



# 미래 산업의 게임 체인저, 양자정보과학기술(QIST) : 양자 2.0의 시대

이방래 · 임종연 · 원동규

미국, 유럽, 중국을 비롯한 주요 국가에서는 국가의 안보와 산업 경쟁력을 양자기술이 좌우한다는 공통된 인식 하에 대규모 정부투자가 이루어지고 있다. 하지만 우리나라는 개별 연구가 대학, 연구기관, 기업 등에서 산발적으로 실시되고 있어, 세계의 새로운 조류를 만드는 주도적 지위를 구축할 수 없는 상황이다. 따라서 국제경쟁력 강화와 사회·경제적 과제 해결, 새로운 학술편야의 탄생을 통해 미래의 성장·발전을 이끄는 양자기술의 연구개발을 전략적으로 추진하는 것이 필요하다.

본 고에서는 양자결맞음, 양자중첩, 양자얽힘 등의 양자 특유의 성질에 대해, 지금까지 어려웠던 제어와 활용이 가능하게 되는 것을 양자정보과학기술(QIST) 혹은 양자 2.0으로 정의하고, 양자기술 산업의 현황을 진단하고 시사점을 도출하고자 환경 및 시장 분석, 연구개발 투자 및 성과 분석을 진행하였다.

양자기술 산업은 현재 산업화 초기 단계이다. 관련 산업을 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱으로 구분하면, 현재의 시장규모는 양자컴퓨팅이 가장 크지만 성장률에서는 양자통신이 가장 높게 나타났다. 한편 양자기술은 높은 기술적 난이도로 인해 인력 교육 및 유입이 쉽지 않은 분야이다. 이에 지속적인 투자, 인력 양성 및 산학연 생태계 조성이 매우 중요한 분야임을 강조하였다. 양자기술 산업에 대한 생태계 조성을 바탕으로 국가경제 안보 보장, 산업경쟁력 강화를 추진할 것을 제안한다.

## CONTENTS

### 1. 들어가며

- 양자기술 개요
- 양자기술 부상의 배경
- 양자기술 육성의 필요성

### 2. 환경 및 시장 분석

- 국내 기술 동향
- 경쟁 환경
- 시장 역학 분석
- 시장 분석

### 3. 연구개발 투자 및 성과 분석

- 미국의 연구개발 투자전략
- 일본의 연구개발 투자전략
- 우리나라의 연구개발 투자전략
- 우리나라의 투자 및 성과 분석

### 4. 시사점 및 제언

# 1. 들어가며<sup>1)</sup>

## ▶ 양자기술 개요

- **(개념)** 양자기술 또는 양자정보과학기술(quantum information science & technology)은 “양자역학적 특성을 정보통신기술에 적용하기 위하여 양자상태를 생성(쓰고), 제어(전송, 저장, 처리), 측정(읽고) 및 분석하는 기술”로, 일반적으로 양자컴퓨팅, 양자통신, 양자센싱으로 구분됨(IITP, 2020)
  - 양자컴퓨팅: 양자역학적 현상을 이용하는 양자컴퓨터는 상호작용하는 양자비트(qubit, 큐비트)를 기반으로 하며 확률적이며 가역적 연산방법을 사용하는 컴퓨팅 기술
  - 양자통신: 송신자와 수신자 사이에 단일광자 또는 공유된 얽힘에서 고전 통신 기술의 도움으로 양자 정보(예를 들면, 광자 또는 원자의 상태)를 전달하는 기술
  - 양자센싱: 양자 원리를 활용함으로써 고전 시스템을 사용한 센싱·계측 기술의 분해능, 민감도, 측정영역의 한계를 극복하는 기술
- 양자 역학을 계산이나 통신에 응용하려는 움직임은 1980년대 Feynman에 의한 양자 시뮬레이션의 개념 제창까지 거슬러 올라감
  - 양자 역학과 정보 과학이 융합한 양자 정보 과학의 탄생을 거쳐, 이론대로 양자를 조작·제어할 수 있게 된 것은 1990년대 후반부터임
- 양자 결맞음(quantum coherence: 양자간 정보교환상태, 중첩의 근거), 양자중첩(quantum superposition), 양자 얽힘(quantum entanglement) 등의 양자 특유의 성질에 대해, 지금까지 어려웠던 제어와 활용이 가능하게 된 것을 「양자 2.0」으로 정의함
  - 최근에는 양자성을 유지하고 정보를 유지할 수 있는 양자 결맞음 지속시간이 연장되고 있음
  - 양자정보과학기술(양자 2.0)은 고도의 조작·제어기술의 진전에 의해 산업적 응용분야가 확장되면서 새로운 가치 창출의 가능성이 급속히 높아져가고 있음

## ▶ 양자기술 부상의 배경

- **(빠른 연산 속도)** 양자컴퓨터는 기존 최고의 디지털 슈퍼컴퓨터와 비교해도 비교 불가능할 정도로 연산속도가 빠름
  - 기존에 널리 사용되고 있는 RSA 암호체계는 2048비트를 사용하는 경우, 디지털컴퓨터를 이용하여 소인수 분해 방식으로 암호를 풀려면 100만년 이상 걸리는데, 범용 양자컴퓨터가 개발된다면 이를 몇 초 안에 풀 수 있다고 함
- **(반도체 칩 소형화의 한계)** 기존 반도체 칩의 성능 향상 속도가 한계에 도달했고, 이로 인해 디지털 컴퓨터의 연산 성능 향상 속도가 더디지고 있어서 연산 속도가 매우 빠른 양자컴퓨터가 주목받고 있음

1) 본 고는 이방래 외(2021)를 바탕으로 수정·보완함

- 반도체 집적회로의 성능은 18개월마다 2배로 증가한다는 ‘무어의 법칙’이 수십 년간 통용되어 왔으나 2000년대 이후로는 전혀 들어맞지 않을 정도로 반도체 칩의 성능 향상 속도가 느려짐

- **(저전력) 활용이 급증하고 있는 슈퍼컴퓨터는 대규모 전력을 사용하는 데에 반해 양자 컴퓨터는 전력 소비가 상대적으로 매우 적음(아주경제, 2021; 이준, 2019)**

- 슈퍼컴퓨터의 전력소비량을 줄이고자 딥러닝 기술을 적용하는 경우도 있으나 근본적으로 전력 소비가 적은 양자 컴퓨터가 주목받고 있음

- **(인공지능의 한계) 최근에 인공지능 기술이 급속히 발전하기는 했으나 대규모 데이터에 대한 고속 연산을 필요로 하며 이로 인해서 많은 컴퓨팅 자원(RAM 및 GPU 등)과 대규모 전력사용이 필요하여 비용부담이 되고 있는 상황에서 저전력으로 초고속 연산이 가능한 양자기술이 주목받게 됨**

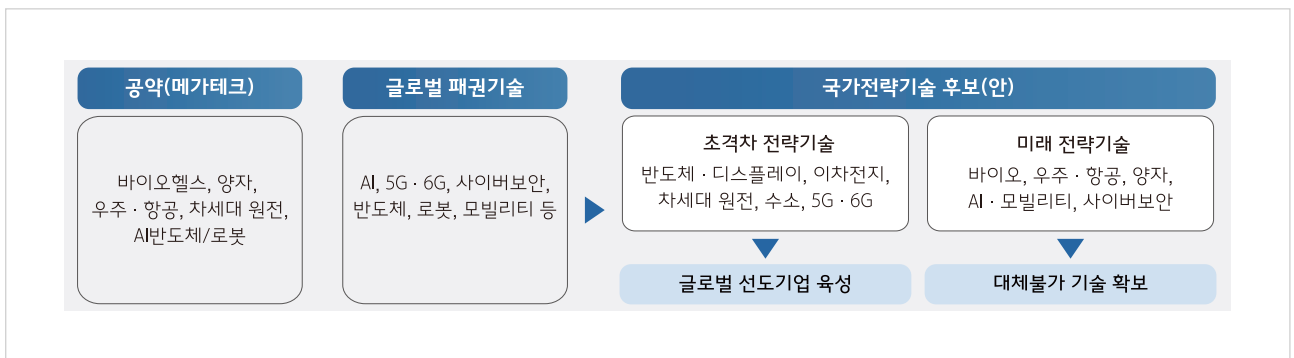
- 인공지능 기술이 제대로 적용되려면 많은 수의 정답 데이터(labeled data)가 필요한 경우가 대다수인데 이 것 역시 비용과 데이터 확보 측면의 한계로 작용함

### ▶ 양자기술 육성의 필요성

- **(국가필수전략기술) 전세계적인 기술패권 경쟁이 심화되는 상황에서 우리나라도 양자기술을 기술주권 확보가 필요한 국가필수전략기술로 인식하고 있음**

- 제20대 대통령직 인수위원회(이하 ‘인수위’) 과학기술교육분과는 차기 정부 핵심 국정과제로 ‘국가전략기술 초격차 R&D 및 디지털 국가전략’을 추진한다고 발표하였는데, 양자기술이 국가전략기술 후보에 포함됨

<그림 1> 국가전략기술(안)



출처) 제20대 대통령직 인수위원회(2022)

- **(난제 해결에 기여할 기술) 범용 양자컴퓨터가 개발된다면 빠른 연산 속도로 인해 다양한 난제 영역에서 해결사 역할을 하면서 산업 발전을 견인할 것으로 기대됨**

- (반도체) 집적회로의 형태 및 공정 프로세스 최적화, 반도체 미세구조 설계 등을 통해서 연산 성능의 획기적인 향상을 기대할 수 있음(과기정통부, 2021)

- (의료 및 신약 분야) DAN 구조 분석을 통한 신약개발, 정밀 MRI, 미세암 진단 등에 활용될 수 있음

- (안보 분야) 사이버 공격에 안전하게 시스템을 유지할 수 있음

- **(ICT 분야 국가 경쟁력 확보)** 우리나라의 ICT 기술 중에서 양자기술은 선도국에 비해 뒤쳐져 있어 육성이 필요한 분야임
  - 양자기술은 인공지능의 한계를 극복하고 데이터 및 ICT 기술을 기반으로 하는 4차 산업 혁명을 견인할 기술로 일컬어지고 있어, 양자기술에 대한 국가경쟁력 확보는 필수적임
  - 그러나 2020년도 기술수준평가 결과에 의하면 ICT·SW 분야의 17개 중점과학기술 중에서 ‘양자정보통신 기술’이 상대적으로 기술 수준이 가장 낮고 기술 격차는 가장 큰 것으로 조사됨

## 2. 환경 및 시장 분석

### ▶ 국내 기술 동향

- **(분야별 국내연구 현황)** 영역 전반에서 국내 R&D 수준은 선진국 대비 미흡하고 관심 있는 소수 연구 그룹 중심으로 수행 중<sup>2)</sup>
  - (양자광학/이론) 광자 기반 양자컴퓨팅 기술은 포스텍, 표준연에서 많이 수행하고. 알고리즘/SW분야는 한양대, 서울대, 고등과학원, ETRI 등에서 연구 진행 중
  - (원자/이온) 이온트랩 기반 기술은 서울대, SKT에서 연구 진행 중이고, 중성원자 기반 기술은 KAIST 등에서 연구 진행 중
  - (소자/기타) 고체 기반 양자컴퓨팅 기술의 세부 분야는 초전도, 반도체 양자점, 다이아몬드 결함, 위상 양자컴퓨터 등 다양함
- **(KISTI의 양자기술 연구 현황)** KISTI의 양자&차세대연구망팀은 국가과학기술연구망(KREONET)의 차세대 연구 및 서비스를 위한 사전 연구를 수행하고 있으며, R&D투자전략연구센터에서는 양자기술 R&D투자 배분과 국가전략기술기획에 적용하기 위한 분석연구를 수행 중
  - (양자암호통신망 구축 기술) 양자암호통신망 구축 기술을 연구개발하고 있는데, 세부적으로는 연구망 서비스화를 위한 양자암호키분배장비와 양자키관리 기술, 양자채널의 자원 효율적 구축을 위한 다중화 기술을 연구 중
  - (양자기술 R&D투자 및 전략분석) 국가R&D투자배분과 국가전략기술기획에 적용하기 위한 인력 및 투자분석 연구 중

### ▶ 경쟁 환경

- **(양자기술 산업 특성)** 양자기술 산업은 각국 정부의 경쟁적인 지원책, 글로벌 기업들의 경쟁이 극심하지만 절대 강자로 불릴만한 시장 참여자가 없는 산업화 초기 단계여서 우리나라가 추격할 기회가 있을 것으로 판단됨

2) 선도국과의 기술격차는 최소 5~10년 정도로 추정

- IBM의 초전도 양자컴퓨터가 범용 양자컴퓨터에 근접해 가고 있고 디웨이브도 수천개 큐비트를 활용한 초전도 양자컴퓨터를 만들었으나 초전도 상태를 유지하기 위해 많은 장치들을 사용해야 하는 단점이 존재하여 특정 플랫폼이나 특정 기업이 절대 강자라고 하기는 어려움
- 양자통신은 기존 RSA 암호체계를 대체하는 형태로 시장이 형성되고 있고, 우리나라의 SK텔레콤, KT, LG 유플러스가 두각을 드러내고 있는데, SK텔레콤과 KT는 양자키분배(QKD) 방식, LG유플러스는 양자내성암호(PQC) 기술 방식으로 사업화를 추진 중
- 양자센싱 분야는 기존 센서 시장이 존재하는 상황이어서 정밀도를 크게 향상시킨 고정밀 양자센서가 차별적인 시장을 구축해 나가는 형태인데, 국내의 경우 대학 및 연구소에서 연구개발을 진행하는 단계임

## ▶ 시장 역학 분석

- **(촉진요인)** 양자기술은 미래 산업 경쟁력의 핵심기술(game changer)로서 산업·경제 전반에 혁신을 가져올 것으로 기대되면서 시장 확대 가능성이 높아지고 있음
  - 특히, 양자컴퓨팅의 경우 기존 디지털컴퓨터보다 30조 배<sup>3)</sup> 이상 빠른 연산이 가능하여 산업 전반에 새로운 가능성과 기회를 창출할 것으로 예상됨
- **(저해요인)** 양자기술은 연구 범위의 한계, 인력 교육 훈련, 기술 지식이전, 소재 개발, 예산지원 분야에서 문제가 발생할 가능성이 있음
  - 양자기술은 물리학, 수학, 전기공학, 재료공학, 컴퓨터공학 등 다학제간 연구교류가 필요하고 기초과학에서 응용기술 및 엔지니어링 기술까지 풍부한 지식이 필요하여 전문인력 교육이 어려움
  - 또한 표준화 미비, 지식재산권 등록 및 관리의 어려움, 인력 수급 불일치 등으로 민간 기업으로의 기술이전이 미흡함
- **(기회요인)** 주요국 정부는 지속적·연속적 정책 지원을 통해 양자기술 원천기술 선점에 집중하고 있음
  - 우주항공·국방·금융 등 산업적 활용 가능 분야를 중심으로 사업화 촉진을 지원하고 이를 기반으로 양자산업 생태계가 조성될 수 있도록 유도하고 있음
  - 빅데이터 시대를 맞이하여 양자컴퓨팅 기술을 컴퓨터의 기계학습에 적용하려는 시도가 급증하고 있음
- **(위협요인)** 양자기술은 그 기술의 난이도가 매우 높으며, 다양한 분야의 융합 및 대규모 투자가 필요함
  - 따라서 단기적으로 논문, 특허 등 가시적 성과를 창출하는 것이 어렵기 때문에, 단기적 성과를 기대한다면 지속적인 연구 수행이 쉽지 않음
- **(공급자 협상력)** 양자기술은 기술적 난이도가 매우 높아서 진입장벽이 높고, 공급자의 협상력이 구매자의 협상력보다 높음
  - 공급자 중심의 경쟁 환경으로 인해 차별적 기술 우위는 시장의 지배적 위치를 차지할 것으로 판단됨

3) 2,048비트 RSA 공개키 암호를 푸는데 슈퍼컴퓨터는 100만년 이상, 양자컴퓨터는 1초 소요

## 시장 분석

- (분야별 상이한 시장규모 확대 양상)** 양자기술의 세계 시장규모는 연평균 25.8%의 성장세를 보이지만 세부 분야별로는 시장증가율에서 차이가 발생함
  - 세계 양자컴퓨팅 시장규모는 2021년 기준 4.7억 달러 규모로 형성되어 있고 연평균 성장률은 33.8%를 보이고 있음
  - 양자통신의 세계시장은 2021년 1.4억 달러이나 양자암호통신에 대한 수요 확대로 시장규모가 연평균 47.9%로 급격히 증가하는 추세임
  - 양자센싱은 기존 센서 시장이 있기는 하지만 정밀도가 요구되는 양자센서 시장이 차별적으로 존재하여 2021년 기준 세계 시장이 4.1억 달러 규모를 형성하고 있고, 시장규모 증가율은 연평균 3.8%로 상대적으로 낮음

<표 1> 양자기술 시장 전망

구분		시장규모 및 전망 (단위: [세계]백만 달러, [국내]억 원)								CAGR
		2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	
양자통신(A)	세계	80.2	121.7	142.9	158.8	323.6	481.6	581.0	1,238.1	47.9%
	국내	42	65	93	105	219	332	408	888	54.8%
양자센싱(B)	세계	394.6	399.6	410.3	426.3	447.7	474.4	492.2	510.7	3.8%
	국내	655	728	811	915	1,025	1,154	1,306	1,485	12.4%
양자컴퓨팅(C)	세계	229.4	328.4	471.6	589.1	767.1	1,029.7	1,341.8	1,764.7	33.8%
	국내	10.2	17.4	34.9	46.8	66.5	99.7	140.4	222.3	55.3%
합계	세계	704.1	849.8	1,024.8	1,174.2	1,538.3	1,985.7	2,414.9	3,513.5	25.8%
	국내	707	810	939	1,067	1,311	1,586	1,855	2,595	20.4%

출처) [A, B, C: 국내] IITP(2020), [A: 세계] IEC(2020), [B: 세계] TechNavio(2020), [C: 세계] MarketsandMarkets(2021)

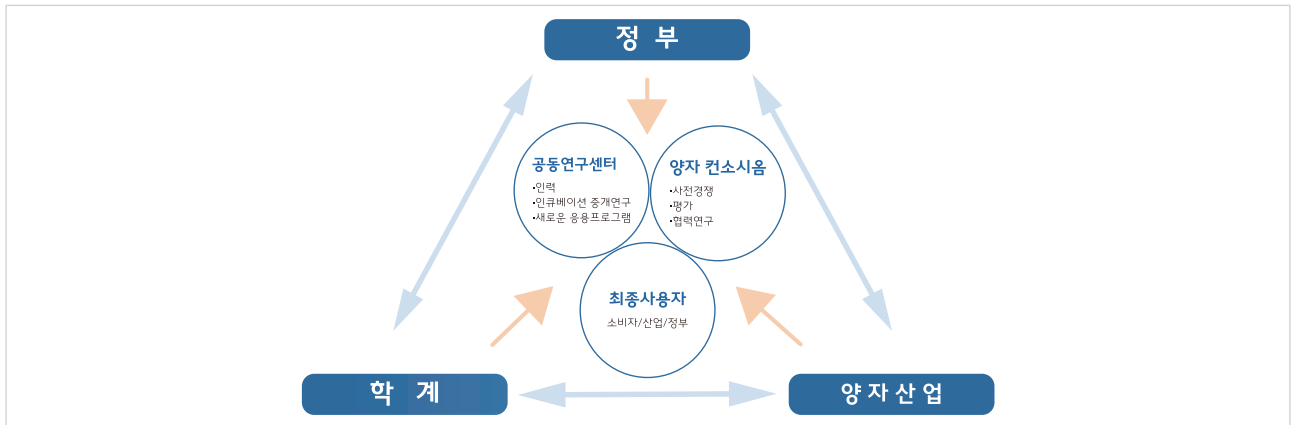
## 3. 연구개발 투자 및 성과 분석

### 미국의 연구개발 투자전략

- 1990년대부터 양자컴퓨팅 이론 및 기초연구를 선도
- 2008년 ‘국가양자정보과학연방비전’을 수립하고 매년 2억 달러의 연방정부 투자를 포함하여 10억 달러 안팎의 투자를 지속
- DoD, NIST, NSF, DARPA, IARPA 등 연방정부기관의 다양한 R&D 프로그램을 통해 각 대학과 산업체가 양자컴퓨팅 전 분야에 대한 기초 및 응용연구 진행 중
- IBM, Google, Microsoft, Lockheed Martin 등 산업계의 R&D 참여가 본격화되면서 이들 기업의 풍부한 자금이 각 대학으로 유입 중
- 2018년 12월 양자이니셔티브법 통과로 5년간 약 12억 달러 예산 투입 계획

- 최근 미국 정부 R&D투자 영역은 7개의 광범위한 범주를 사용하여 국가 포트폴리오 구성(NSTC, 2018)
  - ※ 4개는 기초 과학(S1 - S4)이고 3개는 기술 개발(T1 - T3)인데, 양자센싱(S1), 양자컴퓨팅(S2), 양자 네트워킹(S3), 양자 장치 및 이론 발전으로 가능해진 과학적 발전분야(S4), 지원 기술(T1), 미래 응용 프로그램(T2), 위험 완화(T3)로 구성됨
- 양자기술 개발 및 사용에 영향을 미치는 요인 해결, 장점 강화 및 단점 보완을 위한 정책적 접근 방식 채용

<그림 2> 미국의 양자산업 생태계와 전략



<표 2> 정책적 접근 방식

정책읍선	잠재적 구현 접근 방식
협업	· 과학 및 산업 분야 · 국가
인력	· 기존 프로그램 활용 및 새로운 인력 창출 · 직업 훈련 촉진 · 국제적 인력의 적절한 고용 촉진(국가 안보에 위험을 초래하지 않는 것으로 간주될 경우)
투자	· 특정 결과를 위한 투자 · 양자기술 연구 센터에 대한 지속적인 투자 · 대중의 솔루션에 박차를 가하는 웅대한 도전
공급망	· 글로벌 공급망의 격차를 식별하기 위한 노력 강화 · 위험 공급망이 있는 품목에 대한 제조 능력 확장

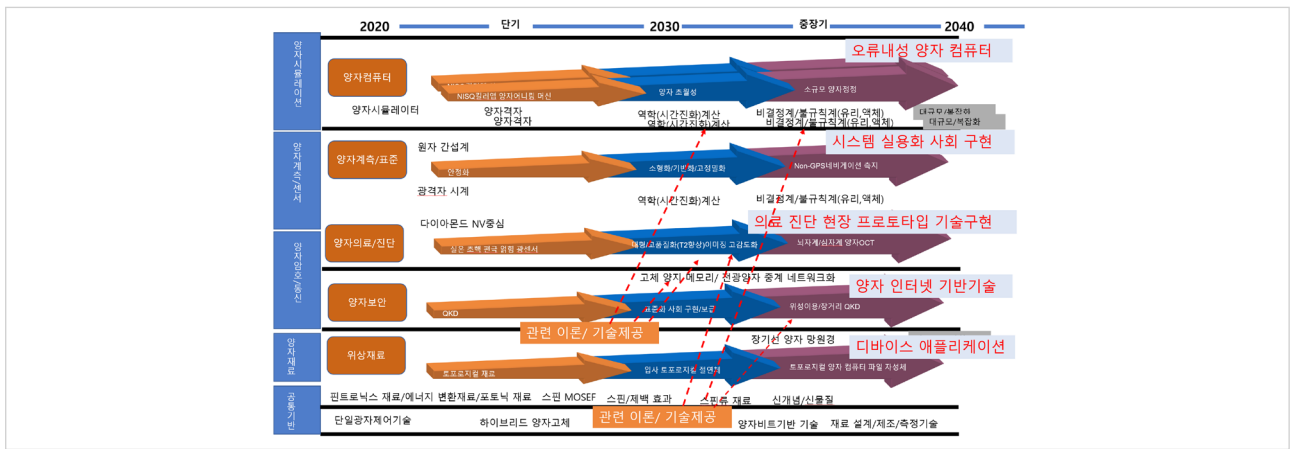
출처) NSTC(2018)

### 일본의 연구개발 투자전략

- 1990년대 말 NEC가 최초의 초전도 큐비트를 개발, 발표하는 등 일본은 양자정보과학의 강국임
- 2006년부터 정부의 다양한 연구개발 프로그램을 통해 다방면의 기반기술 개발을 지원해 왔음
- 2016년 정부주도의 본격적인 양자컴퓨팅 기술개발을 위해 <제5기 과학기술기본계획>에 양자과학 연구계획을 포함
- 2016년 4월, 양자과학기술을 총괄할 연구법인 <양자과학기술연구개발기구(QST)> 설립
- 광·양자 비약 플래그십 프로그램(QLEAP)에서 2018년부터 10년간 약 220억엔 투자 계획

- 사회·경제적 과제의 해결을 위해, 「양자 컴퓨터」, 「양자 계측·표준」, 「양자 의료·진단」, 「양자 보안」, 「토폴로지컬 재료」의 5개를 전략적 추진 과제로서 연구 개발을 제안
  - ※ 분야·영역융합의 촉진, 오픈이노베이션의 추진, 기업축진과 투자환경의 정비라는 세 가지 대처가 중요
  - ※ 일본의 강점과 약점을 감안한 후 우수성 확보를 의식하면서 국제연계를 도모함과 동시에 표준화, 지적재산관리에 의한 국가안보보장 확보와 산업경쟁력 강화가 필요
  - ※ 연구 개발을 장기적으로 지원할 수 있는 학술 분야·커뮤니티와 연구자 네트워크를 형성하기 위해 분야·영역의 연계, 다양화, 국내외에서 인재의 육성·두뇌 순환을 지속적으로 할 수 있도록 정책적 지원을 요구
  - ※ 사회·경제적 과제 해결을 위한 전략적 연구개발과의 상호작용을 높이고 그에 따른 시너지 효과를 발휘시키는 것이 중요

<그림 3> 일본의 양자2.0 연구개발과제 추진개념도(안)



출처) CRDS(2019)

## ▶▶▶ 우리나라의 연구개발 투자전략

- 우리나라도 2014년 12월 ‘양자정보통신 중장기 추진전략’, 2019년 1월 ‘양자컴퓨팅 기술개발사업 추진계획’, 2021년 4월 ‘양자기술 연구개발 투자전략’을 수립함으로써 선도국에 비해 늦기는 했지만 양자기술의 선도국 추격 및 주도권 확보 경쟁에 합류함
  - 우리 정부는 2020년대 양자기술 4대 강국 진입의 목표 하에 ① 도전적 원천 연구 강화, ② 전문인력 확보 및 국내외 협력기반 구축, ③ 특화 연구 인프라 확충 및 연계·고도화, ④ 양자기술의 활용 및 산업 혁신 촉진 등 4대 중점전략을 추진해 나갈 계획임(과기정통부, 2021)
  - 이러한 전략의 일환으로 50 큐비트급 한국형 양자컴퓨팅 시스템(KQIP)을 조기 구축하고, 단계적으로 고도화할 계획임
  - 또한 도전적 원천 연구를 강화하고 관련 출연(연)을 중심으로 연구·교육 거점을 구축하여 연구역량을 결집하는 한편, 양자 핵심연구자를 현재 약 150명 수준에서 2030년 1,000명까지 확대하기 위해 박사급 전문과정을 개설·운영하고, 선도국에 젊은 연구자를 파견하여 프로젝트·교육 등에 참여하고, 해외 석학도 초빙할 계획임
  - 특히, 국내 독자 양자컴퓨팅 시스템을 조기 구축하고, 현재 구축이 진행 중인 양자팍을 완공하여 산·학·연 연구자들을 지원하는 한편, 최근 글로벌 기술 블록화 양상에 대응하기 위한 국제협력도 강화해 나갈 계획임



## ☞ 우리나라의 투자 및 성과 분석

- **(기술분류체계)** 양자기술의 기존 투자현황 및 성과를 분석하고 미래의 투자 방향 설정을 위해 과학기술 혁신본부와 KISTI는 전문가 집단과 공동으로 기술분류체계를 도출함(2022년 1월)

<표 3> 양자기술의 기술분류체계

<양자 컴퓨팅>		<양자 통신>	
코드	기술군	코드	기술군
T01	큐비트구현 기반기술	T14	유선 양자암호
T02	큐비트물리적 구현기술	T15	무선(자유 공간) 양자암호
T03	큐비트양자얽힘게이트구현 기술	T16	양자전송
T04	다중 큐비트상태측정하드웨어기술	T17	QKD 네트워크
T05	다중 큐비트게이트신호생성 하드웨어 및 제어 기술	T18	양자 네트워크
T06	고속 하드웨어 제어 프로세서 및 펌웨어 기술	T19	위성 양자 통신
T07	양자 컴퓨터 프론트엔드 및 백엔드 소프트웨어 스택	T20	양자통신이론
T08	양자 정보 및 양자컴퓨팅 이론	T21	양자통신용 소재/소자기술
T09	양자 오류 보정 및 제어 이론	<양자 센싱>	
T10	양자 컴퓨터 알고리즘	T22	양자 관성센싱
T11	시스템 통합화 및 확장가능한 큐비트아키텍처	T23	양자 시간·주파수 측정
T12	확장가능한 이종양자 인터페이스	T24	양자 자기장 센싱
T13	양자 시뮬레이터	T25	양자 전기장 센싱
		T26	양자광 기반 센싱
		T27	양자 센싱 기반기술

- **(정부투자)** 정부R&D투자는 지속적으로 증가하여 2022년 기준 1,314억 원으로 추정되지만 전문인력의 부족으로 과감한 투자를 하기에는 한계가 있음

<표 4> 양자기술의 연도별 정부R&D투자 현황(억 원)

년도	2017	2018	2019	2020	2021	2022	합계
투자예산	265	369	535	813	949	1,314	4,245

주) 과학기술혁신본부가 제공한 주요사업 예산과 KISTI가 선별한 국가연구개발과제 예산을 합산하여 집계함(2022년 과제 예산은 추정값)

<표 5> 양자기술의 분야별 정부R&D투자 현황(2017-2022년, 억 원)

구분	양자컴퓨팅	양자통신	양자센싱	합계
투자예산	1,718	1,609	918	4,245

주) 2017- 2021년 과제들을 기술군별로 분류하여 집계함(2022년 과제 예산은 추정값)

- 양자컴퓨팅 과제의 키워드를 살펴보면 양자컴퓨터, 양자정보, 포스트 양자 암호, 양자 얽힘 등의 기본적인 단어가 고빈도 단어로 나타났으며 전체적으로 양자컴퓨터 제작 기술과 이론 및 알고리즘을 포괄하는 분야로 나타남
  - 양자통신 과제들은 사물인터넷, 빅데이터, 그래핀, 인공지능, 광집적회로, 보안 등의 키워드가 고빈도 키워드로 나타남에 따라 이들 분야가 양자통신이 응용되는 기술 분야인 것으로 추정됨
  - 양자센싱 과제들은 바이오, 화학, 사물인터넷, 적외선, 플랫폼, 위성, 알고리즘, 실용화 등의 키워드들이 서로 다른 산업분야에서 사용되는 키워드라는 것을 알 수 있고, 이를 통해 양자센싱은 이미 다양한 산업분야에서 활용되거나 응용연구가 진행되고 있다고 판단됨
- **(글로벌 논문) 2016-2021년 동안 SCOPUS 논문은 총 34,349건으로, 연평균 8.1%씩 증가함**
    - 국가별 건수는 중국 7,030건, 미국 5,230건이고 우리나라는 705건으로 12위로 나타남
    - 평균 피인용수는 영국 26.7, 미국 24.5이고, 우리나라와 중국은 10.6, 11.2로 나타남
    - 미국 대비 우리나라의 논문수는 13% 수준(한국 705건, 미국 5,230건)이고, 평균 피인용수는 43% 수준(한국 10.6, 미국 24.5)으로 나타남
    - 기관별로는 중국과학기술대학과 MIT가 논문수가 많고, 국내기관은 KIST, 고려대, 서울대, KAIST, ETRI, UST, 고등과학원, 표준연, 포스텍, 부산대가 두드러짐
    - 논문수의 연평균증가율은 양자컴퓨팅 5.8%, 양자통신 11.7%, 양자센싱 8.7%로 나타남
    - 분야별 논문수를 미국과 비교하면 양자컴퓨팅은 13%(한국 411건, 미국 3,264건), 양자통신 17%(한국 270건, 미국 1,613건), 양자센싱 10%(한국 48건, 미국 498건)로 나타남
  - **(미국 특허) 2014-2021년 동안 미국 공개특허는 총 823건으로, 연평균 28.3%씩 증가함**
    - 국가별 건수는 미국 478건, 중국 76건, 일본 75건, 한국 45건, 영국 14건, 독일 7건임
    - 평균 피인용수는 미국 1.9, 일본 0.9이고 한국과 중국은 0.4로 나타남
    - 미국 대비 우리나라의 미국 특허수는 9% 수준(한국 45건, 미국 478건)이고, 평균 피인용수는 21% 수준(한국 0.4, 미국 1.9)으로 나타남
    - 세계적으로는 MIT, 도시바, 마이크로소프트가 많고, 국내의 경우 ETRI, KIST, SK텔레콤, 삼성전자, KAIST가 두드러짐
    - 특허수의 연평균증가율은 양자컴퓨팅 64.0%, 양자통신 17.6%, 양자센싱 22.4%로 나타남
    - 우리나라의 경우 양자통신 분야가 양자컴퓨팅이나 양자센싱보다 상대적으로 성과가 많은 것으로 확인됨

&lt;표 6&gt; 논문 및 특허 성과 분석

코드	SCOPUS 논문					미국 공개특허				
	전체 건수	미국		한국		전체 건수	미국		한국	
		건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수		건수	평균 피인용수	건수	평균 피인용수
T01	4,456	948	17.6	174	6.7	100	27	0	1	0
T02	231	91	24.4	12	7.9	21	14	1.6	1	0
T03	1,086	211	24.4	31	8.7	20	17	1.6	1	1
T04	542	149	45.6	11	6.8	16	12	0.4	0	0
T05	1,321	401	34.2	19	9.3	17	12	4.2	0	0
T06	1,196	380	28	30	10.6	15	10	0.7	0	0
T07	194	73	18.8	0	0	8	6	1.2	0	0
T08	693	143	25.8	39	6.5	6	2	12	0	0
T09	806	314	50.2	22	7.2	44	41	3.4	1	0
T10	270	71	36.1	7	5.6	16	15	0.3	0	0
T11	562	235	39	14	22.2	26	26	6.2	0	0
T12	711	175	32.9	21	30	10	10	7.3	0	0
T13	2,260	566	32.8	56	30.9	28	23	0.8	1	0
T14	4,971	617	16.9	122	6.1	197	82	1.7	23	0.3
T15	999	203	10	46	11.5	69	53	1.5	2	3.5
T16	1,621	287	15.7	43	6.7	95	54	1.1	7	0.3
T17	137	9	4.2	2	4	0	0	0	0	0
T18	1,592	299	25.7	23	28	46	42	1.5	0	0
T19	476	97	12	24	9.2	9	4	1.5	0	0
T20	1,679	323	14.6	53	4.4	78	36	1.2	7	0.3
T21	349	87	39	19	9.3	6	4	1.8	0	0
T22	200	54	14.1	4	24.5	2	0	0	0	0
T23	699	141	22	13	27.5	44	34	0.7	2	0
T24	300	71	23.6	7	5.7	10	7	13.7	0	0
T25	89	30	17.2	0	0	5	3	8	0	0
T26	171	62	25.1	3	8.7	1	0	0	0	0
T27	785	187	30.5	23	23.8	1	1	0	0	0

주) SCOPUS 논문은 2016-2021년, 미국 공개특허는 2014-2021년을 대상으로 분석

- **(연구인력)** 논문 피인용수 기준 글로벌 상위 50% 이내인 우리나라의 핵심 연구자 수는 분야간 중복을 허용하여 컴퓨팅 93명, 통신 142명, 센싱 34명으로 나타남(2023년 과학기술인력정책에 반영 예정)
  - 국내의 핵심 연구자 수를 미국과 비교시 컴퓨팅 4.3%수준, 통신 10.4%수준, 센싱 4.2%수준이고 통신 분야의 핵심 연구자 수가 상대적으로 많은 것으로 나타남

<표 7> 양자컴퓨팅 분야 주요국의 피인용수 등급별 인력 수

구분	상위5%이내	상위5-15%	상위15-30%	상위30-50%	50%이상	합계
한국	9	7	20	57	171	264
미국	340	463	586	740	1,397	3,526
EU	185	456	733	767	1,579	3,720
중국	106	156	324	647	2,049	3,282
일본	25	69	95	118	315	622
영국	55	124	157	193	263	792

주) 2016-2021년 SCOPUS 논문을 대상으로 분석

<표 8> 양자통신 분야 주요국의 피인용수 등급별 인력 수

구분	상위5%이내	상위5-15%	상위15-30%	상위30-50%	50%이상	합계
한국	5	14	42	81	249	391
미국	221	306	336	498	1,156	2,517
EU	238	593	728	718	1,593	3,870
중국	218	326	720	1,270	2,977	5,511
일본	25	53	107	139	291	615
영국	62	115	199	183	358	917

주) 2016-2021년 SCOPUS 논문을 대상으로 분석

<표 9> 양자센싱 분야 주요국의 피인용수 등급별 인력 수

구분	상위5%이내	상위5-15%	상위15-30%	상위30-50%	50%이상	합계
한국	0	3	17	14	73	107
미국	30	197	363	226	472	1,288
EU	18	598	269	375	821	2,081
중국	2	36	122	347	1,282	1,789
일본	0	31	57	79	165	332
영국	3	49	74	74	143	343

주) 2016-2021년 SCOPUS 논문을 대상으로 분석

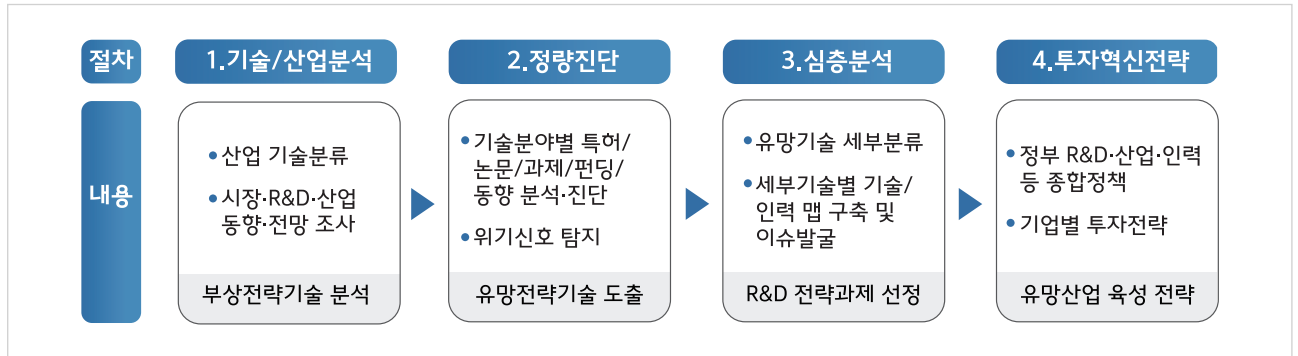
## 4. 시사점 및 제언

- (양자기술의 문해력(literacy))** 양자기술의 대부분은 아직 실용화 수준에 도달하지 않았지만, 가까운 장래에 보급이 시작되었을 때 그것을 다루기 위한 ‘양자기술의 문해력(literacy)’이 중요함
  - 양자기술에 의한 디바이스나 시스템은 양자 역학의 원리에 따라 동작하기 때문에, 양자기술 문해력의 획득에는 우선 양자 역학 그 자체의 이해가 필요함
  - 연구개발 영역에서는 양자 역학을 기술로 다루기 위한 양자정보과학이 중심이 되지만, 융합·응용 영역에서는 해당 분야의 지식도 요구됨
- (꾸준한 투자)** 양자기술은 복합적인 기술이 요구되어 단기간에 성과를 낼 수 있는 분야가 아니므로 지속적이고 장기적인 투자가 계속되어야 함

- 양자기술에서 우리나라의 논문, 특허 성과 및 인력자원이 선도국에 비해 미약하지만 향후에 우주항공, 국방, 의료, 금융, 자동차 분야 등에서 수요가 크게 늘어날 것으로 전망되고 국가전략기술로 인식되므로 장기적인 투자가 필요함
- **(양자컴퓨팅 투자)** IBM, 구글 등 글로벌 기업들이 개발하는 양자컴퓨터는 초전도, 이온트랩, 중성원자, 양자점 반도체 등의 서로 다른 플랫폼을 기반으로 제작되고 있어서 플랫폼 간 경쟁구도를 이루고 있음
  - 비록 현재는 초전도와 이온트랩 방식이 앞서나가고 있지만 다른 플랫폼 방식을 포기할 정도로 절대적인 우위에 있는 것으로 보이지는 않음
  - 플랫폼별로 활용하는 기술이 달라서 기술적 진보의 속도가 느려질 수는 있지만 절대 우위의 플랫폼이 결정될 때까지는 장기적인 투자가 뒷받침되어야 함
  - 당분간은 기초연구 쪽으로 다양한 플랫폼을 지원하되 이론과 실험 측면에서 절대 우위의 플랫폼이 잠정적으로 판단되는 시기가 되면 특정 플랫폼 방식에 대규모의 전략적 투자를 하여 선도국을 추격할 수 있을 것으로 판단됨
  - 정부연구개발 과제 분석에서도 광자, 초전도, 양자점 반도체 순으로 정부투자가 많이 이루어졌으나 절대 우위 플랫폼이 잠정적으로 결정되는 시점에는 그 비중이 달라져야 할 것으로 보임
  - 한편 양자컴퓨터는 하드웨어 제작뿐만 아니라 양자컴퓨터를 실제로 사용자 입장에서 활용할 수 있는 SW 및 알고리즘의 개발도 동시에 이루어져야 하는데 이러한 분야도 장기적인 투자가 필요함
- **(양자통신 투자)** 양자통신은 미래에 범용 양자컴퓨터가 개발되면 기존의 보안수단인 RSA 암호체계가 무력화 된다는 인식하에 통신 및 보안 분야에서 선도적으로 연구 개발된 분야임
  - 일반적으로 통신 보안 분야에서 새로운 암호체계가 모든 산업에 확산되는 데에는 10년 이상의 기간이 소요된다고 함
  - 따라서 범용 양자컴퓨터가 개발되는 시점보다 10여 년 전에 양자통신에 의한 암호체계가 개발되어야 하고 그 이후 모든 산업에 확산되는 데에 10여 년이 걸린다고 산정해야 함
  - 10년 또는 20년 후에는 범용 양자컴퓨터가 개발될 것으로 예측되는 현 시점에서 양자통신에서 초기 버전의 보안체계가 개발되어 산업에 확산되고 있음
  - 그러나 범용 양자컴퓨터 및 알고리즘 개발에 글로벌 기업들이 대규모 투자를 추진하고 있으므로 범용 양자컴퓨터를 이용한 양자암호 해독 시간이 예상하지 못할 정도로 단축될 가능성도 배제하기 어려움
  - 따라서 양자통신 기술에 대한 지속적이고 장기적인 투자가 이루어져야 함
- **(양자센싱 투자)** 양자센서는 관성, 중력, 자기장 등의 물리량을 측정하는 기존의 전통적인 센서와 경쟁하는 구도를 보이면서 기존 센서들이 측정하기 힘든 영역에서 고정밀 센싱을 양자센서가 수행하는 것으로 인식됨
  - 그러나 기존의 전통적인 센서들이 가격적인 측면에서 상대적으로 매우 저렴하므로 시장에서는 소비자들의 정밀도에 대한 수요에 따라 양자센서와 기존의 센서들이 선택되는 양상임
  - 정밀도가 중요하지 않은 분야에서는 저렴한 가격의 기존 센서들이 선택될 것이고, 정밀도가 매우 중요한 분야에서는 양자센서들이 선택될 것임

- 그러나 양자기술이 이용되는 산업이 점차 증가함에 따라 양자센서의 활용은 지속적으로 증가할 것으로 전망되어 지속적이고 장기적인 투자가 요구됨
- **(양자산업 생태계 조성)** 대학원 및 산업체 인력에 대한 다양한 인력양성 프로그램 개발이 선행되어야 하고 산학연간 협업 생태계 조성이 필요함
  - 현재 우리나라의 양자기술 전문가는 150-200여명 정도로 추산되고 있는데 이 정도의 인력으로는 전세계적인 양자기술 경쟁에서 선도국을 추격하기에는 많이 부족한 상황임
  - 이러한 한계 상황을 타개하려면 인력 양성 및 산업 생태계 조성에 힘을 기울여야 함
  - 다행히 2021년에는 ‘미래양자융합토론회(포럼)’가 개최되어 산업 생태계 조성을 위한 시발점이 마련되었음
  - 다만 이 포럼은 양자기술 분야의 학계 및 연구계의 연구 성과를 산업적 성과로 연계함으로써 산학연 협력의 장(場)의 역할을 함
  - 연구 성과의 산업계 활용은 생태계 조성에서 뒷부분에 해당하고 이에 앞서서 양자기술에 대한 인력개발 프로그램이 선행되어야 할 것으로 보임
  - 양자기술은 물리학, 수학, 컴퓨터공학, 전기공학, 재료공학 등 다양한 학문과 엔지니어링 기술이 융합된 기술이므로 다학제간 융합이 필수적임
  - 글로벌 기업들의 양자 인력 양성 프로그램을 살펴보면 양자 전공자와 비전공자로 나누어서 인력 양성 프로그램이 진행됨
  - 양자 전공자의 경우 주로 물리학 관련 분야 대학원 과정에서 배우는 큐비트 제작부터 오류 정정 등에 이르기까지 이론과 실험을 주로 다룸
  - 양자기술 비전공자의 경우 전자공학, 소프트웨어, 기계공학, 광학, 재료공학 등의 전공자에게 양자기술에 대한 기초적인 지식 교육 위주로 진행됨
  - 한편 대학(원) 전문 인력 양성이 활성화 되기 위해서는 졸업 후 취업할 수 있는 인력 수요처 창출이 중요한데, 반도체 산업의 인재 확보를 위한 기업과 대학간 계약학과 추진도 참고할만한 사례로 판단됨
- **(양자기술 발굴체제 및 플랫폼 구축)** 양자기술 빅데이터를 분석하여 유망기술 및 R&D 과제 도출 등을 통해 산업 경쟁력 확보 방안을 마련해야 함
  - 도출된 전략을 정부 R&D·산업 정책 등에 반영하고, 분석 결과를 기업의 투자전략 수립에 활용할 수 있어야 함

&lt;그림 4&gt; 국가 핵심전략기술 발굴 분석 프로세스



출처) 관계부처 합동(2019)을 수정·보완함

## 참고문헌

- 과학기술정보통신부(2021), 「양자기술 연구개발 투자전략」, 2021.04.29.
- 관계부처 합동(2019), 「시스템반도체 비전과 전략」, 2019.5.1.
- 대통령 인수위(2022), 「제20대 대통령직 인수위원회 자료집」, 2022.05.
- 아주경제(2021), <https://www.ajunews.com/view/20210922101110371>
- 원동규, 임종연, 여운동, 심진우(2021), 「반도체 과학·기술·산업 분석」, 한국과학기술정보연구원, 2021.12.
- 이방래, 원동규, 이재민, 윤민영, 장우석, 여운동, 이창환(2021), 「양자기술 과학·기술·산업 분석」, 한국과학기술정보연구원, 2021.12.
- 이준(2019), 「양자컴퓨터 R&D 현황과 전망」, IITP 주간기술동향, 2019.09.25.
- CRDS(Center for R&D Strategy) (2019), 「Strategic Proposal: Quantum 2.0」, 2019.
- Deutsche Bank Research(2021), 「Economic-technology revolution through Quantum 2.0」, 2021.
- IEC(2020), [Inside Quantum Technology, Report IQT-IQN-0920: 2020, Quantum Networking: A Ten-year Forecast and Opportunity Analysis] in 「Quantum information technology」, 2020.
- IITP(2020), 「ICT R&D 기술로드맵 2025 - ICT디바이스·양자」, 2020.12.
- Jariwala, D., “Moore’s law is dead. Long live the Moore’s law”, Twitter.
- MarketsandMarkets(2021), 「Quantum Computing Market with COVID-19 impact - Global Forecast to 2026」, 2021.02.
- NSTC(National Science & Technology Council) (2018), 「National Strategic Overview for Quantum Information Science」, 2018.
- TechNavio(2020), 「Global Quantum Sensors Market 2020-2024」, 2020.04.

## 저 자

### 이방래

KISTI 데이터분석본부  
R&D투자전략연구센터  
책임연구원(투자분석팀장)  
T. 02-3299-6052  
E. brlee@kisti.re.kr

### 임종연

KISTI 데이터분석본부  
R&D투자전략연구센터  
선임연구원(혁신전략팀장)  
T. 02-3299-6239  
E. jylim@kisti.re.kr

### 원동규

KISTI 데이터분석본부  
R&D투자전략연구센터  
책임연구원(센터장)  
T. 02-3299-6053  
E. dkwon@kisti.re.kr

# KISTI ISSUE BRIEF

제44호

발행일 2022. 07. 11.

발행인 김재수

편집위원 조민수, 최희석, 이준, 정한민, 함재균,  
이준영, 이상환, 정도범

발행처 34141 대전광역시 유성구 대학로 245  
한국과학기술정보연구원 정책연구실  
<https://www.kisti.re.kr>

ISSN 2635-5728