

양자컴퓨팅 연구개발과 혁신전략

김수영 연구원(거대공공사업센터)

I. 논의 배경

- 수요포럼은 다양한 과학기술 분야에 대한 현황분석 및 문제점 진단을 통해 대응 방안을 모색하고자 진행하며 이번 포럼에서는 **양자컴퓨팅 연구개발과 혁신전략**을 주제로 논의
- 양자컴퓨팅은 특정 연산에 대해 기존 컴퓨터보다 월등히 빠른 처리 성능을 보일 것으로 기대되어, 현 기술로 해결이 어려운 문제를 풀어낼 혁신적 기술로 주목받고 있음
 - 2019년 구글에서 양자 우위(quantum supremacy) 관련 논문을 발표하는 등 양자컴퓨터의 우월성이 증명되고 있으나, 여전히 초기 단계에 불과하여 경쟁력 있는 기술력 확보까지 다소 시간이 필요
- 세계 양자컴퓨팅 시장 규모는 2050년까지 연간 8,500억 달러*에 달할 것으로 전망되며 이에 미국, 중국 등 주요국은 양자 기술개발 지원 전략을 수립(BCG, 2022)
 - * 약 80%(6,800억\$)는 제약, 금융 분야, 나머지(1,700억\$)는 양자컴퓨팅 개발업계 차지 예상
 - 미국은 2009년 국가양자정보과학비전 수립 후 백악관 산하 국가양자이티셔티브 위원회(2022)까지 양자 개발 관련 정책을 꾸준히 제시
 - 중국은 '제14차 5개년 계획(2021-2025)'을 수립하여 양자정보 등을 미래 선도 산업 육성 분야로 제시
 - IBM, Google 등 글로벌 IT 기업 외에도 세계적으로 450개 이상의 양자컴퓨팅 스타트업에서 투자가 이뤄지고 있음(ADL, 2022)
- 우리나라 정부도 정보통신융합법을 시행하고 국정과제에 한국형 양자컴퓨팅 시스템 구축 목표를 반영하는 등 양자 기술에 대해 대응하고 있으나, 관련 기반은 미흡
 - 국가전략기술육성방안(2022)을 통해 12대 국가전략 기술 중 하나로 양자를 지정하여 국가 차원의 중장기적 전략 로드맵을 수립

제155회 수요포럼 개최 개요

(일시/장소) 2023년 3월 8일(수) 14:00~16:00 / 한국과학기술기획평가원 국제회의실

(토론 좌장) 류영수 KISTEP 재정투자분석본부장

(발 표 자) 김재완 고등과학원(KIAS) 부원장

(패 널) 김동호 포스코홀딩스 상무보, 배준우 한국과학기술원(KAIST) 교수,

이용호 한국표준과학연구원(KRIS) 초전도양자컴퓨팅시스템연구단 단장

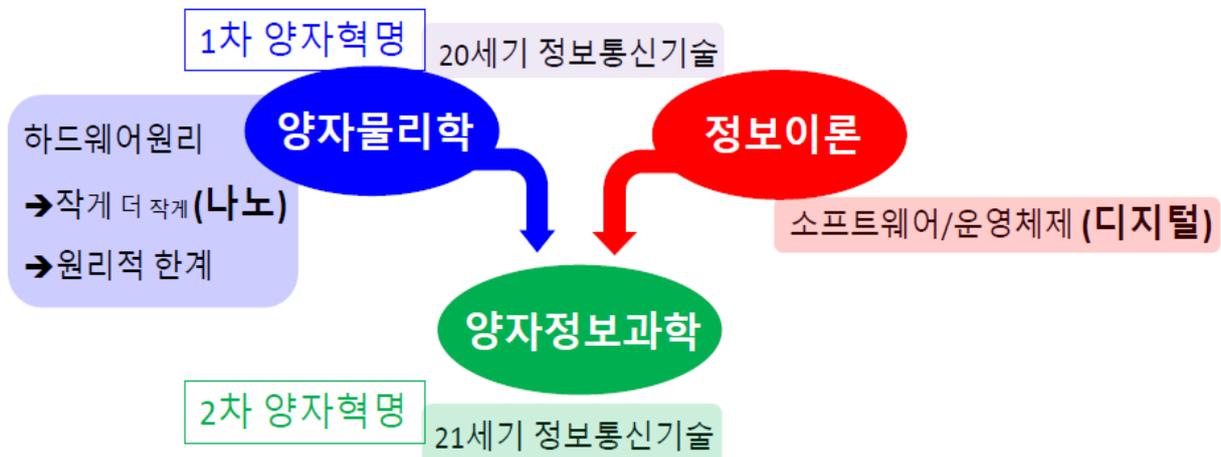
- 연구개발, 인력양성, 산업협력지구 지정 등 정부 차원의 지원 체계는 마련되었으나, 선진국과 기술격차 최소 5~10년으로 추정되며 양자정보통신 분야의 정부 투자 규모는 2023년 약 900억 원 수준

- 본 수요포럼을 통해 미래핵심 기술로 부상하고 있는 양자컴퓨팅 기술의 가능성 및 현주소를 확인하고 국내 기반 및 경쟁력 확보를 위한 주요 방안에 대해 논의

II. 현황 및 이슈

■ 양자물리학에 따른 정보통신기술의 변화

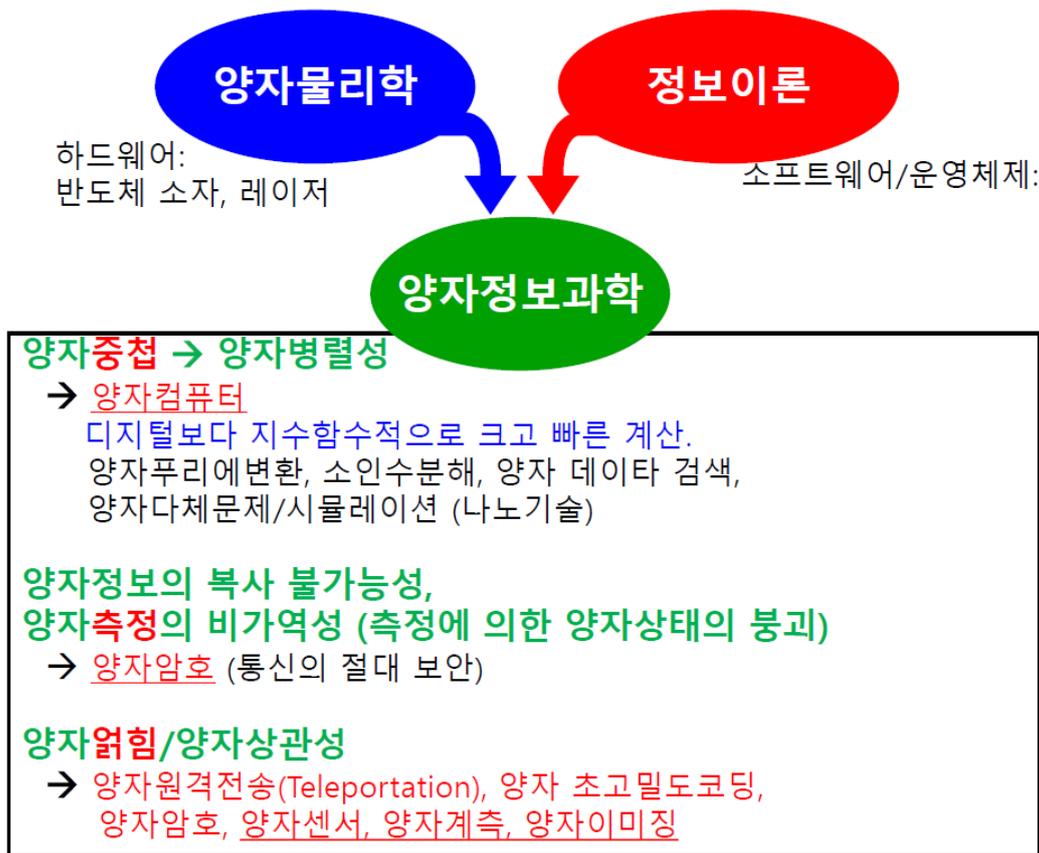
- (1차 양자 혁명) 과거에는 정보통신기술에서 스마트폰, 컴퓨터 등 디지털 기술의 하드웨어 원리로 활용이 제한



양자물리학 → 하드웨어, 소프트웨어, 운영체제에 적극적으로 이용
 → 양자컴퓨터 / 양자암호 / 양자센서, 양자계측, 양자이미징

[그림-1] 21세기 양자물리학의 역할 확대
 (출처 : 155회 수요포럼 발표자료)

- (2차 양자 혁명) 최근 양자 중첩과 얽힘을 이용하여 기존에는 불가능했던 새로운 영역을 개척
 - 반도체의 미세화에 따른 나노미터 이하의 공간에서는 고전 컴퓨터 정보의 최소 단위인 0과 1의 구분이 불분명해져 양자역학 원리의 적용이 불가피
 - 하드웨어, 소프트웨어, 운영체제까지 양자물리학 기술이 적용



[그림-2] 양자정보과학기술의 특성

(출처 : 155회 수요포럼 발표자료)

■ 양자 컴퓨터의 개념 및 특징

- 양자 컴퓨터는 큐비트(qubit)를 사용하며, 중첩과 얽힘을 활용하여 특정 연산을 매우 빠르게 계산
 - 큐비트는 0과 1이 동시에 중첩된 양자물리학의 특성을 이용하고 얽힘을 통해 입자 간 원거리 상호작용이 발생
 - 다른 요인의 영향을 통합하여 단일 값으로 표현하는 퍼지로지과 차별
- n큐비트의 양자 컴퓨터는 n개의 중첩상태를 가지고 2^n 개 CPU를 가진 고전 컴퓨터 수준으로 초고속 연산이 가능함
 - 양자비트 개수에 대해 지수함수적으로 늘어나는 계산 공간을 가짐
- 양자컴퓨터를 구현하는 방법은 매우 다양하며, 어떤 방법을 통해 최종적인 실용적인 양자컴퓨터를 개발할 수 있을지는 불확실
 - NMR(핵자기공명) 등 방식이 과거 양자컴퓨터 하드웨어 후보로 주목받았으나 확장성(Scalability)의 제약으로 인해 현재는 관련 연구가 거의 이루어지지 않음

- Liquid-state NMR
- NMR spin lattices
- Ion-trap (이온덫)
- Neutral-atom optical lattices
- Cavity QED + atoms
- Linear optics with single photons
- Nitrogen vacancies in diamond (다이아몬드 결함)
- Electrons on liquid He
- Josephson junctions (초전도)
 - "charge" qubits
 - "flux" qubits
 - Transmon qubits
- Spin spectroscopies, impurities in semiconductors
- Coupled quantum dots
 - Qubits: spin, charge, excitons
 - Exchange coupled, cavity coupled

[그림-3] 양자컴퓨터 하드웨어 후보

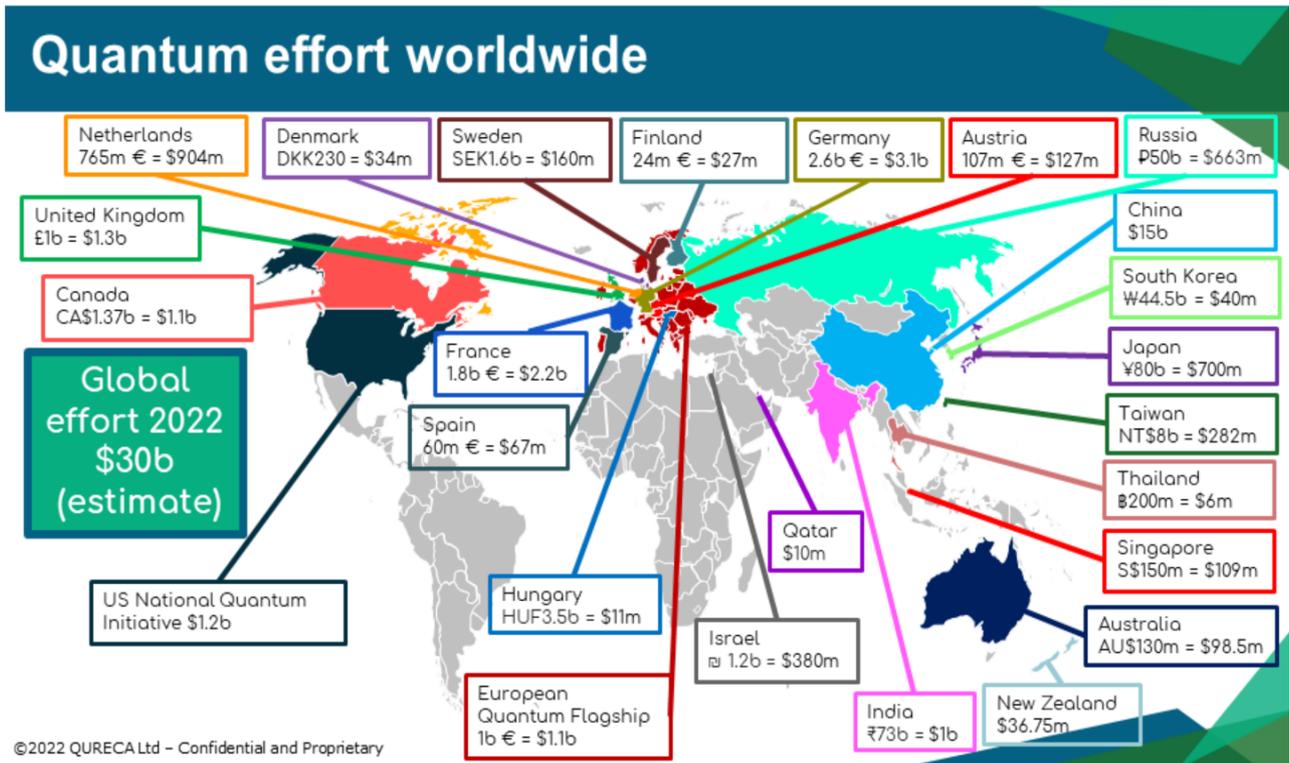
(출처 : 155회 수요포럼 발표자료)

- 양자컴퓨팅의 실용적 수준에 도달하기 위해서는 5~10년 이상의 시간이 소요될 것으로 예상
 - 양자컴퓨터 성능에 있어 숫자도 중요하지만, 양자 시스템 특성에 따른 오류보정 등 다양한 요소가 고려되어야 함
 - 양자 연산 과정에서 발생하는 오류에 대해서 완화하거나 정정하는 기술에 관한 연구가 추진 중

■ 글로벌 양자컴퓨팅 정책 현황

- 국가의 보유 기술이 국가 안보 및 동맹 관계에 영향을 미치는 기술 패권 경쟁에 대응하기 위해 미국, 중국, 유럽 등 선진국은 대규모 투자로 양자 기술 선점에 나섬
 - 여전히 기초연구 단계이기 때문에 정부 지원이 많은 부분을 차지
 - QDE-C(미국), Q-star(일본), QuIC(유럽) 등은 MOU를 체결하고 국제 양자 산업 협회 협의회(ICS)를 2023년 공식적으로 출범하여 기술 협력체제 공고화
- (미국) 「미국 혁신경쟁법(2021)」에 첨단기술 육성*, 국제협력을 통한 중국 견제 강화 등에 관한 사항을 담아, 과학기술에 대한 투자 확대 및 자국 중심의 산업경쟁력 향상 추진
 - * 양자컴퓨팅 및 정보시스템을 10대 첨단기술 분야로 지정
 - 국가 간 수출 통제를 양자 기술까지 확대하고 산학 협력을 통해 안보 관련 양자컴퓨터 기술개발 가속화
 - 조 바이든 행정부는 미국계 사모펀드 등을 통해 양자컴퓨터 등 군사 활용 가능성이 있는 기술 분야에 대한 중국 투자를 차단하는 등 중국 첨단산업 투자 규제
 - ※ 美 상무부는 중국 QC테크, 룡손 등 중국 기업 28곳을 수출제재 명단에 등재
 - 미국은 산학 주도로 개발을 주도하였으며 IBM, Bell Lab, Google 등이 양자컴퓨팅 개발에 활발히 참여
- (중국) 양자 정보를 2035년까지 완성할 7대 첨단 과학기술로 제시하고 대규모 정부 투자로 양자컴퓨팅 등 첨단기술의 내수 체계 구축 가속화

- 중점실험실, 중앙기업 등에 2,000명 규모의 기초과학 분야 해외 인재 유차활용을 목적으로 천인(千人)계획 (2008) 등 중장기적인 국가중점 프로젝트를 추진
- 중국은 정부 주도로 개발을 주도하고 있으며, 2018년에는 양자 통신 인공위성, 2020년에는 76큐비트 수준의 양자컴퓨터를 개발
- (EU) Quantum Flagship Program을 통해 4개의 양자컴퓨팅 프로젝트를 지원하며 10년간 10억 유로(약 1조 원)를 투자
 - 디지털 10년 정책 프로그램 2030(2023) 시행으로 양자컴퓨팅 등 국가 차원의 전략 로드맵 수립



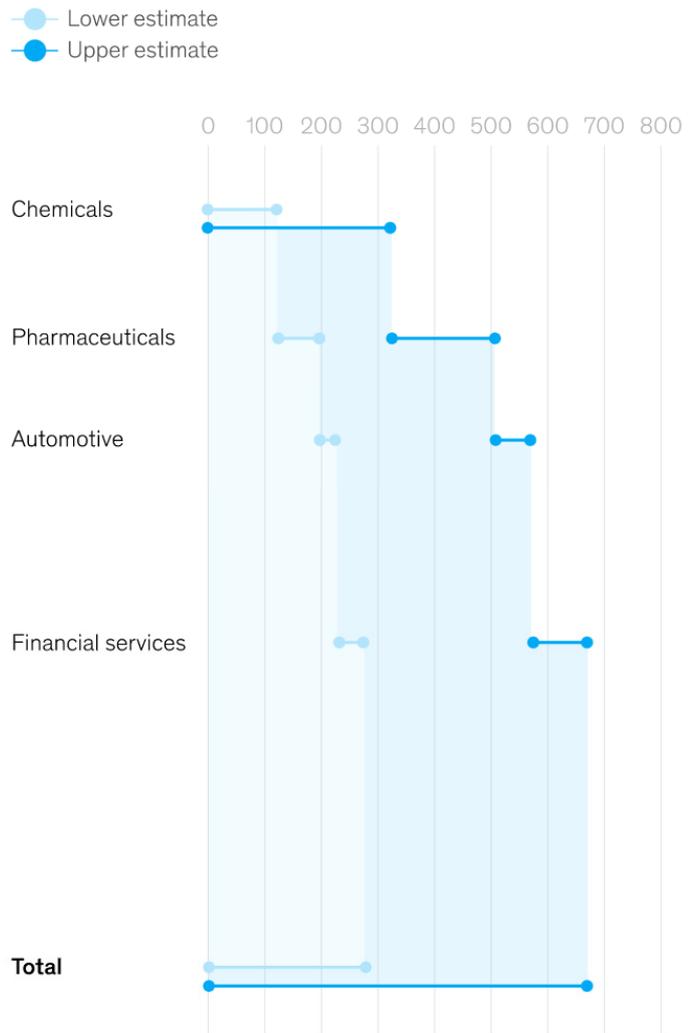
[그림-4] 글로벌 양자 개발 투자현황(2022)
(출처 : 155회 수요포럼 발표자료(원본:qureca))

■ 양자컴퓨팅의 산업 전망

- 의약, 화학, 자동차, 금융 분야에서 양자컴퓨팅의 산업 가치는 2035년 3,000억 달러에서 7,000억 달러 사이로 전망(Mckinsey, 2021)
- ※ 양자 애플리케이션은 재무, 물류, 항공우주 분야에서 연간 최대 2,200억 달러의 수익 창출 추정(BCG, 2021)

Industry, key segment for quantum computing	Economic value	
	~2025-30	~2030-35
Global energy and materials		
Oil and gas	●	●
Sustainable energy	●	●
Chemicals	●	●
Pharmaceuticals and medical products		
Pharmaceuticals	●	●
Advanced industries		
Automotive	●	●
Aerospace and defense	●	●
Advanced electronics	●	●
Semiconductors	●	●
Financial industry		
Financial services	●	●
Telecom, media, and technology		
Telecom	●	●
Media	●	●
Travel, transport, and logistics		
Logistics	●	●
Insurance	●	●

Value at stake with incremental impact of quantum computing by 2035, \$ billion



[그림-5] 2035년 양자컴퓨팅의 산업 가치 전망(2021)

(출처 : 155회 수요포럼 발표자료(원본:Mckinsey))

- 미국, 프랑스, 캐나다 등 기술 선도국은 full stack 기업 육성을 지원
※ IonQ(美), Rigetti(美), Pasqal(佛), D-Wave(加) 등
- 양자컴퓨팅 기술 선두권에 있는 다수의 대학*에서는 양자컴퓨팅 스타트업으로 spin-off가 진행되어 활발한 기업활동이 추진
* (캠브리지) Cambridge Quantum Computing 社 설립 후 Honeywell과 JV 설립
(하버드) QuEra 양자컴퓨팅 회사 설립
(듀크) IONQ 설립 후 IPO 진행
- 구글, IBM, Amazon, MS 등 글로벌 IT 기업은 IonQ과 같은 스타트업과 함께 투자하고 있으며, 2025년까지 사용이 가능한 100큐비트를 목표로 기술개발 추진
- 기술 자체의 완성도는 높지 않아도 적극적인 수용을 위한 노력이 진행되고 있으며 use case 확장 추진

	Applications	Value creation potential ¹ (\$B)	
		Low	High
Cryptography (\$40-\$80B)	Encryption/decryption	\$40	\$80
Optimization (\$110-\$210B)	Aerospace: Flight route optimization	\$20	\$50
	Finance: Portfolio optimization	\$20	\$50
	Finance: Risk management	\$10	\$20
	Logistics: Vehicle routing/network optimization	\$50	\$100
Machine learning (\$95-\$250B)	Automotive: Automated vehicle, AI algorithms	\$0	\$10
	Finance: Fraud and money-laundering prevention	\$20	\$30
	High tech: Search and ads optimization	\$50	\$100
	Other: Varied AI applications	\$80+	\$80+
Simulation (\$175-\$330B)	Aerospace: Computational fluid dynamics	\$10	\$20
	Aerospace: Materials development	\$10	\$20
	Automotive: Computational fluid dynamics	\$0	\$10
	Automotive: Materials and structural design	\$10	\$15
	Chemistry: Catalyst and enzyme design	\$20	\$50
	Energy: Solar conversion	\$10	\$30
	Finance: Market simulation (e.g. derivatives pricing)	\$20	\$35
	High tech: Battery design	\$20	\$40
	Manufacturing: Materials design	\$20	\$30
	Pharma: Drug discovery and development	\$40	\$80

[그림-6] 기술 성숙도별 양자컴퓨팅의 가치 창출 전망(2021)
(출처 : 155회 수요포럼 발표자료(원본:BCG))

III. 시사점

- 국내 양자컴퓨터에 관심이 증가하고 있으나, 연구개발 인프라가 미흡하고 투자가 부족하여 성장에 한계
 - 양자컴퓨팅에 대한 2023년 정부R&D 투자 규모는 약 244억 원으로 경제 규모, 시장 전망 등을 고려했을 때 매우 부족
 - ※ 후발 주자인 독일의 경우 1년에 3,000억 원 규모로 투자 진행
 - 삼성, LG, 현대차 등 양자컴퓨터에 대한 국내 기업*의 관심이 증대되고 있으나, 국내 연구 개발 환경이 미비하여 주로 국외에 투자
 - * (삼성전자) 미국 IonQ, Aliro Technology 등 해외 스타트업 투자
(LG전자) 네덜란드의 양자컴퓨팅 개발업체 큐엔코와 공동연구 추진(2021)
(현대차) 양자컴퓨팅의 미래 모빌리티 분야 응용연구, 해외 스타트업 투자
 - 국내 양자컴퓨터 하드웨어 기업이 부재하며 알고리즘 중심의 스타트업은 선도국 대비 소규모 수준
- 퀀텀 밸리 형성, 교육 프로그램 구성 등 연구 생태계를 조성하여 양자 분야에 지속해서 인력을 공급하고 기초연구 결과가 실용화될 수 있도록 연계

- 양자컴퓨팅, 양자정보통신 등 관련 기업, 연구기관, 공공기관, 대학을 모아 산학연 클러스터 구축 필요
※ '23.3.21. 기준 양자 분야 연구개발을 주도할 양자밸리 구축 검토 중(과기정통부)
- 양자분야 전공자와 비양자분야 전공자의 협업 및 동반성장이 필요하므로 양자컴퓨터 관점에서 협업할 수 있는 기반을 제공하는 교육 프로그램 마련
※ 글로벌 기업의 인력양성 프로그램의 경우 전공자는 큐비트 제작부터 오류 정정 등의 이론과 실험을, 비전공자(전자공학, 광학, 소프트웨어 등 전공자 대상)는 기초 지식 위주의 교육이 진행

■ 실용적이고 최종적인 양자컴퓨터 개발을 위해 연구소, 대학, 기업 간 역할 정립 및 분담이 필요

- 연구기관과 대학은 다음 세대를 위한 도전적인 연구를 수행하고 기업은 글로벌 선도 수준을 목표로 기술개발을 이행하는 이원화 전략이 필요
- 양자컴퓨팅 분야 스타트업 육성에 대한 투자와 정책적 지원 확대로 기술창업 활성화 및 창업기업의 성장 촉진

■ 국가 안보 면에서 양자컴퓨팅 기술은 핵심기술로 예상되며 이에 원천기술 확보를 위한 목적지향의 정책 수립과 연구 계획 설계가 중요

- 실용적 수준의 양자컴퓨터 개발까지 2세대 이상 시간이 필요할 것으로 예상되므로, 장기적인 관점에서 국내 기업 참여 및 연구자 유입을 유도할 수 있는 제도 마련 필요

■ 양자기술을 활용할 것으로 예상되는 산업 분야가 증가할 것으로 전망되므로 이를 고려한 지속적이고 장기적인 연구개발 수행 필요

- 나노 및 디지털 기술로 확보한 기반 기술을 고도화하고 양자컴퓨팅뿐만 아니라 양자센싱, 양자통신 등 분야별 실용화 중심의 기술개발 추진
- 양자역학에 대한 이해력을 높이고 융합응용을 위한 양자정보과학과 다양한 분야 간 지식 공유 등을 통한 연구자의 전문성 향상