14장 심혈관계 생리학

- 심혈관계 생리학
- 압력, 부피, 유동과 저항
- 심근과 심장
- 펌프로서의 심장

심혈관계 개요

심혈관계(cardiovascular system)

- 심장(*kardia*) + 소관(*vasculum*)
- 액(혈액)으로 채워져 있는 일련의 관(혈관)과 펌프(심장)
- 심장에서 발생하는 압력 → 혈액이 시스템을 통해 계속 순환
- 혈액: 폐에서는 산소, 창자에서는 영양소, 세포에는 물질 전달과 노폐물 제거
- 세포간 정보 전달, 이물질에 대한 방어

심혈관계는 체내에서 물질을 수송한다

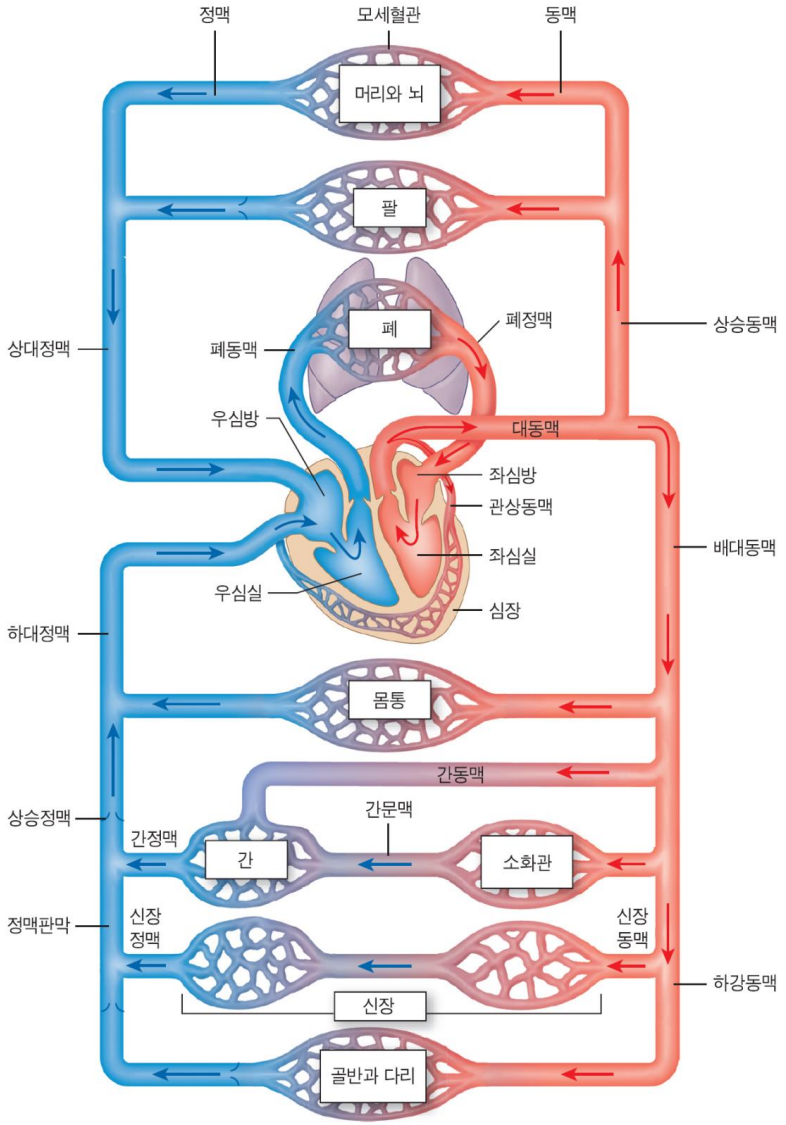
표 14-1 심혈관계에서 일어나는 수송

이동하는 물질	출발 지점	도달 지점
몸으로 들어가는 물질들		
산소	폐	모든 세포
영양소와 물	소화관	모든 세포
세포에서 세포로 이동하는 물질들		
노폐물	특정 세포	간에서 처리
면역세포, 항체, 응고 단백질	혈액에 항시 존재	필요로 하는 세포에서 이용
호르몬	내분비세포	표적세포
저장 영양소	간과 지방조직	모든 세포
몸에서 떠나가는 물질들		
대사 노폐물	모든 세포	신장
열	모든 세포	피부
이산화탄소	모든 세포	폐

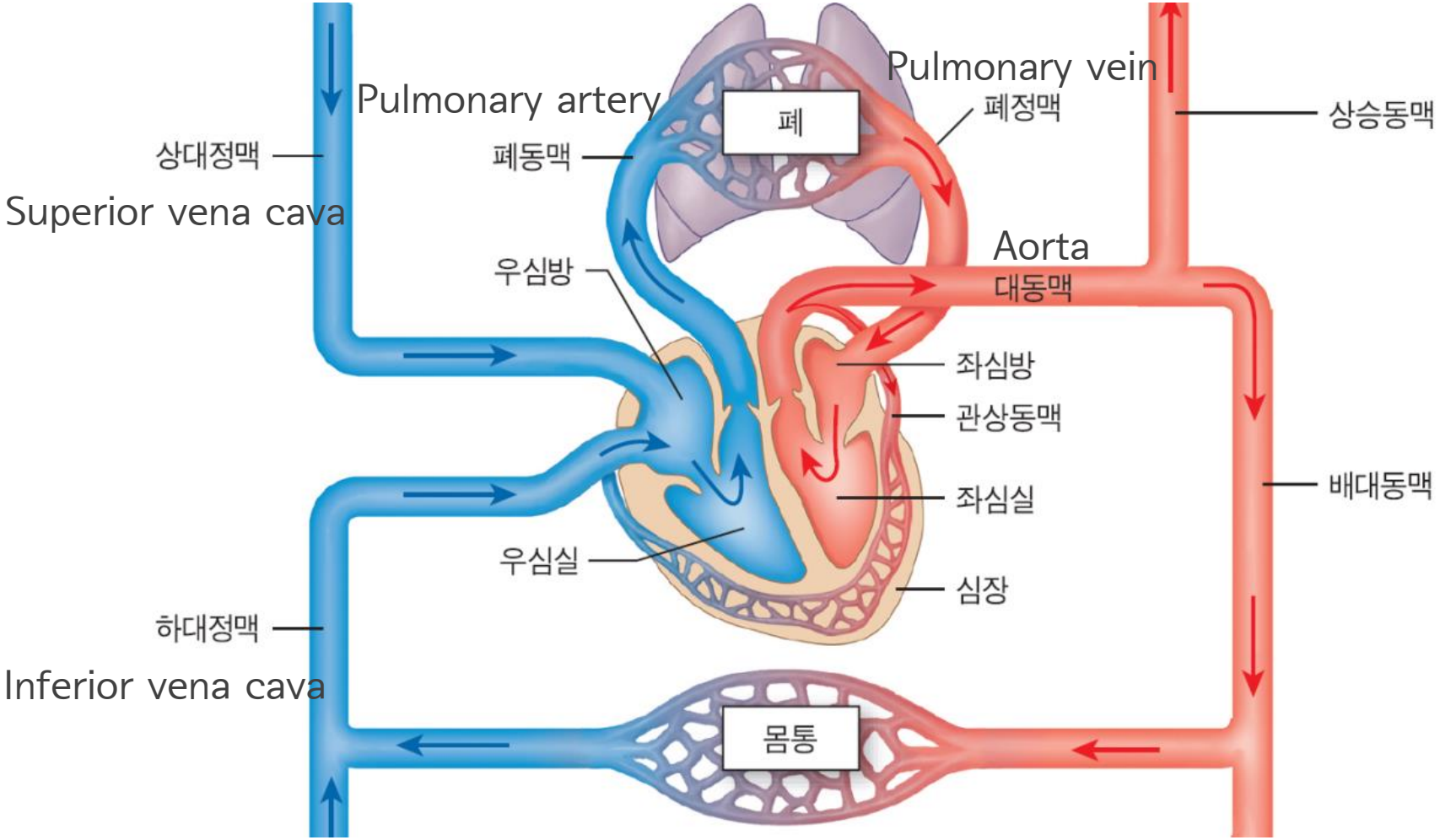
심혈관계는 심장과 혈관, 혈액으로 이루어져 있다

심혈관계: 심장 + 혈관 + 혈액

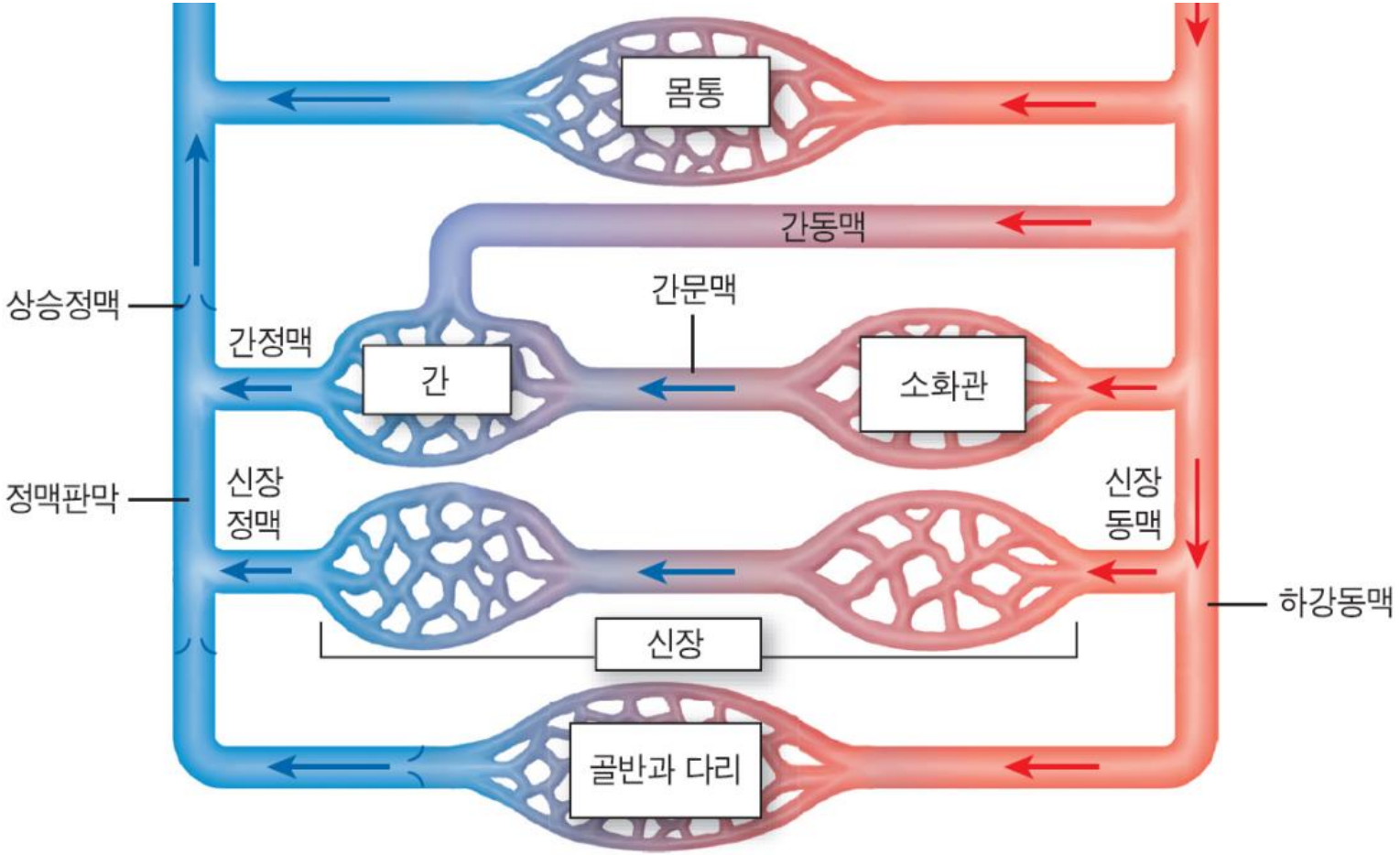
- 혈관: 동맥(artery) (심장→세포)
  정맥(vein) (세포→심장)
- 판막: 혈류를 한쪽 방향으로 진행 시킴, 심장과 정맥에 존재



심혈관계는 심장과 혈관, 혈액으로 이루어져 있다



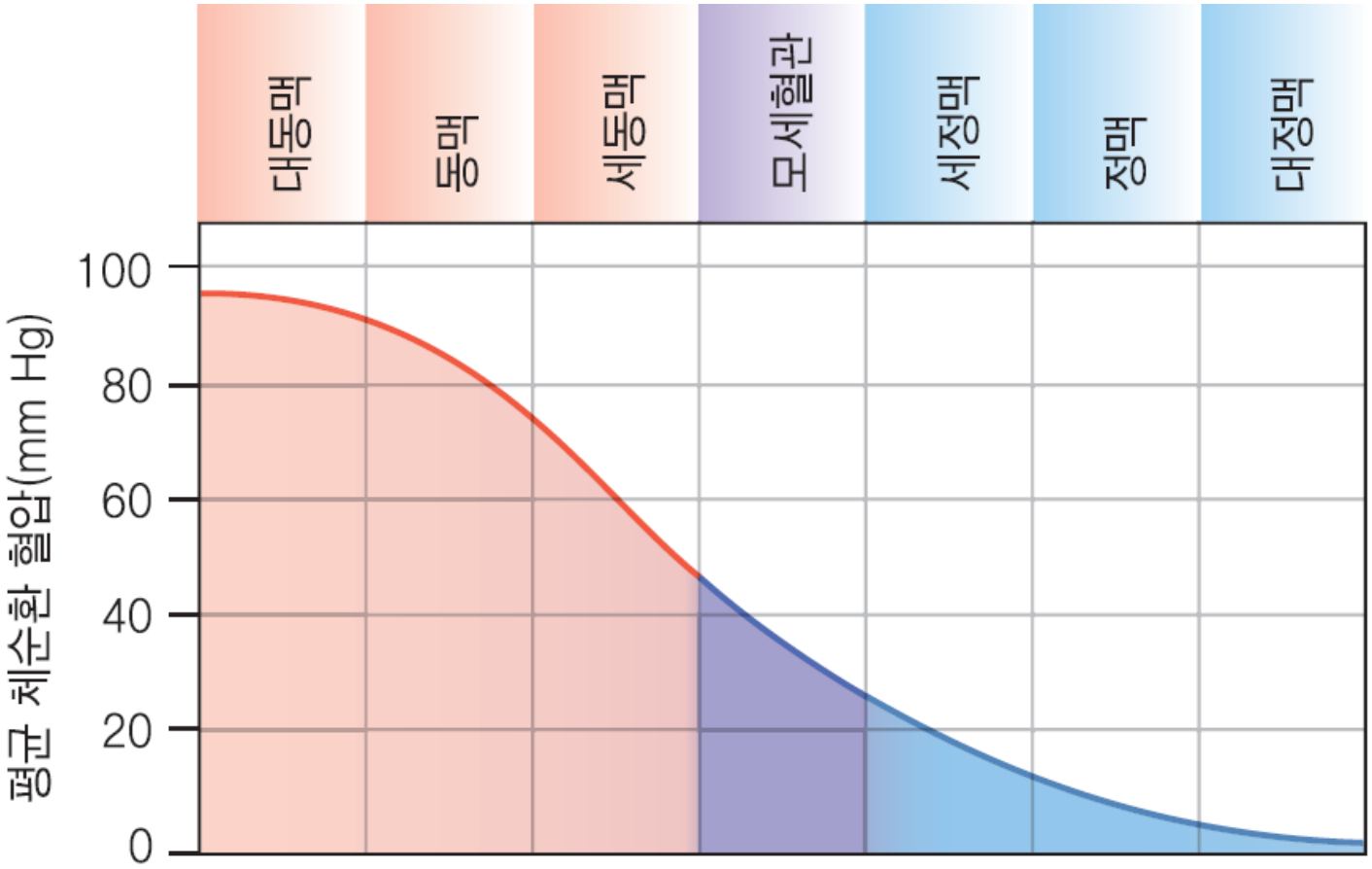
심혈관계는 심장과 혈관, 혈액으로 이루어져 있다



압력, 부피, 유동과 저항

혈액이 흐르는 기계론적 이유: 압력 기울기(ΔP) (고 → 저)

- 심장의 경우, 압력이 높아진다 = 심장의 방이 수축

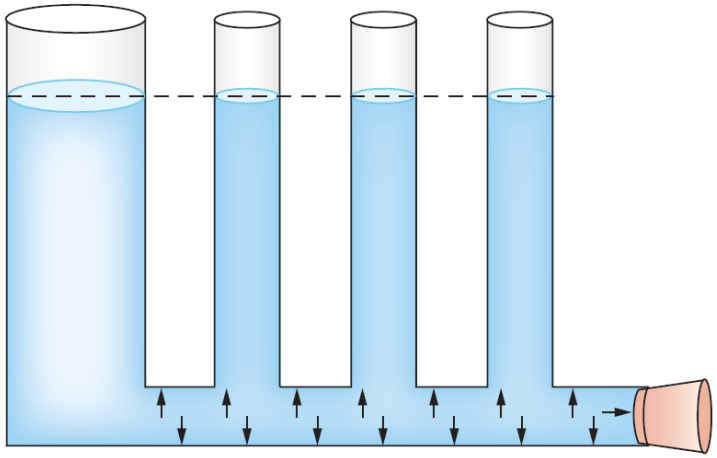


이동하는 유체의 압력은 거리에 따라 감소한다

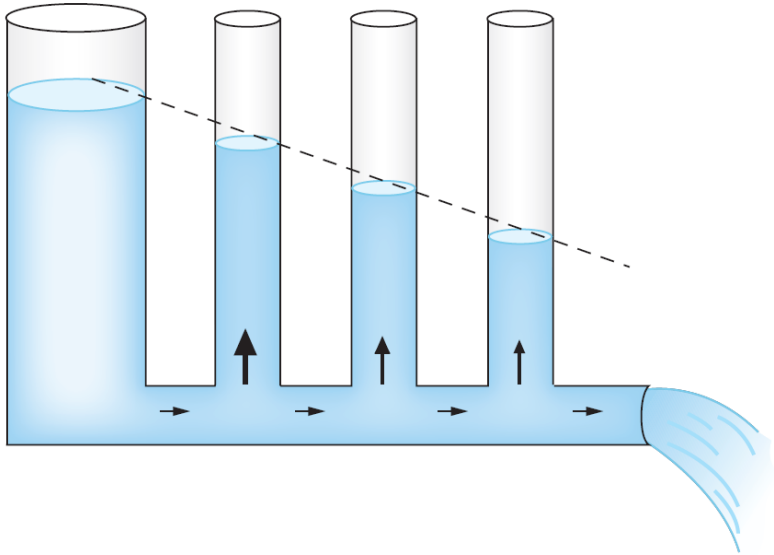
- 심장/혈액에서 압력의 단위: mmHg (1mmHg = 1torr)

정지된 액체와 유체 사이의 압력

(a) 정수압은 용기 안에 채워진 액체에 의하여 용기의 벽에 걸리는 압력이다. 정수압은 물기둥의 높이에 비례한다.



(b) 일단 유체가 시스템을 통하여 흐르기 시작하면, 거리에 따라 에너지가 마찰력에 의하여 손실되므로 압력이 감소한다. 이런 현상은 순환계에서도 동일하게 적용된다.



액체의 압력은 부피 변화 없이도 변한다

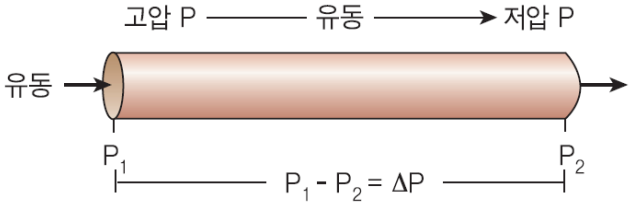
- 유체를 담고 있는 용기의 벽을 수축 → 압력 증가

- 수축하는 심근에서 발생하는 압력 → 혈액 → 심실 밖 혈관 → 혈관에 있던 혈액이 새로운 혈액으로 대체
- 추진압력(driving pressure)
- 심근 이완 → 용기 내부 유체 압력 감소
- 심장이 이완하여 확장되면 내부의 방 압력 감소
- 혈관이 수축 = 혈압 증가

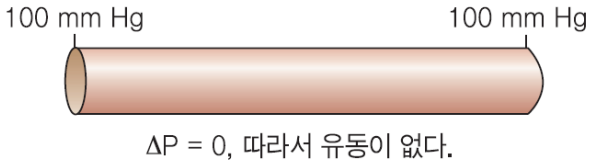
혈액은 고혈압 부위에서 저혈압 부위로 흐른다

관을 따라 흐르는 유체의 유량은 압력기울기에 의존한다.

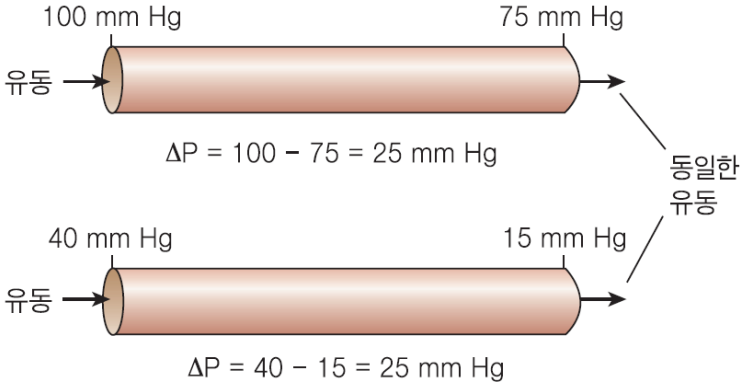
(c) 액체는 압력기울기(ΔP)의 차가 양의 값일 때에 유동하게 된다.



압력기울기가 없기 때문에 유동이 일어나지 않는다.



(d) 유동은 절대압력(P)보다는 압력기울기(ΔP)에 따라 일어난다. ΔP는 이들 관에서 동일하므로 유동은 동일하다.



저항은 유동에 대한 항력이다

$$\text{유동} \propto \Delta P \text{ (P: 압력)}$$

$$\text{유동} \propto 1/R \text{ (R: 저항)}$$

- 푸아죄유의 법칙 $R = 8L\eta/\pi r^4$

(L: 관의 길이, r: 관의 반지름, η: 유체의 점도)

$R \propto L\eta/r^4$ ($\because$ $8/\pi$는 상수) $\therefore$ 유동 $\propto r^4$

- 관의 길이↑, 유체 점도↑, 관의 반지름↓ : 저항↑

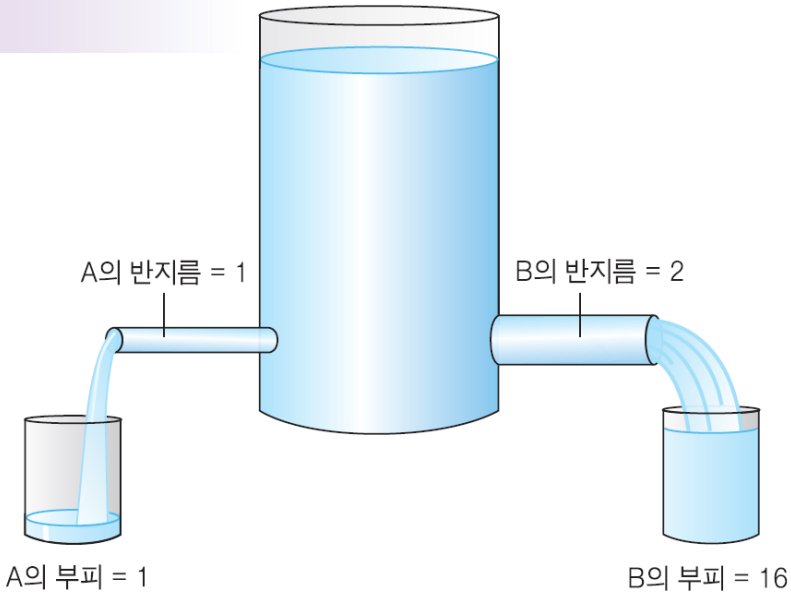
$R \propto 1/r^4$ ($\because$ 혈관 길이: 불변, 혈액의 점도: 거의 일정)

$$\text{유동} \propto \Delta P/R$$

저항은 유동에 대한 항력이다

관의 반지름이 감소하게 되면, 유동에 대한 저항은 증가한다.

(e)



$저항 \propto \frac{1}{반지름^4}$	
A관	B관
$R \propto \frac{1}{1^4}$ $R \propto 1$	$R \propto \frac{1}{2^4}$ $R \propto \frac{1}{16}$

$유동 \propto \frac{1}{저항}$	
A관	B관
$유동 \propto \frac{1}{1}$ 유동 ∝ 1	$유동 \propto \frac{1}{\frac{1}{16}}$ 유동 ∝ 16

Q 그림 문제

만약 A의 반지름이 3으로 변했다면, A를 따라 흐르는 유동은 B를 따라 흐르는 유동보다 약 _____ 배가 된다.

유속은 유량과 단면적에 따라 변한다

유동(flow): 일반적으로 유량(flow rate, Q)을 의미

유량: 단위 시간당 시스템의 특정 위치를 지나가는 혈액의 부피

- 분당 리터(L/min) 또는 분당 밀리리터(mL/min)

유속(velocity of flow, v) ≠ 유량

- 주어진 시간 안에 혈액 일정량이 지나가는 거리
- 혈액이 한 지점을 얼마나 빨리 지나가는지 측정하는 척도

$$v = Q/A \text{ (A: 관의 절단면)}$$

유속은 유량과 단면적에 따라 변한다

$$\text{유동} \propto \Delta P/R$$

$$Q \propto \Delta P/R \ (\because \text{유동} = Q)$$

$$v = Q/A$$

$$Q = v \times A$$

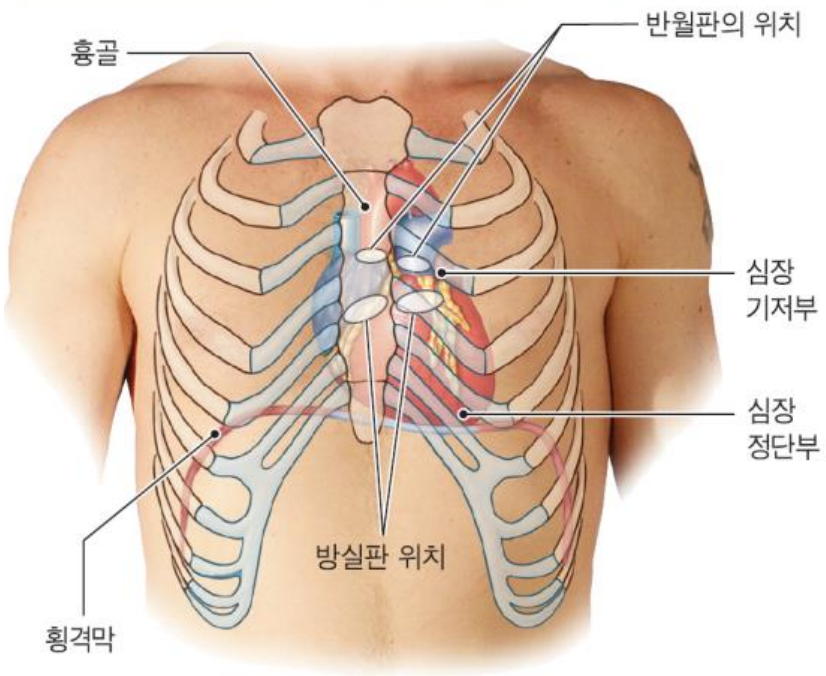
$$v \times A \propto \Delta P/R$$

$$\Delta P \propto v \times A \times R$$

$$\text{평균 동맥압} \propto \text{심박출량} \times \text{말초저항}$$

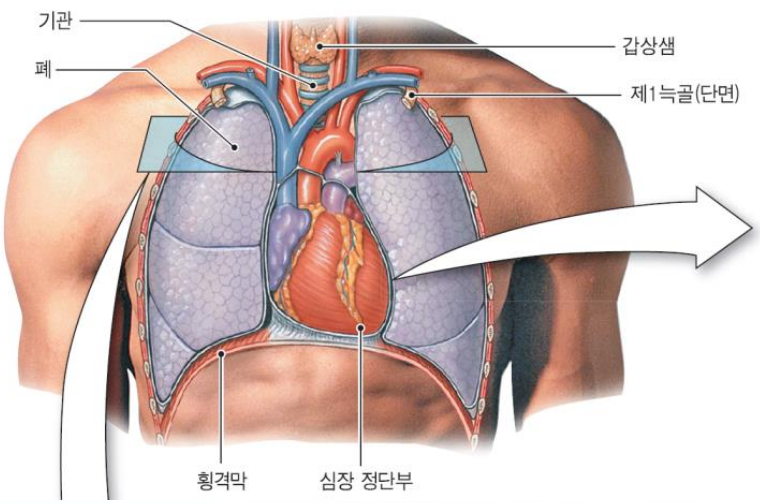
심장은 4개의 방이 있다

(a) 심장은 가슴 중앙에 위치한다.

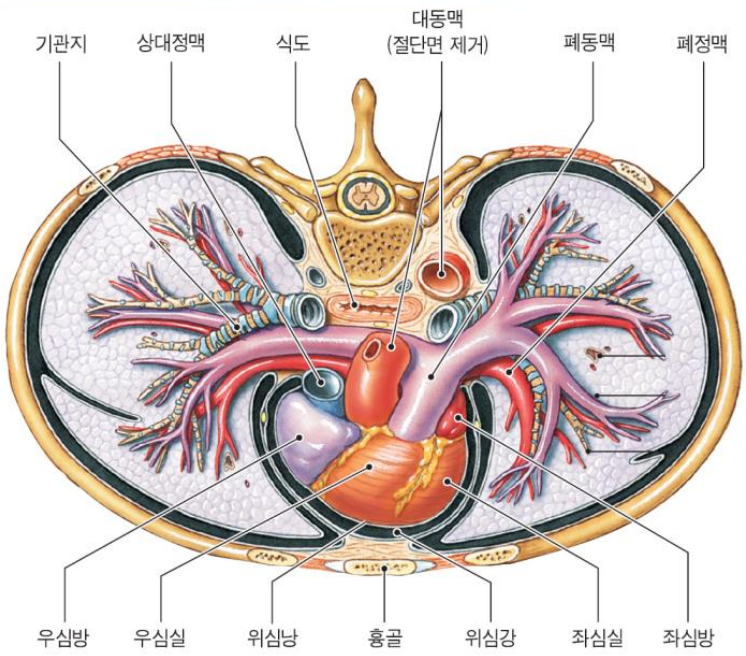


흉강(가슴안) 해부

(c) 심장은 폐 사이에 끼여 있으며, 흉강의 배쪽에 위치한다.



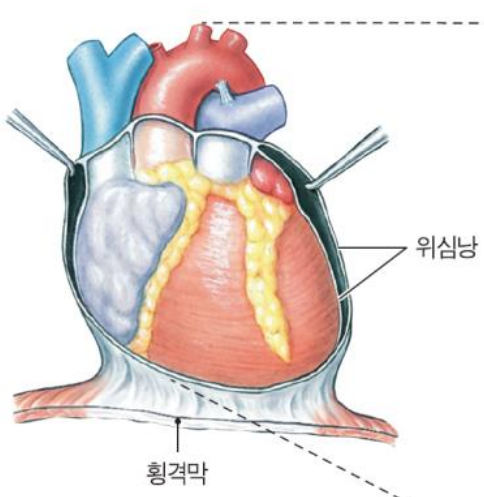
(d) 그림 (c)의 횡단면의 위쪽 도면

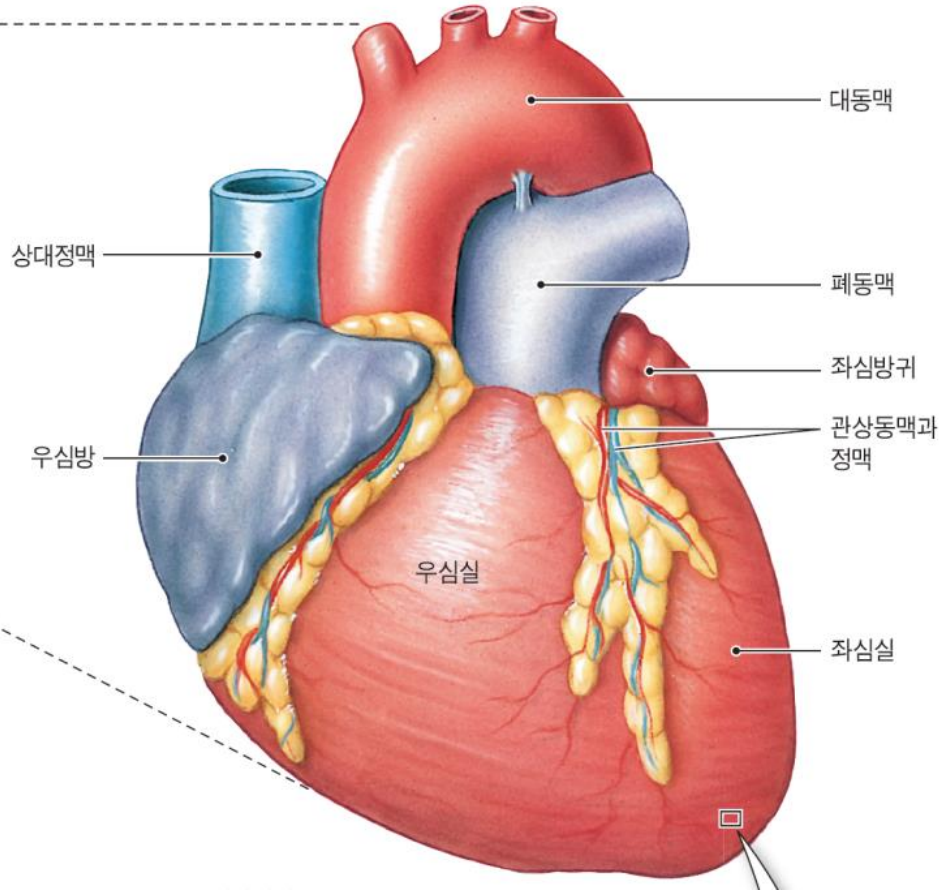


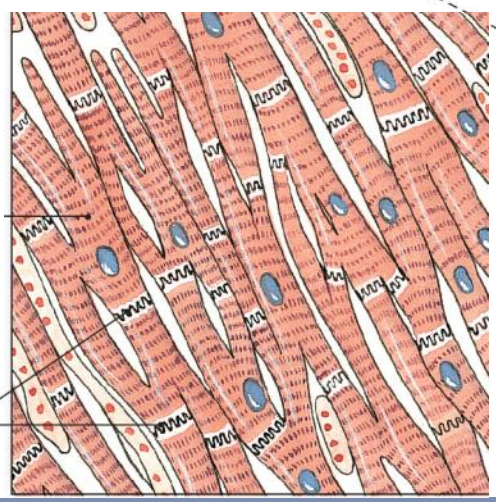
심장은 4개의 방이 있다

(e) 심장은 막 사이에 액체가 채워진 주머니인 심장막으로 둘러싸여 있다.

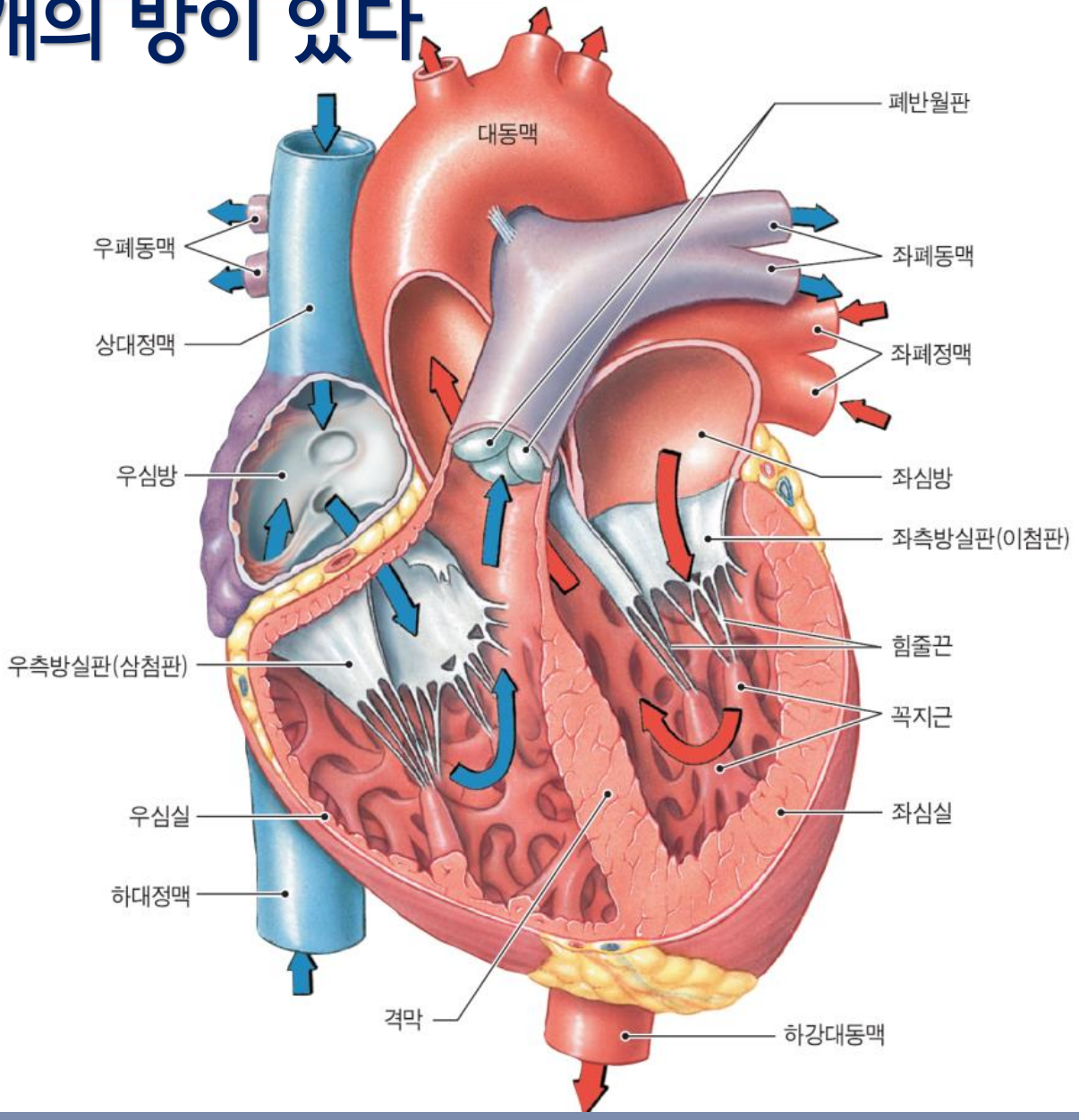
(f) 심실은 심장의 대부분을 차지한다. 동맥과 정맥은 심장을 기반으로 하여 붙어 있다.







심장은 4개의 방이 있다


대동맥
폐반월판
우폐동맥
좌폐동맥
상대정맥
좌폐정맥
우심방
좌심방
좌측방실판(이첨판)
힘줄끈
우측방실판(삼첨판)
꼭지근
우심실
좌심실
하대정맥
격막
하강대동맥

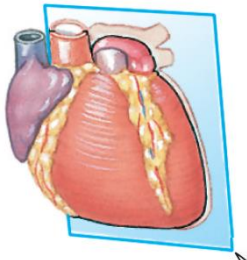
심장은 4개의 방이 있다

표 14-2 심장과 주요 혈관

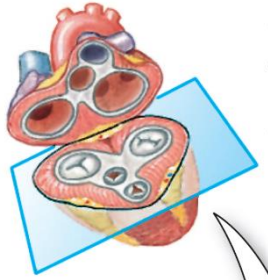
파란 글씨는 저산소 함량 혈액을, 빨간 글씨는 고산소 함량을 나타낸다.

	혈액을 보내주는 곳	혈액을 받아들이는 곳
심 장		
우심방	대정맥	우심실
우심실	우심방	폐
좌심방	폐정맥	좌심실
좌심실	좌심방	폐를 제외한 몸 부위
혈 관		
대정맥	체정맥	우심방
폐동맥	우심실	폐
폐정맥	폐의 정맥	좌심방
대동맥	좌심실	체동맥

심장판막은 심장에서 일어나는 유동을 한 방향으로 진행시킨다



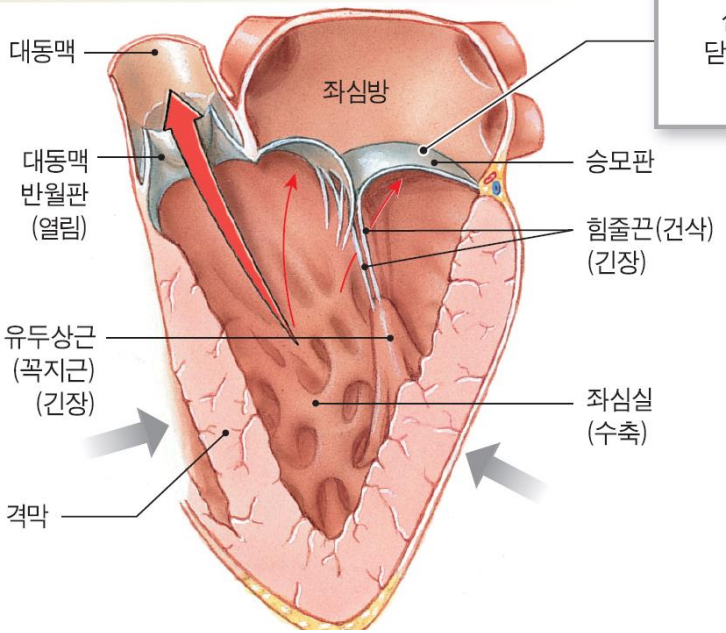
수직절단면은 AV(승모) 판막과 대동맥반월판을 보여준다.



수평절단면은 심방에서 바라본 AV판과 대동맥 혹은 폐동맥 내부에서 바라본 반월판을 보여준다.

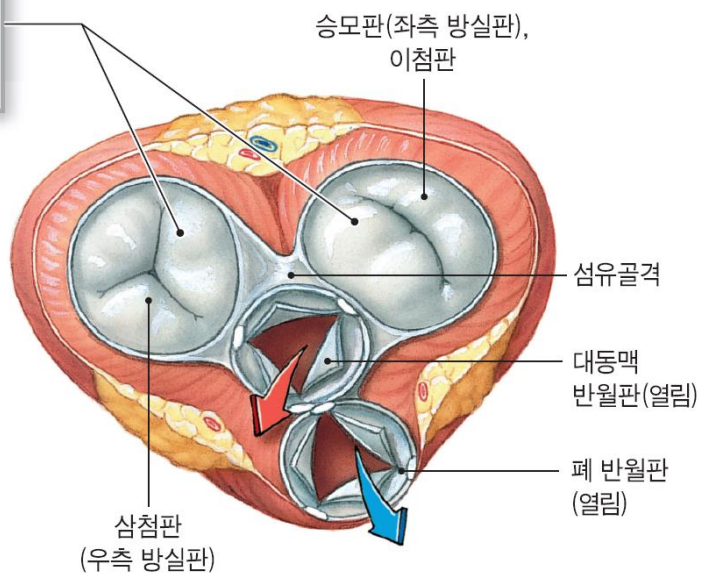
심실 수축

(a) 전단면



심실 수축 동안, **방실판**은 닫혀 있기 때문에 심방으로의 역류를 방지한다.

(b) 횡단면



심장판막은 심장에서 일어나는 유동을 한 방향으로 진행시킨다

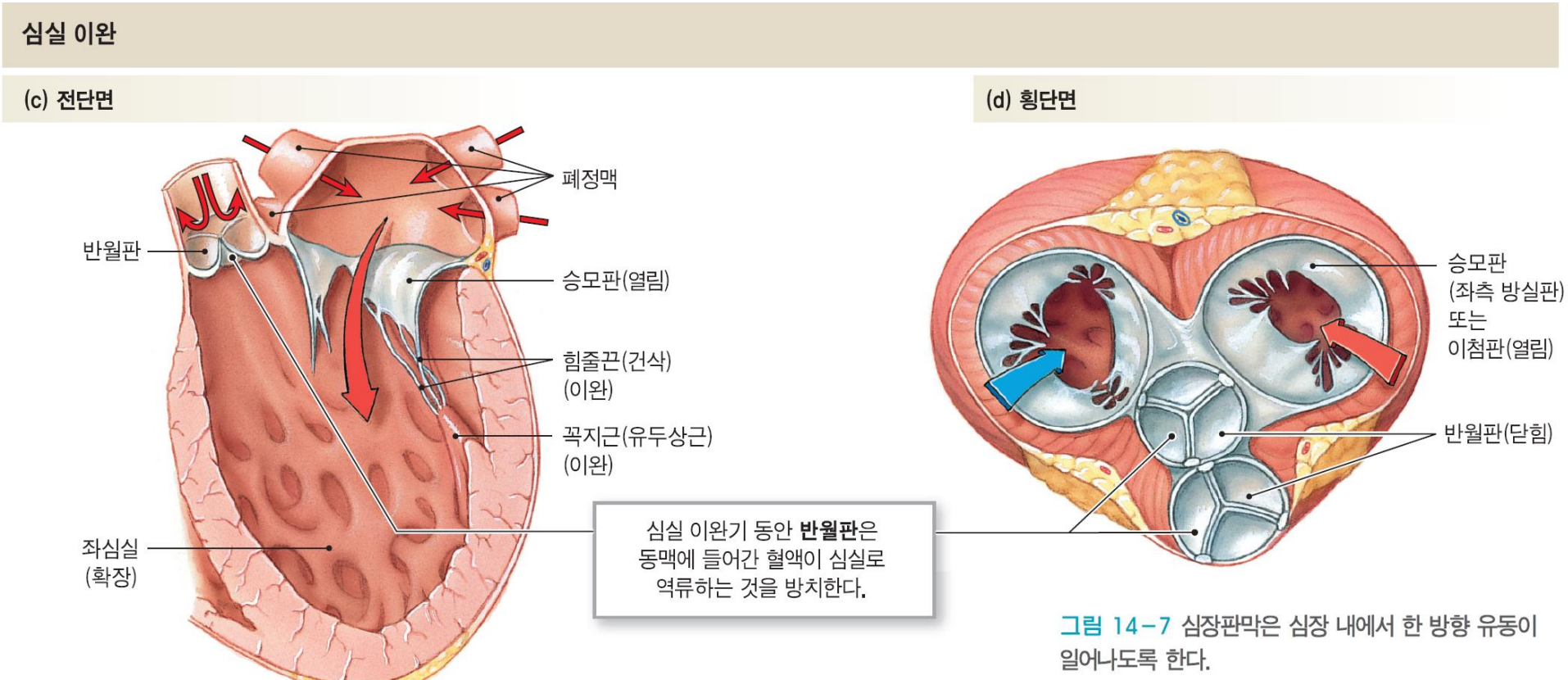
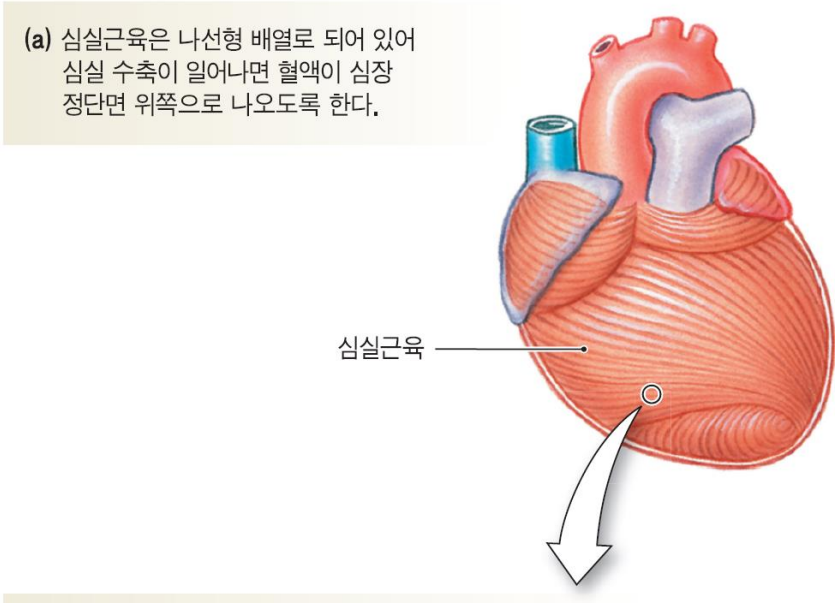


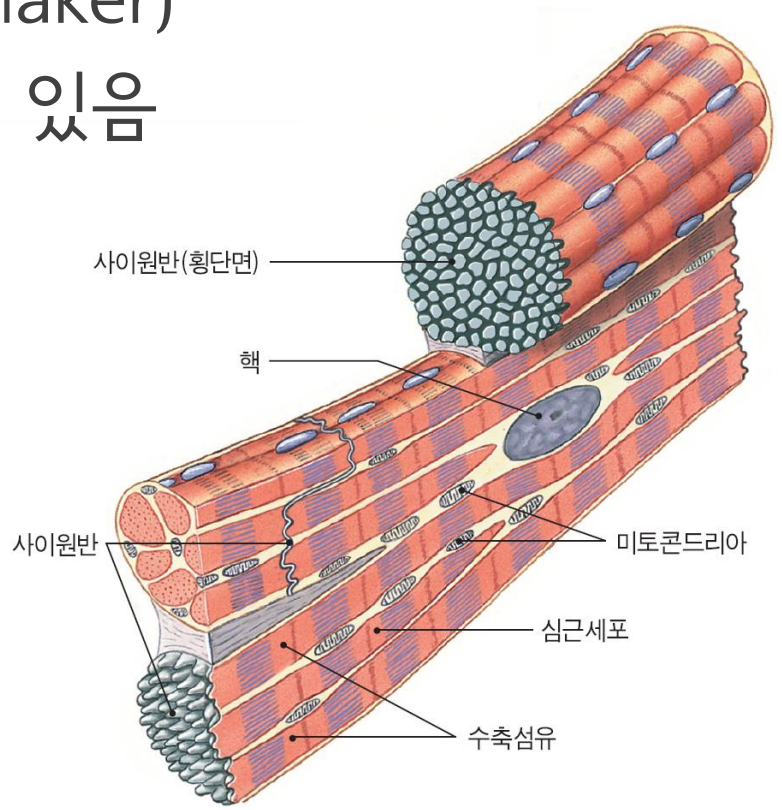
그림 14-7 심장판막은 심장 내에서 한 방향 유동이 일어나도록 한다.

심근세포는 신경자극 없이 수축한다

자율박동세포(autorhythmic cell)

- 활동전위를 자발적으로 생성하도록 특수화된 심근세포
- 심장박동수를 조절, 박동원(pacemaker)
- 크기가 작고 수축섬유를 적게 갖고 있음



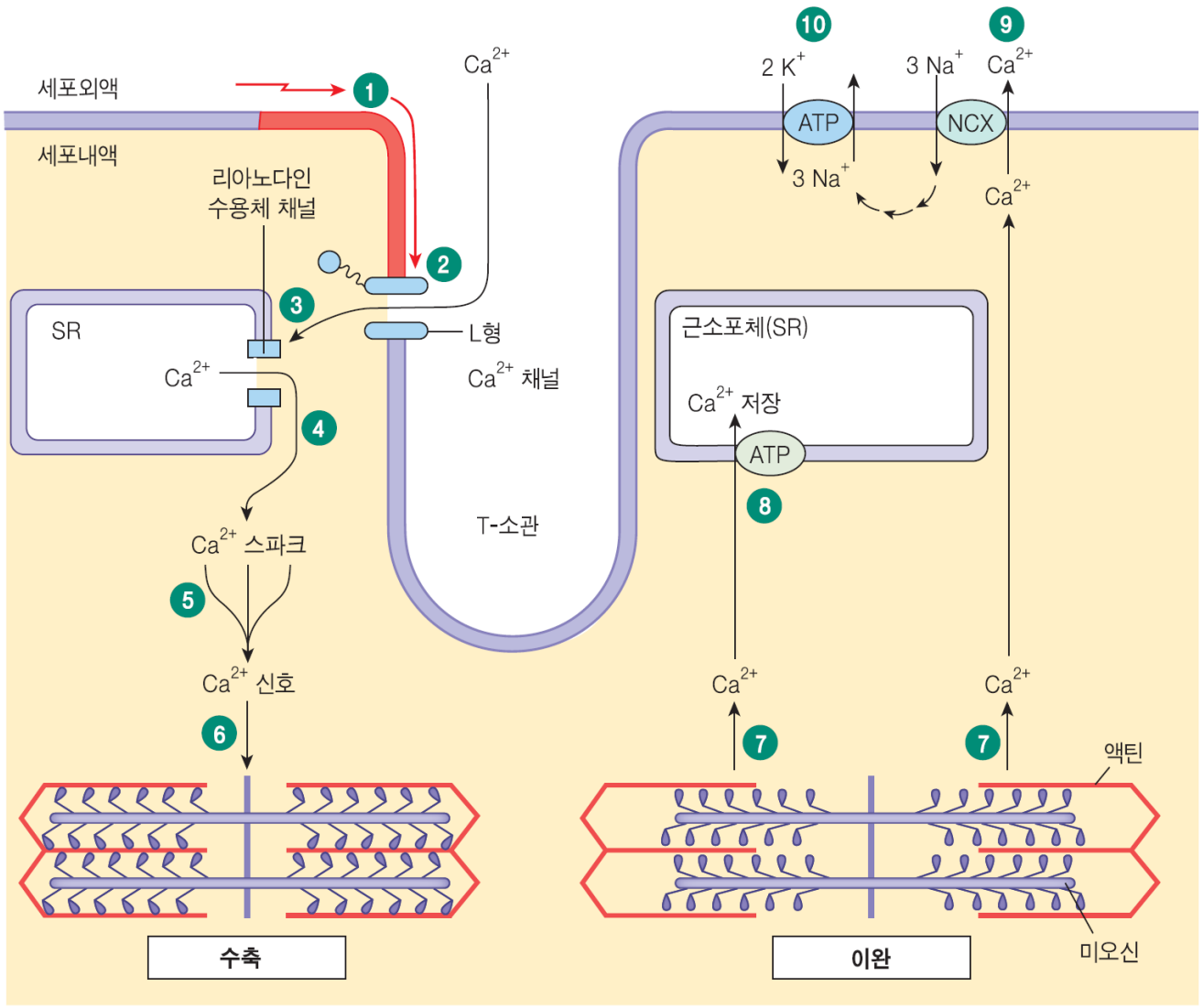


심근세포는 신경자극 없이 수축한다

심근세포의 특성

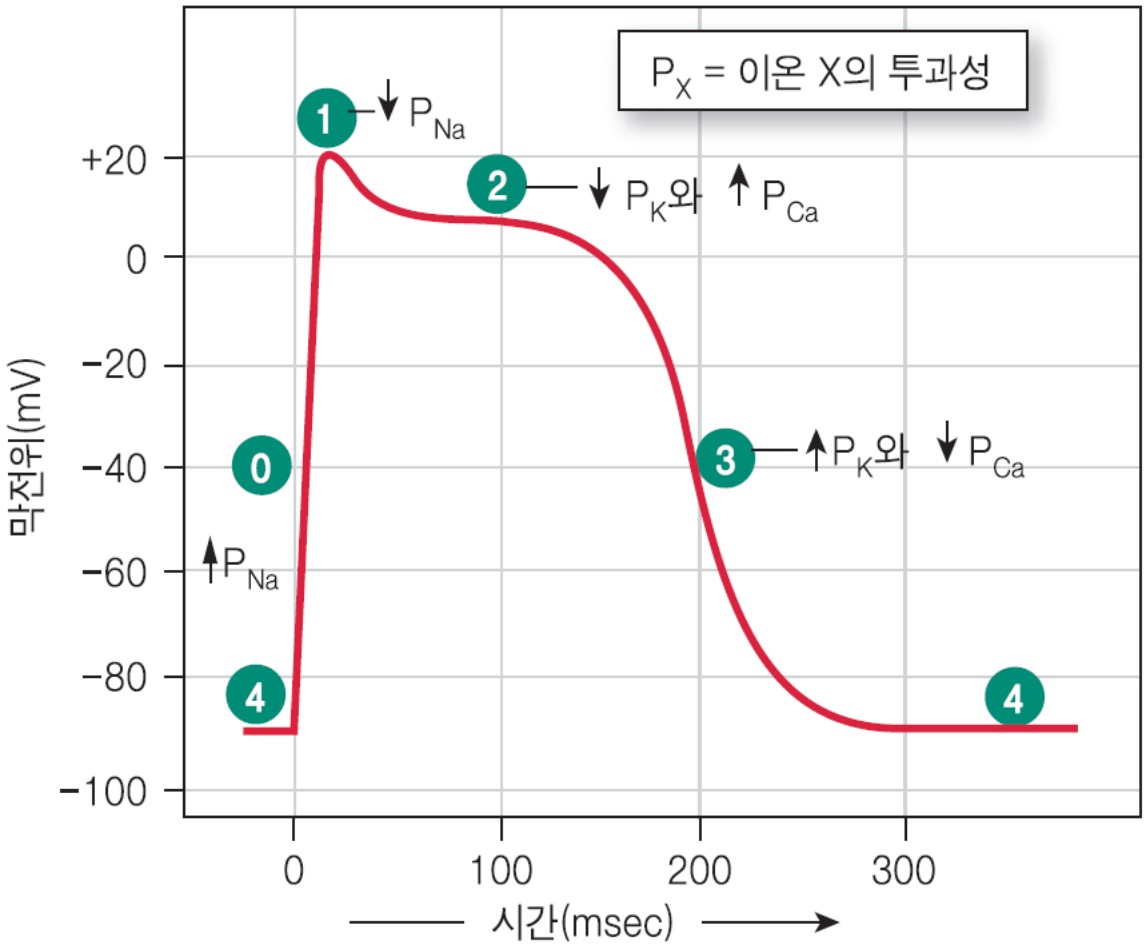
- 심근 섬유는 골격근 섬유보다 훨씬 작고, 단핵
- 심근세포는 이웃세포와 끝과 끝이 연결된 형태로 붙어 망상을 형성, 사이원반(개재판, intercalated disk) 형성
- 사이원반 내에 있는 틈새이음을 통해 전기적으로 연결 → 거의 동시에 수축
- 심근세포의 T소관은 골격근의 T소관보다 큼
- 근소포체가 골격근에서보다 작음
- 미토콘드리아가 심장 수축섬유의 세포 부피의 1/3 차지 = 심근이 많은 에너지를 필요

칼슘 유입은 심장의 흥분-수축 짝물림의 특징이다



1. 활동전위가 인접 세포로부터 들어온다.
2. 전압작동성 Ca^{2+} 채널이 열린다. Ca^{2+}가 세포 안으로 들어온다.
3. Ca^{2+}가 리아노다인 수용체 채널(RyR)을 통하여 Ca^{2+}의 유출을 유도한다.
4. 국소적 유출은 Ca^{2+} 스파크를 일으킨다.
5. 합산된 Ca^{2+} 스파크는 하나의 Ca^{2+} 신호를 생성한다.
6. Ca^{2+} 이온은 트로포닌에 결합하여 수축을 시작한다.
7. Ca^{2+}가 트로포닌으로부터 떨어지면 이완이 일어난다.
8. Ca^{2+}가 저장을 위해 근소포체로 펌프되어 들어간다.
9. Ca^{2+}가 Na^+와 NCX 역수송체에 의하여 교환된다.
10. Na^+ 기울기는 Na^+-K^+-ATPase에 의하여 유지된다.

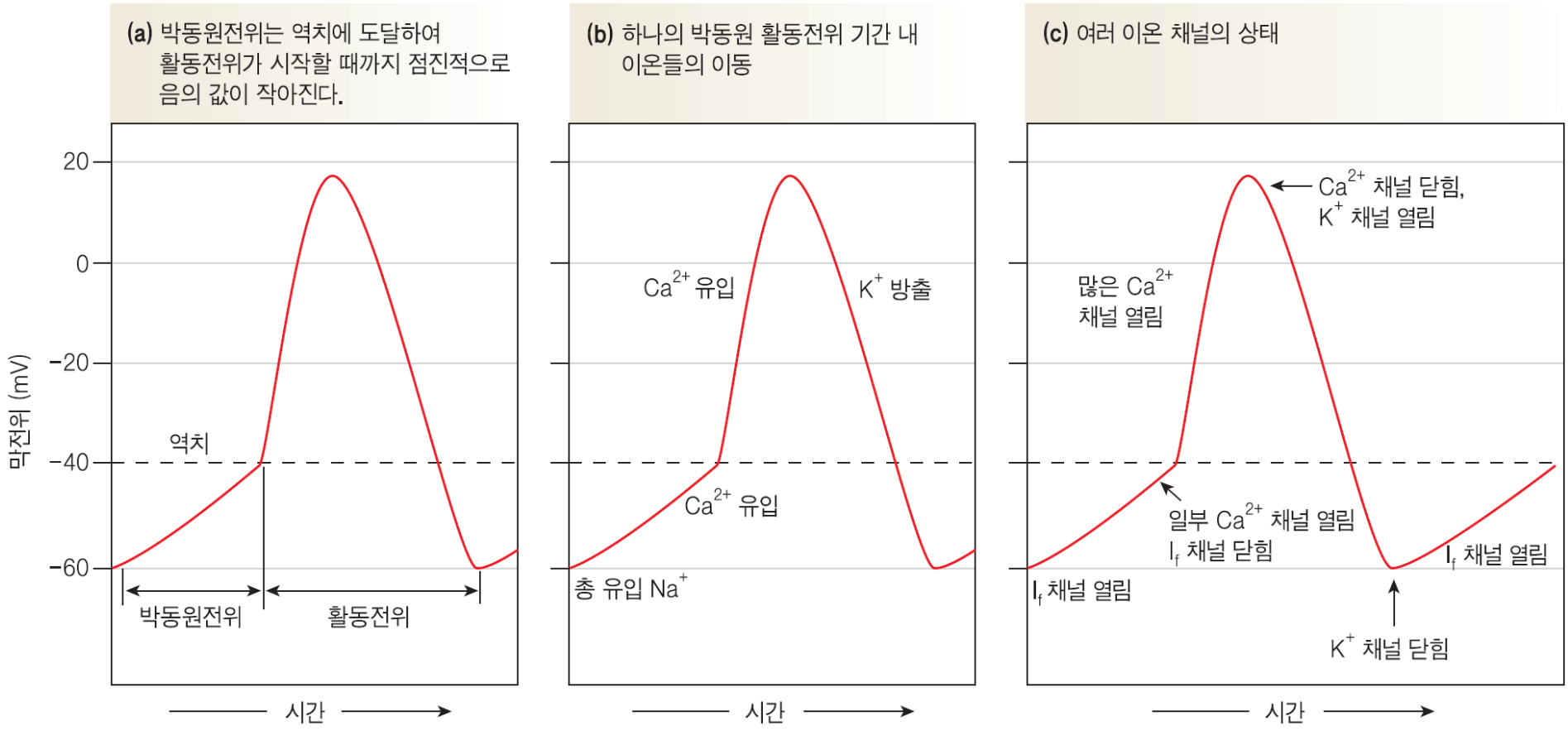
심근의 활동전위는 변한다



단계*	막채널
0	Na^+ 채널 열림
1	Na^+ 채널 닫힘
2	Ca^{2+} 채널 열림; 빠른 K^+ 채널 닫힘
3	Ca^{2+} 채널 닫힘; 느린 K^+ 채널 열림
4	휴지기 전위

*각 단계의 숫자는 전형적으로 붙이는 숫자이다.

심근의 활동전위는 변한다

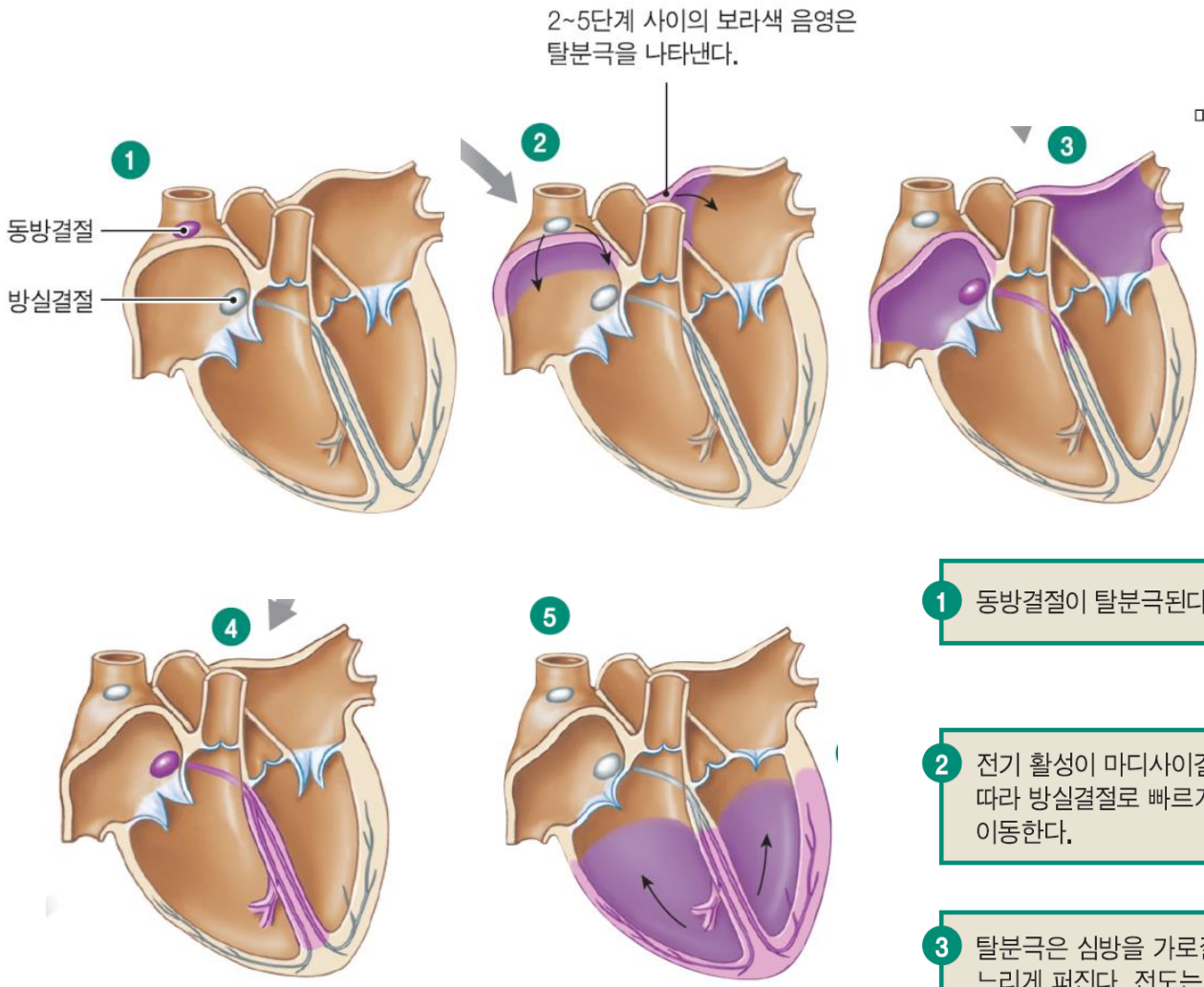


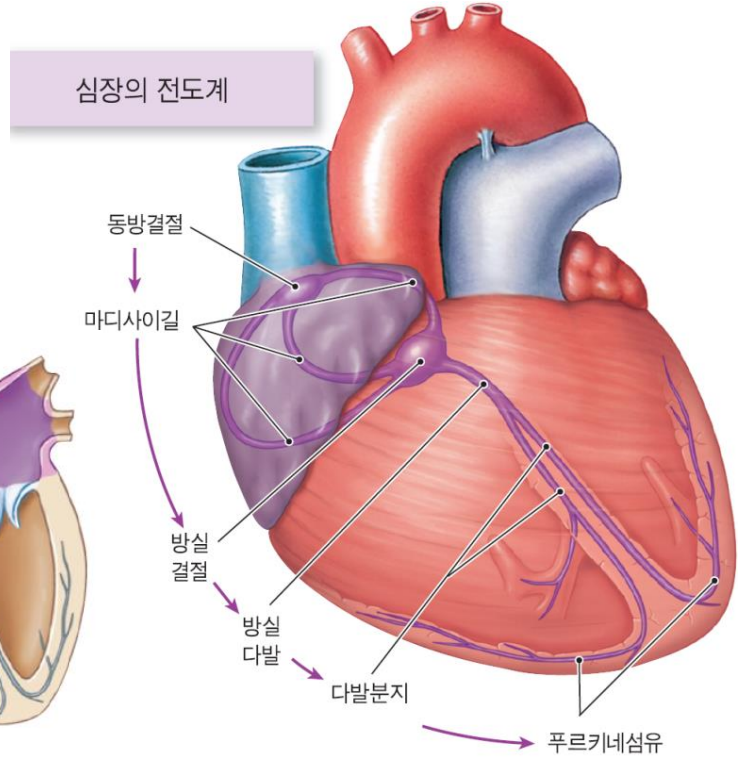
심근의 활동전위는 변한다

표 14-3 심근과 골격근의 활동전위 비교

	골격근	수축심근	자율심근
막전위	-70 mV에서 안정	-90 mV에서 안정	불안정한 박동원전위, -60 mV에서 시작
역치로 가기 위한 사건	ACh 채널에 의한 Na^+ 총 유입	틈새이음을 거쳐 탈분극 유입	I_f 채널을 통한 Na^+ 총 유입, Ca^{2+} 유입에 의한 강화
활동전위 상승기	Na^+ 유입	Na^+ 유입	Ca^{2+} 유입
재분극기	신속, K^+ 방출이 원인	Ca^{2+} 유입에 의해 정점의 지연, K^+ 방출에 의한 급속 변화	신속, K^+ 방출이 원인
과분극	K^+ 채널이 닫혔을 때 높은 K^+ 투과성 때문에 K^+의 과다 유출이 원인. K^+의 누출과 Na^+가 휴식기 전압으로 회복	일어나지 않음, 휴식기의 전압이 K^+의 평형 전압인 -90 mV	일어나지 않음, 재분극이 -60 mV에 이르면, I_f 채널은 다시 열림. ACh는 세포를 과분극시킬 수 있다.
활동전위 기간	짧음: 1~2 msec	지연: 200+ msec	다양함, 일반적으로 150+ msec
불응기	일반적으로 짧음	Na^+ 채널의 재조정이 활동전위 끝에 이를 때까지 지연되기 때문에 길다.	없음

전기 전도는 수축을 조정한다





1. 동방결절이 탈분극된다.
2. 전기 활성이 마디사이길을 따라 방실결절로 빠르게 이동한다.
3. 탈분극은 심방을 가로질러 더 느리게 퍼진다. 전도는 방실결절을 느리게 지나간다.
4. 탈분극은 심실전도계를 통하여 심장 정단부로 빠르게 이동한다.
5. 탈분극파가 정단에서 위쪽으로 전파된다.

박동원은 심장박동수를 결정한다

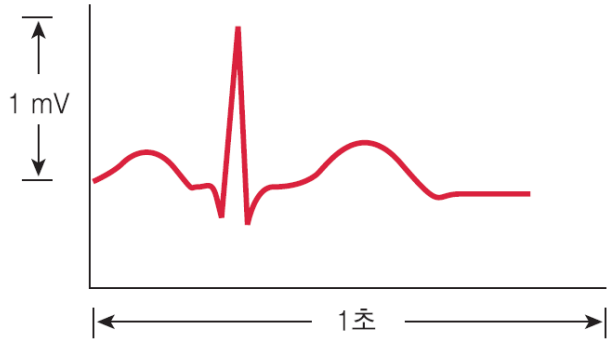
- 동방결절에 있는 세포는 심장박동 속도를 조절
- 가장 빠른 박동원이 심장박동을 결정
- 동방결정이 손상되면 다른 박동원이 기능을 대신

완전심장차단

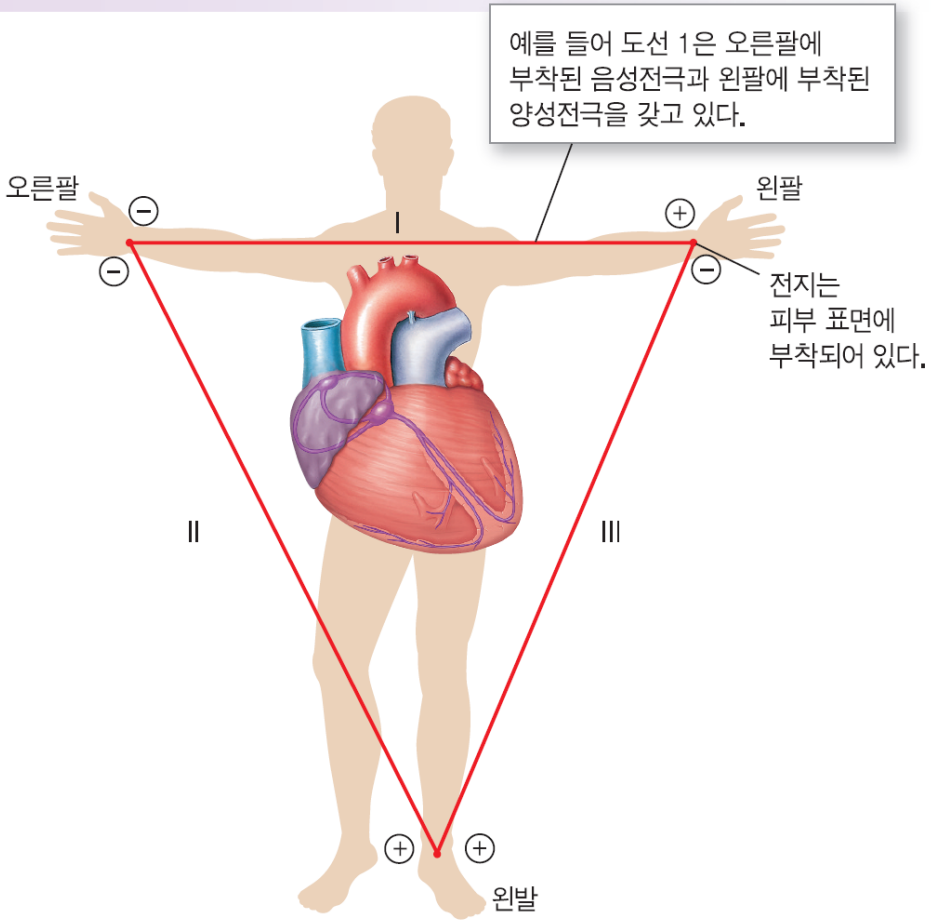
- 방실결정을 통하여 심방에서 심실로 이어지는 전기신호의 전도가 망가진 질병
- 심실의 수축 속도는 매우 느림 → 혈액의 흐름이 원활 X
- 전지구동장치을 외과적으로 이식

심전도는 전기적 활동을 반영한다

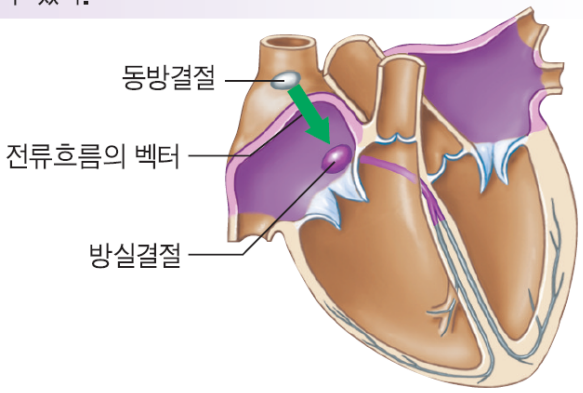
(a) 심전도(ECG)는 몸의 표면에서 기록되는 모든 세포의 전기활성의 합이다.



(b) **아인토벤의 삼각형.** 두 팔과 다리에 부착된 ECG 전극은 삼각형을 이룬다. 두 전극쌍 각각은 '리드'로 발음하는 양극과 음극의 전극으로 이루어진 도선으로 되어 있다. 하나의 ECG는 한 번에 하나의 도선으로부터 기록된다.



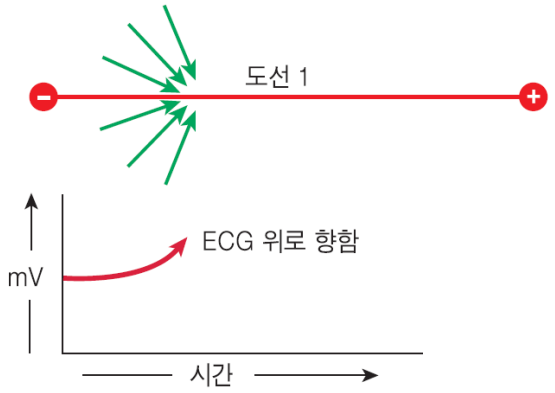
(c) 심장에 있는 모든 세포에서 한 번 일어나는 전기 활성은 이 그림에서와 같이 심방 탈분극을 표시하는 벡터화살표로 나타낼 수 있다.



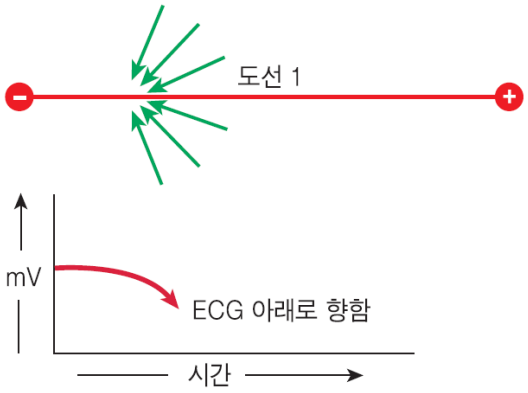
심전도는 전기적 활동을 반영한다

(d) ECG 굴절의 방향은 전류흐름의 벡터와 도선 축 사이의 상호관계를 나타낸다.

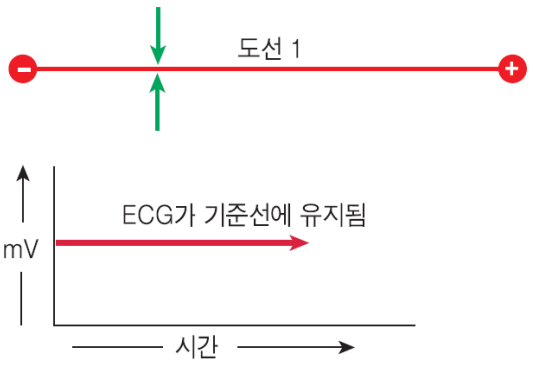
하나의 ECG의 위쪽 굴절은 전류의 벡터가 양성전극으로 향해 있음을 의미한다.



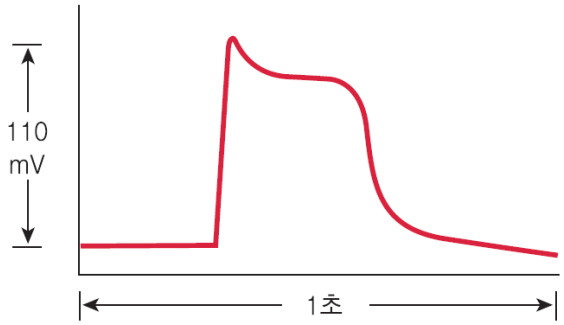
아래쪽 굴절은 전류벡터가 음성전극으로 향해 있음을 의미한다.



전극의 축과 수직한 벡터는 비굴절(기준선)을 이룬다.



(e) (a)의 ECG와 하나의 수축성 심근 활동전위를 비교해보라.



- 이 심실세포의 활동전위는 세포 안쪽에 들어 있는 전극과 세포 바깥쪽의 전극 사이에서 일어나는 세포내 기록이다.
- 위쪽 굴절은 탈분극을 나타내고, 아래쪽 굴절은 재분극을 나타낸다.
- 활동전위는 신호 원천에 가까운 곳에서 측정하기 때문에 그 진폭이 훨씬 크다.

심전도는 전기적 활동을 반영한다

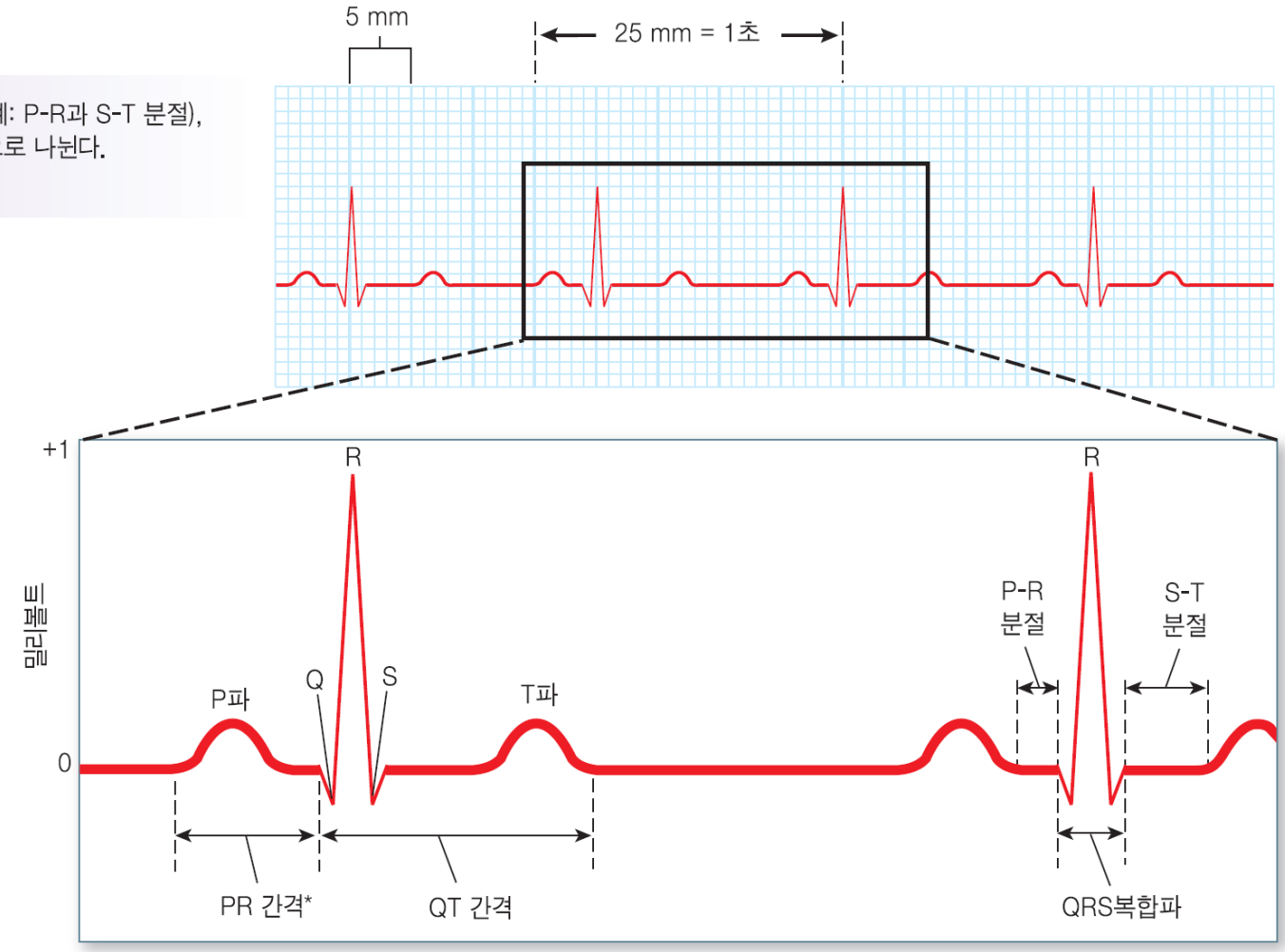
(f) 심전도는 파(P, Q, R, S, T), 파 사이의 분절(예: P-R과 S-T 분절), 파가 포함되어 있는 간격(예: PR과 QT 간격)으로 나뉜다. 이 그림은 도선 1에서 얻어진 심전도이다.

P파: 심방 탈분극

PR 분절: AV 결절에서 AV 다발로의 전도

QRS복합파: 심실 탈분극

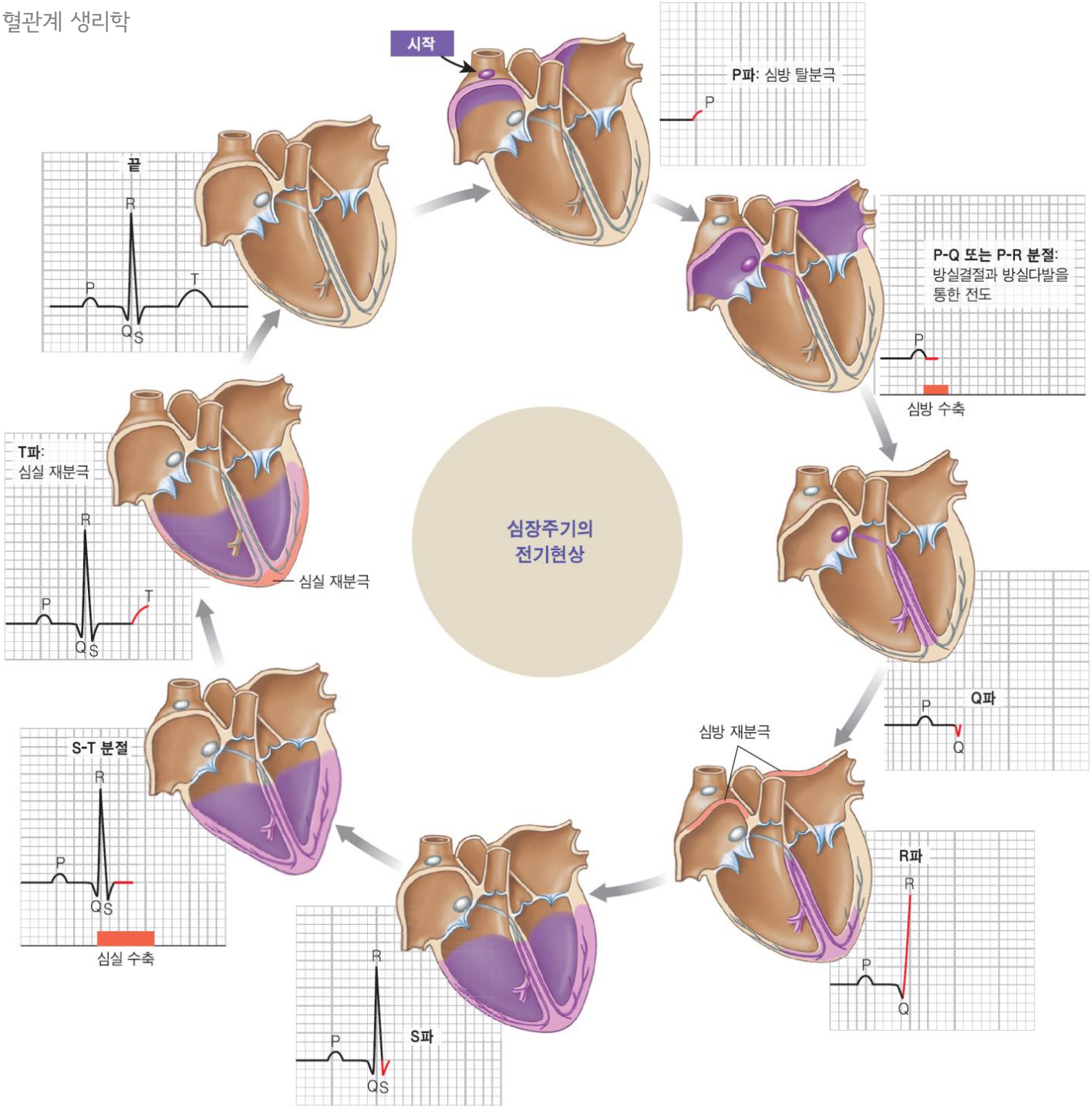
T파: 심실 재분극



*때때로 Q파는 심전도에서 보이지 않는다. 이런 이유 때문에 분절이나 간격은 QRS복합파의 첫 번째 파에서 시작하지만 R파를 사용하여 명명한다.

그림 문제

1. 만약 ECG 차트 속도가 25 mm/sec로 진행한다면, 이 사람의 심장박동수는 얼마인가? (하나의 눈금 = 1 mm)


시작
P파: 심방 탈분극
P
P-Q 또는 P-R 분절:
방실결절과 방실다발을
통한 전도
심방 수축
Q파
심방 재분극
R파
S파
심실 수축
S-T 분절
T파:
심실 재분극
심실 재분극
끝
심장주기의
전기현상

심전도는 전기적 활동을 반영한다

(g) ECG Analysis

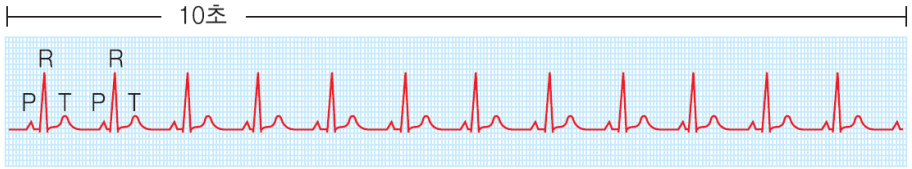
심전도 기록을 분석할 때 생기는 질문들

1. 심장박동 속도는 얼마인가? 정상 범위가 분당 60~100에 있는가?
2. 리듬은 정상적인가?
3. 모든 정상 파들이 파악할 수 있는 형태로 나타났는가?
4. 각각의 P파에 QRS복합파가 하나씩 존재하나? 만약 그렇다면, P-R 분파는 일정한 길이로 존재하는가? 만약 각각의 P파에 QRS복합파가 하나가 아니라면, P파를 이용하여 심장박동수를 세어 보아라. 그리고 R파에 따라서 박동수를 세어보아라. 그들의 박동수는 동일한가? 어느 파가 손목에서 느끼는 맥박과 일치하는가?

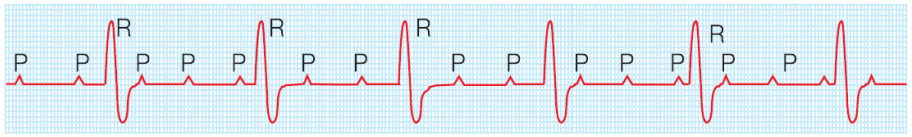
Q 그림 문제

2. 3가지 비정상적인 심전도를 왼쪽 그림에서 볼 수 있다. 각 비정상적 심전도를 검토하고 심장에서 일어나는 정상적인 전기전도의 어떤 이상과 서로 연관되어 있는지 찾아보라.
3. (5)번의 ECG 기록에서 각 파가 무엇인지 확인하라. 각 파들의 발생형태를 보고 심장의 어떤 전기전도에서 일어나는지 살펴보라.

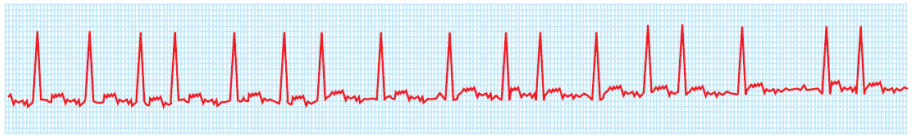
(h) 정상과 비정상 ECGs. 모든 심전도 결과는 10초간의 기록이다.



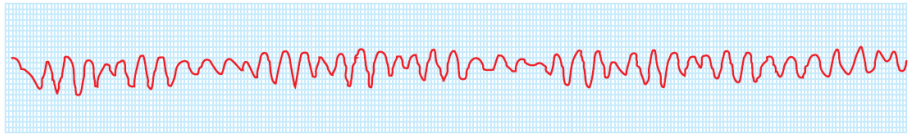
(1) 정상 심전도



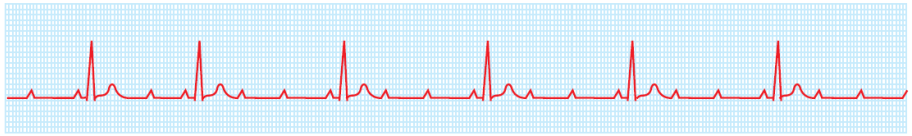
(2) 3도 차단



(3) 심방세동

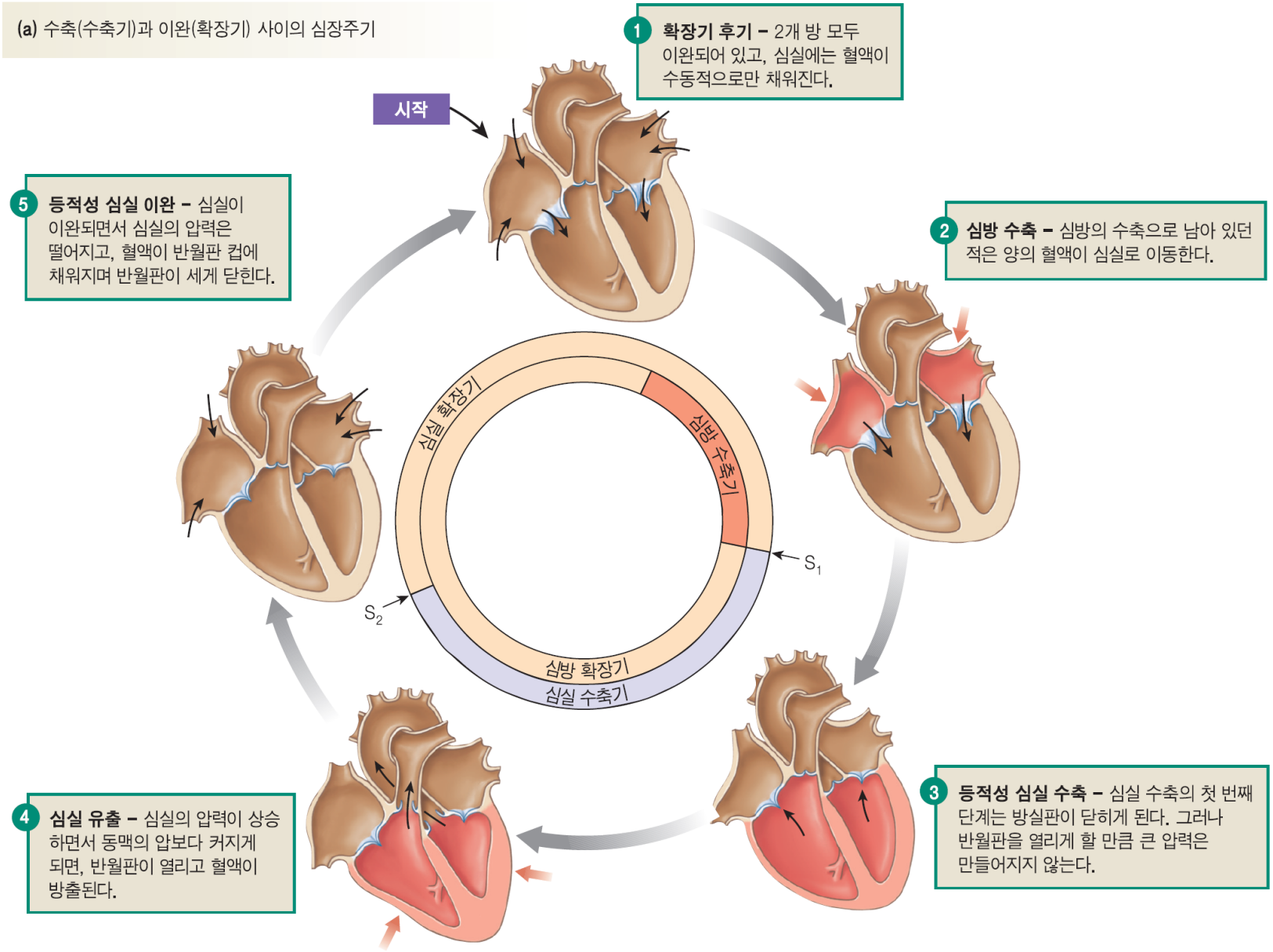


(4) 심실세동

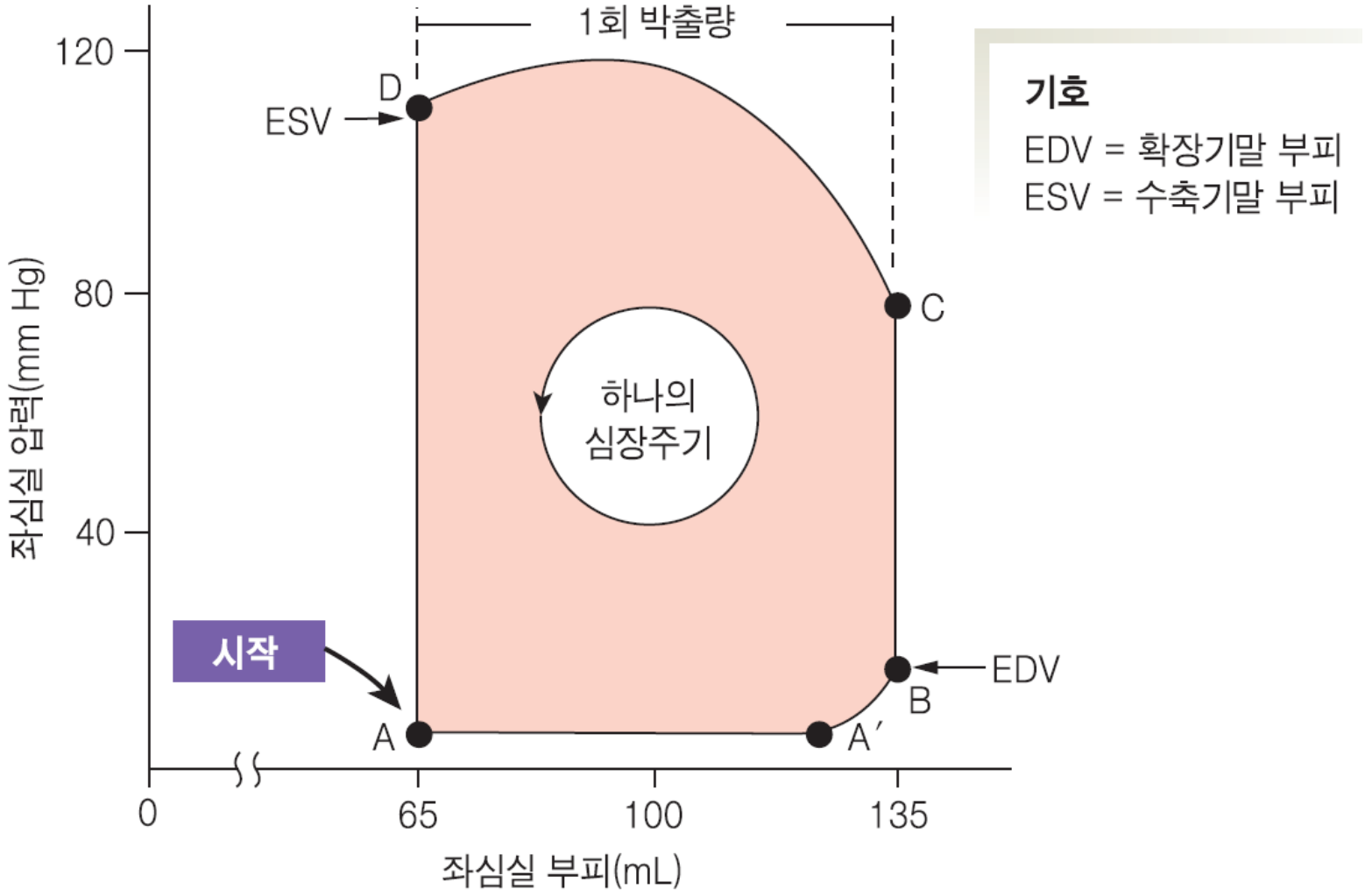


(5) 위의 비정상적 ECG를 분석하라.

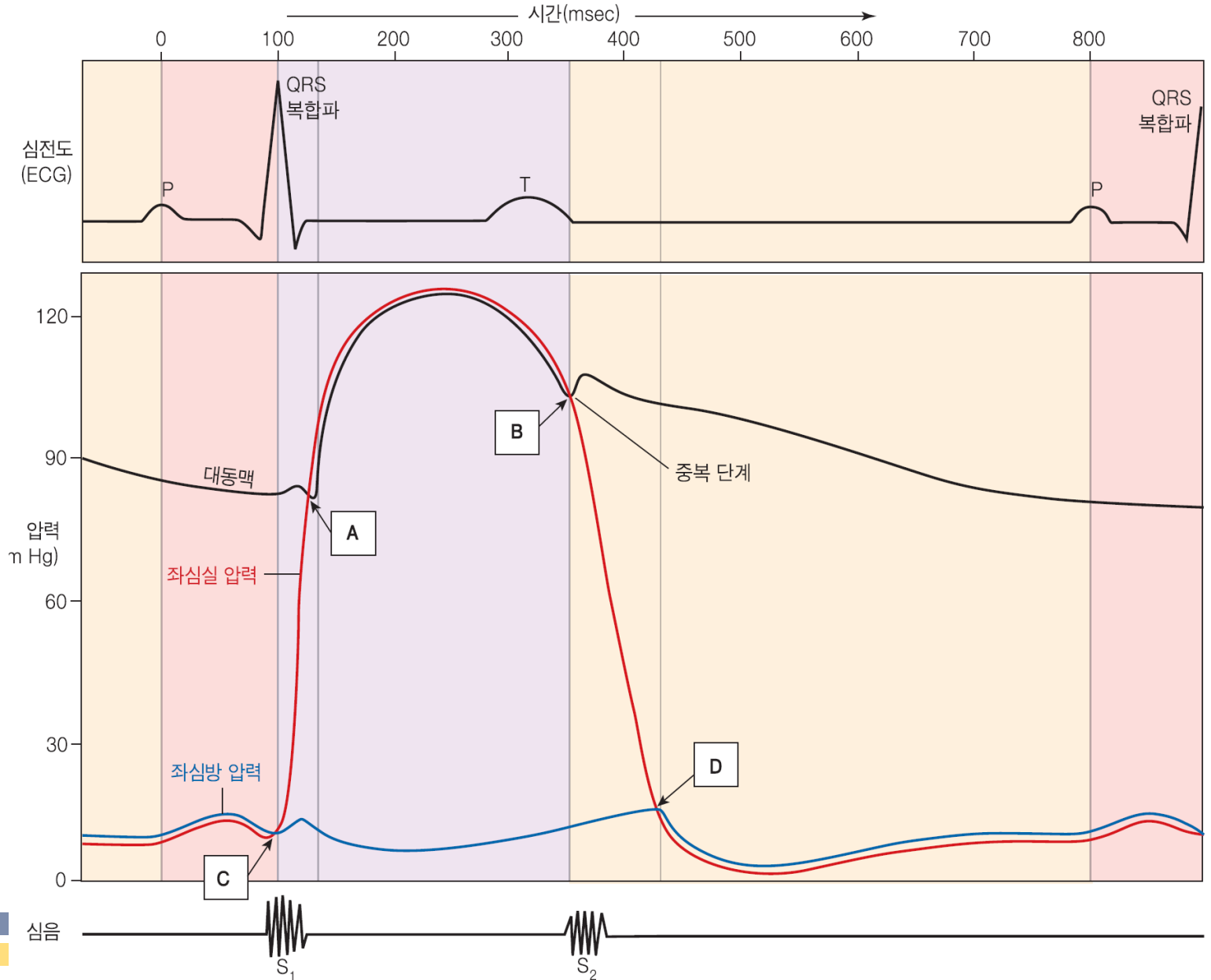
심장주기 동안 심장은 수축과 이완을 진행한다



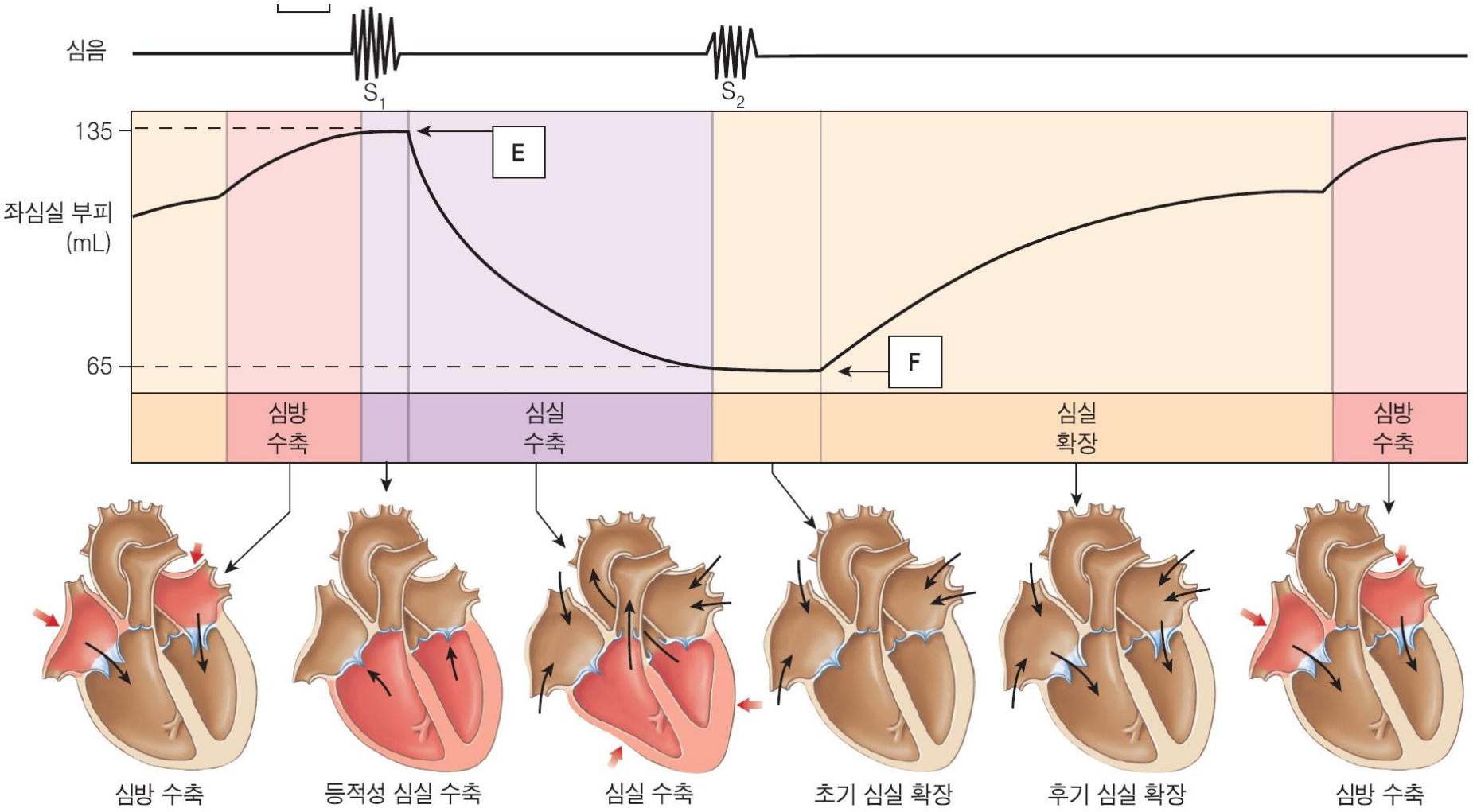
압력-부피 곡선은 1회의 심장주기를 나타낸다



압력-부피 곡선은 1회의 심장주기를 나타낸다



압력-부피 곡선은 1회의 심장주기를 나타낸다



박출량은 1회 수축 시 분출하는 혈액량이다

1회 박출량: 한 번의 수축에서 하나의 심실이 퍼내는 혈액량

수축 전의 혈액의 부피 - 수축 후의 혈액의 부피 = 1회 박출량

EDV - ESV = 1회 박출량

135mL - 65mL = 70mL

- 1회 박출량은 상수가 아님, 운동할 때엔 100mL 만큼 증가
- 심실에 잔류하는 혈액은 위기 상황에 대비한 여유

심박출량은 심장 기능의 척도이다

심박출량(cariac output, CO): 몸 전체에 배분되는 전체 혈류

심박출량(CO) = 심장박동수 × 1회 박출량

- 휴식기의 평균 심장박동수: 분당 72회
- 1회 박출량: 70mL

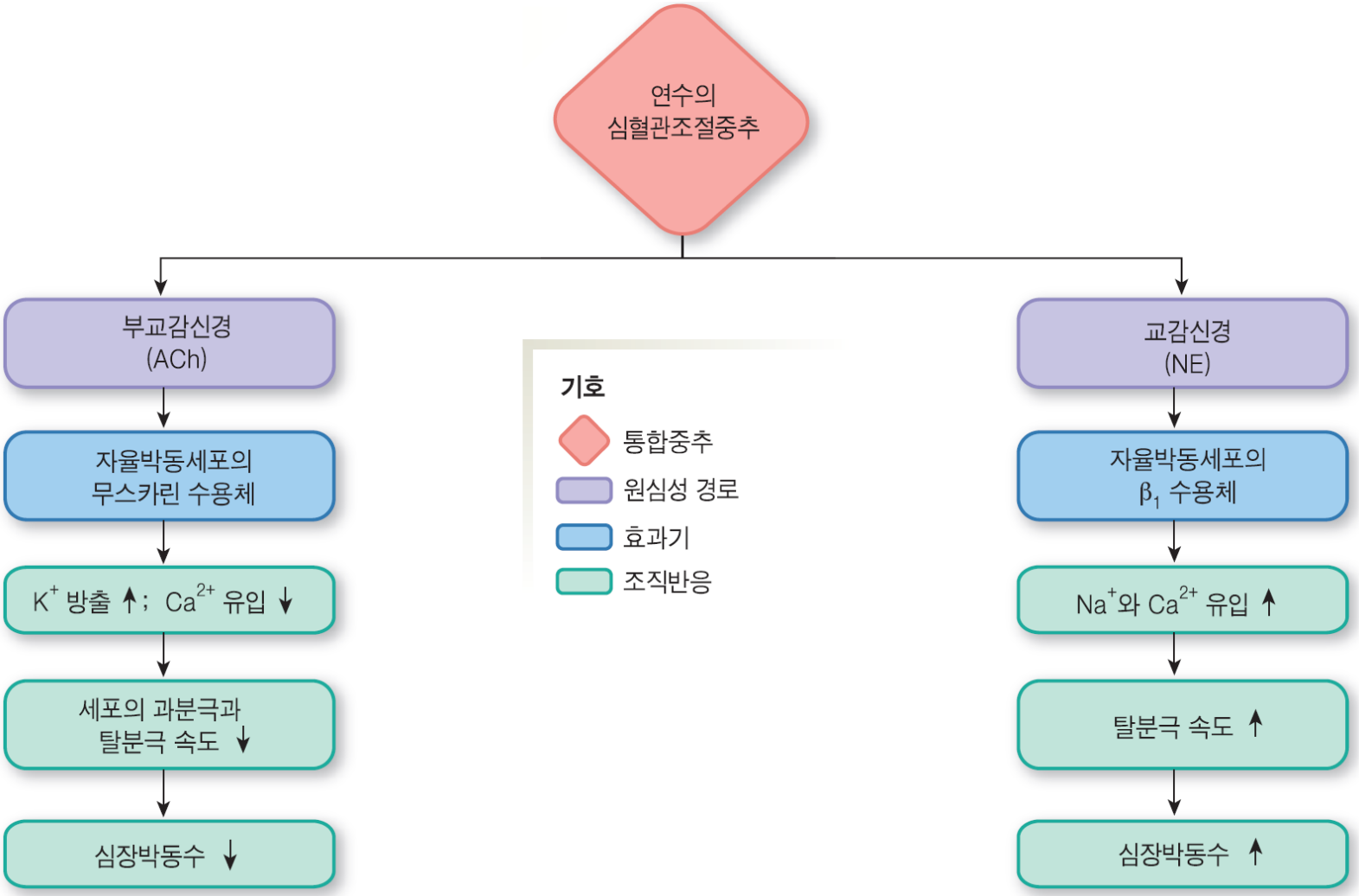
CO = 72회/분 × 70mL/회 = 5,040mL/분 (대략 5L)

- 운동시엔 30-35L/분씩 증가

자율신경계가 심장박동수를 조절한다

- 휴식기의 평균 심박수: 70회(bpm) (60-100bpm)
- 운동선수: ↓, 흥분하거나 근심: ↑, 어린이 ↑
- 신경이나 호르몬 자극에 의해 조절

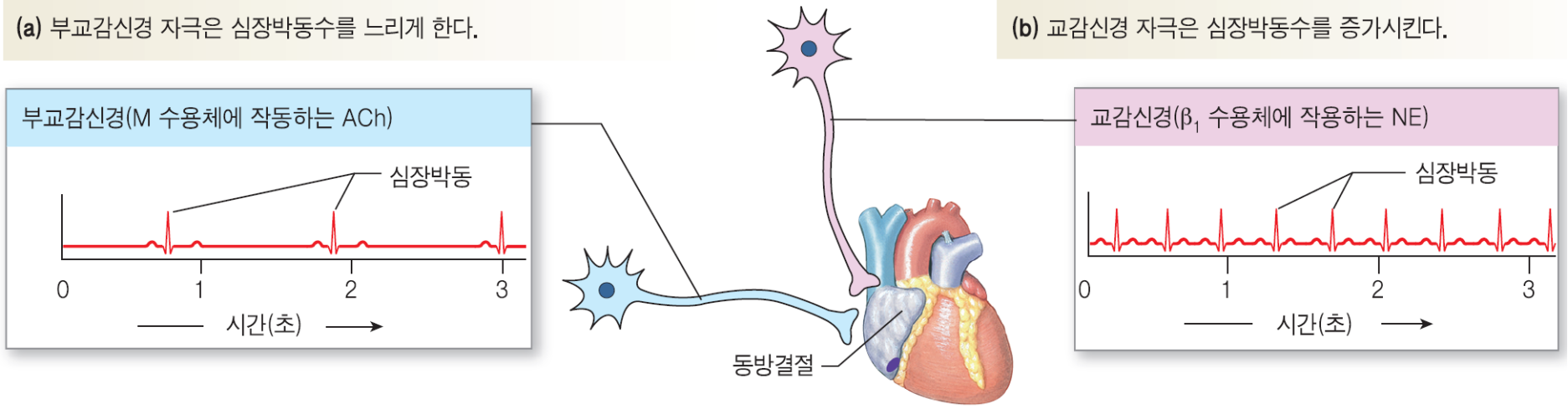
자율신경계가 심장박동수를 조절한다



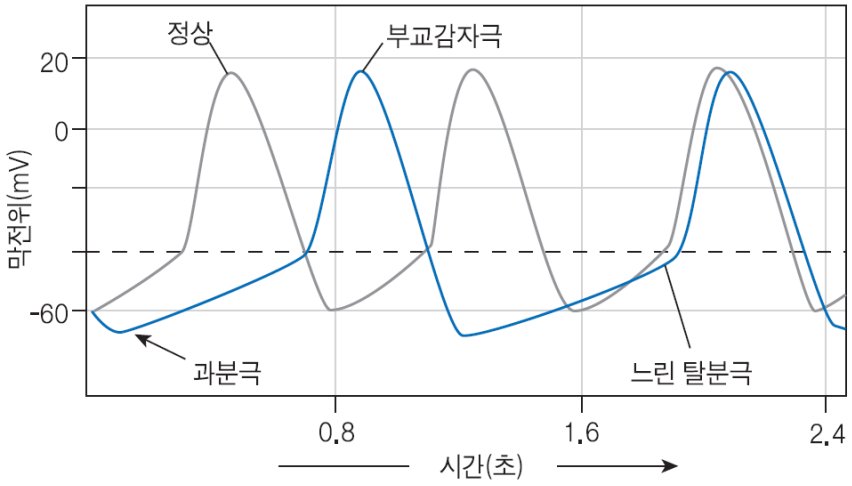
자율신경계가 심장박동수를 조절한다

(a) 부교감신경 자극은 심장박동수를 느리게 한다.

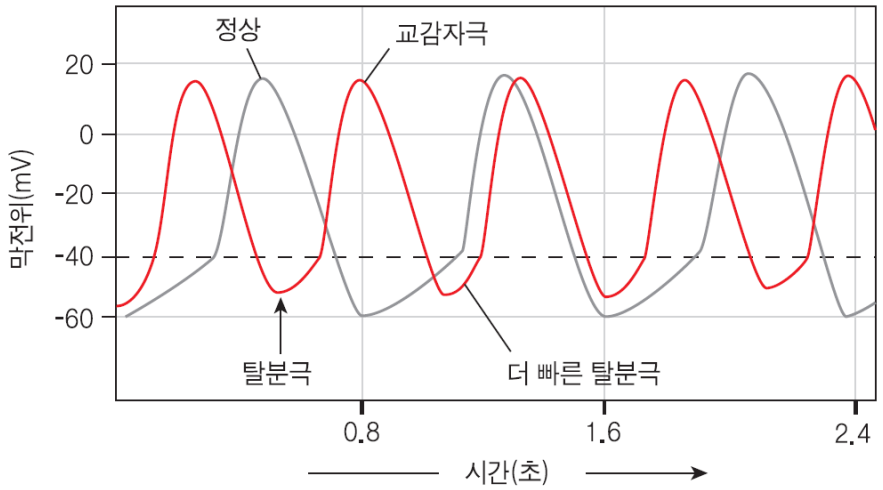
(b) 교감신경 자극은 심장박동수를 증가시킨다.



(d) 부교감자극은 자율박동세포의 막전위를 과분극시키고 탈분극을 느리게 함으로써 심장박동수를 느리게 한다.



(e) 교감자극과 에피네프린은 자율박동세포를 탈분극시키고 탈분극 속도를 증가시켜 심장박동수를 증가시킨다.



수축성은 신경계와 내분비계가 조절한다

