

기술패권 접근을 위한 글로벌 파트너 탐색 전략 : 양자컴퓨팅 주요 큐비트 기술 중심으로

정선화·조병선·이선재·신용희

본 보고서는 ETRI ICT전략연구소 기본사업인
“국가 지능화 기술정책 및 표준화 연구”를 통해 작성된 결과물입니다.



Executive summary

📄 연구 추진 배경

- 새로운 컴퓨팅 패러다임으로 양자컴퓨팅 기술이 부상하고 있으며 세계 각국은 양자컴퓨팅을 핵심 안보 기술이자 미래 산업 '게임체인저' 기술로 간주하고 그 파급력에 주목해 국가적인 발전전략을 수립하고 대규모 연구개발 투자를 진행 중
- 공공 및 민간에서의 대규모 투자와 국가와 산학연간 광범위한 글로벌협력 덕분에 양자컴퓨팅은 최근 기술분야 중에서 가장 빠르게 성장하고 있으나 미중 기술패권 다툼으로 국가 간 경제·안보 동맹이 기술동맹으로 확대되는 기술블록화 움직임 시작
- '세계를 선도하는 글로벌 R&D 추진전략(안)'이 발표되고(2023.11) R&D 글로벌역량을 강조하는 정책적 환경 속에 기술블록화 움직임에 전략적으로 대응하고 기술혁신을 위한 글로벌협력 관계 구축 필요

📄 연구 목적과 내용

- 본 보고서에서는 논문과 특허 데이터를 분석하여 글로벌협력 관계 구축을 위한 객관적인 자료를 제공하고, 나아가서 협력 파트너 탐색을 위한 기초 자료를 제시
- 중점연구분야 및 연구인력 분석은 본 보고서에서 정의된 양자컴퓨팅 기술분류체계의 모든 기술에 대해 수행
- 국가 및 기관 경쟁력과, 글로벌협력 수준 분석은 기술분류체계의 큐비트 하위 기술 중 현재 기준 가장 기술 성숙도가 높고 활발하게 연구가 이루어지고 있는 초전도(superconducting), 이온(trapped ion), 광(photonics), 원자(neutral atom) 방식에 국한하여 심층분석 수행



분석결과

○ 선도 국가

- 연구활동(논문활동) 관점에서 최근 시기(2019년~2022년) Top 5 국가 및 특징

큐비트	미국	중국	독일	영국	일본	이탈리아	러시아	연구활동 특징
초전도	1위	2위	3위	5위	4위			미국 우위 지속, 중국의 양적·질적 추격
이온	1위	2위	3위	4위		5위		미국의 양적·질적 독보적 우위
광	1위	2위	3위	4위			5위	미국의 양적·질적 우위, 중국의 양적·질적 맹추격
원자	1위	2위	3위	5위			4위	미국의 양적·질적 우위, 중국의 양적 맹추격

- 산업화(특허활동) 관점에서 최근 시기(2019년~2022년) Top5 국가 및 특징

큐비트	미국	중국	영국	캐나다	독일	오스트리아	이스라엘	프랑스	연구활동 특징
초전도	1위	2위	4위	5위	3위				미국 양적 우위, 기술상시장에서 중국이 추월
이온	1위	3위	2위			4위			특허자산지수 기준 미국의 독보적 우위
광	1위	3위	4위	2위			5위		특허자산지수 기준 미국의 독보적 우위
원자	1위							2위	특허활동 소규모

○ 선도 기관

- 연구활동(논문활동) 관점에서 Top10 선도기관의 국가 분포 및 리스트

큐비트	미국	중국	영국	일본	오스트리아	프랑스	호주	네덜란드	이탈리아
초전도	4개	4개		1개				1개	
이온	5개	1개	1개		2개	1개			
광	2개	3개	1개			1개	1개		2개
원자	5개	1개	1개		2개	1개			

순위	초전도	이온	광	원자
1	CAS	메릴랜드대학교	CAS	CAS
2	IBM	CAS	UST of China	메릴랜드대학교
3	UST of China	NIST	CNRS	CNRS
4	난징대학교	인스부르크대학교	MIT	NIST
5	델프트공과대학교	ÖAW	CAS Key Lab of Quantum Tech	UST of China
6	난징대학교	듀크대학교	NIST	MIT
7	NIST	CNRS	Consiglio Nazionale delle Ricerche	MaxPlanck Ins of Quantum Optics
8	예일대학교	MIT	Sapienza Università Roma	CQC2T
9	캘리포니아대학, 산타바바라	옥스포드대학교	브리스톨대학교	뉴사우스웨일즈대학교
10	이화학연구소	캘리포니아대학교, 버클리	퀸즐랜드대학교	미시건대학교, 앤아버

– 산업화(특허활동) 관점에서의 Top5 선도기업의 국가 분포 및 리스트

큐비트	미국	중국	캐나다	영국	오스트리아	이스라엘	프랑스
초전도	2개	2개	1개				
이온	2개	1개		1개	1개		
광	2개	1개	1개			1개	
원자	3개						1개

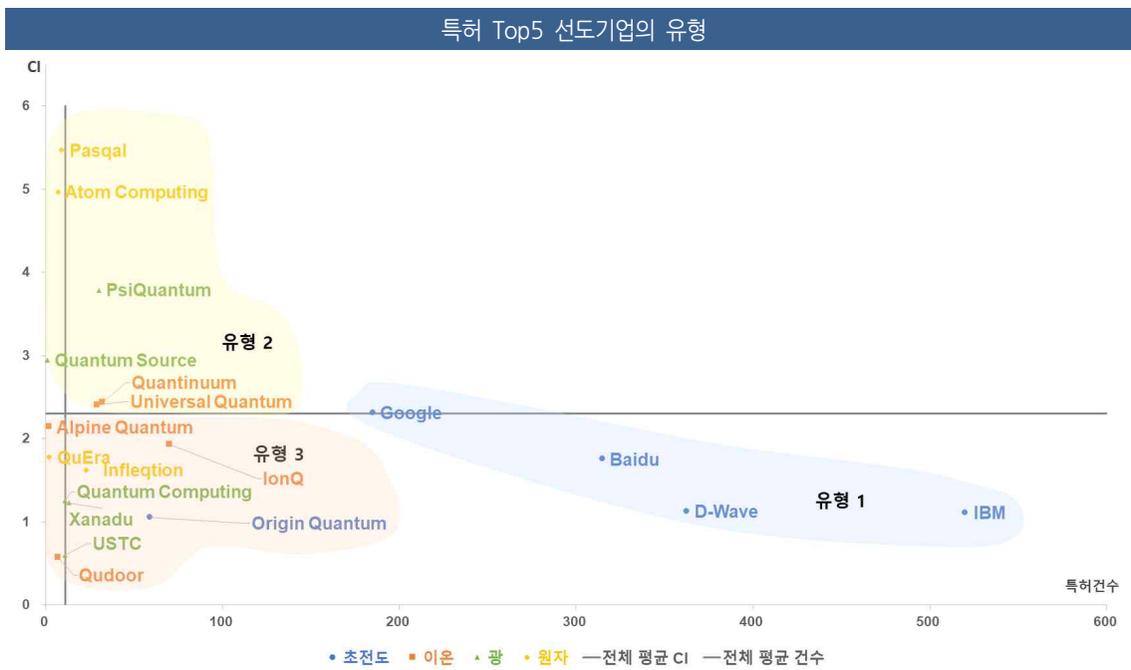
순위	초전도	이온	광	원자
1	IBM	IonQ	PsiQuantum	Pascal
2	Origin Quantum	Quantinuum	Quantum Computing	Infleqtion
3	Baidu	Qudoor	Xanadu	Atom Computing
4	Google	Universal Quantum	UST of China	Qera
5	D-Wave	Alpine Quantum	Quantum Source Labs	

– 산업화(특허활동) 관점에서의 4가지 큐비트 유형별 Top5 선도기업 유형 구분

[유형 1] 기술축적도가 높은 그룹(현재 초전도 분야 기업이 대다수)

[유형 2] 기술역량은 높으나 기술축적도는 낮은 그룹

[유형 3] 기술역량 및 기술축적도 평균 미만 그룹



* 특허건수는 해당기업이 출원한 특허건수이며, 기술축적도를 의미
 Competitive Index(CI)는 Technology Relevance(TR)과 Market Coverage(MC) 곱으로 산출되며, 기술역량을 의미
 TR은 피인용 기반의 기술성 지수, MC는 특허출원 국가 수를 기반으로 산출되는 시장성 지수

○ 글로벌협력 관계

- 초전도, 이온, 원자 방식에서는 미국이, 광 방식에서는 중국이 최대 협력중심국
- EU권에서는 “초초전도(독일), △이온(독일, 오스트리아), △광(영국, 독일), △원자(독일) 중심”으로 협력 중

큐비트	협력중심국	협력복잡도	협력관계
초전도	미국, 독일, 중국	20	
이온	미국, 오스트리아, 독일, 영국	22	
광	미국, 중국, 독일, 영국, 호주, 일본, 캐나다, 이탈리아	48	
원자	미국, 독일, 이탈리아	24	

* 협력중심국은 3개 이상 국가와 협력관계가 있는 국가, 협력복잡도는 10% 이상 협력하는 관계(화살표)의 수

④ 글로벌협력 제언 - 초전도 큐비트 (Superconducting Qubit)

○ 개념 및 장단점

- 절대온도 0°C에서 저항이 사라지는 초전도 현상에 기반을 두고 조셉슨 접합이라는 전자소자를 이용하여 양자역학의 특성인 중첩과 얽힘 현상 구현
- 초전도 방식의 큐비트는 높은 수준으로 제어가능하고 속도가 빠르고 기존의 재료 위에 구축이 가능하고 기존의 미세공정기술과 호환성을 갖는 등의 장점을 갖고 있으나, 절대영도 근처의 매우 낮은 온도에서만 작동하고 노이즈에 취약하며 상대적으로 매우 짧은 수명이 단점

○ 국가경쟁력

순위	논문				특허			
	국가	비중	집중도		국가	비중	집중도	
			CR2	CR5			CR2	CR5
1	미국	35.6	25.6	60.5	미국	46.9	69.0	92.5
2	중국	27.3			중국	22.1		
3	독일	11.6	-		캐나다	4.3	-	
4	일본	8.9	-		영국	5.5	-	
5	영국	5.4	-		독일	13.7	-	

*논문비중은 전체논문 중 해당국가 점유율, 특허비중은 전체 PAI 중 해당국가 점유율

○ 기관경쟁력

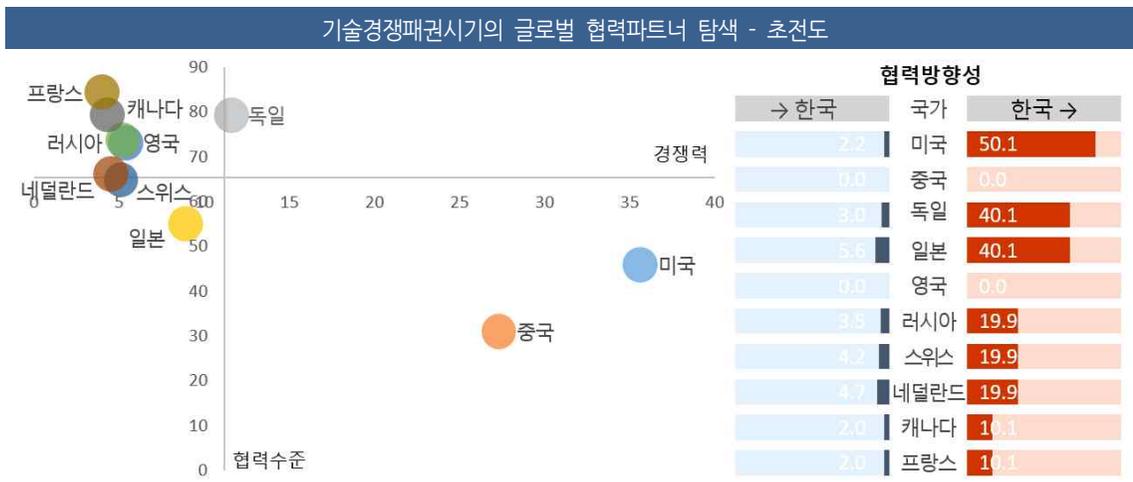
순위	논문			특허		
	기관명	국가	유형	기업명	국가	유형
1	CAS	중국	연구소	IBM	미국	기업
2	IBM	미국	기업	Origin Quantum	중국	기업
3	예일대학교	미국	대학	Baidu	중국	기업
4	NIST	미국	연구소	Google	미국	기업
5	UST of China	중국	대학	D-Wave	캐나다	기업
6	이화학연구소	일본	연구소			
7	난징대학교	중국	대학			
8	델프트공과대학교	네덜란드	대학			
9	캘리포니아주립대학교, 산타바바라	미국	대학			
10	칭화대학교	중국	대학			

○ 글로벌협력 파트너 국가 탐색

- 경쟁력, 글로벌 협력수준, 선도기관을 고려한 파트너 국가 후보 - 네덜란드, 캐나다
 - [근거 ①] 양적지표 평균 이상 경쟁력 상위 3개국 중 미중은 경쟁 우위 위치에 있으나, 글로벌 협력수준은 평균보다 낮아(미 45.9%, 중 31.0%) 협력 파트너 국가 후보에서 제외
 - [근거 ②] 네덜란드는 경쟁력 양적지표에서 7위에 위치하지만, 경쟁력 질적지표 18.8%로 3위에 위치하고, 글로벌 협력수준도 66.2%로 낮지 않으며, 논문활동 기준 8위인 델프트공과대학이 위치
 - [근거 ③] 캐나다는 경쟁력 양적지표에서 8위에 위치하지만, 경쟁력 질적지표 20.0%로 2위에 위치하고, 글로벌 협력수준도 79.4%로 매우 높고, 특허지표 PAI 기준 4위인 기업 D-Wave가 위치

국가	인력비중	논문 경쟁력		글로벌 협력수준		
		논문점유율	상위10% 논문비중	협력수준	협력방향성	
					→ 한국	한국 →
미국	19.2	35.6	15.5	45.9	2.2	50.1
중국	22.1	27.3	10.1	31.0	0.0	0.0
독일	6.5	11.6	11.9	79.3	3.0	40.1
일본	3.8	8.9	12.5	55.0	5.6	40.1
영국	4.5	5.4	10.5	73.1	0.0	0.0
러시아	2.2	5.2	10.5	73.7	3.5	19.9
스위스	-	5.1	27.8	64.9	4.2	19.9
네덜란드	-	4.5	18.8	66.2	4.7	19.9
캐나다	2.7	4.3	20.0	79.4	2.0	10.1
프랑스	3.2	4.0	14.3	84.5	2.0	10.1

*인력비중은 양자컴퓨팅 분야 전체의 인력비중



*경쟁력: 논문점유율, 협력수준: 타 국가와의 논문공저 비율, 협력방향성: (화살표시작 국가의) 협력수준 대비 두 국가간 협력수준 비중

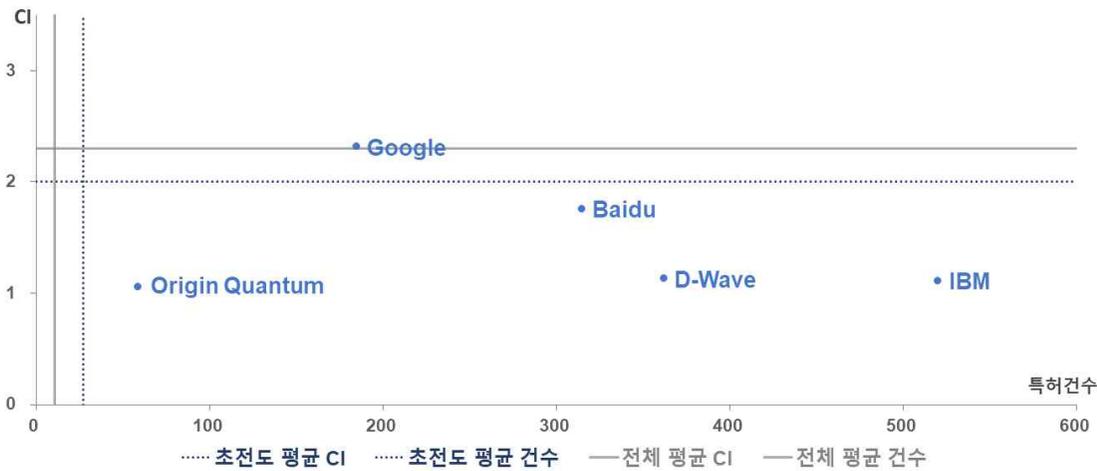
○ 글로벌협력 파트너 기업 탐색

○ 양적·질적 지표를 고려한 파트너 기업 후보 - D-wave

[근거 ①] 초전도 분야는 타 기술 대비 빅테크 기업을 중심으로 연구가 꾸준히 진행된 결과, 선도기업은 기술경쟁력 확보한 상태로 협력연구에 보수적일 것으로 예상

[근거 ②] 기술력을 확보한 미국의 빅테크 기업 및 국가적 특수성이 있는 중국 기업 대비 캐나다 기업인 D-wave는 상대적으로 협력 가능성이 높을 것으로 예상

(특허) 기업경쟁력 비교 분석 - 초전도



* 특허건수는 해당기업이 출원한 특허건수이며, 기술축적도를 의미

Competitive Index(CI)는 Technology Relevance(TR)과 Market Coverage(MC) 곱으로 산출되며, 기술역량을 의미

TR은 피인용 기반의 기술성 지수, MC는 특허출원 국가 수를 기반으로 산출되는 시장성 지수

○ 기업 Profile

순위	기관명	Description						
		역량(PAI)	큐비트	유형	국가	펀딩	설립	인력규모
1	IBM	양자 컴퓨팅 하드웨어, 클라우드 서비스, 파트너십 및 연구 제공						
		520.2	초전도	기업	미국	Unknown	1911	
2	Origin Quantum	양자 시뮬레이터 컴퓨팅 서비스 및 양자 컴퓨팅 개발자를 위한 전문 개발 교육 환경 제공						
		362.4	초전도	기업	중국	162,563,040	2017	51-100
3	Baidu (Research)	양자 기술을 Baidu 핵심 비즈니스에 지속적으로 통합하는 양자 인공 지능(AI) 연구 허브 역할 수행						
		315.0	초전도	기업	중국	Unknown	2017	
4	Google	기계 학습에 필요한 컴퓨팅 가속화를 목적으로 양자 프로세서 구축 및 새로운 양자 알고리즘 개발 목표						
		185.1	초전도	기업	미국	Unknown	2013	
5	D-Wave	풀 스택 기술업체로서 양자 컴퓨팅을 지원하는 클라우드 서비스, 애플리케이션 개발 도구 등을 제공						
		59.0	초전도	기업	캐나다	304,967,706	1999	101-500

④ 글로벌협력 제언 - 이온 큐비트 (Trapped Ion Qubit)

○ 개념 및 장단점

- 전자기장을 이용하여 3차원 공간에 포획된 전하를 띤 입자를 이용
- 상온에서 작동하고 큐비트 수명이 길고 최대 1,000초까지 얽힘을 유지할 수 있고 얽힘 큐비트 개수를 많이 만들 수 있으며 자연 소재의 큐비트라 큐비트 자체 오류는 없다는 장점이 있으나 복잡한 이온포집 기술로 인해 큐비트 수를 늘리기가 어렵고 느린 연산속도가 단점

○ 국가경쟁력

순위	논문				특허				
	국가	비중	집중도		국가	비중	집중도		
			CR2	CR5			CR2	CR5	
1	미국	37.2	53.3	74.1	미국	84.1	91.3	100.0	
2	중국	16.1			영국	7.2			
3	독일	9.0			-	중국			6.5
4	영국	6.4			-	오스트리아			1.5
5	이탈리아	5.4			-	스웨덴			0.6

*논문비중은 전체논문 중 해당국가 점유율, 특허비중은 전체 PAI 중 해당국가 점유율

○ 기관경쟁력

순위	논문			특허		
	기관명	국가	유형	기업명	국가	유형
1	NIST	미국	연구소	IonQ	미국	기업
2	메릴랜드대학교	미국	대학	Quantinuum	미국	기업
3	인스부르크대학교	오스트리아	대학	Qudoor	영국	기업
4	CAS	중국	연구소	Universal Quantum	중국	기업
5	ÖAW	오스트리아	연구소	Alpine Quantum	오스트리아	기업
6	옥스포드대학교	영국	대학			
7	듀크대학교	미국	대학			
8	MIT	미국	대학			
9	CNRS	프랑스	연구소			
10	캘리포니아대학교, 버클리	미국	대학			

○ 글로벌협력 파트너 국가 탐색

● 경쟁력과 글로벌협력 수준을 고려한 파트너 국가 후보 - 영국

[근거 ①] 양적지표 평균 이상 경쟁력 상위 2개국은 경쟁 우위 위치에 있으나, 글로벌 협력수준은 평균보다 낮아(미 32.7%, 중 28.3%) 협력 파트너 국가 후보에서 제외

[근거 ②] 영국은 경쟁력 양적지표에서 평균보다는 낮지만 4위에 위치하고, 글로벌 협력수준은 58.8%로 낮지 않고, 논문활동 기준 6위인 옥스퍼드대학교와 특허지표 PAI 기준 3위인 기업 Universal Quantum이 위치

국가	인력비중	논문 경쟁력		글로벌 협력수준		
		논문점유율	상위10% 논문비중	협력수준	협력방향성	
					→ 한국	한국 →
미국	19.2	37.2	16.4	32.7	6.1	60.0
중국	22.1	16.1	6.5	28.3	2.8	9.9
독일	6.5	9.0	11.8	62.0	2.3	9.9
영국	4.5	6.4	16.7	58.8	0.0	0.0
이탈리아	3.4	5.4	10.0	39.5	0.0	0.0
스위스	-	5.3	20.0	47.6	10.1	20.0
오스트리아	-	5.2	20.0	75.6	6.5	20.0
프랑스	3.2	4.6	33.3	75.0	3.7	9.9
스페인	-	4.4	12.5	65.7	0.0	0.0
싱가포르	-	4.4	12.5	68.6	0.0	0.0

*인력비중은 양자컴퓨팅 분야 전체의 인력비중



*경쟁력: 논문점유율, 협력수준: 타 국가와의 논문공저 비율, 협력방향성: (화살표시작 국가의) 협력수준 대비 두 국가간 협력수준 비중

○ 글로벌협력 파트너 기업 탐색

○ 양적·질적 지표를 고려한 파트너 기업 후보 - Alpine Quantum

- [근거 ①] IonQ는 경쟁력 양적지표(특허건수) 및 질적지표(CI) 경쟁 우위에 있으므로, 타 기업 대비 상대적으로 협력연구에 보수적일 것으로 예상
- [근거 ②] Alpine Quantum는 양적지표에서 광 평균 건수 보다 아래에 있으나, 질적지표에서는 광 평균 CI 이상에 있어 공동 기술개발 후보 기업으로 검토 가능



* 특허건수는 해당기업이 출원한 특허건수이며, 기술축적도를 의미
 Competitive Index(CI)는 Technology Relevance(TR)과 Market Convergence(MC) 곱으로 산출되며, 기술역량을 의미
 TR은 피인용 기반의 기술성 지수, MC는 특허출원 국가 수를 기반으로 산출되는 시장성 지수

○ 기업 Profile

순위	기관명	Description						
		역량(PAI)	큐비트	유형	국가	펀딩	설립	인력규모
1	IonQ	이온 트랩 양자컴퓨터 개발						
		147.1	이온	기업	미국	657,000,000	2016	51-100
2	Quantinuum	양자 소프트웨어 및 OS 기업인 케임브리지 퀀텀과 허니웰 퀀텀 솔루션사가 결합한 기업						
		85.6	이온	기업	영국	448,800,000	2021	101-500
3	Qudoor	양자키통신 단말장비 개발						
		16.5	이온	기업	중국	7,752,659	2018	
4	Universal Quantum	확장 가능한 트랩 이온 양자 컴퓨터 연구						
		17.6	이온	기업	영국	15,103,500	2019	11-50
5	Alpine Quantum	포획된 이온 양자 장치 개발						
		4.3	이온	기업	오스트리아	37,475,000	2018	11-50

④ 글로벌협력 제언 - 광 큐비트 (Photonics Qubit)

○ 개념 및 장단점

- 광자의 양자상태를 사용하여 정보를 표현하고 조작하는 방식
- 광자가 환경과 약하게 상호작용하기 때문에 긴 응집 시간을 가지고 있으며, 긴 거리를 통해 쉽게 통신 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 큐비트를 조작하고 제어하기 어렵고 현 기술로는 컴팩트한 광자회로를 만드는 것이 어렵다는 단점 존재

○ 국가경쟁력

순위	논문				특허			
	국가	비중	집중도		국가	비중	집중도	
			CR2	CR5			CR2	CR5
1	미국	27.3	53.9	81.8	미국	77.5	88.7	100.0
2	중국	26.6			캐나다	11.2		
3	독일	11.5	-		중국	6.5		
4	영국	9.5	-		영국	2.9		
5	러시아	6.9	-		이스라엘	1.9		

*논문비중은 전체논문 중 해당국가 점유율, 특허비중은 전체 PAI 중 해당국가 점유율

○ 기관경쟁력

순위	논문			특허		
	기관명	국가	유형	기업명	국가	유형
1	USTof China	중국	대학	PsiQuantum	미국	기업
2	CAS	중국	연구소	Quantum Computing	미국	기업
3	MIT	미국	대학	Xanadu	캐나다	기업
4	CNRS	프랑스	연구소	UST of China	중국	기업
5	NIST	미국	연구소	Quantum Source Labs	이스라엘	기업
6	CAS Key Laboratory of Quantum Information	중국	연구소			
7	퀸즐랜드대학교	호주	대학			
8	브리스톨대학교	영국	대학			
9	SapienzaUniversitàdi Roma	이탈리아	대학			
10	ConsiglioNazionale delleRicerche	이탈리아	연구소			

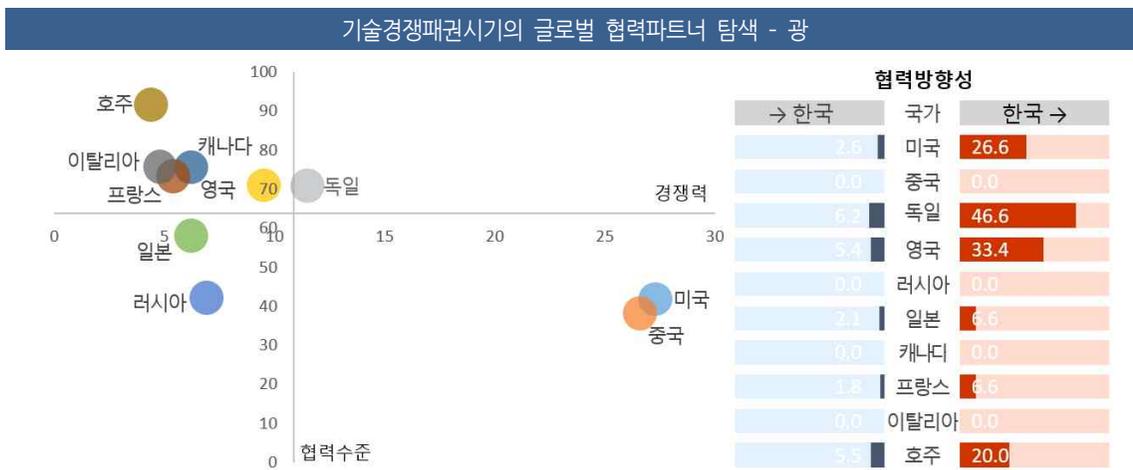
○ 글로벌협력 파트너 국가 탐색

○ 경쟁력과 글로벌협력 수준을 고려한 파트너 국가 후보 - 프랑스, 캐나다

- [근거 ①] 경쟁력 상위 3개국 중 미중은 양적지표에서 경쟁 우위 위치에 있으나, 글로벌 협력수준은 평균보다 낮아(미 41.8%, 중 38.2%) 협력 파트너 국가 후보에서 제외
- [근거 ②] 프랑스는 경쟁력 양적지표에서 8위에 위치하지만, 경쟁력 질적지표 16.7%로 3위에 위치하고, 글로벌 협력수준도 73.3%로 높은 편이며, 논문활동 기준 4위인 연구소 CNRS가 위치
- [근거 ③] 캐나다는 경쟁력 양적지표에서 7위에 위치하지만, 경쟁력 질적지표 19.0%로 3위에 위치하고, 글로벌 협력수준도 75.6%로 높은 편이며, 특허지표 PAI 기준 3위인 기업 Xanadu가 위치

국가	인력비중	논문 경쟁력		글로벌 협력수준		
		논문점유율	상위10% 논문비중	협력수준	협력방향성	
					→ 한국	한국 →
미국	19.2	27.3	13.8	41.8	2.6	26.6
중국	22.1	26.6	8.8	38.2	0.0	0.0
독일	6.5	11.5	15.4	70.9	6.2	46.6
영국	4.5	9.5	12.5	71.0	5.4	33.4
러시아	2.2	6.9	4.3	42.1	0.0	0.0
일본	3.8	6.2	9.5	58.1	2.1	6.6
캐나다	2.7	6.2	19.0	75.6	0.0	0.0
프랑스	3.2	5.4	16.7	73.3	1.8	6.6
이탈리아	3.4	4.8	12.5	75.8	0.0	0.0
호주	-	4.4	20.0	91.7	5.5	20.0

*인력비중은 양자컴퓨팅 분야 전체의 인력비중

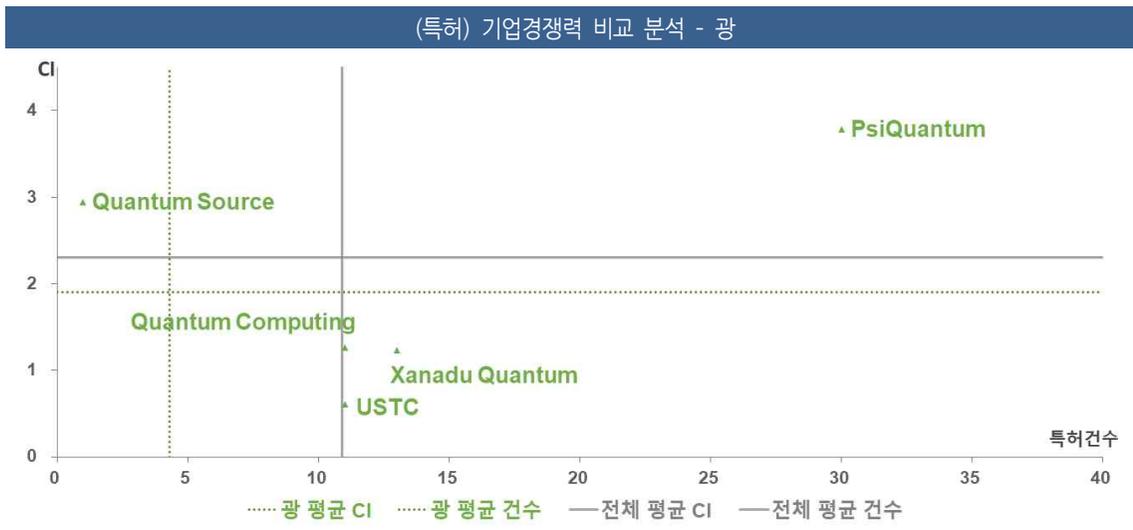


*경쟁력: 논문점유율, 협력수준: 타 국가와의 논문공저 비율, 협력방향성: (화살표시작 국가의) 협력수준 대비 두 국가간 협력수준 비중

○ 글로벌협력 파트너 기업 탐색

○ 양적·질적 지표를 고려한 파트너 기업 후보 - Xanadu, Quantum Source

- [근거 ①] PsiQuantum은 경쟁력 양적지표(특허건수) 및 질적지표(CI) 경쟁 우위에 있으므로, 타 기업 대비 상대적으로 협력연구에 보수적일 것으로 예상
- [근거 ②] Xanadu는 질적지표에서 광 평균 CI 보다 아래에 있으나, 양적지표에서는 광 평균 건수 이상에 있어 공동출원 후보 기업으로 검토 가능
- [근거 ③] Quantum Source는 양적지표에서 광 평균 건수 보다 아래에 있으나, 질적지표에서는 광 평균 CI 이상에 있어 공동 기술개발 후보 기업으로 검토 가능



* 특허건수는 해당기업이 출원한 특허건수이며, 기술축적도를 의미

Competitive Index(CI)는 Technology Relevance(TR)과 Market Coverage(MC) 곱으로 산출되며, 기술역량을 의미
 TR은 피인용 기반의 기술성 지수, MC는 특허출원 국가 수를 기반으로 산출되는 시장성 지수

○ 기업 Profile

순위	기관명	Description						
		역량(PAI)	큐비트	유형	국가	펀딩	설립	인력규모
1	PsiQuantum	실리콘 광자 큐비트를 사용하여 최초의 범용 양자 컴퓨터 구축을 목표						
		103.1	광	기업	미국	665,000,000	2016	101-500
2	Quantum Computing	고객을 위한 풀 스택 양자 솔루션 제공업체						
		18.9	광	기업	미국	7,407,500	2018	
3	Xanadu	양자 광 프로세서 및 Strawberry Fields라는 오픈 소스 양자 소프트웨어 플랫폼의 풀 스택 개발자						
		17.6	광	기업	캐나다	261,538,520	2016	101-500
4	UST of China	USTC Pan Jianwei 팀에 의해 개발된 Jiuzhang은 양자 우위를 주장하는 최초의 광자 양자 컴퓨터						
		13.4	광	기업	중국	Unknown	2022	
5	Quantum Source Labs	광자 기술 개발을 통해 양자 컴퓨터를 수백만 큐비트로 확장하는 것을 목표						
		3.0	광	기업	이스라엘	27,000,000	2021	11-50

📄 글로벌협력 제언 - 원자 큐비트 (Neutral Atom Qubit)

📍 개념 및 장단점

- 최외곽에 전자가 하나 있는 알칼리 금속계의 원자들을 주로 활용
- 자들이 전하를 띠지 않기 때문에 원자들 간 상호작용이 약하다는 단점이 존재하지만, 이러한 특성으로 대규모 원자들을 안정적으로 포획 가능하다 것이 장점으로 작용

📍 국가경쟁력

순위	논문				특허			
	국가	비중	집중도		국가	비중	집중도	
			CR2	CR5			CR2	CR5
1	미국	29.3	55.0	80.9	미국	61.7	100.0	100.0
2	중국	25.7			프랑스	38.3		
3	독일	11.4			-	-	-	
4	러시아	8.3			-	-	-	
5	영국	6.2			-	-	-	

*논문비중은 전체논문 중 해당국가 점유율, 특허비중은 전체 PAI 중 해당국가 점유율

📍 기관경쟁력

순위	논문			특허		
	기관명	국가	유형	기업명	국가	유형
1	CAS	중국	연구소	Pascal	미국	기업
2	NIST	미국	연구소	Inflection	프랑스	기업
3	메릴랜드대학교	미국	대학	Atom Computing	미국	기업
4	뉴사우스웨일즈대학교	호주	대학	Quera	미국	기업
5	CNRS	프랑스	연구소			
6	UST of China	중국	대학			
7	Max Planck Institute of Quantum Optics	독일	연구소			
8	CQC2T	호주	연구소			
9	MIT	미국	대학			
10	미시건대학교, 앤아버	미국	대학			

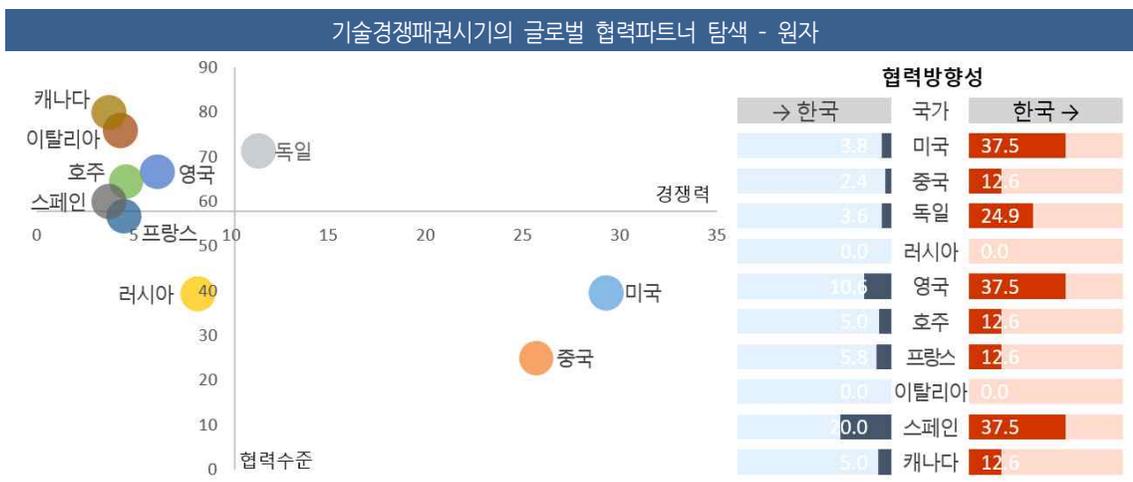
○ 글로벌협력 파트너 국가 탐색

○ 경쟁력과 글로벌협력 수준을 고려한 파트너 국가 후보 - 호주, 프랑스

- [근거 ①] 경쟁력 상위 3개국 중 미중은 양적지표에서 경쟁 우위 위치에 있으나, 글로벌 협력수준은 평균보다 낮아(미 39.6%, 중 24.9%) 협력 파트너 국가 후보에서 제외
- [근거 ②] 호주는 경쟁력 양적지표에서 6위에 위치하지만, 경쟁력 질적지표 28.6%로 공동 1위에 위치하고, 글로벌 협력수준도 64.5%로 낮지 않은 편이며, 논문활동 기준 4위인 뉴사우스웨일즈대학이 위치
- [근거 ③] 프랑스는 경쟁력 양적지표에서 7위에 위치하지만, 경쟁력 질적지표 28.6%로 공동 1위에 위치하고, 글로벌 협력수준도 56.7%로 낮지 않은 편이며, 특허지표 PAI 기준 2위인 기업 Pasqal이 위치

국가	인력비중	논문 경쟁력		글로벌 협력수준		
		논문점유율	상위10% 논문비중	협력수준	협력방향성	
					→ 한국	한국 →
미국	19.2	29.3	18.4	39.6	3.8	37.5
중국	22.1	25.7	7.0	24.9	2.4	12.6
독일	6.5	11.4	21.1	71.4	3.6	24.9
러시아	2.2	8.3	0.0	39.3	0.0	0.0
영국	4.5	6.2	20.0	66.7	10.6	37.5
호주	-	4.6	28.6	64.5	5.0	12.6
프랑스	3.2	4.5	28.6	56.7	5.8	12.6
이탈리아	3.4	4.3	28.6	75.9	0.0	0.0
스페인	-	3.7	16.7	60.0	20.0	37.5
캐나다	-	3.7	16.7	80.0	5.0	12.6

*인력비중은 양자컴퓨팅 분야 전체의 인력비중

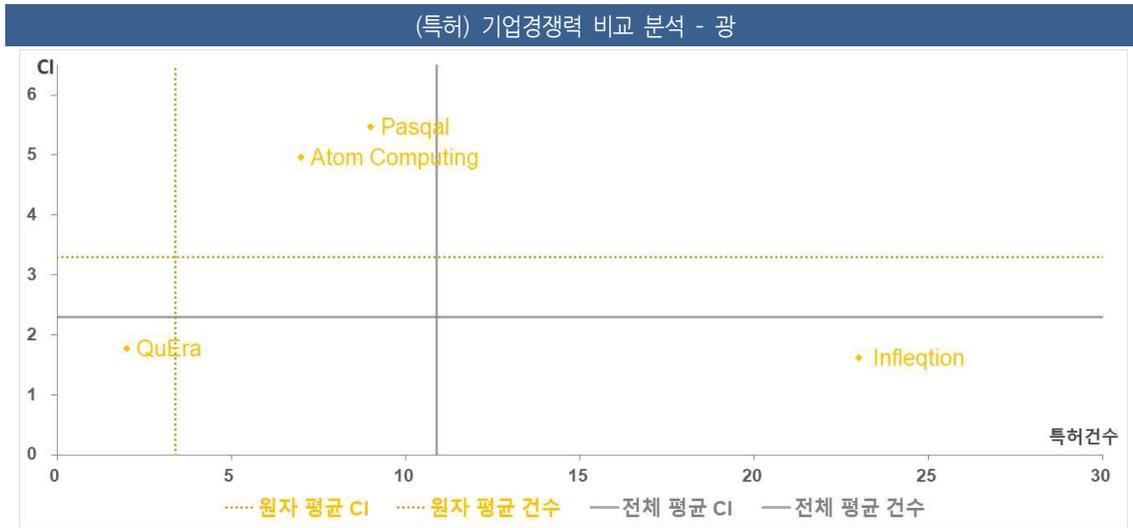


*경쟁력: 논문점유율, 협력수준: 타 국가와의 논문공저 비율, 협력방향성: (화살표시작 국가의) 협력수준 대비 두 국가간 협력수준 비중

◎ 글로벌협력 파트너 기업 탐색

● 양적·질적 지표를 고려한 파트너 기업 후보 - Infleqtion, Pascal, Atom Computing

- [근거 ①] 원자분야는 초기 단계이므로 다양한 기업들이 서로 협력방안을 모색
- [근거 ②] Infleqtion는 질적지표에서는 광 평균 CI 보다는 아래에 있으나, 양적지표에서는 광 평균 건수 및 타 기업 대비 경쟁 우위에 있어 공동출원 후보 기업으로 검토 가능
- [근거 ③] Pascal 및 Atom Computing은 양적·지표에서 모두 광 평균 이상으로 공동 기술개발 후보 기업으로 검토 가능



* 특허건수는 해당기업이 출원한 특허건수이며, 기술축적도를 의미
 Competitive Index(CI)는 Technology Relevance(TR)과 Market Coverage(MC) 곱으로 산출되며, 기술역량을 의미
 TR은 피인용 기반의 기술성 지수, MC는 특허출원 국가 수를 기반으로 산출되는 시장성 지수

◎ 기업 Profile

순위	기관명	Description							
		역량(PAI)	큐비트	유형	국가	펀딩	설립	인력규모	
1	Pascal	레이저를 사용하는 광학 핀셋으로 중성 원자를 제어하여 최대 수백 큐비트의 양자 레지스터를 조작	44.1	원자	기업	프랑스	138,780,000	2019	101-500
2	Infleqtion	ColdQuanta(레이저 냉각 및 초저온 원자 지원 양자 기술 판매) 및 Super.Tech의 지주 회사	38.3	원자	기업	미국	189,000,000	2007	51-100
3	Atom Computing	광학적으로 갇힌 중성 원자 배열로 형성된 핵 스핀 큐비트를 사용하여 양자 컴퓨터를 구축	29.1	원자	기업	미국	80,975,000	2018	51-100
4	Quera	확장 및 프로그래밍 가능한 양자 컴퓨터 솔루션 기반으로 중성 원자에 대한 연구	3.5	원자	기업	미국	17,000,000	2019	11-50

목 차

C O N T E N T S

Executive summary

I. 연구 목적과 범위	1
1. 연구배경	1
2. 연구내용 및 범위	2
II. 국내 역량 및 글로벌 R&D 생태계 내 한국의 위상 ..	13
1. 중점연구 분야 분석	13
2. 연구인력 분석	17
3. 한국의 역량	24
III. 국가기관별 경쟁력 및 협력수준 분석	29
1. 초전도 큐비트 (Superconducting Qubit)	32
2. 이온 큐비트 (Ion Trapped Qubit)	42
3. 광 큐비트 (Photonics Qubit)	52
4. 원자 큐비트 (Neutral Atom Qubit)	62
5. 소결	72
IV. 글로벌 R&D 협력 파트너 탐색 및 고려사항	83
1. 글로벌 R&D 협력 파트너 탐색	83
2. 추후 고려사항	87
참고문헌	91



참고문헌

○ 국내자료

- 이효정, 최연경, 김기범 (2017.11) 양자정보통신, ICT의 새로운 미래, 삼성KPMG 경제연구원
- 백충헌, 황용수, 김태완, 최병수 (2018.2) 양자컴퓨팅 기술 연구개발 동향, 전자통신동향지
- 유성민 (2019.2) 양자컴퓨터 현황 분석, 미국과 중국을 중심으로, 한국인터넷진흥원 KISA Report
- 박성수, 송호용 (2019.4) 양자정보통신기술 현황과 전망, 전자통신동향지
- 이준, 문희진 (2019.5) 양자컴퓨터 R&D 정책 현황과 전망, 한국과학기술정보연구원 KISTI 정책총서
- 정지형, 최병철 (2019.7) 빛의 속도로 계산하는 꿈의 컴퓨터, 양자컴퓨터, 한국과학기술기획평가원
KISTEP Issue Paper
- 김지소 (2019.8) ICT의 새로운 진화, 양자정보통신을 향한 주요국의 도전, 정보통신기획평가원 ICT
Spot Issue 해외 ICT R&D 정책동향
- 산업경제연구원 (2019.11) 미·중 기술패권 경쟁의 핵심, 양자정보기술의 현황
- 임승혁 (2019) 범용양자컴퓨터, 한국과학기술기획평가원 KISTEP 기술동향브리프
- 백충헌, 최병수 (2020.4) 양자점 큐비트 기반 양자컴퓨터의 국외 연구동향 분석, 정보통신동향지
- 연원호, 나수엽, 박민숙, 김영선 (2020.8) 미·중간 기술패권 경쟁과 시사점, 대외경제정책연구원 연구보고서
- 김한영 (2020.9) 양자오류보정, 고등과학원
- 한중과학기술협력센터 (2020.10) 중국의 양자정보 연구개발 동향, 이슈리포트
- 정보통신기획평가원 (2020.12) ICT R&D 기술로드맵 2025, ICT 디바이스·양자, 양자정보통신
- 국회입법조사처(2020) 미국 「양자연구집중지원법」 제정의 주요 내용과 시사점
- 과학기술정보통신부 (2021.4) 디지털을 넘어 퀀텀 시대를 준비하는 양자기술 연구개발 투자전략(안),
과학기술관계장관회의
- 이방래, 원동규, 이재민, 윤민영, 장우석, 여운동, 이창환 (2021.12) 양자기술 과학·기술·산업 분석,
한국과학기술정보연구원 KISTI R&I Report
- 조은영 등 (2021.12) 양자컴퓨팅 소프트웨어 최신 기술 동향, 전자통신동향지
- 한국국방연구원(2021) 미래의 창과 방패, 양자 기술
- 박혜영 (2022.5) 주요국의 양자기술 개발과 투자 전략 - 전략기술 분야와 중점 R&D를 중심으로,

정보통신기획평가원 ICT Spot Issue 해외 ICT R&D 정책동향

이방래, 임종연, 원동규 (2022.7), 미래 산업의 게임 체인저, 양자정보과학기술(QIST) : 양자 2.0의 시대, 한국과학기술정보연구원 KISTI Issue Brief

유형정 (2022.7) 양자정보기술, 한국과학기술기획평가원 KISTEP 브리프

과학기술정보통신부 (2022.10) 양자기술 인재확보 시급, 보도자료

안세정, 이준영 (2022.12) 학술논문 데이터로 본 글로벌 반도체 기술 패권 경쟁, 한국과학기술정보연구원

정보통신산업진흥원 (2022.11) 미국·중국·EU 등 양자컴퓨팅 개발 동향, 글로벌 ICT 월간동향리포트

박성수 (2022.11), 디지털을 넘어 양자시대를 준비하는 양자컴퓨터, SW 중심사회 FOCUS

과학기술정보통신부·한국지능정보사회진흥원·미래양자융합포럼 (2022.12) 2022 양자정보기술백서

중소기업기술정보진흥원 (2022) 양자컴퓨터의 현재와 전망, TIPA 이슈 리포트

권요한 (2023.1) 양자컴퓨팅 기술 동향 및 시사점 - 양자프로세스(QPU) 중심으로, 정보통신기획평가원 ICT Spot Issue 해외 ICT R&D 정책동향

정지형 (2023.2) 양자컴퓨터 정책 및 기술동향과 시사점, 전자통신동향지

과학기술&ICT (2023.3), 미국, 양자컴퓨팅 환경에서의 데이터 보호 방안 보고서 발표

MIT Technology Review (2023.3) 양자컴퓨팅이 가진 잠재력

서화정 (2023.3) 양자컴퓨터와 양자컴퓨팅 개발 플랫폼의 최신 동향, 정보통신기획평가원 주간기술동향

정일룡, 성은정, 백승욱 (2023.3), 양자기술 투자정책 동향 분석, 한국표준과학연구원 양자 국가기술전략 센터 보고서

한국연구재단 (2023.6) 국가전략기술분야 글로벌 상위 논문·특허 분석

과학기술정보통신부 (2023.6) 대한민국 양자과학기술 비전, 양자시대를 여는 우리의 도전과 전략

국가과학기술자문회 (2023.11) 세계를 선도하는 글로벌 R&D 추진전략(안), 관계부처합동

🌐 **국외자료**

UK National Quantum Technologies Programme (2015) A Roadmap for Quantum Technologies in the UK

Margaret Martonosi and Martin Roetteler (2018.11) Next Steps in Quantum Computing: Computer Science's Role, Computing Community Consortium

- Robin Blume-Kohout and Kevin Young (2018.12) Quantum Computing Metrics and Benchmarking, Frameworks: Not Yet, Sandia National Laboratories
- National Academies Press(2019) Quantum Computing: Progress and Prospects
- YOLE (2020) Quantum Technologies : Market and Technology Report 2020
- Alex Capri(2021.8) Quantum Computing: A New Frontier in Techno-Nationalism, Hinrich Foundation
- Graham AllisonKevin KlymanKarina BarbesinoHugo Yen (2021.11) The Great Tech Rivalry : China vs the U.S., Belfer Center
- Thomas Scheidsteger, Robin Haunschild, Lutz Bornmann, Christoph Ettl (2021) Bibliometric Analysis in the Field of Quantum Technology, Quantum Reports
- Alexandre Ménard, Ivan Ostojic, Mark Patel, and Daniel Volz (2022.2) A Game Plan for Quantum Computing, Mckinsey & Company
- Q-Next (2022.7) A Roadmap for Quantum Interconnects
- Junchao Wang, Guoping Guo, Zheng Shan (2022.7) Benchmarking the Performance of an Quantum Computer, Scholarly Community encyclopedia
- EU (2022.10) Key Performance Indicators for Quantum Technologies in Europe
- Alan Priestley (2022.10) Emerging Tech : Emergence Cycle for Quantum Computing, Gartner
- Omida (2022.11) Quantum Computing Hardware – 2022 Analysis
- Heather West, Ashish Nadkarni, Peter Rutten (2022) IDC Market Glance, Quantum Computing, 2Q22, IDC
- Tsubasa Ichikawa (2022) Bibliometric Analysis of Topic Structure in Quantum Computation and Quantum Algorithm Research, Arkiv
- Mckinsey & Company (2023.4) Quantum Technology Monitor
- Mckinsey & Company (2023.5) What is Quantum Computing?
- Qureca (2023.3) Overview on Quantum Initiative Worldwide-update 2022
- ORF(Observer Research Foundation) (2023.9) Global initiatives in quantum computing: The role of international collaboration
- Omdia (2023) The Quantum Technology Regulatory and Government Investment Analysis
- The Quantum Insider (2023) The Quantum Insider Intelligence Platform

○ 웹사이트

(유럽위원회 홈페이지)

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_22_7516

(외교부 홈페이지) https://overseas.mofa.go.kr/de-bonn-ko/brd/m_7690/view.do?seq=1343475

○ 신문기사

연합뉴스 (2017.9.11.) 中, 세계 최대 13조원짜리 양자연구소 짓는다

(<https://www.yna.co.kr/view/AKR20170911131800074>)

CIO(2020.12.1.), 첫 태동부터 현재에 이르기까지... '양자컴퓨팅'의 간략한 역사 살펴보기

(<https://www.ciokorea.com/news/174164>)

Scicne and Business (2021.5) Israel, Switzerland and UK face exclusion from major EU quantum and space research projects

(<https://sciencebusiness.net/framework-programmes/news/israel-switzerland-and-uk-face-exclusion-major-eu-quantum-and-space>)

중앙일보 (2022.2.10.) [미중 기술경쟁 6ROUND] 라운드 3: 양자정보과학(QIS)

(<https://www.joongang.co.kr/article/25047097#home>)

동북아저널(2022.4.28.), 양자 컴퓨팅은 상용화까지 어디까지?

(<https://www.dongbooka.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=25&id=4460>)

한국일보 (2022.7.25.) 양자컴퓨터 전쟁 닥치는데... 한국엔 싸울 인력이 없다

(<https://m.hankookilbo.com/News/Read/A2022071817100004407>)

YTN사이언스(2022.9.22.) 미 워싱턴에 한미 양자기술 협력센터 개소

(<https://m.science.ytn.co.kr/program/view.php?mcd=0082&key=202209221707573501>)

서울경제 (2022.10.13.) 상위 1% 양자연구자 전세계 104명...한국은 '0'

(<https://www.sedaily.com/NewsView/26CC2IKS18>)

BlockMeida (2023.1.6.) 중국 연구원들 “양자 컴퓨터로 암호화 해제하는 방법 찾았다” ...전문가들 진위 확인 중 (<https://www.blockmedia.co.kr/archives/285347>)

서울경제 (2023.2.15.) [퀀텀혁명이 온다] "양자기술, K칩 공정과 유사...제2 반도체 신화 만들어야"

(<https://www.sedaily.com/NewsView/29LRF10795>)

Forbes (2023.2.20.) Quantum Motion Adds £42 Million To Accelerated Funding Of Quantum

Computing Startups

(<https://www.forbes.com/sites/gilpress/2023/02/20/quantum-motion-adds-42-million-to-accelerated-funding-of-quantum-computing-startups/?sh=c3dfc822ae10>)

조선일보 (2023.3.21.) 양자 연구소·기업 한 곳에 모은다... 한국판 '퀀텀밸리' 추진

(<https://biz.chosun.com/science-chosun/science/2023/03/21/CV7IKPPY2RHLBGHGCG6LLWMLGLU/>)

머니투데이 (2023.4.20.) 양자기술, 기존 R&D 방식 안통한다...산학연과 원팀이 핵심

(<https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2023041816154155211>)

중앙일보 (2023.5.17.) 中추격할라, 美·日 양자컴퓨터도 동맹...구글·IBM 2000억 지원

(<https://www.joongang.co.kr/article/25163418#home>)

조선일보 (2023.6.6.) 한국 양자컴퓨팅 논문 25위, 양자통신은 18위... '도전적 연구 강화해야'

(<https://www.chosun.com/economy/science/2023/06/05/RGQQLL3SYFBRXKM7WS42QYSG3Q/>)

조선일보 (2023.6.15.) IBM 양자컴, 물리 시뮬레이션에서 슈퍼컴 넘었다

(<https://biz.chosun.com/science-chosun/technology/2023/06/15/V46FNDZFS5HTNHNCLJDNM4FHJQ/>)

IT데일리 (2023.6.19.) [글로벌] '실리콘 방식'으로 IBM에 맞서는 인텔 양자컴퓨터 칩

(<http://www.itdaily.kr/news/articleView.html?idxno=214674>)

IT동아 (2023.6.27.) IBM, 인텔, MS도 뛰어드는 '양자 컴퓨터', 왜 지금 주목받는가?

(<https://post.naver.com/viewer/postView.naver?volumeNo=36159191&memberNo=11778559&vType=VERTICAL>)

연합뉴스 (2023.7.8) MS·인텔·IBM 삼각경쟁...양자컴퓨터 개발 속도내는 빅테크들

(<https://www.yna.co.kr/view/AKR20230707114900017>)

아시아경제 (2023.10.12.) 中, 美 슈퍼컴보다 1경배 빠른 양자컴퓨터 개발

(<https://www.asiae.co.kr/article/2023101217252315043>)

더구루 (2023.10.25.) 양자컴퓨터 기업 아이온큐 '업계 최초' 바륨 기반 29개 알고리즘 큐비트 달성

(<https://www.theguru.co.kr/mobile/article.html?no=61728>)

조선일보 (2023.10.25.) 美 스타트업, 스핀 기반 양자컴퓨터로 1000큐비트 돌파

(<https://biz.chosun.com/science-chosun/technology/2023/10/25/E3KA2FSZ6JGIHNRMIIVYLPO2W7E/>)

지디넷 (2023.12.5.) IBM, "1천 큐비트급 양자컴퓨터 칩 공개...양자 중심 슈퍼컴 지향"

(<https://zdnet.co.kr/view/?no=20231205091326>)

저자 소개

정선화 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 기술경제연구실 책임연구원
e-mail: sh-jeong@etri.re.kr Tel. 042-860-6511

조병선 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 기술경제연구실 책임연구원
e-mail: tituscho@etri.re.kr Tel. 042-860-1136

이선재 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 기술경제연구실 박사후연구원
e-mail: lseonj@etri.re.kr Tel. 042-860-1017

신용희 ETRI ICT전략연구소 기술정책연구본부 기술경제연구실 실장
e-mail: syong@etri.re.kr Tel. 042-860-1147

기술패권 접근을 위한 글로벌 파트너 탐색 : 양자컴퓨팅 주요 큐피트 기술 중심으로

발행인 한 성 수

발행처 한국전자통신연구원 ICT전략연구소

발행일 2023년 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

