

신경과학을 위한 물리학

물리학, 뇌를 어떻게 탐구할 것인가?

DOI: 10.3938/PhiT.25.043

정 재 승

How Does Physics Contribute to Brain Sciences?

Jaeseung JEONG

Brain dynamics based on nonlinear dynamics and chaos theory has been advancing for the last three decades. Measuring brain activity using physical instrumentation and describing brain dynamics based on complex system modeling and statistical physics contribute prominently to understanding the physics of the brain. In addition, theoretical physicists have nurtured and have been developing computational neuroscience since 1980. This short article introduces the advent of computational neuroscience and brain dynamics. Further, it discusses the brain-machine interface and brain-inspired artificial intelligence in terms of neurophysics.

인간의 의식은 뇌에서 비롯된 것일까? 아니면 정신작용을 설명하기 위해서는 우리는 영혼이라는 가설이 필요한가? 뇌는 그저 영혼의 밀실일 뿐인가? 아마도 뇌는 인간에게 가장 가까 이 존재하면서도, 그 본질을 이해하지 못하고 있는 가장 매력 적인 연구대상일 것이다.

두개골로 감싸고 그것으로도 부족해 척수액으로 둘러싸여 가장 안전하게 보호받고 있는 신체 기관인 뇌는 인간의 사고와행동이 만들어지는 곳이다. 뇌는 우리가 만져볼 수 없는 기관이라 통각 수용체가 존재하지 않는다. 다시 말해 뇌를 꺼내어바늘로 찔러도, 전혀 아프지 않다. 그 정도로 뇌는 안전하게

저자약력

정재승 교수는 KAIST 물리학과에서 학부를 졸업하고 박사 학위를 받았다. 예일대 정신과 연구원, 콜롬비아의대 정신과 조교수 등을 거쳐, 현재 KAIST 바이오및뇌공학과 교수로 재직 중이다. 의사결정 신경과학을 탐구하고 있으며, 정신질환 모델링, 뇌-기계 인터페이스, 뇌기반 인공지능 등을 연구하고 있다. 현재 한국계산뇌과학회 회장이다.(jsjeong@kaist.ac.kr)

보호돼 있다.

유전적으로 타고났든, 경험에 의해 후천적으로 얻게 되었든, 어떤 것도 뇌의 변화를 만들어내지 않고서는 사고와 행동에 영향을 미칠 수 없다. 설령 영혼이 존재한다 해도, 그 안식처 는 '뇌 언저리'여야 한다. 당신이 이전보다 더 성숙한 인간이 되었다는 뜻은 당신의 뇌가 바뀌었다는 뜻이다.

인간의 사고와 행동을 뇌의 생물학적인 기작으로 설명한다고 해서 '그렇다면 인간의 행동이 생물학적으로 타고났단 말인가!'라고 분노할 필요는 없다. 인간의 뇌는 다른 어떤 기관보다도 후천적인 경험에 의해 가장 많이 변하는 기관이다. 교육과 경험, 사고하는 방식이 얼마든지 당신의 뇌를 바꾸어놓을 수 있다. 다만, 경험이 뇌의 회로를 변화시키고 신경전달물질과 전기신호들을 바꾸어놓아야만 당신의 사고와 행동이 변한다. '인생의 목표는 성공이 아니라 성숙'이라는 말을 실천하고 싶다면, 뇌가 성숙해지도록 애써야 한다.

되는 우리의 생각과 행동이 마지막으로 통과해야 할 관문인 동시에, 남과 구별되는 나의 정체성이 형성되는 영혼 공작소 다. 손과 발이 달라서가 아니라 뇌가 남들과 달라서 '나'이기 때문이다. 여러분의 뇌를 다른 몸으로 옮긴다고 해도 여러분들 은 여전히 자신의 정체성을 잃지 않을 것이다.

다시 말해, 인간의 사고와 행동을 이해하기 위해서는 뇌에 대한 이해가 필수적이다. 나는 누구인가? 내 주변사람들을 어떻게 이해할 것인가? 우리 사회는 왜 이런 집단행동을 보이는 걸까? 이런 질문들에 답을 찾는데, 신경과학은 작지만 중요한 실마리를 제공할 것이다.

계산신경과학(Computational Neuroscience)이라는 이름으로 뇌를 모델링하겠다는 야심찬 물리학자들이 있다. 그들은 우리가 언젠가는 뇌를 이해하고 모사할 수 있으리라 믿는다. 그들에 따르면, 인간의 뇌 역시 전자기학을 충실히 따르는 회로이며 그들이 사용하는 언어는 전기신호다. 대뇌의 생물학적 메커니즘은 물리학적인 법칙을 벗어날 수 없으며, 물리학자들은 복잡한 현상을 관통하는 근본원리를 찾는데 궁극의 연구 목표를가지고 있기에 뇌는 그들에게 더없이 흥미로운 연구 대상이다.

인간의 뇌는 약 1000억 개 정도의 신경세포로 이루어져 있

으며, 하나의 신경세포는 주변의 1만 개 정도의 신경세포들과 시냅스 연결을 이루고 있다. 하나의 신경세포는 수상돌기를 통 해 주변의 신경세포들로부터 수많은 입력을 받고, 이 입력값이 어느 정도 역치값을 넘어가면 신경세포는 축색돌기를 통해 주 변 신경세포에게 출력값을 전한다.

수상돌기가 받는 입력값은 모두 아날로그 신호이며, 축색돌기가 만들어내는 출력값은 모두 스파이크(Spike) 형태의 디지털 신호다. 다시 말해, 인간의 뇌는 아날로그신호를 디지털신호로 바꾸는 세포체와 디지털 신호를 아날로그 신호로 바꾸는 시냅스가 복잡하게 네트워크를 이루고 있는 구조이며, 아날로그와 디지털 신호가 적절히 변환되면서 놀라운 정신작용을 만들어내는 것이다.

흥미롭게도 이 모든 과정은 전기신호를 통해 이루어지며, 화학적 신호들은 그저 전기신호를 돕는 일만 한다. '인간의 뇌라는 생물학적인 정보처리기관이 컴퓨터라는 인공적인 정보처리기관과 전기신호라는 같은 언어를 사용하고 있다'는 것은 매우매력적인 설정이다. 우리가 둘 사이에 적절한 통역기를 놓아준다면, 둘은 직접 상호작용을 할 수 있기 때문이다.

인간의 뇌는 복잡한 방식으로 정보를 부호화하고(encoding), 입력된 정보를 처리하며(processing), 새로운 정보가 들어오면 예전 정보를 다시 읽어오고(retrieving), 다른 영역들이 이 정보를 읽어내면서(decoding), 상황을 판단하고 결정을 내린다. 이 복잡한 과정이 인간의 뇌 신경회로망(neural network)에서 벌어지고 있는 것이다. 감각, 감정, 기억, 주의집중, 의사결정, 의식이라는 복잡한 정신작용들이 모두 이 과정을 필요로 한다.

따라서 뇌에 대한 근본 원리를 찾고 모사하기 위해서 물리학자들이 수십 년간 애써왔다. 1940년대 일리노이대 물리학자이자 신경생리학자 워런 맥컬럭(Warren S. McCulloch) 교수와 수학자 월터 피츠(Walter H. Pitts) 교수는 신경세포 활동을모사할 간단한 수학적 모델을 제시했다. 이들은 신경세포들이아무리 복잡한 입력값을 받는다고 해서, 결국 출력값은 '활성화' 또는 '휴면', 즉 1과 0뿐이라는 사실에 주목했다. 컴퓨터과학자들은 뇌의 활성화 및 휴면 모드를 모방, 1과 0으로만 이뤄진 2진법적 전기 스위치로 기계의 기본 논리시스템을 설계해 인간의 뇌와 유사한 기계를 프로그래밍할 수 있다는 것을보였다.

캐나다의 심리학자 도널드 헵 교수는 인간의 기억이 두 신경세포 사이의 시냅스에서 연결강도로 저장가능하다는 과감한 주장을 펼쳤다. 컴퓨터과학자들은 헵의 주장을 바탕으로 신경 망의 시냅스에서 연결강도를 조정하는 방식으로 기억을 주입하는데 성공했다. 더욱 놀라운 것은 이것이 실제로 인간의 뇌에서 기억이 저장되는 방식이라는 사실이 나중에 실험적으로 밝혀졌다. 그 후 많은 물리학자들이 이것을 바탕으로 신경세포

모델링에 애써왔다.

아직 갈 길이 멀지만, 아주 단순한 수준에서나마 인간의 뇌에서 벌어지는 현상을 컴퓨터 내에서 재현할 수 있다는 사실은 우리에게 뇌 모델링의 가능성을 시사한다. '개인의 정체성은 각 신경세포 및 신경세포들 사이의 상호작용의 산물에 불과하다'는 가설이 맞는다면, 컴퓨터 안에서 우리는 뇌를 재현할 수도 있다.

그렇다고 뇌가 컴퓨터처럼 단순하게 작동하는 것은 아니다. 컴퓨터와 인간의 뇌에는 근본적인 차이가 존재하며 뇌는 다른 어떤 인공물과 비교도 안 될 만큼 훨씬 더 복잡하다.

컴퓨터는 잘 알다시피 하드웨어와 소프트웨어가 명확히 나누어져 있다. 내가 여러분의 사무실에 있는 컴퓨터를 뜯어본다고해서, 여러분이 컴퓨터를 어떻게 사용하는지 알 수 없다. 주로어떤 프로그램을 사용하는지, 그 안에 어떤 정보가 저장돼 있는지 알 길이 없다. 컴퓨터의 하드웨어는 소프트웨어에 대한정보를 담고 있지 않기 때문이다. 둘은 완전히 분리된 채 존재하고 기능한다.

그러나 내가 만약 여러분의 두개골을 열고 뇌를 관찰한다면, 여러분이 주로 어느 영역을 사용하고 어떤 정보가 뇌에 저장 돼 있으며, 어떤 성격의 사람인지 알 수 있다. 현재는 뇌에 대 한 이해가 부족해, 아직은 모른다고 해도 언젠가를 알 수 있 다. 왜냐하면 뇌는 구조를 바꾸는 방식으로 기능을 더하고 있 기 때문이다. 다시 말해, 뇌는 소프트웨어와 하드웨어가 나누 어져 있지 않고 둘이 일체화돼 있기 때문이다.

올리버 색스가 쓴 음악에 대한 신경생리학 책 『뮤지코필리 아』를 보면 흥미로운 대목이 나온다. 음악연주가의 뇌는 한 눈에 알아볼 수 있다. 다른 어떤 사람과도 확연히 구별되는 뇌를 가지고 있다. 심지어 음악연주가 안에서도 악기에 따라 확연히 다른 뇌구조를 가지고 있다고 말이다. 음악가의 뇌는 과학자의 뇌와 다르며, 기업인의 뇌와도 다르다.

뇌의 구조는 나이에 따라 다르며, 남녀가 다르고, 인종에 따라 다르다. 정치적으로 보수적인가, 진보적인가에 따라 다르며, 어떤 성격의 소유자인가에 따라 다르다. 술을 좋아하는 사람인지 운동을 좋아하는 사람인지, 담배를 즐겨 피는 사람인지 스트레스를 많이 받는 사람인지, 구조가 기능을 고스란히 담아내고 있다.

되는 세포수를 늘리고 시냅스 연결을 정교하게 바꾸고, 네트워크 구조를 변형시키면서 새로운 정보를 입력하고, 새로운 기능을 추가하고, 새로운 기억을 담아낸다. 우리의 정신을 이루는 모든 기억, 감성, 성격, 자의식, 인격 등을 뇌로부터 얻어내기 위해서는, 그리고 그것을 이식하기 위해서는 구조를 바꾸는형태로 이식해야만 한다. 다시 말해 현재의 컴퓨터처럼 하드웨어와 소프트웨어와 절대적으로 구분되어 기능하는 형태로는 인

신경과학을 위한 물리학

간의 뇌를 온전히 담아낼 수 없다.

뇌의 네트워크 구조를 정보화해서 넣으면 그것이 곧 나라고 간주할 수 있냐고? 그건 마치 인간을 정교하게 그린 그림이 곧 그 사람이라고 믿었던 고대 조상들의 사고방식이다.

인간의 뇌가 컴퓨터처럼 하드웨어, 소프트웨어 이분법적으로 나누어져 있지 않고, 하나로 이루어져 있다는 것은 우리에게 시사하는 바가 무엇일까? 정신은 고귀한 기능이지만 물리적 토대 없이 존재하기 힘들며, 형이상학적인 사고의 발현은 본질 적으로 형이하학적인 과정을 통해 만들어진다는 사실이다. 뇌 의 정신작용은 그 자체로 물질을 탐구하는 물리학자의 연구대 상으로 훌륭하다.

그렇다면 왜 지금 물리학자들은 뇌에 주목하는가? 왜 복잡계를 연구하고 생물물리학을 연구하는 물리학자들이 뇌를 탐구하는가? 아마도 그것은 최근 비약적으로 발전하고 있는 뇌영상 기술 덕분일 것이다. 최근 50년간 우리가 뇌에 대해 알게된 사실들은 그 이전 500년 동안 우리가 뇌에 대해 알고 있었던 것보다 많다. 이제 과학자들은 하나의 신경세포에서부터 뇌회로까지, 뇌 안에서 벌어지는 일들을 다양한 방식으로 촬영하고 측정할 수 있게 됐다.

게다가 두개골을 열지 않고도 뇌 안에서 벌어지는 현상을 측정할 수 있는 뇌영상기술이 등장하면서, 인간이 인지적인 행 동을 하는 동안 뇌의 생물학적 변화를 관찰할 수 있다. 섬세하 고 정교하게 뇌 안을 들여다볼 수 있게 됐고, 간편하게 뇌 활 동을 관찰할 수 있게 됐다.

이제 누구나 뇌파를 측정할 수 있는 장치를 온라인 쇼핑몰에서 30만 원이면 살 수 있다. 뇌에 전기 자극을 주는 장치가 DIY 조립식으로 만들어져서 2만 원이면 구입할 수 있다. 뇌파게임 앱도 다운로드 받을 수 있다. 바야흐로 뇌공학 일상의 시대로 접어들고 있는 것이다.

그 덕분에, 이제 우리는 사람들이 감정을 가질 때, 상황을 판단할 때, 기억을 할 때 뇌에서 도대체 무슨 일이 벌어지는지 조금씩 이해하게 됐다. 사람들이 왜 그런 반응을 보였고, 왜 그런 결정을 내렸는지 어렴풋이 알 수 있게 됐다.

그렇다면 이제 복잡한 뇌활동을 일관되고 통일적으로 기술할 원리를 밝히는 노력을 시작할 때다. 사과나무에서 사과가 떨어 지는 것과 달이 지구 주위를 도는 것을 하나의 원리로 설명했 던 것처럼, 신경세포에서부터 뇌회로에 이르기까지 복잡한 두 뇌활동을 관통하는 근본 원리를 찾고 그 동역학적 현상을 통 일되게 기술하는 물리학적인 노력이 필요한 때이다.

신경과학자들은 '뇌'라는 렌즈를 통해 인간이 어떻게 정치적인 선택을 하고, 경제적인 의사결정을 내리는지 추적하고자 한다. 미학적인 평가는 어떻게 이루어지며, 도덕적인 판단은 어떻게 벌어지는지 논쟁하고자 한다. 이것을 어떻게 마케팅에 이용하고, 현대 철학을 다시 바라보며, 법을 어떻게 바꾸어야 하는지도 얘기하고자 한다. 공간은 사고에 어떤 영향을 미치는지, 인간관계는 우리를 어떻게 바꾸어놓는지 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 이 모든 응용을 제대로 관장하려면, 물리학자들이 뇌의 근본원리를 밝히려는 시도를 해야 한다.

지금까지 뇌를 연구하는 물리학자들은 계산신경과학(Computational Neuroscience)이라는 이름으로 이 분야를 연구해왔다. 그들은 '인간과 사회에 대한 지적 탐구'의 지형도를 새롭게그리고, 인간에 대한 신경과학적인 이해를 뇌에 대한 모델링으로 가능하다고 믿는다. 우리가 테스트할 뇌 모델을 가지고 있다는 것은 인간 행동을 예측하고, 정신질환을 치료하는 실마리를 얻는 계기가 된다. 이를 통해 우리는 인간 탐구에 대한 더깊은 통찰을 얻을 수 있다. 인간은 하나의 관점으로 이해되기에는 너무도 복잡한 존재이니까.

1,000억 개로 이루어진 세포덩어리가 어떻게 137억 년을 버텨온 우주를 이해하는 지성을 만들어냈는지, 70억 명의 인간들은 어떻게 서로 다른 정체성을 갖게 됐는지, 그 지적 호기심이 신경과학의 출발이다. 이 흥미로운 질문들에 제대로 답하기 위해서는 물리학자들이 복잡한 현상 사이에 가려진 신경동역학의 근본원리를 추적해야 한다. 이제 그 서막이 올랐다.