

Essential Cell Biology

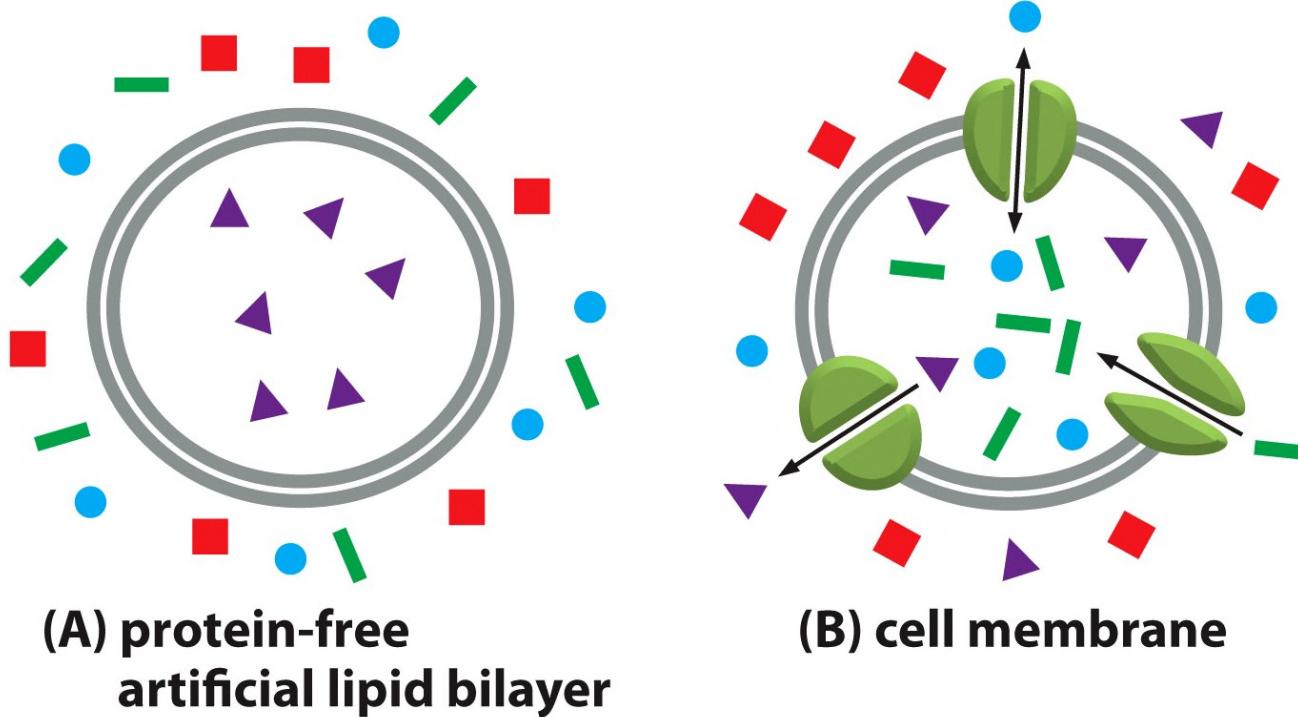
Third Edition

Chapter 12

Membrane Transport

막수송

- 지질이중층은 물질의 투과장벽으로 작용
- 막수송단백질을 경유하여 물질의 이동이 발생함
 - 수송체(transporter): 자신의 형상을 바꿔 용질이동
 - 통로(channel): 친수성막공을 통한 용질 이동



세포 내 이온농도는 세포바깥과는 매우 다르다

- 이 이온농도차이는 세포생존과 기능수행에 필수적임
- Na이온농도는 세포밖이 높으며, K이온농도는 세포 내부가 높음
- 세포 안과 밖의 양이온, 음이온은 거의 동량임

TABLE 12-1 A COMPARISON OF ION CONCENTRATIONS INSIDE AND OUTSIDE A TYPICAL MAMMALIAN CELL

COMPONENT	INTRACELLULAR CONCENTRATION (mM)	EXTRACELLULAR CONCENTRATION (mM)
Cations		
Na ⁺	5–15	145
K ⁺	140	5
Mg ²⁺	0.5	1–2
Ca ²⁺	10 ⁻⁴	1–2
H ⁺	7 × 10 ⁻⁵ (10 ^{-7.2} M or pH 7.2)	4 × 10 ⁻⁵ (10 ^{-7.4} M or pH 7.4)
Anions*		
Cl ⁻	5–15	110

* The cell must contain equal quantities of positive and negative charges (that is, be electrically neutral). Thus, in addition to Cl⁻, the cell contains many other anions not listed in this table; in fact, most cellular constituents are negatively charged (HCO₃⁻, PO₄³⁻, proteins, nucleic acids, metabolites carrying phosphate and carboxyl groups, etc.). The concentrations of Ca²⁺ and Mg²⁺ given are for the free ions. There is a total of about 20 mM Mg²⁺ and 1–2 mM Ca²⁺ in cells, but this is mostly bound to proteins and other substances and, for Ca²⁺, stored within various organelles.

지질 이중층은 용질과 이온에 대해 비투과성을 갖음

- 지질이중층 내부가 소수성이므로 친수성분자의 투과장벽으로 작용
- 산소, 이산화탄소 등은 이중층을 빠르게 투과함
- 작은 극성분자도 투과가능함
- 커다란 극성분자는 거의 투과불가능함
- 이온에 대해서 비투과성을 갖음

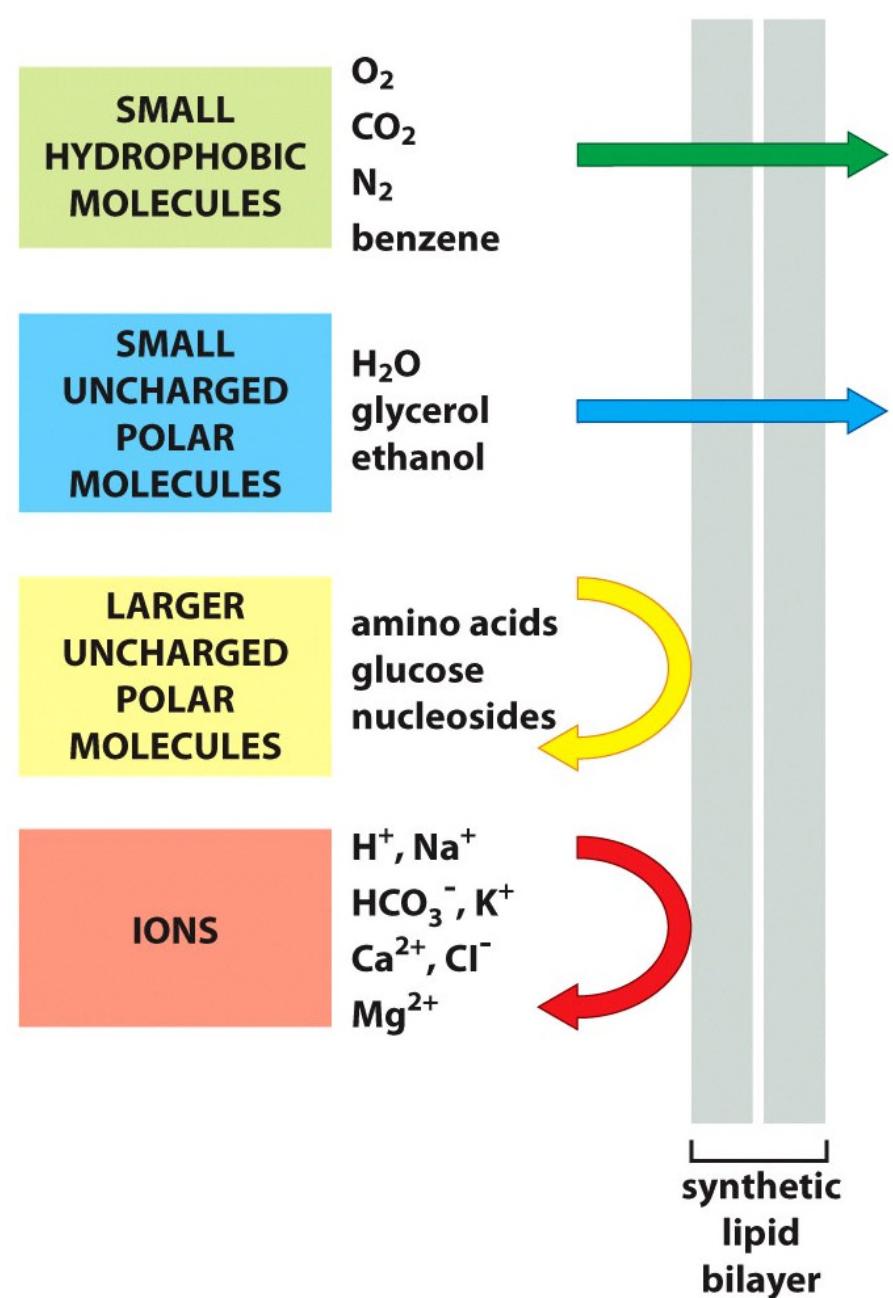
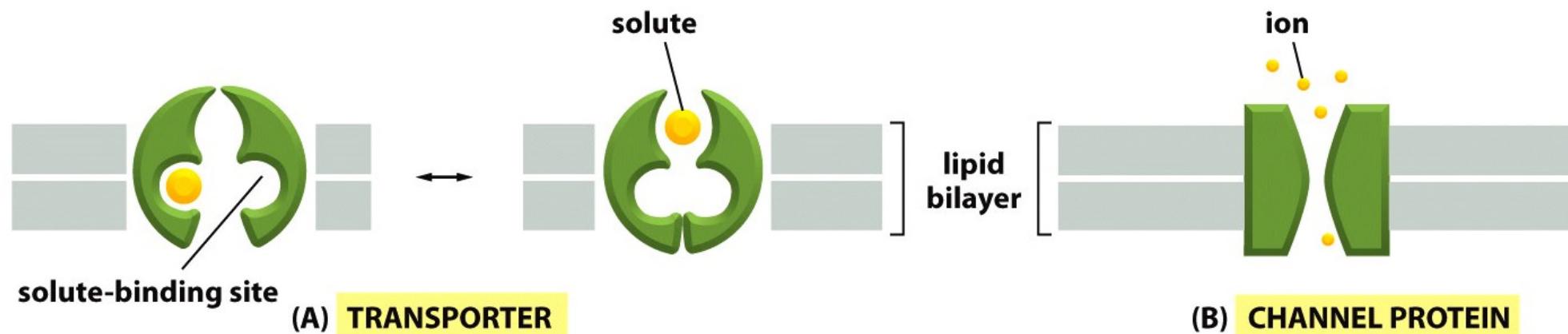


Figure 12-2 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

막수송단백질은 수송체(transporter)와 통로(channel)로 나눌 수 있다.

- 일부 작은 분자와 이온은 수송체 혹은 통로를 통해 세포내부로 들어옴
- 통로는 주로 용질의 크기와 전하를 기준으로 차별화됨
- 수송체는 단백질의 결합부위에 꼭 맞는 용질 분자만 수송



어느 막수송단백질이 더 특이적일까?

용질은 수동 및 능동수송을 통하여 세포막을 통과한다.

- 수동수송(passive transport) : 용질이 농도구배의 순방향으로 막을 가로질러 이동, 촉진확산(facilitated diffusion)이라고도 함
- 능동수송(active transport): 용질이 농도구배의 역방향으로 막을 가로질러 이동, 에너지소모가 필수적임

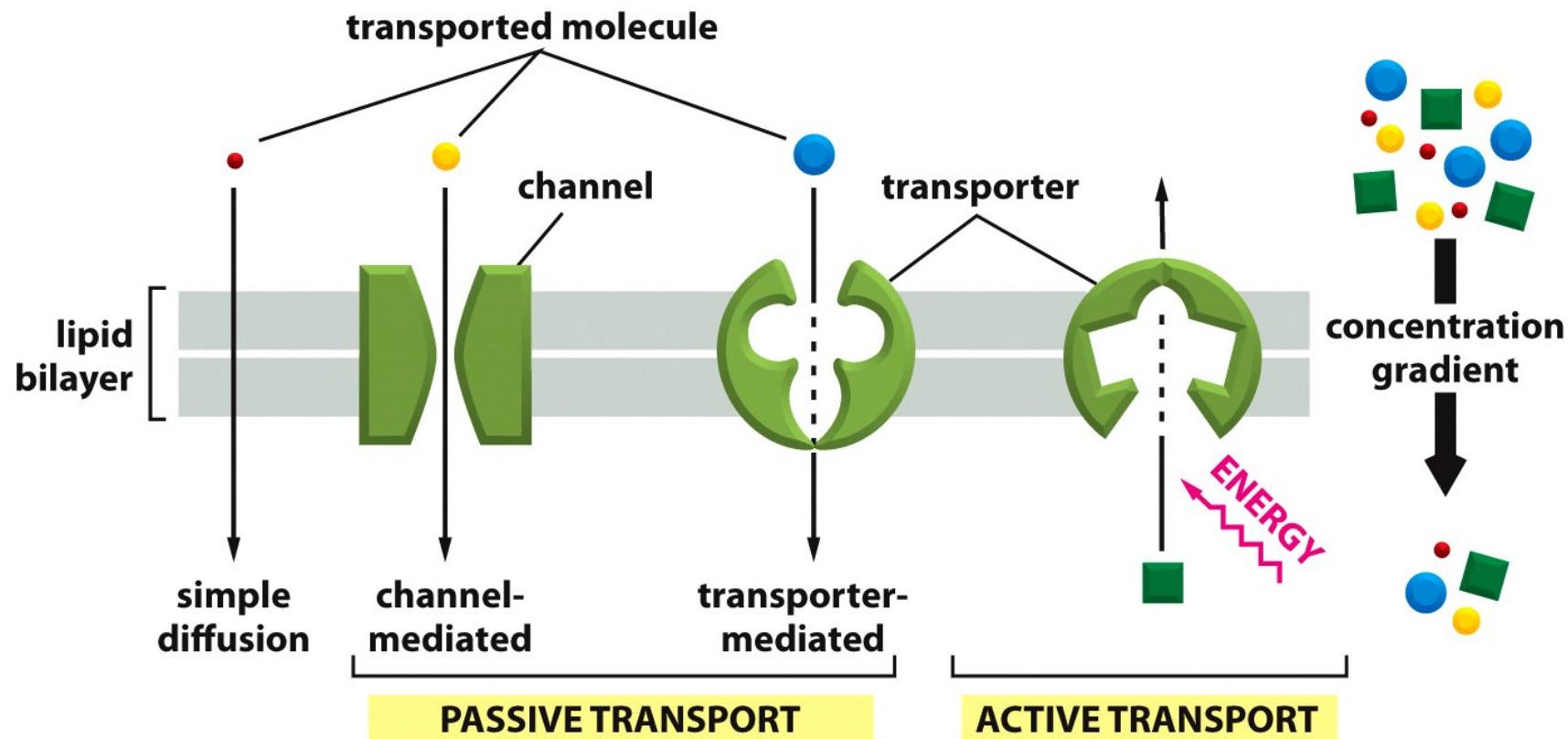


Figure 12-4 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

수송체와 그 기능

각 세포는 자신의 고유기능에 적합한 다양한 수송체를 갖음

- 원형질막: 당, 아미노산, 뉴클레오티드 수송체, Na-K 이온채널
- 라이소솜: H^+ 수송체
- 미토콘드리아 내막: 프브루산수송체, ATP수송체

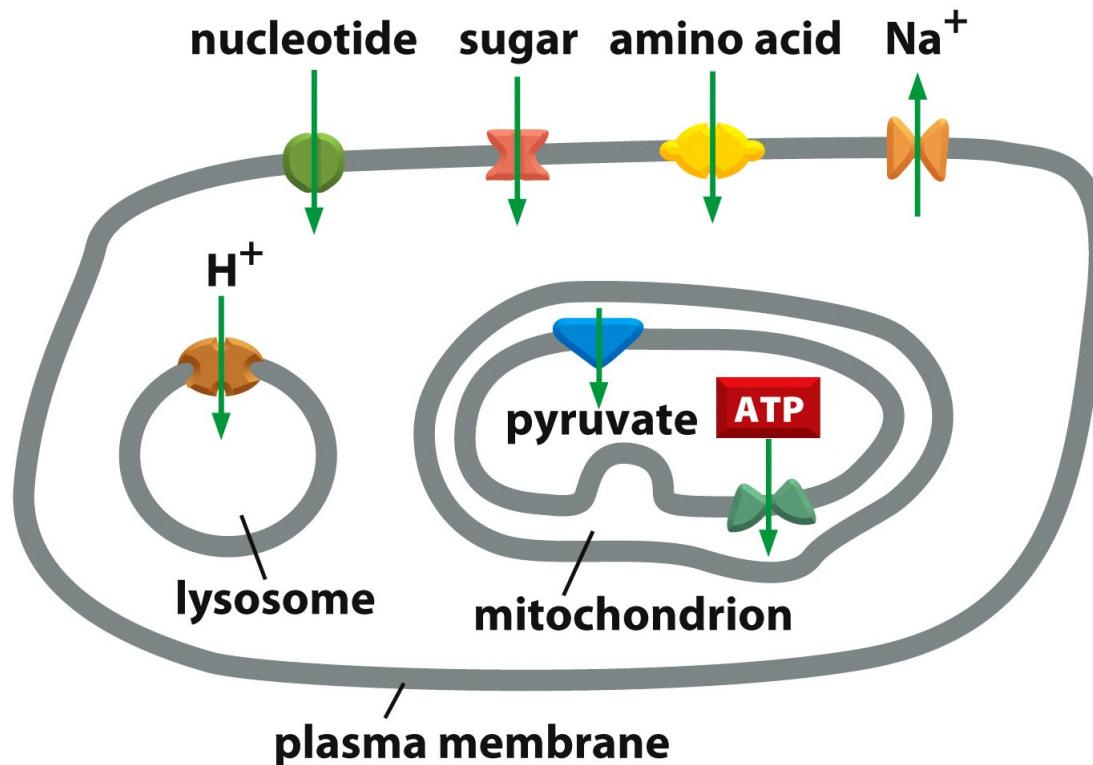


Figure 12-5 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

농도구배와 전기력이 수동수송을 구동한다.

중성분자의 수동수송

- 중성분자의 수동수송의 구동력은 **농도구배**이다
예: 간세포막의 포도당수송체
식후 경우와 저혈당의 경우 수송체의 수송방향이 반대임
- 이런 종류의 수송체는 자신이 수송방향을 결정하지 못함

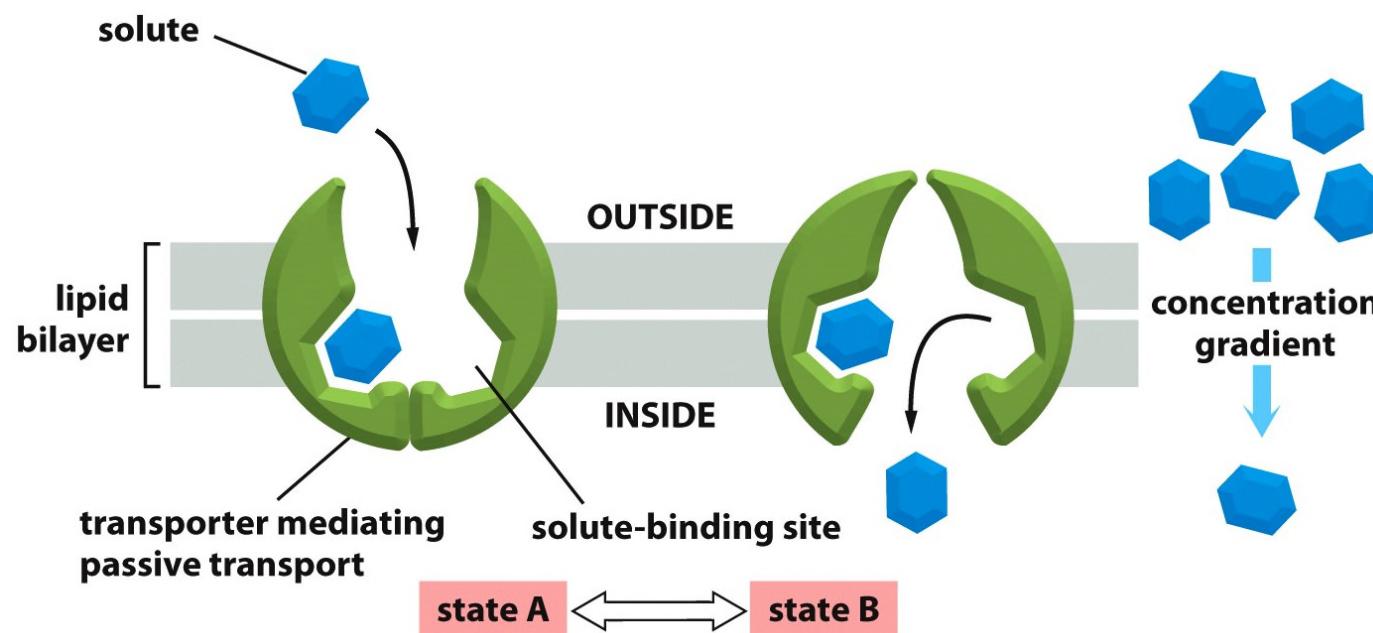


Figure 12-6 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

- 막전위(membrane potential): 세포막을 가로질러 발생하는 전위차
세포막은 세포안쪽이 음전위를 갖음 → 양이온을 세포안쪽으로
음이온을 세포바깥쪽으로 보내려는 경향

이온의 수동수송

- 이온을 수송하는 구동력은 농도구배와 전위차 두 가지의 복합적인 결과임
- 두 효과의 총합 → 전기화학적구배(electrochemical potential)

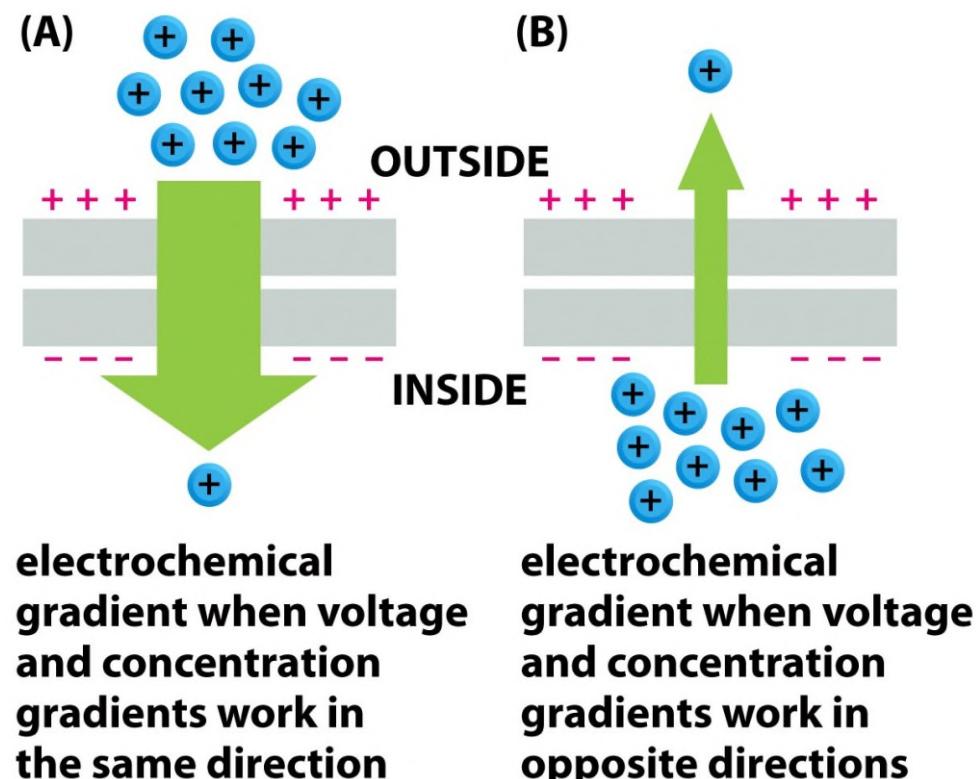
- 두 가지 경우가 발생함

농도구배에 대해 전위차가 순방향

예: Na^+

농도구배에 대해 전위차가 역방향

예: K^+



능동수송은 전기화학구배를 역행하여 용질을 수송한다.

- 능동수송은 세포안의 이온조성 유지에 필수적임

- 능동수송체의 종류

연계수송체(coupled transporter): 한가지 용질의 오르막수송과 다른 용질의 내리막수송을 연계함

ATP구동펌프(ATP-driven pump): 오르막수송을 ATP의 가수분해와 연계

예: **Na⁺-K⁺ ATPase (Na-K 이온펌프)**

광구동펌프(light-driven pump): 오르막수송을 빛에너지 유입과 연계

예: 박테리오로돕신

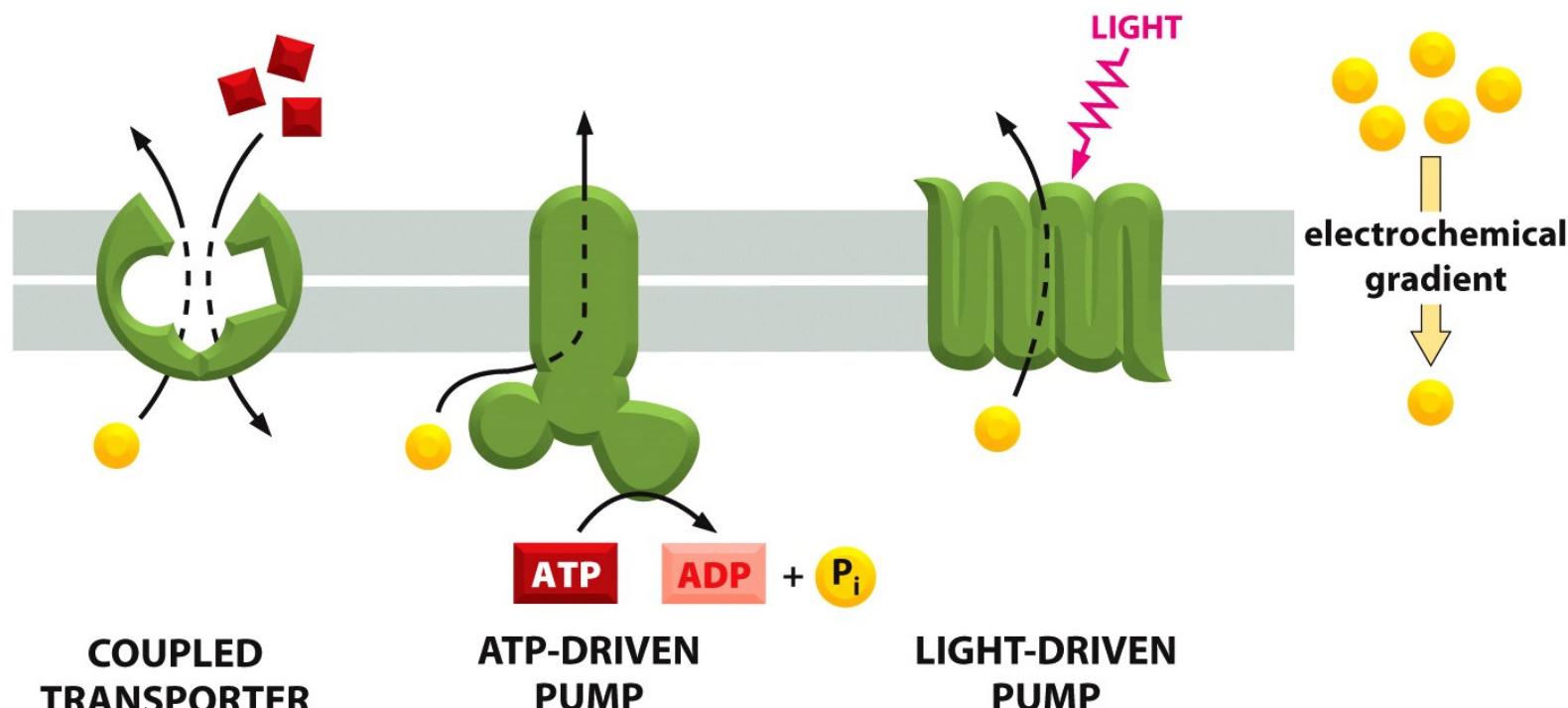


Figure 12-8 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

동물세포는 Na^+ 배출을 위해 ATP 가수분해에너지를 이용한다.

Na^+-K^+ ATPase (Na-K 이온펌프)

- 이온수송체이며, ATP를 가수분해하는 효소임
- ATP를 가수분해한 에너지를 이용 Na 이온과 K 이온을 수송함
- 동물세포의 에너지소모량의 30% 차지
- Na 이온의 경우 세포기질 쪽이 10~30배 낮은 농도
(Na 이온의 이동은 막전위를 형성시키는 주된 원인임)
- K 이온의 경우 세포기질 쪽이 10~30배 높은 농도

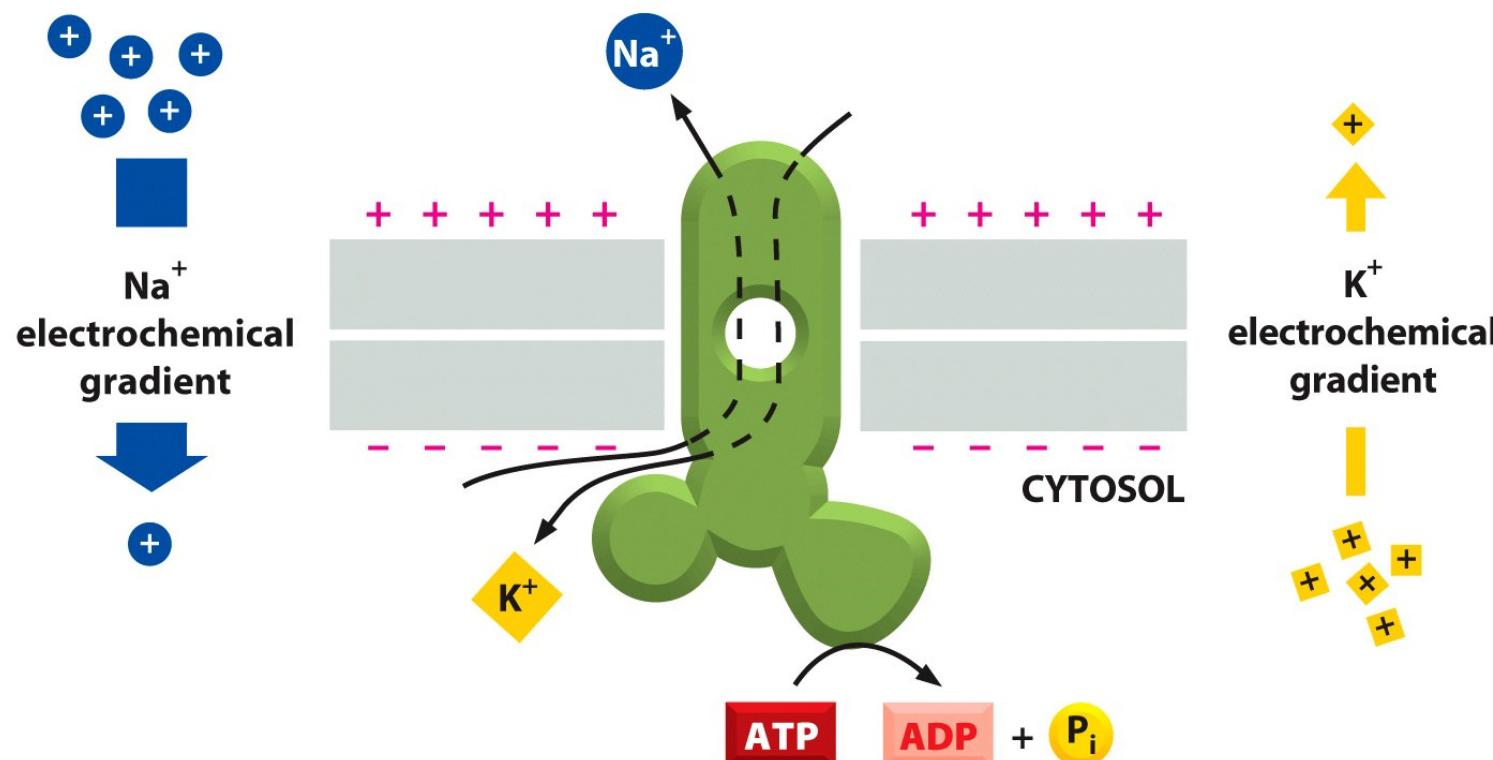


Figure 12-9 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

Na-K 이온펌프 의 구동원리

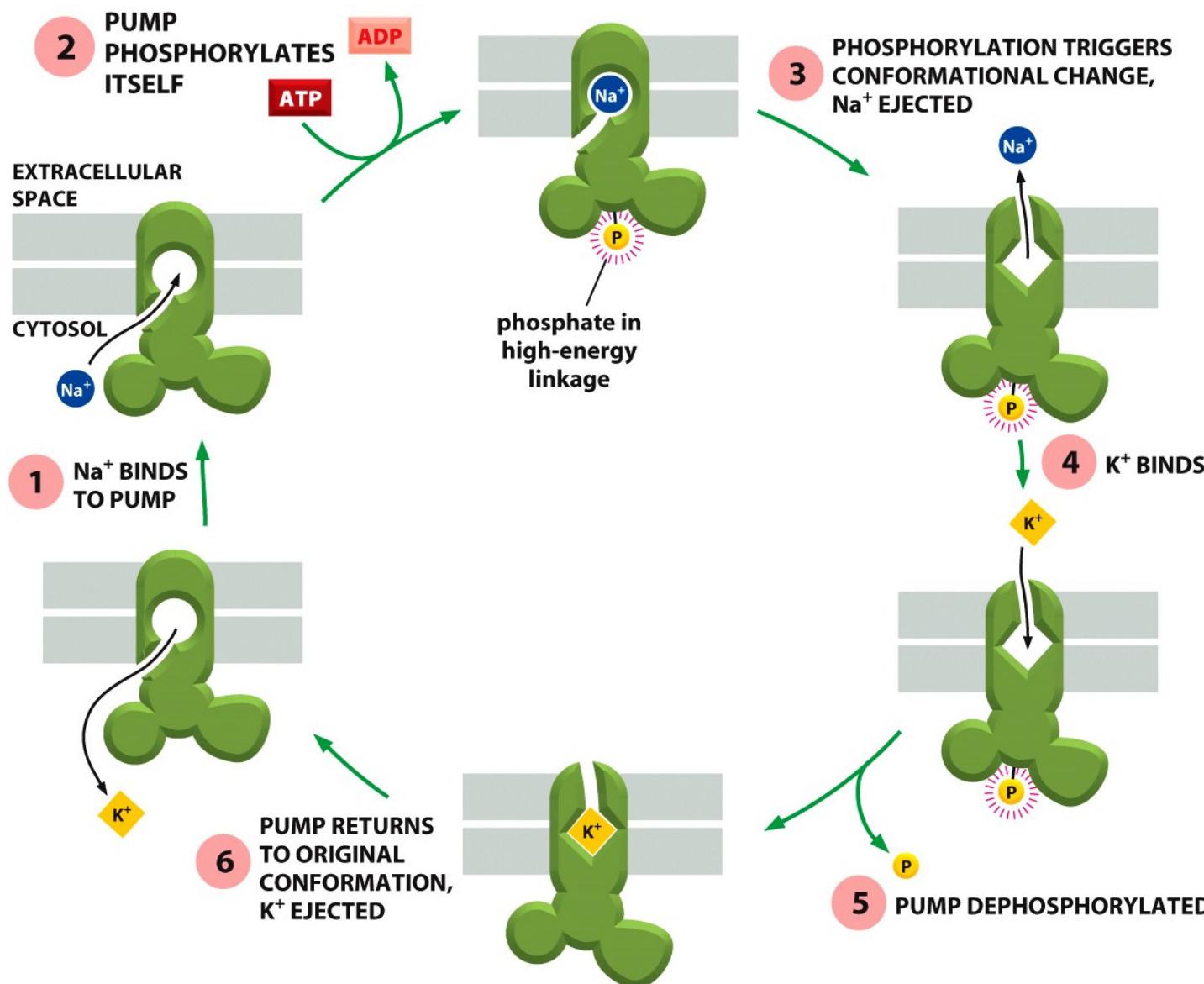


Figure 12-11 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

세포에서의 삼투압

- 원형질막은 물에 대해 투과성을 가지고 있음
아쿠아포린: 원형질막의 특화된 물의 통로단백질
- 이온농도가 높은 쪽으로 원형질막을 가로질어 물분자 이동
→ 삼투압(osmotic pressure): 막을 가로질러 발생하는 수압차
물의 이동의 구동력임

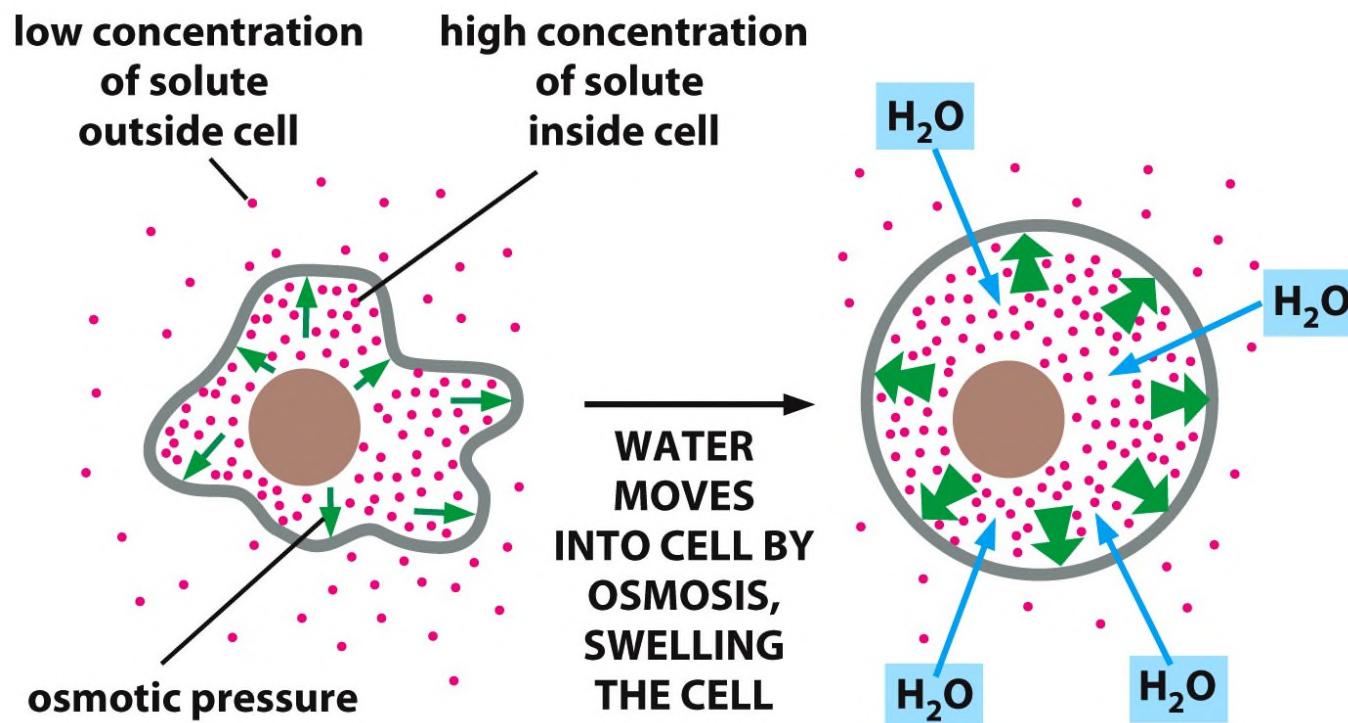
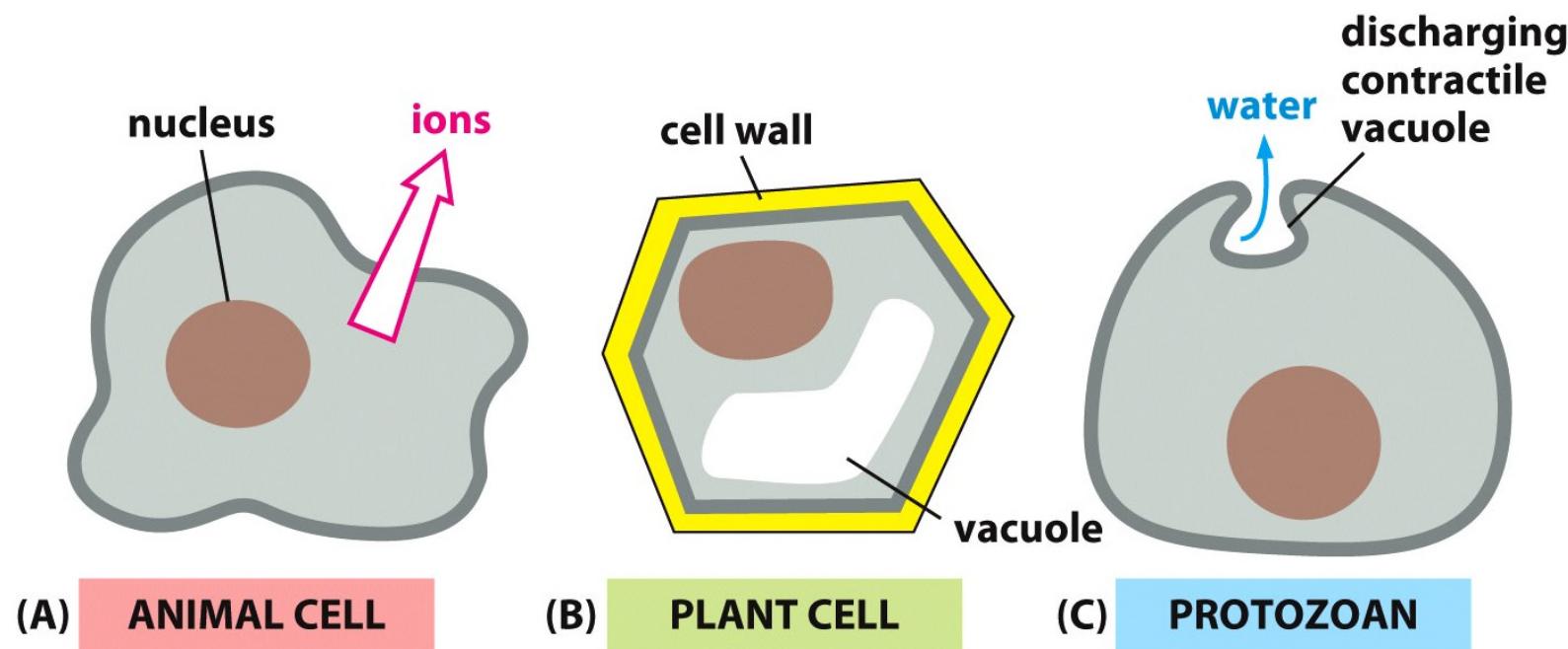


Figure 12-12 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

삼투압에 의한 팽창을 막기 위해 세포는 각기 다른 방식을 사용한다.

- 동물세포의 경우: 전기화학구배에 의해 외부용질이 수시유입
→ Na-K 이온펌프는 Na^+ 를 세포 바깥으로 퍼내어 용질균형을 맞춤
- 식물세포의 경우: 단단한 세포벽이 팽창을 막음
- 원생동물의 경우: 주기적으로 수축포를 통해 물 배출



세포안의 Ca^{2+} 농도는 Ca^{2+} 펌프에 의해 낮게 유지된다.

- 수송을 통해 세포안을 저농도(10^{-4} mM)로 유지, 세포 밖은 1~2mM
- 세포 안의 낮은 Ca^{2+} 온농도는 매우 중요한 역할
→ Ca^{2+} 의 세포유입 시 신호전달물질분비 혹은 근육세포수축

Ca^{2+} 펌프

- 이온수송체이며 ATP가수분해효소임
- ATP 가수분해에너지를 이용 Ca^{2+} 을 오르막수송함
- 주기적인 인산화과정과 탈인산화과정을 통하여 이온수송

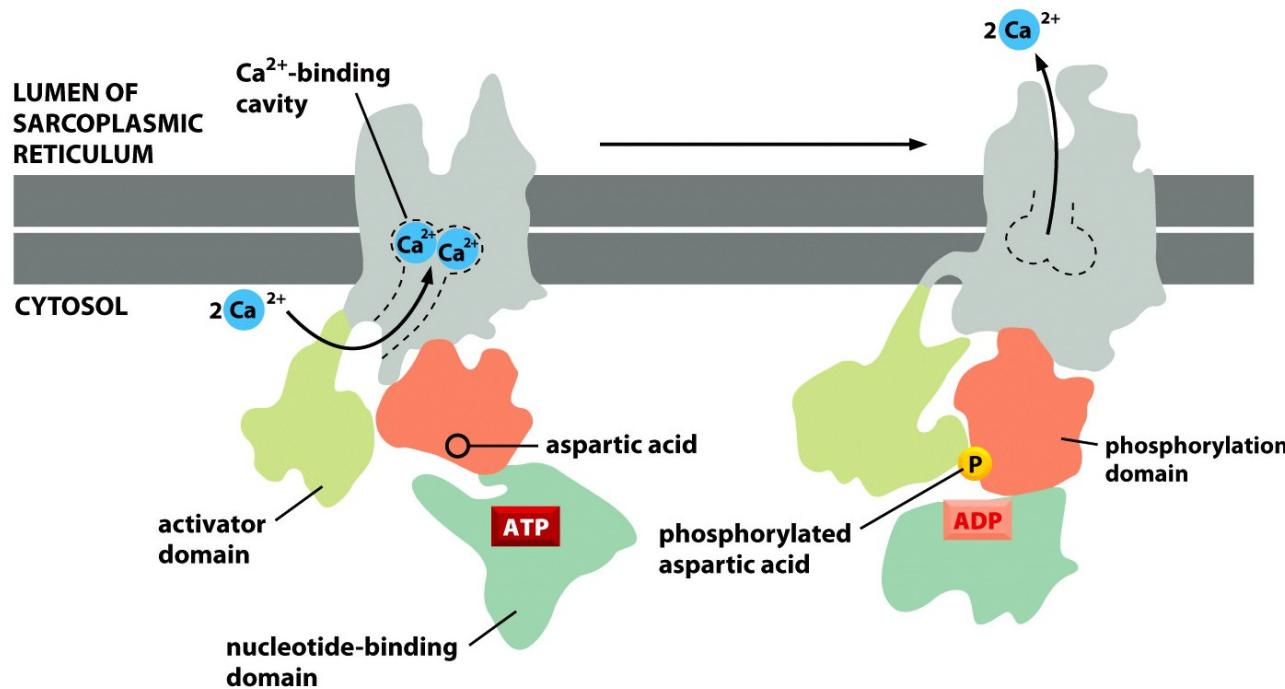


Figure 12-15 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

연계수송체(coupled transporter)

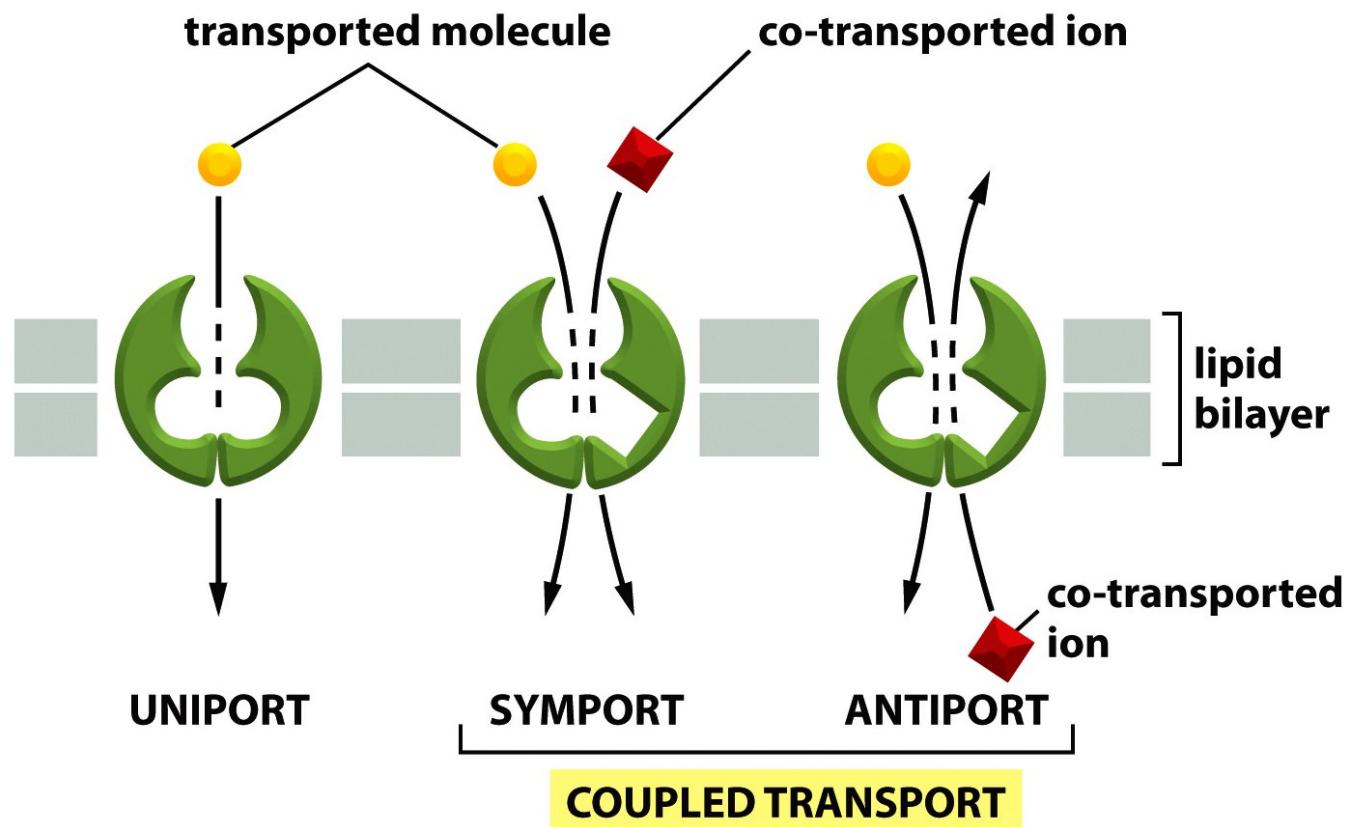
- 한 용질의 내리막수송을 에너지원으로 다른 용질을 오르막수송을 수행함

- 연계수송체의 종류

동방향수송체(symport): 두 용질을 같은 방향으로 수송함

역방향수송체(antiport): 두 용질을 서로 반대방향으로 수송함

cf: 단일수송체(uniprot): 한 종류의 용질만 수송 → 연계수송체 아님



장상피세포의 포도당-Na⁺ 동방향수송체

- 장내의 높은 Na이온 농도에 의한 농도구배를 에너지원으로 Na이온과 포도당을 세포내부로 수송함

질문) 만약 장상피세포에 포도당 수동수송체가 있다면?

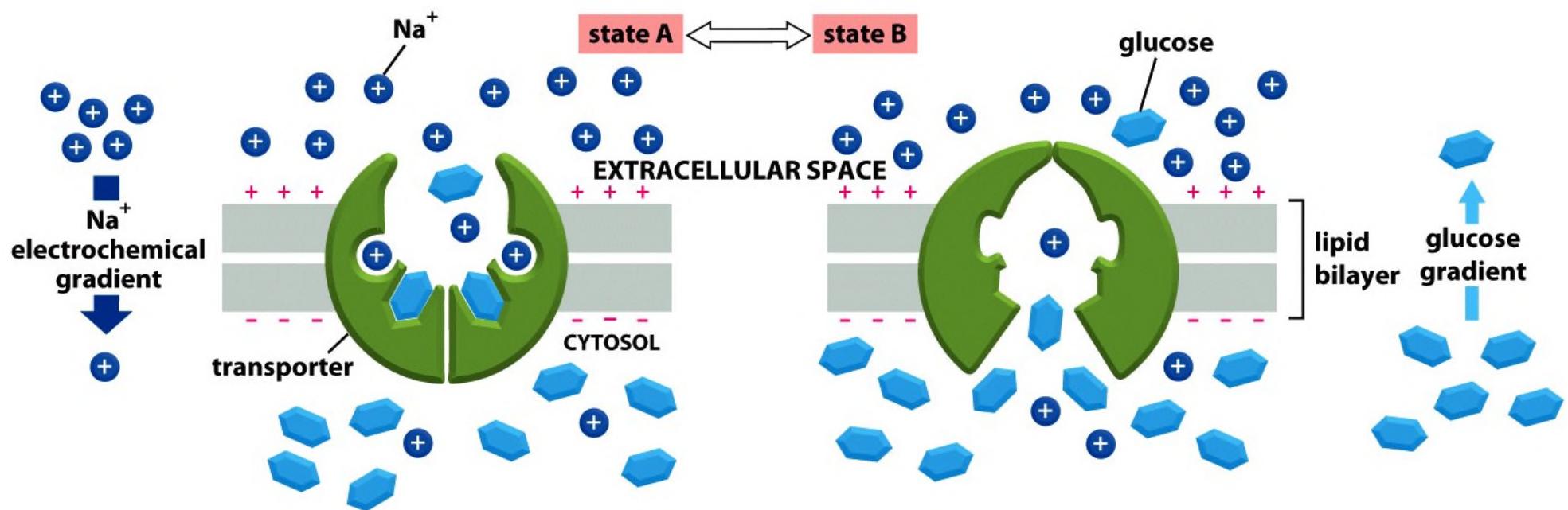


Figure 12-17 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

장상피세포의 포도당수송체의 분포

- 장내강 부위: 포도당- Na^+ 연계수송체가 존재함
- 세포의 측면부와 기저부: 포도당 수동수송체가 존재함
- 이 두 종류의 수송체는 세포간 밀착결합에 의해 분리됨
→ 서로 섞이지 못함
- 다른 당 혹은 아미노산도 같은 원리로 흡수함

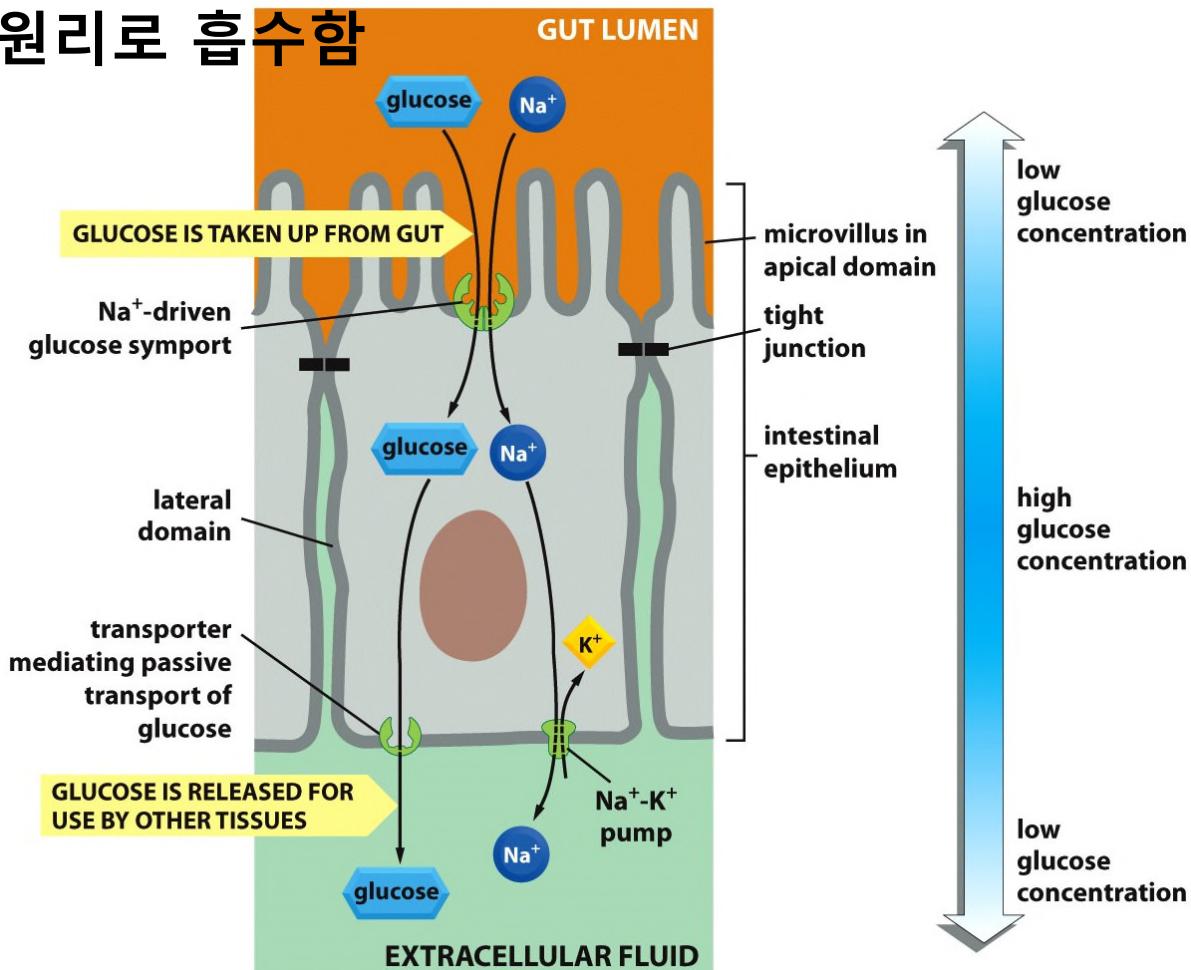


Figure 12-18 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

H^+ 농도구배는 식물, 진균, 박테리아의 막수송의 추진력이다.

- 동물세포의 Na-K 이온펌프 대신 식물세포에는 H이온펌프가 존재함
- H^+ 펌프에 의해 막을 가로질러 H^+ 구배(혹은 pH구배) 발생
→ H^+ 의 전기화학구배를 이용하여 특정용질을 연계수송

참고: 광합성박테리아는 박테리오로톱신에 의해 빛에너지를 이용 H^+ 구배를 형성함

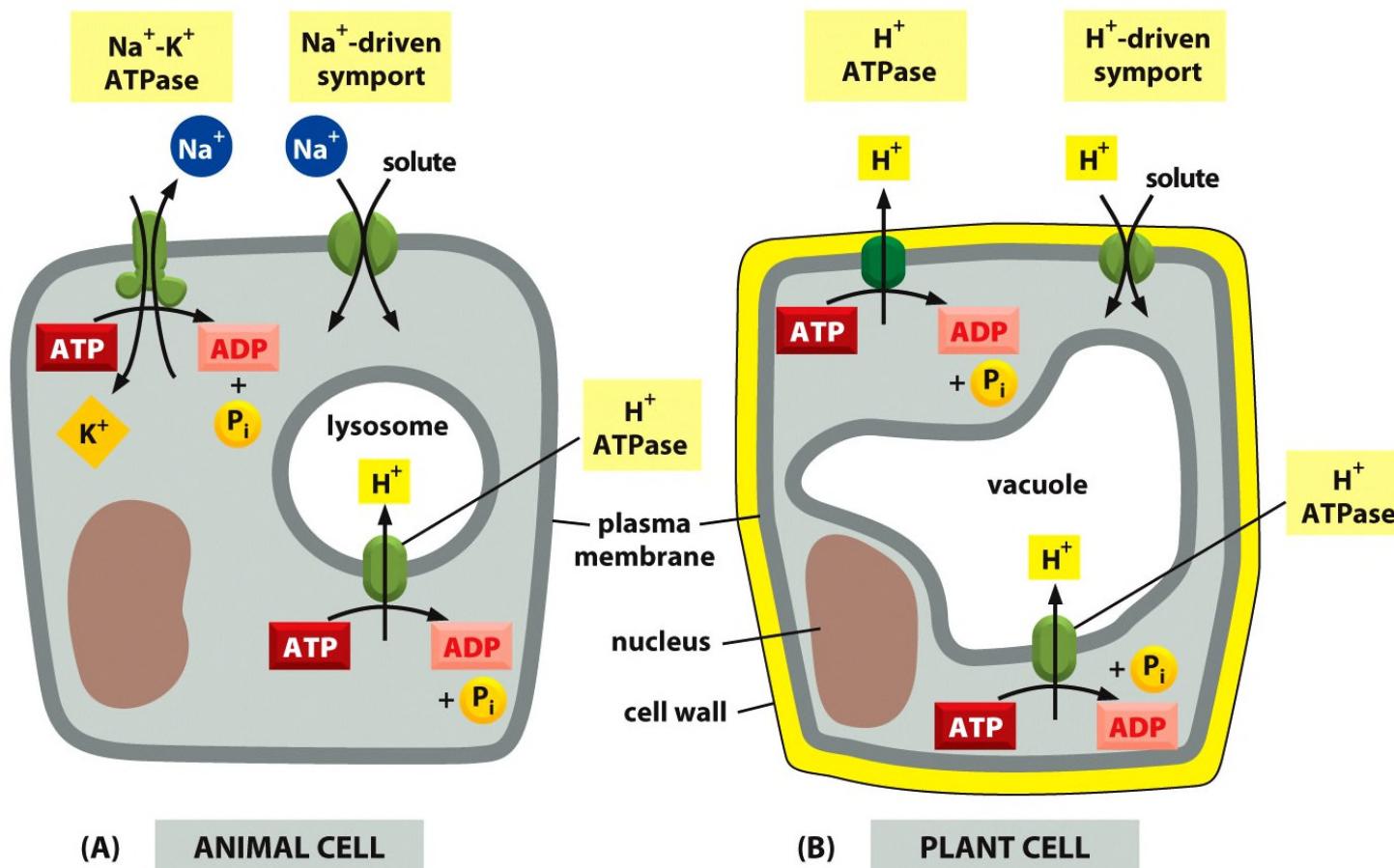


Figure 12-19a,b Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

수송체의 몇 가지 예

TABLE 12-2 SOME EXAMPLES OF TRANSPORTERS

TRANSPORTER	LOCATION	ENERGY SOURCE	FUNCTION
Glucose transporter	plasma membrane of most animal cells	none	passive import of glucose
Na ⁺ -driven glucose pump	apical plasma membrane of kidney and intestinal cells	Na ⁺ gradient	active import of glucose
Na ⁺ -H ⁺ exchanger	plasma membrane of animal cells	Na ⁺ gradient	active export of H ⁺ ions, pH regulation
Na ⁺ -K ⁺ pump (Na ⁺ -K ⁺ ATPase)	plasma membrane of most animal cells	ATP hydrolysis	active export of Na ⁺ and import of K ⁺
Ca ²⁺ pump (Ca ²⁺ ATPase)	plasma membrane of eucaryotic cells	ATP hydrolysis	active export of Ca ²⁺
H ⁺ pump (H ⁺ ATPase)	plasma membrane of plant cells, fungi, and some bacteria	ATP hydrolysis	active export of H ⁺
H ⁺ pump (H ⁺ ATPase)	membranes of lysosomes in animal cells and of vacuoles in plant and fungal cells	ATP hydrolysis	active export of H ⁺ from cytosol into vacuole
Bacteriorhodopsin	plasma membrane of some bacteria	light	active export of H ⁺

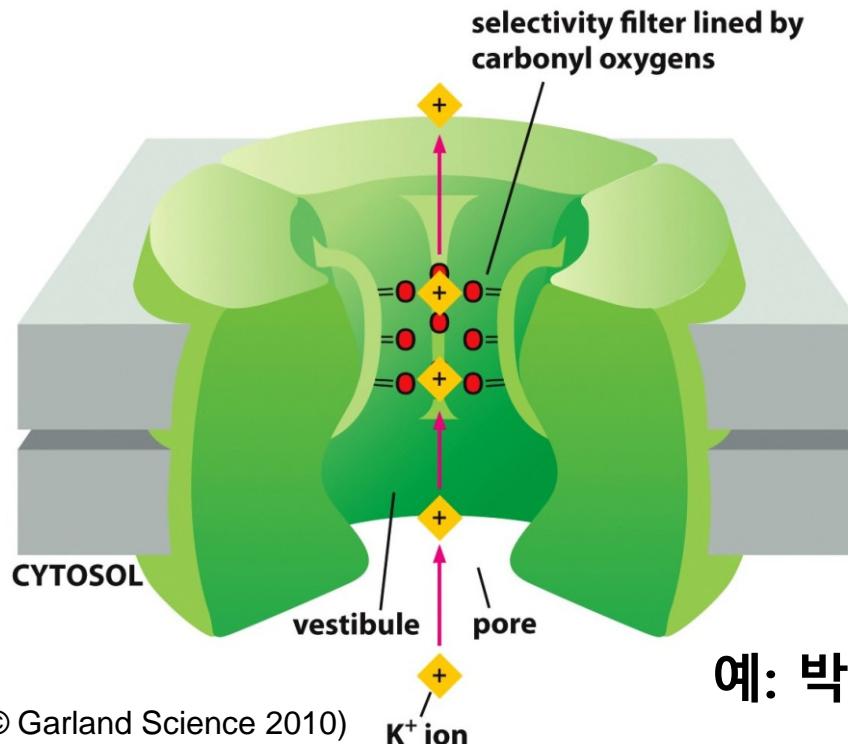
이온통로와 막전위

이온통로는 이온선택성을 가지며 개폐가 조절된다.

이온통로의 특성(1):

이온선택성이 있어 특정 무기 이온 만 통과시킴

- 이온통로의 지름, 형태, 통로표면의 전하성아미노산 분포에 의해 결정
질문: 작은 양이온(수소이온등)을 투과시키려면 어떻게 해야 하는가?



예: 박테리아의 K이온채널

이온통로의 특성(2): 전형적인 이온통로는 폐쇠구조와 개방구조를 오간다

- 열린 이온통로는 이온이 지날 때 구조변화가 없으므로 수송속도는 수송체에 비해서 월등히 높음
- 이온통로는 에너지와 연계하여 **능동수송을 하지 못함**
- 이온통로가 열리면 이온농도 구배의 순방향으로 맹렬히 이동함
→ 막전위를 변화시킴 → 세포막을 따라 전기신호가 전달됨 (신경신호전달)

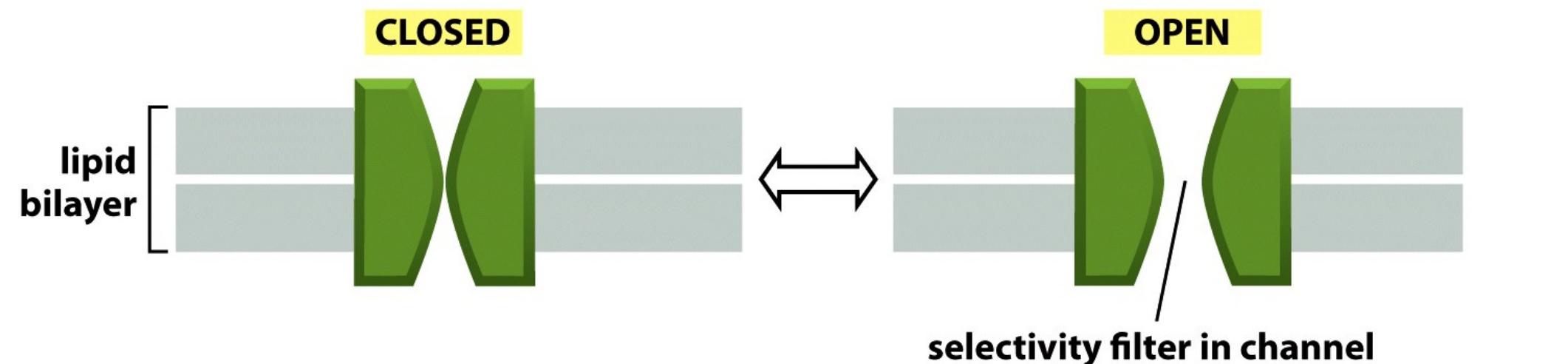


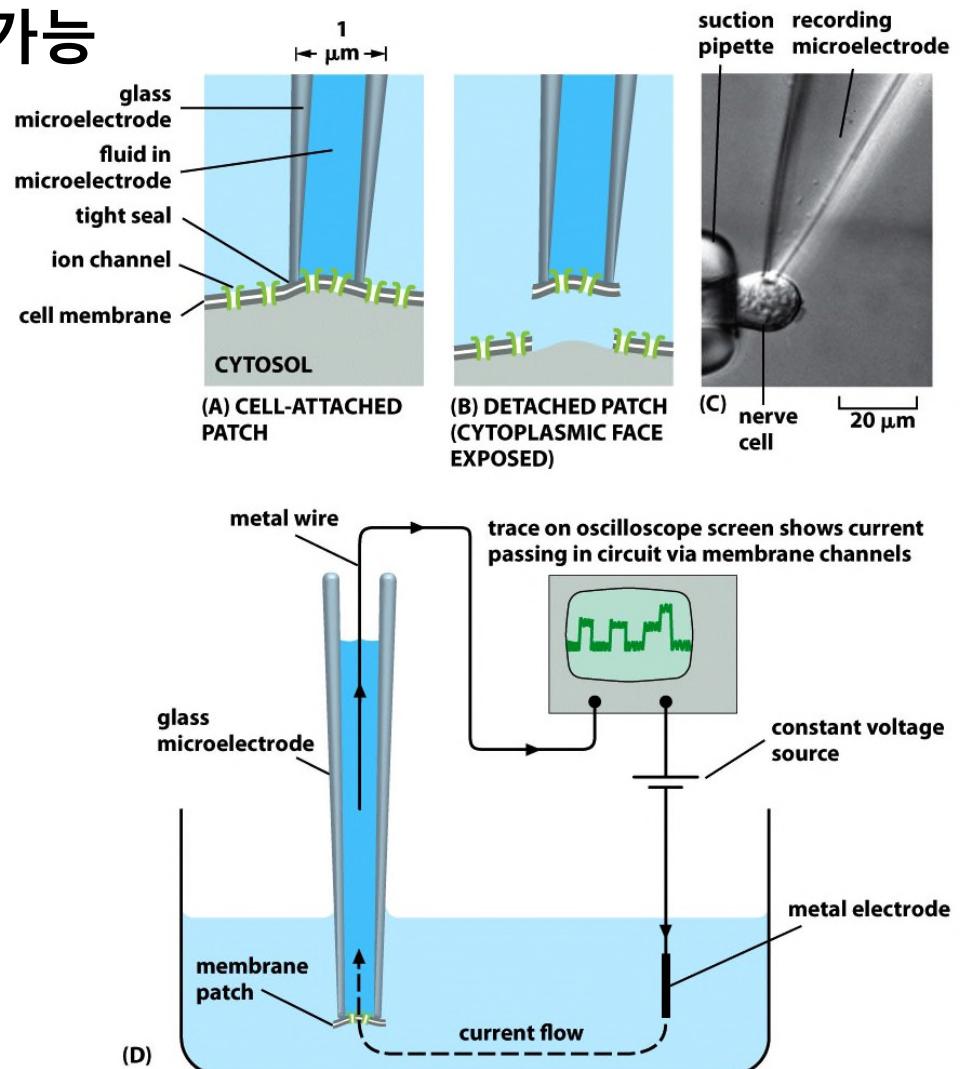
Figure 12-21 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

이온통로는 무작위로 개방과 폐쇄 상태를 재빠르게 오간다

질문: 이온통로 하나의 개방/폐쇄 상태를 모니터링 할 수 있을까?

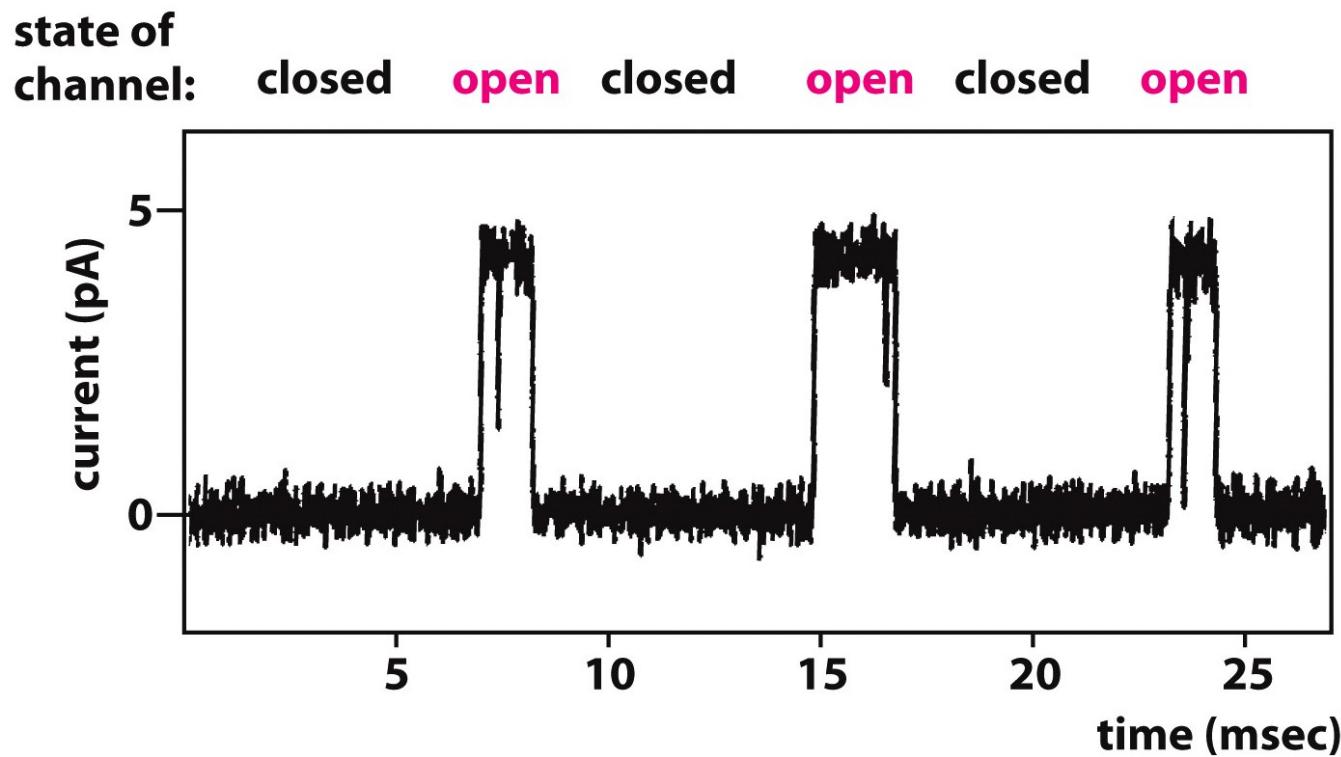
패치클램프(Patch-clamp recording)

- 모세관전극을 이용 이온채널을 세포막에서 분리하여 이온통로의 이온흐름을 모니터링하는 기술
- 단 한 개의 이온채널의 동작특성도 검지가능



-외부 조건이 일정해도 이온채널은 무작위로 개폐를 반복함
→ 전류가 흘렀다 갑자기 흐르지 않음

예: 근육세포의 아세틸콜린연계 이온통로
아세틸콜린과 결합 후 통로가 열렸다 재빠르게 닫힘



다양한 유형의 자극이 이온통로의 개폐에 영향을 준다

이온선택성과 개폐조건에 따른 이온채널의 분류

- 전위의존적 통로 (voltage-gated channel): 통로가 열리는 확률이 막전위에 의존함
- 리간드의존적 통로 (ligand-gated channel): 통로단백질과 결합하는 특정분자(리간드)에 의해 조절됨
- 자극의존적 통로 (stress-gated channel): 통로단백질에 가해지는 기계적인 힘에 의해 조절됨

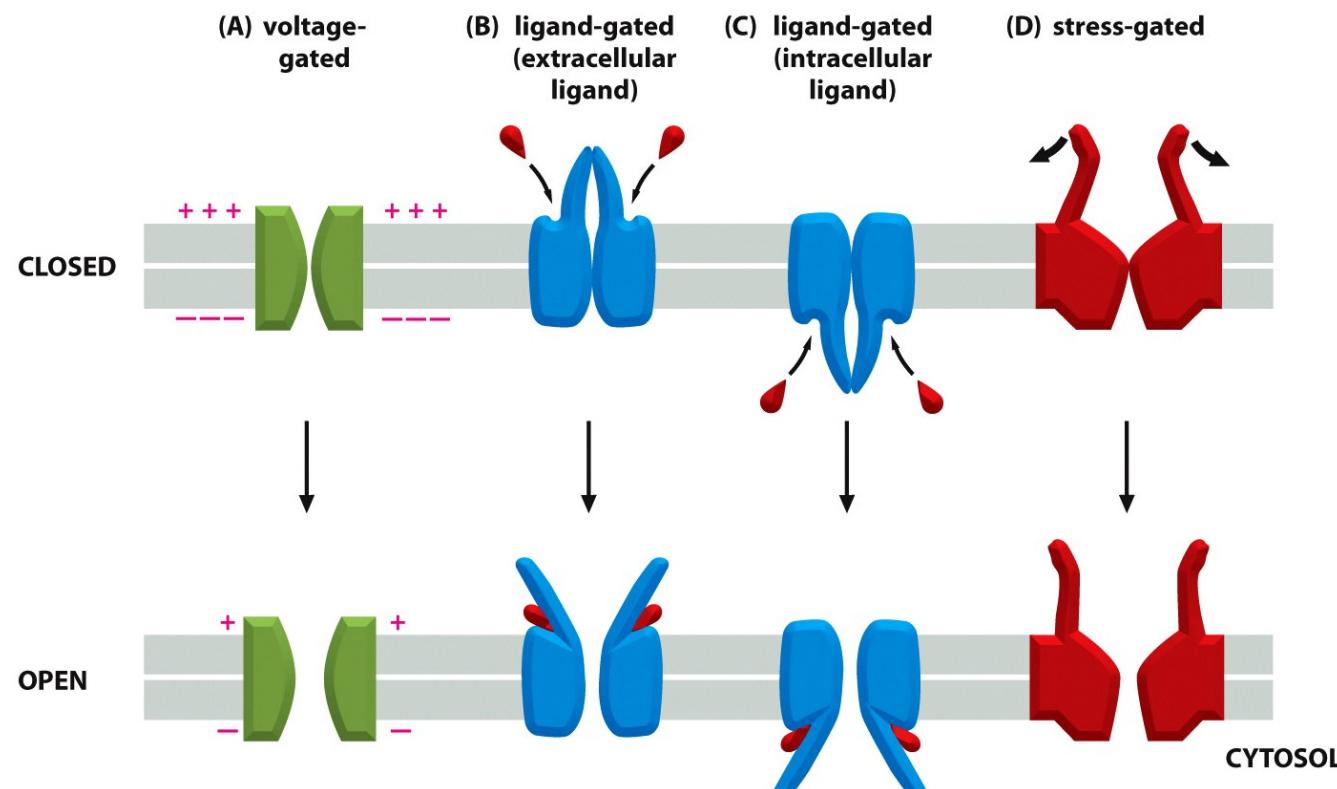


Figure 12-25 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

자극의존적 통로의 예 : 청각세포 (달팽이관 속)

- 통로하나 여는데 필요한 힘 : $2 \times 10^{-13} \text{ N}$
- 가장 작은 소리 → 필라멘트를 0.04nm 늘림

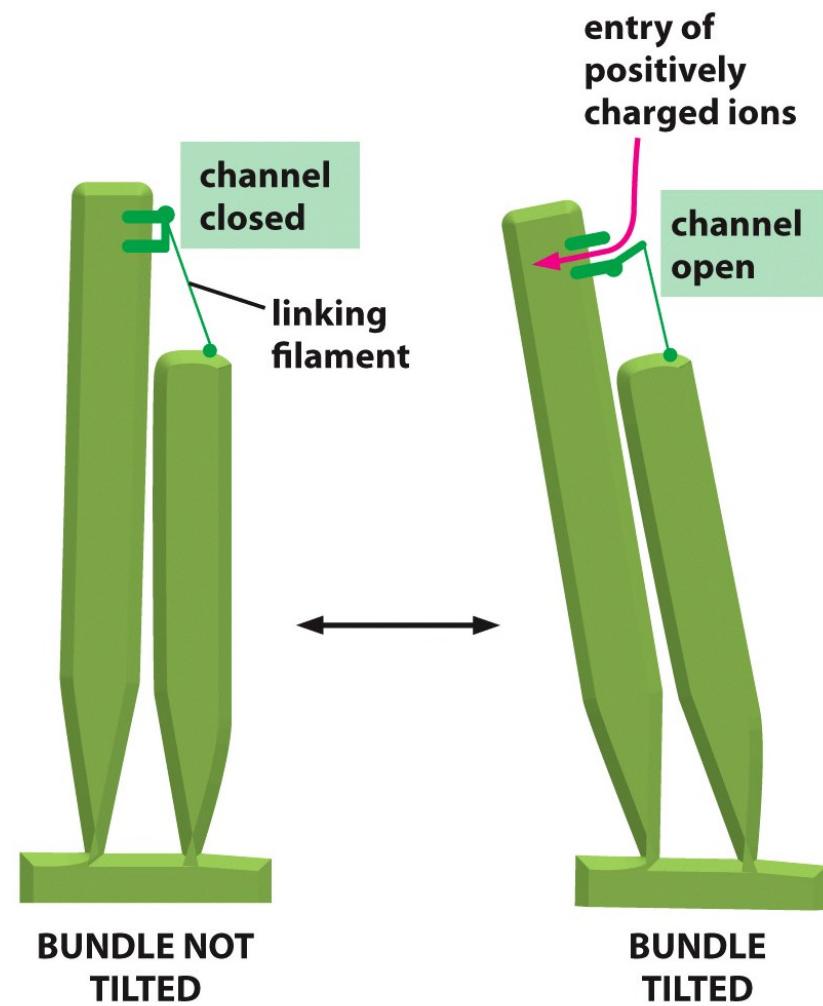
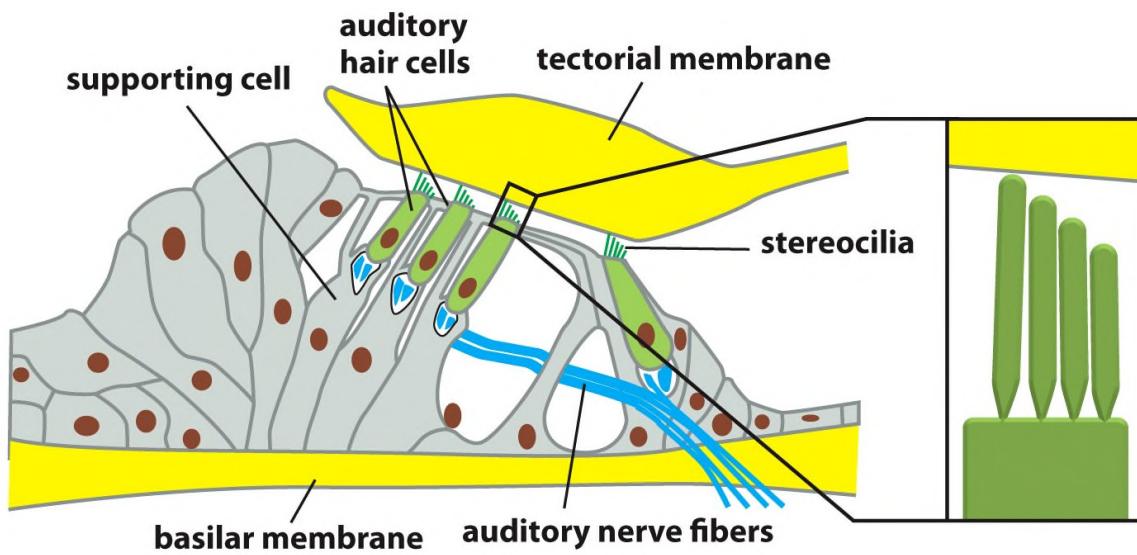


Figure 12-26a Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

전위의존적 이온통로는 막전위에 반응한다.

전위의존적 이온통로는 신경세포에서 전기적 신호를 전파하는데 기여함

전위의존적 이온통로

- 막전위에 민감한 전압감지부분이 존재함
- 막전위가 변화하면 이를 감지해 전압감지기 영역이 통로의 입체구조를 변화시킴
→ 막전위변화는 일정시간 동안 개방된 채널수 즉 확률을 변화시킴



(A)



(B)



(C)

막전위는 특정 이온에 대한 막투과성에 의해 결정된다.

- 모든 세포는 원형질막을 가로질러 막전위(membrane potential)을 갖음

전자기학의 몇가지 원리

- 금속에서의 전류는 전자의 흐름, 수용액에서 전류는 이온의 흐름
- 막을 통한 이온의 흐름은 전류로 측정됨
막사이의 이온의 축적은 막전위로 측정됨

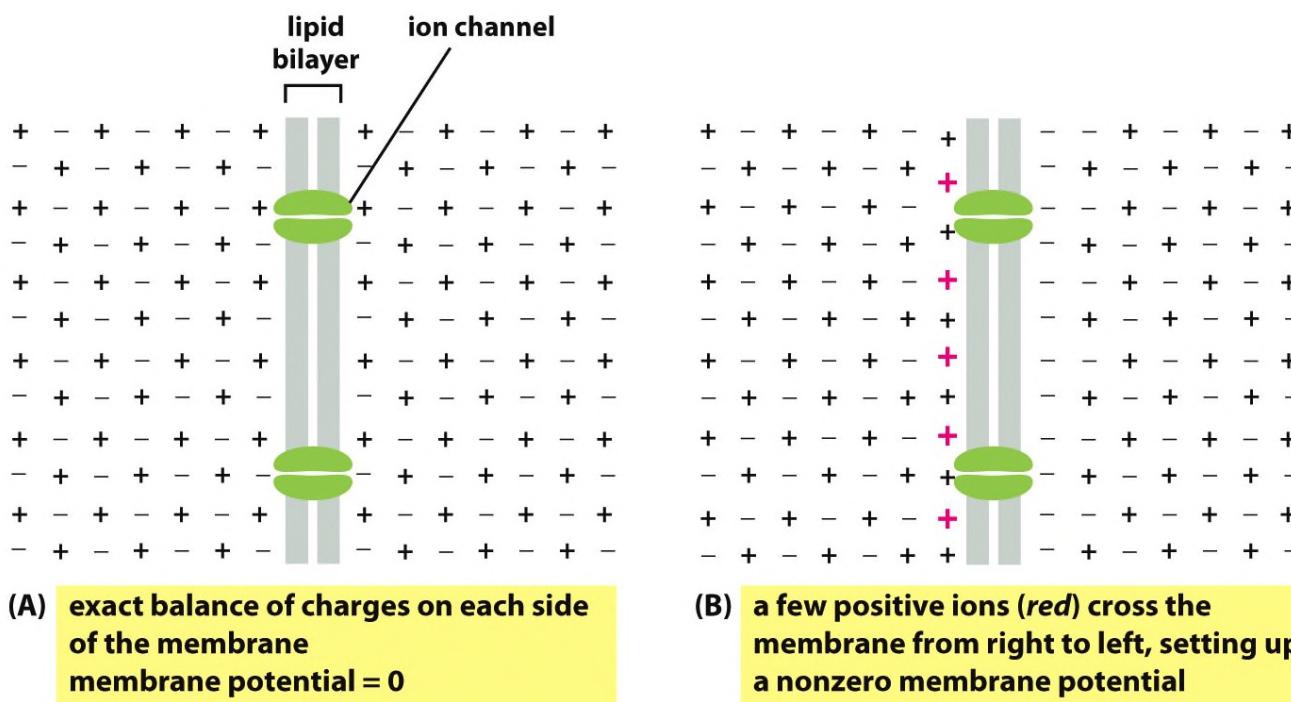


Figure 12-28 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

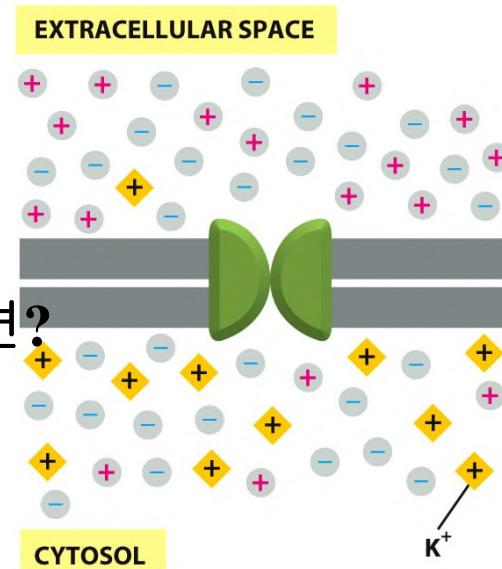
휴지막전위(resting potential)의 형성원리

1. Na-K 이온펌프는 세포막을 가로질러 Na, K 이온농도의 불균형을 형성
2. K⁺누출통로에 의해 농도구배를 따라 K⁺ 바깥으로 배출
3. 전하불균형 발생 → 막전위형성
4. K⁺의 농도구배 추진력이 막전위에 의해 상쇄됨
→ 휴지막전위 형성 (안정상태, 더 이상 막을 가로질러 전하의 축적이 일어나지 않음)

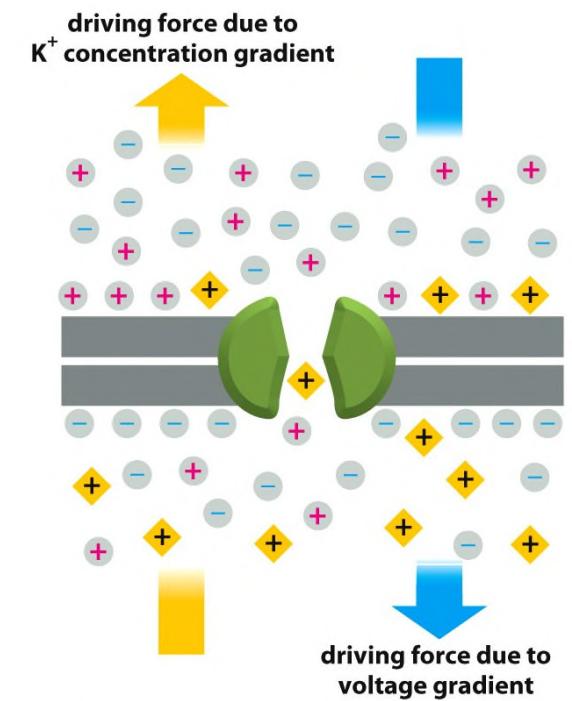
세포들은 대개 -20 ~ -200mV 막전위를 갖음

질문: 휴지막전위 상태에서
갑작스럽게 Na⁺통로가 개방된다면?

활동전위는 어떻게 형성될까?



(A) K⁺ channel closed, membrane potential = 0; more K⁺ inside the cell than outside, but zero net charge on each side (positive and negative charges balanced exactly)



(B) K⁺ channel open; K⁺ moves out, leaving negative ions behind, and this charge distribution creates a membrane potential that balances the tendency of K⁺ to move out

네른스트방정식

세포막을 가로질러 특정이온의 농도차가 존재하고, 휴지상태에서 특정이온의 투과성이 존재할 때 휴지막전위에 도달할 때까지 농도구배의 순방향으로 이온의 흐름이 발생함

문제1: 세포의 Na이온 및 K이온에 의해서 발생하는 휴지막전위를 하라?

문제2: 특정이온에 의해 휴지막 전위가 형성되기 위해서는 어떤 조건이 만족하여야 하는가?

The force tending to drive an ion across a membrane is made up of two components: one due to the electrical membrane potential and one due to the concentration gradient of the ion. At equilibrium, the two forces are balanced and satisfy a simple mathematical relationship given by the

Nernst equation

$$V = 62 \log_{10} (C_o/C_i)$$

where V is the membrane potential in millivolts, and C_o and C_i are the outside and inside concentrations of the ion, respectively. This form of the equation assumes that the ion carries a single positive charge and that the temperature is 37°C.

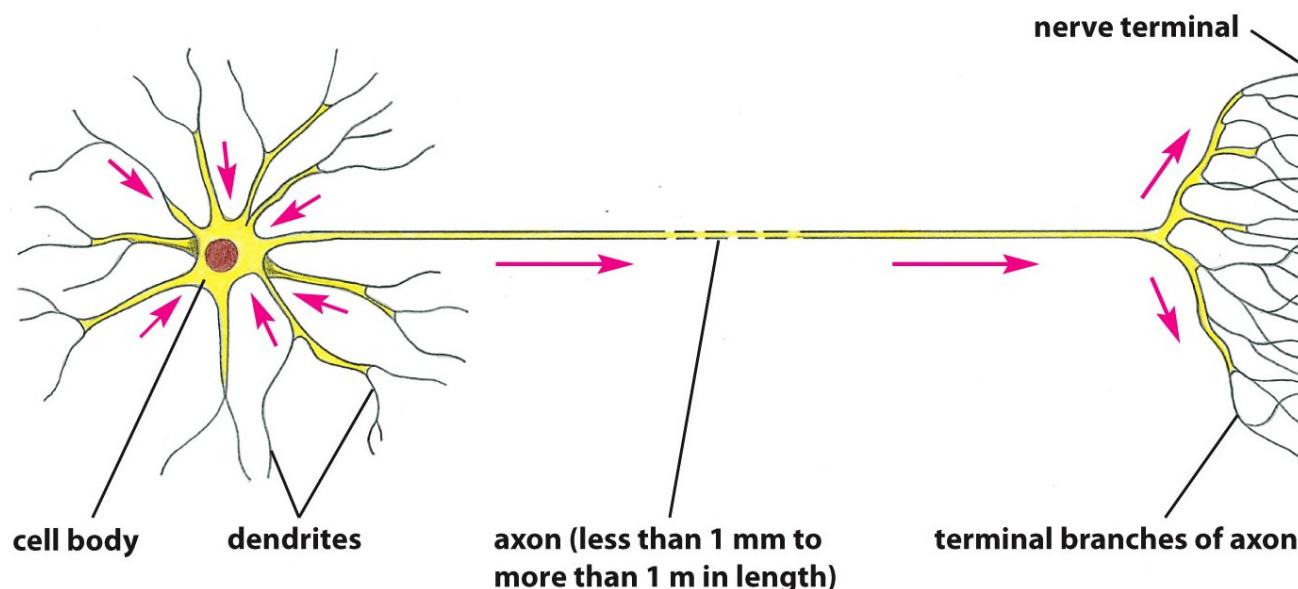
신경세포의 이온통로와 신호전달

뉴런(neuron)

- 신경세포, 신호를 받아들이고, 전도시키며, 전달하는 역할을 수행함
- 감각기관으로부터 중추신경계로 신호를 전달함

뉴런의 구조

- 세포체(cell body), 수상돌기(dendrite), 축색(axon), 신경말단(nerve terminal)



활동전위는 빠른 장거리 신호전달을 가능하게 한다. (광통신을 생각하라)

- 뉴런은 능동적인 신호기작을 이용 장거리신경신호를 전달함
- 국부적인 전기자극 부근의 세포막의 전기활동성을 폭발시켜 축색을 따라서 빠르게 전파됨

활동전위(action potential): 세포막을 따라서 움직이는 전기적 흥분의 물결
→ 전기신호의 약화 없이 초속 100 m의 속도로 신호가 전달

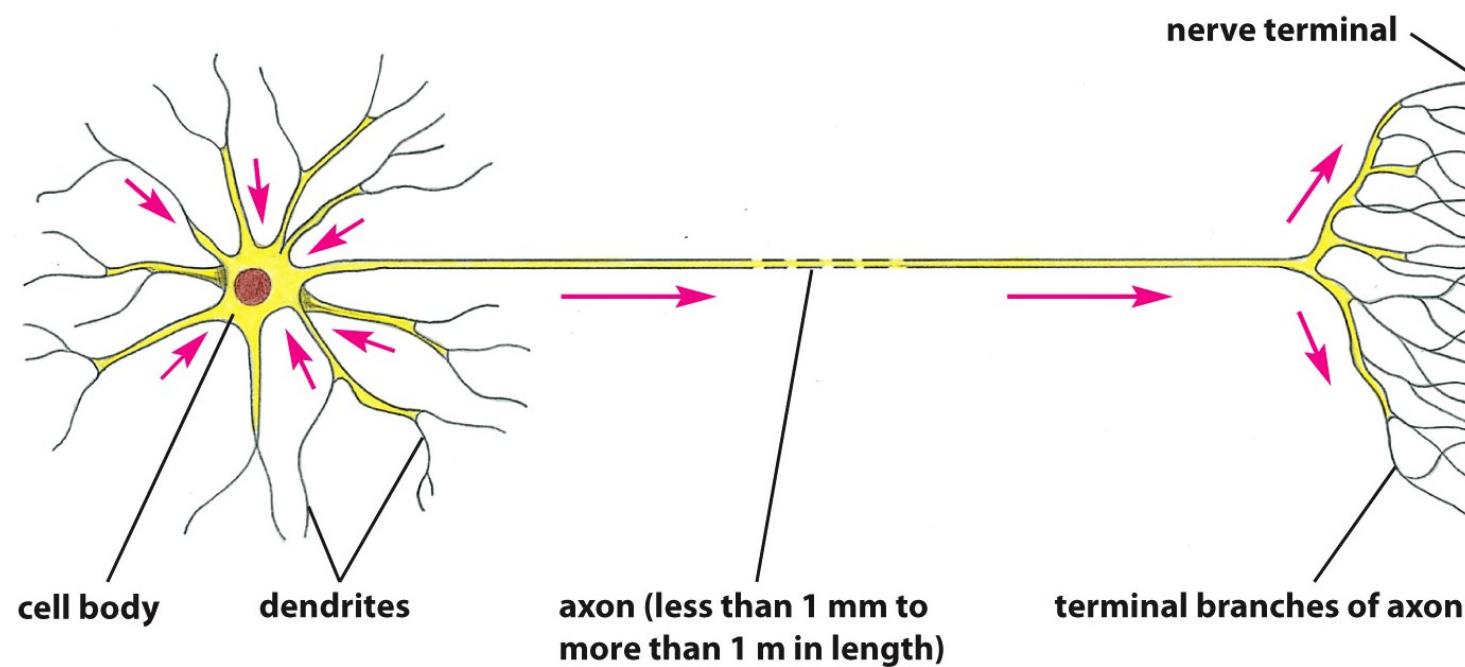


Figure 12-33 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

활동전위는 전위의존적 Na^+ 펌프에 의해서 매개된다

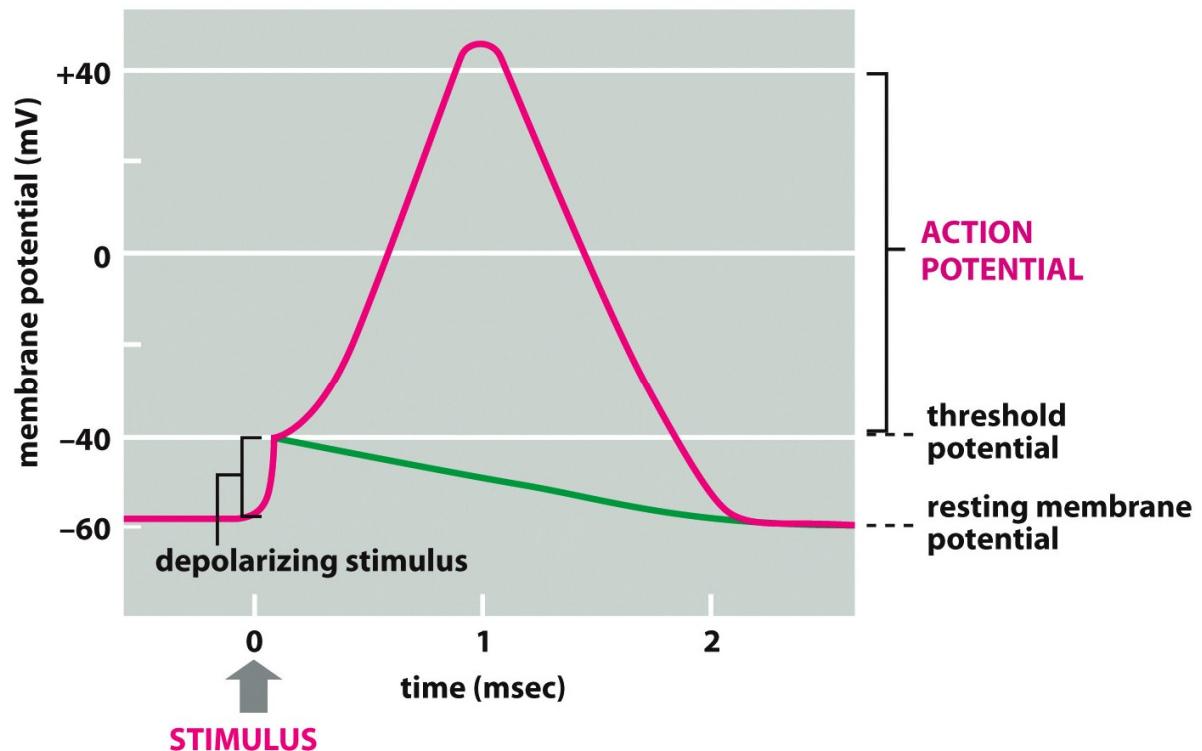
- 뉴런의 활동전위는 세포막의 탈분극(depolarization)에 의해 개시됨
- 국부적인 전기자극 부근의 세포막의 전기활동성을 폭발시켜 축색을 따라서 빠르게 전파됨

활동전위 발생과정

1. 신경전달물질에 의해 뉴런의 특정부위 탈분극 발생
2. 특정치 이상의 탈분극하에서 전위의존적 Na^+ 통로 개방
3. 농도구배에 따라 Na^+ 세포 내 유입 → 막전위의 급격한 변화
4. 활동전위 형성

막전위의 변화

$-60\text{mV} \rightarrow 40\text{ mV}$



전위의존적 Na^+ 통로는 세 가지 구조를 갖는다

- 휴지막전위에서는 폐쇄상태에서 존재함
- 탈분극 시에 개방구조를 갖음
- 개방구조 형성 후 곧바로 비활성상태로 진행함

질문: 전위의존적 Na^+ 통로가 두 가지 구조(개방/폐쇄)를 갖는다면?

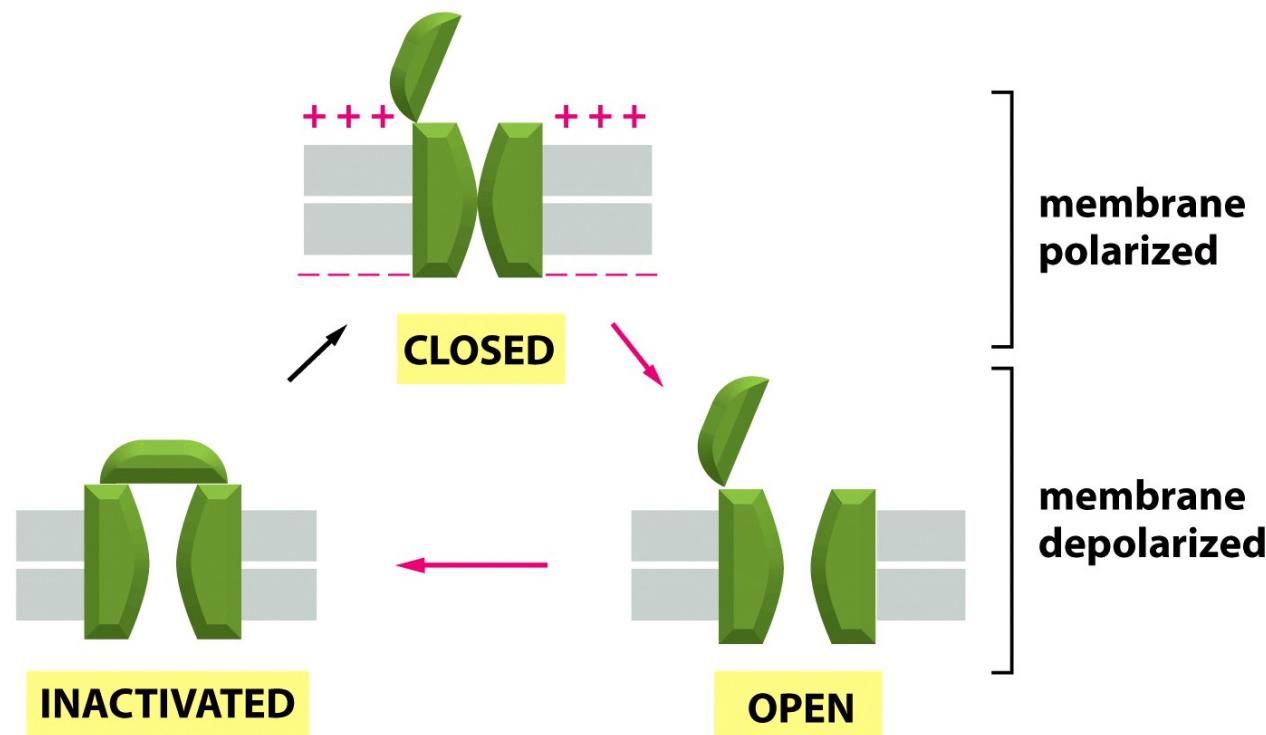
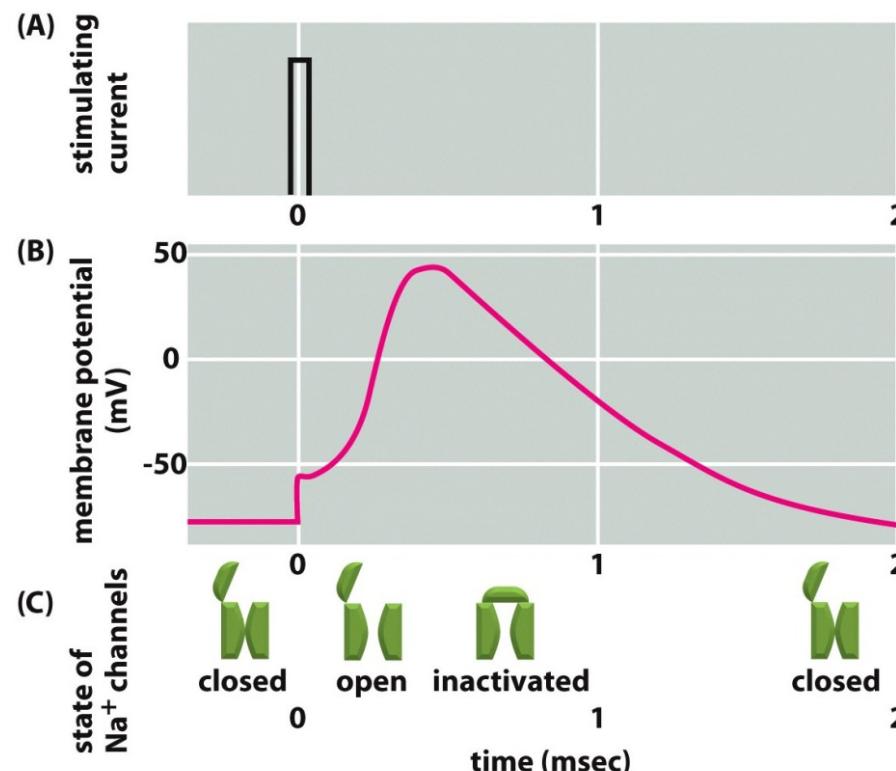


Figure 12-34 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

활동전위의 형성과 소멸과정

- 탈분극 시 전위의존적 Na^+ 통로의 개방에 의해 급격히 활동전위 형성
- 전위의존적 Na^+ 통로의 개방 후 곧바로 비활성화
- 이후 반응이 느린 전위의존적 K^+ 통로가 활성화됨
→ 신속하게 휴지막전위 상태로 복귀함

질문: 전위의존적 K^+ 통로가 없다면 휴지막전위로 복귀가 가능할까?



https://www.youtube.com/watch?v=MtJyHp_AZL8 action potential ani.

<https://www.youtube.com/watch?v=fHRC8SlLcH0>

활동전위의 전파과정

- 한 부위의 자가 증폭적인 탈분극에 의해 인접한 세포막이 탈분극이 발생
- 순차적인 자가증폭과정이 세포막을 통하여 전달됨
- 뉴런의 세포체에서 시작된 자가증폭과정은 축색을 거쳐 신경말단까지 전달됨

질문: 왼쪽방향으로 전달이 안되는 이유는?

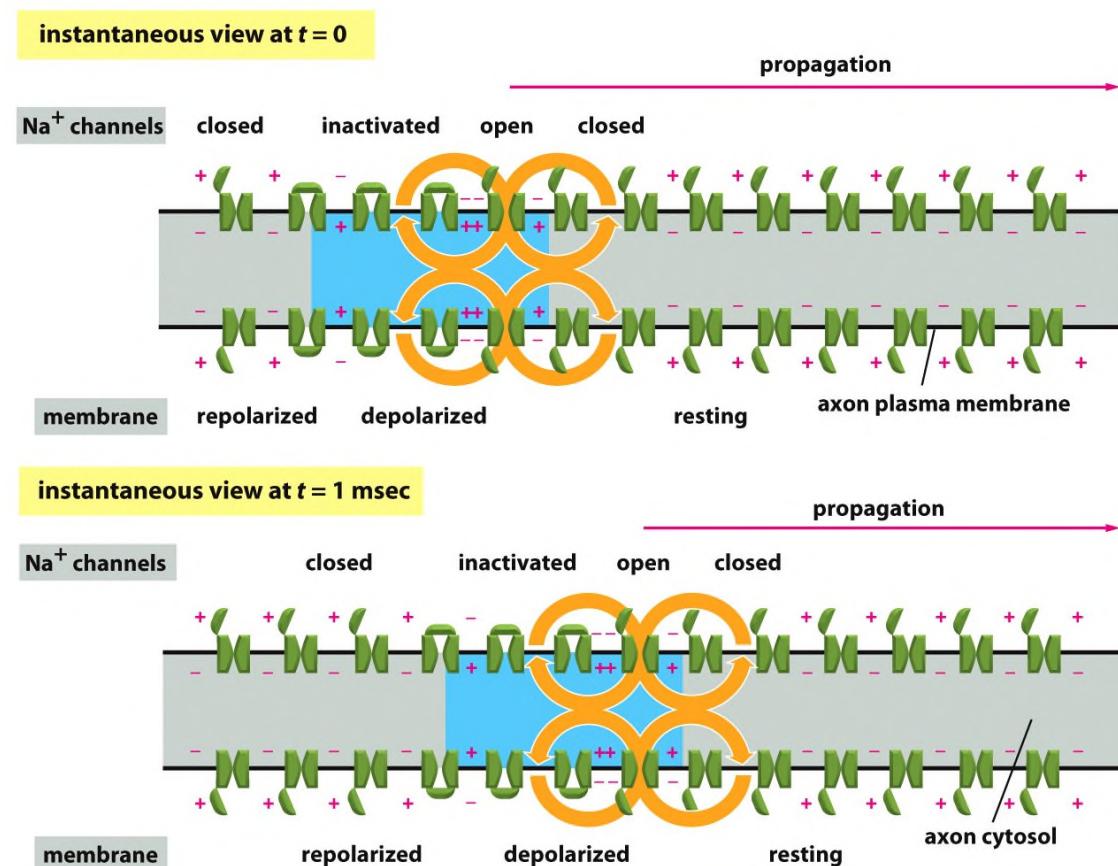
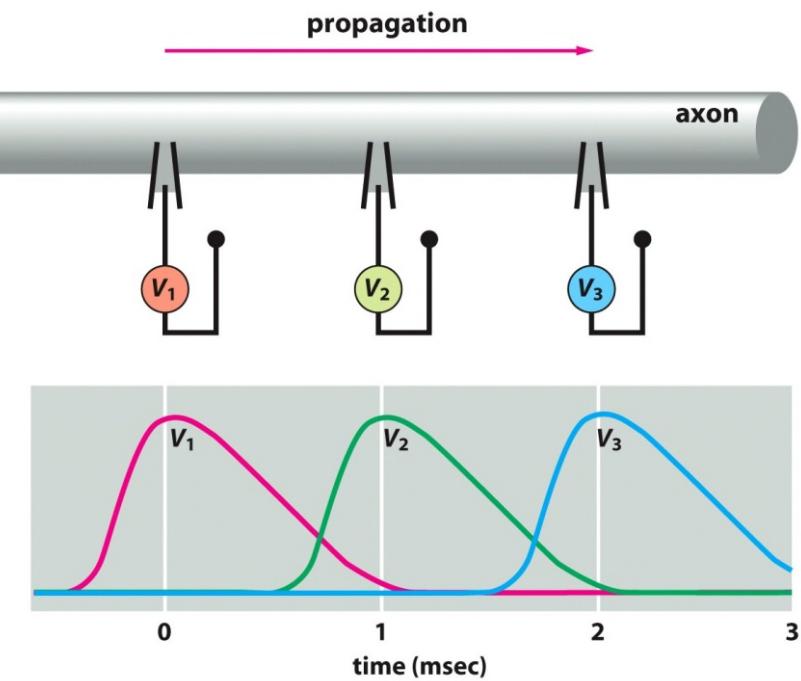
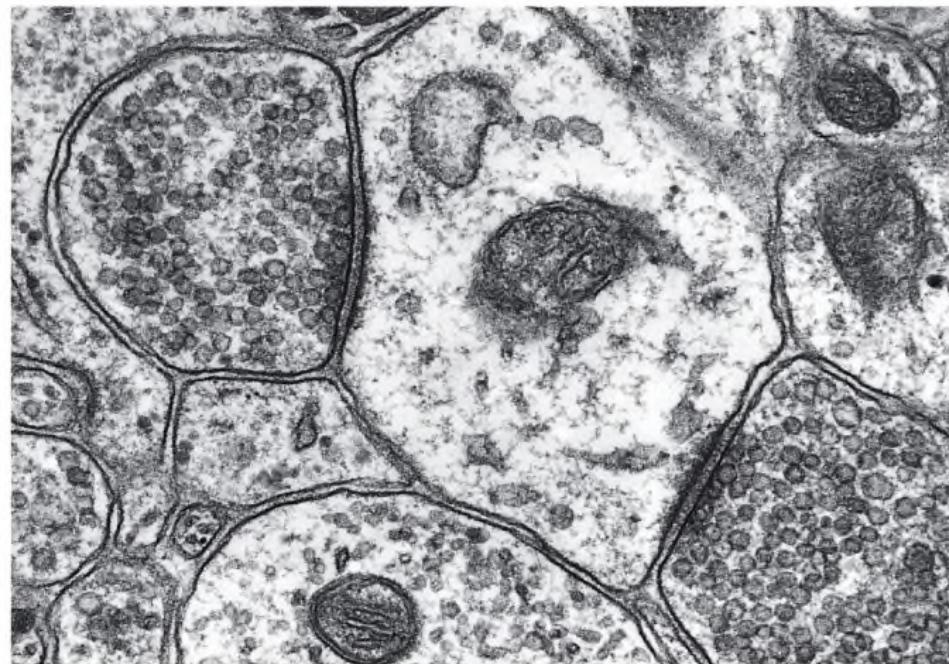


Figure 12-39b Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

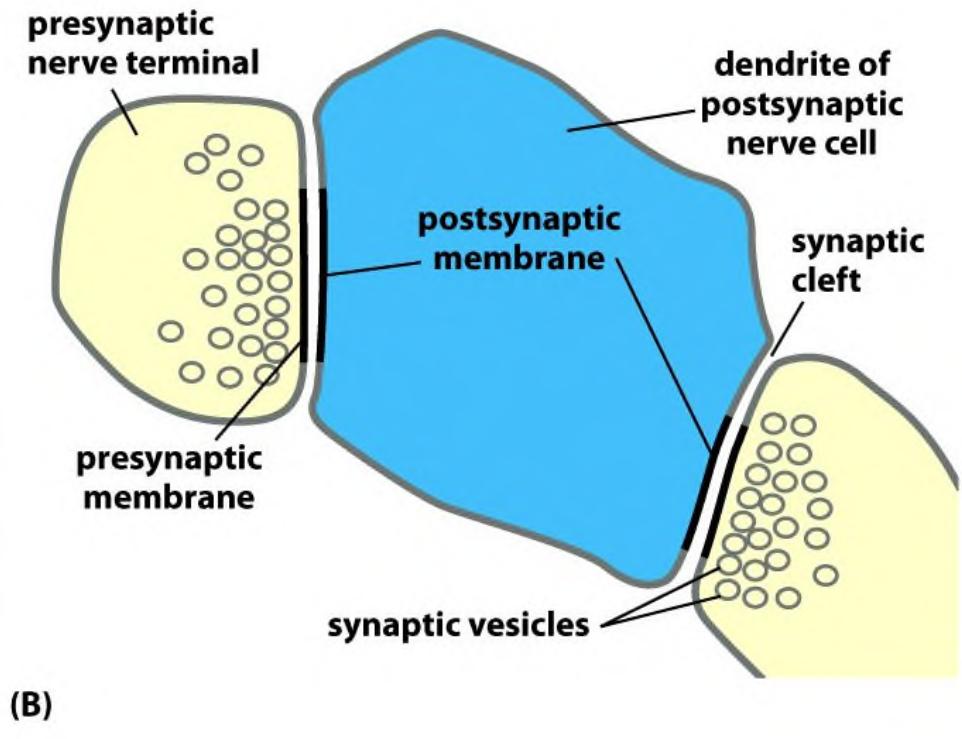
시냅스(Synapse)

- 시냅스는 신경말단과 이웃하는 표적세포와의 접합부
- 시냅스에는 20 nm의 간극(synaptic cleft)이 존재

질문: 어떤 방식으로 이웃세포에 신경신호를 전달할까?

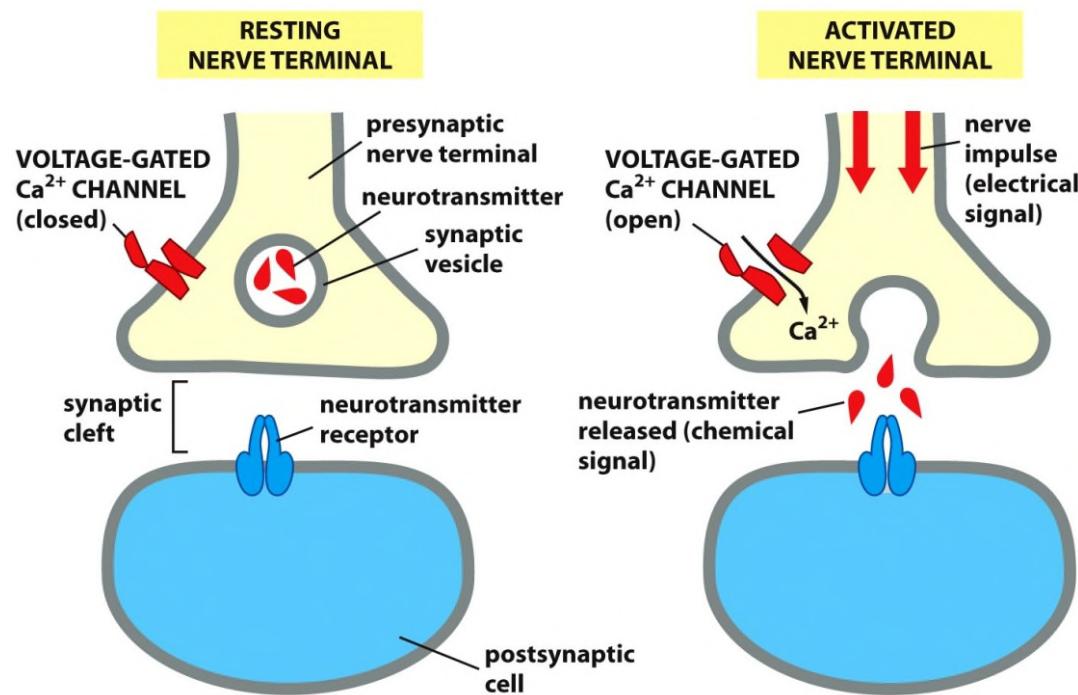


2 μm



전위의존적 Ca^{2+} 통로는 신경말단에서 전기신호를 화학신호로 전환함

- 신경말단은 신경전달물질을 담은 소낭이 밀집해 있음
- 활동전위가 신경말단에 도달하면 전위의존적 통로가 개방되어 Ca^{2+} 이 내부로 유입
- Ca^{2+} 은 소낭과 세포막의 융합을 가속화시킴
- 신경전달물질을 이웃 표적세포로 분비함

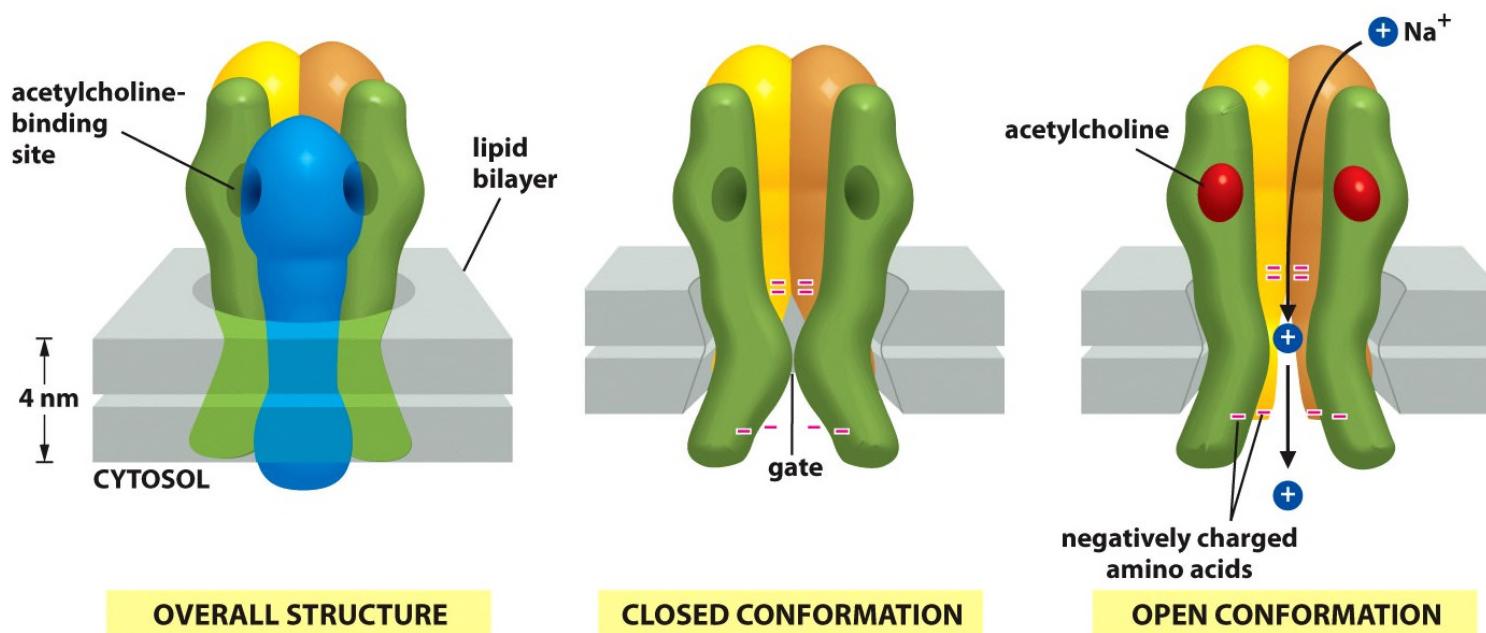


표적세포의 전달물질의존적 통로는 화학신호를 다시 전기신호로 전환

- 분비된 신경전달물질은 급속히 확산되어 표적세포의 신경전달물질 수용체(neurotransmitter receptor)들과 결합함
- 수용체 부근의 막전위가 변하여, 표적세포의 활동전위가 형성됨

대표적 예: 뉴런과 근육세포 간의 시냅스

→ 이 경우 신경전달물질은 아세틸콜린이며, 아세틸콜린수용체에 의해서 수용됨 → Na^+ 통로 개방



<https://www.youtube.com/watch?v=mltV4rC57kM> Synapse

<https://www.youtube.com/watch?v=90cj4NX87Yk>

신경세포는 흥분성 혹은 억제성 신호를 모두 받는다

흥분성뉴런(excitatory neuron):

축색말단에서 분비되는 신경전달물질이 표적세포에서 활동전위를 생성
아세틸콜린, 글루탐산 \rightarrow Na^+ 채널, Ca^{2+} 채널 활성화 \rightarrow 탈분극 촉진

억제성뉴런(inhibitory neuron):

축색말단에서 분비되는 신경전달물질이 표적세포에서 활동전위생성을 억제
 $\text{GABA}(\gamma\text{-아미노부틸산}), \text{글리신} \rightarrow \text{Cl}^-$ 채널 활성화 \rightarrow 탈분극 억제

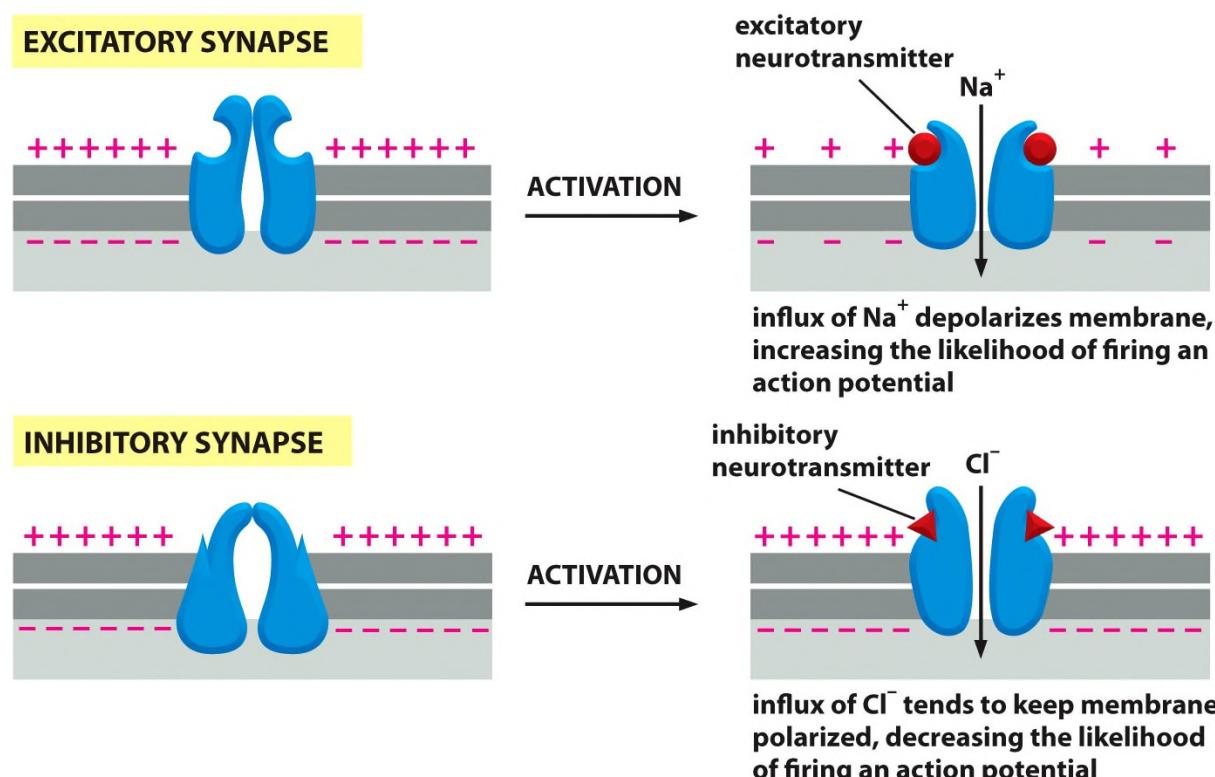


Figure 12-44 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

12장에서 배운 이온채널의 총정리

TABLE 12-3 SOME EXAMPLES OF ION CHANNELS

ION CHANNEL	TYPICAL LOCATION	FUNCTION
K ⁺ leak channel	plasma membrane of most animal cells	maintenance of resting membrane potential
Voltage-gated Na ⁺ channel	plasma membrane of nerve cell axon	generation of action potentials
Voltage-gated K ⁺ channel	plasma membrane of nerve cell axon	return of membrane to resting potential after initiation of an action potential
Voltage-gated Ca ²⁺ channel	plasma membrane of nerve terminal	stimulation of neurotransmitter release
Acetylcholine receptor (acetylcholine-gated Na ⁺ and Ca ²⁺ channel)	plasma membrane of muscle cell (at neuromuscular junction)	excitatory synaptic signaling
Glutamate receptors (glutamate-gated Na ⁺ and Ca ²⁺ channels)	plasma membrane of many neurons (at synapses)	excitatory synaptic signaling
GABA receptor (GABA-gated Cl ⁻ channel)	plasma membrane of many neurons (at synapses)	inhibitory synaptic signaling
Glycine receptor (glycine-gated Cl ⁻ channel)	plasma membrane of many neurons (at synapses)	inhibitory synaptic signaling
Stress-activated cation channel	auditory hair cell in inner ear	detection of sound vibrations

전달물질의존적 이온통로들은 정신 활성 약물의 주요 표적이 된다

- 불면증, 불안, 우울증, 전신분열증 등 정신질환치료제들은 뇌의 시냅스에 작용하며, 대개 전달물질의존적 이온통로와 결합함
- 발륨, 할시온, 테마제팜, 신경안정제
→ GABA의존적 Cl-통로와 결합 → GABA가 더 쉽게 결합
- 프로작 (우울증 치료제)
→ 흥분성 신경전달물질인 세로토닌의 재흡수를 막음

시냅스결합은 우리의 사고, 행동, 기억을 가능하게 한다

- 뉴런을 통한 신호전달은 진화의 과정에서 비효율적임
(전기신호 → 화학신호 → 전기신호 → 화학신호 → 전기신호)
- 시냅스 간극은 우리의 사고, 행동, 기억 등 고차원적인 작업을 가능케 함

예: 한 개의 뉴런

- 수백, 수천의 뉴런으로 부터 신호를 받음
- 흥분성과 억제성이 공존하는 속에서 모든 정보를 종합하여 활동전위를 형성함

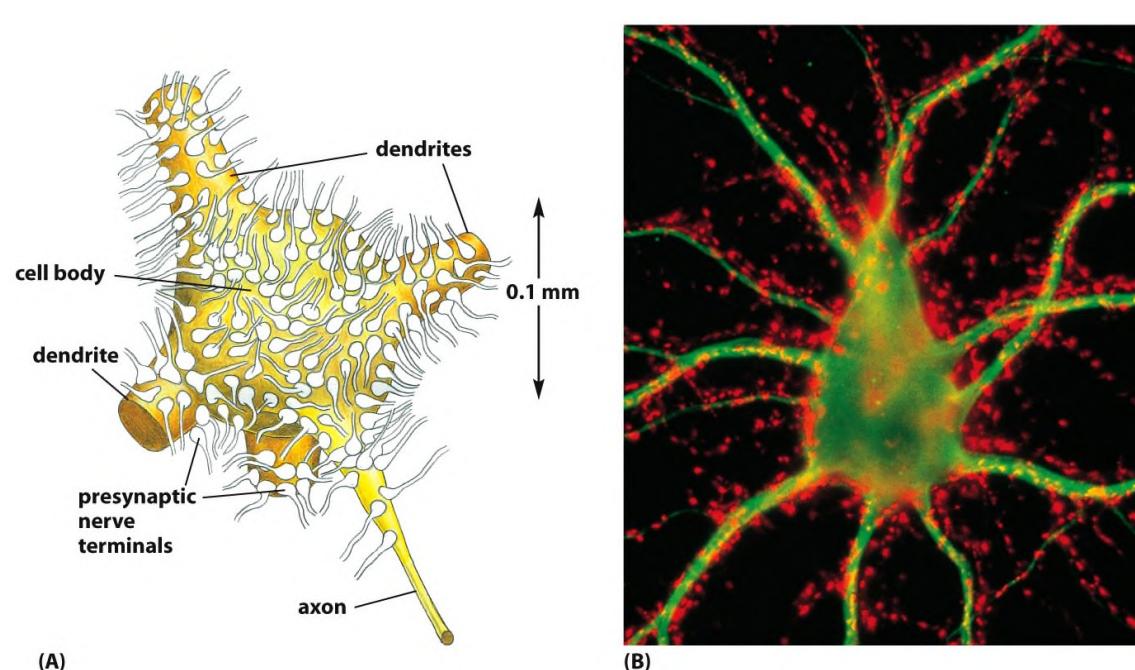
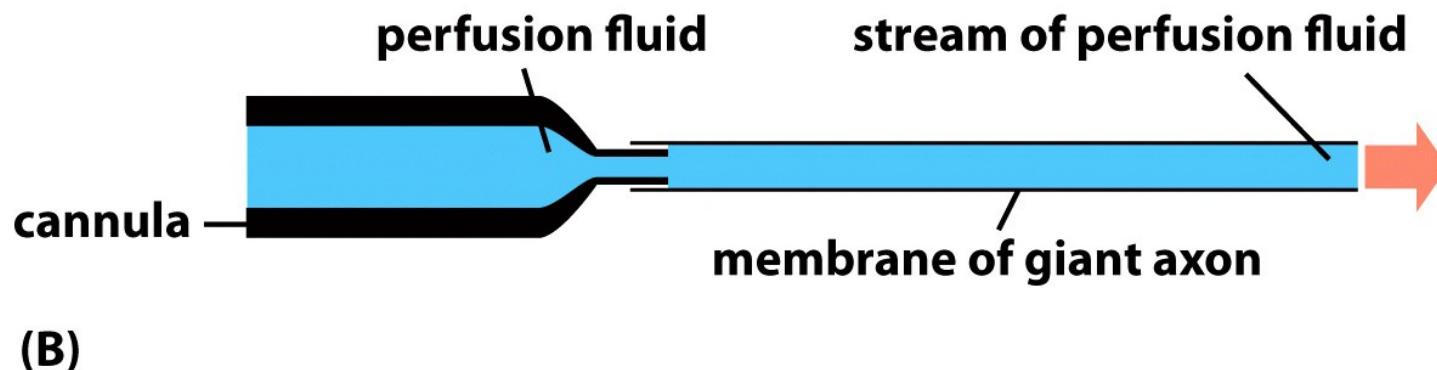
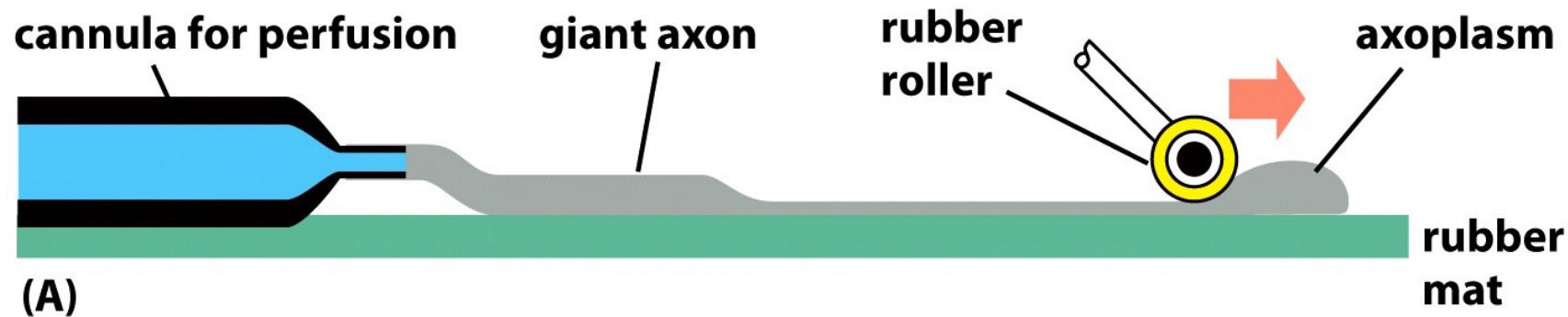
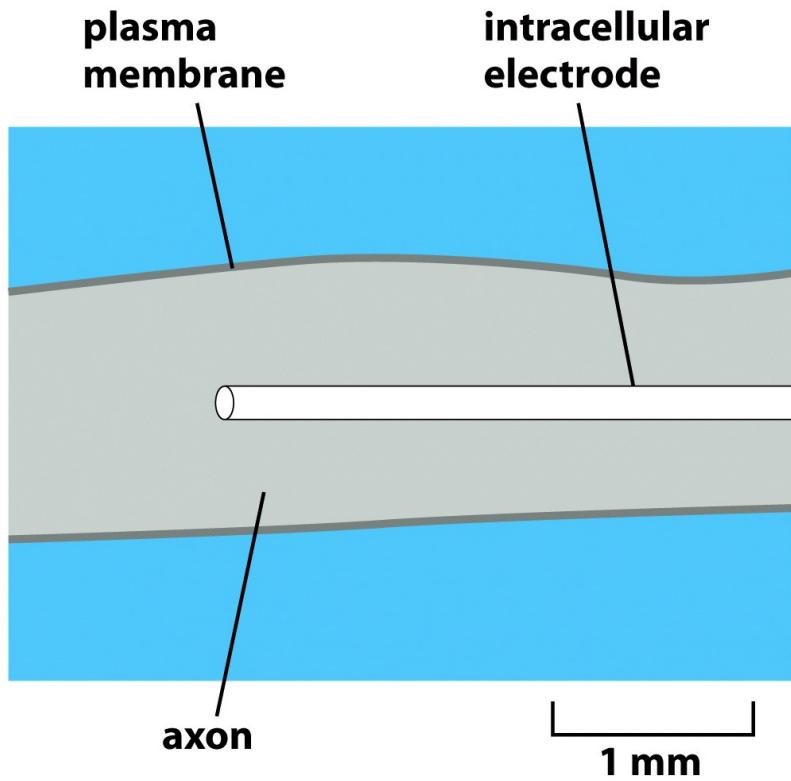


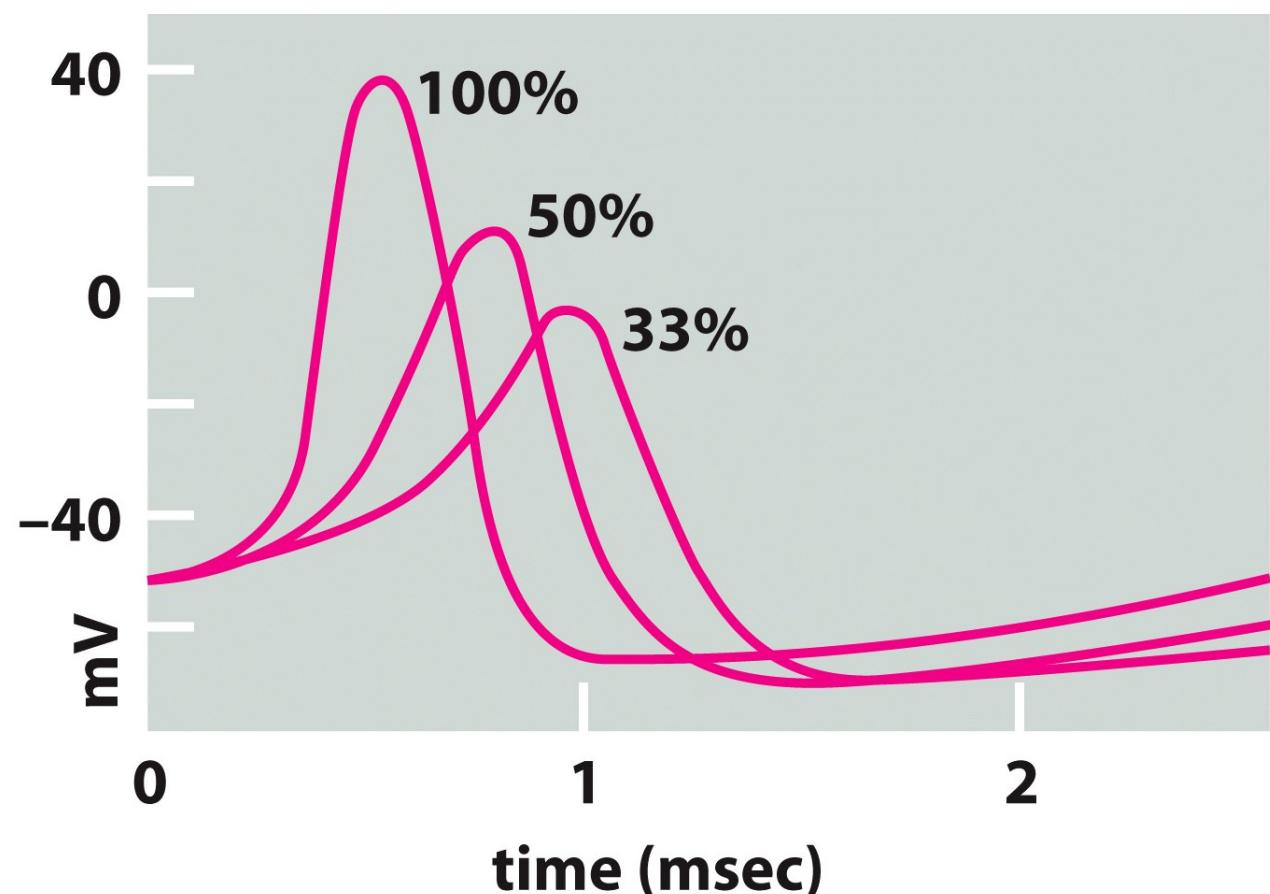
Figure 12-45 Essential Cell Biology (© Garland Science 2010)

옛날 생물학자들은 신경신호전달을 어떻게 연구했을까?





축색 바깥과 안의 Na 이온농도를
변화시킨다면 ?



Home Work #1 에세이

- 1. 물은 생명현상 발현에 왜 중요한가?
(자연과학적 관점과 사회학적 관점을 포함)**

- 2. 왜 막관통단백질이 알파나선구조를 갖으며
지질이중층을 통과하는지 설명하시오.
(자연과학적 관점과 사회학적 관점을 포함)**

1인칭시점에서 에세이를 작성하시오