

# 신경과학과 행동

- ▲ **뉴런 : 행동의 기원**  
 뉴런의 구성 요소  
 뉴런의 주요 유형  
 위치에 근거하는 뉴런 유형
- ▲ **뉴런의 전기화학적 활동 : 정보 처리**  
 전기적 신호 : 뉴런 내에서의 정보 전달  
 화학적 신호 : 뉴런들 사이의 시냅스 전달
- ▲ **신경계의 조직**  
 신경계의 구분  
 중추신경계의 구성 요소
- ▲ **뇌의 구조**  
 후뇌  
 중뇌  
 전뇌  
 뇌 가소성  
 현실세계 뇌 가소성과 환상지의 감각
- ▲ **신경계의 발달과 진화**  
 중추신경계의 출생 전 발달  
 중추신경계의 진화적 발달  
 유전자, 후성유전학과 환경  
 최신 과학 후성유전학과 초기 경험의 지속적 효과
- ▲ **뇌의 연구방법**  
 뇌 손상 환자의 연구  
 뇌의 전기적 활동에 관한 연구  
 뇌 구조와 뇌 활성화의 연구에 사용되는 뇌 영상  
 현실세계 뇌사와 식물상태  
 다른 생각 뇌의 신화

**레**이 이스터링과 데이브 더슨은 서로 다른 시대와 장소에서 살았다. 이스터링은 1949년에 출생하여 버지니아 주의 리치몬드에서 자랐고 더슨은 1960년도에 출생하여 인디애나 주의 먼시에서 자랐다. 그러나 젊었을 때의 두 사람의 생은 매우 유사하였다. 두 사람 모두 미식축구를 좋아하였고 수비를 맡았으며 대학 미식축구 팀에서 인기가 매우 높아 전국 미식축구 리그(National Football League, NFL)에서 활약하였다. 이스터링은 1970년대 애틀랜타 팔콘 팀에서 활약하였고 1977년 시즌에서 최저 점수를 허용하는 기록을 세웠다. 더슨은 1980년대 시카고 베어스 팀에서 선수로 활약하였고 그는 가장 강한 수비 선수 중 한 명이었으며 1986년 시카고 베어스가 슈퍼볼을 차지하는 데 큰 공헌을 하였다. 불행하게도 이스터링과 더슨의 생은 은퇴 후에도 매우 유사하였다. 두 사람 모두 심각한 인지 결함과 우울증을 경험하였고 두 사람 모두, 즉 더슨은 2011년에, 이스터링은 2012년에 자살로 생을 마감하였다. 그들의 뇌를 부검한 결과 그들의 뇌에서 만성 외상성 뇌장애(chronic traumatic encephalopathy, CTE)가 발견되었는데, CTE는 반복적인 뇌진탕과 관련되어 초래되는 진행성 뇌 손상이다(McKee et al., 2012). 더슨과 이스터링은 CTE로 진단받은 20명 이상의 전직 NFL 선수들 중 2명에 불과하고, 복싱, 레슬링, 하키와 럭비 시합 중에 반복적으로 뇌 손상을 입을 경우에도 CTE가 초래되는 것으로 알려져 있다(Costanza et al., 2011; Daneshvar et al., 2011; Lahkan & Kirchgessner, 2012; McKee et al., 2012).

CTE가 이스터링 혹은 더슨을 사망에 이르게 하였는지에 관해서는 잘 알려져 있지 않지만 CTE가 인지 결함과 정서 결함, 예를 들어 주의집중의 어려움, 기억 상실, 안절부절못함과 우울증과 관련되어 있는 것으로 이해되고 있으며, 이러한 결함이 반복적인 뇌진탕을 입은 지 10년 이내에 시작되고 시간이 지남에 따라 점점 심각해진다(McKee et al., 2009). CTE는 나이 들거나 은퇴한 운동선수에만 국한되어 나타나지 않는다. 최근 연구는 다양한 두부 손상의 결과로 말미암아 사망한 17세 축구 선수에서도 CTE가 관찰됨을 보고하였다(McKee et al., 2012). 다행히도 CTE와 CTE의 예후에 대한 인식이 증가하고 있고 이로 말미암아 대학, 중고등학교 및 다른 청소년 스포츠 단체뿐만 아니라 전문 스포츠 단체에서도 이 문제에 대처할 준비를 하고 있다.



레이 이스터링(왼쪽)과 데이브 더슨(오른쪽) 모두 NFL의 뛰어난 선수였고, 은퇴 후 두 사람 모두 뇌 손상으로 말미암아 불행을 경험하였다.

**뉴런**

정보처리 과제를 수행하기 위해 신경계 내의 다른 세포와 의사소통하는 세포

**세포체(소마)**

정보처리 과제를 통합하고 세포의 생존을 유지하게 하는 뉴런의 구성 요소

**수상돌기**

다른 뉴런으로부터 정보를 수용하여 이를 세포체로 전달하는 뉴런의 구성 요소

**축색**

정보를 다른 뉴런, 근육 혹은 내분비선으로 전달하는 뉴런의 구성 요소

**수초**

지방 물질의 절연 층

**교세포**

신경계에 위치하는 지지 세포

**이 장에서는 뇌가 어떻게 작용하는지, 뇌가 작용하지 않을 경우 어떤 일이 발생하는지** 혹은 앞의 두 경우가 어떻게 행동에 영향을 미치는지에 관해 살펴본다. 먼저 뇌의 정보 처리에 관여하는 가장 기본적인 단위인 뉴런, 혹은 신경원에 관해 살펴본다. 뉴런의 전기적 및 화학적 활동이 모든 행동, 사고와 정서의 출발점이다. 그런 다음 중추신경계, 특히 뇌의 해부학, 즉 뇌의 전반적인 조직, 서로 다른 기능들을 행하는 주요 뇌 구조들과 뇌의 진화적 발달에 관해 살펴보기로 하자. 마지막으로 뇌를 연구하고 또 어떻게 뇌가 작용하는가를 이해하는 것을 가능하게 하는 연구 방법들에 관해 살펴본다. 여기에는 손상된 뇌를 검사하는 방법과 살아 있는 건강한 뇌를 스캔하는 방법들이 포함된다.

**뉴런 : 행동의 기원**

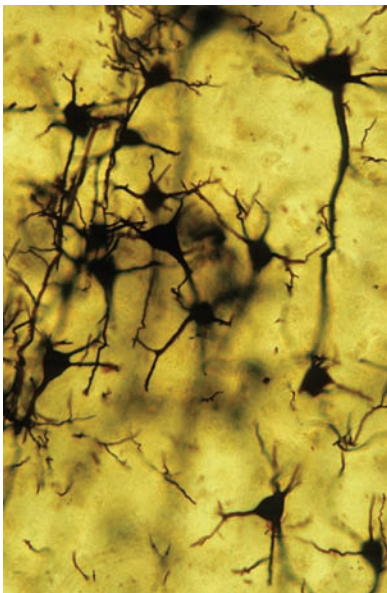
대략 10억 정도의 사람들이 4년마다 열리는 월드컵 최종 게임을 시청한다. 이는 상당히 많은 숫자이지만 지구상에 살고 있는 약 70억 인구의 14%보다 약간 많은 숫자에 불과하다. 이보다 더 인상적인 숫자는 월드컵 토너먼트 중 어느 게임이든 간에 한 게임을 본 사람의 숫자인데, 300억 정도로 추정된다. 그러나 실제로 엄청난 수는 여러분의 두개골 안에 위치하여 지금 여러분이 읽고 있는 큰 숫자들을 이해하도록 도와주고 있다. 여러분의 뇌에는 대략 1,000억 개 정도의 신경 세포들이 다양한 과제들을 수행하여 여러분으로 하여금 인간으로 기능할 수 있게 한다.

인간은 사고를 하거나 감정을 느끼거나 행동을 할 때 자주 눈에 띄는 신호에 의존한다. 친구를 만나러 가는 동안 여러분이 어떻게 느낄 것인가를 예로 들어 보자. 여러분을 지켜보는 사람이 여러분의 얼굴에 나타나는 미소를 보거나 여러분이 빨리 걷는 것을 관찰할 것이다. 여러분은 친구를 만나면 무슨 말을 할 것인지를 마음속으로 리허설하고 친구에게 가까이 갈수록 행복감을 느낄 것이다. 이 모든 눈에 띄고 경험적인 신호들은 여러분의 뇌세포들의 활동으로 일어난다. 여러분이 가지고 있는 기대감, 느끼는 행복감, 걷는 속도 등은 뇌에서 일어난 정보 처리의 결과이다. 여러분의 생각, 감정과 행동 모두가 하루에 수조 번이나 정보를 받아들이고 행동을 생산해 내는 뇌세포들로부터 초래된다. 이 세포들이 **뉴런(neuron)**, 즉 신경계에 위치하여 정보 처리 과제를 수행하기 위해 서로 의사소통하는 세포들이다.

**뉴런의 구성 요소**

1800년대 과학자들은 자신들의 관심을 사지, 폐와 간 기능의 연구에서 관찰하기 어려운 뇌 작용의 연구로 돌렸다. 철학자들은 뇌를 '매혹적인 베틀'로 묘사하였는데, 즉 행동이라는 태피스트리를 짜는 신비스러운 기관으로 묘사하였으며, 뇌에 관한 철학자들의 이러한 은유를 많은 과학자들이 증명하였다(Corsi, 1991). 과학자들은 뇌를 정교한 실로 끊임없이 연결된 격자로 보았으며 뇌를 잘 짜여진 하나의 큰 망이라고 결론 내렸다. 그러나 1880년대 스페인의 의사인 산티아고 라몬 카할(Santiago Ramón y Cajal, 1852~1934)이 뇌에 있는 뉴런들을 염색하는 새로운 기법을 적용하였다(DeFelipe & Jones, 1988). 이 염색법은 세포 전체의 모양을 드러나게 하였으며, 이에 따라 뉴런들이 서로 다른 형태와 크기를 가진다는 것이 밝혀졌다(그림 3.1 참조).

카할은 뉴런들이 세 가지 기본 요소, 즉 세포체, 수상돌기와 축색으로 구성된 복잡한 구조를 가지고 있다는 것을 발견하였다(그림 3.2 참조). 신체 기관의 세포들처럼 뉴런들은 **세포체[cell body, 소마(soma)]**라고도 부른대를 가지고 있으며, 세포체는 뉴런의 가장 큰 요소로서 정보 처리 과제를 조정하고 세포가 살아 있게 하는 기능을 가지고 있다. 이곳에서 단백질 합성, 에너지 생산과 신진대사가 일어난다. 세포체는 핵(nucleus)을 가지고 있는데, 여기에는 DNA, 혹은 여러분이 누구인가에 관한 유전 청사진을 함유하는 염색체가 위치한다. 세포체는 분자들을 세포 안



ED RESCHKE/GETTY IMAGES

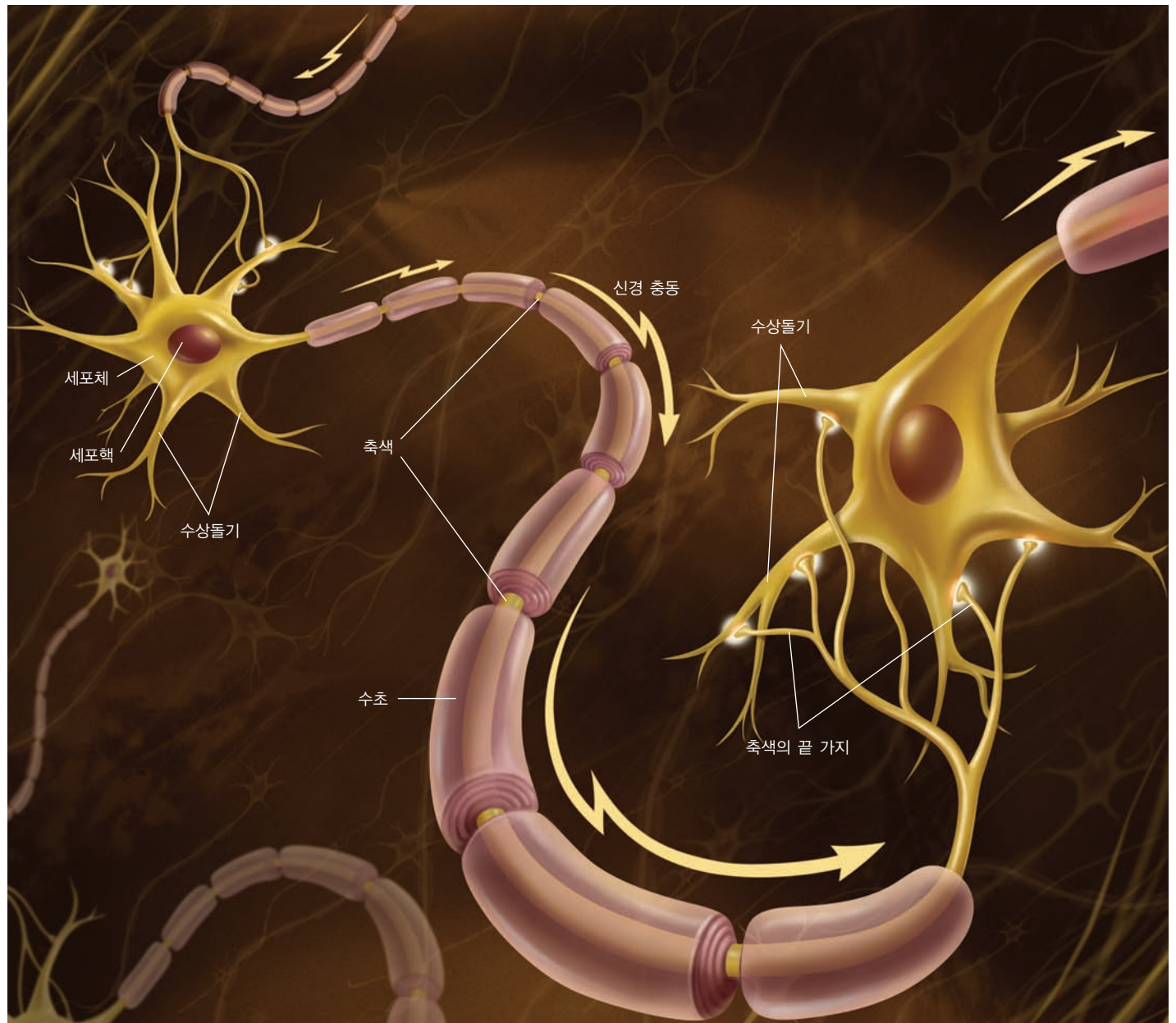
▲ **그림 3.1** 골지 염색법을 사용하여 관찰된 뉴런 산티아고 라몬 카할은 골지(golgi) 염색법을 사용하여 뉴런의 모습을 발견하였다. 그는 각 뉴런의 세포체가 다른 뉴런들로 향하는 많은 가는 줄들로 구성되어 있다는 것을 최초로 발견하였다. 그는 놀라게도 각 뉴런의 가는 줄들이 다른 뉴런과 실제로 붙어 있지 않는 것도 관찰하였다.

과 밖으로 이동하게 하는 투과성의 세포막으로 둘러싸여 있다.

다른 체세포들과 달리 뉴런은 세포체로부터 확장된 두 유형의 요소를 가지고 있다. 즉, 수상돌기와 축삭을 가지고 있으며 이들을 통하여 뉴런들이 서로 의사소통한다. 수상돌기(dendrites)는 다른 뉴런으로부터 정보를 수용하여 이를 세포체에 전달한다. 수상돌기라는 용어는 나무를 뜻하는 그리스어의 *dendrite*로부터 유래되었는데, 실제 대부분의 뉴런들은 마치 나뭇가지처럼 보이는 수많은 수상돌기들을 가지고 있다. 축삭(axon)은 정보를 다른 뉴런, 근육 혹은 내분비선으로 전달한다. 척수의 기저 부위에서 발가락에 이르는 축삭을 길게 잡아당기면 그 길이가 무려 1미터나 될 정도로 매우 긴 축삭도 있다.

많은 뉴런들에서 축삭은 수초(myelin sheath)로 덮여 있는데, 수초는 지방성 물질의 절연 층이다. 수초는 신경계에서 관찰되는 지지 세포인 교세포(glia cell, ‘풀’을 의미하는 그리스어 단어로 부터 유래되었다)로 만들어진다. 비록 여러분의 뇌에는 1,000억 개의 뉴런들이 바쁘게 정보를 처리하지만 뉴런보다 10~50배 정도 더 많은 교세포들도 다양한 기능을 수행한다. 일부 교세포

▼ 그림 3.2 뉴런의 구성 요소 뉴런은 세 가지 부분으로 구성되어 있다. 세포체는 유기체의 DNA를 포함하는 염색체를 가지고 있으며 뉴런의 건강을 유지하게 한다. 수상돌기는 다른 뉴런으로부터 정보를 받아들이고, 축삭은 정보를 다른 뉴런, 근육과 내분비선으로 전달한다.



**시냅스**

한 뉴런의 축삭과 다른 뉴런의 수상돌기 혹은 세포체 사이의 접합 부위

**감각 뉴런**

외부 세계로부터 정보를 받아 이 정보를 척수를 통해 뇌로 전달하는 뉴런

**운동 뉴런**

정보를 척수로부터 근육으로 전달하여 움직임이 일어나게 하는 뉴런

**개재 뉴런**

감각 뉴런, 운동 뉴런 혹은 다른 개재 뉴런들을 서로 연결하는 뉴런

포들은 죽은 뉴런의 일부를 소화하고 일부 교세포들은 뉴런에게 물리적 지지와 영양을 공급하며, 또 다른 교세포들은 수초를 형성하여 축삭으로 하여금 더 효율적으로 정보를 전달하도록 돕는다. 축삭이 절연 물질인 수초로 둘러싸여 있으면 다른 뉴런, 기관 혹은 근육으로 더 효율적으로 신호를 전달하게 된다. 실제 다발성 경화증(multiple sclerosis)과 같은 탈수초화 질환에서는 수초가 상실되며 이로 인하여 한 뉴런에서 다른 뉴런으로의 정보 전달이 느려진다(Schwartz & Westbrook, 2000). 이 결과 다양한 문제들, 즉 사지의 감각 상실, 부분적 시력 상실, 협응 운동과 인지 기능의 어려움 등이 초래된다(Butler, Corboy, & Filley, 2009).

**?** 뉴런의 어느 요소가 의사소통을 가능하게 하는가?

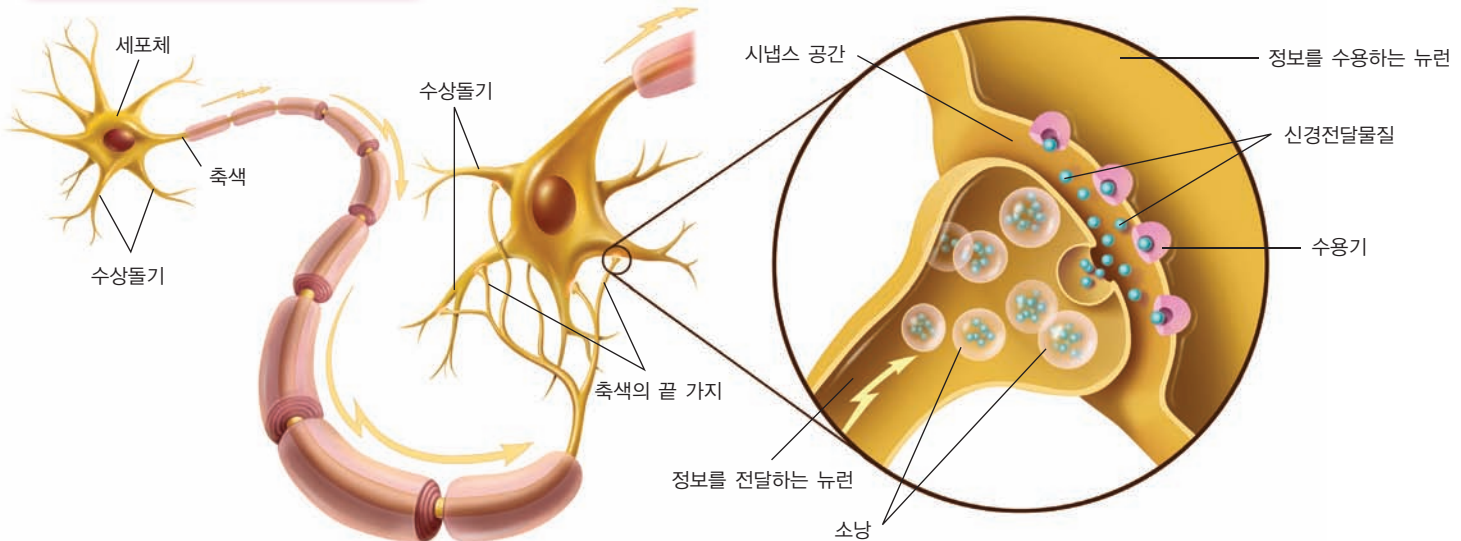
카탈은 뉴런의 수상돌기와 축삭들이 서로 붙어 있지 않는 것도 관찰하였다. 한 뉴런의 축삭과 다른 뉴런의 수상돌기 혹은 세포체 사이에 작은 틈이 존재한다. 이 틈이 시냅스(synapse), 즉 한 뉴런의 축삭과 다른 뉴런의 수상돌기 혹은 세포체 사이의 접합 부위의 일부이다(그림 3.3 참조). 여러분의 뇌에 있는 1,000억 개의 뉴런들 중 많은 뉴런들이 수천 개의 시냅스 접합을 가지고 있기 때문에 대부분의 성인 뇌에 100~500조의 시냅스가 존재한다는 것은 전혀 놀랄 일이 아닐 것이다. 곧 살펴보겠지만 시냅스를 통한 정보 전달이 뉴런들 사이의 기본적인 의사소통 수단이며 이로 말미암아 우리가 생각하고 느끼고 행동하게 된다.

**뉴런의 주요 유형**

세 가지 주요 뉴런 유형, 즉 감각 뉴런, 운동 뉴런, 개재 뉴런들이 있으며 각 유형의 뉴런은 독특한 기능을 행한다. **감각 뉴런(sensory neurons)**은 외부 세계로부터 정보를 수용하고 이 정보를 척수를 통하여 뇌로 전달한다. 감각 뉴런들은 자신들의 수상돌기 끝에 특별한 구조를 가지고 있으며 이를 통하여 빛, 소리, 접촉, 맛과 냄새에 관한 신호를 수용한다. 예를 들어 우리 눈에 위치하는 감각 뉴런의 끝부분은 빛에 민감하다. **운동 뉴런(motor neurons)**은 신호를 척수로부터 근육으로 전달하여 운동이 일어나게 한다. 이 뉴런들은 종종 긴 축삭을 가지고 있어 신체 말단의 근육까지 연결된다. 그러나 신경계의 대부분은 세 번째 유형의 뉴런, 즉 **개재 뉴런(interneurons)**으로 구성되어 있는데, 개재 뉴런은 감각 뉴런, 운동 뉴

**?** 세 유형의 뉴런들이 어떻게 상호작용하여 정보를 전달하는가?

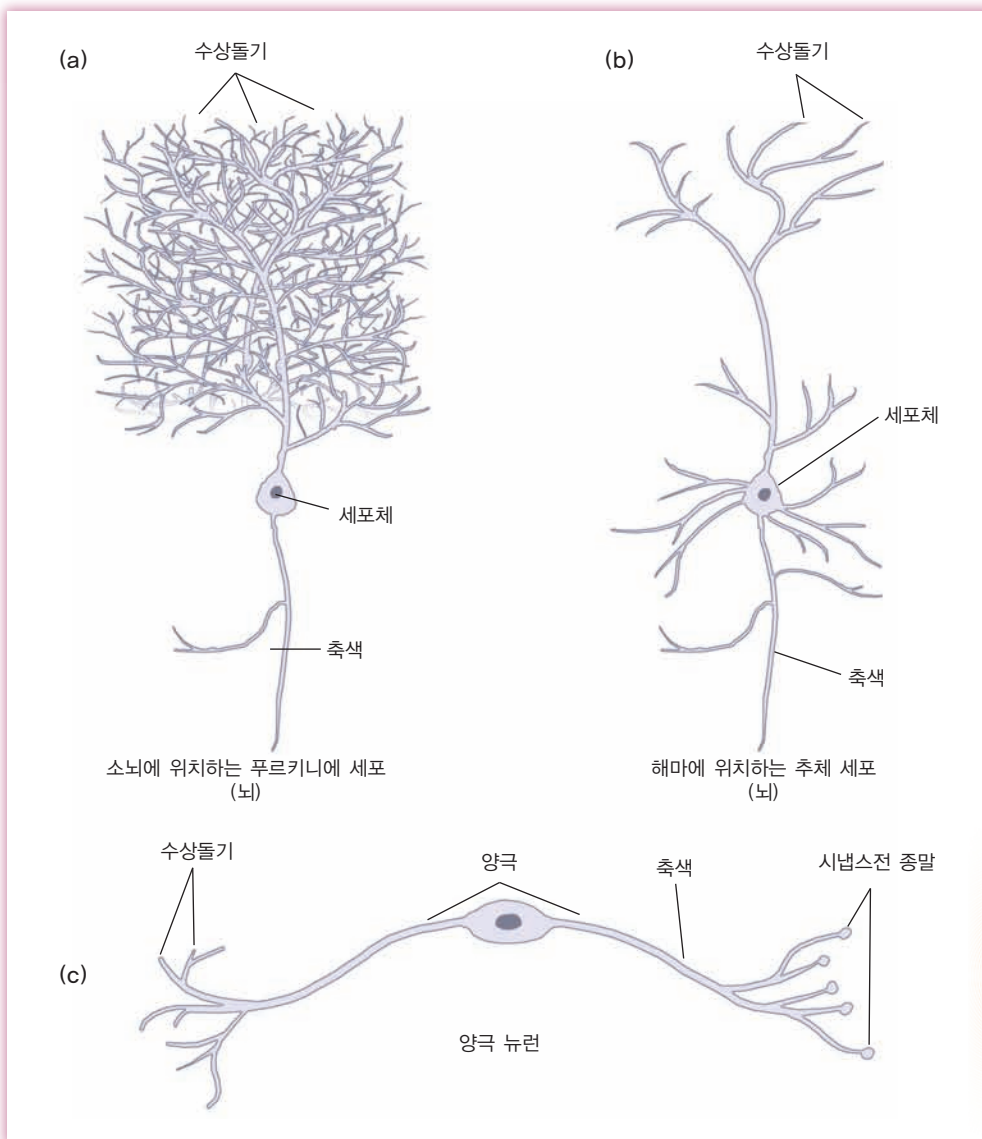
▼ **그림 3.3 시냅스** 시냅스는 한 뉴런의 축삭과 다른 뉴런의 수상돌기 혹은 세포체 사이의 접합을 의미한다. 뉴런들이 서로 붙어 있지 않는 것에 주목하라. 뉴런들 사이에 작은 시냅스 공간이 존재하며 이곳을 통해 정보가 전달된다.



런 혹은 다른 개재 뉴런들을 서로 연결하는 기능을 한다. 일부 개재 뉴런들은 감각 뉴런으로부터 정보를 받아 신경계로 전달하는 한편 일부 개재 뉴런들은 신경계로부터 운동 뉴런으로 정보를 전달한다. 또 다른 개재 뉴런들은 신경계 내에서 다양한 정보 처리 기능을 행한다. 개재 뉴런들은 작은 회로를 통하여 단순한 과제, 예를 들어 감각 신호의 위치 탐지 등을 행하거나 친숙한 사람의 얼굴 인식 등과 같은 훨씬 더 복잡한 과제를 수행하기도 한다.

### 위치에 근거하는 뉴런 유형

뉴런들이 감각, 운동 혹은 연결 기능으로 전문화되어 있는 것 이외에도 뉴런들은 위치에 따라 다소 전문화된 기능을 가진다(그림 3.4 참조). 예를 들어 푸르키니에 세포(Purkinje cell)는 정보를 소뇌로부터 뇌의 나머지 영역과 적수로 전달하는 개재 뉴런이다. 이 뉴런들은 덩불처럼 매우 밀도가 높고 정교한 수상돌기를 가지고 있다. 추체 세포(pyramidal cell)는 삼각형 모양의 세포체와 많은 작은 가지들 가지는 하나의 긴 수상돌기를 가지고 있다. 양극 세포(bipolar cell)는 눈의 망막에 위치하며 하나의 축색과 하나의 수상돌기를 가지고 있다. 뇌는 다양한 유형의 정보를 처리하며 이러한 과제를 수행하기 위해 세포 수준에서부터 상당한 정도의 전문화가 이루어져 있다.



◀ **그림 3.4 뉴런의 유형** 뉴런은 세포체, 축색과 적어도 하나의 수상돌기를 가지고 있다. 그러나 뉴런들은 모양과 크기에서 상당히 다르다. (a) 푸르키니에 세포는 풍성한 나뭇가지 모양의 수상돌기를 가지고 있다 (b) 추체 세포는 삼각형 모양의 세포체와 많은 작은 가지를 가지는 하나의 긴 수상돌기를 가지고 있다 (c) 양극 세포는 단지 하나의 수상돌기와 하나의 축색을 가지고 있다.

**안정 전위**

한 뉴런의 세포막 밖과 안의 전위 차이

**요약**

- ▶ 뉴런은 신경계를 구성하는 기본 단위이다. 뉴런은 외부 세계로부터 수용한 정보를 처리하고 다른 뉴런과 의사소통하며 신체의 근육과 기관으로 메시지를 전달한다.
- ▶ 뉴런은 세 가지 주요 부위, 즉 세포체, 수상돌기와 축삭으로 구성되어 있다.
  - ▶ 세포체에는 유기체의 유전 정보를 담고 있는 핵이 위치한다.
  - ▶ 수상돌기는 다른 뉴런으로부터 감각 정보를 수용하여 이를 세포체로 전달한다.
  - ▶ 각 축삭은 세포체로부터 다른 뉴런 혹은 근육이나 신체 기관으로 정보를 전달한다.
- ▶ 뉴런들은 서로 붙어 있지 않다. 뉴런들은 작은 틈을 사이에 두고 분리되어 있으며 이 틈은 한 뉴런에서 다른 뉴런으로 정보가 전달되는 시냅스의 일부이다.
- ▶ 교세포는 주로 수초 형성을 통하여 뉴런을 지지하는 역할을 한다. 수초는 축삭을 둘러싸고 있으며 정보 전달을 용이하게 한다. 탈수초화 질환의 경우 수초가 상실된다.
- ▶ 뉴런들은 행하는 기능에 따라 구분된다. 뉴런의 세 가지 주요 유형에는 감각 뉴런(예 : 양극 뉴런), 운동 뉴런과 개재 뉴런(예 : 푸르키니에 세포)이 포함된다.

**뉴런의 전기화학적 활동 : 정보 처리**

우리의 생각, 느낌과 행동은 뉴런들 사이의 의사소통에 달려 있는데, 어떻게 의사소통이 일어나는가? 뉴런 내 혹은 뉴런 간의 정보 소통은 두 단계, 즉 전도와 전달로 진행된다.

- 전도(conduction)는 뉴런 내부에서 전기적 신호가 전달되는 것, 즉 수상돌기에서 세포체, 나아가서는 축삭으로 이동하는 것을 의미한다.
- 전달(transmission)은 시냅스를 건너 뉴런들 사이에 전기적 신호가 전달되는 것이다.

이 두 단계 모두를 합하여 과학자들은 뉴런의 전기화학적 활동(electrochemical action)이라고 부른다.

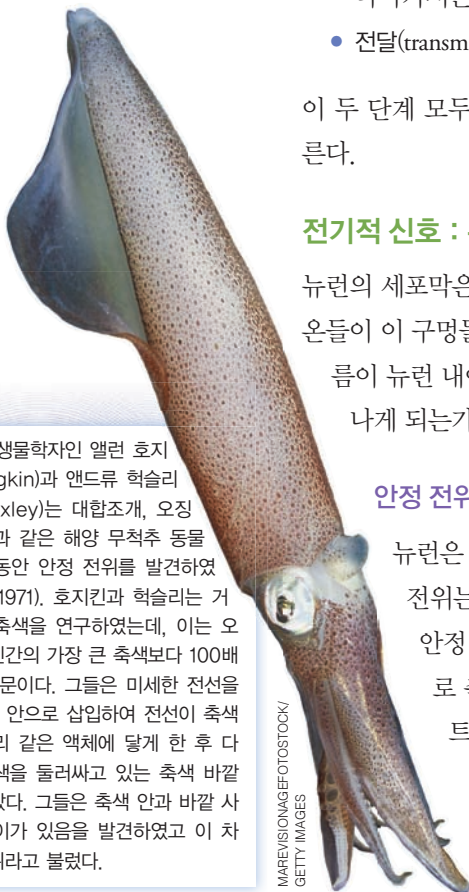
**전기적 신호 : 뉴런 내에서의 정보 전달**

뉴런의 세포막은 채널로 작용하는 작은 구멍들을 가지고 있으며, 전하를 띠는 작은 분자인 이온들이 이 구멍들을 통해 세포 안과 밖을 통과한다. 뉴런의 세포막을 건너 일어나는 이온의 흐름이 뉴런 내에서 전기적 신호의 전도를 일어나게 한다. 전기적 신호의 전도가 어떻게 일어나게 되는가?

**안정 전위 : 뉴런의 전기적 속성의 근원**

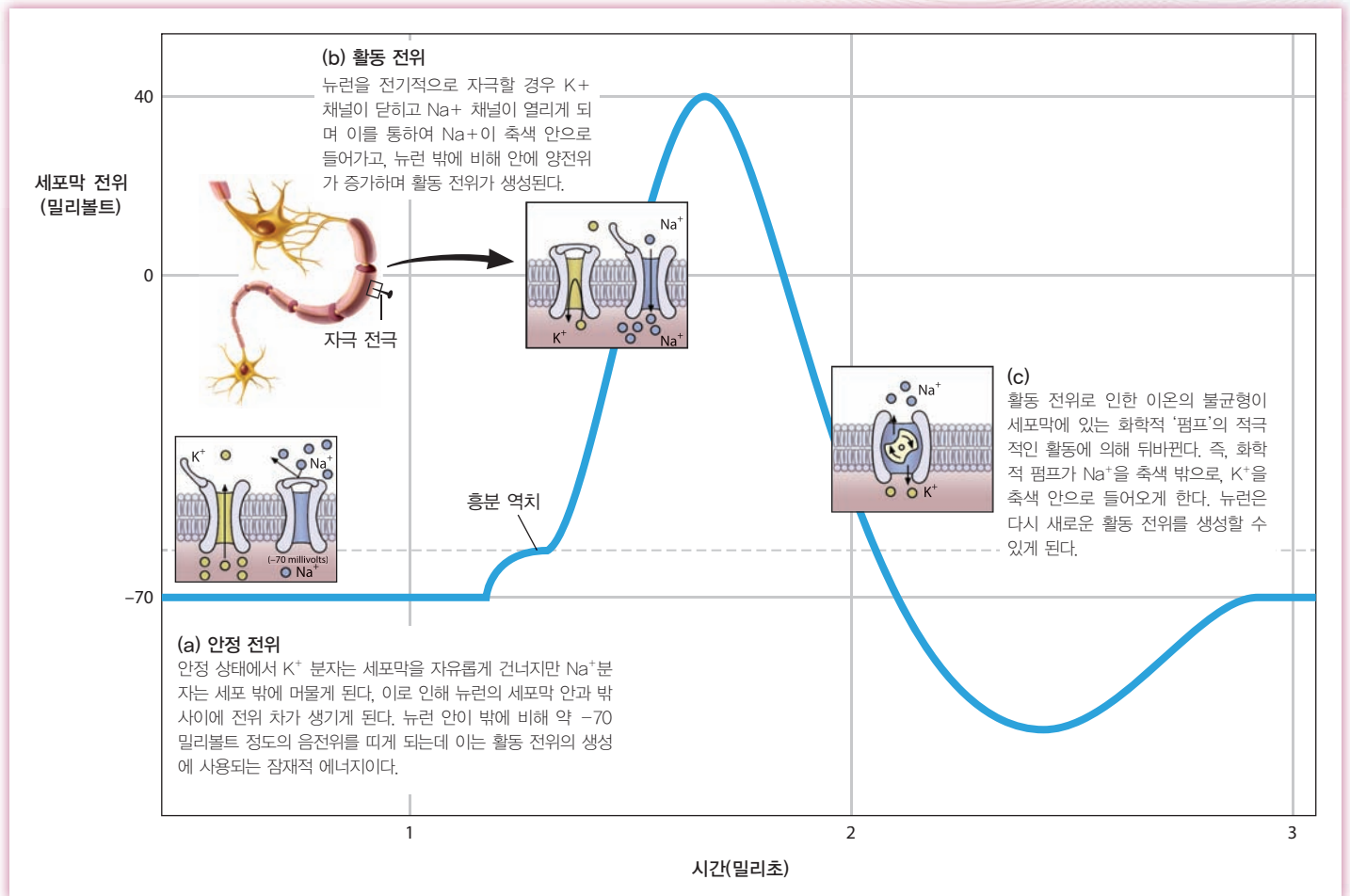
뉴런은 자연적으로 전하를 띠는데, 이를 **안정 전위(resting potential)**라고 부른다. 안정 전위는 뉴런의 세포막 안과 밖 사이의 전하 차이를 의미한다(Kandel, 2000). 1930년대 안정 전위가 생물학자들에 의해 처음 발견된 당시 안정 전위는 대략 -70밀리볼트로 측정되었다. 이는 전형적인 배터리 전하보다 훨씬 적은 것인데, 예를 들어 9 볼트 배터리는 9,000밀리볼트이다(Klein & Thorne, 2007).

안정 전위는 뉴런의 세포막 안과 밖의 이온 농도의 차이로 인하여 초래된다(그림 3.5a 참조). 이온은 양전하(+charge) 혹은 음전하(-charge)를 띤다. 안정 상태에서는 양전하를 띠는 이온인 칼륨 이온(potassium ion, K<sup>+</sup>)과 음전하를



1939년 여름 생물학자인 앨런 호지킨(Alan Hodgkin)과 앤드류 헉슬리(Andrew Huxley)는 대합조개, 오징어와 가재 등과 같은 해양 무척추 동물을 연구하는 동안 안정 전위를 발견하였다(Stevens, 1971). 호지킨과 헉슬리는 거대한 오징어 축삭을 연구하였는데, 이는 오징어 축삭이 인간의 가장 큰 축삭보다 100배나 더 컸기 때문이다. 그들은 미세한 전선을 오징어의 축삭 안으로 삽입하여 전선이 축삭 안에 있는 젤리 같은 액체에 닿게 한 후 다른 전선을 축삭을 둘러싸고 있는 축삭 바깥의 액체에 놓았다. 그들은 축삭 안과 바깥 사이에 전위 차이가 있음을 발견하였고 이 차이를 안정 전위라고 불렀다.

MAREVISIONAGE/GETTYSTOCK/GETTY IMAGES



▲ 그림 3.5 활동 전위 뉴런은 안정 전위라고 불리는 자연적으로 발생하는 전위를 가진다. 뉴런을 전기적으로 자극하면 활동 전위가 일어난다.

떠는 단백질 이온(protein ion, A<sup>-</sup>)이 뉴런 밖에 비하여 뉴런 안에 더 많은 농도로 위치한다. 이와 상반되게 양이온인 나트륨 이온(sodium ion, Na<sup>+</sup>)과 음이온인 염소 이온(chloride ion, Cl<sup>-</sup>)은 세포막 밖에 더 많은 농도로 위치한다.

축색 안과 밖의 K<sup>+</sup> 농도는 축색 세포막에 위치하는 채널들에 의해 통제되는데, 이 채널들은 분자가 뉴런의 안과 밖으로 이동하는 것을 허용한다. 안정 상태 동안에는 K<sup>+</sup> 분자가 세포막을 자유롭게 이동하는 것을 허용하는 채널이 개방되는 반면 Na<sup>+</sup> 이온과 다른 이온의 이동을 허용하는 채널들은 대개 닫혀 있다. 뉴런 안에 K<sup>+</sup> 분자가 자연적으로 더 많은 농도로 있기 때문에 일부 K<sup>+</sup> 분자는 열려 있는 채널을 통하여 뉴런 밖으로 이동하며 이에 따라 뉴런 내부가 외부에 비하여 대략 -70밀리볼트 정도의 전위를 띠게 된다. 후버담이 수문이 열릴 때까지 콜로라도 강물을 막아 두듯이 안정 전위는 잠재적인 에너지인데, 이는 안정 전위가 전기 충동이 일어날 수 있는 여건을 만들기 때문이다.

? 뉴런의 세포막 안과 밖의 어떤 차이가 안정 전위를 생성하는가?

**활동 전위 : 뉴런을 가로질러 신호 보내기**

대부분의 시간 동안 뉴런들은 안정 전위를 유지한다. 그러나 오징어의 거대한 축색을 가지고 연구했던 생물학자(90쪽의 사진 참조)들은 짧은 시간 동안 축색에 전기 쇼크를 가함으로써 신호를 만들어 낼 수 있었고 그 결과 전기 충동(electric impulse)이 축색을 따라 전도되는 것을 관찰하였다(Hausser, 2000; Hodgkin & Huxley, 1939). 이 전기 충동을 활동 전위(action potential)

**활동 전위**  
 뉴런의 축색을 따라 시냅스에 전달되는 전기적 신호

라고 부르는데, 이는 뉴런의 축색을 따라 시냅스로 전도되는 전기적 신호를 의미한다.

활동 전위는 전기 쇼크가 일정 수준, 즉 역치(threshold)에 도달할 때에만 발생한다. 쇼크가 역치 이하일 경우 재빨리 소멸되는 작은 신호들만이 기록되었다. 쇼크가 역치에 도달하면 훨씬 더 큰 신호인 활동 전위가 관찰되었다. 흥미롭게도 전기 쇼크의 강도를 역치보다 더 높더라도 활동 전위의 강도가 증가되지 않았다. 활동 전위는 실무물(all or none)을 따른다는 것이다. 역치 이하의 전기 자극은 활동 전위를 생산하지 못하는 반면, 역치 혹은 그 이상의 전기 자극은 항상 활동 전위를 생산한다. 자극이 역치 혹은 역치 이상인가와는 무관하게 활동 전위는 항상 동일한 속성과 동일한 강도로 생산된다.



ISTOCKPHOTO/THINKSTOCK

여러분이 전등 스위치를 켤 때 일어나는 전류의 흐름처럼 활동 전위는 실무물을 따른다. 즉, 전등 스위치를 키면 방이 밝아지고 키지 않으면 방은 어두운 상태로 남는다. 이와 유사하게 뉴런의 전기적 자극이 역치를 넘으면 활동 전위가 생성되지만 역치를 넘지 못하면 안정 전위 상태로 남는다.

거대한 오징어 축색을 연구하는 생물학자들은 활동 전위의 또 다른 놀라운 속성을 관찰하였다. 즉, 그들은 활동 전위가 0보다 훨씬 큰 +40밀리볼트라는 것을 발견하였다. 이는 활동 전위의 생성 기제가 단순히 안정 전위인 -70밀리볼트를 상실하는 것이 아니라는 것을 시사하는데, 왜냐하면 이 경우 활동 전위가 0이 되어야 하기 때문이다. 그렇다면 왜 활동 전위는 0 이상의 전위를 가지는가?

**?** 활동 전위는 왜 실무물을 따르는가?

활동 전위는 축색의 세포막 채널에 변화가 있을 경우 발생한다. 안정 상태에서는  $K^+$  채널만이 열려 있다는 사실을 여러분은 기억하고 있을 것이다. 그러나 전위가 역치값으로 상승할 경우  $K^+$  채널이 짧은 시간 동안 닫히게 되고 대신 다른 양이온인 나트륨 이온( $Na^+$ )의 흐름을 허용하는 채널이 열리게 된다(그림 3.5b 참조). 전형적으로  $Na^+$ 은 축색 안보다 밖에 더 많이 위치한다.  $Na^+$  채널이 열리면 이 양이온이 세포 안으로 들어가게 되어 축색 밖에 비하여 안이 더 양전위를 띠게 된다.  $Na^+$ 이 축색 안으로 이동함으로써 활동 전위가 최대값인 +40밀리볼트를 띠게 된다.

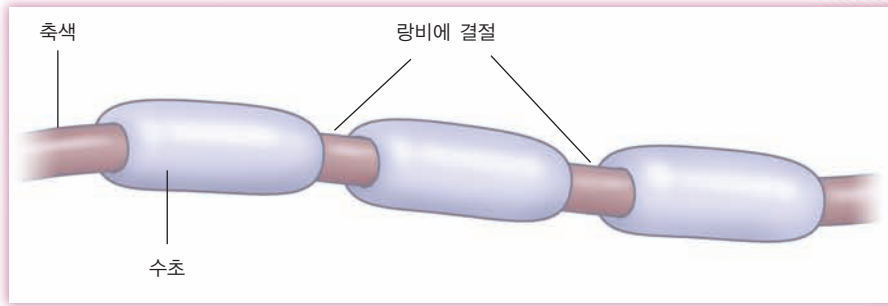
활동 전위가 최댓값을 가진 후 세포막 채널은 원래 상태로 돌아가게 되며 축색이 안정 전위에 도달할 때까지  $K^+$ 이 세포 밖으로 이동한다. 이 과정 동안 많은 여분의  $Na^+$ 이 축색 안에 머물게 되고 많은 여분의  $K^+$ 이 축색 밖에 있게 된다. 이온이 불균형 상태로 있는 이 시기 동안 뉴런은 또 다른 활동 전위를 생산할 수 없으며, 이 시기를 불응기(refractory period)라고 부르는데, 즉 활동 전위가 생성된 후 다른 새로운 활동 전위가 생성되지 못하는 시기이다. 이온 농도의 불균형은 세포막에 위치하는 능동적인 화학 '펌프'에 의해 전환되는데, 즉  $Na^+$ 이 축색 밖으로 이동하고  $K^+$ 이 축색 안으로 이동하게 된다(펌프는 활동 전위 동안에는 작용하지 않는다. 그림 3.5c 참조).

앞서 어떻게 활동 전위가 뉴런의 한 지점에서 생성되는가를 살펴보았다. 그러면 어떻게 이 전위가 축색을 따라 이동하는가? 이동은 도미노 효과에 의해 일어난다. 축색이 시작되는 지점에서 활동 전위가 생성되면 활동 전위는 짧은 거리만 이동하고 그 지점에서 활동 전위가 다시 생성된다. 이 활동 전위 역시 짧은 거리를 이동하여 그 지점에서 다른 활동 전위를 생성하게 하며 이 과정을 통하여 활동 전위가 축색의 길이를 따라 전달된다. 이 단순한 기제로 말미암아 활동 전위가 축색의 전체 길이를 이동하게 되고 또 얼마나 긴 축색을 이동하는가와 무관하게 활동 전위의 강도가 유지된다.

수초가 활동 전위의 전달을 용이하게 한다. 수초는 축색 전체를 감싸고 있지 않고 대신 마치 소시지의 한 토막처럼 축색 군데군데에 수초가 없는 부분이 있다. 수초가 없는 축색 부위를 발견한 프랑스 병리학자인 루이스 안토니 랑비에(Louis Antonine Ranvier)의 이름을 붙여 랑비에 결절(nodes of Ranvier)이라고 부른다(그림 3.6 참조). 수초화된 축색을 따라 전류가 전달될 때

**불응기**  
활동 전위가 생성된 후 나타나는 것으로 이 시기 동안에는 새로운 활동 전위가 생성되지 못한다.





◀ **그림 3.6 수초와 랑비에 결절** 교세포에 의해 형성되는 수초는 뉴런의 축삭을 감싸며, 이로 인하여 활동 전위가 축삭을 따라 전달될 때 더 빨리 전달된다. 수초 사이사이에 수초가 없는 부분이 있는데, 이를 랑비에 결절이라고 부른다. 전기 충동이 한 결절에서 다음 결절로 점프하기 때문에 축삭을 따라 정보 전달이 빠르게 일어난다.

전류는 전체 축삭을 따라 전달되는 것이 아니라 한 랑비에 결절에서 다른 결절로 점프를 한다 (Poliak & Peles, 2003). 이러한 점프를 도약 전도(saltatory conduction)라고 하며, 이는 축삭을 따라 정보가 전도되는 것을 돕는다.

**화학적 신호 : 뉴런들 사이의 시냅스 전달**

아마 여러분은 활동 전위가 축삭의 끝에 도달하면 그곳에서 멈출 것이라고 여길 것이다. 어쨌든 뉴런들 사이의 시냅스 공간은 한 뉴런의 축삭과 인접해 있는 다른 뉴런의 수상돌기가 실제로 서로 접하지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 활동 전위는 화학적 작용에 의존하여 작은 시냅스 공간을 건너게 된다.

? 뉴런은 어떻게 다른 뉴런과 의사소통하는가?

축삭은 대개 **종말 단추**(terminal button)에서 끝나는데, 종말 단추는 축삭으로부터 확장되어 나온 혹처럼 생긴 구조이다. 종말 단추는 **신경전달물질**(neurotransmitter)을 담고 있는 작은 소낭 혹은 백으로 채워져 있다. 신경전달물질은 시냅스를 건너 정보를 수용하는 뉴런의 수상돌기로 정보를 전달하는 화학물질이다. 정보를 수용하는 뉴런의 수상돌기는 세포막의 일부인 **수용기**(receptor)를 가지고 있는데, 수용기는 신경전달물질을 수용하고 새로운 전기적 신호의 생성을 시작하게 하거나 막는 역할을 한다.

$K^+$ 과  $Na^+$ 이 세포막을 건너면 정보를 보내는 뉴런, 즉 시냅스전 뉴런(presynaptic neuron)은 안정 전위에서 활동 전위로 바뀌게 된다. 활동 전위는 축삭을 따라 전달되어 종말 단추에 도달하게 되며 그곳에서 소낭 속에 있는 신경전달물질이 시냅스에 분비되도록 자극한다. 이 신경전달물질들은 시냅스에 떠다니며 인근에 있는 정보를 수용하는 뉴런, 즉 시냅스후 뉴런(postsynaptic neuron)의 수상돌기에 있는 수용기와 접촉하게 된다. 이후 시냅스후 뉴런에 새로운 활동 전위가 생성되고 활동 전위가 축삭을 따라 다음 시냅스와 다른 뉴런에 전달되는 과정이 지속된다. 이 전기화학적 작용을 시냅스 전달(synaptic transmission)이라고 부르며(그림 3.7 참조), 이 작용은 뉴런들이 서로 소통하는 것을 가능하게 하고, 나아가서는 여러분의 생각, 정서와 행동의 근거가 된다.

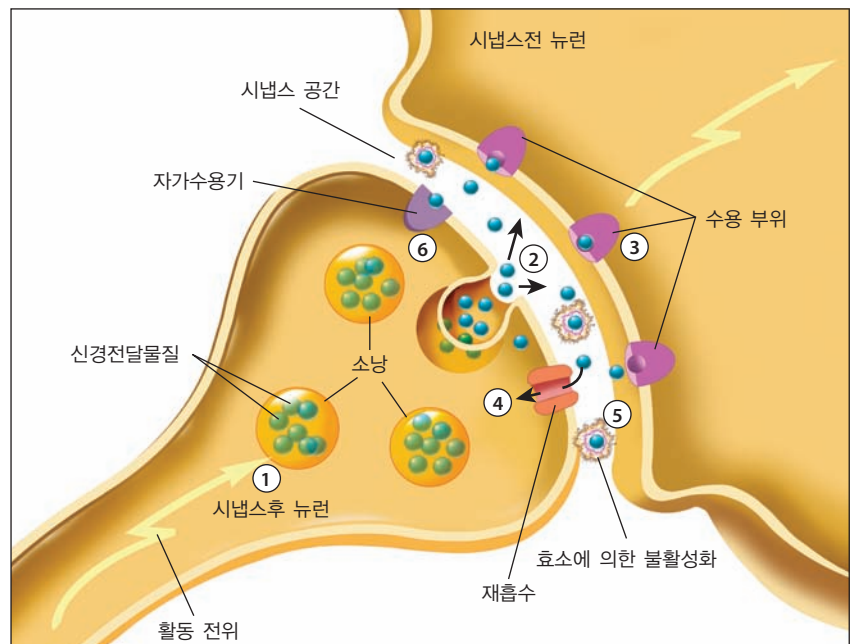
여러분이 한 뉴런에서 다른 뉴런으로 정보가 어떻게 전달되는가를 이해했을 것으로 여겨지지만 이 과정을 좀 더 상세하게 살펴보기로 하자. 한 뉴런이

**종말 단추**  
축삭으로부터 확장되어 나온 혹처럼 생긴 구조

**신경전달물질**  
시냅스를 건너 정보를 수용 뉴런의 수상돌기로 전달하는 화학물질

**수용기**  
신경전달물질을 수용하고 새로운 전기적 신호를 생성하게 하거나 생성하지 못하게 하는 세포막의 일부

▼ **그림 3.7 시냅스 전달** (1) 활동 전위가 축삭을 따라 이동하여 (2) 소낭에서 신경전달물질이 분비되도록 자극한다. (3) 신경전달물질이 시냅스에 분비되며, 시냅스를 건너 시냅스후 뉴런의 수상돌기에 있는 수용 부위와 결합하면 새로운 활동 전위가 생성하게 된다. 신경전달물질은 (4) 시냅스전 뉴런으로 재흡수되거나 (5) 시냅스에서 효소에 의해 분해되거나 (6) 시냅스전 뉴런의 자가수용기와 결합함으로써 시냅스에서 제거된다.



**아세틸콜린**

수의적 운동의 통제를 포함한 다양한 기능에 관여하는 신경전달물질

**도파민**

운동, 동기, 즐거움과 정서적 각성을 통제하는 신경전달물질

**글루타메이트**

뇌의 주요 흥분성 신경전달물질

**GABA(감마-아미노뷰티릭산)**

뇌의 주요 억제성 신경전달물질

**노르에피네프린**

특히 경계 상태와 환경 내에 있는 위협의 인식에 관여하는 신경전달물질

**세로토닌**

수면과 깡, 섭식과 공격적 행동의 통제에 관여하는 신경전달물질

**엔도르핀**

뇌의 통증 경로와 정서 센터에 영향을 미치는 화학물질

**효능제**

신경전달물질의 효능을 증가시키는 약물

**길항제**

신경전달물질의 기능을 봉쇄하는 약물

다른 뉴런과 수천 개의 시냅스 연결을 한다는 것을 기억할 것이다. 그러면 한 뉴런의 수상돌기는 시냅스에 분비되는 여러 신경전달물질들 중 어느 것을 수용하고 어느 것을 수용하지 않아야 되는가를 어떻게 알 수 있는가? 이에 대한 한 가지 답은 뉴런들이 특정 유형의 신경전달물질을 사용하는 경로를 뇌에 형성하는 경향을 가지고 있다는 것이다. 즉, 한 신경전달물질은 뇌의 한 영역에 많이 존재하는 반면 다른 신경전달물질은 뇌의 다른 영역에 많이 존재한다는 것이다.

두 번째 답은 신경전달물질과 수용기가 열쇠와 자물쇠처럼 작용한다는 것이다. 특정 열쇠가 단지 특정 자물쇠에만 맞듯이 일부 신경전달물질이 수상돌기의 특정 수용기하고만 결합한다. 신경전달물질의 분자 구조가 수용기의 분자 구조와 ‘꼭 맞아야’만 한다.

두 번째 가능한 질문은 화학적 메시지가 시냅스 후 뉴런에 전달된 후 시냅스에 남아 있는 신경전달물질에 어떤 일이 일어나는가이다. 신경전달물질이 뉴런에 영향을 미치는 것을 막는 기제가 있어야만 하며, 만약 그렇지 못할 경우 신경전달물질은 끊임없이 신호를 보내게 된다. 신경전달물질은 세 가지 과정을 통하여 시냅스를 떠나게 된다(그림 3.7 참조). 첫째, 재흡수(reuptake)를 통하여 신경전달물질이 시냅스 전 뉴런의 축삭에 있는 종말 단추로 재흡수된다. 둘째, 신경전달물질이 효소 불활성화(enzyme deactivation)라고 불리는 과정을 통하여 시냅스에 있는 효소에 의해 파괴될 수 있다. 특정 효소는 특정 신경전달물질을 분해한다. 마지막으로 신경전달물질이 시냅스 전 뉴런의 자가수용기(autoreceptors)라고 불리는 수용기와 결합할 수 있다. 자가수용기는 얼마나 많은 양의 신경전달물질이 시냅스에 분비되었는가를 탐지하여 만약 지나치게 많은 양이 분비될 경우 신경전달물질의 분비를 멈추는 신호를 뉴런에게 보낸다.

### 신경전달물질의 유형과 기능

서로 다른 신경전달물질이 열쇠와 자물쇠처럼 서로 다른 유형의 수용기들을 활성화한다면 여러분은 얼마나 많은 유형의 신경전달물질이 뇌에 존재하는가에 관해 궁금할 것이다. 오늘날 우리는 60여 종의 화학물질들이 뇌와 신체에서 정보 전달의 역할을 한다는 것과 이 화학물질들이 생각, 감정과 행동에 서로 다른 영향을 미치는 것으로 알고 있다. 여기서 신경전달물질들을 살펴해보지만 이 중 일부 신경전달물질에 관해서는 뒷장에서 다시 살펴보게 될 것이다.

- **아세틸콜린(acetylcholine, Ach)**은 수의적 운동 통제를 포함하는 다양한 기능에 관여하는 신경전달물질이다. 아세틸콜린은 뇌의 뉴런들과 축삭이 근육 혹은 심장과 같은 신체 기관과 연결되는 시냅스에서 발견된다. 아세틸콜린은 근육을 활성화시켜 운동이 일어나게 할 뿐만 아니라 주의, 학습, 수면, 꿈과 기억 등을 통제하는 데에도 관여한다(Gais & Born, 2004; Hasselmo, 2006; Wrenn et al., 2006; Wrenn et al., 2006). 심각한 기억 장애를 동반하는 알츠하이머 병(Salmon & Bondi, 2009)은 아세틸콜린을 생산하는 신경원의 상실과 관련되어 있다.
- **도파민(dopamine)**은 움직임, 동기, 쾌락과 정서적 각성에 관여하는 신경전달물질이다. 도파민이 쾌락 추구 혹은 보상과 관련된 행동 등과 같은 기본적인 동기 행동에 중요한 역할을 하기 때문에 도파민은 약물 중독에 중요한 역할을 한다(Baler & Volkow, 2006). 높은 도파민 수준은 조현병과 관련되어 있고(Winterer & Weinberger, 2004), 낮은 수준은 파킨슨병과 관련되어 있다.
- **글루타메이트(glutamate)**는 뇌의 주요 흥분성 신경전달물질인데, 이는 글루타메이트가 뉴런들 사이의 정보 전달을 증대시킨다는 것을 의미한다. 이와 상반되게 **GABA(gamma-aminobutyric acid)**는 뇌의 대표적인 억제성 신경전달물질로서 뉴런의 발화를 멈추게 하는 경

향을 가지고 있다. 너무 많은 글루타메이트 혹은 지나치게 적은 GABA는 뉴런을 지나치게 활성화시켜 발작을 초래할 수 있다.

- 두 가지 서로 관련되는 신경전달물질, 즉 **노르에피네프린(norepinephrine)**과 **세로토닌(serotonin)**은 기분과 각성에 영향을 미친다. 노르에피네프린은 특히 경계 상태 혹은 환경 내 위험에 대한 인식을 높이는 데에 관여한다(Ressler & Nemeroff, 1999). 세로토닌은 수면과 각성, 섭식 행동과 공격 행동에 관여한다(Dayan & Huys, 2009; Kroeze & Roth, 1998). 두 신경전달물질 모두 기분과 각성에 영향을 미치기 때문에 각 신경전달물질의 수준이 낮으면 기분 장애가 발병된다(Tamminga et al., 2002).
- **엔도르핀(endorphins)**은 뇌의 통증 경로와 정서 센터에 작용하는 화학 물질이다(Keefe et al., 2001). ‘엔도르핀’이라는 용어는 내인성 모르핀

**?** 어떻게 신경전달물질이 러너스 하이 느낌을 생산하는가?

(*endogenous morphine*)의 약어이며 이 약어는 매우 적절한 묘사이다. 모르핀은 진정과 쾌락 효과를 가지는 합성약물이고 엔도르핀은 이와 유사한 속성, 즉 통증을 완화시키고 기분을 돋우는 효과를 가지는 뇌에서 생성되는 물질이다. 많은 운동선수들이 신체의 극한 상황에서 경험하는 ‘황홀감 혹은 러너스 하이(runner’s high)’는 뇌에서 분비되는 엔도르핀의 분비와 관련되어 있다(Boecker et al., 2008).

신경전달물질들 각각은 서로 다른 방식으로 사고, 감정과 행동에 영향을 미치므로 정상적인 기능은 각 신경전달물질의 정교한 균형을 필요로 한다. 경미한 불균형, 즉 한 신경전달물질이 너무 많거나 혹은 충분하지 않은 것조차 행동에 막대한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 불균형이 때로는 자연적으로 발생한다. 예를 들어 뇌가 충분한 세로토닌을 생산하지 않으면 우울하거나 불안울을 경험하게 된다. 또 다른 경우에는 개인이 적극적으로 신경전달물질의 불균형을 추구한다. 흡연, 음주, 합법적 혹은 불법 약물 복용 등이 뇌의 신경전달물질의 균형을 깰 수 있다. 예를 들어 LSD 약물은 구조적으로 세로토닌과 유사하기 때문에 LSD는 뇌에서 세로토닌 수용기와 매우 쉽게 결합하여 세로토닌이 사고, 감정과 행동에 미치는 효과와 유사한 효과를 낸다. 다음 절에서 우리는 어떻게 일부 약물들이 이러한 방식으로 수용기를 속이는지를 살펴볼 것이다.

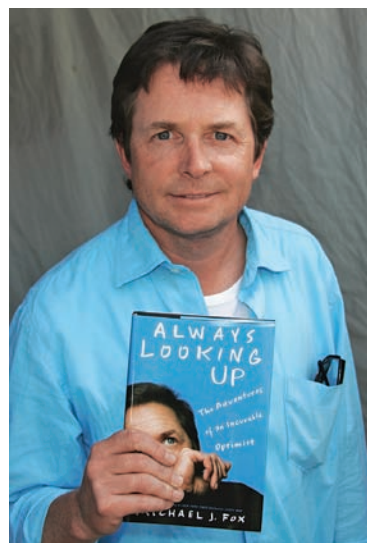
### 어떻게 약물이 신경전달물질을 모방하는가

신경계에 영향을 미치는 많은 약물들은 신경전달물질의 합성 혹은 기능을 증진시키거나, 방해하거나 혹은 모방함을 통하여 작용한다(Cooper, Bloom, & Roth, 2003; Sarter, 2006). **효능제(agonists)**는 신경전달물질의 작용을 증진시키는 약물이다. 반면 **길항제(antagonists)**는 신경전달물질의 기능을 봉쇄하는 약물이다. 일부 약물은 신경전달물질의 합성 혹은 분비 단계를 변화시키는 한편, 일부 약물들은 신경전달물질과 유사한 화학 구조를 가지고 있어 약물이 뉴런의 수용기와 결합할 수 있다. 만약 약물이 수용기와 결합하여 신경전달물질을 활성화시키면 그 약물은 효능제인 반면 만약 신경전달물질의 작용을 봉쇄하면 그 약물은 길항제이다(그림 3.8 참조).



AP PHOTO/CHRIS STEWART

독일의 산드라 월렌호스트는 2009년 하와이에서 개최된 세계 철인 대회 한 부분인 112마일 자전거 경주를 시작하였다. 월렌호스트와 같은 운동가들이 극심한 스포츠를 할 때 주관적인 황홀함을 경험하는데, 이는 뇌의 정서 및 통증 센터에 작용하여 기분을 상승시키고 통증을 완화시키는 화학적 메신저인 엔도르핀의 분비 때문이다.



DAVID LIVINGSTON/GETTY IMAGES

마이클 제이 폭스는 그의 자서전에서 파킨슨병과 싸우는 과정을 기술하였다. 폭스의 모습은 이 질환에 대한 대중적 인식을 증가시키고 치료법을 찾고자 하는 노력을 고무시켰다.