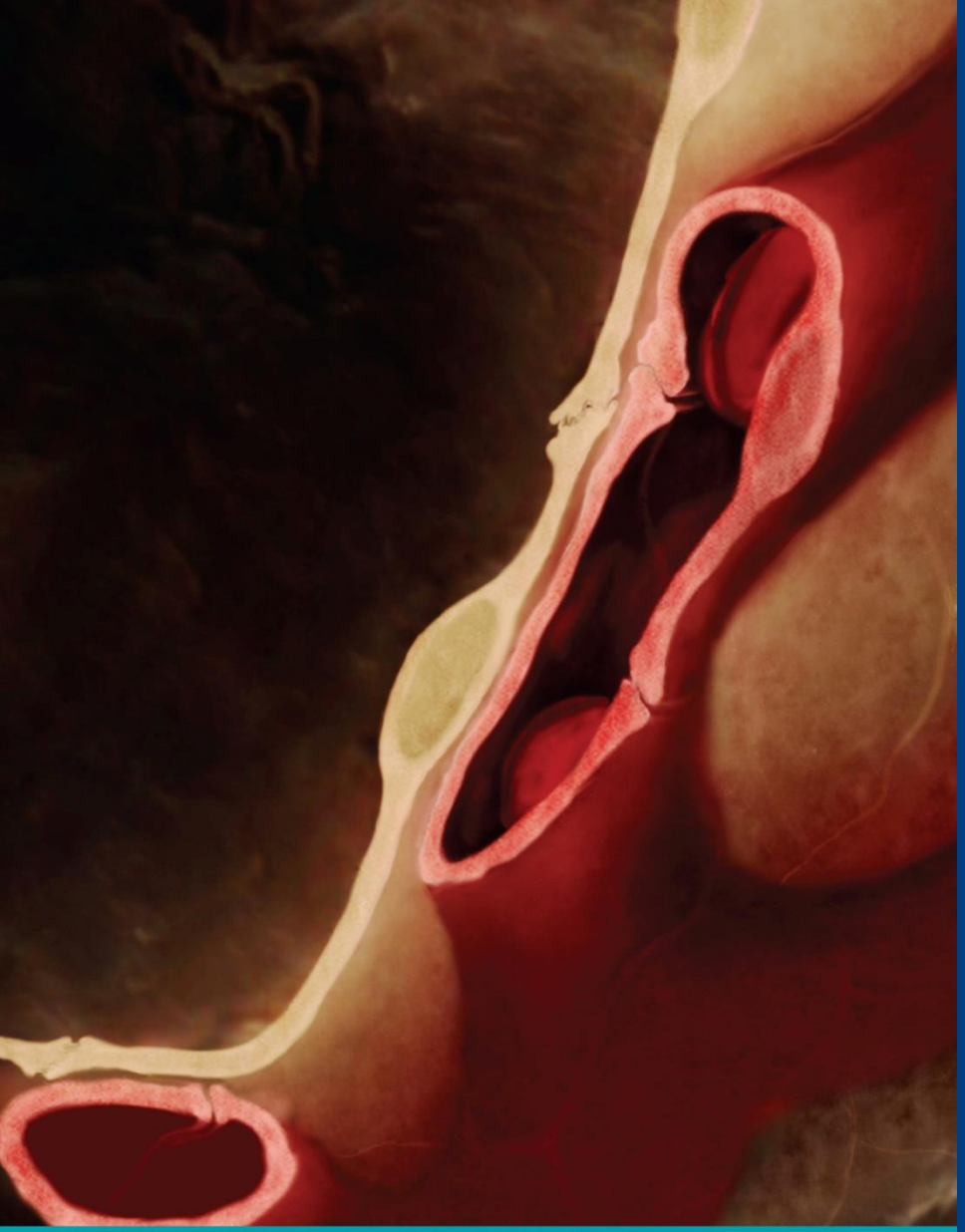


호흡막의 주사전자현미경 사진

17

호흡계: 가스교환과 호흡조절

Part A

Copyright © 2012 Biosciencepublishing, Inc

개요

I. 폐순환의 개요
II. 기체확산
III. 산소와 이산화탄소의 교환
IV. 혈액 내의 기체이동
V. 중추의 환기조절
VI. 화학수용기에 의한 환기조절
VII. 환기와 관류의 국소조절
VIII. 호흡계의 산-염기 항상성

I. 폐순환의 개요

- 동맥혈의 O_2 와 CO_2 l농도는 비교적 일정수준을 유지
  - 산소는 조직에서 소모되는 비율과 같은 비율로

    폐포->혈액으로 이동
  - 이산화탄소는 조직에서 생성되는 비율과 같은 비율로 혈액->폐포로 이동

O_2 와 CO_2 의 이동

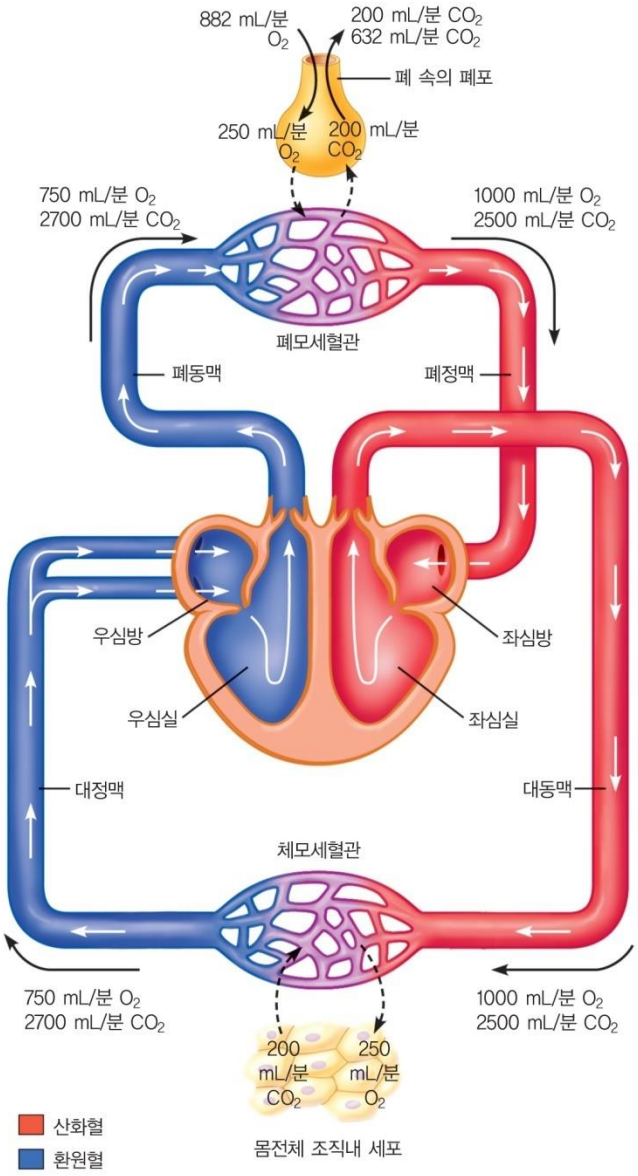


그림 17.1 안정상태에서 폐조직과 체조직의 산소 및 이산화탄소의 이동. 폐모세혈관망에서 산소는 폐포에서 혈액으로, 이산화탄소는 혈액에서 폐포로 확산된다. 체모세혈관망에서 산소는 혈액에서 세포로, 이산화탄소는 세포에서 혈액으로 확산된다.

호흡막

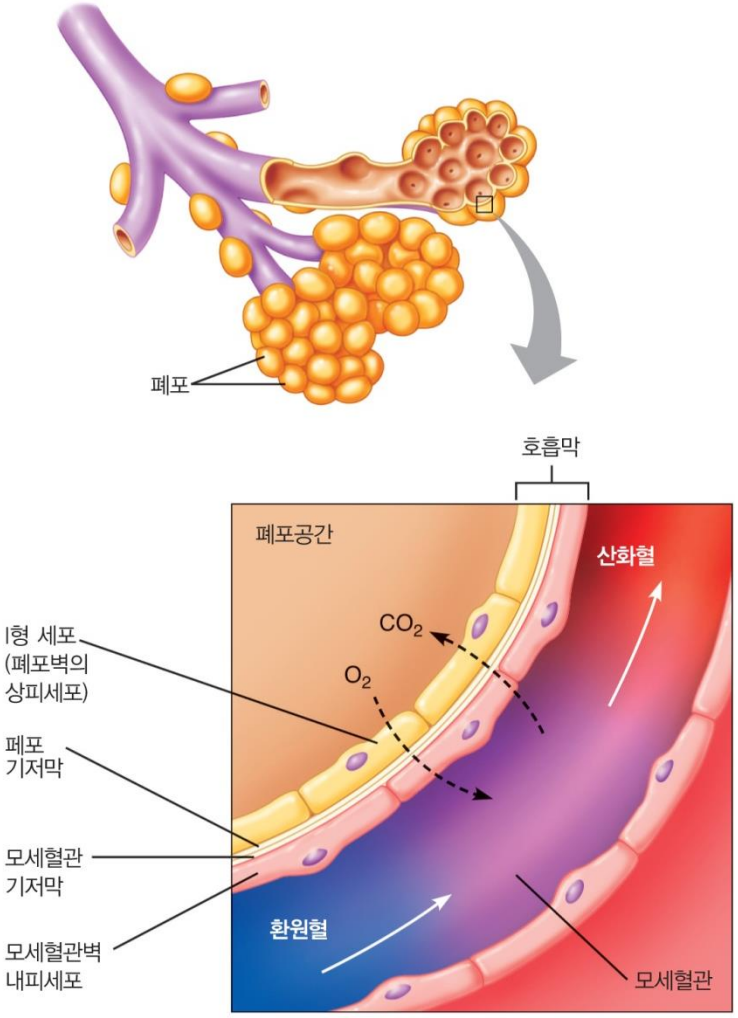


그림 17.2 호흡막. 폐포와 혈액 사이에서 산소와 이산화탄소의 교환은 호흡막을 통해 단순확산으로 이루어진다. 호흡막은 폐포를 둘러싼 단층의 I형 상피세포, 모세혈관 내부를 둘러싼 단층의 내피세포, 폐포와 모세혈관의 기저막으로 구성된다.

II. 기체확산

- 기체의 분압
- 액체속 기체의 용해도

기체의 분압: 이상기체의 법칙

- 기체압력은 온도, 기체분자 수, 부피와 관련이 있다
- $PV = nRT$
- $P = nRT/V$

혼합기체

- 많은 기체가 여러종류의 분자로 섰인 것
- 기체분압 =그 기체가 포함된 전체 기체압력에 비례

혼합기체

- $P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + \ldots P_n$
- 분압은 각 기체의 분할농도에 의해 결정됨
- 혼합기체의 전체압

$$P_{gas} = \%_{gas} \times P_{total}$$

공기 속의 기체 조성

- 공기성분
  - 79% 질소
  - 21% 산소
  - 이산화탄소, 헬륨, 아르곤 등이 소량으로 존재
  - 물은 습도를 결정하는 요인

공기 속의 기체 조성

- $P_{air} = 760\ mm\ Hg = P_{N_2} + P_{O_2}$
  - $P_{N_2} = 0.79 \times 760\ mm\ Hg = 600\ mm\ Hg$
  - $P_{O_2} = 0.21 \times 760\ mm\ Hg = 160\ mm\ Hg$
  - 공기에는 단지 0.03% 이산화탄소가 존재
    - $P_{CO_2} = 0.0003 \times 760\ mm\ Hg = 0.23\ mm\ Hg$

습도 100% 에서의 공기 조성

- $P_{air} = 760\ mm\ Hg = P_{N_2} + P_{O_2} + P_{H_2O}$
  - $P_{N_2} = 0.741 \times 760\ mm\ Hg = 563\ mm\ Hg$
  - $P_{O_2} = 0.196 \times 760\ mm\ Hg = 149\ mm\ Hg$
  - $P_{H_2O} = 0.062 \times 760\ mm\ Hg = 47\ mm\ Hg$
  - $P_{CO_2} = 0.00027 \times 760\ mm\ Hg = 0.21\ mm\ Hg$

액체속 기체의 용해도

- 기체분자는 기체상태로 액체에 용해될 수 있다
- 기체의 용해능력은 기체와 액체의 특성에 따라 결정됨
- 기체상태의 기체와 용해된 기체 모두 분압을 나타냄

액체속 기체의 용해도

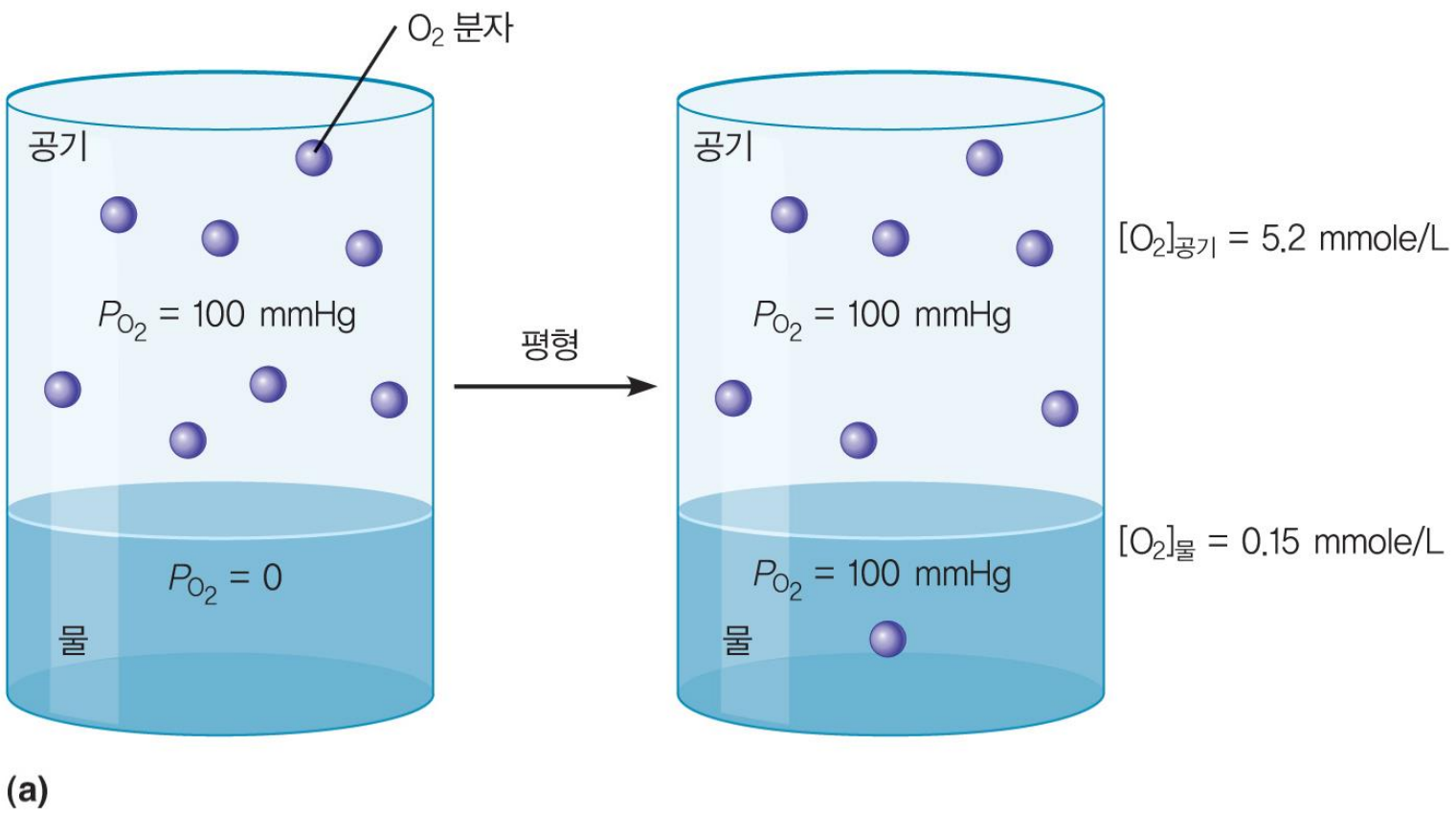
- 기체분압은 용해되는 기체의 양에 영향을 준다
  - 기체상태의 기체와 용해된 기체의 분압이 평형에 도달할 것이다

헨리의 법칙

$$c = kP$$

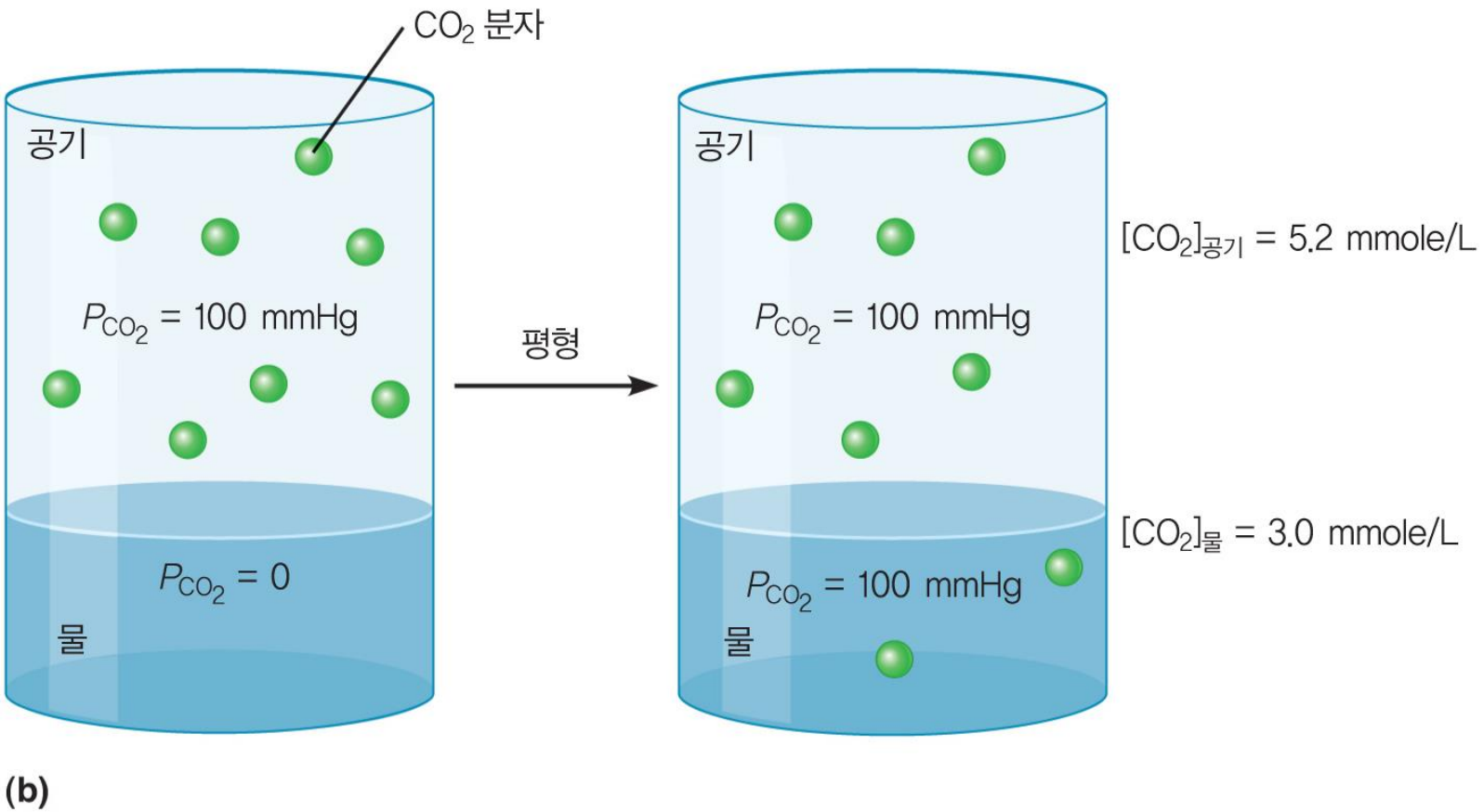
- c = 용해된 기체의 몰농도
- k = 헨리법칙(Henry's Law)의 상수
- P =대기 속 기체의 분압

O_2 의 용해도


O_2 분자
공기
P_{O_2} = 100 mmHg
P_{O_2} = 0
물
평형
공기
P_{O_2} = 100 mmHg
P_{O_2} = 100 mmHg
물
$[O_2]_{공기}$ = 5.2 mmole/L
$[O_2]_{물}$ = 0.15 mmole/L

(a)

CO_2의 용해도


CO_2 분자
공기
P_{CO_2} = 100 mmHg
P_{CO_2} = 0
물
평형
공기
P_{CO_2} = 100 mmHg
P_{CO_2} = 100 mmHg
물
$[CO_2]_{공기}$ = 5.2 mmole/L
$[CO_2]_{물}$ = 3.0 mmole/L

(b)

산소와 이산화탄소의 용해도

물에서 100 mm Hg 분압을 나타낼 때

- 물속의 $[O_2]$ = 0.15 m몰/리터
- 물속의 $[CO_2]$ = 3.0 m몰/리터

이산화탄소는 산소보다 물에 더 잘녹는다

III. 산소와 이산화탄소의 교환

- 폐에서의 기체교환
- 호흡하는 조직에서의 기체교환
- 폐포의 P_{O_2} 와 P_{CO_2}의 결정요소

기체확산

- 기체는 분압경사에 따라 낮은 쪽으로 확산됨
  - 높은 압력 → 낮은 압력
- 혼합기체에서 기체는 분압경사에 따라 확산됨
  - 높은 분압 → 낮은 분압
- 각 기체는 그 기체의 분압경사에 따라 확산
  - 다른 기체가 있는 것과 상관 없이

산소와 이산화탄소의 분압

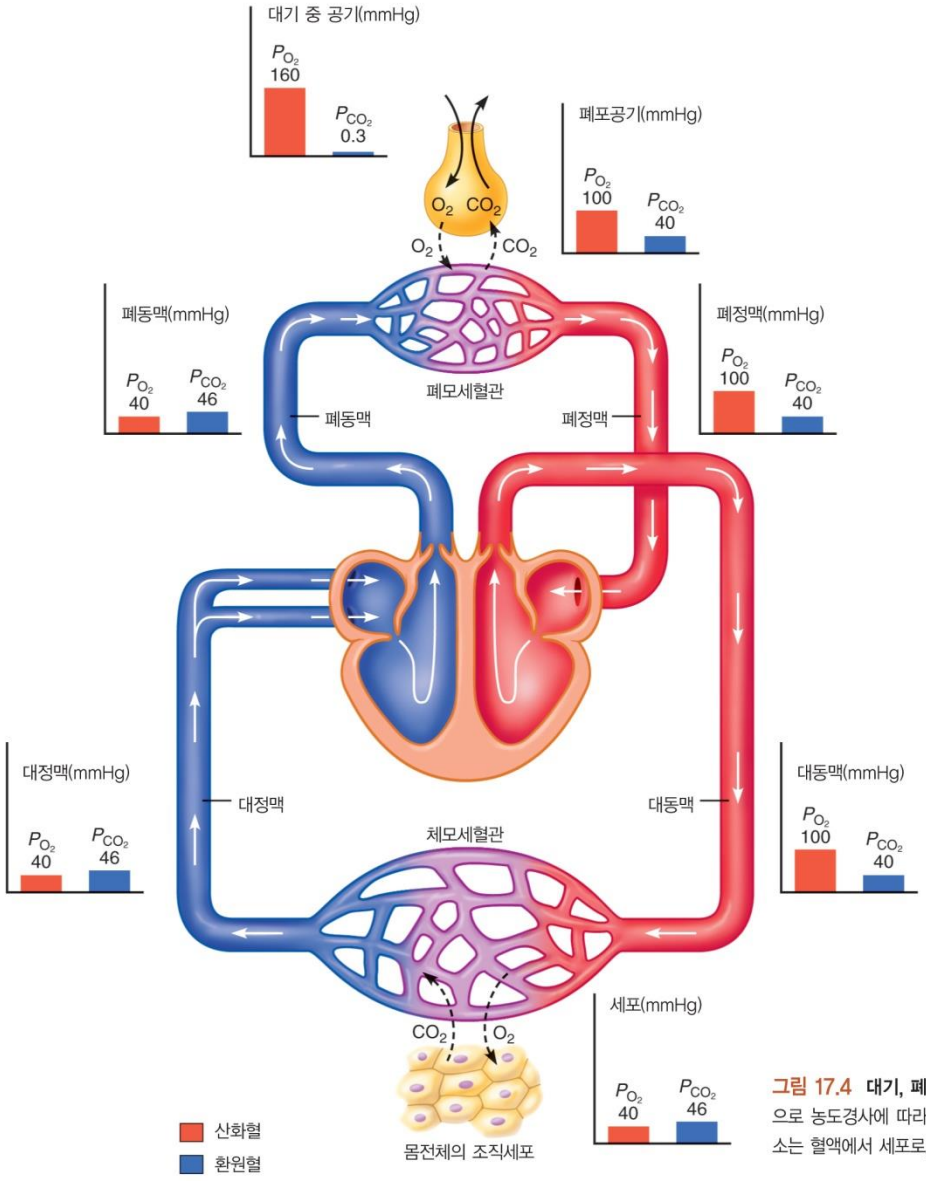


그림 17.4 대기, 폐포 공기, 체내의 여러 부위에서 산소와 이산화탄소의 분압. 산소와 이산화탄소는 분압이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 농도경사에 따라 확산된다. 폐모세혈관망에서 산소는 폐포에서 혈액으로, 이산화탄소는 혈액에서 폐포로 확산된다. 세포에서 산소는 혈액에서 세포로, 이산화탄소는 세포에서 혈액으로 확산된다.

산소와 이산화탄소의 분압

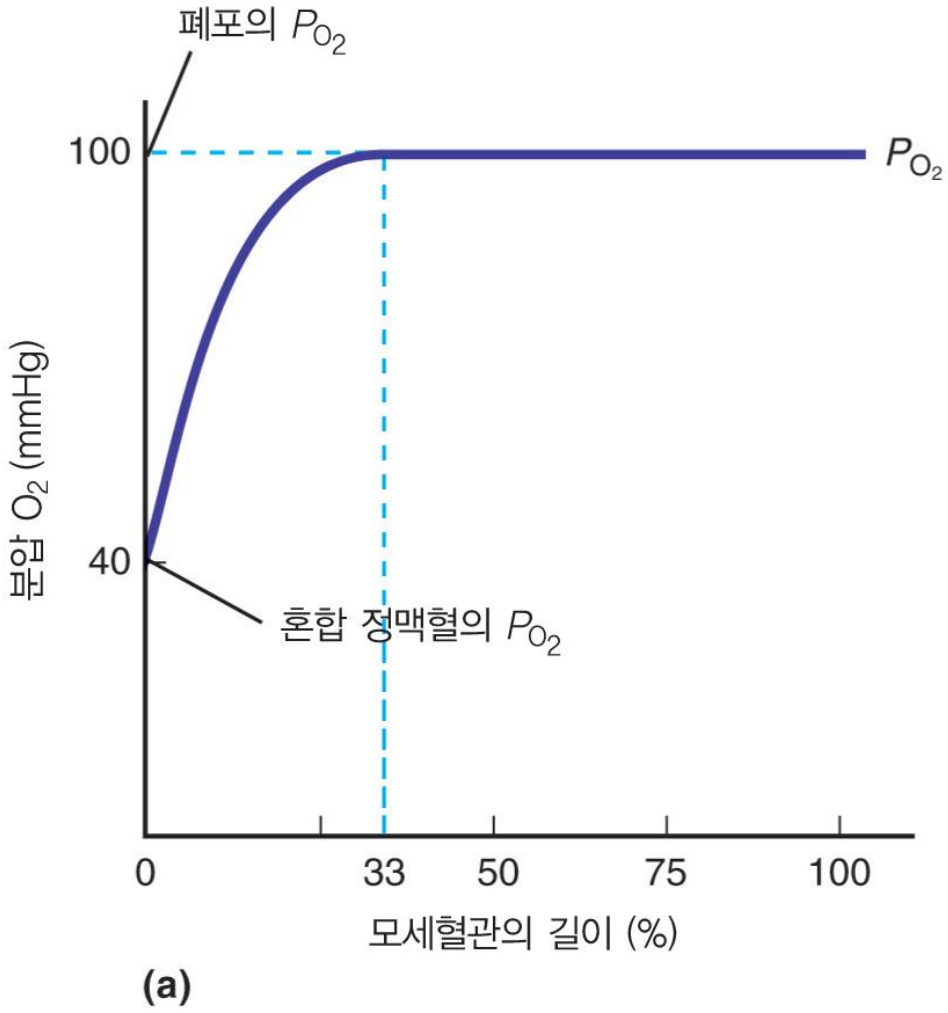
표 17.1 대기와 체내의 여러 부위에서의 산소와 이산화탄소의 전형적인 분압

	산소	이산화탄소
대기	160 mmHg	0.3 mmHg
폐포내 공기	100 mmHg	40 mmHg
폐정맥	100 mmHg	40 mmHg
체순환동맥	100 mmHg	40 mmHg
세포	≤40 mmHg	≥46 mmHg
체순환정맥	40 mmHg	46 mmHg
폐동맥	40 mmHg	46 mmHg

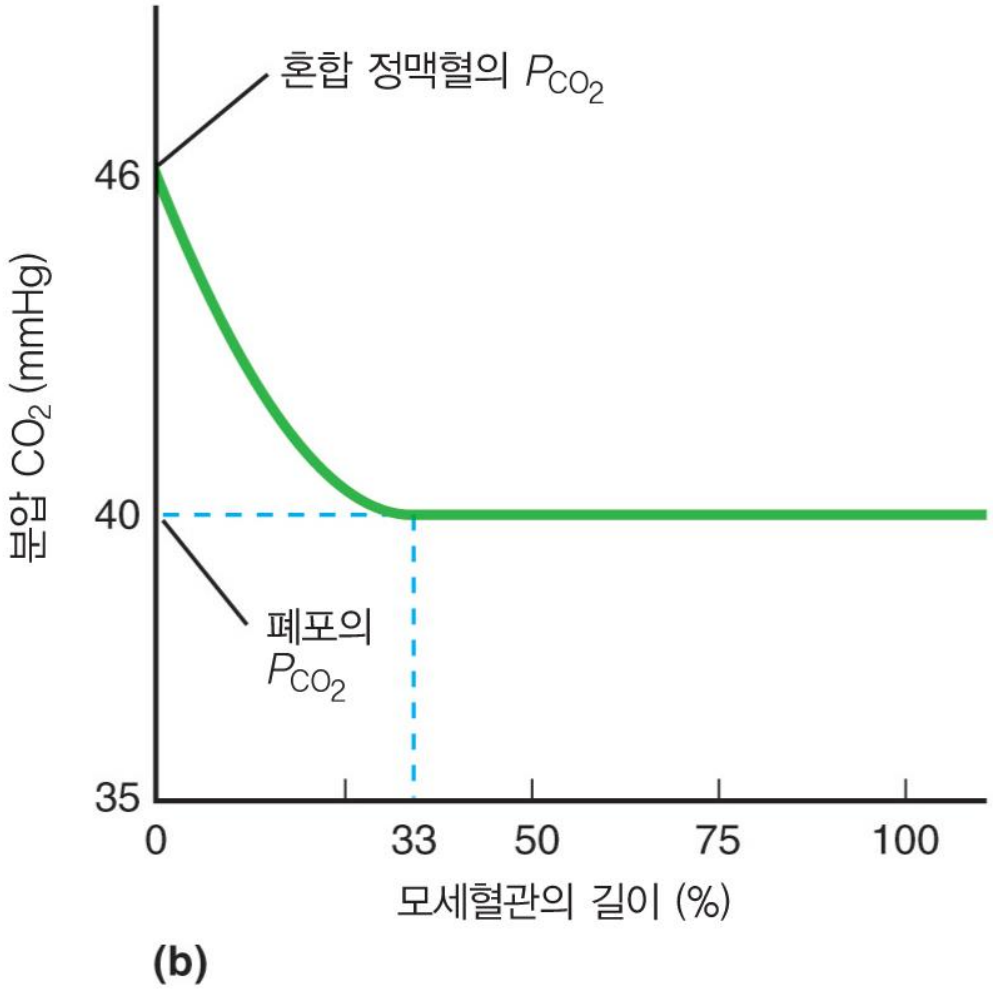
폐에서의 확산속도

- 폐포와 혈액사이의 확산이 신속함
  - 확산 장벽이 얇고
  - 표면적이 넓다

폐의 산소교환



폐의 이산화탄소 교환


혼합 정맥혈의 P_{CO_2}
46
40
35
분압 CO_2 (mmHg)
폐포의
P_{CO_2}
0
33
50
75
100
모세혈관의 길이 (%)
(b)

호흡하는 조직에서의 기체교환

- 기체는 분압경사에 따라 낮은 곳으로 확산
- P_{O_2} 세포 ≤ 40 mm Hg ; P_{O_2} 대동맥 =100 mmHg
  - 산소는 혈액->세포로 확산됨
  - P_{O_2} 대정맥 = 40 mm Hg
- P_{CO_2} 세포 ≥ 46 mm Hg ; P_{CO_2} 대동맥 = 40 mmHg
  - 이산화탄소는 세포->혈액으로 확산됨
  - P_{CO_2} 대정맥 = 46 mm Hg

혼합 정맥혈

- 특정혈관상에서 교환된 산소와 이산화탄소의 실제 양은 조직의 대사활성에 의해 결정된다
  - 대사율이 크면→ 교환율도 크다
- 각 정맥에서의 P_{O_2} 와 P_{CO_2} 는 다양하다

혼합 정맥혈

- 모든 정맥혈은 우심방으로 되돌아와 우심실에서 폐동맥으로 나간다
- 폐동맥 속 혈액은 혼합정맥혈(mixed venous blood)이다
  - P_{O_2} = 40 mm Hg
  - P_{CO_2} = 46 mm Hg

폐포의 P_{O_2} 와 P_{CO_2}의 결정요소

- 폐포분압에 영향을 주는 요소
  - 흡기의 P_{O_2} 와 P_{CO_2}
  - 분당 폐포의 환기
  - 호흡하는 조직이 O_2 를 소모하고 CO_2를 생산하는 비율
- 폐포분압은 일반적으로 폐포환기와 산소소모율, 이산화탄소 생성율에 의해 결정됨

필요한 환기량과의 일치

- 호흡항진(Hyperpnea) =환기가 증가되면 호흡이 증가되는 것
  - 동맥혈의 P_{O_2} 와 P_{CO_2}의 최소변화
- 저환기(Hypoventilation) =폐포환기가 조직의 요구량에 못미치는 것
  - 동맥혈의 P_{O_2} 감소
  - 동맥혈의 P_{CO_2} 증가
- 과환기(Hyperventilation) =폐포환기가 조직의 요구량을 넘어선 경우
  - 동맥혈의 P_{O_2} 증가
  - 동맥혈의 P_{CO_2} 감소

호흡용어

표 17.2 호흡생리학에 사용된 용어

용어	정의
과다호흡	신체 대사 요구량의 증가로 인한 환기 증가
호흡곤란	힘들게 또는 어렵게 호흡하는 것
무호흡	일시적으로 호흡이 끊어지는 것
빠른 호흡	빠르게 얕은 호흡을 하는 것
과환기	환기가 신체 대사요구를 넘은 상태
저환기	환기가 신체 대사 요구보다 부족한 상태
저산소증	조직에 산소가 부족한 상태
저산소혈증	혈액 속에 산소가 부족한 상태
고탄산혈증	혈액 속에 이산화탄소가 과다한 상태
저탄산혈증	혈액 속에 이산화탄소가 부족한 상태

IV. 혈액내의 기체이동

- 혈액 속의 산소이동
- 혈액 속의 이산화탄소이동

혈액 속의 산소이동

1. 헤모글로빈이 산소운반
2. 헤모글로빈-산소 해리곡선
3. 헤모글로빈의 산소 친화도에 영향을 주는 기타요소들

혈액 속의 산소이동

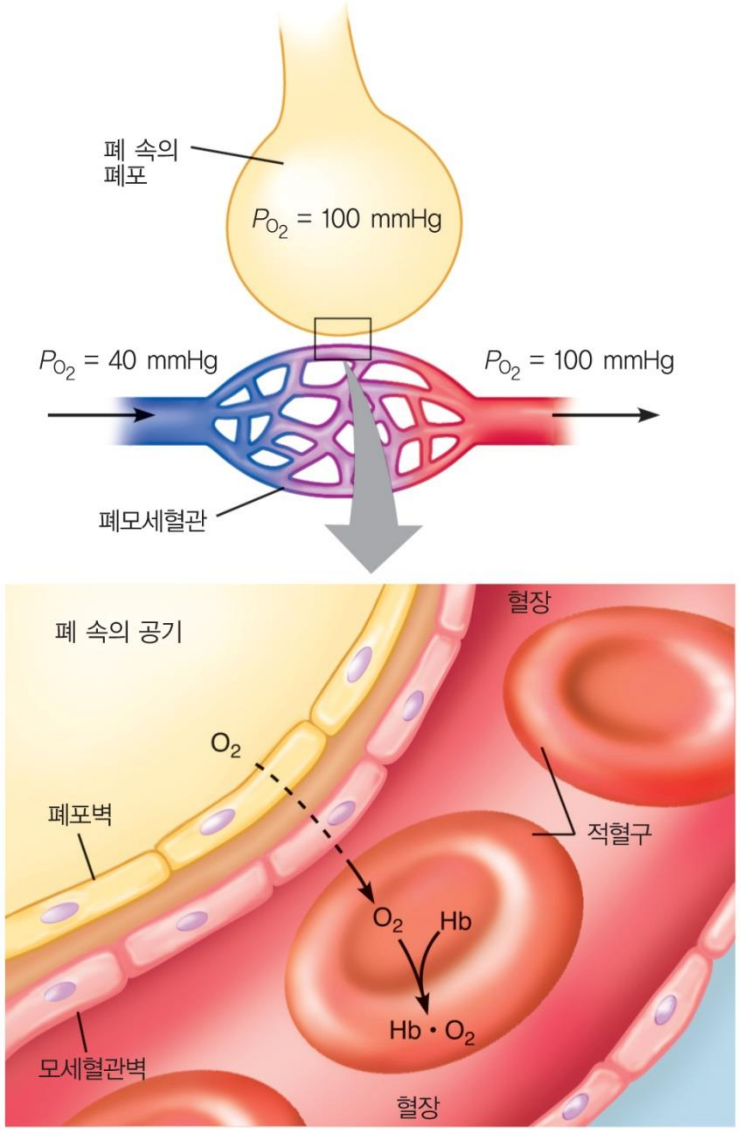
- 산소는 혈장에 잘 용해되지 않음
- 동맥혈 산소의 3.0 mL/200 mL 만이 혈장에 녹아있다 (1.5%)
- 나머지 197 mL는 헤모글로빈과 결합하여 운반됨

헤모글로빈에 결합된 산소

$$Hb + O_2 \leftrightarrow Hb\bullet O_2$$

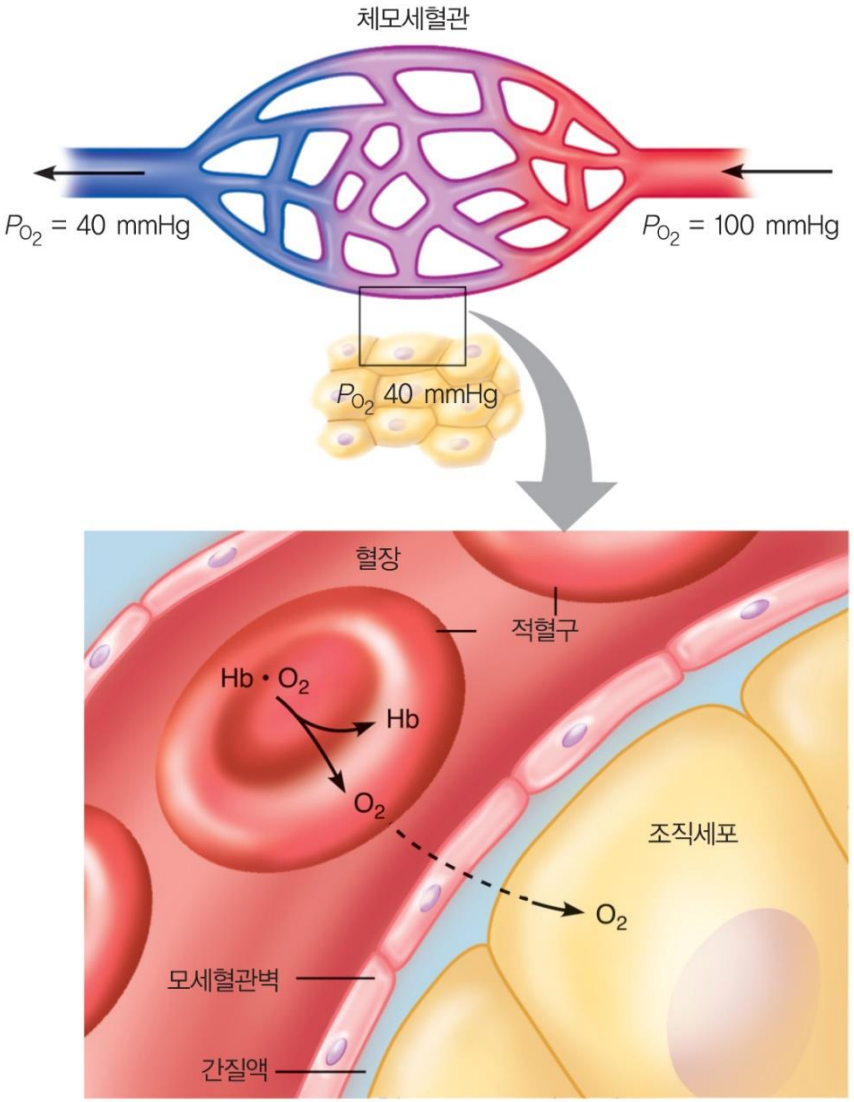
- Hb =디옥시헤모글로빈
- $Hb\bullet O_2$ =옥시헤모글로빈

산화헤모글로빈의 형성



(a)

헤모글로빈에서 산소의 해리



(b)

헤모글로빈의 포화도

- 헤모글로빈에는 산소 4분자까지 결합할 수 있다
- 헤모글로빈에 산소결합은 질량작용의 법칙을 따른다
  - 산소가 많을수록 → 헤모글로빈에 더 많이 결합
    - 직선이 아닌 S 형태
    - 양성협동과정(Positive cooperativity)

헤모글로빈의 포화도

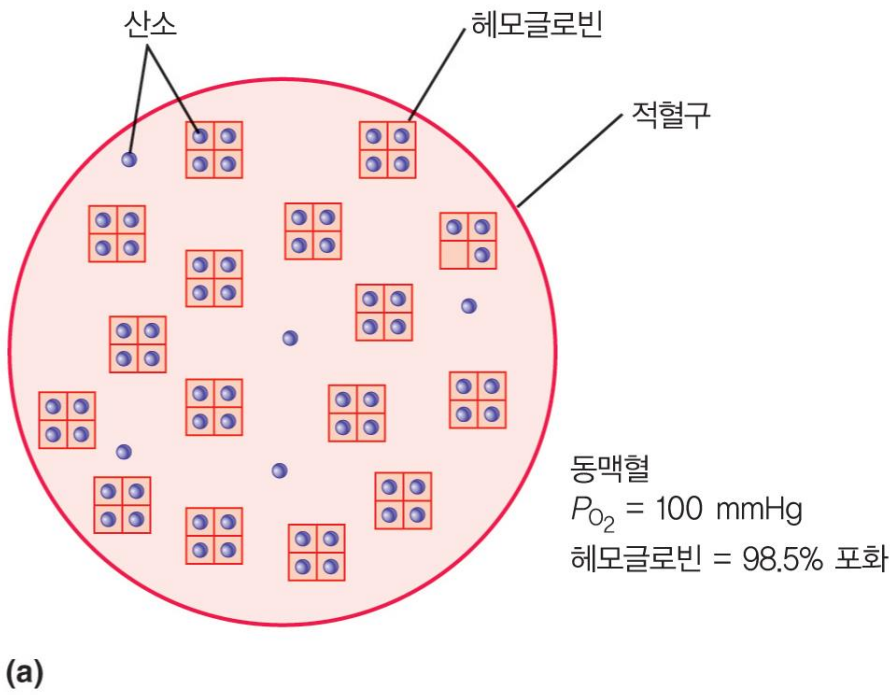
- 헤모글로빈의 포화도는 헤모글로빈에 결합한 산소가 얼마나 많은가에 달려있다
  - 100% 포화 → 헤모글로빈 4개의 결합부위가 모두 산소와 결합한 상태

혈액의 산소전달능력

- 100% 포화되었을 때, 헤모글로빈 1 g이 1.34 mL의 산소를 나른다
- 정상혈액의 헤모글로빈 농도 = 12–17 g/dL
- 혈액 속 헤모글로빈의 산소전달능력:

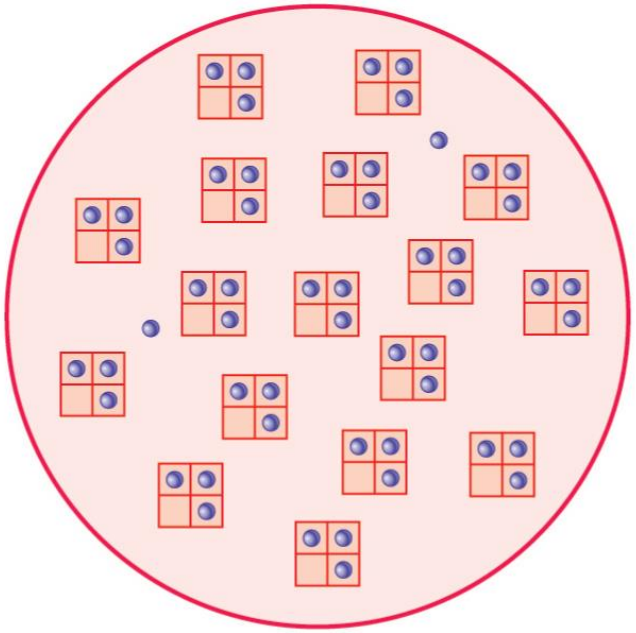
  200 mL 산소/혈액 1리터

헤모글로빈의 산소포화도



- 동맥혈
- 헤모글로빈이 98.5% 포화됨

헤모글로빈의 산소포화도



혼합 정맥혈
P_{O_2} = 40 mmHg
헤모글로빈 = 75% 포화

(b)

- 정맥혈
- 헤모글로빈이 75% 포화됨

산소해리곡선

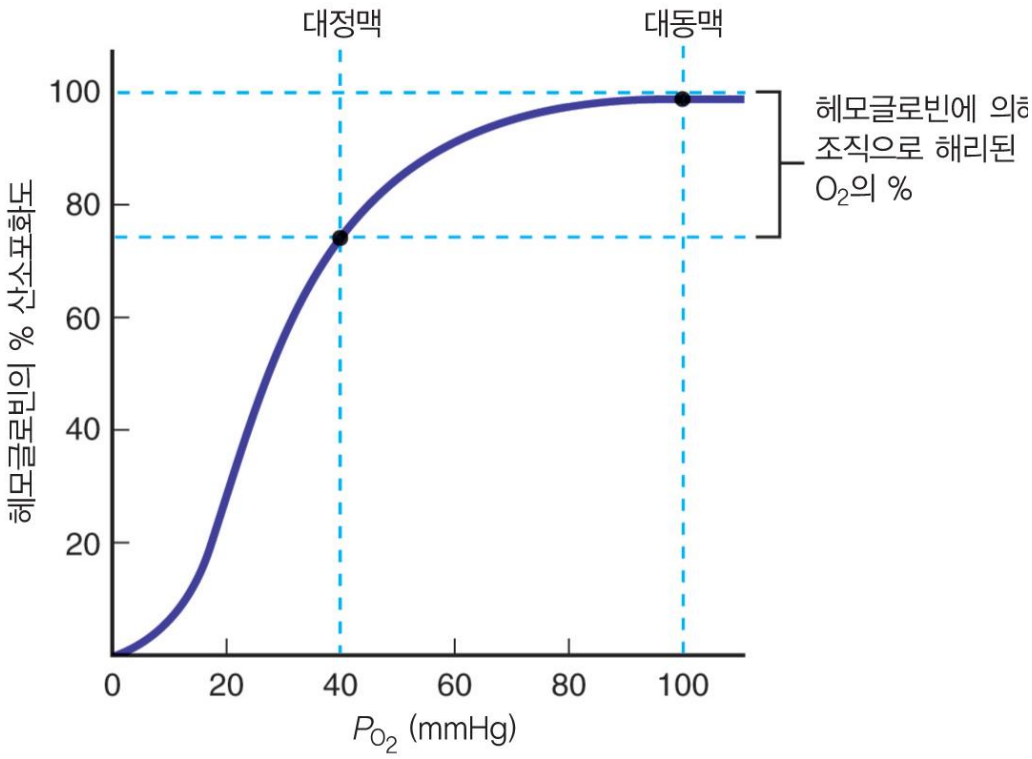


그림 17.8 헤모글로빈-산소 해리 곡선. 산소가 헤모글로빈에 결합하는 것은 혈액 속의 산소분압에 달려 있다. 분압이 낮은 상태에서는 적은 양의 산소가 헤모글로빈에 결합한다. 분압이 증가하면 산소 결합도 증가하여, 거의 100% 포화에 도달한다.

산소에 대한 친화력 변화

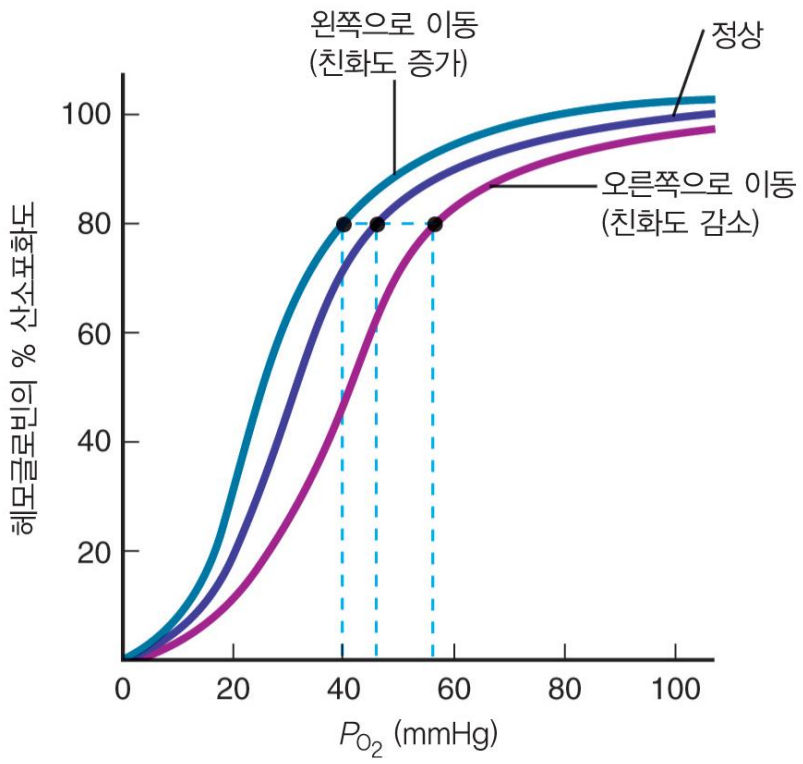
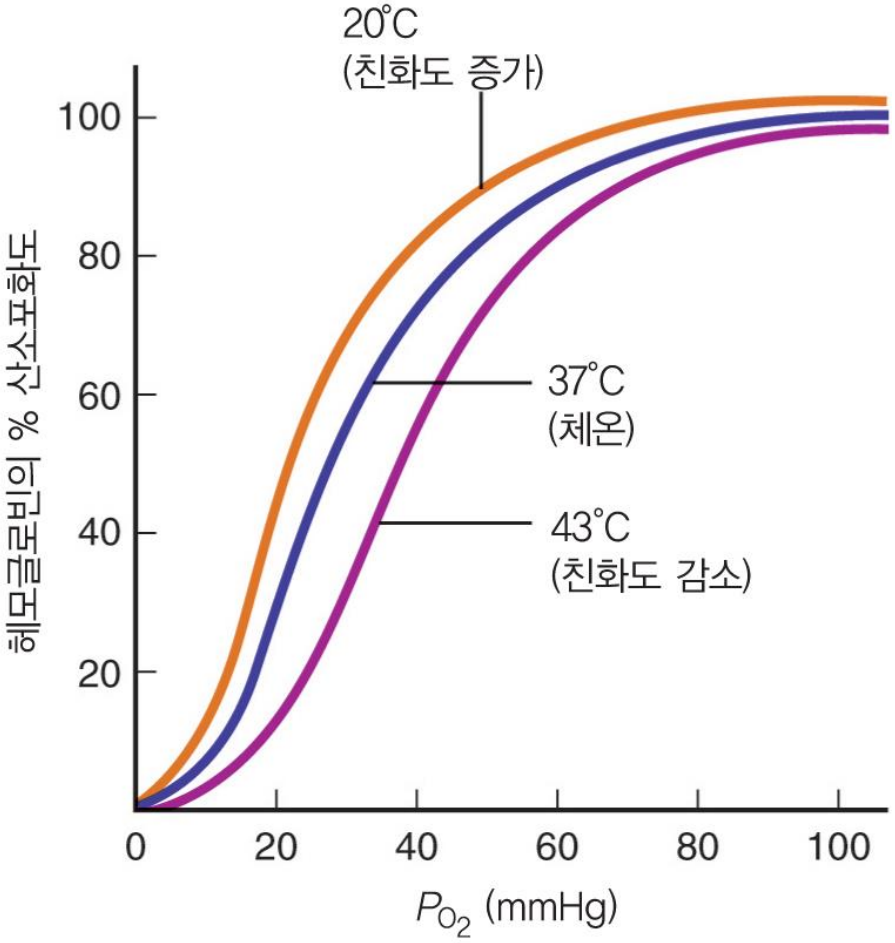


그림 17.9 헤모글로빈-산소 해리 곡선에서 산소에 대한 헤모글로빈 친화력의 변화. 산소에 대한 헤모글로빈의 친화력이 증가하면 곡선이 왼쪽으로 이동하는 반면, 친화력이 감소하면 곡선이 오른쪽으로 이동한다.

- 오른쪽으로 이동시
  - 산소친화도 감소
- 왼쪽으로 이동시
  - 산소친화도 증가

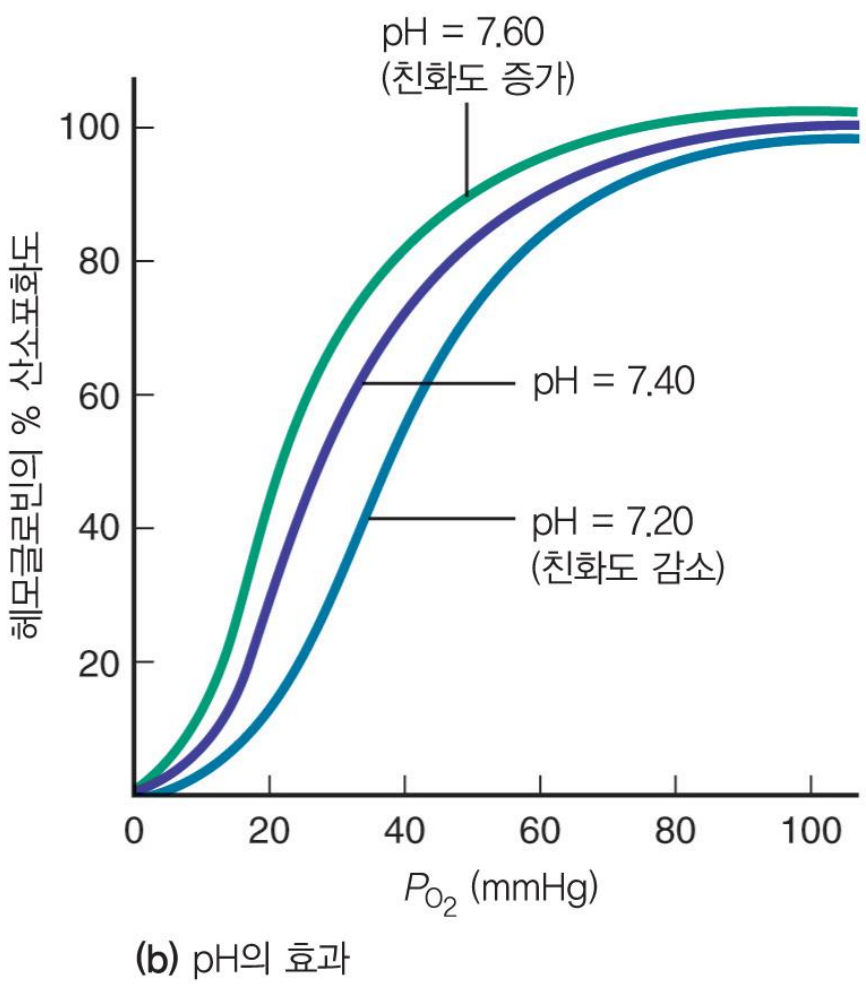
산소포화도에 대한 온도의 효과



(a) 온도의 효과

- 높은 온도
  - 조직이 활성화됨
  - 오른쪽으로 이동
  - 더 많은 산소가 조직에서 해리
  - 더 많은 산소가 조직으로 운반됨

산소포화도에 대한 pH 효과



(b) pH의 효과

- 보어효과(Bohr effect)
  - 낮은 pH 에서 O_2 해리 증가
- 활성화된 조직
  - 산이 많아지면 조직의 pH 감소
  - pH감소는 포화곡선을 우측으로 이동
  - 많은 산소가 조직으로 해리됨

CO_2 의 효과-카르바미노 효과

- 이산화탄소는 헤모글로빈과 반응하여 카르바미노헤모글로빈(carbaminohemoglobin)을 형성
  - $Hb + CO_2 \leftrightarrow HbCO_2$
- $HbCO_2$는 헤모글로빈보다 산소에 대한 친화도가 낮다
- 대사활성이 증가 → CO_2 분압이 증가
- 활성화된 조직에서 산소해리가 증가

2,3-DPG의 효과

- 2,3-DPG = 2,3디포스포글리세린산
- 빈혈이나 고산지대 처럼 산소가 부족한 조건에서 적혈구내에 생성되는 화합물
- 산화헤모글로빈이 합성을 억제
- 2,3-DPG는 산소에 대한 헤모글로빈의 친화도가 감소-> 산소해리 증가

일산화탄소

- 헤모글로빈은 산소보다 일산화탄소 (CO) 에 친화력이 다 크다
- 산소와 헤모글로빈의 결합을 방해

혈액의 CO_2 운반

표 17.3 혈액의 이산화탄소 운반

형태	체순환 동맥혈		체순환 정맥혈	
	CO_2 양 (mL/혈액 1 L당)	총혈액 중 CO_2의 %	CO_2 양 (mL/혈액 1 L당)	총혈액 중 CO_2의 %
혈액에 용해되어	27	5.5	31	5.8
중탄산염으로 용해되어	439	89.6	470	87.0
헤모글로빈과 결합하여	24	49	39	7.2
총합	490	100.0	540	100.0

혈액에서의 이산화탄소 운반

- 이산화탄소 운반에서 탄산탈수효소의 역할
- 체모세혈관과 정맥에서 이산화탄의 교환과 운반
- 폐모세혈관과 폐정맥에서 이산화탄소는의 교환과 운반
- 이산화탄소 이동에 대한 산소의 효과

이산화탄소의 수송기전

- 이산화탄소가 산소보다 혈장에 용해가 잘되지만,용해가 아주 잘되는 것은 아니다
  - 혈장에 용해된 상태로 5–6% 수송
- 이산화탄소는 헤모글로빈과 결합

  ->카바미노헤모글로빈 형성
  - 헤모글로빈과 결합하여 5–8% 수송

이산화탄소의 수송기전

- 적혈구에 의해 중탄산염으로 전환->혈장으로 들어감
  - 86–90%는 중탄산염 형태로 혈장에 용해되어 수송됨

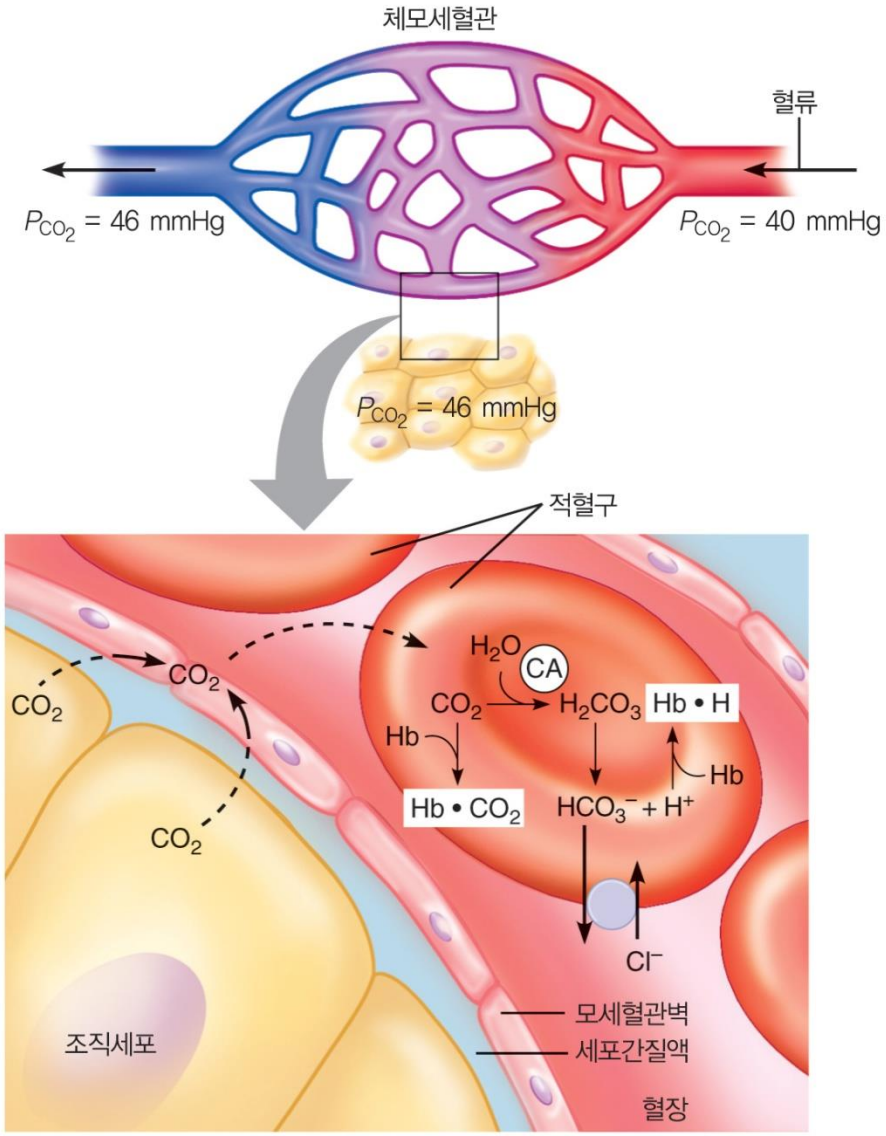
탄산탈수효소

- 이산화탄소와 물을 탄산으로 전환하는 효소

$$CO_2 + H_2O \xleftarrow{CA} H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

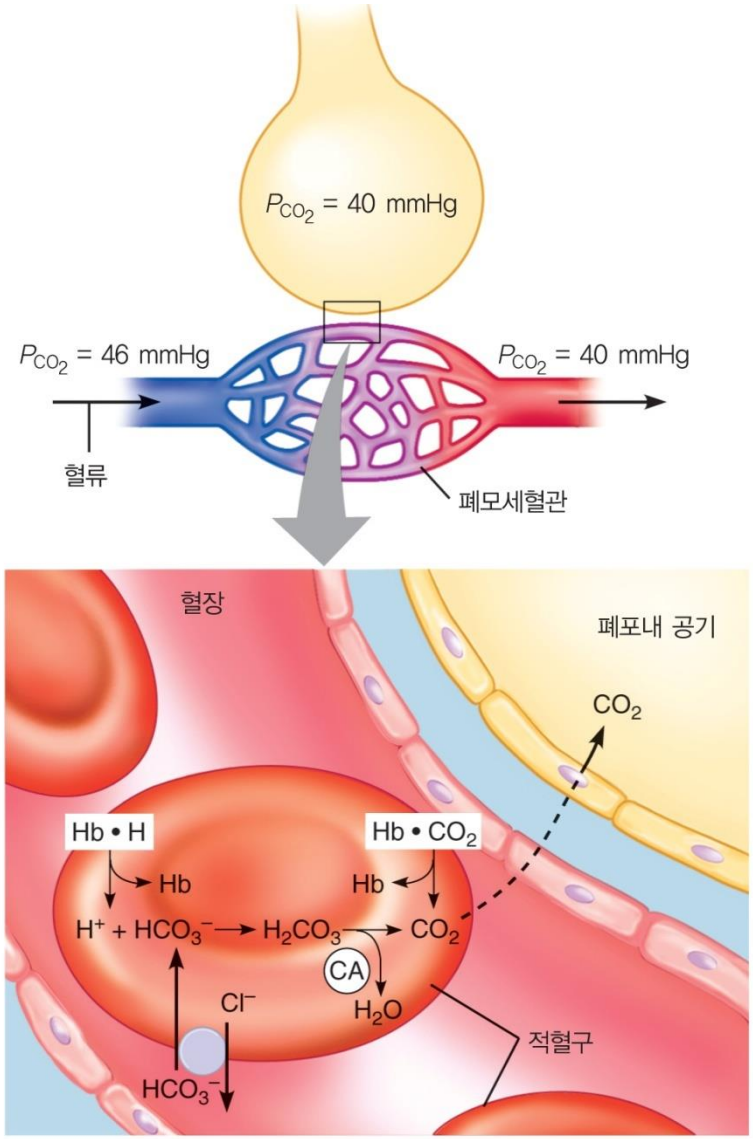
- 질량작용의 법칙:CO_2가 증가하면 중탄산염과 수소이온의 증가를 초래함

CO_2 교환: 조직


체모세혈관
혈류
P_{CO_2} = 46 mmHg
P_{CO_2} = 40 mmHg
P_{CO_2} = 46 mmHg
적혈구
CO_2
CO_2
CO_2
H_2O
CA
CO_2
H_2CO_3
Hb • H
Hb
Hb
Hb • CO_2
HCO_3^- + H^+
Cl^-
조직세포
모세혈관벽
세포간질액
혈장

(a)

CO_2 교환 : 폐


P_{CO_2} = 40 mmHg
P_{CO_2} = 46 mmHg
P_{CO_2} = 40 mmHg
혈류
폐모세혈관
혈장
폐포내 공기
CO_2
Hb • H
Hb • CO_2
Hb
Hb
$H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow CO_2$
CA
H_2O
Cl^-
HCO_3^-
적혈구

(b)

CO_2 운반에 대한 P_{O_2}의 효과

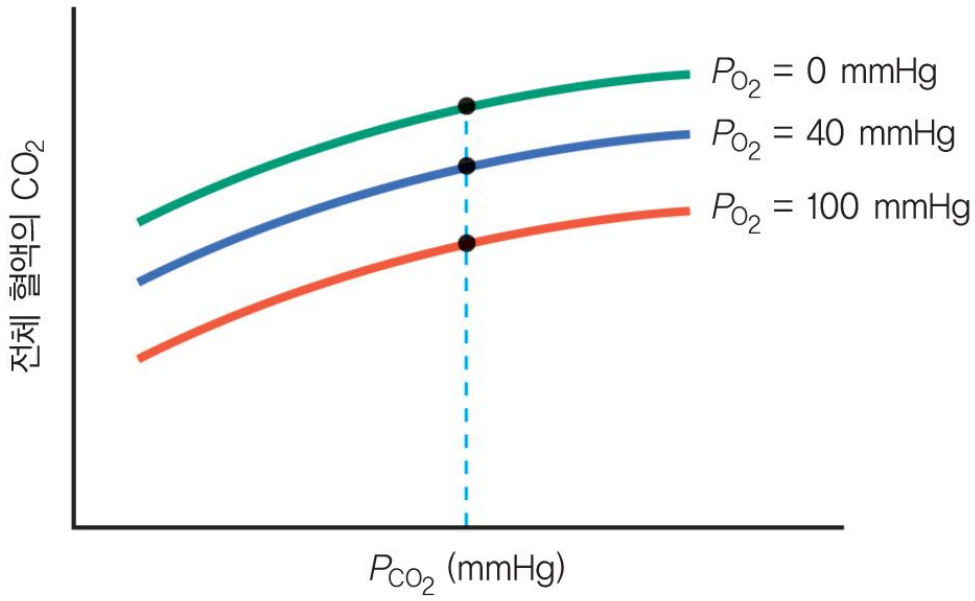
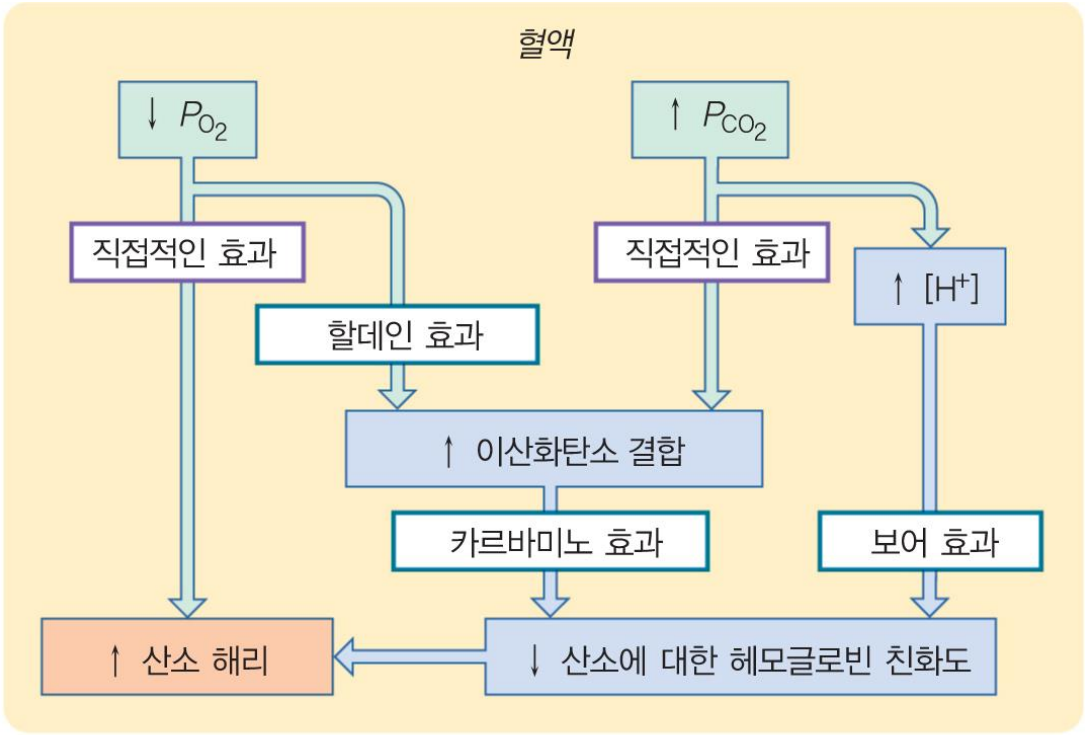


그림 17.12 이산화탄소의 운반에 대한 P_{O_2}의 효과. 혈액 속에 증가된 P_{O_2}는 이산화탄소에 대한 헤모글로빈의 친화도를 감소시켜서 혈액의 이산화탄소의 수송 능력을 떨어뜨린다. 그러므로 이 그림에서의 P_{CO_2}(수직 점선) 값에서는 P_{O_2} = 40 mmHg에서보다 P_{O_2} = 0 mmHg에서 더 많은 양의 이산화탄소가 이동하며 이는 P_{O_2} = 100 mmHg에서보다 더 많은 양이다.

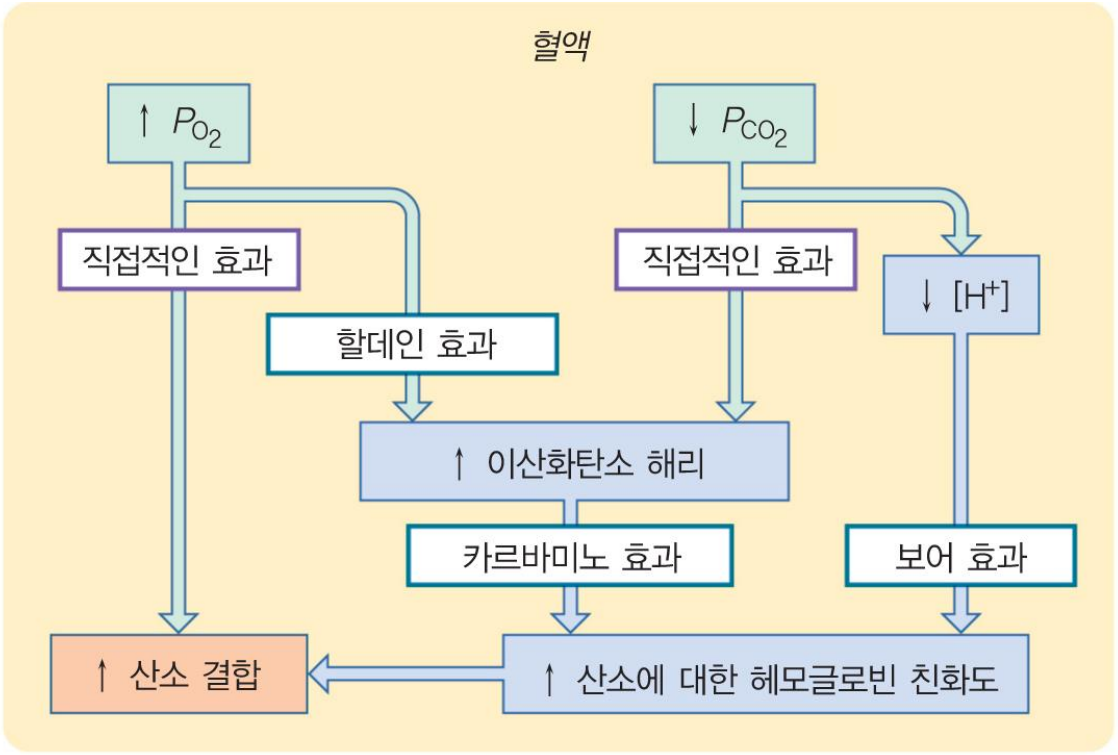
조직: CO_2 결합/O_2 해리



(a) 이산화탄소 결합과 호흡조직에서 헤모글로빈의 산소 해리

초기 자극
생리반응
결과

폐: CO_2 결합/O_2 해리



(b) 이산화탄소 해리와 폐에서 헤모글로빈의 산소 결합

초기 자극

생리반응

결과