

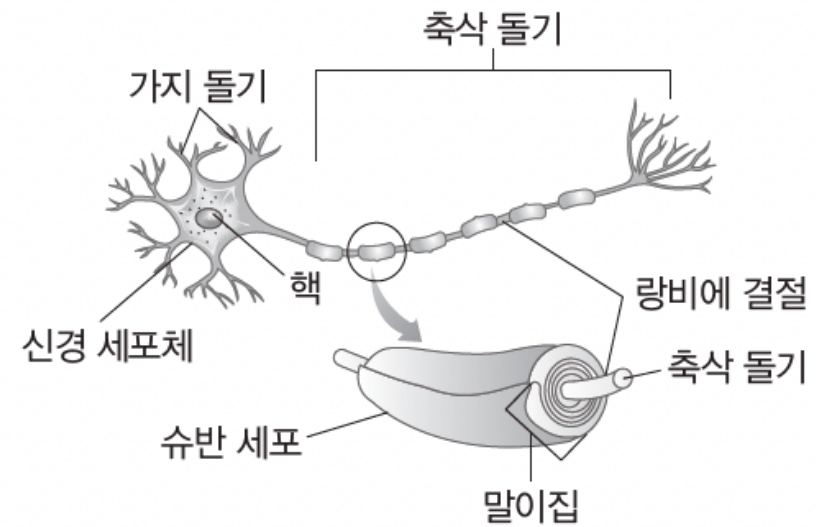
신경사극전도와 시냅스



1 뉴런

(1) **뉴런의 구조**: 신경계를 구성하는 뉴런은 매우 다양한 형태를 가지고 있으나 기본적으로 신경 세포체, 가지 돌기, 축삭 돌기로 이루어져 있다.

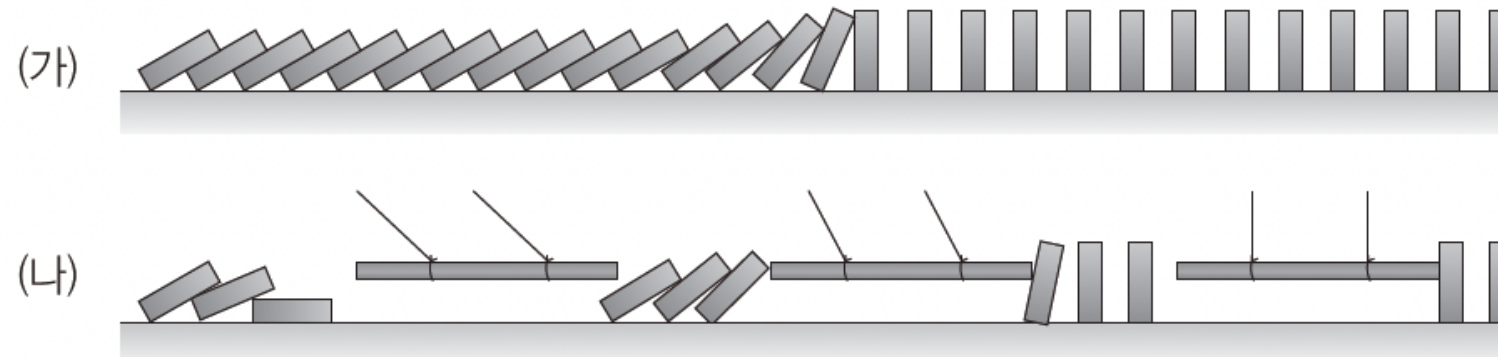
- ① **신경 세포체**: 핵, 미토콘드리아 등이 있는 신경 세포체는 뉴런에 필요한 물질과 에너지를 생성하며, 뉴런의 생명 활동을 조절한다.
- ② **가지 돌기**: 신경 세포체에서 뻗어 나온 나뭇가지 모양의 짧은 돌기로, 다른 뉴런이나 세포로부터 자극을 받아들인다.
- ③ **축삭 돌기**: 신경 세포체에서 뻗어 나온 긴 돌기로, 말단 부위까지 신호가 이동하며 다른 뉴런이나 세포로 신호를 전달한다.
- ④ **말이집**: 슈반 세포가 뉴런의 축삭 돌기를 반복적으로 감아 형성된 구조로 말이집으로 싸여 있는 부분에서는 흥분이 발생하지 않는다.



(2) **뉴런의 종류**: 뉴런을 구분하는 기준에는 말이집의 유무나 뉴런의 기능 등이 있다.

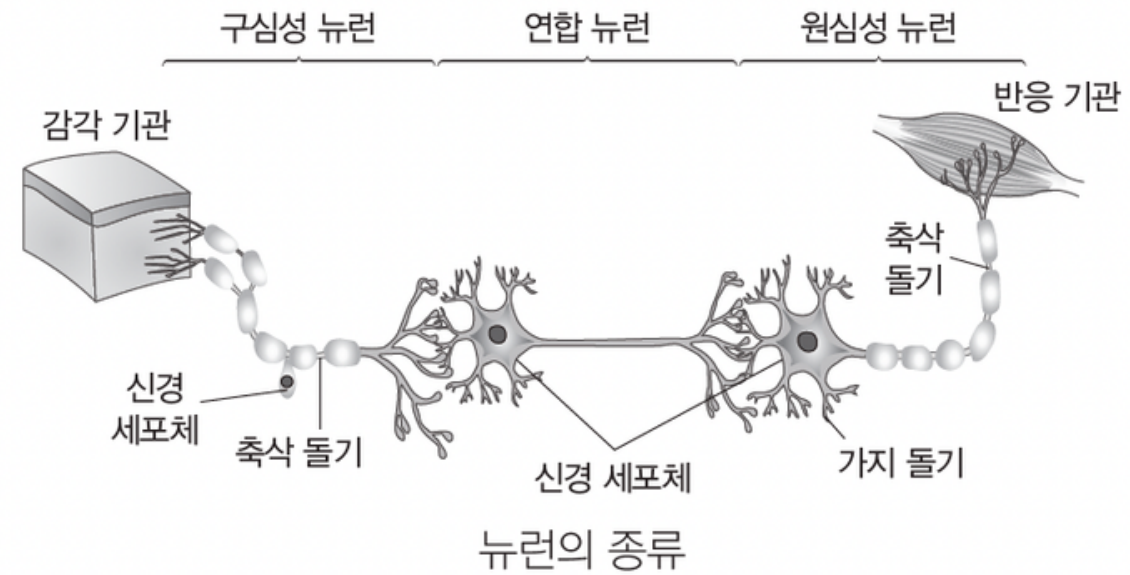
① 말이집 유무에 따른 구분

- 민말이집 뉴런: 축삭 돌기가 말이집으로 싸여 있지 않은 뉴런을 민말이집 뉴런이라고 한다. 민말이집 뉴런은 축삭 돌기의 전체에서 흥분이 발생한다.
- 말이집 뉴런: 축삭 돌기의 일부가 말이집으로 싸여 있는 뉴런을 말이집 뉴런이라고 한다. 말이집에 의해 절연된 축삭 돌기 부분에서는 흥분이 발생하지 않고 말이집으로 싸여 있지 않은 랑비에 결절에서만 흥분이 발생한다. 이처럼 랑비에 결절에서 연속적으로 흥분이 발생해 흥분이 전도되는 현상을 도약전도라고 한다. 도약전도가 일어나는 말이집 뉴런은 도약전도가 일어나지 않는 민말이집 뉴런보다 흥분 전도 속도가 빠르다.



② 기능에 따른 구분

- 구심성 뉴런(감각 뉴런): 몸 안팎에 존재하는 여러 가지 자극을 받아들인 감각 기관으로부터 발생한 흥분을 연합 뉴런으로 전달하거나, 구심성 뉴런이 직접 자극을 받아들여 연합 뉴런으로 전달한다. 가지 돌기가 비교적 긴 편이고 신경 세포체가 축삭 돌기의 중간 부분에 있다. 중추 신경계를 향해 흥분이 이동하므로 구심성 뉴런이라고 한다.
- 원심성 뉴런(운동 뉴런): 연합 뉴런으로부터 반응 명령을 전달받아 근육과 같은 반응 기관으로 흥분을 전달한다. 길게 발달된 축삭 돌기의 말단은 반응 기관에 분포하며, 신경 세포체가 비교적 크게 발달되어 있다. 중추 신경계에서 전달된 흥분이 반응 기관을 향해 이동하므로 원심성 뉴런이라고 한다.
- 연합 뉴런: 구심성 뉴런과 원심성 뉴런을 연결하는 뉴런으로 뇌와 척수에 존재한다. 구심성 뉴런으로부터 흥분을 전달받아 정보를 처리하고 처리 결과에 따른 명령을 원심성 뉴런에 전달한다.



분극 (휴지 상태)	• 뉴런이 자극을 받지 않았을 때이며, 휴지 전위가 유지된다. • Na^+ 통로와 대부분의 K^+ 통로가 닫혀 있다. • 상대적으로 세포막 안쪽은 음(−)전하, 세포막 바깥쪽은 양(+)전하를 띤다.		
탈분극	뉴런이 자극을 받으면 일부 Na^+ 통로가 열리고, Na^+ 이 세포 안으로 확산한다. → 막전위가 상승한다.		
재분극	막전위가 역치전위에 도달하면 대부분의 Na^+ 통로가 열리고, 많은 양의 Na^+ 이 세포 안으로 확산한다. → 막전위가 급격히 상승한다.		
분극	Na^+ 통로가 닫히고 대부분의 K^+ 통로가 열리면서 K^+ 이 세포 밖으로 확산한다. → K^+ 통로가 천천히 닫히므로 K^+ 이 세포 밖으로 계속 확산하면서 과분극이 된다. → 막전위가 하강하다가 휴지전위 아래로 내려간다.		
분극	대부분의 K^+ 통로가 닫히고, $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ 펌프에 의해 이온 분포가 자극을 받기 전의 상태로 돌아간다. → 다시 휴지전위가 된다.		

- Na^+ 의 농도: 세포 밖 > 세포 안
- K^+ 의 농도: 세포 밖 < 세포 안

주의해

Na^+ 의 농도

탈분극이 일어나 Na^+ 이 세포 안으로 이동하면 Na^+ 의 농도는 세포 안이 세포 밖보다 높아진다고 생각할 수 있다. 그러나 Na^+ 통로를 통한 Na^+ 의 이동은 농도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 이동하는 확산에 의해 일어나므로 Na^+ 의 농도는 세포 안에서가 세포 밖에서보다 높아질 수 없다. 따라서 탈분극이 일어날 때에도 Na^+ 의 농도는 항상 세포 밖에서가 세포 안에서보다 높다.

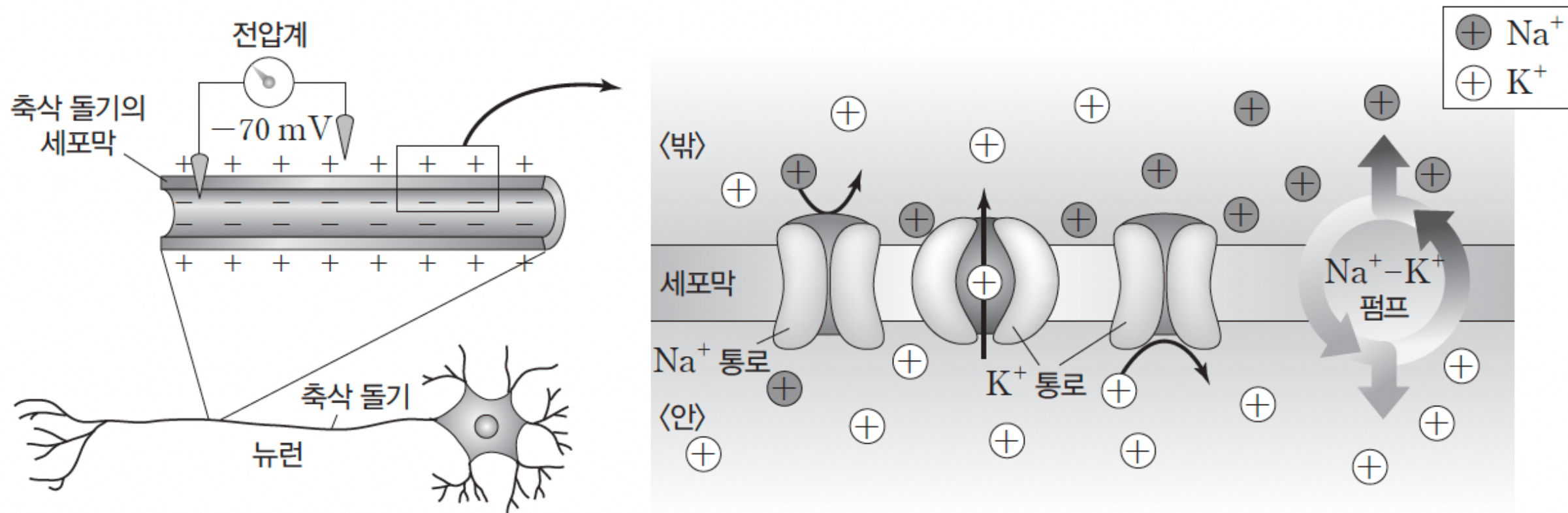
2 흥분의 전도

(1) 분극

- ① 분극: 자극을 받지 않아 휴지 상태인 뉴런은 세포막을 경계로 안쪽이 상대적으로 음(－)전하를 띠고, 바깥쪽이 상대적으로 양(＋)전하를 띤다. 이러한 상태를 양극으로 나누어진 상태라고 하여 분극이라고 하며, 이때 형성되는 막전위를 휴지 전위라고 한다.
- ② 분극의 원인: 뉴런의 세포막에는 여러 종류의 막단백질이 존재한다. 막단백질에는 Na^+ 과 K^+ 의 능동 수송을 담당하는 Na^+-K^+ 펌프, Na^+ 의 확산을 담당하는 Na^+ 통로, K^+ 의 확산을 담당하는 K^+ 통로 등이 있다. Na^+-K^+ 펌프는 ATP를 분해하여 얻은 에너지를 이용하여 세포 안의 Na^+ 을 세포 밖으로 내보내고, 세포 밖의 K^+ 을 세포 안으로 들여온다. 이로 인해 뉴런의 Na^+ 농도는 항상 세포 밖이 안보다 높고, K^+ 농도는 세포 안이 밖보다 높다. 휴지 상태에서는 K^+ 통로가 일부 열려 있어 K^+ 이 안에서 밖으로 확산되지만 Na^+ 통로는 거의 대부분 닫혀 있어 Na^+ 이 밖에서 안으로 확산되지 못한다. 또한 세포 안에는 음(－)전하를 띠고 있는 단백질이 세포 밖보다 많이 존재한다. 이러한 이온의 불균등 분포, 이온의 막 투과도 차이, 음(－)전하 단백질로 인해 세포 안은 상대적으로 음(－)전하를, 세포 밖은 상대적으로 양(＋)전하를 띤다.

이온	세포 밖	세포 안
K^+	3.5~5 mM	150 mM
Na^+	135~145 mM	15 mM

- ③ 휴지 전위: 분극 상태에서 세포 안과 밖의 전위차를 휴지 전위라고 한다. 휴지 전위는 세포에 따라 $-60\text{ mV} \sim -90\text{ mV}$ 로 다양하며, 뉴런의 휴지 전위는 -70 mV 이다.



분극 상태일 때의 이온 분포

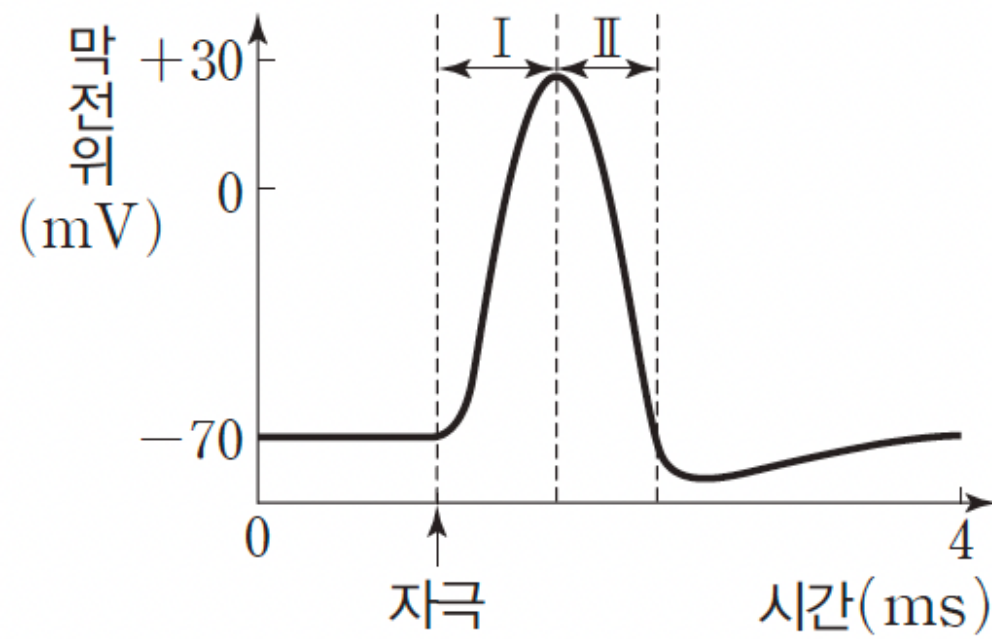
(2) 탈분극

- ① 탈분극: 역치 이상의 자극이 가해진 뉴런의 부위에서 안정적으로 유지되던 막전위가 상승하는 현상을 탈분극이라고 한다.
- ② 탈분극의 원인: 뉴런이 역치 이상의 자극을 받으면 자극을 받은 부위에서 Na^+ 통로가 열리면서 Na^+ 에 대한 막 투과도가 커지고, Na^+ 이 세포 안으로 급격하게 확산된다. 이러한 과정이 진행되면서 막전위가 상승하는 탈분극이 일어난다.

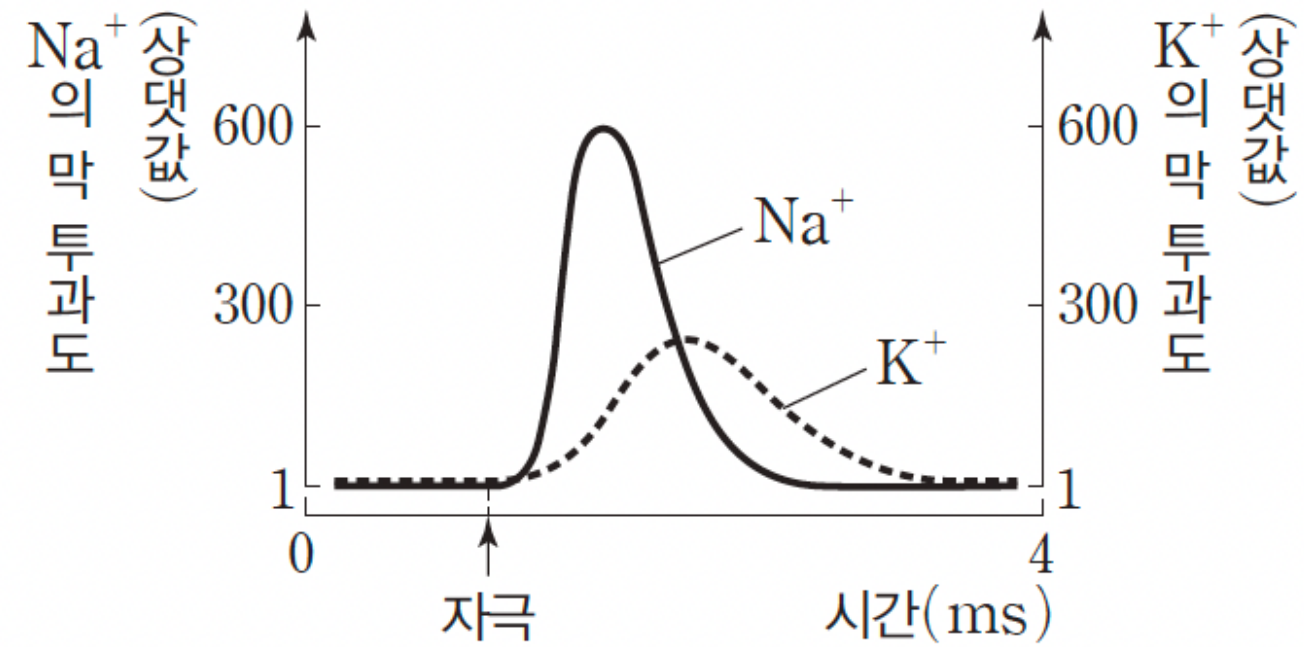
(3) 재분극

- ① 재분극: 상승한 막전위가 다시 휴지 전위로 하강하는 현상을 재분극이라고 한다.
- ② 재분극의 원인: 열린 Na^+ 통로는 시간이 지남에 따라 닫히고, 닫혀 있던 K^+ 통로가 열린다. 이로 인해 Na^+ 의 막 투과도는 감소하고 K^+ 의 막 투과도는 증가하여, Na^+ 통로를 통한 Na^+ 의 확산은 감소하고 K^+ 통로를 통한 K^+ 의 확산은 증가한다. 이러한 과정이 진행되면서 막전위가 하강하는 재분극이 일어난다.
- ③ 과분극: 재분극이 일어나면서 막전위가 휴지 전위(-70 mV)보다 더 낮은 -80 mV 까지 하강하였다가 휴지 전위로 회복되는데 이처럼 뉴런의 막전위가 휴지 전위보다 낮아지는 현상을 과분극이라고 한다.

- 그림 (가)는 어떤 뉴런에 역치 이상의 자극을 주었을 때 이 뉴런의 축삭 돌기 한 지점에서 시간에 따른 막전위를, (나)는 이 지점에서 시간에 따른 Na^+ 과 K^+ 의 막 투과도를 나타낸 것이다.
- Na^+ 통로가 열리면 Na^+ 의 막 투과도가 증가하고, K^+ 통로가 열리면 K^+ 의 막 투과도가 증가한다.



(가)

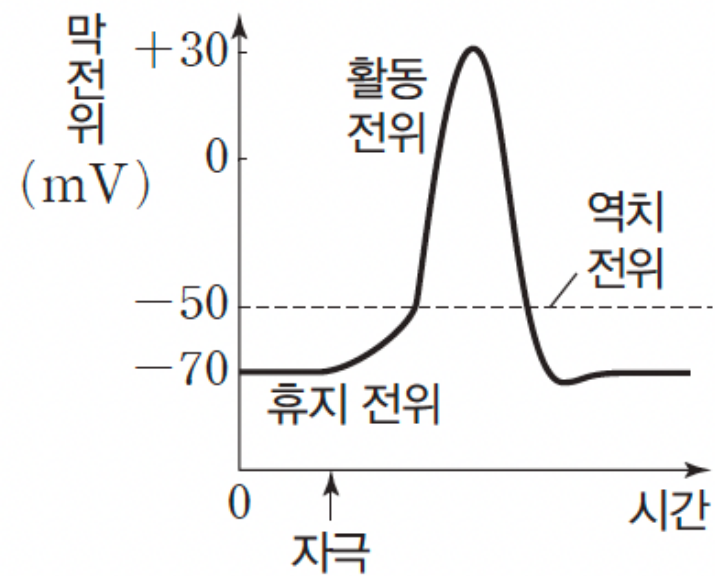


(나)

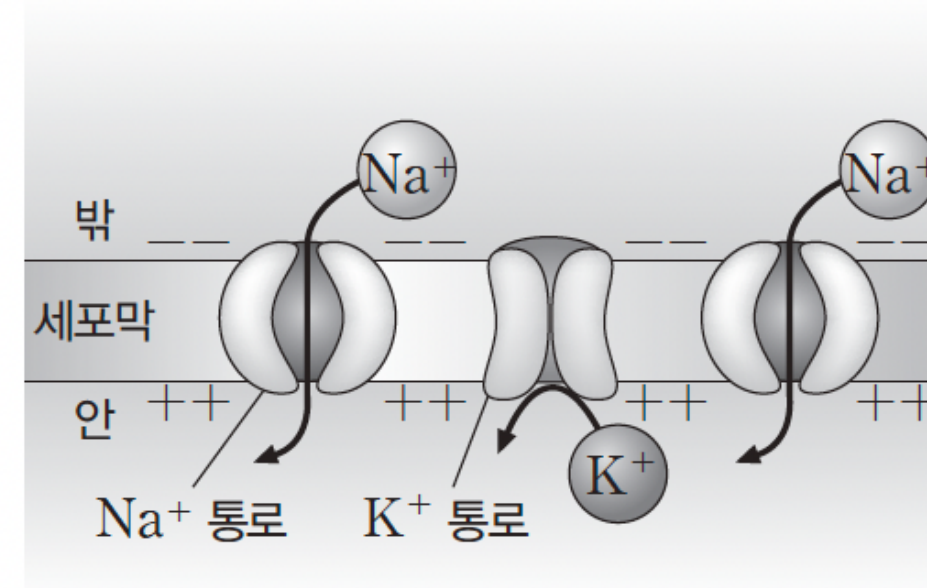
- (가)에서 막전위가 변하는 것은 Na^+ 통로와 K^+ 통로의 열리고 닫히는 상태가 변하고, 이로 인해 (나)에서와 같이 Na^+ 과 K^+ 의 막 투과도가 변하기 때문이다.
- (가)의 구간 I은 탈분극 구간이고, II는 재분극 구간이다.
- 구간 I에서 막전위 상승은 주로 Na^+ 통로가 열려 Na^+ 이 세포 안으로 유입되어 일어나고, II에서의 막전위 하강은 주로 K^+ 통로가 열려 K^+ 이 세포 밖으로 유출되어 일어난다.

(4) 활동 전위

- ① 활동 전위: 휴지 상태인 뉴런의 한 지점에 역치 이상의 자극이 가해지면 막전위가 빠르게 상승하였다가 하강한다. 이러한 막전위 변화를 활동 전위라고 한다.
- ② 활동 전위와 흥분의 전도: 뉴런의 한 지점에서 활동 전위가 일어나면 일정 시간 뒤 그 지점과 가까운 지점에서 다시 활동 전위가 발생한다. 이처럼 연쇄적으로 활동 전위가 발생하여 흥분이 뉴런 내에서 이동하는 현상을 흥분의 전도라고 한다.



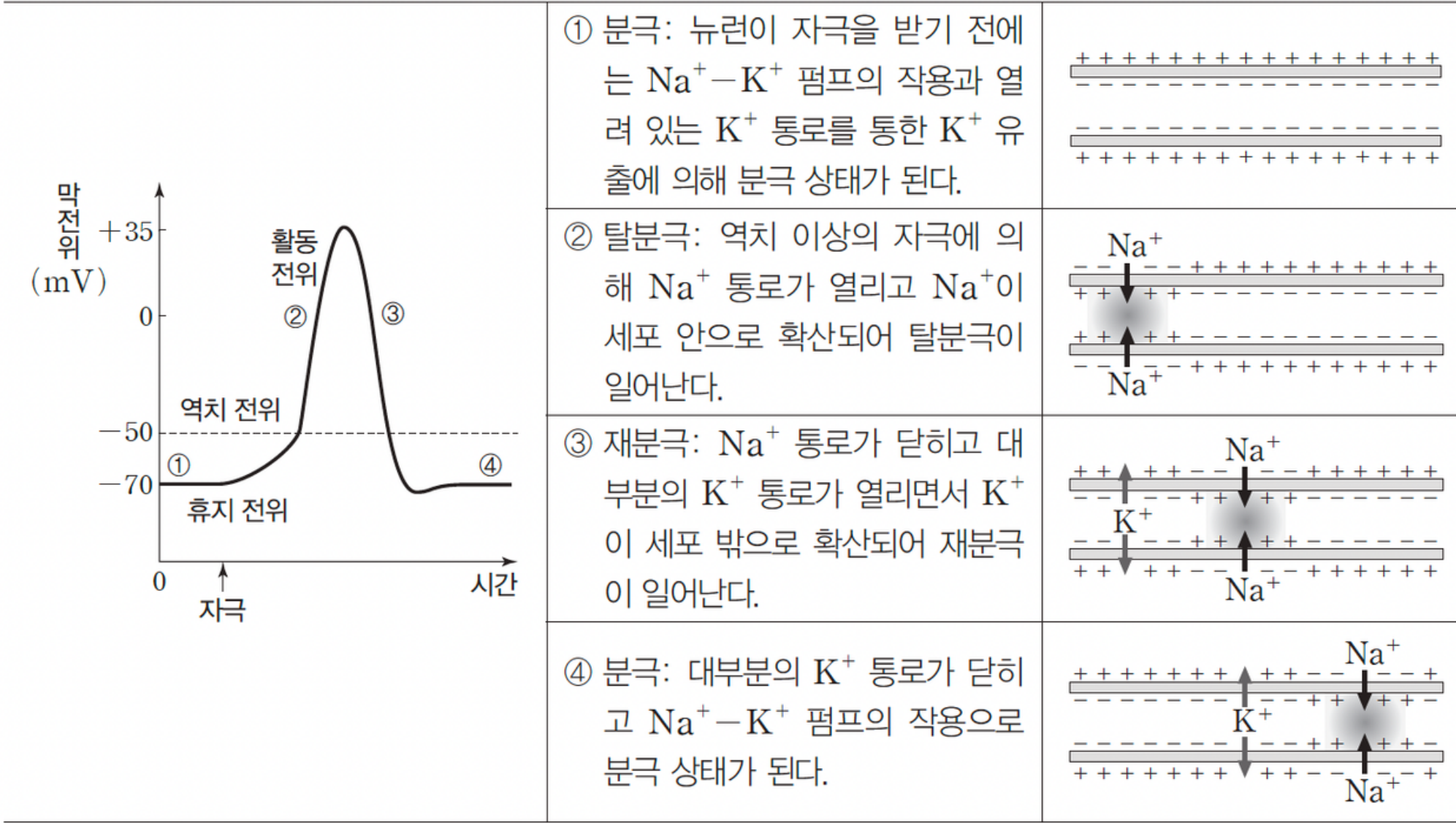
휴지 전위와 활동 전위



탈분극 시 이온의 이동

(5) 흥분의 전도 과정

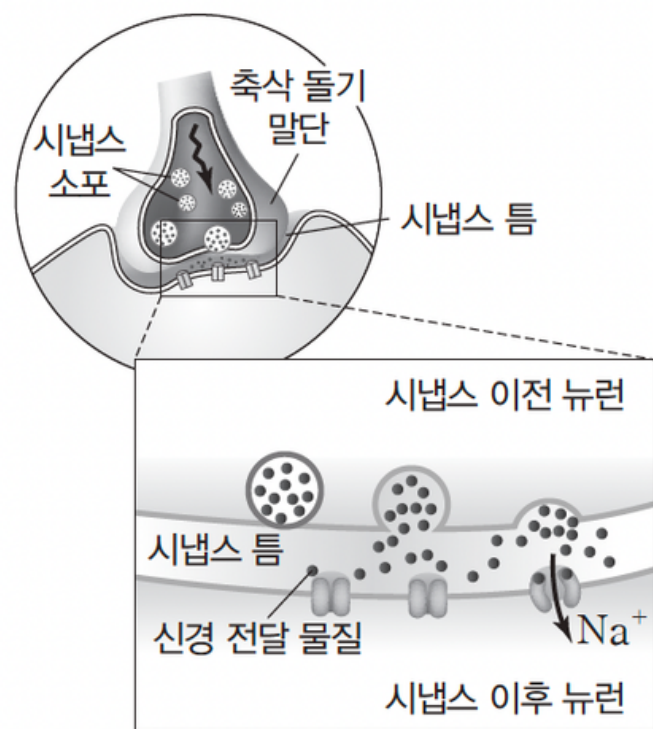
- ① 뉴런의 특정 부위에 탈분극이 일어나 활동 전위가 발생하면 일정 시간 뒤 인접한 부위에서도 탈분극이 일어나 활동 전위가 발생한다. 이를 통해 흥분이 축삭 돌기를 따라 뉴런의 말단 부위까지 전도된다.
- ② 만약 축삭 돌기의 중간 지점에서 활동 전위가 발생하면 흥분 전도는 양방향으로 진행된다.



3 흥분의 전달

(1) 흥분의 전달

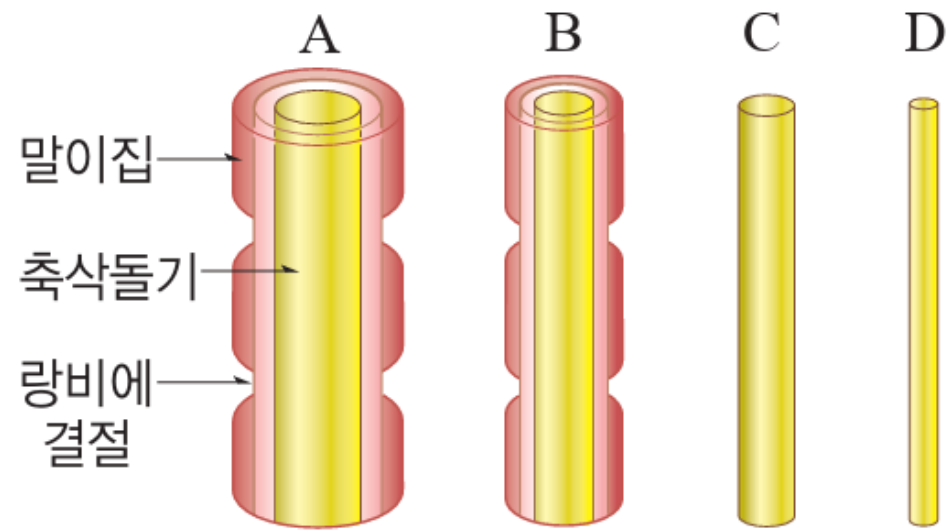
- ① 흥분의 전달: 자극을 받아 활동 전위가 발생한 뉴런에서 흥분이 다음 뉴런의 가지 돌기나 신경 세포체로 전달되는 현상을 흥분의 전달이라고 한다.
- ② 시냅스: 뉴런의 축삭 돌기 말단과 다른 뉴런의 가지 돌기나 신경 세포체가 약 20 nm의 틈을 두고 접한 부위를 시냅스라고 한다. 하나의 뉴런이 다수의 뉴런과 시냅스를 형성하기도 한다. 시냅스를 기준으로 흥분을 전달하는 뉴런을 시냅스 이전 뉴런이라고 하고, 흥분을 전달 받는 뉴런을 시냅스 이후 뉴런이라고 한다.
- ③ 흥분의 전달 과정: 시냅스 이전 뉴런의 흥분이 축삭 돌기 말단까지 전도되면 축삭 돌기 말단에 존재하는 시냅스 소포가 세포막과 융합되면서 시냅스 소포에 있던 신경 전달 물질이 시냅스 틈으로 분비된다. 이 신경 전달 물질이 확산되어 시냅스 이후 뉴런의 신경 전달 물질 수용체에 결합하면 시냅스 이후 뉴런의 이온 통로가 열리면서 탈분극이 일어난다.



흥분 전달 과정

- (2) 흥분의 전달 방향: 시냅스 소포는 축삭 돌기 말단에만 있으므로 흥분은 항상 시냅스 이전 뉴런의 축삭 돌기 말단에서 시냅스 이후 뉴런의 가지 돌기나 신경 세포체로만 전달된다.

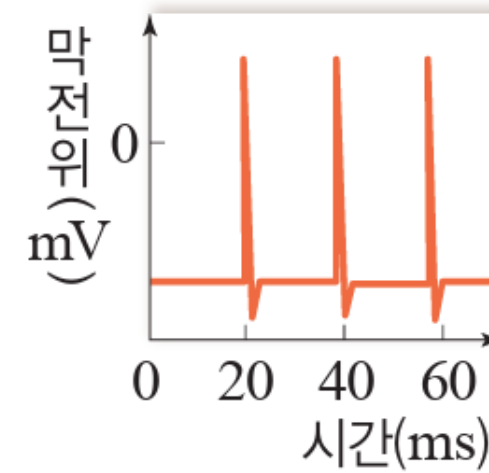
| 축삭돌기의 지름에 따른 신경자극전도 속도 비교 |



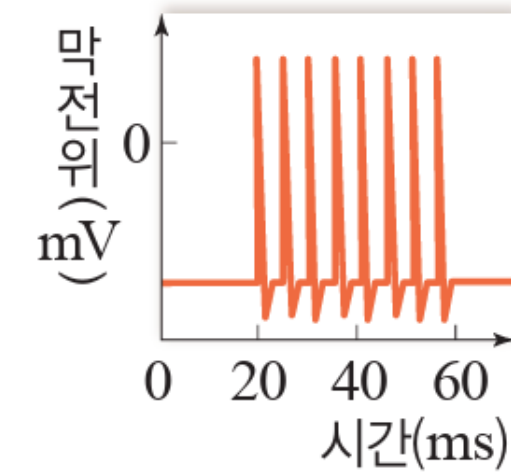
- 말이집신경인 A와 B에서 축삭돌기의 지름이 큰 A가 B보다 신경자극전도 속도가 빠르다.
 - B와 C는 축삭돌기의 지름이 같지만 B는 말이집신경, C는 민말이집 신경이므로 B가 C보다 신경자극전도 속도가 빠르다.
 - 민말이집신경인 C와 D에서 축삭돌기의 지름이 큰 C가 D보다 신경자극전도 속도가 빠르다.
- ➔ 신경자극전도 속도: $A > B > C > D$

자극의 세기에 따른 활동전위

- 자극의 세기가 강할수록 활동전위의 발생 빈도가 증가한다.
- 자극의 세기는 신경자극전도 속도에 영향을 주지 않는다.
- 역치 이상의 자극이 주어질 때 활동전위의 크기는 자극의 세기와 관계없이 일정하다.

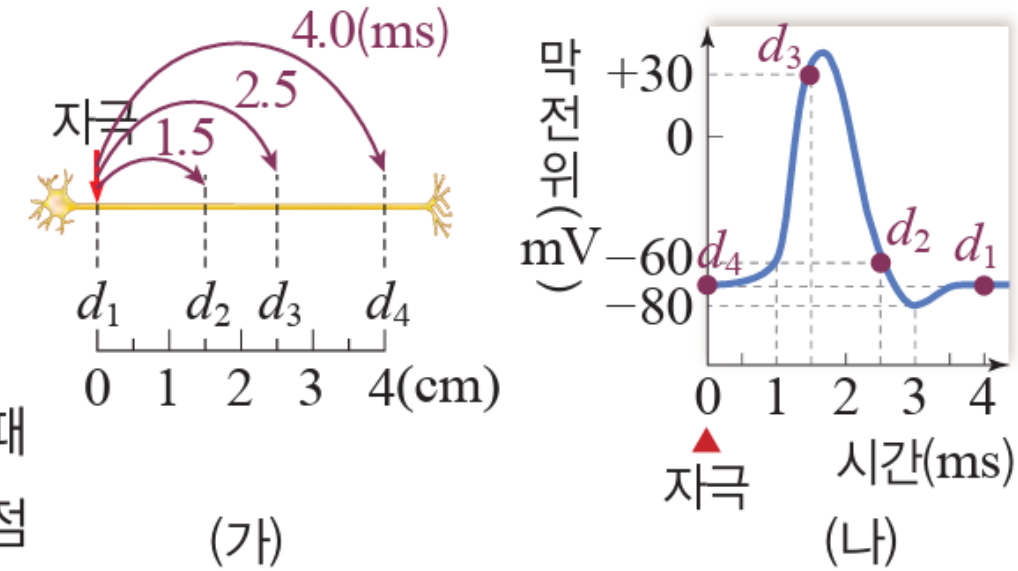


⬆️ 약한 자극



⬆️ 강한 자극

그림 (가)는 민말이집신경의 지점 $d_1 \sim d_4$ 와 역치 이상의 자극을 준 위치를, (나)는 각 지점에서 활동전위가 발생하였을 때의 막전위 변화를 나타낸 것이다. 이 신경에서 신경자극 전도 속도는 1 cm/ms 이고, 신경자극전도는 1회 일어났다.

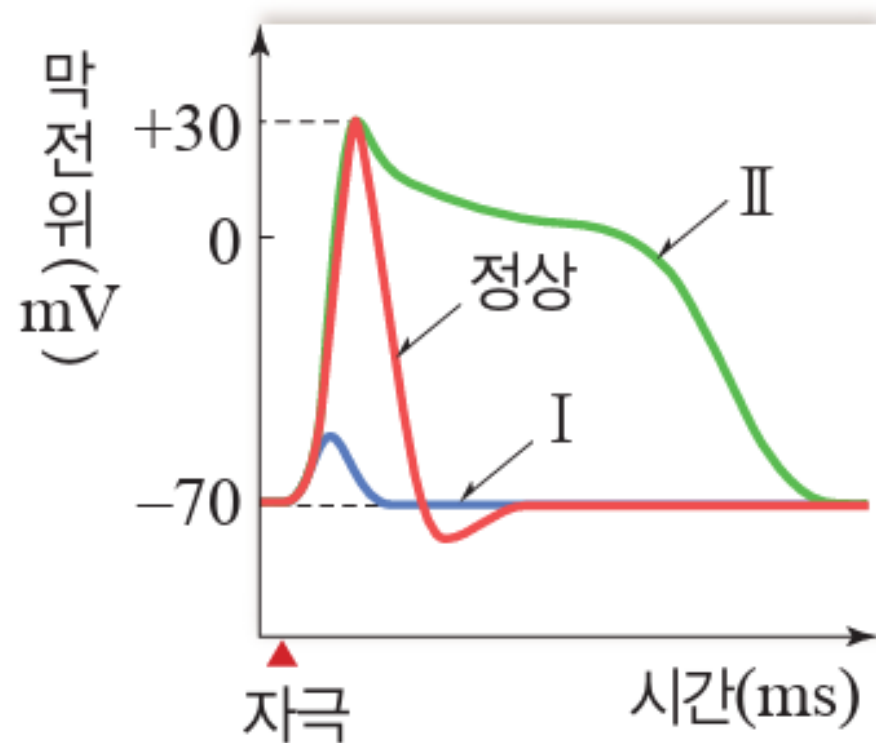


- ㉠ d_1 에 역치 이상의 자극을 주고 경과된 시간이 4 ms일 때 각 지점까지 신경자극이 전도되는 데 걸리는 시간과 각 지점의 막전위 변화가 진행된 시간

지점	d_1	d_2	d_3	d_4
d_1 과의 거리(cm)	0.0	1.5	2.5	4.0
신경자극이 전도되는 데 걸리는 시간(ms)	0.0	1.5	2.5	4.0
㉠이 4 ms일 때 막전위 변화가 진행된 시간(ms)	4.0(=4.0-0.0)	2.5(=4.0-1.5)	1.5(=4.0-2.5)	0.0(=4.0-4.0)
막전위 변화				

- 각 지점까지 신경자극이 전도되는 데 걸리는 시간 = $\frac{d_1\text{과의 거리}}{\text{신경자극전도 속도}}$

* 이온 통로를 통한 이온의 이동을 방해하는 물질을 처리하였을 때 막전위 변화



- I: Na^+ 통로를 통한 Na^+ 의 이동을 방해하는 물질을 처리하고 뉴런에 역치 이상의 자극을 주면
 ➔ 탈분극이 일어나지만 막전위가 역치전위를 넘지 못해 활동전위가 발생하지 않는다.
- II: K^+ 통로를 통한 K^+ 의 이동을 방해하는 물질을 처리하고 뉴런에 역치 이상의 자극을 주면
 ➔ 탈분극은 정상적으로 발생하지만, 막전위가 하강하는 데 걸린 시간이 정상보다 길어 재분극 구간이 길다.