

CONVERGENCE RESEARCH REVIEW

융합연구리뷰

2025

2월호 Vol. 11 February

뇌-컴퓨터 인터페이스 분야 융합기술 현황 및 과제

임창환(한양대학교 바이오메디컬공학과 교수)

융합연구 기술이전과 사업화를 위한 절차 및
제도 현황과 개선 방안

임 환(한국연구소기술이전협회장)



미래융합전략센터
Future Convergence Strategy Center

CONTENTS

03 편집자주

04 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야 융합기술 현황
및 과제

39 융합연구 기술이전과 사업화를 위한 절차
및 제도 현황과 개선 방안

편집자주

생각만으로 기계를 움직이는 시대

뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI) 기술이 빠르게 현실화되고 있다. 일론 머스크의 뉴럴링크는 사지마비 환자의 의사소통을 돕는 브레인칩을 성공적으로 이식했으며, 시각 장애 회복을 목표로 한 차세대 기술도 개발 중이다. 이처럼 BCI는 의료뿐만 아니라 게임, 방위산업, 로봇 제어 등 다양한 분야로 확장되고 있다.

그러나 시장 경쟁력을 갖추기 위해서는 단기 성과 중심의 연구를 넘어, 신경공학·AI·로보틱스가 융합된 장기적 R&D 전략이 필요하다. 글로벌 기업들은 특허·임상·규제 변화를 면밀히 분석하며 기술 선점을 위한 준비를 가속화하고 있으며, 국내 기업 역시 선도국과 경쟁하려면 기초연구부터 상용화까지 아우르는 체계적 투자가 필요하다.

본 호 기술리뷰에서는 BCI 기술의 발전 가능성을 다룬다. 뇌과학, 뇌공학, 인공지능, 로보틱스를 유기적으로 연계한 지원 체계를 구축하고, 연구 성과가 실용화로 이어지도록 정책적 노력이 뒷받침되어야 한다. 생각만으로 기계를 조작하고 의사소통이 가능한 미래 사회, 우리가 주도할 수 있을까?

융합의 파급력: 기술이 산업으로 나오기까지

융합연구는 혁신을 주도하는 핵심 수단이지만, 연구 성과가 연구실에만 머문다면 그 가치는 제한적일 수밖에 없다. 융합 성과가 산업과 연계되어 실질적인 경제적·사회적 가치를 창출하도록, 기술이전과 사업화가 필요한 이유다.

연구기관이 보유한 핵심 기술이 기업으로 이전되면, 기업은 이를 기반으로 새로운 제품과 서비스를 개발하여 시장 경쟁력을 확보할 수 있다. 한편, 기술이전만으로는 충분하지 않으며, 기업이 직면하는 기술 완성도 부족, 시장 진입 전략 부재 등의 문제를 해결할 후속 지원 역시 필요하다.

본 호 정책리뷰에서는 법·제도 개선, 공공·민간 협력 투자, 실증 테스트베드 확대, 연구자 인센티브 강화 등 융합 기술 사업화를 촉진하기 위한 핵심 방안을 제시한다. 연구 성과가 산업으로 원활히 연결될 수 있도록 제도적 개선 방향을 모색한다.

융합기술

뇌-컴퓨터 인터페이스
분야 융합기술
현황 및 과제

임창환

한양대학교 바이오메디컬공학과 교수

1 서론

1.1. 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야의 정의

뇌-컴퓨터 인터페이스(brain-computer interface: 이후 BCI)는 뇌 신호를 측정하여 사용자의 의도 또는 뇌 상태를 디코딩(decoding)하고 이를 바탕으로 외부 기기를 제어하거나 외부와의 의사소통을 가능하게 하는 기술을 통칭하며 뇌-기계 인터페이스(brain-machine interface: BMI)로도 불린다. BCI는 최근 일론 머스크의 뉴럴링크(Neuralink)로 인해 대중에게도 널리 알려지게 된 기술이다. 본 고에서는 BCI 기술 분야의 전반적인 시장 동향과 요소 기술, 당면 과제를 분석하고 향후 발전 가능성을 예측해 보고자 한다.

1.2. 뇌-컴퓨터 인터페이스 산업의 시장 동향

시장 조사 기관인 MarketsandMarkets에 따르면 BCI 시장은 2023년 현재 23.5억 달러 규모로 14.1%의 CAGR로 성장하여 2029년에는 50.6억 달러에 이를 것으로 예상된다. 아직은 시장 형성 초기 단계로서 뉴럴링크 이외에도 싱크론, 클리나텍 등의 기업에서 다양한 인체 대상 임상실험이 진행되고 있어 2030년 이후에는 시장 규모가 급격히 성장할 것으로 예상된다. BCI 분야는 중증 환자의 보조기기 제어 및 커뮤니케이션 수단, 게이밍을 포함한 엔터테인먼트, 뉴로마케팅, 교육, 군사 훈련 시뮬레이션 및 무인기 제어를 포함한 군사 방위 분야 등으로 응용 분야를 넓혀 가고 있어 지속적인 성장이 기대된다.

그림1. 2024년 기준 BCI 산업의 주요 플레이어.
(아직 상용화 이전 단계에 있는 뉴럴링크 등은 제외)



* 출처: MarketandMarkets (2024)

1.3. 원고 구성

본고는 BCI를 크게 침습형 BCI(invasive BCI)와 비침습형 BCI(noninvasive BCI)로 구분하여 각 기술의 요소 기술 및 전망을 제시하며 BCI 분야의 한계 및 과제, 해결 방안에 대해 제안하는 순서로 구성되어 있다. 침습형 BCI는 수술적인 방법을 통해 뇌 신호 측정용 전극을 두개골 내부에 삽입하는 방식을 의미하며 비침습형 BCI는 수술적인 방법을 통하지 않고 두피 표면에서 측정되는 뇌 신호를 이용하는 BCI 방식을 가리킨다.

2 침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스

2.1. 침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스 개요

테슬라의 CEO이자 미국 정부효율부(DOGE)의 수장인 일론 머스크(Elon Musk)는 2016년에 뇌공학 스타트업인 뉴럴링크(Neuralink)를 설립하였으며 2023년에 FDA로부터 임상 승인을 획득한 브레인칩 ‘텔레파시’를 2025년 1월 현재까지 3인의 사지마비 환자에게 성공적으로 이식하여 생각만으로 외부 기기를 제어하거나 의사소통을 가능하게 하는 데 성공했다. 머스크는 2030년까지 약 2만 명에게 텔레파시 칩을 삽입할 것이라고 공언했다. 최근 뉴럴링크는 사지마비 환자 적용 이후의 계획을 발표하는 자리에서 시각을 상실한 환자들에게 브레인칩을 이식하여 시력을 회복하는 기술을 개발하겠다는 청사진을 밝히기도 했다.

현재 미국에는 싱크론(Synchron), 프리시전 뉴로사이언스(Precision Neuroscience) 등의 뇌공학 기업이 브레인칩의 임상시험을 진행하고 있으며 특히 싱크론은 제프 베이조스 및 빌 게이츠가 이끄는 벤처 캐피탈이 거액을 투자한 것으로 보도되었다. 또 다른 글로벌 IT 기업인 메타(Meta)는 2017년 뇌-컴퓨터 인터페이스 기술을 개발하는 연구팀을 자체적으로 조직했으며 이후에 인수한 컨트롤랩스(Ctrl-Labs)를 통해 지속적인 연구개발을 진행하고 있는 것으로 알려지고 있다. 또한 메타는 미국 UCSF 연구팀의 BCI 연구를 지원하고 있다고 알려져 있다.

유럽에서는 프랑스 그레노블에 본사를 둔 의료기기 회사인 클리나텍(Clinatec)이 뇌신호 측정 및 뇌자극이 가능한 이식형 브레인칩 디바이스인 위매진(WImagine)을 인체 대상으로 임상시험하고 있으며, 2023년에는 스위스 로잔연방공대에서 위매진 시스템을 이식한 하지 마비 환자가 다시 걷는 영상을 공개했다. 중국은 2024년 뉴럴링크가 텔레파시 칩의 성공적인 이식을 발표한 직후 네오(NEO)라는 이름의 신경 인터페이스 시스템을 이식한 환자가 생각만으로 로봇 팔을 제어하는 영상을 공개했다.

이처럼 뇌에서 발생하는 신호를 해독하여 외부 기기를 제어하거나 외부와의 의사소통을 가능하게 하는 기술을 뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-Computer Interface: 이후 BCI)라고 한다. BCI는 1970년대 초부터 개념이 정립되어 미국 및 유럽을 중심으로 연구실 수준에서 활발한

연구가 수행돼 왔으나 산업화에는 오랜 시간이 소요될 것으로 예상됐다. 하지만 일론 머스크의 뉴럴링크가 막대한 자금력을 바탕으로 빠른 속도로 인체 대상 임상에 성공하면서 산업화가 가시화되고 있는 상황이다. BCI는 사지마비 환자의 이동성을 높이고 원활한 의사소통을 가능하게 하는 기술로서 산업적인 파급효과뿐만 아니라 장애인의 사회 복귀를 가능하게 하고 고령자의 생산성을 높일 수 있어 사회, 복지, 경제 전반에도 큰 파급효과를 유발할 것으로 기대된다.

그림2. 뇌 내에 삽입한 WImagine 장치를 이용하여 다시 걷게 된 하지마비 환자



* 출처: 시타임스 (2023)

2.2. 침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스의 구성

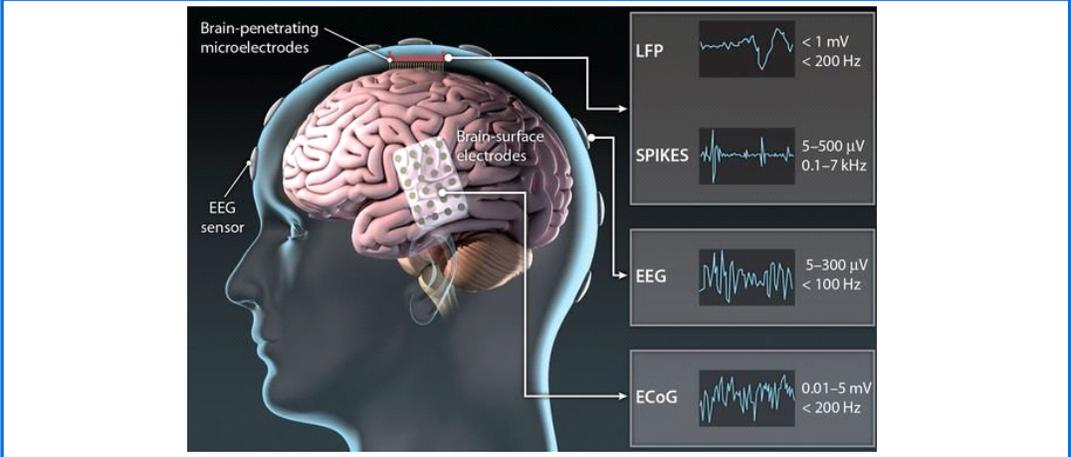
침습형 BCI는 다시 피질 내 신호(spike)와 피질 외 신호(electrocorticogram: ECoG)를 측정하는 시스템으로 구분된다. 피질 내 신호는 높은 공간적 해상도의 신호를 획득할 수 있다는 장점이 있는 반면에 신경세포 및 뇌조직의 손상이 불가피하다는 한계가 있고 피질 외 신호를 측정하는 경우에는 상대적으로 안전성이 높으나 공간적 해상도에 제한이 있다. 침습형 BCI는 이들 신호를 디코딩 알고리즘을 이용하여 분석하여 운동-감각이나 인지 관련 기능을 복원하는 것을 주요 목적으로 한다. 침습형 BCI는 과거 BMI(brain-machine interface)로 불렸으나 최근에는 BCI라는 용어로 통일되는 추세에 있다.

침습형 BCI는 다음과 같은 세부 요소 기술로 나눌 수 있다.

❖ 신경 신호 획득 기술

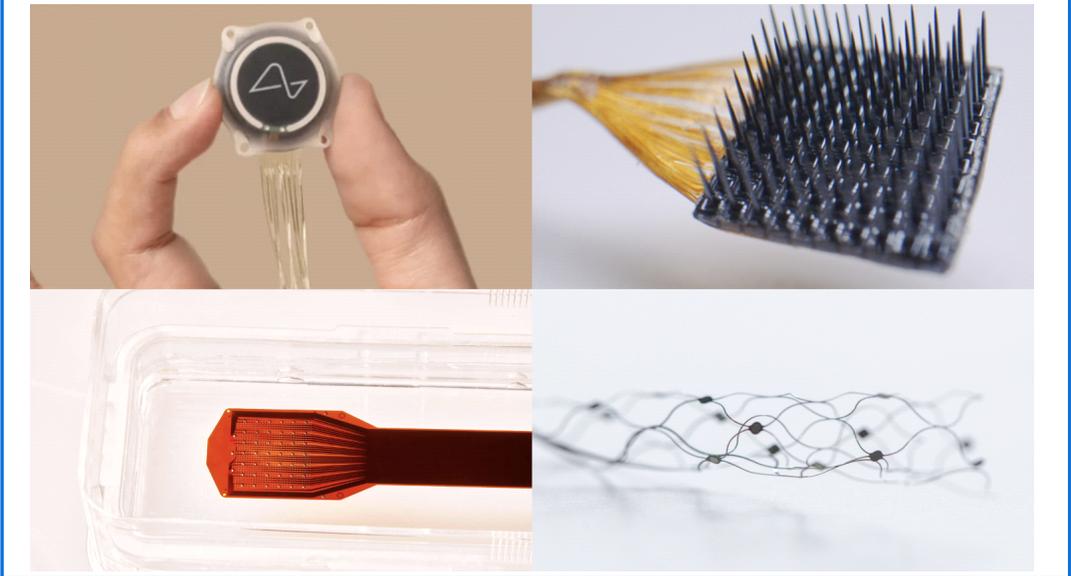
전극의 위치에 따라 피질 내 신호와 피질 외 신호로 나눌 수 있다. 피질 내에 바늘 형태의 전극을 삽입하여 국소 뉴런의 활동 전위(action potential: 이후 spike)나 국소장전위(local field potential: 이후 LFP)를 측정한다 (그림 3). 이 방식은 좁은 뇌 영역에서 높은 공간적 분해능으로 신경신호를 측정할 수 있어 정밀한 외부 기기 제어가 가능하다는 장점이 있지만 침습도가 높아 각종 부작용의 가능성이 있다. ECoG은 경막(dura mater) 위나 아래에 전극을 위치하여 해당 피질 내에 있는 다수 뉴런들의 평균 활동을 감지하는 방식으로, 피질 내에서 신경신호를 측정하는 방식에 비해서는 정밀도가 낮지만 침습도가 상대적으로 낮기 때문에 수술이 상대적으로 용이하고 이식에 따른 부작용 가능성이 비교적 적다는 장점이 있다. 그림 4는 대표적인 신경신호 획득 방식을 나타내고 있다. 그림에서 뉴럴링크와 블랙록 뉴로테크(Blackrock neurotech)는 피질 내 신호를, 싱크론과 프리시전 뉴로사이언스는 ECoG 신호를 측정하는 시스템을 개발했다. 뉴럴링크는 실 형태의 전극을 수술 로봇을 이용하여 피질 표면에 삽입하는 방식을 채택하고 있으며 블랙록 뉴로테크는 유타 어레이(Utah array)라고 불리는 바늘 형태의 미세 전극 배열을 피질에 꽂는 방식을 채택했다. 싱크론의 스텐트로드(stentrod)는 목 부위의 정맥을 통해 스텐트(stent)를 대뇌 피질까지 밀어 올리고 스텐트에 부착된 전극으로부터 뇌 신호를 읽어내는 기술을 개발했다. 프리시전 뉴로사이언스는 부드럽게 휘어지는 ECoG 전극 배열을 이용해 피질 표면을 따라 두개강내 뇌파(intracranial EEG)를 측정한다.

그림3. 다양한 뇌 신호 측정 방식 및 신호의 사례



* 출처: electricalelibrary (2019)

그림4. 대표적인 신경신호 획득 방식
 (좌상) 뉴럴링크의 신경실 (우상) 블랙록뉴로테크의 유타어레이
 (좌하) 프리시전뉴로사이언스의 ECoG 전극 (우하) 싱크론의 스텐트로드



* 출처: (좌상) npr (2024) / (우상) blackrockneurotech 홈페이지 / (좌하) wired (2023) / (우하) wikipedia

❖ 신호 전처리 기술

피질 내 전극으로부터 얻어지는 신호는 일반적으로 두 가지 주요 구성 요소로 구분할 수 있다. 첫째, 전극 주변 뉴런 집단에서 발생하는 전위 변화를 저주파수 영역에서 관찰한 LFP 신호이며, 둘째, 고주파수 영역에서 개별 또는 다수의 뉴런 발화를 포착한 spike 신호이다. LFP는 수십~수백 Hz 범위의 비교적 낮은 주파수 대역에서 발생하는 국소 전위 변동으로, 미가공 신경 신호를 300Hz의 차단 주파수로 저역통과(lowpass) 필터링함으로써 획득된다. 이때 활성화된 뉴런들 사이 집합적 시냅스 전류 흐름에 영향을 받아 신호가 비교적 느리고 장기적인 변동을 나타낸다.

spike는 고주파수(수백 Hz 이상) 영역에서 짧은 시간에 발생하는 급격한 전압 변화로, 신경 신호를 300Hz의 차단 주파수로 고역통과(highpass) 필터링한 뒤 추가적인 후처리를 통해 획득한다. spike는 보통 매우 짧은 폭(1ms 미만)의 전기 신호이기 때문에, 필터링 과정에서 잡음과 구분해 내는 것이 중요하다.

1) Spike 신호 후처리

Spike 신호는 추가 정제 과정을 통해 SUA(single-unit activity), MUA(multi-unit activity), ESA(entire spiking activity)의 세 가지 형태로 가공할 수 있다.

- ◆ SUA: 특정한 단일 뉴런이 발화하는 시점을 추출해 낸 것으로, 주로 신호 진폭이 특정 임계값(threshold)을 넘어서는 지점을 찾는 임계 교차 방법(threshold crossing)과, 여러 뉴런에서 발생하는 spike 파형을 군집화하는 spike sorting 기법을 활용하여 얻는다. 이 과정을 통해 측정된 신호가 어떤 뉴런에 의해 발화된 것인지 분류해 낼 수 있으며, 단일 뉴런의 정확한 발화 시점 정보를 확보함으로써 개별 세포 수준의 뉴런 동작을 분석할 수 있게 된다.
- ◆ MUA: spike sorting을 적용하지 않고, 단순히 전극 근처 일정 반경(예: 140~300 μ m) 내에 존재하는 다수의 뉴런들이 발화한 spike를 합산한 것이다. MUA는 단일 뉴런 단위

구분 없이, 해당 전극 반경 범위에 있는 뉴런들의 총 발화 패턴을 반영하므로, 주로 인접 뉴런 집단에서 공통적으로 나타나는 흥분 상태나 패턴을 파악하기에 유리하다.

- ◆ ESA: SUA나 MUA가 spike 발생 시점을 이진(binary) 신호로 취급하는 것과 달리, ESA는 일정 시간 구간 동안 전극 주변에서 발생한 spike 수와 크기를 종합적으로 고려하여 연속적인 형태의 신호로 변환한다. 구체적으로는 spike가 발생할 때마다 그 크기를 포함해 순간적인 에너지를 측정하고, 이를 전파 정류(full-wave rectification) 처리 후 저역 통과 필터링함으로써 얻을 수 있다. ESA를 이용하면 spike 발생 패턴에 대한 더 부드러운 시간적 추이를 관찰할 수 있어, 잡음에 민감한 이진 신호보다 안정적인 해석이 가능하다는 장점이 있다.

2) ECoG 신호 전처리

ECoG 신호는 뇌 표면에 전극 배열을 부착하여 획득하는 신경 신호로서, LFP와는 달리 뇌 피질 표면에서의 전위 변화를 반영한다. 일반적으로 ECoG 신호는 DC ~ 수백 Hz 범위의 주파수 성분을 포함하며, 대역통과(bandpass) 필터와 전원 잡음(50/60 Hz)을 제거하기 위한 노치(notch) 필터를 사용해 신호를 정제한다.

예를 들어, 저주파수(~수 Hz) 영역에서의 드리프트(drift) 제거와 고주파수(~수백 Hz) 영역에서의 잡음 제거를 동시에 수행하기 위해, 1~200Hz 정도의 대역을 통과시키는 대역통과 필터가 사용될 수 있다. 노치 필터의 경우, 국가나 실험 환경에 따라 다를 수 있지만, 50Hz 또는 60Hz의 전원 주파수를 제거하기 위해 필수적으로 적용된다.

❖ 신호 특징 추출 기술

1) spike 신호 특징 추출

spike는 이진 신호 형태로 간주되며, 가장 대표적인 특징값으로는 일정 시간 윈도우 내의 spike 발생 횟수를 합산한 발화율(firing rate)을 사용할 수 있다. 예를 들어, 30~100ms 간격으로 신호를 구간화한 뒤, 해당 구간 내에 발생한 spike 수를 카운팅하여 발화율을 계산한다. 이렇게 구한 발화율은 이후 분류기(머신러닝/딥러닝 모델 등)의 입력 특성으로 활용되어, 행동이나 운동 의도 등을 추정하는 데 쓰인다. 이뿐만 아니라, spike 사이의 간격(ISI, inter-spike interval)을 이용해 신경 활동 패턴의 시간적 구조를 파악하거나, spike 시점 분산도 등을 추가 특징으로 활용하기도 한다.

2) LFP 신호 특징 추출

LFP 신호는 주파수 대역별로 다양한 생리학적 의미를 갖는다. 주로 알파(8~12Hz), 베타(13~30Hz), 감마(30~100Hz) 대역 등으로 구분한 뒤, 각 대역의 파워 스펙트럼을 추출하거나, 웨이블릿 변환을 통해 시간에 따라 변하는 주파수 성분을 분석한다. 운동과 관련된 활동이나 감각 처리와 관련된 활동이 특정 주파수 대역에서 증가 혹은 감소하는 패턴으로 나타나므로, 이를 특징값으로 만들어 분류나 회귀 분석에 활용한다. 또한 LFP와 ECoG 신호에 공통적으로 적용되는 방법으로, 시간 영역에서 신호의 진폭을 저역통과 필터링하거나 스무딩 처리하여 LMP(Local motor potential)라는 특징을 얻을 수 있다. LMP는 단순화된 시간-진폭 곡선으로, 고주파수를 제거한 뒤 남은 저주파 신호의 추세를 포함한다. 이는 운동 준비 혹은 수행 시점에 발생하는 느린 전위의 변화를 반영할 수 있어, BCI 디코딩에 폭넓게 활용된다.

3) ECoG에서의 고주파(gamma) 분석

ECoG의 경우, 높은 감마(gamma) 영역대가 운동 및 인지 과정에서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있어 이를 강조해서 분석하기도 한다. 예를 들어, 과제 수행 전후로 감마 대역 파워가 변화하는 양상을 통해 운동 준비 상태나 인지적 부하를 추정할 수 있다. 최근에는 이러한 변화 패턴을 더욱 세밀하게 파악하기 위해 베이지안 네트워크(Bayesian networks), TV-DBN(time-varying dynamic Bayesian network)를 비롯한 확률 그래프 모델을 적용하기도 하며, 고유벡터 중심성 분석(eigenvector centrality analysis) 등을 통해 각 영역 간의 상호작용에 대한 네트워크 수준의 특징을 추출하기도 한다. 이를 통해 단순 파워 스펙트럼 이상의 복잡한 상관관계 정보를 활용할 수 있다.

❖ 인공지능 기반 디코딩 기술

뇌신호로부터 운동이나 인지 상태를 예측하는 디코딩은, 과거에는 선형 회귀나 선형 판별 분석(LDA), SVM(Support Vector Machine) 등 통계적 학습 기법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 뇌신호가 갖는 복잡하고 비정상적(nonstationary) 특성을 다룰 때 인공신경망 기반의 딥러닝 기법이 효과적임이 보고되면서, 다양한 신경망 구조가 적용되고 있다.

1) 다양한 인공신경망 구조

- SRNN(standard recurrent neural network): 기본적인 순환 구조를 통해 시계열 데이터를 처리할 수 있지만, 장기 의존성(long-term dependency) 문제가 있다.
- LSTM(long short-term memory): 셀 상태(cell state)와 게이트(gate) 구조를 통해 중요한 정보는 장기 보존, 불필요한 정보는 선별적 소실시켜, 시계열 길이가 긴 뇌신호에도 유효하다.
- GRU(gated recurrent unit): LSTM보다 간단한 게이트 구조로 비슷한 성능을 내면서 학습 파라미터 수를 줄인 방식으로, 속도와 성능의 균형이 좋다.

딥러닝 기법을 적용하면, 특징 추출 단계에서 사람의 개입이 줄어드는 것이 큰 이점이다. 과거에는 spike의 발화율, LFP의 파워 스펙트럼 등 구체적인 특징값을 직접 설계해야 했지만, 딥러닝은 여러 층(layer)의 비선형 변환을 통해 데이터로부터 자동으로 유의미한 표현을 학습할 수 있다.

2) XAI(eXplainable AI)의 등장

인공신경망의 내부 계산 과정은 일반적으로 블랙박스(black box)로 간주되어, 어떤 이유로 특정 결과를 도출했는지 해석하기 어려운 단점이 존재했다. 특히 의료, 뇌과학 분야에서는 결과 해석의 중요성이 크기 때문에, 최근에는 설명가능한 인공지능(XAI, eXplainable Artificial Intelligence)기법이 활발히 연구되고 있다.

예를 들어, 어떤 뇌 영역의 활동이 특정 의사결정이나 예측에 더 크게 기여했는지 시각화하거나, 특정 시간 구간에서의 신호 변화가 모델 출력에 어떻게 반영되는지 보여주는 기법들이 제안되고 있다.

❖ 감각 피드백 기술

BCI에서 디코딩 모델을 이용해 뇌신호로부터 추정된 운동 의도 정보는 로봇 팔, 마우스 커서 등 외부 장치를 조작하는 데 활용된다. 이때 사용자가 직접 해당 장치의 동작 결과를 확인하고 조작의 정확도를 향상시키기 위해 피드백(feedback) 제공이 필수적이다.

1) 폐루프(closed-loop) 피드백의 필요성

BCI 기술은 사용자와 장치 간의 양방향 인터랙션을 통해 성능이 향상되는 폐루프(closed-loop) 체계를 지향한다. 사용자 측면에서는 디코딩 결과에 따라 동작하는 장치를 시각적으로 모니터링하고, 올바른 목표 동작과 비교해 부족한 점을 인지함으로써 다음 시도에서 뇌신호를 더 적절히 조절하려고 노력한다. 시스템 측면에서는 점진적으로 개선된 뇌신호 패턴

에 맞춰 학습 알고리즘을 갱신하며, 이 과정을 반복함으로써 궁극적으로 정확도와 활용성 모두 높일 수 있다.

2) 촉각/체성감각 피드백

현재 가장 널리 사용되는 피드백 방식은 시각 피드백으로, 예를 들어 화면상의 커서가 사용자의 의도대로 움직이는지 여부를 시각적으로 확인하는 방식이다. 최근에는 감각 영역에 전기 자극을 전달함으로써 촉각(haptic) 정보를 재현하는 연구도 진행되고 있다. 예를 들어, 뇌 피질의 체성감각 영역(somatosensory cortex)에 삽입된 전극을 통해 전기자극을 가하면, 사용자가 마치 피부나 손가락에 물리적 자극이 있는 것처럼 느끼도록 할 수 있다. 이러한 촉각 피드백이 성공적으로 구현된다면, 의수를 착용한 사용자가 실시간으로 물체를 잡았을 때의 접촉 압력이나 질감 변화를 직접 느끼면서 제어할 수 있게 되어, 자연스럽게 정교한 움직임을 구현하는 데 큰 도움이 된다.

다만, 체성감각 영역을 직접 자극하는 것은 시각 피드백보다 기술적 난이도가 높고, 장기적인 안정성과 안전성 문제도 해결해야 한다. 그럼에도 불구하고, 진정한 양방향 BCI 구현을 위해 다양한 연구 그룹에서 풍부한 감각 정보를 전달하는 방안을 모색하고 있다.

❖ 국내 침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스 연구 및 산업 현황

국내에서는 침습형 BCI 연구가 비침습적 BCI에 비해 상대적으로 활발하지는 않으나 침습형 BCI 구현을 위한 핵심 요소기술에 대한 연구는 여러 대학 및 연구소에서 진행이 되고 있다. 침습형 BCI의 구성 요소인 전극, 체내 삽입형 저전력 회로 시스템, 체내외 통신 및 전력 공급, 디코딩 알고리즘 등은 개별 기술 측면에서 볼 때 세계적인 수준에 근접한 것으로 평가할 수 있으나 이들을 통합한 시스템의 개발이나 인체 대상 침습형 BCI 실험 등은 아직 진행되고 있지 않아 미국, 유럽 등 선도 국가와는 7년 내외의 기술 격차가 있는 것으로 판단된다.

국내 기업 중에는 지브레인(Gbrain)이 2024년에 자체 개발한 ECoG 전극에 대한 임상시험 계획(IND)을 승인받아 국내 고유 기술로 침습형 BCI를 구현할 수 있는 토대를 마련한 것으로 평가된다. 다만, 지브레인의 ECoG 전극은 뇌전증 환자를 대상으로 수술 계획을 수립하기 위한 용도로 개발되었으며 BCI 적용을 위해 개발된 것은 아니다. 2025년에는 침습형 BCI 전문 스타트업 기업인 넥스트휴먼(Next Human)이 설립되어 국내에 관련 기술을 보유한 다양한 연구실과 협업을 통해 BCI 기술 수준을 끌어올리고 있다. BCI 관련 시장의 확대와 함께 국내에도 다수의 스타트업 기업이 추가로 설립될 것으로 기대된다.

3 비침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스

3.1. 비침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스 연구 동향

비침습형 BCI는 수술 과정 없이 머리 외부에서 측정되는 다양한 뇌 신호를 활용하여 BCI 시스템을 구현하는 것으로서 주로 뇌파나 근적외선분광(Near infrared spectroscopy: NIRS)을 이용한다. 특히 국내에서는 뇌파(EEG) 및 근적외선분광(NIRS) 등 신경신호를 이용하여 개인의 다양한 뇌 상태 또는 감정 상태를 파악하는 기술인 수동형 BCI(Passive BCI: 이후 pBCI) 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근 들어 pBCI를 이용하여 교육, 엔터테인먼트, 정신건강 케어 등 다양한 응용 분야에 적용하기 위한 시도가 활발하게 이뤄지고 있다. AI 기술의 발전에 힘입어 개인의 뇌 상태 인식의 정확도와 신뢰도가 향상되고 있으며 국내외 다수의 회사에서 제품을 출시하고 있다.

비침습형 BCI는 사지마비 환자의 의사소통이나 재활보조기구의 제어, 신경재활, 뉴로피드백 등 임상적 응용 분야에서 출발하여 교육, 엔터테인먼트, 마케팅 등 대중적인 응용 분야에까지 그 적용 분야를 넓혀가고 있는데, 현재까지 BCI 분야에서 가장 대중적으로 성공한 모델은 캐나다의 기업인 인터랙슨(Interaxon)의 뮤즈(Muse)로서 명상을 도와주는 일종의 뉴로피드백 애플리케이션으로 활용되고 있다.

그림5. 캐나다 인터랙슨(Interaxon)의 뮤즈(Muse) 헤드셋



* 출처: choosemuse

3.2. 비침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스의 구성

비침습형 BCI는 어떤 종류의 뇌 상태를 인식하고 응용하는지에 따라 아래와 같이 분류가 가능하다.

- (1) 운동 의도를 읽어 외부 기기를 제어하는 BCI
- (2) 잠재의식을 읽어내어 뉴로마케팅이나 거짓말 탐지 등의 분야에 응용하는 BCI
- (3) 정신적인 심상이나 선택적인 주의집중을 읽어내어 식물인간과 유사한 상태에 있는 사람과 의사소통을 하는 BCI
- (4) 감정을 읽어서 게임이나 엔터테인먼트, 교육 등 대중적인 응용 분야에 적용하는 BCI

BCI의 또 다른 분류 방법으로는 사용자에게 특정한 뇌 활성화 패턴을 생성하기 위한 시점을 알려주는지의 여부에 따라 동기적 BCI와 비동기적 BCI로 분류하기도 한다.

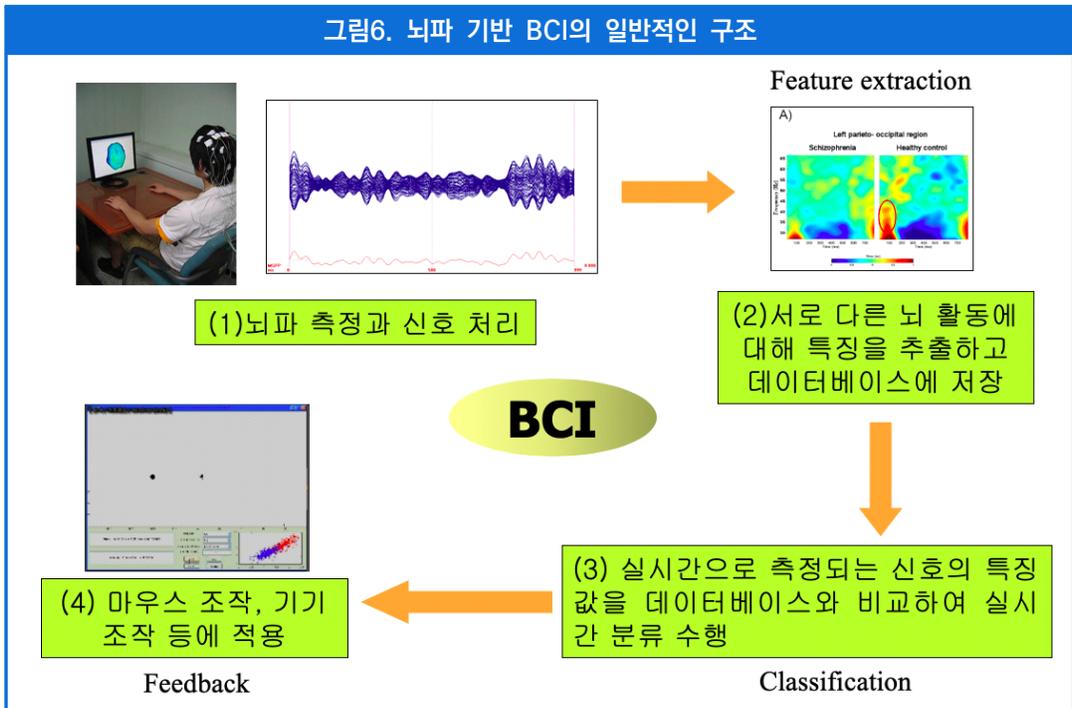
- (1) 동기적 BCI (synchronous BCI) - 시스템이 분류하는 시점을 인지하고 있는 상황에서 분류를 수행하는 BCI
- (2) 비동기적 BCI (asynchronous BCI) - 시스템이 특정 뇌 활성화 패턴의 시작 시점까지 검출하고 분류를 수행하는 이상적인 방식의 BCI

비동기적 BCI는 아직 정확도가 낮아 연구 수준에 머물러 있으며 대부분의 BCI 시스템은 동기적 BCI로 구동되고 있다.

최근에는 어떤 패러다임을 사용하는가에 따라 BCI를 다음의 세 가지 카테고리로 분류하기도 한다(Zander & Kothe, 2011).

- (1) 능동형 BCI (active BCI) - 운동심상(motor imagery)과 같이 사용자가 어떤 외부자극도 없는 상황에서 특정한 뇌 활성 패턴을 능동적으로 생성하고 이를 뇌파 등의 신경신호를 이용하여 검출함으로써 명령어를 생성하는 BCI 방식이다. 내재적 BCI (Endogenous BCI)라고도 하며 대표적으로는 운동심상을 이용하는 BCI와 운동심상이 아닌 다른 정신적 심상 과제를 수행(예를 들어 마음속으로 노래 부르거나 3차원 도형 회전을 상상하기 등)하는 비운동심상 기반 BCI가 있다.
- (2) 반응형 BCI (reactive BCI) - 외부에서 주어지는 감각 자극에 대해 선택적으로 주의집중을 함으로써 고유한 패턴의 신경신호를 생성하고 이를 검출함으로써 명령어를 생성하는 BCI 방식으로 외재적 BCI (Exogenous BCI)라고도 한다. 대표적으로는 정상상태 시각유발전위(SSVEP) 기반의 BCI, 청각정상상태반응(ASSR) 기반의 BCI, 시각 P300 기반 BCI, 청각 P300 기반 BCI, 정상상태 체성감각유발전위(SSSEP) 기반 BCI 등이 있다.
- (3) 수동형 BCI (passive BCI) - 비교적 최근에 만들어진 용어로서 BCI의 결과로 직접적인 명령어를 생성하지는 않으나 개인의 뇌 상태(예를 들어 집중, 심신안정도, 감정, 이해도 등)를 추정하는 다음, 뇌 상태를 반영하는 적절한 피드백을 부여하는 BCI 방식이다. 정신건강의학과, 재활의학과 등 임상에서 사용되는 뉴로피드백(Neurofeedback)도 일종의 수동형 BCI로 볼 수 있으며, 감정을 읽는 수동형 BCI는 특별히 감정 BCI (Affective BCI)로 부르기도 한다.

대부분의 비침습적 BCI의 구동원리는 기본적으로 지문인식 과정과 매우 유사하다. 그림 6은 BCI 시스템, 특히 뇌파 기반 BCI 시스템의 일반적인 구조를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 실시간으로 측정되는 뇌파 신호에 대해 기본적인 신호처리 과정을 거친 다음, 서로 다른 뇌 활동에 대해 뇌파 신호의 특징점(feature)을 추출하게 되며 훈련(training) 과정에서 구축된 데이터베이스에 저장된 특징점과 실시간으로 측정된 신호의 특징점을 비교함으로써 분류를 수행한다. 사용자의 뇌 활동이나 의도가 분류되면 그 정보를 기반으로 명령어를 생성하며 이를 이용하여 컴퓨터의 마우스 커서를 조작하거나 휠체어, 로봇팔 등과 같은 외부 기기를 제어할 수 있다.



* 출처: 임창환 (2010)

3.3. 능동형 및 반응형 BCI

능동형 및 반응형 BCI의 구현을 위해 주로 사용되는 패러다임에는 뮤리듬 기반 BCI, P300 기반 BCI, SSVEP 기반 BCI, 청각자극 기반 BCI, 비운동심상 기반 BCI 등이 있다.

○ 뮤리듬 기반 BCI

신체의 일부분을 실제로 움직이거나 움직이는 상상을 할 때, 감각운동피질에서 뮤리듬(mu rhythm: 8-12Hz)이나 베타리듬(beta rhythm: 특히 18-22Hz)에서 신호 파워가 증가하거나 감소하는 현상이 나타나는데 이러한 변화를 검출하여 운동 의도를 파악하는 BCI 방식으로 운동심상 기반 BCI로도 불린다. 뮤리듬 기반 BCI는 대표적인 능동형 BCI로서 사용자가 원하는 시점에 특정한 뇌 활성 패턴을 생성할 수 있으므로 반응시간이 짧고 외부 자극이 필요하지 않다는 장점이 있지만 분류 정확도가 상대적으로 낮아 오작동 시 치명적인 결과를 초래할 수 있는 이송 장치의 제어에는 활용이 어렵다. 최근에는 외부 기기의 직접적인 제어를 위한 응용보다는 뇌졸중 환자의 신경재활 시 운동 의도를 파악하여 재활 로봇을 능동적으로 구동함으로써 재활 효과를 극대화하기 위한 목적으로도 연구되고 있다 (Cervera 외, 2018).

○ P300 기반 BCI

P300은 300ms에서 발생하는 양(positive)의 전위를 의미하며 가장 널리 사용되는 사건관련 전위(event-related potential: ERP) 중 하나이다. P300은 빈번히 발생하는 반복 자극 중 피험자가 특정 자극에 집중하고 있고 그 특정 자극이 나타날 때, 자극이 발생한 시점으로부터 300 ms 부근의 시간대에 두정엽 부근에서 측정되는 양의 값을 가진 전위를 의미한다. P300은 주로 정신적 타자기(mental typewriter)를 구현하기 위한 목적으로 연구되어 왔으나 최근에는 휠체어나 가전기기 등을 제어하는 목적으로도 개발되고 있다. P300 기반의 BCI 시스템은 뮤리듬 기반 BCI에 비해 정확도나 신뢰도가 우수하며 긴 훈련시간이 필요하지 않다는 장점이 있으나 기본적으로는 시각자극을 필요로 하는 반응형 BCI이기 때문에 사용자가 임의의 패턴 조합을 생성할 수 없으며 수행 속도가 상대적으로 느린 단점이 있다.

○ SSVEP 기반 BCI

SSVEP는 정상상태시각유발전위(steady-state visual evoked potential)의 약어로서 특정한 주파수로 점멸하거나 위상이 변하는 시각자극을 지속적으로 바라볼 때, 시각피질 부근 뇌파에서 자극 주파수에 해당하는 성분이 증가하는 현상을 가리킨다. 사용자에게 서로 다른 주파수

로 점멸하는 여러 개의 시각자극을 제시한 다음에 사용자가 특정한 자극에 선택적으로 집중할 때 후두엽에서 측정된 뇌파를 주파수 영역에서 분석하면 어떤 주파수에서 변화가 발생했는지를 알아낼 수 있고 이를 통해 사용자가 집중하는 자극을 특정할 수 있다. 최근에는 주파수 영역뿐만 아니라 시간영역에서 신호를 분석하는 다양한 알고리즘이 제안되어 속도가 빠르면서도 정확도가 높은 BCI의 구현이 가능해졌다.

○ 청각자극 기반 BCI

시각자극을 이용하는 BCI는 시각기능이 온전한 환자에게만 적용이 가능하고 심각한 전신 신경 마비 환자에게는 적용이 불가능하다는 한계가 있다. 청각자극 기반 BCI를 구현하기 위해서 P300이나 청각 정상상태 반응(auditory steady-state response: ASSR)이 주로 활용된다 (Kim 외, 2012).

○ 비운동심상 기반 BCI

비운동심상 기반 BCI는 운동 심상 이외의 다양한 정신적 심상(mental imagery)을 수행하는 동안 발생하는 뇌파 신호를 디코딩하여 사용자의 의도를 파악하는 BCI 패러다임이다. 널리 활용되는 정신적인 심상에는 머릿속으로 노래 부르기, 공간도형 회전하기, 암산하기, 작문하기 등이 있다. 2019년에는 한양대학교 연구팀이 운동심상과 비운동심상 과제를 혼합하여 외부와의 의사소통이 단절된 완전감금증후군(completely locked-in syndrome) 상태의 환자와 실시간으로 예-아니오 의사소통을 하는 데 성공했다(Han 외, 2019).

3.4. 수동형 BCI

pBCI는 뇌파나 근적외선분광 등을 이용하여 사용자의 다양한 뇌 상태(집중, 인지 부하, 스트레스, 감정 등)를 읽어내어 다양한 응용 분야에 적용하는 것을 목표로 한다. 가장 대표적이고 보편화된 pBCI는 뉴로피드백으로서 ‘뇌 활동을 실시간으로 보여주는 일종의 바이오피드백(biofeedback)’이다. 뉴로피드백은 사용자에게 뇌기능을 스스로 조절하는 방법을 훈련하기 위한 목적으로 이용되며 측정된 뇌 상태를 바탕으로 영상이나 소리 형태의 피드백을 제공한다. 최근에는 뉴로피드백을 게임과 연동하는 경우도 흔하다.

pBCI의 유력한 애플리케이션은 건강수면 감시장치, 명상 보조장치, 인지재활 보조장치, 뉴로 시네마틱스, 스마트폰 비서, 뉴로마케팅, 뉴로엔터테인먼트, 뉴로에듀케이션 등이 있으며 이미 상용화에 성공한 사례도 다수 있다. 예를 들어, 게임 플레이어의 뇌 상태를 반영하여 게임 캐릭터의 능력치나 기술을 바꾸어 주는 방식은 10여 년 전부터 시도되고 있다. 2013년 van de Laar 등은 유명 컴퓨터 게임인 World of Warcraft에 pBCI 기술을 접목하여 두정엽의 알파밴드 파워의 변화에 따라 게임 속 아바타의 형태나 기능을 바꾸는 기술을 시연했다 (van de Laar 외, 2013). 2018년 독립영화 제작자인 리처드 램천(Richard Ramchurn) 감독은 ‘더 모멘트(The Moment)’라는 제목의 영화를 발표했는데, 이 영화는 이마에서 측정된 단일 채널 뇌파로부터 실시간으로 사용자의 집중도를 추정해 영화의 배경음악이나 스토리에 변화를 줌으로써 개인마다 다른 영화를 경험하도록 했다. 램천은 27분 분량의 영화 제작을 위해 75분 분량의 영상을 촬영하였으며 약 101조 개의 변형이 가능하도록 했다. 램천의 시도와 유사한 접근법을 교육 분야에도 적용할 수 있는데, 기존에 일방향적인 동영상 재생 방식이었던 이-러닝(e-learning)에 pBCI 기술을 도입하면 실시간으로 학습자의 집중도, 지루함, 이해도 등을 추정하여 적응적으로 학습 콘텐츠를 제공하는 ‘어댑티브 러닝(adaptive learning)’이 가능하다. 한양대학교 연구팀은 2023년에 온라인 학습 중 집중도를 실시간으로 파악하여 학습 콘텐츠를 적응적으로 바꾸어주는 기술을 개발하였다 (Kim 등, 2023). 이 연구에서 pBCI 기술이 접목된 어댑티브 러닝 방식을 사용한 경우 그렇지 않은 경우보다 30% 이상의 성적 향상이 보고되었다.

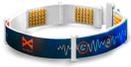
3.5. 비침습형 BCI를 위한 웨어러블 디바이스

비침습형 BCI의 실용화를 위해서는 착용이 편리하고 심미성이 높은 웨어러블 신경신호 측정 디바이스의 개발이 필수적이다. 뇌파는 휴대성이 뛰어나고 비침습적일 뿐만 아니라 시간분해능이 매우 우수하다는 장점을 가지고 있지만 전도성 젤이 없는 경우 머리카락이 있는 두피에서는 양질의 뇌파 신호를 측정하기 어렵다는 한계가 있다. 일반적으로 뇌파를 측정할 경우 전도성을 지닌 습식(wet) 전극을 사용하며, 이는 전극과 표피 사이의 접촉 임피던스를 낮추어 뇌파 획득이 용이하도록 한다. 그러나 습식 전극은 사용 이후 표피에 잔여물이 남아 불편하고, 재사용이 어렵다는 단점이 있다. 반면 건식(dry) 전극은 잔여물이 남지 않아 착용성은 훨씬 우

수하나, 신호대잡음비 등의 성능이 부족하여 외부 환경변화에 매우 취약하며, 사용 및 측정 위치에 따라 심전도나 안전도, 근전도 등의 기타 전기적 신호에 취약하다는 단점이 있다. 이러한 한계로 인해 상용 웨어러블 뇌파 측정 디바이스는 대부분 머리카락이 없는 이마에서 전전두엽의 뇌파 신호를 측정하기 위하여 헤드밴드 형태로 개발된 경우가 많다. 이마 부위에서 측정된 뇌파로부터는 집중도, 감정, 심신안정도 등의 정보를 획득할 수 있다. 아래의 표는 국내외에서 개발된 헤드밴드형 웨어러블 뇌파 측정기기의 사례를 보여주고 있다.

표1. 헤드밴드형 웨어러블 뇌파 측정 기기의 사례

(제품 사진은 각 업체의 홈페이지에서 캡처)

제품명	제조사 (국가)	전국 개수	제품 사진
Muse	Interaxon (캐나다)	4	
FocusBand	T 2 Green Pty (호주)	3	
Dreem	Dreem (프랑스)	3	
BrainBit	BrainBit (미국)	4	
MyndBand	MyndPlay (영국)	3	
Neural Impulse Actuator	OCZ Technology (미국)	3	
BrainLink Pro	Macrotellect (중국)	2	
SmartCap	SmartCap Technologies (호주)	5	

Neuroharmony	Panaxtos (대한민국)	2	
NeuroNicle E2	Laxtha (대한민국)	2	
Flowtime	FLOWTIME (중국)	2	
FocusCalm	FocusCalm (미국)	3	
OMNIFIT Brain	OMNIFIT (대한민국)	2	

최근에는 뇌파 외에도 근적외선분광 신호를 측정하는 웨어러블 디바이스가 출시되고 있으며 뇌파의 경우와 마찬가지로 착용 편의성을 높이기 위해 헤드밴드 형태로 개발된 경우가 대부분이다. 근적외선분광 장비는 부식되지 않는 광전극(optode)을 사용하기 때문에 전도성 젤을 이용하여 피부에 부착시킬 필요가 없으며 높은 안정성을 가진다는 특징이 있다. 또한 웨어러블 뇌파 측정 기기와 마찬가지로 장비의 크기가 크지 않아 높은 휴대성과 이동성을 가진다. 그러나, fNIRS 방식의 단점은 수백 밀리 ~ 수 초 수준의 낮은 시간 해상도, 2-3cm 수준의 낮은 공간 해상도, 적외선의 낮은 투과도로 인한 측정 깊이 한계 등이 있다.



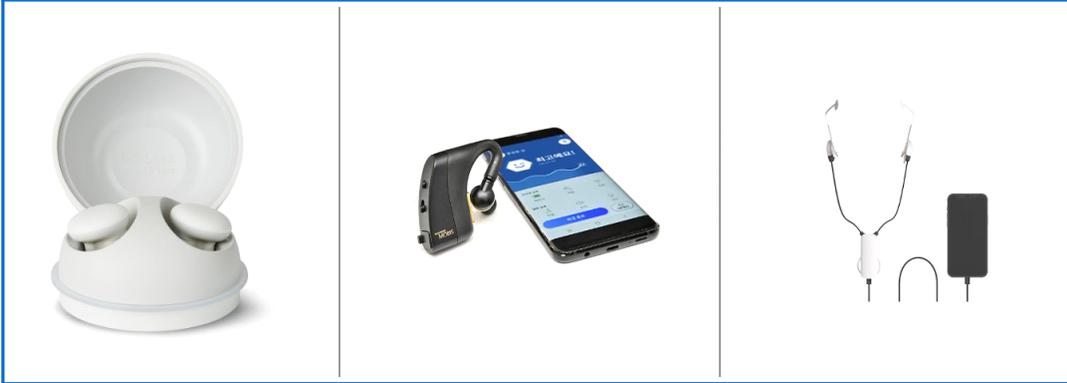
* 출처: (좌) neu-brains / (중) biolinkmedical / (우) tracksys

3.6. 국내 비침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스 연구 및 산업 현황

아직 대부분의 침습형 BCI는 상용화 전단계에 머무르고 있으나 수술을 필요로 하지 않는 비침습형 BCI 기술은 이미 상용화가 진행되고 있다. 비침습형 BCI 시장은 의료(뇌질환 진단·치료, 재활), 군사·보안, 게임·엔터테인먼트 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높아 지속적으로 성장할 것으로 예상되며 신경공학, AI, 웨어러블 기술의 발전과 함께, 고령화, 의료 수요 증가 등이 맞물려 향후에도 많은 투자가 이뤄질 것으로 기대된다.

국내에서는 주로 pBCI 분야에 대한 연구가 활발하며 특히 대기업이 큰 관심을 보이고 있다. (주)현대모비스는 2022년에 귀 주변에서 측정된 뇌파 신호를 이용하여 운전자의 주의집중 저하를 인식하고 적절한 경고음을 발생시키는 이어셋형 뇌파 측정 시스템, 엠브레인(m.brain)을 발표했다. 엠브레인은 경기도 공공버스에 시범 도입되었으며 운전자의 부주의 발생 빈도가 25.3% 저감된 것으로 보고됐다. 그런가 하면 (주)LG전자는 2023년에 이어버드 형태의 귀-뇌파(ear-EEG) 측정 기기인 ‘브리즈(Brid.zzz)’를 출시했다. 브리즈에는 수면 중 사용자의 뇌파 신호를 분석하고 적절한 소리 자극을 통해 수면의 질을 향상시키는 기능이 탑재됐다. (주)SK바이오팜은 이어폰 형태의 뇌파 측정 디바이스인 제로와이어드(Zero Wired)를 개발해 뇌전증 환자의 발작을 예측하고 사전에 적절한 조치를 취할 수 있게 하는 기능을 탑재했다. 이 디바이스는 2023년 CES에서 혁신상을 수상하기도 했다. (주)삼성전자도 2024년 CES에서 ‘아이디어스(ID.EARS)’라는 이름의 이어버드형 뇌파 측정 시스템을 발표했다. 이들 웨어러블 뇌신호 측정 디바이스에 새로운 기능과 앱이 탑재되면서 시장 규모는 지속적으로 확대될 것으로 예상된다.

그림 8. 국내 기업들의 BCI 기반 웨어러블 디바이스
 (좌) LG전자의 브리즈 (중) 현대모비스의 엠브레인 (우) SK바이오팜의 제로와이어드



* 출처: (좌) LG전자 / (중) 나무위키 / (우) 조선비즈 (2022)

4 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야의 과제

4.1. 침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야의 과제

침습형 BCI의 가장 큰 이슈는 안전성과 관련된 리스크에 있다. 뇌에 직접 전극을 삽입하기 때문에 수술 과정에서의 감염, 출혈, 조직 손상 등의 위험성이 존재한다. 또한 장기간 사용 시 뇌 조직과 이식된 전극 사이에서 염증 반응이나 섬유화가 진행될 수 있으며, 이로 인해 신호 품질이 점차 저하되어 실용성을 떨어뜨릴 우려가 있다. 더 나아가 전극이 삽입된 상태로 머리를 외부 충격으로부터 보호해야 하는 어려움도 존재해, 의료용 임플란트로서의 안전성 확보가 가장 중요한 과제이다. 이 문제는 전통적인 바늘 형태 전극을 사용할 경우 주로 발생하며 이 문제를 해결하기 위해서 뉴럴링크에서는 실 형태의 유연한 전극을 제안했다. 하지만 뉴럴링크의 신경실(neural thread)은 첫 환자에게 적용했을 때, 일부 실이 피질에서 빠지는 현상이 발생해 이후 환자에게는 신경실을 보다 깊게 삽입하기도 했다.

유지 및 관리 문제도 제기되고 있는데 현재 침습형 BCI를 구현하기 위해 사용되는 전극은 금속 소재 혹은 탄소나노튜브 등의 신소재가 쓰이지만, 체내 환경에서 오랜 기간 안정적으로 기능하기 위해서는 더 높은 내구성과 생체 적합성이 필요하다. 또한 신호 전달 효율을 높이려

면 신경세포와 전극 간에 이상적인 접촉 상태가 유지되어야 하는데, 뇌 조직은 생체 신호에 의해 구조가 변화하고 성장하기 때문에 장기적으로 동일한 신호 품질을 확보하기가 쉽지 않다. 아울러 전극에서 획득한 대규모 신경 신호를 실시간으로 처리할 수 있는 고성능 알고리즘과 저전력 칩 기술도 아직 충분히 성숙되지 않은 상황이다.

마지막으로 윤리적, 사회적 측면에서의 고려 사항도 무시할 수 없다. 침습형 BCI는 환자나 일부 연구 대상자를 제외하고는 수술에 대한 부담이 크기 때문에 의료용 외에 일반적 사용으로 확대하기는 쉽지 않다. 또한 개인정보 중에서도 극도로 민감한 뇌 활동 데이터가 실시간으로 수집될 수 있는데, 이는 데이터 보안과 프라이버시 보호 측면에서 새로운 난제를 야기한다. 기술이 발전함에 따라 이러한 문제를 어떻게 규제하고 감시할 것인가에 대한 사회적 합의가 요구된다.

종합하면, 침습형 BCI 기술은 신경과학과 공학, 임상의학의 협력과 함께 윤리적, 사회적 합의가 이뤄져야만 성공할 수 있는 분야이다. 안전성과 내구성, 장기적 안정성, 대규모 데이터 처리 기술, 윤리-사회적 수용성 등 복합적인 문제를 해결해야만 더 많은 대상에게 도움이 될 수 있다.

4.2. 비침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야의 과제

비침습형 BCI의 경우에도 다양한 이슈가 있다. 특히 실험실에서 개발한 비침습형 BCI 기술을 실제 응용 분야에 적용할 때 다양한 문제가 발생하는데, 실험실 환경에서 고가의 뇌 신호 측정 시스템을 이용하여 개발한 BCI가 저가의 웨어러블 뇌 신호 측정 시스템에 적용할 경우에는 증가된 잡음 수준과 사용자의 오용 등으로 인해 충분한 성능을 내지 못하는 경우가 많다. 실제로 뇌 상태 인식을 위해 측정되는 생체신호 및 신경신호는 측정 지점 주변의 전자기 등에서 발생하는 외부 잡음에 의해서도 크게 영향을 받는다.

또한 뇌파나 생체신호는 개인별로 양상이 크게 다르기 때문에 개인 맞춤형 시스템 구축이 필요하며 개인 내에서도 측정 시 사용자의 상태나 주변 환경의 영향을 받기 때문에 일반적으로 적용이 가능한 디코딩 알고리즘의 개발이 매우 어렵다. 착용 편의성이 높은 뇌 신호 측정 시스템의 개발도 중요한 이슈 중 하나다. 귀 주변에서 뇌파를 측정할 수 있는 귀-뇌파(ear

EEG)의 경우에는 착용 편의성이 높으나 신호의 신뢰도가 낮고 반대로 머리카락이 있는 부위에서 신호를 측정하는 고품질의 측정 시스템의 경우 착용이 어렵거나 가격이 비싸다. 또한 일반적으로 웨어러블 시스템을 구현하기 위하여 사용되는 건식 방식의 전극은 움직임에 의한 동 잡음의 영향을 크게 받으며 두상에 따라 부착이 잘 되지 않는 전극이 있을 수 있다. 건식 웨어러블 시스템에서 전극이 피부에 잘 닿게 하기 위하여 사용하는 스파이크 전극은 사용자의 고통과 불편함을 유발할 수 있다. 이뿐만 아니라, 사용자가 웨어러블 뇌파 측정 시스템을 사용할 때마다 측정 전극의 위치가 변할 수 있으며 접촉 부위의 땀 발생이나 온-습도의 영향을 받기 때문에 사용할 때마다 캘리브레이션(calibration)을 실시해야 할 수 있어 실용성과 사용 편의성이 떨어진다는 문제점도 있다.

그런가 하면 데이터의 획득 과정이 어렵다는 문제점도 있다. 디코딩 알고리즘 또는 딥러닝 모델을 개발하기 위해서는 인간 피험자를 대상으로 한 데이터 획득이 선행돼야 하는데 이 과정은 많은 시간이 소요되고 잘 훈련된 측정 기사에 의해 실험이 이뤄져야 하는 경우가 많기 때문에 충분한 양의 양질의 데이터 수집이 어렵다. 또한, 뇌파/생체신호 측정을 위한 기기 간의 표준이 설정되어 있지 않아 데이터의 교환이 어려우며 측정기기별로 필터링 방법 및 증폭 방법이 달라 다기관으로부터 빅데이터 수집이 어렵다는 점도 문제이다. 최근 딥러닝 분야에서는 부족한 데이터를 보완하기 위하여 데이터 증강(data augmentation) 기술이 활용되고 있으나 뇌파/생체신호는 변동성이 크고 개인차도 크기 때문에 효과적으로 데이터 증강을 하기 어렵다.

상용화에 가장 가깝다고 평가되고 있는 pBCI의 경우에도 다양한 문제점이 있다. 우선, 뇌 상태 인식 결과에 대한 정답이 존재하지 않으며 개인 사용자의 주관적인 응답에 의존할 수밖에 없어 측정 결과에 대한 신뢰도 검증이 어렵다는 문제가 있다. pBCI의 대중화를 위해서는 크게 다음의 세 가지 이슈를 선결해야 한다: (1) 머리카락 위에서의 측정 가능성 및 착용 편의성, (2) 큰 개인차, (3) 킬러 애플리케이션의 부재

(1) 머리카락 위에서의 측정 가능성 및 착용 편의성

2012년 8월, 10달러 대의 가격에 8채널 뇌파 신호의 증폭, 필터링, AD 변환까지 가능케 하는 뇌파측정 전용 SoC 소자가 미국 TI사에서 출시(제품명: ADS1299)되어 가벼우면서도 고성능의 헤드밴드 타입 뇌파 측정 시스템이 다수 출시되고 있다 (Casson, 2019). 헤드밴드 형

태의 뇌파 측정 기기는 머리카락이 없는 이마 부위에서 뇌파를 측정하므로 착용이 간편하고 심미적인 측면에서 장점을 가지나 이마 부위에서 측정된 뇌파 데이터로부터 얻을 수 있는 뇌 상태 정보는 집중도, 심신안정도, 감정 상태 정도로 제한돼 있을 뿐만 아니라 정확도도 낮다. 실제로 이마 이외의 전극을 사용할 시에 얻을 수 있는 뇌 상태 정보의 사례는 많은데, 예를 들어 후두엽과 측두엽 전극을 이용하면 시각 자극에 대한 선호도를 측정할 수 있고, 집중도의 경우에도 이마부위(Fp1, Fp2)보다 조금 더 위쪽의 전극(F3, F4)을 사용할 때 더 높은 정확도를 기대할 수 있다. 이뿐만 아니라, 이마 부위에서 측정된 뇌파에는 안구의 움직임이나 눈깜빡임에 의해 발생하는 안구전도, 안면부 근육의 움직임에 의해 발생하는 근전도 등이 혼입되기 쉬워 뇌파로부터 정확한 뇌 상태 추정기가 어려울 수 있다. 따라서 헤드밴드 형태의 뇌파 측정 기기보다 헤드셋(혹은 모자) 형태의 뇌파 측정기가 정확도나 활용도 측면에서 보다 바람직하다. 하지만 머리카락이 부도체이기 때문에 뇌파 측정을 위한 전극을 두피에 접촉하기가 어렵다는 문제가 있다. 일반적으로 실험실 내에서는 전도성을 가진 액상 젤(gel)을 사용하여 전극과 두피를 전기적으로 연결하나 대중적인 애플리케이션에서는 전도성 젤을 이용할 경우 본인이 스스로 착용하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라 준비 시간이 오래 소요되고 사용 후 머리를 감아야 하는 불편함이 있기 때문에 선호되지 않는다. 보통은 다수의 돌기를 가진 전극을 이용하여 전극이 머리카락 사이를 비집고 두피와 접촉하게 하는데 이런 건식 전극은 사용 시 두피에 불편감을 유발할 수 있다. 최근에는 이 문제를 해결하기 위해 각 돌기마다 소형 스프링을 부착하거나 브러시 형태의 전극을 사용하기도 한다. 하지만 아직까지는 헤드셋 형태의 뇌파 측정기기는 헤드밴드 형태의 뇌파 측정기기에 비해 가격이 상대적으로 비싸고 착용이 불편하며 신호의 질이 떨어지는 경우가 많아 추후 더 많은 연구개발이 필요하다.

(2) 큰 개인차

pBCI의 대중화를 가로막는 가장 큰 걸림돌은 개인마다 측정된 뇌파 신호가 매우 큰 편차를 보인다는 것이다. 예를 들어 뇌파 지표 중에서 가장 널리 활용되는 지표인 전두엽 알파 비대칭성(frontal alpha asymmetry)의 경우만 하더라도 사용자가 부정적인 감정을 가질 때는 좌반구 알파 활동이 증가하는 것으로 알려져 있지만 실제 실험 대상의 약 80%에서만 전형적인 양상이 관찰된다. 이러한 큰 개인 간 편차는 뇌파 측정을 통해 개인별 뇌 상태를 추론하는 pBCI의 신뢰도를 저하시키는 중요한 요인이다. 개인차를 극복하는 가장 이상적인 방법은 개인차가 최소화된 새로운 뇌파 지표를 개발하는 것으로서 이런 접근법을 '보편적 분류법

(universal classification)’이라고 한다. 지난 수 십 년간 많은 연구자들이 이 접근법을 연구해 오고 있으나 아직까지 이 목적에 부합하는 뇌파 지표는 발표되지 않고 있다.

보편적 분류법보다 현실적인 방법은 개인별로 맞춤형 뇌파 지표를 찾는 방식으로 착용한 뇌파 측정기기가 자동으로 개인에게 가장 적합한 뇌파 지표를 찾는 방법이다. 이러한 접근법을 ‘세션을 통한 학습(learning over sessions)’이라고 한다. 개개인에게 적합한 맞춤형 뇌파 지표를 탐색하기 위해서는 개인별 학습 과정이 필수적으로 동반돼야 하는데, 뇌파 측정기기를 사용하기 위해 장시간의 학습(훈련)을 거치는 것은 pBCI 사용자에게 상당한 불편을 야기할 수 있다. 따라서 학습 과정에 소요되는 시간을 최소화하기 위한 연구가 필요하다.

(3) 킬러 애플리케이션의 부재

사용자들이 불편함을 감수하면서도 웨어러블 뇌 신호 측정 시스템을 착용하게 하기 위해서는 소위 ‘킬러 애플리케이션’의 개발이 필요하다. BCI 연구자들은 현재 pBCI의 응용 분야로 거론되고 있는 교육, 엔터테인먼트, 수면 모니터링, 인지재활 모니터링, 뉴로마케팅 등 중에서 교육이나 엔터테인먼트 분야에서 첫 번째 킬러 애플리케이션이 나올 것으로 기대하고 있다.

10년 내에 신규 시장이 비약적으로 형성될 것으로 예상되는 BCI 산업은, 전 세계적으로 빠르게 기술적, 상업적 발전을 이루고 있다. 특히 의료 및 재활 분야, 게임-엔터테인먼트 분야, 방위산업, 교육, 로봇 제어 등 다양한 영역에서 BCI 기술이 적용될 가능성이 높아지고 있다. 이는 고령화 사회에 따른 재활치료 수요 증가, 4차 산업혁명 시대의 지능화 서비스에 대한 요구, 그리고 인공지능 및 센서 기술의 발전 등이 맞물린 결과이기도 하다.

국내 기업들이 이러한 변화에서 경쟁력을 갖추기 위해서는 장기적이고 체계적인 연구개발 투자가 필수적이다. BCI 기술은 단순히 소프트웨어나 하드웨어 중 한 영역만 발전한다고 해서 상용화로 이어지기는 어렵다. 뇌신호를 정확히 측정, 해석하는 측면(신경공학, 의공학), 데이터를 처리, 분석하는 측면(AI, 빅데이터), 제품에 적용하는 측면(소프트웨어 개발, 로봇공학, 재활 기기)이 유기적으로 결합해야만 시장성이 확보되기 때문이다. 국내 기업이 글로벌 시장에서 생존하기 위해서는 단발성 프로젝트나 단기 성과 중심 R&D가 아니라, 기초 기술부터 응용까지 아우르는 중장기 전략이 필요하다. 예컨대 기업 차원에서는 미국, 유럽 등 선도국가의 특허 동향, 임상시험 동향, 규제 변화를 면밀히 살펴야 하고, 관련 분야 인재를 지속적으로 육성해야 한다.

이러한 장기적 R&D 투자를 가능케 하기 위해서는, 정부 차원에서 대형 R&D 프로그램을 운영하여 기초·응용 연구를 동시에 지원하는 방안이 절실하다. 가령 대형 국책 과제를 통해 ‘뇌과학-뇌공학-로보틱스-인공지능’처럼 상호 긴밀히 연결된 연구 분야를 유기적으로 묶어 지원하고, 각 연구 성과가 실제 시제품 개발과 테스트로 이어지도록 전주기적으로 관리할 필요가 있다. 또한 정부 주도의 R&D 프로그램 운영은 공공 연구기관 및 대학, 민간기업 간의 협력 체계를 구축하는 데도 큰 도움이 된다.

국내에서는 이미 BCI 기술을 구현할 수 있는 여러 연구기관(대학 연구실, 정부출연연구소, 기업 부설연구소 등)이 존재한다. 예컨대 뇌신호 획득 장치, 신경 해석 알고리즘, 인공지능 기반 분석 툴, 실시간 제어 소프트웨어 등을 개발 중인 기관들이 산재해 있다. 그러나 BCI 산업은 뇌과학과 뇌공학, 의공학, 로봇공학, 소프트웨어 공학, AI 기술 같은 다양한 학문 분야가

밀접하게 융합되어야 하는 복합 산업이다. 이러한 특성상, 국내 연구기관들이 단독으로 모든 분야를 커버하기는 어렵기 때문에, 산-학-연 협력을 통해 서로의 강점을 결합해야 한다. 특히 뇌신경과학 분야에서의 기초 연구 역량은 BCI 기술의 정확도, 안정성, 확장성을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 동시에 이를 제품화하고, 의료기기 인증을 받으며, 실제 환자나 사용자의 요구 사항을 반영해 개발하기 위해서는 기업의 상용화 노하우가 필수적이다. 결국 기초 연구-응용 연구-상용화를 하나의 밸류 체인으로 묶어, 국가 차원에서 전략적으로 육성할 필요가 있다.

BCI 산업의 특성상 서로 다른 기술 영역이 결합해야만 상용화 가능성이 높아지므로, 협력형 R&D 컨소시엄이나 공동 연구소, 테스트베드 운영이 매우 중요하다. 예를 들어 대학교와 기업, 공공 연구소가 함께 참여하는 공동 연구 센터를 구축해, 임상시험과 시제품 검증을 위한 장비·시설을 공유하거나, 인프라 구축 비용을 절감할 수 있다. 또한 정부와 지자체 차원에서 테스트베드(예: 스마트 병원, 재활센터, 로봇 시범단지 등)를 운영하면, 연구 성과물의 현장 적용성을 빠르게 확인할 수 있으며, 사용자 경험(UX)에 관한 피드백도 풍부하게 얻을 수 있다.

아울러 BCI 기술 분야는 혁신적인 아이디어와 빠른 실행력을 지닌 스타트업이 성장하기에 유리한 생태계를 갖고 있다. 이를 적극 뒷받침하기 위해서는 투자, 인큐베이팅, 액셀러레이팅 프로그램을 강화할 필요가 있다. 특히 의료기구나 국방 분야처럼 규제가 엄격한 영역에 진출하고자 할 때, 스타트업은 대기업 대비 자금력이나 인허가 대응 능력이 부족할 수 있다. 따라서 정부, 대기업, 투자사가 협력하여 규제 샌드박스 제도, 초기 임상시험 지원, 국제 특허/인증 자문 등을 제공해야 한다. 이는 잠재력 있는 스타트업들을 글로벌 무대에 빠르게 안착시키고, 국내 BCI 생태계를 전체적으로 활성화하는 데 기여할 것이다.

BCI 기술 중에서도 침습형 BCI는 사용자 두개골 내부, 혹은 뇌에 직접 전극을 삽입해 높은 신호 품질을 얻는 방법이므로 4등급 의료기기로 분류된다. 이 영역은 잠재적 위험도가 높아, 엄격한 임상시험, 안전성 검증, 제조 품질 관리(GMP)등 여러 규제를 충족해야만 상용화가 가능하다. 의료기기로서 침습형 BCI가 본격적으로 상용화되려면, 우선 연구 단계부터 기기에 대한 안전성 평가체계를 정립해야 한다. 이어서, 임상시험을 통해 신경조직 손상 위험, 감염 가능성, 장기 삽입 시 안정성 등을 철저히 검증해야 한다. 이는 막대한 비용과 시간이 소요되는 절차이나, 이를 통과하는 기업이야말로 의료재활 혹은 중증 환자 대상 보조기기 시장에서 세계

적인 선두주자가 될 가능성이 높다. 이러한 상황에서 세계 시장에 빠르게 진출하기 위해서는 BCI 기술에 대한 인허가 절차를 간소화하거나, 임상시험 등을 위한 별도 트랙을 마련해 시장 진입을 촉진할 필요가 있다. 예를 들어, 미국 FDA나 유럽 CE 인증 등 국제적으로 통용되는 규격에 미리 대비해야 하며, 국내에서도 식약처 등 규제 기관과 긴밀히 협력하여 임상시험 프로토콜을 합리적으로 설정해야 한다.

현재 글로벌 경쟁이 치열한 의료 및 재활 분야에서는 규제 대응 능력이 곧 경쟁력이 된다. 국내 기업이 외국 규제기관의 인증을 빠르게 획득할 수 있도록, 정부가 해외 인증 절차를 단축, 지원하는 프로그램을 운영하거나, 국내 임상시험 결과를 국제적으로 인정받을 수 있도록 노력해야 한다. 이러한 지원이 없다면, 우수한 기술력을 갖춘 기업도 해외 인증에 수년 이상이 걸려 초기 시장 진입 타이밍을 놓칠 수 있다.

BCI 신호 프로토콜, 데이터 포맷, 인터페이스 표준 등에 대한 국제 표준화 활동에 적극 참여하는 것 역시 국내 기업의 글로벌 경쟁력 확보에 필수적이다. 향후 국제 표준이 확립되면, 호환성, 안전성, 보안 등 여러 측면에서 표준 미준수 기업은 시장에서 도태될 가능성이 크기 때문이다. 국내에서는 표준 개발 과정에 참여할 전문 인력과 학술적 역량이 이미 축적되어 있으므로, ISO, IEC, IEEE 등 국제표준화 기구나 관련 국제 컨소시엄에 적극적으로 참여해 표준 제정에 기여하고, 한국 기업이 유리한 기술 스펙을 반영하도록 노력해야 한다.

또한 글로벌 협력을 통해 우리나라 기업의 해외 진출 기반을 마련하는 것도 중요하다. 공동 연구 프로젝트나 기술 교류, 해외 대형 병원이나 연구소와의 임상 협업을 통해 국내 BCI 기술의 실효성과 안전성을 세계적으로 입증할 기회를 확보해야 한다. 해외 MOU, 학술 콘퍼런스 참여, 국제 박람회 참가 등을 통해 글로벌 네트워크를 구축한다면, 투자 유치와 해외 시장 판로 개척이 한층 수월해질 것이다.

국내 시장의 확대를 위해서는, 공공 수요가 견인차 역할을 할 수 있도록 다양한 정책적 노력도 필요하다. 특히 재활치료, 장애인 보조기기, 교육/훈련 등 공공 서비스 분야는 정부-지자체의 예산 투입과 제도적 지원이 상대적으로 용이하며, 잠재적 사용자층도 명확하다. 예컨대 국립재활원, 장애인 복지관, 국공립 학교, 군-경찰 훈련 센터 등에서 BCI 솔루션을 시범 도입하면, 초기 시장을 형성하고 사용자 피드백을 얻는 동시에, 사회적 가치도 함께 창출할 수 있다. 시범사업에서의 성공 사례는 민간 영역으로 확산되어, 국내 BCI 시장 규모를 키우는 데 기여할 것이다.

BCI 기술은 의료나 재활치료 외에도 국방, 게임-엔터테인먼트, 교육, 산업 자동화 등 매우 폭넓은 분야에 적용이 가능하다. 예컨대 군에서 무인 드론이나 로봇을 뇌신호로 제어하는 연구가 진행되면, 민간 드론 산업이나 자율주행 기술과도 접목될 수 있다. 게임-엔터테인먼트 분야에서는 VR, AR 기술과 결합해 몰입도 높은 게임을 구현할 수 있고, 이는 새로운 플랫폼과 콘텐츠 산업을 탄생시킬 수도 있다. 국가 차원에서 이러한 적용 모델 발굴에 지속적인 연구 지원과 제도적 뒷받침을 제공한다면, 내수 시장을 안정적으로 확보할 수 있고, 이를 발판 삼아 글로벌 시장에도 성공적으로 진출할 수 있다.

마지막으로, BCI 기술은 뇌파 및 신호 분석 과정에서 발생할 수 있는 개인정보, 특히 민감한 뇌 정보가 노출될 위험이 있으므로, 이에 대한 법적-윤리적 가이드라인 마련이 시급하다. 뇌신호는 개인의 감정, 의도, 기억, 건강 상태 등을 암시할 수 있는 매우 민감한 정보이므로, 잘못 사용되거나 유출될 경우 사생활 침해는 물론, 심각한 윤리적, 사회적 논란을 초래할 수 있다. 따라서 정부와 학계, 산업계가 협력하여 데이터 보호 정책과 개인정보 비식별화 처리 기준을 마련하고, 이를 BCI 연구 및 서비스 현장에 적용해야 한다. 예컨대 데이터 암호화, 익명화 기술, 접근 권한 관리 등 구체적인 기술적, 행정적 수단이 구축되어야 하며, 위반 시의 처벌 규정도 명확히 할 필요가 있다.

사회적 우려를 해소하기 위한 공론화 과정 역시 필수적이다. 시민참여 포럼, 전문가 세미나, 공청회 등을 통해 다양한 이해관계자 간 의견을 수렴해야 한다. BCI 기술로 인한 잠재적 윤리 문제, 사용자의 '뇌 사생활' 보호, 기기의 신뢰성과 안전성 등은 일반 시민뿐 아니라 환자 단체, 장애인 단체, 윤리학자, 법률 전문가 등 폭넓은 집단의 관심사가 될 수 있다. 이러한 공론화 과정을 거치면, 기술적 한계나 경제적 이익만을 놓고 논의하는 것이 아니라, 사회의 가치관과 기술 발전 방향을 조율하는 기회가 마련된다. 또한 BCI 산업이 환영받고 안정적으로 자리잡을 수 있는 제도적 기반과 문화적 기반을 조성하게 된다.

대중 매체, 교육 프로그램 등을 통해 BCI 기술의 잠재적 가치와 위험성을 균형 있게 전달하는 노력도 중요하다. 막연한 기대나 근거 없는 두려움을 불식시키고, 객관적이고 과학적인 정보가 널리 확산될 수 있도록 정확한 홍보와 보도가 이뤄져야 한다. 또한 체험형 이벤트, 과학관 전시, 공공 체험 프로그램 등을 확대해 일반인들이 직접 BCI 기기를 사용해 볼 기회를 제공한다면, 기술에 대한 거부감을 줄이고 호기심을 유발하여 수용성을 높일 수 있을 것이다. 이

를 통해 BCI 기술의 산업적, 공공적 가치를 인식하게 만들 수 있으며, 미래 인재 양성에도 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

상기한 정책적 고려 사항을 종합하여, 정부와 민간이 함께 정책, 제도, R&D 추진 계획 등을 수립한다면, 대한민국의 BCI 기술 발전과 산업화는 가속화될 수 있을 것이다. 장기적 R&D 투자와 공공-민간 협력, 규제/인증 간소화와 윤리적 가이드라인 마련 등은 단순한 BCI 기술 성장에만 그치지 않고, 인접 분야인 의료, 교육, 국방, 엔터테인먼트 등 다양한 분야의 발전을 견인할 수 있을 것이다.

저자소개

임창환(Im, Chang-Hwan)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">· 서울대학교 전기컴퓨터공학 박사/석사· 서울대학교 전기공학 학사 | <ul style="list-style-type: none">· (現) 한양대학교 바이오메디컬공학과 교수· (現) 한양대학교 뇌공학연구센터장· (前) 연세대학교 의공학부 교수· (前) University of Minnesota Post-doc. |
|---|---|

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 임창환. (2010). 뇌파 기반 뇌-컴퓨터 인터페이스 기술의 소개. 의공학회지, 31(1), 1-13.

〈국외문헌〉

- 1) M.A. Cervera, S.R. Soekadar, J.Ushiba, J.R. Millan, M. Liu, N. Birbaumer, G. Garipelli (2018), "Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis", Ann Clin Transl Neurol, 5(5), 651-663.
- 2) M.J. Fagan, S.R. Ell, J.M. Gilbert, E. Sarrazin, P.M. Chapman (2008) "Development of a (silent) speech recognition system for patients following laryngectomy," Med Eng Phys, 30(4), 419-425.
- 3) C.H. Han, Y.W. Kim, D.Y. Kim, S.H. Kim, Z. Nenadic, C.H. Im (2019) "Electroencephalography-based endogenous brain-computer interface for online communication with a completely locked-in patient," J NeuroEng Rehabil, 16, 18.
- 4) T. Hueber, E.L. Benaroya, G. Chollet, B. Denby, G. Dreyfus, M. Stone (2010) "Development of a silent speech interface driven by ultrasound and optical images of the tongue and lips," Speech Comm, 52(4), 288-300.
- 5) D.W. Kim, J.C. Lee, Y.M. Park, I.Y. Kim, C.H. Im (2012), "Auditory brain-computer interfaces (BCIs) and their practical applications", Biomed Eng Lett, 2(1), 13-17.
- 6) T. Kim, Y. Shin, K. Kang, K. Kim, G. Kim, Y. Byeon, ... K.J. Yu (2022) "Ultrathin crystalline-silicon-based strain gauges with deep learning algorithms for silent speech interfaces," Nature Comm, 13(1), 5815.

- 7) H. Kim, Y. Chae, S. Kim, C.H. Im (2023) "Development of a Computer-Aided Education System Inspired by Face-to-Face Learning by Incorporating EEG-based Neurofeedback into Online Video Lectures," IEEE Trans Learn Technol, 16, 78-91.
- 8) J. Kwon, H. Nam, Y. Chae, S. Lee, I.Y. Kim, C.H. Im (2023) "Novel Three-Axis Accelerometer-Based Silent Speech Interface Using Deep Neural Network," Eng Appl Art Intel, 120, 105909.
- 9) Y. Wang, M. Zhang, R. Wu, H. Gao, M. Yang, Z. Luo, G. Li (2020) "Silent Speech Decoding Using Spectrogram Features Based on Neuromuscular Activities," Brain Sci, 10(7), 442.
- 10) T.O. Zander, C. Kothe (2011), "Towards passive brain-computer interfaces: applying brain-computer interface technology to human-machine systems in general", J Neural Eng, 8(2), 025005.

〈기타문헌〉

- 1) <https://zdnet.co.kr/view/?no=20250113083312>
- 2) <https://www.joongang.co.kr/article/25237730>
- 3) <https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=163448>
- 4) <http://www.bosa.co.kr/news/articleView.html?idxno=2187339>
- 5) <https://about.fb.com/ko/news/2021/07/뇌-컴퓨터-인터페이스bci의-획기적-성과-facebook이-지원한-ucsf/>
- 6) <https://www.joongang.co.kr/article/25252271>
- 7) <https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=151325>
- 8) <https://www.aitimes.com/news/articleView.html?idxno=161221>
- 9) <https://www.electricalibrary.com/en/2019/03/22/brain-machine-interface/>
- 10) <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/mixedrealitylab/works/the-moment.aspx>

융합정책

융합연구 기술이전과
사업화를 위한
절차 및 제도 현황과
개선 방안

임 환

한국연구소기술이전협회장

1 서론

1. 융합연구의 중요성과 기술사업화의 필요성

융합연구는 기존 기술의 한계를 뛰어넘어 새로운 가치를 창출하고, 복잡한 사회 문제를 해결하는 데 필수적이다. 특히 AI, 바이오, 신소재 등 4차 산업혁명의 핵심 기술들은 단일 분야의 연구만으로는 한계가 있으며, 다학제적 접근을 통해서만 경쟁력을 갖출 수 있다. 제4차 융합연구개발 활성화 기본계획에 따르면 우리나라 융합연구 투자실적은 기본계획이 시작된 2009년 대비 2022년 5.6조 원으로 3배이상 규모가 증가하고 논문, 특허 및 기술료 등 전반적인 성과도 크게 증가했다.

공공연구를 담당하는 출연(연)의 역할이 이제는 다양한 학문과 기술을 결합하는 융합연구가 핵심적인 혁신 동력으로 자리 잡고 있다. 그러나 융합연구가 연구실 내에서만 머문다면 그 가치가 충분히 발휘되지 못한다. 연구개발 성과를 산업과 연결하고, 이를 실질적인 경제적·사회적 가치로 전환하는 기술사업화가 반드시 필요하다. 기술사업화는 연구 성과를 특허, 기술이전, 창업 등의 형태로 산업에 적용하여 기업의 경쟁력을 높이고 국가 경제에 기여하는 과정이다.

출연(연)의 연구 성과가 실질적으로 산업과 연계될 때, 연구개발의 투자 효율성이 극대화되고, 공공 연구가 사회적 가치를 실현할 수 있다. 따라서 출연(연)은 융합연구를 통해 혁신적 기술을 개발하는 동시에, 이를 효과적으로 사업화할 수 있는 전략적 접근이 필요하다. 연구개발이 산업과 연결될 때 비로소 국가 경쟁력을 높이고, 지속 가능한 성장의 기반을 마련할 수 있기 때문이다.

2. 공공연구기관에서의 기술이전·사업화 역할

공공연구기관은 단순히 연구개발(R&D) 성과를 창출하는 것에 그치는 것이 아니라, 이를 산업으로 확산하여 경제적·사회적 가치를 극대화하는 역할을 수행해야 한다. 특히 출연(연)은 국가 차원의 연구개발을 선도하는 기관으로서, 축적된 연구 성과를 산업과 연계하는 기술이전·사업화의 핵심적인 허브 역할을 해야 한다. 연구개발 성과가 기술이전과 사업화를 통해 기업으로 이전될 때, 산업의 기술 혁신이 가속화되고 국가 경쟁력이 강화된다.

기술이전·사업화는 연구개발의 궁극적인 목표인 실용화를 실현하는 과정이다. 출연(연)이 보유한 핵심 기술이 기업에 이전되면, 기업은 이를 기반으로 새로운 제품과 서비스를 개발하여 시장 경쟁력을 확보할 수 있다. 동시에 출연(연)은 기술료 수익을 통해 연구개발을 지속할 수 있는 선순환 구조를 구축할 수 있다. 하지만 단순히 기술을 이전하는 것만으로는 충분하지 않으며, 기업이 기술을 성공적으로 사업화할 수 있도록 적극적인 지원이 필요하다. 기술이전 후 기업이 직면하는 기술 완성도 부족, 생산 공정 최적화, 시장 진입 전략 부재 등의 문제를 해결하기 위해 출연(연)은 지속적인 후속 연구 지원과 협력을 강화해야 한다.

그림1. R&D 성과의 기술사업화 플랫폼 개요도



* 출처: 미래창조과학부 (2014)

또한, 기술사업화의 효과를 극대화하기 위해 출연(연)의 역할은 기술 공급자에서 벗어나 기업과 공동으로 시장 수요를 발굴하고, 사업화 가능성이 높은 기술을 전략적으로 육성하는 방향으로 확대될 필요가 있다. 최근 글로벌 기술 패권 경쟁이 심화되는 상황에서, 단순히 논문이나 특허의 양적 확대를 목표로 삼기보다, 연구 성과가 실질적인 산업 혁신으로 이어질 수 있도록 기술이전·사업화 전략을 정교화해야 한다. 이를 위해 출연(연)은 기업과의 협력 네트워크를 강화하고, 기술사업화 전문인력과 제도적 지원을 확대하는 등 보다 적극적인 역할을 수행해야 한다.

결국, 출연(연)의 기술이전·사업화는 연구 성과를 산업으로 연결하는 핵심 과정이며, 이는 국가 혁신 생태계의 지속적인 성장과 발전을 위한 필수적인 요소다. 연구개발의 성과가 산업과 긴밀히 연계될 때, 출연(연)의 연구가 사회에 실질적인 영향을 미칠 수 있으며, 공공 연구의 본질적인 역할 또한 더욱 강화될 것이다.

3. 기고의 목적 및 주요 논점

이번 기고는 출연(연)의 융합연구 및 기술사업화의 중요성을 강조하고, 이를 효과적으로 추진하기 위한 전략적 방향을 논의하는 데 목적이 있다. 연구개발(R&D) 성과가 실질적인 산업 혁신으로 이어지기 위해서는 융합연구를 통해 경쟁력 있는 기술을 창출하는 것뿐만 아니라, 이를 산업과 효과적으로 연계할 수 있는 기술이전·사업화 전략이 필요하다. 특히, 연구 성과의 활용도를 극대화하기 위해서는 연구자, 기업, 정부 등 다양한 이해관계자가 긴밀히 협력하는 체계를 구축하는 것이 필수적이다.

먼저, 사업화 촉진 과제 측면에서 이 기고에서는 먼저 출연(연)에서의 연구개발 성과 관리와 기술이전·사업화의 주요 과제를 살펴보고자 한다. 융합연구의 사업화도 기존 기술사업화의 일반 범주에 크게 벗어나지 않음을 전제로 출연(연)의 연구 성과가 효과적으로 산업에 이전되기 위해 필요한 제도적 개선점과 연구자 및 기관 차원의 인센티브 체계를 분석하고, 보다 실질적인 성과 창출을 위한 접근법을 논의할 것이다. 또한 융합연구의 기술이전 및 사업화를 촉진하기 위한 전략적 방안을 제시하며, 특히 AI 기반 연구 성과 관리 시스템 도입, 산업 맞춤형 기술이전 모델, 그리고 글로벌 기술 협력 확대 방안 등을 제시할 것이다. 이를 통해 출연(연)이 기존의 기술 공급자 역할을 넘어, 산업과 협력하여 지속적인 혁신을 견인하는 방향으로 나아갈 수 있도록 하는 전략을 모색하고자 한다.

다음으로 제도측면에서 출연(연)의 연구개발 성과가 실질적인 경제적·사회적 가치로 전환될 수 있도록 하는 정책적 시사점과 실행 이슈를 제안할 것이다. 연구개발 성과를 산업과 연결하는 과정에서 발생하는 다양한 장애 요인을 분석하고, 이를 극복하기 위한 제도적·재정적 지원 방안을 검토할 예정이다. 이를 통해, 출연(연)이 보다 효과적으로 기술이전과 사업화를 수행할 수 있도록 방향성과 궁극적으로 국가 혁신 생태계 강화에 기여할 수 있는 전략적 방안을 제시하는 것이 이 기고의 목적이다.

4. 공공연구기관의 기술이전·사업화 절차 개요

1) 기술이전·사업화의 주요 개념

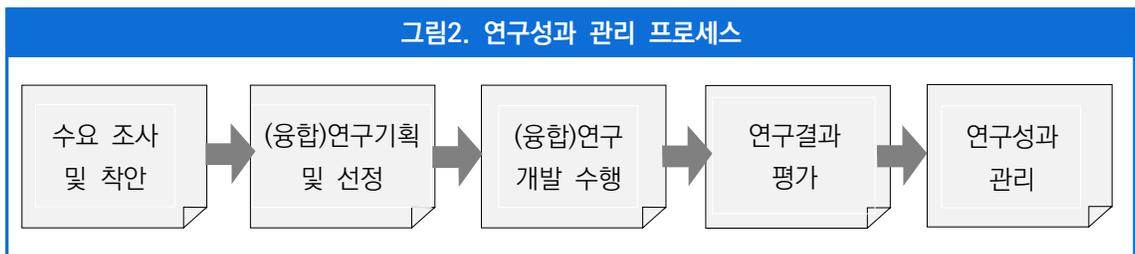
기술이전·사업화는 연구개발(R&D) 성과를 산업과 연결하여 경제적·사회적 가치를 창출하는 과정이다. 기술이전(Technology Transfer)은 연구기관이 보유한 지식재산(IP)을 기업 또는 외부 기관에 제공하여 상용화할 수 있도록 하는 활동을 의미하며, 계약을 통해 특허, 노하우, 소프트웨어, 연구 장비 등의 기술적 자산이 이전된다. 기술이전의 방식은 라이선스(Licensing), 기술 매각(Assignment), 공동 연구(Research Collaboration) 등으로 구분되며, 새로운 시장을 창출해야 하는 첨단 기술의 경우에 직접 사업화를 위한 창업(Company Building)의 과정을 거치기도 한다. 연구개발 성과가 실제 산업에 활용되기 위해서는 전략적으로 적절한 이전 방식이 선택되어야 한다.

기술사업화(Technology Commercialization)는 이전된 기술을 기반으로 제품 및 서비스를 개발하고, 시장에서 상용화하는 과정까지 포함한다. 단순히 기술을 이전하는 것에서 그치는 것이 아니라, 기술의 시장 적용성 검토, 시제품 제작, 양산 공정 최적화, 시장 개척 등을 포괄하는 개념이다. 기술이전과 사업화가 성공적으로 이루어지려면, 연구개발 초기 단계에서부터 시장성과 경제성을 고려한 전략적 접근이 필요하다.

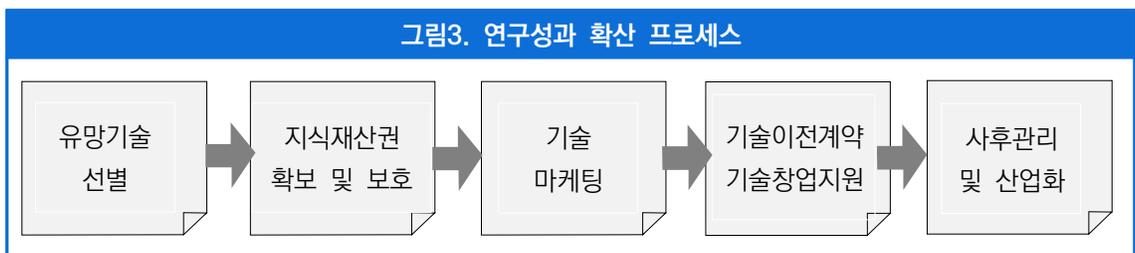
공공연구기관에서의 기술이전·사업화는 일반 기업의 기술 개발과 차별화되는 특징을 가진다. 기업이 시장 중심의 연구를 수행하는 반면, 공공연구기관은 국가 연구개발(R&D) 정책과 연계되어 장기적인 연구를 수행하며, 사회적 공익성과 산업 파급 효과를 함께 고려해야 한다. 따라서 연구 성과의 효과적인 이전과 사업화를 위해서는 정부, 기업, 연구기관이 긴밀하게 협력해야 하며, 이를 지원하는 법적·제도적 기반이 필수적이다.

2) 일반적인 기술이전 절차 및 단계

공공연구기관의 연구개발과 기술이전은 체계적인 절차를 거쳐 진행되며, 우선 연구개발은 수요조사 및 아이디어를 시작으로 연구기획과 연구비 확보를 통해 시작되며, 연구개발을 수행하여 보고서, 논문, 특허 등 연구 성과를 창출한다. 시장 수요에 대한 치밀한 조사와 연구개발 수행과정에서의 시장 및 사업화 적합성은 기술사업 성공에 결정적 영향을 끼친다.



기술이전 및 사업화는 위와 같은 연구성과 관리 과정에서 창출된 성과중 사업화에 유망한 기술을 선별하여 수요자와 매칭하는 과정을 거치며, 기술이전 사업화 전략에 따라 기술이전과 창업을 하게 되며, 사후관리를 통해 산업적으로 활용되게 된다. 일반적으로 다음과 같은 단계로 구성된다.



● 유망기술 선별

연구개발 과정에서 확보된 기술을 검토하고, 사업화 가능성을 평가한다. 이 단계에서는 기술의 독창성, 시장성, 법적 보호 가능성(특허 출원 여부) 등을 고려한다. 또한, 기술성숙도지수(TRL, Technology Readiness Level)를 분석하여 상용화 가능성을 평가하는 과정이 포함된다.

● 지식재산권 확보 및 보호

기술이 이전되기 위해서는 특허, 실용신안, 저작권 등의 지식재산권(IP)을 확보해야 한다. 이를 위해 공공연구기관은 연구 성과를 사전에 특허 출원하고, 기술 보호 전략을 수립하여 경쟁력을 확보한다.

● 기술 마케팅

이전 가능한 기술을 기업에 홍보하고, 적합한 기술 수요 기업을 발굴하는 단계다. 이 과정에서 기술이전 설명회, 기술 데이터베이스 기반 수요자 발굴 등의 활동이 이루어진다. 기업과의 협력을 통해 기술 도입이 필요한 산업군을 특정하고, 맞춤형 기술 이전 전략을 수립한다.

● 기술이전 계약 또는 창업

연구기관과 기업 간의 협의를 거쳐 기술이전 계약이 체결된다. 계약 유형에는 독점 또는 비독점 라이선스, 로열티 기반 계약, 일시불 지급 등이 포함될 수 있다. 이 과정에서 기술료(Technology Fee) 산정, 계약 조건 협의, 지식재산권 이전 방식 등이 결정된다. 또한 융합 연구 성과를 통해 시장과 산업 생태계를 창출해야 하는 첨단 기술이나 시장을 재편할 만한 가능성을 지닌 파괴적 혁신 기술에 대해서는 창업을 유도하기도 해야 한다.

● 기술이전 후 지원 및 후속 연구 협력

이전된 기술이 성공적으로 사업화될 수 있도록, 연구기관은 기업과 지속적으로 협력해야 한다. 후속 연구개발 지원, 기술 컨설팅, 시제품 제작 지원 등의 활동을 통해 사업화 가능성을 높인다. 또한, 공공 연구기관은 정부 지원 사업과 연계하여 기술사업화 자금을 확보하는 역할도 수행한다.

그러나 기술이전 및 사업화의 성공 여부는 위의 연구성과 확산 과정의 마지막 단계인 사후 관리 및 산업화 달성에 좌우되는 경우가 대부분이다. 물론 연구 결과의 탁월성이 중요한 역할을 하지만 시장에서 성공하기 위해서는 아래의 시장에서 사업화를 완성시키는 기업과 공공연구기관이 협력해서 이루어지는 산업화 협력 과정이 부각되어야 한다.

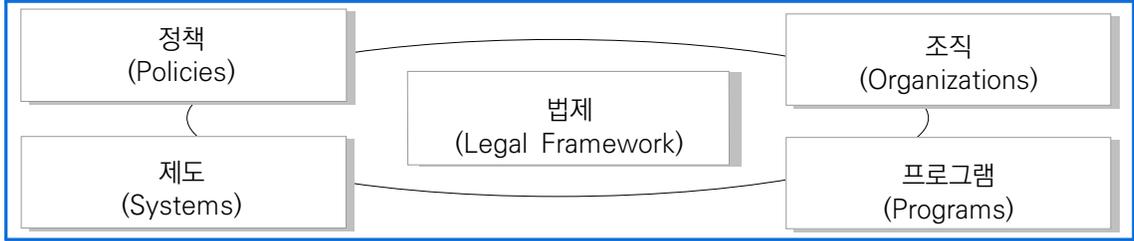


특별히 최근 정부정책도 아래 산업화과정과 앞부분의 성과관리와 확산과정이 유기적으로 연계 되고 피드백이 이루어질 필요에 대해 중요성을 공감하고 제도와 프로그램을 확대해 가고 있다.

3) 공공 연구성과 사업화 촉진을 위한 핵심 기반

공공연구기관의 기술이전·사업화를 효과적으로 촉진하기 위해 다양한 법적·제도적 지원이 마련되어야 한다. 정부는 그간 과학기술기본법, 기술이전 촉진법 등을 근간으로 기술사업화를 법적 요건으로 다루고 있다. 또한 법적 근거를 바탕으로 관할 부처의 정책이 마련되고, 유관 조직 설치와 다양한 사업화 촉진 제도가 마련된다. 전담 관리기관은 정책 성과를 촉진하기 위해 예산을 마련하고 다양한 프로그램을 시행하게 된다.

그림5. 공공연구성 사업화 촉진 기반



● (법제) 기술이전 및 사업화 촉진 법제

사업화 추진을 가능하게 하는 법률, 규정, 시행령 등의 체계를 구성하여 공공연구와 사업화 주체에게 강제력을 가진다. 핵심 내용은 연구개발 성과의 소유권, 특허·기술 이전 규정, 기업 협력 규정, 조세 감면 등 관련 정책이나 프로그램, 조직운영의 법적 근거를 제공한다. 관련 법제로는 ‘과학기술기본법’을 근간으로 ‘국가연구개발 혁신법’, 국가연구개발 사업 등의 성과평가 및 성과관리에 관한 법률’, ‘기술의 이전 및 사업화 촉진에 관한 법률’, ‘중소기업기술혁신 촉진법’, ‘기술보증기금 관련 법령’ 등 공공 연구개발 성과를 관리하고 산업계와 연계하기 위해 제정된 법이 있다. 연구기관 입장에서는 기술이전·사업화 지원과 관련 조직 운영, 전문인력 양성, 기술평가 활성화 및 기술금융 지원, 인센티브 제도 등을 포함하고 있어, 연구자가 기술사업화 활동에 적극적으로 참여할 수 있도록 장려하고, 기술료 수익을 연구자와 연구기관이 공유할 수 있도록 법적 기반을 제공한다.

● (조직) 기술이전·사업화 전담조직(TLO) 운영

사업화를 추진하는 기관 및 관련 거버넌스 체계를 말한다. 사업화를 담당하는 주체이며, 법·제도·정책을 집행하는 역할을 수행한다. 핵심적으로는 연구개발 성과를 사업화하는 기관 및 담당 부서(산학협력단, 기술이전센터, TLO 등)를 기본으로 하고, 공공기술사업화를 추진하는 관리기관(KIAT, COMPA 등)을 포함하며, 최근 각 대학 및 공공연구기관의 기술지주회사와 공동기술지주 회사(한국과학기술지주, 미래과학기술지주) 등이 있다. 각 출연(연) 및 공공연구기관에는 기술이전·사업화를 전문적으로 지원하는 조직인 TLO(Technology Licensing Office)가 운영되고 있다. TLO는 연구 성과의 특허 관리, 기술 마케팅, 기업 협력 지원 등을 담당하며, 연구자가 기술사업화에 집중할 수 있도록 행정적 지원을 제공한다.

● (프로그램) 기술사업화 및 기술창업 지원 프로그램

사업화 전담기관이 사업화를 지원하는 구체적인 실행 계획이나 지원 사업을 말한다. 스타트업 지원, 창업 보육, 시제품 제작 지원, 기술사업화 컨설팅 등을 수행하며, 정책을 실행하는 실질적 수단으로, 단기·장기적으로 운영된다. 프로그램 수행을 위해서는 예산과 인력이 필요하며 이는 정책적 방향에 크게 좌우되어, 부처 정책에 따라 부침과 신설, 변경 등이 이루어지고 있다. TIPS 프로그램(창업 지원), 연구소기업 육성 프로그램 등은 대표적으로 성공한 프로그램이라 할 수 있다. 연구자가 연구개발 성과를 직접 창업으로 연결할 수 있도록, 과학기술정보통신부도 공공연구 성과기반 딥테크 창업을 장려하기 위한 프로그램을 신설해 운영하고 있다. 팀 빌딩, 창업자금 연계, 경영 지원, 초기 투자 유치 지원 등이 제공된다. 이를 통해 연구개발이 단순히 논문이나 특허에 그치지 않고, 실질적인 산업 혁신으로 이어질 수 있도록 한다. 출연(연)과 기업 간의 협력을 강화하기 위해 산학연 협력 프로젝트, 공동 연구개발 사업, 기술 공동개발 프로그램 등이 운영된다. 이를 통해 연구기관의 핵심 기술이 산업과 긴밀하게 연결되도록 하고, 연구자가 기업과 협력하여 실용적인 연구개발을 수행할 수 있도록 장려한다.

● (제도) 기술이전 사업화 촉진 제도

기술사업화 제도는 법제보다 구체적인 운영 원칙을 포함하며, 기관이나 기업이 자체적으로 법적 테두리 안에서 자율적으로 운영 가능한 특징이 있다. 사업화 과정에서 적용되는 운영 방식 및 절차를 포함한다. 기술이전 절차, 연구개발 과제 평가 방식, 기술료 배분 기준 등 부처의 장이나 기관장에 따라 다양한 촉진 제도를 마련해서 가이드라인, 또는 매뉴얼 등으로 마련할 수 있다. 예를 들어 기술이전 수익 배분제도는 대학과 연구소가 배분 비율에 차이가 있다. 창업에 따른 휴·겸직 제도, 산학연 협력 촉진 제도, 기술금융 및 기술보증 제도 등도 운영 중에 있다. 기술이전·사업화를 추진하는 기업이 금융 지원을 받을 수 있도록 기술보증기금 지원, 정책자금 지원, R&D 투자 세액공제 등의 제도가 마련되어 있다. 이를 통해 기술 기반 기업이 안정적으로 사업을 운영할 수 있도록 지원하며, 연구 성과의 시장 진입을 촉진한다.

● (정책) 산학연 협력 및 사업화 활성화 정책

사업화 활성화를 위해 정부와 기관은 정책적 방향성을 설정하고 지원책을 마련한다. 이러한 정책은 법제보다 유연하며, 시대적 요구에 따라 조정되어 운영된다. 또한, 제도와 프로그램의 근간이 되는 경우가 많아 장기적인 연구개발(R&D) 생태계 조성에 중요한 역할을 한다.

대개 5년 단위의 기본계획을 수립하고, 이를 단계별로 운영하며, 매년 구체적인 실행계획을 수립하여 추진한다. 대표적으로 과학기술 기본계획, 기술이전 및 사업화 촉진 계획, 융합연구 활성화 기본계획 등이 운영되고 있다.

이를 통해 연구개발 투자 전략, 창업 지원 정책, 사업화 촉진을 위한 재정 지원, R&D 세제 혜택 등 다양한 정책이 실행된다.

결론적으로, 공공연구기관에서의 기술이전·사업화는 연구 성과를 산업에 효과적으로 연결하는 핵심적인 과정이며, 이를 체계적으로 추진하기 위해서는 법제와 제도적 지원, 프로그램과 조직의 효율적 운영이 실효성 있게 실행돼야 할 필요가 있다.

4) 출연(연)의 기술이전 성과 및 한계

□ 국내 기술사업화의 주요 통계 및 성과

국내 기술사업화는 정부의 지속적인 연구개발(R&D) 투자와 기술이전·사업화 활성화 정책에 힘입어 점진적으로 성장하고 있다. 국가연구개발사업을 통해 창출된 연구 성과가 기술이전과 창업으로 이어지는 비율은 매년 증가하고 있으며, 특히 출연(연)과 대학을 중심으로 한 기술이전 건수가 꾸준히 확대되고 있다. 과학기술정보통신부의 "국가연구개발 성과 분석 보고서"에 따르면, 국내 공공 연구기관의 기술이전 건수는 2020년 기준 연간 3,500건 이상을 기록했으며, 기술이전 수입은 약 4,000억 원 규모로 집계되었다. 이 중 출연(연)의 기술이전 비중은 40% 이상을 차지하고 있으며, 주로 정보통신기술(ICT), 바이오·의료, 소재·부품·장비 분야에서 활발하게 이루어지고 있다.

기술 창업 역시 증가세를 보이고 있다. 정부의 연구소기업 및 기술창업 지원 프로그램을 통해 연구개발 성과를 활용한 연구소기업(공공기술 기반 창업 기업)의 수가 매년 증가하고 있으

며, 2022년 기준 연구소기업의 누적 설립 건수는 약 1,600개, 2025년 초에 연구소기업 제도 도입 후 19년 만에 2,000호 연구소기업이 탄생했다. 중소벤처기업부의 '창업지원 기업 이력·성과조사' 자료에 따르면 연구소기업의 3년차 생존율도 일반 스타트업(41.5%) 대비 2배 이상 높은 편(86.8%)으로, 연구개발 성과가 실질적인 산업화로 이어지는 사례가 점점 늘어나고 있다.

그러나 이러한 성과에도 불구하고, 기술이전의 질적 성장은 아직 미흡한 실정이다. 기술이전 계약 후 실제 사업화로 이어지는 비율은 여전히 낮으며, 연구개발 성과가 시장 수요와 충분히 연결되지 못하는 경우가 많다. 이에 따라 기술이전 이후의 후속 지원 강화, 시장 중심의 기술 개발 확대 등의 개선이 필요하다.

□ 출연(연)의 기술이전 사업화 한계

출연(연)은 국가 연구개발을 선도하는 기관으로서, 다양한 연구 성과를 창출하고 기술이전·사업화를 추진해왔다. 2021년 기준 출연(연)의 기술이전 건수는 전체 공공 연구기관 중 가장 높은 비중을 차지하며, 특히 전자·반도체, 바이오·의료, 기계·로봇 분야에서 두드러진 성과를 보였다. 대표적인 사례로, 한국전자통신연구원(ETRI)의 반도체 설계 기술 이전, KIST 창업기업인 (주)큐어버스의 바이오 신약 기술이전 등이 있다. 하지만 출연(연)의 기술이전·사업화에는 몇 가지 한계가 존재한다.

첫째, 기술 성숙도 부족이다. 연구 성과가 기술이전 단계에서 완성도가 낮아 기업이 이를 상용화하는 데 추가적인 연구개발이 필요한 경우가 많다. 기술이전 후 실제 제품화로 이어지는 비율이 낮은 이유 중 하나다.

둘째, 산업 수요와의 미스매치 문제다. 연구개발이 공급자 중심으로 이루어지다 보니, 기업이 필요로 하는 기술과 연구기관이 개발하는 기술 간의 괴리가 발생하는 경우가 많다. 특히 중소기업의 경우, 기술을 도입해도 이를 사업화할 수 있는 역량이 부족한 경우가 많아 효과적인 기술이전이 이루어지지 않는다.

셋째, 기술이전 이후의 지원 부족이다. 기술이전 후 기업이 사업화를 성공적으로 추진할 수 있도록 연구기관의 후속 지원이 필요한데, 현재 대부분의 기술이전이 단순 계약 체결에 그치고 있어 사업화 성공률이 낮은 문제가 있다. 이를 개선하기 위해서는 연구기관이 기업과 지속

적으로 협력하고, 후속 연구 지원과 기술 컨설팅을 제공하는 체계를 강화해야 한다.

□ 해외 주요 국가의 기술사업화 사례 비교

해외 주요 선진국들은 위와 같은 문제 해결을 해소하고 기술이전·사업화 활성화를 위해 다양한 정책과 지원 시스템을 운영하고 있으며, 특히 미국, 독일, 일본 등의 사례는 한국이 참고할 만한 대표적인 모델이다.

● 미국: 대학·연구소 중심의 초기 산업수요 반영한 기술사업화 활성화

MIT, Stanford, UC Berkeley 등 주요 대학은 기술이전 사무소(TLO)를 운영하여 기업과의 협력을 적극적으로 추진하고 있다. 특히 MIT의 "Deshpande Center"는 신생 기술 스타트업 을 지원하는 대표적인 기술사업화 모델로, 초기 연구개발 단계부터 산업 수요를 반영하는 방식으로 운영된다.

MIT Deshpande Center의 Entrepreneurial Ecosystem(사업 생태계 시스템)

- 사업 : 발명 동기를 부여하기 위해 지원금을 제공, 특히 시장성과 창업 적합성을 중점으로 지원
- 지원금 종류
 - Ignition Grants: 최대 5만 달러, 실증 단계 지원
 - Innovation Grants: 최대 25만 달러, 창업 초기 단계 지원
- 추가 지원
 - 촉진자(Catalysts): 학생들이 발명품을 시장에 적용할 수 있도록 가이드 제공
 - 행사 및 프로그램: IdeaStream 심포지엄을 통해 기업가정신 함양, 금융·산업계 네트워킹 지원

● 독일: 산업계 수요 연계 중심의 연구개발 및 기술이전

독일은 출연(연)과 산업 간의 긴밀한 협력을 바탕으로 기술사업화를 추진하고 있다. 프라운 호퍼 연구소(Fraunhofer Society)는 기업과의 공동 연구를 통해 기술이전 및 사업화를 촉진 하는 대표적인 기관이다. 독일은 연구기관이 단순한 기술 공급자가 아니라, 기업과 공동으로 시장 중심의 연구개발을 수행하며, 연구 성과가 직접 산업에 적용될 수 있도록 지원하는 것이 특징이다. 이와 같은 산업 중심의 연구개발 모델은 한국 출연(연)의 기술이전·사업화 활성화에 중요한 시사점을 제공한다.

독일 프라운호퍼 연구소의 사업화 및 기술 확산 특징

- 공동연구 연구개발 예산 구조 (1:1:1 매칭, 연구소, 정부, 산업계 각 1/3)로 민간수요 매칭
- Accelerapp 프로그램 (글로벌 기술사업화 지원)
 - 목적: 기업 맞춤형 시장 진입, 독일 혁신주체 간 협력 연계, 투자·시장 접근 기회 제공
 - 구성: 현장 컨설팅 및 온라인 멘토링 (6개월), 참여기업 기술사업화 역량 평가 및 협력 기획, 기술사업화 및 시장진출 전략 연구, 맞춤형 코칭(기술·BM 개발, 마케팅, 자금 조달 등), Fraunhofer 연구소 및 협력 네트워크 활용 등

● 일본: 정부 주도의 기술사업화 완성도 지원

일본은 정부가 주도적으로 연구개발 성과의 산업화를 지원하는 전략을 채택하고 있다. 일본의 AIST(산업기술종합연구소)는 정부의 연구개발 지원과 연계하여 산업체와 연구기관 간의 협력을 촉진하고 있으며, 기술이전 이후에도 연구기관이 지속적으로 기업과 협력하여 기술 완성도를 높이는 구조를 운영하고 있다. 일본의 기술사업화 모델은 정부의 적극적인 지원과 연구기관의 지속적인 협력 체계를 강조하는 점에서 한국의 기술이전 정책과 비교할 만하다.

AIST 벤처개발센터 및 '총산연발 벤처' 프로그램

- 개념: AIST 연구 성과를 활용하는 설립 5년 이내 벤처에 부여되는 칭호, 최대 10년까지 지원
- 혜택 및 지원
 - AIST 보유 지식재산권에 대한 독점권 및 전용권 부여, 시설 제공, 법무 상담 등
 - AIST의 창업 지원 및 네트워크 활용(벤처개발센터, 연구추진조직, 지식재산 전문가가 협력)
 - 네트워크 활용 지원, 자금 조달처 연계 (투자 유치 지원), 스타트업 피칭 및 매칭 이벤트 개최
 - 출자제도를 통한 사업 확장 촉진

해외 선진국들의 기술이전·사업화 사례를 보면, 연구개발 초기 단계에서부터 연구개발 기관을 중심으로 산업계와의 협력을 지원하고 있다. 시장성과 산업 수요를 고려하고, 기업과 긴밀하게 협력하는 것이 기술이전 성과를 높이는 핵심 요소임을 알 수 있다. 또한, 기술이전 이후에도 연구기관이 지속적인 지원을 제공하는 모델이 사업화 성공률을 높이는 데 중요한 역할을 하고 있다. 한국 출연(연)의 기술이전·사업화 활성화를 위해서는 단순한 기술 공급 방식에서 벗어나, 기업과의 공동 연구 및 후속 지원 체계를 강화하는 방향으로 정책의 전략적 전환이 필요하다.

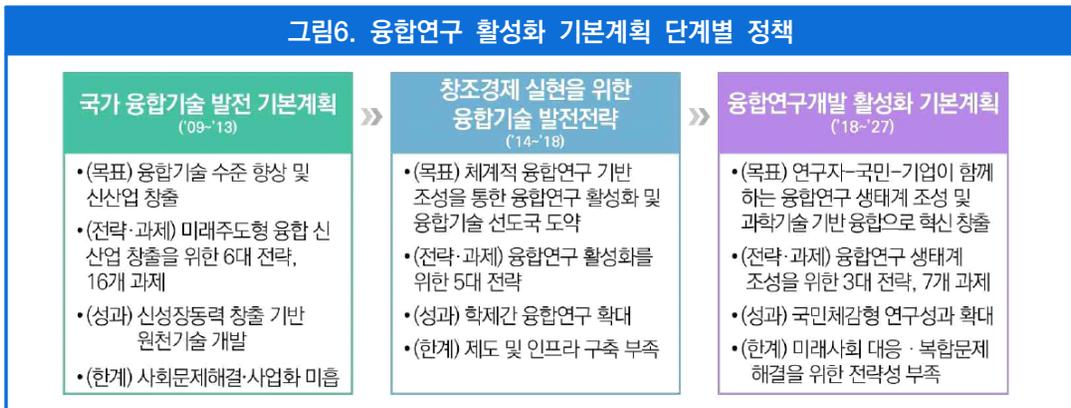
5. 융합연구 기술사업화 현황

우리나라의 융합연구는 지속적으로 성장하고 있으며, 특히 '융합연구개발 활성화 시행계획 (2024년)'에 따르면 연구 투자 규모와 성과가 크게 증가한 것으로 나타났다. 먼저, 융합연구 투자 실적은 2009년 1.6조 원에서 2022년 5.6조 원으로 3배 이상 확대되었다. 이와 함께, 논문, 특허, 기술료 등 연구성과도 크게 증가하면서 융합연구 활성화 수준이 높아지고 있다. 특히, 2022년 기준 융합연구 활성화 수준은 2.75를 기록하며, 목표치인 3.08에 근접한 것으로 평가되었다. 또한, 국가 혁신 역량 순위는 2019년 16위에서 6위로 상승하여 조기 목표를 달성했다. 세부적으로 보면, 융합연구가 연구개발 투자 확대와 정책적 지원을 통해 꾸준히 성장하고 있음을 보여준다.

- 논문 실적: 2009년 8,523건 → 2021년 16,184건
- 특허 출원: 2009년 7,480건 → 2021년 12,036건
- 기술료 수익: 2009년 196억 원 → 2021년 1,748억 원

1) 융합연구개발 활성화 정책 경과

최근 정부는 기술 간 경계를 허물고 다학제적 접근을 통해 국가 복합 문제를 해결하고 신시장을 개척하기 위한 융합연구개발 활성화 정책을 강화하고 있다. 정부는 2009년부터 국가 융합기술 발전 기본계획 수립을 시작으로 현재 제4차 계획을 운영하고 있다. 제1차 계획이 융합연구의 기반을 조성하는 단계였다면, 제2차 계획은 융합연구에 대한 인식을 확산하고, 제3차에서는 융합연구 생태계 조성을 위한 7개 과제를 수행하였다.



* 출처: 과학기술정보통신부 (2023)

현재 '제4차 융합연구개발 활성화 기본계획(2023~2027)'은 국가 복합문제 해결을 위한 융합기술 개발과, 새로운 응용분야 창출로 신시장 개척 기여라는 목표로 경계없는 융합연구, 견고한 융합 추진체계, 진화하는 생태계라는 3대전략과 9개 과제를 진행하고 있다. 기본계획을 바탕으로 그간 계획의 성과와 한계를 극복하고자 2024년도 융합연구개발 활성화 시행계획이 수립되어 연간 계획으로 추진되고 있다.

2) 융합연구개발의 전략적 방향

정부 통계에 따르면 2023년 융합연구개발에 총 3.5조 원을 투자했으며, 이는 정부 R&D 예산의 11.3%에 해당한다고 한다. 부처별로는 산업부(52.9%)가 가장 큰 비중을 차지하며, 과기정통부(27.6%), 복지부(4.0%), 교육부(3.3%)가 뒤를 잇는다. 2024년 추진계획은 "경계 없는 융합연구, 견고한 융합 추진체계, 역동적인 융합생태계 조성"이라는 3대 전략을 중심으로 수립되었다. 이를 통해 산·학·연·관·민이 협력하는 혁신적 융합연구를 활성화하고, 연구 성과가 기술이전과 사업화로 연결되는 선순환 구조를 구축하는 데 중점을 두고 있다.

첫 번째 전략인 '경계 없는 융합연구'의 내용은 아래와 같이 요약된다.

- 변혁적 융합연구 강화: 기존 연구 패러다임을 전환하는 도전적인 연구 주제를 발굴하여 지원하며, TRL(기술성숙도) 기반 사업화 연계 연구를 확대한다.
- 글로벌 융합연구 촉진: AI, 바이오, 반도체 등 첨단산업 육성을 위한 국제 공동연구 지원과 글로벌 협력 센터 운영을 추진한다.
- 초학제 융합 확대: 과학기술과 인문사회, 산업 기술을 결합한 연구를 장려하고, 기업과 연구자가 공동으로 신제품 개발 및 사업화를 추진할 수 있도록 지원한다.

두 번째 전략인 '견고한 융합 추진 체계'의 내용은 아래와 같이 요약된다.

- 융합연구 추진체계 강화: 기술 수요조사를 확대하고, 부처 간 협업을 통해 융합 R&D를 지원한다. 'STEAM연구'를 '미래개척융합과학기술개발'로 개편해 혁신성과 융합성을 강화한다.
- 융합에 특화된 평가체계 수립: 융합연구의 특성을 반영한 평가기준을 도입하고, 질적·정성적 평가를 강화한다. 전문 평가위원단을 운영하며, 연구 착수시기를 유연화한다.
- 융합연구 제도적 기반 마련: 융합연구 촉진을 위한 법 개정을 추진하고, 규제 개선으로 연구 성과의 실용화를 지원한다. 연구 유연성과 자율성을 확대해 기술 변화에 신속 대응한다.

세 번째 전략인 '역동적인 융합생태계 조성'의 내용은 아래와 같이 요약된다.

- 융합연구 데이터 활용·확산: 융합연구 논문, 특허, 산업 데이터를 수집·분석하고 국가융합지수를 개발하여 연구자 및 대중에 제공한다. 연구 초기부터 특허 전략을 지원하고, 사업화 필요 특허에 대한 컨설팅을 연계한다. 또한, 연구 성과 공유를 위한 간행물 발간과 기술·성과 교류 행사를 개최한다.
- 다양한 주체 간 융합 및 교류 활성화: 연구자 교류를 지원하며, 국내외 연구자 매칭 및 해외 연구단 확대를 추진한다. 융합연구 네트워크인 '미래융합협의회'를 확대·개편하여 기관 간 실질적 협력을 강화한다.
- 미래 융합인재 양성: 데이터사이언스, 무인이동체 등 미래 기술 인재 및 반도체 등 국가전략기술 인력을 양성한다. 대학생을 대상으로 산학협력 교육을 강화하고, 취·창업을 지원하는 전문 교육센터를 운영하며, 재직자 대상 실무형 융합교육을 제공한다.

위와 같은 정책과 더불어 융합연구개발 성과가 산업과 연계되고 실질적인 사업화로 이어지기 위해서는 기술이전 절차 개선 및 연구자 인센티브 강화, 후속 연구 지원 체계 강화, 글로벌 기술이전 및 공동연구 활성화 등 기술사업화 핵심 정책을 강화할 필요가 있다.

6. 융합연구 기술이전·사업화의 도전 과제 및 사례 분석

융합연구 기반 기술이전·사업화는 개별 기술이 아니라 여러 기술이 결합된 패키지나 솔루션 형태로 제공되는 경우가 많다. 이는 다양한 산업 분야에서 활용될 가능성을 높이지만, 동시에 산업별 요구에 맞춰 기술을 조정해야 하는 추가적인 과정이 필요하다. 반면, 일반연구는 특정 기술 단위로 이전되기 때문에 적용 가능성이 명확하고, 상대적으로 빠르게 산업화가 이루어질 수 있다.

1) 융합연구의 기술이전·사업화 특징과 시사점

융합연구는 연구 단계에서부터 다학제 간 협력이 필수적이며, 산업과의 긴밀한 연계를 통해 기술이전과 사업화가 이루어진다. 기술이전 후에도 기업이 연구기관과 협력하여 기술을 최적화하는 과정이 필요하기 때문에, 기술 성숙도(TRL)가 낮거나 실증이 부족한 경우 사업화까지 오랜 시간이 걸릴 수 있다. 반면, 일반연구의 경우 독립적인 기술 단위로 적용될 수 있어 기술이전 후 빠르게 상용화될 가능성이 높다.

표 1. 융합연구의 기술이전 사업화 특징과 시사점

구분	융합연구	사업화 시사점
기술수요 발굴	여러 기술이 결합된 복합 기술로, 개별 기술의 완성도보다는 시장이 원하는 통합적 혁신성이 중요	산업계 또는 가상의 미래수요 발견을 위한 융합적 연구기획 프로세스와 방법론 정립 필요 (예: 일본 NEDO의 기술전략맵 - 미래 산업 트렌드 기반 연구 기획)
연구개발 수행	다학제적 협업을 통해 다양한 기술과 지식을 융합하여 새로운 혁신 창출	협업을 위한 다양한 플랫폼, 접근성있는 피드백 생태계 확보 (예: 미국 NIH 바이오헬스 생태계 - 연구기관, 대학, 병원이 연계된 협력 클러스터 운영)
유망기술 발굴	다학제 간 연구 협력의 어려움, 기술성숙도(TRL) 문제, 산업별 수요 맞춤형 기술 조정 필요, 이해관계자간 협력구조 필요	기술적 복합성으로 인해 요소기술에 대한 TRL 합의 조정, 보완의 과정의 집단적 전문 의사결정 프로세스 정립 (예: EU Horizon Europe의 TRL 평가 가이드라인 - 다학제 간 TRL 조정 기준 제공)

기술이전 대상	다수의 기업과 수요자가 다양한 형태로 응용하는 형태가 많으며, 개방형 협력 모델 선호	핵심기술에 대한 권리화 강화, 시장의 가능성에 따라 창업과 출자형 사업화로 기회 확대 필요 (예: MIT Deshpande Center - 연구성과 기반 창업 촉진)
기술이전 방식	패키지 형태의 기술이전이 많으며, 하나의 기술이 아닌 플랫폼·솔루션 형태로 제공됨	공동연구자간 지적재산 공동출원 갈등과 현 IPC분류 대표기술 위주 기술가치 평가방식의 한계 극복을 위한 가이드와 시스템 마련 (예: 프라운호퍼 연구소의 공동특허 관리 체계 - 연구자 간 IP 공동 출원 및 가치 평가 가이드 제공)
산업 적용 난이도	다수의 산업 분야에 적용 가능하나, 특정 환경에 맞춰 커스터마이징 필요	규제 등에 대한 특례 적용, 공공조달이나 리빙랩 등 산업계 활용 촉진을 위한 제도 마련 (예: EU Digital Innovation Hub (DIH) - 신기술 실증을 위한 규제 샌드박스 및 산업 리빙랩 운영)

[표 1]은 수요발굴에서 산업적용까지 융합연구의 기술이전 사업화 특징과 시사점을 정리하고 있다. 융합연구의 기술이전·사업화는 개별 기술보다 시장 중심의 통합적 혁신성이 중요하다. 연구개발은 다학제적 협업을 기반으로 이루어지며, 기술이전 대상은 다양한 기업과 수요자로 개방형 협력이 선호된다. 기술이전은 패키지 형태로 이루어지며, 개별 기술이 아닌 플랫폼·솔루션 방식이 일반적이다. 산업 적용은 여러 분야에서 가능하지만, 환경에 맞춘 커스터마이징이 필요하다고 볼 수 있다.

융합연구 기반 기술이전은 기존 기술보다 복잡하고 도입 과정에서의 난관이 많아 성공률이 낮을 수 있지만, 성공할 경우 시장에서의 파급력이 크고 혁신적인 기술로 자리 잡을 가능성이 높다. 이에 따라 융합연구를 통한 기술사업화는 보다 전략적인 접근과 산업 파트너와의 협력이 필수적이며, 연구개발 초기 단계부터 기술이전과 사업화 가능성을 고려한 체계적인 지원이 필요하다. 이러한 차이를 고려할 때, 융합연구 기반 기술이전·사업화는 보다 전략적인 접근과

산업과의 긴밀한 협력 모델이 필수적이며, 이를 위한 지원 정책과 실행 전략이 더욱 정교하게 마련될 필요가 있다.

2) 국가 융합기술 발전 기본계획의 기술사업화 정책

국가 융합기술의 기술사업화 정책은 [표 2]에 제1차에서 제4차까지의 융합기술 발전 기본계획에서 제시하고 있는 내용을 단계별로 요약하였다. 1차 계획('09~'13)에서는 후속 연구 및 금융지원을 강화하고, 2차 계획('14~'18)에서는 성과 활용 촉진과 기술이전을 위한 지원을 확대했다. 3차 계획('18~'27)에서는 질적 평가 도입과 성과 배분 협의를 지원하며, 4차 계획('23~'27)에서는 성과 배분 가이드라인을 마련하고, 특히 기반 후속 연구 및 사업화 지원을 강화하는 방향으로 요약할 수 있다.

표 2. '국가 융합기술 발전 기본계획' 단계에 포함된 기술사업화 정책

단계	기술이전 및 사업화 추진 정책
제1차 계획 ('09~'13)	<ul style="list-style-type: none"> • 융합신기술의 실용화를 위한 후속연구 지원 강화 • 융합기술 R&D성과의 적용을 위한 테스트베드 조성 강화 • 사업화 단계의 융합기술에 대한 금융지원 확대(펀드, IP사업화 자금)
제2차 계획 ('14~'18)	<ul style="list-style-type: none"> • 유망 융합기술 발굴에서 이전(또는 창업)까지 전주기 전문관리기관 기능 강화 ('연구개발 성과지원 센터' 기능 강화) • 융합연구 성과활용 촉진을 위한 R&D 기획지원, IP R&D 컨설팅 및 패키징 지원 • 수요-공급 간극해소를 위한 인큐베이팅 R&BD 확대, 이전기술 사업화 지원
제3차 계획 ('18~'27)	<ul style="list-style-type: none"> • 연구성과 평가 시 질적 우수성 정성평가 • IP사용 및 성과배분 사전협의 컨설팅 및 (조정)협력계약서 작성 지원 • R&D기획, IP관리, 기술사업화 전주기에 대한 과학기술일자리진흥원 지원서비스
제4차 계획 ('23~'27)	<ul style="list-style-type: none"> • 융합연구 성과배분 범위 명확화를 위한 성과배분 가이드라인 마련 • 융합연구개발 우수성과 사례집 발간 공유 • 사업화 유망 특허대상으로 후속 연구개발사업 연계 강화 • 융합 분야에 특화된 특허지원 프로세스(IP R&D적용 확대, 패키징 강화) 마련

융합연구 기반 기술이전·사업화는 개별 기술이 아니라 여러 기술과 지식이 결합된 형태로 이루어지기 때문에, 기존의 일반적인 연구와는 다른 도전 과제들이 존재한다. 그간 정부의 융합 기술 발전 기본계획 단계별로 언급된 기술사업화 정책들이다. 위 내용을 정리하면

- ① 융합기술 실용화 및 사업화 지원
 - ② 융합 연구성과 활용 촉진 및 성과관리 강화
 - ③ 융합연구 특성을 반영한 특허·IP 활용 지원
 - ④ 정책 홍보 및 우수사례 공유
 - ⑤ 연구개발 지원 네트워크 및 협력 강화
- 로 구분 가능하다.

위와 같은 정책은 아래와 같은 융합연구의 어려움과 해결과제로부터 도출되었다고 볼 수 있다. 특히 기술 성숙도(TRL), 연구자 인센티브, 규제 및 행정 절차, 산업계와의 협력 구조 등에서 복합적인 문제가 발생하며, 이를 해결하기 위한 전략적 접근이 필요하다.

3) 융합연구의 사업화 어려움과 해결과제

융합연구의 기술이전과 사업화는 높은 혁신성을 갖지만, 기존 연구보다 더 복잡한 과정을 거친다. 기술 성숙도, 연구자 인센티브, 규제 대응, 산업계 연계 등의 측면에서 여러 도전 과제가 있으며, 이를 해결하기 위한 전략적 접근이 필요하다.

① 기술 성숙도 및 사업화 연계의 어려움

융합연구는 여러 기술이 결합된 형태로, 단일 기술보다 성숙도가 낮고 추가 연구개발이 필요할 때가 많다. 특히, 산업에서 바로 활용되기 어려운 경우가 많아 사업화까지 시간이 오래 걸린다. 이를 해결하기 위해 연구개발 초기부터 사업화 가능성을 고려한 기획이 필요하며, 연구기관과 기업 간의 지속적인 협력이 필수적이다.

② 연구자 인센티브 부족

기술이전·사업화에 대한 연구자 인센티브가 부족하여 적극적인 참여가 어렵다. 논문·특허 중심의 성과 평가가 일반적이며, 융합연구의 다학제적 협업 특성을 반영한 공정한 보상 체계가 미흡하다. 연구자의 기술 창업과 기술이전에 대한 유연한 제도 마련과 인센티브 확대가 필요하다.

③ 규제 및 행정 절차의 복잡성

융합기술은 여러 산업과 학문이 결합되어 다양한 규제를 동시에 충족해야 하므로, 기술이전과 사업화가 지연되는 경우가 많다. 이를 해결하기 위해 규제 샌드박스와 같은 제도를 적극 활용하고, 연구기관 내 법률·행정 컨설팅 조직을 강화할 필요가 있다.

④ 산업계와의 연계 부족

융합연구는 산업에서의 실제 수요와 연구개발 간의 격차가 발생할 가능성이 높다. 연구 초기부터 기업과의 협력을 확대하고, 산업 수요를 반영한 맞춤형 기술이전 전략을 마련해야 한다. 또한, 산학연 협력 허브 구축을 통해 연구 성과가 산업 혁신으로 직접 연결될 수 있도록 해야 한다.

결론적으로, 융합연구의 성공적인 사업화를 위해서는 연구 초기부터 시장성을 고려한 전략적 접근이 필요하다. 연구자 중심의 인센티브 개선, 규제 대응 지원 강화, 기업과의 협력 확대 등을 통해 연구 성과가 산업과 효과적으로 연결될 수 있도록 해야 한다.

□ 융합연구 기술사업화 사례 분석

융합연구 기반 기술이전·사업화는 일반적인 연구개발 성과보다 사업화 과정이 복잡하고 도전 과제가 많지만, 성공적으로 추진될 경우 높은 부가가치를 창출할 수 있다. 특히 출연(연)에서 개발된 연구 성과가 기술이전과 창업을 통해 글로벌 시장에 진출하거나, 국가적 과제를 해결하는 데 기여한 사례들이 주목받고 있다. 다음은 융합연구의 특징을 잘 반영한 성공적인 기술 사업화 사례들이다.

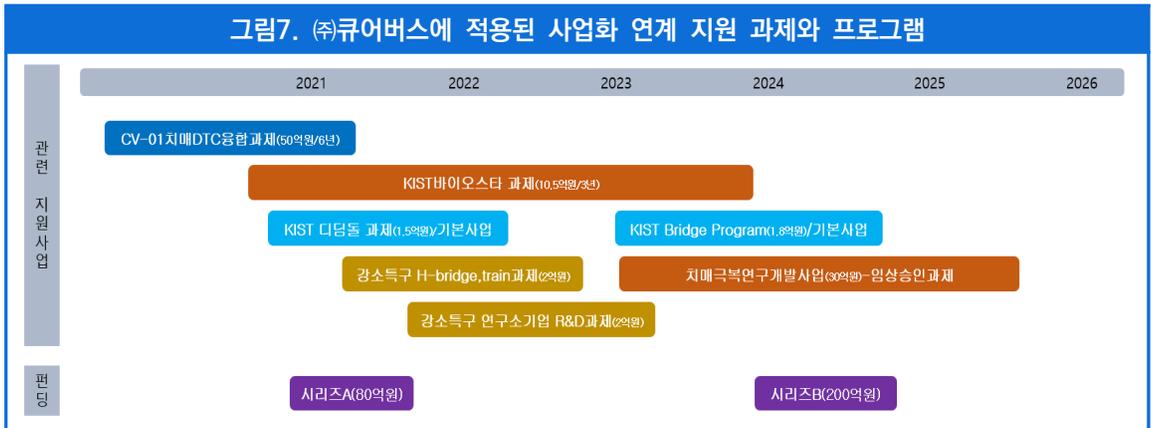
(사례 1) KIST 창업출자기업 (주)큐어버스 - 글로벌 기술이전 성공 사례

국내에서 개발된 융합 바이오 신약 기술이 글로벌 제약사로 기술이전된 대표적인 사례로, KIST(한국과학기술연구원)의 창업출자기업 (주)큐어버스가 있다. 큐어버스는 KIST에서 개발한 뇌질환 치료제 플랫폼 기술을 기반으로 2018년 창업한 바이오 스타트업으로, 최근 이탈리아 안젤리니 파마(Angelini Pharma)에 5,000억 원 규모의 기술이전 계약을 성사시키며 세계적인 주목을 받았다.

표 3. 한국과학기술연구원 글로벌 기술이전 보도자료 ('24.10.21.)

연도	성과	세부 내용	개요도
'24	〈글로벌 기술이전〉 Nrf2 활성화 기반 알츠하이머성 치매 치료 후보약물	(기관) 한국과학기술연구원 (내용) KIST가 개발한 치매 신약 후보물질, 출연연 역대 최대 금액인 5,037억원에 해외기술이전 계약 체결, KIST 창업기업 (주)큐어버스와 이탈리아 안젤리니파마사 간 기술이전 체결, 총 3억 7천만달러의 개발단계별 마일스톤 계약 체결	

이 기술의 핵심은 AI와 빅데이터 분석을 활용한 맞춤형 신약 개발 플랫폼이다. 기존의 신약 개발 방식은 후보 물질 탐색부터 임상 시험까지 10년 이상이 소요되며, 성공 확률도 10% 미만에 불과하다. 하지만 큐어버스의 기술은 AI 기반 신약 설계 및 검증 프로세스를 도입하여 개발 기간을 획기적으로 단축하고, 성공 확률을 높인 것이 특징이다.



* 출처: 한국과학기술연구원 (2024)

KIST의 융합연구팀은 NST의 치매DTC융합연구단 사업으로 시작하여 신경과학, 인공지능, 약물 설계 기술을 개발했으며, 보건복지부 치매극복 연구개발사업 이후 TLO조직 주도의 연구재단의 바이오기업출신 연구자지원 사업('17~'24)을 통한 민간 CEO 연계 창업과 KIST 창업기업지원 디딤돌 사업과 홍릉연구개발강소특구의 창업학교 및 연구소기업 R&D 지원사업, KIST 글로벌 기술이전을 위한 브리지 사업 등의 치밀한 사업 연계를 통해 기술 고도화와 글로벌 기술이전에 성공했다.

큐어버스의 성공은 단순한 신약 개발이 아니라, AI+신경과학+데이터 분석 기술이 결합된 융합 연구 성과를 다양한 사업을 결합해 산업화한 사례로 평가된다. 특히 출연(연)의 창업출자 기업이 글로벌 기술이전을 성사시킨 대표적인 사례로, 연구소 기반의 기술창업 모델의 가능성을 보여준 사례라 할 수 있다.

(사례 2) ㈜토펬스 - AI·데이터 기반 스마트 교통 및 재난관리 성공 사례

교통 통제 및 재난 관리는 과거 단순한 센서 기반 시스템에서, 최근 AI와 빅데이터를 활용한 실시간 분석 및 예측 기반 시스템으로 발전하고 있다. 출연(연)에서 개발한 AI·데이터 기반 기술을 활용하여 성공적인 기술이전 및 사업화를 이룬 대표 사례가 ㈜토펬스의 스마트 교통·재난 관리 시스템이다. 사업화의 핵심은 첨단 융합기술과 수요기업의 기술수용 역량에 있었다. 토펬스는 AI 기반 영상 분석 및 빅데이터 플랫폼을 개발하는 기업으로, KIST 기술이전 이후에도 링킹랩(Linking Lab) 사업 등 협력연구를 통해 인공지능 기반 실시간 교통·재난 예측 시스템을 상용화 하였다. 이 기술은 교통 흐름을 실시간으로 분석하여 최적의 신호 체계를 자동 조정하고, 자연재해 발생 시 드론·CCTV 영상 데이터와 기상 데이터를 융합하여 빠른 의사 결정을 지원하는 기능을 갖추고 있다.

이 시스템은 이미 일부 지자체에서 도입하여 운영 중이며, 교통 혼잡을 30% 이상 감소시키고, 재난 대응 시간을 40% 이상 단축하는 효과를 보이고 있다. 또한, 해당 기술은 해외 스마트시티 프로젝트에도 도입 가능성이 높아 글로벌 확장 가능성이 기대되는 기술이다.

이 사례는 AI, 데이터, 영상 분석, IoT 기술이 융합된 연구 성과가 사업화로 이어진 사례이며, 특히 공공 연구기관이 기술이전 후에 기업과의 상용화 연구협력을 통해 실질적인 사회 문제 해결에 기여한 대표적인 사례로 평가된다.

표 4. 한국과학기술연구원 글로벌 기술이전 보도자료

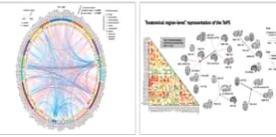
연도	성과	세부 내용	개요도
'24	〈융합 기술이전〉 교통 CCTV 기반 차량/교통 분석을 통한 실시간 교통 관리 시스템	(기관) 한국과학기술연구원 (내용) AI, 데이터, 영상 분석, IoT 기술이 융합. 교통 CCTV 기반 차량/교통 분석을 통한 실시간 교통관리 시스템. 실증 R&BD 프로그램을 활용 기술완성도 제고. 교통관리시스템 전문회사인 (주)토펬스에 기술이전. CES 2025 글로벌 공동마케팅 추진	

(사례 3) IBS - 뇌영상 바이오마커를 활용하여 통증의 정도를 예측하는 기술 개발

기초과학연구원(IBS)과 성균관대학교 연구팀은 뇌영상 바이오마커를 활용하여 통증의 정도를 예측하는 기술을 개발하였다. 이 기술은 캡사이신을 통해 유발된 지속적인 통증 동안 기능적 자기공명영상(fMRI)을 사용하여 뇌의 기능적 연결망 변화를 분석함으로써, 통증의 강도를 정확하게 예측할 수 있다. 이를 통해 환자들의 전반적인 통증 점수를 객관적으로 평가하는 것이 가능해져 환자의 삶의 질 향상에 도움을 줄 것으로 기대하고 있다.

본 사례는 융합기술 사업화 관점에서 신경과학, 의료영상, 데이터 분석 등 다양한 분야의 지식과 기술이 융합되어 이루어진 성과로, 다학제적 융합 연구의 중요성과 가능성을 보여주고 있다. 또한 주관적으로 평가되던 통증을 객관적으로 측정할 수 있는 바이오마커의 개발로 진단의 정확성을 높이고, 개인 맞춤형 치료 전략 수립에 기여할 수 있게 됐다. 통증을 객관적으로 평가함으로써 신약 개발 과정에서 약물의 효능을 정확하게 판단할 수 있어, 임상 시험의 효율성을 높이고 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대한다.

표 5. 기초과학연구원 융합 기반 성과

연도	성과	세부 내용	개요도
'22	〈세계적 저널게재〉 통증 실험 기반 통증 정도를 예측할 수 있는 뇌영상 바이오마커 개발	(기관) 기초과학연구원 (내용) LAR 뇌 영상 통증 바이오마커를 통해 캡사이신에 의해 유발된 지속적 통증 정도를 정확히 예측할 수 있는 기술. 환자들의 전반적인 통증 점수를 예측 가능 ※ Nature Medicine 게재('21.1)	

또한 뇌영상 데이터를 분석하여 통증을 예측하는 알고리즘과 소프트웨어 개발을 통해 새로운 의료기기 및 디지털 헬스케어 솔루션 시장을 창출할 수 있을 것이다. 이처럼 뇌영상 바이오마커를 통한 통증 예측 기술은 융합기술의 사업화에 있어 다각도의 기회를 제공하며, 의료 분야의 혁신을 촉진할 잠재력을 지니고 있다.

위의 세 가지 사례는 각각의 산업 분야에서 융합연구 기반 기술이전·사업화의 성공 사례를 보여주며, 다음과 같은 시사점을 제공한다. 융합연구는 개별 기술보다 산업적 파급력이 크지만, 기술 성숙도(TRL)와 사업화 연계 과정이 중요하다. 이러한 성공 사례들은 연구개발 성과가 단순한 기술이전에 머무르지 않고, 창업, 글로벌 시장 진출, 사회 문제 해결까지 연결될 수 있음을 보여준다. 향후 출연(연)의 기술이전·사업화 전략도 단순한 기술 공급을 넘어, 기업과의 협력을 강화하고, 연구개발 초기 단계에서부터 사업화 기회를 모색하는 방향으로 발전할 필요가 있다.

7. 융합연구 기술이전·사업화 활성화를 위한 개선 방안

융합기술의 사업화를 효과적으로 촉진하기 위해서는 연구개발(R&D), 기술이전, 창업 및 기업 성장까지 연계하는 종합적 플랫폼이 필요하다. 특히, 규제 완화, 투자 유치, 기업 육성, 글로벌 시장 진출, 지재권 보호 및 기술평가 문제 해결 등 다양한 측면에서 지원 체계를 강화해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 개선 방안을 제안한다.

1) 융합 기술사업화 촉진 법·제도 정비

- 기술이전·사업화 촉진 법제 보완: 협동·융합연구 기반 촉진법 개정 노력에 부가하여 기술이전 및 사업화를 활성화하기 위한 별도 조항을 마련하고, 사업화 주체가 되는 연구소·기업·기술지주회사·공공연 연구기관의 기술사업화 활동을 체계적으로 지원해야 한다.
- 출연연 연구자의 기술 출자기업 지분취득 문제 해소: 연구자가 기술 출자기업의 지분을 보유할 수 있도록 제도적 보완이 필요하며, 공직자 이해충돌 이슈를 해결하여 공공연구기관 소속 연구자의 사업화 촉진자(Technology Facilitator) 역할을 강화해야 한다.
- IP 기반 기술금융 활성화: 융합기술에 대한 기술평가 기반 투자 및 담보대출이 활성화될 수 있도록 기보 등 관련기관과의 정책협력을 통해 융합기술 가치평가 체계를 강화하고, 기술이전 기업이 자금을 원활하게 조달할 수 있는 금융 지원 프로그램을 확대해야 한다.

2) 공공·민간 협력 투자 및 융합 기술 창업 지원

- 출연연의 상용화 보완연구 사업 활성화: 융합기술은 단일 기술보다 상용화 과정이 복잡하므로, 초기 단계의 기술 실증을 지원하는 PoC 사업과, 시장 진출을 위한 후속 연구개발을 지원하는 Bridge 사업을 확대하여 기업이 보다 원활하게 상용화할 수 있도록 지원해야 한다.
- 공공·민간 공동 R&D 및 사업화 투자 펀드 조성: 융합기술 사업화는 장기간의 연구개발과 높은 초기 투자비용이 요구되므로, 정부와 민간이 공동으로 펀드를 조성하여 기술 이전 기업 및 연구소기업의 성장을 지원해야 한다.
- VC, CVC 연계 강화 및 엑셀러레이팅 프로그램 확대: 융합기술 스타트업이 성장할 수 있도록 벤처캐피털(VC), 기업형 벤처캐피털(CVC)과의 협력 체계를 구축하여 초기 및 성장 단계별 투자 지원을 강화해야 한다. 특별히 PoC 및 실증 전용 펀드(TRL 6~8단계)를 확대하고, 앵커기업과 성과협력 네트워크를 통해 CVC 유입을 촉진할 필요가 있다. 또한 융합기술 창업기업을 대상으로 기술실증, 제품 개발, 시장 개척까지 전 과정을 지원하는 전담조직을 설치하고 민간과 협력해 엑셀러레이팅 플랫폼을 구축해 가야 한다.

3) 융합기술 사업화 지원 인프라 구축

- 융합기술 실증 테스트베드(Testbed) 확대: 융합기술이 상용화되기 위해서는 정부 또는 지자체 주도의 공공 테스트베드 구축을 통해 융합기술 실증환경이 조성되어야 한다. 서울시는 2023년부터 KIST 기술이전 기업 (주)이센과 함께 고려대학교 의료를 통해 '뇌질환자 비대면 진료보조 시스템' 실증특례를 시작으로 사업을 확대해 가고 있다.
- 산학연 융합 클러스터 조성 및 글로벌 연계: 특정 기술 분야(예: AI+바이오, 바이오+디지털 헬스, 반도체+신소재 등)를 중심으로 산학연 융합 클러스터를 조성하여 연구개발, 기술이전, 창업, 산업화를 원스톱으로 효율화하는 체계를 구축해야 한다. 홍릉특구 일대의 바이오·의료 기기·디지털헬스 특화 클러스터나 독일 프라운호퍼의 AI·제조·바이오·반도체 융합 산학연 클러스터 등과 같은 클러스터가 활성화 되어야 한다. 또한 해외 산학연 협력우수 연구기관과 연계하여 글로벌 시장 진출을 지원하는 연계 플랫폼도 활성화될 필요가 있다.
- 공공 연구기관의 사업화 전담 조직 역량강화 및 기여자 인센티브 강화: 융합기술 사업화는 기존의 단일 기술이전 모델보다 복잡한 절차와 장기적인 지원이 요구된다. TLO는 '기술사업화 촉진 허브'(TLO에서 TCO로 전환*)로 기능할 필요가 있다. 이를 위해 연구기관 내 사

업화 전담 조직을 확대하거나 일부 홀딩스 형태의 민간 기능을 도입하고, 기여자에 대한 명확한 보상기준 없이 성과 압박만 주는 현재 구조를 개선하여, 인센티브를 강화하고 지속적인 기술이전·산업화 연계 체계를 구축해야 한다.

* TLO : Technology License Office, TCO : Technology Commercialization Office

4) 융합연구의 지식재산권 보호 및 기술평가 문제 해결

- 융합기술 특허 보호 및 IP 전략 강화: 다학제적 기술이 융합된 연구 성과는 기존 특허법 체계에서 보호받기 어려운 경우가 많다. 기존 국제특허분류(IPC) 기반심사나 발명의 단일성 원칙, 클레임 범위설정이 모호하다. 따라서, 융합기술에 적합한 IP 보호 전략을 수립하고, 국가 차원의 지원 체계를 마련해야 한다.
- 기술가치 평가체계 개선: 기존의 기술이전 평가 방식은 단일 기술 중심으로 이루어져 있어, 융합기술의 가치를 적절히 평가하기 어렵다. 기술보증기금 등 기술가치 평가기관도 연구하고 노력하고 있지만 아직 시스템적 반영이 미흡하다. 따라서, 멀티-기술 패키지 평가 모델을 도입하여 기술의 시장성과 응용 가능성을 종합적으로 고려하는 새로운 평가 체계가 마련되도록 고민해야 한다.
- 기술이전 계약 시 지식재산권(IP) 활용 모델 다변화: 융합기술의 특성상 단순한 특허 매각 방식에서 벗어나, 라이선스, 공동 개발, 기술 패키징 모델 등 다양한 형태의 기술이전 계약 방식을 도입하여 기업이 필요에 맞게 기술을 활용할 수 있도록 해야 한다. 융합기술의 경우 여러 기술이 결합된 형태로 존재하고, 기술의 발전 속도가 빠르기 때문에 보다 유연한 IP 활용 모델이 필요하다. 또한 단순한 특허 이전이 아니라, 알고리즘, 하드웨어, IP를 포함한 기술 패키지를 기업에 제공할 필요가 있다.

융합기술의 사업화는 단순한 기술이전이 아니라 연구개발, 기술이전, 창업, 후속 지원, 글로벌 시장 진출까지 연계하는 종합적 플랫폼 구축이 필수적이다. 이를 위해 ▲ 융합연구 사업화를 위한 법제의 정비 ▲출연연 연구자의 기술 출자기업 지분 취득 문제 해결 ▲ PoC 및 Bridge 사업 활성화 ▲융합기술의 지재권 보호 및 평가 문제 해결을 포함한 다각적 지원이 필요하다. 이러한 종합적인 접근을 통해 융합기술의 사업화를 촉진하고, 연구개발 성과가 산업으로 원활하게 연결될 수 있도록 해야 한다.

3 결론 및 제언

융합연구 기반 기술이전·사업화는 단순한 연구 성과 이전을 넘어, 산업의 혁신을 촉진하고 국가 경제에 실질적으로 기여할 수 있는 중요한 과정이다. 특히, 출연(연)의 역할이 점차 기술 공급자를 넘어 산업 혁신을 주도하는 협력 파트너로 변화하고 있으며, 이에 맞춰 기술이전·사업화의 지속적인 발전 방향과 정책적 지원이 필요하다.

1) 융합 기술사업화 촉진 법·제도 정비

기술이전·사업화는 연구개발 성과가 실질적인 경제적·사회적 가치로 전환되는 핵심 과정이며, 이를 지속적으로 발전시키기 위해서는 기술이전의 질적 고도화, 기업과의 협력 확대, 글로벌 기술시장 진출이라는 세 가지 방향성이 중요하다.

첫째, 기술이전의 질적 고도화를 위해 기술이전 후 기업이 추가 연구개발을 통해 빠르게 사업화할 수 있도록, 연구기관이 지속적인 지원을 제공하는 구조를 마련해야 한다. 상용화 Bridge 사업이나 PoC(Proof of Concept)등이 더욱 활성화되어야 한다. 이를 위해 기술 성숙도(TRL) 기반 맞춤형 기술이전 모델을 구축하고, 기업과 공동으로 기술을 검증하는 실증 연구 지원을 확대해야 한다.

둘째, 기업과의 협력 확대를 위해 연구개발 단계에서부터 산업계의 수요를 반영한 R&D 전략이 필요하다. 이를 위해 산학연 협력 플랫폼을 구축하여 연구기관과 기업이 공동으로 기술 개발 및 실증 프로젝트를 수행하는 모델을 강화해야 한다.

셋째, 글로벌 기술시장 진출을 위해 연구기관이 보유한 핵심기술의 해외 이전을 적극적으로 추진하고, 해외 연구기관 및 기업과의 협력 네트워크를 확대해야 한다. 특히, 글로벌 기술이전 및 공동 연구개발 프로젝트를 적극 활용하여, 한국의 연구 성과가 해외 시장에서도 경쟁력을 가질 수 있도록 해야 한다.

2) 융합연구 사업화 촉진을 위한 정책적 제언

융합기술의 사업화는 단순한 기술이전이 아니라 연구개발(R&D), 기술이전, 창업, 후속 지원, 글로벌 시장 진출까지 연계하는 종합적 플랫폼 구축이 필수적이다.

첫째, 융합 기술사업화를 촉진하기 위한 법·제도적 기반을 정비해야 한다. 협동·융합연구 촉진법 개정과 함께, 기술이전 및 사업화를 활성화할 수 있도록 연구소기업·기술지주회사·공공연구기관의 역할을 명확히 하고, 연구자가 기술 출자기업의 지분을 보유할 수 있도록 공직자 이해충돌 문제를 해결해야 한다. 또한, IP 기반 기술금융 활성화를 통해 융합기술 기업이 자금 조달에 어려움을 겪지 않도록 지원해야 한다.

둘째, 공공·민간이 협력하여 R&D 및 사업화 투자 펀드를 조성하고, PoC(Proof of Concept) 및 Bridge 사업을 활성화하여 융합기술의 실증 및 후속 연구개발을 지원해야 한다. 또한, 벤처캐피탈(VC), 기업형 벤처캐피탈(CVC)과의 협력을 강화하고, 민간 주도의 액셀러레이팅 플랫폼 구축을 지원하여 융합기술 창업기업이 빠르게 성장할 수 있도록 해야 한다.

셋째, 융합기술 실증 테스트베드(Testbed) 확대 및 산학연 융합 클러스터 조성을 통해 연구개발, 기술이전, 창업, 산업화까지 원스톱으로 지원하는 체계를 구축해야 한다. 이를 위해 KIST-고려대학교의 뇌질환 비대면 진료 실증 특례와 같은 사례를 확산하고, 해외 산학연 협력 연구기관과의 글로벌 연계 플랫폼을 활성화해야 한다.

넷째, 공공 연구기관의 사업화 전담 조직 역량을 강화하고, 연구자 및 기술사업화 기여자에 대한 인센티브를 확대해야 한다. 기존의 TLO(Technology Licensing Office)를 '기술사업화 촉진 허브' 역할을 수행하는 TCO(Technology Commercialization Office)로 전환하고, 기술이전 담당자의 보상체계를 개선하여 지속적인 기술이전·산업화 연계를 강화해야 한다.

마지막으로, 융합기술의 지식재산권 보호 및 기술평가 체계를 개선해야 한다. 다학제적 기술이 기존 특허법 체계에서 보호받기 어려운 문제를 해결하기 위해 멀티-기술 패키지 평가 모델을 도입하고, 특허 매각 중심의 기술이전 방식에서 벗어나 라이선스, 공동개발, 기술 패키징 등 다양한 형태의 기술이전 계약 모델을 확대해야 한다.

이처럼 융합기술의 성공적인 사업화를 위해서는 법·제도적 기반 강화, 투자 확대, 기술 실증 및 글로벌 연계, 연구자 인센티브 강화, 지재산 보호 및 기술평가 개선 등의 다각적이고 종합적인 접근이 필요하다.

3) 미래 융합 기술사업화 전략과 출연(연)의 역할

미래 기술사업화는 단순한 기술이전에서 벗어나, 산업 혁신 및 글로벌 시장 경쟁력 강화를 위한 전략적 접근이 필요하다. 이를 위해 출연(연)의 역할도 기존의 연구개발 수행 기관에서 산업 및 국가 혁신을 주도하는 플랫폼 역할로 전환되어야 한다.

● AI 및 데이터 기반 기술사업화 모델 도입

미래 기술사업화에서는 AI와 빅데이터를 활용하여 연구개발 성과를 보다 효율적으로 평가하고, 수요기업 매칭의 효율을 개선하고 적절한 BM(Business Model)을 제시하는 등 기술이전 및 사업화 성공 가능성을 높이는 것이 중요하다. 출연(연)은 AI 기반 연구 성과 분석 시스템을 구축하고, 기술사업화 예측 모델을 도입하여 연구 성과가 시장에서 성공할 가능성을 사전에 분석하는 시스템을 도입할 필요가 있다.

● 신기술 분야(AI, 바이오, 쿼텀, 탄소중립 등)에서의 선도적 역할 수행

미래 산업에서는 인공지능, 바이오·헬스, 양자 컴퓨팅, 탄소중립 등의 신기술 분야에서의 핵심기술 확보가 결정적인 국가 성장 동력으로 작용할 것이다. 출연(연)은 이러한 분야에서 연구 역량을 고도화하고 선도적인 연구개발 협력을 수행하며, 기업과 협력하여 글로벌 기술 경쟁력을 확보하는 데 더 매진해야 한다.

● 출연(연) 중심의 글로벌 기술 협력 네트워크 구축

기술사업화는 국내 시장뿐만 아니라 글로벌 시장에서의 확장이 중요한 요소다. 최근 국가 간 기술 패권 경쟁이 심화되고 글로벌 시장 선점이 중요해지고 있다. 이에 따라 단순한 기술이전이 아닌, 전략적 글로벌 협력과 기술 주도권 확보를 위해 출연(연)은 해외 연구기관 및 기업과의 협력을 확대하고, 글로벌 기술이전 프로젝트를 적극 추진하여 한국의 연구 성과가 해외 시장에서도 경쟁력을 가질 수 있도록 해야 한다.

융합연구 기반 기술이전·사업화는 기존 연구개발 방식과 달리 연구기관, 기업, 정부 간의 긴밀한 협력 체계가 필수적이다. 출연(연)은 단순한 연구 성과 창출을 넘어 산업 혁신의 촉진자이자 기술사업화의 핵심 파트너로 발전해야 한다. 이를 위해 기술이전 절차를 효율화하고, 연구자의 참여를 유도하는 인센티브 체계를 구축하며, 기업과의 협력을 강화해야 한다. 또한, 기업 수요 중심의 사업화 운영 모델을 도입하고, 글로벌 기술시장과의 연계를 확대하는 전략적 접근이 필요하다. 융합연구의 성과가 산업과 효과적으로 연결될 때, 국가 혁신 생태계 강화와 미래 산업 경쟁력 확보로 이어질 수 있다. 출연(연)이 이러한 혁신의 중심축이 될 수 있도록 체계적인 정책 지원과 전략적 접근이 지속적으로 이루어져야 한다.

저자소개

임 환(Lim, Hwan)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> · 고려대학교 경영과학 박사 · KAIST 경영정보학 석사 | <ul style="list-style-type: none"> · (現) 한국연구소기술이전협회장 · (現) 흥릉강소특구사업단장 · (前) KIST 기술사업전략본부장 · (前) KIST 경영기획실장 |
|---|---|

참고문헌

〈국내문헌〉

- 1) 과학기술정보통신부, 「국가연구개발 성과 분석 보고서」, 2022.
- 2) 국가과학기술운영위원회, 제1차 국가융합기술 발전 기본계획, 2008.
- 3) 국가과학기술운영위원회, 제4차 국가융합기술 발전 기본계획, 2023.
- 4) 국가과학기술운영위원회, 창조경제 실현을 위한 융합기술 발전전략, 2014.
- 5) 국가과학기술자문회의, 「2024년도 융합연구개발 활성화 시행계획」, 2024.
- 6) 김도현 외, 「출연(연)의 기술이전-사업화 전략 연구」, 한국기술혁신학회, 2021.
- 7) 손수정 외, 독일의 기술사업화 주체별 특징, STEPI, 2017.
- 8) 이재훈 외, 「국내 연구소기업 창업 성공 사례 분석」, 기술경영경제학회, 2022.
- 9) 중소벤처기업부, 연구소기업 및 기술창업 지원 정책 자료집, 2022.
- 10) 한국과학기술기획평가원(KISTEP), 「기술이전 및 사업화 촉진을 위한 제도 개선 연구」, 2021.
- 11) 한국과학기술연구원 융합정책연구센터, 제3차 융합연구개발_활성화_기본계획. 2018.
- 12) 한국과학기술연구원(KIST), AI 기반 신약 개발 플랫폼 기술이전 사례 보고서, 2023.
- 13) 한국과학기술연구원(KIST), 사업화유망기술 보고서, 2023.
- 14) 한국산업기술진흥원(KIAT), 「공공기술 사업화 실태조사 및 정책 제언」, 2023.
- 15) 한국연구재단(NRF), 「융합연구 활성화를 위한 정책 방향 연구」, 2022.
- 16) 한국전자통신연구원(ETRI), 「AI 기반 스마트 재난관리 시스템 기술 보고서」, 2022.
- 17) 한국화학연구원(KRICT), 「탄소중립을 위한 CO₂ 저감 기술 실증 연구」, 2023.

〈국외문헌〉

- 1) Angelini Pharma, "Technology Licensing Agreement with Cureverse," Press Release, 2023.
- 2) Deshpande Center for Technological Innovation at MIT, Startup Commercialization and Entrepreneurship Support, USA, 2023.
- 3) European Commission, Horizon Europe TRL Assessment Guidelines, EU, 2022.
- 4) European Digital Innovation Hub (DIH), Regulatory Sandbox and Living Lab for Emerging Technologies, EU, 2023.
- 5) Fraunhofer Society, "Annual Report 2022: Technology Transfer and Innovation," Germany, 2022.
- 6) Fraunhofer Society, Joint Patent Management and Technology Valuation Framework, Germany, 2022.
- 7) Japanese National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), "Technology Commercialization Policies and Industry Collaboration," Japan, 2021.
- 8) Mowery, D., Nelson, R., & Sampat, B., "Technology Transfer and the Bayh-Dole Act: Lessons for Developing Countries," Research Policy, 2010.
- 9) National Institutes of Health (NIH), Biomedical Research and Innovation Ecosystem, USA, 2021.
- 10) New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Technology Strategy Map and Future Industry Trends, Japan, 2022.

〈기타문헌〉

- 1) 기계신문, KIST, 고려대의료원·이센과 ‘뇌질환자 비대면 진료보조 시스템’ 실증특례 추진, <https://www.mtnews.net>.
- 2) 미래융합전략센터 홈페이지 <https://kist.re.kr/fcsc/>.
- 3) 전자신문, [기고] 일본 산업기술종합연구소(AIST)의 벤처창업 정책과 성과 시사점, <https://www.etnews.com/20211129000183>.

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

융합연구리뷰

Convergence Research Review

발행일 2025년 2월 26일

발행인 임혜원

한국과학기술연구원 미래융합전략센터

발행처 (02792) 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5

TEL. 02-958-4987 <https://kist.re.kr/fcsc>

편집 공성형, 김우중, 배경은, 박정환



미래융합전략센터
Future Convergence Strategy Center

2025

융합연구리뷰

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

ADDRESS 02792 서울특별시성북구화랑로14길 5

TEL 02.958.4987



ISSN. 2465-8456