기술동향

양자정보기술

KISTEP 미래기술기획센터 유형정

KISTEP

Contents

제1장 개요

1.1 작성 배경

양자정보기술은 인공지능에 이어 미래 산업·안보의 게임체인저가 될 기술

- 양자 고유의 특성(얽힘, 중첩 등)을 활용한 차세대 혁신기술로 전체 산업 생태계의 판도를 바꿔놓을 것으로 기대

※ 미국 안보 20대 핵심유망기술(미국 NSC, ’20.10), 세계경제포럼·MIT 10대 혁신기술(’17, ’18)

* 출처 : 과기정통부 (2021), 양자기술 연구개발 투자전략(안)

[그림 1] 양자정보기술 특징과 전망[1)]

- 특히, 반도체 집적화(‘무어의 법칙’)의 한계를 양자정보기술로 극복하여 에너지, 교통·물류, 항공·우주, 신약개발, 금융 등 다양한 산업에 활용될 것으로 전망
  - 기하급수적으로 증가하는 데이터양을 고전컴퓨터로 처리하는데 한계 상황 직면
  - 양자컴퓨터는 동시다발적 정보처리로 고전적 디지털 컴퓨터 대비 비교 불가 수준의 월등한 연산 성능(N→2^n)을 보유
  - 최근 양자우월성* 달성에 대해 구글(’19) 및 중국 USTC(’20)에서 결과를 발표

    * Quantum Supremacy : 양자컴퓨터가 합리적인 시간 내 고전컴퓨터로 풀 수 없는 문제를 해결할 수 있음을 보이는 것으로, 양자컴퓨터가 고전컴퓨터보다 우월하고 대체 가능하다는 의미는 아님

- 세계시장은 ’19년 약 7억 달러에서 ’26년 약 35억 달러 규모로 성장하여 연평균성장률(CAGR) 25.8%를 기록할 전망[2)]
  - Google, IBM 등 글로벌 기업들은 원천기술 확보를 통한 글로벌 시장 선점 준비

1) 과학기술정보통신부 (2021), 「양자기술 연구개발 투자전략(안)」.
2) 한국과학기술정보연구원 (2021), MarketsandMarkets (2021), TechNavio (2020), Inside Quantum Technology (2020).

양자정보기술의 안보적 중요성이 강조되어 각 국은 해외 기술 유출의 방지 및 자국 내 기술 축적과 공급망 구축을 위한 정책을 추진하는 등 경쟁 가속화

- 양자정보기술은 보안성 강화(양자암호통신)와 암호체계 무력화(양자컴퓨팅)라는 양면성을 가져 전략 기술화되었으며, 각국은 양자정보기술을 기술패권 경쟁의 핵심 기술로 선정

※ **現** 공개열쇠 암호방식은 기존 컴퓨터가 소인수분해에 취약한 점에 착안되었으나 양자컴퓨팅 기술 완성 시 짧은 시간 내 소인수분해가 가능해져 암호체계 위협

- 미-중 기술패권 경쟁과 함께 미·영·일·중 등 주요국은 양자정보기술의 폭발적 파급력에 주목하여 주도권 확보를 위해 치열하게 경쟁 중

※ 미국 : 양자법(National Quantum Initiative Act) 제정('18), 영국 : 국가양자기술전략 ('19), 일본 : 양자혁신전략('20), 중국 : 제14차 5개년계획('21) 등

- 방산기술 위주의 국가 간 수출 통제(바세나르체제 등)가 최근 양자정보기술까지 확대되는 등 선도국 간 기술 블록화로 공유할 첨단기술이 없는 국가는 소외될 가능성이 증가

- 미국은 이미 상거래 통제 목록에 양자정보 및 양자센싱 기술을 포함하고, 암호해독 가능성이 있는 중국기업[3]과 러시아 제재 항목에 유관기관[4] 등을 거래 제한 명단에 포함

※ Hefei 연구소, QuantumCTek('21.11), Russian Quantum Center('22.3) 등

우리나라도 양자정보기술을 정부 주도의 선제적 대응이 필요한 기술로 인지하고 다양한 정책을 추진하고 있어 갈수록 관심이 집중되는 추세

- 양자정보기술의 도전적 원천 연구 및 R&D 사업의 투자 전략성 강화 등을 담은 「양자기술 연구개발 투자전략(안)」을 발표('21.4)하고, 단계별 연구개발 투자전략을 마련

- 투자 전략을 위한 대내외 환경 분석 결과, 미래 성장 가능성이 높으나 기술적 난이도가 높고 산업 기반이 없는 초기 기술로 정부 주도의 R&D 투자가 필요한 상황

- 이에, 국가차원의 집중 육성이 필요한 10대 필수전략기술('21.12)로 양자정보기술을 지정하고[5], 윤석열 정부에서도 110대 국정과제에 포함하여 집중 육성 예정[6]

- 경제성장과 안보 차원에서 선도국과 기술격차가 큰 추격형 기술로 양자정보기술이 선정되었으며, 대체 불가 기술확보를 목표로 투자 확대 필요성을 강조

3) 한중과학기술협력센터 (2021), 「중국 과학기술 정책 주간동향」 2021-27호.
4) 전략물자관리원, https://sanction.kosti.or.kr/user/nd94820.do?View&boardNo=00003612&itemShCd3=13
5) 과학기술정보통신부 (2021), 「국가 필수전략기술 선정 및 육성·보호 전략」.
6) 고윤미 외 (2022), 「새정부 과학기술 관련 국정과제 주요 내용 및 시사점」.

1.2 기술의 정의 및 범위

양자정보기술은 양자역학적 특성을 이용한 정보 전송 및 연산 수행 기술

- 정보, 과학, 통신, 기술 등의 조합으로 각국별 다양하게 명칭을 정의하고 있으며, 고전정보 처리가 아닌 정보 그 자체에 양자 특성을 도입한 새로운 정보처리 기술

※ 양자(量子, Quantum)는 더 이상 쪼갤 수 없는 물리량의 단위를 의미

- 고전정보처리는 0 또는 1의 논리값을 가지는 비트를 정보의 기본단위로 이용하는 반면 양자정보처리는 0과 1, 양자중첩*을 정보처리에 이용하며, 이를 큐비트(Qubit)로 명칭

* 두 개(또는 그 이상)의 양자 상태가 확률적으로 공존

- 본 고에서는 정보통신기술을 확장하고 큐비트 개념을 포함하는 '양자정보기술'로 명칭

〈표 1〉 각 나라별 양자 기술 명칭 및 정의

국가	명칭	정의
미국	**양자정보과학(Quantum Information Science(QIS)** (NQI('18.12))	양자역학과 정보이론이 합쳐진 기술 (정보 저장, 전송, 조작, 컴퓨팅 및 측정을 위한 양자역학)
유럽	**양자기술(Quantum Technology)** (Quantum Manifesto('16))	양자역학의 성질을 실제 응용분야에 사용 가능하도록 변화시키는 새로운 기술 (양자통신, 양자시뮬레이터, 양자센서, 양자컴퓨터 등)
중국	**양자과학기술** (국가중점연구개발계획('16))	양자제어 및 양자정보 분야의 중대과학문제와 병목기술에 대한 기초, 전략 및 미래지향적인 탐구
일본	**양자과학기술** (양자기술혁신전략('20.1))	양자의 행동이나 영향에 관한 과학 및 그것을 응용하는 기술 (1. 양자컴퓨터, 양자시뮬레이션, 2. 양자계측, 센싱, 3. 양자통신, 암호, 4. 양자소재(양자특성, 재료)
한국	**양자정보통신** (양자정보통신 중장기 추진전략('14.12))	양자적 특성을 정보통신분야에 적용하여 사이버 보안, 초고속 연산 등 기존 정보통신의 한계를 극복할 수 있는 차세대 정보통신기술
	양자기술 (S&T GPS('18.3))	양자기술은 양자역학적 상태를 직접 제어하고 활용하여 정보를 처리하거나 성능을 비약적으로 향상시키는 일에 국한하여 초점을 맞추고 있으며, 양자정보기술과 거의 일치
	양자정보통신기술 (정보통신 진흥 및 융합활성화 등에 관한 특별법('21.6))	양자역학적 효과를 기반으로 하는 양자암호 및 통신, 양자센서 및 소자, 양자컴퓨터 등을 가능케 하는 기술 (양자통신(암호통신/양자인터넷 등), 양자컴퓨터(연산), 양자센서)
	양자기술 (양자기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안('22.1))	양자(量子)역학의 원리를 활용하여 정보를 생성, 계측, 전송, 저장, 처리하는 기술

양자정보기술은 크게 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱 분야로 구분

〈표 2〉 양자정보기술 분야별 분류

분야	적용 양자 특성	기술목표	역할 및 활용
양자 컴퓨팅	중첩·얽힘을 이용한 정보의 동시처리	초고속 연산 (꿈의 컴퓨터)	• AI·빅데이터 등에 초고속 병렬연산 수행 ※ 현대암호체계 해독, 양자기계학습
양자 통신	정보가 쉽게 붕괴·손상	높은 보안 능력 (차세대 방패)	• 기하급수적으로 늘어나는 기기 간 안전한 데이터 전송 ※ 통신인프라 보안, 금융보안(보안카드·ATM 등)
양자 센싱	높은 민감성	초정밀 계측	• 고성능 센서가 필요한 분야 정밀한 데이터 측정 수행 ※ 차세대 의료영상기기, GPS 등

- (양자컴퓨팅) 양자의 특성(중첩과 얽힘)을 이용하여 초고속 병렬연산이 가능한 새로운 개념의 컴퓨터로 알고리즘과 시뮬레이터, 범용양자컴퓨터 등으로 분류됨

※ 보다 상세한 내용은 기 발간된 범용양자컴퓨터(2019-19호)의 기술 정의 및 범위 참고[7)]

- (양자통신) 양자의 특성을 활용한 물리적 보안 통신 및 양자컴퓨터 등 양자기기간 연결을 위한 네트워크 기술로 양자암호통신, 양자 네트워크 및 전송, 오류정정부호 등으로 분류됨
  - 양자컴퓨팅·센서의 고성능화, 보안성 고도화 등이 가능한 양자인터넷을 목표로 발전 중

〈표 3〉 기존 통신과 양자인터넷의 차이점[8)]

구분	기존 통신	양자인터넷
정보전달 매체	레이저광 / 무선(RF)	단일광자
정보부여	광출력/전류/전압의 세기, 위상	편광/위상 등
통신정보탈취	가능(도청 및 암호해독가능)	불가능(암호키탈취/암호해독 물리학적으로 불가)
장거리 전송	가능(중계국의 신호증폭)	가능(양자중계기 텔레포트)
양자컴퓨팅/ 양자센싱 연결	불가능	가능(분산양자컴퓨터 실현가능)

* 출처 : 과기정통부 (2021), 양자인터넷 핵심원천기술개발사업 기획 보고서

- (양자센싱) 전·자기장, 중력, 빛 등의 영향에 따른 양자 상태 변화를 이용하여 초정밀 계측을 가능하게 하는 기술로 관성·중력, 전·자기장, 광·이미징, 시간·주파수 센싱 등으로 분류됨
  - 센서별 성숙도에 따라 원천기술 확보 및 소형화/저전력화 등 상용화 목표로 발전 중

7) 임승혁 (2019), 「범용양자컴퓨터」 https://www.kistep.re.kr/boardDownload.es?bid=0031&list_no=34979&seq=1
8) 과기정통부 (2021), 「양자인터넷 핵심원천기술개발사업 기획 보고서」.

〈표 4〉 기존 센싱과 양자센싱 기술의 차이점

구분	활용 영역	고전센싱	양자센싱
관성·중력	• 지각 변동 감지 및 지진 예측	• 정밀도: ~ 10 nm s^{-2} • 연속동작 불가	• 정밀도: ~ 0.01 nm s^{-2} • 연속동작 가능
	• 자원탐사, 잠수함 항법용 중력지도	• 위성, 선박, 항공기, 잠수함 등에서 운항 중 측정 불가	• 위성, 항공기, 선박, 잠수함 등에서 운항 중 측정 가능
	• 소형 양자중력계	• 기계 장치로 소형화 한계	• 소형화 기술 적용 가능
전·자기장	• 뇌전증/부정맥 진단 • 반도체 나노자화 소자 테스트	• 민감도: 1pT (10^{-12} T) 이상 • 분해능: 200 nm 이상 (홀센서, 자기장 왜곡)	• 민감도: 1fT (10^{-15} T) 이하 • 분해능: 10nm 이상 (자기장 왜곡 없음)
	• MRI	• 측정영역: 300 x 300 mm^2 이상 • 분해능: 0.1 mm 이상	• 측정영역: 0.1 x 0.1 mm^2 이하 • 분해능: 0.001 mm 이하
광·이미징	• 초고분능, 초고감도 광학 이미징 • 고스트 이미징 • 분광, 미소 분자 검출 등에 활용 가능	• 공간 분해능: ~λ/n • 신호대 잡음비: Standard quantum limit[9] • 계측 장비, 측정 대상에 적합한 가용 파장 영역이 존재	• 공간 분해능: ~λ_{eff}/n (얽힘상태를 이용 λ_{eff} 작게 만드는 것이 가능) • 신호대 잡음비: Heisenberg limit[10] • 계측 장비, 측정 대상 가용 파장에 벗어나는 파장 얽힘광원 활용 가능
시간·주파수	• 네트워크, 지구 항법, 심우주 항법 등을 위한 초정밀 시간 주파수 생성	• 안정도: ~ 5×10^{-12}@1 초 • 불확도: 명시불가 (Drift ~ 10^{-10}@1 일) • 주파수 대역 ~ 마이크로파	• 안정도: ~ 10^{-16}@1 초 • 불확도: ~ 10^{-18} • 주파수 대역 ~ 광주파수대역까지 확장
	• 중력 포텐셜 측정	• 지오이드고 측정 불확도: ~ 10 cm (전지구 모델) • 실시간 변동 측정 불가	• 지오이드고 측정 불확도: ~ 1 cm 이하 • 실시간 변동 측정 가능
	• 암흑 물질 탐색	• 탐색 불가	• 탐색 가능

* 출처 : 과기정통부 (2022), 양자센서 기획 보고서 참고하여 재구성

- 본 고를 통해 양자정보기술 컴퓨팅/통신/센싱 분야 국내외 기술, 산업, 정책 및 R&D 투자 동향을 파악하고, 이를 통해 시사점을 도출하고자 함

9) 「양자정보기술백서」 p.89 또는 「양자정보과학기술 연구회 위키」에서 상세정의 확인 가능.
10) https://wiki.quist.or.kr/index.php/양자_센서_(Quantum_Sensor)의 1.4 항목 참고.

제2장 기술동향

양자컴퓨팅, 통신 및 센싱 분야로 구분하여 서술하되, 양자컴퓨팅 분야 기술 동향은 기 발간된 범용양자컴퓨터 (2019-19호)에 서술되어 있어 알고리즘 및 시스템 구축의 최신 동향만 간략히 기술

2.1 양자컴퓨팅

최근 급속한 기술 발전이 이루어지고 있는 분야로 플랫폼별 5~127큐비트 수준의 양자컴퓨팅 시스템이 구축되어 있으며, 알고리즘 및 검증 연구도 활발

- 물리 큐비트를 구현하는 플랫폼에 따라, 초천도체, 이온 트랩, 반도체 양자점, 위상 큐비트, 고체 결함, 광자 기반 큐비트 구현 기술로 구분 가능하며, 특징 및 국내외 기술수준 간략히 비교

〈표 5〉 양자컴퓨팅 플랫폼별 특징

방식	초전도체	이온 트랩	반도체 양자점	위상 큐비트	고체 결함	광자 기반
장점	빠른 게이트 속도, 반도체기술 활용	소자 안전성, 높은 신뢰도	소자의 안전성, 반도체기술 활용	오류 미발생	상온 작동	제어와 전송 용이
단점	초전온 유지, 짧은 양자상태 유지시간	느린 게이트 속도, 복잡한 레이저 장치	얽힘 구현 난이도 높음, 초저온 유지	구현가능성 미입증	얽힘 구현 난이도 높음	대규모 얽힘 생성 어려움

* 출처 : 과기정통부 (2021), 양자기술 연구개발 투자전략(안)

- (알고리즘 및 검증) 양자컴퓨터의 획기적인 계산속도 향상을 위한 양자적 계산 알고리즘으로서 어닐링, NISQ 활용*, 효율적인 에러보정/에러완화 등 의미있는 문제를 풀기 위한 연구 집중
  - * 수백 큐비트급 Noisy Intermediate-Scale Quantum 장치에서 구현 가능한 알고리즘 개발
  - 주요국은 구체적인 양자 알고리즘에서 양자 이득을 실현하기 위해 필요한 큐비트 규모, 회로깊이, 양자게이트 에러율 등 계산비용을 추정하는 연구들을 활발히 진행[11)]
  - 유럽에서는 이온트랩 기반 내결함성 범용 양자 게이트(CNOT) 작동을 처음으로 시연[12)]

11) H. Huang, et al. (2021), 「Information-Theoretic Bounds on Quantum Advantage in Machine Learning」.
12) L. Postler, et al. (2022), 「Demonstration of fault-tolerant universal quantum gate operations」.

- ETRI는 선형잡음문제를 해결할 수 있는 양자알고리즘을 개발하여 세계 최고 수준 양자 알고리즘 성능을 증명하고 양자컴퓨터로 양자내성암호를 풀 수 있는 가능성을 제시[13]

- 연세대는 고전데이터를 분류하는 QCNN(quantum convolutional neural network) 알고리즘을 구현하였으며, 근미래의 NISQ 컴퓨터에 적용 가능할 것으로 기대[14]

● (시스템 구축) 각국은 다양한 방식의 양자컴퓨팅 시스템을 구축하여 발표하고 있으며, 특히 중국은 2가지 방식의 양자 컴퓨팅 시스템으로 양자 우월성을 증명

- 중국은 보존 샘플링 방법을 활용한 113큐비트 광자 컴퓨터 '구장 2'[15] 및 구글과 같은 무작위 양자회로 샘플링 방법을 활용한 66큐비트급 초전도 컴퓨터 '조충지 2.1' 발표[16]

- 이스라엘은 이온트랩 방식의 5큐비트 양자 컴퓨터를 개발하였으며, 개발중인 64큐비트급 양자컴퓨터는 구글, 중국에 뒤이어 양자 이점을 입증할 수 있을 것으로 예상[17]

〈표 6〉 양자컴퓨팅 기술의 국내외 수준 비교

방식	해외 수준	국내 수준	기술 장벽
초전도	• IBM, 구글 등 선도기업들이 시스템화하여 최대 127큐비트 급의 양자컴퓨팅 클라우드 서비스를 제공 • 중국은 60큐비트 양자우월증명	• 8큐비트 초전도 칩 제작 작동 시연 • 20큐비트 수준의 설계 및 제작 공정 가능	• 초전도 소자의 대규모 집적기술 (3차원 적층기술) 및 극저온 고주파 신호의 증폭기술 • 극저온 냉동기 기반의 저잡음 시스템 통합기술
이온 트랩	• IonQ 에서 11큐비트 시스템의 클라우드 서비스 제공 및 32큐비트 시스템 개발 • 100개 이상 큐비트의 24시간 이상 포획 유지 • 이스라엘은 5큐비트 개발	• 연구 초기단계로 20개 큐비트를 동시 생성하나 큐비트간 얽힘 미구현 • 20개의 큐비트를 10분 정도 유지	• 큐비트를 제어하고 얽힘을 구현하는 레이저 기술(주파수, 파워, 펄스 타이밍, 빔의 위치 등 레이저 제어) • 보다 많은 큐비트 동시 포획 및 장시간 유지하는 극저온 챔버 운영 기술
반도체 양자점	• 실리콘(Si) 2큐비트 개발 • 게르마늄(Ge) 4큐비트 생성	• 실리콘(Si) 1큐비트, GaAs 3큐비트 생성	• 소재의 해외 의존성 • 파운드리를 활용한 대규모 칩 제작 기술
위상 큐비트	• (MS) 연구실 수준의 가능성 시연	• 대학 실험실 연구	• 실환경 기술 구현
고체 결함	• 10큐비트 수준 시연, 7큐비트 얽힘 • 양자인터페이스 이용 3큐비트 원격 얽힘 시연	• KIST 2큐비트 개발 • 3~4 큐비트 수준 시연	• 전자스핀-핵스핀 집적화 기반 기술인 스핀 제어/측정 기술 • 다수의 전자스핀 집적화를 위한 공정 개발
광자기반	• 4~6개 광자를 집적광학계에서 실험	• 1~2개 광자 구현	• 다중큐비트 확장 기술

13) W. Song, et al. (2022), 「Quantum Solvability of Noisy Linear Problems by Divide-and-Conquer Strategy」.
14) T. Hur, et al. (2022), 「Quantum Convolutional Neural Network for Classical Data Classification」.
15) H.-S., Zhong, et al. (2021), 「Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light」.
16) Q. Zhu, et al. (2022), 「Quantum Computational Advantage via 60-Qubit 24-Cycle Random Circuit Sampling」.
17) nocamels, https://nocamels.com/2022/03/weizmann-quantum-computer-researchers/

2.2 양자통신

실용화에 가장 근접한 기술로 QKD 통신 거리확장을 위한 연구와 기존 유선 광통신망을 활용하기 위한 양자중계기/메모리 연구가 활발

- (양자암호통신) 양자 난수 발생, 양자키분배(QKD: Quantum Key Distribution), 양자 비밀공유 등의 유/무선 통신 기술로 상용화에 가장 앞서 있으며, 양자위성을 활용한 거리 확장 연구 및 칩 스케일 소형화 연구가 주로 수행
  - QKD는 기존 기술의 거리한계*를 극복하는 Twin-field(TF)(1,000km), MDI(500km) 연구와 함께 송신부 및 수신부 전체 광학모듈을 단일 칩으로 만드는 소형화 연구 진행[18)]
    * BB84방식은 1984년에 제안한 최초의 QKD 프로토콜로 100km의 기술장벽을 가짐
  - 중국에서는 830km 유선 광섬유에서도 TF-QKD가 가능한 것을 보였고[19)], 위성과 신뢰 노드(trusted node) 연결을 통해 거리를 4,600km 수준으로 확장하여 실증 진행[20)]
  - KIST는 단일 광원을 사용하여 노이즈를 보상하고 별 네트워크 구조의 제안을 통해 세계에서 두번째로 다대다 네트워크로 확장 가능한 TF-QKD 검증 성공[21)]
- (양자 전송) 양자 얽힘을 기반으로 양자 정보를 한 위치에서 다른 위치로 전송(Teleportation)하는 기술로 정보직접전송 및 시험망에서의 실 구현 등 양자인터넷 구현의 필수 연구 수행
  - 미국은 유선 양자네트워크를 통해 양자얽힘 큐빗을 전송하였고[22)], 네덜란드는 최초로 직접 연결되지 않은 노드 네트워크 간 순간 이동으로 양자정보 전송 성공[23)]
  - ETRI는 양자원격전송 프로토콜을 제안하고 다자간 암호통신 가능성을 제시하였고[24)], KRISS와 NSR은 국가용 양자암호 시험통신망(20 km)에서 양자직접통신 구현[25)]
- (양자 메모리/중계기) 양자신호의 전송 거리를 증가시키기 위해서 중간 노드에서 양자 얽힘 상태를 저장하고 얽힘 교환 기술을 이용하여 양자 신호를 중계 및 저장하는 기술

---

18) H. Semenenko, et al. (2020), 「Chip-based measurement-device-independent quantum key distribution」.
19) S. Wang, et al. (2022), 「Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre」.
20) Y.-A. Chen, et al. (2021), 「An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres」.
21) C.H. Park, et al. (2022), 「2×N twin-field quantum key distribution network configuration based on polarization, wavelength, and time division multiplexing」.
22) Y. Zhong, et al. (2021), 「Deterministic multi-qubit entanglement in a quantum network」.
23) QuTech, https://qutech.nl/2022/05/25/teleport-quantum-information-across-network/
24) S. M. Lee, et. al. (2020), 「Quantum teleportation of shared quantum secret」.
25) 한국표준과학연구원 (2021.3.3), 「양자 보안 네트워크 가능케 할 '양자직접통신' 구현 성공」.

- 유럽에서는 양자얽힘, 양자상태 저장 등 실환경 양자네트워크 구현 가능성을 제시하고[26], 유선 광통신망 양자중계기에 적용할 수 있는 양자메모리 구현 연구 진행[27]
- 중국은 냉각원자 앙상블 기반 양자메모리를 활용하여 원거리(실환경망: 22 km, 실험실내: 50 km)의 양자메모리 양자얽힘 상태 생성에 성공[28]

〈표 7〉 양자통신 기술의 국내외 수준 비교

구분	해외 수준	국내 수준	기술 장벽
양자키 분배 (QKD)	• 영국 Toshiba 연구소는 이중 밴드(dual-band) 위상 안정화를 통해 600 km 이상의 장거리 TF-QKD를 구현('21) • 중국 USTC 연구팀은 양자위성 양자통신 링크와 광통신 유선망 기반의 QKD network를 통합한 4,600km 양자네트워크를 실증('21)	• KIST 양자정보연구단이 세계에서 두번째로 다대다 네트워크로 확장 가능한 'TF-QKD' 검증에 성공('21)	• 기존 방식의 한계를 개선한 QKD 거리 확장 • 신뢰노드 없는 다자간 양자통신 네트워크 기술
양자 전송	• 미국 시카고대학 Cleland 교수 그룹은 유선 양자네트워크를 통해 초전도 양자얽힘 큐빗 전송 성공 및 2개의 노드 6개의 큐빗에 6-GHZ 생성 성공('21) • 중국의 Pan 그룹에서는 '16년 발사한 양자암호통신 연구위성 Micius를 활용하여 1,120km 거리에서 얽힘을 이용한 QKD시험 성공('20)[29]	• ETRI는 양자원격전송 프로토콜을 제안하고 다자간 암호통신 가능성 및 분산형 양자컴퓨팅을 구현할 수 있는 가능성 제시('20) • POSTECH은 편광 주파수의 하이퍼 얽힘 광자를 통해 효율적으로 편광 얽힘 정보를 전달하여 장거리 통신 프로토콜 가능성 제시('21)	• 다중 큐빗의 얽힘 구현 • 다자간의 장거리 네트워크 거리 확장 • 상용망 양자 전송
양자 메모리/ 중계기	• 네덜란드는 다이아몬드 점결함 기반의 3-node 양자얽힘 네트워크를 구현하고 양자상태 저장 등 실환경 양자네트워크 구현 가능성을 제시('21) • 유럽은 고체 기반의 두 양자메모리의 예고된 양자얽힘을 구현하여 유선 광통신망 양자중계기에 적용할 수 있는 양자메모리 구현('21)	• 광주과학기술원은 고체 앙상블 양자매질에서 나타나는 스핀 결풀림 현상을 통제함으로써 저장 시간 단축을 극복할수 있는 양자 메모리 프로토콜 제시('19)	• 손실없는 장시간/장거리 저장 및 중계 기술 • 기존 인터넷 연동 기술 • Q-Mux/Demux 등의 양자 라우터
양자 오류정정 부호*	• 중국(USTC, 칭화대)와 영국(옥스퍼드대) 협업으로 12큐비트급 초전도 양자 프로세서를 이용하여 〚5,1,3〛 코드를 실험적으로 구현('21)[30]	• 고려대학교 연구팀이 편향된 오류 기반 양자 오류 정정 부호 최적화 방법 및 장치 고안('20)[31]	• 노이즈 저감 기술 • 오류 정정 부호 최적화

* 양자 상태 및 양자 정보를 효율적으로 생성 및 전송하기 위한 이론

26) M. Pompili, et al. (2021), 「Relization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits」.
27) D. Lago-Rivera, et. al. (2021), 「Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories」.
28) Y. Yu, et al. (2020), 「Entanglement of two quantum memories via fibres over dozens of kilometres」.
29) J. Yin, et al. (2020), 「Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres」.
30) M. Gong, et al. (2022), 「Experimental exploration of five-qubit quantum error-correcting code with superconducting qubits」.
31) 인사이트코리아, http://www.insightkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=79547

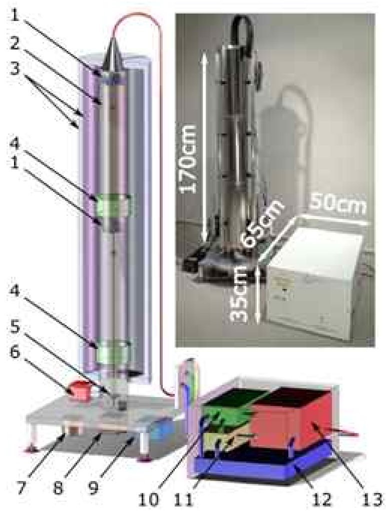
2.3 양자센싱

양자 얽힘이나 압축(Squeezing) 등 양자적 특성을 활용하여 기존 한계* 이상의 정밀도(또는 정확도)를 구현하는 방향으로 연구개발 진행

* 표준양자한계(standard quantum limit) 혹은 산탄잡음한계(shot-noise limit)[32)]

- (관성·중력) 주로 원자-광자간 상호작용을 통하여 중력, 가속도, 회전 속도를 측정하며, 소형화 및 저전력화에 대한 연구가 진행되는 중으로 국방 기술에 응용 가능성이 높음
  - 주로 원자간섭계 기반의 관성 센서 연구가 활발히 진행되고 있으며, 양자 중력계는 운항 중 측정 가능한 형태의 자원탐사, 지진 및 화산활동 감지 등 분야에 활용을 기대
  - 최근 원자간섭계 기반으로 양자투영한계(quantum projection limit)까지 측정 가능한 소형의 중력구배* 및 중력 측정기를 산업용 시제품 형태로 개발[33)]

    * 중력의 변화량으로 중력의 미분치(Gravity-gradient)를 의미



[그림 2] 시제품 형태의 중력 측정기

  - 국내 ADD/한화 연구팀은 회전을 측정하는 관성센서로 원자 스핀 자이로스코프를 구성하고, 회전에 따른 주파수 이동의 환산계수(scale factor)를 측정[34)]
  - GIST는 기존 대비 4배 향상된 퀀텀 자이로스코프를 개발하였고[35)] KRISS는 실험실에서 세계 최고 수준의 중력계를 구현 및 발표 예정

---

32) https://wiki.quist.or.kr/index.php/양자_센서_(Quantum_Sensor)의 2.3.1 항목 참고.
33) C. Janvier, et al. (2022), 「Compact differential gravimeter at the quantum projection-noise limit」.
34) H. Yu, et al. (2020), 「Measuring scale factor of atomic spin gyroscope and closed-loop operation」.
35) B. S. Ham, (2021), 「A nonclassical Sagnac interferometer using coherence de Broglie waves」.

- (전·자기장) 초고해상도 수준의 자기장 센서(자력계)는 성숙된 연구 분야로 생체자기장 등 활용 연구가 많으며, 최근 고체불순물* 기반 자기장 센서가 새로운 연구의 주류

  * 다이아몬드 NV(nitrogen vacancy)를 이용해 1 pT·Hz$^{-0.5}$ 이하의 자기장 민감도 달성 목표

  - 원자자력계 및 초전도 간섭계기반 자력계(SQUID*)는 기술성숙도가 높아 혁신적인 기술 개발보다는 생체자기장 측정을 통한 뇌기능 연구 등 활용성을 이용한 연구가 주된 분야

    * Superconducting Quantum Interference Device: 초전도체를 이용한 초전도양자간섭소자

  - 미국, 일본, 중국 등은 정확도 및 감도를 높이는 다이아몬드 NV 기반 자기장 센서 이론 확립 및 소형화/제품화 연구를 수행하고, 유럽에서는 소재 개선 연구를 수행

  - 고려대학교는 그래핀 점 접촉 주변 전류흐름을 나노미터 수준으로 측정하였고[36], KRISS는 자기장과 온도를 동시에 측정하는 다이아몬드 NV 센서를 개발[37]

  - 전기장 센서는 최근 리드버그 상태의 알카리원자를 이용한 원자기반 방식이 연구되고 있으며 감도, 넓은 주파수, 위상 측정 등이 가능하여 응용 범위가 점차 확대되는 추세[38]

- (시간·주파수) 빛을 매개로 한 두 양자상태의 중첩과 간섭을 이용하여 시간·주파수 측정하는 기술로 원자시계는 통신, 항법, 자원탐사 등 넓은 응용 분야에 상용화된 제품이 존재

  - 미국 NIST는 거대 연구 그룹을 형성하여 이광자시계 및 광주파수 합성 칩 등 원자분광 시스템의 칩스케일 소형화 연구를 수행

    * NIST, Caltech, EPFL, HRL, Aurrion Inc., UC Santa Barbara, Yale 대학 등

  - KRISS*는 Yb 원자를 기반으로 광주파수 영역에서 2×10^{-17}의 세계적 수준의 불확도를 가진 실험실형 광시계를 완성하고 세계협정시 생성에 참여 및 2세대 연구 시작[39]

    * 나노종합기술원,넵코어스와 컨소시움 구성하여 최초로 원자 증기셀 및 초소형 원자시계 구현
    ※ 2세대 이동형 광시계 목표: 총 불확도 1.4×10^{-18} (세계 최고 수준)

- (광·이미징) 빛의 양자 특성을 이용하여 고전물리의 범주를 벗어나는 초고분해능, 표준양자 한계 이상의 감도 등으로 측정하여 MRI, 현미경 등에 궁극적으로 활용되는 것이 목표

  - 고품질의 양자광 생성, 결풀림 및 광손실을 포함하는 노이즈에 대해 내구성이 높은 이미징 방법론 개발, 위상 측정 감도 향상 등의 기존 성능을 향상시키는 방향으로 연구

---

36) M. Lee, et al. (2021), 「Mapping current profiles of point-contacted graphene devices using single-spin scanning magnetometer」.
37) J. Shim, et al. (2022), 「Multiplexed Sensing of Magnetic Field and Temperature in Real Time Using a Nitrogen-Vacancy Ensemble in Diamond」.
38) M. JING, et al. (2020), 「Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy」.
39) H. Kim, et. al. (2021), 「Absolute frequency measurement of the 171Yb optical lattice clock at KRISS using TAI for over a year」.

- 유도 방출 없이 양자 유도 결맞음(Induced coherence)을 이용한 양자 이미징과 이광자 흡수 이미징 등의 얽힘 상태의 빛을 이용한 비접촉 이미징 방법론 연구 활발
- 최근 새로운 양자이미징 방법론으로 QIUP(quantum imaging with undetected photon)가 제시되어 작동 안정성 및 효율 향상, 홀로그래피 활용연구 등이 보고[40]
- KIST는 다중모드 상태를 높은 정밀도로 측정하는 센서를 구현하였고[41], 부산대는 양자 얽힘 광원 개발을 성공하고 최초로 유도 결맞음 실험을 구현[42]
- ADD는 미래 양자레이더 개발을 위한 원천기술 중 하나인 자성체 기반의 양자 주파수 변환 기술 개발에 성공[43]

〈표 8〉 양자센싱 기술의 국내외 수준 비교

방식	해외 수준	국내 수준	기술 장벽
관성·중력	• 주요국은 양자 중력센서의 정확도·감도를 높이기 위한 연구 수행	• KRISS는 실험실 환경에서 정확도 50nm s^{-2}, 감도 80 nm s^{-2} $\tau^{-1/2}$ 수준의 양자 중력센서 구현	• 현장(Field)에서 측정 가능한 중력센서의 상용화 및 선박, 항공기, 잠수함 등에 탑재 가능한 정확도 향상
전·자기장	• 중국은 상온의 세슘 기체셀에서 비고전적 squeezed 빛을 이용하지 않고 현존하는 센서보다 1,000배 이상 민감한 전기장 센서 개발	• 부산대는 민감도 200 fT·$Hz^{-0.5}$ 수준의 원자자력계 기술 확보 • KRISS는 다이아몬드 앙상블 NV를 이용해 자기장 민감도 70 pT·$Hz^{-0.5}$, 온도 민감도 25 uK·$Hz^{-0.5}$ 동시 달성 • KRISS는 SQUID 기반 뇌자도/심자도 측정기술을 국외(호주 Compumedics), 국내(AMCG) 기업에 기술이전('21)	• 공간 분해능 개선 및 외부 자기장 환경에서의 자기장 감도 개선 등에 대한 전제적인 원천 기술 개발 연구
광·이미징	• 중국 연구진은 유도 방출 없이 유도된 결맞음을 기반으로 한 양자 이미징 실험을 제시 • 이광자 흡수(ETPA: entangled two photon absorption) 매커니즘에 대한 이론 연구 수행	• 부산대는 원자앙상블에서 생성된 고품질 양자얽힘 광원 개발을 성공하고, 이를 확장하여 4광자 양자얽힘 광원 개발에 성공('19) • KIST는 다중모드 N00N 상태를 이용하여 간섭계의 3개의 위상을 동시에 가장 높은 정밀도로 측정하는 데 성공('21)	• 기존 방식 대비 새롭게 제안된 기법에 대한 이론 연구, 작동 안정성 및 효율을 높일 수 있는 실험 연구 필요
시간·주파수	• 마이크로칩테크놀로지는 극한 환경에서의 정확한 타이밍 정확도 및 안정성을 제공하는 칩 스케일 원자 시계 SA65 CSAC 출시('21)	• KRISS의 이터븀 광시계는 전세계 시간의 기준이 되는 세계협정시 생성에 참여하여 프랑스·일본·미국·이탈리아 이어 전 세계 5번째로 기여('21)	• 낮은 오차를 가진 원자시계의 칩 스케일화

40) S. Töpfer, et al. (2022), 「Quantum holography with undetected light」.
41) S. Hong, et al. (2021), 「Quantum enhanced multiple-phase estimation with multi-mode N00N states」.
42) J. Park, et al. (2019), 「Polarization-entangled photons from a warm atomic ensemble using a Sagnac interferometer」.
43) 국방과학연구소 (2022.4.5.), 「자성체 기반의 양자 주파수 변환 핵심기술 개발」.

제3장 산업동향

양자컴퓨팅 분야는 기 발간된 범용양자컴퓨터(2019-19호) 이후 최신('20년~) 산업 동향 위주로 기술함

3.1 양자컴퓨팅

(IBM, 미국) 초전도 양자컴퓨팅 서비스를 클라우드로 제공(IBM Q)하고, 새로운 모듈식 아키텍처와 네트워킹에 대한 양자 컴퓨터 실용화 로드맵 발표

- IBM Q 네트워크를 구축(180여개 유료 회원) 및 대륙별 연구허브를 선정·지원하여 IBM 중심의 양자컴퓨팅 기술 생태계 구축에 집중하고, 수집된 데이터는 연구개발에 활용 중

- '23년까지 1,121큐비트 양자컴퓨팅 시스템(초전도 방식) 개발 계획을 발표('20.9)하고, '25년까지 4,000큐비트 이상급 단일 양자 프로세서 개발 계획을 발표('22.5)[44)]

  - '21년 127큐비트 '이글 프로세서' 를 공개·운용하고 있으며, '22년 하반기에는 로드맵에 따라 433큐비트 '오스프리 프로세서' 발표 예정

    ※ '20년 65큐비트(허밍버드) → '21년 127큐비트(이글) → '22년 433큐비트(오스프리) 예정

  - '23년 서버리스 접근법 도입, 범용 양자프로세서(1,121큐비트, 콘도르) 개발 및 '25년 모듈식 프로세서로 여러 클러스터를 연결*해 4,000큐비트 이상의 프로세서 개발 목표

    * 양자프로세서 확장성을 위해 병렬 연결, 단거리 연결 장치(커플러) 배치 및 양자통신 링크 방식

(구글, 미국) 54큐비트 시카모어 초전도 프로세서로 양자우월 증명('19.10) 이후 성능 고도화 중이며, 상용 양자컴퓨터 개발 목표를 제시('21.5)

- 오류보정을 통한 성능 고도화, NASA 공동연구('17), 양자기계학습툴(Tensorflow Quantum) 개발('20) 등을 추진 중이며 '21년 Quantum AI Campus 개소('21.5)[45)]

---

44) Quantum AI, https://quantumai.google/hardware/our-lab
45) 지디넷코리아, https://zdnet.co.kr/view/?no=20220513103613

- '29년까지 100만 큐비트(1,000 논리 큐비트)를 가지는 범용 양자컴퓨터 구축 목표
- 오류정정 코드를 구성하는 물리 큐비트 숫자가 증가함에 따라 오류가 지수함수적으로 감소하는 것을 54큐비트 시카모어 프로세서를 활용하여 확인('21.8)[46]

● 상업용 양자컴퓨팅 도구 등을 개발하는 SW 스타트업 샌드박스(Sandbox AQ)를 구글로부터 분사하고, 구글의 전 최고경영자(CEO) 에릭 슈미트를 이사장으로 초빙('22.3)[47]

(인텔, 미국) QuTech(和)과 공동으로 반도체 양자점 방식을 지속 연구하여 양산 가능성을 확인하고, SW를 포함한 Full-stack* 접근 방식을 연구

* 칩, 시스템, 소프트웨어, 클라우드 서비스 등 모든 솔루션을 포함

※ 초전도 방식 'Tangle Lake' 49큐비트 칩을 구축했지만 현재는 스핀 큐비트(양자점)에 집중

● 인텔의 공정기술로 칩을 제조하면 QuTech에서 칩의 성능분석을 수행하는 형태의 협업

- 반도체양자점 방식은 단위 면적당 큐비트 수에 이점을 가지며, 수년간 최적화된 인텔의 반도체 공정장비를 그대로 사용하여 300nm 웨이퍼 양산 가능성을 확인('22.4)[48]
- 자체 SDK(소프트웨어 개발 키트) 개발 등 Full-stack을 연구하고 있으며, 미국 아르곤 국립 연구소(ANL)에 양자컴퓨팅 테스트 베드를 '22년 말까지 제공 발표[49]

● 양자컴퓨터용 미래 암호 기술 개발을 위한 '크립토 프론티어 연구센터(Intel Crypto Frontiers Research Center)' 설립을 발표('21.8)[50]

(리게티, 미국) Full-stack 양자컴퓨팅 업체를 지향하며 '26년까지의 4,000 큐비트 로드맵을 발표하였으나, 최근 개발 일정을 수정·발표('22.5)

● '20년 31큐비트 초전도 프로세서 Aspen-8을 발표한 후 '21년 12월 40큐비트 프로세서 두 대를 함께 모으는 새로운 모듈식 디자인을 기반으로 80큐비트 시스템을 발표[51]

- 이후 발표한 일정에서는 1~2년 연기한 '25년 말에 약 1,000큐비트의 시스템이 준비되고, '27년 또는 그 이후에 4,000큐비트의 시스템을 보유할 것으로 예상[52]

---

46) Google AI Blog, https://ai.googleblog.com/2021/08/demonstrating-fundamentals-of-quantum.html
47) 블로터, https://www.bloter.net/newsView/blt202203230017
48) 디일렉, https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=16683
49) 사이언스모니터, http://scimonitors.com/인텔-풀스텍-양자컴퓨터-개발-주요-전략/
50) IT조선, http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2021/08/26/2021082602354.html
51) https://arstechnica.com/science/2021/06/quantum-computing-startup-rigetti-to-offer-modular-processors/
52) The Quantum Insider, https://thequantuminsider.com/2022/05/18/rigetti-pushes-back-roadmap-on-development-of-1000-qubit-4000-

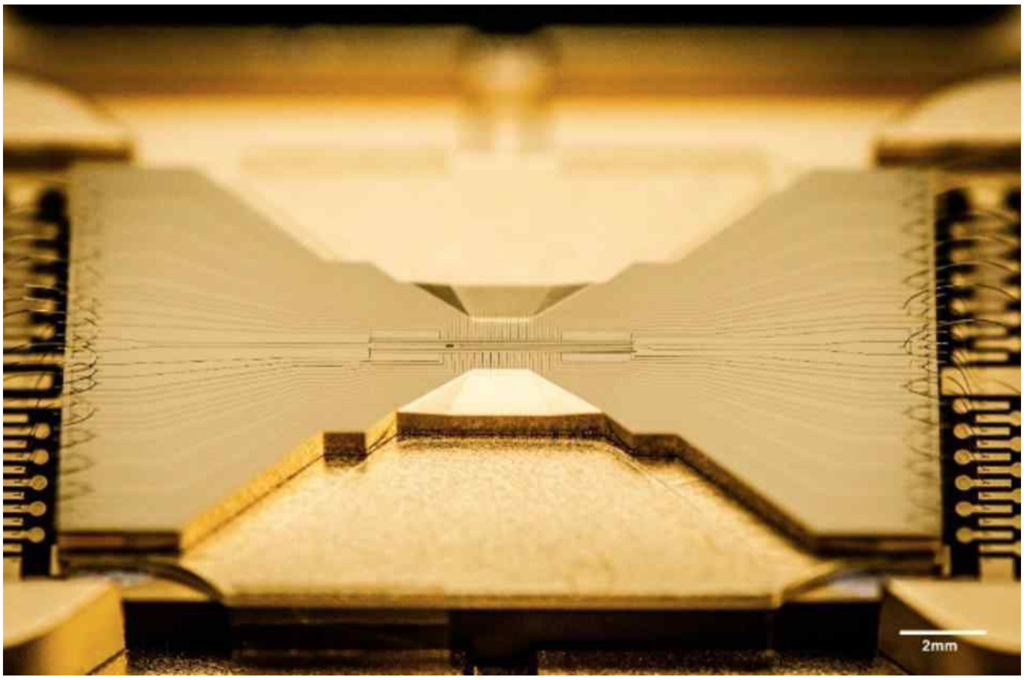
(IonQ, 미국) 메릴랜드 대학의 크리스 먼로와 듀크 대학의 김정상 교수가 공동 창업('15)한 이온트랩 양자컴퓨팅 회사로 양자 이점 로드맵 발표('20.12)

※ MS와 Google, Amazon을 통해 11큐비트 양자컴퓨팅 클라우드 서비스 제공 중

- '20년 새로운 벤치마크 도입과 이를 활용한 '28년까지의 양자 이점 로드맵을 발표
  - 실제 환경에서의 유용성 평가를 위해 알고리즘 큐비트(Algorithm Qubit, AQ) 제안
  - 기 출시한 99.9% 충실도의 32큐비트 시스템은 22개의 알고리즘 큐비트가 포함
  - 로드맵 공개와 함께 AQ 40큐비트에 도달하자마자 기계 학습에서 양자 이점을 볼 수 있고 72큐비트에서 양자 이점을 상당히 광범위하게 수행하기 시작할 것으로 예측

    ※ '21년 22큐비트→'23년 29큐비트→'25년 64큐비트→'26년 256큐비트→ '28년 1,024큐비트

- '22년 자사 최신 양자 컴퓨터 Aria는 20개 알고리즘 큐비트 달성을 발표[53)]
  - 벤치마킹 결과 정확도가 높으며 550개 이상의 게이트 포함 양자 회로를 성공적 실행
  - '23년 네트워크로 연결되는 일반 데스크톱 사이즈의 모듈식 양자 컴퓨터 도입 목표



[그림 3] 이온트랩 기반 32큐비트 프로세서

53) https://thequantuminsider.com/2022/02/25/ionq-aria-achieves-record-20-algorithmic-qubits/

(Quantinuum, 미국) Honeywell 퀀텀 솔루션이 이온트랩 기반 SW 회사 COC*와 합병하여 새로운 회사 Quantinuum를 구성('21.6)

* Cambridge Quantum Computing

- '20년 10큐비트 이온트랩 프로세서 시스템 모델 H1을 발표하고, 양자볼륨 128 달성

※ 게이트 신뢰도 > 99.97%(single-qubit gate), 99.95%(two-qubit gate)

- 이온 포획 QCCD(quantum charge-coupled device) 양자컴퓨터에서 7개의 물리큐비트를 이용한 반복적 오류측정 및 보정을 수행한 최초의 연구 결과 발표('21.7)[54]

- '21년 12월 발표한 시스템 모델 H1-2은 양자 볼륨 2,048을 통과하였으며, 4개월 뒤 완전히 연결된 12개의 큐비트를 모두 사용하여 양자 볼륨 4,096을 통과('22.4)

※ 게이트 신뢰도 > 99.994%(single-qubit gate), 99.81%(two-qubit gate)

- 기 제시된 '30년까지 로드맵 달성을 목표로 모델 H1의 클라우드 서비스 제공

※ '20년 양자 볼륨 128→'21년 양자 볼륨 2,048 →'22년 양자 볼륨 4,096

(기타) 대형 IT기업은 클라우드 서비스를 양자컴퓨팅 회사를 연결하거나 자체 연구조직을 신설하고 있으며, 다양한 스타트업이 최근까지도 활발히 설립되는 중[55]

- (마이크로소프트, 미국) 최적화 알고리즘, 양자프로그램 개발환경 제공 및 컴퓨팅회사 연결

- (아마존, 미국) 양자컴퓨팅 서비스 '아마존 브래킷'을 출시 및 양자컴퓨팅 조직 신설

- '21년 내결함성 양자컴퓨팅 구축을 목표로 Caltech에 새로운 시설 오픈

- (D-wave System, 캐나다) 양자 어닐링 방식을 사용하는 세계 최초 128큐비트 양자컴퓨터(D-wave1)을 출시하였고 구글, NASA, 폭스바겐, 록히드마틴 등 선두 그룹에서 사용

- (Xanadu Quantum Technology, 캐나다) 광자 양자컴퓨터(Borealis)로 양자컴퓨팅 이점을 달성한 최초의 스타트업으로, '22년 6월 공용 클라우드 서비스 출시[56]

- (후지쯔, 일본) 세계 최고 슈퍼컴퓨터 제조업체인 후지쯔는 초전도 양자컴퓨터 공동개발* 계획 발표('20.10) 및 이화학연구소에 협업 센터 개소('21.4)

* 이화학연구소(RIKEN), 도쿄대학교, 델프트대학교(네덜란드) 참여

---

54) C. Ryan-Anderson, et. al. (2021), 「Realization of real-time fault-tolerant quantum error correction」.
55) 한국과학기술정보연구원 (2021), 「양자기술 과학·기술·산업 분석」.
56) https://thequantuminsider.com/2022/06/01/xanadu-launches-first-public-cloud-deployed-computer-with-quantum-computational-advantage/

- 최대 1,000 큐비트 양자컴퓨터 구현을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 기술 개발

- (알리바바, 중국) '20년 양자컴퓨터 연구개발전문조직 Alibaba DAMO Academy 설립 및 개방형 양자회로 시뮬레이터 ACQDP* 공개

  * Alibaba Cloud Quantum Development Platform

- (퀀트웨어, 네덜란드) 델프트공과대학교 산하 연구 기관의 스핀오프 스타트업 퀀트웨어는 초전도 방식 25큐비트 QPU '콘트랄로' 생산 기술 개발 성공을 발표('22.3)[57]

  - '21년 개념증명(PoC)에 따라 정확도 99.9%에 도달한 5큐비트 프로세서를 출시한 바 있으며, 주문 후 30일 내 콘트랄로 제작 및 판매하는 것이 가능

〈표 9〉 플랫폼별 양자컴퓨팅 스타트업 동향[58]

플랫폼	기업명	설립	국가
초전도체	Anyon Systems	'14년	캐나다
	EeroQ	'16년	미국
	Bleximo	'17년	미국
	Oxford Quantum Circuits	'17년	영국
	Quantum Computing Inc	'18년	미국
	IQM	'18년	핀란드
	Nord Quantique	'20년	캐나다
이온트랩	Alpine Quantum Technologies	'18년	오스트리아
	Quantum factory	'18년	독일
	Oxford Ionics	'19년	영국
	EleQtron	'20년	독일
냉/중성 원자	ColdQuanta	'07년	미국
	Atom Computing	'18년	미국
	QuEra Computing	'18년	미국
	PASQAL (Qu&Co('17년 설립, 네덜란드)와 합병)	'19년	프랑스
반도체양자점	Silicon Quantum Computing	'17년	호주
	Equal1 Laboratories	'17년	아일랜드
	Quantum Motion	'17년	영국
광자	PsiQuantum	'15년	미국
	ORCA Computing	'19년	영국

57) 코딩월드뉴스, https://www.codingworldnews.com/news/articleView.html?idxno=8312
58) 양자정보연구지원센터, http://www.qcenter.kr/bbs/board.php?tbl=bbs52

(국내) 일부 대기업이 외국과 협력 연구 중이며, 국내 1호 스타트업 설립

- 삼성종합기술원 내에서 IBM과 협력 연구를 유일하게 수행중이며, KAIST에서 '21년 국내 최초로 양자컴퓨팅 SW와 AI를 기반으로 솔루션을 제공하는 스타트업 큐노바 설립[59)]

3.2 양자통신

(국외) 각 국별 통신사의 QKD 네트워크 및 테스트베드 구축을 위한 R&D 투자와 함께 암호통신 서비스를 통한 글로벌 시장 주도권 확보 경쟁 중

- (Quantum Xchange, 미국) '18년 10월 워싱턴-뉴욕시-뉴저지간 19개소 약 1,000km에 대해 양자암호를 이용한 암호통신 서비스 중

- (화웨이, 중국) '16년 독일 뮌헨에 양자연구소를 설립하고, '18년 상용 광통신망에 양자암호를 적용하는 필드 시험을 수행

- (QuantumCTek, 중국) 중국 과학기술대학에서 '09년 창립하였으며, 양자암호통신 장비 및 양자 신호 생성 및 검출 관련 상용 제품을 개발하여 자국에 판매

- (NICT, 일본) 국가정보통신기술연구소(NICT)에서는 NEC, 미쯔비시 및 NTT 등이 참여하여 국가시험망(JGN)을 기반으로 실용 수준의 QKD 기술과 네트워크 응용을 개발 중
  - '10년 Tokyo QKD Network 구축 및 국가시험망을 활용하여 양자키 생성 및 안정성 검증과 키 관리 계층 적용
  - '17년 마이크로 위성 '소크라테스'를 활용한 우주-지상 간 양자암호키 분배 실험에 성공
  - NEC, 도시바 등 양자 연구 선두주자는 고성능 QKD 시스템 및 양자 소자 연구 진행

- (EU) 4개 국가(베를린(독일), 마드리드(스페인), 제네바(스위스), 비엔나(오스트리아))를 중심으로 양자통신 인프라 시험망을 구성 및 QKD 시범망 추진
  - 이탈리아는 토리노~피렌체(650km)구간 QKD 테스트베드 구축('17)

- (British Telecom, 영국) UK Quantum Network 프로젝트로 125km 상용등급 양자 네트워크 테스트베드 구축('19)

---

59) 큐노바, https://qunovacomputing.com

- (IDQuantique, 스위스) QKD 시스템, 단일 광자 카운터 및 난수생성기 등을 제품화한 양자 암호통신장비 세계 1위 기업으로 SKT에 인수('18)

(국내) SKB는 세계 최초로 800km 국가 기간통신망 양자암호기술 적용에 성공했으며, KT는 1km 구간 무선 양자암호 전송기술 확보

- (SKT) IDQ의 최대주주 지분을 취득하면서 본격적으로 제품개발 및 상용화 추진 중
  - '16년 세계 최초로 상용 LET망 유선구간(세종~대전 구간)에 양자암호통신 기술을 적용하여 운영하고, '20년 5G 전송망에 QKD로 보안을 강화(서울-대전-대구 380km)
  - '17년 양자난수생성 칩 시제품 개발 성공 이후 '18년 3월 스위스 IDQuantique 인수
  - '20년 세계 최초 양자난수생성(Quantum Random Number Generator) 칩 상용화
    ※ 기존 QRNG 칩 사이즈: 2.5mm x 2.5mm x 0.8mm
  - '22년 5월 국내 암호분야 기업들(비트리·KCS·옥타코 등)과 함께 양자난수생성 기술로 보안을 강화한 제품을 개발, 국방·공공 시장 및 글로벌 시장에 진출 발표[60)]
  - '22년 6월 SKB는 30여개의 양자중계기로 연결된 800km 전국망 양자암호망 구성[61)]
- (KT) KIST와 공동으로 양자통신 응용연구센터를 설립하고 양자암호통신 실용화 연구 수행
  - '17년 (서울~수원 구간 46㎞) 일대일 구조 양자암호통신 시험망을 구축·운영 및 '18년 세계 최초로 10km 1대 4 다자간 양자통신 10km 구간 시험망 구축 성공
  - '18년 자체 기술로 연구용 QKD 시스템을 개발하여 '20년 민간(코위버, 우리넷)에 기술 이전을 진행하고, 공공부문 양자통신 실증연구 및 양자암호통신 표준화 선도 중
  - '22년 5월 최초로 국내 최장 거리인 1㎞ 구간에서 무선 양자암호 전송에 성공[62)]
- (LG 유플러스) IoT 단말용 양자보안칩 개발 및 양자내성암호(PQC) 기술력 확보('21.8)
  - '22년 4월 PQC가 적용된 광전송장비를 통해 해킹이 불가능한 전용회선 최초 출시[63)]
- (이와이엘) '21년 3월 KT와 공동으로 양자암호 활용 일반 스마트폰 간 통화 도청방지 기술 개발 및 10월 세계 최초로 양자난수를 활용한 도청방지 솔루션을 상용화[64)]

---

60) 뉴스와이어, https://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=945109
61) 지디넷코리아, https://zdnet.co.kr/view/?no=20220608084137
62) 동아사이언스, https://m.dongascience.com/news.php?idx=54259
63) 지디넷코리아, https://zdnet.co.kr/view/?no=20220420222806
64) 동아사이언스, https://www.dongascience.com/news.php?idx=44623

3.3 양자센싱

국방, 자원탐사 활용에 기대가 큰 원자시계, 중력·자기장 센서 등 상용화에 가까운 센서는 스타트업 및 다국적 기업에서 산업화 초기 연구 진행 중

- (록히드마틴, 미국) NV 기반 양자 자기장센서 및 양자레이더 이용 항법시스템 개발 중
- (AO Sense, Cold Quanta, 미국) 정밀 항법, 중력 측정 등에 활용을 위한 휴대용 양자중력계 개발 및 냉각원자를 이용한 GPS 없는 Quantum Positioning System 개발 수행
- (Bosch, 독일) 자동차부품 전문회사로 네비게이션용 NV기반 양자자이로스코프 및 자기장 센서를 개발하고 나이트 비전용 양자이미징센서 등을 개발 중
- (Qnami, 스위스) '17년 설립된 스타트업으로 NV기반 나노스케일 이미징 시제품 상용화

〈표 10〉 국가별 양자센싱 기업 동향

기업명	내용	기업명	내용
Lockheed Martin(미국)	양자 레이더, 양자 자기장 센서 이용 항법 시스템 개발 중	Honeywell (미국)	초소형 원자 가속도계 개발 중
AOSense (미국)	휴대용 중력계 상용화	Quspin (미국)	원자기반 양자 자기장 센서
ColdQuanta (미국)	GPS 없는 Quantum Positioning System 개발 중	TwinLeaf (미국)	원자기반 양자 자기장 센서
Bosch (독일)	NV 센터 기반 휴대용 양자 자기장 센서 개발	SQUTEC (독일)	내시경과 결합하여 심자도 측정 자기장 센서
M Squared (영국)	단일파장 레이저, 초고속 안정화 레이저, 3D 용량 이미징 등 상용화	GWR (영국)	초전도 기반 중력계 상용화
Qnami (스위스)	나노스케일 이미징 시제품 상용화	Sparrow Quantum (덴마크)	단일광자 광원 상용화
MuQuans (프랑스)	레이저냉각 이용 원자시계 상용화, 이동형 중력계 상용화	Oscilloquartz (스위스)	네트워크 동기화 세슘 원자시계 상용화

- 국내는 우리로(단일광자 검출기), SKT(양자 라이다)에서 일부 기술 개발 진행 중이며, KRISS는 ㈜AMCG에 SQUID 기반 96채널급 심자도 측정장치 기술이전 완료('21)[65)]

65) https://www.kriss.re.kr/gallery.es?mid=a10106030000&bid=0002&list_no=3958&act=view

심장 자기장 측정(KRISS)	단일광자 기반 양자 라이다(SKT)
	

[그림 4] 국내 양자센싱 기업 동향

3.4 국제표준화 한국참여 현황

양자컴퓨팅, 통신 분야 표준화에 참여하고 양자백서 발간을 주도적으로 진행

- (양자 백서) 표준화에 앞서 진행되는 국제전기기술위원회(IEC) 백서에 한국 KRISS가 제안한 '양자정보기술'이 채택되어 발간을 완료하고 양자기술 표준화 평가그룹(SEG) 신설[66)]
  - 백서 작성에는 ETRI(의장), KIMM, KAIST 등 국내 10명, 해외 33명이 참여하였고[67)], 표준화관리 이사회(SMB)는 SEG 14(양자기술)의 의장에 ETRI 단장을 선임[68)]
    ※ SEG는 국제표준 개발을 담당하는 표준화 위원회(TC)설립을 위한 준비단계
- ISO(국제표준화기구)/IEC JTC 1(합동기술위원회1) Study Group(SG)를 통해 양자컴퓨팅 표준화 활동 및 QKD의 보안평가방법론 표준화 문서 준비단계 운영
- IEEE(미국전기전자학회) 작업프로젝트(P7130)을 통해 양자컴퓨팅 기술 정의 작업[69)]
- ETSI(유럽전기통신표준화기구) 산하 산업표준그룹(ISG) QKD에 양자암호 표준화 채택
  - SKT는 QKD 기반의 양자암호기술을 유럽 표준으로 제안하여 승인('21.12)[70)]

---

66) https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsList.do?bbs_cd_n=81
67) 국제전기기술위원회(IEC) (2021)「Quantum information technology」.
68) 지디넷코리아, https://zdnet.co.kr/view/?no=20220606100740
69) 미국전기전자학회(IEEE), https://standards.ieee.org/ieee/7130/10680/
70) 전자신문인터넷, https://www.etnews.com/20211209000150

- ITU(국제전기통신연합)-T(전기통신표준화부문)에서는 양자키를 사용하는 장비 간 연결 및 프레임워크 정의 규격 논의 등 양자암호 네트워크 표준화 진행 중[71]
  - 국내 KT, SKT, ETRI, KAIST가 ITU-T의 SG13(네트워크), SG17(보안)에서 활발히 활동하고 있으며, 개발 표준 20개 중 10여건 이상 주 에디터십을 보유[72]
  - '18년 KT가 세계 최초로 개방형 계층구조의 양자암호 네트워크 표준화 착수를 제안하고, '19년 최종 승인 완료 및 ITU 권고안 Y.3800표준으로 명명
  - '19년 10월 기준 KT는 전 세계에서 양자암호통신과 관련해 가장 많은 6개의 표준화 과제와 34건의 기고서 실적을 기록
    ※ ITU-T SG13에서 11건의 기고서를 제출해 4개의 신규 표준화 과제 채택

71) 국제전기통신연합(ITU), https://www.itu.int/itu-t/workprog/wp_search.aspx
72) 융합연구정책센터 (2022),「양자암호통신 기술 현황과 전망」.

제4장 정책동향

4.1 주요국 정책동향

(미국) 세계 최초의 양자법 제정과 종합적 지원정책 마련을 위한 위원회 격상 등을 추진하는 가운데 국가간 양자 기술통제와 기술블록화를 주도[73)]

- ’09년 「국가양자정보과학비전」을 수립하고 정보기관 주도로 대규모 정부 연구개발을 추진하였으며 ’15년 기점으로 대기업의 참여와 다양한 스타트업을 통해 기술개발이 가속화

- ’18년 세계 최초로 「양자법」 제정을 제정하여 조직화된 지원체계를 구축*하고 5년간 12억달러(’19~’23, 1.4조원) 투자 발표 등 전방위적으로 종합 지원을 진행

  * 백악관 직속 국가양자조정실(NQCO), 국가과학기술위원회(NSTC) 산하 양자정보과학소위원회 신설 등

- ’20년 인터넷 시초인 ARPAnet의 파급효과를 양자분야에서 실현하기 위한 양자 네트워크/인터넷 비전* 발표 후 5개 양자정보과학연구센터(MS, 하버드大, 코넬大, 인텔, 록히드마틴 참여)의 설립·지원(7천억원)하는 정책을 발표(’20.8)

  * 양자 네트워크를 위한 전략적 비전(’20.2, NQCQ), 양자인터넷 전략비전(’20.7, 에너지부)

  - 관련 예산확보를 통해 양자인터넷, 양자정보 전송 등 기술개발 및 표준화 준비 착수

- 양자정보과학소위원회는 양자 네트워킹 연구(’21.1), 양자센서 산업화(’22.3) 등 국가 양자 이니셔티브 프로그램의 일부로 추진할 단기 목표를 연달아 발표 중

  - 신규 인재 양성의 중요성과 우수 해외 인재 유입을 정리한 보고서도 발표(’21.10)

- 중국과의 기술패권경쟁에서 승리하기 위해 「혁신경쟁법」을 제정하고, 양자정보를 포함한 10대 분야에 향후 5년간 290억달러(33조원) 투입 발표(’21.6월 상원 통과)

  - ’22년 2월 하원이 「2022년 미국 경쟁법」을 발의·가결하고 양자정보과학 및 양자정보통신을 포함하는 분야의 기술·혁신 경쟁력 강화 등의 내용을 패키지로 포함[74)]

---

73) https://www.quantum.gov/
74) 최창택 (2022), 「미 하원 「2022년 미국 경쟁법」 주요 내용과 시사점」.

- 한편, '18.11월 「수출통제개혁법(ECRA: Export Control Reform Act)」 등 수출관리규정 제·개정(양자컴퓨팅, 극초음속, AI 등)을 통해 양자 기술의 중국으로의 유출을 경계
  - 산업안보국(BIS) 주관으로 '14개 신흥기술 및 기초기반 기술(양자정보 및 양자센싱 기술 포함)'을 상거래 통제 목록에 포함하고, 정기적으로 검토 프로세스를 운영
  - 상무부(DOC)는 암호해독 가능성이 있는 양자 관련 기술 접근 저지 목적으로 중국, 일본, 싱가포르 등 27개 기업을 거래 제한 명단에 포함('21.11)
    ※ Hefei 연구소, QuantumCTek 등 중국 기업 다수 포함
  - 우크라이나 관련 러시아 제재 항목에도 러시아의 양자 유관기관을 포함('22.2)
    ※ Russian Quantum Center(RQC), Moscow Institute of Physics and Technology(MIPT)
- 최근 바이든 행정부는 기존 자문위원회의 기능을 격상하여 백악관 산하에 '국가 양자 이니셔티브 위원회'를 신설하는 행정명령 발표('22.5)[75]
  - 위원회는 백악관 과학기술정책(OSTP) 실장을 비롯해 산업계, 대학 및 연방 정부 대표의 26명으로 구성되며, 미 에너지부에 보고하지 않고 백악관에 직접 보고할 예정

(중국) 최고 지도층의 관심으로 범국가적 차원의 양자분야 투자 확대

- '06년 「국가중장기과학기술발전계획요강(2006~2020)」에서 양자제어를 포함하여 발표하고 양자과학기술 프로젝트를 추진 중이며, 양자 지원을 위한 별도의 법령은 아직 없음
  ※ 중화인민공화국과학기술진보법, 중화인민공화국 과학기술성과촉진에 관한 법률에 따라 관리
- '16년 「제13차 5개년계획」부터 양자를 전략분야로 설정하고 양자통신분야 중대형 프로젝트를 추진하였으며, '21년 「제14차 5개년계획」에도 양자정보기술의 추진을 제시[76]
  - 「14차 5개년계획」에는 양자정보, 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자과학 등이 언급
  - '30년까지 국가전략구현 6대 중대 프로젝트에 양자컴퓨팅, 양자통신을 포함하여 추진 중
    ※ '25년 슈퍼컴퓨터급 양자 시뮬레이터 개발, '30년 500~1,000큐비트급 범용양자컴퓨터 개발
- 연구기관 설립, 인력양성 등 다양한 프로그램을 통해 양자분야에 대한 관심·투자 활발
  - '17년 세계 최대의 양자정보연구소(허페이, 약 13조원 규모)를 설립을 발표하고 '21년 개소하였으며, 중국 최고층은 양자과학기술 발전의 가속화를 지속 강조('20.10)
  - '18~'22년 기간 중 양자기술 분야 1천억 위안(16.5조원)의 투자계획을 발표하였으며, '21년 중국과기대(USTC)를 중심으로 최초 양자 박사과정 개설[77]

75) 동아사이언스, https://m.dongascience.com/news.php?idx=54043
76) 양자정보연구지원센터 (2022), 「국가차원의 양자연구 집중지원 추진체계 분석」.

(유럽) 양자플래그십 프로젝트 추진과 EU 차원의 개발 로드맵을 제시와 함께, 각 국별 특색에 맞는 정책을 개별 발표하여 경쟁적으로 연구역량을 고도화

- '06년 Quantum Europe 프로젝트를 착수한 이래, '16년 산·학·연이 모두 참여한 '양자 선언문(Quantum Manifesto)'과 함께 개발 로드맵을 발표
  - 4개 분야(양자통신, 양자시뮬레이터, 양자센싱, 양자컴퓨팅)로 단계별 중장기 R&D 목표 설정 및 '18년 10월부터 「양자 플래그십 프로젝트」를 통해 10억 유로를 지원 중
  - '2030 Digital Compass'에서 '25년 유럽 첫 양자컴퓨터 개발 목표 제시('21.3)[78)]

- (영국) 높은 수준의 기초과학 기반을 토대로 산업적 성과 창출에 집중하기 위해 2차례 「국가 양자기술전략('15, '19)」 발표와 함께 10년 이상 정부 주도의 투자를 발표
  - '14년 국가양자기술프로그램(The UK National Quantum Technologies Programme)을 출범하고 양자기술에 관한 대형 프로젝트에 총 10억 파운드 투자를 목표
  - 영국연구혁신기구(UKRI)는 38개 신규 양자기술*에 7천만파운드(1,100억원) 투자 계획('20.7)과 상용 양자 컴퓨터 개발에 1천만파운드(약 158억원) 투자 계획을 발표('20.9)
    * 암세포 구별 이미징 기술(Adaptix사-맨체스터대), 양자 컴퓨터용 OS (Riverlane사) 등
  - 양자기술상용화 프로젝트 분야에 5천만파운드의 자금 지원을 추가 발표('21.11) 및 국방부는 민간 Orca Computing의 소형 PT-1 광양자컴퓨터를 인수하여 구축('22.6)[79)]

- (독일) 연방교육연구부(BMBF)는 '양자기술 기초(basic)부터 시장(market)까지' 프로그램('18.9) 및 양자컴퓨팅 로드맵을 발표('21.1)하고 양자연구 지원에 관한 지침 마련('21.3)
  - BMBF, TRUMPF사 및 프라운호퍼 연구협회는 공동의 양자컴퓨팅 이니셔티브를 제안
  - '21년 향후 5년 내에 자체 기술에 기반한 양자컴퓨터 구축 등 양자 기술 분야 연구개발을 위해 20억 유로 규모의 투자계획을 추가 발표[80)]

- (네덜란드) 전문연구기관 QuTech 설립으로 연구역량 고도화 및 기업의 투자·협력 진행
  - 델프트대학과 응용과학연구기구(TNO)가 공동 설립한 QuTech을 중심으로 네덜란드 정부기관('15), 인텔('15) 및 마이크로소프트('16)로부터 연구비 지원 및 공동 개발
  - 초전도, 반도체양자점, 위상 양자, 다이아몬드 점결함 등 여러 가지 양자컴퓨팅 하드웨어 플랫폼을 참여 산업체별 동시에 연구 개발 중

---
77) KOSTEC (2021), 중국 과학기술 정책 주간동향, 2021-27호, 2021.12.10.
78) European Commission, 「2030 Digital Compass」.
79) BBC NEWS, https://www.bbc.com/news/technology-61647134
80) 연방교육연구부 (2021.05.11.) 「Mit großen Schritten zum Quantencomputer 'Made in Germany'」.

(일본) 양자컴퓨팅과 관련된 기초과학 위주의 개별 프로그램 투자 중심에서 국가 차원의 전략을 마련하고 미국 중심의 기술 블록화에 적극 동참

- '10년 정보통신연구기구(NICT)가 양자기술 개발을 시작한 후 본격적인 양자기술 개발을 위해 '16년 양자과학기술을 총괄할 연구법인 양자과학기술연구개발기구(QST)를 설립
  - 대규모 국가연구과제 단위가 아닌 개별연구 형태로 추진되어 왔으나, 양자컴퓨터 분야는 동경대-RIKEN 중심으로 대규모 연구개발을 추진
  - 양자 중계 기술(양자 메모리, 양자얽힘 등) 및 네트워크화 기술 확보 추진
  - FIRST('09-'13), ImPACT('14-), ERATO('16-'21) 등 다양한 연구개발 프로그램이 진행
- 국가차원의 전략을 지속적으로 발표하면서 국가전략기술과 연구목표를 선정하고 투자
  - '16년 제5기 과학기술기본계획을 발표하면서 양자기술을 우선순위에 포함하였고, 별도의 양자지원법 마련 대신 과학기술혁신기본법을 개정하여 연구개발을 지원('21.4 시행)
    ※ AI, 바이오, 양자를 3대 국가 전략기술로 선정하여 지원
  - 양자과학기술의 새로운 전개방안('17.2), 광·양자 퀀텀도약 플래그십(Q-LEAP)('18), 양자혁신전략('20.1) 및 문샷 프로그램('20.2)을 잇달아 발표[81]
    ※ 기술로드맵, 양자 혁신거점 지정, '30년까지 NISQ양자컴퓨팅 시스템 개발, '50년까지 오류정정 범용양자컴퓨터 확보 등 다양한 목표를 제시하고 연구개발 추진 중
  - '21년 경제안보 관련 첨단기술 분야(AI·양자컴퓨터 등 군사화가 쉽고 안보 직결 분야 대상)에 1,000억엔(약 1조원) 규모의 대규모 기금 창설 결정 후 '22년 운용을 목표
  - 도요타, 도시바 등 24개 산업체를 중심으로 양자기술 협의체(Q-STAR) 창립('21.9)[82]
  - 장래 국가 간 패권 다툼의 중핵이 될 중요 기술로 양자를 규정하고 양자 기술 연구·지원 거점 및 일본산 양자컴퓨터 1호기 정비 등 국가 성장전략 원안 마련 준비('22.4)[83]
    ※ 30년까지 양자 기술 이용자를 1천만 명 수준으로 확대하며 양자 기술을 이용한 생산액을 50조엔(약 493조원) 규모로 육성한다는 목표도 원안에 반영
- 한편, 미국과 함께 현대판 COCOM* 구축을 검토하는 등 양자기술 블록화 정책에 동참
  * 1949년 서방 국가들이 구소련 등 공산권 국가의 군사력 강화로 이어질 수 있는 기술의 유출을 막기 위해 설립되어 전략 물품 수출을 통제한 체제
  - 미국·日 量子협력에 관한 도쿄 성명 발표('19.12) 후, 미·일 정상회담('21.4) 의제로 논의한 바 있으며, 양자암호통신·반도체·인공지능(AI) 등 구체적 대상 품목은 조율 중[84]

---

81) 한국과학기술기획평가원 (2019), 「양자정보과학,」 과학기술&ICT정책·기술 동향.
82) FUJITSU, https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2021/0901-01.html
83) 연합뉴스, https://www.yna.co.kr/view/AKR20220407047400073
84) 조선일보, https://www.chosun.com/international/japan/2022/01/11/FHVO4SYU35BVXPNVLOKCBMMVBQ/

4.2 국내 정책동향

'21년 4월 범부처 「양자기술 R&D 투자 전략」을 발표하고 '21년 10월 국가과학기술자문회의 산하 양자기술특별위원회를 구성하여 운영 중[85)]

※ 양자기술 연구개발 투자전략 후속조치로 국가과학기술자문회의법(제7조) 및 동 법 시행령(제10조), 과학기술자문회의 시행세칙('21.10.19. 개정)에 의거 설치

- '14년 12월 과학기술정보통신부에서 양자정보통신 중장기 추진전략을 최초 마련한 이후, '16년 '양자정보통신 중장기 기술개발사업'에 대한 예비타당성조사가 '18년 최종 실패
  - 이후 정보통신기획평가원(IITP)는 「ICT R&D 기술로드맵 2025」을 통해 '35년까지 양자컴퓨팅, 양자통신 및 양자센싱/계측 분야 기술로드맵과 기술개발 전략을 발표('20)[86)]
- '21년 양자 R&D 후발국으로서 효율적 투자 추진을 위한 추격형 R&D 투자전략 마련
  - 2030년대 양자 기술 4대 강국 진입을 위한 비전을 제시하고 양자컴퓨팅, 양자통신 및 양자센싱 분야별/단계별 연구개발 추진목표를 발표
  - 도전적 원천 연구 강화, 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축, 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화, 양자 기술의 활용 및 산업혁신 촉진, R&D사업 투자 전략성 강화 등

〈표 11〉「양자기술 R&D 투자 전략」의 단계별 추진 목표

단계	목표	주요 내용
1단계 (2021~2024)	인력 양성, 요소 기술 개발 등 기반 마련	50큐비트급 양자프로세서 확보
		초소형 유선양자암호통신 확보
		요소기술(공간해상도, 정밀도 등) 고도화, 소형화
2단계 (2025~2030)	학문적·산업적 활용 가능성(성공사례) 입증	NISQ 양자컴퓨팅시스템 확보
		초고속·정밀 무선양자암호통신 (양자 드론·항공기) 확보
		양자센서 산업(반도체, 의료) 활용
2단계 (2031~2035)	양자기술 상용화 본격 추진	오류정정 범용양자컴퓨터 확보
		양자인터넷 기술 확보
		양자센서 응용영역 확대(초장거리 망원경, 양자현미경 등)

* 출처 : 과기정통부 (2021), 양자기술 연구개발 투자전략(안) 참고하여 재구성

- 양자기술특별위원회는 양자기술의 체계적 육성 전략을 마련 및 이행하기 위해 4개 기술(컴퓨팅, 통신, 센싱, 기초·기반), 2개 활용(경제, 안보) 분과와 산하 실무위원회 구성
  - 민-관이 함께 참여하는 강력한 추진체계를 구축하여 양자기술·산업 발전을 위한 전략을 구체화하고 핵심 추진과제 집중 추진을 목표로 운영

85) https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilList.jsp?category_cd=2&group_id=36
86) 정보통신기획평가원 (2020), 「ICT R&D 기술로드맵 2025,」 2020.12.16.

※ 정부위원, 민간위원 및 재외과학자 특별 자문 초빙 등 총 22명으로 특별위원회를 구성

- 양자 기술 분야 주요 계획 및 발전 전략 심의·조정, 지원·협력체계 구축·운영에 관한 사항 조정, 산업·공공·국방 전 분야에 있어 양자기술 활용·확산을 위한 시책 등을 심의

’17년 「양자정보통신기술개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안」 발의 이후 ’22년 ‘양자기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안’ 발의 및 심사 중[87)]

- ’17년 이은권 의원 대표 발의로 추진된 「양자정보통신기술개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안」은 심사 결과 별도 제정 법률안 입법 필요가 인정되지 않는 의견으로 제시(’17.9)
  - 양자정보통신기술 관련 산업은 그 특성에 따라 별도 규제가 필요한 산업이라고 보기 어려우나 동 법 제정으로 인해 향후 규제 확대로 이어질 우려가 있다는 취지로 불인정

- ’19년 김성태 의원 대표 발의로 추진된 「정보통신 진흥 및 융합 활성화 등에 관한 특별법(이하 ICT 특별법) 일부 개정법률안」은 수정을 거쳐 신설 시행(’20.6)
  - ICT 특별법 내 양자정보통신 기술의 정의를 추가하는 형태로, 양자기술 연구가 정보통신의 산업영역에만 한정되지 않는 점에서 양자기술 전체 포괄에는 한계
  - 양자 기술개발 등에 대한 구체적인 세제지원 병행이 필요한 입법사항은 삭제되어 시행된 것으로, 양자기술 연구 및 사업화를 위한 지원의 단독법안 검토의 필요성이 제기

- ’22년 변재일 의원 대표 발의로 추진된 「양자기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안」은 특별법 형태의 단일법으로 발의되어 현재 소관위 심사 진행 중(’22.3)
  - 양자기술의 효율적 연구개발과 인력, 산업, 국제협력 등에 대한 종합적인 생태계 지원방안을 마련하여 양자기술을 장기적 관점에서 체계적으로 육성하려는 목적의 제정안
  - 기존 ICT 특별법에 양자내용이 일부 포함되어 있으나 파급력이 큰 양자산업을 장기적으로 육성하는 데 한계가 있으므로 새로운 법률 제정의 필요성이 요구

---

87) 의안정보시스템, https://likms.assembly.go.kr/bill/main.do

제5장 R&D 투자동향

정부 R&D 투자동향 파악을 위해 ①양자정보기술 분야 **주요사업 분석('19~'22)** 및 ②NTIS 키워드 검색*을 통한 **과제단위 분석('16~'20)**을 수행함
※ NTIS를 활용한 과제 단위 분석은 검색 키워드에 따라 지원 규모 총액이 상이할 수 있음
*(과제검색키워드) (이론|컴퓨팅|통신|센싱|소재|알고리즘)양자 !디스플레이

- (주요사업) 양자정보기술 주요 R&D사업은 처음 신설된 '19년 106억원에서 '22년 현재 699억원으로 대폭 확대('21년 대비 113% 증)

※ 출연(연) 주요사업(연간 170억원 내외) 및 비R&D(양자암호통신인프라구축 사업) 제외

※ 기술개발(972억원), 기반구축(396억원)에 4년('19~'22)간 총 1,368억원 투입 중

〈표 12〉 양자정보기술 주요사업('19년~'22년) 예산 현황

(단위 : 억원)

사업명	'19년 예산	'20년 예산	'21년 예산	'22년 예산	증감 ('21 대비)	%
총계	**106**	**234.34**	**328.26**	**699.39**	**371.13**	**113**
도전적 원천연구 강화	**106**	**191.34**	**227.64**	**447.09**	**219.75**	**96**
양자컴퓨팅연구인프라구축	-	-	-	100	100	순증
양자컴퓨팅기술개발사업	60	84.34	96.34	114.09	17.75	18
양자인터넷핵심원천기술개발	-	-	-	72	72	순증
양자암호통신집적화및전송기술고도화	-	49	73	76	3	4
양자센서핵심원천기술개발	46	58	58	85	27	47
양자특화 인프라 구축	**-**	**27**	**59.77**	**112**	**52.23**	**87**
양자정보과학연구개발생태계조성	-	27	59.77	112	52.23	87
인력 양성 및 국제 협력*	-	16	**41.15**	**140.3**	**99.15**	**241**

* 인력 양성 및 국제 협력 분야는 사업이 아닌 과제 단위에서 금액을 산출하여 포함

- (도전적 원천연구 강화) 양자컴퓨팅, 양자통신 및 양자센싱 분야 R&D에 3년간 522억원을 지원하고, '22년 컴퓨팅 100억원, 통신 72억원 및 센싱 27억원 신규 R&D 추가
  - (양자컴퓨팅, 47%) 양자소자(36.6%), 양자 시뮬레이터(20.3%), SW 및 알고리즘(18.1%), 기타 기반 기술(25%) 개발에 238억원 지원('19~'21)

    ※ '22년 50큐비트급 연구용 양자컴퓨팅 시스템 구축 착수('22~'26, 총 490억원)

- (양자통신, 28%) 유선 양자암호통신 상용화를 위한 시스템 집적화(42%), 단일광자 생성 얽힘 기술 등 원천기술 고도화(58%)에 122억원 지원('19~'21)
  ※ '22년 양자기기 간 연결용 유·무선 양자인터넷 핵심기술 개발 착수('22~'26, 총 478억원)
- (양자센싱, 25%) 관성 센서(30%), 이미징 센서(19%), 자기장 센서(17%), 기타 기반기술(양자광원, 광주파수 등 34%) 개발에 161억원 지원('19~'21)
  ※ '22년 첨단산업(배터리·반도체 등) 타켓형 양자센서 기술 개발착수('22~'25, 총 100억원)

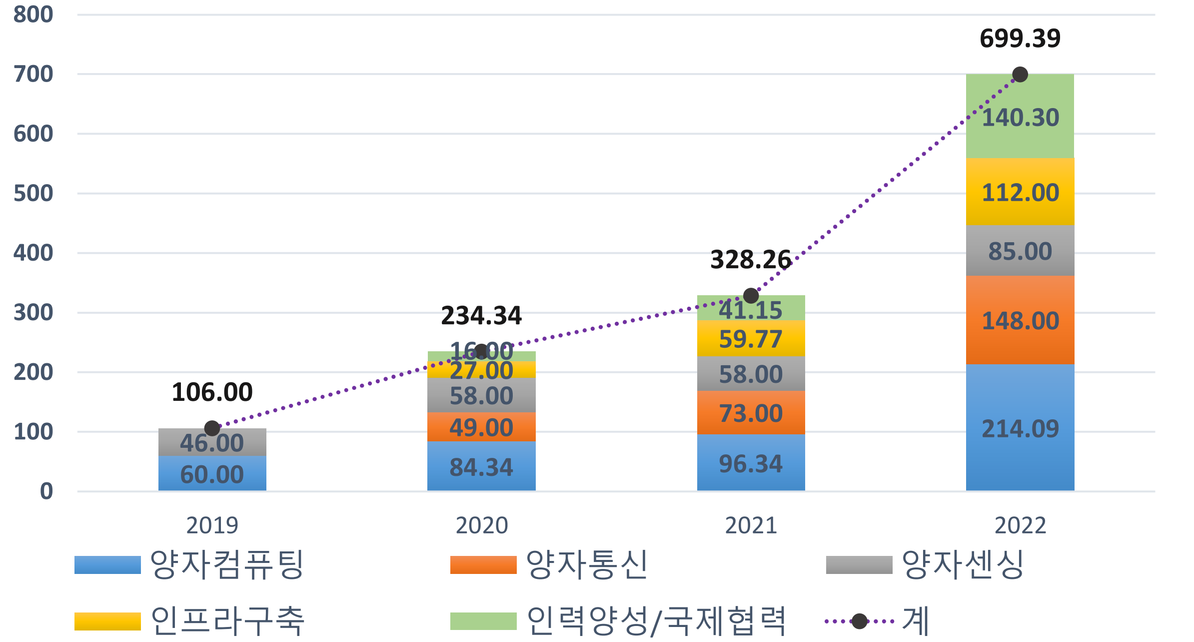
● (양자특화 인프라 구축) 양자팹 구축, 해외클라우드 사용 지원에 199억원 지원('19~'22)

※ 이 외에 양자암호통신인프라구축('20~'25, 비R&D)에 연간 약 100억원 지원

● (인력 양성 및 국제 협력) 인력양성, 국제협력 등에 3년간 146억원을 지원하고 '22년 일반 R&D로 양자기술협력 분야에 60억원 신규 R&D 사업 추가

- 석·박사, Post-Doc 단기 해외연수 등에 30억원 지원하고, 신진연구자 교류 지원, 국제 포럼 개최 등에 27억원 지원('19~'21)
  * 이 외에 ITRC사업으로 양자 분야 3개 센터에 연간 약 20억원 지원

(단위 : 억원)



[그림 5] 주요사업의 기술개발, 인프라, 인력양성/국제협력 분야별 투자현황

(과제기준) 양자 R&D 총 연구비는 ’16년 308억원 수준에서 ’20년 751억원 수준으로 주요사업의 투자확대와 함께 지속적으로 증가

※ 인프라구축, 인력양성/국제협력 등 구분없이 기술분야에 포함하여 분석하고, 소재, 이론 등 타 분야 모두에 활용 가능한 기초과제는 양자컴퓨팅에 포함시킨 것으로 해석에 주의 필요

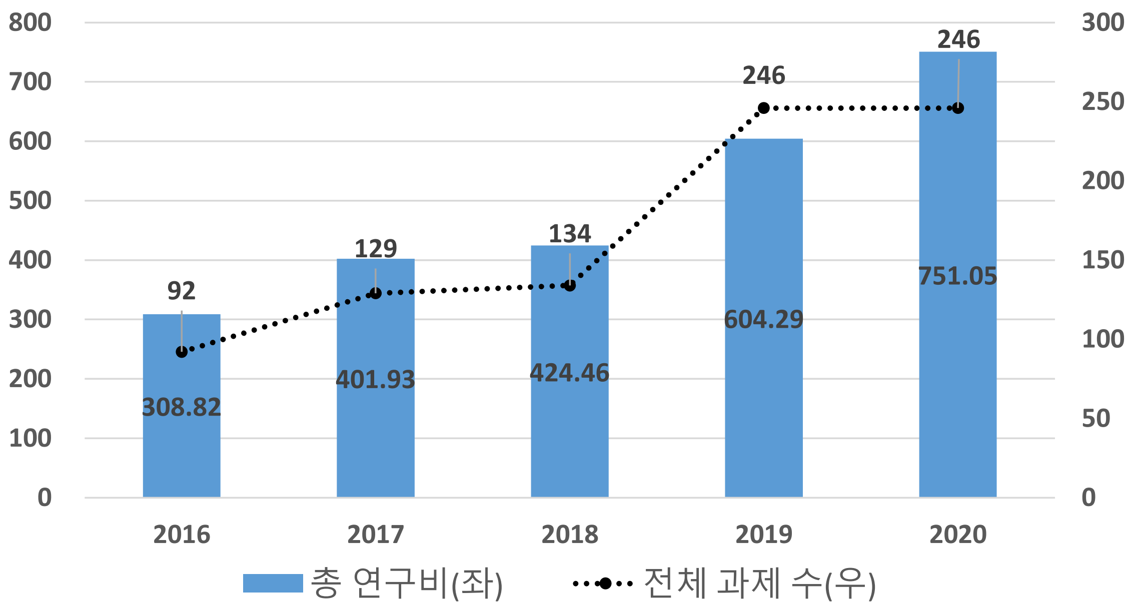
- (기술별) 양자컴퓨팅, 양자통신 및 양자센싱 분야 과제 수 및 총 연구비는 매년 증가 추세
  - ’18년 양자정보통신 예타사업 최종 미시행으로 개인기초연구 과제 수가 ’19년 일시적으로 증가하였으며, 이후 주요사업의 신설로 ’20년 양자 전체 과제 수는 최종 유지

    ※ 개인기초연구(과기부/교육부) 사업 양자 과제 수: ’18년 69개→’19년 118개→’20년 92개

〈표 13〉 양자정보기술 과제 단위 투자현황(’16년~’20년)

구분	총 연구비(억원)				과제 수(개)			
	양자컴퓨팅	양자통신	양자센싱	계	양자컴퓨팅	양자통신	양자센싱	계
2016년	95.76	113.97	99.09	**308.82**	42	20	30	**92**
2017년	205.47	114.99	81.47	**401.93**	58	38	33	**129**
2018년	219.32	124.26	80.88	**424.46**	60	41	33	**134**
2019년	311.38	159.30	133.61	**604.29**	124	74	48	**246**
2020년	388.29	200.10	162.66	**751.05**	142	71	33	**246**
계	**1220.22**	**712.62**	**557.71**	**2490.56**	**426**	**244**	**177**	**847**

(단위: 억원, 개)

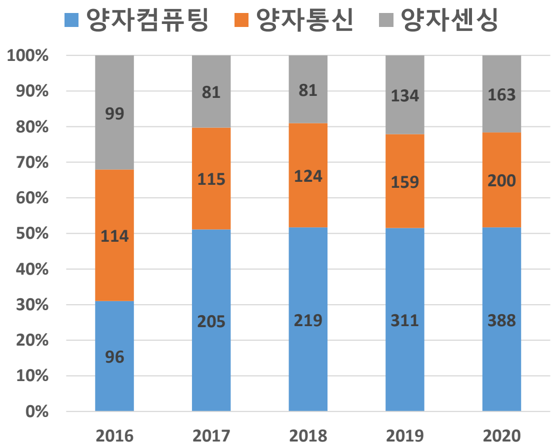


[그림 6] 양자정보기술 과제 단위 총 연구비 및 전체 과제 수

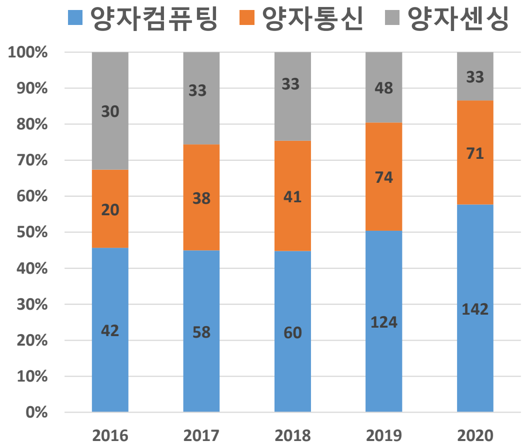
  - 연구비 기준 기술별 R&D 비중은 ’16년에는 각각 33% 수준으로 비슷하였으나, ’17년 이후 컴퓨팅 분야가 약 51%를 차지하고 뒤이어 통신(26%) 및 센싱(22%)이 차지

- 과제 수 기준 기술별 R&D 비중은 컴퓨팅 및 통신 분야가 각각 50% 및 30% 수준에서 유지하고 있으며, 센싱 분야 비중은 '16년부터 지속적으로 낮아지는 추세

〈 총 연구비 기준 R&D 비중 〉



〈 과제 수 기준 R&D 비중 〉



[그림 7] 양자정보기술별 연구비 및 양자 과제 비중

- (부처별) 과학기술정보통신부(과기부)가 94.2% 비중으로 대부분을 수행하고 있음
  - '16~'20년 기준으로 과기부에 이어 교육부가 4.7%, 중소벤처기업부가 0.9% 비중 순으로 3개 부처가 도합 99%를 차지하고 있음

    ※ 과기부 주도의 연구 특성으로 연구수행단계 기준 양자 기초연구 R&D 비중이 85.3%, 수행주체 기준 대학과 출연연에서 양자 R&D 전체의 92.2%를 수행하고 있음
  - 과기부는 '16년 298억원(96.5%)에서 '20년 688.7억원(91.7%)으로 타 부처 연구비가 증가하여 비중은 다소 감소하였으나, 여전히 대부분의 R&D 과제를 수행

〈표 14〉 양자정보기술 부처별 투자현황

(단위: 억원)

구 분	'16년	'17년	'18년	'19년	'20년	계
과학기술정보통신부	298.00	389.44	405.80	562.96	688.70	2,344.90
교육부	10.82	11.56	14.16	29.71	31.40	97.65
중소벤처기업부	-	0.93	4.18	4.59	13.45	23.15
기타(보건복지부, 산업통상자원부, 방위사업청 등)	-	-	0.32	7.03	17.50	24.86
계	**308.82**	**401.93**	**424.46**	**604.29**	**751.05**	**2,490.56**

제6장 결론

6.1 요약

(기술) 전세계 우수한 연구진들이 양자컴퓨팅/통신/센싱 분야 연구를 활발하게 수행 중으로, 최근 급속한 기술 발전이 이루어지고 있음

- 양자컴퓨팅은 물리큐비트 플랫폼별로 장단점이 존재하는 가운데 현재는 초전도체 및 이온트랩 기반 양자컴퓨팅 시스템이 주로 구축되어 있으며, 이론 및 알고리즘 연구도 활발

- 양자통신은 QKD 통신의 거리확장 연구와 양자중계기 및 메모리 연구가 활발하며, 양자센싱은 기존 한계 이상의 정밀도(또는 정확도)를 구현하는 방향으로 연구개발 진행

(산업) 미국 IT 공룡의 양자컴퓨팅 HW 개발 및 클라우드 서비스 제공과 함께 다양한 스타트업 탄생으로 시장을 주도하고 있으며, 한국은 통신분야 표준화 적극 주도

- 양자컴퓨팅 분야 대형 IT기업은 클라우드 서비스를 양자컴퓨팅 회사에 연결하거나 자체 연구조직을 신설하고 있으며, HW/SW 구분없이 다양한 스타트업이 최근에도 활발히 설립

- 각 국별 통신사의 암호통신 서비스를 통한 글로벌 시장 주도권 확보 경쟁이 심화되는 가운데, 국내 통신사는 암호통신 유선 시범 서비스 운영과 함께 본격 상용화 단계에 진입
  - 한국은 양자컴퓨팅 및 통신 분야 표준화에 적극 참여하고 양자백서 발간을 주도

- 양자센싱 기술은 원자시계, 중력·자기장 센서 등 상용화에 가까운 제품이 존재

(정책) 국가간 양자 기술통제와 기술블록화에 대응하기 위해 각 국별 특색에 맞는 정책을 경쟁적으로 발표하고 있으며, 한국도 지원정책 마련에 적극 참여

- 미국은 세계 최초의 양자법 제정 및 양자위원회를 운영하고 있으며, EU는 자체개발 로드맵과 프로젝트를 동시에 추진하고, 중국은 범국가적 양자분야 투자 확대를 추진

- 특히 일본은 국가차원의 전략을 마련하고 미국 중심의 기술 블록화에 적극 동참

- 한국도 양자 R&D 후발국으로서 효율적 투자 추진을 위한 R&D 투자전략을 마련하였고, ’22년 「양자기술 개발 및 산업화 촉진에 관한 법률안」 발의 등 제도 마련에도 집중

(투자) 국내 양자분야 주요 R&D사업은 ’19년 106억원에서 ’22년 699억원으로 대폭 증가(약 6.6배)하였고 최근 투자가 더 활발해질 예정

- 양자정보기술 주요사업의 ’22년 예산 699억원은 직전 3년(’19~’21)간 기 투자한 668억원보다 많으며, 연구비 및 과제 수 모두 증가하는 추세
  - 양자컴퓨팅(46%), 양자통신(31%), 양자센싱(23%)의 비중으로 투자되었으며, 과기부가 전체 94.2%로 대부분 R&D를 수행

6.2 정책제언

(기술개발) 양자기술분야 도전적인 집단연구 및 기초·기반 R&D 추진 강화

- 컴퓨팅/통신/센싱 분야 모두 해외가 대단히 앞서있으나 출연연(KRISS, ETRI, KIST 등)과 각 학교에서 추격 중으로 장기간 관심 하에 투자 지속을 통한 격차를 줄일 필요
  - 대학 중심의 집단연구 방식으로 장기 지원 및 산학연 역량 결집을 통한 시너지 창출
  - 국내 논문 및 특허는 꾸준히 증가 중이나(별첨 참고) 질적 우수성을 높일 필요가 있으며, 이를 위해 전문기관·연구소 협력 등으로 성과 창출과 관리의 역할 분담·집중

- 양자컴퓨팅 구현을 위한 플랫폼을 특정하여 선택할 단계는 아직 아니며 여러 기술에 투자가 필요한 시점으로 대세 기술을 따라갈 수 있는 R&D를 준비할 필요
  - ’19년을 기점으로 주요사업 예산이 대폭 증대되어 다양한 플랫폼 연구에 긍정적인 상태로, 플랫폼에 종속되지 않을 수 있는 Full-stack 방식에서 접근한 기초·기반 R&D도 지원

(생태계) 장기적으로 민간 주도 양자 생태계를 개척하기 위해 국가간 협력, 해외 유수 연구소·대학과의 국제협력과 인력양성, 인프라 구축을 동시에 추진 필요

- 기술패권 경쟁에 따라 강화되는 전략기술 수출입 통제에 대응하기 위해 주요 선도국과의 정부 간 협력을 강화하고 연구소 및 대학과 국제협력을 통해 유기적 연결 필요

- 이미 추진되고 있는 한-미 국제협력을 통해 서로 간 의존성을 지속·강화하고, 양자 신소재, 고사양 소재·부품 및 장비개발 등 공동연구로 추후 전략물자의 원활한 확보

● 기술 최선진국인 미국도 해외 인재의 유입을 적극 촉진하는 상황이므로 당장의 수요보다 장기적인 관점에서의 인력 생태계 구축에 대한 각계각층의 고민과 노력이 요구

- 벤처 초창기의 산학연 파트너십 강화 등과 같은 벤처·창업 지원으로 인력 수요처를 창출하고 국내 열악한 양자 산업환경 개선을 위해 인력생태계 활성화를 점진적 추진
  ※ 양자정보연구지원센터에서 지원 중인 양자클라우드서비스 등으로 연구인력 교육·훈련 활성화
- 물리학 외에 전기공학 등 융합이 가능한 분야의 연구인력 역시 중요한 인재로 생각하는 문화가 형성되어야 하며, 졸업 후 국내 양자분야로 유도하기 위한 박사후과정 지원 필요

● 최상의 장비 및 공정기술을 보유한 양자 인프라의 구축 및 연계로 성숙된 기술의 사업화를 지원하고 양자통신과 같은 민간이 주도하는 양자 산업 생태계를 개척할 필요

- 양자 산업의 기술적 성숙도에 맞추어 단계적인 시험·실증 기반을 조성하고, 표준 기반의 기능·성능·안정성·신뢰성 검증 지원으로 수요 창출 및 기업의 상용화 지원
  ※ 양자암호통신인프라구축, 양자정보과학연구개발생태계조성 등 사업의 인프라 연계·활용
- 양자통신은 국내 대기업이 주도하여 표준화에 적극 참여하고 전·후방 산업 생태계가 조성되는 중으로, 양자컴퓨팅 및 센싱 분야에도 민간의 관심 및 참여 확대가 요구

(정책지원) 양자정보기술 집중지원법 마련과 함께 양자연구소 설립, 국가차원의 로드맵에 따른 투자 고도화, 사업 집중 관리 등 다양한 정책 마련 절실

● 양자정보기술의 신산업화를 대비하여 'R&D개발 → 시험·검증 → 표준화 → 기술사업화'의 선순환 생태계 조성을 위한 산업기반 및 제도 마련

- 집중지원법의 조속한 통과를 통해 장기적 관점에서 체계적 육성을 위한 제도를 마련하고, 양자연구소 등 연구거점 구축으로 원천기술 및 연구인력 저변 확보
- 국가차원의 전략 로드맵 수립으로 양자정보기술의 체계적인 실행 전략을 마련할 필요

● 양자정보기술 주요사업의 증가가 일시적인 유행에 그치지 않기 위해서는, 사업의 세밀한 관리를 통해 양자분야의 전략적인 투자 목표와 방향성을 상실하지 말아야 할 필요

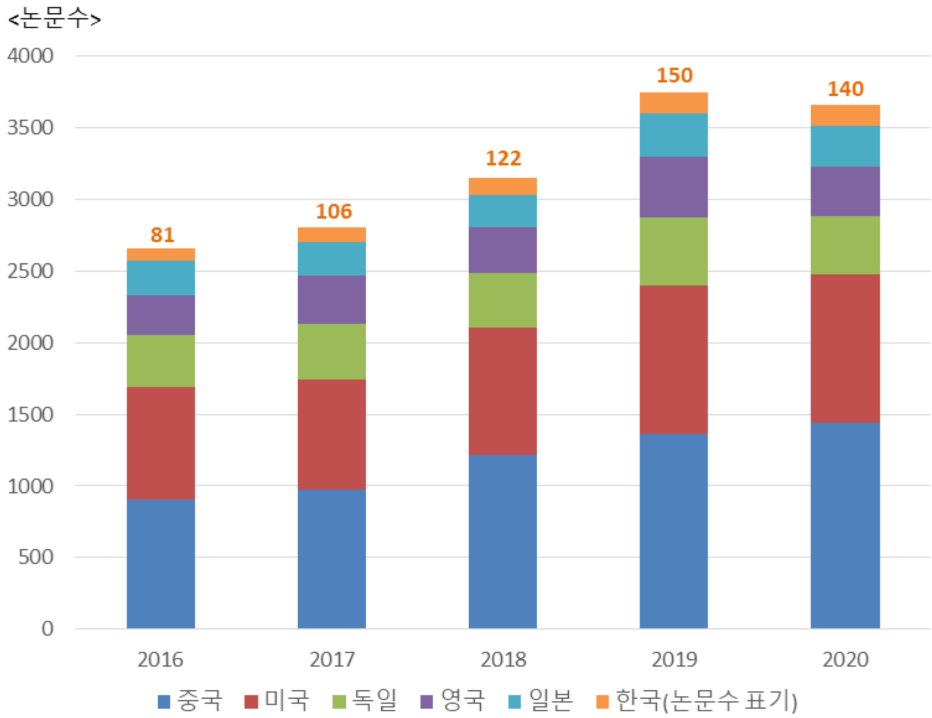
- 양자정보기술 연구비의 최근 증가 속도 대비 연구인력의 공급 속도는 따라가지 못하는 상황으로, 연구비 투자 대비 성과는 당분간 낮게 측정될 수 있는 위험성이 존재
- 양자 과제를 수행하는 연구자의 타 분야 이탈을 방지할 수 있는 주요사업을 지속적으로 관리하고, 투자 전략에서 제시한 단계별 성과 창출 등 전략목표 달성에 노력

(별첨) 양자정보기술 논문·특허 현황

(논문) 기술 초기 단계인 양자정보기술에 관한 논문 출판은 꾸준히 증가하고 있으며 한국의 논문 출판 수는 전체의 약 2.1%를 차지

※ SCOPUS 논문(2016-2020)을 대상으로 분석[88]

- 국제논문 출판 수를 볼 때, 중국(20.5%)과 미국(15.2%)이 매우 높은 비중을 보이고 있고, 독일(6.8%)-영국(5.8%)-일본(4.4%)이 그 뒤를 잇고, **한국은 2.1%로 12번째**에 위치
- 분석한 논문들의 논문당 평균 피인용 횟수를 분석하면 영국 26.7, 미국 24.5, 독일 23.7 로 나타나 질적 우수성을 보이고, 일본 16.1, **한국은 10.6은 상대적으로 낮은 결과를 보임**



[그림 8] 양자정보기술 국제논문 추이

- (양자컴퓨팅) 논문 출판수는 미국(17.3%), 중국(16.5%)이 높은 비중으로 보이고 있고, 독일(7.9%)-영국(5.7%)-일본(4.8%)이 뒤를 잇고 있으며, 한국은 2.2%로 12번째에 위치

---

88) 한국과학기술정보연구원(KISTI)에 의뢰하여 scopus.kisti.re.kr에서 기술별 검색식(비공개)을 자체 전문가 그룹에서 보완 작업 한 후 검색한 결과로, 2020년 논문의 경우 DB 업데이트 주기로 인해 일부 데이터 부족

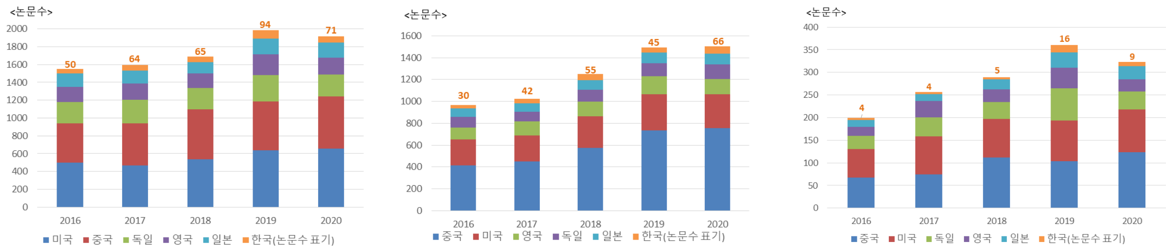
- 국가별 평균 피인용수는 영국 31.5, 미국 28.3, 독일 25.6, 일본 17.6, 중국 13.3으로 나타나고, 한국은 12.4를 보임

● (양자통신) 논문 출판수는 중국(25.9%), 미국(12.1%), 영국(5.9%), 독일(4.8%), 일본(3.8%)이고 한국은 2.0%로 12위에 위치

- 국가별 평균 피인용수는 영국 21.3, 독일 20.5, 미국 17.8, 일본 13.8, 중국 10.3으로 나타나고, 한국은 8.9를 보임

● (양자센싱) 논문 출판수는 중국(19.6%), 미국(16.7%), 독일(8.9%), 영국(6.0%), 일본(4.7%%)이고 한국은 1.6%로 13위에 위치

- 국가별 평균 피인용수는 영국 30.3, 독일 26.2, 미국 23.4, 일본 17.9으로 나타나고, 한국은 14.1을 보임



(a) 양자컴퓨팅 (b) 양자통신 (c) 양자센싱

[그림 9] 양자정보기술 분야별 국제논문 추이

(특허) 양자정보기술 관한 미국특허 출원은 미국이 가장 많이 출원하고 있고, 중국, 일본, 한국도 꾸준이 증가하고 있음

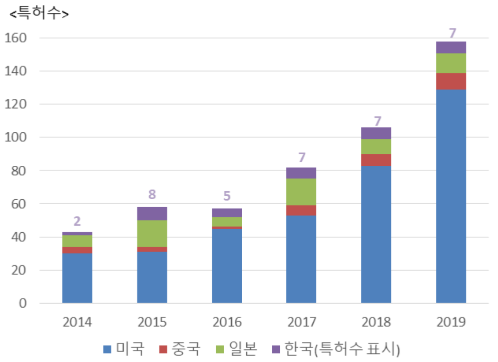
※ 미국 공개 특허(2014-2019년)를 대상으로 분석[89]

● 2014-2016년에는 년당 약 50-80건 정도의 특허가 출원되었고 2017년 이후 100건 이상의 특허가 매년 출원되는 추세임

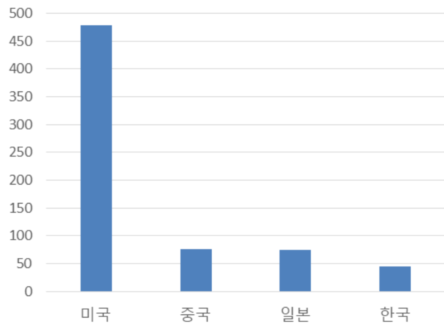
● 국가별 특허 비중을 보면 미국이 전체의 58.1%로 절대다수를 차지하고 있으며, 중국 9.2%, 일본 9.1%, 한국 5.5%의 비중을 보이고 있음

● 출원기관별로는 미국 IBM 64건, 일본 도시바 58건, 미국 마이크로소프트 28건 등의 순위를 보이고 있고, 한국 ETRI가 18건으로 국내 출원인으로는 가장 많이 출원한 것으로 나타남

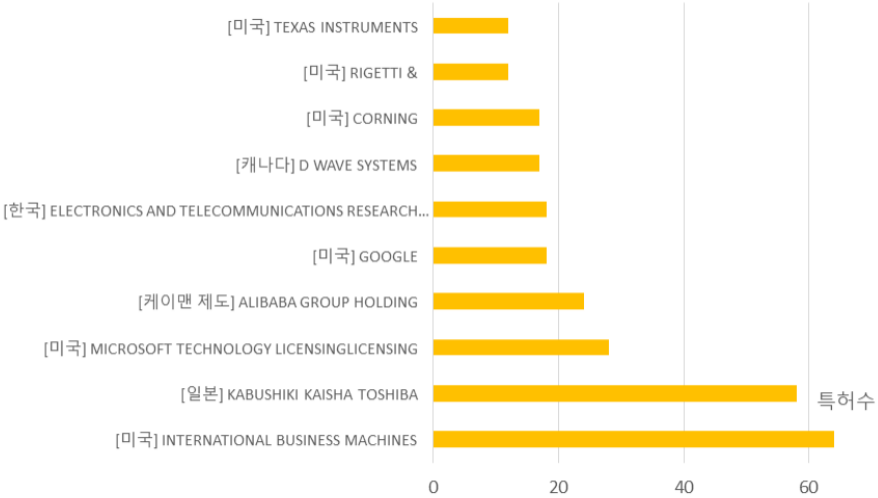
89) 한국과학기술정보연구원(KISTI)에 의뢰하여 gpass.kisti.re.kr에서 기술별 검색식을 자체 전문가 그룹에서 보완작업 한 후 검색한 결과로, 2020년 특허는 제출과 공개 사이의 비밀유지기간(18개월) 때문에 특허 분석기간에서 제외



(a) 연도별 미국특허수



(b) 국가별 미국특허수(2014-2019년)



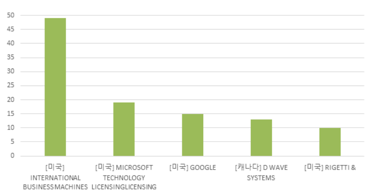
(c) 출원인별 미국특허수(2014-2019년)

[그림 10] 양자정보기술 미국 특허출원 현황

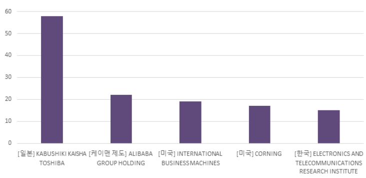
- (양자컴퓨팅) 주요 출원인으로 [미국]IBM 49건, [미국]마이크로소프트 19건, [미국]구글 15건, [캐나다]디웨이브 시스템 13건, [미국]리게티 10건 등으로 나타남

- (양자통신) 주요 출원인으로 [일본]도시바 58건, 알리바바 22건, [미국]IBM 19건, [미국]코닝 17건, [한국]ETRI 15건으로 나타남

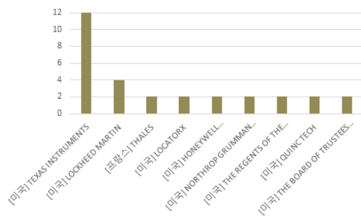
- (양자센싱) 주요 출원인으로 [미국]텍사스 인스트루먼트 12건, [미국]록히드마틴 4건 나타남



(a) 양자컴퓨팅



(b) 양자통신



(c) 양자센싱

[그림 11] 양자정보기술 분야별 미국 특허의 주요 출원인

참고문헌

국내 문헌

• 과학기술정보통신부 (2021), 「양자기술 연구개발 투자전략(안),」 2021.04.30.

• 한중과학기술협력센터 (2021), 「중국 과학기술 정책 주간동향,」 2021-27호, 2021.12.10.

• 과학기술정보통신부 (2021), 「국가 필수전략기술 선정 및 육성·보호 전략,」 2021.12.22.

• 고윤미 외 (2022), 「새정부 과학기술 관련 국정과제 주요 내용 및 시사점,」 2021.06.09.

• 임승혁 (2019), 「범용양자컴퓨터,」 KISTEP 기술동향브리프 2019-19호, 2019.12.23.

• 과기정통부 (2021), 「양자인터넷 핵심원천기술개발사업 기획 보고서,」 2021.05.

• 한국과학기술정보연구원 (2021), 「양자기술 과학·기술·산업 분석,」 2021.12.31.

• 융합연구정책센터 (2022), 「양자암호통신 기술 현황과 전망,」 융합연구리뷰 7(7), 2021.07.19.

• 한국과학기술기획평가원 (2018) 「주요국 양자정보기술 지원정책 동향,」 2018.03.16.

• 최창택 (2022), 「미 하원 「2022년 미국 경쟁법」 주요 내용과 시사점,」 KISTEP 브리프, 2022.02.10.

• 양자정보연구지원센터 (2022), 「국가차원의 양자연구 집중지원 추진체계 분석,」 2022.03.30.

• 한국과학기술기획평가원 (2019), 「양자정보과학,」 과학기술&ICT정책·기술 동향, 2019.03.15.

• 정보통신기획평가원 (2020), 「ICT R&D 기술로드맵 2025,」 2020.12.16.

• 이동현 (2020), 「양자 센서 연구 동향 및 활용 전망,」 IITP 주간기술동향 1960호, 2020.08.19.

• 한국연구재단 (2021), 「양자인터넷 기술,」 R&D BRIEF 2021-26호, 2021.11.29.

• 양자정보연구지원센터 (2022), 「양자 컴퓨터의 활용,」 양자정보과학 리포트, 2021.12.01.

• 박성수 (2022), 「디지털을 넘어 양자시대를 준비하는 양자컴퓨터,」 소프트웨어정책연구소 월간 SW중심사회 2022년 01월호, 2021.12.27.

• 김효실 (2022), 「한·중 양자정보기술 동향 비교,」 KOSTEC ISSUE REPORT 3, 2022.03.

• 양자정보과학기술연구회 (2022), 「2021 양자 컴퓨팅 기술 백서,」 2022.03.

• 박준식 외 (2021), 「양자기술관련 국제표준화 동향,」 한국통신학회지 38(3), pp. 58-62.

해외 문헌

- H. Huang, et al. (2021), 「Information-Theoretic Bounds on Quantum Advantage in Machine Learning,」 Physical Review Letters 126(19), 190505.
- L. Postler, et al. (2022), 「Demonstration of fault-tolerant universal quantum gate operations,」 Nature 605(7911), pp. 675-680.
- W. Song, et al. (2022), 「Quantum Solvability of Noisy Linear Problems by Divide-and-Conquer Strategy,」 Quantum Sci Technology 7(2), 025009.
- T. Hur, et. al. (2022), 「Quantum Convolutional Neural Network for Classical Data Classification,」 Quantum Machine Intelligence 4(1), pp. 1-18.
- H.-S. Zhong, et al. (2021), 「Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light,」 Physical Review Letters 127, 180502.
- Q. Zhu, et al. (2022), 「Quantum Computational Advantage via 60-Qubit 24-Cycle Random Circuit Sampling,」 Science bulletin 67(3), pp. 240-245.
- H. Semenenko, et al. (2020), 「Chip-based measurement-device-independent quantum key distribution,」 Optica 7(3), pp. 238-242.
- S. Wang, et al. (2022), 「Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre,」 Nature Photonics 16(2), pp. 154-161.
- Y.-A. Chen, et al. (2021), 「An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres,」 Nature 589(7841), pp. 214-219.
- C.H. Park, et al. (2022), 「2×N twin-field quantum key distribution network configuration based on polarization, wavelength, and time division multiplexing,」 npj Quantum Information 8(1), pp. 1-12.
- Y. Zhong, et al. (2021), 「Deterministic multi-qubit entanglement in a quantum network,」 Nature 590(7847), pp. 571-575.
- S. M. Lee, et. al. (2020), 「Quantum teleportation of shared quantum secret,」 Physical Review Letters 124(6), 060501.
- J. H. Kim, et. al. (2021), 「Noise-resistant quantum communications using hyperentanglement,」 Optica 8(12), pp. 1524-1531.
- M. Pompili, et al. (2021), 「Relization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits,」 Science 372(6539), pp. 259-264.
- D. Lago-Rivera, et. al. (2021), 「Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories,」 Nature 594(7861), pp. 37-40.

- Y. Yu, et al. (2020), 「Entanglement of two quantum memories via fibres over dozens of kilometres,」 Nature, 578(7794), pp. 240-245.
- J. Yin, et al. (2020), 「Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres,」 Nature 582(7813), pp. 501-505.
- M. Gong, et al. (2022), 「Experimental exploration of five-qubit quantum error-correcting code with superconducting qubits,」 National science review 9(1), nwab011.
- C. Janvier, et al. (2022), 「Compact differential gravimeter at the quantum projection-noise limit,」 Physical Review A 105(2), 022801.
- H. Yu, et al. (2020), 「Measuring scale factor of atomic spin gyroscope and closed-loop operation,」 AIP Advances 10(7), 075209.
- B. S. Ham, (2021), 「A nonclassical Sagnac interferometer using coherence de Broglie waves,」 Advanced Devices & Instrumentation 2021.
- M. Lee, et al. (2021), 「Mapping current profiles of point-contacted graphene devices using single-spin scanning magnetometer,」 Applied Physics Letters 118(3), 033101.
- J. Shim, et al. (2022), 「Multiplexed Sensing of Magnetic Field and Temperature in Real Time Using a Nitrogen-Vacancy Ensemble in Diamond,」 Physical Review Applied 17(1), 014009.
- M. JING, et al. (2020), 「Atomic superheterodyne receiver based on microwave-dressed Rydberg spectroscopy,」 Nature Physics 16(9), pp. 911-915.
- H. Kim, et. al. (2021), 「Absolute frequency measurement of the 171Yb optical lattice clock at KRISS using TAI for over a year,」 Metrologia 58(5), 055007.
- S. Töpfer, et al. (2022), 「Quantum holography with undetected light,」 Science advances 8(2), eabl4301.
- S. Hong, et al. (2021), 「Quantum enhanced multiple-phase estimation with multi-mode N00N states,」 Nature communications 12(1), pp. 1-8.
- J. Park, et al. (2019), 「Polarization-entangled photons from a warm atomic ensemble using a Sagnac interferometer,」 Physical review letters 122(14), 143601.
- C. Ryan-Anderson, et. al. (2021), 「Realization of real-time fault-tolerant quantum error correction,」 Physical Review X 11(4), 041058.
- 국제전기기술위원회(IEC) (2021), 「Quantum information technology,」 IEC White Paper QIT:2021, 2021.10.20.

보도자료

- 한국표준과학연구원 (2021.3.3), 「양자 보안 네트워크 가능케 할 '양자직접통신' 구현 성공」
  https://www.kriss.re.kr/gallery.es?mid=a10201100300&bid=0022&b_list=10&act=view&list_no=4113&nPage=3&vlist_no_npage=6&keyField=&orderby=
- 국방과학연구소 (2022.4.5.), 「자성체 기반의 양자 주파수 변환 핵심기술 개발」
  https://www.dapa.go.kr/dapa/na/ntt/selectNttInfo.do?bbsId=326&nttSn=40985&menuId=678
- 산업통상자원부 (2022.3.22.), 「국제전기기술위원회(IEC) 시장전략이사회에 한국 이사 2명 진출」
  https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=165424&bbs_cd_n=81&currentPage=1&search_key_n=&cate_n=1&dept_v=&search_val_v=
- 연방교육연구부 (2021.5.11.) 「Mit großen Schritten zum Quantencomputer 'Made in Germany'」
  https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/karliczek-mit-grossen-schritte-uantencomputer-made-in-germany.html

사이트

- https://sanction.kosti.or.kr/user/nd94820.do?View&boardNo=00003612&itemShCd3=13
- https://wiki.quist.or.kr/index.php/%EB%8C%80%EB%AC%B8
- https://nocamels.com/2022/03/weizmann-quantum-computer-researchers/
- https://qutech.nl/2022/05/25/teleport-quantum-information-across-network/
- http://www.insightkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=79547
- https://quantumai.google/hardware/our-lab
- https://zdnet.co.kr/view/?no=20220513103613
- https://ai.googleblog.com/2021/08/demonstrating-fundamentals-of-quantum.html
- https://www.bloter.net/newsView/blt202203230017
- https://www.thelec.kr/news/articleView.html?idxno=16683
- http://scimonitors.com/인텔-풀스텍-양자컴퓨터-개발-주요-전략/
- http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2021/08/26/2021082602354.html
- https://arstechnica.com/science/2021/06/quantum-computing-startup-rigetti-to-offer-modular-processors/
- https://thequantuminsider.com/2022/02/25/ionq-aria-achieves-record-20-algorithmic-qubits/
- https://thequantuminsider.com/2022/05/18/rigetti-pushes-back-roadmap-on-development-of-1000-qubit-4000-qubit-models/
- https://thequantuminsider.com/2022/06/01/xanadu-launches-first-public-cloud-deployed-computer-with-quantum-computational-advantage/

- https://www.codingworldnews.com/news/articleView.html?idxno=8312
- http://www.qcenter.kr/bbs/board.php?tbl=bbs52
- https://qunovacomputing.com
- https://zdnet.co.kr/view/?no=20220608084137
- https://m.dongascience.com/news.php?idx=54259
- https://zdnet.co.kr/view/?no=20220420222806
- https://www.dongascience.com/news.php?idx=44623
- https://www.kriss.re.kr/gallery.es?mid=a10106030000&bid=0002&list_no=3958&act=view
- https://zdnet.co.kr/view/?no=20220606100740
- https://standards.ieee.org/ieee/7130/10680/
- https://www.etnews.com/20211209000150
- https://www.quantum.gov/
- https://m.dongascience.com/news.php?idx=54043
- https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital -decade-digital-targets-2030_en
- https://www.bbc.com/news/technology-61647134
- https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2021/0901-01.html
- https://www.yna.co.kr/view/AKR20220407047400073
- https://www.chosun.com/international/japan/2022/01/11/FHVO4SYU35BVXPNVLOKCBMMVBQ/
- https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilList.jsp?category_cd=2&group_id=36
- https://likms.assembly.go.kr/bill/main.do

- https://m.dongascience.com/news.php?idx=54259
- https://zdnet.co.kr/view/?no=20220420222806
- https://www.dongascience.com/news.php?idx=44623
- https://www.kriss.re.kr/gallery.es?mid=a10106030000&bid=0002&list_no=3958&act=view
- https://zdnet.co.kr/view/?no=20220606100740
- https://standards.ieee.org/ieee/7130/10680/
- https://www.etnews.com/20211209000150
- https://www.quantum.gov/
- https://m.dongascience.com/news.php?idx=54043
- https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en
- https://www.bbc.com/news/technology-61647134
- https://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2021/0901-01.html
- https://www.yna.co.kr/view/AKR20220407047400073
- https://www.chosun.com/international/japan/2022/01/11/FHVO4SYU35BVXPNVLOKCBMMVBQ/
- https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilList.jsp?category_cd=2&group_id=36
- https://likms.assembly.go.kr/bill/main.do

|저자소개|

유 형 정

한국과학기술기획평가원 미래기술기획센터 부연구위원

Tel: 043-750-2493 E-mail: yhj@kistep.re.kr

|편집위원소개|

류 영 수 선임연구위원

진 영 현 연구위원

임 승 혁 부연구위원

채 명 식 부연구위원

이 강 수 부연구위원

한국과학기술기획평가원 사업조정본부

Tel: 043-750-2503 E-mail: lks@kistep.re.kr

[KISTEP 브리프 발간 현황]

발간호	제목	저자 및 소속	비고
01	시스템반도체	채명식 (KISTEP)	기술동향
02	미 하원 「2022년 미국 경쟁법」 주요 내용과 시사점	최창택 (KISTEP)	혁신정책
03	메디컬 섬유소재	정두엽 (KISTEP)	기술동향
04	2020년 한국의 과학기술논문 발표 및 피인용 현황	한웅용 (KISTEP)	통계분석
05	2020년 신약개발 정부 R&D 투자 포트폴리오 분석	강유진·김주원 (KISTEP)	통계분석
06	바이오헬스 정책·투자동향	김종란·강유진·홍미영 (KISTEP)	기술동향
07	러시아-우크라이나 사태에 따른 과학기술 동향과 시사점	김진하·이정태 (KISTEP)	혁신정책
08	미래 스마트 팩토리 유망 서비스	KISTEP·ETRI	미래예측
-	2030 국가온실가스감축목표에 기여할 10대 미래 유망기술	이동기 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제323호)
09	바이오연료	박지현·강유진 (KISTEP)	기술동향
10	2020년 국내 바이오산업 실태조사 주요 결과	한웅용 (KISTEP)	통계분석
11	일본 과학기술·경제안전보장전략 주요내용과 시사점	김규판(KIEP) 김다은·홍정석(KISTEP)	혁신정책
12	6G 통신 기술	이승필·형준혁 (KISTEP)	기술동향
13	우리나라 산업기술인력 수급 현황 - 2020년도 기준 -	한웅용 (KISTEP)	통계분석
14	소재 신(新)연구방법론	정두엽·조유진 (KISTEP)	기술동향
-	대전환 시대의 과학기술혁신 정책 이슈	변순천 외 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제324호)
15	OECD MSTI 2022-March의 주요 결과	정유진 (KISTEP)	통계분석

발간호	제목	저자 및 소속	비고
16	2020년도 국가연구개발사업 성과분석 현황	한웅용 (KISTEP)	통계분석
-	디지털 전환의 미래사회 위험이슈 및 대응 전략: 인공지능 역기능을 중심으로	구본진 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제325호)
-	「국가R&D 혁신방안」 추진과제 분석 및 향후 추진방향 제언	최창택 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제326호)
17	2020년 미국의 박사학위 취득자 현황 분석 - NSF,Doctorate Recipients from U.S. Universities -	한웅용 (KISTEP)	통계분석
-	일반국민은 2022년 정부R&D예산에 대해 어떻게 생각하고 있을까?	이승규·박지윤 (KISTEP)	이슈페이퍼 (제327호)
18	새정부 과학기술 관련 국정과제 주요 내용 및 시사점	고윤미·배용국·양은진·심정민(KISTEP)	혁신정책
19	2021년 국가 과학기술혁신역량 분석	김선경 (KISTEP)	통계분석
20	2022년 IMD 세계경쟁력 분석	김선경 (KISTEP)	통계분석
21	양자정보기술	유형정 (KISTEP)	기술동향