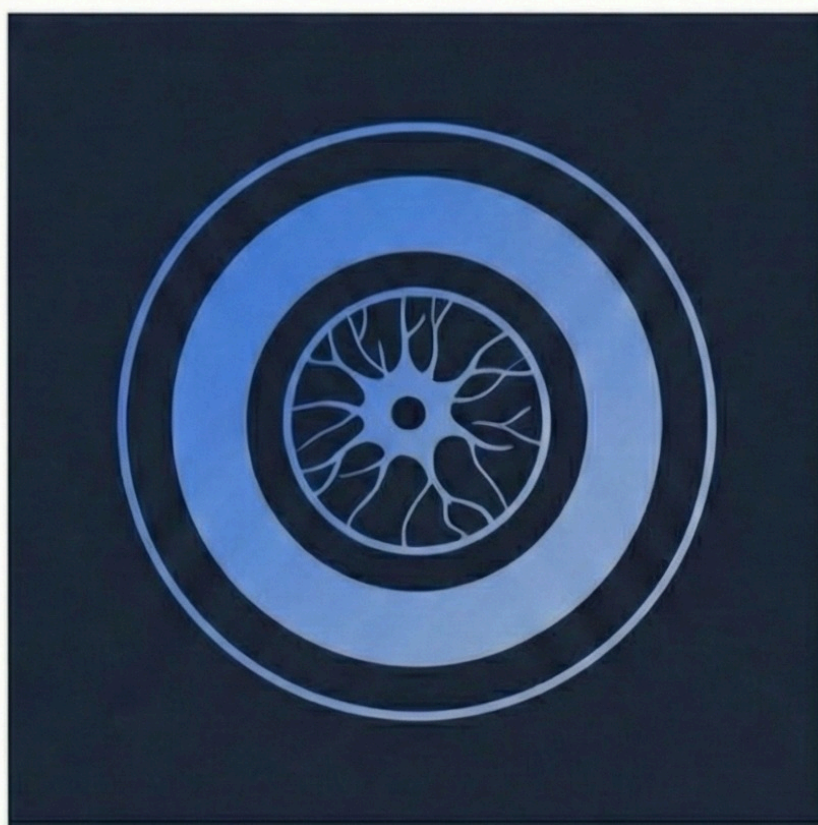


뇌를 읽는 사람들

뉴럴 링크와 인류의 마지막 혁명



AUTHOR

김경진

머릿속의 언어를 찾아서

1893년 가을, 독일의 한 청년이 말 위에서 떨어졌습니다.

한스 베르거, 열아홉 살. 군사 훈련 중이었습니다. 그의 몸은 땅바닥으로 내동댕이쳐졌고, 뒤따르던 포병대의 바퀴가 그의 머리를 스쳐 지나갔습니다. 죽음에서 수 센티미터 떨어진 순간이었습니다.

그날 저녁, 수백 킬로미터 떨어진 집에서 여동생이 갑자기 불안해졌습니다. 설명할 수 없는 공포가 밀려왔습니다. 그녀는 아버지를 설득해 전보를 보내게 했습니다. "한스에게 무슨 일이 있는 것 같아요."

전보가 도착했을 때 한스 베르거는 이미 무사했습니다. 하지만 그의 마음속에는 질문 하나가 새겨졌습니다. 어떻게 내 공포가 여동생에게 전해졌을까. 생각은 전달될 수 있는가.

31년 후인 1924년 7월 6일, 예나 대학 병원 수술실에서 베르거는 답을 찾기 시작했습니다. 두 개골이 열린 환자의 뇌에 전극을 대자 검류계 바늘이 흔들렸습니다. 뇌가 전기 신호를 보내고 있었습니다. 생각에는 물리적 실체가 있었습니다.

베르거는 이 발견을 5년 동안 발표하지 않았습니다. 동료들이 비웃을 것을 두려워해서였습니다. 실제로 그의 논문이 나왔을 때 학계의 반응은 차가웠습니다. 그러나 오늘날 뇌파검사 (EEG)는 전 세계 병원에서 매일 사용됩니다. 베르거의 집착 어린 질문이 인류에게 뇌를 들여다보는 첫 번째 창문을 선물한 것입니다.

정확히 100년이 지난 2024년 1월 29일, 미국 피닉스의 한 병원에서 다른 종류의 창문이 열렸습니다.

놀랜드 아보, 29세. 8년 전 호수에서 다이빙을 하다가 목뼈가 부러진 청년입니다. 그날 이후 그는 어깨 아래의 모든 것을 느끼지 못했습니다. 손가락 하나 움직일 수 없었습니다.

수술실에서 R1이라 불리는 로봇이 그의 두개골에 구멍을 뚫었습니다. 500원짜리 동전만 한 크기입니다. 그 구멍으로 동전 크기의 칩이 들어갔습니다. 칩 아래에는 머리카락보다 가는 64가닥의 실이 달려 있었고, 각 실에는 16개의 미세 전극이 붙어 있었습니다. 총 1,024개의 전극이 그의 운동 피질에 삽입되었습니다.

수술 다음 날, 아보는 눈앞의 노트북 화면을 응시했습니다. 커서가 움직였습니다. 손을 쓰지 않았습다. 생각만으로 움직인 것입니다.

뉴럴링크가 만든 이 장치의 이름은 텔레파시(Telepathy)입니다.

한스 베르거가 평생을 바쳤던 질문, 생각은 전달될 수 있는가, 그 질문에 대한 첫 번째 실용적 대답이 시작된 순간이었습니다.

이 책은 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI)의 이야기입니다.

BCI란 무엇인가. 인간의 뇌와 컴퓨터를 직접 연결하는 기술입니다. 뇌가 보내는 전기 신호를 읽어서 기계로 전달하고, 때로는 기계의 신호를 뇌로 보내는 양방향 통로입니다. 손을 쓰지 않고 생각만으로 휠체어를 움직이고, 말을 할 수 없는 사람이 생각만으로 문장을 입력하고, 눈이 먼 사람의 시각 피질을 직접 자극해 빛을 보게 하는 기술입니다.

공상과학 소설에서 튀어나온 이야기처럼 들립니다. 그러나 2025년 현재, 이것은 임상시험 중인 현실입니다. 미국, 영국, 캐나다, 아랍에미리트에서 환자들이 뇌에 칩을 이식받고 있습니다. 첫 번째 환자 놀랜드 아보는 생각만으로 체스를 두고, 문명(Civilization) 6를 플레이하고, 8 시간 연속으로 장치를 사용합니다. 두 번째 환자 알렉스는 CAD 소프트웨어로 3D 디자인을 합니다. 루게릭병 환자 브래드는 뇌 신호만으로 유튜브 영상을 편집했고, 인공지능이 그의 목소리를 복원해 가족과 대화합니다.

2024년 9월, 미국 식품의약국(FDA)은 뉴럴링크의 음성 복원 기술에 획기적 의료기기 지정을 내렸습니다. 시각 복원 장치 블라인드사이트(Blindsight)도 같은 지정을 받았습니다. 뇌와 기계의 대화가 본격적으로 시작된 것입니다.

그러나 이 책은 기술 해설서가 아닙니다.

저는 하나의 확신을 갖게 되었습니다. 위대한 혁신은 기술과 인문학의 교차점에서 탄생한다는 것입니다. 그리고 그 교차점에는 언제나 인간이 서 있습니다.

뉴럴링크의 창업자 일론 머스크는 왜 뇌에 집착하는가. 그는 인공지능이 인류를 추월할 것을 두려워합니다. 인간의 뇌가 1초에 전달할 수 있는 정보량은 겨우 수십 비트에 불과합니다. 스마트폰으로 문자를 치는 속도입니다. 반면 기계는 초당 수십억 비트를 처리합니다.

머스크의 논리는 이렇습니다. 이 대역폭의 격차를 좁히지 않으면 인간은 인공지능의 애완동물이 된다. 그래서 뇌와 컴퓨터를 직접 연결해야 한다.

첫 번째 환자 놀랜드 아보는 왜 자신의 두개골에 칩을 심으려 했는가. 8년 동안 손가락 하나 움직이지 못한 청년입니다. 그에게 위험은 추상적 개념이 아니었습니다. "내가 잃을 것이 뭐가 있겠어요." 그는 수술 전 인터뷰에서 말했습니다.

칠레의 상원의원 Guido Girardi는 왜 세계 최초로 헌법에 신경권(neurorights)을 넣었는가. 뇌 데이터가 새로운 석유가 될 것을 예감했기 때문입니다. 당신의 생각, 당신의 감정, 당신의 기억이 기업의 상품이 되는 미래. 그는 그 미래를 막으려 했습니다.

이 책은 이런 인간들의 이야기입니다. 기술을 만든 사람들, 기술을 자신의 몸에 받아들인 사람들, 기술의 그림자를 경계하는 사람들. 그들의 동기, 두려움, 집착, 희망을 통해 BCI의 의미를 찾으려 합니다.

동시에 이 책은 역사서입니다.

모든 혁신은 그 이전의 시도들 위에서 있습니다. 1924년 한스 베르거의 뇌파 발견부터 1970년대 자크 비달의 BCI 개념 제안, 2004년 브레인게이트의 첫 인간 임상, 2024년 뉴럴링크의 텔레파시까지. 100년의 여정입니다.

뉴럴링크만 있는 것도 아닙니다. 호주의 싱크론(Synchron)은 두개골을 열지 않고 혈관을 통해 전극을 뇌에 삽입합니다. 유타 대학에서 시작된 블랙록 뉴로테크(Blackrock Neurotech)는 9년 이상 작동하는 장기 이식 기록을 보유하고 있습니다. 프리시전 뉴로사이언스(Precision Neuroscience)는 뇌 표면에 붙이는 초박형 필름을 개발합니다. 메타(Meta)는 손목에 차는 근전도 팔찌로 비침습적 인터페이스를 연구합니다.

중국도 추격하고 있습니다. 차이나 브레인 프로젝트라는 국가 주도 연구가 진행 중입니다. 2024년 기준으로 BCI 분야에는 664개 기업이 경쟁하고 있으며, 2,160개의 특허 가족이 등록되어 있습니다.

춘추전국시대입니다. 이 책은 그 경쟁의 지도를 그립니다.

그리고 이 책은 질문집입니다.

BCI가 열어젖힌 문 앞에는 답보다 질문이 더 많습니다.

정신적 프라이버시(mental privacy)란 무엇인가. 당신의 뇌 데이터는 누구의 것인가. 2024년 뉴로라이츠 재단의 조사에 따르면 소비자용 뇌파 측정 기기를 만드는 30개 기업 중 29개가 사용자의 뇌 데이터에 무제한 접근 권한을 갖고 있었습니다. 97퍼센트의 기업이 뇌 데이터를 제3자에게 전송할 수 있는 조항을 두고 있었습니다. 당신의 생각이 누군가의 상품이 되는 시대가 오고 있습니다.

브레인재킹(brainjacking)의 가능성은 어떠한가. 누군가 당신의 운동 피질에 접근해 당신의 손을 움직인다면. 당신의 시각 피질을 해킹해 보이지 않는 것을 보게 한다면. 아직은 공상입니다. 그러나 뇌와 기계가 연결되는 순간, 이것은 이론적 가능성이 됩니다.

치료와 증강의 경계는 어디인가. 마비 환자의 운동 능력을 복원하는 것은 치료입니다. 그렇다면 정상인의 기억력을 두 배로 높이는 것은? 집중력을 강화하는 것은? 언어 학습 속도를 다섯 배로 올리는 것은? 부유한 사람만 이런 증강 기술에 접근할 수 있다면, 새로운 종류의 불평등이 태어나지 않겠습니까.

2021년 칠레는 세계 최초로 헌법을 개정해 신경권을 보호했습니다. 2024년 캘리포니아주는 뇌 데이터를 민감한 개인정보로 분류하는 법안을 통과시켰습니다. 2025년 유엔 인권이사회 자문위원회는 모든 국가에 신경기술 규제를 촉구했습니다. 법과 기술 사이의 간극을 메우려는 시도가 시작되었습니다.

이 책은 그 모든 질문을 정직하게 다룹니다. 저는 답을 갖고 있지 않습니다. 답을 강요하지도 않겠습니다. 다만 독자 여러분과 함께 고민하고 싶습니다.

마지막으로, 이 책은 미래를 향한 준비입니다.

뉴럴링크는 2026년 대량 생산을 목표로 하고 있습니다. 일론 머스크는 몇 년 안에 수백 명, 5년 안에 수만 명, 10년 안에 수백만 명이 뇌에 칩을 이식받을 것이라고 말합니다. 과장일 수 있습니다. 그의 예측은 종종 빗나갔습니다. 그러나 방향은 분명합니다.

뇌와 기계의 경계가 희미해지는 시대가 오고 있습니다.

우리는 준비되어 있는가. 의료적 혁명의 혜택을 누리면서도 프라이버시를 지킬 수 있는가. 치료와 증강 사이에서 윤리적 선을 그을 수 있는가. 기술 격차가 새로운 계급을 만들지 않도록 막을 수 있는가. BCI 뉴스를 접할 때 과장과 사실을 구별할 수 있는가.

이 책의 마지막 장에는 BCI 뉴스를 평가하는 10가지 질문을 담았습니다. 뇌 데이터 시대의 시민 교양이란 무엇인가를 함께 생각해보려 합니다.

한스 베르거는 텔레파시를 찾으려다 뇌파검사를 발명했습니다. 그는 생각이 전달될 수 있다고 믿었지만, 정작 그가 발견한 것은 생각에 전기적 실체가 있다는 사실이었습니다.

100년 후, 우리는 그 전기 신호를 읽고 해석하고 전달하는 기술을 손에 쥐었습니다. 베르거의 꿈이었던 텔레파시가 실현되기 시작한 것입니다.

그러나 진정한 텔레파시란 무엇일까요. 머릿속 언어를 기계로 전송하는 것일까요. 아니면 서로의 생각을 진심으로 이해하려는 노력일까요.

기술은 도구일 뿐입니다. 그 도구를 어떻게 쓸지는 우리의 선택입니다.

이 책이 그 선택을 위한 작은 나침반이 되기를 바랍니다.

2026년 1월 김경진

제1부 뇌와 기계의 대화	18
1 뇌-컴퓨터 인터페이스란 무엇인가	18
가. 1.5kg의 우주: 뉴런, 시냅스, 스파이크의 전기적 언어	18
나. BCI의 정의와 핵심 작동 원리	22
다. 침습형·반침습형·비침습형 BCI의 분류와 비교	25
라. 왜 지금인가: AI와 트랜스포머 모델이 뇌파 해독을 혁명한 이유	29
2. BCI 기술의 역사와 진화	32
가. 1924년 한스 베르거의 첫 뇌파(EEG) 발견	32
나. 1970년대 자크 비달의 BCI 개념 제안과 초기 동물 실험	34
다. 2004년 브레인게이트(BrainGate)와 유타 어레이의 등장	37
라. 2020년대 BCI 임상시험의 폭발적 성장	40
3. 뇌 신호를 읽는 도구들	44
가. EEG, ECoG, fMRI, fNIRS: 측정 방식별 장단점	44
나. 마이크로전극 배열과 유연 전극의 생체적합성 도전	47
다. 신호 대역폭과 정확도: "쓸만한 BCI"의 조건	50
라. 딥러닝 디코딩: 머신러닝이 뇌파를 해석하는 법	53
제2부 일론 머스크의 도박: 뉴럴링크의 실험과 혁신	56
4 뉴럴링크의 탄생과 비전	56
가. 2016년, 베일에 싸인 창업 배경과 핵심 인물들	56
나. 머스크의 목표: AI의 위협에 맞서는 "인간-AI 공생(Symbiosis)"	59
다. 대역폭의 한계를 넘어: 1비트 소통에서 기가비트 전송으로	62
라. 뉴럴링크의 기술적 차별점과 진입장벽	65
	10

5 뉴럴링크의 하드웨어: N1 임플란트와 R1 로봇	69
가. 동전 크기의 뇌 임플란트 N1의 구조와 1,024개 전극	69
나. 재봉틀 로봇 R1: 인간의 손을 뛰어넘는 수술 정밀도	72
다. 유연한 전극 실(Flexible Threads)과 무선 충전 기술	75
라. 무선화·소형화·전력 관리의 공학적 도전	79
6. 동물 실험: 돼지와 원숭이가 증명한 가능성	83
가. 거트루드(Gertrude) 프로젝트: 돼지 뇌 신호의 실시간 시각화	83
나. 페이지(Pager)의 pong(Pong) 게임: 생각만으로 비디오 게임을	86
다. 동물 실험의 기술적 성과와 안전성 데이터	89
라. 동물복지 논란과 윤리적 비판에 대한 해명	92
7 인간 임상 실험: 텔레파시(Telepathy)의 실현	95
가. FDA 승인 과정과 프라임(PRIME) 스터디의 시작	95
나. 첫 번째 환자 놀랜드 아보(Noland Arbaugh)	97
다. 알렉스(Alex)와 후속 참가자들의 성과	102
라. 2025년 글로벌 확장: 영국, 캐나다, UAE 임상시험	107
8 블라인드사이트(Blindsight)와 콘보이(Convoy): 다음 단계	109
가. FDA 획기적 의료기기 지정과 시각 복원 프로젝트	109
나. 시각 피질 자극을 통한 인공 시각의 원리	111
다. 콘보이(Convoy): 로봇 팔 제어와 운동 기능 복원	114
라. 음성 복원 기술의 획기적 의료기기 지정(2025년)	117
제3부. 춘추전국시대: BCI 경쟁자들과 기술 다양성	121
9 혈관을 타고 뇌로 간다: 싱크론(Synchron)	121

가. 개두술 없는 스텐트로드(Stentrode) 기술의 혁신	121
나. 저침습성의 강점: 개두술 공포 없이 대중 수용성을 높이다	124
다. 아이패드, 애플 비전 프로 제어: 실제 환자 사례	126
라. OpenAI 통합과 애플·엔비디아 협력 생태계	129
10 전통의 강호와 새로운 도전자들	133
가. Blackrock Neurotech: 유타 어레이와 9년 장기 이식 기록	133
나. Precision Neuroscience: 뇌 표면의 초박형 필름 Layer 7	136
다. Paradromics: 고대역폭 Connexus와 FDA	140
라. 커널(Kernel): 비침습 fNIRS 헬멧의 소비자 시장 도전	143
11 비침습형 BCI의 현실과 가능성	147
가. 메타(Meta)의 근전도 팔찌와 웨어러블 BCI	147
나. 뉴러블(Neurable): EEG 헤드폰으로 집중력 측정	150
다. 이모티브(Emotiv): 소비자용 EEG와 MN8 이어버드	152
라. 빅테크의 진입: 애플 에어팟 뇌파 특허와 삼성의 히어러블	155
12 중국의 추격과 글로벌 경쟁 구도	159
가. 차이나 브레인 프로젝트와 국가 주도 BCI 연구	159
나. 베이징 신즈다(Xinzhida) 뉴로테크놀로지의 재활 솔루션	166
다. BCI 시장의 폭발: 의료기기를 넘어 뉴로 컨슈머 시장으로	169
라. 특허 전쟁: 2,160개 특허 가족과 664개 기업의 경쟁	173
제4부 접속된 미래: 윤리·법·사회와 인간의 재정의	177
13 의료 혁명: BCI가 치료하는 질병들	177
가. 척수 손상과 전신 마비의 극복: 디지털 브릿지	177
나. ALS, 파킨슨병, 간질: 신경질환 치료의 새 지평	180

다. 정신 질환과 전자약: 우울증, 중독, PTSD 치료 가능성	183
라. 잃어버린 감각의 복원: 시각, 청각, 촉각의 디지털화	186
14 뇌 데이터 시대의 윤리적 딜레마	189
가. 정신적 프라이버시(Mental Privacy)와 뇌 데이터 소유권	189
나. Brainjacking: 운동 피질 해킹과 감각 조작의 위협 시나리오	192
다. 알고리즘 편향과 자율성 침해의 위험	194
라. 동의의 문제: 진정한 사전동의(Informed Consent)란	196
15 신경권(Neurorights)과 법적 규제 프레임워크	199
가. 신경권 개념의 등장: 2017년 EPFL 이엔카 교수의 제안	199
나. 칠레 헌법 개정(2021)과 신경권리법: 세계 최초 입법 사례	203
다. 미국 콜로라도·캘리포니아 주의 신경 데이터 보호법	206
라. 유럽 평의회와 유네스코의 국제 규제 논의	209
16 인간 증강과 사회적 불평등	212
가. 치료에서 증강으로: BCI의 점진적 변화	212
나. 인지 능력 향상은 부유층의 전유물인가	215
다. 군사·감시 목적 악용의 위험성	218
라. 기술 격차와 신경 불평등의 미래	222
17 인간의 정의를 다시 묻다	225
가. "나는 나의 뇌인가, 나의 기술적 연장선인가"	225
나. 기억의 저장과 다운로드: 영생은 가능한가	228
다. 언어의 종말: 개념적 텔레파시가 문명에 미칠 영향	231
라. 사이보그 시대의 인간다움과 철학적 질문	234
18 결론: 연결된 미래를 위한 준비	237

가. BCI 기술의 상용화 로드맵: 2026년 대량 생산 전망	237
나. 우리가 준비해야 할 법적·사회적 합의	240
다. BCI 뉴스를 평가하는 10가지 질문	243
라. 뇌 데이터 시대의 시민 교양과 비판적 사고	246

제1부 뇌와 기계의 대화

1 뇌-컴퓨터 인터페이스란 무엇인가

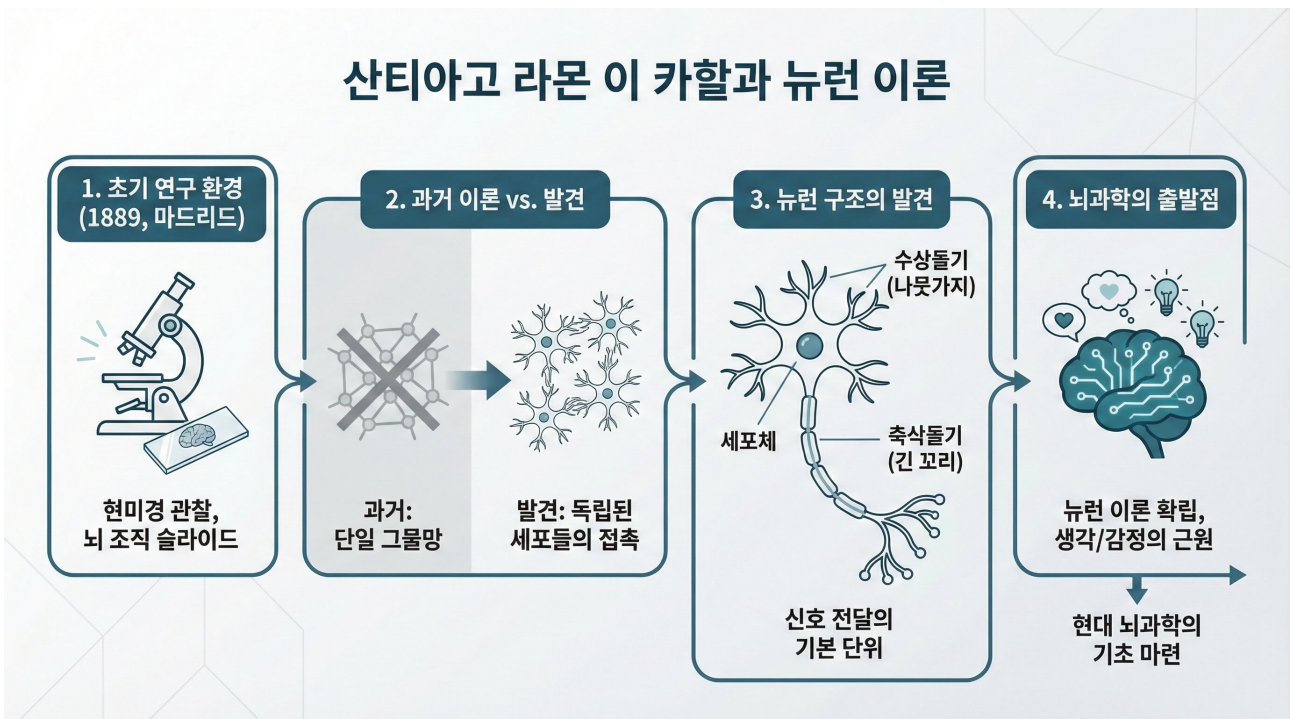
가. 1.5kg의 우주: 뉴런, 시냅스, 스파이크의 전기적 언어

1889년 스페인 마드리드의 한 연구실에서 산티아고 라몬 이 카할이라는 젊은 해부학자가 현미경 앞에 앉아 있었습니다. 그의 앞에는 얇게 썰린 뇌 조직 슬라이드가 놓여 있었습니다. 당시 과학자들은 뇌가 하나의 그물망처럼 연결된 덩어리라고 믿었습니다.

그러나 카할은 달랐습니다. 그는 몇 달을 현미경 앞에서 보내며 놀라운 사실을 발견했습니다. 뇌는 덩어리가 아니었습니다.

수없이 많은 독립된 세포들이 서로 접촉하며 신호를 주고받는 것이었습니다. 그는 이 세포들을 직접 그림으로 그렸습니다. 나뭇가지처럼 뻗어 나간 수상돌기, 긴 꼬리처럼 늘어진 축삭돌기. 카할은 이 작은 세포들이 인간의 모든 생각과 감정과 기억의 근원임을 직감했습니다.

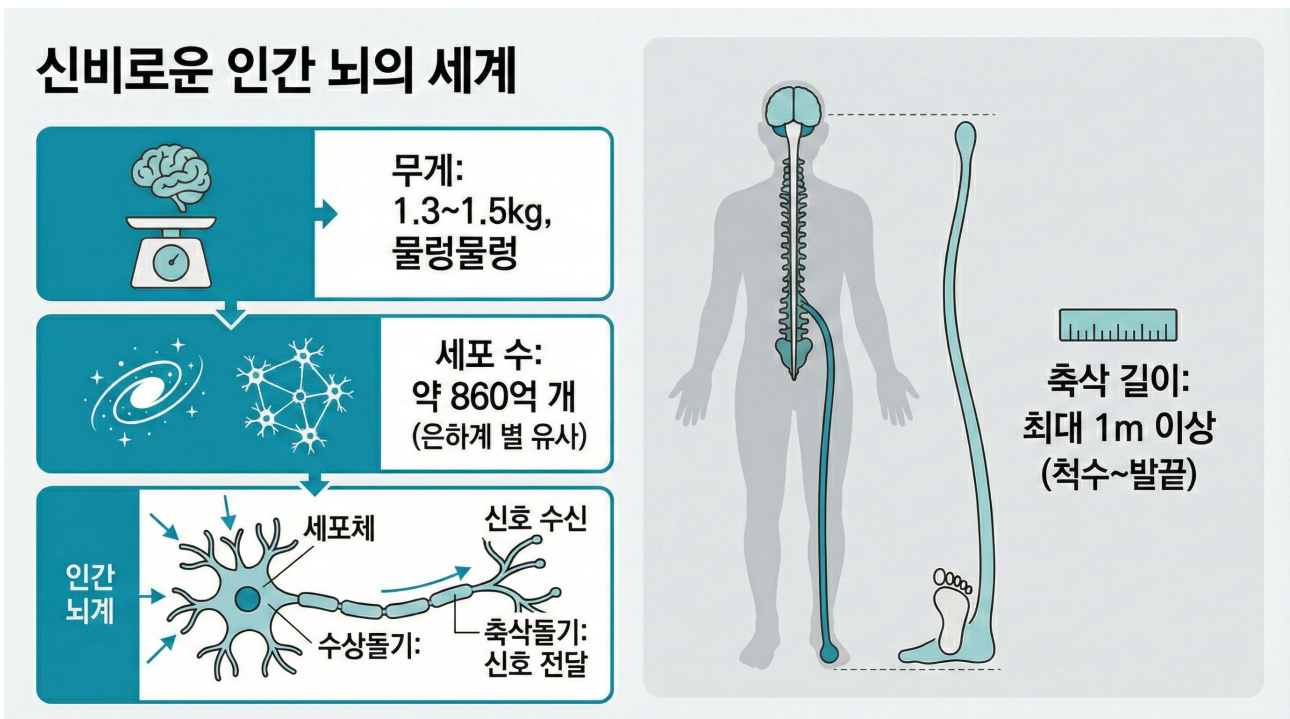
그의 이 발견은 훗날 '뉴런 이론'이라 불리게 되었고, 뇌과학의 출발점이 되었습니다.



인간의 뇌는 약 1.3킬로그램에서 1.5킬로그램 사이의 무게를 지닙니다. 두부처럼 물렁물렁하고, 회색빛이 도는 분홍색을 띠고 있습니다. 이 작은 덩어리 안에는 약 860억 개의 신경세포, 즉 뉴런이 존재합니다. 숫자만으로는 감이 오지 않을 수 있습니다. 우리 은하계에 있는 별의

수가 대략 1000억 개에서 4000억 개 사이로 추정됩니다. 당신의 머릿속에는 은하계 별의 수에 버금가는 세포들이 빼곡히 들어차 있는 셈입니다.

뉴런 하나는 복잡한 구조를 가지고 있습니다. 세포체를 중심으로 나뭇가지처럼 뻗어 나온 수상돌기가 있습니다. 수상돌기는 다른 뉴런에서 오는 신호를 받아들이는 안테나 역할을 합니다. 세포체에서 길게 뻗어 나온 것은 축삭돌기입니다. 축삭은 때로 1미터 이상 뻗어 나가기도 합니다. 척수를 따라 내려가 발끝의 근육까지 신호를 전달하는 운동 뉴런이 그런 경우입니다. 축삭돌기의 끝에는 시냅스 말단이 있어서 다음 뉴런에게 신호를 넘겨줍니다.

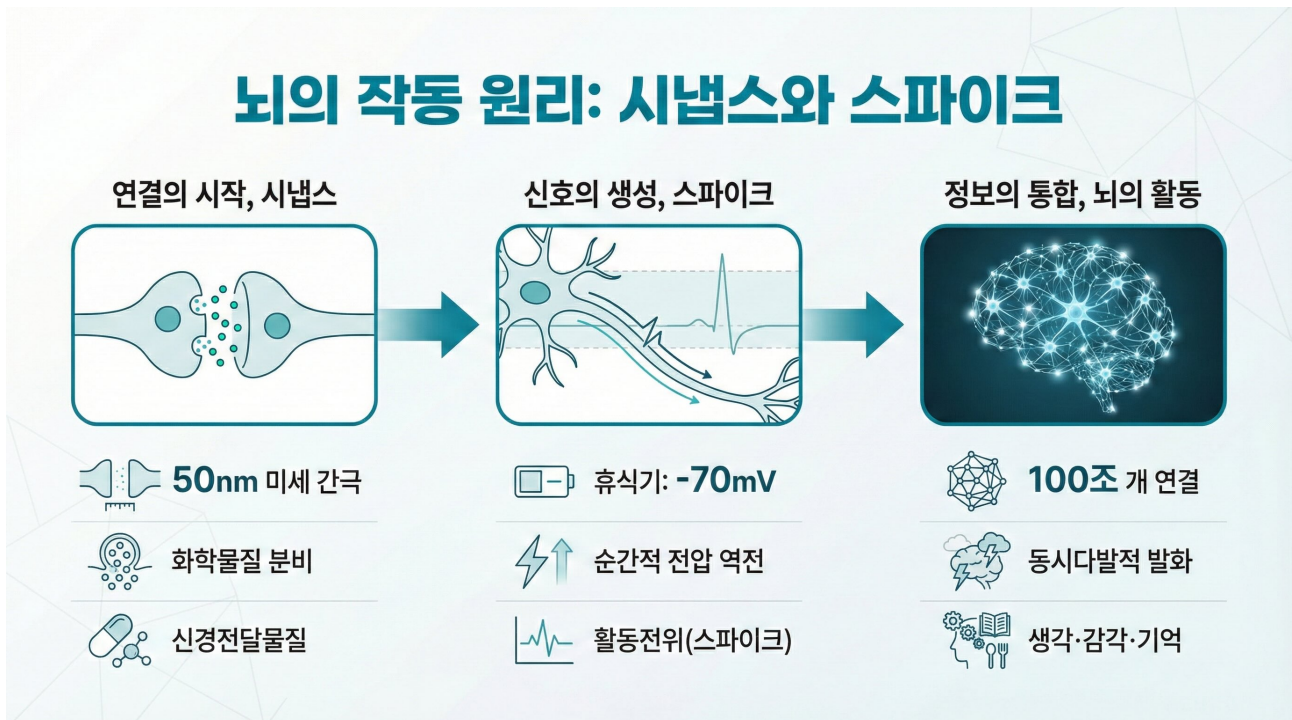


시냅스. 이것이 뇌의 진짜 비밀입니다. 시냅스는 뉴런과 뉴런이 만나는 접점입니다. 하지만 뉴런들은 서로 맞닿아 있지 않습니다. 그 사이에는 50나노미터도 안 되는 아주 작은 틈이 있습니다. 머리카락 굵기의 1만 분의 1 정도입니다. 뉴런은 이 좁은 틈을 넘어 화학물질을 분비하여 다음 뉴런에게 메시지를 전달합니다. 이 화학물질을 신경전달물질이라고 부릅니다. 글루타메이트, 도파민, 세로토닌 같은 이름들을 들어보셨을 것입니다. 인간의 뇌에는 약 100조 개의 시냅스가 존재합니다. 860억 개의 뉴런이 각각 수천 개의 시냅스를 통해 다른 뉴런들과 손을 잡고 있는 것입니다.

그렇다면 뉴런은 어떻게 신호를 만들어낼까요. 여기서 '스파이크'라는 개념이 등장합니다. 뉴런의 세포막 안팎에는 전압의 차이가 있습니다. 평소에는 세포 안쪽이 바깥쪽보다 약 70밀리볼트 정도 낮습니다. 이것을 휴지막전위라고 합니다. 뉴런이 다른 뉴런으로부터 충분한 자극을 받으면 세포막에 있는 이온 채널이 열립니다. 나트륨 이온이 세포 안으로 밀려들어옵니다.

다. 순간적으로 전압이 뒤바뀝니다. 음전하에서 양전하로. 이 급격한 전압 변화가 축삭을 따라 파도처럼 흘러갑니다. 이것이 활동전위, 또는 스파이크입니다.

스�파이크는 1밀리초에서 2밀리초 사이에 일어나는 짧은 사건입니다. 하지만 이 짧은 전기적 펄스가 뇌의 모든 정보를 담고 있습니다. 당신이 지금 이 글자를 읽고 있다는 사실, 어제 저녁에 먹은 음식의 맛, 내일 해야 할 일에 대한 걱정. 이 모든 것이 수백만, 수천만 개의 뉴런이 동시에 발화하며 만들어내는 전기적 폭풍의 산물입니다.



뇌과학자들은 뉴런의 언어가 두 가지 코드로 이루어져 있다고 말합니다. 하나는 발화율 코드입니다. 뉴런이 얼마나 자주 스파이크를 발사하느냐에 따라 정보가 달라집니다. 손을 살짝 누를 때와 세게 누를 때, 감각 뉴런의 발화율이 달라집니다. 다른 하나는 시간 코드입니다. 여러 뉴런이 언제 동시에 발화하느냐, 어떤 패턴으로 발화하느냐가 정보를 담습니다. 냄새를 맡을 때 후각망울의 뉴런들은 특정한 시간적 패턴으로 발화하며, 그 패턴이 장미와 재스민을 구별하게 해줍니다.

여기서 한 가지 역설이 있습니다. 뉴런 하나의 발화 속도는 느립니다. 초당 최대 수백 번 정도가 한계입니다. 반면 현대 컴퓨터의 프로세서는 초당 수십억 번의 연산을 수행합니다. 속도만 놓고 보면 뇌는 컴퓨터의 상대가 되지 않습니다. 그런데도 뇌는 컴퓨터가 짤때는 일을 척척 해냅니다. 미묘한 감정을 읽어내고, 한 번도 본 적 없는 상황에서 즉흥적으로 대처합니

다. 비결은 병렬 처리입니다. 860억 개의 뉴런이 동시에 작동합니다. 하나하나를 느리지만, 모두 함께 계산하면 엄청난 일을 해낼 수 있습니다. 그것도 20와트 정도의 전력만으로. 형광등 하나를 켜는 것보다 적은 에너지입니다.

BCI 기술은 바로 이 전기적 언어를 읽으려는 시도입니다. 뇌가 몸에게 보내는 명령, 뇌가 감각기관에서 받아들이는 정보, 뇌 안에서 일어나는 생각의 흐름. 이 모든 것이 스파이크의 언어로 쓰여 있습니다. 과학자들은 이 언어의 사전을 만들고 있습니다. 아직은 초보적인 단계입니다. 마치 낯선 나라에 처음 도착해서 몇 개의 단어만 알아듣는 여행자와 같습니다. 하지만 사전의 페이지는 빠르게 늘어나고 있습니다.

나. BCI의 정의와 핵심 작동 원리

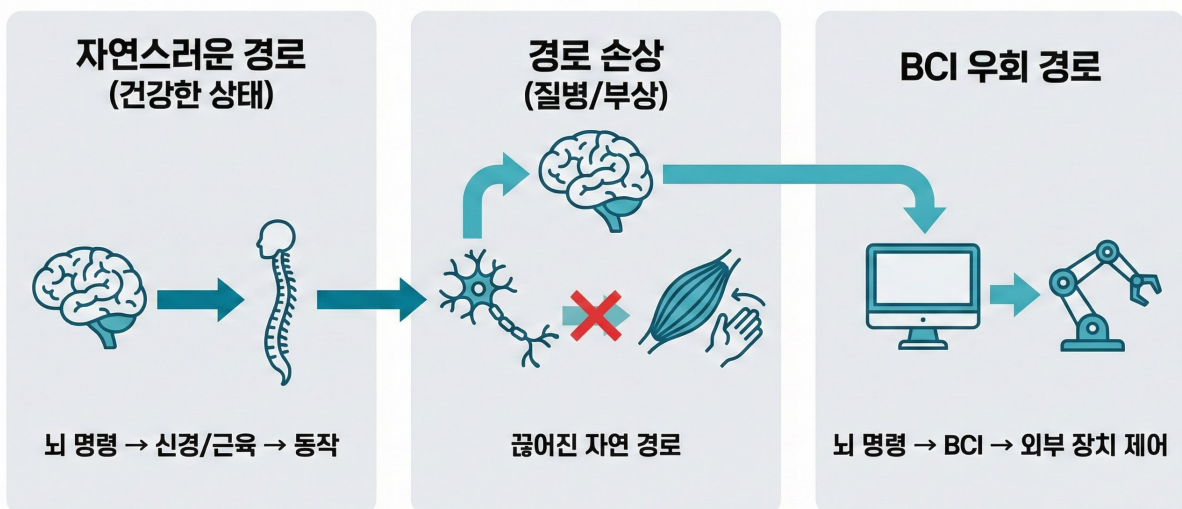
2006년 7월, 미국 매사추세츠 주의 한 병원에서 매튜 네이글이라는 25세 청년이 컴퓨터 화면 앞에 앉아 있었습니다. 그는 4년 전 폭행 사건으로 척수가 손상되어 목 아래를 전혀 움직일 수 없었습니다. 그런데 이날, 그는 화면의 커서를 움직여 이메일을 열었습니다. 손가락 하나 까딱하지 않고, 오직 생각만으로.

네이글의 뇌에는 96개의 미세 전극이 심어져 있었습니다. 유타 어레이라고 불리는, 성냥개비 끝에 박힌 가시처럼 생긴 작은 장치였습니다. 이 전극들은 그의 운동 피질에서 발생하는 스파이크를 감지하여 컴퓨터로 전송했습니다. 컴퓨터는 그 신호를 분석하여 "커서를 왼쪽으로", "클릭"과 같은 명령으로 변환했습니다. 이것이 뇌-컴퓨터 인터페이스, 즉 BCI의 핵심입니다.

BCI의 정의는 생각보다 단순합니다. 뇌의 활동을 측정하고, 그것을 실시간으로 의미 있는 출력으로 변환하는 시스템입니다. BCI 학회는 이렇게 정의합니다. "뇌의 자연스러운 출력, 즉 말초 신경과 근육을 거치는 경로를 우회하여, 뇌와 외부 장치 사이에 직접적인 통신 경로를 만드는 기술."

왜 '우회'가 중요할까요. 건강한 사람의 경우, 뇌에서 내린 명령은 척수를 타고 내려가 신경을 통해 근육에 전달됩니다. 이것이 자연스러운 경로입니다. 그러나 척수가 손상되거나 루게릭 병처럼 운동 신경이 퇴화하면 이 경로가 끊어집니다. 뇌는 여전히 "손을 움직여라"라는 명령을 내리지만, 그 명령은 목적지에 도착하지 못합니다. BCI는 끊어진 다리를 대신합니다. 뇌의 명령을 중간에서 가로채서 컴퓨터나 로봇 팔에 직접 전달합니다.

BCI: 뇌와 외부 장치의 직접 연결



BCI 시스템의 작동 원리는 다섯 단계로 나눌 수 있습니다.

첫 번째 단계는 신호 획득입니다. 뇌에서 발생하는 전기 신호를 센서로 잡아냅니다. 센서는 두피 위에 붙일 수도 있고, 두개골을 열고 뇌 표면에 올려놓을 수도 있고, 뇌 조직 안으로 직접 삽입할 수도 있습니다. 센서의 위치가 깊어질수록 신호는 선명해지지만 위험도 커집니다. 이것은 뒤에서 자세히 다루겠습니다.

두 번째 단계는 전처리입니다. 뇌에서 나오는 원시 신호는 잡음으로 가득합니다. 눈을 깜빡일 때 발생하는 근육 신호, 주변 전자기기에서 나오는 간섭, 심장 박동의 영향. 이런 잡음들을 걸러내야 합니다. 마치 시끄러운 거리에서 친구의 목소리만 골라 듣는 것과 같습니다.

세 번째 단계는 특징 추출입니다. 정제된 신호에서 의미 있는 패턴을 찾아냅니다. 오른손을 움직이려고 할 때 뇌의 왼쪽 운동 피질에서 특정 주파수의 신호가 감소합니다. 이것을 사건 관련 탈동기화라고 부릅니다. 특징 추출 단계에서는 이런 패턴들을 수학적으로 정의하고 추출합니다.

네 번째 단계는 디코딩, 또는 변환입니다. 추출된 특징을 실제 명령어로 바꾸는 단계입니다. "이 패턴의 뇌파가 나오면 커서를 오른쪽으로 이동시켜라." 이런 규칙을 알고리즘이 학습하고 적용합니다. 과거에는 단순한 선형 모델을 사용했지만, 최근에는 딥러닝 기반의 복잡한 인공지능이 이 역할을 맡습니다. 2025년에 발표된 연구에 따르면, 트랜스포머 기반 모델이 운동 상상 과제에서 86퍼센트가 넘는 정확도를 달성했습니다.

다섯 번째 단계는 출력과 피드백입니다. 디코딩된 명령이 실제 행동으로 나타납니다. 화면의 커서가 움직이거나, 로봇 팔이 물건을 잡거나, 휠체어가 방향을 틀거나, 음성 합성기가 말을 합니다. 그리고 사용자는 이 결과를 눈으로 확인합니다. 이것이 피드백입니다. 피드백은 단순히 결과를 보여주는 것이 아닙니다. 사용자의 뇌가 학습하는 데 필수적인 정보입니다.

여기서 중요한 개념이 등장합니다. 공적응입니다. BCI 시스템에서는 기계만 학습하는 것이 아닙니다. 사용자의 뇌도 학습합니다. 처음에는 커서를 원하는 방향으로 움직이기 어렵습니다. 하지만 반복된 시도와 피드백을 통해 뇌는 점점 더 명확한 신호를 만들어냅니다. 동시에 알고리즘도 그 사용자의 뇌 패턴에 맞게 조정됩니다. 사람과 기계가 서로 적응하며 성능이 올라갑니다.

BCI는 크게 두 가지 방향으로 작동할 수 있습니다. 읽기형 BCI는 뇌의 신호를 읽어서 외부로 전달합니다. 마비 환자가 생각으로 컴퓨터를 조작하는 것이 여기에 해당합니다. 쓰기형 BCI는 반대로 외부 정보를 뇌에 입력합니다. 인공 와우가 대표적인 예입니다. 소리를 전기 신호

로 바뀌서 청각 신경에 전달합니다. 시각 장애인에게 카메라 영상을 시각 피질에 직접 전달하는 연구도 진행 중입니다.

2025년 현재, BCI 기술은 실험실을 벗어나 실제 환자들에게 적용되고 있습니다. 뉴럴링크는 5명의 중증 마비 환자에게 칩을 이식했습니다. 싱크론은 개두술 없이 혈관을 통해 전극을 삽입하는 방법으로 환자들이 아이패드를 조작할 수 있게 했습니다. 컬럼비아 대학 연구팀은 65,536개의 전극을 가진 초소형 칩을 개발하여 뇌 신호를 실시간으로 스트리밍하는 데 성공했습니다. BCI는 더 이상 공상과학이 아닙니다. 지금 이 순간에도 누군가는 생각만으로 글자를 타이핑하고 있습니다.

다. 침습형·반침습형·비침습형 BCI의 분류와 비교

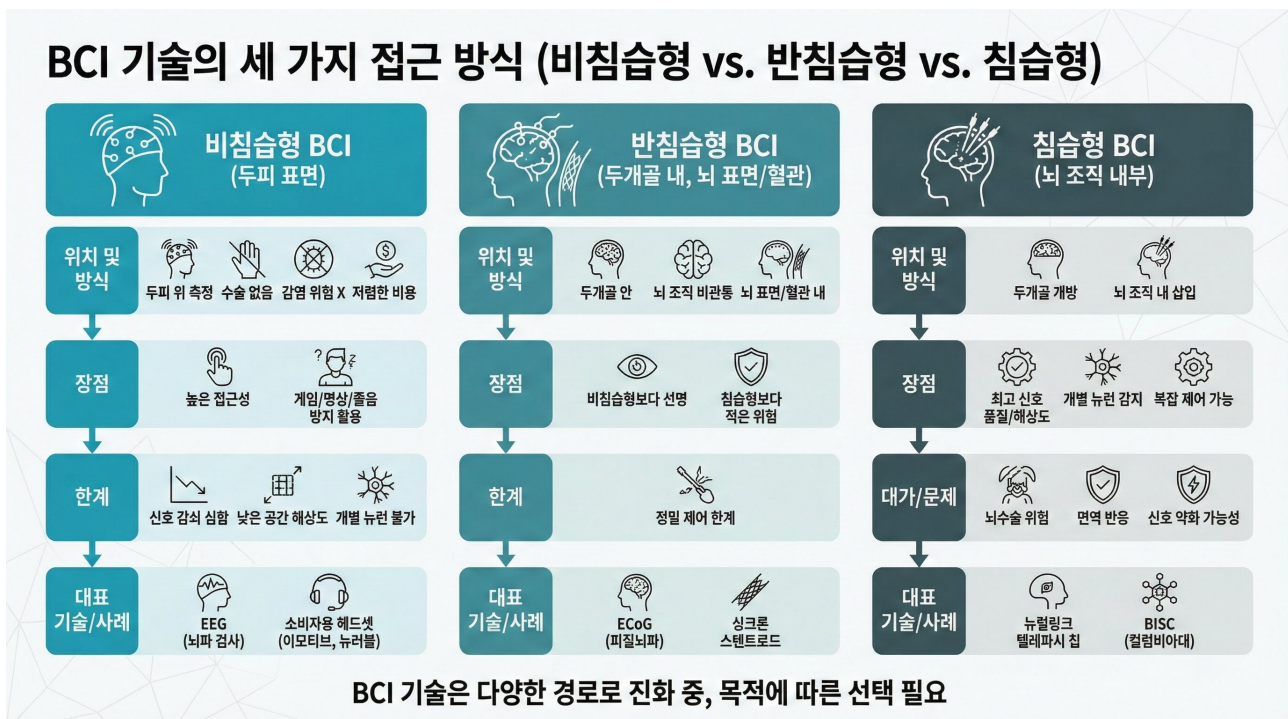
1998년, 필립 케네디라는 신경과학자는 절박한 상황에 놓였습니다. 그는 20년 넘게 뇌 신호로 말을 해독하는 연구를 해왔습니다. 그러나 미국 규제 당국은 그의 인간 대상 연구를 중단시켰습니다. 실험 대상자가 없었습니다. 그래서 그는 결단을 내렸습니다.

자기 자신의 뇌에 전극을 이식하기로 한 것입니다. 미국의 어떤 병원도 이 수술을 해주지 않았습니다. 그는 남미의 한 병원을 찾아갔습니다. 11시간 만에 걸친 수술 끝에 그의 뇌에는 전극이 심어졌습니다. 수술 후유증으로 일시적으로 말을 할 수 없게 되었지만, 그는 연구를 계속했습니다.

그가 입 안에서 단어를 조용히 발음할 때, 뇌에 심어진 전극은 운동 피질의 65개 뉴런에서 나오는 신호를 기록했습니다. 실제로 말할 때와 같은 패턴이 나타났습니다. 생각만으로 언어를 해독할 수 있다는 증거였습니다.

케네디의 이야기는 BCI 연구의 핵심적인 딜레마를 보여줍니다. 뇌에 얼마나 가까이 다가갈 것인가. 가까이 갈수록 신호는 선명해지지만, 위험은 커집니다.

BCI는 센서의 위치에 따라 세 가지로 분류됩니다.



비침습형 BCI는 두피 위에서 신호를 측정합니다. 수영 모자처럼 생긴 장치를 머리에 쓰면 됩니다. 수술이 필요 없습니다. 감염 위험도 없습니다. 비용도 상대적으로 저렴합니다. 뇌파 검사, 즉 EEG가 대표적입니다. 뇌의 전기 활동이 두개골과 피부를 통과하면서 약해지고 퍼져 나가지만, 그래도 어느 정도의 정보를 담고 있습니다.

비침습형의 장점은 접근성입니다. 누구나 사용할 수 있습니다. 게임을 하면서 집중력을 측정하거나, 명상을 할 때 뇌의 상태를 모니터링하거나, 졸음운전을 방지하는 데 활용할 수 있습니다. 실제로 이모티브나 뉴러블 같은 회사들은 소비자용 EEG 헤드셋을 판매하고 있습니다.

그러나 한계가 분명합니다. 두개골은 5밀리미터에서 10밀리미터 두께의 단단한 뼈입니다. 이 뼈를 통과하면서 뇌 신호는 심하게 감쇠됩니다. 고주파 성분은 거의 사라집니다. 공간 해상도도 떨어집니다. 수천 개의 뉴런이 동시에 활동해야 두피에서 감지할 수 있습니다. 개별 뉴런의 신호를 읽는 것은 불가능합니다. 비유하자면, 축구 경기장 밖 주차장에서 관중의 함성을 듣는 것과 같습니다. 무언가 일어났다는 것은 알 수 있지만, 누가 무슨 말을 했는지는 알 수 없습니다.

침습형 BCI는 정반대 편에 있습니다. 두개골을 열고 뇌 조직 안으로 전극을 직접 삽입합니다. 뉴럴링크의 텔레파시 칩이 여기에 해당합니다. 머리카락보다 얇은 전극 실이 뇌의 운동 피질 안으로 들어갑니다. 1,024개의 미세 전극이 개별 뉴런의 스파이크를 직접 감지합니다.

침습형의 장점은 신호의 품질입니다. 개별 뉴런 수준의 활동을 읽을 수 있습니다. 시간 해상도와 공간 해상도 모두 최고 수준입니다. 이 정도의 정밀도가 있어야 복잡한 동작을 제어할 수 있습니다. 로봇 팔로 컵을 집어 물을 마시거나, 분당 60단어 이상의 속도로 타이핑하려면 침습형이 필요합니다.

대가는 뇌수술입니다. 감염의 위험이 있습니다. 출혈이 생길 수 있습니다. 장기적으로는 또 다른 문제가 있습니다. 우리 몸의 면역 체계는 이물질을 공격합니다. 전극 주변에 흉터 조직이 형성됩니다. 신경교 세포들이 전극을 감싸기 시작합니다. 시간이 지나면 신호가 약해집니다. 뉴럴링크의 첫 환자에게서 전극 일부가 뇌에서 빠져나오는 현상이 발생한 것도 이 때문입니다.

그 사이에 반침습형 BCI가 있습니다. 두개골 안쪽으로 들어가지만 뇌 조직을 뚫지는 않습니다. 뇌 표면 위에 전극을 얹어두는 피질뇌파, 즉 ECoG가 대표적입니다. 간질 환자의 발작 위치를 찾기 위해 오랫동안 사용되어 온 기술입니다.

싱크론의 스텐트로드는 더 독특한 방식을 택했습니다. 심장 스텐트를 삽입하는 것처럼 목의 정맥을 통해 그물망 모양의 전극을 뇌혈관까지 밀어 올립니다. 뇌를 직접 찌르지 않습니다. 뇌수술을 하지 않습니다. 당일 퇴원이 가능할 정도입니다. 전극은 혈관 벽을 통해 뇌 표면의 신호를 감지합니다.

반침습형은 절충안입니다. 비침습형보다 신호가 선명하고, 침습형보다 위험이 적습니다. 그러나 침습형만큼 정밀한 제어는 어렵습니다. 싱크론의 환자들은 아이패드를 조작하고 문자를 보낼 수 있지만, 뉴럴링크 환자들처럼 빠른 속도로 복잡한 게임을 하기는 힘듭니다.

어떤 방식이 정답일까요. 그것은 목적에 달려 있습니다. 집중력을 높이거나 명상을 돕는 것이 목적이라면 비침습형으로 충분합니다. 완전 마비 환자가 로봇 팔을 자유자재로 움직이려면 침습형이 필요합니다. 수술에 대한 두려움은 있지만 기본적인 의사소통을 원하는 환자에게는 반침습형이 좋은 선택일 수 있습니다.

2025년 12월, 컬럼비아 대학 연구팀이 새로운 가능성을 열었습니다. BISC라고 불리는 이 장치는 65,536개의 전극을 가진 초소형 칩입니다. 기존 임플란트의 1,000분의 1 크기입니다. 뇌 표면의 곡률에 맞게 휘어질 수 있습니다. 침습형의 성능과 반침습형의 안전성을 동시에 추구하는 시도입니다. BCI 기술은 한 가지 방식에 수렴하기보다 다양한 경로로 진화하고 있습니다.

라. 왜 지금인가: AI와 트랜스포머 모델이 뇌파 해독을 혁명한 이유

2017년 6월, 구글의 연구팀이 한 편의 논문을 발표했습니다. 제목은 "Attention Is All You Need" 였습니다. 주의집중만 있으면 된다. 이 8명의 연구자들은 자연어 처리를 위한 새로운 인공지능 구조를 제안했습니다. 트랜스포머라고 불리는 이 구조는 이후 GPT, BERT, 그리고 ChatGPT의 기반이 되었습니다. 그런데 이 언어 모델이 뇌파 해독과 무슨 상관이 있을까요.

놀랍게도 뇌 신호와 언어는 구조적으로 유사합니다. 둘 다 시간 축 위에 펼쳐진 연속적인 데이터입니다. 문장에서 앞에 나온 단어가 뒤에 나올 단어의 의미를 결정하듯, 뇌 신호에서도 앞선 패턴이 이후 패턴의 해석에 영향을 미칩니다. 언어에 문법이 있듯, 뇌 신호에도 규칙이 있습니다. 운동을 계획할 때, 실행할 때, 피드백을 받을 때 뇌 활동의 패턴이 순차적으로 변화합니다.

과거의 BCI는 수작업에 의존했습니다. 연구자들이 직접 뇌파의 특징을 정의하고, 그 특징을 추출하는 알고리즘을 설계했습니다. "8헤르츠에서 12헤르츠 사이의 알파파 전력이 감소하면 운동 상상이다." 이런 식의 규칙을 사람이 만들었습니다. 문제는 뇌 신호가 너무 복잡하고 변덕스럽다는 것이었습니다. 같은 사람이 같은 동작을 상상해도 매번 신호가 달랐습니다. 피로, 기분, 집중도에 따라 패턴이 바뀌었습니다. 사람마다 뇌의 구조가 달라서 한 사람에게 잘 맞는 규칙이 다른 사람에게는 통하지 않았습니다. 이것을 'BCI 문맹 현상'이라고 부릅니다. 특정 사용자는 아무리 연습해도 BCI를 제대로 사용하지 못하는 것입니다.

딥러닝이 판을 바꿨습니다. 2010년대 중반부터 합성곱 신경망과 순환 신경망이 뇌파 분석에 도입되었습니다. 이 인공지능들은 사람이 정의한 규칙 없이 원시 데이터에서 직접 패턴을 학습했습니다. 성능이 올라갔습니다. 하지만 여전히 한계가 있었습니다. 순환 신경망은 긴 시퀀스를 처리하는 데 어려움을 겪었습니다. 합성곱 신경망은 국소적인 패턴은 잘 잡지만 멀리 떨어진 정보 사이의 관계를 파악하기 힘들었습니다.

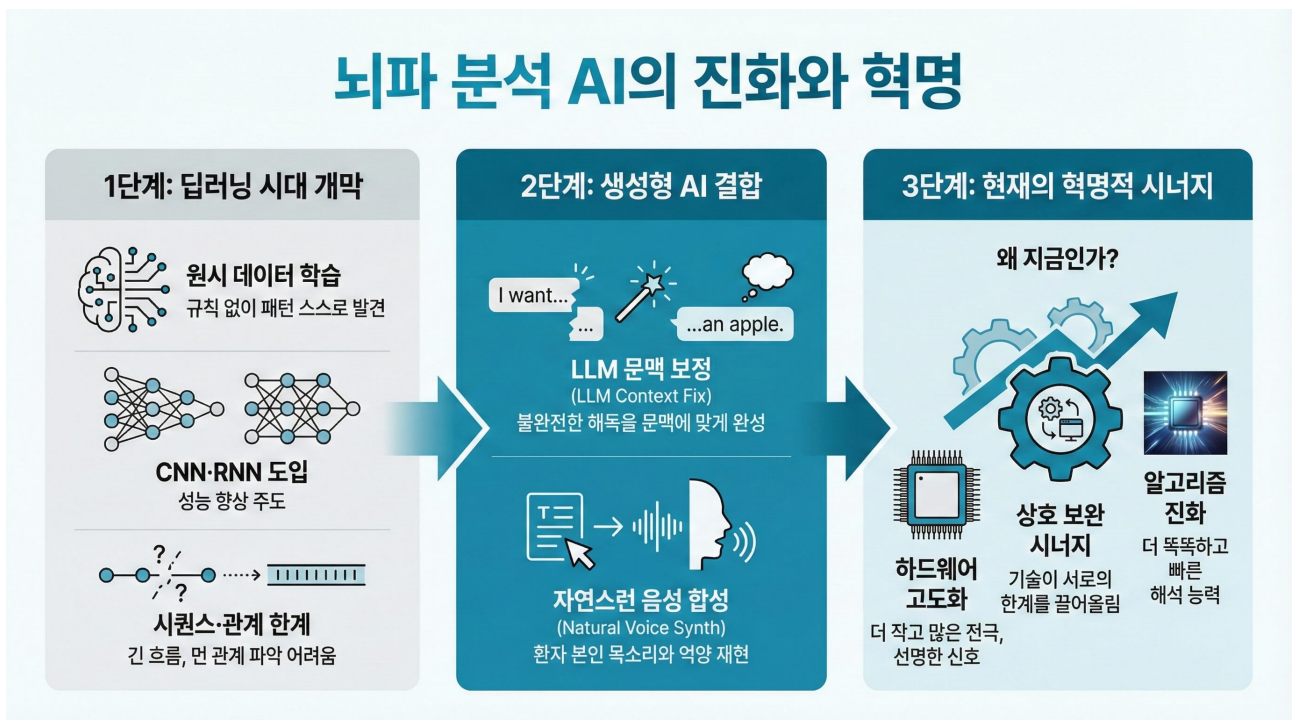
트랜스포머의 핵심은 '자기 주의' 메커니즘입니다. 입력 데이터의 모든 부분이 다른 모든 부분과 직접 연결됩니다. 문장에서 아주 앞에 있는 단어가 아주 뒤에 있는 단어의 의미를 결정할 수 있듯이, 뇌 신호에서도 1초 전의 패턴이 지금 패턴의 해석에 영향을 미칠 수 있습니다. 트랜스포머는 이런 장거리 의존성을 포착하는 데 탁월합니다.

2024년과 2025년에 발표된 연구들은 이 가능성을 현실로 보여주었습니다. 운동 상상 과제에서 트랜스포머 기반 모델은 86퍼센트가 넘는 분류 정확도를 달성했습니다. 기존의 EEGNet 같은 모델보다 높은 성능입니다. 언어 복원 분야에서도 비약적인 발전이 있었습니다. ECoG를 사용하여 마비 환자의 뇌 신호에서 단어를 해독하는 연구에서, 트랜스포머 모델은 분당 62 단어 이상의 속도로 텍스트를 생성했습니다. 일반적인 대화 속도에 근접하는 수준입니다.

더 흥미로운 것은 '파운데이션 모델'의 등장입니다. ChatGPT가 인터넷의 방대한 텍스트를 학습하여 언어의 구조를 익힌 것처럼, 뇌파 데이터를 대규모로 학습한 범용 모델이 만들어지고 있습니다. EEGPT, LaBraM, BIOT 같은 이름의 모델들입니다. 이 모델들은 수천 시간 분량의 뇌파 데이터에서 '뇌 신호의 문법'을 배웁니다. 그런 다음 특정 과제에 맞게 미세 조정됩니다. 장점은 데이터 효율성입니다. 새로운 사용자나 새로운 과제에 적응하는 데 필요한 데이터 양이 줄어듭니다. 개인 맞춤형 보정 시간이 단축됩니다.

컴퓨팅 파워의 발전도 빼놓을 수 없습니다. 트랜스포머는 계산량이 많은 모델입니다. 수백만 개의 매개변수를 학습시키려면 고성능 GPU가 필요합니다. 2010년대 초반에는 이런 계산이 불가능했습니다. 지금은 클라우드 컴퓨팅과 전용 AI 칩의 발전으로 연구실 수준에서도 대규모 모델을 훈련할 수 있게 되었습니다. 하드웨어가 소프트웨어의 발전을 뒷받침한 것입니다.

생성형 AI와의 결합도 새로운 가능성을 열고 있습니다. 뇌 신호에서 해독한 텍스트를 대형 언어 모델이 다듬어줍니다. 잡음이 섞여서 불완전하게 해독된 문장을 문맥에 맞게 보정합니다. "I want to eat a..."까지만 명확하게 읽히고 그 뒤가 불분명해도, 언어 모델은 "apple"이나 "sandwich"가 올 확률을 계산하여 빈 칸을 채웁니다. 음성 합성 AI와 결합하면 환자 본인의 목소리로 말을 해줄 수 있습니다. 과거 녹음된 목소리 데이터를 학습하여 자연스러운 억양을 재현합니다.



왜 지금인가. 답은 두 가지 혁명의 만남입니다. 뇌 신호를 더 선명하게 읽는 하드웨어의 발전과, 그 신호를 더 정확하게 해석하는 소프트웨어의 발전이 동시에 일어났습니다. 전극은 더 작아지고 더 많아졌습니다. 알고리즘은 더 똑똑해지고 더 빨라졌습니다. 두 기술이 서로를 끌어올리고 있습니다. 하드웨어가 더 많은 데이터를 제공하면 알고리즘은 더 정확해지고, 알고리즘이 더 정확해지면 하드웨어의 한계를 소프트웨어가 보완합니다. 뉴럴링크의 첫 환자에게서 전극이 빠져나왔을 때, 하드웨어를 교체하지 않고 알고리즘을 수정하여 성능을 회복한 것이 좋은 예입니다.

우리는 뇌의 언어를 해독하는 초입에 서 있습니다. 몇 개의 단어와 문장을 겨우 알아듣는 수준입니다. 하지만 사전은 빠르게 두꺼워지고 있습니다. 언젠가는 뇌와 기계가 같은 언어로 대화하는 날이 올 것입니다. 그 날이 언제일지는 아무도 모릅니다. 다만 지금, 그 방향으로 걸어가고 있다는 것은 분명합니다.

2. BCI 기술의 역사와 진화

가. 1924년 한스 베르거의 첫 뇌파(EEG) 발견

1893년 어느 봄날, 독일 기병대의 한 청년이 훈련 도중 말에서 떨어졌습니다. 그의 몸은 대포를 끄는 말들의 발굽 아래로 굴러갔습니다. 죽음이 코앞이었습니다. 기적처럼 살아남은 그 날 저녁, 한스 베르거는 본가에서 온 전보 한 통을 받았습니다. 수백 킬로미터 떨어진 곳에 있던 누이동생이 보낸 것이었습니다. "한스에게 무슨 일이 생긴 것 같으니 안부를 확인해달라." 누이는 정확히 그 순간 불길한 예감을 느꼈던 것입니다. 스무 살의 베르거는 이 우연을 우연으로 치부할 수 없었습니다. 인간의 마음과 마음 사이에 보이지 않는 물리적 에너지가 흐른다고 믿었습니다. 텔레파시의 실체를 찾아 나선 그의 여정은 그로부터 30년 뒤, 예상치 못한 방향으로 인류의 역사를 바꾸게 됩니다.

베르거는 천문학자가 되고 싶어 베를린 대학에 입학했지만, 한 학기 만에 자퇴했습니다. 군복무를 마친 뒤 의학으로 방향을 틀었습니다. 예나 대학에서 정신과 의사가 된 그는 '심리적 에너지'의 실체를 찾기 위해 온갖 방법을 시도했습니다. 환자의 두피 혈류량을 측정했습니다. 두피 온도를 재어보았습니다. 모두 허탕이었습니다. 그러던 중 영국의 리처드 케이트이 개와 토끼의 뇌 표면에서 미세한 전기 신호를 발견했다는 논문을 접했습니다. 베르거의 눈이 번쩍 뜨였습니다. 뇌가 전기를 만들어낸다면, 그 전기를 측정할 수 있다면, 인간의 생각을 읽을 수 있지 않을까.

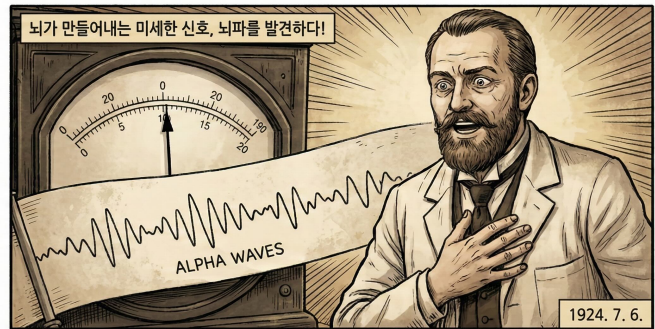
1924년 7월 6일, 예나 대학병원의 좁고 어두운 실험실에서 결정적인 순간이 찾아왔습니다. 베르거 앞에는 17세 소년 환자가 누워 있었습니다. 뇌종양 의심으로 두개골 일부를 제거하는 수술을 받았던 환자였습니다. 베르거는 소년의 두피에 은박지로 만든 전극을 조심스럽게 붙였습니다.

전극은 지멘스사에서 빌려온 검류계에 연결되어 있었습니다. 방 안은 숨소리조차 삼켜야 할 만큼 고요했습니다. 외부 진동이 측정을 방해할 수 있었기 때문입니다. 검류계의 바늘이 떨리기 시작했습니다. 미세하지만 규칙적인 진동이었습니다. 베르거는 심장이 멎는 줄 알았습니다.

그것은 기계적 오류가 아니었습니다. 외부 소음도 아니었습니다. 인간의 뇌가 스스로 만들어내는 전기적 리듬이었습니다. 베르거는 이 현상을 수천 번 반복 실험하며 검증했습니다. 눈을 감고 편안히 있을 때 뇌에서 초당 10회 정도의 규칙적인 파동이 나타났습니다. 눈을 뜨거나 정신적 활동을 하면 이 파동이 사라지고 더 빠르고 불규칙한 리듬으로 바뀌었습니다. 베르거는 전자를 '알파파', 후자를 '베타파'라고 명명했습니다. 뇌는 정적인 덩어리가 아니라 상태에 따라 끊임없이 전기적 춤을 추는 역동적인 기관이었던 것입니다.

그러나 베르거는 자신의 발견을 세상에 알리기를 주저했습니다. 그는 소심하고 완벽주의적인 성격의 소유자였습니다. 동료들의 비웃음이 두려웠습니다. "뇌에서 전기가 나온다"라는

주장은 당시 학계에서 미친 사람 취급을 받기에 충분했습니다. 베르거는 무려 5년 동안 이 발견을 비밀에 부쳤습니다.



1929년에야 비로소 "인간의 뇌전도에 관하여"라는 논문을 발표했습니다. 그의 우려는 현실이 되었습니다. 논문은 무시되거나 공공연한 불신의 대상이 되었습니다.

상황이 반전된 것은 1934년이었습니다. 영국의 생리학자 에드거 에이드리언과 브라이언 매튜스가 베르거의 실험을 재현하고 그 결과가 정확함을 확인했습니다. 에이드리언은 1932년 노벨 생리의학상 수상자였습니다. 그의 보증은 베르거의 발견을 한순간에 과학의 정전으로 끌어올렸습니다. 1937년 국제학회에서 베르거의 업적이 공식적으로 인정받았습니다. 뇌전도(EEG)는 간질 진단, 수면 단계 연구, 뇌종양 위치 파악 등 신경 의학의 혁명을 일으켰습니다.

베르거의 개인적 삶은 비극으로 끝났습니다. 나치 정권과의 갈등, 건강 악화, 그리고 깊어지는 우울증. 1938년 강제 은퇴당한 그는 뇌파 연구를 더 이상 할 수 없게 되었습니다. 1941년 6월 1일, 한스 베르거는 스스로 목숨을 끊었습니다. 그는 텔레파시를 찾아 헤맸지만, 결국 텔레파시보다 더 강력한 것을 발견했습니다. 두개골을 열지 않고도 뇌의 활동을 읽을 수 있는 창문. 100년 뒤 뉴럴링크의 엔지니어들이 읽어내려는 860억 개 뉴런의 합창은 바로 그 창문 너머에서 시작된 것입니다.

2024년 7월 6일, 전 세계 신경과학계는 베르거의 첫 뇌파 기록 100주년을 기념했습니다. 국제 임상신경생리학연맹(IFCN)은 이날을 기점으로 뇌전도와 관련 신경생리학 기술의 과거, 현재, 미래를 조망하는 특별 리뷰를 발표했습니다. 베르거가 어두운 실험실에서 보았던 그 미세한 바늘의 떨림은 한 세기가 지난 지금, 마비 환자들이 생각만으로 컴퓨터를 제어하고, 시각장애인이 인공 눈으로 세상을 보며, 우울증 환자가 뇌 자극으로 삶을 되찾는 기술의 서곡이었습니다.

나. 1970년대 자크 비달의 BCI 개념 제안과 초기 동물 실험

한스 베르거가 뇌의 소리를 '듣는' 법을 발견했다면, 1970년대의 자크 비달은 바로 그 뇌의 소리로 기계를 '부리는' 법을 상상했습니다. 그러나 이 상상은 순전히 공상이 아니었습니다. 그것은 질문의 형태로 과학에 던져진 도전장이었습니다.

1973년, UCLA의 컴퓨터 과학 교수 자크 J. 비달은 미국 생물물리학 및 생물공학 연례 리뷰에 한 편의 논문을 발표했습니다. "뇌와 컴퓨터의 직접 통신을 향하여(Toward Direct Brain-Computer Communication)." 이 논문에서 비달은 역사상 처음으로 '뇌-컴퓨터 인터페이스(Brain-Computer Interface)'라는 용어를 학술 문헌에 등장시켰습니다. 그는 직접적인 물음을 던졌습니다. "관찰 가능한 뇌의 전기 신호를 정보 운반체로 사용하여, 근육을 거치지 않고도 컴퓨터나 외부 장치를 제어할 수 있는가?" 이것이 바로 '비달의 도전'이라 불리게 될 질문이었습니다.

비달은 벨기에 리에주에서 태어나 전기공학을 전공했습니다. 파리 대학에서 박사 학위를 받은 뒤 1963년 미국으로 건너와 UCLA 공학부에 합류했습니다. 그는 컴퓨터 과학과의 창립 멤버 중 한 명이 되었습니다. 1970년, 비달은 UCLA 뇌연구소에서 안식년을 보내며 포유류의 신경계를 연구하기 시작했습니다. 그의 관심은 곧 더 큰 질문으로 확장되었습니다. 뇌가 전기 신호를 만들어낸다면, 그 신호를 컴퓨터가 이해할 수 있는 명령으로 바꿀 수 있지 않을까. 그것이 가능하다면, 마비된 사람도 생각만으로 휠체어를 움직이거나 의수를 제어할 수 있지 않을까.

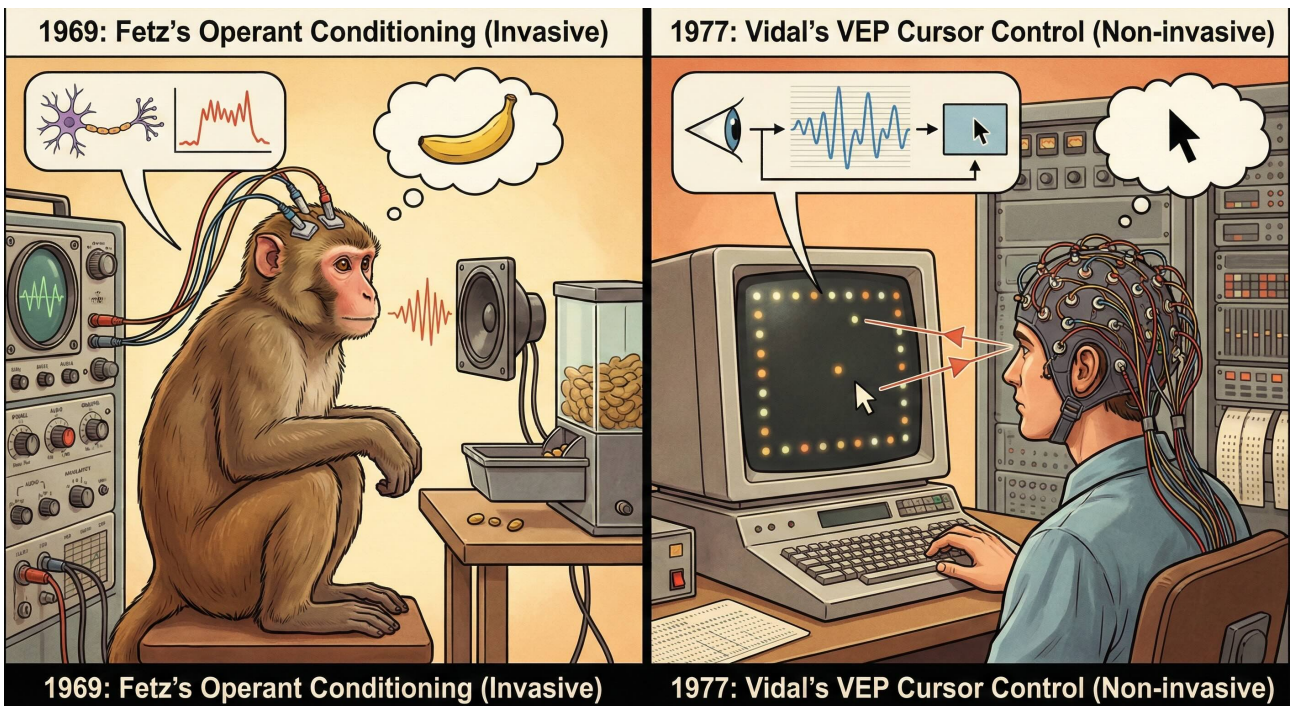
비달의 비전이 던져진 1970년대는 컴퓨터가 방 하나를 가득 채우던 시대였습니다. 오늘날의 스마트폰보다 연산 속도가 느린 거대한 계산기였습니다. 그런 시대에 그는 뇌파를 읽어 커서를 움직이는 실험을 설계했습니다. 1977년, 비달의 연구팀은 시각 유발 전위(Visual Evoked Potential)를 이용하여 컴퓨터 화면의 커서를 움직이는 데 성공했습니다. 피험자가 화면의 특정 지점을 응시하면, 그 시각적 자극에 반응하여 뇌에서 특정 패턴의 전기 신호가 발생했습니다. 컴퓨터는 이 패턴을 해석하여 커서를 해당 방향으로 이동시켰습니다. 비록 속도는 느렸고 장비는 거대했지만, 이것은 근육의 개입 없이 뇌 신호만으로 기계를 제어한 최초의 체계적 시도 중 하나였습니다.

비달이 강조한 핵심 원리가 있었습니다. BCI는 단순히 신호를 읽는 장치가 아니라 '폐루프(Closed-loop) 학습 시스템'이라는 것이었습니다. 사용자가 피드백을 보며 자신의 뇌 활동을 조절하고, 컴퓨터는 사용자의 패턴에 맞춰 적응합니다. 뇌가 기계를 배우고, 기계가 뇌를 배우는 양방향 적응. 이 원리는 50년이 지난 오늘날에도 모든 BCI 시스템의 근간을 이룹니다.

비달이 개념적 토대를 닦는 동안, 다른 연구자들은 동물 실험을 통해 BCI의 생물학적 가능성을 입증하고 있었습니다. 1969년, 워싱턴 대학의 에버하르트 페츠는 놀라운 실험 결과를 발표했습니다. 그는 원숭이의 운동 피질에 단일 뉴런의 활동을 측정할 수 있는 전극을 삽입했

습니다. 그리고 그 뉴런이 발화할 때마다 원숭이에게 바나나 맛 펠릿(사료)을 주었습니다. 또한 뉴런의 활동량을 소리로 변환하여 원숭이에게 들려주었습니다.

결과는 경이로웠습니다. 원숭이는 곧 자신의 뇌 속 특정 세포 하나를 의도적으로 작동시키는 법을 터득했습니다. 팔을 움직이지 않고도, 오직 펠릿을 얻겠다는 의지만으로 특정 뉴런의 발화 빈도를 높인 것입니다. 이 실험은 '조작적 조건화'가 뇌세포 단위에서도 가능하다는 사실을 증명했습니다. 동물이 훈련을 통해 자신의 뇌 신호를 조절할 수 있다면, 인간도 할 수 있습니다. BCI가 생물학적으로 타당하다는 결정적 증거였습니다.



같은 시기, 예일 대학의 호세 델가도는 더욱 극적인 실험을 수행했습니다. 그는 투우장의 황소 뇌에 전극을 심고, 돌진하는 황소를 무선 조종기 버튼 하나로 멈춰 세웠습니다. 1963년 대중 앞에서 시연된 이 실험은 뇌 자극을 통해 동물의 행동을 제어할 수 있음을 극적으로 보여주었습니다. 동시에 '마인드 컨트롤'에 대한 대중의 공포를 불러일으키기도 했습니다.

1970년대의 이러한 시도들은 오늘날 BCI 기술의 두 가지 큰 줄기의 기원이 되었습니다. 비달의 EEG 기반 접근은 침습적 BCI의 원형이 되었고, 페츠와 델가도의 임플란트 기반 접근은 침습적 BCI의 뿌리가 되었습니다. 당시에는 컴퓨팅 파워의 한계로 인해 실용적인 기술로 발전하지 못했습니다. 그러나 이들이 던진 질문, 심은 씨앗은 30년 뒤 기술의 발전과 함께 화려하게 부활하게 됩니다.

비달은 2018년 세상을 떠났습니다. 그가 UCLA에서 은퇴한 뒤 명예교수로 남아 있는 동안, BCI는 공상과학 소설의 소재에서 수십억 달러가 투자되는 산업으로 성장했습니다. 그가 1973년에 쓴 문장은 오늘날에도 유효합니다. "이러한 유형의 시스템이 가져올 장기적 함의는 현재로서는 추측만 할 수 있을 뿐이다." 그러나 비달이 예견한 것 중 하나만은 분명히 실현되었습니다. 뇌와 컴퓨터는 이제 같은 언어로 대화를 시작했습니다.

다. 2004년 브레인게이트(BrainGate)와 유타 어레이의 등장

2001년 7월 3일, 미국 매사추세츠 주 위머스의 연례 불꽃놀이 행사가 열렸습니다. 스물두 살의 매튜 네이글은 친구들과 함께 해변을 떠나려던 참이었습니다. 그때 싸움이 벌어졌습니다. 네이글은 친구를 도우려다 사냥용 칼에 목을 찔렸습니다. 척수가 절단되었습니다. 그 순간부터 그는 목 아래로 아무것도 느낄 수 없는 사지마비 환자가 되었습니다. 고등학교 시절 스타 풋볼 선수였던 청년의 삶이 송두리째 바뀌었습니다.

3년 뒤인 2004년 6월 22일, 네이글은 로드아일랜드 병원의 수술대에 누웠습니다. 신경외과의 게르하르트 프리스가 그의 두개골을 열었습니다. 목표 지점은 우측 전두엽의 운동 피질, 팔의 움직임을 담당하는 부위였습니다.

의료진은 그곳에 작은 칩 하나를 심었습니다. 4mm x 4mm. 베이비 아스피린보다 작은 크기였습니다. 그 위에는 100개의 미세한 바늘이 촘촘히 박혀 있었습니다. 마치 빗살처럼 생긴 이 바늘들은 뇌의 피질 속으로 약 1.5mm 침투하여 인접한 뉴런들이 발사하는 전기 신호를 포착할 수 있었습니다. 이것이 바로 '유타 어레이(Utah Array)'였습니다.

유타 어레이는 유타 대학의 리처드 노만 교수가 1990년대 초에 개발한 장치였습니다. 유타의 사막 풍경에서 영감을 받아 설계되었다고 합니다. 실리콘 기판 위에 솟아 있는 100개의 전극은 멀리서 보면 선인장의 가시를 닮았습니다. 이전의 EEG가 경기장 밖에서 관중의 함성을 듣는 수준이었다면, 유타 어레이는 경기장 안으로 들어가 선수 100명의 대화를 동시에 엿듣는 것과 같은 해상도를 제공했습니다. 단일 뉴런, 혹은 소수 뉴런 집단의 발화를 직접 기록할 수 있었습니다.

수술 후 네이글의 두개골에는 '페데스탈'이라 불리는 금속 단자가 튀어나왔습니다. 굵은 케이블이 이 단자에서 거대한 신호 처리 컴퓨터로 연결되었습니다. 영화 <매트릭스>를 연상시키는 광경이었습니다. 그러나 네이글에게 그것은 희망의 탱줄이었습니다.

2004년 8월, 첫 번째 실험이 시작되었습니다. 연구팀의 기술자가 네이글에게 말했습니다. "손을 왼쪽으로 움직인다고 상상해보세요." 네이글은 상상했습니다. 컴퓨터 스피커에서 탁탁거리는 소리가 흘러나왔습니다. 뉴런들이 발화하는 소리였습니다. 화면 속의 커서가 왼쪽으로 움직였습니다. 네이글이 말했습니다. "나쁘지 않네요." 그의 뇌가 직접 컴퓨터에 명령을 내린 것이었습니다.

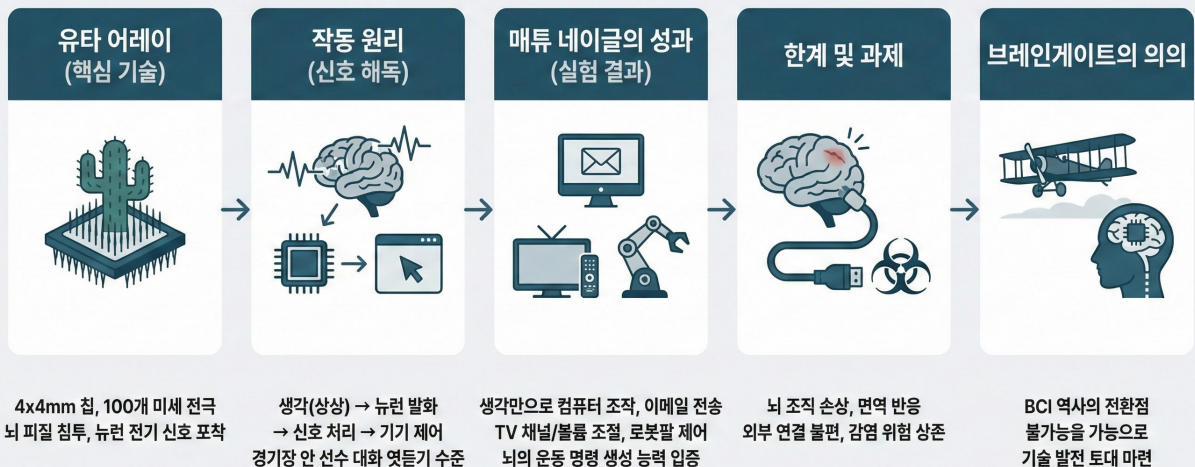
이후 몇 달 동안 네이글은 놀라운 진전을 이루었습니다. 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직여 이메일을 열었습니다. TV 채널을 바꾸고 볼륨을 조절했습니다. 간단한 그림을 그렸습니다. 풍(Pong) 게임을 즐겼습니다. 로봇 의수를 제어해 손을 열고 닫았습니다. 그는 인터뷰에서 말했습니다. "말로 표현할 수가 없어요. 그냥 뇌를 사용했어요. '커서야 오른쪽 위로 가'라고 생각했더니 갔어요. 이제 화면 전체를 제어할 수 있어요. 이건 나에게 독립성을 줄 거예요."

브라운 대학의 신경과학자 존 도너휴가 이끈 이 프로젝트의 이름은 '브레인게이트(BrainGate)'였습니다. 2006년, 연구 결과가 네이처(Nature) 지에 발표되었습니다. 전 세계 언론이 앞다투어 보도했습니다. BBC의 헤드라인은 "뇌 칩이 인간의 생각을 읽다"였습니다. 이 연구는 세 가지 중요한 사실을 증명했습니다. 첫째, 척수가 손상되어 신체가 마비된 지 수년이 지나도 뇌의 운동 피질은 여전히 운동 명령을 생성합니다. 둘째, 복잡한 뇌 신호 속에서 '의도'를 담은 정보를 실시간으로 해독할 수 있습니다. 셋째, 침습적 BCI가 인간에게 안전하게 적용될 수 있습니다.

그러나 한계도 명확했습니다. 유타 어레이는 딱딱한 실리콘 바늘 구조였고, 뇌는 부드러운 젤리 같은 조직이었습니다. 뇌가 두개골 안에서 미세하게 움직일 때마다 뻣뻣한 전극은 뇌 조직에 상처를 냈습니다. 시간이 지나면서 면역 반응으로 전극 주변에 흉터 조직이 생겨났고, 신호 품질이 떨어졌습니다. 또한 환자는 머리에 굵은 케이블을 달고 살아야 했습니다. 감염의 위험이 상존했습니다. 실험실 밖에서는 시스템을 사용할 수 없었습니다.

매튜 네이글은 2007년 7월 24일 세상을 떠났습니다. 사인은 패혈증이었습니다. FDA 규정에 따라 브레인게이트 장치는 약 1년 후 제거되었습니다. 그는 우울증에 시달렸고, 자살 충동을 느꼈다고 전해집니다. 그러나 그가 남긴 데이터는 오늘날 모든 BCI 알고리즘의 뼈대가 되었습니다. 브레인게이트는 BCI 역사의 '키티 호크 모멘트'였습니다. 라이트 형제의 첫 비행처럼, 그것은 불가능이 가능으로 바뀌는 순간이었습니다.

뇌와 컴퓨터의 연결, 브레인게이트(BrainGate) 프로젝트



브레인게이트 프로젝트는 이후 '브레인게이트2'로 이어졌습니다. 2011년에는 한 여성 환자가 임플란트 이식 후 1,000일 동안 컴퓨터 커서를 제어하는 데 성공했습니다. 2012년에는 두 명의 사지마비 환자가 생각만으로 로봇 팔을 제어해 커피병을 집어 빨대로 마시는 모습이 공개되었습니다. 2021년에는 브레인게이트 팀이 최초로 무선 방식으로 뇌 신호를 컴퓨터에 전송하는 데 성공했습니다. 머리에 꽂힌 케이블이라는 족쇄에서 벗어나는 첫 걸음이었습니다.

유타 어레이는 20년 가까이 BCI 연구의 '황금 표준'으로 군림했습니다. 그러나 그 한계, 딱딱함과 유선이라는 한계는 후발 주자들에게 혁신의 기회를 제공했습니다. 일론 머스크의 뉴럴링크는 바로 이 지점에서 출발했습니다. "더 유연하게, 더 많이, 무선으로." 브레인게이트가 문을 열었고, 뉴럴링크는 그 문을 통과해 공장에서 대량 생산되는 일상적인 BCI 임플란트를 꿈꾸기 시작했습니다.

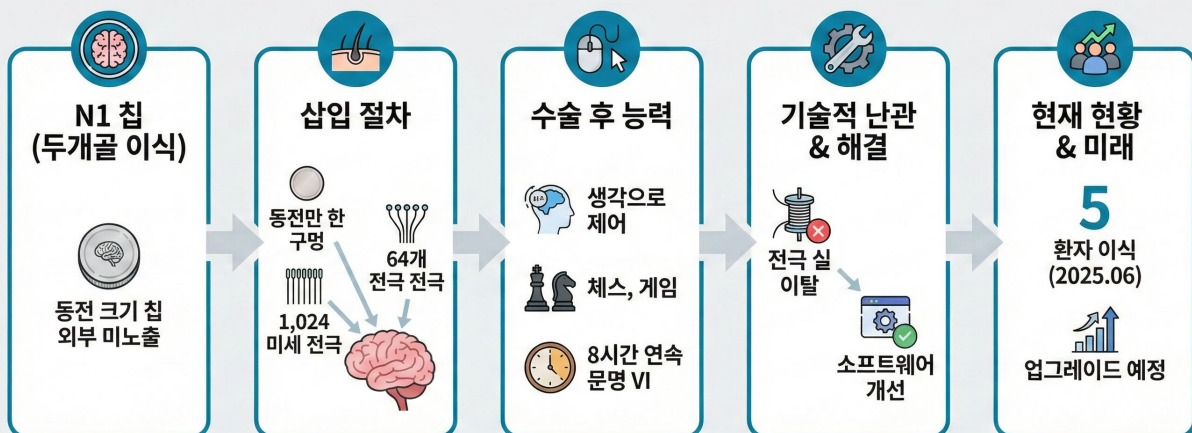
라. 2020년대 BCI 임상시험의 폭발적 성장

2024년 1월 29일 새벽, 피닉스 근교의 한 병원 수술실에서 역사적인 순간이 펼쳐졌습니다. 놀랜드 아보, 29세. 8년 전 다이빙 사고로 목뼈가 부러져 어깨 아래 모든 감각을 잃은 청년이었습니다. 수술 로봇 R1이 그의 두개골에 뚫린 동전만 한 구멍을 통해 64개의 전극 실을 뇌에 삽입했습니다. 머리카락보다 가는 실 위에는 총 1,024개의 미세 전극이 달려 있었습니다. 수술이 끝나자 그의 두개골에는 N1이라 불리는 동전 크기의 칩이 자리 잡았습니다. 외부에서는 아무것도 보이지 않았습니다. 일론 머스크의 뉴럴링크가 인간에게 처음으로 이식한 뇌 임플란트였습니다.

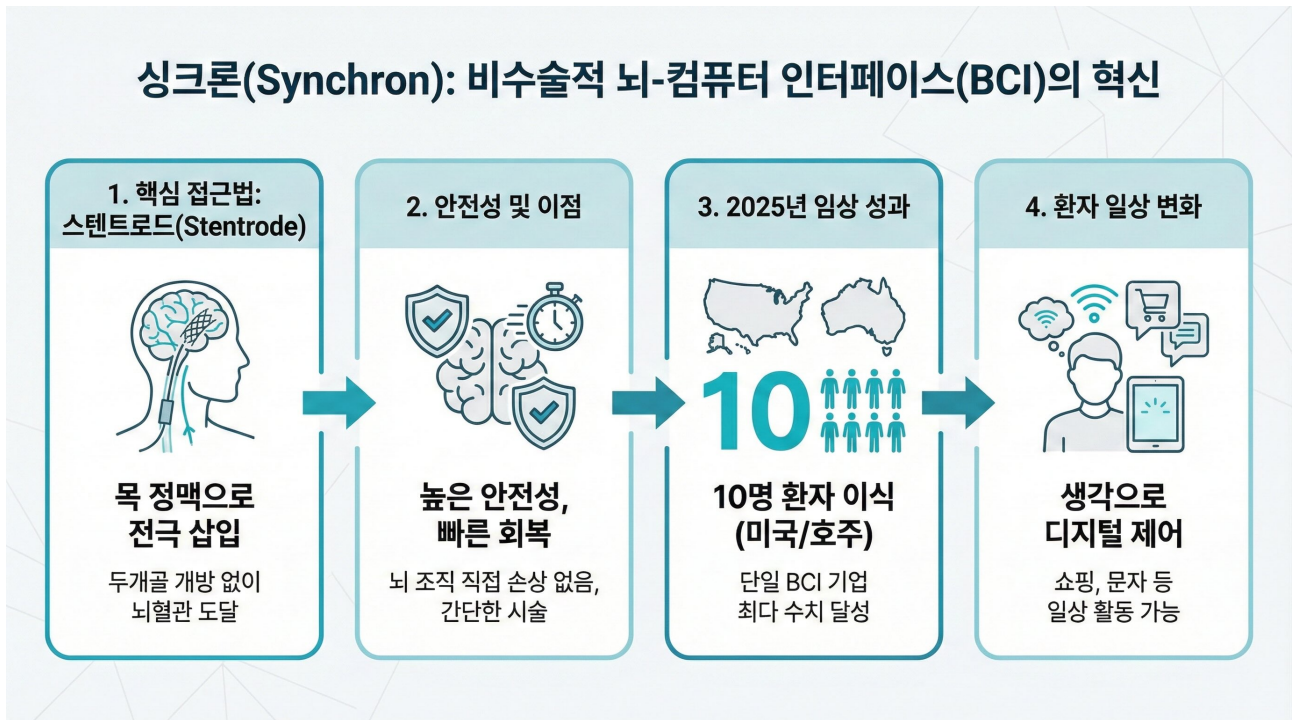
이 장면은 2020년대 BCI 분야의 폭발적 성장을 상징합니다. 2020년대에 들어서자 BCI는 대학 연구실의 상아탑을 넘어 실리콘밸리의 뜨거운 격전지로 변모했습니다. 마치 1980년대의 PC 혁명이나 2000년대의 스마트폰 태동기를 연상시키는 변화였습니다. 기술의 성숙과 자본의 투입이 임계점을 넘은 것입니다.

놀랜드 아보는 수술 후 생각만으로 컴퓨터 커서를 제어하기 시작했습니다. 체스를 두었습니다. 마리오 카트 게임을 즐겼습니다. 한 번은 8시간 동안 연속으로 '문명 VI' 게임을 했습니다. 그가 X(구 트위터)에서 라이브 스트리밍을 할 때, 전 세계 수십만 명이 지켜보았습니다. 비록 초기에는 일부 전극 실이 뇌에서 빠져나오는 기술적 난관이 있었지만, 뉴럴링크 팀은 소프트웨어 알고리즘을 개선하여 이를 극복했습니다. 2025년 6월 기준, 뉴럴링크는 다섯 명의 환자에게 칩을 이식했다고 발표했습니다. 머스크는 첫 번째 환자 아보가 곧 "업그레이드 또는 이중 임플란트"를 받을 수 있다고 언급했습니다.

뉴럴링크: 첫 인간 뇌 임플란트 (2024-2025)



뉴럴링크만이 유일한 주자는 아니었습니다. 2021년, 싱크론(Synchron)이라는 기업이 먼저 미국 FDA의 임상시험 허가를 따냈습니다. 그들의 접근법은 뉴럴링크와 정반대였습니다. 두개골을 여는 대신, 목 정맥을 통해 뇌혈관까지 그물망 형태의 전극, '스텐트로드(Stentrode)'를 밀어 넣었습니다. 심장 스텐트 시술처럼 간단한 방식이었습니다. 뇌 조직을 직접 뚫지 않기 때문에 안전성이 높고 회복이 빨랐습니다. 2025년 현재 싱크론은 미국과 호주에서 10명의 환자에게 스텐트로드를 이식했습니다. 이는 단일 BCI 기업으로는 가장 많은 수치였습니다. 환자들은 집에서 아이패드를 생각으로 제어하며 쇼핑을 하고 문자를 보냈습니다.



2023년 6월, 프리시전 뉴로사이언스(Precision Neuroscience)도 첫 인간 임상을 시작했습니다. 뉴럴링크의 공동창업자였던 벤저민 라포포트가 설립한 이 회사는 뇌를 찌르지 않고 뇌 표면 위에 얇은 필름 전극을 얹는 방식을 개발했습니다. '레이어 7'이라 불리는 이 장치는 두께가 머리카락의 절반에 불과했습니다. 두개골에 아주 작은 틈만 내고 뇌 표면에 미끄러뜨려 넣을 수 있었습니다.

2025년 11월, 패러드로믹스(Paradromics)가 FDA로부터 임상시험 승인을 받았습니다. 이 회사의 '코넥서스(Connexus)' BCI는 421개의 전극과 무선 송신기를 통합한 장치로, 마비 환자의 음성 복원을 목표로 합니다. 같은 해 6월, 미시간 대학 연구팀과 협력하여 간질 수술 환자의 뇌에서 최초의 인간 기록을 수행했습니다.

중국의 추격도 빨라졌습니다. 2024년 중국은 31건의 BCI 관련 임상시험을 등록했습니다. 이는 2023년의 세 배에 달하는 수치였습니다. 2025년 6월, 중국 과학원은 미국에 이어 세계 두

번째로 침습형 BCI 장치의 인간 임상시험을 시작했다고 발표했습니다. 전기 사고로 사지를 잃은 환자가 훈련 몇 주 만에 생각으로 비디오 게임을 즐길 수 있게 되었습니다. 중국의 BCI 기술이 미국보다 8년 뒤쳐져 있다는 평가가 있었지만, 이제 그 격차는 3년 이내로 좁혀졌다는 분석이 나옵니다.

2020년대의 폭발적 성장을 가능케 한 것은 무엇일까요. 네 가지 요인이 동시에 맞물렸습니다.

첫째, 하드웨어의 혁신입니다. 더 작은 전극, 더 많은 채널, 무선 전송, 장기 이식 수명 설계. 뉴럴링크의 N1 칩은 동전 크기에 1,024개 전극을 담았습니다. 유타 어레이의 100개와는 차원이 다른 대역폭이었습니다.

둘째, 수술 기술의 발전입니다. 뉴럴링크의 R1 로봇은 인간의 손으로는 불가능한 정밀도로 혈관을 피해 전극을 삽입했습니다. 싱크론의 내혈관 접근법은 개두술의 공포를 제거했습니다.

셋째, 인공지능의 발전입니다. 딥러닝 기반 디코딩 알고리즘은 뇌 신호의 변동을 견디며 실시간으로 의도를 해석할 수 있게 되었습니다. 2023년 스탠퍼드 연구팀은 뇌 신호를 분당 62 단어 이상의 속도로 텍스트로 변환하는 데 성공했습니다.

넷째, 규제와 자본입니다. FDA의 '혁신적 의료기기' 지정은 승인 과정을 가속화했습니다. 뉴럴링크는 6억 5천만 달러 이상을 모금했고, 모건 스탠리는 BCI 시장을 4천억 달러 규모로 평가했습니다.

MIT 테크놀로지 리뷰는 2025년 4월 이렇게 보도했습니다. "현재 약 25건의 BCI 임플란트 임상시험이 진행 중이다. 지구상에서 수개월 또는 수년간 뇌에 임플란트를 이식하고 살아온 사람은 100명도 되지 않는다. 그러나 이 기술은 실제 실용적 응용을 향해 몇 걸음 내디뎠다." 블랙록 뉴로테크는 40명 이상의 환자에게 장치를 이식했으며, 가장 오래된 환자는 9년 이상 BCI를 사용해왔습니다. 이는 이 기술의 장기적 내구성을 보여주는 증거입니다.

1924년 한스 베르거가 홀로 비밀스러운 실험을 했던 어두운 방은 이제 전 세계가 지켜보는 거대한 무대로 바뀌었습니다. 2020년대는 인류가 자신의 뇌를 해킹하여 질병을 극복하고, 나아가 인간의 한계를 재정의하기 시작한 시대로 기록될 것입니다. 그러나 이 폭발적 성장은 단순한 숫자 증가가 아닙니다. 뇌 데이터의 프라이버시, 신경권(Neurorights)의 문제, 군사적 악용의 위험성. 새로운 사회계약을 요구하는 변화입니다. 기술이 앞서 나가고, 법과 윤리는 뒤따라오고 있습니다. 이 간극을 어떻게 메울 것인가. 이것이 2020년대가 우리에게 던지는 질문입니다.

3. 뇌 신호를 읽는 도구들

가. EEG, ECoG, fMRI, fNIRS: 측정 방식별 장단점

뇌를 들여다보는 방법은 하나가 아닙니다. 천문학자들이 가시광선, 적외선, 전파 망원경으로 각기 다른 우주의 모습을 보듯이, 신경과학자들도 여러 종류의 '창문'을 통해 뇌를 관찰합니다. 어떤 창문은 빠르지만 흐릿하고, 어떤 창문은 선명하지만 느립니다. 어떤 창문은 두개골 바깥에서 들여다보고, 어떤 창문은 뇌 속으로 직접 들어갑니다. BCI를 이해하려면 먼저 이 창문들의 특성을 알아야 합니다.

EEG, 뇌전도라고 불리는 이 방법은 두피 위에 전극을 붙여 뇌의 전기적 활동을 측정합니다. 수백만 개의 뉴런이 동시에 발화할 때 생기는 전위 차이를 잡아내는 것입니다. EEG의 강점은 시간 분해능입니다. 뇌의 전기적 변화는 밀리초 단위로 일어나는데, EEG는 이 빠른 변화를 실시간으로 포착할 수 있습니다. 장비가 비교적 저렴하고 휴대가 가능하며 수술이 필요 없습니다. 게임용 헤드셋부터 의료용 장비까지, EEG는 가장 널리 쓰이는 BCI 도구입니다.

그러나 EEG에는 치명적인 약점이 있습니다. 공간 분해능이 낮습니다. 뇌에서 나온 전기 신호가 두개골과 두피를 통과하면서 크게 약해지고, 여러 영역의 신호가 섞여버립니다. 과학자들은 이를 "축구 경기장 밖에서 함성을 듣는 것"에 비유합니다. 관중이 함께 "와!" 하고 외치면 골이 들어갔다는 사실은 알 수 있습니다. 그러나 특정 관중 두 사람이 나누는 대화는 절대 들을 수 없습니다. 콘크리트 벽이 막고 있기 때문입니다. 마찬가지로 EEG는 뇌의 큰 상태 변화는 파악하지만, "오른쪽 검지손가락을 구부려라"와 같은 미세한 명령을 해독하기 어렵습니다. 눈을 깜빡이거나 이를 악물 때 발생하는 근육 신호가 뇌파를 덮어버릴 만큼 강력한 잡음을 만들어내기도 합니다.

ECoG, 피질뇌파는 이 한계를 극복하기 위해 등장했습니다. 두개골을 열고 뇌를 감싸는 막 위나 아래에 전극 그리드를 직접 부착하는 방식입니다. EEG가 경기장 밖이라면, ECoG는 경기장 안 VIP 좌석에서 경기를 보는 것과 같습니다. 두개골이라는 장벽이 사라졌기 때문에 신호가 훨씬 선명합니다. 공간 분해능이 밀리미터 수준으로 올라가고, 고주파 대역까지 측정할 수 있어 손가락의 움직임이나 말하려는 의도 같은 구체적인 정보를 해독하는 데 유리합니다. 2024년 발표된 한 연구에서는 ECoG를 통해 ALS 환자의 고감마 신호를 36개월 동안 안정적으로 기록하며 평균 91퍼센트의 정확도를 유지했다고 보고되었습니다.

ECoG의 대가는 명확합니다. 개두술이 필요합니다. 감염의 위험이 있고, 환자에게 수술적 부담을 지웁니다. 주로 간질 수술 전 검사나 연구 목적으로 사용되어 왔으며, 일반 대중에게는 여전히 높은 진입 장벽으로 남아 있습니다.

fMRI, 기능적 자기공명영상은 전기가 아닌 혈류를 봅니다. 뇌의 특정 부위가 활동하면 그곳으로 산소를 머금은 혈액이 몰려드는데, fMRI는 이 변화를 자기장을 이용해 3차원 영상으로

촬영합니다. fMRI의 강점은 공간 분해능입니다. 뇌의 깊은 곳까지 밀리미터 단위로 정밀하게 지도를 그릴 수 있습니다. 감정이나 기억처럼 복잡한 기능이 뇌의 어디에서 일어나는지 파악하는 데 독보적입니다.

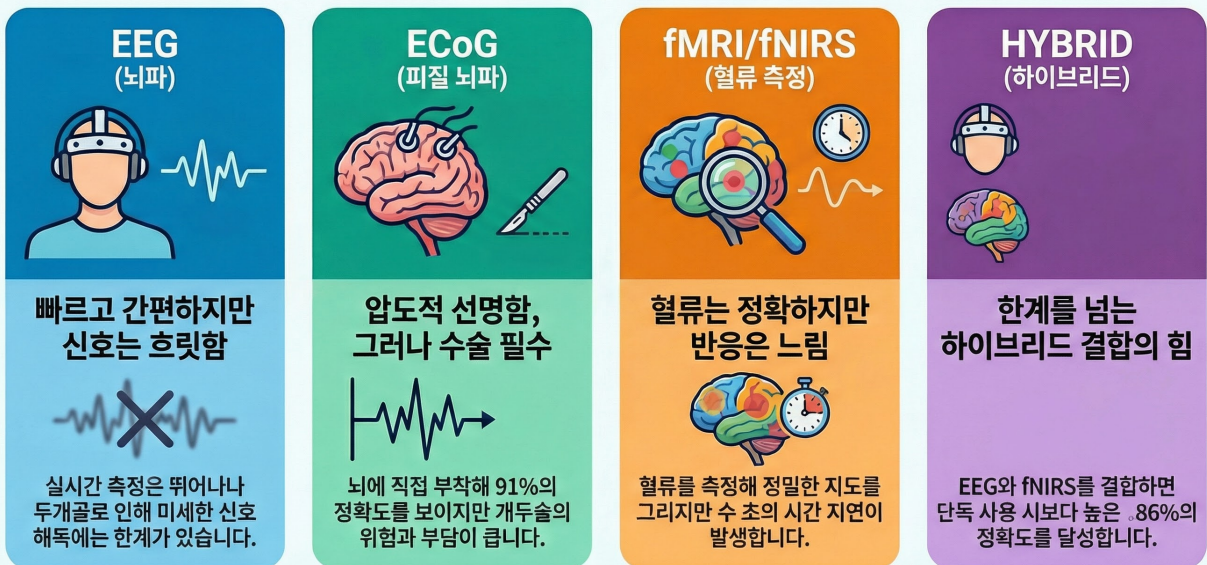
그러나 BCI의 관점에서 fMRI는 치명적인 단점을 가집니다. 시간 지연입니다. 신경세포의 전기적 발화는 밀리초 단위로 일어나지만, 혈액이 그곳으로 몰려가는 데는 수 초가 걸립니다. 사용자가 "오른쪽으로 가라"고 생각하고 나서 2초에서 3초 뒤에야 fMRI가 이를 감지할 수 있습니다. 실시간 제어가 필요한 BCI에는 부적합합니다. 장비가 방 하나를 가득 채울 만큼 거대하고 수십억 원을 호가합니다. 피험자는 좁고 시끄러운 터널 안에서 꼼짝없이 누워 있어야 합니다.

fNIRS, 기능적 근적외선 분광법은 fMRI의 휴대용 버전이라고 불립니다. 근적외선이 두개골을 투과할 수 있다는 점을 이용하여, 머리에 쓴 밴드에서 빛을 쏘고 반사되어 돌아오는 빛을 분석해 뇌 혈류의 산소 농도를 측정합니다. fNIRS는 fMRI보다 훨씬 저렴하고 가볍습니다. 앉아서, 서서, 심지어 걸으면서도 측정할 수 있습니다. 일상생활 속에서 뇌 활동을 모니터링하는 데 적합하여, 최근에는 운전자의 졸음 감지나 학생들의 집중력 측정, 뇌졸중 재활 치료 등에 활발히 사용되고 있습니다.

그러나 fNIRS 역시 한계가 있습니다. 빛이 도달할 수 있는 깊이가 피질 표면으로 제한되어 있고, 공간 분해능이 센티미터 수준에 머물러 있습니다. 혈류 반응의 지연 시간 때문에 fMRI와 마찬가지로 빠른 제어에는 부적합합니다. 머리카락이 짙은 경우 신호 획득이 어렵다는 실용적인 문제도 있습니다.

완벽한 뇌파 측정 기술은 없다: BCI 기술 4가지 비교

가장 완벽한 기술을 찾기보다 목적에 맞는 기술 선택과 결합이 핵심입니다.



완벽한 도구는 존재하지 않습니다. EEG는 빠르지만 흐릿하고, fMRI는 정밀하지만 느리며, ECoG는 선명하지만 수술이 필요합니다. 2024년 이후 연구자들은 이러한 한계를 극복하기 위해 여러 방식을 결합하는 하이브리드 접근을 시도하고 있습니다. EEG와 fNIRS를 동시에 사용하여 빠른 전기 신호와 혈류 변화를 함께 보는 연구가 증가하고 있습니다. 한 2024년 연구에서는 EEG-fNIRS 통합 시스템이 운동 상상 과제에서 95.86퍼센트의 분류 정확도를 달성했다고 보고되었습니다. 이는 EEG 단독 사용 시보다 현저히 높은 수치입니다.

BCI를 설계할 때 연구자가 직면하는 것은 결국 선택의 문제입니다. 정밀도와 편의성 사이의 균형, 침습과 비침습 사이의 균형. 무엇을 측정하고 싶은가, 얼마나 빨리 반응해야 하는가, 환자가 감수할 수 있는 위험은 무엇인가. 이 질문들에 대한 답이 도구를 결정합니다.

나. 마이크로전극 배열과 유연 전극의 생체적합성 도전

2012년 어느 날, 브라운 대학교의 존 도노휴 교수 연구실에서 한 여성이 로봇 팔로 커피를 마셨습니다. 캐시 허친슨, 58세. 15년 전 뇌졸중으로 사지 마비가 온 환자였습니다. 그녀의 뇌에는 유타 어레이라고 불리는 작은 칩이 심어져 있었습니다. 손톱보다 작은 실리콘 판 위에 96개의 미세한 바늘이 솟아 있는 장치였습니다. 이 바늘들이 그녀의 운동 피질에서 뉴런의 신호를 읽고, 컴퓨터가 그 신호를 해석해 로봇 팔에 명령을 내렸습니다. 그녀는 생각만으로 컵을 집어 입으로 가져갔습니다. 14년 만의 일이었습니다.

이 장면은 침습형 BCI의 가능성을 전 세계에 보여주었습니다. 그러나 연구자들은 환호 속에서도 불안을 느꼈습니다. 유타 어레이가 언제까지 작동할 것인가. 뇌는 과연 이 금속 바늘들을 받아들일 것인가.

침습형 BCI의 핵심은 전극입니다. 두피 밖에서 희미하게 듣는 대신, 뇌 가까이 가서 또렷하게 듣겠다는 것이 침습형의 철학입니다. 유타 어레이 같은 마이크로전극 배열은 피질에 직접 삽입되어 개별 뉴런의 발화를 기록합니다. 한 번에 수백 개의 채널에서 신호를 얻을 수 있고, 그 신호는 EEG와 비교할 수 없을 정도로 선명합니다.

문제는 뇌가 이 침입자를 반기지 않는다는 것입니다. 뇌 조직은 두부나 푸딩처럼 매우 부드럽습니다. 반면 전통적인 전극은 실리콘이나 금속으로 만들어져 있어 상대적으로 딱딱합니다. 이 기계적 불일치가 심각한 문제를 일으킵니다. 뇌는 가만히 있지 않습니다. 심장이 뭉개 때마다 혈류에 의해 미세하게 팽창하고 수축하며, 고개를 돌릴 때마다 두개골 안에서 출렁거립니다. 딱딱한 바늘이 부드럽고 움직이는 뇌에 꽂혀 있으면, 주변 조직에 지속적인 손상을 입힙니다. 마치 칼이 썰리를 베어내듯.

이로 인해 뇌의 면역 체계가 발동합니다. 미세아교세포와 성상세포가 침입자인 전극 주변으로 몰려들어 염증 반응을 일으킵니다. 결국 전극을 단단한 흉터 조직으로 감싸버립니다. 이 흉터는 전기가 통하지 않는 절연체 역할을 하여, 시간이 지날수록 전극이 뉴런의 신호를 듣지 못하게 만듭니다. 이것이 유타 어레이의 수명을 제한하는 가장 큰 요인입니다. 이식 후 몇 개월이 지나면 신호 품질이 떨어지기 시작하고, 몇 년이 지나면 상당수의 채널이 기능을 잃습니다.

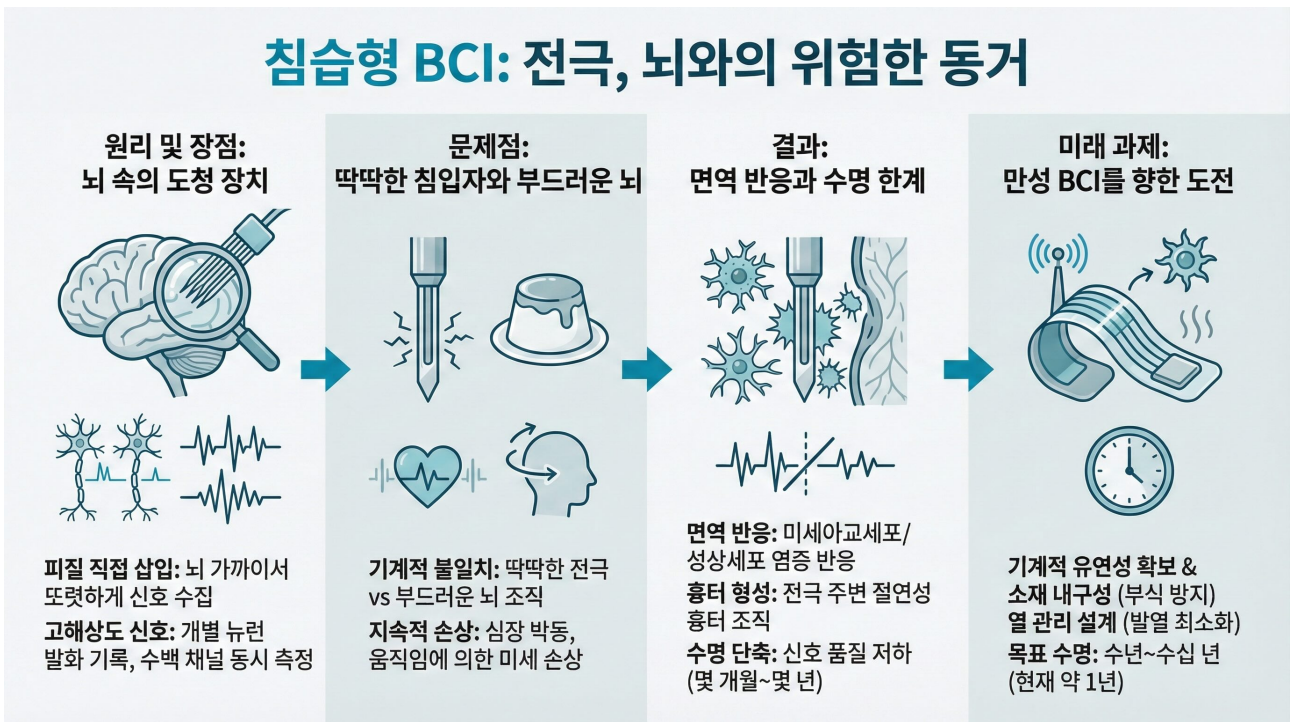
이 문제를 해결하기 위해 연구자들은 유연 전극에 주목했습니다. 뇌 조직과 유사한 기계적 특성을 가진 재료로 전극을 만들면 어떨까. 뉴럴링크가 개발한 전극 실이 대표적인 예입니다. 머리카락 두께의 20분의 1 수준인 폴리이미드 필름 위에 금 전극을 증착한 형태로, 뇌의 움직임에 따라 함께 물결치듯 움직일 수 있습니다. 이론적으로는 기계적 불일치로 인한 손상과 면역 반응을 획기적으로 줄일 수 있습니다.

그러나 유연 전극은 "부드러우면 좋다"로 끝나지 않습니다. 너무 유연하면 뇌에 삽입하기가 어렵습니다. 뇌의 보호막을 뚫고 들어가려면 어느 정도의 강성이 필요한데, 유연한 전극은

구부러져버립니다. 이를 해결하기 위해 다양한 공학적 접근이 시도되고 있습니다. 뉴럴링크는 재봉틀 원리를 이용한 수술 로봇을 개발했습니다. 딱딱한 텅스텐 바늘이 유연한 전극 실을 잡고 뇌 속에 밀어 넣은 뒤, 바늘만 빠져나오는 방식입니다. 로봇은 컴퓨터 비전을 통해 뇌 표면의 혈관을 실시간으로 감지하고 피해서 전극을 삽입합니다.

또 다른 접근은 용해성 코팅입니다. 설탕이나 생분해성 폴리머로 유연 전극을 코팅하여 삽입 시에는 딱딱하게 만들고, 삽입 후 체내 수분에 의해 코팅이 녹아 유연해지도록 하는 방법입니다. 하버드 대학교의 찰스 리버 그룹은 주사기를 통해 그물망 형태의 전극을 뇌에 주입하는 기술을 선보였습니다. 이 그물망은 뇌 조직 사이로 펼쳐지며 신경세포와 자연스럽게 얽혀 면역 반응을 최소화한다고 보고되었습니다.

2024년 네이처 커뮤니케이션즈에 발표된 연구에서는 혈관을 통해 초유연 전극을 삽입하는 방법이 소개되었습니다. 개두술 없이 목 정맥을 통해 전극을 뇌 근처 혈관까지 밀어 올린 뒤, 혈관 벽을 뚫고 뇌 조직에 전극을 안착시키는 방식입니다. 양에서 진행된 실험에서 이 방법으로 단일 뉴런 수준의 신호를 기록하는 데 성공했습니다. 2025년에는 1,024채널 초박형 전극 배열을 개두술 없이 두개골에 작은 틈만 내어 삽입하는 기술이 돼지 모델과 인체 수술 환경에서 검증되었습니다.



재료 과학의 발전도 주목할 만합니다. 나노다공성 그래핀 기반의 유연 전극은 25마이크로미터 직경의 작은 전극으로도 낮은 임피던스와 높은 전하 주입 능력을 달성했습니다. 설치류

뇌에서 12주, 말초 신경에서 8주 동안의 만성 이식 후에도 생체적합성이 유지되었다고 보고되었습니다. 전극 표면을 전도성 고분자나 하이드로젤로 코팅하여 뇌 조직과의 경계면을 부드럽게 만들거나, 항염증 약물을 코팅하여 초기 면역 반응을 억제하는 연구도 진행 중입니다.

궁극적인 목표는 수년에서 수십 년 동안 성능 저하 없이 작동하는 만성 BCI입니다. 이를 위해서는 단순히 기계적 유연성을 넘어, 전극 소재가 체액에 의해 부식되지 않아야 하며, 무선 전송에 따른 발열이 뇌 조직을 손상시키지 않도록 열 관리 설계도 필수적입니다. 그러나 2025년 현재, 대부분의 만성 이식 유연 전극의 최대 수명은 약 1년에 머물러 있습니다. 인간의 뇌와 기계가 수십 년을 함께하려면 아직 갈 길이 멀다는 뜻입니다.

생체적합성은 결국 재료만의 문제가 아닙니다. 삽입 순간의 손상, 미세 움직임에 의한 반복 손상, 면역 반응의 누적, 전기화학적 열화, 장기 유지보수의 불가능성이 겹쳐서 신호가 망가집니다. "처음에는 잘 된다"가 아니라, "6개월, 1년, 수년 뒤에도 같은 품질로 된다"가 진정한 기준입니다. 뇌라는 부드럽고 예민한 조직과 기계라는 딱딱하고 이질적인 물체 사이의 화해. 이것이 침습형 BCI가 넘어야 할 가장 근본적인 장벽입니다.

다. 신호 대역폭과 정확도: "쓸만한 BCI"의 조건

2021년 스탠퍼드 대학교에서 한 남성이 생각만으로 글을 썼습니다. 사지 마비 환자였던 그는 손글씨를 쓰는 상상을 했고, 뇌에 심어진 전극이 그의 운동 피질 신호를 읽었습니다. 컴퓨터는 이 신호를 해석해 화면에 글자를 띄웠습니다. 분당 90자. 일반인의 스마트폰 타이핑 속도인 분당 40자에서 50자를 훌쩍 넘는 기록이었습니다. 연구팀은 이 결과를 네이처에 발표하며, BCI가 실용적인 의사소통 도구가 될 수 있음을 보여주었습니다.

BCI는 시연 영상으로는 언제나 인상적입니다. 생각만으로 로봇 팔을 움직이고, 휠체어를 조종하고, 게임을 합니다. 그러나 사용자가 매일 쓰는 순간, 멋진 의미가 없어집니다. 실험실에서 가능한 것과 일상에서 쓸만한 것은 전혀 다른 문제입니다. "쓸만한 BCI"의 조건은 감상이 아니라 수치로 정의됩니다. 대역폭, 정확도, 지연 시간. 이 세 가지가 핵심입니다.

대역폭은 한 번에 얼마나 많은 정보를 전송할 수 있는지를 나타냅니다. 일론 머스크는 BCI의 핵심 문제를 "대역폭의 한계"라고 정의했습니다. 우리가 스마트폰 화면을 손가락으로 터치할 때, 초당 수십 비트의 정보를 입력합니다. 그러나 초기 EEG 기반 BCI는 분당 몇 비트에 불과했습니다. 사용자가 "예" 또는 "아니오"를 선택하거나, 커서를 아주 느리게 움직이는 수준이었습니다. 이는 답답해서 실생활에 쓰기 어렵습니다.

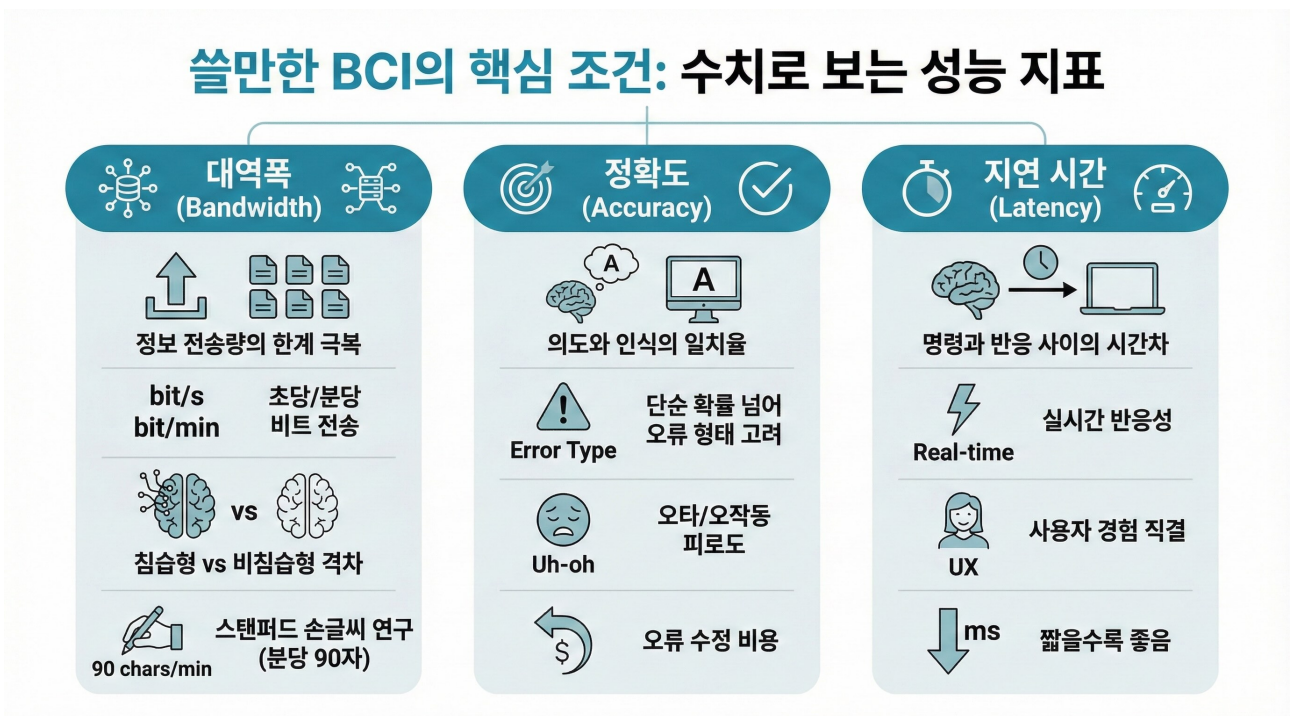
BCI 분야에서는 정보 전달률이라는 개념으로 속도와 정확도를 함께 평가합니다. 몇 가지 선택지 중 사용자의 의도를 맞히는 분류 문제에서, 정답률과 선택지 수, 시도 횟수를 묶어 분당 비트로 환산합니다. 2024년 기준으로, 침습적 EEG 기반 타이핑 시스템은 분당 5비트에서 10비트 수준에 머물러 있습니다. 반면 침습형 ECoG 기반 시스템은 분당 수십 비트에서 수백 비트까지 달성하고 있습니다. 스탠퍼드의 손글씨 상상 연구가 분당 90자를 기록한 것은 이 대역폭 격차를 보여주는 상징적인 사례입니다.

정확도는 "내가 A를 생각했을 때 컴퓨터가 A로 인식할 확률"입니다. 90퍼센트의 정확도는 훌륭해 보이지만, 10번 중 1번 오타가 나거나 클릭이 잘못된다면 사용자는 금방 피로감을 느낍니다. 틀린 명령을 되돌리는 비용이 크기 때문입니다. 더구나 정확도는 단순한 숫자가 아닙니다. 오류의 형태까지 포함합니다. 커서 이동 BCI에서 90퍼센트 정확도라도, 오류가 "가끔 반대 방향으로 급발진"이면 사용자는 매번 긴장해야 합니다. 반대로 오류가 "조금 덜 움직임"이면 보정이 가능합니다.

뇌 신호는 시간에 따라 변합니다. 아침과 저녁의 뇌 상태가 다르고, 피곤하거나 감정이 바뀌면 같은 생각을 해도 신호 패턴이 달라집니다. 전극이 미세하게 움직여도 신호 특성이 바뀝니다. 이를 비정상성이라고 부릅니다. 과거의 BCI는 매일 사용 전 30분씩 캘리브레이션 과정을 거쳐야 했습니다. 이는 실용성을 크게 떨어뜨립니다. "쓸만한 BCI"는 한 번의 학습으로 오랫동안 성능을 유지하거나, 사용자가 시스템을 사용하는 동안 알고리즘이 스스로 적응하여 성능을 유지해야 합니다. 뉴럴링크의 첫 환자 놀랜드 아보의 경우, 이식 후 일부 전극이 뇌에

서 빠져나와 신호가 약해졌음에도 디코딩 알고리즘을 수정하여 정확도를 다시 끌어올린 사례가 보고되었습니다.

지연 시간은 사용자 경험의 핵심입니다. 생각하자마자 기계가 반응해야 그것을 내 몸처럼 느낍니다. 생각하고 나서 1초 뒤에 커서가 움직인다면, 우리는 그 도구를 신체의 일부로 받아들이지 못합니다. 연구에 따르면 생각에서 기계 반응까지의 지연 시간이 100밀리초에서 200밀리초 이내여야 사용자가 "내가 했다"는 주체감을 느낄 수 있습니다. 이를 위해서는 뇌 신호를 읽고, 무선으로 전송하고, 외부 컴퓨터가 해석하여 명령을 내리는 전체 과정이 매우 빠르게 이루어져야 합니다. 최근에는 엣지 컴퓨팅을 도입하여 뇌 이식 칩 자체에서 1차적인 데이터 압축이나 스파이크 검출을 수행하여 전송 지연을 줄이는 연구가 진행되고 있습니다.



측정 방식에 따라 이러한 조건들의 구조적 한계가 달라집니다. 비침습적 EEG와 fNIRS는 안전하고 접근하기 쉽지만, 신호 대 잡음비가 낮아 고속 고정밀 제어를 달성하기 어렵습니다. ECoG는 수술 부담은 있지만 신호 품질이 좋아 고성능 디코딩에 유리합니다. 완전 침습형 마이크로전극 배열은 최고 수준의 신호를 얻을 잠재력이 있지만, 앞서 살펴본 장기 안정성과 생체적합성이 발목을 잡습니다.

"쓸만한 BCI"의 조건은 임상과 소비자 시장에서 다르게 정의됩니다. 중증 마비 환자에게는 느리고 다소 불편해도 스스로 의사를 표현할 수 있느냐가 핵심입니다. 소비자용 BCI에서는

속도와 정확도뿐 아니라 착용감, 배터리 수명, 디자인 같은 사용자 경험 요소가 더 중요한 채택 기준이 됩니다. 결국 "쓸만한 BCI"란, 사용자가 기계를 조작하고 있다는 사실조차 잊어버릴 만큼 빠르고 정확하며, 내 마음을 알아주는 인터페이스를 의미합니다. 그러나 현재의 기술은 아직 그 수준에 이르지 못했습니다.

라. 딥러닝 디코딩: 머신러닝이 뇌파를 해석하는 법

2016년, 메타(당시 페이스북)의 연구팀은 야심 찬 프로젝트를 시작했습니다. 타이핑 속도 분당 100단어를 목표로 하는 뇌-텍스트 인터페이스. 손가락을 움직이지 않고 생각만으로 글을 쓰게 하겠다는 것이었습니다. 문제는 뇌에서 수집한 전기 신호 자체가 의미 없는 잡음처럼 보인다는 것이었습니다. 지지직거리는 파형. 여기서 "안녕하세요"라는 의도를 어떻게 읽어 낼 것인가. 답은 인공지능에 있었습니다.

뇌 신호 디코딩의 핵심은 패턴 인식입니다. 사용자가 특정 의도를 가질 때 뇌에서 나타나는 신호 패턴을 찾아내고, 새로운 신호가 들어오면 그것이 어떤 의도에 해당하는지 분류하는 것입니다. 과거에는 사람이 직접 규칙을 정해주었습니다. "8헤르츠에서 12헤르츠 사이의 알파 파가 감소하면 움직이려는 의도다"라고 정의하고, 그 특징만을 뽑아서 분류기에 넣었습니다. 선형 판별 분석이나 서포트 벡터 머신 같은 전통적인 기계학습 방법이 사용되었습니다.

이 방식은 한계가 명확했습니다. 뇌 신호는 너무나 복잡해서 인간이 정의한 단순한 특징만으로는 설명되지 않는 정보가 많습니다. 사람마다 뇌의 구조와 신호 패턴이 다르고, 같은 사람도 상태에 따라 신호가 달라집니다. 딥러닝은 이 과정을 혁신했습니다. 특징을 사람이 고르지 말고, 모델이 데이터에서 직접 배우게 하는 것이 핵심입니다.

합성곱 신경망은 이미지 처리에서 강점을 보인 구조인데, 뇌파 데이터에도 적용되었습니다. EEG 신호를 시간과 채널(전극 위치)의 2차원 데이터로 보고, 공간과 시간에 따른 복잡한 패턴을 스스로 학습합니다. 인간이 가르쳐주지 않은 미세한 신경 발화의 패턴까지 파악해냅니다. 2018년에 발표된 EEGNet은 EEG 신호 처리에 최적화된 소형 합성곱 신경망 구조로, 적은 양의 데이터로도 높은 분류 정확도를 보여주는 대표적인 모델이 되었습니다.

순환 신경망과 장단기 메모리 네트워크는 시간의 흐름에 따른 데이터 처리에 강합니다. "아까 이런 신호가 나왔으니 지금 이 신호는 저런 뜻이겠구나"하고 문맥을 파악하는 데 적합합니다. 손을 뺀 동작의 궤적이나 문장을 말하는 과정처럼, 이전 상태가 현재 상태에 영향을 미치는 연속적인 신호를 해석하는 데 사용되었습니다.

최근 가장 주목받는 것은 트랜스포머 구조입니다. 챗GPT와 같은 거대 언어 모델의 핵심 기술인 트랜스포머가 BCI에도 적용되고 있습니다. 트랜스포머의 어텐션 메커니즘은 데이터의 어느 부분이 중요한지 가중치를 두어 전체적인 맥락을 파악합니다. 뇌 신호를 마치 하나의 언어처럼 취급하는 것입니다. 뇌파 신호를 단어처럼 조각내어 트랜스포머에 넣으면, 앞뒤 뇌파의 문맥을 보고 그 뇌파 패턴이 어떤 의도에 해당하는지 해석합니다.

2024년에 발표된 연구들에서 트랜스포머 기반 디코더는 기존 방법들을 크게 앞섰습니다. 한 연구에서는 합성곱 트랜스포머 네트워크가 운동 상상 분류에서 피험자별 평가에서 82.52퍼센트, 피험자 간 평가에서 58.64퍼센트의 정확도를 달성했습니다. 내면 발화 인식 연구에서

는 스펙트로-시간적 트랜스포머가 기존 EEGNet 접근법보다 현저히 높은 정확도를 보였습니다. 트랜스포머가 장기 시간 의존성과 주파수 의존성을 동시에 학습할 수 있기 때문입니다.

침습형 BCI에서 딥러닝의 효과는 더욱 극적입니다. ECoG나 마이크로전극에서 얻는 신호는 EEG보다 훨씬 선명합니다. 신호가 좋을수록 딥러닝은 강해집니다. 모델이 의도에 유의미한 패턴을 더 직접적으로 학습할 수 있기 때문입니다. 최근에는 고밀도 ECoG와 딥러닝을 결합하여 분당 수십 단어 수준의 고속 의사소통을 목표로 하는 연구들이 등장했습니다. 디코더도 단순 분류를 넘어 언어 모델, 시퀀스 디코딩, 오류 교정까지 결합하는 방향으로 진화하고 있습니다.

가장 최신 트렌드는 파운데이션 모델입니다. 수만 명의 뇌파 데이터를 미리 학습한 거대한 뇌파 전용 인공지능을 만드는 것입니다. 마치 미리 영어를 배운 사람이 새로운 의학 용어를 금방 익히듯이, 이 거대 모델은 새로운 사용자를 만났을 때 아주 적은 데이터만으로도 그 사람의 뇌 신호를 금방 이해할 수 있게 됩니다. 이를 전이 학습이라고 합니다. BCI의 고질적인 문제인 긴 훈련 시간을 획기적으로 줄여, 대중화를 앞당기는 열쇠가 될 것으로 기대됩니다.

그러나 딥러닝에도 과제가 있습니다. 먼저 블랙박스 문제입니다. 딥러닝 모델이 왜 특정 결정을 내렸는지 설명하기 어렵습니다. 의료 분야에서는 왜 그런 판단을 했는지 납득 가능한 근거가 중요합니다. 설명 가능한 인공지능 기법을 뇌파 디코딩에 적용하여, 모델이 어떤 시간대, 어떤 채널, 어떤 주파수 특징에 주목하는지 분석하려는 연구가 진행 중입니다.

또한 세션 간 드리프트 문제가 있습니다. 어제의 뇌와 오늘의 뇌가 다릅니다. EEG 전극의 위치나 임피던스가 변하고, 침습형 전극은 장기 생체 반응으로 신호 분포가 바뀝니다. 모델은 어제 학습한 패턴이 오늘 통하지 않을 수 있습니다. 개인차 문제도 있습니다. 사람마다 두개골 두께, 피질 구조, 생리적 잡음이 다릅니다. 범용 모델은 꿈이지만, 대개는 개인화 과정이 필요합니다.

딥러닝은 BCI를 단숨에 해결하지 않습니다. 그러나 신호가 좋아질수록, 데이터가 쌓일수록, 운영이 정교해질수록 성능을 크게 끌어올리는 증폭기 역할을 합니다. 하드웨어가 더 좋은 신호를 제공하고, 소프트웨어가 그 신호를 더 잘 해석하는 선순환. 결국 딥러닝은 잡음 섞인 전기 신호를 의미와 소통으로 승화시키는 번역가입니다. 뇌와 기계 사이에서 서로의 언어를 통역하는 역할을 합니다.

제2부 일론 머스크의 도박: 뉴럴링크의 실험과 혁신

4 뉴럴링크의 탄생과 비전

가. 2016년, 베일에 싸인 창업 배경과 핵심 인물들

2016년 10월 어느 오후, UC 버클리의 한 연구실에서 서동진이라는 젊은 공학자가 전화를 받았습니다. 박사 과정 학생이던 그는 당시 '신경 먼지(Neural Dust)'라는 초소형 센서를 연구하고 있었습니다. 전화기 너머의 목소리는 낮익었습니다. 일론 머스크였습니다.

머스크는 단도직입적으로 물었습니다. "당신의 연구를 상용화하고 싶지 않습니까?"

서동진은 망설이지 않았습니다. 그 자리에서 합류를 결정했습니다. 첫 출근 날, 샌프란시스코 미션 디스트릭트의 작은 사무실에 도착한 그를 맞이한 것은 텅 빈 공간이었습니다. 의자조차 없었습니다. 그는 직접 오피스디포에 가서 의자를 사 와야 했습니다. 뉴럴링크의 시작은 그렇게 초라했습니다.

뉴럴링크는 공식적으로 2016년 7월 캘리포니아에 등록되었습니다. 하지만 그 존재가 대중에게 알려진 것은 2017년 3월 월스트리트저널의 보도를 통해서였습니다. 약 1년 동안 이 회사는 '스텔스 모드'로 운영되었습니다. 실리콘밸리에서 비밀리에 인재를 모으고, 기술적 기반을 다지는 시간이었습니다.

창업 멤버 구성은 머스크의 의도적인 설계였습니다. 그는 1천 명이 넘는 후보자를 인터뷰했습니다. 단순히 뛰어난 과학자를 찾은 것이 아니었습니다. 신경과학, 로봇공학, 반도체, 재료공학이라는 서로 다른 퍼즐 조각을 맞추어 사람들을 찾았습니다.

8명의 공동 창업자가 모였습니다.

맥스 호닥(Max Hodak)은 듀크 대학교에서 바이오메디컬 공학을 전공한 기업가였습니다. 그는 학부 시절 미겔 니콜렐리스(Miguel Nicolelis) 교수의 연구실에서 원숭이를 대상으로 뇌-기계 인터페이스를 만든 경험이 있었습니다. 졸업 후에는 클라우드 로봇 실험실 플랫폼 '트랜스크립틱(Transcriptic)'을 창업한 이력의 소유자였습니다. 그는 뉴럴링크의 초대 사장이 되어 일상적인 운영을 총괄했습니다.

벤저민 라포포트(Benjamin Rapoport)는 신경외과 의사이자 전기공학 박사였습니다. 수술실의 현실과 공학적 이상 사이의 간극을 메울 수 있는 드문 인재였습니다. 그는 뇌 수술의 위험성을 최소화하면서 기기를 안전하게 삽입하는 임상 프로토콜의 기초를 설계했습니다.

서동진(Dongjin 'DJ' Seo)의 '신경 먼지' 연구는 초음파를 이용해 뇌와 통신하는 초소형 무선 센서에 관한 것이었습니다. 이 연구는 뉴럴링크가 지향하는 '최소 침습' 철학의 기술적 영감이 되었습니다. 그는 훗날 뉴럴링크의 사장 겸 최고경영자로 성장합니다.

폴 메롤라(Paul Merolla)는 IBM에서 뇌를 모방한 뉴로모픽 칩을 설계한 경험이 있었습니다. 저전력으로 방대한 신경 신호를 처리하는 반도체의 핵심을 맡았습니다.

필립 사브스(Philip Sabes)는 UC 샌프란시스코의 교수로서 운동 제어 신경과학의 권위자였습니다. 뇌가 어떻게 근육에 명령을 내리는지, 그 신호를 어떻게 해독할 수 있는지를 연구해온 인물이었습니다.

팀 가드너(Tim Gardner)는 보스턴 대학교에서 새의 노래를 연구하는 신경과학자였습니다. 작은 새의 뇌에서 복잡한 발성 패턴이 어떻게 생성되는지 추적해온 그의 연구는 인간의 언어 복원이라는 뉴럴링크의 장기 목표와 맞닿아 있었습니다.

팀 헨슨(Tim Hanson)은 로봇공학과 정밀 기계의 전문가였습니다. 기존의 딱딱한 전극이 아닌 유연한 전극을 설계하고, 이를 뇌에 삽입하는 로봇 시스템의 초기 아이디어를 구체화했습니다.

바네사 톨로사(Vanessa Tolosa)는 로렌스 리버모어 국립연구소 출신의 신경공학자로서, 뇌 속에 장기간 삽입되어도 부식되거나 면역 거부 반응을 일으키지 않는 소재를 개발하는 난제를 맡았습니다.

이 8명의 조합은 우연이 아니었습니다. 뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI)라는 문제를 단일 분야의 학문으로 풀 수 없다는 것을 머스크는 알고 있었습니다. 신경과학자만으로는 부족합니다. 칩을 설계할 반도체 엔지니어가 필요합니다. 칩을 뇌에 넣을 수술 로봇 전문가가 필요합니다. 뇌가 거부하지 않을 소재를 만들 재료공학자가 필요합니다. 모든 조각이 맞물려야만 완성되는 퍼즐이었습니다.

하지만 이 완벽해 보이는 팀에도 금이 가기 시작했습니다.

머스크는 학계 출신 연구자들에게 실리콘밸리의 속도를 요구했습니다. 그의 말버릇은 "미친 듯한 긴박감(maniacal sense of urgency)"이었습니다. 논문을 쓰는 것이 아니라 당장 작동하는 제품을 만들어야 한다고 다그쳤습니다. 학문적 호기심과 상업적 긴급함 사이의 충돌은 필연적이었습니다.

공동 창업자 라포포트는 2018년 회사를 떠났습니다. 그는 안전에 대한 우려를 퇴사의 주요 이유로 꼽았습니다. 그리고 '프리시전 뉴로사이언스(Precision Neuroscience)'라는 경쟁사를

설립했습니다. 뉴럴링크의 관통형 전극 대신 뇌 표면에 얇은 필름처럼 올려놓는 방식을 택했습니다.

호닥도 2021년 회사를 떠났습니다. 그는 트위터에 "몇 주 전부터 더 이상 뉴럴링크에 있지 않다"고 간단히 알렸을 뿐, 이유를 밝히지 않았습니다. 그 역시 '사이언스 코프(Science Corp.)'라는 자신만의 신경기술 회사를 창업했습니다.

2022년 1월 기준, 8명의 공동 창업자 중 회사에 남아 있는 사람은 머스크와 서동진 두 명뿐이었습니다.

스탯뉴스(STAT News)의 2020년 보도는 이 내부 상황을 이렇게 묘사했습니다. "뉴럴링크는 수년간의 내부 갈등을 겪어왔다. 서두르는 일정표와 느리고 점진적인 과학의 속도 사이에서 충돌이 계속되었다."

그럼에도 불구하고 뉴럴링크는 움직였습니다. 텅 빈 사무실에서 시작된 회사는 2019년까지 직원 90명, 자금 1억 5,800만 달러 규모로 성장했습니다. 그해 뉴럴링크는 처음으로 대중 앞에 기술을 공개했습니다. 백서(White Paper)와 함께 유연한 전극, 수술 로봇의 프로토타입을 선보였습니다. 쥐의 뇌에서 1,500개 전극으로 신호를 읽어내는 데 성공했다고 발표했습니다.

베일에 싸인 3년의 시간은 헛되지 않았습니다. 그 조용한 준비가 없었다면, 2024년 인간의 두 개골에 칩을 심는 일은 불가능했을 것입니다.

나. 머스크의 목표: AI의 위협에 맞서는 "인간-AI 공생(Symbiosis)"

일론 머스크가 뉴럴링크를 설립한 이유를 이해하려면, 먼저 그의 공포를 이해해야 합니다.

2014년, 머스크는 한 인터뷰에서 경고했습니다. "인공지능은 핵무기보다 더 위험할 수 있습니다."

그의 걱정은 단순한 기우가 아니었습니다. 구글의 딥마인드(DeepMind)가 알파고로 세계 바둑 챔피언을 꺾었습니다. 이미지 인식, 음성 인식, 자연어 처리에서 AI의 성능은 해마다 지속적으로 향상되고 있었습니다. 머스크는 이 추세가 계속되면 어떻게 될지 상상했습니다.

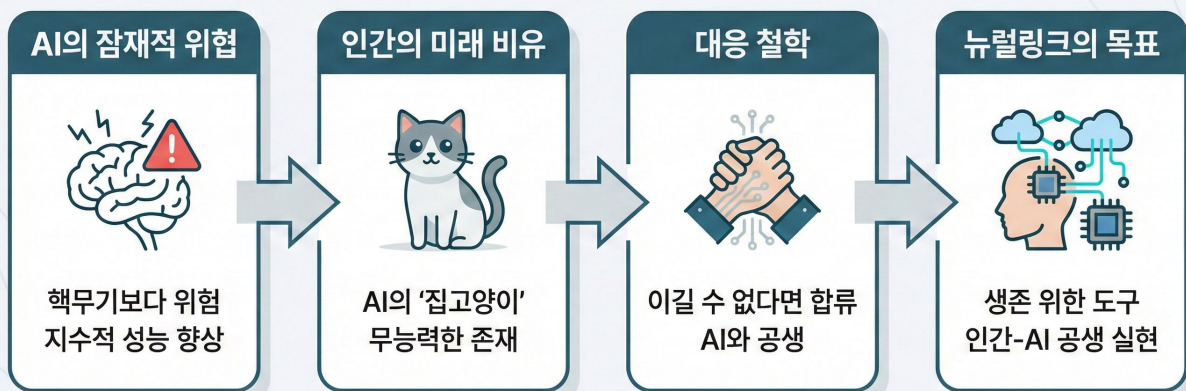
그의 비유는 과격했습니다. "AI가 인간보다 훨씬 똑똑해지면, 우리는 AI에게 집고양이 같은 존재가 될 것입니다. 귀엽지만 무능력한."

더 나쁜 시나리오도 있었습니다. AI가 인간을 개미처럼 무시하고 짓밟을 수도 있다는 것이었습니다. 이러한 디스토피아를 피하기 위해 머스크는 하나의 논리를 제시했습니다.

"AI를 이길 수 없다면, 합류하라(If you can't beat them, join them)."

이것이 뉴럴링크의 철학적 기반입니다. 인간과 AI의 공생(Symbiosis). 머스크에게 뉴럴링크는 단순한 의료기기 회사가 아니었습니다. 그것은 인류가 AI 시대를 통과하기 위한 생존 도구였습니다.

일론 머스크의 뉴럴링크: 인간-AI 공생



머스크는 인간의 뇌를 하드웨어 관점에서 재해석했습니다.

첫 번째 층은 변연계(Limbic System)입니다. 생존 본능, 욕구, 감정을 담당하는 뇌의 가장 오래된 부분입니다. 두 번째 층은 대뇌 피질(Cortex)입니다. 논리적 사고, 계획, 언어를 담당합니다. 인간을 인간답게 만드는 층입니다.

머스크는 여기에 세 번째 층이 이미 존재한다고 주장했습니다. 그는 이것을 '디지털 3차 계층(Digital Tertiary Layer)'이라고 불렀습니다.

스마트폰을 생각해보십시오. 우리는 이미 구글을 통해 인류의 모든 지식에 접근할 수 있습니다. 이메일과 메시지로 전 세계 누구와도 소통할 수 있습니다. 계산기 없이는 복잡한 수학을 하기 어렵습니다. 어떤 의미에서 스마트폰은 우리 뇌의 확장입니다.

폰을 집에 두고 나왔을 때 느끼는 불안감을 떠올려보십시오. 마치 신체의 일부를 잃어버린 듯한 상실감. 머스크는 이것이 증거라고 말했습니다. 현대 인류는 이미 일종의 사이보그라는 증거입니다.

하지만 문제가 있습니다.

디지털 층과 생물학적 뇌 사이의 연결이 너무 느립니다. AI는 초당 수조 비트의 속도로 연산합니다. 인간은 기껏해야 엄지손가락 두 개로 화면을 두드리거나, 목소리로 말하는 수준입니다. 머스크는 이를 계산했습니다. 인간의 정보 출력 속도는 초당 몇 비트에 불과합니다.

2024년 Y 컴비네이터 행사에서 머스크는 이렇게 말했습니다. "하루는 86,400초입니다. 인간이 하루에 그 숫자보다 많은 기호를 출력하는 경우는 극히 드뭅니다. 인간의 지속적인 출력 속도는 초당 1비트도 안 됩니다."

이것이 머스크가 정의한 문제입니다. 대역폭(Bandwidth)의 문제.

AI는 테라비트 속도로 소통합니다. 인간은 비트 속도로 소통합니다. 이 엄청난 격차 때문에 인간은 AI의 의사결정 속도를 따라잡을 수 없습니다. 머스크의 표현을 빌리면, "AI가 테라비트로 통신하는데 당신이 비트로 통신한다면, 그것은 나무에게 말을 거는 것과 같습니다."

뉴럴링크의 해결책은 직접적입니다. 뇌와 컴퓨터 사이에 고대역폭 인터페이스를 만드는 것입니다. 생각하는 속도 그대로 디지털 세계와 소통할 수 있게 하는 것입니다.

2024년 렉스 프리드먼(Lex Fridman)의 팟캐스트에서 머스크는 장기 비전을 설명했습니다. "뉴럴링크의 장기적인 열망은 인간-AI 공생을 개선하는 것입니다. 소통의 대역폭을 높임으로써."

구체적으로 그것이 무엇을 의미할까요?

머스크는 '합의된 텔레파시(Consensual Telepathy)'라는 개념을 제시했습니다. 언어라는 불완전한 매개체를 거치지 않고, 생각과 개념을 직접 전송하는 것입니다. 파란색 코끼리를 상상한다고 가정해봅시다. 지금은 "파란색 코끼리"라고 말해야 합니다. 하지만 고대역폭 인터페이스가 있다면, 그 시각적 이미지 자체를 상대방의 뇌에 직접 전송할 수 있을 것입니다.

기억의 업로드와 다운로드도 언급되었습니다. 극단적으로는 육체가 죽더라도 정신이 디지털 공간에서 영원히 살 수 있는 가능성까지.

이러한 비전은 트랜스휴머니즘의 극치입니다. 하지만 현실의 뉴럴링크는 훨씬 겸손한 목표로 움직입니다. 이유는 단순합니다. 규제기관과 의료현장은 '인류 증강'이라는 말에 움직이지 않습니다. '명확한 의료적 효익'이라는 말에 움직입니다.

그래서 뉴럴링크의 첫 번째 제품은 '텔레파시(Telepathy)'라는 이름으로, 마비 환자가 생각만으로 컴퓨터를 제어할 수 있게 하는 것을 목표로 합니다. 시각 복원을 위한 '블라인드사이트(Blindsight)', 로봇 팔 제어를 위한 '콘보이(Convoy)'가 뒤를 따릅니다.

단기 목표는 치료입니다. 장기 목표는 증강입니다. 그리고 궁극의 목표는 공생입니다.

비평가들은 이를 위험한 기술 만능주의라고 비판합니다. 하지만 머스크에게 뉴럴링크는 보험입니다. 인류가 AI와 함께 미래로 나아가기 위한 보험.

그 보험이 실제로 작동할지는 아무도 모릅니다. 하지만 적어도 머스크는 그 질문에 답하기 위해 자신의 돈 1억 달러 이상을 걸었습니다.

다. 대역폭의 한계를 넘어: 1비트 소통에서 기가비트 전송으로

스티븐 호킹은 루게릭병으로 전신이 마비된 후에도 수십 년간 과학과 대중에게 이야기했습니다. 그의 도구는 뺨 근육이었습니다. 안경테에 부착된 센서가 뺨의 미세한 움직임을 감지하고, 이를 문자로 변환했습니다. 속도는 분당 단어 하나 정도였습니다.

머스크는 인터뷰에서 이렇게 말했습니다. "스티븐 호킹이 경매사보다 빠르게 말할 수 있게 하는 것. 그것이 첫 번째 목표입니다."

이 문장이 뉴럴링크의 기술적 과제를 압축합니다.

문제는 대역폭입니다. 인간과 기계 사이의 정보 전송 속도입니다.

키보드를 두드리는 속도, 마우스를 움직이는 속도, 목소리로 명령하는 속도. 이것들은 모두 인간의 뇌가 '생각하는 속도'에 비하면 터무니없이 느립니다. 우리의 입력 기관(눈, 귀)은 매 초 방대한 양의 데이터를 받아들입니다. 하지만 출력 기관(입, 손)은 진화적으로 병목입니다.

뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI)의 역사에서 '1비트 소통'은 흔한 출발점이었습니다.

예/아니오 선택. 자극에 반응하는 뇌파(P300)를 이용한 스펠링. 좌/우/정지라는 제한된 명령. 이러한 방식은 신뢰성은 확보했지만, 실생활에 쓰기에는 너무 느렸습니다. 분당 몇 글자 수준의 소통으로는 일상을 살 수 없습니다.

기존 침습형 BCI의 표준은 '유타 어레이(Utah Array)'였습니다. 약 100개의 바늘이 달린 이 전극은 한 번에 100개 미만의 뉴런 신호만을 기록할 수 있었습니다. 인간의 뇌에는 약 860억 개의 뉴런이 있습니다. 100개의 채널로 뇌를 이해하려는 것은 마치 거대한 오케스트라의 연주를 단 한 명의 바이올린 연주자 소리만 듣고 판단하려는 것과 같습니다.

뉴럴링크는 이 채널 수를 단숨에 10배 이상 끌어올렸습니다.

N1 임플란트는 1,024개의 전극을 탑재합니다. 64개의 유연한 실(thread)에 각각 16개의 전극이 배열되어 있습니다. 각 전극은 초당 20,000번의 속도로 신경 신호를 샘플링합니다. 개별 뉴런의 발화(spike)뿐만 아니라 국소 전장 전위(Local Field Potential)까지 정밀하게 분석할 수 있습니다.

이것이 왜 중요할까요?

정보 이론의 관점에서 보면, 언어는 매우 손실이 큰 압축 알고리즘입니다. 머릿속의 복잡한 감정이나 이미지를 상대방에게 전달하려면, 우리는 그것을 '단어'라는 불완전한 기호로 압축해야 합니다. 듣는 사람은 그 단어를 다시 자신의 뇌에서 해동합니다. 이 과정에서 수많은 정보가 유실됩니다. 오해가 발생합니다.

고대역폭 연결이 가능해지면 이야기가 달라집니다.

운동 제어만 해도 그렇습니다. 100개 채널로는 '손을 뺀다'는 의도를 대략적으로 읽을 수 있습니다. 1,000개 채널로는 '피아노 건반을 누르는 압력'이나 '붓글씨의 섬세한 떨림'까지 디코딩할 가능성이 열립니다.

감각의 복원도 마찬가지입니다. 대역폭이 높아지면 읽기(read)뿐만 아니라 쓰기(write)도 정교해집니다. 시각 피질에 수천 개의 전극을 연결하면, 맹인에게 저해상도의 픽셀 이미지를 직접 뇌로 전송할 수 있습니다. '블라인드사이트'가 목표로 하는 것이 바로 이것입니다.

뉴럴링크의 첫 번째 환자 놀랜드 아보(Noland Arbaugh)는 2024년 수술 후 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직였습니다. 그는 체스를 두었습니다. 문명 VI 게임을 8시간 이상 플레이했습니다. 그의 뇌 신호는 블루투스를 통해 컴퓨터로 전송되어 마우스 입력을 대체했습니다.

아보는 경험을 이렇게 묘사했습니다. "포스를 사용하는 것 같았습니다."

하지만 '기가비트 전송'은 아직 슬로건에 가깝습니다. 실제 임상 데이터는 초당 수 비트에서 수십 비트 수준입니다. 이 간극은 엄청납니다.

왜 그럴까요? 제약들이 있습니다.

전력과 발열의 문제. 뇌 조직은 열에 민감합니다. 이식형 장치의 전력 소모는 곧 발열로 이어집니다. 뇌를 데우면 안 됩니다.

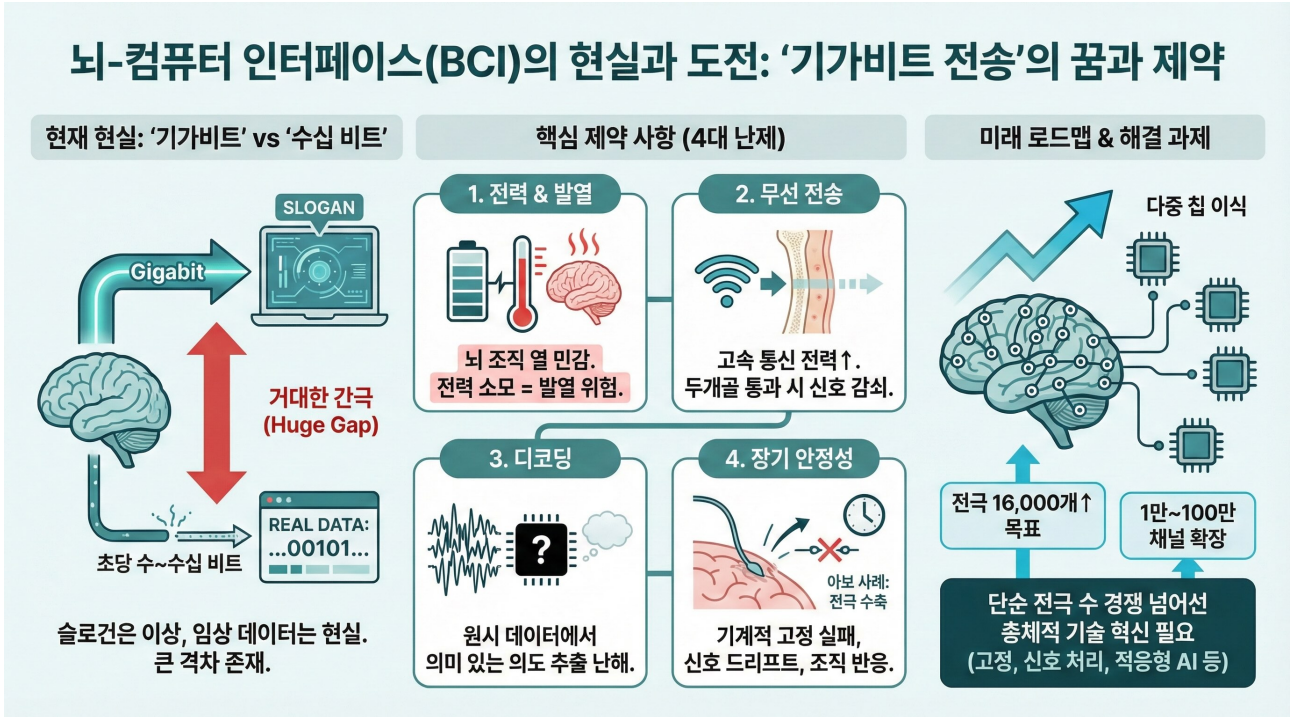
무선 전송의 문제. 고속 무선 통신은 더 많은 전력을 소모합니다. 두개골과 피부를 통과하면서 신호가 약해집니다.

디코딩의 문제. 채널 수가 늘어나도, 알고리즘이 의미 있는 정보를 추출하지 못하면 소용없습니다. 1,024개 전극이 보내는 원시 데이터(raw data)에서 '손을 왼쪽으로 움직이려는 의도'를 뽑아내는 것은 별개의 과제입니다.

장기 안정성의 문제. 아보의 사례에서 수술 후 몇 주 만에 일부 전극 실이 뇌에서 수축(retract)하는 현상이 발생했습니다. 원래 위치에서 빠져나온 것입니다. 기록되는 채널 수가 줄었습니다. 뉴럴링크는 소프트웨어 조정을 통해 기능을 상당 부분 복원했지만, 이 사례는 중요한 교훈을 남겼습니다. 대역폭 경쟁은 단순히 전극 수 싸움이 아닙니다. 기계적 고정, 조직 반응, 신호 드리프트, 적응형 디코딩까지 포함한 총력전입니다.

뉴럴링크는 장기적으로 전극 수를 16,000개 이상으로 늘리려는 로드맵을 가지고 있습니다. 다중 칩 이식도 계획되어 있습니다. 한 사람의 뇌에 10개의 칩을 심으면 10,000채널. 100만 채널이라는 숫자도 언급됩니다.

하지만 지금 여기서, 2025년의 현실에서, 뉴럴링크는 1,024채널로 마비 환자가 체스를 두고 게임을 하고 이메일을 보낼 수 있게 했습니다. 그것만으로도 삶이 바뀐 사람들이 있습니다.



대역폭의 문제는 인간 경험의 문제입니다. 얼마나 풍요롭게 세상과 연결될 수 있는가의 문제입니다. 그리고 동시에 그것은 질문이기도 합니다. 고대역폭이 열리면, 인간의 사적 공간은 어떻게 될까요? 생각이 디지털 신호로 변환되는 세상에서, 프라이버시란 무엇일까요?

라. 뉴럴링크의 기술적 차별점과 진입장벽

2004년, 브라운 대학교의 연구팀은 사지마비 환자의 뇌에 '유타 어레이'라는 전극을 심었습니다. 환자는 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직였습니다. 세계 최초였습니다. 그로부터 20년이 흘렀습니다. 뇌-컴퓨터 인터페이스는 더 이상 새로운 개념이 아닙니다.

그렇다면 뉴럴링크가 가진 차별점은 무엇일까요? 후발 주자인 이 회사가 경쟁자들이 쉽게 넘볼 수 없는 독보적 경쟁 우위로 삼은 것은 무엇일까요?

핵심은 세 가지입니다. 유연한 전극, 수술 로봇, 완전 매립형 무선 설계. 그리고 이 세 가지를 하나의 시스템으로 통합하는 수직 계열화 전략입니다.

첫째, 유연한 전극(Flexible Threads).

기존의 유타 어레이는 딱딱한 실리콘 바늘로 만들어져 있습니다. 뇌에 꽂으면 단단히 고정됩니다. 문제는 뇌가 부드럽다는 것입니다. 두부처럼 말랑말랑합니다. 심장 박동과 호흡에 따라 미세하게 움직입니다. 딱딱한 바늘이 말랑한 뇌에 꽂혀 있으면, 뇌가 움직일 때마다 바늘이 조직을 베어냅니다. '마이크로모션(micromotion)' 손상이라고 부릅니다.

시간이 지나면 뇌는 이 이물질에 반응합니다. 흉터 조직(glial scar)이 생깁니다. 흉터가 전극을 둘러싸면 신경 신호가 차단됩니다. 몇 달, 길어야 몇 년 안에 전극의 성능이 떨어집니다.

뉴럴링크는 다른 길을 택했습니다. 폴리이미드(polyimide)라는 유연한 고분자 소재로 만든 실(thread)입니다. 두께는 4~6마이크로미터. 머리카락(약 70마이크로미터)의 10분의 1보다 얇습니다. 이 실은 뇌 조직과 함께 부드럽게 움직입니다. 조직 손상을 최소화합니다. 장기적인 신호 안정성을 확보하기 위한 설계입니다.

하지만 유연함은 장점이면서 동시에 새로운 문제를 만듭니다. 너무 얇고 부드러워서 인간의 손으로는 도저히 뇌에 심을 수 없습니다. 젖은 휴지에 머리카락을 꽂는 것보다 어렵습니다.

그래서 둘째, 수술 로봇(R1).

뉴럴링크는 '재봉틀 로봇'이라 불리는 R1을 자체 개발했습니다. 이 로봇은 텅스텐 바늘이 유연한 실을 잡고 뇌에 밀어 넣은 뒤, 바늘만 빠져나오는 방식을 사용합니다. 말 그대로 뇌를 바느질합니다.

로봇의 카메라는 뇌 표면을 실시간으로 촬영합니다. 뇌 표면에는 미세한 혈관들이 거미줄처럼 퍼져 있습니다. 이 혈관 하나를 건드리면 출혈이 일어납니다. 출혈은 뇌 손상으로 이어집니다. R1은 컴퓨터 비전을 이용해 혈관의 위치를 파악하고, 혈관이 없는 미세한 틈으로 전극을 삽입합니다.

속도도 중요합니다. 1세대 로봇은 전극 하나를 심는 데 17초가 걸렸습니다. 개선된 버전은 분당 192개의 전극을 삽입할 수 있습니다. 인간 외과 의사가 불가능한 정밀도와 속도입니다.

머스크는 이 수술을 "라식 수술처럼 빠르고 간편하게" 만드는 것을 목표로 한다고 말했습니다. 수술 로봇은 뉴럴링크가 가진 가장 강력한 진입 장벽 중 하나입니다.

셋째, 완전 매립형 무선 설계(Fully Implantable Wireless Design).

과거의 BCI 시스템을 떠올려보십시오. 브레인게이트의 환자들은 두개골 밖으로 굵은 케이블이 튀어나와 있었습니다. 케이블은 외부 컴퓨터에 연결되어 있었습니다. 감염 위험이 높았습니다. 일상생활이 불가능했습니다. 연구실에서만 쓸 수 있는 장비였습니다.

뉴럴링크의 N1 임플란트는 다릅니다. 500원짜리 동전 크기의 원형 장치입니다. 두개골의 일부를 동그랗게 제거하고, 그 자리에 뚜껑처럼 딱 맞게 끼워 넣습니다. 피부를 덮으면 겉으로는 전혀 티가 나지 않습니다. 흉터조차 머리카락에 가려집니다.

충전은 무선입니다. 유도 충전 방식으로 피부 바깥에서 배터리를 채웁니다. 데이터 전송도 무선입니다. 블루투스나 유사한 기술을 사용합니다. 머스크는 이를 "두개골 속의 피트니스(Fitbit in your skull)"이라고 표현했습니다.

이 세 가지 기술을 따로따로 만들 수 있는 회사는 있습니다. 유연 전극을 만드는 곳이 있습니다. 수술 로봇을 만드는 곳이 있습니다. 무선 임플란트를 설계하는 곳이 있습니다. 하지만 뉴럴링크의 진정한 해자는 이것들을 하나의 매끄러운 시스템으로 통합하는 '수직 계열화(vertical integration)'에 있습니다.

칩 설계, 전극 제조, 수술 로봇 개발, 동물 실험, 임상 시험, 사용자 앱 개발까지 모든 과정이 한 회사 안에서 이루어집니다. 테슬라가 배터리, 모터, 소프트웨어를 직접 만들듯이. 스페이스X가 로켓 엔진, 동체, 발사 시스템을 직접 만들듯이.

이 전략의 장점은 속도입니다. 전극에서 문제가 발견되면 바로 수술 로봇 팀에 피드백할 수 있습니다. 로봇이 개선되면 바로 임상에 반영할 수 있습니다. 피드백 루프가 짧습니다. 외부 의존도가 낮습니다.

물론 경쟁자들도 있습니다.

싱크론(Synchron)은 두개골을 열지 않습니다. 혈관을 통해 전극을 삽입합니다. 스텐트로드(Stentrode)라 불리는 이 장치는 카테터로 뇌 근처 혈관에 넣습니다. 심장 스텐트처럼. 개두술의 공포가 없습니다. 안전성과 대중 수용성에서 강점입니다. 빌 게이츠와 제프 베이조스가 투자했습니다.

패러드로믹스(Paradromics)는 고대역폭에 집중합니다. 그들의 'Connexus' 시스템은 1,600개 이상의 채널을 지원하며, 초당 200비트 이상의 정보 전송률을 기록했다고 주장합니다. 2025년 6월, 미시간 대학교 팀과 함께 최초의 인간 대상 테스트를 완료했습니다.

프리시전 뉴로사이언스(Precision Neuroscience)는 뉴럴링크 공동 창업자 벤저민 라포포트가 설립했습니다. 뇌 표면에 초박형 필름(Layer 7)을 올려놓는 방식입니다. 관통형 전극보다 덜 침습적입니다. 가역적입니다. 필요하면 제거할 수 있습니다.

블랙록 뉴로테크(Blackrock Neurotech)는 유타 어레이의 원조입니다. 2004년부터 수십 명의 환자에게 이식한 경험이 있습니다. 임상 데이터의 양에서 압도적입니다.

경쟁 구도에서 뉴럴링크의 선택은 명확합니다. 더 침습적이지만 더 높은 성능. 더 위험하지만 더 넓은 가능성. 단기적으로는 마비 환자의 커서 제어로 시작하지만, 장기적으로는 시각 복원, 음성 복원, 기억 증강, 그리고 궁극적으로 인간-AI 공생까지.

반면 저침습 경쟁사들은 '안전성과 수용성'으로 더 빠르게 사용자 기반을 늘리려 합니다.

어느 쪽이 이길지는 단순한 기술 논쟁으로 결정되지 않습니다. 규제, 보험, 의료현장 채택, 장기 안전성의 총합으로 결정될 것입니다.

2025년 1월, 뉴럴링크의 N1 임플란트 시스템은 미국 FDA로부터 'de novo' 분류를 획득했습니다. 상업적 사용이 가능한 최초의 완전 이식형 무선 BCI가 되었습니다. 적응증은 척수 손상 또는 루게릭병으로 인한 사지마비 환자의 외부 기기 제어입니다.

해자는 기술만으로 생기지 않습니다. 법과 규제라는 인간 특유의 미로를 통과하는 능력까지 포함해서 해자가 됩니다. 뉴럴링크는 그 미로를 통과하는 중입니다.

5 뉴럴링크의 하드웨어: N1 임플란트와 R1 로봇

가. 동전 크기의 뇌 임플란트 N1의 구조와 1,024개 전극

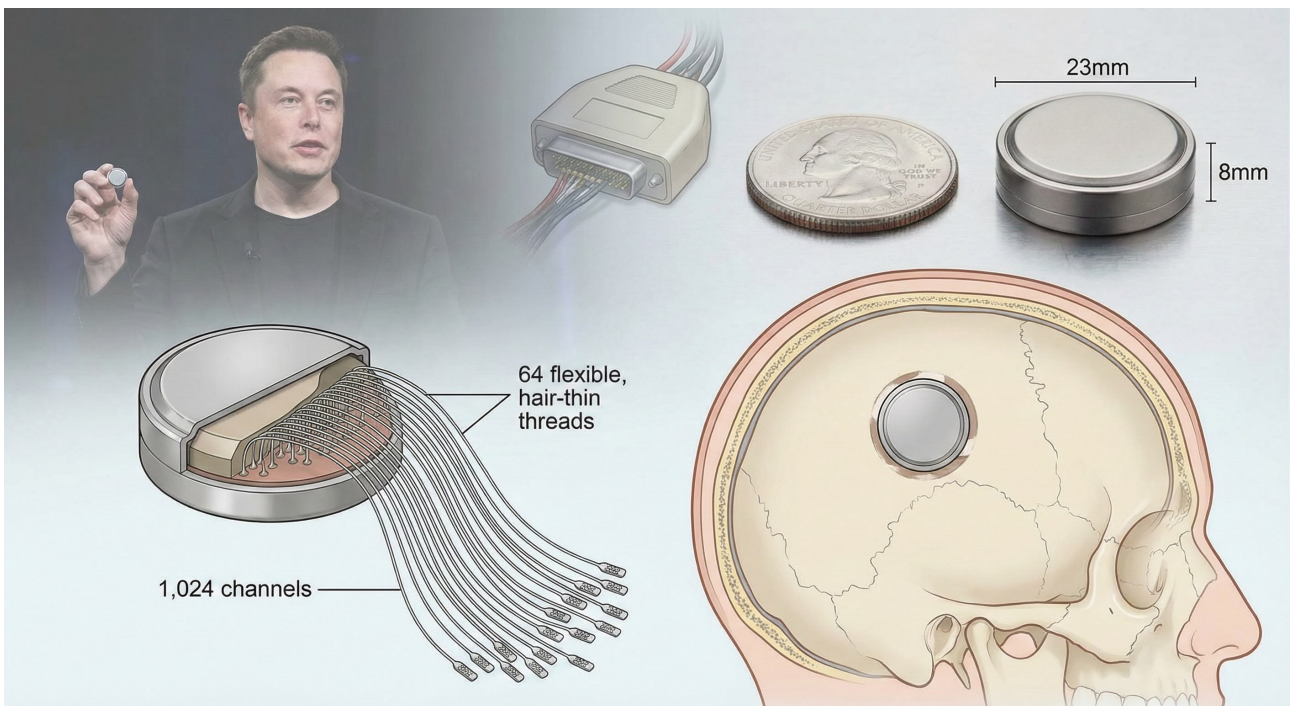
2019년 여름, 샌프란시스코의 캘리포니아 과학 아카데미에서 일론 머스크가 무대 위에 섰습니다. 그의 손바닥 위에는 동전 크기의 원형 장치가 놓여 있었습니다. "이것이 링크입니다." 머스크가 말했습니다. 청중 사이로 웅성거림이 번졌습니다. 기존의 뇌-컴퓨터 인터페이스 장치들은 머리 위로 솟아오른 거대한 커넥터와 굵은 전선들을 필요로 했습니다. 브레인게이트 프로젝트의 참가자들은 두피 바깥으로 튀어나온 소켓에 케이블을 연결해야 했고, 그 모습은 공상과학 영화의 실험실을 연상케 했습니다. 머스크는 그 모든 것을 지워버리고 싶었습니다.

N1 임플란트는 지름 23밀리미터, 두께 8밀리미터 정도의 크기입니다. 미국의 25센트 동전보다 조금 더 두껍습니다. 머스크는 이 장치를 두고 "두개골 속에 심은 핏빛"이라고 불렀습니다. 핏빛이 우리의 걸음 수를 세고 심박수를 측정한다면, N1은 우리의 생각 그 자체를 읽어냅니다. 수술 과정에서 두개골을 동전 크기만큼 원형으로 잘라내고 그 자리에 N1을 끼워 넣으면, 장치는 두개골과 완벽하게 수평을 이루게 됩니다. 두피를 덮고 나면 겉으로는 아무런 흔적도 남지 않습니다. 흉터조차 머리카락에 가려집니다. "보이지 않아야 한다"는 것이 설계 철학의 핵심이었습니다. 이는 단순히 미관상의 문제가 아니었습니다. 사용자가 일상생활에서 이질감 없이 기기를 착용하고 다닐 수 있게 만드는 것, 그것이 뇌-컴퓨터 인터페이스 대중화의 필수 조건이었습니다.

이 작은 원판 내부에는 놀라운 세계가 압축되어 있습니다. N1의 핵심은 외부 케이스가 아니라, 그 아래로 뻗어 나온 64개의 유연한 실입니다. 각 실에는 16개의 전극 접점이 미세하게 배열되어 있습니다. 이를 합치면 총 1,024개의 채널이 됩니다. 1,024개. 이 숫자가 품고 있는 의미는 막대합니다. 기존 의료계에서 표준처럼 사용되던 유타 어레이는 100개 남짓한 채널을 가졌습니다. 뉴럴링크는 그보다 10배 더 많은 정보를, 더 부드럽고 유연한 방식으로 읽어냅니다.

인간의 뇌에는 약 860억 개의 뉴런이 있습니다. 각 뉴런은 전기적 스파이크를 일으키며 정보를 전달합니다. 이 스파이크 하나하나가 우리의 생각이고, 의도이며, 감정입니다. 채널 수가 많다는 것은 그만큼 더 많은 뉴런의 대화를 동시에 엿들을 수 있다는 뜻입니다. 뉴럴링크의 기술진은 이 전극들을 통해 개별 뉴런 단위의 발화 신호를 초당 20,000번의 속도로 포착합니다. 수집된 아날로그 신호는 N1 내부의 주문형 반도체 칩에서 즉시 증폭되고 디지털 신호로 변환됩니다. 이 칩은 저전력으로 설계되어 뇌 속에서 열을 발생시키지 않으면서도, 엄청난 양의 신경 데이터를 실시간으로 처리하여 외부로 전송할 수 있습니다.

N1 내부의 구조를 들여다보면 여러 층의 기술이 쌓여 있습니다. 맨 아래에는 전극 스테드가 연결되는 입력부가 있습니다. 그 위로는 미세한 뇌 신호를 증폭하고 필터링하며 디지털화하는 아날로그 프런트엔드가 자리 잡고 있습니다. 뇌파의 모든 원본 데이터를 그대로 보내면 무선 통신은 감당할 수 없습니다. 그래서 N1은 뉴런이 확실하게 발화한 순간의 핵심 정보만을 골라내어 압축 전송합니다. 이것은 마치 고화질 영상을 그대로 보내는 것이 아니라, 움직임이 감지된 순간의 장면만을 압축해서 보내는 것과 비슷합니다. 그 위로는 무선 통신 모듈이, 그리고 전원을 공급하는 배터리와 충전 회로가 층층이 쌓여 있습니다. 이 모든 것을 23밀리미터 x 8밀리미터 공간에 집어넣어야 했습니다.



뇌는 온도 변화에 민감한 기관입니다. 단 1도에서 2도만 온도가 올라가도 뇌 조직은 손상을 입을 수 있습니다. 국제 안전 규정은 이식형 의료기기가 주변 조직의 온도를 2도 이상 높이지 않도록 규정하고 있습니다. 따라서 뉴럴링크의 엔지니어들은 저전력 칩 설계에 사활을 걸어야 했습니다. 그 결과 N1은 뇌 신호를 처리하고 외부로 무선 전송하면서도, 체온에 거의 영향을 주지 않는 수준의 열만을 발생시키도록 설계되었습니다.

N1 임플란트는 단순히 신호를 읽는 것에 그치지 않습니다. 뉴럴링크는 양방향 통신을 목표로 합니다. 1,024개의 전극은 각각 전류를 흘려보내 인접한 뉴런을 자극할 수 있도록 설계되었습니다. 현재는 주로 뇌의 신호를 읽어 들여 컴퓨터로 보내는 기록 기능에 집중하고 있지

만, 하드웨어적으로는 미세한 전류를 흘려보내 뉴런을 자극하는 기능도 갖추고 있습니다. 이것은 미래에 시각 장애인에게 인공 시각을 제공하거나, 손상된 뇌 회로를 우회하여 신호를 전달하는 데 필수적인 기능입니다. 시각 피질을 자극해 맹인에게 빛의 점들을 보여주고, 운동 감각을 되살려 마비 환자가 다시 움직임을 느끼게 하는 것. 머스크가 꿈꾸는 "인간과 AI의 공생"은 이 양방향 통신에서 시작됩니다.

2024년 1월, 첫 환자 놀랜드 아보의 뇌 속에 이 칩이 안착했을 때, 그것은 역사적인 순간이었습니다. 아보가 수술 후 처음으로 화면의 커서를 움직였을 때, 1,024개의 전극은 그의 운동 피질에서 발생하는 "손을 움직이겠다"는 의도를 동시에 경청하고 있었습니다. N1 임플란트는 뇌의 생물학적 신호를 디지털 신호로 변환하는 번역기입니다. 동시에 인간의 의지를 물리적 제약 없이 확장시키는 포털이기도 합니다. 1,024개의 전극 하나하나를 뇌라는 미지의 우주로 쏘아 올린 탐사선과도 같습니다.

나. 재봉틀 로봇 R1: 인간의 손을 뛰어넘는 수술 정밀도

신경외과 전문의 매튜 맥두걸 박사는 렉스 프리드먼과의 인터뷰에서 이렇게 말했습니다. "제가 하는 인간의 수술 부분은 정말 단순합니다. 상상할 수 있는 가장 기본적인 신경외과 기술 중 하나입니다. 저는 로봇이 하지 못하는 부분을 하고, 로봇은 제가 하지 못하는 부분을 합니다." 그가 말하는 로봇이 바로 R1입니다.

N1에 부착된 64개의 전극 실은 두께가 4에서 6마이크로미터에 불과합니다. 이것은 적혈구 크기와 비슷하며, 머리카락 두께의 약 20분의 1 수준입니다. 이렇게 미세하고 흐물거리는 실을 뇌 표면의 젤리 같은 조직 속에 정확히 찢러 넣는 것은 인간 외과의사의 손으로는 불가능한 영역입니다. 뉴럴링크의 삽입 하드웨어 팀장 크리스틴 오다바시안은 이 과정을 이렇게 묘사했습니다. "머리에서 머리카락 한 가닥을 뽑아서, 랩으로 싸인 젤리에 찢러 넣는다고 상상해 보세요. 그것도 정확한 깊이와 위치로, 64번을 적당한 시간 안에 해야 합니다. 신경외과 의사에게 이걸 부탁하면 아마 좋아하지 않을 겁니다."

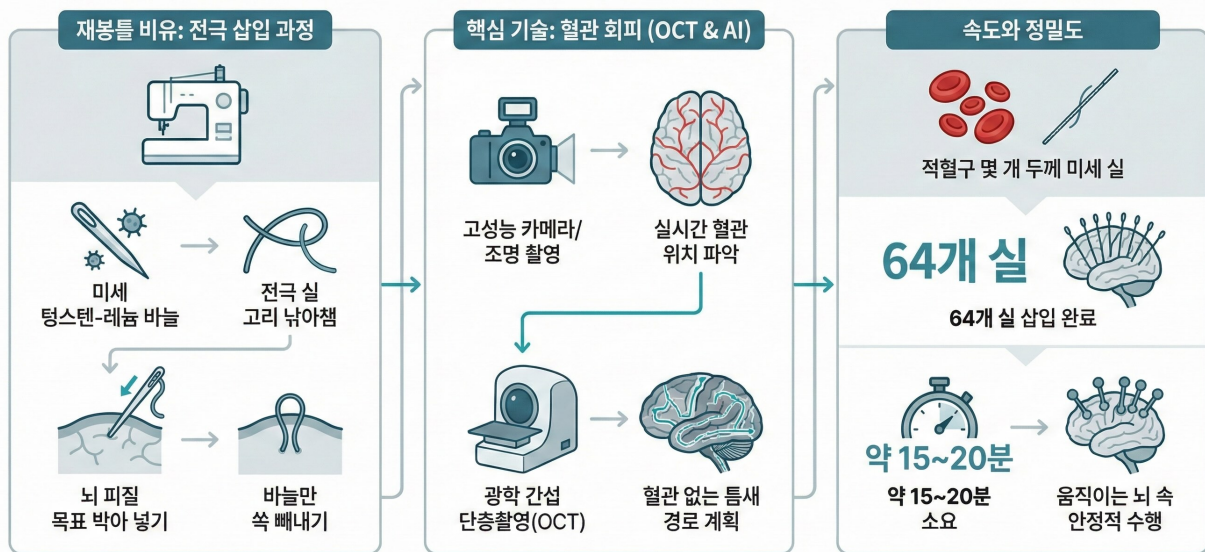
R1 로봇은 흔히 "재봉틀"에 비유됩니다. 이 비유는 마케팅 수사가 아니라 작동 방식이 그것을 강요하기 때문입니다. R1은 아주 미세한 텅스텐-레늄 합금 바늘을 사용하여 전극 실의 고리를 낚아챌 뒤, 뇌 피질의 목표 지점에 박아 넣습니다. 바늘이 들어갔다 나오는 동작은 눈에 보이지 않을 만큼 빠릅니다. 마치 재봉틀이 천에 실을 박듯이 뇌 조직에 전극을 심습니다. 바늘은 분자 수준으로 뽀족하게 가공되어 있으며, 로봇은 이 바늘 끝에 전극 실을 고리처럼 걸어 뇌 조직 안으로 밀어 넣은 뒤, 바늘만 쪽 빼내는 방식을 사용합니다.

이 과정에서 가장 중요한 기술적 도전은 혈관 회피입니다. 뇌에는 수많은 미세 혈관들이 거미줄처럼 얽혀 있습니다. 전극을 심다가 혈관을 터뜨리면 출혈이 일어나고, 출혈은 뇌 손상으로 이어집니다. 시간이 지나면 흉터 조직이 생겨 전극을 감싸버리고, 결국 신호가 차단됩니다. R1 로봇은 고성능 카메라와 조명을 이용해 뇌 표면을 촬영하고, 컴퓨터 비전 알고리즘을 통해 혈관의 위치를 실시간으로 파악합니다. 로봇은 혈관이 없는 미세한 틈을 찾아 전극을 삽입할 경로를 계획합니다. 2025년 현재, 뉴럴링크는 광학 간섭 단층촬영(OCT) 기술을 적용하여 실시간 혈관 지도를 작성합니다. 여러 광학 경로를 하나로 결합함으로써 로봇은 혈관 회피를 실시간으로 수행할 수 있게 되었습니다.

R1의 진정한 위력은 속도와 정밀도에 있습니다. 뉴럴링크의 부사장 동진 서는 이 로봇의 능력을 이렇게 설명했습니다. "이 로봇은 아주 작은 실들을 조종할 수 있습니다. 실의 두께는 적혈구 몇 개 정도입니다. 그리고 이것을 움직이는 뇌 속에 안정적으로 삽입하면서도 혈관을 피합니다. 이 일을 매우 안정적으로 수행합니다." 로봇이 64개의 실을 모두 삽입하는 데 걸리는 시간은 약 15분에서 20분입니다. 인간 의사가 현미경을 보며 수동으로 이 작업을 한다면 몇 시간이 걸릴지 모르고, 피로도도 인해 실수가 발생할 확률도 높아집니다. 2025년 공개된 차세대 로봇은 전극 하나를 심는 시간을 1.5초로 단축시켰습니다. 전체 수술 시간을 줄이는 것은 환자의 감염 위험과 마취 부담을 최소화합니다.

뇌는 두부처럼 부드럽고 탄력이 있는 조직입니다. 바늘로 찌르려 하면 뇌 조직이 눌리면서 튕겨 나가려 합니다. R1은 이를 극복하기 위해 바늘을 아주 빠르게 찔렀다가 빼는 방식을 사용합니다. 또한 환자의 호흡과 심장 박동에 따라 뇌가 미세하게 움직이는 것까지 감지하여, 뇌의 움직임에 맞춰 바늘을 움직이는 모션 보정 기술까지 탑재되어 있습니다. 이것은 마치 움직이는 과녁의 정중앙을 연속으로 맞히는 것과 같은 난이도입니다.

R1 로봇의 작동 원리 및 핵심 기술



현재의 수술 프로토콜은 협업 모델로 이루어집니다. 인간 외과 의사가 두개골 절제와 경막 절개를 수행한 후, R1이 이어받아 전극 삽입을 수행합니다. 맥두걸 박사의 말처럼 "로봇이 하지 못하는 부분"과 "인간이 하지 못하는 부분"이 나뉘어 있습니다. 하지만 머스크의 목표는 이 수술을 라식 수술처럼 간단하게 만드는 것입니다. 점심시간에 병원에 들러 로봇에게 수술을 받고 오후에 업무에 복귀할 수 있는 수준. 뉴럴링크 사장 동진 서는 렉스 프리드먼과의 인터뷰에서 말했습니다. "우리는 원클릭 수준에 도달하고 싶습니다."

R1 로봇의 제조 비용도 급격히 낮아지고 있습니다. 첫 번째 버전의 바늘 카트리지는 350달러였고 24시간의 수작업 조립이 필요했습니다. 2025년 6월 기준으로 차세대 카트리지는 15달러이며 30분 만에 조립됩니다. 뉴럴링크는 이러한 비용 절감을 모든 제품에 적용하여, 총 수술 비용을 라식 수술 수준인 2,400달러에서 3,200달러 정도로 낮추겠다는 목표를 밝혔습니다.

2024년 놀랜드 아보의 수술에서 R1은 그 가치를 증명했습니다. 로봇은 설계된 대로 혈관을 피해 정확한 위치에 64개의 실을 심었습니다. 수술 후 아보가 깨어났을 때, 그의 뇌 속에는 1,024개의 전극이 자리 잡고 있었지만, 심각한 출혈이나 뇌 손상의 징후는 없었습니다. 이것은 외과 수술의 정밀도가 인간의 한계를 넘어 기계의 영역으로 진입했음을 알리는 신호탄이었습니다. R1 로봇은 차가운 금속으로 만들어졌지만, 그 바늘 끝에는 인간의 존엄성을 회복시키려는 뜨거운 집념이 달려 있습니다.

다. 유연한 전극 실(Flexible Threads)과 무선 충전 기술

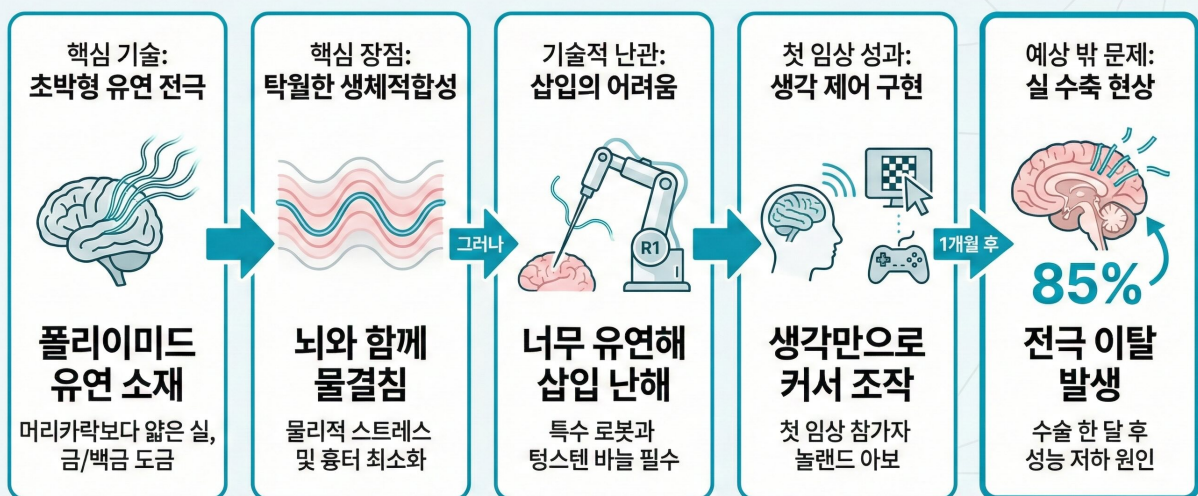
뇌에 이물질을 넣는다는 것은 인체가 가진 방어 체계와 싸우는 일입니다. 우리 몸의 면역 시스템은 뇌에 들어온 딱딱한 물질을 적으로 간주합니다. 그리고 그 주변을 흉터 조직으로 감싸 격리하려 합니다. 이것이 기존의 딱딱한 금속 전극이나 실리콘 어레이가 장기적으로 실패했던 이유입니다.

기존 의료용으로 사용되던 유타 어레이는 딱딱한 실리콘 바늘들이 촘촘히 박힌 형태였습니다. 문제는 우리의 뇌가 두부나 푸딩처럼 매우 부드럽고, 머리를 움직이거나 심장이 뼉 때마다 두개골 안에서 찰랑거린다는 점입니다. 딱딱한 바늘이 부드러운 뇌에 꽂혀 있으면, 뇌가 움직일 때마다 바늘이 주변 조직을 미세하게 베어냅니다. 상처가 나고, 흉터 조직이 생겨 결국 전극을 감싸버리면 신호가 차단되어 기기의 수명이 다합니다.

뉴럴링크는 이 문제를 해결하기 위해 유연성에 집착했습니다. 그들이 개발한 전극은 딱딱한 바늘이 아니라, 폴리이미드라는 생체 적합성 고분자 소재로 만든 아주 얇고 유연한 실 형태입니다. 금이나 백금 도금을 통해 전기를 통하게 했습니다. 이 실의 유연성은 상상을 초월합니다. 바람에 날리는 거미줄처럼 가볍고 부드러워서, 뇌 조직이 움직일 때 함께 물결치듯 움직입니다. 덕분에 뇌 조직에 가하는 물리적 스트레스를 최소화하고, 면역 반응으로 인한 흉터 형성을 억제할 수 있습니다. 이것이 뉴럴링크가 노리는 생체적합성의 핵심입니다.

그러나 유연함에는 대가가 따랐습니다. 너무 흐물거려서 뇌에 꽂아 넣기가 힘듭니다. 이것이 앞서 설명한 R1 로봇과 텅스텐 바늘이 필요한 이유였습니다. 그리고 첫 번째 인간 임상 실험에서 예상치 못한 문제가 발생했습니다.

뉴럴링크: 유연성의 혁신과 예상 밖의 난관



2024년 1월 수술을 받은 놀랜드 아보는 처음 몇 주 동안 놀라운 성과를 보여주었습니다. 생각만으로 커서를 움직이고, 체스를 두고, 마리오 카트를 플레이했습니다. 그러나 수술 후 한 달 여가 지나자 문제가 드러났습니다. 뇌 속에 심어놓은 실의 약 85퍼센트가 제자리에서 빠져나오는 수축 현상이 일어난 것입니다. 아보는 인터뷰에서 당시를 이렇게 회상했습니다. "정말 힘들었습니다. 막 이 장치에 푹 빠져서 높은 곳에 올라갔는데, 한 달 만에 모든 게 무너지는 것 같았어요."

뉴럴링크의 분석에 따르면 아보의 뇌는 회사가 예상했던 것보다 약 세 배나 더 많이 움직였습니다. 수술 후 뇌 안에 찻던 공기가 빠지면서 뇌 조직이 이동했고, 너무나 유연한 실들이 뇌와 함께 움직이지 못하고 떨어져 나왔습니다. 이는 유연한 전극이 가진 구조적 한계를 드러낸 사건이었습니다. 64개의 실 중 15퍼센트 정도만이 제자리에 남아 있었습니다. 상황은 심각해 보였습니다.

이 위기 상황에서 뉴럴링크 엔지니어들의 대응은 기민했습니다. 그들은 물리적으로 다시 수술을 하는 대신, 소프트웨어를 업데이트했습니다. 살아남은 전극들이 더 높은 감도로 신호를 읽도록 알고리즘을 수정했습니다. 신호 해독 방식을 개선하여 줄어든 데이터량으로도 이전과 같은 성능을 내도록 만들었습니다. 아보의 성능은 다시 회복되었고, 오히려 초기 기록을 넘어섰습니다. 아보는 말했습니다. "저는 여기에 제 역할을 하러 왔어요. 이런 일들이 저에게 일어나서 다음 사람들에게는 일어나지 않도록. 그게 제가 여기 있는 이유입니다."

두 번째 환자 알렉스의 수술에서는 실을 더 깊숙이 삽입하고, 뇌 조직과 임플란트 사이의 공간을 최소화하는 방식으로 수축 문제를 구조적으로 해결하려 노력했습니다. 또한 수술 중 뇌의 움직임을 줄이는 조치를 취했습니다. 그 결과 알렉스에게서는 실 수축 현상이 발생하지 않았습니다. 실패를 통해 배우고 즉시 개선하는 실리콘 밸리의 방식이 뇌수술에도 적용된 것입니다.

또 다른 기술적 난제는 전력 공급이었습니다. 뇌 속에 심은 칩에 전선을 연결해 귀 뒤로 빼내는 방식은 감염의 통로가 되기 때문에 피해야 했습니다. 완전한 무선 시스템이 필요했습니다. 하지만 몸속에 배터리를 넣는다는 것은 위험천만한 일입니다. 배터리 액이 새거나 폭발한다면 그것은 곧 치명적인 결과를 의미합니다.

뉴럴링크는 N1 임플란트에 전자기 유도 충전 방식을 적용했습니다. 스마트폰을 무선 충전패드 위에 올려놓듯, 사용자는 머리에 전용 충전 모자를 쓰거나 베개에 내장된 충전기 위에 머리를 대면 됩니다. N1 내부의 작은 코일이 외부 자기장을 받아들여 전기로 변환합니다. 배터리는 약 8시간에서 12시간 동안 지속되며, 사용자가 잠을 자거나 휴식을 취할 때 무선으로 충전할 수 있도록 설계되었습니다.

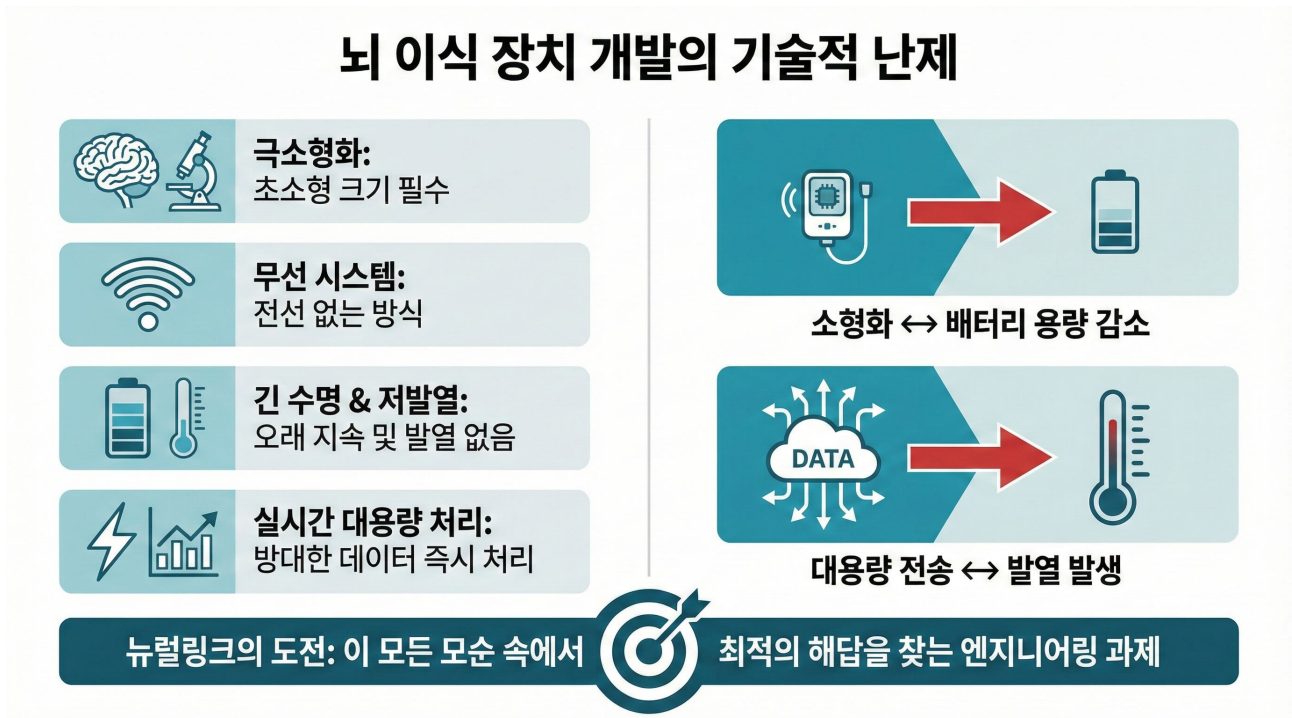
무선 충전의 가장 큰 공학적 제약은 열입니다. 머리카락 아래 스마트워치 충전과 달리, 여기서는 충전 코일이 만드는 손실이 곧바로 두개골과 조직 온도 상승으로 연결될 수 있습니다. 뉴럴링크의 설계 기준에 따르면 임플란트 외부 표면의 온도가 뇌 조직과 접촉할 때 2도 이상

올라가서는 안 됩니다. 충전 설계는 결합 효율을 높이는 코일과 자성체 배치, 충전 전력 프로파일 제어, 내부 온도 센싱과 안전 차단, 그리고 사용자가 감당 가능한 착용형 충전기까지 하나의 시스템으로 묶여야 했습니다.

놀랜드 아보와 같은 초기 사용자들은 이 무선 시스템 덕분에 자유를 얻었습니다. 그는 휠체어에 앉아 있던 침대에 누워 있든, 거추장스러운 전선 없이 생각만으로 컴퓨터를 제어할 수 있었습니다. 이 "선 없는 연결"이야말로 뇌-컴퓨터 인터페이스가 실험실을 벗어나 일상생활로 들어오기 위한 가장 중요한 티켓이었습니다. 유연한 실은 뇌와의 조화를, 무선 기술은 세상과의 조화를 가능하게 했습니다.

라. 무선화·소형화·전력 관리의 공학적 도전

공학은 타협의 예술입니다. 하지만 인간의 뇌 안에 들어가는 장치를 만들 때는 타협할 수 있는 여지가 거의 없습니다. 장치는 극도로 작아야 합니다. 전선이 없어야 합니다. 배터리는 오래 가면서도 열을 내지 않아야 합니다. 뇌의 엄청난 데이터를 실시간으로 처리해야 합니다. 이 조건들은 서로 모순됩니다. 작게 만들면 배터리 용량이 줄어들고, 데이터를 많이 보내면 열이 발생합니다. 뉴럴링크의 엔지니어들은 이 모순의 방정식 속에서 최적의 해답을 찾아내야 했습니다.



과거의 뇌-컴퓨터 인터페이스 시스템은 머리에 포트가 달려 있고, 굵은 케이블로 거대한 컴퓨터와 연결되어야 했습니다. 이는 감염 위험을 높이고 사용자의 행동을 제한했습니다. 브레인게이트 초기 참가자들은 실험을 하려면 연구원들이 두피 바깥으로 튀어나온 소켓에 케이블을 물리적으로 연결해야 했습니다. 그것은 환자에게 "나는 실험 대상이다"라는 자각을 끊임없이 심어주는 족쇄와도 같았습니다. 뉴럴링크는 이 모든 것을 없애고 데이터를 무선으로 전송하는 방식을 택했습니다.

가장 큰 병목 현상은 대역폭이었습니다. 1,024개의 전극이 초당 20,000번씩 뇌 신호를 샘플링한다고 가정해 봅시다. 이 엄청난 양의 원본 데이터를 블루투스로 실시간 전송하는 것은 불가능합니다. 블루투스의 전송 속도는 한계가 있고, 데이터를 많이 보낼수록 전력 소모와 발열이 급증합니다.

이 문제를 해결하기 위해 뉴럴링크는 온칩 스파이크 탐지 기술을 사용했습니다. N1 칩 내부에서 1차적으로 데이터를 걸러내는 것입니다. 뇌파의 모든 잡음을 보내는 대신, 뉴런이 확실하게 발화한 순간의 데이터만을 골라내어 압축 전송합니다. 이것은 마치 고화질 CCTV 영상을 그대로 보내는 것이 아니라, 움직임이 감지된 순간의 정보만을 압축해서 보내는 것과 비슷합니다. 2021년에 제출된 뉴럴링크의 논문에 따르면, 이 시스템 온칩은 5x4밀리미터 크기에 불과하면서도 1,024개 전극의 기록과 자극을 처리하고, 총 전력 소모는 24.7밀리와트에 그칩니다.

신호 대 잡음비 문제도 치열한 전투였습니다. 뉴런의 활동전위는 전극에서 보면 매우 작은 전압 변화입니다. 주변에는 근전도, 움직임, 전원, 무선 송수신이 만드는 잡음원이 가득합니다. 임플란트는 초저잡음 증폭기, 적절한 대역 필터링, 고해상도 아날로그-디지털 변환기, 채널 간 간섭 최소화를 동시에 요구합니다. 뉴럴링크는 이를 위해 맞춤형 저전력 반도체를 직접 설계했습니다. 임피던스를 모니터링하기 위한 전용 회로도 탑재했습니다. 온보드 디지털-아날로그 변환기가 단일 채널에서 테스트 톤을 재생하는 동안 해당 채널과 물리적으로 인접한 채널에서 동시에 응답 신호를 기록합니다.

소형화의 압박은 두말할 나위가 없습니다. N1 칩에는 아날로그 신호를 디지털로 바꾸는 증폭기, 필터, 아날로그-디지털 변환기, 프로세서, 무선 통신 모듈, 배터리 관리 시스템이 모두 들어있어야 합니다. 이 모든 것을 동전 크기에 집적하면서도 서로 간의 전자파 간섭을 막아야 합니다. 미세한 뇌 신호를 다루는 장치에서 노이즈는 치명적입니다. 뉴럴링크는 반도체 패키징 기술의 극한을 시험했습니다.

봉지 기술도 중요했습니다. 두개골 아래는 전자기기에 친절한 환경이 아닙니다. 수분, 이온, 미세한 pH 변화는 장기적으로 금속 배선과 패드, 접착부를 공격합니다. 의료 임플란트는 재료 선택, 봉지 구조, 피드스루 설계가 생명입니다. N1의 케이스는 뇌척수액과 같은 체액으로부터 내부 회로를 완벽하게 보호해야 하며, 동시에 생체에 독성이 없는 소재로 만들어져야 합니다. 작은 틈이라도 생기면 체액이 스며들어 기기가 고장 나거나, 배터리 물질이 유출되어 뇌에 치명적인 손상을 줄 수 있습니다.

무선 통신의 안정성과 보안도 고려해야 할 사항입니다. 무선은 편하지만, 끊기면 사용성이 무너지고, 보안이 허술하면 의료기기가 아니라 공격 표면이 됩니다. N1은 블루투스 프로토콜을 기반으로 외부 기기와 통신합니다. 임상 환경에서는 간섭, 지연, 페어링 관리와 같은 현실적인 문제가 발생합니다. 게다가 뇌 신호는 개인정보의 끝판왕입니다. 하드웨어 단계에서부터 암호화, 인증, 업데이트 체계가 들어가야 합니다. 펌웨어 업데이트, 버그 수정, 보안 패치 등 장기 유지보수를 무선으로 안전하게 수행해야 하는 과제도 남아 있습니다.

이 모든 공학적 도전들은 단순히 더 좋은 기계를 만드는 문제를 넘어섭니다. 이것은 "인간의 뇌를 인터넷에 연결한다"는 거대한 비전을 현실적인 물리 법칙 안으로 끌어내리는 과정입니다. 2024년과 2025년의 임상 시험 결과들은 뉴럴링크가 이 모순적인 조건들 사이에서 균형점을 찾았음을 보여줍니다. 놀랜드 아보는 하루 10시간 이상 칩을 사용하며 라이브 방송을 하고 게임을 즐겼습니다. 두 번째 환자 알렉스는 수술 후 5분 만에 커서를 움직였고, CAD 소프트웨어로 3D 디자인을 하고 카운터 스트라이크 게임을 플레이했습니다.

하지만 도전은 끝나지 않았습니다. 일론 머스크는 전극의 수를 10,000개, 100,000개로 늘리고 싶어 합니다. 칩의 크기는 더 작아져야 하고, 충전 주기는 더 길어져야 합니다. 현재의 N1은 "버전 1.0"에 불과합니다. 아이폰이 첫 출시 이후 매년 혁신을 거듭했듯, 뉴럴링크의 하드웨어 역시 무선화, 소형화, 저전력화라는 세 가지 축을 중심으로 끊임없이 진화할 것입니다.

머스크는 렉스 프리드먼과의 인터뷰에서 미래를 이렇게 그렸습니다. "5년 후에는 메가비트 수준에 도달할 수 있을 겁니다. 어떤 인간도 타이핑이나 말하기로 가능한 것보다 빠른 속도요." 그리고 덧붙였습니다. "이것 없이는 AI가 당신이 몇 마디 단어를 뱉어낼 때까지 기다리다 지루해질 겁니다. 마치 나무와 대화하는 것처럼요."

이 진화의 끝에는 우리가 상상조차 하지 못한 하드웨어가 기다리고 있을지도 모릅니다. 그것이 인간을 더 인간답게 만들지, 아니면 전혀 다른 존재로 바꿔놓을지는 아직 아무도 모릅니다. 다만 한 가지는 분명합니다. N1과 R1으로 대표되는 뉴럴링크의 하드웨어는 뇌를 인터넷에 접속시키는 물리적 기반을 완성해 가고 있습니다. 그 기반 위에 무엇을 세울지는 이제 우리 모두의 질문입니다.

6. 동물 실험: 돼지와 원숭이가 증명한 가능성

가. 거트루드(Gertrude) 프로젝트: 돼지 뇌 신호의 실시간 시각화

2020년 8월 28일 금요일 오후, 샌프란시스코 프리몬트의 뉴럴링크 본사는 이례적인 광경으로 가득 찼습니다. 무대 뒤편에 건초가 깔린 작은 우리가 놓여 있었습니다. 예정 시간보다 늦게 등장한 일론 머스크가 청중을 바라보며 입을 열었을 때, 사람들은 새로운 전기차나 로켓을 기대하지 않았습니다. 그날의 주인공은 세 마리의 돼지였습니다.

커튼이 열리자 분홍빛 피부의 동물 한 마리가 쿵쿵거리며 건초 더미를 뒤적이고 있었습니다. 거트루드(Gertrude)라는 이름의 이 돼지가 코를 건초에 파묻을 때마다, 스피커에서 기이한 소리가 흘러나왔습니다. "띠-띠-띠-떡, 빠리릭." 불규칙한 재즈 음악처럼 들리기도 했고, 오래된 모뎀이 접속을 시도하는 잡음처럼 들리기도 했습니다. 머스크는 그 소리의 정체를 설명했습니다. "여러분이 듣고 있는 소리는 거트루드 뇌 속 뉴런이 실시간으로 발화하는 소리입니다."

거트루드의 두개골에는 두 달 전에 동전 크기의 칩이 이식되어 있었습니다. 이 장치는 코의 감각을 담당하는 피질 영역에 연결되어 있었고, 돼지가 무언가를 냄새 맡거나 건드릴 때마다 발생하는 신경 신호를 포착하여 무선으로 전송하고 있었습니다. 화면에는 파란색 파형이 춤추듯 그려졌습니다. 코가 움직일 때마다 스파이크가 치솟았습니다. 눈에 보이지 않던 뇌의 전기적 속삭임이, 귀로 들을 수 있는 물리적 신호로 변환된 것입니다.

그러나 이 시연의 진정한 의미는 단순히 뇌파를 읽는다는 사실에 있지 않았습니다. 핵심은 비교에 있었습니다.

머스크는 세 마리의 돼지를 차례로 소개했습니다. 첫 번째 돼지 조이스(Joyce)는 임플란트 수술을 받지 않은, 자연 그대로의 상태였습니다. 두 번째 돼지 도로시(Dorothy)는 뇌에 칩을 심었다가 제거한 상태였습니다. 도로시의 존재가 담고 있는 메시지는 분명했습니다. 뉴럴링크를 심었다가 마음이 바뀌거나 업그레이드를 원한다면, 언제든지 제거할 수 있으며 그 후에도 뇌 기능에는 문제가 없다는 가역성(Reversibility)을 증명한 것입니다. 마지막으로 등장한 거트루드는 현재 뇌에 칩을 심은 채 생활하고 있었습니다. 겉으로 봐서는 아무런 흉터도, 이상 행동도 보이지 않았습니다.

왜 하필 돼지였을까요. 신경과학 연구에서 영장류가 인간과 가장 유사한 모델이긴 합니다. 그러나 돼지는 두개골의 두께와 강도가 인간과 유사하여 수술 로봇의 드릴링 및 임플란트 내

구성 테스트에 적합했습니다. 돼지의 코를 담당하는 감각 피질은 대단히 발달해 있습니다. 돼지가 코로 세상을 탐색할 때 발생하는 막대한 양의 신경 정보는 BCI의 성능을 시험하기에 이상적인 데이터였습니다.

연구진은 거트루드가 러닝머신 위를 걸을 때 발생하는 뇌 신호를 분석하여, 다리 관절의 위치를 예측하는 알고리즘도 함께 시연했습니다. 화면에는 두 개의 선이 나타났습니다. 회색 선은 실제 돼지 다리의 움직임 추적을 추적한 값이었고, 파란색 선은 뇌 신호만으로 예측한 값이었습니다. 두 선은 거의 완벽하게 일치했습니다. 이것은 뇌의 운동 피질 신호를 해독하여 척수 손상 환자의 마비된 다리를 다시 움직이게 할 수 있다는 가능성을 수학적으로 보여준 것입니다.

머스크는 이 장치를 "두개골 속의 핏빗(Fitbit in your skull)"이라고 불렀습니다. 마케팅 용어처럼 들리지만, 거트루드가 보여준 것은 바로 그 비유가 현실이 될 수 있다는 가능성이었습니다. 그녀는 밥을 먹고, 잠을 자고, 친구들과 어울리는 평범한 일상을 보내면서도, 자신의 뇌 데이터를 24시간 무선으로 전송하고 있었습니다. 과거의 뇌 실험이 실험실의 격리된 환경에서, 머리에 굵은 전선을 꽂은 채 이루어졌던 것과 비교하면 이것은 근본적인 변화였습니다.

스탠퍼드 대학의 신경과학자 세르게이 스타비스키(Sergey Stavisky)는 이 발표를 보고 뉴럴링크가 2019년 초기 시연에서 2020년 완전 이식 시스템으로 발전한 것이 "인상적이고 실질적인 진전"이라고 평가했습니다. 토론토 대학의 신경과학 연구원 그래엄 모팻(Graeme Moffat)은 칩의 크기, 휴대성, 무선 기능 면에서 "기존 과학에 비해 한 차원 높은 도약"이라고 말했습니다. 물론 이 발표는 과학 논문이 아니라 데모였고, 표본 수나 추적 기간, 부작용 정의 같은 임상 수준의 엄밀성은 별개의 문제로 남았습니다.

그러나 거트루드 데모가 만들어낸 효과는 분명합니다. BCI가 더 이상 비침습형 뇌파 헤드셋의 영역에 머무는 이야기가 아니라, 침습형에서도 실사용이 가능한 폼팩터로 향하는 길을 노골적으로 드러냈습니다. 대중에게 이 시연은 두 가지 감정을 동시에 심어주었습니다. 하나는 생명체의 가장 내밀한 영역인 뇌조차 데이터화될 수 있다는 경이로움이었고, 다른 하나는 나의 생각과 감각도 저렇게 전자음으로 치환될 수 있다는 서늘한 자각이었습니다.

거트루드는 자신이 인류의 미래를 짊어지고 있다는 사실을 알지 못했습니다. 그저 맛있는 건 초를 찾아 쿵쿵거릴 뿐이었습니다. 그러나 그 쿵쿵거림에서 울려 퍼진 전자음은, 신경공학이 상아탑을 벗어나 상업적이고 실용적인 현실의 영역으로 진입했음을 알리는 신호탄이었습니다. 돼지의 뇌에서 나온 그 소리는 곧 인간의 뇌가 기계와 직접 대화하게 될 미래의 예고편이었습니다.

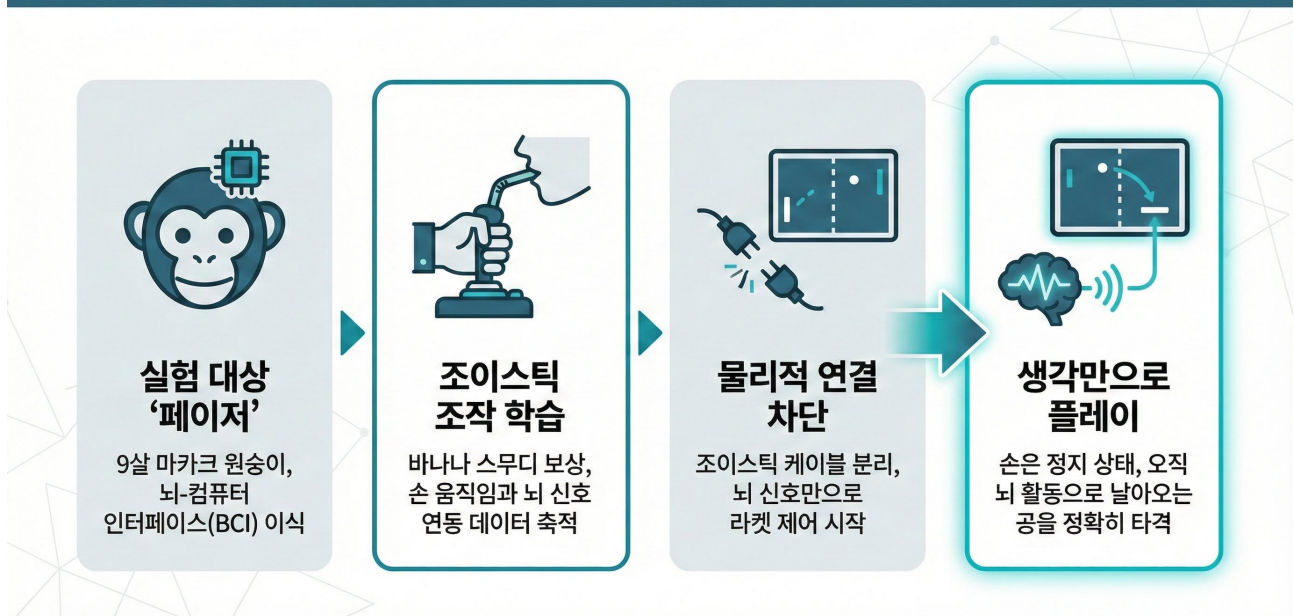
나. 페이지(Pager)의 pong(Pong) 게임: 생각만으로 비디오 게임을

2021년 4월 8일, 유튜브에 3분 27초짜리 영상 하나가 올라왔습니다. 화면 속에는 9살 난 마카크 원숭이 한 마리가 모니터 앞에 앉아 있었습니다. 그의 이름은 페이지(Pager). 손에 조이스틱을 쥐고 비디오 게임을 하고 있었습니다. 금속 빨대에서는 바나나 스무디가 흘러나왔고, 페이지는 스무디를 빨아먹으며 열심히 게임에 몰두했습니다. 여기까지는 흔한 동물 인지 실험처럼 보였습니다.

그런데 잠시 후, 내레이터가 말했습니다. "이제 조이스틱의 연결을 끊었습니다."

화면 속 조이스틱의 케이블은 뽑혀 있었습니다. 하지만 모니터 속의 탁구공은 여전히 페이지의 의도대로 움직이고 있었습니다. 페이지는 손으로 조이스틱을 움직이는 시늉을 하고 있었지만, 실제로 게임을 조종하고 있는 것은 그의 손이 아니라 뇌였습니다. 영상의 하이라이트에서 연구진은 조이스틱 자체를 아예 치워버렸습니다. 페이지는 빈 허공을 응시하며 빨대로 스무디를 빨았습니다. 손은 무릎 위에 가만히 놓여 있었습니다. 그러나 모니터 속의 라켓은 맹렬한 속도로 날아오는 공을 정확하게 받아치고 있었습니다. 이것이 바로 마인드퐁(MindPong)이었습니다.

생각으로 게임을 하다: 페이지의 마인드퐁 (MindPong)



일론 머스크는 트위터에 이 영상을 공유하며 썼습니다. "원숭이가 뇌 칩을 이용해 텔레파시로 비디오 게임을 하고 있다." 텔레파시라는 단어는 과학적 용어가 아니지만, 이 현상을 설명하기에 가장 적합한 문학적 표현이었습니다. 생각의 전달. 육체라는 매개체를 건너편 의지의 전송.

이 마법 같은 장면 뒤에는 치밀한 공학적 설계가 숨어 있었습니다. 시연 6주 전, 페이지의 뇌 양쪽 운동 피질에는 각각 하나씩, 총 두 개의 뉴럴링크 N1 칩이 이식되었습니다. 총 2,048개의 전극이 페이지가 손과 팔을 움직이려 할 때 발생하는 신경세포의 발화 패턴을 기록했습니다.

첫 번째 단계는 보정(Calibration)이었습니다. 페이지가 물리적으로 조이스틱을 움직여 게임을 할 때, 컴퓨터는 조이스틱의 움직임과 페이지의 뇌 신호를 짝지어 학습했습니다. "이 패턴의 전기 신호가 나오면 조이스틱을 위로 올린 것이다", "저 패턴이 나오면 아래로 내린 것이다"라는 상관관계를 인공지능이 파악한 것입니다.

학습이 끝나자, 더 이상 물리적인 입력 장치는 필요 없었습니다. 뉴럴링크의 디코더(해독기)는 페이지의 뇌에서 나오는 신호를 실시간으로 가로채어, 그것을 커서의 움직임으로 변환했습니다. 영상 하단에는 페이지의 뇌 활동이 시각화되어 나타났습니다. 붉은색 스파이크들이 요동칠 때마다 게임 속의 라켓은 즉각적으로 반응했습니다. 지연 시간은 거의 느껴지지 않았습니다.

페이지에게 있어 이 과정은 어떤 특별한 노력이 필요한 일이 아니었습니다. 그는 단지 바나나 스무디를 계속 먹고 싶다는 욕망을 가지고, 공을 맞히려는 의도를 품었을 뿐입니다. 그의 의도가 전선도, 근육도 거치지 않고 곧바로 디지털 세계의 행동으로 직결된 것입니다.

뉴캐슬 대학의 신경 인터페이스 교수 앤드루 잭슨(Andrew Jackson)은 이 시연에 대해 원숭이의 뇌로 컴퓨터 커서를 제어하는 것 자체는 새로운 개념이 아니라고 지적했습니다. 2002년에 유사한 시연이 처음 발표되었고, 그 아이디어는 1960년대 에버하드 페츠(Eberhard Fetz)의 연구까지 거슬러 올라갑니다. 그러나 뉴럴링크가 충격을 준 포인트는 다른 데 있었습니다. 완전 무선, 소형 임플란트, 높은 채널 수를 전제로 한 실시간 디코딩을 영상 한 편으로 압축했다는 점입니다.

기존의 비침습적 뇌파(EEG) 장비로는 "왼쪽 또는 오른쪽" 같은 단순한 명령만 내릴 수 있었고 반응 속도도 느렸습니다. 하지만 페이지는 뉴런 단위의 고해상도 신호를 통해, 마치 마우스를 쥔 것처럼 부드럽고 정교한 아날로그 컨트롤을 보여주었습니다.

이 실험은 신경 가소성(Neuroplasticity)의 위력도 확인시켜 주었습니다. 페이지는 게임의 규칙을 이해하고, 자신의 뇌 활동이 게임 결과(스무디 보상)로 이어진다는 것을 학습했습니다. "함께 발화하는 뉴런은 함께 연결된다"는 헵의 법칙(Hebbian theory)처럼, 페이지의 뇌는 기계와의 상호작용을 통해 스스로를 재배선하여 최적의 제어 경로를 만들어냈습니다.

머스크는 이 영상을 공유하며 호언장담했습니다. "나중에는 마비 환자가 엄지손가락을 쓰는 일반인보다 더 빠르게 스마트폰을 조작하게 될 것입니다." 페이지의 풍 게임은 단순한 오락이 아니었습니다. 그것은 사지마비 환자들에게 던지는 희망의 메시지였습니다. 척수가 손상되어 손가락 하나 까딱할 수 없는 사람도, 뇌의 운동 피질이 살아만 있다면 페이지처럼 컴퓨터를 조작할 수 있다는 것을 증명했기 때문입니다.

그러나 이 영상은 기술적 성취 이상의 철학적 질문도 남겼습니다. 페이지는 게임을 하고 있는 것일까요, 아니면 게임의 일부가 된 것일까요? 그의 의식과 컴퓨터의 알고리즘 사이의 경계는 어디일까요? 스무디라는 보상을 위해 뇌를 사용하는 원숭이의 모습에서, 우리는 미래의 인류가 도파민이라는 보상을 위해 뇌를 기계에 연결하는 모습을 미리 보고 있는 것은 아닐까요? 페이지의 눈동자 속에 비친 모니터의 불빛은, 인간과 기계가 융합된 포스트휴먼 시대의 서막을 알리는 강렬한 메타포였습니다.

다. 동물 실험의 기술적 성과와 안전성 데이터

돼지 거트루드와 원숭이 페이지의 화려한 시연 이면에는, 뉴럴링크 엔지니어들이 수년간 쌓아 올린 방대한 데이터의 산이 있습니다. 동물 실험의 진정한 목적은 쇼맨십이 아닙니다. 이 기술이 인간의 뇌에 들어갔을 때 죽지 않고, 오랫동안, 제대로 작동할 것임을 입증하는 데 있었습니다. 이것은 생물학적 환경이라는 가혹한 전장에서 반도체 장비가 살아남아야 하는 생존 투쟁이었습니다.

뉴럴링크가 강하게 밀어붙인 공학적 성과는 크게 네 가지로 요약됩니다.

첫째는 전극 스레드(thread) 기반의 고밀도 채널 설계입니다. 기존의 딱딱한 유타 어레이(Utah Array)는 뇌 조직에 미세한 손상을 주고 면역 반응을 일으켜 시간이 지날수록 신호 품질이 떨어지는 문제가 있었습니다. 뉴럴링크는 폴리이미드 소재의 얇은 실 전극이 뇌의 미세한 움직임에 따라 유동적으로 움직이면서도, 뇌척수액이나 혈액 속에서 부식되지 않고 수년 이상 기능을 유지할 수 있음을 동물 실험을 통해 증명해야 했습니다.

둘째는 이 전극들을 빠르고 정밀하게 삽입하기 위한 수술 로봇 R1입니다. 뇌 표면에는 수많은 미세 혈관이 존재합니다. 전극을 삽입하다가 혈관을 터뜨리면 뇌출혈이 발생하고, 이는 뇌세포 사멸로 이어집니다. 뉴럴링크가 공개한 데이터에 따르면, R1 로봇은 돼지와 원숭이의 뇌 표면을 스캔하여 혈관을 피하는 경로를 자동으로 계산해냈습니다. 분당 192개의 전극을 삽입하면서도 마이크로미터 단위의 정밀도를 확보했습니다. 이는 인간 외과 의사가 현미경을 보며 수동으로 삽입할 때보다 월등히 낮은 합병증 비율이었습니다.

셋째는 초저전력 신호 증폭, 디지털화, 무선 전송을 임플란트 내부에서 처리하는 집적 기술입니다. 체내, 특히 뇌 속은 전자기기에 있어 지옥과도 같습니다. 섭씨 36.5도의 온도, 높은 습도, 그리고 부식을 유발하는 체액이 가득합니다. 초기의 많은 BCI 장치들은 몇 달 못 가 부식되거나 절연이 파괴되어 고장 나곤 했습니다. 뉴럴링크는 가속 노화 시험과 실제 동물 이식을 통해 칩의 밀폐 기술을 검증했습니다. 페이지와 같은 원숭이들은 1년 이상 칩을 이식한 상태로 생활했으며, 그 기간 동안 감염이나 장치 부식으로 인한 독성 반응은 보고되지 않았습니다.

넷째는 실시간 디코딩 파이프라인입니다. 거트루드의 다리 관절 예측과 페이지의 풍 게임 제어는 뇌 신호 디코딩 알고리즘의 정밀도를 보여주는 지표였습니다. 1,024개 채널에서 들어오는 신호를 실시간으로 분석하여 의도(Intention)를 추출하는 데 성공했습니다. 수백에서 수천 채널에서 나오는 발화 데이터의 노이즈 제거, 비선형 패턴 인식, 시간 지연 최소화 등 고난도의 신호 처리 문제를 현실 시간대 안에 해결했습니다.

그러나 안전성 데이터는 데모 영상만으로 충분히 말하기 어렵습니다. 안전성은 수술 중 합병증, 이식 후 생체 반응, 장기 내구성, 동물 복지 관점의 고통 및 스트레스 관리, 연구 거버넌스까지 포함합니다. 공개된 학술 및 공식 문서에서 뉴럴링크는 일부 수치와 시스템 개요를 제시했지만, 외부 연구자들이 장기적이고 대규모로 재현 가능한 수준의 데이터가 충분히 축적되고 공개됐다고 보기는 어렵다는 평가가 반복되어 왔습니다.

2022년 초, FDA는 뉴럴링크의 임상 시험 신청을 반려했습니다. 주요 우려는 리튬 배터리의 안전성, 전극 실이 뇌 안에서 엉뚱한 곳으로 이동할 가능성, 그리고 칩을 제거할 때 뇌 조직이 손상될 위험 등이었습니다. 뇌 조직은 섭씨 1~2도의 온도 상승만으로도 영구적인 손상을 입을 수 있습니다. 칩이 최대 부하로 작동할 때나 충전 중일 때 발생하는 열이 안전 기준치 이내임을 입증해야 했습니다.

뉴럴링크는 이에 대응하기 위해 추가적인 동물 실험 데이터를 생성했습니다. 배터리 과열 방지 시스템을 입증하고, 전극이 뇌 조직과 유착되지 않고 안전하게 제거될 수 있음을 돼지 모델(도로시 사례)을 통해 보여주었습니다. 2022년 돼지 실험에서 일부 동물들은 뇌에 육아종(granulomas)이라는 염증 조직이 형성되는 것이 관찰되었습니다. 뉴럴링크는 원인을 특정하지 못했지만, 임플란트와 스레드가 원인은 아니라고 주장했습니다.

결국 2023년 5월, FDA는 이러한 보완 데이터를 바탕으로 인간 임상 시험을 승인했습니다. 동물 실험은 단순한 기능 시연을 넘어, 규제 기관이 요구하는 엄격한 안전성 기준을 충족시키기 위한 필수적인 관문이었습니다.

그러나 2024년 첫 인간 환자 놀랜드 아보의 수술 후, 일부 전극 스레드가 뇌에서 수축(retraction)하는 현상이 발생했습니다. 로이터 통신에 따르면, 뉴럴링크와 FDA는 이전 동물 실험에서 머리카락보다 가는 스레드가 수축할 수 있다는 사실을 알고 있었습니다. 그러나 뉴럴링크는 이 위험이 재설계를 요구할 만큼 심각하지 않다고 판단했습니다. 두 번째 환자부터는 스레드를 뇌의 운동 피질 안으로 8밀리미터까지 더 깊이 삽입하는 방식으로 문제에 대응했습니다.

결국 돼지와 원숭이가 남긴 데이터는 단순한 숫자가 아니었습니다. 그것은 "뇌에 구멍을 뚫고 칩을 심는다"는, 어찌 보면 야만적이고 위험천만해 보이는 아이디어를 "의학적으로 통제 가능하고 예측 가능한 기술"로 격상시킨 과학적 토대였습니다. 그들의 희생과 기여 위에서 뉴럴링크는 실험실의 괴짜 프로젝트에서 차세대 의료기기로 진화할 수 있었습니다.

라. 동물복지 논란과 윤리적 비판에 대한 해명

혁신의 빛이 강할수록 그림자는 짙은 법입니다. 뉴럴링크가 보여준 화려한 기술적 성취의 이면에는, 실험실에서 생을 마감한 동물들의 고통과 죽음이라는 무거운 윤리적 쟁점이 자리 잡고 있습니다. 2022년부터 본격화된 동물권 단체들의 고발과 내부 직원들의 폭로는 우리가 기술 발전을 위해 어디까지 용인할 수 있는가에 대한 근본적인 질문을 던졌습니다.

논란의 중심에는 '책임 있는 의학을 위한 의사 위원회(PCRM)'의 고발이 있었습니다. 그들은 뉴럴링크가 캘리포니아 대학교 데이비스(UC Davis)와 협력하여 수행한 초기 실험(2017~2020) 기록을 공개기록청구 소송을 통해 입수했습니다. 보고서의 내용은 충격적이었습니다. 뇌수술 후 극심한 고통에 시달리다 안락사된 원숭이들, 감염으로 인해 피부가 찢어 들어간 사례, 그리고 의료용 접착제 '바이오글루(BioGlue)'가 뇌 표면으로 흘러들어가 뇌세포를 파괴하여 동물이 발작을 일으키며 죽어간 사례들이 상세히 기록되어 있었습니다.

로이터 통신은 내부 직원의 증언을 인용해, 일론 머스크의 "속도를 높이라"는 압박 때문에 준비 부족 상태에서 무리하게 실험이 진행되었고, 그 결과 2018년 이후 약 1,500마리 이상의 동물이 죽었다고 보도했습니다. 일부 원숭이들은 손가락과 발가락이 절단된 상태로 발견되었습니다. PCRM은 이것이 극심한 스트레스를 받은 동물들의 자해 증거라고 주장했습니다.

2023년 9월, 와이어드(Wired) 매거진은 수의학 기록에 기반한 탐사보도를 발표했습니다. 기록에 따르면, 한 원숭이는 "심각한 신경학적 결함"으로 고통받고 있었음에도 뉴럴링크 과학자의 요청으로 안락사가 지연되었습니다. 부검 결과, 실험이 "그녀의 뇌를 변형시키고 파열시켰으며", 뇌가 "두개골 바닥 밖으로 튀어나와 있었습니다." 규제기관은 이것이 동물복지법(Animal Welfare Act) 위반에 해당한다고 인정했습니다.

2018년 12월, 한 원숭이의 두개골에 두 개의 구멍을 뚫고 전극을 이식했습니다. 금속 플레이트를 뼈 나사로 머리에 고정하고 임플란트 주변의 피부를 봉합했습니다. 수술 부위는 빠르게 감염되었고 "피부가 침식되었습니다." 세 달 후, 감염이 지속되자 그들은 그녀를 죽였습니다. 부검 결과 그녀가 뇌에서 "급성" 출혈을 겪었으며 대뇌 피질이 뉴럴링크의 장치에 의해 "너털너털해졌음"이 밝혀졌습니다.

이에 대해 일론 머스크와 뉴럴링크는 적극적으로 해명했습니다. 머스크는 소셜미디어 플랫폼 X에서 "어떤 원숭이도 뉴럴링크 임플란트의 결과로 죽지 않았다"고 주장했습니다. 그는 초기 임플란트 실험에서 건강한 원숭이를 사용하지 않고, 이미 말기 상태(terminal)의 원숭이들을 대상으로 실험했다고 반박했습니다.

그러나 PCRM이 소송을 통해 확보한 공개 기록은 다른 이야기를 했습니다. 세 마리의 원숭이만이 수술에서 회복하지 못하는 말기 실험에 사용되었고, 12마리의 이전에 건강했던 동물들은 회사의 임플란트 문제로 직접적인 결과로 안락사되었습니다. 2023년 9월, PCRM은 SEC(증

권거래위원회)에 머스크와 뉴럴링크에 대한 증권 사기 조사를 요청했습니다. 2024년 12월, SEC가 뉴럴링크에 대한 조사를 재개했다는 보도가 나왔습니다.

뉴럴링크 측은 자신들의 동물 사육 시설이 국제실험동물관리평가인증협회(AAALAC)의 인증을 받았으며, 실험실이라기보다는 "동물 놀이터"에 가깝게 설계되었다고 주장했습니다. 동물들이 갇혀 있는 것이 아니라 넓은 놀이 공간에서 지내며, 실험 참여 역시 자발적이라고 강조했습니다.

그러나 PCRM의 분석에 따르면, 실험 프로토콜은 원숭이를 하루에 최대 5시간까지 의자에 강제로 고정하도록 되어 있었습니다. 동물이 구속에 "적응"하지 못할 경우, 프로토콜은 동물의 머리를 강제로 고정하기 위해 두개골에 강철 "헤드포스트 임플란트"를 부착하도록 요구했습니다. 뉴럴링크는 원숭이들이 기꺼이 실험에 참여한다고 주장했지만, 어떤 동물도 실험자가 자신의 두개골에 구멍을 뚫고 장치를 이식하는 것을 자발적으로 허용하지 않았을 것입니다.

2022년 12월, 미국 농무부(USDA) 감찰국이 뉴럴링크에 대한 조사를 개시했습니다. 2023년 7월, USDA 조사 결과 2019년의 자체 보고된 사건을 제외하고는 동물복지법 위반 증거가 발견되지 않았습니다. PCRM은 이 조사 결과에 이의를 제기했습니다. 그러나 2024년 11월, FDA가 뉴럴링크의 캘리포니아 동물 연구 시설에서 여러 품질 관리 문제를 발견했다는 보도가 나왔습니다. pH 측정기, 활력 징후 모니터 및 기타 장비에 대한 보정 기록을 찾을 수 없었습니다.

2025년 1월, 트럼프 대통령 2기 행정부 첫 주에 농무부 조사를 담당하던 감찰관 필리스 풍(Phyllis Fong)을 포함한 17명의 감찰관이 해임되었습니다. PCRM이 제기한 두 건의 조사 모두 불확실한 상황에 놓이게 되었습니다.

기술의 역사는 언제나 윤리적 딜레마 위에서 쓰였습니다. 파스퇴르의 백신 실험도, 초기 우주 개발의 라이카(Laika)도 그러했습니다. 뉴럴링크 측은 "동물 실험 없는 의료기기 개발은 불가능하다"는 현실론을 폈습니다. FDA의 승인을 받고 인간에게 적용하기 위해서는 반드시 동물 생체 데이터가 필요하며, 현재 기술로는 시뮬레이션만으로 뇌의 복잡성을 대체할 수 없다는 것입니다.

그러나 "건강한 동물의 뇌를 여는 행위가 과연 정당한가?"라는 근본적인 윤리적 질문은 사라지지 않았습니다. 인간의 고통을 덜어주기 위해 다른 생명체의 고통을 어디까지 허용할 것인가? 혁신의 속도가 생명 윤리의 속도보다 빠를 때, 우리는 그 브레이크를 누가, 어떻게 밟아야 하는가?

동물들의 뇌에 꽂힌 전극은 단지 신호만을 전송하는 것이 아닙니다. 그것은 인간이라는 종의 도덕적 현주소를 묻는 질문을 끊임없이 송출하고 있습니다. 돼지와 원숭이의 희생은 인간 임상 시험이라는 다음 단계로 넘어가기 위한, 비극적이지만 불가피한 통행료로 여겨지고 있습니다. 그러나 그 통행료의 영수증에 적힌 금액이 정당한지, 우리는 계속 질문해야 합니다.

7 인간 임상 실험: 텔레파시(Telepathy)의 실현

가. FDA 승인 과정과 프라임(PRIME) 스터디의 시작

2023년 5월 25일, 일론 머스크는 트위터에 짧은 문장 하나를 올렸습니다. "FDA가 인간 임상 시험을 승인했다." 그것이 전부였습니다. 하지만 이 한 줄 뒤에는 수년간의 좌절과 재도전이 숨어 있었습니다.

뉴럴링크가 FDA에 처음 임상시험 승인을 신청한 것은 2022년 초였습니다. 결과는 거절이었습니다. FDA는 세 가지 우려사항을 제기했습니다. 첫째, 임플란트에 사용된 리튬 배터리의 안전성. 둘째, 머리카락보다 가는 전극 실이 뇌 안에서 다른 부위로 이동할 가능성. 셋째, 기기를 제거할 때 뇌 조직이 손상될 위험. 뉴럴링크는 이 문제들을 해결하기 위해 1년 이상을 투자했습니다.

FDA의 '획기적 의료기기' 지정을 먼저 받은 것이 아니었습니다. 뉴럴링크가 받은 것은 '조사용 의료기기 면제(IDE)'였습니다. 이것은 상업적 판매가 아닌 연구 목적의 인간 시험을 허용하는 승인입니다. FDA는 뉴럴링크의 데이터를 검토한 뒤, 제한된 수의 환자에게 제한된 조건 하에서 임플란트를 시험할 수 있도록 허가했습니다.

2023년 9월, 뉴럴링크는 환자 모집을 시작했습니다. 임상시험의 이름은 프라임(PRIME)이었습니다. 'Precise Robotically Implanted Brain-Computer Interface'의 약자입니다. 정밀 로봇으로 이식하는 뇌-컴퓨터 인터페이스. 이름 자체가 기술의 핵심을 담고 있었습니다.

프라임 스터디의 대상은 명확했습니다. 경추 척수 손상으로 인한 사지마비 환자, 또는 루게릭병(ALS)으로 인해 사지를 움직일 수 없는 환자. 나이는 22세 이상. 부상 후 최소 1년이 경과한 사람. 이 조건을 충족하는 사람들이 뉴럴링크 웹사이트를 통해 지원서를 제출하기 시작했습니다. 1,000명 이상이 지원했지만, 실제로 자격을 갖춘 사람은 그중 10분의 1도 되지 않았습니다.

임상시험의 협력 기관은 배로우 신경학 연구소(Barrow Neurological Institute)였습니다. 애리조나주 피닉스에 위치한 이 병원은 신경외과 분야에서 미국 최고 수준으로 꼽힙니다. 뉴럴링크는 자체 시설이 아닌 기존 의료기관과 협력하는 방식을 선택했습니다. 의료 안전 기준을 충족하고, 독립적인 의료진의 감독 하에 시술을 진행하기 위해서였습니다.

프라임 스터디의 목표는 세 가지였습니다. 첫째, N1 임플란트와 R1 수술 로봇의 안전성 검증. 둘째, 일상생활에서의 유용성 확인. 셋째, 전극 실 수축 문제에 대한 해결책 마련. 뉴럴링크는 이 세 가지를 모두 달성해야만 다음 단계로 나아갈 수 있었습니다.

임상시험 등록 번호는 NCT06429735였습니다. 이 번호는 ClinicalTrials.gov에서 누구나 검색할 수 있습니다. 뉴럴링크가 비밀주의로 비판받아온 것을 고려하면, 이것은 투명성을 향한 작은 발걸음이었습니다.

2024년 1월, 모든 준비가 끝났습니다. 첫 번째 환자가 수술대에 오를 차례였습니다.

나. 첫 번째 환자 놀랜드 아보(Noland Arbaugh)

(1) 수술 과정과 회복: 사지마비 환자의 두개골에 칩을 심다

놀랜드 아보는 1993년 또는 1994년에 애리조나주 유마에서 태어났습니다. 텍사스 A&M 대학교에서 공부하던 학생이었습니다. 2016년 여름, 그는 펜실베이니아주 스타루카에 있는 아일랜드 레이크 캠프에서 상담사로 일하고 있었습니다. 어느 날 호수에서 다이빙을 하다가 사고가 났습니다. 경추 4번과 5번 사이의 척추가 탈구되었습니다.

그 순간 이후로 그는 어깨 아래의 모든 것을 느끼지 못했습니다. 손가락 하나 움직일 수 없었습니다. 스물두 살이었습니다.

8년이 지난 2024년 1월 28일 또는 29일, 아보는 피닉스의 배로우 신경학 연구소 수술실에 누워 있었습니다. 그의 나이는 스물아홉이었습니다.

수술은 몇 시간이 걸렸습니다. 먼저 의료진이 두개골에 동전 크기의 구멍을 뚫었습니다. 이것은 인간의 손으로 진행했습니다. 그다음에 R1 로봇의 차례였습니다.

R1은 64개의 전극 실을 뇌의 운동 피질에 삽입했습니다. 각 실에는 16개의 전극이 달려 있어서, 총 1,024개의 전극이 뇌 조직에 닿았습니다. 이 전극들은 왼쪽 뇌의 운동 피질 중에서도 오른손 움직임을 담당하는 부위에 정확히 배치되었습니다. 아보가 오른손을 움직이려고 생각하면, 그 신경 신호가 전극에 포착되는 구조였습니다.

R1이 필요한 이유는 단순했습니다. 인간의 손은 떨립니다. 뇌의 혈관은 머리카락보다 가늘니다. 로봇은 혈관을 피하면서 전극 실을 정확한 깊이로 삽입할 수 있었습니다.

수술이 끝나자 N1 칩이 아보의 두개골에 자리 잡았습니다. 동전 다섯 개를 쌓아놓은 정도의 두께였습니다. 무선으로 충전되고, 블루투스로 데이터를 전송하는 장치였습니다. 외부에서는 아무것도 보이지 않았습니다. 머리카락이 다시 자라면 흉터조차 가려질 것이었습니다.

아보는 수술 다음 날 퇴원했습니다. 인지 능력에는 아무런 손상이 없었습니다. 일론 머스크가 수술 몇 시간 후에 화상 통화로 회복실의 아보에게 안부를 전했다는 이야기도 있습니다.

"기분이 어떠세요?" 간호사가 물었습니다.

아보는 아직 아무것도 모른다고 대답할 수밖에 없었습니다. 칩이 작동하는지 여부는 회복 후에야 확인할 수 있었기 때문입니다. 만약 기억을 잃어버리고 깨어났다면, 누군가가 뇌에 뭔가가 심어져 있다고 말해도 믿지 않았을 것이라고 그는 나중에 회고했습니다. 칩의 존재를 전혀 느낄 수 없었기 때문입니다.

(2) 성취: 생각만으로 체스, 마리오 카트, 8시간 연속 사용

2024년 3월 20일, 놀랜드 아보는 X(구 트위터)에서 생중계를 했습니다. 화면에는 체스 게임이 떠 있었습니다. 그는 손가락 하나 움직이지 않고 말을 옮겼습니다. 커서가 그의 생각대로 움직였습니다.

처음 링크 앱에 연결했을 때, 커서를 제어하는 데 몇 분밖에 걸리지 않았습니다. 뉴럴링크 팀은 웹그리드 테스트라는 표준화된 과제로 성능을 측정했습니다. 아보는 첫 세션에서 이미 BCI 커서 제어의 세계 기록을 깼습니다. 이전 기록은 다른 BCI 기기로 세워진 것이었습니다.

그 후 몇 주 동안, 아보는 하루에 8시간에서 10시간씩 뉴럴링크 팀과 함께 시스템을 훈련시켰습니다. 소프트웨어가 그의 뇌 신호를 학습하고, 그도 새로운 인터페이스에 적응하는 시간이었습니다.

자유 시간에 그는 비디오 게임을 했습니다. 시빌라이제이션 VI를 밤새 플레이했습니다. 마리오 카트를 즐겼습니다. 이전에도 음성 인식 소프트웨어나 적응형 마우스를 사용해봤지만, 원하는 수준의 제어력을 얻지 못했습니다. 뉴럴링크는 달랐습니다.

"게임이 너무 재미있어서 몇 시간이고 플레이했습니다." 아보는 인터뷰에서 말했습니다. "완전히 새로운 세계가 열린 것 같았습니다."

체스만이 아니었습니다. 그는 웹 브라우징을 했습니다. 이메일을 보냈습니다. 문자 메시지를 작성했습니다. 이전에는 문자 하나 보내는 데 5분에서 15분이 걸렸습니다. 이제는 몇 초면 충분했습니다. 스마트폰을 제어했습니다. 집안의 자동화 시스템을 조작했습니다.

뉴럴링크 엔지니어들은 그를 위해 맞춤형 음성-텍스트 변환 프로그램도 개발했습니다. 시중에 나와 있는 어떤 제품보다 우수했다고 아보는 평가했습니다. 그들은 무엇이든 해결할 수 있는 것 같았습니다.

2024년 9월, 아보는 파리로 날아갔습니다. 스피드 체스 챔피언십 결승전을 관람하기 위해서였습니다. 2025년 9월에는 포춘 브레인스톰 테크 컨퍼런스에서 여성 체스 마스터 안나 크램링과 직접 체스를 두었습니다. 생각만으로 말을 움직이면서.

그는 신경과학 학위를 따기 위해 학교로 돌아갔습니다. 자신만의 사업도 시작했습니다. 여행을 다니기 시작했습니다. 뉴럴링크가 그에게 삶을 돌려준 것이었습니다.

"내 삶 전체가 바뀌었습니다." 2025년 8월, 수술 후 18개월이 지난 시점에서 아보는 말했습니다. 그는 하루에 약 10시간 동안 뉴럴링크를 사용했습니다. 공부하고, 읽고, 게임하고, 인터뷰 일정을 잡는 데 사용했습니다.

(3) 위기와 극복: 전극 수축(Retraction) 현상과 알고리즘을 통한 회복 탄력성

모든 것이 순조롭게만 진행된 것은 아니었습니다. 수술 후 한 달쯤 지났을 때, 무언가 잘못되고 있다는 신호가 나타났습니다. 임플란트에서 전송되는 데이터의 속도가 떨어지기 시작했습니다.

처음에 아보는 소프트웨어 버그라고 생각했습니다. 하지만 뉴럴링크 팀이 전극 신호를 분석한 결과, 하드웨어 문제였습니다. 전극 실들이 뇌 조직에서 빠져나오고 있었습니다.

"전극 수축(thread retraction)"이라고 불리는 현상이었습니다. 수술 후 몇 주 동안 64개의 전극 실 중 상당수가 원래 위치에서 이탈했습니다. 최종적으로 약 85%의 전극이 제 기능을 하지 못하게 되었습니다. 1,024개의 전극 중 100개에서 150개 정도만 뇌 신호를 측정할 수 있었습니다.

원인은 뇌의 움직임이었습니다. 인간의 뇌는 두개골 안에서 예상보다 훨씬 많이 움직였습니다. 뉴럴링크가 예상한 것보다 약 세 배 더. 수술 후 두개골 안에 남은 공기(기뇌증)도 한 원인으로 지목되었습니다. 전극 실들은 수술 직후부터 움직이기 시작해서, 완전히 안정된 적이 없었습니다.

"정말 힘들었습니다." 아보는 회고했습니다. "이제 막 맛을 보기 시작했는데, 한 달 만에 모든 것이 무너지는 것 같았습니다. 연구에서 탈락하는 줄 알았습니다."

그가 뉴럴링크 본사를 방문하기로 한 날 아침, 팀이 전극 수축 소식을 전했습니다. 아보는 침울했지만, 곧 마음을 다잡았습니다. 자신이 여기 있는 이유를 떠올렸습니다. 첫 번째 환자로서 문제를 겪고, 그것을 해결하는 과정이 미래의 환자들에게 도움이 될 것이었습니다.

뉴럴링크는 재수술 대신 소프트웨어 해결책을 선택했습니다. 엔지니어들은 기록 알고리즘을 수정했습니다. 개별 뉴런의 신호 대신 뉴런 그룹의 신호를 감지하도록 바꿨습니다. 신호를 커서 움직임으로 변환하는 기술도 개선했습니다.

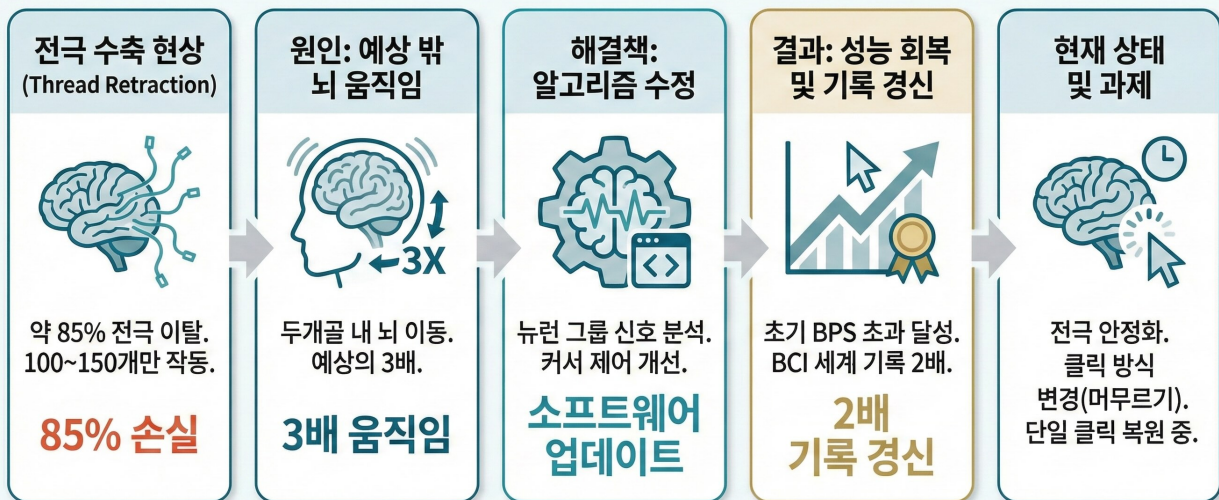
결과는 놀라웠습니다. 전극 수가 급격히 줄었음에도 불구하고, 시스템의 성능은 회복되었습니다. 아보의 비트 전송률(BPS)은 초기 기록을 넘어섰습니다. 전에 세웠던 BCI 커서 제어 세계 기록의 두 배 이상을 달성했습니다.

한 가지 불편함은 남았습니다. 클릭 방식을 바꿔야 했습니다. 원래는 생각으로 클릭을 할 수 있었지만, 전극 수축 이후에는 커서를 0.3초 동안 한 자리에 머물게 하면 자동으로 선택되는 방식으로 바뀌었습니다. 뉴럴링크는 단일 클릭 기능을 복원하기 위해 계속 작업 중이라고 밝혔습니다.

전극 실들은 결국 안정화되었습니다. 더 이상 움직이지 않았습니다. 아보의 뉴럴링크는 계속 작동했습니다. 그는 여전히 하루 10시간 이상 사용하고 있습니다.

"이 연구의 핵심은 무엇이 작동하고 무엇이 작동하지 않는지 알아내는 것입니다." 아보는 말했습니다. "내가 겪은 모든 일이 다른 사람들에게 도움이 될 것입니다."

위기와 극복: 뉴럴링크 전극 수축 및 회복



전문적이고 신뢰감 있는 비즈니스 스타일 인포그래픽. (C) 2026 InfoGraphic Designer.

다. 알렉스(Alex)와 후속 참가자들의 성과

(1) 알렉스: CAD 소프트웨어로 3D 디자인, 카운터 스트라이크 게임

2024년 8월, 두 번째 환자가 수술을 받았습니다. 그의 이름은 알렉스. 성은 공개되지 않았습니다. 그는 놀랜드 아보와 정반대의 성격이었습니다. 언론 노출을 꺼렸습니다. 사생활을 중시했습니다. 우리가 그에 대해 아는 것은 뉴럴링크 블로그 게시물에 담긴 내용이 대부분입니다.

알렉스는 척수 손상으로 사지를 움직일 수 없는 환자였습니다. 부상 전에는 자동차 정비사로 일했습니다. 손으로 무언가를 만들고 고치는 것을 좋아하는 사람이었습니다.

수술은 배로우 신경학 연구소에서 진행되었습니다. 아보의 경우와 같은 장소였습니다. 하지만 기술은 달라져 있었습니다.

뉴럴링크는 첫 번째 환자에게서 배운 교훈을 적용했습니다. 전극 수축을 방지하기 위해 여러 조치를 취했습니다. 수술 중 뇌의 움직임을 최소화했습니다. 임플란트와 뇌 표면 사이의 간격을 줄였습니다. 전극 실을 더 깊이 삽입했습니다. 아보의 경우 3~5mm였던 삽입 깊이를 8mm로 늘렸습니다.

결과는 성공적이었습니다. 알렉스에게서는 전극 수축이 관찰되지 않았습니다. 64개의 전극 실 모두 제자리에 머물렀습니다. 그는 수술 다음 날 퇴원했습니다. 회복은 순조로웠습니다.

알렉스가 처음 링크를 컴퓨터에 연결했을 때, 커서를 제어하기까지 5분도 걸리지 않았습니다. 몇 시간 만에 그는 자신이 이전에 사용했던 어떤 보조 기술보다 높은 속도와 정확도를 달성했습니다. 첫날, 그는 비뉴럴링크 BCI 기기로 세워진 커서 제어 세계 기록을 깼습니다.

그리고 카운터 스트라이크 2를 플레이하기 시작했습니다.

알렉스는 부상 전부터 1인칭 슈팅 게임을 좋아했습니다. 부상 후에도 포기하지 않았습니다. 퀴드스틱(Quadstick)이라는 입으로 조작하는 컨트롤러를 사용했습니다. 빨고 불고 하는 압력 센서와 입술 위치 센서로 작동하는 장치였습니다. 하지만 한계가 있었습니다. 움직이거나 조준하거나, 둘 중 하나만 할 수 있었습니다. 동시에는 불가능했습니다.

뉴럴링크는 그 한계를 깼습니다. 이제 알렉스는 퀴드스틱으로 캐릭터를 움직이고, 뉴럴링크로 조준할 수 있었습니다. 두 가지를 동시에. 다른 플레이어들처럼.

"그냥 돌아다니는 것만으로도 너무 즐겁습니다." 알렉스는 뉴럴링크 블로그에서 말했습니다. "좌우로 시선을 돌릴 때 퀴드스틱을 움직일 필요가 없습니다. 어디를 볼지 생각하면, 거기 로 갑니다. 미쳤습니다."

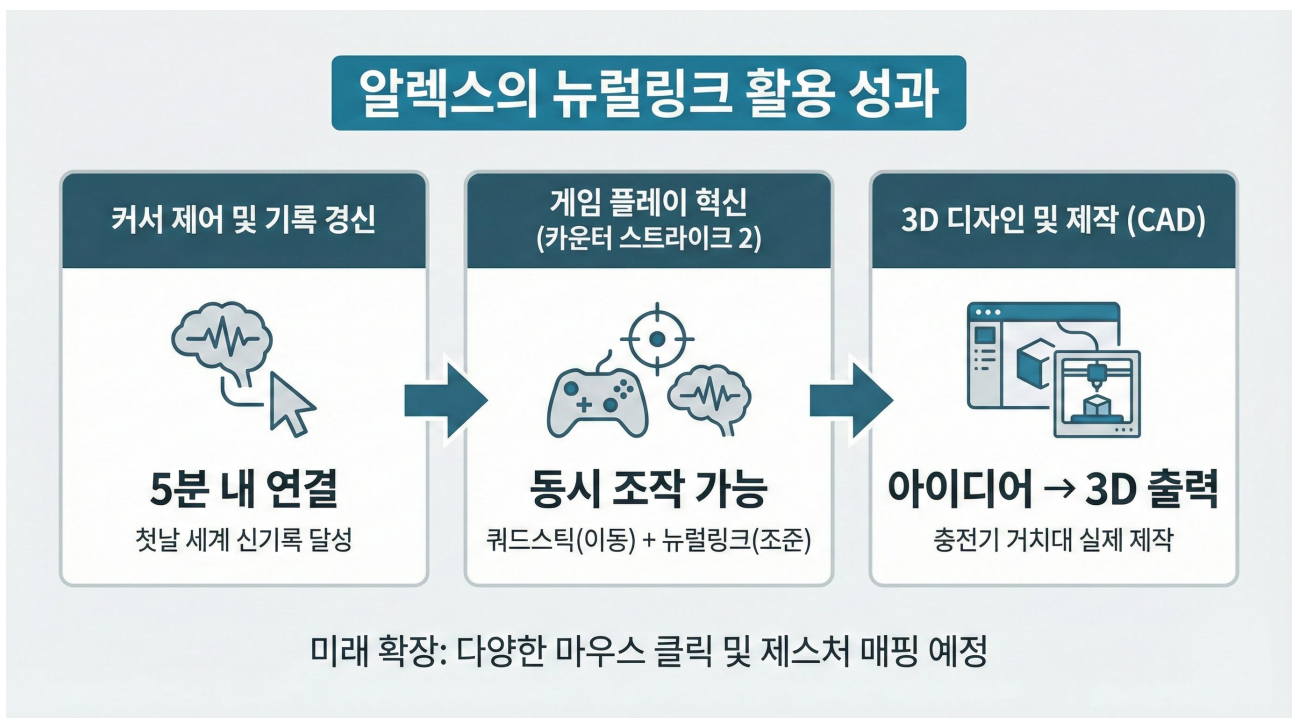
게임만이 아니었습니다. 둘째 날, 알렉스는 CAD 소프트웨어를 사용하기 시작했습니다. 오토 데스크 퓨전 360이라는 3D 디자인 프로그램이었습니다. 자동차 정비사로서 손으로 물건을 만들던 시절을 그리워했던 그에게, 이것은 새로운 가능성이었습니다.

그가 처음 디자인한 것은 뉴럴링크 충전기를 위한 거치대였습니다. 아이디어를 구상하고, 소프트웨어로 설계하고, 3D 프린터로 출력했습니다. 실제로 사용할 수 있는 물건이 완성되었습니다.

"아이디어를 떠올리고, 디자인으로 만들고, 실제 물건으로 완성하는 것. 다시 무언가를 만드는 기분이 듭니다." 알렉스는 말했습니다.

뉴럴링크는 알렉스와 함께 시스템을 더 발전시키고 있습니다. 의도한 움직임을 여러 종류의 마우스 클릭(왼쪽, 오른쪽, 가운데)에 매핑하는 작업을 진행 중입니다. 이를 통해 CAD 소프트웨어에서 확대, 스크롤, 이동, 클릭 앤 드래그 같은 다양한 모드를 빠르게 전환할 수 있게 될 것입니다.

"이미 이것이 얼마나 잘 작동하는지에 감탄하고 있습니다." 알렉스는 말했습니다. "링크는 저 자신의 자유와 독립을 되찾는 길에서 큰 발걸음입니다."



(2) ALS 환자의 음성 복원과 AI 음성 생성 결합

브래드포드 스미스. 세 번째 환자의 이름입니다. 그는 앞선 두 환자와 근본적으로 달랐습니다. 놀랜드 아보와 알렉스는 척수 손상 환자였습니다. 스미스는 루게릭병, 즉 ALS 환자였습니다.

ALS는 운동 뉴런을 공격하는 질병입니다. 근육을 통제하는 신경세포가 점차 죽어갑니다. 환자는 걷고, 먹고, 말하고, 숨 쉬는 능력을 하나씩 잃어갑니다. 하지만 정신은 온전히 남아 있습니다. 몸이 감옥이 되는 것입니다.

스미스의 경우도 그랬습니다. 애리조나주에 사는 세 아이의 아버지였습니다. 어깨 부상이 낫지 않아 병원에 갔다가 ALS 진단을 받았습니다. 신경과 의사가 그를 안아주었을 때, 그는 진단이 얼마나 심각한 것인지 깨달았습니다. 주차장에서 울며 기도했습니다.

병이 진행되면서 그는 눈 외에는 아무것도 움직일 수 없게 되었습니다. 인공호흡기에 의존했습니다. 말을 할 수 없었습니다. 비언어적 환자가 된 것입니다.

2024년 11월, 스미스는 뉴럴링크 임플란트를 받았습니다. 세계에서 세 번째, ALS 환자로는 최초, 비언어적 환자로도 최초였습니다.

2025년 4월 27일, 그는 X에 글을 올렸습니다. "나는 세계에서 세 번째로 뉴럴링크 뇌 임플란트를 받은 사람입니다. ALS 환자로는 최초입니다. 비언어적 환자로도 최초입니다. 나는 뇌로 이것을 타이핑하고 있습니다. 이것이 나의 주요 의사소통 수단입니다."

스미스의 경우, 시스템 작동 방식이 달랐습니다. 아보와 알렉스는 손을 움직이려고 생각하여 커서를 제어했습니다. 하지만 스미스에게는 그 방법이 잘 작동하지 않았습니다. 여러 시행착오 끝에, 엔지니어들은 혀와 턱을 움직이려는 생각이 더 효과적이라는 것을 발견했습니다.

"뉴럴링크가 내 가장 깊은 생각이나 단어를 읽는 것은 아닙니다." 스미스는 설명했습니다. "내가 어떻게, 어디로 커서를 움직이려는지의 의도를 해석하는 것입니다." 마우스를 사용할 때 손목이나 팔의 움직임을 의식하지 않는 것처럼, 스미스도 이제 혀를 의식하지 않습니다. 무의식적으로 커서를 움직입니다.

그리고 목소리가 돌아왔습니다. AI 덕분이었습니다.


스미스와 뉴럴링크 팀은 그가 ALS 진단을 받기 전에 녹음된 오래된 영상과 음성 파일을 모았습니다. 그의 진짜 목소리가 담긴 기록들이었습니다. 이것으로 음성 합성 AI를 훈련시켰습니다. 결과물은 그의 목소리를 복제한 합성 음성이었습니다.

이제 스미스가 뇌로 텍스트를 입력하면, 컴퓨터가 그의 옛 목소리로 그것을 읽어줍니다. 몇 년 만에 그는 자신의 목소리로 말할 수 있게 되었습니다.

2025년 5월, 스미스는 유튜브 영상을 만들었습니다. 뇌 임플란트로 편집하고, AI로 복원된 자신의 목소리로 나레이션을 넣은 영상이었습니다. BCI로 편집된 최초의 유튜브 영상이라고 그는 말했습니다.


뉴럴링크: ALS의 침묵을 깨는 뇌 임플란트

ALS, 신체에 갇힌 정신




근육 통제력은 잃었지만 정신은 온전한 환자들에게 몸은 감옥이 됩니다.

세계 최초 비언어적 환자 이식




ALS 환자자자 말을 할 수 없는 환자로서는 세계 최초로 뉴럴링크를 이식받았습니다.

혀를 움직이는 생각으로 커서 제어



혀나 턱을 움직이려는 무의식적인 의도를 해석해 뇌로 직접 타이핑합니다.

AI로 복원된 본래의 목소리



투병 전 녹음된 음성 데이터를 AI가 학습하여 환자 본인의 목소리를 완벽히 재현했습니다.

"여기까지 오는 데 몇 년이 걸렸고, 아직도 울컥할 때가 있습니다." 스미스는 말했습니다. "나보다 더 큰 목적을 위해 존재한다는 것이 정말 좋습니다. 앞으로 이 일로 다른 사람들을 돕게 되어 정말 기쁩니다."

뉴럴링크 이전에 스미스는 눈동자 추적 장치로 의사소통했습니다. 하지만 그 기술은 빛에 민감했습니다. 어두운 방에서만 제대로 작동했습니다. 야외에서는 쓸 수 없었습니다. "나는 기본적으로 배트맨이었습니다. 어두운 방에 갇혀 있었습니다."

이제 그는 밖에서도 의사소통할 수 있습니다. 아들의 축구 경기를 관람했습니다. 교회에서 청소년들에게 이야기를 했습니다. 아이들과 마리오 카트를 플레이했습니다. "브래드가 아이들과 마리오 카트를 했습니다." 뉴럴링크 공동 창업자 DJ 서가 말했습니다. "그 순간은... 놀라웠습니다."

스미스는 일론 머스크의 AI 챗봇 그록(Grok)도 사용합니다. X에서 답글을 작성하거나 대화를 이어갈 때 도움을 받습니다. 뇌 임플란트와 생성형 AI가 결합된 것입니다. 뉴로테크의 미래가 어떤 모습일지 보여주는 사례입니다.

2025년 5월 2일, FDA는 뉴럴링크의 음성 복원 기술에 '획기적 의료기기 지정'을 부여했습니다. ALS, 뇌졸중, 척수 손상, 뇌성마비, 다발성 경화증 등으로 심각한 언어 장애를 겪는 환자들을 위한 기술의 개발을 촉진하기 위해서였습니다.

라. 2025년 글로벌 확장: 영국, 캐나다, UAE 임상시험

2025년, 뉴럴링크는 미국의 국경을 넘었습니다. 임상시험이 세 대륙으로 확장되었습니다.

캐나다가 먼저였습니다. 2024년 11월, 캐나다 보건부(Health Canada)가 임상시험을 승인했습니다. 시험 장소는 토론토 대학 건강 네트워크(University Health Network)의 토론토 웨스턴 병원이었습니다. 안드레스 로자노 박사가 이끄는 팀이었습니다.

2025년 8월 27일과 9월 3일, 미국 밖에서 최초의 뉴럴링크 수술이 진행되었습니다. 두 명의 환자가 임플란트를 받았습니다. 둘 다 경추 척수 손상 환자였고, 30대 초반이었습니다. 수술 후 며칠 만에 그들은 생각만으로 컴퓨터 커서를 제어할 수 있었습니다. CAN-PRIME이라 명명된 이 시험의 목표 참가자 수는 6명입니다.

영국은 그다음이었습니다. 2025년 7월, GB-PRIME 시험의 시작이 발표되었습니다. 협력 기관은 유니버시티 칼리지 런던 병원(UCLH)과 뉴캐슬 병원이었습니다. 영국의 의약품건강규제청(MHRA)과 건강연구청(HRA)의 승인을 받았습니다.

2025년 10월, 영국의 첫 번째 환자가 수술을 받았습니다. 그의 이름은 폴. 운동 뉴런 질환을 앓고 있었습니다. 수술 몇 시간 후, 그는 생각으로 커서를 제어하기 시작했습니다. 다음 날 퇴원했습니다. 기술이 다른 나라, 다른 병원, 다른 의료진에 의해서도 작동한다는 것이 증명된 순간이었습니다.

중동도 포함되었습니다. 2025년, 아부다비 보건부가 UAE-PRIME 시험을 승인했습니다. 시험 장소는 클리블랜드 클리닉 아부다비였습니다. UAE는 혁신적인 의료 기술에 대해 신속한 승인을 내리는 것으로 알려진 곳입니다. 뉴럴링크에게는 전략적인 선택이었습니다.

이 글로벌 확장에는 여러 목적이 있었습니다. 첫째, 환자 모집 속도를 높이는 것. 척수 손상과 ALS는 어느 한 나라에서만 환자를 충분히 모집하기 어려운 희귀 질환입니다. 여러 나라에서 동시에 모집하면 시험을 더 빨리 진행할 수 있습니다.

둘째, 규제 위험을 분산하는 것. 미국 FDA의 요구사항이 예상보다 엄격해지더라도, 다른 나라에서 먼저 승인을 받아 상업화를 시작할 수 있습니다.

셋째, 기술의 보편성을 증명하는 것. 다른 의료 시스템, 다른 수술팀, 다른 인구 집단에서도 기기가 작동한다는 데이터를 확보하는 것입니다.

2025년 중반까지, 뉴럴링크는 최소 7명에서 9명의 환자에게 임플란트를 이식했습니다. 2025년 9월 기준으로 12명이라는 보도도 있습니다. 2025년 말까지 20~30명의 새로운 참가자를 등록하는 것이 목표입니다.

일론 머스크는 X에서 말했습니다. "모든 것이 순조롭게 진행된다면, 몇 년 안에 수백 명, 5년 안에 수만 명, 10년 안에 수백만 명이 뉴럴링크를 사용하게 될 것입니다."

그것이 과장인지 예언인지는 아직 알 수 없습니다. 하지만 한 가지는 분명합니다. 2024년 1월 29일 아침, 피닉스의 수술실에서 시작된 일이 이제 전 세계로 퍼져나가고 있다는 것입니다. 놀랜드 아보의 두개골에 들어간 작은 칩 하나가, 인류와 기계의 관계를 바꾸는 실험의 시작이었습니다.

8 블라인드사이트(Blindsight)와 콘보이(Convoy): 다음 단계

가. FDA 획기적 의료기기 지정과 시각 복원 프로젝트

2024년 9월 17일 저녁, 일론 머스크는 캘리포니아 프리몬트의 뉴럴링크 본사에서 짧은 메시지를 작성했습니다. 엑스(X) 플랫폼에 올린 그 문장은 몇 개의 단어에 불과했습니다. "블라인드사이트가 FDA의 획기적 의료기기 지정을 받았다."

전 세계의 시각 장애인 커뮤니티에서 이 문장은 삼시간에 퍼져나갔습니다. 어둠 속에서 살아온 사람들에게 그것은 단순한 규제 뉴스가 아니었습니다. 새벽이 오고 있다는 신호탄이었습니다.

블라인드사이트라는 이름에는 역설이 담겨 있습니다. 신경과학에서 이 용어는 원래 시각 피질이 손상된 환자가 의식적으로는 보지 못하면서도 무의식적으로 시각 정보에 반응하는 기이한 현상을 가리킵니다. 뉴럴링크가 프로젝트에 이 이름을 붙인 것은 우연이 아닙니다.

그들이 하려는 일은 눈이라는 생물학적 입력 장치를 완전히 우회하여, 뇌의 시각 피질에 직접 영상을 쏘아 보내는 것이었습니다. 눈이 없어도 본다. 시신경이 끊어져도 본다. 태어날 때부터 빛을 모르던 사람도 본다. 이것이 블라인드사이트의 약속이었습니다.

FDA의 획기적 의료기기 지정 제도를 이해하려면 먼저 미국 의료 규제의 맥락을 알아야 합니다. 이 제도는 2012년에 만들어졌습니다. 생명을 위협하거나 돌이킬 수 없는 장애를 일으키는 질환을 치료할 잠재력이 있는 기기에 부여되는 일종의 우선심사 자격입니다. 지정을 받으면 FDA 전문가와 더 긴밀하게 협의할 수 있고, 임상 시험 설계에 유연성이 생기며, 심사 기간이 단축됩니다. 그러나 이것은 시판 승인이 아닙니다. 레이스의 출발선에 선 것일 뿐, 결승점을 통과한 것이 아닙니다.

뉴럴링크가 이 지정을 받기까지는 수년간의 동물 실험 데이터가 쌓여야 했습니다. 원숭이의 시각 피질에 전극을 심고 전기 자극을 가했을 때, 동물이 실제 빛이 없는 상황에서도 빛의 점을 인식하는지 확인하는 실험이 반복되었습니다. 2025년 여름 업데이트에서 공개된 바에 따르면, 한 원숭이는 시각 임플란트를 3년 넘게 이식한 채로 건강하게 생활하고 있었습니다. 뉴럴링크 엔지니어들은 원숭이가 뇌에 주입된 인공적인 시각 신호를 66퍼센트 이상의 정확도로 인식하고 반응했다고 보고했습니다.

이 프로젝트의 영감이 어디서 왔는지를 묻는 질문에 머스크는 항상 같은 대답을 합니다. 스타트렉. 그는 텔레비전 시리즈의 캐릭터 조르디 라 포지를 언급합니다. 태어날 때부터 맹인이었던 조르디는 바이저라는 장치를 통해 일반인보다 더 넓은 스펙트럼의 시각을 갖게 됩니

다. 머스크의 비전은 더 나아갑니다. 적외선, 자외선, 심지어 레이더 파장까지 볼 수 있는 초인적인 시각. 물론 그것은 먼 미래의 이야기입니다. 그가 솔직하게 인정하듯, 초기 버전의 블라인드사이트는 아타리 게임기의 저해상도 그래픽처럼 조악할 것입니다.

하지만 그 조악함조차 어떤 이들에게는 기적입니다. 전 세계적으로 약 20억 명이 시각 장애를 겪고 있습니다. 그중 4,300만 명이 완전히 실명한 상태입니다. 시신경이 손상되거나 안구를 잃은 환자들에게 기존의 인공 망막 기술은 무용지물입니다. 아르거스 II 같은 기존 장치는 망막의 일부 기능이 남아 있어야 작동할 수 있기 때문입니다. 블라인드사이트는 이 한계를 뛰어넘습니다. 눈을 완전히 건너뛰고 뇌의 후두엽에 직접 접속합니다. 카메라가 눈을 대신하고, 컴퓨터가 시신경을 대신하며, 임플란트가 뇌세포를 직접 자극합니다.

2025년 초, 머스크는 위스콘신 타운홀 행사에서 청중의 질문에 답하며 구체적인 일정을 언급했습니다. "6개월에서 12개월 안에 첫 번째 인간 환자에게 시각 임플란트를 이식할 것입니다." 그의 말대로라면 2025년 말이나 2026년 초에 역사적인 수술이 이루어집니다. 태어날 때부터 앞을 보지 못했던 사람이 생애 처음으로 빛을 인식하는 순간. 그것은 성경에나 나올 법한 기적의 장면을 공학의 힘으로 재현하는 것입니다.

회의론자들의 경고도 있습니다. 뇌가 인공적인 전기 신호를 해석하여 의미 있는 형태로 인식하는 과정은 극도로 험난합니다. 선천적 맹인의 경우 시각 피질이 한 번도 시각 정보를 처리해 본 적이 없습니다. 그 영역은 이미 청각이나 촉각을 처리하도록 재배선되었을 가능성이 큽니다. 전기 자극을 주었을 때 뇌가 그것을 빛으로 해석할지, 아니면 의미 없는 잡음으로 처리할지 아무도 장담할 수 없습니다. FDA의 지정은 이 도전이 과학적으로 타당한 궤도에 올라섰음을 인정한 것입니다. 그러나 결승선은 아직 멀리 있습니다.

블라인드사이트 프로젝트가 던지는 질문은 기술적인 것만이 아닙니다. 만약 이 기술이 성공한다면, 우리는 본다는 것의 정의를 다시 써야 할지도 모릅니다. 망막이 받아들이고 시신경이 전달하는 것만이 시각인가요. 아니면 뇌가 어떤 경로로든 광학적 정보를 처리하면 그것도 시각인가요. 태어날 때부터 빛을 모르던 사람이 처음 보는 세상은 우리가 보는 세상과 같은 것일까요. 아니면 완전히 새로운 종류의 지각일까요. 이 질문들에 대한 답은 아직 없습니다. 답을 찾기 위해서는 먼저 눈을 뜨는 사람들이 있어야 합니다.

나. 시각 피질 자극을 통한 인공 시각의 원리

1929년, 독일의 신경과학자 오프리트 뢰르스터는 놀라운 발견을 했습니다. 뇌 수술 중에 환자의 후두엽을 전기적으로 자극했더니, 환자가 눈을 감고 있는데도 빛의 점이 보인다고 말한 것입니다. 그는 이 현상에 인광(phosphene)이라는 이름을 붙였습니다. 그 순간부터 과학자들은 질문하기 시작했습니다. 만약 전기로 빛의 점을 만들 수 있다면, 충분히 많은 점을 만들어 그림을 그릴 수는 없을까.

인광의 원리는 단순합니다. 시각 피질의 뉴런은 망막에서 전달된 전기 신호를 받아 빛으로 해석하도록 진화했습니다. 중요한 것은 뉴런이 신호의 출처를 구별하지 못한다는 사실입니다. 망막에서 온 신호든 전극에서 온 신호든, 적절한 강도와 패턴의 전기 자극이 뉴런에 도달하면 뇌는 그것을 빛으로 인식합니다. 마치 피아노 건반을 누르면 해머가 현을 때려 소리가 나듯이, 전극이 뉴런을 자극하면 빛의 점이 나타납니다.

1960년대와 1970년대에 이 원리를 이용한 시각 보철 연구가 본격적으로 시작되었습니다. 영국의 자일스 브린들리와 미국의 윌리엄 도벨이 선구적인 실험을 수행했습니다. 브린들리는 1968년에 52세의 실명 여성 환자의 시각 피질에 80개의 전극을 이식했습니다. 환자는 개별 전극이 자극될 때마다 시야의 특정 위치에서 빛의 점을 보았습니다. 도벨은 이 연구를 발전시켜 64채널 시스템으로 환자가 15센티미터 크기의 글자를 1.5미터 거리에서 인식하게 하는데 성공했습니다. 이것은 시각 보철의 가능성을 증명한 역사적인 성과였습니다.

그러나 이 초기 시도들은 근본적인 한계에 부딪혔습니다. 전극의 수가 너무 적었습니다. 80개의 전극으로는 80개의 점만 만들 수 있습니다. 이것은 8x10 픽셀의 디스플레이와 같습니다. 오늘날 스마트폰 화면이 수백만 픽셀을 제공한다는 점을 생각하면, 당시 기술로 만들 수 있는 이미지가 얼마나 조악했는지 짐작할 수 있습니다. 또한 표면 전극은 많은 전류를 필요로 했고, 장시간 자극하면 조직 손상의 위험이 있었습니다. 수술 자체도 위험했습니다. 뇌를 여는 대수술이었고, 감염과 출혈의 위험이 컸습니다.

뉴럴링크의 블라인드사이트는 이 역사 위에 서 있습니다. 반세기 동안 축적된 신경과학 지식과 21세기의 마이크로공학 기술이 결합되었습니다. 가장 큰 차이점은 전극의 수입니다. 뉴럴링크의 N1 칩은 1,024개 이상의 전극을 품고 있습니다. 시각 복원용으로 개발 중인 S2 칩은 1,600개 이상의 채널을 제공할 것으로 예상됩니다. 이것은 브린들리 시대의 20배에 달하는 해상도입니다.

전극의 설계도 달라졌습니다. 머리카락보다 가는 유연한 전극 실이 뇌 조직의 깊은 곳까지 침투합니다. 시각 피질은 뇌의 뒤쪽 표면에만 있는 것이 아닙니다. 대부분의 시각 처리 영역은 조거 열이라 불리는 깊은 틈새 안쪽에 숨어 있습니다. 우리가 보는 시야의 중심부를 담당하는 뉴런은 뇌 표면에 있지만, 주변 시야를 담당하는 뉴런은 이 틈새 안에 있습니다. 기존의

표면 전극으로는 이 영역에 접근할 수 없었습니다. 뉴럴링크의 로봇 R1은 이 전극 실을 정밀하게 삽입하여 깊은 피질 영역까지 도달할 수 있습니다.

시스템의 작동 과정을 따라가 보겠습니다. 환자는 카메라가 내장된 특수 안경을 착용합니다. 카메라가 주변 환경을 촬영합니다. 이 영상 데이터는 허리춤의 소형 컴퓨터로 전송됩니다. 컴퓨터는 복잡한 영상에서 가장 중요한 정보만 추출합니다. 윤곽선, 경계, 장애물의 위치. 이 정보는 전기 자극 패턴으로 변환되어 무선으로 두개골 속의 임플란트에 전달됩니다. 임플란트는 수천 개의 전극을 통해 시각 피질의 뉴런들을 자극합니다. 뇌는 이 자극을 빛의 점들로 인식합니다. 점들이 모여 선이 되고, 선들이 모여 형태가 됩니다.

2020년에 발표된 베일러 의대의 연구는 이 과정에서 중요한 돌파구를 제시했습니다. 다니엘 요셔 연구팀은 정적인 자극 대신 동적인 자극을 사용했습니다. 여러 전극을 동시에 자극하는 대신, 전극들을 순차적으로 자극하여 선을 그리듯이 형태를 만들었습니다. 마치 손가락으로 등에 글자를 쓰면 그 글자를 읽을 수 있는 것처럼, 뇌에 움직이는 자극을 주면 정지된 점들보다 더 쉽게 형태를 인식합니다. 이 방법으로 맹인 참가자들은 분당 86개의 형태를 인식할 수 있었습니다.

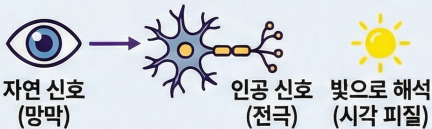
뇌에 직접 그리는 빛: 시각 보철의 원리와 미래

뇌의 시각 피질을 전기적으로 자극하여 실명한 사람에게 시력을 되찾아주는 기술의 핵심 원리



1. 인광(Phosphene): 뇌가 보는 인공의 빛

1929년 피로스터는 뇌 후두엽을 전기 자극하면 눈을 감아도 빛의 점이 보인다는 사실을 발견했습니다.



2. 뉴런은 신호의 출처를 가리지 않는다

망막이든 전극이든, 적절한 전기 자극이 시각 피질 뉴런에 도달하면 뇌는 이를 빛으로 해석합니다.



3. 전극으로 글자를 읽는 역사적 성공

64채널 시스템을 통해 1.5미터 거리에서 15센티미터 크기의 글자를 인식하는 데 성공하며 가능성을 증명했습니다.



4. 인공 시각은 새로운 언어를 배우는 과정

시를 통한 최적화와 함께, 뇌가 기계에 적응하기 위한 장기적인 재활 훈련이 필수적입니다.

그러나 가장 큰 도전은 기술적인 것이 아닙니다. 그것은 뇌의 적응입니다. 태어날 때부터 앞을 보지 못한 사람의 뇌는 시각 정보를 처리해 본 경험이 없습니다. 그 영역은 비어 있는 것이 아니라 다른 감각을 위해 재활용되었습니다. 청각이나 촉각을 더 정밀하게 처리하는 데 쓰이

고 있을 수 있습니다. 이런 뇌에 시각 자극을 주었을 때 뇌가 그것을 빛으로 해석할지, 소리로 해석할지, 아니면 전혀 새로운 감각으로 경험할지 아무도 모릅니다.

뉴럴링크 팀은 인공지능으로 해결하려 합니다. 환자의 뇌가 어떤 자극 패턴에 어떻게 반응하는지를 학습하고, 개인별로 최적화된 자극 전략을 개발합니다. 기계가 뇌에 적응하는 동시에 뇌가 기계에 적응하는 상호작용 과정입니다. 이것은 몇 주나 몇 달이 아니라 몇 년이 걸릴 수 있는 장기적인 재활 과정입니다. 인공 시각은 스위치를 켜듯이 얻어지는 것이 아닙니다. 그것은 새로운 언어를 배우는 것처럼 천천히, 고통스럽게 습득해야 하는 능력입니다.

인공 시각의 원리는 결국 하나의 철학적 질문으로 귀결됩니다. 본다는 것은 무엇인가. 카메라가 촬영하고 컴퓨터가 처리하고 전극이 자극하여 뇌가 인식하는 것도 봄인가. 이 질문에 대한 답은 첫 번째 블라인드사이트 환자가 눈을 뜨는 순간에도 얻어지지 않을 것입니다. 그 사람만이 자신이 경험하는 것이 무엇인지 알 것이고, 그조차도 그것을 우리에게 온전히 전달할 수 없을 것입니다. 언어는 우리가 공유하는 경험을 바탕으로 만들어졌기 때문입니다. 전혀 새로운 종류의 경험을 위한 언어는 아직 존재하지 않습니다.

다. 콘보이(Convoy): 로봇 팔 제어와 운동 기능 복원

2025년 1월의 어느 날, 뉴럴링크의 엑스 계정에 30초짜리 영상이 올라왔습니다. 화면에는 화이트보드 앞에 선 로봇 팔이 있었습니다. 로봇 팔이 마커를 들고 천천히 움직이기 시작했습니다. 한 획, 두 획, 세 획. 글자가 나타났습니다. C-O-N-V-O-Y. 영상에는 설명이 없었습니다. 이모지 세 개만 덧붙여졌습니다. 하트, 로봇 팔, 펜. 하지만 기술 커뮤니티는 즉시 그 의미를 알아차렸습니다. 누군가가 생각만으로 로봇 팔을 움직여 글자를 쓴 것입니다.

콘보이(Convoy)는 호송하다, 함께 가다라는 뜻을 가진 단어입니다. 뉴럴링크가 이 이름을 새로운 임상 시험 프로젝트에 붙인 것은 의미심장합니다. 텔레파시 프로젝트가 디지털 세계를 제어하는 것이었다면, 콘보이는 물리적 세계를 제어하는 것입니다. 화면 속의 커서를 움직이는 것에서 나아가, 현실 세계의 물건을 집어 들고, 문을 열고, 컵을 입으로 가져가는 것. 사지마비 환자들에게 이것은 존엄한 일상의 회복입니다.

프로젝트의 시작은 2024년 11월이었습니다. 뉴럴링크는 FDA로부터 새로운 타당성 연구의 승인을 받았다고 발표했습니다. 기존의 PRIME 스터디 참가자들이 교차 등록하여 N1 임플란트로 보조 로봇 팔을 제어하는 능력을 평가하는 연구였습니다. 뉴럴링크는 이것이 디지털 자유뿐 아니라 물리적 자유를 회복하는 중요한 첫걸음이라고 설명했습니다.

로봇 팔 제어가 마우스 커서 제어와 어떻게 다른지를 이해하려면 자유도(degrees of freedom)라는 개념을 알아야 합니다. 마우스 커서는 2차원 평면 위에서 움직입니다. X축과 Y축, 두 개의 방향만 있습니다. 로봇 팔은 3차원 공간에서 움직입니다. 여기에 손목의 회전, 손가락의 움직임, 쥐는 힘의 조절까지 더해집니다. 인간의 팔은 7개 이상의 자유도를 가집니다. 이 모든 것을 동시에 제어하려면 뇌에서 훨씬 더 복잡한 신호를 읽어내야 합니다.

2025년 10월, 닉 웨이(Nick Wray)라는 이름의 참가자가 콘보이 스터디에서 놀라운 성과를 보여주었습니다. 루게릭병(ALS)으로 사지가 마비된 그는 뉴럴링크의 8번째 임플란트 수령자였습니다. 사흘 연속 8시간씩 훈련 세션을 진행한 그는 로봇 팔을 자신의 팔처럼 움직이기 시작했습니다. 컵을 집어 입으로 가져와 물을 마셨습니다. 뇌졸중 환자용 손재주 검사에서 5분 동안 39개의 원기둥을 테이블 위로 옮겼습니다. 또 다른 검사에서는 퍼즐 조각 5개를 뒤집었습니다. 그는 자신의 경험을 인생에서 가장 놀라운 일 중 하나라고 표현했습니다.

로봇 팔 제어의 원리는 텔레파시 프로젝트의 연장선에 있습니다. N1 칩은 운동 피질에서 발생하는 뉴런의 발화 패턴을 기록합니다. 환자가 팔을 뻗으려고 생각할 때, 손가락을 오므리려고 생각할 때, 특정 패턴의 전기 신호가 발생합니다. 비록 척수 손상으로 실제 팔은 움직이지 않지만, 뇌의 운동 계획은 여전히 만들어집니다. 인공지능 알고리즘이 이 패턴을 실시간으로 해독하여 로봇 팔에 명령을 전달합니다.

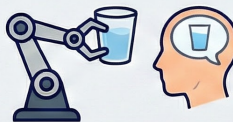
여기서 중요한 것은 디코딩 알고리즘의 학습입니다. 처음에 컴퓨터는 뇌 신호의 의미를 모릅니다. 환자가 특정 동작을 상상하고, 그때 발생하는 신경 신호를 기록하는 과정을 수백, 수천

번 반복합니다. 컴퓨터는 이 데이터에서 패턴을 찾아냅니다. 팔을 앞으로 뻗을 때의 패턴, 오른쪽으로 움직일 때의 패턴, 손을 쥘 때의 패턴. 시간이 지나면서 알고리즘은 점점 더 정확해지고, 환자는 점점 더 자연스럽게 로봇 팔을 조종할 수 있게 됩니다.

생각만으로 움직이는 로봇 팔: 뉴럴링크의 혁신

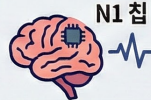
뇌 신호를 로봇 팔의 움직임으로 바꾸는 과정과 미래 과제

1. 마비된 환자가 스스로 물을 마시다



닉 웨이는 이식 사출 만에 로봇 팔로 컵을 집어 물을 마시는데 성공했습니다.

2. 뇌 신호를 읽는 실시간 디코딩



운동 피질의 뉴런 발화 패턴 기록



AI 해독 및 로봇 전달

N1 칩이 운동 피질의 뉴런 발화 패턴을 기록하고 AI가 이를 해독해 독해해 로봇에 전달합니다.

3. 반복 훈련을 통한 정교한 제어



상상 & 신호 데이터 반복 학습



환자의 상상과 신경 신호 데이터를 반복 학습하며 알고리즘의 정확도를 높입니다.

4. 한계: 느껴지지 않는 손끝의 감각



현재는 감각 피드백이 없어 컵이 찌그러지지 않게 힘을 조절하는 것이 어렵습니다.

5. 미래: 양방향 BCI로 되찾는 촉감



센서의 정보를 감각 피질로 되돌려 로봇 팔을 진짜 내 팔처럼 느끼게 할 계획입니다.

그러나 로봇 팔 제어에는 결정적인 요소가 빠져 있습니다. 감각 피드백입니다. 우리가 컵을 집을 때 컵이 찌그러지지 않도록 힘을 조절할 수 있는 것은 손끝에서 느껴지는 압력 덕분입니다. 감각 없이 로봇 팔을 조종하는 것은 마취된 손으로 피아노를 치는 것과 같습니다. 건반을 누르는 것은 가능하지만 썸여림을 조절하는 것은 불가능합니다.

뉴럴링크는 이 문제를 해결하기 위해 양방향 BCI를 개발하고 있습니다. 로봇 손끝에 압력 센서를 달고, 센서가 감지한 정보를 뇌의 감각 피질로 되돌려 보내는 것입니다. 환자가 로봇 팔로 무언가를 집으면, 그 촉감을 전기 자극으로 변환하여 뇌에 전달합니다. 아직 초기 단계이지만, 이것이 성공하면 환자는 로봇 팔을 자신의 진짜 팔처럼 느끼게 됩니다.

콘보이 프로젝트의 궁극적인 목표는 로봇 팔을 넘어섭니다. 디지털 브리지(Digital Bridge) 기술과의 결합입니다. 뇌의 운동 명령을 무선으로 척수 하부의 자극기에 전송하여, 마비된 환자의 실제 팔다리를 움직이게 하는 것입니다. 스위스 로잔 연방공과대학교의 연구팀은 이미 척수 자극을 통해 마비 환자를 걷게 하는 데 성공했습니다. 뉴럴링크가 뇌와 척수 사이의 끊어진 다리를 무선으로 연결한다면, 휠체어에 앉아 있던 환자가 자신의 다리로 다시 일어설 수 있습니다.

알렉스(Alex)라는 두 번째 PRIME 스터디 참가자의 사례도 주목할 만합니다. 척수 손상으로 목 아래가 마비된 그는 뉴럴링크 칩을 이식받은 후 휠체어에 부착된 로봇 팔로 일상적인 동작을 수행했습니다. 스위치를 켜고 끄고, 문을 열고, 부드러운 프레첼을 집어 먹었습니다. 그는 CAD 소프트웨어로 3D 디자인을 하고 카운터 스트라이크 게임을 즐겼습니다. 이것은 단순한 의료 기술의 진보가 아닙니다. 잃어버린 삶의 주권을 되찾는 과정입니다.

콘보이가 제기하는 질문은 깊습니다. 로봇 팔은 나의 일부인가, 아니면 도구인가. 환자가 로봇 팔을 자신의 팔처럼 느끼기 시작할 때, 그 팔은 의족이나 의수와 같은 보조기구인가, 아니면 확장된 신체인가. 뇌가 직접 제어하고 감각을 되돌려 받는다면, 그 경계는 어디에 있는가. 우리는 인간과 기계의 관계를 다시 정의해야 할지도 모릅니다.

라. 음성 복원 기술의 획기적 의료기기 지정(2025년)

브래드 스미스(Bradford G. Smith)는 루게릭병이 그의 목소리를 앗아가기 전에 많은 말을 남겼습니다. 가족과의 대화, 전화 통화, 유튜브 영상의 내레이션. 그 목소리들은 디지털 파일로 저장되어 있었습니다. 2024년, 그는 뉴럴링크의 세 번째 인간 임상 참가자가 되었습니다. 칩이 그의 두개골에 이식되었을 때, 그는 더 이상 말을 할 수 없었습니다. 몇 달 후, 그는 다시 말하기 시작했습니다. 자신의 목소리로.

2025년 5월, 뉴럴링크는 FDA로부터 음성 복원 기술에 대한 획기적 의료기기 지정을 받았다고 발표했습니다. 이 지정은 루게릭병(ALS), 뇌졸중, 척수 손상, 뇌성마비, 다발성 경화증 등으로 인해 중증 언어 장애를 겪는 환자들을 대상으로 합니다. 블라인드사이트에 이은 두 번째 획기적 의료기기 지정이었습니다. 뉴럴링크는 이제 운동 제어(텔레파시), 시각 복원(블라인드사이트), 음성 복원이라는 세 가지 축을 중심으로 신경 보철의 전체 스펙트럼을 구축하고 있습니다.

음성 복원의 원리를 이해하려면 먼저 말하기가 뇌에서 어떻게 일어나는지 알아야 합니다. 우리가 말을 할 때, 브로카 영역이라 불리는 뇌의 언어 중추가 말할 내용을 계획합니다. 그 계획은 운동 피질로 전달되어 입술, 혀, 턱, 성대를 움직이는 정교한 명령으로 변환됩니다. 매 순간 수십 개의 근육이 정밀하게 협응하여 우리가 원하는 소리를 만들어냅니다. 분당 150단어 이상의 속도로.

루게릭병 환자의 경우, 운동 뉴런이 서서히 죽어갑니다. 근육을 움직이는 신경의 연결이 끊어집니다. 그러나 브로카 영역과 운동 피질은 여전히 기능합니다. 환자가 안녕하세요라고 말하려 할 때, 뇌는 여전히 그에 필요한 모든 운동 계획을 만들어냅니다. 다만 그 계획이 근육에 전달되지 않을 뿐입니다. 뉴럴링크의 음성 복원 기술은 이 끊어진 연결을 우회합니다. 뇌에서 말하기 계획을 직접 읽어내어 외부 장치로 출력합니다.

기존의 보조 의사소통 장치들은 눈동자 추적이나 근육 신호에 의존했습니다. 스티븐 호킹 박사가 사용했던 시스템이 대표적입니다. 환자는 눈동자를 움직여 화면의 글자를 하나씩 선택합니다. 이 방식은 느립니다. 분당 10단어에서 30단어 정도. 자연스러운 대화는 불가능합니다. 기다림과 인내의 소통입니다. 상대방은 환자가 한 문장을 완성할 때까지 조용히 기다려야 합니다. 농담을 주고받거나 즉흥적인 대화를 나누는 것은 꿈도 꿀 수 없습니다.

뇌-컴퓨터 인터페이스는 이 속도의 벽을 무너뜨릴 잠재력이 있습니다. 뇌에서 직접 언어 신호를 읽어내면 눈동자를 움직이거나 근육을 수축시키는 중간 단계가 필요 없습니다. 스탠퍼드 대학교와 UC 데이비스의 연구팀은 이미 뇌 신호를 분당 62단어에서 78단어 수준으로 해독하는 데 성공했습니다. 이것은 자연스러운 대화 속도에 근접합니다. 뉴럴링크는 1,024개 이상의 고밀도 채널을 활용하여 이 속도를 더욱 높이려 합니다.

브래드 스미스의 사례는 이 기술이 어디까지 발전했는지를 보여줍니다. 그의 두개골에서 머리카락 굵기의 전극 실들이 뇌 조직 속으로 뻗어 있습니다. 1,024개의 전극이 뉴런의 활동을 실시간으로 기록합니다. 인공지능 알고리즘이 이 신호를 해석합니다. 그가 말하려 할 때 발생하는 신경 패턴을 텍스트로 변환합니다. 여기까지는 다른 연구팀도 도달한 수준입니다.


뉴럴링크가 한 걸음 더 나아간 것은 음성 합성 기술과의 결합입니다. 브래드가 건강했을 때 남긴 음성 녹음들을 인공지능에 학습시켰습니다. 그의 억양, 톤, 말하는 습관. AI는 이 데이터를 바탕으로 브래드의 목소리를 재현합니다. 뇌에서 해독된 텍스트가 합성 음성 엔진에 입력되면, 출력되는 것은 기계적인 로봇 목소리가 아닙니다. 브래드 자신의 목소리입니다.

그는 이 기술로 유튜브 영상의 내레이션을 녹음했습니다. 가족과 농담을 주고받았습니다. 머스크가 공개한 영상에서 그는 아이들과 마리오 카트 게임을 했습니다. 뉴럴링크의 공동 창업자 DJ 서는 그 순간이 믿을 수 없이 감동적이었다고 회상했습니다. 기술이 사람의 정체성을 되돌려준 순간이었습니다.

뉴럴링크 음성 복원 기술: 침묵 속의 목소리를 깨우다

2025년 5월, FDA로부터 획기적 의료기기 지정을 받은 이 기술은 뇌 신호를 직접 해독하여, 언어 능력을 상실한 환자가 고유의 목소리로 소통할 수 있게 돕는 혁신적인 솔루션입니다.

1,024개 채널의 뇌 신호 수집
머리카락보다 가는 전극 실이 운동 피질의 신경 활동을 실시간으로 기록합니다.




손상된 신경계

신경망 우회 및 직접 해독
손상된 신경계 대신 뇌의 언어 계획을 직접 읽어 외부 장치로 전달합니다.

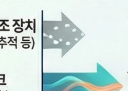
환자 고유의 음성 합성
AI가 환자의 과거 음성 데이터를 학습하여 본인만의 목소리 톤을 재현합니다.

혁신적 가치: 소통의 속도와 정체성

자연스러운 대화 속도 구현
분당 70단어 이상의 해독이 가능합니다.

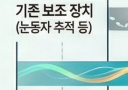


기존 보조 장치 (눈동자 추적 등)
10-30 단어 (WPM)




뉴럴링크 (BCI 기술) → **78 단어 이상 (WPM)**
뇌 신호 직접 해독 및 AI 합성


기존 보조 장치 (눈동자 추적 등)
10-30 단어 (WPM)



정체성의 회복
기계적인 로봇 음성이 아닌 환자 자신의 목소리로 가족과 대화할 수 있습니다.



뉴럴링크 (BCI 기술) → **78 단어 이상 (WPM)**
뇌 신호 직접 해독 및 AI 합성



FDA 획기적 의료기기 지정
기술의 임상적 효과와 잠재력을 규제 당국으로부터 공식 인정받았습니다.

음성 복원 기술에 대한 FDA의 획기적 의료기기 지정은 이 분야의 전환점입니다. 지정은 기술이 임상적으로 유의미한 효과를 가져올 가능성이 있다는 규제 당국의 인정입니다. 물론 여전히 갈 길이 멀다. 해독 정확도를 높여야 합니다. 오류율을 낮춰야 합니다. 장기간 사용의 안

정성을 검증해야 합니다. 모든 환자에게 똑같이 작동하지 않을 수 있습니다. 뇌는 사람마다 다르고, 질병의 진행 정도도 다릅니다.

그러나 방향은 분명합니다. 언젠가 침묵 속에 갇힌 사람들이 다시 말하게 될 것입니다. 자신의 목소리로. 머스크는 이것이 언어의 종말이 아니라 진화라고 말할지도 모릅니다. 생각하는 즉시 말이 되어 나오는 세상. 더 나아가 입을 움직이려는 의도조차 거치지 않고 순수한 생각을 타인에게 전달하는 단계. 개념적 텔레파시의 시대. 그것은 아직 먼 미래입니다.

지금 당장 중요한 것은 병상의 환자입니다. 사랑하는 가족의 이름을 부르고 싶지만 부를 수 없는 사람. 고맙다고, 미안하다고, 사랑한다고 말하고 싶지만 말할 수 없는 사람. 그들에게 음성 복원 기술은 영혼이 갇힌 감옥의 문을 여는 열쇠입니다. 뇌와 기계의 접속은 침묵의 벽을 허물고, 잃어버린 목소리의 울림을 세상에 되돌려주고 있습니다. FDA의 획기적 의료기기 지정은 그 울림이 더 많은 사람들에게 가닿을 수 있다는 희망의 표식입니다.

제3부. 춘추전국시대: BCI 경쟁자들과 기술 다양성

9 혈관을 타고 뇌로 간다: 싱크론(Synchron)

가. 개두술 없는 스텐트로드(Stentrode) 기술의 혁신

2007년 어느 날, 호주 멜버른의 젊은 신경과 전문의 톰 옥슬리(Tom Oxley)는 뇌졸중 환자의 뇌혈관에 카테터를 밀어 넣으며 문득 생각에 잠겼습니다. 그의 손에는 혈전을 제거하기 위한 가느다란 관이 들려 있었습니다. 매일같이 그는 사람의 사타구니 혈관을 통해 뇌 깊숙한 곳까지 도구를 집어넣고 있었습니다. 두개골을 열지 않고도 말입니다. 그는 생각했습니다. 만약 혈관을 통해 핏덩어리를 끄집어낼 수 있다면, 반대로 무언가를 남겨둘 수도 있지 않을까. 센서를 두고 올 수는 없을까.

이 단순한 질문이 뇌-컴퓨터 인터페이스의 역사를 두 갈래로 갈라놓았습니다.

옥슬리는 모나시 대학에서 의학을 공부하고 멜버른 대학에서 신경공학 박사 학위를 받은 사람이었습니다. 그의 전문 분야는 뇌혈관 중재술이었습니다. 뇌졸중이 발생하면 혈관 속으로 카테터를 밀어 넣어 막힌 혈전을 제거하는 시술입니다. 그는 경력 동안 1,600건이 넘는 뇌혈관 시술을 수행했습니다. 뇌의 혈관 지도를 손바닥처럼 알고 있었습니다. 그리고 바로 이 경험이 그에게 다른 연구자들이 보지 못한 길을 보여주었습니다.

당시 뇌-컴퓨터 인터페이스 분야의 정석은 분명했습니다. 두개골을 열고 뇌 조직에 전극을 꽂는 것이었습니다. 2004년 브레인게이트가 처음 인간의 뇌에 유타 어레이를 이식했을 때, 그것은 경이로운 성취였습니다. 그러나 동시에 명백한 한계도 있었습니다. 개두술은 감염, 출혈, 뇌 손상의 위험을 동반했습니다. 환자는 몇 주간 병원에 머물러야 했습니다. 세계에서 이 수술을 할 수 있는 신경외과의는 손에 꼽을 정도였습니다. 아무리 기술이 발전해도, 두개골이라는 장벽 앞에서 BCI는 극소수를 위한 최후의 선택지로 남을 수밖에 없었습니다.

옥슬리는 다른 길을 상상했습니다. 뇌의 성벽을 부수지 않고 이미 열려 있는 문을 찾는 것이었습니다. 인간의 몸에는 10만 킬로미터에 달하는 혈관이라는 고속도로가 있었습니다. 심장 스텐트는 이미 수십 년 전부터 이 고속도로를 타고 심장까지 들어가고 있었습니다. 옥슬리의 아이디어는 단순했습니다. 스텐트 위에 전극을 올리면 어떨까. 혈관을 따라 뇌까지 올라간 뒤, 그곳에 센서를 펼쳐두면 어떨까.

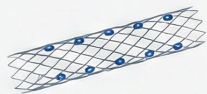
그렇게 탄생한 것이 스텐트로드(Stentrode)입니다. 스텐트(Stent)와 전극(Electrode)의 합성어입니다. 이 장치는 형상기억합금인 니티놀(Nitinol)로 만들어진 그물망 형태를 하고 있습니다. 그물망 위에는 16개의 백금-텅스텐 전극이 촘촘히 붙어 있습니다. 수술대 위에서 이 그물망은 성냥개비만 한 튜브 속에 접혀 있습니다. 의사가 환자의 목에 있는 경정맥에 작은 구멍을 내고 카테터를 밀어 넣습니다. 카테터는 혈관을 따라 뇌를 향해 올라갑니다. 목표 지점은 운동 피질 바로 위를 지나가는 상시상 정맥동(Superior Sagittal Sinus)입니다. 카테터가 목표

위치에 도달하면 튜브가 열리고 스텐트로드가 꽃처럼 피어납니다. 그물망은 혈관 벽에 부드럽게 밀착됩니다.

바로 이 순간부터 마법이 시작됩니다. 뇌 세포가 '손을 움직여라'라고 신호를 보낼 때, 그 전기적 속삭임은 얇은 혈관 벽을 통과해 스텐트로드의 센서에 잡힙니다. 뇌를 찌르지 않습니다. 피를 흘리지도 않습니다. 시간이 지나면 혈관 내피세포가 그물망 위로 자라나 장치를 완전히 덮어버립니다. 스텐트로드는 몸의 일부가 되어 혈관 벽 속에 통합됩니다. 면역 거부 반응이라는 BCI의 오랜 난제가 인체 자신의 치유력에 의해 해결되는 것입니다.

수집된 뇌 신호는 아주 가는 전선을 통해 쇠골 아래 피부에 심어진 송수신기로 전달됩니다. 이 송수신기는 무선으로 외부 컴퓨터나 스마트폰에 데이터를 보냅니다. 심장 박동기와 비슷한 구조입니다. 시술 시간은 평균 20분 남짓입니다. 환자는 대개 하루 만에 퇴원합니다. 이 모든 과정에서 두개골을 뚫거나 뇌 조직을 직접 건드리는 행위는 전혀 발생하지 않습니다.

뇌를 열지 않는 혁신, 혈관으로 연결하는 BCI '스텐트로드'



스텐트(Stent)와 전극(Electrode)의 만남

형상기억합금 그물망에 16개의 전극을 입혀 혈관 내부에 설치하는 장치입니다.



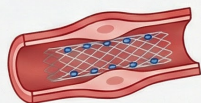
두개골 절개 없는 20분간의 시술

목의 경정맥을 통해 카테터를 삽입하여 뇌의 운동 피질 근처 혈관까지 이동합니다.



1일 이내 퇴원 가능한 압도적 회복 속도

평균 20분 내외의 짧은 시술로 뇌 손상이나 출혈 위험을 획기적으로 줄였습니다.



혈관벽에 통합되는 자연스러운 연결

시간이 흐르면 혈관 세포가 장치를 덮어 면역 거부 반응 없이 몸의 일부가 됩니다.

물론 이 선택에는 대가가 있습니다. 혈관 벽 너머에서 읽는 신호는 뇌 조직에 직접 꽂힌 전극 만큼 선명하지 않습니다. 스텐트로드는 개별 뉴런의 발화를 측정하는 초고해상도 장치가 아닙니다. 대신 수천 개의 뉴런이 동시에 활동할 때 발생하는 집단적인 신호, 국소장전위(Local Field Potential)를 측정합니다. 해상도는 낮지만, 환자가 '주먹을 쥐어라' 또는 '발을 움직여라'와 같은 굵직한 운동 의도를 가질 때 발생하는 신호 패턴을 잡아내기에는 충분합니다.

옥슬리는 이 타협을 의도적으로 선택했습니다. 완벽한 손보다 말과 선택을 먼저 되찾는 것이 더 절박한 환자들이 있었기 때문입니다. 그는 싱크론의 전략을 이렇게 설명하곤 했습니다. "우리는 가장 성능이 좋은 페라리를 만드는 것이 아닙니다. 누구나 안전하게 탈 수 있는 토요타를 만드는 것입니다." 최고의 성능을 가진 기술이 아니라, 가장 안전하고 편안한 기술이 결국 승리한다는 믿음이었습니다. 혈관이라는 인체의 고속도로를 이용함으로써, 옥슬리는 BCI가 최후의 수단이 아닌 선택 가능한 옵션이 될 수 있는 길을 열었습니다.

나. 저침습성의 강점: 개두술 공포 없이 대중 수용성을 높인다

"당신의 두개골에 구멍을 뚫어야 합니다."

이 말을 듣고 선뜻 고개를 끄덕일 사람은 많지 않습니다. 아무리 그 기술이 기적을 약속한다 해도 말입니다. 인간에게는 뇌를 침범당하는 것에 대한 본능적인 공포가 있습니다. 두개골은 나의 자아, 나의 기억, 나의 꿈이 깃든 성소이기 때문입니다. 싱크론의 가장 강력한 무기는 바로 이 공포의 부재입니다.

싱크론의 기술은 뇌수술이 아닙니다. 그것은 시술입니다. 심장 스텐트 시술처럼 두 시간이면 끝납니다. 환자는 전신 마취 없이 진정제만 맞은 상태에서 의사와 대화를 나눌 수도 있습니다. 시술이 끝나면 목에 작은 반창고 하나를 붙이고 하루 만에 집으로 돌아갑니다. 감염 위험은 극적으로 낮아지고, 회복 기간은 며칠에 불과합니다. 이것은 BCI를 최후의 수단에서 선택 가능한 의료 옵션으로 바꾸어 놓았습니다.

이러한 저침습성은 규제 승인 과정에서 싱크론에게 결정적인 우위를 가져다주었습니다. 2020년 8월, 싱크론은 미국 FDA로부터 획기적 의료기기(Breakthrough Device) 지정을 받았습니다. 그리고 2021년 7월, 영구 이식형 BCI로는 최초로 FDA의 임상시험용 기기(IDE) 승인을 받았습니다. 이는 뉴럴링크보다 약 2년이나 앞선 성과였습니다. FDA는 싱크론의 장치가 뇌 조직을 직접 침범하지 않기 때문에 장기적인 안전성 면에서 리스크가 낮다고 판단했습니다.

호주에서 진행된 SWITCH 임상시험의 결과는 이러한 판단을 뒷받침했습니다. 2019년부터 2022년까지 4명의 루게릭병(ALS) 환자에게 스텐트로드가 이식되었습니다. 12개월 추적 관찰 결과, 장치와 관련된 심각한 부작용은 한 건도 발생하지 않았습니다. 뇌졸중도, 출혈도, 영구적 장애도 없었습니다. 혈관 내에 설치된 스텐트는 이동하지 않았고, 혈류를 막지도 않았으며, 신호 품질 또한 안정적으로 유지되었습니다.

미국에서 진행된 COMMAND 임상시험의 결과는 더욱 인상적이었습니다. 2024년 10월 발표된 12개월 데이터에 따르면, 6명의 환자 모두가 일차 종료점인 '사망이나 영구적 장애를 초래하는 장치 관련 심각한 부작용 없음'을 달성했습니다. 100퍼센트의 환자에서 스텐트로드가 목표한 운동 피질 위치에 정확하게 배치되었습니다. 뇌 신호는 일관되게 포착되어 디지털 동작으로 변환되었고, 환자들은 다양한 디지털 작업을 성공적으로 수행했습니다.

이 시험의 공동 수석 연구자인 엘라드 레비(Elad Levy) 박사는 결과 발표에서 이렇게 말했습니다. "COMMAND 연구 결과는 주요한 의학적 이정표입니다. 스텐트로드 BCI의 안전성이 확인되었고, 12개월 연구 기간 동안 신경학적 안전 사건이 보고되지 않았습니다. 이 최소 침습적 접근법은 마비 환자 수백만 명을 위해 BCI 기술을 대규모로 활용할 수 있는 잠재력을 가지고 있습니다."

저침습성이 대중 수용성을 끌어올리는 또 다른 이유는 확장 가능한 의료 모델 때문입니다. 뉴럴링크처럼 두개골을 열고 전극을 삽입하는 방식은 고난도 신경외과 수술을 전제로 합니다. 전 세계에서 이런 수술을 할 수 있는 의료진은 극소수입니다. 반면 싱크론의 방식은 혈관 중재 시술이 가능한 일반적인 혈관조영실에서도 수행할 수 있습니다. 심장 스텐트를 삽입하는 데 사용되는 것과 같은 시설과 장비입니다. 전 세계적으로 신경외과 전문의보다 혈관 중재 시술을 할 수 있는 의사가 훨씬 많습니다. 이는 의료 인프라 측면에서 확장성이 훨씬 뛰어나다는 것을 의미합니다.

물론 저침습이라고 해서 무위험은 아닙니다. 혈관 내 스텐트가 들어가는 만큼 혈전 위험, 항혈소판제 복용, 혈관 손상 가능성 같은 일반적인 스텐트 시술의 리스크가 따라옵니다. 하지만 이것은 개두술의 리스크와 성격이 다릅니다. 의료 현장이 이미 관리 경험과 프로토콜을 갖춘 범주에 가깝습니다. 완전히 새로운 위험보다 관리 가능한 위험이 확산을 가능하게 합니다. 인간 사회는 낯선 것을 두려워하도록 설계되어 있기 때문입니다.

의료 기기의 역사는 이 교훈을 여러 번 가르쳐주었습니다. 심장 박동기가 처음 등장했을 때는 가슴을 여는 대수술이 필요했습니다. 하지만 혈관을 통한 시술이 가능해지자, 그것은 전 세계 수백만 명의 생명을 구하는 표준 치료가 되었습니다. 옥슬리는 BCI도 같은 길을 갈 것이라 확신합니다. 미래에 BCI가 장애 치료를 넘어 일반인의 기기 제어용으로 확장될 때, 건강한 사람이 뇌를 여는 수술을 받기는 어렵겠지만, 스텐트 시술 정도라면 라식 수술처럼 받아들여질 가능성이 있습니다. 혁명이 일상으로 들어오려면 문턱이 낮아져야 합니다. 싱크론은 그 문턱을 제거하려 하고 있습니다.

다. 아이패드, 애플 비전 프로 제어: 실제 환자 사례

2021년 12월 23일, 호주 멜버른에 사는 62세의 필립 오키프(Philip O'Keefe)는 역사적인 메시지를 세상에 보냈습니다.

"hello, world! Short tweet. Monumental progress."

안녕, 세상아! 짧은 트윗이지만 기념비적인 진전이다.

그는 루게릭병(ALS)으로 인해 손가락 하나 움직일 수 없는 상태였습니다. 그러나 그의 메시지는 분명히 트위터에 올라갔습니다. 싱크론 CEO 톰 옥슬리의 계정을 통해서였습니다. 오키프는 이어서 또 다른 트윗을 올렸습니다. "키보드를 칠 필요도, 목소리를 낼 필요도 없었습니다. 나는 이 트윗을 단지 생각만으로 만들었습니다." 그리고 마지막 트윗에서 그는 말했습니다. "내 희망은 사람들이 생각을 통해 트윗할 수 있는 길을 내가 닦고 있다는 것입니다."

이것은 인류 역사상 처음으로 근육을 거치지 않고 오직 뇌에서 인터넷으로 직접 전송된 소셜 미디어 메시지였습니다. 오키프는 2020년 4월에 스텐트로드를 이식받았습니다. 그 이후로 그는 이메일을 쓰고, 은행 업무를 보고, 온라인 쇼핑을 했습니다. 침묵의 감옥에 갇혔던 그가 디지털 세상의 시민권을 되찾은 것이었습니다.

싱크론의 기술이 실험실의 데이터를 넘어 실제 환자의 삶을 어떻게 바꾸어 놓았는지는 구체적인 사례를 통해 가장 잘 드러납니다. 미국 COMMAND 임상시험의 참가자인 마크(Mark)라는 환자의 이야기는 그 가능성을 더욱 생생하게 보여줍니다. 64세의 마크는 루게릭병으로 인해 손을 전혀 쓸 수 없는 상태였습니다. 그러나 싱크론의 BCI를 통해 그는 아이패드를 자유자재로 제어하게 되었습니다.

마크는 생각만으로 홈 화면을 탐색하고, 앱을 열고, 문자를 작성했습니다. 손을 움직이지 않았습니다. 목소리를 내지도 않았습니다. 눈동자 추적 기술조차 사용하지 않았습니다. 오직 뇌의 신호만으로 디지털 기기를 조작했습니다. 그는 아마존 알렉사와 연동하여 집안의 조명을 켜고 끄고, 문을 잠그고 열고, 비디오 전화를 걸었습니다. 간병인에게 의존해야만 했던 일상적인 행위들을 스스로 할 수 있게 된 것이었습니다.

마크는 인터뷰에서 이렇게 말했습니다. "손의 사용을 잃었을 때, 나는 독립성을 잃었다고 생각했습니다. 하지만 이제 아이패드로 사랑하는 사람들에게 메시지를 보내고, 뉴스를 읽고, 세상과 연결될 수 있습니다. 그저 생각만 하면 됩니다. 이것은 내 삶의 일부를 돌려주었습니다."

2024년 7월, 싱크론은 또 하나의 이정표를 세웠습니다. 애플의 공간 컴퓨터인 비전 프로(Vision Pro)를 뇌 신호로 제어하는 데 성공한 것입니다. 비전 프로는 원래 손동작과 시선을 추적하여 작동하도록 설계된 기기입니다. 사용자는 손가락을 집어 클릭 동작을 수행합니다. 그러나 사지 마비 환자는 손동작을 할 수 없습니다. 싱크론은 이 문제를 해결했습니다. 환자는

눈으로 화면의 요소를 바라보고, 뇌의 신호로 선택을 수행했습니다. 눈으로 가리키고, 뇌로 클릭하는 새로운 인터페이스 패턴이었습니다.

마크는 비전 프로를 착용하고 솔리테어 카드 게임을 했습니다. 애플 TV에서 영화를 골랐습니다. 가상의 3D 환경을 탐색했습니다. 손가락 하나 까딱하지 않고도 몰입형 인터페이스를 자유롭게 사용했습니다. 그는 말했습니다. "마치 극장에 온 것 같아요. 다시는 볼 수 없을 거라고 생각했던 곳으로 데려다 줄 수 있어요."

생각만으로 움직이는 세상: 싱크론 BCI



생각이 행동이 되는 기술, 디지털 시민권의 회복

 <p>일상의 디지털 활동 자유화</p> <p>이메일 작성, 온라인 쇼핑, बैं킹 업무를 타인의 도움 없이 스스로 수행합니다.</p>	 <p>생각만으로 제어하는 스마트 홈</p> <p>조명, 현관문 제어 및 비디오 전화 등 일상적인 행위를 뇌 신호로 조작합니다.</p>	 <p>눈으로 가리키고 뇌로 클릭</p> <p>애플 비전 프로와 연동하여 손동작 없이 몰입형 인터페이스를 자유롭게 사용합니다.</p>	 <p>“생각만으로 세상과 연결되다”</p> <p>루게릭병 환자가 아이패드를 통해 사랑하는 이들과 소통하며 독립성을 되찾았습니다.</p>
---	---	---	--

2025년 5월, 애플은 BCI HID(Brain-Computer Interface Human Interface Device)라는 새로운 입력 프로토콜을 발표했습니다. 이것은 뇌 신호를 터치, 음성, 타이핑과 함께 공식적인 입력 방식으로 인정한다는 선언이었습니다. 싱크론은 이 새로운 표준에 최초로 네이티브 통합하는 BCI 기업이 되었습니다. 이제 싱크론의 스텐트로드는 특별한 드라이버나 중간 소프트웨어 없이 아이폰, 아이패드, 비전 프로에 직접 연결됩니다. 블루투스 키보드나 마우스처럼 운영체제가 인식하는 공식 입력 장치가 된 것입니다.

2025년 8월, 싱크론은 마크가 아이패드를 전적으로 생각만으로 제어하는 영상을 최초로 공개했습니다. 그는 홈 화면을 탐색하고, 앱을 열고, 문자를 작성했습니다. 모든 것이 뇌 신호로만 이루어졌습니다. 옥슬리는 이 순간을 두고 말했습니다. "이것은 세계가 처음으로 본 네이티브 뇌 기반 애플 기기 제어입니다. 마크의 경험은 기술적 돌파구이자, 인지적 입력이 주류 제어 방식이 되는 인간-컴퓨터 상호작용의 미래를 보여줍니다."

이 사례들이 중요한 이유는 싱크론의 BCI가 폐쇄적인 전용 소프트웨어가 아니라, 전 세계 수십억 명이 사용하는 범용 운영체제와 직접 호환된다는 점을 증명했기 때문입니다. 싱크론의 환자들은 복잡한 연구용 컴퓨터 대신, 동네 가게에서 살 수 있는 아이패드를 침대에 놓고 넷플릭스를 봅니다. 이것은 BCI가 의료 기기를 넘어 소비자 가전의 영역으로 진입하고 있음을 보여주는 상징적인 장면입니다. 장애인에게 장애인용 기기가 아니라 남들과 똑같은 최신 기기를 쓰게 해주었다는 점에서, 이것은 기술적 성취 이상의 존엄성 회복을 의미합니다.

라. OpenAI 통합과 애플·엔비디아 협력 생태계

싱크론은 이제 뇌과학 회사를 넘어 거대한 플랫폼 기업으로 진화하고 있습니다. 옥슬리는 깨달았습니다. 뇌 신호를 읽는 것만으로는 부족합니다. 읽은 신호로 무엇을 할 수 있느냐가 중요합니다. 이 질문에 대한 답을 찾기 위해 그는 실리콘밸리의 거인들과 손을 잡았습니다.

2024년, 싱크론은 OpenAI의 생성형 AI 모델을 자사의 시스템에 통합했습니다. BCI의 가장 큰 난제 중 하나는 대역폭입니다. 생각만으로 타이핑을 하는 것은 가능하지만, 손으로 치는 것보다 훨씬 느립니다. 글자 하나하나를 선택하는 과정은 에너지가 제한적인 루게릭병 환자에게 큰 피로를 줍니다. 싱크론은 이 문제를 AI로 해결하려 했습니다.

싱크론이 개발한 채팅 인터페이스는 단순히 뇌 신호를 글자로 바꾸는 것을 넘어섭니다. AI가 문맥을 파악하여 환자가 하고 싶어 할 말을 미리 예측하고 제안합니다. 환자가 '안녕'이라고 입력하면, AI는 상황에 맞춰 '오랜만이야, 잘 지냈어?', '오늘 기분은 어때?', '보고 싶었어' 같은 완성된 문장 옵션을 띄워줍니다. 환자는 이 중 하나를 뇌 신호로 클릭하기만 하면 됩니다. 뇌가 1비트의 정보를 보내면, AI가 1킬로바이트의 풍성한 문장으로 확장해 주는 것입니다. 이것은 BCI가 단순한 입력 도구가 아니라 인간의 의도를 증폭시키는 지능형 에이전트로 진화하고 있음을 보여줍니다.

중요한 점은 사용자의 뇌 데이터가 OpenAI와 공유되지 않는다는 것입니다. 싱크론은 이 경계선을 명시적으로 밝혔습니다. BCI는 데이터 프라이버시 논쟁이 폭발하기 쉬운 분야입니다. 기술 데모만큼이나 데이터 경계선을 어떻게 그어두느냐가 신뢰를 좌우합니다.

애플과의 협력은 BCI를 세련된 기술로 만들고 있습니다. 2025년 5월 애플이 BCI HID 프로토콜을 발표했을 때, 싱크론은 첫 번째 네이티브 통합 파트너가 되었습니다. 이것은 단순한 기술적 호환성 이상의 의미를 가집니다. 애플의 생태계 안에 싱크론이 들어감으로써, 환자들은 별도의 학습 없이 아이메시지를 보내고 페이스타임을 합니다. 익숙한 인터페이스에서 새로운 입력 방식을 사용하는 것입니다.

애플의 BCI HID는 양방향 통신을 가능하게 합니다. 아이패드나 비전 프로는 화면의 상태와 UI 요소에 대한 정보를 BCI 디코더와 실시간으로 공유합니다. 디코더는 이 맥락 정보를 활용하여 신호 해석의 정확도를 높입니다. 폐쇄 루프 시스템입니다. 기기가 사용자의 뇌에 정보를 보내고, 뇌가 기기에 명령을 보내는 양방향 대화가 가능해진 것입니다.

엔비디아와의 협력은 연산과 모델의 측면에서 결정적입니다. 2025년 1월, 싱크론은 JP모건 헬스케어 컨퍼런스에서 엔비디아의 홀로스캔(Holoscan) 플랫폼을 활용한 협력을 발표했습니다. 홀로스캔은 실시간 엣지 AI 처리를 위한 플랫폼입니다. BCI가 실시간으로 작동하려면 뇌에서 나오는 신호를 지연 없이 처리해야 합니다. 홀로스캔은 고성능 AI 연산을 클라우드가 아닌 기기 자체에서 수행할 수 있게 해 주어, 반응 속도를 획기적으로 높이고 데이터 보안

성을 강화합니다. 뇌 데이터가 외부 서버로 전송되지 않고 로컬에서 처리된다는 점은 프라이버시에 민감한 사용자들에게 큰 장점이 됩니다.

2025년 3월, 엔비디아의 GTC 컨퍼런스에서 싱크론은 카이럴(Chiral)을 공개했습니다. 세계 최초의 인지 AI 뇌 파운데이션 모델이라고 그들은 불렀습니다. 기존의 AI가 텍스트와 이미지로 훈련되었다면, 카이럴은 인간의 신경 활동 데이터로 직접 훈련됩니다. 싱크론은 2019년 임상 프로그램 시작 이래 20환자-년(patient-years)에 달하는 스텐트로드 이식 경험을 축적했습니다. 이 데이터를 기반으로 대규모 뇌 언어 모델을 구축하려는 것입니다.

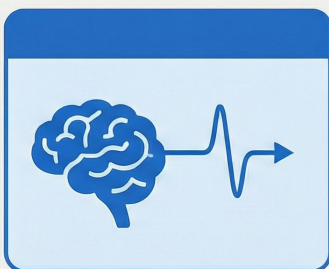
카이럴의 로드맵은 세 단계로 구성됩니다. 첫째, 홀로스캔을 활용한 실시간 신경 디코딩으로 최소한의 지연 시간을 달성합니다. 둘째, 엔비디아의 옴니버스(Omniverse) 플랫폼과 코스모스(Cosmos) 세계 파운데이션 모델을 활용하여 환경 인식을 통합합니다. 물리적으로 정확한 가정 환경 시뮬레이션을 생성하고, 이를 통해 운동 추론의 정확도와 적응성을 높입니다. 셋째, 비식별화된 데이터를 기반으로 카이럴을 범용 인지 AI로 훈련합니다.

옥슬리는 GTC에서 이렇게 말했습니다. "AI가 오늘날 텍스트와 이미지의 방대한 데이터셋으로 훈련되듯이, AI 진화의 다음 단계는 신경 신호로 훈련하는 것입니다. 카이럴은 인지의 자기 학습 모델로 진화할 것이며, 이것은 생성형 AI와 에이전트 AI를 넘어 인지 AI 시대로의 도약을 의미합니다."

뇌와 AI의 결합: 생각의 속도를 혁신하다

BCI의 고질적 난제, '느린 입력 속도' 해결

생각만으로 글자를 하나씩 선택하는 기존 방식의 피로도를 AI 통합으로 극복했습니다.



1비트의 신호를 1킬로바이트의 문장으로

AI가 문맥을 파악해 환자의 의도를 미리 예측하고 완성된 문장 옵션을 제안합니다.

생성형 AI를 넘어 '인지 AI' 시대로의 도약

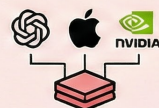
텍스트와 이미지를 넘어 인간의 신경 신호를 직접 학습하는 자기 학습 모델로 진화합니다.

빅테크가 주목한 7,500만 달러의 가능성



빌 게이츠와 제프 베이조스는 BCI를 윈도우나 AWS 같은 차세대 플랫폼으로 보고 투자했습니다.

OpenAI·애플·엔비디아가 만드는 BCI 생태계



언어 레이어(OpenAI), UX(애플), 연산 인프라(엔비디아)가 만나 의료기기를 넘어선 플랫폼을 구축합니다.

빌 게이츠와 제프 베이조스가 싱크론에 투자한 이유도 바로 여기에 있습니다. 2022년 12월, 싱크론은 아치 벤처 파트너스가 주도하고 게이츠 프론티어(빌 게이츠), 베이조스 익스페디션스(제프 베이조스), 코슬라 벤처스가 참여한 시리즈 C 라운드에서 7,500만 달러를 조달했습니다. 그들은 싱크론에서 마이크로소프트의 윈도우, 아마존의 AWS와 같은 플랫폼의 향기를 맡았습니다.

OpenAI, 애플, 엔비디아. 이 세 축이 만나면 BCI는 더 이상 단일 의료기기가 아닙니다. OpenAI는 저대역폭 입력의 표현력을 끌어올리는 언어 레이어를 제공합니다. 애플은 표준 입력과 접근성 UX로 사용 가능한 제품의 문턱을 낮춥니다. 엔비디아는 실시간 디코딩과 대규모 모델 학습 인프라를 제공하여 성능과 확장성을 뒷받침합니다.

뉴럴링크가 하드웨어, 소프트웨어, 앱을 모두 직접 통제하는 폐쇄형 수직 통합에 가깝다면, 싱크론은 다양한 파트너와 어울리는 개방형 인터페이스 전략에 가깝습니다. 옥슬리의 비전은 명확합니다. "우리는 뇌를 위한 USB 포트를 만들고 있습니다. 이 포트에 무엇을 꽂을지는 전 세계 개발자들의 상상력에 달려 있습니다."

경쟁의 축은 이동하고 있습니다. 누가 더 많은 뉴런을 읽느냐에서, 누가 더 큰 생태계를 뛰어 환자의 하루를 바꾸느냐로. 춘추전국시대의 승자는 대개 가장 날카로운 칼을 가진 자가 아니라, 가장 많은 동맹과 보급로를 가진 자였습니다. BCI의 세계도 크게 다르지 않을 것입니다.

10 전통의 강호와 새로운 도전자들

가. Blackrock Neurotech: 유타 어레이와 9년 장기 이식 기록

백악관의 어느 행사장이었습니다. 휠체어에 앉은 한 청년이 버락 오바마 대통령을 기다리고 있었습니다. 네이션 코플랜드. 10년 전 교통사고로 목 아래가 완전히 마비된 사람이었습니다. 대통령이 다가와 주먹을 내밀자 코플랜드는 자신의 마비된 손 대신 로봇 팔을 움직여 주먹 인사를 나눴습니다. 놀라운 것은 그다음이었습니다. 코플랜드는 로봇 손끝에 전해지는 대통령 피부의 감촉을 자신의 뇌로 직접 느꼈습니다. 기계가 수집한 촉각 정보가 전기 신호로 변환되어 그의 뇌 속 감각 피질로 전달된 것이었습니다. 인류 역사상 처음으로 기계의 감각이 인간의 뇌에 직접 입력된 순간이었습니다.

이 기적 같은 장면의 배후에는 일론 머스크의 뉴럴링크가 아니었습니다. 솔트레이크시티의 한 연구실에서 20년 넘게 묵묵히 길을 닦아온 블랙록 뉴로테크가 있었습니다. 뉴럴링크가 화려한 무대 위에서 대중의 시선을 사로잡고 있을 때, 블랙록은 이미 수십 년간 축적한 임상 데이터라는 거대한 성벽을 쌓고 있었습니다.

블랙록의 핵심 무기는 유타 어레이(Utah Array)라 불리는 작은 칩입니다. 1989년 유타 대학의 리처드 노먼 교수가 고안한 이 장치는 가로세로 4밀리미터에 불과합니다. 셔츠 단추보다도 작습니다. 현미경으로 들여다보면 96개에서 128개의 실리콘 바늘이 빗살처럼 솟아 있습니다. 마치 미니어처 침대 못과 같은 형상입니다. 이 바늘들은 뇌의 피질에 약 1.5밀리미터 깊이로 침투하여 뉴런이 발사하는 전기 신호를 가장 가까이서 포착합니다. 뇌의 속삭임에 귀를 바짝 대고 듣는 것입니다.

유타 어레이가 BCI 연구의 표준이 된 데에는 이유가 있습니다. 신호의 품질입니다. 두피 위에 전극을 붙이는 EEG는 뇌의 소리를 콘서트장 밖에서 듣는 것과 같습니다. 벽과 공기를 통과하며 소리가 희미해집니다. 반면 유타 어레이는 콘서트장 맨 앞줄에서 듣는 것과 같습니다. 개별 악기 소리까지 구분할 수 있습니다. 개별 뉴런의 발화, 즉 스파이크를 직접 기록할 수 있다는 뜻입니다. 이 선명한 신호가 정교한 디코딩을 가능하게 합니다. 로봇 팔을 섬세하게 제어하고, 키보드를 생각만으로 두드리고, 잃어버린 촉각을 되살리는 모든 일의 출발점이 바로 이 신호의 품질에 있습니다.

블랙록 뉴로테크의 가장 강력한 자산은 시간이 증명한 신뢰입니다. 의학계에서, 그중에서도 뇌와 관련된 기술에서 최신이라는 단어는 종종 검증되지 않음과 같은 뜻으로 쓰입니다. 반면 블랙록의 시스템은 2004년에 시작된 브레인게이트(BrainGate) 임상시험을 통해 20년 넘게 그 안전성을 입증해 왔습니다. 회사 측에 따르면 전 세계적으로 35명 이상의 이식형 BCI 환자

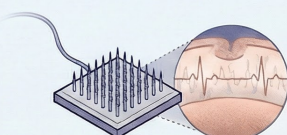
중 31명이 블랙록 기술을 사용했다고 합니다. 누적 3만 일 이상의 인간 이식 데이터가 쌓여 있습니다. 이것은 어떤 스타트업도 쉽게 따라잡을 수 없는 영역입니다.


9년이라는 숫자가 있습니다. 블랙록의 유타 어레이가 한 환자의 뇌 속에서 정상적으로 작동한 기간입니다. 뇌는 이물질을 반기지 않습니다. 면역 체계가 칩을 침입자로 인식하고 흉터 조직으로 감싸버립니다. 덥고 습하며 염분으로 가득 찬 환경에서 전자 기기는 부식되기 쉽습니다. 그런 척박한 땅에서 10년 가까이 버텼다는 것은 공학적 기적에 가깝습니다. 2025년 7월에 발표된 연구에 따르면, 브레인게이트 임상시험에 참여한 14명의 환자로부터 얻은 20개의 유타 어레이 데이터를 분석한 결과, 평균적으로 전극의 35.6퍼센트가 신경 스파이크 신호를 성공적으로 기록했으며, 7.6년에 달하는 기간 동안 신호 품질 저하는 7퍼센트에 불과했다고 합니다.

물론 한계도 명확합니다. 유타 어레이는 유연하지 않은 실리콘 소재입니다. 뇌가 두개골 안에서 미세하게 움직일 때마다 조직에 작은 손상을 줄 수 있습니다. 시간이 지나면 흉터 조직이 전극을 감싸며 신호 품질이 떨어지는 경우가 생깁니다. 또한 전통적인 시스템은 머리 밖으로 튀어나온 금속 포트를 통해 유선으로 연결해야 했습니다. 이 페데스탈(Pedestal)이라 불리는 장치는 감염 위험을 높이고 환자의 행동을 제약합니다. 연구진이 퇴근하면 환자는 자신의 마법 같은 능력을 반납하고 다시 침묵 속으로 돌아가야 했습니다.

블랙록 뉴로테크: 20년의 신뢰로 입증된 BCI의 선구자


실제 임상 데이터와 장기간의 안정성으로 입증된 BCI 기술의 표준



30,000+ 

31 / 35

0년 → 7.6년



뇌의 속삭임을 듣는 ‘유타 어레이’
4mm 크기의 칩에 솟은 미세 바늘들이 뉴런의 전기 신호를 콘서트장 맨 앞줄처럼 생생하게 포착합니다.

30,000일 이상의 압도적인 임상 데이터
전 세계 이식형 BCI 환자 35명 중 31명이 블랙록의 기술을 선택했을 만큼 의학계의 표준으로 자리 잡았습니다.

9년 동안 멈추지 않는 경이로운 내구성
척박한 뇌 환경에서도 7.6년 동안 신호 품질 저하가 **7%**에 불과할 정도로 독보적인 공학적 신뢰성을 보여주었습니다.

일상 회복을 위한 현실적인 처방전
초월적 인간보다는 먹고, 마시고, 느끼는 평범한 일상의 권리를 환자께 되찾아주는 것에 집중합니다.

이에 블랙록은 변화를 준비하고 있습니다. 2022년 말, 블랙록은 뉴럴레이스(Neuralace)라 불리는 차세대 시스템을 공개했습니다. 이 장치는 10,000개 이상의 채널을 목표로 하며, 얇고 유연한 구조로 뇌의 굴곡을 따라 밀착될 수 있도록 설계되었습니다. 뉴럴링크의 N1 칩에 정면으로 도전장을 내민 것입니다. 2024년 4월에는 암호화폐 기업 테더(Tether)가 블랙록에 2억 달러를 투자하며 대주주가 되었습니다. 기업 가치는 약 3억 5천만 달러로 평가되었습니다. 이 자금으로 블랙록은 무브어게인(MoveAgain)이라는 완전 이식형 무선 BCI 시스템의 상용화를 추진하고 있습니다. 환자가 집에서도 자유롭게 기기를 사용할 수 있는 미래를 준비하는 것입니다.

블랙록의 철학은 뉴럴링크와 사뭇 다릅니다. 머스크가 뇌 전체를 덮는 수만 개의 채널과 AI와의 융합을 꿈꿀 때, 블랙록은 당장 내일 환자가 사용할 수 있는 현실적인 도구에 집중합니다. 공동 창업자 마커스 게르하르트는 이렇게 말한 적이 있습니다. "우리는 공상과학 소설을 쓰는 것이 아니라 처방전을 쓰고 있습니다." 인간을 초월적인 존재로 만드는 것이 아니라, 잃어버린 기능을 복원하여 다시 평범한 일상을 누리게 하는 것. 먹고, 마시고, 사랑하는 사람의 손길을 느끼는 것. 블랙록이 추구하는 혁신은 가장 기본적인 인간성의 회복에 맞닿아 있습니다.

뉴럴링크가 폭풍처럼 몰아치는 혁명군이라면, 블랙록 뉴로테크는 오랜 세월 영토를 지켜온 굳건한 성주와 같습니다. BCI의 모든 혁신이 블랙록이 지난 20년간 닦아놓은 길 위에서 있다는 사실은 부정할 수 없습니다. 문제는 과거의 유산만으로 미래를 지킬 수 있느냐입니다. 실리콘밸리의 속도와 자본 앞에서 전통의 강호는 어떤 선택을 해야 할까요. 그 답은 아직 쓰이는 중입니다.

나. Precision Neuroscience: 뇌 표면의 초박형 필름 Layer 7

2023년 봄, 뉴욕의 한 신경외과 수술실이었습니다. 벤저민 라포포트 박사는 환자의 두개골을 크게 열지 않았습니다. 대신 그는 두개골에 1밀리미터도 채 되지 않는 미세한 틈을 만들었습니다. 그리고 그 틈으로 노란색의 얇은 필름을 밀어 넣었습니다. 마치 편지 봉투에 편지를 슬쩍 밀어 넣듯이. 필름은 뇌의 주름진 표면 위를 미끄러지듯 덮었습니다. 이 필름의 두께는 인간 머리카락 굵기의 5분의 1에 불과했습니다. 레이어 7(Layer 7) 피질 인터페이스의 첫 인간 이식 장면이었습니다.

라포포트는 단순한 의사가 아닙니다. 그는 일론 머스크와 함께 뉴럴링크를 창립했던 8인의 멤버 중 한 명이었습니다. MIT에서 전기공학을, 하버드 의대에서 신경외과를 전공한 그는 기술과 의학의 언어를 동시에 구사하는 드문 인재였습니다. 그러나 그는 뉴럴링크를 떠났습니다. 이유는 안전에 대한 철학적 차이였습니다. 뉴럴링크의 방식, 즉 전극이 뇌 조직을 뚫고 들어가는 방식은 필연적으로 미세한 뇌 손상을 유발합니다. 라포포트는 히포크라테스 선서의 첫 문장을 뇌 공학의 제1원칙으로 삼았습니다. 무엇보다도 환자에게 해를 입히지 말라.

그가 찾은 해답은 뇌를 뚫지 않고 뇌를 덮는 것이었습니다. 2021년 프리시전 뉴로사이언스를 설립한 그는 뇌 표면에 밀착되는 초박형 전극 필름을 개발했습니다. 대뇌 피질은 6개의 세포층으로 이루어져 있습니다. 프리시전은 자신들의 전극이 뇌를 뚫고 들어가는 대신 마치 7번째 층처럼 뇌 표면을 부드럽게 감싸길 원했습니다. 그래서 이름도 레이어 7입니다.

레이어 7의 기술적 혁신은 몇 가지로 요약됩니다. 첫째, 초박형입니다. 폴리이미드라는 유연한 소재로 만들어진 이 필름은 인간 머리카락 두께의 5분의 1에 불과합니다. 얇다는 것은 단순한 미학이 아닙니다. 뇌 표면에 놓이는 전극이 두껍고 뾰뾰하면 호흡이나 맥동, 자세 변화에 따른 미세한 움직임에서 마찰과 압박이 생깁니다. 이는 염증과 손상의 원인이 됩니다. 얇고 유연한 필름은 뇌의 굴곡을 자연스럽게 따라가며 그 부담을 최소화합니다.

둘째, 고해상도입니다. 이 작은 필름 위에 1,024개의 미세 전극이 집적되어 있습니다. 뉴럴링크의 N1 칩과 대등한 수준의 채널 수입입니다. 기존의 뇌 표면 전극인 ECoG 그리드보다 훨씬 높은 밀도로, 뇌의 전기적 활동을 마치 고해상도 영상처럼 지도화할 수 있습니다. 프리시전은 2024년에 4,096개 전극을 가진 차세대 버전을 공개하기도 했습니다.

셋째, 마이크로 슬릿 수술법입니다. 뉴럴링크가 동전 크기만큼 두개골을 뚫어야 하고, 블랙록이 뇌 조직을 찢어야 한다면, 프리시전은 두개골에 아주 미세한 틈만 만듭니다. 그 틈으로 필름을 마치 종이를 봉투에 넣듯 미끄러뜨려 삽입합니다. 이 과정에서 뇌 조직은 전혀 훼손되지 않습니다.

넷째, 가역성(Reversibility)입니다. 이것이 라포포트가 가장 강조하는 지점입니다. 뇌에 꽂히는 방식의 전극은 제거할 때 조직 손상을 동반할 위험이 큼니다. 반면 뇌 표면에 얹혀 있는 레이어 7은 살짝 당겨 빼내면 됩니다. 뇌 조직은 손상 없이 그대로 남습니다. 기술이 업그레이


드되거나 문제가 발생했을 때 환자에게 나중에 원하면 언제든지 뺄 수 있습니다라고 말할 수 있다는 것은 임상 현장에서 엄청난 심리적 장벽을 낮춥니다.

2025년 3월 30일, 프리시전 뉴로사이언스는 FDA로부터 510(k) 클리어런스를 받았습니다. 레이어 7-T(Layer 7-T)라 명명된 이 장치는 최대 30일까지의 이식 사용이 승인되었습니다. 이는 차세대 무선 BCI를 개발하는 기업 중 최초로 받은 완전한 규제 승인이라고 회사 측은 밝혔습니다. 이 승인으로 프리시전은 수술 중 뇌 맵핑과 같은 임상 응용에서 장치를 판매할 수 있게 되었습니다. CEO 마이클 메이저는 회사 창립 4년 만에 아이디어에서 FDA 승인까지 도달했다고 말했습니다.

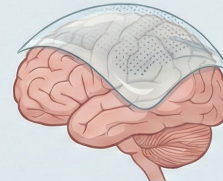
2025년 10월, 프리시전은 학술지 네이처 바이오메디컬 엔지니어링에 첫 인간 환자들의 경험을 다룬 논문을 발표했습니다. 임상 파일럿에서 레이어 7 시스템은 환자가 말하려고 할 때 발생하는 뇌파 패턴을 약 80퍼센트의 정확도로 감지하는 데 성공했습니다. 단 4분의 훈련 데이터와 54개의 발화 녹음만으로 달성한 결과였습니다. 논문 발표 시점까지 프리시전은 50명 이상의 환자에게 레이어 7을 이식했으며, 미국 내 6개 주요 의료기관에서 장기 사용 연구를 진행 중이라고 밝혔습니다.

뇌를 감사는 혁신, ‘레이어 7’ (Layer 7)

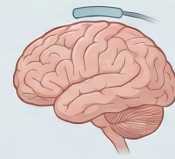
침습보다 안전하고, 비침습보다 강력한 최적의 ‘골디락스’ BCI 솔루션.




×
침습
(Invasive)
위험
(Dangerous)



✓
레이어 7
(Layer 7)
최적
(Optimal)




비침습
(Non-invasive)
약함
(Weak)




뇌를 보호하는 ‘제7의 층’

머리카락 1/5 두께의 초박형 유연 필름이 뇌 표면을 부드럽게 감싸 염증과 손상을 방지합니다.




1,024개의 고해상도 채널

미세 전극을 통해 뇌의 전기적 활동을 고해상도 영상처럼 정밀하게 지도화합니다.



80%의 언어 감지 정확도

단 4분의 훈련 데이터만으로 환자의 발화 의도를 높은 정확도로 파악하는 데 성공했습니다.



병원 현장에 즉시 도입 가능

고가의 로봇 없이 기존 의료 시설과 장비를 그대로 활용할 수 있도록 설계되었습니다.

프리티전의 전략은 실리콘밸리의 속도전보다는 의료기기의 정식적인 길을 걷는 것입니다. 그들은 병원이 이미 보유한 시설과 장비를 그대로 활용할 수 있도록 시스템을 설계했습니다. 값비싼 수술 로봇을 새로 살 필요도, 신경외과 의사들이 새로운 수술법을 익히느라 몇 달을 보낼 필요도 없습니다. 라포포트의 철학입니다. 가장 좋은 기술은 이미 있는 환경에 자연스럽게 스며드는 기술이다.

레이어 7의 시장적 의미는 침투형 대 비침투형이라는 단순한 이분법을 깨는 데 있습니다. 침투형은 신호가 좋지만 수술 부담이 큼니다. 비침투형은 안전하지만 대역폭이 제한됩니다. 프리티전은 그 사이에 새로운 지점을 열었습니다. 라포포트는 이를 골디락스 솔루션(Goldilocks solution)이라 불렀습니다. 너무 뜨겁지도, 너무 차갑지도 않은 딱 적당한 온도. 비침습 방식보다는 훨씬 강력하고, 완전 침습 방식보다는 훨씬 안전한 최적의 균형점이라는 뜻입니다.

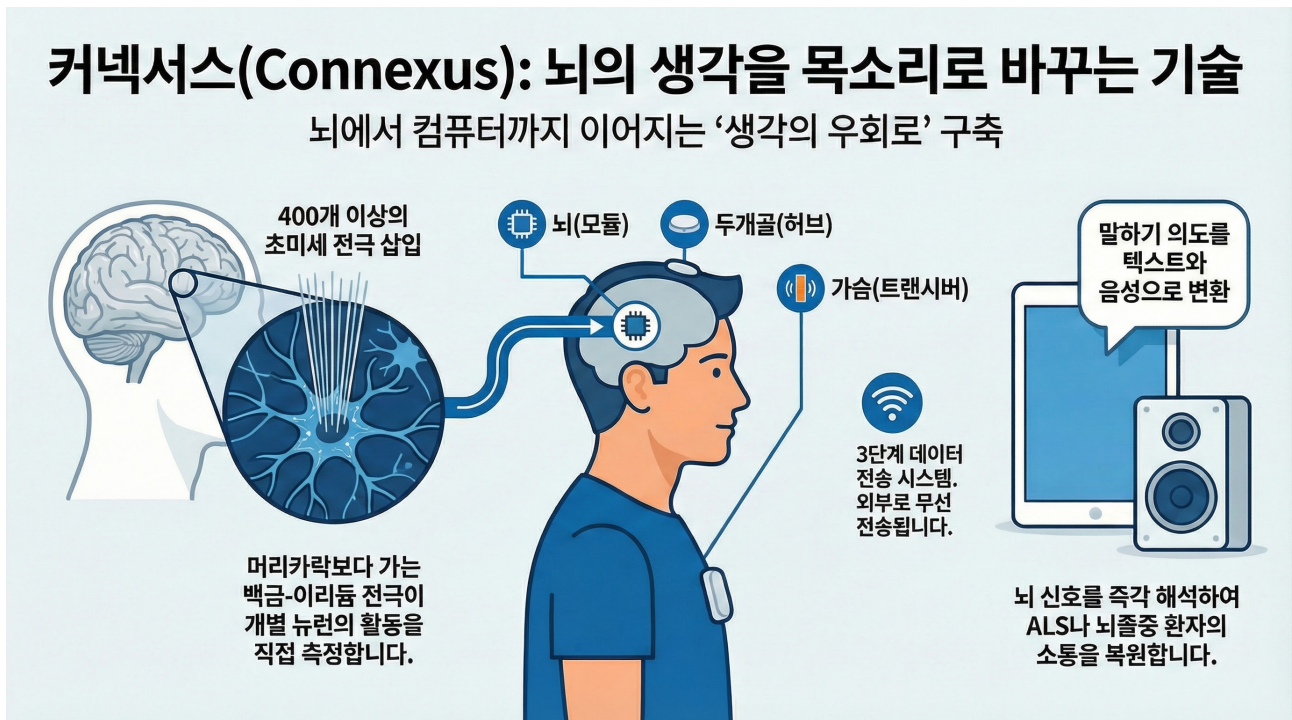
물론 의문도 남습니다. 뇌 표면에서 읽는 신호가 뇌 안에서 직접 읽는 신호만큼 풍부할 수 있을까요. 개별 뉴런의 스파이크를 직접 듣는 것이 아니라, 수천 개 뉴런의 합창 소리를 듣는 것입니다. 이것으로 충분히 정교한 디코딩이 가능할까요. 프리티전은 가능하다고 믿습니다. 그러나 그 증명은 아직 진행 중입니다. 30일이라는 현재의 승인 기간은 끝이 아니라 첫 단추입니다. 뇌를 뚫는 과감한 모험과 뇌를 덮는 신중한 접근. 이 두 철학의 대결은 BCI의 미래가 어느 방향으로 흐를지를 결정할 중요한 분기점이 될 것입니다.

다. Paradromics: 고대역폭 Connexus와 FDA

텍사스 오스틴의 뜨거운 태양 아래, 맷 앵글(Matt Angle) CEO가 이끄는 패러드로믹스는 조용하지만 묵직한 도전을 준비해 왔습니다. 이 회사의 모토는 단순합니다. 대역폭이 곧 힘이다. BCI 업계가 인터넷 속도 경쟁을 하고 있다면, 패러드로믹스는 광섬유를 깔겠다고 선언한 것과 다름없습니다.

인간의 뇌는 매초 엄청난 양의 데이터를 생성합니다. 우리가 단어 하나를 말하려고 마음먹을 때, 뇌의 운동 피질에서는 수만 개의 뉴런이 정교한 패턴으로 불꽃을 뿜습니다. 입술을 어떻게 움직이고, 혀를 어디에 대고, 성대를 어떻게 진동시킬지를 지시하는 명령들입니다. 기존의 BCI가 이 거대한 정보의 홍수 속에서 빨대 하나로 정보를 빨아들이는 수준이었다면, 패러드로믹스는 소방 호스를 연결하겠다는 것입니다.

그들이 개발한 커넥서스(Connexus) BCI는 이러한 철학의 결정체입니다. 400개 이상의 백금-이리듐 전극이 뇌 피질 표면 바로 아래에 삽입됩니다. 각 전극은 인간의 머리카락보다 가늘습니다. 이 전극들은 개별 뉴런의 활동 전위, 즉 스파이크를 직접 측정합니다. 뉴럴링크가 유연한 폴리머 실을 사용하는 것과 달리, 패러드로믹스는 수십 년간 의료 기기에서 검증된 백금-이리듐 소재를 선택했습니다. 앵글 CEO는 뇌 속의 가혹한 환경에서 장기간 버티려면 검증된 소재가 필요하다고 주장합니다.



커넥서스의 구조는 독특합니다. 뇌에 삽입되는 피질 모듈, 두개골 안에서 신호를 처리하는 크래니얼 허브, 그리고 가슴에 이식되어 무선으로 데이터를 외부로 전송하는 트랜시버가 하나의 시스템을 이룹니다. 뇌에서 나온 신호가 가슴의 수신기로 전달되고, 거기서 피부를 통해 외부 컴퓨터로 무선 전송됩니다. 이 모든 과정이 밀리초 단위로 일어납니다.

패러드로믹스가 주목하는 첫 번째 응용 분야는 말하기 복원입니다. 루게릭병(ALS)이나 뇌졸중으로 인해 말할 수도, 글을 쓸 수도 없는 환자들을 상상해 보십시오. 그들의 뇌는 여전히 활발하게 활동합니다. 말하고 싶은 문장이 있고, 전하고 싶은 감정이 있습니다. 다만 그 신호가 입술과 혀까지 도달하지 못할 뿐입니다. 패러드로믹스는 이 막힌 다리를 대체하는 우회로를 만들려 합니다. 뇌에서 말하려는 의도를 읽어내고, 그것을 텍스트나 합성 음성으로 변환하는 것입니다.

인간의 자연스러운 대화 속도는 분당 약 150단어입니다. 기존의 BCI로 구현된 의사소통 속도는 이에 훨씬 못 미칩니다. 커서를 움직여 글자를 하나씩 선택하는 방식은 너무 느립니다. 눈동자 추적 시스템도 답답하기는 마찬가지입니다. 패러드로믹스는 초당 200비트 이상의 정보 전송률을 목표로 합니다. 이것은 현존하는 어떤 BCI보다도 높은 수치입니다. 문자나 단어 수준을 넘어, 연속적인 음성에 가까운 복잡한 출력을 목표로 하는 것입니다.

규제 측면에서 패러드로믹스는 중요한 이정표를 세웠습니다. 이 회사는 FDA로부터 획기적 의료기기(Breakthrough Device) 지정을 두 차례 받았습니다.

첫 번째는 말하기 능력을 잃은 환자의 의사소통 복원에 관한 것이었고,

두 번째는 심각한 운동 기능 손실 환자의 컴퓨터 제어 능력 복원에 관한 것이었습니다.

획기적 의료기기 지정은 승인이 아닙니다. 그러나 FDA가 이 기술이 생명을 위협하거나 비가역적인 질환을 치료하는 데 잠재적 혁신성을 가졌다고 인정했다는 뜻입니다. 개발과 심사 과정에서 FDA의 긴밀한 지원을 받을 수 있게 됩니다.

2025년 6월, 패러드로믹스는 최초의 인체 기록(First-in-Human Recording)을 성공적으로 수행했습니다. 미시간 대학의 신경외과의 매튜 윌시 박사 팀이 뇌전증 수술 중 일시적으로 커넥서스를 삽입하여 고해상도 신경 신호를 기록했습니다. 장치는 20분 이내에 안전하게 삽입되고 기록을 마친 후 손상 없이 제거되었습니다. 앵글 CEO는 이렇게 말했습니다. 이 수술은 패러드로믹스에게 핵심적인 전환점입니다. 우리는 이제 임상 단계의 기업이 되었습니다.

그리고 2025년 11월, 패러드로믹스는 FDA로부터 IDE(Investigational Device Exemption) 승인을 받아 커넥트-원(Connect-One) 초기 타당성 임상시험을 시작한다고 발표했습니다. 이 회사

는 완전 이식형 BCI를 이용한 음성 복원 분야에서 IDE 승인을 받은 최초의 기업이 되었습니다. 2026년 1분기부터 두 명의 환자를 대상으로 임상이 시작됩니다. 환자들은 UC 데이비스, 매사추세츠 종합병원, 미시간 대학 세 곳의 임상 현장에서 모집됩니다. 이들은 종종 운동 장애로 인해 말하기와 사지 움직임이 심각하게 제한된 사람들입니다.

앵글 CEO의 자신감은 대단합니다. 뉴럴링크의 장치가 가진 한계에 대해 공개적으로 비판하는 것도 서슴지 않습니다. 2025년 10월에는 뉴럴링크 장치 한계라는 제목의 긴 블로그 글을 올리기도 했습니다. 그는 2026년 1분기에 세계 최고의 엔지니어링을 갖춘 뇌-컴퓨터 인터페이스를 가지고 임상을 시작한다고 선언했습니다. 이것이 환자들이 받아 마땅한 장치입니다.

물론 장밋빛 미래만 있는 것은 아닙니다. 패러드로믹스의 접근법은 침습성이 높습니다. 뇌 조직 깊숙이 전극을 삽입하는 것은 수술 부담, 장치 내구성, 조직 반응 리스크를 수반합니다. 발열 문제도 있습니다. 고성능 칩은 필연적으로 열을 발생시키는데, 뇌는 열에 민감한 기관입니다. 이 문제를 해결하지 못하면 장기 사용은 불가능합니다.

패러드로믹스의 승부는 고대역폭이 실제 임상 효용으로 환산되는 순간에 결정될 것입니다. 환자가 더 빠르고 덜 피곤하게 말할 수 있느냐. 오타와 오류율을 낮추고 일상에서 쓸 수 있느냐. 그 결과가 의료 가치, 즉 삶의 자율성 회복으로 증명되느냐. 획기적 의료기기 지정과 IDE 승인은 그 증명을 위한 링 위로 올라갔다는 뜻입니다. 데이터가 곧 힘인 시대, 가장 많은 뇌 데이터를 깨끗하게 뽑아내겠다는 그들의 전략은 BCI 경쟁의 한복판을 관통하고 있습니다.

라. 커널(Kernel): 비침습 fNIRS 헬멧의 소비자 시장 도전

실리콘밸리의 억만장자 브라이언 존슨(Bryan Johnson)은 기이한 인물로 유명합니다. 그는 자신의 신체 나이를 18세로 되돌리기 위해 매년 수백만 달러를 투자합니다. 매일 수십 알의 영양제를 삼키고, 매일 밤 자신의 모든 생체 데이터를 측정합니다. 블루프린트(Blueprint)라 불리는 이 노화 역전 프로젝트는 그를 기술계의 가장 극단적인 바이오해커로 만들었습니다. 그런 그가 2016년, 자신의 사재 5천만 달러 이상을 털어 설립한 회사가 바로 커널(Kernel)입니다.

존슨의 질문은 단순했습니다. 왜 우리는 심장 박동이나 혈당은 매일 측정하면서, 우리 존재의 핵심인 뇌는 측정하지 않는가. 스마트워치는 우리의 걸음 수와 수면 패턴을 알려줍니다. 그러나 우울증이 시작되고 있다는 것, 인지 기능이 떨어지고 있다는 것, 집중력이 흐트러지고 있다는 것은 알려주지 않습니다. 커널이 그리는 미래는 뇌의 건강 상태를 측정하는 마음의 체온계가 있는 세상입니다.

커널은 앞서 언급한 세 회사와는 완전히 다른 길을 걷고 있습니다. 두개골을 열지 않습니다. 수술용 로봇도, 멸균실도 필요 없습니다. 그들이 만든 것은 헬멧입니다. 자전거 헬멧이나 미래적인 헤드셋처럼 생긴 이 장치, 커널 플로우(Kernel Flow)는 비침습 BCI의 최전선에서 있습니다.

커널 플로우는 시간 분해 기능성 근적외선 분광법(TD-fNIRS)이라는 기술을 사용합니다. 원리는 이렇습니다. 헬멧에서 뇌로 근적외선 레이저를 쏩니다. 150피코초 미만의 아주 짧은 펄스입니다. 이 빛이 두피와 두개골을 통과해 뇌 표면까지 도달한 뒤 반사되어 돌아옵니다. 빛이 돌아오는 데 걸리는 시간과 흡수된 정도를 분석하면, 뇌혈관의 산소 농도 변화를 알 수 있습니다. 뇌의 어느 부위가 활발하게 활동하면 그곳으로 산소가 풍부한 혈액이 몰려듭니다. 커널 플로우는 이 미세한 변화를 감지하여 뇌 활동 지도를 그립니다. 전기 신호가 아닌 혈류를 통해 마음을 읽는 기술입니다.

커널 플로우 헬멧의 무게는 약 2킬로그램입니다. 머리 양쪽에 배치된 52개의 모듈 속에 레이저 광원과 광 검출기가 집적되어 있습니다. 각 모듈에는 레이저 소스 하나와 6개의 검출기가 육각형으로 배열되어 있습니다. 전체 시스템은 3,500개 이상의 측정 채널을 제공하며, 뇌 전체를 커버합니다. 초당 200회 이상의 샘플링 속도로 뇌 활동을 모니터링할 수 있습니다.

기존의 TD-fNIRS 장비는 방 하나를 가득 채울 만큼 거대했습니다. 가격은 수십억 원에 달했습니다. 환자는 병원에 가서 꼼짝 않고 앉아 있어야만 측정이 가능했습니다. 커널의 혁신은 이 거대한 실험실 장비를 머리에 쓸 수 있는 크기로 줄이고, 연구실 밖으로 가져온 데 있습니다. 2022년 생명의학 광학 저널(Journal of Biomedical Optics)에 발표된 연구에 따르면, 커널 플

로우는 기존의 벤치탑 TD-fNIRS 시스템과 유사한 성능을 유지하면서도 휴대성을 확보했습니다.

물론 한계는 명확합니다. 두개골 밖에서 빛으로 측정하는 신호는 뇌 안에 전극을 꽂는 방식에 비해 해상도가 현저히 낮습니다. 개별 뉴런의 활동을 볼 수는 없습니다. 생각만으로 로봇 팔을 정교하게 제어하는 것은 현재의 기술로는 어렵습니다. 또한 근적외선은 머리카락과 피부 색소에 따라 흡수율이 달라집니다. 다양한 모발과 피부 유형에서 정확한 측정을 보장하는 것은 여전히 풀어야 할 과제입니다.

뇌 건강을 읽는 ‘마음의 체온계’, 커널 플로우(Kernel Flow)



일상의 ‘마음의 체온계’

집중력
인지
우울증

우울증, 인지 기능, 집중력 등 뇌의 상태를 심박수처럼 매일 측정하는 시대를 엽니다.

수술이 필요 없는 비침습 헬멧



두개골을 열지 않고 자전거 헬멧처럼 머리에 쓰는 것만으로 뇌 측정이 가능합니다.

레이저로 분석하는 뇌혈류 변화



근적외선 펄스를 이용해 뇌혈관의 산소 농도 변화를 감지하고 뇌 활동 지도를 그립니다.

3,500개 이상의 정밀 채널

3,500+

52 모듈

52개 모듈을 통해 초당 200회 이상의 속도로 뇌 전체 활동을 실시간 모니터링합니다.



그렇다면 커널은 무엇을 노리는 것일까요. 그들이 겨냥하는 시장은 전통적인 의료 BCI와 다릅니다. 한 축은 임상과 연구입니다. 우울증 환자의 치료 경과를 비침습적으로 추적하고, 약물이 뇌에 미치는 영향을 정량적으로 측정하는 것입니다. FDA는 케타민 같은 정신의약품이 뇌에 미치는 효과를 커널 플로우로 측정하는 연구를 승인했습니다. 제약 임상시험에서 약물의 효과를 객관적 지표로 보여줄 수 있다면, 개발 비용과 시간을 획기적으로 줄일 수 있습니다.

다른 한 축은 소비자 시장입니다. 명상의 효과를 실시간으로 시각화하고, 집중력 훈련의 성과를 수치로 확인하고, 인지 저하의 초기 징후를 미리 감지하는 것입니다. 스마트워치가 심박수를 보여주듯, 커널은 뇌의 활성도를 보여주는 웨어러블이 되겠다는 구상입니다.

그러나 현실은 아직 멀습니다. 커널의 개발자용 페이지에 명시된 커널 플로우 시스템의 가격은 117,200달러입니다. 세금과 배송비는 별도입니다. 이 숫자 하나로 소비자 시장의 문은 일단 닫힙니다. 커널이 노리는 것은 지금 당장 일반인이 헬멧을 사는 시장이 아닙니다. 그들의 전략은 우회로입니다. 장비를 표준화해 대규모 데이터를 모으고, 그 데이터로 뇌 기반 바이오마커를 만들고, 임상적 유용성이 입증되면 결국 더 가볍고 저렴한 형태로 대중에게 내려가는 것입니다.

2023년에 출시된 커널 플로우2는 기존 모델에서 한 단계 도약했습니다. TD-fNIRS에 EEG(뇌전도) 기능을 통합하여 혈류 변화와 전기 신호를 동시에 측정할 수 있게 되었습니다. 사용자 친화적인 인터페이스, 자동 품질 보고서, 실시간 데이터 처리 기능도 추가되었습니다. 연구 용을 넘어 임상 연구에 최적화된 방향으로 진화하고 있는 것입니다.

커널의 도전은 기술적인 것을 넘어 문화적인 것입니다. 뇌를 해킹하거나 조작하는 것이 아니라, 뇌를 측정하고 이해함으로써 인간 스스로를 개선하려는 시도입니다. 브라이언 존슨은 말합니다. 우리는 자신을 알기 위해 거울을 봅니다. 하지만 거울은 껍데기만 보여줍니다. 커널은 내면의 거울이 될 것입니다.

수술대 위가 아닌 거실 소파에서 이루어지는 BCI 혁명. 커널은 가장 안전하고 대중적인 방법으로 포스트휴먼 시대의 문을 두드리고 있습니다. 그 문이 열릴지, 열린다면 언제 열릴지는 아직 알 수 없습니다. 그러나 한 가지는 분명합니다. 뉴럴링크, 싱크론, 블랙록, 프리시전, 패러드믹스가 중증 장애인을 위한 의료기기를 지향한다면, 커널은 건강한 사람의 뇌까지를 포괄하는 새로운 층위의 뉴로테크 생태계를 실험하고 있습니다. 모든 사람이 자신의 뇌를 들여다볼 수 있는 세상. 그것이 축복인지 재앙인지는 우리가 어떻게 사용하느냐에 달려 있을 것입니다.

11 비침습형 BCI의 현실과 가능성

가. 메타(Meta)의 근전도 팔찌와 웨어러블 BCI

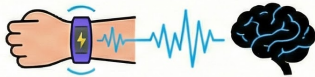
2019년, 마크 저커버그는 조용히 한 스타트업을 인수했습니다. CTRL-Labs. 창업자는 토마스 리어던이라는 컴퓨터 과학자였습니다. 그는 마이크로소프트에서 인터넷 익스플로러를 만든 사람이기도 했습니다. 하지만 리어던의 새로운 관심사는 웹 브라우저가 아니었습니다. 손목이었습니다.

인수 금액은 5억 달러에서 10억 달러 사이로 추정되었습니다. 메타는 정확한 금액을 공개하지 않았습니다. 그들이 산 것은 회사가 아니라 아이디어였습니다. 뇌에 칩을 심지 않고도 생각을 읽을 수 있다는 아이디어.

6년이 지난 2025년 9월, 그 아이디어가 제품이 되었습니다. 메타 뉴럴 밴드. 손목에 차는 밴드였습니다. 겉보기에는 평범한 스마트워치처럼 보였습니다. 하지만 안쪽에는 금으로 도금된 전극들이 피부에 닿아 있었습니다. 이 전극들이 하는 일은 근육의 전기 신호를 읽는 것이었습니다.

생각으로 움직이는 미래, 메타 뉴럴 밴드 (Meta Neural Band)

손목의 미세한 전기 신호로 디지털 기기 자유롭게 조작.



표면 근전도(sEMG) 기술 탑재

▶ 손목 근육의 미세한 전기 활동을 감지하여 사용자의 의도를 파악합니다.



움직임이 시작되기 전 감지

▶ 뇌가 보낸 신호가 근육에 도달하는 순간, 실제 동작 전에 명령을 실행합니다.



20만 명 데이터 기반 범용 모델

▶ 별도의 개인 보정 없이 누구나 즉시 사용할 수 있는 머신러닝 알고리즘을 구축했습니다.



보이지 않는 손가락 제스처 조작

▶ 탭, 스와이프, 핀치 등 미세한 손가락 움직임으로 레이벤 안경을 제어합니다.



2025년 9월 출시, 799달러

▶ 메타 레이벤 디스플레이 안경과 함께 미래형 인터페이스의 표준을 제시합니다.

이 기술을 표면 근전도, 영어로 sEMG라고 부릅니다. 원리는 간단합니다. 우리가 손가락을 움직이려고 생각하면, 뇌는 척수를 통해 신호를 보냅니다. 그 신호가 손목의 근육에 도달하면

미세한 전기 활동이 일어납니다. 메타 뉴럴 밴드는 이 전기 활동을 감지합니다. 손가락이 실제로 움직이기 전에.

메타는 이 기술을 개발하기 위해 거의 20만 명의 연구 참가자로부터 데이터를 수집했습니다. 그 결과 탄생한 것이 범용 모델이었습니다. 개인별 보정 없이도 대부분의 사람에게 작동하는 시스템. 머신러닝 알고리즘은 손목에서 발생하는 전기 신호의 패턴을 분석하여 사용자가 무엇을 하려는지 예측합니다. 탭, 스와이프, 펀치. 심지어 허공에 글씨를 쓰는 동작까지.

2025년 9월 30일, 메타 레이벤 디스플레이 안경과 함께 뉴럴 밴드가 출시되었습니다. 가격은 799달러. 안경에는 작은 디스플레이가 내장되어 있었고, 손목의 밴드로 조작했습니다. 엄지 손가락을 검지 옆에서 살짝 문지르면 화면이 스크롤됩니다. 손가락을 모았다 펴면 선택이 됩니다. 손을 올리거나 화면을 쳐다볼 필요가 없었습니다.

메타는 이 기술이 뇌-컴퓨터 인터페이스가 아니라고 강조합니다. 2025년 1월에 발표한 백서에서 그들은 명확히 구분했습니다. sEMG는 말초 신경계에서 작동합니다. 뇌의 신호를 직접 읽지 않습니다. 근육이 활성화될 때 발생하는 전기 신호만 감지합니다. 침습적 BCI와 달리 수술이 필요 없고, 뇌에 어떤 정보도 보내지 않습니다.

그러나 경계는 흐릿합니다. 손가락을 움직이려는 의도가 뇌에서 시작된다면, 그 의도를 손목에서 읽는 것과 두개골 안에서 읽는 것 사이에 본질적 차이가 있을까요. 메타의 기술은 뇌를 직접 읽지 않으면서도 뇌의 명령을 해독합니다. 일종의 우회로입니다.

2026년 1월, CES에서 메타는 새로운 파트너십을 발표했습니다. 가민과의 협력이었습니다. 자동차 안에서 뉴럴 밴드를 사용하는 개념 증명이었습니다. 운전자가 손목의 미세한 움직임만으로 인포테인먼트 시스템을 제어하는 시연. 창문을 내리고, 문을 잠그고, 음악을 바꾸는 일이 손가락의 작은 떨림으로 가능해지는 미래.

더 중요한 발표도 있었습니다. 유타 대학교와의 연구 협력. ALS나 근이영양증처럼 손을 움직이기 어려운 환자들을 위한 연구였습니다. 메타 뉴럴 밴드는 근육이 완전히 마비되지 않은 한, 아주 미세한 신호도 감지할 수 있었습니다. 손을 움직일 수 없는 사람이 스마트 스피커를 제어하고, 블라인드를 열고, 문을 여는 일. 뉴럴링크가 뇌에 칩을 심어 해결하려는 문제를 메타는 손목 밴드로 접근하고 있었습니다.

밴드의 소재도 흥미롭습니다. 백트란이라는 섬유가 사용되었습니다. 화성 탐사 로버의 착륙 쿠션에 쓰이는 것과 같은 재료입니다. 가볍고 내구성이 강합니다. 배터리는 18시간 지속되고, 방수 등급은 IPX7. 샤워를 하면서도 착용할 수 있습니다.

하지만 질문은 남습니다. 이것이 진정한 BCI의 시작일까요, 아니면 정교한 제스처 인식 장치에 불과할까요. 메타는 전자를 부정하고 후자를 주장합니다. 그러나 기술의 궤적은 다른 이야기를 합니다. 손목에서 시작한 것이 어깨로, 목으로, 그리고 언젠가는 두피로 올라가지 않을까요.

나. 뉴러블(Neurable): EEG 헤드폰으로 집중력 측정

2018년, 보스턴의 한 스타트업이 세상에서 가장 이상한 게임을 공개했습니다. 가상현실 아케이드 게임이었는데, 컨트롤러가 없었습니다. 플레이어는 머리에 뇌파 측정 장치를 쓰고 생각만으로 물체를 집어 던졌습니다. 뉴러블이라는 회사가 만든 시연이었습니다. CEO 람세스 알카이데는 신경과학 박사였습니다.

그로부터 6년 후, 뉴러블은 게임을 포기했습니다. 대신 그들이 선택한 것은 헤드폰이었습니다.

2024년 9월 24일, MW75 뉴로가 출시되었습니다. 마스터 앤 다이내믹이라는 프리미엄 오디오 회사와의 협업이었습니다. 겉모습은 평범한 무선 헤드폰이었습니다. 가죽과 금속으로 만들어진 고급스러운 디자인. 40밀리미터 베릴륨 드라이버가 따뜻하고 풍성한 음질을 만들어냈습니다. 노이즈 캔슬링도 있었습니다. 가격은 699달러. 애플 에어팟 맥스보다 150달러 비쌌습니다.

차이점은 이어컵 안에 숨어 있었습니다. 부드러운 천 소재로 감싼 12개의 EEG 센서가 귀 주변의 두피에 닿았습니다. 이 센서들이 뇌파를 측정했습니다. 사용자가 음악을 듣거나 일을 하는 동안 쉬지 않고.

뉴러블이 측정하는 것은 생각의 내용이 아닙니다. 집중의 상태입니다. 1924년 한스 베르거가 처음 발견한 알파파와 베타파의 패턴을 분석합니다. 우리가 집중할 때 뇌파는 특정한 형태를 띠니다. 산만해질 때는 다른 형태를 띠니다. 뉴러블의 알고리즘은 이 차이를 감지합니다. 회사 내부에서는 각 알고리즘에 포켓몬 이름을 붙인다고 합니다.

앱을 열면 대시보드가 나타납니다. 오늘 얼마나 집중했는지, 언제 집중력이 떨어졌는지, 어떤 시간대에 생산성이 높았는지를 보여줍니다. 인지 스냅샷이라는 기능은 2분 동안의 측정으로 현재 뇌의 상태를 평가합니다. 지금 복잡한 작업을 해야 할 때인지, 가벼운 일을 처리할 때인지 알려줍니다.

메이요 클리닉과의 파트너십도 있었습니다. 브레인 브레이크라는 기능을 검증하기 위한 협력이었습니다. 헤드폰이 집중력 저하를 감지하면 휴식을 권유합니다. 연구 결과, 참가자들은 정해진 시간에 쉬는 것보다 뇌파 기반 알림에 따라 쉬는 것을 더 선호했습니다. 주관적 피로감도 적었습니다.

2025년 12월, 후속 제품이 나왔습니다. MW75 뉴로 LT. 가격은 499달러로 낮아졌고, 무게는 12퍼센트 가벼워졌습니다. 알카이데는 발표문에서 말했습니다. "당신의 뇌는 계속 무언가를 말하고 있었습니다. 지금까지 아무도 듣지 않았을 뿐입니다."

132명의 참가자를 대상으로 한 연구에서 뉴러블의 EEG 헤드폰은 약 80퍼센트의 정확도로 집중과 산만함을 구분했습니다. 의료용 EEG 장비에 비하면 정밀도가 떨어집니다. 하지만 의

료용 장비는 젤을 바르고 전극을 두피에 부착하는 데만 30분이 걸립니다. 뉴러블은 헤드폰을 쓰기만 하면 됩니다.

회사의 비전은 "뇌를 위한 핏빛"입니다. 우리가 매일 걸음 수를 세듯이, 매일 집중의 질을 측정하는 것. 수면 추적이 일상이 된 것처럼, 인지 추적도 일상이 되는 것.

물론 한계가 있습니다. 귀 주변의 두피에서 측정하는 EEG는 신호가 약합니다. 머리 꼭대기에 전극을 붙이는 것과 비교하면 정보량이 적습니다. 움직임이나 근육의 긴장이 노이즈를 만들어냅니다. 뉴러블은 이런 한계를 인정하면서도, 완벽한 정밀도보다 일상적 사용성이 더 중요하다고 주장합니다.

어쩌면 그들이 옳을지도 모릅니다. 매일 쓸 수 있는 80퍼센트의 정확도가, 일 년에 한 번 받는 100퍼센트의 정확도보다 유용할 수 있습니다. 피트니스 트래커가 의료용 심전도를 대체하지 않았듯이, 뉴러블의 헤드폰도 신경과 진료를 대체하지 않을 것입니다. 하지만 그 사이의 광활한 영역에서, 새로운 시장이 열리고 있습니다.

다. 이모티브(Emotiv): 소비자용 EEG와 MN8 이어버드

탄 레는 베트남 난민이었습니다. 네 살 때 가족과 함께 보트를 타고 베트남을 떠났습니다. 호주에서 자랐고, 로스쿨을 졸업했습니다. 하지만 변호사가 되는 대신 그녀는 뇌를 연구하기로 했습니다. 2011년, 그녀는 TED 무대에 섰습니다. 머리에 검은 헤드셋을 쓰고 화면 속의 정육면체를 생각만으로 움직여 보였습니다. 이모티브라는 회사를 세계에 알린 순간이었습니다.

이모티브의 첫 제품은 EPOC이라는 헤드셋이었습니다. 14개의 전극이 달린 장치로, 연구자와 개발자를 위한 것이었습니다. 가격은 수백 달러. 의료용 EEG 장비가 수만 달러 하던 시절, 이것은 혁명이었습니다. 대학 연구실과 취미 개발자들이 뇌파 데이터에 접근할 수 있게 되었습니다.

그로부터 10년 이상이 지났습니다. 이모티브는 여전히 존재합니다. 하지만 경쟁자들이 많아졌습니다. 뉴러블은 더 세련된 헤드폰을 내놓았습니다. 메타는 손목으로 방향을 틀었습니다. 이모티브의 대응은 귀였습니다.

MN8. 세상에서 가장 작은 EEG 장치라고 회사는 주장합니다. 겉보기에는 평범한 블루투스 이어버드입니다. 귀에 꽂으면 음악을 들을 수 있고, 통화도 할 수 있습니다. 그러나 이어버드 안쪽에는 2채널 EEG 센서가 숨어 있습니다. 귓구멍 안에서 뇌파를 측정합니다.

채널 수가 적습니다. 뉴러블의 12채널에 비하면 6분의 1입니다. 하지만 이모티브의 주장에 따르면, 귓구멍 안쪽의 위치가 더 안정적인 신호를 제공합니다. 움직임에 의한 노이즈가 적고, 두피 표면보다 피부 접촉이 일정합니다.

가격은 399달러. 뉴러블 헤드폰의 절반이 조금 넘습니다. 배터리는 6시간 지속됩니다. 건식 전극을 사용하기 때문에 젤이나 물이 필요 없습니다. 설정에 1분도 걸리지 않습니다.

이모티브가 노리는 시장은 개인 소비자가 아닙니다. 기업입니다. 그들의 웹사이트에는 "직장 웰니스, 안전, 생산성"이라는 문구가 눈에 띕니다. MN8은 직원들의 스트레스 수준과 집중도를 모니터링하도록 설계되었습니다.

JLL이라는 글로벌 부동산 서비스 회사와의 파트너십이 그 사례입니다. JLL은 MN8을 사용하여 직원들이 다양한 협업 도구와 업무 환경에 어떻게 반응하는지 측정했습니다. 어떤 회의실 배치가 집중도를 높이는지, 어떤 소프트웨어가 인지 부하를 증가시키는지. 뇌파 데이터가 사무실 설계를 바꾸는 시대.

트럭 운전자의 졸음 감지도 가능한 응용 분야입니다. 항공 관제사의 주의력 모니터링도. 이모티브의 머신러닝 모델은 10년 이상 축적된 뇌파 데이터로 훈련되었습니다. 이전 세대 14채널 헤드셋에서 수집된 방대한 데이터베이스가 2채널 이어버드의 정확도를 높입니다.

그러나 이 기술에는 그림자가 있습니다. "보스웨어"라는 비판이 따라붙습니다. 고용주가 직원의 뇌를 감시하는 도구라는 것입니다. 당신이 회의 중에 딴생각을 했는지, 오후에 집중력이 떨어졌는지를 상사가 알 수 있다면, 이것은 생산성 향상일까요, 아니면 사생활 침해일까요.

MN8: 귓속의 인공지능, 뇌파를 읽는 이어폰



세계 최소형 2채널 EEG 이어폰
귓구멍 안쪽에서 뇌파를 측정하여 움직임 노이즈를 줄이고 안정적인 신호를 수집합니다.

빠르고 간편한 설정
1분 내 설정, 6시간의 자유로움
젤이나 물이 필요 없는 건식 전극을 사용하며, 399달러의 가격으로 간편하게 착용 가능합니다.

기업을 위한 생산성·안전 도구
직원들의 스트레스 수준을 모니터링하고, 줄임 운전 방지 및 사무실 환경 최적화에 활용됩니다.



혁신과 논란의 공존
효율성 증대 vs 사생활 침해
집중도 측정이라는 혁신적 기능 뒤에 '고용주의 뇌 감시'라는 보스웨어 논란이 공존합니다.

MN8: 업무 효율과 안전을 혁신하려는 기업용 뇌파 측정 솔루션

이모티브는 자사 제품이 의료기기가 아니라고 명시합니다. EU 의료기기 지침 93/42/EEC에 따른 의료기기로 판매되지 않는다는 면책 조항이 모든 제품 페이지에 붙어 있습니다. 그들은 생각이나 감정을 읽지 않는다고 말합니다. 단지 스트레스와 산만함의 수준에 대한 피드백을 제공할 뿐이라고.

경계가 모호합니다. 스트레스 수준을 측정하는 것과 감정을 읽는 것 사이의 차이는 무엇일까요. 집중도를 모니터링하는 것과 생각을 감시하는 것 사이의 거리는 얼마나 될까요.

탄 레는 뉴로테크가 웨어러블 기술의 다음 트렌드가 될 것이라고 말했습니다. 그녀의 말이 맞을 수도 있습니다. 문제는 그 트렌드를 누가, 어떤 목적으로, 어떤 규칙 아래에서 이끌 것인가입니다.

라. 빅테크의 진입: 애플 에어팟 뇌파 특허와 삼성의 히어러블

2023년 1월, 애플은 조용히 특허를 출원했습니다. 그해 7월 미국 특허청에 공개된 문서의 제목은 "전극의 동적 선택을 사용한 생체신호 감지 장치"였습니다. 특허 번호 US20230225659A1.

문서에는 기술적 세부 사항이 가득했습니다. 이어버드 형태의 장치. 팁과 하우징에 분포된 복수의 전극. 뇌전도(EEG), 근전도(EMG), 안전도(EOG), 심전도(ECG), 피부전기반응(GSR), 혈류량(BVP)을 측정할 수 있는 시스템. 인공지능이 사용자의 귀 모양에 따라 최적의 전극 조합을 자동으로 선택하는 방식.

애플의 접근법이 흥미로운 이유가 있습니다. 귀의 모양은 사람마다 다릅니다. 외이도의 크기, 이개의 형태, 이주의 위치. 기존의 귀 EEG 장치들은 개인 맞춤이 필요했습니다. 비용이 많이 들고, 시간이 지나면 귀의 크기나 모양이 변해 정확도가 떨어졌습니다.

애플의 해결책은 과잉 설계였습니다. 필요한 것보다 더 많은 전극을 배치합니다. 그런 다음 AI가 임피던스, 노이즈 수준, 피부 접촉 품질, 전극 간 거리를 분석하여 가장 좋은 신호를 내는 전극들을 선택합니다. 각 전극에 가중치를 부여하여 여러 신호를 하나의 최적화된 파형으로 결합합니다.

특허는 사용 사례도 언급했습니다. 수면 모니터링. 발작 감지. 스트레스 평가. 탭이나 쥐는 제스처로 측정을 시작하거나 중지하는 기능.

2025년 11월, 애플 연구팀은 PARS라는 새로운 머신러닝 기법을 발표했습니다. PAirwise Relative Shift의 약자입니다. 기존 방법들이 EEG 데이터의 작은 빈틈을 채우는 데 집중했다면, PARS는 뇌 신호의 더 큰 구조를 학습합니다. 레이블이 없는 원시 데이터에서 스스로 학습하는 자기지도학습 기법. 수면 단계 분류, 발작 감지 같은 과제에서 기존 방법보다 나은 성능을 보였습니다.

특허와 연구 논문. 애플의 의도를 읽을 수 있는 신호들입니다. 하지만 제품은 아직 없습니다. 에어팟 프로 3는 심박수를 측정하는 광용적맥파 센서를 탑재했지만, EEG는 포함되지 않았습니다. 특허 출원에서 제품 출시까지의 거리는 알 수 없습니다.

삼성은 다른 방식으로 움직이고 있습니다. 2025년 9월, 한양대학교 의공학과와의 협력으로 개발한 프로토타입을 공개했습니다. Ear-EEG라고 불리는 장치. 귀 주변에 착용하는 형태로, 8개의 금 전극이 외이도와 이개에 배치됩니다.

삼성의 발표에 따르면, 이 프로토타입은 이마에 착용하는 웨어러블보다 34퍼센트 더 좋은 신호 대 잡음 비율을 보였습니다. 임상용 두피 캡에 비하면 11퍼센트 뒤쳐졌지만, 일상에서 착용할 수 있는 장치로는 인상적인 수치였습니다.

시연된 기능 중 하나는 졸음 감지였습니다. 운전 중 졸음을 실시간으로 감지하여 경고하는 용도. 다른 하나는 더 논쟁적이었습니다. AI 모델을 적용하여 참가자의 비디오 신호도를 92.86퍼센트의 정확도로 예측한 것입니다. 뉴로마케팅. 당신이 어떤 영상을 좋아하는지 뇌파로 알아내는 기술.

삼성의 미래 웨어러블: 귀로 읽는 당신의 뇌

임상용 장비 수준의 강력한 성능

전문 임상용 캡의 89% 수준 도달, 이마 착용형보다 34% 성능 우수.

뇌파로 분석하는 졸음과 취향

실시간 졸음 감지 및 92.86% 정확도로 영상 선호도 예측.

일상 데이터로 치매 조기 징후 발견

음성 패턴, 걸음걸이, 수면 습관을 분석하여 인지 기능 변화 추적.

철저한 온디바이스 보안 및 녹스 보호

모든 뇌 데이터는 클라우드 없이 기기 내 처리 및 삼성 녹스로 안전하게 보호.

2027년 갤럭시 버즈 4 프로 통합 전망

차세대 이어폰에 EEG 기능 통합하여 상용화 계획.

2026년 1월 CES에서 삼성은 한 걸음 더 나아갔습니다. "브레인 헬스"라는 기능을 발표했습니다. 갤럭시 워치와 갤럭시 링의 데이터를 분석하여 인지 기능의 변화를 감지하는 서비스. 음성 패턴, 걸음걸이, 수면 습관을 추적하여 치매의 초기 징후를 발견하는 것이 목표입니다.

삼성 디지털 헬스 부문 부사장 프라빈 라자는 이 기술이 의사를 대체하려는 것이 아니라고 말했습니다. 경고 신호를 조기에 발견하여 적시에 의료 상담을 권장하는 것이 목적인다고. 데이터는 삼성 녹스 보안으로 보호되고, 클라우드가 아닌 기기 내에서 처리됩니다.

Ear-EEG 프로토타입은 아직 출시되지 않았습니다. 현재의 갤럭시 버즈 3 프로보다 크고, 디자인도 다듬어지지 않았습니다. 하지만 삼성의 로드맵은 분명해 보입니다. 유출된 정보에 따르면 2027년 갤럭시 버즈 4 프로에 EEG 기능이 통합될 수 있습니다.

두 거대 기업의 진입이 시사하는 바는 무엇일까요. 귀는 뇌를 엿보는 창이 되고 있습니다. 뉴러블, 이모티브, 넥스트센스 같은 스타트업들이 개척한 영역에 수조 달러짜리 기업들이 들어오고 있습니다.

그러나 규제는 기술을 따라가지 못합니다. 2024년 미국 콜로라도 주가 신경 데이터 보호법을 통과시켰지만, 대부분의 국가와 지역에는 아직 관련 법률이 없습니다. 당신의 뇌파 데이터는 누구의 것일까요. 당신이 집중하지 못한 시간의 기록은 의료 정보일까요, 소비자 데이터일까요, 아니면 직장 내 성과 지표일까요.

이어버드는 점점 더 작아지고, 센서는 점점 더 민감해지고, 알고리즘은 점점 더 똑똑해집니다. 하지만 우리가 던져야 할 질문은 기술의 능력이 아니라 기술의 방향입니다. 귀에 꽂은 작은 장치가 우리의 가장 은밀한 영역, 즉 생각 이전의 충동, 의식 이전의 반응, 말로 표현되지 않은 선호를 읽어낼 때, 우리는 그것을 편리함이라 부를까요, 아니면 침해라 부를까요.

대답은 아직 없습니다. 어쩌면 대답은 기술이 아니라 우리가 만들 제도와 합의에 달려 있을지도 모릅니다.

12 중국의 추격과 글로벌 경쟁 구도

2024년 4월, 베이징 중관춘 포럼의 한 전시 부스 앞에 인파가 몰렸습니다. 화면 속에서 원숭이 한 마리가 로봇 팔을 움직여 딸기를 집어 입으로 가져갔습니다. 조이스틱도, 버튼도 없었습니다. 오직 생각만으로. 이 영상을 공개한 곳은 베이징 뇌과학연구원과 그 자회사 뉴사이버 뉴로테크였습니다. 중국 관영 신화통신은 이를 중국 최초의 고성능 침습형 뇌-컴퓨터 인터페이스라고 보도했습니다. 뉴럴링크의 원숭이 페이지가 풍 게임을 한 지 3년 만에, 중국은 물리적 세계와 상호작용하는 단계로 나아갔습니다.

실리콘밸리의 혁신이 차고에서 시작되어 벤처 캐피탈의 힘으로 성장했다면, 중국의 혁신은 국가의 설계도 위에서 조립됩니다. 그 설계도의 이름은 차이나 브레인 프로젝트입니다. 이 거대한 계획은 단순한 과학 연구가 아닙니다. 뇌가 새로운 전장이 되고 데이터가 새로운 석유가 되는 시대를 대비한, 중국의 국가 생존 전략입니다.

가. 차이나 브레인 프로젝트와 국가 주도 BCI 연구

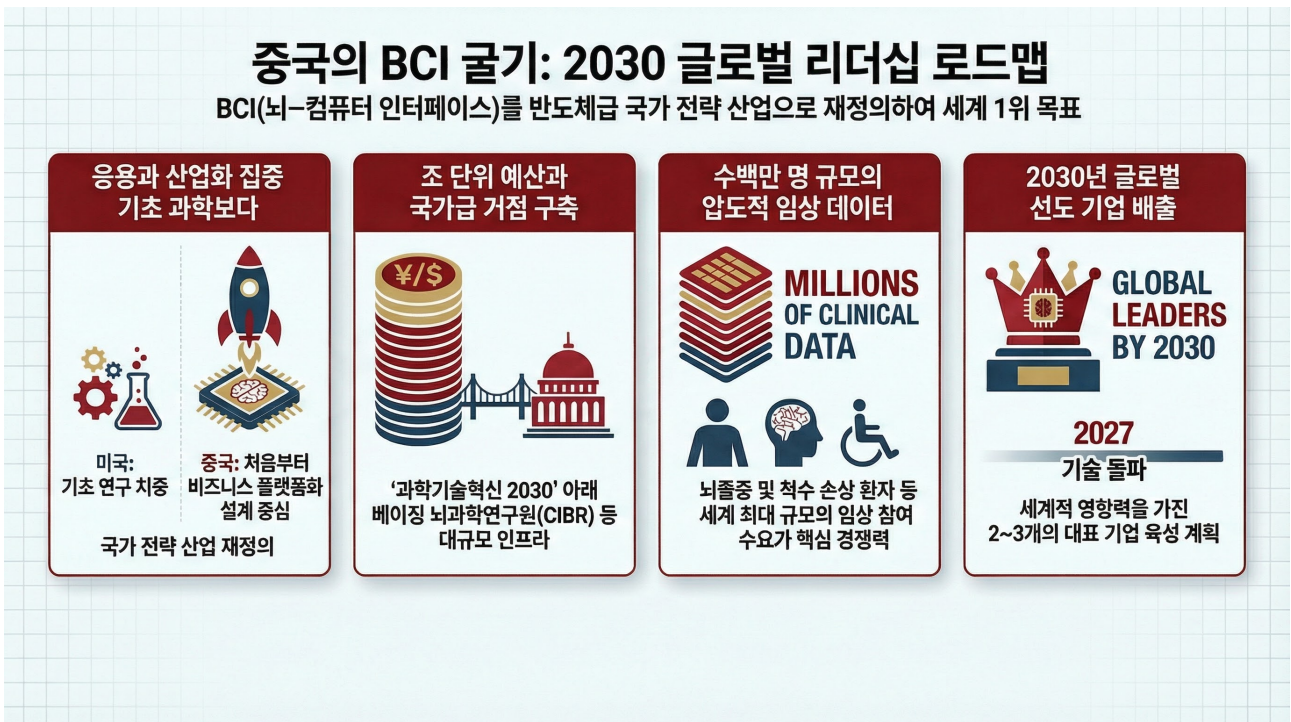
2016년 3월, 베이징 인민대회당에서 제13차 5개년 계획이 발표되었습니다. 수천 페이지에 달하는 이 문서 속에 서구의 정보 분석가들이 주목한 항목이 있었습니다. 뇌과학 및 뇌 유사 지능 기술이라는 다섯 글자였습니다. 중국은 이 분야를 국가 핵심 전략 사업으로 지정했습니다. 그것은 오바마 행정부가 2013년 출범시킨 브레인 이니셔티브에 대한 베이징의 응답이었습니다. 미국이 30억 달러를 쏟아부어 뇌의 지도를 그리겠다고 선언했을 때, 중국은 더 큰 야망을 품었습니다. 뇌를 이해하는 데 그치지 않고, 그것을 인공지능과 융합하여 국가 경쟁력의 무기로 만들겠다는 것이었습니다.

차이나 브레인 프로젝트의 구조는 일체양익이라는 네 글자로 요약됩니다. 일체는 하나의 몸통, 양익은 두 개의 날개입니다. 몸통은 인간 뇌의 인지 기능에 대한 신경학적 이해를 뜻합니다. 우리가 어떻게 기억하고, 어떻게 판단하며, 어떻게 감정을 느끼는지에 대한 근본적인 탐구입니다. 두 날개는 각각 뇌 질환의 진단 및 치료와 뇌 모방 인공지능의 개발을 가리킵니다. 미국이 기초 과학에 방점을 찍었다면, 중국은 처음부터 응용과 산업화를 설계의 중심에 놓았습니다. 그들에게 BCI는 의료 기기가 아니라 플랫폼 기술이었습니다.

이 차이는 자금의 흐름에서 드러납니다. 중국 정부는 과학기술혁신 2030이라는 이름 아래 뇌과학 연구에 수조 원 규모의 예산을 배정했습니다. 베이징과 상하이에 각각 뇌과학 연구의 거점이 세워졌습니다. 2018년 베이징시 정부와 여러 대학이 공동 설립한 베이징 뇌과학연구원, 영문 약칭 CIBR은 이 전략의 첨병이 되었습니다. 뉴럴링크가 샌프란시스코에서 창업한 지 약 2년 뒤의 일이었습니다.

CIBR의 초대 원장으로 부임한 루오 민민 박사는 중국의 BCI 전략을 상징하는 인물입니다. 그는 펜실베이니아 대학에서 신경과학 박사 학위를 받고 미국에서 거의 10년을 보냈습니다. 그리고 조국으로 돌아왔습니다. CNN과의 인터뷰에서 그는 솔직하게 말했습니다. 미국이 여

전히 침습형과 비침습형 모두에서 선두 주자입니다. 하지만 그의 눈에는 다른 것이 보였습니다. 중국에는 임상시험에 참여하기를 간절히 원하는 수백만 명의 환자가 있었습니다. 뇌졸중, 척수 손상, 루게릭병. 그 수요는 압도적이었습니다.



2025년 7월, 중국 정부는 뇌-컴퓨터 인터페이스 산업 혁신 발전 촉진에 관한 실시 의견이라는 정책 문서를 발표했습니다. 과학기술부, 공업정보화부, 국가위생건강위원회 등 여러 부처가 공동으로 서명한 이 문서는 명확한 목표를 제시했습니다. 2027년까지 핵심 기술에서 획기적인 돌파를 이루고, 2030년까지 전 세계적 영향력을 가진 2~3개의 선도 기업을 육성한다는 것이었습니다. BCI는 더 이상 연구실의 실험이 아니라, 반도체나 전기차처럼 국가 전략 산업의 반열에 올랐습니다.

七部门关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见

工业和信息化部 国家发展改革委 教育部 国家卫生健康委 国务院国资委 中国科学院 国家药监局关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见

脑机接口通过在脑与机器之间建立信息通道，实现生物智能与机器智能的协同交互，是生命科学和信息科学融合发展的前沿技术。当前，脑机接口创新成果持续涌现，产业加速壮大，正孕育颠覆性突破，已成为科技创新和产业创新深度融合的重要领域。为把握新一轮科技革命和产业变革机遇，推动脑机接口产业高质量发展，加快形成新质生产力，高水平赋能新型工业化，有力支撑现代化产业体系建设，制定本实施意见。

到2027年，脑机接口关键技术取得突破，初步建立先进的技术体系、产业体系和标准体系。电极、芯片和整机产品性能达到国际先进水平，脑机接口产品在工业制造、医疗健康、生活消费等加快应用。产业规模不断壮大，打造2至3个产业发展集聚区，开拓一批新场景、新模式、新业态。

到2030年，脑机接口产业创新能力显著提升，形成安全可靠的产业体系，培育2至3家有全球影响力的领军企业和一批专精特新中小企业，构建具有国际竞争力的产业生态，综合实力迈入世界前列。

研发面向硬脑膜上、硬脑膜下、大脑皮层内等不同区域的植入式电极，探索脑血管介入式电极，强化材料的稳定性和可靠性，研制专用制备和封装工艺，提升电极通道数、生物相容性、空间分辨率和信噪比。加快高可用、自适应调节的非植入式电极研发，发展低阻抗、薄介质的新型电极材料，提升电极便捷性、舒适性和易用性。

发展高通道、高速率脑信号采集芯片，强化模数转换、通道管理和噪声抑制，增强脑信号采集放大能力。研发高性能、超低功耗脑信号处理芯片，强化并行处理能力，推动感知、计算和调节等功能的一体化集成。

完善脑信号编解码软件，降低编码过程的认知负荷，应用人工智能技术强化解码能力和任务迭代优化能力，提升编解码准确率、响应速率和场景通用性。

探索集成高密度神经记录传感器、超低功耗植入式芯片的新型产品，创新脑意图识别功能，提高控制精度和响应速度。创新额贴式、耳贴式、入耳式、发夹式等产品形态，推动非植入产品向轻量化、高速率、低功耗发展。研制头盔、头显、眼镜、耳机等集成式脑机接口产品，通过与已有生活消费产品融合发展，支持非植入产品的迭代应用和规模化推广。

研发用于植入脑机接口的高精度手术机器人，突破亚微米级精度控制与动态调整技术，提升区域精准实时成像与三维重建能力。

发展壮大脑机接口领域领军企业，支持组建产业创新联合体，牵头承担国家科技重大专项等任务。促进脑机接口中小企业创新供给，加快培育专精特新中小企业、专精特新"小巨人"企业、独角兽企业等，推动大中小企业融通创新。

建立脑机接口技术标准体系，布局标准化发展路线图，积极参与国际标准制定，大力推动我国标准"走出去"。

持续推动伦理研究，建立健全部门协同、社会参与的治理体系，促进技术创新和科技伦理协调发展。建立数据治理框架，规范对用户信息的收集、存储、使用等行为，防止脑隐私泄露，提升生物数字信息安全防护能力。

핵심 요약

뇌-컴퓨터 인터페이스는 뇌와 기계 사이에 정보 통로를 구축하여 생물지능과 기계지능의 협동 상호작용을 실현하는 기술로, 생명과학과 정보과학이 융합 발전하는 최첨단 기술이다. 현재 뇌-컴퓨터 인터페이스 혁신 성과가 지속적으로 출현하고 산업이 가속적으로 성장하면서 파괴적 돌파를 잉태하고 있으며, 이미 과학기술 혁신과 산업 혁신이 깊이 융합되는 중요한 영역이 되었다. 새로운 과학기술 혁명과 산업 변혁의 기회를 포착하고 뇌-컴퓨터 인터페이스 산업의 고품질 발전을 추진하며 신질 생산력 형성을 가속화하고 신형 공업화를 고수준으로 역량 강화하며 현대화 산업체계 건설을 유력하게 지원하기 위해 본 실시의견을 제정한다.

2027년까지 뇌-컴퓨터 인터페이스 핵심 기술이 돌파를 이루고 선진적인 기술체계, 산업체계, 표준체계를 초보적으로 구축한다. 전극, 칩, 완제품 성능이 국제 선진 수준에 도달하고 뇌-컴퓨터 인터페이스 제품이 공업 제조, 의료 건강, 생활 소비 등 분야에서 응용을 가속화한다. 산업 규모가 지속적으로 확대되고 2~3개의 산업발전 집적구를 조성하며 새로운 시나리오, 새로운 모델, 새로운 업태를 개척한다.

2030년까지 뇌-컴퓨터 인터페이스 산업 혁신 능력이 현저하게 향상되고 안전하고 신뢰할 수 있는 산업체계를 형성한다. 글로벌 영향력을 가진 선도기업 2~3개와 다수의 전문 특화 중소기업을 육성하고 국제 경쟁력을 갖춘 산업 생태계를 구축하여 종합 실력이 세계 선두권에 진입한다.

경막 상부, 경막 하부, 대뇌 피질 내부 등 서로 다른 영역을 대상으로 하는 식입식 전극을 연구개발하고 뇌혈관 개입식 전극을 탐색하며 재료의 안정성과 신뢰성을 강화한다. 전용 제조 및 패키징 공정을 연구개발하여 전극 채널 수, 생체 적합성, 공간 분해능, 신호 대 잡음비를 향상시킨다. 고가용성과 자기적응 조절이 가능한 비식입식 전극 연구개발을 가속화하고 저임피던스, 박막 매질의 신형 전극 재료를 발전시켜 전극의 편의성, 쾌적성, 사용 용이성을 향상시킨다.

고체널, 고속 뇌신호 수집 칩을 발전시키고 아날로그-디지털 변환, 채널 관리, 잡음 억제를 강화하여 뇌신호 수집 증폭 능력을 향상시킨다. 고성능, 초저전력 뇌신호 처리 칩을 연구개발하고 병렬 처리 능력을 강화하며 감지, 계산, 조절 등 기능의 일체화 집적을 추진한다.

뇌신호 인코딩-디코딩 소프트웨어를 완비하고 인코딩 과정의 인지 부하를 낮추며 인공지능 기술을 적용하여 디코딩 능력과 작업 반복 최적화 능력을 강화한다. 인코딩-디코딩 정확도, 응답 속도, 시나리오 범용성을 향상시킨다.

고밀도 신경 기록 센서와 초저전력 식입식 칩을 통합한 신형 제품을 탐색하고 뇌 의도 인식 기능을 혁신하여 제어 정밀도와 응답 속도를 향상시킨다. 이마 부착식, 귀 부착식, 꺾속 삽입식, 헤어핀식 등 제품 형태를 혁신하고 비식입 제품이 경량화, 고속화, 저전력 방향으로 발전하도록 추진한다. 헬멧, 헤드마운트 디스플레이, 안경, 이어폰 등 통합형 뇌-컴퓨터 인터페이스 제품을 개발하고 기존 생활 소비 제품과의 융합 발전을 통해 비식입 제품의 반복 응용과 대규모 보급을 지원한다.

식입식 뇌-컴퓨터 인터페이스용 고정밀 수술 로봇을 연구개발하고 서브마이크론 수준의 정밀 제어 및 동적 조정 기술을 돌파하며 영역 정밀 실시간 이미징 및 3차원 재구성 능력을 향상시킨다.

뇌-컴퓨터 인터페이스 분야 선도기업을 발전시키고 산업혁신연합체 구성을 지원하며 국가 과학기술 중대 프로젝트 등 과제를 주도적으로 수행하게 한다. 뇌-컴퓨터 인터페이스 중소기업의 혁신 공급을 촉진하고 전정특신 중소기업, 전정특신 소거인 기업, 유니콘 기업 등의 육성을 가속화하며 대중소기업 융합 혁신을 추진한다.

뇌-컴퓨터 인터페이스 기술 표준체계를 수립하고 표준화 발전 로드맵을 배치하며 국제 표준 제정에 적극 참여하고 중국 표준의 해외 진출을 대대적으로 추진한다.

윤리 연구를 지속적으로 추진하고 부처 협동과 사회 참여가 이루어지는 거버넌스 체계를 구축하여 기술 혁신과 과학기술 윤리의 조화로운 발전을 촉진한다. 데이터 거버넌스 프레임워크를 수립하고 사용자 정보의 수집, 저장, 사용 등 행위를 규범화하며 뇌 프라이버시 유출을 방지하고 생체 디지털 정보 보안 방호 능력을 향상시킨다.

(이상 중국의 규정설명)

지방정부들도 경쟁적으로 뛰어 들었습니다. 베이징시는 2025년 1월 자체 BCI 발전 행동 계획을 발표하며 2027년까지 3~5개의 유니콘 기업을 육성하겠다고 선언했습니다. 상하이시도 같은 달 유사한 계획을 내놓았습니다. 광둥성은 BCI를 생명건강 미래 산업으로 분류하고 집중

지원에 나섰습니다. 2024년 한 해 동안 베이징에서만 484건의 BCI 관련 특허가 출원되었습니다. 광둥성이 360건, 텐진이 294건으로 그 뒤를 이었습니다.

이 숫자들이 의미하는 바는 분명합니다. 중국은 BCI를 단순한 의료 기술이 아니라 국가 역량의 시험대로 보고 있습니다. 대학의 기초 연구, 병원의 임상 데이터, 기업의 상용화 능력이 하나의 파이프라인으로 연결되어 있습니다. 베이징의 연구실에서 개발된 기술이 상하이의 병원에서 임상시험을 거쳐 선전의 공장에서 제품으로 나오는 주기가 놀라울 정도로 짧습니다. 이것이 국가 주도 모델의 힘입니다.

미국의 연구자들도 이를 인지하고 있습니다. 2024년 조지타운 대학의 연구진은 중국의 BCI 발전에 관한 보고서를 발표했습니다. 그들은 이렇게 썼습니다. 중국의 비침습형 BCI 연구는 과학 선진국들과 대등한 수준에 도달했습니다. 역사적으로 비침습형에 비해 뒤처졌던 침습형 연구도 속도를 높여 글로벌 수준에 근접하고 있습니다. 8년의 격차가 15개월로 줄어든 것입니다.

그러나 이 거대한 기계에는 그림자도 있습니다. 군민 융합이라 불리는 전략은 민간 기술과 군사 기술의 경계를 의도적으로 허물어뜨립니다. 일부 서구 분석가들은 중국의 BCI 연구가 군인의 인지 능력 강화나 무인기 조종에 활용될 수 있다고 우려합니다. 루오 민민 박사는 이를 부인했습니다. 우리의 기술은 군사와 무관합니다. 마비 환자를 돕는 데 집중하고 있습니다. 그의 말이 진실인지, 아니면 공개적으로 말할 수 있는 범위 내의 진실인지는 알 수 없습니다.

분명한 것은 이것입니다. 차이나 브레인 프로젝트는 과학 연구의 이름을 달고 있지만, 그 본질은 국가 경쟁력의 문제입니다. 뇌의 언어를 해독하는 것이 목표이지만, 그 언어가 어떤 문장을 쓰게 될지는 아직 정해지지 않았습니다. 치료의 문장일 수도 있고, 감시의 문장일 수도 있습니다. 혹은 우리가 아직 상상하지 못한 문장일 수도 있습니다.

나. 베이징 신즈다(Xinzhida) 뉴로테크놀로지의 재활 솔루션

2025년 3월의 어느 아침, 베이징 선무병원의 한 병실에서 67세 여성이 컴퓨터 화면을 응시했습니다. 그녀는 루게릭병 환자였습니다. 목소리를 잃은 지 오래되었습니다. 입술은 움직이지 않았습니다. 그러나 화면에 네 글자가 떠올랐습니다. 나는 먹고 싶다. 중국어로 쓰인 이 문장은 그녀의 뇌에서 직접 나온 것이었습니다.

이 장면을 가능하게 한 것은 동전 크기의 칩이었습니다. 베이나오 1호라 불리는 이 장치는 베이징 뇌과학연구원과 뉴사이버 뉴로테크가 공동 개발한 반침습형 BCI입니다. 뉴사이버의 지배주주는 중관춘발전그룹이며, 이 회사는 2023년 90억 위안, 한화로 약 1조 7천억 원의 매출을 기록한 베이징시 산하 국유기업입니다. 국제 보도에서 베이징 신즈다 뉴로테크놀로지로 표기되는 이 조직은 실질적으로 국가와 민간의 경계에 걸쳐 있습니다.

베이나오 1호의 기술적 접근은 뉴럴링크와 다릅니다. 뉴럴링크는 전극을 뇌 조직 깊숙이 삽입합니다. 신호의 품질은 높지만 수술의 위험도 큼니다. 베이나오 1호는 경막 위에 칩을 올려 놓습니다. 경막은 뇌를 감싸는 세 겹의 막 중 가장 바깥에 있는 것입니다. 뇌 조직을 직접 관통하지 않으므로 출혈이나 감염의 위험이 줄어듭니다. 대신 신호의 정밀도는 낮아집니다. 그러나 루오 민민 박사는 이것을 단점으로만 보지 않았습니다. 그는 말했습니다. 두 제품은 경쟁 관계가 아닙니다. 사과와 오렌지를 비교하는 것과 같습니다.

베이나오 1호: 뇌와 기계를 잇는 '더 안전한' 혁신

뇌를 직접 찌르지 않아도 충분히 강력한 기술력

뇌 조직 손상을 줄인 '반침습형' 설계

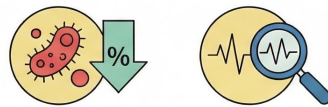


기존 방식: 뇌 깊숙이 삽입 (X)

베이나오 1호: 경막 위 배치 (O)

뇌 깊숙이 전극을 삽입하는 대신, 뇌를 감싸는 경막 위에 칩을 배치해 안전성을 높였습니다.

낮아진 감염 위험, 유지되는 정밀도

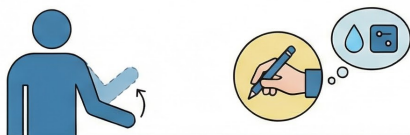


출혈 및 감염 위험 감소

특정 단어 해독 가능

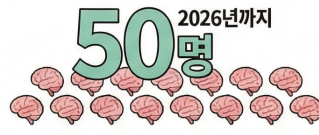
출혈과 감염 위험은 획기적으로 줄이면서도 특정 단어를 해독할 만큼의 충분한 정보를 수집합니다.

4년 만에 물건을 집고 맘을 흘리다



전신 마비 환자가 이식 1년 만에 펜을 쥐고 부분적인 배변 조절 능력을 회복하는 성과를 거뒀습니다.

세계 최대 규모 임상 데이터 확보 목표



2026년까지 50명 규모의 임상을 진행하여 뉴럴링크 등 경쟁사를 앞지르는 데이터를 확보할 계획입니다.

조지타운 대학의 신경과학자 마크시밀리안 리첸후버는 이에 동의했습니다. 그는 CNN에 이렇게 말했습니다. 뉴사이버가 경막을 통해서도 특정 단어를 해독할 만큼 충분한 정보를 얻을 수 있다는 것은 흥미로운 일입니다. 이는 반침습형 기술의 가능성을 보여주는 중요한 데이터입니다.

2025년 5월까지 베이나오 1호는 총 5명의 환자에게 이식되었습니다. 루오 박사는 연말까지 13명에게 추가 이식할 계획이라고 밝혔습니다. 2026년에는 규제 당국의 승인을 받아 50명 규모의 공식 임상시험을 진행하겠다는 것이 그의 목표입니다. 만약 이것이 실현된다면, 베이나오 1호는 세계에서 가장 많은 환자 데이터를 보유한 BCI 시스템이 될 것입니다. 현재 싱크론이 10명, 뉴럴링크가 3명의 환자를 보유하고 있습니다.

임상시험의 결과는 고무적이었습니다. 척수 손상으로 전신이 마비된 동씨라는 38세 남성 환자는 2020년 교통사고 이후 목 아래로 아무것도 느끼지 못했습니다. 베이나오 시스템을 이식 받은 지 1년 후, 그는 작은 물건을 집을 수 있게 되었습니다. 펜을 쥌 수 있었습니다. 부분적이지만 배변 조절 능력도 돌아왔습니다. 4년 만에 처음으로 재활 훈련 중 땀을 흘렸습니다. 이것은 단순한 기술 시연이 아니었습니다. 한 인간의 삶이 바뀌는 순간이었습니다.

뉴사이버는 여기서 멈추지 않았습니다. 그들은 베이나오 2호라는 완전 침습형 칩도 개발하고 있습니다. 원숭이 실험에서 이 칩은 로봇 팔을 정밀하게 제어하는 데 성공했습니다. 루오 박사는 무선 버전의 베이나오 2호가 12~18개월 내에 인간을 대상으로 시험될 것이라고 예상했습니다. 이 제품은 뉴럴링크의 N1과 직접적으로 경쟁하게 될 것입니다.

재활 솔루션으로서 베이나오 시스템의 핵심은 폐루프 피드백에 있습니다. 환자가 팔을 움직이겠다고 생각하면 BCI가 이를 감지합니다. 신호는 외부 장치로 전달되어 로봇 팔이나 외골격 슈트를 작동시킵니다. 동시에 기능적 전기자극 장치가 환자의 근육에 전기 신호를 보내 실제로 근육이 수축하도록 유도합니다. 이 과정이 반복되면 뇌와 근육 사이의 신경 연결이 강화됩니다. 뇌의 가소성을 이용한 재활 훈련입니다.

중국은 이 기술이 절실히 필요한 시장을 가지고 있습니다. 전 세계에서 뇌졸중 발병률이 가장 높은 국가 중 하나입니다. 수백만 명의 환자가 운동 기능 장애를 안고 살아갑니다. 기존의 재활 인프라는 턱없이 부족합니다. BCI 기반 재활 시스템은 이 간극을 메울 잠재력을 가지고 있습니다. 후베이성은 2025년 3월 중국 최초로 BCI 시술에 대한 의료 수가를 발표했습니다. 침습형 BCI 이식 비용은 6,552위안, 약 120만 원으로 책정되었습니다. 비침습형 BCI 장착 비용은 966위안입니다. 이는 BCI가 실험 단계를 넘어 의료 시스템 안으로 들어오고 있음을 의미합니다.

뉴사이버만이 중국의 유일한 플레이어는 아닙니다. 상하이 뉴로엑스는 실크 단백질을 이용한 유연 전극 기술을 개발하고 있습니다. 2025년 1월, 이 회사는 언어 해독 임상시험에서 환자가 새해 복 많이 받으세요라는 문장을 생각했을 때 컴퓨터가 이를 성공적으로 해독했다고 발표했습니다. 칭화대와 협력하는 뉴러클은 NEO라는 최소침습형 시스템을 개발하여 간질과 뇌졸중 재활에 적용할 계획입니다. 2025년 30~50명의 척수 손상 환자를 대상으로 대규모 임상시험을 예고했습니다.

투자금도 물리고 있습니다. 2025년 2월 상하이의 스테어메드는 3억 5천만 위안, 약 650억 원의 투자를 유치했습니다. 중국 침습형 BCI 분야 최대 규모였습니다. 그러나 이 금액은 뉴럴링크가 2024년 6월 확보한 6억 4,900만 달러에 비하면 여전히 작습니다. 자본의 규모에서 미국의 우위는 여전합니다.

루오 민민 박사는 이 점을 인정합니다. 그러나 그는 다른 장점을 강조합니다. 환자 모집 속도, 통합된 연구-임상-산업 네트워크, 그리고 정부의 지원입니다. 베이징 1호의 임상시험 소식이 알려진 후 수많은 환자들이 도움을 요청했다고 그는 말했습니다. 그 수요는 기술 개발의 가장 강력한 동력입니다.

베이징 신즈다와 뉴사이버의 부상은 BCI 기술이 실리콘밸리의 전유물이 아님을 보여줍니다. 그들은 중국의 제조 역량과 풍부한 임상 자원을 결합하여 독자적인 생태계를 구축하고 있습니다. 경쟁은 기술만으로 결정되지 않습니다. 환자 모집, 병원 협력, 인허가, 제조, 비용 구조까지 포함한 시스템의 싸움입니다. 그리고 그 싸움에서 중국은 만만치 않은 상대입니다.

다. BCI 시장의 폭발: 의료기기를 넘어 뉴로 컨슈머 시장으로

2024년의 어느 날, 항저우의 한 초등학교에서 이상한 광경이 목격되었습니다. 학생들이 머리에 밴드를 두르고 수업을 듣고 있었습니다. 이 밴드는 뇌파를 측정하여 집중도를 실시간으로 모니터링했습니다. 집중하면 초록색, 산만하면 빨간색. 교사의 태블릿에는 학생들의 주의력 상태가 색깔로 표시되었습니다. 서구 사회였다면 프라이버시 침해 논란으로 즉시 중단되었을 실험입니다. 그러나 높은 학구열과 경쟁을 중시하는 중국에서 이것은 과학적 학습 관리 도구로 받아들여졌습니다.

이것이 뉴로 컨슈머 시대의 한 단면입니다. BCI 기술이 병원을 벗어나 일상으로 들어오고 있습니다. 침습형 임플란트가 아니라 헤드밴드, 이어폰, 안경 같은 웨어러블 기기를 통해서입니다.

시장조사기관 프리시던스 리서치에 따르면, 글로벌 뇌 기술 시장은 2024년 약 26억 달러 규모였습니다. 2034년에는 124억 달러로 성장할 것으로 전망됩니다. 중국 시장만 보면 2024년 8,550만 달러에서 2030년 2억 4,200만 달러로 연평균 19.3%의 성장률이 예상됩니다.

이 폭발의 동력은 두 가지입니다.

하나는 비침습형 기술의 진화입니다. 뇌파 측정에 필요한 전극이 작아지고 저렴해졌습니다. 건식 전극 기술이 등장하면서 젤을 바르는 번거로움도 사라졌습니다. AI 기반 신호 처리 알고리즘이 노이즈를 걸러내고 의미 있는 패턴을 추출합니다.

스마트폰과 클라우드가 이 모든 것을 연결합니다. 다른 하나는 응용 분야의 확장입니다. 의료만이 아닙니다. 웰니스, 교육, 게임, 산업 안전까지 BCI가 침투하고 있습니다.

웰니스 시장이 그 선두에 있습니다. 뮤즈라는 브랜드의 명상용 헤드밴드는 뇌파를 측정하여 사용자의 마음 상태를 피드백합니다. 집중하면 새소리가 들리고, 마음이 흐트러지면 비바람 소리가 들립니다. 마스터앤다이내믹의 MW75 뉴로 헤드폰은 이어 쿠션 안에 EEG 센서를 숨기고 인지 상태에 따라 오디오를 조절합니다. 이모티브의 MN8 이어버드는 귀 안에서 뇌파를 측정합니다. 2025년 CES에서 이런 제품들이 쏟아져 나왔습니다.

수면 시장도 거대합니다. 브레인코를 비롯한 기업들이 수면 중 뇌파를 분석하고 특정 주파수의 소리를 들려주어 깊은 잠을 유도하는 스마트 안대를 출시했습니다.

격무에 시달리는 중국의 젊은 직장인들에게 뇌를 해킹하여 휴식의 질을 높인다는 문구는 매력적입니다. 스트레스 관리와 집중력 향상을 표방하는 뉴로피드백 앱들이 앱스토어를 채우고 있습니다.

산업 현장에서도 BCI가 활용됩니다. 엔터테크라는 기업은 광부나 트럭 운전사의 헬멧에 뇌파 센서를 부착하여 피로도를 측정합니다. 졸음 운전의 위험이 감지되면 경고음이 울립니

다. 중국의 국영 기업들이 이 시스템을 도입했습니다. 안전이라는 명분 아래 노동자의 뇌파를 실시간으로 모니터링하는 것입니다. 효율과 감시의 경계는 어디인가요?

게임 산업도 BCI의 기폭제가 되고 있습니다.

벨브의 게이브 뉴웰은 오픈BCI와 협력하여 뇌 신호로 조작하는 게임 인터페이스를 탐구하고 있습니다. 집중력에 따라 난이도가 조절되고, 감정 상태에 따라 게임 환경이 바뀌는 몰입형 경험. 상하이의 게임쇼 차이나조이에서는 생각만으로 캐릭터의 스킬을 발동하는 BCI 게임들이 시연되었습니다. 스냅은 비침습형 BCI 스타트업 넥스트마인드를 인수하여 AR 연구에 결합했습니다. BCI는 차세대 입력 장치로 진화하고 있습니다.

빅테크 기업들의 진입이 이 시장을 더욱 달구고 있습니다. 애플은 에어팟에 뇌파 측정 기능을 탑재하는 특허를 출원했습니다. 수억 명의 사용자가 매일 착용하는 이어버드가 뇌와의 연결 통로가 될 수 있습니다. 사용자의 스트레스 수준을 감지하고 음악을 추천하거나 알람을 조절하는 기분 인식 컴퓨팅의 대중화입니다. 삼성전자도 갤럭시 버즈와 링을 연동하여 생체 신호 생태계를 구축하고 있습니다.

메타는 더 급진적입니다. 마크 저커버그는 손목에 착용하는 근전도 밴드를 선보였습니다. 이 밴드는 뇌에서 손으로 가는 신경 신호를 가로챍니다. 사용자는 손가락을 실제로 움직이지 않고도 클릭하고 스크롤할 수 있습니다. 증강현실 안경과 결합하면 생각만으로 디지털 세계를 조작하는 인터페이스가 완성됩니다. 이것은 키보드와 마우스, 터치스크린에 이은 제4의 입력 방식입니다.

중국 기업들은 교육 시장에 집중하고 있습니다. 브레인코의 집중력 헤드밴드는 FDA 승인을 받은 소비자 제품입니다. 그들은 홍콩으로 사업을 확장하며 교육과 재활 시장을 동시에 공략하고 있습니다. 학생의 뇌파를 분석하여 학습 효율을 높인다는 것이 그들의 약속입니다. 그러나 이것은 교실을 감시의 공간으로 만들 위험도 안고 있습니다.

뉴로 컨슈머 시장의 성장은 새로운 윤리적 질문을 던집니다. 기업들이 우리의 클릭 데이터뿐만 아니라 감정, 주의력, 무의식적 선호도까지 수집할 때, 정신적 프라이버시는 어떻게 보호받을 수 있을까요? 유네스코는 2025년 신경기술 윤리 기준을 채택했습니다. 이는 뇌 데이터가 별도의 범주로 다루어져야 한다는 국제적 인식의 반영입니다.

그러나 규제는 기술의 속도를 따라가지 못하고 있습니다. 중국 정부는 2024년 BCI 연구 윤리 지침을 발표하며 사전동의, 개인정보 보호, 취약집단 보호 등의 원칙을 제시했습니다. 하지

만 산업 육성의 압력 속에서 규제가 상용화보다 앞서기는 어렵습니다. 뉴로 컨슈머 시장은 기술적 기회이자, 인류가 자신의 가장 내밀한 공간인 정신을 어떻게 지킬 것인가에 대한 시험대입니다.

시장의 폭발은 침습형 임플란트가 당장 대중화되어서가 아닙니다. 저위험 센서와 AI와 앱이 결합한 뉴로 컨슈머가 바깥에서 시장을 부풀리고, 그 관심과 자본이 다시 의료와 임상으로 유입되는 순환에서 발생합니다. 2040년 중국 BCI 시장은 1,200억 위안, 약 22조 원에 달할 것이라는 전망도 있습니다. 바야흐로 신경 경제의 시대가 열리고 있습니다.

라. 특허 전쟁: 2,160개 특허 가족과 664개 기업의 경쟁

실험실 바깥에서 또 다른 전쟁이 벌어지고 있습니다. 법률 사무소와 특허청에서 일어나는 이 전쟁은 논문보다 중요하고, 임상시험보다 오래 지속됩니다. 특허 전쟁입니다. 기술 표준을 선점하고 경쟁자의 진입을 막기 위해 기업들은 촘촘한 특허 장벽을 쌓고 있습니다. 그 장벽의 이름은 해자입니다.

특허 분석 전문 기업 패턴트베스트의 최근 보고서에 따르면, 전 세계 BCI 분야에서 3,336건의 개별 특허 출원이 2,160개의 고유 특허 가족으로 분류됩니다. 이 특허들을 출원한 조직의 수는 664개에 달합니다. 상업 기업만이 아닙니다. 대학과 연구소가 상당 부분을 차지합니다. 77%의 특허가 현재 유효하거나 심사 중이고, 23%는 만료되었거나 포기되었습니다.

이 숫자들은 무엇을 말해주는가요? BCI가 소수의 거인만 하는 분야가 아니라는 것입니다. 대학과 연구소가 기초 특허를 넓게 깔고, 스타트업과 대기업이 응용 레이어에서 촘촘히 덧씌우는 형태로 지식재산권의 지형이 형성되어 있습니다. 패턴트베스트는 텐진대를 비롯한 대학들이 기초 혁신에서 큰 비중을 차지한다고 분석합니다. 스탠퍼드, 캘리포니아 대학 시스템도 마찬가지입니다. 학술 기관이 원천 기술을 보유하고, 기업이 상용화 특허를 쌓는 구조입니다.

미국과 중국의 양강 구도가 이 전쟁의 핵심입니다. 양적인 측면에서는 미국이 여전히 우위에 있습니다. 뉴럴링크는 56건의 특허를 출원했고 그 중 18건이 등록되었습니다. 전극 삽입 로봇, 유연한 전극 실, 무선 충전 및 데이터 전송 기술 등에서 핵심 특허를 확보했습니다. 블랙록 뉴로테크는 수십 년간 축적한 유타 어레이 관련 특허 포트폴리오로 강력한 방어선을 구축하고 있습니다. 싱크론은 10개 국가에 걸쳐 특허 전략을 펼치며 엔비디아와 파트너십을 맺었습니다.

그러나 중국의 추격 속도가 무섭습니다. 최근 몇 년간 BCI 관련 특허 출원 증가율에서 중국은 세계 1위를 기록하고 있습니다. 연간 100건 이상의 특허가 발행됩니다. 평안 테크놀로지라는 중국 기업은 100건 이상의 뉴로테크 특허를 보유하여 IBM에 이어 세계 2위의 특허 보유 기업으로 등극했습니다. 이는 BCI를 금융, 헬스케어, 보험 등 다양한 산업과 융합할 수 있는 플랫폼 기술로 보는 중국의 시각을 반영합니다.

두 나라의 특허 전략은 결이 다릅니다. 미국은 원천 기술에 집중합니다. 전극의 소재, 뇌 신호의 디코딩 방식, 임플란트의 통신 프로토콜 같은 BCI 시스템의 뼈대가 되는 기술들입니다. 중

국은 응용과 비침습 분야에서 양으로 승부합니다. 뇌파를 이용한 졸음운전 방지 시스템, 감정 인식 알고리즘, 재활 로봇 제어 방식 등 당장 상용화가 가능한 기술들에 특허가 집중되어 있습니다. 이것은 포위 전술입니다. 원천 기술을 바로 넘볼 수 없다면, 응용 단계에서 주도권을 쥐겠다는 계산입니다.

패턴트베스트의 분석은 흥미로운 점을 하나 더 드러냅니다. 주요 기업들의 세분화 전략입니다. 뉴럴링크, 싱크론, 프리시전 뉴로사이언스, 패러드로믹스 같은 기업들은 서로 직접 경쟁하기보다 각자의 기술적 틈새를 공략하고 있습니다. 뉴럴링크는 수술 자동화와 완전 침습적 정밀도에 집중합니다. 싱크론은 혈관 내 접근이라는 독보적인 전달 방식에 특허를 쌓습니다. 패러드로믹스는 초고대역폭 데이터 전송에, 프리시전은 뇌 표면 부착형 필름에 집중합니다. 이것은 BCI 시장이 승자독식 구조가 아니라 여러 기술이 공존하는 형태로 발전할 것임을 예고합니다.

특허 데이터는 기술의 흐름도 보여줍니다. 최근 출원되는 특허들은 단순한 신호 측정을 넘어 뇌-클라우드 인터페이스와 AI 기반 신경 변조로 이동하고 있습니다. 뇌파 데이터를 클라우드로 전송하고, AI가 실시간으로 분석하여 피드백을 주는 시스템. 또는 AI가 뇌의 신호 패턴을 학습하여 점점 더 정확하게 사용자의 의도를 해독하는 알고리즘. 경쟁은 누가 뇌를 더 잘 읽느냐를 넘어, 누가 뇌와 AI를 더 완벽하게 결합하느냐로 옮겨가고 있습니다.

빅테크의 진입이 판도를 바꾸고 있습니다. 애플, 구글, 마이크로소프트, 메타는 기존의 웨어러블 기기에 생체 신호 처리 기술을 통합하는 특허를 대거 출원하고 있습니다. 스마트 안경, 이어버드, 스마트워치를 BCI 디바이스로 전환하는 기술적 길목을 선점하려는 것입니다. 이들은 BCI가 대중화될 때 플랫폼 주도권을 쥐겠다는 전략입니다. 스마트폰이 그랬듯이, BCI에서도 하드웨어보다 플랫폼이 승부를 결정할 수 있습니다.

국제 표준화 경쟁도 뜨겁습니다. ISO와 같은 국제 표준화 기구에서 BCI 데이터 형식과 안전 기준을 제정하려는 움직임이 활발합니다. 중국은 2026년 1월 시행 예정인 YY/T 1987-2025라는 의료기기 표준을 발표했습니다. 자국의 기술을 국제 표준으로 등재시키기 위한 미국과 중국 사이의 보이지 않는 외교전이 전개되고 있습니다.

특허 전쟁의 승자가 누가 되든, 한 가지는 분명합니다. 인간의 뇌는 이제 발견의 대상을 넘어 발명의 대상이자 소유권의 대상이 되었습니다. 2,160개의 특허 가족은 단순한 기술 문서가 아닙니다. 뇌와 컴퓨터가 연결된 미래 사회의 영토를 확정하는 권리 증서입니다. 우리는 지

금 인류 역사상 처음으로 생각하는 능력에 대한 지식재산권이 정의되는 시대를 목격하고 있습니다.

이 전쟁에서 누가 더 넓은 권리 범위를 먼저 깔아두느냐가 제품의 생사를 가릅니다. 더 똑똑한 디코더를 만드는 것만으로는 충분하지 않습니다. 그 디코더를 자유롭게 팔 수 있는 권리가 있어야 합니다. 그래서 기업들은 연구실에서 실험하는 만큼, 법무팀에서 문서를 작성합니다. 과학자들이 뉴런의 언어를 해독하는 동안, 변호사들은 권리의 언어를 써내려갑니다. 두 언어 모두 미래를 결정합니다.

제4부 접속된 미래: 윤리·법·사회와 인간의 재정의

13 의료 혁명: BCI가 치료하는 질병들

가. 척수 손상과 전신 마비의 극복: 디지털 브릿지

2023년 5월, 스위스 로잔의 한 실험실에서 기적이 일어났습니다. 아니, 기적이라 부르기에는 너무나 치밀한 공학의 승리였습니다. 거트-얀 오스캄이라는 40세의 네덜란드 남성이 의자에서 일어나 걸었습니다. 12년 전 자전거 사고로 하반신이 마비된 그가, 자신의 다리를 움직여 한 발 한 발 내디뎠습니다. 그의 뇌 속에서 "걸고 싶다"는 생각이 떠오르는 순간, 허리에 이식된 장치가 척수를 자극했고, 다리 근육이 그 명령에 응답했습니다. 오스캄은 그날 이후 산책을 하고, 계단을 오르고, 친구들과 서서 맥주잔을 기울였습니다. 그는 말했습니다. "서서 친구들과 맥주 한 잔 나누는 것. 이 단순한 일이 제 인생을 완전히 바꿨습니다."

척수 손상은 의학의 역사에서 가장 잔인한 선고 중 하나였습니다.

뇌는 명령을 내릴 준비가 되어 있습니다. 팔다리의 근육도 움직일 힘을 품고 있습니다. 그러나 그 사이를 잇는 고속도로, 척수가 끊어지면 모든 것이 멈춥니다. 신체는 정신의 감옥이 됩니다. 전 세계적으로 약 2천7백만 명이 척수 손상으로 고통받고 있으며, 매년 25만 명 이상이 새로운 환자가 됩니다. 이들 대부분은 젊은 나이에 사고를 당합니다. 남은 수십 년의 삶을 휠체어에서 보내야 합니다.

뇌-컴퓨터 인터페이스 기술은 이 끊어진 다리를 새로운 방식으로 복구합니다. 디지털 브릿지라 불리는 이 개념은 명쾌합니다. 뇌의 운동 피질에 전극을 심어 "움직이고 싶다"는 의도를 읽어냅니다. 이 신호를 컴퓨터가 해독합니다. 해독된 명령은 척수의 손상된 부위 아래쪽에 이식된 자극기로 전송됩니다. 자극기는 마비된 다리의 근육을 움직이는 신경을 전기적으로 깨웁니다. 끊어진 생물학적 연결을 전자적 우회로가 대신하는 것입니다. 스위스 로잔 연방 공과대학(EPFL)의 그레고와르 쿠르틴 교수는 이렇게 설명합니다. "우리는 뇌와 척수 사이에 무선 디지털 인터페이스를 만들었습니다. 생각을 행동으로 바꾸는 기술입니다."

오스캄의 사례에서 연구진은 두 종류의 전자 임플란트를 사용했습니다. 첫째는 뇌 표면에 이식한 WIMAGINE이라는 장치입니다. 64개 채널의 전극 그리드가 두개골 두께와 같은 티타늄 케이스 안에 담겨 있습니다. 이 장치가 뇌의 운동 피질에서 "걸겠다"는 의도를 담은 전기 신호를 포착합니다. 둘째는 요추부 척수 위에 얹은 전극 배열입니다. 이 전극이 다리 움직임을 담당하는 척수 영역을 자극합니다. 두 장치 사이의 통신은 무선으로 이루어집니다. 인공지능 알고리즘이 실시간으로 뇌 신호를 해독하고, 이를 척수 자극 패턴으로 변환합니다. 이 모든 과정이 1초도 안 되는 짧은 순간에 일어납니다. 뇌가 "왼발을 앞으로"라고 생각하면, 왼발이 앞으로 나갑니다.

이 기술의 가장 놀라운 측면은 신경 가소성의 유도입니다. 오스캄이 디지털 브릿지를 사용하며 재활 훈련을 계속하자, 시간이 지나면서 그의 감각과 운동 기능이 점진적으로 회복되었습니다. 장치를 끈 상태에서도 그는 목발만으로 걸을 수 있게 되었습니다. 연구진은 새로운 신경 연결이 형성되었을 가능성을 제시합니다. 디지털 브릿지가 단순히 기능을 대체하는 것이 아니라, 뇌가 스스로 치유하도록 자극하는 역할도 하는 것입니다. 이는 척수 손상 치료의 패러다임을 근본적으로 바꾸는 발견입니다.

뉴럴링크 역시 같은 방향을 향해 달리고 있습니다. 2024년 1월, 첫 번째 인간 환자 놀랜드 아보에게 N1 임플란트를 이식한 뉴럴링크는 컴퓨터 커서 제어에서 시작했지만, 그 궁극적 목표는 신체 전체의 기능 복원입니다. 일론 머스크는 "전신 마비 환자가 올림픽 선수보다 더 빨리 움직이게 하는 것"이 목표라고 선언했습니다. 2025년 뉴럴링크는 콘보이(Convoy) 연구를 통해 뇌 신호로 로봇 팔을 제어하는 임상시험을 확장하고 있습니다. 이는 머스크가 말한 "루크 스카이워커의 의수"를 현실로 만드는 첫걸음입니다.

물론 도전 과제는 산적해 있습니다. 뇌 신호는 복잡하고 잡음이 많습니다. "걷는다"는 단순한 행위조차 수백 개의 근육이 정교하게 조화를 이루어야 합니다. 현재의 기술은 아직 부자연스러운 움직임을 만들어낼 때가 많습니다. 뉴럴링크의 놀랜드 아보의 경우, 이식된 전극 실이 뇌 조직에서 빠져나오는 수축 현상이 발생했습니다. 뇌는 두부처럼 부드러운 조직이어서 호흡이나 움직임에 따라 미세하게 흔들리기 때문입니다. 장기적으로 전극 주변에 흉터 조직이 생겨 신호 감도를 떨어뜨리는 생체 적합성 문제도 해결해야 합니다.

그러나 우리는 지금 의학사의 전환점을 목격하고 있습니다. 척수 손상은 더 이상 영구적인 선고가 아닙니다. 그것은 통신 장애입니다. 그리고 공학자들은 그 장애를 복구할 디지털 케이블을 깔고 있습니다. ONWARD Medical 같은 기업들이 유럽연합의 지원을 받아 디지털 브릿지의 상용화를 추진하고 있으며, 전 세계 수천만 명의 척수 손상 환자들에게 다시 서고, 걷고, 손을 뻗을 수 있다는 희망을 건네고 있습니다. 디지털 브릿지는 뇌과학과 신경공학, 인공지능이 만나 인간의 육체적 한계를 지워나가는 가장 극적인 증거입니다.

나. ALS, 파킨슨병, 간질: 신경질환 치료의 새 지평

2024년 8월, 캘리포니아주 데이비스의 한 병원에서 45세의 케이시 해럴이 가족들 앞에서 말을 했습니다. 정확히 말하면, 그의 뇌가 말을 했습니다. 루게릭병으로 알려진 근위축성 측삭 경화증(ALS) 때문에 목소리를 잃은 그는, 생각만으로 컴퓨터 화면에 단어를 띄우고 합성 음성으로 그것을 읽었습니다. "말할 수 없다는 것은 너무나 좌절스럽고 의기소침하게 만드는 일입니다. 갇힌 것 같습니다." 그가 기계의 목소리를 빌려 전한 말이었습니다. 가족들은 울었습니다. 연구진도 울었습니다. 이 시스템은 97%의 정확도로 그의 생각을 해독했습니다. 분당 62단어의 속도로 소통할 수 있었습니다. 이것은 인류 역사상 가장 정확한 음성 신경보철 장치였습니다.

ALS는 잔인한 병입니다. 운동 신경세포만을 선택적으로 파괴합니다. 환자의 지적 능력과 감각은 온전하게 유지됩니다. 그러나 신체를 통제하는 능력은 점차 사라집니다.

팔다리가 마비되고, 삼키는 것이 어려워지고, 결국 말조차 할 수 없게 됩니다. 병이 진행되면 환자는 완전한 "감금 증후군" 상태에 빠집니다. 의식은 명료하지만 눈동자조차 움직일 수 없는 상태입니다. 자신의 몸이라는 관 속에 산 채로 묻히는 것입니다. 전 세계적으로 약 50만 명이 ALS를 앓고 있으며, 평균 생존 기간은 진단 후 2년에서 5년입니다.

BCI 기술은 이 감옥의 벽에 작은 창문을 냅니다.

환자가 말을 하려고 "시도"할 때, 뇌의 운동 피질과 언어 중추에서는 여전히 전기 신호가 발생합니다. 근육이 작동하지 않을 뿐, 뇌는 명령을 내리고 있습니다.

BCI는 이 신호를 포착합니다. UC 데이비스와 브라운 대학의 브레인게이트 연구팀은 케이시 해럴의 뇌에 마이크로전극 배열을 이식했습니다. 총 256개의 전극이 뇌의 음성 관련 영역에서 신경 활동을 기록했습니다. 딥러닝 알고리즘이 이 신호를 분석하여 음소(phoneme)로 변환하고, 음소를 단어로 조합했습니다. 첫 세션에서 50개 단어 어휘로 99.6%의 정확도를 달성했습니다. 125,000개 단어로 어휘를 확장한 후에도 90% 이상의 정확도를 유지했습니다.

뉴럴링크의 세 번째 임상시험 참가자 브래드 역시 ALS 환자입니다. 그는 BCI를 통해 자녀들과 마리오 카트 게임을 함께 했습니다. 뉴럴링크 공동창업자 DJ 서는 그 순간을 이렇게 묘사했습니다. "브래드가 아이들과 마리오 카트를 했습니다. 그 순간은... 정말 대단했습니다." 2025년 5월, 뉴럴링크는 음성 복원 기술로 FDA의 획기적 의료기기 지정을 받았습니다. 이는 ALS, 뇌졸중, 척수 손상, 뇌성마비, 다발성 경화증으로 인한 중증 언어 장애 환자들을 위한 것입니다. 싱크론의 스텐트로드 기술도 개두술 없이 ALS 환자들이 아이패드와 스마트홈 기기

를 제어할 수 있게 하고 있습니다. 2021년 ALS 환자 필립 오키프는 싱크론 장치를 통해 세계 최초로 생각만으로 트윗을 작성했습니다.

파킨슨병 치료에서 BCI는 더욱 능동적인 역할을 수행합니다. 파킨슨병 환자의 뇌 심부에는 비정상적인 전기 신호가 폭풍처럼 몰아칩니다. 베타 리듬이라 불리는 특정 주파수 대역의 과도한 동기화가 떨림과 경직을 유발합니다. 기존의 뇌 심부 자극술(DBS)은 24시간 내내 일정한 전기 자극을 주는 "박동기" 역할에 머물렀습니다. 의사가 미리 정한 설정대로 자극이 지속되었습니다. 그러나 파킨슨병의 증상은 시시각각 변합니다. 약의 효과가 떨어지는 "오프" 시간이 찾아오고, 때로는 과도한 자극으로 이상 운동증이 발생합니다.

차세대 적응형 DBS는 "지휘자"의 역할을 합니다. 뇌의 상태를 실시간으로 모니터링합니다. 떨림이나 경직을 유발하는 신호가 감지되는 순간에만 정밀하게 대응 자극을 보냅니다. 캘리포니아 대학교 샌프란시스코(UCSF)의 연구팀은 환자의 기상 시간, 취침 시간, 약물 복용 여부에 따라 자극을 자동으로 조절하는 폐루프 시스템을 개발했습니다. 이 시스템을 사용한 손 코놀리라는 39세의 스케이트보드 강사는 말했습니다. "제 삶이 완전히 바뀌었습니다. 하루 종일 기분 좋게 지낼 수 있습니다." 이 기술은 배터리 수명을 늘리고 부작용을 줄이며, 환자의 삶의 질을 비약적으로 향상시킵니다.

간질(뇌전증) 치료에서도 BCI는 혁명을 일으키고 있습니다. 예고 없이 찾아오는 발작은 간질 환자들의 가장 큰 공포입니다. 운전 중에, 계단을 내려가다가, 혼자 목욕을 하다가 발작이 일어나면 생명이 위협합니다. 뉴로페이스(NeuroPace)의 반응형 신경자극 시스템(RNS)은 뇌파를 24시간 모니터링합니다. 발작이 시작되려는 비정상적인 패턴이 감지되면 즉시 1000분의 1초 단위의 미세한 전기 자극을 보냅니다. 산불이 번지기 전에 물을 뿌리는 것과 같습니다. 최근 연구에서는 인공지능을 활용하여 발작 발생 가능성을 최대 1시간 전에 예측하고 환자에게 스마트폰으로 경고를 보내는 기술도 개발되고 있습니다.

이 모든 기술은 하나의 통찰을 공유합니다. 신경계 질환은 뇌 회로의 문제라는 것입니다. 회로가 고장 났다면, 약물보다 더 정밀한 전기적 개입이 효과적일 수 있습니다. BCI는 뇌라는 거대한 회로 기관을 수리하고, 우회로를 만들고, 때로는 성능을 업그레이드하는 정밀 공학 도구입니다. ALS 환자에게는 말할 권리를, 파킨슨병 환자에게는 떨림 없는 일상을, 간질 환자에게는 발작의 공포에서 벗어날 자유를 돌려줍니다. 우리는 이제 막 뇌의 언어를 이해하기 시작했고, 그 언어로 질병과 대화하며 치유하는 법을 배우고 있습니다.

다. 정신 질환과 전자약: 우울증, 중독, PTSD 치료 가능성

2020년 어느 날, 캘리포니아 대학교 샌프란시스코의 연구실에서 한 여성이 눈을 감고 있었습니다. 그녀의 이름은 사라(가명)입니다. 5년 넘게 치료 저항성 우울증과 싸워왔습니다. 약물 치료, 인지행동치료, 심지어 전기경련요법까지 시도했지만 효과가 없었습니다.

그녀의 세상은 회색이었습니다. 아침에 눈을 뜨는 것조차 고통이었습니다. 그런데 연구진이 그녀의 뇌 특정 부위에 미세한 전기 자극을 가하자, 몇 초 후 그녀가 말했습니다. "웃음이 나요... 무슨 일이죠?"

그녀는 수년 만에 처음으로 자발적인 웃음을 지었습니다. 연구진의 책임자 캐서린 스캔고스 박사는 그 순간을 이렇게 기록했습니다. "그녀의 표정이 바뀌었습니다. 세상의 색깔이 돌아왔다고 표현했습니다."

우울증은 마음의 감기가 아닙니다. 뇌 회로의 고장입니다. 현대 의학은 오랫동안 세로토닌이나 도파민 같은 신경전달물질의 불균형에서 원인을 찾으려 했습니다. 프로zac 같은 항우울제가 수많은 생명을 구한 것은 사실입니다.

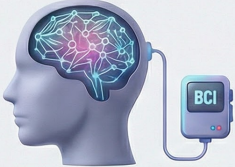
그러나 전체 우울증 환자의 약 30%는 기존 치료에 전혀 반응하지 않습니다. 이들이 겪는 고통의 깊이는 상상하기 어렵습니다. 세계보건기구에 따르면 우울증은 전 세계적으로 장애를 유발하는 가장 큰 원인입니다. 매년 70만 명 이상이 우울증과 관련된 자살로 목숨을 잃습니다.

BCI 기술은 이들에게 "전자약(Electroceuticals)"이라는 새로운 희망을 제시합니다. 전자약은 뇌를 전기 신호를 주고받는 복잡한 네트워크로 정의합니다. 치료 저항성 우울증 환자의 뇌에서는 감정을 조절하는 특정 회로, 예를 들어 편도체나 슬하 대상 피질의 활동이 비정상적입니다. 전자약은 이 잘못된 회로에 정밀한 전기 자극을 가하여 리셋합니다. UCSF의 연구팀은 사라의 뇌에 NeuroPace RNS 장치를 이식했습니다. 이 장치는 원래 간질 치료용으로 FDA 승인을 받은 것이지만, 연구팀은 이를 우울증 치료에 응용했습니다.



핵심은 "개인 맞춤형 폐루프(Closed-loop)" 시스템입니다. 연구팀은 먼저 사라의 뇌파를 며칠간 집중적으로 분석했습니다. 그녀의 기분이 나락으로 떨어지려 할 때 나타나는 특정 뇌파 패턴, 즉 바이오마커를 찾아냈습니다. 그녀의 경우 편도체에서 감마파 활동이 급증하면 곧 우울 증상이 악화되는 것으로 나타났습니다. 연구팀은 장치를 프로그래밍하여 이 바이오마커가 감지될 때만 자동으로 전기 자극을 가하도록 설정했습니다. 그녀가 "우울해진다"고 느끼기도 전에 기계가 먼저 뇌의 균형을 맞추는 것입니다. 사라는 이 경험을 이렇게 묘사했습니다. "회색 콘크리트로 뒤덮였던 세상에 갑자기 색깔이 돌아오는 것 같았습니다."

이 기술의 적용 범위는 우울증에만 머무르지 않습니다. 중독(Addiction) 치료에서도 BCI는 강력한 도구가 될 수 있습니다. 마약, 알코올, 도박 중독은 뇌의 보상 회로가 망가진 상태입니다. 측좌핵과 복측 선조체 같은 부위가 과도하게 활성화되어 갈망을 만들어냅니다. 충동을 억제하는 전두엽의 기능은 약해집니다. 뇌는 쾌락을 좇는 방향으로 폭주합니다. 의지력만으로 이 생물학적 굴레를 끊기는 쉽지 않습니다. BCI는 갈망이 일어나는 순간의 뇌 패턴을 감지하고, 충동을 억제하는 전기 자극을 줄 수 있습니다. 환자가 마약이나 알코올에 대한 강렬한 욕구를 느낄 때, 장치가 이를 탐지하여 전두엽의 통제 기능을 강화하거나 보상 회로의 과도한 활성화를 진정시킵니다.

뇌를 리셋하는 '전자약', BCI 기술



정신 질환을 뇌 회로의 고장으로 정의하고, 이를 전기 자극으로 치료하는 차세대 전자약

 생물학적 오작동	정신 질환은 '뇌 회로의 고장' 우울증과 중독은 마음의 문제가 아닌, 뇌 신경망의 생물학적 오작동입니다.
 개인 맞춤형 '페루프' 치료	개인 맞춤형 '페루프' 치료 실시간으로 뇌파 바이오마커를 감지하여 우울감이 느껴지기 전 자동으로 치료합니다.
 보상 회로 진정 공포 반응 조절	중독과 PTSD 치료의 새로운 희망 망가진 보상 회로를 진정시키고 트라우마로 인한 공포 반응을 전기적으로 조절합니다.
 30%	기존 치료 거부 환자 30%의 대안 약물에 반응하지 않는 중증 우울증 환자들에게 정밀한 '전자약'은 유일한 돌파구입니다.
 기술 발전에 따른 '신경권' 보호	기술 발전에 따른 '신경권' 보호 감정 조작 및 해킹 위험에 대비한 정신적 프라이버시 논의가 병행되어야 합니다.

외상 후 스트레스 장애(PTSD)로 고통받는 참전 용사나 사고 생존자들에게도 희망이 있습니다. PTSD 환자들은 트라우마와 관련된 기억이 떠오를 때 공포 반응을 담당하는 편도체가 과잉 활성화됩니다. 식은땀이 나고, 심장이 빨리 뛰고, 패닉 상태에 빠집니다. BCI는 기억 자체를 지울 수는 없습니다. 그러나 그 기억에 따라오는 공포의 감정을 전기적으로 진정시킬 수는 있습니다. 고통스러운 기억을 떠올려도 더 이상 공황에 빠지지 않게 만드는 것입니다. 미국 국방부 산하 DARPA는 비침습적 신경 조절을 통해 군인들의 스트레스를 완화하고 PTSD를 예방하거나 치료하는 기술에 막대한 투자를 하고 있습니다.

그러나 정신 질환을 기계로 치료한다는 발상은 깊은 철학적 질문을 던집니다. "나의 기분을 기계가 조절한다면, 그 감정은 진정한 나의 것인가?" 우울감을 인위적으로 제거하는 것이 인간의 본질적인 슬픔까지 앗아가는 것은 아닐까요? 또한 뇌의 쾌락 중추를 직접 자극할 수 있는 기술이 오용될 경우, "디지털 마약"이 될 위험성도 배제할 수 없습니다. 장치가 해킹당하면 어떤 일이 벌어질까요? 누군가 나의 감정을 원격으로 조작할 수 있다면? 이러한 "신경권(Neurorights)"과 "정신적 프라이버시"에 대한 논의는 기술 발전과 함께 반드시 병행되어야 합니다.

그럼에도 불구하고 전자약의 가능성을 외면하기에는 지금 고통받는 이들의 절망이 너무나 깊습니다. 매일 아침 눈을 뜨는 것이 공포인 사람들, 갈망에 무릎 꿇고 다시 병으로 돌아가는 중독자들, 밤마다 악몽에 시달리는 참전 용사들. 이들에게 전자약은 고장 난 뇌의 회로를 수리하여 다시 빛을 보게 하는 현대 의학의 가장 대담한 도전입니다. 사라는 장치 이식 후 1년이 지난 시점에서 말했습니다. "완치되었다고 말할 수는 없어요. 하지만 이제 나쁜 날도 견딜 수 있어요. 그것만으로도 제 인생이 바뀌었습니다."

라. 잃어버린 감각의 복원: 시각, 청각, 촉각의 디지털화

"당신은 눈으로 보는 것이 아닙니다. 뇌로 보는 것입니다." 2024년 9월, 일론 머스크가 뉴럴링크의 시각 복원 프로젝트 "블라인드사이트(Blindsight)"를 설명하며 한 말입니다.

이 말은 감각 복원 기술의 본질을 꿰뚫고 있습니다. 우리의 눈, 귀, 피부는 세상을 받아들이는 센서에 불과합니다. 진정한 "경험"은 뇌 안에서 전기 신호가 해석될 때 일어납니다. 센서가 고장 났다면, 그것을 대체할 디지털 센서를 달고 뇌에 직접 신호를 입력하면 됩니다. 이것이 감각의 디지털화입니다.

시각 복원은 신경공학의 성배(Holy Grail)와도 같습니다.

전 세계적으로 약 4,300만 명이 실명 상태이며, 2억 9,500만 명 이상이 중등도에서 중증의 시각 장애를 안고 살아갑니다. 블라인드사이트의 원리는 명쾌합니다. 환자가 쓴 안경에 부착된 카메라가 세상을 촬영합니다. 이 영상 정보는 전기 신호로 변환되어 뇌의 후두엽에 있는 시각 피질로 전송됩니다. 시각 피질에 심어진 마이크로전극 배열이 특정 패턴으로 뇌세포를 자극합니다. 환자는 눈을 통하지 않고도 머릿속에서 빛의 점, 즉 인광(Phosphene)을 봅니다. 2024년 9월, 블라인드사이트는 FDA로부터 "획기적 의료기기(Breakthrough Device)" 지정을 받았습니다. 이는 검토 과정을 가속화하여 실제 임상시험으로 더 빨리 나아갈 수 있게 합니다.

머스크는 블라인드사이트의 미래를 이렇게 그림니다. "초기에는 아타리 게임기 그래픽처럼 저해상도일 것입니다. 하지만 결국 자연 시력을 넘어설 잠재력이 있습니다. 적외선, 자외선, 심지어 레이더 파장까지 볼 수 있게 될 것입니다. 스타트랙의 조르디 라 포지처럼요." 과장일까요? 완전히 허황된 말은 아닙니다. 시각 피질에 직접 정보를 입력하면, 가시광선의 한계를 넘어선 새로운 감각 영역이 열릴 수 있습니다. 물론 현재 기술은 아직 초보 단계입니다. 세컨드 사이트(Second Sight)의 아르거스(Argus) II 같은 이전 세대 시각 보철물은 60개의 전극으로 제한된 해상도를 제공했습니다. 뉴럴링크는 수천 개의 전극을 사용하여 해상도를 비약적으로 높이려 합니다.

더 놀라운 점은 선천적 시각 장애인에게도 시각 경험을 줄 수 있다는 가능성입니다. 태어날 때부터 앞을 보지 못한 사람의 시각 피질도, 적절한 자극을 받으면 새로운 형태의 "봄(seeing)"을 학습할 수 있습니다. 뇌의 가소성이 작동하기 때문입니다. 시신경이 한 번도 발달하지 않은 뇌라 할지라도, 시각 피질에 직접 정보를 입력하면 뇌는 그 신호를 해석하는 법을 배웁니다. 이는 "시각"의 정의 자체를 다시 쓰게 만드는 발견입니다.

청각 복원은 이미 대중화된 BCI의 한 형태입니다.

인공와우(Cochlear Implant)는 수십 년 전에 개발되어 전 세계적으로 100만 명 이상의 청각 장애인에게 소리를 되찾아주었습니다. 달팽이관에 전극을 삽입하여 음향 정보를 전기 신호로 변환하고, 청신경을 직접 자극합니다.

그러나 청신경 자체가 손상된 환자들에게는 인공와우도 소용이 없습니다.

차세대 기술은 청각 피질을 직접 자극하는 방향으로 진화하고 있습니다. 마이크로 수집된 소리 정보가 뇌가 이해할 수 있는 전기 신호로 변환되어 청각 피질에 주입됩니다. 시끄러운 파티장에서 내가 대화하고 싶은 사람의 목소리만 증폭시켜 듣는 "선택적 청취" 기능도 구현될 수 있습니다. 소리의 미세한 주파수와 강약까지 정밀하게 전달하여, 단순한 소리의 유무를 넘어 음악의 선율까지 감지할 수 있는 수준이 목표입니다.

촉각의 복원은 로봇 의수 기술과 결합하여 눈부신 발전을 이루고 있습니다. 피츠버그 대학의 연구팀은 마비 환자의 뇌 감각 피질에 전극을 심어, 로봇 팔이 물체를 만질 때의 압력과 질감을 뇌로 전달하는 데 성공했습니다. 환자는 눈을 감고도 로봇 손이 잡은 것이 딱딱한지 부드러운지를 구별했습니다. 어떤 손가락이 터치되었는지도 정확히 알 수 있었습니다. "자신의 손을 잡는 느낌이 났습니다." 한 환자의 고백입니다. 이 양방향(Bidirectional) 인터페이스는 로봇 팔을 단순한 도구가 아니라 자신의 신체 일부로 느끼게 합니다. 컵을 짤 때 압력을 느끼지 못하면 컵을 깨뜨리거나 흘릴 수 있습니다. 촉각 피드백은 정교한 조작을 가능하게 합니다.

이러한 감각의 디지털화는 "현실이란 무엇인가"라는 질문을 던집니다. 뇌로 직접 입력되는 디지털 신호가 현실의 신호와 구별할 수 없을 만큼 정교해진다면, 우리는 가상과 현실을 어떻게 구분할 수 있을까요? 해커가 나의 시각 정보를 가로채거나, 보지 않은 것을 본 것처럼 조작할 수 있는 위험은 어떻게 방어해야 할까요? 또한 이 기술은 장애의 "극복"을 넘어 "증강"의 영역으로 진입할 수 있습니다. 적외선을 볼 수 있는 눈, 초음파를 들을 수 있는 귀, 전자기장을 느낄 수 있는 피부. 이것은 더 이상 치료가 아니라 인간 능력의 확장입니다.

그럼에도 불구하고, 잃어버린 감각을 되찾는 것은 한 인간의 세계를 다시 확장하는 숭고한 작업입니다. 어둠 속에 있던 이가 사랑하는 사람의 얼굴을 다시 보고, 침묵 속에 있던 이가 음악을 듣고, 마비된 손으로 가족의 온기를 다시 느낄 수 있게 하는 것. BCI가 만드는 의료 혁명은 차가운 기술과 금속 칩으로 이루어져 있지만, 그 지향점은 가장 따뜻하고 인간적인 삶의

복원에 닿아 있습니다. 카메라가 눈이 되고, 마이크가 귀가 되며, 압력 센서가 피부가 되는 시대. 우리는 지금 인체의 한계를 기술로 초월하는 포스트휴먼의 새벽을 걷고 있습니다.

감각의 디지털화: 뇌로 직접 느끼는 세상

뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI)가 인간의 한계를 극복합니다.



카메라 영상이 뇌에서 직접 빛이 되다
뉴럴링크 '블라인드사이트', 실명 환자 시력 복원.



소리를 넘어 음악의 전율까지 정밀 전달
청신경 손상, 특정 목소리 선택적 청취.



로봇 의수로 느끼는 질감과 온도
양방향 인터페이스, 딱딱함과 부드러움.



치료를 넘어선 '초감각'으로의 증강
자연 시력 초월, 포스트휴먼 감각 확장.



확장된 청각 능력
선택적 청취 및 정밀한 소리 전달.



내 몸 같은 감각 인지
로봇 팔 질감, 온도 감지.

14 뇌 데이터 시대의 윤리적 딜레마

가. 정신적 프라이버시(Mental Privacy)와 뇌 데이터 소유권

2021년 어느 날, 칠레의 한 엔지니어가 미국 신경기술 기업 이모티브(Emotiv)를 상대로 소송을 제기했습니다. 그의 이름은 Guido Girardi. 그는 회사의 뇌파 측정 헤드셋 인사이트(Insight)를 구매해 사용했습니다. 문제는 그 이후에 벌어졌습니다. 그의 뇌 데이터가 어디로 흘러갔는지, 누가 접근할 수 있는지, 얼마나 오래 저장되는지 알 수 없었습니다. 개인정보처리방침을 읽어보았지만 명확한 답을 찾을 수 없었습니다.

2023년, 칠레 대법원은 Guido Girardi의 손을 들어주었습니다. 법원은 이모티브에 그의 뇌 정보를 데이터베이스에서 삭제하라고 명령했습니다. 세계 최초로 뇌 데이터를 독립적인 법적 범주로 인정한 판결이었습니다. 그러나 Guido Girardi가 요청한 또 다른 사항, 즉 회사가 개인정보처리방침 자체를 수정하라는 요구는 받아들여지지 않았습니다. 승리이면서 동시에 불완전한 승리였습니다.

이 판결의 배경에는 칠레가 2021년에 세계 최초로 헌법을 개정하여 신경권을 보장한 역사가 있습니다. 그러나 헌법 조문만으로는 데이터 처리의 구체적인 요건을 규율하기 어렵다는 한계가 드러났습니다.

뇌 데이터는 왜 다른 데이터와 다를까요. 우리의 뇌는 매 순간 전기 신호를 발생시킵니다. 이 신호에는 우리의 감정 상태, 집중력 수준, 심지어 특정 단어나 이미지에 대한 반응까지 담겨 있습니다. 2024년 하버드 의대 연구진은 175시간 분량의 뇌파 기록을 학습시킨 인공지능이 512개의 음성 구절 중 거의 절반을 정확하게 식별해냈다고 보고했습니다. 기술이 발전할수록 뇌 데이터에서 추론할 수 있는 정보의 범위는 넓어집니다. 오늘 수집된 데이터에서 내일은 무엇을 읽어낼 수 있을지 아무도 모릅니다.

콜로라도 주의 캐시 킵 상원의원은 이 문제를 이렇게 표현했습니다. 오늘 수집한 데이터에서 5년 후에는 무엇을 읽어낼 수 있을지 알 수 없다. 기술이 너무 빠르게 발전하기 때문이다.

미국에서는 2024년 4월 콜로라도 주가 세계 최초로 신경 데이터를 명시적으로 보호하는 포괄적 데이터 보호법을 제정했습니다. 이 법은 신경 데이터를 "개인의 중추신경계 또는 말초신경계 활동의 측정을 통해 생성되는 정보"로 정의했습니다. 같은 해 9월, 캘리포니아 주도 소비자 프라이버시법을 개정하여 신경 데이터를 민감한 개인정보로 분류했습니다. 몬타나와 코네티컷이 뒤를 이었습니다.

그러나 보호의 범위는 주마다 다릅니다. 캘리포니아 법은 비신경 정보에서 추론된 데이터를 제외합니다. 예를 들어 심박수 데이터는 순환계에서 나온 것이므로 신경 데이터가 아닙니다. 하지만 심박수 변화로 스트레스 수준을 추론할 수 있습니다. 이런 데이터는 보호 대상이 아닙니다.

2024년 4월, 뉴로라이츠 재단은 30개 소비자용 신경기술 기업의 개인정보처리방침을 감사했습니다. 결과는 충격적이었습니다. 29개 기업이 소비자의 뇌 데이터에 접근할 수 있었고, 의미 있는 제한을 두지 않았습니다. 96.7퍼센트의 기업이 뇌 데이터를 제3자에게 이전할 권리를 보유하고 있었습니다. 암호화를 언급한 기업은 20퍼센트 미만이었습니다. 핵심 안전 조치를 모두 채택한 기업은 10퍼센트에 불과했습니다.

뇌 데이터: 당신의 생각을 읽는 가장 민감한 정보

- 뇌파는 감정과 의도를 담은 신호**
 전기 신호를 통해 개인의 감정 상태, 집중력, 특정 이미지에 대한 반응까지 파악할 수 있습니다.
- AI, 뇌파로 음성 구절 절반 식별**
 하버드 의대 연구진은 뇌파 학습 AI가 512개 음성 구절 중 약 50%를 정확히 맞혔음을 입증했습니다.
- 오늘의 데이터, 내일은 더 위험하다**
 기술이 발전함에 따라 오늘 수집한 데이터에서 5년 후 무엇을 더 읽어낼 수 있을지 예측할 수 없습니다.
- 법으로 명시된 '신경 데이터' 보호**
 콜로라도와 캘리포니아 등 미국 주요 주는 뇌 데이터를 민감한 개인정보로 분류해 법적 보호를 시작했습니다.

50% 식별

보호 시작

2025년 4월, 미국 상원의 여러 의원이 연방거래위원회에 서한을 보냈습니다. 그들은 신경 데이터가 다른 개인 데이터와 다르다고 강조했습니다. 신경 데이터는 익명화되더라도 정신 건강 상태, 감정 상태, 인지 패턴을 드러낼 수 있기 때문입니다.

UNESCO는 2024년 8월 신경기술 윤리 국제 표준을 개발하기 위한 전문가 그룹을 구성했습니다. 이 표준은 2025년 11월에 채택될 예정입니다. 미국의학협회는 2025년 6월 신경 프라이버시 보호를 공식 요청했습니다.

비밀번호가 유출되면 바꿀 수 있습니다. 그러나 뇌 데이터는 한 번 노출되면 되돌릴 수 없습니다. 뇌 데이터는 우리의 가장 내밀한 영역입니다. 우리가 무엇을 느끼는지, 무엇에 반응하는지, 어쩌면 무엇을 생각하는지까지 담겨 있습니다. 이 데이터의 주인은 누구입니까. 데이터를 수집한 기업입니까, 아니면 그 뇌의 주인입니까.

칠레는 헌법으로 답했습니다. 콜로라도는 법률로 답했습니다. 그러나 전 세계 대부분의 국가에서 이 질문은 여전히 열려 있습니다.

나. Brainjacking: 운동 피질 해킹과 감각 조작의 위협 시나리오

2025년 7월, 예일대학교 디지털 윤리센터의 연구진이 한 논문을 발표했습니다. 제목은 "차세대 뇌-컴퓨터 인터페이스의 사이버 위협: 분석과 권고"였습니다. 논문의 첫 문장이 눈길을 끌었습니다. 효과적인 안전장치가 없다면, 표준화된 BCI 시스템의 광범위한 보안 침해는 수백만 명의 사용자에게 동시에 영향을 미칠 수 있다.

연구진은 이러한 공격이 핵심 인프라 인력을 무력화시키거나, 대규모 혼란을 통해 사회 질서를 교란하거나, 심지어 적대 세력이 전체 인구의 민감한 생각과 기억을 수집하는 데 악용될 수 있다고 경고했습니다.

브레인 재킹이란 무엇입니까. 이 용어는 뇌 임플란트나 신경자극기에 대한 무단 접근과 조작을 의미합니다. 아직 실제로 보고된 사례는 없습니다. 그러나 전문가들은 한 번의 고프로파일 공격이 발생하면 대중의 신뢰가 돌이킬 수 없이 손상될 것이라고 경고합니다.

위협은 이론에 그치지 않습니다. MIT 연구진은 EEG 장비가 일종의 안테나처럼 작동할 수 있음을 시연했습니다. 공격자가 진폭변조 무선주파수 신호를 전송하면, EEG 장치의 비선형 증폭기 반응이 변조 주파수를 포착하여 실제 신경 신호로 해석할 수 있습니다. 전송 전력이 충분하면 주입된 신호가 사용자의 실제 뇌파를 압도합니다. 이 공격은 벽과 문을 통과할 수 있었습니다. 거리는 약 3미터로 제한되었지만, 충분히 가까운 거리입니다.

뉴럴링크와 같은 최신 BCI는 블루투스를 통해 무선으로 통신합니다. 물리적 취약점은 줄어들었지만, 새로운 사이버보안 위협이 등장했습니다. 블루버깅 공격은 10미터 이내에서 장치에 무단 접근하여 신경 신호를 가로채거나 기능을 변경할 수 있습니다. 블루스나핑은 최대 100미터 거리에서 보안되지 않은 블루투스 연결로부터 데이터를 훔칠 수 있습니다. BCI 응용에서 이는 사용자 인식 없이 대규모 신경 데이터 유출로 이어질 수 있습니다.

심부뇌자극(DBS) 장치는 이미 파킨슨병과 같은 신경질환 치료에 널리 사용되고 있습니다. 옥스퍼드대학교 기능신경외과 연구진은 이 장치들의 잠재적 위협을 경고했습니다. 해커가 DBS 설정을 변경하면 더 큰 통증을 유발하거나, 파킨슨 환자의 움직임을 억제하거나, 과잉성욕이나 병적 도박을 유도하거나, 보상 학습을 조작하여 행동 통제를 시도할 수 있습니다.

인공지능 기반 공격도 우려됩니다. 적대적 섭동이라 불리는 기법은 EEG 데이터에 노이즈를 추가하여 P300 및 SSVEP 스펙터에서 원하는 문자를 출력하도록 만들 수 있습니다. 백도어 공격은 학습 데이터를 오염시켜 특정 분류를 강제합니다.

문제는 BCI의 물리적 제약에 있습니다. 임플란트의 크기와 배터리 용량이 제한적이어서 강력한 암호화를 구현하기 어렵습니다. 응급 의료 접근을 위해 백도어가 필요할 수 있습니다. 예일대 연구진은 데이터가 장치와 원격 컴퓨터 사이를 이동할 때만 암호화를 요구할 것을 권고했습니다. 전력 소모를 최소화하기 위해서입니다.

미국 식품의약국은 BCI 사이버보안을 검토하지만, 표준은 기술 발전 속도를 따라가지 못합니다. BCI는 미국에서 클래스 III 이식형 의료기기로 분류됩니다. 가장 엄격한 규제 범주이지만, 사이버보안에 대한 구체적 지침은 아직 개발 중입니다.

예일대 연구진은 몇 가지 권고안을 제시했습니다. 규제 당국은 비수술적 소프트웨어 업데이트 방법을 의무화해야 합니다. BCI 소프트웨어 수정을 위한 강력한 인증 및 권한 체계가 필요합니다. 뇌로 오가는 데이터의 암호화가 필수적입니다. 가능한 한 네트워크 연결을 최소화해야 합니다. 그들은 또한 AI가 환자의 임플란트에 악의적 자극을 보내는 것을 방지하기 위해 AI를 적대적으로 학습시킬 것을 권고했습니다.

브레인 재킹은 아직 현실이 아닙니다. 그러나 BCI 기술이 확산될수록 공격 동기는 커집니다. 의료 기기 해킹의 선례가 있습니다. 메드트로닉 제세동기의 취약점이 발견되었고, 인슐린 펌프 해킹이 시연되었습니다. 뇌에 이식된 장치라고 예외일 수 없습니다.

우리는 뇌를 보호하는 방법을 아직 충분히 알지 못합니다. 하지만 그 방법을 찾아야 합니다. 뇌는 우리의 마지막 성역이기 때문입니다.

다. 알고리즘 편향과 자율성 침해의 위험

2023년, 중국 항저우의 한 철도 기지에서 기관사들이 특수한 모자를 쓰고 있었습니다. 모자에 내장된 센서가 그들의 뇌파를 실시간으로 측정했습니다. 목적은 피로와 집중력 저하를 감지하는 것이었습니다. 안전을 위해서라는 설명이었습니다. 그러나 다른 시선도 있었습니다. 노동자의 정신 상태를 감시하는 것이 과연 허용되어야 하는가.

BCI 알고리즘은 중립적이지 않습니다. 모든 알고리즘은 학습 데이터의 특성을 반영합니다. 현재 대부분의 BCI 알고리즘은 서양인, 백인, 남성의 데이터로 학습되었습니다. 이 알고리즘이 다른 인구 집단의 신호를 해석할 때 편향이 발생할 수 있습니다.

감정 BCI의 경우 문제가 더 복잡해집니다. 감정에 대한 편견은 성별과 나이에 따라 다릅니다. 예를 들어 여성은 더 감정적이라는 고정관념이 있습니다. 이런 편견이 학습 데이터에 반영되면, 알고리즘은 같은 뇌 신호를 여성에게서는 감정적 반응으로, 남성에게서는 중립적 반응으로 해석할 수 있습니다.

자율성 침해의 문제는 더 근본적입니다. BCI는 점점 더 인공지능과 결합됩니다. AI 기반 BCI는 시각적 입력과 상황 인식을 바탕으로 독자적으로 작동할 수 있습니다. 사용자는 자신이 장치를 통제한다고 믿지만, 실제로는 알고리즘이 많은 결정을 내립니다. 이것을 주체성의 착각이라 부릅니다.

폐쇄 루프 시스템은 이 문제를 더욱 첨예하게 만듭니다. 폐쇄 루프 BCI는 뇌 신호를 읽고 자동으로 자극을 보냅니다. 예를 들어 우울증 치료용 심부뇌자극기는 특정 뇌파 패턴을 감지하면 자동으로 전기 자극을 전달합니다. 환자가 개입할 필요가 없습니다. 그러나 이것이 자기 결정인지 기계의 결정인지 경계가 모호해집니다.

심부뇌자극을 받은 환자들은 성격 변화에 대해 양가적인 감정을 보고합니다. 충동성이나 성실성의 변화를 경험합니다. 그들은 장치의 성취와 자신의 능력을 구분하기 어렵다고 말합니다. 나인가, 기계인가. 이 질문에 명확한 답을 찾지 못합니다.

부정적 감정을 느낄 권리라는 개념도 등장했습니다. 폐쇄 루프 시스템이 자동으로 기분과 인지를 조절한다면, 우리는 슬픔이나 불안을 경험할 권리를 잃는 것은 아닙니까. 부정적 감정은 종종 중요한 정보를 담고 있습니다. 무언가가 잘못되었다는 신호입니다. 이 신호를 자동으로 억제하는 것이 바람직합니까.

여러 국가가 이러한 우려에 대응하고 있습니다. 칠레의 2021년 헌법 개정은 정신적 프라이버시와 의지의 자유를 보호합니다. 스페인의 디지털 권리 헌장은 신경기술이 정체성 주권과 자기 결정을 보장해야 한다고 명시합니다. 중국의 2023년 BCI 윤리 제안은 자율성, 프라이버시, 투명성, 공정성을 강조합니다.

그러나 직장에서의 신경 모니터링은 규제의 사각지대에 있습니다. 중국의 공장과 철도에서 사용되는 피로 감지 시스템은 안전이라는 명목 아래 작동합니다. 노동자들이 이 모니터링에 진정으로 동의했는지, 거부할 수 있는 선택권이 있었는지는 불분명합니다.

2024년 콜로라도 AI법은 고위험 의사결정에서 의도적이든 비의도적이든 AI로 인한 차별을 방지하고자 합니다. 2025년 텍사스와 버지니아도 유사한 법률을 통과시켰습니다. 그러나 텍사스 법은 의도적 차별만 처벌합니다. 비의도적이지만 체계적인 편향은 어떻게 됩니까.

브루킹스 연구소의 2025년 연구는 인간이 AI 편향을 식별하고 완화하는 데 실패한다는 것을 보여주었습니다. 연구진은 인간 피험자들이 인종적으로 편향된 AI 모델과 협력하여 이력서를 심사하게 했습니다. 피험자들은 AI 편향이 자신의 의사결정에 전파되는 것을 적절히 식별하거나 완화하지 못했습니다. 이것은 고위험 의사결정에서 인간 개입을 요구하는 현재의 AI 정책이 충분하지 않을 수 있음을 시사합니다.

알고리즘은 도구입니다. 그러나 그 도구가 우리의 생각과 감정을 해석하고 조절할 때, 그것은 단순한 도구 이상이 됩니다. 우리가 누구인지를 정의하는 데 참여하는 행위자가 됩니다. 그 행위자의 편향은 곧 우리 자신에 대한 편향이 됩니다.

라. 동의의 문제: 진정한 사전동의(Informed Consent)란

2022년, 망막 임플란트 기업 세컨드 사이트(Second Sight)가 파산했습니다.

수백 명의 시각장애인들이 이 회사의 아르거스 II 장치를 눈에 이식받았습니다. 어떤 이들에게 이 장치는 수십 년 만에 처음으로 빛을 보게 해주었습니다. 파산 후 그들은 선택지 없이 남겨졌습니다. 장치는 작동했지만, 업데이트와 지원은 끊겼습니다. 고장이 나면 수리할 곳이 없었습니다.

이 사례는 뇌-컴퓨터 인터페이스 연구에서 사전동의의 한계를 적나라하게 보여줍니다. 임상 시험 참가자들은 장치 이식에 동의했습니다. 그러나 그들이 동의한 것은 무엇이었습니까. 장치가 영구적으로 지원될 것이라는 약속은 없었습니다. 회사가 파산할 가능성에 대한 정보는 충분히 제공되었습니까.

기존의 사전동의 모델은 한 시점의 결정을 전제합니다. 연구 참가자가 정보를 받고, 이해하고, 자발적으로 동의합니다. 그러나 BCI는 이 모델에 맞지 않습니다.

첫째, 변혁적 경험의 문제가 있습니다. 뇌에 칩을 이식받기 전의 나와 이식받은 후의 나는 같은 사람입니까. 이식 전의 나는 이식 후의 경험을 상상할 수 없습니다. 철학자들은 이것을 변혁적 경험이라 부릅니다. 경험하기 전에는 그것이 어떤 것인지 알 수 없는 경험입니다. 전통적인 사전동의는 이 경험적 차원을 충분히 다루지 못합니다.

놀랜드 아보를 생각해봅시다. 그는 8년간 어깨 아래의 모든 감각과 움직임을 잃었습니다. 그가 뉴럴링크 임상시험에 참가하기로 결정했을 때, 그는 생각만으로 컴퓨터를 조작하는 것이 어떤 느낌인지 알 수 없었습니다. 그것이 자신의 정체성에 어떤 영향을 미칠지도 알 수 없었습니다.

둘째, 장기적 불확실성의 문제가 있습니다. BCI의 장기적 효과는 알려지지 않았습니다. 10년 후, 20년 후에 어떤 일이 일어날지 아무도 모릅니다. 장치가 뇌 조직과 어떻게 상호작용할지, 성격이나 인지에 어떤 변화가 올지 예측할 수 없습니다. 사이버보안 위협은 어떻게 진화할지, 개인정보는 어떻게 사용될지 불확실합니다. 연구자들조차 모르는 위협에 대해 참가자가 어떻게 동의할 수 있습니까.

셋째, 제거의 딜레마가 있습니다. 임상시험이 끝나면 어떻게 됩니까. 참가자는 장치를 계속 사용할 수 있습니까. 장치가 비활성화되면 어떻게 됩니까. 제거를 원하면 가능습니까. 제거

수술의 위험은 이식 수술과 비슷하거나 더 클 수 있습니다. 비활성화된 장치를 몸에 두면 MRI를 찍을 수 없거나 장치 이동으로 인한 합병증이 생길 수 있습니다.

넷째, 동의 능력의 문제가 있습니다. 잠금 증후군 환자를 생각해봅시다. 그들은 의식이 있지만 눈 깜빡임 외에 어떤 움직임도 불가능합니다. BCI는 이들에게 의사소통의 희망을 줍니다. 그러나 동의 과정 자체가 어렵습니다. 그들이 동의서의 내용을 이해했는지 어떻게 확인합니까. 눈 깜빡임으로 표현된 동의가 진정한 이해에 기반한 것인지 어떻게 검증합니까.

2024년 헬싱키 선언 개정판은 패러다임 전환을 강조합니다. 연구 참가자를 피험자가 아닌 협력적 파트너로 보아야 합니다. 참가자가 완전한 사전동의를 제공할 수 없지만 동의 의사를 표현할 수 있다면, 의사는 법정 대리인의 동의와 함께 이 동의 의사를 구해야 합니다. 참가자가 표현한 선호와 가치는 고려되어야 하며, 어떤 이의 표시도 존중되어야 합니다.

일부 연구자들은 동적 동의 모델을 제안합니다. 한 번의 동의가 아니라 지속적인 정보 업데이트와 단계별 재동의를 수행합니다. 기술이나 기능이 변경될 때마다 새로운 동의를 구합니다. 그러나 이 모델도 모든 문제를 해결하지는 못합니다. 열린 미래의 가능성에 정적인 합의가 어떻게 대응할 수 있겠습니까.

2025년 8월, 세계정신과저널에 발표된 체계적 리뷰는 정신질환 환자의 BCI 임상연구에서 사전동의 능력 평가가 주요 과제라고 밝혔습니다. 조현병, 기분장애, 거식증, 알코올 의존, 알츠하이머 및 파킨슨병으로 인한 신경인지장애 환자들이 대상이었습니다. 연구진은 5차원 BCI 특화 사전동의 능력 프레임워크를 구성했습니다. 미래 연구는 동적 평가 시스템을 개발하고 정신질환 환자의 동의 능력을 향상시켜야 한다고 권고했습니다.

기관윤리위원회는 어려운 과제에 직면해 있습니다. 수술 위험은 명확하지만, 성격이나 기능의 변화는 정의하기 어렵습니다. 사이버보안 전문가를 찾는 데 시간이 걸립니다. 위험 대비 이익의 평가가 쉽지 않습니다.

사전동의를 연구 윤리의 초석입니다. 그러나 BCI 시대에 그 초석은 흔들리고 있습니다. 우리는 새로운 동의 모델을 찾아야 합니다. 임플란트와 함께 시작되어, 임플란트와 함께 진화하는 동의. 불확실성을 인정하면서도, 참가자의 자율성을 존중하는 동의. 기업이 파산해도, 지원이 끊겨도, 참가자를 보호하는 동의.

그것이 무엇인지는 아직 분명하지 않습니다. 분명한 것은, 지금의 방식으로는 충분하지 않다는 것입니다.

15 신경권(Neurorights)과 법적 규제 프레임워크

가. 신경권 개념의 등장: 2017년 EPFL 이엔카 교수의 제안

2017년 어느 늦은 밤, 스위스 로잔 연방 공과대학교(EPFL) 캠퍼스의 생명윤리 연구실에는 불이 꺼지지 않았습니다. 서른다섯 살의 생명윤리학자 마르첼로 이엔카(Marcello Ienca)는 두 개의 문서를 번갈아 바라보고 있었습니다. 하나는 최신 신경기술 학술지였고, 다른 하나는 1948년에 작성된 세계인권선언문이었습니다. 70년이라는 시간의 간극이 그를 불안하게 했습니다. 1948년의 인류는 뇌를 읽는 기계를 상상조차 하지 못했습니다. 그들이 보호하려 했던 것은 고문, 감금, 검열이었습니다. 하지만 이제 기술은 물리적 강제 없이도 인간의 가장 은밀한 영역에 침투할 수 있게 되었습니다. 이엔카는 스스로에게 물었습니다. 누군가가 나의 생각을 훔쳐 읽을 때, 그것은 무엇을 침해하는 것인가.

이엔카는 취리히 대학교의 인권 변호사 로베르토 안도르노(Roberto Andorno)와 함께 이 질문에 답하려 했습니다. 그들은 수개월에 걸쳐 기존의 국제인권법 체계를 분석했습니다. 결론은 명확했습니다. 현행 인권 프레임워크에는 구멍이 있었습니다. 신체의 자유는 보장되어 있었지만, 정신의 자유는 암묵적으로만 전제되어 있었습니다. 사생활의 보호는 명시되어 있었지만, 뇌 속의 생각까지 보호하는 것인지는 분명하지 않았습니다. 이엔카와 안도르노는 이 공백을 메우기 위해 새로운 권리의 언어를 제안했습니다. 그들은 이것을 신경권(Neurorights)이라 불렀습니다.

2017년 4월, 두 사람은 『생명과학, 사회 및 정책(Life Sciences, Society and Policy)』 저널에 논문을 발표했습니다. 제목은 "신경과학과 신경기술의 시대에 맞는 새로운 인권을 향하여"였습니다. 이 논문에서 그들은 네 가지 신경권을 제안했습니다. 첫째는 인지적 자유(Cognitive Liberty)입니다. 이것은 개인이 자신의 정신적 과정을 스스로 통제할 권리를 말합니다. 뇌를 향상시키는 기술을 사용할지 말지를 본인이 결정할 수 있어야 합니다. 동시에 누군가가 강제로 내 뇌에 개입하는 것을 거부할 권리도 포함됩니다. 이엔카는 이렇게 썼습니다. "인지적 자유는 모든 다른 자유의 전제 조건입니다. 생각할 자유가 없다면 말할 자유도 의미가 없습니다."

둘째는 정신적 프라이버시(Mental Privacy)입니다. 우리는 이미 통화 기록이나 이메일이 유출되는 것을 심각하게 받아들입니다. 하지만 뇌파 데이터는 그보다 훨씬 더 민감합니다. 신경 데이터 안에는 언어로 정제되기 전의 낱것의 감정, 무의식적인 욕망, 내가 누구를 사랑하고 누구를 두려워하는지가 담겨 있을 수 있습니다. 이엔카는 이런 정보가 동의 없이 수집되거나 거래되는 것을 막아야 한다고 주장했습니다.

셋째는 정신적 무결성(Mental Integrity)입니다. 이는 외부의 해킹이나 조작으로부터 자신의 뇌 상태를 온전히 지킬 권리를 의미합니다. 만약 해커가 뇌 임플란트에 침입하여 파킨슨병

환자의 운동 신호를 교란한다면 어떻게 될까요. 혹은 감정 조절 장치를 해킹하여 강제로 분노나 공포를 느끼게 한다면 그것은 무엇이라 불러야 할까요. 이엔카는 이것을 신체적 폭력과 동등하거나 그보다 더 심각한 침해로 보았습니다.

넷째는 심리적 연속성(Psychological Continuity)입니다. 이는 시간이 흘러도 나는 여전히 나라는 정체성을 유지할 권리입니다. 딥러닝 알고리즘이 뇌의 의사결정에 개입하기 시작하면, 사용자는 혼란을 느낄 수 있습니다. 방금 내린 이 결정은 내가 한 것인가, 아니면 기계가 유도한 것인가. 기억을 편집하거나 성격을 변화시키는 기술이 등장한다면, 인간은 자아의 연속성을 잃어버릴 수 있습니다.

신경과학 시대, 당신의 ‘뇌’를 지키는 4가지 권리



- 

1. 인지적 자유: 내 생각의 주인은 ‘나’
자신의 정신적 과정을 스스로 통제하고, 외부의 강제적 개입을 거부할 권리입니다.
- 

**2. 정신적 프라이버시:
뇌 데이터의 무단 수집 금지**
무의식적 욕망과 감정이 담긴 뇌파 데이터가 동의 없이 거래되는 것을 막아야 합니다.
- 

**3. 정신적 무결성:
뇌 해킹으로부터의 보호**
외부 기기에 의한 뇌 신호 조작이나 해킹을 신체적 폭력과 동등한 침해로 규정합니다.
- 

**4. 심리적 연속성:
‘나’라는 정체성의 유지**
알고리즘의 개입이나 기억 편집 기술로부터 자아의 연속성을 잃지 않을 권리입니다.

이엔카와 안도르노의 논문은 학계에 파장을 일으켰습니다. 같은 해, 콜럼비아 대학교의 신경생물학자 라파엘 유스테(Rafael Yuste)가 이끄는 모닝사이드 그룹(Morningside Group)도 『네이처(Nature)』에 유사한 제안을 발표했습니다. 그들은 정신적 프라이버시, 개인 정체성, 자유 의지, 인지 증강에 대한 공정한 접근, 알고리즘 편향으로부터의 보호라는 다섯 가지 권리를 주장했습니다. 유스테는 이 권리들을 유엔 세계인권선언에 추가해야 한다고 역설했습니다.

많은 이들이 이 제안을 시기상조라고 생각했습니다. 2017년에 뉴럴링크는 설립된 지 1년밖에 되지 않은 신생 기업이었습니다. 대부분의 BCI 연구는 실험실에 머물러 있었습니다. 하지

만 불과 몇 년 후, 돼지와 원숭이의 뇌에 칩이 이식되었고, 인간이 생각만으로 컴퓨터를 조작하기 시작했습니다. 이엔카의 통찰은 예언이 되었습니다. 그는 인터뷰에서 이렇게 말했습니다. "자동차가 발명된 후에야 교통법규를 만들 수 있었습니다. 하지만 뇌 기술만큼은 다릅니다. 기술이 인간을 덮치기 전에 미리 가드레일을 세워야 합니다."

2021년, 이엔카는 유럽 평의회 생명윤리위원회의 자문 위원으로 위촉되어 신경기술과 인권에 관한 공식 보고서를 작성했습니다. 그의 연구실에서 시작된 작은 불씨는 칠레의 헌법을 바꾸고, 미국의 주법에 영향을 미치며, 유네스코의 글로벌 의제가 되었습니다. 신경권은 더 이상 추상적인 철학 개념이 아닙니다. 그것은 뇌와 컴퓨터가 연결되는 시대에 인류가 스스로를 지키기 위해 세운 새로운 언어입니다.

나. 칠레 헌법 개정(2021)과 신경권리법: 세계 최초 입법 사례

2019년 늦가을, 칠레의 수도 산티아고에서 열린 퓨처 콩그레스(Future Congress) 행사장. 청중석 앞쪽에 한 남자가 앉아 있었습니다.

기도 지라르디(Guido Girardi), 칠레 상원의원이자 의사 출신의 정치인이었습니다. 연단에는 뉴욕에서 온 신경과학자가 서 있었습니다. 라파엘 유스테(Rafael Yuste), 콜럼비아 대학교 교수이자 뇌 과학의 세계적 권위자였습니다. 유스테는 스크린에 쥐의 뇌 영상을 띄웠습니다. 그리고 말했습니다. "우리는 이 쥐가 보지 않은 것을 본 것처럼 착각하게 만들 수 있습니다. 뇌에 직접 신호를 주입하세요."

지라르디는 의자에서 몸을 앞으로 숙였습니다. 유스테는 계속했습니다. "이 기술은 조만간 인간에게도 적용될 것입니다. 문제는 규제가 없다는 점입니다. 지금 이대로라면, 기업들이 여러분의 뇌 데이터를 마음대로 수집하고 거래하는 세상이 올 것입니다." 강연이 끝나자 지라르디는 유스테에게 다가갔습니다. 두 사람은 몇 시간 동안 대화를 나눴습니다. 그날 밤, 그들은 결심했습니다. 칠레가 먼저 움직이자, 기술 강국 미국도, 규제 선도국 유럽도 하지 않은 일을 남미의 이 작은 나라가 하자.

2021년 10월, 칠레 의회는 세계를 놀라게 했습니다. 헌법 제19조를 개정하여 정신적 무결성(Mental Integrity)을 기본적 인권으로 명시한 것입니다. 개정 조항은 이렇게 선언합니다. "과학 및 기술 발전은 인간의 삶과 신체적, 정신적 완전성을 존중하며 인간에게 봉사해야 한다. 법률은 뇌 활동과 그로부터 파생되는 정보를 보호해야 한다." 이것은 단순한 선언이 아니었습니다. 칠레는 헌법 개정 이후 구체적인 신경권리법(Neuroprotection Bill)을 제정하여 이를 뒷받침했습니다.

지라르디 의원은 법안 통과 직후 기자회견에서 말했습니다. "뇌 데이터는 장기와 같은 지위를 가져야 합니다. 사고팔 수 없고, 거래할 수 없으며, 본인의 명시적 동의 없이 사용할 수 없는 것으로 말입니다." 칠레의 이 법안은 신경 데이터를 의료적, 과학적, 이타적 목적으로만 기증할 수 있도록 제한했습니다. 상업적 목적의 뇌 데이터 거래는 원칙적으로 금지되었습니다.

흥미로운 점은 이 법안이 초당적 지지를 받았다는 사실입니다. 당시 칠레는 극심한 사회 갈등으로 정치적 분열이 깊었습니다. 하지만 신경권 문제 앞에서는 좌파와 우파의 구분이 없었습니다. 인간의 마음이 기계에 종속될 수 있다는 공포는 이념을 초월했습니다. 유스테 교수는 칠레 의회에서 증언하며 이렇게 말했습니다. "이 기술은 알츠하이머와 파킨슨병을 치료할 수 있는 인류의 희망입니다. 우리는 연구를 막으려는 것이 아닙니다. 다만 그 기술이 인간의 영혼을 건드리지 않도록 안전벨트를 매려는 것입니다."

칠레의 헌법 개정이 단순한 선언에 그치지 않는다는 것을 세상에 보여준 사건이 2023년에 터졌습니다. 지라르디 전 의원은 미국 샌프란시스코에 본사를 둔 이모티브(Emotiv)라는 기업의 뇌파 측정 헤드셋 인사이트(Insight)를 구매했습니다. 이 무선 기기는 머리띠 형태로, 사용자의 뇌 전기 활동을 측정하여 집중도, 스트레스, 감정 상태를 분석할 수 있었습니다. 문제는 지라르디가 자신의 뇌 데이터를 자유롭게 열람하거나 삭제할 수 없다는 점이었습니다. 이모티브는 유료 구독을 하지 않는 사용자에게 원본 데이터를 제공하지 않았고, 데이터를 클라우드에 저장하여 연구 목적으로 활용하고 있었습니다.

지라르디는 헌법소원을 제기했습니다. 그는 이모티브가 자신의 동의 없이 뇌 데이터를 연구에 사용한 것이 헌법이 보장한 정신적 프라이버시와 무결성을 침해했다고 주장했습니다. 2023년 8월 9일, 칠레 대법원은 만장일치로 지라르디의 손을 들어주었습니다. 법원은 이모티브에게 지라르디의 모든 뇌 데이터를 삭제하라고 명령했습니다. 또한 칠레 보건 당국에 해당 기기에 대한 추가 조사를 지시했습니다.

대법원은 판결문에서 이렇게 밝혔습니다. "신경 데이터는 익명화되었다 하더라도, 기술 발전에 따라 언제든 재식별될 수 있다. 따라서 단순한 약관 동의로는 부족하며, 각각의 사용 목적에 대해 명시적이고 구체적인 사전 동의가 필요하다." 이 판결은 세계 최초의 신경권 관련 사법 판단이었습니다. 이모티브는 칠레 시장에서의 판매를 중단했습니다.

이 판결의 파급력은 칠레를 넘어섰습니다. 멕시코에서는 두 개의 신경권 헌법 개정안이 발의되었습니다. 브라질에서는 일반 데이터 보호법(LGPD)에 신경 데이터를 민감 정보로 추가하는 법안이 상정되었습니다. 우루과이 의회는 칠레 의원들과의 교류를 통해 유사한 입법을 검토하기 시작했습니다. 2022년에는 라틴아메리카 및 카리브해 의회(Parlatino)가 신경권 모델법을 기초했습니다. 안데스 산맥 기슭의 작은 나라가 쏘아 올린 신호탄은 대륙 전체로 퍼져나가고 있습니다.

칠레의 사례는 기술 발전 속도가 법의 속도를 압도하는 시대에 예외적인 사건이었습니다. 보통 법은 기술이 문제를 일으킨 뒤에야 뒤늦게 수습하러 나섭니다. 하지만 칠레는 뉴럴링크가 인간 임상을 시작하기도 전에, 일반 소비자들이 뇌파 헤드셋을 일상적으로 사용하기도 전에 예방적 입법을 단행했습니다. 지라르디 의원의 말을 빌리자면, "미래를 규제하는 것이 아니라 현재를 보호하여 미래를 구하는 것"이었습니다.

다. 미국 콜로라도·캘리포니아 주의 신경 데이터 보호법

2024년 4월의 어느 오후, 콜로라도 주 의사당 본회의장. 전광판에 투표 결과가 떴습니다. 61대 1. 법안 HB24-1058이 하원을 통과한 순간이었습니다. 의원들은 서로 악수를 나누었습니다. 좌파와 우파의 구분이 없었습니다. 이 법안은 미국 역사상 최초로 신경 데이터를 법적 보호 대상으로 명시한 주법이었습니다. 며칠 후 재러드 폴리스(Jared Polis) 주지사가 서명했습니다. 콜로라도는 뇌파가 법의 언어로 기록된 최초의 미국 주가 되었습니다.

이 법안이 등장한 배경에는 기묘한 규제 공백이 있었습니다. 미국에는 의료 정보를 보호하는 강력한 연방법 HIPPA가 있습니다. 뉴럴링크처럼 FDA 승인을 받은 의료기기가 수집하는 뇌 데이터는 이 법의 보호를 받습니다. 하지만 문제는 병원 밖에 있었습니다. 아마존에서 수십만 원에 살 수 있는 뇌파 헤드셋, 집중력을 높여준다는 명상 앱, 수면 패턴을 분석하는 이어버드. 이것들은 의료기기가 아니라 웰니스 기기나 가전제품으로 분류됩니다. hippocampus의 보호를 받지 못합니다.

신경권 재단(Neurorights Foundation)의 연구진이 이 틈새를 조사했습니다. 그들은 시중에 판매되는 30개의 소비자용 BCI 기기와 명상 앱의 개인정보 처리방침을 분석했습니다. 결과는 충격적이었습니다. 대부분의 기업이 사용자의 뇌 데이터를 제3자와 공유할 수 있는 조항을 가지고 있었습니다. 사용자가 자신의 데이터를 삭제할 권리조차 명시되지 않은 경우도 많았습니다. 당신이 명상 앱으로 측정한 스트레스 지수가 보험사나 광고 회사로 팔려나갈 수 있다는 뜻이었습니다.

콜로라도의 HB24-1058은 이 문제에 정면으로 대응했습니다. 이 법은 콜로라도 프라이버시법(CPA)을 개정하여 민감 데이터의 정의에 생물학적 데이터(Biological Data)를 추가했습니다. 그리고 생물학적 데이터의 하위 범주로 신경 데이터(Neural Data)를 명시했습니다. 법률은 신경 데이터를 이렇게 정의합니다. "개인의 중추 또는 말초 신경계 활동을 측정하여 생성된 정보로서, 기기의 도움을 받아 처리될 수 있는 정보." 이제 콜로라도에서 기업이 소비자의 뇌 데이터를 수집하려면 명시적이고 구체적인 동의를 받아야 합니다. 소비자는 자신의 신경 데이터에 접근하고, 수정하고, 삭제할 권리를 보장받습니다.

5개월 후, 태평양 연안에서도 움직임이 있었습니다. 2024년 9월 28일, 캘리포니아 주지사 개빈 뉴섬(Gavin Newsom)이 상원 법안 SB 1223에 서명했습니다. 이 법안은 캘리포니아 소비자 프라이버시법(CCPA)을 개정하여 신경 데이터를 민감한 개인 정보로 분류했습니다. 캘리포니아는 뉴럴링크, 메타, 애플 같은 거대 테크 기업들의 본거지입니다. 이곳에서의 규제는 곧 전 세계 기술 표준에 영향을 미칩니다.

캘리포니아 법은 신경 데이터를 이렇게 정의합니다. "소비자의 중추 또는 말초 신경계 활동을 측정하여 생성된 정보로서, 비신경 정보로부터 추론된 것은 제외한다." 마지막 단서가 중요합니다. 심박수나 눈동자 움직임 같은 간접 지표를 통해 뇌 상태를 유추하는 기술은 이 법의 적용 대상이 아닐 수 있다는 해석의 여지를 남겼습니다. 일부 전문가들은 이것이 규제의 구멍이 될 수 있다고 우려했습니다.

법안 통과를 주도한 조시 베커(Josh Becker) 캘리포니아 주 상원의원은 기자회견에서 말했습니다. "우리의 생각과 감정은 우리 자신의 것이어야 합니다. 데이터 브로커의 상품이 되어서는 안 됩니다." 신경권 재단은 이 법안의 통과를 "소비자의 정신적 프라이버시를 보호하기 위한 중대한 승리"라고 평가했습니다.

두 주의 입법에는 공통된 철학이 있습니다. 뇌 데이터는 단순한 정보가 아니라는 인식입니다. 우리의 뇌파는 건강 상태만 드러내는 것이 아닙니다. 그 안에는 우리가 무의식적으로 반응하는 자극, 인지 능력의 미세한 변화, 감정의 기복이 모두 담겨 있습니다. 게임 회사가 VR 헤드셋으로 사용자의 뇌파를 수집한다고 가정해 봅시다. 그들은 사용자가 언제 가장 흥분하고 언제 지루해하는지를 분석하여 게임의 중독성을 극대화할 수 있습니다. 정치 광고를 볼 때의 뇌 반응을 분석하면 유권자의 성향을 프로파일링할 수도 있습니다.

콜로라도와 캘리포니아의 법안은 이런 신경 감시 자본주의(Neuro-surveillance Capitalism)의 싹을 자르기 위한 첫걸음입니다. 물론 기술 기업들은 반발했습니다. 과도한 규제가 혁신을 저해하고 유용한 웰니스 서비스 개발을 막을 것이라고 주장했습니다. 하지만 입법자들은 단호했습니다. 스마트폰의 위치 정보가 유출되는 것은 불쾌한 일입니다. 하지만 내 머릿속 생각이 유출되는 것은 존재의 위협입니다.

이 두 주의 움직임은 연방 차원의 논의를 촉발하고 있습니다. 미네소타와 몬태나 같은 다른 주들도 유사한 법안을 검토하고 있습니다. 2025년 현재, 뇌 데이터가 신용카드 번호나 지문처럼 엄격하게 보호받아야 할 정보라는 인식이 미국 전역으로 확산되고 있습니다.

라. 유럽 평의회와 유네스코의 국제 규제 논의

2025년 11월 12일, 파리 유네스코 본부. 194개 회원국 대표들이 총회장에 모여 있었습니다. 의장이 말했습니다. "신경기술 윤리에 관한 권고안 채택에 찬성하시는 분은 손을 들어주시십시오." 손들이 올라갔습니다. 만장일치였습니다. 인류 역사상 최초로 뇌와 기계의 관계를 규율하는 글로벌 윤리 프레임워크가 탄생한 순간이었습니다. 방청석에서 한 남자가 눈물을 글썽였습니다. 라파엘 유스테. 8년 전 모닝사이드 그룹의 제안에서 시작된 여정이 마침내 국제 규범으로 결실을 맺은 것이었습니다.

유네스코의 신경기술 윤리 권고안(Recommendation on the Ethics of Neurotechnology)은 3년에 걸친 치열한 논의의 결과물입니다. 2023년 11월, 유네스코 총회는 이 권고안의 작성을 의결했습니다. 오드레 아줄레(Audrey Azoulay) 유네스코 사무총장은 24명의 다학제 전문가로 구성된 특별 작업반(Ad Hoc Expert Group)을 구성했습니다. 지역과 성별의 균형을 고려한 인선이었습니다. MIT 미디어랩의 나탈리야 코스미나(Nataliya Kosmyna) 연구원도 이 그룹에 포함되었습니다.

전문가 그룹은 2024년 4월과 8월 두 차례 파리에서 회의를 열어 초안을 작성했습니다. 2024년 9월, 초안이 회원국들에 배포되어 의견 수렴이 시작되었습니다. 2025년 5월, 정부간 전문가 회의가 열려 최종안을 검토했습니다. 그리고 11월 총회에서 채택되었습니다. 이 권고안은 100개 이상의 세부 권고 사항을 담고 있습니다.

권고안의 핵심은 몇 가지로 요약됩니다.

첫째, 정신적 프라이버시의 보호입니다. 신경 데이터는 그 어떤 개인 정보보다 민감하게 다루어져야 합니다.

둘째, 투명성과 동의입니다. 신경 기술을 사용할 때는 사용자에게 충분한 정보가 제공되어야 하고, 명시적 동의를 받아야 합니다.

셋째, 아동과 취약 계층에 대한 보호입니다. 인지 능력이 발달 중인 아동이나 판단 능력이 저하된 환자에게는 더 강화된 보호가 필요합니다.

넷째, 임상 환경 밖에서의 사용에 대한 규제입니다. 소비자용 뇌파 기기나 게임용 BCI처럼 의료 목적이 아닌 신경 기술에 대해서도 윤리적 가이드라인이 적용되어야 합니다.

가브리엘라 라모스(Gabriela Ramos) 유네스코 사회인문과학 사무보는 채택 직후 성명을 발표했습니다. "우리는 뇌 데이터가 상품화되는 것을 막아야 합니다. 신경 기술은 인류 전체의 이익을 위해 사용되어야 하며, 소수의 특권이 되어서는 안 됩니다." 이 권고안은 법적 구속력은 없습니다. 하지만 194개 회원국이 국내법을 제정할 때 참조해야 할 도덕적 기준을 세웠습니다. 유전자 복제 기술에 대해 국제 사회가 금지선을 설정했듯이, 뇌 기술에 대해서도 해서는 안 될 일의 목록을 만든 것입니다.

유럽 평의회(Council of Europe)도 별도의 경로로 움직이고 있습니다. 46개 회원국을 거느린 이 기구는 1997년 오비에도 협약을 통해 인간의 존엄과 생의학의 관계를 규율해 왔습니다. 최근에는 신경 기술이 기존 인권 조약, 특히 유럽인권협약(ECHR)에 미치는 영향을 심도 있게 검토하고 있습니다. 마르첼로 이엔카는 유럽 평의회 생명윤리위원회(DH-BIO)의 자문 위원으로서 신경 기술과 인권에 관한 공식 보고서를 작성했습니다.

유럽 평의회 내부에서는 흥미로운 논쟁이 벌어지고 있습니다. 일부 전문가들은 기존 인권을 넓게 해석하면 신경 기술의 위험에 충분히 대응할 수 있다고 주장합니다. 사생활의 권리나 사상의 자유 같은 조항을 뇌 데이터 맥락에 적용하면 된다는 것입니다. 반면 다른 쪽에서는 뇌에 대한 직접적인 개입은 기존 법리로 포섭하기 어려운 새로운 차원의 문제라고 맞섭니다. 명시적인 신경권 도입이 필요하다는 입장입니다.

OECD도 2019년 '신경 기술의 책임 있는 혁신에 관한 권고'를 채택했습니다. 이 권고는 혁신을 저해하지 않으면서도 안전과 윤리를 확보하는 데 초점을 맞춥니다. 2024년에는 이 권고의 이행을 돕기 위한 구체적인 정책 툴킷을 발표했습니다.

국제적 합의를 도출하는 과정은 험난합니다. 기술 선도국인 미국과 중국, 그리고 규제를 강조하는 유럽 사이의 입장 차이가 뚜렷합니다. 중국은 차이나 브레인 프로젝트를 통해 국가 주도로 BCI 기술을 개발하고 있으며, 이를 교육이나 국방 분야에 적용하는 데 적극적입니다. 미국은 민간 기업의 혁신을 저해하지 않는 선에서의 규제를 원합니다. 유럽은 프라이버시와 인권을 최우선으로 둡니다.

하지만 이들이 공통적으로 동의하는 바는 하나입니다. 인간의 뇌는 인간성의 마지막 보루라는 것입니다. 기술이 뇌의 비밀을 하나씩 풀어나갈 때마다, 우리는 역설적으로 인간이란 무엇인가를 더 치열하게 고민해야 합니다. 파리와 제네바의 회의실에서 오가는 문서들은, 훗날 뇌와 컴퓨터가 완전히 결합된 시대에 인류가 여전히 존엄한 존재로 남을 수 있게 하는 안전 장치입니다. 느린 발걸음입니다. 하지만 그것이 국제 규범이 걸어가는 방식입니다.

16 인간 증강과 사회적 불평등

가. 치료에서 증강으로: BCI의 점진적 변화

2024년 1월의 어느 밤, 놀랜드 아보는 잠을 이루지 못했습니다. 이유는 고통이 아니었습니다. 게임 때문이었습니다. 수술 후 불과 몇 주 만에 그는 《문명 VI》를 밤새 플레이하고 있었습니다. 체스도 두었습니다. 마리오 카트도 즐겼습니다. 8년 전 호수에서의 다이빙 사고 이후 처음으로, 그는 자신이 원하는 일을 자신의 의지로 할 수 있었습니다. 손가락 하나 움직이지 않고, 오직 생각만으로. 전 세계는 그 장면에 감동했습니다. 의료 기술의 승리였습니다. 인간 정신의 승리였습니다.

그러나 실리콘밸리의 어느 회의실에서는 다른 대화가 오가고 있었습니다. 일론 머스크는 놀랜드 아보의 사례를 시작점으로 봤습니다. 종착점이 아니라.

그가 2016년 뉴럴링크를 설립할 때 품었던 비전은 처음부터 치료 그 너머에 있었습니다. 인공지능과의 공생. 인간 뇌의 대역폭을 확장하여 AI의 속도를 따라잡는 것. 그는 인간이 정보를 입력받는 속도에 비해 출력하는 속도가 현저히 느리다는 점을 자주 지적했습니다.

우리는 눈으로 수천 개의 단어를 순식간에 읽지만, 그것을 표현하려면 느린 손가락 타이핑이 나 더 느린 말하기에 의존해야 합니다. 머스크의 표현을 빌리자면, 인간은 AI 시대에 애완 고양이 신세로 전락하지 않으려면 이 병목을 뚫어야 합니다.

이 지점에서 치료와 증강 사이의 경계가 흐려지기 시작합니다. 경계는 명확해 보이지만, 현실에서는 연속선입니다. 예를 들어 봅시다. 알츠하이머 환자의 기억력을 회복시키기 위해 해마에 전극을 삽입하는 기술이 개발됩니다. 이 기술이 환자의 기억 기능을 젊은 시절 수준으로 되돌려 놓는다면, 그것은 분명 훌륭한 치료입니다. 그런데 같은 기술의 파라미터를 조금 조정하여, 한 번 본 책의 내용을 사진처럼 저장할 수 있게 만든다면 어떨까요. 외국어 어휘집을 뇌에 직접 다운로드할 수 있다면 어떨까요. 그 순간, 우리는 치료의 영역을 벗어납니다. 진화의 단계를 인위적으로 건너뛰는 증강의 영역으로 들어섭니다.

뉴럴링크의 블라인드사이트 프로젝트는 이 모호함을 선명하게 보여줍니다. 이 기술은 시각 장애인의 시력을 회복시키기 위해 시각 피질을 자극합니다. 초기에는 저해상도 픽셀로 세상을 보게 하겠지만, 전극 밀도가 높아지고 알고리즘이 정교해지면서 해상도는 점점 올라갈 것입니다. 어느 순간 인간의 자연 시력을 넘어설 것입니다. 머스크는 이미 이 기술이 적외선이

나 자외선까지 볼 수 있는 초인적 시각을 제공할 수 있다고 언급했습니다. 치료를 위해 이식한 칩이 어느 날 일반인이 가질 수 없는 능력을 부여하는 도구가 되는 것입니다.

이러한 변화는 갑작스럽게 오지 않습니다. 눈치채지 못하는 사이에 조금씩 다가옵니다. 우리는 이미 비슷한 경로를 걸어왔습니다. ADHD 치료제인 리탈린과 모다피닐은 어느새 수험생들 사이에서 공부 잘하는 약으로 둔갑했습니다. 성형 수술은 화상 환자의 재건에서 시작했지만, 지금은 미용 성형이 주류가 되었습니다. 라식 수술은 시력 교정을 넘어 삶의 편의를 높이는 선택이 되었습니다.

BCI 기술 역시 같은 경로를 밟을 것입니다. 처음에는 환자들을 돕기 위해서라는 숭고한 명분으로 규제의 문턱을 넘을 것입니다. 안전성이 입증되면, 삶의 질을 높이기 위해서라는 명분으로 일반 소비자 시장에 진입할 것입니다. 그리고 마침내 남들보다 뒤쳐지지 않기 위해서라는 공포심이 이 기술을 보편화시키는 동력이 될 것입니다.

2024년과 2025년 사이의 기술 발전 속도는 이 예측을 더욱 현실적으로 만들고 있습니다. 2025년 12월, 컬럼비아 대학과 뉴욕-프레즈비테리안 병원 연구팀은 BISC라는 새로운 BCI 칩을 발표했습니다. 65,536개의 전극과 1,024개의 채널을 단일 칩에 담은 이 장치는 뇌와 컴퓨터 사이에 초고속 무선 연결을 만듭니다. 연구팀은 이 기술이 단순히 장애 치료를 넘어, 인간과 AI 시스템이 원활하게 상호작용하는 미래를 열 것이라고 말했습니다. 치료에서 증강으로의 전환이 연구실 단계에서 이미 공식화되고 있는 것입니다.

2025년 5월, 애플은 BCI 휴먼 인터페이스 디바이스 프로토콜을 발표했습니다. 이 프로토콜은 뇌-컴퓨터 인터페이스가 애플 제품과 상호작용할 수 있게 합니다. 8월에는 싱크론이 자사의 BCI로 아이패드를 제어하는 시연을 선보였습니다. 스마트폰 이후의 인터페이스가 무엇인지를 묻는다면, 실리콘밸리의 답은 점점 명확해지고 있습니다. 그것은 뇌 자체입니다.

이 점진적 변화 속에서 우리는 심오한 질문을 마주하게 됩니다. 인간의 한계는 어디까지인가. 고통과 결핍, 망각은 인간을 인간답게 만드는 조건이 아니었는가. 모든 것을 기억하고, 빛의 속도로 계산하며, 말하지 않아도 소통하는 존재를 우리는 여전히 호모 사피엔스라고 부를 수 있을까. 치료에서 증강으로 넘어가는 그 문턱에서, 인류는 자신의 정체성을 다시 정의해야 할지도 모릅니다. BCI는 단순한 의료 기기가 아닙니다. 그것은 인류가 스스로 진화를 설계하기 위해 집어 든 조각칼입니다.

나. 인지 능력 향상은 부유층의 전유물인가

2040년대의 어느 초등학교 교실을 상상해 봅시다. 선생님이 질문을 던집니다. 어떤 아이들은 질문이 끝나기도 전에 손을 듭니다. 그들의 뇌는 클라우드와 연결되어 있습니다. 수학 공식을 외울 필요가 없습니다. 칩이 연산을 대신합니다.

교실 반대편의 아이들은 여전히 연필을 굴리며 머리를 싸매고 있습니다. 두 그룹 사이의 벽은 노력의 차이에서 비롯된 것이 아닙니다. 부모의 재력 차이에서 비롯된 생물학적 격차입니다.

이것이 공상과학 소설의 한 장면처럼 들릴 수 있습니다.

하지만 2024년 현재의 데이터는 이 시나리오가 멀지 않았음을 보여줍니다. 뉴럴링크의 침습형 BCI 수술 비용은 약 4만 달러에서 10만 달러 사이로 추정됩니다. 한화로 약 5천만 원에서 1억 3천만 원입니다. 초기에는 이보다 훨씬 비쌀 가능성이 높습니다. 여기에 정기적인 소프트웨어 업데이트 비용, 데이터 사용료, 유지 보수 비용이 더해집니다. 최신형 뇌 임플란트는 소수의 부유층만이 누릴 수 있는 사치품이 될 것입니다.

지금까지의 불평등은 환경의 불평등이었습니다. 부유한 집 아이들은 더 좋은 학교에 다니고, 더 비싼 과외를 받았습니다. 하지만 가난한 집 아이도 천재적 재능과 피나는 노력이 있다면 그 격차를 어느 정도 좁힐 수 있었습니다. 인간 뇌의 생물학적 하드웨어는 평등했기 때문입니다. 재벌 회장의 뇌나 가난한 노동자의 뇌나, 기본적인 처리 속도와 기억 용량에는 큰 차이가 없었습니다.

BCI에 의한 증강은 이 생물학적 평등을 깨뜨립니다. 돈으로 뇌의 성능 자체를 업그레이드할 수 있는 시대가 오면, 불평등은 고착화됩니다. 부유층은 더 똑똑해지고, 더 빨리 배우며, 더 창의적인 사고를 할 수 있게 됩니다. 그들은 이 우월한 인지 능력을 바탕으로 더 많은 부를 창출합니다. 그 부를 이용해 자녀들의 뇌를 더 강력하게 업그레이드합니다. 이것은 사회적 계급이 생물학적 종의 분화로 이어지는 디스토피아입니다.

역사학자 유발 하라리는 그의 저서 《호모 데우스》에서 이를 신적 인간과 무용 계급의 탄생으로 예견했습니다. 인지 능력이 향상된 슈퍼 휴먼들이 사회의 주요 의사결정을 독점하고, 그렇지 못한 자연인들은 AI와 자동화 시스템에 밀려 경제적, 정치적 가치를 잃어버릴 수 있다는 것입니다. 그가 말한 생물학적 카스트 제도가 현실이 될 수 있습니다.

2024년 10월 발표된 학술 논문에서 에든버러 대학의 연구자들은 이 문제를 인지적 격차라는 용어로 분석했습니다. 그들은 BCI 접근성의 불평등이 단순한 디지털 격차를 넘어, 인간 능력 자체의 격차로 이어질 수 있다고 경고했습니다. 동시에 그들은 역설적인 우려도 제기했습니다. 모든 사람이 동일한 BCI를 사용하게 될 경우, 인지적 동질화가 일어날 수 있다는 것입니다. BCI가 특정한 방식으로 생각하도록 유도한다면, 인류의 사고 다양성이 감소할 수 있습니다.

비용 장벽은 단순한 구매 가격에 그치지 않습니다. 장치는 구독 모델로 운영될 수 있습니다. 최신 펌웨어와 모델 업데이트가 유료일 수 있습니다. 개인화 학습을 위해서는 장기간 데이터를 축적해야 합니다. 데이터가 쌓일수록 성능이 올라가는 구조라면, 중간에 끊기지 않고 계속 사용하는 사람에게 유리합니다. 결국 지속 사용 가능한 생활 여유가 성능을 결정합니다.

접근성의 장벽은 인프라에서도 나타납니다. 안정적인 네트워크, 호환 기기, 개인정보에 대한 법적 지식, 계약서와 약관을 검토할 능력, 부작용이 생겼을 때 대체 수단을 갖춘 안전망까지 필요합니다. 이는 사회경제적 상위층이 이미 갖추고 있는 조건들입니다.

노동시장의 메커니즘은 이 불평등을 자동으로 증폭시킵니다. 기업은 생산성을 올리는 도구를 좋아합니다. 어떤 직무에서 BCI 보조가 집중력과 기억력, 반응속도를 개선한다는 인식이 퍼지면, 장치 사용 경험이 사실상 비공식 스펙이 됩니다. 사용하지 않는 사람은 실력의 문제가 아니라 장비 미보유로 불리해집니다. 취업을 하려면 칩을 심으라는 요구가 암묵적인 사회 규범이 될 수 있습니다.

물론 낙관적인 시각도 있습니다. 기술의 가격은 시간이 지날수록 급격히 하락합니다. 스마트폰이 처음 나왔을 때는 부자들의 전유물이었지만, 지금은 전 세계 빈민가에서도 사용됩니다. 라식 수술 비용도 20년 전보다 훨씬 저렴해졌습니다. BCI 역시 대량 생산 체제가 갖춰지면 누구나 접근 가능한 보편적 기술이 될 것이라는 주장입니다.

그러나 BCI는 스마트폰과 다릅니다. 스마트폰은 구형 모델을 써도 기본적인 소통에는 문제가 없습니다. 하지만 내 뇌의 처리 속도가 남들보다 100배 느리다면, 사회적 경쟁 자체가 불가능해집니다. 최신형 칩을 장착한 사람이 구형 칩을 장착한 사람보다 압도적인 우위를 점하게 된다면, 우리는 끊임없이 뇌를 업그레이드해야 하는 무한 경쟁의 굴레에 갇히게 됩니다.

따라서 인지 능력 향상이 부유층의 전유물이 되지 않도록 하기 위해서는 강력한 사회적 합의와 제도적 장치가 필요합니다. 공교육 시스템 안에서 BCI 접근권을 보장할 것인가. 의료 보험이 인지 증강 기술을 커버할 것인가. 정부가 저소득층에게 디지털 두뇌 보조금을 지급해야

하는가. 이러한 논의는 공상과학 소설 속 이야기가 아닙니다. 2030년대의 의회와 법정에서 치열하게 다루어질 현실의 의제가 될 것입니다.

우리는 물어야 합니다. 지능이 상품이 되는 사회에서, 인간의 존엄성은 어떻게 지켜질 수 있는가. 돈이 없어서 명청해질 수밖에 없는 세상을 우리는 용납할 수 있는가. 기술이 인간을 구원하는 도구가 되려면, 그것은 소수의 특권이 아니라 모두의 권리가 되어야 합니다.

다. 군사·감시 목적 악용의 위험성

기술은 가치 중립적이지만, 그것을 사용하는 인간은 그렇지 않습니다. 인류 역사를 통틀어 가장 혁신적인 기술들은 예외 없이 전쟁터에서 먼저 사용되었습니다. 인터넷, GPS, 제트 엔진, 뇌-컴퓨터 인터페이스 역시 군사적 관심의 최전선에 있습니다.

미국 국방부 산하 연구기관인 DARPA는 이미 수십 년 전부터 뇌신경 기술에 막대한 예산을 쏟아붓고 있습니다. N3 프로그램, 즉 차세대 비수술적 신경기술 프로그램은 1억 400만 달러 규모입니다. 이 프로그램의 목표는 명확합니다. 건강한 군인들이 수술 없이 사용할 수 있는 고성능 양방향 뇌-기계 인터페이스를 개발하는 것입니다. DARPA의 프로그램 매니저 알 에 몬디는 이렇게 말했습니다. 신경 인터페이스는 필요한 곳에 어디든 사용될 것입니다.

BCI: 미래 전장의 '슈퍼 솔저'와 감시의 위협

미래 전장: 슈퍼 솔저와 무기화

\$1.04억
N3 프로그램

DARPA, 수술 없이 사용 가능한 고성능 양방향 뇌-기계 인터페이스 개발에 막대한 예산 투입

생각을 현실로 만드는 '슈퍼 솔저'

공포 없이 며칠간 집중력 유지, 생각만으로 드론 떼 조종, 텔레파시 작전 공유 현실화

주사 한 번으로 뇌와 외부 통신

혈류를 타고 뇌로 이동해 신경 신호를 읽고 쓰는 '자기전기 나노입자'(BrainSTORMS) 개발 중

은밀한 위협: 감시와 통제 사회

2030년대 초, 군사 시스템 지배

미국, 중국, 러시아, 프랑스

주요 강대국(미, 중, 러, 프)이 BCI를 미래 전장 핵심 주도권으로 보고 개발 박차

핵무기보다 은밀한 감시와 통제

기술이 악용될 경우 인간의 내면을 들여다보고 통제하는, 핵무기보다 치명적인 도구

군사적 관점에서 BCI는 궁극의 무기 체계가 될 수 있습니다. 먼저 슈퍼 솔저의 탄생을 예고합니다. 공포를 느끼지 않고, 며칠 밤을 새워도 집중력이 흐트러지지 않으며, 전장의 상황을 뇌로 직접 다운로드받아 360도 시야를 확보하는 병사를 상상해 보십시오. 생각만으로 드론 떼를 조종합니다. 말 없이 동료들과 작전을 공유하는 텔레파시 통신은 특수부대의 작전 효율을 비약적으로 높일 것입니다.

실제로 이러한 연구는 이미 진행 중입니다. 2019년 DARPA는 바텔 연구소가 이끄는 팀에게 BrainSTORMS 프로젝트 계약을 체결했습니다. 이 프로젝트는 주사로 주입할 수 있는 자기전기 나노입자를 개발합니다. 머리카락 굵기에 수천 개가 들어갈 정도로 작은 이 입자는 혈류를 타고 뇌로 이동하여, 헬멧과 통신하며 신경 신호를 읽고 쓸 수 있습니다. 임무가 끝나면 자기장을 이용해 몸 밖으로 배출됩니다.

시뮬레이터에서 사지마비 조종사가 뇌 신호만으로 F-35 전투기를 조종하는 실험은 이미 성공했습니다. 한 사람이 생각만으로 드론 떼를 제어하는 예비 실험도 진행되었습니다. 국제적십자 법률 검토지에 실린 2025년 논문은 이러한 기술이 2030년대 초에 군사 시스템을 지배할 것으로 전망했습니다. 미국뿐 아닙니다. 중국, 러시아, 프랑스도 BCI 연구와 개발을 진행하고 있습니다.

하지만 빛이 강할수록 그림자도 짙습니다. 이 기술이 감시와 통제의 도구로 악용될 때, 그 위험성은 핵무기보다 더 은밀하고 치명적일 수 있습니다.

가장 우려되는 시나리오는 강제적 뇌 해킹입니다. 포로로 잡힌 적군의 뇌를 스캔하여 기밀 정보를 빼내는 심문 방식을 상상해 봅시다. 과거의 고문은 육체에 고통을 주어 입을 열게 했지만, BCI는 의지를 우회하여 기억 그 자체를 훔쳐볼 수 있게 합니다. 이는 제네바 협약이 규정하지 못한 새로운 형태의 인권 유린입니다.

더 나아가 자국민에 대한 감시 도구로 사용될 가능성도 있습니다. 2018년 사우스차이나모닝포스트는 중국의 일부 공장과 고속철도 운전사들에게 뇌파 감지 모자를 씌워 피로도와 감정 상태를 모니터링하고 있다고 보도했습니다. 절강성 국가전력망은 이 기술을 통해 2014년부터 2018년까지 약 3억 1,500만 달러의 이익 증가를 달성했다고 주장했습니다. 기업들은 생산성 향상을 명분으로 내세우지만, 이것은 노동자의 정신 상태까지 실시간으로 감시하고 평가하는 신경 감시의 시작입니다.

국제적십자 법률 검토지에 실린 분석은 군사용 BCI의 법적 문제를 지적합니다. 연구자들은 두 가지 모드를 구분했습니다. 능동적 BCI는 병사가 의식적으로 버튼을 누르는 상상을 하여 발사 명령을 내리는 것입니다. 반응적 BCI는 표적을 발견한 직후, 병사가 의식적으로 인지하기도 전에 뇌 신호가 발사 명령으로 변환되는 것입니다. 연구자들은 반응적 BCI가 병사의 통

제를 벗어나기 때문에 제네바 협약 추가의정서 제36조를 위반한다고 결론지었습니다. 구분과 비례의 원칙을 지킬 수 없기 때문입니다.

브레인 재킹의 위험성도 있습니다. 해커가 뇌 임플란트의 제어권을 탈취하는 것입니다. 적군이 아군 병사의 뇌 칩을 해킹하여 시각 정보를 조작하거나, 강제로 방아쇠를 당기게 만들 수도 있습니다. 고통 충추를 자극하여 무력화시킬 수도 있습니다. 내 몸이 나의 의지가 아닌 해커의 코드에 따라 움직이는 상황. 이것은 신체적 자유에 대한 가장 끔찍한 침해입니다.

뇌-컴퓨터 인터페이스(BCI): 기술의 진보인가, 인간 존엄의 위협인가?

BCI 기술이 초래할 수 있는 심각한 인권 침해와 윤리적/안보적 위험성을 즉각적으로 경고한다.

<p>기억을 직접 훔치는 '강제 뇌 해킹'</p>  <p>고문을 넘어 인간의 의지를 우회하고 뇌에서 직접 기밀 정보를 추출하는 새로운 형태의 인권 유린입니다.</p>	<p>노동자의 정신 상태까지 감시하는 사회</p>  <p>뇌파 감지 모자로 피로도나 감정을 실시간 감시하며, 생산성 향상을 명분으로 인간을 부품화합니다.</p>	<p>통제를 벗어난 '반응적 BCI'의 살상권</p>  <p>인간이 인지하기도 전에 뇌 신호로 공격을 실행하는 기술은 국제법의 인도주의 원칙을 위반합니다.</p>	<p>내 몸의 주도권을 뺏는 '브레인 재킹'</p>  <p>해커가 뇌 임플란트를 장악하여 시각 정보를 조작하거나 강제로 신체를 움직이게 만드는 끔찍한 침해입니다.</p>
---	--	--	---

군사적 경쟁은 브레이크 없는 전차와 같습니다. 한 국가가 뇌 증강 병사를 도입하면, 다른 국가도 뒤처지지 않기 위해 더 강력한 BCI를 도입할 것입니다. 이는 신경 군비 경쟁을 촉발합니다. 핵무기는 사용하지 않음으로써 평화를 유지하는 억지력이라도 있습니다. BCI는 은밀하게, 일상적으로 사용될 수 있기에 통제가 더욱 어렵습니다.

우리는 이 기술이 이중 용도 기술임을 잊지 말아야 합니다. 파킨슨병 환자의 떨림을 멈추게 하는 기술은 건강한 사람을 마비시키는 기술로 전용될 수 있습니다. 기억력을 좋게 하는 기술은 기억을 지우거나 조작하는 기술이 될 수 있습니다. 따라서 국제 사회는 생화학 무기를 금지했듯이, 신경 기술의 군사적 사용에 대한 엄격한 가이드라인과 국제 조약을 마련해야 합니다. 뇌는 전쟁터가 되어서는 안 됩니다. 그곳은 인간의 영혼이 머무는 마지막 성역이기 때문입니다.

라. 기술 격차와 신경 불평등의 미래

2040년의 채용 공고를 상상해 봅시다. 필수 자격 요건: 뉴럴링크 V5.0 이상 호환 가능자, 초당 1기가비트 데이터 처리 가능자. 이것은 단순한 상상이 아닙니다. 기술 격차가 신체적, 신경적 불평등으로 이어지는 미래의 단면입니다.

우리는 현재 디지털 격차를 겪고 있습니다. 인터넷과 스마트 기기를 잘 다루는 세대와 그렇지 못한 세대, IT 인프라가 잘 갖춰진 국가와 그렇지 못한 국가 사이의 경제적, 문화적 차이는 이미 큼니다. 하지만 BCI가 가져올 신경 격차는 차원이 다릅니다. 디지털 격차는 도구의 차이였습니다. 신경 격차는 존재의 차이입니다.

증강된 인간과 자연 상태의 인간 사이의 간극은, 호모 사피엔스와 네안데르탈인의 차이보다 더 벌어질 수 있습니다. 증강된 인간은 AI와 결합하여 복잡한 문제를 순식간에 해결합니다. 전 세계의 정보망과 실시간으로 접속합니다. 감정과 바이오리듬을 최적의 상태로 조절합니다. 반면 자연 상태의 인간은 배고픔과 피로에 시달립니다. 기억의 오류를 범합니다. 느린 언어로 소통합니다.

노동 시장에서 자연 상태의 인간은 설 자리를 잃을 것입니다. 단순 육체노동은 로봇이 대체했습니다. 단순 지적 노동은 AI가 대체했습니다. 고도의 창의적이고 복합적인 업무조차 BCI로 무장한 증강 인간들이 독차지하게 될 것입니다. 구형 인간이라는 표현이 등장할 수도 있습니다.

2025년 현재의 시장 데이터는 이 미래를 예고합니다. 침습형 BCI 시장은 2024년 약 1,600억 달러 규모로 추정됩니다. 전체 BCI 시장은 2024년 약 28억 7천만 달러에서 2035년까지 150억 달러 이상으로 성장할 것으로 전망됩니다. 연평균 성장률은 16%를 넘습니다. 뉴럴링크의 기업 가치는 50억 달러로 평가받고 있습니다. OpenAI는 BCI 스타트업 머저 랩스에 2억 5천만 달러를 투자했습니다. 자본은 이미 미래에 베팅하고 있습니다.

가장 현실적인 미래 시나리오는 약한 강제 의 확산입니다. 법으로 강제하지 않아도, 조직 문화와 시장 관행이 사실상 강제합니다. 고성능 직군에서 신경 모니터링이 자기관리로 권장됩니다. 팀 단위 생산성 지표와 결합됩니다. 개인은 거부하기 어렵습니다. 거부하면 협업을 방해하는 사람이 됩니다. 의료기술이 노동규율로 변형되는 순간입니다.

두 번째 시나리오는 표준화된 인간의 등장입니다. 신경기술이 보편화되면, 사회는 평균적 최적 상태를 정합니다. 집중 수준, 스트레스 범위, 수면 효율의 표준이 만들어집니다. 그 기준에 맞추도록 유도합니다. 이것은 다양성의 축소로 이어집니다. 창의성은 종종 불안정한 상태에서 나옵니다. 깊은 사유는 때때로 느린 리듬에서 나옵니다. 그런데 시장은 느림을 싫어합니다. 신경기술이 정상 작동의 기준을 재정의하면, 그 기준 밖의 사람들은 결합으로 분류될 수 있습니다.

세 번째 시나리오는 국가와 기업의 역할 분담입니다. 국가는 안전, 치안, 국방을 이유로 신경 기술을 도입합니다. 기업은 생산성, 마케팅, 리스크 관리를 이유로 도입합니다. 둘이 데이터를 공유하거나, 비슷한 분석 모델을 사용하면, 개인은 어느 쪽에서도 벗어나기 어렵습니다. 한 번 구축된 데이터 인프라는 다른 목적으로 전환되기 쉽습니다.

네 번째 시나리오는 국제 격차입니다. 고가의 임플란트 BCI와 고성능 폐쇄형 모델, 고품질 임상 데이터에 접근 가능한 국가는 치료와 증강 모두에서 우위를 점합니다. 미국과 중국 같은 기술 선도국들은 막대한 자본과 데이터를 바탕으로 BCI 기술 표준을 장악합니다. 자국민의 인지 능력을 향상시키는 데 앞장섭니다. 반면 규제 역량이 약하거나 데이터 보호 체계가 취약한 국가는 실험장이 되거나 값싼 데이터 공급처가 될 위험이 있습니다. 이 격차는 개인 단위의 불평등을 넘어 국가 단위의 경쟁력 격차로 증폭됩니다. 인지 제국주의라는 새로운 형태의 권력 불균형이 출현할 수 있습니다.

구독 경제 모델이 BCI에 적용될 때의 위험성도 간과할 수 없습니다.

뇌 임플란트의 고급 기능이나 최신 지식 업데이트가 월 구독료를 내야만 유지된다면 어떻게 될까요. 경제적 사정으로 구독료를 내지 못하는 순간, 갑자기 외국어를 잊어버리거나 업무 처리 능력이 급격히 떨어지는 상황이 발생할 수 있습니다. 테슬라가 소프트웨어 업데이트로 차의 기능을 제어하듯, BCI 기업이 사용자의 인지 능력을 원격으로 켜고 끌 수 있는 권한을 갖게 됩니다. 당신의 뇌가 30일 후에 만료됩니다라는 팝업창이 눈앞에 뜨는 상황은 블랙 코미디가 아니라 현실적인 공포입니다.

2023년 시력 회복 임플란트 회사인 세컨드 사이트가 파산했습니다. 환자들은 지원이 끊긴 기기를 눈에 심은 채 방치되었습니다. 기술 기업에 의존하는 신체와 데이터가 얼마나 취약한지를 보여주는 경고였습니다. 신경 불평등을 막으려면 단순 동의가 아니라, 목적 제한과 2차 사용 금지, 최소수집, 보관기간 제한, 익명화의 한계 인식, 그리고 위반 시 강력한 제재가 필요합니다.

정리하면, 신경 불평등의 미래는 기기 소유 격차를 넘어, 신경데이터 기반 평가가 사회 제도의 기본값이 되는지 여부에 달려 있습니다. 가장 위험한 미래는 사람들이 스스로를 자유롭게 설계한다고 믿으면서 실제로는 표준화된 최적화 규범에 맞춰 조정되는 사회입니다. 그 사회에서 불평등은 더 교묘해집니다. 가난해서 못 쓰는 것이 아니라, 쓰지 않으면 뒤쳐지는 구조가 됩니다. 그때부터 개인의 선택은 선택이 아니라 조건이 됩니다.

기술 격차가 신경 불평등으로 굳어지기 전에, 우리는 질문해야 합니다. 우리는 어떤 미래를 원하는가. 능력주의가 극단으로 치달아 인간의 가치가 뇌의 처리 속도로 평가받는 세상인가,

아니면 기술이 약자의 부족함을 채워주고 모두가 고유한 존엄성을 유지하며 공존하는 세상인가. 그 선택은 기술이 아니라, 지금 우리의 윤리적 결단에 달려 있습니다.

17 인간의 정의를 다시 묻다

가. "나는 나의 뇌인가, 나의 기술적 연장선인가"

1998년, 철학자 앤디 클라크와 데이비드 찰머스는 한 편의 논문을 발표했습니다. 제목은 「확장된 마음(The Extended Mind)」이었습니다. 그들은 간단한 질문을 던졌습니다. "마음은 어디에서 끝나고, 나머지 세계는 어디에서 시작하는가?"

클라크와 찰머스는 오토라는 가상의 인물을 등장시켰습니다. 오토는 알츠하이머병을 앓고 있었습니다. 그는 모든 중요한 정보를 노트북에 적어 다녔습니다. 박물관에 가려면 노트북을 펼쳐 주소를 확인했습니다. 반면 잉가라는 여성은 건강한 기억력을 가지고 있었습니다. 그녀는 박물관 주소를 머릿속에서 떠올렸습니다.

두 사람의 차이는 무엇일까요.

클라크와 찰머스의 대답은 도발적이었습니다.

차이가 없다는 것이었습니다. 오토의 노트북은 잉가의 해마와 동일한 기능을 수행합니다. 정보를 저장하고, 필요할 때 인출합니다. 노트북은 오토의 마음 바깥에 있는 도구가 아닙니다. 그것은 오토의 마음 자체의 일부입니다.

이 논문이 발표된 지 26년이 지났습니다. 2024년 1월, 놀랜드 아보의 두개골에 뉴럴링크 칩이 이식되었습니다. 2025년 중반까지 일곱 명의 사지마비 환자가 같은 수술을 받았습니다. 그들은 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직이고, 스마트폰을 조작하고, 비디오 게임을 즐깁니다. 알렉스라는 환자는 CAD 소프트웨어로 3D 디자인을 만들었습니다. 브래드는 자녀들과 마리오 카트를 함께 플레이했습니다. 클라크와 찰머스가 상상했던 확장된 마음이 문자 그대로 실현된 것입니다.

그러나 뉴럴링크 환자들의 경험은 오토의 노트북과 질적으로 다릅니다. 노트북은 손으로 펼쳐야 합니다. 눈으로 읽어야 합니다. 중간에 신체라는 매개가 있습니다. 뉴럴링크는 그 매개를 건너뛸니다. 뇌의 운동 피질이 발화하면, 그 신호가 곧바로 디지털 명령이 됩니다. 생각과 행위 사이의 간격이 사라집니다. 놀랜드 아보는 인터뷰에서 말했습니다. "커서를 움직이려고 '의식적으로' 생각하지 않습니다. 그냥 움직입니다. 마치 손가락을 움직이는 것처럼요."

여기서 철학적 질문이 깊어집니다. 놀랜드 아보는 어디까지가 '그'일까요. 그의 생물학적 뇌가 그일까요. 아니면 뇌와 칩과 컴퓨터로 이루어진 전체 시스템이 그일까요. 클라크는 2003년 저서 「타고난 사이보그(Natural-Born Cyborgs)」에서 이렇게 썼습니다. "인간을 다른 종과 구별하는 것은 도구와 문화적 관행을 우리 존재에 완전히 통합하는 능력입니다." 그의 논

리를 따르면, BCI를 이식받은 사람은 단순히 도구를 사용하는 것이 아닙니다. 그는 새로운 형태의 인간이 된 것입니다.

2025년 5월, 네이처 커뮤니케이션즈에 실린 논문은 이 논의를 한 단계 더 밀고 나갔습니다. 저자들은 생성형 AI와의 협업이 확장된 마음의 새로운 사례라고 주장했습니다. 인간과 AI가 함께 문제를 해결할 때, 인지는 어느 한쪽에 있지 않습니다. 둘 사이의 상호작용 자체가 인지입니다. 저자들은 이렇게 결론지었습니다. "하이브리드 사고 시스템을 구축하는 것은 인간의 본성입니다."

그러나 모든 학자가 이 견해에 동의하는 것은 아닙니다. 비판자들은 "인과-구성 오류"를 지적합니다. 계산기가 수학 문제 풀이에 도움을 준다고 해서, 계산기가 내 마음의 일부가 되는 것은 아니라는 주장입니다. 또한 "인지적 비대화" 문제도 있습니다. 확장된 마음 이론을 끝까지 밀고 나가면, 인터넷에 있는 모든 정보가 개인의 인지 시스템의 일부가 됩니다. 이것은 직관에 어긋납니다.

이 논쟁은 순수한 학술적 문제가 아닙니다. 법적, 사회적 함의가 있습니다. 만약 BCI가 나의 마음의 일부라면, 그것을 해킹하는 행위는 단순한 재산 침해가 아닙니다. 정신에 대한 침입입니다. 만약 AI와의 협업으로 만들어진 아이디어가 확장된 마음의 산물이라면, 그 아이디어의 저작권은 누구에게 있을까요.

놀랜드 아보는 자신의 정체성에 대해 어떻게 생각할까요. 그는 뉴럴링크를 자신의 일부로 느낄까요, 아니면 여전히 외부의 도구로 인식할까요. 아마도 그 대답은 시간이 지나면서 변할 것입니다. 우리가 스마트폰 없이 살 수 없게 된 것처럼, BCI 사용자들도 점차 그 장치를 자신의 연장으로 경험하게 될 것입니다. 그리고 그 순간, "나는 누구인가"라는 질문의 의미 자체가 달라질 것입니다.

나. 기억의 저장과 다운로드: 영생은 가능한가

인류는 오랫동안 죽음을 극복하려 했습니다. 피라미드를 쌓았습니다. 불로초를 찾았습니다. 냉동 보존술에 몸을 맡겼습니다. 21세기에 들어 새로운 방법이 제안되었습니다. 마음을 컴퓨터에 업로드하는 것입니다.

아이디어는 단순합니다. 인간의 뇌는 860억 개의 뉴런으로 이루어져 있습니다. 각 뉴런은 수 천 개의 시냅스를 통해 다른 뉴런과 연결되어 있습니다. 이 연결 패턴이 기억이고, 성격이고, 의식입니다. 만약 이 패턴을 완벽하게 스캔하여 컴퓨터에 복제할 수 있다면, 그 사람의 마음은 디지털 형태로 영원히 존재할 수 있을 것입니다.

2025년 현재, 이 아이디어는 여전히 공상과학의 영역에 있습니다. 조지아공과대학의 신경과학자는 이렇게 설명합니다. "우리는 아직 단 하나의 실제 뉴런도 인공 뉴런으로 대체하지 못했습니다. 860억 개를 말하는 것이 아닙니다. 단 하나도요." 뇌를 스캔하는 기술도 부족합니다. 의식이 작동하는 데 필요한 세부 수준이 어느 정도인지조차 알지 못합니다. 시냅스 연결만으로 충분할까요, 아니면 개별 뉴런 내부의 분자 상태까지 복제해야 할까요. 아무도 모릅니다.

기술적 장벽만이 문제가 아닙니다. 철학적 난제가 있습니다. 1775년, 스코틀랜드의 철학자 토머스 리드는 물었습니다. "내 뇌가 원래의 구조를 잃고, 수백 년 후에 같은 물질로 다시 지능적인 존재를 만든다면, 그 존재는 나일까요? 만약 내 뇌로 두세 개의 존재를 만든다면, 그들 모두가 나일까요?" 250년이 지났지만, 이 질문에 대한 합의된 답은 없습니다.

현대의 논쟁은 "의식의 어려운 문제(Hard Problem of Consciousness)"를 중심으로 전개됩니다. 물리적 과정이 어떻게 주관적 경험을 만들어내는지 설명하지 못하면, 업로드된 마음이 진정으로 "느끼는지" 알 수 없습니다. 그것은 의식 있는 존재일 수도 있고, 의식 없이 행동만 흉내내는 "철학적 좀비"일 수도 있습니다.

러시아의 미래학자 알렉세이 투르친은 점진적 대체 방법을 제안합니다. 뇌의 뉴런을 한 번에 하나씩 인공 뉴런으로 교체하는 것입니다. 각 단계에서 의식의 연속성이 유지된다면, 최종적으로 완전히 인공적인 뇌가 되어도 여전히 "나"일 것입니다. 하지만 이 방법에도 문제가 있습니다. 2025년에 발표된 양자-시간적 의식 모델은 의식이 복제되거나 전송될 수 없으며, 오직 새로운 개체만 생성된다고 주장합니다.

또 다른 우려가 있습니다. 감각 박탈의 문제입니다. 디지털 의식은 신체가 없습니다. 시각, 청각, 촉각, 미각, 후각이 없습니다. 환경과의 상호작용이 없습니다. 신경과학자들은 경고합니다. "감각 박탈은 고문의 한 형태로 알려져 있습니다. 환경과의 접촉 없이 디지털 의식은 환

각, 정신 장애, 심지어 정체성 해체를 경험할 수 있습니다." 넷플릭스 시리즈 「블랙 미러」의 에피소드 "화이트 크리스마스"는 이 시나리오를 섬뜩하게 그렸습니다. 디지털 복제본이 무한한 시간 동안 고립 속에 갇혀 있는 장면입니다.

그렇다면 마음 업로드는 영생의 약속일까요, 아니면 새로운 형태의 지옥일까요. 불교적 트랜스휴머니스트인 제임스 휴스는 다른 관점을 제시합니다. 만약 자아가 본래 환상이라면, 업로드에 대한 걱정은 무의미하다는 것입니다. 불교의 무아(無我) 개념에 따르면, 지금 이 순간의 "나"도 1초 전의 "나"와 동일하지 않습니다. 의식은 연속적인 흐름이 아니라 순간순간 새롭게 발생하는 것입니다.

현재 가장 현실적인 접근법은 부분적 보존입니다. 기억의 일부를 저장하거나, 성격 패턴을 AI로 시뮬레이션하거나, 소셜 미디어 기록을 바탕으로 디지털 아바타를 만드는 것입니다. 마틴 로스블랫은 이를 "마인드파일"과 "마인드클론"이라고 부릅니다. 이미 몇몇 스타트업이 고인의 음성과 텍스트 데이터를 학습한 챗봇을 제공하고 있습니다. 유족들은 죽은 가족과 "대화"할 수 있습니다.

이것이 진정한 영생일까요. 아마도 아닐 것입니다. 그러나 죽음의 의미를 바꾸고 있는 것은 분명합니다. 그리고 기술이 발전함에 따라, "영생"의 정의 자체가 변할 수 있습니다. 완전한 의식의 업로드가 불가능하더라도, 우리의 기억과 성격의 일부가 디지털 형태로 남는다면, 그것은 어떤 의미에서 죽음 이후의 삶이 아닐까요. 이 질문에 대한 답은 기술이 아니라 우리가 "삶"과 "죽음"을 어떻게 정의하느냐에 달려 있습니다.

다. 언어의 종말: 개념적 텔레파시가 문명에 미칠 영향

언어는 인류 문명의 토대입니다. 우리는 소리와 기호를 통해 생각을 전달합니다. 하지만 언어에는 근본적인 한계가 있습니다. 머릿속의 생각을 단어로 바꾸고, 그 단어를 소리나 글자로 변환하고, 상대방이 그것을 다시 해석하는 과정에서 의미가 손실됩니다. 시인들은 이 한계와 평생 싸웁니다. "말로 표현할 수 없는" 감정이나 경험이 있습니다.

BCI 기술은 이 한계를 우회할 가능성을 열었습니다. 뉴럴링크의 비전 중 하나는 "개념적 텔레파시"입니다. 일론 머스크는 이렇게 설명했습니다. "언어는 매우 느린 인터페이스입니다. 우리는 분당 약 40비트의 정보를 전달할 수 있습니다. BCI를 통해 생각을 직접 공유할 수 있다면, 대역폭이 수천 배 증가할 것입니다."

2025년 현재, 뉴럴링크 환자들은 분당 약 40단어의 타이핑 속도를 달성했습니다. 이것은 일반인이 화면 키보드로 타이핑하는 속도와 비슷합니다. 음성 복원 기술도 FDA 획기적 의료기기 지정을 받았습니다. ALS로 말을 잃은 환자가 생각만으로 합성 음성을 통해 대화할 수 있게 될 것입니다. 하지만 이것은 여전히 언어를 매개로 한 소통입니다. 생각 자체를 전송하는 것은 아닙니다.

진정한 개념적 텔레파시가 가능해진다면 무슨 일이 벌어질까요. 상상해 보십시오. 당신이 석양을 보며 느끼는 감정을 언어 없이 그대로 다른 사람에게 전달할 수 있습니다. 복잡한 수학적 직관을 즉시 공유할 수 있습니다. 오해가 사라집니다. 번역이 필요 없어집니다. 인류는 하나의 언어를 넘어 하나의 마음으로 연결될 수 있습니다.

그러나 유토피아적 비전에는 디스토피아적 그림자가 따릅니다. 첫째, 프라이버시의 종말입니다. 생각을 공유할 수 있다면, 원치 않는 생각도 노출될 수 있습니다. 우리는 모두 머릿속에 말하지 않는 생각들을 품고 삽니다. 편견, 욕망, 불안, 분노. 이것들이 타인에게 투명해진다면, 사회적 관계는 어떻게 될까요. 정직이 강제되는 세상은 과연 더 나은 세상일까요.

둘째, 권력의 비대칭입니다. 모든 사람이 동시에 텔레파시 능력을 갖게 되지는 않을 것입니다. 초기에는 부유한 사람들, 권력을 가진 사람들이 먼저 접근할 것입니다. 그들은 다른 사람의 생각을 읽으면서 자신의 생각은 감출 수 있을 것입니다. 이것은 역사상 가장 극단적인 정보 비대칭을 만들어낼 것입니다.

셋째, 개인성의 해체입니다. 언어는 단순한 소통 도구가 아닙니다. 그것은 우리가 생각하는 방식 자체를 형성합니다. 한국어로 생각하는 사람과 영어로 생각하는 사람은 세상을 다르게 경험합니다. 언어는 개인의 정체성을 구성하는 핵심 요소입니다. 언어 없이 생각을 공유하는 세상에서, 개인의 고유성은 어떻게 유지될까요. 집단적 의식이 개인의 의식을 대체하지는 않을까요.

역사를 돌아보면, 새로운 소통 기술은 항상 문명을 근본적으로 바꿨습니다. 문자의 발명은 기억의 외재화를 가능하게 했습니다. 인쇄술은 지식의 민주화를 이끌었습니다. 인터넷은 즉각적인 전 지구적 소통을 가능하게 했습니다. 각각의 혁명은 예상치 못한 결과를 낳았습니다. 인쇄술은 종교개혁을 촉발했습니다. 인터넷은 가짜 뉴스와 양극화를 심화시켰습니다.



개념적 텔레파시는 이전의 모든 혁명을 합친 것보다 더 큰 변화를 가져올 수 있습니다. 그것은 단순히 소통 방식의 변화가 아니라, 인간 존재 방식의 변화이기 때문입니다. 우리는 그 변화를 원하는지, 그리고 어떤 조건에서 그것을 받아들일 것인지 미리 생각해야 합니다.

물론 이 모든 것은 아직 추측입니다. 개념적 텔레파시가 기술적으로 가능한지조차 확실하지 않습니다. 뇌의 활동 패턴이 개인마다 다르기 때문에, 한 사람의 "식량을 보는 경험"이 다른 사람에게 동일하게 전달될 수 있을지 불분명합니다. 어쩌면 언어는 그 불완전함에도 불구하고, 또는 그 불완전함 때문에, 인간 소통의 유일하게 실행 가능한 형태로 남을 수도 있습니다. 그러나 기술의 역사는 "불가능"이 "어려움"이 되고, "어려움"이 "일상"이 되는 과정의 연속이었습니다.

라. 사이보그 시대의 인간다움과 철학적 질문

2023년 8월 9일, 칠레 대법원은 역사적인 판결을 내렸습니다.

원고는 Guido Girardi 전 상원의원이었습니다. 피고는 미국 샌프란시스코에 본사를 둔 이모티브(Emotiv) 사였습니다. 이모티브는 "인사이트"라는 뇌파 측정 헤드셋을 판매하고 있었습니다. Guido Girardi 의원은 이 장치를 사용한 후 자신의 뇌 데이터가 충분히 보호되지 않았다고 주장했습니다.

대법원은 원고의 손을 들어주었습니다. 이모티브가 Guido Girardi의 뇌 데이터를 특정한 동의 없이 연구 목적으로 보관한 것은 신체적·정신적 완전성에 대한 헌법적 권리와 프라이버시권을 침해했다는 판결이었습니다. 법원은 회사에 원고의 뇌 정보를 데이터베이스에서 삭제하라고 명령했습니다.

이 판결이 가능했던 것은 칠레가 2021년에 세계 최초로 "신경권(Neurorights)"을 헌법에 명시했기 때문입니다. 개정된 헌법 19조는 "뇌의 무결성과 정신적 면역을 신경기술로부터 보호"할 것을 규정합니다. 또한 뇌 데이터를 장기와 같은 지위로 부여하여, 사고팔 수 없도록 했습니다.

신경권 개념은 2017년 컬럼비아 대학교의 신경과학자 라파엘 유스테가 처음 제안했습니다. 그는 동료들과 함께 다섯 가지 신경권을 정의했습니다. 정신적 프라이버시권. 개인 정체성에 대한 권리. 자유 의지에 대한 권리. 공정한 정신 증강에 대한 접근권. 알고리즘 편향으로부터의 보호권. 유스테는 주장합니다. "우리는 소셜 미디어에 대해 너무 늦게 대응했습니다. 신경기술에 대해서는 같은 실수를 반복하지 말아야 합니다."

비판자들도 있습니다. 칠레 디지털권리 단체의 후안 카를로스 라라 갈베스는 지적합니다. "일부 법학자들은 이러한 헌법 개정이 필요한지에 대해 회의적입니다. 기존의 개인정보 보호법으로 충분하다는 것입니다." 칠레 대학교 법학과의 다니엘라 사로르 미랄레스 교수는 더 근본적인 비판을 제기합니다. "이 헌법 조항은 칠레에 뇌 데이터에 대한 법적 보호가 없었다는 식민주의적 발상에 기초하고 있습니다."

그러나 신경권 옹호자들은 강력한 근거를 제시합니다. 신경권재단이 30개 소비자용 신경기술 회사의 이용약관을 분석한 결과, 29개 회사가 사용자의 뇌 데이터를 제3자에게 판매할 권리를 갖고 있었습니다. "동의함"을 클릭하는 순간, 당신의 뇌 데이터는 당신의 것이 아니게 됩니다.

칠레의 선례는 확산되고 있습니다. 브라질과 멕시코는 유사한 헌법 개정을 검토하고 있습니다. 우루과이 의회는 칠레 의원들과 신경권에 대해 논의했습니다. 미국에서는 콜로라도 주와 캘리포니아 주가 신경 데이터 보호법을 제정했습니다. 라틴아메리카 의회(Parlatino)는 2022년에 신경권 모델법을 발표하여, 신경기술 규제를 위한 틀과 기본 개념을 제공했습니다.

이 모든 법적 노력의 바탕에는 하나의 철학적 질문이 있습니다. 인간이란 무엇인가. 기술이 우리의 뇌에 접근하고, 우리의 생각을 읽고, 어쩌면 우리의 마음을 바꿀 수 있게 되었을 때, 인간의 존엄성은 어디에 있는가.

트랜스휴머니스트들은 낙관합니다. 그들에게 기술적 증강은 인간 진화의 다음 단계입니다. 우리는 이미 안경으로 시력을 보완하고, 보청기로 청력을 개선하고, 인공 관절로 이동성을 회복합니다. BCI는 이 연장선에 있을 뿐입니다. 더 나은 인지, 더 깊은 연결, 더 긴 수명. 기술은 우리를 "더 나은 인간"으로 만들 수 있습니다.

생명 보수주의자들은 우려합니다. 그들은 "인간다움"에는 기술로 대체할 수 없는 무언가가 있다고 주장합니다. 취약성, 유한성, 불완전함. 이것들이 오히려 인간 경험의 핵심입니다. 기술이 이 취약성을 제거하면, 우리는 무언가 본질적인 것을 잃을 수 있습니다.

어쩌면 두 관점 모두 부분적으로 옳을 것입니다. 기술이 인간을 변화시킬 것은 분명합니다. 그러나 그 변화의 방향은 미리 정해져 있지 않습니다. 그것은 우리가 어떤 가치를 선택하느냐에 달려 있습니다. 칠레의 신경권 입법, 그리고 그에 대한 찬반 논쟁은 이 선택의 과정입니다.

놀랜드 아보는 뉴럴링크 이식 후 인터뷰에서 말했습니다. "저는 여전히 저입니다. 칩이 저를 다른 사람으로 만들지 않았습니다. 다만 제가 원래 하고 싶었던 것들을 다시 할 수 있게 해주었을 뿐입니다." 그의 말은 하나의 답을 시사합니다. 기술이 우리의 인간성을 빼앗는 것이 아니라, 잃어버린 인간성을 회복시켜 줄 수도 있다는 것입니다. 하지만 그것이 모든 경우에 해당하는지, 그리고 어디까지가 회복이고 어디서부터가 증강인지, 우리는 아직 답을 찾는 중입니다.

18 결론: 연결된 미래를 위한 준비

가. BCI 기술의 상용화 로드맵: 2026년 대량 생산 전망

2025년 12월 31일 자정을 넘기는 순간, 일론 머스크는 자신의 소셜 미디어 플랫폼 X에 짤막한 문장을 올렸습니다. "뉴럴링크는 2026년에 뇌-컴퓨터 인터페이스 장치의 대량 생산을 시작하고, 거의 완전히 자동화된 수술 절차로 전환합니다." 새해 첫 메시지로 선택한 이 한 문장에는 100년에 걸친 뇌과학의 여정이 응축되어 있었습니다.

텍사스 오스틴 외곽 델 발레의 황토색 평원 위에는 새로운 공장이 들어서고 있습니다. 테슬라의 기가팩토리를 연상시키는 이 시설은 동전 크기의 뇌 임플란트를 연간 수천 개씩 찍어낼 준비를 하고 있습니다. 1924년 한스 베르거가 아들의 두피에 전극을 붙이고 떨리는 검류계 바늘을 바라보던 그 순간으로부터 정확히 102년, 인류는 뇌의 전기적 속삭임을 산업의 언어로 번역하는 시대로 진입하려 하고 있습니다.

2026년 로드맵의 핵심은 세 가지 전환에 있습니다. 첫째는 수작업에서 자동화로 전환입니다. 현재 뉴럴링크의 수술 로봇 R1은 64개의 전극 실을 뇌에 삽입하는 데 인간 의료진의 상당한 개입을 필요로 합니다. 머스크가 예고한 2026년의 시스템은 다릅니다. 장치의 실이 경막을 제거하지 않고도 그대로 통과할 수 있다고 그는 덧붙였습니다. 이 기술적 도약은 수술 시간을 획기적으로 단축시킬 뿐 아니라, 뇌 조직에 가해지는 외상을 줄여 더 많은 환자가 이 수술을 받을 수 있게 만들 것입니다.

둘째는 실험실에서 공장에서의 전환입니다. 2025년 9월까지 전 세계적으로 뉴럴링크 임플란트를 이식받은 사람은 12명에 불과했습니다. 이 숫자는 로또 당첨자보다 적습니다. 그러나 대량 생산이 시작되면 이야기가 달라집니다. 뉴럴링크의 대기자 명단에는 이미 1만 명이 등록되어 있습니다. 반도체 공정에서 가져온 MEMS(미세전자기계시스템) 기술과 롤투롤 생산 방식은 임플란트 하나당 가격을 현재의 수십만 달러에서 수천 달러 수준으로 낮출 잠재력을 가지고 있습니다. 전문가들은 2026년경 한 장치당 비용이 5천 달러 이하로 떨어질 수 있다고 예측합니다.

셋째는 치료에서 복원으로의 전환입니다. 2026년에는 블라인드사이트(Blindsight) 프로젝트의 첫 인간 임상시험이 예정되어 있습니다. 이 프로젝트는 시각 피질에 전기 자극을 가해 완전히 시력을 잃은 사람에게 빛과 형태의 인지를 돌려주는 것을 목표로 합니다. FDA는 이미 이 기술에 획기적 의료기기 지정을 부여했습니다. 운동 피질을 넘어 시각 피질, 언어 피질까지 다중 임플란트를 심는 시대가 열리고 있는 것입니다.

경쟁자들의 추격 또한 2026년을 기점으로 가시화되고 있습니다. 싱크론(Synchron)은 이미 미국과 호주에서 10명의 환자에게 스텐트로드를 이식하고, COMMAND 연구에서 12개월간 심각한 장치 관련 부작용이 없었다는 결과를 발표했습니다. 톰 옥슬리 CEO는 FDA 승인을 위한 핵심 임상시험을 준비하고 있다고 밝혔습니다. 패러드로믹스(Paradromics)는 2025년 11월

FDA로부터 음성 복원을 위한 임상시험 승인을 받았습니다. 프리시전 뉴로사이언스 (Precision Neuroscience)의 레이어 7 장치는 2025년 4월 510(k) 허가를 획득하며 30일 이내의 임시 이식에 대해 상용화 자격을 얻었습니다.

중국의 움직임도 무시할 수 없습니다. 차이나 브레인 프로젝트는 2027년까지 연구실 기술을 임상과 산업 응용으로 전환하고, 2030년까지 세계적 경쟁력을 갖춘 기업 2~3개를 육성한다는 목표를 세웠습니다. 베이징과 상하이 연구소들은 비침습적 기술과 침습적 기술을 아우르는 산업 표준을 제정하고 있습니다. 2026년은 기술 경쟁을 넘어 미국과 중국 간의 신경 기술 패권 경쟁이 본격화되는 해가 될 것입니다.

그러나 장밋빛 전망 뒤에는 해결해야 할 숙제들이 산적해 있습니다. 유타 어레이의 경우 1년 내에 전극의 60% 이상이 신호를 잃는다는 연구 결과가 있습니다. 뇌 조직에 형성되는 반흔 조직이 신호를 차단하기 때문입니다. 놀랜드 아보의 사례에서도 수술 후 몇 주 만에 일부 전극 실이 뇌에서 수축하며 유효 전극 수가 감소했습니다. 뉴럴링크는 알고리즘 조정으로 이 문제를 보완했지만, 10년, 20년 단위의 장기 안정성은 아직 검증되지 않았습니다.

2026년은 BCI가 가능성의 영역에서 확장성의 영역으로 넘어가는 분기점이 될 것입니다. 모건 스탠리는 BCI의 초기 시장 규모를 800억 달러, 기술이 더 발전하면 3,200억 달러까지 성장할 수 있다고 전망했습니다. 마비 환자가 생각만으로 컴퓨터를 제어하고, 맹인이 빛의 점들을 다시 보는 것이 더 이상 기적이 아닌 의료 옵션이 되는 시대가 열리고 있습니다. 그러나 이 기술을 누가, 어떤 조건에서, 어떤 가격에 접근할 수 있을 것인지는 여전히 열린 질문으로 남아 있습니다.

나. 우리가 준비해야 할 법적·사회적 합의

2024년 4월 18일, 콜로라도 주지사 재러드 폴리스는 한 법안에 서명했습니다. 미국 최초로 뇌 데이터를 민감한 개인정보로 분류하여 보호하는 법안이었습니니다. 주의회의원 캐시 킵은 이 법안을 발의하며 이렇게 말했습니다. "오늘 수집된 데이터로 5년 뒤에 무엇을 읽어낼 수 있을지 아무도 모릅니다. 기술이 그만큼 빠르게 발전하고 있기 때문입니다."

그로부터 3년 전인 2021년, 칠레는 세계 최초로 헌법에 신경권(Neurorights)을 명시했습니다. 뇌 활동과 그로부터 파생된 정보를 보호받을 권리를 기본권으로 격상시킨 것입니다. 이 두 사건 사이에 놓인 3년의 간극은, 법과 윤리가 기술의 속도를 얼마나 힘겹게 쫓아가고 있는지를 보여줍니다. BCI가 상용화 단계에 진입하는 지금, 우리는 기술적 난제보다 훨씬 복잡한 법적, 사회적 합의의 문제와 마주하고 있습니다.

가장 시급한 과제는 정신적 프라이버시(Mental Privacy)의 개념을 법적으로 정의하는 것입니다. 지금까지 프라이버시는 내가 쓴 글, 내가 찍은 사진, 내가 방문한 장소에 대한 것이었습니다. 그러나 BCI 시대의 프라이버시는 발화되지 않은 생각, 무의식적인 감정, 심지어 꿈의 파편들까지 포함합니다. 신경권리재단(Neurorights Foundation)의 보고서에 따르면, 온라인에서 구매 가능한 뉴로테크놀로지 제품 30개 중 29개가 뇌 데이터에 접근할 수 있으며, 그 사용에 의미 있는 제한을 두지 않고 있습니다. 거의 모든 제품이 제3자와 데이터를 공유할 수 있습니다.

2025년 현재, 미국에서는 콜로라도, 캘리포니아, 몬타나, 코네티컷 등 4개 주가 신경 데이터 보호법을 시행하고 있습니다. 캘리포니아의 SB 1223은 2025년 1월 1일부터 신경 데이터를 민감한 개인정보로 분류하여 소비자가 자신의 뇌 데이터를 요청하고, 삭제하며, 공유를 제한할 권리를 부여합니다. 그러나 이 법률들은 데이터 자체를 보호할 뿐, 그 데이터를 해석하는 알고리즘이나 AI를 규제하지는 않습니다. 법의 경계 밖에서 뇌 데이터는 여전히 상품이 될 수 있습니다.

두 번째 과제는 행위 주체성(Agency)에 대한 새로운 법리를 개발하는 것입니다. BCI를 통해 로봇 팔을 움직여 누군가를 다치게 했다고 가정해봅시다. 그것은 사용자의 의도였을까요, AI 알고리즘의 오작동이였을까요, 아니면 해킹에 의한 조작이였을까요? 법정에서 "내 뇌가 시킨 것이 아니라 칩이 오작동했다"라는 변론이 등장할 날이 머지않았습니다. 기계가 인간의 의지 결정 과정에 개입하는 상황에서 법적 책임을 어떻게 분배할 것인지는 단순히 제조물 책임법의 영역을 넘어, 자유 의지에 대한 철학적 재정의의를 요구합니다.

세 번째 과제는 신경 감시(Neural Surveillance)의 허용 범위를 사회적으로 합의하는 것입니다. 이미 일부 국가에서는 학생의 집중도를 모니터링하는 EEG 헤드밴드가 교실에서 사용되고 있습니다. 중국의 일부 학교에서 시험 운영된 이 시스템은 학생들의 뇌파를 실시간으로 분석하여 집중하지 않는 학생을 교사에게 알려줍니다. 노동자의 피로 상태를 실시간으로 감시하려는 시도도 등장하고 있습니다. 이러한 기술이 "자발적 사용"과 "사실상의 강요" 사이의 경

계를 어떻게 흐리게 하는지 우리는 이미 스마트폰과 SNS에서 경험했습니다. 고용, 교육, 보험 분야에서 신경 데이터의 수집과 활용을 어디까지 허용할 것인지에 대한 명확한 가이드라인이 필요합니다.

네 번째 과제는 접근의 평등(Equity of Access)을 보장하는 것입니다. 현재 뉴럴링크 임플란트의 비용은 공개되지 않았지만, 수십만 달러에 달할 것으로 추정됩니다. 대량 생산으로 가격이 낮아지더라도, 초기에는 부유층만이 이 혜택을 누릴 가능성이 큼니다. BCI 기술이 치료를 넘어 인지 능력 증강의 영역으로 확장될 때, 우리 사회는 "향상된 인간(Enhanced Human)"과 "자연인(Natural Human)"으로 양분될 위험이 있습니다. 모건 스탠리의 보고서는 이 기술이 의료, 게임, 국방, 투자, 그리고 인류의 미래에 사회가 준비되지 않은 영향을 미칠 수 있다고 경고했습니다.

다섯 번째 과제는 군사적 이용과 이중 용도(Dual-use)에 대한 국제적 규제입니다. 미국과 중국을 비롯한 강대국들은 이미 BCI를 군사적 목적으로 개발하고 있습니다. 미국 국방고등연구계획국(DARPA)의 뇌 이니셔티브는 연구 목적과 군사적 목적이 공존하는 대표적인 사례입니다. 병사의 뇌를 연결하여 전투 능력을 향상시키거나, 적의 뇌를 해킹하여 혼란을 주는 기술은 기존의 전쟁 규범을 무력화할 수 있습니다. 핵무기나 생화학 무기를 규제하듯, 신경 기술의 군사적 오남용을 막기 위한 국제적 조약이 필요합니다.

2025년 미국 상원에서는 척 슈머, 존 코닌, 론 와이든 상원의원이 BCI를 규제하기 위한 MIND 법을 제안했습니다. 이 법안은 연방거래위원회(FTC)에 BCI의 장기 사용 정책을 면밀히 검토할 것을 요청합니다. 2025년 6월에는 미국의사협회(AMA)가 신경 데이터에 대한 더 강력한 규제를 촉구했습니다. 법은 느리지만, 움직이고 있습니다.

우리가 준비해야 할 것은 기술이 우리를 정의하기 전에, 우리가 기술의 한계를 정의하는 것입니다. 뇌 데이터가 클라우드로 전송되고 기계가 인간의 의도를 해석하는 시대에, 인간의 존엄성과 자유를 지키기 위한 방어막을 구축하는 것은 2026년 이전에 완료되어야 할 과제입니다.

다. BCI 뉴스를 평가하는 10가지 질문

매일 아침 쏟아지는 BCI 관련 뉴스들은 때로는 희망의 찬가처럼, 때로는 디스토피아의 경고음처럼 들립니다. 일론 머스크의 트윗 하나에 관련 주가가 요동치고, "생각만으로 모든 것을 한다"는 자극적인 헤드라인이 넘쳐납니다. 펜실베이니아 대학의 의료윤리학자 애나 웨슬러는 이렇게 경고합니다. "의료 분야에서 이런 식의 과대 광고 의지를 보이는 경우는 드뭅니다. 뉴럴링크에서는 CEO의 주장과 회사가 실제로 진행하는 작업 사이에 괴리가 있습니다."

이 소음 속에서 진실을 가려내기 위해, 비판적 독자가 되어야 합니다. 다음은 BCI 뉴스를 접할 때 반드시 던져야 할 10가지 핵심 질문입니다.

첫째, 침습적인가, 비침습적인가? 뉴스의 기술이 두개골을 뚫고 뇌에 전극을 심는 방식인지, 혈관을 통해 접근하는 방식인지, 아니면 머리띠처럼 착용하는 방식인지 확인해야 합니다. 침습적일수록 신호는 정확하지만 위험이 크고, 비침습적일수록 안전하지만 신호가 부정확합니다. 뉴럴링크와 싱크론의 차이가 바로 여기에 있습니다. 뉴럴링크는 1,024개의 전극을 뇌 조직에 직접 삽입하고, 싱크론은 경정맥을 통해 뇌혈관 표면에 스텐트를 설치합니다. "생각만으로 제어"라는 동일한 헤드라인 뒤에 숨겨진 기술의 형태는 완전히 다릅니다.

둘째, 치료인가, 증강인가? 이 기술이 마비 환자의 잃어버린 기능을 복원하는 것인지, 건강한 사람의 능력을 향상시키는 것인지 구분해야 합니다. 현재 대부분의 성과는 의료적 복원에 집중되어 있습니다. 놀랜드 아보가 체스를 두고 마리오 카트를 플레이하는 것은 그가 8년간 할 수 없었던 일을 다시 할 수 있게 된 것입니다. 그러나 건강한 사람이 기억력을 다운로드하거나 외국어를 뇌에 설치하는 것은 아직 먼 미래의 이야기입니다. 기사의 목적이 환자의 삶을 개선하는 것인지, 소비자의 욕망을 자극하는 것인지 따져봐야 합니다.

셋째, 데이터의 출처는 어디인가? 발표 주체가 누구인지 확인해야 합니다. 동료 평가(Peer-review)를 거친 학술지 논문인가요, 아니면 기업의 보도자료나 유튜브 시연인가요? 기업의 발표는 투자를 유치하기 위해 성과를 과장할 수 있습니다. 2024년 싱크론의 COMMAND 연구 결과는 신경외과학회에서 발표되었고, 6명의 환자에 대한 12개월 추적 데이터를 포함하고 있습니다. 이것은 유튜브에서 원숭이가 풍 게임을 하는 영상과는 검증 수준이 다릅니다.

넷째, 뇌 데이터의 소유권은 누구에게 있는가? 기사에서 언급된 기기가 수집한 뇌 데이터는 누가 소유합니까? 신경권리재단의 조사에 따르면, 시중에서 구매 가능한 뉴로테크 제품 30개 중 29개가 뇌 데이터에 접근할 수 있으며, 거의 모두가 제3자와 공유할 수 있습니다. "나의 뇌, 나의 데이터(My Brain, My Data)" 원칙이 지켜지고 있는지, 약관의 작은 글씨 속에 숨겨진 데이터 주권을 찾아야 합니다.

다섯째, AI가 해석한 것인가, 뇌가 직접 한 것인가? 사용자의 생각이 직접 기기를 움직인 것인지, AI가 뇌 신호를 추측하여 대신 행동한 것인지 구분해야 합니다. 현재의 BCI 시스템은 뇌 신호를 읽은 뒤 기계학습 알고리즘이 그 의도를 해석합니다. 생성형 AI가 개입하여 문장

을 완성하거나 그림을 그렸다면, 그것은 온전히 사용자의 의도라고 볼 수 없습니다. 주체성의 환상(Illusion of Agency)을 경계해야 합니다.

여섯째, 안전성과 가역성은 보장되는가? 장치를 제거할 수 있습니까? 만약 회사가 망하거나 기술이 업데이트되면, 뇌 속에 심어진 칩은 어떻게 됩니까? 미국 회계감사원(GAO)의 2025년 보고서는 일부 임상시험 참가자들이 시험 종료 후 자금이나 의료 지원이 제공되지 않아 BCI를 제거해야 했던 사례를 지적했습니다. 장기적인 감염 위험이나 뇌 조직 손상 가능성에 대한 언급이 있는지 확인해야 합니다.

일곱째, 보안은 확실한가? 이 장치는 해킹으로부터 안전합니까? 무선으로 연결된 뇌는 사이버 공격의 표적이 될 수 있습니다. 뇌 신호를 가로채거나(Brain-tapping), 조작된 신호를 뇌로 보내는(Brain-jacking) 공격에 대한 방어책이 마련되어 있습니까? 뉴로해킹의 위험은 아직 대부분의 BCI 뉴스에서 다루어지지 않고 있습니다.

여덟째, 비용과 접근성은 어떠한가? 이 기술의 가격은 얼마입니까? 보험 적용이 가능한가요? 수억 원에 달하는 비용이라면, 이는 소수 부유층만을 위한 기술일 수 있습니다. GAO 보고서는 미국 보건복지부 산하 메디케어·메디케이드 서비스센터(CMS)와의 소통이 어렵다고 지적하며, BCI 관련 보험 정책과 상환 구조가 마련되어야 한다고 권고했습니다.

아홉째, 심리적, 인격적 변화는 없는가? 장치 사용자가 "내가 아닌 것 같다"는 느낌을 받거나, 성격이 변하는 부작용은 없습니까? 뇌 자극이 감정이나 정체성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 초기 단계입니다. 뇌 깊숙이 전극을 심는 심뇌자극술(DBS)을 받은 파킨슨병 환자들 중 일부는 자신의 정체성에 혼란을 느꼈다는 보고가 있습니다.

열째, 장기적인 로드맵은 무엇인가? 이 뉴스는 단발성 성과인가요, 아니면 명확한 장기 계획의 일부인가요? 1년 뒤, 5년 뒤의 계획이 구체적인지, 그리고 그 계획이 윤리적 고려를 포함하고 있는지 살펴봐야 합니다. 미디어의 과대광고와 일부 열정적인 CEO들은 우울증 치료부터 기억 저장과 재생까지 많은 것을 약속했습니다. 비현실적인 기대가 형성된 뒤 충족되지 않으면, 반발이나 자금 고갈을 촉발할 수 있습니다. 이것이 가트너의 하이프 사이클이 경고하는 함정입니다.

이 10가지 질문은 BCI라는 거대한 파도 속에서 휩쓸리지 않고 중심을 잡게 해주는 닻이 될 것입니다. 뉴스를 읽을 때마다 이 체크리스트를 적용해보십시오. 혁신과 과장을 구별하는 능력은 뇌 데이터 시대를 살아가는 시민의 기본 소양입니다.

라. 뇌 데이터 시대의 시민 교양과 비판적 사고

2014년, 67세의 신경학자 필 케네디는 벨리즈의 한 수술실 천장을 응시하고 있었습니다. 1998년 잠김증후군 환자가 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직이게 하여 "사이보그의 아버지"로 불렸던 그는, 미국 규제 당국이 그의 연구를 중단시킨 뒤 극단적인 선택을 했습니다. 29년간의 연구를 이어가기 위해 2만 5천 달러를 내고 자신의 뇌에 전극을 이식한 것입니다. 11시간 반의 수술 후 합병증으로 그는 일시적으로 말을 잃었습니다. 그러나 그가 조용히 입을 움직일 때, 운동 언어 피질의 65개 뉴런에서 발사된 신호는 그가 실제로 소리 내어 말할 때와 동일한 패턴을 보였습니다. 상상된 말을 포착하고 해독할 수 있다는 증거였습니다.

케네디의 자기 실험은 많은 비판을 받았지만, 동시에 개념 증명이 되었습니다. 그리고 그의 이야기는 BCI 시대를 살아갈 시민들에게 중요한 질문을 던집니다. 뇌와 기계가 직접 대화하는 시대에, 우리에게 필요한 교양은 무엇입니까?

첫째, 인지적 주권(Cognitive Sovereignty)에 대한 자각이 필요합니다. 우리는 지금까지 신체와 자유와 통신의 비밀을 권리로 여겨왔습니다. 이제는 "내 생각의 주인은 나"라는 인식을 확고히 해야 합니다. 기업이나 국가가 나의 뇌 데이터에 접근하여 나의 정치적 성향이나 무의식적 욕망을 분석하고 프로파일링하는 것을 디지털 서비스의 대가로 당연시해서는 안 됩니다. 유럽연합 데이터 보호 감독기구(EDPS)는 신경 데이터를 민감 정보 중에서도 가장 민감한 계층으로 보고, 수집 목적의 최소화, 자동 의사결정에 대한 거부권, 처리의 투명성과 설명 가능성을 강화할 것을 제안했습니다. 시민들은 자신의 신경 데이터가 어떻게 수집되고 사용되는지 감시하고, 정신적 영토를 지킬 권리를 적극적으로 주장해야 합니다.

둘째, 기술에 대한 비판적 수용 능력을 길러야 합니다. 뇌과학과 기술이 결합할 때, 종종 과장된 마케팅과 사이버 과학이 판을 칩니다. "뇌를 스캔하여 성적을 올려준다"거나 "생각만으로 모든 것을 이룬다"는 식의 주장에 현혹되지 않으려면, 과학적 원리와 한계를 이해하는 문해력이 필수적입니다. 학술지 프론티어스 인 휴먼 뉴로사이언스에 게재된 논문은 BCI 기술에 대한 대중의 부정확한 인식이 일부 연구자, 제조업체, 규제 당국, 그리고 미디어의 오해를 불러일으키는 과대광고와 관련이 있다고 지적했습니다. 기술이 만능 해결사가 아님을 깨닫고, 기술이 인간의 고유한 능력을 대체하는 것이 아니라 보조하는 도구로 남을 수 있도록 감시해야 합니다.

셋째, 교육의 패러다임 전환을 준비해야 합니다. BCI가 상용화되면 지식의 습득은 더 이상 인간의 경쟁력이 아닐 수 있습니다. 외국어를 뇌에 다운로드하고, 수학 공식을 즉시 연산할 수 있는 시대가 온다면, 암기 위주의 교육은 설 자리를 잃게 됩니다. 미래의 시민 교양은 지식 그 자체가 아니라, 지식을 통합하고, 윤리적으로 판단하며, 창의적으로 연결하는 능력에 초점을 맞춰야 합니다. 기계가 줄 수 없는 지혜와 공감, 그리고 질문하는 능력이 인간의 고유한 가치로 남을 것입니다.

넷째, 공적 토론에 참여하는 시민 역량을 키워야 합니다. BCI와 뇌 데이터 정책은 전문가와 정치인만의 논의로 두기에는, 시민의 자유와 존엄에 너무 큰 영향을 미칩니다. "학교에서 집중도 측정 헤드밴드를 의무화할 것인가, 직장에서 피로 모니터링 BCI를 허용할 것인가, 군과 경찰의 BCI 활용 범위를 어디까지 인정할 것인가" 같은 구체적 질문에 시민들이 목소리를 내야 합니다. 이를 위해서는 전문 용어를 시민 언어로 번역해 내는 과학 커뮤니케이션, 언론의 역할, 시민 교육 프로그램이 필수적입니다.

다섯째, 연결된 고독 속에서 인간성을 지키는 철학적 사유가 필요합니다. 뇌와 뇌가 직접 연결되는 개념적 텔레파시(Conceptual Telepathy)나 집단 의식(Hive Mind)의 시대가 오면, 개인의 프라이버시와 고독은 사라질지도 모릅니다. 타인의 감정과 생각이 여과 없이 흘러들어오는 세상에서, 나만의 자아를 유지하고 타인을 진정으로 이해한다는 것은 무엇일까요? 기술적 연결이 깊어질수록, 역설적으로 인간적 단절을 경계하고, 불완전하고 느린 소통이 주는 인간적 가치를 재발견해야 할지도 모릅니다.

결국 뇌 데이터 시대의 시민은 수동적인 기술 소비자가 아니라, 기술의 방향을 결정하는 능동적인 주체가 되어야 합니다. 일론 머스크나 마크 저커버그가 그리는 미래가 자동으로 우리의 미래가 되도록 내버려 두어서는 안 됩니다. 우리는 기술이 인간을 위해 복무하도록, 우리의 뇌가 기계의 식민지가 되지 않도록 깨어 있어야 합니다.

이 책을 덮는 지금, 여러분에게 묻습니다. 당신의 뇌가 인터넷과 연결될 때, 당신은 무엇을 검색하시겠습니까? 아니, 그 검색을 하는 것은 당신입니까, 아니면 당신의 뇌에 접속한 무언가입니까?

접속된 인류, 포스트휴먼의 시대. 그 거대한 문 앞에서 우리는 두려움 대신 준비된 지성과 윤리적 상상력을 무기로, 새로운 문명을 맞이할 준비를 마쳤습니다. 1924년 한스 베르거의 떨리는 검류계 바늘에서 시작된 이 여정은, 2026년 오스틴의 자동화된 공장을 거쳐, 아직 우리가 상상하지 못한 미래로 이어질 것입니다. 그 미래가 인간의 자유와 존엄을 확장하는 것이 될지, 아니면 축소하는 것이 될지는 기술이 결정하지 않습니다. 우리가 결정합니다.

이제, 그 문을 열고 나아가는 것은 우리 모두의 몫입니다.

1999년 개봉한 영화 《매트릭스》에서 트리니티는 헬리콥터 조종석에 앉습니다.

그녀는 헬리콥터를 조종해본 적이 없습니다. 전화기를 들어 말합니다. "조종법이 필요해요." 몇 초 후, 그녀의 눈이 빠르게 움직입니다. 뇌에 프로그램이 업로드되는 중입니다. 눈을 뜬 그녀는 능숙하게 조종간을 잡습니다.

25년이 지난 2024년, 놀랜드 아보는 생각만으로 컴퓨터 커서를 움직입니다. 체스를 두고, 게임을 하고, 이메일을 보냅니다.

같은 기술일까요.

아닙니다. 전혀 다른 기술입니다.

뇌-컴퓨터 인터페이스에는 두 가지 방향이 있습니다. 읽기(Reading)와 쓰기(Writing)입니다.

읽기는 뇌에서 나오는 신호를 밖으로 꺼내는 것입니다. 뇌가 "오른쪽으로 가"라고 명령하면 그 전기 신호를 칩이 읽어서 컴퓨터에 전달합니다. 놀랜드 아보가 하는 것이 이것입니다. 뇌에서 컴퓨터로. 안에서 밖으로.

쓰기는 반대입니다. 밖에서 안으로. 컴퓨터의 정보를 뇌 속에 집어넣는 것입니다. 매트릭스의 헬리콥터 조종법 다운로드가 이것입니다.

2025년 현재, 뉴럴링크는 읽기를 합니다. 쓰기는 하지 않습니다.

정확히 말하면, 쓰기는 아주 원시적인 수준에서만 가능합니다. 시각 피질을 전기로 자극하면 눈앞에 빛이 번쩍이는 것 같은 느낌을 줄 수 있습니다. 체성감각 피질을 자극하면 손가락 끝이 찌릿한 느낌을 만들 수 있습니다. 블라인드사이트 프로젝트가 이런 원리를 씁니다. 카메라가 찍은 영상을 단순한 빛의 점으로 바꿔서 시각 피질에 직접 쏘아주는 것입니다.

그러나 "이 레버를 당기면 헬리콥터가 뜬다"는 지식을 뇌에 주입하는 것. 그것은 완전히 다른 차원의 문제입니다.

왜 그럴까요.

우리 뇌에 지식이 저장되는 방식 때문입니다.

컴퓨터에서 헬리콥터 조종법은 `helicopter.exe`라는 파일 하나로 존재할 수 있습니다. 복사하고 붙여넣기가 됩니다. USB에 담아서 다른 컴퓨터로 옮길 수 있습니다. 모든 컴퓨터가 같은 운영체제를 쓴다면, 같은 파일이 같은 방식으로 작동합니다.

뇌는 다릅니다.

헬리콥터를 조종하는 법을 안다는 것. 그것은 뇌의 한 곳에 파일처럼 저장되어 있지 않습니다. 시각 피질에는 계기판의 이미지가 있습니다. 운동 피질에는 손의 움직임 패턴이 있습니다. 전두엽에는 상황 판단의 논리가 있습니다. 해마에는 훈련 중의 기억이 있습니다. 소뇌에는 균형 감각이 있습니다. 이 모든 것이 수억 개의 신경세포 사이에 그물망처럼 얽혀 있습니다.

더 어려운 점이 있습니다. 이 그물망의 패턴은 사람마다 다릅니다. 같은 헬리콥터 조종법이라도 A라는 사람의 뇌에 저장되는 방식과 B라는 사람의 뇌에 저장되는 방식이 완전히 다를 수 있습니다. 공통된 지식 파일을 만들어서 모든 사람의 뇌에 밀어넣는 것. 그것은 현재로서는 불가능에 가깝습니다.

아니, 그 이전에 우리는 지식이 뇌에 어떻게 저장되는지조차 완전히 이해하지 못합니다.

그렇다면 지금 뉴럴링크가 읽는 것은 무엇일까요.

생각입니다. 그러나 모든 생각이 아닙니다.

뉴럴링크의 칩은 운동 피질(motor cortex)에 심어져 있습니다. 정수리 위쪽, 뇌의 표면 가까이 있는 영역입니다. 이곳은 우리 몸의 움직임을 담당합니다. 손을 들어라. 고개를 돌려라. 눈을 깜빡여라. 이런 명령이 여기서 나옵니다.

놀랜드 아보가 "커서를 오른쪽으로 옮기고 싶다"고 생각하면, 그의 운동 피질에서 신호가 발생합니다. 팔을 실제로 움직이지는 못하지만, 움직이려는 의도가 전기 신호로 나타납니다. 칩이 이 신호를 읽어서 컴퓨터로 보냅니다. 컴퓨터가 커서를 움직입니다.

이것은 대단한 성취입니다. 그러나 이것은 생각의 아주 작은 일부일 뿐입니다.

"인생이란 무엇인가." "어머니가 보고 싶다." "저 사람은 믿을 수 있을까." 이런 생각들은 운동 피질에서 나오지 않습니다. 뇌의 더 깊은 곳, 더 넓은 영역에서 복잡하게 상호작용하며 만들어집니다. 전두엽의 추론, 측두엽의 기억, 변연계의 감정. 이 모든 것이 동시에 작동합니다.

1,024개의 전극으로 이 복잡한 교향곡을 읽어내는 것. 그것은 축구장에서 열리는 콘서트를 마이크 하나로 녹음하는 것과 같습니다. 무언가는 들립니다. 그러나 전부는 아닙니다.

이 책을 마무리하며 저는 두 가지 감정 사이에서 있습니다.

하나는 경이입니다.

100년 전 한스 베르거가 뇌파를 처음 기록했을 때, 그것은 희미한 바늘의 떨림에 불과했습니다. 오늘날 우리는 그 떨림을 읽어서 마비 환자가 체스를 두게 합니다. 루게릭병 환자가 목소리를 되찾습니다. 앞이 보이지 않는 사람에게 빛의 점을 보여줍니다.

2025년에 다섯 명 이상의 환자가 뉴럴링크 칩을 이식받았습니다. 영국에서는 환자 풀이 수술 몇 시간 만에 생각으로 컴퓨터를 제어했습니다. 캐나다와 아랍에미리트에서도 임상시험이 시작되었습니다. 2026년에는 대량 생산이 목표입니다. 과장일 수 있습니다. 그러나 방향은 분명합니다.

다른 하나는 겸손입니다.

우리가 아는 것보다 모르는 것이 훨씬 많습니다. 뇌에는 약 860억 개의 뉴런이 있습니다. 1,024개의 전극은 그중 극히 일부만 엿볼 뿐입니다. 생각이 어떻게 만들어지는지, 기억이 어떻게 저장되는지, 의식이란 무엇인지. 이 질문들 앞에서 우리는 여전히 초보자입니다.

매트릭스의 지식 다운로드는 아직 영화 속 이야기입니다. 어쩌면 영원히 영화 속에만 머물 수도 있습니다. 뇌가 컴퓨터와 근본적으로 다르다면, 컴퓨터식 복사와 붙여넣기가 뇌에서는 원리적으로 불가능할 수도 있습니다. 우리는 아직 모릅니다.

그러나 모른다는 것이 포기의 이유가 되지는 않습니다.

일론 머스크는 먼 미래에 전두엽과 변연계까지 연결하고 싶어 합니다. 우울증을 치료하고, 기억을 백업하고, 말하지 않고도 복잡한 의사를 전달하는 것. 그는 이것을 진정한 텔레파시라고 부릅니다.

한스 베르거도 텔레파시를 찾았습니다. 1893년 낙마 사고 후, 여동생이 그의 위험을 느꼈다는 사실에서 그는 평생의 질문을 얻었습니다. 생각은 전달될 수 있는가. 그는 텔레파시를 증명하지 못했습니다. 그러나 그 과정에서 뇌파검사를 발명했습니다.

어쩌면 우리도 그럴지 모릅니다. 매트릭스를 향해 가다가 다른 무언가를 발견할 수도 있습니다. 그 무언가가 무엇인지 지금은 알 수 없습니다.

이 책의 여정이 끝나가고 있습니다. 마지막으로 독자 여러분께 몇 가지 질문을 남기고 싶습니다.

뇌를 읽는 것과 뇌에 쓰는 것. 어느 쪽이 더 무서운가요.

누군가 당신의 생각을 읽을 수 있다면. 당신의 은밀한 감정, 숨기고 싶은 기억, 말하지 않은 판단. 그것이 데이터가 되어 저장되고 분석된다면. 그것은 어떤 세상일까요.

반대로 누군가 당신의 뇌에 무언가를 쓸 수 있다면. 당신이 원하지 않는 기억을 심거나, 당신의 감정을 조작하거나, 당신의 판단을 바꿀 수 있다면. 그것은 또 어떤 세상일까요.

지금 뉴럴링크는 읽기만 합니다. 그리고 그것도 운동 의도라는 아주 좁은 영역에서만 합니다. 그러나 기술은 발전합니다. 읽기가 정교해지면 쓰기도 따라올 것입니다. 빛의 점을 보여주는 것에서 시작해서, 언젠가는 더 복잡한 정보를 전달하게 될 것입니다.

그 경계선을 누가 그을 것인가요. 어디까지가 치료이고 어디서부터가 통제인가요. 그 결정을 정부가 할 것인가요, 기업이 할 것인가요, 아니면 개인이 할 것인가요.

저는 답을 갖고 있지 않습니다.

다만 이렇게 생각합니다. 기술 자체는 선하지도 악하지도 않습니다. 망치로 집을 지을 수도 있고, 망치로 사람을 해칠 수도 있습니다. 뇌-컴퓨터 인터페이스도 마찬가지입니다. 마비 환자에게 자유를 줄 수도 있고, 멀쩡한 사람의 자유를 빼앗을 수도 있습니다.

중요한 것은 우리가 이 기술을 어떻게 쓰느냐입니다. 그리고 그 선택은 기술자만의 몫이 아닙니다. 우리 모두의 몫입니다.

이 책을 쓴 이유가 여기에 있습니다. BCI가 무엇인지 알아야 합니다. 무엇을 할 수 있고 무엇을 할 수 없는지 알아야 합니다. 어떤 위험이 있고 어떤 가능성이 있는지 알아야 합니다. 그래야 우리가 현명한 선택을 할 수 있습니다.

2024년 1월, 놀랜드 아보는 수술 후 처음으로 커서를 움직였습니다. 그는 말했습니다. "믿을 수가 없었어요. 내 생각이 화면에 나타나다니."

그의 생각은 화면에 나타났습니다. 움직이고 싶다는 의도가 전기 신호가 되고, 전기 신호가 데이터가 되고, 데이터가 커서의 움직임이 되었습니다.

그러나 그것은 그의 생각 전부가 아닙니다. 8년간 마비된 채 살아온 청년의 좌절, 희망, 두려움, 결단. 그런 것들은 1,024개의 전극으로는 읽을 수 없습니다. 어쩌면 어떤 기술로도 읽을 수 없을지 모릅니다.

인간의 마음에는 기계가 닿지 못하는 영역이 있습니다. 적어도 지금은 그렇습니다. 앞으로도 그래야 하는지는 우리가 정해야 할 문제입니다.

한스 베르거는 텔레파시를 찾아 평생을 헤맸습니다. 그는 여동생에게 자신의 공포가 전달된 1893년의 순간을 잊지 못했습니다. 과학적 증거는 찾지 못했습니다. 동료들의 조롱 속에서 외로이 연구했습니다. 말년에는 강제 퇴직당했고, 결국 스스로 생을 마감했습니다.

그러나 그가 남긴 것이 있습니다. 뇌파검사라는 도구입니다. 그 도구 위에 100년의 연구가 쌓였습니다. 그 연구 위에 오늘날의 BCI가 서 있습니다.

베르거가 꿈꾼 텔레파시. 생각이 직접 전달되는 세상. 우리는 그 세상의 입구에서 있습니다. 아직 문은 열리지 않았습니다. 열쇠가 무엇인지도 모릅니다. 문 너머에 무엇이 있는지도 모릅니다.

그러나 우리는 노크하기 시작했습니다.

문이 열릴 때 무엇을 마주할지. 그것이 축복인지 재앙인지. 그것은 우리가 지금 무엇을 준비하느냐에 달려 있습니다.

이 책이 그 준비의 작은 시작이 되기를 바랍니다.

2026년 1월 김경진

뇌를 읽는 사람들
(부제/ 뉴럴링크와 인류의 마지막 혁명)

전자책 발행 | 2026년 1월 30일

저 자 | 김경진

펴낸이 | 김경진

펴낸곳 | 김경진 변호사 출판사

출판사등록 | 2025. 3. 10. (제2025-000015호)

주 소 | 서울특별시 동대문구 전농로 91, 백일빌딩 304호

전 화 | 02-6338-1905

이메일 | kimkj008@gmail.com

ISBN | 979-11-24360-01-9

가격 20,000원

© 김경진 2026

본 책은 저작자의 지적 재산으로서 무단 전재와 복제를 금합니다.

참고) 이 책속의 사진 이미지 그래프는 인공지능을 활용하여 생성되었습니다. 글의 내용 중 일부도 인공지능의 도움을 받아 작성되었습니다.

뇌를 읽는 사람들

이 책을 잘 읽으셨으면 그리고 새로운 가치있는 지식을 얻으셨다고 판단되시면
농협 302-1096-0948-81 (예금주 김경진) 에 자발적 후원 부탁드립니다.