

IBKS Collabo Report

양자! 진짜야?

(Quantum, Violate Reality)

양자컴퓨터를 투자하기 위한 10가지 질문들

리서치본부장

인터넷/게임 이승훈

02) 6915-5680

dozed@ibks.com

해외주식 조경진

02) 6915-5464

ckjins@ibks.com

시황 권순호

02) 6915-5667

snowkonn@ibks.com

RA 박은명

02) 6915-5527

eunp9622@ibks.com



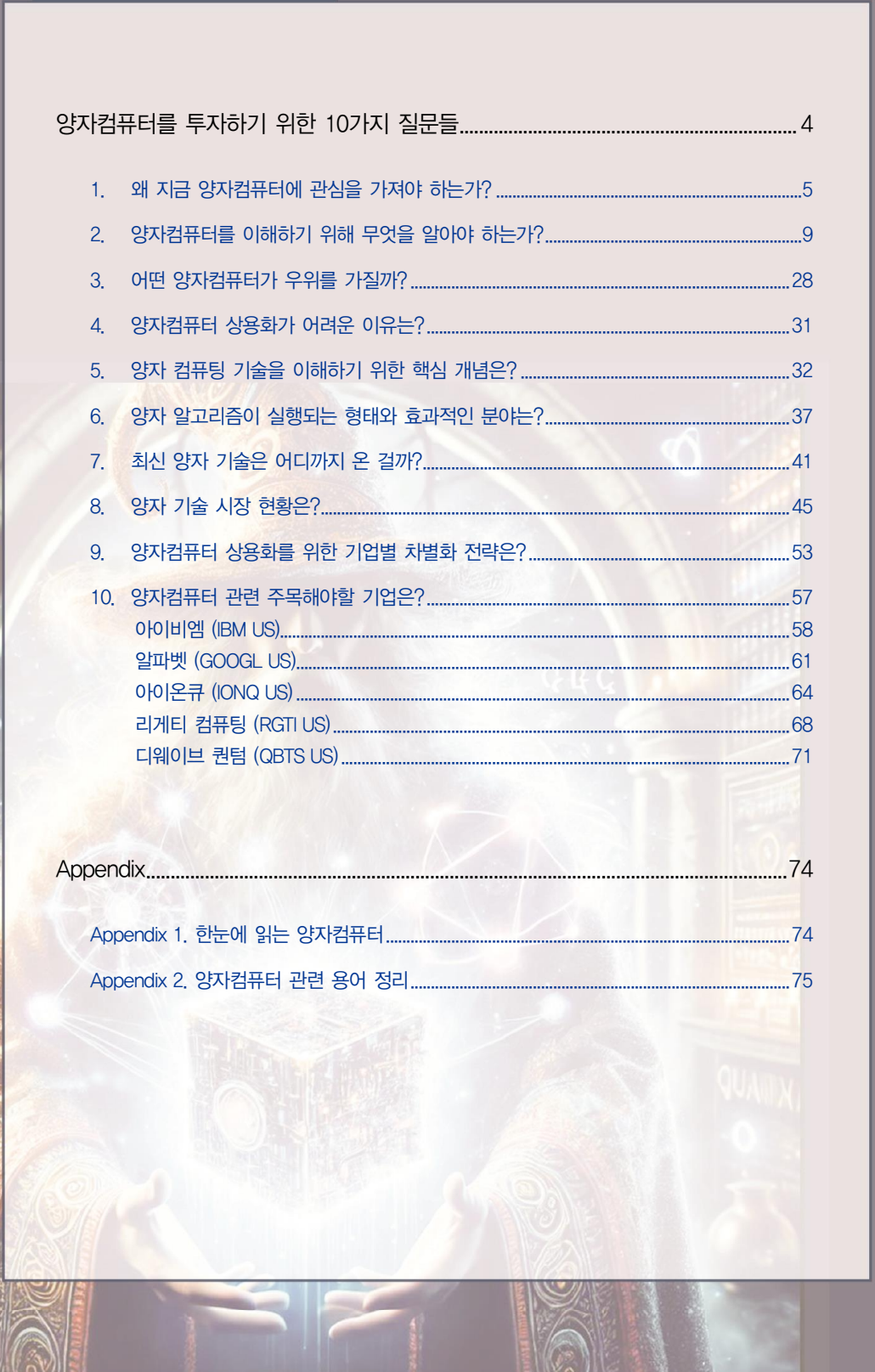
IBK기업은행 금융그룹

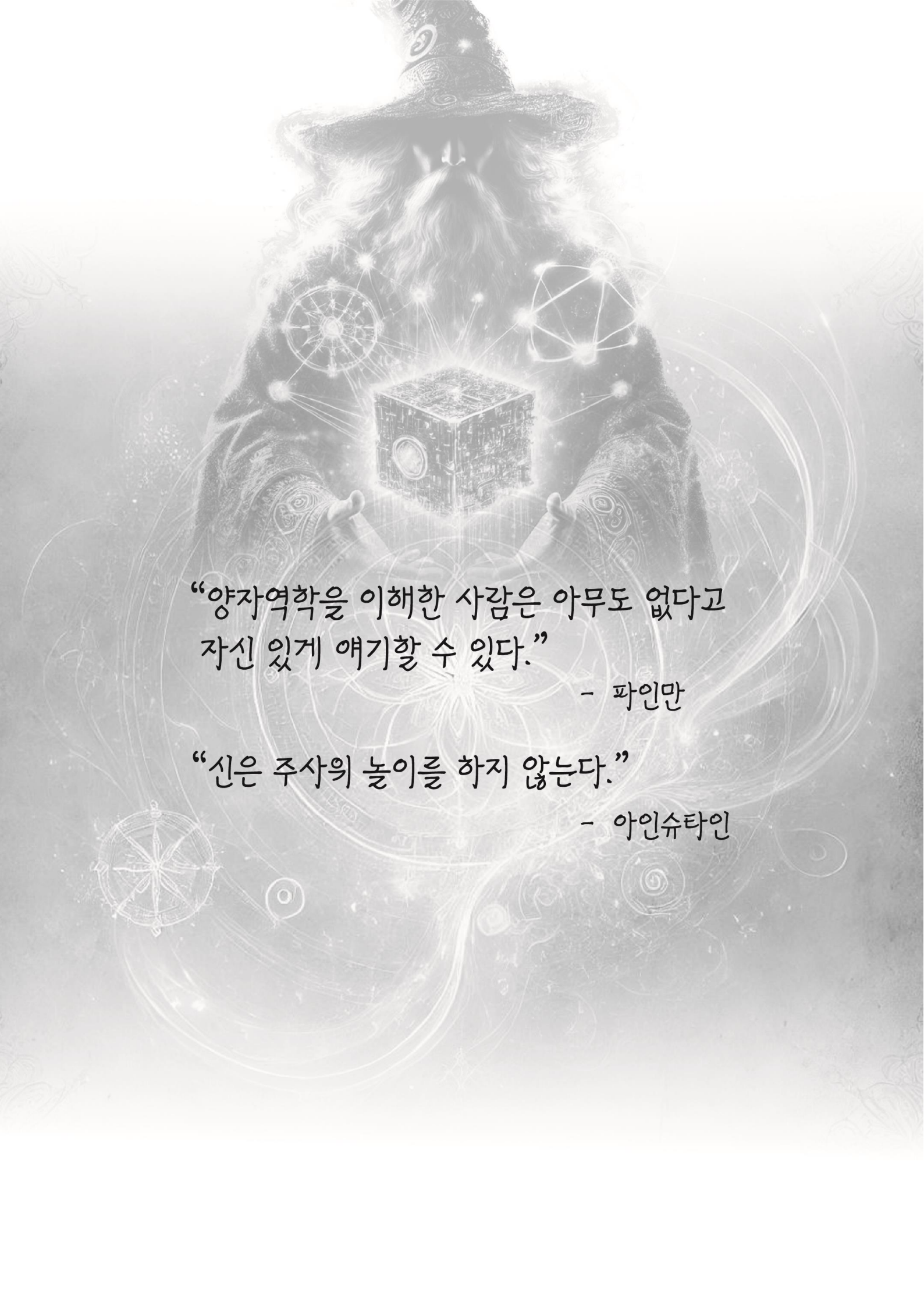
IBK투자증권

본 조사분석자료는 당사 리서치본부에서 신뢰할 만한 자료 및 정보를 바탕으로 작성한 것이나 당사는 그 정확성이나 완전성을 보장할 수 없으며, 과거의 자료를 기초로 한 투자참고 자료로서 향후 주가 움직임은 과거의 패턴과 다를 수 있습니다. 고객께서는 자신의 판단과 책임하에 종목 선택이나 투자시기에 대해 최종 결정하시기 바라며, 본 자료는 어떠한 경우에도 고객의 증권 투자 결과에 대한 법적 책임소재의 증빙자료로 사용될 수 없습니다.

CONTENTS

양자컴퓨터를 투자하기 위한 10가지 질문들.....	4
1. 왜 지금 양자컴퓨터에 관심을 가져야 하는가?	5
2. 양자컴퓨터를 이해하기 위해 무엇을 알아야 하는가?.....	9
3. 어떤 양자컴퓨터가 우위를 가질까?	28
4. 양자컴퓨터 상용화가 어려운 이유는?	31
5. 양자 컴퓨팅 기술을 이해하기 위한 핵심 개념은?	32
6. 양자 알고리즘이 실행되는 형태와 효과적인 분야는?.....	37
7. 최신 양자 기술은 어디까지 온 걸까?.....	41
8. 양자 기술 시장 현황은?.....	45
9. 양자컴퓨터 상용화를 위한 기업별 차별화 전략은?.....	53
10. 양자컴퓨터 관련 주목해야할 기업은?	57
아이비엠 (IBM US).....	58
알파벳 (GOOGL US).....	61
아이온큐 (IONQ US)	64
리게티 컴퓨팅 (RGTI US).....	68
디웨이브 퀀텀 (QBTS US).....	71
Appendix.....	74
Appendix 1. 한눈에 읽는 양자컴퓨터.....	74
Appendix 2. 양자컴퓨터 관련 용어 정리.....	75





“양자역학을 이해한 사람은 아무도 없다고
자신 있게 얘기할 수 있다.”

- 파인만

“신은 주사의 놀이를 하지 않는다.”

- 아인슈타인

양자컴퓨터를 투자하기 위한 10가지 질문들

1. 왜 지금 양자컴퓨터에 주목해야 하는가?

UN은 2025년을 세계양자과학기술의 해로 선정. 기존 컴퓨터가 성능을 개선하는 데 기술적 한계에 봉착한 가운데 기술 진보로 양자컴퓨터가 현실화되고 있기 때문에 중장기적 투자 관점에서 양자컴퓨터를 주목

2. 양자컴퓨터를 이해하기 위해 무엇을 알아야 하는가?

양자컴퓨터는 양자시스템 환경에서 큐비트를 기반으로 작동. 큐비트 및 작동 환경을 이해하기 위해 양자중첩, 양자얽힘 등의 양자역학 관련 지식이 필요

3. 어떤 양자컴퓨터가 우위를 가질까?

양자컴퓨터의 성능은 기존 컴퓨터와 구축 환경, 연산 방식이 상이하기 때문에 큐비트 개수, 연산 속도, 결맞음 시간, 신뢰도 등의 요소가 결정

4. 양자컴퓨터 상용화가 어려운 이유는?

양자시스템을 구축하기 위해 극단적인 환경 구축 및 섬세한 조정이 필요. 또한 연산 속도 극대화, 결과의 측정과 오류 정정 위한 독자적인 양자 알고리즘 개발이 난제

5. 양자 컴퓨팅 기술을 이해하기 위한 핵심 개념은?

양자컴퓨터의 우위를 이해하기 위해서 주어진 데이터를 목표를 위해 얼마나 효율적으로 계산할 수 있는지 파악하고 양자 확률 상태를 이해하는 것이 중요

6. 양자 알고리즘이 실행되는 형태와 효과적인 분야는?

양자컴퓨터는 게이트 기반 방식, 애디애바틱 방식, 위상 방식 등의 알고리즘을 주로 채택. 각각 범용성, 최적화 문제, 오차률을 낮추는데 강점

7. 최신 양자 기술은 어디까지 온 걸까?

구글의 월로우, Xanadu의 Aurora, QITE 개발까지 양자컴퓨터 기술이 빠르고 효율적으로 발전하고 있기 때문에 상용화 시간은 예상보다 단축될 것으로 판단

8. 양자 기술 시장 현황은?

양자 기술 관련 시장은 2040년까지 약 1,730억 달러 규모로 성장할 것으로 예상되며 양자컴퓨터가 가장 큰 규모로 성장할 것으로 예상. 응용 분야의 잠재적 경제 가치는 약 2조 달러 규모에 이를 것으로 전망

9. 양자컴퓨터 상용화를 위한 기업별 차별화 전략은?

빅테크는 양자컴퓨터 관련 하드웨어 인프라와 알고리즘 등의 소프트웨어를 함께 개발하는 반면 전문기업들은 측정 방식을 주력으로 외부 협력을 강화하는 전략 제시

10. 양자컴퓨터 관련 주목해야 할 기업은?

빅테크 기업은 대표적으로 IBM, Google, Microsoft 등이 있으며, 순수 양자 컴퓨팅 기업으로는 IonQ, Rigetti, D-Wave 등을 주목

1. 왜 지금 양자컴퓨터에 관심을 가져야 하는가?

1. 2025년: 세계 양자과학기술의 해

유엔(UN)은 2024년 6월에 2025년을 "세계 양자과학기술의 해(The International Year of Quantum Science and Technology)"로 선포했다. 1925년은 하이젠베르크가 원자 및 전자의 운동을 설명하기 위해 '행렬역학(Matrix Mechanics)'을 제안한 해이다. 이는 기존 뉴턴 역학과는 전혀 다른 방식으로 미시세계의 물리 현상을 설명하는 개념으로 이후 슈뢰딩거 방정식과 함께 현대 양자역학의 근간이 되었다. 행렬역학은 현대 양자역학이 구축되는 데 필수적인 수학적 도구이며 현재 양자컴퓨터가 작동하는 원리를 설명하는 중요한 기초를 제공한다. 특히 양자 연산과 상태 조작의 기반이 되는 행렬 연산 방식은 양자 알고리즘의 발전에 결정적인 역할을 하고 있다. 또한 하이젠베르크는 1927년 입자의 위치와 운동량을 동시에 정확하게 측정할 수 없다는 양자역학의 핵심 개념인 불확정성 원리(Uncertainty Principle)를 발표했다.

표 1. 양자역학에서 양자컴퓨터까지의 발전사

연도	관련 인물	내용
1905	알베르트 아인슈타인	광전효과 발표, 양자의 개념을 처음 도입
1913	닐스 보어	보어의 원자모형 제안, 양자 도약 개념 도입
1924	루이 드 브로이	물질파 가설 제안, 입자와 파동의 이중성 개념 확립
1925	베르너 하이젠베르크	행렬역학을 통해 양자역학의 기초 확립
1926	에르빈 슈뢰딩거	슈뢰딩거 방정식 발표, 파동역학 발전
1927	베르너 하이젠베르크	불확정성 원리 발표
1935	아인슈타인-포돌스키-로젠(EPR)	EPR 역설 발표, 양자얽힘 개념 논의
1964	존 S. 벨	벨 부등식 발표, 양자얽힘의 실험적 검증 가능성 제시
1982	알랭 아스페	벨 부등식 실험적으로 검증, 양자얽힘 확인

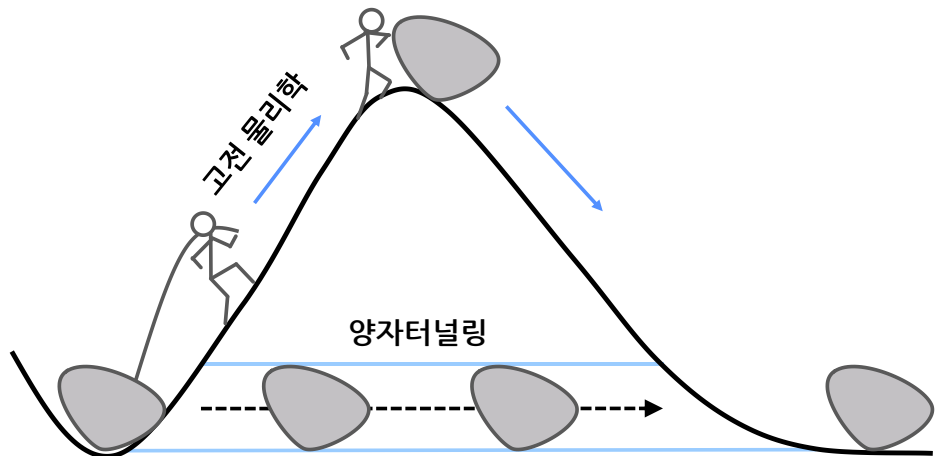
자료: IBK투자증권

2. 기존 컴퓨터 기술의 한계 도달

기존 컴퓨터는 빠르게 발전해 왔지만 최근 들어 성능의 한계에 다다르고 있다. 현재 물리적 한계로 인해 트랜지스터 크기를 더 작게 만드는 것이 점점 어려워지고 있다. 기존 컴퓨터의 연산 속도와 성능은 반도체 기술과 트랜지스터의 발전에 직접적인 영향을 받는다. 트랜지스터(Transistor)는 전자 신호를 증폭하거나 스위칭하는 역할을 하며 현대 컴퓨터의 기본 연산 장치이다. 비트(Bit)는 정보의 최소 단위이며, 0 또는 1의 두 가지 상태를 가질 수 있다. 트랜지스터는 이러한 비트를 저장하고 처리하는 핵심 역할을 한다. 각 트랜지스터는 스위치(Switch)처럼 작동하여 특정 전압에서 켜짐(1) 또는 꺼짐(0)의 상태를 유지하며, 이를 통해 디지털 연산을 수행한다.

컴퓨터 칩 내에서 수십억 개의 트랜지스터가 집적되어 트랜지스터의 크기가 작아지고 개수가 증가할수록 연산 속도와 병렬 처리 성능이 향상된다. 하지만 트랜지스터가 지나치게 작아지면 양자 터널링으로 인해 0과 1의 명확한 구분이 어려워지면서 데이터 오류가 발생할 가능성이 커지고 있다. 현재 반도체 업계는 3nm(나노미터) 공정 기술을 상용화하며 집적도를 극한까지 끌어올리고 있지만 양자 터널링(Quantum Tunneling) 현상이 심화되어 전자의 흐름을 예측하기 어려워진다. 양자 터널링은 입자(전자, 양성자 등)가 고전 물리학적으로는 넘을 수 없는 에너지 장벽을 뚫고 지나가는 현상을 의미한다. 양자 현상이 본격적으로 나타나는 크기는 약 5nm 이하로 알려져 있으며 현재의 3nm 반도체 공정에서도 일부 양자적 효과가 관찰되고 있다.

그림 1. 양자터널링(양자 세계에서 파동처럼 행동할 수 있기 때문)



자료: IBK투자증권

3. 양자컴퓨터 구현을 위한 기술적 진보

현재 양자컴퓨터를 실현하기 위해 필요한 양자 상태를 만들고 유지할 수 있는 기술들이 빠르게 발전하고 있다. 양자 상태를 구현하는 물리적 시스템, 양자를 정밀하게 제어하는 기술이 발전할수록 범용성을 가진 양자컴퓨터의 상용화가 가까워질 것이다.

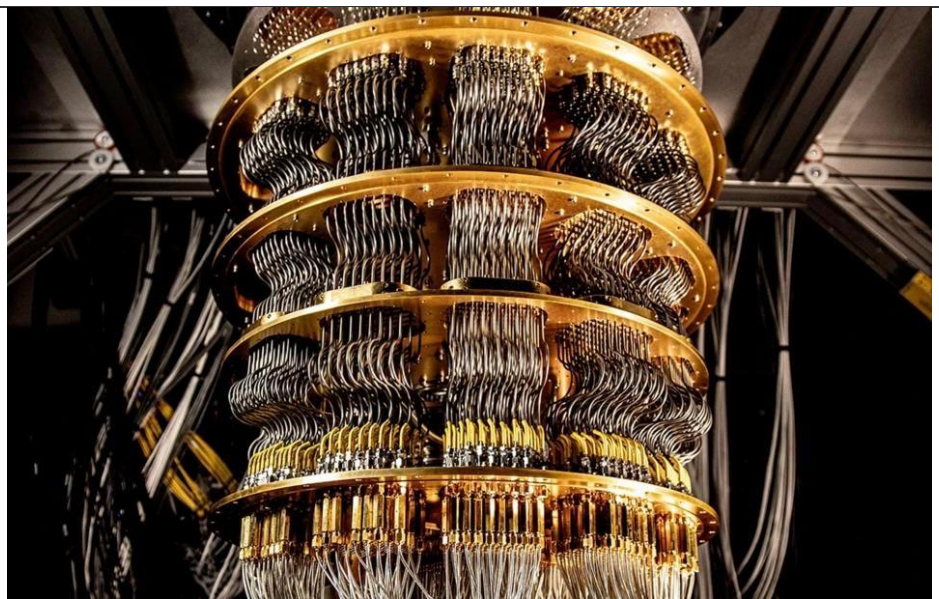
1) 양자 상태를 구현하는 기술 혁신

양자컴퓨터의 최소 정보 단위인 큐비트(Qubit)는 양자역학적 현상이 유지될 수 있는 완벽히 통제된 환경 내에서 실현이 가능하다. 이 환경 구축을 위한 난이도가 높고 천문학적인 투자가 필요하다. 이를 구현하는 대표적인 방식이 초전도체 기반 큐비트와 이온트랩(Ion Trap) 큐비트가 있다. 초전도 큐비트는 극저온 환경에서 전자가 저항 없이 이동하는 특성을 이용하여 양자 상태를 유지한다. 이러한 초전도 큐비트 구현에는 극저온 상태를 유지해야 하는 기술적 난관이 있으며, 냉각을 위한 극저온 시스템 구축이 필수적이다. 또한, 이온트랩 방식은 전기장을 이용해 이온을 포획하고 레이저를 통해 상태를 조작하는 방식으로, 높은 정밀도를 유지할 수 있어 장기적으로 안정적인 양자 연산을 가능하게 한다.

2) 양자를 제어하는 기술 혁신

한편 양자컴퓨터의 성능을 극대화하기 위해서는 양자 상태인 큐비트를 정밀하게 제어하는 기술이 필수적이다. 특히, 측정 이후 나타나는 양자붕괴(Coherence Decay), 양자 오류 정정(Quantum Error Correction, QEC) 등의 기술이 필요하다. 양자 상태는 외부 환경과의 상호작용에 의해 쉽게 붕괴될 수 있으므로, 이를 최소화하기 위한 저온 유지 기술과 정밀한 신호 제어 기술이 발전하고 있다.

그림 2. 구글의 극저온 냉각 시스템(The Cryostat Cooling Chandelier)

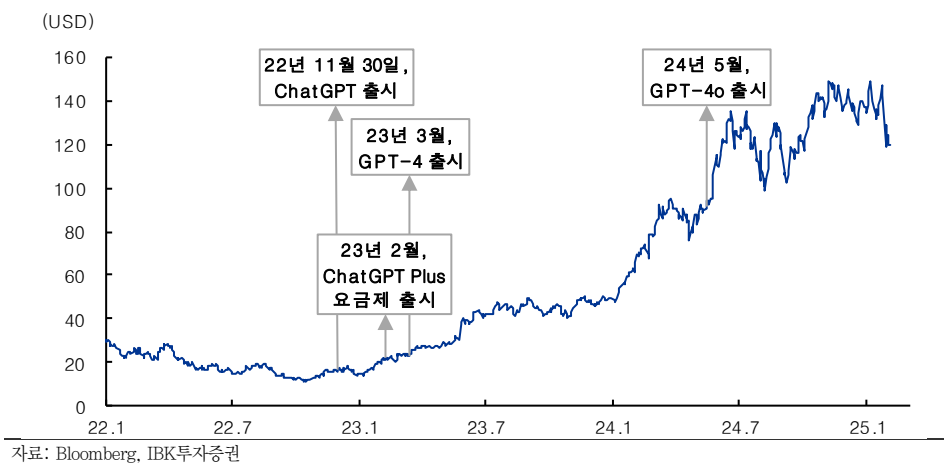


자료: Google, IBK투자증권

4. 기술혁신에 따른 텐베거(Tenbagger)의 출현

AI산업, 2차전지 등 기술 혁신에 따른 텐베거 출현 사례로 인해 양자컴퓨터 관련 산업에서의 수혜 기업 찾기가 본격화되었다. AI 대표 기업인 엔비디아의 가치는 오픈AI의 ChatGPT 출시(2022년 11월) 이전 저점 대비 2025년 1월 최고점까지 11배 이상 상승했다. 단지 엔비디아 주가는 장기간의 횡보와 급등락 구간이 존재하며 최근 급등의 시기는 상장 이후 시기를 고려할 때 상당히 단기간에 불과하다.

그림 3. 엔비디아의 주가 추이



2. 양자컴퓨터를 이해하기 위해 무엇을 알아야 하는가?

1. 양자컴퓨터의 정의

양자컴퓨터에 대해 권위있는 백과사전이나 학술지에서는 아래와 같이 정의한다. 공통점을 뽑으면 고전 컴퓨터로는 불가능한 방식으로 정보를 처리하여 상대적 우위를 가지고 그 정보처리 방식은 양자역학에서 구현할 수 있는 큐비트(Qubit)라는 것이다. 이에 따라 기존 컴퓨터의 작동원리와 그 한계점 그리고 양자컴퓨터에서 활용되는 양자역학 이론을 다룬다.

Oxford English Dictionary (OED):

"A quantum computer is a device that performs computations using the principles of quantum mechanics, such as superposition and entanglement, to process information in ways that classical computers cannot."

(양자컴퓨터는 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement) 같은 양자역학의 원리를 활용하여 고전 컴퓨터로는 불가능한 방식으로 정보를 처리하는 장치입니다.)

Encyclopædia Britannica:

"A quantum computer is a machine that uses the principles of quantum mechanics to perform calculations at speeds and efficiencies unattainable by traditional computers, relying on quantum bits (qubits) instead of classical binary bits."

(양자컴퓨터는 양자 비트(qubit)를 이용해 전통적인 컴퓨터로는 도달할 수 없는 속도와 효율로 계산을 수행하는, 양자역학의 원리를 활용한 기계입니다.)

Nature (학술지, 2017년 특집 기사):

"Quantum computing harnesses quantum mechanics to solve complex problems more efficiently than classical computers, leveraging phenomena like superposition, entanglement, and quantum interference."

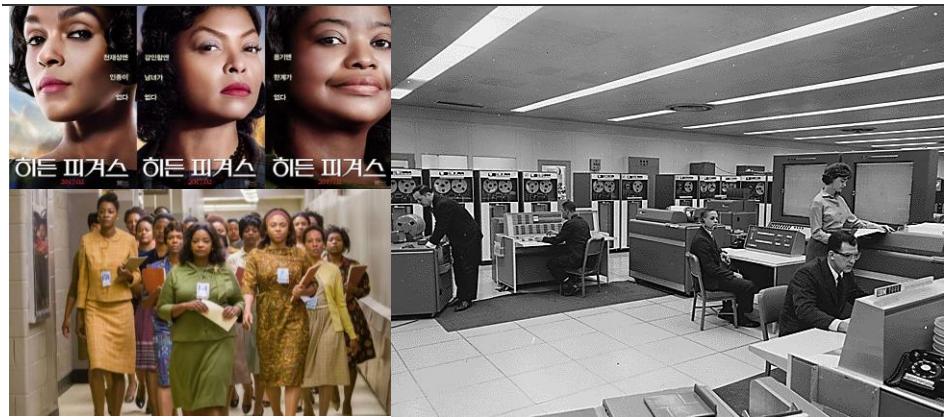
(양자 컴퓨팅은 중첩, 얽힘, 양자 간섭과 같은 현상을 활용하여 고전 컴퓨터보다 더 효율적으로 복잡한 문제를 해결하는 양자역학 기반 기술입니다.)

2. 컴퓨터(Computer)의 발전

1) 개요 및 정의

컴퓨터는 원래 계산하는 사람이라는 의미로 17~19세기에는 실제로 복잡한 수학 계산을 수행하는 사람, 인간 계산원(Human Computer)들을 지칭했다. 1940년대 ENIAC이 개발된 이후에 점차 컴퓨터가 기계를 의미하기 시작했다. 그러나 1960년대 초반까지 NASA에서 여성 수학자들을 컴퓨터로 불렀다.

그림 4. 영화 히든피겨스와 / IBM 7090 PC



자료: 미디어 자료, 위키피디아, IBK투자증권

2) 컴퓨터 구현을 위한 요소

① 하드웨어의 발전: 트랜지스터의 혁신

초기 컴퓨터는 진공관을 사용하여 정보를 처리했다. 1945년에 개발된 ENIAC은 약 17,468개의 진공관으로 구성되어 체육관만큼 컸다. 하지만 1947년, 벨 연구소(Bell Labs)에서 트랜지스터가 발명되면서 상황이 급변했다. 1960년대에는 트랜지스터를 더 발전시킨 집적 회로(IC)가 등장했다. 1971년 인텔의 4004 마이크로프로세서 개발이었다. 마이크로프로세서는 컴퓨터의 두뇌인 중앙 처리 장치(CPU)를 하나의 작은 칩에 집적한 것이다. 2000년대 이후 트랜지스터는 나노미터(nm) 단위 공정까지 발전했다.

표 2. 컴퓨터 연대기: 발전의 역사

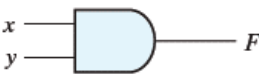
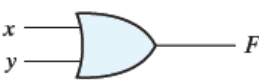
세대	시기	주요 기술	대표적인 컴퓨터	특징 및 주요 사건
1세대 (진공관 시대)	1940년대 ~ 1950년대 중반	진공관, 천공 카드	Z3 (1941), ENIAC (1945), EDSAC (1949)	진공관 사용, 높은 전력 소비 군사 및 과학 계산용
2세대 (트랜지스터 시대)	1950년대 후반 ~ 1960년대 중반	트랜지스터, 자기 테이프	IBM 1401 (1959), IBM 7090 (1959)	트랜지스터로 더 작고 빠르게 비즈니스 데이터 처리 확산
3세대 (집적 회로 시대)	1960년대 중반 ~ 1970년대 초반	집적 회로(IC), 운영체제 도입	IBM System/360 (1964), PDP-8 (1965)	다중 프로그래밍 가능 컴퓨터 소형화, 기업용으로 확산
4세대 (마이크로프로세서 시대)	1970년대 초반 ~ 현재	마이크로프로세서, 반도체 메모리	Altair 8800 (1975), IBM PC (1981), Mac (1984)	개인용 컴퓨터(PC) 등장 그래픽 인터페이스 발전

자료: IBK투자증권

② 알고리즘의 발전: 게이트와 계산 논리의 진화

알고리즘은 19세기 수학자 조지 불(George Boole)의 ‘불 대수(Boole Algebra)’에서 시작된다. 불 대수는 컴퓨터가 데이터를 처리할 수 있는 논리적 기반을 제공했다. 이 개념은 AND, OR, NOT 같은 기본적인 논리 게이트로 구현되어, 전자 회로의 핵심 요소가 되었다. 1960년대에는 컴파일러가 등장하면서 프로그래밍 언어로 작성된 코드를 기계어로 번역하는 기술이 발전했다. 1970~80년대에는 운영체제(OS)와 데이터베이스 관리 시스템(DBMS) 같은 고급 알고리즘이 등장했다. 1990년대부터는 하드웨어의 한계에 직면하면서 병렬 처리(Parallel Processing) 알고리즘이 부각되었다. 2000년대 이후에는 인공지능(AI)과 빅데이터 기술의 부상으로 알고리즘의 중요성이 더욱 강조되었다. 특히 딥러닝(Deep Learning) 알고리즘은 GPU(그래픽 처리 장치)의 병렬 처리 능력을 활용하여 놀라운 성능을 발휘했다. 최신 단계에서는 양자 알고리즘(Quantum Algorithms)이 개발 중이다.

그림 5. 불 대수(Boole Algebra)

Name	Graphic symbol	Algebraic function	Truth table															
AND		$F = xy$	<table><tr><th>x</th><th>y</th><th>F</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x	y	F	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
x	y	F																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
OR		$F = x + y$	<table><tr><th>x</th><th>y</th><th>F</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x	y	F	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
x	y	F																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
Inverter		$F = x'$	<table><tr><th>x</th><th>F</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x	F	0	1	1	0									
x	F																	
0	1																	
1	0																	

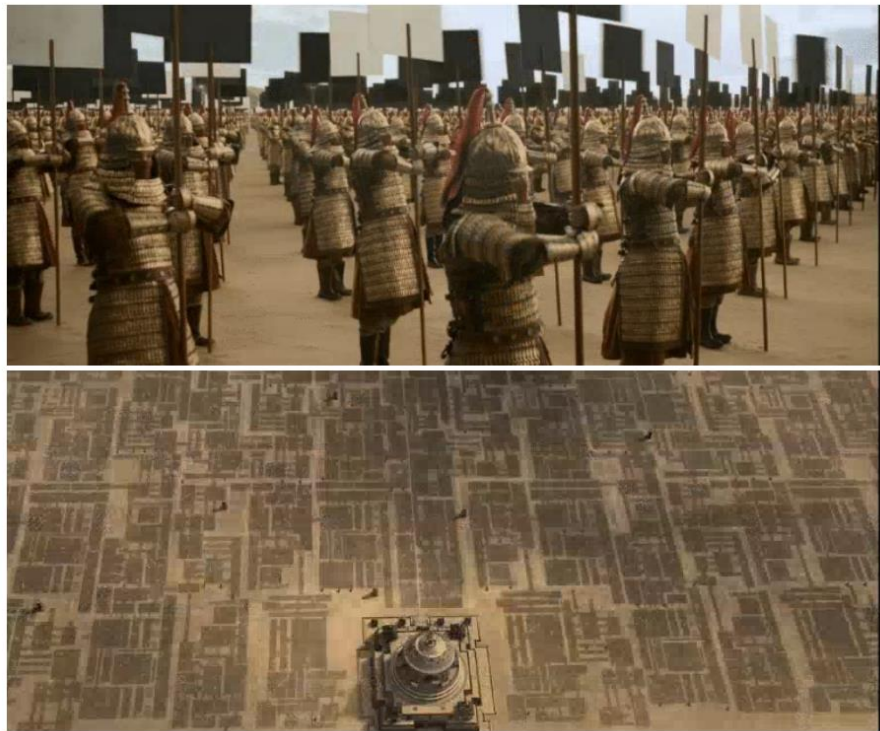
자료: 위키피디아, IBK투자증권

③ 2진법으로 컴퓨터 계산 알고리즘

트랜지스터는 컴퓨터에서 사칙연산을 수행하는 기본 요소로, 전류의 흐름을 제어하는 스위치 역할을 한다. 이 스위치를 조합해 논리 게이트(AND, OR, NOT, XOR 등)를 만들고, 이를 통해 덧셈, 뺄셈, 곱셈, 나눗셈 등을 처리한다. 이러한 논리 회로들은 산술 논리 장치로 통합되어 CPU에서 모든 연산을 담당한다. 이 구조 덕분에 컴퓨터는 단순한 스위치 동작만으로도 복잡한 사칙연산과 논리 연산을 효과적으로 수행할 수 있다.

컴퓨터에서 2진수 덧셈을 진행하는 경우 두 개의 1비트 이진수(A와 B)를 더하는 논리 회로로 합(Sum)과 자리 올림수(Carry)를 출력한다. XOR 게이트를 이용해 두 입력이 다를 때 1을 출력하여 합을 계산하고(합 = $A \oplus B$), AND 게이트를 통해 두 입력이 모두 1일 때 자리 올림수를 생성한다(자리 올림수 = $A \cdot B$)

그림 6. 드라마 삼체의 인간과 깃발로 구현한 계산기



자료: 넷플릭스 삼체, IBK투자증권

그림 7. 이진법 덧셈 연산

십진법 $5+7=12$ 2진법 $101 + 111$

$$\begin{array}{r} 101 \\ 111 \\ \hline 1100 \end{array}$$

논리게이트

		합(XOR)	자리수(AND)
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

합(XOR): 다를 때만 1
 자리수(AND): 둘다 1일 때만 1

합 자리수

첫자리 비트 $1+1$ 0 1두번째 비트 $0+1+1$ 0 1세번째 비트 $1+1+1$ 1 1

네번째 비트 1 추가

자료: IBK투자증권

그림 8. 사람으로 표현한 이진 덧셈



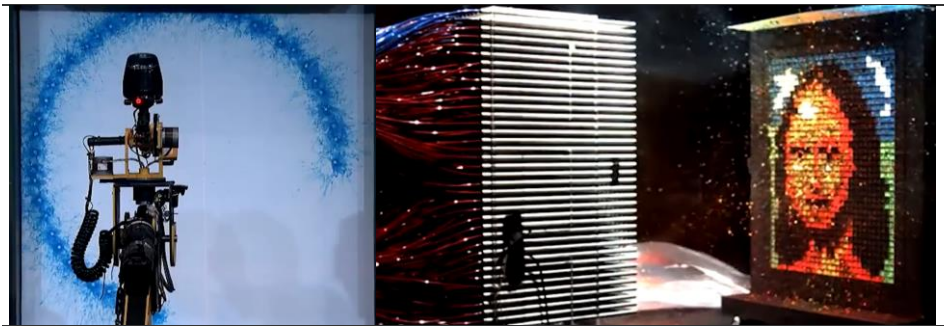
자료: IBK투자증권

3. 슈퍼컴퓨터의 등장과 한계

1) 등장 및 개념

1990년대까지 컴퓨터 성능은 주로 트랜지스터의 집적도 증가와 CPU 클럭 속도 향상을 통해 발전했다. 시간이 지나면서 1) CPU의 클럭 속도를 높일수록 열 발생과 전력 소모가 급격히 증가했고 2) 트랜지스터를 더 작게 만들면서 발생한 양자역학적 문제(예: 누설 전류)로 인해 더이상 기존 방식만으로 성능을 높이기는 어려워졌다. 이후 병렬 처리 기술이 주목받기 시작했다.

그림 9. 병렬처리 방식(CPU와 GPU의 비교)



자료: 엔비디아, IBK투자증권

병렬 처리는 하나의 작업을 여러 개의 작은 작업으로 나누어 동시에 처리하는 방법으로 여러 개의 프로세서가 동시에 작업을 나눠 수행하는 방식이 효율적인 대안으로 떠오른 것이다. 슈퍼컴퓨터는 바로 이 병렬 처리의 극한을 구현한 시스템이다. 수천 개, 많게는 수백만 개의 프로세서가 동시에 작업을 수행하며, 일반적인 컴퓨터가 처리할 수 없는 대규모 계산을 빠르게 해결할 수 있게 되었다.

2) 슈퍼 컴퓨터의 성능 단위

플롭스(FLOPS, Floating Point Operations Per Second)는 컴퓨터의 연산 속도를 나타내는 단위로, 초당 수행할 수 있는 부동소수점 연산의 횟수를 의미한다. 1 FLOPS는 1초에 한 번의 부동소수점 연산을 처리할 수 있는 능력이다. 컴퓨터는 2진법을 사용하기 때문에 10진수의 유한한 수가 2진법에서는 무한 반복 소수로 변환되기도 한다. 예를 들어 10진수 0.1을 2진수로 변환하면 0.0001100110011...과 같이 0011이 무한히 반복되는 소수로 표현할 때 나타난다. 이러한 수를 근사하여 빠르게 처리하는 것이 부동소수점 연산이며, 이를 얼마나 효율적으로 수행하느냐가 컴퓨터의 성능을 좌우한다.

페타플롭스(PFLOPS)는 1초에 1,000조(10^{15}) 번의 연산을 처리할 수 있는 성능을 의미하고 엑사플롭스(EFLOPS)는 이보다 더 높은 성능으로, 1초에 100경(10^{18}) 번의 연산을 수행할 수 있다. 이는 인공지능 대규모 모델 학습, 인간 뇌 시뮬레이션, 양자 물리학과 같은 초고도 연산 작업에 적합하다.

3) 슈퍼컴퓨터 히스토리

슈퍼컴퓨터의 역사는 1964년 시모어 크레이가 설계한 CDC 6600으로 시작되었다. 이 컴퓨터는 초당 약 100만 회의 연산(1 메가플롭스)을 처리하며, 당시의 다른 컴퓨터보다 10배 이상의 성능을 보였다. 1997년, 미국 샌디아 국립 연구소의 ASCI Red는 세계 최초로 테라플롭스(초당 1조 회 연산) 성능을 달성하며 슈퍼컴퓨터 성능의 새로운 이정표를 세웠다. 2008년에는 Roadrunner가 1 페타플롭스(초당 1,000조 회 연산) 성능을 인정받으며 가정용 PC보다 100만 배 빠른 속도를 기록했다. 2010년대 이후 슈퍼컴퓨터는 엑사스케일(초당 1엑사플롭스, 10의 18제곱 회 연산) 시대에 진입했다. 2020년 일본 이화학연구소(RIKEN)와 후지쯔가 공동 개발한 Fugaku는 초당 442 페타플롭스의 성능을 기록하며 다양한 과학 연구 분야에 활용되고 있으며 2022년에는 미국 오리지널 국립 연구소의 Frontier가 세계 최초로 엑사플롭스 성능을 달성했다.

표 3. 플롭스의 단위 별 활용 및 관련된 슈퍼컴퓨터 모델

FLOPS 단위	초당 연산 횟수	사람이 손으로 계산할 경우	실제 연산 사례	슈퍼컴퓨터 (모델 / 연도)
1 FLOPS	1회	1번의 계산 (1초)	단순 덧셈/뺄셈 1회	
1 KFLOPS	1,000회	17분 소요 (초당 1회 계산 시)	간단한 엑셀 수식, 계산기 연산	
1 MFLOPS	1,000,000회	약 11일 소요	이미지 압축, 간단한 암호화 알고리즘	CDC 6600 (1964) 최초의 슈퍼컴퓨터 (3 MFLOPS)
1 GFLOPS	10억 번	약 31년 소요	4K 영상 인코딩, 스마트폰 AI 필터 처리	
1 TFLOPS	1조 번	약 31,700년 소요	자율주행 자동차 센서 데이터 처리	Intel ASCI Red (1997) 최초의 1 TFLOPS 돌파
1 PFLOPS	1,000조 번	약 3,170만 년 소요	기후 시뮬레이션, 천체 물리학 모델링	IBM Roadrunner (2008) - 1 PFLOPS 달성
1 EFLOPS	1경 번	약 3,170억 년 소요	GPT-4 같은 AI 모델 학습, 국가급 슈퍼컴퓨터 연산	Frontier (2022, 미국) 세계 최초 1.1 EFLOPS
1 ZFLOPS	1해 번	우주의 나이보다 더 긴 시간	이론적으로만 존재, 미래형 양자 컴퓨팅 가능성	(미래형 기술, 양자컴퓨터 예상)

자료: IBK투자증권

4. 양자컴퓨터 실현을 위한 핵심 이론

양자컴퓨터는 고전 컴퓨터와는 전혀 다른 방식으로 정보를 처리하는데 양자역학에 기반을 두고 있다. 양자컴퓨터를 이해하기 위해 우선적으로 필요한 양자역학 이론은 양자중첩(Quantum Superposition), 양자얽힘(Quantum Entanglement)이다.

먼저 양자컴퓨터의 가장 기본적인 정보 단위인 큐비트(qubit)가 0과 1의 상태를 동시에 가질 수 있는 현상을 이해하기 위해서는 양자중첩을 이해해야 한다. 고전 컴퓨터의 비트가 오직 0 또는 1의 한 가지 상태만 가질 수 있는 것과는 근본적으로 다르다. 양자 중첩 덕분에 양자컴퓨터는 여러 가지 계산을 동시에 수행할 수 있는 병렬 처리 능력을 통해 복잡한 문제를 훨씬 빠르게 해결할 수 있는 잠재력을 제공한다.

다음으로 양자얽힘은 두 개 이상의 양자 입자가 서로 강하게 연결되어 한 입자의 상태가 결정되면 다른 입자의 상태도 즉각적으로 결정되는 현상이다. 이 얽힘은 입자 간의 물리적 거리에 상관없이 유지되는 것이 특징이다. 양자얽힘은 큐비트 간의 빠른 정보 교환과 동기화를 가능하게 하여 양자 연산의 효율성을 극대화한다. 개별적인 큐비트는 불안정해보이지만 얽힘된 큐비트들은 상대적으로 안정적으로 전체 시스템에서는 엄청난 계산 능력을 발휘한다.

표 4. 양자컴퓨터에 필요한 양자역학이론

핵심 이론	개념	양자컴퓨팅에서의 역할	예시
양자중첩 (Quantum Superposition)	큐비트가 0과 1의 상태를 동시에 가질 수 있는 현상	병렬 처리 능력 향상, 복잡한 문제를 빠르게 해결	대규모 데이터 처리 및 탐색
양자얽힘 (Quantum Entanglement)	두 개 이상의 입자가 강하게 연결되어 한 입자의 상태가 다른 입자에 즉각적으로 영향을 미치는 현상	큐비트 간 빠른 정보 교환, 효율적인 연산 및 보안 강화	양자 암호화 기술, 얽힘 기반 통신

자료: IBK투자증권

1) 양자역학 일반

① 양자역학 개요

양자역학은 자연의 근본적인 현상을 설명하는 이론으로 모든 물질과 에너지가 입자와 파동의 이중적 성질을 동시에 가진다는 개념을 중심으로 한다. 따라서 양자역학에서 입자와 파동의 의미가 중요하다.

표 5. 양자역학에서 양자컴퓨터까지 연대기

연도	인물	내용
1801	토머스 영	최초의 이중슬릿 실험 수행, 빛의 파동성을 증명하여 파동 이론의 기초 확립
1905	알베르트 아인슈타인	광전효과 설명으로 빛이 입자(광자)로 작용할 수 있음을 제안, 양자 이론의 시초
1913	닐스 보어	보어의 원자 모형으로 전자가 특정 궤도에서만 존재할 수 있음을 주장
1924	루이 드브로이	물질파 이론 제안, 입자도 파동의 성질을 가질 수 있음을 설명
1925	베르너 하이젠베르크	행렬역학을 통한 양자역학의 형식화, 현대 양자역학의 기초 확립
1926	에르빈 슈뢰딩거	파동 방정식(슈뢰딩거 방정식) 발표, 양자역학의 핵심 이론으로 자리매김
1927	베르너 하이젠베르크	불확정성 원리 제안, 입자의 위치와 운동량을 동시에 정확히 알 수 없음을 설명
1935	아인슈타인, 포돌스키, 로젠 (EPR)	EPR 역설 제기, 양자얽힘 현상으로 인해 양자역학의 완전성에 의문 제기
1964	존 벨	벨의 부등식 제안, 양자얽힘과 국소성의 논리적 모순을 실험적으로 검증 가능
1981	리처드 파인만	양자컴퓨터 개념 제안, 고전 컴퓨터로는 어려운 문제를 해결할 가능성 설명
1994	피터 쇼어	쇼어 알고리즘 발표, 양자컴퓨터로 큰 수의 소인수 분해가 가능함을 증명
1996	러블 그로버	그로버 알고리즘 개발, 데이터베이스 검색 속도를 획기적으로 개선
2001	IBM, 스탠포드 대학	7큐비트 양자컴퓨터로 쇼어 알고리즘 실행, 15의 소인수 분해 성공
2007	D-Wave Systems	세계 최초의 상용 양자컴퓨터 발표, 양자 어닐링 기반
2019	구글	양자 우월성 선언, Sycamore 프로세서로 특정 계산 속도 향상
2024	구글	윌로우 칩을 발표, 양자오류 수정에 획기적 진전

자료: IBK투자증권

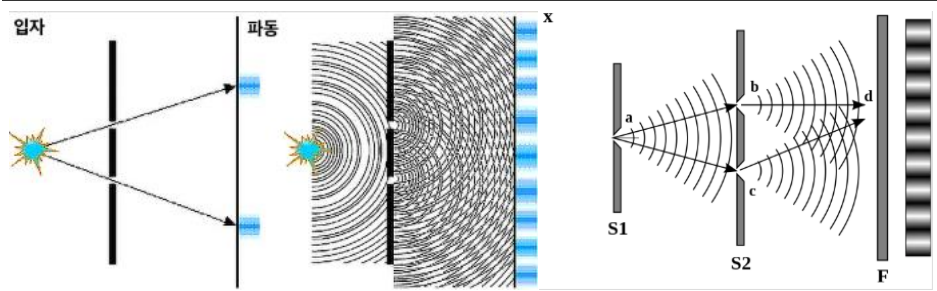
② 입자와 파동의 의미 및 차이

[이중슬릿 실험의 의미]

이중슬릿 실험은 빛과 입자의 파동-입자 이중성(wave-particle duality)을 보여주는 대표적인 실험이다. 실험은 입자를 하나씩 방출하여 두 개의 가느다란 슬릿을 통과하게 한 뒤, 그 뒤편의 스크린에서 입자의 분포를 관찰하는 방식으로 진행된다. 빛이나 전자를 슬릿에 통과시키면 고전 물리학적으로는 두 개의 선이 나타날 것으로 예상되지만 실제로는 밝고 어두운 줄무늬가 반복되는 간섭 무늬(Interference Pattern)가 나타난다. 심지어 입자를 하나씩 쏘아도 간섭 무늬가 형성되어 입자가 스스로 두 개의 슬릿을 동시에 통과해 간섭하는 것처럼 보인다. 그러나, 슬릿을 통과하는 경로를 관찰하는 장비를 설치하면 간섭 무늬는 사라지고 입자가 고전적인 입자처럼 행동하여 두 개의 흔적만 남긴다. 1801년 토마스 영의 실험 이후 다양하게 실험 환경이 변경되었으며 2019년 질량이 수소원자의 2,500배인 거대분자 역시 동일한 결과를 확인했다.

우선 파동-입자 이중성과 측정의 영향을 극명하게 보여준다. 이 실험은 1) 입자가 중첩(Superposition) 상태에 있음을 시사한다. 이런 간섭 무늬는 측정을 통해 입자의 경로 정보를 얻는 순간, 이 중첩이 붕괴되어 사라진다. 2) 측정 자체가 물리적 현실에 영향을 미친다는 점을 보여준다. 한편 얽힌 광자 쌍(Photon Pair)을 생성하여 한 입자(x1)는 이중슬릿을 통과하고 다른 입자(x2)를 별도 검출기로 전송하면 다른 입자(x2)의 측정 여부에 따라 이중슬릿을 통과하는 입자가 간섭 무늬가 나올 수도 있고 사라질 수도 있다. 이는 3) 양자얽힘의 강력한 증거가 될 수 있다(이는 고전역학의 국소성(Locality: 어떤 물리적 효과는 공간적으로 인접한 곳에서만 영향을 미친다는 개념을 벗어난다).

그림 10. 이중슬릿실험 - 간섭 무늬



자료: 나무위키, IBK투자증권

③ 입자와 파동의 차이

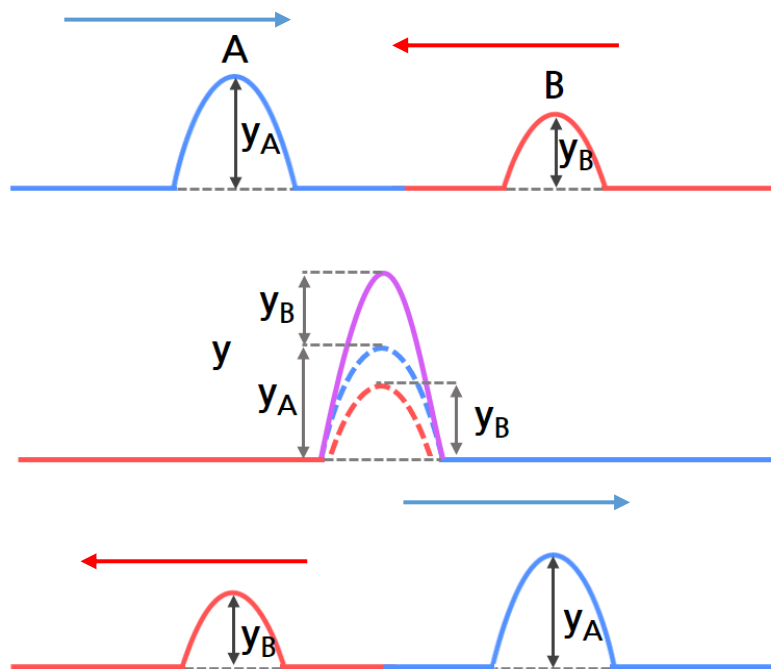
입자와 파동의 차이점은 충돌 이후 뚜렷이 구분된다. 고전 역학에서 입자는 충돌 후 두 입자의 궤적이 명확히 변화한다. 반면, 파동의 충돌은 간섭과 회절이라는 현상을 동반한다. 두 개의 물결이 만날 경우, 서로의 진폭이 합쳐지거나 상쇄되며 복잡한 간섭 무늬를 형성하지만, 충돌 이후에는 원래의 형태로 회복된다. 이는 파동이 공간에 퍼진 연속적인 특성을 가지기 때문이다.

그림 11. 입자: 당구공의 충돌 후 움직임 / 파동: 물, 음파의 모습



자료: 미디어 자료, IBK투자증권

그림 12. 파동의 결합 전후 모습



자료: IBK투자증권

④ 파동과 관련 양자 현상이 나타나기 위한 조건(양자컴퓨터 구현을 위한 조건)

인간이 파동처럼 보이기 위해서는 드브로이 파장(de Broglie wavelength)이 눈에 띄게 커져야 한다. 드브로이 공식은 파장(λ)이 플랑크 상수(h)를 운동량($p = mv$, 질량과 속도의 곱)으로 나눈 값으로 표현된다. 플랑크 상수는 매우 작고, 인간은 질량이 크며 속도 또한 일정하기 때문에 운동량이 매우 커져 파장은 극도로 작아지기 때문에 파동을 관찰할 수 없다. 또한 인간을 이루고 있는 원자들의 파장이 상이하고 외부 환경과의 상호작용으로 양자 상태가 빠르게 붕괴되기 때문이다(결맞음 붕괴, Decoherence). 양자 상태의 인간을 확인하기 위해서는 1) 파장을 키우기 위해 인간의 질량을 극도로 줄이거나, 2) 속도를 거의 0에 가깝게 낮추거나, 절대영도에 가까운 초저온 환경에서 초전도체 현상을 유도해야 한다. 초전도체에서는 전자가 쿠퍼 쌍(Cooper Pair)를 이루면서 안정적인 상태로 결합하여 전자들의 속도가 감소한다(초전도 큐비트 제조).

그림 13. 드브로이 파장 공식을 통해 인간의 파장 계산(인간 파장은 원자핵보다 작은 수준)

- 질량: 70kg

드브로이 파장 공식

- 속도: 시속 5km (약 1.4 m/s)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{70 \times 1.4} \approx 6.8 \times 10^{-36} \text{ m} \quad \lambda = \frac{h}{mv}$$

자료: IBK투자증권

그림 14. 초전도체

초전도체의 특성

- 1) 일정 온도 이하에서 전기저항이 0이 되는 물질
- 2) 1911년 쉘리 영하 269도 근처에서 전기저항이 사라지는 현상 발견
- 3) 현재 극저온이나 초고압 조건에서 초전도 현상 구현
- 4) 한국에서 상온, 상압에서 초전도체 LK-99 제조 주장



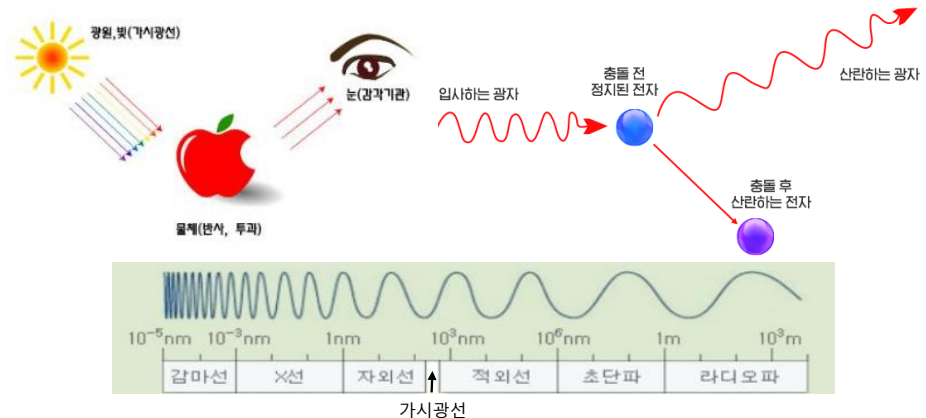
자료: 미디어 자료, IBK투자증권

⑤ 측정(Measurement)의 물리학적 의미

양자역학에서 측정(Measurement)은 단순히 물리량을 관찰하거나 기록하는 행위 이상의 깊은 의미를 가진다. 양자 시스템은 중첩(Superposition) 상태로 존재하며, 측정을 통해 이 중첩이 하나의 확정된 상태로 붕괴(Collapse)되는 현상이 발생한다. 측정이 가지는 물리적 의미를 잘 보여주는 예시 중 하나는 광자(빛의 입자)와 전자의 상호작용이다. 전자는 매우 작은 크기를 가진 입자로 대략 10^{-18} 미터의 크기를 가질 정도로 미세하다. 이 전자의 위치를 측정하기 위해서는 높은 에너지를 가진 광자를 쏘아야 한다. 그러나 이 과정에서 광자가 전자에 충돌하면서 전자의 운동 상태에 영향을 주게 되는데 이로 인해 전자의 원래 운동량이 변화된다. 이는 측정 자체가 전자의 물리적 상태를 변화시키는 대표적인 사례다.

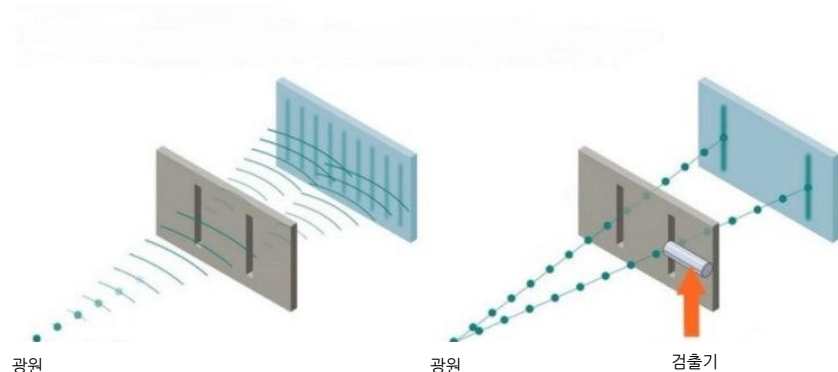
하이젠베르크의 불확정성 원리(Heisenberg's Uncertainty Principle): 입자의 위치와 운동량을 동시에 정확하게 측정하는 것이 근본적으로 불가능하다는 것. 측정 기술의 한계가 아닌 자연의 본질적인 특성으로 위치를 정확히 알수록 운동량은 불확실해지고 반대로 운동량을 정확히 측정할수록 위치는 더 모호해진다.

그림 15. 관측의 과정 및 빛의 파장 비교



자료: SchoolManualWiki, 삼성디스플레이, 두산백과, IBK투자증권

그림 16. 관측을 하면서 이중슬릿 실험의 결과



자료: IBK투자증권

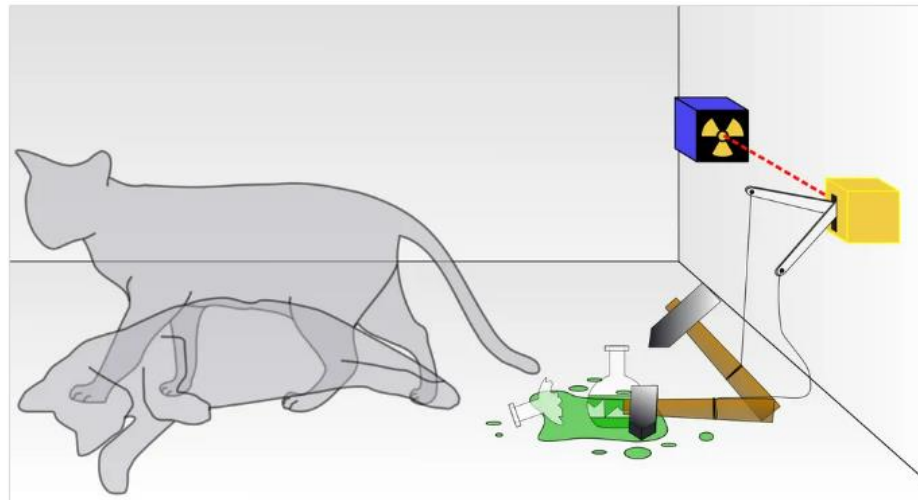
2) 양자중첩(한 큐비트의 상태)

[슈뢰딩거의 고양이 사고 실험]

슈뢰딩거의 고양이 실험은 1935년 오스트리아의 물리학자 에르빈 슈뢰딩거(Erwin Schrödinger)가 고안한 사고실험이다. 이 실험은 특히 코펜하겐 해석(Copenhagen Interpretation)의 한계를 비판하기 위한 목적으로 고안되었다. 코펜하겐 해석은 닐스 보어와 베르너 하이젠베르크에 의해 발전된 해석으로 측정 이전에는 물리적 시스템이 확정된 상태에 있지 않으며 측정 행위가 중첩 상태를 하나의 구체적인 결과로 붕괴시킨다고 주장한다. 슈뢰딩거의 고양이 실험은 밀폐된 상자 안에 고양이, 방사성 물질, 방사성 붕괴를 감지하는 게이거 계수기, 그리고 독가스 플라스크를 배치한다. 방사성 물질은 일정 확률로 붕괴할 수 있으며, 만약 붕괴가 발생하면 계수기가 이를 감지하고 플라스크를 깨뜨려 고양이는 죽게 된다. 반대로 붕괴가 일어나지 않으면 고양이는 살아있다. 상자를 열어 측정하기 전까지 양자역학의 관점에서는 고양이가 살아있는 상태와 죽어있는 상태가 동시에 존재하는 중첩(superposition) 상태에 놓인다.

전자나 원자와 같은 미시 세계에서 측정 전 중첩 상태가 성립하는 것은 수용할 수 있지만 이를 고양이와 같은 거시 세계에 적용하면 "살아있음과 죽어있음의 공존"이라는 직관적으로 이해하기 어려운 상황이 발생한다.

그림 17. 슈뢰딩거의 고양이 사고 실험

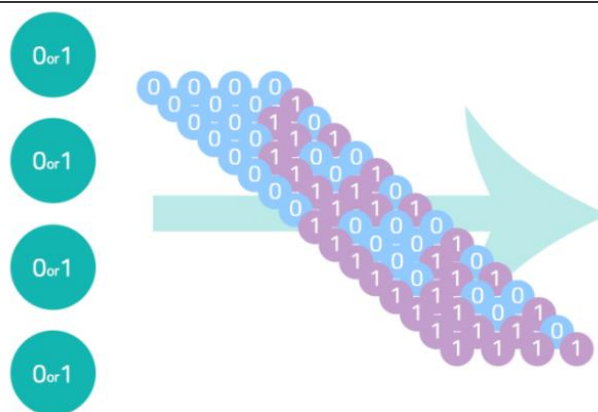


자료: 위키피디아, IBK투자증권

양자컴퓨터에서 양자중첩(Quantum Superposition)은 양자컴퓨팅의 핵심 개념으로 고전 컴퓨터와 비교했을 때 양자컴퓨터가 압도적인 계산 성능을 발휘할 수 있는 주요 이유이다. 고전 컴퓨터의 비트는 0 또는 1의 상태만 가질 수 있는 반면, 양자컴퓨터의 큐비트(qubit)는 0과 1의 상태를 동시에 가질 수 있는 중첩 상태에 존재할 수 있다. 이러한 큐비트의 상태는 벡터 공간의 한 점으로 표현되며, 이는 블로흐 구(Bloch Sphere)라는 시각적 모델을 통해 설명된다. 이 모델에서 큐비트는 북극(0)과 남극(1) 사이의 어느 지점에도 존재할 수 있어 고전적인 비트보다 훨씬 더 풍부한 정보를 담을 수 있다. 이러한 양자중첩을 통해 n 개의 큐비트는 2^n 개의 상태를 동시에 표현할 수 있어 한 번의 연산으로 수많은 입력을 병렬로 처리할 수 있다. 최근 구글은 월로우칩으로 105개의 큐비트를 구현했다. 105개의 큐비트는 이론적으로 10의 105승개의 경우의 수를 한번에 처리할 수 있다. 이 수치는 우주의 별의 수보다 100만배, 우주의 나이의 1천조배 크다. 고전역학은 물체가 하나의 명확한 상태에 존재하며, 초기 조건을 알면 미래의 상태를 정확히 예측할 수 있는 결정론적(deterministic) 체계를 기반으로 한다. 반면 양자중첩은 측정 전까지 여러 가능성이 공존하며 측정 순간 확률적으로 하나의 상태로 붕괴된다.

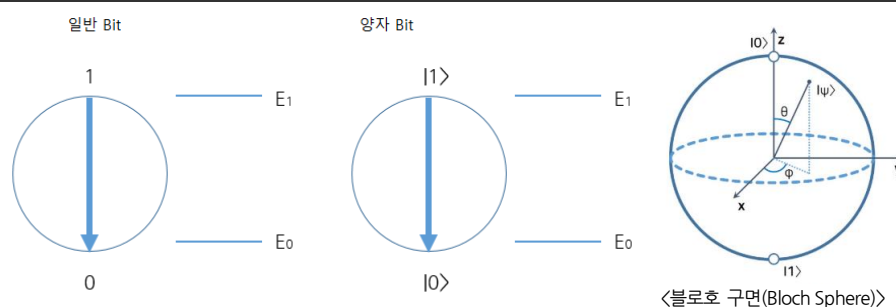
양자중첩과 관련해서 코히어런스(Coherence, 결맞음)와 디코히어런스(Decoherence, 결어긋남)의 개념이 중요하다. 양자중첩이 양자 시스템의 상태라면 코히어런스는 그 시스템을 유지하는 능력이다. 결국 코히어런스 없이는 중첩이 오래 유지될 수 없다.

그림 18. 큐비트의 연산 방식(4큐비트, 16가지 경우의 수 동시 연산)



자료: 국가나노기술정책센터 웹진, IBK투자증권

그림 19. 비트와 큐비트



자료: 한국정보통신기술협회, IBK투자증권

거시 세계와 양자중첩을 연결하는 이론 중에 다세계 해석(Many-World Interpretation)이 존재한다. 양자중첩은 붕괴되지 않고 모든 가능한 결과가 실제로 발생하며 각각이 독립적인 평행 우주를 만든다. 즉, 관측을 통해 하나의 결과만 선택되는 것이 아니라 모든 결과가 서로 다른 우주에서 동시에 존재한다는 것이다.

그림 20. 영화 스파이더맨에서 나타난 다세계 해석의 모습

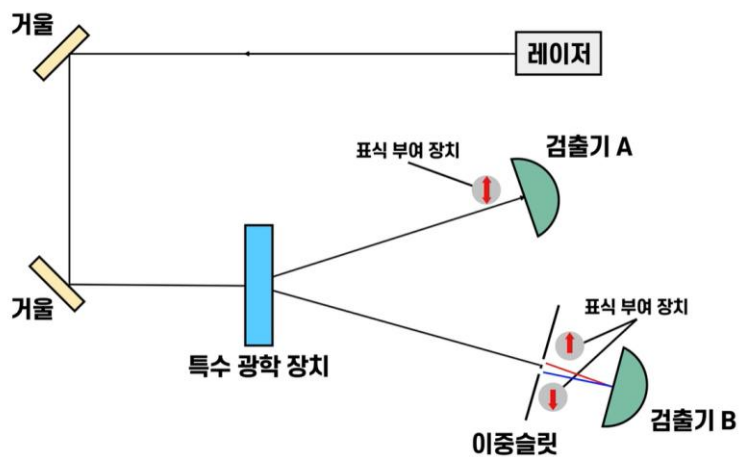


자료: 스파이더맨, 노웨이홈, IBK투자증권

3) 양자얽힘(여러 큐비트 간의 연결)

양자얽힘(Quantum Entanglement)은 두 개 이상의 입자가 서로 얽혀 있을 때 한 입자의 상태를 측정하면 다른 입자의 상태가 즉각적으로 결정되는 현상을 의미한다. 이는 고전 물리학의 국소성(locality) 원칙에 반하는 것으로 보인다. 국소성이란 한 물리적 시스템의 변화가 다른 시스템에 영향을 미치기 위해서는 반드시 공간적으로 인접해 있어야 하며 그 영향은 빛의 속도를 초과할 수 없다는 원칙이다. 양자얽힘은 비국소성(non-locality)이라는 특성을 가지며 이는 벨의 부등식 실험을 통해 실험적으로 입증되었다. 양자얽힘은 비국소성 특성을 기반으로 양자통신 및 양자컴퓨터 분야에서도 중요한 역할을 한다. 양자얽힘은 코히어런스가 유지될 때만 가능하며 디코히어런스 상태에서는 존재할 수 없다.

그림 21. 이중슬릿 실험: 양자지우개 실험 개념도



자료: IBK투자증권

그림 22. 4광년 떨어진 삼체 문명과 지구 사이의 실시간 정보 교환 내용이 포함된 삼체



자료: 넷플릭스 삼체, IBK투자증권

4) 양자간섭

양자간섭(Quantum Interference)은 중첩된 양자 상태들이 서로 강화(Constructive Interference)하거나 상쇄(Destructive Interference)하는 현상이다. 양자 시스템은 확률진폭(Probability Amplitude)으로 작동하며 이 진폭들의 상대적인 위상(Phase) 차이가 간섭의 핵심 요소이다. 양자컴퓨터의 경우 개별 큐비트는 0과1의 중첩 상태로 존재하며 관측 이후 각각 결과가 나올 확률을 결정하는 것이 확률진폭이고 위상은 큐비트가 상호 작용을 할 때 0과1 결과가 나올 확률에 영향을 미친다.

양자컴퓨터는 이러한 간섭 원리를 통해 측정 문제를 효과적으로 해소한다. 계산 과정은 측정 없이 진행되며, 측정은 단순히 최종 결과를 확인하는 역할만 수행한다. 또한 양자 오류 수정(Quantum Error Correction) 기술도 간섭을 활용하여 오류를 감지하고 수정함으로써 계산의 신뢰성을 높인다.

5) 큐비트 구현을 위한 방식

큐비트(Qubit)는 구현하는 방식에 다양한 물리적 기술이 활용된다. 초전도 큐비트(Superconducting Qubits)는 조셉슨 접합을 이용한 초전도 회로로 빠른 연산 속도와 대규모 확장성이 강점이며 구글과 IBM이 주도하고 있다. 이온 트랩 큐비트(Trapped Ion Qubits)는 전기장과 레이저로 이온을 제어해 높은 정확도와 긴 코히어런스 시간을 제공하지만 확장성에는 한계가 있으며 아이온큐(IonQ)가 대표적이다.

이온트랩 방식은 전기장과 자기장을 이용해 개별 이온(양전하를 띤 원자)을 공중에 떠 있게 하여 큐비트로 활용하는 기술이다. 이 방식은 정확도가 높고 코히어런스(결맞음) 시간이 길다는 장점이 있다. 자연상태의 특정 원자에서 레이저를 통해 전자를 제거하여 양전하를 띤 이온을 만든다(이온화된 원자 획득). 전기장과 자기장을 조합한 트랩(Trap)에서 이온들을 전기적 반발력을 이용하여 일렬로 정렬된 선형 배열을 형성한다. 이온에 특정 레이저를 쏘아 냉각시켜서 속도를 최대한 낮춘다. 이후 레이저 펄스를 이용하여 중첩된 큐비트를 만든다. 이 방식에서 이온을 초고진공 상태에 띄어놓아야 외부 입자와의 충돌을 제거하여 양자 상태를 오래 유지할 수 있다.

초전도체 방식 대비 자연상태의 원자를 이용하기 때문에 자연상태의 큐비트를 제조한다. 상대적으로 제조 오류가 적고 균일하기 때문에 얽힘 생성이 쉽고 코히어런스 시간이 길다. 이온 간의 얽힘을 생성하기 위해 이온 간의 진동모드(이온이 양전하를 띠기 때문에 진동이 발생)을 활용하다. 단지 이온수가 증가하면 이 진동을 제어하기 어려워지기 때문에 큐비트를 대규모로 확장하기 어렵다. 또한 각 큐비트를 레이저로 정확히 타겟하여 조절하기 때문에 큐비트가 증가하면 제어 오류가 상승한다.

이온트랩은 큐비트를 제어하기 위해서 레이저 펄스를 이용하기 때문에 초전도 방식보다 제어 속도가 느리다. 초전도 방식의 마이크로파가 전기 신호로 단순한 반면 레이저 시스템은 작은 이온을 각각 조준해야 하는 만큼 많은 시간이 필요하다.

표 6. 큐비트 구현 방식에 따른 비교

구현 방식	원리	기술적 특징	제어 방법	측정(확인) 방법
초전도 큐비트	전자 에너지 준위	조셉슨 접합, 마이크로파로 제어	마이크로파 신호로 양자 상태 조작	마이크로파 반사 측정
이온 트랩 큐비트	이온 포획	레이저로 이온 상태 제어	레이저로 이온의 전자 에너지 전환	형광 검출을 통한 상태 판별
반도체 큐비트	전자 스핀 활용	양자점 기술, 전자 스핀 상태 제어	전자기장 또는 마이크로파로 스핀 제어	스핀 상태에 따른 전류 변화 측정
광자 큐비트	광자의 편광 상태	광학 섬유, 레이저 기반 큐비트 전송	광학 편광기 및 위상 변조기를 이용	광자 포착 및 측정

자료: IBK투자증권

표 7. 1989년 노벨상 수상자의 기술이 적용된 이온 트랩 방식

노벨상 수상자 (1989)	업적	이온 트랩과의 관계
볼프강 파울	파울 트랩 개발	이온 트랩 큐비트의 기반 기술로 직접 연결
한스 데멜트	펜닝 트랩 개발	전자와 이온 포획 기술로 양자 컴퓨팅 발전에 기여
노먼 램지	램지 간섭법 개발	이온 트랩 큐비트의 정밀 측정 기술에 활용됨

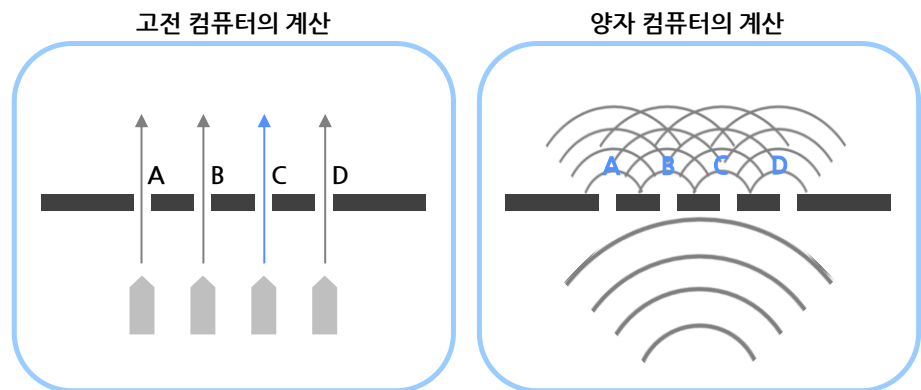
자료: IBK투자증권

3. 어떤 양자컴퓨터가 우위를 가질까?

1. 연산 원리의 차이

기존 컴퓨터는 비트(Bit) 단위를 사용하여 정보를 처리하며, 이 비트는 0 또는 1의 두 가지 상태 중 하나로 결정적으로 존재한다. 이에 따라 모든 경우의 수를 개별적으로 실행하고 반복적인 연산 후 최종 결과를 비교한다. 반면, 양자컴퓨터(Quantum Computer)는 큐비트의 양자중첩(Superposition)이라는 특성 덕분에 동시에 0과 1의 상태를 가진다. 또한 양자얽힘(Entanglement)을 통해 서로 강하게 연결된 큐비트 간에 정보가 즉각적으로 공유된다. 따라서, 여러 번 반복해야 하는 연산을 중첩 상태로 1번에 진행하기 때문에 문제의 성격에 따라 기존 컴퓨터보다 빠르게 해결한다. 슈퍼컴퓨터는 연산을 병렬로 처리하지만 정보 단위는 여전히 비트이며, 하드웨어적으로 프로세스를 병렬로 연결하여 높은 연산 속도를 구현한다. 그러나, 기본적으로는 이진법에 기반한 순차적 계산 방식을 따른다.

그림 23. 양자컴퓨터의 계산 원리

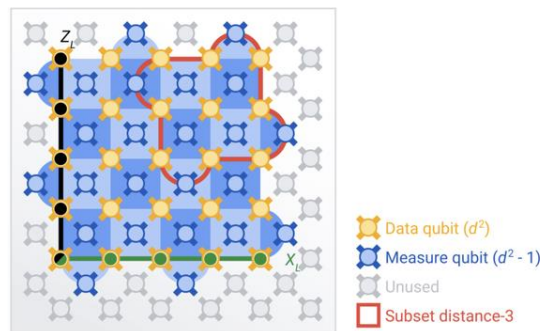


자료: IBK투자증권

2. 측정의 관점

기존 컴퓨터는 결정론적(deterministic) 시스템으로 비트(Bit)가 항상 명확하게 정의된 상태(0 또는 1)를 갖는다. 이러한 비트는 측정하여도 상태가 변하지 않으며 데이터의 저장, 전송, 연산 과정에서 언제든지 동일한 결과를 보장한다. 반면 양자컴퓨터는 비결정론적(probabilistic) 특성을 가지며 큐비트(Qubit)는 양자중첩(Superposition) 상태로 존재한다. 측정하는 순간 큐비트는 특정한 하나의 값으로 붕괴(Quantum Collapse)되어 더 이상 중첩 상태를 유지하지 못한다. 따라서 양자컴퓨터는 큐비트를 측정없이 조절하고 문제해결을 위해 조절하는 고난도의 작업을 하게 된다. 또한 측정 전후의 오류를 확인하고 수정하는 것 없이 중요한 요소이다. 측정과 환경 간섭으로 인한 오류를 최소화하기 위해 논리적 큐비트(Logical Qubit)가 사용되고 이는 여러 개의 물리적 큐비트(Physical Qubit)를 조합하여 구성된다.

그림 24. 논리적 큐비트의 구조



자료: Google, IBK투자증권

3. 성능의 관점

현재 양자컴퓨터를 구축하고 실행할 때 과도한 자원과 에너지를 소비하기 때문에 단순한 문제 해결에 사용하는 것은 비효율적이다. 1) 양자컴퓨터를 구축하고 실행하기 위해 천문학적인 비용이 소요되는 것, 2) 양자컴퓨터가 한번의 연산 시간이 기존 컴퓨터의 반복적인 연산 시간의 총합을 넘어서면 성능의 우위를 이야기할 수 없다. 또한 3) 측정없이 양자환경을 유지하면서 도출한 결과에 대한 검증 역시 또다른 위험 리스크로 고려되어야 한다.

표 8. 알파고(AlphaGo) 개발 및 개발, 운영 비용과 에너지 소모량 비교

항목	세부 내용	수치/비용	비고
개발 비용	연구 개발 비용	약 2,000만 ~ 3,000만 달러	답마인드의 연구 인력 및 인프라 포함
하드웨어 비용	GPU 및 서버 인프라	약 50만 ~ 100만 달러	1,202개의 CPU, 176개의 GPU 사용
운영 에너지 소비량	1회 대국당 에너지 소비량	약 50 kWh	일반 가정 하루 전력 소비량과 유사
인간 대국당 에너지 소비량	이세돌 9단의 1회 대국당 소비 에너지	약 0.1 kWh (100~200 kcal)	인간 대비 약 500배 에너지 소비

자료: IBK투자증권

4. 양자컴퓨터의 성능 비교

양자컴퓨터의 성능을 비교할 때 주로 큐비트 개수, 연산 속도, 결맞음 시간, 신뢰도 네 가지 요소가 핵심 지표로 사용된다.

우선 큐비트 개수는 양자컴퓨터의 이론적인 계산 능력을 나타내는 가장 기본적인 지표다. 구글의 시커모어(54Q) 같은 초전도 양자컴퓨터는 많은 큐비트를 활용하여 난이도 높은 양자 우월성 실험을 성공적으로 수행했다. 그러나 큐비트 수가 많다고 해서 무조건 성능이 우수한 것은 아니다. 다음 연산 속도는 양자 게이트(Quantum Gate)를 얼마나 빠르게 수행할 수 있는지를 보여준다. 빠른 연산 속도는 복잡한 계산을 더 짧은 시간에 완료할 수 있게 해주며, 외부 환경으로 인한 오류 발생 가능성을 줄이는 데 유리하다. 초전도체 방식의 양자컴퓨터가 비슷한 조건의 이온트랩 기반 양자컴퓨터보다 빠르다. 세번째 결맞음 시간은 큐비트가 양자 상태를 유지할 수 있는 시간으로 양자컴퓨터의 안정성을 결정짓는 중요한 요소다. 결맞음 시간이 길수록 복잡한 계산을 수행하는 데 필수적이다. 일반적으로 이온트랩 기반 양자컴퓨터가 초전도 기반보다 더 긴 결맞음 시간을 갖는다. 끝으로 신뢰도는 양자 연산이 얼마나 정확하게 수행되는지를 나타내며 계산 결과의 품질을 평가하는 중요하다. 양자컴퓨터는 외부 환경의 미세한 변화에도 민감하기 때문에 오류가 발생하기 쉽다. 일반적으로 이온트랩 방식이 초전도체 방식보다 우위를 보인다.

표 9. 양자컴퓨터 구현 방식별 성능 비교

구분	수치	플랫폼	개발업체 및 양자컴퓨터 이름
물리 큐비트 개수	72Q	초전도	구글 브리슬콘
	54Q	초전도	구글 시커모어
	53Q	초전도	IBM 로체스터
	20Q	이온트랩	IQOQI
	13Q	이온트랩	아이온큐
연산 속도	12ns	초전도	구글 시커모어(54Q)
	480ns	이온트랩	옥스포드 대학(2Q)
결맞음 시간	600s	이온트랩	칭화대학(1Q)
	3s	이온트랩	아이온큐(11Q)
	111 μ s	초전도	IBM 오스틴(20Q)
신뢰도	99.92%	이온트랩	NIST(2Q)
	99.89%	이온트랩	오크리지 연구소(3Q)
	99.64%	초전도	구글 시커모어(54Q)
	99.20%	초전도	IBM 아우센스(5Q)

자료: 한국과학기술기획평가원(2019년), IBK투자증권

4. 양자컴퓨터 상용화가 어려운 이유는?

양자컴퓨터를 실현하기 어려운 이유는 양자 환경 구축, 양자 상태 유지, 양자 오류 정정, 그리고 측정 없이 결과를 확인하는 네 가지 핵심 요소가 필요하기 때문이다. 이는 모두 양자역학의 근본적인 원리들과 밀접하게 연결된다.

1) 양자 환경 구축은 큐비트가 양자얽힘(Entanglement)과 양자중첩(Superposition) 상태를 형성할 수 있는 안정적인 기반을 마련해야 한다. 이를 위해서는 극저온 환경과 진공 상태, 강력한 자기장 등이 필요하다. 이러한 장치를 설계, 구축하기 위해서는 대규모 예산과 공간이 필요하다. 큐비트를 컨트롤하기 위해서는 자기장, 레이저 등의 미세한 기술이 필요하다.

2) 충분히 연산을 진행할 수 있도록 큐비트가 오랜 시간 동안 양자적 특성을 유지해야 한다. 이 부분은 결맞음(Coherence)과 디코히어런스(Decoherence) 개념이 핵심이다. 결맞음은 양자 상태의 안정성을 의미하며 디코히어런스는 외부 환경의 측정, 간섭으로 인해 양자 상태가 붕괴되는 현상이다.

3) 측정 없이 결과를 확인하는 과정은 양자간섭과 약한 측정(Weak Measurement) 원리를 기반으로 한다. 양자컴퓨터는 직접적인 측정 없이 간섭 패턴의 변화를 분석하거나 약한 측정을 통해 정보를 간접적으로 추출함으로써 중첩 상태의 붕괴 없이 계산 결과를 도출할 수 있다.

3) 양자 오류 정정(Quantum Error Correction)은 양자 시스템의 민감성을 보완하기 위한 중요한 과정으로 큐비트의 오류를 감지하고 수정하기 위해 양자얽힘과 양자 중복 불가능성(No-Cloning Theorem)을 활용한다. 이는 얽힌 큐비트 간의 상관관계를 통해 오류를 추적하고 복구하는 방법이 개발 중이다.

표 10. 양자컴퓨터 구현을 위해 필요한 기술

구현 요소	설명	관련 양자역학 원리	핵심 개념
양자 환경 구축	양자중첩과 얽힘이 가능한 안정된 환경 조성	양자얽힘 (Entanglement) 양자중첩 (Superposition)	극저온, 진공 상태, 외부 잡음 차단
양자 상태 유지	큐비트의 양자상태 장시간 유지	결맞음 (Coherence) 디코히어런스 (Decoherence)	외부 간섭 최소화, 결맞음 시간 연장
양자 오류 정정	큐비트 오류 감지 및 수정	양자얽힘 (Entanglement) 양자중복 불가능성 (No-Cloning Theorem)	논리적 큐비트, 정정 알고리즘
측정 없이 결과 확인	양자 상태 붕괴 없이 결과를 간접적으로 확인	양자간섭 (Quantum Interference) 약한 측정 (Weak Measurement)	간섭 패턴 분석, 약한 측정, 간접 확인

자료: IBK투자증권

5. 양자 컴퓨팅 기술을 이해하기 위한 핵심 개념은?

양자 컴퓨팅에 대한 발전 방향은 단순히 계산 속도의 급격한 증가와 같은 막연한 기대보다는 명확한 발전 방향을 파악해야 할 필요가 있다. 중첩(Superposition), 얽힘(Entanglement), 간섭(Interference)과 같은 양자역학적 원리를 정보 처리에 직접 활용한다는 점이 핵심이다. 이러한 특성은 기존 고전 컴퓨팅으로는 해결하기 어려운 문제들을 효과적으로 다룰 수 있는 가능성을 열어준다.

본 ‘양자 기술’ 장의 목적은 양자 기술을 정확히 이해하고 최신 동향을 명확히 파악해 테마성 투자로 인한 리스크를 줄이고, 기술 발전의 방향성을 기반으로 한 합리적 투자 판단을 돕는 것이다. 이를 위해 먼저 양자컴퓨터의 계산적 우위를 평가할 수 있는 기준인 계산 복잡도를 소개한다. 이어서, 양자 컴퓨팅 구조를 명확히 이해하기 위해 간단한 동전 던지기 예시의 확장을 통해 통계적 접근 방식을 제시한다

이후 소프트웨어(이론적 측면)에서의 양자 시뮬레이션과 알고리즘 발전, 하드웨어 관점에서의 오류 정정 기술과 확장성, 그리고 양자 기술의 산업 적용 사례 및 최신 동향을 분석할 수 있는 프레임워크를 제시한다.

양자 컴퓨팅을 이해하기 위한 두가지 핵심 개념

양자 컴퓨팅이 나아갈 방향을 아는 것은 결국 기술이 가지고 있는 핵심적인 성격을 파악하는 것에서부터 비롯한다고 생각한다. 현재 양자 컴퓨팅이 가질 수 있는 강점을 이해하기 위한 핵심 개념으로 1) 계산 복잡도 개념과 2) 확률적 상태에 대한 표기법을 이해하기 쉽게 제시 한다.

1. 계산 복잡도: 양자 우위 파악의 핵심

계산 복잡도는 알고리즘의 **성능**(주로 실행 시간 또는 메모리 사용량)을 측정하는 척도. 복잡도는 입력 크기(N)에 따라 알고리즘이 얼마나 자원을 사용하는지를 나타내며, 일반적으로 빅오 표기법(Big-O Notation)으로 표현한다.

빅오 표기법 (Big-O Notation)

- 빅오는 **최악의 경우 실행 시간**을 표현
- 입력 크기(N)가 커질수록 알고리즘의 수행 시간이 어떻게 증가하는지 추세를 표기
- 상수를 무시하고 가장 빠르게 증가하는 항만 남겨 단순 표기

예시)
$$T(n) = 3N^2 + 5N + 2 \rightarrow O(N^2)$$

결국, 입력 데이터에 대해서 얼마나 양자 알고리즘을 사용한 양자 컴퓨팅이 계산 복잡도를 얼마나 줄일 수 있는지를 통해 어떤 영역에서 양자 컴퓨팅이 효율적이고 혁신적인 컴퓨팅 성능을 가질 수 있는지 점점 가능하다.

예를 들면 대표적인 양자 알고리즘인 Shor의 알고리즘은 소인수 분해에 대한 계산 복잡도를 $O(2^N)$ 에서 $O(N^3)$ 수준으로 감소 시켜 준다. 즉, 입력 값의 소인수가 100개 일 때, 10^9 수준. 입력 소인수 값이 100개 정도일 때 고전 알고리즘과 양자 알고리즘으로 인한 차이는 명확하게 양자 컴퓨팅의 이점을 알 수 있는 사례이다.

다만, 한가지 유의할 것은 모든 영역에서 양자 컴퓨팅이 계산 복잡도를 줄여 줄 수 있는 것이 아니라. 데이터의 양이 특정 임계점 보다 작을 경우에는 고전 컴퓨팅이 더 효율적인 경우가 존재하고 양자 컴퓨팅이 계산 우위를 가질 수 있는 영역이 일부 영역으로 존재한다는 것. 계산 자체가 불가능한 영역에서는 양자 컴퓨팅도 우위를 가질 수 있는 것은 없음. 즉, 계산 복잡도를 나타낼 수 없는 문제에 대해서는 양자컴퓨터가 등장 한다 하더라도 해당 문제에 대한 해결 가능성은 없다고 볼 수 있다.

계산 불가능에 해당하는 간단한 문제는 ‘정지 문제’(주어진 프로그램 입력 값에 대해 프로그램이 무한히 실행 되지 않고 유한한 시간 안에 멈추는지 여부를 판별하는 문제). 즉 계산 가능성이 수반 된 문제에서, 계산 복잡도를 낮추는 알고리즘이 발전하는 과정을 트래킹 하는 것이 중요하다.

1. $O(1)$ (상수 시간)

- 입력 크기와 무관하게 항상 일정한 시간에 실행

2. $O(\log N)$ (로그 시간)

- 입력 크기를 절반씩 줄이며 작업이 진행

3. $O(N)$ (선형 시간)

- 입력 크기에 비례해서 작업 시간이 증가

4. $O(N \log N)$ (선형 로그 시간)

- 로그 시간과 선형 시간이 결합된 복잡도

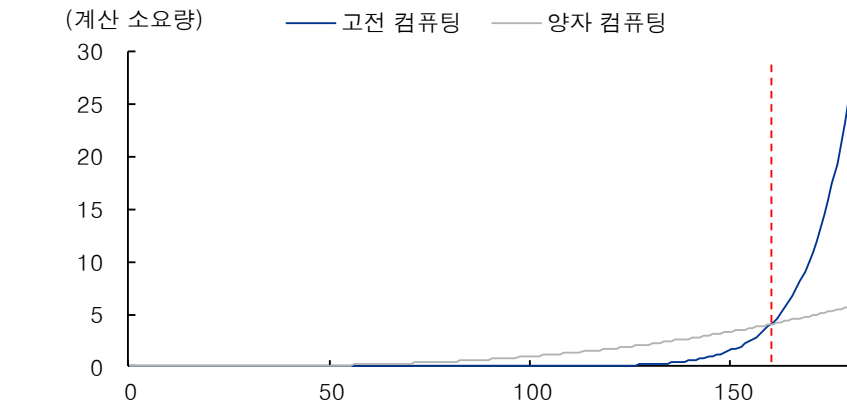
5. $O(N^2)$ (이차 시간)

- 입력 크기에 제곱 비례하여 실행 시간이 증가

6. $O(2^N)$ (지수 시간)

- 입력 크기에 대해 지수적으로 시간이 증가

그림 25. 규모에 따른 계산 소요량, 문제의 성격에 따라 필요한 컴퓨터는 다를 수 있음



자료: IBK투자증권

2. 양자 상태에 대한 확률적 이해: 동전 던지기에서 확장해 보기

양자 상태를 실생활에서 느낌을 통해 이해하려고 한다면 굉장히 이해하기 어렵지만, 오히려 통계적인 프레임과 양자 역학을 선구적으로 진행해온 연구자들의 수학적인 표기법을 받아들인다면, 오히려 이해가 훨씬 쉬울 수 있다(진짜 훨씬 쉬울 수 있다).

이를 설명하기 위해서 동전 던지기의 예시를 **Dirac 표기법(Bracket 표기법)**으로 표현한 식을 먼저 제시하고 이를 양자 상태로 확장해 본다. 피부로 느끼기 어려웠던 양자 컴퓨팅의 원리가 간단한 수식으로 표현되고, 실제 작동 원리를 파악 하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대 한다.

먼저, 동전 던지기의 예시를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 동전이 나올 수 있는 값에 대한 변수를 X라고 설정
- 2) 앞면을 1, 뒷면을 0 이라고 설정
- 3) 앞면과 뒷면이 나올 확률이 같다고 설정(앞면: 1/2, 뒷면: 1/2)

이렇게 설정한 동전 던지기를 수식(확률 질량 함수)로 표현하면 다음과 같다.

$$P(X=0) = \frac{1}{2}, P(X=1) = \frac{1}{2}$$

이러한 동전 던지기에 대한 확률적인 상태를 앞에서 말한 Dirac(Bracket) 표기법으로 표시를 하면 다음과 같다.

$$|\text{동전}\rangle = \frac{1}{2} |\text{뒷면}\rangle + \frac{1}{2} |\text{앞면}\rangle = \frac{1}{2} |0\rangle + \frac{1}{2} |1\rangle$$

동전에 대한 확률 상태를 이런 식으로 쓸 수 있다 정도만 받아들이다면 양자 상태의 큐비트를 표현하는 수식을 이해하는 것도 쉽게 가능하다. 참고로 읽는 방법은(앞면)은 ‘브라(bra) 앞면’이라 읽으면 되고 |앞면>는 ‘켓(ket) 앞면’이라고 읽을 수 있다. <>(Bracket)을 쓰기 때문에 앞과 뒤를 따서 이런 표기와 발음을 사용한다고 이해하면 재미(?) 있을 수 있다.

수식과 기호에 대한 두려움만 잠시 접어 둔다면 양자 상태의 큐비트는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

표기법 자체는 동전의 확률적인 상태를 표현하는 것과 전혀 다르지 않다. 다만 한가지 조건이 추가되는 것은 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 이라는 조건만 만족하면 ‘중첩’된 양자 상태를 나타내는 것이다. 양자를 정확히 이해하지 않더라도 큐비트가 위와 같이 표현된다는 것만 알면 양자 알고리즘이 어떤 식으로 적용 되는 지 알 수 있다.

이러한 조건을 만족시키는 다음 식은 ‘양자 상태의 큐비트’를 나타낸다고 볼 수 있다.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

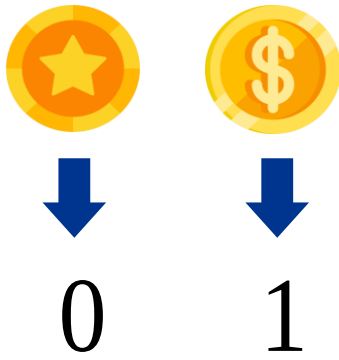
추가로 두 개의 큐비트가 가지는 ‘얽힘’이라는 상태를 표현하는 방법도 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때 2개의 큐비트는 2개의 상태가 중첩되어 있는 것이다. 이를 위해 만족해야 하는 조건은 $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \omega^2 = 1$ 뿐이다.

$$|\psi\rangle = \alpha|00\rangle + \beta|01\rangle + \gamma|10\rangle + \omega|11\rangle$$

위에 나열된 식을 그냥 양자 상태를 이렇게 표현 하는구나 정도로 받아들일 수 있으면, 직관적으로 양자 상태에 대한 개념이 이해되지 않더라도 실질적인 문제 해결과 계산을 위해 어떤 방식으로 활용 되는지 정도를 파악 할 수 있을 것이다. 사실, 리처드 파인만이 ‘양자 물리학을 제대로 이해하는 사람은 아무도 없다’라고 말한 것을 해석해보면, 우리가 관측 가능한 물리 세계에서 직관적으로 아무도 받아들일 수 없지만, 양자 법칙이 따르는 성격을 나타내기위해 이렇게 표기 할 수 있음을 받아들이고 연구를 진행 한다는 것이다. 투자의 입장에서 기술을 파악하기 위해 기억할 것은 얽힌 큐비트가 ‘동시’에 계산하는 것을 이 표기법 아래에서 진행 한다는 것이다.

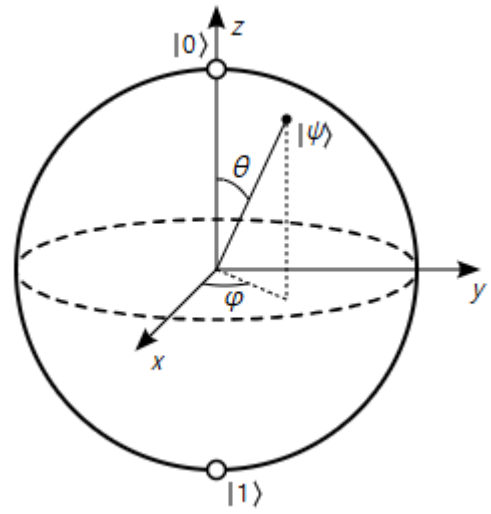
더 깊은 이해를 필요로 하는 사람을 위해 내용을 덧붙이자면, α, β 는 실수가 아닌 복소수 범위의 값을 가지고 이에 따라서 유클리디안 거리의 제곱 합이 1이어야 한다는 조건이 있는 것이다. 이에 따라, 양자 상태의 큐비트 하나를 표현하기 위한 조건은 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 로 치환된다. 두 값이 실수 범위가 아닌 복소수일 때 가질 때의 의미는 양자가 가질 수 있는 0, 1 두가지 상태에 대한 간섭을 나타낼 수 있으며 이는 결국, 1) 관측 시 0, 1 중 어떤 값을 관측할 확률이 높은지(상태 혼합 정도)를 나타낼 수 있고 2) 양자 연산에 영향을 끼치는 ‘위상’ 정보를 파악 할 수 있다. 아래 Bloch 구 그림에서 θ 는 1) 관측이 될 확률에 대한 값이고 ϕ 는 2) 위상 정보를 나타낸다.

그림 26. 평범한 동전 던지기는 고전 컴퓨팅 방식의 방식



자료: IBK투자증권

그림 27. 큐비트 상태를 시각적으로 나타내는 Bloch Sphere



자료: Wikipedia, IBK투자증권

6. 양자 알고리즘이 실행되는 형태와 효과적인 분야는?

양자 컴퓨팅 모델과 적합한 알고리즘

이번 장에서는 앞에서 간단히 살펴본 계산 복잡도와 큐비트 개념을 바탕으로, 실제로 어떤 방식으로 양자 컴퓨팅 기술이 구현되고 있는지를 세 가지 대표적인 접근법을 통해 짚어보고자 한다. 크게 게이트 기반 양자 컴퓨팅(Gate Model), 애디아바틱(Adiabatic) 양자 컴퓨팅과 양자 어닐링(Quantum Annealing), 그리고 위상(Topological) 양자 컴퓨팅으로 나눌 수 있으며, 각각은 물리적 구현과 알고리즘적 관점에서 장단점이 뚜렷하다. 다음 섹션에서는 이 세 가지 방식의 개념과 활용, 그리고 주요 연구 동향을 살펴보고, 궁극적으로 양자 컴퓨팅이 어떻게 혁신적인 계산 능력을 제공하는지 정리한다.

1. 게이트 기반 양자 컴퓨팅 (Gate Model)

게이트 기반 양자 컴퓨팅은 전통적인 디지털 회로의 작동 방식과 유사하게, 1큐비트 또는 2큐비트 게이트를 논리 회로처럼 순차적으로 구성해 원하는 양자 상태를 만든 뒤 최종적으로 측정하는 방식을 사용한다. 이때 게이트(Gate)란, 큐비트의 상태를 변화시키는 양자 연산을 의미한다. 즉, 고전 컴퓨터에서 ‘AND, OR’ 등 논리 게이트가 비트의 상태를 바꾸는 역할을 하듯이, 양자 컴퓨팅에서는 큐비트(양자 상태)에 수학적인 연산(행렬 곱셈 등)을 적용해 상태를 원하는 방향으로 조절하는 것이다.

예를 들어, Hadamard 게이트(H)는 한 큐비트를 균등한 중첩 상태(Superposition)로 만들어주거나(또는 그 역을 수행) 각종 양자 알고리즘에서 중요한 초기화·변환 단계를 담당한다. 이를 Dirac 표기법(Bracket 표기법)으로 표현하면 다음과 같다.

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$

즉, $|0\rangle$ 상태는 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ 라는 균등 중첩 상태가 되며, $|1\rangle$ 상태 역시 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$ 처럼 서로 다른 위상을 가지는 중첩 상태로 바뀐다. 이렇게 큐비트 상태를 적절히 변환하고, 여러 게이트를 연결해 회로를 구성한 뒤 최종적으로 측정하는 것이 게이트 기반 양자 컴퓨팅의 핵심 아이디어다.

게이트 기반의 양자 컴퓨팅 알고리즘의 가장 대표적인 예시로는 다음과 같은 양자 알고리즘이 있다. Shor의 알고리즘(Shor's Algorithm), Grover의 알고리즘(Grover's Algorithm), 양자 위상 추정(Quantum Phase Estimation, QPE), 그리고 변분적 접근법(VQE, QAOA 등)이 많이 언급된다.

예를 들어, Shor의 알고리즘은 매우 큰 수를 이루는 소인수를 찾는 문제를 획기적으로 빠른 속도로 해결할 수 있도록 고안된 알고리즘이다. 고전적으로는 소인수분해의 계산 복잡도가 지수적으로 증가해 $O(2^n)$ 정도가 걸리지만, Shor의 알고리즘을 사용

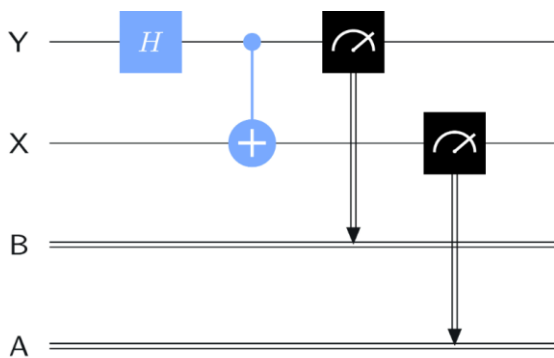
하면 다항식 수준인 $O(N^3)$ 정도로 낮출 수 있다.¹ 이는 기존 암호 체계를 위협할 만한 강력한 기능을 갖춘다는 점에서 큰 주목을 받았으며, 이로 인해 양자 안전(Quantum-Safe) 암호나 양자 보안 기술에 대한 연구도 함께 부상하고 있다.

한편 Grover의 알고리즘은 데이터베이스에서 특정 항목을 찾는 ‘검색’ 문제를 크게 단축할 수 있다는 특징이 있다. 고전적으로는 선형 시간 $O(N)$ 이 소요되는 작업을, 양자 상태의 중첩과 간섭 효과를 활용하면 대략 $O(\sqrt{N})$ 정도로 줄일 수 있다. 데이터베이스 탐색이나 검색 기반 연산이 중요한 현대 컴퓨팅 환경에서, 이것만으로도 다양한 산업 분야에 강력한 가치를 제공할 수 있다는 점이 부각된다.

또한 양자 위상 추정(Quantum Phase Estimation, QPE)은 어떤 연산자(행렬)의 고유값을 추정하는 문제에 효과적이다. 이는 복잡한 물리계나 화학계의 분자 에너지 준위를 파악할 때, 또는 수리적 문제에서 중요한 정보를 추출하는 데 폭넓게 활용될 수 있다. 변분적 양자 알고리즘(VQE, QAOA 등)은 기존에 지수 시간이 필요했던 최적화나 시뮬레이션 문제를 다항식 수준으로 낮추어 볼 수 있다는 가능성을 제시하며, 실제로 화학 시뮬레이션(분자 에너지 준위 계산), 신소재 개발, 금융 모델링 등 다양한 영역에서 연구가 활발하다.

즉, 게이트 기반 양자 컴퓨팅은 논리 게이트를 순차적으로 배치해 원하는 양자 상태로 유도한 뒤 측정함으로써 결과를 얻는다. 이런 ‘양자 논리 회로’ 접근법은 범용성을 갖추고 있어, 향후 실용화되면 기존의 고전적 계산 체계를 뛰어넘는 여러 분야에서 혁신적인 성능 향상을 기대할 수 있다.

그림 28. 게이트 기반의 양자 컴퓨팅 논리 구조도 예시

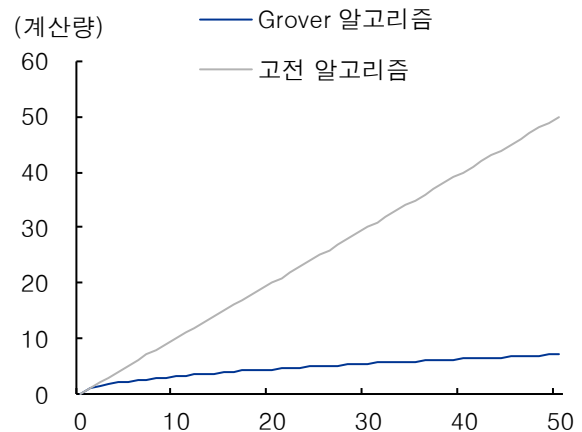


자료: IBM(Qiskit), IBK투자증권

주1) X, Y는 큐비트, A, B는 고전 비트

주2) H는 본문에서 예시로 든 하다마드 게이트, +는 CNOT 게이트, 나머지 하나의 표식은 ‘관측’을 의미

그림 29. Grover 알고리즘과 고전 알고리즘 계산 복잡도 차이



자료: IBK투자증권

¹ 정확히는 일반 알고리즘: $\exp(O(n^{1/3} \log^{2/3} n))$, shor 알고리즘 $(O(n^3 \log(n \log(\log n))))$

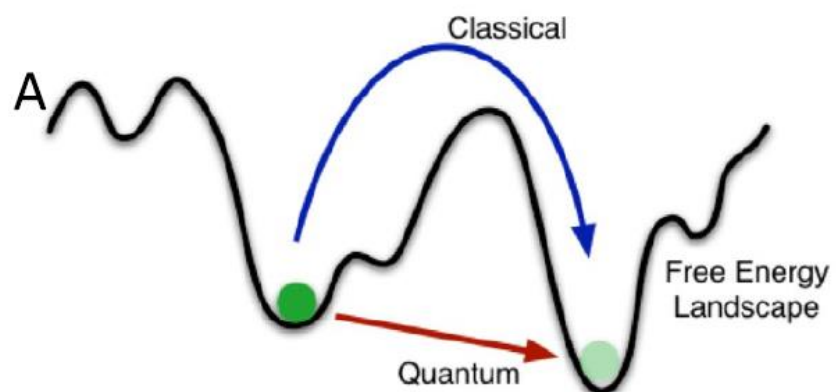
2. 애디아바틱(Adiabatic) 양자 컴퓨팅 & 양자 어닐링(Quantum Annealing)

애디아바틱 양자 컴퓨팅은 시스템의 해밀토니안(Hamiltonian)을 서서히 변형함으로써, 양자계가 ‘최저 에너지 상태’로 자연스럽게 수렴하도록 유도하는 방식이다. 물리적으로 에너지가 더 낮은 상태로 이동하려는 양자의 성질을 활용한다고 볼 수 있는데, 이를 바탕으로 수많은 경우의 수가 존재하는 복잡한 문제(주로 최적화 문제)를 효과적으로 풀 수 있다는 가능성을 제시해왔다.

특히 양자 어닐링(Quantum Annealing)은 이러한 애디아바틱 방식의 대표적인 구현 중 하나로, Ising 모델로 표현되는 대규모 조합 최적화 문제에 강점을 지닌다. 이를테면 네트워크 상에서 최적의 경로를 찾거나 복잡한 결정 구조의 에너지 최솟값을 구하는 문제가 여기에 해당한다. 실제로 D-Wave 시스템은 이 방식을 기반으로 상용화된 하드웨어를 출시해, 제한적이거나 특정 범위의 최적화 문제를 빠르게 풀 수 있다는 점을 입증했다.

장점으로는 특정 형태의 최적화 문제에서 게이트 기반 양자 컴퓨팅보다 쉽게 하드웨어를 구성해 대규모 큐비트를 운영할 수 있다는 점이 꼽힌다. 다만, 게이트 기반처럼 범용적인 계산 알고리즘을 자유롭게 구현하기에는 제약이 있어서, 특정 유형의 문제에 집중되는 경향이 있다. 그럼에도 불구하고, 빠른 최적화가 필요한 여러 산업 영역(물류, 금융 포트폴리오 최적화, 재료 설계 등)에서 꾸준한 연구와 투자가 이어지고 있으며, 실제로 기업들이 제한적이거나 최적화 문제 해결을 위해 D-Wave 기기를 사용하고 있기도 하다.

그림 30. 최적화 문제에 적합한 애디아바틱 방식



자료: The European Physical Journal, IBK투자증권

3. 위상 양자 컴퓨팅(Topological Quantum Computing)

위상 양자 컴퓨팅은 Non-Abelian Anyon이나 Majorana 준입자(Majorana fermion)와 같은 독특한 준입자를 이용해, ‘위상적’으로 안정화된 큐비트를 구현하려는 시도를 말한다. 다른 방식보다 물리적 오차율을 극단적으로 낮출 수 있다는 이론적 장점이 가장 큰 특징으로 꼽힌다. 쉽게 말해, 위상 구속(Topological Protection)을 통해 양자 정보가 오류 없이 안전하게 보존되도록 하는 것이다.

알고리즘적 관점에서는 게이트 기반과 크게 다르지 않게 회로 모델을 구현할 수 있지만, 물리적인 수준에서 에러를 거의 억제한다는 점이 이상적인 목표로 제시되고 있다. 다만 이러한 어떤 준입자를 실제로 제어하고 측정하는 기술은 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 실현 가능성이 높다고 보기는 어렵다는 평가가 많다. 그럼에도 불구하고, 이론적으로 가장 매력적인 양자 컴퓨팅 방식으로 여겨져 마이크로소프트 등 선도 기업들이 적극적으로 투자하고 있다.

위상 양자 컴퓨팅이 만약 성공적으로 구현된다면, 현재 양자 컴퓨팅에서 가장 큰 난관으로 꼽히는 ‘에러 보정’ 문제를 물리적 차원에서 해소해버릴 수 있다는 점에서 궁극적인 목표로 거론된다. 여기에 머무르지 않고 수학·물리학적으로도 새로운 연구 주제를 제공하고 있어, 향후 큰 돌파구가 열릴 수 있다는 기대감이 존재한다.

각기 다른 장점을 가진 모델들

정리하자면, 1) 게이트 기반 양자 컴퓨팅은 범용성을 갖춘 양자 논리 게이트로 복잡한 알고리즘을 구현할 수 있고, 2) 애디아바틱/양자어닐링은 특정 최적화 문제에서 효과적인 접근으로 대규모 큐비트 활용이 가능하며, 3) 위상 양자 컴퓨팅은 물리적 안정성을 극대화할 잠재력을 가진 방식이다. 이 세 가지 흐름은 서로 경쟁하면서도 보완적인 방향으로 발전하고 있으며, 한계와 가능성이 동시에 존재하기 때문에 향후 어느 방식이 현실 세계의 문제를 해결하는 데 주도권을 쥐게 될지는 아직 확정하기 어렵다. 다만 각각의 특성상, 산업·투자 측면에서는 최적화 문제(애디아바틱/어닐링)와 범용 문제 해결(게이트 기반) 그리고 장기적 혁신(위상 양자 컴퓨팅) 관점에서 고르게 연구가 진행될 것으로 예상된다. 이러한 기술들이 실제로 우리의 산업 전반에 적용될 날이 온다면, 양자역학적 성질을 직접 체감하기는 여전히 어려울지 몰라도, 수많은 문제를 지금보다 훨씬 빠르고 효율적으로 해결하는 양자 컴퓨팅 시대가 열릴 것으로 기대한다.

7. 최신 양자 기술은 어디까지 온 걸까?

1. 구글 윌로우: 양자 컴퓨팅 속도 증가, 논리 큐비트에서 임계점 이하 오류 달성

RCS(Random Circuit Sampling) 성능 향상과 의미

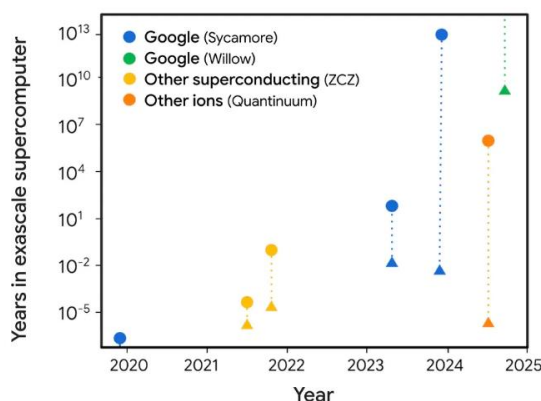
RCS(Random Circuit Sampling)는 무작위로 구성된 양자 회로에서 나오는 확률 분포를 샘플링하는 문제를 말한다. 구체적으로 n 개의 큐비트에 무작위 게이트를 깊이 d 만큼 적용한 뒤, 최종 측정 결과로 얻는 비트 열들이 특정 분포를 따른다고 할 때, 이 분포 자체를 고전적(클래식) 컴퓨터로는 모사하기가 매우 어렵다는 것이 핵심이다.

이러한 무작위 회로는 매우 복잡한 양자 얽힘 상태를 만들어내고, 2^n 개의 가능한 비트 열 각각에 대한 확률 $p(x)$ 를 고전적으로 계산·샘플링하는 것은 지수적 자원이 필요하다고 추정된다. 따라서, RCS는 ‘양자 우위(Quantum Supremacy)’를 가능하게 하는 대표적인 벤치마크로 자리 잡았으며, 양자컴퓨터의 실제 연산 속도가 어디까지 왔는지를 상징적으로 보여주는 지표이다.

2019년 구글이 발표한 시뮬레이션에서는, 무작위 양자 회로를 몇 분 만에 풀어내어 기존 슈퍼컴퓨터가 수천 년 이상 걸릴 문제를 해결할 수 있다고 보고했다. 2024년 12월 발표된 Willow 결과에 따르면, 물리적 큐비트 105개를 사용한 RCS 문제에서 더 빠른 계산 성능을 달성했고, 이론적으로는 5분 vs 10^{25} 년이라는 엄청난 격차를 보이는 사례를 제시했다.

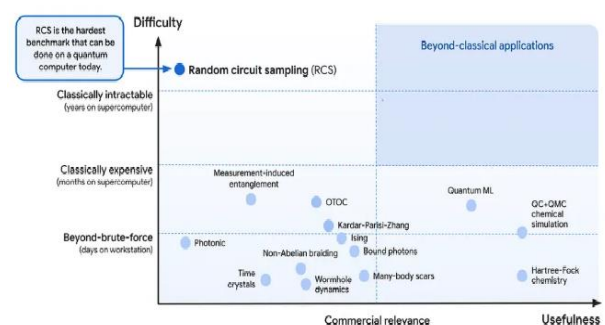
RCS는 궁극적으로 양자 컴퓨팅 기술력이 얼마나 빠르게 성장하고 있는지를 가늠하는 척도이다. 앞으로도 RCS는 양자 컴퓨팅 성능이 얼마나 빨라졌는지 측정할 수 있는 도구로 지속적으로 사용될 것이다. 다만, 한가지 주의할 점은 양자컴퓨터가 가장 효율적으로 생성할 수 있는 형태의 시뮬레이션일 뿐 다양한 영역에서 같은 속도 이가 날것이라 기대하는 것은 과도한 해석이다.

그림 31. 2019년 Sycamore 대비 윌로우 계산 속도



자료: Google, IBK투자증권

그림 32. RCS는 고전 컴퓨터에게 어렵지만 실용적이지는 않음



자료: Google, IBK투자증권

논리적 큐비트 형성과 오류율 개선

양자컴퓨터에서 ‘논리적 큐비트(logical qubit)’는 다수의 불안정한 물리적 큐비트(physical qubit)를 묶어 오류율을 획기적으로 낮춘 안정된 단위를 말한다. 마치 이론상 완벽한 ‘가상 큐비트’를 현실에서 만들어내는 과정으로 이해할 수 있는데, 이때 코딩(quantum error-correcting code)과 머신러닝(ML) 등의 기술이 활용되어 오류를 보정하거나 최소화한다.

Willow는 물리적 큐비트 105개로 RCS 성능을 극적으로 끌어올린 것과 더불어, 일부 큐비트를 묶어 ML 모델을 통해 오류율을 임계치(Threshold) 이하로 낮추는 시도를 했다.

여기서 중요한 점은 “논리적 큐비트로 묶는 작업”자체가 현재는 매우 제한적인 수준에서만 실현된다는 것이다. 즉, Willow 발표에서 오류율이 개선된 논리적 큐비트는 2개 내외 수준이며, 이를 수십·수백만 개로 확장하기까지는 상당한 시간이 걸릴 것으로 전망된다.

양자컴퓨터가 안정적으로 작동하기 위해서는 오류 없는(또는 매우 낮은 오류율의) 논리적 큐비트 수가 대폭 늘어나야 한다. 지금까지 기술 발표에서 오류 정정 코드를 적용해 실제 오류율을 낮추는 진전을 이루긴 했으나, 수만~수십만 개 이상의 논리적 큐비트를 확보하기 위해서는 기하급수적으로 늘어나는 물리적 큐비트 수와 복잡도를 모두 다뤄야 한다. 결국, 구글 Willow 같은 연구는 “이론적 가능성에서 실제 실현 단계로 넘어가는 전환점”을 마련했다는 데 의의가 있다.

2. Xanadu의 Aurora 개발: 모듈식 양자 컴퓨팅 시스템의 가능성

캐나다의 양자 컴퓨팅 기업 Xanadu가 개발하는 ‘Aurora’시스템은 광자(Photonic) 기반 큐비트를 활용하여 여러 모듈을 ‘광자 네트워킹’으로 연결하는 방식을 제시한다. 이는 반도체 칩 내에서 초전도 큐비트를 단독으로 늘리는 방식(구글, IBM 등)과 달리, 모듈화와 네트워킹에 초점을 맞추어 확장성을 확보한다는 점에서 큰 특징이 있다.

모듈을 통한 양자 컴퓨팅은 다음과 같은 이점을 가지고 있다.

- 확장성: 물리적 큐비트 수가 늘어날수록 여러 문제(배선, 냉각, 양자 얽힘 유지 등)가 지수적으로 증가하는 반면, 모듈 단위로 분산 배치하면 이 문제를 상대적으로 효율적으로 해결할 수 있다.
- 유연성: 서로 다른 모듈을 교체·조합해가며 다양한 형식의 양자 알고리즘 실험이 가능하다.
- 네트워킹: 광자를 통한 통신은 장거리 전송에도 유리하며, 장비 간 상호 연결성이 높아질수록 ‘분산 양자 컴퓨팅(Distributed Quantum Computing)’의 가능성이 열릴 수 있다.

구글 Willow가 단일 칩 성능과 오류 정정에 집중해왔다면, Xanadu의 Aurora는 ‘큰 시스템을 어떻게 효율적으로 연결할 것인가?’라는 점에 집중하며 확장 가능한 형태의 양자 컴퓨팅 개발에 대한 고민이 이루어 지고 있음을 알 수 있다.

3. QITE 개발: 양자 알고리즘도 더 효율적으로

QITE(Quantum Imaginary Time Evolution)란 양자 알고리즘 분야에서, Imaginary Time Evolution은 양자 상태를 특정 방향으로 ‘진화’시켜 최적화 문제를 풀거나, 물리계의 바닥상태(Ground State)를 효율적으로 추정하는 방법이다. 전통적 알고리즘 대비 양자 특성을 활용해 계산 효율을 높일 수 있지만, 많은 양의 양자 게이트 및 복잡한 회로 구성이 필요하다는 문제가 있다.

IonQ와 미국 오크리지 국립연구소(ORNL)는 QITE 기반 하이브리드 알고리즘을 개발하여, 기존의 QAOA(Quantum Approximate Optimization Algorithm)와 비교했을 때 2-큐비트 게이트를 85% 이상 절감하는 데 성공했다. 이는 노이즈에도 훨씬 강인하고, 양자 컴퓨팅에서 흔히 직면하는 복잡한 조합 최적화 문제를 해결하는 데 있어서 중요한 성과로 평가된다.

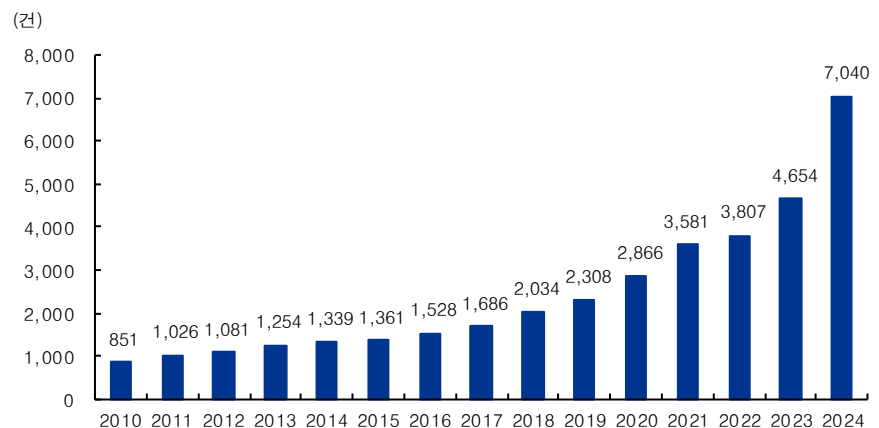
계산에 필요한 큐비트와 게이트 수가 줄어들면, 상대적으로 적은 자원으로도 유의미한 양자 이점을 발휘할 수 있다. 이는 현재 양자 하드웨어의 ‘오류율 문제’, ‘유효 연산 시간 제한’ 등을 극복하는 데 큰 도움이 되며, 향후 양자 알고리즘이 실질적으로 적용될 가능성(예: 재무, 물류, 신물질 탐색 등)을 높여준다.

아직은 초기 단계 이지만, 발전 방향과 속도는 가속화

2024년 들어 양자 컴퓨팅과 관련된 논문 등록 건수가 급격히 늘어나면서, 전 세계적으로 연구와 개발이 빠른 속도로 가속화되고 있다는 점이 주목된다. 아직은 초기 단계이기 때문에 하드웨어 측면에서의 안정적인 논리적 큐비트 확보, 알고리즘 효율성 개선, 그리고 분산 네트워킹 방식의 확장성 확보 등 여러 과제가 산적해 있다. 그럼에도 불구하고 주요 기업과 연구기관이 적극적으로 투자와 연구를 진행함에 따라, 향후 상용화 가능성에 대한 기대감이 점차 높아지고 있다.

특히 오류 정정 기술의 구체적인 진전, 모듈형 시스템을 통한 물리적 제약 완화, 그리고 게이트 사용량을 획기적으로 줄이는 알고리즘 개발이 맞물려 양자 컴퓨팅의 실질적 활용도를 대폭 끌어올릴 가능성이 제시되고 있다. 결과적으로 재무, 물류, 신물질 탐색 등 기존 고전적 방식으로는 난해했던 문제들에 대해 양자우위(Quantum Supremacy)를 실제로 구현할 수 있는 길이 열릴 것이라는 전망이 힘을 얻고 있으며, 이에 대한 논의와 연구도 앞으로 더욱 활발해질 것으로 예상된다.

그림 33. Arxiv에 등록된 'Quantum Computing' 관련 논문 수



자료: Arxiv, IBK투자증권

8. 양자 기술 시장 현황은?

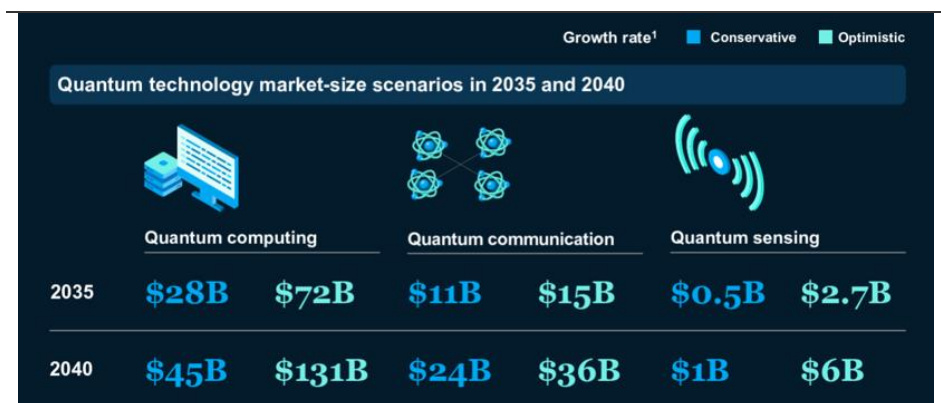
1. 양자컴퓨터 시장 규모

세계 양자 관련 시장
연평균 +19% 이상 성장

맥킨지에 따르면 세계 양자 기술 관련 시장은 2023년 약 90억 달러 규모에서 2040년까지 최대 1,730억 달러 규모로 연평균 +19% 이상 성장할 것으로 전망된다. 양자 기술 시장을 ICT 기준으로 보면 양자 컴퓨팅, 양자 통신 그리고 양자 센싱으로 세분화된다. 양자 컴퓨팅은 2040년까지 1,310억 달러, 양자 통신은 360억 달러, 양자 센싱은 60억 달러 규모로 성장할 것으로 예상되며 양자 컴퓨팅 분야가 약 75.7%의 높은 비중으로 가장 큰 시장을 형성할 것으로 전망되고 있다.

또한 양자 컴퓨팅의 응용 분야에서 파생될 잠재적 경제 가치는 2035년 9,000억~2조 달러에 이를 것으로 전망되며, 향후 10년간 시장의 급속한 성장이 예상된다. 주요 응용 분야로는 금융, 제약 및 헬스케어, 물류 및 공급망, 보안 및 암호화, 재료 과학, 에너지, 인공지능(AI) 및 머신러닝 등이 있으며, 산업 전반에 걸쳐 혁신적인 변화를 가져올 것으로 내다보고 있다.

그림 34. 2035년과 2040년의 양자 기술 관련 시장 규모의 보수적 전망과 낙관적 전망



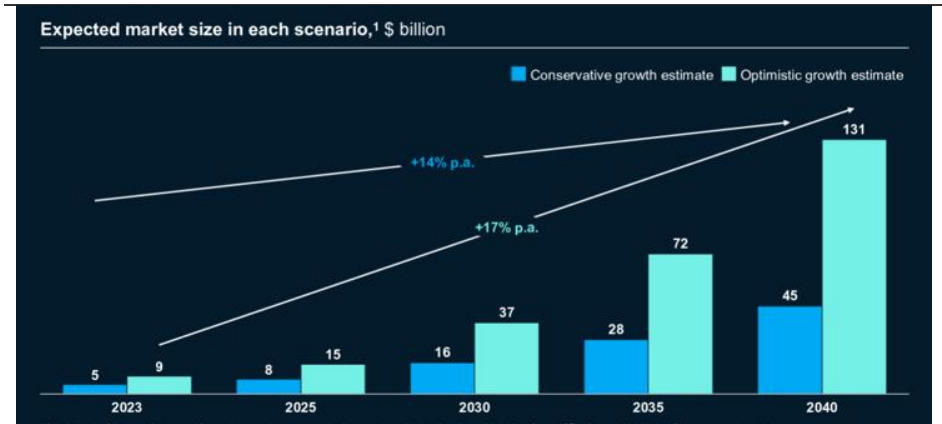
자료: McKinsey Analysis, IBK투자증권

표 11. 양자 기술 ICT 시장 분류

대분류	세부 분류
양자 센싱	중력 센서, 원자 시계, MRI 등
양자 통신	QKD, 위성 통신, 광섬유 통신 등
양자 컴퓨팅	하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 서비스 등

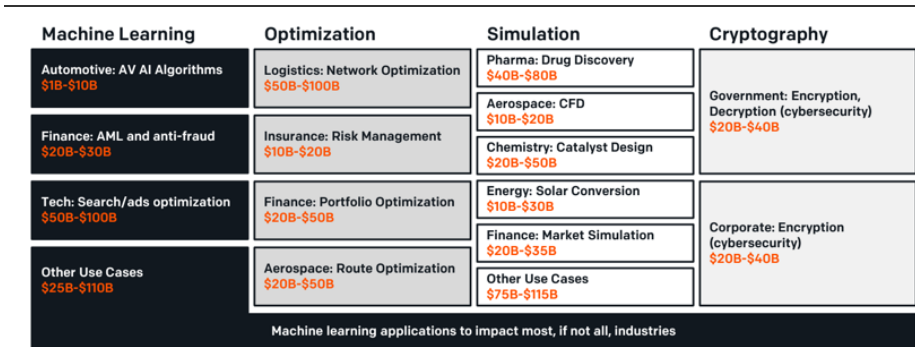
자료: 업계자료, IBK투자증권

그림 35. 2040년까지의 양자컴퓨터 시장 규모의 보수적 전망과 낙관적 전망



자료: McKinsey Analysis, IBK투자증권

그림 36. 기술 성숙도에 따른 양자컴퓨터 응용 분야별 시장 규모 전망



자료: BCG, IonQ, IBK투자증권

주: 전망 주체와 예측 산업이 상이해 시장 규모에 차이가 있음

표 12. 양자 컴퓨팅의 주요 응용 분야

분류	내용
금융	리스크 분석, 포트폴리오 최적화, 옵션 가격 책정
제약 및 헬스케어	약물 개발, 유전자 분석, 분자 시뮬레이션
물류 및 공급망	경로 최적화, 공급망 효율화
보안 및 암호화	양자 키 분배(QKD), 기존 암호화 시스템의 보안성 강화
재료 과학	새로운 소재 및 화합물 개발
에너지	에너지 효율 최적화, 배터리 설계
인공지능(AI) 및 머신러닝	대규모 데이터셋 학습 및 모델 최적화

자료: 업계자료, IBK투자증권

그림 37. 양자 컴퓨팅 기술의 상용화 예상 시나리오



자료: IBK투자증권

2. 빅테크 주도의 양자컴퓨터 생태계 구축

하드웨어, 소프트웨어,
클라우드 서비스 중심의
생태계 확장

양자컴퓨터 시장은 크게 하드웨어, 소프트웨어 그리고 클라우드 서비스 세 가지 밸류 체인으로 구분되며, 이 외에도 응용 분야, 최종 사용자, 서비스 형태 등에 따라 더욱 세분화될 수 있다.

빅테크가 주도하는 양자 생태계는 먼저 하드웨어 측면에서 양자컴퓨터의 물리적 구현 및 양자 프로세서 제작 등 인프라 개발에 집중하고 있다. 동시에 양자 알고리즘, 프로그래밍 언어, 애플리케이션 등 소프트웨어 개발을 통해 양자컴퓨터의 제어 및 활용 효율을 극대화하고 있다.

클라우드 서비스는 기업과 개발자가 양자컴퓨터에 직접 접근할 수 있도록 하거나, 하드웨어를 소유하지 않고도 양자 컴퓨팅 기술을 사용할 수 있도록 지원하여, 전반적인 하드웨어 및 소프트웨어의 접근성을 향상시키는 역할을 한다.

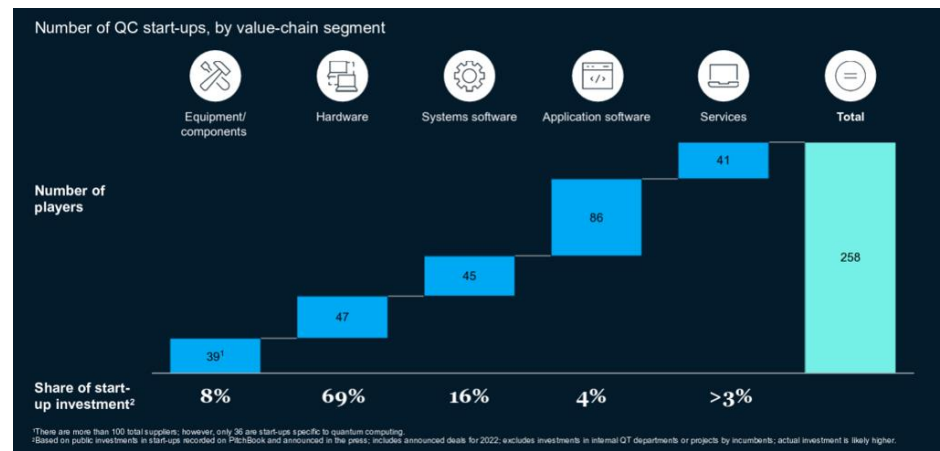
이처럼 양자 생태계는 각 분야가 독립적으로 발전하면서도 상호작용하며 운영된다. 향후 생태계 전반에서 수익을 창출할 수 있는 기업이 유망할 것으로 예상되며, 특히 기존 컴퓨터 대비 차별화된 성과를 낼 수 있는 산업과 협력을 강화하는 기업들의 투자 매력도가 높을 것으로 전망한다.

표 13. 양자컴퓨터의 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 서비스 분류 및 특징

분류	내용	특징	세부 분류
하드웨어	큐비트 구현 기술	큐비트를 구현하는 다양한 기술로, 각 기술은 속도, 정확도, 확장성 측면에서 차이가 있음	초전도 큐비트, 이온 트랩, 광자 기반, 스핀 큐비트, 양자 어닐링, 토폴로지 큐비트 등
	인프라	물리적 환경 및 장비를 통해 안정적이고 효율적인 양자 계산 환경 제공	양자 프로세서, 극저온 냉각 시스템, 양자 네트워크 장비 등
소프트웨어	양자 알고리즘	금융, 물류, 제약 등 다양한 산업 문제를 해결하기 위한 알고리즘 개발	최적화, 시뮬레이션, 머신러닝 등
	프로그래밍 언어	양자 알고리즘을 작성하고 양자컴퓨터와 상호작용하는 소프트웨어 도구	Qiskit, Cirq, PyQuil, OpenQASM 등
	개발 플랫폼 및 시뮬레이터	실제 하드웨어 없이도 양자 알고리즘을 실험할 수 있는 소프트웨어 환경 제공	양자 애플리케이션 개발, 양자 시뮬레이션 등
클라우드 서비스	클라우드 플랫폼	클라우드를 통해 사용자가 하드웨어 및 소프트웨어에 접근하여 양자 컴퓨팅 활용 가능	양자 하드웨어 및 소프트웨어, 클라우드 제공 등

자료: 업계자료, IBK투자증권

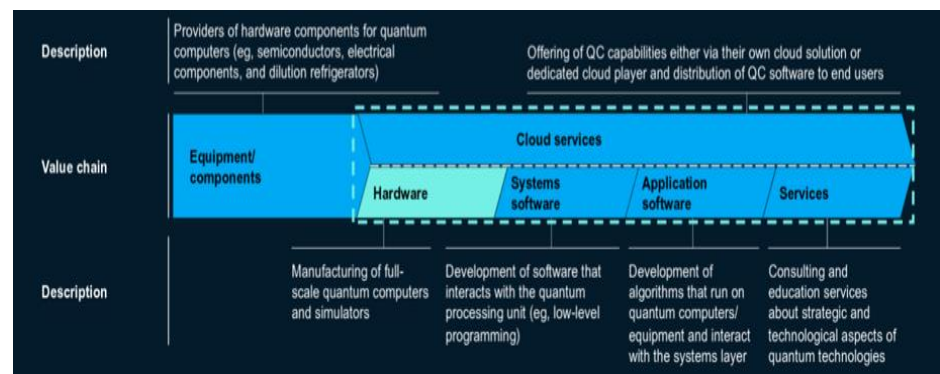
그림 38. 양자 컴퓨팅 시장에서 가장 높은 투자 비중을 차지 하고 있는 하드웨어와 소프트웨어



자료: McKinsey Analysis, IBK투자증권

주: 2022년 이후 공개되지 않은 자료를 포함하면 실제 투자 금액은 더 높을 것으로 파악. 총 합이 100%로 산정되지 않음

그림 39. 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 서비스가 상호적으로 작용하는 양자 컴퓨팅 시스템



자료: McKinsey Analysis, IBK투자증권

3. 국가별 양자컴퓨터 정책 및 투자 현황

미국 VS 중국
양자컴퓨터 왕좌의 게임

양자 컴퓨팅 기술은 미래 첨단 산업과 국가 안보의 핵심 기술로 글로벌 주요 국가들은 이를 전략적으로 육성하기 위해 다양한 정책과 대규모 투자를 진행하고 있다. 그중에서도 미국과 중국은 양자컴퓨터 기술의 선도국으로서 양자컴퓨터 연구와 개발을 활발하게 펼치고 있다.

두 국가의 양자 컴퓨팅 정책과 전략은 방향성에 큰 차이가 있다. 미국은 민간과 공공의 협력을 기반으로 상용화에 초점을 두고 글로벌 동맹국과 기술 협력 관계를 확대하고 있는 한편, 중국은 정부 주도하에 양자컴퓨터 관련 기술 개발에 대한 막대한 투자를 진행, 군사 및 국가 안보 측면에서 독립적인 기술을 전략적으로 활용하고 있다.

최근 미국은 중국의 양자 기술 우위를 차단하고 자국의 기술 주도권을 유지하기 위한 정책을 펼치고 있는데, 2022년부터 바이든 행정부는 양자컴퓨터 관련 부품, 소재, 암호화 장치 등 기술 수출 통제 및 규제를 강화했으며 글로벌 공급망 재편을 통한 중국의존도를 축소하는 등 자국 내 양자 기술 개발을 가속화하고 있다.

2024년 10월에는 미국이 중국의 반도체, 인공지능(AI), 양자 컴퓨팅 등 첨단 기술 분야에 대한 투자를 제한하는 규제를 최종 결정했으며 2025년 1월 2일 발효됐다. 미국의 자본과 노하우가 중국에 군사적 우위를 가져다줄 기술 개발 지원으로 이어지지 않도록 하는 것이 목적이다.

표 14. 미국과 중국의 양자컴퓨터 관련 주요 정책 및 투자 비교

분류	미국	중국
정책 주체	- 민간 주도의 혁신과 정부의 지원 - 주요 기관: NSF, DOE, DARPA, QED-C 등	- 중앙 정부 주도 및 지방 정부 지원 - 주요 기관: MOST, CAS, Hefei 등
주요 법안 및 계획	- National Quantum Initiative Act (2018) : 양자 기술의 국가 전략 수립 - CHIPS and Science Act (2022) : 기술 경쟁력 강화	- 13차/14차 5개년 계획 : 양자 기술을 전략적 우선순위로 설정 - 양자 정보 과학 및 기술 국가 전략
투자 규모	- 10년간 12억 달러 이상 정부 자금 지원 - 민간 기업이 수십억 달러 추가 투자 : Google, IBM, Microsoft 등	- 정부가 100억 위안(약 14억 달러) 투자 - 민간 기업이 연구 개발 참여 : 알리바바, 바이두, 화웨이 등
연구 중점 분야	- 양자컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어 - 양자 알고리즘 개발 - 양자 네트워킹 및 상용화	- 양자 통신(양자 암호화, 위성 통신) - 양자 센서 기술 - 양자컴퓨터 하드웨어
산업화 접근 방식	- 민간 협력으로 상용화 가속화 - 스타트업 및 중소기업 지원 확대	- 정부 주도의 프로젝트 중심 연구 - 대기업 주도 연구개발
국제 협력	- 동맹국(유럽, 일본, 호주 등)과 협력 강화 - 글로벌 기술 표준화 노력	- 러시아 및 개발도상국과 협력 - 독립적인 기술 생태계 구축을 목표
군사적 활용	- 국방부(DOD) 및 DARPA의 프로젝트에 양자 기술 적용 - 국가 안보 관련 연구 지원	- 양자 기술을 국가 안보와 군사적 우위를 위한 전략적 기술로 간주 - 양자 통신 및 암호화 기술 군사 적용
기술의 주요 목표	- 상업적 이용 확대 - 글로벌 경쟁 우위를 위한 기술 표준화	- 군사적/국가 안보 강화 - 독립적 기술 생태계 구축

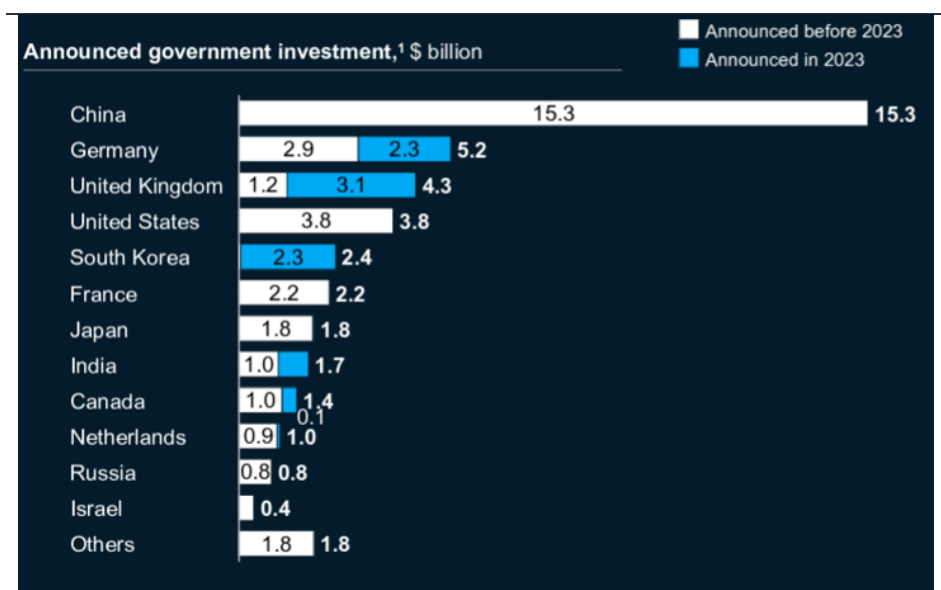
자료: 업계자료, IBK투자증권

표 15. 주요 국가별 양자 관련 기술 전략 및 목표

국가	내용
중국	- 중앙 정부 및 지방 정부 주도의 프로젝트 중심 연구 - 군사적 활용과 국가 안보 기술 개발에 중점
미국	- 양자 기술의 국가 전략 수립과 기술 경쟁력 강화 - Google, IBM 등 민간 협력으로 상용화 가속화
유럽	- Quantum Flagship Program을 통해 10년간 단계적으로 투자 - 독일, 프랑스, 영국이 주요 투자국으로 양자 통신과 양자 센서 기술에 중점
일본	- 정부가 양자 기술 로드맵을 발표하고, 양자컴퓨터 및 통신 인프라 구축에 투자 - NTT, NEC, 도시바 등 대기업과 협력
캐나다	- 양자컴퓨터 연구와 상용화에 중점 - D-Wave, Xanadu 등 세계적 스타트업이 정부 지원을 받고 있음
호주	- Australian Quantum Initiative를 통해 양자 센서 및 양자 컴퓨팅 개발 - 연구 인프라에 대한 장기 투자 계획
한국	- 양자 암호 통신 및 컴퓨팅 연구 중심 - 삼성전자, SK텔레콤, LG전자 등이 정부와 협력하여 기술 개발

자료: 업계자료, IBK투자증권

그림 40. 주요 국가별 정부의 양자 기술 관련 투자 규모



자료: McKinsey Analysis, IBK투자증권

한국, 2035년까지
글로벌 양자 경제 중심
국가로 도약 목표

4. K-양자는 아직

한국의 경우 2019년부터 양자 과학기술 연구개발을 본격화하였으나 선진국들과 비교해 약 5년 이상의 기술 격차를 보이고 있다. 후발주자로서 핵심기술 조기 확보 등 기술 추격을 위한 정부 차원의 투자 필요성이 지속적으로 제기되고 있는 상황이다. 이에 한국은 양자 기술을 미래 전략 산업으로 인식하고, 정부와 민간이 협력하여 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 센싱 분야의 기술 개발과 상용화를 추진하고 있다.

구체적으로 정부는 ‘대한민국 양자 과학기술 비전 및 전략(23.6)’, ‘퀀텀 이니셔티브(24.4)’ 등을 통해 양자 과학 기술 대표 사업인 ‘플래그십 프로젝트’의 추진 방향을 제시하고 2035년까지 총 3조 원 규모를 투자해 글로벌 5대 양자 강국에 진입한다는 목표를 밝혔다.

한편, 2024년 11월에는 국내 최초로 127큐비트 ‘이글(Eagle)’ 프로세서가 탑재된 ‘IBM 퀀텀 시스템 원’을 연세대학교 퀀텀 컴퓨팅 센터에 설치했으며 미국, 독일, 일본, 캐나다에 이어 5번째로 양자컴퓨터의 보유국이 됐다. 연세대학교는 이를 활용해 신약 개발 등 바이오 분야에 활용할 예정으로 밝혔다.

2028년에는 앞서 ‘IBM 퀀텀 네트워크’에 국내 양자 연구 개발 허브(Hub)로 합류한 양자 컴퓨팅 전문기업 한국퀀텀컴퓨팅(KQC)과 협력해 ‘IBM 퀀텀 시스템 투’를 부산에 설치한다고 밝혔다. 국내에서도 양자 컴퓨팅과 바이오 분야에서 세계적 수준의 연구 및 교육을 수행할 수 있는 기반을 마련해 나가는 것으로 해석된다.

그림 41. 우리나라의 양자과학기술 대표 사업 ‘플래그십 프로젝트’의 비전 및 목표

< 비전 및 목표 >			
비전	2030년대 양자기술 선도국 진입		
사업목적	임무지향형 양자과학기술 플래그십 프로젝트 추진으로 선도국 수준의 기술 대도약 및 상용기술 개발역량 확보		
구분	양자컴퓨팅	양자통신	양자센싱
사업 목표	1,000큐비트급 초전도·중성원자 양자컴퓨팅 HW/SW 핵심 기술 및 시스템 개발	양자중계기 기반 한국 최초 얽힘 기반 양자네트워크(초기인터넷) 개발실증	고전한계 극복 양자센서 4대 플랫폼 시스템 검증 산업화
	오류감소 기반의 확장형 양자컴퓨팅 핵심기술 확보	100km급 얽힘 정제 양자중계기 기반의 양자 네트워크(3노드) 실증	세계 Top-Tier 초고분해능 핵심원천기술동양자센서3개이상확보

자료: 과학기술정보통신부, IBK투자증권

9. 양자컴퓨터 상용화를 위한 기업별 차별화 전략은?

1. 양자컴퓨터 하드웨어 구현 기술의 차이

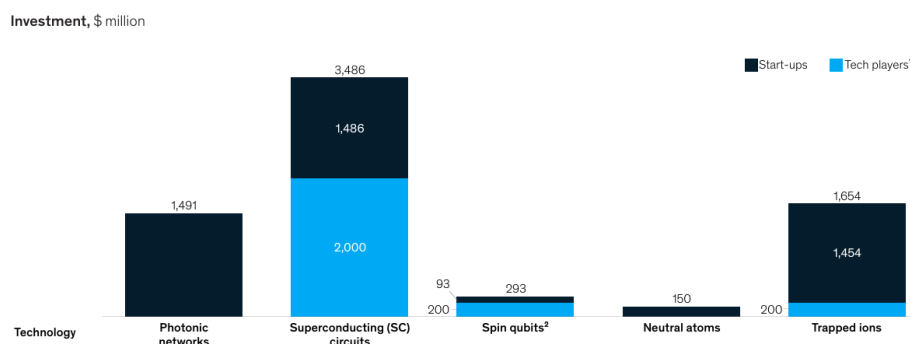
투자 비중이 가장
높은 초전도 큐비트와
이온트랩 큐비트 방식

양자컴퓨터 하드웨어 구현에는 대표적으로 초전도 큐비트(Superconducting Qubits) 방식과 이온트랩 큐비트(Trapped Ion Qubits)방식이 채택되고 있다. 두 방식은 각각의 고유한 장단점을 가지고 있는데, 초전도 큐비트는 전기저항이 없는 초전도 물질을 기반으로 회로 내에서 큐비트를 구현하며, 빠른 연산 속도와 높은 확장성을 제공해 상용화에 가장 근접한 기술로 평가된다. 한편, 빠른 처리 속도와 확장성 측면에서 유리하지만, 극저온 환경을 유지해야 하는 점에서 제작 및 운영 비용이 상대적으로 높다.

이온트랩 큐비트는 전기장을 활용해 개별 이온을 전자기장으로 포획한 후, 레이저를 통해 제어하는 방식으로 동작하며, 높은 정밀도와 안정성이 요구되는 응용 분야에서 강점을 보인다. 한편, 이온트랩 큐비트는 상온에서 작동 가능해 운영 부담이 적은 반면, 시스템 확장성 측면에서는 한계를 보인다.

이 외에도 양자 어닐링, 광자 큐비트, 반도체 스핀 큐비트, 토폴로지 큐비트 등 다양한 하드웨어 구현 방식들이 존재한다. 이처럼 양자 컴퓨팅 기술은 원리, 연산 속도, 확장성, 운영 환경 등 각 기술이 지닌 특성과 장단점에 따라 다양한 응용 분야에서 핵심적인 역할을 수행할 것으로 기대된다.

그림 42. 빅테크와 스타트업이 가장 높은 비중으로 투자하고 있는 초전도 큐비트와 이온트랩 큐비트



자료: McKinsey Analysis, IBK투자증권

표 16. 초전도 큐비트와 이온트랩 큐비트 기술 비교

구분	초전도 큐비트 (Superconducting Qubits)	이온트랩 큐비트 (Trapped Ion Qubits)
기술적 특징	초전도체와 조셉슨 접합 전기적 초전도 현상을 활용 초전도 코일 사용	전기장과 자기장을 이용한 이온 트랩 전기장으로 이온을 가두고 레이저로 조작
결맞음 시간	짧음(수십 마이크로초~밀리초)	김 (초~분 단위)
게이트 오류	높음(10의 -3승)	낮음(10의 -4승 ~ -5승)
연산 속도	빠름 (나노초 수준)	느림 (마이크로초 수준)
운영 환경	극저온 필요	극저온 불필요
확장성	대규모 양자 비트 배열에 유리	다수의 이온 제어가 어려움
장점	빠른 연산 속도 높은 연산 정확도 성숙한 기술	긴 코히어런스 시간 높은 정확도 제어 기술 발달
단점	극저온 환경 필요 높은 제조 비용	레이저 시스템 복잡 대규모 확장이 어려움
주요 사용 기업	IBM, Google, Rigetti	IonQ, Quantinuum

자료: 업계자료, IBK투자증권

양자컴퓨터 상용화의
리더를 찾아서

2. 빅테크와 순수 양자 컴퓨팅 스타트업

양자컴퓨터 시장을 선도하는 주요 빅테크와 순수 양자 컴퓨팅 기업은 각자의 기술적 강점을 기반으로 차별화된 전략을 펼치고 있다. 개별 핵심 기술에 집중하는 전략, 하드웨어, 소프트웨어 그리고 클라우드까지 통합한 풀스택(Full-Stack) 솔루션 제공, 특정 응용 분야에 집중하여 연구 개발을 하는 등 막대한 투자를 진행하며 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

빅테크 중 IBM은 안정적인 양자 하드웨어와 강력한 소프트웨어 생태계를 구축, 전반적인 시스템 안정성을 강조하며 시장을 선도하고 있고, Google은 양자 우월성 증명과 인공지능(AI) 및 머신러닝 기술과의 결합을 통해 차별화된 경쟁력을 확보, 마이크로소프트는 클라우드 기반 양자 컴퓨팅 서비스를 제공하고 있다.

한편, 순수 양자 컴퓨팅 기업 중 IonQ는 이온 트랩 기술을 활용하여 높은 정확도의 논리 연산과 클라우드 서비스 통합을 지원함으로써 정밀도가 요구되는 응용 분야에 주력하고 있으며, Rigetti는 풀스택 양자 컴퓨팅 플랫폼 상용화에 앞장서 기술 생태계 전반을 아우르는 솔루션을 제공하고 있다. 한편, D-Wave는 양자 어닐링 방식을 통해 최적화 문제 해결에 특화된 기술을 바탕으로 시장 내 독자적인 위치를 확보하고 있다. 각 기업의 핵심 기술, 활용 분야, 상용화 단계 및 내재된 리스크 등을 지속적으로 점검해 나가야 한다는 판단이다.

표 17. 양자컴퓨터 관련 주요 기업과 전략

기업명	내용
엔비디아 (NVIDIA)	GPU와 양자컴퓨터 통합, 연구자와 기업 대상 고성능 컴퓨팅 솔루션 제공
마이크로소프트 (Microsoft)	클라우드 중심, 하드웨어 제공업체와 협력, 소프트웨어 개발 툴에 집중
아마존 (Amazon)	클라우드 중심, 하드웨어 파트너십 통해 양자 접근성을 높이고 생태계 확장
알파벳 (Alphabet)	하드웨어 및 알고리즘 개발 집중, '양자 우월성' 입증
인텔 (Intel)	반도체 제조 역량을 활용한 양자 하드웨어 개발, 소형화와 상용화 목표
아이비엠(IBM)	대규모 생태계 조성, 연구자 및 기업 대상 오픈소스 소프트웨어 지원
아이온큐 (IonQ)	이온트랩 기반 양자 컴퓨팅 솔루션 개발, 범용성 높은 접근 방식 제공
리게티 컴퓨팅 (Rigetti Computing)	하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 통합, 초전도 큐비트 기반 양자컴퓨터 제공
디웨이브 쿼텀 (D-Wave Quantum)	어닐링 기반 양자컴퓨터, 최적화 문제 해결 중심
퀀티넘 (Quantinuum)	하드웨어, 소프트웨어 통합 솔루션, 암호학 및 보안 중심 응용 프로그램 개발
퀀텀 컴퓨팅 (Quantum Computing)	소프트웨어와 알고리즘 개발 주력, 실제 응용 가능한 양자 솔루션 개발

자료: 각 사, 언론보도, IBK투자증권

주: 해당 기업들은 종목 선호도 및 추천과 무관함

표 18. 글로벌 양자컴퓨터 관련 주요 기업별 전략

기업	집중 분야	주요 전략 및 포지셔닝	큐비트 구현 방식	주요 활용 분야
IBM	하드웨어, 소프트웨어, 클라우드	- IBM Quantum Network 플랫폼 - Qiskit 오픈소스 프레임워크 제공 - 하드웨어 스케일링과 오류율 감소	초전도	연구기관 및 기업용 도구 개발
Google	하드웨어, 소프트웨어, 클라우드	- 양자 우월성 입증(Willow) - 양자 하드웨어 개발 가속화 - AI와 양자 컴퓨팅 기술 통합	초전도	머신러닝, 최적화, 시뮬레이션
Rigetti	하드웨어, 소프트웨어 클라우드	- Full-Stack 양자 컴퓨팅 플랫폼 - 양자-고전 통합 하이브리드 컴퓨팅 - 양자 회로 설계 최적화	초전도	최적화, 클라우드 연구
IonQ	하드웨어, 클라우드	- 이온 트랩 기술 활용 - 클라우드 통합 및 접근성 확대 - 상용화 응용 사례 개발	이온트랩	금융, 약물 설계, 물질 연구
D-Wave	하드웨어, 소프트웨어	- 양자 어닐링 기술 선도 - 하이브리드 플랫폼 제공 - 응용 최적화에 특화된 시스템 제공	양자 어닐링	최적화, 물류, 공급망 관리
Microsoft	소프트웨어, 클라우드	- 클라우드 플랫폼 확장(Azure Quantum) - 토폴로지 큐비트 연구 - 하드웨어 기업과 협력해 생태계 확장	토폴로지, 이온트랩	클라우드 서비스 확장
Amazon	클라우드	- 클라우드 기반 생태계 구축(AWS) - 다양한 하드웨어 및 소프트웨어 접근 가능 - 하드웨어 기업과 협력해 생태계 확장	양자 시뮬레이션	클라우드 서비스 확장
Quantinuum	하드웨어, 소프트웨어	- 이온트랩 기술 활용 - 하드웨어와 소프트웨어 통합 생태계 구축 - 상용화 가능성 높은 분야에 집중	이온트랩	암호학, 재료 과학, AI
NVIDIA	하드웨어, 소프트웨어	- GPU와 QPU 연산 결합한 하이브리드 기술 - 하드웨어 비종속성(시뮬레이션 도구) - AI와의 융합 가능성	양자 시뮬레이션	양자 시뮬레이션, AI, 연구
Intel	하드웨어	- 실리콘 기반 스핀 큐비트 활용 - 소형화와 상용화 가능한 하드웨어 연구 - 기존 반도체 인프라 활용	스핀(실리콘 기반)	저비용 하드웨어, IoT 통합
Xanadu (중국)	하드웨어, 소프트웨어	- 광자 기반 양자컴퓨터 기술 개발 - PennyLane 소프트웨어 제공 - AI 및 머신러닝 통합	광자	양자 머신러닝과 시뮬레이션
Alibaba (중국)	클라우드, 연구	- 초전도 기술 고성능 양자컴퓨터 개발 - 중국내 양자 클라우드 플랫폼 제공 - 중국 정부의 적극적인 지원	초전도, 광자	클라우드 컴퓨팅, 암호화 연구

자료: 각 사, 업계자료, IBK투자증권



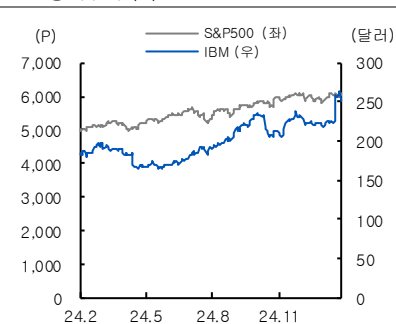
Company Analysis

기업명	투자의견	목표주가
아이비엠 (IBM US)	NR	—
알파벳 (GOOGL US)	NR	—
아이온큐 (IONQ US)	NR	—
리게티 컴퓨팅 (RGTI US)	NR	—
디웨이브 퀀텀 (QBTS US)	NR	—

Not Rated

산업 분류(GICS)	IT 서비스		
상장거래소	New York		
현재가 (2/7, 달러)	252.34달러		
시가총액 (달러)	233십억달러		
시가총액 (원)	340조원		
유동주식수	916백만주		
52주 최고가	265.72달러		
최저가	162.62달러		
주주구성			
블랙록	13.29%		
VANGUARD GROUP	10.04%		
주가상승	1M	6M	12M
상대기준	11%	21%	20%
절대기준	13%	37%	42%

IBM 상대주가 (%)



아이비엠 (IBM US)

세계 최대 규모의 양자 컴퓨팅 생태계 구축

최초의 양자컴퓨터 클라우드 서비스 제공

IBM은 1911년 설립된 글로벌 IT 기업으로 하드웨어, 소프트웨어, 클라우드 컴퓨팅, 인공지능(AI), 블록체인 등 다양한 IT 서비스를 제공함. 메인프레임과 슈퍼컴퓨터 등 대규모 컴퓨팅 장치 산업에서 꾸준히 우위를 점하고 있음. 2016년 최초의 클라우드 기반 양자컴퓨터 플랫폼 IBM Quantum Experience을 출시해 양자 컴퓨팅 상용화의 초석을 마련함.

IBM Quantum Network를 통한 양자 생태계 확장

동사는 연산 능력 극대화를 위한 큐비트 확장과 오류 수정의 균형있는 개발 로드맵을 설정하고, 양자 컴퓨팅 생태계를 구축하고 있음. IBM Quantum Network를 통해 양자컴퓨터의 실질적인 산업 활용 사례를 선도하고 있으며, 280개 이상의 기업 및 연구 기관이 참여해 양자 기술 상용화를 가속화 하고 있음. 특히, 오픈소스 양자 소프트웨어 개발 프레임워크인 퀴스킷(Qiskit)을 통해 연구자와 개발자들이 양자 알고리즘을 설계하고 테스트할 수 있도록 함. 금융, 화학, 물류 등 다양한 분야에서 최적화 및 시뮬레이션 솔루션을 양자 컴퓨팅과 결합하여 제공하고 있음.

소프트웨어 부분 성장과 양자 컴퓨팅 모멘텀 동시 보유

4Q24 매출액은 176억 달러로 컨센서스(175.4억 달러)부합. EPS는 3.92달러로 컨센서스(3.75달러)를 상회하며 실적 호조를 기록함. 이는 Red Hat(+17%, YoY)과 자동화(+16%, YoY) 등 소프트웨어 부분의 약진(+11%, YoY)에 기인함. FY 25 가이드스 매출액 최소 5% 성장, 잉여현금흐름 135억 달러를 제시. 25년에는 Red Hat 성장 가속화, 맞춤형 AI(watsonx)와 하이브리드 클라우드 서비스 확대, 양자 컴퓨팅 하드웨어 성능 향상 및 퀴스킷 생태계 확장 등 주가 상승 모멘텀 다수 존재함.

(단위: 백만달러, 배)	2022	2023	2024	2025F	2026F
매출액	60,530	61,860	62,753	64,966	68,094
영업이익	7,511	8,522	8,384	11,909	12,784
세전이익	7,698	9,094	9,954	12,635	13,747
지배주주순이익	1,639	7,502	6,023	9,941	10,673
EPS(달러)	1.8	8.1	6.4	10.7	11.3
증가율(%)	-62.5	318.8	-20.8	3.3	5.9
영업이익률(%)	12.4	13.8	13.4	18.3	18.8
순이익률(%)	2.7	12.1	9.6	15.3	15.7
ROE(%)	8.0	33.7	24.2	33.2	30.0
PER	19.6	19.0	23.5	23.6	22.3
PBR	5.8	6.6	7.4	7.7	6.6
EV/EBITDA	13.0	14.1	18.9	16.6	15.1

자료: Company data, Bloomberg 컨센서스

최근 성과 및 로드맵

양자 컴퓨팅의 기술 전환 가속화와 응용 가능성 제시

퀀텀 헤론
(Quantum Heron)과
퀀텀 시스템 투
(Quantum System Two)

동사는 2023년 IBM 퀀텀 서밋(Quantum Summit)에서 IBM이 출시한 양자 프로세서 중 가장 뛰어난 성능과 낮은 오류율을 나타낸 IBM 퀀텀 헤론(Quantum Heron)을 선보였다. 퀴스킷(Qiskit) 소프트웨어를 활용해 특정 양자 회로에서 5,000개의 2큐비트 게이트 연산을 정확하게 실행할 수 있다는 점에서 획기적인 발전을 보여줬다.

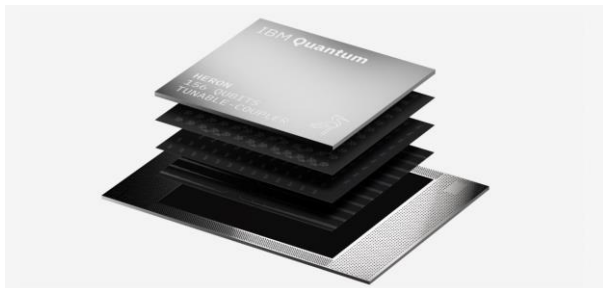
또한 세계 최초의 모듈형 양자컴퓨터인 IBM 퀀텀 시스템 투(Quantum System Two)를 공개하며, 차세대 양자 중심 슈퍼 컴퓨팅 아키텍처를 소개했다. 이 시스템은 3개의 퀀텀 헤론 프로세서와 이를 지원하는 전자 제어 장치로 가동된다. 2024년부터 도입을 시작했으며 첫 번째 시스템은 뉴욕 요크타운 하이츠에 설치되어 있다. IBM의 양자 컴퓨팅 기술이 실질적인 응용 가능성을 높이고, 차세대 기술로의 전환을 가속화하는 중요한 계기가 된 것으로 판단한다.

표 19. IBM의 양자컴퓨터 관련 연혁

연도	내용
2016	IBM Quantum Experience를 통해 클라우드 기반 양자컴퓨터 상용화 시작
2019	세계 최초의 상업용 양자컴퓨터 시스템 IBM Quantum System One 공개
2021	127큐비트이글(Eagle) 공개
2022	433큐비트 오스프레이(Osprey) 공개
2023	1121큐비트 규모의 양자칩 콘도르(Condor)
2024	1386큐비트 규모의 플라밍고(Flamingo) 및 모듈형 양자 프로세서 퀀텀 헤론(Quantum Heron) 공개
2025	4158큐비트 규모의 쿠카부라(Kookaburra) 발표 예고

자료: IBM, IBK투자증권

그림 43. IBM의 양자 프로세서 퀀텀 헤론(Quantum Heron)



자료: IBM, IBK투자증권

그림 44. IBM의 퀀텀 시스템 투(Quantum System Two)



자료: IBM, IBK투자증권

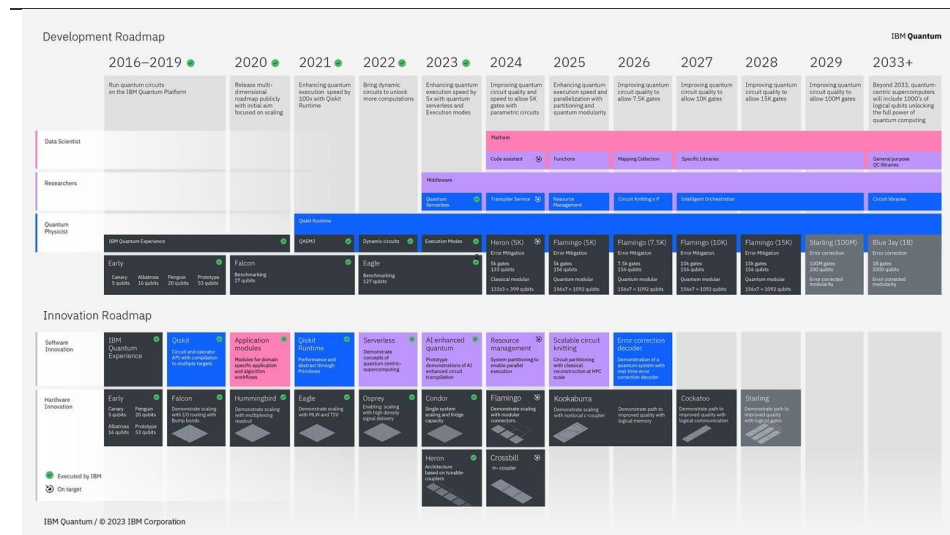
실시간 양자 오류 수정이 가능한 양자컴퓨터 개발

IBM의
양자 컴퓨팅 로드맵

동사는 IBM 퀀텀 서밋에서 차세대 양자 컴퓨팅 시스템 발표와 함께 2033년까지의 양자 기술 개발 계획을 담은 로드맵을 공개했다. 로드맵에 따르면 2029년까지 실시간 오류 수정이 가능한 양자 시스템을 완성하고, 2033년까지 2,000 큐비트 성능의 프로세서를 개발하여 10억 개의 양자 게이트를 실행한다는 목표를 제시했다.

또한 AI 플랫폼 ‘왓슨 x(watsonx)’와 양자 컴퓨팅 소프트웨어 퀵스킷(Qiskit)을 통합하여, 양자 코드 프로그래밍의 자동화를 추진한다고 밝혔다. 생성형 AI 기술을 활용해 양자 소프트웨어의 개발과정의 복잡성을 줄이고, 양자 컴퓨팅 상용화를 가속화하겠다는 전략이다.

그림 45. IBM의 양자 기술 개발 로드맵



자료: IBM, IBK투자증권

Not Rated

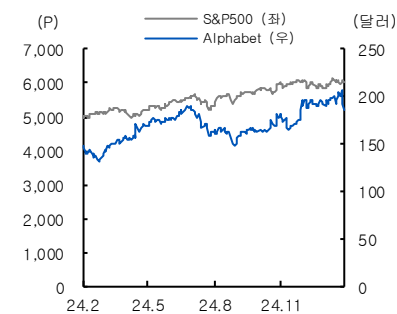
산업 분류(GICS) IT 서비스
상장거래소 NASDAQ

현재가 (2/7, 달러)	185,34달러
시가총액 (달러)	2,270십억달러
시가총액 (원)	3,304조원
유동주식수	5,817백만주
52주 최고가	207.05달러
최저가	130.67달러

주주구성	
VANGUARD GROUP	8.55%
블랙록	7.30%

주가상승	1M	6M	12M
상대기준	-7%	0%	6%
절대기준	-5%	17%	28%

Alphabet 상대주가 (%)



알파벳 (GOOGL US)

윌로우(Willow)로 한 번 더 입증한 양자 우월성

AI와 양자 컴퓨팅의 기술 융합으로 패러다임 전환 주도

알파벳은 2004년 8월 상장된 지주회사로 자회사 구글을 통해 웹검색, 광고, 지도, 기업 솔루션 등 소프트웨어 애플리케이션과 클라우드 컴퓨팅 등 하드웨어 제품을 제공함. 2012년 Google Quantum AI 설립 후 초전도 큐비트 기반 하드웨어 개발, 클라우드 기반 양자 서비스를 확대하고 있음. 방대한 양의 데이터 세트와 AI 역량을 양자 컴퓨팅 기술과 통합하여 양자 컴퓨팅의 상업적 활용 가능성을 집중 연구하고 있음.

양자 우월성 입증에서 초월적 연산력까지 보여준 윌로우

2019년 시커모어(Sycamore)통해 기존 슈퍼컴퓨터로 1만 년이 소요되는 문제를 200초 만에 해결하며 양자 우월성(Quantum Supremacy)을 세계 최초로 입증함. 이후 2024년 12월 동사는 차세대 양자 칩 윌로우(Willow)를 발표하고, 연구 결과를 국제 학술지 네이처에 공개함. 윌로우 칩을 탑재한 양자컴퓨터는 현존하는 가장 빠른 슈퍼컴퓨터로 평가되며, 10자년(10의 25승)이 걸리는 문제를 5분 이내에 풀어내며 양자 컴퓨팅 기술 발전의 가능성을 보여줌. 향후 신약 개발, 핵융합 에너지, 배터리 설계 등 다양한 분야에 적용될 수 있는 잠재력을 제시함.

윌로우가 끌어올린 주가, 높아진 양자 컴퓨팅의 위상

안정적인 재무 구조와 수익 창출 능력을 바탕으로 고성능 양자 프로세서 구현, 클라우드 플랫폼을 기반으로 양자 컴퓨팅 분야에서 경쟁 우위를 확보할 것으로 예상함. 24년 반독점 논란 및 검색엔진 경쟁 심화(AI 검색 도입) 우려로 12MF PER 18배 수준까지 하락하며 상대적 약세를 보였으나, 최근 윌로우 칩 공개와 양자컴퓨터 상용화 기대감은 주가 상승 요인으로 작용함. 향후 동사는 고정밀 큐비트 구현과 오류 정정 알고리즘 개발 집중해 양자 컴퓨팅 생태계 구현을 주도할 것으로 예상됨.

(단위:백만달러,배)	2022	2023	2024F	2025F	2026F
매출액	282,836	307,394	298,590	330,537	358,241
영업이익	74,842	84,293	111,600	128,278	136,979
세전이익	76,386	90,844	145,316	145,316	165,269
지배주주순이익	59,972	73,795	104,224	113,571	127,547
EPS(달러)	4.6	5.8	8.2	9.1	10.4
증가율(%)	-19.4	27.2	38.6	12.6	15.0
영업이익률(%)	26.5	27.4	37.4	38.8	38.2
순이익률(%)	21.2	24.0	34.9	34.4	35.6
ROE(%)	23.6	27.4	31.6	30.2	29.0
PER	18.1	22.8	22.5	20.5	17.8
PBR	4.4	6.1	6.7	5.8	4.7
EV/EBITDA	11.2	16.7	15.2	13.3	11.9

자료: Company data, Bloomberg 컨센서스

최근 성과 및 로드맵

윌로우(Willow)에 더 많은 큐비트를 장착할수록 더욱 감소하는 오류율

윌로우(Willow)로 다시
한 번 입증한 양자 우월성

2024년 12월 9일 구글이 발표한 신형 양자 칩 윌로우(Willow)는 105개의 큐비트로 이루어져 있으며 윌로우 칩을 탑재한 양자컴퓨터는 현존하는 가장 빠른 슈퍼컴퓨터에서 10자년(10의 25승)이 걸리는 계산을 5분 만에 풀어냈다. 윌로우 칩의 핵심은 이전 버전인 시커모어(Sycamore)대비 연산 속도를 대폭 높이면서 오류 발생 가능성을 획기적으로 낮췄다는 점이다. 윌로우는 임계치 이하로 양자 계산을 시연할 수 있는 최초의 칩으로 윌로우에서 사용하는 큐비트가 많을수록 오류가 줄어들고 시스템이 더 양자화 된다는 의미 있는 결과를 발표했다.

2019년 구글은 ‘시커모어’로 양자 우월성(Quantum Supremacy)을 입증한 바 있다. 시커모어는 신뢰도가 높은 양자 로직 게이트로 구성된 54큐비트 프로세서로 슈퍼 컴퓨터로 약 1만 년이 걸리는 문제를 약 200초 만에 해결하며 특정 분야에서 양자 컴퓨팅이 압도적일 수 있다는 가능성을 제시했다. 당시 동일한 문제(RCS, 랜덤 회로 샘플링)를 전통적인 슈퍼 컴퓨터가 해결하는 데는 수천 년이 더 걸릴 것으로 예상했었는데, 윌로우 발표를 통해 양자 컴퓨팅의 상용화 시점을 한 걸음 앞당겼으며, 상업적 활용 가능성을 제시한 사례로 평가받고 있다.

표 20. 양자컴퓨터 관련 연혁

연도	내용
2012	Google Quantum AI 설립
2019	양자컴퓨터 연구를 본격적으로 시작. 54큐비트 양자 칩 Sycamore 개발 Supremacy 라는 논문을 통해 세계 최초로 양자컴퓨터가 슈퍼컴퓨터보다 빠르게 문제 해결 할 수 있다는 것을 입증
2023	국제 학술지 '네이처'에 동시에 여러 개의 큐비트를 사용해(논리 큐비트) 양자 오류를 수정하는 기술을 발표 여러 큐비트를 동시에 사용-연산 도중 발생한 양자 오류 감지-수정을 가능하게 함
2024.10	67큐비트 양자컴퓨터로도 슈퍼컴퓨터의 연산을 뛰어넘는 것을 증명
2024.12	구글의 양자컴퓨터 연구 조직인 '퀀텀 시'가 새로운 양자컴퓨터 윌로우(Willow)를 깜짝 공개 가장 빠른 슈퍼컴퓨터로 10자년(10의 25승)이 걸리던 문제를 단 5분만에 풀 수 있는 능력을 선보임

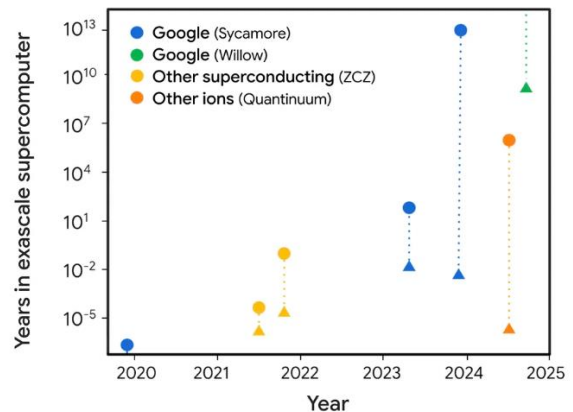
자료: Google, IBK투자증권

그림 46. 구글의 차세대 양자칩 윌로우(Willow)



자료: Google, IBK투자증권

그림 47. 초월적 연산 속도를 보여준 윌로우 칩



자료: Google, IBK투자증권

Google의 양자 컴퓨팅 로드맵

고정밀 큐비트 구현과 오류 정정 알고리즘 개발 집중

구글은 양자 오류(Quantum Error) 문제 해결을 통해 양자 컴퓨팅의 계산 안정성을 높이는 데 주력하고 있다. Google Quantum AI의 핵심 과제는 양자 컴퓨팅 기술의 안정성 향상과 상용화로, 현재 양자컴퓨터로는 노이즈와 오류 정정 문제로 대규모 계산 문제를 해결하는 데 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 구글은 고정밀 큐비트 구현과 오류 정정 알고리즘 개발에 집중하고 있으며, 2030년까지 100만 큐비트의 양자컴퓨터 개발을 목표로 하고 있다.

양자 컴퓨팅의 상용화 전략으로 구글은 Google Cloud Platform(GCP)과 Quantum AI를 결합하여 클라우드 기반 양자 서비스 제공하고 있다. 사용자가 보다 쉽게 양자 컴퓨팅 리소스에 접근할 수 있도록 하며, 시장 접근성을 높이고 있다. 연구기관, 기업, 스타트업 등과 협력하여 양자 알고리즘 및 실제 응용 사례 개발에 나섬으로써 양자 컴퓨팅 생태계를 확장하고 있다.

그림 48. 구글의 양자 컴퓨팅 로드맵



자료: Google, IBK투자증권

Not Rated

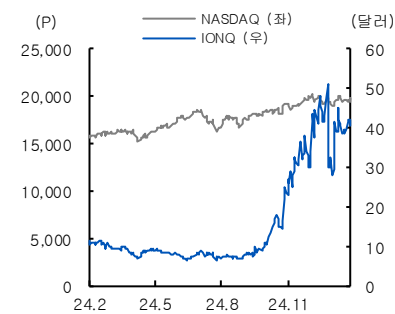
산업 분류(GICS) 기술 하드웨어
상장거래소 New York

현재가 (2/7, 달러) 40,57달러
시가총액 (달러) 8,779백만달러
시가총액 (원) 13조원
유동주식수 176백만주
52주 최고가 54.74달러
최저가 6.22달러

주주구성
VANGUARD 9.82%
블랙록 7.40%

	1M	6M	12M
주가상승			
상대기준	-18%	476%	265%
절대기준	-18%	497%	290%

IonQ 상대주가 (%)



아이온큐 (IONQ US)

이온트랩 기반 양자컴퓨터 상용화에 주력

최초 상장된 순수 양자컴퓨터 기업

순수 양자 컴퓨팅 기업으로는 최초로 2021년 나스닥에 상장된 스타트업으로 2015년 크리스토퍼 먼로와 정상 김에 의해 설립되었으며 메릴랜드주 College Park에 본사를 두고 있음. 기존 극저온(-273.15℃)에서만 가동되던 한계를 넘어 상온에서도 작동되는 이온트랩(Trapped Ion) 기술 기반의 양자컴퓨터 개발에 주력하고 있음.

빅테크와 파트너십 통한 이온트랩 방식 양자 컴퓨팅 상용화

이온트랩(Trapped Ion) 방식은 전자기장을 이용해 이온을 진공 상태로 가두고 레이저를 이용해 제어한 후 이를 큐비트로 활용하는 기술임. 초전도 큐비트 대비 상대적으로 오류율이 낮아 안정적인 연산이 가능함. 동사의 하드웨어 기술을 아마존(AWS), 마이크로소프트(Azure), 구글(Cloud)과 같은 파트너십을 통해 양자컴퓨터를 설치하지 않아도 양자 컴퓨팅 서비스를 이용할 수 있도록 주요 클라우드 플랫폼과의 통합을 통해 이온트랩 방식의 양자 컴퓨팅의 접근성을 높이고 있음.

상업용 양자 컴퓨팅 개발 로드맵 조기 달성 기대

큐비트간 결합이 유연한 이온트랩 방식의 차별화된 기술력과 확장성, 클라우드 서비스를 통한 접근성 확대로 로드맵 조기 달성을 지속할 것으로 예상함. 또한 양자 네트워크 기업 큐비텍(Qubitekk) 인수를 통한 사업 확장을 지속하며 양자 컴퓨팅 산업에서의 영향력은 더욱 커질 것으로 기대됨. 24년에는 미국 양자 관련 최대규모 수주(5,450만 달러)및 추가 파트너십 확보(900만 달러)로 매출액 가이던스를 7,500만 달러에서 9,500만 달러 상향 조정함. 다만, 높은 연구개발비로 인한 순손실 지속과 상용화 본격화 이후 수익 구조 개선이 수반될 것으로 예상됨에 따라 단기적으로 높은 주가 변동성은 불가피할 전망이다.

(단위:백만달러,배)	2022	2023	2024F	2025F	2026F
매출액	11	22	22	41	83
영업이익	-86	-158	-111	-130	-148
세전이익	-49	-158	-131	-131	-125
지배주주순이익	-49	-158	-128	-125	-142
EPS(달러)	-0.3	-0.8	-0.4	-0.6	-0.6
증가율(%)	67.5	-212.0	-217.4	26.3	-11.5
영업이익률(%)	-770.3	-715.7	-514.0	-314.2	-177.6
순이익률(%)	-435.8	-715.8	-591.1	-302.6	-171.1
ROE(%)	-8.4	-30.0	-13.2	-20.9	-34.1
PER	-	-	-	-	-
PBR	1.2	5.3	17.1	21.9	29.3
EV/EBITDA	-4.3	-15.2	-	-	-

자료: Company data, Bloomberg 컨센서스

최근 성과 및 로드맵

양자 관련 최대 규모 국방 프로젝트 진행 및 큐비텍 인수

5,450만 달러 규모
프로젝트 진행 및
파트너십 확대

동사는 2024년 9월 미국 공군 연구소(AFRL)와 5,450만 달러 규모의 양자 네트워킹 기술 개발 계약을 체결했다. 이는 2024년 양자 관련 계약 수주에서 가장 큰 규모이며, 4년에 걸쳐 양자 시스템 확장, 네트워킹, 배포를 가능하게 하는 하드웨어를 설계하고 개발한다는 내용이다.

또한 동사는 지난 11월 양자 네트워킹 기업인 큐비텍(Qubitekk)을 2,200만 달러에 인수했다. 인수를 통해 큐비텍의 118개 미국 및 국제 특허를 포함해 총 600개 이상의 특허를 보유하게 되었다. 큐비텍은 미국 최초의 상업적 양자 네트워크인 EPB 양자 네트워크를 설계하고 구축한 기업으로 이번 인수로 동사는 네트워크 분야로 사업 영역을 확장하고, 상업적 리더십을 확대할 것으로 예상된다.

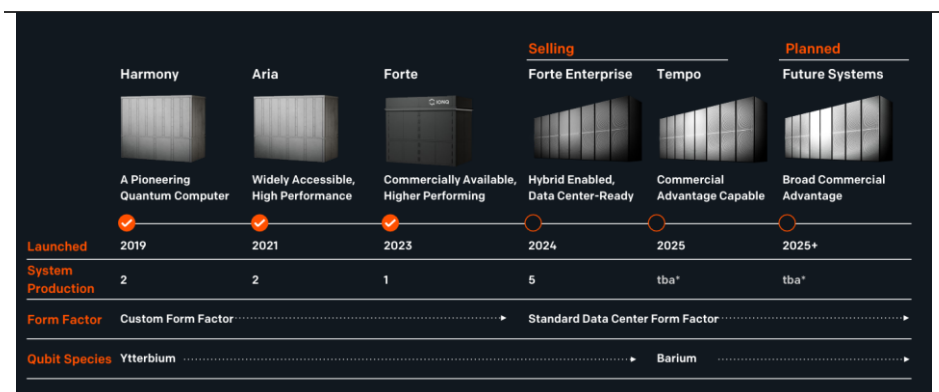
이 외에도 다국적 제약 회사인 아스트라제네카(AstraZeneca)와 신약 개발을 위한 양자 응용 프로그램 개발 센터 설립, 설계 소프트웨어 업체인 앤시스(Ansys)와 협업, 엔비디아의 쿠다(QUDA-Q) 플랫폼과 동사의 하드웨어를 결합하여 반도체 처리 속도를 획기적으로 높이기 위한 양자 컴퓨팅 공동 개발을 진행하는 등 글로벌 기업들과의 파트너십을 통해 성장 기반을 다지고 있다.

표 21. 아이온큐의 양자컴퓨터 관련 연혁

연도	내용
2019	Harmony 출시
2021	AWS와 협업 클라우드 기반 양자 컴퓨팅 서비스 제공
2022	Aria 출시
2023	Forte 출시 및 랙 장착형 엔터프라이즈급 양자컴퓨터 출시 계획 발표
2024	미국 공군과 대규모 계약 체결 및 양자 네트워크 전문 기업 큐비텍(Quibitekk) 인수
2025	#AQ64 시스템 개발 목표, 원시 이중 큐비트 게이트 신뢰도 99.9% 이상 목표

자료: IonQ, IBK 투자증권

그림 49. IonQ의 상업용 양자컴퓨터 제품 포트폴리오



자료: IonQ, IBK투자증권

표 22. 국내 투자자의 IonQ 보관 금액은 25억 4,310만 달러(약 3조 7,000억 원)으로 시가총액의 약 30% 비중

(단위:달러)

순위	종목	보관금액
1	TESLA INC	240억 1,936만
2	NVIDIA CORP	113억 8,236만
3	APPLE INC	46억 3,630만
4	MICROSOFT CORP	31억 2,439만
5	PROSHARES ULTRAPRO QQQ ETF	30억 7,756만
6	ALPHABET INC CL A	26억 4,753만
7	PALANTIR TECHNOLOGIES INC CL A	25억 4,897만
8	IONQ INC	25억 4,310만
9	INVESCO QQQ TRUST SRS 1 ETF	23억 8,861만
10	DIREXION DAILY TSLA BULL 2X SHARES	21억 2,482만

자료: 한국예탁결제원, IBK투자증권

주: 2025년 1월 30일 기준

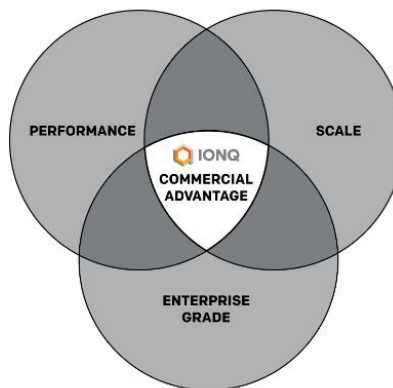
IonQ의 양자 컴퓨팅 로드맵

성능, 확장성, 엔터프라이즈급 솔루션 동시에 충족한 상업적 우위 확보

동사는 성능, 확장성, 엔터프라이즈급 솔루션을 동시에 만족시키는 상업적 양자 컴퓨팅에 집중하겠다는 목표를 밝혔다. 네이티브 게이트 충실도, 아키텍처 설계, 오류 수정을 통한 성능 개선, 멀티코어 운영 및 광자 상호 연결 시스템을 활용한 큐비트 활용 확장, 그리고 기업의 실제 요구 사항을 충족시킬 수 있는 응용 프로그램 개발을 통해 상업적 우위를 확보하겠다는 전략을 공개했다.

또한 동사는 양자 컴퓨팅 상업화의 일환으로 알고리즘 큐비트(#AQ)라는 개념을 통해 양자컴퓨터의 실질적인 문제 해결에 집중하고 있다. 2024년에는 35 알고리즘 큐비트를 1년 앞당겨 달성하는데 성공하며 기술 개발 목표를 조기 달성하고 있으며, 2025년부터 2028년까지 64 알고리즘 큐비트에서 1,024 알고리즘 큐비트로의 확장 목표를 제시했다. 또한 2025년 말까지 네이티브 2 큐비트 게이트 성능을 99.9% 이상으로 향상시키는 것을 목표로 하고, 2026년에는 바륨 큐비트로의 전환을 통한 추가적인 성능 향상을 계획하고 있다.

그림 50. IonQ의 양자 컴퓨팅 상업화 로드맵



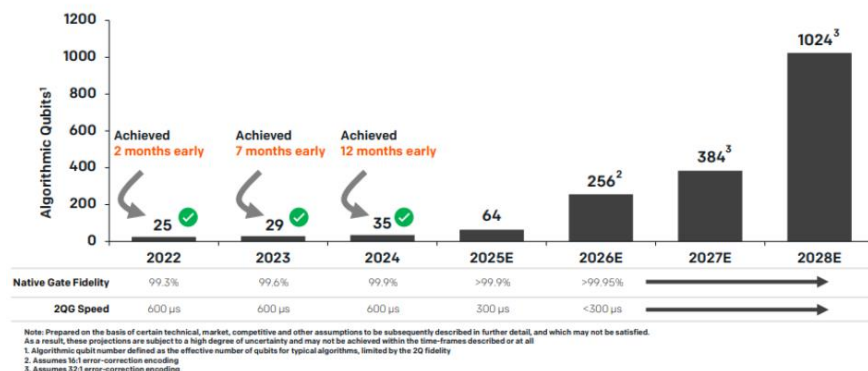
자료: IonQ, IBK투자증권

그림 51. IonQ의 알고리즘 큐비트 로드맵

Consistently Ahead of Technology Roadmap



IonQ delivered Forte's #AQ35 a full 12 months early, and #AQ36 mere weeks later



자료: IonQ, IBK투자증권

Not Rated

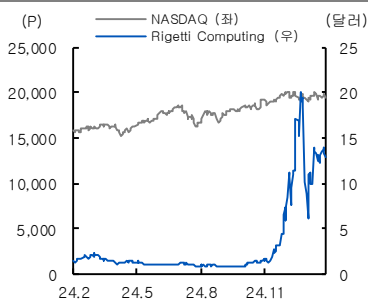
산업 분류(GICS) 반도체&반도체 장비
상장거래소 NASDAQ

현재가 (2/7, 달러)	12.85달러
시가총액 (달러)	3,599백만달러
시가총액 (원)	5,239십억원
유동주식수	262백만주
52주 최고가	21.42달러
최저가	0.66달러

주주구성	
DEER MANAGEMENT	7.71%
BESSEMER	3.85%

주가상승	1M	6M	12M
상대기준	-30%	1531%	1007%
절대기준	-30%	1552%	1032%

Rigetti Computing 상대주가 (%)



리게티 컴퓨팅 (RGTI US)

순수 풀스택(Full Stack) 양자 컴퓨팅 기업

초전도 기술 기반 하이브리드 양자 컴퓨팅 솔루션 제공

리게티 컴퓨팅은 2013년 IBM출신 채드 리게티(Chad Rigetti)에 의해 설립된 풀스택(Full Stack) 양자 컴퓨팅 기업으로 자체 제조시설 Fab-1을 갖추고 있으며, 양자 처리 장치 Quantum Processor Unit(QPU) 설계 및 제조부터 양자 컴퓨팅 서비스 Quantum Computing as a Service(QCaaS), 클라우드 서비스까지 통합 솔루션을 제공함. 클라우드 상에서 양자컴퓨터를 운영할 수 있도록 슈퍼 컴퓨터와 양자컴퓨터가 결합된 하이브리드 양자 컴퓨팅 플랫폼을 제공해 상용화에 기여함.

자체 클라우드 플랫폼을 통한 양자컴퓨터 상용화에 기여

2017년부터 Rigetti Quantum Cloud Services(QCS)를 통해 양자 컴퓨팅을 클라우드 환경에서 활용할 수 있는 플랫폼을 제공하고 있음. 동사의 멀티칩 양자 프로세서(QPU)를 클라우드를 통해 사용할 수 있으며 고전 컴퓨팅 인프라와 통합되어 있음. 이후 한 단계 발전된 형태의 클라우드 플랫폼인 포레스트(Forest)를 통해 국방, 의료, 제조업과 같은 다양한 분야에서 개발자와 기업의 양자 컴퓨팅의 접근성을 높이고 양자컴퓨터 수요 확대에 기여하고 있음.

독자적 기술력과 파트너십으로 생태계 확장

동사는 2016년 세계 최초로 초전도 큐비트 칩의 상업적 제조 시설을 설립, 독자적인 하드웨어 제작 역량을 확보하고 있음. 풀스택 양자 컴퓨팅 솔루션과 멀티칩 아키텍처를 통해 양자 컴퓨팅 시장 내 차별화된 입지를 다질 것으로 기대됨. 24년 말, 출시한 84큐비트의 Ankaa-3 시스템의 QCS 도입, 25년 1분기 아마존(Braket) 및 마이크로소프트(Azure)에 도입될 예정으로 클라우드를 통한 상업용 고객 확대가 예상됨.

(단위:백만달러,배)	2022	2023	2024F	2025F	2026F
매출액	13	12	12	11	16
영업이익	-109	-72	-71	-67	-65
세전이익	-65	-74	-70	-70	-63
지배주주순이익	-72	-75	-70	-57	-55
EPS(달러)	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3
증가율(%)	-12.9	18.6	12.4	38.6	26.9
영업이익률(%)	-832.5	-602.1	-599.6	-604.8	-413.3
순이익률(%)	-545.9	-625.5	-589.1	-510.3	-350.4
ROE(%)	-31.9	-57.8	-48.0	-28.5	-18.1
PER	-	-	-	-	-
PBR	0.6	1.3	17.6	22.5	17.1
EV/EBITDA	0.2	-1.0	-	-	-

자료: Company data, Bloomberg 컨센서스

최근 성과 및 로드맵

전략적 파트너십을 통한 상업용 양자 컴퓨팅 솔루션 확대

클라우드 서비스 Forest를
통한 양자 컴퓨팅 상용화

동사는 고성능 양자 프로세서를 설계 및 제작하여 양자 컴퓨팅 시스템의 핵심인 하드웨어를 공급하는 동시에, 자체 클라우드 기반 플랫폼 포레스트(Forest)를 운영하여 풀스택(Full Stack) 대표 기업으로서 개발자들이 양자 컴퓨팅을 활용한 소프트웨어를 개발할 수 있는 환경을 제공하고 있다.

IBM, Google, Microsoft, Amazon 과는 차별화된 독자적인 양자 컴퓨팅 기술을 개발하는 동시에, 풀스택 기반 양자 컴퓨팅 서비스를 제공하여 정부기관과 다국적 기업들과의 파트너십을 확장하고, 산업 전반에서 활용할 수 있는 실용적인 양자 컴퓨팅 솔루션 구축에 집중하고 있다.

24년 말, 동사는 84 큐비트 Ankaa-3 시스템을 공개하며, 초전도체에 고급 금속 증착 기술을 활용한 84 큐비트 양자 프로세서를 출시했다. 해당 프로세서는 게이트 충실도(Fidelity) 99.5% 이상을 달성하며 연산 신뢰도와 정확성을 대폭 향상시킨 바 있다.

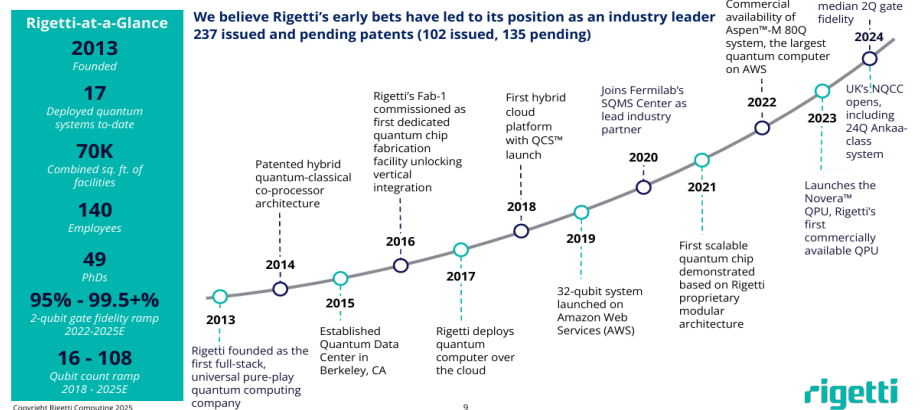
표 23. 양자컴퓨터 관련 연혁

연도	내용
2013	순수 양자 컴퓨팅 기업으로 첫 풀스택(Full-Stack)기업으로 설립
2017	Rigetti Quantum Cloud Services(QCS)출시 PyQuil이라는 Python 기반 오픈소스 도구로 양자 알고리즘 설계와 실행을 간소화 Series A에서 6,400만 달러 투자유치
2019	아마존웹서비스(AWS)를 통해 32큐비트 시스템 론칭
2020	업계 최초로 자체 양자 프로세서(QPU) 제조 생산 시설 Fab-1 설립
2022	SPAC 합병으로 나스닥에 상장. 약 2억 6천 만 달러의 자금 조달
2023	첫 상용 QPU인 노베라(Novera) 출시. 9개의 큐비트를 사용한 QPU로 효율적인 연산 제공
2024	84큐비트 'Ankaa-3' 공개

자료: Rigetti Computing, IBK투자증권

그림 52. Rigetti Computing의 10년간 연혁

Leading Industry Position 10+ Years in the Making



자료: Rigetti Computing, IBK투자증권

Rigetti Computing의
양자 컴퓨팅 로드맵

실용적 양자 컴퓨팅 솔루션 개발 목표

2025년에는 모듈식 시스템 아키텍처를 도입하여 100 큐비트 이상의 양자 컴퓨팅 시스템을 출시할 계획이다. 이를 위해 99.5% 이상의 고충실도를 목표로, 4 개의 9 큐비트 칩을 연결한 시스템을 개발 중이다. 이러한 접근 방식은 큐비트 수를 효율적으로 확장하는 동시에, 연산 신뢰도를 높이는 데 기여할 것으로 예상된다.

2030년까지 4,000 큐비트 이상의 대형 양자컴퓨터 개발 및 상용화하는 것을 목표로 하고 있으며, 대형 연구기관 및 기업과 협업하여 실제 산업에서 활용 가능한 양자컴퓨터를 구축하고 있다. 금융, 제약, 에너지, 기후 등 다양한 분야에서 양자 컴퓨팅 기술이 적용될 수 있도록 지원한다는 계획이다.

그림 53. Rigetti Computing의 양자 컴퓨팅 로드맵

Modular System Architecture Foundation of 2025 Roadmap

2025 System Milestone Roadmap

Qubit count	36	108
Anticipated 2Q Fidelity	2X reduction in error rate from current levels	2X reduction in error rate from current levels
Scaling	4 x 9Q	
Deployment	Anticipated Q2 2025	Anticipated Q4 2025

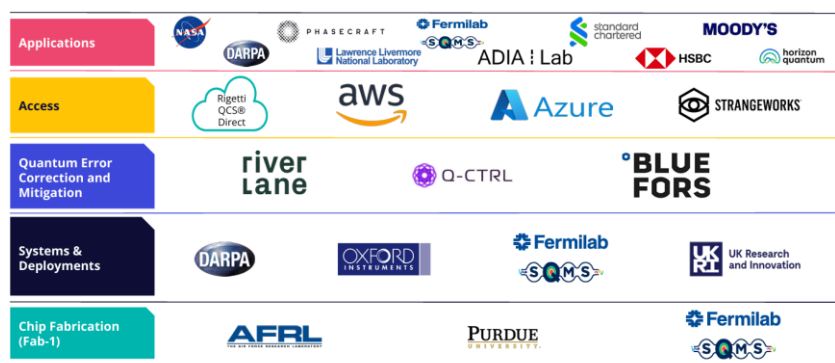
"We believe the anticipated 4-chip 36-qubit system will be the most ambitious multi-chip QPU architecture in the market, and a significant milestone for the company and the quantum computing industry."

- Dr. Subodh Kulkarni
Rigetti CEO

자료: Rigetti Computing, IBK투자증권

그림 54. Rigetti Computing의 다양한 파트너십

Partnerships Help Accelerate Our Path



자료: Rigetti Computing, IBK투자증권

Not Rated

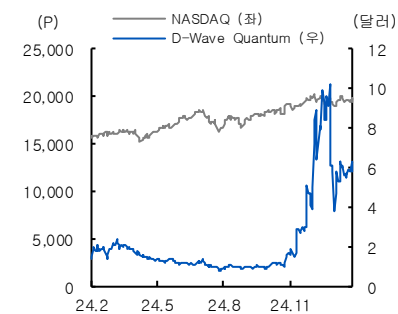
산업 분류(GICS) 소프트웨어
상장거래소 New York

현재가 (2/7, 달러) 5.81달러
시가총액 (달러) 1,310백만달러
시가총액 (원) 1,906십억원
유동주식수 189백만주
52주 최고가 11.41달러
최저가 0.75달러

주주구성
퍼블릭 섹터 펀 9.04%
BDC CAPITAL INC 4.18%

주가상승률	1M	6M	12M
상대기준	-39%	596%	480%
절대기준	-39%	617%	505%

D-Wave Quantum 상대주가 (%)



디웨이브 퀀텀 (QBTS US)

최초의 상업용 양자컴퓨터 공급 기업

어닐링형 양자컴퓨터 솔루션 제공 기업

1999년 설립된 캐나다 회사로 2022년 8월 SPAC 합병으로 나스닥에 상장함. 양자 컴퓨팅 시스템, 소프트웨어, 클라우드 서비스를 개발하고 제공함. 양자 어닐링 기술을 기반으로 최적화 문제 해결에 특화된 양자컴퓨터 솔루션을 제공함. 2011년 세계 최초로 128큐비트 프로세서가 장착된 상업용 양자컴퓨터 'D-Wave One'을 개발함.

최적화 문제 해결에 특화된 양자 어닐링 기술 보유

양자 어닐링(Quantum Annealing) 방식은 특정 알고리즘에 특화된 하드웨어 형태이며 최적의 방법으로 문제를 해결하는 데 특화된 양자컴퓨터 구현 방식임. 이 기술을 통해 에너지를 최소화하는 물류 최적화, 네트워크 문제, 머신러닝 등 조합 최적화 문제 해결에 앞서고 있으며, 2021년 '폭스바겐'과 교통 혼잡 문제를 해결하는 프로젝트를 진행한 바 있음. 이와 같이 응용 가능한 실질적 문제 해결에 중점을 둔 양자 컴퓨팅 서비스를 개발하고 제공함. 최근에는 게이트 방식까지 포트폴리오 영역을 확장하여 양자컴퓨터의 상업적 사용 사례를 확장하고 있음.

클라우드 기반 어닐링형 양자 컴퓨팅 상업용 고객 확대

정부 및 연구기관 중심의 매출 비중이 높은 타 양자 컴퓨팅 업체 대비 금융, 물류, 제조업 등 70개 이상의 다양한 고객사에서 매출이 발생하며, 최적화 문제 중심으로 응용 사례를 확보하고 있음. 클라우드 기반 양자 컴퓨팅 애플리케이션 Leap 배포를 통해 고객들이 어닐링형 양자컴퓨팅 기술을 쉽게 활용하고 연구자와 개발자가 빠른 프로토타입 개발이 가능하도록 지원하고 있음. 상업적 활용도가 높아 빠른 확장 가능성이 기대되며, 24년 예약 매출은 23년 대비 +128% 성장한 2,390만 달러를 기록할 것으로 전망되며 향후 상업용 고객의 매출액 확대가 기대됨.

(단위:백만달러,배)	2022	2023	2024F	2025F	2026F
매출액	7	9	11	9	16
영업이익	-59	-81	-55	-54	-53
세전이익	-54	-79	-56	-56	-52
지배주주순이익	-54	-83	-65	-64	-56
EPS(달러)	-0.5	-0.6	-0.5	-0.3	-0.3
증가율(%)	-161.7	-33.3	-39.5	44.2	19.4
영업이익률(%)	-828.9	-919.7	-524.0	-622.4	-321.5
순이익률(%)	-748.7	-944.5	-614.7	-735.5	-338.5
ROE(%)	-	-	-	-94.1	-21.9
PER	-	-	-	-	-
PBR	-	-	-	10.6	6.9
EV/EBITDA	-2.9	-1.4	-	-	-

자료: Company data, Bloomberg 컨센서스

주요 성과 및 로드맵

클라우드 기반 어닐링형 양자 컴퓨팅 상업적 활용 확대

하이브리드 컴퓨팅
솔루션으로 사용 분야
확장

동사의 주요 양자 컴퓨팅 솔루션으로는 비즈니스를 위해 제작된 5세대 양자 어닐링 컴퓨터인 어드밴티지(Advantage), 실시간 액세스를 제공하는 클라우드 기반 양자 솔루션 서비스인 리프(Leap), 오픈 소스 파이썬 도구 모음 오션(Ocean) 그리고 가장 최근 출시된 리프 퀀텀 런치패드(Leap Quantum LaunchPad)가 있다.

리프 퀀텀 런치패드는 클라우드를 통해 양자 컴퓨팅 서비스를 제공하는 프로그램으로 동사는 양자 컴퓨팅 인프라를 먼저 체험한 후 유료 버전으로 전환을 고려할 수 있도록 3개월 무료 평가 버전으로 제공한다. 기업과 연구 기관이 실제 문제 해결에 양자컴퓨터를 체험해 볼 수 있는 환경을 조성하고 차후 고객이 자사의 기술을 도입할 수 있도록 한 상용화 전략으로 판단된다.

표 24. 양자컴퓨터 관련 연혁

연도	내용
2011	세계 최초의 상용 양자컴퓨터인 D-Wave One 시스템 출시
2013	D-Wave Two 시스템 출시. NASA와 Google이 이 컴퓨터를 도입하며 양자 연구 시작
2015	D-Wave 2X 시스템 출시
2017	D-Wave 2000Q 시스템 출시
2019	D-Wave 2000Q LN 시스템 출시
2020	Advantage 시스템 발표. 큐비트 수와 연결성 대폭 증가. 양자 하이브리드 컴퓨팅을 클라우드 서비스로 제공하여 일반 기업도 사용 가능하게 함
2022	Advantage Performance 시스템 출시. 양자 게이트 모델 연구 병행 계획 발표
2024	Advantage 2 시스템 출시
2027	Advantage Performance 3 시스템 출시 예정

자료: D-Wave Quantum, IBK투자증권

그림 55. D-Wave Quantum의 양자 컴퓨팅 솔루션과 고객사



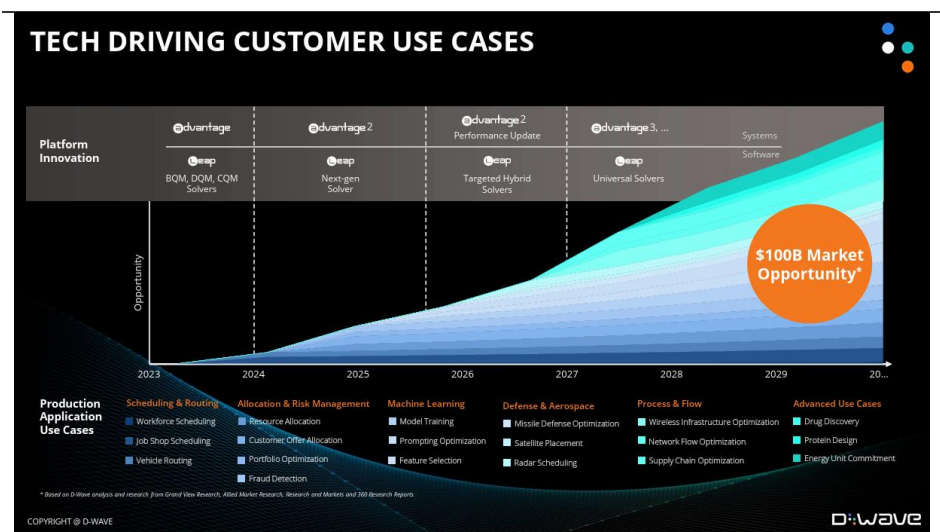
자료: D-Wave Quantum, IBK투자증권

양자 어닐링 기술을 통한 최적화 문제 해결에 주력

D-Wave Quantum의 양자 컴퓨팅 로드맵

동사는 양자 어닐링 기술을 지속적으로 발전시키면서, 산업 적용 가능성을 극대화하는 전략을 추진하고 있다. 타 기업들이 범용 양자 컴퓨팅(Universal Quantum Computing)에 집중하는 반면 동사는 양자 어닐링을 통한 최적화 문제 해결에 특화되어 있다. 동사는 이러한 최적화 문제 해결 기술력을 기반으로 머신러닝, AI, 금융, 에너지, 물류 등 다양한 산업에서 양자 컴퓨팅의 실질적 활용을 확대해 갈 것으로 전망한다.

그림 56. D-Wave Quantum의 양자 컴퓨팅 로드맵



자료: D-Wave Quantum, IBK투자증권

Appendix 1. 한눈에 읽는 양자컴퓨터

양자 컴퓨팅이란?

쉽게 이해하는
양자컴퓨터

양자 컴퓨팅(초고속 연산)은 양자 역학의 원리를 활용하는 차세대 컴퓨터 기술로 양자 현상에 기반한 하드웨어 및 알고리즘을 비롯한 특수 기술을 사용하여 기존 컴퓨터나 슈퍼 컴퓨터가 해결할 수 없거나 충분히 빠르게 해결할 수 없는 복잡한 문제를 해결하는 기술이다. 양자가 가진 중첩, 얽힘, 측정 등의 특성을 활용하여 기존 암호화 기술의 한계를 극복하고 더욱 강화된 보안을 제공하는 기술로 인류가 구현할 수 있는 가장 파워풀한 ‘계산기’라 할 수 있다.

양자컴퓨터는 어떻게 작동될까?

양자컴퓨터는 정보 처리 단위로 큐비트(Qubit)를 사용하며, 이를 통해 병렬 연산과 복잡한 계산을 수행할 수 있다. 중첩을 통해 큐비트가 0과 1의 상태를 동시에 가지며 병렬로 계산을 수행하고, 얽힘으로 큐비트 간 강한 연결을 만들어 협력적으로 연산한다. 간섭을 통해 원하는 결과를 강화하고 불필요한 값을 제거하여 최적의 문제 해결을 도출하고, 측정을 하면 중첩 상태가 무너지고 확률적으로 하나의 값으로 결정된다.

양자컴퓨터가 더 빠른 이유는?

양자컴퓨터에 사용되는 쇼어 알고리즘(소인수 분해), 그로버 알고리즘(검색)과 같은 양자 알고리즘은 복잡한 문제에 대해 다차원 계산 공간을 만드는 새로운 접근 방식을 적용하여 기존 컴퓨터보다 훨씬 더 빠르고 효율적인 문제 해결이 가능하다.

양자컴퓨터는 어디에 사용될까?

양자컴퓨터는 화학, 제약, 의료, 금융, 물류 등 다양한 산업 분야에 응용되어 생산성을 높이고 새로운 비즈니스 모델을 창출하는 데 사용된다. 특히, 양자컴퓨터 기술은 조합 최적화, 확률 계산, 검색 문제 등 경우의 수를 적용할 수 있는 영역에서 더욱 유용하게 활용될 수 있다. 또한 세계 각국은 양자 기술을 국가 안보의 핵심 기술로 인식하고 미래 첨단 기술 패권을 차지하기 위해 국가 차원의 연구 개발과 대규모 투자를 진행하고 있다.

양자컴퓨터의 한계와 숙제?

양자 시스템은 외부 환경에 매우 민감해 양자컴퓨터의 안정적 작동을 위해서는 온도, 진동, 자기장 등 환경 조절이 필요하다. 이 외에도 양자 오류 개선, 양자 알고리즘 개발, 인프라 구축 등 상용화를 위해 해결해야 할 과제들이 남아있다.

Appendix 2. 양자컴퓨터 관련 용어 정리

구분	용어	내용
기본 개념	큐비트(Qubit)	양자컴퓨터에서 정보를 표현하는 기본 단위로, 0과 1을 동시에 표현 가능한 양자 상태
	코히어런스(Coherence)	큐비트가 양자 상태를 유지할 수 있는 시간
	디코히어런스(Decoherence)	큐비트의 양자 상태가 외부 간섭을 받아 깨지는 현상
	양자 중첩(Superposition)	큐비트가 동시에 여러 상태(0과 1)에 존재할 수 있는 현상
	양자 얽힘(Entanglement)	두 개 이상의 큐비트가 상호 의존적인 상태를 형성하여 하나를 측정하면 다른 것도 결정되는 현상
	양자 상태(Quantum State)	큐비트의 현재 상태를 나타내는 정보
	브라-켓 표기법(Bra-Ket Notation)	양자 상태를 표현하는 수학적 표기법
	양자 확률 분포	큐비트 측정 시 발생하는 확률 분포
	양자 측정	큐비트의 양자 상태를 측정하여 고전적 정보로 변환하는 과정
	양자 잡음(Quantum Noise)	큐비트에 영향을 미치는 외부 요인
	열 잡음(Thermal Noise)	열로 인해 발생하는 잡음으로 큐비트 성능에 영향을 줌
	양자 중첩 해제	중첩 상태가 깨지고 특정 상태로 전환되는 현상
	게이트 오류율	양자 게이트를 사용할 때 발생하는 오류 확률
	리드아웃 오류	큐비트 측정 시 발생하는 오류
	양자 오류율	양자 연산 중 발생하는 오류의 비율
	양자 복잡도	양자 알고리즘의 계산 복잡도를 나타내는 척도
	양자 우위(Quantum Supremacy)	양자컴퓨터가 고전 컴퓨터보다 특정 작업에서 우월함을 보여주는 개념
	NISQ 컴퓨팅	'Noisy Intermediate-Scale Quantum'의 약자로, 잡음이 있는 양자컴퓨터의 초기 상태를 의미
소프트웨어	게이트(Gate)	양자 연산을 수행하는 논리 장치
	양자 게이트(Quantum Gate)	큐비트 상태를 변경하는 양자 논리 게이트
	하다마드 게이트(Hadamard Gate)	큐비트를 중첩 상태로 만드는 양자 게이트
	CNOT 게이트	두 큐비트의 얽힘을 생성하는 제어-Not 게이트
	양자 회로(Quantum Circuit)	여러 양자 게이트가 연결된 회로
	양자 오류 수정	디코히어런스를 방지하기 위해 오류를 수정하는 기술
	양자 시뮬레이션	특정 시스템을 모방하여 양자 계산을 사용하는 기법
	양자 컴파일러	양자 알고리즘을 실행 가능한 양자 회로로 변환하는 소프트웨어
	양자 디버깅	양자 알고리즘에서 오류를 분석하고 해결하는 과정
	양자 통신	양자 얽힘과 암호화를 사용하여 데이터를 전송하는 기술
	양자 키 분배(QKD)	양자 암호화를 사용해 안전하게 키를 분배하는 기술
	양자 프로그래밍 언어	양자 알고리즘 작성을 위한 전용 언어 (예: Q#, Qiskit)
	양자 컴퓨팅 프레임워크	양자 컴퓨팅을 구현하기 위한 소프트웨어 툴킷 (예: Cirq, TensorFlow Quantum)
	양자 클라우드 서비스	클라우드를 통해 양자 컴퓨팅을 제공하는 서비스 (예: IBM Quantum, Amazon Braket)
	양자 네트워크	양자 상태를 전송하거나 공유하기 위한 네트워크 기술
	양자 시뮬레이션	특정 시스템을 모방하여 양자 계산을 사용하는 기법
	양자 컴파일러	양자 알고리즘을 실행 가능한 양자 회로로 변환하는 소프트웨어
알고리즘	양자 알고리즘	양자컴퓨터에서 실행되는 알고리즘
	쇼어 알고리즘(Shor's Algorithm)	소인수분해를 효율적으로 수행하는 양자 알고리즘
	그로버 알고리즘(Grover's Algorithm)	비정렬 데이터에서 검색 문제를 해결하는 양자 알고리즘
하드웨어	큐비트 아키텍처	큐비트를 배치하고 연결하는 하드웨어 구조
	양자 어닐링(Quantum Annealing)	최적화 문제를 해결하기 위해 설계된 양자컴퓨터의 동작 방식
	초전도 큐비트	초전도 재료로 만든 큐비트
	이온 트랩 큐비트	전기장으로 이온을 가두어 만드는 큐비트
	광자 큐비트	빛(광자)을 이용해 정보를 처리하는 큐비트
	스핀 큐비트	전자의 스핀 상태를 기반으로 한 큐비트
	톱올로지 큐비트	위상학적 특성을 활용한 큐비트로, 높은 오류 내성이 특징
	양자 메모리	양자 상태를 저장하는 기술
	양자 하드웨어	양자컴퓨터를 구성하는 물리적 장치
	양자 상태 제어	큐비트를 원하는 상태로 조작하는 기술
수학적 개념	파울리 행렬(Pauli Matrices)	양자 연산을 표현하는 수학적 행렬
	밀도 행렬(Density Matrix)	혼합 상태를 표현하는 양자 역학적 도구
	힐버트 공간(Hilbert Space)	양자 상태가 존재하는 수학적 공간

자료: IBK투자증권

Compliance Notice

동 자료에 게재된 내용들은 외부의 압력이나 부당한 간섭없이 본인의 의견을 정확하게 반영하여 작성되었음을 확인합니다.
동 자료는 기관투자자 또는 제3자에게 사전 제공한 사실이 없습니다.
동 자료는 조사분석자료 작성에 참여한 외부인(계열회사 및 그 임직원등)이 없습니다.
조사분석 담당자 및 배우자는 해당종목과 재산적 이해관계가 없습니다.
동 자료에 언급된 종목의 지분을 1%이상 보유하고 있지 않습니다.
당사는 상기 명시한 사항 외 고지해야 하는 특별한 이해관계가 없습니다.

종목명	담당자	담당자(배우자) 보유여부			1%이상 보유여부	유가증권 발행관련	계열사 관계여부	공개매수 사무취급	IPO	회사채 지급보증	중대한 이해관계	M&A 관련
		수량	취득가	취득일								
해당 사항 없음												

투자의견 안내 (투자기간 12개월)

종목 투자의견 (절대수익률 기준)			
매수 15% 이상	Trading Buy (중립) 0%~15%	중립 -15%~0%	축소 -15% 이상 하락
업종 투자의견 (상대수익률 기준)			
비중확대 +10% ~	중립 -10% ~ +10%	비중축소 ~ -10%	

투자등급 통계 (2024.01.01~2024.12.31)

투자등급 구분	건수	비율(%)
매수	132	91.7
Trading Buy (중립)	7	4.9
중립	5	3.5
매도	0	0