활동뿐만 아니라 상응하는 자기장을 생성한다. EEG의 주된 한계는 전기장이 두개골에 의해 약화되고 퍼지지만 자기장은 영향을 덜 받는다는 것이다. 이 작은 자기장을 측정하면 뇌 활동을 관찰할 수 있지만 이전 세대의 센서는 액체 헬륨으로 센서를 냉각해야 하므로 센서가 환자에게 얼마나 가까이 다가갈 수 있는지 제한된다. 양자센서를 사용하면 냉각 없이 필요한 감도에 도달할 수 있고 작은 패키지로 더 많은 센서를 환자의 머리에 놓을 수 있고 환자가 훨씬 더 자유롭게 움직일 수 있다. 척수유발 자장측정장치(MSG)는 척수의 신경축삭(Nerve Axon)에서 나온 신호가 만든 수십 fT 이하의 미약한 자장을 경부에서 검출하여 척수의 기능을 조사하는 장치로, 손발의 마비나 저림 증상의 원인인 척수의 압박장해 부위를 비침습적으로 확인할 수 있다. 뇌나 심장에 비해서 목은 관측범위가 좁기 때문에 벡터 SQUID 시차형 자속계를 채용하여 장해가 발생한 위치를 파악하고, 외과적 수술의 지침이 되는 정보를 얻을 수 있다. 뇌자계(MEG)나 MSG는 매우 효과적인 의료기기이지만, 장치의 가격과 운전비용이 높다. 이를 줄이기 위해서는 뇌자계의 경우 소프트웨어나 하드웨어에 의해서 잡음을 감소시킬 방안이, MSG는 증발한 헬륨을 회수해서 재활용하는 방법이 검토되어야 한다.

그림 III-3-8 뇌자도 측정장치(영국 노팅엄대학교, KRISS)



※ 황응준 (2021)

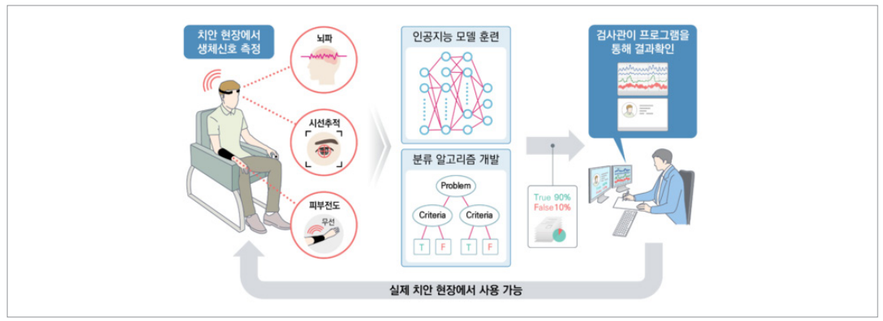
일본 Uehara 연구진은 이 장치를 이용한 MEG 및 MSG를 개발하여 의료분야에 응용했다.[44] 2018년 영국 노팅엄대학교와 유니버시티칼리지런던의 연구진은 MEG를 상온에서 작동하는 원자자력계 센서를 적용하여 냉각장치를 없앰으로써 헬멧 크기로 줄여 편리한 측정이 가능하도록 했다.[45] 이 센서를 설치하는 헬멧은 3D 프린터로 제작하여 무게가 905g 수준이므로 자기장 측정하는 동안 움직일 수도 있고, 어린아이들에게도 착용 가능할 것으로 보여 소아기 뇌 발달 연구에 유용할 수 있다. 캐나다 워털루대학교 양자컴퓨터연구소에서 양자 프로세서로 다이아몬드 겸함을 사용하는 새로운 MRI 기술을 개발 중으로 이는 원자 하나의 크기보다 수천배 정밀함을 가지는 것을 목표로 하고 있다.

한국 KRISS의 이용호 박사는 SQUID 센서를 이용하여 심자도 및 뇌자도 측정시스템 개발을 시작하여, 2002년 40채널 장치를 개발하여 심장과 뇌 일부를 측정하는데 성공하였다. 2004년에는 세브란스 병원에 심자도 장치를 설치해 기초 임상연구를 시작하였으며, 2010년 독일 메디컬 스타트업에 심자도 측정장치 기술이전에 성공하였다.[43] 뿐만 아니라 2016년에는 뇌전도 발생 부위를 정확하게 추적하고 뇌기능과 정신질환 진단에 효과적으로 사용할 수 있는 뇌자도 측정장치를 호주의 의료장비 글로벌 기업에 기술 이전하는 것에 성공하였다.

42) 허원도
43) 황응준 (2021)
44) 지혁민 (2022)
45) 고광본 (2018)

2022년 7월 경찰청과 과기정통부의 과학치안실용화사업에 KAIST 정재승 교수의 뇌파활용 진술 진위여부 판별 검사기법 및 첨단 융·복합 장비 개발이 선정되었다. 이는 뇌파를 활용하여 정보 노출 상황에서 다양한 자극 활용이 가능한 검사 기법 및 허위 진술을 판별하기 위해서 다양한 뇌파 지표 발굴과 분석 기법 개발을 통한 수사지원 강화 및 허위진술 판별 통합 첨단 검사 장비를 개발하고 이를 법심리 감정 결과의 신뢰성 제고에 사용할 수 있을 것으로 기대하고 있다.[44] 이외에도 LIG넥스원은 국방 무기체계 고도화를 위해 양자센서를 적용하는 방향에 대해서 한화시스템즈도 아직 분야는 확정하지 않았지만 양자센서 적용방안을 검토하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 심장질환 진단을 위해 초전도양자간섭계를 이용하면 심자도 시스템 개발도 가능할 것으로 보인다. 심자도 신호는 약 1pT 또는 그 이하의 미세신호이므로, 뇌자도 측정처럼, SQUID 기반으로 하는 자력계를 이용한다면 가능할 것으로 보인다.

그림 III-3-9 뇌자도 측정장치(KAIST)

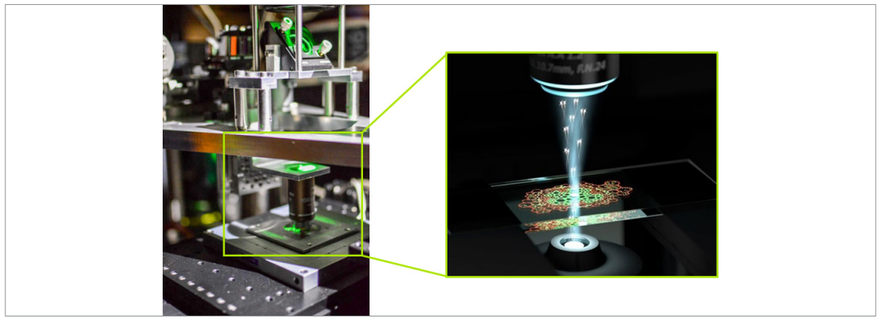


※ 지혁민 (2022)

2. 양자현미경·양자내시경

2021년 호주 퀸즈랜드대학교의 Catxere Casacio는 최초의 얽힘기반 센서인 양자현미경을 개발했다.[46] Casacio는 광학 노이즈를 방지하기 위해 양자물리적 트릭인 양자얽힘을 사용하여 두 번째 레이저 빔의 광자가 더 독립적이고 변동하지 않으나 양자물리적으로 서로 결합되는 방식을 활용하였다. 이러한 얽힘은 Stoke's field에서 잡음의 진폭을 억제하거나 압착할 수 있기 때문이다. 이 기술을 사용하면 신호는 변경되지 않고 더 약한 노이즈로 인해 레이저 강도를 높이지 않고도 더 선명하게 나타나므로, 관찰 간격 동안 평균적으로 1개 미만의 광자가 샘플 구조에 의해 산란되는 경우에도 라만 신호를 감지할 수 있어 상대적으로 가벼운 레이저 강도로도 높은 해상도와 대비를 얻을 수 있게 되었다. 이 양자현미경의 양자 얽힘은 세포를 파괴하지 않고 35% 향상된 선명도를 제공하며, 그에 따라 지금까지 볼 수 없었던 미세한 생물학적 구조를 확인할 수 있다. 이 센서 기술은 더욱 나은 내비게이션 시스템에서부터 자기공명영상(MRI) 기계에 이르기까지 모든 종류의 새로운 기술을 촉발할 것으로 기대하고 있다.

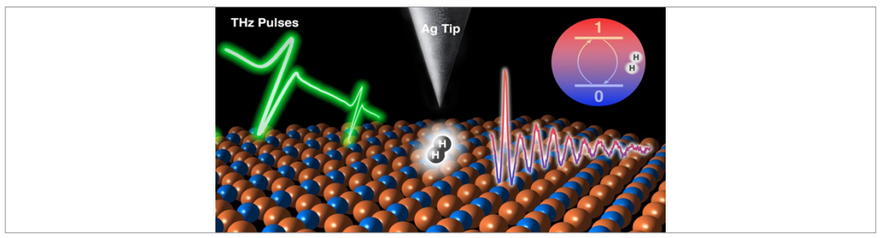
그림 III-3-10 양자현미경(호주 퀸즈랜드대학교)



※ 문광주 (2021) 집필진 재구성

미국 캘리포니아대학교(Irvine) 물리학자들은 2022년 4월 THz 레이저가 장착된 주사 터널링 현미경(STM)에서 양자센서로 수소 분자를 사용하는 것을 시연하였는데, STM의 은 팁과 작은 질화구리 섬이 배열된 평평한 구리 표면으로 구성된 샘플 사이에 두 개의 결합된 수소 원자를 배치하는 방법을 사용하였다.[47] 매우 민감한 프로브를 만들어 0.1Å까지의 변화를 볼 수 있어 이 분해능에서 샘플의 전하 분포가 어떻게 변하는지 볼 수 있다. STM 팁과 샘플 사이의 공간은 약 6Å로 거의 상상할 수 없을 정도로 작다. Ho의 팀이 조립한 STM은 이 공간에 흐르는 미세한 전류를 감지하고 수소 분자와 샘플 요소의 존재를 증명하는 분광 판독값을 생성하는 장비로, 단일 분자를 통한 THz 유도 정류 전류를 기반으로 하는 화학적으로 민감한 분광법의 첫 번째 시연이라고 말했다. Ho에 따르면 수소의 양자 일관성을 기반으로 하는 이러한 세부 수준에서 물질을 특성화하는 능력은 촉매 과학 및 공학에 큰 도움이 될 수 있다. 이 기술은 2차원 물질의 분석에도 적용될 수 있다.

그림 III-3-11 수소 분자의 양자센서 전환 시연(미국 캘리포니아대학교)



※ David (2022)

46) 문광주 (2021)

47) David (2022)

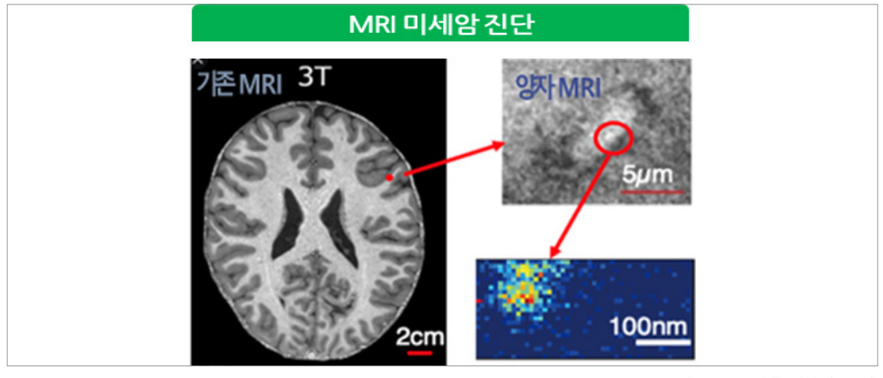
한국 ETRI는 바이러스 단위를 관찰할 수 있는 고해상도의 양자현미경에 관한 연구를 시작하였으며 해당 기술 확보를 위해 지속적 연구개발 필요성에 대해 언급하기도 하였다. 이에 의료 분야에서 셀 단위의 국소적인 부위를 관찰하는 정밀 의료행위의 구현을 기대할 수 있고 바이러스 단위 반응의 현미경 영상 촬영 기술 구현을 기대할 수 있다.

3. 양자 MRI 의료진단 서비스

자기 공명 영상(MRI)은 자기장에서 수소 핵의 서명을 사용하는 방식으로, 환자의 신체에 있는 물이 전파로 펄스될 때 재방사되는 작은 자기장은 신체의 다른 지방, 혈액, 근육 조직 사이의 대조 정보를 제공하게 된다. 이 시스템은 와이어 코일과 전자증폭기를 사용하여 전통적인 방식으로 자기장을 감지한다. 양자센서는 이 영역을 직접 감지하여 감도, 휴대성 및 비용을 개선할 수 있을 것이다. 또한 핵자기공명, MRI의 기본 물리학은 화학 분석 또는 폭발 탐지와 같은 산업 응용 분야까지도 적용가능하다. 새로운 센서는 이러한 감지기를 더 단순하고 민감하게 만들어 새로운 응용 분야도 개척 가능할 것이다.[44] 한국에서는 순천향대병원이 정밀 MRI와 양자내시경을 활용하는 방안에 관심이 있고, 보령제약은 양자현미경을 개발하는 데 관심이 있다.

한국 IBS는 세상에서 가장 작은 MRI 측정에 성공하였다.[35] 전자와 양성자 속에 있는 자석과 같은 스핀의 밀도를 측정하는 MRI는 스캔하기 위해서는 수십억 개의 스핀이 필요하지만, 이 기술은 표면 위 원자 한 개에 대한 자기공명영상 측정이 가능함을 증명한 것이다. 이를 기반으로 단일 원자 MRI를 사용해 분자 및 자성 물질과 같은 보다 복잡한 구조의 스핀 상태들을 시각화할 수 있어, 이를 활용하게 된다면 나노 스케일의 자기 구조 분석을 요하는 신물질·약물 개발에 활용 가능할 것으로 보인다.

그림 III-3-12 양자 MRI를 통한 미세암 진단



※ 과학기술정보통신부 (2021)

제5절 교통·물류·항공

1. 시각주기유도시스템 및 양자 라이다

항공기의 경우 시각주기유도시스템 감지기술을 고도화하기 위해 양자센서를 적용하는 것을 검토하고 있다. 레이저기술을 기반으로 구현되는 현행 시각주기유도시스템의 기종 자동식별 사정거리는 100m 내외로 그 한계가 문제점으로 제기되고 있다.[35] 시각주기유도시스템은 항공기별로 상이한 좌우 편차, 정지점까지의 거리 등을 고려함으로써, 항공기가 원하는 위치에 정지하기 위한 정보를 측정 및 제공한다. 보다 정확한 정보를 얻기 위해서 악천우 등 기상변화에 최소한으로 영향을 받으며, 자동식별 사정거리가 연장된 시각주기유도시스템의 필요성이 대두되고 있다. 따라서 양자센서 기반으로 항공기 시각주기유도시스템 감지기술 고도화가 필요하다. 현재 사용되는 레이저기술기반의 시각주기유도시스템은 미국 Honeywell, 벨기에 ADB- Safegate, 영국 FMT 등이 독점하고 있으며, 한국은 ㈜안세기술이 유일하게 시각주기유도시스템과 관련된 기술을 보유하고 있다. 미국 Honeywell은 전자기장을 사용하여 각 이온을 포착하므로 마이크로파 신호 및 레이저를 사용하여 조작 및 인코딩할 수 있는 기술을 이미 구축하고 있으며 중요한 하위 시스템 및 구성요소를 설계, 구축 및 통합하는데 필요한 종단 간 기능도 이미 보유하고 있다. 공식적으로 관련된 개발 방향을 언급하고 있지 않으나 보유한 기술력과 연구 방향으로부터 유추했을 때 양자라이다 기반 시각주기유도시스템을 준비하고 있을 가능성이 높다. 이 분야에 대한 기술력을 확보하게 된다면 양자통신 및 양자컴퓨터 분야와 일체형으로 개발될 가능성이 높을 뿐만 아니라, 자율주행 등과 관련된 분야로까지 확대가 가능할 것으로 기대되고 있다. 현재 시장을 장악하고 있는 글로벌 메이저 회사를 제외하고는 시장을 장악하고 있는 특정 기업이 없기 때문에 관련 기술을 빠르게 확보한다면 향후 시장 진입이 용이할 것으로 보인다.

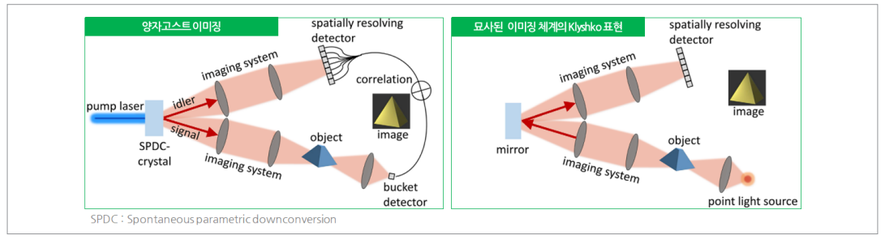
또한 자율주행자동차에서 라이다는 드론의 눈에 해당할 수 있는 핵심기술로 양자기반의 라이다를 통해 자율주행 성능을 대폭 개선할 수 있을 것이다. 광주과학기술원(GIST) 함병승 교수팀은 자율주행에 있어 핵심 난제인 라이다의 물리학적 한계 극복을 위해 양자얽힘 빛 다발을 이용함에 따라 라이다를 퀀텀라이다로 패러다임 전환해 스캔속도, 해상도, 가시거리 등이 동시에 해결될 수 있다고 밝혔다.[48]

48) 아시아경제 (2021)

2. 주행 정확도 및 안전성 개선

자동차 센서 제조업체는 최근 주행 정확도를 개선하고 위성 항법에 대한 의존도를 줄이기 위해 양자 자이로스코프를 적용하는 방법을 검토하고 있다.[37] 주행 중 안개나 비를 통과하여 도로 상황에 대한 이미징 구현을 목표로 하는데 있어 양자 고스트 이미징 기술을 작용할 수 있을 것이다. 양자 고스트 이미징은 카메라의 시야에서 벗어난 물체를 이미징할 수 있는 기술로 광원에서 서로 다른 주파수의 두 개의 얽힌 광자가 생성되고, 광학 주파수 내에 있는 것은 고해상도 광자 계수 카메라에 의해 직접 기록된다. 3D 양자카메라, 후방 카메라, 저휘도 이미징 및 양자레이더 또는 라이다를 포괄하는 넓은 영역으로 SPAD(Single Photon Avalanche Detectors) 어레이와 같은 양자이미징 시스템은 펄스 광원과 연결된 매우 민감한 단일 광자 검출기로서 광원에서 물체까지의 범위를 측정할 수 있다.[41] 게다가 SPAD는 근적외선 스펙트럼으로 확장된 광학 스펙트럼과 함께 작동하므로 벽모서리 뒤의 숨겨진 영역처럼 시야 밖의 물체를 감지하는 데에도 사용할 수 있다.[49] 고스트 이미징 프로토콜은 분해능이 더 낮지만 양자얽힘 없이 사용가능해 매우 낮은 조명과 비와 안개와 같은 장애물이 존재하는 환경 하에서 물체를 이미징할 수 있다. 이를 적용하게 위해서 앞으로 이미지 설정이 더 작고 안정적으로, 자외선 이미징의 경우에는 추가 광자쌍 소스 개발이 필요하다. SPDC(Spontaneous Parametric Downconversion)를 사용하기 위해서는 에너지 절약에 관련된 개발이 더 필요하기 때문에 관련된 산업 분야에 대한 요구가 발생할 수 있을 것이다.

그림 III-3-13 고스트이미징 측정 방법



※ Basset et al. (2019) 집필진 재구성

49) Marta Gilaberte Basset et al. (2019)

제6절 유틸리티 및 건설

1. 양자중력센서기반 지하통신시설물 위치 파악

통신시설물 재난 피해와 공사 중에 발생하는 시설물 피해 상황 파악을 위해 양자중력센서를 이용한 지하통신시설물 위치 파악 기술에 대한 연구가 필요하다. 우리나라 통신사들은 케이블 및 관로 등 정확한 지하시설물의 위치를 파악하기 위하여 양자중력센서를 이용한 지하시설물 지도 작성 기술에 대한 연구를 진행하고 있다.[35] 각종 지하시설물 공사 등에 의하여 발생하는 방송통신 시설물 피해와 재난을 예방하기 위한 일환이다. 현재 사용되고 있는 GPR 기술 등은 신호 감도가 떨어져 실질적인 지하시설물 지도를 작성하기가 어렵기 때문에 정밀한 측정이 가능한 양자중력센서를 이용하는 방안이 필요하다. 이 센서에 의하여 작성된 지도는 분포형 광케이블 음파탐지 시스템과 연동하여 가스관, 고압전기케이블 등 지하시설물 피해예방에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

그림 III-3-14 지하통신시설물 피해 현장



스탠포드대학교에서 처음으로 원자중력계를 제작하였다. 최근 영국 버밍엄대학교가 인솔하는 영국 국립양자테크놀로지연구 허브의 하나인 Sensors and Timing의 연구자들은 진동이나 그 외의 환경적 문제를 극복하는 미소 중력 변동을 검출하는 양자중력센서가 지하 1m 지점에 있는 터널의 존재를 매핑하는 옥외 실험에 성공하였다.[50] 이 센서는 복수의 원자를 떨어뜨렸을 때에 생기는 중력장의 끌어당김의 미묘한 변화를 측정하는 방식으로, 측정 대상 객체의 크기와 밀도에 따라 검출되는 인장강도도 커지기 때문에 지하에 묻혀 있어 보이지 않는 구조물을 매핑할 수 있다는 것이다.

50) 아더킹 (2022)

그림 III-3-15 지하시설물 모니터링 기술



※ NIA (2021)

이 연구의 성공으로 지하의 구조물을 매핑하기 위한 상업적인 길이 열렸고 종래보다 염가로 신뢰성이 높은 지하 구조의 매핑을 기존 방법보다 10배나 빠르게 제공하는 것이 가능하게 된다고 보여지고 있다. 또한 철도나 건물, 도로 등의 건설 프로젝트에 있어서의 비용 삭감과 기간 단축, 화산 분화를 비롯한 자연 현상의 예측 정밀도 향상, 지하에 숨어있는 천연자원이나 인공적인 구조물의 발견, 귀중한 유물에 손상을 주지 않는 고고학적인 조사가 가능할 것으로 기대되고 있다.

2. 통신선로 단락 검출

통신시설관련 재난 상황에 대응하기 위하여 통신선로 단락이 발생하였을 경우에 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) 방식에 양자센서 적용으로 통신 시설의 단락과 결함을 정밀하게 찾아 낼 수 있는 방법을 고려할 수 있다.[35] 광섬유케이블은 강력한 레이저 및 정확한 센서 적용이 가능하며, 광섬유 특성 기반에서 양자센서 적용을 통해 통신선로 단락을 검출할 수 있을 것이다. 단일광자검출기는 최고의 감도와 우수한 타이밍 정확도(〈100ps)를 결합하여 손실에 대한 높은 내성과 높은 공간 분해능(1cm)을 제공할 수 있다. OTDR 시스템을 사용자가 원하는 측정에 맞게 조정하고 적절한 검출기를 선택하면 상용 OTDR로 얻을 수 있는 것보다 훨씬 더 높은 성능을 얻을 수 있을 것이다. OTDR은 광섬유 케이블의 무결성을 테스트하는 데 유용하며, 광섬유로 반사되는 빛의 시간과 강도를 측정하여 접속 손실을 확인하고 길이를 측정하며 결함을 찾을 수 있게 된다. 또한 스플 라이스 및 벤드를 찾는 문제 해결 장치로 사용되어 광 손실을 식별하게 된다. 케이블은 데이터 전송을 방해할 수 있으므로 광케이블에서 특히 중요한 요소이다. OTDR 방식에 양자센서를 적용하여 정밀한 무결성 측정과 광 손실을 감지하고 문제가 있는 부분을 정확히 찾아 낼 수 있는 연구를 추진하는 것이 필요할 것이다.[35]

제7절 기타 산업

1. 지구 물리학 조사 및 매장물 탐사

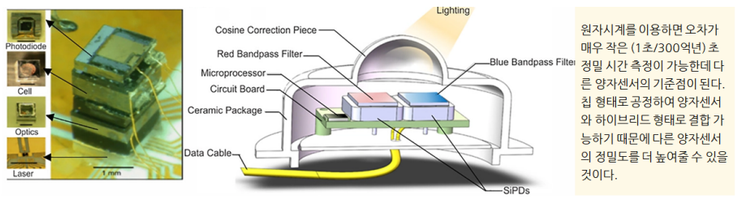
양자관성 탐색은 가속, 회전 및 시간의 세 가지 감지 유형으로 구성된다. 저온 원자 간섭계는 매우 낮은 온도에서 냉각된 원자가 파동과 같은 거동을 나타내며 질량과 상호작용하는 모든 힘에 민감한 간섭 패턴에 변화를 관찰할 수 있는데, 이러한 원리를 이용하면 중력 측정에 있어 양자기반의 경우 고전적인 경우보다 몇 자릿수 더 높은 정밀도에 도달할 가능성이 있다.[41] 원자 간섭계를 이용해 중력을 정확하게 측정하게 되면, 센티미터 수준의 해상도로 지구 표면과 지구 내부의 해저지형 혹은 광물탐사에도 사용될 수 있다. 지구 내부의 광물의 밀도에 따라 중력에 변화가 생기기 때문에 원자를 통해 중력을 정확하게 측정하는 것으로 지구 내부의 물질 상태를 알 수 있는 것이다. 지하 암석 및 토양 조건을 이해하면 석유 및 가스 탐사, 채광, 건설 및 매립지 관리에 많은 이점이 있다. 또한 많은 고고학적 유적이나 고대 수로처럼 위치가 불확실하거나 불명인 매장 자산은 전통적인 방법으로 조사하기 어려울 수 있다.[37] 양자 중력계의 놀라운 감도 덕분에 훨씬 더 작은 물체라도 아주 깊은 매장 깊이에서도 감지할 수 있다. 좋은 해상도를 얻으려면 센서가 지면에 가까워야하지만 감도는 광물 탐사 또는 브라운필드의 신속한 제거와 같은 완전히 새로운 적용을 가져올 수 있다. 예를 들어, 영국 국립 양자 테크놀로지 연구 허브의 하나인 Sensors and Timing의 연구자들은 미소 중력 변동을 검출하는 양자중력센서가 지하 1m 지점에 있는 터널의 존재를 매핑하는 옥외 실험을 성공하였다.[50] 미국 AO Sense는 지구의 중력장 변화를 측정하는 특수 가속계로 기존 실험실 규모의 냉각, 컨트롤러, 센서를 통합하여 휴대용을 제작하여, 화산 및 지진활동을 탐자하고, 광물 및 석유 등 자원 탐사가 가능해지고 있다. 아직까지 필요한 보조 하드웨어는 여전히 크고 복잡하지만 센서 헤드 자체는 기존 장치에 비해 비교적 견고하지만, 이처럼 향후 개발을 주도하는 응용 분야가 증가함에 따라 비용과 크기가 줄어들 것이다.

2. 석유 및 가스 탐사

열악한 환경에서의 석유 및 가스 탐사는 세슘이나 루비듐과 같은 요소에서 잘 정의된 원자 전이의 주파수를 사용하여 시간을 측정하는 매우 정확한 원자시계의 이점을 이용할 수 있다.[41] 칩 스케일 원자시계(CSAC)는 16cm^{3}만큼 작은 부피, 120mW 미만 전력 소비를 가지고 통합할 수 있을 만큼 충분히 작게 만들 수 있어 석유 탐사의 다양한 응용 분야에 사용될 수 있다. 미국 Microsemi는 해저 지진계로 알려진 기술을 사용하여 수중 오일 탐사를 위한 CSAC를 개발했다. 수중 매핑은 해저에 센서를 배

치하여 이루어진다. 그런 다음 선박에서 다양한 각도로 음파가 전송되고 파도로 인한 지진은 지진 응답을 타임 스탬프하는 센서에 의해 감지된다. 매우 정확한 시간 측정을 통해 해저에서 회수된 센서에서 수중 지역의 3D지도를 얻을 수 있다. 결과적으로 CSAC는 석유 및 가스 탐사를 위한 흥미로운 상용 양자센서로 부상하고 있다. [그림 Ⅲ-3-16]에서 보는 것처럼 미국 NIST에서 개발된 원자시계는 인공조명 시스템에서 광합성 활성 방사선(PAR)을 감지하도록 설계된 시스템으로 관심 있는 파장 범위를 분리하는 필터를 사용하고 PAR은 실리콘 포토다이오드를 사용하여 모니터링 된다.

그림 Ⅲ-3-16 칩 스케일 원자시계(미국 NIST)



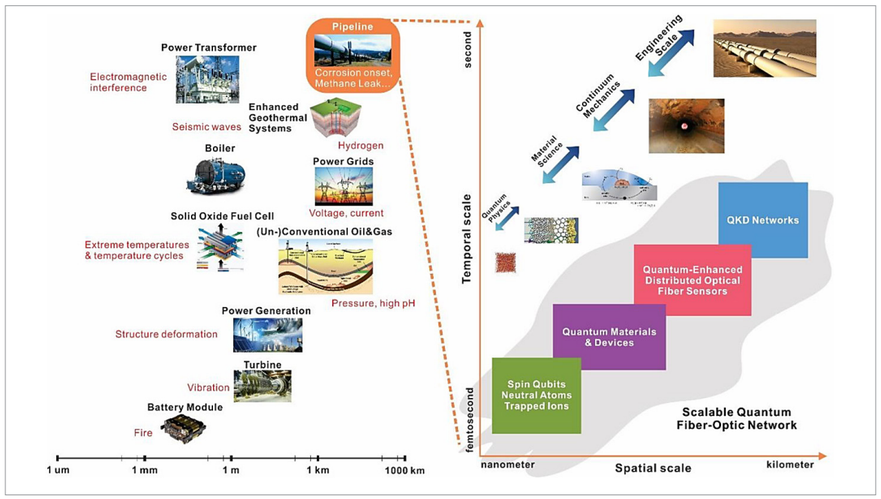
원자시계를 이용하면 오차가 매우 작은 (1초/300억년) 초정밀 시간 측정이 가능한데 다른 양자센서의 기준점이 된다. 칩 형태로 공정하여 양자센서와 하이브리드 형태로 결합 가능하기 때문에 다른 양자센서의 정밀도를 더 높여줄 수 있을 것이다.

※ Scott E. Crawford et al. (2021) 집필진 재구성

3. 가스 파이프라인 감시

양자 감지 및 양자네트워킹은 분산 광섬유 감지에 대한 기존 및 새로운 접근 방식 모두에 통합되어 전례 없는 수준의 성능과 비용 절충을 달성할 수 있으므로 천연가스 파이프라인 응용을 위한 분산 광섬유 감지기술의 광범위한 상업적 확장이 가능하다.[41] 설치된 광섬유 네트워크를 통해 원격 위치에 분산된 얽힌 빛은 온도, 압력, 파이프 부식 및 가스 농도와 같은 시스템 매개변수를 추정할 때 정확도를 높일 수 있다. 고급 데이터 분석 방법론과 양자 장치의 통합을 통해 탄소 저장 및 기타 지하 응용 분야를 위한 유정의 복원력, 신뢰성, 보안 및 무결성을 개선할 수 있을 것이다.

그림 Ⅲ-3-17 양자센서의 에너지 응용 분야



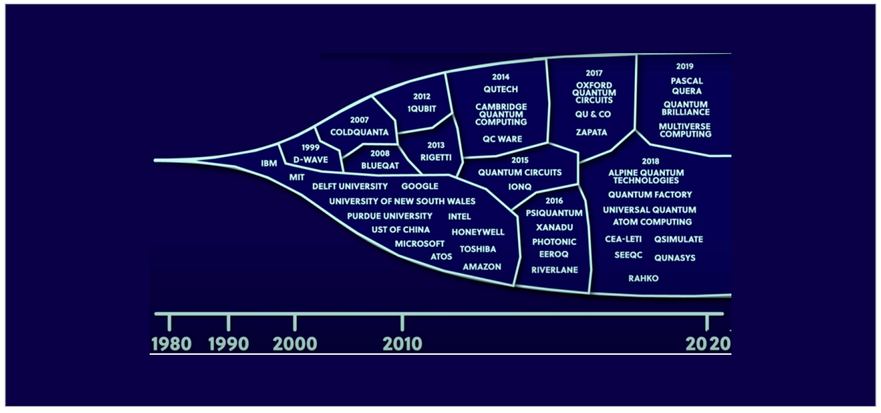
※ Scott E. Crawford et al. (2021)

제4장 양자컴퓨팅분야 산업화 모델

제1절 개요

양자컴퓨터는 많은 질문과 과제가 남아 있음에도 불구하고, 기존 컴퓨터가 담당하던 일기예보와 기후변화, 암호해독, 자율주행, 신약후보물질 발굴, 도시교통 최적화, 우주탐사, 인공지능, 더 나은 배터리, 더 깨끗한 비료, 사이버 보안, 전자재료 발견, 재무 모델링, 태양광 포집 등 아주 복잡한 계산이 필요한 많은 부분을 대체할 수 있을 것이다.[51] 양자컴퓨팅은 빠르게 발전하는 분야로 새로운 혁신이지만, 아직은 고전적 컴퓨터 프로그램의 하위 프로그램 또는 하위 루틴일 것이다. 그럼에도 불구하고, 양자컴퓨터가 산업적으로 미치는 영향은 막대할 것으로 보인다. 실제로 [그림 Ⅲ-4-1]에서 보는 것처럼 2010년 이후 양자컴퓨팅에 관련된 연구를 하는 기업과 벤처가 폭발적으로 증가하고 있다.[52]

그림 Ⅲ-4-1 양자컴퓨팅 산업계 연간 성장률



※ Nicole (2022)

본 장에서는 양자컴퓨터 분야에서 의료, 국방, 금융 등 6개 산업영역으로부터 총 18개의 산업화 모델을 소개한다.

51) 이혁성 (2019)
52) Nicole (2022)

표 III-4-1 양자컴퓨터 주요 분야별 산업화 모델 개요

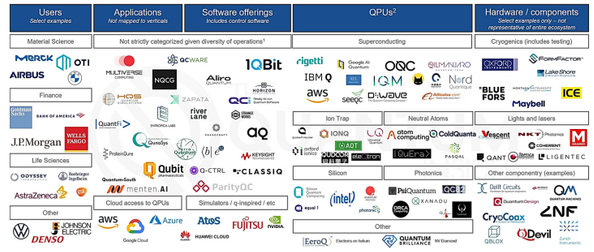
구분	산업화 모델
국방·안보	① 암호체계 개발 ② 암호 해독 및 정보수집 등
제조·반도체	① 양자컴퓨터기반 생산계획 설계 ② 반도체 미세구조 설계
의료·제약·소재	① 자기 공명영상(MRI) 해상도 향상 ② 이미징 플랫폼 개선 ③ 암 치료접근 방법 적용 ④ 신약물질 탐색을 위한 양자 시뮬레이터 개발 ⑤ 단백질 구조 분석 ⑥ 신소재 개발 최적화 등
금융	① 블록체인 보호 ② 리스크 프로파일링(위험관리 분석) 등
교통·물류·항공	① 교통망 경로 최적화 ② 항공기 디자인 최적화 ③ 물류자원 최적화 등
기타 산업	① 인공지능 ② 기후변화 모델링 ③ 에너지

※ 양자컴퓨팅분야의 추가적인 산업화 모델은 본 3편의 1장(산업영역별 산업화 모델)을 참조

미국 Google, IBM 및 Rigetti Computing의 초전도 컴퓨터, IonQ 및 Honeywell의 이온트랩 양자컴퓨터, 미국 PsiQuantum 및 캐나다 Xanadu의 광양자 컴퓨터, 프랑스의 PASQAL 및 미국 QuEra Computing의 원자 양자컴퓨터 등이 서로 경쟁하며 발전하고 있다.[53] MarketsandMarkets의 2021년 2월 조사에 따르면, 상위 5개 업체의 세계 양자컴퓨팅 시장의 점유율은 2019년 기준 50~55%로 캐나다 D-Wave Systems 15~20%, 미국 IBM 20~25%, Microsoft 10~12%, Amazon 8~10% 및 Rigetti Computing 6~8%를 차지하고 있다. 특히 IBM과 D-Wave Systems는 양자컴퓨팅 시장의 선두 주자로, 저명한 브랜드, 광범위한 제품 및 강력한 유통망을 보유하고 있다. Microsoft와 Amazon은 주로 제품 출시를 통해 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 강화해왔으며, 이들 업체의 매출은 경쟁사 매출보다 더 빨리 증가하고 있다. 향후 3~5년 내에 IBM과 D-Wave Systems은 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 확고히 할 것으로 예상되며, Amazon은 주로 아시아태평양 지역에서 사업 성장으로 인해 시장 내 점유율이 증가할 것으로 예상되고 있다.[53] [그림 III-4-2]와 [그림 III-4-3][54]는 양자컴퓨팅 생태계 지도 및 양자컴퓨팅 개발 주요 스타트업을 나타낸다. [그림 III-4-3]는 2018년 기준으로 나타낸 것이기 때문에 2022년 양자컴퓨팅 시장지도에 나타나지 않을 기업이 있을 수 있다.

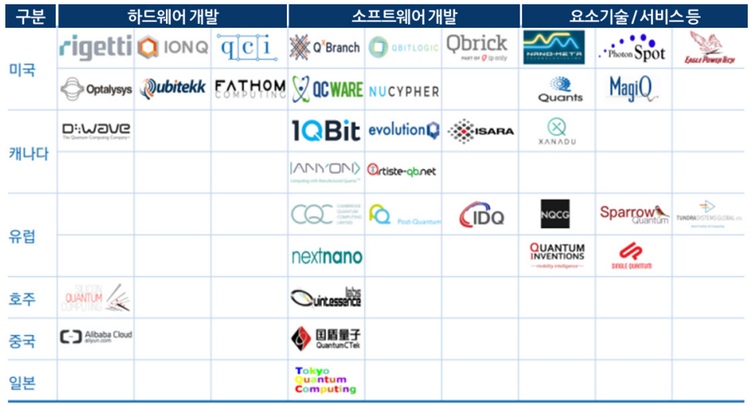
53) 삼정 KPMG 경제연구원 (2017)
54) 조성선 (2018)

그림 III-4-2 양자컴퓨팅 시장지도



※ Alex Challans (2022)

그림 III-4-3 양자컴퓨팅 개발 주요 스타트업



※ 조성선 (2018)

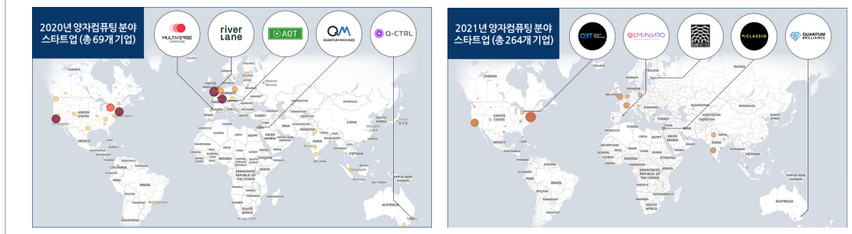
양자컴퓨터 주요 기업은 〈표 III-4-2〉처럼 현재 다양한 유형의 양자컴퓨터를 개발할 뿐만 아니라 상용화와 서비스를 제공하고 있다. 다음에서 양자컴퓨터 주요 기업별 동향에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

표 III-4-2 주요 양자컴퓨터 기업 동향

구분	주요 서비스
Amazon	• 세계 최대 클라우드 서비스 AWS(Amazon Web Service)를 통해 양자컴퓨팅 서비스 제공 및 양자 프로세서 제작업체들과의 협력 본격화 • 풀 관리 시스템 Braket 서비스 : D-wave Systems 초전도 기반 양자어닐러, IonQ 포획 이온 기반 양자컴퓨터, Riggetti Computing 초전도 기반 양자컴퓨터 유료 액세스 • 캘리포니아 공과대학교와 양자컴퓨팅센터 개설 및 아마존 양자솔루션 랩 운영 계획 발표(2021.10)
Google	• 알고리듬 개발 및 연구자들의 넓은 연구기회 제공을 위한 다양한 플랫폼 제공 및 하드웨어 개발과 클라우드 서비스 준비 병행 • NASA와 공동으로 양자인공지능연구소 설립 : 양자컴퓨터 기반의 인공지능 기술연구 • 오픈소스: 양자회로를 실기에서 실행하기 위한 벼대(Cirq), 양자화학(OpenFermion), 기계학습(TensorFlow), 양자 머신러닝(TensorFlow Quantum) 제공
IBM	• IBM-Q Hub와 같은 서비스 제공을 통해 다임러, 웰스파고, 델타항공 등에 사례 연구 및 응용 기회 제공 및 총 15개 이상의 양자컴퓨터 시스템 제공을 통한 미래 고객 발굴 • IBM Quantum Experience : 대중에게 풀 스택 양자컴퓨터 사용 권한을 제공 • 433 큐비트 프로세서 오스프리(Osprey) 공개(2022.11) • 오픈 소스 Qiskit : 애플리케이션(Aqua), 고전 컴퓨터를 사용하는 고속 시뮬레이션 실시(Aer), 노이즈의 특징 및 노이즈 후보 등을 위한 모듈(Ignis), 실기의 실행 및 실기 규약을 충족하도록 회로를 분해하는 모듈(Terra), 초전도 양자 컴퓨터의 양자 게이트를 펄스 레벨로 제어(OpenPulse), 디바이스를 설계 모듈(Qiskit Metal) • 한국 삼성, 미국 JP Morgan Chase, 독일 Daimler AG 등 글로벌 대기업과 IBM Q 네트워크 형성(2017), 4개 대륙에 연구허브기관 선정 • 상업 서비스 IBM Q 일반 공개(2016.05) : 11개 산업파트너, 13개 허브, 30개 벤처, 34개 대학 등 106개 기관이 유료 사용(2020.06 기준) • 한국에 연세대학교와 합력하여 Quantum System One 출시(2021.11)
Intel	• 반도체 기반 양자 프로세서 개발 집중, QuTech과 공동으로 개발한 양자 프로세서의 클라우드 서비스 제공 준비 및 관련 연구자들에게 오픈 소스 개발 툴 및 서비스 제공 • 극저온 웨이퍼 프로버(Prober) 공개 및 Cryo-CMOS 칩 개발(2019.01) • QuTech과 1.1K에서 동작하는 2개 스핀큐비트 게이트 발표(2021.05)
Ion-Q	• 이온 포획 기반 양자프로세서를 이용한 실제 연산 서비스를 Microsoft의 Azure와 Amazon의 AWS에 제공 • 양자컴퓨터는 Google, IBM, Microsoft Azure, Amazon AWS의 클라우드 환경에서 액세스 • Aria 출시 : 바륨 이온을 활용하여 20개 알고리듬 큐비트 달성(2022)
Microsoft	• 기존 클라우드 서비스의 양대 강자 중 하나인 Azure 서비스를 이용한 양자컴퓨팅 연구의 클라우드 서비스화 개시 예정, 서비스 플랫폼 개발과 공개 • 반도체기업 Rambus와 극저온 D램 메모리 시스템 개발(2017.04)
PsiQuantum	• Google 및 IBM과 같이 동작하는 양자컴퓨터 구현을 위해 광자를 이용한 양자프로세서 하드웨어 및 소프트웨어 개발 진행 • 양자 칩의 초기 버전 생산을 진행 중(2021) • Mercedes-Benz와 전기자동차용 리튬 이온 배터리 설계 연구(2022.04)
Quantinuum	• Honeywell Quantum Solutions과 Cambridge Quantum 통합(2021.12.02) • 이온 포획 양자 전자결합소자 형태의 큐비트 아키텍처 연구 • 기업 소프트웨어 패키지 출시 예정(2022) : 제약, 소재 과학, 특수 화학물질 및 농약 부문의 복잡한 과학 문제를 해결
Rigetti Computing	• 양자 클라우드 서비스 QCS 발표(2018.08) • Full-stack 양자컴퓨팅 업체 지향하며 128큐비트 칩 개발
Zapata Computing	• Rigetti, IBM, Honeywell, IonQ 등의 하드웨어를 지원하는 양자컴퓨팅 알고리듬 및 소프트웨어 개발 • Orquestra 도입 : 종단 간 워크플로 기반 도구 세트 • 독일 Bosch 카셰어링, 물류 등을 위한 AI 알고리듬 개발을 위해 약 1조원 투자(2019) • 시리즈 B 펀딩에서 총 6,400만 달러를 모금 양자컴퓨팅 상용화 가속(2020.11)
QuTech	• 양자얽힘을 기반으로 하는 양자네트워크에서의 Link- layer 프로토콜 개발에 성공(2019) • Intel과 함께 미국 오리건주 힐스보로 소재 인텔 D1 제조 공장에서 최초의 대규모 실리콘 큐비트를 제작하는 데 성공(2022.04)
Alibaba	• 자체 Alibaba Cloud 서비스를 통해 초전도소자 방식의 11큐비트 양자 컴퓨팅 클라우드를 출시하고 계산을 직접 실행해볼 수 있도록 서비스를 제공(2018.02) • GPU보다 10배의 향상된 성능을 제공할 수 있는 첫 번째 인공지능 칩인 한광800 발표(2019.09)
D-Wave Systems	• 500개 이상의 큐비트가 있고 20개 방향으로 큐비트 간 연결을 통해 새로운 제퍼 배치(Zephyr Topology, 큐비트가 수직 또는 수평 방향)로 구성된 6세대 양자컴퓨터 시제품을 공개(2021.06) • 프로토타입 출시(2022.06)

[그림 III-4-4]은 2020년[55]과 2021[56]년의 양자컴퓨팅 관련 스타트업에 대해서 각각 소개하고 있다.

그림 III-4-4 양자컴퓨팅 스타트업 분석



※ StartUs (2020, 2021)

2020년 전 세계적으로 양자컴퓨팅 분야 스타트업 기업이 약 69곳으로 나타난다. 5개의 신흥 강자로 스페인 Multiverse Computing은 금융 산업을 위한 양자 소프트웨어를 연구 개발 하는데, 게이트 모델 컴퓨팅, 양자어닐링, GBS(Gaussian Boson Sampling)와 같은 접근 방식을 사용하여 포트폴리오 최적화 문제를 해결하고 위험 분석을 수행하며 시장 시뮬레이션 문제를 제거한다. 영국 Riverlane은 양자컴퓨터용 운영 체제를 개발하고, 호주 Q-CTRL은 양자컴퓨터를 위한 하드웨어에 구애받지 않는 클라우드 기반 소프트웨어를 제공한다. 이스라엘의 Quantum Machines가 개발한 하드웨어에 구애받지 않는 알고리듬인 QUA는 양자 오케스트레이션 플랫폼의 일부로 큐비트에 구애받지 않으며 모든 양자 프로세서를 지원한다. 오스트리아 Alpine Quantum Technologies가 개발한 범용 양자정보 프로세서는 재료 설계, 금융 및 제약과 같은 광범위한 산업 분야에 걸쳐 확장 가능하고 적용할 수 있는 이

55) StartUs (2020)
56) StartUs (2021)

온 포획 접근 방식을 사용하며 전용 레이저 펄스를 사용하여 범용 양자컴퓨팅을 가능하게 하는 각 큐비트를 조작한다. 2022년에는 264개의 글로벌 스타트업 중 주목해야 할 5개의 스타트업을 위치, 설립 연도, 기술 관련성 및 자금 조달과 같은 요소를 고려하여 데이터 기반으로 선정하였다. 핀란드 Quantastica는 에너지, 제약 및 물류 산업군을 위한 양자컴퓨팅을 제공하고 캐나다 Quantum Bridge Technologies는 인더리스트 4.0, 통신과 군사기술 등에 적용할 수 있는 보안 통신을 위한 양자인터넷을 개발하고 있다. 스페인 Qilimanjaro는 엔지니어링과 핀테크를 위한 양자어닐링 플랫폼을 제공하고, 호주 Quantum Brilliance는 제약, 자동차, 재료 분야에 적용하기 위해서 고성능 에지 컴퓨팅을 위한 다이아몬드 양자가속기를 제조하고 있다. 이스라엘 Classiq Technologies는 소재와 금융에 관련된 양자알고리듬 설계 소프트웨어를 제공하고 있다. 흥미로운 점은 2020년 초부터 2021년 말까지 약 2년 이내에 양자컴퓨팅 관련 스타트업으로 분류할 수 있는 스타트업이 69곳에서 264곳으로 약 4배에 근접하게 증가를 하였다는 것이다. 이 중 몇 개의 스타트업에 주요 기업을 성장할 수 있을지는 미지수이나, 그 증가수준으로 보았을 때, 앞으로도 잠재력이 높은 분야라고 할 수 있다. 아래에서는 각 산업 분야별로 개발되거나 개발 예정인 연구들에 대해서 간략하게 소개하고 양자컴퓨팅의 산업을 국가별로 현황을 검토하고자 한다.

그림 III-4-5 양자컴퓨터 활용이 기대되는 분야



※ 집필진 작성

제2절 국방·안보

1. 암호체계 개발

양자컴퓨터 기술의 발달은 현재의 디지털 암호체계를 무력화할 수 있어 안보 측면에서 중요하다. 프랑스는 양자기술을 활용하여 국방 부문에 혁신을 준비하고 있다. 프랑스는 국가 양자 계획의 일환으로 2025년까지 양자기술 개발에 20억 달러를 투자할 계획이다.[57] 영국 런던의 글로벌 정보 분석업체 GlobalData의 리포트에 따르면 양자기술 부문에서 2018~2020년 사이에 특허 출원이 두 배로 증가하면서 상당한 성장을 경험하고 있다. 양자기술은 잠재적으로 인공지능(AI)과 같은 국방 분야에 혁명을 일으켜 자율 차량을 가능하게 하고 정밀 무기 시스템에 대한 표적화를 개선할 수 있다. 프랑스 연구비의 일부는 초기에 기존 컴퓨터가 양자 처리 능력에 액세스할 수 있도록 하는 플랫폼을 만드는데 투자되었는데, 양자컴퓨터가 비싸고 구축이 매우 복잡하여 방위 산업에 양자 도구에 대한 액세스를 제공하려면 원격 플랫폼이 중요하기 때문이다. 유럽의 양자컴퓨터 기업인 IQM은 프랑스의 양자 투자 확대에 대한 직접적인 대응으로 2022년 파리에 사무실을 오픈한다. 이 사업 투자는 프랑스의 양자 기반을 확장하고 해당 분야에서 훈련된 인력의 양을 늘릴 수 있는 기회를 제공할 것으로 기대하고 있다.

가장 잘 알려진 양자컴퓨터 응용 프로그램 중 하나는 Shor의 알고리듬에 설명된 기하급수적 속도 향상에 의한 큰 소수의 인수분해로 큰 소수 곱셈, 이산 로그 문제 또는 타원 곡선 이산 로그 문제 기반 스키마를 기반으로 한 RSA, DH 및 ECC4와 같은 공개 키 암호화 방식을 위협할 수 있다. 고전 컴퓨터에서는 어렵지만, NISQ 양자컴퓨터의 리소스는 RSA 차단에 필요한 리소스와 아직까지 거리가 멀다. 하지만 위협은 현실적이라, 적대적 정보 또는 외국 정보가 양자암호 분석을 사용할 수 있게 될 때까지 암호화된 트래픽을 가로채서 저장할 수 있기 때문이다. 기밀 해제 시간이 강력한 양자컴퓨터 개발 예상 시간을 이미 추월했기 때문에 오늘날 위와 같은 위협은 실제로 다가올 수 있다. 양자암호 분석은 대칭 암호화 체계에 대한 무차별 대입 공격을 위한 향상된 도구도 제공할 수 있다. 예를 들어 잘 알려진 Grover의 검색 알고리듬은 무차별 대입 공격에 대해 키 보안을 절반으로 줄인다. 256비트 AES5 키는 대략 2,128개의 양자 연산에서 무차별 대입으로 해결할 수 있다. 양자컴퓨터의 막대한 리소스 요구 사항에도 불구하고 대칭 키 길이를 두 배로 늘리는 것이 방법일 수 있다.

또한 최대 초다항식 속도 향상을 제공할 수 있는 대칭 암호 시스템에 있는 구조를 기반으로 하는 대칭 키 시스템에 대한 암호 분석 공격에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

57) David (2022)

그러나 이러한 알고리듬은 양자 컴퓨터에 대한 과도한 리소스 요구 사항이 있기 때문에 양자컴퓨터의 논리적 큐비트의 수의 증가가 시급하다.[41] 이에 따라 논리적 큐비트 수를 증가시킬 수 있는 기술개발이 시급하다.

2. 암호 해독 및 정보수집

양자컴퓨터가 암호 해독에 이용된다면 아무리 복잡한 암호라도 단 몇 분 안에 풀릴 수 있으며, 오늘날의 암호 해독의 많은 부분을 뚫을 수 있을 것으로 기대하고 있다. 현재 거의 대부분의 암호를 만드는 시스템 알고리듬은 소인수분해를 이용한다. 엄청나게 큰 숫자를 소인수분해하기 때문에 굉장히 시간이 많이 걸리는 작업이다. 양자컴퓨터는 이런 암호 방식을 무력화시킨다. 그야말로 미래는 보안에 달려 있다고 해도 과언이 아니다. 사적인 통신이나 회사 자료, 군사 기밀들이 폭로되는 것은 시간문제이므로 국방·보안 측면에서 중요한 이슈라고 할 것이다. 강력한 양자 컴퓨터의 등장으로 현재 은밀하게 수집된 데이터들이 아주 민감한 문제가 될 수도 있다. 현재 수집되고 있는 오늘날의 암호화된 데이터는 나중에 모두 분석될 수 있기 때문에 위험할 수 있으며, 인터넷 라우팅 관련 다른 국가로 트래픽이 전송될 때 해커들은 네트워크 데이터를 기록할 수 있다. 이러한 종합적인 측면을 고려하여 양자컴퓨팅 기반의 암호 해독과 정보수집에 대한 적용 및 대응에 대한 검토가 필요할 것이다.

제3절 제조·반도체

1. 양자컴퓨터기반 생산계획 설계

기계의 주요 부품, 운송 및 전자 제품과 같은 제조과정은 고품질의 제품을 생산하기 위해 여러 변수를 고려해야 하는 효율적인 프로세스와 설계가 필요하다.[58] 예를 들어, 고속으로 이동하는 항공기의 날개를 효율적으로 설계하기 위해서는 여러 드래프트를 고려하는 것이 유리하다. 이러한 설계를 위한 공기 역학, 작동 강도, 구조 역학, 충돌 및 안전, 생산 문제와 같은 복잡한 프로세스는 수치 시뮬레이션, 특히 유한 요소 방법 기반의 시뮬레이션이나 in-silico 모델 등을 통해서 얻어질 수 있다. 예를 들어, 엔지니어링 시뮬레이션은 물리적 프로토타입 및 실험실(예: 자동차 및 항공우주 영역의 풍동)의 필요성을 줄여 설계 및 테스트에 대한 시간 및 비용을 줄일 수 있다. 하지만 여전히 문제를 해결하기 위한 현재 프로세스는 비효율적이며 긴 설계 시간과 함께 상당한 계산 리소스가 필요하고 지원되는 모델의 복잡성과 품질 및 필요한 계산 시간 때문에 적용이 제한된다. 제품 설계자가 여러 변수와 다양한 가능성을 보다 빠르게 탐색할 수 있는 해결 방안으로서 제안된 양자컴퓨팅은 시간을 절약하고 더 나은 제품을 만드는 데 도움이 될 것으로 기대되고 있다. 그 사례로 독일 Bosch는 생산 계획과 관계된 전기 드라이브의 최적화에 대한 양자컴퓨터 기반 시뮬레이션 접근 방식을 조사하고 있다.

산업 4.0의 주요 목표는 생산의 맞춤화 가능성과 유연성을 높이는 것이다. Matrix 생산 방식은 필요에 따라 유연하게 결합할 수 있는 제품, 불가지론적 생산 셀의 사용을 의미하기도 하지만, 증가된 유연성은 주어진 생산 셀 레이아웃에 대한 생산 순서 선택에 대한 요구도 같이 증가시킨다.[59] 이러한 산업 4.0의 주요 목표를 달성하기 위해 양자컴퓨터 기반 생산 계획을 설계할 필요가 있을 것이다.

2. 반도체 미세구조 설계

무어의 법칙이 종말을 향해 가고 있다는 주장은 2011년 이론 물리학자 미치오 가쿠의 저서 『미래의 물리학』에서 제기되었다. 가쿠 교수는 대안적인 반도체 집적 기술이 발견되지 않는다면 무어의 법칙은 2020년 이내에 자취를 감출 것이라는 예상을 내놓았는데, 실제 2013년에 AMD가 미세화에 실패하면서 큰 주목을 받기 시작하였다. 무어의 법칙 종언은 자연스레 "차세대 컴퓨팅 기술은 무엇이 될 것인가"라는 화두와 연결 되는데, 양자 컴퓨팅은 유력한 대안 중 하나로 수년 전부터 큰 주목을 끌고 있다. DATE 18학회에서 IC 설계의 기본 패러다임이 미세화가 아니라 양자컴퓨팅 기반의 반도체 설계가 중요하다는 관점에서 R&D가 진행될 것임을 시사하였다.

58) Quantum Technology and Application Consortium (2021)
59) Carlos Oliver, Vidisha Suman (2021)

제 4 절　의료·제약·소재

양자컴퓨팅은 의약품, 백신 개발 및 촉매제와 같은 소재 발굴에 유용하다. 특히 COVID-19 대유행에 대한 우리의 경험으로 해당분야에서의 양자컴퓨팅의 필요성이 더욱 부각되었다. 양자컴퓨팅은 복잡한 유기 분자의 고급 시뮬레이션을 통해 연구원들이 신약을 개발하는 데 도움이 될 수 있다. 개발 단계에서 모든 신약은 화합물의 가장 안정적인 구성에 대해 테스트되어야 하며, 여기에는 양자컴퓨팅의 뛰어난 분자 모델링 및 시뮬레이션이 포함된다. 뿐만 아니라 파이프라인에 분자가 없는 영역에서 분자 선택은 양자컴퓨터로만 완전히 해결할 수 있는 조합 최적화 문제로, 이는 COVID-19와 같이 빠르게 출현하는 질병의 경우에 적용될 수 있다. 펜실베니아 주립대학교의 연구원들은 이 분야에서 활발히 활동하고 있다. 양자 시뮬레이션은 약물 개발자가 개발에 대다수를 차지하는 시험의 많은 부분에서 시뮬레이션을 사용할 수 있는 기능을 제공하기 때문에, 신약을 개발하고 출시하는 시간을 단축하여 연구개발에 대한 투자를 절감할 수 있고, FDA 승인 프로세스의 속도를 높일 수 있을 것일 것이다. 원자와 분자의 조작을 다루는 화학 및 재료 공학 분야 자체는 양자 원리의 적용을 포함하고 있을 뿐만 아니라 제조, 의료, 건설, 식품 가공, 전자 제품 등에 응용되고 있다. 따라서 다양한 화학 구성을 사용할 수 있으므로 올바른 구성을 찾는 데 시간이 걸릴 수 있기 때문에, 양자컴퓨팅은 이러한 프로세스의 속도를 높이는 데 도움이 될 수 있다.[59] 화학 공정을 모델링하기 위해 양자 시뮬레이션을 사용하는 회사 및 연구 기관은 습식 실험실 및 시행착오 실험을 사용하는 회사보다 근본적인 이점을 가질 것이다.

1. 자기공명영상(MRI) 해상도 향상

서울대학교 김도현 교수와 고려대학교 이동헌 교수는 자기공명영상(MRI) 장치의 해상도를 더 높이기 위한 방법으로 다이아몬드 점결함 방식의 양자컴퓨터를 개발 중에 있다. 다이아몬드 점결함 기술은 다이아몬드 내 탄소 원자 하나를 뺀 구멍에 질소를 결합해 큐비트를 만들고 레이저 등 광학장비로 큐비트를 가둔다는 점에서 이온트랩 방식과 비슷하고 할 수 있다.[60] 이 기술은 LG전자와 함께 공동 연구를 검토하고 있다.

그림 III-4-6　스핀 큐비트 양자컴퓨터(서울대학교)

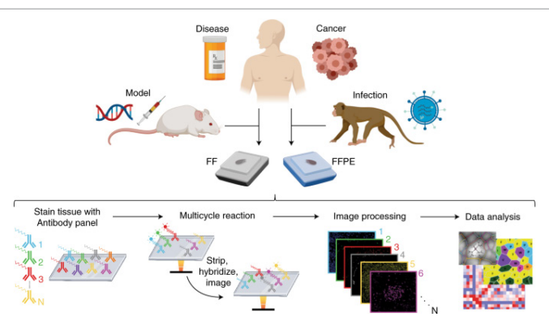


※ 이혜성 (2020)

2. 이미징 플랫폼 개선

양자컴퓨팅을 이용한 다중화 이미징 기술의 발전으로 단일세포수준에서 건강하고 질병에 걸린 조직을 특성화하는 능력이 크게 향상되었다. 미국 스탠포드 의과대학교 Nolan 교수의 인덱싱에 의한 공동 검출(Co-detection by indexing, CODEX)은 DNA결합 항체 및 상보적인 형광 표지가 된 DANA 프로브의 주기적 추가 및 제거에 의존하며 지금까지 최대 60개의 마커를 동시에 시작화하는데 사용되었다. 이는 조직의 단일 세포 공간 관계에 대한 심층적인 관찰을 가능하게 하며 발달 생물학, 질병 및 치료 설계의 발견을 촉진하고 있다. 양자컴퓨팅 기술을 이용하여 CODEX는 앞으로 조혈, 암 및 백혈병, 자가면역 및 염증 반응, 면역 네트워킹 및 면역 시스템을 규명해나갈 것으로 기대하고 있다.[61]

그림 III-4-7　CODEX 다중 조직 영상화 이미지(미국 스탠포드 의과대학교)



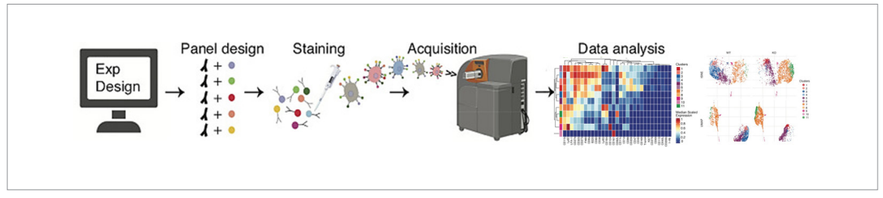
※ Sarah Black et al. (2021)

60)　이혜성 (2020)

61)　Sarah Black et al. (2021)

분석 가능한 단백질 수가 월등한 단일세포분석장치인 질량 분석-유동 세포 분석(CyTOF)은 형광 라벨을 금속 동위원소로 교체하여 광학 유세포 분석에 나타나는 스펙트럼 중복을 제거함으로써 질량 세포 분석을 통해 평균적으로 60개의 개별 매개변수를 동시에 분석할 수 있는 강력한 방법이다. 하지만 계측 실험 설계, 실행 및 해석에서 상당히 증가된 복잡성과 관련되기 때문에, 대량 세포 분석 데이터를 단편화, 복잡성 및 분석에 대한 문제점을 해결하기 위한 방법이 필요하다.[62] 최소한의 질량 세포 분석 전문 지식을 가진 연구자가 데이터 기반의 간소화된 프로젝트 워크플로를 개발할 수 있도록, 생성되는 대규모 고차원 데이터 세트를 해석하기 위한 머신러닝 알고리듬이 포함된 양자컴퓨팅 기술을 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 III-4-8 CyTOF 실험 방법 및 데이터 클러스터



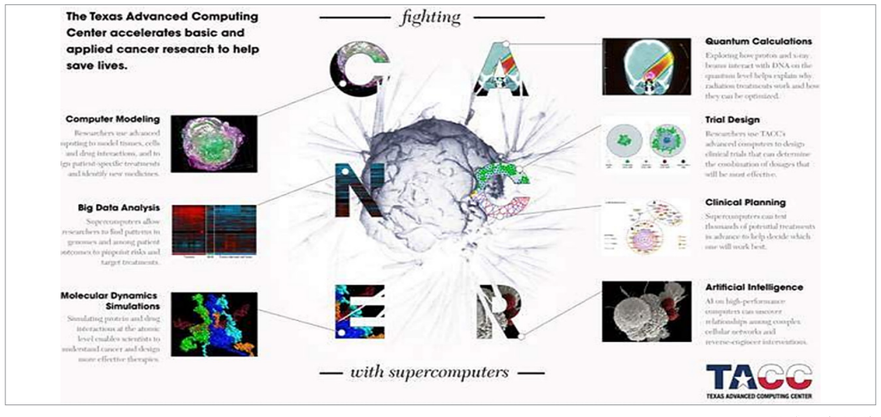
※ Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022) 집필진 재구성

3. 암 치료접근 방법 적용

미국 텍사스대학교는 암 치료방법을 연구하는 과정에서 양자컴퓨터를 이용하는 방법에 대해 연구하고 있다. Texas Advanced Computing Center(TACC)에서 슈퍼컴퓨터인 Stampede로 양자 역학 계산 모델을 사용하여 양성자-암-치료 화학 반응에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 실행을 통해 암환자의 생명이나 건강에 해를 끼치지 않는 최적의 방사선 산출량 및 그 기본 원리에 대해 연구 중이다.[63] 이는 암 발달의 복잡성을 잘 이해하고, 새롭고 효과적인 치료법을 식별하여 암에 대한 이해를 높이는 방대하고 복잡한 데이터 세트 패턴을 설명하는 데 도움이 될 것으로 기대하고 있다.

62) Akshay Iyer et al. (2022)
63) 구현모 (2020)

그림 III-4-9 양자컴퓨터 적용 사례 : 암치료 접근 방법 (미국 텍사스대학교)

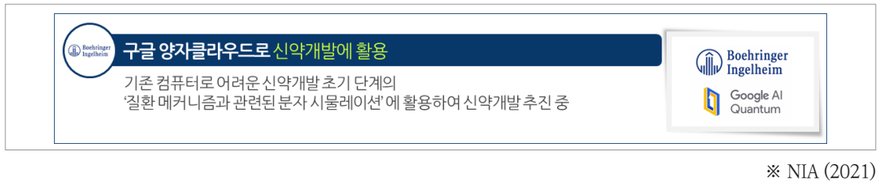


※ 구현모 (2020)

4. 신약 물질 탐색을 위한 양자 시뮬레이터 개발

양자컴퓨터 알고리듬 기반의 양자 시뮬레이션을 통해 신약을 개발하는데 소요되는 시간을 단축할 수 있는 가능성이 조명되고 있다. 2021년 1월 11일 독일 Behringer은 Google Quantum AI와 구글의 양자컴퓨터를 활용하여 분자 동역학 시뮬레이션을 통한 질병 관련 분자 메커니즘을 규명을 위해 3년간의 파트너쉽을 체결했다고 발표하였다. Google의 양자컴퓨터 및 알고리듬 리소스를 통해 in silico 상에서 고분자 및 저분자 약물, 효소, 세포, 단백질 등 끊임없이 유동적으로 움직여 고정된 상태를 파악하기 어려운 분자 간의 상호작용 모델링을 연구할 계획이다. 양자컴퓨터는 신약개발 초기 단계의 필수적인 과정인 질환 메커니즘과 관련된 분자의 시뮬레이션 같은 복잡한 문제를 해결하는 데 적합할 뿐만 아니라 현재의 기술 수준보다 더 큰 분자를 대상으로 비교 분석을 진행할 수 있는 잠재력을 갖고 있다.[64] 또한 약이 결합하는 단백질은 부드러운 물질로 수중에서 고속으로 변형되기 때문에 그 움직임을 정밀하게 계산하면 후보물질 탐색의 정밀도가 증가하게 될 것이다.[35]

그림 III-4-10 양자컴퓨터 적용 사례(신약 개발)



※ NIA (2021)

64) 서일 (2021)

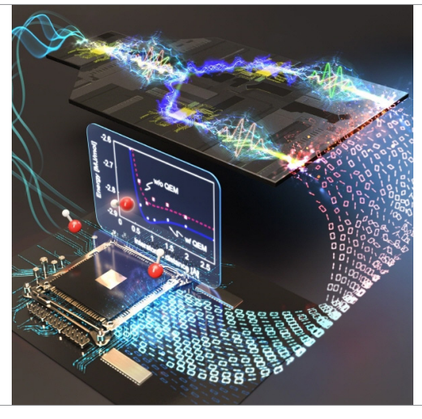
Behringer이 발표한 후 불과 17일 후 스위스 Roche는 영국 Cambridge Quantum Computing과 함께 양자화학 플랫폼 EUMEN을 활용하여 양자컴퓨팅 기반 아츠하이머 치료제 후보물질 발굴과 개발을 위해 다년간의 파트너쉽을 체결하였다고 발표하였다. EUMEN은 에너지의 흡수를 따라 원자의 이동경로를 시뮬레이션 하기 위해 설계된 알고리듬으로, 양자컴퓨팅 기반의 새로운 치료제 후보 물질에 대한 모델링이 가능하다.[65] 이처럼 양자컴퓨팅은 최근 신약 후보물질을 발굴하고 최적화할 수 있는 분자 시뮬레이션 분야에서 활용하려는 거대 제약회사들의 움직임이 늘어나고 있다. 이는 비단 해외에서만 벌어지고 있는 일은 아니다.

한국은 3~5년 후 양자시뮬레이터를 통한 신약 개발을 추진하고 있는 추세이다.[35] 2018년에 설립된 바오밥에이아이바이오(Baobab Ai BIO)는 초저온전자현미경(Cryo-EM)기반 Undruggable 단백질 구조 정밀 분석과 양자역학 및 인공지능 기반 대용량 데이터를 신속하게 분석하여 암유발 YAP-TEAD 저해제 1상을 2022년에 진입을 목표로 하고 있다.[66] 이 회사의 신약개발 플랫폼인 바이오-스페이스 보이저(Bio-Space Voyager)는 Cryo-EM를 통한 정확한 단백질 구조분석, 인공지능 기반을 통한 신뢰도 높은 신약설계, 양자역학을 통한 신속한 대용량 연산능력을 기반으로 기존과 차별화된 신약을 발굴 및 개발할 것으로 기대하고 있다. 한양대학교는 2019년부터 양자계산화학 및 머신러닝에 적용 가능한 NISQ 기반 양자 시뮬레이터 연구를 추진 중이다. KAIST는 2020년부터 원자 분자 양자 시뮬레이터 개발을 위한 국제공동연구단을 운영하고 있다. 특히 2022년에는 제약업계에 인공지능의 붐이 심화되었다. 신약 개발 속도와 확률을 대폭 높일 수 있다는 기대감에 각 제약회사가 인공지능 기술 도입을 서두르는 가운데 최근에는 양자역학을 접목한 인공지능기술까지 신약 개발에 활용되고 있어 주목된다. 2022년 2월 17일 KIST 김용수 박사 연구팀은 단일광자가 가지고 있는 다양한 자유도를 동시에 사용하여 양자연산 공간을 확장함으로써 양자컴퓨터의 연산공간 크기를 수월하게 확장하는 새로운 방법을 이용하여 분자의 구조를 계산하는 데 성공하였다.[67] 이 연구가 실용화된다면 신약 개발에 적용 가능할 것으로 기대되고 있다. 2022년 2월 25일 팜캐드는 KAIST 교원창업으로 시작한 국내 1호 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업인 큐노바와 신약개발 공동 연구 협약을 채결하였다. 양사는 신약후보물질 발굴을 위해 양자컴퓨터를 활용하는 양자소프트웨어 기술 개발, 양자컴퓨터의 연산능력을 최적화해 신약후보물질 개발, 리보핵산(RNA) 염기서열(시퀀스) 최적화 등에 협력하기로 했다. 팜캐드는 표적 단백질과 저분자 신약후보물질의 물리·화학적 결합을 예측하기 위해, 원자 단위뿐 아니라 눈에 보이지 않는 전자 분포까지 계산하는 양자역학 기반의 가상(in-silico) 신약개발 플랫폼인 파뮬레이터를 개발했다. 양자계산 데이터와 이를 학습한 인공지능(AI) 기반의 데이터베이스를 확보해왔다. 팜캐드는 단백질과 약물 상호작용에 대한 계산화학 시뮬레이션 과정에, 큐노바의 양자컴퓨팅 기술을 활용할 계획이다.[68] 팜캐드는

65) 노신영 (2021)
66) BioSpectator (2021)
67) 정현 (2022)
68) 윤소영 (2022)

자체 신약 개발(NOAC: 혈액항응고제) 뿐 아니라 다수의 제약·바이오기업들과 항암제, mRNA 기반 코로나19 예방 백신, 알츠하이머 치료제 등을 연구·개발하고 있다.

그림 III-4-11 고전-양자 하이브리드 컴퓨팅 이용 분자 구조 계산 개념도



※ KIST (2022)

대웅제약은 최근 미국 XtalPi와 양자역학 기반 인공지능 신약 개발 플랫폼을 이용한 합성치사(Synthetic Lethality) 원리에 기반한 항암 타깃 신약 개발을 공동 진행하기로 하였다. XtalPi는 광범위한 분자화합물의 약학적 성질의 예측할 수 있는 독자적인 신약 개발 클라우드 컴퓨팅 플랫폼을 이용해 선정한 항암 타깃에 대해 신약후보물질을 발굴하고, 이후 대웅제약은 전임상 및 임상 개발 등 사업화를 진행할 예정으로 공동연구를 통해 산출된 결과물은 대웅제약이 소유한다. 2014년 MIT의 양자물리 전문가들이 설립한 XtalPi는 디지털 약물발견 및 개발 플랫폼을 개발해 상위 10대 제약사 중 7개사를 포함, 전 세계 70개가 넘는 제약회사에 서비스를 제공하고 있다. 최근 1년간 한국 오비메드, 미국 Google, 중국 텐센트와 HOPU, 영국 5Y, 일본 소프트뱅크 등 대기업들이 참여한 시리즈 C·D 투자에서 7억 달러가 넘는 유치를 완료했으며, 미국 Pfizer & BioNtech와도 전략적 제휴를 체결하고 신약 개발에 사용하기 위한 인공지능 기반 분자 모델링 플랫폼 개발을 진행 중이다. SK케미칼도 양자역학 기술 기반 AI 신약 개발 업체인 고려대학교 조은성 교수가 창업한 인세리브로와 협약을 맺고 신약 공동개발에 나섰다. 인세리브로는 양자역학 기반 분자 모델링 기술과 AI 플랫폼을 바탕으로 특정 질환에 대한 신약 선도·후보 물질을 도출하는 역할을 담당하고, SK케미칼은 인세리브로가 도출한 후보물질에 대한 초기 약효평가에서부터 비임상, 임상 등 후보물질의 검증 전반과 신약 개발의 인허가, 생산 등의 역할을 맡기로 했다. 양사는 새로운 신약 개발뿐 아니라 기존 인세리브로가 진행한 프로젝트의 탐색 단계 물질에 대해서도 상용화 기회를 함께 모색한다는 방침이다. 인세리브로는 분자모델링 기술을 더욱 정교하게 업그레이드한 인공지능과 분자모델링 기술 QM/MM docking과 Water Pharmacophore을 결

합한 신약 개발 플랫폼 MIND를 보유하고 있으며 양자역학 기술을 적용해 후보물질의 약물 친화도와 적중률을 한층 높여주는 솔루션을 제공할 수 있는 차별성을 지닌 것으로 평가받고 있다. 보령제약은 양자역학 AI 기반 신약 개발 전문업체 퀀텀인텔리전스(QIC)와 신약 개발 공동연구를 진행 중이다. 양사는 QIC 양자역학 기반 플랫폼을 활용해 혁신적인 신약 후보물질을 도출하고 신약 파이프라인을 발굴한다는 계획이다. 비소세포성 폐암과 면역질환을 타깃으로 하는 신약 후보물질 도출에 성공한 적이 있는 QIC의 물리화학 기반 3D 양자 계산 알고리듬을 적용한 AI 신약 개발 플랫폼 기술은 실제 화합물 전자 분포를 가장 유사하게 계산해 구조를 구현해낸다는 평가를 받고 있다. 이를 통해 화합물 성질을 정확하게 예측하며 후보물질 도출 효율을 높여줄 것으로 기대하고 있다. 휴온스 역시 양자역학 기반 AI 기업 팜캐드와 손을 잡고 신약 개발 공동연구를 하고 있다. 휴온스는 팜캐드의 플랫폼 파뮬레이터를 활용해 헬스케어 전반에 걸쳐 성공 확률이 높은 신약후보물질들을 발굴한다는 계획이다. 연구 분야와 범위는 양사 협의를 통해 점진적으로 구체화해나갈 예정이다.[69)]

5. 단백질 구조 분석

미국 하버드대학교는 2012년에 D-Wave systems 양자컴퓨터를 사용하여 6개 아미노산 격자 단백질 모델의 기저 상태를 발견하였는데, 이는 양자컴퓨터가 자연 과학과 관련한 최적화 문제를 해결하는데 사용된 최초의 사례이다. 미국 스탠포드대학교의 FAH(Folding at Home)는 단백질 접힘 실험, 의약품 설계 등 다양한 목적을 위해 분자동역학을 시뮬레이트하는 비영리 분산 프로젝트이다. 백질의 접힘 오류(Misfolding)와 관련한 질병으로 알려진 알츠하이머병, 헌팅턴병, 많은 종류의 암, 항생제 내성 등의 분자생물학 및 분자역학에 대한 폭넓은 학술적 연구에서 활용되고 있다. 이러한 질병을 치료하기 위해 단백질의 3차원 구조 및 작동 방식을 이해하고 분석함으로써 새로운 약물도 개발하고 하고 있다. 특히 최근에는 COVID-19에 대한 연구도 진행되고 있으며, 프로그램을 다운받는 것만으로 누구나 연구에 도움을 줄 수 있다. 프로그램을 다운받은 후 I support research fighting 탭을 클릭하면 연구를 돕고자 하는 분야를 특정해서 도울 수도 있다. 또한 일본 호시약과대학교 주도 컨소시엄에서 양자화학계산을 활용하여 질병과 관련된 단백질의 정밀한 구조를 밝히려하고 있다. 일본 이화학연구소가 개발하는 슈퍼컴퓨터인 MD-GRAPE가 단백질의 움직임을 계산하는 것과 달리 초고정밀 정지화면을 얻으려 하고 있다.

69) 이순호 (2022)

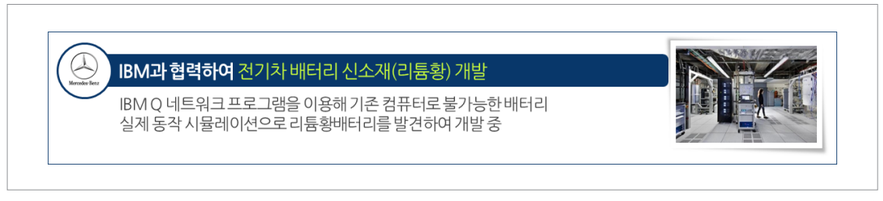
6. 신소재 개발 최적화

양자컴퓨팅 분야에서 가장 주목받고 있는 분야는 재료·화학 분야로, 재료의 물성이나 분자의 성질·화학 반응에 대해 알려면, 그러한 재료 및 분자를 구성하는 전자의 상태를 계산해야 한다. 전자는 양자역학을 따라 움직이며, 입자 수가 증가하면 엄밀한 계산은 기하급수적으로 큰 계산 비용을 필요로 한다. 이러한 계산을 고전 컴퓨터에서 취급하기 위해, 지금까지 다양한 근사법 등이 도입되어 있다. 하지만 여전히 전자 간의 양자적인 상관이 강하며 복수의 전자 궤도에 겹침 상태로 전자가 배치됨으로써 안정화되는 분자나 근저 상태뿐 아니라 여기 상태가 관여하는 현상 등 슈퍼컴퓨터를 사용해도 시뮬레이션하기 어려운 대상이 존재한다. 예를 들어, 금속을 함유한 천 촉매나 광기능 재료 등이 있다. 양자컴퓨터는 양자적인 겹침 상태를 자연스럽게 표현할 수 있기 때문에, 이러한 양자성이 강하고 고전 컴퓨터에서는 계산하기 어려운 대상이라도 시뮬레이션할 수 있을 것으로 기대된다. 촉매는 질소 소정 및 CO_2 회수, 재이용에 있어 중요한 역할을 한다. 또한 에너지 문제를 해결하는 궁극적인 방법은 광기능 재료를 사용하는 인공광합성을 실현하는 것이다. 하지만 광반응이 관여하는 광합성에는 양자 결맞춤이 기여하고 있으며, 그 메커니즘은 아직 완전하게 이해되지 않고 있다. 양자컴퓨터를 사용하는 계산 과학적 접근방식으로 인해 이러한 대상에 대한 지식을 얻음으로써, 지구적인 규모의 에너지 문제 및 카본 중립을 실현하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.[13)] 양자역학 시뮬레이션이 재료의 특성과 거동을 보다 정확하게 예측하는 데 도움이 될 수 있는 한 가지 방법은 표준 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 모델링되기 쉽지 않은 응축 물질의 모델링을 하는 것이다. 따라서 다중 구성 요소 시스템의 상호 작용을 시뮬레이션하기 위한 수치적으로 정확하고 본질적으로 편향되지 않은 방법인 QMC(Quantum Monte Carlo)가 개발되었다. 이 방법은 고체 재료의 내부 물리학을 밝힐 수 있으며, 이는 재료 설계 효율성과 고전 컴퓨터 모델링으로 발견하거나 개념화할 수 없는 완전히 새로운 재료의 개발을 통해 비용 절감을 유도하는 데 도움이 될 것이다.[60)]

2017년에는 IBM이 일반에 공개한 양자컴퓨터로 원자량이 작은 무기염류의 수소화 리튬(LiH)과 수소화 베릴륨(BeH_2)을 모델링하는 사례가 소개되었다.[13)] 2020년에는 양자컴퓨터를 적용한 다양한 소재 개발이 진행되었다. 미국 시카고대학교는 IBM의 53큐비트 Hummingbird 양자 칩을 사용하여 엑시톤 응축물이라는 양자 물질의 시뮬레이션을 수행했다. 이러한 응축물은 50년 전에 예측되었지만 최근에야 그 존재가 입증되었다. 엑시톤 응축물은 거의 손실 없이 에너지를 전달하는 드문 특성을 가지고 있으며 에너지 효율적인 재료에 대한 엄청난 잠재력을 가지고 있다. 같은 해에 미국 Google은 VQE를 사용하여 H_{12} 분자, 현재까지 가장 큰 양자 화학 시뮬레이션을 수행했다.[60)] 하버드대학교는 독일 MPQ의 알칼리 원자 양자플랫폼을 이용하여 하버드 모델 양자 시뮬레이션을 수행하였고, NIST는 알칼리 토금속 원자를 이용한 양자자성 모델 양자시뮬레이션을 진행하였다. 미국과 유럽은 현재 양자 시뮬레이터 연구를 주도하고 있으며, 원자 플랫폼의 양자 다체문제 해결, 광자 플랫폼의 보존샘플링 기반 양자 화학 에너지 레벨 문제해결 등에 주력하고 있다.[20)] 2020년 1월 독일 Daimler AG와 IBM은 양자

컴퓨터를 사용하여 3개의 리튬 함유 분자의 쌍극자 모멘트를 시뮬레이션하여 오늘날 전기자동차의 리튬전지보다 용량, 지속 시간, 가격 면에서 뛰어난 리튬황전지를 개발 중에 있다.[3) 60)] 아직 개발 단계지만 이는 자동차 산업 내에서 양자컴퓨팅에 대한 잠재적으로 높은 수준의 관심을 나타낸다.[60)] 또한 Volkswagen도 전기차 시대를 대비하여 화학 시뮬레이션을 통한 전기차용 고성능 배터리 개발에도 양자컴퓨터를 적용 중이다.[51)]

그림 III-4-12 양자컴퓨터 적용 사례(독일 Daimler AG)



※ NIA (2021)

제5절 금융

금융 분야는 고속 거래 등 계산 리소스를 필요로 하는 분야다. 특히 옵션 가격을 결정하려면 주가 등의 원 자산 가격의 동태를 확률 모델을 사용하여 계산해야 한다.

양자컴퓨팅은 양적 금융 분야를 어렵게 하는 잠재적인 알고리듬 병목 현상을 깨고 포트폴리오 관리, 투자 및 거래를 위한 최적의 솔루션에 도달할 수 있게 할 것이다. 예를 들어, 기존의 고빈도 거래(HFT) 모델에서는 빈번한 재조정으로 인해 거래 사이의 지연 시간이 발생하여 투자자를 손실에 노출시킨다. 양자컴퓨팅을 사용하여 이 문제를 해결하고 여러 시간대와 투자 우선순위에 걸쳐 최적의 글로벌 포트폴리오를 생성할 수 있을 것이다. 양자컴퓨팅은 또한 기존 시스템에서 접근할 수 없는 방식으로 최적의 차익 거래 기회를 감지할 수 있다. 포트폴리오 최적화 분야에서 은행은 종종 대량의 거래를 예약하고 우선순위를 정하는 문제에 직면하게 된다. 여기에서 수백만 큐비트가 있는 양자 프로세서는 최상의 답을 찾기 위해 가능한 모든 주문 결제 조합을 병렬로 탐색할 수 있을 것이다.

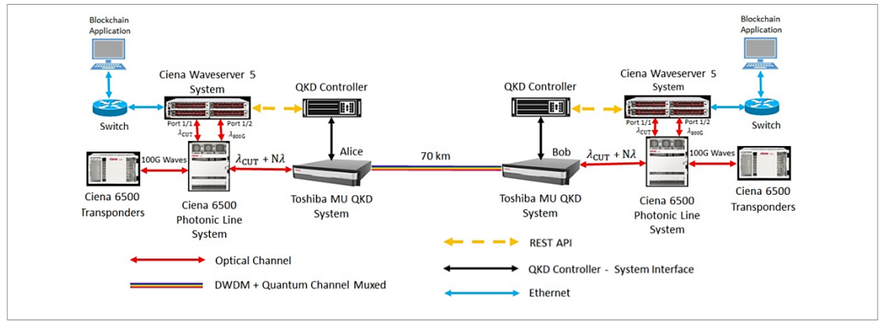
위험 관리 분야에서 위험 분석을 수행하기 위해 해석적으로 풀 수 있는 모델은 한정적이다. 현재 선택되는 방법은 난수를 사용하여 원 자산 가격의 동태를 시뮬레이션하는데 반복되는 무작위 샘플링에 의존하는 몬테카를로 계산이 필요하며 그 결과는 재무 예측에서 위험과 가능성을 이해하는 데 도움이 된다. 하지만 대규모 포트폴리오의 경우 이는 하룻밤 사이에 수행되는 작업이며 며칠에 걸쳐 연장될 수도 있다. 그러나 양자컴퓨팅이 제공하는 2차 속도 향상은 그러한 계산을 사실상 즉각적으로 실행할 수 있기 때문에 시간과 노력을 줄여줄 수 있다. 따라서 은행 및 금융 대기업은 이 기술의 가능한 응용 프로그램의 필요성을 인식하고 있다. 또한 HSBC는 2022년 3월 양자컴퓨팅에 대한 전문성을 강화하고 관련 기술을 활용하기 위해 향후 3년간 IBM과 협력할 것을 발표하였고, City Group, BMP Parima, BBVA, 일본 유초은행 등 11개 글로벌 금융회사가 양자기술 관련 프로젝트에 참여하고 있다. BBVA는 100개 이상의 변수를 고려하는 복잡한 포트폴리오 최적화 이슈에 대해 양자컴퓨터가 갖는 장점을 테스트했다. 또 Goldman Sachs는 위험성 평가 등에 활용하는 기존 시뮬레이션의 한계를 개선한 양자 알고리듬을 개발을 위해 양자컴퓨팅을 통한 몬테카를로 시뮬레이션의 고속화를 추진 중이다.[51)] JP Morgan Chase은 Toshiba와 협력해 양자컴퓨터 기반 사이버 공격을 방어하는 기술을 개발하고 있다.

2022년 2월 JP Morgan Chase, Toshiba와 Ciena의 연구팀은 광섬유 케이블을 통해 양자보호 블록체인 애플리케이션 시연에 성공하였다고 발표하였다.[70)] 영국 Barclays PLC, 미국 Bank 및 Wells

70) Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022)

Fargo 등 일부 대형 은행에서 이미 연구개발팀을 꾸리고 양자컴퓨팅에 투자하여 금융의 미래를 준비하기 위해 양자기술 공급업체들과 제휴를 맺었다.[2) 59)] 중장기적으로 기존 공개키 암호 방식이 양자컴퓨터에 의해 깨질 수 있음을 우려하여 정보보호 차원에서의 양자컴퓨터 개발에도 관심을 갖고 있다. 이처럼 금융 시장에서는 위험성 평가와 정보보호를 위해서 양자컴퓨터 개발과 양자알고리듬 개발에 동시 접근하고 있다.

그림 III-4-13 JP Morgan Chase, Toshiba, Ciena의 블록체인 보호 사례



※ Farzam Toudeh-Fallah et al. (2022)

이외에도 타겟팅과 예측, 리스크 프로파일링, 거래 최적화 등의 응용 분야가 있으며 이에 대해서는 3편 1장의 금융파트에서 기술하고 있다.

제6절 교통·물류·항공

1. 교통망 경로 최적화

독일 Volkswagen과 캐나다 D-Wave Systems은 2016년, 2018년 두 차례에 걸쳐 베이징과 리스본의 교통체증을 분석하고 택시와 버스의 경로를 양자컴퓨터로 최적화하는 알고리듬 개발에 성공하였다.[3)] Volkswagen은 D-Wave 2000Q를 비롯한 2종의 양자컴퓨터를 활용하여 연산능력을 직접 검증하면서 도시교통·이동경로 최적화 서비스를 준비하고 있다. 2019년 11월에는 일부 버스에 D-Wave 클라우드 기반 양자 컴퓨팅 서비스를 사용하는 내비게이션 앱을 장착했다.[60)] 이 서비스는 단순히 혼잡 정보를 제공하는 것이 아니라 ms 단위로 각 차량에 대한 최적의 경로를 계산한다. 이러한 서비스들은 기존 슈퍼컴퓨터로도 수행 가능한 작업이지만 양자컴퓨팅을 통해 보다 향상된 최적화를 실현시키는 것이 이들의 목표이다.[51)]

그림 III-4-14 양자컴퓨터 적용 사례(Volksagen)

양자컴퓨터로 교통체증 해소를 위한 교통관리시스템 개발

캐나다 D-WAVE와 협력하여,
수많은 차량의 통행 루트를 파악하여
교통체증을 해소하는 관리시스템 개발



※ NIA (2021)

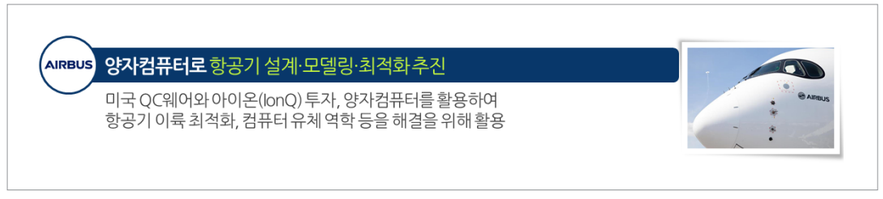
2. 항공기 디자인 최적화

양자컴퓨팅은 항공기 개발의 디지털화를 크게 향상시킬 수 있다. 다중 물리학 모델링 및 시뮬레이션을 크게 개선하고 오늘날 불가능했던 시뮬레이션을 용이하게 한다. 예를 들어, 현재 엔지니어는 날개 위의 공기 흐름을 정확하게 모델링하는 데 수년이 걸린다. 양자컴퓨팅은 계산 시간을 크게 줄여 설계 효율성을 극대화하고 연료 소비를 줄일 수 있고 상업용 항공기를 운영하는 데 필요한 최적의 연료량과 속도를 평가하는 데 도움이 될 수 있으며, 잠재적으로 업계가 지속 가능성 성과를 개선하는 데 도움이 될 수 있다. 또 다른 잠재적인 응용 프로그램은 대량의 소싱 구성 요소에 대한 더 빠른 검증 및 검증과 복잡한 매개변수에 대한 구성 요소 성능 시뮬레이션이다. 양자방법론으로의 전환은 검증 및 검증 프로세스를 가속화하고 생산 효율성을 향상시킬 수 있다.[60] 네덜란드 Airbus는 항공기 상승 궤적을 최적화하고, 날개 박스의 구조적 안전성을 유지하면서도 무게를 최적화하는 설계 과정을 시뮬레이션하기 위해 양자컴퓨터 도입을 검증하고 있으며,[3] 항공기 설계나 고장 원인 분석에도 도입을 검증하고 있다. 항공기 설계를 위해 엄청난 양의 시뮬레이션을 슈퍼컴퓨터에서 실행하고 있는데, IT 예산의 3%가 이와 관련한 하드웨어에 투자되고 있어 양자컴퓨터를 통한 예산절감 효과를 기대하고 있다.[51]

3. 물류 자원 최적화

물류는 시간과 위치에 민감한 산업이다. 따라서 프로세스를 최적화하면 많은 이점을 얻을 수 있다. 한 장소에서 다른 장소로 물건을 옮길 때 고려해야 할 많은 요소가 있는데 무엇보다도 공급망, 차량 가용성, 트래픽 및 고객 기대치가 있다. 양자컴퓨팅은 기업이 모든 선적에 대한 최적의 경로를 찾는 데 도움이 될 수 있다. 이 기술은 날씨 및 교통과 같은 실제 요인도 고려한다. DHL과 다른 물류 회사들은 이미 이를 큰 잠재력을 가진 트렌드로 주목하고 있다.[59]

그림 III-4-15 양자컴퓨터 적용 사례(Airbus)



※ NIA (2021)

제7절 기타 산업

1. 인공지능

인공지능은 이미 주류를 이루고 있는 신기술로 여기에는 다양한 작업을 수행하기 위해 방대한 양의 지식을 기계에 가르치는 작업이 포함된다. AI는 이미 의료, 전자 상거래, 교육, 금융, 보안 및 미디어 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 양자컴퓨팅은 AI 향상에 상당한 도움이 될 수 있다. AI 개발은 기계학습을 위해 방대한 양의 데이터를 처리해야 하는데 이는 AI가 패턴을 인식하고 더 나은 결정을 내리는 데 도움이 된다. 고전 컴퓨팅이 제 역할을 하고 있지만 AI는 양자기술로부터 많은 이점을 얻을 것이다. 더 빠른 처리는 더 나은 AI 성능으로 이어질 수 있고 최종적으로 AI로부터 더 인간과 같은 반응을 초래할 수도 있을 것이다.[59] 양자컴퓨팅을 통해 AI를 크게 가속화한다는 궁극적인 목표를 향한 중요한 단계로 이것은 우리가 처음으로 이해하는 가상 비서 또는 극도로 사실적으로 행동하는 비 플레이어 제어 비디오 게임 캐릭터처럼 잠재적인 발전이 이루어지고 있다.[60] 양자 강화 딥 러닝은 신경망과 같은 기계학습에 사용되는 현재 알고리듬을 최적화할 수 있다. 기계학습 알고리듬은 일반적으로 최적화 문제로 간주될 수 있으며, 양자 기계는 양자 및 표준 처리를 모두 특징으로 하는 하이브리드 방법을 도입하여 해결가능하다.

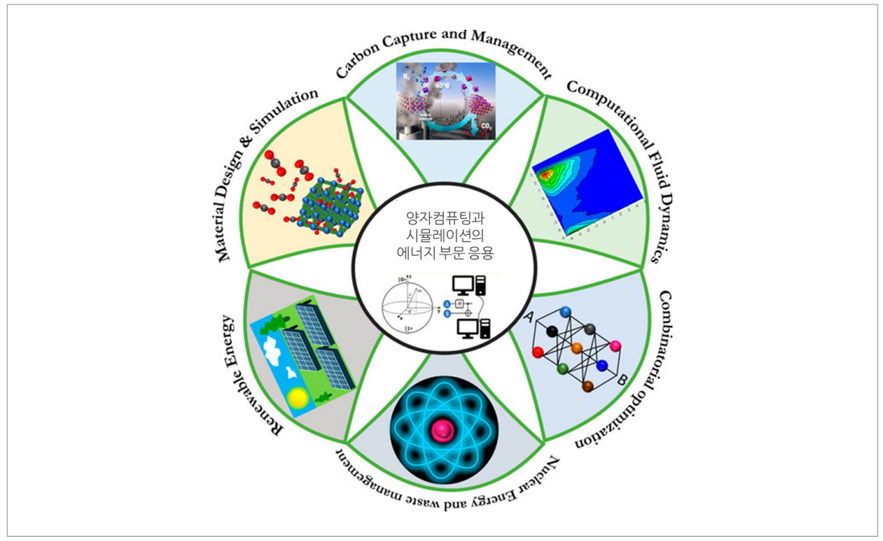
2. 기후 변화 모델링

세계 경제 포럼의 보고서에 따르면 복잡한 분자를 시뮬레이션하려면 원자가 추가될 때마다 기하급수적으로 더 많은 컴퓨터 성능이 필요하기 때문에, 오늘날 존재하는 기후 모델은 정확하지 않은 경우가 많다. 양자컴퓨팅은 실제 조건을 모방할 수 있는 규모로 입력을 쉽게 수용할 수 있는 보다 정확한 기후 모델을 설계하는 데 도움이 될 수 있다. 또한 연구자들은 복잡한 분자를 정확하게 시뮬레이션할 수 있어 특정 분자가 대기의 다양한 조건에서 어떻게 반응하는지 정확히 이해할 수 있는 가능성을 열어준다. 예를 들어 과학자들이 대기 중 이산화탄소의 양을 억제하는 방법을 더 잘 이해하는 데 도움이 될 수 있다.[60]

3. 에너지

양자컴퓨팅 및 시뮬레이션의 여러 초기 단계 응용 프로그램은 이미 입증되었으며 이러한 예비 결과는 양자컴퓨팅 및 시뮬레이션이 환경을 보호하면서 증가하는 에너지 수요를 충족하는 데 시급히 필요한 신기술의 배포를 크게 가속화 할 수 있음을 보여준다.[71] 예를 들어 [그림 Ⅲ-4-16]처럼 합금, 촉매, 산소 운반체, CO_2 흡착제/용매 및 에너지 저장 재료와 같은 새로운 재료 개발, 교통 흐름 및 에너지 공급망 최적화, 풍력 및 태양열 발전소, 화석 및 원자력 발전소와 같은 에너지 생성 시설의 위치 파악, 수소, 천연가스 및 CO_2 수송을 위한 파이프라인 네트워크 설계, 지진 영상 및 역전, 저수지 시뮬레이션 및 전산 유체역학과 같은 작업의 속도를 높일 수 있다.

그림 Ⅲ-4-16 양자컴퓨터의 에너지 분야 응용



※ Hari P. Paudel et al. (2022)

선로, 변전소, 변압기 및 발전소에서 가정과 기업으로 전기를 전달하는 기타 구성 요소의 네트워크인 전력망은 태양열 및 풍력 에너지원과 같은 재생 가능 에너지원이 증가함에 따라 변화하고 있다. 전력망에 꾸준히 전력을 공급하는 화석 및 원자력 발전소와 달리 재생 에너지원은 간헐적이며 태양이 비치거나 바람이 불 때에만 전기를 공급한다. 따라서 실시간 의사 결정이 필요한 그리드의 안정적이고 효율적인 운영은 양자컴퓨팅의 도움을 받을 수 있는 점점 더 복잡한 작업이 되고 있다. 전력망 운영자는 예측 전력 수요를 충족하는 동시에 몇 가지 다른 제약 조건을 충족하기 위해 총 운영비용이 가장 낮도록 최상의 전력 생성 장치를 지속적으로 식별하고 배치해야 한다. 전력망 운영자는 자연적 또는 인위적 사건으로 인한 정전에도 신속하게 대응해야 한다. 운영자는 장비와 인력을 배치할 장소와 시기도 결정해야 하기 때문에 실시간으로 수행되어야 하는 이 복잡한 계획 작업은 양자컴퓨팅의 도움을 받을 수 있다. 미국 전력 회사인 Commonwealth Edison Company는 최근 전력 시스템 모델링 및 의사 결정을 위한 양자컴퓨팅 사용하는 것을 시작하고 있다.

에너지 발전소의 위치를 정하는 것은 어려운 계산 작업이다. 예를 들어, 풍력 발전 단지는 바람의 흐름이 많고 전력망에 쉽게 접근할 수 있는 곳에 위치해야 하며, 태양열 또는 풍력 발전소는 시작 비용이 낮도록 위치해야 한다. 양자컴퓨팅은 이러한 위치 할당 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있을 것이다. 열 교환기 네트워크 합성의 목표는 산업 플랜트의 에너지 소비를 줄이는 동시에 플랜트의 총 자본 비용을 최소화하는 것이다. 이를 위해서는 공정 중 가열하거나 냉각하기 위해 공정 흐름 사이 또는 공정 흐름과 유틸리티 흐름(예: 증기, 냉각수) 간에 에너지를 전달하기 위한 최적의 열교환기 네트워크를 결정해야 한다. 물류 및 일정에 있어서 ExxonMobil은 특정 시간 창에서 여러 항구에서 여러 고객에게 석유 제품을 공급하는 비용을 줄일 수 있는 해상 재고 라우팅 문제를 해결하기 위해서, 전력회사 Enel은 연간 3,200만개 이상의 일자리에 수만 명의 현장 근로자에게 파견되고 있어 근무 시간 대비 근로자의 이동 시간을 줄이는 것을 목표로 파견 관리 속도를 높이는 방안을 검토하고 있다. 전력 회사는 가전제품, 온도 조절 장치, 조명 및 기타 장치를 원격으로 제어할 수 있도록 하여 주택 소유자의 편의와 비용 절감을 제공하는 스마트 홈에서 대량의 데이터에 액세스할 수 있도록, 양자컴퓨팅을 사용하여 이 데이터를 분석하고 운영을 개선할 수 있을 것이다. 마지막으로 유체 흐름 시뮬레이션은 정유에 사용되는 화학 반응기, 다양한 유체를 운반하는 파이프라인, 해양 시추 플랫폼 설계를 위한 해양 역학, 풍력 발전 단지의 기류와 같은 많은 에너지 응용 분야에서 중요하다. 예를 들어, Qubit Engineering은 풍력 발전 단지 개발자에게 최적화된 터빈 레이아웃 설계를 제공하고 풍차 로터 주변의 기류를 시뮬레이션하기 위해 Microsoft Azure Quantum을 사용하고 있다.

71) Hari P. Paudel et al. (2022)

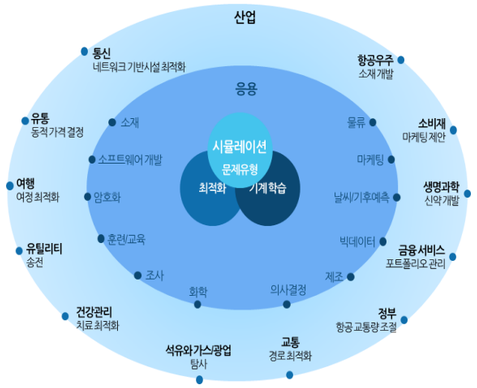
제5장 산업화 모델 시사점

최근 양자기술 전반에 관한 관심이 급증하며 세계 주요국 및 국내에서도 양자기술에 대한 투자와 기술개발에 집중하고 있는 추세이다.[38] 양자기술은 무기체계에서 창과 방패로 모두 사용될 수 있다. 초고속 양자컴퓨터에 의한 사이버 공격, 양자레이다에 의한 스텔스 표적 탐지, 양자센싱에 의한 초고감도 표적식별 등이 일례이다. 양자 무기 전력화는 아직까지 각 기술별로 많은 장벽과 한계가 있다. 그러나, 양자 무기는 기술 혁신성으로 인해 미래 전장의 패러다임을 바꿀 와해적이고 파괴적인 신무기가 될 것이라 확신되고 있다. 따라서, 국방 선진국들은 양자무기 핵심기술 확보와 체계개발을 위해 열을 올리고 있다. 우리는 양자기술의 혁신성을 무기체계에 어떻게 적용할 것인가 고민하고, 양자 원천기술을 융합하여 미래 전장의 주역이 될 수 있는 신개념 양자 무기체계를 개발하여야 할 것이다. 이를 위해서는 민·군을 막론하고 국내외 관련기술 공동연구 및 정부/기관 간 상호 협업이 무엇보다 중요하다 할 것이다. 우리나라가 디지털정보기술 분야에서 세계적으로 우위에 있지만, 양자컴퓨터와 양자암호 실험연구에서는 다른 선진국에 비해 많이 뒤진 것이 사실이다. 그렇지만 양자컴퓨터와 양자암호 기술이 아직 세계적으로도 충분한 수준에 이르지 못한 데다, 양자센서는 양자컴퓨터와 양자암호를 위한 요소 기술이고 우리나라가 앞서 나갈 수 있는 여지도 있어 좋은 기회가 열리고 있다.[72]

미래의 게임 체인저가 해결해야 할 과제들에 대해 전문가들은 양자컴퓨터가 소인수분해, 대량 데이터 탐색, 최적경로 예측 등 동시다발적으로 발생되는 정보의 처리가 요구되는 복잡한 계산과 데이터 처리에 강점이 있는 만큼 다양한 산업 분야에서 게임 체인저, 즉 시장의 흐름을 통째로 바꾸거나 판도를 뒤집어 놓을 만한 결정적인 역할을 할 것으로 예측된다. [그림 Ⅲ-5-1]에서 보는 것처럼 양자 시뮬레이션의 서비스 분야의 산업계 적용은 우리가 생각하는 것 이상으로 다양하며, 아직도 개발되지 않은 분야가 무궁무진하다 할 수 있다. 미국과 유럽이 미개척 분야를 개척하기 위해, 그리고 시장이 확장될 가능성이 매우 높다고 판단하기 때문에, 그 시장을 선점할 수 있도록 다양한 응용 분야를 발굴하여 개발하는 것이 필요하다.

72) 한국경제 (2021.01.13)

그림 III-5-1 양자 시뮬레이션의 서비스 분야



※ 집필진 작성

이제 한국도 기술 선도국과의 격차를 줄여야할 시기가 되었다. 우리나라는 수십 년 이상 꾸준히 투자해온 선도국에 비해 기술 수준이나 연구개발비 규모 면에서나 극복해야할 장벽이 많다. 기술 개발에 난이도가 큰 만큼 정부 차원에서 국가의 미래를 좌우할 핵심기술로 인식하고 긴 안목에서의 지속적인 투자와 종합적인 청사진 설계가 필요하다. 양자 분야의 기초 연구에서부터 응용, 개발 연구에 이르기까지 일관성 있는 중장기 전략이 필요하며, 무엇보다도 국내외 협력기반을 구축하여 다학제 융합연구에 힘써 앞으로의 10~20년 뒤를 대비해야 한다. 출연(연)을 중심으로 대학과 산업계가 참여하는 협업 생태계를 구축하고, 그 어느 때 보다도 협력의 리더십을 발휘하여 학문적 난제뿐만 아니라 인류 공통의 문제를 해결해야 한다.

그림 III-5-2 국내 양자기술 분야 발전 방향



※ NIA (2021)

그림 III-5-3 양자기술이 가져올 미래상



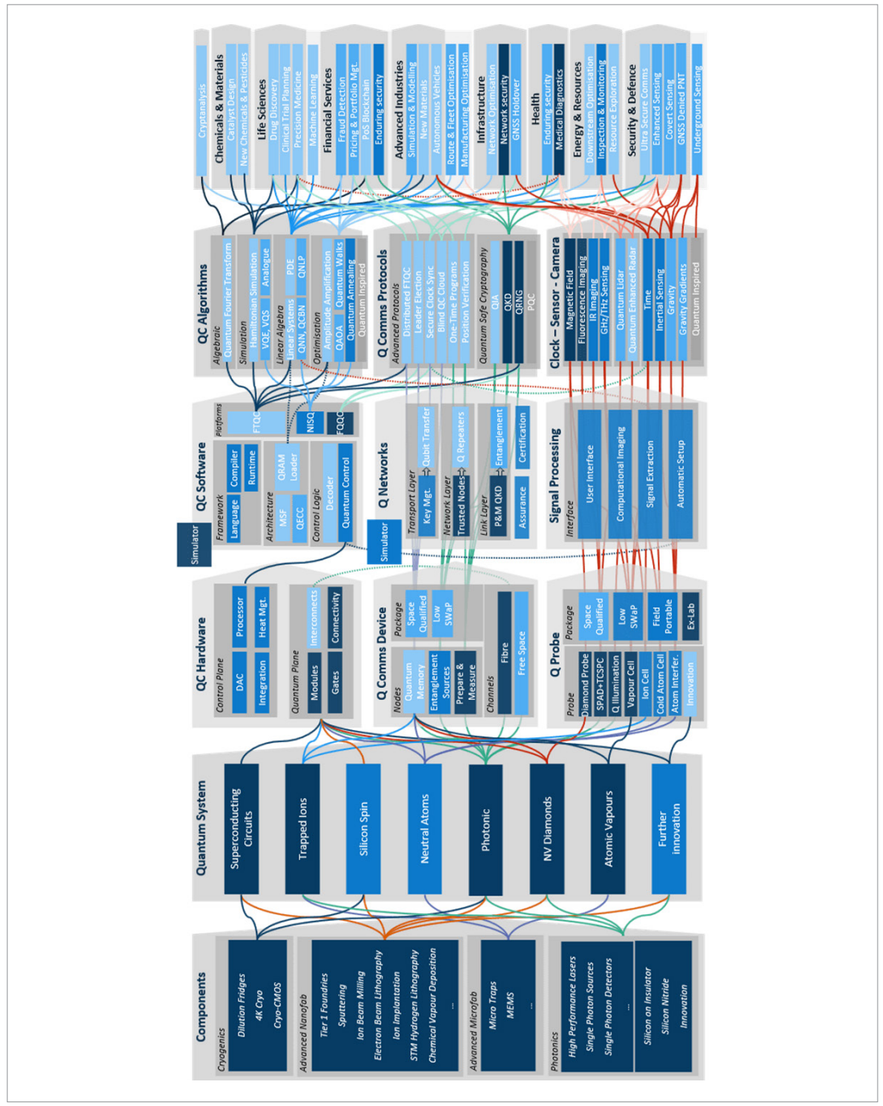
※ 과학기술정보통신부 (2021)

양자시대에는 아직 압도적 기술 우위로 기득권을 가진 선발주자가 없다. 양자기술은 미래 기술 패권을 정할 게임 체인저 기술로 세계 각국과 글로벌 기술이 각축전을 벌이고 있어 한국도 시급한 대책 마련이 필요한 상황이다. [그림 III-5-4][73]에 기술한 것처럼, 양자기술 분야는 매우 다양한 기술을 활용하고 있으며 확장가능성이 무궁무진 할뿐만 아니라, 위에서 언급한 것과 같이 다양한 사업서비스 분야

73) David Shaw (2022)

를 발굴할 수 있는 가능성도 다양하다고 할 수 있다. 이미 많은 국가와 기업들이 이러한 가능성을 파악하여 보안과 안보 분야에서 주요 활성화되었던 통신 분야도 점점 의료, 금융, 교통 등과 접목한 사업군을 속속들이 발굴하고 있다. 하지만 아직 독점 기업이 나타나지 않은 것으로 보인다. 즉 아직 추격의 기회는 열려 있으므로, 한국이 보유하고 있는 ICT 인프라 및 역량이나 반도체 제조 분야와 같은 강점을 살릴 수 있는 비교 우위점을 찾아 전략을 세우는 것도 향후 산업경쟁력의 미래를 결정하는데 중요한 역할을 할 것이다.

그림 III-5-4 양자 가치 사슬



※ David Shaw (2022)

참고문헌

• 국내문헌

1	가스신문(2021), “광센싱 기반 가스센싱 시스템은 광범위한 지역 배관 및 탱크 누출 쉽게 확인”.
2	강진규(2022), “이젠 양자컴퓨팅? 금융권 AI에 이어 양자기술적용 모색”.
3	고광본(2018), “‘950g 헬멧’ 뇌자기장 신호장치 개발...자폐 진단 쉬어져”.
4	구현모(2020), “미래사회의 게임 체인저 ‘양자 컴퓨터’”.
5	김봉수(2021), “퀀텀레이저로 자율주행차 라이다 성능 대폭 개선 가능”, 아시아경제.
6	김소연, 이정태, 오세준(2021), “양자기술과 미래 무기체계 발전전망”.
7	노신영(2021), “로슈, CQC와 ‘양자 컴퓨팅’ AD 신약개발 파트너십”.
8	동아사이언스(2018), “중국, 베이징서 7600㎞ 거리 비엔나까지 무선 양자통신 성공”.
9	디지털타임스(2016), “SGA솔루션즈, `클라우드 보안 지원 사업` 선정”.
10	문광주(2021), “광자 얽힘을 이용해 양자현미경의 선명도 35% 높였다.”.
11	박남수(2021), “양자정보통신 동향과 정보통신공사업 전망”.
12	박병권, 한상욱(2022), “전기 전자와 첨단 소재, 양자 키 분배 시스템 기술개발 동향”.
13	박재희(2021), “옥스드론, 드론용 양자 암호화 모듈을 공급하는 ㈜케이씨에스”.
14	삼정 KPMG 경제연구원(2017), “양자정보통신, ICP의 새로운 미래”.
15	서윤석(2021), “바오밥 AI, 'Cryo-EM+양자역학 및 AI 기반 신약개발'”, BioSpectator.
16	서일(2021), “베링거, 구글과 ‘양자 컴퓨팅’ 신약개발 파트너십”.
17	서정윤(2022), “과기정통부, 양자암호통신 인프라 구축사업 성과 공개”.
18	아더킹(2022), “양자물리학의 원리로 지하에 파묻힌 구조물을 매핑하는 "양자중력구배선" 실험 성공”.
19	윤소영(2022), “팸캐드, 큐노바와 양자컴퓨팅 기반 신약개발 MOU”.
20	이순호(2022), “신약개발도 AI 전성시대 … 양자역학 더해져 정확성·속도 ‘업그레이드’”.
21	이혁성(2019), “양자컴퓨터 기술 동향 및 산업 응용”.
22	이혜성(2020), “양자컴 통해 MRI 해상도 높이고 2차전지 효율 개선”.
23	전자신문(2020), “이와이엘, 美 공군 드론에 '초소형 암호칩' 공급”.
24	전자신문(2021), “양자암호 100㎞까지 전송…SKT·KT 장비 호환”.
25	정보통신기획평가원(2020), "ICT R&D 기술로드맵 2025, ICT 디바이스·양자".
26	정현(2022), “KIST, 신소재-신약 개발 앞당길 '실용적 양자컴퓨터' 구현”.
27	정훈, 이헌규(2015), “‘드론을 이용한 물류서비스 추진 방향’, 우정경영연구소”.
28	조성선(2018), “양자컴퓨터 개발 동향과 시사점”.
29	지식산업정보원 R&D 정보센터(2022), “미래 양자기술 동향과 생태계 분석 : 컴퓨팅/센서/양자암호·통신/양자점”.
30	지혁민(2022), “KAIST 뇌공학과 정재승 박사, 치안분야 '뇌파활용' 시범사업 참여”.
31	천선우(2021), “LGU+, 양자내성암호로 공연 티켓팅 서비스 보안 강화한다”.
32	최태우(2021), “이와이엘, 양자 난수 생성기-암호화 통합 초소형 단일칩 QCC 개발”.
33	한국경제 오피니언(2021), “[김재완의 21세기 양자혁명 양자 센서와 하이젠베르크 한계”.
34	한국연구재단 보도자료(2019), “실험이 아닌 컴퓨터 계산으로 메탄에서 에틸렌 제조”.
35	한국지능정보사회진흥원(2021), “양자기술 산업활용 사례”.
36	한국지능정보사회진흥원(2021), “양자산업 생태계 가치사슬 및 상용화 로드맵·산업화 모델”.
37	허원도(2012), “초전도 양자간섭 디바이스의 의료분야 응용”.
38	홍경표(2022), “한화시스템, KT와 손잡고 항공우주 양자함호 기술 공동개발”, 연합인포맥스.
39	황응준(2021), “[대덕, 대덕人⑨]'스퀴드 센서' 시작점 이용호 표준연 박사”.
40	David(2021), “英 스타트업 “2023년 위성 양자키 전송””, The Science Monitor.
41	David(2022), “수소 분자 양자센서 전환 시연”, The Science Monitor.
42	David(2022), “프랑스 양자기술 개발 20억 달러 투자, 국방혁신”, The Science Monitor.
43	IRS Global(2022), “4차 산업혁명의 엔진, 양자기술 글로벌 혁신 기술 트랜드 및 향후 전망”.
44	KRISS(2022), “다이아몬드 양자센서로 자기장과 온도의 변화 동시에 감지한다”.
45	LG유플러스 보도자료(2018), “KT-LG유플러스, 양자통신 기술 첫 국제표준화 성공”.

• 해외문헌

1	Akshay Iyer, Anouk A. J. Hamers, and Asha B. Pillai(2022), CyTOF®for the Mass, Front Immunol, 14(13).
2	Alex Challans(2022), Quantum Computing Market Map and Data 2022.
3	Carlos Oliver, Vidisha Suman(2021), Quantum computing: why you should care.
4	David Shaw(2022), Quantum valume chain : Overview.
5	Farzam Toudeh-Fallah et al.(2022), Paving the way towards 800Gbps Quantum-Secured Optical Channel Deployment in Mission-Critical Environments.
6	Florian Budde, Daniel Volz(2019), The next big things? Quantum computing’s potential impact on chemicals.
7	FutureBridge(2020), Quantum Computing: A Key to Autonomous Vehicle Industry Success.
8	Hamilton et al.(2019), Overview of NASA’s National Space Quantum Laboratory Program, 70th International Astronautical Congress(IAC).
9	Hari P. Paudel et al.(2022), Quantum Computing and Simulations for Energy Applications: Review and Perspective.
10	HPC wire(2020), Fujitsu and Toyota Systems Optimize Large-Scale Supply Chain Logistics using Quantum-Inspired Technology.
11	Katrin Granel(2022), Flying into Quantum – a Game Changer for Airlines?
12	Koh Young(2017), A quantum leap towards the factory of the future.
13	Lisa Zyga(2016), Proposed quantum nano-MARI could generate imgages with angstrom-level resolution.

14	Malik, M., Magaña-Loaiza, O.S., & Boyd, R.W.(2012), Quantum-secured imaging.
15	Marta Gilaberte Basset, Frank Setzpfandt et al.(2019), Perspectives for Applications of Quantum Imaging, Laser & Photonics Reviews, 13(10), 1900097.
16	Michal Krelina(2021), Quantum technology for military applications, EPJ Quantum Technology, 8:24
17	Nicole(2022), A Deeper Dive into Near-Term Quantum & Applications.
18	NIST(2012), Cool Nano Loudspeakers Could Make for Better MRIs, Quantum Computers.
19	Quantum Technology and Application Consortium(2021), Industry quantum computing application.
20	Rafael Sotelo(2022), Air Cargo Load Optimization using Quantum Annealing on Amazon Braket.
21	Research Blog(2022). 5 Top Emerging Quantum Cryptography Solutions
22	Sarah Black et al.(2021), CODEX multiplexed tissue imaging with DNA-Conjugated antibodies.
23	Scott E. Crawford, Roman A. Shugayev et al.(2021), Quantum Sensing for Energy Applications: Review and Perspective, Advanced Quantum Technologies, 4, 2100049.
24	Simon Jordan(2020), Why it's time to start turning quantum sensing theory into real-world commercial advantage.
25	StartUs(2020), 5 Top Emerging Quantum Computing Startups.
26	StartUs(2021), 5 Top Quantum Computing Startups to Watch in 2022.
27	Tech Briefs(2022), Enhancing Aircraft System Monitoring and Reducing Unscheduled Maintenance.
28	Theresa Hitchens(2019), Air Force Eyes New Deep Space Sensors in Australia, Spain, Breaking Defense.
29	Tim van Erp, Bartlomiej Gladysz(2022), Quantum Technologies in Manufacturing Systems: Perspectives for Application and Sustainable Development, Procedia CIRP, Vol.107, pp.1120-1125.

• 사이트

1	https://101blockchains.com/blockchain-and-quantum-computing
2	https://aite-novarica.com/report/quantum-technology-and-insurance
3	https://gesrepair.com/quantum-computing-and-its-role-in-the-future-of-manufacturing
4	https://qpicloud.tech
5	https://www.everestgrp.com/2018-12-potential-use-cases-of-quantum-computing-in-banking-financial-services-48389.html/
6	https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantum-manufacturing
7	https://www.startus-insights.com/innovators-guide/5-top-emerging-quantum-cryptography-solutions/
8	https://thequantuminsider.com/2022/05/09/quantum-computing-market-map-and-data-2022/

IV

양자기술 전문인력 교육 정보 및 현황



제1장 국내외 양자기술 인력양성정책

제2장 국내외 양자기술 인력양성 전문 교육 정보

제3장 국내 양자기술 전문인력 현황 및 수급전망

제1장 국내외 양자기술 인력양성정책

제1절 개요

양자기술은 가장 기본적인 수준인 양자역학에서부터 출발하여 자연에 대한 우리의 이해를 양자 정보 이론으로 표현하고, 양자컴퓨터와 같이 양자기술 확장을 위한 엔지니어링 접근 방식까지 매우 광범위한 스펙트럼을 다루고 있다. 신흥 양자산업의 관점에서 2020년 연구에 따르면 21개의 미국 양자 회사를 대상으로 한 설문조사에서 전체 고용인 가운데, 엔지니어가 95%, 그리고 전기 엔지니어는 71%를 차지했다. 이는 다른 유형의 엔지니어보다 훨씬 높은 비율이다. 이처럼 양자산업의 발전은 양자기술과 전기 및 컴퓨터, 기계 공학 등에 대한 숙련된 인력의 가용성에 달려있다.[1)]

잘 훈련된 양자 전문인력의 수급의 중요성이 더해가고 있다. 차세대 첨단 기술 혁명을 주도하고 있는 양자기술은 최근 몇 년 동안 대부분의 과학 연구, 하드웨어 접근 방식 및 실험에서 실용적인 제품 및 상업화로 크게 이동하고 있으며,[2)] 양자기술의 경제적 파급력을 인식하고 있는 가운데, 많은 국가에서 양자컴퓨터의 발전을 촉진하기 위해 국가 양자 전략을 시작하고자 노력하고 있다. 결국 다양한 산업 분야가 양자 우위를 확보하고 변화하는 글로벌 경제에서 민첩성 유지를 위해서는 전문인력의 수급이 중요하다. 잘 훈련된 전문인력의 부족은 양자 우위를 향하는 과정에서의 "양자 병목 현상"으로 인식되고 있다.

전 세계적으로 국가 정부, 산업체, 대학은 양자정보과학, 양자 공학, 양자 정보 및 과학 등 양자기술의 확장을 위한 새로운 유형의 노동력을 창출하기 위해 움직이고 있다.[3)] 미국은 지난 2022년 2월 미국 국가과학기술심의회(National Science and Technology Council, NSTC)가 양자정보과학 인력양성 전략을 발표하면서,[4)] 향후 10년 동안 양자정보과학 및 응용 분야에서 미국의 리더십을 유지하고 확장하기 위한 노력을 더욱 공고히 다지고 있다. 이 전략 문서는 현재 산학연의 양자 인력에 대한 공급이 부족하다고 판단하고 있으며, 특히 현장으로의 경력 전환을 위한 단기적, 교육/훈련/지원활동 등의 장기적인 접근이 필요하고, 이를 위한 국가 전략을 제시하고자 했다. 미국뿐 아니라 유럽, 영국, 일본 등 대다수 양자기술을 선도해 가는 국가들도 양자정보과학 생태계의 인력 수요, 전문 교육을 통한 수요와 공급의 격차 해소 방법 등 양자 인력 육성을 위해 노력하고 있다.

1) Fox et al. (2020)
2) Batra et al. (2021); Hilton (2019)
3) Aiello et al. (2021); Asfaw et al. (2021); Perron et al. (2021); Rainò et al. (2021)
4) National Science & Technology Council (2022)

제2절　미국

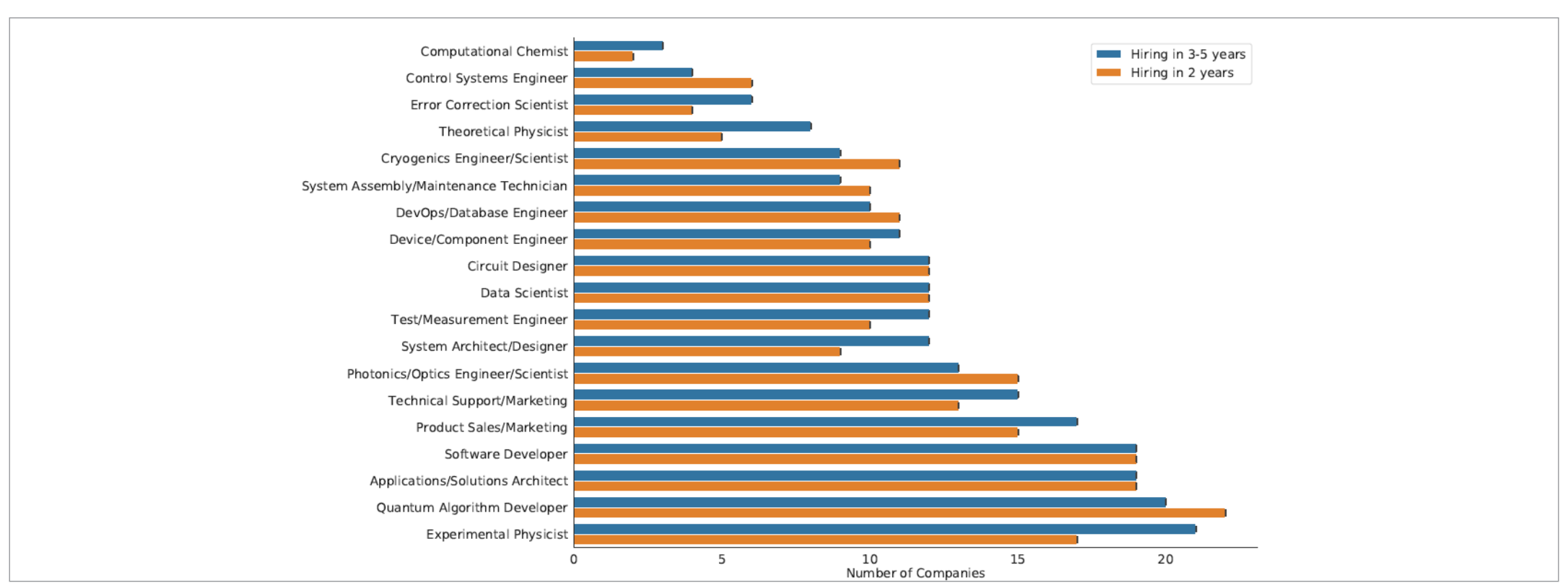
1. 양자 인력양성 국가 전략

가. 문제점 인식

미국은 지난 10년 동안 양자정보과학에 대한 대대적인 투자를 해왔으나, 전문인력 측면에서 공급이 수요를 따라가지 못하고 있으며, 향후 이러한 부족한 공급이 어느 정도 지속된다는 것이 일반적인 견해이다. 미국은 전문인력의 부족에 대한 향후 장단기적 특성을 파악하기 위해서 여러 가지의 전략적 시도를 하고 있다. 최근 국가과학기술심의회의 양자정보과학소위원회가 발간한 『Quantum Information Science and Technology Workforce Development National Strategic Plan』에 의하면, 장단기 관점에서 인력 수요의 특성을 이해하는 것이 중요하다고 언급하고 있다.[5)]

2021년 설문조사 결과를 통해서 양자산업이 요구하는 인력 수요의 특성을 몇 가지로 예상해 볼 수 있다.[6)] 첫째, 양자산업계가 요구하는 일자리의 유형은 단기적으로 큰 변화가 없을 것으로 보인다. [그림 Ⅳ-1-1]에서 보듯이 향후 2년과 향후 3~5년 동안 한 직무에 채용할 기업 수가 거의 같을 것이다. 즉 양자기술의 발전이 이루어지고 있음에도 불구하고 업계의 근본적인 인력 구성은 향후 5년 동안 크게 바뀌지 않을 것이다.

그림 Ⅳ-1-1　57개 기업 중 향후 2년(파란색) 또는 향후 3~5년(주황색)에 해당 직종을 고용할 것이라고 응답한 기업의 수

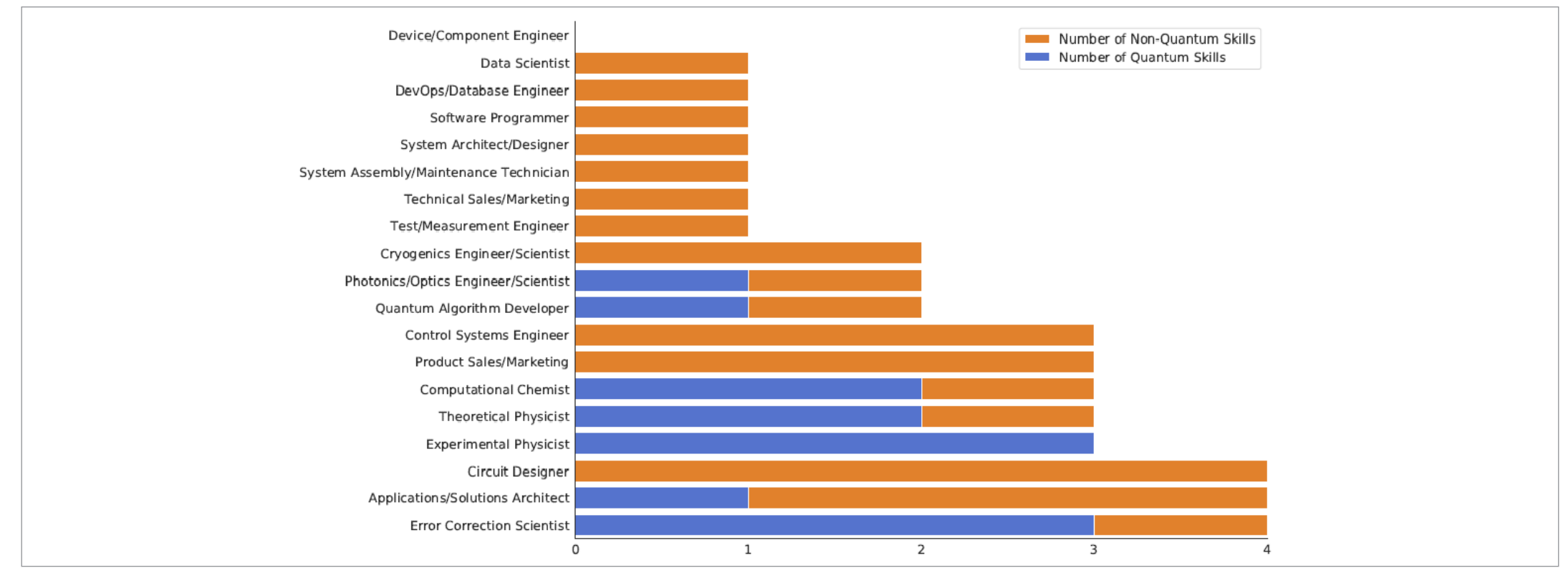


※ Hughes et al. (2021)

5) National Science & Technology Council (2022)
6) Hughes et al. (2021)

둘째, 모든 양자 인력이 양자 분야만으로 전문화될 필요는 없다는 것이다. [그림 Ⅳ-1-2]에서 보듯이 직무 유형에 필요한 양자/비양자기술의 수를 나타낸다. 양자기술은 유형별로 특정 직무 역할로 묶이는 경향이 있으며, 모든 종사자에게 양자에 대한 깊은 전문 지식이 요구되지 않음을 나타낸다. 또한 [그림 Ⅳ-1-3]은 양자산업의 다양한 직무 역할에 필요한 학위 분포를 나타낸다. 오류정정 과학과 같이 고도로 전문화된 양자 분야를 제외하고 반드시 박사 학위가 필요한 것은 아니다.

그림 Ⅳ-1-2　각 직업 유형에 필요한 중요한 양자(파란색) 및 비양자(주황색) 기술의 수



※ Hughes et al. (2021)

그림 Ⅳ-1-3　양자산업에서 다양한 직무 역할에 필요한 학위 분포

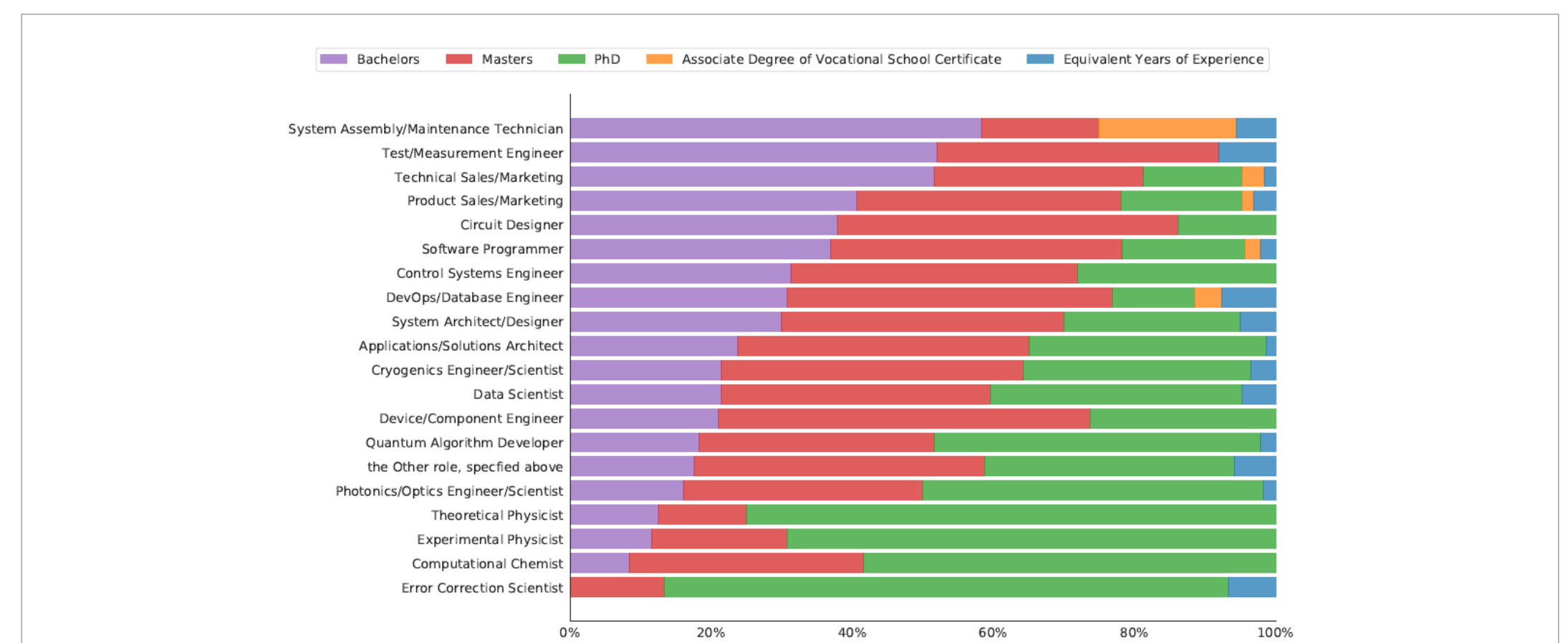


FIG. 4: The distribution of degrees needed for different job roles in the quantum industry.

※ Hughes et al. (2021)

나. 비전과 행동전략

미국 정부의 양자 인력에 대한 비전을 요약하면 다양하고 포용적 범위의 기술인력을 지속적으로 육성하는 것이라고 볼 수 있다.[7] 그리고 이러한 전략을 실천에 옮길 수 있도록 행동전략을 아래 〈표 Ⅳ-1-1〉와 같이 세우고 있다.

표 Ⅳ-1-1 미국의 양자 인력 관련 행동전략

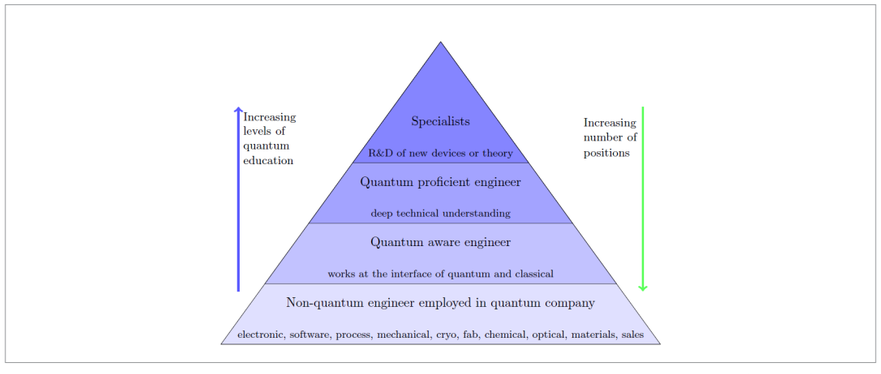
행동전략	주요 내용
Action 1	장단기 관점에서 QIST 생태계의 인력 수요를 파악
Action 2	공공홍보 및 교육자료를 만들어서 가능한 많은 사람들에게 소개
Action 3	전문교육 및 훈련 프로그램 기회가 부족하지 않게 대응
Action 4	QIST 및 관련 분야의 직업에 접근성을 높이고 공평하게 이루어져야 함

(1) 장단기 관점에서 양자정보과학 생태계의 인력수요 파악

교육 및 지원활동 프로그램의 초점과 규모는 산업, 학계 및 기관의 인력 요구 사항을 충족해야 하나 양자정보과학 인력 환경은 작업의 복잡성, 학제 간 특성, 재능과 아이디어의 전 세계적으로 상호 연결된 순환, 기초 연구에서 산업 개발로의 급속한 진화로 인해 평가하기 어려운 상황이다. 반면 새로운 기초과학 하위 영역이 생성되는 동시에, 엔지니어링 기술 개발, 그리고 프로토타입을 거쳐서 제품으로 확대되고 있다. 이러한 변화의 폭은 컴퓨터 과학, 전기 공학, 물리학, 화학, 수학 등의 핵심 과학 분야, 그리고 마케팅 및 판매, 제조, 시스템 엔지니어링 등의 제조 및 판매 지원 분야에서 감지된다. 데이터 분석을 포함한 기술적인 능력과 팀으로 작업할 수 있는 것과 같은 조직적 능력 모두가 양자정보과학 전문가에게 필요한 능력이긴 하다. 그러나 양자정보과학 숙련자(학부 양자정보과학 관련 전공, 부전공 또는 트랙 보유), 양자정보과학 지식보유자(양자정보과학에 관련된 학부 수업 한 가지 수강자) 또는 STEM 전문가(양자정보과학 산업에서 필요로 하는 보완적인 기술을 보유한 개인)에 대한 실질적인 수요가 증가하고 있다. [그림 Ⅳ-1-4]은 양자산업의 요구 사항을 염두에 둔 시장의 다양한 부문에 대한 예상 직위의 상대적 수와 각각에 대한 양자 교육의 필수 수준을 나타낸다. 'Non-quantum engineer employed in quantum company'로 표현된 STEM 전문가는 양자 배경 없이 해당 분야에서 고급 학위를 가질 수 있으므로 현재 표현된 양자 교육 수준이 전체 교육을 나타내지는 않는다. 마찬가지로 양자 전문가는 분야에 따라 박사 학위를 취득할 필요가 없다.

7) National Science & Technology Council (2022). 비전 원문은 다음과 같음 "The United States should develop a diverse, inclusive, and sustainable workforce that possesses the broad range of skills needed by industry, academia, and the U.S. Government, while being able to scale and adapt as the QIST landscape evolves"

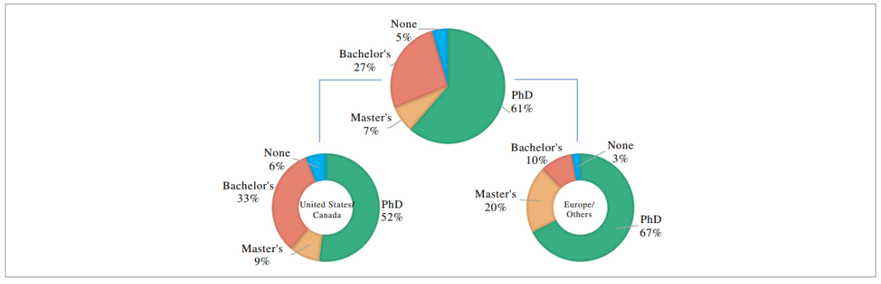
그림 Ⅳ-1-4 양자 직업 시장의 다양한 부문에 대한 예상 직위의 상대적 수와 각각에 대한 양자 교육의 필수 수준



※ Asfaw et al. (2021)

[그림 Ⅳ-1-5]는 현재 추정되는 직업 시장과 양자 직업에 대한 학업 학위(박사, 석사, 학사 또는 학위 없음) 요구 사항의 분포를 나타낸다. 전 세계 시장 중 미국/캐나다, 유럽 및 그 외 국가로 세분화한 결과, 박사 학위를 소지한 졸업생의 수요가 가장 많으며 다음으로 학사 및 석사 졸업생이 필요한 것으로 나타났다. 구인을 위한 고등 교육 요건은 미국과 캐나다보다 유럽에서 훨씬 높은 수준의 학위수준을 요구하고 있으며, 미국/캐나다는 학사 졸업자를 더 많이 요구한다.

그림 Ⅳ-1-5 (a) 전 세계, (b) 미국/캐나다, (c) 유럽/기타 국가의 다양한 양자 시장 구인에 대한 학위 요건

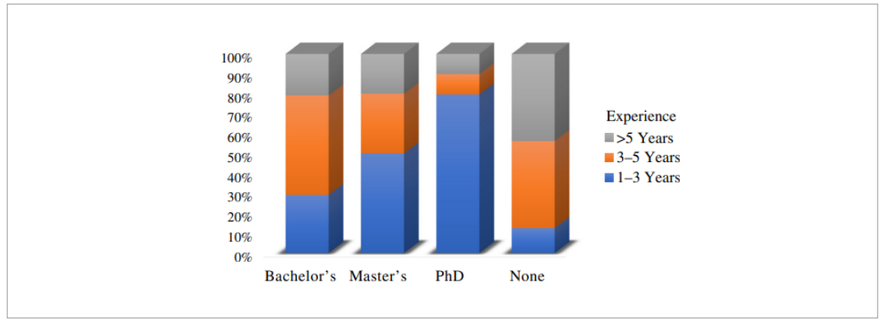


※ Kaur & Venegas-Gomez (2022)

[그림 Ⅳ-1-6]은 요구되는 학업 학위와 수 년 간의 최소 전문 경험을 갖춘 구인 광고의 직위를 보여준다. 박사 학위와 학사 학위 사이에는 분명히 큰 차이가 있다. 1~2개 과정을 통해 습득한 기본적인 양자지식을 필요로 하는 역할은 전문적인 경험을 가진 학사졸업자가 중요할 수 있지만, 취업에 필요한 전문적인 경험의 기준은 상대적으로 전문 양자 기능에 대해 교육을 받은 박사 졸업생의 경우 더 낮다. 이

분석은 기술 요구 사항에 초점을 맞추는 것이 아니라 학문적 학위 요구 사항에 중점을 둔 것으로, 학위가 졸업생을 산업별 기술로 훈련시키고 미래 노동력의 요구를 충족시키는지 여부에 대해서는 논쟁이 있다. 그러나, 졸업생이 인턴십을 통해 산업 교육을 받거나 커뮤니티 참여를 통해 기타 기술, 비즈니스 및 소프트 기술을 습득하면 고용 시장에서 더 가치 있는 후보자가 될 수 있음을 나타낸다고 볼 수 있다.

그림 Ⅳ-1-6 전 세계적으로 제공되는 다양한 일자리에 대한 학위 외에 최소 전문 경험 요건



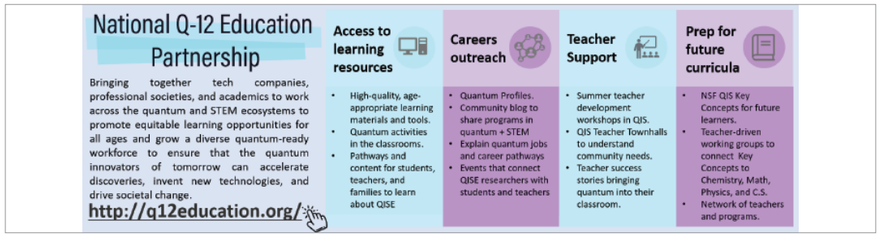
※ Kaur & Venegas-Gomez (2022)

양자 전문인력를 장단기적으로 공급하기 위한 방법을 몇 가지 생각해 볼 수 있다. 첫째, 단기적 관점에서 볼 때 국제협력의 틀속에서 해외 인력을 유치하는 것이다. 미국은 전통적으로 학계, 국립 연구소 및 산업계에 참여하여 경력을 발전시키기 위해 해외 전문가의 유입을 통해서 인력을 공급해왔다. 양자정보과학의 기회가 미국 외 지역에서 성장함에 따라 협력 환경을 제공하기 위한 노력이 지속돼야 하며, 이를 위해서는 연방 부처 및 기관, 연방 연구소, 연방 자금 지원 R&D 센터(Federally-Funded R&D Centers, FFRDC), 대학 부속 연구 센터 연구소(University-Affiliated Research Center Laboratories, UARC) 및 방위 산업 기반에서 활동하는 인력에 대한 미국 시민권 확보 문제도 검토해 볼 필요가 있다. 둘째, 장기적인 관점에서 양자 분야에 참여하기를 원하는 모든 미국인을 포함하는 다양한 인력을 육성하기 위해서는 포용적이며 지원적이고 평등한 업무 및 학습 환경, 정책 및 구조를 만들기 위한 체계적인 문화 변화가 필요하다.

(2) 대중 홍보 및 교육을 통한 양자정보과학의 대중화

미국 백악관 과학기술정책실(OSTP)과 국립과학재단(NSF)이 2020년 『National Q-12 Education Partnership』을 발족시켰으며, 초중고 교실 수업 과정에서 양자기술 프로그램을 만들어 양자 인력 육성의 노력을 시작한 바 있다. [그림 Ⅳ-1-7]에서 보듯이 일명 'Q-12 파트너십'은 연방 정부, 산업, 전문가 사회, 교육 커뮤니티 간의 협력체이며, 초중고 학생들을 차세대 양자 인력으로 육성하고자 한다. 예를 들어, 미국의 대학들이 non-STEM 학생들에게 양자 입문 과정을 제공하기도 하고, 지역 전문대학교, 군사학교, 일반대학교에도 이러한 수준의 교육 자료를 제공한다.[8]

그림 Ⅳ-1-7 어린 학생들을 양자정보과학에 연결하기 위한 연방 정부, 업계, 전문 협회 및 교육 커뮤니티 간 교육 파트너십



※ National Science & Technology Council (2022)

지난 2022년 2월 학계, 조기 교육, 산업계, 연방 정부 및 비영리 조직 전반에서 200명이 넘는 이해관계자가 모였다. 이 회의에서 유치원부터 고등학교에 이르는 수준의 양자정보과학 교육의 진행 상황을 논의하고 과제를 식별하며, 교사와 학생을 참여시키기 위한 도전과제와 권장 사항 설명 등 양자정보과학에 대한 대중의 참여 확대를 논의했다.[9]

IBM 등의 개방형 클라우드 연결 양자컴퓨팅 프로토타입의 글로벌 가용성은 지원 가능성을 논의해야 하지만, 양자정보과학 개념과 연결되는 교육 기회를 만들기 위한 지속적인 노력이 필요하다. 특히 양자정보과학은 아직 많이 알려지지 않아서 대부분의 학생, 교사, 학부모 또는 일반 대중에게 양자정보과학의 이점이 아직 명확하지 않을 수 있기 때문에, 장기적으로 양자정보과학 인력을 개발하려면 보다 광범위하게 이용 가능한 봉사활동 및 조기 교육 기회를 통해 양자정보과학에 대한 노출이 제공돼야 한다. 대중 매체, 대중 문화 또는 대학 및 업계의 보도 자료는 학생과 가족이 해당 분야에 대해 처음 듣는 일반적인 방법이며, 특히 양자정보과학 과목의 첫 번째 접촉의 질이 학생의 지속적인 참여에 중요한 요소이기 때문에 조기 교육 자료에 대한 공식적인 평가가 중요하다. 이러한 기회는 과대 광고를 최소화하면서 핵심 원칙을 설명하고, 양자정보과학의 신비를 풀고, 사회에 대한 긍정적인 역할을 강조하고 다양한 양자정보과학 직업 옵션을 설명할 수 있도록 설계돼야 한다. 이러한 활동은 모든 배경의 교육자, 멘토, 학생 등을 포함하여 대중에게 이익이 되어야 하며, 이는 지역 산업체 및 대학과 연결하여 세미나를 개최하는 등의 정규 학교 및 비즈니스 활동의 일환으로 수행할 수 있으며 박물관, 영화, 게임 및 기타 미디어와 같은 비공식 학습 장소에서도 가능하다.

8) National Science & Technology Council (2022)
9) National Science & Technology Council (2022)

(3) 양자정보과학의 각 분야별 격차 해소

고등 교육(전문 인증, 준학사, 학사, 석사 및 박사 학위, 전문 재교육 프로그램을 포함한 고등학교 이후 교육)은 양자정보과학 인력에 필요한 교육, 훈련 및 기술을 제공하는 데 중요한 역할을 한다. 양자정보과학을 뒷받침하는 핵심 개념은 전문화된 고급 학부 물리학, 화학, 공학 또는 컴퓨터 과학 과정에서 가르치고 있으나 이러한 과정의 많은 자료는 여전히 현재 양자정보과학 프로토타입 시대 이전의 혁신에 초점을 맞추고 있다. 이는 대부분의 양자정보과학에 참여하는 대부분의 미국 교육 기관과 대학원 과정 역시 해당된다. 강력한 양자정보과학 프로그램을 갖춘 기관에서도 공학이나 컴퓨터 과학과 같은 분야의 핵심 교과 과정에 양자정보과학 개념을 포함시킨 사례를 소수에 불가하나 최근에는 실습교육을 포함한 주제별 부전공 프로그램과 입문 양자정보과학 과정을 제공하기 시작했다.[10)]

앞서 언급한 바와 같이, 산업계, 정부 및 학계는 다양한 깊이의 양자정보과학 지식과 기술을 보유한 인력뿐만 아니라 양자정보과학에 국한되지 않는 기술을 보유한 인력이 필요하다. 단기 인력 수요는 최근 졸업생과 중간 경력자의 조합으로 채워질 것이며, 양자정보과학 분야로 전환하는 근로자는 양자 생태계에서 매우 중요한 역할을 할 수 있음을 살펴보았다. 광범위한 교육 기회는 양자정보과학 경력의 다양한 깊이와 학문적 요구를 충족할 수 있으며, 기술을 향상시키거나 다양한 경력 단계의 연구원 및 전문가를 재교육할 수 있는 기회가 필요하고 이에 대한 투자가 양자정보과학으로의 진입점을 확대시킬 수 있다.

마지막으로 양자정보과학을 활용하는 수요자(End-users)에 대한 교육이 필요하다. 수요자 그룹은 현재 정의되지 않았지만, 광범위하고 여러 도메인에 걸쳐 있을 것으로 예상된다. 전문 영역에 종사하는 수용자의 경우, 양자정보과학 전문 지식을 습득한 후 양자정보과학의 장점을 활용하여 기존의 영역에 적용할 수 있다. 예를 들어, 의사는 양자센싱이 적용된 MRI을 이용하여 양질의 뇌 이미지를 얻을 수 있고, 군 지휘관은 양자정보과학 시스템을 사용하여 복잡한 물류 문제를 해결할 수 있다. 양자정보과학 수요자 교육은 다른 교육 접근 방식을 모델로 삼을 가능성이 가장 높기에 장기적으로 추진하는 것이 바람직하다.

(4) 양자정보과학 관련 분야 참여에 대한 장벽 해소

양자정보과학 전문 지식의 필요성이 커짐에 따라 다양성, 형평성 및 포용성에 대한 고려가 모든 개발 분야에서 핵심적인 역할을 하도록 해야 한다. 모든 과학 분야의 배경을 가진 국내외 인재를 위한 여러 진입로를 개발함으로써 기술적 리더십을 이끈 접근 방식을 유지하고 강화해야 한다. 강력한 전문가 풀을 유지하고 성장시키는 것은 지난 25년 동안 미국에서 양자정보과학을 성공으로 이끈 접근법을 보완하고 확장하는 것에서 시작된다. 이를 위해 기관에서 제공하는 기존 연구 훈련 프로그램의 지속적인 지원과 적절한 강화를 통해 기초 연구의 지속적인 지원과 확장에 대한 역할과 필요성을 강조하고 더 많은 학제 간 기회 창출을 장려했다.

인재풀을 늘리기 위해 아직 양자정보과학 활동을 하지 않은 단체, 기관의 연구역량을 높이고 학생들이 더 많은 기관에서 양자정보과학 연구에 참여할 수 있는 새로운 기회를 제공하는 프로그램을 개발하여 생태계를 성장시켜야 한다. 최근 국립과학재단(NSF)의 "양자 정보 과학 및 공학의 역량 확장(ExpandQISE, Expanding Capacity in Quantum Information Science and Engineering)" 프로그램을 개발하여 주요 양자정보과학 연구 기관/센터에서 수행한 기존의 영향력 있는 작업 사이의 긴밀한 연결을 구축하고 유지하도록 지원함으로써 다양한 스펙트럼을 갖는 연구 인재의 참여를 촉진한다.[11)]

국립과학재단(NSF)은 생물물리학과 생물공학 부문의 양자 바이오센싱과 양자 시뮬레이션 연구에 초점을 맞춘 양자도약챌린지연구소 두 곳(양자센싱 연구소, 로버스트 양자 시뮬레이션 연구소)을, 2020년 설립된 세 곳의 양자도약챌린지연구소에 더해 신설하는 방안을 발표했다. 양자도약챌린지연구소는 양자 정보 과학과 공학의 최첨단을 선도하는 대규모 범학제적 프로젝트 연구는 물론 교육, 훈련, 인력 개발, 연구 조율 및 지역 활동 참여, 협력적인 파트너십과 인프라 발전 등의 분야에서 활동을 수행한다. 로버스트 양자 시뮬레이션 연구소(NSF Quantum Leap Challenge Institute for Robust Quantum Simulation)는 모건주립대학교와 노스캐롤라이나센트럴대학교의 두 흑인대학(HBCUs)과 협력적인 파트너십을 구축할 예정이며, 양자센싱 연구소는 시카고 공립학교와 파트너십을 맺고 양자과학의 기초를 가르치는 양자 아카데미 프로그램을 유치원에서 고등학교까지(K-12) 제공할 예정이다.

미국 양자정보과학 생태계의 거의 모든 측면에서 국제 참가자는 중요한 역할을 하고 있다.[12)] 국제 참가자들은 학부 및 대학원생으로 연구를 수행하고 박사후 연구원으로 독립적인 연구를 수행하며 산학계의 연구 프로그램을 이끌고 있다. 이 중 많은 사람들이 미국으로 이주하여 연방 서비스를 포함한 다양한 방식으로 계속해서 기여하고 있다. 다른 사람들은 고국으로 돌아가거나 새로운 위치에서 프로그램을 수립하여 글로벌 협력자 네트워크를 강화한다. 학계 및 산업계의 직업과 달리 대부분의 연방 정부 직업에는 미국 시민권과 같은 추가 요구 사항이 있다. 수여된 양자정보과학 관련 대학원 학위의 절반 이상이 외국인 학생에게 수여된다는 사실은 균형 잡힌 인력 개발 전략의 일환으로 관심이 있는 STEM 교육을 받은 외국인을 위해 미국 시민권을 취득할 수 있는 경로에 대한 홍보가 필요하다.

마지막으로 인재 개발을 계획할 때 교육 및 훈련에 필요한 일정에 유의해야 한다. 예를 들어, 양자정보과학의 기초 연구 인력을 우선적으로 늘리면 2년 이내에(박사후 과정 자금 지원 및 석사 학생 참여) 또는 5~10년(박사 학위 또는 해당 분야에서 계속할 수 있는 학부 참여)에 전문가 인력을 늘릴 수 있다.

10) Cervantes et al. (2021)

11) https://www.nsf.gov/pubs/2022/nsf22561/nsf22561.htm

12) https://shequantum.org/

즉각적인 필요(6개월~1년)를 채우기 위해 기존의 전문 학계, 산업계, 국립 연구소 및 정부 과학 및 기술 전문가의 인재 풀을 활용하여 양자정보과학으로의 이동을 고려할 수 있다. 이러한 전환은 안식년, 펠로우십 및 전문 교환 프로그램 등의 정부 또는 민간 후원 프로그램을 통해 지원과 인센티브가 제공되는 경우 촉진될 수 있다.

제3절 유럽 연합

1. EU QTEdu

가. QTEdu 프로젝트

(1) 기술 역량 요구 사항

EU는 2020년 9월 출시된 양자기술 교육의 조정과 지원 활동(QTEdu: Coordination and Support Action for Quantum Technology Education) 프로젝트를 통해 유럽연합 양자기술 플래그십(European Quantum Flagship)이 양자기술을 사회에 알리고 교육할 수 있는 학습 생태계 조성을 목적으로 양자기술 분야의 교육과 훈련 프로젝트를 계획하고 설계하기 위해서 필요한 정보들을 수집해왔다.[13] 양자기술 유럽 역량 프레임워크(European Competence Framework for Quantum Technologies)는 양자기술 분야에서 가능한 역량과 기술의 현황을 펼쳐 보이는 것으로 8개의 주요 분야로 구성하여 양자기술의 광범위한 범위를 규정하고, 8개 분야 아래 다양한 세부 분야들로 구성하고 있다.

표 Ⅳ-1-2 유럽의 양자기술 역량 프레임워크 주요 분야

번호	세부 분야
1	양자 물리학의 개념
2	양자기술 물리학 기초
3	Enabling 기술
4	양자컴퓨터 및 센서 하드웨어

번호	세부 분야
5	양자 컴퓨팅 & 시뮬레이션
6	양자 센서 및 계측
7	양자 커뮤니케이션
8	실용 기술 및 소프트 기술

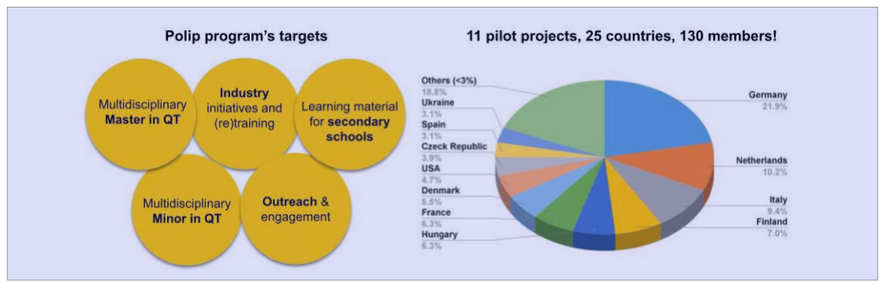
〈표 Ⅳ-1-3〉에서 보듯이 구체적으로는 4개의 주요활동을 수행하며, [그림 Ⅳ-1-8]에서 보듯이 현재 25개국의 130여명의 회원이 11개 파일럿 프로그램을 진행중에 있다.[14]

13) https://qtedu.eu
14) https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/education-coordination-support-actions/

표 Ⅳ-1-3 유럽의 양자기술 역량 프레임워크 Pilot Program 주요 활동

번호	주요 활동	내용
1	커뮤니티 구축	양자기술에 중점을 둔 학제간 유럽 교육 연구 커뮤니티 구축
2	인프라 서비스	사람, 자원 및 기회에 대한 링크를 구축 및 유지 관리
3	역량 프레임워크	양자기술에 필요한 역량의 환경을 매핑
4	범유럽 파일럿 프로그램의 조정	범유럽 파일럿 프로그램의 생성을 조정

그림 Ⅳ-1-8 QTEdu 현황

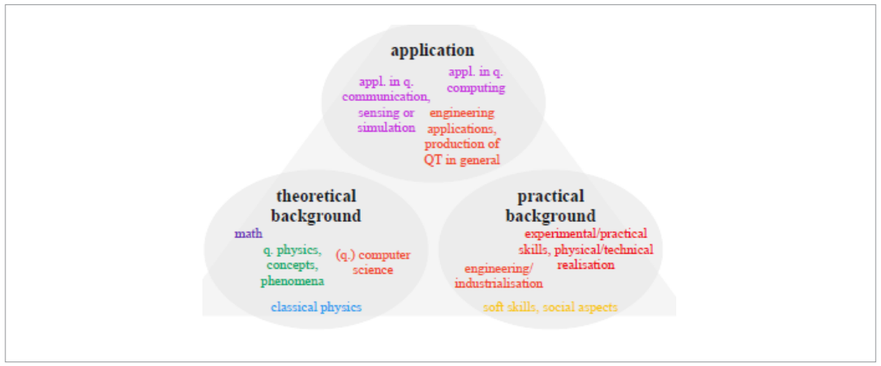


※ QTEdu 홈페이지

유럽은 양자 플래그십 프로젝트의 유럽 역량 프레임워크 개발을 위한 입력 자료로서 사용된, 유럽 산업계 및 학계 전문가 대상의 설문결과를 기반으로, 유럽의 미래 양자 인력의 기술 요구 사항을 살펴봤다.[15] [그림 Ⅳ-1-9]에서 보듯이 미래의 양자 인력에게 원하는 능력을 총 3개의 범주로 도출하였다. '고전 및 양자물리학, 수학 및 컴퓨터 과학의 하위 범주를 포함하는 이론적 배경', '실험 기술, 엔지니어링 및 소프트 기술을 갖춘 실제 배경', '새로운 2세대 양자기술이 포함된 응용 프로그램'으로 구분할 수 있다.

15) Greinert et al. (2022)

그림 Ⅳ-1-9 미래 양자 인력에게 원하는 능력의 범주



※ Greinert et al. (2022)

[그림 Ⅳ-1-10]에서 보듯이 교육 당사자의 특성에 따라, 교육 내용도 그 깊이와 난이도를 조정하여 제공하기 위해서, 각 분야별로 A1(Awareness) 입문 수준에서 C2(Innovation) 혁신 분야까지를 규정했다.

그림 Ⅳ-1-10 프로그램별 필요 능력 수준 구분



※ Greinert & Müller (2022)

[그림 Ⅳ-1-11]은 2021년 8월 그래픽 업데이트 이후 버전 1.0의 Competence Framework 구조를 나타낸 것이다. 양자기술을 위한 유럽 역량 프레임워크는 양자기술에서 가능한 역량과 기술의 지형을 매핑하는 것을 목표로 하며, 양자기술의 교육 및 훈련 프로젝트 계획 및 설계를 용이하게 하기 위한 것이다.

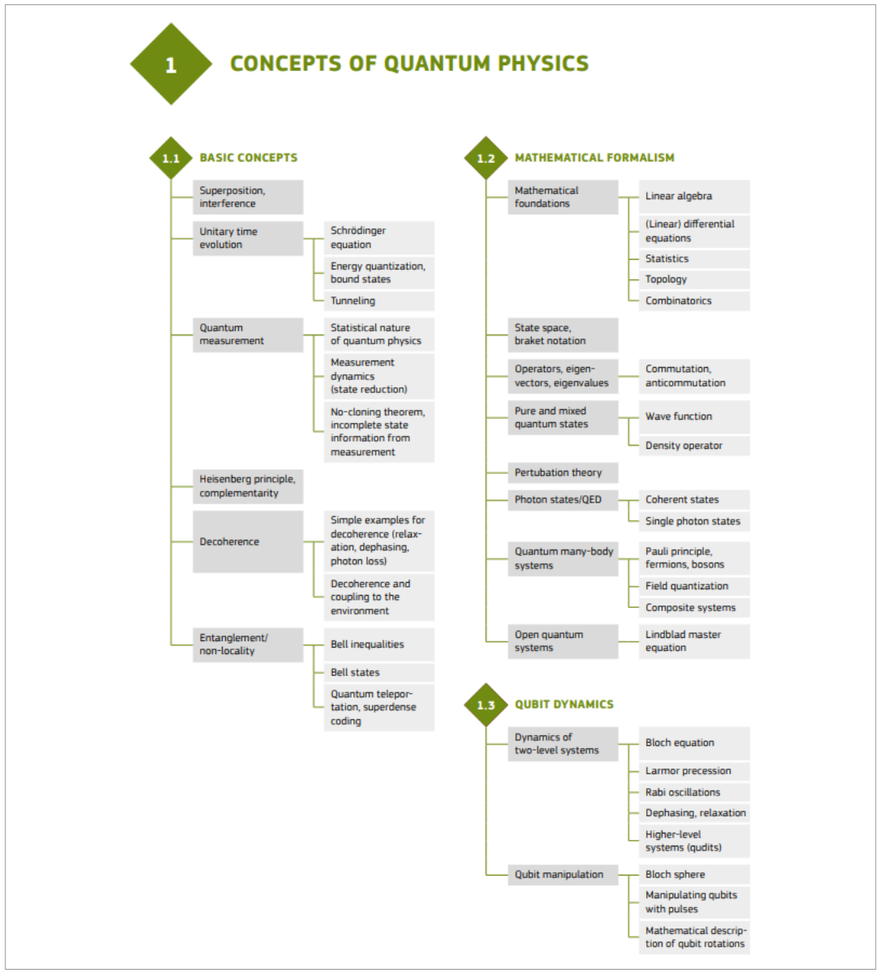
그림 Ⅳ-1-11 Quantum Technologies 버전 1.0을 위한 유럽 역량 프레임워크의 구조



※ Greinert & Müller (2022)

[그림 Ⅳ-1-12]는 [그림 Ⅳ-1-11]의 프레임워크 구조의 항목별 자세한 사항 중 'concept of quantum physics'에 대한 세부정보를 나타낸다. 이 프레임워크는 이미 유럽의 디지털 기술을 위해서 개발된 DigCompEdu 프레임워크에서도 활용되고 있고, 점진적이고 체계적인 수준의 교육 과정은 다양한 교육당사자들에게 적용되기에 적합하게 활용될 수 있다.

그림 Ⅳ-1-12 프레임워크 구조의 항목별 자세한 사항 중 1. concept of quantum physics에 대한 세부정보



※ Greinert & Müller (2022)

나. QTEdu 수행활동 및 주요결과

(1) 유럽 양자주간 (EQW, European Quantum Week) 2020 교육 섹션 공동 조직

2020년 11월 온라인으로 개최된 EQW 이니셔티브 내에서 학교와 일반 대중을 대상으로 한 교육 세션이 조직됐다. 총 23개국이 참여했으며 자국어로 된 양자기술에 대한 강연에 참석했다. 현재의 양자기술에 대한 여러 언어로 녹화된 비디오 목록이 양자 플래그십 유튜브 채널에서 제공되고 있다. EQW@School의 프로그램은 QTEdu CSA 팀이 관리했으며 교육 자료를 준비해 주최측에 배포했다.

(2) 온라인 포털 및 저장소 개발

프로젝트에서 계획한 데이터베이스를 호스팅하기 위한 웹 기반 플랫폼은 개발 중이지만 거의 마무리 단계에 있으며, 이를 통해 QTEdu 국제 커뮤니티를 위한 조정 지점으로서 이미 사용 가능한 저장소의 배포, 커뮤니티 구축을 수행한다. 실제로 양자 플래그십 조정 및 지원활동과의 강력한 협력 덕분에 두 개의 데이터베이스(Education Programs 및 Material & Tools)가 생성됐고, 현재 QFlag 웹사이트(qt.eu)에서 호스팅되며 곧 새 플랫폼으로 이동할 예정이다. 또한 Events and Jobs에 있는 두 개의 다른 데이터베이스가 기업에서 학생들을 위한 교육 및 봉사 활동 이벤트 및 인턴십을 수집하기에 적합한 저장소로 사용되고 있다. 4개의 모든 데이터베이스는 특히 QTEdu 커뮤니티 이벤트 및 활동을 통해 QTEdu 팀에서 적극적으로 홍보하고 있으며, 또한 커뮤니티 회원 데이터베이스에 대한 데이터가 수집되고 커뮤니티 회원이 임시 방식으로 액세스할 수 있도록 하는 한편 구조화된 저장소가 개발되고 있다.

(3) QTEdu 주제별 워킹 그룹의 생성

학교, 고등 교육, 산업 및 인력, 교육 연구, 형평성 및 포용 총 5개의 작업 그룹이 만들어졌으며, 2021년 3월 현재 모든 작업 그룹에 등록된 구성원은 총 266명이었고, 2021년 8월까지 325명으로 증가했다.

(4) 양자기술 교육 프로젝트를 위한 범유럽 파일럿 컨소시엄 구성

파일럿 프로젝트 컨소시엄의 형성을 촉진하기 위해 QTEdu CSA는 다양한 청중을 대상으로 하는 5개의 파일럿 프로그램에 대한 프레임워크를 개발했다. 나아가 커뮤니티 구성원이 자유롭게 파일럿 컨소시엄을 구성할 수 있는 성공적인 파일럿 네트워킹 세션을 조직했다. 현재 봉사 활동, 학교, 부전공, 석사 및 산업에 전념하는 프로그램 내에서 11개의 시범 프로젝트가 형성됐다.

(5) 양자기술 역량 프레임워크 구현

프레임워크의 개발은 양자기술의 역량과 기술의 지형을 매핑해 교육 생태계의 다양한 이해 관계자 간의 의사 소통과 협력을 촉진하는 공통 언어를 설정하는 것을 목표로 한다. 대학의 석사 프로그램, 업계 인력을 위한 교육 프로그램 또는 교육 연구 이니셔티브와 같은 양자기술의 다양한 교육 및 훈련 프로젝트를 계획하고 구성하기 위한 출발점이 될 것으로 예상된다. 일련의 전문가 인터뷰로 3차에 걸친 Delphi 연구를 수행해 먼저 베타 버전을 만든 다음 Competence Framework 버전 1.0을 공식화했다.

(6) QTEdu 커뮤니티 워크샵 준비

QTEdu CSA는 2021년 유럽 양자기술 컨퍼런스(EQTC 2021)에서 3개의 커뮤니티 워크샵 세트를 조정하고자 한다. 이 워크샵은 각각 학교 및 봉사 활동, 고등 교육 및 산업과 같은 다양한 양자 분야의 양자기술 교육 및 훈련에 중점을 둔다. 각 워크샵은 초청 및 기고된 대화, 커뮤니티 토론으로 구성되며 각 파일럿의 리더는 파일럿의 목표와 진행 상황을 발표할 예정이다. CSA는 또한 유럽 전역의 교육 및 산업 리더들과 양자기술 교육의 미래에 대해 논의하기 위해 회의 말미에 패널 토론을 조직하고 있다.

(7) 커뮤니티 협력

QTEdu CSA는 Horizon2020 프로젝트 내 유럽 양자산업 컨소시엄 (European Quantum Industry Consortium, QUIC), 양자기술에 대한 양자 플래그십 국제 협력 (Quantum Flagship International Cooperation on Quantum Technologies, InCoQFlag) 및 QFlag WP4와의 협력하고 관련 활동과 병행해 지속적으로 연락하고 대화하기 위해 노력하고 있다. CSA와 QFlag 교육 담당자 간에 겹치는 부분이 있어 서로 다른 약속된 노력 간의 긴밀한 조정과 시너지 효과 발생을 위해 노력하고 있다. 또한 매주 QFlag CSA 조정 회의와 설문조사에 대한 공유 의견을 통해 InCoQFlag CSA의 활동과 지속적으로 접촉하고 있다. QTEdu CSA는 관련 QuIC 교육 및 생태계 작업 패키지를 모두 관찰했을 뿐만 아니라 공유 설문조사를 통해 업계 커뮤니티의 의견을 얻기 위해 협력하고 있다. QTEdu CSA는 유럽 내 훈련 및 교육의 막대한 규모 확대와 EU 양자 과학 및 혁신 커뮤니티에 양자기술을 엔지니어링 응용 프로그램에 가져올 준비가 된 인력을 제공하는 데 필요한 커뮤니티 노력을 조정하고 있다. 이러한 접근 방식을 통해 QTEdu는 양자기술의 견고하고 지속 가능한 구현 및 진행을 제공하는 데 필요한 유럽 양자 교육의 강력한 지원을 보장할 것이다.

제4절 기타 국가

1. 독일 Junior Research Group Leader 지원 사업

우수한 신진 연구자들이 독립적인 연구프로젝트 수행을 통해 교수 또는 연구기관의 연구자로 임용될 수 있도록 지원하는 것을 목적으로, 독일연구재단(BMBF), 헬름홀츠연구소, 프라운호퍼연구소, 막스플랑크연구소 총 4곳에서 운영한다. 대규모 연구 기관과 대학은 공동으로 자체 프로그램 또는 독일 연구 재단(Deutsche Forschun-Gsgemeinschaft, DFG) 또는 기타 자금 지원 기관의 지원을 받아 주니어 연구 그룹의 설립에 자금을 지원한다. 주니어 연구 그룹은 대학 또는 비대학 연구 기관의 연구소에 기반을 두고 있으며, 원칙적으로 주니어 연구 그룹은 5년 동안 지원되지만 자금 지원은 최대 9년까지 연장될 수도 있다.

표 Ⅳ-1-4 Junior Research Group Leader 지원 사업

실시기관	프로그램 명	지원자격	지원내용
독일 연구재단	Emmy Noether Programme	• 박사학위 수여자 • 2년 이상의 연구경력 • 해외연구활동 경험 • 국제저널에 논문 게재	• 최대 6년(3+3) • €83,400/년(급여)
헬름홀츠 연구소	Young Investigators Groups	• 박사학위 후 2~4년 내 • 6개월간 해외 연구경험	• 6년 • €30만/년간
프라운호퍼 연구소	Fraunhofer Attract	• 박사학위 수여자 • 산업기술 발전에 관심 있는 자	• 최대5년(3+2) • €250만/5년간
막스플랑크 연구소	Max Planck Research Groups	• 박사학위 수여자	• 최대9년(5+2+2) • €4,700~5,900/개월

※ 한국연구재단 (2018)

2. 영국의 인력 양성 지원

가. 박사과정교육센터(Centres for Doctoral Training, CDTs) 기금 지원

영국은 양자 지원 법령이 별도로 없다. 영국 연구혁신기구(UK Research and Innovation, UKRI) 산하의 9개 위원회 중 하나인 공학 및 물리 과학 연구 위원회(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)는 주로 영국의 대학에 공학 및 물리 과학 분야의 연구 및 대학원 학위를 수여하기 위한 보조금을 정부로부터 제공받으며, 양자 관련 CDT 프로그램을 지원한다.[16)]

나. 양자 시스템 엔지니어링의 교육 및 기술 허브[17)]

양자기술 훈련과정과 협동과정, 경력개발과정 등을 제공하는 교육훈련기관인 Training & Skills Hub in Quantum Systems Engineering은 새로운 세대의 지도자를 훈련할 필요성에 의해 설립되었다. 런던 대학(University College London, UCL)이 제공하는 학제간 연구 환경 내에서 과제를 해결하기 위해 리더 집단을 훈련하고, UCL 시스템 엔지니어링 센터 및 상업 및 정부 기관과 함께 양자기술 및 통합 광전자 시스템 제공에서 매우 성공적인 두 EPSRC 박사 과정 교육 센터의 기존 교육 프로그램을 활용한다. 또한 우수한 엔지니어들을 위한 새로운 박사과정을 제공한다. 첫 해에 학생들은 현재 엔지니어링 문제를 중심으로 구성된 세 가지 집중 모듈을 통해 장치, 정보 및 계산 과학에 대한 배경 지식을 얻고, 팀 프로젝트와 더 긴 개별 연구 프로젝트를 완료하여 연말에 주요 연구 박사 주제를 선택할 수 있도록 준비한다. 이후 UCL 내에서 또는 더 광범위한 국가 양자기술 프로그램에서 박사 연구로 이동해 커뮤니케이션 기술, 기술 이전, 기업, 팀워크 및 경력 계획에 대한 교차 교육을 4년 동안 수행한다. 또한 최고의 졸업생들이 박사 단계를 넘어 아이디어를 개발하고 응용에 대한 새로운 개념을 가속화할 수 있는 기회를 제공하는 동시에 양자기술을 적용하기에 성숙된 산업에서 이미 일하고 있는 사람들에게 지속적인 교육을 제공한다.

16) https://www.ukri.org/councils/epsrc/
17) https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P510270/1

3. 중국의 인력 양성 지원

가. 중국 최초 양자과학기술 박사학위 수여기관

최근 중국 교육부는 2020년도 학위 수여기관 명단을 발표, 총 54개 학위 수여기관을 신설했는데, 이중에 중국과학기술대학이 양자과학기술 박사학위 수여기관에 포함됐다. 중국과학기술대학은 1990년대 초 중국 최초로 양자정보 과학연구를 전개했고 지금까지 물리학, 컴퓨터과학기술, 전자과학기술, 재료과학 및 공학, 수학, 제어과학 및 공학, 소프트웨어공학 등을 포함한 융합학과를 형성했다. 국제적으로 유명한 인재양성과 연구기지 중 하나가 되어 국가를 위해 대량 자질 높은 과학기술인력을 양성해 공급하는 정책을 수행해왔다. 이밖에 허페이미소규모물질과학국가연구센터, 중국과학원 양자정보 및 양자과기혁신연구원, 중국과학원 양자정보중점실험실, 중국과학원 미시자기공명중점실험실 등 수준 높은 연구기지를 개설해 양자과학기술 분야 인재양성을 위한 일류 지원체계를 제공하고, 향후 양자과학기술 학문분야 발전 촉진, 양자과학기술 혁신선도인재 양성의 질적 수준과 양적 규모 향상 등에서 중요한 견인차 역할을 발휘할 전망이다.[18]

4. 일본의 인력 양성 지원

가. 인재육성 확보를 위한 추진방안

문부과학성 양자과학기술위원회는 양자 분야의 발전을 위해서는 인재의 육성 및 확보가 시급하다는 판단 하에서 양자 분야의 인재육성 및 확보방안을 정리한 보고서를 공표했으며, 보고서의 주요 내용은 다음과 같다.

표 Ⅳ-1-5 일본의 양자 인재 육성 방안

번호	주요 방안	내용
1	국내외 연계·교류를 활성화	양자 분야에 관한 정보를 원스톱으로 집약·전송하는 시스템 구축
2	교육 프로그램의 체계화	폭넓은 사람에게 제공하는 인재육성시스템 개발
3	지속적 지원	신진 연구자의 독립적 연구가 가능한 자금 등의 지속적 확보
4	양자기술 도입·지원 활동 추진	교육 콘텐츠를 활용하여 젊은층 등에 아웃리치 활동 추진
5	인재육성 생태계 구축	교육과 상용화를 위해서 학계와 산업계가 연계하는 시스템 구축

※ Science and Technology Council Research Planning and Evaluation Committee Quantum Science and Technology Committee (2020)

18) Lan (2021)

5. 이스라엘의 인력 양성 지원

가. 이스라엘 혁신청의 양자컴퓨팅 센터 설립

이스라엘 혁신청(Israel Innovation Authority)은 이스라엘 양자컴퓨팅 센터를 설립하기 위해 Quantum Machines를 선택했다. 센터는 지식과 관련 인적 자본을 모두 수집하면서 이스라엘에서 운영되는 여러 양자컴퓨팅 연구 및 개발 그룹에 솔루션을 제공하고, 이스라엘 혁신 생태계에 R&D 서비스를 제공한다. 센터 설립은 R&D 비용을 절감하고 지식에 대한 접근을 가능하게 하고 지정된 기술팀을 통해 연구원 성장을 안내하며 새롭게 성장하는 혁신 생태계를 위한 신입 인력 양성의 기반을 제공한다. 이를 통해 혁신청은 양자컴퓨팅 R&D에 내재된 비즈니스 잠재력을 촉진하고 오늘날 이스라엘에서 운영되는 신생 기업을 지원하며 센터를 사용하고자 하는 글로벌 인재를 유치한다.[19]

나. 이스라엘 양자 이니셔티브 (INQI, Israel National Quantum Initiative)

INQI는 주요 R&D 펀딩 기관들의 합작 투자 업체로, 2019년 말 설립돼 현재 광범위한 R&D 프로그램을 지원하고, 퀀텀 기술 커뮤니티 지원과 그 역량을 강화하는 데 목적을 두고 있다. INQI의 궁극적 목표는 광범위하고 우수한 기초 연구를 위한 충분한 조건을 만들고 실현 가능케 하는 것으로, 이는 응용 연구 및 응용 산업 개발을 위한 생태계 형성과 함께 고급 어플리케이션 및 경제적 목적을 달성하기 위한 필수적인 단계다.[20]

19) https://www.gov.il/en
20) 송정현 (2021)

제5절 국내

1. 양자정보과학 융합전문인력 양성센터 지정

과학기술정보통신부는 현재 척박한 연구생태계를 활성화하고, 향후 산업계로 진출해 활약할 전문인력 풀을 확충하는 차원에서 박사급 전문인력을 2022년 현재 150여 명에서 우선 2030년까지 1천여 명 양성을 목표로, ITRC(2015년~, 3개 센터 연 40명 내외) 및 국내 석·박사와 포스닥을 대상으로 하는 해외연수(2020년~, 연 50명 이상)를 지원하고 있다. 2022년에는 인력 수요-공급 연계 등 선순환 양자생태계 조성을 위해 산·학·연이 다함께 참여하는 양자정보과학 융합전문인력 양성센터 지정(2022년 고려대 등 9개 대학 컨소시움에 대해 9년간(2022~2030년) 총 240억원 투입, 2023년 1개) 및 ITRC 1개소 확대(2022년, 총 4개) 등을 추진해, 향후 9년간 총 800여명의 박사급 인력을 양성할 예정이다.[21] 아울러, 50큐비트급 한국형 양자컴퓨터 구축 착수(2022~2026년, 490억원, 표준연 등 9개 산·학·연 참여), 양자인터넷(2022~2026년, 456억원), 양자센서(~2025년, 370억원) 등 연구개발 투자 확대를 통해 전문인력 양성 기반을 공고히 할 계획이다.

표 Ⅳ-1-6 ITRC 양자 연구 인력 현황

[단위 : 명]

구분	대학교수	참여학생			산학협력 중점교수	전임연구원	산업체	합계
		학부	석사	박사				
고려대	9	0	33	21	0	2	6	71
부산대	9	3	4	39	0	3	10	68
카이스트	11	2	15	34	2	4	17	85

※ ITRC 대학정보통신연구센터협의회 홈페이지

21) 과학기술정보통신부 (2022)

2. 미래 양자기술·산업 육성법 마련·시행

과학기술정보통신부의 양자기술의 경쟁력 강화와 양자산업 활성화를 지원하는 개정 '정보통신진흥 및 융합활성화 등에 관한 특별법(이하정보통신융합법)'[22]이 2021년 6월 10일부터 시행됐다. 이번에 시행되는 '정보통신융합법'은 양자정보통신의 정의부터 연구개발·인력양성·국제협력·표준화 등에 대한 지원근거, 전담기관 및 양자정보통신산업협력지구(클러스터) 지정 등에 관한 사항이 종합적으로 담긴 것으로 추후 양자기술 및 산업에 대한 정부차원의 적극적 지원 가능성을 높였다. 이를 근거로 과기정통부는 체계화된 양자 생태계 활성화 지원과 함께 한·미정상회담에서 논의된 양국 간 양자분야 기술개발 협력 및 인력교류 확대 등을 위한 후속 조치를 지속 추진해나갈 예정이다. 미국의 주요 연구기관 및 정부부처와의 협의를 통해 공동연구 주제·범위 및 전문인력 교류 절차 등을 구체화하고, 양자 연구 성과의 산업적 활용을 촉진하기 위한 산·학·연 교류 창구로서 "미래양자융합포럼"을 2021년 6월 30일 창립했다.

3. '양자기술 연구개발 투자전략' 수립을 통한 양자 특화 핵심인력 육성

과학기술정보통신부는 미래 전략기술 확보를 위한 '양자기술 연구개발 투자전략'을 2021년 4월 30일 확정했다.[23] '2030년대 양자기술 4대 강국 진입(전 산업 혁신 촉진 및 국가 안보 강화)'의 목표 하에 도전적 원천 연구 강화, 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축, 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화, 양자기술의 활용 및 산업 혁신 촉진 등 4대 중점전략을 추진한다.

양자 특화 핵심인력을 중점 육성하고, 국내외 협력 생태계를 구축하기 위해 '30년 양자 핵심인력 1,000명 확보를 목표로, 이론-실습-(기업)프로젝트를 통합 제공하는 박사급 전문과정을 개설·운영하고, 선도국에 젊은 연구자(석·박사, Post-Doc.)를 파견해 프로젝트·교육 등에 참여하며, 해외 석학도 초빙할 계획이다. 또한, 산학연 역량 결집을 통한 협업생태계 구축을 위해, 양자분야별 전문인력·시설을 보유한 출연(연) 중심으로 허브(Hub)를 지정하고, 대학과 산업계가 협력기관(Spoke)으로 참여해 연계·협력할 수 있도록 지원할 예정이다.

22) 과학기술정보통신부 (2021a)
23) 과학기술정보통신부 (2021b)

4. 양자기술인력확보를 위한 '양자대학원 지원' 사업

과학기술정보통신부는 양자기술 최고급(박사급) 전문 인재를 양성해 국내 양자생태계를 조성하고 세계 기술 경쟁력을 강화하기 위해 양자대학원을 구축·운영하려고 한다.[24] 사업내용은 국내 대학(원)이 연합해서 대학·학제 간 개방형 교육 및 연구 기반의 양자 핵심인재 양성체계 즉, 양자대학원을 구축·운영하는 것이다. 2032년까지 3개의 양자대학원을 운영하여 540명을 배출하려고 하며, 2022년~2024년까지 매년 1개의 대학원을 신설하려고 한다. 2022년 올해의 경우, 고려대학교가 주관기관으로 경희대학교, 성균관대학교 등 8개 대학교와 한국표준과학연구원, 한국전자통신연구원 등 연구기관과 현대자동차, 우리넷 등 기업이 협력기관으로 참여하는 양자대학원이 선정됐다.

24) 과학기술정보통신부 (2021c)

제6절 시사점

양자정보과학은 이미 역사적으로 사회를 위한 변혁적인 기술을 생산했다. 양자물리학은 트랜지스터, 레이저, 자기 공명 영상으로 이어졌으며 정보이론은 컴퓨터, 디지털 통신 및 인터넷의 발전을 촉진했다. 즉, 양자물리학과 정보이론이 현대 디지털 시대를 열었다해도 과언이 아니다. 양자정보과학은 이제 컴퓨터 과학, 공학, 화학, 재료 과학과 같은 다양한 분야에서 훈련 받은 실무자들이 협력해 컴퓨팅, 시뮬레이션, 타이밍 및 네트워킹에 대한 혁신적인 접근 방식을 개척하고 있다. 양자정보과학의 발전은 기초 지식을 제공하고 점점 더 많은 분야에서 응용을 이끌고 내고 있다. 양자컴퓨팅 알고리듬 및 하드웨어는 제약 화합물, 인공 광합성 또는 비료 기술과 관련된 분자 시뮬레이션을 통해 의학, 에너지 과학 및 농업의 개발을 촉진할 수 있으며, 양자센싱은 해양 항해 및 신경 과학과 같은 다양한 영역과 관련된 새로운 방식과 향상된 측정 감도를 제공한다. 양자네트워크는 센싱, 컴퓨팅 및 통신에서 완전히 새로운 응용을 창출할 수 있다. 그러나, 이러한 발전의 속도는 궁극적으로 양자정보과학의 인력에 달려있다.

다양한 양자기술을 필요로 하는 직무 역할이 전체 직무에서 차지하는 비율이 적을 수 있기 때문에 장기적으로는 양자 특정 과정과 일반적인 과학, 수학, 물리, 공학 학제간의 균형을 고려해야 한다. 양자기술 인력 양성은 양자기술 개발 및 생태계 조성의 가장 중요한 요소라고 모든 국가들이 판단하고 있으며, 이를 뒷받침하기 위해 다양한 연구지원 및 교육 프로그램 개발에 대해 각국이 노력하고 있다. 양자인력의 충분한 공급만이 양자산업의 리딩 뿐만 아니라 격화되는 경쟁에서 살아남을 수 있다.

제2장 국내외 양자기술 인력양성 전문 교육 정보

제1절 개요

훈련된 양자 인력을 구축하려면 양질의 교육에 대한 폭넓은 접근, 교육 제공자와 업계 간의 파이프라인, 지속적인 직장 교육, 미래 산업 역량 요구에 대한 예측을 포함하는 기술 개발에 대한 전체적인 접근 방식이 필요하다. 현재 직업 전환 및 인력 배치를 지원하고 현재 고용된 사람들의 능력을 높이기 위해 광범위한 교육 및 훈련 옵션을 제공하기 위한 노력이 진행 중이다.[25)]

학문 분야로서의 양자정보과학의 급속한 성장과 졸업생을 위한 실행 가능한 경력 경로는 정규 양자 교육 노력의 증가로 이어졌다. 광범위한 비전문가 청중을 위한 지원활동 노력도 최근 몇 년 동안 제한된 맥락에서 개발됐으며 계속 확장될 것으로 기대한다. 대학원 수준에서 점점 더 많은 기관이 석사 학위 프로그램을 시작했거나 개발 중이며 여러 STEM 분야의 학사 학위 소지자에게 양자 인력 또는 경우에 따라 양자정보과학 분야의 박사 학위로 전환하는 데 도움이 되는 전문 교육을 제공한다.

전체 분야에서 형평성과 광범위한 창의적 관점을 증진하기 위해 다양한 학생을 모집하고 지원할 필요성이 있으며, 학제간 양자정보과학 과정을 가르치기 위해 다양한 부서의 조교와 교수진을 훈련시킬 필요가 있다.[26)]

고등 교육 외에도 양자 정보에 대한 수많은 초등학생~고등학생(K-12 학제) 및 공공 지원 프로그램이 이미 존재하거나 개발 중이지만 이러한 프로그램의 범위는 여전히 제한적이며 영향 또한 상대적으로 알려져 있지 않다. K-12 교실, 박물관 및 기타 학습 환경에 양자정보과학을 광범위하게 도입하기 위한 콘텐츠 프레임워크를 구축하기 위한 노력의 일환으로 미국 국립과학재단(NSF)이 후원하는 2020년 워크숍에서는 엔지니어링 컨텍스트에 적용할 수 있는 9개의 미래 양자정보과학 학습자를 위한 핵심 개념 세트 초안을 작성했다.[27)]

National Q-12 Education Partnership과 Q2Work 프로그램은 교사들과 협력하여 이러한 개념을 다양한 연령과 과목으로 확장하고 K-12 및 공교육 이니셔티브의 개발을 지원한다.[28)] 국립과학재단(NSF)은 교육자와 커뮤니티 이해 관계자 간의 양자 리터러시를 높이고 커리큘럼을 개발하기 위해 수업 설계 및 구현을 시범 운영하는 교사 워크숍과 융합 액셀러레이터인 QuSTEAM 및 국가 양자 리터러

25) Kaur & Venegas-Gomez (2022)
26) Asfaw et al. (2021)
27) https://qis-learners.research.illinois.edu/about/
28) https://q12education.org

시 네트워크를 지원한다.[29] 이러한 노력을 보완하기 위해 양자정보과학에 관심이 있는 학생들을 위한 수많은 여름 캠프, 방과후 프로그램 및 온라인 과정이 존재한다.

양자정보과학 교육의 핵심 구성 요소는 산업적 맥락에서 기술 향상이라고 하는 지속적인 교육이다. 몇몇 대학은 이미 STEM의 기존 학부 학위를 소지한 학생들을 대상으로 양자 공학 석사 프로그램 또는 대학원 전문 자격증을 제공하거나 기존 전문가에게 온라인 학습 및 인증을 제공한다. EdX, Coursera 등과 같은 온라인 평생 교육 플랫폼의 증가는 일반 대중을 위한 정식 양자 과정을 제공하고 있다.[30]

비공식적으로 YouTube에는 공개적으로 볼 수 있는 대학 과정이 빠르게 증가하고 있으나, 이러한 프로그램과 과정은 여러 분야에 걸쳐 빠르게 증가하는 숙달된 양자기술 요구를 충족시키기에 불충분하거나 범위가 너무 좁을 수 있다. 본 장에서는 양자기술 분야에서 기술과 지식을 향상시키기 위해 학습자를 지원할 수 있는 다양한 양자 교육 자원을 검토하고, 교육 프로그램/세미나/학술대회 등 교육 정보를 살펴본다.

29) Aiello et al. (2021)
30) https://www.edx.org/course/quantum-mechanics-for-everyone

제2절 양자 교육 자원의 형태

1. 학위 프로그램

가. 개요

고용주가 가치 있게 여기는 기술, 지식 및 교육뿐 아니라 사용 가능한 직업 기회를 이해하면 양자산업의 회사가 직면한 훈련 및 고용 문제와 양자 인력을 준비하는 고등 교육의 역할에 대한 명확한 그림을 제공할 수 있다.[31] 예를 들어, 고등학교에서 양자 개념을 도입하면 대학 물리학 연구 중 늦게 진로를 발견하는 것보다 젊은 사람들이 일찍부터 양자물리학에 입문할 수 있을 것이다.[32] 또한, 컴퓨터 과학, 엔지니어링, 비즈니스 또는 금융과 같은 학위의 표준으로 양자기술의 다학문 과정을 통합하기 위한 양자 교육 학위 프로그램 구축을 위한 로드맵을 개발하면 다른 분야의 졸업생이 양자기술의 역할에 참여할 수 있는 기회가 넓어질 것이다. 더욱이 양자 개념에 대한 지식이 연구 분야에서 어떻게 역할을 하는지가 학부 수준에서 소개된다면 기업은 양자 엔지니어나 양자 소프트웨어 개발자와 같은 역할에 박사 학위보다는 학사 또는 석사 졸업생을 고용하는 경향이 더 커지는 등 적합한 인력 매칭이 이루어질 것이다.[33]

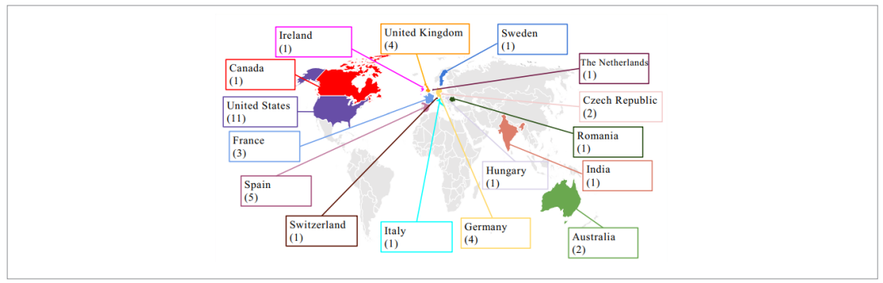
미국 양자 경제 개발 컨소시엄(Quantum Economic Development Consortium, QED-C)은 지식, 기술 및 학업 학위 측면에서 양자산업 인력 요구 사항에 대한 포괄적인 이해를 얻기 위해 설문조사를 실시했으며, 양자산업의 다양한 직업에서 석사 및 박사 학위가 학사 학위보다 우선시된다는 점을 강조했다.[34] 양자컴퓨팅 보고서(Quantum Computing Report)에 따르면, 현재 전 세계적으로 162개의 알려진 대학 및 기관이 양자기술에 대한 교육 프로그램 및 연구 활동을 하고 있다.[35] 영국 UCL(University College London)[36] 및 국제 양자기술 대학원 (International Graduate School for Quantum Technologies)의 박사 과정 교육 프로그램,[37] 유럽 캠퍼스의 양자 과학 및 기술,[38] 싱가포르의 Quantum Technologies,[39] 네덜란드의 QuTech Academy[40] 등은 차세대 양자 과학자 및

31) Fox et al. (2020)
32) https://www.qubitbyqubit.org
33) Aiello et al. (2021)
34) Hughes et al. (2021)
35) https://quantumcomputingreport.com/
36) https://www.ucl.ac.uk/quantum/study-here
37) https://igsqt.ac.uk/
38) https://www.eucor-uni.org/en/qustec/
39) https://www.quantumlah.org/
40) https://qutechacademy.nl/

연구원을 준비하기 위한 더 많은 프로그램 개발을 장려한다.

국립 연구소와 주요 대학에서 제공하는 박사 과정은 양자 과학 및 기술의 특정 분야에 대한 심층 교육 및 연구 경험을 제공하지만, 이러한 프로그램은 종종 많은 기관에서 비용이 많이 들고 제한적이다. 많은 학생들이 전문 박사 학위를 취득하기보다는 졸업 후 바로 취업을 선택하기도 한다. 실제로 엔지니어, 소프트웨어 개발자 및 디자이너와 같은 많은 산업 직업은 다양한 기술과 양자물리학에 대한 기본 이해를 갖춘 졸업생을 필요로 하기 때문에 양자산업 중심의 석사 프로그램을 더 많이 보유하는 것이 유리할 수 있다. [그림 Ⅳ-2-1]과 같이 양자 교육 및 자원 조달을 위한 최초의 온라인 플랫폼인 QURECA는 양자 과학 및 기술 분야에서 석사 학위를 제공하는 전 세계 40개 대학을 인정했다.[41)]

그림 Ⅳ-2-1 양자기술에 집중한 석사 학위 프로그램의 지역별 개수



※ Kaur et al. (2022)

이들은 주로 북미(12개)와 유럽(21개)에 집중되어 있고, 영국에 4개, 호주에 2개, 인도에 1개의 대학교가 있고 전 세계의 선택된 국가 또는 지역 그룹에 양자 관련 석사 프로그램을 도입하는 데 상당한 관심이 있었다. 그러나 이러한 석사 프로그램이 미래 인력의 요구를 충족하기에 충분할 가능성은 거의 없다. 교육 비용, 학위 가치 및 접근성은 학생들이 이러한 프로그램에 등록하지 못하게 할 수 있는 제한 요소 중 일부이다. 양자기술이 다루는 기계 공학, 광학 공학, 시스템 공학, 응용 프로그램 개발 및 기타 여러 분야를 포함하여 학문의 폭을 감안할 때 교육 기관은 산업 수요의 기준에 맞는 석사 프로그램을 만들어야 한다.

또한 교육 기관 및 대학은 이러한 새로운 기술을 찾는 성인의 수요를 충족하기 위해 필수 양자 커리큘럼과 함께 더 짧은 대학원 수료증 또는 평생 교육 프로그램을 제공하고 있다. 예를 들어, 캐나다 워털루 대학의 IQC(Institute for Quantum Computing)는 양자 교육의 선구자로서 이론 및 구현을 포

41) https://qureca.com/

함하여 양자정보과학에 대한 지식과 석사 및 박사 학위를 취득할 수 있는 학제간 프로그램을 제공하며,[42)] 양자 플래그십의 QTEdu 개방형 마스터 파일럿 프로젝트는 유럽 전역의 교육 프로그램을 사용해 양자기술 석사 학위로 이어질 수 있는 학점 교류 기능을 제공한다.[43)]

EU 양자 플래그십의 QTEdu CSA는 업계와 학계의 유럽 양자 이해 관계자로부터 데이터를 수집해 양자기술들의 교육 및 훈련 프로젝트 설계,[44)] 그리고 업계의 특정 양자 역할에 필요한 지식 기술 교육에 대한 계획을 용이하게 하기 위해 유럽 역량 프레임워크(European Competence Framework)에 따라 일련의 "자격 프로필"을 작성했다. 기관의 행정 및 재정적 제약을 감안할 때 양자기술을 전문으로 하는 학사 학위를 설계하고 제공하는 것은 갈 길이 멀 수 있다. 연구소는 물리학, 수학, 컴퓨터 과학 및 기타 분야에 특화된 최신 STEM 커리큘럼을 통해 양자 과학을 소개할 수 있다.[45)] 이 프로그램의 주요 목표는 진정한 종합 교육을 제공하여 기존 및 최근 졸업생을 가르치는 것뿐만 아니라 현재 고용돼 있는 개인이 양자 교육에 참여하도록 장려하는 것이다.

나. 세계 주요 대학 양자 관련 커리큘럼 개요

(1) 하버드 대학 (Havard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences)[46)]

하버드 대학의 양자과학 및 공학관련 과정의 목적은 양자센서·시뮬레이션·양자컴퓨터를 위한 실용적이고 유용한 플랫폼과 혁신과학에 양자역학의 개념과 방법을 적용시킬 수 있는 다양한 배경과 연구 경력을 가진 연구자들을 배출하는 것이다. 물리, 화학 등 양자기초과학관련 과목과 SEAS(School of Engineering and Applied Sciences) 등 응용과 공식 과정으로 이루어져 있다. 또한 실험실의 교대실습, 독립연구 및 논문작성을 포함해 개별적으로 준비된 다양한 커리큘럼 등이 준비돼 있다. 주요 커리큘럼은 다음과 같이 핵심과정, 세부과정, 연구과정으로 이루어져 있다.

표 Ⅳ-2-1 하버드대학과 양자 프로그램

구분	핵심 과정	세부 과정	연구 과정
1	기초양자역학	양자 시뮬레이터	기존의 과정을 연장하여 직접 선택하는 과정이며, 전문분야 외의 한 과정을 포함해야 함
2	양자광학	암호학	
3	양자 정보과학 입문	양자정보시스템의 물리학	
4	응용 양자시스템	-	

42) https://uwaterloo.ca/
43) https://qtom.qtedu.eu/
44) Greinert and Müller (2022a)
45) Perron (2021)
46) https://www.seas.harvard.edu/

(2) MIT (MIT Center for Quantum Engineering)

MIT는 양자물리학, 양자광학, 양자역학, 양자컴퓨터, 양자시뮬레이터, 양자정보과학 등 학부와 대학원과정에서 이수할 수 있는 강의를 제공하고 있다. MIT 양자공학센터(MIT Center of Quantum Engineering)에서는 양자과학자와 양자공학자를 육성하기 위해 전통적인 학문영역에 다리를 놓을 수 있는 새로운 학부과정과 대학원의 커리큘럼을 개발하고 있다. 또한 MITxPRO를 통해 정부, 산업계, 기존기자들도 핵심원리, 응용 및 활용을 배울 수 있는 기회를 제공하고 있다.

(3) 옥스퍼드 대학

옥스퍼드 대학은 석사과정에서는 기초양자이론에 대해서 배울 수 있는 과정을, 박사과정에서는 원자물리학 및 레이저 물리학 등 다양한 양자분야에 대해 배울 수 있는 과정을 제공하고 있다. 특히 원자물리학 및 레이저 물리학 박사과정에서는 양자에 대한 전문교육과정이 있다. 교육과정은 강의, 세미나, 토론 수업 등으로 진행하며 광선의 상호작용, 양자광학, 양자 정보 처리 및 통신 등의 과목을 제공한다. 교육과 더불어서 다양한 주제로 발전하는 양자컴퓨터, 양자광학, 양자 암호학, 양자 메모리 등의 양자 관련 주제의 연구프로젝트에 참여할 수 있다.

2. 온라인 코스

현재 양자기술 연구의 최첨단에서 일하는 "양자 공학자"가 되려면 극소수의 예외를 제외하고 양자물리학 박사 학위가 있어야 한다. 이는 고도로 기술적인 연구의 최전선에서 필요하지만, 기술이 실현되면 엔지니어와 기술자도 필요하다. 일부 대학에서는 인력의 이러한 격차를 해소하기 위해 보다 전문화된 과정을 제공하고 있지만, 이미 자격을 갖춘 엔지니어, 기술자 및 비즈니스 전문가를 양자기술에 대해 재교육해야 할 필요성이 제기되고 있다.

온라인 교육 제공업체는 현재와 미래의 양자 인력을 구축하는 데 필요한 격차를 메울 수 있는 유연하고 저렴한 직업 관련 온라인 학습을, 전 세계 개인 및 조직에 제공하는 것을 목표로 하는 기초 양자과학에서 보다 전문화된 양자기술에 이르는 분야까지의 전문 단기 과정을 제공한다.[47] edX[48] 및 Coursera[49]은 보다 근본적인 접근 방식에 초점을 맞춘 보다 많은 학문적 학습을 제공하지만, QURECA는 기존 양자 커뮤니티의 격차를 메우기 위한 온라인 과정과 리소스를 제공하는 최초의 온라인 교육 및 채용 플랫폼이다.[50] QURECA는 QuantFi와 협력하여 양자 금융의 전문 교육 시리즈인 비기술적 과정인 "Quantum for Everyone"을 시작했으며,[51] 해당 교육 플랫폼은 Zapata Computing과 같은 글로벌 양자 기업을 위해 사용됐다.[52]

미국 MIT의 CQE(Center for Quantum Engineering)는 양자기술의 핵심 원칙, 구현 및 의미를 배우고자 하는 비즈니스, 정부 및 기술 리더에게 MITxPRO를 통해 온라인 전문 개발 양자 커리큘럼 "양자컴퓨팅 원리(Quantum Computing Fundamentals)" 및 "양자컴퓨팅 구현(Quantum Computing Realities)"을 제공한다.[53] 이 커리큘럼은 양자 과학과 양자 공학 사이의 학문적 격차를 해소하여 양자를 발전시키도록 설계됐으며, Isaac Chuang, William Oliver 및 Peter Shor와 같은 세계 최고의 양자컴퓨팅 교수가 가르친다.

네덜란드 Delft University of Technology의 edX 온라인 교육 포트폴리오에는 "양자정보, 양자하드웨어, 양자암호통신, 양자소프트웨어, 양자인터넷의 원리(Fundamentals of Quantum Information, Quantum Hardware, Quantum Cryptography, Quantum Software, and Quantum Internet)"를 포함한 다양한 인증 프로그램이 포함되어 있다. 미국 퍼듀 대학교(Purdue University)는 "양자기술(Quantum Technology)"의 MicroMaster 프로그램을 "컴퓨팅" 및 "검출기 및 네트워킹" 두 가지 범주로 출시했다. 또한 캐나다 토론토 대학교 Peter Wittek의 "Quantum Machine Learning" 과정과 미국 스탠포드의 "Quantum Mechanics for Scientists and Engineers" 과정이 edX에서 제공된다.

러시아의 상트페테르부르크 주립대학교는 러시아어 학습자를 위한 과정을 포함해 초급 및 중급 학습자를 위한 Coursera에 대한 4개 과정과 함께 "양자컴퓨팅: 기초에서 최첨단 전문화까지"를 제공한다. 미국 콜로라도 볼더 대학교의 "양자역학", 프랑스 École Polytechnique의 "양자광학", 미국 메릴랜드 대학교의 "양자물리학 탐구"와 같은 학습 과정을 Coursera를 통해 액세스할 수 있다. 일본 게이오 대학(Keio University)에서 개발한 "양자컴퓨터의 이해(Understanding Quantum Computers)"는 "인기 과학" 수준에서 양자컴퓨팅에 관심이 있는 모든 사람을 위해 FutureLearn에서 제공되는 단기 과정이다.[54]

47) Aiello et al. (2021)
48) https://www.edx.org
49) https://www.coursera.org/
50) https://qureca.com/
51) https://www.quantfi.com/
52) https://www.zapatacomputing.com/
53) https://xpro.mit.edu/
54) https://www.futurelearn.com

양자컴퓨터에서 코드를 실행할 수 있는 능력을 갖춘 qBraid는 프로그래밍을 위한 학습 플랫폼과 다양한 교육 수준을 대상으로 하는 양자컴퓨팅 입문 과정을 제공한다.[55] Quantum Country의 Andy Matuschak 및 Michael Nielsen의 "매우 호기심 많은 사람을 위한 양자컴퓨팅(Quantum Computing For Very Curious)"에서는 양자컴퓨팅 및 양자역학의 모든 기본 원리, 양자 검색 알고리듬 및 양자 순간 이동을 보다 자세히 설명한다.[56]

평생 학습자로 구성된 양자 커뮤니티에 권한을 부여하고, 도전과 기회를 해결하며, 장기적으로 양자 이니셔티브를 유지하기 위해 IEEE Quantum의 새로운 주력 프로그램인 "양자컴퓨팅 교육 인력 개발 프로그램"은 양자기술의 다양한 분야에서 과정을 제공한다.[57] 호주에 기반을 둔 양자컴퓨팅 스타트업인 Q-CTRL은 소프트웨어 엔지니어, 보안 분석가 및 데이터 과학자에게 양자컴퓨팅의 기초 교육을 제공하도록 설계된 초보자를 위한 대화형 플랫폼인 Black Opal을 출시했다.[58] Microsoft는 Alphabet X 및 California Institute of Technology의 Institute for Quantum Information and Matter와 협력하여 Brilliant에 대한 양자컴퓨팅의 퀴즈 기반 과정을 출시했다.[59] 이 외에도 Udemy™의 양자컴퓨팅 과정, QPlayLearn의 56개 멀티미디어 학습 리소스,[60] 컴퓨터 과학 포털인 GeeksforGeeks™[61] 등 다른 온라인 학습 리소스가 있다.

3. 컨퍼런스, 워크샵 및 해커톤

IBM Quantum은 차세대 양자 연구원 및 개발자의 역량을 강화하고 양자컴퓨팅, 양자 기계 학습 및 양자 오류 수정에 대한 지식을 전 세계적으로 전달하는 데 중점을 두고 Qiskit 글로벌 여름 학교를 시작했다.[62] 오픈 소스 Qiskit 교과서는 양자컴퓨터 작업을 위한 Qiskit 소프트웨어 개발 키트를 사용해 양자 계산을 가르치는 양자 알고리듬 또는 양자 계산 과정 보충 교재로 전 세계 대학에서 사용하고 있다.

55) https://www.qbraid.com/
56) Matuschak & Nielsen (2019)
57) https://quantum.ieee.org/
58) https://q-ctrl.com/products/black-opal/
59) https://brilliant.org/
60) https://qplaylearn.com/
61) https://www.geeksforgeeks.org
62) https://qiskit.org/

캐나다 워털루 대학의 IQC는 세계적 수준의 봉사 프로그램에 이르기까지 고등학생부터 대학원생의 다양한 학생들을 대상으로 여름 학교와 세미나를 진행해 왔다. 학부 및 석사 학생들에게 양자기술에 대한 포괄적인 소개를 제공하기 위해 로스 알라모스 국립 연구소(LANL)의 양자컴퓨팅 여름 학교,[63] 양자 과학 및 기술의 유럽 봄 학교,[64] UCL 양자과학기술 연구소(UCLQ)의 양자기술학교,[65] 뮌헨 양자과학기술 센터(MCQST) 여름 학생 프로그램[66] 및 시드니 퀀텀 아카데미(SQA, Sydney Quantum Academy)의 양자컴퓨팅 여름 학교 캠프가 운영되고 있다.[67] QWorld의 "Quantum Summer School"은 학생, 연구원 또는 양자컴퓨팅에 대한 경력 개발에 관심이 있는 모든 전문가를 대상으로 하는 프로그램이다.[68]

표 IV-2-2 양자 관련 컨퍼런스 및 학회

구분	학회명	영문명
1	유럽양자기술 컨퍼런스	European Quantum Technologies Conference (EQTC)
2	양자컴퓨팅및엔지니어링 국제컨퍼런스	IEEE on Quantum Computing and Engineering (QCE)
3	양자정보처리 컨퍼런스	Quantum Information Processing Conference (QIP)
4	양자 2.0 회의 및 전시회	Quantum 2.0 Conference and Exhibition
5	미국물리학회	American Physical Society
6	국제광자공학회	SPIE Quantum West
7	국제양자암호학회	QCrypt

표 IV-2-3 양자 상업화 관련 컨퍼런스

구분	컨퍼런스명	영문명
1	유럽 양자 비즈니스	Quantum Business Europe (QBE)
2	실용 양자 컴퓨팅	Practical Quantum Computing (Q2B)
4	이코노미스트	Economist Impact
5	퀀텀텍	Quantum Tech

63) https://www.lanl.gov/
64) https://strasbourg2022.eu/
65) https://www.ucl.ac.uk/quantum/news/2022/ mar/uclq-summer-school-returns
66) https://www.mcqst.de/support/summer- bachelor-program/
67) https://www.sydneyquantum. org/programs/schools/
68) https://qworld.net/quantum-summer-school-2021/

표 Ⅳ-2-4 양자 관련 지역 커뮤니티

구분	커뮤니티명	영문명
1	남미 양자 커뮤니티	Quantum Latino
2	동유럽 양자 커뮤니티	Quantum Eastern Europe (QEE)
4	시네카 양자컴퓨팅 랩	CINECA Quantum Computing Lab
5	양자컴퓨팅의 실용 이론	Quantum Computing Theory in Practice

양자컴퓨팅 업계 리더 및 신생 기업은 대학 및 연구 기관과 협력하여 학습자가 실제 양자 기계를 프로그래밍하고 시뮬레이션하여 실제 문제를 해결할 수 있는 기회를 제공하고 양자컴퓨팅 해커톤을 주도적으로 실시하고 있다. 해커톤을 통해 다양한 배경의 참가자가 양자기술에 대해 배우고, 다양한 산업에서 양자 응용 프로그램을 식별하고, 양자컴퓨팅 클라우드 서비스를 사용해 자체 포트폴리오 프로젝트를 개발하며, 엔지니어, 연구원, 학계 및 산업 전문가와 네트워크를 형성할 수 있다.

표 Ⅳ-2-5 양자 관련 해커톤

구분	해커톤 기관	영문명
1	캐나다의 Xanadu 社	QHack
2	에어버스	Airbus Quantum Computing Hackathon
3	QuantX Labs	Big Quantum Hackathon
4	Quantum Open Source Foundation	Quantum Futures Hackathon
5	MIT iQuHACK	Quantum Computing Hackathon
6	Quantum Coalition Hack	Quantum Coalition Hack
7	QPARC	QPARC Challenge

4. 게임

종종 혼란스럽거나 반직관적인 것으로 간주되는 양자 원리를 교육하는 데 있어 유망한 새로운 영역은 게임 기반 학습이다. 양자 과학의 핵심 원리를 이해하기 위한 시각적 단서를 통합하면 게임은 학습자가 분석적 사고, 멀티태스킹, 전략 수립, 문제 해결 및 팀 빌딩 기술을 구축하도록 참여시키는 강력한 도구가 되어 결과적으로 양자의 다양한 문제를 해결하는 데 도움이 된다.[69]

69) Nita et al. (2021)

IBM 리서치가 스위스 바젤대학교(University of Basel)의 제임스 우튼(James Wootton) 교수와 공동으로 설계한 IBM Hello Quantum은 두 개의 큐비트를 시각화해 양자 프로그램 코딩에 양자컴퓨팅 원리를 적용하는 방법에 대한 직관과 지식을 구축하는, 비전문가를 위해 설계된 퍼즐 게임이다.[70] 양자 체스는 일반 체스와 비슷하지만 양자를 사용하여 예측할 수 없는 요소를 도입한다.[71] Quantum Flytrap은 학부 물리학 실험을 보다 즐겁고 인터랙티브하게 만들기 위해 광자로 게임을 할 수 있는 가상 실험실을 만들었다. 드래그 앤 드롭 인터페이스를 통해 학습자는 양자 현상을 시각화하고 기존 실험을 재현하며 새로운 실험의 프로토타입을 만들 수 있다.[72] 사람들에게 양자기술을 알리고 교육하기 위한 목적으로, Science at Home은 연구원들이 큐비트 조작을 해결 및 최적화하고 최첨단 양자 연구에 기여할 수 있도록 Quantum Moves 2를 출시했다.[73] 캐나다 워털루 대학교의 IQC는 양자 행동과 양자물리학과 고전 물리학의 차이점을 강조하는 Angry Birds에서 영감을 받은 게임인 Quantum Cats를 공개했다.[74] 한편, Quantum Odyssey는 학습자가 양자컴퓨팅의 세계에 몰입할 수 있도록 도와주는 최초의 비디오 게임이다.[75] 영국 스코틀랜드 세인트앤드루스 대학교에서 개발한 양자역학 시각화 프로젝트(Quantum Mechanics Visualization Project, QuVis)는 양자역학 개념을 배우고 가르치기 위한 연구 기반 대화형 시뮬레이션을 설계했다.[76] 가상 플랫폼을 넘어서서 Spin-Q Gemini는 양자컴퓨팅 데스크탑 플랫폼을 제공하여 K-12 학제 및 대학생에게 양자컴퓨팅 이해에 대한 실습 교육 및 실제 장치 경험을 제공한다.[77] 양자역학을 이해하는 것이 처음에는 두려운 것처럼 보일 수 있지만 게임을 교육 도구로 사용하면 재미있고 매력적인 학습에 참여하는 동시에 기술을 확장할 수 있다.

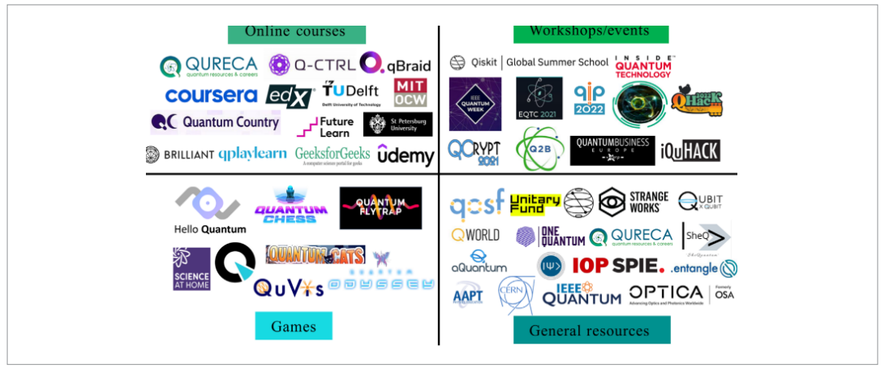
5. 커뮤니티 구축 및 기타 자원

양자 인력 개발을 가속화하기 위해 많은 조직에서 기존 과정 학습 및 교육 트랙을 넘어 콘텐츠를 통합하여 다양한 교육 및 훈련 관행을 제도화했다. 예를 들어, QURECA, QWorld 및 OneQuantum은 워크샵, 멘토링, 경력 및 네트워킹 이벤트, 봉사 활동을 통해 학생 참여를 향상시켜 양자기술에 대한 인식을 제고하기 위한 글로벌 양자 그룹을 설립했다.[78] 이러한 조직은 학계 및 업계 전문가와 협력하여 차세대 양자 인력을 식별, 육성, 발전시키고 있다. e-러닝 플랫폼을 통해 양자 교육을 촉진함으로써

70) http://hello-quantum.mybluemix.net/
71) https://quantumchess.net/quantum-chess/
72) https://quantumflytrap.com/
73) https://www.scienceathome.org/quantum/games
74) http://quantumcats.ca/
75) https://www.quarksinteractive.com
76) https://www.st-andrews. ac.uk/physics/quvis
77) Hou et al. (2021)
78) https://onequantum.org/

SheQuantum은 여성이 재능 있는 양자 인력으로 기여할 수 있도록 권한을 부여하고 있다.[79] Unconventional Computing Lab,[80] Brazil Quantum[81] 및 aQuantum[82] 등은 언어 장벽을 줄여 다양한 커뮤니티에서 양자기술을 교육하고 홍보하고 있다. The Coding School의 Qubit by Qubit 이니셔티브는 양자컴퓨팅 분야의 실습 및 혁신적인 프로그램, 워크샵 및 코스를 통해 고등학생 및 학부생을 교육하는 것을 목표로 한다. 양자컴퓨팅에 관심이 있는 모든 사람을 위한 다양한 학습 리소스를 제공하는 플랫폼인 Quantum Curious는 강력한 STEM 배경 지식 없이도 더 많은 청중을 유치하는 플랫폼이다.[83] 양자컴퓨팅을 위한 개방형 도구의 개발 및 표준화를 지원한다는 사명을 가진 QOSF, Quantum Insider의 통합 플랫폼 Entangle,[84] Quantum Computing Stack Exchange[85] 및 Strangeworks가 제공하는 Quantum Computing[86] 등은 양자 학습 수단을 제공하고 전 세계 양자기술 커뮤니티와 오픈 소스 양자 소프트웨어 프로젝트를 컴퓨팅, 코딩 및 공유하는 플랫폼이다.

그림 Ⅳ-2-2 현재 및 미래 인력 개발에 사용할 수 있는 글로벌 교육 및 훈련 리소스 개요



※ Kaur & Venegas-Gomez (2022)

79) https://shequantum.org/
80) https://unconventionalcomputing. org/
81) https://linktr.ee/brazilquantum
82) https://www.aquantum.es/
83) https://quantumcurious.org/
84) https://thequantuminsider.com/entangle.html
85) https://quantum-computing.stackexchange.com/
86) https://strangeworks.com/

제3절 주요 양자기술 교육프로그램

1. 미국

가. 키스킷 (Qiskit)

Qiskit은 펄스 수준, 회로 수준 및 응용 모듈 수준에서 양자컴퓨터를 활용해 작업하는 오픈 소스 소프트웨어 개발 키트로, IBM Quantum Experience나 시뮬레이터 상에서 프로토타입 양자 기기들에 양자 프로그래밍을 직접 작동해볼 수 있는 툴을 제공하고 있다. 전반적인 양자 연산을 위한 회로 모델을 따르고 있으므로 초전도 큐비트나 이온트랩을 지원하는 모든 종류의 하드웨어에서 이 모델을 활용할 수 있다. IBM 연구소가 클라우드 양자컴퓨팅 서비스인 IBM Quantum Experience 소프트웨어 개발을 위해 교육 기관을 설립한 후 외부 조력자들의 다양한 공헌을 통해 그 규모가 확대되고 있다.

Qiskit은 스위프트나 자바스크립트로 시작했지만 실제로는 주로 파이썬 프로그래밍 언어가 사용되고 있다. 양자 프로그래밍을 위해 양자컴퓨팅 사용 예제가 탑재돼 있는 쥬피터 노트북을 제공하고 있으며, 예제 내에는 Qiskit 사용을 위한 과학적 연구로 뒷받침되는 소스 코드와 학습자들이 양자 프로그래밍의 기초를 배울 수 있도록 설계된 연습 문제들도 함께 포함돼 있다. 뿐만 아니라 Qiskit을 기반으로 한 오픈소스 교과서를 통해서 대학교 수준의 양자 알고리듬이나 양자 연산 클래스 등도 활용할 수 있도록 했다. Qiskit은 양자 시스템과 시뮬레이터와의 상호작용을 위해 필요한 일련의 도구들을 제공해 양자 어플리케이션 개발을 가속화하고 있다.

Qiskit은 회로 접속과 관련해, 다양한 기존 회로 접속을 통해서 벤치마크를 선택하고 조금 더 복잡한 회로 내에서 블락을 구성하거나 양자 연산 우위를 활용할 수 있는 툴로 활용할 수 있다. 하드웨어 접근과 관련해, 초전도 큐비트에서 이온 트랩에 이르기까지, 다양한 양자 하드웨어 아키텍쳐 상에서 코드를 수행할 수 있는 기회를 제공한다. 양자 알고리듬에 있어서는, 양자 알고리듬 라이브러리 상에 머신러닝, 최적화 및 화학 관련 어플리케이션을 연구하고 프로토타입화를 진행해 볼 수 있도록 프로그램을 마련했다. 또한 노이즈 특성과 회로 최적화를 위해서 빌트인 모듈을 활용해 노이즈의 영향을 연구하고 줄일 수 있도록 설계했다.

Qiskit은 선형대수에 대한 기초적 지식과 파이썬 프로그래밍 언어를 선행과정으로 정의하고 이를 기반으로 초급 및 중급과정으로 교육과정을 설계하고, 지속적으로 개발해 나가고 있다.

초급과정의 양자컴퓨팅 및 양자 하드웨어 소개에서는 양자 알고리듬, 양자회로를 활용한 구현 및 알고리듬이 구동되는 양자하드웨어에 대한 이해와 함께 양자컴퓨팅을 소개하는 내용이 포함돼 있다. 이 수업은 2020년 7월 Qiskit 글로벌 여름학교의 2주 인텐시브 코스로 처음 제공됐다. 27개의 강의로 구성돼 있고, 9개의 강의 노트와 9개의 관련 실험도 함께 포함돼 있다. 1강에서 6강은 양자 회로를 활용하는 양자컴퓨팅과 양자 알고리듬에 대한 소개가 주를 이루고 있고, 양자 상태와 양자 회로를 활용한 작동 원리에 대한 이해에 방점을 두고 있다. 7강에서 12강은 쇼어 알고리듬(Shor's Algorithm)에 관한 내용으로 전반부 3개 강의는 양자 Fourier 변환과 양자 페이즈 예측에 대한 직관력을 키우는 쪽에, 후반부 3개 강의는 양자 회로를 활용한 쇼어 알고리듬 구현에 중점을 두고 있다. 13강에서 15강까지는 반복 반응면 코드를 활용한 양자 에러 정정을 소개하면서 양자 연산 중에 발생 가능한 에러 종류들을 보여주고 이 에러 출현 시에 양자 연산 대응 방법에 대해서 알려주고 있다. 16강에서 21강은 초전도 큐비트를 강조하면서 양자 연산을 위해 활용되는 하드웨어를 소개한다. 전반부 3강은 조셉슨 접합(Josephson Junctions)을 활용한 부조화 진동자에서 초전도 트랜스몬 큐비트 구성, 후반부 3강은 회로 양자 전기 역학 구조에서의 큐비트 커플링을 중점적으로 강의한다. 22강에서 27강은 양자 화학 문제들을 게이트 기반 양자컴퓨터를 활용해서 해결하는 기술들을 소개하는데, 전반부 3강은 양자 화학 문제 구조를 서술하고 이런 문제들은 게이트 기반 양자컴퓨터에 어떻게 매칭하는 지에 대한 방법론을 논의하고, 후반부 3강에서는 다양한 양자 고유해결자(Eigensolver)를 실행시켜 양자 화학 문제를 해결하기 위해 양자 하드웨어에서 최고 성능을 추출하는 방식을 집중적으로 교육한다. 이와 더불어 1번과 2번 실험은 1~6번 강의를 지원하는데, 1번 실험은 단일 큐비트와 멀티 큐비트 상태 및 양자순간이동에 대해서, 2번 실험은 그로버 알고리듬을 양자 회로를 사용하여 구현하는 내용을 포함한다. 3번과 4번 실험은 7~12번 강의를 지원하는데, 3번 실험은 표준 양자 페이즈 추정 실행에 대해서 4번 실험은 쇼어 알고리듬을 구현하는 데 활용된다. 5번 실험은 13~15번 강의를 지원하는데 반복 코드를 구현하고 노이즈 상태에 따라 어떤 성능이 발현되는지를 관찰하게 된다. 6번과 7번 실험은 16강에서 21강을 지원하는데, 6번 실험은 라비와 램지 실험(Rabi and Ramsey Experiments)에서 큐빗의 π 펄스로 힘과 주파수를 조정할 수 있도록 하고, 7번 실험은 큐비트 분광학을 통해서 큐비트의 0-1 사이 변환과 1-2 결정 등이 어떻게 진행되는지 보여준다. 8번과 9번 실험은 22강에서 27강을 지원하며, 8번 실험은 수소화리튬 원자상태를 시뮬레이션해 큐비트 연산자를 확보할 수 있도록 하고, 9번 실험은 다양한 양자 아이겐설버에 대한 실험 상태를 준비하고 측정 결과물에서 다양한 폴리 작동자(Pauli Operators) 기대값을 연산할 수 있도록 한다.

나. 큐빗바이큐빗 (Qubit by Qubit)

Qubit by Qubit은 코딩 스쿨(The Coding School) 온라인 교육을 주관하는 조직으로 컴퓨터 과학 교육을 통해서 차세대 양자 인력을 육성하고자 하는 목표를 가지고 있다. 2014년 브라운 대학교 학부가 주도해 설립하였고, 코딩 스쿨이 프로그램에 참여하여 40개국 이상 800명이 넘는 지도자들과 함께 세계적인 기관으로 확대해 나가고 있다. 최상의 프로그래밍과 교수법을 담보하기 위해서, UCLA, USC, 비터비 엔지니어링 스쿨, 브라운 대학교 및 빌라노바 대학교 등을 포함한 전 세계적인 교육 기관들과 파트너십을 체결하고 운영 중에 있다. Qubit by Qubit의 양자컴퓨팅 코스(Quantum Computing Course)는 고등학생들을 대상으로 양자컴퓨팅에 쉽게 접근할 수 있게 하자는 목표로 만들어졌으며, 실제 지도 및 실습 등을 제공해, 학생들이 산업 전문가들로부터 배울 기회를 제공하고 잠재적인 미래 STEM(Science, Technology, Engineering & Mathematics) 리더들과의 글로벌 커뮤니티를 조성하고 있다. 양자컴퓨팅은 헬스케어에서 금융 및 사이버보안에 이르기까지의 전 산업 분야에 영향을 끼치게 될 수밖에 없으므로, 고등학생들이 차세대 컴퓨팅 혁명에서 주도적인 위치에 이르는 준비를 할 수 있도록 돕고 있다.

학생 대상 프로그램과 관련해, 프로그램의 지원 대상은 고등학생 (미국 기준 9~12학년) 및 gap year 학생이다. 2학기 동안 주당 3~5시간, Zoom을 통한 라이브 교육으로 2학기에 걸쳐 매주 강의와 실습이 진행되며, 고등학생만 가능하다. 사전에 기하학을 필수적으로 이수해야 하며 그 외에는 STEM 교육 이수나 양자 지식을 요구하지 않는다. 코스 개발진으로 하버드, 스탠포드, 옥스퍼드 대학교 및 MIT 연구진이 참여했다. 첫 번째 학기에는 양자역학, 양자 회로 등을 포함해 양자 관련 주요 주제와 개념을 다루고, 두 번째 학기에는 향후 활용하게 될 수학과 파이썬 교육받게 되는데, 양자 회로 코딩과 양자 알고리듬에 집중해 학생들이 실제 양자컴퓨터에서 코딩할 수 있도록 한다. 교육 프로그램의 구성을 보면, 양자 게이트를 대표하는 선형대수 교육, 양자컴퓨터에 회로전송 파이썬 라이브러리 활용 및 결과 분석, 그로버 알고리듬과 같은 주요 양자 알고리듬의 개념적 이해, 파이썬 활용 QKD 수행, 원자 시뮬레이션을 통한 다양한 양자 아이겐솔버 구동 등이 있다.

양자 경험의 제공과 관련해, 주 단위로 진행되는 2학기 강의, 실습 및 숙제 등을 통해서, 학생들은 기본 선형 대수학, 양자역학, 양자연산정보 및 양자 알고리듬 등을 포함한 양자컴퓨팅을 기본적으로 이해할 수 있게 되며, 실제 양자컴퓨터에 코딩할 수 있는 기회를 갖게 된다. 또한 코스 수료 시 수료증도 받게 된다. 매주 학생들은 1.5시간의 강의, 조교와 함께하는 1시간 실습과 숙제로 이어지는 3가지 활동에 참여하게 되며, 강의는 주제와 관련 개념 이해를 위한 기회를, 실습은 학생들이 실제 경험해볼 수 있는 기회를 제공하게 된다. MIT, 스탠포드 및 워털루 대학교를 포함하여 숙제 리뷰를 포함하는 모든 세션에서 학생들은 필요한 도움과 지원을 받게 된다.

학생들은 양자 세계를 형성하고 있는 산업계 지도자와 양자 전문가들을 만날 수 있는 기회를 가지게 되고, 글로벌 미래 양자 지도자 집단과 함께 전 세계의 친구들을 사귀게 되며, 전 세계에서 양자컴퓨팅을 공부하는 고등학생으로서 향후 대학 교육과 직업 경쟁에 있어서도 상대적인 우위를 점하게 될 것이다.

다. 기타 미국의 양자 교육 프로그램

표 Ⅳ-2-6 미국 양자기술 인력양성 교육 프로그램

교육 프로그램	주요 사항
IBM Quantum Spring Challenge 2022[87]	• 주관기관: IBM • 기간/대상: 2022.05.23. ~ 2022.05.27.(5일간 온라인 교육) / 무료 / 과제완료 후 IBM Badge 수여 • 내용: 2022년 IBM Quantum Spring Challenge는 Feynman 교수의 비전에 정확히 초점을 맞추어 화학 및 다물체 시스템을 시뮬레이션하고 해결해야 할 4가지 도전과제를 제시. 참가자들이 다물체 시스템을 둘러싼 문제를 해결하고 다른 부분은 페르미온 화학 시뮬레이션에 중점을 두며, 참가자들은 양자 컴퓨팅 연구의 최전선에서 문제를 조사할 수 있는 특별한 기회를 얻음
Qiskit Global Summer School 2022[88]	• 주관기관: IBM • 기간/대상: 2022년 7월 (제3회) / 2주 온라인 교육 강사섭외, 강사료 지원 / 국내 고등학생 • 내용: Qiskit Global Summer School 2022는 양자컴퓨팅과 그 응용의 세계를 탐구하는 기술과 노하우로 미래의 양자 연구원과 개발자에게 권한을 부여하도록 설계된 2주 집중 여름 프로그램. 3년차 여름 학교는 양자 화학에 특히 중점을 두고 양자컴퓨팅 및 양자시뮬레이션에 대한 응용 프로그램에 대해 집중적으로 소개하고 다양한 강의와 라이브 Q&A로 구성
Quantum Summer Symposium 2022[89]	• 주관기관: Google Quantum AI • 기간/대상: 2022년 7월 3일간 온라인 교육 • 내용: Google Quantum AI의 연례 회의로 학계, 산업계 및 정부의 전문가들이 모여 양자컴퓨팅 연구의 진행 상황을 논의
Amazon Quantum Ledger Database (QLDB) Service Introduction[90]	• 주관기관: Amazon • 기간/대상: 10분 (온라인 교육) / 무료 • 내용: AWS 고객을 위한 그래프 데이터베이스를 제공하는 서비스인 Amazon Quantum Ledger Database(QLDB)에 대해 서비스와 핵심 기능을 소개하며, AWS Training 프로그램에는 Quantum 관련 다수의 강의를 포함
DOE Science Undergraduate Laboratory Internships (SULI)[91]	• 주관기관: DOE Science Undergraduate Laboratory Internships • 기간/대상: 10~16주 / 월급 지급 / 대학생, 최근 졸업한 대학원생 • 내용: 2014년부터 학부생 또는 최근 졸업한 대학원생을 대상으로 수행하는 인턴십 프로그램. 선발된 학생들은 17개의 참여 DOE 실험실/시설 중 한 곳에서 임명된 인턴으로 참여해 DOE 임무를 지원하는 프로젝트에서 실험실 직원 과학자 또는 엔지니어의 지도 하에 연구를 수행. SULI 프로그램은 DOE 실험실/시설과 협력해 DOE 과학실, 교사 및 과학자를 위한 인력 개발 사무소(WDTS)에서 후원하고 관리. SULI 프로그램에 대한 지원은 세 가지 별도의 인턴십 기간 동안 매년 모집하며, 인턴십은 여름 학기(5월 ~ 8월)의 경우 10주, 가을(8월 ~ 12월) 및 봄(1월 ~ 5월) 학기의 경우 16주
TeachQuantum[92]	• 주관기관: IBM • 기간/대상: 6주 / NSF Quantum Leap Challenge에서 지원 • 내용: 고등학교 교사를 위한 연간 6주 여름 연구 경험으로 구성된 다년 프로그램으로, 실제 양자 연구 환경에 몰입하고 교실에서 양자 중심 STEM 개념을 가르칠 수 있도록 준비시킴. 선발된 교사는 교실에서 구현할 새로운 양자 영감 활동을 개발하고 학년도 내내 분기별 회의에 참여해 결과와 모범 사례를 공유
Quantum Computing Summer School Fellowship[93]	• 주관기관: 로스 알라모스 국립 연구소(LANL) • 기간/대상: 2022년 6월 6일부터 10주 / 대학생, 대학원생 • 내용: 세계 최고의 양자컴퓨팅 전문가의 튜토리얼과 최첨단 양자컴퓨팅 연구를 수행하는 LANL 직원 과학자의 일대일 멘토링을 포함하는 몰입형 10주 커리큘럼. 여름 학교 펠로우십 수혜자는 양자 계산의 이론적 기초를 이해하고 D-Wave Systems, Rigetti 및 IBM에서 개발한 것과 같은 상업용 양자컴퓨터 프로그래밍에 능숙해지며, 대략 20명의 학생이 여름 학교를 위해 LANL로부터 장학금을 받음

87) https://challenges.quantum-computing.ibm.com/
88) https://qiskit.org/events/summer-school/
89) quantumai.google/education
90) http://aws.amazon.com
91) https://science.osti.gov/wdts/suli
92) https://hqan.illinois.edu
93) https://www.lanl.gov/

2. 기타 국가

표 Ⅳ-2-7 양자기술 인력양성 교육 프로그램

교육 프로그램	주요 사항
Quantum for Everyone[94]	• 주관기관: QURECA • 기간/대상: 4주 / 400 EUR(학생은 90% 할인) 무료 / 과제완료 후 IBM Badge 수여 • 내용: 온라인으로 진행되며 총 4가지 주제(Basics of Quantum Computing, Quantum Computing Use Cases, Transitioning to Quantum-Safe Security, The Quantum Industry)로 구성됨. 이외에도 다양한 교육 프로그램이 있음
Game : Quantum Moves 2[95]	• 주관기관: 덴마크 Aarhus University • 기간/대상: 별도 회원가입 없이 상시 이용가능 • 내용: 대중 및 초/중/고등부, 대학(원)생 대상으로 한 양자이론을 게임형식으로 설명하며, 관련 내용의 Video, Article, Blog post, Podcast를 제공
European Spring School in Quantum Science and Technology	• 주관기관: 스트라스부르 대학의 국제 대학원 QMat과 양자과학 및 기술의 EFEQT 유럽 마스터 인증서 및 유럽 양자 플래그십의 QTEdu • 기간/대상: 2022년 4월 10일 ~ 4월 14일 / 무료 • 내용: 양자과학 및 기술의 유럽 봄 학교는 유럽 전역과 과학 영역에서 석사 학생과 박사 연구원을 모아 양자 과학 및 기술 주제를 교환. 학계 및 산업계의 전문 강사가 현재 연구 과제와 새로운 응용 분야를 다루면서 양자과학, 재료 및 나노 과학 및 양자기술 분야 간의 다리를 만드는 데 도움을 주며, 모든 학생은 학생 간담회, 포스터 발표, 실험실 견학, 사회 및 문화 활동을 통해 자신의 연구 프로젝트를 발표할 기회를 제공.
Quantum Tech School	• 주관기관: UCL 양자 과학 기술 연구소 • 기간/대상: 2022년 7월 4일 ~ 2022년 7월 8일 / 무료 • 내용: 공학 및 컴퓨터 과학에 대한 배경지식이 있는 학부생을 대상으로(자연 과학을 공부하는 학생들에게도 열려 있음), 여름 학교는 양자컴퓨팅 및 양자통신을 포함한 흥미로운 양자기술 분야에 대한 포괄적으로 소개. 양자역학의 기초 등 다양한 강의를 제공하며, 나노 스케일 장치 제작 및 현재 세대 양자 프로세서 프로그래밍을 포함해 양자기술의 실습 기회를 제공.
MCQST Summer Student Program	• 주관기관: Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) • 기간/대상: 2022년 7월 31일 ~ 8월 27일 • 내용: MCQST 여름 학사 프로그램은 전 세계 학부생들에게 MCQST 및 참여 기관에서 양자 과학 및 기술(QST) 연구에 대한 통찰력을 얻을 수 있는 기회를 제공. 미니 강의 시리즈를 특징으로 하는 입문 주간과 3주간의 연구 프로젝트로 구성되며, MCQST는 양자정보 이론, 양자 시뮬레이션, 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자 계측 및 감지, 양자물질, 학제 간 탐색 방향과 같은 특정 연구 방향에 중점
Quantum Summer School 2021	• 주관기관: Qworld • 기간/대상: 2021년 7월 26일 ~ 2021년 8월 8일 • 내용: 양자컴퓨팅 및 양자프로그래밍 개발에 관심이 있는 고등학생, 대학생 및 대학원생, 연구원, 교수 및 산업계 사람들을 대상으로 함. 여름 학교의 일환으로 참가자는 입문 수준의 QBronze-Qiskit과 중급 수준의 워크샵 시리즈인 QSilver의 2단계 프로그램을 Zoom 및 Discord 플랫폼에서 원격으로 진행
European Quantum Technologies Conference (EQTC)	• 주관기관: 유럽 양자기술 이니셔티브 • 기간/비용: 2021년 11월 29일 ~ 2021년 12월 2일 / 50유로 ~ 100유로 • 내용: 기초 과학, 통신, 컴퓨팅, 시뮬레이션 및 센싱/계량학 전반에 걸쳐 유럽 및 국제 양자기술 활동을 다룸. 기초 과학, 인프라 개발, 산업 참여, 교육 및 훈련, 양자 커뮤니티의 성 균형 장려 및 촉진, 국제 협력 및 정책 결정을 포함한 양자기술의 광범위한 주제를 다루며, 유럽과 전 세계 양자기술의 최첨단을 강조하는 포럼을 제공. EQTC 2021은 또한 유럽 양자 플래그십의 Strategic Research Agenda, Innovation, Education Working Groups의 보고서 및 토론을 포함하여 European Quantum Flagship 이니셔티브, 전략 및 기회에 대한 전체 업데이트를 제공
Quantum Computing Summer School Camp (호주)	• 주관기관: Sydney Quantum Academy • 기간/대상: 2022년 1월 17일부터 1월 21일까지 / 무료 • 내용: Qubit by Qubit에서 미국 팀과 협력하여 9-12학년 학생들과 최근 학교를 졸업한 학생들을 위한 혁신적인 1주 여름 가상 캠프. 양자역학, 양자코딩, 양자 알고리듬, 양자하드웨어, 양자컴퓨팅 응용 등을 탐구하며, 후원자 IBM Quantum 덕분에 학생을 위한 장학금도 제공.
Quantum Core Training (캐나다)[96]	• 주관기관: D-wave • 기간/대상: 5일 (하루에 3-4시간) / $1,000 • 내용: 녹음된 강의와 퀴즈 및 과제를 통해 학생들을 대상으로 매월 진행

3. 국내

표 Ⅳ-2-8 국내 양자기술 인력양성 교육 프로그램

교육 프로그램	주요 사항
양자정보과학 여름학교[97]	• 주관기관: 한국물리학회, 양자정보연구지원센터, 양자사피엔스인재양성센터 • 기간/대상: 2022년 8월 22일 ~ 26일(오프라인) / 무료 / 대학생, 대학원생, 일반인 • 내용: 선형대수학, 양자역학의 기본가정, 2일차: 양자역학의 기본가정, 양자 계산 소개, 3일차: 양자컴퓨터, 양자 알고리듬, 4일차: 양자 알고리듬, 5일차: Special Topics
고등학생을 위한 양자컴퓨터 특강 프로그램[98]	• 주관기관: 양자정보연구지원센터 • 기간/대상: 2022년 2월~2023년 1월(상시접수) / 강사섭외, 강사료 지원 / 국내 고등학생 • 내용: 세계적으로 관심이 증가하고 있는 양자정보과학 분야에 대해 고등학교 흥미 유발 및 진로탐색에 있어 유용한 기회를 제공하며, 신청 교육기관(고등학교)별 협의를 통해 이론수업 또는 이론+실습 프로그램으로 구성해 진행

94) https://platform.qureca.com/courses/quantum-for-everyone/
95) https://www.scienceathome.org/quantum/games
96) http://dwavesys.com
97) http://quantumschool.kr/
98) https://qcenter.kr

교육 프로그램	주요 사항
양자센서 여름/겨울학교[99]	• 주관기관: 양자센서 인력양성 연구센터 • 기간/대상: 3일간 (온/오프라인) / 일반 연구자 및 대학원생 • 내용: 양자컴퓨터 및 양자 시뮬레이터 구현에 대한 기초 내용과 연구 현황을 배울 수 있는 기회를 제공하고, 초전도, 이온트랩, 중성원자, 양자점, 고체접결함, 광자 등에 대한 양자컴퓨팅 기초 지식 및 연구동향을 다룸. 2019년 8월 “제1회 양자 연구회 여름학교”를 시작으로 3회까지 진행
양자컴퓨팅 인공지능 SW개발 전문인력 양성 시범 사업	• 주관기관: 포항테크노파크 • 기간/대상: 기초교육(5일간), 전문교육(10일간) / 무료 / 경북지역에 거주하는 졸업예정자 및 취업준비생 등 (연령, 학력, 전공 무관)수시 / 기업관리자 또는 산업조직 내 양자기술에 관심있는 자 • 내용: 글로벌 양자컴퓨팅 기업(마이크로소프트) 클라우드 서비스를 활용해 프로그래밍 체험 교육을 진행하고, 경상북도 인공지능 연구개발 환경을 조성한다. 양자컴퓨팅 인공지능 SW개발 기본 과정(40시간)과 양자컴퓨팅 인공지능 SW개발 고급 과정(80시간)으로 진행양자기술 기초이론, 양자역학 개념, 양자기술 국내외 동향
양자 ICT 산업인력양성 교육프로그램[100]	• 주관기관: 한국지능정보사회진흥원, 양자산업생태계지원센터 • 기간/대상: 온라인(상시접수), 오프라인(2022년 10월-11월 중) / 무료 / 양자기술에 관심있는 누구나(연령, 학령, 전공 무관) • 내용: 양자 全분야(통신·센서·컴퓨터)의 수준별 온·오프라인 교육을 통해 전환·신규유입인력 확보 추진 ※ (초급/중급) 양자산업생태계지원센터 홈페이지를 통해 수강 가능 ※ (고급) 중급교육 수료자 대상 양자기술 관련 연구기관과 협의를 통해 실습교육 진행

99) https://www.quist.or.kr/

100) https://www.kqic.kr/

제4절 국내 양자기술 전문인력 교육프로그램 구성안

1. 양자 ICT 전문인력 양성 교육프로그램[101]

가. 개요

양자 관련 전문 인력 및 실무 인력의 규모는 전 세계적으로도 그 규모가 상당히 작고, 양자컴퓨팅 관련 분야의 연구가 본격화 되면서 전 세계의 다양한 산·학·연 기관에서 지속적으로 필요한 인력을 구하고 있지만, 인력 양성에 걸리는 절대적인 시간과, 양자 관련 학문이 상대적으로 높은 난이도를 요구함에 따라 해당 학문의 연구 지원자가 많지 않은 점 등을 고려하면, 빠른 시일 내에 필요한 만큼의 인력을 충원하기가 쉽지 않은 것이 현실이다. 따라서, 전 세계 유수의 대학과 정부 및 산업계는 클러스터 및 클러스터 간 네트워크를 구성하고, 양자컴퓨팅 관련 다양한 연구를 상호 협력 하에 진행하면서, 경쟁과 협력을 통해 학문의 발전에 이바지 하고 있다. 우리나라의 경우도, 현재 보유하고 있는 전문 인력의 규모가 150명 수준으로 작고, 해당 전문 인력도 일부 정부 기관에 제한적으로 업무를 진행 중이기 때문에, 해당 전문 인력의 확보가 일차적인 목표가 되어야 할 것이다. 또한 현재 컴퓨터 프로그래밍 및 코딩 분야에서의 경쟁력 높은 인력들이 가지고 있는 전통적 컴퓨터 코딩 분야의 역량이 양자컴퓨팅 영역에서도 활용될 수 있는 전환 교육 프로그램이 마련돼야 하고, 해당 교육 프로그램의 이수 및 자격 요건 부여에 따라 국내의 인력이 국내 뿐만 아니라 세계 시장에서 역할을 수행할 수 있도록 글로벌 수요에 맞는 프로그램이 제공돼야 할 것이다. 이와 유사하게, 해외에서 양자컴퓨팅 관련 자격 요건을 갖춘 글로벌 인력의 경우 국내 산업계에서 활용할 수 있는 기준을 제시함과 동시에 재택근무 및 원격 근무 체계 전환과 더불어 글로벌 인력이 국내 산업 및 학문을 위해 연구할 수 있는 글로벌 양자 프로그램의 체계를 고려해 그 실용적인 교육 프로그램을 고민하고 운영할 필요가 있다. 또한, 양자컴퓨터의 상용화와 실제 산업에의 적용까지 긴 호흡이 적용되는 점을 고려해, 차세대의 양자 관련 Literacy를 제공하고, 양자 관련 기본 소양 교육을 통해, 향후 양자산업에서의 실무 인력으로 육성할 수 있는 근간을 마련할 필요가 있다. 본 백서에서는 국내에 접목할 수 있는 양자기술 전문인력 양성 교육 프로그램을 제안하고자 하며, 제안하는 프로그램(안)의 개괄적 내용은 다음과 같다.

101) 미래양자융합센터(QCI) (2021)

표 Ⅳ-2-9 양자기술 인력양성 교육 프로그램(안)

제안 프로그램	주요 사항
양자기술 전문인력 양성	• 난이도: 고급 • 기간/대상 : 석·박사 학위과정 / 양자기술 및 유관분야 석사, 박사, Post-Doc. • 교육목적: 양자기술 및 유관분야의 석·박사급 인력을 대상으로, 양자이론·컴퓨터공학·수학 등 다학제간 융합 교육을 지원하여, 실질적 양자 전문인력을 양성하기 위한 교육 프로그램 • 유형 : 온·오프라인 교육, 이론·실무교육
양자기술 실무인력 양성 (전환인력 포함)	• 난이도: 중급 • 기간/대상 : 6개월(매주 1~2회) / 실무인력, 기존산업계 전환인력 • 교육목적: 양자기술 분야의 산업계 실무 전문인력을 양성할 목적으로 양자기술 전반에 대한 기본적 교육 커리큘럼을 제공하고, 테스트 시행 후 Certification을 제공, 산업 적용 프로세스 교육 병행 • 유형 : 온·오프라인 교육, 이론·실무교육
차세대 양자인력 저변확대	• 난이도: 초급 • 기간/대상 : 2학기(주당 3~5시간) / 중·고등학생 • 교육목적: 중·고등학생을 대상으로 양자기술과 관련된 기초이론, 양자물리학 및 주요 이슈, 기초 코딩 등을 교육함으로써 미래 양자분야 기술인력을 확보 • 유형 : 온·오프라인 교육, 이론·실무 코딩교육
산업조직 내 양자기술 이해인력 확보	• 난이도: 기초 • 기간/대상 : 수시 / 기업관리자 또는 산업조직 내 양자기술에 관심있는 자 • 교육목적: 양자기술 기초이론, 양자역학 개념, 양자기술 국내외 동향, 산업화 모델, 비즈니스 사례 등을 교육하여, 양자기술 대상 투자 등을 독려할 수 있도록 양자 이해인력을 확보 • 유형 : 온·오프라인 교육, 이론교육(온라인 동영상, 커뮤니티 형성을 통한 전문가 교류 등)

※ 미래양자융합센터(QCI) (2021)

나. 양자 전문 인력 양성

2021년 현재 양자 관련 국내 전문 인력은 약 150명 수준이고, 이들도 국내 정부 부설 연구기관의 소속이거나, 대학에서 학문적 연구를 진행하는 경우가 대부분이다. 전세계적으로 해당 분야에는 순수 학문 연구자 대비, 산업 연계형 연구자가 부족한 것이 일반적인데 이는 양자컴퓨팅이 최근까지 실험실 연구가 지배적이었고, 이를 통한 산업이나 정부쪽의 적극적인 투자 및 사업화에의 의지가 크지 않았던 데에 기인하고 있다. 그러나, 2000년대 초반 이후로 유럽 및 미국, 중국의 양자 분야에 대규모의 정부 중심의 투자가 이어지고, IBM, 구글 및 Microsoft 등의 글로벌 사업자들이 차세대 주력 사업으로서의 위상을 정하고 전격적으로 연구 및 사업화 계획을 진행함에 따라, 해당 분야에 대한 인력양성의 니즈가 한꺼번에 집중되게 됐다. 이로 인해, 관련 연구는 양자물리학, 수학, 화학, 엔지니어링 및 컴퓨팅 등의 협업을 이뤄낼 수 있는 세계 유수의 대학 중심으로 진행되고 있다. 미국의 보스턴, 시카고, 및 캘리포니아와 영국 옥스퍼드 등에서 산·학·연이 파트너십을 맺고 클러스터를 구성해 대학에서는 연구 인력을, 산업계에서는 양자컴퓨팅 접근 가능한 하드웨어 및 연구 인력이 향후 사업체에서 지속적으로 연구를 할 수 있는 일자리 및 펀드 지원을 정부 연구기관은 정부 연구과제와 연결해 더 큰 관점의 연구를 할 수 있는 자본과 연구 기회를 제공하는 협력 체계를 구축하고 있다.

이런 트렌드를 고려할 때 국내에서도 양자의 다학제간 연구가 가능할 수 있도록 대학 내에 양자 연구 센터의 개념을 도입하고, 양자 연구 센터 내에 물리학 이외에 수학, 화학, 엔지니어링 및 컴퓨팅 관련 연구 인력이 하나의 연구 과제를 공동으로 연구하고 이의 융합 과정을 만들어 내며, 융합 과정을 재분화해 해당 전문가를 만들어 내는 프로그램을 구성해 내는 것이 중요하다. 융합 과정 연구의 핵심은 현실의 난제를 해결할 수 있는 과제를 통해 이를 사업화시킬 수 있는 실용 학문으로 가져가는 것이기 때문에, 정부 관점에서의 필요 과제 및 민간 영역에서의 필요 과제를 함께 두고, 해당 과제를 협업 기반으로 연구해 낼 수 있는 시스템을 구축할 수 있어야 한다. 이를 위해 정부 및 민간 기관은 연구가 진행될 수 있는 펀딩을 진행하고, 해당 연구가 장기적일 수 밖에 없는 점을 고려해 과제의 대학 연구 인력이 학위 소지 후에 정부 및 사업체에서의 일자리를 제공해 지속적으로 연구할 수 있는 기회를 제공할 사전적 준비가 돼 있어야 한다. IBM의 경우, 전 세계에서 미국, 독일, 일본에 이어 네 번째로 국내에 연세대와 함께 'IBM 양자컴퓨팅 데이터 센터' 건립을 추진 중에 있다. 2021년 11월 새로운 양자프로세서인 '이글(Eagle) 프로세서'를 이용해 127개의 큐비트를 활용하게 됐다. 2023년 양자 우위를 달성하고 향후 10년 내에 양자컴퓨팅 상용화를 이룰 것이라는 IBM의 비전을 달성하는 일환이라고 볼 수 있다. 연세대와 IBM은 양자컴퓨팅에 관한 학술 연구, 양자컴퓨팅 활용을 위한 소프트웨어 개발, 산업 내 필요한 양자컴퓨팅 자원 제공 등 관련 연구를 위해 협력할 예정이다. IBM은 국내에 이글 퀀텀 프로세서가 설치된 IBM 양자컴퓨터 기기를 설치하고, 한국 내 양자컴퓨팅 생태계를 가속화 할 것으로 밝히고 있다. 또한, 성균관대학교 양자정보연구지원센터가 포춘 500 소속 기업·연구소·교육 기관·스타트업 등이 속한 글로벌 양자컴퓨팅 커뮤니티 IBM 퀀텀 네트워크에 가입했으며, 국내 최초로 IBM 퀀텀 네트워크 허브(IBM Quantum Network Hub)가 되어 국내 양자정보과학 생태계를 지원하고 있다. 현재까지 IBM 퀀텀 네트워크 허브에는 일본, 영국, 미국, 캐나다, 독일, 스페인, 포르투갈, 호주 등 전 세계 유수 대학이 참여하고 있다. IBM 퀀텀 네트워크 허브가 된 성균관대를 포함해 네트워크 참여 기관은 국내를 비롯해 전 세계 140개 이상 IBM 퀀텀 네트워크 회원과 함께 IBM 양자컴퓨팅을 활용해 여러 부문에서 협업 및 연구를 진행할 수 있다. 양자컴퓨팅 연구 및 상용화에 관심이 있는 국내 대학·연구소·기업은 성균관대 양자정보연구지원센터 허브에 가입해 IBM 퀀텀 네트워크에 참여하는 것을 정부에서 지원받게 된다. 이를 통해 IBM 퀀텀 네트워크 기존 회원들의 풍부한 경험 및 앞선 양자기술을 한국에서도 더 쉽게 체험하고 다양하게 시도할 수 있다. 이는 국가 주도의 R&D 프로그램과 민간 영역이 의료, 통신, 제약 등의 다양한 분야에서 활용하고자 하는 분야에 있어서의 Enabler로서의 양자컴퓨팅 학문을 이해하고, 양자컴퓨팅의 활용을 통해 각 영역에서 원하는 결과물을 내는 속도와 과정의 혁신임을 인지하여야 할 것이다.

양자 분야 전문 인력이 산업과 연계돼, 사회 전체를 발전시키는 데 일익을 담당하기 위해서는 전공 분야의 깊이와 이의 다양한 적용이 가능한 워킹 그룹 기반의 융합 연구가 필수적이고, 나아가 해당 학문적 연구를 기반으로 산업과의 연계를 위한 실용적인 기술 영역이 함께 할 필요가 있다.

해외 연구 기관의 연구 인력 충원/확보 기회를 활용하고, 글로벌 네트워크 기반의 협업 프로젝트 진행 시에 국내 연구기관 및 인력 참여를 통해 글로벌 연구 실적을 쌓는 데도 도움이 될 수 있을 것이다.

다. 양자 실무 인력 양성

전 세계적으로 일부 대학 또는 기업의 독자적인 양자컴퓨터 개발 노력을 제외하고는 IBM의 양자컴퓨터 접근을 통해 양자컴퓨팅 프로그래밍을 진행하는 것이 일반인들에게 개방돼 있는 거의 유일한 기회이다. 양자컴퓨터의 설치 및 운영 조건이 워낙 제한적이고 까다롭기 때문에 전 세계적으로 양자컴퓨터가 많지 않아 일반 대중이 접근할 수 있는 기회 역시 제한적일 수밖에 없다. 따라서, 국내의 독자적이고 접근성이 용이한 양자컴퓨터 개발 전까지는 IBM의 Qiskit 프로그램을 활용해, 국내에서 육성된 실무 인력이 글로벌 인재로 커나갈 수 있는 기회를 제공할 수 있어야 할 것이다. 국내 교육을 통해 필요한 자격을 취득하는 것이 바로 글로벌 인재로서 인정받고, 우리나라의 양자산업에 더해 글로벌 기업 또는 교육기관의 인재로서 커 나갈 수 있는 발판을 제공할 수 있게 될 것이다. 이를 위해 양자 비전공자들을 위한 양자 관련 교육을 사전적으로 수행하고, IBM 양자컴퓨터를 활용한 Qiskit 프로그램을 이수하며, 필요 시 양자컴퓨팅 수요 산업의 산업 프로세스까지 교육시키는 일관된 프로그램을 제공해 인재를 길러 낼 수 있어야 할 것이다.

실무 인력 양성 프로그램 예시와 관련해, 교육 대상은 기존 컴퓨팅 프로그래밍 개발 인력 또는 그에 준하는 인력으로 정하며, 교육 내용은 기본 양자 이론, Qiskit과 같은 프로그램의 Certificate 제공, 양자 분야와 관련된 주요 산업 프로세스 등으로 구성할 수 있다. 교육 방식으로는 강의 및 실습, 집체 및 온라인 교육으로 정할 수 있다. 강사는 양자물리학 전공자, Qiskit Cerfiticate 보유자, 산업 전문가 등으로 구성할 수 있다. 일정은 6개월 과정으로 구성 및 매 주 1~2회 시행하며, 매주 다양한 일정의 강의와 실습에 참여가 가능토록 한다.

프로그램 참여를 통해 양자 역학, 양자 회로 등을 포함한 양자 관련 주요 주제 및 개념을 이해하고, 실제 양자컴퓨터 접속을 통한 양자 프로그래밍 능력의 함양, 산업 내 필요 영역에 대한 깊이 있는 이해, Qiskit Certificate 획득 및 국내 자격 요건 동시 획득 등을 기대할 수 있다. 더불어, 글로벌 양자 프로그래머 지원 기회, 국내 필요 기업 취업 응시 기회, 글로벌 필요 기업 취업 응시 기회 등이 프로그램 수료자를 대상으로 제공되도록 추진될 수 있다.

라. 차세대 양자 인력 저변 확대

양자컴퓨팅이 적용되는 산업 및 사회 변화는 지속적인 진화를 거듭하면서 향후 10년 이후에는 본격적으로 사회 전반 현상에 적용될 것으로 기대되고 있다. 해당 시점 이후에는 양자컴퓨팅 관련 인적, 물적 자원에 대한 수요가 폭발적으로 증가할 것으로 전망하고 있다. 유럽 및 미국 등의 주요 국가에서는 해당 시점에 필요한 인적 자원 육성을 사전적으로 지원할 수 있는 기본 양자교육 프로그램을 개발하고 이를 통해 차세대 양자 인적 자원 육성의 근간을 마련하고 있다. 우리나라에서도 양자물리학 기초 과정 및 기초 코딩 관련 교육을 고등학생 대상으로 구성할 필요가 있다. 국내 유수 대학의 교수진들이 필요한 기초 교육 내용을 개발하고, 그 내용을 원하는 학생들은 누구라도 들을 수 있는 온라인 기반으로 제공하며, 해당 교육 프로그램을 학교에서 채택하고 이를 정규 선택 과목의 하나로 이수할 경우, 이를 정규 학점으로 인정해 주는 등 적극적으로 양자컴퓨팅 기초 교육에 대한 구체적 프로그램을 만들 필요가 있다.

학생 대상 프로그램과 관련해, 지원 대상은 전국의 고등학생, 비용은 국가 지원, 운영 내용은 2학기 운영 및 주당 3~5시간으로 구성한다. 교육 방식은 온라인 라이브 교육으로 매주 강의와 실습 진행으로 한다. 일정은 2학기에 매 주 1~2회 추진한다. 매주 다양한 일정의 강의 및 실습에 참여 가능토록 한다. 특정 사전 교육 요구하지 않는다. 코스 개발 및 강의에는 국내 양자물리학 및 컴퓨팅 관련 전문 교수진 및 강의 개발자 또는 관련 전문가를 참석토록 한다.

프로그램 기대 효과로 양자역학, 양자회로 등을 포함한 양자 관련 주요 주제 및 개념에 대한 이해도 향상 등을 들 수 있다. 더불어, 수학 및 파이썬 코딩 언어, 양자회로 코딩 및 양자 알고리듬, 실제 양자컴퓨터 코딩 능력을 함양할 수 있다.

아울러, 교육 프로그램 구성을 위해 매주 진행되는 2학기 동안의 강의를 제공하고, 실습 및 숙제를 통한 실무 능력을 함양시킬 수 있도록 지원한다. 또한 글로벌 경험 제공을 위해 산·학·연 커뮤니티 구성하고, 타 글로벌 커뮤니티와의 교류 프로그램 마련토록 한다. 양자컴퓨팅 관련 학과 입학 시 크레딧 제공 방안을 수립하고, 양자컴퓨팅 관련 학과 입학 시 사전 교육 프로그램 이수 인정을 받을 수 있도록 제도화 하는 것이 고려될 수 있다.

제5절 시사점

양자기술의 급속한 확장은 모든 수준의 양자 교육을 포괄하고 모든 학문, 성별, 인종 및 민족적 배경에 걸쳐 양자 분야의 준비된 인재를 배출하기 위한 기술과 훈련을 수용하는 균형 잡힌 양자 인력 전략의 개발을 필요로 한다.

기존의 전문 교육이라 함은 주로 대학교/대학원 같은 전문 교육기관에서의 학위 취득을 위한 프로그램으로 주로 구성됐으나, 양자기술 분야에서는 학위 프로그램 뿐만 아니라 온라인 코스, 컨퍼런스, 워크샵 및 해커톤, 게임 및 기타 커뮤니티 구축 플랫폼을 제공하는 학습 플랫폼을 포함해 다양한 종류의 교육 방식이 존재한다. 이는 사용자에게 쉽고 친근하게 다가갈 수 있는 유용한 도구가 되며 비용을 감안한 다양한 접근 방법을 제공한다. 특히, 온라인으로 제공하는 프로그램이 방대해지면서 시간과 장소에 대한 제약이 많이 사라지게 됐다. 이러한 접근 방법을 통해 더 많은 리소스를 보유한 기관, 대학교, 연구소, 기업과의 파트너십은 인프라가 부족한 곳에서의 양자 교육 기회를 얻는 데 도움이 될 것이다. 빠르게 확장되는 양자기술 분야에 대한 수많은 신규 기업, 조직, 학계 및 민간 기관의 참여에 이러한 교육 프로그램들이 장벽을 낮출 것으로 기대한다.

제3장 국내 양자기술 전문인력 현황 및 수급전망

제1절 개요

미국, EU 등 양자기술 선도국에서는 양자기술 전문인력의 중요성을 인식하고, 전략적인 인력양성정책 수립을 우선순위 과제로 여기고 있다. 우리나라에서도 지난 2021년 4월 '양자기술 연구개발 투자전략'을 통해 양자 전문인력 확보를 4대 전략 중 하나로 발표했다. 이처럼 국내외적으로 양자 전문인력 양성정책이 앞다투어 발표되며, 국내의 양자 전문인력 현황과 수급전망에 대한 중요성이 증대되고 있다. 이에 따라 미래양자융합포럼은 국내 산·학·연 기관의 양자기술 전문인력 현황 및 향후 수급전망에 대한 조사를 진행했다.

본 조사의 목적은 ①국내 산·학·연 기관의 양자 전문인력 현황을 파악하고 ②향후 수급(수요와 공급) 규모를 전망함으로써, 분야별(양자통신·센서·컴퓨팅) 인력 미스매치(Mismatch)를 해소하고, 지속적인 산업 성장을 도모하기 위한 인력양성 방안을 제시하기 위함이다. 전자는 국내 양자기술 산업 생태계의 규모를 파악할 수 있다는 점에서 의의가 있으며, 후자는 미래 양자기술 전문인력 양성정책 수립뿐만 아니라 양자기술 R&D 및 산업화 정책의 규모를 설정하는 데 활용될 수 있다.

본 조사에 따르면 국내 양자기술 전문인력 중 핵심인력(박사학위 소지자)은 384명으로 파악되며, 그 분포는 산업계 72명, 연구계 189명, 학계 123명으로 확인됐다. 전체 국내 양자기술 전문인력은 총 1,051명으로 집계됐다. 향후 11년간(2023~2033년) 산업계와 연구계의 양자기술 전문인력 소요인력은 총 2,616명으로 전망됐으며, 학계에서 배출되는 연간 공급인력은 총 904.2명으로 집계됐다. 본 조사 결과를 통해 국내 양자기술 전문인력의 수급 차이를 확인할 수 있으며, 이를 극복하기 위한 적극적인 방안 마련이 시급한 시점이다.

제2절 국내 양자기술 전문인력 현황 및 수급전망 조사

1. 조사 개요

올해 미래양자융합포럼은 국내 산·학·연 양자기술 전문인력의 현황 및 수급전망에 대한 조사를 시행했다. 대학에서 양성된 양자기술 전문인력이 산업체 또는 연구기관으로 연계된다는 관점을 기반으로, 다음과 같이 학계와 산업계·연구계를 구분하여 별도의 조사를 시행했다.

가. 산업계 및 연구계

양자관련 사업·연구 또는 단체활동에 참여 중인 산업계 및 연구계를 대상으로, 현재 각 기관에 소속된 전문인력의 현황 및 향후 11년 간(2023~2033년) 양자관련 연구 또는 사업을 추진하는 데 필요로 하는 연간 소요인력에 대해 조사했다. 양자기술 전문인력의 전문분야는 크게 양자통신, 양자센서, 양자컴퓨터로, 학위는 학사, 석사, 박사로 나누어 조사를 진행했다. 다만, 산업계의 경우 기업 내 향후 인력 채용 정책을 쉽게 예측하기 어려운 면이 있어 실제 채용 여부와는 무관한 단순 필요인력에 대하여 조사했다.

2022년 7월 14일부터 2022년 7월 19일까지 6일간, 각 기관의 대표 전문가를 대상으로 이메일을 통한 조사를 시행했으며, 미응답자를 대상으로 전화를 통한 직접조사를 추가로 시행해 산업계·연구계 총 43개 기관의 조사 결과를 도출했다. 산업계의 경우 양자기술의 연구개발을 직접 수행하거나 참여하는 기관, 기존 사업영역에 양자기술을 활용 및 적용하는 기관 등 국내 양자관련 대·중·소기업 34개를 대상으로 조사를 진행했으며, 연구계의 경우 국내 대표적인 양자기술 R&D 연구기관인 ETRI, KIST, KRISS를 포함해 9개 기관을 대상으로 진행했다.

나. 학계

국내 학계의 양자기술 전문인력 현황의 경우, 한국연구재단에서 올해 실시한 국내 양자인력 현황 조사 결과를 인용했다. 양자관련 연구 및 단체활동에 참여 중인 대학의 연구실 및 교수를 대상으로, 각 대학의 학부·학과별 석·박사, 포스닥, 교수 현황에 대한 조사를 실시했으며, 2022년 8월 4일부터 2022년 8월 9일까지 6일간 조사를 진행했다. 그 결과 26개 대학의 43개 학부·학과의 조사 결과를 도출했다.

미래양자융합포럼은 대학의 교수별 예상하는 연간 배출인력(석사 학위자, 박사 학위자)에 대한 조사를 진행했다. 해당 조사는 양자기술과 관련된 물리학과, 전기전자공학과, 수학과, 컴퓨터공학과 등 학과의 소속 교수 중 양자기술 관련 학회에 소속돼 있거나, ITRC 사업 등 양자관련 인재양성과업을 수행중인 교수를 대상으로 진행했다. 미래양자융합포럼 연락망을 활용해 양자기술 관련 학회 및 ITRC 등의 소속 전문가 리스트를 확보했고, 조사 중 추가 조사 대상(교수) 추천을 통해 총 93명의 조사 대상을 확정했으며, 2022년 8월 3일부터 2022년 9월 2일까지 약 한 달간 전화를 통한 직접조사를 시행했다. 그 중 양자기술 전문인력을 양성하지 않거나 은퇴한 교수, 연락을 받지 아니한 전문가 27명을 제외하고 총 66명, 응답률 71%의 조사 결과를 도출했다.

2. 2022년 국내 양자기술 전문인력 현황

2022년 국내 양자기술 관련 산·학·연 기관의 양자기술 전문인력 현황을 조사한 결과, 양자기술 핵심인력(박사학위 소지자)은 산업계 72명, 연구계 189명, 학계 123명, 총 384명으로 확인됐다. 국내 전체 양자기술 전문인력은 산업계는 256명, 연구계는 284명, 학계는 511명으로 총 1,051명으로 집계됐다.

표 Ⅳ-3-1 2022년 국내 양자기술 전문인력 현황(종합)

※ □ : 핵심인력

[단위 : 명]

구 분	학사	석사	박사	총계
산업계	95	89	72	**256**
연구계	34	61	189	**284**

[단위 : 명]

구 분	석·박사*	포스닥	교수	총계
학계**	388	43	80	**511**

* 석·박사 통합과정생이 대부분으로 집계
** 국내 학계의 양자기술 전문인력 현황의 경우, 한국연구재단에서 올해 실시한 국내 양자인력 현황 조사 결과를 인용

☞ **국내 산·학·연 양자기술 핵심인력 수 : 384명**

☞ **국내 산·학·연 양자기술 전문인력 수 : 1,051명**

국내 전체 양자기술 전문인력의 소속기관의 비율은 산업계 24%(256명), 연구계 27%(284명), 학계 49%(511명)로, 학계에 양자기술 전문인력이 주로 분포돼 있는 것을 확인했다. 반면, 국내 양자기술 핵심인력의 비율은 산업계 19%(72명), 연구계 49%(189명), 학계 32%(123명)로, 양자기술 핵심인력(박사학위 소지자)은 주로 연구계에 분포돼 있는 것을 확인했다.

그림 Ⅳ-3-1 기관유형별 2022년 국내 전체 양자기술 전문인력 현황

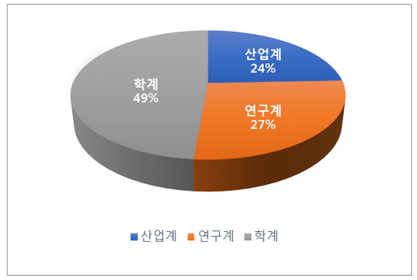
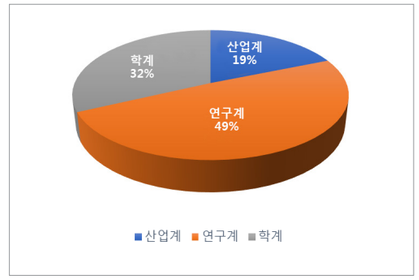


그림 Ⅳ-3-2 기관유형별 2022년 국내 전체 양자기술 핵심인력 현황



가. 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황

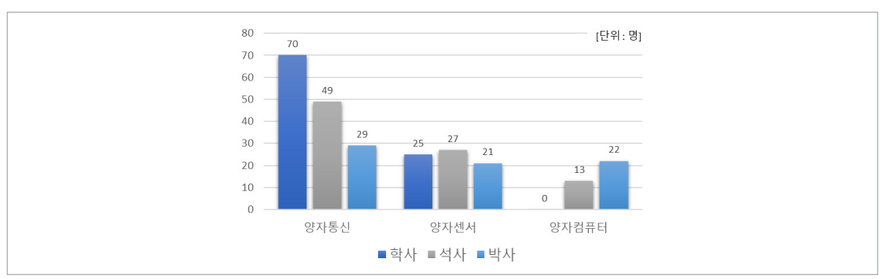
국내 양자관련 대·중·소기업 34개 대상으로 조사를 진행한 결과, 올해 산업계의 양자기술 전문인력은 256명으로 집계됐다. 양자기술 분야별로 양자통신 분야에 148명, 양자센서 분야에 73명, 양자컴퓨터 분야에 35명이 종사하고 있으며, 산업계 전문인력의 최종학위는 학사 95명, 석사 89명, 박사 72명으로 확인됐다.

표 Ⅳ-3-2 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황

[단위 : 명]

구분	학사	석사	박사	총계
양자통신	70	49	29	148
양자센서	25	27	21	73
양자컴퓨터	0	13	22	35
합 계	95	89	72	256

그림 Ⅳ-3-3 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황



산업계 양자기술 전문인력의 전문분야를 양자통신·양자센서·양자컴퓨터로 나누었을 때, 양자통신 58%(148명), 양자센서 28%(73명), 양자컴퓨터 14%(35명)로, 산업체 양자기술 전문인력의 50% 이상이 양자통신 분야에 집중돼 있는 것으로 확인했다. 산업계 양자기술 전문인력의 학·석·박사의 비율은 학사 37%(95명), 석사 35%(89명), 박사 28%(72명)으로, 특정 학위에 편중되어 있지 않음을 확인했다.

그림 Ⅳ-3-4 기관유형별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황

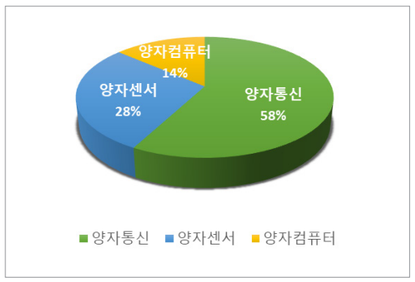
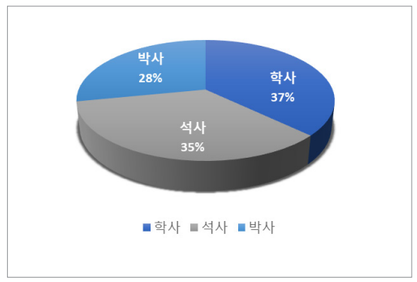


그림 Ⅳ-3-5 학위별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황



나. 2022년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황

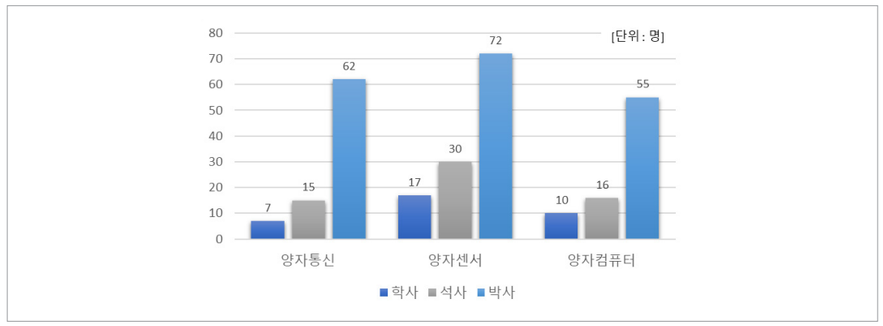
국내 양자관련 연구기관 9개를 대상으로 조사를 진행한 결과, 올해 연구계의 양자기술 전문인력은 284명으로 집계됐다. 양자기술 분야별로 양자통신 분야에 84명, 양자센서 분야에 119명, 양자컴퓨터 분야에 81명이 종사하고 있으며, 연구계 전문인력의 최종학위는 학사 34명, 석사 61명, 박사 189명으로 확인됐다.

표 Ⅳ-3-3 2022년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황

[단위 : 명]

구 분	학사	석사	박사	총계
양자통신	7	15	62	84
양자센서	17	30	72	119
양자컴퓨터	10	16	55	81
합 계	34	61	189	284

그림 Ⅳ-3-6 2022년 국내 연구계 양자기술 전문인력 현황



연구계 양자기술 전문인력의 전문분야는 양자통신 30%(84명), 양자센서 42%(119명), 양자컴퓨터 28%(81명)로, 양자센서 전문인력이 가장 많았으며, 양자통신 전문인력과 양자컴퓨터 전문인력의 수는 비슷했다. 연구계 양자기술 전문인력의 학·석·박사의 비율은 학사 12%(34명), 석사 21%(61명), 박사 67%(189명)으로, 연구기관의 특성상 박사 학위 소지자의 비율이 압도적으로 높음을 확인했다.

그림 Ⅳ-3-7 기관유형별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황

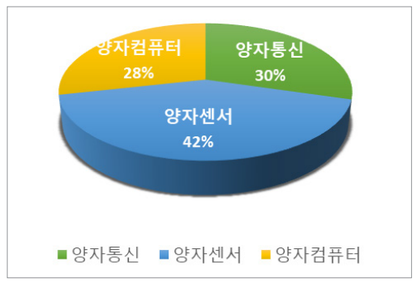
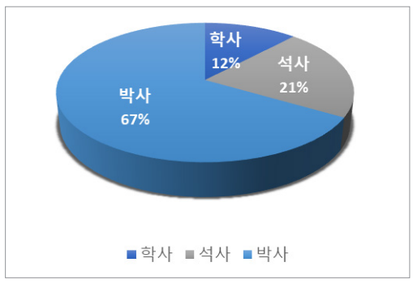


그림 Ⅳ-3-8 학위별 2022년 국내 산업계 양자기술 전문인력 현황



다. 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황

2022년 국내 학계의 양자기술 전문인력 현황은 한국연구재단에서 올해 실시한 국내 양자인력 현황 조사 결과를 인용했다. 국내 양자관련 연구 및 단체활동에 참여 중인 26개 대학, 43개 학부·학과의 소속 양자기술 전문인력의 현황을 조사한 결과, 올해 학계의 양자기술 전문인력은 511명으로 집계됐다. 석·박사 과정생 388명(76%), 포스닥은 43명(8%), 교수는 80명(16%)으로 확인됐다. 석·박사 과정생의 경우 석·박사 통합과정생이 대부분으로 집계됐다.

표 Ⅳ-3-4 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황

[단위 : 명]

구 분	석·박사*	포스닥	교수	총계
학계**	388	43	80	511

* 석·박사 통합과정생이 대부분으로 집계
* * 국내 학계의 양자기술 전문인력 현황의 경우, 한국연구재단에서 올해 실시한 국내 양자인력 현황 조사 결과를 인용

그림 Ⅳ-3-9 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황

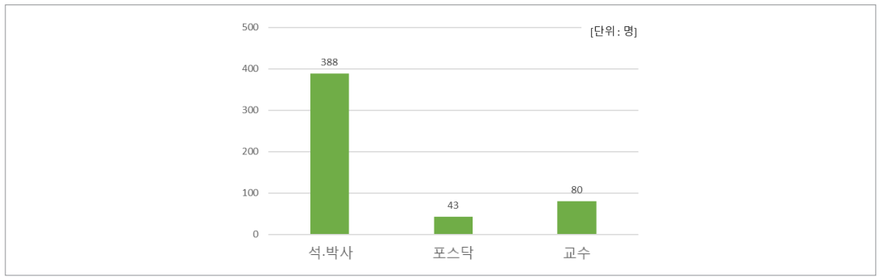
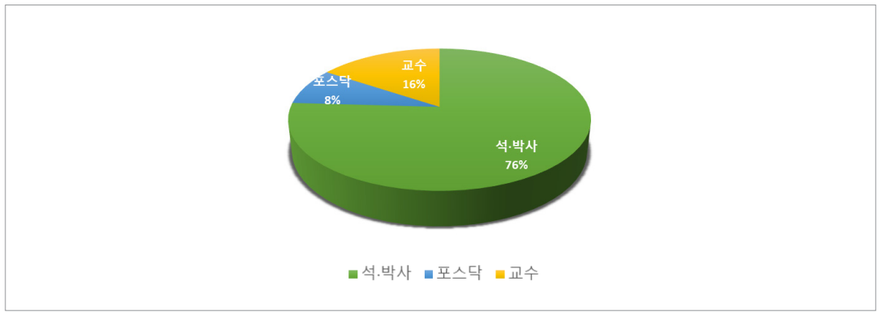


그림 Ⅳ-3-10 학위별 2022년 국내 학계 양자기술 전문인력 현황



3. 향후 11년간 국내 양자기술 전문인력 소요전망 (2023~2033년)

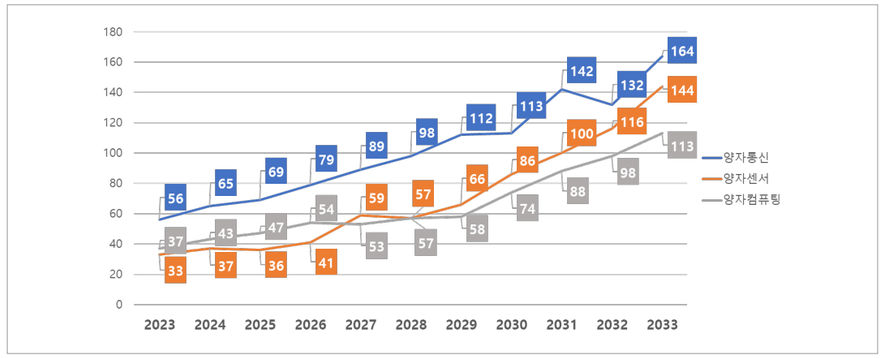
국내 양자관련 산업계 34개, 연구계 9개 기관을 대상으로 향후 11년간(2023~2033년)의 양자기술 전문인력의 소요전망에 대해 조사한 결과, 총 2,616명의 양자기술 전문인력이 요구됨을 확인했다. 11년간 양자통신 분야에 1,119명, 양자센서 분야에 775명, 양자컴퓨터 분야에 722명의 전문인력이 소요될 것으로 나타났으며, 소요되는 전문인력은 학사 학위자 809명, 석사 학위자 792명, 박사 학위자 1,015명으로 확인했다. 매년 요구되는 전문인력의 수는 연평균 31.75%의 증가율(CAGR)로 증가했다.

표 Ⅳ-3-5 향후 11년간 국내 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)(종합)

[단위 : 명]

구 분		'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	합계
양자 통신	학사	17	20	20	26	29	29	37	43	49	53	64	**387**
	석사	21	25	25	28	33	38	40	39	54	37	54	**394**
	박사	18	20	24	25	27	31	35	31	39	42	46	**338**
	소계	**56**	**65**	**69**	**79**	**89**	**98**	**112**	**113**	**142**	**132**	**164**	**1119**
양자 센서	학사	7	8	9	11	19	20	23	24	34	37	43	**235**
	석사	9	11	6	11	13	11	15	24	19	29	37	**185**
	박사	17	18	21	19	27	26	28	38	47	50	64	**355**
	소계	**33**	**37**	**36**	**41**	**59**	**57**	**66**	**86**	**100**	**116**	**144**	**775**
양자컴퓨터	학사	7	8	11	12	13	14	17	17	25	33	30	**187**
	석사	12	15	14	18	14	19	15	24	26	25	31	**213**
	박사	18	20	22	24	26	24	26	33	37	40	52	**322**
	소계	**37**	**43**	**47**	**54**	**53**	**57**	**58**	**74**	**88**	**98**	**113**	**722**
종합	학사	31	36	40	49	61	63	77	84	108	123	137	**809**
	석사	42	51	45	57	60	68	70	87	99	91	122	**792**
	박사	53	58	67	68	80	81	89	102	123	132	162	**1015**
	합계	**126**	**145**	**152**	**174**	**201**	**212**	**236**	**273**	**330**	**346**	**421**	**2616**

그림 Ⅳ-3-11 양자기술 분야별 국내 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) (종합)



가. 향후 11년간 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)

국내 양자관련 대·중·소기업 34개 대상으로 조사를 진행한 결과, 향후 11년간(2023~2033년) 산업계 양자기술 소요인력은 총 1,821명으로 집계됐다. 11년간 양자통신 분야 879명, 양자센서 분야에 544명, 양자컴퓨터 분야에 398명의 전문인력이 소요될 것으로 전망되며, 소요되는 전문인력은 학사 학위자 689명, 석사 학위자 603명, 박사 학위자 529명으로 확인했다.

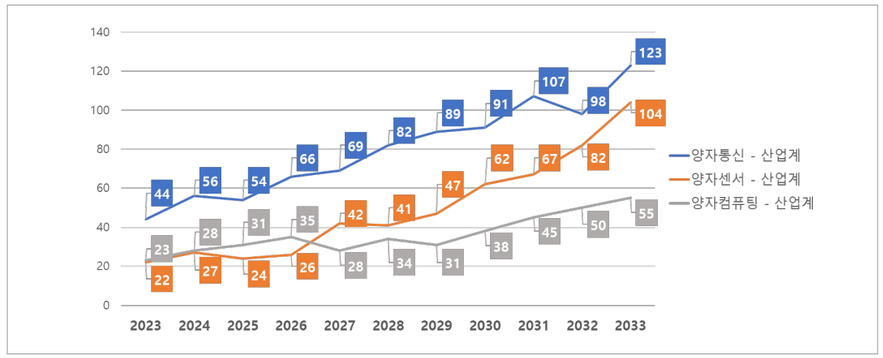
표 Ⅳ-3-6 향후 11년간 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)

[단위 : 명]

구 분		'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	합계
양자통신	학사	15	19	18	24	26	27	34	40	44	49	60	**356**
	석사	17	23	21	23	25	33	31	31	41	25	39	**309**
	박사	12	14	15	19	18	22	24	20	22	24	24	**214**
	계	**44**	**56**	**54**	**66**	**69**	**82**	**89**	**91**	**107**	**98**	**123**	**879**
양자센서	학사	5	7	7	9	16	18	20	21	28	33	39	**203**
	석사	8	10	4	8	11	9	12	20	13	24	32	**151**
	박사	9	10	13	9	15	14	15	21	26	25	33	**190**
	계	**22**	**27**	**24**	**26**	**42**	**41**	**47**	**62**	**67**	**82**	**104**	**544**
양자 컴퓨터	학사	4	5	8	7	9	10	12	12	17	24	22	**130**
	석사	9	12	11	14	9	14	9	15	16	15	19	**143**
	박사	10	11	12	14	10	10	10	11	12	11	14	**125**
	계	23	28	31	35	28	34	31	38	45	50	55	**398**
종합	학사	24	31	33	40	51	55	66	73	89	106	121	**689**
	석사	34	45	36	45	45	56	52	66	70	64	90	**603**
	박사	31	35	40	42	43	46	49	52	60	60	71	**529**
	합계	**89**	**111**	**109**	**127**	**139**	**157**	**167**	**191**	**219**	**230**	**282**	**1821**

산업계의 11년간 양자기술 소요인력의 연평균 증가율(CAGR)은 11.05%이며, 양자통신 분야는 9.80%, 양자센서 분야는 15.17%, 양자컴퓨터 분야는 8.25%로 확인했다. 양자센서 분야에서 가장 큰 연평균 증가율을 보였으며, 양자통신 분야, 양자컴퓨터 분야 순으로 확인했다. 산업계에서 요구하는 전문인력의 전문분야는 매년 양자통신 분야에서 가장 큰 수치를 보였으며, 2027년부터는 양자센서 분야에 대한 인력 요구가 양자컴퓨터 분야에 대한 인력 요구 수치를 뛰어넘을 것으로 전망됐다.

그림 Ⅳ-3-12 양자기술 분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)



산업계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 전문분야의 비율은 양자통신 48%(879명), 양자센서 30%(544명), 양자컴퓨터 22%(398명)으로 집계됐으며, 양자통신 분야가 산업계 소요인력의 50% 정도로 가장 크며, 양자센서 분야, 양자컴퓨터 분야 순으로 확인했다.

산업계의 양자기술 소요인력의 최종학위 비율은 학사 학위 38%(689명), 석사 학위 33%(603명), 박사 학위 29%(529명)으로 집계됐다. 올해 2022년 산업계 양자기술 전문인력의 최종학위 비율(학사 학위 37%, 석사 학위 35%, 박사 학위 28%)과 같이 최종 학위별 비율이 비슷하게 나타났으며, 산업계의 경우 양자기술 전문인력에 대해 특정 학위에 대한 요구가 있지 않은 것을 알 수 있다.

그림 Ⅳ-3-13 양자기술 분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율

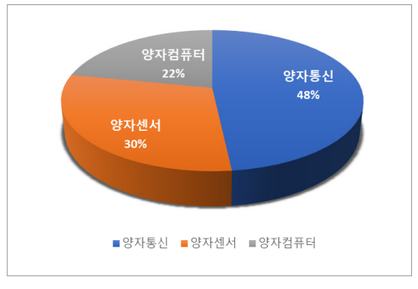
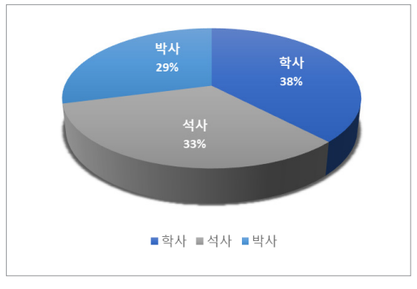
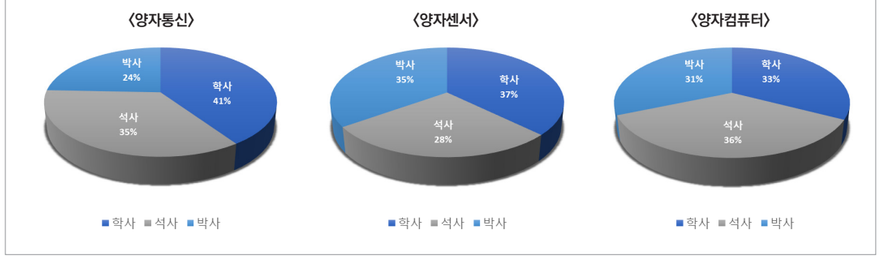


그림 Ⅳ-3-14 학위별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율



산업계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 전문분야별(양자통신, 양자센서, 양자컴퓨터)로 최종학위에 대한 요구 비율을 살펴보면, 양자통신 분야는 학사 41%(356명), 석사 35%(309명), 박사 24%(214명)로 집계됐으며, 양자센서 분야는 학사 37%(203명), 석사 28%(151명), 박사 35%(190명)로 집계됐고, 양자컴퓨터 분야는 학사 33%(130명), 석사 36%(143명), 박사 31%(125명)로 확인됐다. 양자통신 분야의 경우 학사학위 소지자에 대한 소요가 석사 또는 박사학위 소지자에 대한 소요보다 높은 특성을 보였으며, 양자센서 분야와 양자컴퓨터 분야의 경우에는 특정 학위에 대한 요구가 있지 않은 것으로 확인했다.

그림 Ⅳ-3-15 양자기술 분야별 국내 산업계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 학위별 비율



나. 향후 11년간 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)

국내 양자관련 연구기관 9개를 대상으로 조사를 진행한 결과, 향후 11년간(2023~2033년) 연구계 양자기술 소요인력은 총 795명으로 집계됐다. 11년간 양자통신 분야 240명, 양자센서 분야에 231명, 양자컴퓨터 분야에 324명의 전문인력이 소요될 것으로 전망되며, 소요되는 전문인력은 학사 학위자 120명, 석사 학위자 189명, 박사 학위자 486명으로 확인했다.

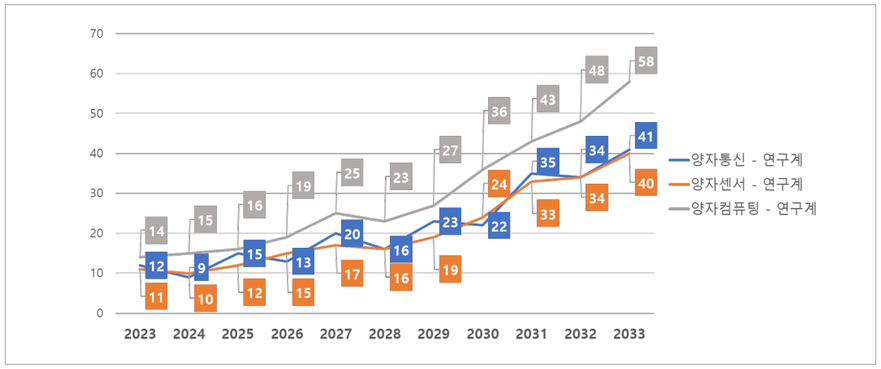
표 Ⅳ-3-7 향후 11년간 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)

[단위 : 명]

구 분		'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	합계
양자통신	학사	2	1	2	2	3	2	3	3	5	4	4	**31**
	석사	4	2	4	5	8	5	9	8	13	12	15	**85**
	박사	6	6	9	6	9	9	11	11	17	18	22	**124**
	계	**12**	**9**	**15**	**13**	**20**	**16**	**23**	**22**	**35**	**34**	**41**	**240**
양자센서	학사	2	1	2	2	3	2	3	3	6	4	4	**32**
	석사	1	1	2	3	2	2	3	4	6	5	5	**34**
	박사	8	8	8	10	12	12	13	17	21	25	31	**165**
	계	**11**	**10**	**12**	**15**	**17**	**16**	**19**	**24**	**33**	**34**	**40**	**231**
양자컴퓨터	학사	3	3	3	5	4	4	5	5	8	9	8	**57**
	석사	3	3	3	4	5	5	6	9	10	10	12	**70**
	박사	8	9	10	10	16	14	16	22	25	29	38	**197**
	계	**14**	**15**	**16**	**19**	**25**	**23**	**27**	**36**	**43**	**48**	**58**	**324**
종합	학사	7	5	7	9	10	8	11	11	19	17	16	**120**
	석사	8	6	9	12	15	12	18	21	29	27	32	**189**
	박사	22	23	27	26	37	35	40	50	63	72	91	**486**
	합계	**37**	**34**	**43**	**47**	**62**	**55**	**69**	**82**	**111**	**116**	**139**	**795**

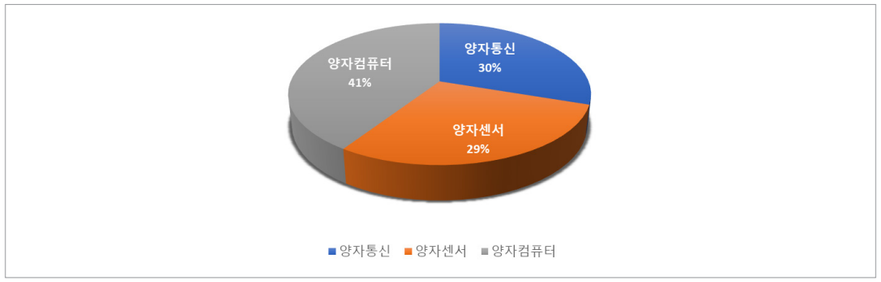
연구계의 11년간 양자기술 소요인력의 연평균 증가율(CAGR)은 12.79%이며, 양자통신 분야는 11.82%, 양자센서 분야는 12.45%, 양자컴퓨터 분야는 13.79%로, 양자컴퓨터 분야에서 가장 큰 연평균 증가율을 확인했다. 매년 연구계에서 요구하는 전문인력의 전문분야 또한 양자컴퓨터 분야가 가장 큰 것으로 확인했고, 양자통신 분야와 양자센서 분야에 대한 요구는 비슷한 것으로 나타났다.

그림 Ⅳ-3-16 양자기술 분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년)



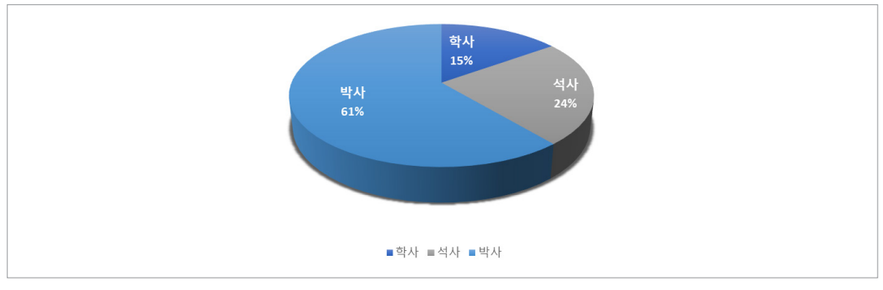
연구계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 전문분야 비율은 양자통신 30%(240명) 양자센서 29%(231명), 양자컴퓨터 41%(324명)로 확인했으며, 양자컴퓨터 분야에서 가장 큰 비율을 보였다. 양자통신 분야와 양자센서 분야에 대한 전문인력의 소요는 비슷한 것으로 확인했다.

그림 Ⅳ-3-17 양자기술 분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율



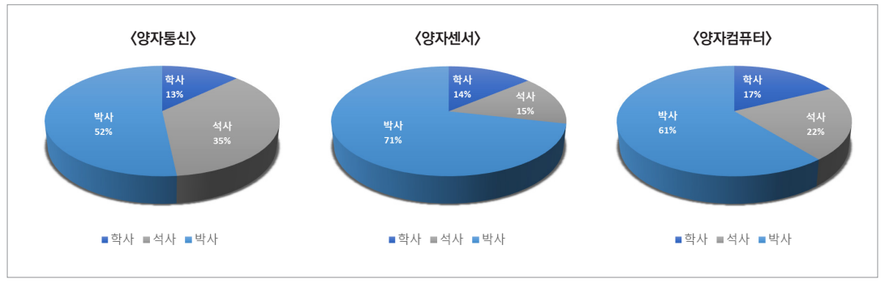
연구계의 양자기술 소요인력의 최종학위 비율은 학사 학위 15%(120명), 석사 학위 24%(189명), 박사 학위 61%(486명)로 집계됐다. 올해 2022년 연구계 양자기술 전문인력의 최종학위 비율(학사 학위 12%, 석사 학위 21%, 박사 학위 67%)과 같이, 연구기관의 특성상 박사학위 소지자에 대한 전문인력 소요가 높은 것을 확인했다.

그림 Ⅳ-3-18 학위별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 비율



연구계에서 요구하는 양자기술 전문인력의 전문분야별(양자통신, 양자센서, 양자컴퓨터)로 최종 학위에 대한 요구 비율을 살펴보면, 양자통신 분야는 학사 13%(31명), 석사 35%(85명), 박사 52%(124명)로 집계됐으며, 양자센서 분야는 학사 14%(32명), 석사 15%(34명), 박사 71%(165명)로 집계됐고, 양자컴퓨터 분야는 학사 17%(57명), 석사 22%(70명), 박사 61%(197명)로 확인됐다. 양자통신, 양자센서, 양자컴퓨터 분야 모두 박사학위 소지자에 대한 수요가 50% 이상으로 높았고, 특히 양자센서 분야와 양자컴퓨터 분야의 경우 박사학위 소지자에 대한 수요가 압도적으로 높은 것으로 나타났다.

그림 Ⅳ-3-19 양자기술 분야별 국내 연구계 양자기술 전문인력 소요전망(2023~2033년) 학위별 비율



4. 국내 학계 양자기술 전문인력 배출현황

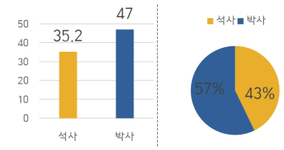
가. 향후 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망

국내 양자기술 관련 학과에 소속된 대학교수 중 양자기술 관련 학회 또는 양자분야 인력양성과제에 참여하고 있는 교수 66명(총 93명 중 66명 응답, 응답률 71%)을 대상으로, 예상하는 연간 배출인력에 대해 조사한 결과, 향후 학계에서 배출되는 양자기술 전문인력을 학위별로 구분했을 때, 석사 학위자는 연간 35.2명, 박사 학위자는 연간 47명이 배출될 것으로 전망됐다. 양자기술의 특성상 석·박사 통합과정이 다수 존재하는 것으로 조사됐으며, 박사 과정과 석·박사 통합과정을 통해 박사 학위를 수여한 자는 모두 박사 배출인력으로 파악했다. 이에 따라 석사 학위자보다 박사 학위자의 연간 배출인력 규모가 크게 집계된 것으로 보인다.

본 조사 결과를 바탕으로 향후 11년간 누적 배출인력을 전망한 결과, 2033년까지 총 904.2명의 양자기술 전문인력이 배출될 것으로 전망된다.

그림 Ⅳ-3-20 향후 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망

구분	인원(명)
석사	35.2
박사	47
합계	**82.2**



※ 본 조사 결과에는 교수의 개인별 전망치가 반영됨
※ 본 조사 결과, 석박사 통합과정을 통해 박사 학위를 수여한 자가 다수 존재하는 것으로 조사됨

표 Ⅳ-3-8 향후 11년간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망(누적)

[단위: 명]

구분	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33
석사	35.2	70.4	105.6	140.8	176	211.2	246.4	281.6	316.8	352	387.2
박사	47	94	141	188	235	282	329	376	423	470	517
합계	**82.2**	**164.4**	**246.6**	**328.8**	**411**	**493.2**	**575.4**	**657.6**	**739.8**	**822**	**904.2**

* 연간 국내 학계 양자기술 전문인력 배출전망을 단순 누적함

나. 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망

향후 학계에서 배출되는 연간 양자기술 전문인력을 주요 학과별로 구분했을 때, 가장 많은 인력을 배출한 학과는 물리학과로 전체의 47.32%를 차지하고, 그 뒤로 전기전자·컴퓨터공학과가 전체 중 37.1%의 비율을 보였다. 주요 학과별로 연간 배출인력의 학위를 구분했을 때, 박사 학위자의 경우 물리학과 55%, 전기전자·컴퓨터공학과 45% 순으로 인력이 배출되지만, 석사 학위자의 경우는 오히려 물리학과가 37%, 전기전자·컴퓨터공학과가 45%로 그 순위가 뒤바뀜을 알 수 있다.

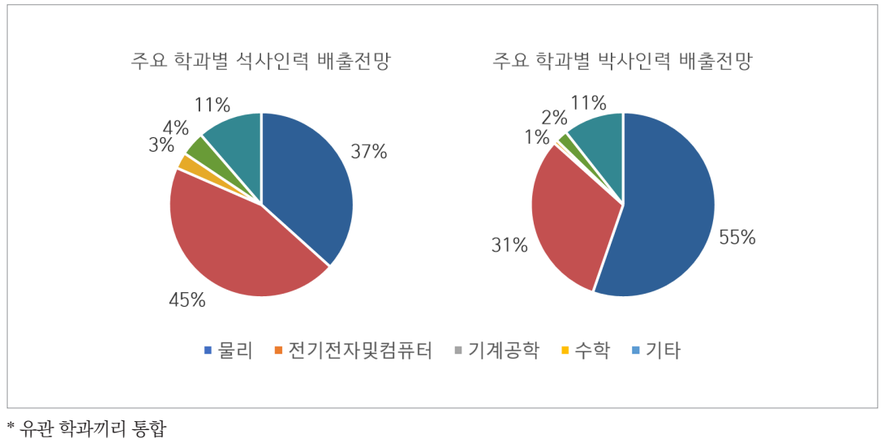
표 Ⅳ-3-9 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망

[단위: 명]

구분	석사	박사	합계	비율
물리학	12.9	26	**38.9**	47.32%
수학	1.5	1	**2.5**	3.04%
기계공학	1	0.3	**1.3**	1.59%
전기전자·컴퓨터공학	15.8	14.7	**30.5**	37.1%
기타	4	5	**9**	10.95%
합계	**35.2**	**47**	**82.2**	**100%**

* 유관 학과끼리 통합

그림 Ⅳ-3-21 주요 학과별 연간 양자기술 전문인력 배출전망(석사/박사)



* 유관 학과끼리 통합

제3절 시사점

국내 양자기술 전문인력의 현황 및 수급전망 조사를 통해서 국내 산·학·연 양자기술 전문인력의 규모 및 전문분야, 최종학위 등의 전반적인 현황을 파악했으며, 산업계와 연구계의 양자기술 전문인력의 수요와 학계에서 배출되는 양자기술 전문인력의 규모를 파악했다. 이는 국내의 산업계, 학계, 연구계의 양자인력의 현황과 공급·수요를 모두 아우르는 자료로서 의의가 있다고 할 수 있다. 또한 산업계와 연구계에서는 양자기술 전문인력의 부족을 호소하고 학계에서는 양자기술 분야로의 취업의 어려움을 호소하는 현 상황에서, 산·학·연의 인력 공급과 수요를 비교하고 전망했다는 점에서도 가치가 있다고 볼 수 있다.

이번 국내 양자기술 전문인력 조사 결과는 체계적인 연구인력 조사로 긍정적 의미를 가지나 한계점이 존재한다. 먼저, 양자기술 전문인력의 범위가 구체적으로 정의되지 않은 상태에서 조사가 진행됐다. 양자기술 전문인력의 범위를 정의하는 것은 지금도 국내 전문가들에 의해 양자기술의 범위에 대해 논의가 이루어지고 있다. 두 번째로, 산업계 양자기술 전문인력 수요조사에서, 인력 채용부서가 아닌 실제 양자기술을 담당하고 있는 부서를 대상으로 조사를 진행했다. 현재 산업계에서 양자기술 전문인력에 대한 수요가 존재하는 것으로 알려졌지만 학계의 배출 인력이 산업체 취업으로 연계되지 못하는 경우가 발생하고 있다. 이는 대기업의 인력 채용부서에서는 즉각적 매출이 발생하지 않는 양자분야 인력 채용을 진행하지 않기 때문이다. 따라서 이번에 실시한 산업체 대상 인력 수요 조사는 실제로 향후 발생할 산업계의 인력 수요로 보기 어렵다. 마지막으로, 학계의 양자기술 전문인력 배출전망에서, 산업계·연구계의 수요전망 조사와는 달리 학계에서 공급되는 인력의 총량(규모)만을 조사했다. 또한 학계 조사 대상의 응답률이 71%인 점에서 국내 학계 전체를 조망했다고 보는 것에 한계가 있다.

이와 같은 한계점을 보완하기 위해서는 다음과 같은 노력이 필요하다. 우선적으로 양자기술 전문인력에 대한 정의는 필수적이다. 순수 양자기술만을 연구하는 전문인력과 함께 기타 산업영역과의 접목·융합으로 양자분야에 도움이 되는 산업융합인력까지 범위를 설정할 수 있다. 국내 양자기술 전문가와의 수차례의 논의를 통하여 양자기술 전문인력의 정확한 범위를 설정할 필요가 있다. 또한 향후 진행할 양자기술 전문인력 조사의 조사 내용을 구체화할 필요가 있다. 올해 진행한 조사의 경우, 각 기관의 대표 양자기술 전문가를 통해 각 기관·부서·학부·학과 단위의 양자기술 전문인력의 현황과 인력의 수요 또는 공급에 대하여 조사를 진행했다. 더욱 구체적이고 명확한 국내 양자기술 인력의 파악을 위하여 기관 단위를 넘어 개인 단위의 조사로 확장할 필요가 있다. 추가로, 올해는 진행하지 못했던 학계에서 배출되는 양자기술 전문인력의 전문 양자기술 분야(양자통신·센서·컴퓨팅 등)를 조사 내용에 포함하여 산업계·연구계의 양자기술 전문인력 수요의 그것들과 비교·분석할 수 있도록 해야한다. 아울러, 양자기술 전

문인력 조사 결과를 체계화 및 DB화할 필요가 있다. 체계적인 조사를 위해 조사 대상, 조사 내용 등의 명확한 기준을 설정함과 동시에, 조사 주기를 설정하고 조사 양식을 표준화하여 데이터를 축적하는 것이 중요하다. 축적된 데이터를 바탕으로 통계화하는 작업을 진행함으로써 양자기술 전문인력 조사의 효용성을 높여야한다. 특히, 통계 데이터를 기반으로 양자기술 전문인력의 수급 모니터링 방안을 마련해 산·학·연의 양자기술 전문인력의 갭(Gap) 문제를 파악하고 해결방안을 모색하는 노력이 필요하다. 마지막으로, 양자기술 전문인력 조사의 모든 과정의 전문성을 높이기 위해 양자기술 인력 전문가 자문단을 구성하고 운영할 필요가 있다. 향후 진행할 양자기술 전문인력 조사 자체에 대한 자문과 함께 조사 결과에 따른 국내 양자기술 전문인력 관련 시사점을 도출하고 이를 반영한 전략을 수립할 수 있다. 또한 매해 변화하는 국내 양자기술 전문인력 생태계 상황에 걸맞도록 양자기술 전문인력 조사의 내용 등을 수정하고 발전시킬 수 있다.

향후 국내 양자기술 전문인력 실태조사를 지속적으로 진행할 예정이며, 미래양자융합포럼은 위의 사항을 준수하고 조사를 보완해나갈 예정이다. 양자기술 전문인력 조사를 통해 범국가적 차원에서 국내 양자기술 전문인력 생태계의 산·학·연 미스매치(Mismatch)를 해결하고 양자기술 인력의 선순환 구조를 만들기를 희망한다. 또한 조사 결과가 정부 또는 유관기관의 양자기술 전문인력 양성 관련 정책 기획에 기초자료로 활용됨으로써 국내 양자기술 인력양성에 도움이 되기를 기대해 본다.

참고문헌

• 국내문헌

1	과학기술정보통신부(2021a), “미래 양자기술 · 산업 육성법 마련 · 시행”.
2	과학기술정보통신부(2021b), “양자기술 연구개발 투자전략”.
3	과학기술정보통신부(2021c), “양자기술 인재확보 시급, ’30년까지 전문인력 1,000명 확보 전략 마련 착수”.
4	과학기술정보통신부(2022), “30년까지 1천명 확보 목표로 양자 전문인력 양성 노력”.
5	미래양자융합센터(2021), “양자 ICT 교육 프로그램 발굴 및 벤처창업 지원”.
6	송정현(2021), “주한이스라엘대사관 ’이스라엘 기술로 보는 퀀텀 기술의 미래’ 주제로 온라인 세미나 개최”.
7	한국연구재단(2018). “독일의 Junior Research Group Leader 지원사업”, NRF R&D 정책 Brief 2018-50호.

• 해외문헌

1	A. Asfaw, A. Blais et al.(2021), Building a quantum engineering undergraduate program, Physics Education.
2	A. Matuschak and M. Nielsen(2019), Quantum computing for the very curious, Quantum country.
3	B. Cervantes, G. Passante, B. Wilcox and S. Pollock(2021), An overview of quantum information science courses at US Institutions.
4	C. D. Aiello, D. D. Awschalom et al.(2021), Achieving a quantum smart workforce, Quantum Science and Technology 6(3).
5	C. Hughes, D. Finke, D.-A. German, C. Merzbacher, P. M. Vora, and H. J. Lewandowski(2021), Assessing the needs of the quantum industry, Physics Education.
6	David Matthews(2021), US and UK seal new alliance in quantum research.
7	F. Greinert and R. Müller(2021), European competence framework for quantum technologies.
8	F. Greinert and R. Müller(2022), Qualification profiles for quantum technologies, QTEdu.
9	F. Greinert, R. Müller, P. Bitzenbauer, M. S. Ubben, K. A. Weber(2022), The future quantum workforce: competences, requirements and forecasts.
10	G. Rainò, L. Novotny, and M. Frimmer(2021), Quantum engineers in high demand.
11	Gaurav Batra, Martina Gschwendtner et al.(2021), Shaping the long race in quantum communication and quantum sensing, McKinsey & Company.
12	J. Hilton(2019), Quantum’s road to commercialization, Forbes.
13	J. K. Perron, C. DeLeone, S. Sharif, T. Carter, J. M. Grossman, G. Passante, and J. Sack(2021), Quantum undergraduate education and scientific training.
14	Laurentiu Nita, Laura Mazzoli Smith, Nicholas Chancellor and Helen Cramman(2021), The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving.
15	M. F. J. Fox, B. M. Zwickl, and H. J. Lewandowski(2020), Preparing for the quantum revolution: what is the role of higher education?
16	Maninder Kaur, Araceli Venegas-Gomez(2022), Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives.
17	National quantum coordination office(2022), Summary of the quantum workforce: Q-12 actions for community growth meeting.
18	National Quantum Coordination(2020), Summary of the national Q-12 education partnership kick-off event.
19	National Science & Technology Council USA(2022), Quantum information science and technology workforce development national strategic plan.
20	National science foundation(2021), NSF announces quantum leap challenge institutes for biological sensing and quantum simulation.
21	Science and Technology Council Research Planning and Evaluation Committee Quantum Science and Technology Committee(2020), Promotion policy for developing and securing quantum human resources.
22	Shi-Yao Hou, Guanru Feng, Zipeng Wu, Hongyang Zou, Wei Shi, Jinfeng Zeng, Chenfeng Cao, Sheng Yu, Zikai Sheng, Xin Rao, Bing Ren, Dawei Lu, Junting Zou, Guoxing Miao, Jingen Xiang and Bei Zeng(2021), SpinQ Gemini: a desktop quantum computing platform for education and research.
23	Subcommittee of quantum information science committee on science(2021), National quantum initiative supplement to the president’s FY 2022 budget.
24	Subcommittee on economic and security implications of quantum science & committee on homeland and national security(2021), The role of international talent in quantum information science.
25	Wu Lan(2021), China’s first quantum technology doctoral program settled in USTC. China News Service.

• 사이트

1	https://www.kqic.kr/
2	https://www.quist.or.kr/
3	http://quantumschool.kr/
4	https://qcenter.kr
5	https://www.ptp.or.kr
6	http://www.itrc.or.kr/
7	https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/quantum-technologies/airbus-quantum-computing-challenge
8	https://march.aps.org/
9	https://www.aquantum.es/
10	http://aws.amazon.com
11	https://q-ctrl.com/products/black-opal/
12	https://linktr.ee/brazilquantum

13	https://brilliant.org/
14	https://www.quantumcomputinglab.cineca.it/en/home-en/
15	https://ciqc.berkeley.edu/educ-overview
16	https://www.bnl.gov/quantumcenter/student- opportunities.php
17	https://www.per-central.org/items/detail.cfm?ID=15731
18	https://www.coursera.org/
19	https://www.quantumlah.org/
20	https://www.csusm.edu/quest/index.html
21	http://dwavesys.com
22	https://events.economist.com/commercialising-quantum
23	https://www.edx.org
24	https://www.edx.org/course/quantum-mechanics-for-everyone
25	https://thequantuminsider.com/entangle.html
26	https://www.ukri.org/councils/epsrc/
27	https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/P510270/1
28	https://www.eqtc.org/
29	https://qtom.qtedu.eu/
30	https://strasbourg2022.eu/
31	https://www.nsf.gov/pubs/2022/nsf22561/nsf22561.htm
32	https://www.futurelearn.com/courses/intro-to- quantum-computing/1
33	https://www.geeksforgeeks.org/?s=quantum+computing
34	https://quantumai.google/education
35	https://hqan.illinois.edu/education-and-workforce
36	https://qiskit.org/
37	https://challenges.quantum-computing.ibm.com/spring-2022
38	http://helloquantum.mybluemix.net/
39	https://qce.quantum.ieee.org/
40	https://quantum.ieee.org/
41	https://igsqt.ac.uk/
42	https://www.insidequantumtechnology.com/
43	https://www.gov.il/en/departments/general/iia-to-establish-israeli-quantum-computing-center-17-jul-2022
44	https://www.research-in-germany.org/en/jobs-and-careers/info-for-postdocs-and-junior-researchers/career-paths/junior-research-group-leader.html
45	https://qis-learners.research.illinois.edu/about/.
46	https://www.lanl.gov/projects/national-security-education-center/information-science-technology/summer-schools/quantumcomputing/
47	https://www.mcqst.de/support/summer-bachelor-program/
48	https://xpro.mit.edu/
49	https://www.iquise.mit.edu/
50	https://qubbe.uchicago.edu/research/workforce.html
51	https://onequantum.org/
52	https://www.optica.org/en-us/events/topical_meetings/quantum/
53	https://q12education.org
54	https://q2b.qcware.com/
55	https://www.quantumbusinesseurope.com/
56	https://www.qbraid.com/home.html
57	https://2022.qcrypt.net/
58	http://www.qctip.org/
59	https://qhack.ai/
60	https://qipconference.org/
61	https://qiskit.org/events/summer-school/
62	https://www.q-next.org/opportunities/
63	https://qosf.org
64	https://www.quantumcomputingchallenge.com/
65	https://qplaylearn.com/
66	https://www.colorado.edu/research/qsense/workforce
67	https://www.qtedu.eu
68	https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/education-coordination-support-actions/
69	https://www.quantfi.com/
70	https://www.quantumcoalition.io/
71	https://quantumcomputingreport.com/
72	https://quantumcomputing.stackexchange.com/
73	https://quantumcurious.org/
74	https://quantumeasterneurope.com/
75	https://quantumflytrap.com/
76	https://quantum-latino.com/
77	https://www.scienceathome.org/quantum/games
78	https://quantumchess.net/quantum-chess/
79	https://qscience.org/opportunities/

80	https://quantumsystemsaccelerator.org/our-ecosystem/
81	https://www.quantumtechcongress.com/
82	https://quantx.fr/big-quantum-hackathon/
83	https://www.quarksinteractive.com
84	https://www.qubitbyqubit.org/
85	https://qureca.com/
86	https://platform.qureca.com/courses/quantum-for-everyone/
87	https://www.eucor-uni.org/en/qustec/
88	https://qutechacademy.nl/
89	https://qworld.net/quantum-summer-school-2021/
90	https://rqs.umd.edu/education/
91	https://shequantum.org/
92	https://spie.org
93	https://www.sydneyquantum.org/programs/schools/
94	https://sqms.fnal.gov/workforce-development- opportunities/
95	https://strangeworks.com/
96	https://science.osti.gov/wdts/suli
97	https://www.ucl.ac.uk/quantum/study-here
98	https://www.ucl.ac.uk/quantum/news/2022/mar/uclq-summer- school-returns
99	https://www.ukri.org/news/uk-and-canada-launch-world-first-programme-of-quantum-technologies/
100	https://unconventionalcomputing.org/
101	https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis
102	https://uwaterloo.ca
103	http://quantumcats.ca/
104	https://www.zapatacomputing.com/
105	https://quantum.country/qcvc

V

글로벌 양자분야 주요 산·학·연 협의체 현황



제1장 미국 QED-C

제2장 EU Quantum Flagship

제3장 기타 국가
(캐나다 QIC, 일본 Q-STAR)

제1장
미국
QED-C

미국은 2018년 제정된 양자법(The National Quantum Initiative Act, NQIA)에 의거하여 미국 대통령은 국가양자조정실(National Quantum Coordination Office) 직속 양자연구정책 자문기구인 국립양자이니셔티브자문위원회(National Quantum Initiative Advisory Committee)를 설치했다. 이에 따라 미국 상무부(Department of Commerce)의 NIST(National Institute of Standards and Technology)는 비영리기구인 SRI International과 협정을 체결하여 QED-C(Quantum Economic Development Consortium, 양자경제개발컨소시엄)을 설립했고, QED-C는 과거 반도체 산업과 유사한 경로를 따라가며 양자산업 공급망을 활성화하고 있다.[1] 이 협의체의 역할은 산업, 학계 및 기타 관련 연구원을 모아 미국이 양자컴퓨팅을 포함한 양자분야에 국가적 우위를 확보할 수 있도록 강력한 산업용 양자기반 산업 및 관련 공급망을 지원하고 성장시키는 것이다. 미국 양자산업 조성에 관심이 있는 공공 및 민간단체로 구성된 QED-C는 시장과 실제 사례를 식별하고, 연구 모형, 표준제정과 양자인력 양성에 이바지하는 것이 목표이며, 이를 통해 정부는 기본 연구개발을 지원하고 산업계는 공급망 구축, 제조, 테스트 및 평가를 담당하는 효율적인 역할 분담을 구상하고 있다.[2] 2022년 5월 기준 134개 이상의 기업 등 200여 개 이상의 회원사가 QEC-D에 참여하고 있다.

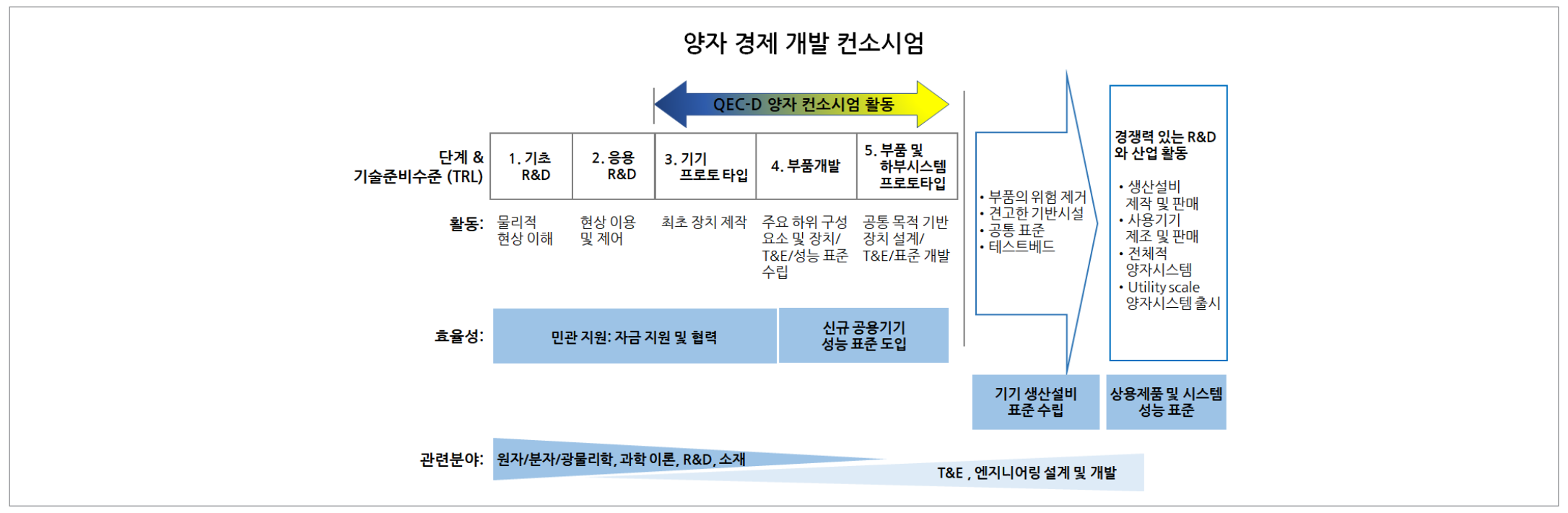
QED-C는 다음과 같은 목표를 갖고 있다.

- 강력한 미국 양자생태계 및 양자산업 공급망 활성화 및 지원
- 연방 R&D 투자 우선순위, 표준 및 규정, 양자인력 교육 및 개발을 안내하고 정보를 제공하기 위해 총괄적인 업계 목소리 제공
- 정부 기관과 산업계의 파트너십 촉진 및 조정
- 지적 재산, 효율적인 공급망, 기술 예측 및 양자사용능력 공유 증진
- 양자기술의 잠재적인 경제적 영향 전달
- 양자기반 기술에 대한 영향력이 큰 사용 사례 및 응용 분야 식별
- 광범위한 응용 분야를 실현하기 위한 충족 가능한 기술, 표준 및 성능 측정 기준, 인력의 격차 식별
- 산업계, 학계 및 정부의 이해 관계자와 협력해 기술, 표준 및 인력 격차 메움

[그림 V-1-1]은 양자정보과학기술의 현황과 QED-C의 목표를 보여준다. 양자컴퓨팅 장치 개발 기간은 5년이 걸리는데, 초기 3년은 목적에 맞는 장치를 고안, 1년간 데이터 생성, 이후 1년 동안은 데이터 분석이 필요하다.[3] QED-C는 목적에 맞는 장치를 고안하는 초기 3년을 3개월로 축소하는 것을 목표로 하고 있다. 미국의 양자장치 개발은 이미 엔지니어링 실용성 단계로 돌입하였으며, 감지, 통신 및 계산 분야에서 중간 규모의 양자컴퓨터(Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ) 장치에 대한 확대 적용 기회가 탁월하기 때문에 이것을 상업적으로 확장하는 것이 목표 중 하나이다.

1) 지식산업정보원 (2022)
2) David (2019)
3) Susan (2019)

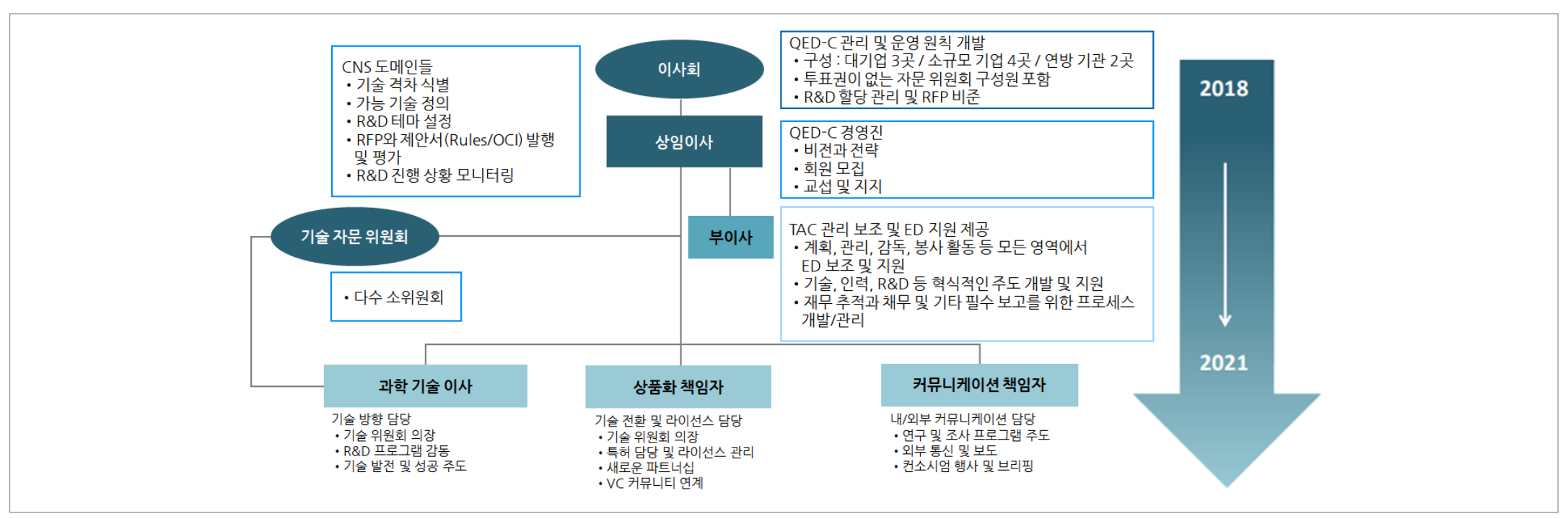
그림 Ⅴ-1-1 양자정보과학기술(QIST) 현황 및 QED-C 목표



※ The Science Monitor (2019)

이러한 목적을 돕는 QED-C 조직의 구조는 [그림 V-1-2]와 같다.[4] 기술 분야, 상품화, 커뮤니케이션 책임자들을 각각 전문적인 역할로 실무를 담당할 수 있도록 하고 있으며, 지속적인 연구개발 모니터링을 지속함으로써 양자생태계 활성화를 조직적으로 지원하고 있다.

그림 Ⅴ-1-2 QED-C 조직도

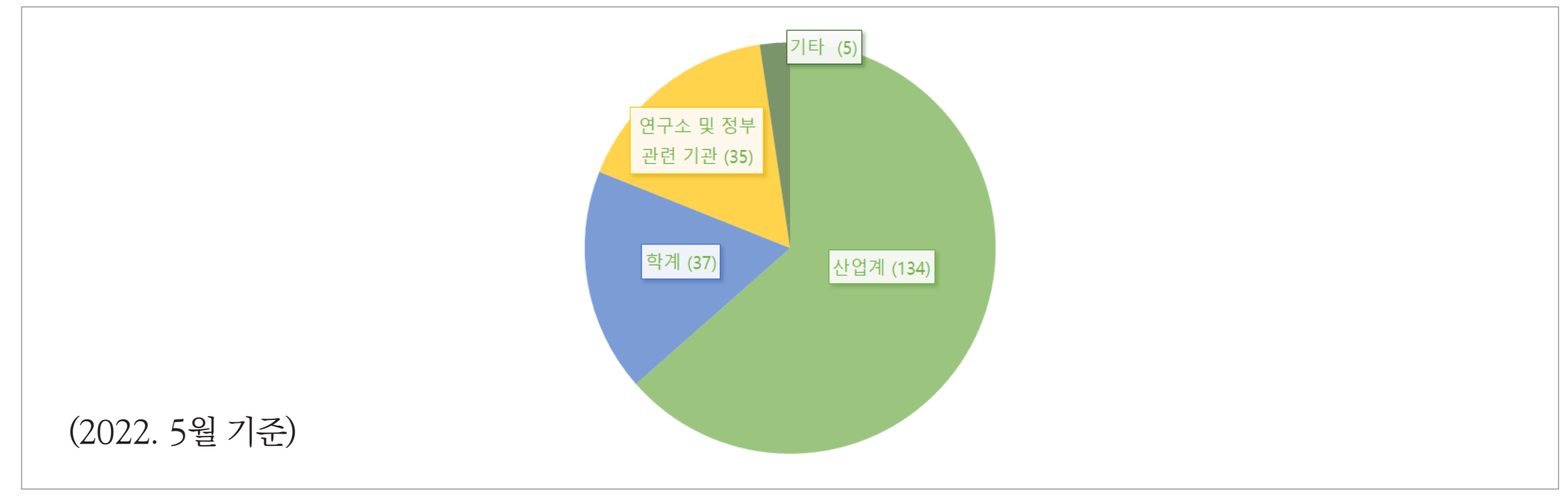


※ 2021 QEDC/SRI International (2021)

2022년 5월 기준 QED-C의 미국 내 회원 기관은 134개 기업, 37개 대학교, 35개 정부 관련 기관과 연구소로 확인된다. 2021년 기준으로 150여 개의 기업이 참여하고 있었으나, 현재 16개 기업은 확인되지 않으며, 대학의 경우 2021년 35개였다가 2022년에 두 곳이 증가해 37개 학교가 확인되고 있다. 그 외에 회원으로 오스트레일리아, 캐나다, 덴마크, 핀란드, 일본, 네덜란드, 뉴질랜드, 노르웨이, 스웨덴, 영국 기업 및 파트너가 있으며, 최근 핀란드의 다수의 기업이 QED-C에 가입해, 미국 내 공급망을 확보하기 위해서 적극적으로 활동하고 있다.

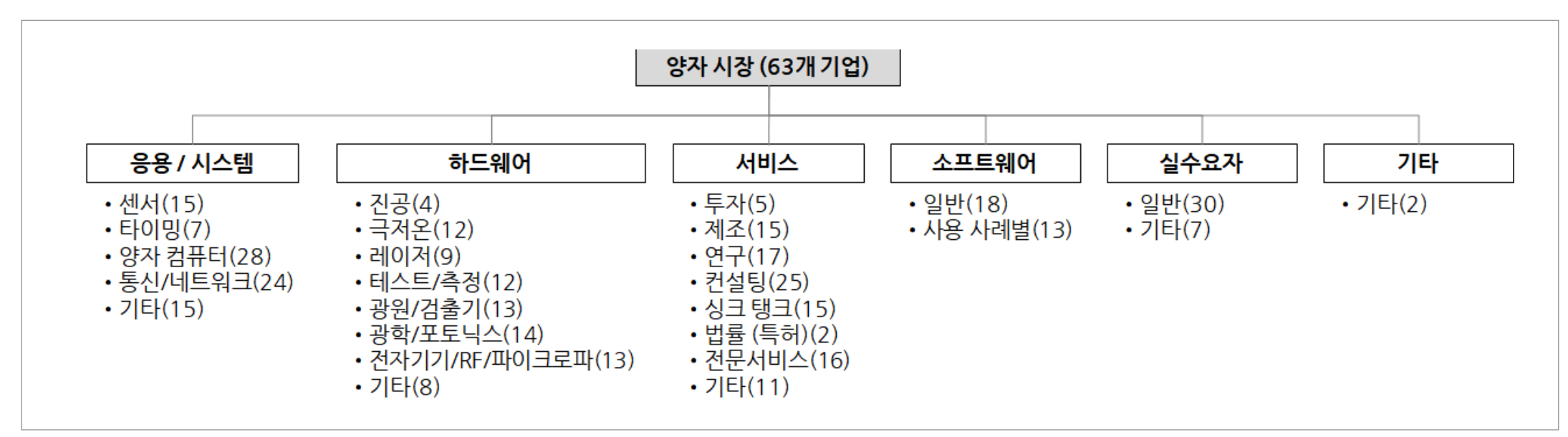
4) QEDC/SRI International (2021)

그림 Ⅴ-1-3 QED-C 참여 기관 현황



134개의 QED-C 회원 중에는 Google, IBM, Microsoft와 같은 대기업뿐만 아니라, Aliro Technologies, AlphaRail, Cosmic Microwave Technology, Novum-Industria, Triton Systems와 같은 벤처기업도 가입해 활동하고 있다. 벤처기업들은 주로 통신 및 네트워크 분야 또는 양자컴퓨팅과 같은 응용 분야나 소프트웨어 분야에 진출해 있으며, 연구개발이나 서비스 플랫폼을 주로 제공하고 있다. 양자컴퓨팅은 Google, IBM, Microsoft, Honeywell, Rigetti, IonQ, Quantum Circuits 및 ColdQuanta와 같은 기존 기업뿐만 아니라 신생 기업 모두에서 활발하게 추진되고 있으며 연간 총투자액은 수억 달러라고 알려졌다. 한편 QED-C는 전체 양자공급망을 확인할 수 있고 양자기술의 광범위한 영역에서 실제 양자제품을 제공하는 양자시장(Quantum Marketplace)을 운영하고 있다.[5] 이를 통해 회원사 및 참여 구성원들의 기술과 가능성에 대한 정보를 새로운 고객에게 제공하고, 양자기반 제품 개발에 필요한 고객과 공급업체 간 상호 정보를 확인할 수 있게끔 돕고 있다. 양자시장은 [그림 V-1-4]와 같이 응용/시스템, 하드웨어, 서비스, 소프트웨어, 실수요자, 기타 등 6개의 대분류로 구분하고, 각 대분류는 다시 소분류로 나눠 관련 기업의 수를 표기했다. 2022년 5월 기준 회원 기업 134개 중 양자시장에 보유 기술 및 서비스를 공개한 기업은 63개로 확인되며, 다른 71개의 기업도 보유한 기술, 제품, 서비스에 따라 공개를 준비하고 있는 것으로 알려져 있다.

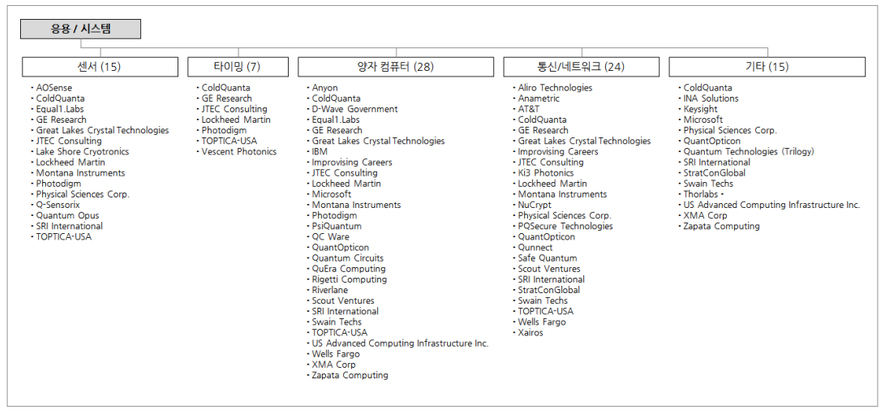
그림 Ⅴ-1-4 QED-C 양자시장 대분류 및 소분류



5) https://quantumconsortium.org/quantum-marketplace

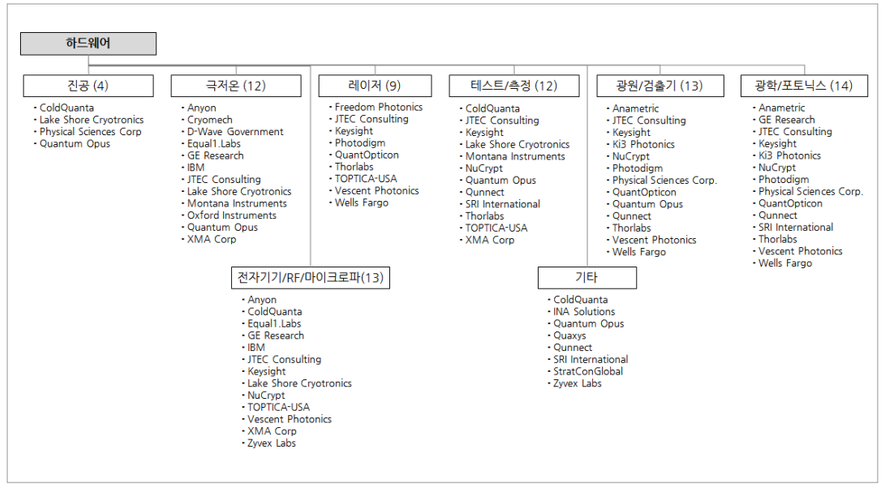
각각의 소분류별로 포함되는 기업들은 [그림 V-1-5]부터 [그림 V-1-8]까지 자세히 표시했다. 먼저 응용/시스템 분야는 센서, 타이밍, 양자컴퓨터, 통신/네트워크 및 기타로 분류하고 있다.

그림 V-1-5 응용/시스템 분야의 소분류 및 관련 기업명



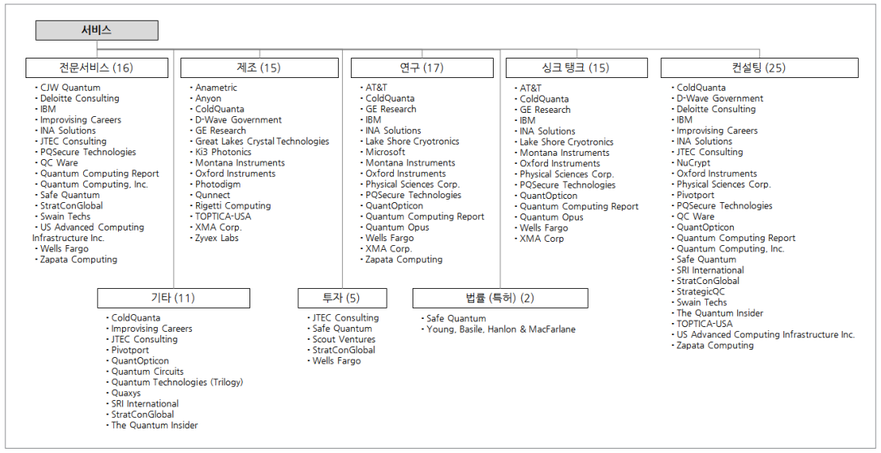
다음으로 하드웨어 분야는 진공, 극저온, 레이저, 테스트/측정, 광원/검출기, 광학/포토닉스, 전자기기, RF, 마이크로파 및 기타로 좀 더 다양하게 세분화할 수 있다. QED-C는 전자기기, RF, 마이크로파를 각각 다르게 분류하고 이에 포함되는 기업들을 구분하고 있지만, 현재는 해당 분야로 분류된 기업들이 똑같으므로 [그림 V-1-6]에서는 세 분류를 하나로 통합해 표현했다.

그림 V-1-6 하드웨어 분야의 소분류 및 관련 기업명



서비스 분야는 투자, 제조, 연구, 컨설팅, 싱크 탱크, 법률 및 특허, 전문 서비스, 기타로 분류돼 있다.

그림 V-1-7 서비스 분야의 소분류 및 관련 기업명



소프트웨어 분야는 일반과 사용 사례별로 분류되고, 실수요자에게 공급하는 분야는 일반과 기타로 분류하고 있다.

그림 V-1-8 소프트웨어 및 실수요자 분야의 소분류 및 관련 기업명



QED-C 회원사로 가입한 134개 기업에 대한 간략한 소개와 주요 제품 그리고 양자시장에 관련된 내용은 〈표 V-1-1〉에 기술했다.

표 V-1-1 QED-C 회원 기업 소개

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Aegiq	• 기업소개 : 단일 광자 및 통합 양자광학 플랫폼 사용, 차세대 네트워킹 및 컴퓨팅 구축, 양자컴퓨팅 및 양자광학 연구개발 추진 • 홈페이지 : https://www.aegiq.com
Aliro Technologies*	• 기업소개 : 하버드 대학교 Narang Lab.에서 분사, IBM, Quantinuum, IonQ, Rigetti Computing 양자하드웨어 공급업체와 협력, 양자시스템 구축 위한 양자네트워크 개발 주도(양자컴퓨팅 및 네트워킹) • 주요제품 : Aliro Q. Network(AQN) • 홈페이지 : https://www.aliroquantum.com • 주요시장 :응용/시스템(통신/네트워크), 소프트웨어, 실수요자
AlphaRail*	• 기업소개 : 토론토 대학교 Creative Destruction Lab 2020 Quantum Stream 졸업한 미국 기반 스타트업, 철도 운영 최적화 문제 해결하기 위해 고성능 컴퓨팅 및 양자컴퓨팅 사용 연구 • 홈페이지 : https://www.alpharail.com
Amazon*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 기술 발전 지원 • 홈페이지 : https://www.amazon.com
Anametric*	• 기업소개 : 반도체 설계, 사이버 보안, 칩 규모 양자광자를 위한 기술 및 장치 개발, 남부 감리교 대학교와 공동 연구를 통한 상용화 사이버 보안을 위한 양자포토닉스 • 홈페이지 : https://www.anametric.com • 주요시장 : 하드웨어(광원, 탐지기/광학, 포토닉스), 실수요자, 소프트웨어, 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(제조)
Anyon	• 기업소개 : 초전도 범용 양자컴퓨터 및 단기 중급 양자컴퓨터 제공, 양자 처리장치(QPU), 양자제어 전자 장치, 초저온/극저온 시스템 등 양자컴퓨터 전체 수직 하드웨어 스택(Stack) 관련 기술 개발 • 주요제품 : On-Premises NISQ 양자컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.anyonsys.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파), 소프트웨어, 응용/시스템(양자컴퓨터), 서비스(제조), 실수요자
AOSense*	• 기업소개 : 정밀 탐색, 중력 측정 및 시간 측정을 위한 원자 광학 장치 개발 • 주요제품 : 원자 빔 소스, 전자기기, 주파수 표준, 레이저, 테이퍼 증폭기, 광섬유 주파수 빗, 광역학, 광학 절연체, 원자 광학 센서, 자이로스코프, 가속도계, MU(관성 측정 장치), 중력계 • 홈페이지 : https://www.aosense.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서)
Aperio Global*	• 기업소개 : 객체 감지 및 세분화, 사이버 공간 행동 예측 포함한 분류 및 회귀 문제 해결, 전이 학습 활용 가능 양자참조모델(Quantum Reference Models) 생성, 분류 및 회귀 문제 해결하기 위해 IBM Quantum Experience 및 Qiskit를 사용하는 AI 솔루션용 양자큐비트(Qubit) 알고리듬 활용 • 주요제품 : 인공지능, 양자센싱 및 컴퓨팅, 사이버 운영, 네트워크 복원, 국가 안보 • 홈페이지 : https://www.aperioglobal.com
AT&T*	• 기업소개 : 통신, 고객 정보 보호 등 정보 자산 보안, 고객이 위탁한 정보 보호 위해 미사용 및 전송, 중이 정보 자산 보호 • 주요제품 : 통신 • 홈페이지 : https://www.att.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 소프트웨어, 서비스(연구, 싱크탱크), 실수요자
ATOM Computing*	• 기업소개 : 중성 원자 양자컴퓨팅 중점 시스템 통합 • 홈페이지 : https://www.tom-computing.com

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Axion Tech	• 기업소개 : 암호화 장치인 True 난수 생성기 개발 • 주요제품 : 초고속 암호, True 난수 생성, 컴퓨터 보안, 내장 디지털 서명 • 홈페이지 : https://www.axiontechnologiesllc.com
BAE Systems	• 기업소개 : 영국 국방, 정보 보안, 항공우주 관련 기업, 양자정보과학기술(QIST) 적용 및 상용화 목적 • 주요제품 : 사이버 복원 플랫폼 침입 탐지, 사이버 기술, 지능형 자율 시스템, 다중 지능 신호 처리, EO/IR 센서 • 홈페이지 : https://www.baesystems.com
Benchmark*	• 기업소개 : 성능/양자컴퓨팅, 데이터 통신 및 에지 네트워크 솔루션 응용을 위한 맞춤형 솔루션 제공, 복잡/임베디드 시스템 및 하드웨어 응용 목적 설계 및 제조 • 주요제품 : 신호 무결성, 포토닉스 패키징, 열 모델링, 자유공간 광학, 마이크로일렉트로닉스 및 LCP 제조 • 홈페이지 : https://www.bench.com
Bleximo*	• 기업소개 : QASIC(Quantum Application-Specific Integrated Circuit) 기술과 초전도 큐비트를 활용한 Full Stack 양자컴퓨팅 시스템 구축 • 홈페이지 : https://www.bleximo.com
Boeing*	• 기업소개 : 시스템 엔지니어링, 소프트웨어 시뮬레이션, 극저온 원자 물리학, 주파수 안정화 레이저, 초고속 레이저 시스템, 통합 포토닉스, 소형 진공 시스템, 내비게이션 시스템, 이미징 및 감지 기술, 제조 및 생산 시스템 분석, 전자기 효과 등 연구 및 제조 • 홈페이지 : https://www.boeing.com
Booz Allen Hamilton*	• 기업소개 : 연방정부에 서비스로 양자연구 제공 목적, 관리 및 정보 기술 컨설팅 화사 • 홈페이지 : https://www.boozallen.com
Boston Consulting Group*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 컨설팅 및 자문 서비스, 분석 및 데이터 과학 부문(CG GAMMA)과 양자컴퓨팅의 기계 학습 응용 프로그램 연구 수행 • 홈페이지 : https://www.bcg.com
Cambridge Quantum Computing	• 기업소개 : 양자컴퓨팅, 양자 소프트웨어 및 양자 사이버보안 중점, 양자기술 상용화를 위한 시스템 구축 • 주요제품 : 양자화학, 머신러닝, 알고리듬, 사이버보안, 소프트웨어 개발 도구상자(Toolkit) • 홈페이지 : https://www.cambridgequantum.com
Cisco	• 기업소개 : 양자분야를 다루고 있지 않음(협력관계 유지) • 홈페이지 : https://www.cisco.com
CJW Quantum	• 기업소개 : 2018년 국가 양자발의법(National Quantum Initiative Act) 서명에 중요한 역할(Carl Williams) • 주요제품 : 전략적 컨설팅, 공공정책 컨설팅, 엔지니어링 및 위험 관리, 국제적 참여 조언 등 • 홈페이지 : https://www.cjwquantum.com • 주요시장 : 서비스(전문 서비스)
Coherent	• 기업소개 : 양자시스템 미세 가공, 레이저 기반 제조 • 주요제품 : 레이저 • 홈페이지 : https://www.coherent.com
ColdQuanta*	• 기업소개 : 저온 원자 기술 활용, UHV 및 유리 셀 기술, 클라우드, 기기 및 시스템 설계 기술 제공 • 주요제품 : 양자물질 시스템, 양자시간 기록 시스템, 양자컴퓨터, 리드버그(Rydberg) RF 감지기, 양자관성센서 • 홈페이지 : https://www.coldquanta.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍 등), 실수요자, 하드웨어(전자기기, RF 마이크로파, 진공 등), 서비스(컨설팅, 제조, 연구, 싱크 탱크 등)
Corning*	• 기업소개 : 솔루션 제공 • 주요제품 : 첨단 광학, 광통신, 유리 등 • 홈페이지 : https://www.corning.com

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Cosmic Microwave Technology*	• 기업소개 : Caltech에서 분리한 업체 • 주요제품 : 극저온 저소음 증폭기, 수신기, Quad Ridge Flared Horn, 광섬유 송수신기, 트랜지스터 바이어스 공급 장치 • 홈페이지 : https://www.cosmicmicrowavetechnology.com
Cryomech*	• 기업소개 : 2단계 저온 냉각기 포함 극저온 냉각기 및 저온 유지 장치 등 극저온 장비 설계 및 제조 • 주요제품 : 냉동기, 저온 유지 장치, 헬륨 관리 시스템, 액체 질소 • 홈페이지 : https://www.cryomech.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온)
D-Wave Government*	• 기업소개 : 세계 최초 양자컴퓨터 상용 공급, 양자컴퓨팅 시스템 및 소프트웨어/서비스 개발, 어닐링/게이트 모델 양자컴퓨터 개발, Full Stack 기술 제공, 다양한 문제에 대한 양자응용 프로그램 수행 • 주요제품 : 양자시스템 구축 및 제공(5000+ 이상 큐비트), 도약 양자클라우드 서비스 등 • 홈페이지 : https://www.dwavesys.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 하드웨어(극저온), 서비스(컨설팅, 제조), 실수요자
Deloitte Consulting*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 기초 교육 및 전략적 양자여정 로드맵 개발, 워크숍 진행 • 주요제품 : 전문 서비스 • 홈페이지 : https://www.deloitte.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스)
EMW Consulting*	• 기업소개 : 군사/민간 분야 정책, 인력, 교육 육성, 네트워킹 도입 및 사용, 양자정보과학(QIS) 교육, 인력, 기술 육성 정책
Entanglement Institute*	• 기업소개 : QIS의 가속화를 위해 고급 양자컴퓨팅 및 QIS 테스트 베드 및 보안 시설 구축, 최적의 시스템 통합에 대해 작동, 양자 네트워킹을 위한 프로토타입 공간 제공
Equal1.Labs	• 기업소개 : 실리콘 기반 양자컴퓨터 플랫폼 개발, 양자컴퓨팅 기능을 상대적으로 전력 소비가 적은 비용 효율적인 소형 폼 팩터로 제공 • 주요제품 : 실리콘 기반 양자컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.equal1.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파), 응용/시스템 (양자컴퓨터, 센서)
FormFactor*	• 기업소개 : 극저온 테스트 및 측정 시스템 공급 • 주요제품 : 계측 도구, 양자극저온, 프로브 카드, 프로브 시스템, 분석 프로브 • 홈페이지 : https://www.formfactor.com
Freedom Photonics*	• 기업소개 : 광자 부품, 모듈 및 하위 시스템 제조, 반도체 레이저, 광다이오, 광증폭기/셔터, 고속 광변조기, 광자 지적회로 및 2D/3D 통합, 정교한 마이크로 과학기술 보유, 양자통신/네트워킹 및 감지에 관심 • 주요제품 : 레이저 및 레이저 시스템, 광검출기 • 홈페이지 : https://www.freedomphotonics.com • 주요시장 : 하드웨어(레이저)
Frequency Electronics*	• 기업소개 : 원자시계 기술 관련 연구 • 주요제품 : 우주 제품, 모듈식 GPS 시간 및 주파수 참조 시스템, 위성통신 지상국 • 홈페이지 : https://www.freqelec.com
GE Research*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 알고리듬, 양자네트워킹 및 양자감지기술에 관심 • 주요제품 : 비행, 전력, 건강관리 • 홈페이지 : https://www.ge.com/research • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍), 서비스(연구, 싱크 탱크), 소프트웨어, 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 광학/포토닉스, 마이크로파), 실수요자
General Dynamics Mission Systems*	• 기업소개 : 정보 시스템 기술 통합 • 홈페이지 : https://www.gd-ms.com
Google*	• 기업소개 : Google Quantum AI는 양자컴퓨팅의 첨단 기술 발전 및 고전적인 분야 이상에서 작동 가능한 장치 개발

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Great Lakes Crystal Technologies*	• 기업소개 : 고품질 다이아몬드 기질과 그 위에 성장한 동위원소 정제(C-12 농축) 다이아몬드 에피층을 포함한 고성능 다이아몬드 재료 제품군 개발 • 주요제품 : 반도체용 다이아몬드 기판, 강화된 C-12 다이아몬드 에피웨이퍼(Epiwafer) • 홈페이지 : https://www.glcrystal.com • 주요시장 : 응용/서비스(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서) 서비스(제조), 실수요자
Honeywell*	• 기업소개 : 트랩 이온 기술 기반 양자컴퓨팅 솔루션 • 홈페이지 : https://www.honeywell.com
Hyperion Research	• 기업소개 : 기술, 상업, 정부 관점 아래 양자기술 개발 추적(양자컴퓨팅 수석 분석가) • 홈페이지 : https://www.hyperionres.com
IBM*	• 기업소개 : 종단 간 양자컴퓨팅 제공, 양자컴퓨터, 오픈 소스 양자컴퓨팅 SDK, 애플리케이션 연구 및 개발, 전문 개발자 인증 프로그램 등 양자컴퓨팅 교육 프로그램 제공 • 주요제품 : 양자컴퓨터, 양자컴퓨팅 애플리케이션, 양자 소프트웨어, 양자컴퓨터 기술 서비스 • 홈페이지 : https://www.ibm.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파), 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크), 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어
Improvising Careers	• 기업소개 : Inside Quantum Technology, Quantum London, Quantum • 주요제품 : Strategy Institute 등 양자 관련 조직. 워크숍 및 이벤트 진행 이벤트 주최, 중재 패널, 채용 워크숍 • 홈페이지 : https://www.improvisingcareers.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스 등), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터)
In-Q-Tel*	• 기업소개 : 미국 정보 커뮤니티 투자자 • 홈페이지 : https://www.iqt.org
INA Solutions	• 기업소개 : 양자기계학습 이용 고급 정보 기술 솔루션 제공 및 설계 • 주요제품 : 양자기계학습, 인공지능, 기계학습 • 홈페이지 : https://www.ina-solutions.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크), 응용/시스템, 소프트웨어, 하드웨어, End User
Inside Quantum Technology*	• 기업소개 : 출판, 이벤트, 분석 양자기술 비즈니스 서비스 • 주요제품 : 양자센서 시장 진화(2022~2031), 양자컴퓨팅 어플리케이션 등 시장 분석 자료 • 홈페이지 : https://www.nsidequantumtechnology.com
InterDigital	• 기업소개 : 차세대 무선 통신 시스템 및 AI 솔루션에 양자컴퓨터 사용 모색 • 홈페이지 : https://www.interdigital.com
IonQ*	• 기업소개 : 포착된 이온 양자컴퓨터 구축 및 양자컴퓨팅 스택(Stack)의 모든 측면에서 R&D 수행 • 주요제품 : IonQ Forte(완전한 소프트웨어 구성 가능 양자컴퓨터) • 홈페이지 : https://www.ionq.com
JTEC Consulting*	• 기업소개 : 양자자원 및 기술을 정보 커뮤니티 및 국방부로 도입하는 것에 중점을 둔 Intel 계약의 주계약자 • 주요제품 : 미국 국방부에 양자 도입 • 홈페이지 : https://www.jtec-consulting.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍), 서비스(컨설팅, 투자, 전문 서비스 등), 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정, 광원 및검출기, 광학/포토닉스, 레이저), 소프트웨어
Keysight*	• 기업소개 : 양자연구개발, 제조 및 배포로 구현 가능한 기술 및 고급 설계 및 검증 솔루션 제공, 양자컴퓨터를 100개 큐비트로 확장 가능한 큐비트 제어 솔루션 제공 • 주요제품 : 큐비트 제어 시스템, 네트워크/스펙트럼 분석기, EDA 소프트웨어, 광자 테스트 시스템 • 홈페이지 : https://www.keysight.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 레이저, 광원 및 검출기, 광학 및 포토닉스, 테스트 및 측정), 응용/서비스

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Ki3 Photonics	• 기업소개 : 양자신호처리, 양자통신, 얽힘광자의 소스, 광섬유 간섭계 시스템 등 에너지 효율이 좋은 포토닉시스템 제공, 광섬유 인프라를 활용해 양자신호의 생성, 조작, 배포 및 제어를 수행해 병렬/다채널 정보 처리 가능한 양자네트워크 준비 중 • 홈페이지 : https://www.ki3photonics.com • 주요시장 : 응용/서비스(통신/네트워크 등), 서비스(제조), 하드웨어(광원 및 검출기, 광학 및 포토닉스), 실수요자
L3Harris*	• 기업소개 : 고객의 어플리케이션 요구 사항을 해결하는 양자기술 식별 및 기술 통합 시스템 개발 • 주요제품 : 전자광학/적외선 주야간 감시 장비, 레이더, 통신 및 전자 정보, 첨단 항공전자, 통신, 음향, 자장 변화 탐지, 음향, 디스플레이 시스템, 시뮬레이터 • 홈페이지 : https://www.l3harris.com
Lake Shore Cryotronics*	• 기업소개 : 극저온 온도 센서 및 계측, 자기 측정기기, 차세대 양자물질 특성 분석 시스템 공급 • 주요제품 : UHV 광학 저온 유지 장치, 극저온 웨이퍼 프로브 스테이션, 양자재료 시험 시스템, 보정된 ULT 센서 • 홈페이지 : https://www.janis.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정, 진공), 서비스(연구, 싱크 탱크), 응용/시스템(센서), 소프트웨어
Lockheed Martin*	• 기업소개 : 계산, 고품질 솔루션, 민감한 측정, 넓은 채널 대역폭, 보안 통신 등 양자정보과학(QIS) 적용 • 주요제품 : 컴퓨팅, 감지, 통신 • 홈페이지 : https://www.lockheedmartin.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신, 네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍)
Marki Microwave*	• 기업소개 : RF 및 마이크로파 구성요소 공급 • 주요제품 : 증폭기, Balune, IQ 혼합기, 커플러(Coupler), 바이어스 티(Bias Tees), 배율기(Multiplier), 이퀄라이저(Equalizer) • 홈페이지 : https://www.markimicrowave.com
Microsemi FTS*	• 기업소개 : Icrochip Technology Inc.(Nasdaq: MCHP)의 출자 자회사, 통신, 방위, 보안, 항공우주 산업 시장을 위한 반도체 및 시스템 솔루션 포트폴리오 제공, 성능 및 방사선 강화 아날로그 혼합 신호 집적 회로, FPGA, SoC 및 ASIC 포함 • 주요제품 : 전원 관리, 음성 처리 장치, RF, 이더넷, 세계 표준을 설정하는 타이밍 및 동기화 장치, PoE(Power-over-Ethernet) IC 및 미드스팬 맞춤형 디자인 기능과 서비스 제공 엔터프라이즈 스토리지 및 통신 솔루션, 보안 기술 및 확장 가능, 변조 방지 제품 • 홈페이지 : https://www.microsemi.com
Microsoft*	• 기업소개 : 양자하드웨어, 제어, 소프트웨어, 개발 도구 등 컴퓨팅 Stack의 모든 계층에서 병렬 도입, 확장 가능하고 안정적인 양자컴퓨팅 실현에 도움이 되는 위상(Topology) 큐비트 개발 중, 양자 소프트웨어, 어플리케이션 개발 • 주요제품 : Azure Quantum • 홈페이지 : https://azure.microsoft.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터 등), 서비스, 실수요자, 소프트웨어
Minne Quantum*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 및 양자기술 발전을 전담하는 비영리 조직, 양자컴퓨팅 모임 주최 • 홈페이지 : https://www.minnequantum.org
Montana Instruments*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅, 양자네트워킹, 양자재료 연구, 양자교육을 위한 고정밀 전기, 광학, 극저온 제품 제조 • 주요제품 : CryoCore, CryoAdvance, Cryostation, 극저온/자기 광학 • 홈페이지 : https://www.montanainstruments.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 테스트/측정), 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서), 서비스(제조, 연구, 싱크 탱크), 실수요자
MPW	• 기업소개 : 레거시 기술과 아이디어가 활용됨에 따라 관련성이 높아지고 있는 애플리케이션에 영향 있는 Photonics 개발 • 주요제품 : Quantum 2.0, 포토닉스 • 홈페이지 : https://www.mpw-llc.com

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
NKT Photonics	• 기업소개 : 광섬유 및 레이저 기술 • 주요제품 : 초연속 백색광 레이저, 단일 주파수 레이저, Femtosecond 레이저, 광섬유 및 모듈 • 홈페이지 : https://www.nktphotonics.com
Northrop Grumman*	• 기업소개 : DoD/IC 임무 지원을 위한 QIS 기술 사용 관심, 양자정보과학(QIS) 기술 관련 R&D 수행 중 • 홈페이지 : https://www.northropgrumman.com
Novum-Industria	• 기업소개 : MIT(Massachusetts Institute of Technology) 플라즈마 과학 및 융합 센터에서 분사, 의료 응용(양성자 및 탄소 방사선 요법, PET 동위원소 생산), 보안 응용(특수 핵 물질 검출), 초고장/초소형/초전도 사이클로트론 가속기 개발 • 주요제품 : 저온/고온 초전도체 • 홈페이지 : https://www.novum-industria.com
NuCrypt*	• 기업소개 : 양자광자학을 위한 특수 실험실 장비 구축, 양자상태 단층 촬영 측정용 소프트웨어 개발 • 주요제품 : 얽힌 광자 소스, 분산 얽힘 측정, 편광 분석기, 상관 전자 장치, 안정화 지연 간섭계 • 홈페이지 : https://www.nucrypt.net • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(컨설팅), 하드웨어(전자기기, 광학/포토닉스. 마이크로파, RF, 광원/검출기), 소프트웨어, 실수요자
Ode, L3C	• 기업소개 : 양자계산화학을 위한 차세대 양자논리 전자 및 핵(QLEAN™) 제공, 양자과학, 기술 및 연구(qSTAR)를 통해 서비스 제공하는 사회적 기업, 비결정적 다항식 시간 경도 화학 문제 해결하는 알고리듬 개발
OEwaves*	• 기업소개 : 마이크로파 광자 제품 및 솔루션 제공, 상업 및 군사 시장을 위한 통신, 센서, 안정적인 클러킹, RADAR/LIDAR, 테스트 및 측정 시스템 지원 제품 제공 • 주요제품 : 레이저, 발진기, RF 테스트 및 측정 시스템, W-Band 초저위상 노이즈 분석기 • 홈페이지 : https://www.oewaves.com
Oxford Instruments	• 기업소개 : 물리학, 양자기술, 신소재, 장치 개발을 위한 장치 설계 및 공급, 극저온 및 고자기 환경 생성을 통한 원자 크기 관련 연구 지원 • 주요제품 : Proteox 시스템, TeslatronPT, Kelvinox 시스템, 습/건식 시스템 • 홈페이지 : https://www.nanoscience.oxinst.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 제조, 연구, 싱크 탱크), 하드웨어(극저온), 실수요자
PayPal	• 기업소개 : 기계 학습, 암호화, 통신 • 홈페이지 : paypal.com
Photodigm*	• 기업소개 : 분광학 인증 DBR(Distributed Bragg Reflector) 레이저 주요 공급업체 • 주요제품 : 분광학 인증 DBR 레이저, 레이저 설계 서비스, Gain chip • 홈페이지 : https://www.photodigm.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터, 센서, 타이밍), 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 서비스(제조)
Photon Spot*	• 기업소개 : 서브 켈빈 극저온 및 단일 광자 검출기 제조 • 주요제품 : 극저온, 검출기 • 홈페이지 : https://www.photonspot.com
Physical Sciences Corp.*	• 기업소개 : 양자센서(가속도계, 자이로스코프, 자력계) 및 양자통신(광자 소스 및 감지)의 발전과 사용을 위한 지원 기술(초고진공, 통합 포토닉스, 소형 원자 소스) 연구 및 개발 • 주요제품 : 계약 R&D • 홈페이지 : https://www.psicorp.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 센서 등), 하드웨어(광원/검출기, 광학/포토닉스, 진공), 서비스(컨설팅, 연구, 싱크 탱크)
Pivotport	• 기업소개 : 멘토링 및 양자 어플리케이션 개발 • 주요제품 : 양자/클라우드 엔지니어링, 오디오 엔지니어링, 맞춤형 키트 Guitar 시스템 • 홈페이지 : https://www.pivotport.com • 주요시장 : 소프트웨어, 서비스(컨설팅 등)

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
PQSecure Technologies*	• 기업소개 : 임베디드 및 IoT 어플리케이션 등 양자안전 암호화 솔루션 설계, 개발 및 구현 프로토콜 보안에 대한 양자위험 분석 • 주요제품 : PQC 하드웨어/소프트웨어 IP, 하이브리드 PQC 솔루션 • 홈페이지 : https://www.pqsecurity.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크), 실수요자
PsiQuantum*	• 기업소개 : 기후, 의료, 생명 과학, 에너지 분야 등의 문제 해결을 위한 양자컴퓨터 구축, 광자 및 전자칩, 양자아키텍처 및 내결함성, 패키징 및 제어 전자 장치, 극저온 시스템, 양자응용 프로그램 등 양자컴퓨팅 Stack 작업 중 • 주요제품 : 양자컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.psiquantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터)
Q-CTRL Federal	• 기업소개 : 양자제어 엔지니어링, 양자기술에서 최대 성능 추출에 중점 양자컴퓨팅, 양자감지, 양자지원 탐색 분야 R&D 프로그램 및 소프트웨어 개발 중, Berkeley Lab Advanced Quantum Testbed, Fermilab, NIST에 제공 • 주요제품 : 소프트웨어(Open Control, Black Opal, Boulder Opal, Fire Opal) • 홈페이지 : https://www.q-ctrl.com
Q-Sensorix*	• 기업소개 : 정확도와 전력 효율성이 높은 다이아몬드 기술 NV 센터 기반 마이크로칩 크기 자력계 온도, 양자 자이로스코프 개발 • 주요제품 : 자이로스코프, 자력계, 온도/스트레인 센서 • 홈페이지 : https://www.q-sensorix.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서), 실수요자
Qblox	• 기업소개 : 네덜란드 델프트 기반 양자기술 연구소 QuTech의 분사, 확장 가능하고 대기 시간이 짧은 큐비트 제어 장비 개발 추진 • 주요제품 : Quantify, 펄서(Pulsar), 클러스터, SPI 필터 • 홈페이지 : https://www.qblox.com
qBraid	• 기업소개 : 다양한 양자컴퓨팅 언어의 라이브러리를 변환 및 최적화, 모든 양자하드웨어에서 호환되며 양자알고리듬 개발 도구와 상호 운용할 수 있는 양자코드 작성 가능 클라우드 환경 제공 • 주요제품 : 양자컴퓨팅 • 홈페이지 : https://www.qbraid.com
QC Ware*	• 기업소개 : 양자 소프트웨어 및 서비스 공급업체, 양자컴퓨팅 하드웨어용 어플리케이션 개발, AFRL, Aisin, Airbus, BMW Group, Covestro, Goldman Sachs, Total에 서비스 제공 중 • 주요제품 : QC Ware Forge(양자컴퓨팅 클라우드 서비스) • 홈페이지 : https://www.qcware.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스)
QDevil	• 기업소개 : mK에서 실온까지 작동하는 보조 장비 및 특수 부품 개발 및 제조, Niels Bohr Institute(코펜하겐 대학)의 양자소자 센터와 제품 개발 중, 하버드 대학교와 코펜하겐 대학교의 연구 협력기반 Qfilter 개발 • 주요제품 : Qfilter, QDAC(24채널 초안정 저잡음 DAC), QBoard(고속 교환 칩 캐리어 시스템), 필터, Qbox(24채널 브레이크아웃 박스), 샘플 홀더, 마이크로 캐비티(Cavity), 게이트 제어 장치 • 홈페이지 : https://www.qdevil.com
QPRI*	• 홈페이지 : https://www.qprinstruments.com
Qrypt*	• 기업소개 : 정보 암호화 위해 양자 난수 생성기 사용 양자엔트로피 생성 양자보안 암호화 솔루션 개발 • 주요제품 : 엔트로피 생성, BLAST 알고리듬, Post-Quantum 암호화, Double Ratchet • 홈페이지 : https://www.qrypt.com
QuantCAD	• 기업소개 : 양자장치의 노이즈 문제 해결 가능한 서비스, 소프트웨어 설계 및 판매 • 주요제품 : 노이즈의 미시적 시뮬레이션 • 홈페이지 : https://www.quantcad.com

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Quantinuum*	• 기업소개 : Full Stack 기술을 통해 양자컴퓨팅 개발, Cambridge Quantum와 Honeywell Quantum Solutions 양사 합병 • 주요제품 : 양자강화 사이버보안, 양자컴퓨팅 하드웨어, 양자최적화 개발, 양자화학, AI • 홈페이지 : https://www.quantinuum.com
QuantOpticon	• 기업소개 : 양자광학 기술 개발, 양자광자 구성 요소 및 하위 시스템 개발을 자동으로 처리하는 프로토타이핑 플랫홈 구축 • 주요제품 : Cavity-QED/반도체 양자/ 2D 재료 시뮬레이션 소프트웨어 • 홈페이지 : https://www.quantopticon.co.uk • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터 등), 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 서비스(컨설팅, 연구, 싱크 탱크 등), 실수요자, 소프트웨어
QuantrolOX	• 기업소개 : 큐비트 조정, 안정화 및 최적화 등 양자기술을 위한 자동화된 기계 학습 기반 제어 소프트웨어 구축, 고체 상태 큐비트에 적용 가능한 소프트웨어 기술 개발 중 • 홈페이지 : https://www.quantrolox.com
Quantum Circuits*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 및 응용 프로그램 및 Full Stack 양자컴퓨팅 플랫폼 개발 및 공급, 양자솔루션을 위해 공용 클라우드 에코시스템 통해 접속할 수 있는 서비스 제공 • 주요제품 : 양자컴퓨팅 서비스 • 홈페이지 : https://www.quantumcircuits.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어, 서비스, 실수요자
Quantum Computing Report*	• 기업소개 : 양자기술과 관련된 뉴스 및 데이터 제공하는 시장 분석 회사 • 주요제품 : 뉴스, 분석, 컨설팅, 스코어 카드, 직업 목록 • 홈페이지 : https://www.quantumcomputingreport.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크)
Quantum Computing, Inc.*	• 기업소개 : 비양자 전문가들을 위해 양자컴퓨팅에 간단히 접속할 수 있는 고전 및 양자 소프트웨어인 Qatalyst 공급 • 주요제품 : Qatalyst • 홈페이지 : https://www.quantumcomputinginc.com • 주요시장 : 서비스 컨설팅, 전문 서비스, 소프트웨어, 실수요자
Quantum Microwave*	• 기업소개 : 마이크로파 및 밀리미터파 부품 공급 및 제조 • 주요제품 : 마이크로파, 밀리미터파 및 극저온 제품, 저소음 공장 제품 • 홈페이지 : https://www.quantummicrowave.com
Quantum Opus*	• 기업소개 : 극저온 실험을 위한 소형 초전도 나노와이어 시스템, 양자광학, 양자계산, 광자 결핍 광통신 등에 필요한 초전도 광자 계수 솔루션, 소형 저온 유지 장치, 극저온 전자 장치 공급, 950nm 또는 1550nm 근처 최대 검출 효율 위해 최적화된 표준 제품 제공 • 주요제품 : 고효율 UV-VIS-NIR 검출기, 극저온 전자기기, 원버트/소형 저온 유지 장치 • 홈페이지 : https://www.quantumopus.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서), 서비스(연구, 싱크 탱크), 하드웨어(극저온, 광원/검출기, 테스트/측정, 진공 등), 실수요자
Quantum Semiconductor*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 및 감지 응용 프로그램에 적합한 COMS 호환 가능 Group IV 초격자, CMOS 기반 이종접합 광다이오드 개발 • 주요제품 : CMOS 이미지 센서, LiDAR 광검출기, 광전자 특성, 광학/광자 수신기, 양자감지+컴퓨팅+통신, 양자 난수 생성 • 홈페이지 : https://www.quantumsemi.com
Quantum Technologies (Trilogy)	• 기업소개 : 양자기술을 활용해 양자 난수 생성기 적용 및 양자 키 분배 적용 예정 • 주요제품 : 양자앱, 인프라 보안, 양자 Trilogy 솔루션 • 홈페이지 : https://www.quantumtrilogy.com • 주요시장 : 응용/시스템, 소프트웨어, 서비스
Quantum Xchange*	• 기업소개 : 양자네트워크 출시, 양자 안전키 교환을 통해 데이터 보안을 쉽게 강화할 수 있는 최초 양자 안전키 배포 시스템 발명 • 주요제품 : 키 전달 시스템(Phio) • 홈페이지 : https://www.quantumxc.com

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Quantum1 Group*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅, 감지, 통신 등 광범위한 양자기술 산업에 투자 • 홈페이지 : https://www.quantum1.group
Quaxys	• 기업소개 : 반도체 큐비트(초전도, 스핀, 토폴로지 큐비트)를 연구하는 양자엔지니어 및 과학자를 위한 기술 기반 하드웨어 교육 제공 • 주요제품 : 초전도 큐비트를 위한 하드웨어 교육, RF 및 마이크로파 교육, 극저온 마이크로파 하드웨어, 실온 전자레인지 하드웨어, 양자인력 개발 • 홈페이지 : https://www.quaxys.com • 주요시장 : 하드웨어
Qubitekk*	• 기업소개 : 양자산업 지식 공유 • 주요제품 : 레이저 통합 얽힌 광자 소스, QKD 모델, 단일 광자 계수 모듈, 동시 계수계 • 홈페이지 : https://www.qubitekk.com
QuEra Computing*	• 기업소개 : 중성 원자 기반 양자컴퓨팅 제공 최적화, 시뮬레이션, 재료, 제약, 양자컴퓨터 등 확장 가능한 양자알고리듬 개발 및 공급 • 주요제품 : 양자컴퓨터, 양자알고리듬 • 홈페이지 : https://www.quera.com • • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터)
QuintessenceLabs	• 기업소개 : 사이버 보안, 키 관리 상호운용성 프로토콜을 준수하는 암호화 키 및 정책 관리 제품, 하드웨어 난수 생성기, 양자 키 분배 시스템 개발 및 자동을 포함하는 기타 암호화 솔루션 제공, 양자 사이버보안 제품 및 솔루션 제공 • 주요제품 : 양자 난수 생성기, 양자엔트로피 증강, 키 및 정책 관리자, KMIP 클라이언트 SDK, 솔루션, 양자 키 배포(qOptica), 일회용 패드 암호화 • 홈페이지 : https://www.quintessencelabs.com
QunaSys	• 기업소개 : 알고리듬 개발을 통해 양자컴퓨팅의 잠재력을 최대한 발휘할 수 있는 기술 구축 • 주요제품 : 화학을 위한 양자컴퓨터 클라우드 서비스, 양자컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.qunasys.com
Qunnect	• 기업소개 : 통신 인프라를 확장 가능한 양자네트워크로 전환하기 위한 하드웨어 구축 • 주요제품 : 양자메모리, 양자얽힘소스, 양자가능장치 • 홈페이지 : www.qunnect.inc • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 하드웨어(광원/검출기, 광학/포토닉스, 테스트/측정 등), 서비스(제조)
RaytheonBBN*	• 기업소개 : 전담 Quantum 과학자팀 보유, 양자암호로 보호되는 매트로 네트워크 제공 • 홈페이지 : rtx.com
Rigetti Computing*	• 기업소개 : 양자컴퓨터와 이를 구동하는 초전도 양자프로세서를 구축하는 통합 시스템, 양자클라우드 서비스 플랫폼(기계를 공용, 사설, 하이브리드 클라우드에 통합 가능), 양자파운드리 서비스(공정 설계 키트 제조용), 초전도 양자집적회로 설계 레이아웃 • 주요제품 : 양자클라우드 서비스, 양자파운드리 서비스 • 홈페이지 : https://www.rigetti.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터)
Riverlane	• 기업소개 : 오류 수정 양자컴퓨터를 위한 초저지연 운영, 체제인 Deltaflow.OS 구축, 양자-고전 하이브리드 알고리듬 가속화, 하드웨어 R&D 촉진, 다양한 큐비트 기술에 이식 가능 • 주요제품 : 양자운영 시스템 • 홈페이지 : https://www.riverlane.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어, 실수요자
Rydberg Technologies*	• 기업소개 : 차세대 감지, 측정, 이미징 솔루션을 위한 양자기술 연구개발 개발, 무선 주파수, 마이크로/밀리미터파, 테라헤르츠 전기장용 양자센서를 위한 원자 증기 셀, 다양한 솔루션을 제공할 수 있는 양자RF감지 기술, EMC 테스트, 계측, RF 회로 설계 • 주요제품 : 원자 증기 셀, 광학 주파수 트래커, Rydberg RF 장 프로브, 원자 RF 측정 서비스 • 홈페이지 : https://www.rydbergtechnologies.com

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Safe Quantum	• 기업소개 : 양자안전 엔터티가 되기 위한 전략, 스트레스 테스트 및 문제 해결 크립토 애자일 전략, 개념 증명 데모 설계 • 주요제품 : 시장 진입 및 퇴출 전략, 기술 및 사업 계획, 서비스로서의 기업가, 전문가 증인 서비스 • 홈페이지 : https://www.safequantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 서비스(투자, 법률, 컨설팅, 전문 서비스)
Scout Ventures*	• 기업소개 : 보안 응용 프로그램 딥 테크 투자자 • 주요제품 : 양자통신 컴퓨팅과 암호화 • 홈페이지 : https://www.scout.vc • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터), 서비스(투자)
Seeqc*	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 • 주요제품 : 양자컴퓨팅, 확장성 • 홈페이지 : https://www.seeqc.com
Sivananthan Laboratories*	• 기업소개 : 스마트 국가 안보, 산업 모니터링, 공중 보건 및 재생 에너지용 외선 센서 • 주요제품 : 지능형 적외선 센서 및 이미저 • 홈페이지 : https://www.sivananthanlabs.us
SNASurvey	• 기업소개 : 소프트웨어 개발, 양자기술, 조직 역학, 중국 상거래 등 비즈니스 및 컴퓨팅 영역 비즈니스 및 관리 자문 서비스 제공
SRI International*	• 기업소개 : QED-C 관리하는 미국 비영리 연구 기관 • 주요제품 : 소프트웨어, 인공지능 • 홈페이지 : https://www.sri.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서), 하드웨어(광학/포토닉스, 테스트/측정 등), 서비스(컨설팅 등), 소프트웨어
Stable Lasers*	• 기업소개 주파수 안정화 레이저용 부품 및 시스템 공급, 저주파 드리프트 내재 완전 통합형 경량 이동식 랙마운트 시스템 설계 • 주요제품 : 완전 시스템, Fabry-Perot 캐비티, 특수 하우징, 캐비티 하우징, 저잡음 레이저 주파수 전자 모듈 • 홈페이지 : https://www.tablelasers.com
StratCon-Global*	• 기업소개 : 양자기술 평가 • 홈페이지 : https://www.stratconglobal.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크 등), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 투자, 전문 서비스 등), 하드웨어, 실수요자
Strategic-QC*	• 기업소개 : 양자 중심의 채용 및 전문 서비스 • 홈페이지 : https://www.strategicqc.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅)
Sumitomo (SHI) Cryogenics*	• 기업소개 : 극저온 장비 제조, 2002년 IGC-APD Cryogenics, Inc. 인수 • 주요제품 : 압축기, 크라이오 쿨러, 크라이오 펌프 • 홈페이지 : https://www.shicryogenics.com
Swain Techs	• 기업소개 : 의료 IT, 자동화, 소프트웨어/시스템 엔지니어링 분야 기술 솔루션 제공, 모건주립대학교와 인공지능, 양자컴퓨팅 및 블록체인 연구개발, National Quantum Literacy Network 일원 • 주요제품 : 인공지능, 기계 학습, 사이버 보안 • 홈페이지 : https://www.swaintechs.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터 등), 서비스(컨설팅, 전문 서비스), 소프트웨어, 실수요자
Tektronix	• 기업소개 : 테스트 및 측정 솔루션을 설계 및 제조 • 주요제품 : 오실로스코프 및 프로브, 분석기, Keithley 제품, 신호 발생기, 소스 및 공급 장치, 반도체 테스트 시스템, 소프트웨어 • 홈페이지 : https://www.tek.com
Terranet Ventures*	• 기업소개 : 사이버 보안 서비스 제공, 양자컴퓨팅 응용 프로그램 관련 기술 투자 • 홈페이지 : https://www.terranetventures.com

* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
The Quantum Insider	• 기업소개 : 양자기술에 관한 뉴스와 데이터 및 주요 이해 관계자 연결 및 시장 정보 제공 • 주요제품 : 양자시장 인텔리전스, 양자데이터, 양자뉴스, 양자연구, 양자컨설팅/마케팅, 양자콘텐츠 • 홈페이지 : https://www.thequantuminsider.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅 등)
Thorlabs	• 기업소개 : 구성요소, 기기 및 시스템 기반 포토닉스 제조, 상관된 광자쌍 소스는 양자광학 응용 프로그램에 사용하도록 설계, NPL 펄스 레이저 제품군(단일 광자 소스 개발), 350~1100nm 소형 단일 광자 감지 모듈(테스트 및 측정 애플리케이션용) • 주요제품 : 단일 광자 감지 모듈, 나노초 펄스 레이저, 다이오드 시스템 • 홈페이지 : https://www.thorlabs.com • 주요시장 : 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스, 테스트/측정), 응용/시스템, 실수요자
TOPTICA-USA*	• 기업소개 : 레이저 솔루션 제공, 양자응용을 위한 고급 레이저 개발, 실제 응용 프로그램으로 양자기술 전환 • 주요제품 : 레이저 랙 시스템, 주파수 빗, 파장 미터, 가변 다이오드 레이저, 레이저 제어 및 잠금 전자 장치 • 홈페이지 : https://www.toptica-usa.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터, 센서, 타이밍), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 제조), 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 레이저, 테스트/측정), 실수요자
Toshiba Corp	• 기업소개 : 양자암호화용 제품 및 통신 제품 출시 예정
Triton Systems	• 기업소개 : 글로벌 비즈니스 벤처기업 • 주요시장 : 음향, 인공지능, 엔지니어링 재료, 로봇 공학 및 변조 방지, 파괴적 기술 및 재료 설계 • 홈페이지 : https://www.tritonsystems.com
Universities Space Research Association*	• 기업소개 : NASA 요청으로 1969년 설립된 비영리 민간 기업 100개 이상 대학, 정부, 기타 기관과 효과적으로 협력해 우주 과학 및 기술 발전 및 교육 촉진 프로그램 운영, 2012년부터 양자컴퓨팅 이론, 알고리듬, 벤치마킹 기술 등 보유 • 홈페이지 : https://riacs.usra.edu/quantum
US Advanced Computing Infrastructure Inc.*	• 기업소개 : 양자어닐링 적용, 양자컴퓨팅 사용 비즈니스 컨설팅, 소프트웨어 통해 솔루션 제공, 투자 고문, 미국 주식 포트폴리오 식별 • 주요제품 : 시카고 퀀텀 넷 스코어, 양자프로젝트 서비스, 포트폴리오 최적화 솔루션, 양자전략 워크숍 • 홈페이지 : https://www.chicagoquantum.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터 등), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스)
Verizon	• 기업소개 : 네트워크에 양자기술 사용 보안, 네트워킹 및 통신과 관련 연구 • 홈페이지 : https://www.verizon.com
Vescent Photonics*	• 기업소개 : 양자가능 레이저 기술 제조 및 판매, 연구/개발 가속화를 위한 사용 용이성 및 배포된 시스템을 위한 견고한 턴키 작동용 설계 • 주요제품 : 전개 가능한 광 주파수 빗, 레이저 잠금 상자, 원자 포획/냉각 레이저, 레이저 전류 컨트롤러, 오프셋 위상 잠금 서보(Servo) • 홈페이지 : https://www.vescent.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파, 레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 응용/시스템(타이밍), 실수요자
Wells Fargo*	• 기업소개 : 양자얽힘, 양자센서, 양자통신/보안, 및 양자컴퓨팅 등 양자기술 연구 및 개발 • 주요제품 : 양자안전금융 환경 • 홈페이지 : https://www.wellsfargo.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 양자컴퓨터), 하드웨어(레이저, 광원/검출기, 광학/포토닉스), 서비스(투자, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크), 소프트웨어, 실수요자
Xairos*	• 기업소개 : GPS 타이밍 대체용 글로벌 타이밍 서비스 구축 • 주요제품 : 양자시계 동기화, PNT, 우주 기반 양자통신 • 홈페이지 : https://www.xairos.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크)
Xanadu	• 기업소개 : 양자컴퓨터 구축 • 주요제품 : 양자클라우드, 포토닉스, PennyLane • 홈페이지 : https://www.xanadu.ai

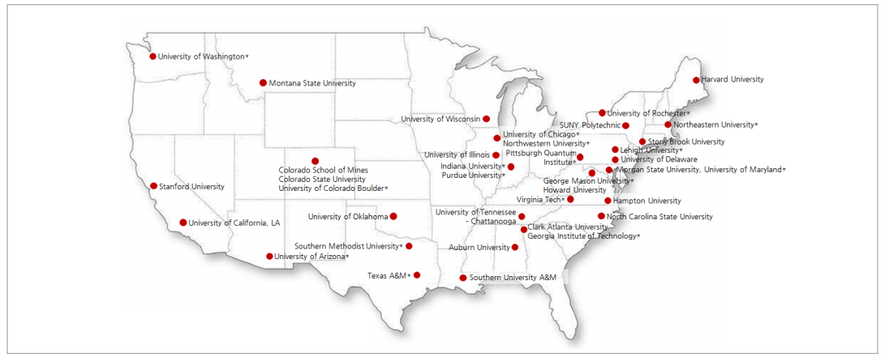
* 후원금 지원 (94개 기업)

업체명	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
XMA Corp*	• 기업소개 : 극저온 제품 라인 설계 및 배포, 최첨단 열화 방법 비초전도성 재료에 관심, 자체 저항 칩 제조 기능 맞춤형 설계 • 주요제품 : 고밀도 감쇠기 블록, DC-65GHz 종단, IR 필터, SMP 및 SMPM 감쇠기, SMA, Tefline 어댑터 • 홈페이지 : https://www.xmacorp.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기, RF, 마이크로파, 테스트/측정), 응용/시스템(양자컴퓨터 등), 서비스(제조, 연구, 싱크 탱크), 실수요자
Young, Basile, Hanlon & MacFarlane*	• 기업소개 : 지적 재산 관리 서비스 제공 • 주요제품 : 특허 포트폴리오 관리, 지식재산 컨설팅 • 홈페이지 : https://www.youngbasile.com • 주요시장 : 서비스(법률)
Zapata Computing*	• 기업소개 : 복잡한 계산 문제를 해결하기 위한 양자 소프트웨어 플랫폼 Orquestra® 개발, 양자-고전 Stack 통합 및 자동화로 화학, 금융, 물류, 제약, 엔지니어링 및 재료 문제 해결 • 주요제품 : Orquestra, 양자워크숍 • 홈페이지 : https://www.zapatacomputing.com • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터 등), 소프트웨어, 서비스(컨설팅, 전문 서비스, 연구, 싱크 탱크), 실수요자
Zettaflops*	• 기업소개 : 고급 컴퓨팅 아이디어를 위한 리소스 제고 (2007년 워크숍 이후 활동하지 않음) • 주요제품 : Petaflops 슈퍼컴퓨터 • 홈페이지 : https://www.zettaflops.org
Zyvex Labs*	• 기업소개 : 주사 터널링 현미경(STM) 기반 수소 탈패시베이션, 리소그래피 및 관련 패턴 전사 기술 개발, 양자컴퓨팅 백플레인에 사용할 수 있는 극저온 작동 고성능, 저잡음 아날로그 장치 탐구 • 주요제품 : ZyVector STM 컨트롤러 사용 기관 : 메릴랜드 대학교, 샌디아 국립 연구소, 일리노이 대학교, 뉴사우스웨일즈 대학교, 칼리지 런던 대학교 원자 정밀 리소그래피, 패턴 전사, 제작 서비스, 나노 포지셔닝 기술, ZyVector STM 컨트롤러 • 홈페이지 : https://www.zyvexlabs.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기, RF, 마이크로파 등), 서비스(제조)

※ https://quantumconsortium.org

QED-C 회원으로 가입한 대학교는 [그림 V-1-9]에 표시한 것처럼, 미국 전역에 걸쳐 37개이며 주로 동부에 분포하고 있다. 서부는 워싱턴 대학교, 스탠퍼드 대학교, 캘리포니아 대학교, UCLA만 가입하고 있다. 클락애틀랜타 대학교, 모간주립 대학교, 노스이스턴 대학교, 남부감리교 대학교, 서던 대학교 A&M, SUNY 폴리테크닉, 애리조나 대학교, 테네시 대학교, Chattanooga는 양자연구를 수행하는 학과나 연구 센터가 확인되지 않으며, 양자분야 강의 제공, 개별적인 연구, 타 대학교의 양자연구그룹이나 센터의 참여 교수로 활동하는 것으로 확인되고 있다.

그림 Ⅴ-1-9 QED-C 참여 대학교



〈표 Ⅴ-1-2〉는 회원 대학교명과 대표하는 교내 양자분야 연구 센터 또는 실험실 명칭과 홈페이지를 보여준다.

표 Ⅴ-1-2 QED-C 회원 대학교 내 양자 관련 기관

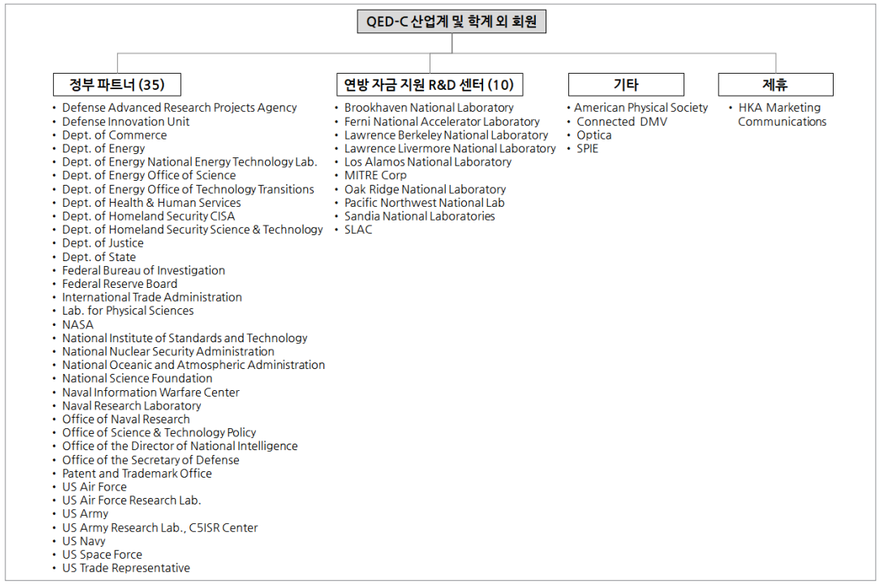
대학교명	양자연구 관련 학과 및 연구소
오번 대학교 (Auburn University)	• 관련조직 : 오번대학교 양자시스템(AUQuaS) : 화학공학과, 화학 및 생화학과, 물리학과, 전자 및 컴퓨터 공학과, 수학 및 통계학과, 재료공학과 및 컴퓨터 과학 및 소프트웨어 공학과 14명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantum.auburn.edu
클락애틀랜타 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 소개 별도로 없음 • 홈페이지 : https://www.cau.edu(Clark Atlanta University)
콜로라도 스쿨 오브 마인 (Colorado School of Mines)	• 관련조직 : Technology's Quantum Leap Mines Quantum Engineering Program 운영 및 야금재료공학과, 전자공학과, 물리학과, 응용 수학 및 통계학과 17명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantum.mines.edu
콜라라도 주립 대학교	• 관련조직 : 물리학 및 컴퓨터 과학과 양자분야 교수 일부 소개 • 홈페이지 : https://www.colostate.edu(Colorado State University)
조지 메이슨 대학교 (George Mason University)	• 관련조직 : Quantum Science and Engineering Center : 컴퓨터 과학과, 전자 및 컴퓨터 공학과, 물리학과, 수학과, 물리학 및 천문학과, 기계공학과 등 15명 교수 참여 • 홈페이지 : https://qsec.gmu.edu
조지아 공과 대학교 (Georgia Institute of Technology)	• 관련조직 : Georgia Tech Quantum Institute : 갇힌 이온 물리학 조사, 미세 가공된 이온 트랩 개발, 양자아키텍처 모델링 및 원자 기반 센서 개발 연구 추진 • 홈페이지 : https://gtqi.gatech.edu
햄프턴 대학교	• 관련조직 : IBM-HBCU Quantum Center : 2020년 9월 25일 IBM 1억 투자 • 홈페이지 : https://www.hamptonu.edu(Hampton University)
하버드 대학교 (Harvard University)	• 관련조직 : Harvard Quantum Initiative : 물리학과, 응용 물리학과, 컴퓨터 과학과, 재료 과학과, 전자 공학과, 화학과, 응용 수학과, 수학과, 화학 생물학과, 에너지학과 43명 교수 소속 • 홈페이지 : https://quantum.harvard.edu
하워드 대학교	• 관련조직 : IBM-HBCU Quantum Center • 홈페이지 : https://www.howard.edu(Howard University)
인디애나 대학교 (Indiana University)	• 관련조직 : Quantum Science and Engineering Center : 양자계산, 양자암호화, 보안 통신 및 고정밀 측정 및 물리학과, 수학과, 화학과, 컴퓨팅 및 공학과, 심리학 및 뇌과학과, 지능 시스템 공학과 25명 교수 참여 • 홈페이지 : qsec.sitehost.iu.edu
리하이 대학교 (Lehigh University)	• 관련조직 : Quantum Computing and Optimization Lab : 복잡한 최적화 문제를 해결하기 위한 새로운 양자컴퓨팅 방법론 개발 • 홈페이지 : https://quantum-computing.lehigh.edu
몬타나주립 대학교 (Montana State University)	• 관련조직 : 광학 및 양자시스템(물리학과) : 공중 부양 광역학, 양자물질 및 나노 광학, 신호 처리, 메모리 및 레이저를 위한 초안정 레이저 및 재료, RF 포토닉스, 초고속 비선형 광학 및 홀로그래피에 관한 연구 • 홈페이지 : https://physics.montana.edu
모간주립 대학교	• 양자 관련 학과 및 연구자 소개 별도로 없음 • 홈페이지 : https://www.morgan.edu(Morgan State University)
노스캐롤라이나 주립 대학교 (North Carolina State University)	• 관련조직 : IBM Quantum Hub at NC State : 화학과, 컴퓨터 과학과, 전자 및 컴퓨터 공학과, 수학과, 물리학과 참여 • 홈페이지 : https://quantum.ncsu.edu
노스이스턴 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.northeastern.edu(Northeastern University)
노스웨스턴 대학교 (Northwestern University)	• 관련조직 : Initiative at Northwestern for Quantum Information Research and Engineering : 물리학과, 천문학과, 재료공학과, 화학과, 전자공학 및 컴퓨터 공학과 40여 명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantum.northwestern.edu
피츠버그 양자협회 (Pittsburgh Quantum Institute)	• 관련조직 : 피츠버그 지역 양자분야 연구 통합 조직 : 피츠버그 대학교(University of Pittsburgh), 카네기 멜런 대학교(Carnegie Mellon University), 듀케인 대학교(Duquesne University)의 물리학, 화학, 공학, 컴퓨터 과학, 비즈니스 및 과학 철학 분야 소속 100여 명 교수 참여 • 홈페이지 : https://www.pqi.org
퍼듀 대학교 (Purdue University)	• 관련조직 : - Purdue Quantum Science and Engineering Institute : 단일 원자/분자 규모의 물질-물질 및 빛-물질 간 상호작용, 초저온 원자, 다물질 역학, 원자 앙상블의 간섭의 일시적인 효과, 고체 상태 양자장치, 양자 나노포토닉스 등 53명 교수 참여 - Birck Nanotechnology Center : 양자특성 확인 가능 실험실 - 물리학부 : 헬륨 재포획 및 액화 가능 시스템 보유 • 홈페이지 : https://www.purdue.edu/discoverypark/quantum
남부 감리교 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.smu.edu(Southern Methodist University)
서던 대학교 A&M	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.subr.edu(Southern University A&M)
스탠퍼드 대학교 (Stanford University)	• 관련조직 : Stanford Quantum Computing Association : 교수진 16명 및 SystemX Alliance, Quantum Science and Engineering, QC ware, Moonshot Factory, Rigetti, Microsoft, IPB, Google, 및 qBraid과 협력 관계 유지 • 홈페이지 : https://qc.stanford.edu
스토니 브룩 대학교 (Stony Brook University)	• 관련조직 : SUNY Center of Quantum Information Science at Long Island : 양자통신 분야 연구 집중, 물리학과 및 컴퓨터 과학과 8명 교수 참여 • 홈페이지 : https://stonybrook.edu/cqis
SUNY 폴리테크닉	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.sunypoly.edu(SUNY Polytechnic)
텍사스 A&M 대학교 (Texas A&M)	• 관련조직 : Institute For Quantum Science & Engineering : 양자광학 및 포토닉스에 기반 연구 • 홈페이지 : https://iqse.tamu.edu
아리조나 대학교	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.arizona.edu(University of Arizona)
캘리포니아 대학교, LA (University of California-LA)	• 관련조직 : UCLA Center for Quantum Science and Engineering : NRT AIF-Q 교육 제공, 물리천문학부, 전자컴퓨터공학부, 화학과, 화학 및 생화학과, 토목환경공학과, 수학과, 신소재 공학과 24명 교수 참여 • 홈페이지 : https://cqse.ucla.edu

대학교명	양자연구 관련 학과 및 연구소
시카고 대학교 (University of Chicago)	• 관련조직 : Chicago Quantum Exchange : 양자정보과학 관련 교육 및 공동 연구 수행을 위해 연구자자와 기관 연결 • 홈페이지 : http://www.chicagoquantum.org
	• 관련조직 : Quantum Engineering : 분자공학부 40명 이상의 교수진 참여 양자중첩 및 얽힘 이용 변형 기술 개발 • 홈페이지 : https://pme.uchicago.edu/themes/quantum-engineering
	• 관련조직 : Quantum Information Science and Engineering Network(QISE-NET) : 시카고 대학교와 하버드 대학교가 공동 운영 및 교육 프로그램 운영 • 홈페이지 : http://qisenet.uchicago.edu
	• 관련조직 : James Franck Institute : 재료 과학, 응집 물질 물리학, 물리 화학, 원자, 분자 및 광학(AMO) 물리학이 교차하는 분야 연구 수행 • 홈페이지 : http://jfi.uchicago.edu
콜로라도 볼더 대학교 (University of Colorado Boulder)	• 관련조직 : CUbit Quantum Initiative : 학제 간 연구 및 교육 수행 • 홈페이지 : http://www.colorado.edu/initiative/cubit
콜로라도 볼더 대학교 (University of Colorado Boulder)	• 관련조직 : A Joint Institute of UC Boulder and NIST(JILA) : 콜로라도 볼더 대학교와 NIST의 공동 연구소로 설립, 노벨상 수상자인 Eric Cornell과 John Hall을 포함한 물리학과 35명 교수 참여 • 홈페이지 : http://jila.colorado.edu/research/quantum-information-science-technology
	• 관련조직 : Quantum Engineering Initiative : 2021년 설립된 큐비트 양자 이니셔티브 • 홈페이지 : http://www.colorado.edu/engineering/quantum-engineering-initiative
델라웨어 대학교 (University of Delaware)	• 관련조직 : Quantum Science and Engineering : 큐비트 제어 가능 기계 제작 방법, 큐비트 연산 변환 가능 프로그래밍 또는 기계 언어 개발을 위해 약 35명 교수 참여 • 홈페이지 : https://qse.udel.edu
일리노이 대학교 (University of Illinois)	• 관련조직 : Illinois Quantum Information Science and Technology Center(IQUIST) : 항공우주 공학, 화학, 컴퓨터 과학, 전자 및 컴퓨터 공학, 재료 과학 및 공학, 수학, 기계 과학 및 공학, 철학, 물리학 분야 65명 교수 참여, Chicago Quantum Exchange 회원 • 홈페이지 : https://iquist.illinois.edu
메릴랜드 대학교 (University of Maryland)	• 관련조직 : Quantum at Maryland : 양자컴퓨터, 초 보안 양자네트워킹 및 양자물질 연구 관련 200여 명의 과학자 및 엔지니어 참여, NIST, Lockheed Martin, IonQ 등과 공동 연구 협력, Mid-Atlantic Quantum Alliance와 협력 • 홈페이지 : https://quantum.umd.edu
오클라호마 대학교 (University of Oklahoma)	• 관련조직 : Center for Quantum Research and Technology : 양자센싱, 양자정보, 합성 상관 양자시스템 및 양자재료 분야 연구를 위해 원자, 분자 및 광학 물리학과와 응집 물질 물리학과 교수 15명 참여 • 홈페이지 : https://www.ou.edu/cqrt
로체스터 대학교 (University of Rochester)	• 관련조직 : Quantum Information and Technology : 전자 사이에 양자역학적 상호작용 생성 방법 탐구를 위해 15명의 교수 참여 • 홈페이지 : https://www.rochester.edu/ccqo/quantum
테네시 대학교-Chattanooga	• 관련조직 : 양자 관련 학과 및 연구자 통합 관리 없음 • 홈페이지 : https://www.utk.edu(University of Tennessee-Chattanooga)
워싱턴 대학교 (University of Washington)	• 관련조직 : UW QuantumX : 양자응용 및 기초 연구 수행을 위해 물리학과 17명 교수 참여 • 홈페이지 : https://quantumx.washington.edu
위스콘신 대학교 (University of Wisconsin)	• 관련조직 : Wisconsin Quantum Institute : 양자센서, 양재재료, 양자컴퓨팅 및 네트워킹 연구를 위한 26명의 교수 참여 • 홈페이지 : https://wqi.wisc.edu
버지니아 공과 대학교 (Virginia Tech)	• 관련조직 : Quantum Information Science and Engineering : 양자역학을 실제 응용 분야에 적용하기 위한 연구를 위해 31명 교수 참여 • 홈페이지 : https://provost.vt.edu/destination_areas/qise.html

※ https://quantumconsortium.org

[그림 V-1-10]은 QED-C 회원으로 가입한 연방 자금 지원 R&D 센터(Federally Funded R&D Center) 및 해당 관리자 10개 기관, 정부 파트너 35개 기관, 1곳의 제휴기관, 전문 학회 4곳 등 총 50개 기관을 보여준다. 이는 양자기술 및 상업화를 추진하고 있는 다른 여러 나라와 비교해도 매우 큰 규모로, 미국이 양자기술 분야에 상당한 관심이 있음을 보여주는 일례라고 할 수 있다.

그림 V-1-10 QED-C 정부 파트너 및 연방 자금 지원 R&D 센터 회원



• 브룩헤이븐 국립연구소(Brookhaven National Laboratory, BNL):[6]

스토니브룩 대학교와 함께 양자인터넷의 비전을 현실로 구현해 안전한 온라인 통신이 가능하도록 협력하고 있다. 약 158km에 걸쳐 두 기관을 연결하는 미국에서 가장 긴 양자네트워크를 구축했는데, 최종 목표인 연구소와 뉴욕시를 연결하기 위해 양자중계기 프로토타입을 개발하고 있다.

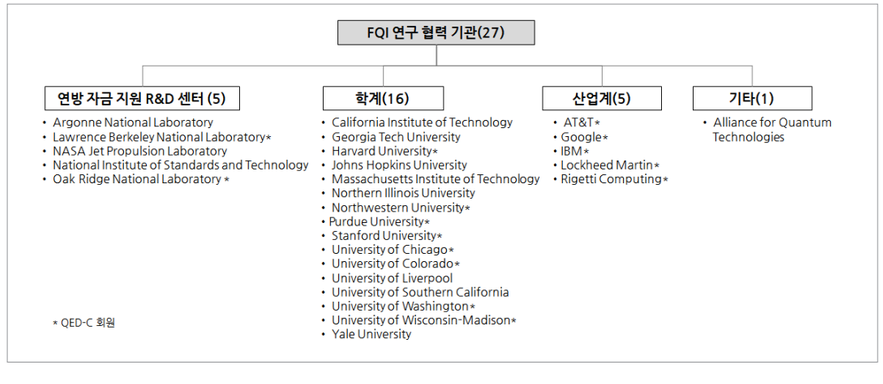
• 페르미 국립가속기연구소(Fermi National Accelerator Laboratory, Fermilab):[7]

Fermilab 양자연구소(Fermilab Quantum Institute, FQI)는 고에너지 물리학 응용 프로그램을 발전시키면서 양자정보과학 연구 및 개발을 추구하고 있다. 이를 위해 새로운 양자기능을 활용하고 자기장의 크기 및 방향 정밀 측정, 위상 변이 측정, 원자시계 앙상블과 같은 애플리케이션을 배포하기 위

6) https://bnl.gov/science/quantum.php
7) https://quantum.fnal.gov

해 노력 중이다. FQI는 양자컴퓨팅과 양자과학 및 기술의 미래를 발전시키고 형성하기 위해 학술 기관, 산업계 및 국립 연구소를 포함한 27개 다른 조직과 관계를 맺고 양자정보, 포토닉스, 재료 과학 등에 대해서 협업을 진행하고 있다. 협력관계를 유지하고 있는 기관은 [그림 V-1-11]과 같으며, 일부 기관은 QED-C 회원으로 동시에 등록되어 있다.

그림 V-1-11 페르미 국립연구소 양자연구소 협력 기관

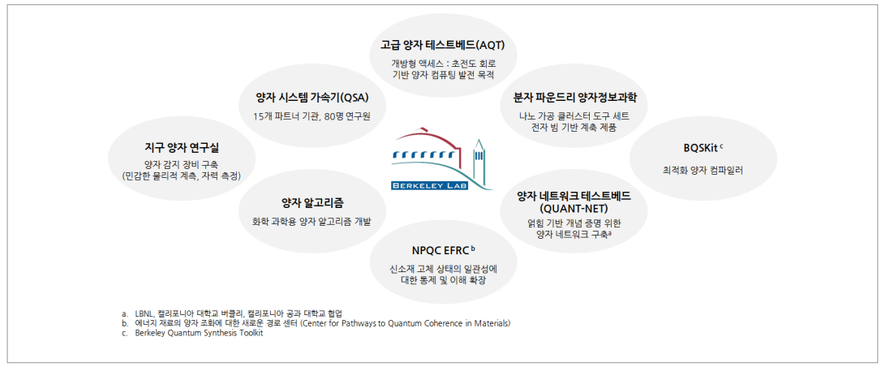


• 로렌스버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL):[8]

[그림 V-1-12]에서처럼 LBNL의 다양한 연구 센터는 QuantISED 퀘스트(암흑 물질 입자 측정 센서 개발), 양자재료(강한 상관관계가 있는 물질에 빛을 비추어 그 속성 조사), ALS(새로운 합성 물질과 그 전자, 스핀, 화학적, 물리적 특성 개발 및 이해), 대규모 큐비트 통합 및 광자 변환을 위한 초전도 구조(마이크로파 광자와 고체 물질 간 변환, 초전도 필름/인터페이스의 얽힘 생성 및 특성 향상), NERSC(Perlmutter 사용 양자정보과학 장치 및 기술 개발), 및 양자변환 향상을 위한 AI 지원 제어(광신호를 양자연결로 변환하는 효율성 향상) 등을 연구하고 있다.

8) https://quantum.lbl.gov/

그림 V-1-12 로렌스 버클리 국립 연구소 양자기술 관련 연구 그룹



a. LBNL, 캘리포니아 대학교 버클리, 캘리포니아 공과 대학교 협업
b. 에너지 재료의 양자 코히어 대한 새로운 경로 센터 (Center for Pathways to Quantum Coherence in Materials)
c. Berkeley Quantum Synthesis Toolkit

• 로렌스 리버모어 국립연구소(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL):[9]

LLNL은 차세대 양자컴퓨팅 및 감지시스템의 개발을 가능하게 할 새로운 솔루션을 모색하고 있다. 솔루션으로 양자특성을 가진 물질의 합성 및 특성화, 양자시스템에서 잡음 및 결맞음의 근원에 대한 근본적인 이해 및 제어 개발, 양자 및 고전 제어, 센싱 및 컴퓨팅 요소 간의 인터페이스에 대해 고려하고 있다.

• 로스 알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory, LANL):[10]

2005년에 연구 센터로 설립된 LANL 양자연구소(Quantum Institute)는 1998년에 핵자기 공명 기술을 사용해 트리클로로에틸렌(Trichloroethene) 분자 내에 액체 기반 양자컴퓨터의 프로토타입을 만들었고 이를 발전시켜 고체 장치로서 양자컴퓨터를 구성하기 위해 호주 뉴사우스웨일스 대학교, 캘리포니아 공과대학교, 메릴랜드 대학교 등과 고체 매트릭스 또는 격자의 개별 원자를 조작할 수 있는 기술을 탐구하고 있다. 1999년에 약 50km 길이의 광섬유를 통해 양자키를 보내는 것에 성공한 후, 약 16km의 거리에서 공기를 통해 정보를 전송하기 위해 편광된 광자를 사용하는 이동 가능한 독립형 자유 공간 양자암호화 시스템을 개발했다. 이 시스템은 신속하게 설치할 수 있고, 시간대와 상관없이 전송이 가능한 것으로 알려져 있다. 현재 위성과 지상국 사이의 수백 km 거리에 양자키를 전송하기 위해, 지구 궤도 위성에 탑재할 수 있는 더 작은 크기의 시스템을 개발하고 있다.

9) https://quantum.llnl.gov
10) https://quantum.lanl.gov

• MITRE Corp.:

비영리 운영 기관이며 20년 이상 양자연구 프로그램을 진행해 온 MITRE의 양자정보과학 그룹(MITRE Quantum Information Science Group)[11]은 고해상도를 유지하면서도 센서의 하드웨어 크기와 무게를 크게 줄여줄 가능성을 발견했다. 한편 매사추세츠 공과 대학교 Dirk Englund 교수 및 샌디아 국립연구소 Matt Eichenfield 박사 등 전문가가 포함된 MITRE 양자 Moonshot[12]팀의 리더인 Gerald Gilbert 박사는 극저온에서 세계 최초의 고속 프로그래밍 가능 광자플랫폼 달성을 공식적으로 알렸다.

• 오크리지 국립연구소 (Oak Ridge National Laboratory, ORNL):[13]

양자컴퓨팅 연구소(Quantum Computing Institute)는 소재 제조 및 특성화, 고성능 컴퓨팅, 전기 시스템 및 센서에 대한 뛰어난 ORNL의 보유 기술을 활용해 CMOS 기술을 뛰어넘기 위한 아이디어와 플랫폼 개발, 전산공학부 양자정보과학 섹션(Computational Sciences and Engineering Division Quantum Information Science Section)[14]은 에너지, 보안 및 과학적 발견에 대한 미국의 우선순위를 해결, 양자통신 및 네트워킹 그룹은 양자 키 배포 기술 개발을 통해 미국 주요 인프라의 사이버 보안을 개선, 양자전산과학 그룹은 양자프로세서를 활용할 수 있는 고급 도구 및 기술 연구, 양자컴퓨팅 및 센싱 그룹은 양자의 이점을 입증하는 작업을 수행하고 있다.

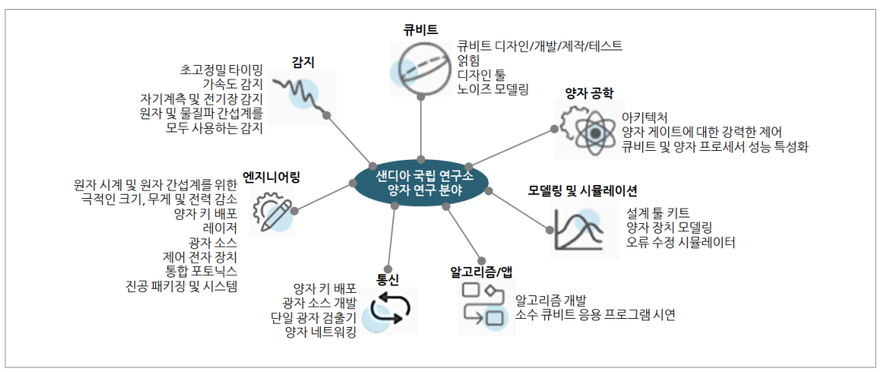
• 태평양 북서부 국립연구소 (Pacific Northwest National Lab, PNNL):[15]

화학, 재료 과학 및 에너지 복원력 부분의 양자컴퓨팅, 시뮬레이션, 통신 및 감지 발전을 위한 연구를 핵심으로 삼고 있으며, 초정밀 재료로 특성화된 초전도 양자컴퓨팅 장치를 개발하는 것으로 목표로 삼고 있다. Microsoft, 워싱턴 대학교, PNNL이 공동으로 설립한 노스웨스트 양자연합(Northwest Quantum Nexus, NQN)[16]은 최근 워싱턴 주립대학교와 IonQ의 NQN 회원 자격을 승인했다. QED-C는 PNNL이 주도하는 Q4NS 국가안보 양자기술 자문위원회를 설립했다.

• 샌디아 국립연구소 (Sandia National Laboratories):[17]

양자정보과학 전체와 고유한 기술 영역인 마이크로 전자 공학 및 양자장치 제조, 나노 기술, 맞춤형 재료 및 고성능 컴퓨팅을 활용해 [그림 V-1-13]에 기술한 것처럼 다양한 연구를 수행하고 있다. 전자기장을 적용해 이온 또는 라인을 분리하는 MEMS 규모의 표면 전극 이온 트랩을 설계 및 제작하고, 큐비트 시스템의 성능에 대한 실행 가능한 평가를 허용하는 게이트 세트 단층 촬영 및 기타 기술을 개발해 큐비트 특성화 분야를 선도하고 있다. 양자성능 연구실(Quantum Performance Lab, QPL)[18]은 개별 큐비트 및 다중 큐비트 프로세서를 평가하기 위해 게이트 세트 단층 촬영에 대한 참고로 사용되고 큐비트의 노이즈 및 오류를 특성화하고 성능을 정량화하기 위해 오픈 소스 pyGSTi 소프트웨어 패키지를 지원하고 있다.

그림 V-1-13 샌디아 국립 연구소 양자기술 연구 분야



• SLAC 국립 가속기 연구소 (SLAC National Accelerator Laboratory, SLAC):[19]

스탠퍼드 대학교와 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)는 양자기초, 아키텍처 및 기계 이니셔티브인 Q-Farm과 동반 관계를 맺었다. 약 50명 이상의 교수진과 연구원들이 큐비트 발견과 설계, 양자시스템 통합, 암흑 물질 탐지를 위한 양자센서, 초기 QIS 애플리케이션, 양자광자 네트워크 통합 플랫폼에 관한 연구를 수행하고 있다.

11) https://mitre.org/research/technology-transfer/technology- licensing/quantum-information-science
12) https://mitre.org/quantum-moonshot
13) https://quantum.ornl.gov
14) https://ornl. gov/section/quantum-information-science
15) https://pnnl.gov/quantum-information-sciences
16) https://nwquantum.com
17) https://sandia.gov/quantum
18) https://qpl.sandia.gov
19) https://qis.slac.stanford.edu

제2장
EU Quantum Flagship

2019년 4월부터 시행된 양자플래그쉽 조정 및 지원 연대(Quantum Flagship Coordination and Support Action)와 유럽연합집행위원회의 장기 연구 및 혁신 과제 중 하나인 European Quantum Flagship Initiative의 접점 역할을 하고 있는 양자플래그쉽(Quantum Flagship, Qflag)은 10년 동안 10억 유로 규모의 자금이 지원되는 대규모 프로젝트로 전문가의 평가를 통해 선택된 연구 및 혁신 과제로 구성돼 있다. Qflag는 양자분야에서 유럽의 리더십과 우수성을 제고하고, 양자기술을 활용해 경쟁력 있는 산업을 선도하며, 유럽을 혁신적인 연구, 비즈니스 및 투자에 특화된 지역으로 만드는 것을 목표로 삼고 있다. 또한 장기적인 목표로서 양자네트워크와 상호연결된 양자컴퓨터, 시뮬레이터 및 센서를 통해 결맞음(Coherence)과 얽힘(Entanglement) 등의 양자정보를 양자웹(Quantum Web)으로 배포하는 것을 구상하고 있다.[20)]

한편 Qflag는 유럽의 양자기술 전략 연구 의제를 준비하고 구현하는 과정에 밀접하게 참여하고 있다. 현재 QFlag 안에는 프랑스(CEA), 독일(VDITZ, BOSCH), 이탈리아(CNR), 네덜란드(TNO), 스페인(ICFO), 스위스(UNIGENEVA) 등의 저명한 연구실, 국가연구소 및 산업계가 소속돼 있어 European Quantum Flagship Initiative를 지원하기 위한 조밀한 네트워크를 보유하고 있다. 또한 QFlag는 연구 분야의 적용 사례를 구별하고, 양자기술에 대한 인프라, 교육, 훈련에 대한 요구 사항을 분석해 협회 및 회원국에 제공함으로써, 새로운 교육 과정을 수립할 수 있도록 돕고 있으며, 전략적 연구 의제의 우선순위에 따라 협력 프로젝트를 만들어 EU 집행위원회의 투자를 유치하고 있다.

이와 더불어 2018년 10월부터 양자기술 분야에 대한 세계 최고 수준의 연구지원을 통해 유럽 내 양자커뮤니티를 강화하고, 연구 결과를 제품 및 응용 분야에 적용할 수 있도록 유럽 양자산업의 토대를 마련하고 있다. [그림 V-2-1]처럼 Qflag는 램프업(Ramp-Up) 단계(2018년 10월~2021년 9월)에서 양자정보과학 기술의 핵심 활용 분야인 양자컴퓨팅, 양자 시뮬레이션, 양자통신, 양자계측 및 감지 등의 4개 분야 12개 프로젝트와 기초과학 영역의 7개, 지원 분야의 1개 프로젝트에 대해 약 1억 5,200만 유로의 예산을 지원했다.[21)]

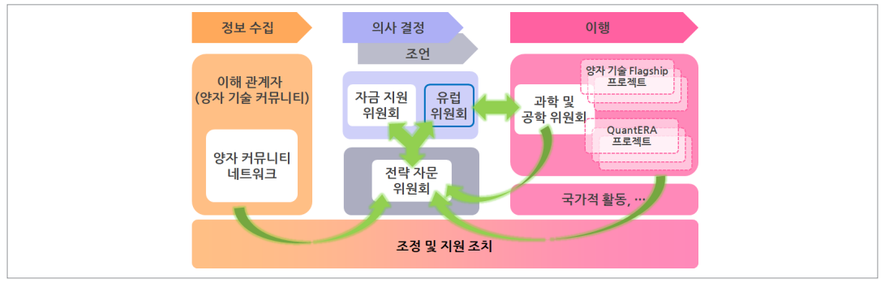
그림 V-2-1 양자기술 Flagship의 Ramp-up 단계 개요 및 20개 프로젝트 분야



20) https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship
21) Quantum Technologies Flagship (2020)

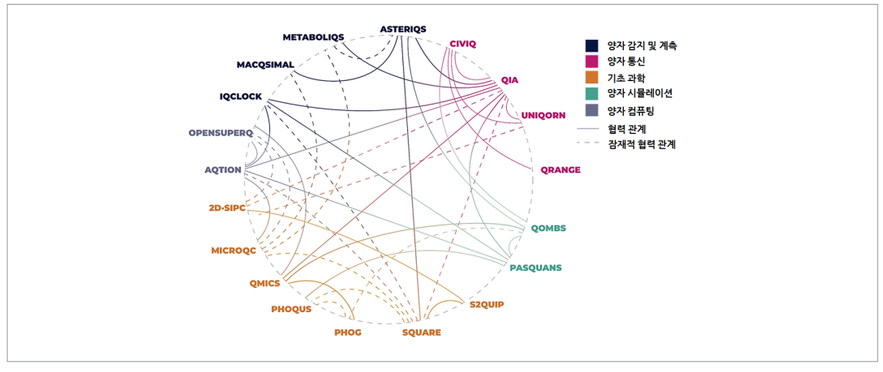
[그림 V-2-2]에 표현된 것처럼, Qflag의 주요 의사 결정 기관인 유럽위원회와 자금위원회는 독립적인 고위 양자전문가들이 모인 전략자문위원회를 통해 Qflag의 방향성을 설정하고, 전반적인 진행 상황과 전략 연구 의제를 지도받고 있다. 또한 과학 및 공학 위원회가 이를 보완하는데, 프로젝트 관리자, QuantERA 대표와 함께 조정자 역할을 하고 있다.

그림 V-2-2 양자기술 Flagship 지배 구조



[그림 V-2-3]은 2019년 중간 보고서에서 보고된 내용으로 20개의 프로젝트 간 현재의 협력관계와 잠재적인 협력관계를 도식화한 것이다. 이는 프로젝트 기간인 3년 중 18개월 동안의 진행 상황을 나타내고 있다. 각 프로젝트에서 진행한 결과는 아래와 같다.

그림 V-2-3 양자기술 Flagship 프로젝트 간 기존 및 잠재적 시너지 효과



※ Midterm Report of the Quantum Technologies Flagship (2020)

- ASTERIQS : 자동차 산업 및 의료 기기와 같은 실온 장치 응용을 위한 다이아몬드 NV(Nitrogen-Vacancy) 센터 기반 양자센서 개발
- MACQSIMAL : 혁신적인 통합 및 패키징 기술뿐만 아니라 5가지 다른 유형의 센서를 사용해 MEMS 기술을 통해 양자계측 및 센싱 발전
- METABOLIQS : 향상된 이미징 감도(7배)를 이끈 뛰어난 결맞음 시간과 감지/편광 효율과 함께 극도로 얇은 NV 중심의 균질한 층 형성
- IQCLOCK : 현재 시판 중인 표준 마이크로파 원자시계보다 100배 더 안정적인 차세대 통합/소형 광학 양자시계로 진보
- CIVIQ : 연속 가변 양자 키 배포 기술을 발전시켜 신흥 통신 네트워크 통합
- QIA : 양자정보, 양자 키 배포, 디지털 서명 및 보안 양자클라우드 컴퓨팅을 저장할 수 있는 고효율 다중 양자메모리 기술 개발
- QRANGE : 암호화, 게임 및 양자 시뮬레이션과 같은 다양한 애플리케이션을 위한 세 가지 유형의 양자 난수 생성기에 대해 지정, 모델링 및 검증된 기술
- UNIQORN : 양자 난수 생성기와 양자 키 배포 시스템 및 양자네트워크 영역에서 양자통신을 위한 고급 구성요소 시스템 개발
- 2D-SIPC : 다수의 새로운 2D 광전자 재료 발견, 양자통신을 위한 광자 방출기의 조정 능력 획득, 새로운 단일 광자 검출기 개발 및 산업 분야의 시스템과 호환되는 광자 회로에 통합
- MICROQC : 다양한 오류 원인에 대해 마이크로파 구동 이온을 사용하는 조건부 양자게이트 개발 및 구현
- PHOG : 광자 응용 및 이미지를 위한 조밀하게 얽힌 광자 기반 광원(광자 총)의 초고해상도 현미경 제조에 근접
- PHOQUS : 다른 플랫폼에 유용한 이론적 프레임워크를 사용해 양자 시뮬레이션을 위한 다양한 유형의 광자 플랫폼 개발 진행
- QMICS : 통신에 사용되는 전파 양자 마이크로파(마이크로파 양자 키 배포, 자유 공간 양자 마이크로파 및 양자레이더) 및 감지의 실제 적용
- S2QUIP : 저전력 소비를 위해 MEMS를 이용해 광자 회로 재구성을 가능하게 하는 2D 재료의 나노 가공 수행
- SQUARE : 큐비트(세륨, 에르븀)로서의 단일 희토류 이온(REI)의 검출 및 제어 및 최적의 광자 통합을 위해 단일 희토류 이온 도핑 박막의 성장 기술 개발
- PASQUANS : 차세대 원자 기반 프로그래밍이 가능한 양자 시뮬레이터(100개 원자 핀셋 어레이, 50개 이온 트랩 이온, 20개 리드버그 원자 어레이) 개발
- QOMBS : 양자 시뮬레이션이 실제 장치를 최적화하는 데 유용할 수 있다는 첫 번째 시연
- AQTION : 유럽 공급망 및 19인치 랙과 같은 산업 표준을 사용해 이온 트랩 기술을 기반으로 확장 가능한 유럽 양자컴퓨터를 구축하기 위한 개념 증명 및 개발, 클라우드에서 사용할 수 있는 시

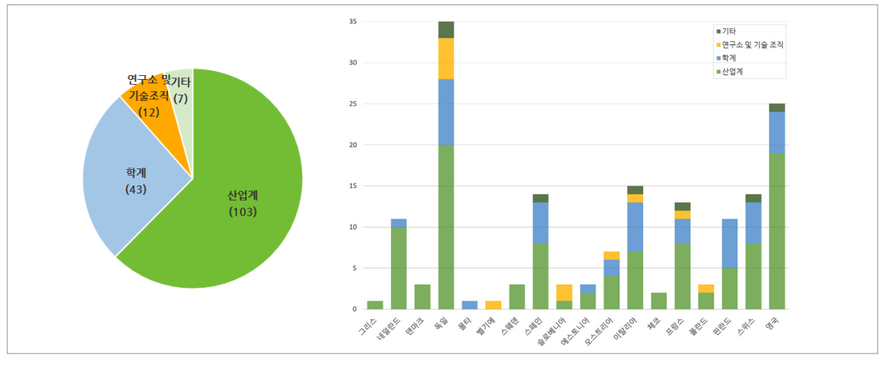
연용 10큐비트 양자컴퓨터 조립 및 랙에 장착된 50큐비트의 프로토타입 시연

- OPENSUPERQ : 큐비트 게이트에 대해 99% 이상의 충실도 달성, 7큐비트 기계 조립, 초전도 큐비트 기술 기반 컴퓨팅 연구소 확대

Qflag 프로젝트에 참여하는 약 1,400명의 과학자는 77개의 기업(벤처 23개 기업), 103개의 대학교, 56개의 연구 조직 등 총 236개 조직에 소속돼 있다. 2019년 기준 Qflag 프로젝트의 총 3분의 2가 최소 1건 이상을 특허 출원했고, 총 60건이 출원됐으며 16건은 등록이 완료됐다. 또한 약 500여 편의 논문이 발표됐으며, 이 중 50여 편은 둘 이상의 Qflag 프로젝트 간 협업에 의한 것이었다. 여러 프로젝트가 [그림 V-2-3]에서 보는 것처럼 공동 파트너를 이루고 있어 시너지 효과를 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 중복 작업을 방지할 수도 있다. 이를 기반으로 2020년 9월부터 미국, 캐나다 및 일본과의 국제 협력 및 중등/고등/산업 교육을 위한 양자기술 교육 프로그램 개발에 관련된 2개의 추가 조정 및 지원 조치가 이뤄지고 있다. Ramp Up 단계의 최종 보고서는 아직 확인되지 않지만, 각 프로젝트의 진행 상황 및 결과에 대해서는 Qflag 홈페이지를 통해서 확인할 수 있다.

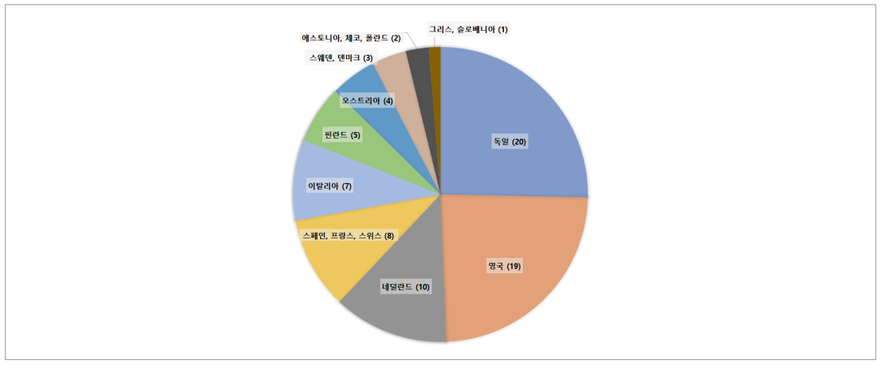
유럽의 양자기술 커뮤니티는 물리학을 포함한 수학, 화학, 컴퓨터 과학 등 다양한 학문적 연구에 뿌리를 두고 있으며, 커뮤니티 대부분은 물리학 분야인 광학, 광자학, 원자 물리학, 고체 물리학 및 나노 기술 분야를 기반으로 Qflag의 네트워크를 통해 모든 유럽 국가에 존재한다. 2022년 6월 기준으로 EU 27개국 중 라트비아, 루마니아, 룩셈부르크, 리투아니아, 불가리아, 사이프러스, 슬로바키아, 아일랜드, 크로아티아, 포르투갈, 헝가리를 제외한 16개국 그리스, 네덜란드, 덴마크, 독일, 몰타, 벨기에, 불가리아, 스웨덴, 스페인, 슬로베니아, 에스토니아, 오스트리아, 이탈리아, 체코, 프랑스, 폴란드, 핀란드, 스위스, 영국의 산업계, 학계, 연구소 및 기술 조직 중 Qflag 회원으로 가입한 비율은 [그림 V-2-4]과 같다. 산업계는 103개의 기업이 회원으로 가입했고, 학계는 43개의 대학교 및 학과 또는 학내 연구소가 Qflag 회원이고, 연구소와 기술 조직 12개, 기타 7개 등 총 165개 기관으로 확인된다. 국가별 가입 정도를 비교하면, 독일이 35개 기관으로 가장 높은 비율을 보이며 영국이 25개 기관으로 그 뒤를 따르고 있다.

그림 V-2-4 Qflag 회원 국가별 및 분야별 분포



[그림 V-2-5]에 나타난 것처럼 Qflag에 가입된 103개 기업의 국가별 회원 수는 서로 차이가 있다. 독일이 가장 많고 영국이 뒤를 따르고 있으며, 네덜란드가 10개, 다른 나라들은 한 자릿수의 기업들이 Qflag에서 활동하는 것으로 확인된다.(몰타와 벨기에 소속 기업은 없음) 그중 몇 개의 기업은 벤처로 확인되는데 Sparrow Quantum(덴마크), Swabian Instruments(독일), Ketita Labs(에스토니아), QuantFi(프랑스), Qnami(스위스), Anchored In(영국), KETS(영국), NU Quantum(영국), Photon Force(영국) 등 9곳이다.

그림 V-2-5 Qflag 기업 회원 국가별 분포



앞서 설명한 국가별 회원 기업명은 [그림 V-2-6]에, 각 기업 소개와 주요 개발 및 생산 제품에 대한 정보는 〈표 V-2-1〉에 기술했다.

그림 V-2-6 Qflag 국가별 기업 회원

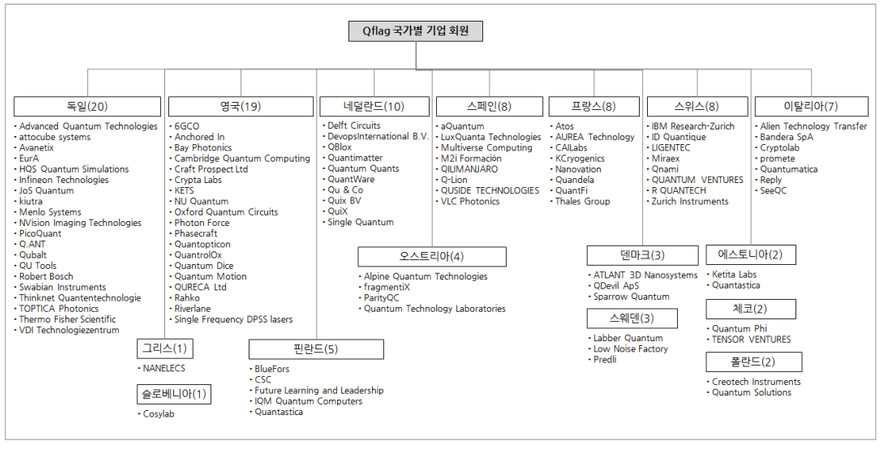


표 Ⅴ-2-1 Qflag 회원 기업 소개

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
NANELEC (그리스)	• 기업소개 : 전 세계적으로 광범위한 금융 네트워크 • 홈페이지 : https://www.nanelec.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅)
Delft Circuits (네덜란드)	• 기업소개 : 양자컴퓨팅용 하드웨어 생산 및 테스트 • 주요제품 : Cri/oFlex® – 극저온 I/O용 유연한 마이크로파 케이블링 • 홈페이지 : https://delft-circuits.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온)
DevopsInternational B.V. (네덜란드)	• 기업소개 : 머신러닝 및 블록체인 중점 소프트웨어 개발 • 주요제품 : We-Help(실업자, 기업 연결 AI 기반), WeCare(사용자, 병원 연결 분산 ID 기반), ProdTrack(블록체인 기반), Algorithmly(통계적 결정 머신러닝 기반) • 홈페이지 : https://devopsinternational.nl • 연 락 망 : Vikas Pandey, vikpande@devopsinternational.nl • 주요시장 : 소프트웨어(일반 등)
QBlox (네덜란드)	• 기업소개 : 양자컴퓨팅을 위한 전자기기 및 큐비트 제어 장비 개발 (QuTech 분사) • 주요제품 : 펄서, 클러스터, SPI, 정량화, 문서화 • 홈페이지 : https://www.qblox.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기)
Quantimatter (네덜란드)	• 기업소개 : 로봇 프로세스 자동화인 사이버 보안 테스트 플랫폼 제공 • 주요제품 : as-a-service, 인증서 암호화 기간 검증, 인증서 관리, 하이브리드 키 • 홈페이지 : https://www.quantimatter.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반)
Quantum Quants (네덜란드)	• 기업소개 : 타당성 연구 및 비니지스 분석 • 주요제품 : 알고리듬 및 모델의 프로토타입 구현 과정 및 워크샵 제공 • 홈페이지 : https://quantumquants.wixsite.com/research • 연 락 망 : Giuseppe Colucci, info.quantumquants@gmail.com • 주요시장 : 서비스(전문서비스, 기타)
QuantWare (네덜란드)	• 기업소개 : 모듈식 칩 아키텍처를 통한 양자하드웨어 공급 • 주요제품 : 초전도 양자프로세서 설계, 개발 및 제작 • 홈페이지 : https://www.quantware.eu • 연 락 망 : Alessandro Bruno, alessandro@quantware.eu • 주요시장 : 하드웨어(기타)
Qu & Co (네덜란드)	• 기업소개 : 양자컴퓨터 화학 및 양자AI 중점 • 주요제품 : QUBEC (화학 및 재료 과학용 양자전산 플랫폼) • 홈페이지 : https://quandco.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반), 서비스(기타)
Quix BV (네덜란드)	• 기업소개 : Plug-and-Play 통합, 재구성 가능한 광 기반 양자프로세서 제공 • 주요시장 : 소프트웨어(일반)
QuiX (네덜란드)	• 기업소개 : TriPleX 플랫폼을 기반으로 하는 통합 광자 프로세서와 양자광자용 맞춤형 통합 장치 제공 • 주요제품 : NISQ 광자 양자컴퓨터, 프로그래밍 가능한 광자 프로세서, 광자 양자기술 맞춤형 PIC • 홈페이지 : https://www.quixquantum.com • 연 락 망 : Hans van den Vlekkert, info@quix.nl • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반)
Single Quantum (네덜란드)	• 기업소개 : Kavli Institute of Nano science에서 분사, 초전도 나노와이어 기술 기반 단일 광자 검출 시스템 개발 및 제조 • 주요제품 : 초전도 나노선 단일 광자 검출기 • 홈페이지 : https://singlequantum.com • 주요시장 : 하드웨어(광원/검출기)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
ATLANT 3D Nanosystems (덴마크)	• 기업소개 : ALD 공정 기반 패터닝 기술 활용해 마이크로 및 나노가공 분야 R&D, 맞춤형 개발 및 장비 제공 • 주요제품 : ATLANT3DTM, NanofabricatorsTM, ATLANT3DTM, 미세 가공 • 홈페이지 : https://atlant3d.com • 연 락 망 : Maksym Plakhotnyuk, mp@atlant3d.com • 주요시장 : 서비스(연구, 제조)
QDevil ApS (덴마크)	• 기업소개 : 양자전자장치 개발 • 주요제품 : QCAGE(마이크로파 캐비티 샘플 홀더), QDAC(게이트 컨트롤러), DACS, QBOARD(고급 샘플 홀더), QFILTER, QBOX(브레이크아웃 박스) • 홈페이지 : https://qdevil.com • 연 락 망 : Jonatan Kutchinsky, info@qdevil.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기)
Sparrow Quantum (덴마크)	• 기업소개 : 닐스 보어 연구소 양자광자 연구실 연구 및 특허 기반 광양자 기술 부품 개발 및 상용화(비상장 기업) • 주요제품 : 3mmx3mm 칩 • 홈페이지 : https://sparrowquantum.com • 주요시장 : 하드웨어(광원)
Advanced Quantum Technologies (독일)	• 기업소개 : 국제 학제 간 학술지 • 홈페이지 : https://onlinelibrary.wiley.com/journal/25119044 • 연 락 망 : Stefan Hildebrandt, advquantumtech@wiley.com • 주요시장 : 서비스(기타)
attocube systems AG (독일)	• 기업소개 : 산업 및 연구 분야에서 나노 기술 솔루션 제공 • 주요제품 : 저온 유지 장치, 현미경, 측정 도구, 나노 포지셔너, 변위 센서 • 홈페이지 : https://www.attocube.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서)
Avanetix (독일)	• 기업소개 : 산업별 애플리케이션 소프트웨어 스택 제공 • 주요제품 : 물류, 제조, 기획, 시뮬레이션 • 홈페이지 : https://www.avanetix.io • 주요시장 : 소프트웨어(일반)
EurA AG (독일)	• 기업소개 : Technology Network • 주요제품 : Consulting • 홈페이지 : https://www.eura-ag.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅)
HQS Quantum Simulations (독일)	• 기업소개 : 화학 구조와 그에 따른 물리적 특성을 제품에 구현 및 개발 프로세스 개선 • 주요제품 : 맞춤형 시뮬레이션 소프트웨어, HQS 양자지원설계 클라우드, 오픈 소스 소프트웨어 • 홈페이지 : https://quantumsimulations.de • 주요시장 : 소프트웨어(일반, 기타)
Infineon Technologies AG (독일)	• 기업소개 : 반도체 공급, 초전도/반도체 큐비트 가공 가능 공정 설비, 지멘스가 운영하던 반도체 부서가 독립하면서 설립 • 주요제품 : ASIC, 배터리 관리 IC, 마이크로 컨트롤러, RF, USB 등 • 홈페이지 : https://www.infineon.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기/RF), 소프트웨어(일반)
JoS Quantum (독일)	• 기업소개 : 고성능 소프트웨어와 알고리듬 제공 • 주요제품 : 병렬 양자위상 추정에서 오류 탄력적 양자진폭 추정, 오픈 소스 소프트웨어 PYGRND, 학습 허브, 위험 모델링, 에너지 모델링, 양자회로도구 및 도구 체인, 프로토타입 및 개념 증명 • 홈페이지 : https://jos-quantum.de • 주요시장 : 소프트웨어(일반)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
kiutra (독일)	• 기업소개 : 차세대 극저온 냉각 장치 개발 • 주요제품 : S-Type Essential, S-Type Optical, L-Type Rapid • 홈페이지 : https://kiutra.com • 연 락 망 : Tomek Schulz, tomek.schulz@kiutra.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온)
Menlo Systems (독일)	• 기업소개 : 고정밀 계측용 기기 개발, 광학 주파수 빗 기술 • 주요제품 : 광학 주파수 빗, 시간 및 주파수 분포, 테라헤르츠 시스템, 초고속 및 초안정 레이저 및 해당 제어 전자 장치 • 홈페이지 : https://www.menlosystems.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기), 서비스(제조)
NVision Imaging Technologies (독일)	• 기업소개 : 분자 분석 및 의료 영상 변환 • 홈페이지 : https://www.nvision-imaging.com • 연 락 망 : Sella Brosh, info@nvision-imaging.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
PicoQuant (독일)	• 기업소개 : 단일 광자 계수 응용 분야 • 주요제품 : 펄스 레이저 및 LED, 광자 계산 및 타이밍, 형광 분광기, 형광 현미경 • 홈페이지 : https://www.picoquant.com • 연 락 망 : Andreas Bülter, info@picoquant.com • 주요시장 : 하드웨어(광원/검출기, 광학)
Q.ANT (독일)	• 기업소개 : 양자광자 프레임워크 기반 새로운 센서와 광자 컴퓨팅 칩 개발 • 주요제품 : 전자 대 광자, 양자제어, 광자 대 전자 • 홈페이지 : https://qant.de • 주요시장 : 응용/시스템(센서), 하드웨어(전자기기)
Qubalt (독일)	• 기업소개 : 양자 및 암호 분석 공격으로부터 보호하는 보안 솔루션 • 주요제품 : 양자보안인증, 양자보안 소프트웨어, 양자위치검증 • 홈페이지 : https://www.qubalt.de • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
QU Tools (독일)	• 기업소개 : 광학, 초고속 시간 측정 및 운영 체제 소프트웨어 제공 • 주요제품 : 간섭계 거리 측정, 타임 태거 및 시간-디지털 변환기, 얽힘 데모, 양자감지, NV 센터 감지 • 홈페이지 : https://qutools.com • 주요시장 : 응용/시스템(센서, 타이밍), 소프트웨어(일반)
Robert Bosch (독일)	• 기업소개 : 모빌리티 솔루션, 산업 기술, 소비재, 에너지 및 빌딩 기술 • 주요제품 : 스마트 홈 & 시티, 커넥티드 모빌리티 및 커넥티드 제조 • 홈페이지 : https://www.bosch.com • 주요시장 : 서비스(제조), 소프트웨어(일반, 기타)
Swabian Instruments (독일)	• 기업소개 : 데이터 수집 및 신호 생성 시스템 설계 및 제조, 슈투트가르트 대학교 물리학과에서 분사 • 주요제품 : 타임 태거 시리즈, 펄스 스트리머, 싱크로나이저 • 홈페이지 : https://www.swabianinstruments.com • 주요시장 : 응용/시스템(타이밍), 하드웨어(전자기기), 서비스(제조)
Thinknet Quantentech-nologie (독일)	• 기업소개 : 기술 전문가와 산업 챔피언 연결 • 주요제품 : HORIZON2020 프로젝트 EASY-RES 등 • 홈페이지 : https://www.bayern-innovativ.de • 연 락 망 : Christoph Karl quantum@bayern-innovativ.de • 주요시장 : 서비스(컨설팅)
TOPTICA Photonics AG (독일)	• 기업소개 : 다이오드 및 파이버 레이저 솔루션 제공 • 주요제품 : 바이오포토닉스/현미경 사용, 테스트/측정, 양자기술 및 분광학 • 홈페이지 : https://www.toptica.com • 연 락 망 : Wilhelm Kaenders info@toptica.com • 주요시장 : 하드웨어(테스트/측정)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Thermo Fisher Scientific (독일)	• 기업소개 : 생명과학, 진단 및 의약품 개발, 실험실 장비 연구 분야별 학술정보 및 토탈 솔루션 제공 • 주요제품 : 반도체 분석, 분광분석, 원소 및 동위원소 분석 등 • 홈페이지 : https://www.thermofisher.com • 주요시장 : 하드웨어(테스트/측정), 서비스(기타)
VDI Technol-ogiezentrum (독일)	• 기업소개 : 혁신적인 연구개발 지원 • 주요제품 : 컨설팅, 자금 조달, 혁신, 전략 • 홈페이지 : https://www.vditz.de • 주요시장 : 서비스(컨설팅)
Labber Quantum (스웨덴)	• 기업소개 : 양자알고리듬과 물리적 큐비트 사이에 필요한 인터페이스 제공 • 주요제품 : Labber • 홈페이지 : https://www.keysight.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기), 소프트웨어(기타)
Low Noise Factory (스웨덴)	• 기업소개 : 극저온 응용 분야용 최첨단 마이크로웨이브 저잡음 증폭기 • 주요제품 : 극저온/실온 저잡음 증폭기, 극저온 아이솔레이터/서큘레이터 • 홈페이지 : https://www.lownoisefactory.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온, 전자기기/마이크로파)
Predli (스웨덴)	• 기업소개 : 신흥 기술(AI, 블록체인, 양자컴퓨팅) 교육 프로그램 및 전문 지식 제공 • 주요제품 : 부트 캠프, 전략 컨설팅, 기술 실사 • 홈페이지 : https://www.predli.com/emerging-tech • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 기타)
aQuantum (스페인)	• 기업소개 : 양자 소프트웨어 엔지니어링 및 프로그래밍 연구, 개발 및 컨설팅 • 주요제품 : 하이브리드 클래식 양자컴퓨팅, 소프트웨어 개발 품질, 양자 소프트웨어 개발 정부 및 관리, 통합 환경 및 양자 소프트웨어 배포, 양자개발도구, 양자 소프트웨어 개발의 AI • 홈페이지 : https://www.aquantum.es • 주요시장 : 소프트웨어(일반, 기타)
LuxQuanta Technologies (스페인)	• 기업소개 : 양자안전보안 계층 제공, 광자과학연구소(Institute of Photonic Sciences) 분사 • 주요제품 : 양자 키 분배 • 홈페이지 : https://www.luxquanta.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Multiverse Computing (스페인)	• 기업소개 : 금융업계를 위해 소프트웨어 제공 • 주요제품 : 텐서 네트워크, 디지털 어닐링, 인공지능, 초전도 광자, 이온 트랩, 중성 원자 • 홈페이지 : https://www.multiversecomputing.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
M2i Formación (스페인)	• 기업소개 : aQuantum에서 만든 양자 프로그래밍 과정 온라인 수업 제공 • 홈페이지 : https://www.m2iformacion.com • 주요시장 : 서비스(기타)
QILIMANJARO (스페인)	• 기업소개 : 풀 스택 코히어런트 양자어닐링 컴퓨터 구축 목적 • 주요제품 : 풀 스택 게이트 기반 플랫폼, 아날로그 양자프로세서, 양자 알고리듬, 저잡음 양자컴퓨팅 플랫폼 • 홈페이지 : https://www.qilimanjaro.tech • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터), 소프트웨어(일반, 기타)
Q-Lion (스페인)	• 기업소개 : 양자오류 수정 코드 개발 • 홈페이지 : https://www.q-lion.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
QUSIDE TECH-NOLOGIES (스페인)	• 기업소개 : 보안 통신용 양자 및 광자 기술 개발, 광자과학연구소(Institute of Photonic Sciences) 분사 • 주요제품 : 양자엔트로피 솔루션(FMC 시리즈, QN100 칩셋), 임의성 가속(PCIe 시리즈) • 홈페이지 : https://quside.com • 주요시장 : 하드웨어(광원)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
VLC Photonics (스페인)	• 기업소개 : 양자광학 시스템을 광자 집적 회로로 개발을 위한 서비스 제공 • 주요제품 : 통신/데이터콤, 센싱, 양자, 계측, LIDAR, 생체 광자학, 광자 통합 컨설팅, PIC 설계, 제조 및 패키징, 웨이퍼 및 칩(DIE) 수준의 특성화 및 테스트 서비스 • 홈페이지 : https://www.vlcphotonics.com • 연 락 망 : Iñigo Artundo, info@vlcphotonics.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크, 센서), 하드웨어(테스트/측정)
Cosylab (슬로베니아)	• 기업소개 : 첨단 기술 계측을 위한 제어 시스템 제공 • 주요제품 : 빅 사이언스, 방사선 요법, 의료 기기 • 홈페이지 : https://www.cosylab.com • 연 락 망 : Diego Casadei, diego.casadei@cosylab.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Ketita Labs (에스토니아)	• 기업소개 : 단기 양자컴퓨팅을 위한 하이브리드 양자-고전 알고리듬 연구, 에스토니아 대학 분사 • 주요제품 : Hybrid Quantum Classical Algorithm • 홈페이지 : https://quantumzeitgeist.com/quantum-technology-companies/ketita-labs • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Quantastica (에스토니아)	• 기업소개 : 하이브리드 양자-고전 컴퓨팅 전환용 소프트웨어 도구 및 솔루션 • 주요제품 : 프로그래밍 도구, 양자알고리듬 개발, 양자 시뮬레이터, 크로스 플랫폼 • 홈페이지 : https://quantastica.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Alpine Quantum Technologies (오스트리아)	• 기업소개 : 다용도 이온 트랩 플랫폼 기반 양자컴퓨터 개발 • 주요제품 : IBEX, 양자 시뮬레이터 • 홈페이지 : https://www.aqt.eu • 주요시장 : 응용/시스템(양자컴퓨터)
fragmentiX (오스트리아)	• 기업소개 : 양자안전저장(Quantum Safe Storage) 솔루션 등 사이버보안 • 주요제품 : fragmentiX 클러스터/NANO box • 홈페이지 : https://www.fragmentix.com • 연 락 망 : Werner Strasser, werner.strasser@fragmentix.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
ParityQC (오스트리아)	• 기업소개 : 양자컴퓨터에서 양자최적화를 위한 아키텍처 • 주요제품 : ParityOS 소프트웨어, ParityQC 아키텍처 • 홈페이지 : https://parityqc.com • 연 락 망 : Magdalena Hauser, info@parityqc.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반, 기타)
Quantum Technology Laboratories (오스트리아)	• 기업소개 : 양자통신 및 양자암호화 • 주요제품 : QKD, 컨설팅, 프로토타입 • 홈페이지 : https://www.qtlabs.at • 연 락 망 : Thomas Scheidl, Thomas.Scheidl@qtlabs.at • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 기타)
Alien Technology Transfer (이탈리아)	• 기업소개 : 딥테크 스타트업과 중소기업을 위한 공공 및 민간 기금 마련 전문 컨설팅 • 홈페이지 : https://alientt.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 투자)
Bandera SpA (이탈리아)	• 기업소개 : 생산(스마트 공장, IoT) 환경에서 센서 및 통신 장치 구현 • 주요제품 : PVC 펠렛화, 압출 장비, 플랫 다이, Blown film • 홈페이지 : https://www.luigibandera.com • 연 락 망 : Giovanni A. della Rossa, gadr@lbandera.com • 주요시장 : 응용(센서, 통신/네트워크)
Cryptolab (이탈리아)	• 기업소개 : 암호화 및 양자암호화 • 주요제품 : 사이버 보안 솔루션 • 홈페이지 : https://www.cryptolab.us • 연 락 망 : Massimo Bertaccini, m.bertaccini@cryptolab.it • 주요시장 : 소프트웨어(기타)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
Promete (이탈리아)	• 기업소개 : Low Energy Coherent Systems 연구, 제품, 서비스 제공, 국립 물질 물리학 연구소(INFM-CNR)의 분사 • 주요제품 : Trylight(Thiol 반응성 표면에 항체를 묶기 위해 광화학 공정을 수행하기 위한 사용하기 쉬운 도구), 굴절계, Ramona(라돈 가스 축적 수준 감지) • 홈페이지 : http://www.promete.it • 연 락 망 : Roberto Germano, germano@promete.it • 주요시장 : 하드웨어(테스트/측정, 기타)
Quantumatica (이탈리아)	• 기업소개 : 얽힌 광자/입자를 사용한 양자얽힘 리소그래피 • 홈페이지 : http://www.quantumatica.net • 연 락 망 : Giovanni A. della Rossa, info@quantumatica.com
Reply (이탈리아)	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 적용 솔루션 개발 • 주요제품 : 양자컴퓨팅을 통한 생산 라인 최적화 및 오류 감지, 양자 알고리듬을 통한 포트폴리오 관리, 철도 운송 일정 최적화 • 홈페이지 : https://www.reply.com/it/topics/quantum-computing/quantum • 연 락 망 : Marco Magagnini, m.magagnini@reply.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
SeeQC (이탈리아)	• 기업소개 : 양자컴퓨팅을 위한 디지털 칩 규모 통합 플랫폼 제공 • 주요제품 : SFQuClass 프로세서 • 홈페이지 : https://seeqc.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Quantum Phi (체코)	• 기업소개 : 컨설팅, 분석 및 연구 • 홈페이지 : https://www.quantumphi.com • 연 락 망 : Michal Krelina, michal.krelina@quantumphi.com • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 연구)
TENSOR VENTURES (체코)	• 기업소개 : 양자프로젝트/아이디어 직접 지원 및 학계와 협력 • 홈페이지 : https://tensor.ventures • 연 락 망 : Martin Drdul, martin@tensor.ventures • 주요시장 : 서비스(투자)
Creotech Instruments (폴란드)	• 기업소개 : 전자 제조 및 소규모 위성 통합 시설 운영 • 주요제품 : 우주 과학, 지리 공간 조작 • 홈페이지 : http://creotech.pl • 연 락 망 : Greg Kasprowicz, grzegorz.kasprowicz@creotech.pl • 주요시장 : 서비스(제조, 기타)
Quantum Solutions (폴란드)	• 기업소개 : 양자수학 분야 교육 제공 및 연구 참여 • 연 락 망 : Tomasz Kwoczak, tk@quantumsolutions.cloud • 주요시장 : 서비스(기타)
Atos (프랑스)	• 기업소개 : 컨설팅 서비스, 디지털 보안 및 탈탄소화 제품, AQTion(컴퓨팅) 및 PASQUANS(시뮬레이션) 양자Flagship 프로젝트 참여 • 주요제품 : QLM, QLaaS, myQLM, Q-score, Services :QLM User Club • 홈페이지 : https://atos.net/en/solutions/quantum-learning-machine • 연 락 망 : Cyril Allouche, cyril.allouche@atos.net • 주요시장 : 하드웨어(제조), 소프트웨어(기타), 서비스(컨설팅)
AUREA Technology (프랑스)	• 기업소개 : 고성능 광학 솔루션 설계 및 제조 • 주요제품 : 양자광자소스, 단일 광자 계수기, 타이밍 전자 장치, 초고속 레이저 및 소프트웨어 플랫폼 • 홈페이지 : http://www.aureatechnology.com • 주요시장 : 하드웨어(광원/검출기, 레이저), 소프트웨어(기타)
CAILabs (프랑스)	• 기업소개 : Multi-Plane Light Conversion 기반 광자 솔루션 설계, 생산 및 판매 • 주요제품 : AROONA-STAR, CANUNDA, TILBA, PROTEUS, 맞춤형 광학 솔루션 • 홈페이지 : https://www.cailabs.com • 주요시장 : 하드웨어(광원, 광학), 서비스(제조)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
KCryogenics (프랑스)	• 기업소개 : 초저진동 및 초저 드리프트 저온유지장치용 극저온 전문업체 • 연 락 망 : Kleiman Alain-Marc, kcryogenics@gmail.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온)
Nanovation (프랑스)	• 기업소개 : 양자기술을 위한 포토닉스, 광전자 공학용 와어드 밴드랩 산화물 반도체용 2D 재료 ZnO, NiO, Ga_2O_3 에피 층, 금속/ZnO 나노입자 어레이, MgO, Al_2O_3, p-Cu_2O, • 주요제품 : ZnS, CuO • 홈페이지 : http://nanovation.com • 연 락 망 : David Rogers, d.j.rogers@nanovation.com • 주요시장 : 하드웨어(기타)
Quandela (프랑스)	• 기업소개 : 모듈식 컴퓨팅 플랫폼, 맞춤형 광자 공학 모듈 • 주요제품 : MosaiQ, Entropy, Prometheus, Perceval • 홈페이지 : https://www.quandela.com • 주요시장 : 하드웨어(테스트/측정), 소프트웨어(기타)
QuantFi (프랑스)	• 기업소개 : 재무 분석용 양자컴퓨팅 • 주요제품 : Quantum agnostic • 홈페이지 : https://www.quantfi.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Thales Group (프랑스)	• 기업소개 : 항공우주 분야 • 주요제품 : 항공(전자공학, 레이더, 통신), 우주(궤도 기반 시설 설계, 개발 및 배치), 방위(레이더, 무선 통신) 및 보안(전자 거래, 사이버 보안) • 홈페이지 : https://www.thalesgroup.com • 주요시장 : 응용/시스템(통신/네트워크), 소프트웨어(기타)
BlueFors (핀란드)	• 기업소개 : 극저온 희석 냉장고 시스템 제공 • 주요제품 : 희석 냉장고, 특수 시스템, 자석, 배선 • 홈페이지 : https://bluefors.com • 주요시장 : 하드웨어(극저온)
CSC (핀란드)	• 기업소개 : 고품질 ICT 전문가 서비스 제공 • 홈페이지 : https://www.csc.fi/en/home • 연 락 망 : Mikael Johansson, mikael.johansson@csc.fi • 주요시장 : 소프트웨어(기타), 서비스(전문 서비스)
Future Learning and Leadership (핀란드)	• 기업소개 : 혁신, 비즈니스 모델 및 새로운 리더십 과정 지원 전문가 • 홈페이지 : https://www.linkedin.com/in/cristinaandersson • 연 락 망 : Cristina Andersson, Cristina.andersson@develor.fi • 주요시장 : 서비스(컨설팅)
IQM Quantum Computers (핀란드)	• 기업소개 : 전도 기술에 중점을 둔 범용 양자컴퓨터를 위한 확장 가능한 하드웨어 구축 • 주요제품 : 확장 가능한 제어 솔루션, 디지털 아날로그 아키텍처, 초고속 프로세서 • 홈페이지 : https://www.meetiqm.com • 연 락 망 : Jan Goetz, jan@meetiqm.com • 주요시장 : 하드웨어 (기타)
Quantastica (핀란드)	• 기업소개 : 하이브리드 양자-고전 컴퓨팅으로 전환 목적 소프트웨어 도구 및 솔루션 제공 • 주요제품 : 양자 시뮬레이터, 양자알고리듬 • 홈페이지 : https://quantastica.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
IBM Research -Zurich (스위스)	• 기업소개 : 과학기술, 보안 연구, 클라우드 및 AI 시스템 연구, 인지 컴퓨팅 및 산업 솔루션, Binnig & Rohrer 나노기술 센터 • 홈페이지 : https://www.zurich.ibm.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
ID Quantique (스위스)	• 기업소개 : 양자 키 분배 시스템, 양자안전 네트워크 암호화, 단일 광자 카운터 및 하드웨어 난수 생성기 제공, 제네바 대학교 응용 물리학 그룹에서 분사 • 홈페이지 : https://idquantique.co.kr • 주요시장 : 하드웨어(광원), 소프트웨어(일반, 기타)

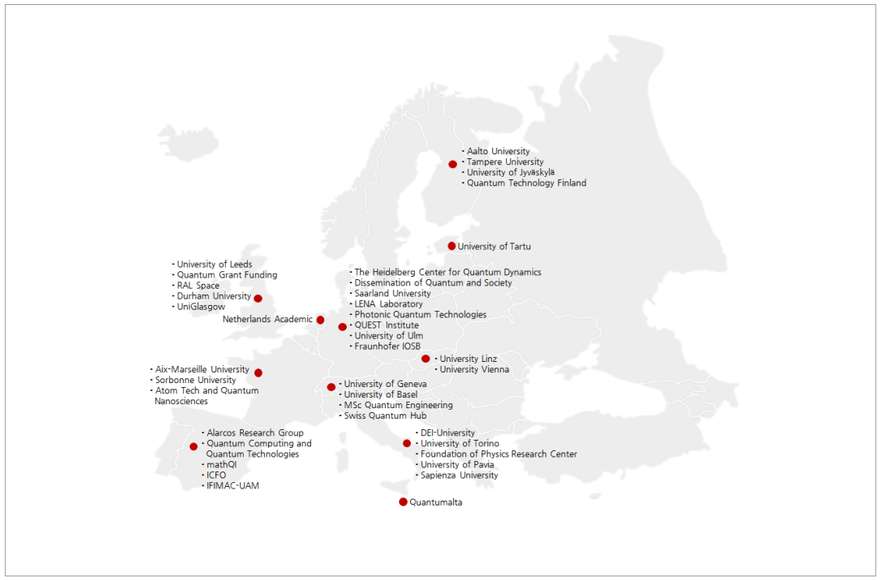
업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
LIGENTEC (스위스)	• 기업소개 : 광자 집적 회로(PIC) 제조 및 대량 생산 • 주요제품 : 저손실 SiN PIC • 홈페이지 : https://www.ligentec.com • 주요시장 : 서비스(제조)
Miraex (스위스)	• 기업소개 : 광자 및 양자풀스택 솔루션, 고감도 측정 및 분산 양자컴퓨팅 인프라 구축을 위한 집적 회로 • 주요제품 : 감지 제품 • 홈페이지 : https://www.miraex.com • 연 락 망 : Clément Javerzac-Galy, hello@miraex.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기), 소프트웨어(기타)
Qnami (스위스)	• 기업소개 : 양자센서 개발, 바젤 대학교 물리학과 기반 • 주요제품 : ProteusQ, 퀀텀레버 부속품, Vario PQ, AppLab, 양자파운드리 • 홈페이지 : https://qnami.ch • 주요시장 : 응용/시스템(센서)
QUANTUM VENTURES (스위스)	• 기업소개 : 양자기술의 실제 적용에 투자(딥테크 투자) • 홈페이지 : https://www.quantumventures.uk • 연 락 망 : Marta Areny, m.areny@quantumventures.ch • 주요시장 : 서비스(투자)
R QUANTECH (스위스)	• 기업소개 : 양자알고리듬, 양자측정을 통해 Holo-Networks 기반 블록체인 허용 • 주요제품 : RTranscender(Field Programmable Analogical Arrays 하드웨어 기반 모듈) • 홈페이지 : https://rquantech.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Zurich Instruments (스위스)	• 기업소개 : 첨단 기기 제작 및 공급 • 주요제품 : 양자컴퓨팅 시스템, 락인앰플리파이어, 임피던스 분석기, 임의 파형 발생기, 위상 고정 루프, PID Controllers, Boxcar 평균기, LabOne 소프트웨어 • 홈페이지 : https://www.zhinst.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기), 서비스(제조)
6th Generation of Computing Quantum(6GCO) (영국)	• 기업소개 : 차세대 컴퓨팅 6GCO 도입 • 홈페이지 : https://www.6gco.org • 연 락 망 : Gagan Garg, gagan@6gco.org
Anchored In (영국)	• 기업소개 : 비즈니스 아이디어 실현 지원 • 주요제품 : 양자, 포토닉스 및 디지털 기술의 회사 성장, 공공 및 민간 자금 조달, 시장 조사 • 홈페이지 : https://www.anchoredin.uk • 연 락 망 : Anke Lohmann, anke.lohmann@anchoredin.uk • 주요시장 : 서비스(컨설팅, 투자)
Bay Photonics (영국)	• 기업소개 : 다양한 기판/패키지/모듈에 대한 반도체/마이크로 전자/광자 조립 공정 제공 • 주요제품 : 다이 본더, 와어어 본더, 볼 본더, 웨지 본더, 챔버 등 • 홈페이지 : https://www.bayphotonics.com • 연 락 망 : John Parham john.parham@bayphotonics.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기), 서비스(제조)
Cambridge Quantum Computing (영국)	• 기업소개 : 엔터프라이즈 양자솔루션 개발 • 주요제품 : Quantum Origin(암호화 키 생성 클라우드 호스팅 플랫폼) • 홈페이지 : https://cambridgequantum.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Craft Prospect Ltd (영국)	• 기업소개 : 우주 기반 QKD 전달 지원 기술과 서비스 개발 • 주요제품 : Forwards looking imager • 홈페이지 : https://craftprospect.com • 주요시장 : 응용/시스템(기타), 소프트웨어(기타)
Crypta Labs (영국)	• 기업소개 : 양자 난수 발생 기술 적용 보안 통신 제공 • 주요제품 : 하드웨어, 구성요소 및 서비스로서의 양자 • 홈페이지 : https://cryptalabs.com • 주요시장 : 응용/시스템(기타), 소프트웨어(기타)

업체명(국가명)	기업 소개 및 주요 개발 및 생산 제품
KETS (영국)	• 기업소개 : 초소형, 무게 저감, 초전력의 칩 기반 솔루션 사이버 보안 • 주요제품 : 양자광자전력, 양자보안 통합 플랫폼 • 홈페이지 : https://kets-quantum.com • 주요시장 : 하드웨어(광원), 소프트웨어(기타)
NU Quantum (영국)	• 기업소개 : 단일 광자 방출 및 감지 가능 양자장치 제공, Cavendish 실험실에서 생성된 연구 상용화를 위해 설립 • 홈페이지 : https://nu-quantum.com • 주요시장 : 하드웨어(광원/검출기)
Oxford Quantum Circuits (영국)	• 기업소개 : 초전도 회로 개발 • 주요제품 : Coaxmon • 홈페이지 : https://oxfordquantumcircuits.com • 주요시장 : 하드웨어(전자기기)
Photon Force (영국)	• 기업소개 : 시간 분해 이미징 기반 이미지 감지, 단일 광자 감지 및 타이밍 기능 보유 장치 개발 • 주요제품 : PF32 시간 상관 단일 광자 카운팅 카메라 • 홈페이지 : https://www.photon-force.com • 주요시장 : 응용/시스템(타이밍, 기타), 하드웨어(광원/검출기)
Phasecraft (영국)	• 기업소개 : 양자이론 및 소프트웨어 개발 • 주요제품 : 화학 반응 시뮬레이션, 물류 제약 조건 해결 • 홈페이지 : https://www.phasecraft.io • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
Quantopticon (영국)	• 기업소개 : 양자광학 구성요소 설계 및 최적화 프로세스 개선 • 주요제품 : 양자광자 장치 모델링 지원 • 홈페이지 : https://quantopticon.co.uk • 연 락 망 : Mirella Koleva, mirella@quantopticon.co.uk • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
QuantrolOx (영국)	• 기업소개 : 큐비트 조정, 안정화 및 최적화 목적 양자기술을 위한 자동화 제어 소프트웨어 구축 • 주요제품 : 양자제어를 위한 기계 학습 기반 소프트웨어 • 홈페이지 : https://quantrolox.com • 연 락 망 : Vishal Chatrath, vishal@quantrolox.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반)
QuantumDice (영국)	• 기업소개 : 소형 완전 내장형 자체 인증 양자 난수 생성기 상용화 • 주요제품 : QRNG 장치 • 홈페이지 : https://quantum-dice.com • 주요시장 : 응용/시스템(기타), 소프트웨어(기타)
Quantum Motion (영국)	• 기업소개 : 유비쿼터스 실리콘 기술 기반 확장 가능 큐비트 어레이 플랫폼 개발 • 홈페이지 : https://quantummotion.tech • 주요시장 : 소프트웨어(기타)
QURECA Ltd (영국)	• 기업소개 : 전문 서비스, 비즈니스 개발, 교육 및 채용을 위한 온라인 플랫폼 제공 • 홈페이지 : https://qureca.com • 연 락 망 : Araceli Venegas-Gomez, info@qureca.com • 주요시장 : 소프트웨어(기타), 서비스(전문서비스 기타)
Rahko (영국)	• 기업소개 : 양자화학을 위한 양자기계 학습, 양자머신러닝 • 홈페이지 : https://rahko.ai • 주요시장 : 소프트웨어(일반)
Riverlane (영국)	• 기업소개 : 양자컴퓨터를 실험 기술에서 사용 제품으로 변환하는 소프트웨어 구축 • 주요제품 : Deltaflow.OS® • 홈페이지 : https://www.riverlane.com • 주요시장 : 소프트웨어(일반)
Single Frequency DPSS lasers for QT(영국)	• 기업소개 : 단일 주파수 DPSS 레이저 제작 • 주요시장 : 하드웨어(레이저)

※ https://qt.eu/about-quantum-flagship/the-european-community/directories

Qflag의 회원인 대학교와 연구소는 [그림 V-2-7]에 표시한 것처럼 네덜란드, 독일, 몰타, 스페인, 에스토니아, 오스트리아, 이탈리아, 프랑스, 핀란드, 스위스, 영국 등 11개국 43개로 나타나고 있다.

그림 V-2-7 Qflag 회원 대학교와 연구소



미국 QED-C처럼 대학교 자체가 회원으로 가입하거나, 학과 또는 연구실 단위로 가입한 곳도 있으며, 몇 개의 대학교가 그룹을 조직해 단체로 가입한 사례도 있는데 이 경우는 Quantum Flagship의 프로젝트에 따라 각 대학교 간 협업을 이룬 것으로 보인다. 예를 들어 독일의 Dissemination of Quantum and Society는 예나 대학교(University of Jena), 라트비아 대학교(University of Latvia), 부쿠레슈티 대학교(University of Bucharest), 이바스킬라 대학교(University of Jyväskylä) 및 폰티펙스 대학교(Pontifex University) ICADE로 구성된 연구 연합체로 양자에 대한 사회의 반응과 유럽에서 양자기술이 어떻게 진화하는지 분석하기 위해 설립됐다. 아래의 〈표 V-2-2〉는 Qflag 회원 대학교와 연구소의 관련 조직에 대한 정보를 보여주고 있다.

표 Ⅴ-2-2 Qflag 회원 대학교와 연구소 내 양자 관련 기관

국가명	명칭	양자연구 관련 학과 및 연구소
네덜란드	암스테르담 응용 과학 대학교 (Amsterdam University of Applied Sciences)	• 관련조직 : Applied Quantum Computing : 양자델타 네덜란드 재단(QDNL)과 응용 연구 SIA 태스크포스(Taskforce for Applied Research SIA)에서 공동 자금 지원한 AUAS와 수학과 컴퓨터 과학 센터(CWI)가 공동으로 설립해 양자컴퓨팅 응용 프로그램 개발 • 홈페이지 : https://www.amsterdamuas.com
독일	하이델베르크 대학교 (University of Heidelberg)	• 관련조직 : The Heidelberg Center for Quantum Dynamics : 막스 플랑크 연구소(Max-Planck Institutes)와 협업해 소물체 물리학과 다물체 물리학의 경계선에서 양자시스템의 역학에 관한 근본적인 질문에 전념 • 홈페이지 : https://cqd.uni-heidelberg.de
독일	Dissemination of Quantum and Society	• 관련조직 : 예나 대학교, 라트비아 대학교, 부쿠레슈티 대학교, 이바스킬라 대학교 및 폰티펙스 대학교 ICADE 연구 연합체
독일	자를란트 대학교(Saarland University)	• 관련조직 : Quantum and Solid-State Theory Group : 초전도 회로와 같은 고체 시스템을 사용하는 양자컴퓨터 구현에 중점 • 홈페이지 : http://qsolid.uni-saarland.de
독일	브라운슈바이크 공과대학교 (Technische Universität Braunschweig)	• 관련조직 : LENA Laboratory for Emerging Nanometrology : 나노 시계의 중요한 감지를 위한 양자기술 개발 및 양자표준과 유비쿼터스 센서 개발 • 홈페이지 : https://www.tu-braunschweig.de/mib/lena
독일	라이프니츠 대학교 하노버 (Leibniz University Hannover)	• 관련조직 : Photonic Quantum Technologies : 소형 광자 양자 시스템 개발 • 홈페이지 : https://www.hot.uni-hannover.de/en/research-groups/photonic-quantum-technologies
		• 관련조직 : Institute for Experimental Quantum Metrology : 2009년 물리기술 연방 연구소와 라이프니츠 대학교 하노버가 공동으로 설립해 갇힌 이온 사용 시간 및 주파수 측정 목적 • 홈페이지 : https://www.quantummetrology.de/home/about-quest
독일	울름 대학교 (University of Ulm)	• 관련조직 : Institute of Theoretical Physics : 개방형 양자시스템 이론, 양자정보학, 생물학의 양자효과, 생물학의 양자물리학 등 연구 • 홈페이지 : https://www.uni-ulm.de/en/nawi/institut-fuer-theoretische-physik-start-page
독일	프라운호퍼 (Fraunhofer)	• 관련조직 : Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation : 양자알고리듬과 산업적 응용, 양자 후 암호화 응용 및 양자 키 분배 체계 관련 연구 • 홈페이지 : https://www.iosb.fraunhofer.de
몰타	몰타 대학교 (University of Malta)	• 관련조직 : Quantumalta : 강한 결맞음을 사용해 더 정확한 측정이나 빠른 계산을 할 수 있는 방법에 대해 연구 • 홈페이지 : https://www.quantum.edu.mt
스페인	카스티야라만차 대학교 (University of Castilla-La Mancha)	• 관련조직 : Alarcos Research Group : 양자 소프트웨어 공학 측면에 중점, 사회 및 인구 통계학적 현상 연구를 위한 고급 데이터 분석 및 컴퓨팅 기술 적용 • 홈페이지 : https://alarcos.esi.uclm.es/indexENG.php
스페인	바스크 지방 대학교	• 관련조직 : Quantum Computing and Quantum Technologies : 양자컴퓨팅 및 양자기술의 기초 및 구현을 위한 최첨단 이론 개발 • 홈페이지 : https://qmics.wmi.badw.de/upv-2 (University of the Basque Country)
스페인	마드리드 콤플루텐세 대학교	• 관련조직 : mathQI : 벨 부등식과 양자비국소성 및 물질의 양자위상 분류 연구 https://www.ucm.es/mathqi(Universidad Complutense de Madrid) • 홈페이지 :
스페인	바르셀로나 과학 기술 연구소	• 관련조직 : ICFO : 2002년 카탈루냐 정부와 카탈루냐 공과대학교에 의해 설립을 26개 연구그룹, 60개 실험실, 300여 명의 연구원 중 50명 이상이 양자기술 관련 연구 참여, 유럽 기술 플랫폼 포토닉스 21(Photonics21)에 참여 • 홈페이지 : https://www.icfo.eu(Barcelona Institute of Science and Technology)
스페인	마드리드 자치 대학교	• 관련조직 : IFIMAC : 나노 및 양자공학 중 플라즈모닉스 분야 연구 및 저차원 반도체 구조에서 발광 및 흡수 스펙트럼 이해 • 홈페이지 : https://www.ifimac.uam.es(Universidad Autonoma de Madrid)
에스토니아	타르투 대학교 (University of Tartu)	• 관련조직 : Institute of Physics : Bell 및 Greenberger-Horne- Zeilinger 상태 생성 및 제어 • 홈페이지 : https://fi.ut.ee
오스트리아	린츠 대학교 (University Linz)	• 관련조직 : Design Automation for Quantum Computing : 양자컴퓨터를 위한 설계 자동화와 양자알고리듬/회로의 설계 및 구현 방법 및 웹 도구 MQT DDVis 제공 • 홈페이지 : https://iic.jku.at
오스트리아	비엔나 대학교 (University Vienna)	• 관련조직 : Quantum Optics, Quantum Nanophysics and Quantum Information : 양자정보처리, 광학 정밀도 측정, 양자기반 및 양자정보이론, 상대론적 양자정보 및 계측, 다체 양자이론에 대한 연구 • 홈페이지 : https://quantum.univie.ac.at
이탈리아	파도바 대학교 (DEI-University of Padova)	• 관련조직 : QuantumFuture : 지상과 우주 자유 공간의 양자통신을 위한 광섬유 기반 광통신 연구 • 홈페이지 : https://quantumfuture.dei.unipd.it
이탈리아	토리노 대학교 (University of Torino)	• 관련조직 : Physics Department : 다이아몬드 물리학, 고온 및 중 임계 온도 초전도 물질의 생산 및 특성화 및 나노 구조 재료 • 홈페이지 : http://www.solid.unito.it
이탈리아	물리학 연구소 (Foundation of Physics Research Center)	• 관련조직 : 컴퓨팅 튜링 장벽(Turing Barrier)을 깨뜨릴 수 있는 양자 하이퍼컴퓨터 개발, 산업 프로토타입 구현 및 투자 유치를 위한 인큐베이터 활동 참여 • 홈페이지 : https://www.foprc.org/qhl
이탈리아	파비아 대학교 (University of Pavia)	• 관련조직 : Department of Physics : 위상 및 저차원 물질에 대한 양자특성 연구 • 홈페이지 : https://fisica.unipv.it/bellani
이탈리아	로마 라 사피엔자 대학교 (Sapienza University of Rome)	• 관련조직 : Quantum Information Lab and Quantum Optics Group : 집적 광자 회로를 통한 양자정보 프로토콜 구현 • 홈페이지 : http://www.phys.uniroma1.it
		• 관련조직 : Quantum Lab : 다중 매개변수 추정과 보존 샘플링 구현 및 검증 • 홈페이지 : https://www.quantumlab.it
프랑스	엑스 마르세유 대학교(Aix-Marseille University)	• 관련조직 : Natural Computing team, LIS laboratory : 양자정보학과 물리학 또는 생물학 간 연결 기반 자연 계산 연구 • 홈페이지 : https://cana.lif.univ-mrs.fr
프랑스	재료 및 구조 연구개발 센터	• 관련조직 : Atom Tech and Quantum Nanosciences : 양자정보 처리의 소형화를 위해 양자에서 고전적 정보 변환이 가능한 기계 구성을 위해 7개 연구팀 참여 • 홈페이지 : https://www.cemes.fr/gns?lang=fr (Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales, CEMES-CNRS)
프랑스	소르본 대학교 (Sorbonne University)	• 관련조직 : CNRS, LIP6 : 파리 양자컴퓨팅 센터 창립 멤버, 인공지능 및 데이터 과학, 아키텍처, 시스템 및 네트워크, 안전, 보안 및 신뢰성 및 컴퓨팅 이론 및 수학 이용 양자역학의 기초 이해 가능 방법 탐구 • 홈페이지 : https://www.lip6.fr

국가명	명칭	양자연구 관련 학과 및 연구소
핀란드	알토 대학교 (Aalto University)	• 관련조직 : Department of Communciations and Networking : 양자계산, 양자 키 분배 프로토콜 및 마이크로파 양자통신을 위한 매트릭스 설계 • 홈페이지 : https://www.aalto.fi/en/department-of-communications-and-networking
		• 관련조직 : Centre for Quantum Engineering : 전도 및 탄소 기반 양자나노전자 및 장치, 저온 원자 가스의 이론 및 응용 등 연구 • 홈페이지 : https://www.aalto.fi/sv/centre-for-quantum-engineering-cqe
		• 관련조직 : QCD Labs : 초전도 회로를 사용한 실험적 양자물리학 연구 • 홈페이지 : https://www.aalto.fi/en/department-of-applied-physics/optics-and-photonics
핀란드	위베스퀼레 대학교 (University of Jyväskylä)	• 관련조직 : Hybrid Quantum Technologies in Silicon : 실리콘을 사용해 새로운 양자기술 개발 • 홈페이지 : https://www.jyu.fi/science/en/physics/research/materials-physics/quantum-technologies
핀란드	핀란드 양자기술 (Quantum Technology Finland, QTF)	• 관련조직 : 고체 상태에서 양자현상 조사 위해 2018~2025년까지 연구를 위해 11개 연구그룹, 140여명 연구원으로 구성, 알토 대학교, 헬싱키 대학교 및 VTT 기술 연구 센터 100여 명의 연구원이 공동 연구 참여 • 홈페이지 : https://qtf.fi
핀란드	탐페레 대학교 (Tampere University)	• 관련조직 : Theoretical Optics and Photonics : 간 분산 및 형광, 초고속 편광 효과, 사중극자 광학 메타표면, 광학 회절 억제, 나노 물질에 의한 빔 굴절, 광학 나노리소그래피 • 홈페이지 : https://www.aalto.fi/en/department-of-applied-physics/optics-and-photonics
영국	리즈 대학교 (University of Leeds)	• 관련조직 : Theoretical Physics Group : 양자다물체 물리학, 물질 토폴로지의 위상, 비평형 양자역학, 전산 생물 물리학, 양자광학 및 양자장 이론, 양자기술 • 홈페이지 : https://theory.leeds.ac.uk
영국	노비고 보조금 기금	• 관련조직 : Quantum Grant Funding • 홈페이지 : http://novigogrants.co.uk (Novigo Grant Funding)
영국	RAL Space	• 관련조직 : Quantum Sensors : 양자기술을 우주에 배치하기 위해 필수 하위 시스템과 우주에서 더 정확한 중력 측정값을 얻고 측정 시간을 줄이기 위해 양자기술의 제어 시스템용 전자 장치와 저온 원자 중력계 개발 • 홈페이지 : https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Cold-Atoms-and-Quantum-Sensors.aspx
영국	더럼 대학교 (Durham University)	• 관련조직 : Quantum Light and Matter Research : 양자빛과 물질에 대한 근본적인 이해 향상 • 홈페이지 : https://www.dur.ac.uk/qlm
영국	글래스고 대학교 (University of Glasgow)	• 관련조직 : Quantum Circuits Group : 초전도 스핀트로닉스, 양자공학 나노전자 회로 및 양자정보처리 분야 적용 나노전자 회로 개발 • 홈페이지 : https://www.gla.ac.uk/schools/engineering/research/divisions/ene/researchthemes/micronanotechnology/quantumcircuits/#tabs-1
스위스	스위스 양자허브	• 관련조직 : Swiss Quantum Hub • 홈페이지 : https://www.swissquantumhub.com
스위스	취리히 연방 공과대학교	• 관련조직 : MSc Quantum Engineering • 홈페이지 : https://master-qe.ethz.ch (ETH Zurich)
스위스	바젤 대학교 (University of Basel)	• 관련조직 : Quantum Optics and Atomic Physic : 양자이미징 장치 개발 및 고체 상태 나노시스템과 원자 사이의 양자 인터페이스 조사 • 홈페이지 : https://atom.physik.unibas.ch
스위스	제네바 대학교 (University of Geneva)	• 관련조직 : Quantum Correlations : 양자정보처리, 양자기초 및 양자열역학의 이론 분야에 대한 연구 • 홈페이지 : https://www.unige.ch/gap/qic/theory
		• 관련조직 : Quantum Technologies : 생체 광자학에서 감지 및 이미징을 위해 활용하기 위한 양자계측 • 홈페이지 : https://www.unige.ch/gap/qic/qtech

Qflag에 가입한 연구소 및 기타 기관은 〈표 V-2-3〉와 〈표 V-2-4〉에 각각 나타냈다. 가입한 12곳의 연구 기관이 속한 나라는 각각 독일, 벨기에, 슬로베니아, 오스트리아, 이탈리아, 폴란드, 프랑스 등으로 대다수가 각 나라의 국립 연구기관이다. 특이한 것은 독일의 프라운호퍼 연구소는 학계 회원으로 가입한 곳이 있는가 하면 연구소 회원으로 가입한 곳이 있다. 한편 기타 기관은 협회나 벤처를 지원하는 곳 등으로 파악되고 있다.

표 V-2-3 Qflag 회원 연구소

국가명	기관명	양자 관련 기관 및 연락망
독일	율리히 연구소 (Forschungszentrum Jülich)	• 전문분야 : 반도체와 초전도체 큐비트 • 홈페이지 : https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Personen/PGI/PGI-2/EN/DiVincenzo_D.html?nn=764964 • 연 락 망 : David DiVincenzo, d.divincenzo@fz-juelich.de
독일	프라운호퍼 하인리히 헤르츠 연구소	• 전문분야 : 광통신 및 양자회로 개발 지원 • 홈페이지 : https://www.hhi.fraunhofer.de (Fraunhofer Heinrich Hertz Institute, HHI) • 연 락 망 : Moritz Kleinert, moritz.kleinert@hhi.fraunhofer.de
독일	독일 PTB 양자기술 역량센터	• 전문분야 : 양자계측 및 양자센서 연구 : 광학 원자시계, 시간 및 주파수 분포, 전기 양자계측, 양자컴퓨터, 작은 자기장 측정, 단일 광자 검출기 및 양자통신과 관련된 소스 • 홈페이지 : https://www.ptb.de/cms/seite-nicht-gefunden.html(German Competence Centre for Quantum Technology at PTB) • 연 락 망 : Nicolas Spethmann, nicolas.spethmann@ptb.de
독일	프라운호퍼 포토닉 마이크로시스템 연구소	• 전문분야 : (광자) 마이크로소프트 시스템, 마이크로 시스템 기술, 나노 전자 기술 및 무선 마이크로 시스템 분야 응용 연구, 반도체와 초전도체를 기반으로 한 고체 큐비트의 제조에 집중 • 홈페이지 : https://www.ipms.fraunhofer.de (Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems) • 연 락 망 : Maik Simon, maik.simon@ipms.fraunhofer.de
독일	프라운호퍼 IAF (Fraunhofer IAF)	• 전문분야 : III-V 반도체 및 합성 다이아몬드 공급망 • 홈페이지 : https://www.iaf.fraunhofer.de • 연 락 망 : Laura Hau, laura.hau@iaf.fraunhofer.de
벨기에	유럽연합 집행위원회 공동연구센터	• 전문분야 : 양자물리학 및 기술 • 홈페이지 : https://www.quantumphi.com(Joint Research Centre of the European Commission)

국가명	기관명	양자 관련 기관 및 연락망
슬로베니아	요제프 스테판 연구소 (Jozef Stefan Institute)	• 전문분야 : 약 960명의 연구원이 양자과학연구, 슬로베니아 대학과 밀접한 관계, 2007년 한국기초과학연구원과 협약 체결 • 홈페이지 : https://www.ijs.si/ijsw/V001/Jsi • 연 락 망 : Rok Žitko, rok.zitko+qt@ijs.si
슬로베니아	Laboratory LECAD	• 전문분야 : 고급 컴퓨팅 및 엔지니어링 설계 • 홈페이지 : https://www.lecad.fs.uni-lj.si • 연 락 망 : Janez Povh, janez.povh@lecad.fs.uni-lj.si
오스트리아	오스트리아 공과대학 (Austrian Institute of Technology)	• 전문분야 : 양자암호화 솔루션 시스템 설계 및 통합 • 홈페이지 : https://www.ait.ac.at/en/research-fields/physical-layer-security/optical-quantum-technologies • 연 락 망 : Hannes Hübel, hannes.huebel@ait.ac.at
이탈리아	복합시스템연구소 (Institute for Complex Systems, CNR)	• 전문분야 : 나노광자 시스템 및 초전도체의 광학적 비선형성 기반 양자기술에 대한 이론과 실험 • 홈페이지 : https://www.isc.cnr.it • 연 락 망 : José Lorenzana, jose.lorenzana@cnr.it
폴란드	포즈난 슈퍼컴퓨팅 및 네트워킹 센터	• 전문분야 : 컴퓨팅 파워 및 아카이브 시스템 • 홈페이지 : https://www.psnc.pl (Poznan Supercomputing and Networking Center, PSNC) • 연 락 망 : Piotr Rydlichowski, prydlich@man.poznan.pl
프랑스	원자력 및 대체에너지 위원회	• 전문분야 : 원자력 분야 기초과학 및 공학 연구 • 홈페이지 : https://www.cea.fr (The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, CEA)

표 Ⅴ-2-4 Qflag 회원 기타 기관

국가명	대학교 및 기관명	양자연구 관련 학과 및 연구소
독일	SPECTARIS	• 전문분야 : 광학, 포토닉스, 분석 및 의료 기술 산업 협회 • 홈페이지 : https://www.spectaris.de • 연 락 망 : Wenkio Süptitz, sueptitz@spectaris.de
독일	양자비즈니스 네트워크 (Quantum Business Network UG)	• 전문분야 : 국제 양자비즈니스 네트워크 • 홈페이지 : https://quantumbusinessnetwork.de • 연 락 망 : Johannes Verst, info@quantumbusinessnetwork.de
스페인	secpho	• 전문분야 : 광자 기술 전문가, 기업, 기술 센터 및 연구 그룹 기술 혁신 클러스터 • 홈페이지 : https://www.secpho.org • 연 락 망 : Sergio Sáez, sergio.saez@secpho.org
이탈리아	양자캐피탈 투자 (Quantum Capital Investment)	• 전문분야 : 벤처 캐피털 회사 • 홈페이지 : https://www.indacosgr.com • 연 락 망 : Cosimo Calcagno, cosimo.calcagno@indacosgr.com
프랑스	ALPHA-RLH	• 전문분야 : 광자 및 마이크로웨이브 기술 • 홈페이지 : https://www.alpha-rlh.com
영국	양자런던 (Quantum London)	• 전문분야 : 양자컴퓨팅의 비즈니스 전문가 그룹 • 홈페이지 : https://www.linkedin.com/company/quantum-london • 연 락 망 : Paolo Cuomo, qt.eu@artplusfunction.co.uk
스위스	스위스 양자허브 (Swiss Quantum Hub)	• 전문분야 : 양자컴퓨팅에서 Think Tank와 Startup • 홈페이지 : https://www.swissquantumhub.com • 연 락 망 : Franck Franchin, franckf@voltanode.com

제3장 기타 국가 (캐나다 QIC, 일본 Q-STAR)

1. 캐나다 QIC (Quantum Industry Canada)

캐나다는 자국 내 양자기술의 상용화를 촉진하고 캐나다의 경제적 번영을 지속하기 위해 2020년 10월에 캐나다 양자산업협회(Quantum Industry Canada, QIC)를 출범했다. QIC는 '세계적 수준의 양자기술 기초 연구를 기반으로 양자시장 초기 선점'이라는 사명 아래 설립됐다. 창립 회원사로 D-Wave, 1Qbit, Xanadu, Zapata 등 24개의 양자기술 기업들이 참여했으며, 올해 9월 1일을 기준으로 8개의 회원사가 추가돼 총 32개의 기업이 협력하고 있다. QIC의 회원사는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅 등 양자 全분야를 아우르며, 캐나다에서 가장 상용화에 근접한 기업으로 구성됐다. QIC는 전문 지식과 전략적 시장 접근을 통해 캐나다의 양자 관련 기업을 적극적으로 지원하며, 자국의 양자기술 상용화를 글로벌 무대에 알리기 위해 주 정부 및 연방정부와 손잡고 있다.

QIC의 모든 회원사는 크게 소통, 교육, 인프라, 지원 총 4가지를 목표로 협력한다. 먼저 소통의 경우 QIC는 전략적 파트너와 투자자, 수요 기관 등 글로벌 무대를 대상으로 캐나다의 양자기술 상용화 정도를 널리 알림으로써, 세계 양자시장에서의 점유율을 높이는 데에 방점을 찍었다. 교육적 측면으로는 양자기술에 대한 캐나다의 성장 기회를 홍보해 양자생태계 내 신생 기업의 유치를 촉진하고, 인재 양성을 위한 자금을 유치하고자 한다. 또한 양자기술의 연구개발부터 상용화에 이르기까지 캐나다의 양자기업을 위한 초기 상업 경로를 구축하는 등 전략적 파트너와 투자자, 정부로 이루어진 네트워크 인프라를 활용해 양자생태계를 확장하고자 노력한다. 마지막으로 양자스타트업 및 성숙 기업이 세계적인 수준의 상업적 성공을 달성할 수 있도록 사업 전략, 협업 마케팅 등 다양한 방면의 전문 지식을 지원한다.

그림 V-3-1 캐나다 QIC 활동 목표



※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

QIC는 캐나다 온타리오주 토론토에 본사를 두고 있으며, 분기별로 회의를 진행한다. QIC의 이사회는 총 5명으로 구성되어 있으며, 1명의 의장과 4명의 회원으로 이루어져 있다.

표 Ⅴ-3-1 캐나다 QIC 이사회 개요

회원	이름	소개
	Michele Mosca	現) QIC 의장 現) evolutionQ 최고경영자 前) softwareQ 공동창립자
	Bruno Couillard	現) QIC 이사회 회원 現) Crypto4A 최고기술책임자 & 최고경영자
	Rachel Taylor	現) QIC 이사회 회원 現) SBQuantum 공동창립자 & 최고경영자
	Sally Daub	現) QIC 이사회 회원 現) Pool Global Partners 창립자
	Phil Kaye	現) QIC 이사회 회원 現) NRC 양자센서·컴퓨터 도전프로그램 부국장 前) D-Wave 프로그램 디렉터

※ 집필진 작성

QIC는 캐나다의 양자기술 개발 및 상용화를 활성화하기 위해 2022년 1월 온타리오 혁신 센터(Ontario Center of Innovation, OCI)와 파트너십을 체결했다.[22] 두 기관은 양자기술이 의료, 제약, 자원, 금융, 통신, 보안 등 산업 전반에 가져올 막대한 영향력을 인지하고, 캐나다 전역의 비즈니스 네트워크 강화 및 성장 역량 구축에 힘을 쏟고 있다. QIC와 OCI는 각각이 가진 양자기술 전문성과 혁신 네트워크 전문성을 토대로 범국가적 차원의 양자혁신을 일으키기 위한 효과적 협력에 집중하고 있다.

22) https://oc-innovation.ca/

그림 Ⅴ-3-2 QIC-OCI 파트너십 체결(2022)



※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

QIC는 양자통신, 양자센싱, 양자컴퓨팅뿐만 아니라 관련 애플리케이션 기업이 포함된 컨소시엄으로, 올해 9월 기준 32개의 기업이 참여하고 있다. 컨소시엄 기업들을 분야별로 구분하면 양자통신 기업 10개, 양자센싱 기업 3개, 양자컴퓨팅 기업 17개, 양자소재·부품·장비 기업 2개로 양자컴퓨팅 기업으로만 이루어진 타 양자기술 선도국 협의체와는 달리 균형 있게 조직된 협회임을 확인할 수 있다. 또한 QIC는 딥 테크(Deep Tech) 벤처기업 투자자인 POOL Global Partners를 지원 파트너(Supporting Partner)로 삼아 캐나다 기업의 상용화 관련 자금 조달을 지원하고 있다.[23]

표 Ⅴ-3-2 QIC 양자통신 기업 개요

기관명	회원 소개 및 개요
CEW Systems Canada Inc.	• 기업소개 : 암호화 회사로 무선통신시스템, 대칭 데이터베이스 암호화 등 다용도의 양자탄력 암호화 기술 제공
	• 홈페이지 : https://www.cew-s.com/
	• 네트워크 : Chad Wanless (contact@cew-s.com)
Crypto4A	• 기업소개 : 오타와에 기반을 둔 스타트업으로 HSP(Hybrid Security Platform) 등 양자기반 사이버 보안 솔루션 제공
	• 홈페이지 : http://crypto4a.com
	• 네트워크 : Bruno Couillard | bruno@crypto4a.com
EvolutionQ	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 시대의 위험 관리 전략과 강력한 사이버 보안 도구 제공
	• 홈페이지 : https://evolutionq.com
	• 네트워크 : Michele Mosca | michele.mosca@evolutionq.com

23) https://zpcryo.com

기관명	회원 소개 및 개요
Infosec Global	• 기업소개 : 암호화 어질리티(Crypto Agility) 관리 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://www.infosecglobal.com
	• 네트워크 : Vladimir Soukharev | vladimir.soukharev@infosecglobal.com
ISARA Corporationd	• 기업소개 : 양자보안 솔루션 및 서비스 제공
	• 홈페이지 : https://isara.com
	• 네트워크 : Angelo Fasulo | angelo.fasulo@isara.com
Ki3 Photonics Technologies Inc.	• 기업소개 : 기존 통신 네트워크에서 구현할 수 있는 양자광자 솔루션 개발
	• 홈페이지 : http://ki3photonics.com/
	• 네트워크 : Yoann Jestin | yoann@ki3photonics.com
NXM Labs Inc.	• 기업소개 : 자율 보안 소프트웨어 제공
	• 홈페이지 : https://nxmlabs.com
	• 네트워크 : Holly Garnder | holly@nxmlabs.com
QEYnet	• 기업소개 : 우주 기반 양자 키 분배(QKD) 기술을 활용한 암호화 제품 및 서비스 구축
	• 홈페이지 : https://qeynet.com
	• 네트워크 : Jennifer Elliott | jelliott@qeynet.com
Quantropi	• 기업소개 : 자사 특허 기술을 활용한 세계 최초의 디지털 QKD 서비스 QiSpace™ 등 제공
	• 홈페이지 : https://www.quantropi.com/
	• 네트워크 : James Nguyen | james.nguyen@quantropi.com
Quantum Bridge Technologies (QBT)	• 기업소개 : 양자중계기 개발 및 양자인터넷 구축
	• 홈페이지 : https://quantumbridgetech.com
	• 네트워크 : Mattia Montagna | mattia@quantumbridgetech.com

※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

표 Ⅴ-3-3 QIC 양자센서 기업 개요

기관명	회원 소개 및 개요
High Q Technologies Inc.	• 기업소개 : 양자센싱 분야 스타트업으로 현재 초고감도 화학 분석을 위한 Electron Spin Resonance 제품 개발
	• 홈페이지 : www.highqtechnologies.com
	• 네트워크 : Andrew Boorn | andrew.boorn@highqlp.com
SB Quantum	• 기업소개 : 우주, 국방 등에 활용되는 NV 센서 개발
	• 홈페이지 : https://sbquantum.com
	• 네트워크 : David Roy-Guay | info@sbquantum.com
to. technology	• 기업소개 : 양자센싱 및 양자컴퓨팅 기업으로 초전도 양자장비를 위한 지상 및 우주 기반 제어 장비 개발
	• 홈페이지 : https://www.t0.technology/
	• 네트워크 : Joshua Montgomery | joshua@t0.technology

※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

표 Ⅴ-3-4 QIC 양자컴퓨팅 기업 개요

기관명	회원 소개 및 개요
1QBit	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 최적화, 시뮬레이션, 머신 러닝, 하드웨어 혁신 등 산업 난제 해결
	• 홈페이지 : https://1qbit.com
	• 네트워크 : Artur Scherer | artur.scherer@1qbit.com
Adaptive Finance Techonolgies (AFT)	• 기업소개 : 양자머신러닝 창업자 육성 프로그램을 통해 탄생한 기업으로 양자AI 기반 투자 관리 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://adaptive.finance
	• 네트워크 : Roman Lutsiv | rlutsiv@adaptive.finance
Agnostiq	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 오픈 소스 워크플로우 오케스트레이션 플랫폼(Open source workflow orchestration platform)인 Covalent 개발
	• 홈페이지 : https://agnostiq.ai
	• 네트워크 : Oktay Goktas | oktay@agnostiq.ai
Anyon Systems Inc.	• 기업소개 : 내결함성 게이트 기반 양자계산을 위한 토폴로지(Topological) 양자컴퓨팅 플랫폼 개발
	• 홈페이지 : http://anyonsys.com
	• 네트워크 : Alireza Najafi-Yazdi (ayazdi@anyonsys.com)
CogniFrame	• 기업소개 : 하이브리드 머신러닝 기업으로 양자어닐러를 활용해 금융 시장 난제 해결
	• 홈페이지 : https://cogniframe.com
	• 네트워크 : Vish | info@cogniframe.com
D-Wave	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어 기업으로 세계 최초로 상용 양자컴퓨터 개발
	• 홈페이지 : https://www.dwavesys.com
	• 네트워크 : Allison Schwartz | aschwartz@dwavesys.com
Entangled Networks	• 기업소개 : Multi-QPU 양자컴퓨팅 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://entanglednetworks.com
	• 네트워크 : Aharon Brodutch | info@entanglednetworks.com
NanoAcademic	• 기업소개 : 재료 과학, 나노전자공학 및 양자전송을 위한 제1원칙 원자 시뮬레이션 소프트웨어 개발
	• 홈페이지 : https://www.nanoacademic.com
	• 네트워크 : Jeremy F. Garaffa | jeremy.garaffa@nanoacademic.com
NetraMark	• 기업소개 : 양자계산을 활용해 차세대 대화형 기계 지능 플랫폼 개발
	• 홈페이지 : https://netramark.com
	• 네트워크 : Joseph Geraci | joseph.geraci@netramark.com
OTI Lumionics	• 기업소개 : 양자 시뮬레이션, 머신러닝 등을 활용한 재료 발견 플랫폼 제공
	• 홈페이지 : https://otilumionics.com
	• 네트워크 : Michael Helander | michael.helander@otilumionics.com
Photonic	• 기업소개 : 스핀-광자 인터페이스, 실리콘 광자, 양자광학 등 차세대 양자기술 개발
	• 홈페이지 : https://photonic.com
	• 네트워크 : Alex Popov | apopov@photonic.com
ProteinQure	• 기업소개 : 토론토 기반의 스타트업으로 양자컴퓨팅, 분자 시뮬레이션 및 기계 학습을 활용해 단백질 치료제 설계 플랫폼 구축
	• 홈페이지 : https://proteinqure.com
	• 네트워크 : Tomas Babej | tomas@proteinqure.com

기관명	회원 소개 및 개요
Quantum Benchmark	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 오류 진단 및 오류 억제, 성능 검증 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://quantumbenchmark.com
	• 네트워크 : Kristine Boone | kristine@quantumbenchmark.com
softwareQ	• 기업소개 : 양자 소프트웨어 기업으로 고수준 알고리듬 설계부터 최적화까지 풀 스택 플랫폼 제공
	• 홈페이지 : https://softwareq.ca
	• 네트워크 : Vlad Gheorghiu | vlad@softwareq.ca
Solid State AI	• 기업소개 : 양자머신러닝 소프트웨어 AIMS를 통해 최적화 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://solidstate.ai
	• 네트워크 : Abhi Rampal | abhi@solidstate.ai
Xanadu	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 하드웨어 및 소프트웨어 기업으로 범용 양자컴퓨터를 구축하고, 양자기계학습 및 응용 프로그램 개발을 위한 오픈 소스 소프트웨어 라이브러리인 PennyLane 개발 주도
	• 홈페이지 : xanadu.ai
	• 네트워크 : david@xanadu.ai
Zapata Computing	• 기업소개 : 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업으로 화학, 물류, 금융, 가스, 제약, 재료 등 다양한 분야에 솔루션 제공
	• 홈페이지 : https://zapatacomputing.com
	• 네트워크 : Pierre-Luc | pierre-luc@zapatacomputing.com

※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

표 Ⅴ-3-5 QIC 양자소재·부품·장비 기업 개요

기관명	회원 소개 및 개요
Universal Quantum Devices	• 기업소개 : 타임 태깅 및 동시 계수 장비인 Logic16 개발
	• 네트워크 : Thomas Jennewein | thomas.jennewein@uwaterloo.ca
Zero Point Cryogenics	• 기업소개 : 양자기술을 위한 극저온 냉각기 제조 기업
	• 홈페이지 : https://zpcryo.com
	• 네트워크 : Chris Cassin | chris@zpcryo.com

※ https://www.quantumindustrycanada.ca/

2. 일본 Q-STAR (Quantum STrategic Alliance for Revolution)

일본의 양자기술신산업창출협의회(Quantum STrategic industry Alliance for Revolution, Q-STAR)는 2021년 9월 1일에 설립된 일본의 양자 관련 협의체이다. 설립 초기에는 도시바, 토요타, 후지쯔, NTT, NEC 등 24개 대기업 위주의 구성이었으나, 설립 이후 꾸준히 증가해 2022년 7월 기준 59개 기관으로 16개의 특별 회원(Special Member), 14개의 기업 회원(Corporate Member), 20개의 준회원(Associate Member), 1개의 학계 회원(Academic Member), 8개의 중소기업 및 스타트업 회원(Small and Medium/Start-up Member)이 확인된다. Q-STAR는 '양자기술 혁신 국가로서의 일본'이라는 비전 아래 양자기술에 기반을 둔 새로운 산업 및 비즈니스 창출을 목표로 한다. Q-STAR는 이러한 목표 달성을 위해 소재, 장비, 측정 기술, 컴퓨터, 통신 및 시뮬레이션 기술과 같은 서비스를 제공하는 신산업을 창출해 일본 산업을 진흥하고 국가 경쟁력을 높이기 위해 노력한다.

그림 Ⅴ-3-3 일본 Q-STAR 활동 범위

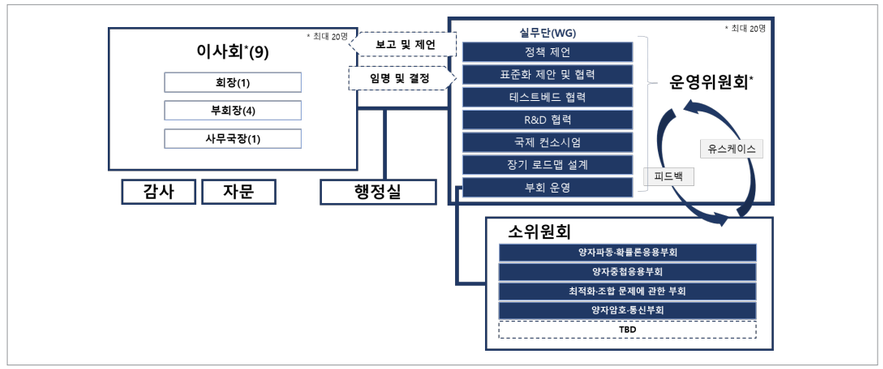


※ Q-STAR(2022)

Q-STAR는 양자기술의 상용화를 통한 중장기 신산업 창출을 위해 양자기술 주요 동향 조사 및 산업계 최고 경영진과의 공유, 다양한 산업영역별 상용화 가능성 연구 및 제안, 양자기술에 필요한 소재·부품·장비 연구 및 공유, 양자기술의 적극적인 활용에 필요한 인력 자원 양성 방법론 연구 및 제안, 양자기술 구현에 필요한 지식재산·표준화·윤리에 관한 필수 자료 연구, Q-STAR의 목표 구현을 위한 국내외 양자 관련 기관과의 협력, 국민 의식 고취 및 정책제언 등의 역할을 수행 중이다.

Q-STAR는 크게 이사회와 운영위원회, 소위원회 3개의 조직으로 구성된다. 현재 도시바의 타로 시마다(Taro Shimada) 사장이 이사회의 회장직을 맡고 있으며, 4명의 부회장은 후지쯔와 히타치, NEC, NTT의 최고 경영진급 인사가 맡고 있다. 운영위원회는 총 7개의 실무단(Working Group)으로 이뤄져 있으며, 양자기술 주요 동향을 조사하고 상용화를 위한 여러 활동을 수행하고 있다. 총 4개의 부회로 구성된 소위원회는 양자기술 유스 케이스(Use Case) 발굴에 주력하고 있으며, 이를 토대로 한 보고서를 주기적으로 발간한다.

그림 Ⅴ-3-4 일본 Q-STAR 조직도



※ Q-STAR (2022)

Q-STAR는 양자암호, 양자컴퓨팅 등 양자기술뿐만 아니라 소재·부품 등의 기반 기술, 양자센서나 양자AI 등의 주요 상용화 기술 같은 연구가 필요한 영역을 파악하기 위해 4개의 부회로 구성된 소위원회를 조직했다. 양자파동·확률론응용 부회는 양자진폭 추정 및 최적화를 활용해 신산업을 창출하는 것을 목표로 한다. 양자중첩응용 부회는 시스템, 서비스, 비즈니스 등에 양자중첩을 적용해 기존 산업 구조의 변화를 모색한다. 최적화·조합 문제에 관한 부회는 실시간 예측과 효율성, 최적화 등 산업계가 직면한 다양한 문제에 최적의 솔루션을 제공하기 위해 양자에 기반한 컴퓨팅 기술인 이징머신(Ising Machine)을 활용한다. 마지막으로 양자암호·통신 부회는 현재 상용화가 활발히 이루어지는 양자암호 통신 기술의 사업적 활용을 적극적으로 검토하고 있다.

표 Ⅴ-3-6 Q-STAR 주요 특별 회원(Special Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
캐논 (Canon)	• 기관소개 : 사무기기, 카메라, 광학기기 제조회사
	• 주요제품 : 카메라, 진단 장비, 사무용 복합기
	• 홈페이지 : https://global.canon/en/
	• 주요시장 : 카메라, 의료, 산업 장비, 사무기기
교세라 (Kyocera)	• 기관소개 : 전자기기 제조회사
	• 주요제품 : 반도체 처리 장비, 평판 디스플레이 제조 장비, 정보 및 통신 부품
	• 홈페이지 : https://global.kyocera.com/
	• 주요시장 : 정보시스템 및 통신 서비스, 엔지니어링, 반도체 재료, 화학 재료
스미토모상사 (Sumitomo)	• 기관소개 : 통합무역회사
	• 홈페이지 : https://www.sumitomocorp.com/en/jp
	• 주요시장 : 철강, 항공우주, 건설, 인프라, 디지털, 에너지
솜포 홀딩스 (SOMPO Holdings)	• 기관소개 : 생명·손해보험회사
	• 홈페이지 : https://www.sompo-hd.com/en
	• 주요시장 : 보험, 디지털, 간호
도시바 (Toshiba)	• 기관소개 : 전기·전자기기 제조회사
	• 주요제품 : 양자암호통신 장치 및 서비스
	• 홈페이지 : https://www.global.toshiba/ww/top.html
	• 주요시장 : 에너지, 인프라, 커뮤니티 솔루션, 의료 시스템 및 서비스, IT 솔루션
토요타자동차 (Toyota Motor)	• 기관소개 : 자동차 제조회사
	• 주요제품 : 캠리, 프리우스, RAV4, 시에나
	• 홈페이지 : https://global.toyota/en/
	• 주요시장 : 자동차, 금융, IT
NEC	• 기관소개 : 통신·전자기기 종합 제조회사
	• 주요제품 : IT 하드웨어 및 솔루션
	• 홈페이지 : https://www.nec.com/
	• 주요시장 : 반도체 IC, 컴퓨터, 우주통신
NTT	• 기관소개 : 통신회사
	• 주요제품 : 통신 장비 및 서비스
	• 홈페이지 : https://www.global.ntt/
	• 주요시장 : 장거리 및 국제 통신, 데이터 통신
히타치 (Hitachi)	• 기관소개 : 전자기기 중심 기계 종합 제조회사
	• 주요제품 : IT 솔루션, 산업기계, 일렉트로닉스
	• 홈페이지 : https://www.hitachi.co.kr/index.html
	• 주요시장 : 전기전자, 중공업, 에너지
픽스스타즈 코프 (Fixstars)	• 기관소개 : IT 회사
	• 주요제품 : 컴퓨팅 보드 및 주변 장치
	• 홈페이지 : https://www.fixstars.com/ja
	• 주요시장 : 의료, 산업 장비, 모바일, 금융
후지쯔 (Fujitsu)	• 기관소개 : 컴퓨터 통합 시스템 설계 기업
	• 주요제품 : 36큐비트 양자컴퓨터 시뮬레이터
	• 홈페이지 : https://www.fujitsu.com/global/
	• 주요시장 : 금융, 신약 개발, 재료
스미토모 미쓰이 파이낸셜그룹 (Sumitomo Mitsui Financial Group)	• 기관소개 : 금융지주회사
	• 홈페이지 : https://www.smfg.co.jp/english/
	• 주요시장 : 상업 금융, 리스, 증권, 소비자 금융
미쓰비시 케미컬 (Mitsubishi Chemical)	• 기관소개 : 기능성 제품, 의료 및 재료 분야 회사
	• 홈페이지 : https://www.m-chemical.co.jp/en/index.html
	• 주요시장 : 재료, 화학, 에너지, IT, 의료
미쓰비시전기 (Mitsubishi Electric)	• 기관소개 : 전기·전자 장비 및 시스템 제조회사
	• 주요제품 : 터빈 발전기, 위성 및 유무선 통신 장비, LCD 장치
	• 홈페이지 : https://www.mitsubishielectric.com/en/index.html
	• 주요시장 : 중전기 기계, 정보통신, 전자 장치, 물류

※ 집필진 작성

표 Ⅴ-3-7 Q-STAR 주요 기업회원(Corporate Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
오사카가스 네트워크 (OSAKA GAS NETWORK)	• 기관소개 : 가스 유통 회사
	• 홈페이지 : https://www.osakagas.co.jp/
	• 주요시장 : 가스, 교육, 컨설팅
KDDI	• 기관소개 : 이동통신 및 유선통신 회사
	• 주요제품 : 개인·가정용 통신 서비스, 기업 대상 ICT 솔루션 서비스
	• 홈페이지 : https://www.kddi.com/
소프트뱅크 (SoftBank)	• 기관소개 : IT 기업이자 투자회사
	• 홈페이지 : https://www.softbank.jp/corp/
	• 주요시장 : 이동통신, 유선통신, IT 솔루션 지원 HW 및 SW
미쓰비시 다나베 파마 (Mitsubishi Tanabe Pharma)	• 기관소개 : 의약품 제조 및 판매 회사
	• 주요제품 : 피부, 소화, 알레르기 관련 의약품
	• 홈페이지 : https://www.mt-pharma.co.jp/e/
	• 주요시장 : 제약
덴소 (DENSO)	• 기관소개 : 자동차 기술, 시스템 및 부품 공급 기업
	• 주요제품 : 가솔린 및 디젤 엔진 제어 시스템, 에어컨 시스템, 반도체 센서 및 마이크로 전자 장치
	• 홈페이지 : https://www.denso.com/global/en/
	• 주요시장 : 자동차, 반도체
미즈호 파이낸셜 그룹 (Mizuho Financial Group)	• 기관소개 : 은행지주회사
	• 주요제품 : 금융 솔루션, 자문 서비스, 자산 관리 서비스
	• 홈페이지 : https://www.mizuhogroup.com/
	• 주요시장 : 금융, 보안, 리서치
미쓰이화학 (Mitsui Chemicals)	• 기관소개 : 종합 화학 제조업체
	• 주요제품 : 엘라스토머, 플라스틱 렌즈
	• 홈페이지 : https://www.mitsuichemicals.com/
	• 주요시장 : 모빌리티, 헬스케어, ICT 솔루션, 기초재료
MS&AD 인슈어런스 그룹 홀딩스 (Mitsui Sumitomo Insurance)	• 기관소개 : 생명·손해보험회사
	• 홈페이지 : https://www.ms-ins.com/english/
	• 주요시장 : AI 기반 건강 예측 서비스

※ 집필진 작성

표 Ⅴ-3-8 Q-STAR 주요 준회원(Associate Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
SBS홀딩스 (SBS Holdings)	• 기관소개 : 물류 관련 서비스 제공 지주회사
	• 주요제품 : 제3자물류(3PL), 국제 물류, 물류 관련 컨설팅 서비스
	• 홈페이지 : https://www.sbs-group.co.jp/
	• 주요시장 : 물류, 부동산, 환경
노무라종합연구소 (Nomura Research Institute)	• 기관소개 : 경영 컨설팅 서비스 기업
	• 주요제품 : 솔루션 서비스 및 기업·투자정보 제공
	• 홈페이지 : https://www.nri.com/jp

표 Ⅴ-3-9 Q-STAR 주요 중소기업 및 스타트업(Small and Medium/Start-up Member) 개요

기관명	회원 소개 및 개요
어헤드 바이오컴퓨팅 (Ahead Biocomputing)	• 기관소개 : 신약 개발 및 대규모 바이오 데이터 처리 소프트웨어 스타트업
	• 주요제품 : IT 기반 의약품 발견 서비스(CPathPred, Spresso, PKRank), MEGADOCK(단백질-단백질 도킹 소프트웨어), GHOSTZ(게놈 빅데이터 분석 소프트웨어)
	• 홈페이지 : https://ahead-biocomputing.co.jp/en/
	• 주요시장 : 생명 정보, 머신러닝, 고성능 컴퓨팅
QuEL	• 기관소개 : 양자컴퓨터 제어 하드웨어 및 미들웨어 스타트업
	• 주요제품 : QuEL-1(양자컴퓨팅 제어시스템)
	• 홈페이지 : https://quel-inc.com/
큐나시스 (QunaSys)	• 기관소개 : 양자컴퓨터 소프트웨어 스타트업
	• 주요제품 : Qamuy(양자화학 계산 소프트웨어), Qulacs(양자회로 시뮬레이터 소프트웨어)
	• 홈페이지 : https://qunasys.com/
	• 주요시장 : 제약 및 화학
그리드 (GRID)	• 기관소개 : AI 최적화 솔루션 제공 기업
	• 주요제품 : ReNom(머신러닝, 딥러닝 AI 개발 플랫폼)
	• 홈페이지 : https://gridpredict.jp/en/
그루브노트 (Groovenauts)	• 기관소개 : 양자컴퓨팅 기반 최적화 솔루션 제공 스타트업
	• 주요제품 : MAGELLAN BLOCKS(양자컴퓨터 클라우드 서비스), TECH PARK(어린이 IT 교육 플랫폼)
	• 홈페이지 : https://www.groovenauts.jp/en/privacy/
SkillUp Ai	• 기관소개 : 온라인 AI 학습 플랫폼 기업
	• 주요제품 : 머신러닝, 딥러닝 등 AI 학습 강좌, AI 캠프
	• 홈페이지 : https://www.groovenauts.jp/
	• 주요시장 : 교육
YDK	• 기관소개 : 항공우주 및 방위사업 관련 기업
	• 주요제품 : 항법장비, 해상장비, 민간항공기 엔진장비, 로켓엔진 점화장치
	• 홈페이지 : https://www.ydktechs.co.jp/en/index.html
	• 주요시장 : 해상 항법 및 항공우주

※ 집필진 작성

표 Ⅴ-3-10 Q-STAR 학계 회원 개요

기관명	회원 소개 및 개요
요코하마국립대학교 양자정보연구센터 (YOKOHAMA National University Quantum Information Research Center)	• 연구분야 : 고효율 프로세서, 양자정보보안
	• 홈페이지 : https://qic.ynu.ac.jp/en/index.html

※ 집필진 작성

참고문헌

• 국내문헌

1	지식산업정보원(2022), “미래 양자기술 동향과 생태계분석-컴퓨팅/센서/양자암호 · 통신/양자점”.
2	David(2019), “美 양자생태계 주도 위해 QEDC 컨소시엄 구성…IBM · 아마존 · 인텔 · 구글 등 60여 곳 참여”, The Science Monitor.

• 해외문헌

1	QEDC/SRI International(2021), QED-C organization.
2	Susan Rambo(2019), Through QED-C, The U.S. government helps build industry support behind quantum computing, SemiconductorEngineering.
3	The Quantum Technologies Flagship(2020), Midterm Report.

• 사이트

1	https://quantumconsortium.org/quantum-marketplace
2	https://bnl.gov/science/quantum.php
3	https://quantum.fnal.gov
4	https://quantum.lbl.gov
5	https://quantum.llnl.gov
6	https://quantum.lanl.gov
7	https://mitre.org/research/technology-transfer/technology-licensing/quantum-information-science
8	https://mitre.org/quantum-moonshot
9	https://quantum.ornl.gov
10	https://ornl.gov/section/quantum-information-science
11	https://pnnl.gov/quantum-information-sciences
12	https://nwquantum.com
13	https://sandia.gov/quantum
14	https://qpl.sandia.gov
15	https://qis.slac.stanford.edu
16	https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship
17	https://oc-innovation.ca
18	https://zpcryo.com
19	https://quantumindustrycanada.ca
20	https://qstar.jp/

부록

편찬위원회

분 야	이 름	소 속	직위(급)	비 고
양자이론	김재완	고등과학원	부원장	편찬위원장
총괄	심규열	과학기술정보통신부	네트워크정책과 팀장	
	최대규	NIA	지능형인프라본부장	
기획	이정기	과학기술정보통신부	네트워크정책과 사무관	
	김영희	NIA	네트워크고도화팀장	
	오윤제	IITP	반도체·양자 PM	
양자통신	권대성	NSR	연구위원	
	박찬용	㈜우리로	부사장	
	허 준	고려대학교	교수	
양자센서	문한섭	부산대학교	교수	
	이동헌	고려대학교	교수	
양자컴퓨터	박성수	ETRI	양자기술연구단장	
	배준우	KAIST	교수	
	한상욱	KIST	양자정보연구단장	
산업화모델	이준구	KAIST	교수	
소재·부품·장비	송진동	KIST	광전소재연구단장	
교육·인력	심정민	KISTEP	과학기술정책센터장	
간사	김효실	미래양자융합센터	센터장	

집필전문가

집필 분야	성 명	소 속	직위(급)
양자통신 R&D 및 소·부·장	권대성	NSR	연구위원
	김용환	KISTI	선임연구원
	김진봉	㈜피피아이	대표이사
	김철한	서울시립대학교	교수
	문형명	㈜피피아이	연구소장
	박창훈	KIST	연수연구원
	배광일	KISTI	선임연구원
	백수현	㈜우리로	이사
	백정현	㈜이와이엘	상무
	부박률	코위버㈜	수석
	손일권	KISTI	선임연구원
	엄상윤	아이디퀀티크㈜	대표
	오성곤	㈜우리넷	이사
	윤천주	ETRI	책임연구원
	이원혁	KISTI	책임연구원
	이은주	KISTI	선임기술원
	장진각	NSR	실장
	지세완	NSR	담당
	홍창호	NSR	담당
양자센서 R&D 및 소·부·장	강노원	KRISS	책임연구원
	고영호	ETRI	선임연구원
	권택용	KRISS	책임연구원
	김헌오	부산대학교	연구교수
	배인호	KRISS	책임연구원
	심정현	KRISS	책임연구원
	이동헌	고려대학교	교수
	임신혁	ADD	선임연구원
양자컴퓨팅 R&D 및 소·부·장	김도헌	서울대학교	교수
	김요셉	KIST	선임연구원
	김용수	KIST	책임연구원
	김철기	KIST	책임연구원
	안재욱	KAIST	교수
	염다현	이화여자대학교	연구교수
	전승우	KIST	선임연구원
	정호중	KIST	선임연구원
	차진웅	KRISS	선임연구원
	최가현	KRISS	선임연구원
	최태영	이화여자대학교	교수
양자기술 산업화모델·협의체	김지현	㈜원익IPS 반도체연구소	부장
	박희철	IBS	연구위원
	윤지원	에스디티㈜	대표이사
양자교육·인력	노광석	고려대학교	연구교수
	심정민	KISTEP	센터장
양자기술 동향	김형수	㈜KT	팀장
	심동희	SK텔레콤㈜	팀장
	허 욱	KOREN NOC	부장
기획·취합·편집	김영희	NIA	팀장
	이용선	NIA	책임
	최진욱	NIA	선임
	장유환	NIA	주임
	이정원	IITP	수석
	김효실	미래양자융합센터	센터장
	박봉원	미래양자융합센터	책임연구원
	오정환	미래양자융합센터	선임연구원
	민선영	미래양자융합센터	전임연구원
	김동규	미래양자융합센터	전임연구원
	박지영	미래양자융합센터	전임연구원

양자정보기술 백서

QUANTUM INFORMATION TECHNOLOGY WHITE PAPER

발행월 2022년 11월

발행인 이종호 · 황종성

발행처 과학기술정보통신부 · 한국지능정보사회진흥원

기획·편집 미래양자융합센터

디자인 누만디 + 누만자

ISBN 978-89-8483-737-9

* 본 양자정보기술 백서의 내용은 과학기술정보통신부 및 한국지능정보사회진흥원의 공식 견해와 다를 수 있습니다.

* 본 양자정보기술 백서 내용의 무단전재를 금하며,
가공·인용할 때에는 반드시 '양자정보기술 백서'라고 밝혀주시기 바랍니다.

과학기술정보통신부

세종특별자치시 가름로 194(어진동)

www.msit.go.kr

NIA 한국지능정보사회진흥원

대구광역시 동구 첨단로 53

053) 230-1114

www.nia.or.kr

비매품/무료

95560

9 788984 837379

ISBN 978-89-8483-737-9 (PDF)