

Quantum 시리즈 25-1

양자 컴퓨팅 기술 발전의 전략적 혁신 그리드

허필선·석왕헌·이주연·이종용

본 보고서는 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 기본사업인
“국가 지능화 기술정책 및 표준화 연구”를 통해 작성된 결과물입니다.
양자(Quantum) 분야는 「양자 컴퓨팅의 경쟁과 협력을 통한 발전」이라는
주제 아래 총 3권으로 구성된 시리즈로 발간되었습니다.



목 차 C O N T E N T S

Executive Summary

I. 양자 컴퓨팅, 발전의 가속	1
1. 퀀텀 시대의 도래	1
2. 양자 컴퓨팅의 부상	2
3. 분석 내용 및 프로세스	4
II. 양자 컴퓨팅 경쟁 구도	5
1. 컴퓨팅 패러다임 경쟁	5
2. 큐비트 구현 기술 경쟁	7
3. 산업 가치사슬 경쟁	10
III. 양자 컴퓨팅의 기술 발전 방향	13
1. 파괴적 기술 혁신	13
2. 양자 컴퓨팅의 기술 발전 단계	14
3. 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력	16
4. 양자 컴퓨팅의 발전 시나리오	23
IV. 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 정책 제언	33
1. 요약 및 결론	33
2. 정책적 시사점	34
참고문헌	36
<부록1> 양자 컴퓨팅의 기술 경쟁 및 발전에 관한 조사 설문지	39
<부록2> 전문가 설문조사 결과 데이터 - 방식/유형/시기 분포	49
<부록3> 전문가 설문조사 결과 데이터 - 방식별 유형 & 유형별 방식	50



Executive Summary

양자 컴퓨팅, 발전의 가속

○ 퀀텀 시대의 도래

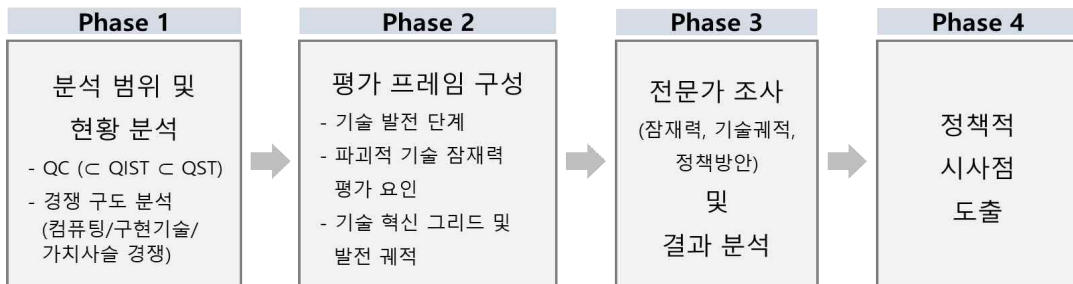
- 정보 시대 패러다임은 아날로그 → 디지털 → 퀀텀 시대로 변화해 왔으며, 시대별 특징은 다음과 같음
 - (아날로그 시대: 전통 물리 기반의 계산) 자연 현상을 연속적인 수학 모델로 설명하고 아날로그 장비 사용
 - (디지털 시대: 제1차 양자혁명 - 1st Quantum Revolution) 양자역학의 원리를 바탕으로 트랜지스터, 레이저, MRI, 반도체 기술이 발전하였으며, 정보는 이진 상태(0과 1)로 정형화되어 처리 및 저장되고, 컴퓨터, 통신, 센서 산업이 급격히 성장
 - (퀀텀 시대: 제2차 양자혁명 - 2nd Quantum Revolution) 양자의 ‘행동 양식’ 자체(중첩, 얽힘, 간섭 등)를 정보처리에 직접 활용하면서 양자 컴퓨팅, 양자 센서, 양자 통신 등의 기술이 본격적으로 개발·상용화 단계로 진입하는 중이며, 기존 디지털 시스템으로는 풀 수 없는 문제(예: 분자 시뮬레이션, 최적화 문제)를 해결할 수 있는 잠재력 보유

○ 양자 컴퓨팅의 부상

- 양자정보과학기술(Quantum Information Science and Technology, QIST)은 양자역학 원리에 기반하여 정보를 생성·처리·전달하는 차세대 정보기술 분야로, 기존 고전 정보과학과 근본적으로 다른 패러다임을 형성
 - 양자정보과학기술은 정보 보안(양자 통신), 센서 정밀도(양자 센싱) 및 계산 속도(컴퓨팅)등에서 고전(classical) 기술이 도달할 수 없는 수준의 성능 향상을 제공할 것으로 기대
 - 양자정보과학기술(QIST)은 국가 안보, 경제, 산업기술 경쟁력의 핵심 자산으로 인식되며, 공공 및 민간 부문 모두에서 적극적인 투자를 진행 중
 - 특히, 양자 컴퓨팅 분야는 Google, IBM, Intel, Microsoft 등 글로벌 빅테크 기업들이 자체 H/W 및 S/W 플랫폼을 개발하며 경쟁 중이고, 클라우드 양자 서비스도 본격화
- 양자 컴퓨팅은 QIST의 핵심 허위 분야로, 양자 중첩과 얽힘 등 양자 현상을 활용하는 차세대 계산 패러다임
 - QIST는 양자 정보 이론(QIT)과 응용 기술(컴퓨팅, 통신, 센싱)의 통합적 발전을 지향하며, 양자 컴퓨팅이 가장 복잡하고 기술적 난이도가 높은 분야로 평가됨
 - 양자 컴퓨팅 개발을 위해서는 큐비트 구현 기술, 오류 보정, 양자 소프트웨어, 양자 알고리즘 등 QIST의 다양한 구성 요소 간 유기적 연계와 융합 연구가 필수적
- 양자 컴퓨팅의 부상은 단순한 신기술 유행이 아니라, 고전 컴퓨팅의 성능 향상 둔화로 인해 새로운 계산 패러다임(computational paradigm)의 수요가 확대된 결과

○ 분석 내용 및 프로세스

- 고전 컴퓨팅과 양자 컴퓨팅은 경쟁(competition) 또는 협력(cooperation)의 관계를 가지며 발전하는 가운데, 컴퓨팅 방식의 진화 또는 전이 관점에서 그 과정을 분석·전망할 필요
 - 양자 컴퓨팅이 발전하면서 궁극적으로 고전 컴퓨팅을 완전 또는 일부 대체할 것인가, 보완재로서 지원하는 수준에 머물 것인가, 각자의 영역에서 공존할 것인가 등 기술 발전의 시나리오가 다양
- 본 연구는 양자 컴퓨팅이 고전 컴퓨팅을 뛰어넘어 시장 및 산업 구조적 변화를 초래하여 파괴적 기술로 발전할 것인지에 대해 그 잠재력을 평가하고, 관련 정책 수단을 검토함
 - 더불어 양자 컴퓨팅 기술 발전의 다양한 궤적(trajjectory)을 범용성(universality)과 대체성(substitutability)을 축으로 하는 기술 혁신 그리드(grid) 상에서 전망한 후, 궤적별 특성 및 정책 방안 등을 분석
 - 양자 컴퓨팅 기술 발전의 분석을 위한 연구 프로세스는 다음과 같이 크게 4단계로 구성



< 분석 프로세스 >

📖 양자 컴퓨팅 경쟁 구도

- (양자 컴퓨팅 분야의 성장) 기업, 투자 및 논문/특허 등 해당 분야의 성장을 보여주는 다양한 지표의 수치가 큰 폭으로 확대되고 있으며, 이는 산업의 역동성 증가로 이해 가능
- (양자 우월성 달성 경쟁) '19년 구글의 양자 우월성 달성 발표 이후 여러 기업들이 다양한 기술 방식에서도 성과를 발표하는 등 기술 경쟁이 본격화
 - (기술 성능 경쟁) 아직 특정 구현 방식이나 기업이 기술적으로 뛰어나다고는 볼 수 없으며, 이는 양자컴퓨팅 기술 발전이 초기 단계로 지배적 기술이 없는 경쟁적 상황을 보여줌
 - (기술 성능 전망) '30년경에는 검증 가능한 양자 오류 정정 기술이 적용된 수천~수백만 개 물리 큐비트 규모의 논리 큐비트 기반 양자컴퓨터가 출현할 것으로 예상
- (가치사슬 경쟁) 각 계층이 밀접하게 연결된 상호 의존적 구조이며, 양자 기술이 연구 단계를 넘어 실용적 가치를 창출하는 국면으로 발전하면서 가치사슬 내 경쟁과 협력이 가속화
 - 반도체 산업이 수직통합에서 전문화된 세부 영역으로 계층화되면서 발전하였으나, 양자 컴퓨팅은 산업 초기 단계부터 등장(GQF, 2025.7)
 - 양자 컴퓨팅 산업은 초기 형성 단계부터 하드웨어 및 큐비트 제조 기업, 오류수정 담당 미들웨어 기업, 도메인별 솔루션 개발 기업 등이 등장하면서 전문화 구조로 발전

📖 양자 컴퓨팅의 기술 발전 방향

🕒 양자 컴퓨팅 기술 발전 단계

- 양자 컴퓨팅은 Gartner의 하이퍼 사이클(Hype cycle) 상에서 '환멸의 계곡(Trough of Disillusionment)'으로 넘어가는 중으로 기대감이 점차 현실감으로 전이되기 시작(Gartner, 2024.7)
 - 기술 성숙도 단계(maturity levels)는 실험실 기반의 배아 단계(Embryonic)에서 이제 막 벗어나 초기 단계(Emerging)로 진입하는 상황으로 평가
- S-곡선 관점에서는 양자 컴퓨팅이 현재 초기 단계인 도입기(introduction)에 해당
 - 학계와 산업계는 '30년 이후에야 진정한 양자 우위(Quantum advantage) 및 실용 단계인 성장기에 진입할 수 있을 것으로 예상하고 있음
- 양자 컴퓨팅 분야에서 통용되는 구분에 따르면 '20년대 초반 이후부터 소위 NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)* 시대에 접어든 것으로 평가
 - * 아직 완전한 양자 오류 정정이 구현되지 않은 상태의 양자 컴퓨터들을 지칭(Preskill, 2018)
 - 오류율이 높은 수십~수백개 수준의 큐비트로 특정 문제에서 제한적으로 양자 우월성을 보여주는 실험적인 단계에 해당
- 양자 컴퓨팅이 하이퍼사이클 상 생산성의 안정기(plateau of productivity), S-곡선의 성숙기 등에 진입했을 때의 경쟁 구도는 고전 컴퓨팅과의 관계를 고려하여 전망할 필요
 - 즉, 양자 기술이 안정화되어 주류 시장에서 널리 사용될 것으로 예측 또는 기대 되지만 기존의 고전 컴퓨팅과의 관계 변화에 대한 분석은 양자 컴퓨팅 산업의 초기 성장 전략에 기여

🕒 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력

- 기술 혁신(technological innovation)은 새로운 지식이나 기존 기술의 새로운 응용을 통해 제품, 서비스, 생산 공정 등을 획기적으로 개선하거나 창출하는 활동으로 정의됨(OECD, 2018)
 - 혁신의 강도 또는 기존 기술과의 단절 정도에 따라 지속적 vs 파괴적 (Christensen, 1997) 또는 점진적 vs 급진적 (Dosi, 1982) 혁신으로 분류 가능
 - 본 고에서는 새로운 기술 체계를 기반으로 기존 기술을 와해하거나(급진적 혁신), 기존 시장을 대체 또는 신시장을 창출함으로써(파괴적 혁신) 기존의 시장과 기술 체계에 큰 변화를 초래하는 혁신에 주목
- 고전 컴퓨팅은 수십 년간 발전하며 H/W 및 S/W 생태계가 견고히 정착되었으나, 양자 컴퓨팅은 관련 생태계가 아직 미성숙한 수준으로 활용 및 응용이 제한적
- 양자 컴퓨팅은 아직은 초기 개발 단계에 있으나, 향후 기술 성숙도와 시장 수용성 등에 따라 기존 컴퓨팅 패러다임을 전환시킬 수 있는 잠재력을 보유한 것으로 평가
 - Gartner(2024.7)에 따르면 양자 컴퓨팅의 편익 등급(benefit rating)은 변혁적(transformational) 등급으로 산업 전반에 걸쳐 비즈니스 수행 방식을 혁신하여 산업 내 역학(dynamics)에 큰 변화를 가져올 것으로 전망

- 양자 컴퓨팅의 잠재력에 대한 관심과 이에 따른 기술 발전 및 산업적 성장은 컴퓨팅 산업 패러다임의 거스를 수 없는 진화 과정으로 이해할 수 있음
 - 이에 따라 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력에 대한 평가는 현시점에서의 진단을 기반으로 미래의 바람직한 발전 방향성 정립을 위해서 꼭 필요한 과정
- 양자 컴퓨팅이 고전 컴퓨팅과의 관계 속에서 파괴적 기술로 발전할 잠재력(가능성)은 기술적 특성뿐만 아니라 시장, 산업 등 다양한 측면에서 평가할 필요
 - 기술 경영 및 혁신 이론에 기반하여 기술, 시장, 생태계, BM 및 제도적 관점의 5대 평가 지표(항목)를 구성하고, 양자 컴퓨팅 분야의 기술 및 산업/정책 전문가의 의견을 조사
 - 파괴적 기술로 자리 잡기 위해서는 양자 컴퓨팅이 기술의 혁신성을 기반으로 기존 시장을 대체하면서 해당 산업 생태계 내에 폭넓게 확산되어 사업적 수익성까지 확보되는 것이 요구되며, 이는 사회-제도적 지원을 통해 가속화됨
- 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있는 잠재력에 대한 평가 결과는 다음과 같음
 - 파괴적 기술로 진화하는 데 있어 시장, 생태계, 제도 등의 비기술적 요인(non-technological factors)보다 '기술적 혁신'의 중요성이 훨씬 큰 것으로 나타남(Technology-push innovation)
 - * 잠재력 평가 요인: 기술 혁신성, 시장 대체성, 생태계 수용 가능성, 비즈니스 파급력, 사회-제도적 준비도
 - 요인별 전문가 평가(7점 척도)와 요인 가중치를 고려한 잠재력 평가 결과, 종합 점수가 5.6(77점)으로 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력이 '높은 수준'인 것으로 나타남

< 시사점 >

- ✓ 양자 컴퓨팅은 아직 산업 및 시장 형성 초기로, 기술적 관점에서 다양한 큐비트 구현 방식간 경쟁이 치열한 상황으로 양자 우월성 또는 양자 우위 달성을 위한 R&D가 활발
- ✓ 이와 같은 현재의 산업 여건은 양자 컴퓨팅이 향후 파괴적 기술로 발전할 수 있을 것인지, 어떤 기술 방식 주도로 파괴적 기술로 성장할 것인지 등 불확실성(uncertainty)을 보여줌
- ✓ 이런 가운데, 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력이 높게 평가된 점은 이 분야에 대한 투자의 필요성이 크다는 점을 나타냄과 동시에 투자 타당성의 논리적 근거가 됨

- 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있도록 지원하는 방안은 'R&D 투자 확대', '양자-고전 Hybrid 환경 지원', '양자 컴퓨팅 전문 인력 양성', '응용 산업별 사업화 지원' 및 '양자 정책 거버넌스 체계 강화' 등이 요인별 1순위로 나타남

○ 양자 컴퓨팅의 발전 시나리오

- 기술 혁신 전략 수립의 일환으로 기술 발전에 따른 양자 컴퓨팅의 포지셔닝과 기술 발전 시나리오(궤적)을 규명할 필요성이 있으며, 분석 도구로 '2x2 전략적 기술 혁신 그리드'를 활용
 - 양자 컴퓨팅은 고전 컴퓨터 대비 문제 해결 방식 자체의 전환을 의미하므로, 그 가능성과 경로를 전략적으로 해석하는 틀이 중요
 - 양자 컴퓨팅(새로운 기술)이 고전 컴퓨팅(기존 기술)과의 관계 속에서 진화하는 과정은 범용성(universality)과 대체성(substitutability)이라는 두 가지 관점(축; axis)에서 분석하는 것이 유용
 - ▶ 범용성 : 기술이 다양한 문제나 응용 분야에서 얼마나 광범위하게 사용될 수 있는지를 의미
 - ▶ 대체성 : 새로운 기술이 기존 기술을 어느 정도까지 대체할 수 있는지를 의미

○ 2개 축에 따라 형성되는 기술 혁신 그리드의 각 사분면 명칭과 의미는 다음과 같음

완전 대체 ↑ 대체성 ↓ 일부 대체	2사분면 Domain Optimizer 특정 도메인에 특화, 고전 컴퓨팅 대체	1사분면 Universal Disruptor 범용적 사용, 고전 컴퓨팅 완전 대체
	3사분면 Complementary Specialist 특수 목적으로 제한, 고전 컴퓨팅과 병행	4사분면 Emerging Backbone 다양한 분야에 활용, 고전 컴퓨팅 대체 한계
	특수 목적 ← 범용성 → 일반 목적	

○ 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술이 될 가능성이 높긴 하지만, 기술 진화 과정에서 내·외부 여건에 따라 발전 시나리오(궤적)가 다양하게 나타날 수 있음

- 현재 양자 컴퓨팅은 Complementary Specialist로서 특수 목적으로 기존 고전 컴퓨팅의 역할을 일부 대체하는 수준에 위치한 것으로 평가되며, 6가지 발전 시나리오가 가능(CU, CDU, CEU, CD, CE, CC)
- 양자 컴퓨팅의 발전 궤적이 다양하게 전개될 가능성을 고려할 때, 각 궤적별 특성에 부합하는 정책 방향 설정과 실행 전략 마련이 중요

○ 향후 양자 컴퓨팅이 따를 것으로 예상되는 유망 기술 궤적(technological trajectory)에 대한 전문가의 전망 결과는 다음과 같음

- **유형** CDU(31%)가 가장 유망하며, 다음으로 CD(23.8%), CE(21.4%) 등 순으로 분포

< 시사점 >

- ✓ 도메인 특화 영역(D)으로 가는 궤적(CDU, CD)이 과반의 선택을 받았다는 점은 '범용화를 위한 R&D'보다 '응용 산업별 적용 및 확산'에 정책적 우선순위(priority)를 뒤야 함을 시사
- ✓ 현재 특정 기술 궤적이 뚜렷한 우위를 보이지 않는 것은 주로 기술적 미성숙(immaturity)에 기인하며, 산업 성장 초기 단계의 높은 예측 불가능성(Unpredictability)을 내포
- ✓ 국가적으로 다양한 기술 궤적을 탐색지원하는 유연한 R&D 전략을 토대로 위험 분담형(Risk-sharing) 공공 투자 프로그램도 확대할 필요

- **방식** 초전도가 40.5%의 선택을 받으며 가장 유망한 방식으로 나타났으며, 다음으로 이온트랩(19%), 광자(14.3%) 등의 순서로 분포

< 시사점 >

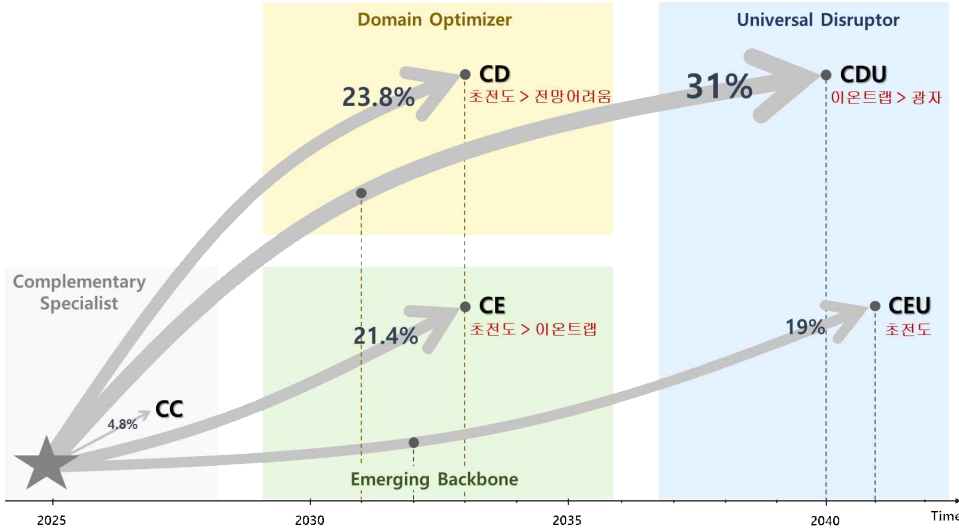
- ✓ 현재 기술적 발전, 생태계 구축, 서비스 제공 등 산업 성장의 여러 관점에서 초전도와 이온트랩 방식이 전반적으로 앞서 있는 것으로 인식되고 있음
- ✓ 이들 방식이 미래의 양자 컴퓨팅 기술 궤적을 주도할 것으로 평가된 점은 발전 가능성이 높은 방식에 대한 전략적 집중 투자로 양자 컴퓨팅 산업의 조기 성장을 도모할 필요가 있음을 시사
- ✓ 한편, 기존에 없던 전혀 새로운 방식이 시도되는 등 신·구 방식 간 경쟁이 심화되고 있어, 특정 기술 방식에 제한을 두지 않는 혁신적 R&D 투자도 병행할 필요

- **시기** Period 1(D/E 진입)은 2030년대 초반, Period 2(U 진입)는 2040년경으로 나타났으며, Universal Disruptor(범용-완전대체 영역)로의 진입한다면 적어도 15년 후가 될 것으로 전망

< 시사점 >

- ✓ 양자 컴퓨팅에 대한 기대가 조정되는 상황으로 본격 성장기로 진입하기까지는 시간과 노력이 요구
- ✓ 양자 컴퓨팅이 창출할 가치(value)는 단기간에 현실화되기 어려운 만큼, 향후 10년 이상을 내다보는 중장기적 관점의 지속 가능한 산업 활성화 정책을 추진할 필요

- **종합** 유형, 방식 및 시기를 종합적으로 고려하면 이온 트랩 또는 광자 기반의 CDU 궤적이 가장 유망하며(31%), 초전도는 CD(23.8%), CE(21.4%)와 같은 제한 진화형 궤적을 주도할 전망(비중 50%↑)



< 유망 기술 궤적별 비중, 방식 및 시기 >

< 시사점 >

- ✓ 유형·방식·시기를 함께 고려한 양자 컴퓨팅 산업의 선도적 발전을 위한 정책 제언
 - 중간 단계 진입 가속화(C→D/E) 중심으로 돌파적 혁신(C/D/E→U)을 병행하는 Two-track 전략 추진
 - 방식별 유망 궤적을 고려한 투자/지원 : 이온트랩→도메인 궤적(D), 초전도→하이브리드·백본 궤적(E)
 - 장기적·일관적·지속적인 정책 기반 확립 (Long-term·Consistent·Sustainable Policy)

- 유망 기술 궤적별 지원 방안에 대한 전문가 의견은 다음과 같음
 - ▶ 상대적으로 유망한 D 경유형(비중 55%)인 CDU, CD 궤적을 위해서는 산업별 실증, 산업 특화형 알고리즘/모델 개발, 도메인 혁신 허브 설립 등을 통해 우선 D 영역 진입을 가속화할 필요
 - ▶ E 경유형(비중 40%)에 대비해서는 양자 컴퓨팅의 독립형(stand-alone) 및 하이브리드(Hybrid) 역량 강화를 병렬 추진함으로써 궁극적으로 U 영역으로의 진화를 도모

양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 정책 제언

- 산업 현황 및 전문가 조사 결과를 기반으로 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 4대 정책을 도출
 - ① 도메인(D) 기반 기술 확산을 중심으로 하는 '응용 기반 전략' 강화
 - 범용 기술 개발보다 산업 현장의 문제 해결에 직결되는 도메인 특화 응용 중심 전략을 우선 추진
 - ② 우위 기술에 대한 '선택·집중'과 지속적인 '개방적 탐색'을 병행하는 균형적 기술 전략 추진
 - 경쟁 우위를 보이는 초전도·이온트랩 방식에 정책적 자원과 R&D 역량을 집중하여 조기 경쟁력을 확보
 - 동시에, 기술적 불확실성에 대비하여 다양한 기술 방식·아키텍처·R&D·투자를 포괄하는 혁신 포트폴리오(innovation portfolio)를 운영하여 장기적 기술 경쟁력과 대응력을 확보
 - ③ 하이브리드 기반 양자 컴퓨팅의 실용적 산업 적용 및 활용 생태계 고도화
 - 현재 가장 높은 활용성을 제공하는 양자-고전 하이브리드 기반 양자 컴퓨팅의 산업 응용을 적극 확대
 - ④ 장기적·일관적·지속적 정책 기반*과 공공-민간 위험 부담형 투자 체계 구축
 - * 기술 혁신과 산업 성장에 필요한 전략인력인프라제도거버넌스 등을 아우르는 정책적 지원 체계를 의미

I 양자 컴퓨팅, 발전의 가속

1 퀀텀 시대의 도래

- 인류는 오랜 시간 동안 연속적인 물리현상을 다루는 아날로그 기반 기술에 의존해 왔으며, 이는 전통 산업의 기초이자 전기, 통신, 기계 기술의 발전을 견인한 핵심 패러다임이었음
- 20세기 중반 이후에는 양자역학의 원리*가 기술에 응용되면서 트랜지스터, 반도체, 레이저, 핵자기공명 영상(MRI) 등이 개발되어 디지털 혁명의 기반이 마련되었고, 이는 '제1차 양자혁명'으로 평가됨
 - * 양자화(Quantization), 파동-입자 이중성, 불확정성의 원리 등
 - 제1차 양자혁명은 양자역학의 원리를 간접적으로* 활용하여 기술적 진보를 이룬 시기이며, 이는 디지털 시대의 도래를 가능하게 만든 이론적·기술적 기반이 됨
 - * 양자역학의 이론적 이해를 바탕으로 만들어진 기술이 실제 제품시스템에 적용되지만, 양자의 특이한 현상(예: 중첩, 얽힘 등)을 직접 제어하거나 조작하지는 않는다는 의미
- 21세기 들어서는 양자의 중첩(superposition), 얽힘(entanglement) 등 고유한 현상을 제어하고 인위적으로 구현할 수 있는 기술이 급진전하면서 '제2차 양자혁명' 또는 '퀀텀 시대'로의 진입이 가속화되고 있음
 - 2차 양자혁명은 양자역학의 원리를 단순히 응용하는 수준을 넘어 정보 처리와 연산 구조 전반을 양자 기반으로 재구성하는 혁신적 전환을 지향하며, 이는 기존 디지털 체계의 한계를 뛰어넘는 기술적 진보로서 또 다른 패러다임 전환을 시사
 - 특히, 양자 컴퓨팅(quantum computing)은 고전 컴퓨팅(classical computing)으로는 불가능한 연산 문제의 해결 가능성을 제시하며, AI, 재료, 금융 등 핵심 산업의 게임 체인저로 주목받는 중
 - 제2차 양자혁명은 연산, 통신, 센싱 등 기존 정보기술 체계를 근본적으로 재구성하는 '퀀텀 시대'로의 전환을 의미
- 정보 시대 패러다임 변화의 특징은 다음과 같음
 - (아날로그 시대: 전통 물리 기반의 계산) 자연 현상을 연속적인 수학 모델로 설명하고 아날로그 장비를 사용해 계산.
 - (디지털 시대: 제1차 양자혁명 - 1st Quantum Revolution) 양자역학의 원리를 바탕으로 트랜지스터, 레이저, MRI, 반도체 기술이 발전하였으며, 정보는 이진 상태(0과 1)로 정형화되어 처리 및 저장되고, 컴퓨터, 통신, 센서 산업이 급격히 성장
 - (퀀텀 시대: 제2차 양자혁명 - 2nd Quantum Revolution) 양자의 '행동 양식' 자체(중첩, 얽힘, 간섭 등)를 정보처리에 직접 활용하면서 양자 컴퓨팅, 양자 센서, 양자 통신 등의 기술이 본격적으로 개발·상용화 단계로 진입하는 중이며, 기존 디지털 시스템으로는 풀 수 없는 문제(예: 분자 시뮬레이션, 최적화 문제)를 해결할 수 있는 잠재력 보유

그림 1-1 정보 시대의 대전환 : 아날로그 → 디지털 → 퀀텀



* 출처: 관계부처 합동, ‘대한민국 양자과학기술 비전 - 양자시대를 여는 우리의 도전과 전략’, 2023.6.27.

2 양자 컴퓨팅의 부상

○ 양자정보과학기술(Quantum Information Science and Technology, QIST)은 양자역학 원리에 기반하여 정보를 생성·처리·전달하는 차세대 정보기술 분야로 기존 고전 정보과학과 근본적으로 다른 패러다임을 형성

* 양자정보과학기술은 현재 세 가지 주요 분야로 분류되며, 양자 통신(Quantum Communication), 양자 센싱(Quantum Sensing), 양자 컴퓨팅(Quantum Computing)이 해당

- 양자정보과학기술은 정보 보안(양자 통신), 센서 정밀도(양자 센싱) 및 계산 속도(컴퓨팅) 등에서 고전(classical) 기술이 도달할 수 없는 수준의 성능 향상을 제공할 것으로 기대

양자통신	양자 얽힘(entanglement)은 두 개 이상의 양자계가 연결된 상태가 되어, 멀리 떨어져 있어도 측정 결과가 서로 강하게 연관되는 특성으로 고전적 통신 기술을 뛰어넘는 양자 통신과 양자암호의 기반을 형성
양자센싱	양자 측정(measurement)·간섭(interference)을 활용하면 자기장·전기장·중력·시간 변화 등 외부 자극에 따른 양자상태 변화를 정밀하게 감지해, 고전 방식의 한계를 넘어서는 초정밀 계측·이미징·항법이 가능
양자컴퓨팅	양자 중첩(superposition)을 통해 하나의 큐비트(qubit)가 동시에 여러 상태를 가질 수 있어, 병렬적 정보처리가 가능

- 양자정보과학기술(QIST)은 국가 안보, 경제, 산업기술 경쟁력의 핵심 자산으로 인식되며, 공공 및 민간 부문 모두에서 적극적인 투자를 진행 중

※ (공공 부문 투자) '24년 한 해 동안 전 세계 정부는 양자 기술에 31억 달러를 추가로 투자하였으며, 누적 공공 투자액은 445억 달러(중국 150억달러, 미국 77억 달러 등)에 달함* (QED-C, '25.3)

※ (민간 벤처 투자) '24년 양자 기술 분야에 대한 민간 벤처 투자는 26억 달러로, '23년의 감소세를 반전시키며 역대 최고치를 기록 (QED-C, '25.3)

- 특히, 양자 컴퓨팅 분야는 Google, IBM, Intel, Microsoft 등 글로벌 빅테크 기업들이 자체 H/W 및 S/W 플랫폼을 개발하며 경쟁 중이고, 클라우드 양자 서비스도 본격화

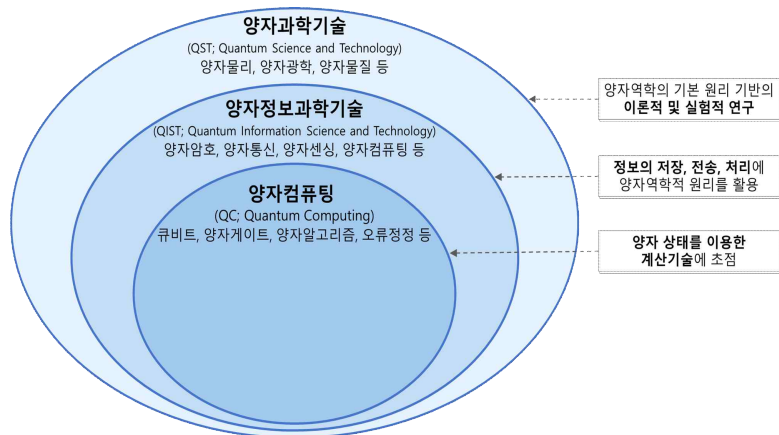
※ IBM은 '23년 1,121큐비트 양자 프로세서 'Condor'를 공개하였고, 수천 큐비트의 모듈형 양자 시스템 개발을 목표로 하는 로드맵을 발표('25.6)

〈참고〉 양자과학기술(Quantum Science and Technology, QST)이란

- ▶ (개념) 원자전자광자스핀 등 나노 단위 이하에서 발생하는 양자역학적 현상을 이론적으로 해석하고, 이를 응용한 기술 전반을 의미
- ▶ (특징) 양자과학기술은 기초과학(물리·화학)과 공학기술(소재·전자정보)을 연결하는 융합 학문으로, 양자 소재 개발, 정밀 계측, 양자제어, 양자광학 등 다양한 분야로 확장

- 양자 컴퓨팅은 QIST의 핵심 하위 분야로, 양자 중첩과 얽힘 등 양자 현상을 활용하여 계산을 수행하는 차세대 계산 패러다임으로 주목
 - 양자정보이론(QIT, Quantum Information Theory)을 기반으로 한 수학적·물리적 모델링이 양자 컴퓨팅 알고리즘 및 아키텍처 설계의 기초가 됨
 - QIST는 양자 정보 이론(QIT)과 응용 기술(컴퓨팅, 통신, 센싱)의 통합적 발전을 지향하며, 양자 컴퓨팅이 가장 복잡하고 기술적 난이도가 높은 분야로 평가됨
 - 양자 컴퓨팅 개발을 위해서는 큐비트 구현 기술, 오류 보정, 양자 소프트웨어, 양자 알고리즘 등 QIST의 다양한 구성 요소 간 유기적 연계와 융합 연구가 필수적
- 양자 컴퓨팅의 부상은 단순한 신기술 유행이 아니라, 고전 컴퓨팅의 성능 향상 둔화로 인해 새로운 계산 패러다임(computational paradigm)의 수요가 확대된 결과
 - 반도체 미세화로 성능을 끌어올리던 흐름이 약화되면서 신약·신소재처럼 분자 수준의 정밀 시뮬레이션이나 초대형 물류·금융 최적화 같은 문제는 기존 방식만으로는 효율적 해결이 어려움
 - 큐비트의 중첩·얽힘을 활용하는 양자 컴퓨팅은 특정 유형의 문제에서 상태 표현과 탐색 효율을 크게 확장할 수 있어 ‘양자 우위가 기대되는 영역’을 중심으로 실질적 이득 가능성이 부각
 - 큐비트 구현·제어 및 오류 완화/정정 기술이 성숙하고 소프트웨어 생태계가 점차 확장되면서, 양자 컴퓨팅의 실용적 구현 가능성이 높아짐(확장성·신뢰성·경제성)
 - 결과적으로 필요(난제 증가)와 가능(기술 성숙)의 2개 축이 맞물리면서 양자 컴퓨팅은 차세대 핵심 인프라 기술로 빠르게 부각

그림 1-2 양자 컴퓨팅(QT)의 위치



3 분석 내용 및 프로세스

- 큐비트를 활용하는 양자 컴퓨팅은 기존 비트 기반의 고전 컴퓨팅 계산 패러다임을 근본적으로 바꾸는 것으로 이를 통해 문제 해결 능력의 퀀텀 점프를 일으킬 잠재력을 보유
 - 제한적이지만 이미 특정 문제에서는 뛰어난 계산 성능을 보여주고 있으며, 최적화 문제, 신소재 및 신약 개발 시뮬레이션 등 분야에서 보완적 역할을 수행하는 단계까지 진입
- 고전 컴퓨팅과 양자 컴퓨팅은 경쟁(competition) 또는 협력(cooperation)의 관계를 가지며 발전하는 가운데, 컴퓨팅 방식의 진화(대체/보완) 관점에서 그 과정을 분석·전망할 필요
 - 양자 컴퓨팅이 발전하면서 궁극적으로 고전 컴퓨팅을 완전 또는 일부 대체할 것인가, 보완재로서 지원하는 수준에 머물 것인가, 각자의 영역에서 공존할 것인가 등 기술 발전의 시나리오가 다양
- 본 연구는 양자 컴퓨팅이 고전 컴퓨팅을 뛰어넘어 시장 및 산업 구조적 변화를 초래하여 파괴적 기술로 발전할 것인지에 대해 그 잠재력을 평가하고, 관련 정책 수단을 검토함
 - 더불어 양자 컴퓨팅 기술 발전의 다양한 시나리오를 범용성(universality)과 대체성(substitutability)을 축으로 하는 기술 혁신 그리드(grid) 상에서 전망한 후, 유망 시나리오별 특성을 파악
- 위와 같은 양자 컴퓨팅 기술 발전의 분석을 위한 연구 프로세스는 다음과 같음

[Phase 1: 분석 범위] 양자정보과학기술(QIST) 분야 중 기술적 난이도가 가장 높고, 미래 지향적인 분야인 ‘양자 컴퓨팅’을 고전 컴퓨팅과의 관계를 고려하여 미래 기술 발전을 분석

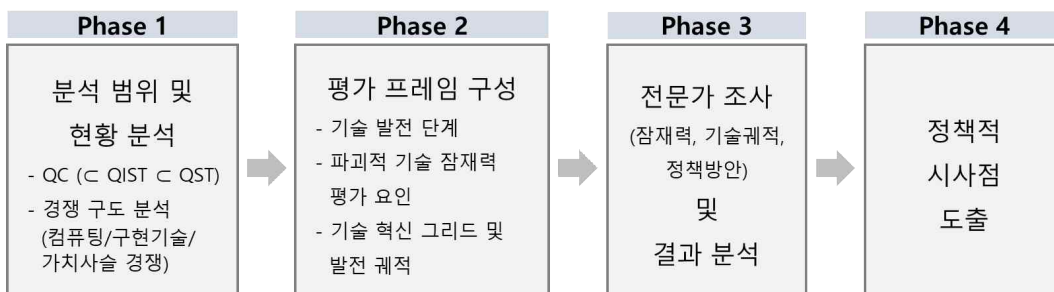
[Phase 2: 평가 프레임] 기술뿐만 아니라 시장, 생태계, 제도 등을 포괄하는 요인을 구성하여 파괴적 기술 잠재력을 평가하고, 기술 혁신 그리드 위에서(2x2 ⇨ 4개 영역) 다양한 발전 궤적*을 검토

* 기술 발전 시나리오가 그리드에서 구현된 경로가 기술 궤적(technological trajectory)이며, Dosi (1982)에 따르면 주어진 기술 패러다임 내에서 문제 해결을 위한 점진적/누적적인 발전 경로를 의미

[Phase 3: 전문가 조사] 양자 및 고전 컴퓨팅 분야의 전문가를 대상으로 잠재력 및 발전 시나리오(궤적)에 대한 설문 조사를 실시 (전문가는 기술뿐만 아니라 산업, 정책 등 관련 전문가도 포함)

[Phase 4: 시사점 도출] 양자 컴퓨팅 현황, 파괴적 기술 잠재력 평가 결과 및 유망한 기술 발전 시나리오(궤적) 및 그 특성 등을 기반으로 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 정책 방안을 도출

그림 1-3 분석 프로세스



주) QST: Quantum Science and Technology, QIST: Quantum Information Science and Technology, QC: Quantum Computing

II 양자 컴퓨팅 경쟁 구도

1 컴퓨팅 패러다임 경쟁

- 고전 컴퓨팅(classical computing)*은 반도체 공정 기술을 중심으로 발전해 왔으나, 물리적 한계, 전력 효율성 및 양자 터널링 문제 등으로 성능 향상이 점차 정체되는 양상
 - * 전류의 흐름을 제어하는 트랜지스터를 통해 0과 1로 표현되는 비트(bit)를 기본 단위로 연산
 - 트랜지스터의 발명 이후, 집적회로(Integrated Circuit)와 마이크로프로세서의 개발로 반도체 집기반의 표준화된 컴퓨팅 구조가 확립되면서 성능이 고도화
 - 반도체 공정 미세화와 트랜지스터 집적도 증가는 무어의 법칙(Moore's Law)*에 따라 고전 컴퓨팅의 연산 능력을 비약적으로 발전시킴
 - * 반도체 집적회로의 성능이 18~24개월마다 2배씩 증가한다는 법칙으로, 인텔의 공동 창립자인 고든 무어(Gordon Moore)가 1965년에 제시
 - 트랜지스터의 크기가 일정 수준 이하로 줄어들면서 전력 소모 감소 효과의 제한, 발열 심화 및 양자 터널링* 발생 등으로 비트 안정성이 저하되고 성능 향상 속도가 둔화
 - * 미세 입자가 가지는 파동의 성질로 인해 에너지 장벽을 넘어가는 양자역학적 현상을 의미하며, 트랜지스터의 전자에서 발생하면 전류가 누설되는 문제가 생김
- 고전 컴퓨팅의 한계가 드러남에 따라 이의 대안으로 양자역학적 현상을 직접 활용하는 양자 컴퓨팅(quantum computing)이 새로운 계산 패러다임(computational paradigm)으로 부상
 - 양자 컴퓨팅은 비트 단위의 순차 연산에 의존하는 고전 컴퓨팅과 달리 중첩과 얽힘* 등 현상을 활용하여 n개의 큐비트로 2ⁿ개 상태를 동시에 표현함으로써 병렬 연산이 가능
 - * 중첩(superposition)은 큐비트가 0과 1을 동시에 가지는 상태를, 얽힘(entanglement)은 2개 이상의 큐비트가 서로 강하게 연결되어 한쪽을 측정하면 다른 쪽도 즉시 결정되는 상태를 의미

그림 II-1 슈퍼컴퓨터와 양자컴퓨터

슈퍼컴퓨터 (현재)	VS	양자컴퓨터 (25~30)
Bit n 개 백만 년 (계산 능력의 한계) RSA	처리 단위 연산 속도 암호 해독 소요기간 암호화 방식	▶ Qubit 2 ⁿ 개 ▶ 1초~하루 (양자병렬계산) PQC

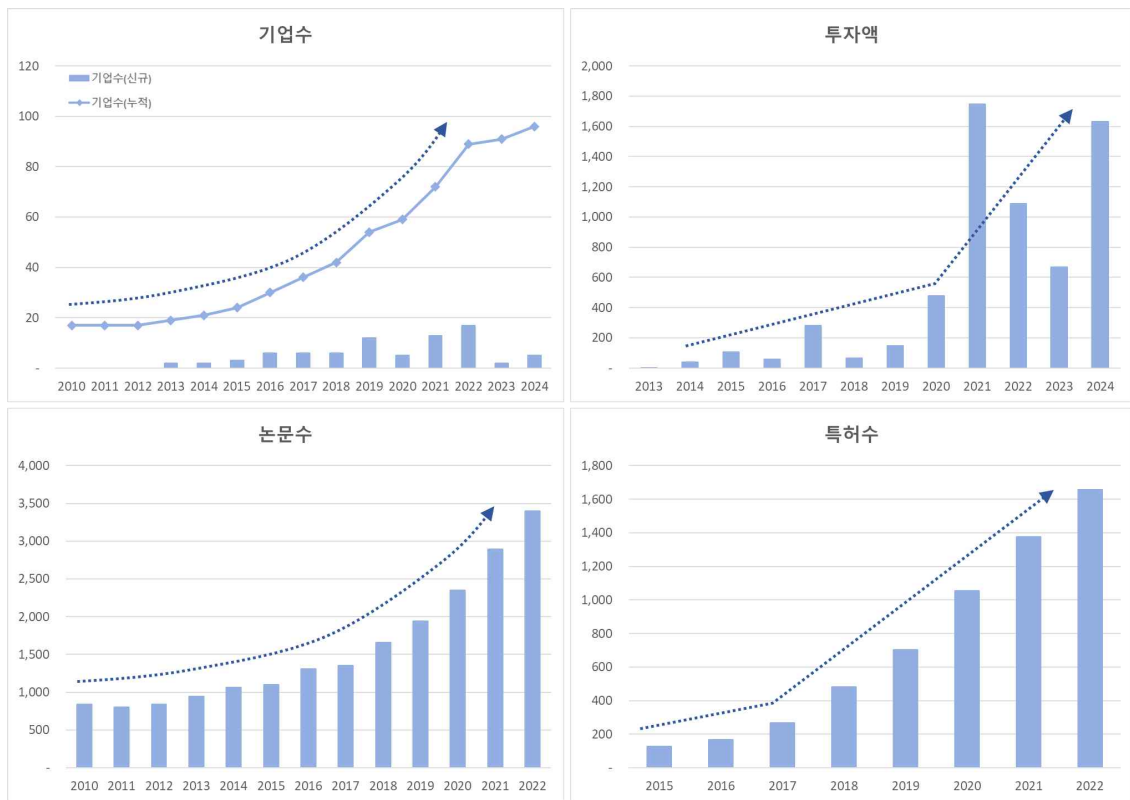
주) RSA: Rivest-Shamir-Adleman, PQC: Post-Quantum Cryptography

* 출처: ETRI, '양자 알고리즘, 가까워진 양자내성암호 공략', ETRI Webzine Vol.200, 2022.6.

- 양자 컴퓨팅은 Shor(소인수분해), Grover(비구조적 탐색) 등 특정 양자 알고리즘*을 통해 고전(슈퍼) 컴퓨팅 대비 압도적인 연산 우위를 가진 것으로 평가
 - * Google은 Sycamore 프로세서를 통해 고전 컴퓨팅으로 약 1만 년 걸릴 계산을 200초 만에 수행하며 '양자 우월성(Quantum Supremacy)'을 최초로 입증했다고 주장('19.10), 이후 개발된 Willow(윌로우)는 슈퍼컴퓨터(Frontier)로 10²⁵년이 걸릴 계산 문제를 5분 내에 풀 수 있다고 발표('24.12)
- 양자 컴퓨팅은 암호해독·최적화·시뮬레이션 등 문제를 빠르게 해결할 수 있는 잠재력이 있어, 보안, 물류·금융, 제약·소재 산업 등 다양한 산업 분야에서 응용될 것으로 기대
- 양자 컴퓨팅은 고전 컴퓨팅 보완하여 성능을 향상시키거나(협력), 때로는 고전 컴퓨팅으로는 풀기가 어려운 문제를 대신하여 해결함으로써(대체) 다양한 분야에 영향을 미치는 중
 - (물류 최적화) 폭스바겐은 '19년 리스본 시내에서 9대 버스의 실시간 경로 최적화 파일럿을 실시
 - * D-Wave 양자 어닐링 컴퓨터를 활용하여 각 버스의 개별 최적 경로를 실시간으로 계산, 교통 정체를 사전에 피하도록 하여 승객 이동 시간을 단축하고 전체 교통 흐름을 향상시킴(Volkswagen group, '19.10)
 - (금융 모델링) JP모건은 IBM과의 협업으로 옵션 등 파생상품 가격 결정 및 위험 분석에 양자 알고리즘을 도입하여, 복잡한 금융 계산의 처리 시간을 90%까지 단축함으로써 투자 포트폴리오 최적화와 리스크 관리에 기여(PatentPC, '25.9)
 - (신약 개발) 베링거인겔하임은 구글 양자 프로세서 Sycamore 상에 신약 후보 물질의 분자 시뮬레이션 워크 플로우를 구현, 당뇨병·섬유증 치료 후보 물질의 순위 매김 작업에서 핵심 연산의 속도가 기존 슈퍼컴퓨터 대비 4배 향상되었음을 보고(Quantum Insider, '25.5)
 - 고전 컴퓨팅으로는 사실상 불가능하거나 매우 비효율적인 문제를 양자 컴퓨팅이 해결하는 사례가 나타나고 있으며, 이른바 양자 우월성 입증 예시*로서 양자 컴퓨팅이 특정 문제에서 기존 최고 성능의 슈퍼 컴퓨터를 능가하는 경우에 해당
 - * 구글 Sycamore 프로세서(양자 회로 출력값 샘플링, '19), USTC Jiuzhang 광자 기반 양자 컴퓨터(가우시안 보손 샘플링, '20/21), D-Wave Advantage2 프로토타입(스핀 유리 물질의 양자 동역학 시뮬레이션, '25) 등
- 양자 컴퓨팅 분야에 대한 기대와 관심이 증가하면서 기업, 투자 및 논문/특허 등 해당 분야의 성장을 보여주는 다양한 지표의 수치가 큰 폭으로 확대되는 중
 - (기업) 글로벌 양자 컴퓨터 기업 수는 '16년 30개에서 '24년 96개로 3.2배 성장하였으며, 매년 새로운 기업이 나타나고 있음(Quantum Insider, '25.6)
 - * '23년 설립된 양자 분야 스타트업 13개 중 10개(77%)가 양자 컴퓨팅 관련 기업으로 나타남(McKinsey, '24.4)
 - (투자) '13~'24년 동안 양자 기술 분야에 대한 투자액은 113억 달러에 달하며, 이 중 과반이 넘는 63.2억 달러(56%)가 양자 컴퓨팅 분야 투자액임(Quantum Insider, '25.6)
 - * 최근 기간이 '21년 이후에 양자 컴퓨팅 분야에 대한 투자가 급증
 - * '24년 양자 분야 스타트업 투자액(약 20억 달러) 중 80% 이상이 양자 컴퓨팅에 집중(McKinsey, '25.6)
 - (논문) 양자 컴퓨팅 분야의 논문 수는 '10~'22년 기간 동안 연평균 12.3%로 성장하였으며, 최근 기간('16~'24)에는 17.2%로 더욱 가파른 성장세를 보이고 있음(KISTI, '23.12)
 - * 양자 기술 전체 분야의 성장율은 양자 컴퓨팅보다 다소 낮은 10.4%임
 - * '21년부터 양자 컴퓨팅 분야가 양자정보기술 분야를 제치고 1위로 올라섬

- (특허) '15~'22년 기간 동안 양자 컴퓨팅 분야의 특허 패밀리*는 연평균 44.5%로 고성장하여 '22년 기준 1,600여건을 출원하였으며, 양자 분야 전체의 과반을 상회(QuIC, '25.1)
 - * 동일한 발명이나 기술에 대해 여러 국가 또는 지역에서 출원된 특허의 집합을 의미
- 양자 컴퓨팅 분야는 양자 통신/센싱 등 다른 세부 분야에 비해 기업 수, 투자액 및 논문/특허 산출의 규모나 성장률 모두 전반적으로 높은 수준에 위치

그림 II-2 양자 컴퓨팅 분야의 성장



* 출처: KISTI(2023.12), QuIC(2025.1), Quantum Insider(2025.6) 등 기반 정리

2 큐비트 구현 기술 경쟁

- (양자 우월성 달성 경쟁) '19년 구글의 양자 우월성 발표 이후, 이온트랩·광자 등 다양한 기술 방식에 기반한 양자 우월성 달성 사례를 여러 기업들이 경쟁적으로 발표
 - 이론 수준에 머물러 있던 양자 우월성(quantum supremacy)* 개념을 구글이 초전도 방식의 53개 큐비트 양자 프로세서(Sycamore)를 활용한 실험을 통해 최초로 달성했다고 발표('19.10)
 - * 양자 역학의 원리로 만든 양자 컴퓨터(quantum computer)가 슈퍼컴퓨터(supercomputer) 보다 성능이 우수하다는 것을 나타내는 기준 또는 목표(TTA, 정보통신용어사전)
 - 이후 광자(Xanadu), 초전도(IBM), 이온트랩(Quantinuum, IonQ) 등으로 기술 방식 및 기업 간 양자 우월성 달성 경쟁이 본격화

- 빅테크 기업(구글, IBM 등)을 비롯해 기술 전문 기업들(IonQ, Quantinuum, Xanadu 등)도 양자 우월성 달성을 자사의 기술 경쟁력과 시장 주도권 확보 전략의 일환으로 활용 중

표 II-1 양자 우월성 달성 경쟁

기술	기업	칩셋	년도	내용
초전도	Google	Sycamore (53 qubits)	'19.10	- 난수 생성 과제를 200초 만에 처리 (IBM Summit 슈퍼컴으로 1만년 걸릴 계산)
광자	Xanadu	Borealis (216 squeezed state qubits)	'22.06	- 특정 샘플링(가우시안 보손) 문제를 36마이크로초 이내로 단축 (평균적으로 슈퍼컴에 의해 9천년 이상 소요)
초전도	IBM	Eagle (127 qubits)	'23.06	- 복잡한 양자 회로의 동작을 시뮬레이션 (기존 슈퍼컴으로는 정확히 시뮬레이션하기 어려움)
이온 트랩	Quantinuum	H2시스템 (52 qubits)	'24.06	- 선형교차 엔트로피 벤치마크 값 0.35를 달성 (구글 Sycamore 성능의 100배 수준)
초전도	Google	Willow (105 qubits)	'24.12	- RCS 벤치마크 과제를 5분 만에 해결 (슈퍼컴퓨터로 10자년(10 ²⁴ 년) 걸릴 계산)
이온 트랩	IonQ	Forte (36 qubits)	'25.03	- 혈액 펌프 역학 시뮬레이션 개선 (슈퍼컴퓨터 대비 12% 빠른 성능 달성)

* 출처: 각사 보도자료(홈페이지) 등 기반 작성

- (기술 성능 경쟁) 아직 특정 구현 방식이나 기업이 기술적으로 뛰어나다고는 볼 수 없으며, 이는 양자컴퓨팅 기술 발전이 초기 단계로 지배적 기술이 없는 경쟁적 상황임을 보여줌
- 큐비트 수에서 초전도 방식이 이온트랩 대비 다소 우세하나, 2-qubit Fidelity, 논리 큐비트 구현 수준 등 여러 기술 지표를 종합하면 특정 기술 또는 기업의 우위를 단정하기 어려움

표 II-2 양자 컴퓨팅 기술 성능 수준

구분	초전도		이온트랩	
	Google	IBM	Quantinuum	IonQ
큐비트 수	105	156	60	36
2-qubit Fidelity ¹⁾	99.88%	99.7%	99.9%	99.99%
논리 큐비트 ²⁾ 구현 수준	'23년 1개 구현 (Sycamore칩, 49개)	'29년 200개 목표 (Starling 시스템)	'24년 12개 구현 (H2 시스템, 56개)	'27년 800개 목표
양자컴퓨팅 확장성	클라우드 미제공 (협력 연구 중심)	자체 클라우드 제공 (Qiskit)	자체/타사 클라우드 혼용 (Nexus, Azure)	타사 클라우드 기반 (AWS, Azure)

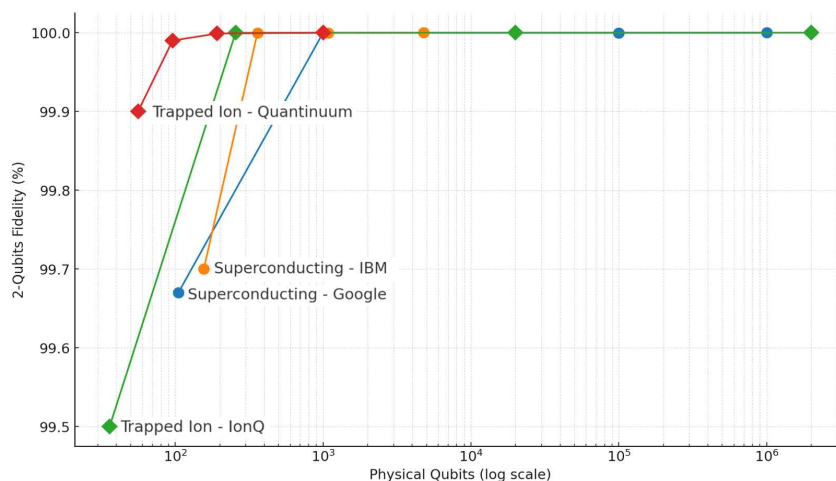
¹⁾ 2-큐비트 게이트 연산이 이상적인 결과와 얼마나 일치하는지를 나타내는 정확도 지표임(2 qubit-Fidelity = 1-오류율). 현재는 약 97~99.5% 수준이며 실용적 오류 정정을 위해서는 99.9%(오류율 0.1% 이하) 이상이 필요

²⁾ 실제 하드웨어에서 구현된 불안정한 물리 큐비트(Physical qubit)들을 여러 개 묶어 오류 정정 기법을 적용해 만든 안정적이고 신뢰할 수 있는 양자 정보의 단위를 의미하며, 논리 큐비트(logical qubit) 1개를 만들려면 현재 기술 수준에서는 수십 개의 물리 큐비트가 필요. Google과 Quantinuum의 괄호 안 개수는 사용된 물리 큐비트 수를 의미

* 자료: 각사 보도자료(홈페이지) 등 기반 작성

- (구글) 자체 기술로드맵* 상 milestone 3단계인 10³개 물리 큐비트 수준의 '장수명 논리큐비트 (long-lived logical qubit)' 확보를 위한 기술 개발을 추진 중
 - * 총 6단계로 ▲ 'Beyond classical(1단계, '19년)', ▲ 'Quantum error correction(2단계, '23년)', ▲ 'Building a long-lived logical qubit(3단계, 진행 중)', ▲ 'Creating a logical gate(4단계)', ▲ 'Engineering scale up(5단계)' 및 ▲ 'Large error-corrected quantum computer(6단계)'로 구성
 - (IBM) 가장 많은 큐비트 수(156개, Heron 프로세서)와 자체 클라우드 서비스 운용 경험을 기술적 강점으로 내세우며, Starling 시스템* 구현을 목표로 기술 개발 중
 - * 200개 논리 큐비트·1억회 게이트 연산급의 대규모 오류정정 양자컴퓨터로 '29년 상용화 목표
 - (Quantinuum) 상대적으로 적은 큐비트*로 많은 수의 논리 큐비트를 구현하는 것에 강점
 - * H2 시스템 기반 논리 큐비트 구현: 4개(30개 물리 큐비트, '24.4월) → 12개(56개 물리 큐비트, '24.12월)
 - (IonQ) 큐비트 수는 가장 열위이나, 공격적인 목표와 다양한 상용 클라우드 활용성 보유
- (기술 발전 전망) '30년경에는 검증 가능한 양자 오류 정정 기술이 적용된 수천~수백만 개 물리 큐비트 규모의 논리 큐비트 기반 양자컴퓨터가 출현할 것으로 예상
- 논리 큐비트 구현 전략은 기업간 및 구현 방식간 모두에서 큐비트 구현 효율성 차이가 존재
 - ① 구글(초전도)·IonQ(이온트랩) : 백만~수백만 개 수준의 물리 큐비트로 수천~수만개의 논리 큐비트 확보
 - ② IBM(초전도)·Quantinuum(이온트랩) : 수천 개 수준의 물리 큐비트로 수백 개의 논리 큐비트 지향
 - (구글) 최종 개발 단계인 milestone 6에는 '대규모 오류 정정 양자 컴퓨터' 구현이 목표(큐비트수: 백만개, 2-qubit Fidelity: 99.99%)이며, '30년 이후에 달성할 것으로 전망
 - (IBM) '29년 이후 200개의 논리 큐비트 구현으로 1억개 이상의 양자 연산 수행이 목표
 - (Quantinuum) '30년에 1,000개의 물리 큐비트로 100개의 논리 큐비트 구현을 목표
 - (IonQ) 가장 공격적인 기술 목표 제시('30년 기준, 큐비트: 2백만개, 2-qubit Fidelity: 99.99 ↑ %)

그림 II-3 양자 컴퓨팅 기술 발전 목표 : Qubits vs 2-qubits Fidelity



주1) 기업별 4개 값은 각각 2024, 2026, 2028 및 2030년에 해당

주2) IBM의 '30년 물리 큐비트 수는 논리 큐비트 목표인 200개에 논리:물리 큐비트 비율인 1:24를 적용하여 산출 (200*24=4,800); <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07107-7>

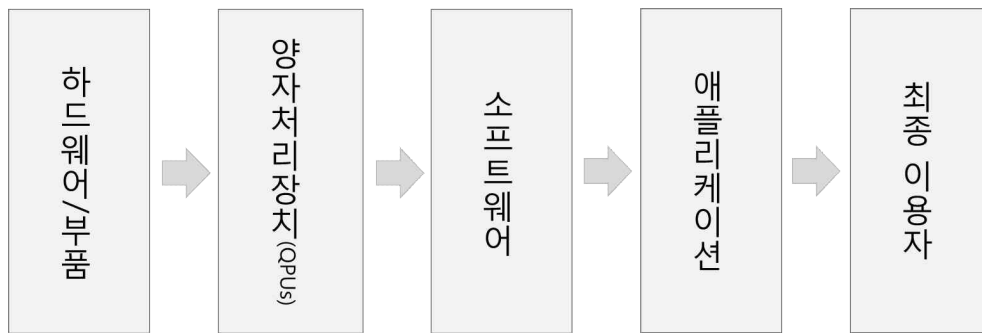
주3) IBM의 2026년 이후 2-Qubits fidelity 값은 Google 수준으로 가정

* 출처: Google(2023), IBM(2025), Quantinuum(2024), IonQ(2025) 등 기반 작성

3 산업 가치사슬 경쟁

- (가치사슬 구조) 양자 컴퓨팅 산업은 하드웨어/부품, 양자처리장치(QPUs), 소프트웨어, 애플리케이션 및 최종 이용자의 5개 계층으로 구분 가능
 - 각 계층은 밀접하게 연결된 상호 의존적 구조이며, 양자 기술이 연구 단계를 넘어 실용적 가치 창출 국면으로 발전하면서 가치사슬 내 경쟁과 협력이 가속화
- (가치사슬 분화) 산업의 초기 단계부터 하드웨어 및 큐비트 제조 기업, 미들웨어 기업, 도메인별 솔루션 개발 기업 등이 등장하면서 전문화(specialization) 구조로 발전 중
 - * 반도체의 경우, 산업 초기에는 설계부터 완성 제품까지 모든 계층을 직접 처리하는 수직통합(Vertical Integration) 구조였으나, 규모 확장과 함께 효율성 제고를 위해 여러 전문 부문으로 분화
- 가치사슬 계층별 특징 및 경쟁 구도는 다음과 같음

그림 II-4 양자 컴퓨팅 산업 가치사슬 구조



△ (하드웨어/부품 계층) 양자 컴퓨터의 물리적 구현에 요구되는 구성요소를 공급하는 소수의 주요 기업이 경쟁하는 구도 형성

- ※ 큐비트 환경 조성 장비 분야의 경우, '24년 기준 Bluefors(핀란드), Oxford Instruments(영국), Leiden Cryogenics(네덜란드) 등 Top 3 업체가 전 세계 희석 냉동기 시장의 약 36%를 차지, 세계 시장 비중이 82%에 달하는 유럽 시장에서는 약 99%를 점유(Valuate, 2025.3)
- 양자 연산을 가능하게 하는 극저온 장치, 정밀 레이저, 제어 전자 장치 등 부품을 포함하며, 큐비트 안정성, 결맞음(coherence), 오류율 개선에 필수 요소임
- 양자 기술의 성능 요구사항이 지속 증가되어 하드웨어/부품 공급 업체들은 QPUs 개발사 및 연구기관과 긴밀히 협력하여 성능 최적화와 시스템 통합을 추진 중
- iCV TA&K(2024)에 의하면, '23년 말 기준 전 세계적으로 총 238개의 하드웨어/부품 기업이 활동 중이며, 지역별로는 중국(85개), 미국(54개), 독일(25개) 순임

△ (QPUs 계층) 양자 컴퓨터의 핵심 프로세서로서 초전도, 이온 트랩, 중성 원자, 광자 등 다양한 큐비트 구현 방식으로 기업 간 경쟁이 치열

- QPUs를 구현하는 기술 방식은 각기 고유한 장점을 갖고 있으며, 아직 계층 내 명확한 단일 승자는 나타나지는 않음

- 기업 간 경쟁은 양자 오류 수정 기술 개발을 통한 내결함성(fault tolerance) 달성, 확장성 확보(모듈형 아키텍처, 클러스터 기술), 큐비트 수 및 품질 향상(노이즈 감소, 코어러런스 시간 연장, 연결성 개선) 등 기술적 성능 향상에 집중
- △ (소프트웨어 계층) 양자 H/W와 상호작용하고 알고리즘을 실행하는 영역*으로 관련 기업은 풀스택 솔루션(ex, IBM)을 제공하거나 특정 분야에 전문화(ex, Riverlane)
 - * 하위 영역으로는 △양자 제어 및 오류 완화 소프트웨어, △양자 프로그래밍 플랫폼/SDK, △QPUs에 대한 클라우드 액세스, △양자 시뮬레이션 및 에뮬레이터 등으로 세분화됨
- (IBM) qLDPC* 코드 기반의 오류 정정 기술에서 오픈소스 플랫폼인 Qiskit 등 하드웨어에서 소프트웨어까지 풀스택 솔루션을 개발 및 제공
 - * quantum Low-Density Parity-Check의 약자로 양자 저밀도 패리티 검증 코드를 의미하며, 양자 컴퓨팅 분야에서 오류 정정을 위해 설계된 코드 체계 중 하나
- (Riverlane) 제어 시스템과 양자 오류 정정(QEC) 스택 간 실시간 정보교환을 위한 QEC 인터페이스(QECi)를 개발하여 상호 운용성을 높이고 있음
- (Nvidia) 양자 분야 연구개발에 필수적으로 요구되는 고성능 GPU 하드웨어와 S/W 도구(CUDA-Q)를 제공함으로써 SW 중심의 풀스택 전략으로 생태계 내 위상을 강화하는 중
- 하위 분야 중 클라우드 플랫폼(QCaaS)에서는 IBM(Quantum Experience), Microsoft(Azure Quantum), Amazon(Braket) 등 기업이 성능, 가격, HW 다양성을 기준으로 경쟁 중
 - ※ IonQ, Pasqal, IQM, Xanadu 등 순수(pure-play) 양자 전문기업들도 자체 또는 파트너를 통한 클라우드 서비스를 제공 중
- △ (애플리케이션 계층) 양자 컴퓨팅의 잠재력을 구현하는 중요한 인터페이스로서 주요 기업들은 큰 파급 효과가 예상되는 응용 분야의 솔루션을 개발 중
 - 현재는 하드웨어의 한계로 인해 현실적 접근으로 양자 시뮬레이션이나 초기 단계의 QPUs에서 실행되는 하이브리드 양자-고전 알고리즘 형태가 많음
 - 양자 기술 공급 기업(HW, SW, QCaaS) 사이의 협력과 수요 기업(금융, 제약, 재료과학, 자동차, 국방 등)과의 긴밀한 협력이 핵심 동력으로 작용
 - ※ 대표적으로 스페인의 양자 SW 기업인 Muliverse Computing은 IBM, IQM, Xanadu, AWS와 협력하여 다양한 하드웨어 아키텍처를 수용하는 금융 솔루션을 개발 중
- △ (최종 이용자 계층) 고객 기반이 지속적으로 확장 중이며, 양자 컴퓨팅 도입으로 전략적 우위를 확보하려는 기업 및 정부기관이 중요한 역할 담당
 - ※ 콜롬비아, 튀르키예 등 양자 활동이 거의 없던 신흥시장에서도 양자 컴퓨터가 공급 중
 - ※ 수요기업들은 기존 사업 분야에서 경쟁력을 강화하고, 미래 신규 비즈니스 발굴을 위해 양자 기술 업체와의 협력을 추진
 - ※ 정부 및 공공 부문은 양자 컴퓨팅 분야의 초기 수요 창출자 역할을 수행함으로써 양자기술 개발 가속화와 국가 양자 생태계 구축에 기여
- 초전도 기반 양자 컴퓨팅 시스템이 시장을 주도하고 있으나, 이온 트랩, 중성 원자, 광자 등 다른 방식에 대한 수요도 점차 확대되는 추세
- 공급자와 수요자 간의 계약 방식에서는 QPUs, 소프트웨어, 인프라, 컨설팅, 교육을 포함한 풀스택 시스템의 장기 계약 판매가 일반적(Quantum Insider, 2025.6)

Ⅲ 양자 컴퓨팅의 기술 발전 방향

1 파괴적 기술 혁신

- 기술 혁신(technological innovation)은 새로운 지식이나 기존 기술의 새로운 응용을 통해 제품, 서비스, 생산 공정 등을 획기적으로 개선하거나 창출하는 활동으로 정의됨(OECD, 2018)
 - 과학적 발견/발명을 상업적/사회적 가치로 연결하는 일련의 기술적·조직적 활동을 포함하며, 단순한 기술 개발이 아니라 실제 시장 또는 사용자 문제 해결로 이어지는 변화를 수반(OECD, 2018)
 - 기술 혁신은 경제 전반의 생산성 향상, 산업 구조 재편, 사회적 변화 등 거시적 파급 효과를 유발하며, 이는 단기적인 성과뿐 아니라 장기적인 기술 축적과도 관련
 - 디지털 시대 이후의 기술 혁신은 플랫폼 시장, 네트워크 효과, 데이터 중심의 가치 창출 등 전통적인 산업혁신 이론과는 다른 양상을 보이기도 하며, 이로 인해 기술 혁신의 정의도 점차 확장(McKinsey & Company, 2020.8)
- 혁신의 강도 또는 기존 기술과의 단절 정도에 따라 지속적 vs 파괴적 (Christensen, 1997) 또는 점진적 vs 급진적 (Dosi, 1982) 혁신으로 분류 가능
 - 지속적/파괴적 혁신은 시장(market)과 소비자(consumer) 관점에서, 점진적/급진적 혁신은 기술(technology) 패러다임 관점에서 혁신을 바라보고 분류한 것임
 - 지속적(sustaining) 혁신은 기존 제품이나 서비스의 성능을 기존 고객을 위해 향상시키는 것이고, 파괴적(disruptive) 혁신은 새로운 시장을 창출한 후 기존 시장을 대체하게 됨
 - 점진적(incremental) 혁신은 동일한 기술 패러다임 내에서의 성능 개선을 의미하며, 급진적(radical) 혁신은 기존 기술 패러다임을 넘어서는 전환을 나타냄

표 III-1 기술 혁신의 분류

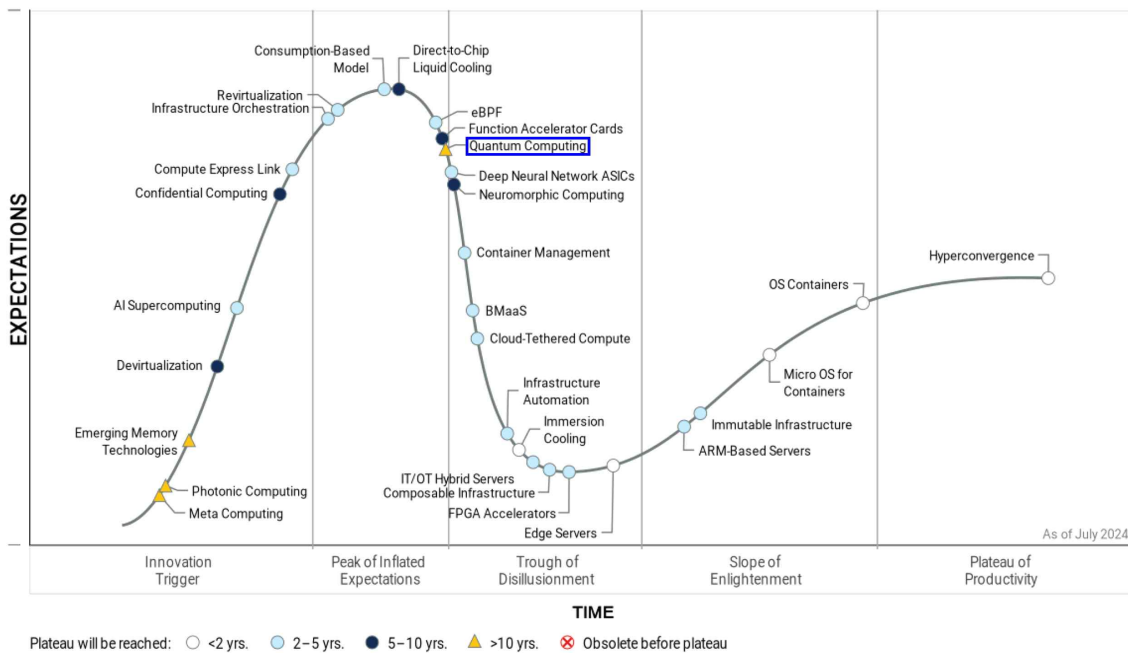
구분	지속적 vs 파괴적	점진적 vs 급진적
분류 기준	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시장과 수요 관점 ▪ 기존 시장에 대한 영향 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 기술의 특성과 지식 체계 ▪ 기존 기술 체계와의 단절 여부
혁신 주체	기존 기업 또는 스타트업	기술자, 기업, 연구기관 등 기술 시스템 전체
관련 문헌	Christensen, C.M., 'The Innovator's Dilemma' (1997)	Dosi, G. 'Technological Paradigms and Technological Trajectories' (1982)

- 본 고에서는 새로운 기술 체계를 기반으로 기존 기술을 와해하거나(급진적 혁신), 기존 시장을 대체 또는 신시장을 창출함으로써(파괴적 혁신) 기존의 시장과 기술 체계에 큰 변화를 초래하는 혁신에 주목
 - 이를 ‘파괴적 기술 혁신’ 관점으로 설정하고, 양자 컴퓨팅(quantum computing)의 바람직한 기술 혁신의 방향성을 탐색하기 위해 기존의 고전 컴퓨팅(classical computing)과의 관계(대체 또는 공존, 성능 경쟁 등)를 중점 분석
 - ※ 파괴적 기술이란 기존 시장의 구조나 지배적 기술을 근본적으로 뒤흔들며, 새로운 시장을 창출하거나 기존 시장의 룰(rule)을 바꾸는 기술(Christensen, 1997)

2 양자 컴퓨팅의 기술 발전 단계

- 양자 컴퓨팅은 Gartner의 하이퍼 사이클(Hype cycle)* 상에서 ‘과장된 기대의 정점(Peak of Inflated Expectations)’에서 ‘환멸의 계곡(Trough of Disillusionment)’으로 넘어가는 중으로 기대감이 점차 현실감으로 전이되기 시작(Gartner, 2024.7)
 - * 기술 촉발(Technology trigger), 과도한 기대의 정점(Peak of inflated expetations), 환멸의 골짜기(Trough of disillusionment), 계몽의 기울기(Slope of enlightenment) 및 생산성의 안정기(Plateau of productivity)의 5단계로 구분(Fenn & Raskino, 2008)
 - 양자 컴퓨팅이 주류 시장에서 폭넓게 채택되고 활용되는 단계(mainstream adoption)에 도달하기까지는 적어도 10년 이상 걸릴 것으로 전망

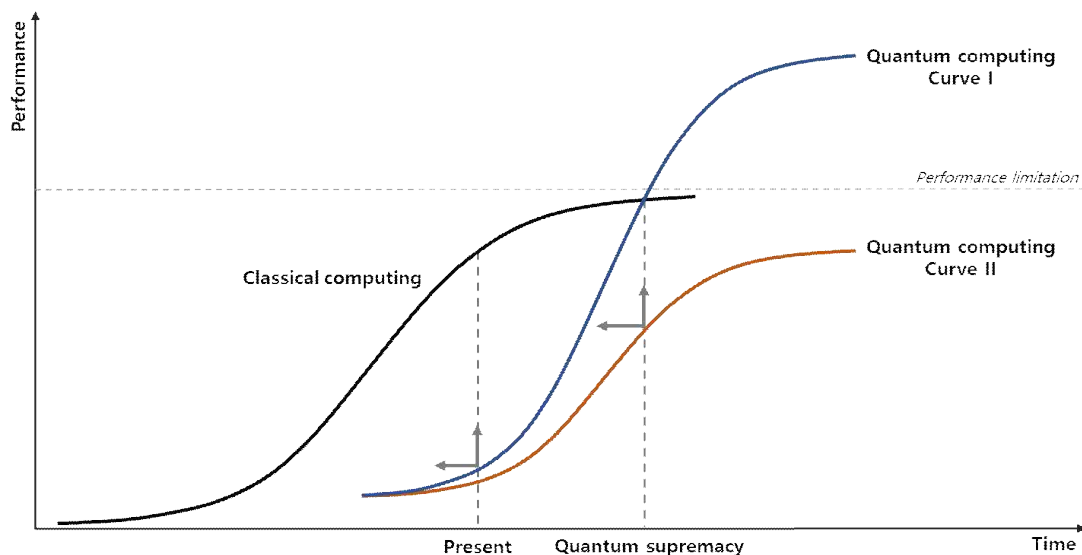
그림 III-1 양자 컴퓨팅 Hype Cycle



* 출처: Gartner, 'Hype Cycle for Compute, 2024'. 2024.7.8.

- ※ Gartner의 Hype cycle에서는 어떤 기술이 생산성의 안정기(plateau of productivity) 단계에 도달하기 까지 걸리는 예상 시간을 '2년 미만', '2~5년', '5~10년', '10년 이상' 및 'Obsolete before plateau'(시장 도태; 기술이 충분한 상용화와 안정화를 이루기 전에 기술적 한계, 시장 변화, 대체 기술 등장 등의 이유로 광범위한 채택 없이 퇴출되는 현상)로 구분
- 기술 성숙도 단계(maturity levels)*는 실험실 기반의 배아 단계(Embryonic)에서 이제 막 벗어나 초기 단계(Emerging)로 진입하는 상황으로 평가
 - * Embryonic(배아), Emerging(부상), Adolescent(성장), Early mainstream(초기 주류), Mature mainstream(성숙 주류), Legacy(레거시) 및 Obsolete(폐기) 단계로 구분됨
- S-곡선* 관점에서는 양자 컴퓨팅이 현재 초기 단계인 도입기(introduction)에 해당
 - * 기술 발전의 일반적인 패턴을 의미하며, 기술 성능이 시간이나 투자 대비 초기에는 느리게 향상되다가 (도입기; Introduction) 일정 시점 이후 급격히 발전하고(성장기; Growth), 다시 기술적 한계에 가까워지면서 (성숙기; Maturity) 성장이 둔화되는(쇠퇴기. Decline) S자형 경로를 따르게 됨(Forster, 1986)
 - 학계와 산업계는 '30년 이후에야 진정한 양자 우위(Quantum advantage)* 및 실용 단계인 성장기에 진입할 수 있을 것으로 예상하고 있음
 - * 양자 컴퓨터가 실제로 유용한 문제에서 고전 컴퓨터보다 더 빠르거나 효율적으로 계산하는 상태로 산업·과학 문제에서의 실질적 경쟁력을 의미하며, '양자 우월성(quantum supremacy)' 개념에 비해 발전된 수준
 - ※ BofA는 양자 컴퓨팅이 '30~33년 사이에 폭발적 성숙 및 실용화(broad utility)를 경험할 것이라 전망'(25.7)
 - ※ IBM은 '26년까지 scientific quantum advantage(양자 우위)의 사례를 제시하고, '29년에 큰 규모의 Fault-tolerant 양자 컴퓨터(Starling 시스템)를 선보일 계획'(25.6)
 - 양자 컴퓨팅 기술 발전이 도입기를 지나 성장기로 빠르게 진입하려면 안정적 양자 우위 달성과 확장 가능한 오류 정정 등 기술적 성능의 조기 향상을 기반으로 상업적 응용의 확산이 필수적
 - ※ 이는 양자 컴퓨팅이 고전 컴퓨팅 중심의 산업을 재구성하는 파괴적 기술이 되기 위한 필수 조건

그림 III-2 양자 컴퓨팅 S-Curve



주1) Curve I과 II는 각각 양자 우위를 달성하거나 그러지 못한 경우를 나타냄
 주2) ↗는 시간적으로 빠르게(←) 기술적 성능 향상(↑)을 이루기 위한 노력을 의미

- 양자 컴퓨팅 분야에서 통용되는 시대 구분에 따르면 '20년대 초반 이후부터 소위 NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)* 시대에 접어든 것으로 평가

* 아직 완전한 양자 오류 정정이 구현되지 않은 상태의 양자 컴퓨터들을 지칭(Preskill, 2018)

- 오류율이 높은 수십~수백개 수준의 큐비트로 특정 문제에서 제한적으로 양자 우월성을 보여주는 실험적인 단계에 해당
- 이는 양자 우위를 지속적으로 입증할 수 있는 수준이 아님을 뜻하며, 실험적 검증은 진행되고 있지만 실질적 응용은 한정적인 상태임을 나타냄
- 향후 'Broad Quantum Advantage' 및 'Full-scale Fault Tolerance' 시대로 언제 진입할지는 매우 불확실한 상황으로 기술적 발전(기술 혁신) 정도에 크게 의존

표 III-2 양자 컴퓨팅 시대 구분

구분	NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)	Broad Quantum Advantage	Full-scale Fault Tolerance
시기	2020년 이후	2030년 이후	2040년 이후
특징	수십~수백개 큐비트	수천~수만개 큐비트	수백만개 큐비트 이상
	오류율 높음	부분적 오류 억제 및 보정	완전한 오류 보정
	특정 문제에서 제한적 양자 우월성	다양한 실제 산업 문제에서 일관된 양자 우위	안정적·범용적 양자 우위
	실험적·탐색적 연구	본격적인 산업 적용, 양자 상용화 시대의 시작	범용 양자 컴퓨팅 달성

* 출처: Campbell(2017), Preskill(2018) 등 기반 정리

- 양자 컴퓨팅이 하이퍼사이클 상 생산성의 안정기(plateau of productivity), S-곡선의 성숙기 등에 진입했을 때의 경쟁 구도는 고전 컴퓨팅과의 관계를 고려하여 전망할 필요
- 즉, 양자 기술이 안정화되어 주류 시장에서 널리 사용될 것으로 예측되지만 기존의 고전 컴퓨팅과의 관계 변화에 대한 분석은 양자 컴퓨팅 산업의 조기 성장 전략에 기여

3 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력

- 고전 컴퓨팅은 수십 년간 발전하며 H/W 및 S/W 생태계가 견고히 정착되었으나, 양자 컴퓨팅은 관련 생태계가 아직 미성숙한 수준으로 활용 및 응용이 제한적
 - 현재의 양자컴퓨터는 NISQ 단계로 불완전한 초기 기술에 해당
 - 하드웨어 성능, 알고리즘 개발, 오류 보정 등 다양한 측면에서 지속 발전 중이며, 이러한 기술 개발 경쟁은 양자 컴퓨팅이 실용적인 수준에 도달하기 위한 필수적인 과정
- 양자 컴퓨팅은 아직은 초기 개발 단계에 있으나, 향후 기술 성숙도와 시장 수용성 등에 따라 기존 컴퓨팅 패러다임을 전환시킬 수 있는 잠재력을 보유한 것으로 평가

표 III-3 컴퓨팅 방식 비교 : 고전 vs 양자

구분	고전 컴퓨팅 (Classical computing)	양자 컴퓨팅 (Quantum computing)
연산 성능	▶ 선형적 처리	▶ 지수적 처리 가능
기술 성숙도	▶ 상용화 완성 단계	▶ 실험적, 프로토타입 단계
응용 범위	▶ 범용적 적용 가능	▶ 특수 문제(암호, 최적화, 시뮬레이션) 중심
산업 생태계	▶ 견고하고 복잡한 생태계	▶ 초기 형성 단계, 파편화된 연구 중심 생태계
진입장벽-활용	▶ 낮음 (개발자 친화 환경)	▶ 높음 (전문 인력 부족, 고비용 장비)
진입장벽-시장	▶ 높음 (표준 및 생태계 고착, 공급망/대기업 과점 구조)	▶ 낮음 (표준 및 주도권 미정립, 산업 초기로 사업 기회 존재)

* 출처: Campbell(2017), Preskill(2018) 등 기반 정리

- 기존의 고전적 컴퓨팅(classical computing) 방식으로는 해결이 어려운 복잡한 문제*를 쉽게 처리할 수 있는 가능성을 가진 것으로 평가
 - * 복잡한 양자역학적 시스템의 시뮬레이션, NP-hard 최적화 문제, 암호 해독, 고차원 데이터의 처리/패턴 인식/강화 학습, 금융 모델링 및 리스크 분석 등
- 양자 컴퓨팅은 현재 산업 성장을 위한 기술 혁신의 전초 단계에 머문 것으로 평가되며, 향후 기존 산업 구조를 근본적으로 바꿀 게임체인저로서 파괴적 기술로 부상할 가능성이 있음
- Gartner(2024.7)에 따르면 양자 컴퓨팅의 편익 등급(benefit rating)*은 변혁적(transformational) 등급에 해당하며, 산업 전반에 걸쳐 비즈니스 수행 방식을 혁신하여 산업 내 역학(dynamics)에 큰 변화를 가져올 것으로 전망
 - * Transformational(변혁적), High(높음), Moderate(보통) 및 low(낮음) 등급으로 구분됨

그림 III-3 양자 컴퓨팅의 편익 등급(Benefit Rating)

편익 (benefit)	대중적 채택까지 걸리는 시간 (Years to Mainstream Adoption)			
	2년 이내	2~5년	5~10년	10년 이상
변혁적 (Transformational)		AI Supercomputing Compute Express Link	Neuromorphic Computing	Emerging Memory Tech. Quantum Computing Meta Computing
높음 (High)	Edge Servers Hyperconvergence	BMaas Composable Infrastructure Consumption-Based Model Container Management Deep Neural Network ASICs Infrastructure Automation Infrastructure Orchestration IT/OT Hybrid Servers Revirtualization	Devirtualization Function Accelerator Cards	Photonic Computing
보통 (Moderate)	Immersion Cooling Micro OS for Containers	ARM-Based Servers Cloud-Tethered Compute eBPF FPGA Accelerators Immutable Infrastructure	Confidential Computing Direct-to-Chip Liquid Cooling	
낮음 (Low)				

* 출처: Gartner, 'Hype Cycle for Compute, 2024', 2024.7.8.

- 양자 어닐링, 광자 방식 등 특수목적형 양자 컴퓨팅은 이미 물류 및 금융 최적화, 신약 개발 등 다양한 분야에서 성과를 내는 등 초기 상용화 단계로 평가
 - D-Wave(캐나다)의 양자어닐링 컴퓨팅은 조합 최적화 등 제한된 문제에 대해 기존 컴퓨팅 대비 우수한 솔루션을 제시함으로써 양자기술 실용화의 가능성을 입증하는 중
 - IonQ(미국)의 이온 트랩 기반 양자 컴퓨팅은 화학 시뮬레이션, 항공/물류 등 분야에서 상용 시스템으로서의 성과를 보여주고 있음
 - Xanadu(캐나다)는 광 기반 포토닉스 양자 컴퓨팅을 통해 금융, 화학/재료, 물류 등 산업에서 다양한 연구 및 상용화 사례를 진행 중
- 양자 컴퓨팅의 잠재력에 대한 관심과 이에 따른 기술 발전 및 산업적 성장은 컴퓨팅 산업 패러다임의 거스를 수 없는 진화 과정으로 이해할 수 있음
 - 양자 컴퓨팅이 미래에 실질적으로 파괴적 기술로 성장하기 위해서는 양자 컴퓨팅의 잠재력을 최대한 이용할 수 있는 실용적 기술 개발과 산업 성장 환경 조성이 필요
 - 이와 함께 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력에 대한 평가는 현시점에서의 진단을 기반으로 미래의 바람직한 발전 방향성 정립을 위해서 꼭 필요한 과정
 - 이는 특정 기술 방식이나 특정 국가 차원이 아닌 고전 컴퓨팅과의 관계를 고려한 양자 컴퓨팅 분야 차원에서 접근해야 함
- 양자 컴퓨팅이 고전 컴퓨팅과의 관계 속에서 파괴적 기술로 발전할 잠재력(가능성)은 기술적 특성뿐만 아니라 시장, 산업 등 다양한 측면에서 평가할 필요
 - 기술 경영 및 혁신 이론에 기반하여* 기술, 시장, 생태계, BM 및 제도적 관점의 5대 평가 요인(지표)를 구성하고, 양자 컴퓨팅 분야의 기술 및 산업/정책 전문가들의 의견을 조사
 - * 파괴적 혁신 이론(Christensen, 1997), 혁신의 확산(Rogers, 2003), 기술 수용 주기(Moore, 1991), 기술 패러다임(Dosi, 1982), 기술 수명 주기(Abernathy & Utterback, 1978) 등
 - 파괴적 기술이 되기 위한 잠재력은 단순히 기술적 관점에서만 평가해서는 안되며, 시장, BM, 수용성, 제도 등 기술이 산업적으로 성장하기 위한 다양한 요인들을 포괄해야 함

표 III-4 파괴적 기술 잠재력 평가 요인

요인(지표)	개념	핵심 질문
기술 혁신성	기존 기술 대비 근본적 차별성	◆ 기존 기술 대비 근본적인 차별성이 있는가?
시장 대체성	기존 제품/서비스의 대체 가능성	◆ 현재의 시장 구조를 무너뜨릴 수 있는가?
생태계 수용 가능성	초기 수용자/생태계 존재 여부 및 확산 가능성	◆ 해당 기술을 받아들이는 초기 생태계와 플레이어가 존재하는가? 향후 대중적 확산이 일어날 것인가?
비즈니스 파급력	새로운 비즈니스 모델/가치 창출 가능성	◆ 새로운 수익 모델과 산업 구조를 만들어낼 수 있는가?
사회·제도적 준비도	사회적 수용성 및 제도적 대응 가능성	◆ 해당 기술은 사회적으로 받아들여지고 제도적으로 준비되어 있는가?

- 파괴적 기술로 자리 잡기 위해서는 양자 컴퓨팅이 기술의 혁신성을 기반으로 기존 시장을 대체하면서 해당 산업 생태계 내에 폭넓게 확산되어 사업적 수익성까지 확보되는 것이 요구되며, 이는 사회제도적 지원을 통해 가속화됨
- 고전 컴퓨팅과의 비교를 기반으로 요인별 특성(현황) 및 평가 포인트는 다음 <표>와 같음

표 III-5 파괴적 기술 잠재력 평가 포인트

요인 (지표)	요인별 비교		평가 포인트
	고전 컴퓨팅 (Classical computing)	양자 컴퓨팅 (Quantum computing)	
기술 혁신성	<ul style="list-style-type: none"> - 비트(0/1) 기반 - 성능 향상은 주로 무어의 법칙, 병렬화, GPU 발전에 의존 - NP-난해 문제 해결에 한계 	<ul style="list-style-type: none"> - 큐비트(Qubit) 기반 중첩·얽힘 활용 - 특정 문제에서 지수적 속도 향상 가능 - 오류율, 결맞음 유지 문제 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 근본적(질적) 차별성 존재 여부 ▶ 기존 한계를 뛰어넘는 문제 해결 가능성
시장 대체성	<ul style="list-style-type: none"> - 범용적·보편적 사용(PC, 서버, 클라우드) - 슈퍼컴퓨터로도 어려운 문제 다수 존재 - 기존 암호 인프라와 강하게 결합 	<ul style="list-style-type: none"> - 특정 응용(암호 해독, 최적화, 신약, 소재, 금융)에서 성능 우위 (양자 우월성) - 기존 보안 체계 위협 (양자 내성 암호 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존 시장(HPC, 보안 등) 무너뜨릴 가능성 ▶ 특정 산업에서 대체재/보완재로 작용 여부
생태계 수용 가능성	<ul style="list-style-type: none"> - H/W/S/W·개발자 생태계 성숙 - 표준과 산업 인프라 확립 - 보급형 기술 	<ul style="list-style-type: none"> - H/W(큐비트 구현 방식) 다양: 초전도, 이온트랩, 광자 등 - 오픈소스 SDK(Qiskit, Cirq 등) 및 QCaaS 등장 및 확산 - 초기 수용자(IBM, Google, Amazon, 정부 연구소) 중심 확산 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 조기 수용자 존재 여부 및 향후 확산 가능성 ▶ 개발자 커뮤니티 성장 정도 ▶ 클라우드 서비스 통한 접근성
비즈니스 파급력	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 비즈니스 모델 안정화 (H/W 판매, 클라우드 서비스, SW 라이선스 등) - 가치사슬 고착화 	<ul style="list-style-type: none"> - 신규 BM 등장 : 구독형 QCaaS 등 - 신약·금융·에너지 등 산업별 혁신 기회 - 기존 IT 가치사슬 재편 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 새로운 BM과 수익 구조 창출 여부 ▶ 기존 산업 질서 변화를 일으킬 파급력
사회·제도적 준비도	<ul style="list-style-type: none"> - 제도·표준 안정화 - 사이버보안, 개인정보 보호 체계 확립 - 사회적 수용성 매우 높음 	<ul style="list-style-type: none"> - 주요국의 전략적 투자(미국 NQI, EU QF, 중국·한국 국가 로드맵) - 양자암호 표준화 진행 중 - 양자 기술 패권 경쟁 가속화 - 긍정부정적인 사회적 인식 존재 * 보안 위협·산업 변화 등에 대한 불안 * 기술 혁신 및 신산업 창출 기대 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 정책·표준 준비도 ▶ 사회적 수용성 ▶ 보안·윤리 이슈 대비 ▶ 지정학적 경쟁 영향 및 대응

주) QCaaS: Quantum Computing as a Service, NQI: National Quantum Initiative, QF: Quantum Flagship, HPC: High-Performance Computing,

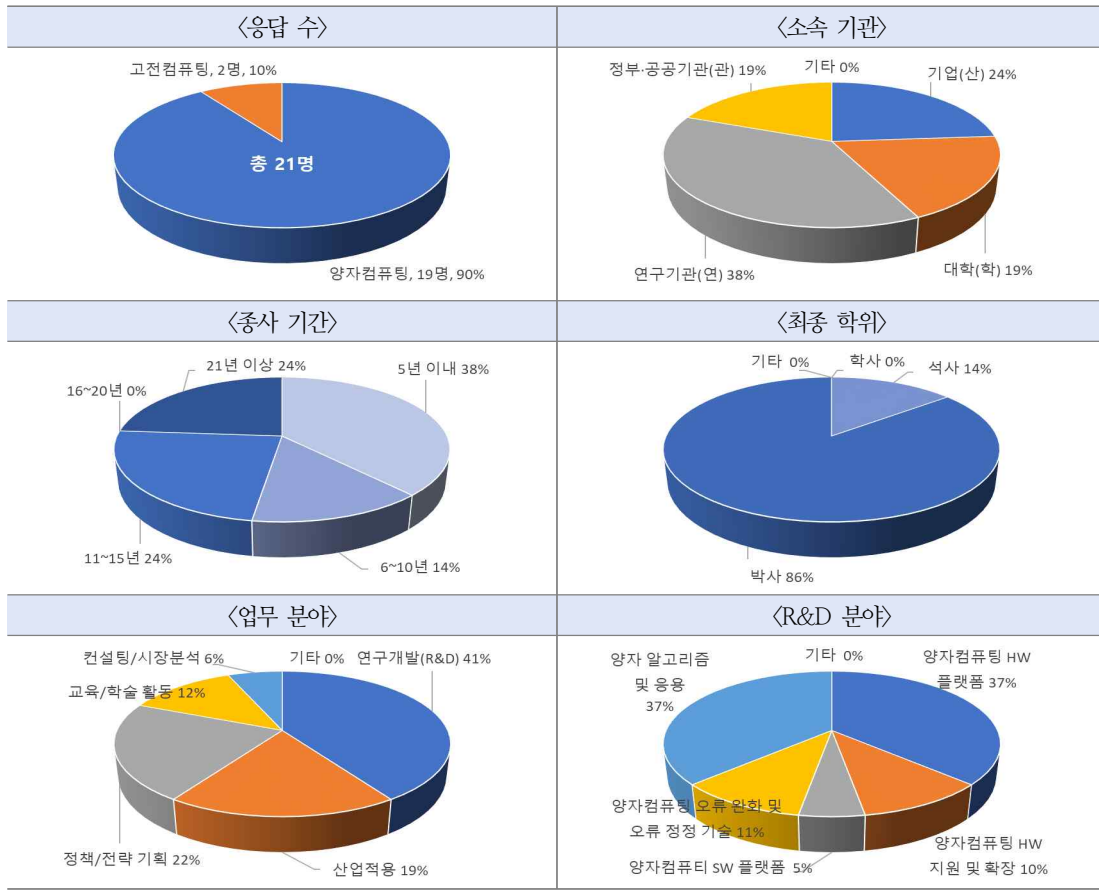
전문가 설문 조사 개요

◇ 조사 개요

- (조사 목적) ‘컴퓨팅 분야 내 경쟁’에 관한 것으로 양자 컴퓨팅이 미래에 어떻게 발전할지에 대한 관련 전문가의 의견을 수집·분석하여 산업 성장 전략 수립에 인사이트를 도출하고자 함
 - 큐비트(qubit)를 활용하는 양자 컴퓨팅이 비트(bit)를 기반으로 하는 고전 컴퓨팅과의 경쟁 속에서 기술이 발전함에 따라 어떤 위상과 궤적을 가질 것인가에 대해 조사
- (조사 설계) 양자 및 고전(슈퍼) 컴퓨팅 전문가를 대상으로 하는 구조화된 설문 조사 실시
 - 양자 컴퓨팅 전문가만의 평가로 인한 편향 완화를 위해 슈퍼 컴퓨팅 전문가도 포함
 - ※ 양자 컴퓨팅과 고전 컴퓨팅과의 경쟁을 기반으로 양자 컴퓨팅의 발전을 전망하므로 균형적 평가 필요
 - 조사 내용은 세부적으로 △ 파괴적 기술이 될 수 있는 잠재력 평가, △ 기술의 발전 시나리오(궤적) 전망 및 △ 관련 지원 방안 제시 등으로 구성 (설문지는 <부록1> 참조)

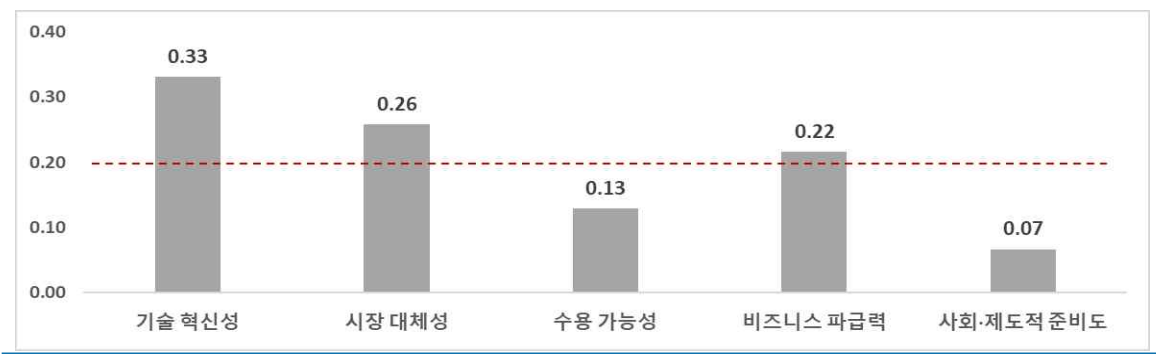
◇ 응답자 현황

- (응답 수/소속 기관) 총 21개 응답이며, 연구기관(38%)>기업(24%)>대학(19%) 등 순으로 분포
- (종사 기간/최종 학위) 양자 컴퓨팅 분야 종사 기간은 다양하며, 대부분 박사 학위 소지
- (업무 분야/R&D 분야) 연구개발 분야가 41%로 가장 높고, 세부적으로 양자컴퓨팅 HW 플랫폼과 양자 알고리즘/응용 등 분야에서 R&D 수행



- 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있는 잠재력에 대한 평가 결과는 다음과 같음
 - 먼저 요인 중요도*의 경우, 기술 혁신성(0.33)이 가장 높고 경제적 관점의 지표인 시장 대체성과 비즈니스 파급력이 평균(0.2)보다 높은 수준으로 각각 0.26, 0.22를 보이며 2위 그룹 형성
 - * Best/Worst 요인 기준 쌍대 비교를 통해 중요도를 산출하는 BWM(Best-worst method) 기법 활용
 - ※ Friedman 검증 결과, p-value 1.18×10^{-7} , $\chi^2=37.889$ 로 요인 중요도의 차이가 없다는 귀무가설 기각
 - 파괴적 기술로 진화하는 데 있어 시장, 생태계, 제도 등의 비기술적 요인(non-technological factors)보다 ‘기술적 혁신’의 중요성이 훨씬 크다는 의미(Technology-push innovation)

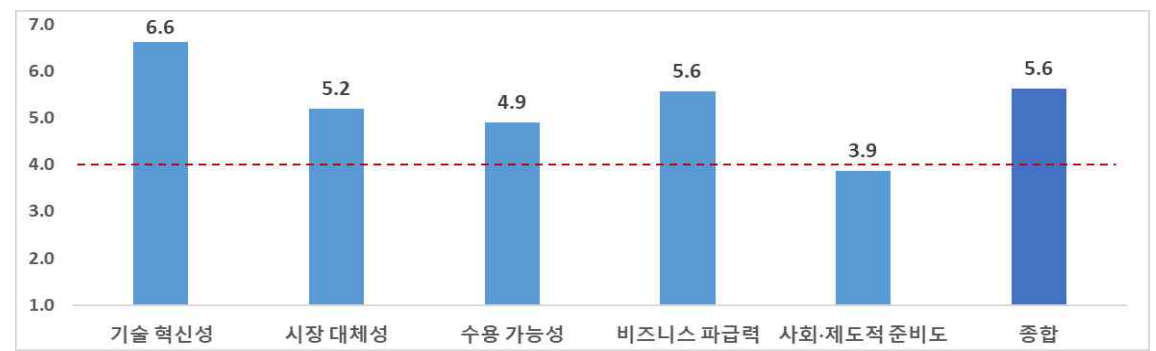
그림 III-4 요인 중요도 분포



주) 붉은색 점선은 평균값 0.2에 해당

- 요인별 전문가 평가(7점 척도)와 요인 가중치를 고려한 잠재력 평가 결과, 종합적으로 5.6 (77점)으로 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력이 ‘높은 수준’인 것으로 나타남
- 세부적으로 살펴보면, ‘기술 혁신성’이 매우 높으며(6.6, 93.7점), 다음으로 ‘비즈니스 파급력 (5.6, 76.2점)’과 ‘시장 대체성(5.2, 69.8)’이 높은 것으로 평가됨
 - * ‘사회·제도적 준비도’ 요인만 ‘보통’ 수준에 약간 못 미치는 것으로 나타났으며, 이에 대한 관심과 노력도 추후 양자 컴퓨팅의 시장 확산이 본격화되면 파괴적 기술로 빠르게 발전하는데 기여할 것으로 판단
 - ※ Friedman 검증 결과, p-value 2.17×10^{-9} , $\chi^2=46.260$ 로 요인 평가값의 차이가 없다는 귀무가설 기각
- 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력에는 계산 패러다임의 근본적 변화(비트 → 큐비트, 중첩·얽힘 등 양자역학적 현상 활용)에 기인하는 기술적 혁신성이 상대적으로 크게 영향을 미침

그림 III-5 파괴적 기술 잠재력 평가 결과



- 주1) 붉은색 점선은 7점 척도 기준 ‘보통’에 해당되며, 5점 이상이 ‘높음’에 해당
- 주2) 종합 값은 요인별 평가 점수를 요인 중요도로 가중 평균하여 산출

< 시사점 >

- ✓ 양자 컴퓨팅은 아직 산업 및 시장 형성 초기로, 기술적 관점에서 다양한 큐비트 구현 방식간 경쟁이 치열한 상황으로 양자 우월성 또는 양자 우위 달성을 위한 R&D가 활발
- ✓ 이와 같은 현재의 산업 여건은 양자 컴퓨팅이 향후 파괴적 기술로 발전할 수 있을 것인지, 어떤 기술 방식 주도로 파괴적 기술로 성장할 것인지 등 불확실성(uncertainty)을 보여줌
- ✓ 이런 가운데, 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력이 높게 평가된 점은 이 분야에 대한 투자의 필요성이 크다는 점을 나타냄과 동시에 투자 타당성의 논리적 근거가 됨

- 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있도록 지원하는 방안에 대한 전문가 평가 결과는 다음과 같음
 - 요인별로 각각 ‘R&D 투자 확대’, ‘양자-고전 Hybrid 환경 지원’, ‘양자 컴퓨팅 전문 인력 양성’, ‘응용 산업별 사업화 지원’ 및 ‘양자 정책 거버넌스 체계 강화’ 등이 1순위로 나타남
 - 요인 중요도를 고려할 때 단기적 관점에서는 기술 혁신성을 높이기 위한 노력에 집중해야 하나, 장기적으로는 생태계 형성, 제도적 지원 방안에 대한 관심도 기울일 필요

표 III-6 파괴적 기술 발전 지원 방안

요인	지원 방안	비중
기술 혁신성	R&D 투자 확대 및 안정적·체계적 지원을 통한 장기적 로드맵 실현	40.5%
	산·학·연 공동 플랫폼 운영을 통한 혁신적 연구 협력 강화	16.2%
	다양한 아키텍처 연구 지원을 통한 혁신 경로 다양성 확보	8.1%
	연산 정확도와 안정성 향상 연구를 통한 기술 신뢰성 확보	21.6%
	핵심 H/W 장비 구축과 공동 활용 지원을 통한 R&D 기반 강화	13.5%
시장 대체성	산업 맞춤형 양자 S/W 활용 확대를 통한 응용 사례 확산	24.2%
	핵심 응용 산업별(금융, 제약·바이오 등) 실증사업 고도화를 통한 상용화 촉진	24.2%
	공공부문 전략적 수요 창출을 통한 초기 시장 활성화	12.1%
	양자-고전 Hybrid 환경 지원을 통한 단계적 전환 기반 마련	36.4%
	맞춤형 가이드라인 개발 및 적용을 통한 응용 산업별 도입 촉진	3.0%
생태계 수용 가능성	양자 컴퓨팅 전문 인력 양성을 통한 연구·산업 생태계 성장 기반 마련	37.5%
	오픈소스 기반 SDK·개발자 지원을 통한 커뮤니티 활성화	15.6%
	QCaaS 접근성 확대를 통한 스타트업 등 초기 수요자 진입 기회 확대	18.8%
	산·학·관 협력 네트워크 구축을 통한 국내 생태계 연계 강화	28.1%
비즈니스 파급력	양자 특화 비즈니스 모델 발굴 지원을 통한 신시장 창출	34.4%
	QCaaS 기반 시장 진입 촉진을 통한 스타트업·벤처 활성화	21.9%
	응용 산업별 PoC 성과 검증 및 사업화 연계 지원 확대	37.5%
	IP·표준 연계 전략 강화를 통한 글로벌 도입·확산 촉진	6.3%
사회·제도적 준비도	양자 정책 거버넌스 체계 강화를 통한 국가 전략 실행력 제고	31.0%
	양자 컴퓨팅 응용·보안 표준화 선도를 통한 도입 기반 강화	27.6%
	양자 컴퓨팅 특화 실증·조달·인증 체계 마련을 통한 활용 촉진	17.2%
	양자 컴퓨팅의 산업적 영향·보안 위협 대응 체계 구축을 통한 수용성 제고	6.9%
	국제 공동 연구·규제 협력 참여를 통한 글로벌 제도 정합성 확보	17.2%

주1) 응답자(양자컴퓨팅 전문가 19명)는 요인별로 최대 2개 방안 선택이 가능, 요인별 총 선택 수는 30~37건임

주2) 요인별 비중 합은 100%임

4 양자 컴퓨팅의 발전 시나리오

- IT의 역사에서 컴퓨팅 기술은 지속적인 진화를 거쳐왔으며, 오늘날 우리는 기존 디지털 컴퓨터의 한계를 넘어서는 새로운 패러다임의 전환기에 직면
 - 양자 컴퓨팅은 계산 복잡도, 보안성, 병렬 처리 성능 등 여러 측면에서 기존 기술인 고전 컴퓨팅의 근본적인 대체 가능성을 내포한 파괴적(disruptive) 기술로 부각
- 기술 혁신 전략 수립의 일환으로 기술 발전에 따른 양자 컴퓨팅의 포지셔닝과 발전 시나리오(궤적)를 규명할 필요성이 있으며, 분석 도구로 '2x2 전략적 기술 혁신 그리드'를 활용
 - 양자 컴퓨팅은 고전 컴퓨터 대비 문제 해결 방식 자체의 전환을 의미하므로, 그 가능성뿐만 아니라 전환에 따른 발전 시나리오를 전략적으로 해석하는 틀이 중요
 - 양자 컴퓨팅(새로운 기술)이 고전 컴퓨팅(기존 기술)과의 관계 속에서 발전하는 과정은 범용성(universality)과 대체성(substitutability)이라는 두 가지 관점(축; axis)에서 분석하는 것이 유용
 - 고전 컴퓨팅은 범용 목적 컴퓨팅(GPC; General Purpose Computing)로서 폭넓게 확산된 반면, 양자 컴퓨팅은 이론적으로 범용적 계산이 가능하지만 현실적으로 실현될지는 아직 미지수 → 범용성 축
 - 양자 컴퓨팅은 새로운 컴퓨팅 패러다임으로 고전 컴퓨팅의 한계 극복을 위해 출현한 만큼 경쟁에 따른 대체 또는 협력을 위한 보완 관계 형성 여부에 따라 발전 경로가 달라짐 → 대체성 축

표 III-7 기술 혁신 그리드의 축(axis)

구분	설명
범용성 (universality) [X-axis]	<ul style="list-style-type: none"> • 기술이 다양한 문제나 응용 분야에서 얼마나 광범위하게 사용될 수 있는지를 의미 • 양자 컴퓨팅이 일반 목적 컴퓨팅(GPC; General Purpose Computing)으로 사용 가능한가, 아니면 특수 목적에 제한되는가? ⇒ 특수 목적(special-purpose) ↔ 일반 목적(general-purpose)
대체성 (substitutability) [Y-axis]	<ul style="list-style-type: none"> • 새로운 기술이 기존 기술을 어느 정도까지 대체할 수 있는지를 의미 • 양자 컴퓨팅이 기존의 고전 컴퓨터(classical computing)를 완전히 대체할 수 있는가, 아니면 부분적으로만 대체할 것인가? ⇒ 일부 대체(partial) ↔ 완전 대체(complete)

- 2개 축에 따라 형성되는 기술 혁신 그리드의 각 사분면 명칭과 의미는 다음과 같음

표 III-8 양자 컴퓨팅의 기술 혁신 그리드

2x2 기술 혁신 그리드	완전 대체(complete) ↑ 대체성 (Substitutability) ↓ 일부 대체(partial)	2사분면 Domain Optimizer	1사분면 Universal Disruptor
		3사분면 Complementary Specialist	4사분면 Emerging Backbone
		특수 목적 (special-purpose) ← 범용성 (universality) → 일반 목적 (general-purpose)	

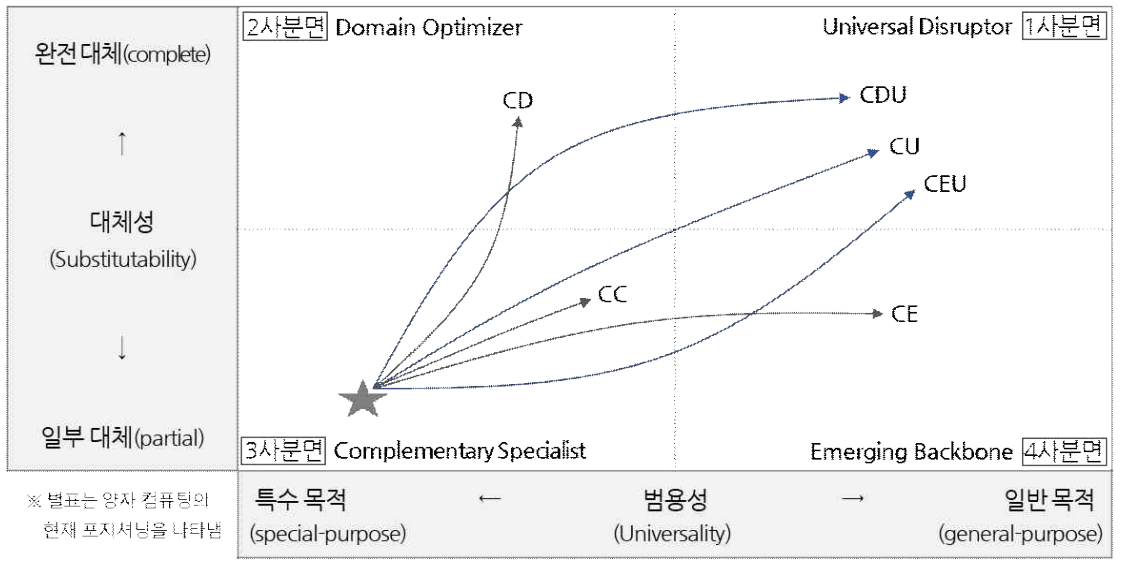
사분면(quadrant) 설명	
<p>1사분면 Universal Disruptor 범용성 高, 대체성 高</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (개념) 양자 컴퓨팅이 범용적으로 사용되는 동시에 기존 고전 컴퓨팅을 완전히 대체할 수 있는 수준으로 발전 : 전면적 패러다임 전환 기술로 자리매김 ▶ (기술적 특징) 완전 오류보정이 구현된 대규모 양자 시스템으로 모든 계산 문제에서 양자 우위를 확보 ▶ (산업적 의미) 기존 컴퓨팅 패러다임이 전면적으로 전환되며 산업 전반의 기술 인프라 구조가 재편 ▶ (예시) 완전 오류보정 양자 컴퓨터(Fully Fault-Tolerant Quantum Computer)
<p>2사분면 Domain Optimizer 범용성 低, 대체성 高</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (개념) 양자 컴퓨팅이 특정 도메인에 특화되어 해당 영역에서 고전 컴퓨팅을 완전히 대체 ▶ (기술적 특징) 특정 산업 분야의 복잡한 문제를 중심으로 최적화된 알고리즘과 하드웨어를 통해, 명확한 양자 우위(Quantum Advantage)를 확보 ▶ (산업적 의미) 도메인별 맞춤형 양자 솔루션이 응용 산업의 혁신을 견인하며, 응용 중심 R&D와 산업 맞춤형 생태계가 형성 ▶ (예시) 화학제약 분야의 양자 시뮬레이션, 분자 구조 분석, 양자 화학 계산 등
<p>3사분면 Complementary Specialist 범용성 低, 대체성 低</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (개념) 양자 컴퓨팅이 특수 목적으로 제한되며 그 용도에서도 고전 컴퓨팅과 병행이 필요한 보완적 기술로 작동 ▶ (기술적 특징) 제한된 큐비트와 오류율로 인해 양자-고전 하이브리드 구조를 중심으로 부분적 성능 향상을 시도 ▶ (산업적 의미) 실증 및 파일럿 단계의 초기 시장으로, 기술 주도권 확보와 파일럿 프로젝트 중심의 경쟁이 전개 ▶ (예시) VQE(Variational Quantum Eigensolver), QAOA(Quantum Approximate Optimization Algorithm), Hybrid Quantum-AI 모델 등 하이브리드 알고리즘
<p>4사분면 Emerging Backbone 범용성 高, 대체성 低</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ (개념) 양자 컴퓨팅이 다양한 분야에서 폭넓게 활용되지만 아직 고전 컴퓨팅을 완전히 대체하기에는 한계가 존재 ▶ (기술적 특징) 범용적 응용이 가능하나 대체성은 낮으며, 양자-고전 융합 구조(Quantum-Classical Hybrid Architecture)로 진화 ▶ (산업적 의미) 고전 컴퓨팅과 공존하면서, 양자 클라우드와 AI와의 융합 등을 통해 새로운 컴퓨팅 인프라로 확산 ▶ (예시) 양자 클라우드 서비스, 양자-고전 하이브리드 컴퓨팅 인프라

● 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술이 될 가능성이 높긴 하지만, 기술 진화 과정에서 내·외부 여건에 따라 발전 시나리오(궤적)가 다양하게 나타날 수 있음

- 양자 컴퓨팅 內 경쟁(Qubit 구현 방식 간 경쟁, 기업 및 방식별 가치사슬 경쟁 등) 뿐만 아니라 컴퓨팅 경쟁(Quantum vs Classical)의 강도가 높아지고 있으며, 이에 따라 미래에 다양한 경쟁 또는 산업 구도가 발생 가능

- 현재 양자 컴퓨팅의 위상은 Complementary Specialist(3사분면)로서 특수 목적용으로 기존 고전 컴퓨팅의 역할을 일부 대체하려고 시도하는 수준에 위치한 것으로 평가

그림 III-6 양자 컴퓨팅의 기술 발전 시나리오



- 향후 기술 발전에 따라 일반 목적용으로 기능하면서 기존 고전 컴퓨팅을 완전히 대체하는 Universal Disruptor로 진화할 수 있으며, 여기에는 세부적으로 3가지 시나리오가 가능
 - CU : Complementary Specialist에서 바로 Universal Disruptor로 발전
 - ⇒ 돌파적 기술 혁신(대규모 큐비트 확보, 에러 보정 완성 등)으로 곧바로 범용적 완전 대체 (예: 완전 오류보정 양자 컴퓨터(FMQC), 범용 양자 OS)
 - CDU : Complementary Specialist에서 Domain Optimizer를 거쳐 Universal Disruptor로 발전
 - ⇒ 특정 도메인에서 우선 고전 기술을 대체한 후, 점차 범용화되면서 다양한 분야를 완전 대체 (예: 화학신약 개발, 금융 최적화 → 일반 목적 계산)
 - CEU : Complementary Specialist에서 Emerging Backbone을 거쳐 Universal Disruptor로 발전
 - ⇒ 다양한 영역에서 보조 역할로 확산된 후에(양자-고전 하이브리드) 점차 대체성 강화 (예: 클라우드 기반 Hybrid 양자-고전 시스템의 지속적 발전)
- Universal Disruptor로 발전하지 못할 수도 있으며, 여기에도 3가지 시나리오가 가능
 - CD : Complementary Specialist에서 Domain Optimizer로 발전
 - ⇒ 특정 도메인 최적화에만 머물고 범용화는 실패 (예: 신약화학금융 등 중심의 특화 양자 기술)
 - CE : Complementary Specialist에서 Emerging Backbone으로 발전
 - ⇒ 다양한 응용은 가능하지만 고전 컴퓨팅과 공존하며, 완전 대체는 한계 (예: 클라우드 기반 양자-고전 하이브리드 서비스)

- CC : 기술 수준은 높아지나 Complementary Specialist에서 벗어나지 못함
 ⇒ 기술적 진보는 있으나, 근본적인 한계로 기존 컴퓨팅 기술의 보조적 역할에 머무
 (예: 실증파일럿 중심의 제한적 양자 응용)

- 기술 발전 시나리오별로 각기 다른 기술·산업·정책적 장·단점을 지니며, 이에 대한 분석적 이해는 기술 진화의 불확실성 속에서 전략적 선택과 리스크 대응 방안 마련에 필수적

표 III-9 기술 궤적별 Pros & Cons

궤적	Pros	Cons
CU	<ul style="list-style-type: none"> • 돌파적 성공시 글로벌 기술 패권 확보 가능 • 새로운 서비스·비즈니스 모델 출현이 가속 → 산업 전반의 혁신 효과 극대화 • 정책 방향의 명료성과 전략적 일관성이 높음 → 대규모 국가 프로젝트로 추진 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 단기간에 기술적 성공 확률이 낮음 (에러 보정 완성, 대규모 큐비트 확보 등) • 대규모·장기적 투자 필요 → 실패 시 막대한 기회비용과 정책적 부담 • 응용 산업별 중간 성과 부족 → 기업인력 등 생태계의 점진적 성장 제한
CDU	<ul style="list-style-type: none"> • 초기 실증과 시장 사례로 정책 및 투자 타당성 확보 가능 : 가장 현실적·점진적 경로 • 특정 산업에서의 성과로 사회적 신뢰, 추가 응용 수요 및 민간 투자 유도가 용이 • 도메인별 성과 기반으로 타 산업 확산 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 특정 도메인 중심 성과에 머물며 범용 확산 지연 가능 • 도메인 응용은 이미 글로벌 빅테크·제약사가 선도 중으로 경쟁 부담 : 신약, 화학, 금융 등
CEU	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 산업에서 빠른 응용 확산이 가능 : 고전·양자 하이브리드 기반 실용적 확산 ⇒ 완전 양자로의 단계적 진화 • 기존 고전 인프라 활용으로 투자 효율성과 생태계 확장성이 높음 • 단계적 추진으로 정책 정당성 및 조기 성과 확보 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 고전 컴퓨팅에의 의존성이 높아 순수 양자 전환이 지연될 가능성 • 글로벌 기업 중심의 하이브리드 시장 선도 → 단순 추격자(follower)에 머물 가능성 • 완전 양자 생태계로의 전환 시 비용 및 마찰 부담
CD	<ul style="list-style-type: none"> • 신약·화학·금융 등 특정 산업에서 특화 모델 및 생태계의 빠른 구축으로 경쟁력 제고 • 빠른 성과 창출과 시장 반영이 용이 → 정책 성과 조기 가시화 • 일부 산업에 집중하여 투자 효율성 극대화 	<ul style="list-style-type: none"> • 도메인 특화 성과가 타산업으로 확산되지 못하여 틈새 시장(niche market)에 머물 가능성 • 국가 차원의 전략적 가치와 산업적 파급효과가 제한적
CE	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 산업에서 빠른 적용과 파급효과 창출 • 기존 IT 자산의 활용으로 투자 부담이 적음 • 응용 성과의 조기 창출로 정책 성과 확보가 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 고전 컴퓨팅 중심 산업 구조의 지속으로 양자는 보조 기술에 머물 가능성 • 국가 전략안보·기술 패권 측면의 레버리지 효과가 제한적
CC	<ul style="list-style-type: none"> • 범용·완전 전환이 아니므로 투자 위험성이 상대적으로 낮음 • 기존 산업 및 컴퓨팅과의 호환성 유지 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 산업 전반으로의 파급 효과가 제한적 • 제한적 성과 창출로 산업·국가 차원의 주력 기술로의 역할에 한계

- 양자 컴퓨팅의 발전 시나리오가 다양하게 전개될 가능성을 고려할 때, 각 궤적(시나리오)별 특성에 부합하는 정책 방향 설정과 실행 전략 마련이 중요
 - 궁극적으로 Universal Disruptor(1사분면, 범용-완전대체)로 발전하는 궤적인 CU, CDU, CEU는 완전 진화형이며, 그렇지 못하는 궤적인 CD, CE 및 CC는 제한 진화형으로 유형 구분 가능
 - 완전 진화형 궤적은 경유하는 사분면(D, E) 영역으로의 빠른 진입과 U 영역(1사분면)으로의 진입을 가속화하는 정책을 조화롭게 병행 추진
 - 제한 진화형 궤적의 경우에도 목적 사분면(D, E or C⁺)으로의 진입에 머물지 않도록 혁신 탐색적 활동*을 통해 U 영역(1사분면)으로의 도약 가능성을 열어두는 업사이드 전략을 추진
 - * 기술, 응용 및 생태계 측면의 혁신을 포괄; 기술 혁신은 기존 기술 틀을 넘어서는 근본적 기술 혁신 가능성의 탐색, 응용 혁신은 신산업에서의 응용 가능성을 실험, 생태계 혁신은 산업 구조 전환이나 플랫폼 기반 혁신 모델 탐색 등이 해당

표 III-10 기술 궤적별 정책 방향

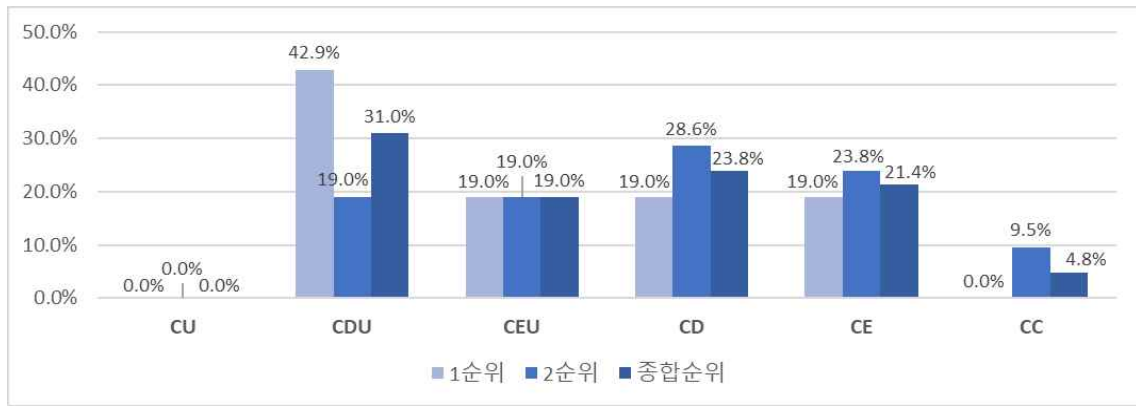
궤적	경로	전략 초점	정책 방향
CU	C → C ⁺ → U	기반 고도화 → 기술 도약	도약형 기술 혁신 (대규모 큐비트 확보, 완전 오류 보정 등)
CDU	C → D → U	산업 실증 → 플랫폼 확산	도메인 기반 신뢰 확보 및 범용 확산 (핵심 산업 중심의 단계적 확산)
CEU	C → E → U	Hybrid 확산 → 양자 중심 전환	단계적 전환 및 완전 양자화 (양자-고전 융합 기반의 체계적 확장)
CD	C → D	산업 특화 + 혁신 탐색	특화 산업 중심의 전략적 집중 (도메인 특화 R&D-실증 강화, 조기 상용화)
CE	C → E	Hybrid 응용 확산 + 혁신 탐색	양자-고전 융합 생태계 조성 (Hybrid 플랫폼 확대, 산업별 실용화 확산)
CC	C → C ⁺	기반 역량 강화 + 혁신 탐색	기술 역량 내재화 및 기반 강화 (핵심 기술 지속 개발, 전문인력 육성)

주) C⁺는 C 영역 내에서의 기술적 발전을 의미

- 양자 컴퓨팅의 미래 발전 시나리오에 대한 이해는 가능성이 높은 궤적을 식별함과 동시에, 각 궤적별 사분면 진입 시점을 함께 고려하는 것이 정책적 대응, 산업 전략 수립 및 기술 로드맵 설계 등 관점에서 중요
 - 관련 전문가 조사는 가능성이 높은 기술 궤적의 선택과 해당 큐비트 방식(현존하지 않는 새로운 방식 포함), 각 사분면(D, E 및 U) 진입 시기 및 궤적별 추진 방안* 등을 설문
 - * 상기 전략 초점과 정책 방향을 고려하여, 세부 경로별로 추진 방안 후보를 제시하고, 우선순위 또는 중요도가 높은 방안을 조사 (CDU의 경우, C→D, D→U의 세부 경로 존재)

- 향후 양자 컴퓨팅이 따를 것으로 예상되는 유망 기술 궤적에 대한 전문가의 전망 결과는 다음과 같음 (상세 데이터는 <부록2, 3> 참조)
 - **유형** CDU(31%)가 가장 유망하며, 다음으로 CD(23.8%), CE(21.4%) 등 순으로 분포
 - * 카이제곱 검증 결과, p-value 0.00333(<0.05)로 95% 신뢰 수준에서 비중 크기가 다름
 - 중간 경로 없이 곧바로 U 영역으로 진입하는 CU 궤적(돌파적 기술 혁신)은 힘든 것으로 평가
 - 현재 영역인 C(Complementary Specialist; 특화보완 영역)에 머무는 CC 궤적도 일부가 선택

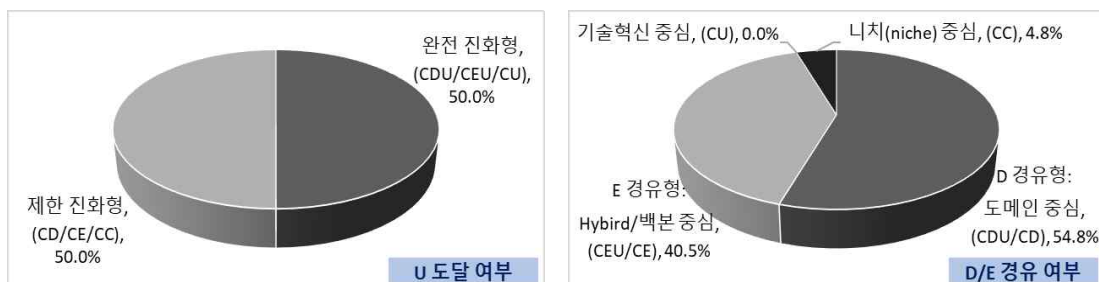
그림 III-7 유망 기술 궤적 유형 분포



주) 전문가별로 1, 2순위 궤적 선택, 총 선택 수는 42건 (응답자 21명)

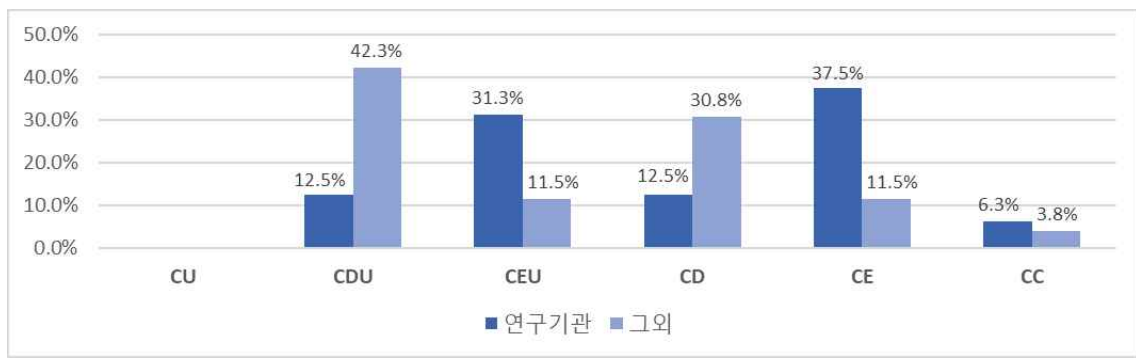
- U로의 도달 여부(①)와 D/E 경유 여부(②)에 따라 유형 구분이 가능하며, 그 특징은 다음과 같음
 - ① 완전 진화형(complete evolutionary trajectory) vs 제한 진화형(limited evolutionary trajectory)
 - ▶ 양자 컴퓨팅은 높은 잠재력이 있으나, 현재로서는 기술적 난제, 경제성 부족 등 여러 제약으로 범용 완전 대체 영역(U)로 발전할 수 있을지에 대한 전문가들의 의견이 갈림(50:50)
 - ② D 경유형 vs E 경유형 vs 기타(기술 혁신 중심, 니치 중심)
 - ▶ D 경유형(CDU, CD)이 과반을 차지하며(54.8%), 가장 유망한 경로群으로 드러남
 - ▶ E 경유형(CEU, CE)도 40.5%에 이르며, D 경유형만큼 유망한 것으로 평가됨
 - ▶ 이외 기타에 속하는 기술 혁신 중심의 CU 궤적은 현실적으로 힘들 것으로 전망되며, 발전과 확산이 제한된 니치(niche) 중심의 CC 궤적은 적은 비중으로 선택됨(4.8%)

그림 III-8 유망 기술 궤적 특성 분류



- 응답자의 특성(소속 기관, 최종 학위, 종사 기간, 업무 분야 등)에 따른 유형 분포의 차이는 전반적으로 없었으나, 연구 기관의 선택 유형이 그 외 기관과 다르게 나타난 점은 주목할 필요
 - ※ 카이제곱 독립성 검증 결과, p-value 0.050(≤ 0.05), $\chi^2=9.488$ 로 분포의 차이가 없다는 귀무가설 기각
 - ▶ 연구기관은 CE 유형이 68.8%, 그 외 기관은 CD 유형이 73.1%로 선택 비중이 높았으며, 이는 응답자가 속한 기관별 역할 및 업무 특성의 차이가 반영된 것으로 추측
 - ※ 연구기관은 국가 차원의 장기적 R&D, 기반 기술, 표준/인프라 구축 등 관점에서, 그 외 기업/대학 등은 양자 컴퓨팅의 실증/시범사업 등 중 단기 상용화에 중점을 둔 사업을 추진하는 경향이 있음

그림 Ⅲ-9 소속 기관별 선택 유형 분포



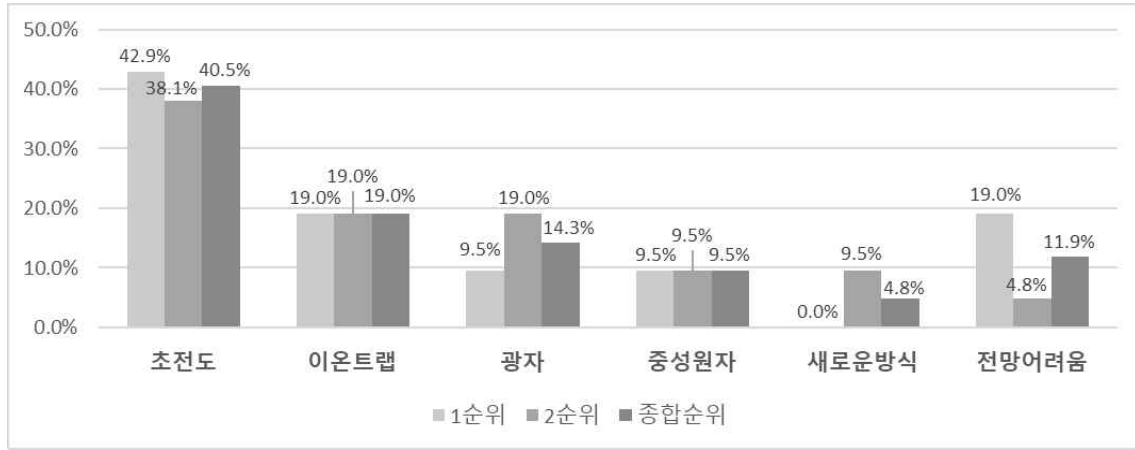
주) 응답자 총 21명 중 연구기관 소속은 8명(38.1%)이며, 그외 기관은 기업, 대학 등을 포함

< 시사점 >

- ✓ 도메인 특화 영역(D)으로 가는 궤적(CDU, CD)이 과반의 선택을 받았다는 점은 '범용화를 위한 R&D'보다 '응용 산업별 적용 및 확산에 정책적 우선순위(priority)를 뒤야 함을 시사
- ✓ 현재 특정 기술 궤적이 뚜렷한 우위를 보이지 않는 것은 주로 기술적 미성숙(immaturity)에 기인하며, 산업 성장 초기 단계의 높은 예측 불가능성(Unpredictability)을 내포
- ✓ 국가적으로 다양한 기술 발전 시나리오를 탐색·지원하는 유연한 R&D 전략을 토대로 위험 분담형(Risk-sharing) 공공 투자 프로그램도 확대할 필요

- **망식** 초전도가 40.5%의 선택을 받으며 가장 유망한 방식으로 나타났으며, 다음으로 이온트랩(19%), 광자(14.3%) 등의 순서로 분포
 - ※ 카이제곱 검증 결과, p-value 0.00125(< 0.05)로 95% 신뢰 수준에서 비중 크기가 다름
 - 큐비트 수, 정확도, 확장성, 게이트 속도 등 다양한 기술적 성능 지표를 종합할 때는 특정 방식의 우위를 단정하기는 어려운 상황
 - 하지만, 기술적 성능 외 상용화(상용 제품 및 클라우드 서비스 제공, 투자 및 생태계 규모, 제조 인프라 등) 수준이 높은 것으로 여겨지는 초전도와 이온트랩이 유망한 기술 방식으로 평가됨
 - 어떤 방식 주도로 기술 궤적을 보일지 아직은 전망하기 힘들다는 의견이 일부 존재(11.9%)
 - 기존에 없던 새로운 방식이 양자 컴퓨팅의 대표 기술 궤적을 주도할 것이라는 의견도 있음(4.8%)

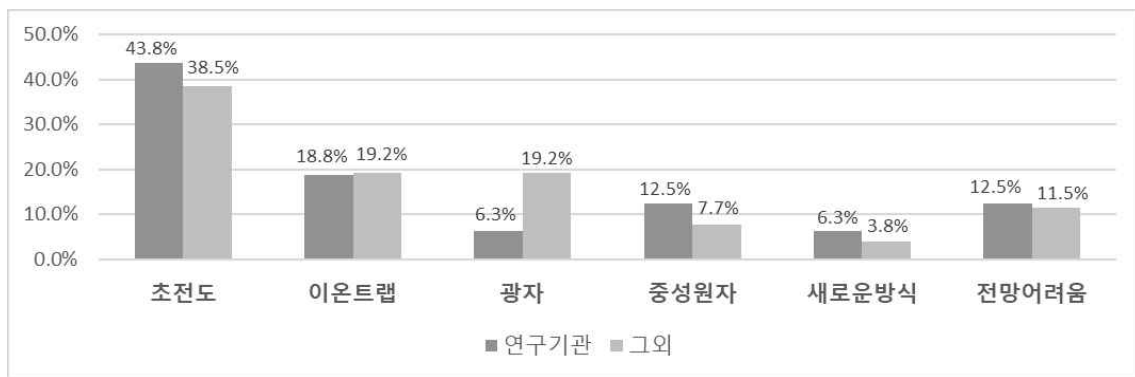
그림 III-10 유망 기술 구현 방식 분포



주) 전문가별로 1, 2순위 계층에 해당하는 방식 선택

- 연구기관 및 그 외 기관간 선택 방식 분포의 차이는 없으나, 광자 방식의 선택 비중이 높은 편
 - ※ 카이제곱 독립성 검증 결과, p-value 0.901(>0.05), $\chi^2=1.606$ 로 분포의 차이가 없다는 귀무가설 채택
 - ※ 이는 콰넬라 등과 같은 광자 기반 양자 컴퓨팅 기업이 포함된 것에 기인

그림 III-11 소속 기관별 선택 방식 분포



주) 응답자 총 21명 중 연구기관 소속은 8명(38.1%)이며, 그외 기관은 기업, 대학 등을 포함

< 시사점 >

- ✓ 현재 기술적 발전, 생태계 구축, 서비스 제공 등 산업 성장의 여러 관점에서 초전도와 이온 트랩 방식이 전반적으로 앞서 있는 것으로 인식되고 있음
- ✓ 이들 방식이 미래의 양자 컴퓨팅 기술 궤적을 주도할 것으로 평가된 점은 발전 가능성이 높은 방식에 대한 전략적 집중 투자로 양자 컴퓨팅 산업의 조기 성장을 도모할 필요가 있음을 시사
- ✓ 한편, 기존에 없던 전혀 새로운 방식이 시도되는 등 신-구 방식 간 경쟁이 심화되고 있어, 특정 기술 방식에 제한을 두지 않는 혁신적 R&D 투자도 병행할 필요

- **[시기]** Period 1은 2030년대 초반, Period 2는 2040년경으로 나타났으며, Universal Disruptor(범용완전대체 영역)로의 진입한다면 적어도 15년 후가 될 것으로 전망
 * Period 1, 2는 각각 D/E(중간 단계)와 U 영역 진입 시기를 의미, 예로 CDU는 D와 U 영역으로의 진입 시기임

표 III-11 기술 궤적별 진입 시기

궤적	예상 진입 시기	
	Period 1	Period 2
CU	-	-
CDU	2031	2040
CEU	2032	2041
CD	2033	-
CE	2033	-
CC	-	-

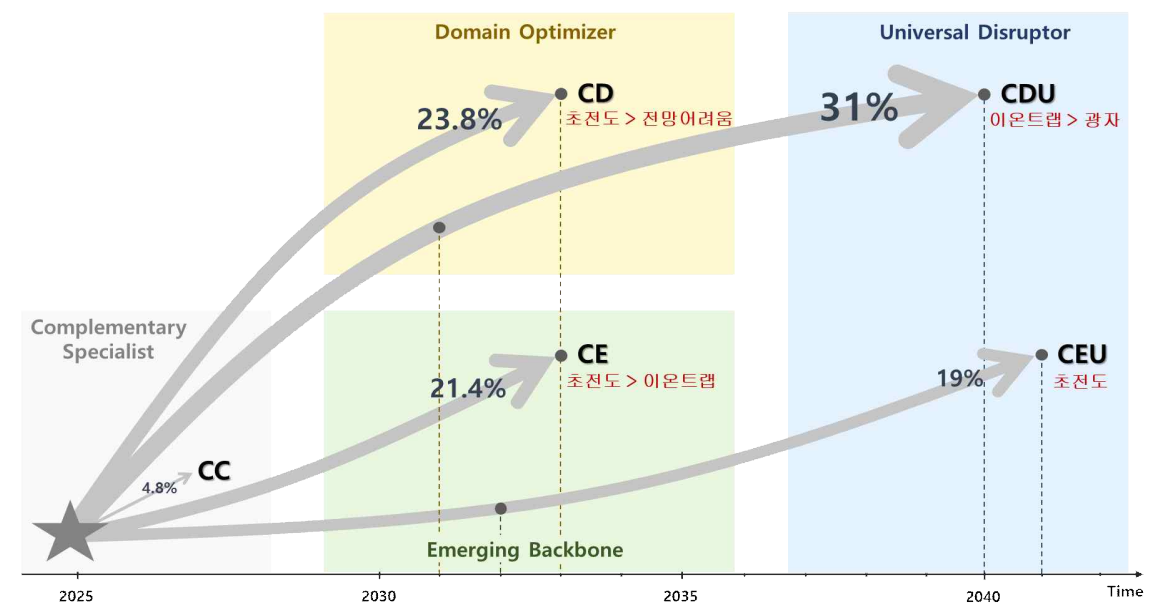
주) 전문가 평가 결과의 평균값임, CU는 유망 궤적으로 선택받지 못했으며, CC는 다른 영역으로의 진입 시기 불필요

< 시사점 >

- ✓ 양자 컴퓨팅에 대한 기대가 조정되는 상황으로 본격 성장기로 진입하기까지는 시간과 노력이 요구
- ✓ 양자 컴퓨팅이 창출할 가치(value)는 단기간에 현실화되기 어려운 만큼, 향후 10년 이상을 내다보는 중장기적 관점의 지속 가능한 산업 활성화 정책을 추진할 필요

- **[종합]** 이온 트랩기반의 CDU 궤적이 가장 유망하며(31%), 초전도는 CD(23.8%), CE(21.4%)와 같은 제한 진화형 궤적을 주도할 전망(비중 50% ↑)
 * CDU 궤적을 주도할 방식으로는 이온트랩(30.8%), 광자(23.1%) 외 방식 전망이 어렵다는 의견도 존재(15.4%)
 - 초전도 기반으로 U 영역에 도달하는 궤적은 CEU이며, 유망성은 상대적으로 낮은 편

그림 III-12 유망 기술 궤적별 비중, 방식 및 시기



주1) 선 화살표의 굵기는 궤적별 선택 비중을 의미하고, 검은 원의 세로축 위치는 궤적별 해당 영역 진입 시기를 나타냄
 주2) 경로별 예상 기술 방식은 1 또는 2순위까지만 표시

< 시사점 >

- ✓ 유형·방식·시기를 함께 고려한 양자 컴퓨팅 산업의 선도적 발전을 위한 정책 제언
 - 중간 단계 진입 가속화(C→D/E) 중심으로 돌파적 혁신(C/D/E→U)을 병행하는 Two-track 전략 추진
 - 방식별 유망 궤적을 고려한 투자/지원 : 이온트랩→도메인 궤적(D), 초전도→하이브리드백본 궤적(E)
 - 장기적·일관적·지속적인 정책 기반 확립 (Long-term•Consistent•Sustainable Policy)

- 기술 발전 시나리오(궤적)별 지원 방안에 대한 전문가 의견은 다음과 같음
 - D 경유형(비중 55%, CDU/CD)을 위해서는 무엇보다 1단계인 D 영역 진입을 가속화해야 하나, 최종 목적지가 다르기 때문에(U or D) 이를 고려한 맞춤형 방안 설계 및 추진이 필요
 - * CDU는 도메인 성과를 플랫폼화표준화해서 U(범용완전대체)로 확장하는데 초점을 두고, CD는 도메인 내 조기 상용화 및 대체 성과 창출을 위한 산업 특화 솔루션 개발에 집중할 필요
 - E 경유형인 CEU(비중 19%)에 대비해서는 양자 컴퓨팅의 독립형(stand-alone) 역량 강화 등 2 단계(U) 진입을 위한 방안의 중요성이 높고, CE(21.4%)는 시범사업 추진 등 1단계 E 영역 진입 노력이 중요
 - 현재 영역(C)에 머물 것으로 예상되는 CC 궤적에 있어서는 U 영역으로의 진화를 위한 탐색적 혁신적 R&D를 확대할 필요가 있다는 의견이 존재

표 III-12 기술 발전 궤적별 지원 방안

궤적(비중)	지원 방안	비중
CU (0%)	핵심 기술의 독자 확보를 위한 집중형 R&D 투자 강화 (C→C+)	-
	양자 기술산업 생태계의 고도화 및 전략적 연계 강화 (C→C+)	-
	핵심 기술 돌파를 위한 초고위험초대형 문샷 프로젝트 추진 (C→U)	-
	전략 분야(국방·금융·보안 등) 중심의 양자 단독 응용 시범 도입 (C→U)	-
	초대형 양자 인프라 및 개방형 실증 플랫폼 구축 (C→U)	-
CDU (31%)	산업별 실증 프로젝트 추진 및 도메인 테스트베드 구축 (C→D)	40.0%
	도메인 특화 알고리즘·소프트웨어 개발 및 산업 컨소시엄 운영 (C→D)	13.3%
	도메인 성과의 플랫폼화 및 범용 기술표준 확산 추진 (D→U)	20.0%
CEU (19%)	도메인 통합형 Quantum HPC 인프라 구축 및 공동 활용 체계 확립 (D→U)	26.7%
	고전-양자 하이브리드 HPC·클라우드 국가 플랫폼 구축 (C→E)	20.0%
	QaaS(Quantum-as-a-Service) 모델 육성 및 산업 적용 확산 (C→E)	20.0%
CD (23.8%)	에러 보정·큐비트 확장 등 독립형 양자 역량 강화 (E→U)	50.0%
	순수 양자 응용 실증 및 핵심 분야 서비스 확산 (E→U)	10.0%
	산업 특화형 양자 알고리즘 및 응용 모델 집중 개발 (C→D)	57.1%
	연구·실증·상용화를 연결하는 도메인 혁신 허브 설립 (C→D)	42.9%
CE (21.4%)	도메인 응용 분야 Quantum 지식재산권(IP) 확보 및 보호 (D 강화)	0.0%
	도메인 간 기술 융합 및 범용 확산 연계 강화 (D→U Bridge)	0.0%
	산업별 하이브리드 Quantum 시범사업 추진 및 응용 확산 (C→E)	66.7%
CC (4.8%)	하이브리드 Quantum 데이터·보안 표준화 체계 구축 (C→E)	0.0%
	공공산업 분야 중심의 Quantum Backbone 서비스 확산 (E 강화)	22.2%
	QaaS(Quantum-as-a-Service) 생태계 조성 및 순수 양자 전환 역량 확보 (E→U Bridge)	11.1%
CC (4.8%)	Quantum 니치(niche) 산업의 고도화 및 실용적 활용 강화 (C 유지)	0.0%
	Quantum 기술 역량의 고도화 및 글로벌 연계 강화 (C 유지)	0.0%
	범용 전환(U)을 위한 탐색적·혁신적 R&D 프로그램 확대 (C→U Bridge)	100.0%

주1) 응답자(21명)는 선택한 2개의 궤적별로 최대 2개 방안 선택이 가능, 항목별 선택 수는 각각 0/15/10/8/9/1건임
 주2) 항목별 비중 합은 100%이며, 'U Bridge' 방안은 해당 궤적이 U에 도달하지 않지만, U로의 진입을 위한 것임을 의미
 주3) CDU/CD 궤적의 C→D 방안, CEU/CE 궤적의 C→E 방안은 각기 해당되는 궤적의 가속화를 위한 방안임

IV 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 정책 제언

1 요약 및 결론

경쟁과 협력 관계를 고려한 파괴적 기술 잠재력 평가와 기술 발전 시나리오 검토

- 21세기에 들어서면서, 중첩얽힘 등 양자 역학의 원리를 직접 제어·활용하여 정보 처리와 연산 구조의 혁신적 전환이 이루어지는 ‘퀀텀 혁명’의 시대로 이미 진입
 - 양자정보과학기술(QIST)은 국가 및 기업 경쟁력의 핵심으로 인식되면서 투자가 확대 중
 - 특히, 양자 컴퓨팅 분야에서 글로벌 빅테크 기업 및 양자 전문 기업들의 기술 개발 경쟁이 본격화
- 양자 컴퓨팅은 고전 컴퓨팅과의 경쟁 또는 협력을 통해 발전하고 있으며, 이는 컴퓨팅 방식의 진화 관점에서 양자 컴퓨팅 발전의 잠재력과 시나리오(궤적) 분석의 중요성을 내포
 - 양자 컴퓨팅은 아직은 초기 개발 단계에 있으나, 향후 기술 성숙도와 시장 수용성 등에 따라 기존 컴퓨팅 패러다임을 전환시킬 수 있는 파괴적 기술로서의 잠재력을 보유한 것으로 평가
 - 잠재력** 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력이 ‘높은 수준’인 것으로 나타남
 - ※ 요인별 전문가 의견과 요인 가중치를 고려한 잠재력 평가 결과, 종합적으로 5.6(7점 척도, 77점) 기록
 - ※ 평가 요인은 기술적(technological) 요인뿐만 아니라 비기술적(non-technological) 요인도 포괄
 - 양자 컴퓨팅의 기술 발전 시나리오를 궤적 유형, 기술 방식 및 진입 시기 관점에서 분석함
 - 유형** CDU(31%)가 가장 유망하며, 다음으로 CD(23.8%), CE(21.4%) 등 순으로 분포
 - ※ C: Complementary Specialist, D: Domain Optimizer, E: Emerging Backbone, U: Universal Disruptor
 - 방식** 초전도가 40.5%로 1위이며, 다음으로 이온트랩(19%), 광자(14.3%) 등이 이어서 분포
 - 시기** Period 1은 2030년대 초반, Period 2는 2040년경으로 나타났으며, Universal Disruptor (범용·완전대체 영역)로 발전한다면 적어도 15년 후가 될 것으로 전망(장기적 발전)
 - ※ Period 1, 2는 각각 D/E(중간 단계)와 U 영역 진입 시기를 의미, 예로 CDU는 D와 U 영역으로의 진입 시기임

⇒ 양자 컴퓨팅의 미래 발전 전망은 파괴적 기술 잠재력 평가와 발전 시나리오(궤적) 분석이 중요하며, 분석 결과를 종합할 때, ‘이온트랩 기반 CDU 궤적’을 따르는 시나리오가 가장 유망한 것으로 나타남

표 IV-1 양자 컴퓨팅의 미래 발전 전망

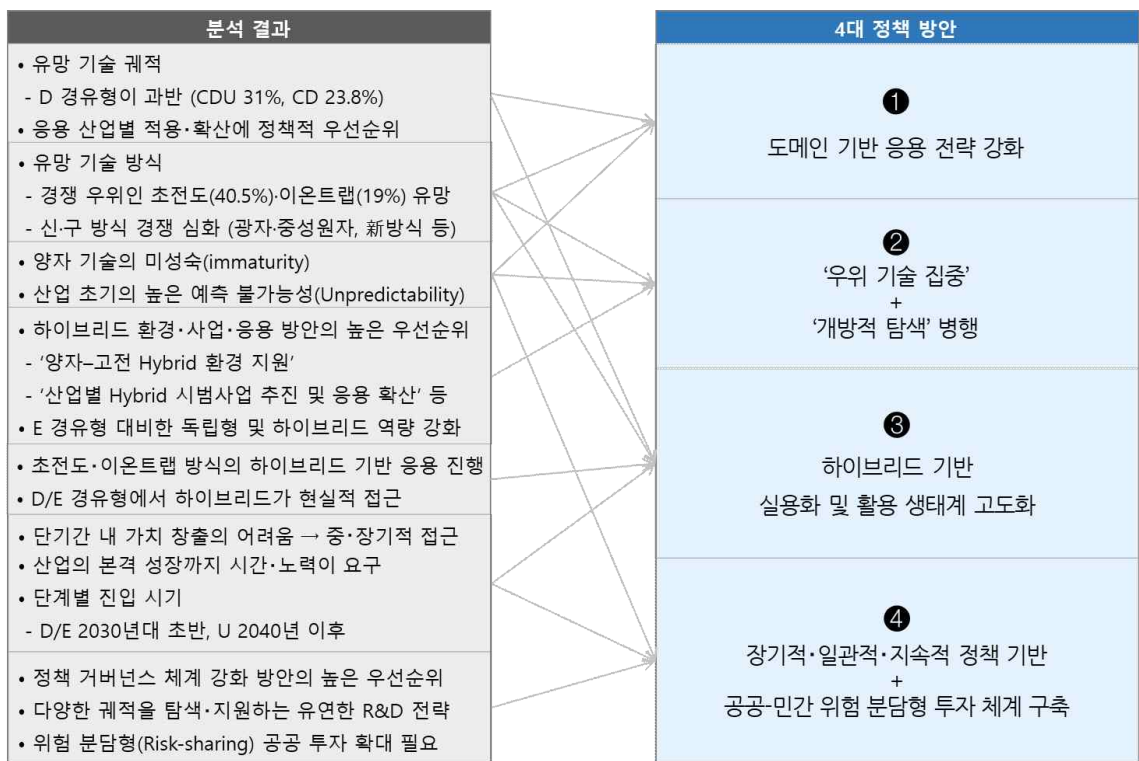
파괴적 기술 잠재력	기술 발전 전망			
	궤적 유형	기술 방식	진입 시기	종합 결과
‘높은 수준’ [5.6(7점척도), 77점]	CDU 31.0% CD 23.8% CE 21.4%	초전도 40.5% 이온트랩 19.0% 광자 14.3%	Period-1 '31~'33 (D/E 진입) Period-2 '40~'41 (U 진입)	<유망 궤적> 이온트랩 기반 CDU <관심 궤적> 초전도 기반 CD/CE

2 정책적 시사점

‘응용 확산’ · ‘집중과 개방의 균형’ · ‘하이브리드 실용화’ · ‘장기적 정책 기반 구축’

- 산업 현황 및 전문가 조사 결과 등 기반으로 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 4대 정책 방안을 도출
 - 현황은 양자 컴퓨팅의 특성과 성장, 기술 경쟁 및 전망, 생태계 내 가치사슬 경쟁 등 관점에서 분석
 - 양자 컴퓨팅의 파괴적 기술 잠재력과 유망 기술 궤적에 대한 상기의 전문가 평가 결과를 활용

그림 IV-1 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 4대 정책



주) 분석 결과는 현황 분석 및 전문가 조사 결과를 기반으로 정리

① 도메인(D) 기반 기술 확산을 중심으로 하는 ‘응용 기반 전략’ 강화

- 범용 기술 개발보다 산업 현장의 문제 해결에 직결되는 도메인 특화 응용 중심 전략을 우선 추진
 - ※ 유망 기술 궤적 분석에서 CDU(31%), CD(23.8%) 등 D 경유형 궤적이 과반을 차지, 양자 컴퓨팅의 NIST 수준과 산업 수요를 고려할 때 단기간 실현 가능한 영역으로 도메인 기반 하이브리드 응용이 부상
- 화학·제약·물류·금융 등 주요 응용 산업에서 도메인 특화 알고리즘 개발 및 실증을 확대하여 산업별 활용성 제고함으로써 도메인 최적화 단계(D)로의 조기 진입을 유도
- 산업 분야별 적용 사례, 문제 정의, 데이터 기반 분석 등을 지원하는 도메인 혁신 허브 구축하여 기업-연구기관 간 협력 기반을 강화하고 양자 기술 적용과 확산을 체계적으로 촉진

② 우위 기술에 대한 ‘선택집중’과 지속적인 ‘개방적 탐색’을 병행하는 균형적 기술 전략 추진

- 현재 기술 성숙도와 생태계 구축 측면에서 경쟁 우위를 보이는 초전도·이온트랩 방식에 정책적 자원과 R&D 역량을 집중하여 양자 컴퓨팅의 조기 경쟁력을 확보
 - ※ 유망 기술 궤적과 기술 방식 분석 결과, 초전도(40.5%)·이온트랩(19%) 비중이 높고, 기술 개발 수준 산업서비스 생태계 구축 측면에서도 이들 두 방식이 전반적 우위를 보이고 있음
- 동시에, 기술적 불확실성에 대비하여 다양한 기술 방식·아키텍처·R&D·투자를 포괄하는 혁신 포트폴리오(innovation portfolio)를 운영하여 장기적 기술 경쟁력과 대응력을 확보

③ 하이브리드 기반 양자 컴퓨팅의 실용적 산업 적용 및 활용 생태계 고도화

- 현재 가장 높은 활용성을 제공하는 양자-고전 하이브리드 기반 양자 컴퓨팅의 산업 응용을 적극 확대
 - ※ 기술 성숙도(NISQ)와 산업 현장의 문제 규모·성능 요구 등을 고려할 때, 하이브리드 방식이 가장 실질적인 성능 개선을 제공하며, 양자 컴퓨팅 초기 시장 형성의 핵심 접근으로 평가됨
- 화학·제약·물류·금융 등 주요 응용 산업에서 하이브리드 기반 알고리즘 워크플로우를 활용한 실증을 확대하여 초기 활용성과 산업 파급력을 확보
- 양자-고전 연계 알고리즘, 실행 환경, 개발 도구 및 플랫폼 등 하이브리드 기술 활용 생태계를 고도화하여 산업 적용 범위와 활용 효과를 지속적으로 확장

④ 장기적·일관적·지속적 정책 기반*과 공공-민간 위험 분담형 투자 체계 구축

- * 기술 혁신과 산업 성장에 필요한 전략인력·인프라·제도·거버넌스 등을 아우르는 정책적 지원 체계를 의미
- 양자 컴퓨팅이 본격 성장하여 범용(U) 단계 진입까지 최소 10~15년 이상이 소요되는 기술 특성을 고려하여 장기적 관점의 일관된 정책 로드맵과 정책적 기반을 마련
 - ※ D/E와 U 단계로의 진입 시기가 각각 '30년대 초반과 '40년 이후로 전망되며, 오류보정(FTQC)이 확보되어 현재의 NISQ 시대를 벗어나는데도 10~20년 이상 걸릴 것으로 예상
- 부처 간 협력 및 산업-학계-연구기관의 연계를 강화하는 정책 거버넌스 체계를 확대·구축하여 정책 추진의 지속성과 효율성을 확보
- 중장기 기술 로드맵, 연구실증 인프라, 전문인력, 협력 생태계 등을 통합적으로 연계·운영하여 양자 기술 발전과 산업 성장을 안정적으로 지원
- 기술적 불확실성이 높은 양자 분야의 특성을 반영해, 공공-민간이 함께 위험을 분담하는 투자 구조를 확대하고, 고위험·고잠재 혁신 연구 지원을 강화

참고문헌

○ 국내자료

- 국가과학기술자문회의, '퀀텀 이니셔티브(안)', 2024.4.25.
- 관계부처 합동, '대한민국 양자과학기술 비전 - 양자시대를 여는 우리의 도전과 전략', 2023.6.27.
- KISTI, '논문 데이터로 본 글로벌 양자기술', KISTI DATA INSIGHT, 제36호, 2023.12.
- ETRI, '양자 알고리즘, 가까워진 양자내성암호 공략', ETRI Webzine Vol. 200, 2022.6.
- Yeon S.-J., 'A Strategic Grid for Implementing Ubiquitous Computing', ETRI Journal Vol. 29 No. 2, 2007.4.

○ 국외자료

- Abernathy W.J., Utterback J.M., 'Patterns of Industrial Innovation', Technology Review, 80(7): 40-47, 1978.
- Campbell, E.T., Terhal, B.M., & Vuillot, C., 'Roads towards fault-tolerant universal quantum computation', Nature Vol 549, 2017.9.
- Christensen C.M., 'The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail', 1997.
- Christensen, C.M., 'The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail', Harvard Business School Press., 1997.
- Dosi, G., 'Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change', Research Policy, Volume 11, Issue 31, pp.147-162, 1982.6.
- European Quantum Industry Consortium(QuIC), 'A Portrait of the Global Patent Landscape in Quantum Technologies', 2025.1.
- Fenn, J., & Raskino, M., 'Mastering the hype cycle: How to choose the right innovation at the right time', Harvard Business Press, 2008.
- Forster, R.N., 'Innovation: The Attacker's Advantage', 1986.
- Gartner, 'Hype Cycle for Compute, 2024', 2024.7.8.

- Global Quantum Forum, 'Panel 12: Chip War 2.0: The Quantum Front', 2025.7, YouTube Event Video.
- Google, 'Meet Willow, our state-of-the-art quantum chip', 2024.12, <https://blog.google/>
- Google, 'Meet Willow, our state-of-the-art quantum chip', 2024.12., <https://blog.google/technology/research/google-willow-quantum-chip/>
- Google, 'Our quantum computing roadmap', 2023, <https://quantumai.google/roadmap>
- Google, 'Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor', 2019.10, <https://research.google/blog>
- IBM, '2025 Development & Innovation Roadmap', 2025, <https://www.ibm.com/roadmaps/quantum>
- IBM, 'IBM 퀀텀 컴퓨터, 기존 슈퍼컴퓨터를 뛰어 넘는 성능 단계 시연', 2023.6, <https://kr.newsroom.ibm.com/>
- IBM, 'Quantum Roadmap', 2025.6., <https://www.ibm.com/roadmaps/quantum/>
- iCV TA&K, '2024 Global Quantum Computing Industry Development Prospect, Quantum Annual Series Report', 2024.2.
- iCV TA&K, 'Global Dilution Refrigerator Report', 2025.3.
- Investor's Business Daily, 'BofA Report: High Stakes In Worldwide Quantum Computing Race', 2025.7.16.
- IonQ, 'IonQ and Ansys Achieve Major Quantum Computing Milestone – Demonstrating Quantum Outperforming Classical Computing' 2025.3, <https://ionq.com/news>
- IonQ, 'IonQ Roadmap for Large-Scale, Fault-Tolerant Quantum Computers', 2025, <https://ionq.com/blog>
- McKinsey & Company, 'The Next Normal – The recovery will be digital', 2020.8.
- McKinsey, 'Quantum Technology Monitor', 2024.4.
- McKinsey, 'Quantum Technology Monitor', 2025.6.
- Moore, G.A., 'Crossing the chasm: Marketing and selling high-tech products to mainstream customers', New York: HarperBusiness, 1991.
- OECD, 'Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation', 2018.

- Preskill, J., 'Quantum computing and the entanglement frontier', arXiv preprint arXiv:1203.5813, 2012, <https://arxiv.org/abs/1203.5813>
- Preskill, J., 'Quantum Computing in the NISQ era and beyond', 2018.8.6.
- Preskill, J., 'Why I Called It 'Quantum Supremacy'', Quantamagazine, 2019.10. <https://www.quantamagazine.org>
- Quantinuum, 'Development roadmap', 2024, <https://www.quantinuum.com/press-releases>
- Quantinuum, 'Quantinuum's H-Series hits 56 physical qubits that are all-to-all connected, and departs the era of classical simulation', 2024.6, <https://www.quantinuum.com/blog>
- Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 'State of the Global Quantum Industry Report', 2025.3.
- Quantum Insider, 'Quantum industry sees big bets and bigger deals in early 2025', 2025.6.
- Quantum Insider, The Quantum Insider Intelligence Platform, 2025.6 access
- Rogers, E.M., 'Diffusion of innovations', (5th ed.), Free Press, 2003.
- Valuates, 'Global Dilution Refrigerators Market Research Report 2025', 2025.3.
- WSJ, 'IBM Has a Roadmap to a 'Fault-Tolerant' Quantum Computer by 2029', 2025.6.10.
- Xanadu, 'Beating classical computers with Borealis', 2022.6, <https://www.xanadu.ai/blog>

<부록1> 양자 컴퓨팅의 기술 경쟁 및 발전에 관한 조사 설문지

안녕하십니까?

우선 본 설문조사에 대한 응답을 수락해 주셔서 대단히 감사드립니다.

한국전자통신연구원(ETRI) 기술정책연구본부는 국가전략기술 분야의 발전 방향을 심층적으로 진단하고, 이를 토대로 미래 산업 전략과 정책적 대응 방안을 모색하고자 노력하고 있습니다. 특히, 양자 컴퓨팅은 차세대 ICT 패러다임을 주도할 잠재력을 가진 핵심 전략 기술로서, 연구개발뿐 아니라 산업·정책적 측면에서 그 파급효과가 매우 클 것으로 예상됩니다.

관련하여, 양자 컴퓨팅 기술이 향후 어떻게 발전해 나갈지에 대해 진단하기 위해 본 설문조사를 진행 중입니다. 양자 컴퓨팅을 중심으로 하는 기술 경쟁에 주목하는 바, 먼저 ‘양자 컴퓨팅 분야 내 경쟁’으로서 큐비트 구현 방식간 경쟁을 분석하여 향후 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인을 탐색하고자 합니다.

다음으로는 ‘컴퓨팅 분야 내 경쟁’으로 고전 컴퓨팅과 양자 컴퓨팅 간 관계를 고려하여 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 잠재력이 있는지, 그에 따른 미래 기술 궤적은 어떻게 나타날지 전망합니다. 이를 통해 양자 컴퓨팅 산업 활성화를 위한 보다 효과적인 정책이 수립될 수 있을 것으로 기대합니다.

본 설문지의 문항에 정답은 없으며 귀하께서 보유하고 계신 전문성에 기반하여 자유롭게 응답하시면 됩니다. 귀하의 응답은 통계법 제33조 및 제34조에 의하여 비밀로 보호되며, 통계작성 목적 이외에는 사용되지 않음을 알려드립니다.

다시 한번 본 설문에 응해주셔서 감사드립니다.

2025년 10월

주관: 한국전자통신연구원 ICT전략연구소 기술정책연구본부

허필선 책임 (042-860-5396)

이주연 연구원 (042-860-0663)

설문조사 수행기관(위탁기관) : (주)가치솔루션

※ 설문 조사는 ‘양자 컴퓨팅의 기술 경쟁 및 발전’이라는 주제 아래 ① ‘지배적 디자인(양자 컴퓨팅 내 경쟁)’ 및 ② ‘파괴적 기술 잠재력 및 궤적(컴퓨팅 분야 내 경쟁)’에 관해 진행되었으며, 본 보고서에 해당하는 ② 관련 문항만 발췌 수록함

다음은 '컴퓨팅 분야 내 경쟁'에 관한 질문으로 양자 컴퓨팅이 미래에 어떻게 발전해 나갈지에 관한 것입니다.

큐비트(qubit)를 활용하는 양자 컴퓨팅이 비트(bit)를 기반으로 하는 고전 컴퓨팅과의 경쟁 속에서 기술이 발전함에 따라 어떤 위상을 가질 것인가에 대해 전망합니다. 세부적으로 △ 파괴적 기술이 될 수 있는 잠재력을 평가하고 △ 기술의 발전 궤적을 전망하며 △ 관련 정책 대안을 제시합니다.

[파괴적 기술 잠재력 평가]

(문6) 귀하는 양자 컴퓨팅이 궁극적으로 기존의 고전 컴퓨팅의 성능을 넘어서면서 대체하거나 새로운 시장을 창출하는 **파괴적 기술***로 발전할 것으로 생각하십니까? 다음과 같은 다양한 평가 지표를 통해서 그 잠재력을 가능해 볼 수 있습니다.

* 파괴적 기술이란 기존 시장의 구조나 지배적 기술을 근본적으로 뒤흔들며, 새로운 시장을 창출하거나 기존 시장의 룰(rule)을 바꾸는 기술(Christensen, 1997)
 예) 필름 카메라 → 디지털 카메라, 내연기관차 → 전기차, 일반 전화기 → 스마트폰 등

< 평가 지표 개요 >

지표(항목)	개념
기술 혁신성	기존 기술 대비 근본적 차별성
시장 대체성	기존 제품/서비스의 대체 가능성
수용 가능성	초기 수용자/생태계 존재 여부 및 확산 가능성
비즈니스 파급력	새로운 비즈니스 모델/가치 창출 가능성
사회·제도적 준비도	사회적 수용성 및 제도적 대응 가능성

주) 세부 내용은 다음 페이지 <참고 자료> 참조

(문6-1) 파괴적 기술 잠재력을 평가하는 지표 중 가장 중요하다고 생각하는 지표(Best)을 골라 파란색 칸 (■)에 적고, 선택한 Best 요인이 다른 각 지표보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 노란색 칸 (□)에 1~9점으로 적어주세요.

※ Best로 선택한 지표는 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

Best->Others 평가	기술 혁신성	시장 대체성	수용 가능성	비즈니스 파급력	사회·제도적 준비도
(여기에 Best 요인 입력)					

주) 1=동등, 3=약간 더 중요, 5=더 중요, 7=매우 더 중요, 9=극도로 더 중요

(문6-2) 파괴적 기술 잠재력을 평가하는 지표 중 가장 덜 중요하다고 생각하는 지표(Worst)을 골라 주황색 칸()에 적고, 다른 각 지표이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸()에 1~9점으로 적어주세요.

- ※ Worst로 선택한 지표는 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.
- ※ Worst로 선택한 지표와 Best로 선택한 지표 간 중요도 점수는 상기 Best>Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	(여기에 Worst 요인 입력)
기술 혁신성	
시장 대체성	
수용 가능성	
비즈니스 파급력	
사회·제도적 준비도	

주) 1=동등, 3=약간 더 중요, 5=더 중요, 7=매우 더 중요, 9=극도로 더 중요

(문6-3) 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있는 잠재력에 대해 세부 지표별로 평가해 주십시오. 아래의 (작성 예)처럼 평가 지표별로 해당하는 점수에 표기해 주십시오. (7점 척도)

- ※ 다음 페이지의 <붙임> 자료를 평가에 참고하세요.

(작성 예)

☛ 지표별로 해당하는 점수에 표기해 주십시오.

지표	평가 점수						
	1 (매우 낮음)	2 (낮음)	3 (약간 낮음)	4 (보통)	5 (약간 높음)	6 (높음)	7 (매우 높음)
기술 혁신성							✓
시장 대체성						✓	
수용 가능성					✓		
비즈니스 파급력						✓	
사회·제도적 준비도				✓			

지표	평가 점수						
	1 (매우 낮음)	2 (낮음)	3 (약간 낮음)	4 (보통)	5 (약간 높음)	6 (높음)	7 (매우 높음)
기술 혁신성							
시장 대체성							
수용 가능성							
비즈니스 파급력							
사회·제도적 준비도							

< 붙임 > 파괴적 기술 잠재력 평가 항목 및 포인트

평가 항목	항목별 특징 비교		평가 포인트
	고전 컴퓨팅 (Classical computing)	양자 컴퓨팅 (Quantum computing)	
기술 혁신성	<ul style="list-style-type: none"> - 비트(0/1) 기반 - 성능 향상은 주로 무어의 법칙, 병렬화, GPU 발전에 의존 - NP-난해 문제 해결에 한계 	<ul style="list-style-type: none"> - 큐비트(Qubit) 기반 중첩·얽힘 활용 - 특정 문제에서 지수적 속도 향상 가능 - 오류율, 결맞음 유지 문제 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 근본적(질적) 차별성 존재 여부 ▶ 기존 한계를 뛰어넘는 문제 해결 가능성
시장 대체성	<ul style="list-style-type: none"> - 범용적·보편적 사용 (PC, 서버, 클라우드) - 슈퍼컴퓨터로도 어려운 문제 다수 존재 - 기존 암호 인프라와 강하게 결합 	<ul style="list-style-type: none"> - 특정 응용(암호 해독, 최적화, 신약, 소재, 금융)에서 성능 우위 (양자 우월성) - 기존 보안 체계 위협 (양자 내성 암호 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기존 시장(HPC, 보안 등) 무너뜨릴 가능성 ▶ 특정 산업에서 대체재/보완재로 작용 여부
생태계 수용 가능성	<ul style="list-style-type: none"> - H/W·S/W·개발자 생태계 성숙 - 표준과 산업 인프라 확립 - 보급형 기술 	<ul style="list-style-type: none"> - H/W(큐비트 구현 방식) 다양: 초전도, 이온트랩, 광자 등 - 오픈소스 SDK(Qiskit, Cirq 등) 및 QCaaS 등장 및 확산 - 초기 수용자(IBM, Google, Amazon, 정부 연구소) 중심 확산 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 초기 수용자 존재 여부 및 대중적 확산 가능성 ▶ 개발자 커뮤니티 성장 정도 ▶ 클라우드 서비스 통한 접근성
비즈니스 파급력	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 비즈니스 모델 안정화 (H/W 판매, 클라우드 서비스, SW 라이선스 등) - 가치사슬 고착화 	<ul style="list-style-type: none"> - 신규 BM 등장 : 구독형 QCaaS 등 - 신약·금융·에너지 등 산업별 혁신 기회 - 기존 IT 가치사슬 재편 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 새로운 BM과 수익 구조 창출 여부 ▶ 기존 산업 질서 변화를 일으킬 파급력
사회·제도적 준비도	<ul style="list-style-type: none"> - 제도·표준 안정화 - 사이버보안, 개인정보 보호 체계 확립 - 사회적 수용성 매우 높음 	<ul style="list-style-type: none"> - 주요국의 전략적 투자(미국 NQI, EU QF, 중국·한국 국가 로드맵) - 양자암호 표준화 진행 중 - 양자 기술 패권 경쟁 가속화 - 긍정부정적인 사회적 인식 존재 <ul style="list-style-type: none"> * 보안 위협·산업 변화 등에 대한 불안 * 기술 혁신 및 신산업 창출 기대 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 정책·표준 준비도 ▶ 사회적 수용성 ▶ 보안·윤리 이슈 대비 ▶ 지정학적 경쟁 영향 및 대응

주) NQI: National Quantum Initiative, QF: Quantum Flagship, HPC: High-Performance Computing

(문6-4) 양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있도록 지원하기 위해 세부 지표별로 적극적으로 추진해야 하는 방안을 평가해 주십시오. 아래의 (작성 예)처럼 평가 지표별로 가장 중요하다고 생각하는 방안 1개를 선택해 주십시오.

- ※ 최대 2개까지 선택은 가능합니다.
- ※ 제시된 항목 중에 선택지가 없다면, 기타란에 주관식으로 기입해 주십시오.

(작성 예)

[지표별 평가]

시장 대체성	2-① 산업 맞춤형 양자 S/W 활용 확대를 통한 응용 사례 확산	(<input checked="" type="checkbox"/>)
	2-② 핵심 응용 산업별(금융, 제약·바이오 등) 실증사업 고도화를 통한 상용화 촉진	()
	2-③ 공공부문 전략적 수요 창출을 통한 초기 시장 활성화	(<input checked="" type="checkbox"/>)
	2-④ 양자-고전 Hybrid 환경 지원을 통한 단계적 전환 기반 마련	()
	2-⑤ 맞춤형 가이드라인 개발 및 적용을 통한 응용 산업별 도입 촉진	()

지표	양자 컴퓨팅이 파괴적 기술로 발전할 수 있도록 지원하는 방안	선택
기술 혁신성	1-① R&D 투자 확대 및 안정적·체계적 지원을 통한 장기적 로드맵 실현	()
	1-② 산·학·연 공동 플랫폼 운영을 통한 혁신적 연구 협력 강화	()
	1-③ 다양한 아키텍처 연구 지원을 통한 혁신 경로 다양성 확보	()
	1-④ 연산 정확도와 안정성 향상 연구를 통한 기술 신뢰성 확보	()
	1-⑤ 핵심 H/W 장비 구축과 공동 활용 지원을 통한 R&D 기반 강화	()
시장 대체성	2-① 산업 맞춤형 양자 S/W 활용 확대를 통한 응용 사례 확산	()
	2-② 핵심 응용 산업별(금융, 제약·바이오 등) 실증사업 고도화를 통한 상용화 촉진	()
	2-③ 공공부문 전략적 수요 창출을 통한 초기 시장 활성화	()
	2-④ 양자-고전 Hybrid 환경 지원을 통한 단계적 전환 기반 마련	()
	2-⑤ 맞춤형 가이드라인 개발 및 적용을 통한 응용 산업별 도입 촉진	()
생태계 수용 가능성	3-① 양자 컴퓨팅 전문 인력 양성을 통한 연구·산업 생태계 성장 기반 마련	()
	3-② 오픈소스 기반 SDK·개발자 지원을 통한 커뮤니티 활성화	()
	3-③ QCaaS 접근성 확대를 통한 스타트업 등 초기 수요자 진입 기회 확대	()
	3-④ 산·학·관 협력 네트워크 구축을 통한 국내 생태계 연계 강화	()
비즈니스 파급력	4-① 양자 특화 비즈니스 모델 발굴 지원을 통한 신시장 창출	()
	4-② QCaaS 기반 시장 진입 촉진을 통한 스타트업·벤처 활성화	()
	4-③ 응용 산업별 PoC 성과 검증 및 사업화 연계 지원 확대	()
	4-④ IP·표준 연계 전략 강화를 통한 글로벌 도입·확산 촉진	()
사회·제도적 준비도	5-① 양자 정책 거버넌스 체계 강화를 통한 국가 전략 실행력 제고	()
	5-② 양자 컴퓨팅 응용·보안 표준화 선도를 통한 도입 기반 강화	()
	5-③ 양자 컴퓨팅 특화 실증·조달·인증 체계 마련을 통한 활용 촉진	()
	5-④ 양자 컴퓨팅의 산업적 영향·보안 위협 대응 체계 구축을 통한 수용성 제고	()
	5-⑤ 국제 공동 연구·규제 협력 참여를 통한 글로벌 제도 정합성 확보	()
기타		

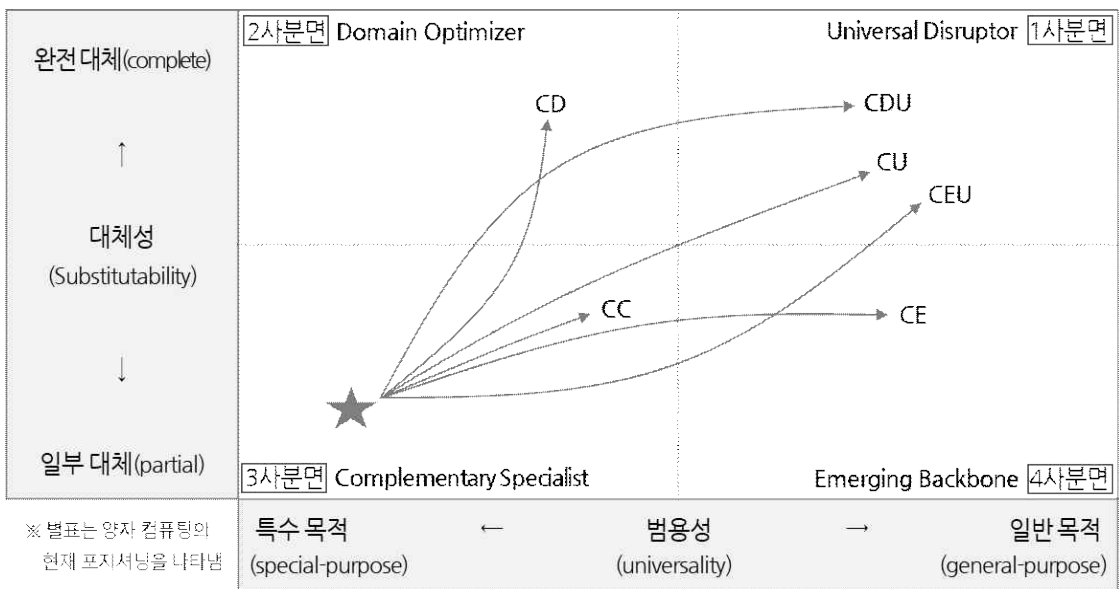
[기술궤적 전망]

(문7) 귀하는 양자 컴퓨팅이 발전함에 따라 어떠한 기술 궤적(technology trajectory)*을 보일 것으로 생각하십니까?

* 기술 궤적이란 특정 기술이 시간에 따라 발전하는 방식이나 경로를 의미하며, 한번 선택된 경로가 이후의 발전을 결정짓는 경로 의존성(path dependency)이 있음

양자 컴퓨팅(새로운 기술)이 고전 컴퓨팅(기존 기술)과의 관계 속에서 진화하는 과정(궤적)은 범용성(universality)과 대체성(substitutability)이라는 축으로 구성된 2x2 그리드(grid) 위에서 생각해 볼 수 있습니다.

〈 양자 컴퓨팅의 기술 혁신 그리드 (2x2) 〉



〈 축(axis) 설명 〉

구분	설명
범용성 (universality)	<ul style="list-style-type: none"> 기술이 다양한 문제나 응용 분야에서 얼마나 광범위하게 사용될 수 있는지를 의미 양자 컴퓨팅이 일반 목적 컴퓨팅(GPC; General Purpose Computing)으로 사용 가능한가, 아니면 특수 목적(special-purpose)으로 제한되는가?
대체성 (substitutability)	<ul style="list-style-type: none"> 새로운 기술이 기존 기술을 어느 정도까지 대체할 수 있는지를 의미 양자 컴퓨팅이 기존의 고전 컴퓨터(classical computing)를 완전히 대체할 수 있는가, 아니면 부분적으로만 대체할 것인가?

< 사분면(quadrant) 설명 >

구분	설명
1사분면 Universal Disruptor	• 범용성 高, 대체성 高 • 양자 컴퓨팅이 범용적 사용이 가능하며, 기존 고전 컴퓨팅을 완전히 대체할 수 있음
2사분면 Domain Optimizer	• 범용성 低, 대체성 高 • 양자 컴퓨팅이 특정 용도에만 적합하며, 그 용도에서는 고전 컴퓨팅을 완전히 대체 가능
3사분면 Complementary Specialist	• 범용성 低, 대체성 低 • 양자 컴퓨팅이 특정 용도에만 적합하며, 그 용도에서도 고전 컴퓨팅이 여전히 필요
4사분면 Emerging Backbone	• 범용성 高, 대체성 低 • 양자 컴퓨팅이 범용으로 사용 가능하나, 고전 컴퓨팅을 완전히 대체하기에는 한계가 존재

< 양자 컴퓨팅의 기술 궤적 설명 >

- 현재 양자 컴퓨팅은 Complementary Specialist(3사분면)로서 특수 목적으로 기존 고전 컴퓨팅의 역할을 일부 대체하는 수준에 위치한 것으로 평가됨 [상기 그림의 별표(★) 위치]
- 향후 기술 발전에 따라 일반 목적으로 기능하면서 기존 고전 컴퓨팅을 완전히 대체하는 수준인 Universal Disruptor(1사분면)로 진화할 수 있으며, 여기에는 세부적으로 3가지 발전 경로(궤적)가 가능
 - (1) **CU** : Complementary Specialist에서 바로 **U**niversal Disruptor로 발전
⇒ 돌파적 기술 혁신으로 곧바로 범용-완전 대체
 - (2) **CDU** : Complementary Specialist에서 **D**omain Optimizer를 거쳐 **U**niversal Disruptor로 발전
⇒ 특정 도메인에 우선 고전 기술을 대체한 후, 점차 범용화되면서 다양한 분야를 완전 대체
 - (3) **CEU** : Complementary Specialist에서 **E**merging Backbone을 거쳐 **U**niversal Disruptor로 발전
⇒ 다양한 영역에서 보조 역할로 확산된 후에 점차 대체성 강화
- Universal Disruptor(1사분면)로 발전하지 못하는 경로도 존재하며, 여기에도 3가지 경로가 가능
 - (4) **CD** : Complementary Specialist에서 **D**omain Optimizer로만 발전
⇒ 특정 도메인 최적화에 머무름
 - (5) **CE** : Complementary Specialist에서 **E**merging Backbone으로만 발전
⇒ 다양한 응용은 가능하지만 고전 컴퓨팅과 공존하며, 완전한 대체는 한계
 - (6) **CC** : 기술 수준은 높아지나 Complementary Specialist에서 벗어나지 못함
⇒ 기술적 진보는 있으나, 근본적인 한계로 보조적 역할에 머무름

※ 다음 (문7-1), (문7-2)의 경우, 조사 결과에 따라 의견 수렴을 위한 2차 조사(델파이)를 진행할 수 있음

(문7-1) 상기 (1)~(6) 중에서 가능성이 높다고 생각하는 기술 궤적을 2개 선택하고, 이에 해당하는 큐비트 구현 방식에 표기해 주십시오.

※ 현재 알려진 방식들 외에, '새로운 방식(new method)' 또는 '방식 전망은 힘들다'는 선택지도 있음

(작성 예)

☛ 1, 2순위의 궤적을 각각 CDU, CE로 선택하고, 해당하는 큐비트가 각각 초전도, 이온트랩으로 예상한다면 다음과 같이 표기됩니다.

1순위 궤적	2순위 궤적	구현 방식
		새로운 방식(New method)
		방식에 대한 전망은 힘들
CDU (2)		초전도(Superconducting)
	CE (5)	이온트랩(Trapped-Ion)
		광자(Photonic)
		전자 스핀(Electron Spin)
		중성원자(Neutral Atom)
		핵스핀(Nuclear Spin)
		다이아몬드 NV 센터(Diamond NV center)
		핵자기공명(NMR)
		토폴로지(Topological)
		기타(여기에 적어 주세요)

1순위 궤적	2순위 궤적	구현 방식
		새로운 방식(New method)
		방식에 대한 전망은 힘들
		초전도(Superconducting)
		이온트랩(Trapped-Ion)
		광자(Photonic)
		전자 스핀(Electron Spin)
		중성원자(Neutral Atom)
		핵스핀(Nuclear Spin)
		다이아몬드 NV 센터(Diamond NV center)
		핵자기공명(NMR)
		토폴로지(Topological)
		기타(여기에 적어 주세요)

(문7-2) 선택하신 2개의 궤적별로 각 사분면 진입 시기를 아래의 (작성 예)처럼 표기해 주십시오.

(작성 예)

☛ CDU 궤적을 선택했다면, 현재의 C(3사분면)에서 D(2사분면)에 진입하는 시기와, 이후 U(1사분면)에 진입하는 시기를 표기

(2) CDU	D 진입 시기 : (2030)	U 진입 시기 : (2040)
---------	--------------------	--------------------

구분	진입 시기	
(1) CU	U 진입 시기 : ()	-
(2) CDU	D 진입 시기 : ()	U 진입 시기 : ()
(3) CEU	E 진입 시기 : ()	U 진입 시기 : ()
(4) CD	D 진입 시기 : ()	-
(5) CE	E 진입 시기 : ()	-
(6) CC	- (이미 C에 위치)	

주) 선택한 2개의 궤적에 대해서만 작성해 주세요. CC를 선택했다면 진입 시기를 작성할 필요가 없습니다.

(문7-3) 양자 컴퓨팅이 따를 것으로 예상되는 기술 궤적별로 적극적으로 추진해야 하는 방안을 평가해 주십시오. 아래의 (작성 예)처럼 앞선 문항에서 선택하신 기술 궤적에 대해 가장 중요하다고 생각하는 방안 1개를 선택해 주십시오.

※ **최대 2개까지 선택은 가능하며, 제시된 항목 중에 선택지가 없다면 기타란에 주관식으로 기입해** 주십시오.

(작성 예)

☛ 앞에서 CC 궤적을 선택했다면, 다음과 같이 해당 궤적의 정책 방안 중 가장 중요한 것에 표기해 주세요.

CC (6)	< 기술 지속 발전(C→C+)과 잠재 전환(C→U)의 균형 단계 > 6-①. Quantum 니치(niche) 산업의 고도화 및 실용적 활용 강화 (C 유지) 6-②. Quantum 기술 역량의 고도화 및 글로벌 연계 강화 (C 유지) 6-③. 범용 전환(U)을 위한 탐색적·혁신적 R&D 프로그램 확대 (C→U Bridge)	() () (✓)
-----------	--	---------------------

궤적	기술 궤적별 추진 방안	선택
CU (3)	< C→C+ : 기반 고도화 및 도약 준비 단계 > 3-①. 핵심 기술의 독자 확보를 위한 집중형 R&D 투자 강화 (C→C+) 3-②. 양자 기술산업 생태계의 고도화 및 전략적 연계 강화 (C→C+) < C/C+→U : 파괴적 기술 혁신 및 범용 전환 단계 > 3-③. 핵심 기술 돌파를 위한 초고위험·초대형 무상 프로젝트 추진 (C→U) 3-④. 전략 분야(국방·금융·보안 등) 중심의 양자 단독 응용 시범 도입 (C→U) 3-⑤. 초대형 양자 인프라 및 개방형 실증 플랫폼 구축 (C→U)	() () () () ()
CDU (1)	< C→D : 산업 실증 및 신뢰 구축 단계 > 1-①. 산업별 실증 프로젝트 추진 및 도메인 테스트베드 구축 (C→D) 1-②. 도메인 특화 알고리즘·소프트웨어 개발 및 산업 컨소시엄 운영 (C→D) < D→U : 플랫폼 확산 및 범용화 단계 > 1-③. 도메인 성과의 플랫폼화 및 범용 기술 표준 확산 추진 (D→U) 1-④. 도메인 통합형 Quantum HPC 인프라 구축 및 공동 활용 체계 확립 (D→U)	() () () ()
CEU (2)	< C→E : 하이브리드 기반 확산 단계 > 2-①. 고전-양자 하이브리드 HPC·클라우드 국가 플랫폼 구축 (C→E) 2-②. QaaS(Quantum-as-a-Service) 모델 육성 및 산업 적용 확산 (C→E) < E→U : 순수 양자 전환 및 완전 확산 단계 > 2-③. 에러 보정·큐비트 확장 등 독립형 양자 역량 강화 (E→U) 2-④. 순수 양자 응용 실증 및 핵심 분야 서비스 확산 (E→U)	() () () ()
CD (4)	< C→D : 산업 특화 및 조기 상용화 단계 > 4-①. 산업 특화형 양자 알고리즘 및 응용 모델 집중 개발 (C→D) 4-②. 연구-실증-상용화를 연결하는 도메인 혁신 허브 설립 (C→D) < D 단계 고도화 및 U 확장 기반 강화 단계 > 4-③. 도메인 응용 분야 Quantum 지식재산권(IP) 확보 및 보호 (D 강화) 4-④. 도메인 간 기술 융합 및 범용 확산 연계 강화 (D→U Bridge)	() () () ()
CE (5)	< C→E : 하이브리드 응용 확산 단계 > 5-①. 산업별 하이브리드 Quantum 시범사업 추진 및 응용 확산 (C→E) 5-②. 하이브리드 Quantum 데이터·보안 표준화 체계 구축 (C→E) < E 단계 고도화 및 U 확장 기반 강화 단계 > 5-③. 공공산업 분야 중심의 Quantum Backbone 서비스 확산 (E 강화) 5-④. QaaS(Quantum-as-a-Service) 생태계 조성 및 순수 양자 전환 역량 확보 (E→U Bridge)	() () () ()
CC (6)	< 기술 지속 발전(C→C+)과 잠재적 전환(C→U)의 균형 단계 > 6-①. Quantum 니치(niche) 산업의 고도화 및 실용적 활용 강화 (C 유지) 6-②. Quantum 기술 역량의 고도화 및 글로벌 연계 강화 (C 유지) 6-③. 범용 전환(U)을 위한 탐색적·혁신적 R&D 프로그램 확대 (C→U Bridge)	() () ()

기타

선택 궤적1
()

선택 궤적2
()



마지막으로 통계분류를 위해 기본 정보에 대해 질문드리겠습니다.

(문8-1) 귀하의 소속 기관 범주를 선택해 주십시오.

- ① 기업(산업계) - 양자컴퓨터 관련 기업, 엔드유저 기업(금융·바이오·제조 등), 컨설팅/애널리스트 기업 포함
- ② 대학(학계) - 교수, 연구자, 학회 소속 등
- ③ 연구기관(연구계) - 정부출연연구기관, 전문연구기관, 국책연구소 등
- ④ 정부·공공기관(관) - 정책/전략기획, R&D 기획 및 지원기관 등
- ⑤ 기타 ()

(문8-2) 소속 기관

- 기관명 ()
- 소속부서 ()
- 직책/직위 () * (예시) 교수, 사장, 부장, 과장, 책임연구원, 팀장, 본부장 등
- 역할 () * (예시) 단독연구자, 사업책임자, 과제책임자, 참여연구원 등

(문8-3) 귀하의 최종 학위에 대해 응답해 주십시오.

- ① 학사 ② 석사 ③ 박사 ④ 기타/전문학위()

(문8-4) 귀하께서 양자 컴퓨팅 분야에 종사하신 총 기간에 대해 응답해 주십시오.

- ① 5년 이내 ② 6~10년 ③ 11~15년 ④ 16~20년 ⑤ 21년 이상

(문8-5) 귀하께서 양자 컴퓨팅 분야에서 주로 하고 계신 업무를 선택해 주십시오.(중복 선택 가능)

- ① 연구개발(R&D) → **(문8-6)으로 이동**
- ② 산업 적용 - 금융, 바이오, 제조 등 산업 현장에서의 활용/적용
- ③ 정책/전략 기획 - 정부·기관의 R&D 기획, 정책 수립, 전략 기획 등
- ④ 교육/학술 활동 - 대학·학회 등에서의 강의, 연구, 학술 활동
- ⑤ 컨설팅/시장분석 - 애널리스트, 시장 조사, 컨설팅 업무
- ⑥ 기타 (직접 기재:)

(문8-6) 귀하께서 연구개발(R&D)하고 계신 분야를 선택해 주십시오.(중복 선택 가능)

- ① 양자 컴퓨팅 HW 플랫폼 - 초전도, 중성원자, 이온트랩, 광자, 반도체 양자점 등 양자컴퓨터
- ② 양자 컴퓨팅 HW 지원 및 확장 - 양자 컴퓨팅 시뮬레이터, 모듈형 양자 컴퓨팅 시스템
- ③ 양자 컴퓨팅 SW 플랫폼 - 양자 SW/알고리즘 개발 플랫폼, 양자 컴퓨팅 클라우드 플랫폼, 양자 컴퓨팅 컴파일러, 양자 컴퓨팅 제어 SW
- ④ 양자 컴퓨팅 오류 완화 및 오류 정정 기술 - 양자 오류 완화, 양자 오류 보정, 결함허용 양자 컴퓨팅
- ⑤ 양자 알고리즘 및 응용 - 양자 이득 구현 알고리즘, 양자 물리계 연구를 위한 양자 알고리즘, 양자 응용 알고리즘 (금융/화학/신약/의학/신물질 등 개발), 양자 기계 학습 및 양자 인공 지능, 양자 최적화 알고리즘, 양자 컴퓨터 기반 디지털트윈, 메타버스, IT 가상화 기술
- ⑥ 기타 (직접 기재:)

설문에 응답해 주셔서 감사합니다.

〈부록2〉 전문가 설문조사 결과 데이터 - 방식/유형/시기 분포

1순위-방식	빈도	비중	1순위-유형	빈도	비중
초전도	9	42.9%	CU	0	0.0%
이온트랩	4	19.0%	CDU	9	42.9%
광자	2	9.5%	CEU	4	19.0%
중성원자	2	9.5%	CD	4	19.0%
새로운 방식	0	0.0%	CE	4	19.0%
전망 어려움	4	19.0%	CC	0	0.0%
합계	21	100.0%	합계	21	100.0%
2순위-방식	빈도	비중	2순위-유형	빈도	비중
초전도	8	38.1%	CU	0	0.0%
이온트랩	4	19.0%	CDU	4	19.0%
광자	4	19.0%	CEU	4	19.0%
중성원자	2	9.5%	CD	6	28.6%
새로운 방식	2	9.5%	CE	5	23.8%
전망 어려움	1	4.8%	CC	2	9.5%
합계	21	100.0%	합계	21	100.0%
종합순위-방식	빈도	비중	종합순위-유형	빈도	비중
초전도	17	40.5%	CU	0	0.0%
이온트랩	8	19.0%	CDU	13	31.0%
광자	6	14.3%	CEU	8	19.0%
중성원자	4	9.5%	CD	10	23.8%
새로운 방식	2	4.8%	CE	9	21.4%
전망 어려움	5	11.9%	CC	2	4.8%
합계	42	100.0%	합계	42	100.0%
구분	1순위-시기		2순위-시기		
	Step 1	Step 2	Step 1	Step 2	
CU (미선택)	-	-	-	-	
CDU (선택수: 13)	2027	2030	2040	2045	
	2028	2035	2030	2040	
	2035	2040	2030	2040	
	2030	2040	2035	2045	
	2030	2040			
	2030	2040			
평균	2030	2038	2034	2043	
평균-전체	2031	2040			
CEU (선택수: 8)	2030	2035	2035	2045	
	2035	2040	2035	2045	
	2029	2042	2030	2035	
	2030	2045	2030	2040	
평균	2031	2041	2033	2041	
평균-전체	2032	2041			
CD (선택수: 11)	2035		2027		
	2035		2035		
	2035		2030		
	2035		2035		
	2035		2035		
평균	2035		2032		
평균-전체	2033				
CE (선택수: 8)	2035		2035		
	2035		2030		
	2030		2030		
	2035		2030		
평균	2034		2031		
평균-전체	2033				
CC (선택수:2)					

주1: Step 1, 2는 사분면 영역별 진입 단계로, CDU의 경우 Step 1은 D 영역, Step 2는 U 영역으로의 진입 시기를 표기

주2: CU는 유망 궤적으로 선택받지 못했으며, CC는 진입 시기가 불필요하여 데이터 부재

주3: 2순위로 CC가 2건 선택되어, 진입 시기 데이터는 총 19건임(총 응답수 21건)

〈부록3〉 전문가 설문조사 결과 데이터 - 유형별 방식 & 방식별 유형

유형별 방식		방식별 유형	
CU	0	초전도	17
초전도	0	CU	0
이온트랩	0	CDU	1
광자	0	CEU	4
중성원자	0	CD	5
새로운방식	0	CE	5
전망어려움	0	CC	2
CDU	13	이온트랩	8
초전도	1	CU	0
이온트랩	4	CDU	4
광자	3	CEU	0
중성원자	2	CD	1
새로운방식	1	CE	3
전망어려움	2	CC	0
CEU	8	광자	6
초전도	4	CU	0
이온트랩	0	CDU	3
광자	1	CEU	1
중성원자	1	CD	1
새로운방식	1	CE	1
전망어려움	1	CC	0
CD	10	중성원자	4
초전도	5	CU	0
이온트랩	1	CDU	2
광자	1	CEU	1
중성원자	1	CD	1
새로운방식	0	CE	0
전망어려움	2	CC	0
CE	9	새로운방식	2
초전도	5	CU	0
이온트랩	3	CDU	1
광자	1	CEU	1
중성원자	0	CD	0
새로운방식	0	CE	0
전망어려움	0	CC	0
CC	2	전망어려움	5
초전도	2	CU	0
이온트랩	0	CDU	2
광자	0	CEU	1
중성원자	0	CD	2
새로운방식	0	CE	0
전망어려움	0	CC	0
총합계	42	총합계	42

주: 전문가별로 1, 2순위 궤적 선택한 후 각각에 해당하는 방식 선택, 총 선택 수는 42건 (응답자 21명)

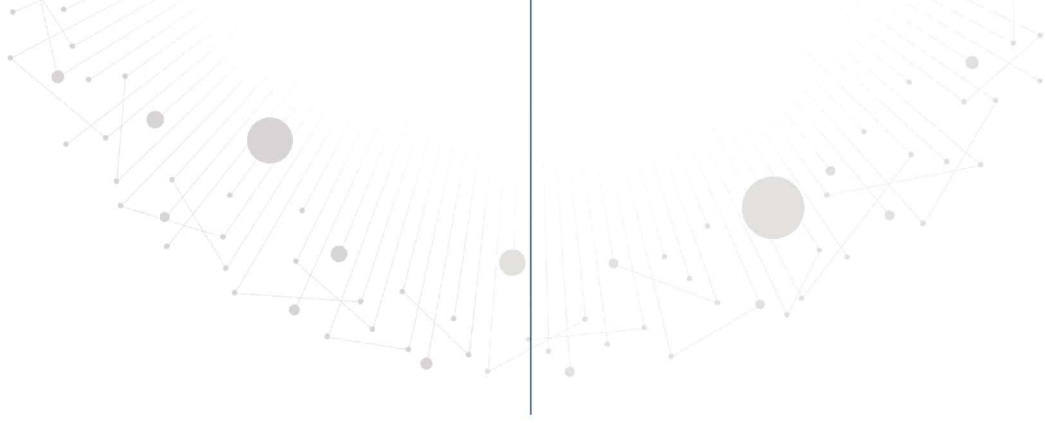
저자소개

- 허필선** ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 산업분석연구실 책임연구원
e-mail: f3style@etri.re.kr Tel. 042-860-5396
- 석왕현** ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 산업분석연구실 선임연구원
e-mail: whseok@etri.re.kr Tel. 042-860-6208
- 이주연** ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 산업분석연구실 연구원
e-mail: vanesa.jylee@etri.re.kr Tel. 042-860-0663
- 이종용** ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 산업분석연구실 책임연구원
e-mail: jongyl@etri.re.kr Tel. 042-860-5269

양자 컴퓨팅 기술 발전의 전략적 혁신 그리드

- 발행인** 한 성 수
발행처 한국전자통신연구원 ICT전략연구소
발행일 2025년 12월 31일





www.etri.re.kr

본 저작물은 공공누리 제4유형:

출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.



ETRI Electronics and Telecommunications
Research Institute

34129 대전광역시 유성구 가정로 218
TEL.(042) 860-6114 FAX.(042) 860-6504

