

과학과 기술의 미래 클러스터 2차년도 결과보고서

연구책임자

이정 동 (서울대학교 공학전문대학원 교수)

공동연구원

이중 수 (서울대학교 공학전문대학원 교수)

이준 환 (서울대학교 사회과학대학 교수)

이정 혜 (서울대학교 공학전문대학원 조교수)



서울대학교 국가미래전략원

과학과 기술의 미래

클러스터 소개

과학과 기술은 날이 갈수록 급격히 발전하고 있으며 산업경쟁력, 성장잠재력, 양극화, 실업, 교육 등 사회 이슈 뿐만 아니라, 국방, 외교 등의 대외적 문제에도 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 과학기술의 발전은 국가 경제와 사회구조의 재편을 요구하고 있으며 국제 관계의 지형 변화로 이어지고 있다. 또한 기존의 과학기술자 중심의 과학기술 전망 및 미래유망산업 도출 등의 비즈니스 중심적 전망에서 벗어나 과학기술과 인문사회적 관점이 융합된 국가적 시각의 과학기술 전망에 대한 수요가 증가하고 있다.

이러한 현실 속에서 다방면의 국가적 전략을 수립하기 위해서는 과학과 기술의 미래를 전망하고 그 발전 흐름을 예측하는 연구가 무엇보다 중요하다. 과학과 기술의 미래 클러스터는 과학기술의 혁신을 이끌기 위한 국가적 정책에 대해 고민하고 미래를 위한 제언을 하는 데에 목표를 둔다.

목차

서언	04
-----------	-----------

요약	06
-----------	-----------

연구의 배경과 목표	09
I. 연구의 배경	09
II. 연구의 목표	10

2차년도 연구 성과	11
I. 연구 결과	11
1. 협력적 기술주권의 개념 및 기술주권 현황 분석 전략	11
2. 과학과 기술의 미래를 열어갈 질문, 그랜드 퀘스트	21
3. 미래세대가 바라보는 세상 : 미래세대 토론회	48
II. 정책 제안	55
1. 협력적 기술주권 달성 및 기술주권지수 측정의 필요성	55
2. 중장기적인 시각 아래 연구개발 투자 정책의 필요성	55
3. 젊은 세대들이 바라보는 미래상을 이해하는 정책의 필요성	57
III. 행사 및 소통	58

3차년도 연구계획	65
I. 연구주제 1	65
II. 연구주제 2	65

첨부	67
I. 기술주권 관련 국내포럼 발표자료	67
II. 기술주권 관련 국내포럼 발표자료	70

서언

과학기술의 급격한 발전은 더이상 새로운 현상이 아니다. 인류 역사상 유래없이 이루어진 지난 수 세기 동안의 경제성장은 과학기술이 견인해 왔으며, 과학기술 발전의 주도권을 보유한 국가가 언제나 세계를 이끄는 국가였음이 자명하다. 그 흐름 위에서 최근에는 과학기술의 패권을 둘러싼 국가 간 경쟁이 더욱 격화되고 있다.

수십 년 간 세계 모든 국가들이 경탄을 금치 못할 수준의 경제성장을 이루고 그 경제적 수준을 오랫동안 유지하고 있는 한국이 선진국의 반열에 있음을 부인할 수 없다. 하지만 한국의 과학기술의 수준 또한 선진국의 반열에 있다고 할 수 있는가? 한국의 과학기술은 어느 수준에 있는가? 이 질문에 대한 '세계 과학기술 발전의 선두주자는 한국이다'라는 답이 확실하다고는 말할 수 없다.

국가 간 과학기술의 패권 경쟁이 가속화되고 있는 가운데, 과학기술의 글로벌 경쟁력을 갖추지 못한다면 한국의 경제적 번영을 유지할 수 없을지도 모른다. 선진국의 경제적 수준을 추격하며 성장해 온 20세기 한국의 과학기술은 선진국들이 구축한 과학기술의 패러다임을 답습하는 것으로 충분한 성과를 얻을 수 있었다. 하지만 지금의 한국은 과거와 다르다. 선진국의 반열에 오른 한국은 선진국의 패러다임을 탈피하고 도전적 질문을 던짐으로써 새로운 분야를 열어가고 과학기술의 발전을 선도해야 한다. 더 이상 추격할 대상이 없는 백색 공간(White Space)에 이른 한국의 과학기술은 눈 위에 새로운 발자국을 남겨야만 한다. 이제는 우리의 길을 우리가 스스로 찾아가야 할 단계이다.

본 보고서에는 1차 연도에 이어 수행한 '과학과 기술의 미래' 클러스터의 2차 연도 연구 내용을 수록했다. 먼저 기술 주권에 관한 연구는 국가 간

기술패권 경쟁이 격화되고 있는 상황에 기술주권을 달성하기 위한 전략인 '협력적 기술주권(Collaborative Technology Sovereignty)'과 기술주권을 정량적으로 측정하기 위한 방안을 논의한다. 다음으로는 과학기술 분야별 전문가 20명이 도출한 과학기술의 미래를 열어갈 10가지 도전적 질문, '그랜드 퀘스트'의 내용을 담았다. 마지막으로 기술의 시대를 선도할 미래세대의 독창적인 아이디어를 '미래세대 토론회'를 통해 도출했으며 그 내용을 본 보고서에 정리했다.

요약

과학과 기술의 중요성에는 의문을 제기하기 어렵지만 한국의 과학과 기술이 세계를 선도하고 있는지에 대해서는 쉽게 의문을 제기할 수 있다. 한국이 지금까지 추격해 온 선진국들은 경제 그리고 과학기술적으로 모두 앞서 나가 있었다. 그러나 그 선진국들과 이제는 어깨를 나란히 하고 있는 대한민국이라는 선진국은 경제적으로는 선진국이지만 과학기술 선진국이라고 하기는 어렵다. 한국의 과학기술은 아직도 선진국들의 패러다임 안에서 추격을 거듭하고 있기 때문이다.

본 보고서는 대한민국이 과학기술 선진국이 되기 위해서는 크게 두 가지가 필요하다고 첫째는 기술주권(Technology Sovereignty)이다. 다른 국가에 대한 일방적인 의존을 배제하더라도 우리가 필요로 하는 기술을 스스로 확보할 수 있는 역량을 갖추어야만 한다. 둘째는 도전적 질문, 그랜드 퀘스트(Grand Quest)이다. 도전적 질문 없이는 선진국의 패러다임에 의존할 수 밖에 없다. 따라서 도전적 질문 없이 기술주권을 확보하기는 어렵다.

미-중, 미-EU 무역분쟁 및 여러 전쟁으로 인한 불확실성이 높아지고 기술과 국가안보 간 연계성이 증가하면서 여러 나라들은 핵심기술을 확보하기 위해 노력하고 있다. 이러한 현실 속에서 부상한 기술주권에 대한 논의는 자국의 이익을 우선하는 국가적 정책으로 이어지고 있다. 그러한 정책들은 자국과 뜻을 같이 하는 국가들과의 기술적 파트너십 강화, 더욱 좁게는 자국 내의 역량에만 집중하는 배타적, 폐쇄적 특성을 갖고 있다.

하지만 날이 갈수록 경색되고 있는 글로벌 혁신의 생태계에서 기술주권을 확보하기는 어렵다. 한 국가의 혁신시스템(National Innovation System)은 경로의존적 그리고 상호의존적 특성을 갖기 때문에 폐쇄적 생태계에서는

그 시스템 내 기술 역량의 성장을 달성하기 어렵다. 그에 따라 최근의 국제적 환경은 기술주권을 확보하기에는 더욱 어려워지고 있다고 할 수 있다. 이를 극복하기 위한 전략으로 본 보고서는 협력적 기술주권(Collaborative Technology Sovereignty)의 개념을 제시한다. 한국의 기술 역량을 키우기 위해서는 국가 간 기술 협력이 반드시 필요하다. 이러한 협력적 기술주권은 '국가가 핵심 기술에 대한 고유한 역량을 보유하면서 동시에 상호신뢰하는 다른 국가와 집단적이고 상호보완적인 방식으로 기술을 공유하는 시스템'으로 정의할 수 있다. 또한 본 보고서는 각 국가의 기술주권 현황을 정량적으로 분석할 수 있는 프레임워크를 제안한다.

그렇다면 한국의 기술 역량을 기르기 위해서는 무엇이 필요할까? 과학과 기술의 미래 클러스터는 한국이 기술선진국으로 도약하기 위해서는 도전적 질문인 그랜드 퀘스트를 제기할 수 있어야 한다고 본다. 그랜드 퀘스트는 과학기술의 각 분야에서 아직까지 풀리지 않은 질문, 단기적으로 해법이 보이지 않는 질문, 그래서 실패할 가능성이 크지만 해법을 구한다면 그 분야의 패러다임을 바꿀 것으로 기대되는 질문이다. 과학과 기술은 새롭게 제시된 도전적 질문을 해결해 나가면서 발전을 거듭해왔다. 기술선진국들은 도전적 질문을 제기하고 스스로 해결하면서 패러다임을 열어왔다. 다시 말해, 도전적 질문을 제기할 수 있는 분위기가 기술선진국이 되기 위한 전제조건이라 할 수 있다.

선진국의 반열에 오른 대한민국이 만든 과학기술의 패러다임이 있는지 물어볼 필요가 있다. 그 누구도 이에 대해 그렇다는 답을 할 수 없을 것이다. 한국의 과학기술은 선진국의 기술적 패러다임을 추격하는 위치를 벗어나지 못했기 때문이다. 그랜드 퀘스트 프로젝트는 한국의 과학기술이 다른 나라를 추격하던 과거의 모습에서 탈피하기 위한 첫 걸음이다. 이에 뜻을 함께 하는 10가지 분야의 전문가들이 모여 자신의 분야에서 풀지 못하고 있는 난제들을 그랜드 퀘스트로 제시했으며, 본 보고서에 그 내용을 정리했다.

그랜드 퀘스트는 이를 해결하기 위한 미래세대의 관심이 필요하다. 그랜드 퀘스트의 주된 청중은 학부 3학년 정도의 지식을 가진 미래 연구자들이다. 이들이 그랜드 퀘스트를 해결해 나갈 때 한국은

기술선진국이 될 것이며 기술주권을 확보할 수 있을 것이다. 과학과 기술의 미래 클러스터는 1차연도에 이어 '미래세대 토론회'를 개최했다. 토론회의 주제는 '인공지능이 일상화된 세상에 던지는 미래세대의 질문'으로 한정하여 제시했다. 다양한 학교와 전공의 학부생 및 대학원생 19명이 참가하여 인공지능에 대한 미래세대의 독창적인 질문들을 도출했으며, 본 보고서에 그 내용을 정리했다.

연구의 배경과 목표

I 연구의 배경

현대의 경제성장을 견인한 과학기술의 영향력은 날이 갈수록 증가하고 있다. 최근에는 산업경쟁력, 성장잠재력, 인구, 기후변화, 질병 등 여러 사회적 이슈 뿐만 아니라 국가 안보에도 영향을 미치고 있다. 여러 나라들은 과학기술이 경제성장의 원동력이며 사회적 문제를 해결할 수단이고 국가 안보를 지킬 수 있는 방안임을 인식하고 있다. 한국 내 인식 또한 다른 나라들과 다르지 않다. 전 세계가 주목할 만한 경제적 성장을 이룬 한국이 지속가능한 번영을 영위하기 위해서는 세계를 선도할 수 있는 과학기술적 역량이 반드시 필요하다.

과학과 기술의 미래 클러스터는 과거 선진국들의 모델을 따르던 한국 과학기술의 한계를 극복할 길을 제시하고자 한다. 더이상 추격의 대상이 없는 백색 공간(White Space)에 놓인 한국의 과학기술은 스스로의 방향성을 제시할 수 있어야 한다. 한국이 지금까지 축적해 온 기술적 역량을 바탕으로 기술선진국으로 나아가기 위한 고민을 담아 시작된 이 연구는 1차 연도에 이어 2차연도에도 기술 역량을 키우기 위한 전략인 협력적 기술주권과 정량적 분석 프레임워크, 기술선진국으로 나아가기 위해 필요한 도전적 질문을 제기하는 그랜드 퀘스트, 미래세대가 바라보는 기술에 대한 통찰을 공유한 미래세대 토론회의 내용으로 진행했다. 2차연도에는 보다 구체적인 결과를 도출했으며, 여러 세미나와 포럼 그리고 홍보 수단을 통해 그 결과를 대중에게 공유하고 있다. 본 연구를 통해 깊이 있는 학술적 연구 결과와 전문가들의 혜안 그리고 미래세대의 시각이 한국이 기술선진국으로 탈바꿈하는 데에 기여할 것으로 기대한다.

II 연구의 목표

본 연구의 목표는 크게 두 가지이다. 첫째는 '한국의 전략기술 도출을 위한 이론적 프레임워크 방향성 검토'이다. 1차연도에는 관련 국내외 포럼 등을 통해 전문가들의 의견을 모으는 데에 주력했다. 2차연도에는 이 결과를 발전시켜 한국에 필요한 전략기술을 획득하기 위한 수단인 협력적 기술주권의 개념을 정립했다. 또한 기술주권을 정량적으로 분석할 수 있는 프레임워크를 개발하는 데에 주력하고 있다.

둘째는 '미래 사회변화 전망을 반영한 국가 과학기술 난제 및 연구 아젠다 발굴'이다. 1차연도에는 이 목표를 달성하는 데에 참고할 수 있는 국내외 사례를 탐색 및 검토하고 파일럿 테스트를 진행했다. 2차연도에는 SBS 문화재단, 한국고등교육재단의 후원 및 협력을 통해 구체적인 결과를 도출했다. 토론회를 통해 사회변화에 대한 미래세대의 고민을 종합했으며 그랜드 퀘스트 프로젝트를 통해 10가지 과학기술 분야의 난제를 제시했다.

2차년도 연구 성과

I 연구 결과

1. 협력적 기술주권의 개념 및 기술주권 현황 분석 전략

1) 협력적 기술주권의 개념

미-중 및 미-EU 무역 분쟁, 러시아의 우크라이나 침공 사태 등 최근 전 세계적으로 지정학적 불확실성이 심화되면서 경제 안보가 주요한 정책적 이슈로 떠올랐다. 또한, 첨단기술과 국가안보와의 연계성이 증가하면서 국가핵심기술의 확보를 위한 기술주권 논의가 부상하였다.¹⁾ 국가핵심기술은 각 국가적 맥락에서 국익의 우선순위 및 글로벌 혁신생태계 내 위치에 따라 국가의 경쟁력 및 안보에 현재 중추적인 역할을 하거나 미래 생태계에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상되는 기술을 의미한다.²⁾³⁾⁴⁾ 기술주권은 '국가나 국가 연합이 필요로 하는 기술을 직접 개발하거나 타국에 대한 일방적인 구조적 의존 없이 스스로 확보할 수 있는 능력'을 의미한다.⁵⁾⁶⁾ 최근 미국, 중국, EU 등 주요국들은 기술주권 확보에 있어서 자국의 이익을 우선시하는 과학기술혁신 정책을 연이어 발표하였다.⁷⁾⁸⁾

1) Luo, Yadong. 'Illusions of techno-nationalism.' *Journal of International Business Studies* (2022): 1-18.

2) The White House. 'National Strategy for Critical and Emerging Technologies' (2020).

3) Bimber, Bruce A., and Steven W. Popper. "What is a critical technology?." (1994).

4) Ramahandry, T., et al. "Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty." Brussels: European Parliamentary Research Service (2021).

5) Edler, Jakob, et al. 'Technology sovereignty: From demand to concept' [*technologiesouveränität: Von der forderung zum konzept*]. No. 02/2020. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI) (2020).

6) March, Christoph, and Ina Schieferdecker. "Technological sovereignty as ability, not autarky." *International Studies Review* 25.2 (2023): viad012.

주요국들에서 지정한 핵심기술 분야가 중복되는데,⁹⁾ 이는 자국의 역량 개발을 우선시하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 기술주권 확보를 위해 뜻을 같이하는(like-minded) 국가들과의 협력을 강화하고 있다. 특히 Five Eyes (FVEY), Quadrilateral Security Dialogue (Quad) 등의 전략적 파트너십(strategic partnership) 구축을 통해 제3국에 대한 의존성을 배제하는 움직임이 있다.¹⁰⁾ 이를 종합해보면 주요국에서의 기술주권 관련 논의가 국가핵심기술에 대해 자국 혹은 자국이 속한 국가 연합 중심의 기술 역량 확보를 추구하는 방향으로 진행되고 있으며, 이는 기술 민족주의(techno-nationalism)의 부활이라고 해석할 수 있다.¹¹⁾¹²⁾¹³⁾ 민족주의적 태도는 낮은 신뢰 수준과 외국 파트너와의 협력 기피로 나타나며, 이는 국경 간 협력(cross-border collaboration)에서 파트너의 기회주의적 행동에 대한 우려를 증가시켜 파트너 간의 상호의존도가 낮아지며 상호작용이 감소하게 된다.¹⁴⁾

그러나 기술 민족주의에 기반한 정책하에서는 기술주권 달성이 불가능하다. 그 이유는 국가혁신시스템(NIS)의 경로의존적(path dependent) 및 상호의존적(mutually interdependent) 특성 때문이다. 첫째로 국가의 미래 기술발전 방향은 역사적 발전 경로에서 기인하는 경로의존성이 나타난다.¹⁵⁾ 또한, NIS에 포함되지 않았던 영역의 기술 역량을 새롭게 개발하는데는 더 큰 비용이 들며, 해당 분야에 대한 투자를 중단하면 이후에 다시 기술 역량을 구축하는데 더 많은 비용이 소요되는

7) The White House. 'National security strategy' (2022).
 8) Wübbcke, J. et al. 'Made in China 2025. Mercator Institute for China Studies,' Papers on China 2.74 (2016).
 9) 백서인 외. '글로벌 기술패권 경쟁에 대응하는 주요국의 기술주권 확보 전략과 시사점.' STEPI Insight (2021): 1-55.
 10) Moerel, Lokke, and Paul Timmers. 'Reflections on digital sovereignty.' EU cyber direct, research in focus series (2021).
 11) Lynn, Leonard, and Hal Salzman. 'Techno-nationalism or building a global science and technology commons?(but what about China?).' *Global policy* 14.5 (2023): 832-846.
 12) Möllers, Norma. 'Making digital territory: Cybersecurity, techno-nationalism, and the moral boundaries of the state.' *Science, technology, & human values* 46.1 (2021): 112-138.
 13) Starrs, Sean Kenji, and Julian Germann. 'Responding to the China challenge in techno-nationalism: Divergence between Germany and the United States.' *Development and Change* 52.5 (2021): 1122-1146.
 14) Ertug, Gokhan, et al. "The effect of nationalism on governance choices in cross-border collaborations." *Journal of Management* (2023): 01492063231172757.
 15) Arthur, W. Brian. 'Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events.' *The economic journal* 99.394 (1989): 116-131.

락아웃(lock-out) 현상이 야기될 수 있다.¹⁶⁾ 이처럼 NIS의 경로의존적 특성을 고려하지 않는 폐쇄적인 STI 정책하에서는 핵심기술에 대한 기술주권 달성이 어렵다. 둘째로 NIS는 다른 국가의 혁신시스템과 상호의존적인 방식으로 복잡하게 얽혀있다.¹⁷⁾ 이에 따라 혁신 활동의 경계가 모호해지면서 초국가적 차원에서 여러 NIS가 연결되고 상호작용하는 글로벌 혁신시스템(GIS)이 형성되었다.¹⁸⁾ GIS의 관점에서 기술 생산을 위한 R&D 활동과 가치사슬이 글로벌 규모로 확장되면서 국제적 협력 및 분업이 촉진되고 있다.¹⁹⁾ 이처럼 국가의 지리적 경계를 넘어서 형성된 지식 및 혁신 네트워크를 고려하였을 때 단일 국가가 자국 중심으로 기술 생태계의 모든 지식과 기술을 개발 및 소유할 수 없다. 그러므로 기술 민족주의에 기반한 폐쇄적인 STI가 아닌 협력에 기반한 기술주권 전략이 필요하다.

국가는 기술주권 달성을 위해 내부 역량에 기반한 자체 개발뿐만 아니라 개방형 혁신(open Innovation)을 통한 국가 간 협력을 추구해야 한다. 협력적 기술주권이란 '국가가 핵심 기술에 대한 고유한 역량을 보유하면서 동시에 상호신뢰하는 다른 국가와 집단적이고 상호보완적인 방식으로 기술을 공유하는 시스템'으로 정의할 수 있다. 즉, 협력적 기술주권 전략은 자국 고유의 역량 개발과 협력을 조화롭게 추구하는 개방적인 STI 정책을 기반으로 한다. 이를 통해 국제 보조금 경쟁과 같이 국가 간의 경쟁적인 중복투자를 통해 나타나는 이류기술의 개발²⁰⁾을 지양하고, 협력을 통해 국내외의 혁신 자원 배분의 효율을 극대화하여 상호보완적 혁신의 창출이 가능하다. 둘째로 글로벌 가치사슬 내에서 불한 요소를 선제적으로 통제함으로써 전략적 균형을 달성할 수 있다. 한 국가가 협력의 균형에서 벗어나 독점적인 행동을 시도하면 다른 국가로부터 보완 기술 공급의 차단과 같은 보복의 위험에 직면하게 되어 균형에서 이탈한 유인이 감소하기

16) Cohen, Wesley M., and Daniel A. Levinthal. "Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation." *Administrative science quarterly* 35.1 (1990): 128-152.

17) Binz, Christian, and Bernhard Truffer. "Global Innovation Systems—A conceptual framework for innovation dynamics in transnational contexts." *Research policy* 46.7 (2017): 1284-1298.

18) Carlsson, Bo. 'Internationalization of innovation systems: A survey of the literature.' *Research policy* 35.1 (2006): 56-67.

19) Schuch, Klaus. 'Techno-globalization and Innovation.' *Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation and Entrepreneurship*. Cham: Springer International Publishing, 2020. 2275-2282.

20) Bauer, Matthias, and Fredrik Erixon. 'Europe's quest for technology sovereignty: Opportunities and pitfalls.' No. 02/2020. ECIPE Occasional Paper (2020).

때문이다.²¹⁾²²⁾ 셋째로 기후변화, 팬데믹, 고령화, 디지털 전환 등 글로벌 도전과제(global challenge)의 해결에 기여할 수 있다. 한 국가의 기술 역량만으로 해결이 어려운 난제들에 대해서 글로벌 지식 및 혁신 네트워크를 통해 각국의 혁신 자원을 결합하여 효과적으로 대응할 수 있다.

협력적 기술주권 프레임워크의 구축을 위해 성공적인 사례에 대한 메타분석을 적극적으로 수행할 필요가 있다. 유럽의 경우 EU 회원국들의 다양한 상황과 이해관계를 조화시켜 공동의 혁신 목표를 보다 효율적으로 추구하기 위해 유럽공동이익 프로젝트(IPCEI)를 출범시켰다. IPCEI의 자격을 얻기 위해서는 최소한 4개의 회원국이 참여해야 하고, 중소기업을 포함한 광범위한 유럽 이해관계자를 포함해야 한다. 2018년 첫 번째 프로젝트인 마이크로일렉트로닉스에 관한 IPCEI가 시작된 이래 참여하는 회원국과 기업의 수가 점차 증가하여 현재 배터리, 수소 등을 포함한 8개의 프로젝트가 승인되었다. 배터리 기술 관련하여 두 개의 프로젝트가 출범하였는데, 2019년 승인된 첫 번째 프로젝트는 7개국²³⁾의 총 17개 기업이 참여하고, 2021년 승인된 두 번째 프로젝트는 12개국²⁴⁾의 총 42개 기업이 참여하고 있다. [그림 1]은 두 번째 배터리 IPCEI EuBatIn으로, 첫 번째 프로젝트와 달리 지속가능성에 중점을 두고 원자재 추출, 배터리 셀·팩의 설계 및 제조, 최종적으로 순환 경제에서의 재활용 및 폐기까지 배터리 가치사슬 전반에 걸친 기술개발 활동이 포함된다. 이처럼 EU는 IPCEI 프레임워크를 통해 국가 간 협력을 기반으로 한 기술 생태계를 구축하여 EU 차원에서의 협력적 기술주권 확보를 위한 노력을 하고 있다.²⁵⁾²⁶⁾

21) Fehr, Ernst, and Simon Gächter. 'Cooperation and punishment in public goods experiments.' *American Economic Review* 90.4 (2000): 980-994.

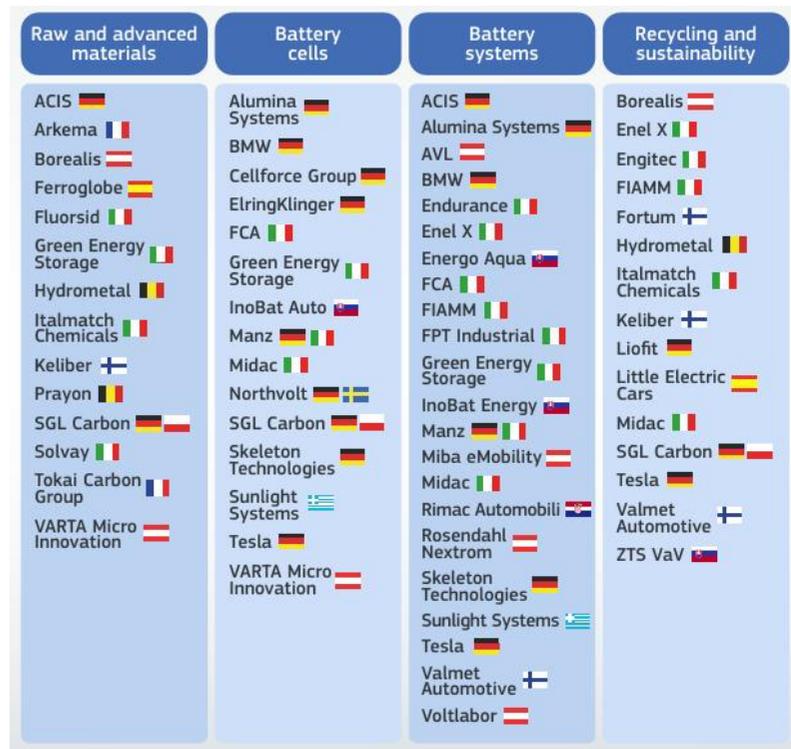
22) Henrich, Joseph. 'Cooperation, punishment, and the evolution of human institutions.' *Science* 312.5770 (2006): 60-61.

23) 벨기에, 핀란드, 프랑스, 독일, 이탈리아, 폴란드, 스웨덴

24) 오스트리아, 벨기에, 크로아티아, 핀란드, 프랑스, 독일, 그리스, 이탈리아, 폴란드, 슬로바키아, 스페인, 스웨덴

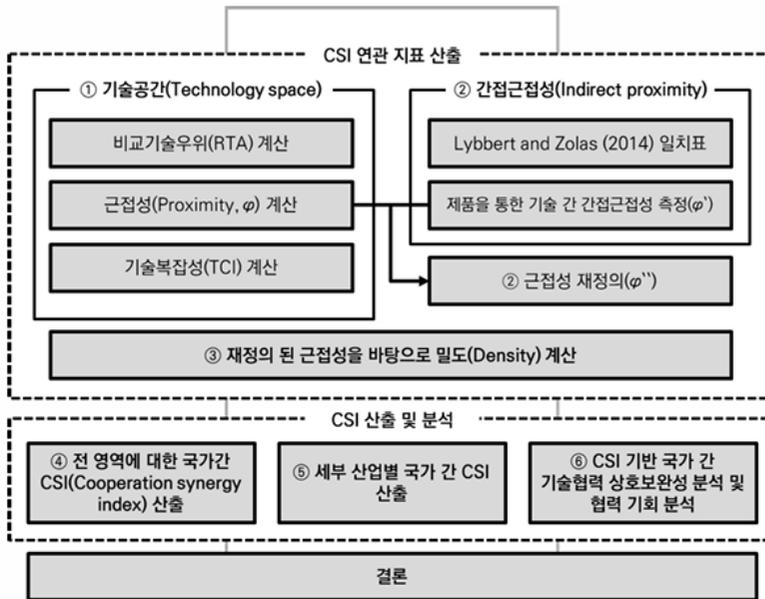
25) European Commission. 'Communication from the Commission 2014/C 188/02 on Criteria for the analysis of the compatibility with the internal market of State aid to promote the execution of important projects of common European interest', Official Journal of the European Union, C188/4 (2014).

26) European Commission. 'Horizon Europe Strategic Plan 2025-2027 Analysis' (2023)



[그림 1] 두 번째 배터리 IPCEI 프로젝트(EuBatIn)의 협력 프레임워크

협력적 기술주권 프레임워크 하에서 협력 기회 탐색을 위한 정량적 분석 방법론이 필요하다. 본 연구에서는 기술과 경제발전의 경로의존적 특성과 국가협력에 따른 혁신체계의 접근성에 대한 선행연구를 바탕으로, [그림 2]와 같이 데이터 기반의 국가 간 협력 파트너 탐색 및 매칭을 위한 협력시너지지수(Cooperate Synergy Index, CSI)를 제안하고자 한다. 특히 데이터와 선행연구의 성과를 토대로 국가별 기술 역량을 분석하고 이를 통해 각국의 CSI를 산출하여 국가 간 협력 매칭을 도출할 수 있다. 이를 통해 국가 간 기술 혁신 체계에 대한 접근 가능성을 탐색하고, 데이터 기반의 기술협력 정책 수단을 제시하고자 한다. 이 접근 방식은 국가들이 서로의 기술 및 산업적 역량에 기반하여 상호보완적인 협력 파트너를 찾을 수 있는 방법을 제공함으로써, 글로벌 기술 협력의 효율성을 높일 수 있을 것이다.



[그림 2] 협력시너지지수(CSI) 분석 프레임워크

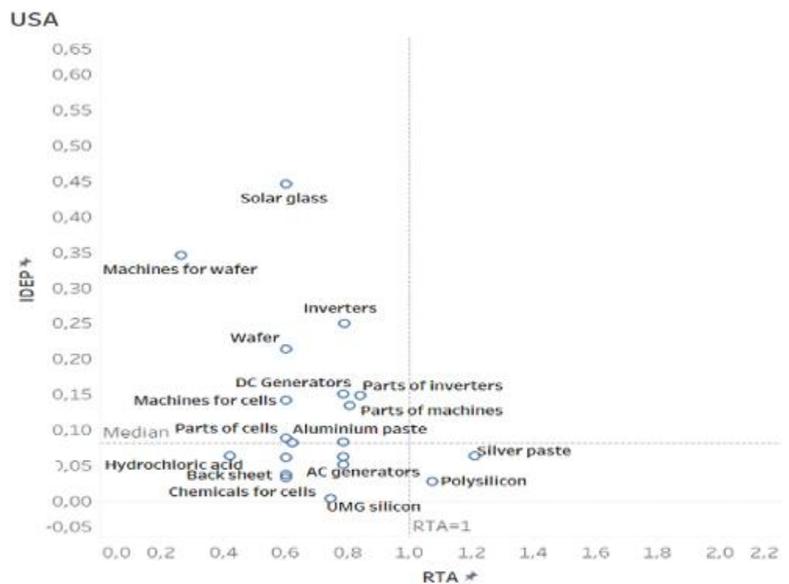
2) 기술주권 현황 분석 프레임워크

기술주권 확보를 위한 핵심기술 선정 및 육성 전략을 수립하는데 있어서 실제 정책적 의사결정을 뒷받침할 수 있는 테크인텔리전스(tech intelligence) 역량이 필요하다. 이를 위해 국가의 전반적인 기술주권의 수준을 평가하고 정책적 시사점을 도출할 수 있는 전략적 분석 프레임워크의 제안이 필요하다. 본 연구에서는 기술주권을 구성하는 핵심 요소인 기술역량, 생산역량 및 구조적 독립성을 고려하여 기술주권을 측정할 수 있는 새로운 지표를 제시하고자 한다. 이를 활용하여 국가별 기술주권 수준 분석, 공급망 단계를 고려한 산업별 기술주권 수준 분석, 자국 내 생산을 고려한 국가별 산업주권기술주권 수준 분석의 세 가지 측면에서 연구를 수행할 수 있다.

관련 선행연구로 Caravella et al. (2024)²⁷⁾는 무역 및 특허 데이터를 기반으로 전략적 의존성(strategic dependency)과 기술 전문화(technological specialization)의 두 가지 지표를 결합하여 미국의 태양광 산업에 대한 상품별 기술주권 수준을 [그림 3]과 같이 도식화하였다. 해당 연구에서 전략적 의존성을 측정할 수 있는 수입의존도(IDEP) 지표를 새롭게 제시하였고, 기술 전문화는 현시기술우위지수(RTA)를 통하여

27) Caravella, Serenella, et al. 'Technological sovereignty and strategic dependencies: The case of the photovoltaic supply chain,' *Journal of Cleaner Production* 434 (2024): 140222.

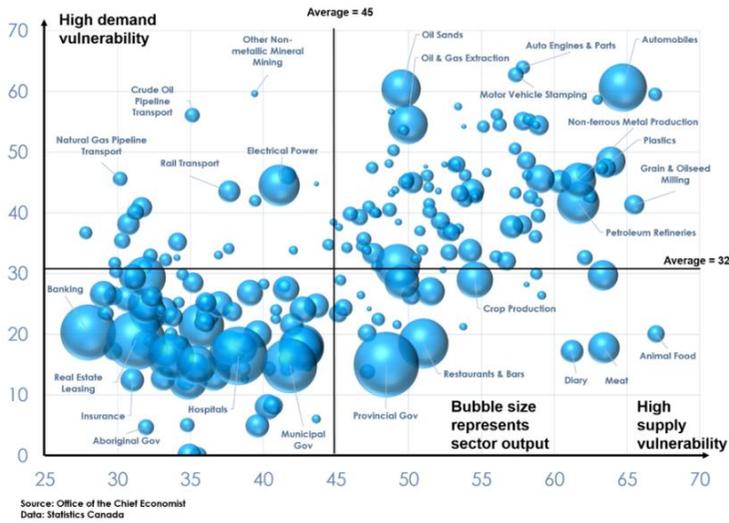
측정하였다. Boileau and Sydor (2020)²⁸⁾은 공급사용표(SUT)와 무역 데이터를 활용하여 글로벌 공급망 붕괴에 대한 캐나다 산업의 공급망 취약성(vulnerability)을 분석하였다. 국제 공급 취약성 지수와 국제 수요 취약성 지수의 두 개의 별도의 지수를 구성하였고, 각가에 대한 측정 결과를 [그림 4]와 같이 나타내었다. 산업별 국제 공급 취약성 지수는 중간재에 대한 의존도, 중간재 수입 의존도, 간접 수입(자국 내 타 산업으로부터의 수입)에 대한 의존도, 수입의 지리적 집중도, "수입한정물품목록"에 등록된 수입품의 개수를 통해 측정하였다. 산업별 국제 수요 취약성 지수는 수출 의존도, 수출의 지리적 집중, 간접 수출에 대한 의존(자국 내 타 산업으로의 수출)을 통해 측정하였다. Hambur (2021)²⁹⁾은 호주 재무부에서 발간한 보고서로 기업 수준에서의 시장 지배력(market power)를 측정할 수 있는 지표(mark-ups)를 새롭게 제시하고 부문별로 계산하여 [그림 5]와 같이 비교하였다. mark-ups는 투입물에 대한 생산량 탄력성(output elasticity)을 투입물에 대한 지출 대비 판매 이익의 비중으로 나눠준 값으로 계산하였다.



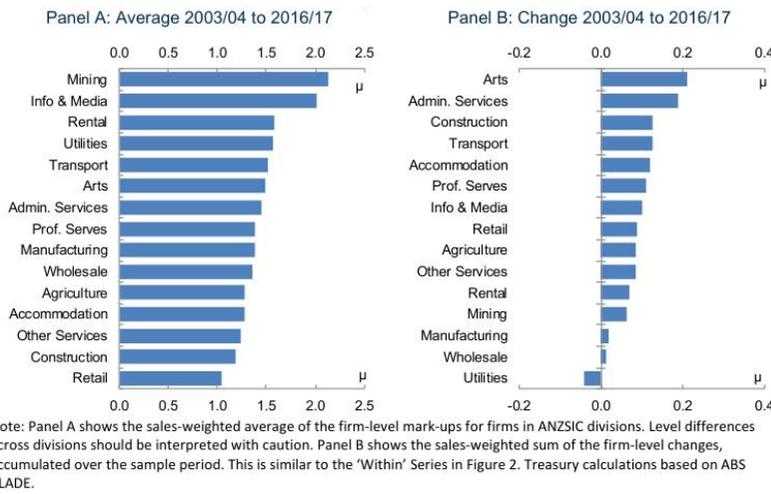
[그림 3] 2019년 미국의 태양광 산업에 대한 상품별 IDEP-RTA 매핑 (Caravella et al., 2024)

28) Boileau, David, and Aaron Sydor. 'Vulnerability of Canadian industries to disruptions in global supply chains.' Global Affairs Canada (2020).

29) Hambur, Jonathan. Product market power and its implications for the Australian economy. No. 2021-03. Treasury Working Paper (2021).



[그림 4] 캐나다의 산업별 국제 수요 및 공급 취약성 매핑
(Boileau and Sydor, 2020)



[그림 5] 호주의 산업별 기업 수준의 시장 지배력(mark-ups) 비교
(Hambur, 2021)

• 글로벌 관점에서 국가별 기술주권 수준 분석

특정 국가의 전반적인 기술역량 및 경제안보 수준은 각 상품들에 대한 값들의 합으로 평가할 수 있다. 다양한 상품에 대해 전반적으로 높은 기술역량과 경제안보 수준을 가지고 있다면 해당 국가의 기술주권은 높은 상태라고 진단할 수 있으며, 반대로 모든 상품들에 대해 전반적으로 낮은 기술역량과 경제안보 수준을 갖고 있다면 기술주권이 낮은 상태라고 볼 수 있다. 이때, 각 상품들은 모두 동일하지 않으므로 Hidalgo and Hausmann (2009)³⁰⁾이 제시한 제품복잡성을 반영하는 Product Complexity Index를

30) Hidalgo, César A., and Ricardo Hausmann. "The building blocks of

재가공하여 특정 국가의 기술주권 수준을 합계하는데 가중치로 활용할 수 있다. 이렇게 집계된 지표들은 해당 값 자체로도 해석이 가능하고 연도별 비교분석이 가능하기 때문에, 글로벌 국가들의 전반적인 기술주권 수준을 비교하고 시간에 따른 변화를 분석할 수 있다. 또한, 이렇게 정량적으로 계산된 기술주권 수준은 국가의 기술수준 및 경제수준을 나타내는 다양한 지표들(무역량, 특허 출원 수, R&D 지출, 연구자 수 등)과 비교하여 검증될 수 있고, 이러한 지표들과의 차이의 원인을 보다 분명하게 식별함으로써 국가의 기술주권 확보를 위한 새로운 정책적 시사점을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

• 공급망 단계를 고려한 산업별 기술주권 수준 분석

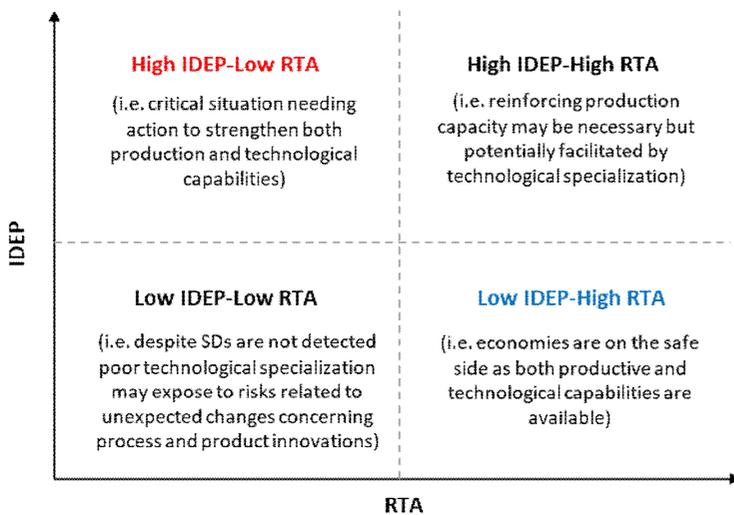
국내 주요 4대 산업(반도체, 배터리, 통신장비, AI)의 공급망 구조를 파악하고, 각 산업별 공급망 단계의 전략적 의존성과 기술 역량의 불균형 분포에 대한 타당한 증거를 제시한다. 또한, 기술 역량과 특허 전문화 간의 관계를 조사하고, 주요국과의 비교 분석을 통해 생산역량과 기술역량에 대한 기술주권 관점에서의 경쟁우위를 진단한다. 첫째, 무역 및 특허 데이터를 결합하여 산업별로 공급망 부문별 세밀한 매핑을 수행할 수 있다. 둘째, 각 산업별로 공급망 내에서 무역 및 기술의 우위를 차지하는 주체들이 어떻게 변화하고 있는지, 그리고 이러한 변화가 특정 주체들의 의존성을 어떻게 증가시키는지 분석할 수 있다. 셋째, 해당 산업들의 핵심 기술에 대한 수입의존도와 기술 역량을 포괄적으로 파악하고, Caravella et al.(2024)가 제시한 프레임워크에 기반하여 [그림 6]과 같이 무역 및 산업 혁신 정책을 맞춤 설정하는 "전략적 정보(Strategic Intelligence)"의 분석을 수행할 수 있다. 본 연구를 통해 산업별 주요 국가의 강점과 약점을 분석하고, 한국 통신장비산업의 발전을 위한 전략적 관리와 정책 수립에 중요한 시사점을 제공할 것으로 기대된다.

• 각 국가의 생산을 고려한 기술주권 수준 분석

기술주권 달성을 위해 경제 안보의 차원에서 자국의 생산 역량 구축뿐만 아니라 공급망 안정성 강화를 함께 고려해야 한다. 경제 안보는 전통적으로 다른 국가들이 경제적 수단(economic instruments)을 사용하여 조작(manipulation)하는 것으로부터 보호하는 것을 의미하였으나,

economic complexity." Proceedings of the national academy of sciences 106.26 (2009): 10570-10575.

세계화의 맥락에서 예상치 못한 충격(unexpected shocks)과 경제적 변동성(economic volatility)의 위험을 줄이는 데 중점을 두는 방향으로 발전했다.³¹⁾ 또한, 코로나 19 이후 공급망 리스크 관리가 중요한 정책적 이슈로 떠올랐다. 이러한 맥락에서 국내 역량(domestic capability) 구축과 공급망의 회복탄력성(supply chain resilience) 구축을 모두 고려한 기술주권 수준을 분석할 필요성이 있다. OECD 세계산업연관표(ICIO)를 활용하여 산업 분야별 국가의 생산 및 수입 데이터를 기반으로 국가별 기술주권 수준을 측정하고 시간에 따른 국가별 순위 변화를 분석할 수 있다. 또한, 국내 역량 및 회복탄력성의 각 요소별 분석을 통해 기술주권 수준 변화의 원인에 대한 풍부한 해석을 제공할 수 있으며, 기술주권 향상을 위한 정책 수립에 있어서 새로운 정책적 시사점을 도출할 수 있을 것으로 생각된다.



[그림 6] 전략적 정보 분석 프레임워크

31) Kahler, Miles. "Economic security in an era of globalization: definition and provision." *The Pacific Review* 17.4 (2004): 485-502.

2. 과학기술의 미래를 열어갈 도전적 질문, 그랜드 퀘스트 (Grand Quests)

과학과 기술은 새롭게 제시된 도전적 질문들을 해결해 나가면서 발전을 거듭해왔다. 하지만 지금까지 다른 나라들을 선도하기 보다는 추격하는 입장에 있던 대한민국의 과학기술은 그러한 도전적 질문을 제시하지 못했다. 과학과 기술의 미래 클러스터는 대한민국의 과학기술계가 가지고 있는 이러한 한계를 극복하고자 각 분야별 도전적 질문을 제시하고자 '그랜드 퀘스트' 프로젝트를 1차년도부터 기획했으며, 2차년도에는 가시적인 성과를 도출할 수 있었다. 서울대학교 국가미래전략원 주관 그리고 SBS 문화재단의 후원으로 프로젝트를 수행했으며, 국가미래전략원 설립 이후 첫번째 단행본인 <그랜드 퀘스트 2024>와 수 차례의 포럼을 통해 대한민국 과학기술계, 산업계 뿐만 아니라 사회 전반에 걸쳐 도전적 질문을 찾아가는 분위기를 만들어 낼 수 있었다.

그랜드 퀘스트 프로젝트는 국외 각 기관이 매년 제시하는 유망기술과는 분명한 차이가 있다. 일례로, MIT Technology Review³²⁾가 매년 제시하는 'MIT 10 Breakthrough Technologies'와 국가미래전략원의 그랜드 퀘스트는 여러 측면에서 차이가 있다. MIT Technology Review는 에디터들이 모여 1년 간 취재한 내용을 바탕으로 향후 10년 이내에 사회적으로 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 유망 기술을 선정하는 데에 주안점을 둔다. 또한 해당 기술을 이끌어 갈 것으로 예상되는 특정 기업을 제시하며 시장성에 주목하기도 한다. 이에 반해 그랜드 퀘스트는 10가지 과학기술 분야별 연구자 2명의 토론을 통해 해당 분야에서 해결책을 찾지 못하고 있는 난제의 발굴을 목표로 한다. 더불어 20년 내외로 학계가 해결책을 제시할 것으로 예상되고, 젊은 연구자들이 그 해결책을 위해 도전할 만한 난제에 초점을 둔다.

1) 분야별 출제위원회

과학과 기술의 미래 클러스터는 경험이 많은 시니어 연구자들로 이루어진 총괄위원회의 수 차례 토론을 통해 10가지 분야를 1차년도에 선정했으며, 해당 분야별 우수한 연구자를 2명씩 추천하여 총 20명의 서울대학교 교수들로 출제위원회를 구성했다. 질문이 한 방향으로 경도되어 도출되지

32) <https://www.technologyreview.com/>

않도록 하기 위해 같은 분야 내에서도 세부적으로는 결이 다른 연구자, 시니어 – 주니어 연구자 등의 기준으로 분야별 출제위원을 매칭했다.

'23년 5월 30일에는 서울대학교 자연대 28동 대회의실에서 김병연 국가미래전략원장, 과학과 기술의 미래 클러스터 공동연구원, 그랜드 퀘스트 총괄위원회, 그리고 출제위원회가 모두 참석한 가운데 그랜드 퀘스트의 프로젝트 취지, 정의, 목표를 공유하고 향후 추진계획을 논의하는 전체 회의를 진행했다.

분 야	출제위원	소 속
초미세·초저전력 반도체	김장우 교수	서울대학교 전기정보공학부
	김상범 교수	서울대학교 재료공학부
차세대 배터리	최장욱 교수	서울대학교 화학생물공학부
	강기석 교수	서울대학교 재료공학부
효소모방 촉매	현택한 석좌교수	서울대학교 화학생물공학부
	성영은 교수	서울대학교 화학생물공학부
환경 적응적 로봇	조규진 교수	서울대학교 기계공학부
	김현진 교수	서울대학교 항공우주공학과
체화 인지구조 인공지능	장병탁 교수	서울대학교 컴퓨터공학부
	이인아 교수	서울대학교 뇌인지과학과
추론하는 인공지능	김용대 교수	서울대학교 통계학과
	윤성로 교수	서울대학교 전기정보공학부
동형암호	천정희 교수	서울대학교 수리과학부
	안정호 교수	서울대학교 지능정보융합학과
항노화 기술	김광일 교수	서울대학교 의과대학, 분당서울대병원
	강찬희 교수	서울대학교 생명과학부
인공지능 기반 항체설계	윤태영 교수	서울대학교 생명과학부
	백민경 교수	서울대학교 생명과학부
양자정보과학	박제근 교수	서울대학교 물리천문학부
	김도현 교수	서울대학교 물리천문학부

[표 1] 2023년 SNU 그랜드 퀘스트 출제위원

2) 간담회 : 분야별 그랜드 퀘스트 도출

'23년 6월 ~ 8월에는 분야별 간담회에서 난상 토론을 통해 10가지 그랜드 퀘스트들을 도출했다. 분야별 3시간 가량의 간담회는 그랜드 퀘스트의 배경, 난제의 성격, 난제를 제시하는 대상 등에 대해 간담회 참석자 간 공감대를 형성한 후, 분야별 난제를 구체화하고 난제의 중요성과 해결하기 어려운 이유, 해법의 큰 방향에 대한 직관 등을 논의하여 정리하기 위한 목적으로 진행했다. 그랜드 퀘스트의 취지에 부합하는 질문을 도출하기 위해 분야별 출제위원 뿐만 아니라 해당 분야와 관련 있는 연구를 진행 중인 총괄위원, 공동연구원이 참석했다. 다음은 간담회의 7가지 주요 논의사항이다.

간담회의 주요 논의사항

- (난제의 정의) 풀기 어려운 문제가 무엇인가?
- (난제의 역사) 이 난제가 형성된 배경과 역사는 무엇인가?
- (난제의 구조) 이 난제가 왜 풀기 어려운가?
- (난제의 가치) 이 난제가 해결된다면 어떤 혁신적인 변화가 기대되는가?
- (난제의 현황) 이 난제에 도전하기 위해 어떤 시도들이 이루어지고 있는가?
- (난제의 전망) 이 난제의 해법이 도출될 법한 시도의 방향은 무엇인가?
- (개인적 경험) 이 난제를 생각하게 된 계기는 무엇인가? 어떤 실패나 좌절을 경험했는가?



[그림 7] 그랜드 퀘스트 분야별 간담회

과학기술의 도약을 위해 도전적 질문을 찾으려는 그랜드 퀘스트 프로젝트는 그 유래를 찾을 수 없는 과정이었다. 따라서 도전적 질문을

제시한 경험이 없는 출제위원들은 취지에 공감하면서도 그랜드 퀘스트를 도출하는 데에 상당한 어려움을 겪었다. 그럼에도 불구하고 출제위원들이 사전에 고민한 바와 그들의 열정을 토대로 각 분야의 패러다임을 바꿀 수 있는 그랜드 퀘스트들을 정리할 수 있었다. 다음은 각 분야별 간담회에서 도출한 10가지 그랜드 퀘스트들이다.

• 초미세·초저전력 반도체

IT 산업의 패러다임을 바꿀 초미세·초저전력 반도체를 만들 수 있을까?

인공지능, 빅데이터 등 현재 컴퓨팅 서비스들이 요구하는 반도체 계산량과 에너지 소모량이 기하급수적으로 늘고 있다. 그러므로 현 세대의 반도체가 아닌 새로운 반도체가 개발되어야 한다. 신개념 반도체는 지금보다 매우 작아져야 하고, 동시에 전력 소모량도 함께 줄어야 하며, 반도체의 정보 계산 및 저장 원리로 기존의 디지털 방식뿐만 아니라 아날로그 방식까지 적용해야 한다. 이런 반도체를 개발할 수 있을까?

• 차세대 배터리

한 번 충전에 10,000km, 10년 가는 배터리를 만들 수 있을까?

이차전지의 에너지 밀도와 긴 수명은 상충관계이다. 에너지 밀도가 높으면서 수명을 길게 하려면 극단적으로 가벼운 소재에 기반하면서도 가역적인 전기화학 반응이 가능한 시스템을 찾아야 한다. 현재의 리튬이온배터리 기술의 한계는 어디일까? 리튬을 대체할 다른 금속을 주기율표에서 다시 찾을 수 있을까?

• 수소모방 촉매

효소처럼 뛰어난 수소생산촉매를 만들 수 있을까?

효율적인 촉매 없이는 물을 전기 분해해서 수소를 대량으로 얻을 수 없다. 지구상에 가장 효율적인 수소생산촉매는 인체 내 의 효소다. 효소가 탁월한 촉매의 역할을 하는 메커니즘은 아직 이해하지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 효소처럼 효율적으로 작용하는 금속촉매를 만들 수 있을까?

• 환경 적응적 로봇

변화하는 환경에 적응하는 로봇을 만들 수 있을까?

제한된 환경에서 주어진 명령만을 수행하는 로봇은 재난 상황처럼 복잡하고 끊임없이 변화하는 환경에서는 쓸 수 없다. 변화된 환경을 인지하고, 이에 맞추어 행동을 적응시키면서 임무를 수행하는 로봇을 만들 수 있을까?

• 체화 인지구조 인공지능

뇌와 같이 인지 구조를 적응적으로 생성하고 활용하는 인공지능을 만들 수 있을까?

닫힌 환경의 한정된 데이터 기반으로 학습하는 현재의 인공지능은 끊임없이 변화하는 불확실한 환경과 문제에 스스로 대응하지 못한다. 반면, 사람의 뇌는 발달 과정에서 경험을 통해 인지 구조를 변형하고 성장시키면서 적응한다. 인간의 뇌와 같이 동적인 환경과 상호 작용하며 인지 구조를 형성하며 발달해 나가는 아기의 마음을 가진 인공지능을 구현할 수 있을까?

• 추론하는 인공지능

인과관계를 완전히 추론하는 인공지능을 만들 수 있을까?

대답과 함께 그 이유를 설명하지 못한다면 인공지능을 믿고 쓸 수 없다. 신뢰할 수 있는 인공지능은 인과관계를 설명할 수 있어야 하지만 현재의 인공지능 패러다임에서는 인과관계 추론이 불가능하다. 인간이 납득할 수 있는 인과관계를 추론하고 제시할 수 있는 인공지능 알고리즘을 만들 수 있을까?

• 동형암호

암호화된 데이터로 인공지능과 소통할 수 있을까?

개인이나 조직의 중요한 정보를 인공지능에게 제공하지 않으면서도 인공지능을 활용할 수 있는 방법은 없을까? 암호화된 상태의 데이터로 인공지능을 학습시키고, 암호화된 질문과 답변을 주고받을 수 있는 궁극의 동형암호체계를 만들 수 있을까?

• 항노화 기술

노화 세포를 탐색하고, 제어할 수 있을까?

노화 세포가 인체 각 조직에 노화를 전파하는 메커니즘을 이해하고 제어할 수 있다면 노화와 관련된 많은 질환을 치료할 수 있는 새로운 돌파구가 열릴 수 있다. 노화 전파의 메커니즘을 과학적, 실험적으로 해석할 수 있을까?

• 인공지능 기반 항체설계

단백질 구조 예측 인공지능을 넘어 항체를 설계하고 생명체의 적응 면역계를 이해하는 인공지능을 만들 수 있을까?

인류는 아직 적응 면역계의 메커니즘을 정확히 이해하지 못하고 있다. 이 메커니즘을 완전히 이해한다면 수많은 질병에 대해 맞춤형 신약을 만들 수 있다. 획기적인 규모의 항체 데이터베이스를 구축하고, 이를 학습하는 인공지능 알고리즘을 만들 수 있을까? 이를 통해 인간의 적응 면역계 작동 메커니즘을 새롭게 해석하는 것이 가능할까?

• 양자정보과학

반도체 집적 회로 기술로 양자 컴퓨팅을 구현할 수 있을까?

양자 컴퓨팅을 실용적으로 쓸 수 있으려면 고전 컴퓨터만큼 오류가 낮아야 한다. 큐비트의 조작 가능성과 계산의 신뢰성을 동시에 만족시키면서 반도체 집적 회로 분야에서 축적된 한국의 역량을 활용할 수 있는 방법이 무엇일까? 집적 회로 기반의 양자 컴퓨팅 플랫폼을 만들기 위해 풀어야 할 문제가 무엇일까?

3) SNU 그랜드 퀘스트 오픈포럼

'23년 9월 6 ~ 8일, 13 ~ 15일에는 간담회에서 도출한 10가지 그랜드 퀘스트를 대중에게 알리기 위한 <SNU 그랜드 퀘스트 오픈포럼>을 진행했다. 마지막 종합토론을 포함하여 2시간 씩 11개 세션으로 진행했으며, 서울대학교 학생 뿐만 아니라 기업, 정부 출연 연구원, 언론사 등에서 많은 관심을 보였으며 총 700여 명이 오픈포럼에 참석했다(참석 사전신청자 기준). 각 세션은 출제위원이 15시간 내외로 분야별 그랜드 퀘스트를 소개한 후, 청중과의 토론으로 이루어졌다. 포럼 종료 후, 토론 내용과 함께 오픈포럼의 내용을 단행본으로 출판하기 위한 작업을 진행하여 국가미래전략원 최초의 출판물인 <그랜드 퀘스트 2024>를 11월 1일에 출간했다. 또한 11월 2일에 SBS가 주최한 '2023년 SBS D 포럼'과 12월 7일에 진행된 '기술혁신과 경제안보, 새로운 국가의 일' 포럼에서 <SNU 그랜드 퀘스트 오픈포럼>의 내용을 요약 발표했다. 다음은 각 분야별 오픈포럼의 결과 요약이다.

• 초미세·초저전력 반도체

IT 산업의 패러다임을 바꿀 초미세·초저전력 반도체를 만들 수 있을까?

지난 수십 년간 반도체 소자는 구하기 쉽고 공정 비용이 저렴한 실리콘을 기반으로 '금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터(MOSFET)' 방식으로 제작됐다. 그리고 같은 크기의 컴퓨터의 성능을 향상시키기 위해 컴퓨터를 구성하는 반도체 소자의 크기를 단계적으로 줄이는 공정 미세화(Scaling-Down) 연구가 활발하게 이루어졌다. 일단 반도체 소자를 작게 만듦으로써 경제적면으로 같은 면적에서 더 많은 반도체 소자를 구성할 수 있어 원가 절감이 가능하며, 성능면으로도 단일 반도체에서 전류가 흐르는 물리적 거리가 줄어들어 성능 가속화가 가능했다.

하지만 이 발전의 궤적은 동일 면적의 반도체가 소비하는 전력이 동일하다는 가정이 있을 때 의미가 있다. 이 가정이 성립하기 위해서는 반도체 소자 크기가 줄어드는 만큼 각 소자가 소비하는 전력도 크기에 비례해 줄어들어야 한다.

그러나 현재의 기술발전 패턴으로는 (1) 반도체 소자의 크기가 계속 줄어들면서, (2) 소자 당 계산/저장 성능을 향상시키고, (3) 소자 하나가 소비하는 전력을 감소시키는 세 가지 목표를 동시에 달성할 수 없는 상황에 가까워졌다. 이런 세 목표사이의 상충관계라는 근본적인 문제가 해결되지 않으면 향후 반도체 산업의 진보는 불가능할 것이다.

공정이 미세화(scaling-down) 될수록 누설전류는 증가할 수밖에 없다. 이 상황에서 방대한 양의 데이터를 고속으로 처리하는 인공지능(AI), 슈퍼컴퓨터, 신경망처리장치(NPU) 장치 등에 기존의 칩(chip)을 적용할 경우 전력소모가 크고 발열문제가 심각하게 발생하게 된다. 구체적인 예로 Chat GPT를 한 번 돌릴 때 3,000~4,000만원가량의 GPU 수 만대가 필요한데, 서버 당 4개 정도의 GPU를 장착한다고 가정해도 만대 수준의 서버로 구성하여야 하기 때문에 엄청난 전기를 사용할 수 밖에 없다. 이 문제를 해결하려면 차세대 GPU 1대가 현재 GPU 성능에 수 십 배에 해당하는 성능을 갖춰야 하고, 그러면서도 현재 GPU 1대에 해당하는 전력을 소모해야 한다. 이는 현재 인류의 기술로는 해결이 불가능한 목표이다.

기존의 반도체 제품 개발 및 양산 기술이 맞닥뜨린 주요 한계 지점은 다음과 같다. 1) 공정기술의 기술적 한계, 2) 더 작은 두께에서 누설 전류를 감당할 수 없는 물리적 한계, 3) 반도체 소재의 한계이다. 지금까지는 공정 미세화가 진행되면서 전체 공정 수 및 복잡도가 증가하는 문제를 해결하기 위해 반도체 설계 레이아웃(Layout) 구성을 위한 가이드는 바꾸지 않고, 평면적으로 배치하던 과거와 달리 수직적 적층(Stack up)만으로 집적도를 증가시키는 해결책을 시도하기도 한다. 하지만 이 접근법은 물리적 한계뿐만 아니라 비용적으로도 한계가 있을 수밖에 없다. 이에 따라 최근 반도체 업계에서는 전력소모가 낮고 효율이 높으며 유연성이 높은 새로운 디지털 반도체 소자 개발에 심혈을 기울이고 있다.

현재 사용되고 있는 'silicon 기반 '금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터'(Si MOSFET)를 대체하는 소자를 개발하는 것은 매우 어려운 문제이다. 그 이유는 해당 기술의 완성도가 매우 높기 때문이다. 50년 넘게 Si MOSFET의 성능이 지속적으로 개량되면서 소자 집적도 측면에서 무려 백만 배 이상의 개선이 이뤄질 정도로 소재 및 공정 기술 최적화가 이루어져 있고, 막대한 노하우가 축적되어 있어 경로를 바꾸는 것이 쉽지 않다. 따라서 새로운 소재나 소자를 개발하더라도 그 완성도를 Si MOSFET 수준으로 높이는 것은 막대한 자본과 인력 및 시간 투자가 필요한 매우 어려운 문제이다.

가장 이상적인 대안은 기존 디지털 반도체의 아키텍처 구조나 소프트웨어의 변경이 아닌 반도체 소재에서 근본적인 혁신을 이루는 것이다. 가장 직접적인 접근법으로는

MOSFET의 기본 동작 원리와 구조를 그대로 유지하면서 실리콘(Si)을 게르마늄(Ge) 또는 칼륨비소(GaAs) 등의 다른 재료로 대체하는 것이다. 안타깝게도 지금까지 비용과 성능 모든 면에서 Si MOSFET을 능가하는 소자를 제작하는 것은 성공적이지 못했으며, 설사 성공한다고 해도 궁극적으로 달성하고자 하는 기존 소자 대비 100배 이상의 큰 성능 향상은 달성하기 어려울 것으로 보인다.

다른 접근법으로는 MOSFET과는 다른 원리로 작동하는 새로운 소자를 개발하는 시도가 있다. 기존 디지털 반도체 구조 형태가 가지는 근본적인 한계를 극복하기 위해 화학 및 생물학적 관점에서 새로운 반도체 소재를 개발하는 연구가 현재 활발하게 이루어 지고 있다. 상온이 아닌 절대온도에서 초고속으로 효율 100%로 동작하는 초전도 반도체나 인간의 생체(특히 뇌) 정보를 이용하는 뉴럴 링크와 같은 것이 대표적인 예이다. 하지만 이러한 새로운 소재를 이용하여 반도체 소자, 회로 및 시스템을 만든다면 이는 단기적으로 인공지능과 같은 특정 어플리케이션 혹은 환경에는 적용할 수 있겠지만, 모든 컴퓨터에 적용이 어려워 범용성의 제약이 있다.

궁극적인 대안으로 초미세 반도체와 초저온/초저온 반도체, 그리고 올 아날로그(All-Analog) 반도체를 생각해 볼 수 있다. 초미세 반도체로는 물리적인 소자의 크기를 감소시키는 방법 뿐 아니라 생체 DNA, 신경세포 등을 반도체 소자로 활용하는 기술들이 연구되고 있다. 또한 절대 온도 가까이에서 작동하는 초저온/초전도 반도체 소자를 활용하는 기술도 중요한 돌파구가 될 수 있다. 또한 모든 반도체 정보 연산 및 정보 저장을 아날로그 방식으로 처리하여 반도체의 효율을 극대화하는 연구들도 중요한 주제이다. 하지만 이러한 대안적 반도체 기술들은 모두 특정 환경에서 가능성을 보이는 단계일 뿐 CPU, GPU와 같은 일반적인 반도체 개발에 활용에 이르기 위해선 해결해야 할 난제들이 많다. 예를 들어 생체 반도체 개발을 위해서는 생체 두뇌 구조를 이해해야 하고, 개발에 초래되는 윤리적 문제가 있다. 초저온/초전도 반도체 개발은 저온을 구현하고 유지하기 위한 비용 문제나 저비용의 소자를 개발해야 하는 문제가 있다. All 아날로그 반도체 개발을 위해서는 정보 저장 및 처리 방식을 바꾸어야 하는 문제가 있다. 그러므로 위에 명시된 차세대 반도체 개발 난제들을 해결하는 것이 차세대 초미세/초저전력 반도체를 구현하는 시발점이 될 것이다.

문제 해결의 파급력은 명확하다. 위에 기술된 초미세/초저전력 반도체가 개발되지 않으면, 미래 인공지능 서비스를 한 번 받기 위해 원자력 발전소 크기의 컴퓨터와 전력 사용이 요구되게 된다고 생각해 보자. 그러므로 이 문제를 해결하지 못하면 인류 기술의 발전이 멈추게 될 것이다. 따라서 새로운 개념의 초저온/초저전력 반도체 개발이 무조건 성공해야 한다.

우선 본 연구자가 연구하고 있는 초저온/초전도 반도체 개발 경험에 따르면, 절대 온도 즉, 섭씨 영하 270도 근처에서 작동하는 반도체는 양자 물리학에 기반하기 때문에 전자전기공학, 물리학, 재료공학, 컴퓨터 전공 지식이 모두 필요한 어려운 연구 진행 자체가 어렵다. 또한, 초저온/초전도 반도체는 고성능과 저전력을 달성하지만, 초저온 환경을 유지하는 냉각 비용이 높은 것과 해당 소자의 크기가

기존 반도체 소자보다 오히려 크다는 문제들을 극복해야 한다. 또한 인간 두뇌 모사 반도체 개발 경험에 따르면, 이 분야도 전자전기공학, 생명공학, 뇌과학, 재료공학 등을 아울러야 하기 때문에 연구 진행 자체가 어렵다. 또한 인간의 두뇌, 뉴런, DNA의 작동 방식에 대한 근본적인 이해가 부족한 것과 실험의 어려움이 현실적인 문제가 되고 있다. 또한 세 아날로그 반도체의 경우 디지털 방식의 계산 및 저장을 아날로그 방식으로 변화시켜 계산하고 저장하는 과정에서 비용이 발생하는 점이 문제가 되고 있고, 이로 인해 지극히 제한적으로만 활용될 수 있는 문제도 극복해야 한다. 그리고 차세대 초저온/초전도, 생체, 아날로그 방식의 반도체들은 안정성 및 재현성이 매우 낮아서 이런 문제들을 해결하는 것도 매우 어려워서, 향후 연구자들이 극복해야 하는 난제들이다.

• 차세대 배터리

한 번 충전에 10,000km, 10년 가는 배터리를 만들 수 있을까?

화석 연료 중심의 에너지에서 재생에너지를 중심으로 하는 '대전환'이 가속화되고 있다. 이 변화는 배터리 기술의 빠른 발전이 있어야 가능한 이야기다. 현재 상용화되어 있는 배터리는 리튬이온배터리로, 전자제품부터 전기차에 이르기까지 폭넓은 분야에서 활용되고 있다. 리튬이온배터리는 그간의 끊임없는 기술개발과 기초연구를 바탕으로 성능이 지속적으로 향상되어왔고, 매해 에너지 밀도의 최대치를 경신하고 있다. 그러나 리튬이온배터리는 본질적으로 에너지 밀도와 수명 사이의 트레이드 오프관계를 가지고 있다. 즉, 에너지밀도를 높이면서도 그 수명을 유지하려면 기존의 리튬이온배터리 구조와 원리로는 한계가 있을 수밖에 없다. 전기자동차와 에너지 저장 시스템의 획기적 발전을 위해서는 기존의 리튬이온배터리의 패러다임으로는 충분하지 않다는 공감대가 있다. 따라서 안전성, 경제성, 고용량 및 장수명의 이점을 고루 갖춘 새로운 배터리 기술의 패러다임이 절실하다.

배터리는 양극, 음극, 그리고 전해질의 세가지 주요 부분으로 구성된다. 각 부분에 사용되는 물질의 종류와 특성에 따라, 배터리의 전체적인 성능 지표인 전압, 수명, 용량 그리고 안전성이 크게 영향을 받게 된다. 기존의 리튬이온배터리의 음극에는 주로 흑연이 사용되며, 양극에는 리튬코발트 산화물, 리튬니켈 산화물, 인산철, 리튬망간 산화물 등이 사용되고 있다. 리튬이온배터리가 가지고 있는 구조적인 한계를 극복하고, 더 높은 에너지 밀도와 긴 수명을 지닌 배터리를 개발하기 위해서는 차세대 배터리의 기본설계 구조와 소재에서 획기적인 혁신이 일어나야 한다.

혁신적인 배터리를 만들기 위해서는 새로운 소재의 화학적 구조, 전기화학적 특성, 그리고 물리적 성질을 이해하고 최적화해야 한다. 이를 통해 배터리에 사용되는 소재의 상호작용과 충전과 방전 과정의 안정성뿐만 아니라, 연속적인 전기화학적 사이클 동안 화학적, 물리적 변형도 고려해야 한다. 더하여, 새로운 소재가 기술적으로

효율적이고 안정적이라고 할지라도, 경제성도 충분히 고려해야 한다. 새로운 소재는 상대적으로 저비용으로 생산되어야 하며, 원재료도 쉽게 구할 수 있어야 한다. 구조 안정성과 경제성을 동시에 향상시키는 패러다임 전환을 이루는 것이 차세대 배터리의 핵심이다.

차세대 이차전지로 리튬공기배터리와 다가이온 배터리에 주목할 필요가 있다. 리튬공기배터리는 음극재로 리튬메탈, 양극재로 리튬과 반응하면서도 가장 가벼운 소재라 할 수 있는 산소를 사용하여 높은 에너지 밀도를 낼 수 있다. 이를 통해 기존의 리튬이온배터리가 가진 에너지 밀도를 획기적으로 개선할 수 있다. 그러나, 리튬공기배터리는 에너지 밀도와 수명 사이의 트레이드 오프와 관련된 여러가지 문제를 안고 있어 추가적인 연구개발이 많이 필요한 상황이다. 첫째, 리튬메탈은 그 자체의 높은 반응성 때문에 위험성을 안고 있다. 특히 다른 화합물과의 불안정한 상호작용 때문에 리튬메탈의 화학적 안정성에 문제가 있고, 이로 인해 충방전 과정에서 가역성이 낮은 문제가 있다. 둘째, 대기중에서는 안정화된 산소가 리튬공기배터리내에서 전자를 수용하게 되면 상당히 불안정한 라디칼 상태가 된다. 이 불안정한 산소는 리튬공기배터리의 성능을 저하시키고, 수명을 짧게하는 등 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 산소의 안정화 방안에 대해 획기적인 연구가 필요한 실정이다.

또 다른 차세대 배터리의 대안으로는 1가 이온인 리튬이온이 아니라 전자 2~3개를 이동시킬 수 있는 다가 이온 소재를 배터리에 도입하는 방법이다. 이는 이론적으로 에너지 밀도를 2~3배 향상시킬 수 있어 배터리의 용량과 성능에 큰 혁신을 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 다가 이온 배터리는 개념적으로 가능하는 것을 확인하였을 뿐 실제로 적용하기 위한 연구는 아직 초기 단계에 있다. 특히 다가 이온 배터리를 구성하는 양극재와 음극재의 핵심 소재의 개발 및 최적화에 대한 연구가 아직 초기 단계에 머무르고 있다.

리튬공기배터리에서 산소의 안정화는 주요 난제 중 하나다. 리튬공기배터리의 궁극적인 목표는 기체상태인 산소를 그대로 활용하는 것이지만, 대안으로 양극재의 산소를 격자 구조로 안정하게 고정하는 방법도 생각해 볼 수 있다. 이 접근법에 대해서는 기존에 상용화 되어 있는 양극보다 에너지 밀도가 조금 높은 수준에서 구현이 되었다는 연구결과가 제시되어 있다. 연구차원에서 산소의 안정적인 운용이 가능한 것은 확인하였으나, 실용적으로 산소를 양극으로 활용하면서 최적 성능을 구현하기 위해서는 많은 추가 연구와 소재의 개선이 필요하다. 또한, 리튬 외의 이온들 중에서도 이론적으로 높은 용량을 보이는 다가 이온들에 대한 연구도 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 일차전지에서 이미 그 가능성을 입증한 Zn, Mn과 같은 이온 뿐만 아니라 Ca, Al 이온을 전하매체로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 연구를 통해 다가 이온배터리가 가지고 있는 잠재성은 확인하였지만, 아직 초기단계이며, 실용적으로 쓸 수 있기 위해서는 더 많은 도전적 연구개발 노력이 필요하다.

다가을 미래의 차세대 이차전지는 산업 전반에 엄청난 영향을 미칠 것이다. 초경량

이차전지가 만들어지면 전기자동차의 주행거리가 크게 늘면서 전기자동차의 확산이 가속화될 것이고, 휴대용 전자기기의 사용시간 또한 획기적으로 늘어날 것이다. 뿐만 아니라 효율적인 에너지 저장 및 관리를 가능하게 하여, 지속가능한 에너지 시스템의 핵심 구성요소로 자리 잡을 것이다. 이를 통해 환경 보호와 에너지 효율성 뿐만 아니라, 글로벌 경제와 산업 트렌드 전반을 주도할 것으로 기대된다.

• 효소모방 촉매

효소처럼 뛰어난 수소생산촉매를 만들 수 있을까?

가장 깨끗하다고 평가되는 “21세기의 연료(Fuel of 21st Century)”, 즉, 수소를 지속가능한 에너지원으로 활용하기 위해서는 친환경적이고 효율적인 수소 생산 방법을 찾아야 한다. 현재의 주요 수소 생산 방법인 증기개질법(Steam Reforming)은 많은 온실가스(CO₂)를 방출하는 방식이기 때문에 친환경적이라 할 수 없다. CO₂를 전혀 방출하지 않을 수 있는 대안으로 물을 전기분해(수전해)하는 방식이 주목받고 있으며, 그 촉매로는 이리듐과 같은 백금 계열의 귀금속이 주목받고 있다. 그러나 이런 귀금속은 희소하고 가격이 높다는 측면에서 규모의 경제를 달성하는데 근본적인 한계가 있다. 따라서 귀금속보다 가격이 낮으면서도 수전해로 대량의 수소를 생산할 수 있는 획기적인 촉매를 개발해야만 친환경적이면서도 효율적으로 수소를 생산할 수 있을 것이다.

가장 이상적인 대안은 생명체 내에 있는 효소다. 생명체는 자체적으로 공유결합을 이용하여 매우 효율적으로 태양의 에너지를 저장하고 생명유지에 필요한 각종 화학반응을 효율적으로 해내고 있는데, 이 과정에서 효소가 기막힌 촉매의 역할을 한다. 효소는 활성화 에너지를 낮추어 반응속도를 촉진시킴으로써 상온, 상압에서 분자간 결합과 해리를 아주 효율적으로 돕는 완벽한 촉매라고 할 수 있다. 이러한 가장 이상적인 촉매인 효소를 모방하면서도 대량의 수소를 값싸게 생산할 수 있도록 세 가지 조건, 즉 활성(activity), 선택성(selectivity), 안정성(stability)을 충족하는 전기화학 촉매를 개발하는 것이 미래에 해결해야 할 난제이다.

하지만 효소의 작동원리는 너무 복잡하여 아직 우리가 이해하지 못하고 있고, 따라서 모방에도 한계가 있다. 예를 들어 효소의 어떤 구조적 특징 때문에 활성화에너지를 낮출 수 있는지를 계산을 통해 이해해보려 해도 계산 자체가 너무 복잡하여 기존의 슈퍼컴퓨터로는 불가능한 실정이다. 뿐만 아니라 효소는 불안정한 상태의 유기물(단백질)이기 때문에 백금과 같은 귀금속 촉매와 달리 효율적인 대량생산에 적합하지 않고(activity의 문제), 유기물 내에 있는 균일 촉매이기에 우리가 원하는 생산물(product)만을 골라내기 어려우며(selectivity의 문제), 장기간 안정적인 촉매로 활용하기는 어려운 문제가 있다(stability의 문제).

백금 계열의 촉매로 생산가능한 수소의 양에 대해서도 아직 개선의 여지가 많이 있기 때문에 현재도 백금 계열 소재 촉매의 수소 생산 효율성을 높이기 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 철이나 니켈 등 비싼 백금과 같은 귀금속을 대체할 수 있는 전이금속 소재 촉매가 백금의 성능을 뛰어넘을 수 있다는 연구들이 제시되고 있다. 하지만 백금 소재 촉매 혹은 백금보다 뛰어난 수전해 성능을 내는 전이금속 소재 촉매일지라도 자연의 효소가 갖는 성능을 결코 넘지는 못한다. 때문에 우리는 아직 효소모방 촉매에 대한 꿈을 가지고 연구를 지속하고 있지만 그 연구결과를 실용적으로 활용할 수 있도록 만드는 데는 여전히 갈 길이 멀다.

이 난제를 풀기 위해서는 유기물로 이루어진 촉매(homogeneous catalyst)가 아니라 “효소의 원리를 모방한 고체 상태의 촉매(heterogeneous catalyst)”를 개발하는 방향에 주목해야 한다. 이것이 가능해지려면, 인공지능, 생물학, 물리학, 화학/화공 간 다학제적 연구가 반드시 필요하다. 예를 들어 생물학의 관점에서는 인공지능을 활용하여 효소의 작동원리를 이해하는 연구를 해야 하고, 물리학이나 컴퓨터공학의 관점에서는 복잡한 계산을 가능케 하는 양자 컴퓨터 연구를 하고, 이를 촉매설계에 활용할 수 있어야 한다.

효소모방 촉매를 개발한다면 수소를 안정적이고 대량으로 생산하면서도 우리가 원하는 수소만을 물에서 얻을 수 있는 좋은 촉매로서 세가지 조건을 충족할 수 있을 것으로 기대한다. 궁극적으로 수소는 에너지의 장주기 저장으로써 매우 유용하기 때문에 전기 발전 비용에서의 경쟁력을 가짐으로서 에너지 산업의 포토폴리오를 근본적으로 바꿀 파급효과가 생길 것이다. 결국 온실가스 배출이 없는 진정한 의미의 “21세기의 연료”의 시대가 열릴 것으로 기대할 수 있다.

최근 저자들의 연구실이 공동으로 계산팀의 도움을 받아 인체내의 활성산소를 조절하는 SOD(superoxide dismutase) 효소를 모방하는 촉매를 개발하였다. 코발트를 기반으로 하는 효소모방 촉매로 최고 성능의 친환경 화학물질인 과산화수소를 생산할 수 있었다.³³⁾ 또한 수소를 생산하는 효소(hydrogenase)를 모방하여 구리 이온이 타이타니아 나노입자에 원자상태로 분포되어 있는 단원자촉매를 개발하여 광촉매 반응으로 물을 분해하여 수소를 생산하는 논문을 발표하기도 하였다.³⁴⁾

33) “Supramolecular tuning of supported metal phthalocyanine catalysts for hydrogen peroxide electrosynthesis,” *Nature Catal.* 2023, 6, 234; “Atomic-level tuning of Co-N-C catalyst for high-performance electrochemical H₂O₂ production,” *Nature Mater.* 2020, 19, 436

34) “Reversible and cooperative photoactivation of single-atom Cu/TiO₂ photocatalysts,” *Nature Mater.* 2019, 18, 620; “Electronic interaction between transition metal single-atoms and anatase TiO₂ boosts CO₂ photoreduction with H₂O,” *Energy Environ. Sci.* 2022, 15, 601

• 환경 적응적 로봇

변화하는 환경에 적응하는 로봇을 만들 수 있을까?

로봇은 제조업 분야에서 특정한 태스크의 자동화에 사용되는 산업용 로봇에서, 최근 의료 로봇, 서비스 로봇, 휴머노이드 로봇 등으로 활용 영역이 비정형 문제로 지속적으로 확장되어 왔다. 이러한 비정형 문제를 해결하기 위해서는 다양하고 복잡한 외부 환경에 대응할 수 있는 환경 적응적(Adaptive) 로봇이 필요하다. 기존의 로봇 구동 방식은 1) 로봇의 몸에 부착된 센서를 통해 주변 환경 정보를 감지하는 '인지', 2) 센서를 통해 수집된 데이터를 바탕으로 모든 움직임을 계산하는 '판단' 그리고 3) 액추에이터(Actuator)를 통해 움직임을 구현하는 '제어'의 세 단계를 거쳐 작동한다. 그러나 실제로 인간과 동물이 움직이는 방식은 로봇과 달리 단계가 명확히 구분되어 있지 않으며, 판단에 있어서도 의식적 반응과 무조건 반사가 모두 일어난다. 최근 비정형 문제의 해결을 위해서 이러한 인간과 동물의 물리적 상호작용(Physical Interaction) 방식을 모방하여 외부 환경에 대한 적응성이 향상된 소프트 로봇(Soft Robot)이 주목을 받고 있고, 딥러닝 기술을 로봇에 적용하여 성능을 개선하려는 시도가 활발하다.

소프트 로봇의 핵심은 임바디드 인텔리전스(Embodied Intelligence)를 가진 로봇을 구현하는 것이다. 임바디드 인텔리전스와 유사한 개념으로 임바디드 AI(Embodied Artificial Intelligence)가 있다. 임바디드 AI는 주로 AI에 로봇의 몸을 달아주는 개념으로 초점이 로봇의 소프트웨어에 있지만, 로봇을 실제 만드는 연구자들의 관점에서 보는 임바디드 인텔리전스는 로봇의 바디에 따라 AI가 다르게 발달한다는 개념으로 초점이 로봇의 하드웨어에 있다. 예를 들어 카메라와 같은 시각 센서가 없고 물체를 다뤄 볼 손이 없는 로봇 구조라면 받아들이는 정보가 제한적이기 때문에 데이터 수집과 학습이 한정적으로 이루어진다. 그러므로 임바디드 인텔리전스의 구현을 위해서는 변화하는 환경에 적응할 수 있도록 로봇의 소프트웨어적인 개선뿐 아니라 하드웨어 자체가 완전히 다르게 만들어져야 한다.

기존의 로봇은 학습을 위한 데이터를 모으는데 근본적인 한계가 있다. 일반적인 AI와 달리 임바디드 인텔리전스는 실제 로봇이라는 하드웨어를 사용해서 데이터를 수집해야 하는데, 구글에서 수행하는 규모가 큰 실험에서도 로봇 20대를 동시에 활용하는 정도에 그치는 등 데이터의 수집규모가 제한적이고 로봇의 구동 속도가 느리기 때문에 데이터 수집이 느리게 이루어진다는 문제가 있다. 다양한 작업을 할 수 있는 로봇 손 같은 경우 인간의 손처럼 높은 자유도를 갖기 위해서는 가격과 무게 등에 본질적인 한계가 있고, 소프트한 집게(gripper)와 같은 경우 장시간에 걸친 반복 정확도나 미세한 작업을 수행하는 능력이 제한되어 있다.

임바디드 인텔리전스의 구현에 있어서 핵심은 외부 환경과 상호작용할 수 있도록 인지-판단-제어가 통합된 새로운 로봇의 몸을 구현하는 것이다. 가장 간단하게는 로봇암(Robot Arm) 전반에 센서와 프로세서를 더 많이 부착하는 방법이 있지만 무게와

비용 측면에서 단점이 있다. 또 다른 대안으로는 센서 없이 연성 메커니즘을 이용하여 로봇의 몸 자체가 환경에 적응하여 변형시킬 수 있도록 하는 방법이 있다. 일례로 로봇의 암을 부드러운 소재를 활용하여 물체의 형상에 쉽게 적응할 수 있도록 하고 이후 소재의 경성을 바꿔서 물체를 잡을 수 있도록 하여 로봇의 바디 자체가 인지(Sensing)와 제어(Actuation) 역할을 모두 수행할 수 있도록 하는 것이다. 그러나 다양한 상황에서 동작하게 하기 위한 기술적 어려움 때문에 현재는 산업 현장에서 물류나 공정의 자동화를 위해 어쩔 수 없이 로봇 암이 작동할 수 있도록 작업 환경 자체를 바꾸는 방향으로 많은 시도가 이루어지고 있는 실정이다.

범용적인 하나의 로봇을 만들기 보다는 임무에 맞는 다양한 로봇이 만들어질 수 있도록 해야 한다. 로봇은 폼 팩터(Form Factor)와 사용처가 매우 다양하기 때문에 인간만큼 범용화된 기능을 가진 로봇을 만드는 것은 어렵다. 또한, 로봇에는 범용성과 속도-가격-무게 간의 근본적인 트레이드 오프(Trade-off)가 존재한다. 다양한 물건을 잡을 수 있는 로봇은 물건의 종류에 따라서 상호작용 방식이 다르므로 센서와 프로그래밍이 달라져야 하기 때문에 범용성이 높은 로봇일수록 구동속도가 느리고, 비싸고, 무겁다. 그러므로 실제 현장에서는 성능 측면에서 다양한 기능을 수행할 수 있는 범용적인 로봇보다는 저렴한 가격으로 특정 임무를 더 빠르게 수행할 수 있는 로봇의 수요가 더 높을 것이다.

산사태, 지진 등 재난재해의 대응이나 3D 업종을 로봇이 대신함으로써 안전한 노동 환경을 구축하여 인간의 존엄성을 지키고 삶의 질을 향상시킬 수 있다. 또한, 전세계적으로 고령화와 저출산이 가속화되는 상황에서 돌봄 로봇 등을 통해 노동력 부족 문제를 해결하여 지속가능한 사회를 만들 수 있다. 이처럼 인간을 대체하는 것뿐만 아니라 인간을 보조할 수 있는 웨어러블 로봇(Wearable Robot)을 통해 장애를 극복하고 물리적 한계를 뛰어넘을 수 있을 것이다.

• 체화 인지구조 인공지능

뇌와 같이 인지 구조를 적응적으로 생성하고 활용하는 인공지능을 만들 수 있을까?

인공지능(AI) 기술은 2000년대 들어서면서 기계학습(machine learning)이라는 강력한 학습 알고리즘의 개발에 힘입어 다양한 패턴을 인식하고 예측하는 기술 분야에서 엄청난 진전을 이루었다. 그러나 현재의 AI기술이 두각을 나타내고 분야들은 대체로 방대한 데이터와 인간의 지도(supervision)가 주어져 있는 환경이다. 즉, '닫힌 환경(dosed environment)'에서 좋은 성과를 낸다는 점에서 근본적으로 한계가 있다. 현실세계는 지금의 AI 관점에서는 너무 가변적이고 애매한 요소가 많기 때문에 이런 상황에 대응할 수 있는 근본적으로 다른 기술이 필요하다. 그 일환으로 AI가 인간의 뇌처럼 주변 환경의 변화에 빠르고 안정적으로 적응하면서 인지하고 행동하는 방법이 무엇일지에 대한 논의가 진행되어 왔다.

인간의 뇌가 정보를 처리할 때의 궁극적 목적은 몸을 통해 행동하는 것, 즉 반응(response)하는 것이다. 인간의 뇌는 평생동안 해마(hippocampus)를 통해 주변 환경과 상호작용하면서 '경험적 학습(experiential learning)'을 하면서 세상에 대한 거대한 인지모델(cognitive model) 혹은 인지구조(cognitive architecture)를 완성해 간다. 이와 달리 현재의 AI는 몸이 없기 때문에 환경과의 상호작용이 아닌 정해진 정보를 수동적으로 학습하고 판별하는데 그친다. 즉 현재의 AI기술은 인간의 뇌와 달리 체화된 인지(embodied cognition) 능력을 발휘하지 못한다. 몸을 가지고 환경과 상호작용하며 지각-행동 사이클을 기반으로 스스로 학습해 나가기 위해서는 AI에 체화된 인지구조를 설계해야 하는데, 이는 설계의 개념이 기존과는 근본적으로 다른 AI를 상상해야 한다.

인간의 뇌와 같이 인지구조를 스스로 생성해 나가는 AI를 만들기 위해서는 뇌 자체의 작동원리를 정확히 이해해야 하고, AI의 현재 발전 패턴과 다른 알고리즘을 생각해내야 한다. 이 두가지 모두 현재로서는 어려운 일들이다. 먼저 인간 뇌는 약 천억개의 뇌세포가 있고 이 세포들이 수백조개의 시냅스로 연결되어 있는 복잡한 구조로 형성되어 있다. 지금까지 수많은 연구가 있었지만, 뇌의 인지적 기전은 여전히 미지의 영역으로 남아있다. 즉 지금까지의 연구로는 뇌의 구조적-기능적 원리를 단순한 방식으로 규정할 수 없다. 뇌의 구조와 작동원리를 알기 위해서는 뇌과학, 인지과학, 심리학 등 관련 학문의 초융합적 연구가 반드시 필요하다. 다른 한편, 현재의 AI기술은 패턴인식과 예측의 성능을 올리는데 매몰되어 있어, 새로운 기술 패러다임에 도전하기 위한 여러 보완적인 기술들이 부족한 실정이다. 한마디로 즉, 체화된 인지구조를 갖는 인공지능을 개발하기 위한 플랫폼이 무척 부실하다고 할 수 있다.

인지 구조에 관한 기존의 연구로는 ACT-R, SOAR, ICARUS 등의 연구가 있었다. 그러나 이러한 연구는 전통적인 계산주의적 인지 모델들로 볼 수 있고, 인지구조와 관련된 AI를 개발하기 위한 시도로 보기 어렵다. 최근 딥러닝이나 트랜스포머 방식의 초거대 AI 모델은 신경망에 기반한다는 점에서 뇌의 작동방식을 일부 모사했다고도 볼 수 있으나 인간과 같이 실시간으로 적응하고 학습하며 발달하는 AI라고 보기는 어렵다. 또다른 대안적 시도는 많은 데이터를 사전에 준비하여 학습시키는 방식이 아니라 인공지능이 몸을 가지고 환경과 상호작용하면서 자기조직에 기반한 비지도 학습 알고리즘을 만드는 것이다. 마치 아기의 마음과 같은 상태에서 출발한다는 뜻에서 아기마음(babymind) AI라고 할 수 있다.

AI가 몸을 가지고 환경에 대응하며 상호작용할 수 있으려면 인간의 뇌와 같은 인지구조(cognitive architecture)를 가지고 학습하고 행동할 수 있어야 한다. 인간의 뇌세포들은 서로 매우 긴밀히 연결된 시냅스(synapse)를 가지고 태어나지만 적응적 유효성이 입증된 연결들만 남고 나머지는 모두 가지치기(pruning)된다. 끊임없이 달라지는 환경을 돌아다니면서 행동하는 지능을 발휘해야 하는 뇌로서는 이 방법만이 에너지를 절약할 수 있는 유일한 진화적 솔루션이었을 것이다. AI분야에서도 모델의 크기와 연산량을 줄이기 위해 딥러닝(deep learning) 모델에서 불필요하거나 중요도가

낮은 파라미터를 제거하는 것이 이에 해당된다. 그러나 인간의 뇌를 모방한 체화된 인지구조(embodied cognitive architecture)를 만들어 내기 위해서는 보다 획기적이고 근본적인 방법을 생각해내야 한다.

2022년 9월, 매년 열리는 AI DAY 행사에서 자율주행기술로 유명한 테슬라에서 두발로 걸어다니는 휴머노이드 로봇을 공개하였다. 일론 머스크는 운전자들이 주행한 데이터를 시에 학습시키는 방식인 테슬라 자율주행 소프트웨어 같은 시스템을 통해 휴머노이드 로봇(옵티머스)에 탑재된 인공지능을 훈련할 수 있다고 밝혔다. 하지만 완전자율주행차 개발을 포기한 최근의 거대 자동차 회사의 예와 같이, 이와 같은 방식으로는 끊임없이 변화하고 불확실하면서도 애매모호한 환경에서 스스로 학습하며 대처할 수 있는 AI 로봇이 탄생할 수 없다. 인간처럼 행동을 구현할 몸이 있고 그 몸을 움직일 적응적 인지구조를 가진 AI 기술의 등장은 복잡한 현실세계에서의 활동제약을 극복해주며 인공지능 시장을 넘어 로봇시장에서도 '게임체인저(game changer)'가 될 것으로 보인다.

• 추론하는 인공지능

인과관계를 완전히 추론하는 인공지능을 만들 수 있을까?

최근 생성형 인공지능들이 잇따라 출시됨과 동시에 이 모델들이 주는 정보의 신뢰성 문제가 화두가 되고 있다. 이전의 많은 인공지능 모델들은 주로 특정한 목적으로 개발된 제한적 환경(closed domain)에서 높은 성능으로 신뢰할 수 있는 정보들을 주는 모델들이었지만 최근의 생성형 인공지능들은 개방된 환경(open domain)에서 보다 일반적으로 활용되고 있다. 이러한 기술 발전의 사이에 대두되는 문제는 개방된 환경의 인공지능이 사실을 말하는가에 대한 팩트체크(fact check)라 할 수 있다.

현재로서는 인공지능의 정보 처리과정(신경망)이 블랙박스화 되어 있어 투입(input)과 산출(output) 간의 인과관계(causality)를 판단할 수 없다. 따라서 인공지능이 내놓은 산출이 진정 팩트인지를 구분하는 것은 어렵다. 더욱이 전문적인 지식이 없는 일반인은 인공지능이 제시하는 그럴듯한 거짓말(hallucination)을 사실로 오해할 가능성이 크기 때문에 개방된 환경 내 인공지능을 믿고 쓸 수 있는지에 대한 우려가 커져가고 있다. 따라서 인공지능이 왜 이런 답을 내놓았는지를 설명할 수 있어야만 해롭지 않은 인공지능을 유용하게 활용할 수 있다.

설명가능성의 문제는 인공지능이 성능에 집중하여 발전되어온 탓에 그 신경망이 너무나 복잡해지면서 발생했다고 볼 수 있다. 만약 우리가 신뢰가능한 인공지능에 초점을 두고 설명가능성에 집중한다면, 인공지능의 성능이 떨어질 수밖에 없다. 즉, 인공지능의 성능과 설명가능성 간에는 분명한 상충관계(tradeoff)가 있고, 이것이 인공지능에서 제기되는 근본적인 난제다. 개방된 환경에서 인공지능이 활용되기

시작했지만, 많은 사람들이 유용한 인공지능을 믿고 사용할 수 있도록 성능이 떨어지지 않으면서도 인공지능이 내놓은 결과의 이유를 설명할 방법을 찾아야 한다.

인간은 추상화 능력이 있으며, 이를 통해서 인과관계를 파악한다. 즉, 다양한 개별 사건들의 경험을 추상화 하고, 공통점을 발견하고 이를 인과관계로 인지한다. 예를 들면, 라면을 위해서 끓이는 물과 커피를 타기 위해서 끓이는 물을 모두 뜨거운 물로 인식하고, 뜨거운 물이 손에 닿으면 아픈 것을 인식한다. 라면을 끓이기 위한 물에 손이 데었을 때, 라면 때문이 아니라 물 때문이라고 인식할 수 있는 능력이 있다. 인공지능에는 이러한 추상화 능력이 아직 없다. 라면을 끓이기 위한 뜨거운 물에 손이 데었을 때, 라면 때문인지 물 때문인지 분간하지 못한다. 그저 라면을 끓이다 손이 냄비에 들어가면 손이 아프다는 신호를 출력할 뿐이다. 인공지능이 인간과 진정으로 소통하기 위해서는 추상화 능력이 필요하고, 이를 위해서는 현재 블랙박스 모형의 복잡한 인공지능 모형의 구조를 설명하고 해석할 수 있어야 한다. 왜 이런 출력이 나왔는지에 대한 질문에 답을 줄 수 있어야 한다.

현재의 제한적 환경(closed domain) 내에서 전문가들이 활용하는 인공지능의 설명가능성 문제는 여러 조건을 설정하는 방식으로 접근하면 가까운 미래에 해결할 수 있을 것이다. 위의 물 끓이기와 같은 개방된 환경(open domain)은 너무나 복잡하기 때문에 인공지능의 블랙박스도 그에 따라 더 복잡해질 수 밖에 없다. 특히 인과관계의 추론을 추상화된 상황에서 시작하는 인간의 신경망을 모방하여, 인공지능이 인간과 비슷하게 인과추론을 하기 위해서는 블랙박스가 더 거대해지고 복잡해질 수밖에 없다. 개방된 환경 내 설명가능성 문제의 해결방안을 찾기 어려운 것은 복잡한 블랙박스의 내부를 들여다보기 어렵기 때문이다.

인공지능의 설명가능성 문제를 해결하기 위한 노력은 다방면으로 진행되고 있다. 제일 쉽게는 설명이 가능한 모형을 구축하여 인공지능을 구현하는 것이다. 그러나, 이때 활용되는 설명가능한 모형 자체가 단순해야 하기 때문에 복잡한 문제를 해결하는 데는 큰 역할을 하지 못한다. 이에 따라 복잡한 인공지능 모형을 설명가능한 형태로 변환하는 방법들이 개발되고 있다. LIME, SHAP 등이 이러한 종류의 알고리즘이며, 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. 하지만, 이러한 방법들도 복잡한 인공지능 모형의 일부분만 설명할 수 있을 뿐, 전체적인 작동원리의 파악은 요원하다. 예를 들면, 채용심사를 위한 인공지능에서 추어진 지원자가 떨어진 이유를 설명한다고 하지만, 이러한 설명이 다른 지원자에게 적용되지 않는 경우가 많이 등장하고 있다. 복잡하면서도 설명가능한 인공지능을 구현하기 위한 노력도 진행되고 있으며, SENN(Self explaining neural networks), 프로토타입 네트워크(Prototype networks) 등이 있다.

보다 근본적으로 설명가능한 인공지능의 난제를 풀기 위해서는 인공지능의 인과관계 추론 방식을 파악해야 한다. 인공지능의 인과적 이유 설명 문제를 파고들어 튜링상을 수상한 Judea Pearl의 고민으로부터 힌트를 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 그의 생각을 실제로 구현하기 위해서는 인과그래프(causal graph),

지식그래프(knowledge graph) 등의 방법을 활용할 수 있을 것이다. 하지만 아직 갈 길이 멀다. 인과추론을 위한 대부분의 방법들은 암진단과 같이 복잡도가 아주 높지 않은 문제에서는 유용하게 쓰이지만, 언어모형과 같이 복잡도가 극히 높은 문제에서의 인과추론 기법은 아직 개발되지 않고 있다. 기존의 인과추론 방법의 복잡도를 획기적으로 높이는 아이디어가 절실히 요구되고 있다.

인공지능의 블랙박스를 이해하지 못하고 있는 현재, 사회적으로 많은 문제들이 발생하고 있다. 특히 기업의 채용에 있어 인공지능에게 서류심사를 맡기는 것이 적합한지에 대한 논쟁이 있으며, 더욱이 인공지능 챗봇과 대화를 하다가 청소년이 극단적 선택을 하는 안타까운 사례도 발생하고 있다. 인공지능의 인과추론 방식을 충분히 이해하여 정직한 인공지능을 활용할 수 있는 단계가 되어야만 이러한 문제들을 해결하여 안전하고 유익한 방식으로 인공지능을 활용할 수 있을 것이다. 설명가능한 인공지능이 탄생한다면, 인공지능과 인간의 진정한 교감의 기폭제가 될 수 있다. 거대언어모형이 자신의 주장에 대해서 근거를 설명할 수 있다면, 인간과 토론도 가능할 것이고, 인간과 협력하여 새로운 지식의 창출도 가능할 것이다. 강인공지능의 시작은 설명가능 인공지능부터 시작될 것이라 조심스럽게 예측해본다.

• 동형암호

암호화된 데이터로 인공지능과 소통할 수 있을까?

암호기술은 고대로부터 중요한 정보를 안전하게 전달하는 수단으로 광범위하게 사용되어 왔다. 한편 컴퓨터가 등장하면서 암호는 패스워드나 인증과 같은 초창기 기술을 넘어 현재는 데이터를 암호화하여 컴퓨터에 저장하고, 암호화된 상태의 데이터를 전송할 수 있는 단계까지 발전하였다. 최종적으로는 컴퓨터의 모든 작업을 암호화된 데이터로 수행하도록 하는 것이 현재 암호학의 목적이다. 이를 위해 암호화된 상태에서 복호화 없이 데이터를 계산할 수 있도록 하는 것이 필수적이다. 동형암호는 컴퓨터가 암호화된 데이터로도 특정 연산을 수행한 후 암호를 해독할 수 있도록 하는 기술로, 암호화된 데이터의 계산 문제를 해결할 수 있는 미래 기술이다.

현재 AI를 활용하기 위해서는 데이터를 암호화되지 않은 상태에서 학습시켜야 한다. 이 과정에서 데이터가 제3자에게 노출될 가능성은 매우 높다. 따라서 군용 데이터나 기업의 데이터 등 기밀 자료들을 안전하게 보호하면서도 인공지능으로 활용할 수 있기 위해서는 근본적으로 데이터를 암호화한 상태에서 인공지능에 학습시킬 수 있어야 한다. 이때 필요한 것이 동형암호 기술이다. 동형암호는 데이터의 기밀을 보호하면서도 컴퓨터의 모든 연산 기능을 수행할 수 있기 때문에 학습과 추론을 수행하는 AI는 자신이 활용한 데이터의 내용을 알 수 없다.

동형암호화된 데이터에 바로 AI를 적용시키는 것은 쉽지 않다. 현재 사용하고

있는 AI 소프트웨어들은 현재의 컴퓨터에서 작동하도록 프로그램 되었기 때문에, 동형암호화된 데이터에서는 작동되지 않는다. 동형암호는 새로운 계산 모델로서 이를 활용하기 위해서는 기존의 소프트웨어를 동형컴퓨터, 즉 암호문 상에서 동작하는 계산기가 이해할 수 있는 소프트웨어로 완전히 새롭게 짜야한다. 기존의 컴퓨터 알고리즘에서는 데이터를 비트로 인코딩하여 연산하지만, 동형암호의 계산 알고리즘은 데이터를 다항식으로 인코딩하고 다항식의 덧셈과 곱셈을 반복하여 연산을 수행한다. 따라서 동형암호를 활용하기 위해서는 기존의 알고리즘들을 모두 새로 만들어야 하고, 또한 기존 알고리즘 위에서 작동하던 컴퓨터 언어와 프로그램, 시스템들도 기초부터 새롭게 구성하여야 한다. 이런 거대한 작업을 수행하기 위해서는 여러 분야의 지식을 합치는 융합연구가 반드시 이루어져야 한다.

이미 학계에서는 암호화 상태에서 계산을 수행하는 크립토계산(Cryptographic Computing)의 기초연구가 다양하게 진행되고 있다. 수학적으로는 임의의 계산을 다항식 계산으로 표현하기 위해 정수론과 해석학을 기반으로 새로운 수학적 기반을 만들고 있다. 또한 정수론의 수학적 기반 위에서 작동하는 알고리즘들도 새로 작성하고 있다. 이를 실제로 사용할 수 있도록 새로운 컴퓨터 언어와 컴파일러 및 데이터베이스를 개발하는 연구들도 활발하게 진행되고 있다. 현재 암호화된 상태에서 간단한 머신러닝 계산을 수행할 수 있는 소프트웨어들이 공개되고 있다.

동형암호를 실현시킬 자원들이 구비되면 이를 바탕으로 새로운 컴퓨터시스템을 구축할 수 있을 것으로 예상된다. 머신러닝과 인공지능에 동형암호 기반 암호화된 데이터를 학습시키기 위해서는 꼭 필요한 기술들이다. 암호화된 데이터를 활용한 머신러닝이 상용화 되는 것은 3~6년 정도, 챗GPT가 사용한 LLM(Large Language Model)은 5~10년이 걸릴 것으로 보인다. 특정 AI모델을 넘어 임의의 계산을 암호화된 상태로 수행하는 인크립티드 컴퓨터(Encrypted Computer)의 상용화는 10-20년이 걸릴 것으로 예상된다. 한편 이를 가속화하기 위한 소프트웨어 및 하드웨어 가속기의 연구와 개발도 활발하게 이루어지고 있다.

얼마나 좋은 정보를 얼마나 많이 가지고 있는가는 역사 속에서 두 집단 간의 승패를 결정짓는데 언제나 결정적인 역할을 해왔다. 마찬가지로 AI 시대에서는 국가나 기업이 얼마나 데이터를 잘 보호하면서도 활용할 수 있는지에 따라 그 국가와 기업의 경쟁력이 달라질 것이다. 이제까지는 AI의 획기적인 기능과 유용성에도 불구하고 개인적이거나 중요한 정보는 활용되지 못하고 있으며, 오히려 다수의 기관과 업체에서는 사용을 금지하고 있다. 만일 데이터를 암호화한 상태로 계산하는 동형암호 기술이 보편화된다면, 보안과 프라이버시 등의 이유로 사용이 제한되던 주요 데이터들도 AI에 안전하게 맡겨 활용하게 될 것이다. 따라서 이런 프라이버시 기반 인공지능(Private AI) 기술을 널리 활용할 수 있는 국가나 기업, 그리고 개인은 압도적인 경쟁력을 갖게 될 것이다.

1세대 암호로 일컬어지는 패스워드와 인증이 역사에 등장한 것은 3천년 전이고, 저장데이터의 보호를 위해 등장한 2세대 대칭키 암호는 2천년, 통신데이터의 보호를

위해 등장한 3세대 공개키 암호는 50년, 그리고 계산데이터의 보호를 위해 등장한 4세대 동형암호는 14년의 역사를 가지고 있다. 이들 기술들은 알려지고 나서도 실제 널리 쓰이기 까지 많은 시간이 걸렸다. 그러나 채택이 시작되면 순식간에 가속이 붙는다. 3세대 공개키 암호의 경우 인터넷 통신의 보호를 위해 https라는 기술로 활용되고 있는데, 2013년경 10여 퍼센트에 달하던 활용률이 불과 5년 후에는 80퍼센트를 넘어가게 되었다. 이것은 공개키 암호의 알고리즘 기술 뿐 아니라 상용화를 위한 여러가지 공학적인 기술들이 동시에 발전하였기 때문에 가능한 일이었다. 동형암호의 경우에도 현재 알고리즘 기술 뿐 아니라 이를 상용화하기 위해 필요한 다양한 공학적 기술과 응용기술이 융합적으로 동시에 개발되어야 한다. 동형암호 알고리즘, 가속기, 프로그래밍어/컴파일러, 머신러닝 등 여러 분야에 걸쳐 다양한 전문가들이 협업하면서 발전하고 있다.

• 항노화 기술

노화 세포를 탐색하고, 제어할 수 있을까?

불로장생(不老長生), 즉 '노화(老化, Aging)의 극복'은 동서양의 인류 모두가 오랜 시간 염원해 왔던 주제이며, 역사와 픽션을 통틀어 자주 통용되는 주제였다. 노화의 정의가 무엇인지, 노화 자체가 질병인지 아닌지, 노화가 과학적으로 극복가능한 현상인지 등 여러가지 논쟁이 진행형에 있다. 예를 들어 세계보건기구(WHO)는 2018년 '노령(old age)'에 질병코드를 부여하는 것을 제안하였으나, 논란 끝에 2022년부터 시행된 질병분류체계에서 "노화에 의한 기능감퇴(ageing associated decline in intrinsic capacity)"라는 개념을 제시하기도 했다. 노화를 과학적으로 다루게 된 역사는 그리 길지 않다. 노화가 유전적으로 조절될 수 있는 프로그램이라는 것은 반세기도 채 못된 1993년 예쁜꼬마선충에 대한 연구결과를 통해 밝혀졌다. 노화에 대한 기존의 통념은 개체 수준에서의 노화현상을 생각하기 쉽지만, 과학적으로는 기능적 최소 단위인 세포의 노화를 이해하는 것이 필수적이다. 인체내 조직에서 노화세포(Senescent cell)가 과도하게 축적되는 것이 노화(aging)의 핵심요인이다. 이에 현재 노화에 관한 연구들은 세포 노화(cellular senescence)의 메커니즘을 이해하는데 집중되고 있다.

노화세포가 조직에 전파되어 기능을 저하시키면서 노화를 일으키는 메커니즘을 정확히 이해할 수 있는가?

신체 조직(tissue)별로 세포 구성이 다르고, 각 세포 별로도 노화의 과정이 다르고, 조직에 미치는 영향이 다르기 때문에 "노화" 또는 "세포 노화"에 대해 과학적으로 통일된 정의를 내리는 것이 쉽지 않다. 더욱이 임상 시험에서 노화에 대해 모종의 개입을 했을 때 그 효과를 효과를 평가할 수 있는 객관화된 지표 또한 존재하지 않는다. 과거에 활성산소를 제거하거나, 텔로머레이즈(telomerase)를 다시 발현시키는

것과 같은 연구주제들이 있었으나 한계에 봉착했다. 현재 노화세포 표적 연구가 노화 치료에 있어 최대 관심을 받고 있지만, 이 또한 노화문제 해결의 궁극적인 열쇠가 될지는 확실치 않다. 뿐만 아니라 노화세포 연구가 진척된다고 하더라도 노화세포를 단순히 제거하거나 억제하는 것이 주변 세포와 조직, 그리고 나아가 개체 전체에 긍정적으로만 작용할 지, 그렇지 않다면 어떤 부작용이 있을 수 있는지, 부작용이 있다면 이를 극복할 방안은 있는지 등에 대해 과학적으로 아직까지 이해하지 못하고 있는 상황이다.

지금까지 세포의 항노화(Anti-aging) 방법에 대해서, 활성산소 제거, 텔로머레이즈 재발현, 줄기세포 이식, 젊은 개체의 피 수혈 등에 집중하여 관련한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이들 방법이 노화 현상 및 노화와 연관된 질환을 제한적으로만 늦출 수 있다는 것이 밝혀졌을 뿐, 광범위하게 적용될 수 있는 기술은 현재 없는 실정이다. 산업적으로도 세포 노화의 조절 및 작용 메커니즘에 대한 과학적 이해가 부족하기 때문에 노화 세포 표적기술에 기반하여 광범위하게 적용가능한 노화 치료제 또한 개발이 더딘 상황이다.

기초과학 분야에서는 최근까지 노화와 연관된 질환별로 특이적이며 개별적인 치료제 개발을 목표로 많은 연구를 수행해왔다. 그러나 최근 연구결과 다양한 노화 연관 질환 상황에서 노화세포의 비이상적 축적이 공통적으로 관측되고 있고, 따라서 세포노화가 곧 기본적인 노화과정이라는 데 대해 합의가 이루어지고 있다. 특히 축적된 노화세포에서 분비되는 특정 물질이 주변 세포 및 조직에 악영향을 주어 기능을 저하시키고, 노화를 촉진하고 노화 연관 질환을 일으키는 주요한 요인일 것이라는 질문에 연구가 집중되고 있다. 이에 따라 과도하게 축적된 노화세포를 조직으로부터 제거하거나 및 노화세포에서 분배되는 노화 전파 물질을 억제하는 방안 등이 해결책으로 제시되고 있다.

노화의 원인이 되는 노화세포를 탐색하고 제거하거나 제어하는 문제를 해결할 수 있다면 지금까지 치료에 난항을 겪고 있던 수많은 노화 연관 질환의 예방과 치료가 가능해질 것이다. 이는 단순히 수명을 늘리는 것이 아니라 건강한 노화를 통해 삶의 질을 올릴 수 있기 때문에 최근의 생명과학 및 의학에서 주목하고 있는 주제가 되고 있다. 한편, 극단적으로 상상했을 때, 노화가 없어진 사회라면 인구 문제에 따른 경제적 이슈나 계층에 따른 수명 차별 등의 사회적 이슈 등 수많은 문제가 야기될 수도 있다. 따라서 노화 극복을 위한 과학기술의 개발과 함께 사회적 제도에 대한 담론도 같이 성숙될 필요가 있다.

노인환자를 20년간 진료해오면서, 노화 및 노쇠로 인한 변화로 치료가 쉽지 않고 결과가 만족스럽지 못한 경험이 많았다. 노화를 늦추고 노쇠를 예방할 수 있다면 "건강하고 활기찬 노년"이 가능할 수 있다고 생각하여 본 주제에 관심을 가지게 되었다.

자연과학의 관점에서 이 난제가 경험적으로 난항을 겪는 역사적인 이유가 추가로 있다. 과거, 젊은 혈액 속 특정 인자가 노화를 늦추거나 억제할 수 있는 작용을 한다고

주장한 일련의 연구가 있었다. 그러나 해당 인자는 여러 독립적인 연구에 의해 효과가 없거나 다르게 나타난다고 보고되면서 큰 논란의 중심에 선 바 있다. 그 후 해당 분야에 대한 연구 지원이나 기업의 개발노력이 크게 줄어들었다. 이런 과정을 지켜보면서 일찍 샴페인을 터뜨릴 수 있는 형태의 연구가 아닌, 진행이 늦더라도 확실하게 검증할 수 있는 연구가 난제 극복에 활용되어야 한다는 생각을 더 하게 되었다.

• 인공지능 기반 항체설계

단백질 구조 예측 인공지능을 넘어 항체를 설계하고 생명체의 적응 면역계를 이해하는 인공지능을 만들 수 있을까?

생명과학은 물리학이나 화학과 달리 보편적인 법칙을 찾아 수식으로 표현하기 굉장히 어렵다. 개인의 편차나 환경에 따라 세포의 반응이 상당히 달라지기 때문이다. 그렇기에 그동안의 생명과학은 정량적 모델링이 아니라 주로 정성적인 이해 위주로 연구되어 왔다. 생명현상을 정량적 이해하지 못했기 때문에 생명현상에 대한 예측과 설계도 어려웠다. 그러나 많은 데이터를 조합하여 추론하는 AI의 역량이 빠르게 발전하고, 생명과학 연구에 본격적으로 적용되면서 새로운 돌파구가 나타나기 시작했다.

일례로, 주어진 단백질 서열로부터 그 3차원 구조를 예측하는 단백질 접힘 난제는 지난 50여년간 해결되지 않았던 문제였으나, 최근 AI가 해결한 바 있다. 2020년, 수십년간 쌓여온 단백질 구조에 관한 실험 데이터와 단백질의 진화정보를 기반으로 구글 딥마인드와 미국 워싱턴대학교가 각각 알파폴드(AlpahFold)와 로제타폴드(RoseTTAFold)라는 단백질 구조 예측 AI를 개발하면서 단백질 구조 접힘 난제를 해결한 것이다.

단백질 구조 접힘 난제가 해결된 지금, 연구자들의 관심은 단백질 구조를 예측할 수 있는 AI를 넘어 바이러스 단백질이나 외부 침입물질 등 여러가지 항원에 대한 항체를 설계하는 AI 개발로 옮겨가고 있다. 기존의 단백질 구조 예측 AI들은 모두 진화정보를 기반으로 한다. 그러나 항체로 대표되는 적응 면역은 후천적으로 획득되는 것이라 유전되지 않는다. 따라서 기존의 단백질 구조 예측 AI로는 해결할 수 없는 난제다.

그동안 축적된 바이오 빅데이터에 AI가 적용되면서 생명현상의 정량적 해석 및 예측과 설계가 가능한 시대로 바뀌고 있다. 여기에서는 단백질 구조 접힘 난제 해결에서 한발 더 나아가, 항체로 대표되는 적응 면역계가 면역 반응을 통해 우리 몸을 지켜내는 메커니즘을 정량적으로 이해하고, 이를 기반으로 주어진 항원에 대한 항체를 설계하는 난제를 해결하는 AI 개발이 필요하다.

특정 항원에 대한 항체는 후천적으로 획득하는 비유전 물질이라서 항원과 항체 결합에 대한 진화 정보가 존재하지 않는다. 현재까지 개발된 단백질 구조 예측 AI들은 모두 진화 정보로부터 구조에 대한 패턴을 찾아 이를 바탕으로 단백질의 구조를 예측한다. 따라서 진화정보를 찾을 수 없는 항원-항체 결합에 대해서는 예측이 거의 불가능하다. 알파폴드, 로제타폴드와 같은 기존 단백질 구조 예측 AI들은 진화정보가 없는 경우의 문제를 풀 수 없기 때문에 항체설계에 큰 도움이 되지 않는다.

이에 더하여 기존의 알파폴드와 로제타폴드는 상대적으로 열적 요동에 흔들리지 않는 단단한 구조, 즉 알파 나선 구조와 베타 병풍 구조를 기반으로 하는 결합에 대해서는 예측을 잘하지만, 고리 구조(loop)와 같이 구조 유연성이 높아 결합과정에서 그 구조가 많이 바뀔 수 있는 경우에는 예측 성능이 급격히 떨어진다. 항체의 경우, 항원과 결합을 바로 이 고리구조를 위주로 형성하기 때문에 알파폴드나 로제타폴드를 활용한 예측은 더욱 어렵다.

항원-항체 결합 예측이 가능한 인공지능을 만들기 위해서는, 항원-항체 결합에 대한 빅데이터가 필요하지만, 항체 신약 개발과 연관된 복잡한 이해관계 때문에 AI 학습에 필요한 공개된 데이터가 아주 제한적이다. 이러한 공개 데이터 부족 문제와 인공지능 학습을 위한 컴퓨터 자원 부족 문제는 이 난제를 해결하기 더욱 어렵게 하고 있다.

이 난제를 해결하기 위하여, 크게 두가지 접근법이 시도되고 있다. 첫번째는 기존 단백질 구조 예측 AI들에 현재까지 실험을 통해 밝혀진 항체 구조, 항원-항체 결합구조 데이터를 적용하여 추가 학습을 시키는 방향이다. 하지만, 적용가능한 구조 데이터가 수천개에 지나지 않아 AI로 학습하기엔 턱없이 부족하여 이 접근법으로는 성능 향상이 굉장히 제한적이다. 두번째 접근법은 특정 항원에 대한 반응하는 항체를 스크리닝하여 항원-항체 상호작용 데이터를 확보하고 이를 기반으로 특정 항원에 더욱 잘 결합하는 항체를 설계하는 AI를 개발하는 방식이다. 이러한 방식은 구조 데이터 부족의 문제에서는 벗어나 있지만, 학습에 활용된 특정 항원에 대해서만 항체 결합 예측이 가능하다는 단점이 있다.

항원-항체 결합구조 예측 난제를 해결하는 가장 직접적이고 효과적인 방법은 항원-항체 결합구조 실험데이터를 수십만 개까지 늘리는 것이지만, 이는 20년 이상의 시간이 소요될 수 있어 실효성이 떨어진다. 대안적으로 초고속 항원-항체 결합 스크리닝 기술을 활용하는 방법이 있다. 이를 통해 최대한 다양한 항원에 대하여 항체의 서열이 변함에 따라 항원과의 결합관계가 변화하는 것을 정량적으로 관측하고, 이를 AI 학습에 활용하는 것이다. 결합 구조를 모르더라도 구조로 인한 현상들을 최대한 정량적 데이터로 관찰하여 AI로 구조를 추론하는 접근법이다. 이러한 AI를 만들기 위해서는 데이터사이언스, 생물학, 물리화학 등 다양한 분야의 지식이 필요하다.

이렇게 개발된 AI는 정량적인 해석이 가능하여 항체를 기반으로 하는 면역체계에 대한 예측과 설계를 가능하게 할 것이다. 이는 항체 신약과 백신 설계, 면역 항암제,

세포 치료제 등으로 확장될 수 있어 파급력이 엄청나다. 또 이중항체처럼 복잡하고 개발이 어려운 항체 치료제를 설계하는 기본적인 플랫폼이 될 것이다. 한국 바이오 기업들의 항체 생산 능력과 결합된다면, 항체 치료제 분야에 새로운 길을 열 수 있을 것으로 기대된다.

항원-항체 결합 예측과 비슷하게 데이터 부족 문제로 어려움을 겪고 있는 단백질-핵산 결합 예측에 대하여서도 추가적인 상호작용 데이터를 활용하는 것이 AI 성능향상에 도움이 된다는 것을 확인하였다. 본 연구팀에서 가지고 있는 정제없이 미량의 항체만으로도 정량적으로 항원-항체 결합을 기존 대비 20~30배 빠르게 관측할 수 있는 기술을 활용하면 해당 난제 해결에 큰 도움이 될 것으로 기대되어 연구팀 내부적으로 무척 고무되어 있는 상황이다.

• 양자정보과학

반도체 집적 회로 기술로 양자 컴퓨팅을 구현할 수 있을까?

현재 우리가 사용하고 있는 컴퓨터는 비트를 통해 정보를 한순간에 0과 1로만 표현할 수 있고 순차적인 연산만 가능하다. 이와 달리 양자컴퓨터는 양자수준에서 나타나는 상태의 중첩을 이용함으로써 처리하는 정보의 양을 기하급수적으로 증가시킬 수 있고, 양자 얽힘 현상을 통해 병렬 연산이 가능하다. 이러한 이론적 장점을 바탕으로 양자컴퓨터에 대한 개념이 제안되었고 많은 사람들이 연구를 통해 기술을 개발해왔다. 하지만 현재 우리가 사용하고 있는 고전컴퓨터보다 오류 발생의 확률이 높아 아직까지 구현된 양자컴퓨터는 실용적이지 못하고, 대규모의 계산을 수행하기 역부족이다.

현재의 양자컴퓨터는 실용성이 낮기 때문에 “양자컴퓨터를 어떤 분야에 활용할 수 있을까?”라는 질문이 제기되고 있고, 동시에 “어떻게 하면 오류 발생을 최소화함으로써 실용적인 양자컴퓨터를 만들 수 있을 것인가?”라는 근본적인 문제가 제기되고 있다. 현재 고전컴퓨터의 오류 발생 확률은 약 10-16 수준이다. 그러나 양자컴퓨터는 구동원리 상 고유한(intrinsic) 오류 확률이 양자컴퓨터 분야의 선도플랫폼의 경우에도 약 10-4, 즉 1만번의 논리연산에 1번 꼴로 오류가 나는 수준이라 실용성이 크지 않은 문제를 가지고 있다.

이와 같은 문제가 발생하는 원인은 양자를 조작하고 측정하는 것 자체가 어렵기 때문이다. 보다 근본적으로는 조작과 측정을 위해서 상호작용이 필수적인데, 상호작용을 잘 할수록 외부의 영향을 받아 오류 확률이 올라가는 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 적절한 수준에서 발생하는 오류를 보정하는 방식이 많이 연구되고 있다. 적용방법에 따라 다르지만 오류 보정을 위해서는 각 큐비트가 일정 수준 이상의 오류 확률이라는 충실도(fidelity) 문턱 값을 넘어야 한다. 따라서

양자컴퓨터를 실용적으로 쓸 수 있으려면 오류를 보정하는 방법이 발전해야 하고, 동시에 일정 수준 이상의 충실도를 가진 큐비트를 충분히 만들 수 있어야 하기 때문에 해결이 쉽지 않은 문제다.

오류 보정을 위해서는 양자 상태 여러 개에 정보를 쓰고 체크하는 방식인 '오류신드롬 측정-고속 피드백' 방식이 대세를 이루고 있다. 그 중에서도 양자 상태를 보면 안된다는 근본적인 문제를 해결하기 위해 비교대상인 양자의 결과와 비교하여 오류 여부를 확인하는 방법이 중점적으로 연구되고 있다. 그 외 대안적 방법들도 연구되고 있는데, 여러가지 오류보정 방법들은 초전도, 이온트랩, 반도체 등 회로기반 양자컴퓨터에 공통적으로 적용될 수 있다. 오류보정 방법이 개발된다고 전제했을 때 남는 문제는 "오류보정을 적용할 수 있는 충실도가 높으면서 결맞음 시간(coherence time)에 비해 고속으로 측정이 가능한 대규모 큐비트를 어떻게 만들 수 있을까?"라는 양자컴퓨터 플랫폼에 대한 문제로 자연스럽게 이어지게 된다.

양자컴퓨터 플랫폼 분야에서는 현재 초전도와 이온트랩을 사용한 방식이 가장 활발하게 연구되고 있다. 초전도의 경우 양자컴퓨터 분야에서 가장 오랫동안 연구되었던 분야이기 때문에 다른 플랫폼에 비해서 상대적으로 더 높은 수준의 축적된 연구 기반을 보유하고 있으며, 큐비트의 규모 확장성(scalability)이 큰 장점이다. 하지만 온도변화에 취약하고, 큐비트의 상태가 완화되는 시간인 T1시간(T1 time)이 비교적 짧은 단점이 있다. 반면 이온트랩 방식은 현재 연구 중인 방식 중 충실도가 가장 높고, 임의의 큐비트 쌍을 자유롭게 한번에 연결할 수 있는 장점이 있지만 덩치가 큰 금속 블레이드를 이용한 이온 포획 방식을 사용하기 때문에 큐비트 개수를 늘리는데 어려움이 있다. 이에 반해 반도체 스핀 큐비트 기반의 실리콘 양자컴퓨터의 개념이 제안되었으나 아직 초기 단계에 머물러 있어 초전도나 이온트랩보다 상대적으로 주목받지 못하고 있다. 그러나 반도체 큐비트는 초전도 방식에 비해 온도에 덜 민감하고, 제어회로와 큐비트를 하나로 만들 수 있기 때문에 규모 확장성 측면에서도 장점이 있다. 그러나 아직까지는 원하는 위치에 스핀을 포획하기 위한 초기튜닝을 매 실험마다 큐비트 각각에 대해 교정해 주어야 하는 단점도 존재한다.

오늘날 전자회로 및 반도체 산업이 급속히 발전하고 있기 때문에 여러가지 대안적 양자 플랫폼들을 모두 집적회로에서 구현하는 것이 가능해지고 있다. 초전도 큐비트와 반도체 스핀 큐비트는 이미 반도체 공정법을 이용해 제작되고 있으며 큐비트 집적화를 목표로 반도체 파운드리 스타트업 기업도 생겨나고 있다. 이온트랩방식 역시 집적회로의 표면전극을 이용하고 초고진공 챔버를 손바닥 크기의 초소형으로 제작하는 등 집적된 형태로 제작하는 노력이 이루어지고 있다. 여러가지 플랫폼들이 있지만, 공통적으로 회로기반 양자컴퓨터로 볼 수 있기 때문에 오류 보정 방식도 모두 동일하게 적용할 수 있다. 특히, 반도체 스핀 큐비트는 트랜지스터와 큐비트의 구조가 유사하다는 특성이 있어 반도체 관련 기술과 제조기반이 매우 잘 갖추어져 있는 우리나라에서 충분히 고려해 볼만한 대안이다.

양자컴퓨터 분야는 초기단계로서 제안된 개념을 실제 구현해보는 단계에 있기

때문에 상용화 되었을 때 어떤 플랫폼을 기반으로 하게 될지 예상하기 어렵다. 몇몇 국가를 제외하고 독자적인 추진이 어려운 거대한 분야라는 특성으로 다양한 참여주체 사이의 협력이 필요한 연구이기도 하다. 이와 같이 불확실성이 큰 상황에서 만약 우리나라가 집적회로 기반의 양자컴퓨터 기술을 주도적으로 발전시키고 선점하게 될 경우 협력적 기술개발 측면에서 독자적인 협상력을 가질 수 있게 될 것이다. 또한 양자컴퓨터 시장이 형성되고 성장한다면 국내에 큐비트 칩 파운드리를 조성하는 등 추가적인 가치창출 기회도 엿볼 수 있을 것이다.

3. 미래세대가 바라보는 세상 : 미래세대 토론회

미래세대 토론회는 미래사회의 주역인 젊은 청년들을 중심으로 미래를 전망하고 중요한 키워드를 제시하는 것을 목표로 기획되었다. 2023년 미래세대 토론회는 '인공지능이 일상화된 세상에 던지는 미래세대의 질문'을 주제로 열렸다. 이 주제는 2022년에 논의된 디지털 사회로의 전환으로부터 시작되었으며, ChatGPT와 같은 인공지능이 사회의 큰 이슈로 떠오르고 있는 현 상황에 대한 인식에서 비롯되었다.

ChatGPT는 최신 트랜스포머(Transformer) 기법을 사용한 인공지능 언어 모델로 대규모 학습을 기반으로 기존 인공지능 모델보다 뛰어난 언어 이해와 생성 능력을 제공한다. 이 모델은 많은 사람에게 놀라움을 주었으며, 일부에게는 두려움으로 다가왔다. 그 영향이 얼마나 널리 미칠지는 아직 확실하지 않지만, 인공지능의 발전이 예상보다 빠르게 이루어지고 있다는 점은 분명하다. 새로운 기술 덕분에 새로운 시장이 열리고, 새로운 산업과 기업이 탄생하고 있다. 성장의 위기를 겪고 있는 한국 경제가 혁신적 기술을 통해 발전하기 위해서는 인공지능이 중요한 돌파구가 될 수 있다. 동시에 인공지능은 우리 사회의 가치관, 소통 방식, 각종 규칙에 큰 변화를 가져오고 있다. 더 나아가 인간의 정체성에 대한 근본적인 질문도 제기하고 있다. ChatGPT가 대표하는 인공지능은 미래세대가 살아갈 세계에 일상적으로 존재할 것이다. 기술의 변화를 막연히 추종하고 수용할 것이 아니라 다가올 세계에서 인공지능과 인간이 어떻게 공존할지에 대한 적극적인 상상이 필요할 때이다. 그 출발점은 미래세대 스스로가 던지는 독창적인 질문과 비전일 것이다. 이번 토론회는 기술의 시대를 선도하는 미래세대의 독창적인 키워드가 도출하는 것을 목표로 진행되었다. 이 키워드들이 과학기술자들이 참조할 기술발전 방향의 길잡이가 되고, 동시에 우리 사회 전체가 무겁게 고민해야 할 사회변화의 단초가 될 것으로 기대한다.

미래를 예측하기 위해서는 미래 사회에 관심을 두고 주도적으로 비전을 확립하고자 하는 과학기술 및 인문사회 등 다양한 분야의 학생들을 선발하여, 그들 간의 팀워크와 토론을 통해 융합적 사고 기반의 결과를 도출하도록 했다. 또한 토론회의 목적이 젊은 청년들이 기대하는 미래상과 그들의 중심 키워드를 도출하는 것임을 고려하여, 학생들이 주도적으로 이끌어 갈 수 있도록 교수진 및 기업경영자로 구성된 멘토단의 지원 아래 학생들의 의견이 중심이 되도록 운영되었다. 학생들은 각 조별로 세부

주제를 선정하고 결과물을 작성하며, 토론의 진행까지 주도적으로 맡았다. 또한 패널로서 자신들의 주제에 대해 주도적으로 응답했다. 멘토단은 토론이 주제로부터 벗어나지 않도록 중재하며, 학생들의 질문에 답해주되 멘토들의 주관과 판단이 포함되지 않도록 지원하여, 청년들의 고유한 생각 아래 중심 키워드가 도출되도록 했다.

국가미래전략원이 한국고등교육재단과 SBS 문화재단의 지원 아래 주최한 2023년 미래세대 토론회의 세부적인 진행은 다음과 같다. 5월부터 6월까지 국가미래전략원과 한국고등교육재단을 통해 지원자를 모집하고 면접을 거쳐 최종 19명을 선발했다. 지원자의 세부현황은 다음과 같다. 학교별로 서울대학교 12명, 고려대학교 1명, 성균관대학교 1명, 숙명여자대학교 1명, 이화여자대학교 3명, 포항공과대학교 1명이었으며, 학위과정별로 학부생 10명과 대학원생 9명, 전공별로 인문 및 사회과학 10명, 이공계 9명으로 다양성을 고려하여 선발되었다.

본 토론회에 앞서 7월 1일과 8일, 서울 강남구 역삼동에 위치한 한국고등교육재단 빌딩 2층 라운지에서 사전 워크숍을 진행했다. 사전 워크숍에서는 교수진 7명(서울대 3, 연세대 2, 경희대 1, KAIST 1)과 기업 대표 1명(맨드언맨드)으로 구성된 멘토단과 참가자들이 참여했다. 이 자리에서 토론회의 취지를 설명하고, 미래 사회에 대한 참가자들의 질문을 논의하는 시간을 가졌다. 또한, 미리 조를 편성하여 참가자들이 사전에 네트워크를 형성하고 의견을 교환할 수 있도록 지원했다.

토론회 참석 학생에게는 미래세대토론회 홈페이지(<http://qsf.or.kr>)를 통해 이전 미래세대 토론회 결과물, 미래 사회와 관련된 영상 자료, 책자 등을 공유하여, 토론회 시작 전까지 꾸준히 소통하기 위해 노력했다. 사전 워크숍의 세부적인 일정은 [표 2]와 같다.

구 분	시 간	강 사	주 제
Day 1 (7.1.)	1 Session	이정동 교수 (서울대)	질문을 던져야 하는 이유
	2 Session	김성국 교수 (연세대)	AI와 사회
	3 Session	이재현 교수 (서울대)	인공지능과 알고리즘 사회: 사회과학적 이슈들
	4 Session	윤성로 교수 (서울대)	인간과 인공지능의 공존은 가능한가
Day 2 (7.8.)	1 Session	최홍섭 대표 (맨드언맨드)	ChatGPT 혁명과 Foundation model의 미래
	2 Session	박노성 교수 (연세대)	자연과학을 위한 딥러닝과 딥러닝을 위한 자연과학
	3 Session	김재인 교수 (경희대)	인공지능 앞에서 인간만의 고유함을 돌아보다
	4 Session	신기정 교수 (KAIST)	초연결사회와 인공지능 (부제:그래프 인공지능)

[표 2] 미래세대 토론회 사전 워크숍 일정

본 토론회는 2023년 8월 9일(수)부터 11일(금)까지 2박 3일로 서울대 시흥캠퍼스 컨벤션센터에서 진행되었으며, 장소를 전일 대관하고 숙식을 지원함으로써 시간의 제약 없이 자유롭게 토론할 수 있도록 분위기를 제공했다. 또한 토론 전 다른 조와 의견을 적극적으로 교환하고 네트워크를 확장할 수 있도록, 하루에 한번씩 전체토론을 진행하여 상호 코멘트를 받았으며, 식사시간에는 조를 적절하게 혼합(Mix and Match)함으로써 식사 시에 보다 자유롭게 대화를 나누고 의견을 교환할 수 있도록 환경을 조성했다. 세부적인 일정은 [표 3]과 같다.

구 분	시 간	내 용	비 고
1일차	08:30 ~ 09:30	• 이 동(교대역 → 시흥캠퍼스)	대형버스
	09:30 ~ 10:30	• 행사 안내	
	10:40 ~ 12:00	• 팀별 토의	
	12:00 ~ 13:00	• 점심식사	팀별 식사
	13:00 ~ 15:30	• 팀별 토의	
	15:30 ~ 18:00	• 전체 토의	팀별 키워드 공유
	18:00 ~ 19:00	• 저녁식사	Mix Match
2일차	08:00 ~ 09:00	• 아침식사	
	09:00 ~ 10:00	• Refresh(AI 로봇 : 몸을 가진 AI)	장병탁 교수
	10:00 ~ 12:00	• 팀별 토의	
	12:00 ~ 13:00	• 점심식사	Mix Match
	13:00 ~ 15:30	• 팀별 토의	
	15:30 ~ 18:00	• 전체토의	
	18:00 ~ 19:00	• 저녁식사	Mix Match
3일차	08:00 ~ 09:00	• 아침식사	
	09:00 ~ 10:00	• Refresh(Ar&Technology)	강민준 공동대표
	10:00 ~ 12:00	• 팀별 토의	
	12:00 ~ 13:00	• 점심식사	팀별 식사
	13:00 ~ 14:30	• 최종 토론 준비	
	14:30 ~ 16:50	• 최종 토론	
	17:00 ~ 19:00	• 저녁 만찬	외부 식사
	19:00 ~ 20:00	• 이 동(시흥캠퍼스 → 교대역)	대형버스

[표 3] 2023년 미래세대 토론회 일정

2023년 미래세대 토론회 결과 2022년 결과물과 마찬가지로 총 5개의 주요 키워드와 그 내용에 관한 결과물을 제시했다. 5개의 주요 키워드는 다음과 같다.

- 도구적 지능과 비효율의 미덕
- 권위의 붕괴, 본능의 부활
- AI 인테그리티
- 유퀘스트
- AI와 일의 변신

위의 결과물들은 조별 주요 키워드, 요약문, 공통원고 및 개인원고 형식으로 제출되었다. 주요 키워드와 요약문은 내용을 함축적으로 제시함으로써 각 주제의 개략적인 내용을 쉽게 파악하고 흥미를 일으킬 수 있도록 작성으며 공통원고는 조의 공통된 주장을 작성하되, 각 조원이

작성한 개별원고를 통해 공통원고를 보다 심층적으로 이해할 수 있도록 작성했다. 본 보고서에는 조별 원고의 핵심 내용을 수록했다. 마지막으로, 2022년과 2023년의 미래세대 토론회의 결과물을 하나의 책으로 묶은 <미래 관찰자의 살아 있는 아이디어>를 2023년 11월 1일에 출간했다.

• 도구적 지능과 비효율의 미덕

- 주요단어 : 도구적 지능, 비효율의 미덕, Ethical Nudge
- 핵심내용

도구적 지능이란 인간을 포함하는 유기체적 지능과 구분되는 개념으로, 최초 선택을 할 수 없는 현재의 AI를 설명한다. 이 때의 최초 선택이란 문제 인지 및 목적 설정을 의미한다. 이러한 구분을 통해 인간의 지능 작동 방식에서 간과되기 쉬운 질문 능력을 조명하며, AI의 발전 방향에 대한 접근법을 다시 논하고자 한다.

효율 추구가 더 이상 진보를 의미하지 않는 상황에서 이와 관련한 부작용들은 이미 여러 곳에 산재해 있다. 만약 AI에게 기존과 같이 효율적이라는 이유만으로 판단을 위탁한다면 인간이 가진 고유한 비판의식을 상실하고 결국에는 인간 존엄을 상실하게 될 것이다. 이에 따라 이제는 비효율로 오해되는 것들을 다시 돌아보고, 인간 고유의 능력을 회복해야 한다.

Ethical Nudge란 행동 경제학에서 말하는 넛지 이론(Nudge Theory)에서 착안하여 만든 개념으로, AI 기술의 발전 방향을 형성하기 위한 실천적 행위이다. AI와 관련하여 우리 사회가 해결해야 하는 문제들이 모두 제도적 강제력이 있는 방법으로 해결될 수는 없다. 규제나 통제와 같이 공공의 강제력을 가지는 실천적 방법이 아닌 바람직한 미래 사회가 형성될 수 있는 유인을 제공하는 실천적 방법이다.

- 권위의 붕괴, 본능의 부활

- 주요단어 : AI의 침략, 권위의 붕괴, 본능의 부활
- 핵심내용

전통적인 구조가 AI의 압도적 발전 앞에서 대혼란을 맞이하고 있다.

AI는 인간의 지적 및 계약적 힘 전반에 균열을 가져오며, 기존의 권위 체계에 도전하고 있다.

AI의 시대에서 생존하기 위해서는 감각적이고 본능적인 영향력을 강조해야 한다.

AI 인테그리터

- 주요단어 : 신중세사회, 집중화와 미분화, I.M. with A.I.
- 핵심내용

Techno-platform이 초거대 AI에 대한 독점적인 접근권한을 가지면서 개인의 삶에 강력한 영향력을 끼치는 것은 신중세사회로 향하는 갈림길에 우리가 서 있음을 의미한다.

빅데이터와 고도의 연산능력에 기반한 인공지능 기술의 독특성은 개인과 Techno-platform 간의 정보와 자원의 불균형을 통해 '집중화와 미분화'라는 새로운 사회적 문제를 야기한다.

공유, 자율, 교육의 가치를 지향하는 I.M. with A.I.(Integrator Movement with AI)라는 새로운 사회적 운동이 등장하여 이러한 '집중화와 미분화'의 문제를 해결해 나가야 한다.

• 유퀘스트

- 주요단어 : 유퀘스트, 창의적인 스파크, Intergovernmental A.I.
- 핵심내용

유퀘스트(OùQuest)'란 OÙ(no)와 Quest(a long or arduous search for something)를 조합한 합성어로, 인간과 인공지능이 함께 공존하며 우리가 지향하는 미래 사회가 실현할 수 있는 세상에 대한 고찰을 담은 것이며, 향후 많은 시간이 소요되는, 반복적이며, 소모적인 고민을 AI가 대신하는 세상이라는 의미를 내포한다.

AI와 인간이 공존하는 미래 사회의 중심에서 인간은 최초의 질문(Question)을 통해 창의적인 스파크(Creative Spark)를 일으키고, 인공지능은 반복적 탐구(Quest)를 통해 지속 가능한 연료(Sustainable Fuel)를 제공함으로써, 이와 같은 촉발과 반복이 끊임없이 이뤄지는 선순환 구조를 확립해 나갈 수 있을 것이다.

유퀘스트(OùQuest)의 세상 속에서 이루어질 무궁무진한 가능성은 초진화에 성공한 설명가능한 인공지능(XAI)이 현실화될 것이라는 '유쾌한' 공상과학적 상상을 대전제로 가정하여 논의되며, Absolute A(AI)의 등장과 함께 가치의 조달(PoC), 민주주의 발전(DoD), 대체로운 소통(DoC), 인간 욕망의 롱테일(LoH)에 새로운 변화의 물결을 일으킬 것이다.

• AI와 일의 변신

- 주요단어 : Meta-AI-morphosis, 대체환상, 다(多)가치사회
- 핵심내용

인간에게 있어서 '일'의 개념은 역사적으로 변화해왔고, 인공지능 시대가 도래한 지금 '일한다' 은 또 한 번의 변화를 앞두고 있다.

인공지능의 일과 인간의 일은 질적으로 다르다. 따라서 산출물의 유사성에 현혹되어 인공지능과 인간의 일을 동등비교 혹은 대체될 수 있는 개념이라고 간주해서는 안된다. 오히려 이 둘 사이의 자명한 차이가 있음에도 기계의 탁월함을 수용하고 인간을 대체할 수밖에 없다고 생각하게 된 통념의 기저에는 어떤 사회문화적 압제가 존재하는지를 역으로 고찰해볼 필요가 있다.

효율만능주의 속에서 금전이라는 동일 가치로 재단되어 왔던 다양한 가치들이, 인공지능이라는 날개를 달고 각자의 빛깔로 세상이 더 풍요로워지기 위해서는 관계 속 성취 및 인정과 자아실현의 본질을 갖는 '일한다'는 개념으로의 변모 Meta-AI-morphosis가 반드시 수행되어야 한다.

II 정책 제안

1. 협력적 기술주권 달성 및 기술주권지수 측정의 필요성

최근 지정학적 불확실성의 증가로 인해 국가들간의 상호신뢰가 낮아지면서 기술주권 및 경제 안보에 대한 논의가 부상하였다. 주요 국가들은 자국의 이익을 우선시하는 폐쇄적인 기술주권 정책을 연이어 발표하고 있다. 그러나 이처럼 자국 역량 개발 및 기술 소유에 초점을 둔 기술 민족주의에 기반한 처방은 국가혁신시스템의 경로의존성 및 상호의존성으로 인해 기술주권의 달성에 근본적인 한계가 있다. 그러므로 국가가 핵심 기술에 대한 고유한 역량을 보유하면서 다른 국가와 상호보완적으로 협력하는 형태의 기술주권 추구가 필요하다. 이를 통해 국제 보조금 경쟁으로 촉발되는 비효율적 중복 투자로 인한 이류기술의 양산을 막고, 글로벌 가치 사슬 내에서 전략적 균형을 달성할 수 있고, 글로벌 도전 과제의 해결에 기여할 수 있다. 협력적 기술주권 프레임워크 구축을 위해서는 유럽의 IPCEI와 같은 성공적인 협력적 기술주권의 사례를 분석하여 적용할 필요가 있다. IPCEI의 사례는 유럽 지역의 지정학적 특성이 강력하게 반영되어 전 세계에 일반화하기 어렵다는 한계가 존재하지만, 유럽의 국제협력 사례를 심도 있게 살펴보고 그 성과와 한계를 파악한다면 글로벌 차원에서 활용가능한 교훈을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 협력적 기술주권의 프레임워크 하에서 국가별 최적의 협력 파트너 탐색 및 매칭을 위한 정량적 분석 방법론에 대한 연구가 필요하다. 이러한 맥락에서 협력시너지지수(CSI)에 대한 연구는 국가별 기술 및 산업 역량에 기반하여 상호보완적인 협력 파트너를 도출함으로써 글로벌 기술 협력의 효율성을 높일 수 있을 것이다. 또한, 기술주권 확보를 정책 수립에 있어서 의사결정을 뒷받침할 수 있는 테크 인텔리전스 역량 구축이 필요하다. 기술주권지수에 대한 연구는 국가 전반의 기술주권 수준, 산업별 기술주권 수준, 자국 내 생산을 고려한 기술주권 수준 등 다양한 측면에서 국가의 기술주권 수준에 대한 평가를 가능하게 함으로써 정책적 의사결정에 있어서 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

2. 중장기적인 시각 아래 연구개발 투자 정책의 필요성³⁵⁾

많은 혁신은 다소 황당한 최초의 도전적 질문으로부터 시작한다. 이

35) <그랜드 퀘스트 2024> 1장, '대한민국의 미래를 열 질문, 그랜드 퀘스트'에서 발췌

도전적 질문을 제시할 수 없다면 과학기술의 혁신을 이끌어 갈 수 없다. 따라서 과학기술의 새로운 분야를 열어갈 수 있는 씨앗인 도전적 질문을 제시하는 자가 과학기술의 패러다임을 이끌어 갈 수 있다. 대한민국은 눈부신 경제성장의 밑바탕에는 선진국의 길을 답습하고 그들이 구축한 패러다임을 충실히 따르면서 발전한 한국의 과학기술이 있었다. 이제 한국의 과학기술은 선진국이 제시한 문제를 해결하는 단계를 넘어 스스로 문제를 출제하는 단계로 접어들어야 한다. 이제 선진국의 위상을 갖추게 된 대한민국은 기존의 로드맵을 벗어나 새로운 패러다임을 제시하는 문제 출제자로 전환해야 한다.

과학기술의 미래를 열어갈 도전적 질문인 그랜드 퀘스트를 도출하는 과정에서 좋은 질문이 만들어지기 위한 조건을 발견할 수 있었다. 첫째는 기초 과학과 응용 기술의 융합이다. 10가지 그랜드 퀘스트들 중 대부분은 기초 과학 연구자들의 중요한 주제들, 그리고 산업적 응용을 위한 구체적 난제들이 만나 도출되었다. 이 과정을 통해 분야 간 융합은 새로운 도전적 질문을 발견할 수 있는 길임을 확인할 수 있었다. 둘째는 한국의 장점을 활용하는 것이다. 한국이 지금까지 높게 쌓아온 과학기술적 역량과 산업 포트폴리오를 새로운 모양으로 활용할 길을 찾는 것 자체가 그랜드 퀘스트가 될 수 있다. 혁신은 이미 보유한 역량의 재조합을 통해 이루어진다고 할 때, 한국이 보유한 수 많은 과학기술적 역량은 혁신이 이루어질 수 있는 무한한 잠재력을 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서 한국의 장점을 활용한다면 도전적 질문을 제시할 수 있을 뿐만 아니라 그랜드 퀘스트의 해답을 제시하는 문제 출제자로 자리매김할 수 있을 것이다. 세 번째 조건은 우연과 가능성의 공간이다. 그랜드 퀘스트 출제위원들은 우연히 조우한 분야에서 도전적 질문을 찾은 경우가 많았다. 자신이 평소 가지고 있던 지식이 다른 분야에서 새로운 질문을 던지기 위한 밑바탕이 되거나 그 질문을 해결할 실마리를 제공할 가능성을 찾기도 했다. 이러한 과정은 넓은 가능성의 공간(space of possibilities) 위에서 가능하다. 이 공간이 넓을 때 어떤 황당한 질문을 던져볼 수 있으며 그러한 환경에서 그랜드 퀘스트가 도출될 수 있을 뿐만 아니라 질문이 진화할 수 있다.

대한민국이 기술 선진국으로 자리잡기 위해서는 그랜드 퀘스트를 출제할 수 있어야 한다. 또한 그랜드 퀘스트는 넓은 가능성의 공간에서 한국의 높은 과학기술적 역량을 활용하고 분야간 융합을 촉진함으로써 도출될 수 있다. 과학과 기술의 미래 클러스터의 그랜드 퀘스트 프로젝트는 대한민국이 과학기술의 새로운 패러다임을 열어갈 수 있다는 가능성을

보여준다. 대한민국이 그 패러다임을 열어가기 위해서는 지속적인 국가적 연구 개발 투자가 필요하다. 10가지 그랜드 퀘스트들의 해결책은 단기적으로 구할 수 없으며, 그랜드 퀘스트의 해법을 찾는 과정에서 질문이 진화할 수 있다. 따라서 한국이 기술 선진국으로 나아가기 위해서는 단기적인 성과에 집착하기 보다는 중장기적인 시각으로 꾸준히 투자하는 국가 정책의 방향성이 필요하다.

3. 젊은 세대들이 바라보는 미래상을 이해하는 정책의 필요성

미래세대 토론회는 비전을 가진 젊은 세대들이 창의적인 시각에서 미래를 예측하기 위한 아이디어와 시각을 서로 공감하고 구체화하는 토론의 장이었다. 미래 시대를 짚어질 젊은 세대들의 책임이 막중하기 때문에, 여전히 그들은 자신들이 그리는 미래를 구체적으로 구현하기 위한 지식을 축적하며 중요한 일에 사용하길 원하고 있다.

이러한 그들의 시각이 개인만의 관점이 아니라 여러 논의를 통해 보완되고 발전될 수 있도록 젊은 세대들을 중심으로 한 다양한 토론기회와 학술적 교류의 장이 마련되어야 한다. 또한 젊은 세대들의 주장이 단순히 결과물을 제시하고 책으로 출판되는 것에서 그치지 않도록, 전문가들(정책 및 기업가, 연구자 등)의 답변과 질문을 통해 세대 간 소통의 장이 마련되어야 한다. 논의의 결과는 사회에 적극적으로 전파되어 시민들도 참여함으로써 미래를 책임질 젊은 세대들을 중심으로 사회가 함께 움직일 수 있도록 지원되어야 할 것이다.

마지막으로, 지금까지는 하나의 주제를 다뤘지만, 이 노력이 꾸준히 확대되어 다양한 주제를 다룰 수 있는 대규모 토론회로까지 발전되어야 한다. 여러 분야에 대한 젊은 세대들의 다양한 질문들이 끊임없이 만들어짐으로써 폭넓은 시야에서 다양한 미래사회의 문제를 미리 준비하고 그들의 의문과 질문을 함께 고민하며 소통할 수 있는 기회가 마련될 것이다.

Ⅲ 행사 및 소통

1. 협력적 기술주권 확보 전략 구축

1) 국내포럼

- 행사명 : KISTEP-국가미래전략원 공동포럼
- 주최 : 한국과학기술기획평가원, 서울대학교 국가미래전략원
- 배경과 목적
글로벌 불확실성 증가, 과학기술 패권경쟁 과열, 경제·사회·안보의 환경 변화 속에서 선도적 혁신 아젠다 발굴과 적시·적합의 전략 수립을 위한 민관 Think Tank 기관 간 협력이 필수적으로 요구되는 상황이다. 이에 따라 정부 과학기술 혁신전략 Think Tank인 한국과학기술기획평가원과 민간의 혁신전략조직인 서울대 국가미래전략원 간 공동포럼 및 MOU 추진에 목적을 두고 있다.
- 일정 및 장소 : 2023년 9월 26일 14:00 ~ 16:40 한국과총
- 행사 일정

시간	세부 운영내용
14:00 ~ 14:30 (30분)	- (개회사) KISTEP 원장('5) - (개회사) 서울대 국가미래전략원장('5) - (축사 및 환영사) 혁신본부장, 연구회 이사장, 서울대 총장('10) - (MOU 체결) KISTEP-국가미래전략원 MOU 체결('5)
14:40 ~ 16:40 (120분)	- (발제 1) 기술패권시대, 과학기술 글로벌 협력 전략(이정동, '20) - (발제 2) 국제협력 R&D 현황진단과 개선방향(황지호, '20) - (발제 3) 데이터 기반 경제안보 및 국제협력 정책방향(박종희, '20) - (토론) 남기태 좌장, 토론자('50)

2) 국제포럼

- 행사명 : Korea-Germany Joint Forum on Technology Sovereignty
- 주최 : KISTEP, Fraunhofer-ISI, 서울대학교 국가미래전략원, 한국고등교육재단
- 배경과 목적
최근 몇 년간 COVID-19 팬데믹으로 인한 공급망의 붕괴, 글로벌 무역 갈등을 비롯한 지정학적 불확실성의 증가와 같은 환경 변화로 인해 기술주권이 중요한 정치적, 정책적 의제로 부상하였다. 이에 따라 미래 혁신정책을 기술 경쟁력뿐만 아니라 회복력 및 기술주권의 측면에서도 고려할 수 있는 새로운 과학적 프레임워크의 필요성이 증가했다. 본 포럼은 한국 및 독일의 기존 과학기술 전략과 연계하여 기술주권 개념을 분석하고, 상호이익과 협력을 위한 근거 기반 기술주권 정책의 과학적 토대를 마련하는데 목적을 두고 있다.
- 일정 및 장소 : 2023년 5월 25일 08:30 ~ 14:20 독일 베를린 Hotel Maritim ProArte

• 행사 일정

Time	Program
08:30 – 09:10 Opening and Session 1	Opening Remarks by Prof. Jakob Edler, Director, Fraunhofer ISI BMBF Parliamentary State Secretary Dr. Jens Brandenburg (Germany) MSIT Vice-Minister Dr. Young-Chang Joo (Korea)
09:10 – 10:10 Session 1	Scientific Concepts of Technology Sovereignty and New Potentials for International Cooperation <i>Presentation</i> President Byung-Seon Jeong, KISTEP (Korea) Prof. Jakob Edler, Fraunhofer ISI (Germany) <i>Q&A and Discussion</i> Session Chair: Prof. Byung-il Choi, KFAS Panel: Prof. Jakob Edler, Fraunhofer ISI President Byung-Seon Jeong, KISTEP Prof. Sangook Park, Seoul National University Dr. Hanns Günther Hilpert, SWP
10:30 – 11:45 Session 2	Scientific Evidence on Strategic Technologies and Existing German-Korean Cooperation Dynamics <i>Presentation</i> Prof. Jeong-Dong Lee, Seoul National University (Korea) Dr. Henning Kroll, Fraunhofer ISI (Germany) <i>Q&A and Discussion</i> Session Chair: Prof. Jakob Edler, Fraunhofer ISI Panel: Prof. Jeong-Dong Lee, Seoul National University President Byung-Seon Jeong, KISTEP Prof. Dr. Oliver Kraft, KIT Dr Henning Kroll, Fraunhofer ISI Prof. Dr. Thomas Gries, RWTH University
13:00 – 14:10 Session 3	Scientific Evidence on Net-zero Technologies and Related Potentials for German-Korean Cooperations <i>Presentation</i> Prof. Ki Tae Nam, Seoul National University (Korea) Prof. Dr. Martin Wietschel, Fraunhofer ISI <i>Q&A and Discussion</i> Session Chair: Dr. Soo Hyun Kim, KIST Europe Panel: Prof. Ki Tae Nam, Seoul National University Prof. Dr. Martin Wietschel, Fraunhofer ISI Dr. Jihee Son, National Institute of Green Technology Dr. Rainer Quitzow, Research Institute for Sustainability RIFS
14:10 – 14:20 Closing and Ways Forward	President Byung-Seon Jeong, KISTEP Prof. Jeong-Dong Lee, Seoul National University Prof. Jakob Edler, Fraunhofer ISI



[그림 8] Korea-Germany Joint Forum on Technology Sovereignty



[그림 12] SBS D Forum (SBS 주최, '23. 11. 2.)

기술혁신과 경제안보, 새로운 국가의 일

2023.12.07 (목)
13:00~18:00
서울대학교 우석경제관 (223동) 504호

주최: 서울대학교 국가미래전략원
후원: SBS 문화재단, 한국고등교육재단

유튜브 중계 및 실시간 질의응답 진행

기술혁신과 경제안보
유튜브중계 QR코드

참가신청 QR코드 & 링크
(<https://forms.gle/J21xqEQ5AybQMcnK6>)

인사말씀	13:00 - 13:05	• 운영회 기획부총장 (서울대학교)
활동보고	13:05 - 13:15	• 이정동 교수 (서울대 공학전문대학원)
Session 1	13:15 - 14:40	데이터기반 경제안보 및 기술주권 전략의 방향 기초발제: 박종희 교수 (서울대 정치외교학부) • 토론 • 박현우 교수 (서울대 데이터사이언스대학원) • 임요한 교수 (서울대 통계학과) • 윤지용 교수 (경희대 행정학과) • 이상주 교수 (서울대 산업공학과) • 김경준 팀장 (무역협회 공급망분석팀)
	14:40 - 14:50	Break
	14:50 - 16:20	<그랜드 퀘스트>의 확산 및 발전방향 기초발제: 이정동 교수 (서울대 공학전문대학원) • 토론 • 남기태 교수 (서울대 계통공학부) • 나준호 연구위원 (LG 경영연구소) • 최영진 본부장 (한국연구재단 국제사업본부) • 최준호 논설위원 (중앙일보) • 오재석 특임교수 (서울대 과학학과)
Session 2	16:20 - 16:30	Break
	16:30 - 18:00	혁신친화적 AI 규제정책의 방향 기초발제: 윤혜신 교수 (한양대 법학전문대학원) • 토론 • 이상원 교수 (건국대 법학전문대학원) • 이송민 교수 (성균관대학교 법학전문대학원) • 박경태 변호사 (법무법인(유한) 태평양) • 박우실 리더 (네이버) • 허주영 변호사 (스캐퍼럼)

서울대학교 국가미래전략원
 SBS 문화재단
 한국고등교육재단
 문의: dtals24@snu.ac.kr

[그림 13] 기술혁신과 경제안보, 새로운 국가의 일 포럼 포스터

3. 미래세대 토론회



[그림 14] 미래세대 토론회 웹사이트 (<http://qsf.or.kr/index.php>)



[그림 15] 미래세대 토론회 브로셔



[그림 16] 미래세대 토론회 사전 워크숍



[그림 17] 미래세대 토론회 1



[그림 18] 미래세대 토론회 2



[그림 19] 미래세대 토론회 1

3차년도 연구계획

I 연구주제 1

국가전략기술을 획득하기 위해서는 기술주권이 필요하다. 더욱이 기술혁신이론에 따르면 기술주권 확보에는 국가 간 기술 협력이 요구된다. 따라서 과학과 기술의 미래 클러스터는 3차년도에도 '한국의 전략기술 도출을 위한 이론적 프레임워크'라는 연구 목표에 관해 협력적 기술주권에 대한 연구를 지속할 계획이다.

협력적 기술주권 프레임워크를 기반으로 기술주권 확보를 위한 정책 수립에 있어서 테크 인텔리전스 역량 구축이 필요하다. 이를 위해 기술주권 수준 분석 및 협력 파트너 탐색을 위한 정량적 연구의 필요성이 있다. 국가의 기술주권 수준에 대한 진단을 위해 국가 전반에 대한 분석뿐만 아니라 개별 산업 수준에서 분석이 가능한 기술주권지수에 대한 연구를 진행하고자 한다. 또한, 글로벌 기술협력의 효율성 향상을 위해 데이터 기반의 협력 기회 탐색 방법론이 필요하다. 본 연구에서는 국가별 기술 역량에 대한 분석을 바탕으로 글로벌 기술 생태계의 측면에서 국가 간 보완적 협력 관계를 정량화하여 최적의 협력 파트너 탐색 및 매칭을 위한 연구를 수행하고자 한다.

또한, 독일의 Fraunhofer ISI (Institute for Systems and Innovation Research)와의 후속 포럼 개최를 통해 협력적 기술주권 프레임워크 구축을 위한 국제적 논의를 종합하고, 기술주권 확보를 위한 한국과 독일 양국의 과학기술혁신정책의 전략적 방향성에 대해 논의하고자 한다.

II 연구주제 2

'미래 사회변화 전망을 반영한 국가 과학기술 난제 및 연구 아젠다

발굴'이라는 두번째 연구 목표에 관해서는 <그랜드 퀘스트> 프로젝트를 지속할 계획이다. 2차년도에는 분야별 전문가 탐색의 범위를 서울대학교 내로 한정했다. 3차년도에는 외부 학술연구기관과의 협력을 통해 서울대학교 뿐만 아니라 다른 대학교의 전문가들을 초빙할 계획이다. 특히 외부 학술연구기관의 인적 인프라를 활용하여 더욱 다양한 분야의 전문가들을 섭외할 예정이다. 또한 과학기술 이슈에 관해 사회적 영향력이 큰 외부 기관의 프로토콜 활용은 과학과 기술의 미래 클러스터의 연구결과 확산에 기여할 것으로 기대된다.

3차년도의 <그랜드 퀘스트> 프로젝트는 2차년도에 발견된 미비점을 보완하면서 수행할 계획이다. 특히 그랜드 퀘스트를 미래세대에게 확산할 수 있도록 하는 방안을 고려하는 중에 있다. 또한 미래세대에게 친숙한 홍보 방법을 모색하고 있으며, 국가미래전략원 유튜브 채널을 활용한 분야별 동영상 배포, SNS 홍보 등을 후보로 논의하고 있다.

분야별 그랜드 퀘스트 도출을 위한 간담회 이후, 이를 대중에 설명하는 자리인 그랜드 퀘스트 오픈포럼은 2차년도와는 달리 온라인 화상회의 방식으로 진행할 계획이다. 또한 오픈포럼 이후, 분야별 출제위원 외 산업계 및 과학기술계 인사들을 초청하여 대중에게 알려진 그랜드 퀘스트에 대한 토론회를 계획하고 있다. 이 토론회를 통해 분야별 그랜드 퀘스트가 뚜렷한 과학기술정책 목표를 제안할 수 있기를 기대하고 있다. 최종적으로 그랜드 퀘스트 오픈포럼과 토론회의 결과를 단행본으로 출간할 계획이다.

첨 부

I 기술주권 관련 국내포럼 발표자료

국가전략기술 육성 특별법 시행 기념
KISTEP-서울대 국가미래전략원 공동포럼

기술패권시대, 과학기술 글로벌 협력 전략

Sep 26, 2023

이정동 교수

서울대 공학전문대학원 / 기술경영경제정책대학원



기술 패권 경쟁과 기술주권 시대의 도래

- 과학기술 분야가 국방 및 경제 분야와 결합되면서 주요 국가들은 국가 안보에 중대한 영향을 미치는 전략기술을 발굴하기 위해 노력하고 있음
 - 전통적으로 경제적, 기술적 역량은 국가 안보를 달성하기 위한 수단으로 인식되어 왔지만, 기술이 영향을 미치는 분야가 다양해지고 그 힘이 커지면서, 이제는 기술 자체가 중요한 안보 자산으로 인식되고 있음
 - 이에 따라 미국, 유럽연합 등 주요국들은 과학기술이 국가안보의 핵심 결정요인임을 인식하고 국가안보와 경제, 기술의 상호연관성을 강조함
 - 특히 글로벌 팬데믹, 우크라이나 전쟁, 글로벌 경기 침체 등 국가 안보 차원에서 다양한 위기가 발생하면서 불확실성을 극복하기 위한 전략기술에 대한 관심이 높아짐



출처: CNN



기술 패권 경쟁과 기술주권 시대의 도래

- 전략기술에 대한 미·중 기술 패권 경쟁이 심화되는 가운데, 주요 국가들의 기술주권 확보에 대한 수요 증가



출처: BillionPhotos / Shutterstock.com

- 무역 분쟁으로 시작된 미국과 중국 간 갈등이 첨단전략기술에 대한 패권 경쟁으로 이어지고 있음
- 유럽, 일본 등 주요 국가들도 초강대국 간 경쟁으로 인한 글로벌 영향에 대비하여 '기술주권'의 개념을 정립하고 이를 확보하기 위한 논의 지속
- 최근 기술주권 논의는 산업·국방·과학 등 각종 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 영향력 있는 기술을 발굴·지원하거나 국가안보 차원에서 자기 주권을 유지하려는 시도로 볼 수 있음



기술 패권 경쟁과 기술주권 시대의 도래

- 혼란한 기술주권 시대에 각국 정부는 기술 혁신을 통해 국내 역량을 보완하고 국가적 목표를 달성하기 위해 점점 더 많은 기술 동맹을 형성하고 있음
 - NATO, G7, Quad 등 기존 동맹은 전략기술에 대한 강조를 시작하거나 증가시켰으며, 더 나아가 개별 국가 또는 전략적 파트너 그룹 간에 새로운 동맹 또는 조직이 설립되고 있음

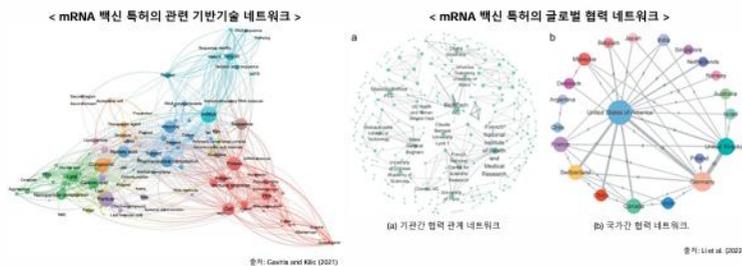
US	EU	JP	UK	AU	CA	DE	FR	KR
Five Eyes, NATO – 2019, Quad – 2021, The Cten Network – 2020, The Tech Accord – 2018	Japan – 2019, EU – US TTC – 2021, ROK – 2020, many EU agencies	Five Eyes, Quad – 2021, Japan-US SCSP – 2015, Japan-US Joint Statement on Advancing a Free and Open Indo-Pacific – 2018, Japan – EU CIP – 2017, Japan-ROK	Five Eyes, NATO – 2019, G7	Five Eyes, Quad – 2021, C&E Technology Working Group, Cybersecurity Tech Accord – 2018, individual country alliances – 2018*	Five Eyes, Cybersecurity Tech Accord – 2018, GPAI – 2020, discussions with US, Japan and Quad	EU, Nato – 2019, ESA, PTCEs – 2019	EU, Nato – 2019, EDA, ESA, PESCO – 2017, EUREKA	Five Eyes, Quad – 2021, GPAI – 2020

기술주권 확보를 위한 협력적 혁신

- 기술 복잡성의 증가, 글로벌 가치사슬의 얽힘, 혁신 주기의 단축 등의 상황에서 다른 국가를 배제하고 독자적인 기술주권을 확보하는 것은 불가능함
 - 기술은 무에서 유로 창조되는, 독립적인 발전과정을 거치는 것이 아니라, 경로의존성과 상호의존성을 가지고 있기 때문에 기술 발전에는 다양한 분야의 혁신이 필요 (Arthur, 2009; Dosi & Nelson, 2010).
 - 오픈 이노베이션(Chesbrough, 2003)은 협력적 혁신의 개념을 적절히 구현하고 있으며 다양한 실증연구가 이를 뒷받침하고 있음 (Huizingh, 2011; Laursen & Salter, 2006; Lichtenthaler, U. & Lichtenthaler, E., 2009).
 - 코로나19의 세계적 대유행을 돌파하기 위한 mRNA 백신 기술 역시 협력적 혁신의 결과물이자 대표적인 사례

기술주권 확보를 위한 협력적 혁신

- mRNA 백신 기술 사례 (Gaviria & Kilic, 2021; Li et al., 2022)



기술 생태계 속 기술주권 확보 방향

- 기술과 혁신의 생태계 속에서 기술주권을 확보하는 것은 적합한 퍼즐 모음을 탐색하는 것



기술 생태계 속 기술주권 확보 방향

- 기술주권을 확보하기 위해서는 대체불가능한 고유 역량을 보유해야 함



기술주권을 위한 과학기술 글로벌 협력 전략 및 시사점

1. 국제협력의 파트너로써 인정 받을 수 있는 고유한 핵심 역량 확보

- 대체불가능한 고유한 퍼즐을 가지고 있어야 글로벌 생태계에서 기술주권을 지킬 수 있음
 - 경제적 가치, 기술적 난이도, 대체불가능성 높은 핵심기술을 보유한 국가는 높은 협상력을 기반으로 산업주도권을 가질 수 있음
- 국제협력을 통해 더 큰 시너지를 얻기 위해선 기초 및 핵심 연구에 대한 경험을 충분히 축적하여 흡수역량을 갖춰야 함
 - 글로벌 리더(Top-tier) 수준의 연구 역량을 갖춘 협력 파트너들 간의 협력이 혁신적인 기술 개발을 선도할 수 있음
 - 기술 및 인재가 유출되지 않도록 지나치게 외부에 의존하고 내부 역량 강화에 소홀히 하는 제후종독 패러독스를 경계해야 함
- 이는 과학기술 글로벌 협력 전략에 있어서 선택이 아니라 필수적이며, 협력을 위한 기본 전제 조건임
 - 상대국의 기술전략에 도움이 될 수 있는 보완적 자산을 갖추기 위해서는 내부적 기술역량의 축적이 선행과제임
 - 이제 선진국 그룹으로 인정받은 한국은 과거와 달리 오히려 경쟁관계로 인식될 수 있어 단순한 호혜적, 보완적 협력관계 그 이상의 매력적인 협력 파트너가 되어야 함

기술주권을 위한 과학기술 글로벌 협력 전략 및 시사점

2. 실질적이고 효과적인 과학기술 국제협력을 위해서는 장기적이고 단계적인 접근이 필요

- 과학기술 R&D 및 국제협력 특성상 연구기획에서부터 협력 효과 및 성과 도출까지 오랜 시간이 요구됨
 - 국제협력은 각국의 법과 규제 시스템 내에서 국간 합의를 바탕으로 진행되므로 장기간에 걸쳐 진행되는 특성이 있음
 - 장기적인 신뢰 관계를 기반으로 서로 관심있는 연구 주제를 발굴하고 공동 연구를 수행하는 속성의 시간 필요
 - 기후변화나 감염병과 같은 글로벌 도전과제는 다년간 과학기술협력이 효과적이며, 이를 위한 장기적 대응이 필요함
- 단계적 접근을 위해 과학기술외교 중장기 계획 등 국가차원의 전략수립이 선행되어야 함
 - 국제협력을 위한 법적 도입, 예산 지원, 국제표준, 인재교류, 다양한 기관 차원의 협업, 국내 정책과의 연계 등 여러 측면을 종합적으로 고려해야 하며, 국가차원의 체계적 과학기술외교 및 국제협력 추진을 위한 기반 연구, 거버넌스, 정책 및 전략에 대한 고민 필요
 - 명확한 원칙과 세부적인 전략을 바탕으로 국제협력 기반 조성, 협력 대상 및 의제 발굴 등의 사전기획 및 조율, 사업단 구축 및 운영, 평가 및 성과관리 등 Step by Step 접근이 요구됨
 - 장기적인 국제협력 인프라를 기반으로 지속적인 유대관계를 유지함으로써 국제사회에서의 신뢰를 높여가야 함

기술주권을 위한 과학기술 글로벌 협력 전략 및 시사점

3. 과학적 증거에 기반한 과학기술정책을 통해 객관성 및 합리성 확보

- 전세계적으로 과학기술정책의 과학화(Science of Science and Innovation Policy: SciSIP)에 대한 노력이 지속
 - 2005년 'Dr. Marburger's Initiative' 이후 증거기반 과학기술혁신정책을 위해 혁신 생태계에 대한 이해 및 분석과 함께 정밀한 데이터 축적 및 평가지표 개발 등이 요구됨
 - 데이터를 기반으로 과학기술기획, 정책수립, 평가, 예산조정 등의 정책의사결정을 효과적으로 지원할 수 있음
- 기술주권 및 과학기술 국제협력 전략을 위한 데이터 및 분석 도구 구축 필요
 - 기술주권 수준 평가, 기술발전 단계별-요소별 기술성숙도 분석, 기술의 상대적 글로벌 경쟁, 약점 및 기회 평가, 상호 호혜적인 협력 파트너 및 분야 발굴 등 다양하게 활용 가능
 - 미국의 경우, 데이터 기반으로 국가핵심기술 전략에 유용한 정보를 제공하기 위해 '핵심기술평가를 위한 국가적 네트워크'(National Network for Critical Technology Assessment)를 구성하고, 1년 400만 달러 파일럿 프로젝트를 진행중(22.09 ~ '23.09)이며 10년 뒤 연간예산 5,000만 달러까지 확대 예정

II 기술주권 관련 국제포럼 발표자료

Germany-Korea Forum on Technology Sovereignty

Cooperative Technology Sovereignty

May 25, 2023

Jeong-Dong Lee

(Professor, Seoul National University, leejd@snu.ac.kr)

in collaboration with Sungjun Choi, Hanbin Kim, Kyungwon Kim, Chihyeok Kwon, Sonja Walter



Cooperative technology sovereignty



Emphasis on technology sovereignty in the developed countries

- **The recent competition for technology supremacy between the U.S. and China is getting exacerbated, accordingly, other major countries are pursuing technology sovereignty.**
 - The recent conflict between the U.S. and China which started with a trade dispute is leading to competition for technology supremacy.
 - And other major countries, such as European countries and Japan, are continuing discussions on securing technology sovereignty in preparation for the global impact caused by competition among superpower countries.
 - The recent discussion on technology sovereignty in various countries are seen as an attempt to identify and support influential technologies that can gain superiority in various competitions, such as industry, defense, and science, or to maintain sovereignty in terms of national security.



4

What is technology sovereignty

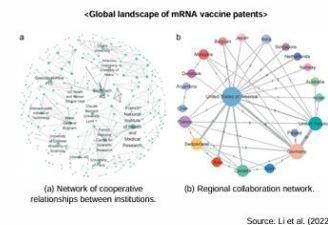
- **Edler et al. (2021) suggest the basic definition and characteristics of technology sovereignty, however, while concerned with risks that challenge the existing innovation ecosystem and limit the options for interdependent technology development.**
 - Technology sovereignty discourses emerged to deal with self-legitimizing, defensive mechanism of countries in the context of the recent tumultuous decade marked by financial and economic crises.
 - "the ability of a state or a federation of states to provide the technologies it deems critical for its welfare, competitiveness, and ability to act, and to be able to develop these or source them from other economic areas without one-sided structural dependency" (Edler et al. 2020).
 - However, they are concerned that potentially fosters an insular perspective that stands in opposition to the long-standing tradition of international collaboration, which has been instrumental in driving technological advancements and economic growth, even though the discourse surrounding technology sovereignty is grounded in legitimate concerns.

The need for emphasis on cooperative concepts

- **The existing discourses are already concerned with the potential risks that imperil the tradition of international collaboration, accordingly, the cooperative concept should be emphasized.**
 - Technology sovereignty serves as a cross-cutting rationale for innovation policy and is reinforced by other policies such as trade, investment, and competition policies when necessary (Edler et al., 2021).
 - The technology sovereignty concept is based on four central premises (Edler et al., 2021):
 - 1) it reacts to the changing world order where free trade and collaboration are no longer consistently reliable
 - 2) it is a dynamic concept focused on building competencies through innovation policy while maintaining international technological interdependencies
 - 3) it emphasizes the importance of retaining competencies and stability rather than pursuing short-term profit maximization
 - 4) it considers activating competition, trade, or investment policies as a last resort, with the intention of retracting these measures to avoid protectionism.
 - Emphasizing a cooperative concept is crucial that upholds the benefits of international openness to mitigate the risks of promoting protectionist tendencies, as well as overcome potential contestation among stakeholders.

Significances of the cooperative innovation

- **Cooperative innovation is essential to secure the technology sovereignty in long-term and global perspectives within numerous turbulent crises.**
 - Technological development requires innovation in various fields since technology does not develop independently and has interdependencies (Arthur, 2009).
 - Open Innovation, as proposed by Chesbrough (2003), aptly embodies the notion of cooperative innovation (Huizingh, 2011; Laursen & Salter, 2006; Lichtenthaler, U. & Lichtenthaler, E., 2009).
 - To break through the global pandemic of COVID-19, the mRNA vaccine technology was also the outcome of cooperative innovation (Gavinia & Kilic, 2021; Li et al., 2022).



In sum: need for cooperative technology sovereignty

- **Cooperative technology sovereignty emphasizes the importance of a cooperative approach that supports international openness in overcoming challenges, avoiding protectionist tendencies.**
 - According to the sovereignty discourse has emerged as a self-legitimizing, defensive mechanism for countries, Edler et al. (2021) proposed a definition and characteristics of technology sovereignty.
 - However, they acknowledge it may inadvertently promote insular perspectives, challenging long-standing international collaboration.
 - Overcoming challenges and avoiding protectionist tendencies requires emphasizing a cooperative approach that supports international openness, with technology sovereignty acting as a cross-cutting rationale for innovation policy.
 - Various empirical cases of cooperative innovation prove that cooperative activities are essential for securing technology sovereignty.
- **So, we propose the concept of 'cooperative technology sovereignty' based on the global innovation ecosystem to respond to these concerns.**

National critical technology to secure the sovereignty



National critical technology and technology sovereignty

- **As the area of science and technology is being combined with the area of national defense and economy, major countries are seeking to identify critical technologies to secure their sovereignty.**
 - Traditionally, economic and technological capacity has been recognized as a means to achieve national security, but technology itself is now being recognized as a critical security asset as the competition for technology supremacy exacerbates.
 - As a result, major countries such as the United States and the European Union are recognizing that science and technology are key determinants of national security and emphasizing the interconnected relationship between national security, economy, and technology.
 - Especially, there is increasing interest in critical technologies to establish defensive mechanism and overcome uncertainty with political and economic crises occurring from a national security perspective, such as the global pandemic, the Ukraine war, and the global economic downturn.
 - In summary, a nation's endeavors to pursue technology sovereignty are intrinsically linked to seeking and developing critical technologies.

Consensus from national critical technology concepts

- **By synthesizing national reports and previous research on critical technology concepts, a common agreement can be identified as follows.**
 - From a national perspective, the key values of critical technology can be categorized into national defense or security, economic interests, social benefits, and scientific and technological advancements.
 - Each country arranges key values based on their priorities. For example, the United States emphasizes national security, while Europe and Japan emphasize considerations for civil society through social impact assessments.
 - Each country simultaneously considers the current situation and future prospects for defining the criticality of technology. For instance, in South Korea, semiconductor and display technologies are critical fields at the present time, while quantum technology is regarded as a critical area in the future.

Traditional methodology and approach for selecting NCT

- **Upon reviewing the process of selecting national critical technology in major countries, Three main stages were identified.**
- **The methodologies and technical approaches used for each stage are as follows:**
 - 1) First, there is the step of forecasting future trends and changes in society. This is usually done through expert-based foresight methodologies, although some countries skip this step.
 - Literature review, Scenario analysis, Horizon scanning, Global trend meta-analysis, etc.
 - 2) The next step is to organize the list of potential/candidate technologies that need to be selected as national critical technologies, which is mainly done through demand surveys and expert consulting. There are some examples of the application of data mining techniques.
 - Creating large sets and longlists using demand surveys, expert opinions, consulting firms, or more recently, data mining techniques to identify promising technology clusters with weak signals.
 - 3) The final step is to evaluate the candidate technologies to select and prioritize NCTs. This is primarily an expert-based, qualitative assessment through workshops and surveys.
 - Panel meeting, Delphi surveys, qualitative evaluation criteria adoption, impact surveys, quantitative evaluation using multiple indicators and data, etc.

Recent efforts of data analysis to support S&T policy

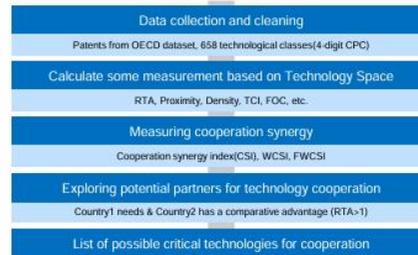
- **Recently, many countries utilize data-driven analysis to evaluate innovation potential and derive more objective results to overcome the subjectivity of the traditional bottom-up approach.**
 - Existing methodologies for selecting critical technologies can be subjective, costly, and limited in comprehensiveness, potentially overlooking the reality of what are important technologies. Accordingly, there is growing interest in data analysis to supplement expert opinion.
 - There are growing various efforts to suggest policy implications with the data-driven and top-down approach.
 - ✓ the availability of usable data is on the rise, while various data analysis techniques, such as network analysis, data mining, natural language processing (NLP), and machine learning (ML), continue to evolve and advance.
 - ✓ Since the 2010s, supported by the NSF and the EU, the field of the Science of Science has developed, and research on S&T policy based on data and scientific evidence has been actively conducted.
 - ✓ For the EU's smart specialization policy, some scholars used a data-driven analysis of a region's strengths and potential for innovation, including analysis of patents and other relevant data (Balland et al., 2018; Balland and Boschma, 2021).
- **Therefore, we suggest and apply a method for identifying critical technology in terms of cooperative technology sovereignty that require cross-border cooperation based on data.**

Methodology for listing critical technologies for cooperation

3

Methodology framework

- **We propose the following framework for identifying critical technologies for cooperative technology sovereignty.**



Background of methodology

• Related researches

- There is a large body of literature showing that regions build on existing capabilities to develop new activities (Boschma 2017; Hidalgo et al. 2018; Balland et al., 2019).
- Inter-regional linkages are considered to give regions access to external knowledge that can tackle or avoid the tendency of regions to get locked-in (Camagni 1991; Boschma and Iammarino 2009).
- This lock-in process may be avoided or overcome by linking to agents in other regions, to get access to external knowledge pools (Maskell and Malmberg 2007; Crespo et al. 2014).
- To capture the effect of inter-regional linkages on regional diversification, Based on co-inventors, indicator the number of linkages (NL) is made (Balland and Boschma, 2022).
- The other indicator is Complementary inter-regional Linkages (CL). For each potential new technology i , CL measures the extent to which region r is linked to another regions s that specialized in a technology j related to new technology i but not in region r (that is, in which regions r is not specialized).

Data and measurement

• Data

- To analyze the impact of regional capabilities and inter-regional ties on technological diversification, We Followed other papers on inter-regional diversification (Bailland and Boschma, 2022).
- In this study, We use patent data that are derived from the OECD dataset (2018)
- And we assigned patent to 658 technological classes (4-digit CPC)

• Revealed Technological Advantage (RTA)

- Based on data, We calculate the Revealed Technological Advantage (RTA).

$$RTA_{c,i} = \frac{X_{c,i} / \sum_c X_{c,i}}{\sum_i X_{c,i} / \sum_c \sum_i X_{c,i}}$$

- Where c stands for country, i stands for technology class, and X stands for number of patents.
- RTA provides an indication of the relative specialization of a given country in selected technological domains.

Data and measurement

• Proximity

- To analyze the diversification patterns of countries, We measured the distance between technology by the conditional probability of RTA
- Proximity can be measured between two technologies by the probability of a country of having comparative advantage in one technology given comparative advantage in another
- If technology i and j are close, a country having advantage in technology i is likely to have an advantage in technology j , and vice versa

$$\varphi_{i,j} = \min\{P(RTA_i \geq 1 | RTA_j \geq 1), P(RTA_j \geq 1 | RTA_i \geq 1)\}$$

- Since the conditional probability is not a symmetric measure, the minimum of the pairs of conditional probabilities is calculated as proximity

Data and measurement

• Density

- Because proximity is a measurement between two technologies, it is possible to calculate proximity of a technologies with every other technology.
- Density is calculated by dividing the sum of all proximities between a technology and other technologies with RTA by sum of all proximity linked to that particular technology.
- The concept of density shows how the country's current technologies surrounds a particular technology.

$$d_j^c = \frac{\sum_i x_{c,i} \varphi_{i,j}}{\sum_i \varphi_{i,j}} \quad x_{c,i} = \begin{cases} 1 & \text{if } RTA_{c,i} \geq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

• Frequency of Cooperation (FOC)

- We utilized patent data from WIPO to calculate and Frequency of Cooperation (FOC) using the number of grants patents in each other's countries.
- This would allow us to measure not only how much patent exchange there is between countries, but also how likely they are to cooperate.

Data and measurement

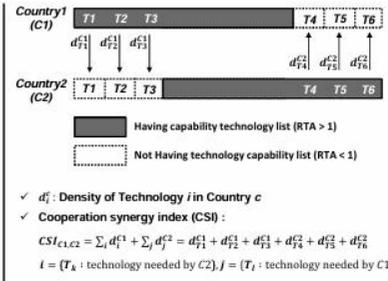
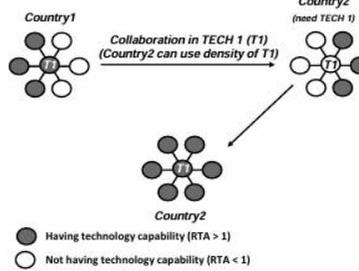
• Technological complexity index (TCI) & Economic complexity index (ECI)

- Combining information on (1) which countries produce specific technologies and (2) how common specific technologies are across countries, it is possible to measure the technological complexity of a nation's technological portfolio for a given period of time.
- Technological Complexity Index (TCI): A technology-specific measure that ranks the Diversity and Ubiquity of the knowledge required for having this technology. It is determined by an iteration between the average Diversity of countries that have the technology, and the average Ubiquity of the other technologies that these countries have.
- Economic Complexity Index (ECI): A country-specific measure that captures how complex a nation's technology basket is. It is calculated as the average TCI of those technologies in which the place shows an RTA equal or greater than one.
- TCI is high when only a few very complex countries have a comparative advantage in technology i .

$$ECI_c = \sum_i \left(\frac{M_{c,i}}{\sum_c M_{c,i}} \right) TCI_i \quad TCI_i = \sum_c \left(\frac{M_{c,i}}{\sum_c M_{c,i}} \right) ECI_c \quad M_{c,i} = \begin{cases} 1 & \text{if } RTA_i \geq 1 \text{ in country } c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Measuring cooperation synergy

Cooperation synergy index (CSI)



Measuring cooperation synergy

Cooperation synergy index (CSI)

- Simply sum of density of other countries' technologies that a country can use from cooperation.

$$CSI_{C1,C2} = \sum_i d_i^{C1} + \sum_j d_j^{C2}, \quad i = \{T_k : \text{technology needed by } C2\}, \\ j = \{T_l : \text{technology needed by } C1\}$$

Weighted Cooperation synergy index (W-CSI)

- Cooperation synergy index weighted by TCI: To reflect the complexity of the technology, we multiplied the density of the technology being collaborated on by its corresponding TCI.

$$W - CSI_{C1,C2} = \sum_i d_i^{C1} \cdot TCI_i + \sum_j d_j^{C2} \cdot TCI_j, \quad i = \{T_k : \text{technology needed by } C2\}, \\ j = \{T_l : \text{technology needed by } C1\}$$

Frequency-Weighted Cooperation synergy index (FW-CSI)

- WCSI reflecting Frequency of Cooperation (FOC): Multiply the WCSI by the FOC obtained from the volume of bilateral patent application.

$$FW - CSI_{C1,C2} = (\sum_i d_i^{C1} \cdot TCI_i + \sum_j d_j^{C2} \cdot TCI_j) \times FOC_{C1,C2}, \quad i = \{T_k : \text{technology needed by } C2\}, \\ j = \{T_l : \text{technology needed by } C1\}$$

List of possible critical technologies for cooperation

Identifying cooperative technology between country1 (C1) and country2 (C2)

- 4 criteria
 - Technology's RTA < 1 in C1
 - Lower than average density of technologies in C1
 - Technology's RTA > 1 in C2
 - Technologies with High TCI values (used for prioritizing)
- By applying these criteria, prioritized technologies for countries' cooperation can be identified.

Result of analysis for cooperation synergy



Data analysis for cooperative technology sovereignty

Analysis process

- Based on OECD stat, we had a list of 100 countries as of 2018, but to simplify the model, we limited it to the top 37 countries that have some level of patents regardless of the item.
- Based on the RTAs of countries, We identified the technologies that each country needs (RTA < 1). In addition, we identified countries with an advantage in this technology (RTA > 1) and calculated the sum of the densities that could be achieved if the two countries collaborated.
 - By considering RTA (revealed technology advantage) and density, We can determine the potential amount of density that can be acquired through cooperation with partners (Balland & Boschma, 2021).
 - Summing Density can be interpreted as the ability to utilize not only the cooperating country's technology but also related technologies in technological cooperation.
- By measuring cooperation synergy index, we explored potential partners for technology cooperation.
- Analyzing the Germany-Korea case, we identified a list of possible critical technologies for cooperation between the two countries.

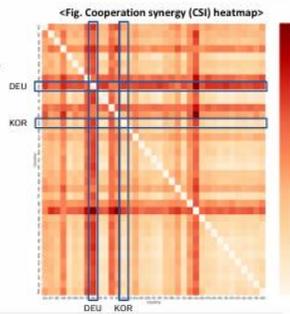
Exploring potential partners for technology cooperation

Measuring cooperation synergy by CSI

- To measure the synergy of the cooperation, We calculated the combined density that occurs when both countries cooperate together.
- Cooperation synergy index (CSI)

$$CSI_{C1,C2} = \sum_i d_i^{C1} + \sum_j d_j^{C2}, \quad i = \{T_s : \text{technology needed by } C2\}, j = \{T_s : \text{technology needed by } C1\}$$

Rank	Cooperation Partner	CSI	Rank	Cooperation Partner	CSI
1	JPN - USA	260.3877	11	DEU - HKG	191.9002
2	DEU - USA	258.6048	12	DEU - IRL	191.6913
3	FRA - USA	222.5216	13	CAN - FRA	191.3380
4	ITA - USA	213.6845	14	CHE - USA	191.3226
5	CAN - JPN	199.9924	15	DEU - ZAF	190.3114
6	DEU - ISR	199.6797	16	DEU - IND	190.1604
7	AUT - USA	199.0586	17	DEU - KOR	189.6160
8	DEU - CHN	195.9796	18	DEU - RUS	188.7863
9	DEU - AUS	194.4782	19	DEU - TWN	186.4849
10	DEU - PRT	193.1965	20	DEU - HUN	185.9363



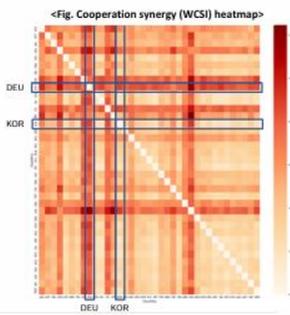
Exploring potential partners for technology cooperation

Measuring cooperation synergy by W-CSI

- To reflect the complexity of the technology, we multiplied the density of the technology being collaborated on by its corresponding TCI.
- Cooperation synergy index weighted by TCI (W-CSI)

$$WCSI_{C1,C2} = \sum_i d_i^{C1} \cdot TCI_i + \sum_j d_j^{C2} \cdot TCI_j, \quad i = \{T_s : \text{technology needed by } C2\}, j = \{T_s : \text{technology needed by } C1\}$$

Rank	Cooperation Partner	WCSI	Rank	Cooperation Partner	WCSI
1	JPN - USA	12466.59	11	DEU - ISR	9228.39
2	DEU - USA	12203.39	12	DEU - CHN	9146.61
3	FRA - USA	10885.54	13	CAN - CHE	9094.45
4	DEU - CAN	10391.78	14	KOR - USA	9072.90
5	ITA - USA	10213.86	15	CHE - USA	9028.76
6	CAN - FRA	10102.74	16	FRA - CHN	8903.30
7	CAN - JPN	10078.14	17	FRA - TWN	8858.12
8	DEU - AUS	9417.87	18	DEU - KOR	8780.86
9	AUS - JPN	9351.09	19	CAN - ITA	8765.91
10	AUT - USA	9256.88	20	DEU - IRL	8760.35



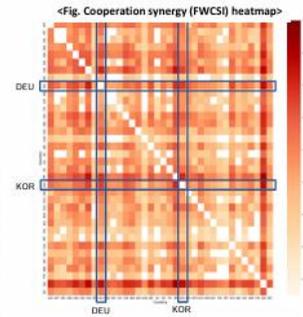
Exploring potential partners for technology cooperation

Measuring cooperation synergy by FW-CSI

- Multiply the WCSI by the FOC obtained from the volume of bilateral patent application.
- Frequency-Weighted Cooperation synergy index (FWCSI)

$$FWCSI_{C1,C2} = (\sum_i d_i^1 \cdot TCI_i + \sum_i d_i^2 \cdot TCI_i) \times FOC_{C1,C2}$$

Rank	Cooperation Partner	FWCSI	Rank	Cooperation Partner	FWCSI
1	JPN - USA	805915299	11	IND - USA	59828942
2	CHN - USA	317993627	12	AUS - USA	54803268
3	KOR - USA	251246794	13	DEU - JPN	45820777
4	DEU - USA	214584473	14	ISR - USA	40067835
5	CHN - JPN	165857725	15	HKG - USA	32918077
6	CAN - USA	105615356	16	MEX - USA	32406423
7	DEU - CHN	89645906	17	RUS - USA	31684542
8	FRA - USA	73085508	18	ITA - USA	28670292
9	KOR - JPN	62491454	19	DEU - KOR	27993388
10	GBR - USA	62408121	20	CHN - FRA	26104468



List of possible critical technologies for cooperation between DEU-KOR

Criteria for technologies needed for cooperation in Germany

- Technology's RTA < 1 in Germany
- Lower than average density of technologies in Germany
- Technology's RTA > 1 in Korea
- High TCI values

Top 10 technologies for cooperation from Korea to Germany

No.	Code	Description
1	BB2Y	Specific uses or application of nanostructures; measurement or analysis of nanostructures; manufacture or treatment of nanostructures
2	C09K	Materials for applications not otherwise provided for; applications of materials not otherwise provided for
3	G02B	Optical elements, systems or apparatus
4	G05F	Systems for regulating electric or magnetic variables
5	G06T	Image data processing or generation, in general
6	H03L	Automatic control, starting synchronization, or stabilization of generators of electronic oscillations or pulses
7	H03M	Coding, decoding or code conversion, in general
8	H04B	Transmission
9	H04M	Telephonic communication
10	H04W	Wireless communication networks

List of possible critical technologies for cooperation between DEU-KOR

Criteria for technologies needed for cooperation in South Korea

- Technology's RTA < 1 in Korea
- Lower than average density of technologies in South Korea
- Technology's RTA > 1 in Germany
- High TCI values

Top 10 technologies for cooperation from Germany to Korea

No.	Code	Description
1	A01N	Preservation of bodies of humans or animals or plants or parts thereof
2	A61L	Methods or apparatus for sterilizing materials or objects in general
3	A61M	Devices for introducing media into, or onto, the body
4	A61P	Specific therapeutic activity of chemical compounds or medicinal preparations
5	A61Q	Specific use of cosmetics or similar toilet preparations
6	C07K	Peptides
7	C12P	Fermentation or enzyme-using processes to synthesise a desired chemical compound or composition or to separate optical isomers from a racemic mixture
8	G01N	Investigating or analysing materials by determining their chemical or physical properties
9	G01S	Radio direction-finding, Radio navigation, determining distance or velocity by use of radio waves
10	G07C	Time or attendance registers; registering or indicating the working of machines.

Conclusion

- The competition for technological hegemony between the U.S. and China has intensified the interest in "critical technologies" to secure technological sovereignty of each country, but there is a risk that it may develop into a narrow perspective of individual countries.
- A new definition of critical technologies that includes the conceptual attributes of "cooperative technological sovereignty" is needed in light of the theoretical background of technological development, such as technological evolution and cooperation-based technological development cases.
 - Motivation for cross-border technology alliances is increasing, this trend is already becoming apparent.
 - It is necessary to reduce international waste in technology development and increase the pace of global technological innovation.
 - National critical technology is "a technology that is considered pivotal to the current industrial and innovation ecosystem or is expected to have a significant impact on the future ecosystem, depending on the priority of each national interest and the national position within the global production and innovation ecosystem".