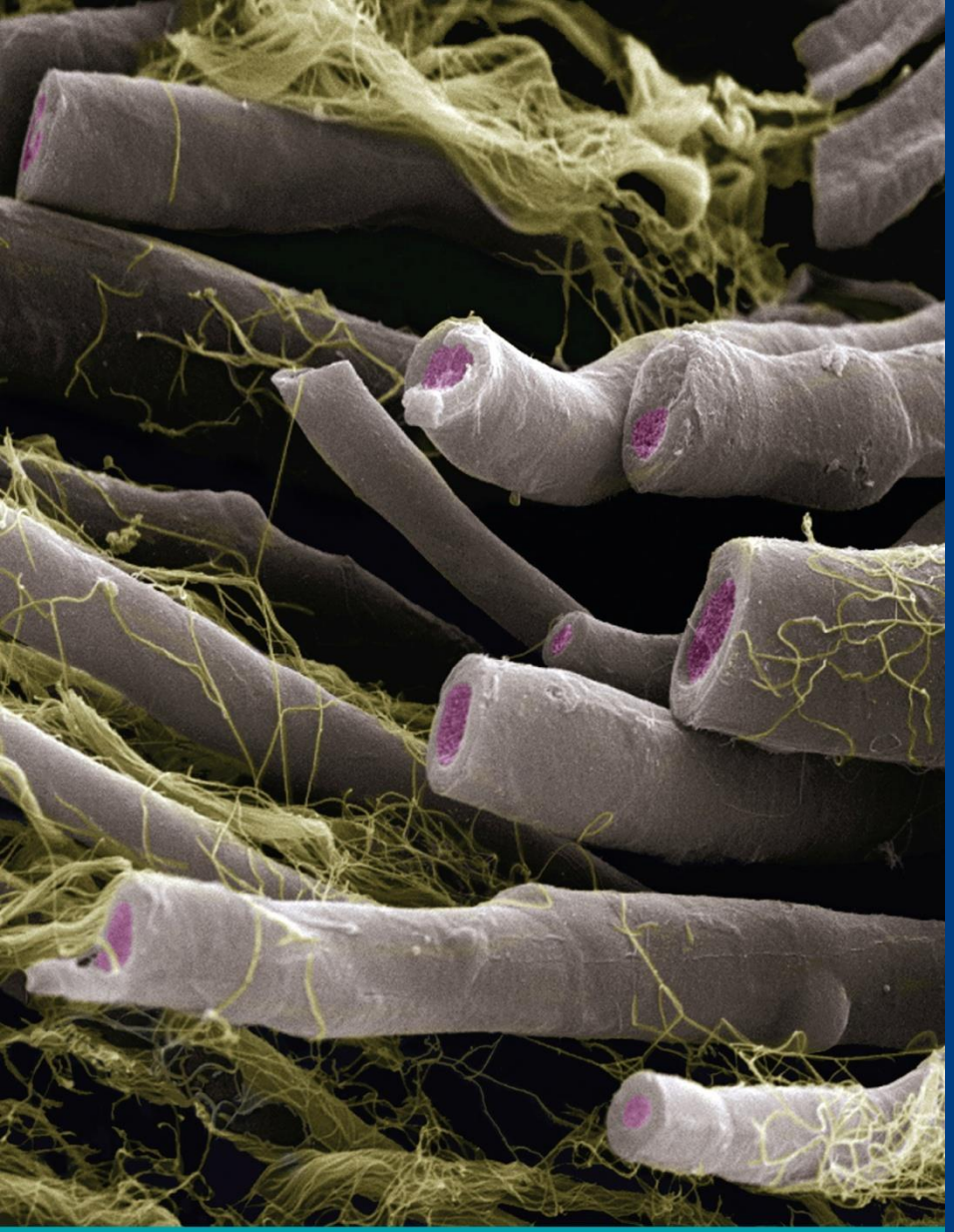


색을 입힌 축삭의 주사전자현미경 사진

7

신경세포와 전기신호표시

Copyright © 2012 Biosciencepublishing, Inc

개요

I. 신경계의 개요
II. **안정막전위의 생성**
III. **막전위 변화를 통한 전기신호**표시
IV. 신경 안정성의 유지

I. 신경계의 개요

- 중추신경계 (CNS)
  - 뇌, 척수
- 말초신경계 (PNS)
  - 들신경계통(Afferent information)
  - 날신경계통(Efferent information)

신경계의 개요

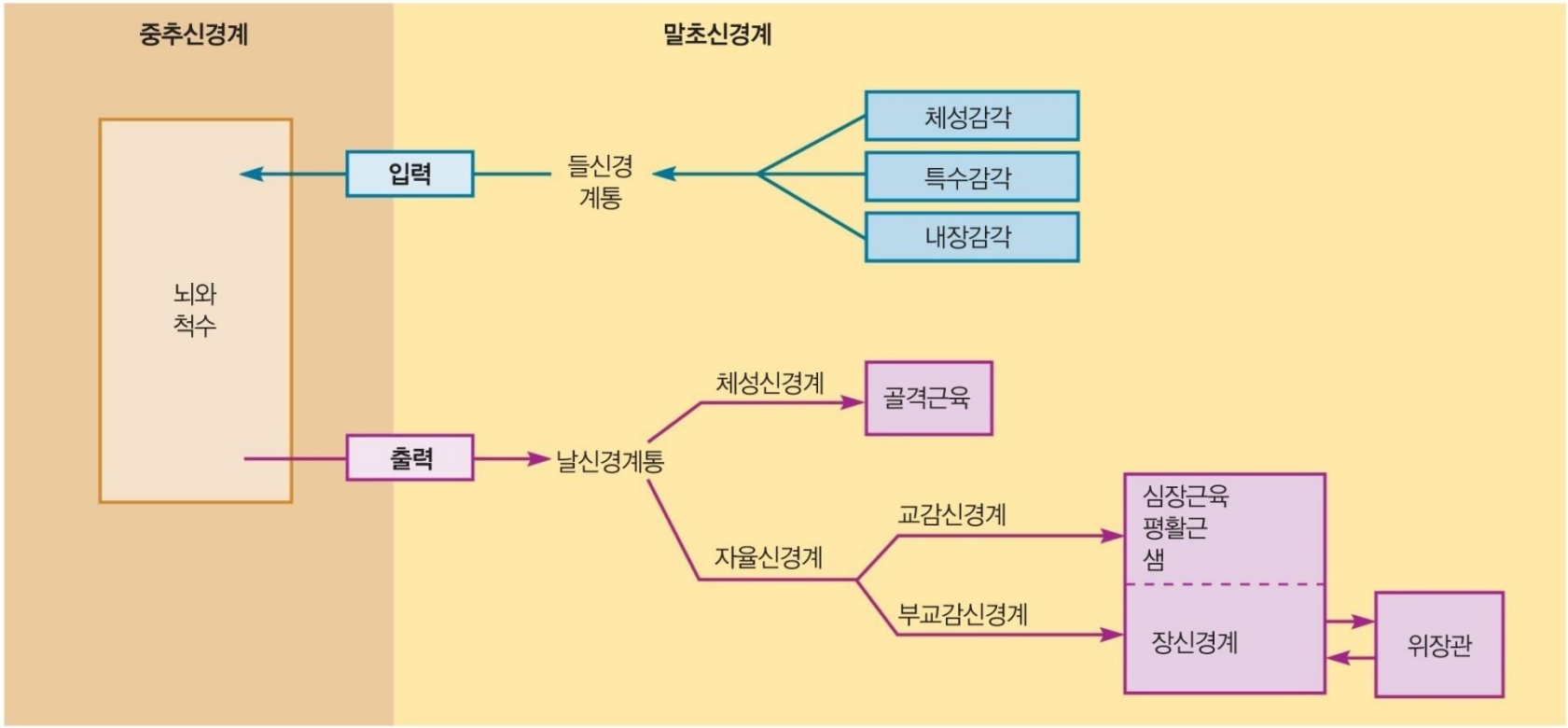


그림 7.1 신경계의 구성. 신경계는 중추신경계와 말초신경계 등 두 개의 주요 부분으로 구성된다. 말초신경계는 기능적으로 들신경계통과 날신경계통으로 구분된다. 화살표는 정보가 지나가는 방향을 나타낸다.

II. 신경계의 세포

- 뉴런(Neuron)
  - 흥분성 세포
- 신경아교세포(Glial cell)
  - 지지세포

뉴런의 구성요소

- 세포체(Soma)
  - 핵과 대부분의 소기관을 포함
- 가지돌기(Dendrite)
  - 정보가 들어오는 것을 받음
- 축삭(Axon)
  - 활동전압이라는 전기신호를 보낸다
- 축삭둔덕(Axon hillock)
  - 축삭이 시작하는 부위
  - 활동전위 개시가 일어난다
- 축삭종말(Axon terminal)
  - 신경전달물질을 방출

뉴런의 구성요소

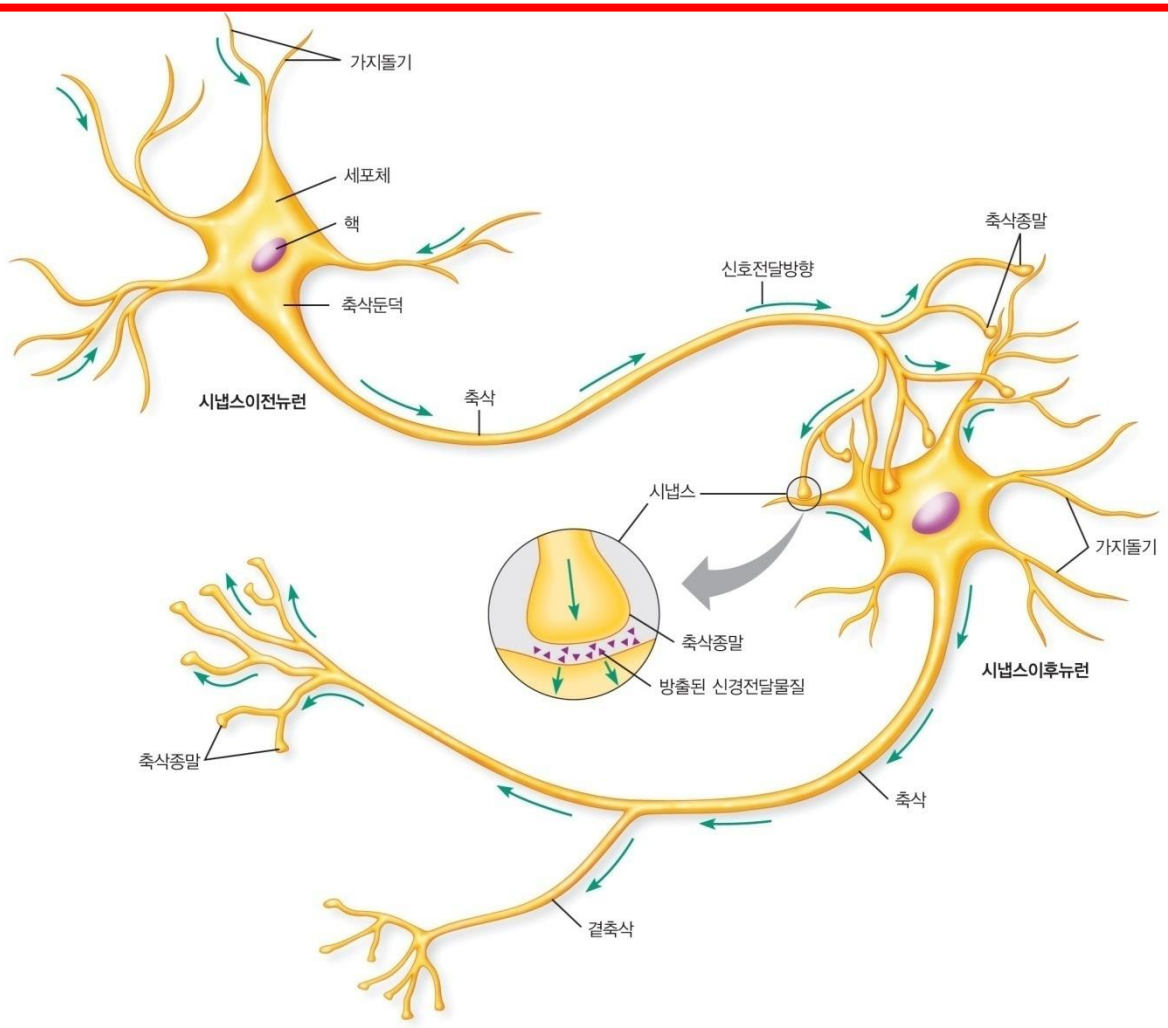


그림 7.2 **전형적인 뉴런의 구조. 두 개의 뉴런이 있다.** 위의 뉴런은 아래의 뉴런과 의사소통을 하고 있는데, 정보의 흐름은 화살표로 표시되어 있다. 뉴런의 주요 부분들은 세포체, 다른 뉴런으로부터 정보를 받는 가지돌기들, 전기자극 전달을 전문으로 하는 한 개의 축삭을 포함한다. 한 뉴런의 축삭종말은 다른 뉴런과 의사소통을 하는 화학적 전령(신경전달물질)을 방출한다.

시냅스

두 뉴런이나 뉴런과 효과기 사이의 소통부위

이온채널: 뉴런

- 누출통로(Leak channels)
  - 항상 열려있음
- 리간드-작동 통로(Ligand-gated channels)
  - 리간드에 결합하여 열리거나 닫힘
- 전압-작동 통로(Voltage-gated channels)
  - 막전위의 변화에 따라 열리거나 닫힘

누출통로

- 뉴런의 원형질막 전체에 존재
- 안정막 전위를 유지하게 함

리간드-작동 통로

- 가지돌기와 세포체에 존재
- 시냅스에서 전달물질을 받아 전위 발생

전압-작동 통로

- 나트륨통로와 칼륨 통로
  - 뉴런 전체에 존재하나 축삭에 더 많이 분포 (특히 축삭둔덕)
  - 활동전압 유발
- 칼슘채널
  - 축삭말단에 존재
  - 신경전달물질 방출

뉴런의 구조적 분류

- 두극뉴런(Bipolar)
- 거짓홑극뉴런(Pseudo-unipolar)
- 다극뉴런(Multipolar)

뉴런의 구조적 분류

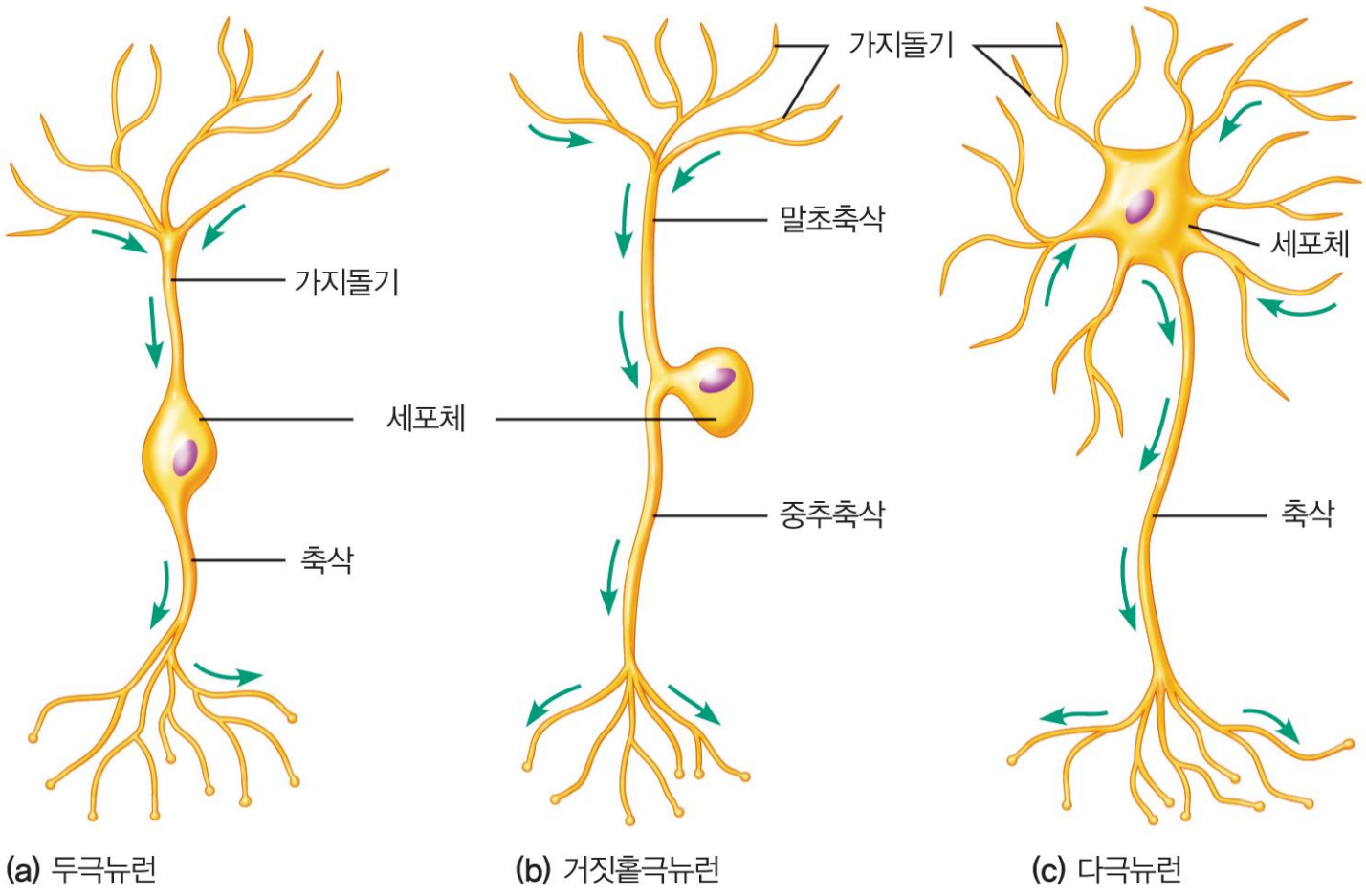


그림 7.3 뉴런의 구조적 분류. (a) 두극뉴런. 시각과 후각에 연관된 들뉴런들은 두극뉴런이다. (b) 거짓홑극뉴런. 들뉴런들의 대부분은 거짓홑극뉴런이다. (c) 다극뉴런. 대부분의 뉴런들은 다극뉴런이다.

뉴런의 구조적 분류

- **들뉴런(Afferent neurons)**
- **날뉴런(Efferent neurons)**
- 사이뉴런(Interneurons)

뉴런의 구조적 분류

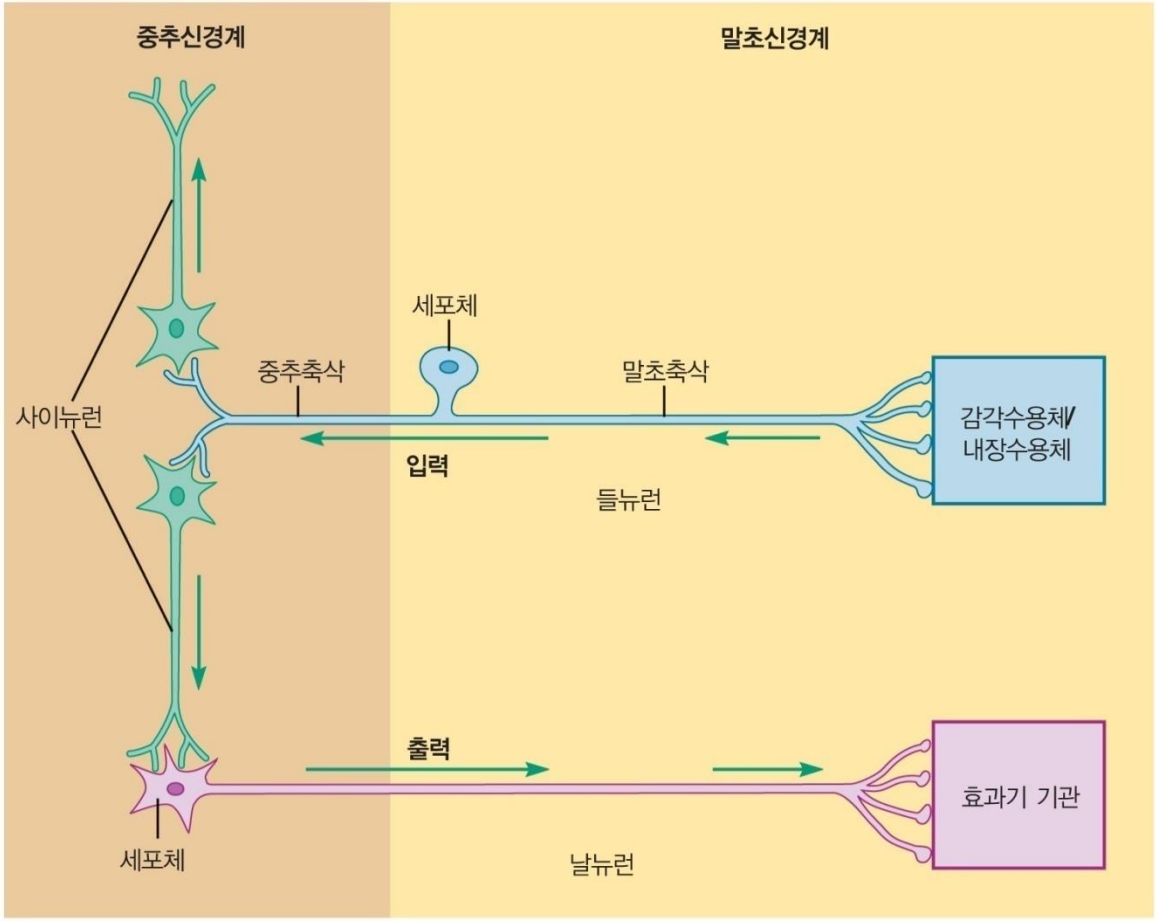


그림 7.4 뉴런의 기능적 분류. 들뉴런은 감각수용체나 내장수용체와 함께 말초에서 시작한다. 들뉴런의 말초축삭은 말초신경계의 부분이지만, 축삭종말은 중추신경계에 위치하여 중추신경계에서 다른 뉴런과 의사소통을 한다. 날뉴런은 중추신경계에서 시작하여 중추신경계에서 세포체와 가지돌기들이 다른 뉴런과 의사소통을 하지만, 축삭은 말초신경계의 부분으로 효과기 기관의 시냅스에서 끝난다. 사이뉴런들은 중추신경계에만 위치해 있고, 들뉴런, 날뉴런, 또는 다른 사이뉴런과 의사소통을 할 수 있다.

뉴런의 구조적 분류

- 핵(Nuclei)
- 신경경로(Pathways and tracts)
- 접합부(Commissures)
- 신경절(Ganglia)
- 신경(Nerves)

아교세포(Glial Cells)

- 별아교세포(Astrocytes)
- 뇌실막세포(Ependymal cells)
- 미세아교세포(Microglia)
- 희소돌기아교세포(Oligodendrocytes)
- 슈반세포(Schwann cells)

말이집 형성세포(Myelin-Forming Cells)

- 희소돌기아교세포
  - 중추신경계에 존재
  - 하나의 희소돌기아교세포는
    - 여러 개의 수초를 형성
    - 여러 개의 축삭에 말이집 분절을 형성

말이집 형성세포

- 슈반세포
  - 말초신경계에 존재
  - 하나의 슈반세포는
    - 하나의 수초를 형성
    - 한 개의 축삭에만 말이집 분절을 형성

수초

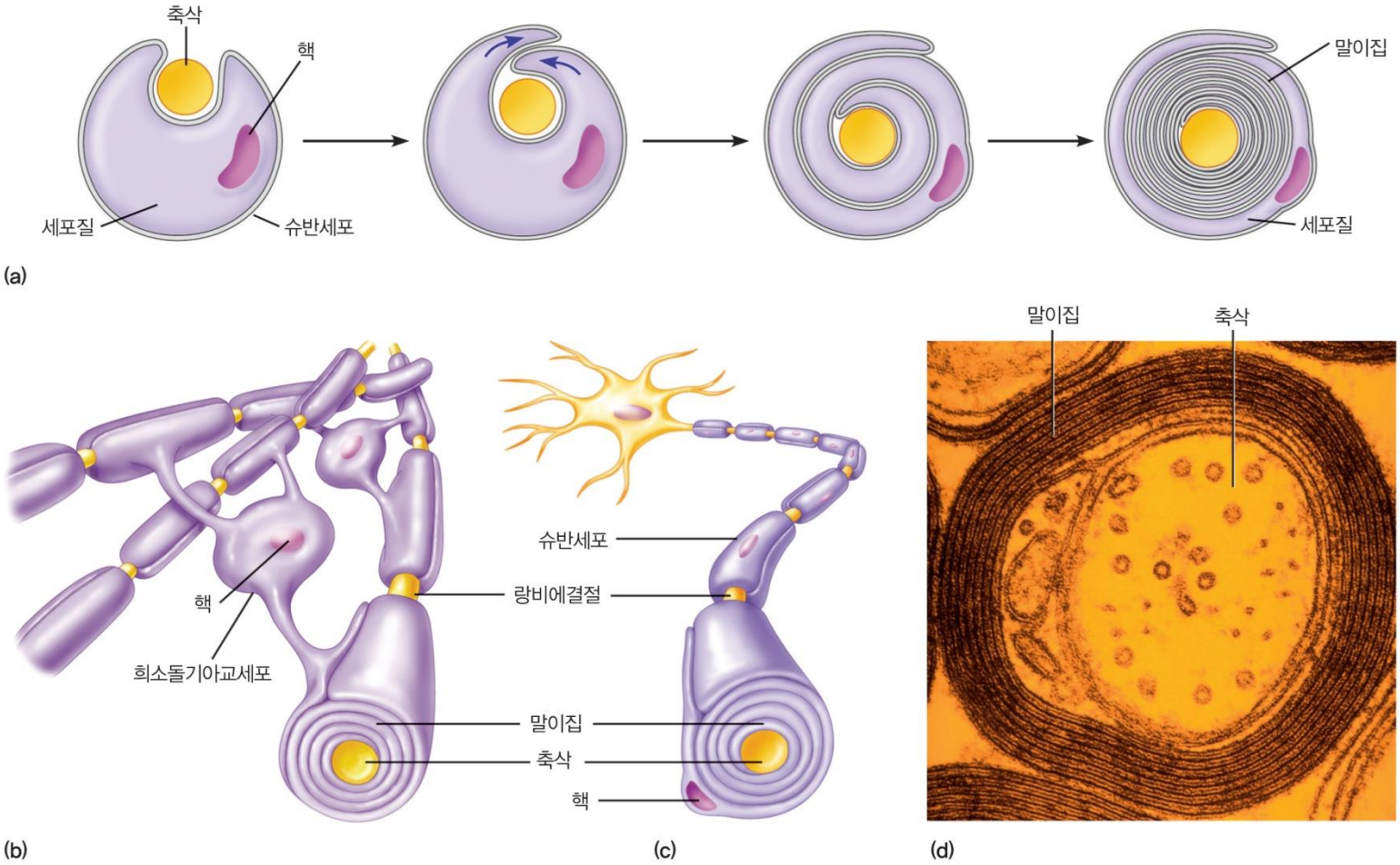


그림 7.5 말이집의 형성과 기원. (a) 슈반세포에 의한 말이집의 형성. 말이집은 슈반세포나 희소돌기아교세포의 원형질막이 동심원 모양의 여러 층들을 이루어 된 것으로, 축삭 둘레의 절연층이 된다. (b) 중추신경계에서 희소돌기아교세포에 의하여 형성된 말이집들의 배열. 희소돌기아교세포 한 개가 세포질 가지들을 내어 여러 개의 축삭 둘레에 말이집을 형성한다. 말이집들의 틈인 랑비에결절을 주목하라. (c) 말초신경계에서 슈반세포에 의하여 형성된 말이집들의 배열. 슈반세포 한 개가 한 개의 축삭에만 말이집을 만든다. (d) 말이집 축삭 횡단면의 전자현미경 사진.

III. 안정막 전위의 생성

- 평형전위를 결정 하는 것
  - 칼륨이온
  - 나트륨이온
- 뉴런의 안정막 전위

안정막 전위의 생성

- 약 -70 mV
- 세포내부는 전기적으로 음성, 세포외부는 전기적으로 양성이다

평형전위

평형전위를 결정하는 것
칼륨이온과 나트륨이온

- 휴지막 전위 결정에 두 가지 요소가 중요
  - 이온의 농도차
  - 두 이온에 대한 막투과성
    - 이온 채널

Copyright © 2011 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

전위

표 7.1 생물학적 시스템에서의 전위의 종류

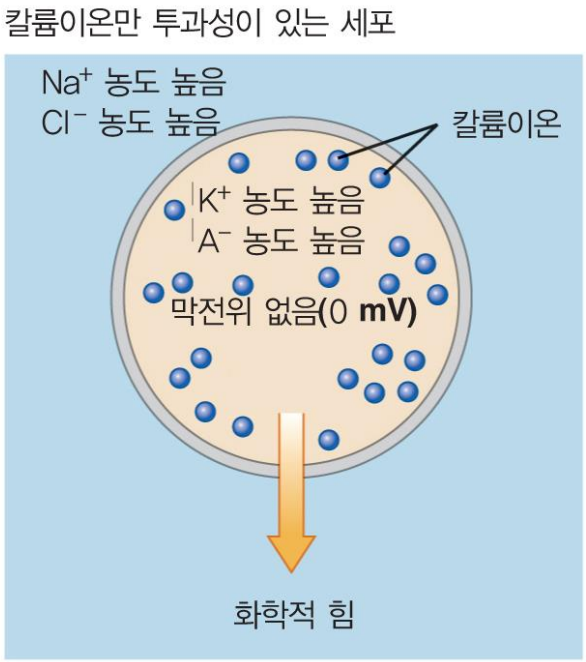
전위	정의
전위차 = E	두 지점 간의 전위의 차이
막전위 = V_m	원형질막을 가로지르는 전위의 차이; 항상 세포 외부의 전위에 대한 세포 내부의 전위 식으로 주어진다.
안정막전위 V_m	세포가 신호를 받지도 보내지도 않는 안정상태에 있을 때 원형질막을 가로지르는 전위의 차이
계단전위	이온통로들을 열거나 닫는 어떤 종류의 자극에 의하여 생기는 막전위의 작은 변화; 계단전위의 크기는 자극의 세기에 비례한다.
시냅스전위	신경전달물질이 수용체에 결합한 것에 반응하여 시냅스이후세포에서 생산된 계단전위
수용체전위	자극이 감각수용체에 작용한 것에 반응하여 생성된 계단전위
활동전위	흥분성 세포의 원형질막이 문턱까지 탈분극한 것에 의하여 생기는 크고 빠른 막전위의 변화
평형전위	이온이 원형질막을 가로질러 이동하게 하는 화학적 힘을 상쇄시킴으로써 이온을 평형상태에 있게 하는 막전위

Na^+/K^+ 펌프

- 안정막 전위의 **20%는 Na/K-ATP효소의** 직접적인 영향으로 생김
  - 전기발생: 3 Na^+ 내보냄, 2 K^+ 들어옴
  - 실제 +1 만큼 나감
- 안정막 전위의 80% Na/K-ATP에 의해 간접적으로 생김
  - 농도차이를 만들어냄
    - Na: 세포 밖이 높고, 안쪽이 낮음
    - K: 세포 밖이 낮고, 안쪽이 높음

칼륨의 평형전위

- K^+ 은 화학적인 힘에 의해 세포 밖으로 확산됨

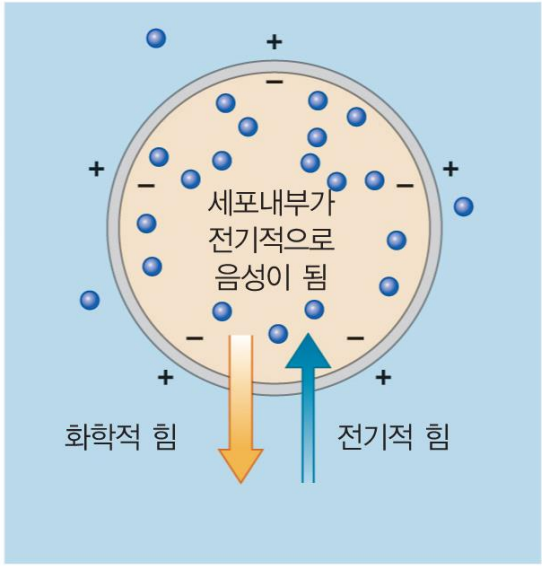


(a)

그림 7.6 칼륨만 투과성이 있는 세포의 막전위. 칼륨이온(K^+)과 유기 음이온(A^-)은 세포 내의 농도가 더 높다. 나트륨이온(Na^+)과 염소이온(Cl^-)은 세포 외의 농도가 더 높다. 화살표의 넓이는 이온이 화살표 방향으로 이동하는 크기를 상대적으로 나타낸다. (a) 칼륨이온은 화학적 힘 때문에 세포 외로 나간다.

전기적인 힘

- K^+ 이 세포밖으로 나가면 세포내부는 더욱 음전하를 띰
- 막전위에 의한 전기적인 힘이 음전하에 대한 인력으로 K^+ 을 다시 세포내로 끌어당김



(b)

그림 7.6 칼륨만 투과성이 있는 세포의 막전위. 칼륨이온(K^+)과 유기 음이온(A^-)은 세포 내의 농도가 더 높다. 나트륨이온(Na^+)과 염소이온(Cl^-)은 세포 외의 농도가 더 높다. 화살표의 넓이는 이온이 화살표 방향으로 이동하는 크기를 상대적으로 나타낸다. **(b)** 약간의 칼륨 이온이 세포 외로 나가면서 양전하도 함께 가져가기 때문에 세포 내부는 외부에 비하여 음성이 된다. 이러한 전하 분포의 변화는 칼륨이온을 세포 내로 끌어당기는 전기적 힘을 만들어내는데, 이 힘은 화학적 힘과 반대로 작용한다.

칼륨의 평형전위

- 세포는 결국 평형에 도달
- 화학적인 힘과 전기적인힘은
  - 서로 반대 방향으로 작용
- 양적으로 동일

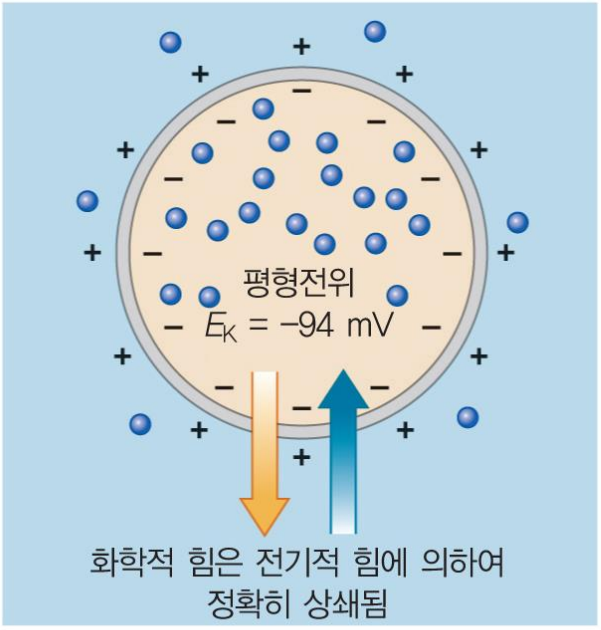


그림 7.6 칼륨만 투과성이 있는 세포의 막전위. 칼륨이온(K^+)과 유기 음이온(A^-)은 세포 내의 농도가 더 높다. 나트륨이온(Na^+)과 염소이온(Cl^-)은 세포 외의 농도가 더 높다. 화살표의 넓이는 이온이 화살표 방향으로 이동하는 크기를 상대적으로 나타낸다. **(c)** 언젠가는, 칼륨이온은 충분히 세포 외로 나가서, 전기적 힘은 화학적 힘에 의하여 칼륨이온이 세포 외로 더 나가는 것을 상쇄할 만큼 강해지고, 마침내 칼륨이온의 순이동은 없어진다. 이 막전위에서 칼륨은 평형에 있다. 그래서 이 막전위는 칼륨 평형전위이고, 뉴런에서 그 크기는 약 −94 mV이다.

(c)

평형

- 막을 통한 순이동이 없을 때 이온은 평형상태 이다
  - 화학적인 힘 = 음성의 전기적인 힘
  - 전기화학적 힘= 0

나트륨 평형전위

- 나트륨이온에 대해서만 투과성이 있다고 가정
- 이온의 분포
  - 세포 밖
    - 나트륨과 염소
  - 세포 내부
    - 칼륨과 음이온들

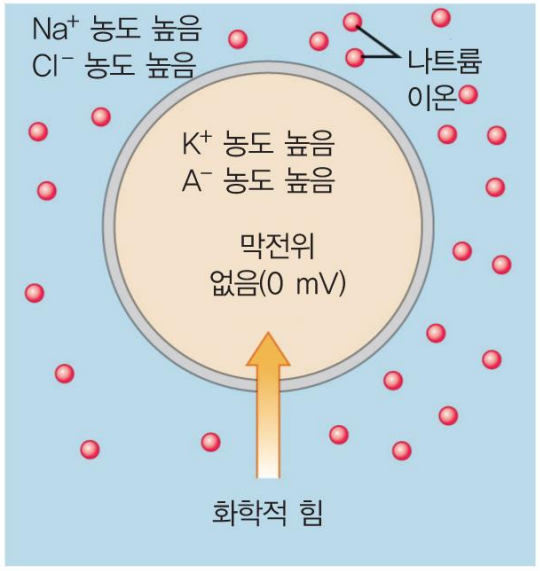
Na^+에 작용하는 힘

- 두 개의 힘이 Na^+ 에 작용
  - 화학적인 힘은 안쪽으로 작용
  - 전기적인 힘은 밖으로 작용
- 이온에 작용하는 순힘 =전기화학적 힘
  - 초기에 화학적인 힘이 더 크므로 세포내로 들어감
  - 그러나 막적위의 증가-> 전기적인 힘이 계속 증가

나트륨 평형전위

- Na^+ 의 화학적인 힘이 세포내로 작용
- Na^+ 이 세포내로 확산

나트륨이온에만 투과성이 있는 세포



(a)

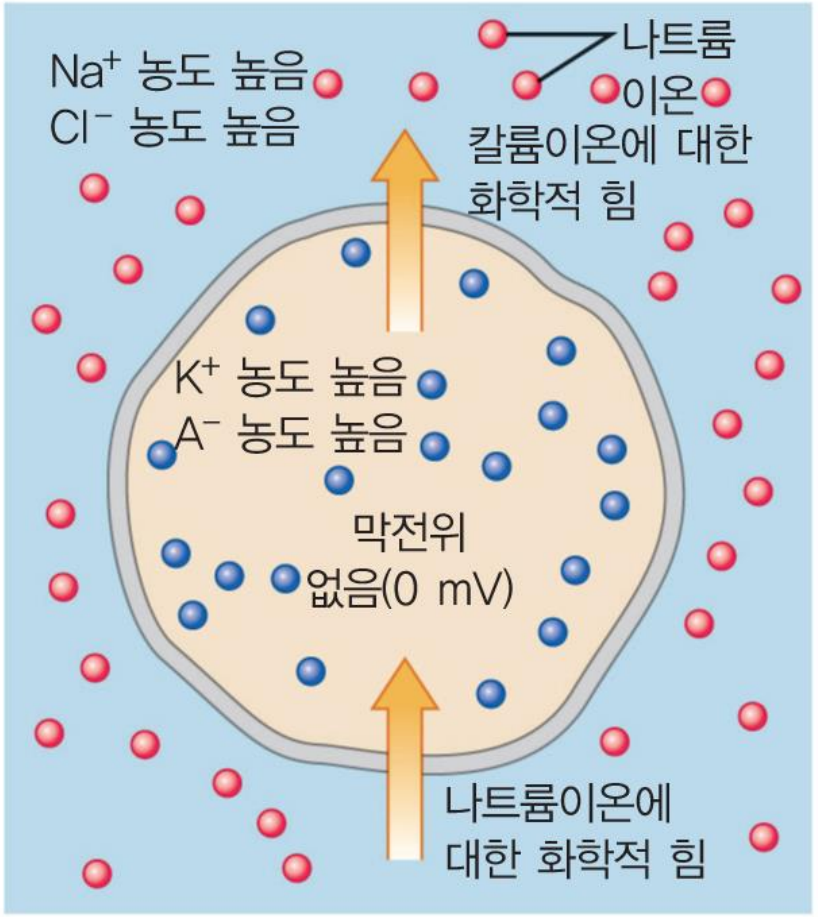
그림 7.7 나트륨만 투과성이 있는 세포의 막전위. 칼륨이온(K^+)과 유기 음이온(A^-)은 세포 내의 농도가 더 높다. 나트륨이온(Na^+)과 염소이온(Cl^-)은 세포 외의 농도가 더 높다. 화살표의 넓이는 이온이 화살표 방향으로 이동하는 크기를 상대적으로 나타낸다. **(a)** 나트륨이온은 화학적 힘 때문에 세포 내로 들어간다.

뉴런의 안정막 전위

- 뉴런은 일반적으로
- 나트륨과 칼륨에 투과성이 있다
  - 나트륨에 비해 칼륨의 투과성이 25배 더 크다
- 이온의 분포
  - 세포밖
    - 나트륨과 염소
  - 세포안
    - 칼륨과 음이온들

뉴런의 안정막 전위

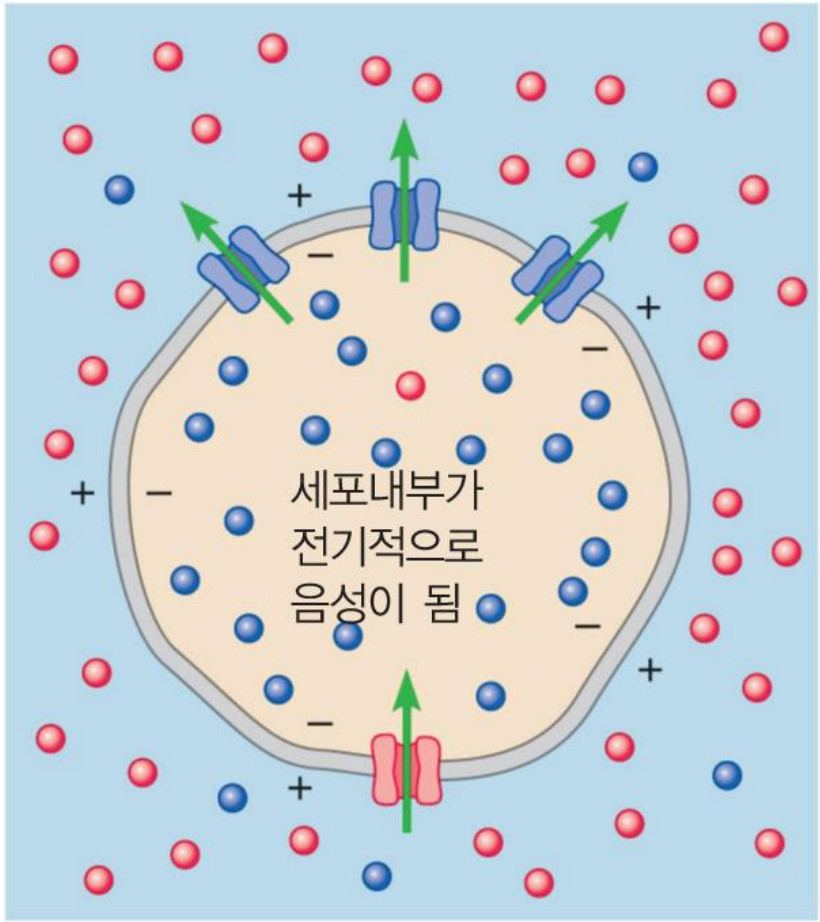
- 화학적인 힘
  - K^+ 나가고 Na^+는 들어감



(a)

뉴런의 안정막 전위

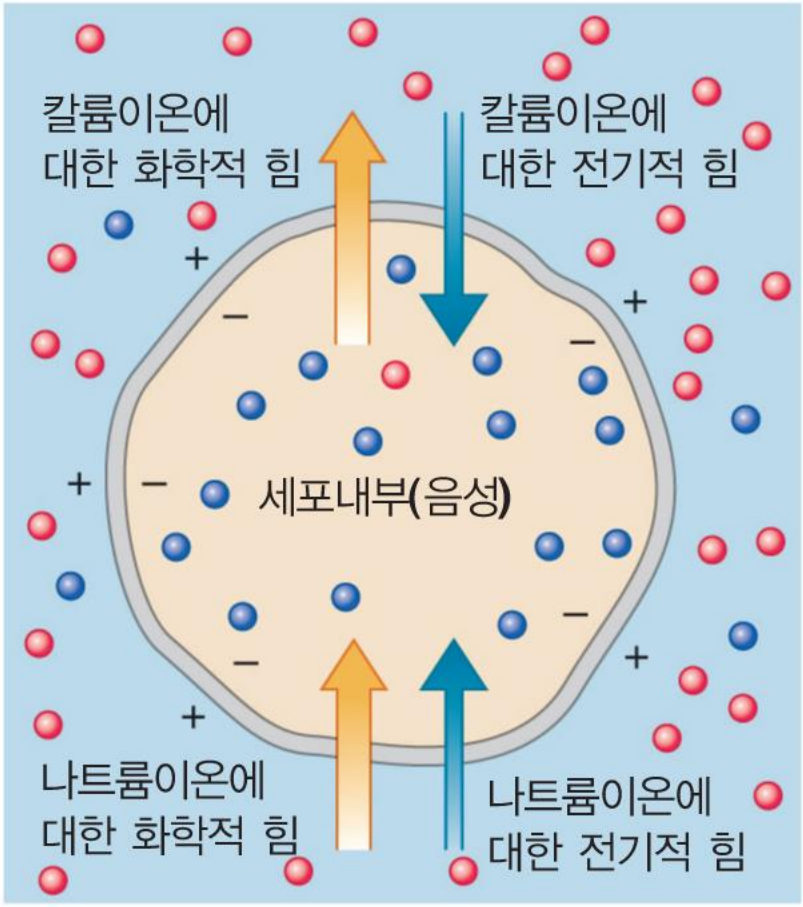
- 뉴런의 막은 K^+에 대해 더 투과성이 있다
- Na^+ 유입보다 더 많은 K^+ 가 유출됨
- ->세포내부는 전기적으로 음성



(b)

안정상태의 뉴런

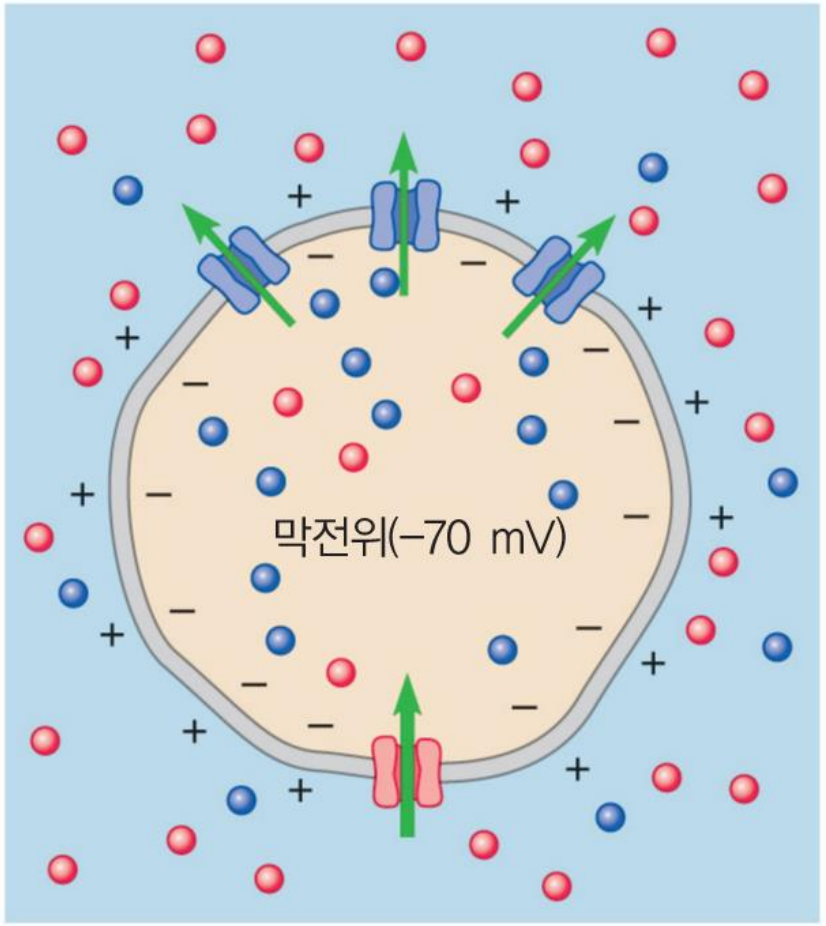
- 전기적인 힘이 작용
  - Na^+ 세포내로
  - K^+ 세포내로
- 전기적인 힘으로 인해
  - K^+ 유출은 느려지고 Na^+ 유입은 빨라짐



(c)

안정상태의 뉴런

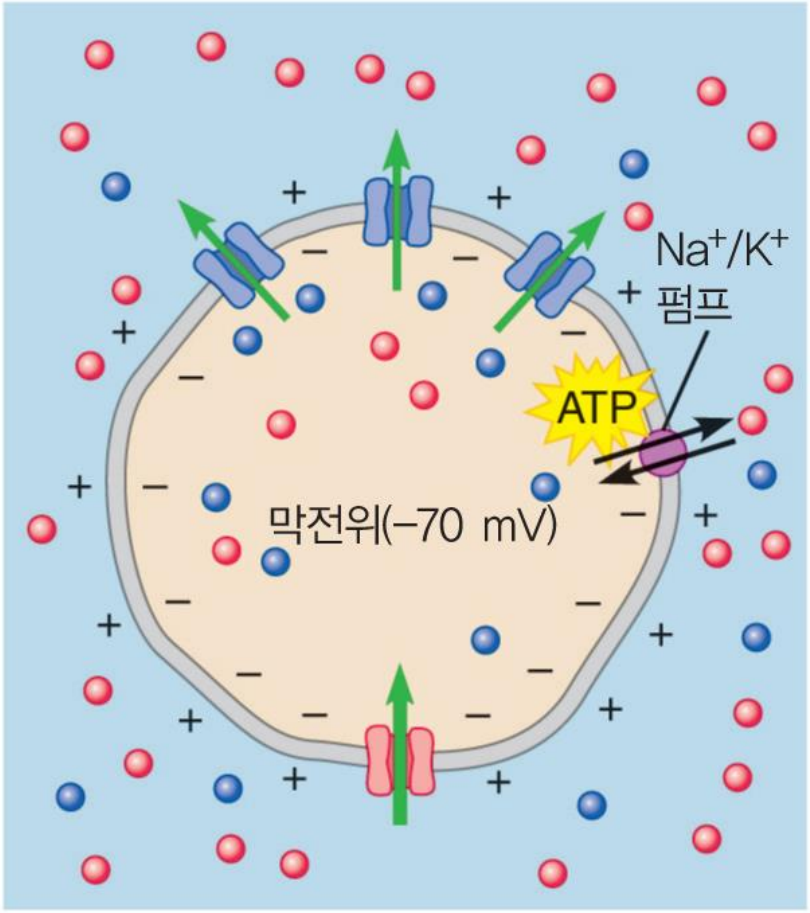
- 따라서 항정상태에 이름
  - Na^+ 유입은K^+ 유출과 균형을 이룸
- **안정막 전위 = –70mV**



(d)

안정상태의 뉴런

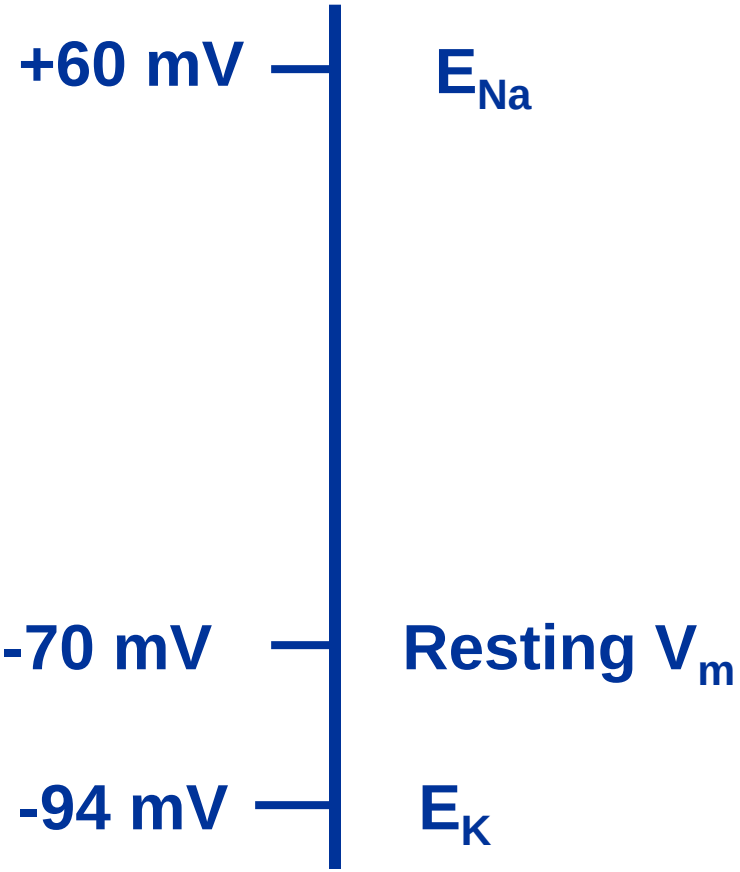
- 나트륨 펌프가 안정막 전위를 유지



(e)

안정막 전위

안정막 전위는 칼륨의 평형전위에 가깝다



이온에 작용하는 힘

- 막전위가 이온에 대해 평형이 아니면
  - 전기화학적 힘은 0이 아니다
  - 어떤 이온에 작용하는 순힘은 막전위가 그 이온이 평형이 되는 방향으로 이온을 이동시킨다
  - 이러한 순힘의 크기는 막전위와 평형전위 간의 차이에 비례한다

안정 전위: K+에 작용하는 힘

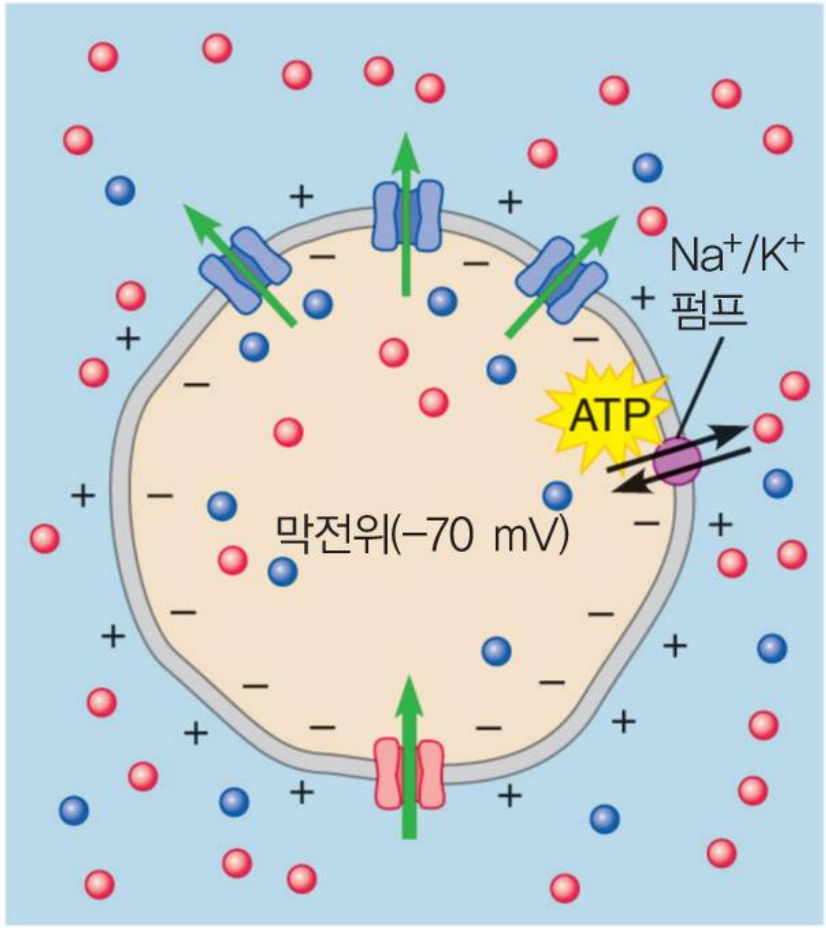
- 안정전위 = -70mV
- $E_{K(평형전위)}$ = -94mV
- $V_{m(막전위)}$ 은 24mV이며 E_K에 비해 덜 음성적이다
  - 전기적 힘은 세포 내로 작용
  - 화학적 힘은 세포 밖으로 작용
  - 순힘은 약해짐: 밖으로 K^+ 가 나가지만 막은 K^+ 에 대해 매우 투과성이 높다

안정 전위: Na+에 작용하는 힘

- 안정전위= -70mV
- E_{Na} = +60mV
- Vm은 E_{na} 보다 덜 음성인 130mV
  - 전기적 힘은 세포내로 작용
  - 화학적 힘은 세포밖으로 작용
  - 순힘이 크다: Na^+는 세포내로 유입되지만 Na^+ 에 대한 막의 투과성이 낮다

안정상태의 뉴런

- 안정상태에서 소량의 Na^+ 가 유출됨 (강한 힘 , 낮은 투과성)
- 안정상태에서 소량의 K^+ 가 유출됨 (낮은 힘, 높은 투과성)
- 나트륨 펌프가 농도차이를 유지하기 위해 Na^+ 와 K^+ 를 되돌림



(e)

안정막 전위



A&P Flix: 신경생리학 **Part 1:** 안정막 전위

IV. 막전위 변화를 통한 전기신호 표시

- 막전위 변화의 설명
- 계단전위(Graded potentials)
- 활동전위(Action potentials)
- 활동전위의 전파

전기신호: 뉴런

- 막전위의 변화
- 관문통로
  - 특정자극에 반응하여 관문통로가 열리거나 닫힘
  - 이온 투과성에 변화를 줌
  - 이온의 이동—전기적 신호

전기신호: 뉴런

- 관문통로의 종류
  - 전압작동 통로(Voltage gated)
  - 리간드작동 통로(Ligand gated, 화학적)
  - 기계자극 작동 통로(Mechanically gated)

막전위 변화

- 안정막 전위—기준점
- 탈분극(Depolariation)
- 재분극(Repolarization)
- 과분극(Hyperpolarization)

막전위 변화

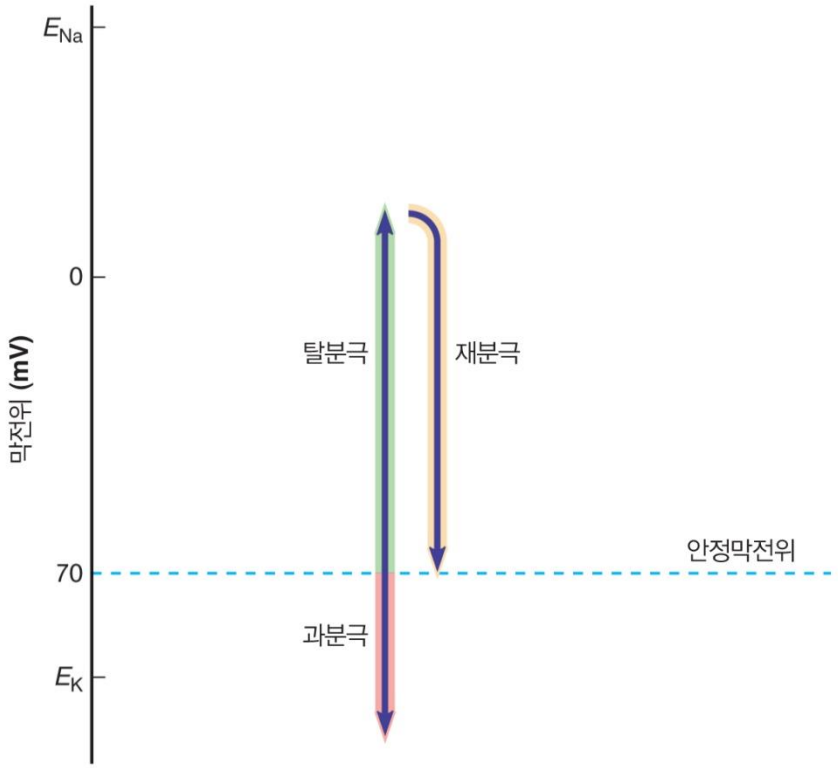


그림 7.9 막전위의 변화. 막전위는 이온통로의 개방이나 폐쇄로 변할 수 있다. 막전위가 음성이 더 작은 값으로 변하는 것을 탈분극이라고 한다. 탈분극한 막이 안정막전위로 돌아가는 것을 재분극이라고 한다. 막전위가 음성이 더 큰 값으로 변하는 것을 과분극이라고 한다. 칼륨 관문통로가 열리면, 칼륨은 세포 밖으로 나가서 막전위를 칼륨 평형전위(E_K)로 가져가게 한다. 즉 세포를 과분극시킨다. 나트륨 관문통로가 열리면, 나트륨은 세포 안으로 들어가서 막전위를 나트륨 평형전위(E_{Na})로 가져가게 한다. 즉 세포를 탈분극시킨다.

계단전위

- 전기긴장성 전도 (electrotonic conduction)로 전위가 퍼져나감
- 전류가 넓은 지역으로 퍼지면서 점차 감소

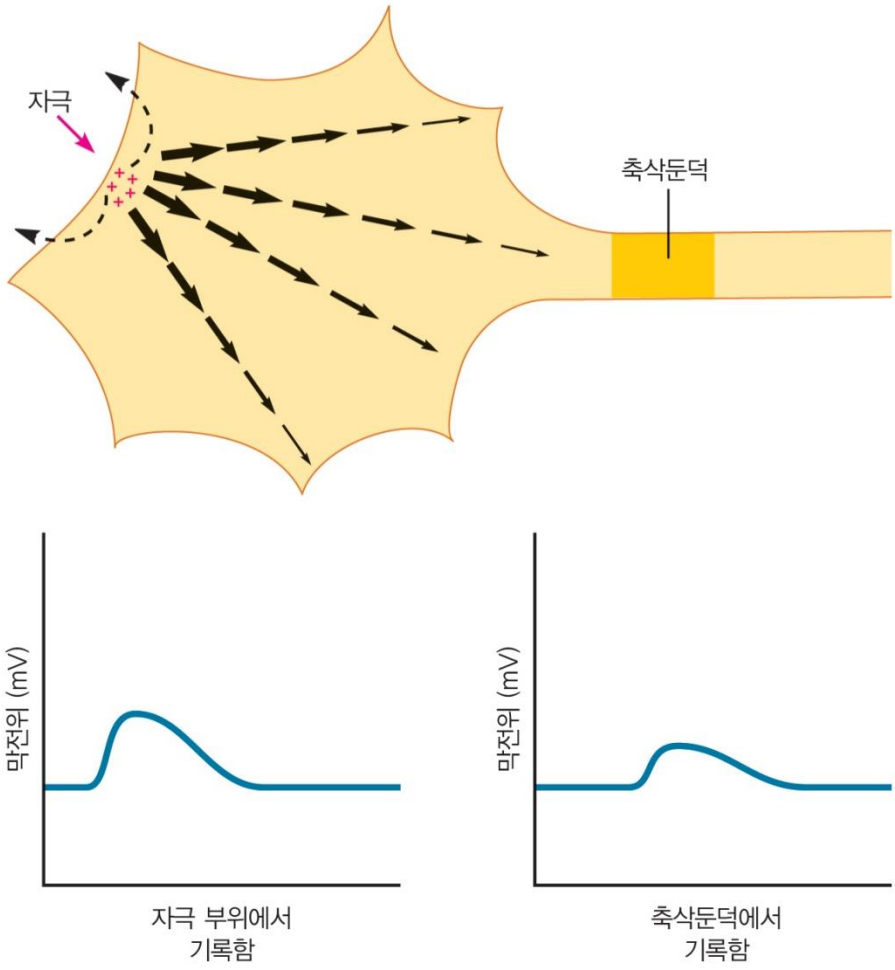


그림 7.11 점차 감소하는 특성의 계단전위. 계단전위는 원형질막의 인접 부위로(이어진 화살표), 그리고 원형질막을 가로질러(조각난 화살표) 이동하면서 사라진다. 따라서 자극 부위에서 기록된 전위 변화는 자극 부위에서 멀어진 부위의 것보다 크다. (화살표가 진할수록 전류가 큰 것을 나타낸다.)

계단전위의 의의

- 계단전위가 활동전위를 일으킬 수 있느냐의 여부를 결정한다
  - 문턱(역치,Threshold)
    - 활동전위를 발생시키는데 필요한 탈분극 수준
  - 흥분성(Excitatory)
    - 탈분극이 일어남
  - 억제성(Inhibitory)
    - 과분극이 일어남

계단전위

- 일부는 탈분극 일수도 있고
- 일부는 과분극 일수도 있다

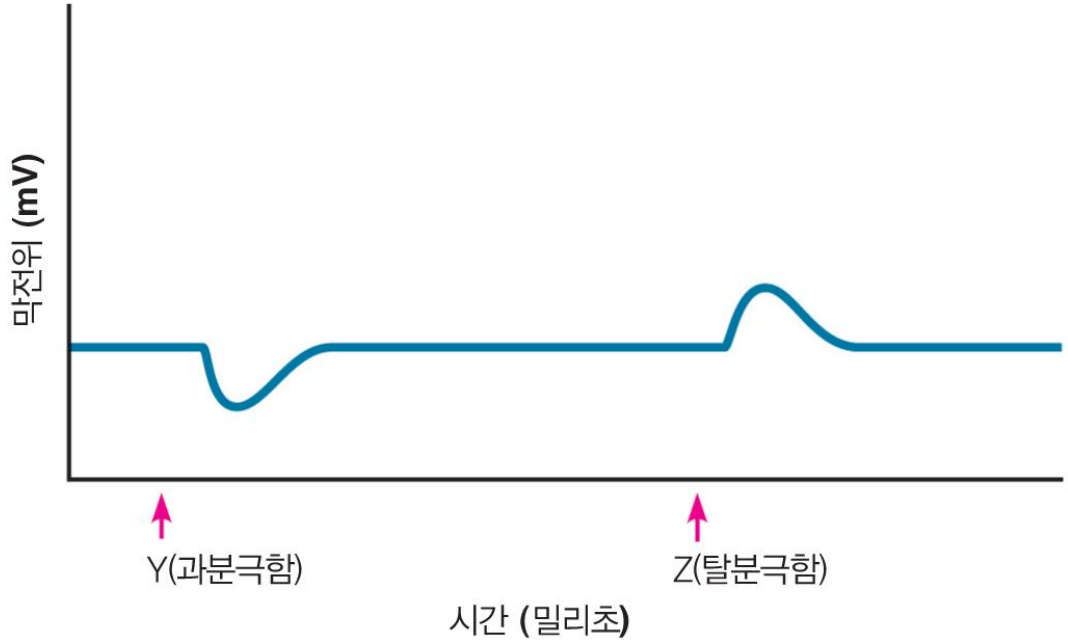


그림 7.12 자극의 유형이 계단전위에 미치는 효과. 자극과 뉴런에 따라 차등전위는 과분극일 수도 있고 탈분극일 수도 있다.

계단전위는 가중될 수 있다

- 시간가중(Temporal summation)
  - 같은 자극
  - 한 자극의 전위가 사라지기 전에 연속 자극이 가해져 효과가 겹침
- 공간가중(Spatial summation)
  - 다른 자극
  - 거의 동시에 생긴 자극이 합쳐짐

활동전위(Action potential)

- 흥분성막은 활동전위를 생성시킬 수 있다
- 활동전위
  - 크고 빠른 탈분극이 일어남
- 뉴런에서는
  - 활동전위가 세포체에서 축삭 말단까지 길이를 따라 퍼져감 (들뉴런의 경우, 수용체에서 말단까지)

활동전위의 단계

- 탈분극(Depolarization)
- 재분극(Repolarization)
- 후과분극(After-hyperpolarization)

활동전위의 단계

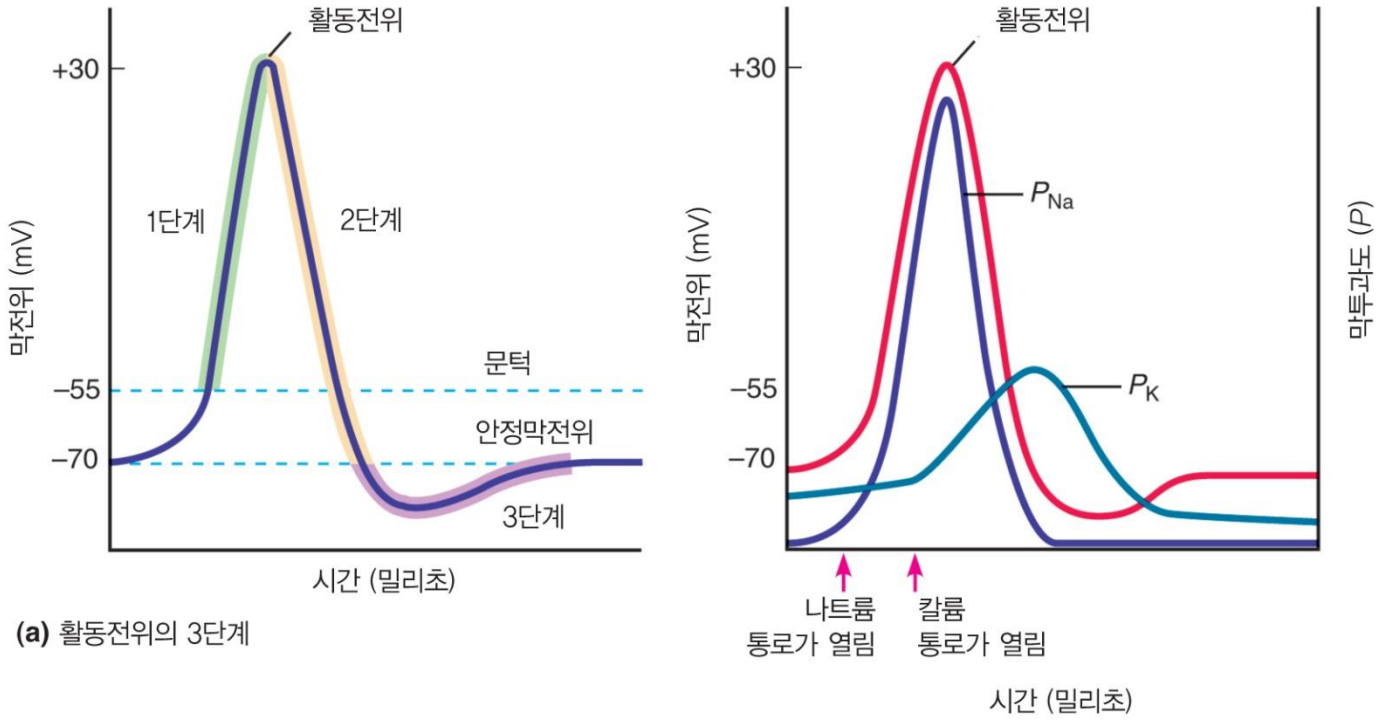


그림 7.14 **전압-작동 나트륨통로의 작용 모델.** 전압-작동 나트륨통로는 두 개의 관문을 가지고 있다. 안정상태에서 나트륨 불활성 관문은 열려 있고 활성 관문은 닫혀 있는데, 활성 관문은 탈분극 자극에 반응하여 열릴 수 있다. 문턱에 이르는 탈분극 자극이 가해진 후 불활성 관문과 활성 관문은 모두 열려 있고, 나트륨은 통로를 통하여 이동할 수 있다. 탈분극 자극 후 약 1밀리초에 불활성 관문은 닫히고 세포가 안정상태로 재분극할 때까지 닫힌 채로 있다. 재분극하기 전까지 통로는 새로운 탈분극 자극에 반응하여 열리지 않는다.

활동전위의 발생

PLAY **A&P Flix:** 신경생리학 **Part 2:** 활동전위의 발생

계단전위와 활동전위의 비교

표 7.2 계단전위와 활동전위의 비교

특성	계단전위	활동전위
생성 부위	가지돌기, 세포체, 감각수용체	축삭
크기	비교적 작고, 자극의 세기에 비례함; 자극 부위에서 멀어지면 사라짐	100 mV 실무율
막전위 변화의 방향	자극에 따라 탈분극 또는 과분극	탈분극
가중	공간가중과 시간가중	가중 없음
불응기	없음	절대 불응기와 상대 불응기
막전위를 변화시키는 이온통로의 종류	리간드-작동성, 기계자극-작동성	전압-작동성
관련된 이온	Na^+, Cl^-, 또는 K^+	Na^+과 K^+
지속기간	수 밀리초~수 초	1~2밀리초(후과분극은 15밀리초 지속됨)

안정상태

- $P_K > P_{Na}$
  - Vm(막전위)는 E_K(칼륨평형전위)에 가깝다
  - Vm는 E_{na}(나트륨평형전위)에 멀다

활동전위의 빠른 탈분극

- $P_{Na} >> P_K$
  - Vm 은 E_{Na} (나트륨평형전위)에 가깝고
  - Vm E_K (칼륨평형전위)에 멀다

문턱(역치)에 대한 탈분극

- 계단전위가 막을 문턱에 이르게 함
- 문턱의 변화
  - 나트륨 통로를 빠르게 열리고 느리게 닫힘
  - 칼륨통로는 느리게 열림

전압작동 나트륨통로

- 통로와 관련된 두 개의 관문
  - 활성관문(Activation gate)
    - 전압 의존성
    - 둔덕에서 열리고 탈분극 된다
    - 양성피드백
  - 불활성관문(Inactivation gate)
    - 전압과 시간 의존성
    - 탈분극 중에 닫혀있지만
    - 활성관문을 여는 탈분극 자극에 의해 열릴 수 있다

전압작동 나트륨통로

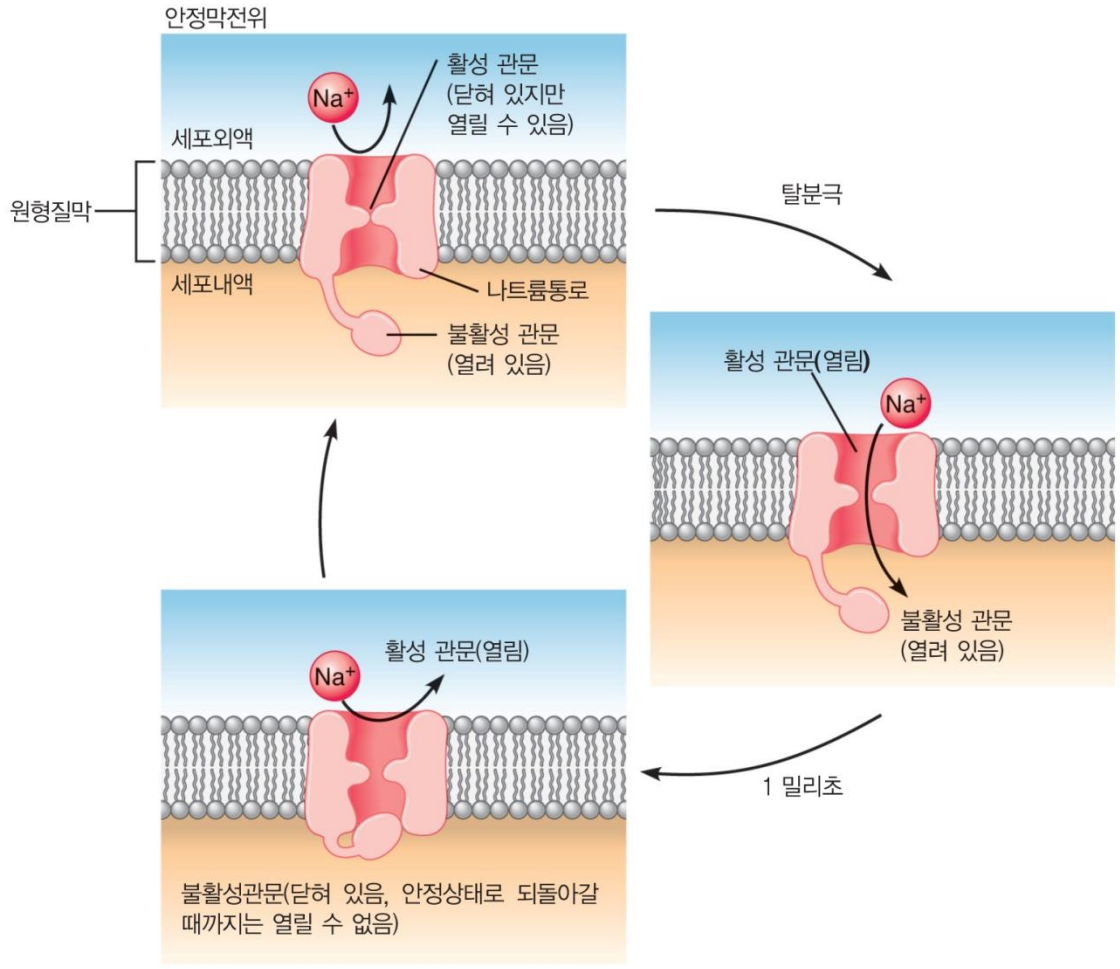


그림 7.15 전압-작동 나트륨통로의 작용 모델. 전압-작동 나트륨통로는 두 개의 관문을 가지고 있다. 안정상태에서 나트륨 불활성 관문은 열려 있고 활성 관문은 닫혀 있는데, 활성 관문은 탈분극 자극에 반응하여 열릴 수 있다. 문턱에 이르는 탈분극 자극이 가해진 후 불활성 관문과 활성 관문은 모두 열려 있고, 나트륨은 통로를 통하여 이동할 수 있다. 탈분극 자극 후 약 1밀리초에 불활성 관문은 닫히고 세포가 안정상태로 재분극할 때까지 닫힌 채로 있다. 재분극하기 전까지 통로는 새로운 탈분극 자극에 반응하여 열리지 않는다.

전압작동 칼륨통로

- 하나의 관문
- 전압과 시간에 의존적
- 음성피드백

나트륨과 칼륨통로의 개폐

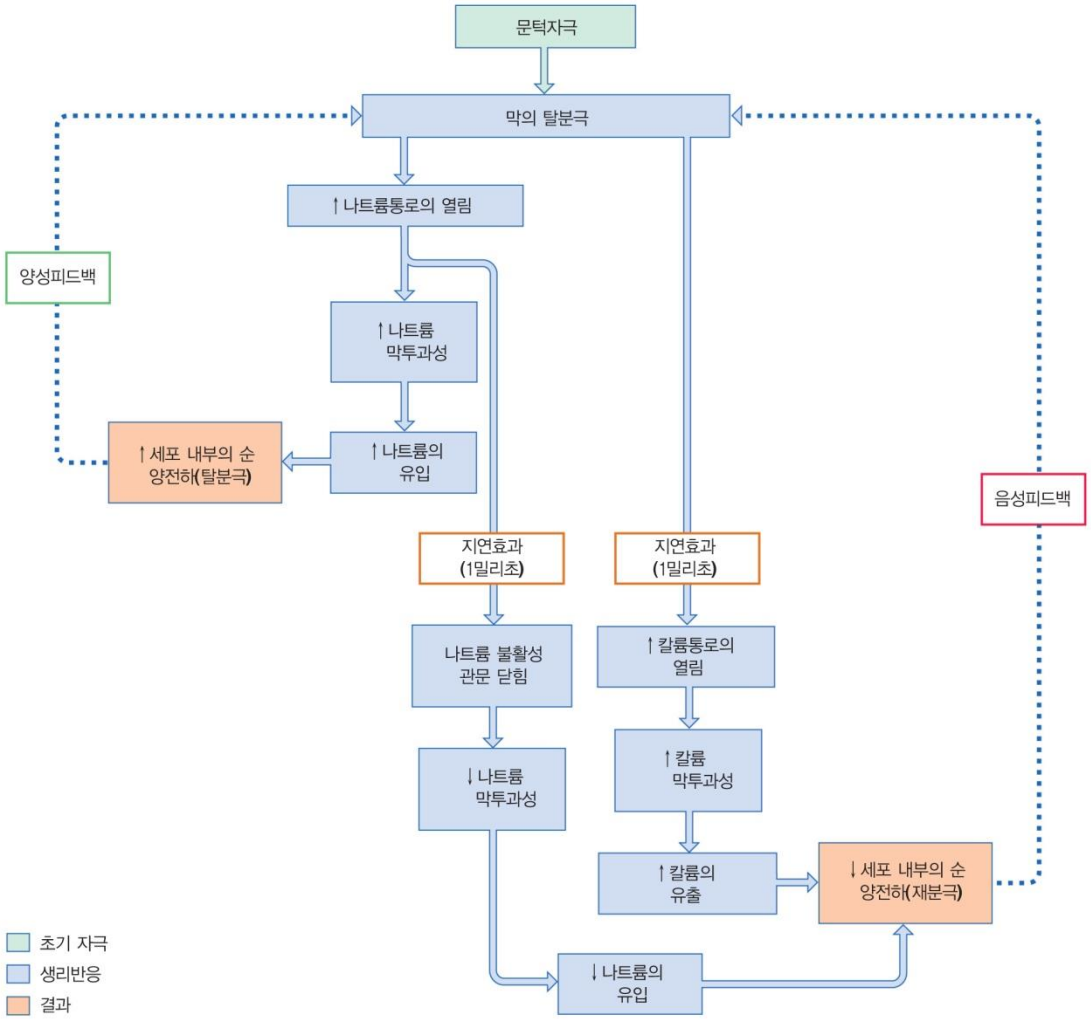


그림 7.16 활동전위 동안 나트륨과 칼륨통로의 개폐. 나트륨통로의 개방은 세포를 급속하게 탈분극시키는 양성피드백 고리의 부분이다. 세포가 문턱으로 탈분극할 때 나트륨통로가 열린다. 이 통로를 통하여 나트륨이 세포 내로 이동함으로써 세포는 더 탈분극하고, 이 때문에 나트륨통로는 더 많이 열린다. 불활성 관문이 닫힐 때까지(탈분극이 문턱에 이른 후 약 1밀리초) 피드백 고리는 계속된다. 칼륨통로의 개방과 폐쇄는 음성피드백 고리의 부분이다. 탈분극에 의하여 칼륨통로는 늦게 열린다. 이 통로를 통하여 칼륨이 세포 외로 나감으로써 세포는 재분극한다. 재분극은 칼륨통로의 개방에 필요한 탈분극 자극과 반대이므로 칼륨통로는 닫힌다.

나트륨과 칼륨통로의 개폐의 요약

표 7.3 안정상태와 활동전위의 세 단계 동안의 뉴런의 특징들

	안정상태	탈분극	재분극	후과분극
막전위	−70 mV	−70 mV → +30 mV	+30 mV → −70 mV	−70 mV→ −85 mV
전압-작동 나트륨통로	폐쇄	개방	폐쇄	폐쇄
활성 관문	폐쇄	개방	개방	폐쇄
불활성 관문	개방	개방	폐쇄	개방
나트륨 이동	누출통로를 통한 소량 유입	전압–작동 통로를 통한 대량 유입*	누출통로를 통한 소량 유입	누출통로를 통한 소량 유입
전압-작동 칼륨통로	폐쇄	폐쇄	개방	폐쇄 중
칼륨 이동	누출통로를 통한 소량 유출	누출통로를 통한 소량 유출	전압-작동 통로를 대량 유출*	전압-작동 통로를 통한 대량 유출, 서서히 감소함*

*주어진 시간 동안 전압-작동 통로와 누출통로를 통하여 이온들이 이동하지만, 누출통로를 통한 전도도는 전압-작동 통로를 통한 것에 비하면 무시할 만하다.

문턱자극의 개념

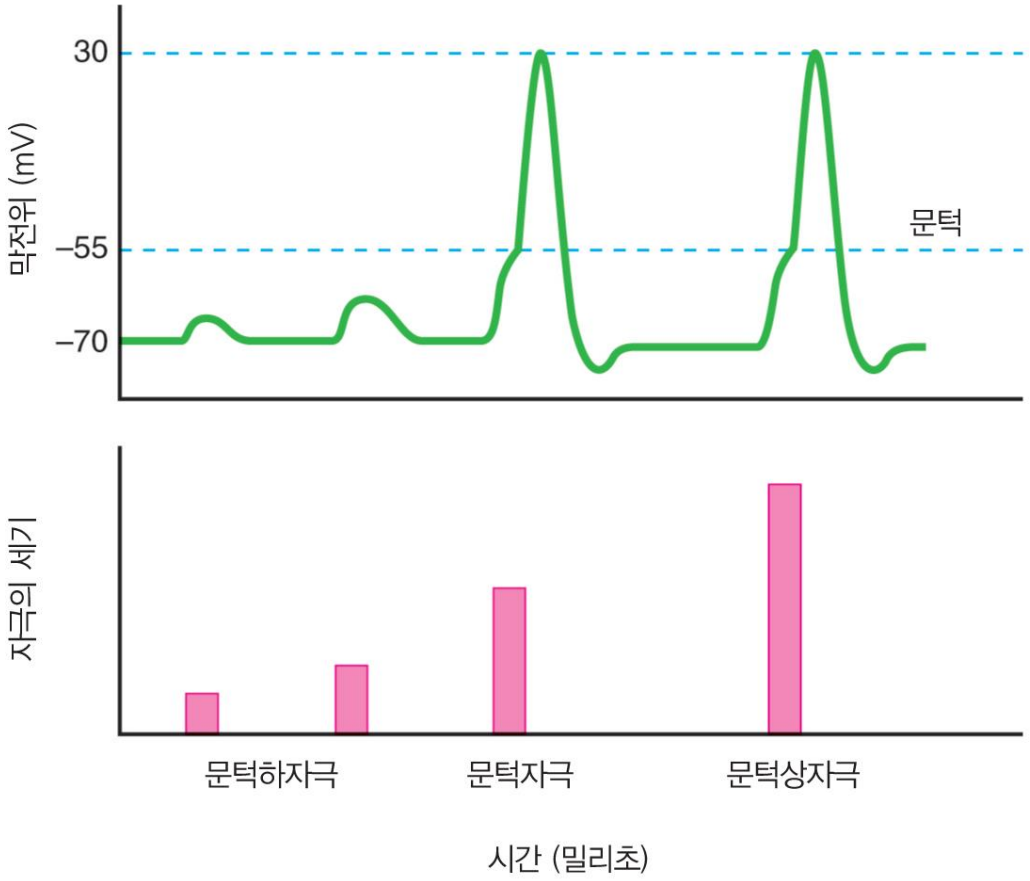


그림 7.17 문턱자극의 개념. 자극이 탈분극의 임계 수준(문턱)에 이른 후에야 활동전위가 생성된다. 문턱 이하의 자극(문턱하자극)은 활동전위를 일으킬 수 없다. 문턱보다 큰 자극(문턱상자극)에 의하여 생성되는 활동전위의 크기와 지속시간은 자극의 세기에 상관없이 문턱자극의 경우와 같다.

실무율의 원리

- 문턱(Threshold)
  - 나트륨 통로를 여는데 필요한 최소의 탈분극
- 문턱 탈분극 → 활동전위 발생
- 문턱하자극(Subthreshold) → 활동전위가 안생김
- 문턱상자극(suprathreshold)→활동전위 발생
- 문턱과 문턱상자극으로 생긴 활동전위의 크기는 동일
  - 100 mV

불응기(Refractory Period)

- 활동전위 직후 안전상태보다 흥분성이 감소한 기간
- 종류
  - 절대불응기(Absolute)
  - 상대불응기(Relative)

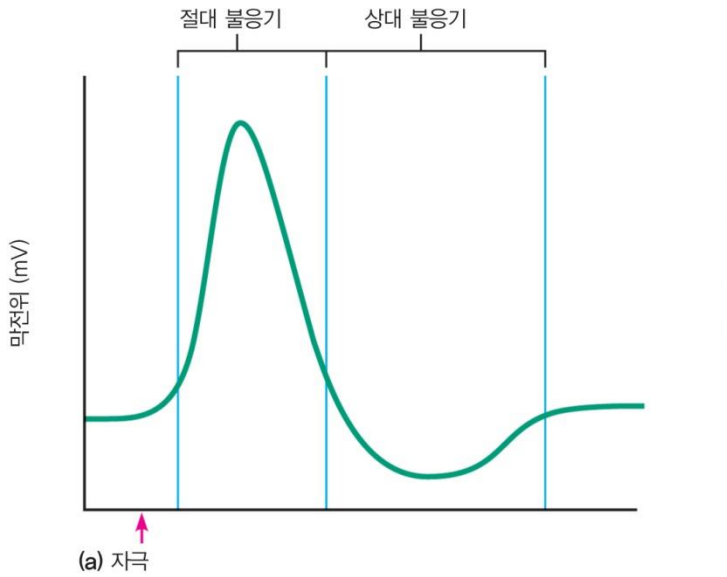
불응기

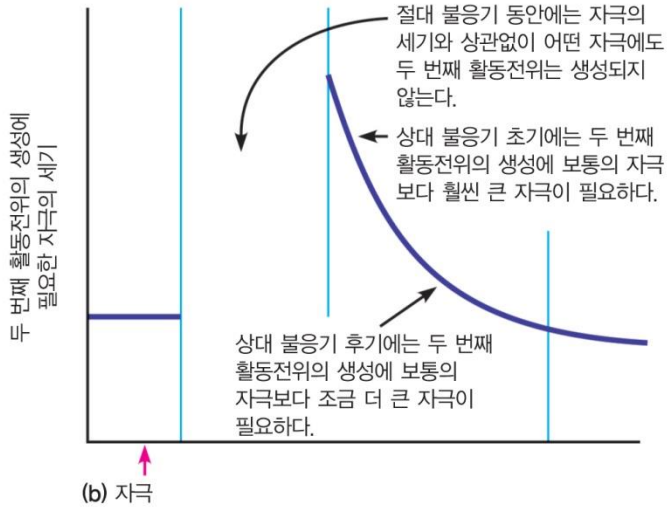
- 절대불응기(Absolute)
  - 활동전위의 탈분극 전체와 재분극 대부분에 걸쳐 나타남
  - 두번째 활동전위는 발생하지 않음
  - 나트륨통로의 불활성 관문 대부분이 닫혀있기 때문

불응기

- 상대불응기(Relative)
  - 칼륨투과성 증가가 재분극 단계를 지나 후과분극 동안 나타남
  - 좀더 강한 자극에 대해서 두번 째 활동전위가 나타남
  - 나트륨관문 일부가 닫히고 일부는 비활성상태

불응기의 원인





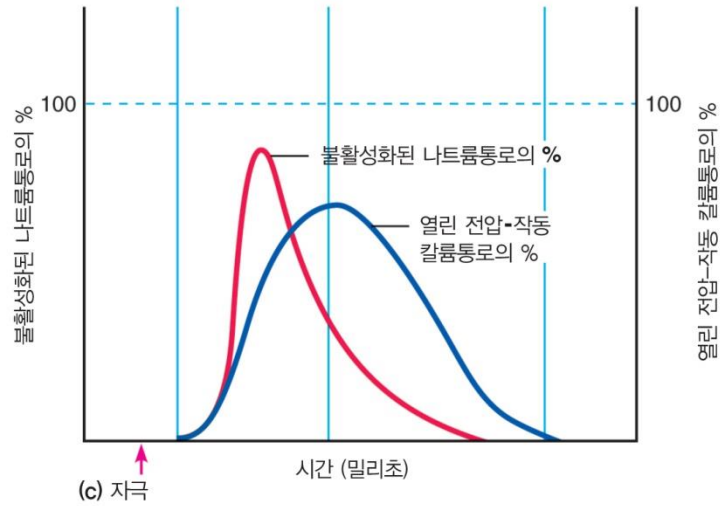


그림 7.18 활동전위에 연관된 불응기. 그래프 (a)는 활동전위 동안에 생기는 막전위의 변화를, 그래프 (b)는 두 번째 활동전위를 일으키는 데 필요한 자극의 세기를, 그래프 (c)는 나트륨통로의 불활성화(불활성 관문이 닫혀 있는)와 열려 있는 전압–작동 칼륨통로의 백분율을 나타낸다.

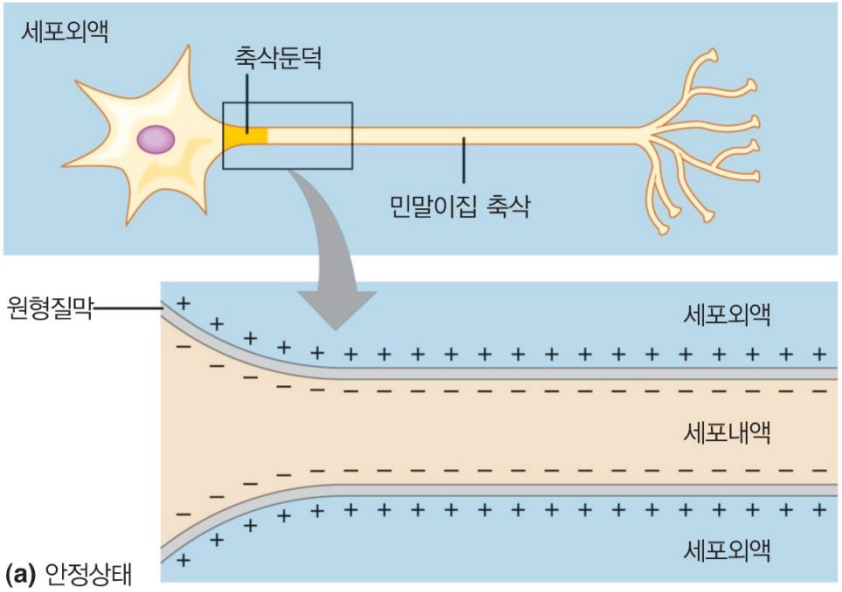
불응기 결과

- 실무율의 원칙
- 활동전위의 빈도로 암호화됨
- 활동전위의 전파: 단방향성

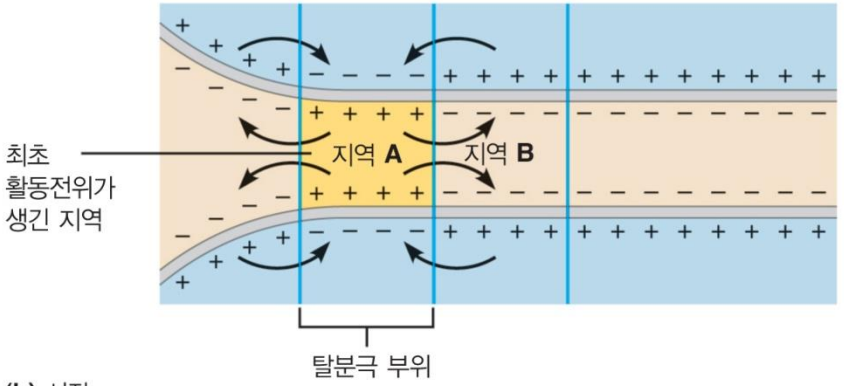
활동전위의 전파

- 전파기전은 축삭 말이집 유무에 따라 다르다

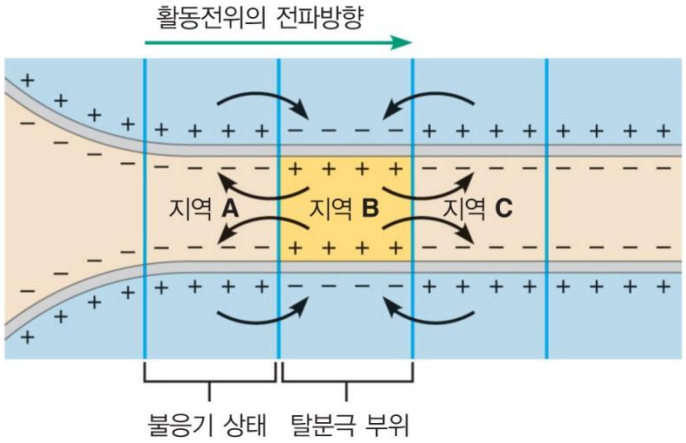
전도: 민말이집(무수신경)



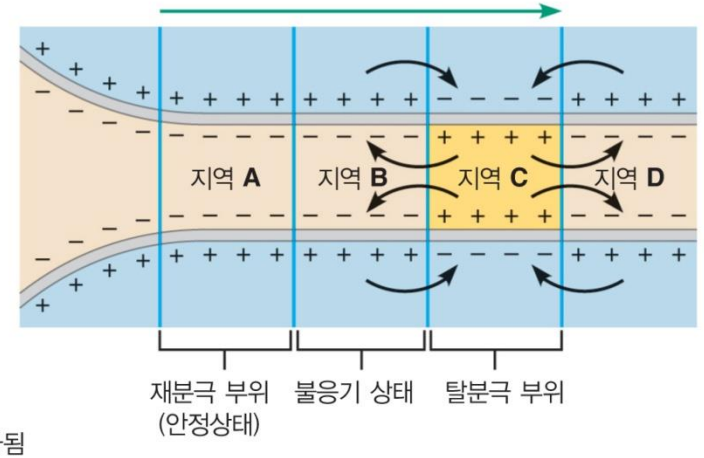
(a) 안정상태



(b) 시작



(c) 전파

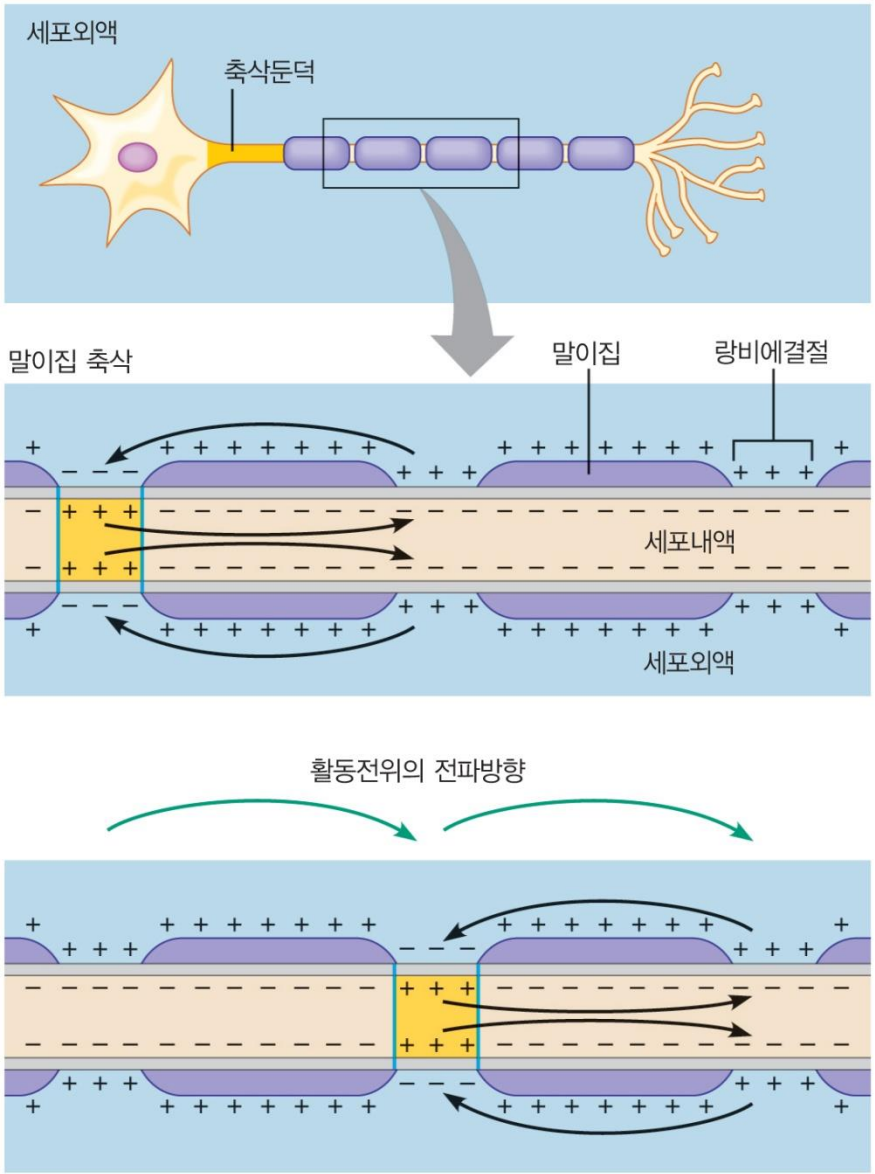


(d) 계속 전파됨

전파에 영향을 주는 요인

- 불응기
  - 단방향성
- 축삭의 직경
  - 클수록 저항력이 적고 빠르게 전도
  - 작을 수록 저항이 많고 느리게 전도
- 수초형성
  - 도약전도로 흐름
  - 빠른 전파

말이집 축삭의 전도



전도속도 비교

표 7.4 여러 종류의 신경섬유들의 전도 속도

섬유의 종류	말이집 존재 여부	기능의 예	섬유의 직경(μm)	전도속도(μm/sec)
Aα	있음	골격근 수축의 자극	12~20	70~120
Aβ	있음	촉각, 압각	5~12	30~70
Aγ	있음	근방추의 수축성 섬유 자극	3~6	15~30
Aδ	약간 있음	통각, 온도감각	2~5	12~30
B	있음	내장 들신경, 자율신경절전섬유	1~3	3~15
C	없음	통각, 온도감각, 자율신경절후섬유	0.3~1.3	0.7~2.3

V. 신경안정성의 유지

- 계단전위와 활동전위는 Na^+와 K^+ 농도경사를 사라지게 한다
- 다만 소량의 이온만 실제 이동함
- Na^+ / K^+ p펌프가 농도경사의 변화를 막아준다