

2023 Vol.03

차세대리포트



이론 연구와 실험 연구의 양극화 진정한 협력을 이루려면?



펴낸곳

한국과학기술한림원

031)726-7900

펴낸이

유 옥 준

발행연월

2023년 10월

홈페이지

www.kast.or.kr

기획·편집

한국과학기술한림원 정책연구팀

컨텐츠

정현섭 과학기술분야 전문 작가

디자인·인쇄

경성문화사

02)786-2999

이 보고서는 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통해 제작되었으며,
모든 저작권은 한국과학기술한림원에 있습니다.

발간사

‘대한민국의 미래를 이끌어갈 젊은 과학자들의 지식과 경험을 활용하여 과학기술 분야의 발전, 그리고 국가와 사회의 미래를 위해 기여할 수 있는 방법은 없을까?’ 지난 2018년부터 발간되고 있는 한국과학기술한림원의 차세대리포트는 이러한 고민으로부터 시작된 노력의 결과물이다.

우수한 젊은 과학기술인 그룹인 ‘한국차세대과학기술한림원(Young Korean Academy of Science and Technology, Y-KAST)’ 회원들과 연구 현장 최일선에서 활약하고 있는 최고의 젊은 과학자들이 중심이 되어 발간하고 있는 차세대리포트는 그동안 ‘양자기술’이나 ‘수소사회’와 같은 최신 과학기술 관련 이슈는 물론 ‘젊은 과학자를 위한 R&D 정책’, ‘과학자가 되고 싶은 나라를 만드는 방법’, ‘대학의 미래’ 같이 과학기술과 관련된 다양한 주제를 다루어 왔다.

올해로 벌써 발간 5주년을 맞이한 차세대리포트는 다양한 이슈에 대해 새로운 시각과 신선한 의견을 전하고자 노력해 왔으며, ‘과학기술 분야 최신 동향’과 ‘사회적 이슈 및 현안’이라는 두 마리 토끼를 잡기 위해 주제의 선정에서부터 발간에 이르기까지의 모든 과정을 치열한 고민을 통해 진행하고 있다.

이러한 과정을 통해 올해 차세대리포트 주제 가운데 하나로 선정된 것은 바로 ‘연구문화 이원화’에 대한 이슈다. 오늘날 인류가 당면한 수많은 난제를 해결하기 위해서는 다양한 분야의 연구자가 머리를 맞대고 초학제적인 협력을 이루어야 할 때라고 할 수 있다. 이러한 기조 속에서 진정한 협력을 이루기 위해서는 서로 다른 방식으로 연구를 수행하는 연구자들이 다름을 이해하고 공감과 소통을 이끌어내 ‘문제 해결 중심’의 연구가 이루어져야 한다.

이번 차세대리포트에서는 연구자의 연구 행위가 ‘이론 연구’ 또는 ‘실험 연구’로 양극화되거나, 각 분야 연구자 간에 괴리감이 생기는 현상을 ‘연구문화 이원화’라고 정의한다. 과학과 공학 분야 연구자들에게 이론 연구와 실험 연구가 각 분야에서 어떻게 인식되고 있는지를 살펴보고 이러한 이원화 현상을 극복하고 문제 해결 중심의 연구가 이루어지기 위한 방안을 제시하고자 한다. 이를 통해 진정한 의미의 협력을 이루는 연구문화가 확산되기를 기대한다.

2023년 10월
한국과학기술한림원 원장
유 욱 준

참여자 소개



배명진 | KAIST 수리과학과 교수

비선형 편미분 방정식, 특히 유체역학 분야에서 다차원 충격파, 접촉성 불연속 경계와 관련된 여러 난제 해결에 크게 기여하였으며, '상산젊은수학자상', '젊은 여성수학자상'을 수상하였다.



김근수 | 연세대학교 물리학과 교수

저차원 양자물질의 전자구조 분야에서 탁월한 연구를 수행하고 있는 차세대 리더로서 밴드갭 제어와 액체 금속 등 일련의 독창적인 연구로 국내외 학계의 주목을 받고 있다.



김상우 | 연세대학교 의생명시스템정보학교실 교수

전산학을 전공하고 의생명 분야에 뛰어난 연구자로서 암, 뇌질환 등 질환을 일으키는 다양한 유전자 변이를 찾아내는 한편, 전 세계적으로 활용되는 분석 알고리즘들을 개발하였다.



손석수 | 고려대학교 신소재공학부 교수

철강 분야, 고엔트로피합금 분야에서 활발한 연구업적을 이뤄내고 있는 차세대 연구자로서 액화수소용 구조재료에 대한 연구를 수행하고 있다.

CONTENTS



들어가기	04
I. '연구문화 이원화'란 무엇인가?	06
① 이론 연구와 실험 연구	
② '연구문화 이원화'란 무엇인가?	
II. 학문 분야별 연구문화 이원화 현상에 대한 담론	09
① 수학 : 현상을 수식화하여 분석함으로써 이론을 정립하는 학문	
② 물리학 : 이론과 실험의 경계에 있는 학문	
③ 신소재공학 : 실험과학과 계산과학이 함께하는 학문	
④ 생명과학 : 컴퓨터를 활용한 '실험 연구'의 등장	
III. 한국과학기술한림원 회원이 진단하는 연구문화 이원화 현상	22
IV. 정책제언	27
① 연구 성과에 대한 평가 제도를 개선해야 한다.	
② 연구 기여도에 대한 공정한 평가 기준 마련과 성숙한 문화가 필요하다.	
③ 공동 연구를 강요하는 것이 진정한 협력은 아니다.	
④ 난제 해결을 위한 공동 연구 지원 프로그램의 개선 및 확충이 필요하다.	
⑤ 유연한 연구 예산 집행이 필요하다.	



인류는 과학과 공학 분야의 연구를 통해 오늘날의 발전을 이룩해왔다. 이러한 과학기술의 발전은 다양한 분야에 소속된 연구자들의 끈기와 노력으로 이루어진다. ‘연구’는 연구자가 진리에 도달하기 위해 자신의 학문적인 역량을 펼치기 위한 필수불가결한 수단이다. ‘연구’ 없는 과학과 공학은 존재할 수 없다.

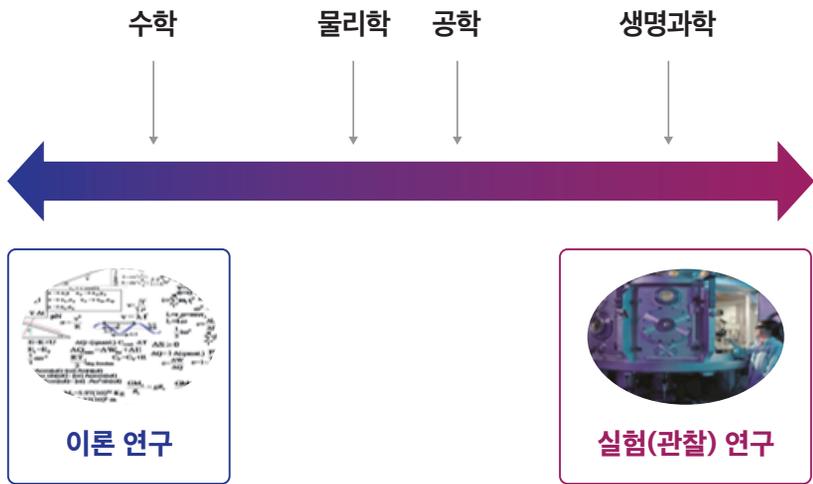
그렇다면 ‘연구’는 정확히 무엇을 의미하는 것일까? 과학·공학 분야에서 ‘연구’가 무엇인지 질문한다면 혹자는 골방에 틀어박혀 책상 위에 수많은 책과 논문을 쌓아두고 열심히 수식을 쓰며 계산하는 ‘이론 연구’를 떠올릴 수도 있다. 또는 흰 가운을 입고 실험실에서 다양한 도구와 기기를 이용하여 실험하는 ‘실험 연구’를 떠올릴 수도 있을 것이다. 이처럼 우리가 떠올리는 ‘연구’는 하나의 모습이 아니며 학문 분야와 연구 주제에 따라 다양하다.

여기서 먼저 짚고 넘어갈 것은 학문 분야별로 실험과 이론에 대한 정의가 다르다는 것이다. 예를 들어 컴퓨터를 이용한 계산 결과를 통해 현상을 설명하는 모델을 수립하는

것이 공학 분야에서는 이론 연구로 인식된다. 반면, 수학에서는 이러한 방식의 연구는 실험 연구로 인식된다. 이처럼 특정 연구 방식이 학문 분야에 따라 이론 연구로 인식될 수도 있고, 실험 연구로 인식될 수도 있다. 따라서 학문 분야에 따라 이론 연구와 실험 연구의 비중이 크게 달라질 수도 있으며, 이론 연구와 실험 연구를 나누는 기준에 대해서도 각 분야의 연구자마다 다양한 의견이 있을 수 있다.



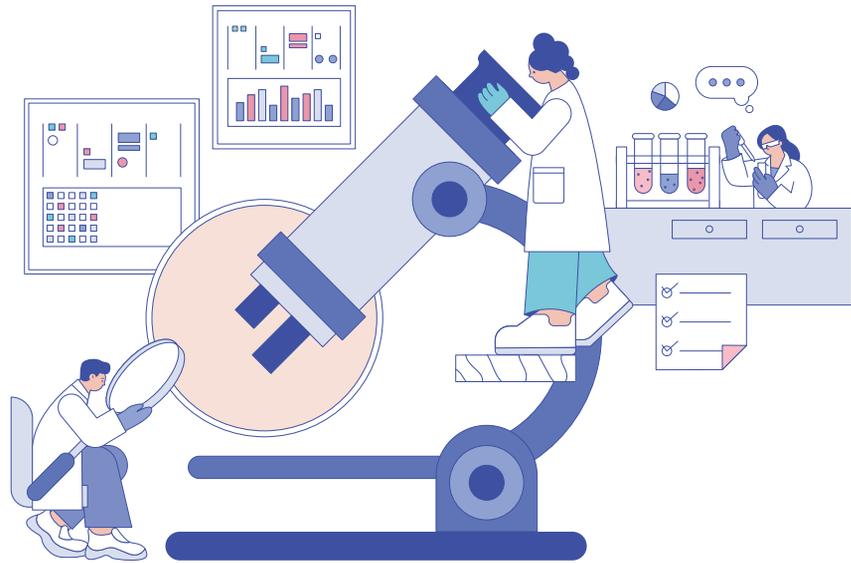
그림 1 학문 분야별 이론 연구와 실험(관찰) 연구 위치



본 차세대리포트에서는 과학·공학 분야에서 ‘이론 연구’와 ‘실험 연구’의 괴리에서 발생하는 현상인 ‘연구문화 이원화’에 대해 살펴보고자 한다. 이를 위해 다양한 학문 분야 가운데 수학, 물리학, 신소재공학, 생명과학 4가지 학문의 관점에서 이론 연구와 실험 연구가 어떻게 이루어지고 있는지, 연구문화가 이원화된 사례에는 어떤 것들이 있는지 소개한다.

또한, 한국과학기술한림원 소속 연구자들을 대상으로 설문조사를 진행하여 연구문화 이원화의 현재를 진단해보고, 우리 세대에게 남겨진 중요한 난제들을 해결하기 위해 앞으로 우리가 추구해야 할 연구 방식은 무엇인지 여러 의견을 모아 해결책을 함께 고민해보고자 한다. 마지막으로, 연구문화 이원화 문제를 해소하기 위한 노력의 일환으로 어떤 정책들이 필요한지 제안한다.

I '연구문화 이원화'란 무엇인가?



① 이론 연구와 실험 연구

‘답이 먼저냐 달같이 먼저냐’하는 논쟁이 있는 것처럼, 과학 연구에서 ‘이론이 먼저냐 실험이 먼저냐’를 따진다면 끝이 없는 논쟁이 펼쳐질 것이다. 관찰과 실험을 통해 새로운 이론이 만들어지기도 하며, 예측한 이론을 증명하기 위해 실험을 할 수도 있다.

‘이론’이란 곧 과학의 본질이자 연구를 수행하는 주된 목표로서, 논리적 연관에 의해 하나의 체계를 갖추어 놓은 것을 말한다. ‘실험’은 자연에서 발생하는 현상에 대해 관념적으로 접근하여 분석하기보다 연구 대상에 대한 실제적 관찰 및 탐색을 통해 결론에 도달하는 행위이다. ‘이론’과 ‘실험’은 이처럼 개념적으로 다르기도 하고 수행하는 방법과 요구되는 역량 또한 차이가 있다. 이에 따라 연구자의 ‘연구’ 행위는

이론을 토대로 연구하는 ‘이론 연구’와 실험을 통해 연구하는 ‘실험 연구’로 나누어 생각해볼 수 있다.



이론 연구와 실험 연구를 다시 정의해보자면, ‘이론 연구’는 머릿속에서 떠오르는 사물의 이치나 지식 등과 관련된 아이디어를 과학적 근거를 통해 논리적이고 합리적으로 전개하여 일반화하는 행위이며, ‘실험 연구’는 특정 조건을 설정하여 어떠한 현상이 일어나는지 관찰하고 조사하는 것이다. ‘이론 연구’와 ‘실험 연구’는 닭과 달걀 논란처럼 어느 쪽이 우선되거나 중요하다고 할 수는 없다. 분명한 것은 이론 연구와 실험 연구는 과학적인 진리를 찾기 위해 서로 떼려야 뗄 수 없는 관계라는 것이다.

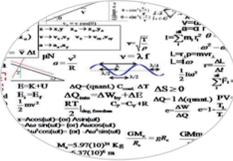
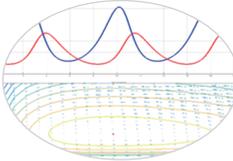


② | ‘연구문화 이원화’란 무엇인가?

이론 연구와 실험 연구는 어느 하나 빼놓을 것 없이 모두 중요하다. 하지만 두 영역이 연구자에게 요구하는 역량 등의 측면에서 상이한 부분들이 존재하다보니 다양한 문제가 발생하기도 한다. 연구자들이 이론 연구에만 치중하거나 실험 연구에 치중하는 즉, 한 방향으로 편향된 연구를 수행하거나 이론 연구자와 실험 연구자 간 소통에 어려움을 느끼고 서로를 이해하지 못하는 현상이 발생하기도 한다. 또한 연구자 개인의 능력과는 무관하게 눈에 보이지 않는 한계선을 만들기도 하며, 각 분야별 연구의 소통이 어려워져 인류에게 꼭 필요한 연구가 이루어지지 못하고 주어진 연구 환경에 최적화된 결과만 만들어내는 문제를 낳을 수 있다. 그 결과 과학·공학 분야에서 연구의 순수성이 훼손되며 ‘문제 해결 중심’ 연구에서 멀어질 수 있다.

본 리포트에서는 이처럼 연구자의 연구 행위가 ‘이론 연구’ 또는 ‘실험 연구’로 양극화 되거나, 각 분야 연구자 간에 괴리감이 생기는 현상을 ‘연구문화 이원화’라고 정의한다. 학문 분야별로 ‘이론 연구’, ‘실험 연구’를 정의하고 나누는 경계에는 차이가 있으므로 연구문화 이원화 현상은 학문에 따라 다양한 모습으로 나타난다. ‘이론 연구’가 무엇인지, ‘실험 연구’가 무엇인지 명확히 정의하는 것이 다소 모호해 논란의 여지가 있을 수 있다. 그럼에도 이론 연구와 실험 연구를 나누고, ‘연구문화 이원화’를 정의한 이유는 국내 과학·공학계에서 이슈가 되고 있는 편향된 연구문화에 대한 문제를 제기하고 해결책을 제안함으로써 연구의 순수성을 되찾아 ‘문제 해결 중심’ 연구문화를 확산하기 위함이다.

그림 2 학문별 이론 연구와 실험 연구: 수학, 물리학, 신소재공학, 생명과학 분야를 중심으로

	 이론연구	 중간연구	 실험(관찰) 연구
수학	엄밀한 논리 전개 증명을 이용한 연구	이론연구와 컴퓨터 계산을 이용한 융합적 방법의 연구	컴퓨터 계산·시뮬레이션을 이용한 연구
물리학	수학적 방법을 이용한 모델 연구	수치적 전산 모사, 제1원리 계산 연구	실험 설계 및 측정을 바탕으로 한 연구
신소재공학	소재, 제조공정, 특성 예측	소재-공정-특성 상관관계 이해를 바탕으로 한 신소재 개발	소재 제조-합성, 소재 원소·구조 분석, 물리적·기계적·전기적 특성 평가
생명과학	진화론, 유전법칙, 유전학 이론	유전자·단백질 네트워크 모델링	분자·세포·동물 실험, 약물 반응 실험

오늘날에는 이론 연구와 실험 연구의 조화를 통한 공동 연구가 더욱 중요해지고 있다. 실제로 이론과 실험이 적절히 조화된 형태의 연구는 보다 독창적인 결과들을 만들어 내고 있으며, 인류를 위해 한층 더 진보된 연구 결과는 이론 연구와 실험 연구의 협력을 통해 만들어질 것으로 전망되고 있다.

II 학문 분야별 연구문화 이원화 현상에 대한 담론



앞서 설명한 바와 같이 학문 분야별로 이론 연구와 실험 연구를 규정하는 범위가 다르고 그 경계도 명확하지 않으므로 연구문화 이원화 현상은 학문에 따라 다르게 나타날 수 있다. 따라서 연구문화 이원화 현상을 이해하기 위해서는 개별 학문 분야별로 현황을 살펴볼 필요가 있다. 본 챕터에서는 수학, 물리학, 신소재공학, 생명과학 등 4가지 각기 다른 학문 분야에서의 연구문화 이원화 사례에 대해 살펴보고자 한다.

① 수학: 현상을 수식화하여 분석함으로써 이론을 정립하는 학문

최첨단 기술의 시대인 21세기, 우리의 과학기술 문명 속에서 수학은 어떤 가치를 지니는 학문일까? 20세기 초반, 여러 가지 실험 결과와 기존 이론이 일치하지 않아 물질의 입자를 새로운 관점으로 이해하는 가설들이 생겨나기 시작했다. 닐스 보어의 정상 상태와 양자 도약에 대한 가설을 하이젠베르크가 수학적 방법을 이용하여 새로운 과학 이론으로 탄생시켰는데 이것이 바로 양자역학 시대의 시작이었다. 시간이 흘러 21세기에 이른 오늘날, 인공지능망을 이용한 딥 러닝(Deep Learning)이 급부상했고, 이에 대한 이론적 이해의 필요성이 커졌다. 그리고 실험 결과로부터 얻어진 경험적 이론에서 한 발짝 더 나아가 수학적 방법을 통해 연역적 이론을 정립하기 위한 본격적인 노력이 시작되었다.

다른 과학기술 분야들의 발전 역사 속에서 수학은 항상 중요한 역할을 했으며, 오로지 수학 연구의 목적으로 탄생한 이론이 우연히도 다른 분야의 중심이론으로 자리 잡은 사례도 있다. 짐 사이먼스(Jim Simons)는 끈 이론(String theory)의 핵심 이론 중 하나인 ‘천-사이먼스 이론(Chern-Simons theory)’을 증명했으며, 현재 규모 1,300억 달러의 투자자산을 운용하는 기업인 렌텍(RenTech)의 공동 창립자 중 한 명이다. 3차원 이상의 고차원에서 정의되는 범함수를 다루는 천-사이먼스 이론을 천싱셴(Shiing-Shen Chern)과 함께 증명한 그는 이 이론이 이후 물리학의 중요한 이론으로 자리잡을 것이라고는 상상조차 하지 못했다. 물리학자인 에드워드 위튼(Edward Witten)은 사이먼스와 천의 이론이 ‘끈 이론’에 적용될 수 있음을 발견했고, 그 결과 오늘날 우리가 알고 있는 ‘천-사이먼스 이론’이 나왔다. 위의 사례들을 통해 우리는 두 가지 사실을 알 수 있다. 첫째, 수학은 복잡한 현상을 수식화하고 이를 분석함으로써 일반적인 이론을 정립하는 학문이라는 것이다. 둘째, 시간과 세대를 초월한 초학제적인 연구에서 위대한 과학기술의 발전이 이루어졌다는 것이다.

한 가지 명확하게 해야 할 것은 모든 수학 연구가 이론 연구라고는 볼 수 없고, 실험 연구 또한 존재할 수 있다는 점이다. 그렇다면 수학 분야의 연구에서 이론 연구와 실험 연구를 어떻게 구분할 수 있을까? 바로 연구에서 컴퓨터의 사용 비중이 어느 정도냐에 따라 나누어 생각해볼 수 있을 것이다. 컴퓨터의 발전과 함께 응용수학 분야의 연구도 비약적인 발전을 이루었다. 물론 모든 응용수학의 연구가 컴퓨터를 이용한 수치계산으로만 이루어지진 않았고, 그렇기 때문에 컴퓨터를 활용하는 것이 온전히 실험 연구라고 하기엔 다소 무리가 있다. 그렇지만 연구 수행에 있어서 컴퓨터를 이용한 수치계산이 얼마나 중요한 부분을 차지하는가에 따라 수학에서의 이론 연구와 실험 연구를 구분하는 하나의 기준이 될 수 있다.

연구문화 이원화 극복을 통해 인류 난제 해결해야

그렇다면 수학에서 고전적으로 이론 연구에 해당하는 연구를 할 때 실험 연구는 전혀 필요하지 않았을까? 그렇지 않다. 인류 난제의 해결을 위해서는 이론 연구와 실험 연구가 모두 필요하며 서로 적절한 조화를 이루어야 한다.

여기서 수리 유체역학 분야의 오래된 난제 하나를 살펴보자. 얼마 전 우리나라의 독자 기술로 누리호 3차 발사에 성공하면서 우리나라도 우주산업 시대에 주도적 역할을 할 수 있을 것이라는 기대가 높아지고 있다. 일반적으로 우주 발사체의 엔진 노즐은 단면적이 입구에서는 감소하다가 최소가 되는 지점(throat)을 지나면서 증가하는 수렴형-발산형 노즐의 형태를 가지는데, 이를 ‘de Laval 노즐’이라고 한다. 노즐의 출구 압력이 충분히 큰 경우 초음속에서 충격파를 지나 아음속 상태로 급격히 감속되는 천음속 흐름이 발생하는 것은 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 잘 알려져 있다. 이러한 현상을 ‘de Laval nozzle 흐름’이라고 하는데 이 현상의 구조적·역학적 안정성을 설명하는 정확한 이론을 수립하는 것이 바로 ‘de Laval nozzle 문제’이다. 이 문제의 해결을 위해 여러 학문 분야에서 다양한 시도가 있었지만, 그 각각의 노력만으로 문제 해결이 가능할지는 매우 불투명하다.

표 1 수학 분야와 타 학문 간 연구 방법의 차이점

	연구 방법	어려운 점
이론 연구	<ul style="list-style-type: none"> • 압축성 유체의 흐름을 기술하는 편미분방정식 시스템(예: 나비에-스톡스 방정식, 오일러 방정식)의 수학적 이해의 분석(존재성, 유일성, 역학적 안정성 등)을 통해 일반적 구조를 연구 	<ul style="list-style-type: none"> • 다양한 물리적 성질의 유체의 흐름을 분석하기 위한 수학적 이론의 부재 • 자연 현상의 물리적 이해 없이 수식에만 의존한 연구의 한계성
실험 연구	<ul style="list-style-type: none"> • 랩(Lab)에서 실험을 통한 데이터 수집 • 컴퓨터 시뮬레이션 또는 수치계산을 이용한 현상 관찰 및 예측 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 실험이 자연 현상을 온전하게 재연하는 것이 어려움 (예: 경계조건의 영향) • 원활한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 사용되는 모델방정식이 자연 현상을 온전히 반영하는 것이 어려움 • 비선형적인 현상을 선형 근사를 사용하여 설명하려는 시도

동일한 자연 현상에 대한 각 분야의 서로 다른 연구 방법을 넘어 현상을 근본적으로 이해하기 위해서는 어떠한 노력이 필요할까? 수학자의 입장에서는 전통적인 수학 이론에만 바탕을 둔 고민을 멈추고 유체 현상의 물리적 기작에 대한 정확한 이해를 통해 이를 수학적 언어로 전환하는 것이 필요할 것이다. 반대로 공학자나 물리학자의 입장에서는 유체 현상의 비선형성에 대한 우선적인 이해를 거쳐 실험 결과로부터 이론을 도출함에 있어 단순 선형 근사에서 벗어나 새로운 접근법의 개발이 필요할 것이다. 무엇보다도 가장 중요한 것은 연구 분야나 연구 방법의 구분을 벗어난 획기적이고 초학제적인 방법이 있을지에 대한 고민이 필요할 것이다.

② | **물리학 : 이론과 실험의 경계에 있는 학문**

물리학자들은 우주로부터 소립자에 이르기까지 다양한 자연 현상의 주요 특징을 실험적으로 관찰하고, 이를 관통하는 법칙을 정립하기 위해 수학적 방법론을 동원한다. 아무리 그럴법한 이론이 고안되더라도 적절한 실험적 검증이 이뤄지지 않으면 하나의 가설에 불과하다. 아인슈타인의 수많은 업적 가운데 가장 유명한 것은 상대성 이론이었지만 당시 실험적 검증이 쉽지 않았기 때문에 그의 노벨상 수상 근거가 된 업적은 비교적 실험적 검증이 용이했던 광전 효과였다. 반대로 아무리 실험적으로 흥미로운 현상이 발견되었더라도 적절한 이론이 뒷받침되지 않으면 추측만 난무하게 된다. 1986년 처음 발견된 고온 초전도 현상은 아직 합의된 이론이 없기 때문에 오늘날까지 물리학 분야의 미해결 난제 중 하나로 남아있다. 이러한 다양한 역사적 사례로부터 학문의 발전에 있어 이론과 실험의 적절한 조화가 매우 중요함을 엿볼 수 있다.

한 물리학자가 이론과 실험에 모두 능통하다면 가장 이상적일 수 있다. 하지만 이론과 실험은 각각 전문성을 높여가는 과정에서 접근 방식과 요구되는 능력에 상당한 차이가 있다. 따라서 이론과 실험에 모두 경쟁력을 갖추기는 쉽지 않기 때문에 대부분 이론 또는 실험 중 하나에 중심을 두게 된다. 실제로 국내외 대학 물리학과는 적절한 비율의 이론과 실험 물리학자를 각각 선발하며, 이들이 공통의 관심사에 대해 자발적으로 소통하고 공동 연구를 추진하기도 한다. 이러한 맥락에서 물리학 분야에서 이론과 실험의 공동 연구는 필수라 해도 과언이 아니며, 공동 연구를 효과적으로 수행하면 우수한 성과로 이어지는 경우가 많다.

연구문화 이원화 극복 사례 : 위상물질 연구

최근 물리학 분야의 첨단 연구 흐름을 살펴보면 이론과 실험의 공동 연구가 더욱 중요해지고 있음을 쉽게 확인할 수 있는데, 대표적인 사례로서 응집물질물리학 분야의 위상물질 연구를 소개하고자 한다.

2004년 꿈의 신소재라 불리는 그래핀이 발견된 이래로 물리학자들은 그래핀의 독특한 물성의 근원을 이해하는 과정에서 지금까지 주목하지 않았던 양자 위상(quantum phase)의 질서가 중요함을 깨달았다. 당시만 하더라도 물리학자들이 물질을 분류하는 이분법적 체계는 전기가 흐르는 도체와 전기가 흐르지 않는 부도체(topological insulator)로 비교적 단순했다. 하지만 2008년부터 물질의 위상학적 질서(topological order)를 바탕으로 부도체를 위상학적으로 평범한(topologically trivial) 상태와 위상학적으로 특이한(topologically non-trivial) 상태로 세분하는 체계가 개발되었다. 위상 부도체의 경우 위상학적으로 보호되어 외부 섭동에 의해 쉽게 변화하지 않는 끝머리 상태(edge states)가 반드시 존재하기 때문에 발열 없는 전력 수송이나 고장 방지(fault tolerant) 양자 컴퓨팅 등 다양한 산업에도 활용할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다.

‘위상(topology)’은 수학적 개념이기에 수학적 기술을 바탕으로 한 이론 연구에서 지속적으로 새로운 위상학적 양자 상태가 예측되었다. 예측된 위상학적 양자 상태를 먼저 발견하기 위해 실험 물리학자들의 ‘골드러시’가 이어지는 형태로 연구가 진행된 것이다. 이론물리학자들이 새로운 위상학적 양자 상태를 제안하면 범함수이론 등에 의거하여 위상학적 양자 상태가 발견될 것으로 예측되는 물질을 찾아내고 그 물질의 특성을 예측한다. 그러면 물질 합성을 전문으로 하는 화학자 또는 물리학자들이 해당 물질을 고품질로 생산하여 공급하고, 다양한 분광학적 방법론을 구사하는 실험 물리학자들이 공급받은 물질에서 예측된 물질의 특성을 검증하는 형태로 연구가 이뤄졌다. 물론 어떤 이론적 예측을 실험으로 검증하기에 이르기까지 오랜 시간이 걸리는 경우가 더 일반적이겠지만, 최근 위상물질 연구에서는 모델-계산-합성-특성평가로 이어지는 이론-실험간, 다학제간 팀 단위 공동 연구가 일종의 성공 방정식으로 인식되어 유행하였고, 이론 예측으로부터 실험 검증에 이르는 주기도 아주 짧았다.

결과적으로 이러한 위상물질 공동 연구를 선도한 것은 주로 미국과 유럽의 연구팀이었는데 기본적인 연구 역량의 영향도 있겠지만 이론-실험, 다학제간 공동 연구를 추진함에 있어 상대적으로 장벽이 낮은 개방적 연구 문화도 크게 작용한 것으로 분석된다.

③ | 신소재공학 : 실험과학과 계산과학이 함께하는 학문

현재 신소재공학 분야에서 실험과학(실험 연구)과 계산과학(이론 연구)의 공동 연구는 신소재 개발을 위한 여러 방법론 중 가장 각광받고 있는 중요한 연구 기술이다. 이러한 연구는 신소재의 개발, 설계, 성능 예측, 특성 최적화 등 다양한 측면에서 혁신적인 접근법을 제공하기 때문이다.

신소재의 개발에 있어서 대상 소재의 특성이 주로 발현되는 영역의 크기에 따라 다양한 계산과학 기법이 필요한데 예를 들어 수 나노미터 범위에서 발생하는 실험적 현상이 소재 특성의 결정적인 요소가 된다면 양자역학을 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션인 범함수이론(Density Functional Theory, DFT)이 적합하다. 반면, 수십 나노미터~수 마이크로미터 범위에서 시간에 따른 소재 구조 변화가 중요한 경우에는 뉴턴역학 기반의 컴퓨터 시뮬레이션인 분자동역학(Molecular Dynamics, MD)이 필요하다. 이러한 원자 수준 모델링을 통해 원자 충돌, 원자 간 상호작용, 결합 생성 등을 이해하고 신소재의 안정성, 강도, 열전도도, 전기적 특성 등을 예측할 수 있다.

이외에도 다양한 컴퓨터 시뮬레이션 기법들이 존재하며, 이들은 각각의 특정 응용 분야에 따라 빠르게 발전하고 있다. 기계학적 계산은 유체 역학, 유한 요소 분석, 분자 동역학 등을 이용하여 신소재의 기계적 응력, 변형, 파괴 등을 시뮬레이션할 수 있고, 이를 통해 재료의 강도, 인장 변형, 파손 거동 등을 예측하고 설계에 활용할 수 있다. 다중 스케일 모델링을 통해서도 실험적 데이터를 이용하여 계산 모델의 입력 매개변수를 조정하거나, 계산 모델의 결과를 실험 결과와 비교하여 모델의 정확성을 평가하는 등의 연구를 수행할 수 있다. 최근 활발히 연구되고 있는 데이터 과학과 인공지능을 통해서도 대량의 실험 데이터와 계산 결과를 처리하고 분석할 수 있고, 기계 학습, 딥 러닝, 예측 모델링 등을 이용하여 재료 특성 예측, 속성 최적화, 재료 설계 등을 수행할 수 있다.

이처럼 실험과학과 계산과학의 공동 연구는 신소재공학 분야에서 더욱 정확하고 효율적인 재료 개발과 최적화를 가능하게 하며, 더 빠르고 경제적인 연구 방법을

제공한다. 또한, 신뢰할 수 있는 예측과 최적화가 가능해져 신소재 기술의 발전을 가속화할 수 있다. 이러한 협업 연구는 최근 신소재 개발 분야에서 빠질 수 없는 중요성을 지니고 있으며, 이를 통해 많은 성공적인 소재 개발 연구결과들이 발표되고 있다.

협업 연구 사례 1: 경량금속 신합금 설계

금속 합금의 성능 향상은 다양한 구조 산업 분야에서 중요한 이슈이다. 대표적으로 타이타늄 합금의 경우 고강도와 경량성을 동시에 갖추어 최근 누리호의 성공적인 발사와 지속적인 연구개발 등의 과정에서 항공 우주 산업의 핵심 재료로 활용되고 있다. 산업 발전에 따라 이 합금은 더욱 가혹한 환경에 노출되고, 이러한 환경에서 우수한 성능을 발휘하기 위한 새로운 합금의 설계가 필요하다.

합금 설계는 다양한 원소의 조합과 비율을 고려하여 원하는 재료 특성을 얻기 위한 최적의 합금 구성을 찾는 과정을 말하며, 이를 위해 계산적인 도구인 합금 모델링이 사용된다. 합금 모델링은 원소 간 상호작용, 입자 크기 및 분포, 결정 구조 등을 고려하여 합금의 기계적, 열적, 전기적 특성을 예측하는 데에 활용된다. 예를 들어 합금 설계를 통해 강도가 높고 동시에 인장 변형이 용이한 합금을 개발하거나, 항복강도와 내식성을 개선한 합금을 설계할 수 있다. 타이타늄 합금 성능 향상을 위한 계산 모델링과 실험의 협업은 다양한 합금 조성과 제조공정 과정의 영향을 미리 예측하고 실험을 통해 최적 조건을 검증한 후 이를 기반으로 새로운 합금을 제조할 수 있다.

협업 연구 사례 2: 전기화학 에너지 저장 재료

에너지 저장은 지속 가능한 에너지 시스템 및 전기자동차와 같은 첨단 기술에 대한 핵심 이슈로 인식되고 있다. 전기화학 에너지 저장 재료의 개발은 충전 및 방전 속도, 에너지 밀도, 사이클 수명 등의 성능 향상을 목표로 하며, 계산과학과 실험과학의 협업 연구는 이러한 성능 개선과 새로운 재료의 개발에 있어 매우 중요하다. 리튬이온 배터리 등 에너지 저장 재료의 성능 향상을 위해 계산 모델링에 기반하여 전기화학적 반응 메커니즘과 이온 이동 거동을 예측하고, 실험을 통해 재료의 구조와 성능을 확인하는 방법이 사용되고 있다. 이를 통해 재료의 에너지 저장 및 방전 특성을 최적화하고 장기적으로 더 효율적이고 안전한 에너지 저장 솔루션을 개발할 수 있다.

협업 연구 사례 3: 나노입자 기반 광학재료

나노입자 기반 광학재료는 광통신, 태양전지, 광센서 등 다양한 응용 분야에서 그 빛을 발하고 있다. 이러한 재료의 개발은 광학 효율, 색상 튜닝, 발광 특성 등의 측면에서 이점을 제공할 수 있으므로 계산과학과 실험과학의 협업 연구는 더 효율적이고 성능이 우수한 나노입자 기반 광학재료의 개발을 가능하게 한다. 예를 들어, 전자 구조 계산을 통해 나노입자의 전자 수준과 전자 구조에 대한 정보를 제공하여 나노입자의 에너지 준위 조절, 전하 이동 특성 등을 개선할 수 있으며, 이를 통해 광학적 특성인 흡수, 발광, 굴절 등을 예측할 수 있다.

이처럼 계산 모델링은 다양한 나노입자 구조와 구성의 광학적 특성을 예측하고 최적의 디자인을 도출하는 데 사용되며, 실험은 실제로 나노입자를 합성하고 그들의 광학적 특성을 측정하여 계산 결과를 검증하는 방향으로 협업이 이루어진다. 이러한 협업을 통해 더 효율적인 광학재료를 개발하고 광학 성능을 향상시킬 수 있다.

하지만, 이러한 공동 연구에는 많은 한계와 현실적인 고충이 존재한다. 최근에는 계산과학 결과가 포함된 논문이 더욱 주목받는다는 사실로 인해 실험 연구를 진행하면서 “시뮬레이션 그림이 하나 있으면 좋겠다”는 요청을 하는 연구자들이 늘어나고 있다. 이러한 현상은 개발된 소재의 물성 발현 메커니즘을 이론적으로 설명할 수 있는 긍정적인 면이 있지만, 출판된 논문의 질이 주요 목표가 되어야 한다는 측면에서 과학적, 공학적으로 바람직하지 않은 과정이다.

실험 연구자들이 소재 개발을 시작할 때부터 이론 및 계산 연구자들과 협력하게 되면, 중간중간 개발되는 소재들의 특성을 계산을 통해 검증해보고, 이를 기반으로 실험 설계 방향을 잡을 수 있다. 따라서 단순히 '좋은 논문'을 위한 시뮬레이션 결과보다는 전체적인 연구 과정을 향상시키고 실제 소재 개발의 질을 높이는 데 더욱 중점을 둔 접근 방식이 기본 바탕이 되어야 한다.

계산과학은 기본적으로 특정 모델에 의존하므로 실제 실험 데이터를 통한 모델의 검증과 보완이 반드시 필요하다. 특히 일부 신소재 시스템은 복잡한 모델링과 시뮬레이션이 요구될 수 있으며, 이는 전문적인 계산과학 지식과 리소스가 필요함을

의미한다. 또한, 일부 실험 조건은 계산적으로 정확하게 구현하기 어려울 수 있어 제한된 실험 조건 재현성의 한계가 존재한다. 특히 실제 소재에는 반드시 결합이라는 것이 존재할 수밖에 없고 이 결합은 소재의 특성을 결정짓는 매우 중요한 인자이다. 이러한 모든 결합과 이들의 영향을 계산을 통해 완벽히 재현하는 것은 불가능에 가깝다.

그럼에도 이러한 한계점(계산-실험 간극)을 극복하기 위한 노력들도 최근에 많이 진행되고 있다. 기존의 계산과학 연구에서는 소재의 구조와 물성 간의 상관관계를 파악하는데 집중해왔고, 소재 제조·합성은 계산과학의 영역이 아니라 전적으로 실험 연구자들의 역량에 맡기는 편이었다. 하지만 최근 머신 러닝 기술의 발전을 통해 소재의 ‘합성 가능성’이나 ‘합성 경로’를 탐색해보고자 하는 시도들이 이뤄지고 있으며, 이제는 고기능성 소재를 예측함을 물론이고 해당 소재를 만들어내는 것이 가능한지, 그리고 그 경로는 무엇인지 추천해주는 시스템을 개발했다. 아직은 초기 단계라 통상의 연구자들이 사용하고 있지는 않지만, 해당 기술들이 고도화 된다면 계산-실험 협업 연구에서 발생하는 간극들이 굉장히 많이 해소될 수 있을 것으로 기대된다.

④ 생명과학 : 컴퓨터를 활용한 ‘실험 연구’의 등장

전통적인 생명과학 연구 방법론

생명과학 연구실을 떠올려 보자. 하얀색 가운을 입고 보안경을 쓴 연구자들이 피펫으로 실험에 필요한 용액을 넣어준다. 한쪽에서는 세포인지 미생물인지 모를 생명체들이 페트리 접시 위에서 자라고 있다. 연구실에 가득한 장비들 안에는 냉동상태로 보관된 시료들이 즐비하고, 그 옆에서는 1분에 4만 번씩 회전하는 원심분리기가 돌고 있다. 밤이 되어도 실험실의 불은 꺼지지 않는다. 세포가 잘 자랄 수 있도록 배지를 갈아 주고 옮겨 담아 주어야 하기 때문이다. 세포는 인간의 생활을 고려하지 않는다.

생명과학 그리고 기초 의학 발전의 역사는 곧 실험과 관찰의 역사와도 같다. 멘델(Mendel)은 유전법칙을 발견하기 위해 10년 동안 완두콩 2만 4천 개체를 키우고 관찰했다. 1911년 페이튼 라우스(Peyton Rous)는 닭에 생기는 종양이 다른 닭으로 전염이 가능한 것을 발견하고, 심지어 이 물질이 여과지를 통과할 만큼 작다는 것을

찾아 최초로 암을 일으키는 바이러스를 발견한다. 유전물질이 다당류나 단백질이 아닌 DNA임을 밝혀낸 것은 1944년 오즈월드 에이버리(Oswald Avery)의 실험 덕분이다. 에이버리는 열처리하여 죽은 병원성 폐렴쌍구균에 DNA 분해효소를 처리했을 때에만 형질전환이 일어나지 않음을 밝혀냈다. 가설의 수립과 대조군을 포함한 관찰, 이를 통한 가설의 검정이라는 기본적인 과정은 생물학을 포함한 모든 과학 실험의 과정과 일치한다. 현재에도 대부분의 생물학과 기초의학 실험실은 이러한 방법을 통해 새로운 발견을 하고 있다. 그리고 이때의 관찰은 우리가 떠올린 모습 그대로 세포, 미생물, 그리고 쥐나 다른 실험동물에 대하여 이루어진다. 대부분의 실험실이 비슷한 생김새를 하고 있는 이유도 그것이다.

실험 없는 생명과학 연구

수학은 공리(axiom)라는 체계로부터 출발하여 다른 명제들을 증명해 나가며, 진리라고 부를 수 있는 영역을 확대해 나간다. 물리학을 포함한 다른 학문도 현상을 가장 잘 근사하는 기본적인 명제와 공식을 만들어 나간다. 예컨대, 뉴턴의 운동법칙, 열역학과 엔트로피의 법칙, 일정 성분비의 법칙, 슈뢰딩거 방정식 등이 그것이다. 관찰값을 가장 잘 설명하기 위해 이론을 만들기도 하지만, 아인슈타인의 상대성 이론처럼 사고에 의한 가정을 먼저 제시하고 이후에 실험으로 이를 증명하기도 한다. 실험이 아닌 사고(思考)에 의한 진보가 가능하다는 뜻이다.

이런 점에서 생물학은 다른 학문들과 그 궤를 달리한다. 생물학의 본질은 생물 또는 생명현상을 연구하는 과학 정도로 정의되므로 결국 생명에 대한 여러 가지 지식들을 찾아내는 일이 주된 연구 과정이다. 사람과 지렁이 또는 원핵생물과 같은 믿기 어려운 수준의 다양성, 그리고 지금은 관찰할 수 없는 까마득한 과거의 일들을 하나로 묶어 관통하는 법칙이라는 것이 존재하기 어렵기에 순수 이론과 사고에 의한 법칙을 만들어내는 일이 드물다.

생명과학에서의 이론 연구 사례

그럼에도 불구하고 생물학에서 이론 연구라는 것이 존재하지 않았던 것은 아니다. 유전학의 가장 근간이 되는 하디-바인베르크 법칙은 1908년 중학교 수학 수준의 수식 $(a+b)^2=a^2+2ab+b^2$ 을 통하여 우성-열성을 가지는 표현형이 세대를 거듭해도 그 비율이

유지되는 것을 증명해 보였다. 다윈이 제창한 진화론은 비록 수년간의 항해와 관찰이 함께 이루어졌지만 결국 전 지구상에 존재하는 생명체의 다양성의 원천과 과정을 하나의 이론으로 아름답게 밝혀냈으며, 이는 이후에 발전한 분자생물학 시대에서 더욱 공고해졌다.

우크라이나 출신의 유전학자인 테오도시우스 도브잔스키(Theodosius Dobzhansky)는 “진화라는 불빛이 없다면, 생물학은 잡다한 사실의 꾸러미”라고 말했을 정도로 진화론은 모든 생물학 지식을 연결하는 하나의 뿌리로 남아 있다. 미국의 여류 생물학자 마거릿 데이호프(Margaret Dayhoff)는 관찰된 단백질 서열의 변이 정도를 토대로 20가지 아미노산 간의 변화 거리를 나타내는 PAM(Point Accepted Mutation) 지표를 만들 수 있었다. 일본 이화학 연구소의 키무라는 대부분의 돌연변이가 생물 종에 대해 유익하지도 해롭지도 않다는 점에 착안하여 중립 돌연변이 가설을 수립하였고, 이는 자연선택과 더불어 유전자 부동(Genetic drift)이라는 원리를 더함으로써 현대의 유전학을 한층 발전시켰다.

컴퓨터만 있는 생물 연구실이 가능하다?

최근 이루어진 생명현상 관찰 기술의 발전은 이론 연구뿐 아니라, 전체적인 생물 분야의 연구 모습을 크게 변화시켰다. 이른바 데이터 기반(data-driven) 연구이다. 1990년대 중반에 등장한 마이크로어레이(microarray) 기술은 한 번에 하나의 유전자에 대해 알 수 있었던 발현(expression) 수준을 동시에 2만 개 전체 유전자에 대해 알아 낼 수 있는 수준까지 끌어올렸다. 2005년 등장한 차세대 시퀀싱(Next-Generation Sequencing, NGS) 기법 또한 기존에 하나의 유전자 조각에 대해서 읽어내던 염기서열(4종류의 염기 A(아데닌), T(티민), G(구아닌), C(사이토신)의 순서)을 30억 전체 유전체(genome) 영역으로 확장 시켰다. 데이터가 부족하여 가설을 검증하는 것이 어려웠던 시대에서 순식간에 데이터의 홍수 시대로 바뀌었고, 넘쳐나는 데이터를 분석하는 것뿐만 아니라 이를 단순히 저장, 처리하는 것마저 새로운 도전이었다.

생물학과 큰 관계가 없어 보였던 컴퓨터 전문가들이 대거 참여하기 시작한 것도 이때부터였다. 기존에는 컴퓨터 기술로 여겨졌던 데이터베이스, 기계학습, 네트워크 이론들이 생물학 데이터에 사용되면서 새로운 발견이 이루어졌다. 대표적으로

클러스터링(clustering)은 다양한 관측치와 변수를 비슷한 몇 개의 군(group)으로 묶어내는 기술이다. 지난 2000년, 42명의 환자로부터 얻은 8천 개의 유전자 발현 데이터를 클러스터링한 결과를 통해 유방암을 4개의 아형(subtype)으로 나누었고 이는 현재의 유방암 아형 분류의 근간이 되었다. 그래프 이론(graph theory)을 기반으로 서로 비슷한 발현 패턴을 보이는 유전자 간의 상관관계를 네트워크로 구축한 결과는 세포 내에서 서로 다른 유전자와 단백질이 어떻게 상호작용하고 있는지를 보여주었다.

데이터를 압축하는 데에 사용되던 수학 모델인 버로우즈-휠러(Burrows-Wheeler) 변환을 차세대 시퀀싱 데이터 처리에 활용한 연구는 현대 유전자 검사를 비롯한 정밀의료의 정확성과 신속성을 이룩하였다. 나아가 유전자 변이를 탐지하고 그 영향을 예측하는 기술, 암 조직 내에 있는 세포들을 분리하고 정량하는 기술, 최적의 약물을 도출하고 추천하는 기술들까지 현대의 생물 연구에서 컴퓨터 분석이 차지하는 영역은 더욱 넓어지고 있다. 이러한 연구실들의 모습은 우리가 상상하던 실험실과 사뭇 다른데, 컴퓨터와 서버, 그리고 모니터에 열중한 연구원들만 보이는 것이 보통의 사무실(office)을 연상케 한다. 이렇게 물 한 방울 없이 계산기기만 있는 생물학 실험실을 드라이 랩(Dry lab)이라고 부른다. 드라이 랩에서 하는 연구 또한 쓰는 도구가 다를 뿐, 기존의 생물학 실험실에서 수행하는 연구와 그 내용과 목표가 정확히 같다. 컴퓨터를 이용한 분석 연구 또한 하나의 '실험 연구'로서 인정받는다는 뜻이다.

실험과 이론, 그리고 분석 연구 간의 갈등과 조화

다른 분야와는 다르게 생물학 분야에서의 실험, 이론, 분석 연구자 간의 관계는 비교적 평화로운 편이다. 이론 연구는 자칫 지식의 백과사전이 될 수 있었던 생명 연구를 하나로 묶어주었고, 이는 모두에게 만족스러운 결과를 가져다주었다. 데이터를 위주로 한 컴퓨터 분석 연구는 실험 연구자들의 가려운 곳을 긁어주는 일종의 마법처럼 여겨졌다. 보기만 해도 머리가 아픈 수식들이 잔뜩 들어간 알고리즘들이 다시 새로운 생물학 발견을 만들어내는 것은 신기한 일이었다. 그리고 그것을 다시 실험적으로 검증하는 것은 현재에도 훌륭한 연구 성과를 창출하는 지름길이다.

물론 갈등이 전혀 없었던 것은 아니었다. 데이터가 쏟아지고, 아직 생물학 지식이 부족한 분석가들이 대거 투입되던 초창기 시절에는 서로에 대한 불신도 존재하였다. 특히 특정 생명현상과 질환에 수십 년을 바쳤던 실험 연구자들이 보았을 때, 엄밀성을 갖추지 못하고 쏟아지는 데이터 해석 수준의 결과물은 일종의 기만처럼 보였을 수도 있다. 반대로, 확률과 통계에 의해 충분히 증거를 갖춘 결과물들을 실험 사진이 없다고 믿지 않는 전통적인 생물학자들에 대한 답답함도 있었을 것이다. 다만 몇 년 정도의 과도기에 잠시 존재하였던 것일 뿐, 이들은 곧 서로 협업하고 상호보완하는 방법을 훌륭하게 익혔으며, 좋은 협력 관계를 만들어내고 있다. 생명과학 분야에서 드라이 랩은 더이상 신기하지도 불안전하지도 않은 주요한 연구 분야가 되었다.



III 한국과학기술한림원 회원이 진단하는 연구문화 이원화 현상

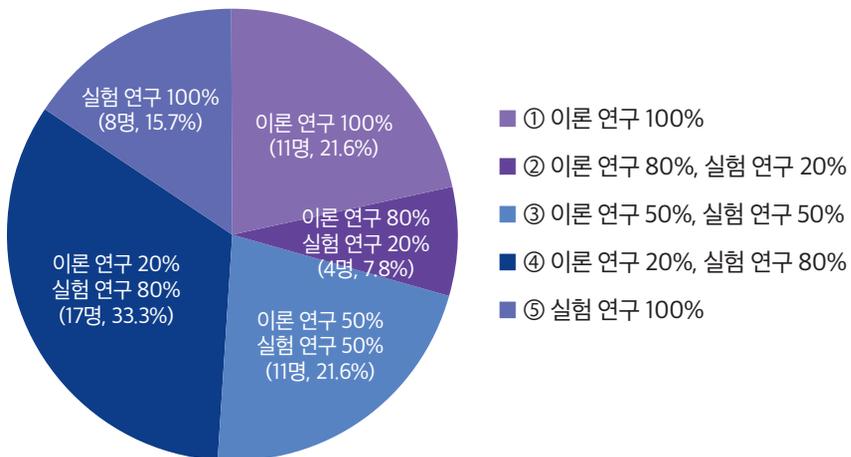
연구문화 이원화 현상에 대해 진단하기 위해 한국과학기술한림원 회원을 대상으로 설문조사를 실시했다. 과학·공학 분야에서 전공을 제한하지 않고 약 50여 명을 대상으로 설문을 진행했다. 설문을 통해 과학·공학 연구자들이 실질적으로 느끼는 연구문화 이원화의 문제점은 무엇인지, 이론 연구와 실험 연구의 공동 연구 필요성에 대해 얼마나 공감하고 있는지 살펴보고, 문제 해결 중심 연구를 위해 필요한 것들에는 무엇이 있는지에 대해 의견을 모았다.

본 설문에는 이론 연구자와 실험 연구자가 고루 참여하였다. 우선 이론 연구와 실험 연구의 기준으로 볼 때 본인의 연구 영역과 가장 가깝다고 생각되는 연구 유형이 무엇인가에 대한 응답 비율은 이론 연구 21.6%, 실험 연구 15.7%, 이론:실험(8:2) 7.8%, 이론:실험(5:5) 21.6%, 이론:실험(2:8) 33.3%였다.(총 51명 응답)

🔍 조사문항 1

응답자께서 본인의 연구영역을 이론 연구와 실험 연구의 기준으로 보았을 때 아래 보기 중 가장 가깝다고 생각되는 항목을 선택하여 주시기 바랍니다.

*응답자 51명



이론 및 실험의 공동 연구에 대한 필요성 높아

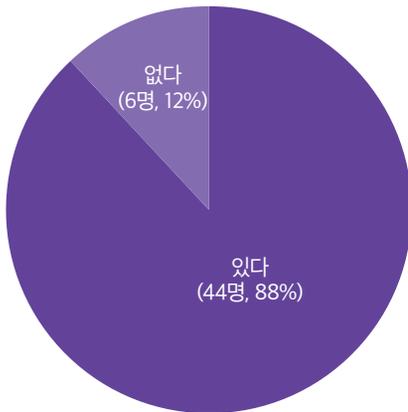
연구자 대부분이 이론과 실험을 함께 진행하는 공동 연구 경험이 있었으며, 공동 연구의 필요성에 대해서도 충분히 공감하고 있는 것으로 나타났다. 이론 연구자와 실험 연구자 간 공동 연구의 필요성에 대해 응답자의 88%가 '있다(필요하다)'라고 응답하였고(총 50명 응답), 실제로 공동 연구를 수행한 경험이 있는가에 대해서는 71.4%가 '있다'라고 답변했다.(총 49명 응답)



조사문항 2

본인이 만일 이론 또는 실험 연구자에 가깝다면 실험 또는 이론 연구자와의 공동연구 필요성을 느낀 적이 있으십니까?

*응답자 50명

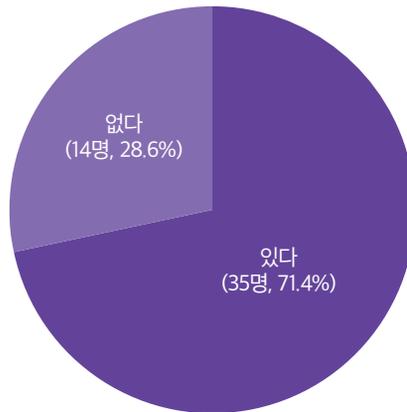


- ① 있다 (설문 계속)
- ② 없다 (설문 종료)

조사문항 3

응답자께서는 위2번 질문과 관련하여 실제로 공동 연구를 수행하신 경험이 있으십니까?

*응답자 49명



- ① 있다 (설문 계속)
- ② 없다 (설문 종료)

연구문화가 이원화된 가장 큰 이유는 “의사소통”

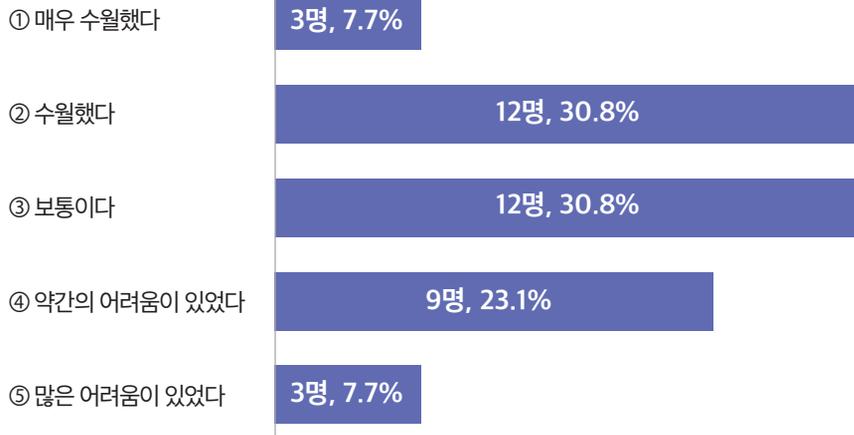
공동 연구가 얼마나 수월하게 진행되었는가에 대한 질문에는 ‘매우 수월’은 7.7%, ‘수월’은 30.8% 그쳐, 긍정적인 응답률은 38.5%에 불과했다. 부정적인 응답은 총 30.8% (‘많이 어려움’ 7.7%, ‘약간 어려움’ 23.1%)로 나타났다.(총 39명 응답)

아울러, 공동 연구를 수행하면서 어려움이 발생하게 되는 이유 중에 ‘의사소통이 어려웠기 때문’이라는 답변이 가장 많았는데, 실험과 이론을 연구하는 그룹이 각각 공유하고 있는 상식의 범위가 다르고, 두 분야의 다른 언어 체계 및 이해도가 달라 거리감이 있었기 때문이었다. 또한, 이론 연구의 가정 범위에 대한 의견 차이, 협업 시 결과에 대한 해석과 이해가 다르거나 서로에 대한 이해가 부족했던 것 등 다양한 이유들이 있었다.

🔍 조사문항 4

공동 연구는 어느 정도로 수월하게 진행이 되었습니까

*응답자 39명



🔍 조사문항 5

공동 연구를 수행하면서 발생하는 어려움은 무엇입니까?

*응답자 15명



공동 연구 수행 중 발생한 어려움에 대한 주요 답변: 의사소통 문제, 예산 문제
(*주관식 답변 결과 재가공)

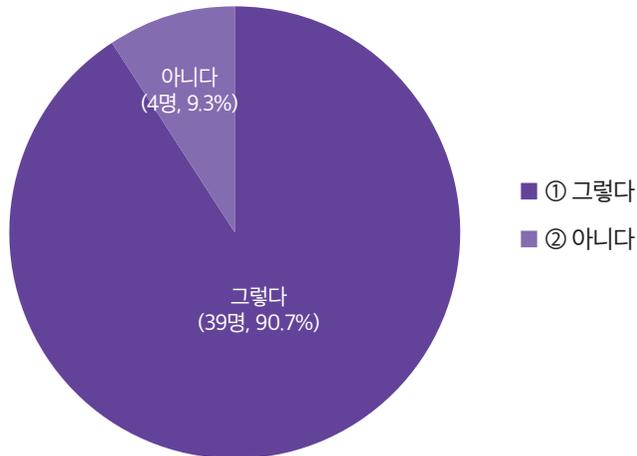
이론과 실험 연구를 함께 수행하기 위해 필요한 것들

실험만으로 이론적인 증명이 가능한 연구라도 이론 연구와 실험 연구는 함께 이루어져야 한다는 부분에 대해서는 90.7%의 응답자가 동의했다. 그만큼 이론 연구와 실험 연구 사이에 협업을 적극적으로 장려해야 한다는 의견이 압도적이었다.

🔍 조사문항 6

실험만으로 이론적 증명이 가능한 연구인 경우라도 이론 연구와 실험 연구가 함께 이루어지는 것이 필요하다고 생각하십니까?

*응답자 43명

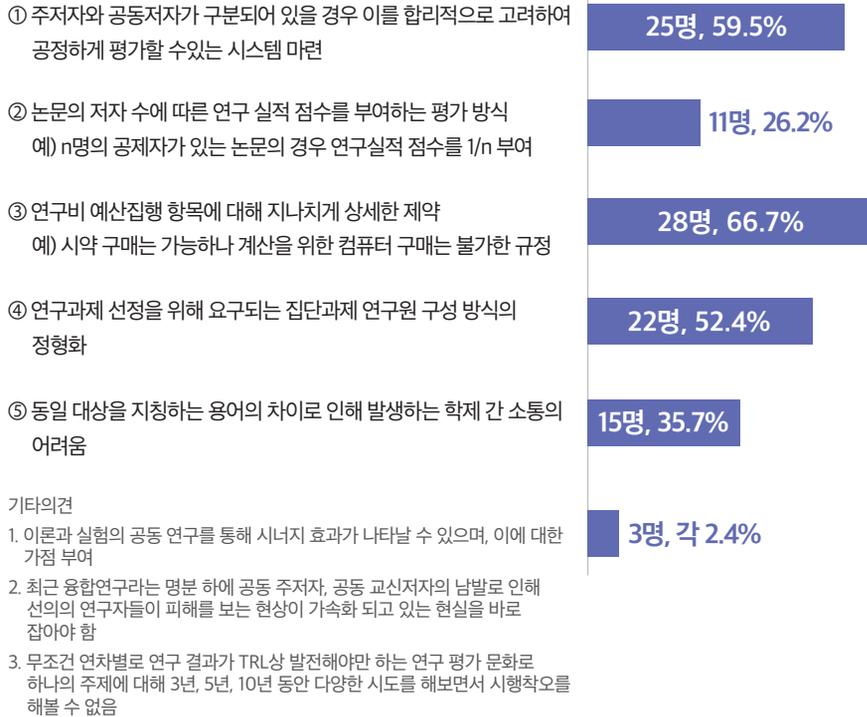


또한, 이론 연구와 실험 연구의 구분을 떠나 '문제 해결 중심' 연구를 위해 가장 시급하게 개선해야 할 사항은 '연구비 예산 집행 항목에 대해 지나치게 상세한 제약(66.7%)', '주저자와 공동저자가 구분되어 있을 경우 이를 합리적으로 고려하여 공정하게 평가할 수 있는 시스템 마련(59.5%)', '연구과제 선정을 위해 요구되는 집단과제 연구원 구성방식의 정형화(52.4%)' 순서로 높게 나타났다.(총 응답자 42명 / 복수 응답 3개까지 가능)

🔍 조사문항 7

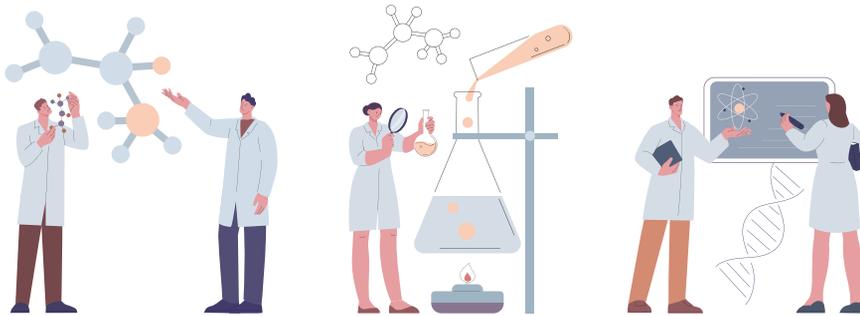
이론 연구와 실험 연구의 구분을 떠나 '문제 해결 중심의 연구'를 위해 가장 시급하게 개선되어야 할 사항은 무엇이라고 생각하십니까? (최대 3개까지 선택)

*응답자 42명



결론적으로 '이론 연구'와 '실험 연구'는 공동 연구로서 진행되어야 한다는 의견이 높은 비중을 차지했다. 아울러, 연구문화 이원화가 발생한 배경에는 '학제간 의사소통 부족'이 가장 큰 원인이라는 인식이 높았다. 또한, 연구비 예산에 대한 제약을 완화하고 공정한 연구 평가 시스템 마련 등을 통해 연구문화 이원화 문제를 해소해야 한다는 의견들이 많았다.

IV 정책제언



① 연구 성과에 대한 평가 제도를 개선해야 한다.

연구 업적에 대한 정당한 평가는 개인의 학문적 커리어 뿐만 아니라, 수행 중인 연구 과제를 정당화하기 위해서도 매우 중요하다. 우리나라는 논문 수, 임팩트 팩터의 총합, 피인용수, FWCI, H-index 등과 같은 수치화된 지표를 바탕으로 연구 업적의 우열을 가리는 경향이 다소 있다. 그에 따라 연구 성과에 대한 평가점수가 저자의 수에 따라 나누어지는 경우 10명의 공저자와 함께 네이처와 같은 저명한 학술지에 논문을 한 편 내는 것보다, 단독 저자로 마이너 저널에 논문을 내는 것이 훨씬 높은 점수를 받는 아이러니한 경우가 생기기도 한다. 비록 한국연구재단을 중심으로 이를 개선하기 위한 노력들이 있었지만 일부 연구기관이나 대학의 채용 및 승진 평가 시스템에 여전히 이러한 특징이 남아 있는 경우가 있다.

한 연구 그룹에서 독립적으로 이룩한 연구 성과에 비해 공동 연구를 통해 이룩한 연구 성과물이 조금이라도 불리한 평가를 받을 수 있다는 점은 공동 연구를 망설이게 하는 요인이 된다. 이는 연구업적을 바탕으로 학위를 받는 대학원생, 취업을 앞둔 박사후연구원, 독립적인 연구력에 대한 입증을 요구받는 신진연구자, 큰 과제를 수주하여 이를 정당화할 만한 연구업적이 필요한 중견 또는 리더급 연구자 등 모든 연구자의 전 생애주기에 걸친 고민거리이다.

학제 간 공동 연구가 비교적 더 활발한 선진국의 평가 시스템을 살펴보면 수치화된 평가 지표는 어디까지나 참고 사항일 뿐, 연구자가 제시한 대표 업적을 중심으로 동료 토론에 의한 정성 평가가 일반화되어 있다. 동료 토론에 의한 정성 평가는 비록 소요되는 사회적 비용이 크기도 하고, 어떻게 보면 기준이 오히려 더 불분명해 보일 수 있다. 하지만 다양한 학문 분야의 연구업적을 정교하게 비교하거나 공동 연구의 지분을 수치화하는 시스템을 개발하는 것은 불가능에 가깝다. 대표 업적을 중심으로 한 동료 평가는 최고라기보단 최선의 방식이다. 이러한 시스템에 대한 신뢰가 축적되면 공동 연구를 가로막는 칸막이도 자연스레 더 낮아질 수 있을 것이다.

② | 연구 기여도에 대한 공정한 평가 기준 마련과 생숙한 문화가 필요하다.

최근에는 주요 논문 저널을 중심으로 공동 주저자 개념이 확산됨에 따라 공동 연구에 대한 장벽을 일정 수준 낮추는 효과가 있다. 하지만 ‘단독 주저자 논문과 공동 주저자 논문을 어떻게 비교하여 평가할 것인가?’에 대한 답은 여전히 학문 분야별, 기관별로 기준이 제각각이다.

반대로 공동 연구 촉진이라는 가치를 위해 공동 주저자를 남발하거나, 분별없이 평가한다면 '공정'이라는 가치를 훼손하는 결과를 낼 것이다. 정교하고 균형감 있는 정책을 개발하기 위한 고민이 반드시 필요한 대목이다. 그 밖에도 소통하며 함께 문제를 해결하기보다는 혼자 골똘히 생각하여 문제를 푸는데 익숙한 교육 문화적 요인도 있고, 대학마다 존재하는 단과대학, 학과라는 체계가 다학제간 소통과 공동 연구를 방해하는 칸막이로 작용하기도 한다.

공동 연구상에서의 기여도에 대한 서로의 이해가 부족한 점도 연구문화에서 더욱 발전이 필요한 부분이다. 예를 들어 생명과학 분야에서 세포를 키워 약물 처리를 해보는 것은 하나의 공헌으로 인정하지만, 데이터를 분석하여 후보 유전자를 발굴하는 일은 그냥 한번 해볼 수 있는 일로 인식되곤 한다. 실제 이러한 연구에 필요한 분석 장비, 인력 비용은 차치하더라도 서로 다른 분야의 연구가 어떻게 진행되고 어떠한 어려움이 존재하는지에 대하여 더 많은 소통의 창구가 필요하다. 그래야 눈에 보이지 않는 무형의 노력과 가치에 대해서도 인정할 수 있는 문화를 정착시킬 수 있을 것이다.

③ | 공동 연구를 강요하는 것이 진정한 협력은 아니다.

공동 연구가 창의적이고 혁신적인 결과물을 도출할 수 있도록 진정한 협력을 이루어 내기 위해서는 공동 연구를 강요하는 시스템을 개선해야 한다. 최근에는 계산과학(이론 연구) 결과가 포함된 실험 연구 결과가 더욱 주목받는다. 이는 사실로 인해 좋은 연구과제를 수주하기 위해서는 집단과제 구성원에 계산 연구자를 반드시 포함해야 한다는 고정된 연구원 구성 템플릿의 제약이 심해지고 있다. 여러 부처에서 실험과 계산을 의무적으로 연결하려는 이유는 연구 결과물의 질적 수준을 향상하고 다양한 전문성의 협력을 촉진하기 위한 목적이며, 공동 연구를 진행함으로써 더 효과적이고 혁신적인 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 기대하기 때문이다.

하지만 모든 계산과학과 실험 연구가 서로에게 무조건 필요한 것은 아니며, 각자 독립적으로 발전할 수 있는 학문 분야로서 서로에게 의존하지 않을 수도 있다. 실험은 현실적인 시스템에서 발생하는 현상을 이해하고 제어하는 데 초점을 맞추지만, 계산은 추상화된 모델과 시뮬레이션을 기반으로 시스템의 동작을 이해하고 예측하는 데 주력한다. 따라서 이와 같은 차이가 존재함에도 불구하고 실험과 계산을 의무적으로 연결시키게 되면 연구 방향이 제한되고 연구자들의 창의성과 다양성이 억압될 수 있다.

실험과 계산의 협력이 좋은 연구과제를 수주하기 위한 수단으로 획일화되어 가는 외부적인 동기가 존재하며, 이로 인한 현실적인 문제를 해결하기 위해서는 연구 방향의 독립성을 존중하고 연구 주제 선정에 있어 자율성과 유연성을 강화해야 한다. 이를 위해 실험과 계산 연구 각각의 독립성과 특성을 인정하고 서로에게 독립적으로 중요한 발견과 결과를 제공할 수 있도록 하는 연구지원 제도를 마련하는 것이 필요하다. 또한 상호 협력의 가치를 강조하는 교육 프로그램과 캠페인 등을 통해 실험과 계산의 공동 연구에 대한 인식을 개선할 수 있는 교육과 정보 제공을 강화해야 한다.

뿐만 아니라, 정부는 연구자들의 협업을 강제적으로 요구하는 것 대신 유연한 협업 모델을 도입함으로써 연구 주제와 방향성 설정의 자율성과 유연성을 존중해야 한다. 이를 위해 자율성과 유연성을 강조할 수 있는 국가 연구지원 정책을 마련해야 한다. 또한, 연구자들이 자신의 전문 분야와 관심사에 맞추어 서로 협력할 수 있는 기회를

제공함으로써 서로 간의 자발적인 협업을 이끌어야 한다. 연구자들이 창의적인 활동을 할 수 있는 환경은 혁신과 발전을 이끄는 핵심적인 요소이다. 이러한 환경은 자율성과 유연성을 바탕으로 구축되어야 하며, 이를 통해 진정한 협력을 이루어 낼 수 있을 것이다.

④ 난제 해결을 위한 공동 연구 지원 프로그램의 개선 및 확충이 필요하다.

짧게는 수십 년, 길게는 수백 년 이상 풀리지 않는 과학 분야의 여러 난제, 그리고 매일 끊임없이 생기는 새로운 연구 문제들, 수많은 연구자들의 노력에도 불구하고 왜 이러한 문제들을 해결하는 데 어려움이 계속 발생할까?

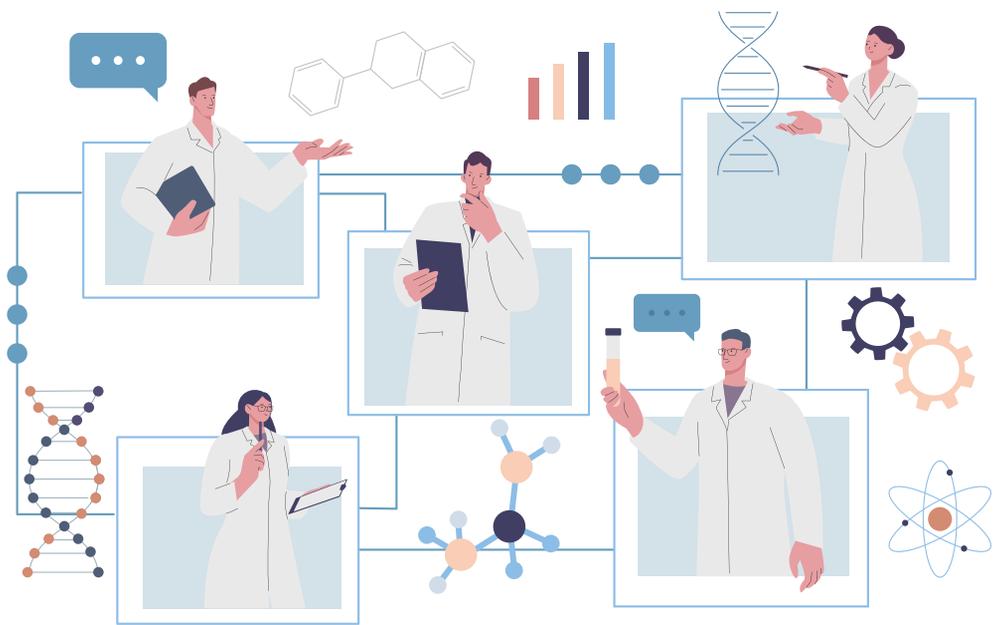
이러한 난제들은 보통 인간의 관찰과 경험을 통해 얻어진 규칙의 우연한 발견에서 시작된다. 이러한 규칙들은 그 기저에 있는 원리를 명확히 이해하여 반박 불가능한 논리로 증명하기 전까지는 법칙이 될 수 없다. 즉, 이 규칙들은 어디까지나 추측일 뿐이다. ‘추측’을 ‘법칙’으로 만들기 위해 필요한 것이 바로 난제 해결이다. 이 같은 난제들의 해결을 위해서는 이론 연구와 실험 연구라는 연구 방법의 이분법적 분류에서 벗어나 초학제적이며 연구 방법이 아닌 문제 해결에 초점을 맞춘 새로운 연구문화의 정착이 필요하다. 이를 위해서는 다양한 학문 분야 전문가들의 원활한 의사소통이 가능하게 하고, 이를 바탕으로 혁신적인 연구를 할 수 있도록 지원해야 한다.

분야별 난제를 공모하고 이와 관련된 기초지식과 기존의 연구 방법 및 결과에 대한 정보를 연구자들에게 개방하는 공유 네트워크를 구축하여 난제 해결에 기여할 수 있는 전문가들이 자유롭게 TF팀을 구성하고 공동 연구를 수행할 수 있는 중장기 연구지원 프로그램 마련이 필요하다. 또한, 프로그램이 원래의 취지에서 벗어나지 않도록 해당 프로그램의 연구 성과 시스템이 기존의 개인 연구 시스템과는 차별화되어야 한다. 연구 기여도 평가와 연구 성과평가 시스템의 문제점으로 인해 난제 해결을 위한 초학제적 공동 연구를 꺼리지 않도록 혁신적인 연구 평가 시스템도 수반되어야 할 것이다.

⑤ | 유연한 연구 예산 집행이 필요하다.

데이터와 계산에 기반한 생물 및 기초 의학 연구가 활발해지고 있지만, 여전히 대부분의 연구실은 전통적인 실험에 기반을 두고 있다. 연구자 수준에서는 그 인식이 빠르게 바뀌었더라도, 연구과제나 연구비 사용과 같은 제도적인 수준에서는 아직 이에 대한 충분한 대비가 되어 있지 못하다. 특히 연구비 사용 부분에서는 이론 연구자들이 사용하는 연구 장비와 재료의 구입이 어려운 상황이다.

현미경, 원심분리기, 대사 케이지는 구입이 가능하지만 연구를 위해 필요한 대규모 서버와 개인용 컴퓨터의 구입은 범용장비라는 이유로 불가하거나 특별한 절차를 거치는 경우가 많다. 항체와 시약의 구입은 가능하지만, 메모리, 하드디스크와 같은 부품 구입은 어려우며 주변 장치나 컴퓨터 관련 소모품을 구매하는 것은 더욱 어렵다. 실제로 이번 차세대리포트 집필 참여자 중 한 명은 대규모 데이터를 분양받기 위한 저장장치 구매 건이 연구비 사용으로 인정되지 않아 수백만 원의 비용을 사비로 지출해야 하는 상황을 겪은 적이 있었다. 또한, 최근 각종 데이터의 크기가 급속히 커지면서 서버나 슈퍼컴퓨터급의 대형 계산 장비가 필요한 경우들이 많은데, 연구자들 사이에서 이러한 장비의 구매는 거의 불가능한 것으로 여겨지고 있다. 이를 대신하기 위하여 클라우드 컴퓨팅과 같은 계산 장비의 대여에 관한 예산 사용을 허용하는 경우가 늘어나고 있지만, 여전히 집행을 위한 절차가 복잡하다. 이처럼 비록 겉으로는 범용장비일지라도 실험실에 따라 충분히 연구 장비와 재료로 사용될 수 있다는 점에 대한 더 폭넓은 이해가 필요하다.



차세대리포트(최근 3개년)

- 2020 뉴로모픽칩, 인간의 뇌를 담은 작은 반도체
대학의 미래, 젊은 과학자의 시선으로 바라보다
암과의 전쟁, 암 정복을 향한 꿈의 치료법
디지털 헬스케어, 건강관리의 새로운 패러다임
- 2021 자율주행, 그 이상의 모빌리티 생각하는 자동차
젊은 과학자의 눈으로 바라보다, 과학기술 2050
학령인구 절벽시대를 마주하다, 대학이 나아갈 길
새로운 팬데믹, 어떻게 준비해야 할까?
- 2022 우주 개척, 어떻게 해야 할까?
유전체 교정 작물, 식량안보의 대안이 될 수 있을까?
코로나19 엔데믹 전환과 롱코비드 문제 어떻게 대응할 것인가?
책임성 있는 AI를 위한 조건은?

한국과학기술한림원은,

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다. 1,000여 명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며, 각 회원의 지식과 역량을 결집하여 과학기술 발전에 기여하고자 노력해오고 있습니다. 그 일환으로 기초과학연구의 진흥기반 조성, 우수한 과학기술인의 발굴 및 활용 그리고 정책자문 관련 사업과 활동을 펼쳐오고 있습니다.

한림석학정책연구는,

우리나라의 중장기적 과학기술정책 및 과학기술분야 주요 현안에 대한 정책자문 사업으로 한국과학기술한림원 회원들이 직접 참여함으로써 과학기술분야 및 관련분야 전문가들의 의견을 담고 있습니다. 한림연구보고서, 차세대리포트 등 다양한 형태로 이루어지고 있으며 국회, 정부 등 정책 수요자와 국민들에게 필요한 정보와 지식을 전달하기 위하여 꾸준히 노력하고 있습니다.

한국과학기술한림원 더 알아보기

- 홈페이지 www.kast.or.kr
- 블로그 kast.tistory.com
- 포스트 post.naver.com/kast1994
- 페이스북 www.facebook.com/kastnews





KAST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

(13630) 경기도 성남시 분당구 돌마로 42

Tel 031-726-7900 Fax 031-726-7909 E-mail kast@kast.or.kr



9 772635 716007
ISSN 2635-716X

23