

Quantum 시리즈 25-2

양자 컴퓨팅 지배적 디자인 탐색: 큐비트 구현 방식 중심으로

이주연·이종용·허필선

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. 연구 배경과 범위	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 내용과 범위	2
II. 지배적 디자인 개요	5
1. 지배적 디자인의 개념과 형성	5
2. 지배적 디자인 결정요인	7
3. 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 결정요인	13
III. 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 탐색	15
1. 결정요인의 중요도	15
2. 결정요인의 방식별 성과점수	18
3. 종합 평가 결과	32
IV. 요약 및 시사점	35
1. 지배적 디자인 탐색 결과 요약	35
2. 정책적 시사점	36
참고문헌	38
<부록1> 전문가 조사 설문지	41
<부록2> 설문 응답 전문가 리스트	50



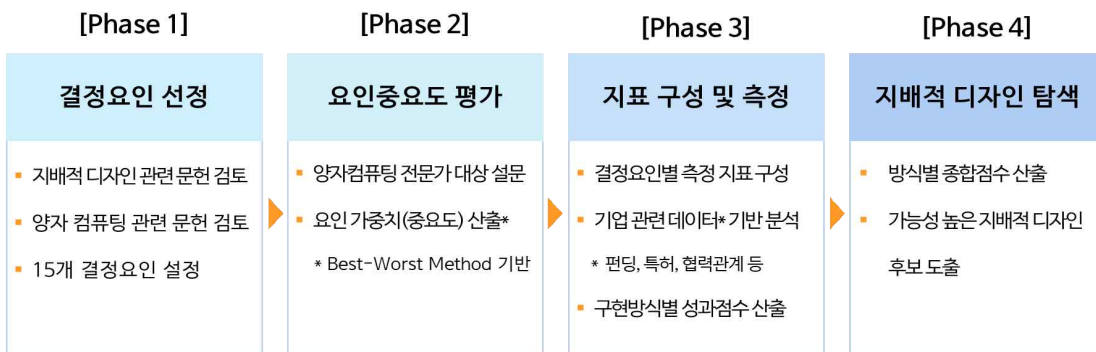
Executive Summary

연구 배경

- 양자 컴퓨팅의 핵심인 큐비트 구현 기술에는 다양한 방식이 존재하나, 특정 방식이 지배적 디자인(dominant design)으로 정해지지 않은 상황
- 지배적 디자인이 결정되면 해당 기술을 중심으로 산업 표준화, 생태계 확장, 투자 집중이 이루어 지므로, 형성 이전 단계에서 지배적 디자인이 될 가능성이 높은 후보를 탐색할 필요
 - 지배적 디자인을 결정하는 요인에 대한 학술적 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 이를 토대로 특정 기술 분야의 지배적 디자인을 탐색하는 다수의 실증 연구가 축적 중
- 양자 컴퓨팅 내 큐비트 구현 방식 간 경쟁을 지배적 디자인 관점에서 연구하거나, 방식별 지배력 형성 가능성을 체계적으로 비교·평가한 연구는 부족
 - 양자 컴퓨팅 관련 기존 연구들은 논문·특허 기반의 R&D 동향 및 국가 간 기술 경쟁 관계 파악, 펀딩·스타트업 데이터를 활용한 산업 생태계 분석 등에 초점
- 양자 컴퓨팅 분야의 지배적 디자인 가능성을 조기에 탐색하는 것은 국내 R&D 및 투자 방향의 적정성을 점검하고 향후 경쟁력을 확보할 수 있는 정책 마련에 기여

연구 내용과 범위

- 본 연구는 양자 컴퓨팅의 다양한 큐비트 구현 방식 중 지배적 디자인(dominant design)이 될 가능성이 높은 기술 방식을 탐색함
 - 분석 대상은 양자 컴퓨팅의 주요 큐비트 구현 방식(초전도, 이온트랩, 중성원자, 광자, 실리콘)이며, 이러한 방식을 채택한 기업을 분석 단위로 설정
 - 지배적 디자인 후보를 탐색하기 위한 연구 프로세스는 다음과 같이 크게 4단계로 구성



지배적 디자인 결정요인

- 지배적 디자인(dominant design)은 기술 경쟁에서 시장·산업 참여자들에 의해 선택되어 해당 분야에서 사실상의 표준(de facto standard)으로 기능하는 디자인을 의미
 - 지배적 디자인이 형성되면 학습효과, 네트워크 효과, 전환비용이 결합되면서 승자(winner)가 거의 모든 시장을 점유하는 사실상 자연 독점(natural monopoly)에 가까운 구조가 나타날 수 있음
- 지배적 디자인의 형성은 기술적 성능뿐 아니라 특정 기술을 지원(support)하는 기업군의 특성 및 전략과 고객·정부·공급업체 등과 같은 외부 이해관계자와의 관계 등에 복합적으로 영향을 받음
- 본 고에서는 정보통신기술(ICT) 분야에 적용 가능한 지배적 디자인 결정요인을 선정하고, 양자 분야 관련 주요 보고서 등을 검토하여 양자 컴퓨팅 분야의 맥락(context)에 맞도록 조정·구체화

그룹	요인	설명
기술 특성	기술적 우위	특정 방식이 제공하는 기술적 성능의 우월성
	호환성	특정 방식이 기존 컴퓨팅 및 클라우드 인프라와 연계·활용이 용이한 정도
	소부장 준비도	안정적 동작에 필요한 소재, 부품, 장비의 성숙도와 가용성
기업 특성	재무적 강점	기업이 보유한 재무적 자원의 규모
	브랜드 평판/신뢰도	시장과 이해관계자가 기업에 대해 가지는 긍정적 인식과 신뢰의 정도
	자원 활용·운영 우위	경쟁자 대비 자원을 효율적으로 활용하고 운영하는 능력
	지식 흡수성	기업이 양자 컴퓨팅 분야의 새로운 지식과 경험을 학습하고 흡수하는 역량
기업 전략	가격 전략	가격을 전략적으로 설정하는 전략
	개방 전략	외부에서 활용할 수 있도록 기술을 개방하는 전략
	시장 진입 시점	제품을 시장에 처음 공개하거나 발표한 시점
	마케팅 전략	마케팅이나 홍보 활동을 통해 시장의 기대를 형성하는 전략
이해관계자	실사용 기반 규모	특정 방식이 실제 시장에서 사용되는 정도
	대형 고객 확보	시장 내 막대한 영향력을 가진 외부 플레이어 지원이나 기술 채택
	정부의 지원	정부나 규제 기관의 특정 방식에 대한 정책적·재정적 지원
	공급업체와의 제휴/협력	특정 방식에 맞는 보완재·서비스 등을 제공하는 공급업체와의 협력 정도

주: 기업은 특정 방식을 지원하는 기업군을 의미함

지배적 디자인 탐색

결정요인의 중요도

- 지배적 디자인을 결정하는 요인의 중요도(가중치)를 산출하고자 양자 컴퓨팅 분야의 기술 및 산업·정책 전문가 19인의 의견을 조사
 - 지배적 디자인 결정요인은 기술을 비롯해 시장, 산업, 정책 요인을 포함하고 있으므로, 응답자를 연구개발 분야 전문가(10인)와 시장·산업·정책 분야 전문가(9인)를 포괄함으로써 응답자 패널을 균형있게 구성
- 조사 결과, 기술적 우위(0.362)가 가장 중요한 요인으로 나타났으며, 그 다음으로 소·부·장 준비도(0.130), 지식 흡수성(0.100) 순으로 확인
 - 기술 특성 그룹의 가중치가 0.544로 다른 그룹에 비해 높은 중요도를 갖는 것으로 나타난 반면, 이해관계자 그룹의 가중치는 0.095로 나타나 상대적 중요도가 낮은 것으로 확인
 - 상위 3개 요인의 전역(global) 가중치 합은 0.592로, 양자 컴퓨팅 분야 내 지배적 디자인 경쟁이 다수 요인의 균형보다는 소수의 핵심 요인에 의해 결정됨을 시사

그룹	요인	국소(local) 가중치	전역(global) 가중치
기술 특성 (0.544)	기술적 우위	0.666	0.362
	호환성	0.096	0.052
	소·부·장 준비도	0.238	0.130
기업 특성 (0.250)	재무적 강점	0.181	0.045
	브랜드 평판/신뢰도	0.113	0.028
	자원 활용·운영 우위	0.307	0.077
	지식 흡수성	0.399	0.100
기업 전략 (0.111)	가격 전략	0.242	0.027
	개방 전략	0.430	0.048
	시장 진입 시점	0.164	0.018
	마케팅 전략	0.164	0.018
이해관계자 (0.095)	실사용 기반 규모	0.300	0.028
	대형 고객 확보	0.273	0.026
	정부의 지원	0.279	0.026
	공급업체와의 제휴/협력	0.148	0.014

주: 일관성(Consistency) 기준을 충족한 응답만을 가중치 산정에 반영함, 볼드체는 전역 가중치 값이 0.1 이상임을 의미

○ 결정요인의 방식별 성과점수

- 결정요인을 대표하는 측정 지표를 구성하고, 분석 대상 기업의 펀딩, 특허 및 협력 관계 등 다양한 정량 데이터를 활용하여 각 요인의 방식별 성과점수(performance score)를 산출
 - 양자 컴퓨팅 분야 전문가가 모든 큐비트 구현 방식의 기술·시장·산업 특성을 일괄적으로 검토하는 정성적 평가는 한계가 있다고 판단하여, 데이터 기반 분석을 통해 성과점수를 정량화함
 - 모든 지표는 값이 클수록 지배적 디자인 형성 가능성이 높아지도록 설정하여(양의 관계), 결과 해석의 일관성 확보

그룹	요인	측정 지표
기술 특성	기술적 우위	방식별 최고 성능 QPU의 물리 큐비트 수(Qubit counts), 2-큐비트 게이트 충실도(2-Qubit gate fidelity), 코히어런스 시간(Coherence time), 게이트 속도(gate speed)를 방식 간 상대순위로 점수화한 뒤 합산
	호환성	방식별 접근 가능한 클라우드의 접근성 지수 (접근 가능한 클라우드 수 × 클라우드 유형별 영향력 지수)
	소부장 준비도	양자 분야 주요 보고서 내 소재·부품·장비 관련 문장을 추출한 후 강점·약점·기회·위험으로 라벨링하고, 항목별 언급 빈도에 점수 부여 후 합산
기업 특성	재무적 강점	IPO/대기업 수(log), 그 외 비상장 기업(스타트업 등)이 받은 누적 펀딩 금액의 평균(log) 합산
	브랜드의 평판/신뢰도	양자 분야 주요 보고서에서 기업이 언급된 출처 수를 집계한 뒤, 방식별 기업당 평균 언급 출처 수
	자원 활용·운영 우위	QPU 계층 내 수평 협력 네트워크에서의 연결 중심성
	지식 흡수성	양자 컴퓨팅 관련 특허 기준, 방식별 특허 수 상위 3개 기업의 특허당 비자기 전방 인용(non-self backward citation) 평균
기업 전략	가격 전략	QPU 서비스를 무료 크레딧으로 제공하는 기업 비중
	개방 전략	오픈소스 SDK를 제공하는 기업 비중
	시장 진입 시점	방식별 최초 QPU 공개·발표한 연도와 2025년과의 차이 (2025-최초공개연도)
	마케팅 전략	기술 개발 로드맵 공개·발표한 기업 비중
이해관계자	실사용 기반 규모	QPU 기업이 최종이용자와 맺고 있는 협력 링크 수
	대형 고객 확보	대기업 및 기업형 벤처캐피탈(CVC)이 투자한 총 투자금액
	정부의 지원	방식별로 정부 차원의 재정 지원이 확인된 국가 수
	공급업체와의 제휴/협력	QPU 계층-타 계층 간 수직 협력 네트워크에서의 연결 중심성

- 초전도는 15개 결정요인 중 9개 요인이 최고 점수를 받으며 기술특성·기업전략·생태계 영역 전반에서 우위를 보인 반면, 나머지 방식들은 특정 요인에서만 부분적인 강점을 보임
 - (초전도) 기술적 우위, 호환성, 재무적 강점, 가격·개방 전략, 시장 진입 시점, 실사용 기반 규모, 정부 지원 및 공급업체와의 제휴/협력 등 다양한 결정요인에서 1위를 차지하며 전방위적 강점을 보임

- (이온트랩) 기술적 우위에서는 3위를 차지했으나 나머지 기술 특성 요인에서 상위권에 위치하고, 자원 활용·운영 우위, 마케팅 전략, 대형 고객 확보 등에서 상대적으로 우수함
- (중성원자) 기업 특성 내 4개 요인 중 브랜드 평판/신뢰도, 지식 흡수성 및 자원 활용·우위에서 높은 점수를 기록하고, 기술적 우위에서도 2위를 차지해 성능 및 학습 측면에서 높은 경쟁력을 보임
- (광자) 가격 전략, 시장 진입 시점, 대형 고객 확보, 정부의 지원 등에서 상대적으로 높은 순위를 기록하였으나, 그 외 요인에서 상대적으로 제한적인 수준에 머무르고 있음
- (실리콘) 소·부·장 준비도, 지식 흡수성 등을 제외한 대부분의 요인에서 낮은 점수를 기록하여 초기 개발 및 상용화 단계에 머무르고 있는 것으로 해석됨

그룹	요인	1위	2위	3위	4위	5위
기술 특성	기술적 우위	초전도	중성원자	이온트랩	광자	실리콘
	호환성	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
	소부장 준비도	이온트랩·실리콘		초전도·광자		중성원자
기업 특성	재무적 강점	초전도	광자	이온트랩	실리콘	중성원자
	브랜드의 평판/신뢰도	중성원자	초전도	이온트랩·실리콘		광자
	자원 활용·운영 우위	이온트랩	중성원자	광자	초전도	실리콘
	지식 흡수성	중성원자	실리콘	초전도	광자	이온트랩
기업 전략	가격 전략	초전도	광자	중성원자	이온트랩	실리콘
	개방 전략	초전도	중성원자	광자	이온트랩	실리콘
	시장 진입 시점	초전도	이온트랩·광자		중성원자	실리콘
	마케팅 전략	이온트랩	초전도	중성원자	실리콘	광자
이해관계자	실사용 기반 규모	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
	대형 고객 확보	이온트랩	광자	중성원자	초전도	실리콘
	정부의 지원	초전도	중성원자·광자		이온트랩	실리콘
	공급업체와의 제휴/협력	초전도	이온트랩	중성원자·광자		실리콘

○ 지배적 디자인 탐색 결과

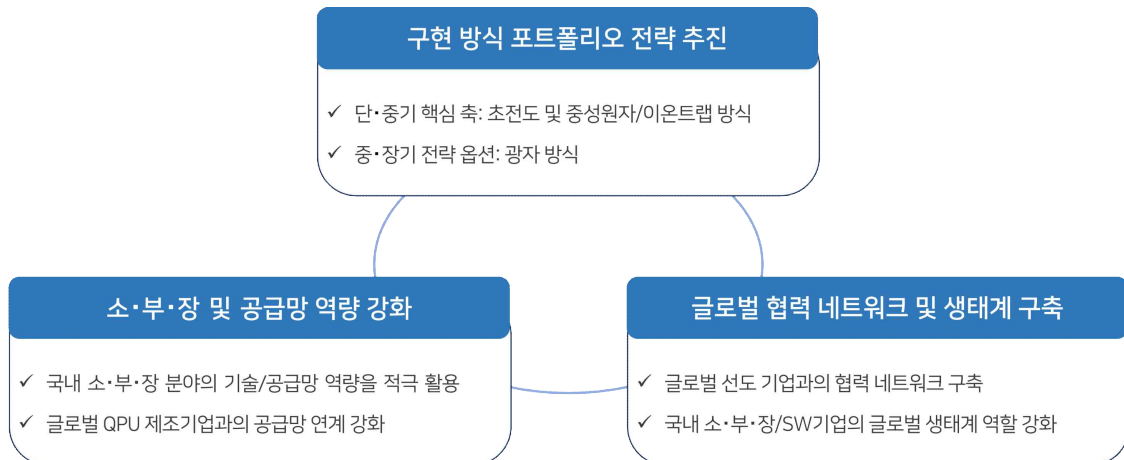
- 결정요인의 중요도(가중치)와 방식별 결정요인의 정규화된 성과점수를 가중합(weighted-sum)하여 각 큐비트 구현 방식의 종합점수를 산출하고, 이를 바탕으로 방식 간 비교·평가
 - 지표 간 측정 방식, 단위 및 범위가 상이하므로 결정요인별 성과점수를 최소-최대 정규화(min-max normalization)하여 0과 1 사이의 값으로 변환한 뒤 종합 평가에 활용
- 초전도 방식이 가장 유력한 지배적 디자인 후보로 도출되었으며, 중성원자(2위)와 이온트랩(3위) 및 광자(4위)도 유의미한 경쟁 잠재력을 보이는 것으로 확인

구분	중요도 (가중치)	성과점수										
		초전도		이온트랩		중성원자		광자		실리콘		
기술 특성	기술적 우위	0.362	1	1.00	3	0.56	2	0.78	4	0.44	5	0.00
	호환성	0.052	1	1.00	2	0.55	3	0.29	4	0.24	5	0.00
	소부·장 준비도	0.130	3	0.33	1	1.00	5	0.00	3	0.33	1	1.00
기업 특성	재무적 강점	0.045	1	1.00	3	0.39	5	0.00	2	0.64	4	0.14
	브랜드 평판/신뢰도	0.028	2	0.79	3	0.64	1	1.00	5	0.00	3	0.64
	자원 활용·운영 우위	0.077	4	0.20	1	1.00	2	0.95	3	0.65	5	0.00
	지식 흡수성	0.100	3	0.09	5	0.00	1	1.00	4	0.06	2	0.19
기업 전략	가격 전략	0.027	1	1.00	4	0.48	3	0.72	2	0.82	5	0.00
	개방 전략	0.048	1	1.00	4	0.77	2	0.86	3	0.82	5	0.00
	시장 진입 시점	0.018	1	1.00	2	0.43	4	0.29	2	0.43	5	0.00
	마케팅 전략	0.018	2	0.87	1	1.00	3	0.79	5	0.00	4	0.59
이해관계자	실사용 기반 규모	0.028	1	1.00	2	0.46	3	0.40	4	0.26	5	0.00
	대형 고객 확보	0.026	4	0.11	1	1.00	3	0.22	2	0.92	5	0.00
	정부의 지원	0.026	1	1.00	4	0.10	2	0.50	2	0.50	5	0.00
	공급업체와의 제휴/협력	0.014	1	1.00	2	0.33	3	0.20	3	0.20	5	0.00
종합점수		-	1	0.73	3	0.59	2	0.61	4	0.42	5	0.18

주: 성과점수는 상대적 순위도 함께 표기, 종합점수는 정규화된 성과점수(0~1)에 가중치를 적용하여 산출

정책적 시사점

- 본 연구의 분석 결과와 국내 R&D 및 산업 현황 등을 종합하여, 국내 양자 컴퓨팅 산업의 발전을 위한 3대 정책 방향을 제시



I 연구 배경과 범위

1 연구 배경

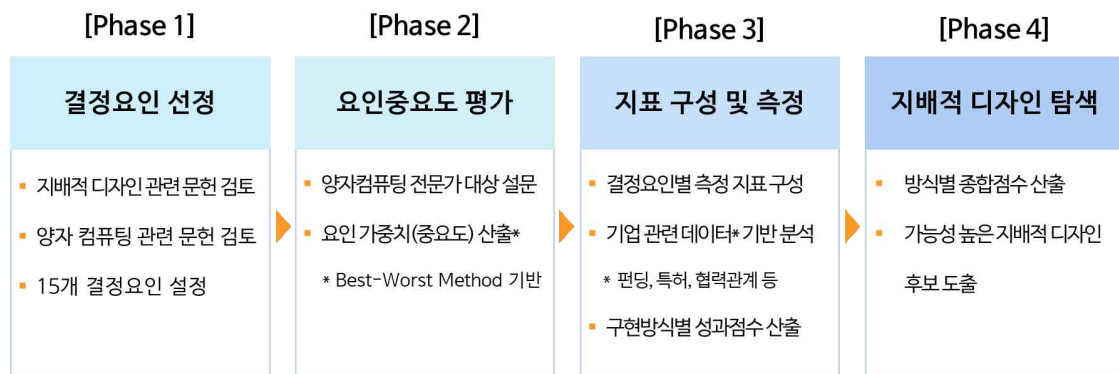
- 양자 컴퓨팅의 핵심인 큐비트 구현 기술에는 다양한 방식이 존재하나, 특정 방식이 지배적 디자인(dominant design)*으로 확정되지 않은 상황**
 - * 경쟁 기술 대비 명확한 시장 우위를 확보하고 그 우위가 상당 기간 지속되며, 기업·사용자·보완재·공급자 등 산업 참여자들이 선택하여 사실상의 표준(de facto standard) 기능을 하는 설계를 의미(van de Kaa et al., 2011)
 - ** 지배적 디자인이 결정되면, 해당 기술을 중심으로 산업 표준화, 생태계 확장, 투자 집중이 이루어지며, 이는 곧 기업 및 국가의 경쟁력과 직결
 - 큐비트 구현 기술은 초전도(Superconducting), 이온트랩(Trapped ion), 중성원자(Neutral atom), 광자(Photonic) 및 실리콘 스핀(Silicon spin) 등 다양한 물리 기반 방식이 존재하며, 각 방식은 고유한 장단점을 가짐
 - 주요 기업과 연구기관이 다양한 기술 방식에 대해 병렬적으로 연구개발하며 방식 간 경쟁을 지속하고 있으나, 현재까지 명확한 승자(winner)가 나오지 않은 상황임
- 지배적 디자인을 결정하는 요인에 대한 학술적 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며*, 이를 토대로 특정 기술 분야의 지배적 디자인을 탐색하는 다수의 실증 연구가 축적 중
 - * 지배적 디자인 형성에 기술적 성능뿐 아니라 관련 기업 특성·전략과 이해관계자 관계 등 복합 요인이 영향을 미치지만, 기존 연구는 이를 부분적으로만 다루어 옴
 - 초기 연구들은 과거 기술 경쟁 사례를 중심으로 지배적 디자인 결정에 영향을 미치는 핵심 요인을 도출하는 연구가 주를 이루었으며, Suarez(2004)는 기술 경쟁 속에서 지배적 디자인이 형성되는 과정을 설명하는 통합적 프레임워크를 제시
 - 이를 기반으로 풍력, 수력, 배터리 등 여러 산업 분야에 적용하여, 경쟁 기술들 사이에서 지배적 디자인이 될 가능성이 높은 후보를 실증적으로 탐색하는 연구로 발전
- 양자 컴퓨팅 내 구현 방식 간 경쟁을 지배적 디자인 관점에서 연구하거나, 방식별 지배력 형성 가능성을 체계적으로 비교·평가한 연구는 부족
 - 양자 컴퓨팅 관련 기존 연구들은 논문·특허 기반의 R&D 동향 및 국가 간 기술 경쟁 관계 파악, 펀딩·스타트업 데이터를 활용한 산업 생태계 분석 등에 초점
- 양자 컴퓨팅 분야의 지배적 디자인 후보 가능성을 조기에 탐색하는 것은 국내 R&D 및 투자 방향의 적정성을 점검하고 향후 경쟁력을 확보할 수 있는 정책 마련에 기여
 - 우리나라는 「양자기술 전략로드맵('22.11)」에 근거하여 정부 주도의 연구개발 전략을 추진 중이며, 초전도(범용), 중성원자(특수목적형)를 양대 축으로 설정하고 있음

2 연구 내용과 범위

◎ 연구 내용 및 프로세스

- 지배적 디자인 관련 연구에서 제시된 결정요인을 양자 컴퓨팅 분야 내 기술 경쟁에 적용함으로써, 구현 방식별 지배적 디자인 가능성을 체계적으로 평가할 필요
 - 지배적 디자인 관점에서 주요 큐비트 구현 방식을 동일한 평가 틀(framework) 아래에서 종합적으로 비교·분석하는 연구가 요구됨
 - 이러한 평가 결과는 한정된 R&D 자원을 어느 구현 방식에 더 집중해서 투자할 것인지 등 지원 및 규제에 대한 전략 수립 및 정책 결정에 있어 기초자료로 기능할 수 있음
- 본 연구는 양자 컴퓨팅의 다양한 큐비트 구현 방식 중 지배적 디자인이 될 가능성이 높은 기술 방식을 탐색하는 것이 핵심 내용임
 - 지배적 디자인을 탐색하기 위한 연구 프로세스는 다음과 같이 크게 4단계로 구성
 - (Phase 1: 결정요인 선정) 관련 문헌을 기반으로 기술 경쟁에서 지배적 디자인을 결정하는 요인을 검토하고, 양자 컴퓨팅 분야의 맥락에 적합한 15개 결정요인을 설정
 - (Phase 2: 요인중요도 평가) 양자 컴퓨팅 분야 전문가를 대상으로 설문 조사를 실시하여 지배적 디자인 결정요인의 상대적 중요도(가중치)를 산출
 - (Phase 3: 지표 구성 및 측정) 결정요인별로 대응하는 측정 지표를 구성하고, 기업 관련 데이터 등에 기반하여 구현방식별 성과점수를 산출
 - (Phase 4: 지배적 디자인 탐색) 결정요인별 중요도와 방식별 성과점수를 가중합하여(weighted-sum), 큐비트 구현 방식별로 지배적 디자인이 될 가능성을 평가

그림 1-1 연구 프로세스



◎ 분석 범위

- 양자 컴퓨팅의 구현 방식(modality)을 분석 대상으로 하며, 다양한 기술 방식 중 초전도, 이온트랩, 중성원자, 광자 및 실리콘 스핀*의 5개 방식을 중점으로 함

* 양자점(Quantum dot) 혹은 전자 스핀(Electron spin) 큐비트라고도 함(IQM Quantum Computers & Omdia, 2025.5)

- 초전도·실리콘스핀은 전자를 이용한 고체 기반, 이온트랩·중성원자는 원자의 에너지 준위를 이용한 원자 기반, 광자는 빛 입자를 직접 정보 단위로 사용하는 비고체(flying qubit) 기반 방식
- 상기 5개 방식은 글로벌 양자 컴퓨터 기업들이 주로 채택하고 있는 구현 방식으로, 투자와 연구 개발 활동이 활발하며 데이터 가용성이 높음

※ 위상(topological), NV 다이아몬드(NV diamond) 등은 채택한 기업의 수가 적고(The Quantum Insider Intelligence Platform, 2025.6), 이론 및 개념 검증단계에 머물러 있어(IDTechEx, 2024.4) 분석 대상에서 제외

- 대학·연구기관이 기초기술을 제공하더라도 상용화 및 시장확산을 주도하여 지배적 디자인 형성에 가장 큰 영향을 미치는 주체는 기업(firm)으로 이를 분석 단위로 설정

- 분석 대상 기업은 Quantum Insider*에서 제공하는 양자 컴퓨터 기업과 양자 관련 시장/기술 보고서에서 주요 기업으로 나타난 NTT를 포함하여 총 69개이며, 각 기업은 하나의 큐비트 방식과 매칭

* 양자과학기술 전문 컨설팅 기관으로 양자 분야 기업, 펀딩, 투자자 등에 대한 데이터와 시장 및 정책 동향 보고서를 제공하며, DB 내 양자컴퓨터 분야를 큐비트 구현 방식 기준으로 분류하여 제시

표 1-1 분석 대상 기업

구현 방식	기업 수	대표 기업
초전도	23	Google Quantum AI lab(미국), IBM(미국), Rigetti Computing(미국), Quantum Circuits(미국), IQM(핀란드), Anyon Systems(캐나다), Alice & Bob(프랑스)
이온트랩	12	IonQ(미국), Quantinuum(영국), eleQtron(독일), Alpine Quantum Techonologies(오스트리아)
중성원자	8	QuEra Computing(미국), Atom Computing(미국), Infleqtion(미국), PASQAL(프랑스)
광자	14	PsiQuantum(미국), Xanadu(캐나다), Quandela(프랑스), ORCA Computing(영국)
실리콘	12	Intel(미국), Diraq(호주), Silicon Quantum Computing(호주)

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6) 바탕으로 저자 재구성

II 지배적 디자인 개요

1 지배적 디자인의 개념과 형성

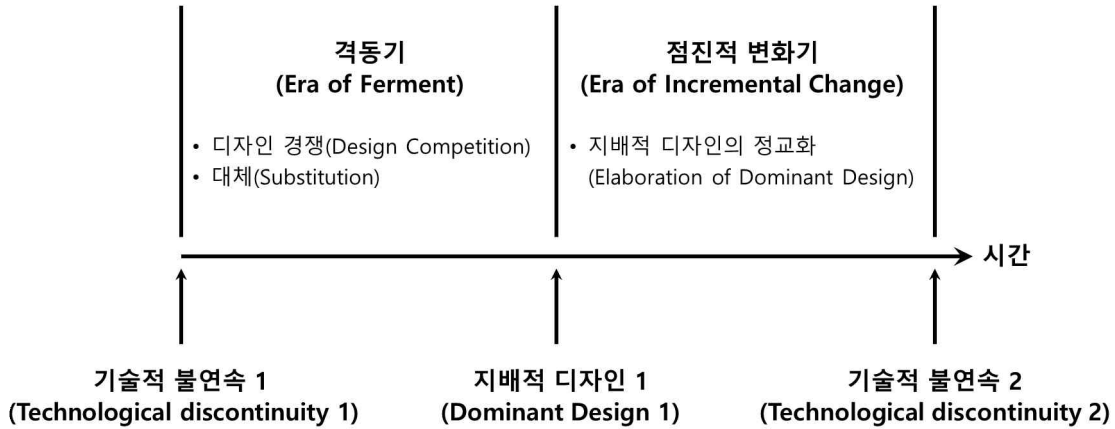
○ 개념

- 지배적 디자인(dominant design)은 기술 경쟁에서 시장·산업 참여자들에 의해 선택되어 해당 분야에서 사실상의 표준(de facto standard)으로 기능하는 디자인을 의미
 - ‘지배적(dominant)*’은 경쟁 기술보다 명확한 시장 우위를 확보하고 그 우위가 상당 기간 지속되면서 기업·사용자·보완재 공급자 등이 해당 디자인을 기준으로 제품·서비스·규격을 맞추는 상태를 말함
 - * 기존 문헌에서 (1) 널리 수용된 경우, (2) 가장 근접한 경쟁 기술이 적극적으로 경쟁을 포기한 경우, (3) 특정 기술이 대안 기술에 비해 뚜렷한 시장 점유율을 달성하고 그 우위가 점점 확대되는 경우, (4) 상당 기간 동안 가장 높은 수준의 시장 수용성을 보이는 경우, (5) 신규 설치(new installations)의 50% 이상이 해당 기술을 사용하는 경우 등으로 정의(van de Kaa et al., 2011)
 - ‘디자인(design)’이란 제품의 구조와 구성 방식을 규정하는 제품 디자인(product design)으로, 여러 구성요소가 결합된 시스템/아키텍처(system/architecture), 상호운용성을 규정하는 표준(standard), 포맷(format), 인터페이스(interface) 혹은 이를 둘러싼 플랫폼(platform) 등의 용어로도 사용되어 옴
 - 본 연구에서는 디자인(design)을 제품 디자인에 한정하지 않고, 특정 기술 방식을 규정하는 구현 방식(modality)에 초점을 맞추고 있으며, 양자 컴퓨팅 시스템을 구성하는 플랫폼/아키텍처(platform/architecture)까지 포괄
 - ※ 양자 컴퓨팅 관련 문헌에서 큐비트 구현 방식을 큐비트 모달리티(modality), 양자 컴퓨팅 접근법 혹은 옵션(approaches/options), 플랫폼/아키텍처(platform/architecture) 및 큐비트 기술(technologies) 등 다양한 용어로 지칭(IDTechEx, 2024; MIT, 2025; IQM Quantum Computers & Omdia, 2025)

○ 지배적 디자인 형성과 의의

- Anderson & Tushman(1990)은 기술 변화가 ‘기술적 불연속→격동기→지배적 디자인→점진적 변화기’로 순환하며, 격동기의 경쟁을 거쳐 지배적 디자인이 형성된다고 설명
 - ※ Utterback & Abernathy(1975)는 산업이 초기의 다양한 제품 디자인 경쟁에서 하나의 디자인에 수렴하는 현상을 유동기(fluid pattern), 과도기(transitional pattern), 경화기(specific pattern)의 세 단계로 구분하여 설명
 - 기술적 불연속은 기존 기술 대비 성능·비용에서 결정적인 우위를 확보하여, 기존 기업의 토대와 생존을 위협할 만큼의 파괴적 혁신(breakthrough innovation)을 의미
 - 기술적 불연속이 등장하면 이를 기반으로 변형된 여러 디자인들이 동시에 등장하는 격동기를 열고, 경쟁이 진행되면서 하나의 지배적 디자인으로 수렴
 - 지배적 디자인이 정해진 후에는 해당 디자인을 중심으로 점진적 기술 혁신이 이어지며, 이는 새로운 불연속적 혁신이 등장할 때까지 지속

그림 II-1 기술 변화 주기(The cycle of technological change)



출처: Anderson & Tushman(1990) 참고하여 저자 재구성

- 지배적 디자인이 형성되면 학습효과, 네트워크 외부성, 전환비용이 결합되면서 승자가 거의 모든 시장을 가져가는 자연 독점에 가까운 구조가 나타날 수 있음
 - 사용자가 증가할수록 가치가 증가하는 네트워크 효과와 기대 형성을 통해 단일 설계(디자인)가 모든 경쟁 설계를 밀어내는 승자 독식(winner-take-all)에 가까운 시장 구조가 형성될 수 있음
 - 지배적 디자인에 기반한 대규모 설치 기반(installed base)과 높은 전환비용(switching costs)은 사용자와 공급자를 특정 설계에 락인(lock-in)시키는 효과를 가져옴
 - 산업 내 기술·제품 등의 설계에 대한 불확실성이 크게 감소하고 시장 참여자들이 동일한 설계를 전제로 투자 의사결정을 내릴 수 있게 되어 산업이 보다 안정화됨
 - 지배적 디자인이 시장의 대부분을 차지하면 경쟁 기술이 생존할 수 있는 틈새 시장은 작고 성장 여지가 제한된 영역으로 축소되어 사실상 자연 독점에 가까운 구조가 형성됨

[참고] 지배적 디자인 형성의 대표적 사례

- (VHS vs. Betamax) 가정용 비디오 테이프 표준 경쟁에서 초기 도입이 빠르고 화질은 우수했지만 녹화 시간이 짧았던 소니의 Betamax 대신, 더 긴 녹화 시간과 개방형 라이선스 전략을 택한 VHS가 더 많은 제조사와 콘텐츠 공급자의 지지를 얻으면서 지배적 디자인으로 자리잡음
- (Blu-ray vs. HD DVD) 차세대 광디스크 표준 경쟁에서 Blu-ray는 주요 영화 스튜디오의 지원과 PlayStation3 기본 탑재 효과를 바탕으로 빠르게 보급된 반면, HD DVD는 스튜디오와 유통망 확보에서 열위에 놓이면서 시장에서 도태되어 최종적으로 Blu-ray가 지배적 디자인이 됨
- (QWERTY vs. Dvorak 키보드) Dvorak 키보드 배열은 이론적으로 손가락 이동 거리를 줄이고 타자 효율을 높일 수 있는 디자인으로 설계되었으나, QWERTY 배열이 이미 시장에 광범위하게 보급되어 사용자 학습 비용, 기기·교육 인프라, 소프트웨어 지원 등이 모두 QWERTY를 중심으로 구축되며 경로 의존성과 네트워크 외부성에 의해 QWERTY 방식이 지배적 디자인으로 유지됨

2 지배적 디자인 결정요인

● Suarez(2004)와 van de Kaa et al.(2011)은 이론 연구와 개별 사례 기반 실증 연구를 종합해 기술이 지배력(dominance)*을 얻는 과정을 설명하는 통합적 프레임워크를 제시

* 여러 대안 기술 간 경쟁에서 특정 기술이 경쟁 기술 대비 시장 내 명확한 우위를 확보한 정도

※ Suarez(2004)는 두 개 이상의 대안적 기술이 경쟁하는 상황에서 특정 기술 대안이 시장에서 사실상의 표준으로 자리 잡아 가는 과정을 기술적 지배력(technological dominance)이 형성되는 과정으로 설명

● Suarez(2004)의 통합적 프레임워크

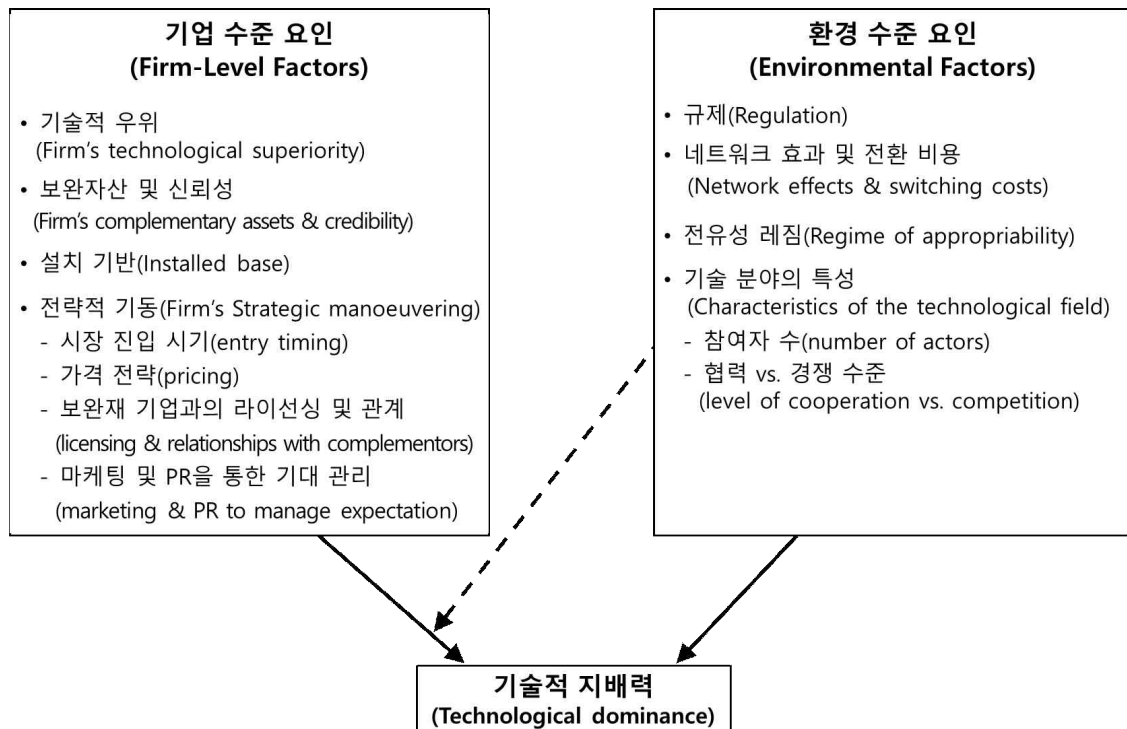
● 정보통신기술(ICT) 영역의 대표적 기술 경쟁 사례*를 중심으로 한 기존 연구를 종합 분석하여 지배적 디자인이 형성되는 과정을 설명하는 통합적 프레임워크를 제시

* 가용용 HDTV, PC 운영체제, VCR, 웹 브라우저, 무선 통신 표준 등 다양한 분야의 기술 경쟁 사례를 분석

- 지배력 형성 요인을 기업 수준 요인(Firm-level factors)과 환경 수준 요인(Environmental factors)으로 구분하여 총 8개 요인을 제시

- 기술적 지배력은 단일 요인이 아니라 다수 요인의 상호작용에 의해 결정됨을 강조

그림 II-2 기술 경쟁에 영향을 주는 요인



주: 점선은 기업 수준 요인이 기술적 지배력에 미치는 효과의 크기나 방향을 환경 수준 요인이 조절(moderate)할 수 있음을 의미

출처: Suarez(2004) 참고하여 저자 재구성

- (기업 수준 요인) 기업의 기술적 우위(technological superiority), 보완자산 및 신뢰성(complementary assets & credibility), 설치 기반(installed base), 기업의 전략적 기동(strategic manoeuvring)으로 구분
 - (기술적 우위) 특정 기술이 경쟁 중인 대안보다 얼마나 잘 작동하는지를 의미하며, 성능이 뛰어난 기술이 지배적 디자인으로 채택될 가능성이 높으나, 기술적 우위는 지배력 경쟁에서 항상 중요한 역할을 하는 것은 아님
 - (보완자산 및 신뢰성) 기업의 이전 경험이나 명성, 제조 역량, 브랜드 신뢰도 등과 같은 보완적 자산이 더 많을수록 지배적일 가능성이 높음
 - (설치 기반) 이미 시장에 보급된 제품이나 고객 기반을 말하며, 네트워크 효과가 존재할 경우, 설치 기반 자체가 추가 고객 수요를 견인하여 기술 확산을 가속화함
 - (전략적 기동) 진입 시기, 가격 전략, 라이선스 정책의 유형, 보완재 및 서비스와의 관계를 관리하는 방식, 마케팅 및 홍보자원 활용 방식 등 기업의 핵심 전략 요소 포함
 - ▶ (시장 진입 시기) 시장에 제품을 출시하는 시장 진입 시점과 체계적인 R&D 활동을 시작하는 시점을 말하며, 조기 시장 진입은 선점 효과를 가져올 수 있고 조기 R&D 활동은 학습 효과와 다양한 기술적 대안을 실험할 시간을 확보할 수 있도록 함
 - ▶ (가격 전략) 초기 공격적인 가격 전략은 빠른 보급을 가능하게 하여 설치 기반을 확대하고, 이는 경쟁 기술 대비 지배적 기술로 자리잡을 가능성을 높임
 - ▶ (보완재 기업과의 라이선싱 및 관계) 개방적 라이선싱은 다양한 기업의 참여를 유도해 보완재와 서비스 생태계를 빠르게 확장시키며 지배적 디자인으로 자리잡을 가능성을 높임
 - ▶ (마케팅 및 PR을 통한 기대 관리) 적극적인 마케팅과 홍보는 고객들의 기대를 형성하여 지배적 디자인 경쟁에 중요한 영향을 미침
 - ※ 제품 사전 발표(product pre-announcement)는 기업의 차기 제품에 대해 긍정적인 기대를 형성하는 동시에 경쟁사 제품 구매를 지연시키는 효과를 낼 수 있음(Farrell & Saloner, 1986)
- (환경 수준 요인) 규제(Regulation), 네트워크 효과 및 전환비용(Network effects & switching costs), 전유성 레짐(Regime of Appropriability), 기술 분야의 특성(Characteristics of the technological field)으로 구분
 - (규제) 정부가 특정 기술의 사용을 의무화하거나 초기 단계에서 구매할 경우, 해당 기술이 지배적 기술로 자리잡을 가능성이 높아짐
 - (네트워크 효과) 네트워크에 가입한 사용자가 많을수록 개별 소비자가 얻는 효용이 증가해 보완재와 서비스 수요를 촉진하고 설치 기반의 가치와 경쟁력을 강화함
 - (전환비용) 사용자가 기존 기술에서 다른 기술로 이동할 때 발생하는 비용을 의미하며 전환 비용이 높을수록 기존 기술에 락인(lock-in)되어 경쟁 기술로 이동이 어려워짐
 - (전유성 레짐) 혁신 성과를 보호하고 수익을 보호할 수 있는 제도적 환경을 말하며 강한 전유성 레짐 하에서는 우월한 기술을 보유한 기업이 경쟁에서 유리
 - (기술 분야의 특성) 기술 분야의 구조나 역동성(참여자 수, 협력이나 경쟁 수준, 가치 사슬 구조 등)이 지배적 디자인 형성에 영향을 줌

◎ van de Kaa et al.(2011)의 통합적 프레임워크

- 기술의 지배력 결정 과정을 이론 및 실증적으로 분석한 기존 문헌 127편을 종합 검토하여, 기술 경쟁에서 일반적으로 적용 가능한 29개의 지배력 결정요인을 제시*

* van de Kaa et al.(2011)은 '지배적 디자인'이라는 용어보다 서로 기능적으로 호환될 수 있도록 개체(entity) 간 상호작용(interrelation)을 규정한 일련의 공식화된 명세서(codified specification)의 집합으로 정의되는 '인터페이스 포맷(interface format)'이라는 용어를 사용

- 결정요인을 크게 포맷 지지 그룹의 특성, 포맷의 특성, 포맷 지원 전략, 기타 이해관계자 및 시장 특성 등 5가지 카테고리(그룹)으로 구분
- 이론적 연구와 실증적 연구의 분석 결과를 바탕으로 각 요인이 지배력(dominance)에 미치는 영향의 방향성을 아래 표와 같이 종합적으로 제시

표 II-1 인터페이스 포맷의 지배력에 영향을 주는 요인

구분	설명	효과
포맷 지지 그룹의 특성 (Characteristics of the format supporter)		
1. 재무적 강점(Financial strength)	포맷 지지 그룹의 현재 및 미래 재정 능력	+
2. 브랜드 명성과 신뢰성 (Brand reputation & credibility)	과거에 좋은 성과를 낸 기업일수록 신뢰성과 명성이 높아져 현재 선택에 영향을 미침	+
3. 운영 우위(Operational supremacy)	포맷 지지 그룹이 경쟁사보다 자원을 효율적으로 사용하는 능력	+
4. 학습 지향성(Learning orientation)	포맷 지지 그룹이 지식을 축적하고 기술을 개선하는 능력	+
포맷의 특성 (Characteristics of the format)		
5. 기술적 우위(Technological superiority)	특정 포맷이 경쟁 포맷보다 기술적으로 더 우월할 경우 선택될 가능성이 높음	+
6. 호환성(Compatibility)	기존 기술이나 설치 기반과의 호환성이 높을수록 선택될 가능성이 커짐	+
7. 보완재(Complementary goods)	보완재(소프트웨어, 콘텐츠, 서비스 등)가 많을수록 포맷 채택 가능성이 증가	+
8. 유연성(Flexibility)	다양한 상황이나 조건에 쉽게 적응할 수 있는 정도	+
포맷 지원 전략 (Format support strategy)		
9. 가격 전략(Pricing strategy)	낮은 초기 가격은 빠른 보급과 설치 기반 확대에 이어질 수 있음	-
10. 전유성 전략(Appropriability strategy)	지식재산권(IPR)과 같은 보호 장치를 통해 수익을 확보할 수 있는 능력	-
11. 진입 시기(Timing of entry)	시장에 진입하는 시점	∩
12. 마케팅 커뮤니케이션 (Marketing communication)	소비자의 인식과 기대를 관리하기 위한 마케팅 및 홍보 활동	+

13. 희소 자원의 선점 (Pre-emption of scarce assets)	핵심 자원(예: 공급망, 협력 파트너, 유통 채널 등)을 경쟁사보다 먼저 확보하는 것	+
14. 유통 전략(Distribution strategy)	제품과 서비스를 시장에 전달하는 방식과 효율성	+
15. 헌신/전념(Commitment)	기업이 특정 포맷을 지지하기 위해 헌신하는 정도	+
기타 이해관계자(Other stakeholder)		
16. 현재 설치 기반(Current installed base)	현재 사용 중인 고객 기반 규모	+
17. 이전 설치 기반(Previous installed base)	이전 세대 기술 기반 사용자 규모	+
18. 빅 피쉬(Big fish)	산업 내 주요 대기업이나 영향력 있는 플레이어의 참여	+
19. 규제기관(Regulator)	정부 및 규제기관의 정책과 승인	+
20. 반독점 법률(Antitrust laws)	경쟁 제한을 방지하는 법적 규제	-
21. 공급자(Supplier)	공급망 내 파트너의 지원 여부	+
22. 포맷 개발 과정의 효율성(Effectiveness of the format development process)	포맷 개발 프로세스의 효율성과 협력 수준	+
23. 이해관계자 네트워크 (Network of stakeholders)	다양한 이해관계자와의 네트워크 관계	+
시장 특성(Market characteristics)		
24. 편승 효과(Bandwagon effect)	특정 포맷을 채택하는 기업/소비자가 많을수록 다른 주체도 이를 따르는 경향	+
25. 네트워크 외부성	네트워크 규모 증가가 제품·서비스 가치 증가로 이어지는 효과	+
26. 경쟁 포맷의 수	선택 가능한 대안이 많을수록 특정 포맷의 지배적 위치 확보는 어려움	-
27. 시장 불확실성	시장 변동성과 불확실성이 클수록 채택이 지연될 가능성	-
28. 변화 속도	기술이나 시장 환경 변화 속도가 빠를수록 지배적 디자인 형성에 영향을 줌	-
29. 전환 비용	기존 포맷에서 새로운 포맷으로 바꿀 때 발생하는 비용.	-

주: +, -, 0은 각각 결정요인과 지배력 형성 간 양의 관계, 음의 관계 및 역 U자형 관계를 의미
출처: van de Kaa et al.(2011) 참고하여 저자 재구성

- (포맷 지지 그룹의 특성) 재무적 강점(Financial strength), 브랜드 명성과 신뢰성(Brand reputation & credibility), 운영 우위(Operational supermacy), 학습 지향성(Learning orientation)으로 구분
 - (재무적 강점) 포맷 지지 그룹이 경쟁 그룹보다 더 강한 재무적 역량을 보유한 경우, 개발 비용을 포함한 초기 손실을 감당할 수 있어 수익이 적은 시기에도 버틸 수 있음
 - (브랜드 명성 및 신뢰성) 명성이 높고 신뢰할 수 있는 포맷 지지 그룹은 다른 이해관계자들의 참여를 유도하며 이를 통해 설치 기반을 빠르게 확장시킬 수 있음

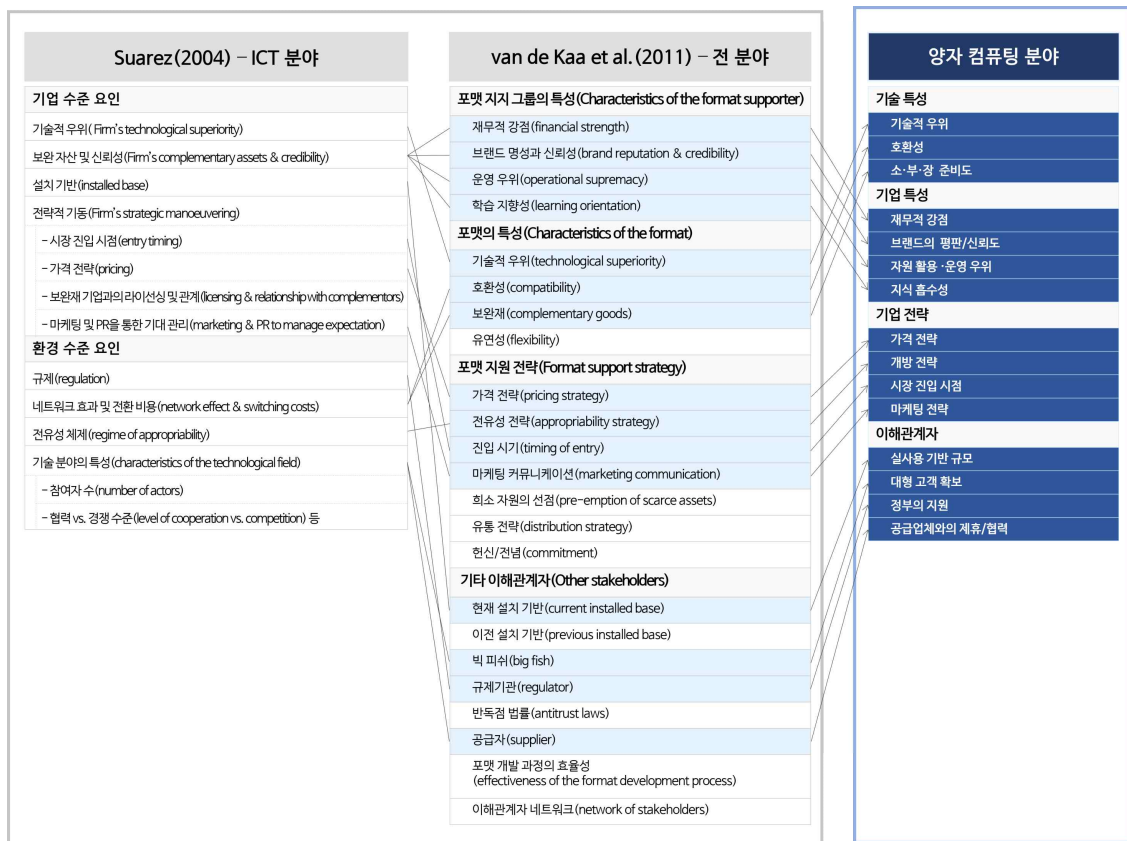
- (운영 우위) 경쟁 그룹보다 자원을 더 효율적으로 활용할 수 있는 능력을 통해 생산 역량 및 기술 활용 측면에서 우위를 가지게 되어 해당 포맷이 지배력을 확보할 가능성이 높아짐
- (학습 지향성) 단순한 기술적 노하우(know-how), 핵심 역량(core capability) 및 흡수 역량(absorptive capacity)을 포함하며 이는 포맷 지지 그룹의 지속적 혁신과 시장 적응력 강화
- (포맷의 특성) 기술적 우위(Technological superiority), 호환성(Compatibility), 보완재(Complementary goods), 유연성(Flexibility)으로 구분
 - (기술적 우위) 더 나은 성능을 발휘하게 하는 기능을 보유한 포맷은 지배력과 긍정적 관계를 보이지만, 기술적으로 가장 우수한 포맷이 반드시 지배적 포맷이 되는 것은 아님
 - (호환성) 상호 연관된 개체들이 함께 작동하도록 맞물리는 관계를 의미하며, 이전 세대 포맷의 설치 기반과 호환될수록 지배력 확보 가능성이 높아짐
 - (보완재) 특정 포맷이 다양한 보완재에 적용될수록 해당 포맷의 수요가 증가하므로, 보완재의 수와 다양성이 많을수록 포맷이 지배력을 확보할 가능성이 높음
 - (유연성) 고객 요구 변화나 새로운 기술 발전에 따라 포맷을 수정·적응시키는데 필요한 추가 비용과 시간을 의미하며, 유연성이 높을수록 제품 조정과 설치 기반 확대를 통해 지배력 강화
- (포맷 지원 전략) 가격 전략(Pricing strategy), 전유성 전략(Appropriability strategy), 진입 시기(Timing of entry), 마케팅 커뮤니케이션(Marketing communications), 희소 자원의 선점(Pre-emption of scarce assets), 유통 전략(Distribution strategy), 헌신/전념(Commitment)으로 구분
 - (가격 전략) 전략적 가격 설정을 통해 시장 점유율을 확대하고 잠재적 신규 진입자의 시장 진입을 억제함으로써 포맷의 지배력 형성에 기여함
 - (전유성 전략) 경쟁사의 모방을 방지하기 위한 모든 활동을 의미하며, 개방적인 전유성 전략을 채택할수록 포맷의 설치 기반이 확대되어 지배력을 확보할 가능성이 높아짐
 - (진입 시기) 처음 구현된 제품이 시장에 진입하는 시점을 의미하며, 조기 진입은 초기 설치 기반 확보를 통해 지배력 형성에 기여하나, 시장 정보 부족과 높은 초기 투자비용으로 장기적 포맷 지원 능력이 제한될 수 있음
 - (마케팅 커뮤니케이션) 경쟁 초기 단계에서 사전 발표(pre-announcement)나 포맷 적용 계획 공개는 고객의 기대를 형성하고 점유율을 확대에 긍정적 영향을 미침
 - (희소 자원의 선점) 기업이 핵심적인 희소 자원을 조기에 확보하여 경쟁사의 접근을 차단할 경우, 이는 경쟁 우위를 강화하고 포맷의 지배력 형성 가능성을 높임
 - (유통 전략) 기업이 자사의 유통 시스템을 강화하기 위한 전략적 접근을 의미하며, 효과적이고 광범위한 유통망 구축은 기술의 시장 수용 속도를 가속화해 지배력 형성에 긍정적
 - (헌신/전념) 불확실성이 높고 경쟁 포맷이 다수인 환경에서 여러 포맷에 분산 투자를 할 경우 시장 점유율과 포맷 지지 그룹을 약화시킬 수 있는 반면, 높은 수준의 일관된 헌신은 해당 포맷의 지배력 형성 가능성을 높임

- (기타 이해관계자) 현재 설치 기반(Current installed base), 이전 설치 기반(Previous installed base), 빅 피쉬(Big fish), 규제기관(Regulator), 반독점 법률(Antitrust laws), 공급자(Suppliers), 포맷 개발 과정의 효율성(Effectiveness of the format development process), 이해관계자 네트워크(Network of stakeholders)로 구분
 - (현재 설치 기반) 포맷이 구현된 기술의 실제 사용 단위 수를 의미하며, 네트워크 외부성이 존재할 경우 설치 기반은 포맷의 시장 채택에 직접적이고 긍정적인 영향을 미침
 - (이전 설치 기반) 기존 사용자들이 새로운 포맷으로 업그레이드할 가능성이 있으므로, 이전 설치 기반이 클수록 포맷이 지배력을 확보할 가능성이 높음
 - (빅 피쉬) 포맷 지지 그룹 외부에서 재정적 지원이나 구매력으로 큰 영향력을 행사하는 행위자를 의미하며, 이들의 참여와 후원은 포맷의 지배력 형성에 긍정적 영향을 미침
 - (규제기관) 특정 포맷의 사용을 법적으로 지정하거나 강제하는 경우, 포맷 지배력 형성 과정에 직접적인 긍정적 영향을 미칠 수 있음
 - (반독점법) 반독점법을 통해 특정 포맷이 시장 독점을 지속하지 못하도록 제한하는 경우, 해당 포맷의 지배력 형성에 부정적 영향을 미침
 - (공급자) 포맷이 적용된 제품이나 서비스를 생산하는 기업을 의미하며, 포맷 지지 그룹이 다수의 공급업체를 포맷 네트워크에 참여시킬수록 포맷의 지배력 확보 가능성이 높아짐
 - (포맷 개발 과정의 효율성) 포맷 개발 과정의 결정 구조, 기간, 품질 등에서 효율성이 높을수록 포맷이 지배력을 확보할 가능성이 증가함
 - (이해관계자 네트워크) 포맷이 적용될 수 있는 각 제품 시장의 주요 이해관계자가 폭넓게 참여한 네트워크를 보유할수록 해당 포맷이 지배력을 형성할 가능성이 높음
- (시장 특성) 편승 효과(Bandwagon effect), 네트워크 외부성(Network externalities), 경쟁 포맷의 수(Number of options available), 시장 불확실성(Uncertainty in the market), 변화 속도(Rate of change), 전환비용(Switching costs)으로 구분
 - (편승 효과) 일부 사용자가 특정 문제의 해결책으로 특정 포맷을 채택하면, 다른 사용자들도 동일한 선택을 하는 경향을 말하며, 이는 단일 포맷의 지배력 확보 가능성을 높임
 - (네트워크 외부성) 특정 제품의 사용자 수가 증가할수록 개별 사용자의 효용이 증가하는 현상을 의미하며, 네트워크 외부성이 강할수록 포맷 지배력 형성에 긍정적
 - (경쟁 포맷의 수) 경쟁하는 포맷의 수는 각 포맷의 잠재적 시장점유율에 중요한 영향을 미치며, 경쟁 포맷이 많을수록 개별 포맷이 지배적 위치를 확보할 가능성은 낮아짐
 - (시장의 불확실성) 시장이 지나치게 불확실한 경우, 기업과 고객이 포맷 선택을 회피하거나 의사결정을 미루는 경향을 보이므로 단일 포맷의 지배력 형성 가능성이 낮아짐
 - (변화 속도) 산업 내 기술 및 시장의 변화 속도를 의미하며, 변화 속도가 빠를수록 포맷의 세대 교체 주기가 짧아져 지배적 포맷이 등장하기 어려워짐
 - (전환 비용) 한 포맷에서 다른 경쟁 포맷으로 이동할 때 필요한 경제적·시간적·인지적 비용을 의미하며, 전환비용이 높을수록 지배적 디자인 형성에 부정적 영향을 미침

3 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 결정요인

- 지배적 디자인 관련 선행연구에서 제시한 ICT 및 일반적 기술 경쟁 분야의 요인을 기반으로 양자 컴퓨팅 분야의 맥락(context)에 맞게 재정의
 - Suarez(2004)는 ICT 분야의 기술 경쟁에 초점을 맞춘 반면, van de Kaa et al.(2011)은 다양한 분야의 기술 경쟁에 적용 가능한 보다 일반화된 결정요인 체계를 제시
 - 보다 세분화된 요인을 제공하는 van de Kaa et al.(2011)의 결과를 기본 프레임으로 하고, Suarez(2004)의 ICT 분야 결정요인을 매핑하여 15개 요인을 도출
 - ※ 환경적 요인인 시장 특성(Market characteristics) 그룹은 초기 개발 단계의 양자 컴퓨팅 분야에서 큐비트 구현 방식 간 차별성을 설명하는데 기여하는 정도가 제한적이라고 판단하여 분석 대상에서 제외
 - 양자 분야의 주요 보고서* 등을 검토하여 상기에서 도출된 15개의 결정요인을 양자 컴퓨팅 분야에 적합하도록 조정 및 구체화
 - * 기술 및 시장 전문 조사기관(McKinsey & Company, IDC, IDTechEx, MIT 등)이나 유럽 양자 산업 컨소시엄(European Quantum Industry Consortium)에서 발간한 보고서 등

그림 II-3 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 결정요인 구성



주: van de Kaa et al.(2011)의 결정요인 중 파란색 배경으로 표시한 요인을 본 연구의 결정요인으로 선택

- 양자 컴퓨팅 분야의 지배적 디자인 결정요인은 기술 특성, 기업 특성, 기업 전략 및 이해관계자 등 네 가지 그룹으로 구분
 - 기술 특성은 주로 큐비트 구현 방식의 기술적 우위와 구현 가능성을 반영하고, 기업 특성 및 기업 전략은 기업이 보유한 자원·역량과 이를 바탕으로 기술을 지원하는 전략적 행동을, 이해관계자는 고객·정부·공급업체 등과 같이 외부 이해관계자와의 관계를 반영

표 II-2 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 결정요인 설명

그룹	요인	설명
기술 특성	기술적 우위	특정 방식이 제공하는 기술적 성능의 우월성 (예, 2 Qubit-gate fidelity, Qubit 수, Coherence time 등)
	호환성	특정 방식이 기존 컴퓨팅 및 클라우드 인프라와 연계·활용이 용이한 정도
	소·부장 준비도	안정적 동작에 필요한 소재, 부품, 장비의 성숙도와 가용성
기업 특성	재무적 강점	기업이 보유한 재무적 자원의 규모
	브랜드 평판/신뢰도	시장과 이해관계자가 기업에 대해 가지는 긍정적 인식과 신뢰의 정도
	자원 활용·운영 우위	경쟁자 대비 자원을 효율적으로 활용하고 운영하는 능력
	지식 흡수성	기업이 양자 컴퓨팅 분야의 새로운 지식과 경험을 학습하고 흡수하는 역량
기업 전략	가격 전략	가격을 전략적으로 설정하는 전략 (예, 무료 크레딧 제공, 저가격 등)
	개방 전략	외부에서 활용할 수 있도록 기술을 개방하는 전략 (예, SDK 오픈 소스 제공 등)
	시장 진입 시점	제품을 시장에 처음 공개하거나 발표한 시점
	마케팅 전략	마케팅이나 홍보 활동을 통해 시장의 기대를 형성하는 전략 (예, 기술 개발 로드맵 발표 등)
이해관계자	실사용 기반 규모	특정 방식이 실제 시장에서 사용되는 정도
	대형 고객 확보	시장 내 막대한 영향력을 가진 외부 플레이어*의 지원이나 기술 채택 * 대기업, 글로벌 투자자 등
	정부의 지원	정부나 규제 기관의 특정 방식에 대한 정책적·재정적 지원
	공급업체와의 제휴/협력	특정 방식에 맞는 보완재·서비스 등을 제공하는 공급업체와의 협력 정도

주: 기업은 특정 방식을 지원하는 기업군을 의미함

III 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 탐색

1 결정요인의 중요도

◎ 평가 방법

- 지배적 디자인을 탐색한 기존 문헌*에서 사용하고 있는 Best-Worst Method(BWM)를 적용하여 결정요인의 중요도(가중치)를 산출하고자 전문가 설문 수행

* van de Kaa & Kamp(2021)는 고고도 풍력 시스템(Airborne Wind Energy) 분야에서, De Graaf et al.(2025)은 해양 수소 연료전지 분야에서 지배적 디자인 탐색 연구를 수행하며 결정요인의 중요도(가중치)를 산출하고자 해당 분야 전문가를 대상으로 BWM 기반 조사를 수행

- BWM*은 Rezaei(2015)가 제안한 다기준 의사결정 기법(multi-criteria decision-making method)으로, AHP 대비 기준(criteria) 간 쌍대 비교 횟수가 적고** 결과의 일관성이 높다는 장점이 있음

* 최상의 기준(Best)과 가장 덜 중요한 기준(Worst)을 의사결정자가 먼저 식별한 후 최상의 기준(Best)과 다른 기준(Others) 간, 가장 덜 중요한 기준(Worst)과 다른 기준(Others) 간 쌍대 비교를 각각 수행하여 선형계획(최소-최대)으로 가중치를 산출

** 기준 수가 n일 때, AHP의 쌍대 비교 횟수는 $n(n-1)/2$ 인 반면(Rezaei, 2015), BWM은 $(2n-3)$ 으로(Mi et al., 2019) 동일한 기준 수에서 BWM은 응답 부담과 비일관성 발생 가능성이 상대적으로 낮음

- 양자 컴퓨팅 분야 전문가를 대상으로 그룹 간, 그룹 내 결정요인 간 쌍대 비교하는 2계층 구조로 문항을 설계하여 설문 조사를 시행*

* 전문가 조사 설문지는 <부록 1>, 설문 응답자 전문가 리스트는 <부록 2> 참조

- (조사 대상) 산·학·연·관 양자 컴퓨팅 분야 전문가 19인을 대상으로 설문을 수행하였으며, R&D 분야와 시장·산업·정책 기획 분야 전문가를 포괄함으로써 응답자 패널을 균형있게 구성

※ 전문가 약 50명에게 설문 참여 의사를 문의하였으며, 그 중 19인이 응답(응답률 약 38%)

- (기간/방식) 2025년 10월 28일 ~ 11월 21일(25일) 동안, 온라인을 통해 조사 수행

표 III-1 응답자 분포

구분		응답자 수
산	양자 컴퓨터 관련 기업	3
	최종 이용자 기업	2
학	양자 컴퓨팅 관련 학과 교수	3
연	연구·개발	5
	정책·전략 기획	4
관	정책·R&D 기획	2
합계		19

- 그룹 간/그룹 내 쌍대 비교를 통해 그룹 및 요인별 국소(local) 가중치를 산출한 뒤, 이를 전체 계층 구조 차원에서 종합하여 요인별 상대적 중요도(global 가중치)를 산출

◎ 평가 결과

- 요인 중요도 평가 결과, 기술적 우위(0.362)가 가장 중요한 요인으로 나타났으며, 그 다음으로 소·부·장 준비도(0.130), 지식 흡수성(0.100) 순으로 확인
 - 그룹 수준에서는 기술 특성 그룹의 가중치가 0.544로 4개 그룹 중 가장 높게 나타난 반면, 이해관계자 그룹은 0.095로 가장 낮아 상대적 중요도가 제한적인 것으로 확인
 - ※ 전체 응답자(19인) 중 18인은 기술 특성 그룹을 최우선(Best)으로 평가했으며, 나머지 1인(양자 컴퓨터 관련 기업에 속한 산업계 전문가)은 기업 특성 그룹을 최우선으로 평가함
 - 상위 3개 요인의 전역(global) 가중치 합은 0.592로, 양자 컴퓨팅 분야의 지배적 디자인 경쟁이 다수 요인의 균형을 넘는 소수 핵심 요인에 의해 결정됨을 시사

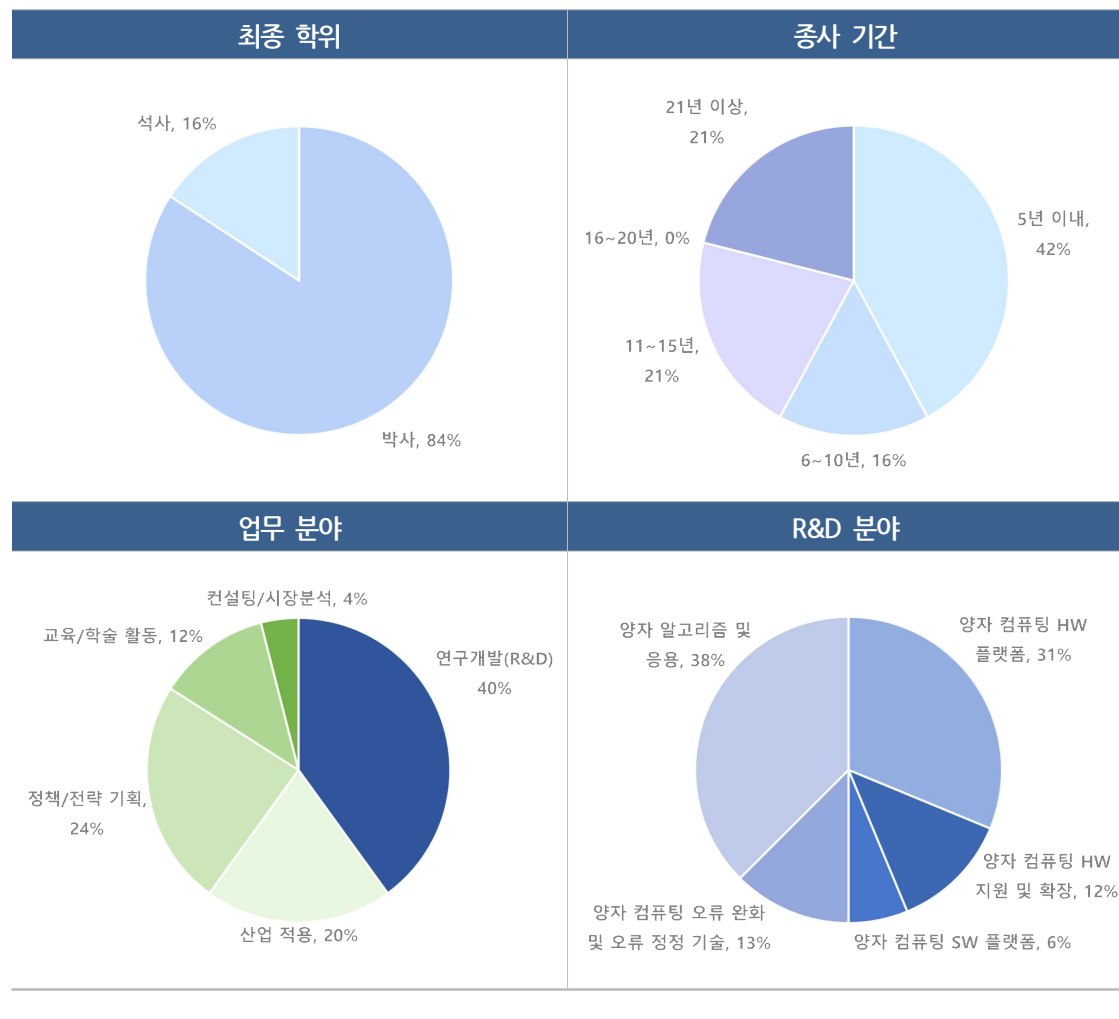
표 III-2 결정요인 가중치

그룹	요인	국소(local) 가중치	전역(global) 가중치
기술 특성 (0.544)	기술적 우위	0.666	0.362
	호환성	0.096	0.052
	소·부·장 준비도	0.238	0.130
기업 특성 (0.250)	재무적 강점	0.181	0.045
	브랜드 평판/신뢰도	0.113	0.028
	자원 활용·운영 우위	0.307	0.077
	지식 흡수성	0.399	0.100
기업 전략 (0.111)	가격 전략	0.242	0.027
	개방 전략	0.430	0.048
	시장 진입 시점	0.164	0.018
	마케팅 전략	0.164	0.018
이해관계자 (0.095)	실사용 기반 규모	0.300	0.028
	대형 고객 확보	0.273	0.026
	정부의 지원	0.279	0.026
	공급업체와의 제휴/협력	0.148	0.014

주: 일관성(Consistency) 기준을 충족한 응답만을 가중치 산정에 반영함, 볼드체는 전역 가중치 값이 0.1 이상임을 의미

[참고] 설문 응답자 특성

- (응답수/소속기관) 총 19개 응답이며, 연구기관(47%)>기업(26%)>대학(15%) 등 순으로 분포
- (최종 학위) 응답자의 대부분이 박사 학위(16명, 84.2%)이며, 석사 학위는 3명(15.8%)에 불과
- (종사 기간) '5년 이내'가 8명(42.1%)으로 가장 많고, 다음으로 '11~15년'과 '21년 이상'이 4명(21%)으로 같으며, '6~10년'은 3명(16%)으로 나타남, 종사 기간 평균은 11.6년*
 - * 양자 분야 종사 기간 평균 산출 시에는 각 구간에 대표값을 부여하여 계산(5년 이내=5년, 6~10년=10년, 11~15년=15년, 16~20년=20년, 21년 이상=21년으로 간주)
- (업무 분야) 연구개발(R&D) 분야가 10명(40%)으로 가장 많고, 정책·전략 기획 6명(24%), 산업 적용 5명(20%), 교육·학술 활동 3명(12%) 등 순으로 분포
- (R&D 분야) 연구개발 분야의 응답자는 양자 알고리즘 및 응용(6명, 38%)과 양자 컴퓨팅 HW 플랫폼(5명, 31%) 분야의 R&D 업무를 주로 수행



2 결정요인의 방식별 성과점수

- 결정요인을 대표하는 측정 지표를 구성하고, 분석 대상 기업의 펀딩, 특허 및 협력 관계 등 정량 데이터를 활용하여 각 요인의 방식별 성과점수(performance score)*를 산출

* 각 결정요인에 대해 특정 구현 방식 간 상대적 우위/열위를 정량화한 값

- 양자 컴퓨팅 분야 전문가가 모든 큐비트 구현 방식의 기술·시장·산업 특성을 일괄적으로 검토하는 정성적 평가는 한계가 있다고 판단하여, 데이터 기반 분석을 통해 성과점수를 정량화함
- ※ 타 기술 분야의 지배적 디자인 탐색 연구 문헌(van de Kaa & Kamp, 2021; De Graaf et al., 2025)에서는 전문가 대상 설문을 통해 각 대안 기술에 대한 결정요인의 성과점수를 측정
- 모든 지표는 값이 클수록 지배적 디자인 형성 가능성이 높아지도록 설정하여(양의 관계), 결과 해석의 일관성 확보

표 III-3 결정요인별 측정 지표

그룹	요인	측정 지표
기술 특성	기술적 우위	방식별 최고 성능 QPU의 물리 큐비트 수(Qubit counts), 2-큐비트 게이트 충실도(2-Qubit gate fidelity), 코히어런스 시간(Coherence time), 게이트 속도(gate speed)를 방식 간 상대 순위로 점수화한 뒤 합산
	호환성	방식별 접근 가능한 클라우드의 접근성 지수 (접근 가능한 클라우드 수 × 클라우드 유형별 영향력 지수)
	소부장 준비도	양자 분야 주요 보고서 내 소재·부품·장비 관련 문장을 추출한 후 강점·약점·기회·위험으로 라벨링하고, 항목별 언급 빈도에 점수 부여 후 합산
기업 특성	재무적 강점	IPO/대기업 수(log), 그 외 비상장 기업(스타트업 등)이 받은 누적 펀딩 금액의 평균(log) 합산
	브랜드 평판/신뢰도	양자 분야 주요 보고서에서 기업이 언급된 출처 수를 집계한 뒤, 방식별 기업당 평균 언급 출처 수
	자원 활용·운영 우위	QPU 계층 내 수평 협력 네트워크에서의 연결 중심성
	지식 흡수성	양자 컴퓨팅 관련 특허 기준, 방식별 특허 수 상위 3개 기업의 특허당 비자기전방 인용(non-self backward citation) 평균
기업 전략	가격 전략	QPU 서비스를 무료 크레딧으로 제공하는 기업 비중
	개방 전략	오픈소스 SDK를 제공하는 기업 비중
	시장 진입 시점	방식별 최초 QPU 공개·발표한 연도와 2025년과의 차이 (2025-최초공개연도)
	마케팅 전략	기술 개발 로드맵 공개·발표한 기업 비중
이해관계자	실사용 기반 규모	QPU 기업이 최종이용자와 맺고 있는 협력 링크 수
	대형 고객 확보	대기업 및 기업형 벤처캐피탈(CVC)이 투자한 총 투자금액
	정부의 지원	방식별로 정부 차원의 재정 지원이 확인된 국가 수
	공급업체와의 제휴/협력	QPU 계층-타 계층 간 수직 협력 네트워크에서의 연결 중심성

가. 기술 특성

○ 기술적 우위

- (측정 방법) 각 큐비트 구현 방식에서 공개된 최고 성능 QPU의 대표 벤치마크를 수집한 뒤, 방식 간 상대 순위로 점수화하여 측정
 - 물리 큐비트 수(Qubit counts)*, 2-큐비트 게이트 충실도(2-Qubit gate fidelity), 코히어런스 시간(Coherence time), 게이트 속도(gate speed) 등의 벤치마크를 분석에 활용
 - * 논리 큐비트(logic qubit)와 신뢰 가능한 회로 깊이/규모가 양자 컴퓨팅의 실질적 유용성을 더 잘 반영하나 (MIT, 2025.5) 관련 데이터가 제한적이므로 본 연구는 물리 큐비트 수를 사용
 - 초전도는 IBM의 Condor, 이온트랩은 Quantinuum의 H2, 중성원자는 Pasqal의 Orion Gamma, 광자는 Xanadu의 Borealis, 실리콘은 Equal1의 unityQ을 기준으로 측정*
 - * MIT(2025.5)를 참고하여 방식별 최고 성능 QPU(상용화 또는 프로토타입으로 공개)를 기준으로 비교 하였으며, 해당 QPU의 벤치마크가 미공개인 경우 동일 방식의 유사한 QPU 공개 수치로 대체함
 - 서로 다른 단위·스케일의 벤치마크를 통합하기 위해 방식 간 순위를 산정해 점수화*한 뒤 합산하였으며, 이는 절대 격차의 크기보다 상대적 서열 구조를 파악하기 위함
 - * 1위 5점, 2위 4점, 3위 3점, 4위 2점, 5위 1점을 부여

표 III-4 벤치마크 설명

구분	설명
물리 큐비트 수	- QPU를 구성하는 큐비트 수
2 큐비트 게이트 충실도	- 실제 2 큐비트 양자 게이트 연산이 정확히 수행된 비율 - 보통 (1 - error_rate)로 표현
코히어런스 시간	- 큐비트가 양자 상태의 특성을 유지하는 시간
게이트 속도	- 큐비트 게이트 연산을 수행하는 데 걸리는 시간

출처: MIT(2025.5), IDTechEx(2024.4)를 바탕으로 저자 작성

- (방식별 비교) 초전도(16점)가 가장 높은 기술적 우위를 보였고, 그 다음으로 중성 원자(14점), 이온트랩(12점), 광자(11점), 실리콘(7점) 순으로 평가됨
 - * 광자는 코히어런스 시간을 타 방식과 동일 기준으로 직접 비교하기 어려워 기본 분석에서는 3순위로 가정하였으나, 2·3·4순위 가정에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, 상위 구도(초전도 > 중성원자)는 유지되었고 광자와 이온트랩의 상대적 순위만 변동하는 것으로 확인됨
 - 특정 방식이 모든 벤치마크에서 일관되게 우위에 있는 것은 아니며, 구현 방식별로 벤치마크 지표에 따라 서로 다른 기술적 강·약점을 보임

표 III-5 방식별 기술적 우위 비교

구분	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
물리 큐비트 수	1,121	56	1,000	216 *	65
2-큐비트 게이트 충실도	99.70%	99.91%	99.48%	99.60%	98.40%
코히어런스 시간(μ s)	198	1,000,000	40,000,000	N/A **	0.15
단일 큐비트 게이트 속도(μ s)	0.02	100	4	36	0.084
기술적 우위 점수	16	12	14	11	7

* 동시 사용가능한 광자 수를 의미

** 다른 방식과 직접 비교가 어려워, 민감도 분석을 수행

출처: MIT(2025.5), The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6), Live Science Plus(2025.1)를 바탕으로 저자 작성

◎ 호환성

- (측정 방법) 큐비트 구현 방식별로 접근 가능한 클라우드 플랫폼 개수에 클라우드 플랫폼 유형별 시장 영향력을 가중하여 측정
 - QPU 기업은 자체 클라우드나 전용 플랫폼을 통해 양자 컴퓨팅 서비스(as a Service)를 제공함으로써 사용자가 자사 QPU에 접근·활용할 수 있도록 함(McKinsey & Company, 2024.4)
 - ※ 양자 컴퓨팅 시장은 구축 방식에 따라 온프레미스(On-Premise)와 클라우드로 구분할 수 있으며, 2024년 기준 시장 규모는 온프레미스 8,685억원, 클라우드 8조 470억원으로 클라우드 방식이 약 10배 정도 큰 규모를 가짐(과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼, 2025.1)
 - 기존 클라우드 컴퓨팅에서 영향력이 큰 플랫폼을 통한 서비스 제공이 확산에 유리하다는 점을 반영하여, 클라우드 플랫폼 유형별 영향력 지수*를 아래 표와 같이 설정하여 적용
 - * 클라우드 유형별 글로벌 커버리지, 시장점유율, 복수 기업 및 여러 방식의 QPU 지원 여부를 종합 고려해 지배력 형성에 미치는 상대적 영향력을 반영

표 III-6 클라우드 플랫폼 유형별 영향력

구분	설명	영향력 지수
글로벌 퍼블릭 클라우드 플랫폼	글로벌 단위 퍼블릭 클라우드 시장에서 높은 영향력을 보유하고, 다수의 QPU 방식을 지원	2.0
지역 기반 클라우드 플랫폼	지역 기반으로 제공되어 글로벌 영향력은 제한적이거나, 다수의 QPU 방식을 지원	1.5
단일 벤더 전용 클라우드 플랫폼	자사 QPU 전용 클라우드 서비스만 제공	1.0

- (방식별 비교) 초전도는 가장 많은 클라우드 채널을 통해 서비스되고 있어 호환성이 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 이온트랩, 중성원자, 광자, 실리콘 순으로 확인됨
 - (초전도) 글로벌 퍼블릭 클라우드와 다수의 자사 QPU 중심 플랫폼을 통해 폭넓게 서비스가 제공되고 있어 개발자 및 이용자가 비교적 용이하게 접근·활용 가능
 - (이온트랩·중성원자) 두 방식 모두 글로벌 퍼블릭, 지역 기반 및 자사 전용 등 모든 유형의 클라우드 플랫폼에서 서비스되는 것으로 확인되나, 초전도에 비해 자사 전용 채널이 부족
 - (광자) 지역 기반 및 자사 전용 클라우드 플랫폼 중심으로 서비스가 제공되어 글로벌 퍼블릭 클라우드 채널을 확보한 타 방식 대비 연결된 클라우드 채널이 제한적
 - (실리콘) 자사 QPU 전용 클라우드 플랫폼에서만 서비스되며 채널 수도 적어 기존 컴퓨팅·클라우드 인프라와의 연계·활용 측면에서 상대적으로 제약이 큰 것으로 평가

표 III-7 방식별 호환성 비교

구분	클라우드 플랫폼 유형			호환성 점수
	글로벌 퍼블릭	지역 기반	자사 전용	
초전도	Amazon Web Service (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud		Alibaba Quantum Lab, ScQ.Cloud, QuantumCTek, Fixstars, D-Wave Systems, Fujitsu, IBM, Intel, Origin Quantum, Oxford Quantum Circuits, Quantum Circuits, Quantum Inspire, QC Ware, Rigetti Computing, SpinQ	21.0
이온트랩	Amazon Web Service (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud	T-Systems International	Alpine Quantum Technologies, QC Ware, IonQ Quantum Cloud, Oxford Ionics, Quantinuum	12.5
중성원자	Amazon Web Service (AWS), Microsoft Azure	OVHcloud	PASQAL, QuEra Computing	7.5
광자		OVHcloud	Bose Quantum Technology, QuantumCTek, Quandela, QuiX Quantum, Xanadu Cloud	6.5
실리콘			Intel, Origin Quantum	2.0

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6)의 데이터를 활용하여 저자 작성

○ 소부장 준비도

- (측정 방법) 양자 분야 주요 보고서* 내 소재·부품·장비 관련 문장을 추출한 뒤, 각 문장을 강점(Strength), 약점(Weakness), 기회(Opportunity), 위협(Threat)으로 라벨링하고 라벨별 언급 빈도에 점수**를 부여해 합산

* IDTechEx(2024.4), 과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼(2025.1) 및 IQM Quantum Computers & Omdia(2025.5) 등

** 강점(Strength)·기회(Opportunity)는 +1점, 약점(Weakness)·위협(Threat)는 -1점을 부여

- (방식별 비교) 이온트랩과 실리콘이 0점으로 나타났으며, 초전도(-2), 광자(-2), 중성원자(-3) 순으로 확인
 - (이온트랩·실리콘) 강점·기회와 약점·위협이 균형을 이루어, 중립적 수준(0점)의 소·부·장 준비도를 보임
 - (초전도·광자·중성원자) 약점·위협에 해당하는 언급이 강점·기회보다 더 많아, 지배력 형성 과정에서 소·부·장 준비도가 잠재적 병목으로 작용할 가능성이 있는 것으로 평가

표 III-8 방식별 소·부·장 준비도 비교

구분	설명	소·부·장 준비도 점수
초전도	S 기존 마이크로 패브리케이션으로 제조 가능(실리콘 팹 활용)	-2
	W <ul style="list-style-type: none"> - 극저온(mK) 냉각 필요 - 냉각 시스템을 위한 대규모 공간 필요 - 인프라(냉각·초기화·측정) 전력 소모 큼 	
이온트랩	S 극저온 냉각 불필요 → 냉각 인프라 불요	0
	O 헬륨(극저온) 불필요 → 온 프레미스 적용에 유리	
	W 제어·측정용 전자 장비 소형화·통합 어려움	
중성원자	T 고성능 레이저 등 광학 장비 발전에 의존	-3
	S 극저온 냉매 불필요	
	O 헬륨 불필요	
	W <ul style="list-style-type: none"> - 레이저·광학 스택 고도화 필요 - 측정/검출 어려움 - 3차원 원자 제어 어려움 - 광학 분해 한계 	
광자	T 고성능 광학 장비 개발에 의존적	-2
	S <ul style="list-style-type: none"> - 상온에서 안정적으로 냉각 불필요 - 실리콘 포토닉스 레버리지 - 광섬유 네트워크와 통합 가능 	
	O 기존 고속 통신 네트워크 통합 용이	
	W <ul style="list-style-type: none"> - 극저온 포토디텍터 필요 - 측정·제어 전자장비 확장성 요구 - 칩 소재, 아키텍처에 따른 광 손실 문제 존재 	
실리콘	T <ul style="list-style-type: none"> - 측정 스키의 초전도 의존 가능성 - 상대적으로 덜 하지만 냉각 요구 - 반도체 소재에 의존적으로 공급난에 취약 	0
	S <ul style="list-style-type: none"> - 기존 실리콘 반도체 미세공정으로 제조 가능 - CMOS로 초고속 측정/제어 통합 가능 	
	O <ul style="list-style-type: none"> - 기존 반도체 공정 활용하여 타 방식 추월 가능 - 측정/제어 전자공학은 타 하드웨어에도 활용 가능 	
	W <ul style="list-style-type: none"> - 저온(약 0.5~4K) 냉각 필요 - 복잡한 읽기 체인 	
	T <ul style="list-style-type: none"> - 냉각 인프라 장비 - 반도체 공급망 불안 및 부품 부족에 영향 받음 	

출처: IDTechEx(2024.4), 과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼(2025.1), IQM Quantum Computers & Omdia (2025.5)를 참고하여 저자 작성

나. 기업 특성

◎ 재무적 강점

- (측정 방법) 큐비트 구현 방식별 대기업 및 IPO기업 수와 비상장 기업의 평균 누적 펀딩 금액(USD)을 로그 변환 후 합산하여 측정
 - 대기업 및 IPO 기업*은 양자 컴퓨팅 사업 관련 구체적인 비용·매출 정보를 직접 확보하기 어려우나, 이들은 필요시 추가 자본 접근성이 높다는 점을 고려하여 해당 기업의 수(log화)**로 측정
 - * Google, IBM, Intel, Fujitsu 등과 같이 하부 조직에서 양자 컴퓨터 관련 사업을 수행하는 대기업과 최신 투자 유형이 IPO 또는 Post-IPO Equity인 기업
 - ** $\log(1+(\text{대기업 수} + \text{IPO기업 수}))$ 로 계산
 - 비상장 기업*의 재무적 자원은 누적 투자금이 확인되는 기업을 대상으로 누적 펀딩 금액의 평균*(log화)으로 측정
 - * 대기업 및 IPO 기업에 해당하지 않으며 누적 투자금(USD)이 존재하는 기업
- (방식별 비교) 초전도가 가장 높은 재무적 강점을 보였으며, 그 다음으로 광자, 이온트랩, 실리콘, 중성원자 순으로 나타남
 - (초전도) 대기업 및 IPO 기업의 참여 폭이 가장 넓고 비상장 기업 투자도 다수 기업에 분산되어, 대기업·상장사의 내부 자원과 외부 자본이 동시에 뒷받침하는 구조를 가짐
 - (광자·이온트랩) 소수의 IPO 기업과 핵심 비상장 기업에 자본이 상대적으로 집중되는 경향을 보이며, 특히 광자는 비상장 기업의 누적 펀딩 총액이 가장 큼
 - (실리콘) 복수의 대기업이 참여하고 있음에도 비상장 기업의 누적 펀딩 규모(총액·평균)가 상대적으로 크지 않아 대기업 자원 의존도가 높은 구조
 - (중성원자) IPO/대기업 참여 없이 소수 비상장 기업에 자본이 집중된 구조로, 개별 기업의 펀딩 규모가 크더라도 방식 전체 차원에서는 재무적 기반이 상대적으로 낮은 수준

표 III-9 방식별 대기업 및 IPO 기업 수

구분	기업명	기업 수
초전도	D-Wave, Fujitsu, Google Quantum AI lab, Hewlett Packard Enterprise, IBM, Israel Aerospace Industries, Rigetti Computing	7
이온트랩	IonQ	1
중성원자	-	0
광자	Quantum Computing	1
실리콘	Hitachi, Intel, NTT	3

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6), Crunchbase(2025.9) 데이터 활용하여 저자 작성

표 III-10 방식별 비상장 기업의 누적 펀딩 금액

구분	총액	기업 수	평균*	범위 [최소, 최대]
초전도	766,163	12	63,847	[50, 295,024]
이온트랩	880,194	6	146,699	[4,200, 748,800]
중성원자	1,033,225	5	206,645	[60,397, 485,863]
광자	2,036,210	11	185,110	[1,091, 1,282,495]
실리콘	468,645	8	58,581	[20,390, 140,000]

* 투자받은 기업의 평균 누적 펀딩 금액을 의미하며, 단위는 천달러임

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6), Crunchbase(2025.9) 데이터 활용하여 저자 작성

표 III-11 방식별 재무적 강점 비교

구분	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
재무적 강점 점수	8.708	8.467	8.315	8.568	8.370

◎ 브랜드 평판/신뢰도

- (측정 방법) 양자 분야 주요 보고서*에서 기업이 언급된 출처 수**를 집계한 뒤, 이를 큐비트 구현 방식별로 평균하여 기업당 평균 언급 출처 수로 측정
 - * MIT(2025.5), McKinsey & Company(2024.4, 2025.6), IDTechEx(2024.4), iCV TA&K(2024.2), QuiC(2024.1)를 분석에 활용하였으며, McKinsey & Company 보고서는 하나의 출처로 간주
 - ** 동일 보고서 내 동일 기업이 여러 번 언급되더라도 1회로 집계하여, 기업별 값은 0~5 범위를 가짐
- (방식별 비교) 중성원자 방식 기업군의 브랜드 평판/신뢰도 점수가 가장 높았으며, 그 다음으로 초전도, 이온트랩·실리콘(동점), 광자 순으로 확인

표 III-12 방식별 브랜드 평판/신뢰도 비교

구분	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
브랜드 평판/신뢰도 점수	1.652	1.583	1.750	1.286	1.583

◎ 자원 활용·운영 우위

- (측정 방법) 양자 컴퓨팅 가치사슬* 중 QPU 계층 내 기업 간 수평 협력 네트워크에서 개별 기업의 연결 중심성(degree centrality)**을 산출하고 이를 방식별 중앙값***으로 측정
 - * 양자 컴퓨팅의 가치사슬은 하드웨어/부품, 양자처리장치(QPUs), 소프트웨어, 애플리케이션, 최종이용자 등 5개 계층으로 구분
 - ** 특정 노드의 연결 정도를 나타내는 지표이며, (연결 수)/(가능한 최대 연결 수)로 정규화해 0~1 범위를 가짐
 - *** 방식별 수평 협력 참여 기업 수가 제한적이고 분포가 비대칭일 수 있어 평균보다 중앙값을 사용함
- 수평 협력은 동일 가치사슬 단계에 위치한 기업들이 자원을 공유하고 공동 의사결정을 통해 비용을 절감하며 효율을 개선하는 전략으로 이해될 수 있음(Hacardiaux & Tancrez, 2022)
- (방식별 비교) 이온트랩 방식의 기업들이 자원 활용·운영 우위가 가장 높으며, 그 다음으로 중성원자, 광자, 초전도, 실리콘 순으로 나타남
 - (이온트랩·중성원자·광자) 협력 참여 기업 수는 3~4개로 적지만 연결 중심성 중앙값이 높게 나타나, 소수 기업 간 연결이 상대적으로 밀집된 수평 협력 네트워크가 형성되어 있음을 시사
 - (초전도) 수평 협력 참여 기업 수가 12개로 가장 많으나 연결 중심성 중앙값(0.214)은 상대적으로 낮아 개별 기업의 협력 연결이 넓게 분산된 구조로 해석됨
 - (실리콘) 연결 중심성 중앙값(0.143)이 가장 낮아, 수평 협력 네트워크 내 연결 정도와 운영상 연계성이 상대적으로 제한적인 것으로 평가

표 III-13 방식별 자원 활용·운영 우위 비교

구분	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
협력 참여 기업 수	12	3	4	4	4
자원 활용·운영 우위 점수	0.214	0.5	0.482	0.375	0.143

◎ 지식 흡수성

- (측정 방식) 미국특허청에 등록된 CPC* G06N 10 계열 특허를 대상으로, 방식별 특허 수 상위 3개 기업의 특허당 비자기 전방 인용(non-self backward citation) 평균으로 측정
 - * Cooperative Patent Classification; 미국 및 유럽특허청이 자체의 기존 분류시스템을 결합한 특허분류체계
 - ※ Cohen & Levinthal(1990)은 외부 지식의 가치를 인식하고 이를 동화(assimilation)·활용(exploitation)하여 상업적 성과로 연결할 수 있는 기업의 능력을 흡수 역량(absorptive capacity)으로 정의
- 자기 인용을 제외한 전방 인용 수를 포트폴리오 내 특허 수로 정규화하여 기업의 흡수 역량을 측정한 Appio et al.(2019)의 방식을 본 연구에 적용해 지식 흡수성을 측정
 - ※ 자기 인용(self-citation)은 인용 특허(citing patent)*와 피인용 특허(cited patent)의 정규화된 양수인(disambiguated assignee) 조직명이 동일한 경우로 정의하여 분석에서 제외함
 - * 인용은 출원인과 심사관 모두에 의해 이루어질 수 있으나, 본 연구는 출원인 인용(applicant citation) 특허만을 분석 대상으로 한정함

- 양자 컴퓨팅 관련 특허는 소수 선도 기업에 집중되는 경향이 있으므로, 방식별 핵심 기업의 평균값을 사용해 방식 수준의 지식 흡수성을 측정

표 III-14 양자 컴퓨팅 관련 CPC 설명

CPC	설명
G06N10/00	양자역학적 현상에 기반한 정보처리(양자 컴퓨팅) 전반
G06N10/20	양자 컴퓨팅 모델 예) 양자 회로 모델, 범용 양자컴퓨터 모델 등
G06N10/40	양자 프로세서 또는 큐비트를 조작하기 위한 구성요소의 물리적 구현 또는 아키텍처 예) 큐비트 결합 또는 큐비트 제어
G06N10/60	양자 알고리즘 예) 양자 최적화, 양자 푸리에/아다마르 변환 기반 알고리즘 등
G06N10/70	양자 오류 정정/검출/예방 예) 서피스 코드, 매직 스테이트 증류 등
G06N10/80	양자 프로그래밍; 양자 컴퓨터를 시뮬레이션하거나 접근하기 위한 플랫폼 예) 양자 컴퓨터에서 실행 가능한 프로그램을 생성하거나 다루기 위한 인터페이스, 언어 또는 소프트웨어 개발 키트(SDK); 클라우드 기반 양자 컴퓨팅

출처: USPTO 홈페이지(2025) 참고하여 저자 작성

- (방식별 비교) 중성원자 방식(94.67)의 기업이 가장 높은 지식 흡수성을 보였고, 실리콘(19.51), 초전도(10.65), 광자(7.94), 이온트랩(2.44) 순으로 나타남
 - (중성원자) 단일 기업에 기반한 결과임에도 지식 흡수성 점수가 다른 방식에 비해 압도적으로 높게 나타나 외부 지식을 적극적으로 탐색·흡수하고 있는 것으로 확인
 - (초전도) 상위 기업의 특허 수가 타 방식 대비 많음에도 불구하고 중간 수준의 지식 흡수성을 보인 것은 이미 내부에 축적된 지식 기반이 존재함을 의미

표 III-15 방식별 지식 흡수성 비교

구분	상위 3개 대표 기업	지식 흡수성 점수
초전도	IBM(546), Google Quantum AI Lab(221), D-Wave Systems(99)	10.65
이온트랩	IonQ(86), Quantinuum(35), Alpine Quantum Technologies(1)	2.44
중성원자	Atom Computing(9)	94.67
광자	PsiQuantum(43), Quantum Source(10), Xanadu(9)	7.94
실리콘	Intel(100), Equal1(32), Hitachi(9)	19.51

출처: USPTO PatentsView(2025.11) 데이터 활용하여 저자 작성, 괄호 안 숫자는 해당 기업의 등록 특허 수를 의미

다. 기업 전략

◎ 가격 전략

- (측정 방법) QPU 서비스를 상용화한 기업 중 무료 크레딧(또는 한시적 무료 이용)을 제공하는 기업의 비중을 큐비트 구현 방식별로 계산하여 측정
 - QPU 기업들은 초기 이용자가 비용 부담 없이 실험·학습할 수 있도록 일정량의 무료 크레딧이나 한시적 무료 이용 기회를 제공하고 있음*
 - * IBM, IQM(초전도), IonQ(이온트랩), Quandela(광자) 등은 무료 크레딧을 제공하며, D-wave Systems(초전도)은 수업·워크숍·해커톤 참가 학생에게 자사 QPU를 무료로 체험할 수 있는 기회 제공
- (방식별 비교) 무료 크레딧 제공 기업 비중은 초전도(0.174)가 가장 높았고, 그 다음 광자(0.143), 중성원자(0.125), 이온트랩(0.083) 순으로 나타났으며, 실리콘은 사례가 확인되지 않음
 - (초전도) 무료 크레딧 제공 기업 비중이 가장 높아, 개발자와 초기 사용자를 빠르게 확보하기 위한 침투가격 성격의 가격 전략이 상대적으로 활발한 것으로 해석됨
 - (광자·중성원자) 관련 기업 수는 제한적이나 일정 비중의 기업이 무료 크레딧을 제공하고 있어 초기 수요를 유인하기 위한 가격 전략이 병행되고 있는 것으로 보임

표 III-16 방식별 가격 전략 비교

구분	무료 크레딧 제공 기업	가격 전략 점수
초전도	D-Wave Systems, IBM, IQM, Rigetti Computing	0.174
이온트랩	IonQ	0.083
중성원자	PASQAL	0.125
광자	Quandela, Xanadu	0.143
실리콘	없음	0.000

출처: 웹 검색 및 기업 홈페이지를 참고하여 저자 작성

◎ 개방 전략

- (측정 방법) QPU 기업의 자사 QPU용 SDK(Software Development Kit) 보유 여부와 오픈 소스 공개 여부를 조사하고, 방식별로 오픈소스 SDK 제공 기업 비중으로 측정
 - QPU 기업은 자사 QPU 또는 해당 방식에서 개발자와 연구자가 손쉽게 접근·개발할 수 있도록 오픈 소스 SDK/개발툴을 제공하고 있음(iCV TA&T, 2024.2)
- (방식별 비교) 오픈소스 SDK 제공 기업 비중은 초전도(0.435)가 가장 높았고, 중성원자(0.375), 광자(0.357), 이온트랩(0.333) 순으로 나타났으며 실리콘은 해당 사례가 확인되지 않음

표 III-17 방식별 개방 전략 비교

구분	오픈소스 SDK 보유 기업 (대표 SDK)	개방 전략 점수
초전도	Alice & Bob(Felis), Anyon Systems(Snowflurry), D-wave Systems(Ocean), Fujitsu(OQTOPUS), Google Quantum AI lab(Cirq), IBM(Qiskit), IQM(IQM), Qilimanjaro(QiliSDK), Quantum Circuits(Aqumen), Qutech(Quantum Inspire), Rigetti Computing(pyQuil)	0.435
이온트랩	IonQ(Qiskit IonQ Provider), Open Quantum Design(OQD Core), Quantinuum(TKET), QUDORA Technologies(Qudora-SDK)	0.333
중성원자	Infleqtion(Oqtant API), PASQAL(Pulser), QuEra Computing(Bloqade)	0.375
광자	LightOn(LightOnML), ORCA Computing(ORCA), PsiQuantum(Bartiq), Quandela(Perceval), Quantum Computing Inc(QCI Client), QuiX Quantum(basiq), Xanadu(Strawberry Fields)	0.357
실리콘	없음	0.000

출처: 기업 홈페이지, The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6) 등을 토대로 저자 작성

◎ 시장 진입 시점

- (측정 방법) 방식별로 최초 QPU 공개·발표 연도를 기준으로 시장 진입의 빠른 정도(market entry earliness)를 [2025 - 최초 공개·발표 연도]로 측정*

* 값이 클수록 조기 진입

- 특정 방식을 채택한 모든 기업이 QPU를 공개·발표한 것은 아니므로, 각 방식에서 가장 먼저 공개·발표된 QPU의 연도를 대표값으로 활용

- (방식별 비교) 초전도(2016)가 가장 먼저 QPU를 공개·발표했으며 그 다음으로 이온트랩·광자(2020), 중성원자(2021), 실리콘(2023) 순으로 확인

- (초전도) 2016년 5월, IBM이 5큐비트 프로세서인 Yorktown을 클라우드(IBM Quantum Experience)로 일반 공개

- (이온트랩) 2020년, IonQ가 11큐비트의 Harmony를 클라우드(IonQ Quantum Cloud)로 제공

- (중성원자) 2021년 7월, Atom Computing은 스트론튬-87 원자 10 x 10 배열을 사용하여 100큐비트의 Phoenix 프로토타입을 공개(Forbes, 2023.10)

- (광자) 2020년 9월, Xanadu가 8, 12, 24큐비트 프로세서(X-8, X-12, X-24)를 클라우드 플랫폼에 출시하여 일반 공개(PR Newswire, 2020.9)

- (실리콘) 2023년 6월, Intel이 12큐비트 Tunnel Falls를 연구 커뮤니티에 공개·배포

표 III-18 방식별 시장 진입 시점 비교

구분	최초 출시 연도	기업명	QPU	시장 진입 시점 점수
초전도	2016	IBM	Yorktown	9
이온트랩	2020	Ion Q	Harmony	5
중성원자	2021	Atom Computing	Phoenix	4
광자	2020	Xanadu	X-series (X-8, X-12, X-24)	5
실리콘	2023	Intel	Tunnel Falls	2

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6) 및 웹 검색 등을 토대로 저자 작성

◎ 마케팅 전략

- (측정 방법) QPU 기업이 기술 개발 목표를 로드맵(roadmap)* 형태로 대외 공개하는지 여부를 조사하고, 구현 방식별로 로드맵을 발표한 기업의 비중으로 측정
 - * 연도, 마일스톤, 성능 목표가 명시된 공식 자료(웹페이지, 블로그, 보고서 등)으로 한정
- (방식별 비교) 이온트랩(0.417), 초전도(0.391), 중성원자(0.375), 실리콘(0.333)이 모두 0.3 이상인 반면, 광자(0.214)는 로드맵 공개 비중이 상대적으로 낮게 나타남
 - 초전도, 이온트랩, 중성원자, 실리콘 방식의 다수 기업은 로드맵을 공개하며 향후 성능 개선 및 스케일업 계획을 시장에 적극적으로 제시하는 경향을 보이는 것으로 해석

표 III-19 방식별 마케팅 전략 비교

구분	로드맵 발표 기업	마케팅 전략 점수
초전도	Alice & Bob, D-Wave Systems, Fujitsu, Google Quantum AI lab, IBM, IQM, Oxford Quantum Circuits, QpiAI, Rigetti Computing	0.391
이온트랩	eleQtron, IonQ, Oxford Ionics, Quantinuum, Quantum Art	0.417
중성원자	Inflektion, PASQAL, QuEra Computing	0.375
광자	Black Semiconductor, LightOn, Quandela	0.214
실리콘	Diraq, Equal1, Intel, Silicon Quantum Computing	0.333

출처: 기업 홈페이지, The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6) 등을 토대로 저자 작성

라. 이해관계자

◎ 실사용 기반 규모

- (측정 방법) QPU 기업이 양자 컴퓨팅 가치사슬 내 최종이용자 계층(기업, 정부, 연구기관, 대학 등)과 협력 관계를 맺은 링크 수를 방식별로 집계하여 측정
 - ※ 실제 사용량(예: 샷 수, 이용자 수)에 대한 접근 가능한 데이터가 부재하여, 최종이용자와의 공개 협력 링크 수로 실사용 기반 규모를 간접 측정함
- (방식별 비교) 실사용 기반 규모 점수는 초전도(89)가 가장 높았으며, 다음으로 이온트랩(45), 중성원자(40), 광자(29), 실리콘(8) 순으로 나타남

표 III-20 방식별 실사용 기반 규모 비교

구분	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
실사용 기반 규모 점수	89	45	40	29	8

◎ 대형 고객 확보

- (측정 방법) QPU 기업의 펀딩 데이터를 기반으로, 기업(Corporate)* 및 기업형 벤처 캐피탈(Corporate VC, CVC)**이 투자한 금액을 구현 방식별로 합산하여 측정
 - * 기업의 자체 자금으로 투자하거나 다른 회사를 인수하는 기업(예, Amazon, IBM, Lockheed Martin 등)
 - ** 자사의 벤처캐피탈 조직을 통해 투자를 수행하는 기업(예, NVentures, Samsung Ventures 등)
- (방식별 비교) 기업·CVC 누적 투자액 규모는 이온트랩(약 19.8억\$)과 광자(약 18.3억\$)가 가장 컸고, 그 뒤로 중성원자(5.8억\$), 초전도(3.8억\$), 실리콘(1.8억\$) 순으로 나타남
 - 주요 QPU 기업들은 전자·제조, 클라우드/IT 인프라, 금융, 항공우주·방산, 모빌리티, 소재, 헬스케어 등 다양한 산업의 기업 및 CVC로부터 전략적 투자를 유치
 - (이온트랩) IonQ, Quantinuum, Quantum Art, ZuriQ 등은 빅테크와 항공우주·방산, 모빌리티 관련 기업 투자자로부터 투자 유치
 - (광자) PsiQuantum, Quandela, Xanadu 등이 투자받았으며, 특히 PsiQuantum의 대규모 투자 유치*가 누적 투자액을 견인한 것으로 해석됨
 - * 2025년 9월 NVentures가 참여한 라운드를 통해 10억 달러 규모의 투자금을 유치
 - (중성원자) Infleqtion, PASQAL, QuEra Computing 등이 기업 투자자로부터 투자를 유치했으나 누적 투자액이 소수 기업에 집중되는 양상을 보임*
 - * 2025년 2월, QuEra Computing은 Google과 SoftBank, NVentures 등이 참여한 라운드를 통해 2억 3천만 달러 이상을 조달

표 III-21 **방식별 대형 고객 확보 비교**

구분	기업 및 기업형 벤처캐피탈(CVC)	대형 고객 확보 점수
초전도	Bloomberg Beta, Booz Allen Ventures, Chevron Technology Ventures, Connecticut Innovations, Glasswing Ventures, Goldman Sachs, M Ventures, NEC, CCB Private Equity Investment Management	376,656
이온트랩	Airbus Ventures, Amazon, Amgen, Hewlett Packard Pathfinder, Honeywell, Hyundai Motor Company and Kia Corporation, Lockheed Martin, Robert Bosch Venture Capital, Samsung Catalyst Fund, Samsung Ventures, NVentures, JPMorgan Chase, IBM, JSR Corporation, GTV Capital, First Momentum Ventures	1,981,200
중성원자	Eni Next, Google Quantum AI lab, NVentures, S Ventures (SentinelOne), Sumitomo Corporation	575,750
광자	Credit Mutuel, Dell Technologies, Galaxia, M12, PhotonVentures, NVentures, Porsche Ventures	1,834,100
실리콘	Airbus Ventures, CEA Investissement, Commonwealth Bank of Australia, Robert Bosch Venture Capital, Telstra	180,792

주: 기업/CVC는 The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6)의 투자자(investor) 분류 기준을 적용하여 집계하였으며, 단위는 천달러임

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6)을 토대로 저자 작성

◎ 정부의 지원

- (측정 방법) QPU 기업에 대한 펀딩/투자 자료를 바탕으로, 각 방식에서 정부 차원의 재정적 지원이 확인된 국가의 수를 집계하여 측정
 - 정부·공공 투자자*의 투자 목록에서 QPU 관련 기업만 추출하여 각 기업의 큐비트 구현 방식을 매칭한 뒤, 방식별 투자 국가 수를 집계
 - * 정부 부처, 공적 연기금·국부펀드·주 개발은행 등
 - ※ The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6)에는 한국 정부 투자 정보가 포함되어 있지 않았으나, 정부 주도로 초전도와 중성원자 방식을 지원하고 있으므로 이를 반영함
 - ※ 유럽위원회(European Commission), 유럽 우주국(ESA), 유럽 혁신 위원회(European Innovation Council) 등 유럽연합(EU) 차원의 지원은 '유럽연합(EU)'으로 별도 분리하여 집계하고, 동일 국가 내 여러 기관에서 동일 방식에 지원하더라도 국가 수는 1로 계산
- (방식별 비교) 지원 국가 수 기준으로 초전도(15개국)가 가장 많고, 중성원자(10개국), 광자(10개국), 이온트랩(6개국), 실리콘(5개국) 순으로 나타남
 - 유럽연합과 영국은 모든 방식에 재정적 지원을 하며 프랑스, 호주 및 캐나다는 이온트랩 방식을 제외한 모든 방식에, 미국은 실리콘을 제외한 모든 방식에 지원
 - 중국과 네덜란드는 초전도와 광자 방식에, 독일과 한국은 초전도와 중성원자에 재정적 지원을 하는 것으로 확인

- 스페인·핀란드·아일랜드(초전도), UAE·벨기에(이온트랩), 덴마크(중성원자)와 같이 특정 방식에 집중하는 국가가 확인됨

표 III-22 방식별 정부의 지원 비교

구분	지원 국가	정부의 지원 점수
초전도	유럽연합, 영국, 네덜란드, 스페인, 이스라엘, 아일랜드, 독일, 프랑스, 핀란드, 싱가포르, 한국, 중국, 호주, 미국, 캐나다	15
이온트랩	유럽연합, 영국, UAE, 이스라엘, 벨기에, 미국	6
중성원자	유럽연합, 영국, 독일, 프랑스, 덴마크, 싱가포르, 한국, 호주, 미국, 캐나다	10
광자	유럽연합, 영국, 네덜란드, 이스라엘, 프랑스, 싱가포르, 중국, 호주, 미국, 캐나다	10
실리콘	유럽연합, 영국, 프랑스, 호주, 캐나다	5

출처: The Quantum Insider Intelligence Platform(2025.6), Korea Europe Research Center(2025), McKinsey & Company(2024.4)를 바탕으로 저자 작성

◎ 공급업체와의 제휴/협력

- (측정 방법) 양자 컴퓨팅 가치사슬 내에서 QPU 계층 기업(중앙 노드)과 타 계층의 기업/기관(주변 노드) 간 수직 협력 네트워크에서 방식별 연결 중심성으로 측정
- (방식별 비교) 초전도(0.61) QPU 기업이 타 계층과 가장 폭넓게 연결되어 있는 것으로 나타났으며, 이온트랩(0.31), 중성원자·광자(0.25), 실리콘(0.16) 순으로 확인

표 III-23 방식별 공급업체와의 제휴/협력 비교

구분	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘
공급업체와의 제휴/협력 점수	0.61	0.31	0.25	0.25	0.16

3 종합 평가 결과

- (평가 방식) 방식별로 결정요인의 정규화된 성과점수를 전문가 설문을 통해 산출된 요인 중요도로 가중합(weighted-sum)하여 종합점수를 산출한 뒤, 방식 간 비교·평가
 - 지표 간 측정 방식, 단위 및 범위가 상이하므로 결정요인별 성과점수를 최소-최대 정규화(min-max normalization)하여 0과 1 사이의 값으로 변환한 뒤 종합 평가에 활용

- (평가 결과) 초전도 방식이 가장 유력한 지배적 디자인 후보로 나타났으며, 중성원자와 이온트랩 및 광자도 유의미한 경쟁 잠재력을 보이는 것으로 확인
 - 초전도(0.73)가 가장 높은 점수를 보였으며, 중성원자(0.61), 이온트랩(0.59)이 2위 그룹을 형성, 이어 광자(0.42), 실리콘(0.18) 순으로 나타남
 - ※ 종합점수의 범위는 [0, 1]임
 - 초전도는 기술적 우위, 호환성, 재무적 강점 등 9개(60%) 요인에서 성과점수가 1위
 - 이온트랩과 중성원자는 몇몇 요인에서 1위에 해당
 - ▶ 이온트랩 1위 요인 : 소부장 준비도, 자원 활용·운영 우위, 마케팅 전략 및 대형 고객 확보
 - ▶ 중성원자 1위 요인 : 브랜드 평판/신뢰도, 지식 흡수성

표 III-24 방식별 지배적 디자인 가능성 종합 평가

구분	중요도 (가중치)	성과점수										
		초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘						
기술 특성	기술적 우위	0.362	1	1.00	3	0.56	2	0.78	4	0.44	5	0.00
	호환성	0.052	1	1.00	2	0.55	3	0.29	4	0.24	5	0.00
	소부장 준비도	0.130	3	0.33	1	1.00	5	0.00	3	0.33	1	1.00
기업 특성	재무적 강점	0.045	1	1.00	3	0.39	5	0.00	2	0.64	4	0.14
	브랜드 평판/신뢰도	0.028	2	0.79	3	0.64	1	1.00	5	0.00	3	0.64
	자원 활용·운영 우위	0.077	4	0.20	1	1.00	2	0.95	3	0.65	5	0.00
	지식 흡수성	0.100	3	0.09	5	0.00	1	1.00	4	0.06	2	0.19
기업 전략	가격 전략	0.027	1	1.00	4	0.48	3	0.72	2	0.82	5	0.00
	개방 전략	0.048	1	1.00	4	0.77	2	0.86	3	0.82	5	0.00
	시장 진입 시점	0.018	1	1.00	2	0.43	4	0.29	2	0.43	5	0.00
	마케팅 전략	0.018	2	0.87	1	1.00	3	0.79	5	0.00	4	0.59
이해관계자	실사용 기반 규모	0.028	1	1.00	2	0.46	3	0.40	4	0.26	5	0.00
	대형 고객 확보	0.026	4	0.11	1	1.00	3	0.22	2	0.92	5	0.00
	정부의 지원	0.026	1	1.00	4	0.10	2	0.50	2	0.50	5	0.00
	공급업체와의 제휴/협력	0.014	1	1.00	2	0.33	3	0.20	3	0.20	5	0.00
종합점수		-	1	0.73	3	0.59	2	0.61	4	0.42	5	0.18

주: 성과점수는 상대적 순위도 함께 표기, 종합점수는 정규화된 성과점수(0~1)에 가중치를 적용하여 산출

IV 요약 및 시사점

1 지배적 디자인 탐색 결과 요약

- (요인 중요도) 양자 컴퓨팅 분야의 지배적 디자인 형성에는 기술적 우위, 소·부·장 준비도, 기업의 지식 흡수성이 핵심 요인으로 나타남
 - 양자 컴퓨팅의 기술 성숙도가 낮은 현 단계에서는 기술적 우위가 지배적 디자인 형성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 해석*
 - * Suarez(2004)는 기술 경쟁 과정을 Phase I~V로 구분하고, 프로토타입(prototype)이 등장하는 Phase II에서 기술적 우위가 지배력 형성에 중요한 요인으로 작용한다고 평가
- (방식별 성과점수) 초전도는 15개 결정요인 중 9개 요인에서 최고 점수를 보인 반면, 실리콘은 일부 요인을 제외하면 전반적으로 낮은 점수를 보임
 - (기술적 우위) 방식별 최고 사양 QPU를 기준으로 대표 벤치마크를 종합한 결과, 초전도 방식이 가장 높은 기술적 우위를 보이는 것으로 평가
 - (소·부·장 준비도) 양자 컴퓨팅의 안정적 동작을 위해 필요한 소재·부품·장비의 성숙도와 가용성을 분석한 결과, 이온트랩과 실리콘이 상대적으로 높은 수준으로 평가
 - (지식 흡수성) 미국특허청(USPTO) 등록 양자 컴퓨팅 관련 특허를 분석한 결과, 중성원자 방식 기업의 지식 흡수성이 가장 높게 나타남
- (종합 평가 결과) 결정요인의 중요도와 방식별 결정요인의 성과점수를 종합한 결과, 초전도 방식이 가장 유력한 지배적 디자인 후보로 평가
 - 중성원자, 이온트랩 및 광자는 초전도 다음으로 잠재력이 높은 방식으로 확인된 반면, 실리콘은 지배적 디자인 경쟁에서 상대적으로 후발 주자로 평가됨

표 IV-1 양자 컴퓨팅의 지배적 디자인 탐색 결과

핵심 요인 중요도		요인별 순위					종합점수	
		1위	2위	3위	4위	5위		
1위	기술적 우위	초전도	중성원자	이온트랩	광자	실리콘	0.73	초전도
2위	소·부·장 준비도	이온트랩·실리콘		초전도·광자		중성원자	0.61	중성원자
3위	지식 흡수성	중성원자	실리콘	초전도	광자	이온트랩	0.59	이온트랩
4위	자원 활용운영 우위	이온트랩	중성원자	광자	초전도	실리콘	0.42	광자
5위	호환성	초전도	이온트랩	중성원자	광자	실리콘	0.18	실리콘

2 정책적 시사점

□ 구현 방식 포트폴리오 전략 추진

- 초전도와 중성원자/이온트랩을 단·중기 핵심 축으로 설정하되, 광자 방식을 중장기 전략 옵션으로 포함하는 포트폴리오형 지원 전략 필요
 - 본 연구의 종합 평가에서 초전도(1위)와 중성원자(2위)가 상위권을 차지하고 있어, 두 방식을 국가 차원의 우선 지원 대상으로 설정하는 투자 방향은 타당
 - ※ 우리나라는 정부 주도로 초전도 및 중성원자 방식에 집중 투자하여 2032년까지 1,000 큐비트급 양자 컴퓨팅 HW/SW 핵심기술 및 시스템 개발을 목표(과학기술정보통신부, 2024.8)
 - 초기 개발 단계에서 특정 방식을 조기에 단일 승자로 가정하여 선택·집중하는 것은 위험할 수 있으므로 중위권으로 확인된 광자 방식을 전략적 옵션으로 유지·확장할 필요
 - 실리콘은 후발 주자로 평가되나, 반도체 공정과의 높은 호환성과 국내 역량을 고려할 때 소규모·장기 탐색형 R&D로 옵션 가치를 유지하는 접근이 적절
 - ※ IQM Quantum Computers & Omdia (2025.5)는 양자 컴퓨팅 분야 11명의 전문가 인터뷰를 통해 향후 단일 방식의 승자가 등장하기보다는 복수의 방식이 상호 보완적 관계를 유지하며 공존하는 멀티 모달 양자 컴퓨팅(multi-modal quantum computing) 환경이 형성될 가능성을 제시

□ 소·부·장 및 공급망 역량 강화

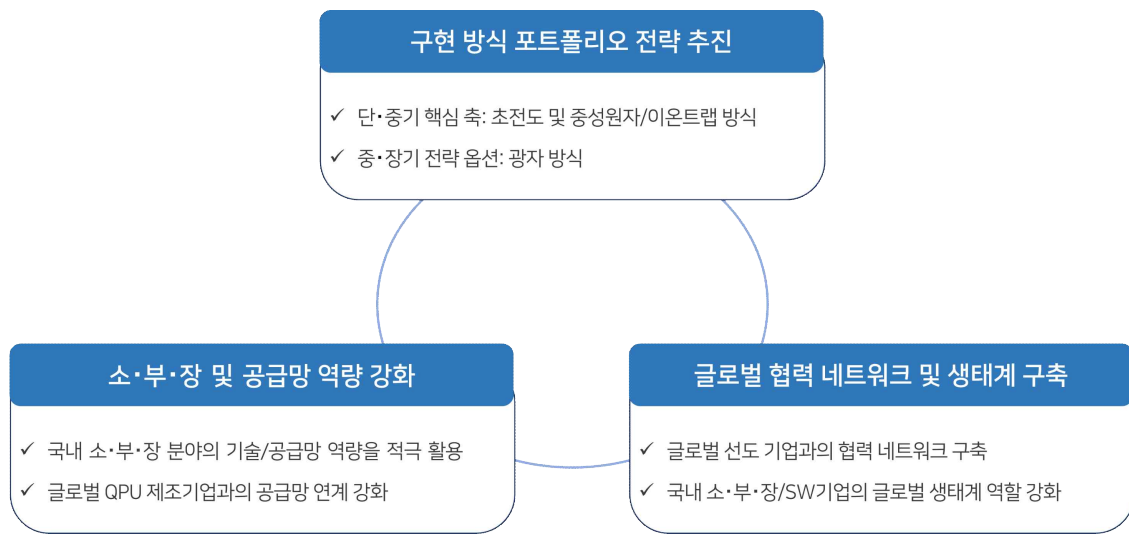
- 국내 QPU 제조기업은 부재하나 반도체·디스플레이·통신·정밀 장비 등 기존 산업에서 소·부·장 역량을 보유하고 있으므로, 관련 기술과 공급망을 레버리지로 적극 활용
 - 우리나라는 현재 양자 컴퓨팅 가치사슬 상 QPU 계층 기업이 부재하고 기술적 역량도 낮은 수준*에 머물러 있어 단기간 내 기술적 우위를 확보하는 데 한계 존재
 - * 양자 컴퓨팅 분야의 기술 수준은 미국이 100점으로 독보적 1위이며, 이어 중국 35점, 독일 28.6점, 일본 24.5점 등이며 우리나라는 2.3점에 그침(관계부처 합동, 2024.6)
 - 저온·고주파·광학·공정·제어 등 기존 소·부·장 강점을 양자 컴퓨터용 핵심 부품·장비로 전환·고도화하고, 글로벌 QPU 제조기업과의 공급망 연계를 통해 간접적으로 기술 경쟁력을 확보

□ 글로벌 협력 네트워크 및 생태계 구축

- 시장 내 경쟁력 확보를 위해 양자 컴퓨팅 분야 글로벌 선도 기업과의 협력 네트워크를 강화하여 지식·기술 축적과 생태계 확장 도모
 - 국내 연구기관·대학 및 기업과 글로벌 선도 기업 간 글로벌 공동연구·인력교류·기술협력 등을 통해 최신 지식과 기술을 신속히 흡수할 수 있는 학습 기반 마련이 필요
 - 소·부·장 및 소프트웨어 계층의 국내 기업은 글로벌 QPU 선도 기업과의 협력을 통해 공동 개발 및 공급망 제휴를 추진함으로써 생태계 연계를 강화할 필요

- 선도국과의 기술 격차를 점진적으로 완화하고 글로벌 양자 컴퓨팅 생태계에서 핵심 파트너로 자리매김할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대
 - 양자 컴퓨팅이 아직 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum)* 단계에 머물러 있고 실질적 응용에 필요한 100만 큐비트** 수준까지는 상당한 스케일링 여지가 남아 있음
 - * 완전한 양자 오류정정이 구현되지 않은 상태의 양자 컴퓨팅을 지칭(Preskill, 2018)
 - ** 현재의 암호체계를 손쉽게 해독하거나 금융 분야에서 최적화와 같은 실질적인 응용을 위해서는 약 100만 큐비트가 필요한 것으로 추정(ASPI, 2023.2)
 - 이러한 상황에서 국제 협력 과정에서의 지속적인 학습과 공동 개발은 중장기적으로 특정 세부 영역에서의 기술 추격 가능성을 모색할 수 있는 중요한 경로가 될 수 있음

그림 IV-1 국내 양자 컴퓨팅 산업 발전을 위한 정책 방향



3 한계 및 향후 과제

- 현 시점의 기술 수준, 기업 역량 및 전략, 생태계 구조를 반영한 결과이므로, 향후 기술 발전, 공급망·정책 환경 변화에 따라 방식별 우위가 달라질 수 있다는 점을 인식할 필요
- 기술 특성뿐 아니라 기업 전략·생태계·정책 요인을 포괄하는 다기준 평가 틀을 제시했다는 점에서, 향후 정기적인 데이터 업데이트와 시나리오를 반영한 추가 분석이 요구
 - 양자 컴퓨팅 구현 방식 간 지배적 디자인 경쟁 추이를 모니터링하는 기반으로 활용될 수 있을 것으로 기대

참고문헌

○ 국내자료

- 관계부처 합동 (2024.6) 글로벌 R&D 전략지도(안) - 첨단바이오, 인공지능, 양자 분야 -
과학기술정보통신부 (2024.8) 미래 첨단산업·안보의 국면전환요소(게임체인저), 「양자과학기술
대표사업(플래그십 프로젝트)」 25년부터 추진
과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼 (2025.1) 2024 양자정보기
술백서
정보통신기획평가원 (2025.2) ICT R&D 기술로드맵 2025~2030 보고서
Korea Europe Research Center(KERC) (2025), 2024 유럽 분야별 연구 및 정책 동향

○ 국외자료

- Anderson & Tushman (1990) Technological discontinuities and dominant designs: a cyclical
model of technological change. *Administrative Science Quarterly* 35 (4), 604-635.
Australian Strategic Policy Institute(ASPI) (2023.2) ASPI's Critical Technology Tracker:
The global race for future power
Appio, F. P., De Luca, L. M., Morgan, R., & Martini, A. (2019) Patent portfolio diversity
and firm profitability: A question of specialization or diversification?. *Journal of Business
Research*, 101, 255-267.
Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990) Absorptive capacity: A new perspective on learning
and innovation. *Administrative science quarterly*, 35(1), 128-152.
De Graaf, K. T., Hus, I. H. E., Van Leeuwen, H. J., & Van de Kaa, G. (2025) Towards
sustainable energy technologies in the maritime industry: The dominance battle for
hydrogen fuel cell technology *International Journal of Hydrogen Energy*, 100, 156-162.
European Quantum Industry Consortium(QuIC) (2024.1) A Portrait of the Global Patent
Landscape in Quantum Technologies
Farrell, J., & Saloner, G. (1986) Installed base and compatibility: Innovation, product
preannouncements, and predation. *The American economic review*, 940-955.

- Hacardiaux, T., & Tancrez, J. S. (2022) Assessing the benefits of horizontal cooperation for the various stages of the supply chain. *Operational Research*, 22(4), 3901–3924.
- iCV TA&K (2024.2) 2024 Global Quantum Computing Industry Development Prospect, Quantum Annual Series Report
- IDC (2024.6) Quantum Benchmarking in the Era of Quantum Utility
- IDTechEx (2024.4) Quantum Technology Market 2024–2034:Trends, Players, Forecasts
- IQM Quantum Computers & Omdia (2025.5) State of Quantum 2025
- Liang, F., Brunelli, M., & Rezaei, J. (2020). Consistency issues in the Best Worst Method: Measurements and thresholds. *Omega*, 96, 102175.
- McKinsey & Company (2024.4) Quantum Technology Monitor.
- McKinsey & Company (2025.6) Quantum Technology Monitor.
- Mi, X., Tang, M., Liao, H., Shen, W., & Lev, B. (2019) The state-of-the-art survey on integrations and applications of the best worst method in decision making: Why, what, what for and what's next?. *Omega*, 87, 205–225.
- MIT (2025.5) Quantum Index Report 2025
- Preskill, J. (2018.8) ‘Quantum Computing in the NISQ era and beyond’
- Rezaei, J. (2015) Best–worst multi–criteria decision–making method. *Omega*, 53, 49–57.
- Suarez, F. F. (2004). Battles for technological dominance: an integrative framework. *Research Policy*, 33(2), 271–286.
- USPTO PatentsView (2025. 11)
- Utterback, J., & Abernathy, W. (1975) A dynamic model of product and process innovation. *Omega* 3, 639–656.
- van de Kaa, G., van den Ende, J., De Vries, H. J., & van Heck, E. (2011) Factors for winning interface format battles: A review and synthesis of the literature. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(8), 1397–1411.
- van de Kaa, G., & Kamp, L. (2021) Exploring design dominance in early stages of the dominance process: The case of airborne wind energy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128918.

○ 웹사이트

(Crunchbase)

<https://www.crunchbase.com>

(The Quantum Insider Intelligence Platform)

thequantuminsider.com

(USPTO 홈페이지)

<https://www.uspto.gov/web/patents/classification/cpc/html/cpc-G06N.html>

○ 신문기사

Forbes(2023.10.24.) Atom Computing Announces Record-Breaking 1,225-Qubit Quantum Computer

(<https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2023/10/24/atom-computing-announces-record-breaking-1225-qubit-quantum-computer/>)

Live Science Plus(2025.1.5.) Quantum computers that are actually useful 1 step closer thanks to new silicon processor that could pack millions of qubits

(<https://www.livescience.com/technology/computing/quantum-computers-that-are-actually-useful-1-step-closer-thanks-to-new-silicon-processor-that-could-pack-millions-of-qubits>)

PR Newswire(2020.9.2.) Xanadu Releases World's First Photonic Quantum Computer in the Cloud

(https://www.prnewswire.com/news-releases/xanadu-releases-worlds-first-photonic-quantum-computer-in-the-cloud-301122427.html?utm_source=chatgpt.com)

<부록1> 전문가 조사 설문지

< 양자 컴퓨팅의 기술 경쟁 및 발전에 관한 조사 >

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 ① 관련 문항만 발췌 수록함

다음은 '양자 컴퓨팅 분야 내 경쟁'에 관련된 질문입니다.

구체적으로 여러 큐비트 구현 방식 중 어떤 방식이 지속적으로 확산되어 경쟁우위를 확보하는 **지배적 디자인***이 될 가능성이 높은지 탐색하고자 합니다. 이는 지배적 디자인 결정에 영향을 미치는 요인 구성 및 중요도 산출과 요인 평가로 이루어 집니다. 이를 통해 구현 방식별로 지배적 디자인이 될 가능성을 종합 평가합니다.

본 설문에서는 **지배적 디자인 결정요인의 중요도**를 산출하기 위해 요인 간 **상대적 중요도**를 평가합니다.

* 여러 가지 기술적 경로(technological trajectory) 중에서 사실상의 표준으로 자리잡은 것(Suarez, 2004)

중요도를 평가하기에 앞서, 다음의 지배적 디자인 결정요인 목록과 설명을 참고하시기 바랍니다. 결정요인은 총 15개이며, 이는 크게 △ 큐비트 구현 방식의 기술 특성, △ 특정 방식을 지원하는 기업 특성, △ 기업의 전략, △ 이해관계자 등 4개 그룹으로 구분됩니다.

그룹	요인	설명
기술 특성	기술적 우위	특정 방식이 제공하는 기술적 성능의 우월성(예, 2Qubit-gate fidelity, Qubit 수, Coherence time 등)
	호환성	특정 방식이 기존 컴퓨팅 및 클라우드 인프라와 연계 활용이 용이한 정도
	소·부·장 준비도	안정적 동작에 필요한 소재, 부품, 장비의 성숙도와 가용성
기업 특성	재무적 강점	기업이 보유한 재무적 자원의 규모
	브랜드의 평판/신뢰도	시장과 이해관계자가 기업에 대해 가지는 긍정적 인식과 신뢰의 정도
	자원 활용·운영 우위	경쟁자 대비 자원을 효율적으로 활용하고 운영하는 능력
	지식 흡수성	기업이 양자 컴퓨팅 분야의 새로운 지식과 경험을 학습하고 흡수하는 역량
기업 전략	가격 전략	가격을 전략적으로 설정하는 전략(예, 무료 크레딧 제공, 저가격 등)
	개방 전략	외부에서 활용할 수 있도록 기술을 개방하는 전략(예, SDK 오픈 소스 제공 등)
	시장 진입 시점	제품을 시장에 처음 공개하거나 발표한 시점
	마케팅 전략	마케팅이나 홍보 활동을 통해 시장의 기대를 형성하는 전략(예, 기술 개발 로드맵 발표 등)
이해관계자	실사용 기반 규모	특정 방식이 실제 시장에서 사용되는 정도
	대형 고객 확보	시장 내 막대한 영향력을 가진 외부 플레이어(예, 대기업, 글로벌 투자자 등)의 지원이나 기술 채택
	정부의 지원	정부나 규제기관의 특정 방식에 대한 정책적·재정적 지원
	공급업체와의 제휴/협력	특정 방식에 맞는 보완재·서비스 등을 제공하는 공급업체와의 협력 정도

주) 기업은 특정 방식을 지원하는 기업군을 의미함

설문은 '4개 그룹 간 중요도'와 '그룹 내 요인 간 중요도'를 평가하는 문항으로 구성됩니다.
아래 응답 방법과 평가 예시를 참고 바랍니다.

응답 방법

1. 주어진 요인들 중에서 가장 중요한(Best) 요인 1개, 가장 덜 중요한(Worst) 요인 1개를 선택합니다.
2. 선택한 Best 요인이 다른 각 요인보다 얼마나 더 중요한지 1~9점으로 표시합니다.
3. 다른 요인이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 1~9점으로 표시합니다.

※ 위 응답 방법은 설문지 내 그룹, 지표에 대한 문항에도 동일하게 적용됩니다.

[참고] 평가 예시

문항 1) 가장 중요한(Best) 요인을 골라 파란색 칸(■)에 적고, 선택한 Best 요인이 다른 각 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 노란색 칸(■)에 1~9점으로 적어주세요.

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

Best->Others 평가	품질	가격	안전	스타일
<p>품질</p> <p><i>(여기에 Best 요인 입력)</i></p>	<p>1</p> <p><i>(자신과의 비교이므로 1)</i></p>	6	5	9

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

문항 2) 가장 덜 중요한(Worst) 요인을 골라 주황색 셀(■)에 적고, 다른 각 요인이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸(■)에 1~9점으로 적어주세요.

※ Worst로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

※ Worst로 선택한 요인과 Best로 선택한 요인 간 중요도 점수는 상기 Best->Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	스타일
	<p><i>(여기에 Worst 요인 입력)</i></p>
<p>품질</p>	<p>9</p> <p><i>(상기 Best->Others 평가에서 이미 평가함)</i></p>
<p>가격</p>	7
<p>안전</p>	8
<p>스타일</p>	<p>1</p> <p><i>(자신과의 비교이므로 1)</i></p>

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

[그룹 간 중요도 평가]

그룹	요인
기술 특성	기술적 우위, 호환성, 소·부장 준비도
기업 특성	재무적 강점, 브랜드의 평판/신뢰도, 자원 활용·운영 우위, 지식 흡수성
기업 전략	가격 전략, 개방 전략, 시장 진입 시점, 마케팅 전략
이해관계자	실사용 기반 규모, 대형 고객 확보, 정부의 지원, 공급업체와의 제휴/협력

(문1-1) 4개 그룹 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 중요하다고 생각하는 그룹(Best)을 선택하여 파란색 칸()에 적고, 선택한 Best 그룹이 다른 각 그룹보다 얼마나 더 중요한지를 평가하여 노란색 칸()에 1~9점으로 적어주세요.

* Best로 선택한 그룹은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

Best->Others 평가	기술 특성	기업 특성	기업 전략	이해관계자
(여기에 Best 그룹 입력)				

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

(문1-2) 4개 그룹 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 덜 중요하다고 생각하는 그룹(Worst)을 골라 주황색 칸()에 적고, 다른 각 그룹이 선택한 Worst 그룹보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸()에 1~9점으로 적어주세요.

* Worst로 선택한 그룹은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

* Worst로 선택한 그룹과 Best로 선택한 그룹 간 중요도 점수는 Best->Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	(여기에 Worst 그룹 입력)
기술 특성	
기업 특성	
기업 전략	
이해관계자	

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

(문1-3) 위 문항에서 선택하신 Best 그룹과 Worst 그룹을 그렇게 판단하신 이유를 간단히 작성해 주십시오.

Best 그룹을 선택한 이유: _____

Worst 그룹을 선택한 이유: _____

[기술 특성 그룹 내 요인 중요도 평가]

그룹	요인	설명
기술 특성	기술적 우위	특정 기술 방식이 제공하는 기술적 성능의 우월성(예, 2Qubit-gate fidelity, Qubit 수, Coherence time 등)
	호환성	특정 방식이 기존 컴퓨팅 및 클라우드 인프라와 연계 활용이 용이한 정도
	소·부·장 준비도	안정적 동작에 필요한 소재, 부품, 장비의 성숙도와 가용성

(문2-1) 기술 특성 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 중요하다고 생각하는 요인(Best)을 골라 파란색 칸(□)에 적고, 선택한 Best 요인이 다른 각 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 노란색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

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

Best->Others 평가	기술적 우위	호환성	소·부·장 준비도
(여기에 Best 요인 입력)			

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

(문2-2) 기술 특성 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 덜 중요하다고 생각하는 요인(Worst)을 골라 주황색 칸(□)에 적고, 다른 각 요인이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

※ Worst로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

※ Worst로 선택한 요인과 Best로 선택한 요인 간 중요도 점수는 Best->Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	(여기에 Worst 요인 입력)
기술적 우위	
호환성	
소·부·장 준비도	

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

(문2-3) 위 문항에서 선택하신 Best 요인과 Worst 요인을 그렇게 판단하신 이유를 간단히 작성해 주십시오.

Best 요인을 선택한 이유: _____

Worst 요인을 선택한 이유: _____

[기업 특성 그룹 내 요인 중요도 평가]

그룹	요인	설명
기업 특성	재무적 강점	기업이 보유한 재무적 자원의 규모
	브랜드의 평판/신뢰도	시장과 이해관계자가 기업에 대해 가지는 긍정적 인식과 신뢰의 정도
	자원 활용·운영 우위	경쟁자 대비 자원을 효율적으로 활용하고 운영하는 능력
	지식 흡수성	기업이 양자 컴퓨팅 분야의 새로운 지식과 경험을 학습하고 흡수하는 역량

(문3-1) 기업 특성 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 중요하다고 생각하는 요인(Best)을 골라 파란색 칸(□)에 적고, 선택한 Best 요인이 다른 각 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 노란색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

* Best로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

Best->Others 평가	재무적 강점	브랜드 평판/신뢰도	자원 활용·운영 우위	지식 흡수성
(여기에 Best 요인 입력)				

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

(문3-2) 기업 특성 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 덜 중요하다고 생각하는 요인(Worst)을 골라 주황색 칸(□)에 적고, 다른 각 요인이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

* Worst로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

* Worst로 선택한 요인과 Best로 선택한 요인 간 중요도 점수는 Best->Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	(여기에 Worst 요인 입력)
재무적 강점	
브랜드 평판/신뢰도	
자원 활용·운영 우위	
지식 흡수성	

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

(문3-3) 위 문항에서 선택하신 Best 요인과 Worst 요인을 그렇게 판단하신 이유를 간단히 작성해 주십시오.

Best 요인을 선택한 이유: _____

Worst 요인을 선택한 이유: _____

[기업 전략 그룹 내 요인 중요도 평가]

그룹	요인	설명
기업 전략	가격 전략	가격을 전략적으로 설정하는 전략(예, 무료 크레딧 제공, 저가격 등)
	개방 전략	외부에서 활용할 수 있도록 기술을 개방하는 전략(예, SDK 오픈 소스 제공 등)
	시장 진입 시점	제품을 시장에 처음 공개하거나 발표한 시점
	마케팅 전략	마케팅이나 홍보 활동을 통해 시장의 기대를 형성하는 전략(예, 기술 개발 로드맵 발표 등)

(문4-1) 기업 전략 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 중요하다고 생각하는 요인(Best)을 골라 파란색 칸(□)에 적고, 선택한 Best 요인이 다른 각 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 노란색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

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

Best->Others 평가	가격 전략	개방 전략	시장 진입 시점	마케팅 전략
(여기에 Best 요인 입력)				

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

(문4-2) 기업 전략 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 덜 중요하다고 생각하는 요인(Worst)을 골라 주황색 칸(□)에 적고, 다른 각 요인이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

※ Worst로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

※ Worst로 선택한 요인과 Best로 선택한 요인 간 중요도 점수는 Best->Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	(여기에 Worst 요인 입력)
가격 전략	
개방 전략	
시장 진입 시점	
마케팅 전략	

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

(문4-3) 위 문항에서 선택하신 Best 요인과 Worst 요인을 그렇게 판단하신 이유를 간단히 작성해 주십시오.

Best 요인을 선택한 이유: _____

Worst 요인을 선택한 이유: _____

[이해관계자 그룹 내 요인 중요도 평가]

그룹	요인	설명
이해관계자	실사용 기반 규모	특정 방식이 실제 시장에서 사용되는 정도
	대형 고객 확보	시장 내 막대한 영향력을 가진 외부 플레이어(예, 대기업, 글로벌 투자자 등)의 지원이나 기술 채택
	정부의 지원	정부나 규제기관의 특정 방식에 대한 정책적·재정적 지원
	공급업체와의 제휴/협력	특정 방식에 맞는 보완재·서비스 등을 제공하는 공급업체와의 협력 정도

(문5-1) 이해관계자 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 중요하다고 생각하는 요인(Best)을 골라 파란색 칸(□)에 적고, 선택한 Best 요인이 다른 각 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 노란색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

* Best로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

Best->Others 평가	실사용 기반 규모	대형 고객 확보	정부의 지원	공급업체와의 제휴/협력
(여기에 Best 요인 입력)				

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

(문5-2) 이해관계자 그룹 내 요인 중 양자 컴퓨팅의 특정 큐비트 구현 방식이 지배력을 가지는데 가장 덜 중요하다고 생각하는 요인(Worst)을 골라 주황색 칸(□)에 적고, 다른 각 요인이 선택한 Worst 요인보다 얼마나 더 중요한지 평가하여 녹색 칸(□)에 1~9점으로 적어주세요.

* Worst로 선택한 요인은 자기 자신과 비교 시, 1을 입력해주세요.

* Worst로 선택한 요인과 Best로 선택한 요인 간 중요도 점수는 Best->Others 평가표와 동일하게 입력해주세요.

Others->Worst 평가	(여기에 Worst 요인 입력)
실사용 기반 규모	
대형 고객 확보	
정부의 지원	
공급업체와의 제휴/협력	

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

(문5-3) 위 문항에서 선택하신 Best 요인과 Worst 요인을 그렇게 판단하신 이유를 간단히 작성해 주십시오.

Best 요인을 선택한 이유: _____

Worst 요인을 선택한 이유: _____

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 인공지능, 양자 최적화 알고리즘, 양자 컴퓨터 기반 디지털트윈, 메타버스, IT 가상화 기술
- ⑥ 기타 (직접 기재:)

설문에 응답해 주셔서 감사합니다.

〈부록2〉 설문 응답 전문가 리스트

구분	성명	소속 기관	소속 부서	직책/직위	
산	양자 컴퓨터 관련 기업	이xx	KB금융그룹	정보보호본부	상무
		김xx	퀀텀 인텔리전스	기업부설연구소	수석연구원
	최종 이용자 기업	김xx	메가존클라우드		Chief Quantum Officer
		김xx	관델라		대표이사
		엄xx	ID Quantique Korea		대표이사
학	안xx	KAIST	물리학과	교수	
	안xx	서울시립대	전자전기컴퓨터공학부	교수	
	박xx	연세대	첨단융합공학부	교수	
연	연구·개발	김xx	한국과학기술연구원	양자기술연구단	책임연구원(단장)
		류xx	한국과학기술정보연구원	양자정보응용연구센터	센터장
		문xx	한국표준과학연구원	양자기술연구소	팀장
		배xx	한국전자통신연구원	양자컴퓨팅연구실	선임연구원
		여xx	한국표준과학연구원	초전도양자컴퓨팅시스템연구단	선임연구원
	정책·전략 기획	김xx	한국표준과학연구원	K-퀀텀국제협력본부	본부장
		정xx	한국전자통신연구원	ICT전략연구소	책임연구원
		정xx	한국표준과학연구원	국가양자정책센터	센터장
관	이xx	정보통신기획평가원	양자기술산업팀	수석	
	경xx	한국지능정보사회진흥원	양자기술활용센터	수석연구원	

저자소개

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

허필선 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 산업분석연구실 책임연구원
e-mail: f3style@etri.re.kr Tel. 042-860-5396

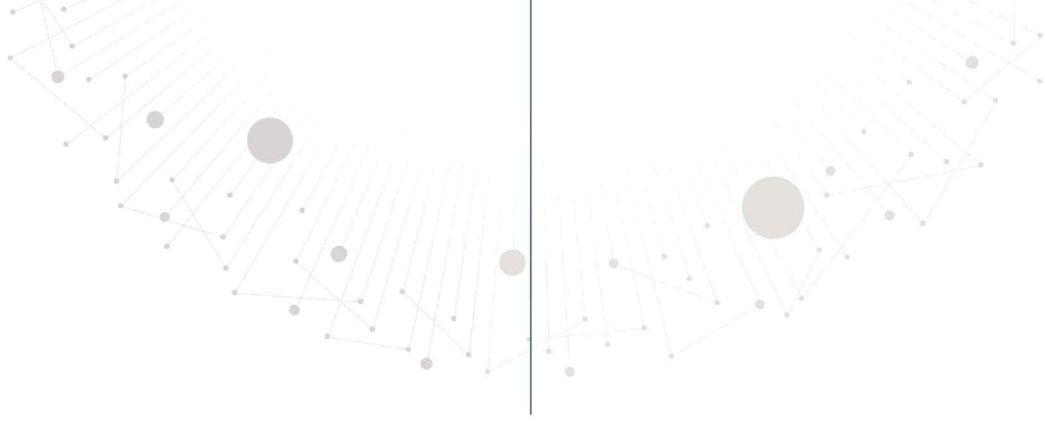
양자 컴퓨팅 지배적 디자인 탐색: 큐비트 구현 방식 중심으로

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

