

02

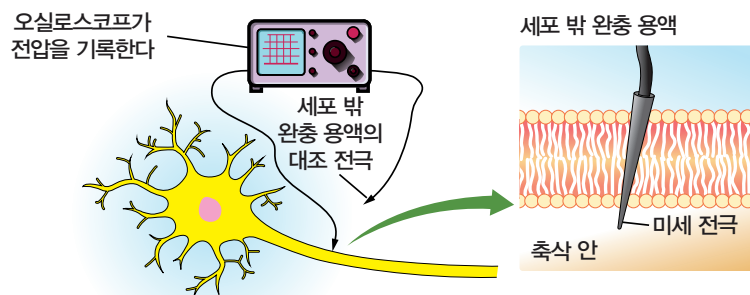
신경 세포의 막전위 변화

- 학습 목표**
- 신경 세포의 막전위 변화를 세포막에서의 이온 이동을 중심으로 설명할 수 있다.
 - 네른스트 방정식을 설명할 수 있다.

세포막은 어떤 이온은 투과시키지만 다른 이온들은 인지질 이중층에 박혀 있는 단백질 채널을 통해서만 투과시키도록 하는 선택적 투과성(selective permeability)을 가진다. 세포막에서 이루어지는 이온의 선택적 투과성에 의해 축삭에서는 막전위가 형성된다.

[1] '휴지 전위'는 자극받지 않은 신경 세포에서의 막전위이다

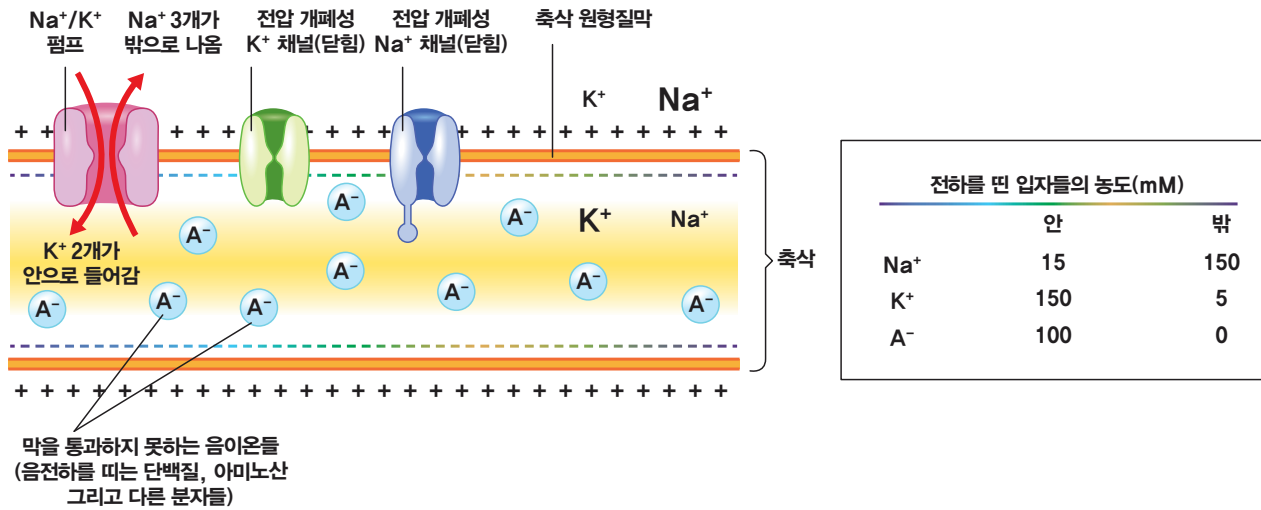
막전위는 전극으로 측정할 수 있으며, 자극을 받지 않은 상태에서 신경 세포가 갖는 막전위를 휴지 전위(resting potential)라고 한다. 휴지 전위는 신체 내에 있는 신경 세포의 경우는 $-50 \sim -60\text{mV}$ 사이로 측정되고, 분리된 신경 세포의 경우는 -70mV 로 측정된다. 막전위가 음의 값을 갖는 것은 세포 외부에 비해 내부의 값이 상대적으로 음의 값을 가지기 때문이다.



[그림 II-6] 막전위 측정 방법

그렇다면 휴지 전위는 어떻게 생성되는 것일까? 휴지 전위는 세포막의 선택적 투과성에 따라 세포 안과 밖에 나타나는 Na^+ 과 K^+ 의 불균등 분포로 인해 생긴다. 세포막에 박혀 있는 $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ 펌프는 ATP를 가수 분해하여 얻은 에너지로 Na^+ 3개를 세포 밖으로 내보내고 K^+ 2개를 세포 안으로 동시에 이동시킨다. 그 결과 동물의 경우 일반적으로 세포 내부 K^+ 의 농도가 150mM 정도로 외부의 5mM 보다 훨씬 높고, Na^+ 은 반대로 세포 외부가 150mM 정도로 안쪽의 농도 15mM 보다 높게 유지되면서 세포 바깥쪽이 양전하를 띠게 한다.

또 세포 안쪽에는 단백질, 아미노산, 핵산과 같이 음전하를 띠는 분자를 많이 포함하고 있기 때문에 세포 안쪽은 더욱더 음전하를 띤다.



[그림 II-7] 휴지 전위인 - 70mV를 만드는 축삭의 안과 밖에서의 이온들의 분포

세포막을 통해 이온을 이동시키는 힘은 전기적인 기울기와 이온의 농도 기울기에 의해 결정된다. 따라서 이온의 농도 기울기와 전기적인 기울기가 정확히 평형을 이루면 세포막을 통한 이온의 순확산은 사라지게 된다. 평형 상태에서 막전위의 세기를 평형 전위(equilibrium potential)라고 하며 네른스트 방정식으로 계산한다. 사람의 체온과 같은 37°C에서 Na⁺ 나 K⁺ 와 같이 + 1의 전하를 가진 이온에 대한 네른스트 방정식은 다음과 같다.

$$E_{ion} = 62mV \log_{10} \frac{C_o}{C_i}$$

C_o 는 외부의 이온 농도
 C_i 는 내부의 이온 농도

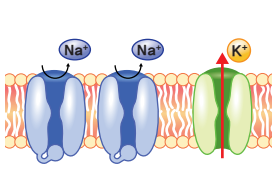
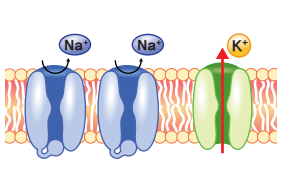
네른스트 방정식은 한 가지 종류의 이온에만 선택적인 투과성을 보이는 막에는 모두 적용할 수 있으며, 세포 외부에 대한 내부의 이온 농도 비율을 아는 경우 이론적인 휴지 전위를 계산할 수 있다. 네른스트 방정식에 의하여 [그림 II-7]에 있는 K⁺에 대한 평형 전위를 구해 보면 - 90mV가 된다. 음의 부호는 세포 안이 90mV만큼 음전하를 띠게 되면 K⁺가 평형 상태에 도달하게 되는 것을 의미한다. Na⁺에 대한 평형 전위를 구해 보면 + 62mV가 된다. 그렇다면 K⁺의 평형 전위가 -90mV임에도 불구하고 휴지 전위는 왜 -70mV를 나타내는 것일까? 이것은 신경 세포가 자극을 받지 않을 때 Na⁺ 채널을 통해 그 양은 적지만 Na⁺가 세포 안쪽으로 확산되어 들어가 세포 안의 음전하를 상쇄하기 때문이다.

[2] '활동 전위' 동안 막전위는 음전하에서 양전하로 바뀐다

신경 세포의 가지 돌기 또는 신경 세포체의 막이 자극되어 탈분극이 일어나면 막전위는 국부적인 전류 흐름에 의해 축삭 언덕(axon hillock)으로 퍼지며, 이때의 막전위는 자극의 세기와 강도에 따라 전류의 크기가 달라지는데 이를 수용기 전위라고 한다. 수용기 전위는 열려 있는 통로를 통한 이온의 누출로 인해 자극이 주어진 지점으로부터 멀어짐에 따라 크기가 점점 감소한다. 신경 세포의 축삭 언덕에서는 수용기 전위를 종합하여 활동 전위를 생성하게 된다.

[표 II-1]은 활성화 게이트와 불활성화 게이트라고 하는 2개의 문을 가진 전압 개폐성 Na^+ 채널과 활성화 게이트 하나만 가진 전압 개폐성 K^+ 채널의 변화에 의한 활동 전위 생성 과정을 나타낸 것이다.

[표 II-1] 전압 개폐성 Na^+ 채널과 K^+ 채널의 개폐와 막전위의 변화

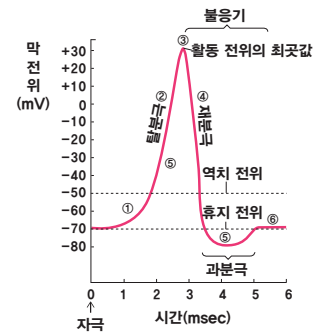
 <p>① 자극이 막전위를 역치까지 상승시킨다. Na^+ 채널의 활성화 게이트가 열린다.</p>	 <p>② 역치 이상이 되면 더 많은 Na^+ 채널이 열리고 막전위가 활동 전위의 최댓값까지 올라간다.</p>	 <p>③ 활동 전위가 최고치에 도달하면 Na^+ 채널의 불활성화 게이트가 닫히고 K^+ 채널의 활성화 게이트가 열리면서 K^+ 이 밖으로 확산된다.</p>
 <p>④ 농도 기울기에 따른 K^+의 세포 밖으로의 확산으로 인해 막전위가 떨어지기 시작한다.</p>	 <p>⑤ 막전위가 휴지 전위에 도달하면 Na^+ 채널의 활성화 게이트가 닫히고 불활성화 게이트가 열린다. K^+의 활성화 게이트가 서서히 닫힌다.</p>	 <p>⑥ K^+ 채널의 활성화 게이트가 닫히면 막전위는 휴지 전위로 돌아온다.</p>

신경 세포에 주어진 자극에 의해 축삭 언덕에서 탈분극이 일어나면 1밀리초(msec) 정도의 잠깐 동안 전압 개폐성 Na^+ 채널의 활성화 게이트가 열려 Na^+ 이 유입되고 막전위는 상승한다.

전압 개폐성 이온 채널

세포막에 걸린 전압의 변화에 의해 개폐가 결정됨

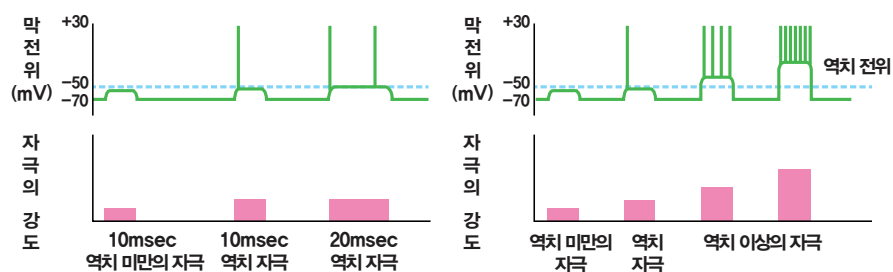
활동 전위에서의 막전위 변화



막전위의 상승은 더 많은 전압 개폐성 Na^+ 채널을 열리게 한다. 그 결과 막전위가 -50~-55mV 정도 되는 역치 전위(threshold potential)까지 올라가고, 더 많은 전압 개폐성 Na^+ 채널의 활성화 게이트가 열려서 Na^+ 들이 농도 기울기를 따라 축삭 안으로 이동하면서 막전위는 활동 전위의 최고치인 +30mV 까지 올라간다. 그 후 전압 개폐성 Na^+ 채널의 불활성화 게이트가 닫히고 Na^+ 가 세포 안으로 유입되지 않는 불응기(refractory period)가 시작된다. 동시에 전압 개폐성 K^+ 채널의 활성화 게이트가 열리기 시작하여 K^+ 들이 농도 기울기를 따라 빠른 속도로 축삭 밖으로 흘러 나간다. 결과적으로 K^+ 는 불응기에 기여하고 Na^+ 가 안으로 들어오는 것을 보상하여 막전위를 휴지 전위로 되돌아가게 한다. 휴지 전위가 다시 형성되면, 전압 개폐성 K^+ 채널의 활성화 게이트도 닫히고, 전압 개폐성 Na^+ 채널의 불활성화 게이트가 열리면서 신경 세포가 불응기를 끝내고 또 다른 자극에 의해 막이 활동 전위를 형성할 수 있도록 한다.

일부 신경 세포들에서는 전압 개폐성 K^+ 채널의 문이 느리게 닫히고, 세포막이 휴지 전위에 도달한 후에도 잠깐 동안 K^+ 가 밖으로 계속해서 빠져나간다. 이런 과도한 K^+ 의 유출은 막전위가 휴지 전위 아래로 잠시 내려가는 과분극을 일으킨다. 활동 전위의 끝에서 세포막은 휴지 상태의 이온 분포로 돌아가기 위해 Na^+ - K^+ 펌프가 Na^+ 와 K^+ 이온들을 원래 위치로 돌아가게 한다.

그렇다면 활동 전위의 크기로 서로 다른 자극의 세기를 구별할 수 있을까? 활동 전위는 실무율(all-or-none law)에 따라 역치 이상의 자극에 대해 동일한 크기의 반응이 나타난다. 활동 전위는 대부분 1~2msec로 지속되기 때문에 신경 세포는 1초에 수백 번의 높은 빈도로 활동 전위를 생성할 수 있다. 따라서 활동 전위의 발생 빈도는 자극의 세기가 커질수록, 그리고 역치 이상의 자극이 주어지는 시간에 따라 증가한다.



[그림 2-8] 자극의 지속 시간과 자극의 세기에 따른 활동 전위 발생 빈도



확인 문제

- 01 자극이 없을 때 신경 세포의 내부에 많이 분포하며 휴지 전위에 영향을 주는 이온의 종류를 쓰시오.
- 02 전압 개폐성 Na^+ 채널에 의한 탈분극 과정을 설명하시오.
- 03 역치 이상 자극의 세기에 따른 활동 전위의 발생 빈도를 설명하시오.