

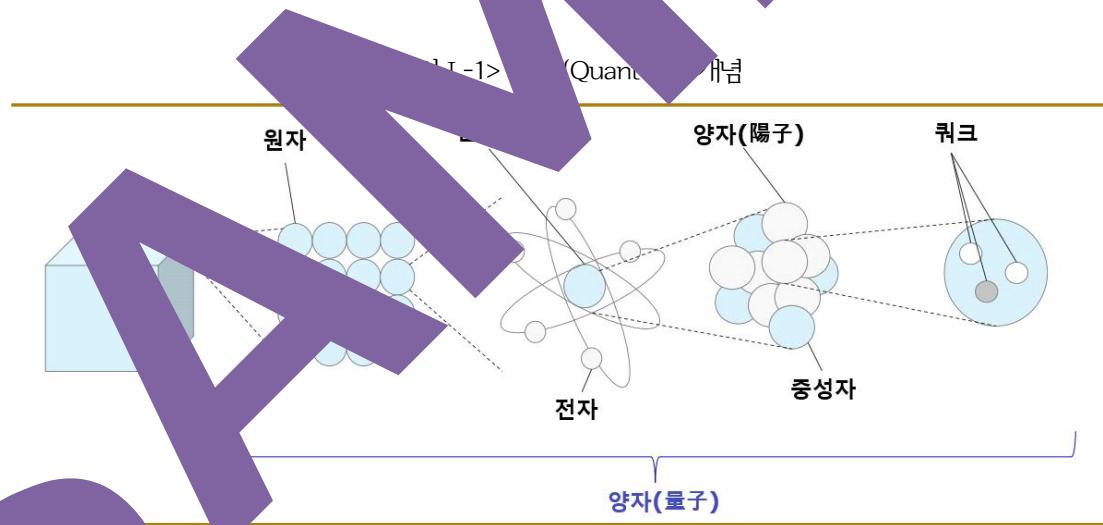
I. 양자정보기술 개발 트렌드와 향후 전망

1. 양자정보기술의 세부 분야별 기술 개발 동향

1-1. 양자정보기술의 개요

1) 개념 및 중요성

- 1920년대 중반에 확립된 양자 역학은 제1차 양자혁명(the first quantum revolution)을 일으켰고, 반도체 및 레이저와 같은 현대의 핵심 기술의 배경을 주며, 과학 기술 혁신 1.0)에 기여하고 있다.
- 그로부터 약 100년을 맞이하는 지금은 제2차 양자혁명(the second quantum revolution)이 진행되고 있으며, 양자 1.0에서는 양자 기술이 양자 역학의 진수라 할 수 있는 '중첩'이나 '양자 얹힘'을 이용하는 양자 컴퓨팅(양자 2.0)의 개발 경쟁이 심화되고 있다. 이 양자 2.0의 중심은 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 통신 · 네트워크이다. 모두 지금 까지 양자 1.0인 레이저 및 전자기기 기반으로 기술을 뛰어넘는 신기술의 방법을 찾아내는 데 주안점을 두고 있다.¹⁾



자료 : 일본총연 첨단기술랩, 양자컴퓨터 해설과 동향, 2020

양자 기술(Quantum Technology)은 양자 고유의 특성(얽힘, 중첩 등)을 활용하여 기존 기술의 한계를 뛰어 넘는 초고속연산(양자컴퓨팅), 초신뢰 보안(양자통신), 초정밀 계측(양자센서)을 가능케 하는 파괴적 혁신기술이다.²⁾

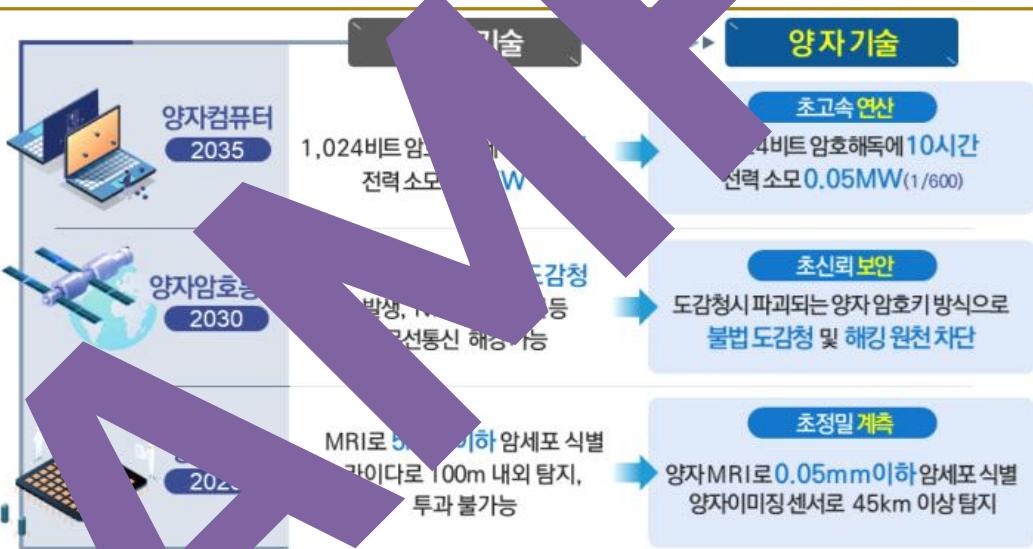
- 1) 일본 오사카대학교대학원기초공학연구과, Brief Overview of Quantum Information Technologies(2022.03.30.)
- 2) 과학기술정보통신부 보도자료(2021.04.29.), 미래 전략기술 확보를 위한 '양자기술(Quantum Technology) 연구개발 투자전략' 수립

<그림 I-39> 국내 양자 기술 연도별 시장규모 전망 (단위: 억원)



자료 : IQ41(2022) & McKinsey(2022) & Mind Source(2024)

<그림 I-40> 양자기술 특징



자료 : 과학기술부, 신부 보도자료, 미래 전략기술 확보를 위한 '양자기술(Quantum Technology) 연구 개발 투자' 수립, 2021.04.30

① 주요 부문별 시장 전망

① 주요 부문별 시장

- 주요 부문별로 살펴보면, 양자통신과 양자컴퓨팅은 매우 빠르게 성장할 전망이며, 양자센싱은 통신과 컴퓨팅보다 규모는 작지만 산업화 과정이 비교적 먼저 진행될 것으로 전망된다.

| | 2024년 | 2025년 | 2026년 | 2027년 | 2028년 | 2029년 | 2030년 | 2031년 | CAGR |
|----------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------|
| 보건·의료 | 2,117 | 2,276 | 2,438 | 2,592 | 2,768 | 2,963 | 3,160 | 3,398 | 7.0% |
| 국방·우주 | 1,941 | 2,080 | 2,234 | 2,381 | 2,528 | 2,698 | 2,900 | 3,095 | 6.9% |
| 글로벌 포지셔닝·통신 | 1,764 | 1,885 | 2,029 | 2,155 | 2,304 | 2,449 | 2,622 | 2,811 | 7.0% |
| 지구물리 응용 | 1,588 | 1,731 | 1,883 | 2,079 | 2,272 | 2,499 | 2,709 | 2,998 | 9.3% |
| 과학기술 R&D | 1,411 | 1,522 | 1,650 | 1,808 | 1,952 | 2,135 | 2,327 | 2,525 | 16.0% |
| 합계 | 8,821 | 9,494 | 10,219 | 11,000 | 11,840 | 12,744 | 13,717 | 14,765 | |

자료 : Mind Commerce (2024)

- 보건·의료 부문은 2024년 2,117억 원(전체 대비 24%) 규모로 양자 시장 큰 수요처로서, 이후 연평균 7.0% 성장률을 보이며 2031년에는 3,398억 원(전체 대비 23%) 규모까지 확대될 것으로 전망되고 있다.
- 두 번째로 큰 수요는 국방·우주 분야로 1,941억 원(전체 대비 21%) 규모로 양자 컴퓨팅·통신 등 기술 분야에서 양자 시장의 주요 성장 동력으로 기여하고 있다. 그 외 글로벌 포지셔닝·통신(20.0%), 지구물리 응용(18.0%), 과학기술 R&D(16.0%)도 양자자력계 등 양자 시장의 주요 성장 동력으로 자리 잡고 있다.

2-2. 주요국별 양자 기술 개발

1) 미국

(1) 양자 컴퓨팅

- 미국은 양자기술 분야에서 자신감을 갖고, 빅테크를 중심으로 대규모 투자와 함께 기술 주도권을 잡는 데 주력하고 있다.
- 트럼프 대통령은 양자 컴퓨팅 당선인에게 양자컴퓨터 육성에 역점을 두고 있다. 트럼프 대통령은 2018년 11월 전 행정부의 인공지능(AI) 관련 규제를 철폐하는 행정명령을 내리면서 양자컴퓨터 기술에도 긍정적 효과가 기대되고 있다.

- 미국은 세계적 규모로 양자정보기술 연구개발을 진행하고 있으며, 특히 큐비트(양자컴퓨터 기본 단위) 개수를 늘리는 등 양자컴퓨팅 연구개발을 중점 추진 중에 있다.

- 현재 양자정보과학 분야의 연구는 센싱, 컴퓨팅, 네트워킹, 양자활용 등 4개의 기초과학 부문을 중심으로 투자되고 있다.⁸⁰⁾
 - 양자의 특성을 활용한 양자센싱, 양자시스템 시뮬레이션과 알고리즘에서 통제된 디지털 양자컴퓨터, 새로운 정보기술 애플리케이션, 소재·화학·우주 등 다양한 분야에서 과학 발전을 유도하고 있다.

80) 한국과학기술기획평가원, 트럼프 정부 첨단산업 육성 정책 동향, 2025.02

3. 주요국별 양자정보기술 관련 정책 추진 동향

3-1. 주요국별 양자정보기술 관련 정책 추진 동향

- 국내외 양자 기술 정책 동향을 요약하면, 미국에서는 국가 양자 이니셔티브(Quantum Initiative) 법을 바탕으로 양자 연구개발을 촉진하고, 양자 컴퓨터, 통신, 센서 등 다양한 기술 분야에 대한 지원 프로그램을 운영 중이며 국가 안보와 경제적 우위를 위해 양자 기술을 중점으로 육성·증진 시켜 나가고 있음을 알 수 있었다.
 - EU에서는 양자 플래그십 프로젝트(Quantum Flagship) 정부 지원 프로그램으로 10억 유로 규모의 예산을 양자 기술 분야에 투자하고 있으며, 유럽 전역에 걸친 양자 네트워크, 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 센서 등 다양한 분야에 대한 지원 프로그램을 지원하고 있다.
 - 중국의 경우, 양자 통신과 양자 컴퓨팅 분야에서 주도적인 위치를 차지하고 있으며, 특히 양자 암호 통신에 대한 투자와 연구가 활발히 이루어지고 있으며 양자 통신 네트워크를 구축하는 등 빠른 성장을 예상된다.
 - 일본은 양자 기술을 AI, 바이오, 신약 분야가 전략 기반으로 설정하고 연구 개발을 강화해 나가고 있으며 양자 기술 이노베이션 혁신 분야 발표하는 등 양자 기술의 산업적 응용을 촉진해 나가고 있다.
 - 우리나라에서도 양자 기술 분야를 통해 글로벌 양자 경제 선도를 목표로, 양자 센서, 양자 암호 통신, 양자 컴퓨터 등 분야에 대한 연구개발을 강화하기 위한 다양한 분야 지원 프로그램을 수립해 나가고 있다.
- 1) 미국 양자 정보 기술 정책 동향
- 2018년 9월 미국 대통령부 과학기술정책국(OSTP) 산하 국가과학기술회의(NSTC)가 공포한 보고서 '양자 정보 과학 국가 전략 개요' 중에서 양자 정보 과학에 대한 정책에 대한 내용은 아래와 같이 제언했다.⁹⁷⁾
- ① 과학 기초 첫째로 두고 접근할 것
 - 양자 정보 과학 분야의 인재 육성에 힘쓸 것
 - 양자 정보 과학과 관련된 산업과의 관계를 강화할 것
 - ② 중요한 인프라(기술·설비 등)를 제공할 것
 - ③ 국가 안전 보장과 경제 성장을 유지할 것
 - ④ 국제 협력을 추진할 것

97) National Science and Technology Council, "National Strategic Overview for Quantum Information Science", September 2018.

4. 양자 컴퓨팅과 AI의 융복합 트렌드 및 향후 전망

4-1. 양자 컴퓨팅과 AI(인공지능)

1) 양자 AI 개요

(1) 양자 컴퓨팅과 AI의 차이¹¹⁴⁾

- 양자 컴퓨터와 AI는 현대의 기술 중에서 가장 많은 주목을 받고 있는 분야 중 하나다. 둘 다 기존 컴퓨팅의 한계를 뛰어넘는 혁신적인 가능성을 가지고 있지만, 그 본질은 크게 다르다.

<표 I-24> 양자 컴퓨터와 AI의 차이

| | 양자 컴퓨터 | AI |
|-------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 작동 원리 | 양자역학의 원리에 근거하여 양자 비트를 대량의 데이터를 학습하여 패턴을 인식한다 하여 계산한다 | |
| 데이터 | 양자 비트 | 텍스트 등 다양한 형식의 데이터 |
| 학습 | 양자 알고리즘 개발 | 기계 학습 및 그라디언트를 이용하는 학습 |
| 특기 | 대규모 최적화 문제를 빠르게 해결하는 신소재 개발, 신약 개발 시뮬레이션 등 | 영상인식, 자연어 처리, 우성 인식 등 패턴 인식 및 예측 |

- AI는 대량의 데이터를 학습하고 그 학습을 바탕으로 새로운 데이터를 예측 및 분류하는 기술이다.
 - 이 프로세스는 인간의 학습과 비슷한 측면이 있으며, 과거의 경험을 통해 새로운 상황에 대처하는 인간의 학습 과정을 모방했다고 할 수 있다.
 - 하지만 AI의 학습에 사용되는 데이터에 편향이 생기면 잘못된 판단을 내릴 수 있다. 때문에, 데이터의 질에 큰 영향을 받으며, 데이터의 편향은 AI의 성능을 크게 좌우하는 요인으로 된다.
- 한편 양자 컴퓨터는 양자역학의 원리에 근거하여 작동하는 컴퓨터다. 기존 컴퓨터에서는 불가능한 복잡한 병렬 계산이 가능하며, 복잡한 문제를 빠르게 해결할 수 있을 것으로 기대된다.
 - 특히 재료 과학이나 약학 분야에서는 양자 컴퓨터를 사용하여 시뮬레이션함으로써 새로운 물질을 발견하거나 약제를 개발하는 속도를 높일 수 있다.
 - 기존 컴퓨터에서는 계산량이 방대해지기 때문에, 근사치를 이용하여 계산하는 것이 일반적이었다. 하지만 양자 컴퓨터는 그러한 근사치의 정밀도를 크게 높일 수 있어, 더욱 정확한 시뮬레이션을 할 수 있다.

114) <https://ai-kenkyujo.com/news/ryoushi-computer/>

B. 최신 발전

- 2023년 IBM Qiskit 플랫폼에서 수십 큐비트로 시연되었으나, 주로 교육 목적으로 국한되고 있다.¹⁴⁷⁾

▣ 기대효과

- 도이치-조사(Deutsch-Jozsa Algorithm) 알고리즘은 양자 컴퓨팅의 이론적 가능성을 최초로 입증한 알고리즘으로, 단일 쿼리로 함수의 성질을 판별하며 $O(1)$ 시간 복잡성을 달성했다.
- 양자 병렬성과 간섭을 활용한 이 접근법은 Shor나 Grover 알고리즘의 토대를 마련했으나, 실용적 응용은 제한적이다. NISQ 시대에서는 교육 및 연구 도구로 주로 활용되며, 양자 컴퓨팅의 잠재력을 탐구하는 데 중요한 역할을 한다. 특히 이의 발전은 더 현실적인 문제에 적용 가능한 변형으로 이어질 가능성이 있다.

3) 양자 머신러닝(QML)과 양자 딥러닝(QDL)

(1) 양자 머신러닝과 양자 딥러닝의 필요성(양자 컴퓨팅의 융합 배경)

- 양자 머신러닝(QML)과 양자 딥러닝(QDL)은 양자 컴퓨팅의 원리를 활용하여 기존의 머신러닝 및 딥러닝 기술의 한계를 극복하고, 새로운 가능성을 열어주는 혁신적인 분야이다. 이들 기술의 필요성은 다음의 세 가지 측면에서 살펴보자.

▣ 고전적 한계 극복

- 복잡한 문제 해결: 고전적 컴퓨터는 특정 복잡한 문제를 해결하는 데 한계가 있다. 양자 컴퓨터는 양자 간섭과 중첩을 활용하여 동시에 여러 상태를 처리할 수 있어, 고전적 알고리즘으로 해결하기 어려운 문제를 보다 효율적으로 해결할 수 있다.
- 데이터 처리 효율성: 양자 알고리즘은 고전적 알고리즘에 비해 지수적으로 빠른 속도를 제공할 수 있다. 예를 들어 양자 서포트 벡터 머신(QSVM)과 같은 알고리즘은 고차원 데이터의 벤더를 더 빠르게 수행할 수 있다.

▣ 데이터 처리 효율성

- 대량 데이터 처리: 양자 머신러닝은 대량의 데이터를 처리하는 데 있어 고전적인 방법보다 훨씬 더 효율적이다. 양자 얹힘을 활용하면 데이터 포인트 간의 상관관계를 동시에 염색할 수 있어, 패턴 인식 및 데이터 분석의 정확성을 높일 수 있다.
- 최적화 문제 해결: 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA)과 같은 양자 알고리즘은 최적화 문제를 해결하는 데 있어 고전적인 알고리즘보다 뛰어난 성능을 보일 수 있다. 이는 특히 변수의 수가 많아질수록 복잡성이 증가하는 최적화 문제에서 큰 장점을 제공한다.

147) <https://github.com/Qiskit/textbook/tree/main/notebooks/ch-algorithms>

▣ 새로운 응용 가능성

- 다양한 분야에서의 활용: 양자 머신러닝과 딥러닝은 의료, 금융, 화학, 재료 과학 등 다양한 분야에서 응용될 수 있다. 예를 들어, 신약 개발이나 화학 시뮬레이션에서 양자 컴퓨터의 강력한 계산 능력을 활용하여 복잡한 분자 구조를 분석할 수 있다.
- AI와의 융합: 양자 컴퓨팅은 인공지능(AI) 기술과 결합하여 새로운 형태의 AI 모델을 개발할 수 있는 가능성을 제공한다. 양자 신경망(QNN)과 같은 모델은 기존의 딥러닝 모델보다 더 빠르고 효율적으로 학습할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

▣ 연구 및 개발의 필요성

- 이론적 연구의 필요성: 양자 머신러닝은 아직 초기 단계에 머물고 있어 이론적 연구가 필요하다. 양자 속도 향상이 실제로 가능한지, 그리고 이를 뒷받침하는 이론적 기작이 무엇인지에 대한 연구가 진행되고 있다.
- 기술적 발전: 양자 컴퓨터의 기술적 발전과 함께 양자 머신러닝과 딥러닝의 성능은 더욱 확대될 것이다. 이는 새로운 응용 분야의 개발과 함께 양자 컴퓨팅의 상용화로 이어질 수 있다.
- 양자 머신러닝과 딥러닝은 기존의 기술로는 해결하기 어렵거나 해결하는 문제를 해결할 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 앞으로의 기술 발전이 기대되는 분야이다.

(2) 양자 머신러닝과 양자 딥러닝 기능별 분류

<표 I-25> 양자 머신러닝과 양자 딥러닝의 기능별 분류

| 기능 | 주요 기법 | 특징 | 응용 |
|----------------|-------------|-------------------|---------------------|
| 분류 | 양자머신러닝(QML) | 양자 커널 병렬성 | 이미지 인식 진단 |
| | 양자딥러닝(QDL) | 딥러닝 구조 | |
| 클러스터링 | 양자머신러닝(QML) | 거리 계산 가속 차원 축소 | 고객 세분화 이상 탐지 |
| | 양자딥러닝(QDL) | QNN QCNN | |
| 회귀 | 양자머신러닝(QML) | 양자 선형 회귀 | HHL 기반 선형 시스템 해결 |
| | 양자딥러닝(QDL) | | 가격 예측 모델링 |
| 최적화 | 양자머신러닝(QML) | QAOA 양자 어닐링 | 조합 문제 해결 변분 최적화 |
| | 양자딥러닝(QDL) | VQC | 물류 학습 최적화 |
| 모델 | 양자머신러닝(QML) | QGANs | 고차원 분포 샘플링 |
| | 양자딥러닝(QDL) | | |
| 시퀀스 | 양자머신러닝(QML) | HQMMs | 시간적 진화 모델링 |
| | 양자딥러닝(QDL) | QRNN | 언어 처리 |
| 구조 추출 | 양자머신러닝(QML) | QPCA | 고차원 데이터 처리 |
| | 양자딥러닝(QDL) | | 전처리 압축 |
| 패턴 인식 상태 분류 | 양자머신러닝(QML) | 양자연관메모리 XQML | 패턴 탐지 해석성 강화 |
| | 양자딥러닝(QDL) | | 맬웨어 탐지 상태 분석 |

II. 양자정보기술 주요 분야별 연구개발 동향과 향후 과제

1. 양자 컴퓨팅 글로벌 연구개발 동향과 향후 과제

1-1. 기술 개요

1) 양자 컴퓨팅 정의

- 양자 컴퓨팅(양자 계산)이란 양자 중첩, 양자 양자 간섭, 양자 자원으로 기존 계산기에서는 불가능한 정보 처리를 가능하게 하는 새로운 계산 모델이다.
- 해당 연구 영역은 이론적인 계산 모델뿐 아니라 소프트웨어, 아키텍처, 하드웨어, 물리학 · 계산기 과학 · 전자 공학까지 광범위한 주제를 다룬다.
- 또한 양자 컴퓨터를 실현하는데 필요한 양자 공학이나 양자 컴퓨터 연구를 통해 얻을 수 있는 계산기 과학에 대한 이해도 관련 연구가 포함된다.

2) 연구개발 의의

- 반도체 미세가공 기술에 의한 전자기기의 성능 상상이 기술적 · 경제적인 한계에 가까워지면서 양자 컴퓨팅, 빅데이터 처리, 미세화학, 심층학습, 조합 최적화 등의 계산 니즈가 고조화되고 있다. 특히 양자 컴퓨팅에 대한 사회적 기대가 커지고 있다.

- 새로운 계산 원리와 함께 새로운 아키텍처, 새로운 디바이스 등 새로운 계산 패러다임과 그 계산 원리와 함께 실현 기술에 대한 관심이 최근 빠르게 증가하고 있으며, 그 중심에 '양자 컴퓨터'가 주목되고 있다.

- 인수분해 문제 등 컴퓨터의 특정한 문제를 효율적으로 계산할 수 있는 양자 알고리즘이 알려지면서 대량의 실용 크기의 계산을 실행하기에는 하드웨어의 성능이 부족하다.
- 특히 양자 모델을 중심으로 하는 하드웨어의 개발 목표는 양자 비트 집적화와 충실도와 조합 최적화에 높은 양자 게이트 적용, 양자 오류 정정 부호의 적용으로 인한 규모 확대이며, 그 자체로 장기적인 문제이다.

- 소프트웨어 및 아키텍처의 관점도 아직 부족하다. 현재 이용할 수 있는 소규모 디바이스에서 유용한 계산을 수행하는 양자 · 고전 하이브리드 알고리즘은 양자 화학 계산 및 양자 기계학습에서의 유용성을 탐색하고 있다.

- 이러한 이론 · 알고리즘과 하드웨어 사이의 큰 간극을 메우려면 양자 정보 과학과 전자 공학, 계산기 과학, 수리 과학 등의 융합을 통한 학제적인 시책이 필요하다. 양자 컴퓨터 영역은 양자 컴퓨터의 실현을 뒷받침하는 학리 기반 · 공학 기반으로서만이 아니라 새로운 알고리즘의 발견 등 양자 계산 · 양자 정보 처리가 계산기 과학에 가져다주는 피드백을 기대할 수 있다는 점에서도 의의가 있다.

1-2. 주요 연구개발 동향 및 이슈

1) 현재까지의 연구개발 흐름

- 양자 컴퓨터의 일반적인 계산 모델은 1993년에 Yao가 제안한 양자 회로 모델²⁰⁹⁾ 등가(等價)한 양자 계산 모델로는 단열 양자 계산, 측정형 양자 계산, 토플로지 양자 계산 등이 있다.
 - 양자 회로 모델보다 물리적으로 자연스러운(즉, 계산기를 실현하기에 타당해 보이는) 모델도 있지만, 현재로서는 양자 회로 모델에 근거한 연구를 진행하는 연구자 및 조직이 많이 있다.
- 양자 컴퓨터 연구의 첫 번째 봄이 일어난 계기는 Shor의 소인수 분해 알고리즘(1994년)과 Grover의 검색 알고리즘(1996년)이라는 양대 알고리즘이 등장이다.
 - 디코하이런스 및 양자 오류 등 하드웨어의 물리적 과제는 그동안 밝은 전망이었지만, Calderbank, Shor, Steane 등이 구체적인 오류 정정 부호를 제안하여 이론적 연구가 2000년대 초에 걸친 양자 컴퓨터 연구의 전성기로 발전하게 되었다.
 - 웹사이트 'Quantum Algorithm Zoo'에는 현재 100여 원 다수의 양자 알고리즘이 정리되어 있다.
- 대규모 양자 컴퓨터를 실현하는 데 있어 물리 양자 회로에 의해 확장성을 갖춘 윤리 양자 비트를 구성하는 '양자 표면 코드' 정장화 기술이 열쇠가 된다.
 - 그중에서도 표면 코드를 활용 가능한 여러의 부호는 약 1%로 크게 주목받고 있다. 이 부호에는 에러 측정과 함께 최근방 양자 비트 사이에서의 2양자 비트만 필요하다는 점, 2차군 부호로 격자의 차원을 늘리는 것만으로 에러 내성을 결정하는 부수 거리를 키울 수 있는 등 하드웨어 실장 면에서의 이점이 있다.

2) 초기 트렌드

- 생겨나기 시작하는 양자 컴퓨터 봄이 시작된 것은 2014년 캘리포니아 대학 산타 바비오나 대학교(UCSB)의 Martinis 팀이 초전도 5 양자 비트 디바이스에서의 총실도(1 양자 게이트 : 99.92%, 2 양자 비트 게이트 : 99.4%, 측정 : 99%) 실증²¹⁰⁾이다.
 - 이 봄은 이론 · 실험 두 측면에서 '양자 컴퓨터를 어떻게 만들어 낼까' 하는 공학적인 단계에 들어갔다는 점이 특징이다.
 - Google, IBM, Microsoft, Intel, Alibaba와 같은 IT 기업이 양자 컴퓨터에 대한 연구개발 자를 확대하였고, QC Ware, Rigetti Computing, IonQ, 1QBit, Zapata Computing 등 의 스타트업이 잇따라 설립되었다.

210) R. Barends, et al., "Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance," *Nature* 508, no. 7497 (2014) : 500-503., <https://doi.org/10.1038/nature13171>

- 예를 들어, 양자 컴퓨터 과학 연구개발 거점, 계산 플랫폼 운영·제공 거점, 교육·훈련 거점, 해외 유력 연구자와 국내 연구자를 연결하는 국제 연계 거점 등 다양한 종류를 생각해 볼 수 있다.
- 각각의 기능에 맞춰 대학 및 공적 연구기관에 설치하고, 양자 정보 처리 교육 프로그램을 개발 및 제공하며, 정확하고 적극적인 아웃리치·과학 홍보 활동을 전개하는 양자 스타트업 기업의 적극적인 지원 등 다양한 시책을 통해 지속성 있는 네트워크를 구축해야 한다.
- 이러한 연구개발 프로젝트 및 연구개발 네트워크의 성공은 양자 컴퓨터 커뮤니티 플랫폼 확충과 에코시스템 양성에 도움이 된다. 계산과학·물리·물리학·수학·전자·공학을 넘나드는 연구자·기술자 커뮤니티는 아직 맹아기이며, 양자 연계, 산학 연계, 기술 레이어 연계를 가능하게 하는 연구개발·인재 육성 거점과 함께 예상 정부의 지원으로 인해 커뮤니티 형성·에코시스템 형성을 위한 활동이 추진해야 한다.

1-6. 양자 컴퓨팅의 활용 동향과 사례

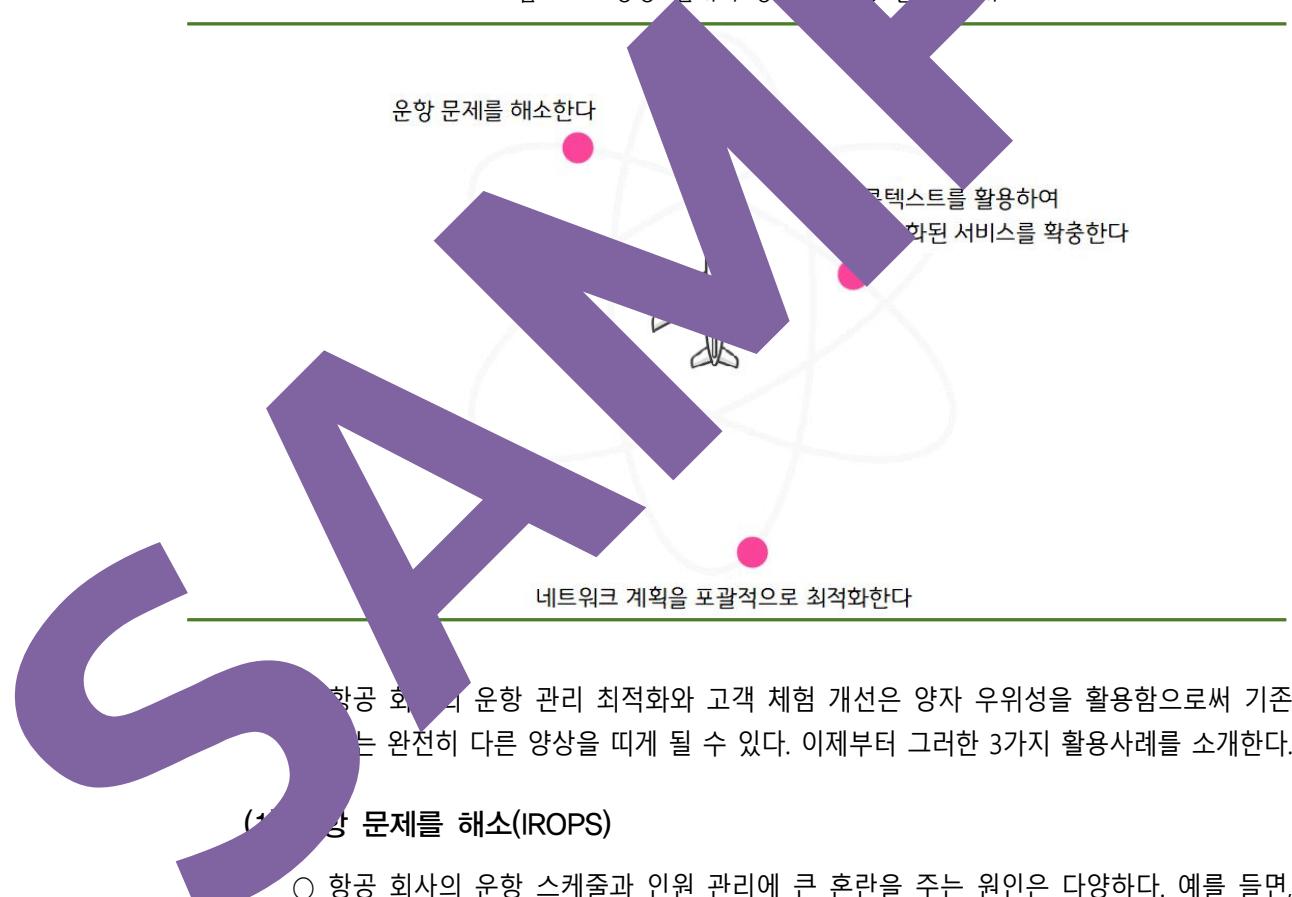
- 양자 컴퓨팅의 하드웨어, 소프트웨어, 알고리즘 등이 융합되어, 고전 컴퓨팅보다 성능을 훨씬 향상시킬 수 있다. 특히 양자 컴퓨팅에서 사용되는 양자 양성을 얻을 수 있는 기회가 생겨난다.
- 본 절에서는 항공·물류·채용·증권·항공·은행 및 금융 시장, 화학 및 석유, 의료, 생명 과학 등 다양한 분야에서 양자 기술의 정보를 제공한다. 각 분야에서 소개하는 업계 고유의 견해나 활용 예상은 앞으로 세계로 양자 기술에 관해 본격적으로 검토할 때 도움이 될 것으로 판단된다.
- 양자 기술의 활용 분야를 실현하는데 어느 정도 시간이 걸린다 해도, 양자에 관한 검토는 활용과 함께 이루어지며 '금방이라도' 어느 업계나 비즈니스에 막대한 성과를 불러올 수 있을 것으로 예측된다.

1) 항공산업

- 신종 코로나 바이러스로 인한 팬데믹에 의해 가장 큰 피해를 입었던 대표적인 업종이 여행 업계와 운송 업계이었다.
- 2025년에 접어들면서 전 세계 항공 운송 업계에는 만성적인 공급망 위기, 인건비 상승, 경제와 항공 여행 수요를 변화시킬 수도 있는 정치적 변화, 항공 지속 가능성 목표를 달성하고 감당해야 하는 어려운 과제 등 전년도의 문제들이 그대로 이어지고 있다.

- 전 세계 항공사들은 2024년에 총 315억 달러, 2025년에 366억 달러의 순이익을 기록할 것으로 예상했지만, 순이익률은 2024년 3.3%, 2025년 3.6%로 승객 1인당 7달러에 불과해 미약할 것이라고 국제항공운송협회(IATA)는 전망했다.
- 최근 빈번해지는 항공 사고 등의 위기를, 기업을 존속시키기 위한 시련이 아니라 기업의 큰 발전과 성장의 기회로 삼는 기업도 있다. 경쟁사를 이기기 위한 전략은 기존 시스템 존속시키는 것만 고려하는 것이 아니라 고환율 등으로 위축된 잠재적인 수요를 이용해 단숨에 성장하기 위한 것이어야 한다. 이러한 선구자 이익을 얻으려면 새로운 기술과 혁신적인 루션을 개척해야 하며, 양자 컴퓨팅도 그 중 하나라 할 수 있다.
- 양자 컴퓨팅은 계산 속도 향상, 데이터 구동에 의한 행동 예측과 같은 새로운 향상, 새로운 알고리즘 및 시스템 기능 창출 등을 통해 기존 시스템에서는 해결하기 어렵거나 불가능한 문제에 대한 대처를 지원하고, 다양한 업계에 새로운 가능성의 풍물로 등장할 것으로 예상된다. 항공 회사의 비즈니스와 관련된 복잡한 문제를 해결할 때 양자 컴퓨팅의 우위성이 가진다면, 항공 분야에 대한 역할을 할 것으로 기대된다.

<그림 II-2> 항공 업계의 양자 컴퓨팅 활용 사례



- 항공 회사의 운항 스케줄과 인원 관리에 큰 혼란을 주는 원인은 다양하다. 예를 들면, 세계적인 질병의 유행, 악천후, 지진, 작동 상의 문제, 기술적인 문제가 있다. 이러한 운항 문제에 대응하여, 운항 스케줄 및 인원 배치를 어떻게 복구시킬지는 항공 회사가 대처해야 하는 가장 어려운 문제 중 하나다.

2. 양자 통신 글로벌 연구개발 동향과 향후 과제

2-1. 기술 개요

1) 양자 통신 정의

- 양자 통신 네트워크는 주로 양자의 물리적인 특징을 활용하여 송수신하는 동안으로 안전하게 암호키를 공유하는 양자 키 배송 네트워크와 양자 정보를 원격지 중첩 및 양자 얹힘 등의 양자 상태를 유지한 채로 주고받는 양자 인터넷으로 분류된다.
- 해당 연구개발 영역은 일대일(1:1) 양자 키 배송의 고속화 및 실용화 기술에서부터 기존 시큐리티 기술과의 융합, 다대다(N:N) 네트워크화와 위성통신을 위한 대규모 글로벌 네트워크 구축, 양자 중계 기술 및 그것을 활용한 양자 인터넷 등 주제에 관한 연구개발을 다루는 영역이다.

<그림 II-10> 국내 양자통신 기술발전 전망도

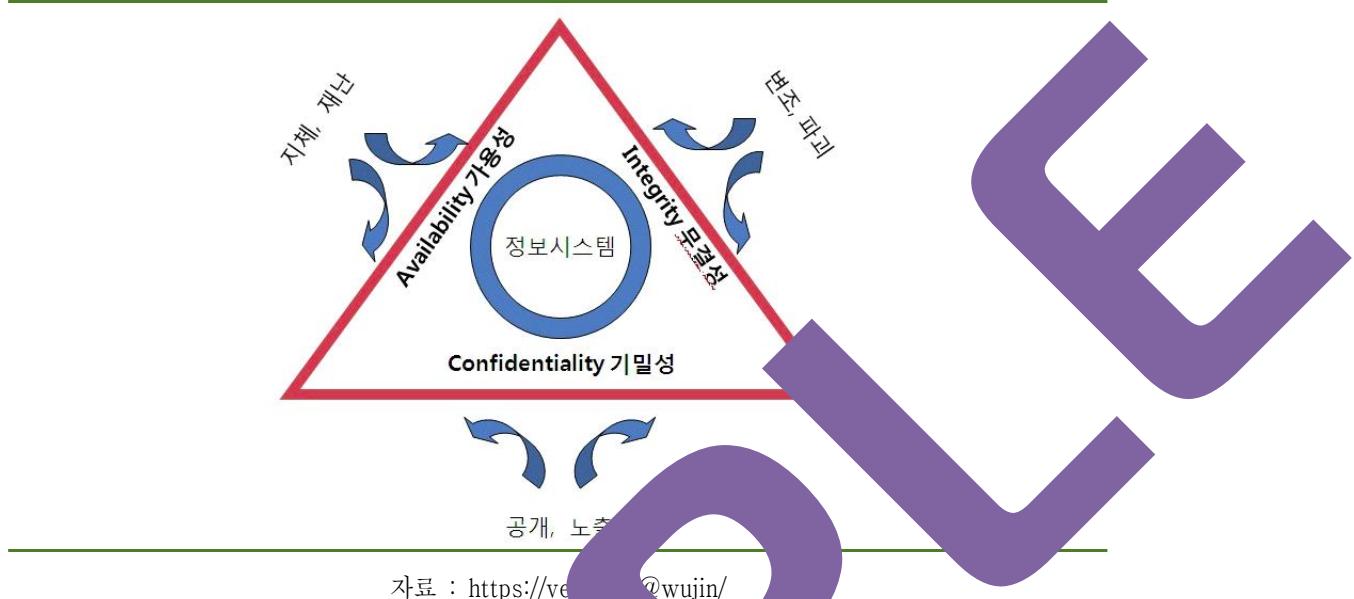


자료 : 정보통신기획평가원(IITP), 2022 양자통신 로드맵('22)

2) 연구개발 주제의

현재의 정보화 사회를 뒷받침하는 공개 키 암호 등의 현대 암호는 해독하는 데 방대한 계산량이 요구되는 '계산량적 안전성'에 따라 안전성이 담보된다. 하지만 최근 양자 컴퓨터에 대한 연구가 가속화되고 있어 미래에 실용화될 양자 컴퓨터나 완전히 새로운 수리 알고리즘이 등장함에 따라 현대 암호가 쉽게 해독될 것이라는 우려가 생겨났다.

<그림 II-11> 정보 보안 3요소



- 그래서 양자 컴퓨터가 실현된다면 중요 기관은 양자 암호로 민밀 정보를 안전하게 주고받고자 해독이 불가능하다는 사실이 확실해지므로 증명는 양자 암호가 반드시 필요하게 되었다.
 - 또한, 유무선 통신 사용이 확대되면서 정보를 위한 양자 네트워크의 중요성이 강조되고 있다.
- 양자 암호는 양자 키 배송(Quantum Key Distribution)과 원타임 패드(One Time Pad, OTP)로 구성된다.
 - OTP는 암호화 과정에서 한 번만 사용되는 난수를 암호 키로 사용하며 한 번 사용한 난수를 두 번 다시 사용하지 않는 방식이다. 양자 암호는 이러한 OTP에서 QKD로 대체되며 양자 키를 사용하는 대체 정보 이론적 안전성을 달성한다.
 - 양자 키 배송은 양자 장치를 네트워크에 연결하고 키를 관리·배송하는 기술이 양자 키 배송 네트워크(Quantum Key Network)이다.
- 한 국가 차원에서 QKD 네트워크의 국제적인 보급을 위해 실용화하려는 움직임이 활발하게 이루어 있으며, 지상계 및 위성계 양쪽에서 양자 암호를 활용하는 국제적인 양자 키 배송 네트워크를 구축하는 일을 서두르고 있다.

그러려면 QKD의 고속화·장거리화 및 네트워크화, 선진적 디바이스 시스템 기술 개발, 전자 시큐리티 기술(기존 시큐리티 기술)과의 융합 등 다양한 과제를 해결해야 한다.

또한 미래에 대규모 분산 양자 컴퓨팅 및 비밀 양자 계산, 광시계 양자 네트워크를 통한 시공간 동기화, 양자 센서 네트워크 등의 양자 애플리케이션이 등장하게 되면 사람들이 안심할 수 있고 안전하며 편리한 생활 및 고도의 사회 경제 활동이 실현될 것으로 기대된다.

III. 양자정보기술 글로벌 연구데이터 및 특허 경쟁력 분석

1. 분석 방법

1-1. 데이터 수집

- 논문 · 특허 검색식 작성 후 특허(Wintelips), 논문(SCOPUS) 기준으로 단위의 데이터를 검색했다.
 - **논문 데이터 수집** : SCOPUS DB의 논문 제목, 저자명, 키워드(Keyword) 등 대상 키워드 검색
 - **논문 제목(Title)** : 연구의 핵심 주제를 나타내는 제목을 기준으로 검색
 - **색인어(Keywords)** : 연구자가 논문의 핵심 주제를 요약하거나 제시하는 속어 등을 기준으로 검색
 - **특허 데이터 수집** : WIPS OMNIBUS의 발명특허(AB), 전체청구항(CLA) 대상 키워드 검색
 - **발명의 명칭(TI, Title)** : 특허 제목이나 명칭을 나타내는 제목을 기준으로 검색
 - **요약(AB, Abstract)** : 특허의 내용이나 내용을 요약하는 요약문을 기준으로 검색
 - **전체 청구항(CLA, Claims)** : 해당 특허의 권리 범위를 범위를 나타내는 청구항을 기반으로 검색
- 검색 기간 : 논문(2013. 01 ~ 2023. 12), 특허(2013. 01 ~ 2023. 12)

1-2. 분석 방법

- 분석 분야
 - 논문의 경우 특허의 양적 규모를 우선적으로 파악하여 해당 연구 분야의 전반적인 성장 추이를 살펴보았다.
 - 연도별 출원 분야 및 특허 출원 수 변화를 분석하여 연구 및 기술 개발의 활성화 정도를 평가했다.
 - 논문의 경우, 논문 점유율 및 증가율을 고려하여 학술지 및 연구 기관별 출판 동향을 분석하며, 특허의 경우 특허 점유율 및 증가율을 기반으로 주요 출원인의 출원 경향을 검토했다.
- 기술경쟁력 평가 : 연구 주체(기관)별로 양적/질적 지표를 활용하여 기술 경쟁력을 평가했다.

■ **양적 지표** : 논문 및 특허의 발표 및 출원 건수, 연도별 증가율을 분석하여 연구 생산성을 측정, 논문의 경우 논문 점유율 및 증가율, 특허의 경우 출원 특허 점유율 및 증가율을 분석하여 연구 및 기술개발의 양적 경쟁을 평가했다.

■ **질적 지표** :

- 논문 : 논문 영향력(논문당 피인용수), 중요 논문 점유율(피인용수 10 이상 논문 점유율), 연구 협력 네트워크 등을 분석하여 연구의 질적 수준을 평가했다.
- 특허 : 특허 영향력(등록 특허당 피인용수), 중요 특허 점유율(IP4 특허 여부, 특허 요건 충족 여부), 특허 유지율, 등록률 등을 분석하여 기술적 가치와 영향력을 IP4 점유율(한국, 미국, 일본, EU, 중국 등 4개국 출원 비율) 및 해외 출원도(출원 특허 패밀리 특허 국가 수)를 분석하여 시장 경쟁력 및 경제적 중요성을 평가했다.

<표 III-1> 기술 경쟁력 평가지표

| 구분 | 지표 | 설명 | 정_ |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 활동도 (양적) | 논문 점유율 | 논문 건수 기반 양적 경쟁력 측정 | 특정기술에서 특정기관(국가)의 논문 점유율 기술의 전체 논문 건수 |
| | 논문 증가율 | 논문 건수 기반 양적 경쟁력 추이 측정 | 최근구간 CAGR |
| | 특허 점유율 | 출원특허 건수 기반 양적 경쟁력 측정 | 기술에서 특정기관(국가)의 특허건수 특정기술의 전체 특허건수 |
| | 특허 증가율 | 출원특허 건수 기반 양적 경쟁력 추이 측정 | 최근구간 CAGR |
| 영향력 (질적) | 논문 영향력 | 논문 건당 피인용수 기반 질적 영향력을 측정 | 기술에서 특정기관(국가)의 전체 논문 피인용수 합 기술에서 특정기관(국가)의 전체 논문건수 |
| | 중요 논문 점유율 | 논문 피인용수 기반 * 피인용수 10 이상 논문 * 특허에 해당하거나, 등록특허에 해당하거나, 등록특허 중 패밀리국가수 혹은 청구항수가 해당기술의 평균보다 높은 특허 | 특정기술에서 특정기관(국가)의 중요논문 수 특정기술의 전체 중요논문 수 |
| | 특허 영향력 | 등록특허 건당 피인용수 기반 질적 경쟁력(기술 경쟁력) 측정 | 특정기술에서 특정기관(국가)의 전체등록특허 피인용수 합 특정기술에서 특정기관(국가)의 전체 등록건수 |
| | 중요 특허 점유율 | 특허* 확보율 기반 * 특허에 해당하거나, 등록특허에 해당하거나, 등록특허 중 패밀리국가수 혹은 청구항수가 해당기술의 평균보다 높은 특허 | 특정기술에서 특정기관(국가)의 중요특허 수 특정기술의 전체 중요특허 수 |
| | IP4 점유율 | 주요국 동시 출원특허 기반 IP4 : 한국, 미국, 일본, EU, 중국 등 4개국 출원 질적 경쟁력(시장 경쟁력) 측정 | 특정기술에서 특정기관(국가)의 IP4 동시 특허출원 건수 특정기술의 IP4 동시 특허출원 건수 |
| | 해외 출원도 | 출원특허 건당 패밀리특허 국가수 기반 질적 경쟁력(경제적 중요성) 측정 | 특정기술에서 특정기관(국가)의 전체 출원특허 패밀리국가수 특정기술에서 특정기관(국가)의 전체 출원건수 |
| 기술경쟁력 | 양적 점유율과 질적 영향력을 고려한 기술 경쟁력 측정 | | 점유율과 영향력의 가중평균 |

2. 논문 및 특허 성과

2-1. 논문 성과

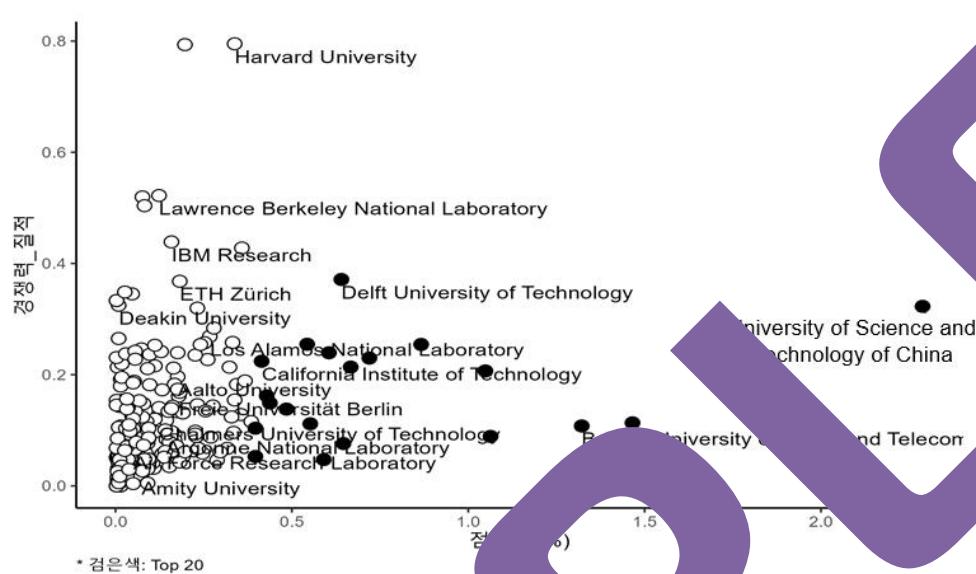
1) 글로벌 Top 50

- (기관별 논문 성과) University of Science and Technology of China가 논문 수 779건, 논문 점유율 2.29%로 가장 높았으며, 이어서 Nanjing University(499건, 1.47%), Beijing University of Posts and Telecommunications(450건, 1.32%), Chinese Academy of Sciences(362건, 1.06%) 순으로 분석됐다.

<표 III-3> 양자 분야 글로벌 Top 50 기관 논문 성과

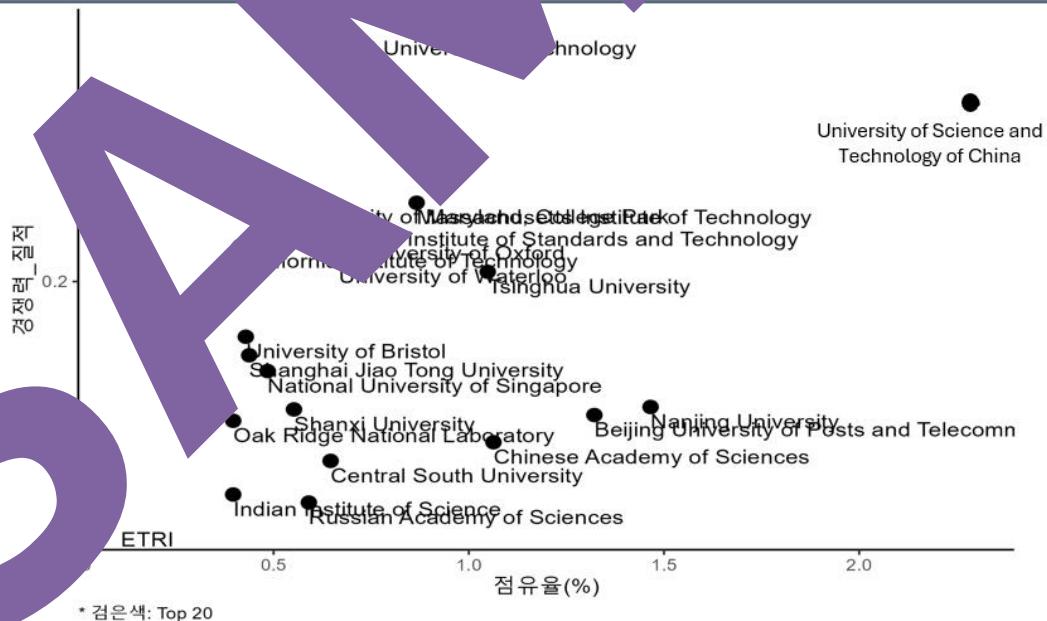
| 순위 | 기관명 | 논문 수 (건) | 논문 점유율 (%) | 증분류 논문 수 | | |
|----|----------------------------------------------------|-------------|------------------|-----------|----------|----------|
| | | | | 양자 컴퓨팅 | 양자 통신 | 양자 융합 |
| 1 | University of Science and Technology of China | 779 | 2.29% | 9 | 252 | 522 |
| 2 | Nanjing University | 499 | 1.47% | 16 | 168 | 321 |
| 3 | Beijing University of Posts and Telecommunications | 450 | 1.32% | 2 | 64 | 386 |
| 4 | Chinese Academy of Sciences | 362 | 1.06% | 26 | 188 | 152 |
| 5 | Tsinghua University | 351 | 1.04% | 9 | 210 | 144 |
| 6 | Massachusetts Institute of Technology | 341 | 0.87% | 21 | 125 | 154 |
| 7 | University of Oxford | 245 | 0.72% | 1 | 151 | 94 |
| 8 | University of Waterloo | 227 | 0.67% | 1 | 126 | 102 |
| 9 | Central South University | 220 | 0.65% | 0 | 16 | 205 |
| 10 | University of Illinois Urbana-Champaign | 218 | 0.64% | 1 | 113 | 109 |
| 11 | National Institute of Standards and Technology | 206 | 0.61% | 8 | 84 | 117 |
| 12 | Russian Academy of Sciences | 201 | 0.59% | 0 | 76 | 126 |
| 13 | Singapore University | 188 | 0.55% | 6 | 45 | 140 |
| 14 | University of Maryland, College Park | 185 | 0.54% | 2 | 131 | 54 |
| 15 | Singapore University of Singapore | 165 | 0.48% | 2 | 72 | 93 |
| 16 | Shanghai Jiao Tong University | 149 | 0.44% | 5 | 60 | 86 |
| 17 | University of Bristol | 146 | 0.43% | 3 | 49 | 94 |
| 18 | California Institute of Technology | 141 | 0.41% | 0 | 88 | 53 |
| 19 | Indian Institute of Science | 135 | 0.40% | 5 | 82 | 48 |
| 20 | Oak Ridge National Laboratory | 135 | 0.40% | 0 | 61 | 75 |
| 21 | Technical University of Denmark | 131 | 0.38% | 0 | 28 | 103 |

<그림 III-13> 양자 분야 글로벌 기관 논문 경쟁력 분포 - 점유율 vs 경쟁력(질적)



○ University of Science and Technology of China는 점유율(%) 지표와 질적 경쟁력 지표에서 높은 성과를 나타내며, University of Science and Technology는 질적_경쟁력 지표에서 높은 성과를 나타냈다.

<그림 III-14> 양자 분야 글로벌 Top 20 기관 논문 경쟁력 분포 - 점유율 vs 경쟁력(질적)



IV. 국내외 주요업체별 양자정보기술 관련 개발 및 시장 전략

1. 해외 주요업체별 개발 동향 및 사업화 전략

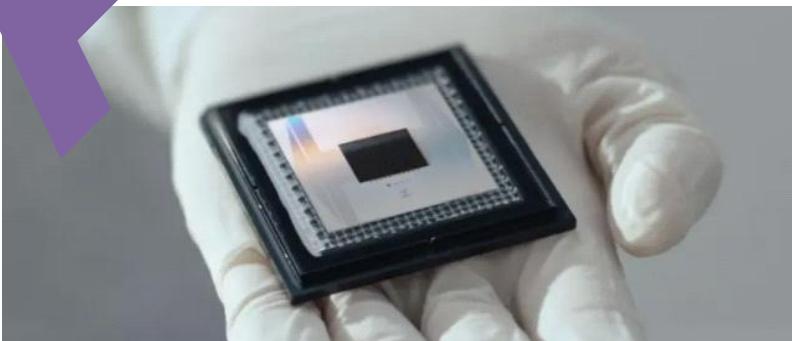
1-1. 미국

1) 구글(Google)

(1) 양자칩 '윌로우(Willow)'

- 구글은 이번에 새로운 반도체(칩)를 발표했다. 이 칩은 10의 25승년(10의 25승년은 10,000,000,000,000,000,000,000년이 걸리는 문제를 불과 5분 만에 해결할 수 있다.)
- 이 칩은 '양자 컴퓨팅'이라 불리는 최신 기술의 최신 결과이다. 입자 물리학의 원리를 이용하여 새로운 유형의 대량 강력한 컴퓨터를 만들고 있다.
- 구글은 새로운 양자 컴퓨터(Quantum Computer)가 중요한 '브레이크스루'를 가져오며, '실용적이고 규모가 큰 양자 컴퓨터로의 진입'을 열 것'이라고 말한다. 하지만, 전문가들은 양자 컴퓨터가 현시점에서는 주로 실험적인 칩이기 때문에, 현실의 다양한 문제를 해결할 만큼 양자 컴퓨터가 실현되기까지는 더 많은 시간과 수십억 달러의 투자를 필요하다고 예상한다.

그림1) 구글이 발표한 양자 칩 'Willow(윌로우)'



253) BBC NEWS JAPEN, 米グーグルが量子チップ「ウィロー」を発表, 10の25乗年かかる計算が..., 2024.12.10

| Willow System Metrics | | Random Circuit Sampling (Chip 2) | |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Number of qubits | 105 | Single-qubit gate error ¹ (mean, simultaneous) | 0.036% \pm 0.013% |
| Average connectivity | 3.47 (4-way typical) | Two-qubit gate error ¹ (mean, simultaneous) | 0.14% \pm 0.052% (iswap-like) |
| Quantum Error Correction (Chip 1) | | Measurement error (mean, simultaneous) | |
| Single-qubit gate error ¹ (mean, simultaneous) | 0.035% \pm 0.029% | 0.67% \pm 0.51% (terminal, all qubits) | |
| Two-qubit gate error ¹ (mean, simultaneous) | 0.33% \pm 0.18% (CZ) | Reset options | Multi-level reset (1) state only Leakage removal (2) state only |
| Measurement error (mean, simultaneous) | 0.77% \pm 0.21% (repetitive, measure qubits) | T ₁ time (mean) | 98 μ s \pm 32 μ s ² |
| Reset options | Multi-level reset (1) state and above Leakage removal (2) state only | Circuit repetitions per second | 63,000 |
| T ₁ time (mean) | 68 μ s \pm 13 μ s ² | Application performance | XEB fidelity depth 40 = 0.1% |
| Error correction cycles per second | 909,000 (surface code cycle = 1.1 μ s) | Estimated time on Willow vs classical supercomputer | 5 minutes vs. 10^{25} years |
| Application performance | $\Delta_{3,5,7} = 2.14 \pm 0.02$ | <small>¹Operation errors measured with randomized benchmarking. ²Estimated from data in the paper.</small> | |

자료 : <https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-computer/>

▣ 양자 역학의 딜레마

- 양자 컴퓨터는 현재의 스마트폰이나 PC에서 처리하는 데이터를 다룰 수 있는 기존 컴퓨터와는 완전히 다른 구조로 작동한다.

- 양자 컴퓨터는 양자 역학, 즉 물질과 정보의 상호작용을 이용하여 기존형보다 더욱 빨리 문제를 해결한다. 이를 통해 양자 컴퓨팅은 같은 복잡한 계산을 같은 프로세스의 속도를 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다.

- 한편, 양자 컴퓨팅의 특성을 활용해 기밀 데이터를 보호하는 데 사용되는 일부 암호를 일으키는데 사용될 가능성이 있다.

미국 애플은 2024년 2월에 iOS 17.4 업데이트에 가능한 'iMessage'를 보호하는 암호가 미래의 강력한 양자 컴퓨터에 대처할 수 없도록 '양자 내성'을 부여하겠다고 발표했다.

- 양자 컴퓨팅은 먼저 그 효과가 중요한 시스템의 시뮬레이션에서 사용될 전망이다.

- 예를 들어 핵융합로의 설계 및 약품의 기저 이해, 제약 개발, 전기자동차(EV)를 위한 더 나은 배터리 개발 등이 있으며, 그 밖에도 많은 태스크와 관련될 예정이다.

▣ 구글의 양자 프로세서 개발로 예상 정정 분야 진전

구글 퀀텀 AI가 개발한 양자 프로세서 '윌로우'는 2024년까지 개발된 양자 프로세서 중 가장 높은 성능을 보이며, 예상 정정 기술에서 중요한 진전을 이뤘다. 구글 연구팀은 큐비트 수가 증가해도 시스템 전체의 에러율이 낮아지는 새로운 칩을 설계하고 프로그램 했다. 이는 30년에 걸쳐 해결하려던 중요한 과제를 극복한 성과로 평가된다.