KISTI R&I Report

양자기술 과학·기술·산업 분석

이방래 · 원동규 · 이재민 · 윤민영 · 장우석 · 여운동 · 이창환

KiSTi 한국과학기술정보연구원
Korea Institute of Science and Technology Information
www.kisti.re.kr

CONTENTS

1장 서론 06

Ⅰ. 배경 07
슈퍼컴퓨터보다 훨씬 빠른 연산 속도 07
반도체 칩 소형화의 한계 08
기존 슈퍼컴퓨터의 대규모 전력 소모에 대한 대안 10
인공지능의 한계 11

Ⅱ. 필요성 11
다양한 산업에서 난제 해결에 기여할 기술 11
ICT 분야 국가 경쟁력 확보를 위한 핵심기술 13

2장 환경분석 17

Ⅰ. 양자기술의 범위 19

Ⅱ. 경쟁환경 20
주요 플레이어 20
경쟁환경 분석 27

Ⅲ. 이슈 분석 29
정치(정책)적 이슈 29
경제/사회적 이슈 31
기술적 이슈 32

3장 시장분석 37

Ⅰ. 시장 역학 분석 39

Ⅱ. 시장 규모 분석 40

전체 시장규모 40

부문별 시장규모 41

4장 과학기술성 분석 53

Ⅰ. 분석 대상 및 기술군 56

Ⅱ. 논문 분석 58

양자통신 분야 58

양자센싱 분야 66

양자컴퓨팅 분야 74

양자 분야 통합 분석 83

Ⅲ. 특허 분석 86

양자통신 분야 87

양자센싱 분야 93

양자컴퓨팅 분야 100

양자 분야 통합 분석 107

Ⅳ. 정부연구개발과제 분석 112

양자통신 분야 112

양자센싱 분야 115

양자컴퓨팅 분야 118

5장 결론 123

KISTI R&I Report:

양자기술 과학·기술·산업 분석

1장 서론

Ⅰ. **배경**

슈퍼컴퓨터보다 훨씬 빠른 연산 속도

반도체 칩 소형화의 한계

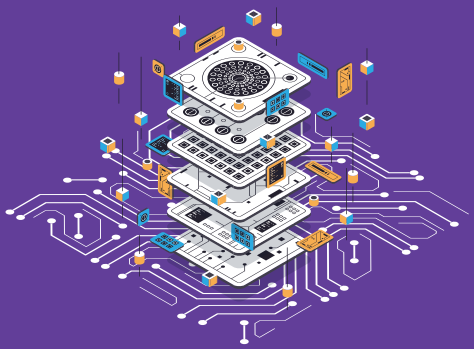
기존 슈퍼컴퓨터의 대규모 전력 소모에 대한 대안

인공지능의 한계

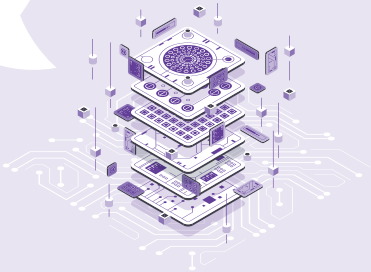
Ⅲ. **필요성**

다양한 산업에서 난제 해결에 기여할 기술

ICT 분야 국가 경쟁력 확보를 위한 핵심기술



1장
배경 및 필요성



Ⅰ. 배경

슈퍼컴퓨터보다 훨씬 빠른 연산 속도

- 슈퍼컴퓨터를 포함한 기존의 디지털 컴퓨터는 0과 1로 이루어진 '비트'를 정보 처리의 단위로 사용하며 하나의 비트는 0과 1 중에서 하나만 표현할 수 있음.
- 그래서 만약 비트 3개를 이용해서 표현 가능한 수는 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111로 총 8가지인데, 이를 표현할 때는 한 번에 한 가지만 가능함.
- 만약 이를 순서대로 모두 표현하려면 기존 디지털 컴퓨터는 8번의 연산을 수행해야 하며, 병렬처리를 하는 슈퍼컴퓨터라도 병렬처리 가능한 코어 개수만큼만 이론적으로 빨라질뿐으로 하나의 코어 내에서는 한 가지만 표현할 수 있음.
- 만약 한 가지 숫자를 표현하는 데에 1초가 걸린다면 디지털 컴퓨터로 순서대로 8가지 숫자를 표현하려면 8초가 걸리고, 코어수 2개인 병렬 처리용 슈퍼컴퓨터를 이용하면 이상적으로는 8/2=4초가 걸림.
- 그러나 양자컴퓨터에서 사용하는 정보처리 단위는 0과 1을 동시에 처리하는 큐비트(Qubit)인데 동일한 상황에서 큐비트 3개를 사용하면 8가지 경우를 동시에 나타낼 수 있어서 소요시간은 1초가 걸리므로 기존 디지털 컴퓨터와 속도 면에서 비교할 수 없을 정도로 빠름.

• 구체적인 예를 들면 디지털 컴퓨터에 적용되고 있는 기존의 RSA 암호체계는 2048비트를 사용하는 경우 이를 소인수 분해 방식으로 암호를 풀려면 100만년 이상 걸리는데, 범용 양자컴퓨터가 개발된다면 이를 몇 초 안에 풀 수 있다고 함.

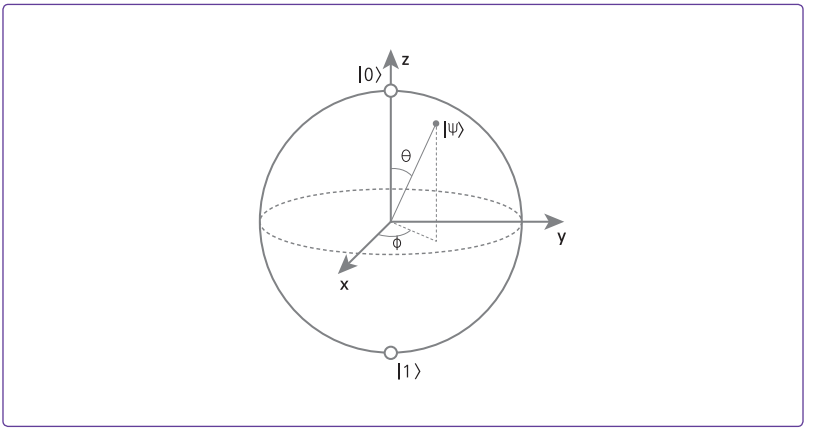


그림 1-1 큐비트의 블로흐구(Bloch sphere) 표현

자료: 위키백과, 블로흐 구면

반도체 칩 소형화의 한계

• 반도체 집적회로의 성능은 18개월마다 2배로 증가한다는 '무어의 법칙'이 수십 년간 통용되어 왔음.

• 이는 1965년 고든 무어의 예측에서 시작되었는데 가격은 유지되는 반면에 성능은 18-24개월마다 두 배씩 증가한다는 법칙으로 반도체 산업의 급속한 발전을 표현하였음.

- 성능이 두 배씩 증가하기 위해는 반도체 칩의 소형화를 통해서 반도체에 들어가는 트랜지스터들의 개수를 늘려야 함.
- 그런데 동일한 공간에 트랜지스터가 소형화되어 개수가 늘어나면서 전기 사용이 늘어나게 되고 트랜지스터간 거리가 너무 가깝다 보니 상호간 전기적 간섭현상이 발생하게 되어 오류가 많아지게 되고 결과적으로 반도체 칩의 소형화가 한계에 도달했다는 의견이 제기됨.
- 수십 년간 반도체 칩의 성능 향상 속도를 표현한 '무어의 법칙'도 2000년대 이후로는 전혀 들어맞지 않을 정도로 반도체 칩의 성능 향상 속도가 느려짐.

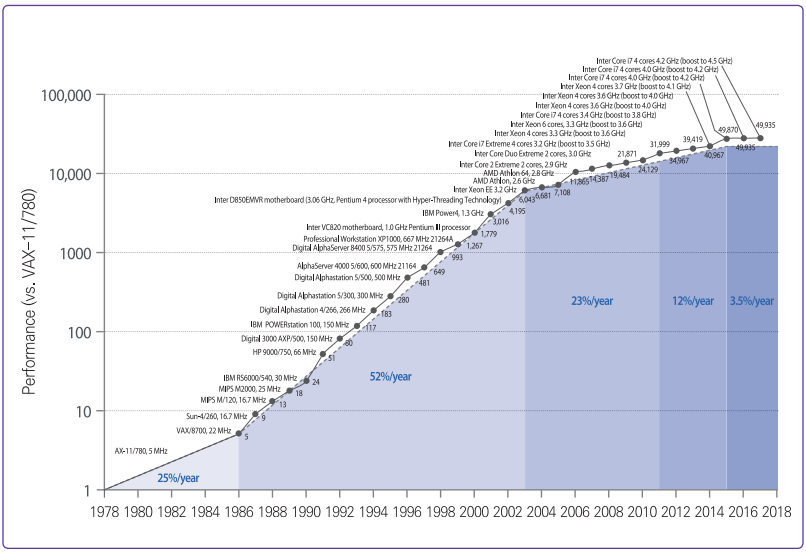


그림 1-2 약해지는 '무어의 법칙'

자료: Deep Jariwala, Moore's law is dead. Long live the Moore's law, Twitter

기존 슈퍼컴퓨터의 대규모 전력 소모에 대한 대안

- 슈퍼컴퓨터는 대규모의 전력을 소모하는데, 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 운영하는 슈퍼컴퓨터의 경우 월평균 전력 소모량이 2018년의 경우 약 3.5GWh 이고 월평균 전기료는 3.6억원에 달함.[1)]
- KISTI가 운영 중인 '누리온'슈퍼컴퓨터의 경우 전력 소모량이 아파트 3천 세대와 맞먹는 수준임.[2)]
- 이렇게 전력 소모가 많다 보니 KISTI는 딥러닝 기술을 적용하여 슈퍼컴퓨터의 전력소모를 줄이는 체제를 구축하여 운영 중임.
- 한편 최근에는 암호화폐 채굴에도 슈퍼컴퓨터가 이용되고 있어 슈퍼컴퓨터 사용으로 인한 전력 소비는 더욱 늘어날 전망임.

자료: 한국과학기술정보연구원(KISTI) 공식 블로그

그림 1-3 KISTI 슈퍼컴퓨터 5호기'누리온'

1) 이준, IITP 주간기술동향 2019.9.25, "양자컴퓨터 R&D 현황과 전망"

2) Digital Today, 2019.02.21

인공지능의 한계

- 최근에 인공지능 기술이 급속히 발전하기는 했으나 대규모 데이터에 대한 고속 연산을 필요로 하며 이로 인해서 많은 컴퓨팅 자원(RAM 및 GPU 등)과 대규모 전력소모를 동반하고 있어서 비용이 부담이 됨.
- 인공지능 기술이 제대로 적용되려면 많은 수의 정답 데이터(labeled data)가 필요한 경우가 대다수인데 이 것 역시 비용과 데이터 확보 측면의 한계로 작용함.
- 또한 인공지능이 적용된 시스템은 예외적인 상황에서 인간의 판단 능력을 능가할 수 없기 때문에 돌발적인 상황에서는 생명의 위협도 존재할 수 있음.

Ⅱ. 필요성

다양한 산업에서 난제 해결에 기여할 기술

- 범용 양자컴퓨터가 개발된다면 이를 활용하여 산업적 발전을 이룰 수 있는 분야가 매우 다양함.
- 양자 기술은 기존 고전 역학적 기술과는 전혀 다른 기술인데, 양자 기술이 범용화 된다면 연산 속도의 퀀텀 점프로 인해서 기존에는 시도조차 할 수 없었던 수많은 난제 영역에서 해결사 역할을 할 것으로 기대됨.

- 일례로 반도체 분야에서는 집적회로의 형태 및 공정 프로세스 최적화, 반도체 미세구조 설계 등을 통해서 성능 향상을 획기적으로 기대할 수 있음.[3)]
- 의료 및 신약 분야에서는 DAN 구조 분석을 통한 신약개발, 정밀 MRI, 미세암 진단 등에 활용될 수 있음.
- 물류 분야에서는 경로 최적화에 활용될 수 있으며, 안보 분야에서는 사이버 공격에 안전하게 시스템을 유지할 수 있음.
- 아직 양자기술이 산업적으로 크게 활용되지 않고 있음에도 불구하고 다양한 응용분야가 기대되고 있어서 범용 양자컴퓨터가 개발된다면 응용분야가 폭발적으로 늘어날 것으로 기대됨.

표 1-1 양자 기술의 응용 분야 예시

문제 유형	산업 적용 예시
조합 최적화	– 운송 네트워크 최적화 – 송전망, 공급망 등 물류 최적화 – 재무 포트폴리오 최적화
미분 방정식	– 자동차, 항공기 디자인을 위한 유체역학 시뮬레이션 – 혈류 분석을 위한 의료기기 개발 – 특수 물질 및 약물 개발을 위한 분자 시뮬레이션
선형대수학 (클러스털, 패턴, 매칭 관련 기계학습)	– 재무 위험관리 – DNA 서열 분류 – 마케팅 및 고객 세분화
인수분해	– 암호해독

자료: Boston Consulting Group, Where Will Quantum Computers Create Value--and When?, 2019.05.

3) 과기정통부, 보도자료, "양자기술 연구개발 투자전략", 2021.4.29.

ICT 분야 국가 경쟁력 확보를 위한 핵심기술

- 우리나라의 수출 품목 중 반도체를 필두로 하는 ICT 기반 제품의 수출비중은 절대적임.

- 우리나라의 ICT 기반 품목(반도체, 평판디스플레이및센서, 무선통신기기, 컴퓨터)이 상위 10대 품목에서 차지하는 수출액 비중이 약 47%에 이를 정도로 우리나라의 수출 구조는 ICT 기반 품목에 의존하고 있어서 ICT 기술의 국가 경쟁력은 우리나라 경제의 뿌리를 이룬다고 할 수 있을 정도로 매우 중요함.

표 1-2 우리나라 상위 10대 수출 품목의 수출액 (단위: 백만불)

구분	2018		2019		2020	
	품목명	금액	품목명	금액	품목명	금액
1위	반도체	126,706	반도체	93,930	반도체	99,177
2위	석유제품	46,350	자동차	43,036	자동차	37,399
3위	자동차	40,887	석유제품	40,691	석유제품	24,168
4위	평판디스플레이 및 센서	24,856	자동차부품	22,535	선박해양구조물 및 부품	19,749
5위	자동차부품	23,119	평판디스플레이 및 센서	20,657	합성수지	19,202
6위	합성수지	22,960	합성수지	20,251	자동차부품	18,640
7위	선박해양구조물 및 부품	21,275	선박해양구조물 및 부품	20,159	평판디스플레이 및 센서	18,151
8위	철강판	19,669	철강판	18,606	철강판	15,997
9위	무선통신기기	17,089	무선통신기기	14,082	컴퓨터	13,426
10위	컴퓨터	10,760	플라스틱 제품	10,292	무선통신기기	13,184

구분	2018		2019		2020	
	품목명	금액	품목명	금액	품목명	금액
10대품목수출액	-	353,671	-	304,238	-	297,093
총수출액 대비비중(%)	-	58.5	-	56.1	-	58.0
(10대품목수출액중) ICT비중(%)		50.7		42.3		48.4

자료: e-나라지표, 10대 수출입 품목

- 양자 기술도 ICT 기술의 일종인데, 양자 기술은 인공지능의 한계를 극복하고, 데이터 및 ICT 기술을 기반으로 하는 4차 산업 혁명을 견인할 기술로 일컬어지고 있는 상황이므로 양자 기술에 대한 국가경쟁력 확보는 필수적임.

- 그러나 현재까지 우리나라 양자기술의 기술력은 미국, 유럽, 일본, 중국 등 선도국가에 비해서 기술격차가 10여년 정도로 뒤쳐져 있음.

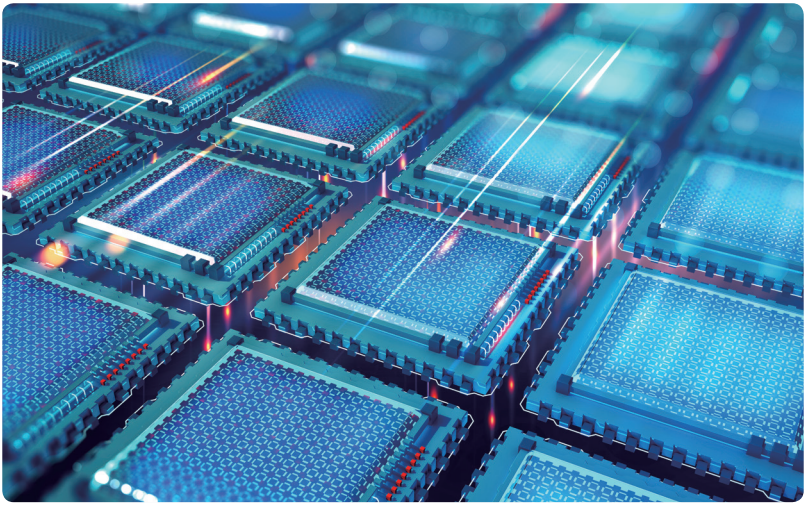
- 2020년도 기술수준평가 결과에 의하면 ICT · SW 분야의 17개 중점과학기술 중에서 '양자정보통신 기술'의 2020년 기술수준이 가장 낮고 기술격차는 상대적으로 가장 큰 것으로 조사됨.

- 다행스럽게도 범용 양자컴퓨터의 실용화 시기가 10 - 20여년은 더 걸릴 것으로 예상되어 산학연정의 협력과 일관되고 대범한 자세로 연구를 추진한다면 선도국을 추격할 여지가 있다고 판단됨.

표 1-3 ICT · SW 분야 주요 기술의 기술수준 및 기술격차

중점과학기술	기술수준		기술격차(년)	
	2018	2020	2018	2020
초고집적 반도체 공정 및 장비 · 소재기술	94.0	90.0	1.0	1.5
인체친화형 디스플레이 기	94.0	95.0	0.5	0.8
대면적 · 초고속 · 초정밀 디스플레이 소재 · 공정 및 장비 기술	97.5	95.0	0.8	0.5
초고속 · 대용량 데이터 플랫폼 기술	50.0	69.0	4.0	3.5
양자정보통신 기술	55.0	62.5	6.5	4.5

자료: 국가과학기술자문회의, 2020년도 기술수준평가 결과(안), 2021.3.11



KISTI R&I Report:

양자기술 과학·기술·산업 분석

2장
환경분석

Ⅰ. 양자기술의 범위

Ⅱ. 경쟁환경

주요 플레이어

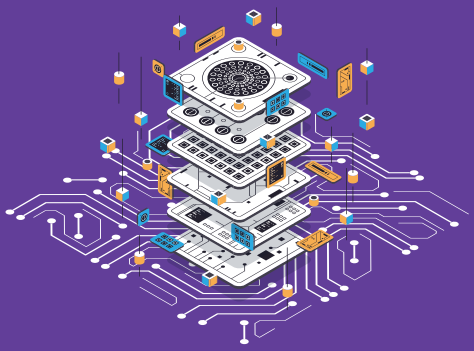
경쟁환경 분석

Ⅲ. 이슈 분석

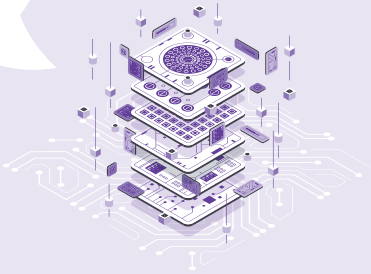
정치(정책)적 이슈

경제/사회적 이슈

기술적 이슈



2장
환경분석



Key Finding

공급자 협상력

양자 기술 분야는 기술적 난이도가 매우 높아서 진입장벽이 높고, 공급자의 협상력이 구매자의 협상력보다 높음. 공급자 중심의 경쟁 환경을 가지며 차별적 기술 우위는 시장의 지배적 위치를 차지할 것으로 판단함.

산업화 초기 단계

양자기술 산업은 기술 개발 성격이 강하여 전체적으로는 산업 형성이 시작되는 시점인 것으로 보임. 세부적으로 나누어 살펴보면, 양자통신은 기존 RSA 암호체계를 대체하는 형태로 시장이 형성되고 있고, 양자센서는 기존 센서와 비교시 정밀도를 향상시켜 측정 한계를 초월하는 분야에서 차별적인 시장을 만들어 가고 있으며, 양자컴퓨팅 분야는 양자우위를 달성하려는 HW 제작과 이를 활용하는 SW 개발 부분이 동시에 진행되는 양상임. 다만 다방면에서 수요가 빠르게 증가하면서 산업이 급속히 확대될 것으로 예상됨.

국내 전문인력의 부족

우리나라의 경우 기술 개발 및 산업 형성이 선도국에 비해 뒤쳐져서 인력 풀이 많이 부족한 상황임. 산업 형성을 통해 산업체 수요가 뒷받침되어야만 대학원 등에서의 인력 양성 및 해외 우수 인력의 유입이 가능할 것으로 판단됨.

Ⅰ. 양자기술의 범위

- 양자기술 또는 양자정보과학(Quantum information technologies) 은 "양자역학적 특성을 정보통신기술에 적용하기 위하여 양자상태를 생성(쓰고), 제어(전송, 저장, 처리), 측정(읽고) 및 분석하는 기술"[4]로, 양자통신, 양자센싱 및 계측, 양자컴퓨팅으로 구분됨.

  - 정보통신기획평가원(IITP)의 "ICT R&D 기술로드맵 2025"에서는 이 세 가지 기술 분야에 대해서 다음과 같이 개략적으로 정의하고 있음.

    - ***(양자통신)*** *송신자와 수신자 사이에 단일광자 또는 공유된 얽힘에서 고전 통신 기술의 도움으로 양자 정보(예를 들면, 광자 또는 원자의 상태)를 전달하는 기술*

    - ***(양자센싱·계측)*** *양자 원리를 활용함으로써 고전 시스템을 사용한 센싱·계측 기술의 분해능, 민감도, 측정영역의 한계를 극복하는 기술*

    - ***(양자컴퓨팅)*** *양자역학적 현상을 이용하는 양자컴퓨터는 상호작용하는 양자비트(qubit, 큐비트)를 기반으로 하며 확률적이며 가역적 연산방법을 사용하는 컴퓨팅 기술*

4) IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 – ICT디바이스 · 양자", 2020.12.

Ⅱ. 경쟁환경

주요 플레이어

(1) 양자통신

- 양자통신 시장에는 세계 각국의 정부뿐 아니라 글로벌 대기업들의 R&D 투자도 함께 증가하면서 향후 시장에서의 주도권을 확보하려는 경쟁이 치열함.

- Toshiba(일본), NEC(일본), AT&T(미국), Quintessence Lab (호주), SK 텔레콤(한국) 등의 기업들이 핵심적인 플레이어로 두드러짐.

표 2-1 양자통신 기업 동향

구분	기업명	설명
세계	Toshiba (일본)	• 신사업 영역으로 양자암호통신 기술에 투자 • Cambridge Research Laboratory을 설립하고 고성능 QKD 시스템, Quantum device 연구 선도
	ID Quantique (스위스)	• 양자키 분배 시스템, 양자 안전 네트워크 암호화, 단일 광자 카운터 및 하드웨어 난수 생성기를 제공 • 유럽 일대의 다수의 금융정보 백업 및 클라우드 망에 양자암호통신 상용 시스템 적용 • 2018년 3월 SK텔레콤(한국)에 인수됨
	NEC (일본)	• Toshiba와 함께 일본 내 양자암호통신장치 개발의 선두 주자
	QuantumCTek (중국)	• 중국 과학기술대학에서 2009년 5월에 창립된 업체 • 양자암호통신 장비 및 양자 신호 생성 및 검출 관련 상용 제품을 개발하여 자국 내에서 판매 중
	Anhui Qasky Quantum Technology (중국)	• Wuhu Construction and Investment Ltd.와 중국 과학기술대학의 공동 투자로 설립된 합작투자사 • 중국 최초로 양자 정보 기술 산업화에 종사하는 하이테크 기업
	AT&T (미국)	• 업계, 학계, 정부기관을 포함한 양자경제개발컨소시엄 합류 • 2020회계 연도에 4억 4,000만 달러 투입(양자통신, 센싱, 컴퓨터 총괄)

구분	기업명	설명
세계	BT (영국)	• UKQN(UK Quantum Network) 프로젝트로 125km 상용등급 양자 네트워크 테스트베드 구축
	Huawei (중국)	• 2015년 화웨이 중앙연구원은 양자전공 박사를 채용해 양자기술 연구를 본격적으로 시작 • 2016년 독일 뮌헨에 양자연구소 설립 • 2018년 안전한 통신 서비스를 위해 상용 광통신망에 양자암호를 적용하는 필드 시험을 수행함
	Deutsch Telekom (독일)	• 도이치텔레콤 네트워크 시험망에 양자암호통신 시스템 적용
	Quintessence Lab (호주)	• 기업용 안전한 부호화 모듈, 진정 양자난수발생기 제공, 캘리포니아 일대의 NASA 연구망(560km)에 자사 기술로 QKD network 구축
	Quantum XCHANGE (미국)	• 미국 뉴욕 금융망에 양자 보호화된 네트워크 기술 제공 발표
	Qutools (독일)	• 광자 검출기 및 양자난수생성기 등의 상용 제품을 출시하였고 QKD 상용 장비 개발 진행
국내	SK텔레콤 (한국)	• 2011년 양자암호통신연구를 시작 • 2017년 7월 양자난수생성 칩 시제품 개발에 성공 • 2018년 3월 양자암호통신 관련 스타트업 기업인 ID Quantique 인수
	KT (한국)	• 한국과학기술연구원(KIST)과 공동으로 수원 한국나노기술원에 양자통신 응용연구센터를 2017년 6월 설립하고 양자암호통신 실용화 연구를 수행 중 • 국내외에서 양자암호통신 표준화도 선도하고 있음
	LG유플러스 (한국)	• 2020년 12월에는 IoT 단말용 '양자보안칩'을 개발. • 2021년 8월에는 PQC 기술력을 확보
	이와이엘 (한국)	• 2021년 10월 세계 최초로 양자난수를 활용한 도청방지(비화기) 솔루션 상용화
	우리로 (한국)	• 1998년 창립한 광통신 부품기업 • 광자를 검출할 수 있는 초고감도 광학센서를 칩에 구현하는 원천기술 보유 • 2020년부터 2023년까지 4년간 총 34억 원의 예산을 지원받아 단일광자 검출소자(SPAD)를 이용해 단일광자로 전송된 신호를 복원하는 초소형 단일광자 검출기(SPD)를 개발할 예정

자료: 자체 작성

(2) 양자센서

- 양자센서·계측 업체에는 AOSense(미국), Apogee Instruments(미국), M-Squared Lasers(영국), Bosch(독일), Muquans(프랑스), Lockheed Martin(미국), Qnami(스위스), GWR(영국), Sparrow Quantum(덴마크), Microsemi(미국), Teledyne(미국), Oscilloquartz(스위스) 등이 있음.

표 2-2 양자센싱·계측 기업 동향

구분	기업명	설명
세계	AOSense (미국)	• 휴대용 중력계 상용화
	Apogee Instruments (미국)	• the Full Spectrum(blue head), the Original(black head), the ePAR(silver head), Quantum Light Pollution Sensor(silver head) 등 4가지 유형의 양자 센서 제공
	M-Squared Lasers (영국)	• 통합 양자 시스템(양자 가속도계, 중력계 및 시계)
	Bosch (독일)	• 휴대용 NV 기반 양자 자이로스코프(quantum gyroscopes) 개발
	Muquans (프랑스)	• Absolute Quantum Gravimeter, MuClock, Laser and optical solutions(ILS laser series, SML and USML laser series, RCD series, iMOB series), Regeneration station 상용화
	Lockheed Martin (미국)	• 양자 레이더, 양자 자기장 센서 이용 항법 시스템 개발 중
	Qnami (스위스)	• 나노스케일 이미징 시제품 상용화
	Honeywell (미국)	• 초소형 원자 가속도계 개발 중
	GWR (영국)	• 초전도 기반 중력계 상용화
	Sparrow Quantum (덴마크)	• 단일광자 광원 상용화
	Microsemi (미국)	• 초소형 원자시계, 내장 원자시계 상용화
	Teledyne (미국)	• 초소형 원자시계 상용화
	Oscilloquartz (스위스)	• 네트워크 동기화 세슘 원자시계 상용화

자료: 자체 작성

(3) 양자컴퓨팅

• 양자컴퓨팅 하드웨어 분야에는 IBM(미국), Microsoft(미국), Amazon(미국) 등 글로벌 IT 기업이 양자컴퓨팅 클라우드 서비스를 출시하여 기술 접근성 및 자사 플랫폼으로 유입을 확대하고 있음.

표 2-3 양자컴퓨터 기업 동향

구분	기업명	사업 현황
세계	IBM (미국)	• 2000년, Fluorine 원자를 이용한 5큐비트 양자컴퓨터 개발 • 2016년, 초전도 5큐비트 양자컴퓨터 개발, 클라우드(Quantum Experience) 서비스로 공개 → 2017년, 양자컴퓨팅 클라우드 상용서비스 IBM Q 런칭 • IBM Quantum Network: IBM Q를 매개로 전세계 140여개 주요 기관/기업과 공동연구 네트워크를 구축 – 23대(1~65큐비트) 양자컴퓨터, 5대(32~5,000큐비트) 양자시뮬레이터 운용 중 – 16개 Hub 기관에 IBM Q 서비스 제공, 지역내 기관/기업들에게 서비스 보급 – 글로벌기업 9개사와 Quantum Network Partner 체결, 응용분야 공동연구 • 2021년 11월 현재 65큐비트 양자컴퓨터 '허밍버드'를 운용 중 • 2021년 11월 127큐비트 양자컴퓨터 '이글'을 공개하였음. • 2022년에는 큐비트를 433개로 늘린 '오스프리', 2023년에는 1,121큐비트 '콘도르'개발을 예고
	D-Wave Systems (캐나다)	• 1999년 설립된 캐나다 기업으로 양자컴퓨팅을 표방한 최초의 기업이자 최초의 양자컴퓨터 상용화 기업 • 2013년 5월엔 512 큐비트의 'D-Wave 2'를 개발 • 2015년 8월 1,000+ 큐비트의 'D-Wave 2X' 시스템 개발 • 2017년 1월에는 2,000+ 큐비트의 'D-Wave 2000Q'를 개발 • 2018년 말에 최초의 실시간 양자 응용 환경인 리프(Leap)를 출시
	Microsoft (미국)	• 2005년, 토폴로지 큐비트 기반 양자컴퓨터 연구 착수 • 양자컴퓨터 연구협력 네트워크 Station Q 설립 → 현재 Microsoft Quantum Network으로 확대 운영 중 • 2012년, Tu Delft 연구진이 Topological Qubit 관측실험 성공을 발표했으나 신뢰성 문제를 겪다가 2017년 철회 • 물리큐비트를 제외한 full stack 플랫폼을 개발, 운영 중(Azure Quantum)

구분	기업명	사업 현황
세계	Microsoft (미국)	• Azure Quantum: Honeywell (이온트랩), IonQ(이온트랩), qci(초전도)의 프로세서 + 1Qbit/ 1Qloud/Microsoft QIO/Toshiba SBM 등의 최적화 알고리즘 + 양자프로그램 개발환경(Q#, 통합개발키트) 제공
	Amazon (미국)	• 2019년말 타사 양자컴퓨터 제공 클라우드서비스 '아마존 브래킷(Amazon Braket)'을 발표
	Honeywell (미국)	• 2018년, Honeywell Quantum Solution 설립 • 2020년, 10큐비트 이온트랩 프로세서 System Model H1 발표 – 양자볼륨 128 – 게이트신뢰도 〉 99.97%(single-qubit gate), 99.5%(two-qubit gate) • 2021년 6월, Honeywell Quantum Solution사와 양자컴퓨터 소프트웨어 전문기업 Cambridge Quantum Computing (CQC)사 합병 발표
	Rigetti Computing (미국)	• 2013년, IBM Research 연구원 Chad Rigetti가 설립 • 2017년, $64M 투자유치 • 자체 제조시설 Fab-1 구축 → MEMS 공정, 3차원적층 TSV 공정, 패키징 개발 • 2017년, full-stack 개발환경 Forest 1.0 발표 – hybrid quantum-classical computing environment – 8큐비트 프로세서 + 30큐비트 가상머신(QVM) + Quil(프로그래밍언어) • 2020년, 31큐비트(초전도) Aspen-8 프로세서 발표 • 동사의 제품은 '퀀텀 클라우드 서비스'로 제공됨. • 2021년 말 세계 최초의 멀티 칩 양자 프로세서 출시 예정
	IonQ (미국)	• 2015년, Maryland대 연구진이 설립 • 2019년까지 $75M 투자 유치 • Microsoft, Amazon Web Service와 파트너쉽 체결 (양자컴퓨팅 플랫폼 제공) • 2020년, 32큐비트 (full connected) 프로세서 개발 – 양자볼륨 4,000,000 수준 • 2023년까지 작은 모듈식 양자컴퓨터를 개발한다는 목표
	Google (미국)	• 2014년 미국항공우주국(NASA)과 공동으로 양자인공지능연구소를 설립 • 2016년 6월 9 큐비트 규모의 양자컴퓨터 발표 • 2018년, 72큐비트 브리슬콘 프로세서 발표 • 2019년에 53 큐비트의 양자컴퓨터 칩 '시커모어(Sycamore)' 프로세서를 공개하였음.

구분	기업명	사업 현황
	Google (미국)	• NASA와 공동으로 D-Wave 양자어닐러 제품을 이용한 응용연구 지속 중 • 2021년, Quantum AI Campus 개소 (Santa Barbara), 2029년 비전 제시: 1,000,000큐비트와 1,000논리큐비트를 갖는 범용양자컴퓨터 개발
	Intel (미국)	• 2015년, TuDelft QuTech에 5천만 달러 투자, 실리콘 양자점 기반 스핀큐비트 회로 공동개발 • 2017년, 17큐비트 칩 발표 • 2018년, 49큐비트 프로세서 탱글레이크 발표 • 현재: QuTech(네덜란드)과 스핀큐비트 프로세서 공동연구 지속 → 인텔 300mm wafer 공정에서 스핀큐빗 집적회로 제조기술 개발 완료(인텔 – 칩 제조, QuTech – 칩 성능분석)
	Alibaba (중국)	• 2015년 클라우드 컴퓨팅 자회사 알리윈(Aliyun)과 중국과학원(CAS)이 양자컴퓨터 연구전문기관 Alibaba Quantum Lab 설립 • 2018년, 11큐비트 초전도 양자컴퓨터와 32큐비트 양자회로 시뮬레이터 발표 • 2020년 1월, 양자컴퓨터 연구개발전문조직 Alibaba DAMO Academy 설립 • 2020년 10월, 개방형 양자회로 시뮬레이터 ACQDP(Alibaba Cloud Quantum Development Platform) 공개
	PsiQuantum (미국)	• Google 및 IBM과 같이 동작하는 양자컴퓨터 구현을 위해 광자를 이용한 양자프로세서 하드웨어 및 SW 개발 진행
국내	삼성전자 (한국)	• 2017년부터 IBM의 양자컴퓨터 공동 연구에 참여 • 2019년 알리로 테크놀로지스와 아이온큐에 투자를 단행 • 2021년에는 이스라엘 양자컴퓨팅 스타트업 '퀀텀 머신(Quantum Machines)'에 투자

자료: 자체 작성

• 한편, 양자컴퓨팅 소프트웨어 기업에는 CQC(영국), Q-ctrl(호주), Zapata Computing(미국), Anyon Systems(캐나다), quantum benchmark (캐나다), 1Qbit(캐나다), QCware(미국) 등이 있음.

표 2-4 양자컴퓨터 소프트웨어 기업 동향

기업	사업 현황
CQC (영국)	• 2014년, 설립 (영국 Cambridge) • 양자 OS 및 어플리케이션 개발 전문 기업 • 제품군: OS 제품 t|ket⟩, 양자화학 시뮬레이션 패키지 EUMEN, 양자ML 등 • 2021년 6월, Honeywell Quantum Solution사와 합병 발표
Q-ctrl (호주)	• 2017년 설립(시드니) • 양자제어 엔지니어링 소프트웨어 (firmware) 전문기업 • 제품군: Black Opal, Bould Opal (양자제어소프트웨어) + integration 서비스 • 고객사: Google, IBM 등
Zapata Computing (미국)	• 2017년 설립 (보스턴) • 양자어플리케이션 개발플랫폼 전문기업 • 응용분야별(재무, 헬스케어, 교통, 소재, 에너지, 항공 등) 어플리케이션 개발 병행 • 제품군: Orquestra (IBM, rigetti, IonQ, Honeywell 플랫폼 지원)
Anyon Systems (캐나다)	• 2014년 설립 (몬트리얼) • High Performance Computing 전문기업 • 초전도 큐비트 기반 양자컴퓨터, 양자제어회로, 초저온냉각기술 등을 개발 • 하드웨어 제어를 위한 소프트웨어와 양자컴퓨터 시스템 시뮬레이션 소프트웨어 개발 병행 • 2017년부터 Google의 양자컴 개발 공동 참여 (구글 초전도큐비트 프로세서의 성능향상을 위한 각종 특성 시뮬레이션)
quantum benchmark (캐나다)	• 2017년 설립 (캐나다 워털루) • 양자컴퓨터 에러분석, 에러보정, 시스템성능최적화 소프트웨어 전문기업 • 제품군: True-Q Design, True-Q Accelerate • 고객사: Google, Fujitsu, IBM 등 • 2021년 5월, Keysight Technology사(설계&검증, 시뮬레이션, 최적화 소프트웨어 전문기업)에 인수됨
1Qbit (캐나다)	• 2012년 설립 (밴쿠버) • 양자컴퓨터 어플리케이션 개발플랫폼 전문기업 • 제품군: QEMIST(양자화학), 1QLOUD(최적화), MARKET SENTIMENT METER(위험관리), XRAI(영상진단보조)
QCware (미국)	• 2014년 설립 (캘리포니아 → 파리) • 미 공군과 NASA 엔지니어들이 주축, 클라우드 기반 양자컴퓨팅 플랫폼 전문기업 • 2017년, USRA와 공동으로 NSF로부터 양자컴퓨팅플랫폼구축 연구과제 수주 • 제품군: 응용분야(양자화학, 최적화, 기계학습, 미분방정식, 몬테카를로), FORGE (에뮬레이터) • 고객사: Airbus, AISIN Group, Goldman Sachs, TOTAL, BMW 등

경쟁환경 분석

- 경쟁환경분석을 마이클포터의 5가지 경쟁요소(the five competitive force)로 분석하면 다음과 같음.

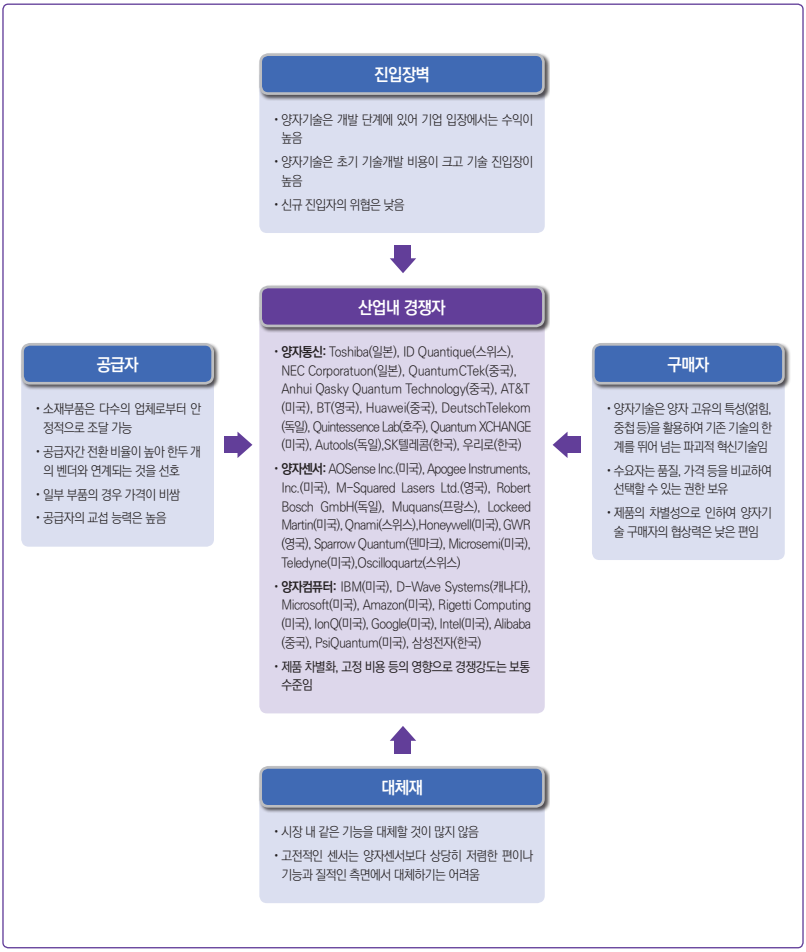


그림 2-1 양자기술 경쟁환경분석

- 신규진입기업의 위협은 낮은 것으로 분석되어 이 분야는 수익성이 높은 것으로 판단되며, 기존 기업 간의 경쟁은 브랜드에 대한 충성도가 높고 가격경쟁이 낮으므로 수익률이 높음.
- 제품의 차별성으로 인해 양자 기술 구매자의 협상능력은 낮고 공급자가 더 높은 협상력을 가짐.
- 한편 소비자의 욕구를 충족시켜 줄 다른 산업의 제품이나 서비스가 존재하지 않아 대체재의 위협은 매우 낮음.
- 결론적으로 양자기술 분야는 공급자 중심의 경쟁 환경을 가지고 있으며, 차별적 기술 우위는 이 시장의 지배적 위치를 차지할 것으로 판단됨.

Ⅲ. 이슈분석

정치(정책)적 이슈

- 우리 정부는 양자 관련 핵심기술 개발 및 연구 저변확대에 주력

  - 2014년 12월 미래 유망기술 육성의 일환으로 양자정보통신 산업의 체계적 육성을 위해 '양자정보통신 중장기 추진전략'을 수립하였음.

  - 2019년 1월 과기정통부는 양자컴퓨팅 등 차세대 ICT 원천기술개발 추진을 본격화하기 위해 '양자컴퓨팅 기술개발사업 추진계획'을 마련

- 2021년 4월 30일에는 미래 전략기술 확보를 위한 양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략을 수립하였음.

  - 비전을 '디지털을 넘어 퀀텀의 시대로'정하고, 2020년대 양자기술 4대 강국 진입의 목표 하에 ① 도전적 원천 연구 강화, ② 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축, ③ 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화, ④ 양자기술의 활용 및 산업 혁신 촉진 등 4대 중점전략을 추진해 나갈 계획임.

  - 이러한 전략의 일환으로 50 큐비트급 한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP)을 조기 구축('20~'24)하고, 단계적으로 고도화할 계획임.

  - 또한, 도전적 원천 연구를 강화하고, 관련 출연(연)을 중심으로 연구-교육 거점을 구축하여 연구역량을 결집하는 한편, 양자 핵심연구자를 현재 약 150명 수준에서 2030년 1,000명까지 확대하기 위해 박사급 전문과정을 개설·운영하고, 선도국에 젊은 연구자를 파견하여 프로젝트·교육 등에 참여하고, 해외 석학도 초빙할 계획임.

- 특히, 국내 독자 양자컴퓨팅 시스템을 조기 구축하고, 현재 구축이 진행 중인 양자팹을 완공하여 산 · 학 · 연 연구자들을 지원하는 한편, 최근 글로벌 기술 블록화 양상에 대응하기 위한 국제협력도 강화해 나갈 계획임.

• 양자기술이 산업·안보적 파급력으로 반도체, 인공지능(AI) 등에 이어 미래 전략기술의 핵심으로 부상함에 따라 주요국은 대규모 예산 투입 등 정부 차원의 지속적·연속적 정책지원에 노력하고 있음.

표 2-5 주요국의 정책동향

국가	주요 정책
미국	• 2009년 1월 양자기술비전 수립 • 2016년 양자기술 발전계획 발표 • 2018년 12월 양자기술기술의 연구·개발·시연·응용 지원, 범부처 계획 조정 및 연방기관간 활동 연계, 산·학·연·관 협력 촉진, 국제 표준 개발 가속화를 위한 '국가양자이니셔티브' 법안 제정 • 2020년 2월 인터넷 시초인 아파넷(ARPAnet)의 파급효과를 양자분야에서 실현하기 위한 '양자인터넷 전략적 비전' 발표
일본	• 2010년 NICT 주도로 양자기술 기술 개발 시작 • 2016년 4월 양자과학기술·연구개발기구(QST) 설립 • FIRST('09-'13), ImPACT('14-), ERATO('16-'21) 등의 연구개발 프로그램이 진행 완료되었거나 진행 중 • 양자기술을 인공지능, 바이오와 더불어 3대 국가전략기술로 지정
중국	• 2006년 2월 "국가중장기과학기술발전계획 요강(2006~2020)" 발표 • 2012년 5월 "양자제어연구 국가중대과학기술 프로그램 12·전문규획" 제정 • 2016년 8월 "13차 5개년 국가과학기술혁신규획(2016~2020)" 발표 • 2017년 9월 세계 최대의 국립 양자기술연구소 설립과 2년 6개월간 약 13조 원 투자 계획을 발표
캐나다	• 글로벌 경쟁우위 강화를 위한 정부차원의 전폭적 지원 지속 • 대학을 양자분야 핵심거점으로 적극 육성 • 산학협력 기반의 실체적 혁신성과 창출에 매진

국가	주요 정책
유럽	• 2016년 5월 양자 선언문(Quantum Manifesto) 발표 • 2018년 10월 양자 플래그십 프로젝트 출범 • (영국) 양자기술의 산업적 활용에 중점 둔 전략 시행 • (독일) 양자기술 관련 인재·활용 저변확대에 집중 • (네덜란드) 양자연구 전문연구기관 설립으로 연구역량 고도화 • (프랑스·이탈리아) 공공연구기관을 중심으로 양자기술 연구 수행
한국	• 2014년 12월 양자정보통신 중장기 추진전략 수립 • 2019년 1월 양자컴퓨팅 기술개발사업 추진계획 마련 • 2021년 4월 미래 전략기술 확보를 위한 양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략 수립

자료: 자체 작성

경제/사회적 이슈

- **(경제적 이슈)** 현재 전 세계 양자기술 관련 시장은 기술 개발 및 시험 테스트 장비 등 기술 개발 수요를 중심으로 형성되어 있음.

  - 양자기술이 아직 상용화를 위한 준비단계에 있기 때문에 양자통신, 양자컴퓨터 등 기술 개발용 장비와 설비를 중심으로 성장해오고 있다면, 향후 우주항공, 국방, 의료, 금융 등의 분야에서 양자컴퓨터에 대한 수요가 증가하면서 관련 시장이 빠르게 확대될 것으로 예상됨.

  - 특히 자동차산업에서는 최적화, 기계학습, 문제해결 시뮬레이션 등을 위해 새로운 양자기술의 활용이 증가하고 있음.

  - 반면 양자기술에 대한 우리 정부의 R&D 투자(전용사업 기준)도 '19년 106억원에서 '20년 326억원으로 확대되었으나, 여전히 선도국 대비 크게 미흡한 실정임(연평균 美 2,600억원, 中1,700억원~1조원).

- **(사회적 이슈)** 양자기술의 사회적 인식(소비자 수용성)이 미흡하고, 산업 미형성으로 인재 유입이 낮음.

  - 양자기술은 ICT기업에게도 생소한 분야로, 향후 상용화에 따른 기술의 영향력, 파급력에 대한 이해도 제고가 선제적으로 진행될 필요가 있음.

  - 양자기술 관련 국내 핵심연구인력은 약 150명 내외로 추산되며, 높은 학문적 난이도와 산업 미형성으로 인재(국내외) 유입이 낮고, 인력양성체계가 미흡함.

기술적 이슈

기술격차

- 양자기술 분야는 미국과 유럽의 기술수준이 매우 높고, 중국이 정부의 전폭적인 R&D 지원을 통해 선진국과의 기술격차를 축소해나가고 있음.

  - 양자통신분야에서는 중국의 기술수준이 미국, 일본을 앞서고 있는 것으로 분석됨.

  - 우리나라 양자기술기술 수준은 선도국(미국)의 81.3%이며, 국내 전체 ICT 기술내 최하위(ICT 평균87.4%, 이동통신 97.8%, 인공지능 87.4%)[5)]

  - 선도국과의 기술격차가 벌어진 상황에서 단기 추격에 성공하기 위해서 기술혁신을 이끌 전문인재를 얼마나 빨리 확보할 수 있느냐가 관건임.

5) IITP, 2019년 ICT 기술수준 조사 및 기술경쟁력 분석 보고서, 2020

양자통신

• 양자통신은 현재 암호기기의 메시지 암·복호화에 필수적인 비밀키 교환에 집중되고 있지만 향후 양자기기 간 양자상태 정보전송으로 확장

• 양자암호시스템 초기시장 선점 및 기술 고도화(한계기술 돌파) 등 시장/원천기술 주도권 경쟁 심화

- 초기 시장 개척 및 경쟁력 강화를 위한 기술 개발
- 미래 기술 강국으로 발돋움하기 위한 핵심원천 기술 개발

양자센서·계측

• 양자센서·계측은 고전적인 측정한계를 극복해 고정밀 데이터를 제공함으로써 의료, 국방, 자율주행, 측량 등 다양한 분야의 비약적인 발전에 기여

• 초기 시장 선점을 위한 집적화, 소형화, 잡음제어 등 상용기술과 기존 기술대비 차별화(정밀도/분해능 향상) 부분이 주요 이슈

- 상용화: 집적화 및 범용화, 소형화
- 잡음제어: 잡음 저감, 실시간 제어, 신호 대 잡음비 향상
- 측정한계 초월: 정밀도 및 분해능 향상, 미지영역 탐구

양자컴퓨터

- 데이터의 폭발적 증가(`22년 44ZB 데이터 생산 예상)와 고성능 반도체 제조 기술 한계도달(수 nm)에 따라 양자컴퓨터 도입이 유력한 대안
- 신뢰성 있는 양자연산을 위해 충분한 큐비트 개수, 낮은 오류율, 긴 양자상태 유지시간 확보로 고성능화, 고집적화 및 확장성 기술 확보
- 적은 개수의 큐비트만 이용해도 양자화학 등에서는 적용이 가능한데, 이를 위해 양자시뮬레이터 플랫폼 조기 개발을 통해 양자컴퓨팅 활용 및 확산 추진
- 양자 컴퓨팅 활용을 위한 알고리즘 및 인공지능 응용 기술 개발

표 2-6 PEST 모형에 대한 이슈 요약

구분	이슈 요약
정치(정책)적 이슈	• (국외) 주요국은 양자기술에 대한 정책지원에 노력 • (국내) 미래 전략기술 확보를 위한 양자 기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략 수립
경제적 이슈	• 양자컴퓨터 수요가 증가하면서 전체적인 시장 규모 성장 전망 • 최근 증가세이나 선도국 대비 투자규모도 작고, 전략성도 부재
사회적 이슈	• 생소한 분야로 양자기술 관련 시장 활성화를 위한 기술수용성 제고 필요 • 높은 학문적 난이도와 산업 미형성으로 인재(국내외) 유입이 낮음
기술적 이슈	• (기술격차) 우리나라 양자기술 기술 수준은 선도국의 73.6%로 격차는 2.6년임. • (양자통신) 양자암호시스템 초기시장 선점 및 기술 고도화(한계기술 돌파) 등 시장/원천기술 주도권 경쟁 심화 • (양자센싱·계측) 초기 시장 선점을 위한 집적화, 소형화, 잡음제어 등 상용기술과 기존 기술대비 차별화(정밀도/분해능 향상) 기술 개발 • (양자컴퓨터) 데이터의 폭발적 증가(`22년 44ZB 데이터 생산 예상)와 고성능 반도체 제조 기술 한계도달(수 nm)에 따라 양자컴퓨터 도입이 유력한 대안

[01101>
QU
[01101>
[01101>
BIT
[01101>

KISTI R&I Report:

양자기술 과학·기술·산업 분석

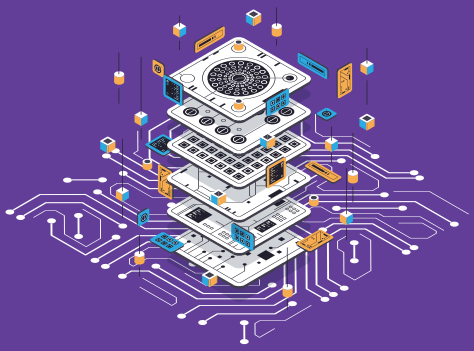
3장
시장분석

Ⅰ. **시장 역학 분석**

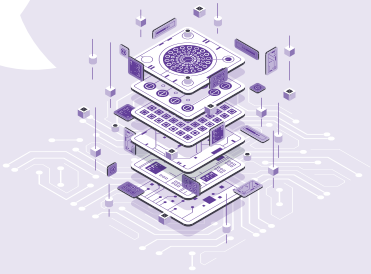
Ⅱ. **시장 규모 분석**

전체 시장규모

부문별 시장규모



3장
시장분석



Key Finding

분야별 상이한 시장규모 확대 양상

양자기술의 세계 시장규모는 연평균 25.8%의 성장세를 보이지만 세부분야별로는 시장증가율에서 차이가 발생함.

- 양자통신의 세계시장은 2021년 1.4억 달러이나 양자암호통신에 대한 수요 확대로 시장규모가 연평균 47.9%로 급격히 증가하는 추세임.
- 양자센서는 기존 센서 시장이 있기는 하지만 정밀도가 요구되는 양자센서 시장이 차별적으로 존재하여 2021년 기준 세계 시장이 4.1억 달러 규모를 형성하고 있고, 시장규모 증가율은 연평균 3.8%로 상대적으로 낮음.
- 세계 양자컴퓨팅 시장규모는 2021년 기준 4.7억 달러 규모로 형성되어 있고 연평균 성장률은 33.8%를 보이며 양자기술의 세 분야 중 중간 위치의 성장률을 보이는데, 이는 범용 양자컴퓨터 개발 완료시 폭발적 시장규모 확대에 대한 기대감과 기술 개발의 높은 난이도로 인해 범용 양자컴퓨터 개발에 대한 회의적 시각이 동시에 표출되고 있는 것으로도 해석할 수 있음.

극과 극의 시장 상황

양자기술은 기존 디지털 컴퓨팅의 속도와는 비교할 수 없는 빠른 연산 속도로 미래 산업의 핵심기술로 인지되어 각국 정부에서 전폭적인 지지를 하는 반면에 높은 기술적 난이도, 다학제적 연구의 필요성, 인력교육의 어려움 등으로 인한 실용화의 어려움이 동시에 존재하는 분야임. 따라서 지속적인 투자는 하되 단기간에 장밋빛 전망을 기대하면 안 되는 분야임.

Ⅰ. 시장 역학 분석

- **촉진요인:** 양자기술은 미래 산업 경쟁력의 핵심기술(Game changer)로서 산업·경제 전반에 혁신을 가져올 것으로 기대되면서 시장 확대 가능성이 높아지고 있음. 특히, 양자컴퓨팅의 경우 기존 디지털컴퓨터보다 30조배[6] 이상 빠른 연산이 가능하여 산업 전반에 새로운 가능성과 기회를 창출할 것으로 예상됨.

- **저해요인:** 양자기술은 연구 범위의 한계, 인력 교육 훈련, 기술 지식이전, 소재 개발, 예산지원 분야에서 문제가 발생할 가능성이 있음.; 양자기술은 물리학, 수학, 전기공학, 재료공학, 컴퓨터공학 등 다학제간 연구교류가 필요하고 기초과학에서 응용기술 및 엔지니어링 기술까지 풍부한 지식이 필요하여 인력 교육이 어려움.; 또한 표준화 미비, 지식재산권 등록 및 관리의 어려움, 인력 수급 불일치 등으로 민간 기업으로의 기술이전이 미흡함.; 양자 특성을 적용하고 시험할 소재 개발이 늦어, 관련 연구 진행이 지연되기도 하고 연구 예산의 불안정성으로 급작스러운 지원 중단 사태가 발생할 수도 있음.; COVID-19의 대유행도 양자 산업과 관련하여 공급망 중단, 원자재의 가용성 부족 등에 영향을 미칠 수 있음.

6) 2,048비트 RSA 공개키 암호를 푸는데 슈퍼컴퓨터는 100만년 이상, 양자컴퓨터는 1초 소요

- **기회요인:** 주요 각국 정부는 지속적·연속적 정책 지원을 통해 양자기술 원천기술 선점에 집중하고 있음. 우주항공·국방·금융 등 산업적 활용 가능 분야를 중심으로 사업화 촉진을 지원하고 이를 기반으로 양자산업 생태계가 조성될 수 있도록 유도하고 있음. 연구전담기관 신설 또는 기존 대학·연구기관 지원을 통해 연구거점을 마련하면서 투자·인력 등 국가적 자원 및 역량을 결집하는 시책을 시행중; 빅데이터 시대를 맞이하여 양자컴퓨팅 기술을 컴퓨터의 기계학습에 적용하려는 시도가 급증하고 있음. 양자컴퓨터가 이런 수요에 가장 잘 부응할 만한 대안으로 떠오르면서, 세계 주요국마다 이를 실용화하기 위해 다양한 노력을 펼치고 있음.
- **위협요인:** 양자정보기술은 그 기술의 난이도가 매우 높으며, 다양한 분야의 융합 및 대규모 투자가 필요함. 따라서 단기적으로 논문, 특허 등 가시적 성과를 창출하는 것이 불가능하기 때문에, 단기적 성과를 기대한다면 지속적인 연구 수행이 쉽지 않음.

Ⅱ. 시장 규모 분석

전체 시장규모

- 양자기술의 세계 시장은 2019년 약 7.0억 달러에서 연평균성장률(CAGR) 25.8%을 보이며 성장하여 2026년 약 35.1억 달러 규모를 기록할 전망임.
- 국내의 양자기술 시장은 2019년 약 707억 원에서 연평균 20.4% 성장하여 2026년 약 2,595억 원 규모를 기록할 전망임.

표 3-1 양자기술 시장전망

구분		시장규모 및 전망 (단위: 세계 : 백만 달러, 국내 : 억 원)								CAGR
		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
양자통신 (A)	세계	80.2	121.7	142.9	158.8	323.6	481.6	581.0	1,238.1	47.9%
	국내	42	65	93	105	219	332	408	888	54.8%
양자센서 (B)	세계	394.6	399.6	410.3	426.3	447.7	474.4	492.2	510.7	3.8%
	국내	655	728	811	915	1,025	1,154	1,306	1,485	12.4%
양자컴퓨팅 (C)	세계	229.4	328.4	471.6	589.1	767.1	1,029.7	1,341.8	1,764.7	33.8%
	국내	10.2	17.4	34.9	46.8	66.5	99.7	140.4	222.3	55.3%
Total	세계	704.1	849.8	1,024.8	1,174.2	1,538.3	1,985.7	2,414.9	3,513.5	25.8%
	국내	707	810	939	1,067	1,311	1,586	1,855	2,595	20.4%

자료: • [A, B, C: 국내] IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 - ICT디바이스 · 양자", 2020.12.
• [A: 세계] [Inside Quantum Technology, Report IQT-IQN-0920: 2020, Quantum Networking: A Ten-year Forecast and Opportunity Analysis] in IEC, "Quantum information technology"
• [B: 세계] TechNavio, "Global Quantum Sensors Market 2020-2024", 2020.04.
• [C: 세계] MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.

부문별 시장규모

(1) 양자통신

▧ 세계 시장

• 양자통신은 QKD(Quantum Key Distribution) 장비와 양자네트워크 암호서비스가 주된 시장으로 보이며, 2019년 약 0.8억 달러에서 연평균 47.9% 성장하여 2026년 약 12.38억 달러 규모를 기록할 전망임.

표 3-2 양자통신 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
QKD 장비	79.34	120.2	141.3	154.2	301.0	441.7	530.1	1,118.0	45.9%
양자네트워크 암호서비스	0.82	1.53	1.60	4.59	22.58	39.86	50.85	120.1	103.9%
합계	80.2	121.7	142.9	158.8	323.6	481.6	581.0	1,238.1	47.9%

자료: [Inside Quantum Technology, Report IQT-IQN-0920: 2020, Quantum Networking: A Ten-year Forecast and Opportunity Analysis] in IEC, "Quantum information technology"

▧ 국내 시장

- 국내 양자통신 관련 시장은 2019년 약 42억 원에서 연평균 54.8% 성장하여 2026년 약 888억 원 규모를 기록할 전망임.

표 3-3 양자통신 국내 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 억 원)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
QKD 장비	41.2	63.7	91.8	102.2	203.9	304.4	372.7	801.7	52.8%
양자네트워크 암호서비스	0.4	0.8	1.0	3.0	15.3	27.5	35.7	86.1	115.4%
합계	41.6	64.5	92.8	105.2	219.2	331.9	408.4	887.8	54.8%

자료: IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 – ICT디바이스 · 양자", 2020.12.

(2) 양자센싱 및 계측

▧ 세계 시장

- TechNavio(2020.04)에 따르면, 세계 양자센서 시장은 2019년 약 3.9억 달러에서 연평균 3.8% 성장하여 2026년 약 5.1억 달러 규모를 기록할 전망임.
- 세계 양자센서 시장은 제품별(by product)로 원자 시계(atomic clocks), PAR 양자 센서(PAR quantum sensors), 중력 센서(Gravity sensors), 자기 센서(Magnetic sensors)로 크게 구분됨.
- 세분화된 시장에서는 원자시계 및 PAR 양자센서가 시장비중이 높고, 중력센서와 자기센서는 비중이 낮게 나타남.

표 3-4 양자센서 제품별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
원자시계	156.81	157.34	159.92	164.17	170.74	179.50	184.42	189.47	2.7%
PAR 양자 센서	136.05	140.11	146.91	156.32	168.01	181.79	192.64	204.14	6.0%
중력센서	70.67	71.09	72.25	74.35	77.04	80.60	82.75	84.95	2.7%
자기센서	31.05	31.09	31.18	31.46	31.87	32.50	32.80	33.10	0.9%
합계	394.58	399.63	410.26	426.30	447.66	474.39	492.61	511.66	3.8%

자료: TechNavio, "Global Quantum Sensors Market 2020-2024", 2020.04.

주: 2025~2026년 수치는 참고자료 2019~2024의 CAGR을 적용하여 추정한 수치임.

• 양자센서의 용도별 세계시장점유율은 2019년 기준 군 및 방위 분야가 전체에서 28.4%를 점유한 것으로 나타났고, 농업(28.1%), 석유 및 가스(16.5%), 자동차(14.0%) 순으로 나타남. 2026년에는 농업(32.1%), 군 및 방위(26.9%), 석유 및 가스(14.6%), 자동차(13.7%) 로 전망됨.

표 3-5 양자센서 용도별 세계 시장점유율

구분	시장점유율(%)							
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
군 및 방위	28.4%	28.1%	27.8%	27.7%	27.5%	27.3%	27.1%	26.9%
농업	28.1%	28.8%	29.4%	30.0%	30.5%	30.9%	31.5%	32.1%
석유 및 가스	16.5%	16.1%	15.9%	15.6%	15.3%	15.1%	14.9%	14.6%
자동차	14.0%	13.9%	13.9%	13.8%	13.8%	13.8%	13.7%	13.7%
기타	13.1%	13.0%	13.0%	12.9%	12.9%	12.9%	12.8%	12.8%
합계	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

자료: TechNavio, "Global Quantum Sensors Market 2020-2024", 2020.04.
주: 2025~2026년 수치는 참고자료 2019~2024의 CAGR을 적용하여 추정한 수치임.

• 양자센서 세계 시장을 지역별로 살펴보면, 유럽(Europe), 북미(North America), 아시아태평양(APAC), 중동 및 아프리카(MEA), 남미(South America)로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음.

표 3-6 양자센서 지역별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
유럽	140.79	142.87	146.99	153.13	161.15	171.21	178.04	185.15	4.0%
북미	130.80	131.36	133.38	136.84	142.09	148.06	151.78	155.59	2.5%
아시아 태평양	82.15	83.84	86.85	90.97	96.34	103.27	108.11	113.17	4.7%
중동 아프리카	20.56	21.34	22.61	24.26	26.01	28.56	30.50	32.57	6.8%
남미	20.28	20.22	20.43	21.10	22.07	23.29	23.94	24.62	2.8%
합계	394.58	399.63	410.26	426.30	447.66	474.39	492.19	510.66	3.8%

자료: TechNavio, "Global Quantum Sensors Market 2020-2024", 2020.04.

주: 2025~2026년 수치는 참고자료 2019~2024의 CAGR을 적용하여 추정한 수치임.

▧ 국내 시장

- 국내 양자센서 시장은 2019년 약 655억 원에서 연평균 12.4% 성장하여 2026년 약 1,485억 원 규모를 기록할 전망임.

- 국내 양자센서 제품별 시장점유율은 2019년 기준 원자시계가 전체에서 49.3%를 점유한 것으로 나타났고, 자기센서(44.4%), 기타(5.5%), 중력센서(0.8%) 순으로 나타남.

표 3-7 양자센서 국내 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 억 원)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
원자시계	323	342	363	384	408	433	460	489	6.1%
중력센서	5	5	6	7	7	8	9	10	10.4%
자기센서	291	328	370	418	472	534	605	685	13.0%
기타	36	53	72	106	138	179	232	301	35.4%
합계	655	728	811	915	1,025	1,154	1,306	1,485	12.4%

자료: IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 – ICT디바이스 · 양자", 2020.12.

(3) 양자컴퓨팅

▧ 세계 시장

- MarketsandMarkets(2021.01)에 따르면, 세계 양자컴퓨팅 시장은 2019년 약 2.3억 달러에서 2021년 약 4.7억 달러로 성장하였고, 2021년 이후 연평균 30.2% 성장하여 2026년 약 17.7억 달러 규모를 기록할 전망임.

표 3-8 양자컴퓨팅 제공별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
Systems	5	21	41	50	54	86	92	105	20.7%
Services	225	307	430	539	713	943	1,250	1,660	31.0%
Total	230	328	471	589	767	1,029	1,342	1,765	30.2%

자료: MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.

- 세계 양자컴퓨팅 시장은 용도별(by application)로 최적화(Optimization), 머신러닝(Machine Learning), 시뮬레이션(Simulation), 기타(Others)로 구분되며, 각 세부 시장은 〈표 3-9〉과 같음.

표 3-9 양자컴퓨팅 용도별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
최적화	108	151	213	260	331	434	553	710	27.2%
머신러닝	29	44	66	85	115	160	215	292	34.6%
시뮬레이션	56	81	117	146	192	258	339	444	30.6%
기타	36	53	77	97	129	177	235	319	32.9%
합계	229	329	473	588	767	1,029	1,342	1,765	30.1%

자료: MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.

• 세계 양자컴퓨팅 시장은 기술별(by technology)로 초전도 양자 비트(Superconducting Qubits), 양자 어닐링(Quantum Annealing), 트랩 이온(Trapped Ions), 기타(Others; 토폴로지·포토닉스)로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음.

표 3-10 양자컴퓨팅 기술별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
초전도 양자비트	126	173	245	308	409	544	724	966	31.6%
양자 어닐링	48	79	120	145	175	241	289	356	24.3%
트랩 이온	55	76	107	135	180	242	325	439	32.6%
기타	-	-	-	2	2	3	4	4	18.9%
합계	229	328	472	590	766	1,030	1,342	1,765	30.2%

자료: MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.
주: 기타(Others) 기술의 CAGR은 2022~2026년 기준임.

• 세계 양자컴퓨팅 시장은 최종 이용 산업별(by end-use industry)로 우주·방위, 은행·금융, 헬스케어·의약품, 에너지·전력, 화학, 수송·물류, 정부, 학술 부문으로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음.

표 3-11 양자컴퓨팅 최종 이용 산업별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
우주·방위	52	73	105	130	167	223	289	377	29.1%
은행·금융	77	110	157	196	256	343	447	587	30.2%
헬스케어·의약품	17	24	36	46	63	86	115	156	34.1%
에너지·전력	9	13	20	25	33	45	60	79	31.6%
화학	17	24	33	41	53	70	90	117	28.8%
수송·물류	22	32	45	56	73	98	127	166	29.8%
정부	25	36	53	67	88	120	158	211	31.8%
학술	11	16	22	28	33	44	57	73	27.1%
합계	230	328	471	589	766	1,029	1,343	1,766	30.3%

자료: MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.

- 세계 양자컴퓨팅 시장은 지역별(by region)로 북미, 유럽, 아시아태평양, 기타 지역으로 구분되며, 각 세부 시장은 다음과 같음.

표 3-12 양자컴퓨팅 지역별 세계 시장전망

구분	시장규모 및 전망 (단위: 백만 달러)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
북미	96.3	134.6	188.6	229.7	291.5	381.0	483.1	617.7	26.8%
유럽	57.3	81.1	115.2	142.2	183.0	242.7	312.4	405.9	28.6%
아시아태평양	71.1	105.9	158.0	204.7	276.1	383.6	516.6	701.5	34.7%
기타	4.6	6.7	9.8	12.4	16.4	22.4	29.7	39.7	32.3%
합계	229.3	328.3	471.6	589.0	767.0	1,029.7	1,341.8	1,764.8	30.2%

자료: MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.

- MarketsandMarkets에 따르면, IBM(미국), D-Wave Systems(캐나다), Microsoft(미국), Amazon(미국), Rigetti Computing(미국) 등 5개 업체가 세계 양자컴퓨팅 시장의 50~55%(2019년 기준)를 점유한 것으로 나타남.
  - IBM과 D-Wave Systems는 양자컴퓨팅 시장의 선두 주자로, 저명한 브랜드, 광범위한 제품, 그리고 강력한 유통 능력이 강점임.
  - Microsoft와 Amazon은 주로 제품 출시를 통해 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 강화해왔으며, 이들 업체의 매출은 경쟁사 매출보다 더 빨리 증가하고 있음.
  - 향후 3~5년 내에 IBM과 D-Wave Systems는 양자컴퓨팅 시장에서 입지를 확고히 할 것으로 예상되며, Amazon은 주로 아시아태평양(APAC) 지역에서 사업 성장으로 인해 시장 내 점유율이 증가할 것으로 예상됨.

표 3-13 양자컴퓨팅 세계 시장점유율(2019년)

경쟁정도	추정 시장점유율(%)
Top 5 Players Market Share	50~55%
IBM	20~25%
D-Wave Systems	15~20%
Microsoft	10~12%
Amazon	8~10%
Rigetti Computing	6~8%
Ohters	35~45%

자료: MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.

▧ 국내 시장

- 국내 양자컴퓨팅 시장은 2019년 약 10.2억 원에서 연평균 55.3% 성장하여 2026년 약 222.3억 원 규모를 기록할 전망임.

  - 현재는 연구용으로만 시장이 형성되어 시장규모가 작지만 점차적으로 확대될 전망임.

표 3-14 양자컴퓨팅 국내 시장전망

구분	예상 시장규모 (단위: 억 원)								CAGR
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
Hardware	8.5	14.0	27.3	33.5	44.0	62.2	80.6	129.6	47.6%
Software	1.6	3.1	6.3	10.8	17.5	27.9	42.8	63.4	69.2%
Cloud service	0.1	0.3	1.3	2.5	5.0	9.6	17.0	29.3	125.1%
Total	10.2	17.4	34.9	46.8	66.5	99.7	140.4	222.3	55.3%

자료: IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 – ICT디바이스 · 양자", 2020.12.

KISTI R&I Report:

양자기술 과학·기술·산업 분석

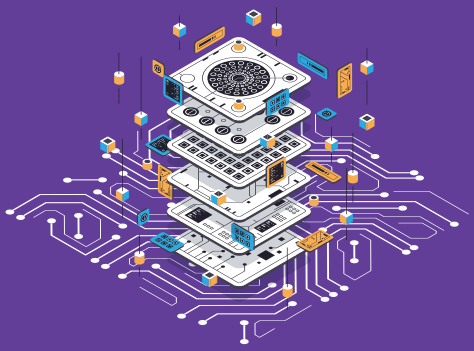
4장
과학기술성 분석

Ⅰ. 분석 대상 및 기술군

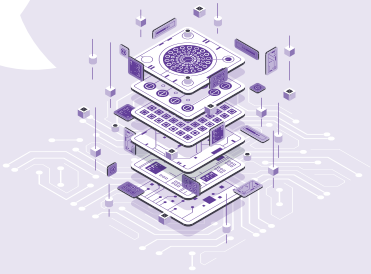
Ⅱ. 논문 분석
- 양자통신 분야
- 양자센싱 분야
- 양자컴퓨팅 분야
- 양자 분야 통합 분석

Ⅲ. 특허 분석
- 양자통신 분야
- 양자센싱 분야
- 양자컴퓨팅 분야
- 양자 분야 통합 분석

Ⅲ. 특허 분석
- 양자통신 분야
- 양자센싱 분야
- 양자컴퓨팅 분야



4장
과학기술성 분석



Key Finding

논문분석

- 양자기술 전체에서 논문수 측면에서는 중국이 가장 많고, 미국, 독일, 영국, 일본 등의 순위를 보이며, 한국은 16위를 보임.
- 분야별 논문수에서 양자통신은 중국, 양자센싱과 양자컴퓨팅은 미국이 1위 국가임.
- 논문 피인용수 측면에서 1위 국가 대비 상대적으로 우리나라가 양호한 분야는 양자암호와 양자 시뮬레이터 분야임.

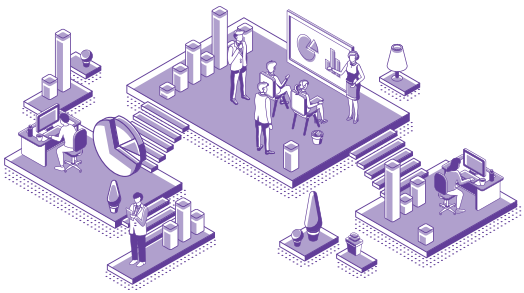
특허분석

- 양자기술 전체에서 특허출원수 측면에서는 중국이 가장 많고, 미국, 한국, 일본, 캐나다 등의 순위를 보임.

- 분야별 특허출원수에서 양자통신과 양자센싱은 중국, 양자컴퓨팅은 미국이 1위 국가이며, 우리나라는 세 분야에서 모두 3위를 보임.
- 질적 수준지표라 할 수 있는 평균 패밀리 특허수 측면에서 양자시간측정센서 분야는 우리나라가 1위 국가로 나타났고, 양자전송과 양자광학센서 분야도 양호한 편으로 나타남.

정부연구개발과제 분석

- 양자통신은 사물인터넷, 빅데이터, 그래핀, 인공지능, 광집적회로, 보안 등의 키워드가 고빈도 키워드로 나타남에 따라 이들 분야가 양자통신이 응용되는 기술 분야인 것으로 추정됨.
- 양자센싱 과제의 키워드들을 살펴보면 바이오, 화학, 사물인터넷, 적외선, 플랫폼, 위성, 알고리즘, 실용화 등의 키워드들이 서로 다른 산업분야에서 사용되는 키워드라는 것을 알 수 있고, 이를 통해 유추해보면 양자센싱은 이미 다양한 산업분야에서 활용되거나 응용연구가 진행되고 있다고 판단됨.
- 양자컴퓨팅 과제의 키워드를 살펴보면 양자컴퓨터, 양자정보, 포스트 양자 암호, 양자 얽힘 등의 기본적인 단어들이 고빈도 단어로 나타났으며 전체적으로 양자컴퓨터 제작 기술과 이론 및 알고리즘을 포괄하는 분야로 나타남.



Ⅰ. 분석 대상 및 기술군

- 양자기술의 기술분류체계는 일반적으로 양자통신, 양자센싱 · 계측, 양자컴퓨팅으로 크게 구분할 수 있는데, 정보통신기획평가원(IITP)에서는 2020년에 양자 로드맵 제작을 위해 다수의 전문가들과 함께 양자 분야 기술분류체계를 새롭게 구성하였음.
  - 본 보고서는 최근에 다수의 양자 분야 전문가들이 함께 도출한 기술분류체계의 기술군들을 분석의 단위로 활용함.

표 4-1 양자 정보 과학 분야 기술분류체계

분류	소분류	코드	요소기술
양자통신	양자암호	T01	양자 난수 발생 기술, QKD 프토토콜, 단일 광자 검출, 양자 광원 생성, QKD 후처리 기술, QKD 시스템 기술, 시스템 부채널 위협 방지기술, 양자 서명/인증, QKD 안전성 기술, 양자암호 프로토콜 이론, 양자 비밀공유, 초소형 QKD 칩 기술
	양자전송	T02	양자 얽힘 생성, 양자 신호 파장 변환, 양자얽힘 정제, 양자통신 오류정정, 양자전송 프로토콜, 양자 직접통신
	양자 네트워크	T03	양자 중계기/메모리, 양자얽힘 기반 양자네트워크, 양자 스위치/라우터, 양자 네트워크 토폴로지, QKD 네트워킹 기술
양자 센싱 · 계측	양자관성 센서	T04	원자 간섭신호 생성 기술, 레이저 냉각/포획 장치 소형화, 고진공 챔버 소형화 기술, 원자 스핀 압착 생성 기술, 라만 레이저 광회로 집적 기술, 나노역학계 냉각 기술, 광역학계 잡음 측정 기술, 비가우시안 상태 생성 기술, 양자 잡음 이론, 양자 비파괴 측정 기술, 측정 정확도 검증 기술

분류	소분류	코드	요소기술
	양자 시간측정 센서	T05	양자 노드 간 얽힘 생성, 원자 스핀 압착 기술, 핵전이 주파수 탐색 기술, 초발광 유도기술, 원자 증기셀 소형화 기술, 광주파수 합성 소형화 기술, 광회로 집적화 기술, 양자 비파괴 측정 기술, 측정 정확도 검증 기술
양자 센싱 · 계측	양자 자기장 전기장 센서	T06	고순도 단결정 양자소재 성장 기술, 양자 단일/복합 불순물 생성기술, 양자 단일/복합 광원 생성기술, 초분극 발생 기술, 양자 간섭계 제작 기술, 양자 결맞음 유지 기술, 원자 증기셀 제작 기술, 양자 자기공명 측정 기술, 양자 자기공명 영상화 기술, 원자 전기장 측정 기술
	양자 광학 센서	T07	양자 간섭계 제작 기술, 고감도 양자분광센서 기술, 비접촉 양자이미징, 양자현미경 기술, 양자얽힘 생성/측정 기술, 압착광원 간섭계 제작 기술, 양자상태 단층분석, 양자얽힘 평가지수 측정, 측정 정확도 검증 기술
양자 컴퓨팅	양자 시뮬레이터	T08	다중 양자비트 기술, 시뮬레이션 기술, 양자어닐링 기술, 양자 제어 기술, 양자상태 측정 및 검증 기술
	물리 양자비트	T09	유니버설 게이트 및 양자비트 기술, 개별제어 가능한 다중 양자비트 기술, 다중 양자비트 얽힘생성 기술, 양자 측정 및 제어 특성 검증 평가 기술, 집적 양자회로용 재료기술, 고전-양자 인터페이스 기술
	논리 양자비트	T10	오류 검출(Detection) 기술, 오류 정정(Correction) 기술, 논리 게이트 구현 기술, 논리양자비트 구현 기술
	양자 알고리즘 및 sw	T11	양자 이점(quantum advantage) 실현을 위한 알고리즘(양자 푸리에변환, 양자위상 추정 등), NISQ 알고리즘 및 인공 지능 기술(양자 기계학습 등)

자료: IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 – ICT디바이스 · 양자", 2020.12.

Ⅱ. 논문 분석

- 논문 분석은 전세계 SCIE급 저널 정보를 제공하는 Web of Science 데이터를 활용하였고, KISTI의 COMPAS(compas.kisti.re.kr)를 활용하여 분석
  - 출판년도 기준 최근 5년(2016-2020)을 대상으로 분석
- 분석 대상 데이터 검색 과정에서 내외부 전문가 활용
- 양자 정보 과학 분야 11개 세분야별로 년도별, 국가별, 기관별 분석
  - 세분야별 양적 수준(건수) 및 질적 수준(평균 피인용수) 산출
  - 기관별 분석은 건수 기준 상위 10대 기관을 추출하고 우리나라의 주요기관은 별도로 추출
- 일등 국가 대비 우리나라의 양적 수준 및 질적 수준을 도출
  - 양적 수준과 질적 수준으로 이루어진 2차원 포지셔닝 맵 가시화

양자통신 분야

① 연도별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 연도별로 게재된 논문의 수를 분석
- 한국에서는 총 87건의 논문이 게재됨.

• 분야별로는 양자통신에서 양자암호 분야가 가장 많은 논문수를 보임.

표 4-2 양자통신 연도별 논문수

기술군	연도	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T01. 양자암호	전체	292	309	388	472	497	1,958
	한국	9	8	12	8	22	59
T02. 양자전송	전체	237	225	199	244	289	1,194
	한국	6	8	5	5	12	36
T03. 양자네트워크	전체	225	210	277	300	314	1,326
	한국	5	10	2	4	9	30
연도별 합계	전체	754	744	864	1,016	1,100	4,478
	한국	20	26	19	17	43	125

② 국가별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 국가를 분석

- 국가별로는 중국이 미국보다 많은 수의 논문을 게재하였는데, 양자암호, 양자전송, 양자네트워크 모든 분야에서 중국의 논문수가 가장 많음.

표 4-3 양자통신 국가별 논문수

국가	합계		T01. 양자암호		T02. 양자전송		T03. 양자네트워크	
	건수*	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수
중국	2,029	9.0	502	10.1	505	10.4	1022	7.7
미국	632	14.9	228	17.9	180	13.1	224	13.3
영국	394	18.2	137	19.4	94	17.6	163	17.5
독일	333	16.1	138	18.6	112	14.7	83	14
캐나다	274	19.1	91	20.1	66	21.8	117	16.9
한국	125	6.2	30	8.1	36	5.8	59	5.3

* 세분류별 검색 건수의 단순 합계

- 2016년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 게재된 논문 건수는 다음과 같음.

표 4-4 양자통신 국가별-연도별 논문수

분야	국가	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T01. 양자암호	중국	66	68	115	135	118	502
	미국	48	43	47	48	42	228
	영국	31	26	27	17	37	138
	캐나다	21	27	28	28	33	137
	일본	20	17	17	18	19	91
	한국	5	10	2	4	9	30
T02. 양자전송	중국	87	94	81	112	131	505
	미국	40	21	33	42	44	180
	독일	34	24	16	19	19	112
	영국	14	19	14	23	24	94
	인도	9	9	13	12	28	71
	한국	6	8	5	5	12	36
T03. 양자네트워크	중국	133	142	205	268	274	1,022
	미국	38	39	38	56	53	224
	독일	26	28	29	36	44	163
	영국	18	18	31	31	19	117
	일본	22	21	16	28	18	105
	한국	9	8	12	8	22	59

- 양자통신 분야에 속한 기술군별 한국과 1위 국가의 수준 차는 다음과 같이 산출

표 4-5 양자통신 기술군별 논문 1위 국가 대비 한국의 수준

기술군		T01. 양자암호	T02. 양자전송	T03. 양자네트워크
논문 건수	한국	30	36	59
	1위국가	502	505	1,022
	비율	6%	7.1%	5.8%
	1위국가명	중국	중국	중국
평균 피인용수	한국	8.1	5.8	5.3
	1위국가	20.1	21.8	17.5
	비율	40%	27%	30.8%
	1위국가명	캐나다	캐나다	영국

- 한국의 양자통신 기술군의 상대적 위치를 발표 건수(양적 수준)와 평균 피인용수(질적 수준) 기준으로 표기하면 다음 그림과 같이 분석됨.

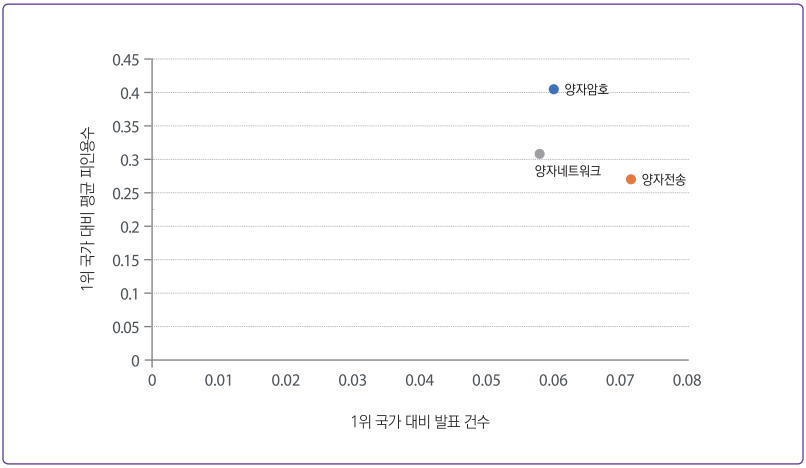


그림 4-1 양자통신 기술군들의 논문 1위 국가 대비 한국의 수준

③ 기관별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 기관을 분석

표 4-6 양자통신 기관별 논문수

분야	기관명	논문 수	평균 피인용수
T01. 양자암호	Univ Sci & Technol China	197	13.7
	Beijing Univ Posts & Telecommun	133	9.1
	Nanjing Univ Posts & Telecommun	71	6.3
	Chinese Acad Sci	63	23.9
	Tsinghua Univ	63	19.9
	State Key Lab Cryptol	58	10.0
	Natl Univ Singapore	53	13.2
	Russian Acad Sci	49	3.2
	Univ Waterloo	48	15.5
	Peking Univ	38	18.4
T02. 양자전송	Univ Sci & Technol China	68	30.7
	Beijing Normal Univ	30	6.4
	Beijing Univ Posts & Telecommun	30	13.9
	Chinese Acad Sci	29	5.5
	Shanxi Univ	29	44.4
	Tsinghua Univ	27	15.4
	Shanghai Jiao Tong Univ	26	15.5
	Austrian Acad Sci	24	27.6

분야	기관명	논문 수	평균 피인용수
T02. 양자전송	Univ Waterloo	22	16.5
	Yale Univ	21	30.2
T03. 양자네트워크	Univ Sci & Technol China	115	19.3
	Chinese Acad Sci	50	26.3
	Beijing Univ Posts & Telecommun	41	11.2
	Shanxi Univ	36	3.3
	Delft Univ Technol	35	35.2
	Tsinghua Univ	34	10.7
	Univ Southampton	27	21.9
	Univ Waterloo	27	11.5
	Univ Oxford	25	24.3
	Anhui Univ	25	9.3

- 2016년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 게재된 논문의 국내 소속기관을 분석

표 4-7 양자통신 국내 기관별 논문수

분야	기관명	논문 수
T01. 양자암호	UST	17
	KIST	15
	고려대학교	9
	KAIST	9
	한국전자통신연구원	7

분야	기관명	논문 수
T01. 양자암호	아주대학교	7
	경희대학교	4
	서강대학교	4
	연세대학교	3
	한국표준과학연구원	3
T02. 양자전송	한국고등연구원	6
	전북대학교	5
	KAIST	5
	서울대학교	5
	고려대학교	5
	KIST	5
	국가보안기술연구소	4
	부산대학교	3
	포항공과대학교	3
	한양대학교(ERICA)	2
T03. 양자네트워크	KIST	7
	포항공과대학교	6
	UST	5
	광주과학기술원	4
	부산대학교	3
	아주대학교	3
	서울대학교	2
	KAIST	2
	광주대학교	2
	한국고등연구원	2

양자센싱 분야

① 연도별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 연도별로 게재된 논문의 수를 분석

- 한국에서는 총 18건의 논문이 게재

표 4-8 양자센싱 연도별 논문수

기술군	연도	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T04. 양자관성센서	전체	29	30	24	28	41	152
	한국	1	0	0	2	0	3
T05. 양자시간측정센서	전체	14	20	22	19	24	99
	한국	0	0	0	0	1	1
T06. 양자자기장전기장센서	전체	24	37	57	86	109	313
	한국	1	0	3	3	4	11
T07. 양자광학센서	전체	19	29	23	28	51	150
	한국	0	1	1	1	0	3
연도별 합계	전체	86	116	126	161	225	714
	한국	2	1	4	6	5	18

② 국가별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 국가를 분석

표 4-9 양자센싱 국가별 논문수

국가	합계		T04. 양자관성센서		T05. 양자시간 측정센서		T06. 양자 자기장전기 장센서		T07. 양자광학센서	
	건수*	평균 피인 용수	건수	평균 피인 용수	건수	평균 피인 용수	건수	평균 피인 용수	건수	평균 피인 용수
미국	192	87.1	33	16.9	38	35.3	82	23.2	39	11.7
중국	188	21.1	39	5.9	34	4.1	72	6.5	43	4.4
독일	122	127.7	17	14.2	16	85.3	80	20.1	9	8.1
영국	59	49.2	10	14.1	4	5.8	30	16.9	15	12.4
프랑스	47	42.3	23	19.8	5	9.6	14	9.0	5	3.8
스위스	27	352.2	4	84.0	4	220.0	19	48.2	-	-
한국	18	28.7	3	13.3	1	1.0	11	10.7	3	3.6

* 세분류별 검색 건수의 단순 합계

• 2016년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 게재된 논문 건수는 다음과 같음.

표 4-10 양자센싱 국가별-연도별 논문수

분야	국가	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T04. 양자관성센서	중국	11	8	5	6	9	39
	미국	4	5	5	7	12	33
	프랑스	3	2	7	6	5	23
	독일	2	4	2	4	5	17
	영국	0	3	2	2	3	10
	한국	1	0	0	2	0	3
T05. 양자시간측정센서	미국	6	10	8	6	8	38
	중국	6	8	7	6	7	34
	독일	3	3	2	4	4	16
	일본	0	1	0	3	2	6
	프랑스	0	1	3	1	0	5
	한국	0	0	0	0	1	1
T06. 양자자기장 전기장센서	미국	5	11	12	25	29	82
	독일	8	8	14	27	23	80
	중국	4	8	18	18	24	72
	일본	2	2	14	18	17	53
	호주	6	4	6	12	13	41
	한국	1	0	3	3	4	11

분야	국가	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T07.양자광학센서	중국	6	6	8	12	11	43
	미국	3	13	8	5	10	39
	캐나다	2	1	0	2	14	19
	영국	2	3	1	2	7	15
	러시아	1	2	2	4	2	11
	한국	0	1	1	1	0	3

• 양자센싱 분야에 속한 기술군별 한국과 1위 국가의 수준 차는 다음과 같이 산출

표 4-11 양자센싱 기술군별 논문 1위 국가 대비 한국의 수준

기술군		T04. 양자관성센서	T03. 양자시간 측정센서	T04. 양자자기장 전기장센서	T05. 양자광학센서
논문 건수	한국	3	1	11	3
	1위국가	39	38	82	43
	비율	7.7%	2.6%	13.4%	7.0%
	1위국가명	중국	미국	미국	중국
평균 피인용수	한국	13.3	1	10.7	3.6
	1위국가	84	220	48.2	12.4
	비율	15.9%	0.5%	22.3%	29.6%
	1위국가명	스위스	스위스	스위스	영국

• 한국의 양자센싱 기술군의 상대적 위치를 발표 건수(양적 수준)와 평균 피인용수(질적 수준) 기준으로 표기하면 다음 그림과 같이 분석

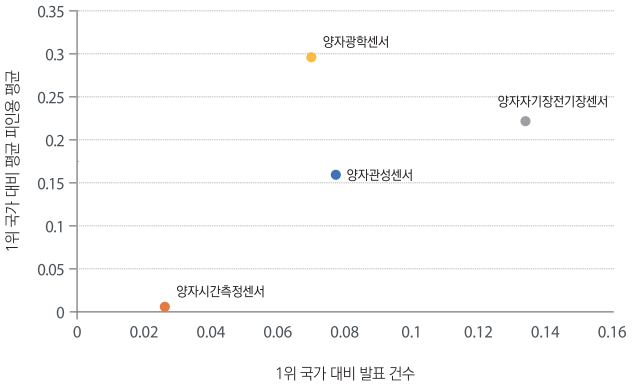
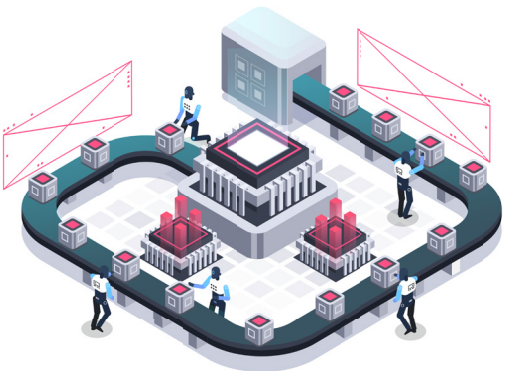


그림 4-2 양자센싱 기술군들의 논문 1위 국가 대비 한국의 수준



③ 기관별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 기관을 분석

표 4-12 양자센싱 기관별 논문수

분야	기관명	논문 수	평균 피인용수
T04. 양자관성센서	Leibniz Univ Hannover	8	9.8
	NIST	7	19.4
	Huazhong Univ Sci & Technol	7	2.4
	Univ Bordeaux	6	28.2
	Sorbonne Univ	6	15.0
	Univ Firenze	5	14.6
	Univ Bremen	5	12.8
	Chinese Acad Sci	5	7.0
	Beihang Univ	5	7.0
	Univ Chinese Acad Sci	5	6.8
T05. 양자시간측정센서	Chinese Acad Sci	12	4.1
	Leibniz Univ Hannover	9	16.0
	MIT	8	83.9
	Univ Colorado	7	31.4
	Univ Chinese Acad Sci	7	1.7
	Stanford Univ	6	50.3
	NIST	5	53.0
	Nanjing Univ Sci & Technol	5	8.2

분야	기관명	논문 수	평균 피인용수
T05. 양자시간측정센서	LENS	3	100.7
	INO CNR	3	100.7
T06. 양자자기장전기장센서	Univ Sci & Technol China	27	8.0
	Univ Ulm	19	16.6
	Natl Inst Adv Ind Sci & Technol	18	4.9
	Univ Melbourne	17	24.7
	Natl Inst Quantum & Radiol Sci & Technol	17	16.6
	MIT	16	50.1
	Univ Stuttgart	16	26.8
	Harvard Univ	15	15.1
	Hebrew Univ Jerusalem	14	12.4
	Chinese Acad Sci	12	5.2
T07. 양자광학센서	MIT	10	15.1
	Peter Great St Petersburg Polytech Univ	7	7.3
	Univ York	6	13.0
	Def Res & Dev Canada	5	4.0
	Carleton Univ	5	4.0
	Chinese Acad Sci	5	1.0
	Air Force Engn Univ	5	1.0
	Univ Toronto	4	15.0
	Natl Univ Singapore	4	11.8
	Ottawa Res Ctr	4	10.3

• 2016년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 게재된 논문의 국내 소속기관을 분석

표 4-13 양자센싱 국내 기관별 논문수

분야	기관명	논문 수
T04. 양자관성센서	한국표준과학원	1
	서울대학교	1
	고려대학교	1
	건국대학교	1
	국방과학연구소	1
T05. 양자시간측정센서	나노종합기술원	1
	한국표준과학원	1
T06. 양자자기장전기장센서	KIST	6
	한국표준과학원	1
	서울대학교	1
	GIST	1
	나노종합기술원	1
	이화여자대학교	1
	고려대학교	1
	부산대학교	1
T07. 양자광학센서	고려대학교	3
	기초과학연구원	3

양자컴퓨팅 분야

① 연도별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 연도별로 게재된 논문의 수를 분석

- 한국에서는 총 103건의 논문이 게재

표 4-14 양자컴퓨팅 연도별 논문수

기술군	연도	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T08. 양자 시뮬레이터	전체	88	81	99	103	185	556
	한국	3	2	4	4	3	16
T09. 물리 양자비트	전체	291	270	376	455	542	1,934
	한국	3	3	6	5	15	32
T10. 논리 양자비트	전체	146	162	185	218	275	986
	한국	0	3	0	4	10	17
T11. 양자 알고리즘 및 SW	전체	172	179	255	347	448	1,401
	한국	2	3	8	7	18	38
연도별 합계	전체	697	692	915	1,123	1,450	4,877
	한국	8	11	18	20	46	103

② 국가별 논문 분석

- 2016년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속 국가를 분석

표 4-15 양자컴퓨팅 국가별 논문수

국가	합계		T08. 양자 시뮬레이터		T09. 물리양자비트		T10. 논리양자비트		T11. 양자 알고리즘 및 SW	
	건수*	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수
미국	1644	20.4	210	23.4	595	17.9	417	24.0	422	19.1
중국	1189	9.3	134	9.5	460	9.4	204	10.5	391	8.6
영국	487	16.4	63	15.6	169	14.3	99	20.0	156	16.6
독일	463	21.7	102	24.0	157	19.2	113	19.4	91	26.5
캐나다	358	17.0	31	15.6	130	16.7	80	15.3	117	18.8
일본	328	19.2	24	15.4	139	18.2	87	30.8	78	9.1
호주	253	17.0	0	0	118	14.5	78	18.6	57	19.9
프랑스	225	18.6	38	24.4	86	15.0	57	24.4	44	13.1
네덜란드	203	29.8	21	59.3	80	23.3	64	39.8	38	10.1
스위스	191	21.5	24	34.1	75	18.0	48	26.5	44	15.2
한국	103	7.2	16	23	32	5.3	17	3.2	38	4.0

* 세분류별 검색 건수의 단순 합계

• 2016년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 게재된 논문 건수는 다음과 같음.

표 4-16 양자컴퓨팅 국가별-연도별 논문수

분야	국가	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T08. 양자 시뮬레이터	미국	36	24	28	48	74	210
	중국	16	22	25	28	43	134
	독일	18	16	20	20	28	102
	영국	9	7	15	11	21	63
	스페인	7	11	8	5	15	46
	한국	3	2	4	4	3	16
T09. 물리 양자비트	미국	95	82	104	153	161	595
	일본	68	67	93	108	124	460
	영국	34	25	23	45	42	169
	독일	25	27	28	39	38	157
	일본	25	20	21	34	39	139
	한국	3	3	6	5	15	32
T10. 논리 양자비트	미국	55	76	91	89	106	417
	중국	24	21	33	49	77	204
	독일	14	25	20	28	26	113
	영국	20	26	11	27	15	99
	일본	14	15	15	16	27	87
	한국	0	3	0	4	10	17

분야	국가	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T11. 양자 알고리즘 및 SW	미국	52	46	77	105	142	422
	중국	43	59	72	102	115	391
	영국	16	22	33	42	43	156
	캐나다	14	12	20	41	30	117
	독일	15	13	13	18	32	91
	한국	2	3	8	7	18	38

• 양자컴퓨팅 분야에 속한 기술군별 한국과 1위 국가의 수준 차는 다음 표와 같이 산출

표 4-17 양자컴퓨팅 기술군별 논문 1위 국가 대비 한국의 수준

기술군		T08. 양자 시뮬레이터	T09. 물리양자비트	T10. 논리양자비트	T11. 양자 알고리즘 및 SW
건수	한국	16	32	17	38
	1위국가	210	595	417	422
	비율	7.6%	5.4%	4.1%	9.0%
	1위국가명	미국	미국	미국	미국
평균 피인용수	한국	23	5.3	3.2	4.0
	1위국가	59.3	23.3	39.8	10.1
	비율	38.8%	22.7%	8.1%	15.3%
	1위국가명	네덜란드	네덜란드	네덜란드	독일

• 양자컴퓨팅 기술군에 대해 한국의 상대적 위치를 발표 건수(양적 수준)와 평균 피인용수(질적 수준) 기준으로 표기하면 다음과 같이 분석

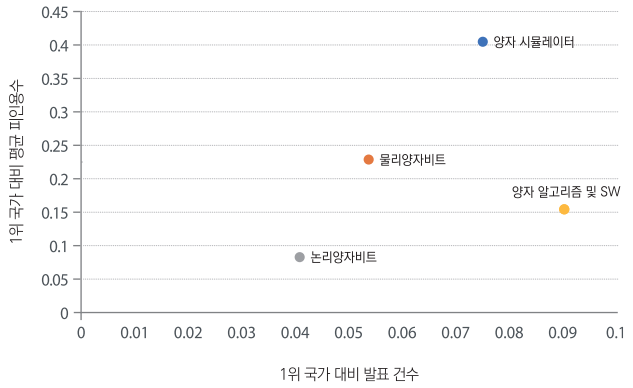


그림 4-3 양자 컴퓨팅 기술군들의 논문 1위 국가 대비 한국의 수준

③ 기관별 논문 분석

• 2016년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 게재된 논문의 소속기관을 분석

표 4-18 양자컴퓨팅 기관별 논문수

분야	기관명	논문 수	평균 피인용수
T08. 양자 시뮬레이터	Univ Sci & Technol China	33	12.1
	Tsinghua Univ	30	13.3
	Univ Maryland	28	30.8
	Harvard Univ	26	48.9
	Univ Oxford	21	15.7
	Chinese Acad Sci	20	10.1
	Basque Fdn Sci	18	22.3
	Southern Univ Sci & Technol	18	5.4
	MIT	17	48.1
	Natl Univ Singapore	15	24.0
T09. 물리 양자비트	Univ Sci & Technol China	76	16.0
	Univ Maryland	64	24.2
	Delft Univ Technol	54	31.3
	Tsinghua Univ	50	15.4
	Chinese Acad Sci	47	21.0
	MIT	46	19.5
	Univ Waterloo	44	10.3
	Univ Oxford	41	26.8
	Natl Univ Singapore	35	14.6
	Princeton Univ	33	29.0

분야	기관명	논문 수	평균 피인용수
T10. 논리 양자비트	Delft Univ Technol	47	49.9
	Yale Univ	39	34.2
	MIT	39	23.5
	Univ Waterloo	38	11.9
	Chinese Acad Sci	37	18.6
	Univ Maryland	35	26.5
	CALTECH	34	27.9
	Univ Sydney	33	13.0
	Univ Tokyo	30	50.1
	Univ Chinese Acad Sci	30	15.2
T11. 양자 알고리즘 및 SW	Univ Sci & Technol China	40	8.5
	Univ Oxford	38	14.3
	Tsinghua Univ	35	9.0
	MIT	33	38.8
	Natl Univ Singapore	30	6.3
	Univ Maryland	28	37.5
	Harvard Univ	28	41.4
	Chinese Acad Sci	28	17.0
	Univ Waterloo	26	27.8
	Microsoft Res	26	41.8

• 2016년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 게재된 논문의 국내 소속기관을 분석

표 4-19 양자컴퓨팅 국내 기관별 논문수

분야	기관명	논문 수
T08. 양자 시뮬레이터	KAIST	4
	고등과학원	4
	중앙대학교	2
	고려대학교	1
	포항공과대학교	1
	서울대학교	1
	UNIST	1
	성균관대학교	1
	ETRI	1
T09. 물리 양자비트	KAIST	8
	서울대학교	7
	고려대학교	4
	고등과학원	4
	UST	4
	서울대학교	3
	KIST	4
	페타룩스	2
	한국표준과학연구원	2
	포항공과대학교	2

분야	기관명	논문 수
T10. 논리 양자비트	고등과학원	6
	서울대학교	5
	고려대학교	3
	ETRI	3
	한국표준과학연구원	2
	기초과학연구원	2
	KISTI	1
	성균관대학교	1
	UST	1
	UNIST	1
T11. 양자 알고리즘 및 SW	KAIST	18
	서울대학교	4
	페타룩스	3
	성균관대학교	2
	가천대학교	2
	한양대학교 ERICA	2
	한양대학교	2
	고등과학원	2
	기초과학연구원	2

양자 분야 통합 분석

- 최근 5년간 SCIE급 논문은 총 8,213건인데, 2016년 1,270에서 2020년에 2,245건으로 증가함.

표 4-20 양자기술 연도별 논문수

년도	2016	2017	2018	2019	2020
건수	1,270	1,269	1,567	1,862	2,245

- 국가별로는 중국이 2,809건, 미국 1,986건, 독일 749건 순이고 우리나라는 200건으로 16위를 나타남.

표 4-21 양자기술 국가별 논문수

순위	국가	건수
1	중국	2,809
2	미국	1,986
3	독일	749
4	영국	636
5	일본	531
6	캐나다	506
7	호주	385
8	프랑스	348
9	인도	345
10	러시아	296
16	한국	200

• 기관별 순위는 CHINESE ACADEMY OF SCIENCES 가 687건으로 1위이고 상위 20위 안에 우리나라 기관은 전무함.

표 4-22 양자기술 기관별 논문수

순위	기관명	건수
1	CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	687
2	UNIVERSITY OF SCIENCE TECHNOLOGY OF CHINA CAS	483
3	CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS	260
4	UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY DOE	210
5	TSINGHUA UNIVERSITY	209
6	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY MIT	186
7	UNIVERSITY OF CALIFORNIA SYSTEM	182
8	BEIJING UNIVERSITY OF POSTS TELECOMMUNICATIONS	181
9	UNIVERSITY OF WATERLOO	173
10	UNIVERSITY SYSTEM OF MARYLAND	163
11	UNIVERSITY OF MARYLAND COLLEGE PARK	156
12	MAX PLANCK SOCIETY	154
13	NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE	154
14	DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	153
15	RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES	153
16	UNIVERSITY OF OXFORD	140
17	NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS TECHNOLOGY NIST USA	127
18	UNIVERSITY OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES CAS	116
19	ETH ZURICH	113
20	CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY	109

- 분야별 논문수는 양자통신 4,478건, 양자센싱 714건, 양자컴퓨팅 4,877건으로 나타남.
  - 양자통신에서 논문은 중국 2,029건, 미국 632건, 한국 125건으로 나타남.
  - 양자센싱에서 논문은 미국 192건, 중국 188건, 한국 18건으로 나타남.
  - 양자컴퓨팅에서 논문은 미국 1,644건, 중국 1,189건, 한국 103건으로 나타남.

- 세분야별로 살펴보면 논문 피인용수의 경우 양자 암호, 양자 시뮬레이터 분야가 일등 국가와 대비하여 0.3 정도의 값을 보여 상대적으로 우수한 분야로 나나탐.
  - 논문의 양적인 측면에서는 모든 분야가 일등 국가 대비 매우 저조하나, 건수나 피인용수가 가장 낮은 두 분야로 양자시간측정센서, 논리양자비트로 나타남.

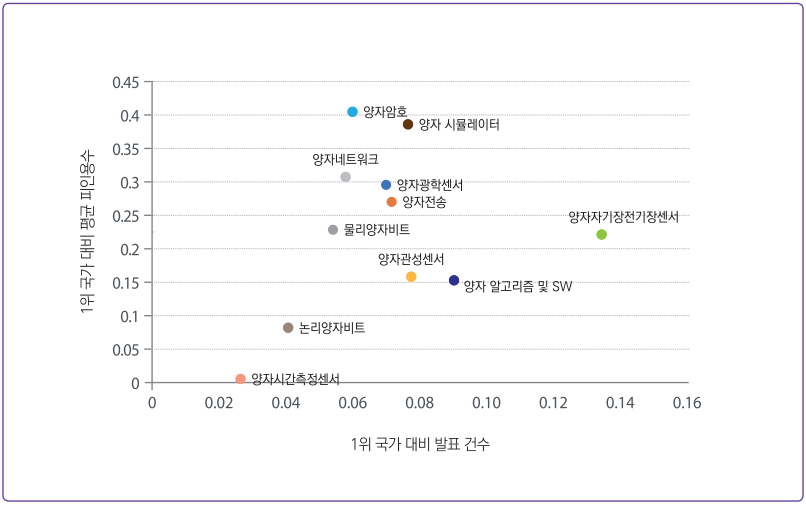


그림 4-4 양자기술 기술군들의 논문 1위국가 대비 한국의 수준

Ⅲ. 특허 분석

- 특허분석은 전세계 특허를 제공하는 LexisNexis 데이터 (KISTI의 gpass.kisti.re.kr 활용)에서 특허 심사국 기준으로 한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO 특허를 대상으로 분석
- 출원년도 기준 최근 7년(2014-2020)의 출원 · 등록된 특허를 대상으로 분석
- 우선권번호가 동일한 특허는 하나의 특허로 집계하여 분석
- 분석 대상 데이터 검색 과정에서 내외부 전문가 활용
- 양자 분야 11개 세분야별로 년도별, 국가별, 출원인별 분석
- 세분야별 양적 수준(건수) 및 질적 수준(평균 패밀리특허수*) 산출

  * 자국에서 출원한 특허를 기초로 해외 여러 국가에 출원한 특허들을 '패밀리특허'라 하며, 동일한 특허로 해외 여러 국가에 출원한 특허의 총 수를 패밀리특허수로 정의하고 분석에 활용

- 논문의 질적수준 분석에 자주 활용하는 피인용수를 특허의 경우에는 주로 미국특허만 제공하므로 선진 6개국 특허 분석에서 피인용수를 사용하기는 부적합함.
- 동일한 특허로 얼마나 많은 국가에 출원했는지를 살펴보는 패밀리 특허수는 특허에 대한 시장 관점의 질적 수준 분석에 활용하기에 적합함.

- 출원인별 분석은 건수 기준 상위 10대 출원인을 추출하고 우리나라의 주요 출원인은 별도로 추출
- 일등 국가 대비 우리나라의 양적 수준 및 질적 수준을 도출
- 양적 수준과 질적 수준으로 이루어진 2차원 포지셔닝 맵 가시화

양자통신 분야

① 연도별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 연도별로 출원된 특허의 수를 분석
- 한국에서는 총 157건의 특허 출원

표 4-23 양자통신 연도별 출원특허수

기술군	연도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T01. 양자암호	전체	77	116	149	331	458	466	266	1,863
	한국	7	13	9	44	56	16	4	149
T02. 양자전송	전체	4	13	16	19	36	26	12	126
	한국	0	0	0	1	1	2	0	4
T03. 양자네트워크	전체	10	15	11	20	35	46	35	172
	한국	1	1	1	1	0	0	0	4
연도별 합계	전체	91	144	176	370	529	538	313	2,161
	한국	8	14	10	46	57	18	4	157

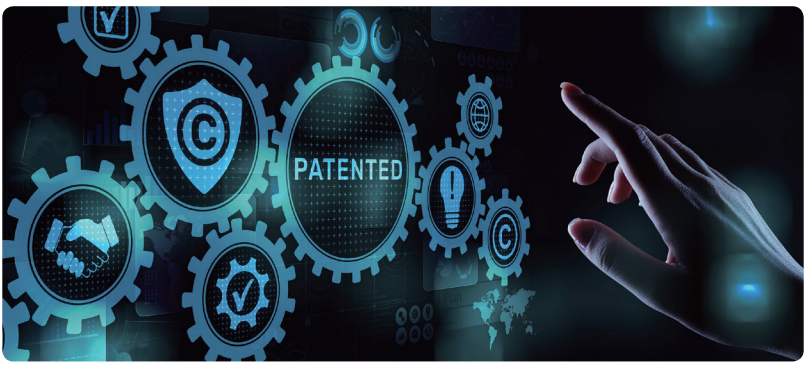
② 국가별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 출원된 특허의 소속 국가를 분석

표 4-24 양자통신 국가별 출원특허수

국가	합계		T01. 양자암호		T02. 양자전송		T03. 양자네트워크	
	건수*	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수
중국	1,970	2.7	1,694	2.9	120	1.6	156	1.5
미국	174	2.5	140	2.6	8	1.6	26	2.7
한국	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

* 세분류별 검색 건수의 단순 합계



• 2014년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 연도별로 한국 및 상위 5개 국가에서 출원된 특허 건수는 다음과 같음.

표 4-25 양자통신 국가별-연도별 출원특허수

분야	국가	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T01. 양자암호	중국	60	81	127	304	453	423	244	1692
	한국	7	13	9	44	56	16	4	149
	미국	15	8	12	21	33	32	19	140
	독일	12	16	8	8	6	7	0	57
	영국	0	1	1	5	9	9	1	26
T02. 양자전송	중국	3	9	17	17	41	23	10	120
	일본	1	3	1	1	2	0	0	8
	미국	0	1	1	0	0	4	2	8
	한국	0	0	0	1	1	2	0	4
	독일	0	0	0	1	2	0	0	3
T03. 양자네트워크	중국	12	11	10	17	38	42	26	156
	미국	0	2	0	3	6	7	8	26
	한국	1	1	1	1	0	0	0	4
	독일	0	0	0	1	0	0	1	2
	프랑스	1	1	0	0	0	0	0	2

• 양자통신 분야에 속한 기술군별 한국과 1위 국가의 수준 차는 다음과 같이 산출

표 4-26 양자통신 기술군별 특허 1위 국가 대비 한국의 수준

기술군		T01. 양자암호	T02. 양자전송	T03. 양자네트워크
특허 건수	한국	149	4	4
	1위국가	1,694	120	156
	비율	8.7%	3.3%	1.6%
	1위국가명	중국	중국	중국
평균 패밀리특허수	한국	2.1	2.5	1.2
	1위국가	10	4	9.5
	비율	21.4%	62.5%	13.1%
	1위국가명	이탈리아	일본	프랑스

• 한국의 양자통신 기술군의 상대적 위치를 발표 건수(양적 수준)와 평균 패밀리특허수(질적 수준) 기준으로 표기하면 다음과 같이 분석

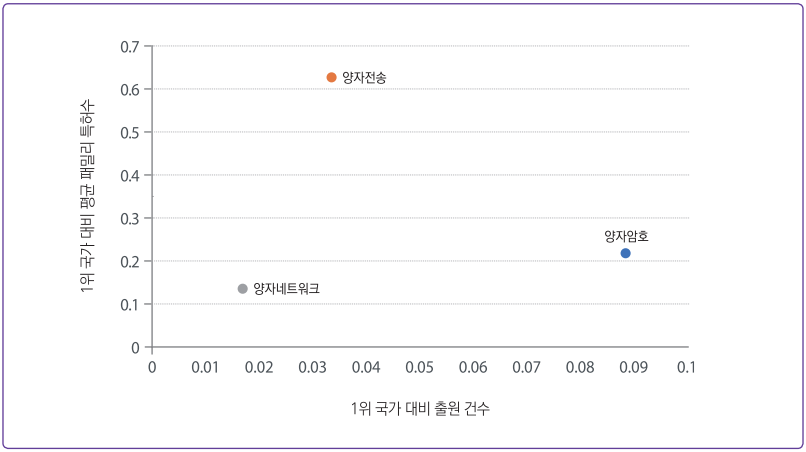


그림 4-5 양자통신 기술군들의 특허 1위 국가 대비 한국의 수준

③ 출원인별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 출원된 특허의 출원인을 분석

표 4-27 양자통신 출원인별 출원특허수

분야	출원인명	특허 수	평균 패밀리 특허수
T01. 양자암호	RUBAN QUANTUM TECH	92	1.2
	UNIVERSITY BEIJING POSTS & TELECOMM	87	1.4
	QUANTUMCTEK	69	1.6
	UNIVERSITY CENTRAL SOUTH	43	1.5
	STATE GRID CHINA	37	1.4
	ELECTRONIC SCIENCE RES INST CHINA ELECTRONICS TECH GROUP	34	1.0
	UNIVERSITY CHENGDU INFORMATION TECHNOLOGY	31	1.9
	CHAE RYEONG	30	1.3
	ANHUI QASKY QUANTUM SCIENCE & TECH	30	1.1
	TOSHIBA	28	4.0
T02. 양자전송	UNIVERSITY CHENGDU INFORMATION TECHNOLOGY	8	1.9
	UNIVERSITY BEIJING POSTS & TELECOMM	8	1.5
	TOSHIBA	8	4.0
	UNIVERSITY NORTHWESTERN	6	2.0

분야	출원인명	특허 수	평균 패밀리 특허수
T02. 양자전송	UNIVERSITY ZHEJIANG GONGSHANG	6	2.0
	HARBIN INST TECHNOLOGY	5	1.4
	UNIVERSITY TSINGHUA	5	1.6
	ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS RESEARCH INSTITUTE	4	2.5
	OMNISENT	4	1.5
	UNIVERSITY BEIHANG	4	2.0
T03. 양자네트워크	UNIVERSITY BEIJING POSTS & TELECOMM	13	1.3
	UNIVERSITY SOUTH CHINA NORMAL	8	1.5
	CORNING	6	5.8
	RUBAN QUANTUM TECH	5	1.0
	QUANTUMCTEK	5	3.0
	STATE GRID CHINA	4	1.8
	NANJING REBORN QUANTUM TECH	4	1.0
	UNIVERSITY CHENGDU INFORMATION TECHNOLOGY	3	2.3
	SOUTH CHINA NORMAL UNIVERSITY	3	5.3
	UNIVERSITY HENAN POLYTECHNIC	3	2.0

- 2014년부터 2020년까지 양자통신 분야와 관련하여 출원된 특허의 국내 출원인을 분석

표 4-28 양자통신 국내 출원인별 출원특허수

분야	출원인	특허 수
T01. 양자암호	채령(CHAE RYEONG)	30
	KIST	17
	SK TELECOM	14
	한국전자통신연구원	13
	KAIST	8
T02. 양자전송	고려대학교	8
	채서룡(CHAE SEO RYOUNG)	7
	EYL	6
	차보영(CHA BO YOUNG)	5
	국민대학교	5
T03. 양자네트워크	한국전자통신연구원	4
	경희대학교 대학 산학협력단	1
	SK TELECOM	1
	KAIST	1
	한양대학교 산학협력재단	1

양자센싱 분야

① 연도별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 연도별로 출원된 특허의 수를 분석
- 한국에서는 총 19건의 특허 출원

표 4-29 양자센싱 연도별 출원특허수

기술군	연도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T04. 양자관성센서	전체	18	14	16	19	23	29	17	136
	한국	0	1	2	1	1	1	0	6
T05. 양자시간측정센서	전체	1	0	6	4	1	4	1	17
	한국	0	0	2	1	0	1	0	4
T06. 양자자기장전기장센서	전체	8	10	21	13	17	24	17	110
	한국	2	3	2	1	0	0	0	8
T07. 양자광학센서	전체	4	3	1	8	5	7	3	31
	한국	0	0	0	0	1	0	0	1
연도별 합계	전체	31	27	44	44	46	64	38	294
	한국	2	4	6	3	2	2	0	19

② 국가별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 출원된 특허의 소속 국가를 분석

표 4-30 양자센싱 국가별 출원특허수

국가	합계		T04. 양자관성센서		T05. 양자시간측정센서		T06. 양자자기장 전기장센서		T07. 양자광학센서	
	건수*	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수
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

* 세분류별 검색 건수의 단순 합계

• 2014년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 출원된 특허 건수는 다음과 같음.

표 4-31 양자센싱 국가별-연도별 출원특허수

분야	국가	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T04. 양자 관성센서	중국	14	8	9	15	14	23	16	99
	일본	0	0	0	0	12	4	0	16
	미국	2	1	0	3	1	3	1	11
	프랑스	0	1	1	0	6	0	0	8
	한국	0	1	2	1	1	1	0	6
T05. 양자시간 측정센서	미국	0	0	3	1	1	3	1	9
	중국	1	0	1	2	0	0	0	4
	한국	0	0	2	1	0	1	0	4
T06. 양자자기장 전기장센서	중국	1	3	10	10	12	15	14	65
	미국	2	3	5	3	6	17	2	38
	한국	2	3	2	1	0	0	0	8
	일본	0	0	1	0	3	0	0	4
	독일	1	1	1	0	0	0	0	3
T07. 양자 광학센서	중국	4	3	2	7	3	7	3	29
	미국	0	0	0	1	1	0	0	2
	한국	0	0	0	0	1	0	0	1

• 양자센싱 분야에 속한 기술군별 한국과 1위 국가의 수준 차는 다음과 같이 산출

표 4-32 양자센싱 기술군별 특허 1위 국가 대비 한국의 수준

기술군		T04. 양자관성센서	T03. 양자시간 측정센서	T04. 양자자기장전 기장센서	T05. 양자광학센서
특허 건수	한국	6	4	8	1
	1위국가	99	9	65	29
	비율	6%	44.4%	12.3%	3.4%
	1위국가명	중국	미국	중국	중국
평균 패밀리특허수	한국	1.5	4.2	3.8	1
	1위국가	4.6	4.2	13.6	2
	비율	32%	100%	28%	50%
	1위국가명	프랑스	한국	미국	미국

- 한국의 양자센싱 기술군의 상대적 위치를 발표 건수(양적 수준)와 평균 패밀리특허수(질적 수준) 기준으로 표기하면 다음과 같이 분석

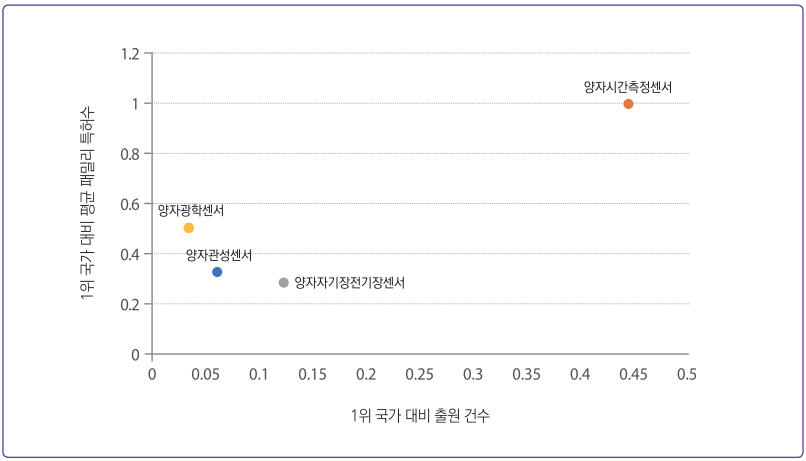


그림 4-6 양자센싱 기술군들의 특허 1위국가 대비 한국의 수준

③ 출원인별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 출원된 특허의 출원인을 분석

표 4-33 양자센싱 출원인별 출원특허수

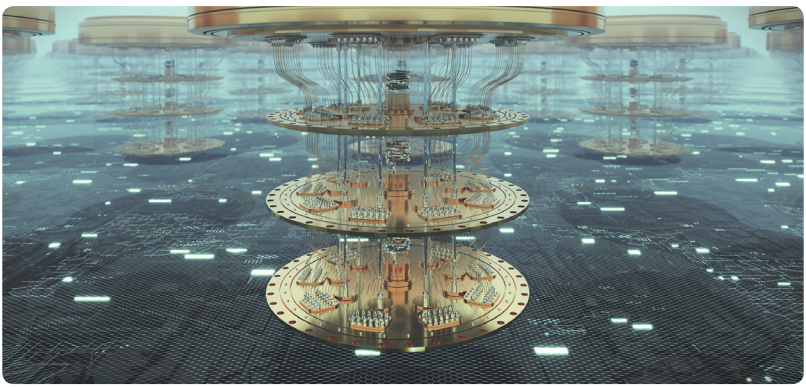
분야	출원인명	특허 수	평균 패밀리 특허수
T04. 양자관성센서	UNIVERSITY BEIHANG	24	1.5
	BEIJING INST AEROSPACE CONTROL DEVICES	21	1.5
	AGENCY FOR DEFENSE DEVELOPMENT	5	1.4
	TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY	5	4.2
	JAPAN AVIATION ELECTRONICS IND	5	4.2
	INNOVATION ACADEMY FOR PRECISION MEASUREMENT SCIENCE AND TECH CAS	4	1.0
	CHENGDU SPACEON ELECTRONICS	4	2.0
	HONEYWELL INTERNATIONAL	4	3.5
	CHINA SHIPBUILDING IND NO 707 RES INST	4	1.0
	BEIJING AUTOMATION CONTROL EQUIPMENT INST	4	1.5
T05. 양자 시간측정센서	TEXAS INSTRUMENTS	6	2.0
	KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	3	3.3
	CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY	2	2.0
	BEIJING INST RADIO METROLOGY & MEASUREMENT	1	1.0
	BEIJING INSTITUTE TECH	1	2.0
	UNIVERSITY NORTH CHINA	1	1.0

분야	출원인명	특허 수	평균 패밀리 특허수
T05. 양자 시간측정센서	WUHAN INSTITUTE OF PHYSICS AND MATHEMATICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	1	5.0
	KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE	1	7.0
	NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS	1	9.0
T06. 양자자기장 전기장센서	SHANGHAI INST MICROSYSTEM & INFORMATION TECH CAS	10	1.6
	KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE	8	3.9
	UNIVERSITY BEIHANG	7	1.6
	STATE GRID CHINA	7	1.0
	LOCKHEED MARTIN	6	76.0
	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY	5	2.2
	MOXLEY III FREDERICK IRA	3	1.7
	BEIJING INST RADIO METROLOGY & MEASUREMENT	3	1.0
	ELECTRIC POWER RES INST STATE GRID ANHUI ELECTRIC POWER	3	1.0
	JINHUA FUAN PHOTOELECTRIC TECH	3	1.0
T07. 양자광학센서	ZHEJIANG SHENZHOU LIANGZI NETWORK SCIENCE & TECH	3	1
	INVISAGE TECHNOLOGIES	2	2
	ZHEJIANG DIKE NEW TECH DEVELOPMENT	2	1
	UNIVERSITY TSINGHUA	2	2
	TAN ZIANG	2	2
	UNIVERSITY HUAZHONG SCIENCE TECH	1	2
	KOREA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	1	1
	ZHAO YIBO	1	1
	UNIVERSITY XIDIAN	1	2
	UNIVERSITY XIAN SCI & TECHNOLOGY	1	1

• 2014년부터 2020년까지 양자센싱 분야와 관련하여 출원된 특허의 국내 출원인을 분석

표 4-34 양자센싱 국내 출원인별 출원특허수

분야	출원인명	특허 수
T04. 양자관성센서	국방과학연구소	5
	부산대학교	1
T05. 양자시간측정센서	KAIST	3
	한국표준과학연구소	1
T06. 양자자기장전기장센서	한국표준과학연구소	8
T07. 양자광학센서	KIST	1



양자컴퓨팅 분야

① 연도별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 연도별로 출원된 특허의 수를 분석

- 한국에서는 총 17건의 특허가 출원

표 4-35 양자컴퓨팅 연도별 출원특허수

기술군	연도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T08. 양자 시뮬레이터	전체	0	2	2	5	10	16	13	48
	한국	0	0	0	0	0	0	1	1
T09. 물리 양자비트	전체	19	41	49	53	137	141	81	521
	한국	1	0	1	2	5	3	0	12
T10. 논리 양자비트	전체	7	7	6	7	13	26	19	85
	한국	0	1	1	1	0	0	1	4
T11. 양자 알고리즘 및 SW	전체	0	1	2	14	12	23	7	59
	한국	0	0	0	0	0	0	0	0
연도별 합계	전체	26	51	59	79	172	206	120	713
	한국	1	1	2	3	5	3	2	17

② 국가별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 출원된 특허의 소속 국가를 분석

표 4-36 양자컴퓨팅 국가별 출원특허수

국가	합계*		T08. 양자 시뮬레이터		T09. 물리양자비트		T10. 논리양자비트		T11. 양자 알고리즘 및 SW	
	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수	건수	평균 패밀리 특허수
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	18	3.8	2	1.5	3	2.3
한국	17	2.3	1	1	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

* 세분류별 검색 건수의 단순 합계

- 2014년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 연도별로 상위 5개 국가에서 출원된 특허 건수는 다음과 같음.

표 4-37 양자컴퓨팅 국가별-연도별 출원특허수

분야	국가	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	합계
T08. 양자 시뮬레이터	중국	0	1	0	2	1	14	9	27
	미국	0	1	2	3	8	1	3	18
	일본	0	0	0	0	1	0	0	1
	한국	0	0	0	0	0	0	1	1
	싱가포르	0	0	0	0	0	1	0	1
T09. 물리 양자비트	미국	11	32	28	34	101	99	43	348
	캐나다	3	4	11	5	13	6	10	52
	중국	1	0	0	4	7	9	18	39
	일본	0	2	6	1	4	5	0	18
	프랑스	1	0	0	0	6	5	0	12
	한국	1	0	1	2	5	3	0	12
T10. 논리 양자비트	미국	3	4	2	4	10	24	14	61
	캐나다	2	0	2	1	1	0	0	6
	중국	1	0	1	0	1	0	1	4
	한국	0	1	1	1	0	0	1	4
	호주	0	2	0	0	0	0	0	2
T11. 양자 알고리즘 및 SW	미국	0	0	2	7	6	13	2	30
	중국	0	1	0	4	4	4	4	17
	캐나다	0	0	0	2	1	2	0	5
	일본	0	0	0	0	1	1	1	3
	아일랜드	0	0	0	1	0	1	0	2
	한국	0	0	0	0	0	0	0	0

- 양자컴퓨팅 분야에 속한 기술군별 한국과 1위 국가의 수준 차는 다음과 같이 산출

표 4-38 양자컴퓨팅 기술군별 특허 1위 국가 대비 한국의 수준

기술군		T08. 양자 시뮬레이터	T09. 물리양자비트	T10. 논리양자비트	T11. 양자 알고리즘 및 SW
건수	한국	1	12	4	0
	1위국가	27	348	61	30
	비율	3.7%	3.4%	6.6%	0%
	1위국가명	중국	미국	미국	미국
평균 패밀리 특허수	한국	1	2.4	2.3	0
	1위국가	7	6.4	15.0	3.5
	비율	14.3%	37.8%	15.0%	0%
	1위국가명	일본	호주	호주	아일랜드

- 양자컴퓨팅 기술군에 대해 한국의 상대적 위치를 출원 건수(양적 수준)와 평균 패밀리 특허수(질적 수준) 기준으로 표기하면 다음과 같이 분석

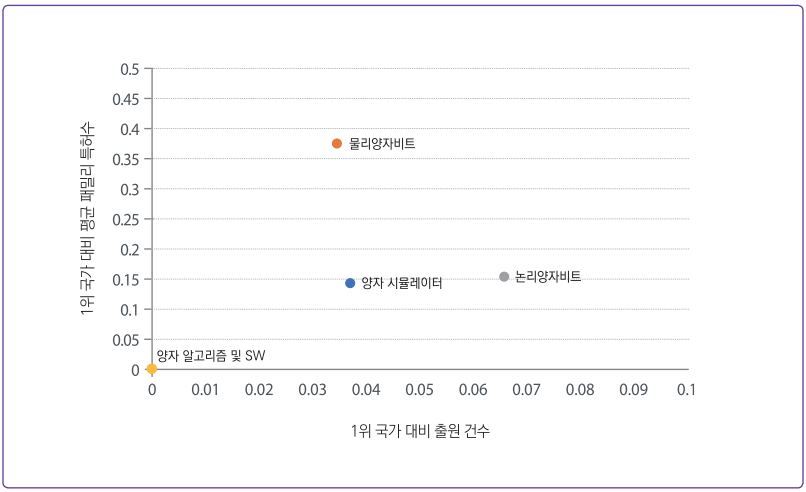


그림 4-7 양자컴퓨팅 기술군들의 특허 1위 국가대비 한국의 수준

③ 출원인별 특허 분석

- 2014년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 출원된 특허의 출원인을 분석

표 4-39 양자컴퓨팅 출원인별 출원특허수

분야	출원인명	특허 수	평균 패밀리 특허수
T08. 양자 시뮬레이터	Origin Quantum Computing	11	1.3
	IBM	5	2.4
	GOOGLE	3	5.0
	Beijing Baidu Netcom Science Technology	2	1.0
	Rigetti Computing	2	1.0
	Chongqing University of Posts and Telecommunications	2	1.0
	Nanjing University	3	1.7
T09. 물리 양자비트	IBM (US)	102	2.1
	GOOGLE	38	5.2
	D WAVE SYSTEMS	38	2.5
	Intel	34	2.5
	Rigetti Computing	29	2.4
	Microsoft	24	3.1
	Harvard UNIVERSITY	11	2.4
	Northrop Grumman Systems	7	9.3

분야	출원인명	특허 수	평균 패밀리 특허수
T09. 물리 양자비트	Beijing Baidu Netcom Science Technology	7	1.0
	IONQ	7	2.0
T10. 논리 양자비트	GOOGLE	10	4.3
	Microsoft	10	2.3
	IBM	6	2.2
	D Wave Systems	5	3.0
	Yale University	4	6.5
	Kelly Julian Shaw (인명)	2	13.0
	President Resident and Fellows of Harvard	2	2.5
	고려대학교	2	2,5
	ETRI	2	2.0
T11. 양자 알고리즘 및 SW	IBM (US)	7	2.7
	Microsoft	6	2.7
	Origin Quantum Computing	5	2.0
	ZAPATA COMPUTING	5	1.0
	1QBIT	3	4.3
	Goldman Sachs	2	1.0
	Rigetti Computing	2	1.0
	Accenture	2	3.5

• 2014년부터 2020년까지 양자컴퓨팅 분야와 관련하여 출원된 특허의 국내 출원인을 분석

표 4-40 양자컴퓨팅 국내 출원인별 출원특허수

분야	출원인명	특허 수
T08. 양자 시뮬레이터	ETRI	1
T09. 물리 양자비트	ETRI	3
	KAIST	2
	서울대학교	2
	삼성전자	1
	KIST	1
	THE4TH	1
	경희대학교	1
	포항공과대학교	1
T10. 논리 양자비트	고려대학교	2
	ETRI	2
T11. 양자 알고리즘 및 SW	없음	

양자 분야 통합 분석

- 최근 7년간 6개국(한국, 미국, 중국, 유럽, 일본, WIPO) 특허는 총 2,817건인데, 출원년도 기준 2014년 128건에서 2019년 726건으로 최근 5년간 연평균 41%씩 증가함.

표 4-41 양자기술 연도별 출원특허수

년도	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020*	합계
건수	128	177	256	451	674	726	405	2817

* 특허는 출원 후 공개되는 데에 보통 1.5년이 걸리고 의도적으로 공개를 지연하는 경우도 있어서 최근년도에는 공개된 특허가 많지 않음.

- 특허심사국별로는 중국이 60.9%로 가장 많고, 미국 24.1%, WIPO 6.8%, 한국 4.4% 비중을 보임.

표 4-42 양자기술 특허 심사국별 출원특허수

AUTHORITY	건수	비율(%)
중국	1,715	60.9
미국	679	24.1
WIPO	191	6.8
한국	123	4.4
유럽	68	2.4
일본	41	1.5
합계	2817	100

• 출원인 국적별로는 중국 2,042건, 미국 632건, 한국 184건의 순위를 보임.

표 4-43 양자기술 출원인 국적별 출원특허수

순위	국가	건수
1	중국	2,042
2	미국	632
3	한국	184
4	일본	105
5	캐나다	65
6	독일	34
7	영국	32
8	프랑스	24
9	스위스	16
10	호주	10

• 출원인별로는 IBM 115건, RUBAN QUANTUM TECH 96건, 구글 49건 순을 나타냄.

• 상위 20대 출원인에 우리나라의 개인으로 추정되는 '채령'이 30건의 특허를 출원

표 4-44 양자기술 출원인별 출원특허수

순위	출원인	국가	건수
1	IBM	미국	115
2	RUBAN QUANTUM TECH	중국	96
3	UNIVERSITY BEIJING POSTS & TELECOMM	중국	90
4	QUANTUMCTEK	중국	70
5	GOOGLE	미국	49
6	STATE GRID CHINA	중국	45
7	UNIVERSITY CENTRAL SOUTH	중국	44
8	D WAVE SYSTEMS	캐나다	42
9	INTEL	미국	40
10	UNIVERSITY BEIHANG	중국	37
11	UNIVERSITY CHENGDU INFORMATION TECHNOLOGY	중국	36
12	TOSHIBA	일본	35
13	MICROSOFT	미국	34
14	ELECTRONIC SCIENCE RES INST CHINA ELECTRONICS TECH GROUP	중국	34
15	UNIVERSITY TSINGHUA	중국	34
16	RIGETTI	미국	33
17	CHAE RYEONG	한국	30
18	ANHUI QASKY QUANTUM SCIENCE & TECH	중국	30
19	UNIVERSITY SOUTH CHINA NORMAL	중국	27
20	ZHEJIANG SHENZHOU LIANGZI NETWORK SCIENCE & TECH	중국	26

- 우리나라의 출원인을 살펴보면 채령 30건, KIST 19건, ETRI 17건, SK텔레콤 14건, KAIST 13건의 순서를 보이고 있음.

표 4-45 양자기술 국내 출원인별 출원특허수

순위	출원인	건수
1	CHAE RYEONG	30
2	KOREA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	19
3	ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS RESEARCH INSTITUTE	17
4	SK TELECOM	14
5	KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	13
6	KOREA UNIVERSITY	10
7	KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE	9
8	CHAE SEO RYOUNG	7
9	EYL	6
10	KOOKMIN UNIVERSITY	5

- 분야별 특허수는 양자통신 2,161건, 양자센싱 294건, 양자컴퓨팅 713건으로 나타남.
- 양자통신에서 출원인 국적별로 중국 1970건, 미국 174건, 한국 157건으로 나타남.
- 양자센싱에서 출원인 국적별로 중국 197건, 미국 60건, 한국 19건으로 나타남.
- 양자컴퓨팅에서 출원인 국적별로 미국 457건, 중국 87건, 한국 17건으로 나타남.

- 세분야별 특허 건수와 평균 패밀리특허수를 1등국가와 비교했을 때, 양자시간측정센서 분야가 건수(0.44)도 많고 평균 패밀리특허수(1)에서 우리나라가 1등국가임이 확인되었음.

- 질적 수준인 평균 패밀리특허수 기준으로 보면 양자시간측정센서, 양자전송, 양자광학센서 분야가 1등 국가 대비 0.5 이상의 값을 보여서 질적 수준이 상대적으로 우수한 분야로 보임.

- 양적 수준은 양자시간측정센서가 1등국가대비 비교적 우수한 편이고 다른 분야는 대부분 취약한 것으로 판단됨.

  - 양적 수준에서 가장 취약한 분야는 양자알고리즘 및 SW, 양자네트워크, 양자시뮬레이터로 나타남.

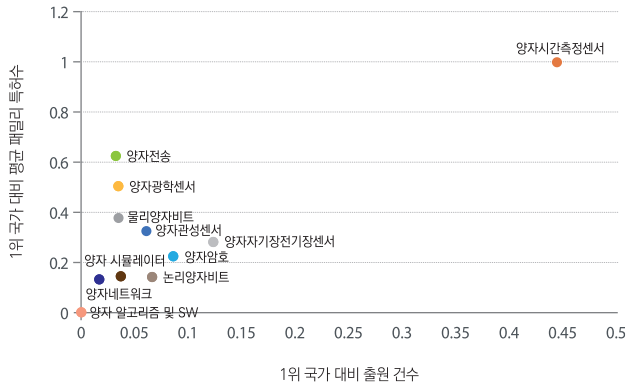


그림 4-8 양자기술 기술군들의 특허 1위국가 대비 한국의 수준

Ⅳ. 정부연구개발과제 분석

양자통신 분야

- 정부투자 과제정보를 제공하는 NTIS에서 '양자통신'으로 검색하면 2016 - 2020년 기간 동안 조사분석확정본으로 총 847건의 과제가 검색됨.

① 년도별 분석

- 양자통신 분야에서 정부투자액은 꾸준히 증가하고 있으며 2016-2020년 기간 총 투자액은 2,916억원으로 나타남.

표 4-46 양자통신 연도별 정부투자액

기준년도	2016	2017	2018	2019	2020	총합계
정부투자비 (억 원)	400	339	554	654	969	2,916

② 기관별 분석

- 정부과제에 대한 주요 수행기관을 살펴보면 한국전자통신연구원, 한국표준과학연구원, 한국과학기술연구원 등의 출연연과 고려대, 한국과학기술원, 서울대 등이 정부투자연구비 관점에서 많은 연구를 수행하고 있음을 확인함.

표 4-47 양자통신 기관별 수행 규모

과제수행기관	정부투자연구비(억 원)
한국전자통신연구원	413
한국표준과학연구원	397
한국과학기술연구원	265
한국과학기술정보연구원	148
고려대학교	121
한국과학기술원	118
서울대학교	106
부산대학교	77
포항공과대학교	62
고등과학원	59
전자부품연구원	47

③ 키워드 분석

- 양자통신 과제에서 발생한 한글 키워드를 살펴본 결과 '양자컴퓨터'도 많은 빈도수(과제수)를 보여서 양자통신과 양자컴퓨터를 구분하기가 쉽지 않음을 확인함.

- 한편 사물인터넷, 빅데이터, 그래핀, 인공지능, 광집적회로, 보안 등의 키워드가 고빈도 키워드로 나타남에 따라 이들 분야가 양자통신이 응용되는 기술 분야인 것으로 추정됨.

표 4-48 양자통신 상위 키워드 분석

한글 키워드	빈도수
양자정보	58
양자통신	48
양자암호	41
양자컴퓨터	37
사물인터넷	31
양자	19
포스트 양자 암호	19
양자 결맞음	18
양자채널	18
양자광학	18
양자얽힘	18
빅데이터	18
그래핀	17
인공지능	16
양자컴퓨팅	15
양자 통신	14
양자 얽힘	14
양자점	13
양자 컴퓨팅	13
양자키분배	12
광집적회로	12
보안	12

양자센싱 분야

- 정부투자 과제정보를 제공하는 NTIS에서 '양자센서,'양자센싱', '양자계측'단어간 OR 연산으로 검색하면 2016-2020년 기간 동안 조사분석확정본으로 총 802건의 과제가 검색됨.

① 년도별 분석

- 양자센싱 분야에서 정부투자액은 2016-2020년 기간에 총액 2,826억원으로 나타남.
- 2018년과 2019년에는 약간 감소한 수치를 보임.

표 4-49 양자센싱 연도별 정부투자액

기준년도	2016	2017	2018	2019	2020	총합계
정부투자비 (억 원)	632	663	403	419	708	2,826

② 기관별 분석

- 정부과제에 대한 주요 수행기관을 살펴보면 기초과학연구원, 한국표준과학연구원, 한국과학기술원 등의 출연연과 한국과학기술원, 서울대, 고려대 등이 정부투자연구비 관점에서 많은 연구를 수행하고 있음을 확인함.

표 4-50 양자센싱 기관별 수행 규모

과제수행기관	정부투자연구비(억 원)
기초과학연구원	711
한국표준과학연구원	507
한국과학기술연구원	263
한국원자력연구원	216
한국과학기술원	119
한국전자통신연구원	90
서울대학교	62
고려대학교	56
광주과학기술원	52
울산과학기술원	46

③ 키워드 분석

- 양자센싱 분야 과제에서 발생한 한글 키워드를 살펴본 결과 그래핀, 양자점, 바이오센서, 화학센서, 2차원 물질, 플라즈몬 등의 키워드가 고빈도 단어로 분석되었음.

- 전체적으로 양자센싱 과제의 키워드들을 살펴보면 바이오, 화학, 사물인터넷, 적외선, 플랫폼, 위성, 알고리즘, 실용화 등의 키워드들이 서로 다른 산업분야에서 사용되는 키워드라는 것을 알 수 있고, 이를 통해 유추해보면 양자센싱은 이미 다양한 산업분야에서 활용되거나 응용연구가 진행되고 있다고 판단됨.

표 4-51 양자센싱 상위 키워드 분석

한글 키워드	빈도수
그래핀	31
양자점	28
바이오센서	26
화학센서	23
2차원 물질	16
플라즈몬	16
형광	15
사물인터넷	15
카보레인	13
플라즈모닉스	12
센서	12
바이오이미징	12
페로브스카이트	12
양자 얽힘	11
양자	11
양자 결맞음	11
광센서	11
스핀트로닉스	11
바이오센싱	11
광전소자	11
양자정보	10
발광소자	10
적외선	10
안정성	10
표면처리	10
플랫폼	10
다종위성	10
정지궤도	10
실용화	10
알고리즘	10

양자컴퓨팅 분야

- 정부투자 과제정보를 제공하는 NTIS에서 '양자컴퓨터'와'양자컴퓨팅'단어 간 OR 연산으로 검색하면 2016-2020년 기간 동안 조사분석확정본으로 총 1,018건의 과제가 검색됨.

① 년도별 분석

- 양자컴퓨팅 분야에서 정부투자액은 2016-2020년 기간에 총액 2,539억 원으로 나타남.
- 2017년만 제외하고는 정부투자액은 계속 증가추세임.

표 4-52 양자컴퓨팅 연도별 정부투자액

기준년도	2016	2017	2018	2019	2020	총합계
정부투자비 (억 원)	362	347	423	551	856	2,539

② 기관별 분석

- 정부과제에 대한 주요 수행기관을 살펴보면 기초과학연구원, 한국과학기술연구원, 한국전자통신연구원 등의 출연연과 서울대, 포항공대, 고려대 등이 정부투자연구비 관점에서 많은 연구를 수행하고 있음을 확인함.

표 4-53 양자컴퓨팅 기관별 수행 규모

과제수행기관	정부투자연구비(억 원)
기초과학연구원	342
서울대학교	307
한국과학기술연구원	240
한국전자통신연구원	206
한국과학기술정보연구원	150
한국표준과학연구원	141
포항공과대학교	141
고려대학교	124
한국과학기술원	104
고등과학원	76
성균관대학교	76

③ 키워드 분석

- 양자컴퓨팅 과제에서 발생한 한글 키워드를 살펴본 결과 양자컴퓨터, 양자정보, 포스트 양자 암호, 양자 얽힘 등 기본적인 단어들이 고빈도 단어로 나타남.
- 양자화학, 양자통신, 나노포토닉스, 사물인터넷, 그래핀, 밀도범함수이론, 광집적회로, 메타물질, 기계학습, 인공지능, 촉매 등의 단어들도 고빈도어로 나타남.
- 전체적으로 양자컴퓨터 분야는 양자컴퓨터 제작 기술과 이론 및 알고리즘을 포괄하는 분야로 판단됨.

표 4-54 양자컴퓨팅 상위 키워드 분석

한글 키워드	빈도수
양자컴퓨터	53
양자정보	50
양자컴퓨팅	29
포스트 양자 암호	25
양자암호	25
양자얽힘	20
양자 컴퓨팅	18
양자화학	18
양자 컴퓨터	17
양자	17
양자통신	17
전자구조	17
2차원 물질	17
양자 얽힘	15
나노포토닉스	15
사물인터넷	14
그래핀	13
큐비트	12
밀도범함수이론	12
광집적회로	12
공개키 암호	11
양자 통신	11
위상물질	11
메타물질	11
스핀	11
기계학습	11

한글 키워드	빈도수
인공지능	11
알고리즘	11
2차원 나노소재	11
촉매	11

④ 플랫폼별 연구비 비중 분석

- 양자컴퓨터 분야에서 이론 및 알고리즘 분야를 제외하고 양자컴퓨터 제작에 관한 부분만 살펴보면 이 분야는 초전도, 이온트랩 등 플랫폼별 개발 경쟁이 치열함.
- 국내의 정부투자 중에서 플랫폼별 투자 비중을 살펴보면 광자기반이 가장 많고, 초전도와 양자점 반도체가 그 뒤를 잇고 있음.
- 본 분석은 '양자컴퓨터'와 '초전도' 단어를 단순히 AND 연산하여 간단하게 살펴본 분석 결과로 2016-2020년 과제를 대상으로 함.

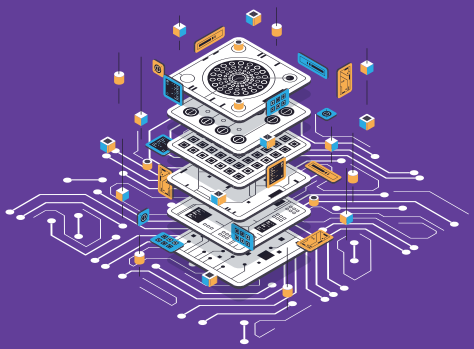
표 4-55 플랫폼별 연구 비중

구분	과제수	정부투자연구비(억 원)	연구비 비중(%)
초전도	100	365	28.0%
이온트랩(이온덫)	11	50	3.8%
양자점 반도체	37	241	18.4%
고체결함	24	104	8.0%
위상 큐비트	8	10	0.8%
광자기반	134	535	40.9%

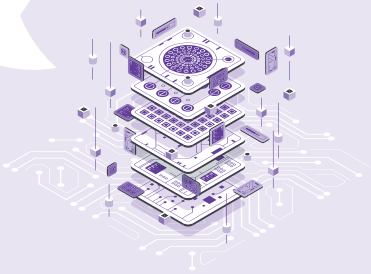
KISTI R&I Report:

양자기술 과학·기술·산업 분석

5장
결론



5장
결론



- 양자 기술은 각국 정부에서 인공지능을 능가할 핵심기술이고 미래에 모든 산업을 크게 흔들 수 있는 전략기술로 인식하면서 대규모 투자를 진행하고 있음.
  - 미국은 양자기술이 미국의 안보와 직결되고 국가적으로 기회를 주는 기술로 인식하여 전략기술로 지정하여 관리
  - 일본은 인공지능, 바이오 및 양자기술을 3대 국가전략기술로 지정하고 이 분야의 선도국과 협력을 강조
  - 중국은 양자굴기를 표방하고 있고, 세계 최초로 양자암호통신 위성 '묵자호'를 띄움으로써 양자통신에서는 미국과 유럽을 앞선다고 평가받음.
  - 영국은 양자 분야의 산업화에 예산을 투자
  - 우리나라도 2014년 12월 '양자정보통신 중장기 추진전략'수립, 2019년 1월 '양자컴퓨팅 기술개발사업 추진계획'마련, 2021년 4월 '양자기술 연구개발 투자전략'을 수립함으로써 선도국에 비해 늦기는 했지만 양자 기술의 선도국 추격 및 주도권 확보 경쟁에 합류함.

- IBM, 구글, 마이크로소프트, 인텔 등의 글로벌 기업들도 양자기술을 미래 산업 판도를 뒤집을 핵심기술로 인식하고 장기적이면서 대규모 투자를 진행

- 한편 양자기술은 현대 과학의 대명사인 양자역학에서 출발하지만 양자역학뿐만 아니라 수학, 컴퓨터공학, 전기공학, 재료공학, 나노공학 등이 어우러진 복합적인 기술인데 이러한 복합적인 기술은 신규 진입자에게 매우 높은 장벽으로 작용함.

- 본 분석에서는 이처럼 주요 선진국과 글로벌 선도기업이 주도하고 있고 진입장벽이 높은 양자기술 분야에서 우리의 경쟁력 향상을 위해 필요한 사항을 정리함.
- 이를 위해 양자 기술의 환경분석, 시장분석, 과학기술성 분석을 먼저 수행하고 이후 시사점을 도출함.

지속적이고 장기적인 투자 필요

- 양자기술은 복합적인 기술이 요구되어 단기간에 성과를 낼 수 있는 분야가 아니므로 지속적이고 장기적인 투자가 계속되어야 함.
- 또한 양자기술이 아직은 산업화가 널리 되지는 않았으나 향후에는 우주항공, 국방, 의료, 금융, 자동차 분야 등에서 수요가 크게 늘어날 것으로 전망되므로 장기적인 투자가 필요함.
- **(양자통신)** 양자통신은 미래에 범용 양자컴퓨터가 개발되면 기존의 보안 수단인 RSA 암호체계가 무력화된다는 인식하에 통신 및 보안 분야에서 선도적으로 연구 개발된 분야임.
  - 일반적으로 통신 보안 분야에서 새로운 암호체계가 모든 산업에 확산되는 데에는 10년 이상의 기간이 소요된다고 함.
  - 따라서 범용 양자컴퓨터가 개발되는 시점보다 10여 년 전에 양자통신에 의한 암호체계가 개발되어야 하고 그 이후 모든 산업에 확산되는 데에 10여 년이 걸린다고 산정해야 함.

- 10년 또는 20년 후에는 범용 양자컴퓨터가 개발될 것으로 예측되는 현 시점에서 양자통신의 새로운 보안체계는 초기 버전이 개발된 것으로 보이며 이를 산업에 확산하는 초기 상황인 것으로 판단됨.
- 그러나 범용 양자컴퓨터 및 알고리즘 개발에 글로벌 기업들이 대규모 투자를 추진하고 있으므로 범용 양자컴퓨터를 이용한 양자암호 해독 시간이 예상하지 못할 정도로 단축될 가능성도 배제하기 어려움.
- 따라서 양자통신 기술에 대한 지속적이고 장기적인 투자가 이루어져야 함.

• **(양자센서)** 양자센서는 관성, 중력, 자기장 등의 물리량을 측정하는 기존의 전통적인 센서와 경쟁하는 구도를 보이면서 기존 센서들이 측정하기 힘든 영역에서 고정밀 센싱을 양자센서가 수행하는 것으로 인식됨.

- 그러나 기존의 전통적인 센서들이 가격적인 측면에서 상대적으로 매우 저렴하므로 시장에서는 소비자들의 정밀도에 대한 수요에 따라 양자센서와 기존의 센서들이 선택되는 양상임.
- 정밀도가 중요하지 않은 분야에서는 저렴한 가격의 기존 센서들이 선택될 것이고, 정밀도가 매우 중요한 분야에서는 양자센서들이 선택될 것임.
- 그러나 양자 기술이 이용되는 산업이 점차 증가함에 따라 양자센서의 활용은 지속적으로 증가할 것으로 전망되어 지속적이고 장기적인 투자가 요구됨.

• **(양자컴퓨팅)** IBM, 구글 등 글로벌 기업들이 개발하는 양자컴퓨터는 초전도, 이온트랩, 중성원자, 양자점 반도체 등의 서로 다른 플랫폼을 기반으로 제작되고 있어서 플랫폼간 경쟁구도를 이루고 있음.

- 비록 현재는 초전도와 이온트랩 방식이 앞서나가고 있기는 하지만 다른 플랫폼 방식을 포기할 정도로 절대적인 우위에 있는 것으로 보이지는 않음.
- 다양한 방식의 플랫폼에 투자를 분산하면 각 플랫폼별로 활용하는 기술이 다르므로 기술적 진보의 속도가 느려지므로 절대 우위의 플랫폼이 결정될 때까지는 장기적인 투자가 뒷받침되어야 함.
- 당분간은 기초연구 쪽으로 다양한 플랫폼을 지원하되 이론과 실험 측면에서 절대 우위의 플랫폼이 잠정적으로 판단되는 시기가 되면 대규모 전략적 투자를 우위에 선 플랫폼에 투자함으로써 선도국을 추격할 수 있을 것으로 판단됨.
- 정부연구개발 과제 분석에서도 광자, 초전도, 양자점 반도체 순으로 정부투자가 많이 이루어졌으나 절대 우위 플랫폼이 잠정적으로 결정되는 시점에는 그 비중이 달라져야 할 것으로 보임.
- 한편 양자컴퓨터는 하드웨어 제작뿐만 아니라 양자컴퓨터를 실제로 사용자 입장에서 활용할 수 있는 SW 및 알고리즘의 개발도 동시에 이루어져야 하는데 이러한 분야도 장기적인 투자가 필요함.

양자 산업 생태계 조성

- 현재 우리나라의 양자 기술 전문가는 150명 정도로 추산되고 있는데 이 정도의 인력으로는 전세계적인 양자 기술 경쟁에서 선도국을 추격하기에는 많이 부족한 상황임.

- 이러한 한계 상황을 타개하려면 인력 양성 및 산업 생태계 조성에 힘을 기울여야 함.

- 다행히 2021년에는 '미래양자융합토론회(포럼)'이 개최되어 산업 생태계 조성을 위한 시발점이 마련되었음.

  - 다만 이 포럼은 양자 기술 분야의 학계 및 연구계의 연구 성과를 산업적 성과로 연계함으로써 산학연 협력의 장(場)의 역할을 함.

- 연구 성과의 산업계 활용은 생태계 조성에서 뒷부분에 해당하고 이에 앞서서 양자 기술에 대한 인력개발 프로그램이 선행되어야 할 것으로 보임.

- 양자 기술은 물리학, 수학, 컴퓨터공학, 전기공학, 재료공학 등 다양한 학문과 엔지니어링 기술이 융합된 기술이므로 어느 한 분야의 전문지식만으로는 기술의 진보 속도가 느려서 다학제간 융합이 필수적임.

  - 글로벌 기업들의 양자 인력 양성 프로그램을 살펴보면 양자 전공자와 비전공자로 나누어서 인력 양성 프로그램이 진행됨.

  - 양자 전공자의 경우 주로 물리학 관련 분야 대학원 과정에서 배우는 큐비트 제작부터 오류 정정 등에 이르기까지 이론과 실험을 주로 다룸.

  - 양자 기술 비전공자의 경우 전자공학, 소프트웨어, 공정, 기계공학, 광학, 재료공학 등의 전공자에게 양자기술에 대한 기초적인 지식 교육 위주로 진행됨.

참고문헌

- [Inside Quantum Technology, Report IQT-IQN-0920: 2020, Quantum Networking: A Ten-year Forecast and Opportunity Analysis] in IEC, "Quantum information technology"
- Boston Consulting Group, Where Will Quantum Computers Create Value--and When?, 2019.05.
- Deep Jariwala, Moore's law is dead. Long live the Moore's law, Twitter
- Digital Today, 2019.02.21.
- e-나라지표, 10대 수출입 품목
- IITP, "ICT R&D 기술로드맵 2025 - ICT디바이스 · 양자", 2020.12.
- IITP, 2019년 ICT 기술수준 조사 및 기술경쟁력 분석 보고서, 2020.
- KISTI, 경쟁분석서비스 COMPAS (compas.kisti.re.kr)
- KISTI, 국가과학기술지식정보서비스 NTIS (ntis.go.kr)
- KISTI, 특허분석서비스 GPASS (gpass.kisti.re.kr)
- MarketsandMarkets, "Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026", 2021.02.
- TechNavio, "Global Quantum Sensors Market 2020-2024", 2020.04.
- 과기정통부, 보도자료, "양자기술 연구개발 투자전략", 2021.4.29.
- 국가과학기술자문회의, 2020년도 기술수준평가 결과(안), 2021.3.11.
- 위키백과, 블로흐 구면
- 이준, IITP 주간기술동향 2019.9.25, "양자컴퓨터 R&D 현황과 전망"
- 한국과학기술정보연구원(KISTI) 공식 블로그

필 자 **이방래** R&D투자전략연구센터 책임연구원
brlee@kisti.re.kr

원동규 R&D투자전략연구센터 책임연구원
dkwon@kisti.re.kr

이재민 미래기술분석센터 책임연구원
jmlee@kisti.re.kr

윤민영 R&D투자전략연구센터 선임연구원
ymy0901@kisti.re.kr

장우석 데이터분석본부전략팀 선임연구원
wsjang90@kisti.re.kr

여운동 R&D투자전략연구센터 책임연구원
wdyeo@kisti.re.kr

이창환 글로벌R&D분석센터 책임연구원
cheree1@kisti.re.kr

KISTI R&I Report

양자기술 과학·기술·산업 분석

발 행 일 2021. 12. 31.

발 행 인 김재수

발 행 처 한국과학기술정보연구원
우) 02456 서울특별시 동대문구 회기로 66

I S B N 978-89-294-1218-0 93560

※ 본 KISTI R&I Report의 내용은 KISTI의 공식적인 의견이 아닌 저자의 견해임을 밝히며, 해당 내용 인용 시 출처를 밝혀 주시기 바랍니다.

KISTI R&I Report

양자기술 과학·기술·산업 분석

비매품/무료
93560
9 788929 412180
ISBN 978-89-294-1218-0

KiSTi 한국과학기술정보연구원
Korea Institute of Science and Technology Information
www.kisti.re.kr