

로가 열려 있으며 소듐통로는 거의 닫혀 있는 상태이다.

열린 포타슘통로를 통한 K^+ 의 확산은 휴지막전위의 생성에 매우 중요하다. 휴지 상태의 포유류 신경세포의 경우 이 포타슘통로를 통해 K^+ 은 막의 양 방향으로 자유롭게 이동할 수 있다. K^+ 의 농도는 세포 안이 세포 밖보다 훨씬 높기 때문에 화학 농도기울기에 의해서 K^+ 은 세포 밖으로 이동한다. 그러나 포타슘통로는 K^+ 만을 통과시키기 때문에 Cl^- 나 다른 유기 음이온은 K^+ 과 동반하여 이동할 수 없다. 그 결과, K^+ 이 선택적으로 세포 밖으로 이동하여 세포 안은 잉여 음전하 상태가 초래된다. 신경세포에 이처럼 축적된 음전하는 막전위의 근원이 된다.

이때 음전하가 무한정 축적되지 않는 이유는 무엇인가? 답은 전기적 위치에너지 자체에서 찾을 수 있다. 세포 안의 잉여 음전하는 양전하를 띠고 있는 K^+ 을 끌어당겨 더 이상 세포 밖으로 확산되는 것을 방지한다. 따라서 이러한 전하 분리 현상(전압)에 의한 전기적 기울기는 K^+ 의 화학적 농도기울기와 정확히 균형을 이루게 된다.

휴지막전위 모델

신경세포로부터 K^+ 의 세포 밖으로의 이동은 화학적 힘과 전기적 힘이 균형을 이룰 때까지 지속된다. 어떻게 포유동물의 신경세포의 휴지막전위를 이 두 힘의 균형으로 설명할 수 있을까? 이 질문에 대한 해답을 찾기 위해서 인공막에 의해 나누어진 두 챔버 모델을 살펴보도록 하자(그림 48.7a). 우선 이 인공막에는 K^+ 만을 통과시킬 수 있는 이온통로가 매우 높은 밀도로 분포한다고 가정하자. 포유류 신경세포에서 관찰되는 K^+ 의 이온 농도기울기를 만들

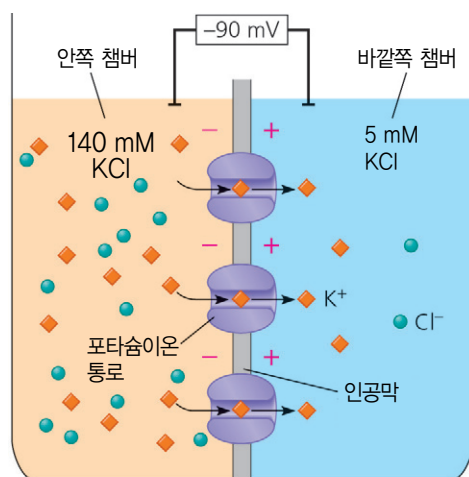
기 위해서 안쪽 챔버에는 140 mM 농도의 KCl 용액을 그리고 바깥쪽 챔버에는 5 mM KCl 용액을 채운다. 이때 K^+ 은 농도기울기를 따라 확산하여 높은 농도의 안쪽 챔버에서 낮은 농도의 바깥쪽 챔버로 이동하게 된다. 그러나 이온통로의 K^+ 에 대한 선택성으로 인해 염화이온(Cl^-)은 통과할 수 없다. 그 결과 막을 사이에 두고 전하의 분리 현상이 일어나게 되어서 안쪽 챔버가 상대적으로 과잉 음전하를 가지게 된다.

이 모델신경세포가 평형 상태에 도달하면 결과적으로 전기적인 기울기가 이온 농도기울기의 방향과는 반대 방향으로 발생하게 되는데, 따라서 농도기울기와 전기적인 기울기가 정확히 평형을 이루게 되어 막을 통한 K^+ 의 순확산은 완전히 사라지게 된다. 평형 상태에서 막전압의 세기를 평형전위(equilibrium potential, E_{ion})라 하며 네른스트공식(Nernst equation)에 의해서 계산된다. 사람의 체온인 37°C에서 Na^+ 이나 K^+ 과 같이 +1의 전하를 가진 이온에 대한 네른스트공식은 다음과 같다.

$$E_{ion} = 62 \text{ mV} \left(\log \frac{[ion]_{outside}}{[ion]_{inside}} \right)$$

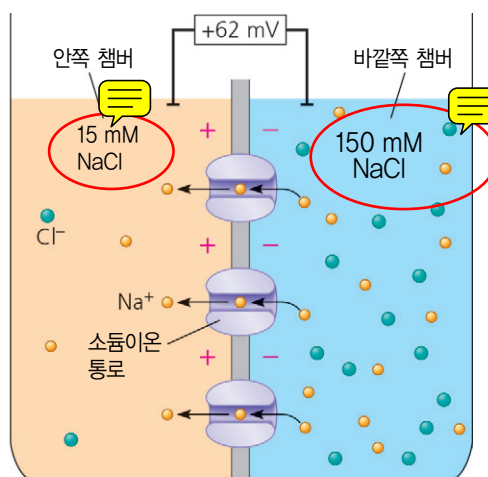
이 공식은 한 가지 종류의 이온에만 선택적인 투과성을 보이는 막에는 모두 적용될 수 있다. 앞서 제시된 모델로 돌아가서 네른스트 공식에 의해 포타슘에 의한 평형전위를 구해보면 -90 mV가 된다(그림 48.7a). 음부호는 세포 안이 90 mV 만큼 음전하를 띠게 되면 K^+ 이 평형 상태에 도달함을 의미한다.

K^+ 에 대한 평형전위는 -90 mV 임에도 불구하고 포유동물의 신경세포의 휴지막전위는 이보다 높다. 이러한 이론적인 값과 실제



(a) K^+ 에 대한 선택적인 투과성을 가진 막 37°C에서 네른스트공식에 의해 계산되는 K^+ 에 대한 평형전위:

$$E_K = 62 \text{ mV} \left(\log \frac{5 \text{ mM}}{140 \text{ mM}} \right) = -90 \text{ mV}$$



(b) Na^+ 에 대한 선택적인 투과성을 가진 막 37°C에서 네른스트공식에 의해 계산되는 Na^+ 에 대한 평형전위:

$$E_{Na} = 62 \text{ mV} \left(\log \frac{150 \text{ mM}}{15 \text{ mM}} \right) = +62 \text{ mV}$$

◀ **그림 48.7 포유류 신경세포의 모델링.** 각각의 용기를 인공막을 사이에 둔 두 개의 챔버로 나눈다. 이온통로를 통해 특정 이온이 자유롭게 막을 통과하며 이에 따라서 화살표로 표시된 이온의 흐름이 생긴다. (a) 막의 열린 포타슘통로를 통해 K^+ 이온이 통과함으로써 막은 K^+ 에 대해 선택적인 투과성을 가지며, 안쪽 챔버의 K^+ 농도가 바깥쪽보다 28배 높다. 이 경우 평형상태에서 막 안쪽의 상대적인 전압은 -90 mV이다. (b) 인공막이 Na^+ 이온에 대해 선택적인 투과성을 가지며, 안쪽 챔버의 Na^+ 농도가 바깥쪽보다 10배 낮다. 이 경우 평형상태에서 안쪽의 상대적인 전압이 +62 mV이다.

WHAT IF? 모든 상황이 (b)와 같다고 가정할 때 특정 종류의 이온에 대해 선택적인 이온통로를 더 하면 막전위는 변화할 것이다. 어떤 이온이 이 통로를 통과할 것이며, 어떤 방향으로 막전위는 변화할 것인가?