

⑧ **신경과학과 공학의 융합 : 뇌-기계 접속기술**

미래엔 척추 손상 환자도 혼자 힘으로 걷는다

글 | 정민환 _ 아주대학교 의과학연구소 신경과학연구실 교수 min@ajou.ac.kr

뇌 신경계의 주요 특징 중 하나는 다른 조직과 달리 한 번 손상되면 재생이 어렵다는 것이다. 이 때문에 사고나 질병으로 뇌신경계에 손상을 입은 경우 대개 완전한 기능회복을 하지 못한 채로 여생을 살아가야 한다. 예를 들어 교통사고로 척수손상을 입은 환자들의 경우 평생 스스로 걷는 것을 포기하고 휠체어에 의지해야만 한다. 이런 환자들의 경우 우리 몸에 운동명령을 내리는 뇌의 운동영역과 뇌의 명령을 이행하는 근육조직에는 전혀 이상이 없다. 다만 뇌의 운동명령을 근육의 움직임으로 전환해주는 척수가 손상되어 뇌와 근육의 연락이 단절되어 있을 뿐이다.

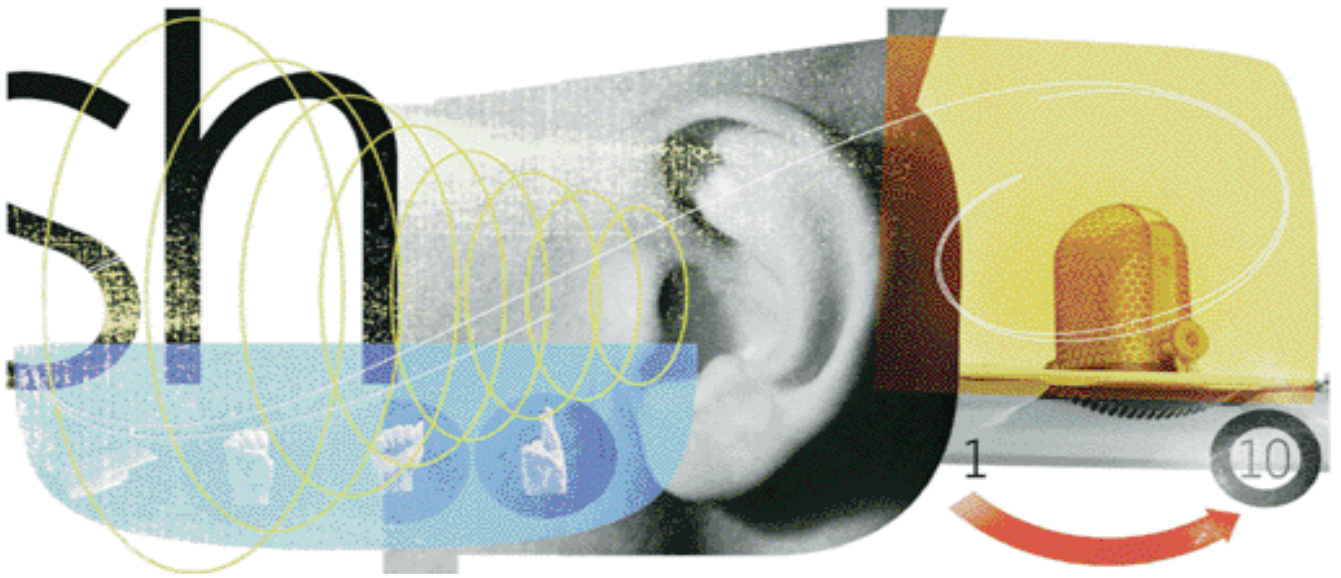
전기·디지털신호로 뇌와 기계 '원리적' 접속 가능

그렇다면 뇌의 운동명령을 직접 근육으로 연결해주면 척수손상 환자가 스스로 걷는 것이 가능하지 않을까? 또는 뇌의 운동명령을 외부 기계에 연결시키면 생각만으로 의족이나 휠체어를 움직일 수 있지 않을까? 맞는 말이다. 이것은 '원리적으로' 가능하며, 실제로 이러한 연구가 현재 활발히 진행되고 있는데, 이 분야가 바로 뇌-기계 접속기술 분야이다. 다만 이러한 기술은 '원리적으로만' 가능하며 아직까지 척수손상 환자를 걷게 해주는 기술은 개발되어 있지 않다. 그러나 뇌-기계 접속기술은 미래의 기술만은 아니다. 예를 들어 인공와우와 같이 분야에 따라 현재 상용화해 실제로 쓰이고 있는 기술도 있다. 즉 뇌-기계 접속기술은 미래의 기술이자 현재의 기술인 것이다.

그렇다면 뇌와 기계의 접속이 어떻게 가능한 것일까? 뇌-기계 접속기술이 원리적으로 가능한 이유로는 먼저 뇌신경계의 정보전달은 전기 신호를 바탕으로 이루어진다는 점을 들 수 있다. 신경세포는 내부와 외부 사이에 미세한 전위(대개 70mV 정도)를 유지하며 이러한 전위를 변화시켜 신호를 전달한다. 컴퓨터와 같은 정밀 기계들 역시 전기신호를 이용해 제어하므로, 뇌와 기계는 원리적으로 상호 접속이 가능하다.

두 번째로 주목할 점은 신경계는 디지털 신호를 이용한다는 점이다. 신경계의 중장거리 통신은 활동전위에 의존하는데 활동전위는 크기와 모양이 일정하다. 즉 신경세포들은 동일한 시그널을 가지고 상호 교신을 한다. 모스 부호를 생각하면 아마 쉽게 이해가 될텐데, 동일한 시그널을 가지고도 시그널의 시간적 패턴에 의해 다양한 조합을 만들어 낼 수 있다. 따라서 우리가 미세전극을 특정 신경세포 가까이 위치시켜 전기적인 신호를 잡아내면 신경세포의 신호를 잡음 없이 도청하는 것이 가능하다. 이 신호를 이용해 외부 기계를 제어하는 것은 원리적으로 또한 실제적으로 충분히 가능하다.

또 하나 뇌-기계 접속기술에 희망적인 사항으로 뇌신경계의 뛰어난 적응력을 들 수 있다. 뇌는 컴퓨터와 다르게 환경변화에 끊임 없이 적응해가며 이 과정에서 하드웨어를 변화시킨다. 특히 신경세포들 사이의 연결구조인 시냅스는 매우 빠르게 변화한다는 것이 잘 알려져 있는데(시냅스 가소성), 이러한 뇌의 적응성이야말로 뇌-기



계 접속 기술을 실질적으로 가능하게 해주는 요인이다. 현재 개발 또는 사용 중인 뇌-기계 접속기술에는 어떤 것들이 있을까? 가장 연구가 활발한 분야인 감각성 뇌-기계 접속기술, 운동성 뇌-기계 접속기술, 그리고 뇌자극술로 나누어 살펴보자.

감각성 뇌-기계 접속기술·인공와우, 인공망막

감각성 뇌-기계 접속기술은 손실된 감각기능을 되찾게 해주는 감각 신경보장구를 개발하는 기술이다. 대표적인 예가 인공와우인데 인공와우는 중이의 손상으로 청각을 잃어버린 사람들의 청각을 되찾게 해주는 장치로서 이미 환자에게 적용시키고 있는 현재의 기술이다. 사람은 외이를 통해 전달된 소리(음파)를 중이의 와우(달팽이관)에서 신경신호로 변환해 소리를 듣는데, 중이의 와우가 손상되면 음파 에너지를 신경신호로 변환할 수가 없어 소리를 들을 수 없게 된다. 이를 해결하는 방법으로 음파 에너지를 전기신호로 바꾼 뒤 전극으로 청각신경을 직접 자극해 소리를 듣게 해주는 것이 인공와우이다. 인공와우는 한 건당 미화 약 2만 달러로 비싼 시술법이지만 1995년 처음 시술된 후 매년 사용자가 늘고 있으며 현재 누적 사용자가 전 세계적으로 10만 명이 넘었다. 우리 나라에서도 활발히 시술되고 있으며, 이미 의료보험이 적용되고 있고, 어릴 때 시술하면 특히 효과가 좋다고 한다.

또 한 가지 활발히 연구가 진행되는 주제가 뇌-기계 접속에 의한 시력 회복이다. 사람의 경우 시각이 워낙 중요하기 때문에 시력

을 잃은 사람이 다시 볼 수 있다면 매우 획기적인 일이 될 것이다. 이를 위해 몇 가지 다른 접근 방법들이 시도되고 있는데 여기서는 인공망막에 대해 소개하기로 한다. 정상적인 사람의 경우 눈을 통해 들어온 빛은 망막의 빛 수용체를 통해 전기적 신호로 변환된다. 따라서 망막색소상피 변성증이나 황반퇴화증과 같은 질병으로 망막이 손상된 사람은 앞을 볼 수 없다. 이런 사람의 경우 인공망막을 개발해 빛 신호를 전기적 신호로 바꾸어 주고, 바뀐 신호를 시각신경에 전달해 주면 원리상 시력을 되찾을 수 있을 것이다.

인공망막도 몇 가지 다른 종류가 개발되고 있는데 미국 남가주 대학을 중심으로 이루어지는 연구에서는 소형 비디오 카메라에 잡힌 시각신호를 무선으로 망막에 이식된 칩으로 전달하여 시신경을 자극하는 기술을 개발하고 있다. 2002~2004년 사이에 맹인 여섯 명을 대상으로 첫 번째 임상실험이 실시되었는데, 50년 동안 앞을 보지 못했던 시각장애인이 큰 글씨를 알아보고 상이한 물체들을 분간하였다. 일차 임상실험에서는 불과 16개의 전극으로 이루어진 칩을 사용했으며, 따라서 칩을 이식 받은 시각장애인은 정상인에 비해 매우 저해상도의 영상 이미지를 보는데 불과했다. 현재 이를 개선하기 위해 60개의 전극으로 이루어진 칩의 임상실험이 진행 중이다. 앞으로 전극의 고집적화가 성공적으로 진행되면 비교적 또렷한 영상을 보는 것이 가능할 것으로 예측된다.

이외에도 빛 에너지를 직접 전기 에너지로 변환해주는 미세 광다이오드를 망막에 이식해 망막색소상피 변성증 환자의 시력을 회



복시키는 연구, 시각정보를 전기신호로 바꾼 뒤 시각중추(시각피질)를 직접 자극하는 방법 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나 시각계가 처리하는 정보량이 청각계가 처리하는 정보량보다 워낙 방대하고, 또한 뇌에서 시각에 관여하는 부위가 청각에 관여하는 부위보다 월등히 크기 때문에 가까운 장래에 시각장애인의 시각을 정상인과 비슷한 정도로 되찾는 것은 쉽지 않을 것이다.

운동성 뇌-기계 접속기술·생각만으로 로봇팔 구동

운동 신경정보장구는 가장 활발히 연구가 진행 중인 뇌-기계 접속 기술 분야로서 손실된 운동기능을 부분적으로 회복시켜주는 기술이다. 척수손상 환자나 루게릭병(근위축 경화증) 환자와 같이 운동중추(운동피질)는 정상이나 근육까지 신호를 전달하는 운동신경에 이상이 생긴 사람들의 경우 운동중추의 신호를 포착해 근육으로 직접 전달해 주거나 또는 외부기계를 제어하는 것이 가능하데 이것이 바로 운동 신경정보장구이다. 아직까지 운동중추의 신호로 자신의 근육을 직접 제어하는 수준까지의 연구는 일천하며, 이보다는 운동중추의 신호로 외부기계를 제어하는 연구가 주류를 이루고 있다.

이 분야의 연구는 방법론적으로 크게 두 가지로 나뉘는데 하나는 뇌파(EEG)를 이용하는 것이고, 또 하나는 개별 신경세포 신호를 이용하는 것이다. 뇌파의 경우 비침습적으로 측정이 가능한데 비해 개별 신경세포 신호를 이용하는 방법은 두개골을 뚫고 전극을 삽입해야 한다. 이런 면에서 보면 뇌파 측정법이 훨씬 우월하다. 그러나 뇌파는 수많은 뇌신경세포 신호가 합해진 신호이므로 뇌신경

망이 처리하고 있는 정보를 해독해내기 힘들다는 결정적인 단점을 가지고 있다. 한편 신경세포 신호를 이용하는 방법은 침습적이란 단점이 있으나 개별 신경세포 신호를 직접 측정하므로 뇌신경망이 어떤 정보를 처리하는가를 정확히 알 수 있는 장점이 있다.

이러한 차이점 때문에 뇌파 측정법은 사람을 대상으로, 신경세포 신호 측정법은 원숭이와 같은 동물을 대상으로 주로 연구가 이루어지고 있다. 뇌파를 이용하는 연구자들의 경우 복잡한 분석 알고리즘을 이용하여 뇌파로부터 최대한의 정보를 추출하려고 노력하고 있다. 그러나 현재의 기술수준은 뇌파를 이용해 1분에 1~2개 정도의 단어를 생성하는데 불과하다. 앞으로 이 기술이 좀 더 유용성을 가지려면 뇌파에서 정보를 추출해내는 분석 알고리즘이 더욱 발달되어야 할 것이다.

한편 신경세포 신호를 이용하는 경우에는 이런 문제가 없다. 아직까지는 대부분 동물을 대상으로 연구가 진행되고 있는데, 저명한 뇌생리학자들이 연구에 동참하고 있으며 상당히 고무적인 결과들이 보고되고 있다. 예를 들어 미국 듀크 대학의 미겔 니콜엘리스 박사는 원숭이의 대뇌피질에 미세전극 다발을 삽입해 원숭이의 팔 운동에 해당하는 신경신호를 측정하였고, 이 신호에 근거해 로봇팔을 구동시키는데 성공하였다. 실험 대상 원숭이는 처음에는 자신의 팔을 함께 움직이면서 로봇팔을 구동시켰으나 이 시스템에 곧 적응해 나중에는 자신의 팔을 움직이지 않고 생각만으로 로봇팔을 구동시켰다.

이러한 침습적인 방법은 실제 환자를 대상으로도 시험되었으며 부분적인 성공을 거두었으나 아직은 초보적인 수준에 불과하다. 앞으로 동물연구를 바탕으로 이 방법을 개선시켜가면서 사람에게 적용하면 좀 더 정교한 움직임의 제어가 가능할 것으로 예측된다. 그러나 전술한 바와 같이 이 방법의 단점은 뇌 속으로 전극을 삽입해야 한다는 것이다. 당분간 환자를 대상으로 사용될것이므로 이런 과정에서 삽입 전극의 안전성, 생체적 합성 등이 검증되어야 한다.

한편 뇌영상 기법의 발전이 두 방법의 문제점을 해결해 줄 가능성이 있다. 최근 네덜란드에서는 뇌의 활동을 자기공명영상법으로 측정한 뒤 이 신호를 이용해 두 피험자가 실시간으로 컴퓨터 탁구 게임을 하는데 성공하였다. 이 기술의 문제는 뇌영상 장치가 매우 크고 고가의 기기라는 점이다. 앞으로 뇌영상 기술이 발전해 고속, 고해상도, 저가의 휴대용 뇌영상 기기가 가능해지면 뇌파보다 훨씬 우수하면서도 비침습적인 뇌-기계 접속기술이 가능할 수도 있을 것이다. 단 이를 위해서는 컴퓨터가 에니악에서 노트북으로 발전한

것과 같은 기술적 진보가 전제되어야 한다.

뇌자극술·파킨슨병·간질 환자에 효과적

뇌-기계 접속기술 개발 연구는 감각 또는 운동 신경보장구 분야가 가장 활발하나 다른 분야에서도 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 한 예로 심부 뇌 자극술과 같이 신경신호를 이용하기보다는 뇌신경계를 자극해주는 기술들이 있다. 심부 뇌 자극술은 우울증과 같은 경우에 사용되기도 하지만 주로 파킨슨병 환자들을 위해 사용되는 일종의 뇌-기계 접속기술이다. 파킨슨병은 중뇌 흑질이라 불리는 뇌 부위의 도파민성 신경세포들이 죽어가는 것이 원인으로, 기저핵이라고 불리는 뇌 부위의 기능 이상으로 이어져 결국 운동실조로 이어지는 매우 심각한 질병으로 중증으로 진행되면 약물로 제어가 불가능해진다.

심부 뇌 자극술은 환자의 기저핵에 삽입된 전극을 통해 자극을 가해(심부 뇌 자극) 운동실조를 극복하는 방법인데 현재 어떠한 수술적 치료방법보다 중증 파킨슨병 환자에게 탁월한 효과를 보이고 있다. 단점으로는 아직까지 고가의 비용을 감수해야 하며 피하에 삽입된 전전지를 수년마다 교체해야 한다는 점을 들 수 있다. 물론 국내에서도 시술되고 있다.

한편 심부 뇌 자극술과 비슷한 치료 기술로 미주신경 자극술이 있다. 신경계를 자극해 뇌질환을 치료한다는 점에서 심부 뇌 자극술과 같은 원리지만 자극하는 부위가 말초신경계인 미주신경이고 치료목적이 간질이라는 점만 다르다. 미주신경 자극술은 그 동안 시행결과 안전성과 간질제어에 대한 효율성이 입증되어 약물로 제어하기 힘든 간질환자를 대상으로 사용되고 있다.

이외에도 뇌졸중 환자의 뇌에 전극을 삽입하고 전기적 자극을 가해 뇌의 기능회복을 촉진하는 연구, 줄기세포를 뇌신경계에 이식한 후 전기적 자극을 가해 생존 및 분화를 촉진시키는 연구 등 다양한 뇌 자극 연구가 진행 중이다. 뇌 자극술은 뇌신경망의 정보처리 조절 및 손상된 신경계의 재생 촉진 등 앞으로 응용 가능성이 많은 분야이다.

뇌 제대로 이해해야 효율적 뇌-기계 접속 가능

최근 뇌-기계 접속기술 연구가 붐을 이루고 있는데 이러한 현상은 당분간 지속될 것으로 전망된다. 학계에서는 저명한 과학자들이 뇌-기계 접속기술 연구에 뛰어들고 있으며, 산업계에서는 뇌-기계 접속기술 관련 벤처기업들이 설립되어 상용화를 목표로 연구에

매진하고 있다. 인공와우, 그리고 심부 뇌 자극술과 같은 신경조절 기구는 이미 상당한 규모의 시장이 형성되어 있으며, 앞으로 시장 규모가 더 커질 것으로 전망된다.

장기적으로 뇌-기계 접속기술의 미래는 과학기술자들이 기술 개발의 장애가 되는 문제점들을 얼마나 효율적으로 해결해 나가느냐, 그럼으로써 인류에게 얼마나 유용한 기술로 발전할 것인가에 달려있을 것이다. 아마 환자를 대상으로 한 기술 개발은 장기적으로도 계속될 가능성이 높다. 뇌-기계 접속기술은 기존 치료법과는 전혀 다른 치료 가능성을 열어주며, 환자들은 침습적인 뇌-기계 접속 기기의 이식을 용인할 것이고, IT 기술 및 로봇 기술이 발전함에 따라 점점 소형의 효율적인 접속 기기들이 개발될 것으로 예측되기 때문이다.

뇌-기계 접속기술의 미래에 있어서 중요한 변수 중의 하나는 과연 정상인을 대상으로 한 기술이 개발될 것인가이다. 현재로서는 이 가능성이 불투명하다. 그러나 뇌파 측정기술 또는 뇌영상 기술의 획기적인 발전으로 정상적인 사람들이 이 기술의 혜택을 볼 가능성을 배제할 수 없으며, 또한 미세전극 시술법이 간편하고 안전하게 개선되어 요즘 라식수술 하듯이 전극을 이식할 가능성도 배제할 수 없다. 이렇게 되면 뇌-기계 접속기술이 광범위하게 보급되어 우리의 삶의 방식을 완전히 바꾸는 것도 가능할 것이며, 이러한 가능성을 대비해 우리 나라도 뇌-기계 접속기술 연구를 활성화할 필요가 있을 것이다.

현재로서는 우리 나라의 뇌-기계 접속기술 연구역량이 그리 높은 편은 아니다. 그러나 뇌-기계 접속기술은 상대적으로 역사가 짧으며, 또한 우리 나라는 높은 수준의 IT 기술을 보유하고 있으므로 연구에 박차를 가한다면 멀지않아 세계적 수준의 연구가 가능할 것으로 보인다. 이를 위해서는 IT 기술의 발전뿐 아니라 뇌과학의 동반 발전이 필수적이다. 왜냐 하면 뇌를 제대로 이해하지 않고는 효율적인 뇌-기계 접속이 불가능하기 때문이다. 뇌-기계 접속기술은 대표적인 BT-IT 융합기술 분야이며, 이의 발전을 위해서는 신경과학과 공학의 동반 발전, 그리고 이 두 분야의 성공적 융합이 전제되어야 한다. ④D



글쓴이는 서울대학교 동물학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 캘리포니아 대학교(어바인)에서 박사학위를 받았다.