

3. 유산소 에너지대사

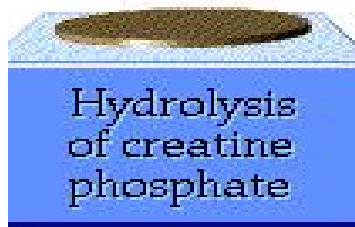
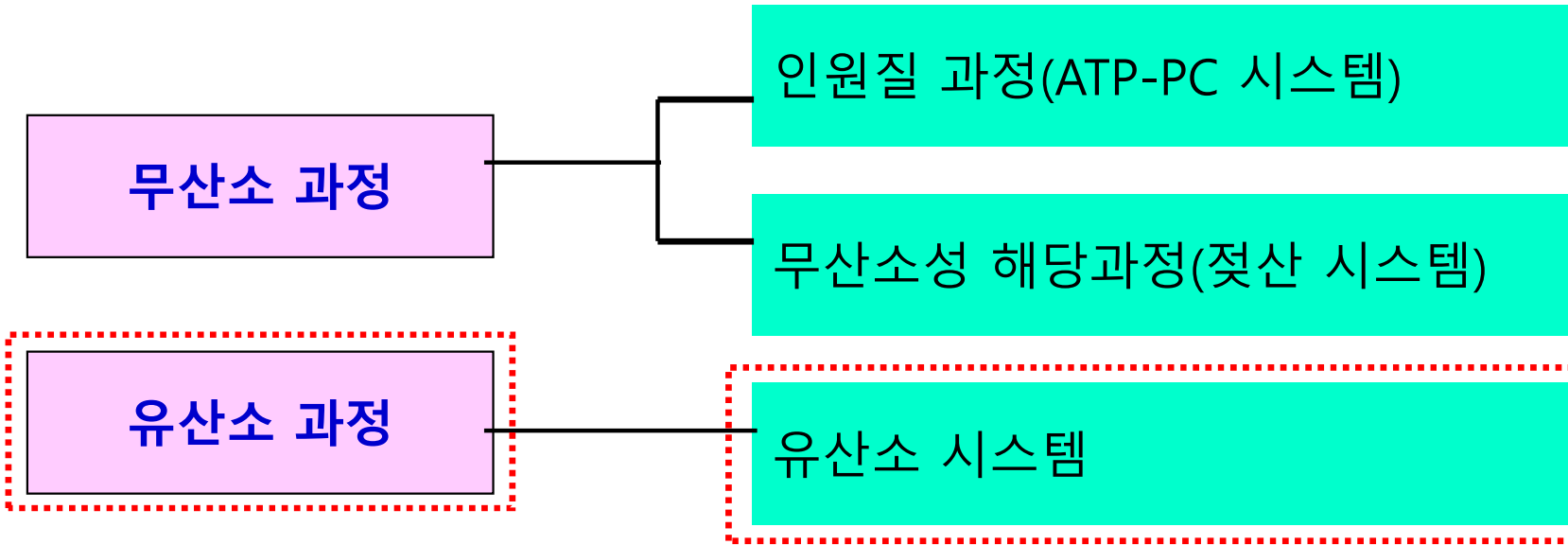
Aerobic Energy system

교재 : 정일규, 휴먼퍼포먼스와 운동생리학 4판, 대경북스, 2011

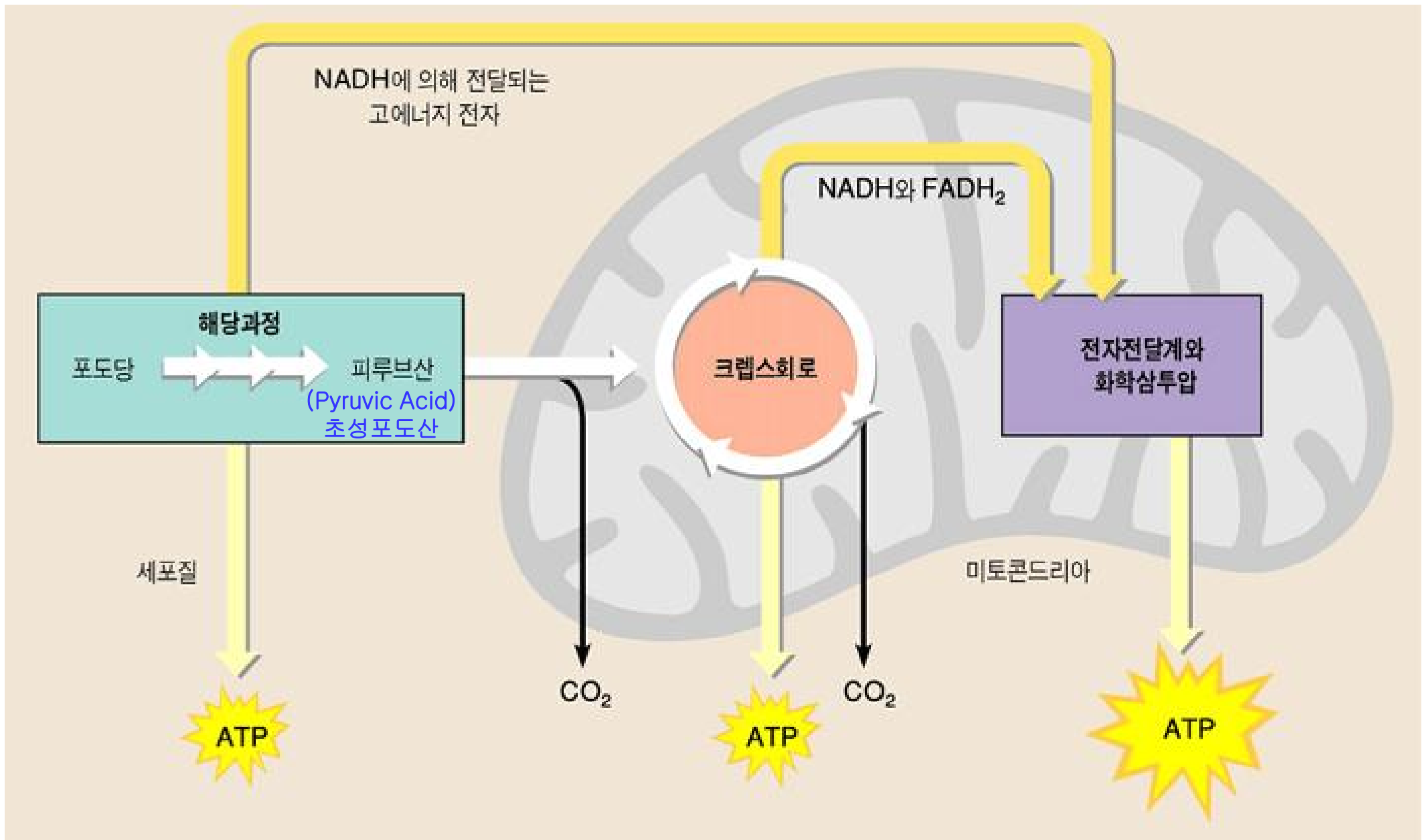


학습 목표

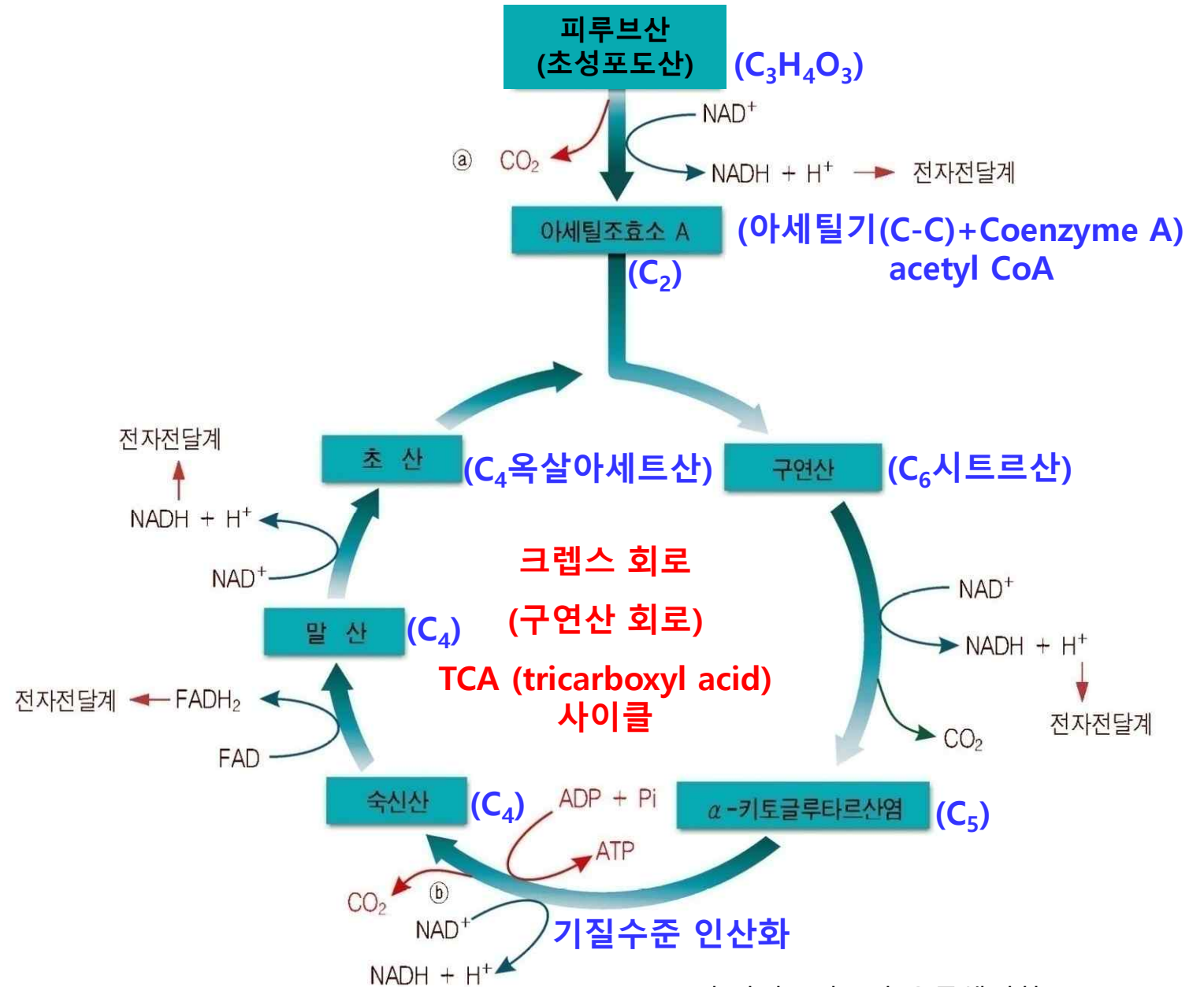
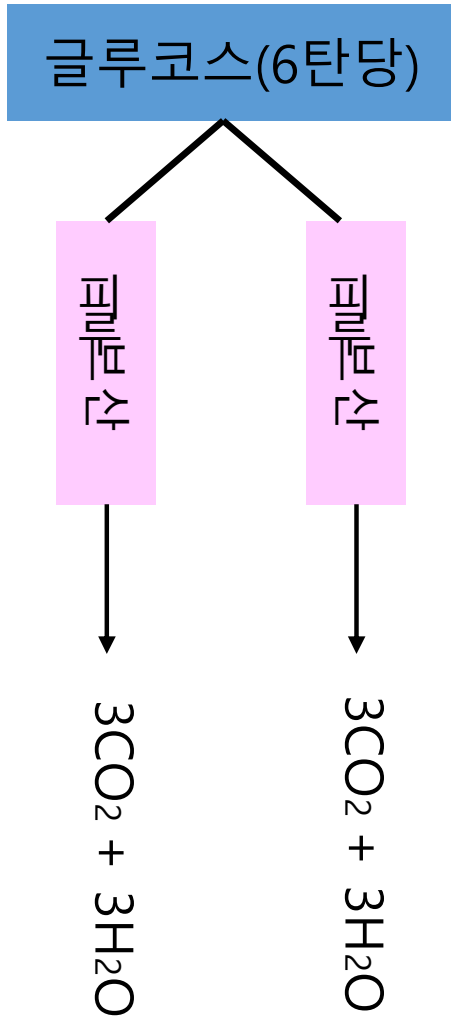
- ❖ 크랩스 회로를 설명할 수 있다.
- ❖ 전자전달계를 설명할 수 있다.
- ❖ 전자전달계의 통한 전자의 이동을 설명할 수 있다.
- ❖ ATP가 합성되는 화학 삼투를 설명할 수 있다.
- ❖ 베타 산화과정에 ATP가 생성되는 기전을 설명할 수 있다.
- ❖ 탄수화물과 지방 에너지 대사의 차이를 설명할 수 있다.
- ❖ 단백질의 에너지 대사를 설명할 수 있다.



유산소 에너지 대사 시스템



크렘스회로 (Krebs cycle)





1개의 피루브산이 크랩스 회로에서 생성하는 ATP와 NADH, FADH의 양은?

피루브산

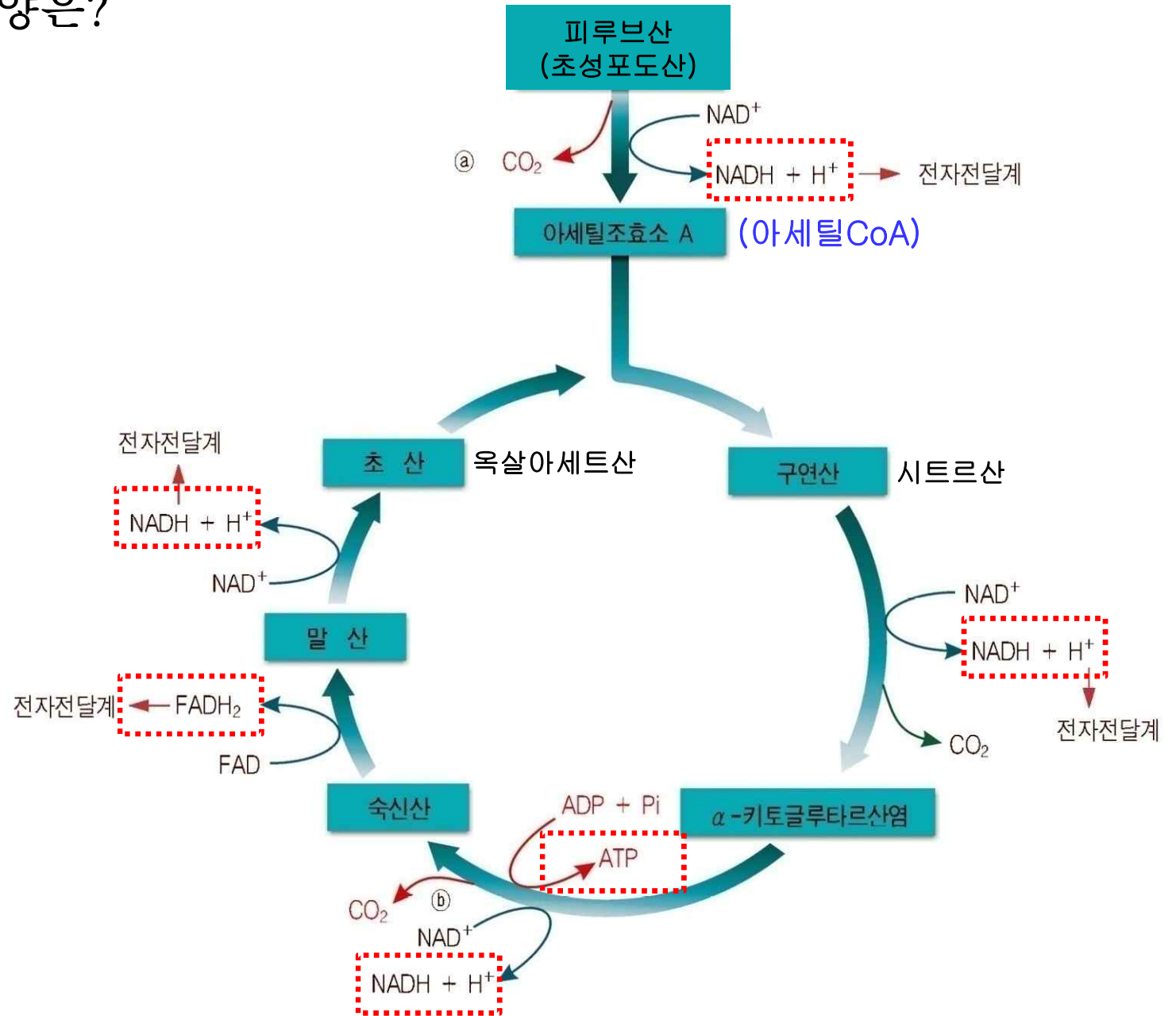
1 NADH

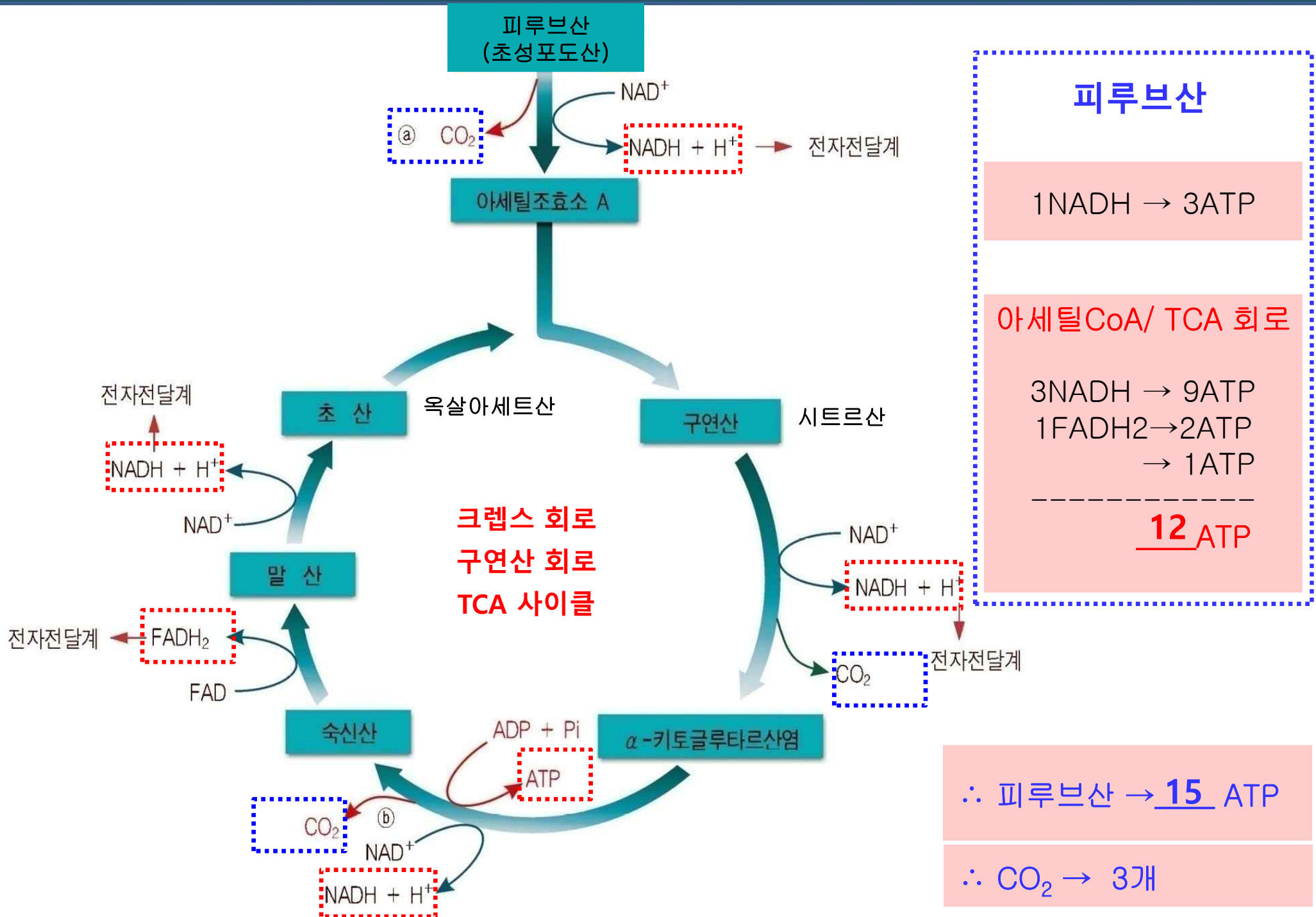
아세틸CoA

3 NADH

1 FADH₂

1 ATP





전자전달계

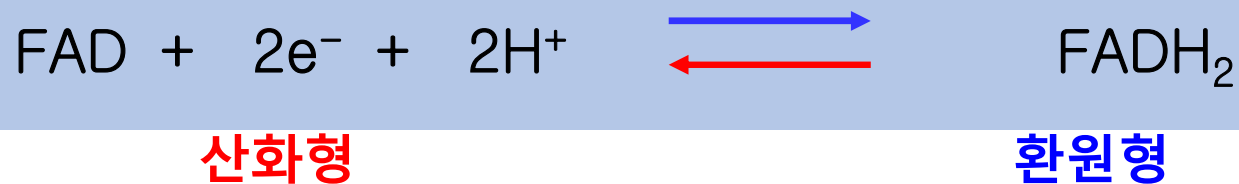
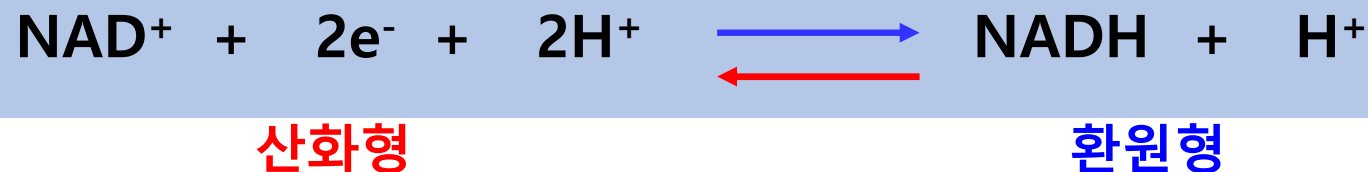
(electron transport system)

- 전자전달계는 기능적으로 4종류의 복합체, 즉 복합체 I (NADH : ubiquinone oxidoreductase), 복합체 II (succinate : ubiquinone oxidoreductase), 복합체 III (ubiquinol : cytochrome C oxidoreductase), 복합체 IV (cytochrome C : oxidoreductase)로 구성된다.
- 미토콘드리아 내막에 있는 전자 전달계는 4개의 전자전달 효소 복합체와 이들 사이에 전자 운반체인 조효소 Q (유비퀴논), 사이토크롬 c (cyt c)로 이루어진다.

cf. NADH는 FADH₂보다 전자에 대한 친화도가 더 높아 방출하는 에너지양이 더 많다. NADH → 3 ATP (2.5 ATP) , FADH₂ → 2 ATP (1.5 ATP)

전자전달계 (electron transport system)

- 세포내의 산화환원반응에서 생성된 전자(electron)는 NAD^+ 또는 FAD 에 수용되어 NADH 와 FADH_2 를 생성한다. 이들 전자전달물질에 수용된 전자는 mitochondria의 내막 안쪽 표면에 결합되어 있는 효소로 구성된 전자전달계(electron transport system)로 전달된다.

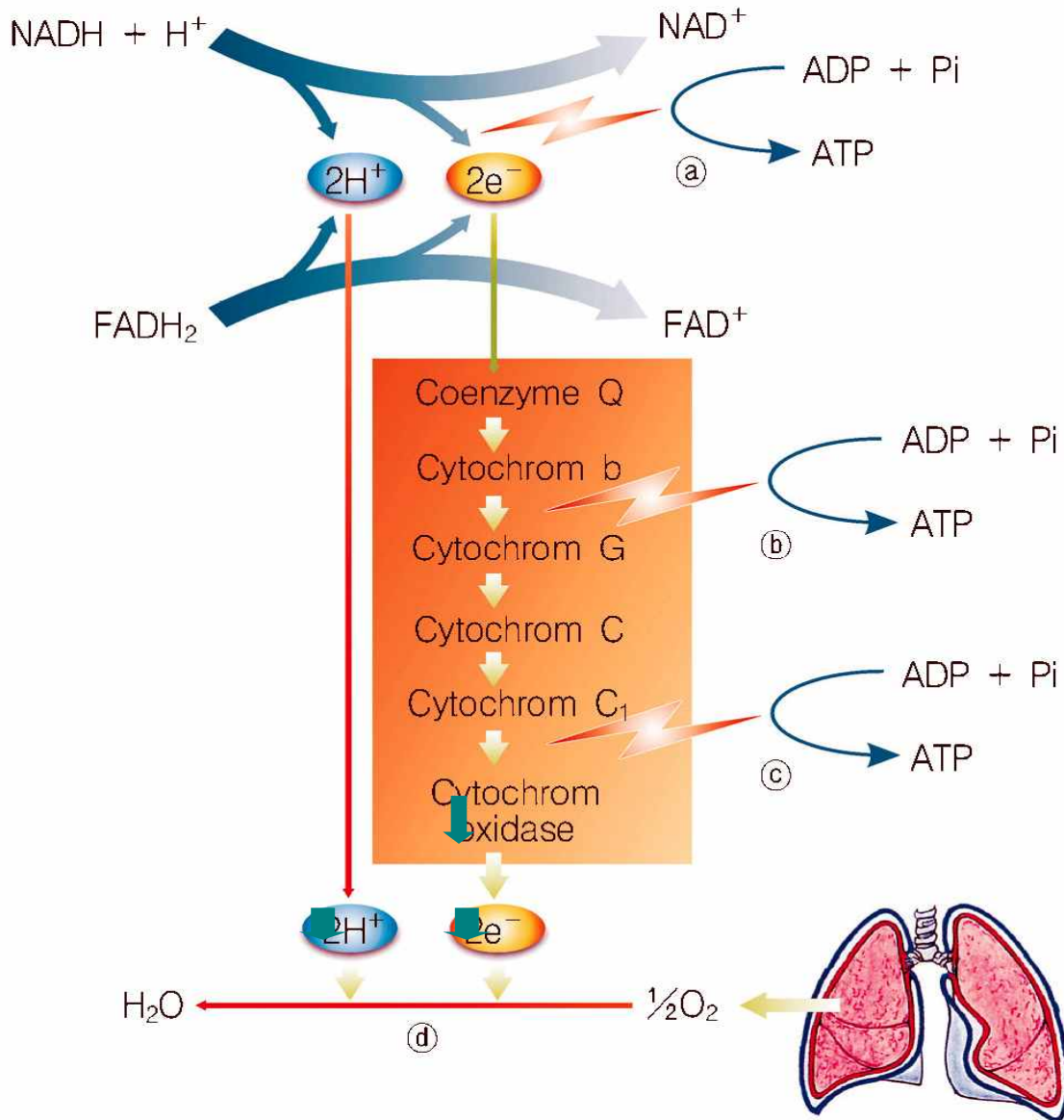


전자전달계

(electron transport system)

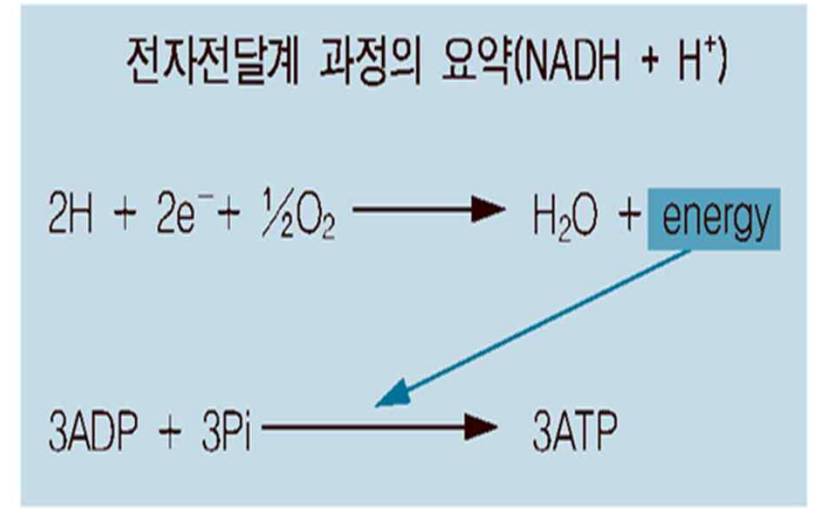
- ✓ NADH와 FADH₂가 포함하고 있는 고에너지 전자는 전자전달 효소복합체와 전자 운반체들의 산화 환원 반응에 의해 차례로 전달되고, 이 과정에서 **에너지가 방출** 된다.
- ✓ 전자전달 효소복합체를 구성하는 전자 운반체들은 **전자 친화력이 낮은 것에서 높은 것 쪽으로 전자를 전달**하며, 이 과정에서 산화 환원 반응이 연쇄적으로 일어난다.
- ✓ **최종적으로 전자는 H⁺과 함께 산소에 전달되어 물(H₂O) 분자가 합성**된다.
- ✓ 산소는 전자 친화력이 높아 전자전달계에서 최종 전자 수용체로 작용하며, 산소가 없으면 전자의 전달이 진행되지 않는다.
- ✓ 이 과정에서 **산소는 최종 전자수용체로 작용하며 환원되어 물 (H₂O) 이 된다.**

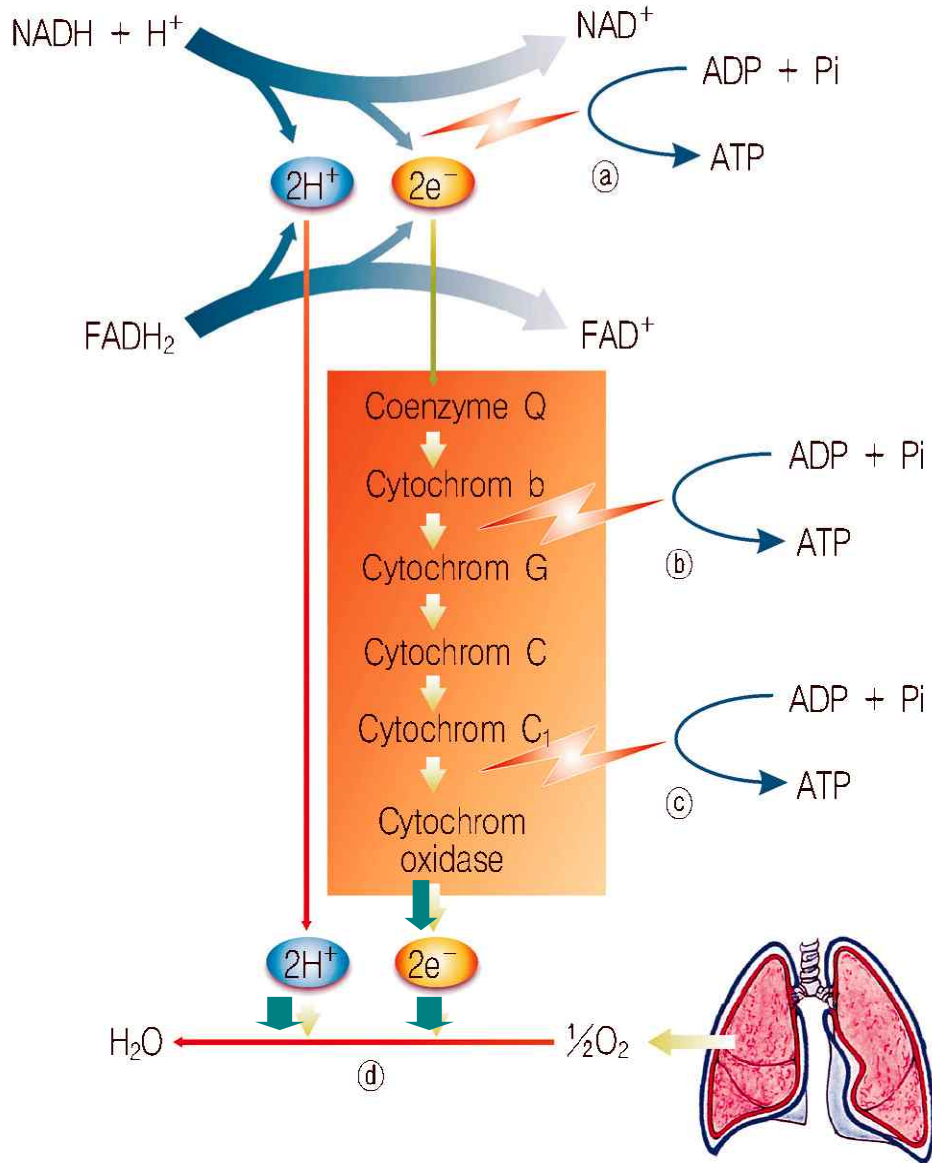
전자전달계



전자전달계
 (electron transport system : ETS)

NAD → 3ATP
FAD → 2ATP





Q. 전자전달계에 영향을 주는 주요인?

-조직세포 내 산소의 존재

-조직세포 내 NADH 또는 FADH₂

-조직세포 내 미토콘드리아의 수와 효소량

산화적 인산화

(oxidative phosphorylation)

- ✓ 고에너지 전자가 전자전달계를 따라 이동하는 과정에서 단계적으로 방출된 에너지를 이용하여 ATP가 합성되는 과정을 산화적 인산화라고 한다.
- ✓ 산화적 인산화는 1) 전자전달계를 통한 전자의 이동과, 이로 인해 2) 미토콘드리아 내막을 경계로 형성된 H^+ 농도 기울기에 의해 ATP가 합성되는 과정인 화학 삼투로 이루어진다.
- ✓ 전자전달계와 화학 삼투를 통해 NADH 1분자로부터 약 3ATP가, FADH₂ 1분자로부터 약 2ATP가 생성된다.

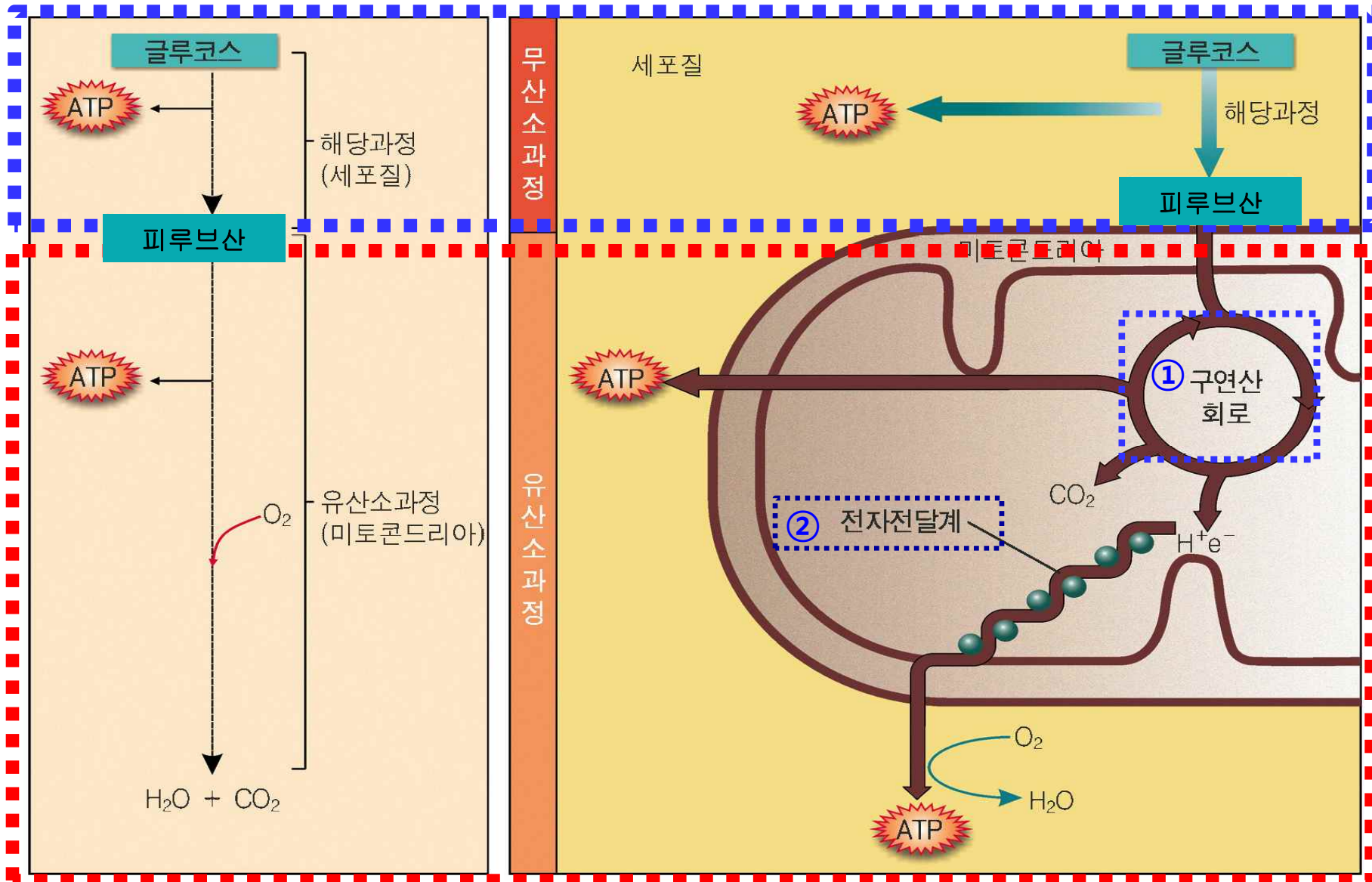
전자전달계를 통한 전자의 이동

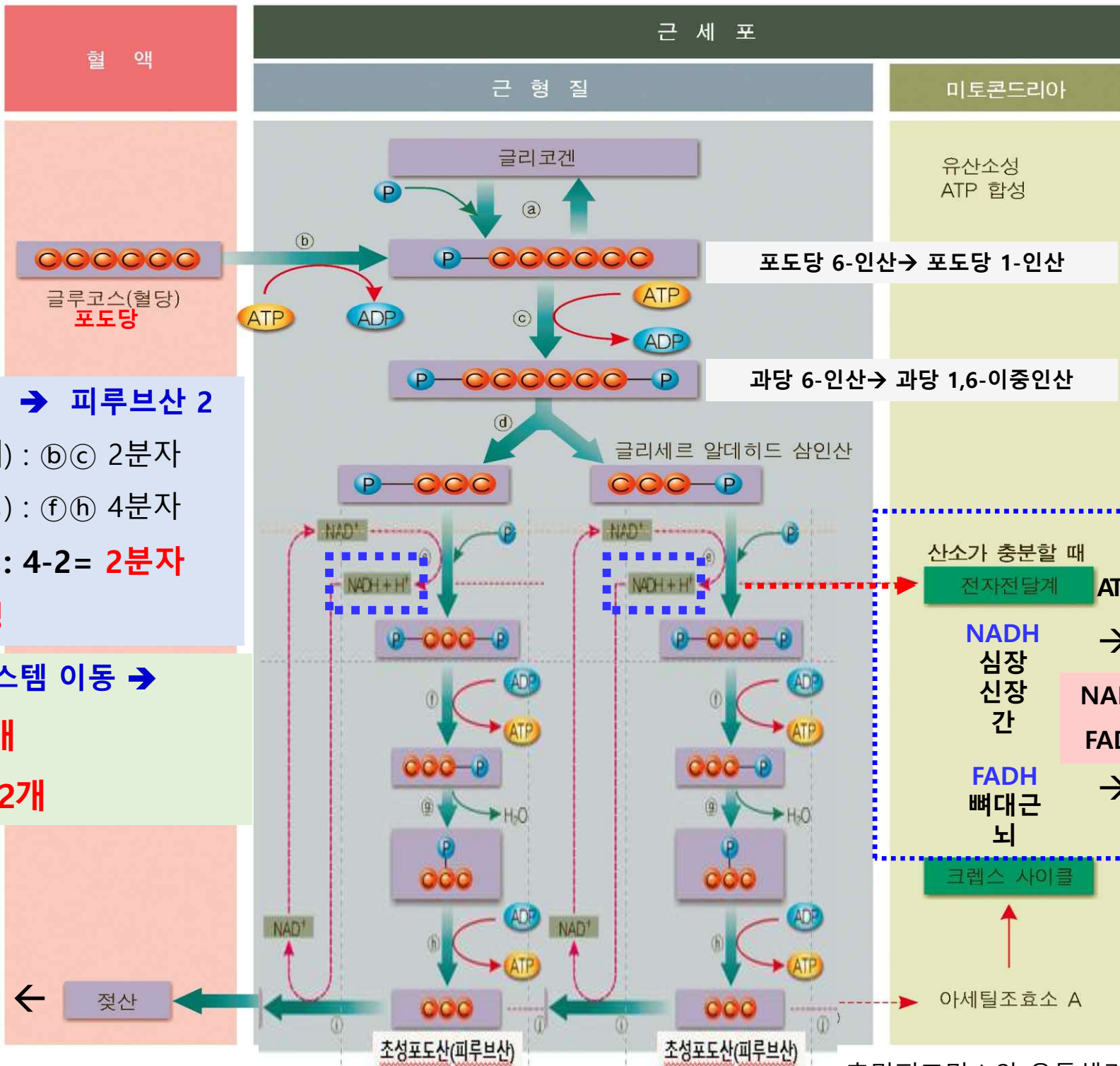
- ✓ 해당 작용과 TCA 회로에서 생성된 NADH와 FADH₂는 미토콘드리아 내막에 있는 전자전달계에 고에너지 전자를 전달해 주고 NAD⁺와 FAD로 각각 산화됨. 이처럼 전자가 차례로 전달되는 과정에서 에너지가 방출된다.
- ✓ NADH는 FADH₂보다 에너지 수준이 높아 방출하는 에너지양이 더 많다.
- ✓ 분자의 NADH는 약 3분자의 ATP를 합성할 수 있는 H⁺ 농도 기울기를 형성하고, 1분자의 FADH₂는 약 2분자의 ATP를 합성할 수 있는 H⁺ 농도 기울기를 형성한다.

화학삼투 (chemiosmosis)

- 전자전달계를 통해 전달되는 전자에 의해 방출된 에너지는 미토콘드리아 기질(matrix)에서 막사이 공간(내강, innermembrane space)으로 H^+ (양성자)를 능동수송하는데 사용
- 미토콘드리아 내막을 경계로 H^+ 의 농도 기울기와 전위 차이(H^+ 농도 : 막 사이 공간 > 미토콘드리아 기질)
- H^+ 의 전기화학적인 양성자기울기에 의해 H^+ 가 ATP 생성효소를 통해 막 사이 공간에서 미토콘드리아 기질로 확산될 때 ATP가 합성
→ 이 과정을 화학삼투
- ATP 생성효소는 ADP를 ATP로 전환시키는 인산화 반응에 에너지를 사용

무산소성 해당과정과 유산소 과정의 전체 과정





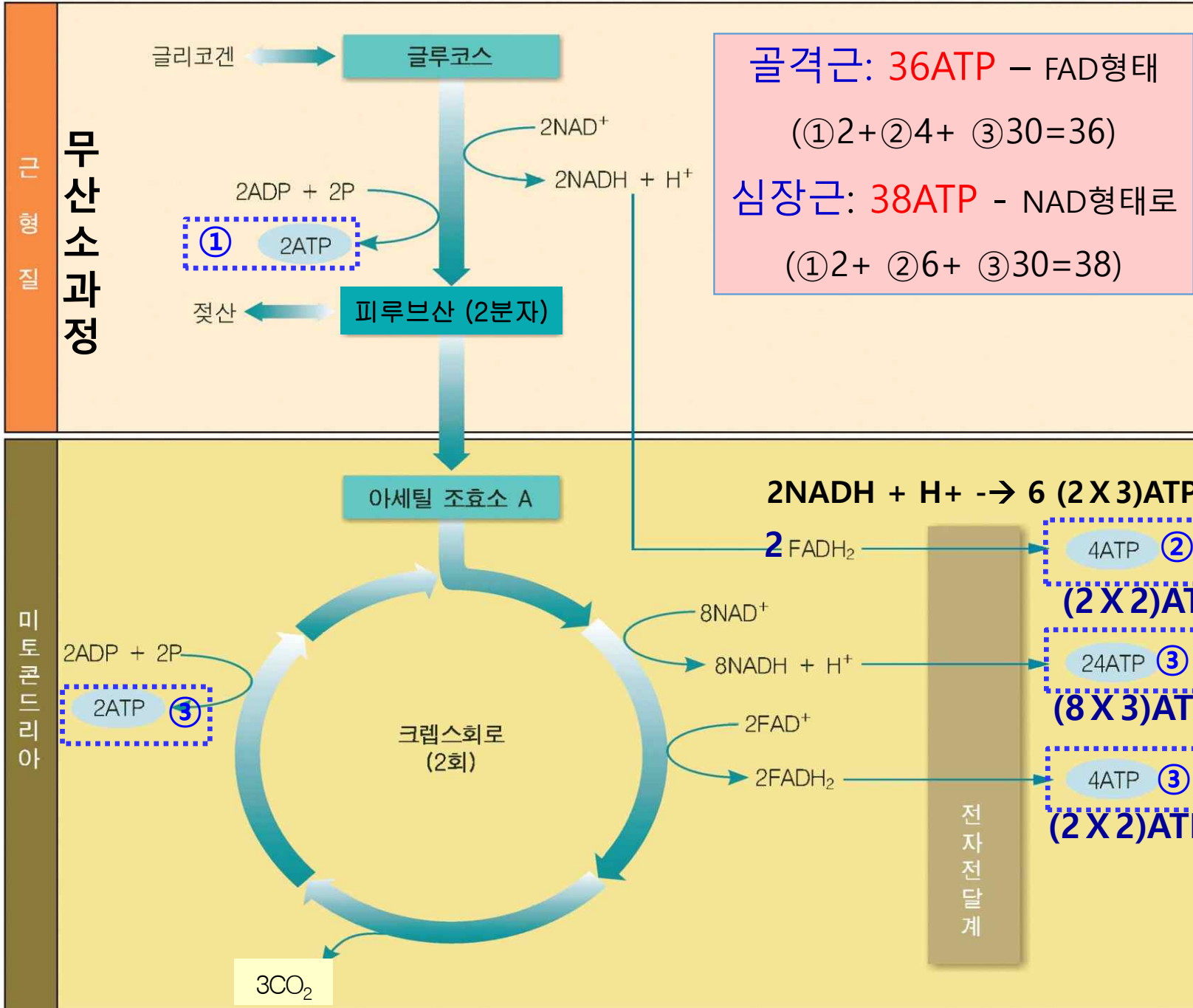
해당 : 포도당 1 → 피루브산 2
 ATP소모(분해) : ②③ 2분자
 ATP생성(합성) : ⑥⑧ 4분자
 1. Net ATP생성: 4-2= 2분자
 2. 2NADH 생성

유산소 시스템 이동 →
 1. NADH 2개
 2. 피루브산_2개

산소가 충분할 때
 전자전달계 ATP 생성량 차이?
 NADH → 38 ATP
 심장
 신장
 간 NAD → 3ATP
 FAD → 2ATP
 FADH 뼈대근
 뇌 → 36 ATP
 크렘스 사이클

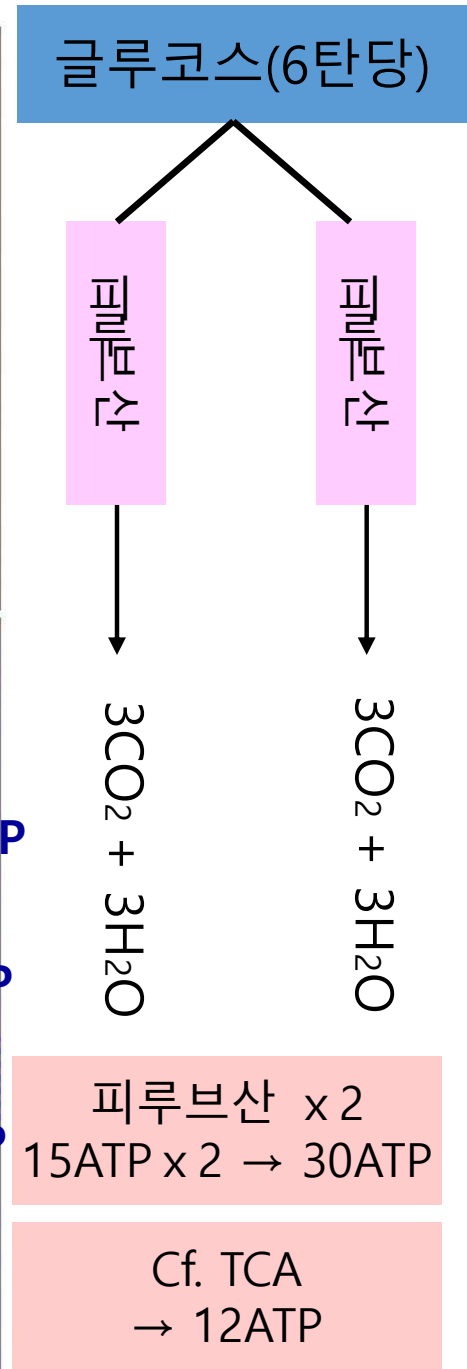
젖산염 ← 젖산

유산소성 탄수화물 분해를 통한 총 ATP 생성량

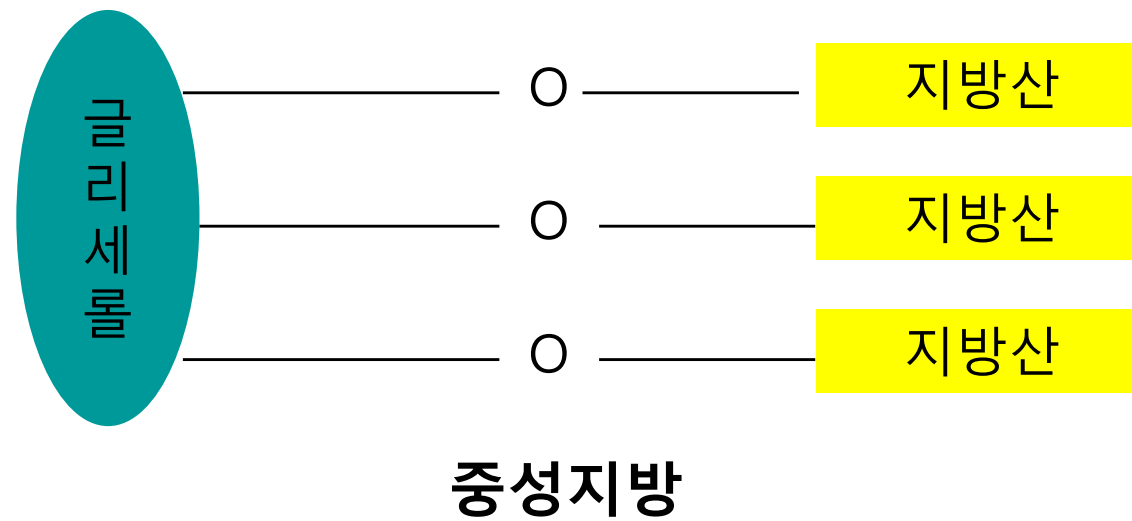


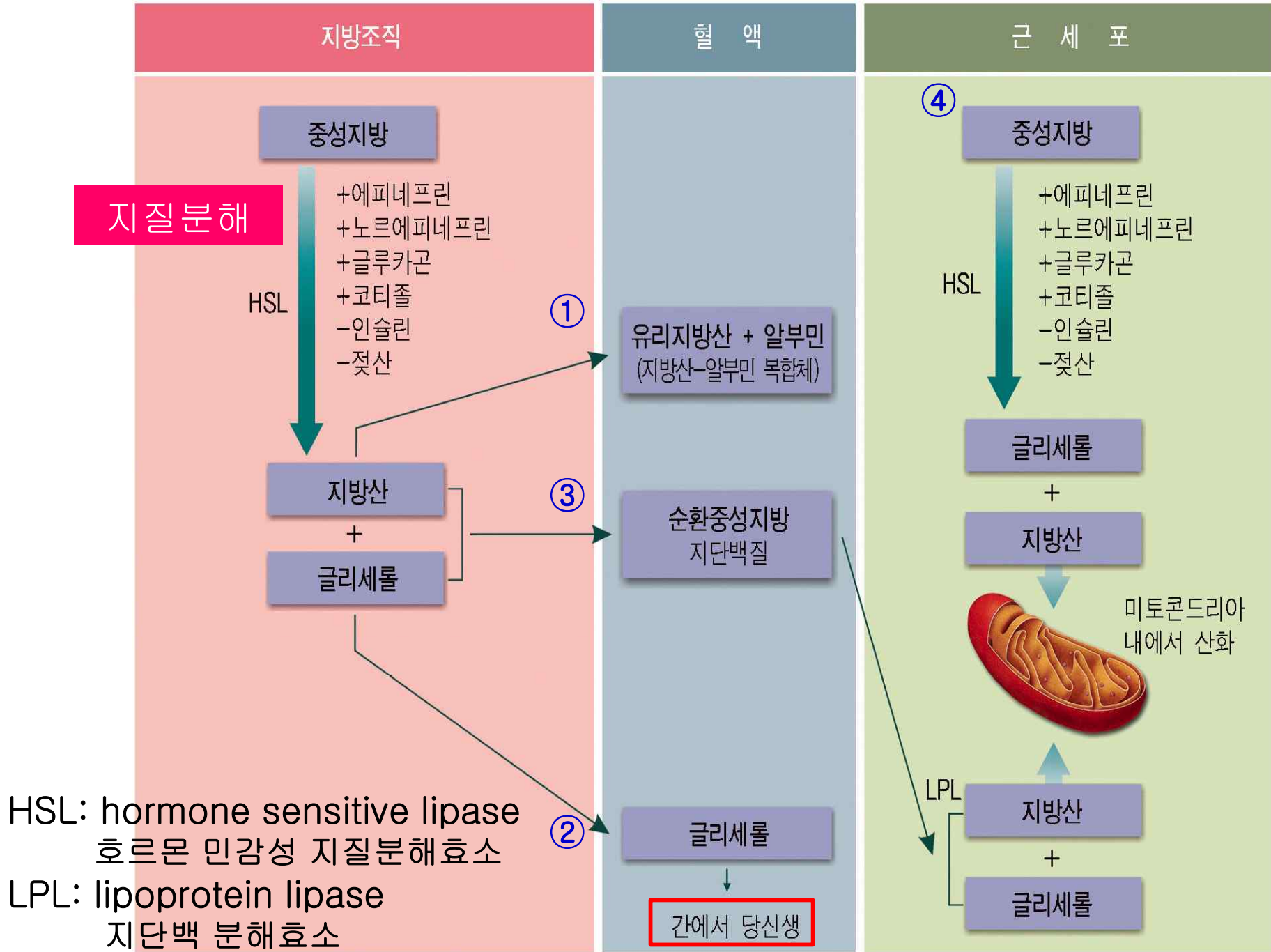
골격근: 36ATP - FAD형태
 (①2+②4+ ③30=36)

심장근: 38ATP - NAD형태로
 (①2+ ②6+ ③30=38)



지방의 에너지 대사





휴먼퍼포먼스와 운동생리학(2011)

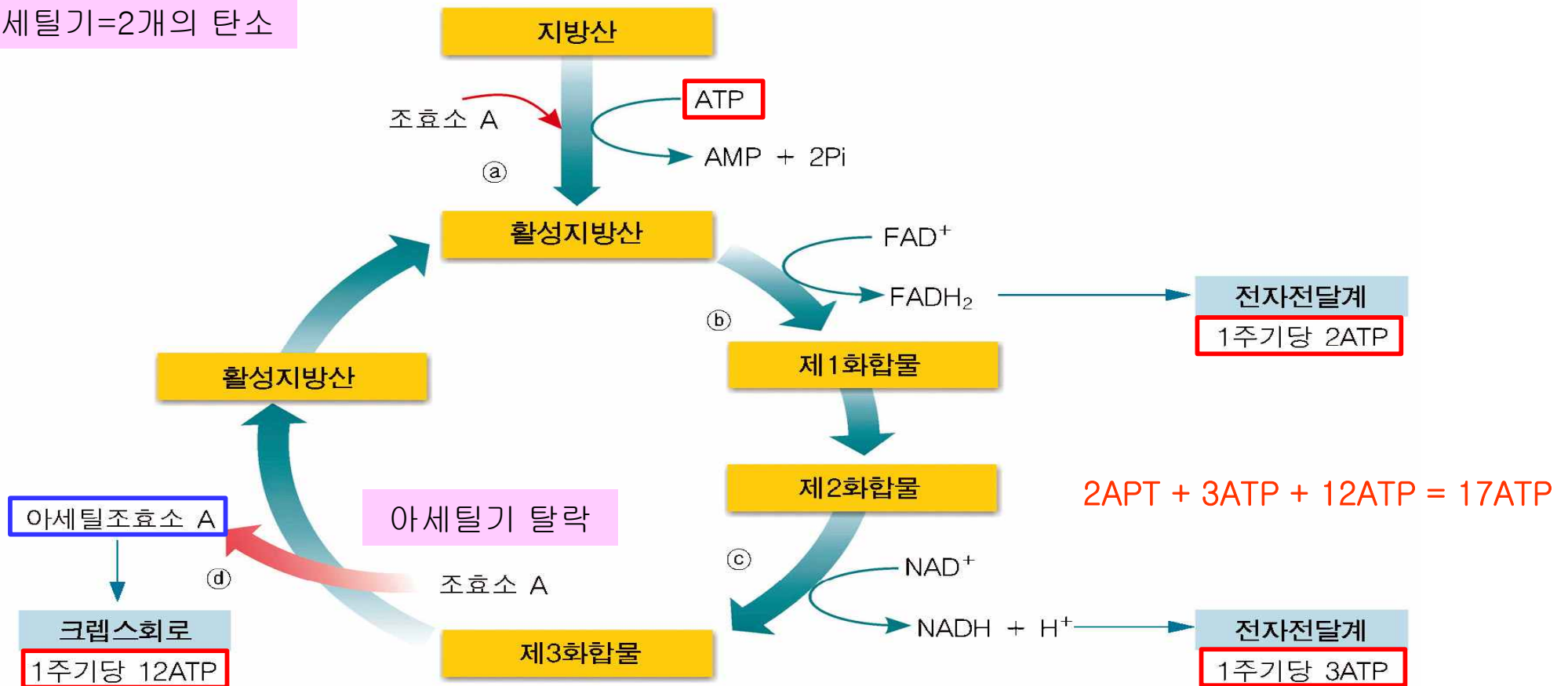
그림 3-16. 호르몬과 젓산에 의한 지방산대사의 조절(+ 촉진작용, -억제작용)

지방산의 베타-산화과정

스테아린산의 탄소사슬(18C) → 아세틸기 9개



아세틸기=2개의 탄소



첫 번째 주기 16APT + 2~7번째 주기 17APT X 6 + 8번째 주기 29APT (17+12) = 147APT

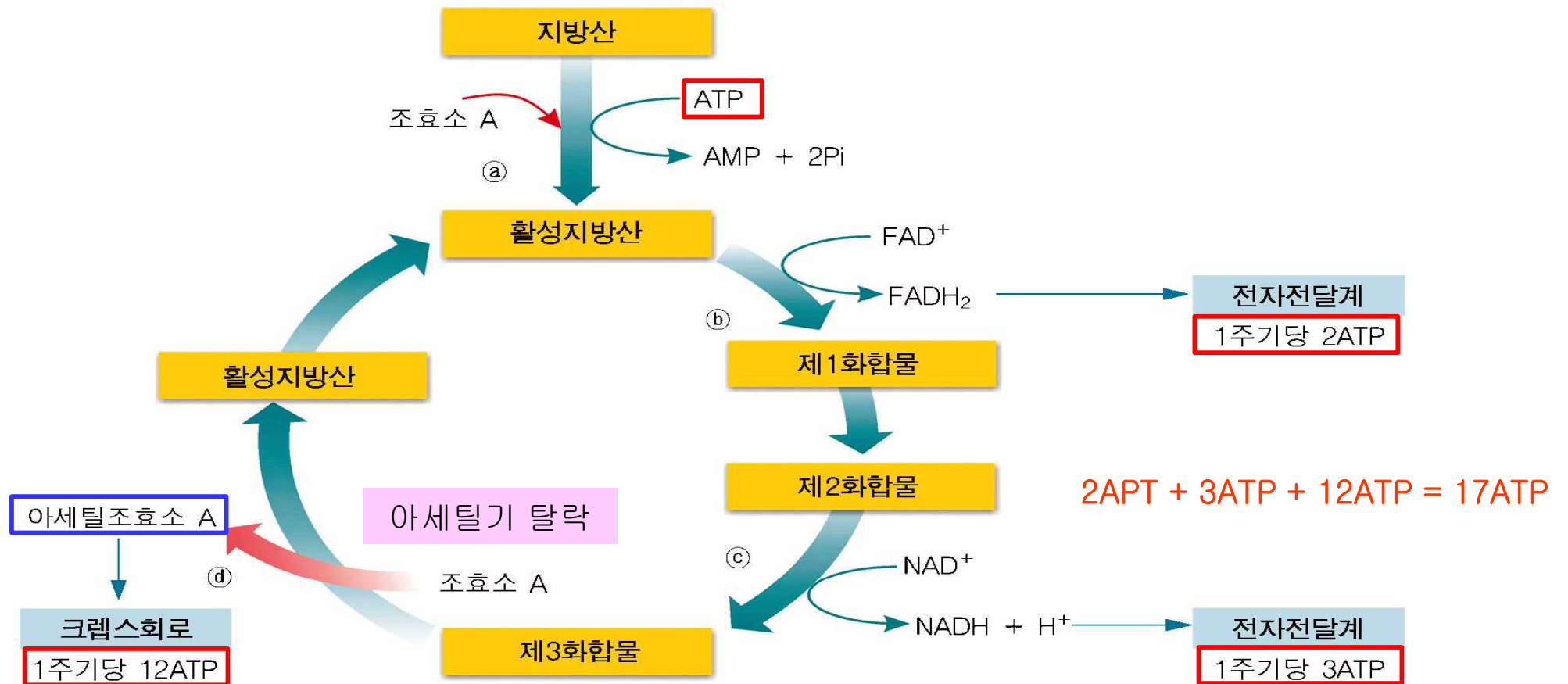
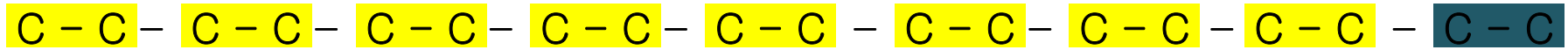
지방산의 베타-산화과정

스테아린산의 탄소사슬(18C) → 아세틸기 9개



아세틸기=2개의 탄소

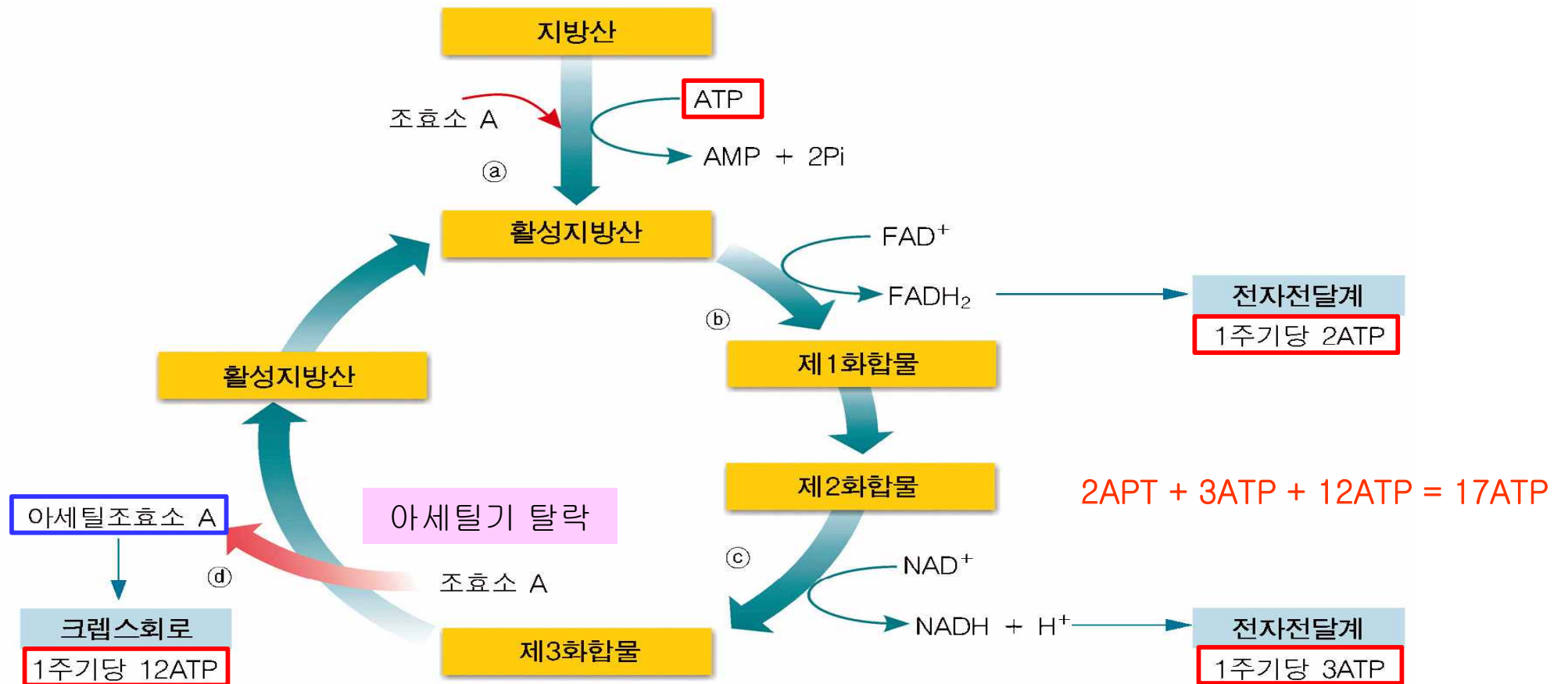
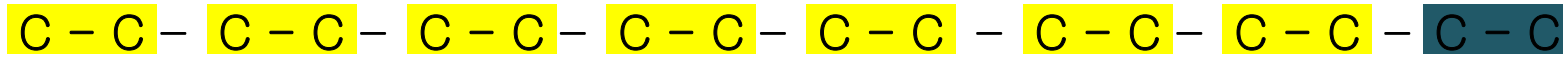
스테아린산의 탄소사슬(18C) → 아세틸기 9개 → 1개 탈락 → 8개



첫 번째 주기 : 아세틸기 9개 → 아세틸기 8개

$17ATP(2APT + 3ATP + 12ATP) - 1 ATP = 16APT$

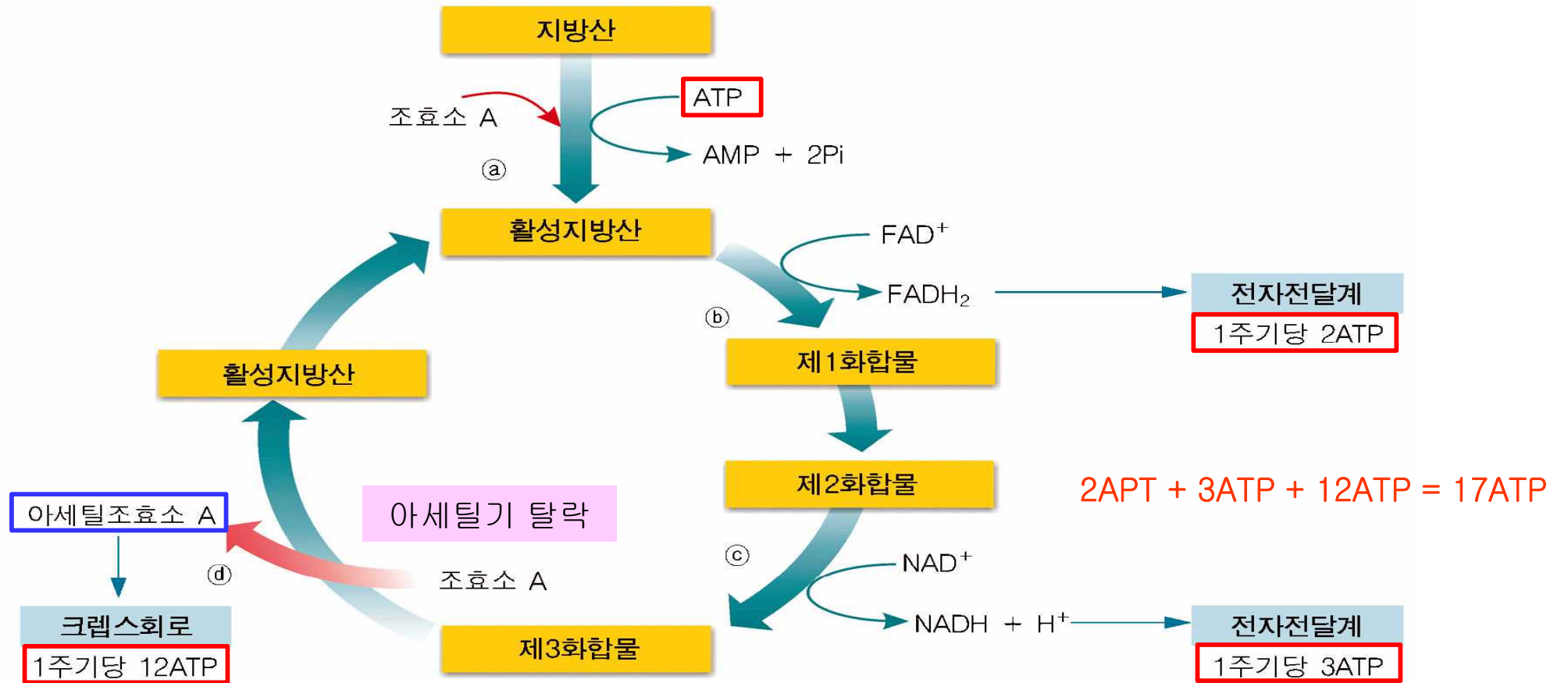
스테아린산의 탄소사슬(18C) → 아세틸기 8개 → 1개 탈락 → 7개



2 번째 주기 : 아세틸기 8개 → 아세틸기 7개

$2ATP + 3ATP + 12ATP = 17ATP$

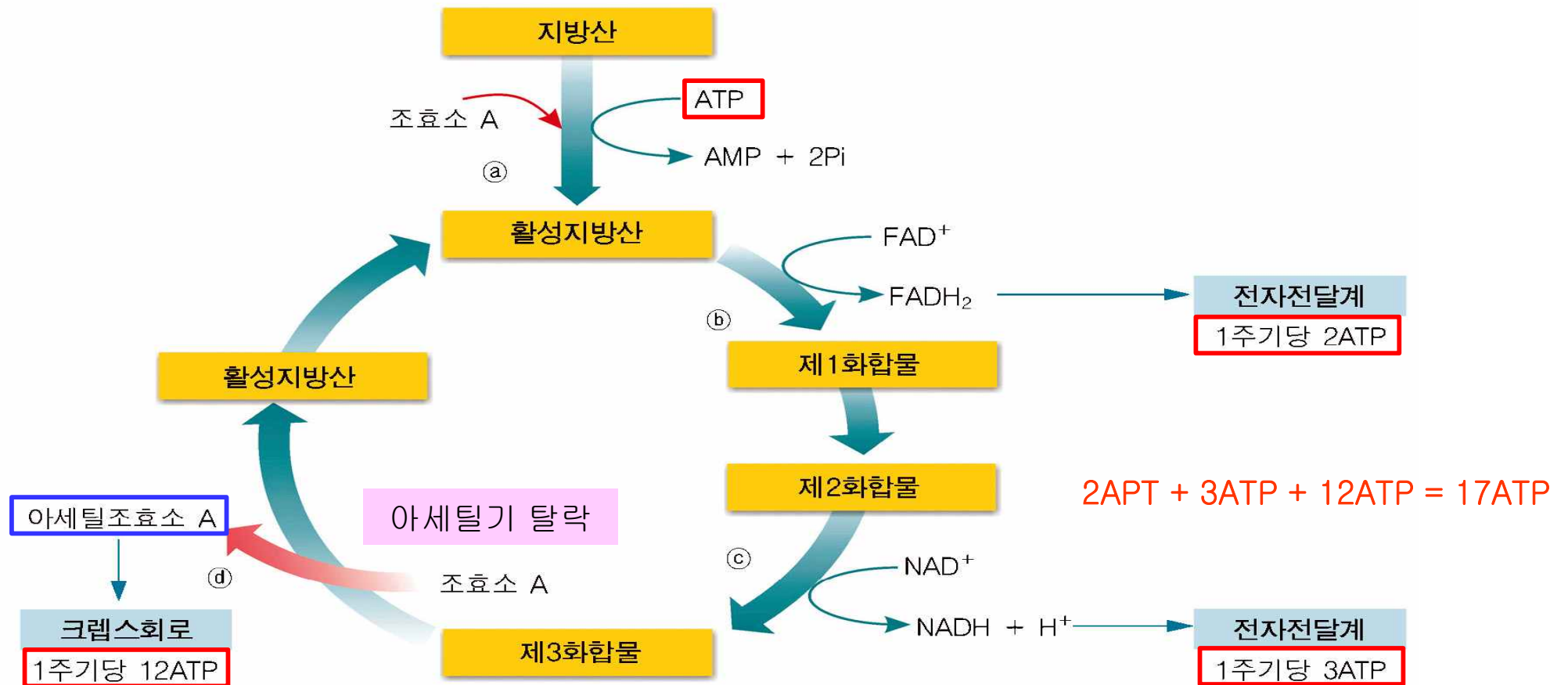
스테아린산의 탄소사슬(18C) → 아세틸기 3개 → 1개 탈락 → 2개



7번째 주기 : 아세틸기 3개 → 아세틸기 2개

$2ATP + 3ATP + 12ATP = 17ATP$

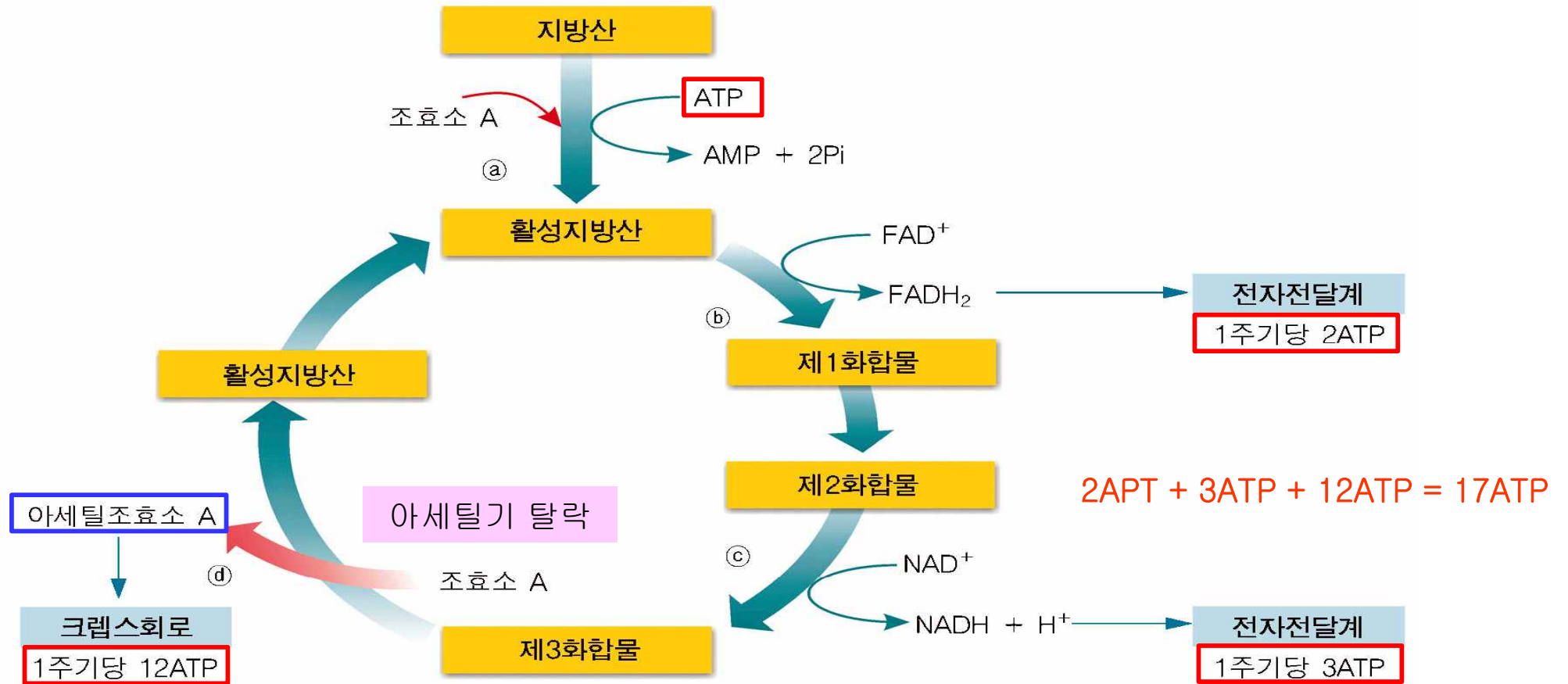
스테인산의 탄소사슬(18C) → 아세틸기 2개 → 아세틸기 1개



8번째 주기 : 아세틸기 2개 → 아세틸기 1개

8번째 아세틸기 [2APT + 3ATP + 12ATP = 17ATP] + 마지막 아세틸기 [12ATP] = 29ATP

지방산의 베타-산화과정



첫 번째 주기

16APT

2~7번째 주기

102ATP(17 x 6)

8번째 주기

29ATP (17+12)

= 147ATP

Q 글리세롤 1개
→ ? ATP 생성

2ATP

FADH₂ (2ATP)
← NADH

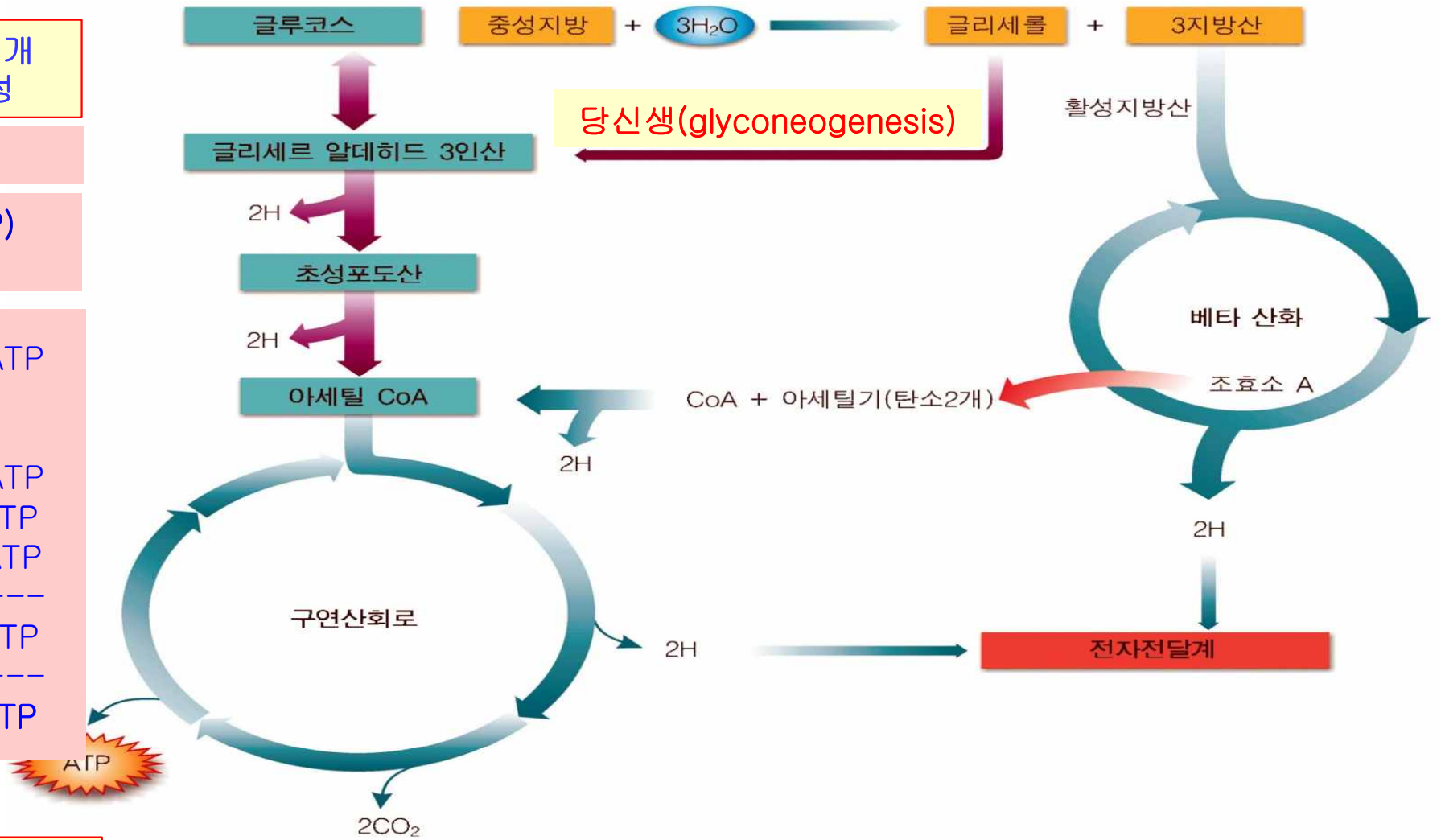
1NADH → 3ATP

TCA
3NADH → 9ATP
1FADH₂ → 2ATP
→ 1ATP

12ATP

피루브산 15ATP

글리세롤 → 19ATP

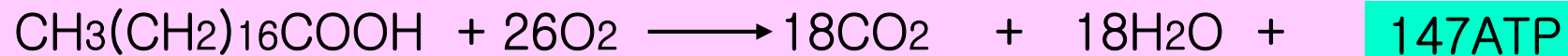
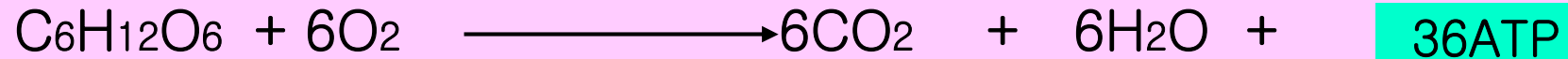


근 원	경 로	ATP 생성량
1분자의 글리세롤	해당과정 + 구연산회로	19
3분자의 지방산(C-18)	β-산화 + 구연산회로	441 (2+2+15)
		(147×3)
		총 460 ATP

그림 3-15. 중성지방의 구성분인 지방산과 글리세롤 분자의 대사과정 요약



탄수화물과 지방 에너지 대사의 차이는?



1. 1 ATP 생성 당 산소소비량 = 탄수화물(휘발유) < 지방(석유)

지방 12% ↑

2. 저장량 : 탄수화물(간, 근육, 혈당) < 지방(지방조직)

3. 단위 시간당 에너지 소비가 높은 운동(운동강도) : 탄수화물 > 지방

혈중 글루코스(혈당) = 뇌, 신경세포가 사용하는 유일한 에너지원

장시간 운동 시 혈당을 보존하기 위해 지방의 연소비율이 증가

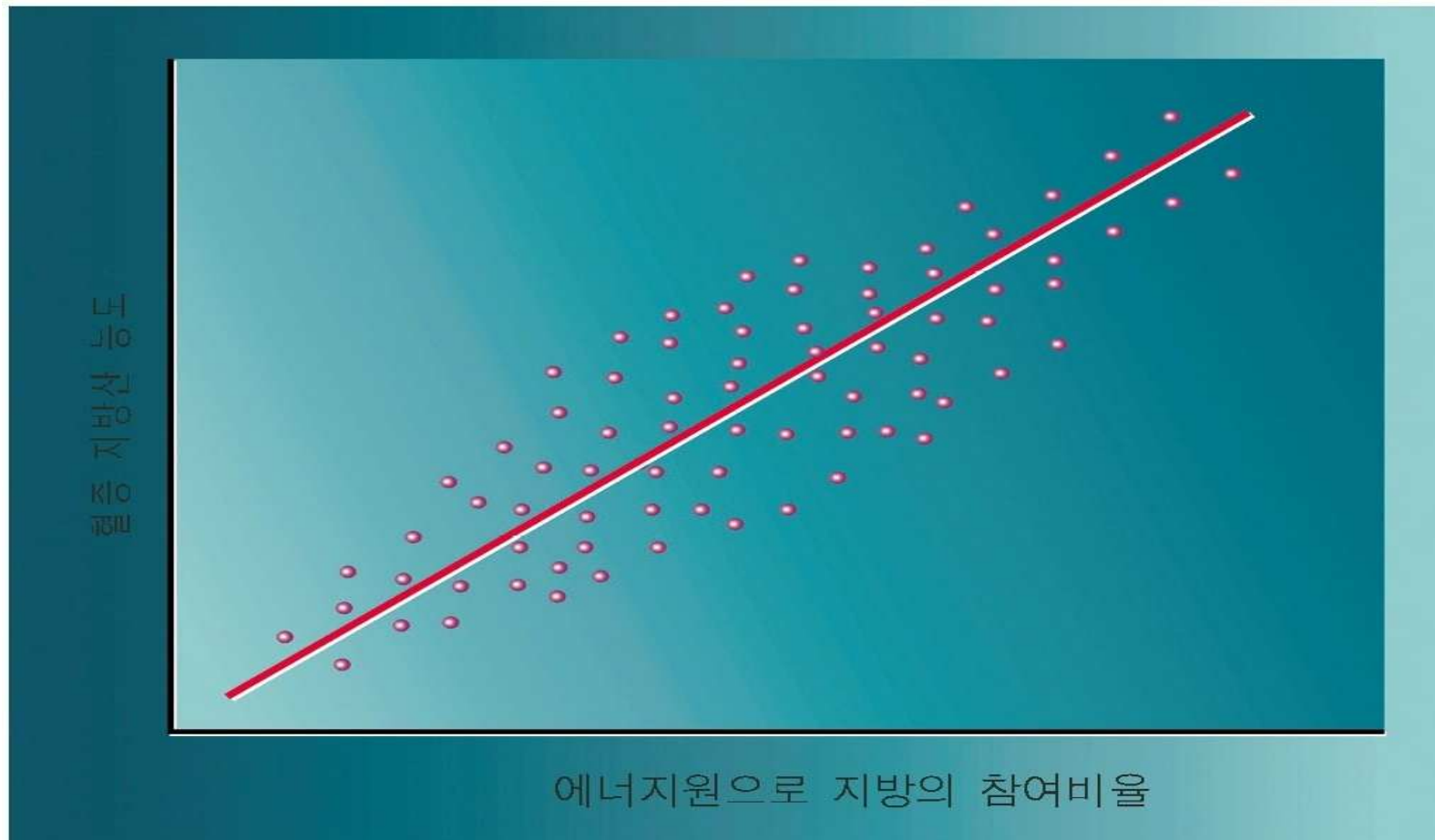


그림 3-17. 동맥혈액 중 지방산농도와 지방산의 에너지원 참여비율간의 관계

근육조직에서 지방산이용률은 지방조직에서 지질분해(lipolysis)가 얼마나 활발하게 일어나는가에 큰 영향을 받음

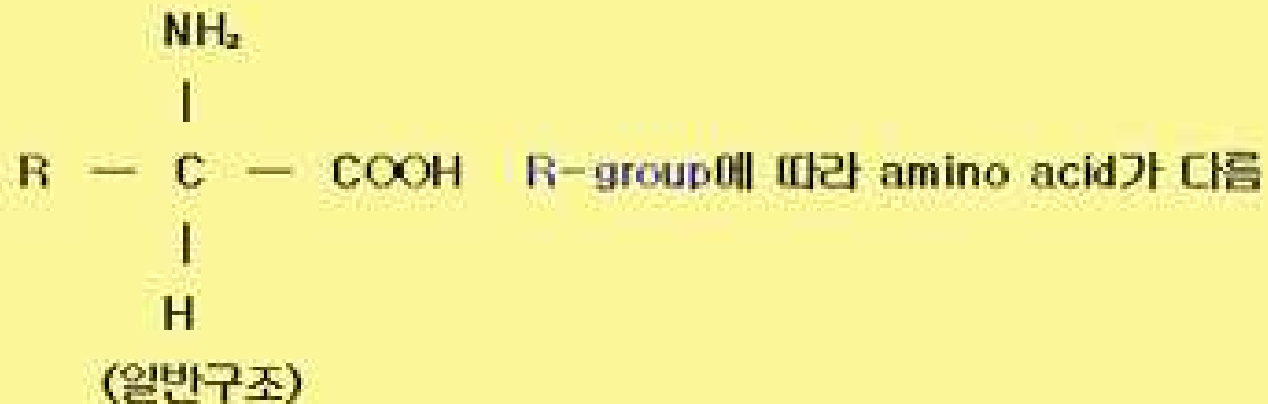
← 혈중유리지방산의 농도와 지질 이용률간에는 직선의 비례관계



단백질의 에너지 대사는?

아미노산(Amino acid)

- Protein의 구성단위
C, H, O, N이 구성 기본 단위
-NH₂(amino기)와 -COOH(carboxyl기)를 소유



- **탈아미노반응(deamination)** : 아미노산이 에너지원으로 이용되기 위해 아미노산의 아민기(-NH₂)가 제거되는 것
- 근육은 탈아미노반응에 의해 남은 아미노산의 탄소골격(COOH)을 에너지원으로 이용할 수 있음 → 피루브산이나 옥살아세트산 등 당신생과정의 중간산물을 생성하여 포도당(당신생과정)을 합성하는 데 이용 가능
- **아미노산전이(transamination)** : 아민기(-NH₂)와 다른 화합물을 결합시켜 다른 아미노산을 형성하는 과정 (예, 아민기(-NH₂) + 피루브산 → 알라닌)
- 글리신(glycine)과 같은 아미노산은 탈아미노반응에 의해 아세틸조효소A 또는 아세토아세트산과 같은 **케톤체(keton body)** 형성 → 케톤생성아미노산
- 단백질 대사과정의 비율이 높을수록 탈아미노반응에 의해 요소나 요산 생성량 증가 → 소변량 증가 → 단식이나 황제다이어트 → 단기간 체중감량 → 탈수 초래 가능

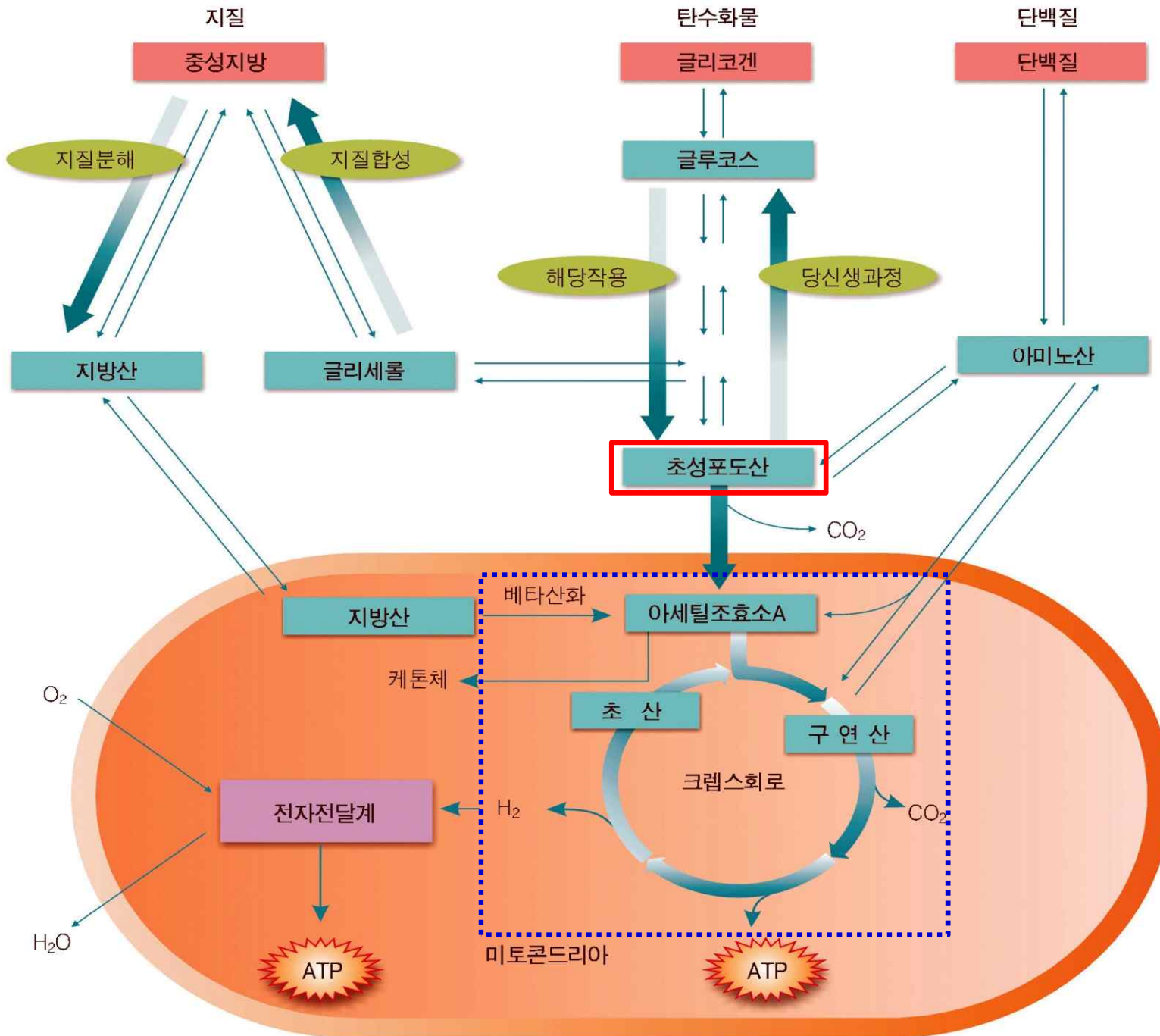


그림 3-21. 탄수화물, 지방, 단백질 대사의 공통경로



간단하게 정리해 보세요.

❖ 포도당 1분자가 유산소 에너지대사 시스템에서 ATP를 생성하는 과정을 기술하세요.

❖ 탄수화물과 지방 유산소 에너지대사의 특징을 비교하세요.