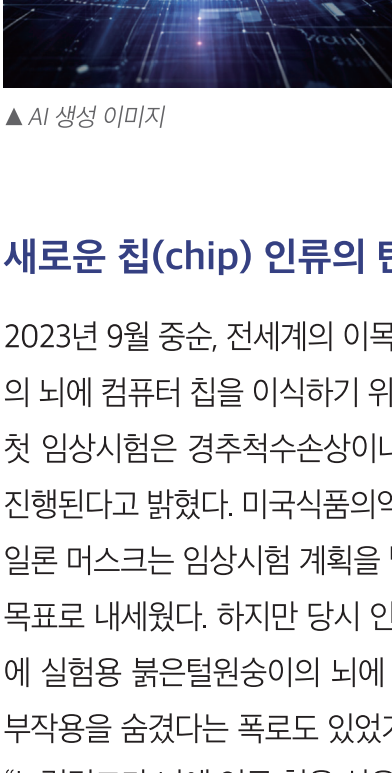




우수성과	영장류의 뇌에 완전 이식하는 무선 텔레파시칩 개발
연구자	장경인 (대구경북과학기술원 로봇및기계전자공학과 교수/엔사이드 주식회사 대표이사)

무선 텔레파시 칩으로 뇌질환 연구의 한계 넘는다



▲ AI 생성 이미지

"I don't think it's as far away as people might think."
-Noland Arbaugh

(사람들이 생각하는 것만큼 그렇게 먼 일은 아니라고 생각합니다.)

- 뉴럴링크 BCI 임상시험 참가자 놀랜드 아르보

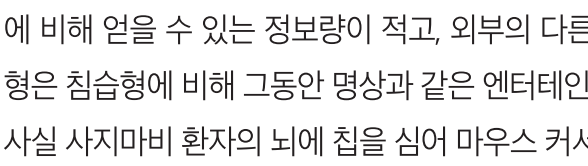
새로운 칩(chip) 인류의 탄생

2023년 9월 중순, 전세계의 이목은 일론 머스크가 이끄는 뇌신경과학 기업 '뉴럴링크(Neural Link)'에 쏠렸다. 인간의 뇌에 컴퓨터 칩을 이식하기 위해 첫 임상시험 참가자를 모집한다고 발표했기 때문이다. 뉴럴링크는 공자를 통해 첫 임상시험은 경추척수손상이나 근위축성측삭경화증(루게릭병)으로 마비를 겪는 환자를 대상으로 약 6년 동안 진행한다고 밝혔다. 미국식품의약청(FDA)에서 인간에 대한 연구를 허가한 지 낙 달 만의 일이었다.

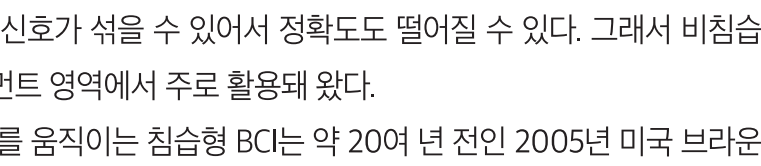
일론 머스크는 임상시험 계획을 발표하며 루게릭병은 물론 우울증이나 조현병 등 다양한 뇌 질환을 정복하는 것을 목표로 내세웠다. 하지만 당시 인간을 대상으로 하는 시험에 대한 우려의 목소리도 컸다. 뉴럴링크는 이미 2021년에 실험용 붉은털원숭이의 뇌에 칩을 이식해 생각만으로 비디오 게임을 하도록 하는 데 성공했는데, 후에 심각한 부작용을 숨겼다는 폭로도 있었기 때문이다. 기대와 우려 속에서 2024년 1월 일론 머스크는 소셜미디어 X를 통해 "뉴럴링크가 뇌에 인공 칩을 심은 최초의 환자가 탄생했다"며 임상시험 성공 소식을 알렸다. 그는 뉴럴링크의 첫 제품을 '텔레파시(Telepathy)'라고 칭하며 "후대전환나 컴퓨터를 포함해 거의 모든 기기를 생각만으로 제어할 수 있다."고 말했다. 실제로 한 달 뒤 이 환자가 생각만으로 컴퓨터 마우스를 조작했다는 소식이 전해졌다.

이처럼 뇌파 측정과 전극 등이 달린 장치를 이용해 뇌와 컴퓨터를 연결하고 상호작용하도록 하는 기술을 가리켜 '뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI, Brain-Computer Interface)' 기술이라고 한다. 이 기술은 뇌파를 수집하고 기록해 정보를 뇌부로 전송하는 것이 핵심이다. 뉴럴링크는 이를 위해 'N1 임플란트 칩'을 이용한다. 50원짜리 동전만 한 이 장치는 전기 신호인 뇌파를 받아들이는 전극이 달린 가는 실과, 이 전기 신호를 무선으로 외부로 전송하는 칩, 그리고 무선 충전 가능한 배터리 등으로 이루어져 있다. 여기서 뇌파를 받아들이는 역할을 하는 실은 총 64개로, 머리카락의 10분의 1 정도도 가늘다. 실 하나에는 전극이 16개씩, 총 1024개가 달려 있다. 기존의 딱딱한 칩 대신 유연하고 가는 실을 이용해 뇌파 측정 영역을 훨씬 넓히면서도 뇌 손상을 줄였다.

뉴럴링크의 첫 임상 시험에 참가해 칩 인류가 된 사람은 미국의 놀랜드 아르보 씨로, 당시 그는 8년 전 있었던 다이빙 사고로 어깨 아래 모든 몸이 마비된 상태였다. 하지만 그는 뉴럴링크 칩을 이식받은 이후 두 달 뒤인 3월, 휠체어에 앉아 손발은 쓰지 않고 생각만으로 컴퓨터 화면을 보며 체스를 둘 수 있게 되었다. 그리고 1년 뒤에는 방송 인터뷰를 통해 칩을 통한 조작 능력이 향상됐고, 게임 실력도 늘었다는 근황을 전하기도 했다.



▲ 놀랜드 아르보 씨, 위키미디어, Rational Optimist Society



▲ 뉴럴링크 임상시험 참가 후 생각만으로 체스 게임을 하고 있는 놀랜드 아르보 씨의 모습, 뉴럴링크 홈페이지 캡처

BCI 기술은 뇌파를 측정하는 방법에 따라 크게 침습형과 비침습형으로 나눌 수 있다. 침습형은 두개골을 열고 장치를 삽입해 뇌파를 측정하는 방식으로, 정확도는 높지만 외과수술에 대한 부담과 위험도가 있다. 반면 비침습형은 두개골을 열지 않고 머리에 장치를 부착하거나 헤드셋을 써서 뇌파를 측정한다. 안전하고 간편하지만 대신 침습형에 비해 얻을 수 있는 정보량이 적고, 외부의 다른 신호가 섞을 수 있어서 정확도도 떨어질 수 있다. 그래서 비침습형은 침습형에 비해 정교한 영상과 같은 엔터테인먼트 영역에서 주로 활용돼 왔다.

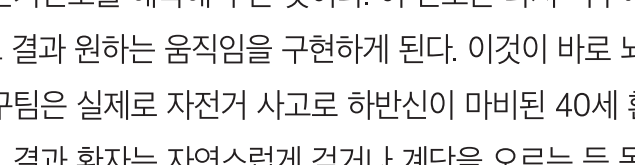
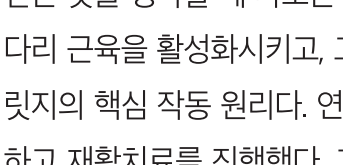
사실 사지마비 환자의 뇌에 칩을 심어 마우스 커서를 움직이는 침습형 BCI는 약 20여 년 전인 2005년 미국 브라운대 연구팀이 먼저 성공한 사례가 있다. 하지만 당시는 큰 장치가 머리에 달려 있어 불편한 데다가 위험도도 높았다. 결국 작고 가벼우면서도 무선으로 정보를 전달하고 배터리도 충전 가능한 BCI 기술을 구현했다는 점에서 뉴럴링크의 임상시험은 높은 평가를 받았다. 그런 면에서 놀랜드 아르보 씨는 자연스러운 일상생활이 가능한 '칩(chip)' 인류라고 할 수 있다.

그는 한 방송 인터뷰에서 "척수 손상이 더 이상 심각한 장애를 만들지 않는 날이 오기를 바란다"며, "사람들이 생각하는 것만큼 먼 미래의 일은 아닌 것 같다"고 말해 BCI 기술에 대한 만족감과 기대감을 나타냈다.

생각을 읽고, 행동하고, 표현한다! BCI 춘추전국시대

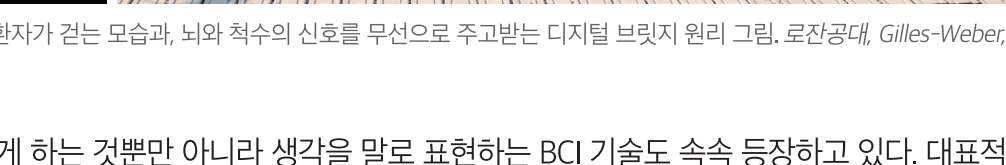
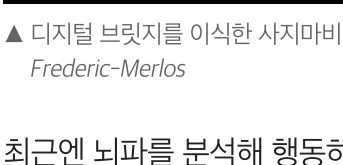
뉴럴링크보다 앞서 BCI 기술로 주목을 받은 곳이 있다. 바로 스위스 로잔공대 그레고아르 쿠르티에 교수 연구팀이다. 연구팀은 2023년 5월 '뇌-척수 인터페이스를 이용한 척수 손상 후 자연스러운 보행'이라는 제목의 논문을 국제 학술지 네이처에 발표했다. 뉴럴링크가 뇌파로 컴퓨터 마우스를 움직이는 것처럼 생각만으로 기기를 조절하는 시험이었다면, 로잔공대 연구팀은 마비가 된 몸을 직접 움직이게 하는 연구라는 점에 차이가 있다.

연구팀은 추락이나 교통사고 등으로 척수가 손상되면 뇌로부터 필요한 신호를 척수가 받지 못해 팔과 다리를 제대로 움직일 수 없게 된다는 점에 주목했다. 기존 연구들에서는 주로 뇌에 직접적으로 전기 자극을 주는 치료가 많았지만, 로잔공대 연구팀은 이와 달리 뇌와 척수 사이의 연결을 회복하는 기술을 연구했다. 즉, 뇌와 척수도 각각 하-척수, 두 가지 유형의 전자 임플란트를 이식하고 둘 사이를 무선으로 연결하는 '디지털 브릿지' 시스템을 개발한 것이다.



이를 위해 연구팀은 프랑스 대체에너지원자력위원회(CEA)에서 개발한 '위마진(WIMAGINE)'이라는 장치를 사용했다. 이 장치는 64개의 전극으로 이루어진 8x8 격자와 기록 전자 장치로 구성되어 있으며, 두개골과 같은 두께의 직경 50mm 원형 티타늄 케이스 안에 들어 있다. 이런 구조 덕분에 전극과 경막 사이의 긴밀하고 안정적인 접촉을 촉진하면서도, 두개골 내부에 이식되면 장치가 보이지 않게 된다.

위마진은 인공지는 기반 알고리즘을 바탕으로 뇌파를 분석해 실시간으로 움직임의 의도를 해독해 준다. 즉, 우리가 걷는 것을 생각할 때 나오는 전기신호를 해독해 주는 것이다. 이 신호는 다시 척수에 연결된 신경 자극기로 보내져 다리 근육을 활성화시키고, 그 결과 원하는 움직임을 구현하게 된다. 이것이 바로 뇌와 척수를 연결하는 디지털 브릿지의 핵심 작동 원리다. 연구팀은 실제로 자전거 사고로 하반신이 마비된 40세 환자에게 디지털 브릿지를 이식하고 재활치료를 진행했다. 그 결과 환자는 자연스럽게 걷거나 계단을 오르는 등 독립적으로 움직일 수 있게 되었다. 게다가 이 환자는 디지털 브릿지가 꺼진 상태에서 감각 인지 능력이 향상된 것으로 나타났다. 연구팀은 디지털 브릿지를 통해 손상된 척수에서 놀라운 새로운 신경 연결이 이루어지고 있다고 설명했다.



▲ 디지털 브릿지를 이식한 사지마비 환자가 걷는 모습과, 뇌와 척수의 신호를 무선으로 주고받는 디지털 브릿지 원리 그림, 로잔공대, Gilles-Weber, Frederic-Merlot

최근엔 뇌파를 분석해 행동하게 하는 것뿐만 아니라 생각을 말로 표현하는 BCI 기술도 속속 등장하고 있다. 대표적으로 미국 기업인 패러드로믹스(Paradromics)는 잃어버린 목소리를 되살리는 BCI 기술의 임상시험을 앞두고 있다. 패러드로믹스의 장치는 지름이 약 7.5mm인 원형 칩에 백금-이리듐 전극이 촘촘하게 박혀 있는데, 이 전극들이 뇌 표면을 1.5mm 깊이로 뚫고 들어가 신호를 감지하는 원리다. 이렇게 수집된 정보는 가슴에 이식된 무선 통신장치로 전달된다. 환자가 문장을 속으로 생각하면, 수집되는 정보를 바탕으로 문장 패턴을 인공지능이 학습하고 이후 이를 토대로 화면에 문장을 보여주거나 실시간 합성 음성으로 들려주게 된다.

두개골을 여는 대신 혈관에 칩을 삽입하는 '스텐트로드 BCI' 기술을 개발한 스타트업인 '싱크론(Synchron)'은 아예 뇌파로 아이폰을 사용할 수 있게 하겠다고 나섰다. 장래로 손을 쓸 수 없는 사람들이 뇌파로 손쉽게 애플 기기를 사용할 수 있도록 애플과 함께 기술개발에 들어간 것이다. 아직은 기술개발 초기 단계이지만, 뇌파를 효과적으로 변환해 사용자가 화면의 아이콘을 탐색하고 선택하게 해 주는 것이 목표다. 이번 애플과의 협력 연구는 BCI 기술이 실제 일상생활에 큰 변화를 이끌어내는 중요한 계기가 될 것으로 기대되고 있다.



▲ 패러드로믹스가 개발한 뇌신호를 소리 패턴으로 변환해 주는 BCI 장치 모습, 패러드로믹스

완전 매립형 무선 뇌신경 신호 기록기, 뇌질환 연구

앞서 살펴본 것처럼 최근 각각 받는 글로벌 BCI 기술들은 모두 인체 부작용이 적은 소재와 가볍고 무선 통신과 충전이 가능하다는 특징이 있다. 그래야 최대한 물리적인 인체에 무리를 적게 줄 수 있고, 외형적으로도 자연스러운 일상생활에 방해가 되지 않기 때문이다. 최근 우리나라 대구경북과학기술원 로봇및기계전자공학과 장경인 교수팀도 이러한 글로벌 경쟁력을 갖춘 BCI 기술을 발표해 주목을 받고 있다.



▲ 무선 뇌신경 신호 기록기 구조와 실제 모습, 장경인 교수 연구팀

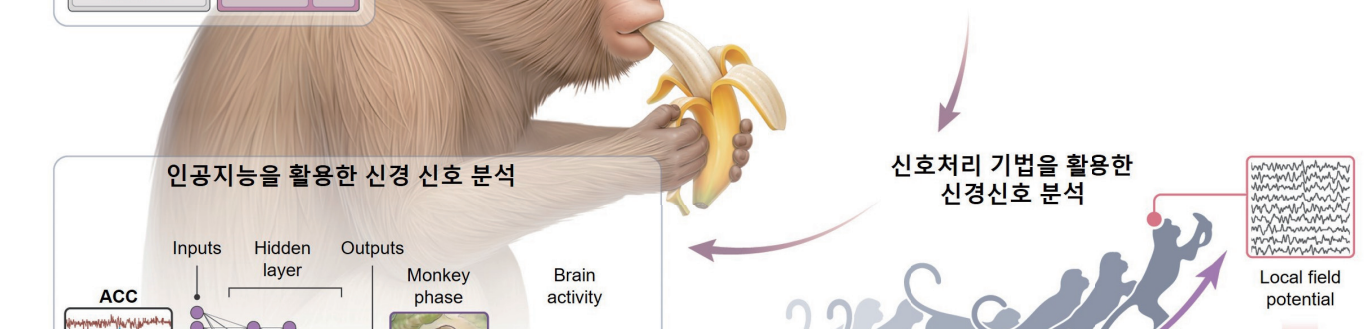
연구팀은 무거우면서도 무선으로 연결돼 있는 기존 BCI 기기가 사용자의 행동을 크게 제약한다고 보았다. 특히 주기적으로 배터리를 충전해야 하는 것은 연구에 큰 걸림돌이었다. 즉, 식사나 수면 같은 자연스러운 상태에서 뇌 활동을 연구하려면 아예 사용자가 장치의 존재를 느낄 수 없을 정도의 기술이 필요하다고 생각한 것이다. 이에 연구팀은 한국생명공학연구원과 공동 연구를 통해 '완전 매립형 무선 뇌신경 기록기'를 개발한 것이다.

이 장치는 머리카락보다 얇고 유연한 초박형으로, 프로브에 32개씩 다공성 전극과 생분해성 실마리 삽입체가 결합된 형태로 돼 있다. 실마리 삽입체는 장치를 뇌에 삽입할 때 기계적인 강성을 제공하는 역할을 하는데, 삽입 후에는 저절로 녹아 없어진다. 장기적으로 조직 손상을 최소화하도록 만든 것이다. 또한 무선 전력 수신 코일과 저전력 회로로 구성해 배터리 없이 완전 매립형으로 작동하도록 했다.

연구팀은 이번 연구를 통해 무선 전력 케이블도 개발했다. 뇌에 신경 기록장치를 삽입한 원숭이가 케이지에서 자연스럽게 움직이는 동안 지속적으 무선 전력을 받을 수 있도록 한 것이다. 이때 리피터 코일을 활용해 단일 코일 대비 수십 배 전력이 이상 송수신 영역을 확장했고, 낮은 발열과 저가장 안전성도 생체 안정성에 대한 검증도 진행했다. 또한 저전력 블루투스 7기반의 양방향 무선 통신 기술을 탑재해, 자유롭게 움직이는 원숭이도 뇌 심부 신호와 행동 데이터를 스마트폰 등 외부 기기로 실시간 전송하고 모니터링할 수 있는 시스템을 구현했다.

연구팀은 이렇게 구축된 장치를 이용해 원숭이의 본능적인 섭식 행동 중 발생하는 뇌 신호를 은밀하고 끊임 없이 기록할 수 있었다. 이때 음식물 섭취 단계에서는 감마파(35-50Hz) 명확하게 증가했는데, 이러한 데이터를 인공지능 기반 딥러닝 모델로 분석한 결과 원숭이의 섭식 행동 단계들 90% 정확도로 자동 분류하는 성과도 올렸다.

이번 연구는 비인간 영장류가 자유롭게 움직이는 환경에서 심부 뇌신경 신호를 1개월 이상 배터리 없이 완전 무선으로 연속 기록하는 데 성공했다는 점에서 그 의미가 크다. 파식형 동물의 행동을 방해하지 않고 안정적으로 작동하는 임상 수준의 기술 완성도를 달성했기 때문이다. 세계적으로 손꼽히는 뉴럴링크나 위마진 등의 BCI 기술도 배터리 사용과 연속 기록 등에 대한 제한이 있기에 이번 장경인 교수팀의 성과는 더욱 주목할 만하다.



▲ 뇌신경 신호 측정 및 분석 개요도. 최후 침습형 설계, 실시간 무선 전력 및 통신, 인공지능 기반 신호분석이 하나의 시스템으로 연결된 BCI 기술 플랫폼이라고 할 수 있다. 장경인 교수팀

고령화 시대가 본격적으로 열리면서 알츠하이머, 파킨슨병과 같은 질환이 빠르게 늘고 있는 상황에서 BCI 기술은 갈수록 더욱 중요해지고 있다. 비만, 자폐증, 우울증과 같은 질환에도 BCI 기술이 중요한 역할을 할 것으로 기대되며 많은 기업들의 투자가 이어지고 있다. 그만큼 뇌의 작동 원리를 알아내 어려움을 해결하고, 더 나아가 편리하고 건강한 일상을 만드는 일은 시급한 과제라는 시장이 장밋하게 할 수 있다. 실제로 2024년 정보통신산업진흥원(NIPA)은 모건스탠리 분석을 인용해, 향후 5년 안에 BCI 시장이 미국에서만 약 540조 원(4000억 달러) 규모로 성장할 것으로 전망하기도 했다. 이러한 때 최초 침습형 설계, 실시간 무선 전력 및 통신, 인공지능 기반 신호 분석 기술이 하나의 시스템으로 연결된 BCI 기술 플랫폼 개발은 국가 연구 경쟁력을 높이는 계기가 될 것으로 기대되고 있다.

① 미니 인터뷰

Q 어떤 계기로 이주제를 연구하기 시작하셨나요?
A 영장류의 본능적 행동과 뇌 신호의 상관관계를 명확히 규명해 난치성 뇌질환의 근본적인 해결책을 찾고 싶었습니다. 그런데 기존의 뇌신경 기록 장치들은 배터리와 유선으로 연결해야 했기 때문에 부피가 크고 거주장소였습니다. 이로 인해 실험동물의 행동을 제약하고 스트레스를 주는 한계가 있었습니다. 이런 점을 계속 고민해 오다 "동물이 기개의 존재를 느끼지 못하는 자연스러운 상태에서 본능적인 뇌 신호를 읽을 수는 없을까?"라는 질문을 하게 됐습니다. 이 질문에서부터 연구를 시작할 수 있었습니다.

Q 이번 수상을 하기까지 연구가 어떤 과정을 통해 진행됐는지 궁금합니다. 또 현재 후속 연구는 어떻게 진행되고 있나요?
A 이번 성과가 나온 뒤 씨앗 과제인 '멀티 모달 뇌기능 센싱 기술' 연구는 2017년부터 시작되었습니다. 이후 약 7-8년 동안 인공 전자소자 기술과 무선 통신 기술을 축적해 왔으며, 2024년 글로벌 융합연구지원 사업을 통해 마침내 영장류를 대상으로 한 '완전 매립형 무선 뇌신경 기록기'를 완성할 수 있었습니다. 실제 섭식 행동 데이터를 확보하는 결실은 이제 된 것입니다. 현재는 우수성과 100선에 선정된 '은밀한 신경 기록기(Stealthy Neural Recorder)' 기술을 더욱 고도화하는 중입니다. 단순히 뇌 신호를 읽는 것(Monitoring)을 넘어 뇌 질환 징후를 실시간으로 포착하고 이에 맞춰 전 자약처럼 치료 자극을 줄 수 있는 양방향 시스템으로 발전시키고 있습니다. 또한, 영장류 실험 데이터를 바탕으로 인공지능 분석 모델을 정교화해서 향후 임상 적용 가능성을 높이는 연구도 진행하고 있습니다.

Q 실제로 BCI 기술 발달 정도로 보았을 때 언제쯤 뇌 관련 난치성 질환이 극복될 것으로 예상하시나요?
A 정확한 시점을 단정 짓기는 어렵지만, 우리는 지금 거대한 기술적 변곡점에 서 있습니다. 향후 10년 이내에 골든에이징이 될 것입니다. 현재 뉴럴링크를 비롯한 글로벌 기업들의 임상 시험이 성공적으로 진행되면서, 사지 마비 환자의 의사소통이나 기기 제어와 같은 기능 복구는 이미 현실화 단계에 접어들었습니다. 하지만 알츠하이머나 파킨슨병, 우울증과 같은 난치성 질환을 '정복'하기 위해서는 단순히 신호 측정을 넘어 뇌에 치료적 자극을 주는 '전자 약' 기술과, 이를 평생 복용에 지고 있어야도 안전한 환자용 배터리를 필수로 필요합니다. 저희 연구팀이 배터리가 없는 완전 무선 시스템에 집중하는 이유도 바로 여기에 있습니다.

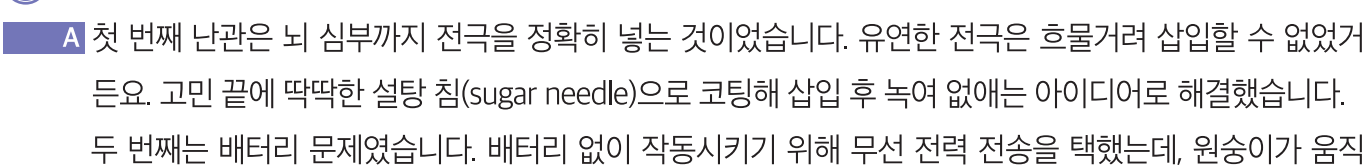
이러한 안전성 문제와 임상 인허가 과정이 순조롭게 해결된다면, 향후 5년에서 10년 내에는 뇌진증이나 파킨슨병의 증상을 획기적으로 완화하는 상용화된 BCI 의료가기를 만나볼 수 있을 것으로 예상합니다. 더 나아가 기억력 회복이나 인지 기능 강화와 같은 고차원적인 영역도 2040년경에는 가시적인 성과를 낼 수 있지 않을까 조심스럽게 전망합니다.

Q BCI 기술과 플랫폼을 활용한 연구나 기술개발은 그 영역이 무궁무진해 보입니다. 앞으로의 전망과, 또 전제 보고 싶은 연구 주제가 궁금합니다.
A 본 연구와 같은 무선 무전원 기술이 상용화된다면, 기존의 거대한 의료 장비 시장이 몸속으로 들어오는 '이식형 전자약' 시장으로 재편될 것으로 보입니다. 또한 AI 기술과 결합되어 뇌 신호만으로 로봇을 제어하거나 의사를 돕는 기술이 일상화 될 텐데요. 그렇다 된다면 장애 극복을 넘어 인간 능력을 확장하는 시대로 나아가게 됩니다.

현재 본 연구에 남아 있는 가장 큰 기술적 속제는 인간에게 적용 가능한 수준의 안전성과 장기 신뢰성을 확보하여, 현재 1개월 수준인 기록 기간을 년 단위로 늘리는 것입니다. 이를 실현하기 위한 적극적인 투자 유치로 연구개발 속도를 높이고, BCI 의료가기 인허가를 획득하여 글로벌 시장에 진출하는 것이 당면한 목표입니다. 나아가 이 기술을 로봇과 연동함으로써 단순한 치료를 넘어 노화나 장애로 인한 신체적 한계를 극복하는 데 기여하고 싶습니다. 궁극적으로는 평생 배터리 교체 없이 뇌 건강을 관리하고 인간의 능력을 확장하는 '토털 디지털 헬스케어 플랫폼'을 완성하는 게 목표입니다.

Q 이번 연구를 진행하는 과정에서 가장 결정적인 순간을 꼽는다면?
A 첫 번째 난관은 뇌 심부까지 전극을 정확히 넣는 것이었습니다. 유연한 전극은 호흡기려 삽입할 수 없었거든요. 고인 끝에 딱딱한 설탕 침(sugar needle)으로 코팅해 삽입 후 녹여 없애는 아이디어로 해결했습니다. 두 번째는 배터리 문제였습니다. 배터리 없이 작동시키기 위해 무선 전력 전송을 택했는데, 원숭이가 움직이는 넓은 공간 전체에 전력을 보내는 것이 기술적으로 매우 까다로웠습니다. 이를 '리피터 코일' 기술로 해결해 동물이 자유롭게 뛰어노는 중에도 끊임 없이 신호를 기록하는 데 성공할 수 있었습니다. 이때가 가장 결정적인 순간으로 남아 있습니다.

이러한 기술적 한계는 '융합'과 '협력'으로 돌파했습니다. 공학적인 난제는 DGIST의 유연 전자소자 기술로 풀었지만, 실제 생체 적용의 문제는 한국생명공학연구원 및 서울대학교병원 의뢰전과의 긴밀한 자문을 통해 해결할 수 있었습니다. 특히 기존 장비의 한계를 인정하고, 생분해성 소재와 초저전력 회로 설계라는 새로운 접근법을 과감히 도입했습니다. 그 결과 기술적 완성도를 높이며 극복해 나갈 수 있었습니다.



▲ 장경인 교수와 연구팀의 모습.

글 고선아(김문빛콘택트연구소 대표) 외
기획 한국과학기술기획평가원(김주희 외)

본 권고는 과학기술정보통신부가 선정한 2025 국가연구개발 우수성과 100선 최우수성과에 대한 이해를 돕고자 작성하였습니다.