

# Q REPORT

## 양자정보과학 리포트

국내·외 Quantum Fabrication 동향



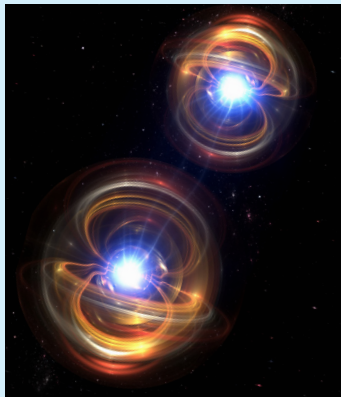


# Q REPORT

양자정보과학 리포트

국내·외 Quantum Fabrication 동향

C O N T E N T S



## 01 양자컴퓨터 기술 및 산업 생태계

- 1-1. 양자컴퓨터 산업의 투자와 창업 현황 ..... 04
- 1-2. 양자컴퓨터에 대한 기업들의 접근 전략 ..... 09

## 02 Quantum Fab: 개방형 연구 플랫폼

- 2-1. 주요국의 양자컴퓨터 산업생태계 육성 정책 ... 14
- 2-2. 공공 Q. Fab 현황 ..... 21
- 2-3. 한국의 Quantum Fab 운영 현황 ..... 28

### [ 들어가는 말 ]

2019년 구글사가 시커모어 프로세서로 양자이득을 입증한 후 그동안 막연한 미래로 여겨졌던 양자컴퓨터가 이제 가능성 입증의 단계를 지나 상용화 기술 확보를 놓고 선도국과 글로벌 기업들을 중심으로 치열한 다투를 벌이는 단계로 진입했다.

이에 본 고에서는 본격적으로 태동하고 있는 글로벌 양자컴퓨터 산업의 생태계를 살펴보고, 후발 주자로서 원천기술 확보와 전문산업 육성을 동시에 이루어야 하는 한국의 입장에서 기술과 산업 생태계를 조기 구축하기 위해 필요한 연구 인프라인 Quantum Fabrication 동향에 대해 살펴보고자 한다.

CHAPTER  
**1장**

# 양자컴퓨터 기술 및 산업 생태계



## 1-1. 양자컴퓨터 산업의 투자와 창업 현황

### 가. 글로벌 시장 동향

2023년 현재 양자컴퓨터는 산업현장 곳곳에서 구체적인 문제 해결을 위해 투입되고 있다. 비록 아직은 시범적인 응용분야 발굴과 테스트 단계에 머무르고 있으나, 금융, 제약, 의료, 항공, 물류 등 각 분야에서 굴지의 글로벌 기업들이 양자플랫폼 기업과 함께 자신들의 현장문제에 적용하는 양자알고리즘을 개발하고 있고, 구체적인 성과들을 하나 하나 쌓아가고 있다.

양자컴퓨터는 산업현장 문제들 중 특히 최적화, 머신러닝, 시뮬레이션에서 탁월한 우위를 보일 것으로 전망되고 있다. 최적화를 위해 다양한 양자-클래식 하이브리드 알고리즘이 개발되고 있고 일부 사례에서는 기존 컴퓨터보다 뛰어난 성능을 이미 입증하고 있다. 또, 화학이나 제약 분야에서 분자레벨의 양자동역학 계산을 양자시뮬레이터로 단축하는 시도를 계속해 꾸준히 성과를 거두고 있다. 또, 양자 머신러닝은 머신러닝, 클러스터링, 분류, 패턴매칭 등 계산집약적인 알고리즘의 속도를 높이는데 기여하고 있다.

한 예로, 2022년 8월, IonQ사는 에어버스사와 공동으로 '항공화물적재최적화 및 양자기계학습' 프로젝트를 수행해 화물의 최적 적재를 위한 알고리즘을 개발하고 에어버스사 개발진에게 양자컴퓨터 기술과 알고리즘에 대한 교육을 제공한 바 있다.





또, IBM사 IBM Quantum Network에는 포춘500대 기업 중 250여개 기업이 가입해 IBM 플랫폼을 이용한 양자알고리즘 개발에 참여하고 있다.

[표1]  
양자컴퓨터 응용분야  
개척을 위한 제휴 사례

제휴기업	년도	내용
D-Wave - 폭스바겐/ BMW/구글	2017	• 자율주행자동차 개발을 위해 대량의 주행 데이터로 인공지능 알고리즘을 훈련하는데 D-Wave사의 양자어닐러를 적용
IBM - 엑슨모빌	2019	• 청정에너지 발굴과 전력망 관리 최적화 등을 위해 양자알고리즘 개발
D-Wave - 록히드마틴	2019	• 소프트웨어 디버깅에 양자어닐러를 적용
QC Wire Goldman Sachs	2020	• 금융부문의 최적화 문제 풀이를 위해 몬테카를로 머신러닝 알고리즘을 양자답러닝에 적용
IonQ - Airbus	2022	• 항공·화물 적재 최적화 알고리즘 공동 개발 진행
IBM - HSBC	2022	• 금융 알고리즘 개발을 위한 3년간의 협력 협약 체결 • 분야: 금융사기 탐지, 포트폴리오 관리 등
D-Wave - CaixaBank	2022	• D-Wave사 양자 하이브리드 클라우드 플랫폼을 이용해 포트폴리오 최적화와 헤징 알고리즘의 실행시간 90% 단축 성과를 달성

한국지능정보사회진흥원(NIA, 2021)에서는 금융, 방위 등 주요 산업영역별로 단기(5년이내) 및 중장기(5년이후) 유망한 응용분야를 아래와 같이 제시한 바 있다. 이에 따르면, 에러정정양자회로가 완성되기 이전의 불완전한 양자컴퓨팅(NISQ)으로도 매우 다양한 분야에서 가시적인 성과를 거둘 수 있음을 보여주고 있다. 세계 각국에서는 이 분야들을 중심으로 전문 응용솔루션 개발 기업들이 활발히 창업되어 활약하고 있다.

[그림1]  
주요 산업영역별  
단기 및 중장기  
유망 응용분야

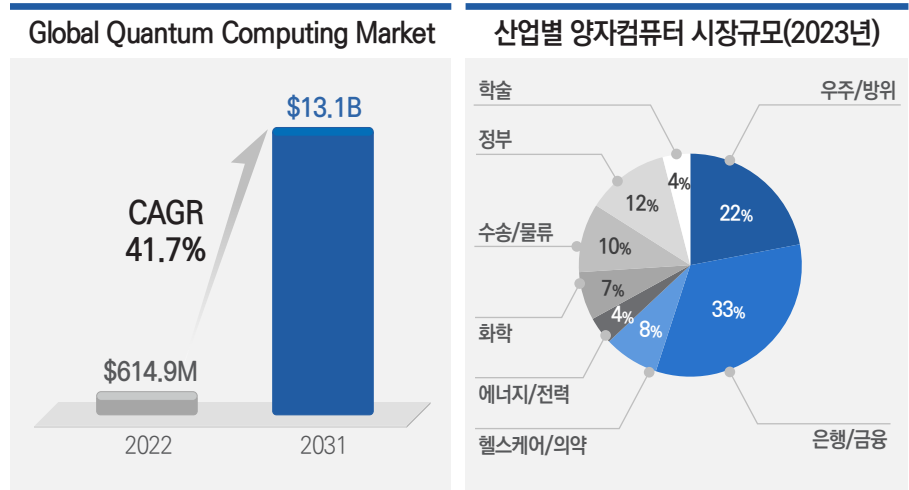
	단기 ~2025	2025~ 중장기
<b>금융</b>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 블록체인 기반 금융서비스 보안</li> <li>• 결제시스템 연동 및 기밀 정보 암호통신 서비스</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 타켓팅과 예측</li> <li>• 리스크 프로파일링</li> <li>• 거래 최적화</li> <li>• 양자금융 서비스</li> <li>• 금융데이터 분석 보안서비스</li> </ul>
<b>방위</b>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자통신과 현대암호 Post processing 알고리즘</li> <li>• 드론용 양자 암호모듈</li> <li>• 암호체계 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자라이다, 양자 레이더</li> <li>• 양자전자전, 양자수중군</li> <li>• 양자우주안보 및 양자위성</li> <li>• 인공위성 양자키분배 네트워크 구현 서비스</li> <li>• 암호해독 및 정보수집</li> </ul>
<b>의료/제약</b>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자 암호통신기반 의료 클라우드 서비스</li> <li>• 단백질 구조 분석</li> <li>• 뇌지도 검사 및 심자도 측정</li> <li>• 양자현미경, 양자내시경</li> <li>• 신약물질탐색을 위한 양자 시뮬레이터</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화학제품 적용(촉매 및 계면 활성제)</li> <li>• 보험료와 프라이싱 (가격책정)</li> <li>• 양자 MRI 의료진단 서비스</li> <li>• 양자 이미징 플랫폼 서비스</li> <li>• 신규 생물학적 제제 적용</li> </ul>
<b>교통/물류</b>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 교통망 경로 최적화</li> <li>• 자율주행배송 서비스(배송로봇, 드론)에 양자 암호 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물류 자원 및 에너지 활용 최적화</li> <li>• 항공운항시스템 최적화</li> <li>• 항공기 시스템 모니터링 향상 및 유지보수 감소</li> <li>• 자율차용 양자레이더</li> <li>• 항공기 시각주기유도시스템 감지기술</li> </ul>

출처(NIA - 양자정보기술백서, 2021)

이에 따라 글로벌 양자컴퓨터 시장은 급격히 확대되고 있다. 시장조사기관에 따르면, 2022년 현재 양자컴퓨터(HW, SW, 서비스 포함)는 614.9백만불 시장을 이미 형성하고 있고, 매년 41%의 성장률을 거듭해 2031년까지 131억달러 시장으로 팽창할 것으로 전망된다. (출처: Transparency Market Research사, 2023)

2022년 현재 분야별 시장규모는 은행/금융권 시장이 33%로 가장 크고, 우주/방위(22%), 정부(12%), 수송/물류(10%) 등으로 조사되고 있다.

[그림2]  
양자컴퓨터 글로벌  
시장규모 추정

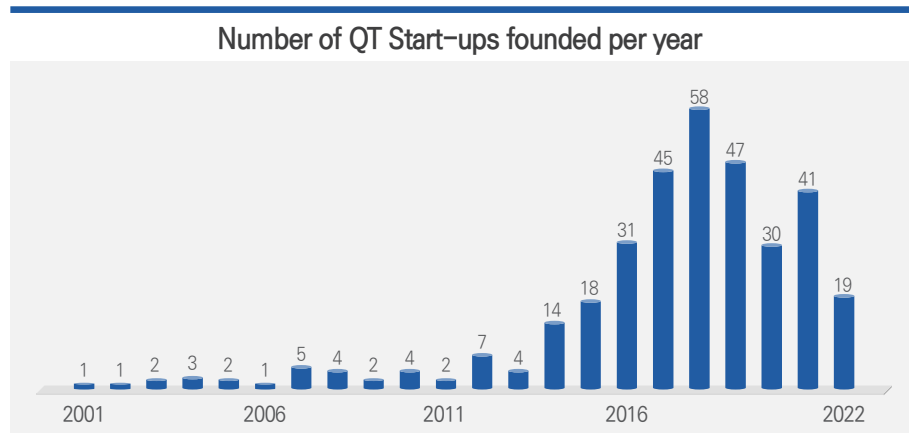


### 나. 투자 및 창업 현황

또 다른 조사기관에 따르면, 2022년까지 양자컴퓨터분야 창업기업은 223개이고 누적 투자액은 52억달러에 달하는 것으로 조사되었다. (McKinsey, 2023)

Startup 창업은 2018년 58개사로 정점을 찍고, 그 이후 감소세를 보여, 현재 전체 창업생태계는 다소 정체된 상태를 보이고 있다. 창업이 정체기에 접어든 것은 인력부족, 기술 미성숙 등이 원인으로 분석되고 있다.

[그림3]  
연도별 양자기술분야 창업기업  
현황 (McKinsey, 2023)



국가별로는, 미국에서의 창업이 72개사로 가장 많고, 캐나다(28), 영국(22), 일본(14), 독일(12) 등이 뒤를 잇고 있다. 그러나, 불행하게도 한국(1)은 최근 창업한 1개 기업으로 순위가 오르는 것은 좋으나 집계된 38개국 중 최하위에 겨우 머물고 있다.

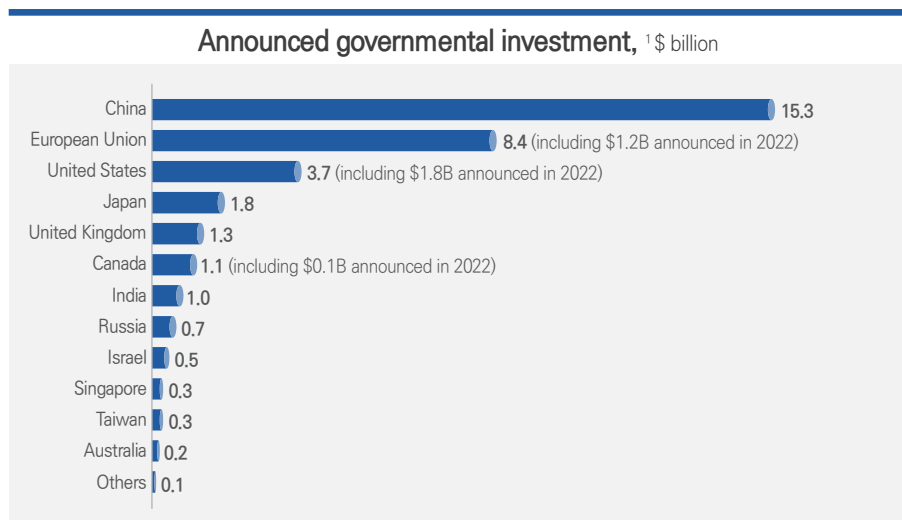
[그림4]  
양자컴퓨터 글로벌 창업기업 수  
(McKinsey, 2023)

**Number of QC Start-ups, by country, 2022** +Change since 2021

Country	2022	Country	2022	Country	2022
United States	72 + 12	Switzerland	5	Bulgaria	1
Canada	28 + 2	Sweden	3 + 1	Liechtenstein	1
United Kingdom	22 + 3	Denmark	3 + 1	Philippines	1
Japan	14 + 1	Colombia	2	Norway	1
Germany	12 + 4	Poland	2	Portugal	1
France	11 + 3	Singapore	2	Romania	1
China	9 + 1	Austria	2	Russia	1
Australia	8 + 1	United Arab Emirates	2	Taiwan	1
Spain	8 + 1	Italy	2 + 1	Turkey	1
Netherlands	7 + 1	Czech Republic	1	Uruguay	1
Finland	6	Estonia	1	Ireland	1
India	6 + 1	Greece	1	South Korea	1 + 1
Israel	6 + 2	Hong Kong	1	<b>Total</b>	<b>248 + 36</b>

이는 양자컴퓨터에 대한 국가의 투자 부진에 따른 당연한 결과이기도 한데, 국가별 투자 규모에서 한국은 상위 12개국에 포함되지도 않았고, 아시아권에서조차 중국, 일본, 대만, 인도, 싱가포르 등에도 뒤처지는 현실을 보여주고 있다.

[그림5]  
양자컴퓨터 국가별 투자 규모  
(McKinsey, 2023)



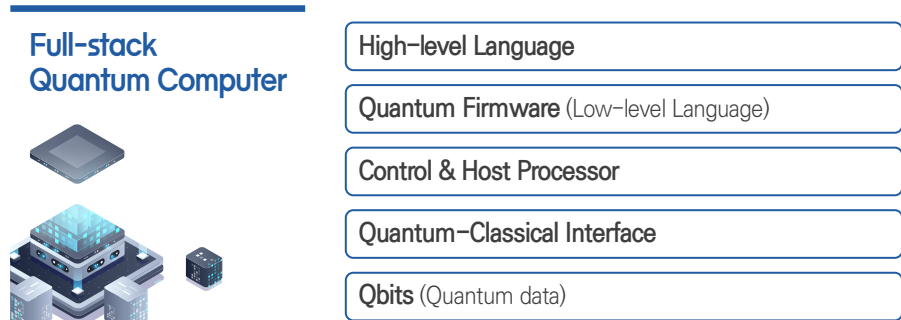
이렇듯 한국의 양자컴퓨터 산업 생태계는 아직 형성조차 되지 못한 상태로, 우리나라와 과학기술의 수준이 비슷한 아시아권 국가들과 비교해도 현저히 뒤떨어지는 모습을 보이고 있다. 이는 양자기술을 기반으로 한 창업 생태계가 국내에 제대로 구축되지 못한 때문으로, 여기에는 전문 연구인력의 부족, 정부의 창업투자 지원 부족 등 여러 가지 원인들이 복합적으로 작용하고 있겠으나, 또한 창업기업의 기술개발을 지원할 핵심 인프라로서 양자팹의 부족 또한 크게 작용한 것으로 보인다.

## 1-2. 양자컴퓨터에 대한 기업들의 접근 전략

[그림6] 풀스택양자컴퓨터의 구성요소

### 가. 기업의 접근법: 풀스택 vs 개방형혁신

양자 산업 생태계가 발달함에 따라 대다수 기업이 양자기술을 도입하기 위해 노력하고 있고, 이들 다수(약 65%)는 클라우드를 통해 양자컴퓨터에 액세스하고 있다. 이에 따라, 양자컴퓨터를 개발하는 기업들도 클라우드를 통한 고객 접근을 기본 전략으로 취하고 있는데, 크게 풀스택 전략과 개방형혁신 전략이라는 두 가지 접근법으로 나뉜다.



출처 : 융합연구리뷰, 2022.1

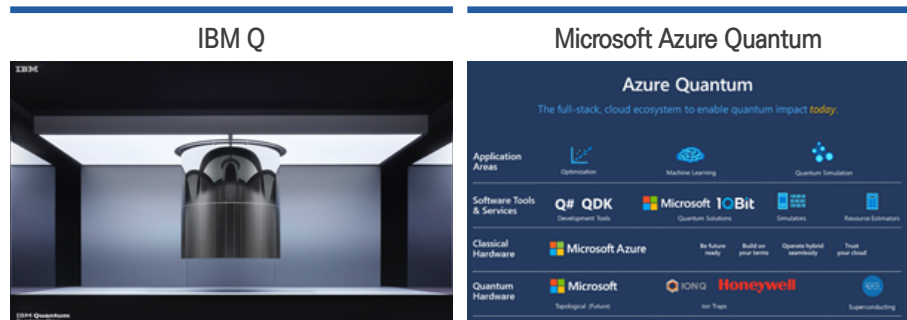
\* 풀스택양자컴퓨터는 큐비트 플랫폼에서 양자프로그래밍 언어까지 아우르는 전체 시스템을 가리키며, 크게 5가지 부분(큐비트, 양자-전 인터페이스, 제어 및 호스트프로세서, 양자펌웨어, 고급양자프로그래밍언어)으로 구성된다.

IBM사<sup>1</sup>은 독보적인 기술역량으로 일찍부터 자사가 풀스택전략을 취했으며, IBM Q 양자클라우드를 통해 자사의 초전도기반 양자컴퓨터와 함께 Qiskit 개발환경을 통한 양자알고리즘 개발 소프트웨어를 함께 제공하고 있다.

반면, 단일 기업이 이 모든 기술요소를 완비하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 대부분의 기업은 합종연횡을 통해 부족한 부분을 보완하는 개방형혁신 전략을 취한다.

IBM과 경쟁하는 클라우드 서비스 제공자인 Microsoft와 Amazon은 다수의 양자컴퓨터 플랫폼 공급자들을 자사의 공급망에 포함시켜 고객기업으로 하여금 여러가지 물리적 플랫폼을 두루 경험하고 자신의 응용분야에 맞는 최적의 플랫폼을 선택할 수 있게 한다.

[그림7] 양자클라우드 서비스



1. IBM은 2023년 12월에 1121 큐비트의 양자컴퓨터 '콘도르'를 공개해 양자컴퓨터 역사에 새로운 장을 열었다.

개방형혁신 전략에 동참하는 대부분의 양자컴퓨터 기업과 수요기업들은 시장에 접근할 때 대략 4가지의 접근 전략<sup>2)</sup>을 취한다.

[표2]  
개방형혁신 기업들의 시장 접근 전략

양자전략	접근방식	사례
전통적	기업의 전통적 문제해결방식 대로, 뛰어난 해법을 찾아 당면한 문제를 해결하려는 접근법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ford사: NASA와 협력으로 에너지소비를 줄이기 위해 주행경로 최적화 양자알고리즘을 개발</li> </ul>
옵션	미래의 선택지를 미리 확보해두기 위해 양자컴퓨터 활용 능력을 쌓는 것에 집중하는 접근법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lockheed: D-Wave사와 협력, 소프트웨어 버그 탐지 알고리즘의 실용화 가능성을 탐색</li> </ul>
발견	이전에는 불가능했던 방식으로 새로운 탐구의 접근방법을 개척해 가는 접근법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미쓰비시: IBM과 공동으로 고효율 OLED 신소재의 분자구조를 연구</li> </ul>
적대적	경쟁자와의 치열한 시장 쟁탈을 위해 핵심 전장에 양자컴퓨터를 투입해 우위를 확보하는 접근법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 엑센추어: IBM과 공동으로 통화 차익거래 및 트레이딩 알고리즘을 개발</li> <li>• BBVA사: 52개 자산투자 포트폴리오 거래경로를 최적화하는 알고리즘을 개발해 현장에 적용</li> </ul>

이러한 전략은 해당기업의 시장에서의 입지, 당면한 현장문제의 성격, 양자컴퓨팅 알고리즘 기술에 대한 이해도 등에 따라 달라질 수 있는데, NISQ 시대에 완성된 양자컴퓨팅 아키텍처와 양자알고리즘의 틀이 없는 상태에서 다수의 기업이 이 시장과 기술에 뛰어드는 이유는 주로 미래에 대한 적극적 대비(옵션 전략)와 함께 새로운 문제해결 방식을 탐구(발견 전략)하려는 동기에서 비롯되고 있다.

2. Joseph Jenkins(2020), The Quantum Computing Business Ecosystem and Firm Strategy

## 나. 분야별 기업 현황

자체 개발 또는 개방형 전략을 통해 풀스택양자컴퓨터 플랫폼을 제공하는 선도 기업들은 IBM, Google 등 미국계 글로벌 기업들이 주를 이루고 있다.

[표3]  
풀스택양자컴퓨터 플랫폼  
제공기업

기업	사업 현황
Google	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2014년, UCSB의 Martinis 연구팀 영입으로 본격적인 양자컴퓨터 개발 착수</li> <li>• 2015년, 9큐비트 양자컴퓨터 에러보정 성공</li> <li>• 2016년, 세계최초 양자화학 시뮬레이션 성공(H2 분자 에너지준위 계산)</li> <li>• 2018년, 72큐비트 브리슬콘 프로세서 발표</li> <li>• 2019년, 54큐비트 시카모어 프로세서를 통해, 양자우위 입증</li> <li>• NASA와 공동으로 D-Wave 양자어닐러 제품을 이용한 응용연구 지속 중</li> <li>• 2021년, Quantum AI Campus 개소(Santa Barbara), 2029년 비전 제시:1,000,000큐비트와 1,000논리큐비트를 갖는 범용양자컴퓨터 개발</li> </ul>
IBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2000년, Fluorine 원자를 이용한 5큐비트 양자컴퓨터 개발</li> <li>• 2016년, 초전도 5큐비트 양자컴퓨터 개발, 클라우드(Quantum Experience) 서비스로 공개 → 2017년, 양자컴퓨팅 클라우드 상용서비스 IBM Q 런칭</li> <li>• 2020년, 65큐비트 허밍버드 프로세서 발표</li> <li>• 2023년, 1,121큐비트 콘도르 발표</li> <li>• IBM Quantum Network: IBM Q를 매개로 전세계 140여개 주요 기관/기업과 공동연구 네트워크를 구축                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- 23대(1~65큐비트) 양자컴퓨터, 5대(32~5,000큐비트) 양자시뮬레이터 운용 중</li> <li>- 16개 Hub 기관에 IBM Q 서비스 제공, 지역내 기관/기업들에게 서비스 보급</li> <li>- 글로벌기업 9개사와 Quantum Network Partner 체결, 응용분야 공동연구</li> </ul> </li> </ul>
Microsoft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2005년, 토폴로지 큐비트 기반 양자컴퓨터 연구 착수</li> <li>• 양자컴퓨터 연구협력 네트워크 Station Q 설립 → 현재 Microsoft Quantum Network으로 확대 운영 중</li> <li>• 2012년, Tu Delft 연구진이 Topological Qubit 관측실험 성공을 발표했으나 신뢰성 문제를 겪다가 2017년 철회</li> <li>• 물리큐비트를 제외한 full stack 플랫폼을 개발, 운영 중 (Azure Quantum)</li> <li>• Azure Quantum: Honeywell (이온트랩), IonQ(이온트랩), qci(초전도)의 프로세서 + 1Qbit/ 1Qcloud/Microsoft QIO/Toshiba SBM 등의 최적화 알고리즘 + 양자프로그램 개발환경(Q#, 통합개발키트) 제공</li> </ul>
Quantinuum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2018년, Honeywell Quantum Solution 설립</li> <li>• 2020년, 10큐비트 이온트랩 프로세서 System Model H1 발표                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양자볼륨 128</li> <li>- 게이트신뢰도 &gt; 99.97%(single-qubit gate), 99.5%(two-qubit gate)</li> </ul> </li> <li>• 2021년 6월, Honeywell Quantum Solution사와 양자컴퓨터 소프트웨어 전문기업 Cambridge Quantum Computing(CQC)사 합병 발표 및 회사명 Quantinuum 으로 변경</li> </ul>

이들 풀스택 플랫폼 기업 외에도, 양자 응용 어플리케이션 개발을 지원하는 양자 소프트웨어 전문기업들이 다수 창업하여, 양자컴퓨터의 OS, Firmware에서 각 산업분야별 어플리케이션 개발을 위한 개발플랫폼, 개별기업을 위한 개발 컨설팅에 이르는 폭넓은 value chain에 걸쳐 활약하고 있다.

[표4] 양자소프트웨어 분야 주요 기업

기업	사업 현황
Q-CTRL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2017년 설립(시드니)</li> <li>• 양자제어 엔지니어링 소프트웨어(Firmware) 전문기업</li> <li>• 제품군: Black Opal, Bould Opal(양자제어 소프트웨어) + integration 서비스</li> <li>• 고객사: Google, IBM 등</li> </ul>
Zapata Computing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2017년 설립 (보스턴)</li> <li>• 양자어플리케이션 개발 플랫폼 전문기업</li> <li>• 응용분야별(재무, 헬스케어, 교통, 소재, 에너지, 항공 등) 어플리케이션 개발 병행</li> <li>• 제품군: Orchestra(IBM, rigetti, IonQ, Honeywell 플랫폼 지원)</li> </ul>
Anyon Systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2014년 설립(몬트리얼)</li> <li>• High Performance Computing 전문기업</li> <li>• 초전도 큐비트 기반 양자컴퓨터, 양자제어 회로, 초저온 냉각기술 등을 개발</li> <li>• 하드웨어 제어를 위한 소프트웨어와 양자컴퓨터 시스템 시뮬레이션 소프트웨어 개발 병행</li> <li>• 2017년부터 Google의 양자컴 개발 공동 참여(구글 초전도큐비트 프로세서의 성능 향상을 위한 각종 특성 시뮬레이션)</li> </ul>
Quantum Benchmark <q1b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2017년 설립 (캐나다 워털루)</li> <li>• 양자컴퓨터 에러분석, 에러보정, 시스템성능 최적화 소프트웨어 전문기업</li> <li>• 제품군: True-Q Design, True-Q Accelerate</li> <li>• 고객사: Google, Fujitsu, IBM 등</li> <li>• 2021년 5월, Keysight Technology사(설계&amp;검증, 시뮬레이션, 최적화 소프트웨어 전문기업)에 인수됨</li> </ul>
1Qbit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2012년 설립 (밴쿠버)</li> <li>• 양자컴퓨터 어플리케이션 개발 플랫폼 전문기업</li> <li>• 제품군: QEMIST(양자화학), 1QLOUD(최적화), MARKET SENTIMENT METER(위험관리), XRAI(영상진단보조)</li> </ul>
QCware	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2014년 설립 (캘리포니아 → 파리)</li> <li>• 미 공군과 NASA 엔지니어들이 주축, 클라우드 기반 양자컴퓨팅 플랫폼 전문기업</li> <li>• 2017년, USRA와 공동으로 NSF로부터 양자컴퓨팅 플랫폼 구축 연구과제 수주</li> <li>• 제품군: 응용분야(양자화학, 최적화, 기계학습, 미분방정식, 몬테카를로), FORGE(에뮬레이터)</li> <li>• 고객사: Airbus, AISIN Group, Goldman Sachs, TOTAL, BMW 등</li> </ul>

이들 외에도, D-Wave로 대표되는 양자어닐러(Quantum Annealer) 전문기업들이 다수 포진해 있으며, 특히 일본의 IT 대기업들이 다수 이 분야에서 산업 영역별로 전문적인 응용솔루션 개발을 진행하고 있다.

\* 양자컴퓨팅은 크게 ① 아날로그 양자컴퓨팅 모델, ② 범용양자게이트 모델, ③ 양자어닐링의 세 분야로 나뉘며, 아날로그 양자컴퓨팅은 양자역학 시뮬레이션에 주로 활용되고, 양자어닐링은 최적화, 머신러닝 등에 활용됨.

[표5]  
양자어닐러 전문 기업

기업	사업 현황
D-Wave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1999년 설립 (캐나다)</li> <li>• 2011년, 세계 최초 양자어닐러 상용제품 개발(128큐비트, \$10M)</li> <li>• 2020년, 5000+ 큐비트 제품 출시</li> <li>• 클라우드서비스 Leap2에서 250여종의 분야별 어플리케이션 제공</li> </ul>
NEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1999년, 세계 최초로 고체소자기반 큐비트 실험 성공</li> <li>• 2014년, 파라메트론 응용 고신뢰도 초전도큐비트 소자 시연</li> <li>• 2018년, NEDO 프로젝트 (양자어닐러 개발과제) 주관기관으로 선정</li> <li>• 2019년, D-Wave사에 \$10M 투자, D-Wave cloud 서비스 reseller계약 체결</li> <li>• 2019년, ParityQC(오스트리아)의 양자컴 아키텍처 협력 계약 체결 → ParityQC architecture를 NEDO 프로젝트에 적용</li> <li>• 자체 파라메트릭 초전도큐비트 기술 기반, 고집적 양자어닐러 개발 계획 발표: 2023년까지 자체 플랫폼 확보</li> </ul>
Fujitsu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2018년, 디지털어닐러 클라우드서비스 런칭</li> <li>• 8,192비트 (all-to-all coupling), 64bit gradations 제공</li> <li>• 실제 산업 현장에 솔루션 적용 중: 자동차공장 라인 최적화, 물류공장 최적화, 개인 맞춤형 광고, 신약 유사물질 검색 등</li> </ul>
NTT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광섬유 루프를 이용한 Coherent Ising Machine(ISM) 개발에 주력</li> <li>• 2018년, 2,000비트 시스템 개발 성공</li> <li>• 미국 주요 연구기관들과 공동연구 파트너십 체결: Caltech, MIT, Cornell, Michigan, Swinburne, Notre Dame, NASA Ames Research Center, 1Qbit</li> <li>• 2021년, Caltech과 공동으로 고속CIM 개발에 착수(기간: 4.5년)</li> <li>• 최종 목표: 100,000비트급 ISM 개발</li> </ul>
Toshiba	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 어닐링 방식의 하나인 Simulated Bifurcation Machine(SBA) 개발 진행 중(2,000비트 all-to-all coupling)</li> <li>• Microsoft Azure 파트너십 체결</li> </ul>
Hitachi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 자체개발 기술방식인 CMOS annealing Machine 개발 중</li> </ul>

CHAPTER  
**2장**

# Quantum Fab 연구 플랫폼



## 2-1. 주요국의 양자컴퓨터 산업생태계 육성정책

양자컴퓨터 산업 생태계는 저절로 형성되지 않는다. 가장 앞선 과학연구 인프라와 인적역량을 보유한 미국조차도 연방정부의 직접 개입을 통해 양자산업생태계 확산을 촉진하고 있고, 중국, 독일, 영국 등 주요국들도 산업생태계 구성요소 하나 하나를 자국내에서 완성하기 위해 부단한 노력을 기울이고 있다.

### 가. 미국

미국은 2018년 국가양자이니셔티브(NQI)법을 제정하고, 연방정부 주도로 연구-산업-교육의 3대 축을 잇는 양자컴퓨터 전략을 추진해오고 있다. 미국은 특히 표준연구소(NIST), 국방성 등 연방정부가 직접 기술개발을 주도해 양자컴퓨터 원천기술과 상용화를 향한 기술적 도전을 이끌어왔다.

[표6] 미국 연방정부 주요기관별 양자기술 개발 사업

기관	기관별 주요 사업 수행 내용
NIST	<p>양자계측분야의 전문성을 바탕으로 양자정보과학의 핵심 기초역량인 큐비트, 제어계측기술 개발을 주도</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 초의 2큐비트 게이트 개발(1995), 양자논리시계 개발(2010), 세계최고수준 단일광자검출기 개발(2013) 등 핵심기술 개발 선도</li> <li>• JQI, QuICS, JILA 등 미국내 대학들과 공동연구센터를 설립, NIST의 연구인프라와 대학의 신진연구인력을 결합한 연구개발 HUB 구축운영</li> </ul>
DoD	<p>DARPA를 통해 QuSAR, Quiness, OLE, QuEST, Detect 등 다양한 양자정보과학 연구프로그램을 수행, 미래 군사암호통신, 해킹, 양자센서 등 미래군사기술 확보에 주력</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• QuASAR: 양자한계 또는 그 이하에서 작동하는 양자센서 개발 지원</li> <li>• Quiness: 양자통신기술 개발 지원</li> <li>• OLE(Optical Lattice Emulator): 양자시뮬레이터 개발 지원</li> <li>• QuEST(Quantum Entanglement Science and Tech): QIS 분야별 기술개발 지원</li> <li>• Detect: QIS 각 분야 응용을 위한 광자검출 핵심기술 개발 지원</li> </ul>

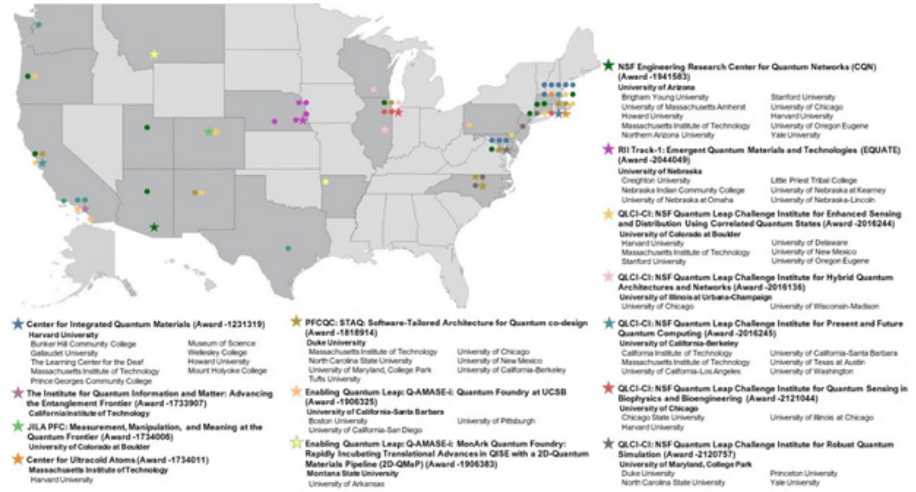
IARPA	<p>2009년부터 CSQ, MQCO, QCS, LogiQ 등의 프로그램을 통해 양자컴퓨팅 핵심요소기술(다중큐비트, 제어, 제조, 에러보정 등)에 대한 체계적인 기술 확보 로드맵을 수립하고, 국내외 산학연이 두루 참여하는 핵심기술 개발 사업을 추진</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CSQ(Coherent Superconducting Qubits, 2009~2014): 10배 이상의 결맞음 시간을 갖는 초전도 큐비트 개발 프로그램</li> <li>• MQCQ(Multi-qubit Coherent Operation, 2010~2015): 다중 큐비트 시스템에서의 크로스톡, 제어, 제조공정상의 다양한 기술이슈 해결</li> <li>• QCS(Quantum Computer Science, 2012~2014): 양자컴 하드웨어에 응용 프로그램을 오픈하고 실행하기 위한 각종 리소스 연구</li> <li>• LogiQ(Logical Qubits Program, 2016~2021): 능동적 에러보정을 위한 논리큐비트 기술 개발</li> </ul>
DoE	<p>DoE는 산하의 국립연구소들을 통해 물리, 계산 분야의 기초과학 연구개발 투자를 활발히 진행하고 있으며, 2010년대 이후 기존의 대형 연구개발프로그램에 양자정보과학 연구를 추가해 지원하고 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ASCR(Advanced Scientific Computing Research) QIS Program</li> <li>• BES(Basic Energy Science) QIS Program</li> <li>• HEP(High Energy Physics) QIS Program</li> <li>• NP(Nuclear Physics) QIS Program</li> </ul>
NSF	<p>NSF는 물리, 수학, 컴퓨터, 공학의 각 영역에서 QIS 부문 연구 지원을 확대해 왔으며, 특히 QIS에 특화된 다양한 물리, 물성 연구센터를 전국 대학과 연합해 구축해왔음. 2018년 NQI Act 이후 DoE와 함께 양자컴퓨터 핵심연구센터를 전국에 구축, 지원중</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NSF Q-AMASE-i, NSF ERC-CQN, JILA, JQI, IQIM, CUA, CQuIC, ITAMP, CIQM, EPIQC, STAQ, QISE-NET 등</li> </ul>

미국은 NQI를 집행할 기관으로 NIST, NSF, DOE를 지정하고 2024년까지 총 12.75억불을 투입해 전국에 8개 거점연구센터 등을 구축·운영하고 있다.

NIST	역할	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NIST 보유 양자과학 측정기술 및 인프라 기반 기술확산</li> <li>• 연방정부 산하 기관들과의 R&amp;D 협력을 통한 전문연구인력 양성</li> <li>• 공공 및 민간 기관과의 컨소시엄/벤처 프로그램 구축을 통한 양자과학 기술 및 산업기반 확대</li> </ul>
	예산	400M\$ (연간 80M\$ x 5년)
NSF	역할	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 학제간 양자정보과학 및 공학 연구 지원</li> <li>• 양자정보과학 및 공학 인력 양성 지원</li> <li>• 대학원생 교육 프로그램 구축</li> <li>• 2~5개 국가거점 연구센터 설립</li> </ul>
	거점 연구 센터	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Q-SEnSE: Quantum Systems through Entangled Science and Engineering</li> <li>• HQAN: Hybrid Quantum Architectures and Networks</li> <li>• CIQC: Challenge Institute for Quantum Computation</li> </ul>
	예산	250M\$ (연간 50M\$ x 5년)
DOE	역할	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국가의 양자정보과학 연구 목표 설정</li> <li>• 산하 연구기관 보유 지식의 활용 극대화</li> <li>• 학부 및 대학원생에 대한 교육 확대</li> <li>• 2~5개 국가거점 연구센터 설립</li> </ul>
	거점 연구 센터	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Q-NEXT: Next Generation Quantum Science and Engineering</li> <li>• C2QA: Co-design Center for Quantum Advantage</li> <li>• SQMS: Superconducting Quantum Materials and Systems Center</li> <li>• QSA: Quantum Systems Accelerator</li> <li>• QSC: The Quantum Science Center</li> </ul>
	예산	625M\$ (연간 125M\$ x 5년)

상기 거점연구센터 이외에도 NSF는 미국 주요 대학들을 중심으로 양자정보과학 분야별 핵심기술 연구와 인력양성을 위해 연구거점 센터들을 구축하고 있다. 2023년12월 현재, 약 71개의 센터가 구축되어 운용 중이다.

[그림8]  
NSF의 양자정보과학 연구거점 센터 분포 현황




주목할 부분은, 미국은 이렇게 확보한 원천기술력을 배경으로 기업의 양자산업 전환에 보다 비중을 둔 국가전략을 추진하고(NQI 6대 전략 중 3개 전략이 양자산업 육성에 초점), 이를 위해 산업현장의 요구를 수렴해 연방정책에 반영하는 Bottom-up 전략을 구사한다는 것이다.

[그림9]  
NQI 6대 정책 방향 중 산업생태계 육성과 관련된 세부정책 내용

01	과학 연구에 대한 정책우선순위 유지	-
02	미래 양자인력 양성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 산업체 인력의 교육개발 프로그램 개발</li> <li>• 미래 인력 수요에 대해 지속적 조사</li> </ul>
03	양자산업 육성을 위한 정부 개입 심화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정부-산학 양자컨소시엄 구성: 기초공동연구와 IP 협력, 기술이전 등 산업계 지원을 위한 정책 개발</li> <li>• 산학연 공동연구 센터 구축 및 투자를 통해 기초분야 공동연구 확대</li> <li>• 양자기술이 정부기관과 산업계에 미치는 영향 연구</li> </ul>
04	핵심 인프라 제공	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 핵심 인프라에 대한 정부와 산학의 투자를 촉진</li> <li>• 정부산하기관 보유 연구시설 및 기술의 민간 개방 확대</li> <li>• 응용기술 개발자를 위한 테스트베드와 교육훈련, 기술지원 제공 확대를 통해 최종 응용분야에 대한 탐색과 지식 축적</li> <li>• 기존 산업 인프라의 양자산업으로의 활용성 극대화</li> </ul>
05	국가안보와 경제성장 간의 균형 유지	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현행 수출통제 메커니즘과 양자정보과학에 대한 산업화 촉진 및 IP 보호, 국가안보관련 조치 등의 상관관계에 대한 폭넓은 정보를 대학과 산업계에 제공</li> </ul>
06	국제협력 촉진	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공통의 관심사를 가진 산업계 및 외국 정부와의 협력 확대</li> </ul>

NIST가 주도로 설립된 QED-C가 그 기능을 수행하는 대표 기관이며, 2018년부터 미국 양자산업계와 대학, 출연연을 망라해 양자산업 육성의 모든 현안 문제를 분석하고 정부정책에 반영하는 역할을 수행해오고 있다.

[그림10]  
QED-C 개요

	설립	2018년, SRI사(컨설팅기업)가 연방정부와 운영 계약을 체결 (실질 운영은 NIST가 주도)
	운영목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 양자기술의 현장 응용 사례 발굴</li> <li>② 양자기술 산업화를 위해 부족한 요소 파악</li> <li>③ 산업생태계 강화를 위해 산학연-정부 협력 사업 수행</li> </ul>
	참여기관	기업체 182개사, 대학 42개, 연방정부연구기관 11개 등
	주요활동	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technical Committee: 응용시나리오, 기반기술 표준, 인력양성 등 분야별 기술분과위원회 운영</li> <li>• Workshop: 기술개발우선순위, 로드맵 등에 대한 비공개 워크샵(회원 전용)</li> <li>• 기술공유 활동: 연방정부 프로그램 정보공유, R&amp;D 공동참여, 기술개발 데이터 공유, 연구자 접근 등</li> </ul>

## 나. EU

EU는 2000년대 이후 양자정보기술개발을 주요 과학기술정책에 포함하고, FP5~FP7까지 20여년간 5억5천만 유로를 투자해 기초기술과 연구전문인력 확보에 매진해왔다. 그리고 2016년, 유럽을 미래 양자정보산업의 글로벌 리더로 자리매김하기 위한 종합계획 Quantum Manifesto와 연구개발프로젝트 Quantum Flagship을 발표하고, EU의 양자기술개발과 산업육성을 위한 구체적 실천목표를 4개 부문(교육, 과학, 공학, 혁신)으로 나눠 제시했다.

유럽의 전략은 미국과 마찬가지로 핵심원천기술의 확보와 더불어 양자기술의 산업화를 촉진하기 위해 인력양성과 기업지원거점 구축, 우수인력 유치와 상용화개발 지원 확대 등으로 구성되어 있다.


[그림11]  
유럽 Quantum Manifesto 4대 Pillars

<b>교육</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자과학분야 기술직/엔지니어/연구자 양성 교육 프로그램 제공</li> <li>• 시민들에 대한 양자기술 홍보와 교육</li> </ul>
<b>과학</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 우수 연구프로젝트 발굴·지원</li> <li>• 우수 인력의 유럽 유입 견인</li> <li>• 국제 공동연구 활성화</li> </ul>
<b>공학</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 산학 공동연구 활성화 및 목표지향적 연구프로그램 강화</li> <li>• 지역 거점별 공동 연구개발 허브와 관련 생태계 구축</li> <li>• 양자과학 실용화를 위한 공학적 접근과 제품개발 프로그램 확대</li> </ul>
<b>혁신</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 범유럽 양자혁신 기금 마련으로 혁신적 기술기업 지원</li> <li>• 양자기술 산업화 응용 촉진을 위한 시장발굴 활동 지원</li> <li>• 혁신적 양자기술의 산업화를 위한 인큐베이팅 프로그램 제공</li> </ul>

유럽은 핵심기술 확보를 위해 22개의 Flagship 연구프로젝트를 선정하고 핵심 플랫폼과 요소기술 확보를 위한 집중연구그룹을 운영하고 있다.

또, 유럽은 미국의 QED-C와 유사한 QuIC(Quantum Industry Consortium)를 설립해 양자기술 및 산업에 대한 업계의 현안을 점검하고 양자기술을 전파하고 있다.

[그림12]  
유럽 QUIC 개요

	<b>설립</b>	2021년
	<b>운영목표</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 유럽 양자기술영역의 민간부문을 대표</li> <li>② 유럽 양자산업계 발전을 위한 정책 제안, 신시장 창출, 일자리 창출</li> <li>③ 미국의 QED-C에 상응하는 유럽의 대표기관 역할 수행</li> </ol>
	<b>참여기관</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Airbus, Bosch, SAP 등 대기업 및 스타트업 다수 (300개 이상)</li> <li>• 32개의 연구기관 및 주요 대학</li> </ul>
	<b>주요활동</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부문별로 9개의 WG 운영</li> <li>• 시장분석 및 응용 사례 확보</li> <li>• IP 거래 촉진, 투자 지원</li> <li>• 기술교육, 표준화, 전략기술로드맵 활동 등</li> </ul>

## 다. 영국

2013년, 국가양자기술프로그램 (National Quantum Technologies Programme)을 통해 양자과학 연구와 산업육성을 위한 마스터플랜을 제시한 영국은 분야별로 연구/교육/산업생태계 육성을 수행할 4개의 HUB 기관 프로그램과 2개의 인력양성프로그램을 만들고 민간 공동으로 총 £1B 이상의 투자를 진행하고 있다.

[표기]  
영국 NQTP 계획의  
핵심 프로그램 구성

HUB 프로그램	UK Quantum Technology Hub in Sensors and Metrology	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분야: 양자센서/계측</li> <li>• 운영기관: Univ. of Birmingham</li> <li>• 수행과제: 센서 제품용 광학부품에서 cold atom 시스템, 패키징까지 전체 공급망(산업생태계) 구축</li> </ul>
	QuantIC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분야: 극저조도/초고해상도 이미징</li> <li>• 운영기관: Univ. of Glasgow</li> <li>• 수행과제: 단일광자 광원, 검출기, MEMS, NEMS에 이르는 일괄 제조 공정기술 개발 및 산업생태계 구축</li> </ul>
	NQIT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분야: 양자컴퓨팅</li> <li>• 운영기관: Univ. of Oxford</li> <li>• 수행과제: 20:20 아키텍처를 적용한 화학코(chemical nose), 난수발생기, quantum cryptography range extenders 등 연구 및 산업생태계 구축</li> </ul>
	Quantum Hub for Quantum Communications	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분야: 양자통신</li> <li>• 운영기관: Univ. of York</li> <li>• 수행과제: 광통신 및 자유공간용 QKD 기술 연구 및 산업생태계 구축</li> </ul>
인력양성 프로그램	Center for Doctorial Training	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자분야 전문 학위과정으로 4년(1+3) 안팎의 교육과정 제공</li> <li>• U. of Bristol, ICL, UCL 등 3곳에 설치</li> </ul>
	Training and Skills Hub in Quantum Systems Engineering	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자기술 훈련과정과 협동과정, 경력개발과정 등을 제공하는 교육훈련 프로그램</li> <li>• 4개 Hub 기관에 함께 설치</li> </ul>

영국은 2024년 1기 NQTP가 종료됨에 따라 2기 NQTP 계획(2025~)을 수립 중이고, 현재 4개 HUB 기관을 Innovation Center로 격상해 양자산업 생태계 육성기관으로 운영하는 방향으로 검토 중이다. 이 때 Innovation Center로서 4개 HUB는 각자 영역에서 다음 세 가지 역할을 추가로 수행하게 된다.

- 대학의 기초연구 성과의 실증 데모
- 민간기업의 기술 사업화 아이디어 검증 및 수요 기술 보급
- CDT(Center for Doctorial Training) 및 Skills Hub 배출 기술인력을 산업계에 공급

## 2-2. 공공 Q. Fab 현황

Q. Fab은 연구기관이 가진 큐비트 프로세서의 핵심기술을 바탕으로 관련 연구기관 및 산업체들에게 자신의 H/W 시스템과 제조기술을 공개/보급하는 통로이며, 미래의 산학연 산업생태계를 형성하기 위한 기술교육과 정부-산학연 간의 커뮤니케이션 창구 역할을 담당하는, 산업생태계 육성을 위한 중심 거점 기관이다.

때문에, 각국은 양자산업 생태계 육성 전략의 핵심으로 Q. Fab(Testbed, Innovation Center)을 경쟁적으로 확대·설치하고 그 기능과 역할을 계속 강화해가고 있다.

※ Q. Fab은 Q. Foundry, Q. Testbed, Q. Innovation Center 등의 용어와 혼용해서 쓰이는데, 단어의 엄밀한 정의와 뉘앙스는 다르지만 공공기반의 연구개발 플랫폼으로서 산학연 연구개발 생태계 확장을 지향한다는 면에서 실질적인 차이는 없다.

### (미국) Advanced Quantum Testbed (AQT)

AQT는 Lawrence Berkeley National Lab이 수행하는 초전도 기반 양자컴퓨팅 플랫폼 개발 프로그램으로, 2018년에 DOE ASCR의 31M\$ 규모의 5개년 프로그램에 선정되었고, MIT Lincoln Lab과 협동 연구를 통해 새로운 형태의 초전도 플랫폼에 대한 탐색연구를 진행하고 있다. Testbed 프로그램의 개발 목표는 아래 2가지이다.

- DOE가 수행하는 각종 과학계산 (최적화, 물성과학, 우주과학 등)에 적용할 수 있는 NISQ 플랫폼 개발
- Testbed의 NISQ 플랫폼에 최적화된 양자계산 알고리즘을 병행 개발하여, 개념 검증을 벗어난 실용적 프로그램으로써의 알고리즘을 확보

AWT는 오픈/참여 플랫폼으로 운영해, 외부의 연구자와 기업이 자유롭게 플랫폼 연구에 참여해 관련 기술을 습득하고 새로운 아이디어를 플랫폼에 적용할 수 있도록 하는 것을 원칙으로 하고 있다.

- (오픈 플랫폼) 대학과 산업체 소속의 Testbed 참여 연구자에게 개발된 Testbed에 관한 모든 기술데이터와 Testbed 개선 과정에 대한 정보를 제공하는 오픈 플랫폼으로 운영
- (참여 플랫폼) Testbed 사용자가 Testbed 개선 작업에 공동으로 참여하고 그 과정의 기술데이터를 공유하는 참여 플랫폼으로 운영



설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berkeley Lab의 Molecular Foundry 설비 일체</li> <li>• Berkeley NERSC 설비 일체</li> </ul>
서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설비 지원 (유/무상)</li> <li>• 기술 지원: 양자제어 기술, 소재 및 Fabrication, 기술, 소프트웨어 및 아키텍처 응용 개발 기술</li> </ul>

### (미국) CUBit Quantum Initiative

CUBit은 Univ of Colorado, NIST Quantum Physics Division이 주축이 되어 설립한 산학연 연구 혁신기구로서, Colorado Front Range 지역의 첨단기업들(Lockheed Martin, Honeywell 등)과 벤처기업, 양자전문연구기관(NIST JILA), 대학의 연구 및 교육 인프라를 엮는 지역의 양자혁신 연구와 산업 육성 거점 역할을 하고 있다.

CUBit은 CU Boulder와 NIST Boulder의 연구역량을 바탕으로 지역내 산업계와 밀접한 연구개발 활동을 통해 산업현장에 직접 응용 가능한 산출물 제공을 목표로 운영되고 있다.

또한, 양자분야의 산업 혁신을 위해서는 기존 산업계 종사 기술인력에 대한 다양한 수준의 교육 훈련 프로그램이 필수적임을 인식하고, 이를 위해 cross-disciplinary, multi-tiered 교육 훈련 프로그램을 개발, 제공 중이다.

	4대 목표	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 콜로라도의 양자역량 강화</li> <li>② 지역 대학 및 연구소와 협력</li> <li>③ 양자전문기업과의 협력</li> <li>④ 지역내 양자전문인력 양성 거점</li> </ol>
	연구분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 양자계측, 센싱</li> <li>• 양자네트워크, 통신</li> <li>• 양자물질, 동역학</li> <li>• 양자컴퓨터, 시뮬레이션</li> </ul>
	기업지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기업협동연구 활성화</li> <li>• 기업인력의 연구프로그램 인턴십 참여</li> <li>• 기업인력에 대한 학위(단기, 학사, 석박사)과정 운영</li> </ul>


**(미국) SQUILL Foundry (Lincoln Lab Superconducting Qbit Foundry)**

SQUILL Foundry는 초전도 큐비트 제작을 위한 까다로운 설비와 특수 프로세스를 외부 기업/기관에게 제공하기 위해 설립된 양자 파운드리 서비스로서, NQI의 지역거점센터인 LPS Qubit Collaboratory가 구축했다.

초전도 큐비트는 커패시터, 인덕터 및 Josephson 접합(초전도 스위치의 일종)을 창의적인 방식으로 결합하여 다양한 특성의 양자 회로 구성이 가능하다. SQUILL Foundry는 Lincoln Lab이 가진 20년 이상의 초전도큐비트 노하우와 Microelectronics Lab의 첨단 설비를 바탕으로 운영된다.


SQUILL 이용자는 초전도 양자컴퓨터 플랫폼의 디자인 규칙 가이드와 실제 레이아웃 샘플을 직접 양자측정을 할 수 있는 고품질 ‘캔들 큐비트’ 칩과 함께 받고, 맞춤형 설계를 SQUILL Foundry에 제출하면, 최종 제작된 극저온 패키지에 와이어 본딩된 조립식 장치를 제공받는다.

SQUILL Foundry는 2021년~2023년 파일럿 운영을 통해 운영체계를 안정화했고, 이후 4년간의 프로젝트로 전환해 미국정부 보조금을 받는 모든 초전도 큐비트 연구그룹에 서비스를 제공할 예정이다. 본격적인 파운드리는 Josephson 접합의 소형 어레이 및 플립 칩 통합을 포함한 고급 기능을 출시하여 보다 발전된 큐비트 설계를 가능하게 할 것입니다. 현재 20개 이상의 연구 그룹이 파운드리를 활용할 준비를 갖추고 있고, 이를 더욱 확대할 계획이다.

	설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microelectronics Lab의 모든 첨단 제작 및 측정 장비</li> <li>• 300mm wafer 공정으로 전환</li> </ul>
	서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 초전도 큐비트 칩 주문제작 서비스(Foundry)</li> <li>• 설계 가이드(IP) 제공</li> <li>• 테스트 툴 제공</li> </ul>

**(미국) Argonne Quantum Foundry**

아르곤 국립 연구소(Argonne National Laboratory)에 위치한 아르곤 쿼텀 파운드리(Argonne Quantum Foundry)는 확장 가능한 실리콘 기반 양자 시스템 개발에 중점을 둔 6,000평방피트 규모의 파운드리 시설이다. 이 파운드리는 NQI의 거점연구센터의 하나인 Q-NEXT가 구축하는 2개의 양자 파운드리 중 하나로 2023년에 개설했다.

	설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microelectronics Lab의 모든 첨단 제작 및 측정 장비</li> <li>• 300mm wafer 공정으로 전환</li> </ul>
	서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 초전도 큐비트 칩 주문제작 서비스(Foundry)</li> <li>• 설계 가이드(IP) 제공</li> <li>• 테스트 툴 제공</li> </ul>

### (미국) SLAC Quantum Foundry


Q-NEXT의 두 번째 양자 파운드리 프로젝트로, DOE의 SLAC 국립가속기연구소 내에 초전도 큐비트 플랫폼 파운드리 전용으로 현재 구축 진행 중이다.

※ Q-NEXT: Next Generation Quantum Science and Engineering.

구분	주요내용
연구팀 구성	<ul style="list-style-type: none"> <li>Argonne National Lab 중심으로 3개 연방연구기관 (ANL, SLAC, Pacific Northwest National Lab), 9개 대학(Caltech, Cornell, Northwestern, PennState, Stanford, UCSB, U. Chicago, Illinois, Wisconsin), 10개 민간기업(Applied Materials, Boeing, IBM, Intel, Microsoft 등)이 참여</li> </ul>
Challenge 테마	<p>〈양자정보의 장거리 전송기술 개발〉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(Challenge 1) 양자중계기를 통한 장거리 정보 전송</li> <li>(Challenge 2) 초고감도 양자센서</li> <li>(Challenge 3) 양자컴퓨터 제조기반 및 테스트베드 구축 - 2개의 양자 파운드리와 국가 양자소자 데이터베이스 구축</li> </ul>

### (미국) UC Santa Barbara Quantum Foundry

NSF의 Q-AMASE-i initiative 사업을 통해 구축된 양자 파운드리로, 내결함성 토폴로자 초전도 큐비트 등 고순도 결정질 양자큐비트 신소재 개발과 교육, 국립연구소 및 산업계와의 연구협력 네트워킹 등에 주력하고 있다.

	연구 및 교육	<ul style="list-style-type: none"> <li>현재 참여 연구원 26명과 대학원생, 산업체 인턴 11명 등</li> <li>학부생을 위한 Summer Internship, 고교생 및 교사를 위한 K-12 교육 프로그램 등 운영</li> </ul>
	연구분야	<ul style="list-style-type: none"> <li>(Thrust 1) Natively Entangled Materials</li> <li>(Thrust 2) Interfaced Topological States</li> <li>(Thrust 3) Coherent Quantum Interfaces</li> </ul>

### (미국) Qubits for Computing Foundry(QCF) at LPS Qubit Collaboraty (U. Maryland)

NSF의 양자정보과학 연구거점센터의 하나인 LPS Qubit Collaboratory에 2023년부터 구축되는 양자 파운드리로서, Lincoln Lab, Intel, HRL Lab 등 3곳의 큐비트 파운드리와 협력해 운영될 예정이며, 최첨단 초전도 및 양자점 스핀큐비트 분야에 특화되어 있다.


Lincoln Lab에서는 세계최고 수준(1큐비트 게이트 충실도 99.9%)의 초전도 큐비트를 제작해 외부 연구그룹들에게 제공할 예정인데, Lincoln Lab의 초전도 큐비트는 이미 20개의 연구그룹에 제공되어 자체 큐비트 설계를 지원하고 있다.

Intel사는 300mm 웨이퍼로 제작된 12개의 양자점으로 구성된 칩(95%의 수율에 도달)을 제공할 예정이며, LPS를 비롯한 4개의 연구그룹과 파트너십을 체결했다.

HRL은 SLEDGE라는 자체 양자점 제조공정을 기반으로 99.9% 1큐비트 게이트 충실도의 양자점 큐비트 6개로 구성된 칩을 LPS와 외부 연구그룹들에게 제공할 예정이다.

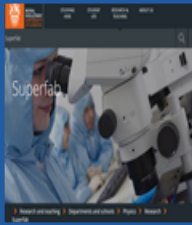
**(캐나다) Quantum-Nano Fabrication and Characterization Facility(QNFCF)**

워털루대학의 IQC(Institute for Quantum Computing)이 운영하는 쿼텀나노팩으로 2018년부터 운영되고 있으며, 90여명의 선임연구원들과 400여명의 랩 운영진으로 구성되어 있고 자체 연구개발 프로그램 뿐만 아니라 민간기업에 대한 제작 및 교육지원 서비스를 함께 제공하고 있다.

	<b>설비</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 클린룸: 8,000ft<sup>2</sup></li> <li>• PECVD ,ALD, LPCVD 등의 증착장비</li> <li>• RIE, Ion milling, O<sub>2</sub> plasma 등 식각장비</li> <li>• UV, e-beam lithography 장비</li> <li>• 측정, 패키징 장비</li> </ul>
	<b>서비스</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 교육: 설비 운영 표준 교육</li> <li>• 기술지원: 설비 운영 지원</li> </ul>

**(영국) SuperFab**


SuperFab은 Royal Holloway, Univ. of London(RHUL)이 EPSRC의 연구비와 NPL, JEOL (일본 광학기업)의 자금지원으로 설립한 초전도 기반 양자컴퓨팅 Fab으로, 2018년 여름에 오픈했다. RHUL은 UK-CSQS(영국 초전도양자컴퓨팅 연구프로그램)을 수행하는 기관이며, EPSRC 지원을 받아 초전도 회로 제작을 위한 Nano fab과 클린룸 설비를 구축한 바 있고, 이를 기반으로 SuperFab을 구축·운영하고 있다.

	<b>설비</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 클린룸</li> <li>• nano fab: e-beam lithography, e-beam metal deposition, sputtering, etching 등</li> </ul>
	<b>서비스</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 설비 무상 지원</li> <li>• 기업 연구개발 지원 (유상) 및 교육: 큐비트 foundry, hybrid device &amp; sensors, 양자광학, 양자계측</li> </ul>

**(영국) QLABS**


Univ. College London(UCL)의 Quantum Science and Technology Institute가 보유한 연구 및 교육 인프라를 기반으로 설립된 Innovation Center로서, 런던지역의 양자정보분야 혁신산업 육성을 목표로 하고 있다. UCL은 기존에 Center for Doctorial Training 프로그램을 운영하는 3개 거점대학 중 하나로서, 기술교육 인프라와 인력이 잘 갖춰진 곳이며, 이를 기반으로 창업기업을 위한 지원 시설을 추가해 Innovation Center로 확대 운영하고 있다.

QLABS는 양자컴퓨터 창업자를 위해 맞춤형 6개월 스타트업 프로그램을 운영하고 있다. 이 프로그램 참가자는 맞춤형 6개월 스케일업 프로그램과 함께 전문 멘토링 서비스와 투자자 연결 서비스, 혁신형 R&D 자금신청 지원 서비스 등 창업초기 기업가를 위한 패키지 지원 서비스를 제공받는다.

	설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최첨단 Diluted Refrigerator, 전자특성화 실험실</li> <li>• 오픈 클라우드 양자컴퓨터 접속</li> <li>• 창업기업을 위한 서비스 작업공간 (사무실, 실험실)</li> </ul>
	서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 교육: 양자컴퓨터 플랫폼, 소프트웨어 개발 기술</li> <li>• 양자컴퓨터 창업 엑셀러레이터/인큐베이터 프로그램</li> <li>• QLABS Stargup 프로그램</li> </ul>

### (영국) Quantum Technology Enterprise Center (QTEC)

QTEC은 Bristol 대학의 EPSRC Skills & Training Hub를 기반으로 양자전문 연구자와 산업체 네트워크를 기반으로 운영되는 창업스쿨 프로그램으로, 양자기술분야의 창업아이디어를 가진 연구자를 대상으로 제공하는 1년간의 전문 창업교육을 제공하고 있다.

	창업교육 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 경영교육(6개월) + 인큐베이팅(6개월)</li> <li>• 경영교육: 기업설립과정, 회계/마케팅/개발 실무</li> <li>• 인큐베이팅: 사업계획서 작성, 투자자 PT 등</li> </ul>
	서비스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 교육비 지원: 연간 3만파운드(생활비) + 12,500파운드(경비)</li> <li>• 주거지원: 합숙소 제공</li> </ul>

QTEC은 2016년부터 28개 기업의 창업을 지원했고, UK에서 창업된 양자컴퓨팅 Startup 중 1/3이 QTEC의 각종 지원을 받았을 만큼 활발하게 활동해오고 있다.

### (이스라엘) UNF(Unit for Nano Fabrication)

히브리 대학교(Hebrew University of Jerusalem) 나노 과학 및 나노 기술 센터(HUCNN)는 2001년에 설립되었으며 물리학, 화학, 응용 물리학, 약학, 의학, 농업, 공학 및 생명 과학 등 다양한 분야의 연구 그룹을 위해 연구설비와 전문기술인력을 제공하고 있다. UNF는 HUCNN의 세 유닛 중 하나로 2007년 설립되었으며, 클린룸과 함께 유기 및 나노물질 가공을 위한 전문설비와 기술지원을 제공한다.

현재 UNF는 이스라엘 양자컴퓨터 연구를 이끌고 있는 히브리대학 양자정보과학센터(QISC, 2011년 설립)와 공동으로 이스라엘 정부의 예산지원을 받아 첨단 양자소자 제작 설비를 대규모로 보강해 양자컴퓨터 Fab으로써의 기능을 확대해가고 있다.



설비

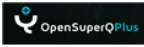
- 클린룸(300m<sup>2</sup>)
- characterization: ellipsometer, hall effect measurement, etc.
- e-beam lithography: Elionix e-beam litho system, etc.
- packaging process: wafer bonder, dicing, wire bonder
- photo lithography: Laser writer system, mask aligner, etc.
- thin film process: ALD, Angstrom Quantum Series Evaporator, ICP/RIE, Ion Milling, PECVD, etc.
- wet chemistry: Electro Plating System, Plasma Asher Diener, EDC Spinner, electro plating system, etc.

(EU) OpenSuperQ

OpenSuperQ는 EU QT Flagship의 20개 주요 연구프로젝트 중 하나로, 초전도 기반 양자컴퓨터 개발 프로그램이자 오픈 플랫폼이다. 이 플랫폼은 독일, 스페인, 스위스 등 유럽 10여개 연구기관이 참여해 개발했으며, 비전문가와 다양한 응용분야 연구자가 함께 사용할 수 있는 100큐비트 초전도 양자컴퓨터 풀스택 플랫폼을 개발하고 클라우드 형태로 공유하고 있다.


(EU) OpenSuperQPlus

OpenSuperQPlus는 OpenSuperQ를 발전시켜 1,000큐비트 양자컴퓨터를 만드는 것을 목표로 하며, 3.5년씩 2단계로 진행되고 있다.

	목표	1,000 큐비트 초전도 양자컴퓨터 플랫폼
	참여기관	10개국 25개 연구기관
	기간/투자	2023~2026 / € 20 Mil.

(EU) Aqtion

Aqtion은 EU QT Flagship의 20개 주요 연구프로젝트 중 하나로, 이온트랩 양자컴퓨터 개발 프로그램이다. 2021년까지 성공적으로 과제를 수행하고, 그 결과로서 2022년 2개의 오류정정 논리큐비트를 구현했다.

	목표	<ol style="list-style-type: none"> <li>비전문가가 사용할 수 있는 소형/휴대형 이온트랩 기반 양자컴퓨터 개발</li> <li>50큐비트 이온트랩 플랫폼, 제어시스템, 광학유닛, 다중레이저시스템, 모듈화된 광학분배시스템 일체 개발</li> </ol>
	참여기관	U. of Innsbruck 외 4개 대학, 3개 기업
	기간/투자	2018~2021 / € 10 Mil.


## 2-3. 한국의 Quantum Fab 운영 현황

한국은 뒤늦은 출발에도 불구하고 정부의 공격적인 국가 양자컴퓨터 개발 프로그램에 힘입어 연구생태계가 양적, 질적으로 급격히 성장하고 있다. 그럼에도, 양자컴퓨터 분야의 창업과 기업의 응용분야 연구개발을 지원할 산업생태계 육성 인프라 구축에는 아직 선진국 대비 미비한 부분이 많은 실정이다. 현재 Quantum Fab을 운영하는 곳은 성균관대학교의 양자정보연구지원센터가 유일하며, 기존 반도체 산업 지원을 위해 구축된 전국의 나노팹들이 부족한 부분을 보완해주고 있다.

### 양자정보연구지원센터

성균관대학교가 운영하는 양자정보연구지원센터는 과학기술정보통신부의 「양자정보과학 연구개발생태계 조성사업」의 일환으로 구축, 운영되는 센터로서, 인재양성과 양자팹 지원을 목적으로 하고 있다.

- 신진 연구인력 양성: 양자정보분야 신진연구인력 양성 및 저변확대를 위한 국내 생태계 구축
- 양자팹(파운드리) 구축: 양자팹을 통한 양자소자공정 인프라 및 공정서비스 제공
- 양자클라우드 및 저변 확대: 양자컴퓨터 클라우드 서비스 활용 및 국내 연구자 네트워킹 지원

	인력양성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신진연구인력 양성: 국내 석박사, 박사후연구원 대상 선도연구그룹 연수 지원</li> <li>• 미래인재 유입: 양자정보과학 계열학교 운영, 청소년 대상 특강</li> <li>• 저변확대 활동: 경진대회, 교류행사, 세미나 등</li> </ul>
	양자클라우드	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IBM, IonQ, D-Wave 플랫폼의 클라우드 접속 서비스 제공</li> </ul>
	양자팹	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 나노팹 등과 연계해, 종합 파운드리 서비스 제공</li> </ul>

양자컴퓨터 플랫폼 중 가장 상용화에 앞선 초전도 분야는 세계적으로 부문별 분업화에 따른 생태계 분화가 상당히 진행된 상황이며, 소자 설계, 파운드리, 양자 부품, 시스템, 컨트롤 전자, 소프트웨어 등 다양한 분야별 전문기업들이 공급망을 형성해 가는 중이다.

특히 양자칩 파운드리는 이제야 자리를 잡기 시작하고 소규모 파일럿 프로그램을 돌리는 수준이므로, 한국의 양자칩 파운드리 시도가 결코 늦지 않았다고 볼 수 있다. 다만 파운드리는 단순히 장비의 구축이 아니라는 점을 인지해야 하고 초전도 공정의 고난이도를 고려하여 공정 안정화 및 파운드리 전반의 생태계를 구축하는데 장기간의 투자가 필요하다.

즉, 지금 양자컴퓨터 산업화에서는 디지털 산업에서 반도체의 TSMC가 파운드리 생태계를 구축한 것과 같은 일이 초전도 양자컴퓨터 칩 비즈니스에서 일어나고 있다고 보면 될 것이다. 양자정보연구지원센터의 양자팍은 정부가 일찍부터 세계 기술트렌드에 빠르게 대응하여 적절한 시기에 구축이 되었으므로, 이를 최대한 활용하여 국내에 양자칩 파운드리 생태계를 만들어가는 구심점이 될 수 있다고 본다.

다행히 한국은 이미 반도체에서 세계 선도 강국이므로 반도체 공정에 익숙한 고급 공정 엔지니어를 다수 확보할 수 있는 잠재력이 있다. 따라서 선도형 양자산업 육성 인프라를 보완하기 위해 한국은 조속히 선진국들의 Quantum Foundry와 Innovation Center 기능을 복합한 복합 인프라 형태의 산업육성 거점 조성에 나서야 하며, 이곳에서는 적어도 초전도와 이온트랩 두 종류의 플랫폼에 대한 Foundry 서비스를 제공할 수 있어야 한다.

기업들과 협업할 수 있는 환경 마련과, 필요한 기술 개발을 충분히 수행할 수 있는 전문가 군을 활용할 수 있는 Lab 및 기술지원서비스 제공, 그리고 기업 재직자에 대한 기술교육 및 전문 연구 과정이 함께 제공되는 형태여야 한다.

최종적으로 양자사업은 이제 태동하는 분야이므로 도전적인 창업가에 대한 전문적인 인큐베이팅과 정부의 창업 투자지원 프로그램이 함께 패키지로 제공되는 환경이 마련된다면 양자컴퓨터의 생태계 체인 중에서 특히 칩 파운드리에서는 대한민국의 양자도약이 가능하리라 본다.

# Q REPORT

양자정보과학 리포트

국내·외 Quantum Fabrication 동향

발행일 | 2024.1.1

발행처 | 성균관대학교 양자정보연구지원센터  
16419 경기도 수원시 장안구 서부로 2066  
<https://www.qcenter.kr>

※ 본 [양자정보과학 리포트]의 내용은 집필진의 견해입니다.