

CONVERGENCE RESEARCH REVIEW

융합연구리뷰

2025

3월호 Vol. 11 March

양자컴퓨팅 분야 융합기술개발 및 사업화
현황과 도전 과제

정재호(연세대학교 양자사업단장)

글로벌 융합연구의 도전과 정착을 위한
연구지원체계 전략

최현석(글로벌융합연구협력지원센터장)



미래융합전략센터
Future Convergence Strategy Center

CONTENTS

03 편집자주

04 양자컴퓨팅 분야 융합기술개발 및 사업화
현황과 도전 과제

22 글로벌 융합연구의 도전과 정착을 위한
연구지원체계 전략

편집자주

양자컴퓨팅 기술 어디까지 왔나...사업화는 머나먼 길?

“실용적인 양자 컴퓨터를 개발하기까지는 적어도 20년은 걸릴 것이다.”

지난 1월, 세계 최대 가전 박람회인 CES에서 엔비디아 CEO인 젠슨 황이 한 말이다. 이 발언으로 인해 양자컴퓨터 상용화에 대한 기대감은 한순간에 주저앉아, 양자컴퓨터를 개발하고 있던 기업들의 주가가 단번에 폭락했다. 리게티 컴퓨팅의 주가는 45%, 아이온큐는 39% 하락했다.

곧바로 양자컴퓨터 상용화에 대한 논쟁이 번졌다. 구글은 초전도 양자칩 ‘윌로’를 공개하며 양자컴퓨터 상용화에 대한 자신감을 드러냈고, 디웨이브 퀀텀의 앨런 바라츠 CEO는 이미 디웨이브가 상업적으로 운영되고 있다고 반박했다. 마이크로소프트의 존 니시는 양자컴퓨팅이 수년 내 실현 가능할 것으로 보인다고 밝혔으며, 젠슨 황의 의견보다 훨씬 빠른 상용화가 가능할 것이라고 주장하기도 했다.

결국 젠슨 황은 GTC 2025의 '퀀텀 데이' 행사에서 자신의 발언에 대해 사과하고, 여러 양자컴퓨팅 업계 리더들을 초청하여 자신의 예측이 틀렸음을 인정했다. 엔비디아는 보스턴에 '엔비디아 가속 양자 연구센터'를 설립하고 양자컴퓨터 연구를 본격화하겠다고 발표하는 등 양자컴퓨팅에 대한 투자를 강조했다.

양자컴퓨팅 기술 개발과 상용화에 대한 논쟁은 대중들에게도 양자 기술에 대한 관심을 높이는 데 기여했다고 본다. 본 호 기술리뷰에서는 양자컴퓨팅 기술의 핵심 요소를 알아보며, 상용화를 앞당기기 위한 도전 과제들을 다루고자 한다.

융합, 세계로 뻗다...새 시대의 도전과 기회

글로벌 융합연구가 새로운 시대의 연구 경쟁력 확보의 핵심으로 떠오르고 있다. 과거 국내 연구만으로는 국제적인 기술 경쟁력을 확보하는 데 한계가 있었지만, 이제는 세계 시장을 목표로 한 초학제적 협력과 연구가 필수적인 상황에 이르렀다.

글로벌 융합연구에 대한 체계적 지원을 위해 과학기술정보통신부에서는 ‘글로벌융합연구협력지원센터’를 구축하여 운영하고 있다. 센터는 연구기획부터 성과 확산까지 전주기적인 지원을 통해 글로벌 융합연구의 활성화와 연구자들의 애로 사항 해결을 돕는다. 다양한 연구자들과 국제적 네트워크를 결합해 효율적이고 지속 가능한 연구 환경을 만들어가고 있으며, 글로벌 복합 문제를 해결하는 데 중점을 두고 있다.

본 호 정책리뷰에서는 글로벌 융합연구의 주요 과제와 이를 해결하기 위한 체계적인 지원 방안을 다룬다. 연구자들이 겪는 실질적인 문제를 어떻게 해결할 수 있을지, 그 해법을 제시하며 글로벌 연구 환경에서의 협력과 성장 가능성을 탐색하고자 한다.

융합기술

양자컴퓨팅 분야
융합기술개발 및
사업화 현황과
도전 과제

정재호

연세대학교 양자사업단장

1 서론

양자컴퓨팅(Quantum Computing)은 정보 표현 및 처리 단위인 큐비트(Qubit)를 기반으로 중첩(Superposition)과 얽힘(Entanglement), 간섭(Interference)이라는 양자역학적 특성을 활용하여 고전 컴퓨터의 한계를 뛰어넘는 연산 능력을 제공한다. 현재 전 세계적으로 개발 중인 주요한 양자컴퓨팅 기반 기술로는 초전도 큐비트, 이온트랩, 중성원자 및 광학 기반 기술 등이 있다. 세계 최대 가전 및 IT 박람회인 CES는 매년 빅테크 기업들을 중심으로 최첨단의 혁신 기술과 전자 가전제품들을 선보여 왔다. 올해 CES에서는 처음으로 양자컴퓨팅 부문이 신설되어 전 세계 테크 전문가들의 지대한 관심을 모으며 CES 2025의 새로운 3대 키워드로 거론되며 크게 주목을 받았다. 특히, 구글, 마이크로소프트, 아마존 등 빅테크 기업들의 연구 개발 결과가 경쟁적으로 공개되며 시장에 대한 기대감도 커졌다. 컨퍼런스 주제인 ‘양자, 비즈니스를 뜻하다(Quantum means business)’는 그동안 이론적 수준으로 평가되던 양자컴퓨팅 기술이 산업 전반에 구체적인 활용이 가능한 비즈니스 응용 사례를 제시하는 단계로 성숙되었음을 의미한다. 한편, 8년 만에 기초연설자로 재등장한 젠슨 황 엔비디아 CEO가 “(상업적으로) 유용한 양자컴퓨터가 등장하기까지는 약 20년은 걸릴 것이다”라는 전망을 내놓으며 상용화 시기에 대해 많은 논란이 되기도 했다. 하지만 양자컴퓨팅이 AI 다음 가는 핵심기술로서 전체 산업군의 판도를 바꾸고 AI를 완성할 기술이라는 데엔 이견이 없다. 필자의 의견으로는 양자컴퓨팅은 향후 수년 내에 AI, 신약 개발, 물류, 소재 화학, 금융 모델링, 암호 해독 등 다양한 분야에서 혁신적인 변화를 주도적으로 이끌 것으로 보고 있다. 본 리뷰에서는 다양한 분야에서의 양자컴퓨팅 활용을 위한 융합기술 개발 현황과 사업화 과정에서의 주요 도전 과제에 대해 알아보려고 한다.

2 양자컴퓨팅 기술 개요

양자컴퓨팅의 기반이 되는 큐비트는 플랫폼 기술에 따라 분류되는데 가장 앞선 기술들로는 IBM, Google, Rigetti 등이 선도하는 초전도 큐비트(Superconducting Qubits)이 대표적이다. 초전도체에서 발생하는 양자적 현상을 이용해 큐비트를 만드는데 반도체 공정을 일부 사용하므로 상대적으로 제조 공정이 성숙되어 있고 게이트 연산 속도가 빠른 장점이 있다. 반면 극적인 환경이 필요하고 에러율, 디코히어런스 등 오류 보정의 기술적 과제가 남아있다. 하지만 현재 가장 발달된 양자 하드웨어 플랫폼 기술임은 확실하며 스케일업을 통해 100큐비트를 넘어 최근 수천 큐비트 이상의 양자 프로세서 개발이 진행 중이다. IonQ, Honeywell 등이 연구 개발하고 있는 이온트랩(Ion Trap) 방식은 높은 충실도(Fidelity)를 갖춘 게이트 연산이 특징이다. 전하를 띤 원자(이온)를 전자기장에 가두어 정렬시키고 이 이온들이 갖는 양자 상태를 이용해 큐비트를 구성하는 방식이다. 초전도 큐비트와 함께 가장 오랫동안 연구된 양자컴퓨팅 플랫폼 중 하나이다. 매우 긴 결맞음 시간(Coherence time)과 표준화된 원자의 특성 상 정확한 게이트 연산과 재현성이 높다. 하지만 많은 이온의 정렬시 강한 쿨롱 상호작용으로 안정성이 떨어지고 각 이온 큐비트를 제어하는 레이저 공정 및 광학적 기술의 복잡성으로 인해 스케일업의 난제가 있다.

중성원자 기반 큐비트는 레이저 냉각과 광학트랩(optical tweezer)을 이용하여 원자를 조작하며 상대적으로 결맞음 시간이 길고 고밀도 큐비트 배열이 가능해 차세대 양자컴퓨팅 플랫폼으로 주목받고 있다. 하지만 게이트 오류율과 트랩의 안정성과 Rydberg 상태 정밀도 유지에 기술 고도화가 필요하며 초전도체 큐비트 대비 연산속도가 상대적으로 느린 단점이 있다. Pasqal, Atom computing, Quantinuum 등이 개발하고 있다.

광자 기반(Photonic Quantum Computing) 큐비트 기술은 광자(빛)를 큐비트로 활용하며 다른 양자컴퓨팅 기술과 달리 광자의 특성상 외부 환경과 거의 상호작용을 하지 않아 결잃음(decoherence)이 매우 적다는 장점이 있다. 광자 큐비트를 제어하기 위해 양자 광학 소자(Quantum optical device)를 사용하여 단일 큐비트, 2-큐비트 연산을 수행한다. 극저온 냉각 없이 상온에서 작동하며 광섬유 및 자유 공간을 통해 고속 정보 전송이 가능하여 양자 네

트위크 및 분산 양자컴퓨팅 기술과 결합해 강력한 확장성을 제공한다. 반면 다체 광자 상호작용의 어려움으로 양자 게이트 구현이 쉽지 않고 단광자 소스의 효율이 낮고 광자 손실로 인한 검출 효율 문제와 복잡한 광학 장비가 필요한 단점이 있다. Xanadu, PsiQuantum 등이 연구 개발하고 있다.

3 양자소프트웨어와 알고리즘

양자컴퓨팅은 앞 절에서 기술한 하드웨어(초전도체, 이온트랩, 중성원자, 광자)적 요소뿐만 아니라 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 소프트웨어와 알고리즘이 필수적이다. 양자컴퓨팅을 위한 소프트웨어와 알고리즘은 기존의 고전컴퓨팅과는 근본적으로 다른 수학적 원리와 계산 모델을 기반으로 한다. 양자소프트웨어(quantum software)는 양자컴퓨터를 프로그래밍하고 실행하기 위한 모든 소프트웨어적 요소를 포함하는 개념이다. 양자 알고리즘, 양자 프로그래밍 언어, 양자 시뮬레이터, 양자 오류 정정 소프트웨어 등을 포함한다. 양자 프로그래밍 언어는 양자 알고리즘을 구현하기 위한 프로그램 언어로서 IBM의 python 기반의 Qiskit, 구글의 Cirq, Xanadu의 PennyLane, 마이크로소프트의 Q# 등이 있다. 양자 시뮬레이터는 실제 양자 컴퓨터가 없이 고전적인 하드웨어에서 양자 알고리즘을 실행하고 테스트할 수 있도록 지원하는 도구이다. 대표적인 시뮬레이터로는 IBM Aer, Cirq의 시뮬레이터, QuEST 등이 있다. 양자컴퓨터는 결잃음(decoherence)과 노이즈에 취약하므로 이를 보완하는 오류 정정 소프트웨어가 필요하다. 대표적인 방법으로는 표준 오류 정정 코드인 Shor 코드, Surface 코드 등이 있다. 이외에 양자 오류를 완화하는 소프트웨어도 개발 중이다.

양자 알고리즘(Quantum algorithm)은 양자컴퓨터의 특성을 활용하여 특정 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 의미한다. 이는 고전적 알고리즘과 달리 양자 중첩, 얽힘, 및 간섭을 활용하여 연산을 수행한다. 양자 알고리즘의 주요 특징을 살펴보면 우선 중첩을 활용하여 여러 연산을 동시에 수행하는 양자 병렬성(quantum parallelism), 연산에서 원치 않는 경로를 상쇄하고 원하는 결과를 증폭하여 효율적으로 답을 찾는 양자 간섭(Quantum interference), 큐비

트 간의 강한 상관관계를 이용하여 연산을 최적화하는 양자얽힘(Quantum entanglement) 등이 있다. 이러한 양자적 특성을 활용하는 대표적인 알고리즘으로는 고전적 알고리즘으로는 지수적 시간(exponential time)이 걸리는 큰 수의 소인수분해를 다항 시간(polynomial time)에 빠르게 수행하는 Shor 알고리즘이 있다. 또한 비정렬 데이터베이스 검색을 신속하게 수행하는 Grover 알고리즘은 다양한 최적화 문제와 머신러닝에 응용할 수 있다. 양자 선형방정식 풀이 알고리즘인 HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd)은 고전적 선형 방정식 solver 보다 지수적으로 빠른 문제 해결이 가능하며 머신러닝, 금융, 유체역학, 양자 화학 등에 적용이 가능하다. 또한 조합 최적화 문제를 효율적으로 해결하는 QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm)은 물류 최적화, 에너지 최적화 등의 문제 해결에 강점이 있다. 마지막으로 양자 시스템의 에너지 상태를 추정하여 분자 동역학을 시뮬레이션하는 VQE (Variational Quantum Eigensolver) 알고리즘은 특히 신약개발, 양자 화학 분야에서 현재 양자 하드웨어 수준(NISQ, Noisy Intermediate Scale Quantum computer)에서 현장에 활용이 가능하여 활발한 연구가 진행 중이다.

4 양자머신러닝의 탄생과 중요성

전 세계적으로 AI 다음 차세대 기술로 불리며 주목을 받아온 양자컴퓨팅 기술이 성공적으로 사업화되기 위해서는 다양한 연구 및 산업 분야에서 하드웨어(양자컴퓨터)를 활용할 수 있는 소프트웨어와 알고리즘 개발이 필수적이다. 인공지능(AI)과 머신러닝(ML)은 현대 과학기술 발전을 이끄는 핵심 분야로 자리 잡았다. 동시에, 양자컴퓨팅은 기존의 컴퓨팅 패러다임을 뛰어넘는 새로운 가능성을 제시하고 있으며, 양자역학의 원리를 활용한 컴퓨팅 기술이 급격히 발전하고 있다. 이러한 두 기술의 융합으로 탄생한 “양자머신러닝(Quantum Machine Learning, QML)”은 데이터 처리 속도를 혁신적으로 높이고, 복잡한 문제를 보다 효율적으로 해결할 가능성을 제시하고 있다. 양자컴퓨팅의 계산적 강점을 활용하여 고전적 머신러닝 및 딥러닝 문제를 더 빠른 학습 속도, 고차원 데이터 표현을 통해 머신러닝을 가속화하고 새로운 방식으로

패턴을 학습한다. 양자머신러닝의 큰 맥락에서 중요한 연구주제는, 머신러닝의 기반이론을 양자물리학 영역으로 확대함으로써 기존의 고전학습 대비 의미 있는 양자속도 향상을 얻을 수 있을지, 또 그것이 가능하다면 어떤 물리적 기전으로 이를 설명할 수 있을지, 그리고 어떻게 현실 문제에 적용하여 양자이득을 실현하고 누릴 수 있을지 등이다.

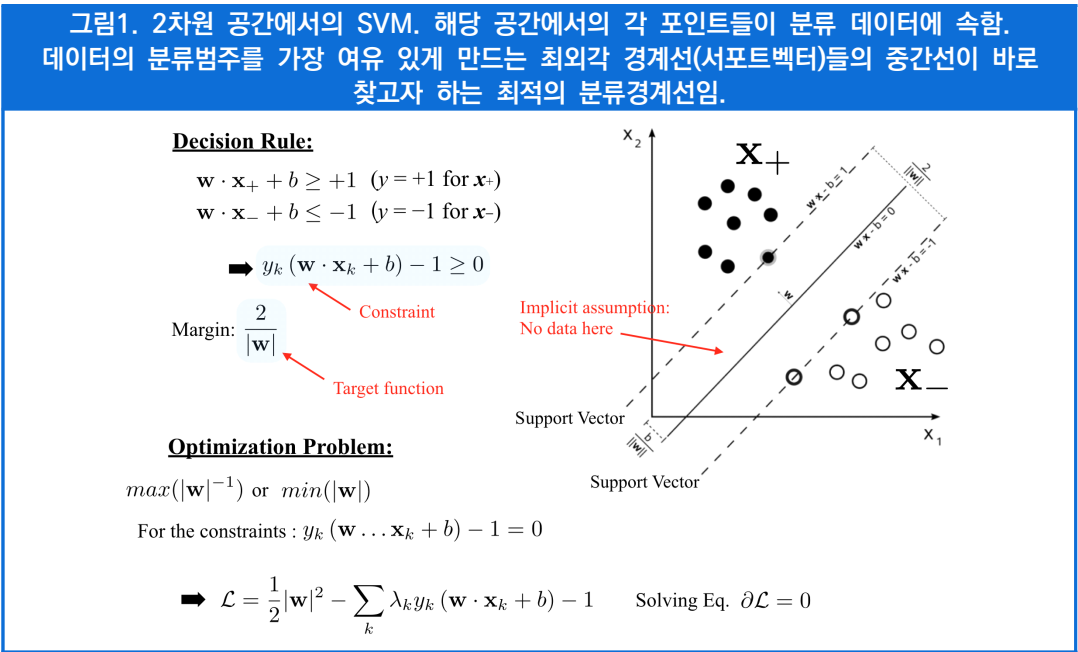
QML은 계산학습 이론의 일반적인 학습 성능 평가지표 맥락에서 유사한 연구들이 수십 년 전 시도된 바 있다. 하지만, 양자머신러닝 연구의 필요성과 효용성 등은 아주 최근에서야 깊이 논의되고 있다. 특히, MIT의 S. Lloyd 교수팀의 양자-서포트벡터머신 연구는 양자머신러닝이 양자컴퓨팅 서브 연구분야로 진입하는 계기가 되었다. 그럼에도 불구하고, 양자머신러닝은 아직 연구 초기 단계로서 용어나 개념이 견고하게 정립되지 않았다. 또한, 초창기 양자머신러닝 연구들에서의 양자이득 증명은 선형 시스템을 다루는 양자컴퓨팅 알고리즘의 속도향상에 기반하고 있으며, 양자데이터의 인코딩 및 활용 측면에서 해결해야 할 이슈들이 많다. 최근에는, 중·단기 구현 가능한 양자기술(NISQ) 측면에서의 AI 모델 및 애플리케이션 연구가 한창이다. 사업화를 위한 양자컴퓨팅 융합기술 개발 관점에서 NISQ 애플리케이션을 구현할 수 있는 가변혼합 알고리즘으로서 양자머신러닝은 현재 AI 기술을 가속화하고 산업적 가치를 구현할 수 있는 잠재력이 크다 하겠다.

4.1. 양자컴퓨팅 서브분야로서의 양자머신러닝 연구분야 진입

양자머신러닝은 양자컴퓨팅의 원리를 머신러닝 기법과 결합하여 기존 AI 모델을 발전시키는 연구 분야이다. 양자컴퓨팅 및 양자머신러닝을 수행하기 위해 반드시 필요한 리소스는 “양자중첩(superposition)”과 “양자얽힘(entanglement)”이다. 이는 양자이론이 주는 병렬연산(이를 “양자병렬성(quantum parallelism)”이라고 한다.)의 가능성을 열어주며, 머신러닝 알고리즘에서 힐버트 공간을 다차원 데이터 공간으로 활용함으로써 보다 효율적인 공간구조 및 탐색을 가능하게 한다. 또한, 최근 양자시뮬레이터 등에서 활발히 연구 중인 가변양자회로(Variational Quantum Circuit, parametrized quantum circuit)는 NISQ 애플리케이션 측면에서의 양자인공신경망(quantum neural networks, QNNs) 기본 모형으로서 활용되고 있다.

초창기에는 양자병렬성을 적극 활용하여 계산과학 전반에 새로운 활력을 불어넣는 동시에 정보 및 컴퓨팅 이론의 기반이론을 양자이론으로 확장하고자 하는 시도가 이루어졌다. 특히, 계

산 복잡도(computational complexity) 측면에서 정의된 학습에의 성능지표를 활용해 머신러닝에서의 양자속도 향상을 일반적인 형태로 증명하고자 하였다. 계산과학에서의 “복잡도 (complexity)”란 흔히 어떤 알고리즘을 실행에 옮길 때 드는 총 계산 비용을 뜻하는데, 대체로 컴퓨터가 해당 작업을 성공적으로 마치는 데 드는 시간 혹은 메모리를 말한다. 머신러닝에서는 원하는 작업을 마칠 때까지 수행하는 의미 있는 정보 추출 과정으로서의 “질의(query)” 연산의 총횟수 혹은 필요한 샘플 데이터의 사이즈 등으로 정의된 학습 성능지표로서의 복잡도가 존재한다. 계산과학적으로 어떤 학습모델의 우수성은 다음과 같이 평가할 수 있다. 1) 우선, 비교적로 학습하는 데 필요한 데이터 사이즈가 작을수록 2) 그리고, 학습한 이후 식별된 가설들의 정확도가 높을수록, 3) 마지막으로 학습이 원리적으로 불가한 상황들이 없을수록 좋다. 이와 같은 요소들을 반영하여 일반적인 학습에의 평가지표를 정의하고 다양한 학습 모델에 적용하는 분야를 “계산학습이론(Computational Learning Theory)”이라고 한다. 양자컴퓨팅/알고리즘 연구 분야에서 지수함수적 속도향상의 가능성이 확인되었던 만큼, 머신러닝 영역에서 역시 긍정적인 결과가 기대되었으나, 양자샘플복잡도를 실제 계산한 결과 동일성능 혹은 계산 과학적으로 큰 의미가 없는 아주 약간의 속도향상 정도만 확인되었다. 이같은 초창기 연구 결과들은 양자머신러닝에 연구에 새로운 모멘텀을 부여할 만큼 어필하지는 못하였다.



양자머신러닝 연구는 양자 버전의 서포트벡터머신(Support Vector Machine, 이하 SVM)의 등장으로 새로운 전기를 맞게 되었다. SVM이란 주어진 데이터들의 분류 알고리즘 내지는 메커니즘으로서 정의되는데, 데이터의 분류/가공 등의 실용적 목적으로도 활용되는 매우 중요한 방법론이다. MIT의 Seth Lloyd 교수팀은 SVM의 주요 연산 커널을 양자 작업으로 확장하여, 이를 기반으로 한 양자-SVM을 정의하였고 해당 연구에서 지수함수적 양자 속도향상이 가능함을 증명하였다. SVM은 주어진 많은 양의 데이터들을 분류하는 방법론으로 임의의 차원의 공간에 분포하고 있는 데이터 포인트들을 “최적으로” 분류하는 초평면(hyperplane)을 구하는 메커니즘으로 이해할 수 있다. 이 과정에서 문제는 분류범주의 최외각 데이터에 접하는 초평면들과 그들 사이의 거리(margin)를 극대화하는 초평면을 찾는 것이다. 해당 문제는 결국 분류범주의 결정 룰(rule)에 대응하는 제약식과 라그랑지안 승수를 곱한 항의 최적화 문제(라그랑지안 최적화 문제)로 환원되고, 이 문제를 풀기 위해서 필요한 가장 큰 계산량이 바로, 데이터의 개수 N 에 대한 선형방정식, 즉 $N \times N$ 행렬의 대각화에 집중되어 있다 (그림1 참조). Seth Lloyd 교수 연구팀은 바로 이 부분에 HHL 알고리즘을 적용하였다.¹⁾ 이같은 아이디어는 HHL 알고리즘 혹은 양자-SVM 알고리즘을 커널로 사용할 수 있는 대부분의 머신러닝 작업에의 속도향상 증명에 적용될 수 있는 기본적인 방법론으로 일반화되었다.

하지만, 이와 같은 시나리오의 양자머신러닝의 속도향상 결과물들은 대부분 추상적이고 실제 구현에 맞지 않다. 특히, 양자중첩에 기반한 양자병렬성의 극대화 측면에서, 양자중첩 데이터의 준비 및 활용을 위한 양자 리소스에 대한 고려가 매우 중요하다는 점을 알게 되었다. 이는 “양자-랜덤-액세스-메모리(quantum random-access memory, 이하 QRAM) 문제”라고 알려져 있다.

1) 첫째로, 분류에 필요한 데이터 샘플을 모두 양자상태로 “변환”하고 이들을 “양자중첩”상태를 최종 준비한다. 다음으로, 풀고자 하는 커널행렬과 관련된 유니타리를 구성한 후 “단일동작”으로서의 양자상태 변환식을 정의한다. 여기에, 양자선형알고리즘(혹은 HHL)을 적용함으로써 양자 병렬성을 극대화한 양자 속도향상을 얻는다.

4.2. NISQ 시대의 양자머신러닝 및 양자AI 연구

양자컴퓨팅 연구의 최근 주요 이슈는 단기 구현이 가능한 형태의 양자이득을 구현하고 이를 활용하는 것이다. 이와 같은 연구 트렌드를 표현하기 위해 “Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)”라는 용어가 대두되었다. 즉, 어느 정도 오류를 포함한(Noisy), 너무 크지 않은 중간 규모의(Intermediate-Scale)의 양자(Quantum) 기술로 증명 가능한 새로운 문제 구성 및 양자 알고리즘/방법론을 개발하자는 것이다. 이같은 NISQ 개념은 2018년, 양자정보 과학 분야의 선구자인 존 프레스킬(John Preskill) 교수가 처음 제안했으며, 이는 완전한 오류 정정이 구현되지 않은 상태에서 실용적인 양자컴퓨팅의 가능성을 탐색하는 단계를 지칭한다. NISQ 연구 트렌드와 관련, 최근 극적인 실험적 진보를 이룩한 Google 그룹은, 본인들이 구축한 양자 프로세서의 동작 특성에 부합하는 자연 샘플링 문제를 구성하였다. 이를 “무작위 회로 샘플링(Random circuit sampling; RCS)²⁾이라고 부른다. 최근, RCS가 주어진 실험적 오류에 대하여, 의미있는 양자이득이 가능하다는 것이 이론적으로 증명되었고, 곧 Google 연구팀은 이를 실험으로 구현하여 결국 양자우위성을 증명하는데 성공하였다.

이같은 NISQ 기술이 가장 큰 영향을 미친 분야 중 하나가 양자머신러닝이다. 특히, 계산복잡도에 의한 양자이득 증명이나 HHL과 같은 선형 양자 알고리즘을 주요 연산 모듈로 활용하는 프레임워크에서 벗어나, 실제 어플리케이션 중심으로 양자이득을 실증하는 형태의 연구로 진화하였다. 현재는 고전 데이터를 양자중첩상태로 인코딩 및 활용하는 것에서 오는 장점, 양자 인공지능망 기본모델을 개발하고 양자 AI 분야를 확립하는 것 등이 주요 아젠다이다.

2) Random circuit sampling은 여러 개의 큐비트를 사용하여 임의의 무작위 양자게이트를 조합해 복잡한 양자회로를 생성하여 여러 번 실행시키고, 측정된 결과 분포를 분석하여 데이터가 고전 컴퓨터로 계산하기 어려운 확률 분포를 따르는지 확인하는 문제이다. 양자컴퓨터의 계산 능력을 검증하는 실험적 방법이며 양자알고리즘 개발과 양자 우월성 검증에 중요하다.

최근 NISQ 시대의 양자 머신러닝 연구를 요약하면 다음과 같다.

- 양자데이터: 데이터의 지형공간을 분석하는 일은 기존 머신러닝에서 매우 중요한 작업 중 하나이다. 최근, 양자이론에 근간한 양자상태공간(Hilbert-space) 자체가 갖는 컴퓨팅/머신러닝 관점에서의 양자이득에 대한 긍정적 연구 결과가 등장하였다. 양자데이터의 지형공간은 구조적으로 매우 복잡하고, 특히 표적 양자데이터 및 유효지형공간을 추출하는 작업은 매우 어렵다. 이와 같은 연구 맥락은 고전 데이터를 어떻게 유용한 양자상태로 임베딩하여 양자 머신러닝에의 이득을 극대화할 수 있을지에 대한 “양자 데이터 임베딩” 분야로 발전하였다 (그림2 참조).

그림2. 양자 데이터-임베딩 서브분야의 확립과 연구 내용-이슈


■ **Quantum Data Embedding**

user-recognizable (or classical) data → quantum state

$$\mathbf{x}_j \rightarrow |\psi(\mathbf{x}_j)\rangle \quad \text{or} \quad \hat{U}(\mathbf{x}_j) |00\dots0\rangle = |\psi(\mathbf{x}_j)\rangle$$

- 원칙적으로 모든 데이터는 큐비트 시스템에 효율적으로 인코딩 가능
- n 고전비트 → n 큐비트 (일반적으로 역은 성립하지 않음)
- 큐비트는(즉, 힐버트 공간은) 어떠한 물리적 과정에서 연계되는 정보(양자정보 포함)도 인코딩 가능한 궁극적 데이터 표현매체

[Phys. Rev. Lett. 122, 040504 (2019)] [arXiv:2001.03622 (2020)]



NISQ
Noisy quantum device

- 양자회로 및 양자신경망: 기존 머신러닝 모델은 선형결합을 통한 가중치 행렬(weight-matrix)의 최적화에 기반을 두고 있다. 양자컴퓨팅에서는 NISQ 기술로 구현·배치·조작이 가능한 가변양자회로(parametrized quantum circuit)를 활용하여 양자 인공신경망(quantum neural networks, QNNs) 기본모형을 구성한다. 이같은 양자 인공신경망은 기존의 신경망보다 적은 파라미터로 보다 강력한 표현력을 가진다.
- 양자 커널 방법: SVM (Support Vector Machine)과 같은 머신러닝 기법에서는 데이터 간 유사성을 측정하는 커널 함수가 중요하다. 양자 커널 기법은 고차원 데이터 공간에서의 유사성을 효율적으로 분석할 수 있어, 복잡한 데이터 패턴을 보다 빠르게 학습할 수 있도록 도와준다.

양자컴퓨팅은 다양한 산업과 결합하여 혁신적인 변화를 만들어가고 있다. 앞서 기술한 NISQ 시대의 양자머신러닝의 대표적인 응용 사례는 다음과 같다.

- **신약 개발 및 분자 시뮬레이션:** 양자컴퓨팅을 이용한 분자 시뮬레이션은 신약 개발에 큰 변화를 가져올 것으로 예상된다. 양자역학적 계산이 필수적인 신약 개발 및 분자 모델링 분야에서는 양자머신러닝이 강력한 도구가 될 수 있다. 양자컴퓨터는 전자구조 계산을 통해 단백질 접힘(Protein Folding) 문제를 해결하는 데 유용하며, GlaxoSmithKline(GSK), Merck, Roche 등의 제약 회사가 양자 알고리즘 연구를 진행 중이다. 양자 컴퓨터의 빠른 계산 속도를 활용하면 신약 후보 물질을 신속하게 선별할 수 있으며, 전통적인 시뮬레이션보다 더 정밀한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.
- **금융 및 리스크 분석:** 금융 분야에서도 양자머신러닝이 기대되는 바가 크다. Goldman Sachs, JP Morgan, HSBC 등의 금융기관이 양자컴퓨팅을 활용한 최적화 및 시뮬레이션을 연구하고 있다. 주식 시장 예측, 금융 시장 모델링, 옵션 가격 결정, 리스크 관리, 포트폴리오 최적화 등 다양한 문제에서 양자(머신러닝)알고리즘을 적용하면 기존 알고리즘보다 뛰어난 성능과 계산 속도를 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대하고 있다.
- **최적화 문제 해결:** 물류, 에너지 효율 최적화, 네트워크 설계 등 다양한 산업에서 최적화 문제를 해결하는 것은 중요한 과제이다. 양자컴퓨팅의 강점인 조합 최적화(combinatorial optimization) 기법을 머신러닝과 결합하면, 기존 대비 더욱 효율적인 최적화 방법을 설계할 수 있다. 산업 최적화 외에도 공급망 관리, 스마트 팩토리 운영 등에서도 활용될 수 있다. Volkswagen과 BMW는 양자 알고리즘을 이용하여 교통 흐름 최적화 및 배터리 개발을 연구하고 있다.

이와 같이, 양자 머신러닝은 무한한 가능성을 갖고 있지만, 여전히 여러 도전 과제에 직면해 있다. 우선, 아직 하드웨어의 성숙도가 낮다. 현재 양자컴퓨터의 큐비트 수는 제한적이며, 에러율도 높다. 실용적인 수준의 양자 머신러닝을 구현하기 위해서는 더 많은 큐비트와 안정적인 하드웨어가 필요하다. 다음으로, 여전히 유용한 양자 머신러닝 알고리즘 개발이 어렵다. 양자 알고리즘을 설계하는 것은 기존의 고전적 알고리즘과는 전혀 다른 사고방식이 필요하다. 연구자들은 양자 알고리즘 개발을 위해 보다 깊은 양자 물리학적 이해와 비수학적 모델링이 요구

되는 난관에 직면해 있다. 그 밖에도, 개발자와 연구자들이 쉽게 접근할 수 있는 라이브러리 및 프레임워크가 부족하다는 것도 문제이다. 현재 Qiskit(IBM), PennyLane(Xanadu), Cirq(Google) 등의 프레임워크가 개발되고 있으나, 여전히 많은 개선이 필요한 실정이다.

4.3. 연구 비전과 향후 전망

양자 머신러닝이 실제로 기존의 머신러닝을 뛰어넘을 수 있음을, 즉 양자 머신러닝에의 양자 이득을 실증하는 것이 매우 중요하다. 연구자들은 특정 문제에서 양자 머신러닝이 고전 머신러닝보다 우수하다는 증거를 지속적으로 제시해야 한다. 다음으로, 양자컴퓨터 하드웨어 기술의 발전과 함께, 더욱 정교한 양자 머신러닝 알고리즘이 개발이 필요하다. 이를 위해 학제 간 협력이 필수적이다. 마지막으로, 연구자들은 산업계와의 협력을 통해 실용적인 양자 머신러닝 애플리케이션을 개발하고 활용사례를 꾸준히 제시해야 한다. 예를 들어, 금융, 헬스케어, 물류 분야의 기업들과 협력하여 연구를 진행할 필요가 있다.

양자 머신러닝은 인공지능과 양자컴퓨팅이라는 두 혁신적인 기술이 결합된 분야로, 미래 과학 기술의 핵심 축이 될 가능성이 크다. 물론, 아직 해결해야 할 기술적 도전이 많지만, 학계와 산업계가 협력하여 연구를 지속한다면, 우리는 가까운 미래에 실용적인 양자 머신러닝 응용 사례를 목격할 수 있을 것이다. 이를 위해 지속적인 연구와 투자가 필수적이며, 글로벌 차원의 협력이 요구된다.

5 양자컴퓨팅 사업화의 도전 과제

5.1. 양자정보과학기술의 일반적 과제

현재의 양자컴퓨터는 하드웨어적 기술 성숙도가 여전히 부족하다. QPU의 근간이 되는 큐비트 기술이 아직 수렴되지 않았으며 큐비트 스케일업의 문제는 양자오류와 연계되어 있다. 여전히 양자회로 수행시 에러율이 높으며, 이를 극복하기 위한 양자 오류 정정(Quantum Error Correction, QEC) 기술이 필요하다. 또한 양자 알고리즘 연구가 활발히 진행되고 있으나, 실제 문제 해결에 사용하기 위한 소프트웨어 및 알고리즘 개발이 제한적이어서 실용적인 응용까지는 시간이 필요할 것으로 사료된다.

이러한 제반 문제 해결을 위해서는 막대한 자원과 비용이 소요되며, 지속적인 투자와 연구개발이 필수적이다. 또한 양자정보기술의 표준화 및 양자 암호 및 보안 관련규제 문제도 각국 정부 및 기업 간 논의가 필요하다. 마지막으로 가장 중요한 것은 양자정보과학 인력 육성이다. 현재 양자컴퓨팅 전문가는 절대적으로 부족하며, 학계 및 기업에서 인재 양성이 중요한 과제가 되고 있다.

5.2. 양자컴퓨터-고전컴퓨터 하이브리드 HPC 플랫폼 구축

양자컴퓨터와 고전 고성능 컴퓨팅을 결합한 하이브리드 HPC³⁾ 플랫폼은 양자컴퓨터의 혁신적인 연산능력과 기존 HPC의 강력한 성능을 통합하여 복잡한 문제를 더욱 효율적으로 해결하는 기술 기반을 제공할 것이다. 이는 현재 NISQ 급 양자컴퓨터가 단독으로 해결하기 어려운 문제를 보완하고 현실적인 활용 가능성을 높이므로써 실제 산업과 연구현장에 적용 사례를 제시하여 사업화를 앞당기는 전략적인 방법이다. 양자 컴퓨터가 특정 문제⁴⁾를 해결하는데 엄청난 속도 향상을 제공할 수 있지만 아직 오류율이 높아 대규모 연산을 처리하는데 제한적이다. 반면 HPC는 대규모 데이터 병렬 연산에 장점이 있지만 NP-난해⁵⁾(NP-hard)문제나 양자 역

3) high performance computing, 슈퍼컴퓨터나 컴퓨터 클러스터를 사용하여 대량의 연산을 수행하는 고성능 컴퓨팅 기술

4) 양자시스템 시뮬레이션, 최적화, 암호 해독 등

5) 다항시간(polynomial time)에 답을 풀 수 없는 문제. NP-문제는 비결정론적 튜링기계를 사용 다항시간 내 답을 구할 수 있는 문제이다.

학적 시스템을 시뮬레이션하는데 한계가 있다. 따라서 이러한 상호 단점을 보완하여 각 컴퓨팅 패러다임의 특성을 융합한 양자-HPC 하이브리드 플랫폼을 구축하면 다음과 같은 장점을 기대할 수 있다.

- 양자알고리즘을 활용한 계산 가속: 최적화 문제, 분자 시뮬레이션, 머신러닝 등의 특정 연산을 양자컴퓨터가 처리하고 나머지는 기존 HPC 에서 수행
- HPC 기반의 양자 에뮬레이션: 오류 보정이 필요한 양자 알고리즘을 HPC에서 사전 테스트 및 시뮬레이션을 수행
- 워크로드 최적 분배: 특정 연산을 가장 효율적으로 수행할 수 있는 컴퓨팅 자원에 맞춰 분산 처리

양자-HPC 하이브리드 시스템을 구축하면 양자컴퓨팅 레이어에서는 양자 회로 실행 및 알고리즘(variational quantum algorithm, QAOA 등)을 구현하고 HPC 클러스터에서는 CPU/GPU 기반의 대규모 병렬 연산을 수행하고 양자 알고리즘의 사전 시뮬레이션 및 후처리 지원과 대규모 데이터 저장 및 처리 기능을 제공할 수 있다. 하이브리드 시스템을 효과적으로 활용하기 위해서는 양자-HPC 워크플로우 관리를 통해 연산을 최적의 방식으로 각 컴퓨터에 분배하고 양자 알고리즘과 클래식 알고리즘을 결합시켜 수행할 수 있어야 한다. 또한 Qiskit, Cirq, Pennylane과 같은 양자 SDK⁶⁾ 및 HPC 용 분산 컴퓨팅 프레임워크인 MPI⁷⁾, CUDA⁸⁾ 등과 연계한 소프트웨어 스택⁹⁾ 구축이 필요하다. 이러한 양자-고전 컴퓨터 하이브리드 HPC 플랫폼 구축 시에는 기존 고전 알고리즘과 양자 알고리즘을 효과적으로 결합할 수 있도록 설계가 되어야 하고 현재 양자컴퓨터의 오류율을 낮추기 위한 보정 기법을 적용하여 신뢰성을 개선하는 것이 시급하다. 또한 HPC-양자컴퓨터 간의 데이터 교환 속도를 최적화하여 latency 및 병목현상을 최소화하는 고성능 네트워크 및 데이터 관리에 대한 전략적 접근이 필요하다. 양자-HPC 하이브리드 컴퓨팅 플랫폼은 현재

6) Software development kit: 특정 소프트웨어나 플랫폼에서 응용 프로그램을 개발할 수 있도록 필요한 라이브러리, 도구, 문서 등을 모은 개발 도구 세트

7) Message Passing Interface: 병렬 컴퓨팅 환경에서 여러 프로세서 간에 메시지를 교환하여 작업을 효율적으로 분산 처리하기 위한 표준화된 라이브러리와 프로토콜

8) Compute Unified Device Architecture: 엔비디아(NVIDIA)에서 개발한 병렬 컴퓨팅 플랫폼이자 프로그래밍 모델로, GPU를 활용하여 대규모 연산이나 데이터 처리를 고속으로 수행할 수 있도록 지원

9) 애플리케이션이 동작하기 위해 필요한 운영체제, 런타임, 라이브러리, 프레임워크 등 여러 소프트웨어 계층을 모아 구성한 것

NISQ 시대 실용적인 양자컴퓨팅 활용 방식으로 단기적으로는 HPC 기반의 양자 시뮬레이션과 특정 작업(최적화, 신약개발, 금융, 소재 화학, 암호학 등)에서 양자 가속기(quantum accelerator)로서 역할을 수행할 것이다. 향후 양자 하드웨어가 더욱 발전하면 궁극적으로 완전한 양자-HPC 융합 컴퓨팅 시스템이 개발되어 인류가 직면한 난제인 기후변화, 에너지 위기, 글로벌 보건 및 헬스케어 등에서 혁신적인 해결책을 제시하게 될 것이다. 또한 다양한 산업 분야에 적용되어 산업 생산성을 제고하는데 크게 기여할 것으로 전망한다. 이와 같은 하이브리드 컴퓨팅 플랫폼 개발 및 구축을 위해서도 양자 알고리즘을 위시한 분산 컴퓨팅, 소프트웨어 최적화, 네트워크 및 통신 통합 기술 등이 함께 발전해야 하며, 장기적인 R&D 전략이 필수적이다.

6 결론 및 전망

양자컴퓨팅 기술은 향후 10년 내에 다양한 산업에서 혁신을 불러올 것으로 예상된다. 특히 AI, 신약 개발, 금융, 보안, 최적화 분야에서 양자컴퓨팅의 실용적 활용 가능성이 높아지고 있으며, 글로벌 기업 및 정부의 투자도 증가하고 있다. 하지만 하드웨어의 기술적 한계, 알고리즘 최적화, 양자 오류 정정 기술의 성숙도 문제 등은 해결해야 할 중요한 과제로 남아 있다. 그럼에도 불구하고 양자컴퓨터와 HPC 하이브리드 컴퓨팅 플랫폼 구축을 통해 현재 NISQ 급 양자컴퓨터의 실용적 활용이 실제 산업과 연구 현장에서 가능할 것으로 사료된다.

결론적으로, 양자컴퓨팅의 융합 기술개발 및 사업화를 성공적으로 추진하기 위해서는 국제 협력, 지속적인 연구개발 투자, 인재 양성, 표준화 및 규제 정립이 필수적이다. 향후 양자컴퓨팅이 실질적인 산업 변화를 주도할 수 있도록 장기적인 국가 차원의 전략 수립과 학계-산업계간의 장기적 비전에 기반한 협력이 필요하다.

저자소개

정재호(Jae-Ho Cheong)

- 연세대학교 의학과 박사(종양외과학, 종양생물학)
- 연세대학교 의학과 석사
- (現) 연세대학교 융합기술원장
- (現) 연세대학교 융합기술원 양자사업단장
- (現) 연세대학교 의과대학 외과학 교수

참고문헌

〈국외문헌〉

- 1) Biamonte J., Wittek P., Pancotti N., Rebentrost P., Wiebe N., and Lloyd S. "Quantum machine learning." *Nature* 549, 195 (2017).
- 2) Cerezo M., Arrasmith A., Babbush R., Benjamin S. C, Endo S., Fujii K., McClean J. R., Mitarai K., Yuan X., Cincio L., et al. "Variational quantum algorithms." *Nat. Rev. Phys.* 3, 625 (2021).
- 3) Grover, Lov K. "Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack." *Phys. Rev. Lett.* 79, 325 (1997).
- 4) Harrow A. W., Hassidim A., and Lloyd S. "Quantum algorithm for linear systems of equations." *Phys. Rev. Lett.* 103, 150502 (2009).
- 5) Preskill J. "Quantum Computing in the NISQ era and beyond." *Quantum* 2, 79 (2018).
- 6) Rebentrost P., Mohseni M., and Lloyd S. "Quantum support vector machine for big data classification." *Phys. Rev. Lett.* 113, 130503 (2014).
- 7) Shor P. W. "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring." *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science.* leee, 1994.
- 8) Zhou L., Wang S. T., Choi S., Pichler H., and Lukin M. D. "Quantum approximate optimization algorithm: Performance, mechanism, and implementation on near-term devices." *Phys. Rev. X*, 10, 021067 (2020).

융합정책

글로벌 융합연구의
도전과 정착을 위한
연구지원체계 전략

최현석

글로벌융합연구협력지원센터장

1 서론

1. 글로벌 융합연구의 배경

과학기술의 급격한 발전과 4차 산업혁명의 도래는 학문 간 경계를 허물고, 새로운 혁신을 창출하는 융합연구의 범위를 더욱 확장시키며, 그 필요성을 더욱 부각시키고 있다. 또한, 글로벌 사회가 직면한 복잡한 문제들은 단일 학문이나 개별 국가의 연구 역량만으로 해결하기 어려운 경우가 많으며, 이를 해결하기 위해 국제적인 과학기술 협력이 필수적이다. 이러한 배경에서, 글로벌 협력을 기반으로 하는 융합연구의 필요성과 그 과학적·사회적 역할이 주목받고 있다.

본 리뷰에서는 현재 진행되고 있는 글로벌 융합연구의 방향성과, 글로벌 과학기술 협력을 통한 융합연구 혁신 창출을 위한 글로벌 융합연구 협력지원센터의 전략을 소개한다. 또한, 현재 글로벌 융합연구를 수행 중인 연구책임자의 현장 의견을 바탕으로, 앞으로 추구해야 할 글로벌 융합연구 전략을 제안하고자 한다.

2. 글로벌 공동연구와 융합연구의 특징과 현황

글로벌 공동연구 형태의 융합연구를 추진하는 배경에는, 기존의 국내 연구만으로는 더 이상 국제 경쟁력을 가진 기술을 개발하고 지속 가능한 기술 우위를 확보할 수 없다는 판단이 있다. 과거의 융합기술 개발 연구에서는 국내 기술 문제 해결이나 산업 발전을 위한 기술 개발이 주요 테마였으며, 세계의 기술을 추격하는 연구개발을 통해 기술의 국내 내재화를 이루고, 외국의 기술 수준에 도달하는 것을 목표로 수행되었다.

그러나 현재 우리나라의 기술력과 산업은 세계적인 경쟁을 이겨내야 하며, 국내 시장이 아닌 세계 시장을 목표로 삼아 외국의 수요와 환경에 맞는 기술을 개발해야 한다. 또한, 외국 연구자와의 협업을 통해 개발 비용을 절감하고, 현지 개발을 통해 시너지 효과를 창출하는 것이 필수적인 상황이다. 이에 따라 우리나라는 글로벌 선도 연구기관 및 연구자와의 초학제적 융합연구를 기획·추진하여, 국내 연구 역량과 자원만으로는 달성하기 어려운 복합 난제 해결 및 미래 사회의 과제에 도전함으로써 미래 개척 기술을 확보하는 것을 목표로 글로벌 융합연구 사업을 추진하고 있다.

글로벌 융합연구는 문자 그대로 글로벌 R&D와 융합연구의 통합으로 이해할 수 있다. 글로벌 융합연구를 이해하기 위해서는, 각각의 개념인 글로벌 R&D와 융합연구의 기존 전략과 의미를 살펴볼 필요가 있다.

글로벌 공동연구 형태는 다양한 필요성에 의해 국제 협력 체계를 구축하고 수행되어 왔다. 특히, 우주 개발, 원자력, 핵융합과 같은 대규모 인프라를 활용하는 연구의 경우, 국내 연구 환경이 충분하지 않기 때문에 국제 공동연구 수행이 필수적이었다. 또한, 국내 기술, 경험, 인프라만으로 해결하기 어려운 기술적 문제와, 기후변화 및 에너지와 같은 범지구적 연구 주제들이 글로벌 R&D의 주요 대상이 되어 왔다.

우리나라의 과학기술 역량 성장에 힘입어 글로벌 R&D 형태는 최근 들어 일반적인 정부 과제나 민간 연구개발에 있어서도 기존의 국내 연구자만으로 구성되었던 틀에서 벗어나 세계 유수 연구기관들과 공동연구팀을 구성하는 사례가 증가하는 추세다. 국제 공동연구를 위한 특정 목적의 연구 사업이 아니더라도, 다양한 융합연구를 위해 국제적인 연구팀을 구성하는 경우가 과거에 비해 크게 늘어나고 있다.

이러한 글로벌 협력(국제공동연구)의 활성화를 위해 2023년 말 과학기술정보통신부는 <그림 1>에서와 같이 세계를 선도하는 글로벌 R&D 추진전략을 발표하고 적극적인 국제공동연구를 지원하여 해외 연구기관과 협력하고 우리나라의 연구가 글로벌 공동연구를 주도할 수 있도록 추진하고 있다. 또한 국내 글로벌 R&D시스템을 혁신하고, 연구자들의 역량 강화하며, 글로벌 표준 연구 생태계를 조성하는 것을 전략으로 제시하고 있다.



융합연구는 기존의 분야, 주체, 국경을 뛰어넘는 연구로써 미래 사회 발전의 핵심 원동력이 된다. 새로운 분야를 창출하고, 더 나은 해결책을 모색하는 연구로서, 다양성을 창출하는 기반이 된다. 또한, 단기간에 성공을 보장할 수는 없으나, 가능성을 시험하는 무대가 되어 도전 가치를 증명해 내는 연구 과제로, 제4차 융합연구 활성화 기본계획에서 정의하고 있다.

융합연구에서는 4차 산업혁명 기술, 특히 인공지능(AI), 로봇, 바이오 등의 분야에서 연구 수요가 빠르게 증가하고 있으며, 이는 연구 분야와 산업계의 주요 흐름이 되고 있다. 따라서 빠르고 효과적인 융합연구 수행 전략이 필요하다. 융합연구개발의 추진 배경에는 현대 사회가 직면한 복잡하고 다차원적인 문제를 효과적으로 해결하려는 목적이 있다. 과학과 기술이 발전 하면서 연구 주제는 점점 더 세분화되고 전문화되고 있지만, 동시에 다양한 학문 분야의 협력을 요구하는 문제들도 증가하고 있다.

2023년 과기부에서 발표한 융합연구 활성화 기본계획에서는 ‘인류’, ‘사회’, ‘지구’ 세 가지 주요 카테고리로 구분하여 세부적인 융합연구 계획을 제시하였다.

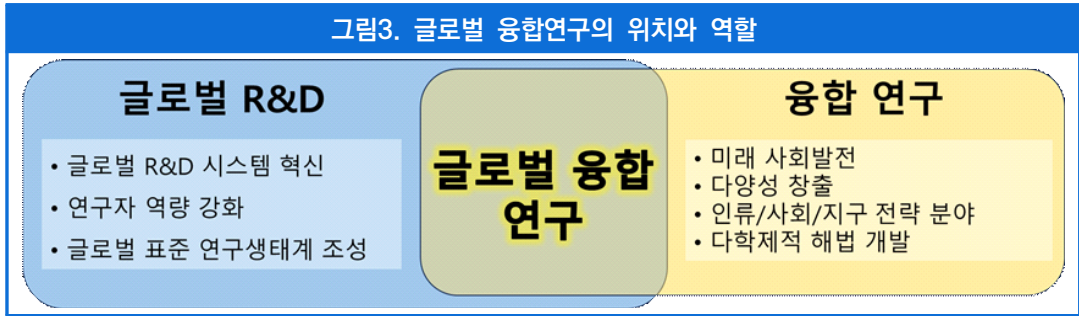


* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

3. 글로벌 융합연구의 위치와 역할

글로벌 융합연구는 글로벌 공동 연구개발과 융합연구의 연구 수행 범위와 방법의 특성을 융합한 연구방식으로 이해하는 것이 필요하다. <그림3>에서와 같이, 글로벌 융합연구는 융합연구 중에서도 글로벌 R&D의 의미를 가지며, 통합을 통해 시너지가 도출되는 영역이 될 것이

다. 그렇기 때문에, 국제적인 공동연구와 협력이 융합연구에서 시너지 효과를 일으키고, 융합 연구의 목적을 효율적으로 달성할 수 있는 연구 분야를 발굴해야 한다. 또한, 별도의 정책과 전략으로 접근해야 다른 연구개발과 차별화된 효과와 성과를 얻을 수 있다.



* 출처: 저자 작성

지리적/문화적 경계와 기술적 경계를 넘어서 확장해 나가는 경향은 위에서 설명한 글로벌 공동연구와 융합연구의 공통적인 부분이다. 이러한 공통점과 현재의 연구 환경에서, 글로벌 공동연구 형태의 융합연구는 자연스러운 결합이면서 전략적으로 연계됨으로써 다른 연구개발 사업과 차별화될 수 있으며, 그 성과로 또 다른 하나의 기술개발 전략과 정책으로 자리매김할 수 있을 것이다. 글로벌 융합연구에서 추구하는 형태는 융합연구가 지리적/문화적 경계를 넘어서 확장되고, 글로벌 공동연구에서 다양한 학문이 도입되는 형태일 것이다. 예를 들어, 기후변화, 전염병 대응, 인공지능 및 바이오기술과 같은 문제들은 단일 학문이나 특정 국가의 연구 역량만으로는 기술 개발이나 전문 인력 양성 문제를 해결하기 어려울 것이다. 이와 같이 글로벌 융합연구의 주요 역할은 글로벌 이슈 해결을 위한 기초·원천 연구, 대형 연구, 그리고 첨단 산업 육성을 위한 응용 및 개발 연구가 될 것이다.

글로벌 융합연구는 다음과 같은 연구개발의 다양한 변화와 효과를 기대할 수 있다.

첫째, 다양한 학문적 배경과 전문성을 결합하여 창의적이고 혁신적인 해결책을 도출할 수 있도록 한다. 서로 다른 연구 문화와 방법론을 가진 연구자들이 협력하면 기존의 연구 방식에서 벗어나 새로운 접근법을 모색할 수 있으며, 이를 통해 보다 효과적인 융합연구를 기대할 수 있다.

둘째, 연구 자원의 효율적인 활용을 가능하게 한다. 대규모 연구 프로젝트는 막대한 자금과 인프라를 필요로 하며, 한 국가나 기관이 이를 단독으로 감당하기 어렵다. 여러 국가가 협력하면 연구비를 분담하고 첨단 연구 장비 및 데이터를 공유할 수 있어 연구의 생산성을 높일 수 있다. 프랑스에 건설 중인 국제핵융합실험로(ITER)와 같은 과제가 좋은 예가 될 것이다. 순수과학 및 제조 생산 기술 등 각 분야에 특화된 장점을 가진 각 국가의 연구 단체들이 모여 공동으로 추진하는 연구는 글로벌 융합연구의 좋은 예라고 할 수 있다.

셋째, 연구 결과의 보편성과 적용 가능성을 확대하는 데 기여한다. 특정 지역에서 개발된 기술이나 이론이 다른 지역에서도 효과적으로 적용될 수 있는지를 검증하려면 다양한 환경과 조건에서 실험과 연구가 수행되어야 한다. 팬데믹 시기에 백신의 개발과 검증, 그리고 생산이 글로벌 형태로 진행된 사례가 그 예가 될 수 있다. 국제 공동연구는 이러한 검증 과정을 촉진하고 연구 결과의 신뢰성을 높이는 역할을 한다.

넷째, 연구 인력의 교류와 교육에도 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 연구자들은 다양한 문화적 배경을 가진 동료들과 협업하면서 글로벌 연구 네트워크를 구축할 수 있으며, 이는 장기적으로 연구 역량을 강화하는 데 기여한다. 또한, 젊은 연구자들에게는 글로벌 연구 환경에서 경험을 쌓을 기회를 제공하여 미래의 융합연구를 선도할 인재를 양성할 수 있다.

국제 공동연구 협력의 측면에서 글로벌 융합연구는 다양한 분야의 지식을 통합하고, 연구 자원을 효과적으로 활용하며, 연구 결과의 적용 범위를 확대하는 데 필수적인 요소이다. 이를 통해 과학과 기술의 발전을 촉진하고, 인류가 직면한 복잡한 문제들을 해결하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

2 본론

1. 글로벌 R&D 체계 방향과 글로벌 융합연구 역할

정부에서 발표한 12대 국가전략기술 분야에서 글로벌 융합연구의 역할을 통해 향후 글로벌 융합연구의 방향을 가늠해 볼 수 있다. 각각의 전략기술들은 우리나라의 미래 신산업으로서 기반이 될 기술들이다. 이들 기술들은 우리나라 단독으로 기술 관련 산업에 지속 가능성을 만들고 공급과 수요 메커니즘을 완성시킬 수 없다. <표1>에서와 같이 12대 국가전략기술들은 세계 시장과 국제적인 공급망과 분리될 수 없기 때문에 소재나 핵심 요소 및 주요 시장이 해외에 있어 국제적 협력과 글로벌 융합연구가 필수적인 기술 분야이다. 글로벌 융합연구의 범위와 분야가 무엇인가로 정의하기보다는 연구 추진과 수행의 형태를 통해 역할을 정할 수 있을 것이다.

표 1. 12대 국가전략기술 분야와 글로벌 융합연구

구분	12대 국가전략기술	글로벌 융합연구의 역할과 필요성
1	반도체·디스플레이	반도체 장비·소재의 해외 의존도가 높아 공급망 협력 필요
2	이차전지	배터리 원자재(리튬, 니켈, 코발트 등) 확보를 위해 자원 부국과 협력 필수
3	차세대 원자력	SMR(소형 모듈 원자로) 등 차세대 원전은 개발 비용이 높고, 원천 기술 라이선스 분쟁 해소와 글로벌 안전 규제 필요
4	우주항공·해양	우주 탐사 및 위성용 핵심부품 수급 및 운영에 국제적 협력 필요
5	사이버 보안	사이버 공격은 국경을 초월한 위협이므로 국제 정보 공유 및 협력이 필요함.
6	인공지능	AI 윤리·표준화 문제 해결, GPU 및 데이터 센터 등 기술 경쟁력 확보를 위해 글로벌 협력이 필요함.
7	양자 기술	양자컴퓨팅·양자통신 등은 초기 연구 단계로, 국제 공동 연구를 통해 기술 개발 속도를 높여야 함.

8	바이오	신약 개발 및 전염병 대응을 위해 글로벌 임상시험과 데이터 공유가 필수
9	첨단로봇 및 제조	스마트팩토리·로봇 기술은 글로벌 공급망과 밀접하게 연계되어 있어 협력이 필요
10	차세대 모빌리티	자율주행 기술의 도로 환경 및 법·제도 표준화를 위해 국제 협력이 필수
11	첨단 소재·부품·장비	반도체, 배터리, 디스플레이 등의 핵심 소재와 장비를 해외에서 확보해야 하므로 공급망 협력이 필요
12	탄소중립·에너지	기후변화 문제는 전지구적으로 국경이 없어 탄소중립 실현을 위해 수소·재생에너지 기술의 국제적 공조 및 협력 필수

향후 국제공동연구의 방향과 형태가 정부의 글로벌 R&D 체계 개편 방향에 따라 변화한다면 글로벌 융합연구의 방향성에서도 변화가 필요할 것으로 생각된다. <그림 4>는 과기부에서 발표한 글로벌 R&D의 체계 개편 방향을 나타낸 것으로써 탁월성 강화, 개방형 연구 및 해외 진출 지원이라는 세 가지 큰 틀에서 체계 개편을 제시하고 있다. 이러한 정책에 따른 융합연구의 방향성과 과제 발굴을 위한 전략에 반영되어야 할 것이다.



* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

2. 최근 주요 사업을 통한 글로벌 융합연구 이해

현재 진행 중인 글로벌 융합연구에서 대표적인 연구 과제 사업은 한국연구재단의 "글로벌 융합연구지원" (2024년) 사업을 예로 들 수 있다. 과기부에서 발표한 융합연구 활성화 기본계획에서 분류한 인류, 사회, 지구에서 현존 국내 연구 역량만으로는 돌파가 불가능한 분야를 발굴하고, 임무 중심 초학제적 글로벌 융합연구를 통한 글로벌 복합 난제 해결 및 기술 한계 돌파를 목적으로 하고 있다. 전형적인 글로벌 융합연구 사업이다.

세계 최고 수준의 1개 이상의 해외 우수 연구기관(연구자)과의 실증적 융합연구를 통해 미래 사회 개척을 위한 선도 기술을 확보하는 것을 목표로, 수요 조사 단계에서 <표 2>와 같이 12대 미래 개척 융합 분야를 제시하고 이에 연계하여 글로벌 복합 난제와 기술 한계를 돌파하는 미래 사회를 위한 선도 기술의 수요 조사를 받아 과제를 도출하였다. 미래 개척 융합 분야의 세 가지 분야별 4개의 세부내역이 있어 총 12개의 세부내역에 따른 융합 지원 사업 연구 분야가 정의되었다. 각각의 세부 분야는 글로벌 복합 난제에 대한 분야로 정의되어 있다.

표 2. 2024년 진행 글로벌융합연구지원사업 연구 분야

	미래개척[융합]분야	개념
I. 자유 롭고 상생 하는 인류	1 건강수명 증진 플랫폼	인간의 신체기능을 확장시키거나 인공지능에 인간적 요소를 도입하여, 인간의 진화와 신체적 건강을 이루는 제반 기술 분야
	2 디지털 정신건강 통합 솔루션	정신의학적 장애·질병을 예방, 치료하기 위하여 근거 기반의 치료적 중재를 제공하는 소프트웨어 및 기기 개발을 위한 기술 분야
	3 복합적 인류생존 요소 확보	인류의 생존을 위한 의·식·주 기본권 보장과 인류 지속가능성 확보를 위한 복합적 기술 분야
	4 인구소멸·변화 대응	인구구조 변화 문제의 해결을 위해 사회구성원 간 건강한 관계 구축과 개인과 삶의 질 향상을 돕는 기술 분야
II. 한계와 제약이 없는 스마트 사회	5 미래사회 주체의 공존	물리 데이터가 상시 연동되어 미래사회 주체(사람-기계-디지털휴먼)가 언제 어디서든 연결 및 공존하는 사회를 구현하는 기술 분야
	6 시·공간의 확장과 연결	가상공간을 확장 구축하여 현실을 대체하거나 시뮬레이션 기술로 사회 이슈를 탐지·해결하는 등 사회의 효율적 운영 관련 기술 분야
	7 사회 안전망의 자율 진화	다양한 미래 불확실성 및 위험인자로부터 국민을 보호하고, 최소한의 사회 시스템 운영을 보장하는 보안·안전 관련 기술 분야

III. 지속 가능한 지구	8 미래형 모빌리티 시스템	이동의 편리성과 환경 영향 최소화를 모두 달성하기 위한 장기적 관점의 미래형 모빌리티 및 시스템 관련 기술 분야
	9 기후변화 대응	자연생태계에 나타나는 장기적인 변화를 파악하기 위해 기후변화의 원인과 현상을 조사 분석하여 기후변화를 감시·예측 및 대응하는 기술 분야
	10 청정에너지 융합	화석연료 에너지난 해결과 탄소중립을 달성하기 위해 기존 신에너지와 재생에너지 기술을 융합하여 최대 효과의 청정 에너지를 창출하는 기술 분야
	11 지구환경회복 및 치유	지구 환경을 정화·복원하기 위해 토양·수환경·산림 분야의 오염 원인 및 유해 물질을 제거·관리하는 기술
	12 극한 미지 영역 개척 (우주/심해/지하)	지구 내 생활 공간 부족 및 자원 고갈 문제를 해결하고자 우주·심해·극지 등 미지의 극한 공간을 개척하기 위해 필요한 기술을 개발

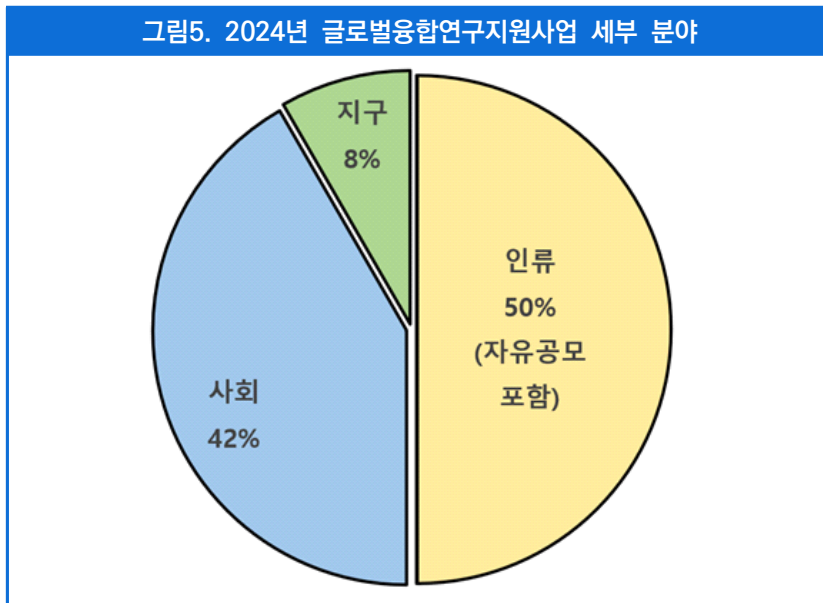
2024년 시행된 글로벌 융합연구지원 사업에서는 융합연구 활성화 기본계획에 따라 분류된 ①인류, ②사회, ③지구에 대한 수요 조사 기반 공모와 ④자유 공모 주제에 대한 사업계획서를 평가하여 다음의 <표 3>와 같이 총 12개의 과제가 선정되어 수행되고 있다.

<그림 5>는 선정된 과제의 분야 비율을 보여주고 있다. 자유 공모 과제에서 미래 개척 융합 관련 분야로 분류된 인류 분야가 절반을 차지하며, 사회와 지구 분야가 그 뒤를 이었다. 선정된 과제를 통해 알 수 있는 점은 "지속 가능한 지구" 분야에서 글로벌 R&D로서 참여할 해외 기관을 발굴하는 것이 쉽지 않으며, 특히 연구 결과의 검증이나 실증에 있어 상대적으로 어려움이 많아 사업 제안서의 빈도도 낮고 선정에 어려움이 있는 것으로 파악되고 있다.

표 3. 2024년 글로벌융합연구지원사업 선정 본과제

순번	과제명	분야	과제분야	공동연구 국가
1	고난도 조작로봇이 스스로 실험하는 스마트실험실 완전 자율화 기술개발	사회	로봇	캐나다
2	Rock-on-a-chip 기반지중 CO2 광물화 및 H2저장 프로세스 예측 기술 개발	지구	에너지 환경	미국
3	고정밀 고신뢰도 텔레인터랙션 플랫폼	자유공모	메타버스	미국
4	난청 및 치매 극복을 위한 글로벌 융복합 헬스케어 솔루션 연구	인류	의과학 의공학기술	미국
5	뇌과학과 수리생태학적 모델링을 통한 인구소멸 문제 해결	자유공모	뇌과학	미국/프랑스
6	생애전주기 이식형 나노메쉬 뇌-기계 일체화 인터페이스	인류	뇌-기계	미국

	기반 신경 보철을 활용한 난치성 뇌질환 치료		인터페이스	
7	실외 혼잡 환경에서 위협상황 예측 및 선제대응을 위한 센티넬 AI (Sentinel AI) 시스템 기술 개발	사회	인공지능	미국
8	인간 수준의 다중감각 센싱 시스템과 정밀 조작 원격 인터페이스를 갖춘 인간형 아바타 로봇 개발	사회	로봇	미국
9	초경량 고해상도 다차원 메타표면 기반 바이오이미징 및 센싱 시스템 구현	자유공모	나노	미국 독일
10	초대규모 무인이동체의 seamless 정보 공유 기반 harmonic-space 구성 및 운용 기술 개발	사회	로봇	미국
11	IoT 센서 정보 기반의 새로운 도감청 공격 탐색 및 방어 기술 개발	사회	데이터 AI 보안	미국 싱가포르
12	고면역원성 항원 포획을 위한 모듈식 DNA 나노구조체 기반 범용 암 치료 백신 개발	자유공모	건강	미국



3. 글로벌 융합연구의 도전과 한계

선정된 과제에 대한 연구 분야 빈도 분석과 선정된 과제의 연구 책임자들에게 글로벌 융합 연구 지원 과제의 준비 과정에서의 어려운 점과 의견을 수집하였다. 또한, 글로벌 융합연구지원센터의 기획 단계에서 대학과 출연(연)의 국제 공동연구 과제를 수행한 경험이 있는 연구 책임자들을 통해 과제 준비와 수행 시 어려운 점을 조사하였다. 이를 통해 향후 글로벌 융합 연구 지원 사업에 대한 전략을 제안하였다.

▣ 국내의 국제공동연구 추진 유형의 한계점

국내 글로벌 공동연구 활성화를 어렵게 하는 요소는 글로벌 공동연구 규모의 부족과 해외 연구기관과 활발히 협력할 수 있는 제도적 장치가 아직 부족한 실정이다.

- 최근 5년간 연 8% 이상 증가하여 2023년에는 5,075억 원 규모에 달하고 있으나, 이는 정부 전체 R&D의 약 1.6%에 불과하며 대부분 소규모 과제 중심으로 운영 중이다. 특히, 해외의 우수 연구기관의 연구비에 비하면 국내의 글로벌 융합연구에서 해외 기관을 위한 연구비는 낮은 수준으로, 연구비를 통한 우수 연구기관 유인에는 어려움이 있다.
- 국제 공동연구 추진 유형으로 세 가지로 분류되지만, 현재 대부분의 글로벌 융합연구는 일반형 과제로 진행되고 있다. 2024년 선정된 과제는 모두 일반형으로, 다른 유형의 선택과 관련 문서 준비가 매우 어려운 조건이었다. 공동 기관형 등 글로벌 연구 사업의 다양성이 가능하도록 제도와 관련 규정의 점검이 필요하다.

표 4. 국제공동연구 추진 유형

구분	i) 일반형	ii) 공동기관형	iii) 별도 과제형
해외기관 참여방법	해외기관을 활용하여 연구를 수행	해외기관이 연구개발기관으로서 연구개발과제를 공동으로 수행	각 별도의 과제를 구성하고 연구 내용상으로 협력
협약 여부	해외기관과 협약 없음	협약 체결	해외기관과 협약 없음
수행 방식	연구개발기관 외	연구개발기관 (주관, 공동)	국가별 별도과제 구성
연구개발비 지급 방식	계좌이체 (국내기관이 지급)	계좌이체 (전문기관이 지급)	해외기관에 지급 없음 (해당 국가에서 지급)
선정 및 결과 평가방식	해외기관에 대한 별도 평가 없음	과제단위로 평가 실시	사업별 평가방식 상이

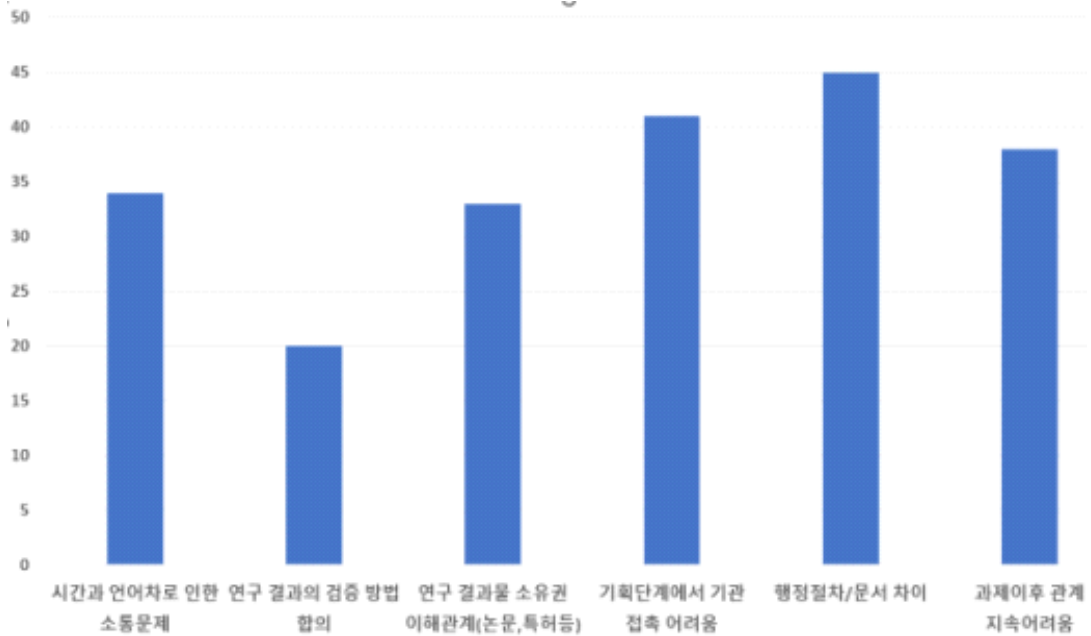
▣ 무엇이 글로벌 융합연구 수행에 어려움을 만드는가?

실제 국제 공동과제를 기획하고 수행한 연구자들과 더불어 2024년 글로벌 융합연구지원 과제의 연구책임자에게 사업 관련 업무 중 난점이 무엇인지 조사한 결과, “행정 절차 및 문서 작업 시 외국 기관과의 차이”를 가장 많이 지적하였다.

외국 기관과의 공동연구 추진을 위한 협의에서 국내 과제에서 요구하는 내용과 절차(증명서 등)는 해외 기관의 공동연구 수행에 어려움을 주고 있다. 우리나라의 연구책임자 입장에서도 외국의 문서가 한국의 제도와 절차에 맞지 않아 어려움을 겪고 있다고 하였다.

그림6. 국제공동연구 수행 애로사항

- 조사 일시: '24년 1월
- 조사 대상: 국제공동과제 수행 경험자 대상(한국생산기술연구원 및 참여 기관)
- 기관 내 국제공동연구 수행 연구책임자 조사 결과 양국 간 행정절차 차이, 기획 단계에서 우수 연구기관 연계 어려움, 시간과 언어차로 인한 소통 문제를 가장 큰 애로사항으로 응답



■ 글로벌 R&D 수행시 애로사항 경험 사례

- (사례 1) 국제 공동연구의 지속가능성 확보와 추가적 성과가치 창출 어려움
 - 기술개발 결과물의 성과가 좋아 국제협력 공동연구에 대해 세계 굴지의 기업들 및 유럽, 미국 등에서 각광받음
 - 그러나 실제로 협력체계를 구축하고 기술이전을 한 주체는 기술 전문가로서 연구소 및 연구원 차원에서 실행되어, 기술 가치의 극대화 달성을 이루지 못함

○ (사례 2) 연구 주체간의 이해관계 대립 해소 어려움

- 중소기업과 해외기관과 산학연 공동연구를 수행하는 중 참여기업의 특허 출원과 해외기관의 논문 발표에서 특허권의 보호에 대한 민감한 문제가 발생하여 연구과제의 원활한 수행에 지장을 초래
- 언어와 문화가 다른 상호간의 소통 문제가 발생하여 연구 지연

○ (사례 3) 연구자 개인보다 기관명으로 과제를 준비할 때 유리한 대우

- 유럽 연구기관과 공동연구를 도출하는 과정에서 기관 내 전문 담당자가 대응하자 연구자 개인이 직접 계획서를 준비할 때보다 해외기관의 대응이 좀 더 적극적으로 변화
- 기관 차원에서 행정과 법률 전문가가 나서서 처리하는 것이 보다 안전하고 신뢰감이 가서 연구에만 집중 가능

▣ 해외 기관과 주관기관 간의 연구 계약의 문제와 연구비 처리

국내의 연구과제는 “국가연구개발혁신법”(이하 혁신법)에 따라 수행되고 있다. 이것은 우리나라의 현실에서만 적용 가능한 것으로 외국 기관에 적용하기엔 어려운 점이 있을 수 있다. 글로벌 융합연구 지원 사업도 당연히 국가 예산으로 진행되는 연구과제이므로 혁신법에 준하여 연구비를 집행해야 한다. 연구과제에 참여하는 해외 기관도 혁신법에 근거하여 연구를 수행해야 하는가에 대해 아직 명확한 근거는 나와 있지 않은 실정이다. 또한 연구비 사용 집행에 있어서 해외 기관에 지급한 연구비의 사용 내역에 대한 증빙, 해외 기관의 간접비 비율 인정 범위 등등 국내 규정이나 법과 해외 기관들의 규정이 충돌하는 경우가 많아 연구 현장의 책임자들은 이러한 문제에 어려움을 겪고 있다.

연구 계약 단계에서 우리나라는 과제 선정 후 일정 기간 내에 계약서의 제출을 요구하고 있지만 외국의 계약 관련 업무 절차는 어떤 경우에는 매우 느리고 반복된 협상에 의해 결정되는 경우가 있다. 특히 국내 총괄 책임자 연구기관이 해외 기관과의 연구 계약에 대해 익숙하지 않을 경우 시간이 매우 많이 필요하고 영문 계약서 작성에 변호사 전문가 조력을 얻기 위한 비용 처리 문제 등 상세한 행정 처리 절차에 미흡한 부분이 많아 연구 책임자의 부담이 큰 현실이다.

- (사례 1) 미국 대학의 간접비 비율이 55%로 계상되어 이에 대한 소명 요구
 - 국내의 기관에서 과도한 간접비 비율로 지적하고 조정을 요구하였지만 미국의 대학측에서는 계약서 수정 불가 방침 고수
 - 과제 공고시 해외기관의 간접비에 대한 제한이 없는 상태에서 고시되었으며 또한 영문으로 작성된 공고가 없어 해외기관과의 협상에 어려움

- (사례 2) 1차년후 연구비 감액에 따른 해외기관 지급 연구비 변경 어려움
 - 연구 과제 시행 1차년(6개월 미만)이후 연구비 감액에 따른 해외기관 연구비 지급액 감액을 위한 계약 내용 변경 요구에 대해 해외기관의 반발
 - 국내 과제의 경우 차년도별 연구비 감액은 흔한 일이지만 해외기관은 계약후 연구활동에 하자가 없는 상태에서 일방적 감액은 이해를 얻기 힘든 상황임
 - 국제적 관례에 맞지 않은 상황으로 연구비 감액 상황을 이해시키기 어려워 국내 기관에서 연구비 삭감에 따른 예산감액을 모두 떠안게 되는 상황

- (사례 3) 연구과제 수행 중 발생하는 지식재산권(논문,특허)의 소유권 관계
 - 공동연구 형태에서 발생특허에 대해 국내의 일방적인 소유 주장은 외국기관에서 받아들여지지 않고 있으며 해외 기관에서 계약서 변경 불가 확인
 - 해외 기관의 역할을 용역이나 제한적 역할로 정의하는 경우를 제외하고는 공동연구 형태에서는 국내 기관의 특허 소유권 보유 계약은 어려운 현실

4. 글로벌 융합연구 수행에서 풀어야 할 숙제

4.1. 국가 간 연구 환경 및 제도의 차이

각국의 연구 환경과 제도는 다르게 운영되므로, 협력 과정에서 조율이 필요하다. 연구 윤리 기준, 지식재산권(IP) 보호 정책, 연구비 지원 방식, 행정 절차 등이 국가별로 상이하여 연구 진행 속도가 늦어질 수 있다. 특히, 연구비 집행 방식이 국가마다 달라 자금 조달과 배분 과정에서 어려움이 발생할 수 있다. 우리나라는 다른 나라에 비해 연구계획서 양식이 복잡하고 요구 정보량이 많아 연구책임자들의 부담이 되고 있다.

4.2. 언어 및 문화적 차이

글로벌 연구 협력을 위해서는 연구자 간 원활한 의사소통이 필수적이다. 그러나 언어적 장벽이 존재하면 논의 과정에서 오해가 발생할 가능성이 높고, 협력의 효율성이 떨어질 수 있다. 또한, 연구 수행 방식과 협업 문화가 다를 경우, 연구 목표나 방법론을 조율하는 데 시간이 걸릴 수 있다.

4.3. 연구데이터 및 기술 공유의 제한

국가마다 연구데이터 및 기술의 공유에 대한 법적, 정책적 제한이 존재한다. 특히, 첨단기술이나 전략적 기술 분야에서는 국가 안보와 관련된 규제가 많아 국제 공동연구가 어렵다. 예를 들어, 최근에 뉴스화가 된 바와 같이 미국 DOE 관련 연구자가 한국 정부 관계자와 접촉 시 미국 정부에서는 해당 자국 연구자들에게 신고를 의무화하고 있다. 특정 기술이나 국가가 수출통제 대상 혹은 주의 대상에 포함되면 연구데이터를 자유롭게 주고받을 수 없으며, 이는 연구 진행에 큰 장애가 될 수 있다.

4.4. 연구비 및 지속 가능성 확보 문제

글로벌 연구과제는 장기적인 협력이 필요하지만, 연구비 지원이 단기적으로 이루어지는 경우가 많다. 한국에서는 정부 주도의 연구비 지원이 많은데, 특정 기간이 지나면 연구비가 끊기는 경우가 발생할 수 있다. 반면, 해외 연구 파트너들은 장기적인 연구 계획을 수립하는 경우가 많아 협력 지속 여부가 불확실해질 수 있다. 이러한 국내 특성이 부정적으로 알려진다면 해외기관과의 연구 협력의 초기 단계에서부터 공평한 협상을 어렵게 할 수 있다.

4.5. 지식재산권 및 연구 성과 배분 문제

국제 공동연구를 수행할 때 연구 성과와 지식재산권(IP)의 소유권을 어떻게 배분할 것인지에 대한 협의는 계약의 핵심 부분이다. 한국 기업이나 연구기관이 연구에 기여한 정도에 따라 공정한 배분이 이루어져야 하지만, 협력국과의 협상 과정에서 불리한 조건이 적용될 가능성도 있다. 특히, 선진국의 우수 연구기관과 협력할 경우 한국의 연구기관이 불리한 위치에 놓일 가능성이 높다.

4.5. 상호 연구원 방문과 공동 실험 시행 한계

현재 글로벌 융합연구지원 사업은 해외 기관과의 상호 방문 및 공동연구를 필수로 하고 있어, 해외 기관의 연구 책임자가 국내를 방문하거나, 한국 연구원이 해외 현지에서 공동연구를 수행하는 방식으로 진행되고 있다. 그러나 체류 비용과 상호 일정 조정에는 어려움이 따른다. 실질적인 공동연구를 유도하고, 국내 연구원들이 다양한 경험을 쌓을 수 있도록 하기 위해서는 체류 비용의 현실화와 연구비의 안정적인 지원이 필요하다. 위의 도표에서도 알 수 있듯이, 공동연구의 주요 해외 기관이 미국에 집중되어 있는 점은 유의할 필요가 있다. 최근 국제 정세를 보면, 특정 국가에 집중되는 모습보다는 지속 가능성을 위해 다양한 국가와의 협력 활동이 중요할 것이다.

글로벌 융합연구의 원활한 수행을 위해서는 국가 간 연구 환경과 제도의 차이를 이해하고, 연구자 간 원활한 소통과 협력을 위한 체계를 마련해야 한다. 즉, 글로벌 R&D 혁신안에서 제시된 전략인 국제 공동연구 생태계 구축이 여기에 해당할 것이다. 연구 자금의 지속적인 지원과 지식재산권 보호 방안을 명확히 하고, 연구 성과의 공정한 배분을 위한 협상력을 갖추는 것이 중요하다. 이를 통해 글로벌 연구 네트워크를 효과적으로 활용하고, 국제적 연구 경쟁력을 강화할 수 있을 것이다.

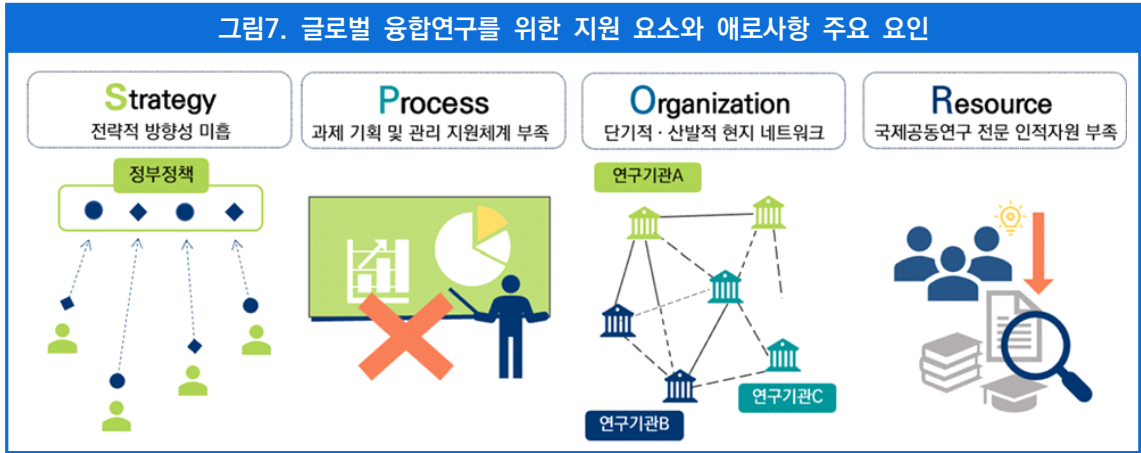
5. 글로벌융합연구협력지원센터의 역할 설정과 전략

5.1. 글로벌융합연구협력지원센터

글로벌 융합연구 관련 정부의 정책 방향에 따라 기존의 글로벌 협력문제를 개선하고, 글로벌 복합 문제 해결, 국가전략기술 등 국가차원의 최고 수준 융합연구 결과를 도출하기 위하여 글로벌융합연구에 대한 체계적 지원 필요성에 따라 “글로벌융합연구협력지원센터”(이하 협력지원센터)를 한국연구재단의 과제로써 구축하게 되었다.

앞에서 기술한 바와 같이 글로벌 융합연구 사업의 수행에서 발생하는 애로점에 대하여 <그림7>에서와 같이 전략, 관리, 네트워크 및 인적 자원에 대한 문제로 구분하고 이에 대한 지원 방안을 도출하였다.

협력지원센터는 국내외 글로벌 융합연구 수요를 파악하고 뛰어난 국제협력 역량 및 네트워크를 가진 기존 재외 주요 과기혁신국제협력기관 등이 직접 참여 또는 연계를 통해 글로벌 복합 문제 발굴부터 연구기획 지원, 연구과정 지원, 성과 확산, 글로벌 융합연구 저변 확대 등 전주기적 협력 생태계 구축 지원의 역할을 수행함으로써 앞서 언급하였던 글로벌 융합연구 사업의 수행에 있어 애로사항을 해소하고 연구수행에 집중할 수 있도록 지원하는 역할이다.



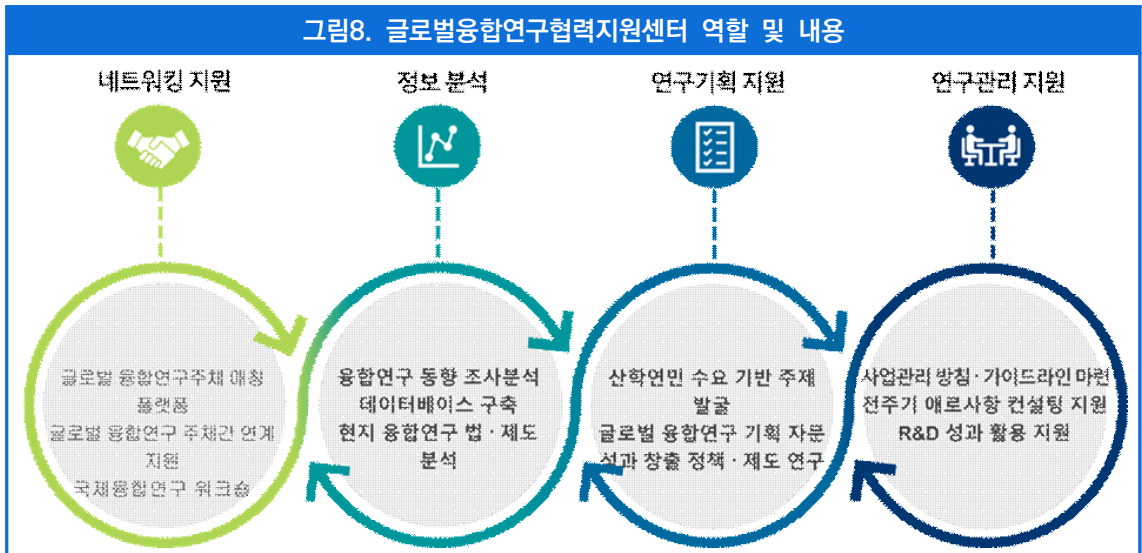
* 출처: 글로벌융합연구협력지원센터 (2024)

5.2. 글로벌융합연구협력지원센터의 역할

글로벌 융합연구 사업의 수행 중 연구자들이 겪는 애로 사항의 해소 방안으로 4가지의 실행 방안이 요구되었으며 협력지원센터에서는 이에 대한 구체적인 실행 방안을 다음과 같이 정하였다.

- (연구기획 지원) 글로벌 융합연구 수요 기반 주제 발굴, 현지 지역·국가에 적합한 공동연구 기획 상세 자문, 글로벌 융합연구 주제 발굴위원회 운영 등
 - 글로벌 복합 문제·수요 발굴, 글로벌 융합연구 R&D 선기획 과제에 대한 실효성·체계성 검증 지원, 글로벌 융합연구 R&D 정책·제도 발굴 및 연구 등
- (정보분석) 글로벌 메가트렌드 기반 융합연구 동향 조사·분석, 글로벌 융합연구 주제 및 연구성과, 인프라 등 데이터베이스 수집 및 분석, 현지 지역·국가 융합연구 관련 법·제도 분석 등

- (네트워킹 지원) 글로벌 융합연구 주체·연구 분야 간 수요 파악 및 매칭 플랫폼 운영, 국제융합연구 워크숍 기획·개최, 국내외 우수 융합연구주체 발굴 및 국제협력 연계 지원 등
- (연구관리 지원) 해외 연구기관과의 협약, 평가, 정산 등 사업 관리 방식에 대한 방참·가이드라인 등 구축 지원, 해외 연구기관별 상이한 연구관리 및 성과 배분 규정 대처 지원, 기타 연구추진 과정 애로사항 등 컨설팅 지원, 글로벌 융합연구 협약 체결시 필요한 연구자 법적·행정적 부담 최소화 지원, 국제융합연구 R&D 성과 활용방안 구축 지원 등

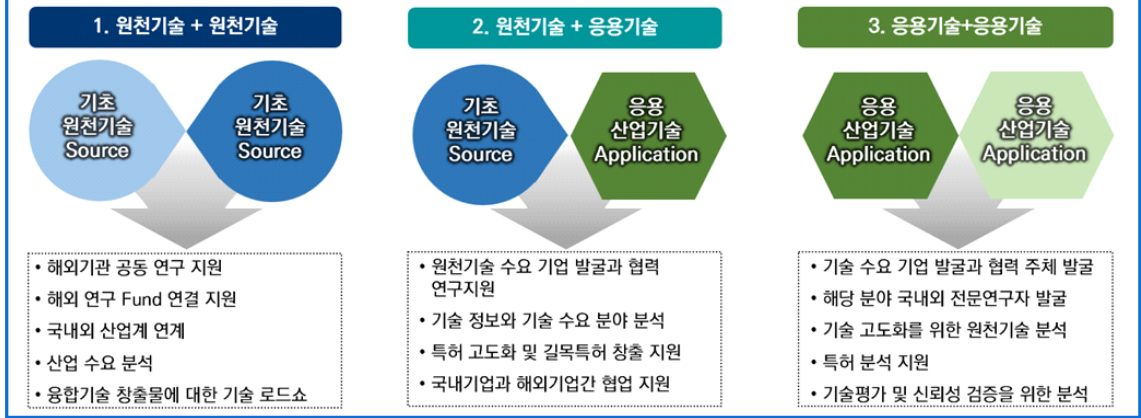


* 출처: 글로벌융합연구협력지원센터 (2024)

5.3. 센터의 융합기술 형태에 따른 대응 및 지원 활동 전략

글로벌 융합연구의 국내외 협력 기술 구성에 따른 지원 방향을 도출하여 지원하고 있다. 원천 기술 간의 융합이나 원천기술과 응용 산업 기술의 융합 등 어떤 수준의 기술로 국제 공동연구를 수행하는가에 따라 지원 수요 및 종류를 맞춤형으로 지원하고 있다. 원천기술을 보유한 국가 혹은 기관에 대한 지식재산권에 대한 분석을 지원하며 응용 산업기술을 보유한 경우 사업화 개척을 위한 검증과 기업 협업 네트워크를 지원하는 형식이다. <그림 9>는 각 형태별 맞춤형 지원 활동의 예시로서 현재 수행 중인 사업들에 대해서도 지원 활동을 수행하고 있다. 이를 통하여 향후 과제들의 성과들이 실질적인 신시장 개척에 이르도록 지원하는 것이 목표이다.

그림9. 기술 융합 모델에 따른 지원 방안

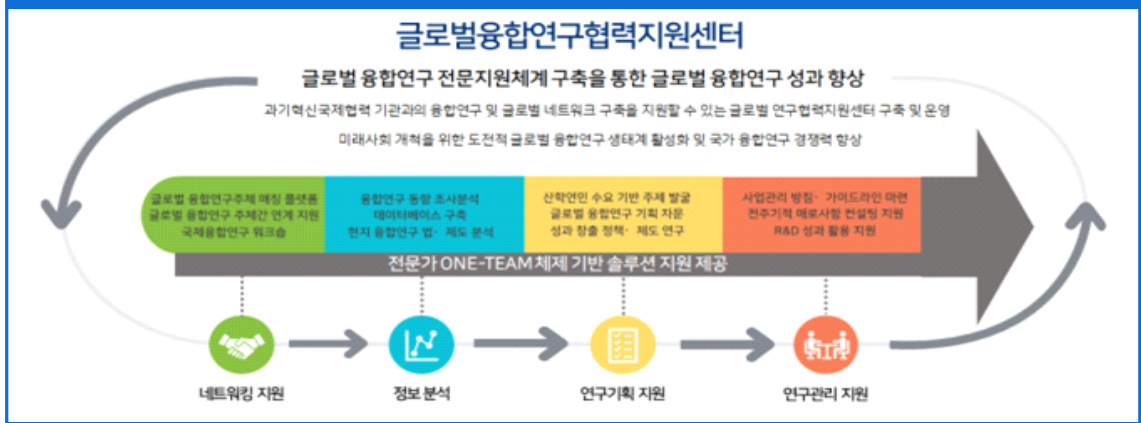


* 출처: 글로벌융합연구협력지원센터 (2024)

5.4. 글로벌 융합연구의 전주기적 지원 활동 구성

협력지원센터에서는 글로벌 융합연구 과제의 기획에서부터 조사, 수행 및 관리에 이르는 과제의 전주기적 일정에 맞춘 지원 활동을 도출하고 과제의 수행에 맞추어 관련 지원 활동을 전개하고 있다. <그림10>에서 보는 바와 같이 전주기적 순환 관계의 지원 활동을 통해 과제 수행 기간 중 지속적인 도출 성과를 관리하고, 새로운 방향으로의 전략 수립을 지원함으로써 연구 과제 이후에도 해외 기관과의 네트워크를 유지할 수 있도록 한다. 결과적으로 글로벌 융합연구의 지속가능한 생태계 구축을 목표로 하고 있다.

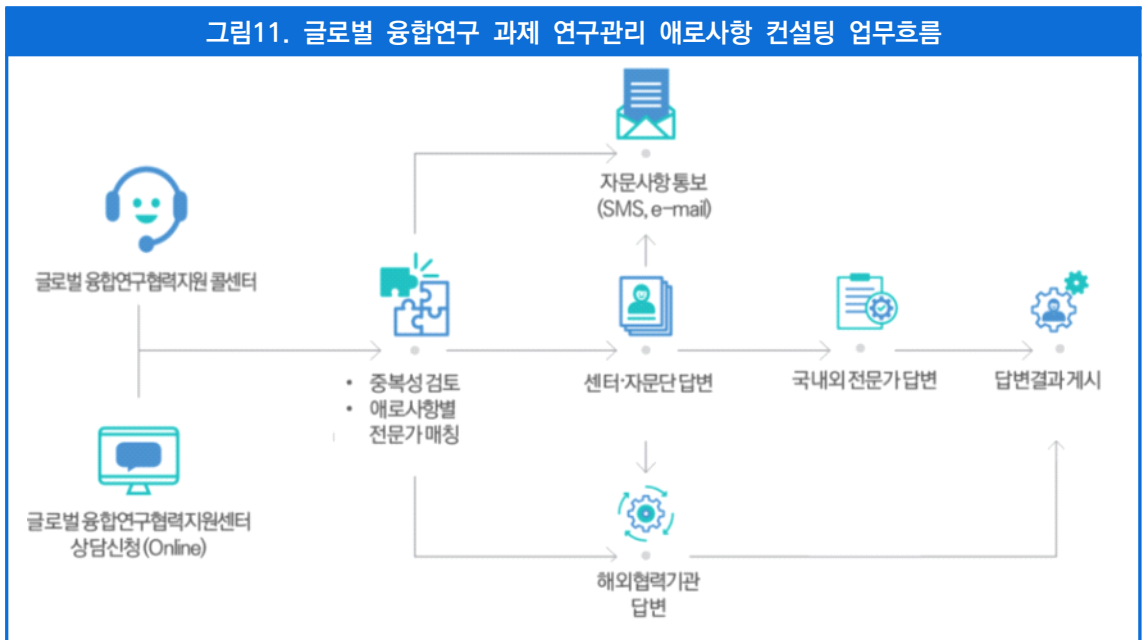
그림10. 글로벌융합연구협력지원센터 종합 운영 방안



* 출처: 글로벌융합연구협력지원센터 (2024)

5.5. 글로벌 융합연구의 애로사항 수집 및 해소를 위한 지원 활동

글로벌 융합연구지원 사업을 수행 중인 연구 책임자의 대부분은 연구 자체의 난이도보다 행정 과 운영상 규정에 대한 부분에서 더 큰 어려움을 호소하고 해결 지원을 요청하였다. 특히 해외 기관과의 연구 계약서에 대한 자문 요청이 가장 많았으며, 이에 대해 글로벌 융합연구협력지원 센터는 변리사 및 미국 내 로펌의 전문 변호사를 통해 계약 원문에 대한 해석과 자문을 진행하고 있다. 해외 기관과의 계약 검토 외에도 연구비 집행, 성과 홍보 및 규정에 대한 연구행정 전문가의 조언도 요청되었다. 이러한 애로사항을 적극적으로 수집하고 해소 방안을 검토하여 제시함으로써, 연구 관리 기관과의 소통을 원활하게 하고, 연구 개발 실무자들의 행정 부담을 줄여 나가고 있다.



* 출처: 글로벌융합연구협력지원센터 (2024)

국제적 협력을 기반으로 한 융합연구의 방향은 분명히 과학기술 개발에 있어서 필요한 모습이다. 다만, 우리나라의 연구 환경과 사회·경제적인 현실에서 어떻게 이러한 연구 방향을 추진해 나가느냐에 따라 관련 연구자들의 반응과 향후 효과에 큰 영향을 미칠 것은 분명하다. 해외 기관과의 협업 경험이 적어 국제 공동연구형 과제에 접근하기 어려운 국내 연구자들의 입장에서는, 정부 연구비 예산의 일부가 외국으로 나가는 현실에 대해 불만을 가질 수도 있다. 그렇기 때문에 글로벌 융합연구를 추진함에 있어서 소외될 수도 있는 국내 연구자들이 국제 공동연구 경험을 할 수 있도록 지원 전략과 지원센터의 역할이 연구체계의 정착 시점까지는 필요할 것으로 판단된다.

또한, 과제가 끝나면 해외 기관과의 네트워크가 끊기고 연구 성과가 사라지지 않도록, 지속 가능한 국내외 연구기관과의 네트워크 체계를 유지하는 것도 글로벌 융합연구의 지속성을 확보하는 데 중요한 요소이다. 이러한 연구의 지속 가능성과 연구체계 정착을 위한 전방위적인 지원, 그리고 연구자를 충분히 이해할 수 있는 연구 관리 및 지원 체계의 구축이 필요하다.

가. 연구비 지원 체계의 효율성 제고

- 연구비 신청 및 집행 절차 간소화
- 국제 공동연구에 대한 지속적 지원 보장
- 국제 연구 스탠다드를 고려한 글로벌 연구의 연구관리 체계 수립

나. 연구성과 평가 및 피드백 시스템 개선

- 국제 공동연구 과제에 대한 성과 평가 기준 정립
- 지속적인 협력 강화를 위한 피드백 시스템 도입

다. 국내 연구자 및 행정지원 인력의 국제 공동연구 역량 강화 지원

- 국내 연구자를 위한 국제 공동연구 네트워크 발굴 및 협력 관계 구축 지원
- 국제공동연구에 대한 관리 및 행정 지원 인력의 육성

글로벌 융합연구협력지원센터를 1년 동안 운영하면서 수요와 활동이 가장 많았던 부분은 향후 글로벌 융합연구가 정착되기 위해 개선이 필요한 부분일 것이다. 위에서 제안한 사항들은 센터에서 받았던 주요 애로사항과 관련된 것으로, 현재 관련 규정이 마련되어 가고 있으며, 연구관리기관에서도 보다 정교하고 구체적인 방안을 수립해 가고 있다. 궁극적으로 글로벌 융합연구의 여건이 개선될 것으로 예상되지만, 현재보다 좀 더 속도감 있는 개선이 이루어져야 세계적인 경쟁 상황에서 우리나라의 이익과 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

저자소개

최현석(Hyeunseok Choi)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> · 한양대학교 정밀기계공학 박사/석사 · 한양대학교 기계공학 학사 | <ul style="list-style-type: none"> · (現) 글로벌융합연구협력지원센터장 · (現) 한국PHM학회회장 · (現) 한국생산기술연구원 수석연구원 · (前) UC Berkeley Post-Doc. |
|---|---|

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 과학기술정보통신부 (2023). 정부 R&D 혁신 방안 및 글로벌 R&D 추진 전략.
- 2) 과학기술정보통신부 (2023). 제4차 융합연구 활성화 기본계획.
- 3) 한국생산기술연구원 글로벌융합연구협력지원센터 기본 사업계획.
- 4) 한국과학기술기획평가원 (2024). 국가연구개발사업 국제공동연구매뉴얼.
- 5) 한국연구재단. 2024년도 글로벌융합연구지원 신규과제 공고.
- 6) 한국콘텐츠학회 (2020). 융합연구의 활성화를 위한 연구 성과와 정책 결정의 영향 관계에 관한 연구.
- 7) 시장경제학회 (2024). R&D 투자정책의 패러다임 전환.
- 8) 과학기술정책연구원 (2005). 정부철연(연)의 R&D 글로벌화 모색을 위한 국내외 사례조사 및 분석.
- 9) 한국과학기술기획평가원 (2023). 정부의 기업 R&D 재정지원 전략성 강화를 위한 정책 연계 방안 탐색 연구.

〈기타문헌〉

- 1) <https://www.law.go.kr/법령/국가연구개발혁신법>.
- 2) Research Information Management. <https://oclc.org>.

이 간행물은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 재원을 받아
작성되었음 (NRF-2023M3C1A6043400)

융합연구리뷰

Convergence Research Review

발행일 2025년 3월 26일

발행인 임혜원

발행처 한국과학기술연구원 미래융합전략센터
(02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02-958-4987 <https://kist.re.kr/fcsc>

편집 공성형, 김우중, 배경은, 박정환



2025

융합연구리뷰

C O N V E R G E N C E
R E S E A R C H
R E V I E W

ADDRESS 02792 서울특별시성북구화랑로14길 5

TEL 02.958.4987



ISSN. 2465-8456