

Issue

Brief

큐비트의 마법, 상상을 계산하는 양자컴퓨터 혁명

삼일PwC경영연구원

March 2025



Contents

들어가며 – 양자컴퓨터, 불가능을 계산하다	01
Part 1. 양자역학: 신의 코드에 접속하다	02
Part 2. 양자컴퓨터가 가져올 미래	12
Part 3. 양자컴퓨터, 현재 어디까지 왔나?	20
Part 4. 순간이동의 꿈, 양자컴퓨팅과 한국의 도전	28
Appendix 1. 양자컴퓨터 개요 및 작동원리	30
Appendix 2. 양자컴퓨팅 소재·부품·장비 목록	34

들어가며

양자컴퓨터, 불가능을 계산하다

지난해 12월, Google은 세상을 놀라게 할 차세대 양자컴퓨터 칩 ‘Willow’를 세상에 내놓았다. 이 칩은 슈퍼컴퓨터가 10의 25제곱 년을 걸려야 풀 수 있는 계산을 단 5분 안에 해치웠다. 이는 우리 눈앞에 다가온, 기존 컴퓨터로는 꿈도 꿀 수 없는 복잡한 문제들을 해결할 수 있는 가능성을 드러낸 것이다. 이에 뒤질세라 Microsoft도 ‘Majorana 1’이라는 최신 양자컴퓨터 칩을 출시하며 양자컴퓨터 개발 전쟁의 막을 올렸다.

양자컴퓨터는 기존 컴퓨터에 양자역학의 원리를 결합한 혁신의 산물이다. 일명 ‘꿈의 컴퓨터’라고 불리는 이 기술은 ‘양자 얹힘’ 같은 현상을 활용해 여러 문제를 한꺼번에 풀어낸다. 그리하여 대규모 데이터 처리나 복잡한 계산에서 강력한 성능을 드러낸다.

양자컴퓨터는 여러 산업 분야에서 새로운 길을 열 것이다. 금융에서는 투자 포트폴리오 최적화와 리스크 분석 같은 복잡한 문제들이 효율적으로 풀려나갈 수 있다. 제약과 화학 산업에서는 신약 개발이나 분자 모델링에서 양자컴퓨터의 활용이 혁신적인 변화를 가져올 것이다. 기후 변화 예측을 위한 복잡한 모델 또한 더욱 정밀하게 계산될 수 있어, 관련 정책과 전략 수립에 큰 힘이 될 것으로 기대된다.

하지만 양자컴퓨터가 상용화되기까지는 여전히 많은 과제를 마주하고 있다. 가장 큰 문제는 오류에 대한 취약성이다. 양자 비트, 즉 큐비트는 외부 환경의 양자 간섭에 쉽게 흔들려 오류를 일으킬 수 있다. 이를 극복하려면 오류 수정 알고리즘이 필요하지만, 아직 완전히 실용적인 수준에는 도달하지 못했다. 양자 컴퓨터를 구현하고 제어하기 위해 필요한 기술과 하드웨어의 복잡성도 큰 장애물이 되고 있다. 이러한 이유로 상용화까지의 길은 여전히 많은 난관으로 가득 차 있다. 젠슨 황 NVIDIA CEO는 최근 CES 2025 기자간담회에서 양자컴퓨터 상용화 시기까지 20년 이상 소요될 것으로 내다보기도 했다.

양자컴퓨터의 상용화 시기에 대한 전망은 엇갈리지만, 양자컴퓨팅 시대가 장기적으로 다가올 것이라는 점에는 별다른 반대가 없다. 양자컴퓨터가 상용화되면 금융, 물류, 화학, 제약 등 다양한 산업 분야에 혁신적인 변혁을 불러올 것이다. 이런 잠재력을 알아본 세계 주요 국가와 기업들은 양자컴퓨터 개발에 거대한 자금을 아낌없이 투자하고 있다.

양자컴퓨터는 단순히 연산 속도를 높이는 데 그치지 않고, 기술적 특이점에 도달할 중요한 기술이다. 이 보고서는 양자컴퓨터에 대한 이해를 높이고, 미래 산업에 미칠 영향을 전망하기 위해 마련되었다. 먼저, 양자컴퓨터를 이해하기 위해 양자역학의 기본 개념을 살펴보고 이어서 산업별 활용 사례를 검토해 본다. 아울러 양자컴퓨터의 작동원리에 대한 구체적 설명과 소재·부품·장비 목록에 대한 내용은 Appendix에 별도로 기술하였다. 해당 내용에 관심 있는 독자에게 도움이 되길 바란다.

Part 1

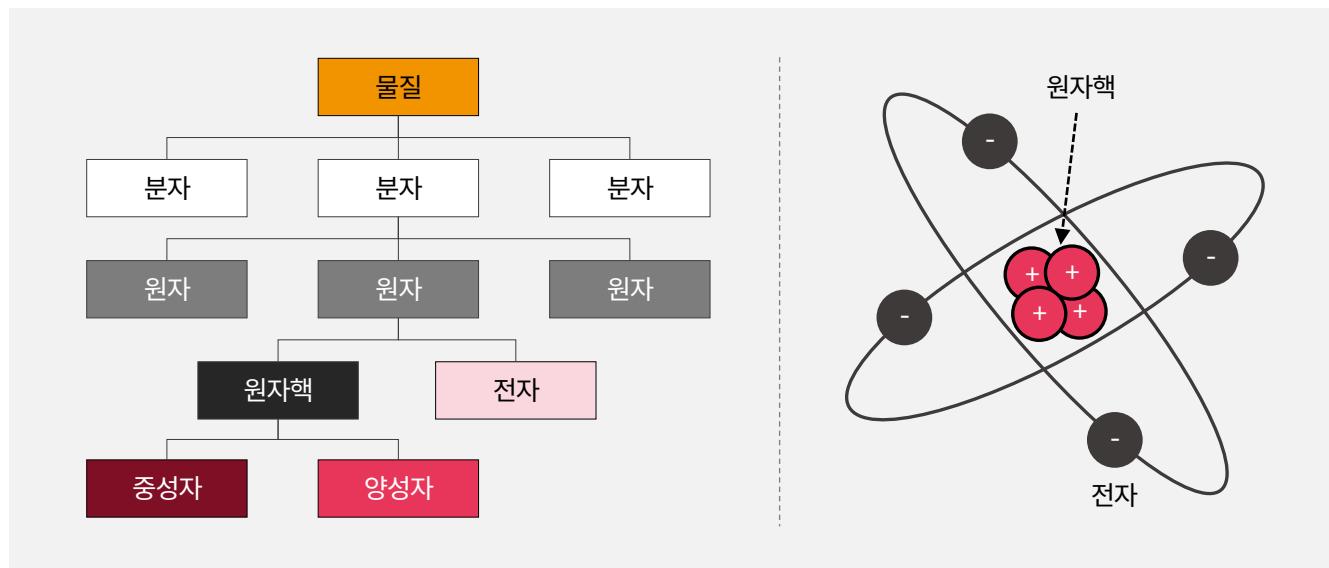
양자역학: 신의 코드에 접속하다

양자컴퓨터를 깊이 이해하려면 그 기반이 되는 양자역학의 개념을 먼저 알아야 한다. 양자역학은 매우 복잡한 물리학 분야로, 짧은 지면에서 이를 완전히 설명하기란 쉽지 않다. 사실, 노벨 물리학상 수상자인 리처드 파인만 조차 ‘양자역학을 완벽히 이해했다고 말하는 사람은 거짓말을 하고 있다’고 언급할 정도다. 이는 양자역학이 우리가 일상에서 경험하지 않는 작은 미시세계의 독특한 현상을 다루기 때문이며, 그 현상들은 우리가 익히 아는 물리 세계와는 크게 다르기 때문이다. 이번 장에서는 양자컴퓨터를 이해하는데 필요한 양자역학의 핵심 개념을 먼저 소개하고자 한다.

양자(Quantum)의 개념

양자역학은 우리가 일상에서 접하는 물체보다 훨씬 작은 세계의 비밀을 밝히는 이론이다. 그렇다면, 그 ‘작은 세계’는 얼마나 작은 것일까? 양자는 아주 작은 물질이나 에너지의 단위를 의미한다. 물질을 점점 더 작게 나누면 분자, 원자, 전자 같은 구성 요소로 나뉜다. 모든 물질은 원자라는 작은 알갱이로 이루어져 있다. 원자는 물질의 기본 구성 단위이자 양자의 한 형태이다. 원자를 더 작게 나누면, 마이너스 전하를 띠는 전자와 플러스 전하를 가진 양성자, 그리고 전하가 없는 중성자 같은 더 작은 단위의 입자들이 된다.

[도표 1] 물질과 분자 및 원자와의 관계

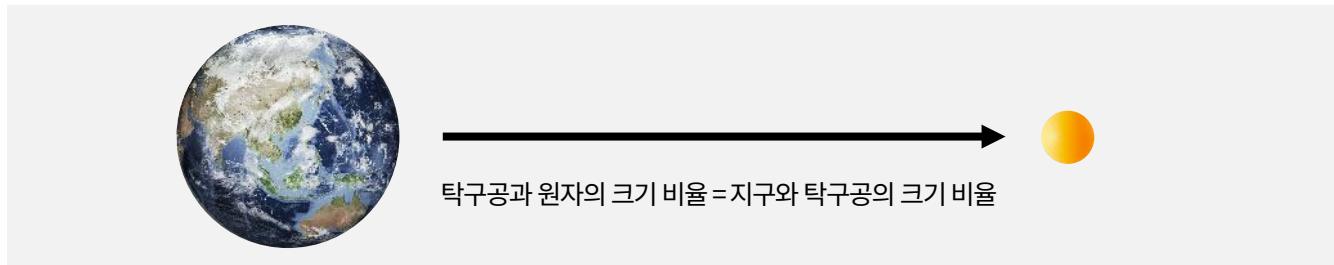


Source: 삼일PwC경영연구원

원자의 크기는 얼마나 될까? 원자는 극히 작은 입자로, 그 크기는 대개 약 0.1나노미터, 즉 10^{-9} 미터 정도다. 만약 원자 하나를 탁구공 크기로 확대한다면, 그 원자들로 이루어진 탁구공은 지구만큼 커져야 한다. 원자는 너무 작아서 인간의 눈으로는 물론, 일반적인 광학현미경으로도 직접 볼 수 없다. 이는 원자의 크기가 가시광선의 파장보다 작기 때문이다. 따라서 원자의 실제 모습을 파악하려면 전자 현미경이나 원자 수준의 이미징 기술을 활용해야 한다.



[도표 2] 원자의 크기 비교



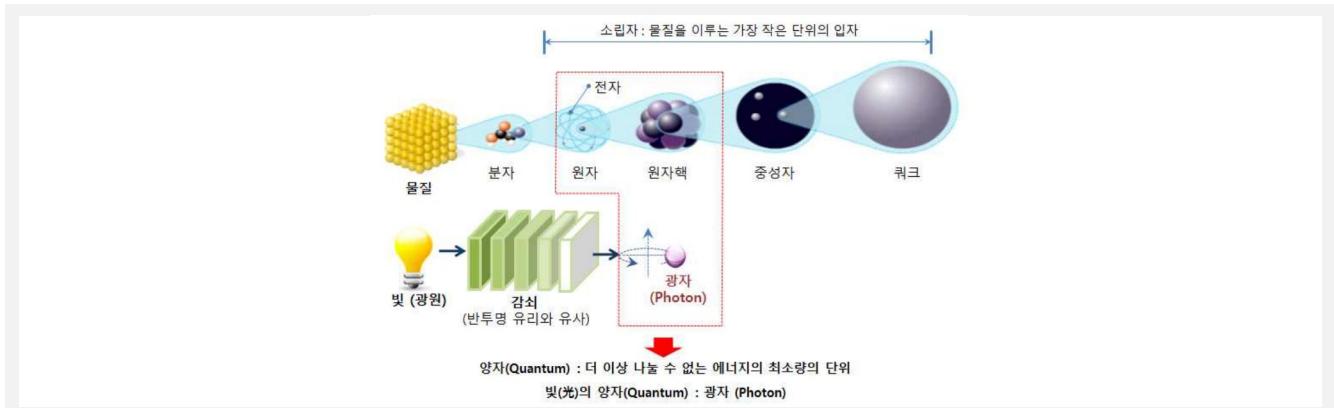
Source: 삼일PwC경영연구원

빛의 기본 단위인 광자 또한 양자의 일종이다. 광자는 빛 에너지를 구성하는 가장 작은 단위로, 더 이상 나눌 수 없는 독립적인 에너지원이다. 우리가 일상에서 보는 빛은 수많은 광자로 이루어진 것이다. 예를 들어, 100와트 형광등에서는 1초에 약 10^{20} 개의 광자가 방출된다. 이처럼 많은 광자가 모여 우리 눈에 빛으로 인식되는 것이다.

우리에게 익숙한 큰 물체, 이를테면 축구공 같은 것들의 움직임은 고전 물리학의 법칙으로 잘 설명된다. 하지만 원자나 전자처럼 작은 미시세계에서는 고전 물리학의 법칙이 적용되지 않는다. 원자의 내부 구조를 들여다보면, 중심에는 양성자와 중성자가 자리 잡고 있으며 전자가 그 주위를 돋다고 흔히 이야기한다. 그러나 전자의 실제 움직임은 고전 물리학으로 설명하기 어렵다. 이러한 이유로 양자역학이 탄생했다. 양자역학은 전자와 같은 작은 입자들의 움직임을 이해하기 위해 발전한 물리학 분야인 것이다. 이는 우리가 일상적으로 경험하는 세계와는 전혀 다른 규칙이 지배하는 미시세계를 설명하는 데 필수적인 이론이다.

이런 까닭에 양자역학은 전자와 같은 작은 입자들의 움직임을 설명하기 위해 발전했다. 양자역학은 우리가 일상에서 경험하는 세계와는 다른 법칙이 지배하는 미시세계를 이해하는데 없어서는 안 될 이론이다.

[도표 3] 양자의 정의



Source: 한국과학기술기획평가원

양자역학의 특징

[도표 4] 고전물리학과 양자역학 비교

구분	고전물리학	양자역학
설명 대상	일상에서 접하는 물질과 에너지의 현상	원자, 소립자 등 미시세계의 현상
물질과 에너지의 관계	별도의 독립된 개념 - 물질(원자 등)은 입자 - 에너지(빛 등)는 파동	상호연결 - 입자도 파동성 보유
에너지의 연속성	연속적	불연속적
확정/불확정성	확정/결정론적 시각 - 공을 떨어뜨리면 하나의 경로로 떨어짐	확률론적 시각 - 입자의 정확한 위치와 운동량 동시 예측 불가(불확정성의 원리)

Source: 삼일PwC경영연구원

입자와 파동: 두 얼굴을 가진 작은 주인공

여러분이 해변에서 공과 파도를 바라보고 있다고 상상해보자. 친구가 공을 하나 떨어뜨리면, 공은 하나의 경로를 따라 곧바로 바닥으로 떨어진다. 이처럼 공은 단 한 곳에만 존재하며, 한 방향으로만 움직이는 입자처럼 행동한다. 반면, 바다를 보면 물결이 사방으로 퍼져나가고 있는 파동의 성질을 쉽게 볼 수 있다. 예를 들어, 누군가 해변에서 나팔을 불면 소리 파동이 공기 중으로 퍼져나가 여러 사람들에게 도달한다. 이처럼 입자의 행동과 파동의 행동은 우리의 일상 속에서 명확히 구분되어 보인다.

이제 양자 세계의 해변으로 가보자. 여기서는 전자나 광자 같은 작은 존재들이 등장하는데, 이들은 상황에 따라 두 가지 모습을 지닌다. 마치 변신 로봇처럼, 때로는 입자처럼 행동하다가도 때로는 파동처럼 행동한다. 과학자들은 이런 현상을 ‘파동-입자 이중성’이라 부른다. 예를 들어, 전자 하나를 공간에 방출하면 그 전자는 물결처럼 사방으로 퍼져 나가지만, 막상 벽에 부딪힐 때는 정확히 하나의 점에만 닿는다. 이 실험에서 전자는 퍼져나갈 때는 파동처럼, 탐지될 때는 입자처럼 행동한 것이다.

일상에서 우리는 입자와 파동의 특성을 별개의 것으로 인식하지만, 양자역학의 세계에서는 이 구분이 흐려진다. 양자역학에서는 입자가 파동처럼 행동할 수 있으며, 파동이 입자처럼 행동할 수도 있다. 이는 양자역학이 우리가 익숙하게 이해하는 물리 세계와 어떻게 다른지를 보여주는 중요한 개념이다.

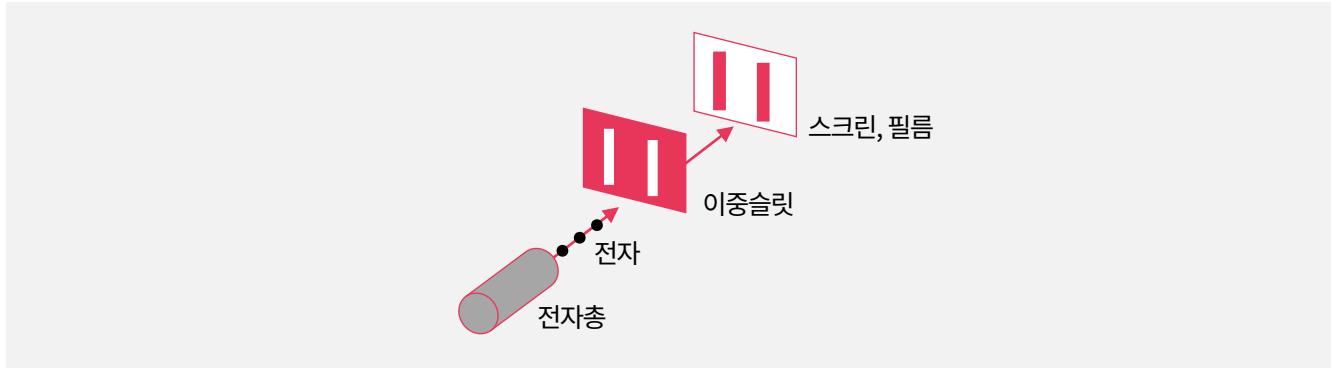
눈에 보이지 않을 정도로 작은 원자와 입자들의 세계, 즉 양자 세계에서는 우리가 알던 단단한 물질이 물결처럼 행동하고, 측정하려 들면 그 행동이 달라지는 등 직관에 반하는 일들이 벌어진다. 양자 세계의 그런 기묘함을 잘 보여주는 대표적인 예가 바로 이중슬릿 실험이다. 이 실험뿐만 아니라, 파동-입자 이중성, 불확정성 원리, 양자 중첩, 양자 얹힘 등의 핵심 개념을 하나씩 살펴보면서 양자역학의 기본 개념을 차례로 설명한다.

이중슬릿 실험: 파동과 입자의 기이한 행동

이중슬릿 실험은 양자역학의 기묘한 특성을 단적으로 보여주는 고전적인 실험이다. 설정은 간단하다. 하나의 벽에 두 개의 좁은 슬릿을 뚫어두고, 그 앞에서 작은 물체나 파동을 쏘아보는 것이다. 슬릿을 통과한 물체들이 뒤쪽 스크린이나 필름에 도달하면서 특정한 패턴을 형성한다. 이제 어떤 패턴이 나타나는지 케이스별로 살펴보자.

작은 공과 같은 입자를 던질 때를 생각해보자. 마치 슬릿이 두 개 뚫린 벽에 테니스공 같은 입자들을 마구 던진다고 상상해보자. 대부분의 공은 벽에 막혀 튕겨나가겠지만, 일부 공은 슬릿을 통과해 뒤쪽 스크린에 도달할 것이다. 그렇다면 스크린에 남은 자국은 어떻게 될까? 슬릿이 두 개이므로, 각각의 슬릿 뒤에 자국이 집중된 두 개의 띠가 나타날 것이다. 이는 당연한 결과다. 공은 입자이므로, 각 슬릿 뒤에 하나씩, 슬릿 모양을 본뜬 두 개의 자국 띠가 형성된다.

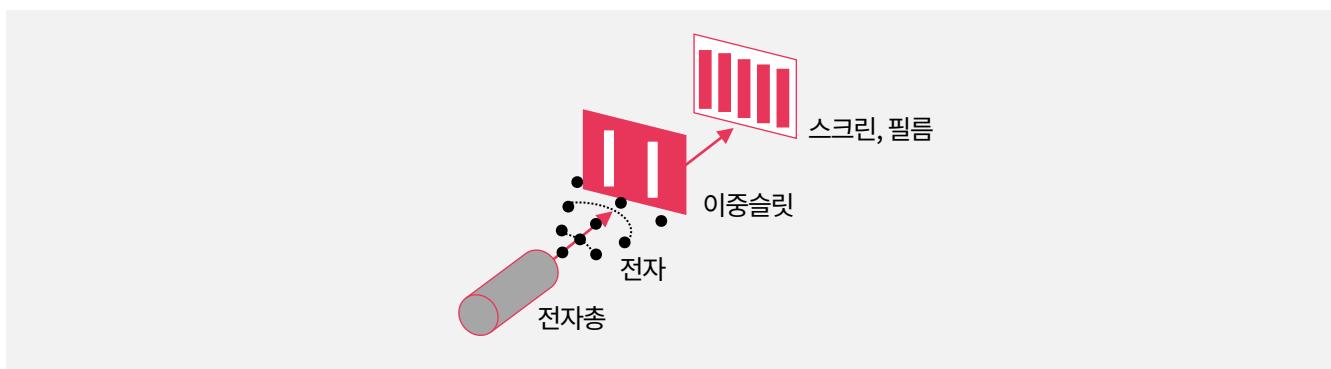
[도표 5] 이중슬릿 실험(입자)



Source: 삼일PwC경영연구원

물결이나 빛과 같은 파동을 보낼 때를 생각해보자. 이번에는 같은 장치를 사용하되, 입자가 아닌 파동을 보내는 상황을 떠올려보자. 예를 들어, 물에 작은 파동을 일으켜 두 틈을 통과시키거나, 단색의 빛을 두 슬릿에 비추는 경우다. 파동은 두 틈을 지나며 갈라진 뒤 다시 퍼져 나가는데, 이때 두 파동이 서로 겹치면서 간섭 무늬를 만들어낸다. 두 파동의 마루가 겹치면 파동은 강해지고, 골이 겹치면 상쇄되면서, 뒤 스크린에는 밝고 어두운 줄무늬 패턴이 나타난다. 이런 간섭 무늬는 파동 특유의 현상으로, 물결이나 빛일 때만 나타나며, 공 같은 입자에서는 볼 수 없는 것이다.

[도표 6] 이중슬릿 실험(파동)

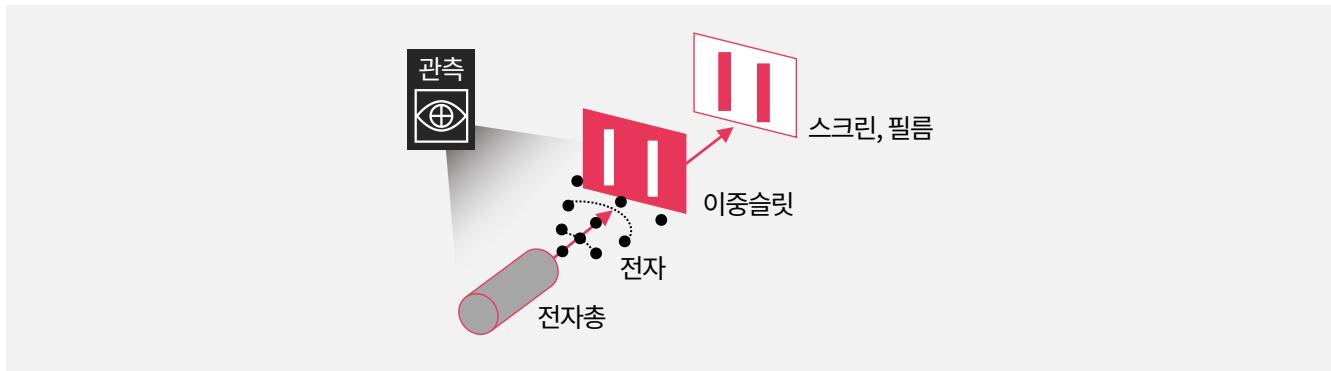


Source: 삼일PwC경영연구원

전자와 같은 양자 입자를 쓸 때, 그것을 관측하지 않는 경우를 생각해보자. 이번에는 전자와 같은 작은 입자를 두 개의 슬릿이 있는 장치에 쓴다. 전자를 한 번에 하나씩 ‘톡톡’ 쏘아 슬릿을 통과시키면, 처음에는 스크린에 여기저기 산발적으로 점이 찍힌다. 그런데 많은 전자를 하나씩 반복해서 쏘다 보면, 놀랍게도 그 점들이 모여 파동의 간섭 무늬와 같은 줄무늬 패턴을 형성한다. 마치 전자가 두 개의 슬릿을 동시에 지나 서로 간섭이라도 한 것처럼 보인다. 분명 전자는 입자임에도 불구하고, 아무도 관측하지 않을 때는 파동처럼 행동하여 간섭 무늬를 만든다는 사실이 드러난다.

전자에 어느 슬릿을 지나는지 관측 장치를 달면 어떻게 될까? 전자가 정말 동시에 두 길을 가는지 확인해보고 싶다. 그래서 슬릿 중 하나 또는 둘에 센서를 달아 전자가 어느 슬릿을 지나가는지 관측을 시도한다. 그러자 아주 흥미로운 일이 벌어진다. 센서를 통해 전자의 경로를 알아내는 순간, 이전까지 보이던 간섭 무늬가 깨끗이 사라지고 스크린에는 두 개의 밴드만 남게 된다. 이는 전자가 관측되는 순간, 입자처럼 행동하기 시작한다는 것을 의미한다.

[도표 7] 이중슬릿 실험(관측)



Source: 삼일PwC경영연구원

다시 말해, 전자는 관측되는 순간 테니스공처럼 하나의 슬릿을 통과하는 입자적 행동으로 돌아오고, 그 결과로 두 줄의 흔적만 남긴다. ‘보고 있으면 암전히 입자처럼 행동하고, 안 보면 몰래 파동처럼 행동한다’는 표현이 딱 들어맞는 상황이다.

정리하자면, 전자는 관측되지 않을 때는 마치 자신의 본신이 두 갈래로 나뉘어 두 슬릿을 동시에 통과하는 것처럼 행동한다. 이는 파동처럼 간섭 패턴을 형성한다는 의미다. 그러나 관측하는 순간엔 하나의 슬릿을 통과한 흔적만 남기는 입자적 성질을 드러낸다.

이 실험은 파동-입자 이중성이라는 양자역학의 핵심 개념을 극적으로 보여준다. 전자나 광자 같은 미시적 입자들은 파동의 성질과 입자의 성질을 동시에 지닌다. 또한 그 결과를 바꾸는 요소는 바로 ‘관측 행위’다. 관찰자가 들여다보는 순간, 전자의 행동 양상이 바뀐다. 이는 쉽게 이해하기 어려운 부분이지만, 이중슬릿 실험을 통해 양자 세계에서는 관측 자체가 현실에 영향을 줄 수 있다는 사실이 드러난다. 이 역설적인 문제는 훗날 양자역학에서 ‘측정 문제’로 불리는 난제로 이어지게 된다.

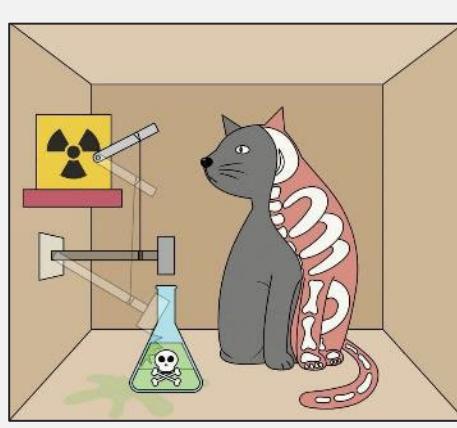
관측

사전에서 말하는 ‘관측’이란 육안이나 기계를 통해 자연 현상 등을 관찰하고 측정하는 행위다. 하지만 단순히 눈으로 본다고 해서 사물의 성격이 변한다는 것은 쉽게 이해되지 않는다. ‘본다’는 행위의 본질을 더 깊이 들여다보면 이해가 쉬워진다. 사물을 빛을 반사하고, 그 반사된 빛이 눈에 들어와서 관측이 이루어진다. 빛이 반사되지 않으면 사물을 관측될 수 없다. 즉, 사물을 본다는 것은 단순히 관찰자의 일방적인 행위가 아니라, 사물과 빛, 에너지 등 자연계의 상호작용의 결과다. 이러한 상호작용은 물질의 고유 상태에 변화를 일으키고, 관측되는 순간 이미 다른 형태로 확정된 사물이 눈에 보이게 된다. 이런 관점에서 관측을 다시 정의해보면, 불확정성 원리를 깨뜨리는 외부 요인의 간섭 또는 일종의 상호작용이라고 할 수 있다.

물리학에서 가장 유명한 고양이, 슈뢰딩거의 고양이

슈뢰딩거의 고양이는 원래 양자역학의 이론적 한계를 보여주기 위해 제시된 예시였지만, 의외로 양자역학을 대중에게 널리 알리는 가장 유명한 사고 실험이 되었다. 이 실험에서는 고양이를 넣은 상자에 유독물질이 50%의 확률로 주입되도록 설정하고, 시간이 지난 후 상자 안의 고양이가 살아 있는지 죽었는지를 알아보는 상황을 가정한다. 상식적으로는 상자를 열어서 관측하기 전에도 고양이는 이미 살아 있거나 죽어 있는 둘 중 하나의 상태일 것이라고 생각할 수 있다. 그러나 양자역학에 따르면, 고양이는 50%의 확률로 살아 있는 상태와 죽은 상태를 동시에 가지다가 상자를 열어 관측하는 순간에야 비로소 한 상태로 확정된다는 결론이 나온다. 이처럼 우리의 직관에 반하는 결과는 양자역학의 본질을 더욱 선명히 드러낸다.

[도표 8] 슈뢰딩거의 고양이



Source: Nutkins.J/Shutterstock

거시세계와 미시세계의 차이

슈뢰딩거의 고양이 사례에서 알 수 있듯이, 양자역학이 비현실적으로 느껴지는 이유는 고양이라는 거시적인 대상을 예로 들었기 때문이다. 우리가 관측하는 거시세계에서는 불확정성의 원리가 이미 무너져 모든 것이 확정된 상태에 있다. 양자역학이 다른 관측되지 않은 미시세계와는 애초에 같은 기준에서 비교할 수 없는 것이다.

일상에서 접하는 모든 사물은 작은 입자들의 집합체로 이루어져 있기 때문에, 이들에게도 양자역학의 법칙이 적용될 수 있다고 생각할 수 있다. 이는 일리가 있는 지적이다. 예를 들어, 60개의 탄소 원자가 모여 축구공 모양을 이루는 거대 탄소분자인 풀러렌(Fullerene)으로 이중슬릿 실험을 했을 때, 입자가 아닌 파동의 성질이 포착되었다고 한다. 이렇게 원자의 집합체인 분자에서 불확정성의 원리가 확인되었다면, 더 큰 집합체나 심지어 고양이 같은 거시적인 대상에도 양자역학의 법칙이 적용될 수 있을 것이다.

하지만 우리가 알듯이, 일상의 현실에서는 그런 현상을 경험하지 않는다. 이는 미시세계와 거시세계의 자연 법칙이 다르게 작동해서가 아니라, 작은 입자들이 모여 거시세계로 확장되는 과정에서 발생하는 수많은 상호작용과 간섭 때문이다. 이 과정에서 불확정성의 원리는 이미 붕괴하게 된다. 만약 기술적으로 일상의 세계에서 모든 외부 간섭과 상호작용을 완전히 차단할 수 있다면, 고양이뿐만 아니라 우리도 동시에 살거나 죽은 상태를 가질 수 있을 것이다.

풀러렌 실험

풀러렌 실험은 양자역학에서 파동-입자 이중성을 연구하기 위해 큰 분자를 사용한 실험이다. 풀러렌(C60)은 60개의 탄소 원자가 축구공 모양으로 배열된 구조로, 비교적 큰 크기와 복잡성을 지니고 있다. 이 실험의 목적은 입자와 파동의 성질이 큰 규모의 분자에서도 나타나는지를 확인하는 것이다. 이는 작은 입자들에 국한된 양자역학의 특성이 더 큰 구조에서도 어떻게 적용될 수 있는지를 탐구하는 중요한 시도다.

실험 과정

- 분자의 발생:** 풀러렌 분자를 실험에 사용할 수 있도록 기화시키거나 레이저로 분리해낸다. 이는 분자를 실험 환경에 맞게 준비하는 단계다.
- 이중 슬릿 통과:** 준비된 이중 슬릿을 통해 풀러렌을 통과시킨다. 이중 슬릿은 풀러렌의 파동 성질을 관찰하기 위한 장치로 사용된다.
- 간섭 패턴 형성:** 풀러렌이 슬릿을 통과한 후 스크린에 도달하면, 입자처럼 두 줄로 나타나는 것이 아니라 여러 겹의 간섭 패턴이 형성된다. 이는 풀러렌이 파동으로 행동했음을 보여주는 결과로, 입자와 파동의 이중성이 큰 분자에도 적용될 수 있음을 증명한다

실험 결과와 해석

이 실험 결과는 양자역학의 기본 원리인 파동-입자 이중성과 중첩 원리를 뒷받침한다. 풀러렌 같은 큰 분자도 파동적 성질을 지니고 있어, 양자역학이 거시적 규모까지 확장될 수 있음을 시사한다. 중첩 원리에 따르면, 풀러렌은 슬릿을 통과하는 동안 여러 경로의 상태가 동시에 존재하며, 관측이 이루어질 때까지 이 상태는 확정되지 않는다.

이 실험을 통해 양자역학이 단순히 소립자나 원자에만 국한되지 않고, 더 큰 분자 크기에서도 적용될 수 있다는 것이 입증되었다. 이는 양자역학의 보편성을 더욱 확대하는 중요한 연구로 평가받고 있다. 이처럼, 양자역학의 원리가 생각보다 더 광범위하게 작용할 수 있음을 보여주는 사례로, 기존의 이해를 넘어서는 새로운 가능성을 제시한다.

하이젠베르크의 불확정성 원리: 측정의 한계와 양자의 흐릿함

양자역학의 또 다른 핵심은 독일 물리학자 베르너 하이젠베르크의 불확정성 원리다. 이 원리는 세상을 단 하나의 이치로 규명하지 않고, 한 가지를 알아차리면 다른 쪽이 흐려진다는 것을 말한다. 아주 작은 입자의 위치와 운동량을 생각해보자. 고전 물리학은 이 두 가지를 동시에 정확히 질 수 있다고 하지만, 양자역학은 고개를 가로젓는다. 위치를 밝히면 운동량은 마치 그림자처럼 희미해지고, 운동량을 불들면 위치는 물속의 그림자처럼 흐려진다고 한다.

다시 말해, 두 물리량을 임의의 정밀도로 동시에 알 수는 없다는 것이다. 이 말이 이상하게 들릴 수 있지만, 불확정성 원리는 단순히 측정기구의 한계나 우리 지식의 부족 때문이 아니다. 그것은 자연의 기본적인 특성이다. 하이젠베르크는 이를 설명하기 위해 유명한 사고 실험을 제시했다. 매우 강력한 현미경으로 전자를 관찰하는 장면을 상상해 보자. 전자의 위치를 정확히 알기 위해서는 결국 전자에 빛(광자)을 쏘아서 반사되는 빛을 관찰해야 한다. 그러나 전자가 움직여버릴 때, 정확한 위치를 알려줄 만큼 강한 빛을 비추면, 그 빛의 에너지와 운동량 때문에 전자가 툭 튕겨나가서 운동량이 변하게 된다.

반대로 전자의 운동량, 즉 속도를 정밀하게 측정하려 한다면, 그 과정에서 위치 정보가 희미해진다. 결국, 위치를 정확히 알면 운동량이 교란되고, 운동량을 정확히 측정하면 위치가 불확실해지는 상황이 발생한다. 이는 결코 측정 기술의 부족 때문이 아니라, 자연에서는 동시에 정확한 위치와 운동량이라는 값 자체가 정의되어 있지 않기 때문이다. 아무리 뛰어난 장비를 쓰더라도 이 한계를 깰 수 없다는 점에서, 불확정성 원리는 양자 세계의 본질적인 한계이자 특성이라고 할 수 있다.

양자 중첩: 동시에 여러 상태에 존재하는 가능성

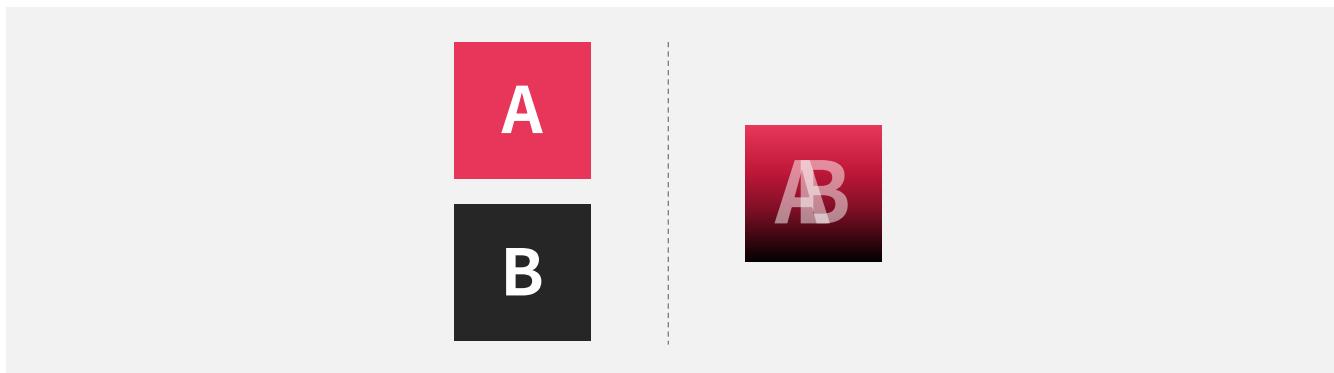
고전 물리학 세계에서는 모든 것이 확정적이다. 동전은 앞면이거나 뒷면이고, 전구는 켜졌거나 꺼진다. 그 어떤 물리량도 한번에 단 하나의 상태만 가질 수 있다. 그러나 양자역학에서 입자는 동시에 여러 상태로 존재할 수 있으며, 이를 양자 중첩 (Quantum Superposition) 상태라고 부른다.

쉽게 말해, 이는 여러 가능성이 겹쳐 있는 조합이라고 할 수 있다. 예를 들어, 양자 중첩 상태에 있는 전자는 한 곳에 정확히 존재하는 것이 아니라 여러 곳에 있을 확률이 겹쳐진 상태로 존재할 수 있다. 하나의 원자 안에서 전자가 특정 껌질에 있을 가능성과 다른 껌질에 있을 가능성의 조합으로 동시에 존재할 수 있는 것이다.

우리가 관측을 하기 전까지는 이러한 모든 가능성이 한데 겹쳐 있는 상태다. 관측하는 순간에야 비로소 그중 하나의 상태로 결정된다고 이해할 수 있다. 이러한 양자 중첩은 양자의 세계가 얼마나 다른지 보여주는 중요한 개념이다.

현실의 전자나 광자 같은 미시 입자들은 실험적으로 양자 중첩 현상을 분명히 보여준다. 앞서 본 이중슬릿 실험에서 전자가 두 개의 경로를 동시에 지나는 것처럼 행동한 것도 일종의 중첩 상태라고 할 수 있다. 중요한 점은, 관측을 하기 전까지는 여러 가능성이 겹쳐 있다가도, 일단 측정하면 하나의 상태로 정해진다는 것이다. 양자역학에서 말하는 중첩 상태는 확률로만 존재하던 여러 잠재적 현실이 관측을 계기로 단일한 현실로 확정되는 과정과 깊이 관련되어 있다. 이런 개념은 양자 세계가 어떻게 우리의 직관을 뛰어넘는지를 잘 보여준다.

[도표 9] 양자중첩



Source: 삼일PwC경영연구원

양자얽힘: 멀리 떨어져 있어도 하나처럼 연결된 입자

마지막으로 살펴볼 개념은 양자역학에서 가장 기묘한 현상으로 꼽히는 양자 얹힘(Quantum Entanglement)이다. 양자 얹힘이란 두 개 이상의 입자들이 마치 한 몸처럼 연결되어 행동하는 현상으로, 설령 두 입자가 우주 반대편에 떨어져 있어도 서로의 상태에 영향을 주는 듯한 상관관계를 보인다.

예를 들어 두 입자가 스핀이라는 양자 상태로 얹혀 있다고 하면, 한 입자의 스핀 방향을 측정하는 순간 다른 한 입자의 스핀도 즉시 결정되며, 두 측정 결과는 밀접한 관계를 갖는다. 이러한 현상 때문에 알베르트 아인슈타인은 양자 얹힘을 두고 멀리 떨어진 곳의 ‘유령 같은 작용(Spooky Action at a Distance)’이라고 불렀다. 아인슈타인은 이 현상이 너무 이상해서, 사실은 입자들이 미리 정해둔 숨은 변수에 따라 그렇게 보이는 것이라고 생각했다. 즉, 입자들이 애초부터 같은 운명을 가지도록 짹지어져 발사되어, 우리가 나중에 확인할 뿐이라는 것이었다.

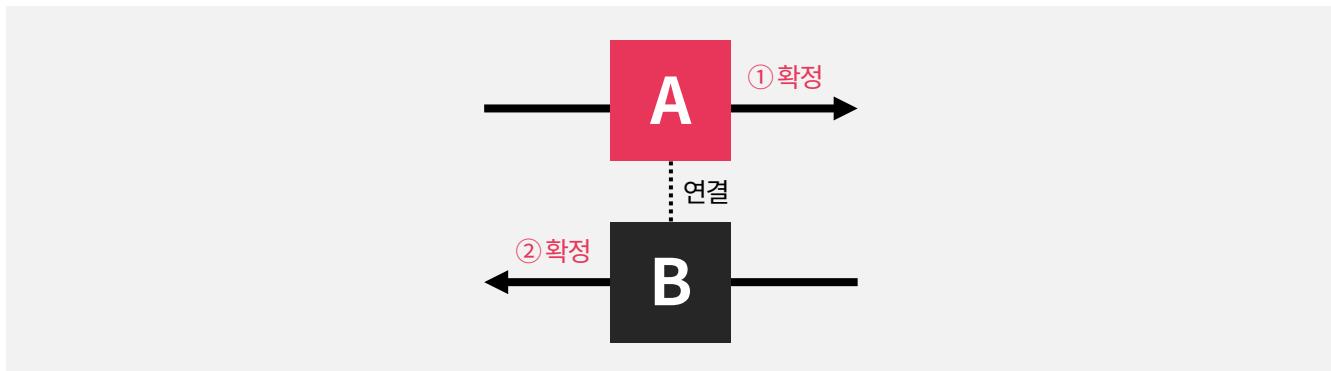
그러나 수십 년간의 이론과 실험은 아인슈타인의 예상과 달리, 양자 얹힘 상태에 있는 입자들은 사전에 정해진 값이 없이도 측정 순간 서로 연관된 값을 나타낸다는 것을 보여주었다. 다시 말해, 얹혀 있는 두 입자는 하나의 양자 상태를 공유하고 있다가 한쪽을 측정하는 순간 그 공유된 상태가 한쪽에는 이 결과로, 다른 쪽에는 저 결과로 동시에 나타난다고 할 수 있다.

중요한 것은 이 현상이 어떤 신호가 빛보다 빠르게 전달되어 일어나는 마법이 아니라는 점이다. 두 입자의 측정 결과가 연관되어는 있지만, 그 결과 자체는 무작위적이어서 이를 이용해 정보를 순간적으로 전달할 수는 없기 때문이다. 결국 얹힘은 두 입자가 하나의 시스템처럼 상호의존적 확률 상태를 유지하다가 측정 시 동일한 정보를 드러내는 양자적 상관관계인 것이다.

이해하기 어렵다면 이렇게 요약할 수 있다. 양자 얹힘된 입자 쌍은 마치 하나의 동전 양면과 같아서, 멀리 떨어져 있어도 한 입자의 상태를 알게 되면 즉시 다른 입자의 상태도 알게 되는 관계다. 다만, 실제 양자 얹힘에서는 동전의 앞뒷면처럼 이미 결정된 값을 갖고 있는 것이 아니라, 측정 전까지는 둘 다 불확정한 상태라는 점에서 차이가 있다.

놀랍게도 이러한 양자 얹힘 현상은 실험을 통해 확실하게 검증되었다. 2022년 노벨 물리학상도 얹힘 현상을 실험적으로 증명한 과학자들에게 수여되었을 정도다. 오늘날에는 얹힘 상태의 광자 쌍을 수천 킬로미터 떨어진 위성과 지상국 사이에 보내는 실험까지 성공하여, 거대한 거리에서도 양자 얹힘이 유지될 수 있음이 확인되었다.

[도표 10] 양자 얹힘



Source: 삼일PwC경영연구원

지금까지 살펴본 파동-입자 이중성, 불확정성 원리, 양자 중첩, 양자 얹힘 등은 모두 양자역학의 기본을 이루는 개념들이다. 이 개념들은 우리의 상식으로는 이해하기 어려운 부분이 많지만, 수많은 실험을 통해 그 현실성이 입증되었으며, 오늘날 첨단 기술로도 이어지고 있다. 특히 양자컴퓨터를 이해하려면 이러한 개념들이 필수적이다.

고전 컴퓨터의 비트(Bit)는 0 또는 1의 한 가지 값만 가질 수 있지만, 양자컴퓨터의 기본 단위인 큐비트(Qubit)는 0과 1이 중첩된 상태로 동시에 존재할 수 있으며, 여러 큐비트가 서로 얹힘으로 연결될 수도 있다. 그 결과, 양자컴퓨터는 단순한 0과 1의 조합 이상의 막대한 양의 정보를 한꺼번에 표현하고 처리할 수 있게 되며, 여러 가지 계산을 병렬로 수행해 기하급수적인 계산 속도의 향상을 이끌어낸다. 요컨대, 양자역학의 원리를 이용하면 고전 컴퓨터로는 상상할 수 없는 방식으로 연산이 가능한 새로운 계산 기계를 만들 수 있다는 것이다. 이는 양자컴퓨터가 기존의 한계를 뛰어넘어 새로운 가능성을 열어줄 수 있음을 의미한다.

Part 2

양자컴퓨터가 가져올 미래

양자컴퓨터의 큐비트 수는 Google과 IBM 같은 선두주자들에 의해 1,000여 개에 이르고 있다. 하지만, 실질적인 상용화를 위해서는 100만 개 수준의 큐비트가 필요하다는 게 업계의 관측이다. Mind Commerce와 McKinsey & Company 같은 조사기관들은 각기 다른 수치를 제시하지만, 양자컴퓨터의 상용화가 시장에 큰 변화를 가져올 것이라는 데에는 이견이 없다.

Mind Commerce는 글로벌 양자컴퓨터 시장이 해마다 20%씩 성장해 2031년엔 32조 원에 이를 거라 내다본다. 한국 역시 같은 기간 연평균 20%의 성장세를 기록할 것으로 보이며, 2024년 789억 원이던 시장 규모가 2031년에는 3,200억 원으로 성장할 것으로 예상된다.

[도표 11] 글로벌 양자컴퓨터 부문별 시장 전망 (단위: 억 원)



Source: Mind Commerce, 양자정보기술 백서

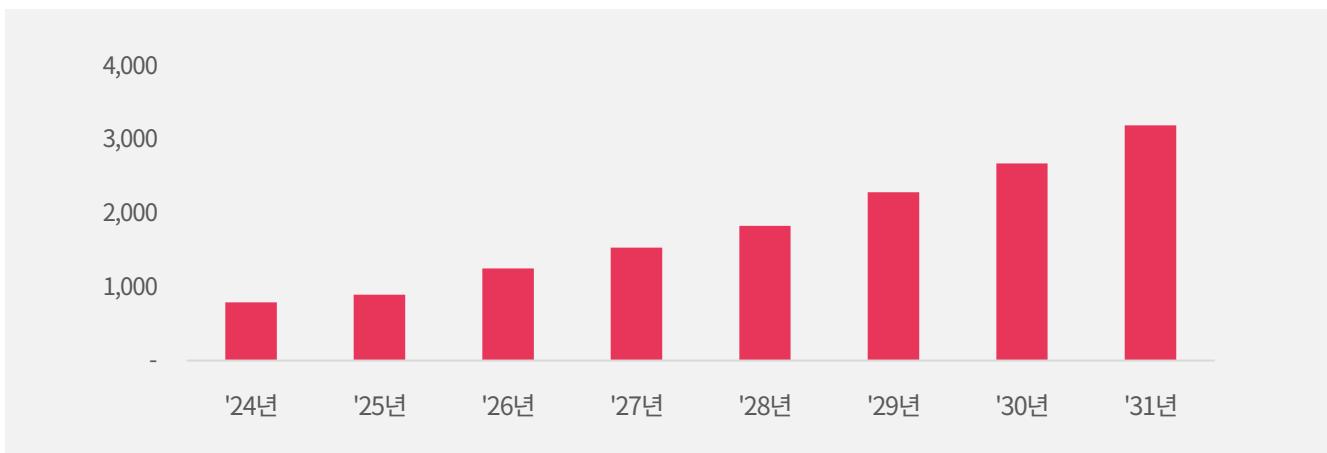
[도표 12] 글로벌 양자컴퓨터 시장 전망 (단위: 십억 달러)



Source: McKinsey & Company(2024.04)



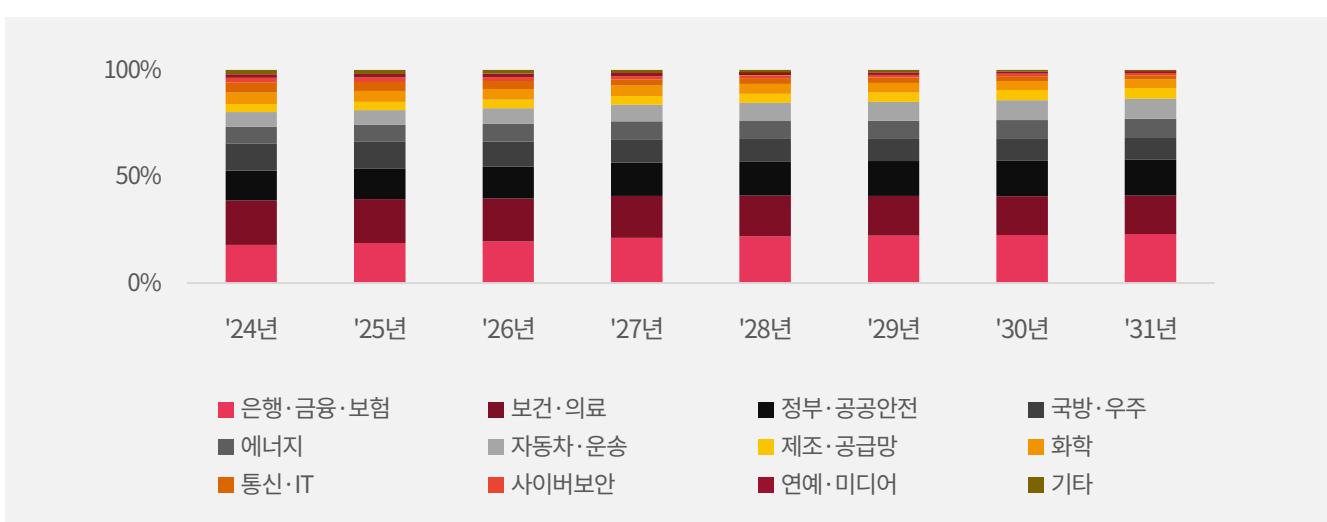
[도표 13] 국내 양자컴퓨터 시장 전망 (단위: 억 원)



Source: Mind Commerce, IQ4I, 양자정보기술 백서

양자컴퓨터는 기존 컴퓨터로는 해결하기 어려운 문제들을 새로운 방식으로 풀 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 이로 인해 산업 전반에 걸쳐 폭넓은 변화를 일으킬 것으로 기대된다. Mind Commerce에 의하면, 양자컴퓨터 기반의 산업별 매출에서 금융, 의료, 국방 분야가 상위권을 차지할 것이라 전망한다. 이 새로운 계산 방식이 가져올 변화를 바라보며, 각 분야에서 어떤 가능성 이 열릴지 주목된다.

[도표 14] 양자컴퓨터 기반 글로벌 매출의 산업별 구성비



Source: Mind Commerce, 양자정보기술 백서

[도표 15] 주요 산업별 양자컴퓨터 활용 분야

구분	양자컴퓨터 활용 분야	
	단기	중장기
금융	• 위험 분석 및 관리 서비스	<ul style="list-style-type: none"> • 포트폴리오 최적화 서비스 • 금융 플랫폼 서비스 • 고객 타겟팅 및 예측 서비스
의료·제약	<ul style="list-style-type: none"> • 신약 설계 서비스 • 단백질 구조 분석 서비스 • 암 진단 및 치료 서비스 	<ul style="list-style-type: none"> • 뇌질환 진단 및 치료 서비스 • 맞춤 의료 서비스 • 방사선 치료 서비스 • 양자 이미징 플랫폼 서비스 • 보험료 산정 및 위험 분석 서비스
소재	<ul style="list-style-type: none"> • 신소재 개발 서비스 • 자동차 배터리 및 운송수단용 연료 소재 개발 서비스 	• 양자 엔진 서비스
국방·안보·우주	• 암호체계 개발 서비스	• 방어 시나리오 생성 서비스
교통·물류·항공	<ul style="list-style-type: none"> • 교통관리 서비스 • 도심항공 모빌리티 교통망 제어 서비스 • 비행 게이트 할당 서비스 • 물류자원 최적화 서비스 	<ul style="list-style-type: none"> • 항공기 디자인 서비스 • 항공 화물 적재 최적화 서비스 • 항공 운항 시스템 최적화 • 콘텍스트(Context) 활용 맞춤화 서비스 • 항공사 네트워크 최적화 서비스 • 자동차 생산 공급망 및 물류 네트워크 운영 서비스
제조·반도체	• 배터리 소재 최적화 서비스	<ul style="list-style-type: none"> • 화학 물질 양산화 서비스 • 제조 공정 최적화 서비스
사이버보안	• 양자컴퓨터로도 풀기 어렵게 설계된 양자내성암호 기술 개발 서비스	• 양자기술 자체를 도입하여 도청·해킹 시도를 즉각 감지하는 차세대 암호체계 개발 서비스
기타	<ul style="list-style-type: none"> • AI 향상 서비스 • 기상예측 서비스 	<ul style="list-style-type: none"> • 전력망 운영 서비스 • 에너지 분야 기타 서비스 • 지하자원 탐색 서비스 • 양자로봇 서비스

Source: 양자정보기술 백서, 삼일PwC경영연구원

물론, 현재의 양자컴퓨터는 큐비트 규모와 불안정성 문제로 아직 실용적인 우위를 증명하지 못한 상태다. 앞으로 양자컴퓨터가 상용화되더라도, 기존 문제 해결 방식을 완전히 대체하기보다는 기존 컴퓨터를 보완하고 강화하는 방향으로 각 산업에 활용될 가능성이 크다. 전문가들 사이에서도 상용화 시점에 대한 견해가 크게 갈리고 있는 가운데, 언젠가 도래할 그 시점에 양자컴퓨터가 각 산업에 미칠 주요한 영향을 살펴보자.

금융·리스크 분석

대형은행 JP Morgan Chase는 IBM의 양자컴퓨터를 활용해 금융 모델링과 리스크 분석을 수행하고 있다. 이는 금융권에서 양자컴퓨터 도입이 투자 전략 면에서 경쟁사보다 유리한 입지를 확보할 것이라는 공감대가 이미 형성되었음을 보여준다. 금융업의 특성상 복잡한 계산 문제와 대규모 데이터 처리가 필요하기 때문에, 포트폴리오 최적화, 옵션 가격 평가, 리스크 관리 등 여러 방면에서 양자 알고리즘을 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

다수의 자산으로 구성된 투자 포트폴리오를 운용하는 일은 기대 수익률과 리스크를 모두 고려하여 최적의 자산 배분을 해야 하는 매우 어려운 과제를 안고 있다. 현재는 효율적인 근사 알고리즘을 사용하고 있지만, 양자컴퓨터는 이 문제를 큐비트 상태 탐색으로 전환하여 더 나은 최적값을 찾을 가능성을 제공한다. 실제로 40~60개의 종목으로 구성된 포트폴리오를 양자기술로 최적화하려는 실험이 진행되었고, 단시간 내에 기존 알고리즘과 유사한 결과를 도출했다. 현재 큐비트의 수와 정밀도는 제한적이어서 활용에 한계가 있지만, 향후 차입 제한이나 섹터별 비중 한도 등 다양한 제약 조건이 따르는 실제 투자 포트폴리오에서도 성과를 나타낼 전망이다.

금융기관은 주가와 금리 변동 같은 시장 리스크를 관리하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 실행하여 포트폴리오의 위험도를 확률적으로 추정한다. 파생상품의 구조가 복잡해질수록, 블랙-숄즈 모형 같은 표준화된 평가 모델이 없으므로 몬테카를로 방식에 의존하게 된다. 이러한 시뮬레이션은 매우 복잡하여 계산에 많은 시간이 필요하지만, 양자 몬테카를로(QMC) 방식을 사용하면 추정 정확도를 높이고 시뮬레이션 횟수를 크게 줄일 수 있다. 이를 통해 위험 관리와 파생상품 가치평가를 거의 실시간으로 수행하여 시장 변동에 신속하게 대응할 수 있을 것으로 예상된다. IBM과 AWS 연구진은 간단한 옵션 포트폴리오를 QMC로 평가하면서 속도 개선 효과를 일부 검증한 바 있다.

초단타 매매로 불리는 고속 금융 거래(HFT)에서도 양자컴퓨터가 기여할 분야가 크다. HFT는 컴퓨터 알고리즘을 이용해 매우 짧은 시간 단위(밀리초~나노초)로 대량 주문을 내고 미세한 가격 차이로 수익을 얻는 거래 전략이다. 성공 여부는 주문 속도에 달려 있으므로 빠른 하드웨어가 필수적이다. 양자컴퓨터는 병렬적인 양자 상태 탐색을 통해 대량의 시장 데이터를 동시에 처리하거나 주문 체결 알고리즘을 최적화하여 HFT 프로세스를 개선할 수 있다. 여러 거래소의 호가창을 양자 병렬로 스캔하여 잠재적 차익거래 기회를 즉각적으로 포착할 수 있게 된다. Toshiba가 개발한 양자기술 기반 알고리즘은 이미 일부 금융사의 HFT 시스템에 도입되어 일정한 효과를 보이고 있다. 진정한 HFT 적용을 위해서는 거의 0에 가까운 지연 시간으로 연산을 처리해야 한다는 어려운 과제가 남아 있지만, 금융권에서는 양자의 속도 우위가 거래 과정에 가져올 혁신에 주목하고 있다.

시뮬레이션(제약·화학·신소재 등)

양자 시뮬레이션은 양자컴퓨터를 활용해 복잡한 양자계 물질의 움직임을 재현하는 기술로, 새로운 촉매나 신소재 개발 과정을 혁신적으로 가속화할 것으로 보인다. 제약 및 화학 산업에서는 약효 물질이나 촉매의 특성을 예측하기 위해 광범위한 분자 시뮬레이션이 필요하다. 양자컴퓨터는 분자의 구조와 성질을 고전적 방법보다 더 정확히 계산할 수 있어, 이미 일부 분자(H_2 , LiH 등)에 대한 실험이 진행되었고, 복잡한 분자로 범위를 넓혀가고 있다. 첨단 반도체 소재 같은 신소재 개발에서도 양자 시뮬레이션을 통해 신소재의 특성을 예측하는 연구가 진행 중이다. 실제 실험에 앞서 컴퓨터 상에서 먼저 소재를 설계함으로써 시간과 비용을 획기적으로 절약할 수 있다. 예를 들어, Microsoft의 양자 클라우드 서비스 Azure Quantum을 신약 개발에 활용 중인 제약회사 Merck, Rigetti Computing의 양자컴퓨터로 재료과학 연구를 수행하는 OTI Lumionics가 있다.

생명공학 분야에서도 양자기술의 활용 가능성은 매우 크다. 방대한 유전자 데이터를 분석할 때 양자기술을 접목하여 탐색 횟수를 줄이거나, 신약 후보 물질 발굴 과정에서 단백질 물질의 특성과 상호작용을 정밀하게 시뮬레이션할 수 있다. 최근 AI의 도입으로 단백질 구조 예측 기술은 크게 향상되었지만, 복합체 형성 같은 어려운 문제가 여전히 남아 있다. 양자컴퓨터를 사용하면 다양한 단백질 입체구조에 대해 신약 후보를 병렬로 스크리닝하여 결합력이 가장 좋은 후보를 찾는 것이 가능하다.

이처럼 양자기술 기반 실험이 확대되면 연구개발의 패러다임은 현재의 실험 주도에서 시뮬레이션 주도로 전환될 가능성이 크다. 수많은 경우의 수를 실험 없이 양자컴퓨터 상에서 가상으로 테스트한 후 가장 유망한 경우만 실험으로 확인하는 방식이다.

마지막으로, 어쩌면 가장 난해한 기후 변화 예측 분야를 살펴보자. 기후 및 대기 모델은 수많은 변수가 있는 매우 복잡한 방정식이다. 하지만 양자컴퓨터의 압도적인 연산 능력이라면 언젠가는 정확한 기후 시뮬레이션을 기대할 수 있다. 양자컴퓨터의 병렬 특성을 이용해 기후 모델 변수 간 조합을 빠르고 정교하게 계산할 수 있다면, 기후 변화 시나리오 분석과 기후 정책 수립에 큰 기여를 할 수 있을 것이다.

국방·항공우주

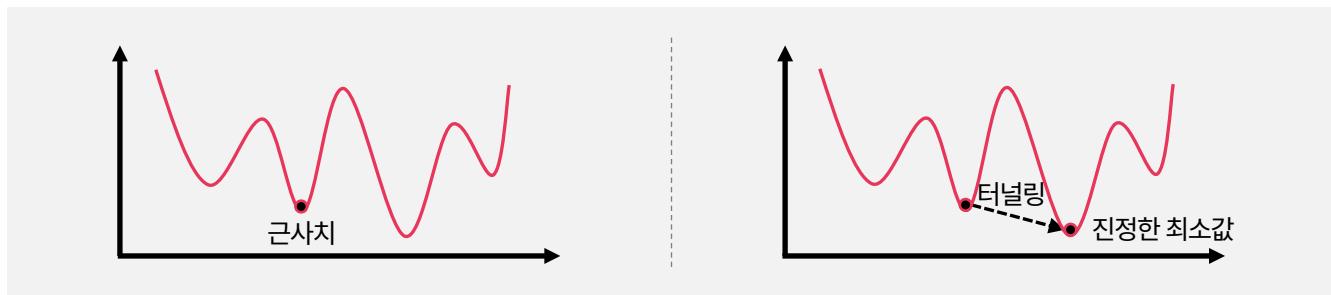
양자기술은 항공우주 및 국방 분야에서도 게임체인저로 부상할 전망이다. 예를 들어, 광자의 얹힘을 이용하여 스텔스 항공기나 미사일을 탐지하는 차세대 레이더 기술이 연구되고 있다. 이 기술은 스텔스 기술로 레이더파가 흡수되거나 교란되더라도 얹힘 특성 덕분에 목표물 신호를 정확히 분리해낼 수 있다고 한다.

이 외에도 GPS 신호 없이 양자 센서를 활용해 위치를 파악하는 양자 나침반이나, 잠수함의 미세한 움직임을 감지하는 양자 관성센서, 양자 암호화를 적용한 위성과 지상 간 통신 등이 국방과 항공우주 분야에 도입되면 국가 안보 역량을 새로운 차원으로 끌어올릴 것으로 기대된다. 이러한 양자기술의 응용은 기존의 한계를 뛰어넘어 첨단 기술의 지평을 넓힐 수 있을 것이다.

최적화 문제 해결(에너지·물류·제조 등)

운영 효율화, 일정 관리, 공급망 관리와 같은 복잡한 최적화 문제들은 산업 부문을 막론하고 산재해 있다. 기존에는 계산상의 한계로 어느 정도의 근사치를 찾는데 그쳤으나, 앞으로는 양자 어닐링 기법 등을 활용하여 더 나은 해답을 탐색할 수 있을 것으로 전망된다. 어닐링 기법은 산봉우리가 있는 지역에 내린 비가 중력에 의해 낮은 곳으로 고이는 현상을 통해 가장 낮은 위치, 즉 최소값을 찾는 방법으로 이해할 수 있다. 고전 물리학에서는 이렇게 찾은 위치가 진정한 최소값이 아닌 근사치일 가능성이 있지만, 양자를 도입한 어닐링 기법에서는 중첩 성질의 영향으로 입자가 장벽을 넘어서는 현상, 즉 양자 터널링이 나타난다. 이 특성을 활용하면 진정한 최소값 탐색이 가능해진다. 각 산업별로 이러한 특성을 응용한다면, 골치 아픈 최적화 문제를 보다 효율적으로 해결할 수 있을 것이다. 양자기술은 이렇게 다양한 분야에 걸쳐 문제 해결의 새로운 가능성을 제시하고 있다.

[도표 16] 고전물리학(좌)과 양자역학(우)에서의 어닐링 기법



Source: 한국주택금융공사, 삼일PwC경영연구원

스페인의 에너지 기업 Iberdrola는 양자컴퓨터 기업과 협력하여 대규모 전력망 내 배터리의 최적 수량, 종류, 위치 등을 결정하는 파일럿 프로젝트를 성공적으로 마쳤다. 이 프로젝트를 통해 배터리 설치 비용을 절감하고 전압 품질을 향상시키는 두 가지 목표를 동시에 달성했다는 평가를 받았다. 특히 재생에너지의 확대로 전력망의 안정성 확보가 중요해진 오늘날, 이 성과는 큰 의미를 지닌다. 양자컴퓨터의 도입으로 에너지 분야의 운영 효율성이 높아질 뿐만 아니라, 저탄소 에너지 전환에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 교통 및 물류 분야에서도 차량 경로, 운송 스케줄링, 교통 신호 제어 등 해결해야 할 복잡한 문제가 많다. Volkswagen은 D-Wave Systems의 양자 어닐링 장비를 사용해 포르투갈 리스본에서 실시간으로 버스 경로를 최적화하는 파일럿 프로젝트를 시연했다. 이는 양자컴퓨터가 스마트 교통 시스템에서 수많은 차량 경로를 동시에 최적화함으로써 교통 체증을 줄이고 효율적인 운행을 가능케 할 수 있다는 가능성을 보여주었다.

[도표 17] Volkswagen의 교통 최적화 파일럿 프로젝트



Source: 언론자료

생산 일정 계획, 공장 라인 최적화, 창고 입지 선정 등 공급망 관리에서도 최적화 문제는 빠질 수 없는 과제다. 현실적으로 다양한 제약에 직면하는 제조 일정 관리에 양자 알고리즘을 도입하면, 단품종 소량 생산환경에서도 공정 스케줄링을 유연하게 조정할 수 있게 된다. 이로써 낭비를 최소화하고 생산률을 극대화하는 효과를 기대할 수 있다. 고전적인 방법과 양자 알고리즘 기반 방법을 혼합해 최적화 솔루션을 테스트하는 기업들도 점차 늘어나고 있다. 이는 제조업계가 효율성을 높이고 경쟁력을 강화하는데 기여할 수 있는 길을 열어줄 것이다.

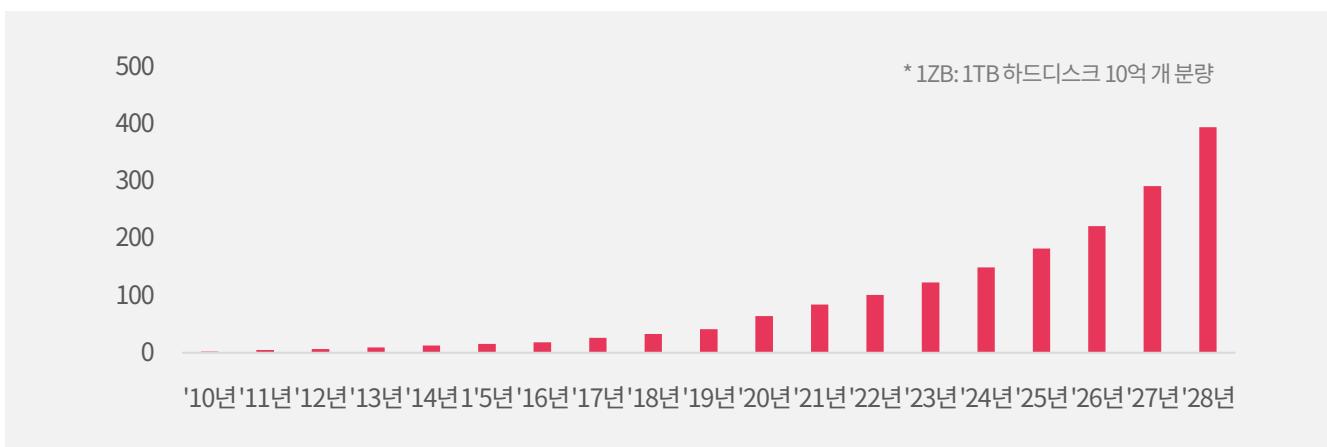
머신러닝·AI·빅데이터

양자컴퓨터를 활용하면 기존 컴퓨터 대비 지수적인 계산 속도 향상이 가능하여, 대규모 데이터를 학습하는 머신러닝에서도 이러한 개선 가능성이 제기되고 있다. 양자 알고리즘을 접목하여 학습 성능을 높이는 양자기계학습(QML)이 실용화되기까지는 해결해야 할 과제들이 남아 있지만, 현재는 양자-고전 하이브리드 머신러닝에 대한 연구가 진행 중이다. 이 방식에서는 복잡한 계산만 양자컴퓨터가 수행하고, 나머지 작업은 기존 컴퓨터가 맡는다.

이미지 분류 등 패턴 인식에 쓰이는 인공신경망 모델과 양자회로를 결합한 양자신경망(QNN)도 연구 대상이다. 현재는 소규모 실험 단계에 있지만, 중첩과 얹힘을 통해 고전 신경망으로는 표현하기 어려운 복잡한 함수를 구현하고 학습 시간을 단축하는 효과가 기대된다. 이 외에도 게임 AI 등에 활용되는 강화학습 기법에 양자기술을 더해 학습 효율을 개선하려는 양자강화학습(QRL) 등의 아이디어가 제시되고 있다. QRL은 자율주행이나 재무 포트폴리오 조정 등에 활용될 전망이다.

한편, 빅데이터 시대에 접어들면서 데이터를 압축 및 요약하는 기술의 중요성이 높아지고 있다. 양자 압축 알고리즘은 양자 상태의 중복 정보를 제거하여 큐비트 수를 줄이는 기술로, 데이터 압축 및 축소 효과를 기대할 수 있다. 비정렬 데이터베이스에서 필요한 정보를 신속하게 찾는 검색 기능도 구현될 수 있다. 산업 곳곳에 AI가 도입되면서 향후 더 많은 데이터 증가가 예상되는 가운데, 양자컴퓨터가 이러한 데이터를 혁신적으로 저장하고 처리하는 게임 체인저가 될 수 있을지 주목된다.

[도표 18] 연도별 글로벌 데이터 생산량 (단위: ZB)



Source: Statista

사이버보안

사이버보안 측면에서는 양자컴퓨터의 도전에 대응하는 보안 기술과, 양자컴퓨터를 활용한 보안 기술이 함께 부상할 것으로 보인다. 현대의 암호 기술은 대개 복잡한 수학적 문제, 예를 들어 큰 수의 소인수분해 등을 기반으로 하지만, 고성능 양자컴퓨터 앞에서는 이러한 암호 체계가 무력화될 위험이 있다. 1994년 피터 쇼어가 양자컴퓨터로 소인수분해를 빠르게 해결할 수 있는 방법을 제시했다. 쇼어 알고리즘과 더불어, 양자컴퓨터에 적용되는 대표적인 계산 방법으로 그로버 알고리즘이 있다. 예를 들어, 0000~9999 사이의 4자리 비밀번호를 찾기 위해 평균 5천 회($10,000/2$)의 계산이 필요하지만, 그로버 알고리즘을 사용하면 단 100회($\sqrt{10,000}$) 만에 찾을 수 있다. 자릿수가 커질수록 양자컴퓨터의 우위가 더 확실하게 드러난다. 현재 개발된 양자컴퓨터의 연산 능력만으로는 현존하는 암호 체계가 즉시 무너지지는 않겠지만, 향후 양자컴퓨터의 발전에 대비해 안전성 재평가는 필수적이다.

이러한 위협에 대응하여 고안된 차세대 암호 체계가 바로 양자내성암호(Post-Quantum Cryptography, PQC)다. 이는 양자컴퓨터로도 풀기 어려운 수학 문제에 기반하여 설계된 새로운 암호 기술이다. 격자, 부호, 다변수 다항식 등을 알고리즘에 적용하는 연구가 진행되고 있다. 2022년 미 국립표준기술연구소(NIST)는 격자와 해시 함수 같은 난제를 적용한 암호 체계 후보를 발표했으며, 2024년에는 최초의 표준안을 공개했다. 세계 각국은 이를 활용한 암호 체계 전환 계획을 수립하고 있다.

또한, 사이버보안에 양자기술 자체를 도입하려는 시도도 늘어나고 있다. 예를 들어 암호 체계에 양자를 도입하여, 외부 요인이 개입하거나 관측할 경우 양자 상태가 붕괴되어 그 흔적이 남게 되는데, 이를 통해 도청이나 해킹 시도를 즉각 감지할 수 있는 방식이다. 이 기술은 이미 일부 국가의 국방 및 금융 분야 보안에 도입되고 있다.

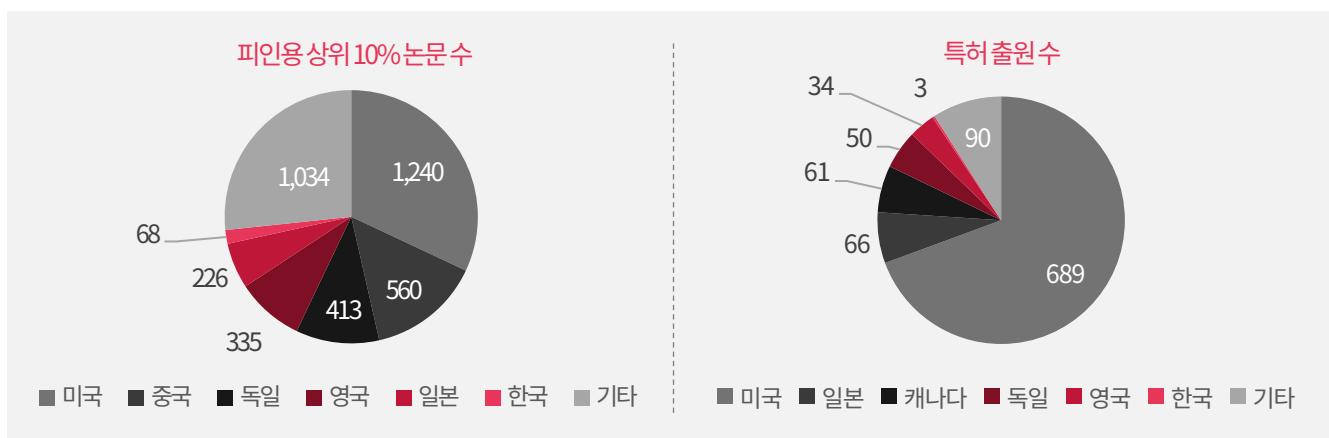
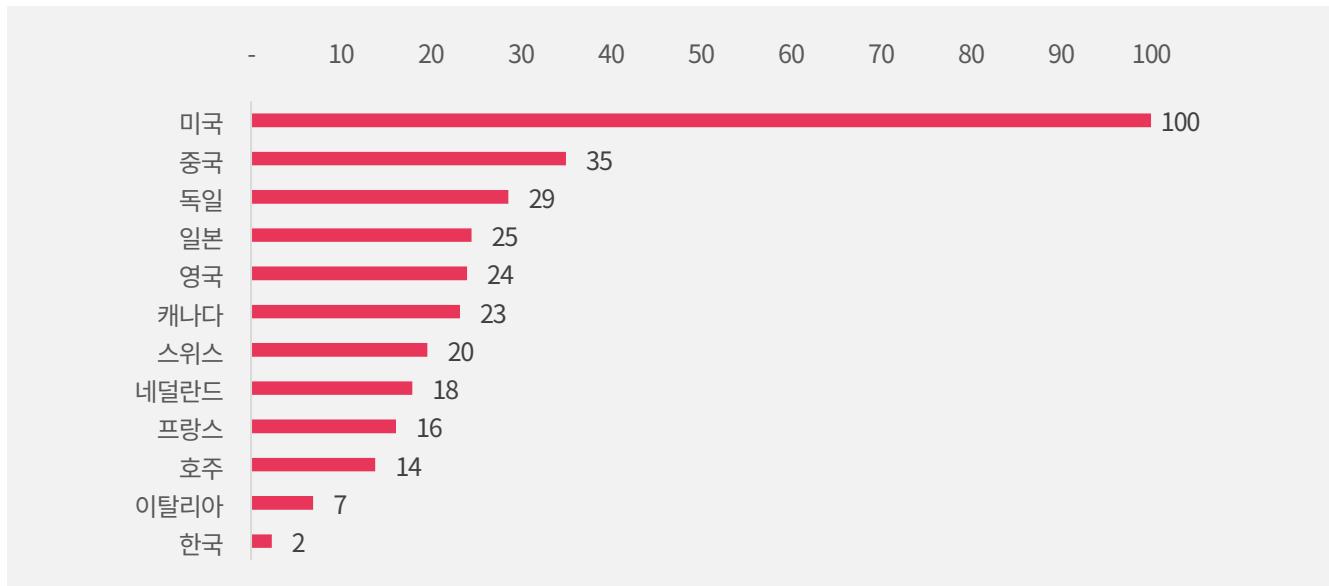
Part 3

양자컴퓨터, 현재 어디까지 왔나?

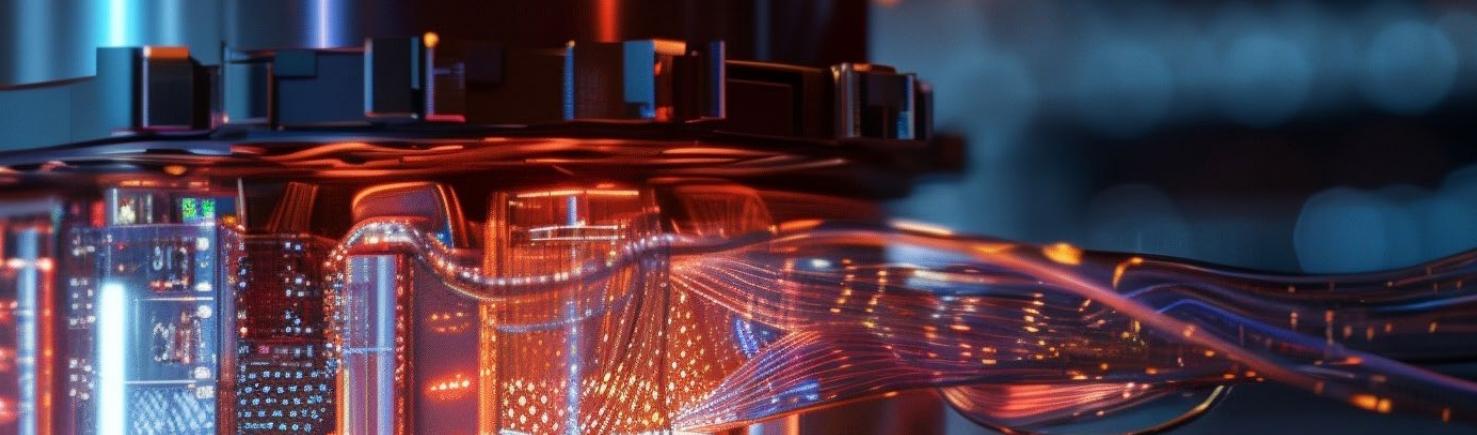
국가별 동향

양자기술이 미래 산업의 판도를 바꿀 게임체인저로 주목받으면서 주요 국가들은 기술 확보를 위한 정책 수립과 투자에 적극 나서고 있다. 과학기술정보통신부가 2024년 발표한 글로벌 기술 수준 지도에 따르면, IBM, Google, Microsoft 등이 있는 미국의 양자컴퓨터 기술 수준을 100점으로 환산했을 때, 2위인 중국은 35점, 그리고 3~5위인 독일, 일본, 영국은 각각 20점대로 미국과 큰 격차를 보였다. 한국은 2점대로 조사 대상 12개국 중 최하위를 기록했다. 반면, 국가별 투자 규모에서는 중국이 가장 앞서는 것으로 나타나, 기술 개발에 대한 국가적 의지를 보여주고 있다.

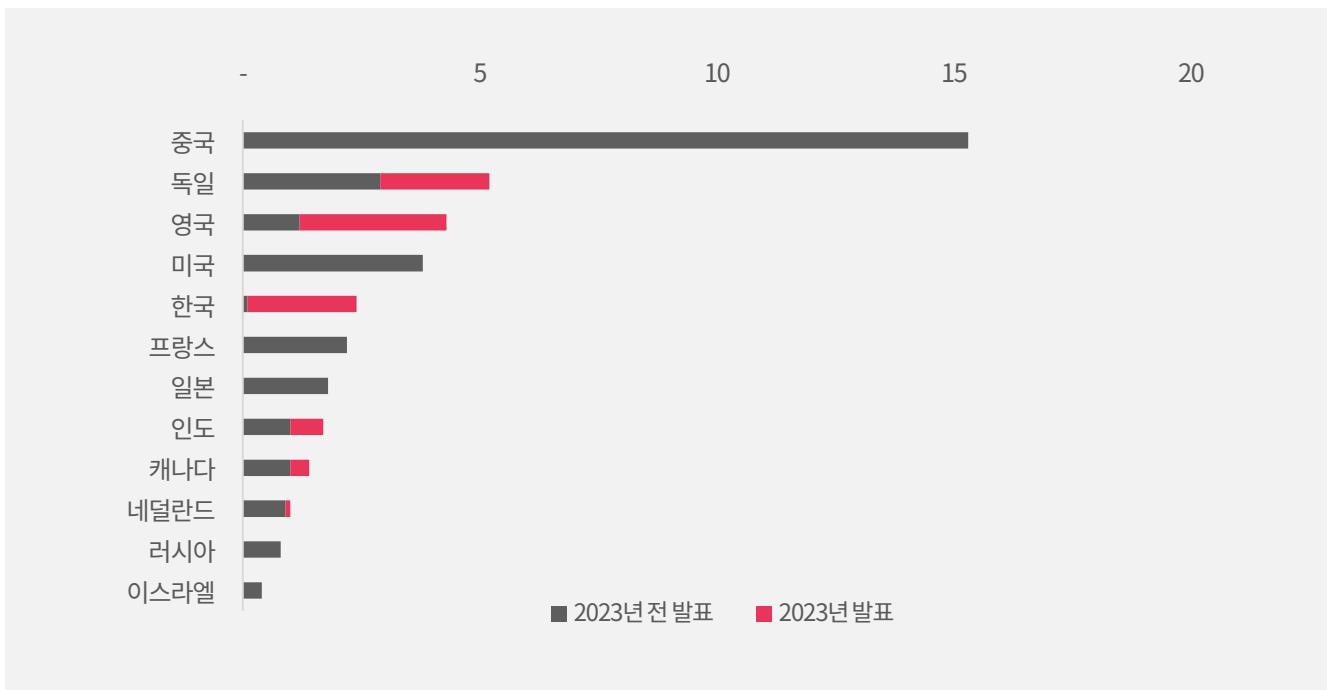
[도표 19] 국가별 양자컴퓨터 기술수준



Source: 과학기술정보통신부, 삼일PwC경영연구원



[도표 20] 국가별 공공부문의 양자기술 투자규모 (단위: 십억 달러)



Source: McKinsey & Company(2024.04)

주요국의 양자기술 관련 정책 및 투자 동향을 살펴본다.

① 미국

미국은 2018년 양자법(National Quantum Initiative Act)을 제정하여 관계 부처를 포함하는 종합지원체계를 구축하고, 2019년부터 2023년까지 37억 달러(약 5조 원)를 투자하였다. 2024년의 예산은 약 9억7천만 달러(1.3조 원)로 책정되어 있다. 2021년에는 혁신경쟁법에 양자컴퓨터를 10대 첨단기술 중 하나로 포함하였으며, 2022년에는 백악관 산하에 국가 양자 이니셔티브 위원회를 설치하였다. 이러한 노력은 양자기술 분야에서 리더십을 확보하기 위한 미국의 전략적 접근을 보여준다.

② 중국

중국은 양자기술을 국가 전략 기술로 포함시키며, 세계 최대 규모의 연구소 설립과 양자산업 클러스터 조성을 통해 기술 주도권을 확보하려는 목표를 가지고 있다. 2018년부터 2023년까지 양자연구 사업에 한화 약 19조 원을 투입하였으며, 2035년까지의 중장기 목표로 매년 양자기술 관련 연구개발비를 7% 이상 증액하겠다고 발표했다. 이러한 노력은 중국이 양자기술 분야에서 글로벌 리더십을 강화하려는 큰 의지를 반영한다.

③ 독일

독일 정부는 양자기술과 관련해 프레임워크 프로그램을 추진하고 있으며, 2018년부터 2022년까지 6억5천만 유로(약 9천억 원)를 투입했다. 2023년부터 2026년까지는 30억 유로(약 3.9조 원)의 투자 계획도 밝힌 상태다. 한편, 유럽연합(EU) 차원에서는 2018년에 출범한 양자기술 플래그십 프로젝트를 주요 방향으로 설정하고, 2027년까지 총 10억 유로(약 1.3조 원)의 예산을 편성했다. 이러한 노력들은 양자기술 분야에서 유럽이 경쟁력을 확보하고 혁신을 주도하기 위한 전략적 접근의 일환이다.

④ 일본

일본은 2020년에 양자기술 이노베이션 전략을 수립하고, 2023년에는 양자 미래산업 창출전략을 발표했다. 2039년까지 양자 기술을 중점 육성하기 위한 중장기 국가 전략을 추진하고 있는 가운데, 2022년 양자기술 관련 예산은 800억 엔(약 8천억 원) 수준으로 알려졌다. 이러한 전략과 투자는 일본이 양자기술 분야에서 혁신을 달성하고, 경쟁력을 강화하기 위한 노력을 보여준다.

⑤ 한국

한국은 2021년에 국가과학기술자문회의 산하에 양자기술특별위원회를 신설하고, 2022년에는 양자기술을 국가전략기술로 지정했다. 2023년에는 과학기술정보통신부가 양자과학기술 비전과 정책목표를 발표하며, 2035년까지 민관 합동으로 3조 원을 투자할 계획을 세웠다. 2024년에는 국가과학기술자문회의가 양자과학기술 대도약을 위한 퀸텀 이니셔티브를 발표하고, 9대 중점기술과 4대 추진전략을 제시했다. 2025년에는 양자과학기술 관련 전용 예산이 전년 대비 54% 증가한 1,980억 원으로 책정되어, 양자컴퓨터 서비스 및 활용체계 구축, 양자 플랫폼 사업 등이 본격적으로 추진될 예정이다. 이러한 전략은 한국이 양자기술 분야에서의 경쟁력을 강화하고, 미래 산업을 선도하려는 의지를 보여준다.

[도표 21] 한국 양자과학기술 전략 과제 (2023년 6월)



Source: 과학기술정보통신부, 삼일PwC경영연구원

[도표 22] 퀀텀 이니셔티브 전략 (2024년 4월)



Source: 국가과학기술자문회의, 삼일PwC경영연구원



글로벌 기업 동향

양자컴퓨터 개발을 선도하는 기업으로는 IBM, Google, Microsoft 등 빅테크와 D-Wave Systems, Rigetti Computing 등이 있다. IBM은 IBM Q Experience라는 클라우드 기반 서비스를 통해 양자컴퓨터를 제공하고 있으며, 2023년에는 1,121큐비트를 탑재한 양자컴퓨터를 개발하였다. Google은 2024년 12월에 자체 개발한 양자 칩 Willow를 장착한 양자컴퓨터를 통해, 현존 슈퍼컴퓨터로는 사실상 계산이 불가능한 문제를 단 몇 분 만에 해결할 수 있다고 발표했다. Microsoft는 클라우드 기반 양자컴퓨터 서비스인 Azure Quantum을 제공하며, 2025년 2월에는 오류 가능성을 혁신적으로 낮춘 위상 초전도체 기반 양자 칩 Majorana 1을 공개했다. Majorana 1은 8개의 큐비트를 구현하고 있지만, 이를 100만 개까지 확장할 수 있도록 설계되었다고 Microsoft는 설명한다. Rigetti Computing은 양자컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어를 개발하는 기업으로, 클라우드 기반 서비스를 제공 중이다. 캐나다의 D-Wave Systems는 양자 어닐링 장비를 제공하며, Volkswagen 등과 협업하여 양자컴퓨터 활용 방안을 개발 중에 있다.

[도표 23] 주요 양자컴퓨터 기업 동향 (글로벌)

구분	국가	주요 서비스
IBM	미국	<ul style="list-style-type: none"> 일반 사용자들에게 양자컴퓨터 사용 권한을 제공하는 IBM Q Experience 클라우드 서비스 127큐비트 규모 양자 프로세서 Eagle 공개(2021) 기업, 대학 등 106개 기관에서 상업 서비스 IBM Q 유료 사용(2020.06 기준) 433큐비트 규모 양자 프로세서 Osprey 공개(2022.11) 1,121큐비트 규모 양자컴퓨터 Condor 개발(2023) 연세대학교와 협업하여 IBM Quantum System One 공개(2024.11)
Google	미국	<ul style="list-style-type: none"> NASA와 함께 양자 AI 연구소 설립 양자 프로세서 Sycamore로 특정 문제에 대해 당시 세계 최고 수준의 슈퍼컴퓨터로 수만 년 걸릴 계산을 수십 초만에 수행 가능하다고 발표(2019) 자체 개발한 양자 칩 '윌로우'(Willow)를 장착한 양자컴퓨터로 슈퍼컴퓨터가 10의 25제곱년(10자년) 간 계산해야 하는 문제를 몇 분 만에 풀 수 있다고 발표(2024.12)
Microsoft	미국	<ul style="list-style-type: none"> 반도체기업 Rambus와 극저온 D램 메모리 시스템 개발(2017.04) 화학·재료과학 연구 시간을 단축할 수 있는 화학물질 탐색 특화 양자 클라우드 서비스 Azure Quantum Elements 공개(2023.06) 위상 초전도체 기반 큐비트를 탑재한 양자 칩 Majorana 1 개발 성공(2025.02)
Intel	미국	<ul style="list-style-type: none"> 극저온 웨이퍼 Prober 공개 및 Cryo-CMOS 칩 개발(2019.01) QuTech과 1.1K에서 동작하는 스핀 큐비트 게이트 발표(2021.05) 양자 스택을 시뮬레이션하는 소프트웨어 패키지 출시(2023.02) 양자컴퓨터 칩 Tunnel Falls 발표(2023.06)
Amazon	미국	<ul style="list-style-type: none"> Amazon Web Service를 통해 양자컴퓨터 서비스 제공 및 양자 프로세서 제작업체들과 협력 양자컴퓨터 연구 가속화를 지원하는 양자 클라우드 서비스 Amazon Braket 출시 양자 오류 수정 비용을 기존 대비 최대 90% 절감 가능한 칩 Ocelot 발표(2025.02)
IonQ	미국	<ul style="list-style-type: none"> Microsoft와 AWS에 이온 포획 기반 양자 프로세서를 이용한 연산 서비스 제공 바륨 이온을 활용, 20개 알고리즘 큐비트를 달성한 양자컴퓨터 Aria 출시(2022) 32개의 이온을 큐비트로 사용하는 양자컴퓨터 Forte 출시(2023.06)

구분	국가	주요 서비스
Rigetti Computing	미국	<ul style="list-style-type: none"> 양자 클라우드 서비스 QCS 발표(2018.08) 128큐비트 칩 개발 양자컴퓨터에서 사용되는 작은 칩들을 모아서 결합시키는 칩렛 방식 적용
PsiQuantum	미국	<ul style="list-style-type: none"> 광자를 이용한 양자 프로세서 하드웨어 및 소프트웨어 개발 진행 Mercedes-Benz와 전기자동차용 리튬 이온 배터리 설계 연구(2022.04)
Quantinuum	미국, 영국	<ul style="list-style-type: none"> 포획 이온 기술 기반 양자 하드웨어를 만드는 Honeywell Quantum Solutions과 양자 소프트웨어, 운영체제 기업 Cambridge Quantum의 합병으로 신설(2021.12) 이온 포획 양자 전자결합소자 형태의 큐비트 연구
Zapata AI	미국	<ul style="list-style-type: none"> Rigetti Computing, IBM, IonQ 등의 하드웨어를 지원하는 알고리즘 및 소프트웨어 개발 독일 Bosch 카세어링, 물류를 지원하는 알고리즘 개발을 위해 약 1조원 투자(2019) 시리즈 B 펀딩에서 총 6,400만 달러 유치하여 상용화 가속(2020.11) IonQ와 생성형 AI 관련 전략적 제휴 체결(2023.08)
Alibaba	중국	<ul style="list-style-type: none"> 초전도소자 기반 11큐비트 양자 클라우드 출시(2018.02) GPU보다 10배의 향상된 성능을 제공할 수 있는 AI 칩 한광800 발표(2019.09)
QuantumCTek	중국	<ul style="list-style-type: none"> 고성능 초전도 양자컴퓨팅 기술 개발 및 공급망 관리 실온모니터링 시스템, 칩 패키징 시스템, 모니터링 시스템 등 개발
Origin Quantum	중국	<ul style="list-style-type: none"> 은행과 협업하여 금융사기 분야 양자 알고리즘 개발 금융사기 차단 가속화 및 금융서비스 스마트화 기여
Huaxiang Electron	중국	<ul style="list-style-type: none"> 37큐비트 규모 이온트랩 양자컴퓨터 시제품 HYQ-A37 공개
BOSON	중국	<ul style="list-style-type: none"> 광 양자컴퓨팅 검증 플랫폼 개발(2022) 바이오, 통신, 금융분야 기업들과 협작
SPINQ	중국	<ul style="list-style-type: none"> 초전도 양자 칩, 제어 시스템, 클라우드 플랫폼 등 공개 은행과 협업하여 양자컴퓨터 핀테크 응용방안 개발 중동지역 과학연구기관에 초전도 양자 칩 수출
QUDOOR	중국	<ul style="list-style-type: none"> 상하이 양자 소프트웨어 기술연구 및 검증센터 공동설립 이온트랩 양자컴퓨터 공개 및 차이나모바일 연구원과 이동통신 분야 응용방안 연구
D-Wave Systems	캐나다	<ul style="list-style-type: none"> 500개 이상의 큐비트를 수직·수평 방향으로 배치한 양자컴퓨터 시제품 공개(2021.06) Volkswagen 등 기업들과 협업하여 양자컴퓨터 응용 방안 개발 중 사이버 보안을 강화하기 위해 양자 암호화 기술 개발 중
QuTech	네덜란드	<ul style="list-style-type: none"> 양자 네트워크에서의 Link-layer 프로토콜 개발(2019) 미국 오리건주 소재 Intel D1 제조 공장에서 대규모 실리콘 큐비트 제작 성공(2022.04)

Source: 양자정보기술 백서, 언론종합, 삼일PwC경영연구원

한국 기업 동향

국내 기업의 경우, 양자컴퓨터 자체 개발보다는 양자컴퓨터가 산업에 미칠 변화에 대비하려는 움직임이 더 두드러진다. 삼성전자는 양자컴퓨터의 해킹 공격에 대응할 수 있는 차세대 보안 기술인 양자내성암호 기능을 갤럭시 S25 시리즈에 처음으로 탑재했다. SK텔레콤도 양자내성암호 개발에 나섰으며, 2024년에는 양자내성암호를 응용한 하이브리드 암호장비를 공개했다. LG전자, 현대자동차, 포스코 등 주요 기업들도 양자컴퓨터 기술 개발보다는 양자컴퓨터를 활용한 소재 개발 등 응용사례를 연구하고 있는 것으로 알려졌다. 양자컴퓨터 기술의 진입장벽이 높은 만큼, 국내 기업들은 핵심 기술의 개발과 확보보다는 외부 양자컴퓨터를 활용하는 방안에 집중하고 있다는 분석이 제기되고 있다.

[도표 24] 주요 양자컴퓨터 기업 동향(한국)

구분	주요 내용
삼성전자	<ul style="list-style-type: none"> 2025년 갤럭시 S25 시리즈에 양자컴퓨터 해킹 공격에 대응할 수 있는 양자내성암호 기능 탑재 2025년 업계 최초로 하드웨어 양자내성암호를 탑재한 보안 칩 S3SSE2A 개발
SK텔레콤	<ul style="list-style-type: none"> 2024년 양자내성암호를 응용한 하이브리드 암호장비 공개 2025년 IonQ와 AI · 양자컴퓨터 관련 전략적 제휴 체결 양자 라이다, 양자내성암호, 광집적화 기반의 양자암호통신 기술 등 다양한 차세대 양자 기술의 개발 추진 중
한국첨단소재	<ul style="list-style-type: none"> 2024년 한국전자통신연구원과 카이스트가 공동 개발한 양자 얹힘 광자 쌍생성 기술에 대한 기술이전 완료 발표 양자키분배 시스템의 필수 소자인 광간섭계 모듈 개발 및 스위스 양자암호시스템 기업 ID Quantique(IDQ)에 제품 납품
코위버	<ul style="list-style-type: none"> 1G/10G/100G급 양자통신암호장비의 국가공인기관 인증 획득
시큐센	<ul style="list-style-type: none"> 보안기술연구소에서 암호 기반 라이브러리를 개발해 한국인터넷진흥원(KISA)으로부터 국내 암호모듈검증 제도(KCMVP) 인증 획득
라온시큐어	<ul style="list-style-type: none"> 전자서명과 구간암호화 기능을 PC 환경에서 제공하는 Key# Biz, 모바일 환경에서 제공하는 Key# Wireless에 양자내성암호 기술 적용
우리넷	<ul style="list-style-type: none"> 국내 최초로 KCMVP 인증 모듈이 적용된 양자통신 암호화장비 개발 및 한국정보통신기술협회 보안기능확인서 획득 과학기술정보통신부가 주관하는 모듈형 양자암호 시스템 개발 사업 참여

Source: 언론종합, 삼일PwC경영연구원

Part 4

순간이동의 꿈, 양자컴퓨팅과 한국의 도전

국가별·기업별 동향에서 보았듯, 현재 양자컴퓨터 분야의 선두주자는 미국이다. 미국에 이어 기술력이 높다고 평가되는 중국이 맹추격하고 있고, 유럽·일본 등이 그 뒤를 따르고 있다. 이에 비하면 한국의 기술력과 투자 규모는 아직 미미한 수준이다.

[도표 25] 주요국(미국·중국·한국) 양자컴퓨터 산업 수준 비교

수준	First mover	Fast follower	Late mover
시장 성장성	 		
생태계	 		
기술력	 		
투자	 		

AI·딥러닝 등 양자컴퓨터 응용분야 다수

통신분야 응용 가능성 유망

정부 지원과 빅테크 개발 인프라

양자기술 핵심인력 최대

전문인력과 인프라 부족

큐비트 1,000여 개 구현

IT 강국, 제조 분야 경쟁력 높음. 양자컴퓨터 자체 개발 기술력은 미흡

공공부문 투자 규모 최대

정부 지원 및 민간 투자 필요

Source: 삼일PwC경영연구원



종종 새로운 기술 경쟁은 승자독식으로 끝날 것이라 여겨진다. 그래서 미국과 중국에 밀린 한국의 노력은 헛수고라는 냉소도 있다. 그러나 중요한 사실은 이 산업은 이제 막 꽂피우기 시작했다는 점이다. 아무도 아직 결정적 우위를 잡지 못한 태동기에 있다는 뜻이다.

AI 분야만 보더라도, 2022년 오픈AI의 ChatGPT 공개 후 미국이 초격차를 벌이는 듯했다. 그러나 2024년 말 중국 딥시크 (DeepSeek)가 ChatGPT의 10%도 안 되는 비용으로 유사 성능의 모델을 내놓으며 세계를 놀라게 했다. 완전한 승자란 없다는 교훈이다. 하물며 이제 막 걸음마를 뗀 양자컴퓨터 분야에서는 후발주자도 충분히 선두로 도약할 기회가 있다.

한국은 한국표준과학연구원 주도로 20큐비트 양자컴퓨터 개발에 성공했고, 현재 50큐비트급 초전도 양자컴퓨터 시스템을 개발 중이다. 출발은 늦었지만 정부의 적극 지원 아래 2035년까지 상용 양자컴퓨터 출시를 목표로 하고 있다. 다만 기술 역량과 인프라가 부족한 만큼, 대규모 R&D 투자와 산학연 협력이 절실하다. 미국·중국의 10% 수준에 불과한 한국의 양자 전문인력도 늘려야 한다.

정부가 생태계를 조성하는 동안, 산업계도 양자컴퓨터에 대한 관심과 투자를 확대해야 한다. 앞서 보았듯 국내 기업들은 양자컴퓨터 자체 개발보다는 응용에 치중하고 있다. 그 중요성을 부정할 순 없지만, 핵심 기술 개발을 소홀히 해서는 안 된다. 진입장벽이 높다고 아예 방대한 미래 시장을 초기부터 포기한다면 돌이킬 수 없는 실기가 될 것이다.

양자컴퓨팅의 장대한 경주는 이제 시작일 뿐이다. 충분히 따라잡을 수 있다는 희망과 의지를 갖고 도전해야 한다. 기초 연구와 인력 양성에 힘쏟고, 국제 협력과 개방 혁신을 통해 우리의 길을 찾아야 한다. 양자역학이 밝혀낸 가능성의 세계처럼, 우리의 가능성 역시 중첩되어 있다. 어느 길을 현실로 만들지는 지금 우리의 선택과 노력에 달려 있다.

Appendix 1

양자컴퓨터 개요 및 작동원리

• 양자컴퓨터의 도입 배경

양자컴퓨터(Quantum Computer)는 기존 컴퓨터에 양자역학의 성질을 더해 기능을 향상시킨 기계로, 1980년대 초 리처드 파인만이 처음 고안했다. 파인만은 복잡한 자연현상을 시뮬레이션하기에 기존 컴퓨터로는 한계가 있으며, 양자역학의 원리를 따르는 특수한 컴퓨터가 필요하다고 생각했다. 현대 컴퓨터가 발전하면서 나타나는 한계점 또한 새로운 컴퓨터의 필요성을 부각시켰다. 기존 컴퓨터는 CPU 내부의 수많은 트랜지스터를 이용해 연산을 수행하는데, 소형화가 거듭되면서 물리적 한계를 마주하게 되었다. 트랜지스터가 나노미터 단위의 원자만큼 작아지면서 양자역학적 현상이 나타나 기존의 물리법칙이 적용되지 않는 경우가 발생했다. 이러한 상황에서 무어의 법칙이 깨질 가능성에 대한 경각심이 일었고, 양자컴퓨터가 새로운 대안으로 주목받게 되었다.

파인만의 아이디어 이후, 1985년 데이비드 도이치가 양자컴퓨터 계산의 기초 이론을 정립했고, 1994년 피터 쇼어가 양자컴퓨터를 활용하여 소인수분해를 빠르게 할 수 있는 방법을 제시했다. 현재 Google, IBM, Microsoft 등 테크 업계는 상용화가 가능한 수준의 양자컴퓨터 개발을 놓고 치열한 경쟁을 벌이고 있다.

이론적으로 양자컴퓨터는 현존하는 슈퍼컴퓨터보다 30조 배가량 빠른 연산을 수행할 수 있다고 한다. 2019년 Google은 양자 프로세서 Sycamore로 특정 문제에 대해 당시 세계 최고 수준의 슈퍼컴퓨터로 수만 년 걸릴 계산을 수십 초 만에 수행했다고 발표했다. 도대체 어떻게 이런 획기적인 성능 개선이 가능한지 앞서 살펴본 양자역학 개념을 접목하여 알아볼 차례다.

• 중첩과 얹힘이 적용되는 큐비트(Quantum Bit, Qubit)의 도입

기존 컴퓨터는 0 또는 1의 값을 갖는 비트를 단위로 정보를 표현한다. 반면, 양자컴퓨터는 0과 1이 확률적으로 ‘동시에’ 존재할 수 있는 양자비트, 즉 큐비트를 기본 단위로 활용한다. 양자역학의 중첩(Superposition) 개념이 떠올랐다면, 1장에서의 설명이 효과를 거둔 셈이다. 큐비트의 도입으로 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터와는 다른 계산 로직을 갖추게 된다.

한 번에 하나의 값(0 또는 1)만을 갖는 비트는 단일 상태만 표현할 수 있어, 비트 기반 컴퓨터는 하나의 계산 경로를 따라 순차적으로 연산을 반복해야 한다. 이를 병렬계산이라고 한다. 문제는 데이터량이 많아질수록 필요한 계산 횟수가 급격히 늘어난다는 점이다. 예를 들어, 비트 2개로 표현할 수 있는 경우의 수는 4개이고, 비트 3개는 8가지 경우의 수가 가능하다. 즉, 비트 수(n)의 경우의 수는 2^n 개로 늘어난다. 정보량이 하나 늘어날 때마다 계산량이 지수적으로 증가해 방대한 데이터 처리는 어려워진다.

이에 반해 큐비트는 중첩 원리를 통해 여러 상태의 결합으로 동시에 존재할 수 있다. 큐비트 2개는 4개의 상태를 한꺼번에 표현할 수 있으며, n 개의 큐비트는 2^n 개의 상태를 동시에 나타낼 수 있다. 이는 수많은 후보를 동시에 검토하고 목표를 찾아가는 병렬계산을 가능하게 하며, 기존 컴퓨터보다 훨씬 빠른 결과 도출이 이루어진다. 이는 계산 속도가 빨라진다고 보기보다는, 필요한 계산 횟수를 줄이는 방식으로 결과값 도출이 신속히 이루어진다고 볼 수 있다.

물론 기존 컴퓨터도 여러 대를 사용해 병렬계산을 구현할 수 있지만, 양자컴퓨터의 병렬계산은 중첩 현상을 한 대의 컴퓨터로 적용한다는 점에서 작동 원리가 본질적으로 다르다. 앞서 지수함수 형태의 계산량 증가를 언급했듯이, 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터에 비해 지수적인 계산 속도 향상이 기대된다.

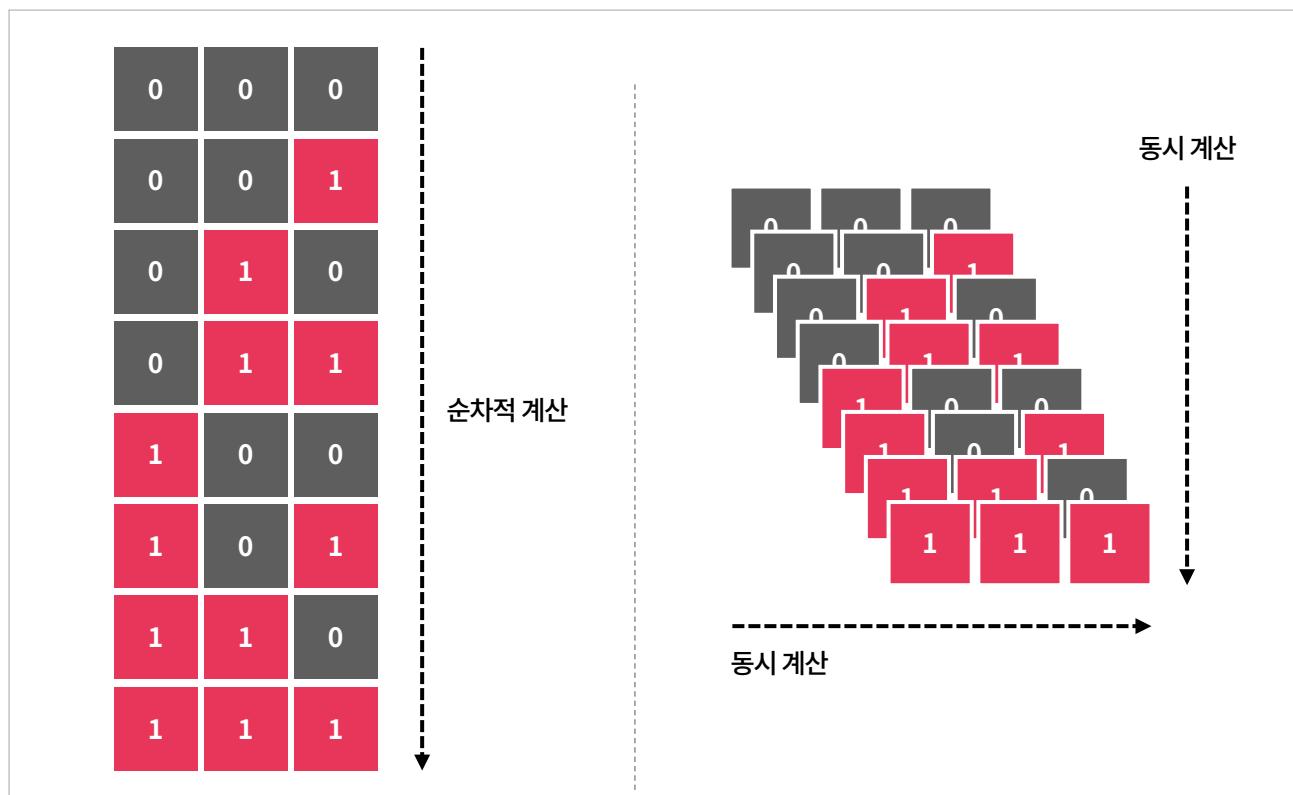
양자컴퓨터에 적용되는 양자역학의 성질은 중첩 현상에만 그치지 않는다. 얹힘(Entanglement)은 둘 이상의 양자 상태가 서로 밀접하게 연결된 특수한 상관관계로, 한 큐비트의 상태가 확정되면 다른 큐비트의 상태도 즉시 결정된다. 이러한 특징 덕분에 양자컴퓨터는 개별 큐비트를 따로 조작할 필요 없이, 한 번의 조작으로 다수의 상태를 동시에 처리할 수 있다. 중첩과 얹힘 현상은 양자컴퓨터의 핵심 능력으로, 복잡한 연산을 가능케 하고, 양자 오류 정정 및 양자 암호 통신 같은 다양한 기술의 기반이 된다.

[도표 26] 기존 컴퓨터와 양자컴퓨터의 기본 개념 비교

구분	기존 컴퓨터	양자컴퓨터
작동 원리	CPU 내부 트랜지스터를 이용하여 전기 신호(0과 1)를 제어	전자와의 파동-입자 이중성 등 양자 물리학의 원리를 정보 처리에 적용
기본 단위	비트	큐비트
비트 n 개의 정보량 표현	2^n 개 중 한 번에 1가지 결과값만 표현	2^n 개 전체의 결과값을 동시에 표현
연산 방법	논리 표에 의한 반복 계산(직렬계산)	행렬 함수에 의한 동시 계산(병렬계산)

Source: 삼일PwC경영연구원

[도표 27] 기존 컴퓨터(좌)와 양자컴퓨터(우)의 연산 개념 비교



Source: 삼일PwC경영연구원

요약하자면, 양자컴퓨터는 큐비트의 중첩 성질을 활용하여 다양한 확률적 결과값을 동시에 표현하고, 얹힘 성질을 통해 여러 상태를 한꺼번에 조작하며 병렬계산을 수행한다. 그리고 최종적으로 측정(관측)을 통해 단일 결과값을 도출한다. 겉보기에는 간단해 보이지만, 이를 구현하기 위한 조건들은 상당히 까다롭다.

• 양자컴퓨터의 구현 조건

양자컴퓨터의 구현은 큐비트 개발에서 시작된다. 어떤 물질을 활용하는지에 따라 큐비트의 개발 방식은 다양하다. 한 번 양자의 성질을 갖는 큐비트를 구현하는 데 성공한다면, 이 큐비트가 외부 상호작용에 영향받지 않고 의도된 연산을 수행할 수 있는 환경을 조성해야 한다.

앞서 ‘관측’을 자연계의 상호작용이라고 정의한 바 있다. 양자는 관측되는 순간 그 중첩과 얹힘 등의 성질을 잃고 하나의 결과값으로 확정되기 때문에, 양자컴퓨터 연산 과정에서 큐비트가 정해진 위치 이외의 외부 요인에 영향을 받지 않도록 폐쇄적인 환경을 유지하는 것이 필수적이다.

끝으로 결과값 측정에도 주의가 필요하다. 연산 단계에서는 양자 성질을 유지하다가 최종적으로 필요한 순간에만 측정하여 확정된 결과값을 도출해야 한다. 이 때문에 양자컴퓨터의 연산 결과는 언제나 확률적인 결과일 수밖에 없다. 따라서 연산의 오류율을 낮춰야 한다는 또 다른 과제가 생긴다. 2025년 2월, Amazon Web Service가 공개한 칩 Ocelot은 기존 대비 양자 오류 수정비용을 기존 대비 최대 90% 절감할 수 있는 기술을 탑재한 것으로 알려졌다. 결과값의 신뢰성이 높아질 것으로 기대되면서 양자컴퓨터의 상용화 시대가 한걸음 더 앞당겨졌다.

[도표 28] 양자컴퓨터 구현 조건

과정	조건
큐비트 구현	<ul style="list-style-type: none"> • 물리적으로 식별 가능한 큐비트 개발 • 다수의 큐비트로 구성된 시스템 구축
연산 수행	<ul style="list-style-type: none"> • 연산 과정에서 외부 상호작용 차단
결과값 측정	<ul style="list-style-type: none"> • 오류율 최소화(오류정정) • 적합한 순간에 결과값 측정

Source: 삼일PwC경영연구원

이러한 여러 조건들은 양자컴퓨터의 핵심 요소인 큐비트 개발 방식에 따라 쉽게 해결되기도 하고, 난제로 남기도 한다. 안정적인 큐비트를 구현하기 위한 다양한 연구개발이 현재 진행 중인 가운데, 대표적으로 세 가지 유형이 주목받고 있다

- **큐비트 개발 방식**

- ① **초전도**

초전도란 절대온도 0도와 같은 특정 조건에서 전기저항이 0으로 감소하는 현상을 말한다. 이 조건에서는 전자의 운동에 에너지 손실이 발생하지 않는다. 이러한 초전도 회로에 양자역학적 시스템을 구현하고, 그 안에서 에너지 준위를 큐비트로 사용하는 방식이 있다. 2023년 IBM이 초전도체 기반 양자컴퓨터 칩 Condor를 발표했고, 이어서 2024년 말에는 Google이 Willow를 발표했다. 초전도 큐비트는 작동 속도가 나노초에서 마이크로초 수준으로 매우 빠르고 제어하기 용이하다. 하지만 절대온도 0도를 유지하기 위해 극저온 냉각기가 필수적이며, 빛과 온도 같은 외부 요인에 취약해 연산 지속시간이 짧다는 단점이 있다. 또한, 큐비트 수가 증가할수록 시스템의 복잡도와 오류율이 급증하는 문제도 해결해야 할 과제로 남아 있다.

- ② **이온 트랩**

양자컴퓨터에서 큐비트를 구현하는 방식 중 하나는 진공에 떠 있는 원자인 이온을 전기장으로 포획(Trap)하고, 레이저를 사용하여 이온의 내부 에너지 준위를 큐비트로 활용하는 방법이다. 이 방식은 동일한 원자 유형으로 완벽히 동일한 큐비트를 만들 수 있어 균일성이 높다. 또한, 레이저를 정교하게 제어함으로써 오류율을 0.1% 미만으로 낮출 수 있다. 이온 격리가 제대로 이루어 진다면 연산 시간도 오래 유지될 수 있다. 그러나 초전도 방식에 비해 연산 속도가 상대적으로 느리고, 큐비트 간의 연결 과정이 복잡하여 확장성에 제약이 있다. IonQ가 이러한 고품질 이온 큐비트를 활용한 양자 시스템 상용화에 주력하고 있다.

- ③ **위상**

위상을 이용한 큐비트 구현 방식은 준입자를 활용하여 위상적으로 보호된 큐비트를 만든다. 이는 외부 환경적 요인에 강하게 작용하므로, 물질의 형태가 변해도 안정적인 연산이 가능하다. 2025년 2월, Microsoft는 위상 초전도체 기반의 큐비트를 탑재한 양자 칩 Majorana 1 개발에 성공했다고 발표하였다. 현재는 8 큐비트를 탑재했지만, Microsoft는 이를 향후 100만 개로 확장할 수 있도록 설계했다고 밝혀 기대감을 모으고 있다.

Appendix 2

양자컴퓨팅 소재·부품·장비 목록

구분	유형	제품명	주요 공급처
초전도 양자컴퓨팅	소재	기판	웨이퍼 코리아, 태원과학, 웨이퍼 마켓, Cryscore
		스퍼터링 타겟	태원과학, Stanford Advanced Materials, Lesker
		액화가스	그린산업가스, 에어리퀴드 코리아
	부품	증폭기	Low Noise Factory (HEMT), Cosmic Microwave Technology, Inc.(HEMT), CELESTIA TTi (HEMT), withwave, Mini-Circuits, Quantum Microwave, Narda-MITEQ
		상용 양자한계 증폭기	Quantware, Silent Waves, BBN, Bluefors, VTT
		써클레이터	Low Noise Factory(저온용 써클레이터), Narda-MITEQ(상온용 써클레이터), Quinstar(저온용 써클레이터), Pasternack(상온용 써클레이터)
		아이솔레이터	Low Noise Factory(저온용 아이솔레이터), Narda-MITEQ(상온용 아이솔레이터), Quinstar(저온용 아이솔레이터), Pasternack(상온용 아이솔레이터)
		로우패스/밴드패스 필터	K&L Microwave, Quantum Microwave, Mini-Circuits
		IR 필터	Quantum Microwave, Bluefors
		동축 케이블	Mini-Circuits, Huber+Suhner, Amphenol RF, Withwave
		저온 동축 케이블	Coax Co., Keycom, CryoCoax, Quantum Coax
		저온용 자기 차폐	Amuneal, muShield, 코암테크
	장비	무냉매 희석 냉동기	Bluefors, Oxford Instruments, Leiden Cryogenics, Maybell Quantum, Zero Point Cryogenics CryoConcept, FormFactor, Qinu
		임의파형 발생기	Tektronix, Zurich Instruments, Tabor Electronics
		양제 제어분석 시스템	Zurich Instruments, Quantum Machines, Keysight, Qblox, SDT
		와이어 본더	Inseto, TPT Wire Bonder, F&S BONDTEC
		고주파 신호 발생기	Keysight, SignalCore, Rohde & Schwarz, AnaPico
		극저온 웨이퍼 프로브 시스템	Bluefors, FormFactor
		전자빔 리소그래피 시스템	RAITH, JEOL, ELIONIX

구분	유형	제품명	주요 공급처
반도체 양자점 양자컴퓨팅	소재	GaAs HEMT	한국과학기술연구원, Weizmann Institute, Puedue University
		실리콘(²⁸ Si) 원재료	Air Liquid
		실리콘(²⁸ Si) 기반 웨이퍼	HRL Laboratory, QuTech
		저미늄(Ge) 기반 웨이퍼	TuDelft, quTech, Basel University
	부품	극저온 신호 증폭기	Cosmic Microwave Technology, Low noise factory
		극저온 고주파 초전도 케이블	Coax Co., Delft Circuits
		극저온 신호 발생기	Intel
		극저온 방향성 결합기	Mini circuits, Low Noise Factory
	장비	무냉매 극저온 희석 냉동기	Oxford Instruments, Bluefors
		고안정도 정전압 발생기	Stanford Research Systems, Bluefors, Basel precision instruments, Stahlelectronics, SDT
		고주파 신호 발생기	Keysight, AnaPico
		다채널 임의함수 발생기	Keysight, Tektronix, Zurich Instruments
		다채널 양자제어기	Quantum Machines, Zurich Instruments
		다채널 업-다운 컨버터	Quantum Machines
이온트랩 양자컴퓨팅	소재	원자 소재	(주)하나로티알
		マイ크로트랩 제작용 웨이퍼	(주)비엠아이티, 웨이퍼코리아
	부품	신호 증폭기	Mini-circuits
		광섬유	Coastal Connections, Thorlabs
		음향 광학 변조기	IntraAction, AA Group
		전자 광학 변조기	New Focus, Eospace, QUBIG
		라디오파/マイ크로파 스위치	Mini-circuits, Analog Devices, American Microwave Corporation
	장비	다이오드 레이저	Moglabs, TOPTICA Photonics
		펄스 레이저	Coherent
		단일채널 단일광자 검출기	Hamamatsu, IDQ, Single Quantum
		다채널 단일광자 검출기	Hamamatsu
		파장 측정기	Highfinesse
		이미징 장치	Thorlabs, Andor
		신호발생기	Anapico, Stanford Research Systems, Windfreak Technologies, Windfreak Technologies
		ARTIQ	M-Labs

구분	유형	제품명	주요 공급처
양자광학 기반 양자컴퓨팅	소재	실리콘(Si)	Silicon Valley Microelectronics, University Wafer
		실리카(SiO ₂)	Rogue Valley Microdevices, Silicon Valley Microelectronics, University Wafer
		질화 실리콘(SiN)	Rogue Valley Microdevices, Silicon Valley Microelectronics
		리튬 나이오베이트(LiNbO ₃)	NanoLN, NGK Insulators LTD, INNOSEMI
		리튬 탄탈레이트(LiTaO ₃)	NanoLN, INNOSEMI
		질화 알루미늄(AlN)	AMS
		탄탈라(Ta ₂ O ₅)	FiveNine Optics
	부품	광섬유	Thorlabs, OZ optics, 파이버피아
		다채널 광섬유 번들	OZ Optics, vanguard-photonic, PHIX Photonics Assembly, Meisu Optics
		광학부품	Thorlabs, OZ optics
		비선형 결정	Raicol, FOCtek Photonics
		비선형 광학모듈	NTT Innovate Devices, Covision
	장비	광자쌍 생성장비	Thorlabs, Aurea
		얽힘 광자쌍 생성장비	Ozoptics
		초전도 나노선 단일광자 검출기	Single Quantum, IDQ, Scontel, Quantum Opus
		단일광자 계수기	quTAG, Swabian Instruments, Liquid Instrument, SDT
		아발란치 포토 다이오드	Excelitas, 우리로
		통신파장 레이저	Toptica, Santec, NKT Photonics
		근적외선 레이저	Toptica, MogLabs, Coherent, Spectra Physicss
		양자점 기반 단광자원	Sparrow Quantum
		도파로 기반 초전도 나노선 단일광자 검출기	Pixel Photonics
		이온 빔 에처	Scia System, INTLVAC
		다채널 전기신호 공급 장치	nicslab, SDT
		다채널 양자광 프로세서 간섭계	Quix Quantum, IPRONICS

구분	유형	제품명	주요 공급처
NV센터 양자컴퓨팅	소재	단결정 다이아몬드	ElementSix, New Diamond Technology, 한국공학대학교
		질소이온	II-VI, Ion Technology Center, 한국원자력연구원
		다이아몬드 나노 구조물	한국나노기술원, 나노종합기술원, 한국과학기술연구원 나노팹, 서울대학교 반도체공동연구소
	부품	핀홀	Thorlabs
		대물렌즈	ZEISS
		이색성 미러	Semrok
		광학 필터	Thorlabs
		마이크로파 증폭기	Mini-Circuits
		RF & 마이크로파 스위치	Mini-Circuits
		음향 광학 변조기	G&H
		전기 광학 변조기	JENOPTIK
	장비	다이오드 조립형 고체상태 레이저	Changchun New Industries Optoelectronics Technology, Novanta Photonics
		외부 캐비티 다이오드 레이저	Newport, TOPTICA Photonics
		단일광자 검출기	Excelitas Technologies
		TTL 펄스 발생기	SpinCore
		벡터 신호 발생기	Stanford Research Systems, KEYSIGHT, Rohde & Schwarz
		임의파형 발생기	Tektronix
		피에조 스테이지	PI
		펄스 카운터	Stanford Research Systems

구분	유형	제품명	주요 공급처
리드버그 양자컴퓨팅	소재	원자	SAES, Sigma-Aldrich, AlfaVackuo
	부품	원자 셀	Thorlabs
		UHV 글래스 셀	ColdQuanta, preicision glass blosing, Japan Cell, Akatsuki
		터보 펌프	Varian, pfeiffer Vacuum
		이온 펌프	Agilent, (주)알파이브이에스, gamma vacuum
		게터 펌프	Agilent, Gamma Vacuum, SAES gatter, Iberica Vacuum
		전자증폭 카메라	Andor, Hamamatsu
		sCMOS 카메라	Andor
		액정소자	Meadowlark
		페브리 페로 공진기	Stable laser systems, Trhoalbs
		위상 고정 서보	TOPTICA Photonics
		음향 광학 변조기	Intraaction, AA optics, Gooch and housego
		전기 광학 변조기	Thorlabs, Qubig, Jenoptik, EOspace, AdvR
		광학 기기	Thorlabs, Edmund Optics, Newport
		정밀 이미징 광학계	Special Optics, Mitutoyo
		레이저 주파수 안정화 서보	vescent, newport, moglabs
	장비	다이오드 레이저	Moglabs, Toptica, Sacher Lasertechnik
		다이오드 레이저 서보	Moglabs
		고출력 레이저	Coherent, lighthouse photonics, precilasers, vexlum
		분광용 레이저	Avesta
		다이오드 레이저 발진기	TOPTICA
		다이오드 레이저 2차 조화파 증폭기	TOPTICA Photonics, Precilasers
		전류 공급 장치	Keysight, Caenels, SDT
		디지털/아날로그 I/O 장치	National Instrument, M-Labs, Quantum Machines
		광주파수 빗	Menlo systems, TOPTICA
		미세선팍 레이저	Menlo systems, stable laser systems, OEWaves, coherent
		레이저 주파수 분석기	OEWaves, HighFinesse, Bristol Instruments, Thorlabs, INC.
		레이저 세기 잡음 분석기	Thorlabs, INC., Oewaves
		음향광학변조기 구동기	Moglabs, G&H

Source: 양자정보기술 백서

Author Contacts

김승철 수석연구위원

삼일PwC경영연구원

seungchurl.k.kim@pwc.com

안정효 책임연구원

삼일PwC경영연구원

jeonghyo.ahn@pwc.com

삼일PwC경영연구원

최재영 원장

jaeyoung.j.choi@pwc.com

www.samil.com

삼일회계법인의 간행물은 일반적인 정보제공 및 지식전달을 위하여 제작된 것으로, 구체적인 회계이슈나 세무이슈 등에 대한 삼일회계법인의 의견이 아님을 유념하여 주시기 바랍니다. 본 간행물의 정보를 이용하여 문제가 발생하는 경우 삼일회계법인은 어떠한 법적 책임도 지지 아니하며, 본 간행물의 정보와 관련하여 의사결정이 필요한 경우에는 반드시 삼일회계법인 전문가의 자문 또는 조언을 받으시기 바랍니다.

S/N: 2503W-RP-033

© 2025 Samil PricewaterhouseCoopers. All rights reserved. "PricewaterhouseCoopers" refers to Samil PricewaterhouseCoopers or, as the context requires, the PricewaterhouseCoopers global network or other member firms of the network, each of which is a separate and independent legal entity.