

*Cell
respiration*

6장 세포호흡

학습목표

- 광합성과 호흡의 생명 유지의 양대 경로이다
- 호흡이란 무엇인가
- 세포 호흡의 과정
- 해당과정
- 크렙스 회로
- 전자전달계 연쇄반응과 화학적 삼투 인산화 경로
- 포도당 1분자는 얼마나 많은 ATP를 생산하는가
- 탄수화물, 지방 및 단백질이 에너지 대사에 들어가는 지점
- 무산소호흡과 발효 반응

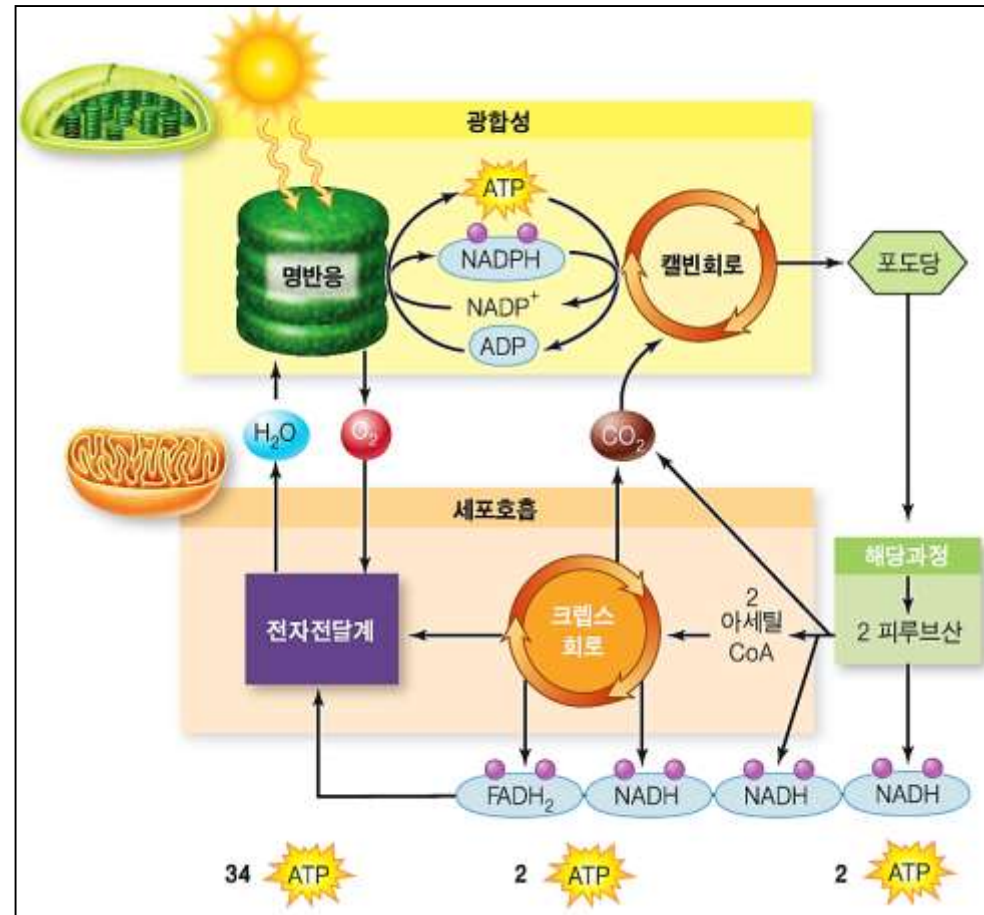
광합성과 호흡은 생명 유지의 양대 경로이다

- 광합성은 엽록체에서 광 에너지를 이용, 탄소고정반응으로 화학에너지를 생산하는 경로이다
- 호흡은 미토콘드리아에서 화학 에너지를 ATP 에너지로 변환 시키는 경로이다
- 엽록체와 미토콘드리아는 세포와 내부 공생으로 탄생되었다

표 6.1 광합성과 호흡의 비교

	광합성	호흡
음식물	생산	소비
에너지	포도당으로 저장	포도당에서 방출
빛	필요	필요 없음
H ₂ O	소비	방출
CO ₂	소비	방출
O ₂	방출	소비

그림 6.12



6.1 세포는 음식물 에너지를 사용하여 ATP를 만든다

호흡

- 산소(O_2) 호흡과 무산소 호흡으로 구분하며, 발효도 산소를 사용하지 않는다
- 산소를 사용하여 포도당을 이산화탄소와 물로 분해하고 에너지(ATP)를 생산
- 광합성과 반대 반응이며, 식물은 광합성과 산소호흡을 모두 한다.

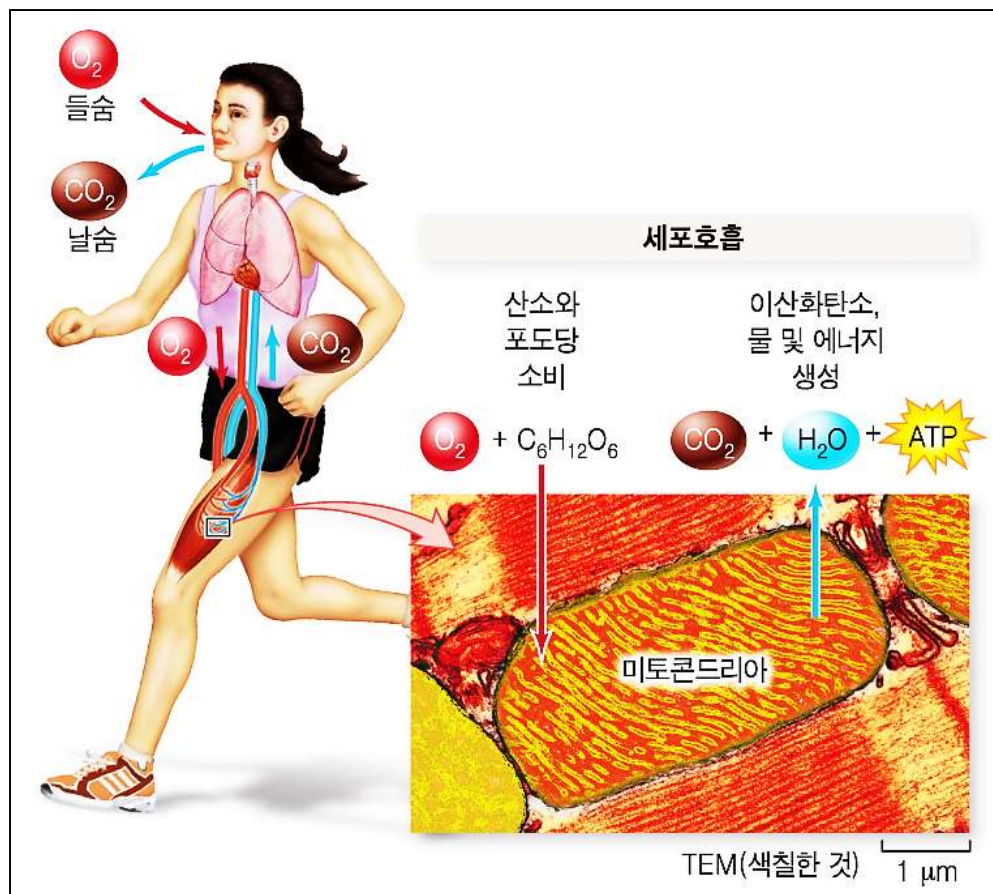


그림 6.1

6.1 세포호흡은 5 가지 주요 과정을 포함한다

세포 호흡

세포 호흡은 크게 5단계로 구분한다

- ① 해당과정(glycolysis)
- ② 아세틸 CoA 생성
- ③ 크렘스회로(krebs cycle) 반응
- ④ 전자전달 연쇄반응
- ⑤ 화학삼투 및 산화적 인산화 반응

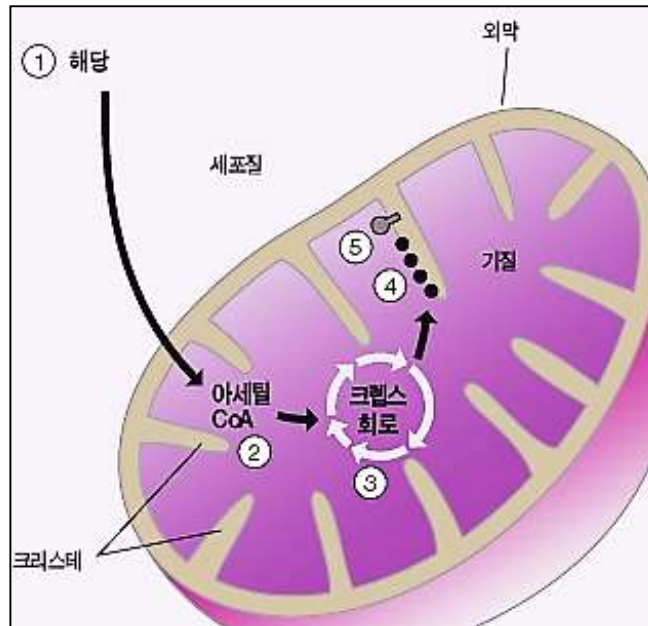
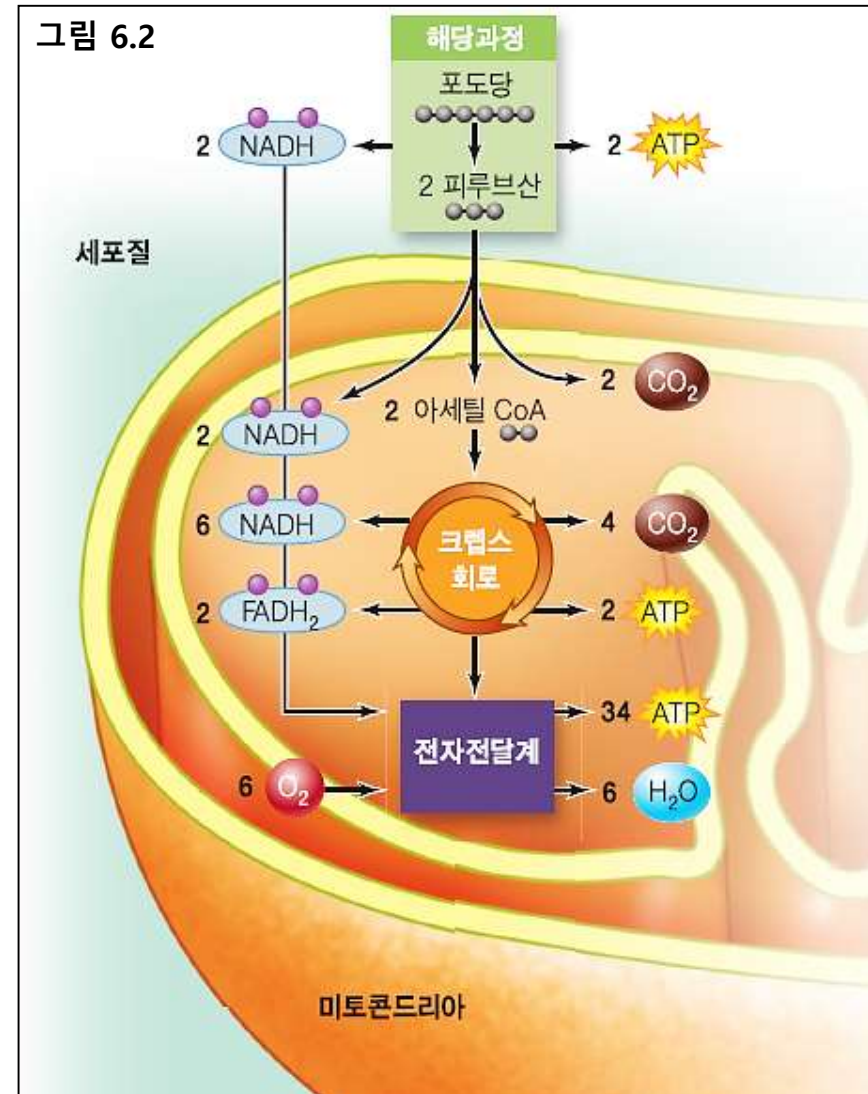


그림 6.2



① 해당과정

- 모든 세포의 세포질에서 일어난다
- 산소를 사용하지 않는다
- 포도당 1분자(6탄소)를 피루브산 2분자 (3탄소)로 분해한다

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_3\text{O}_3$$
- 기질수준 인산화에 의해 ATP를 만든다

기질수준 인산화

(substrate level phosphorylation)

고 에너지의 공여분자가 물리적으로
인산기를 ADP에 전달함으로써 ATP를
생성하는 것

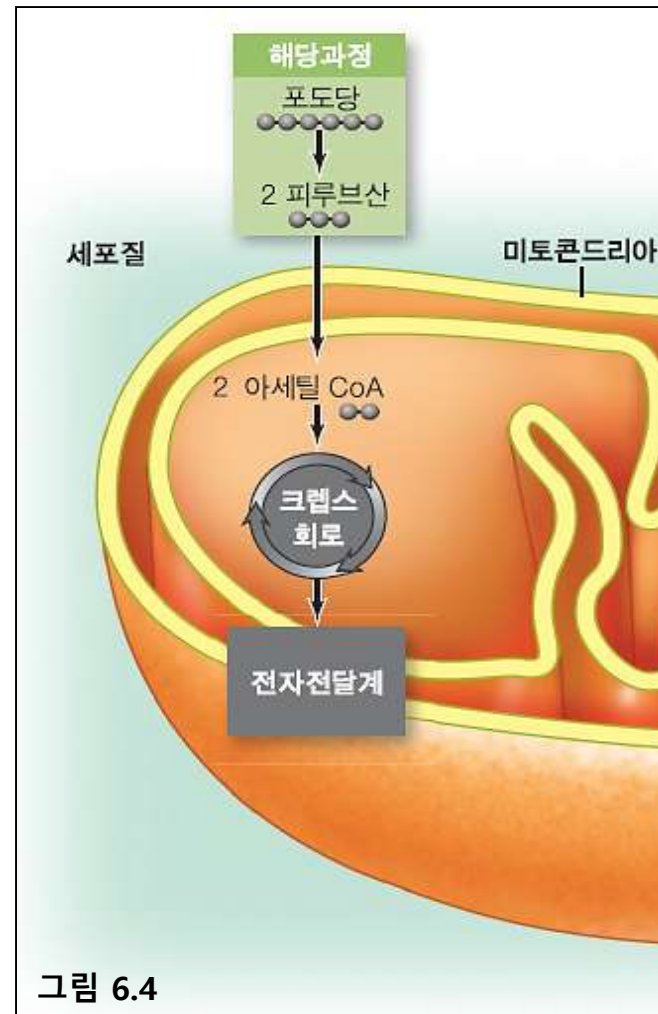
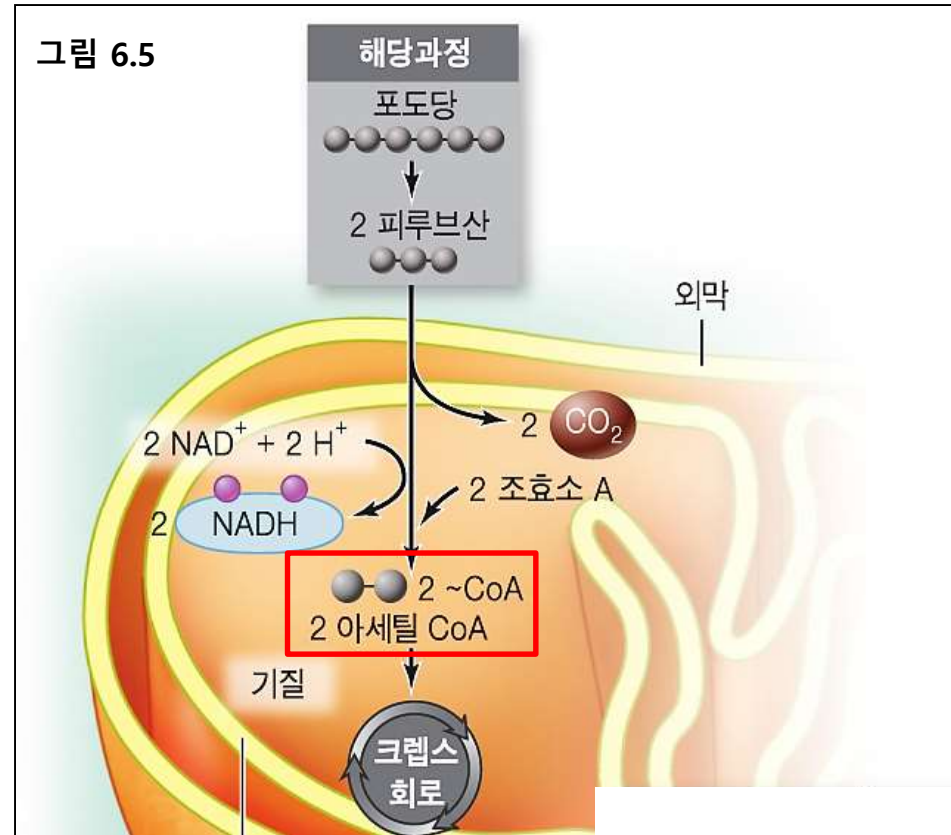


그림 6.4

순 투입
$2 \text{ NAD}^+ + 2 \text{ H}^+$
$2 \text{ ADP} + 2 \text{ P}$
순 산물
2 NADH
2 ATP

② 아세틸 CoA 생성

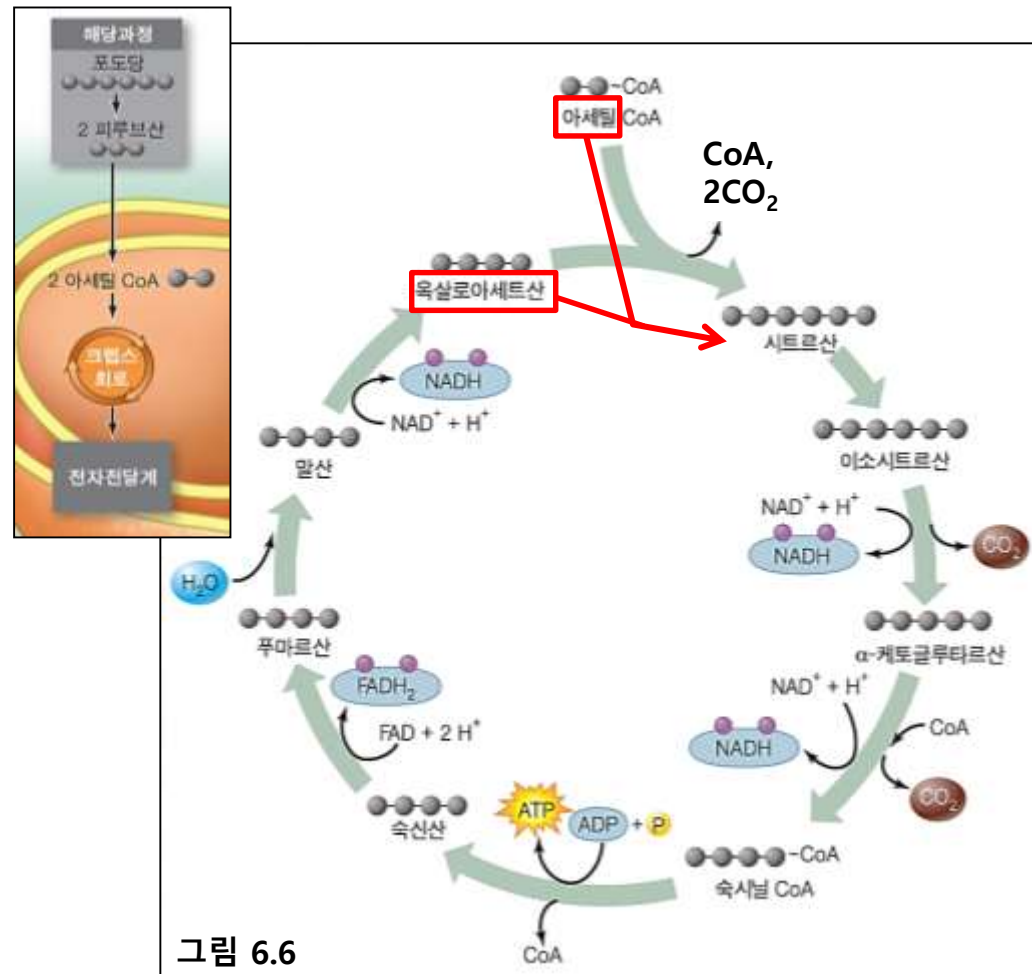
- 피루브산은 미토콘드리아 기질로 이동한 후,
- 크렙스회로로 들어가지 전의 화학반응으로 피루브산은 2분자의 아세틸 CoA(coenzyme A) 생성
 아세틸기 + 조효소 = 아세틸 CoA
- 2개 이산화탄소 제거,
- 2분자 아세틸채, 2분자 NADH 생성



투입	산물
2	2 ~CoA
	2
2 $\text{NAD}^+ + 2 \text{H}^+$	2

③ 크렙스 회로

- 크렙스회로는 ATP와 전자운반체를 생성한다
- 피루브산의 모든 탄소를 CO_2 로 방출한다
- 미토콘드리아 기질에서 1 분자 아세틸기는 조효소 CoA를 버리고 2분자 이산화탄소로 산화된다
- 아세틸기는 옥살아세트산과 결합하여 시트르산을 형성한다
크렙스 회로를 시트르산 회로(citric acid cycle)라고도 한다
- 1분자 포도당에 대하여 2번 회전하여, 총 4 CO_2 , 2 ATP, 6 NADH, 2 FADH_2 생산



투입	산물
2 $\sim\text{CoA}$	4 CO_2
2 $\text{ADP} + 2 \text{P}$	2 ATP
6 $\text{NAD}^+ + 6 \text{H}^+$	6 NADH
2 $\text{FAD} + 4 \text{H}^+$	2 FADH_2

④ 전자전달 연쇄반응 ⑤ 화학적 삼투 인산화

- 크렙스 회로에서 생산한 NADH와 FADH_2 의 고 에너지 전자를 전자전달 연쇄 반응에서 사용하고, 에너지를 넘겨 주고 나면 크렙스 회로로 돌아 간다
- 미토콘드리아 기질의 막간 공간에 양성자(수소이온) 기울기가 만들어지고 펌프하면 화학삼투 인산화가 ATP 합성효소 도움으로 ATP 합성을 추진한다

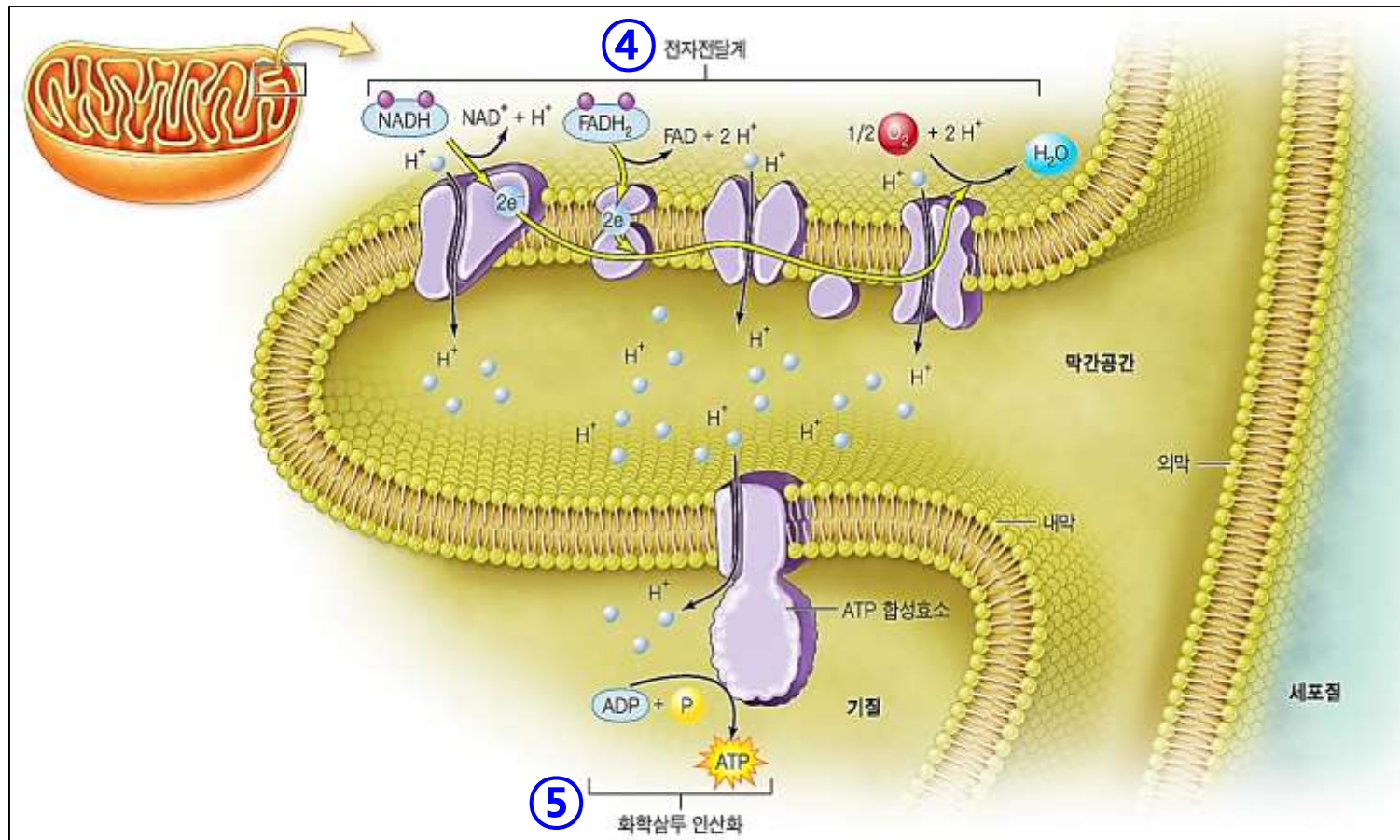


그림 6.7

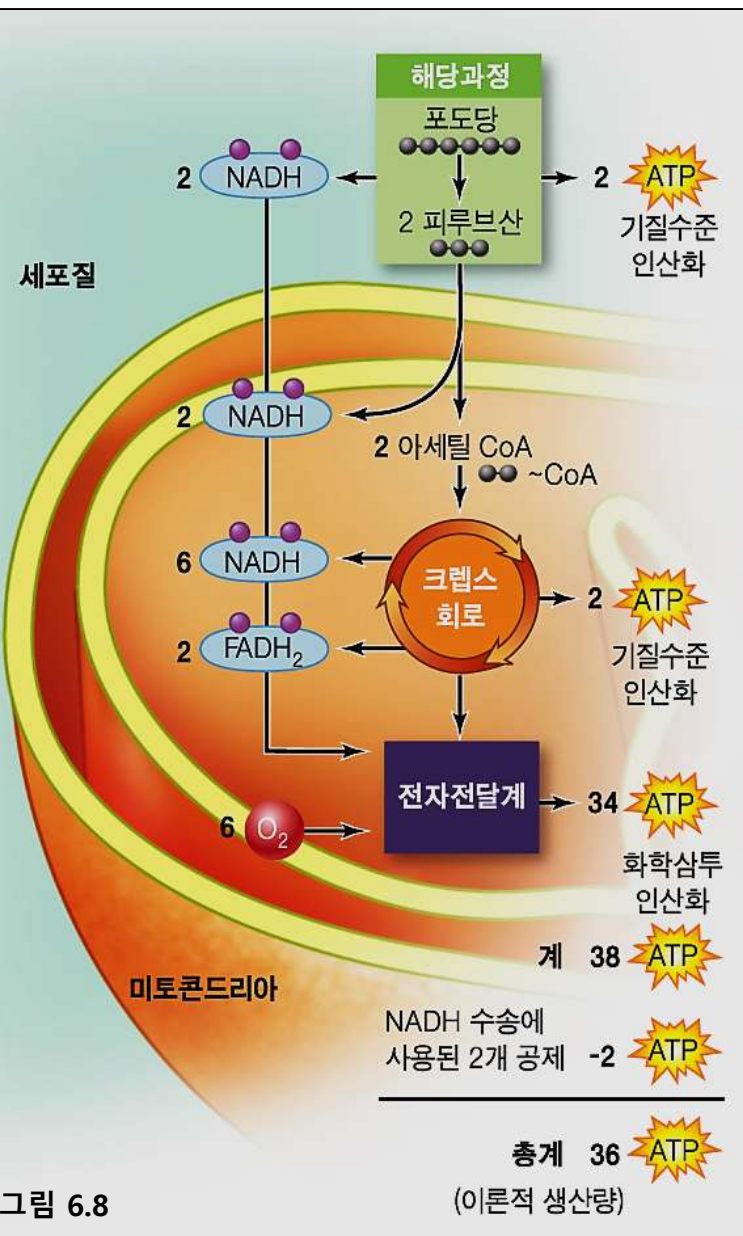
6.6 포도당 한 분자는 얼마나 많은 ATP를 생성하는가?

■ 포도당 1분자가 생산하는 ATP 이론적 개수

구분	생산	소비	최종	비고
① 해당과정	4	2	2	
② 아세틸 CoA	0	0	0	
③ 크렙스회로	2	0	2	
④ 전자전달계	34	0	34	30 ATP ← 10 NADH
⑤ 화학삼투인산화				4 ATP ← 2 FADH ₂
계	40	2	38	

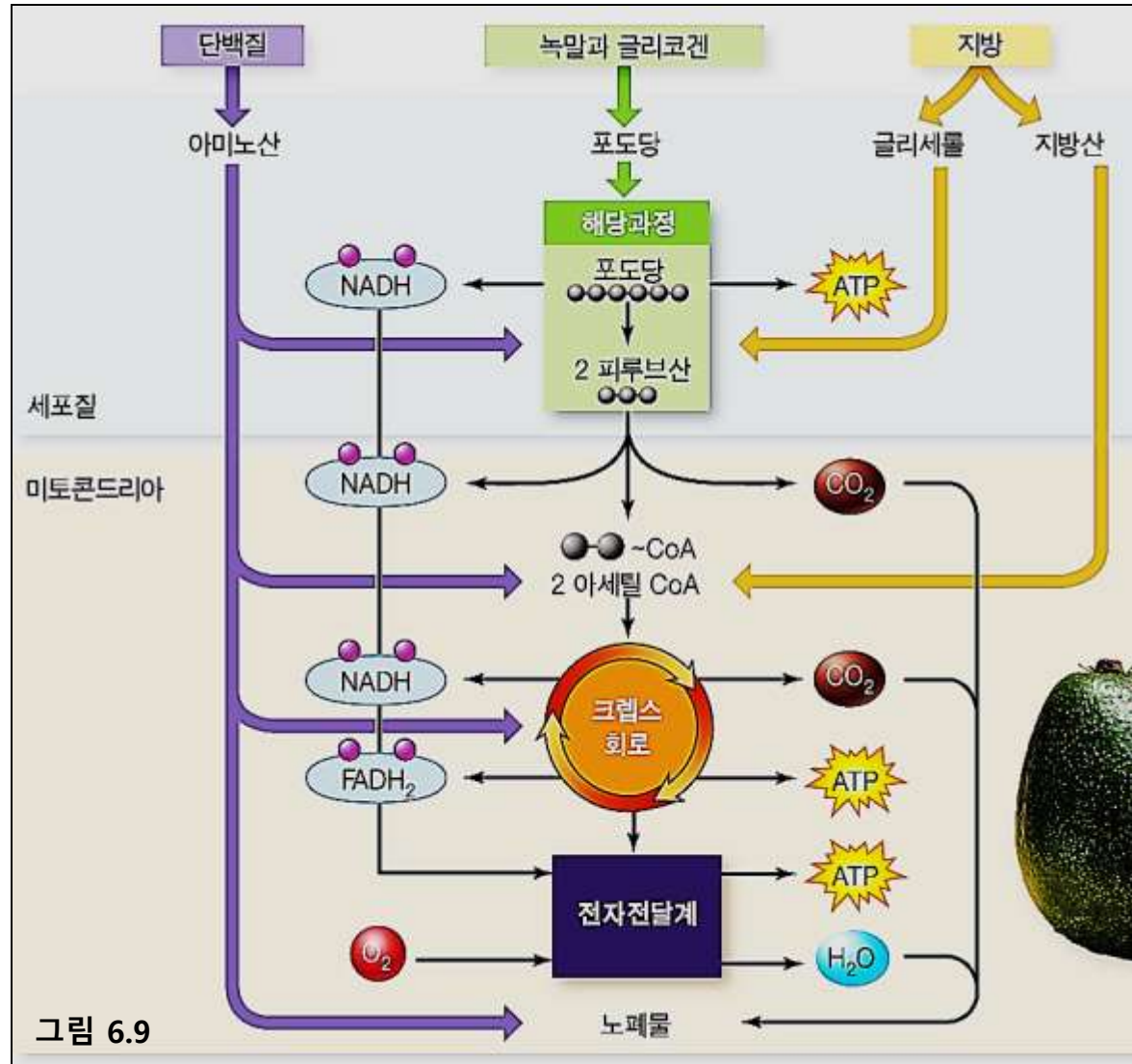
■ 실제 생산한 ATP는 약 30개 정도

- 피루브산과 ADP를 기질로 운반하는데 에너지를 사용하며,
- 일부 양성자는 미토콘드리아 내막에서 누출된다.
- 따라서 포도당에 저장된 에너지의 68%는 열로 손실된다.



6.7 음식물 분자는 에너지 추출경로로 들어간다

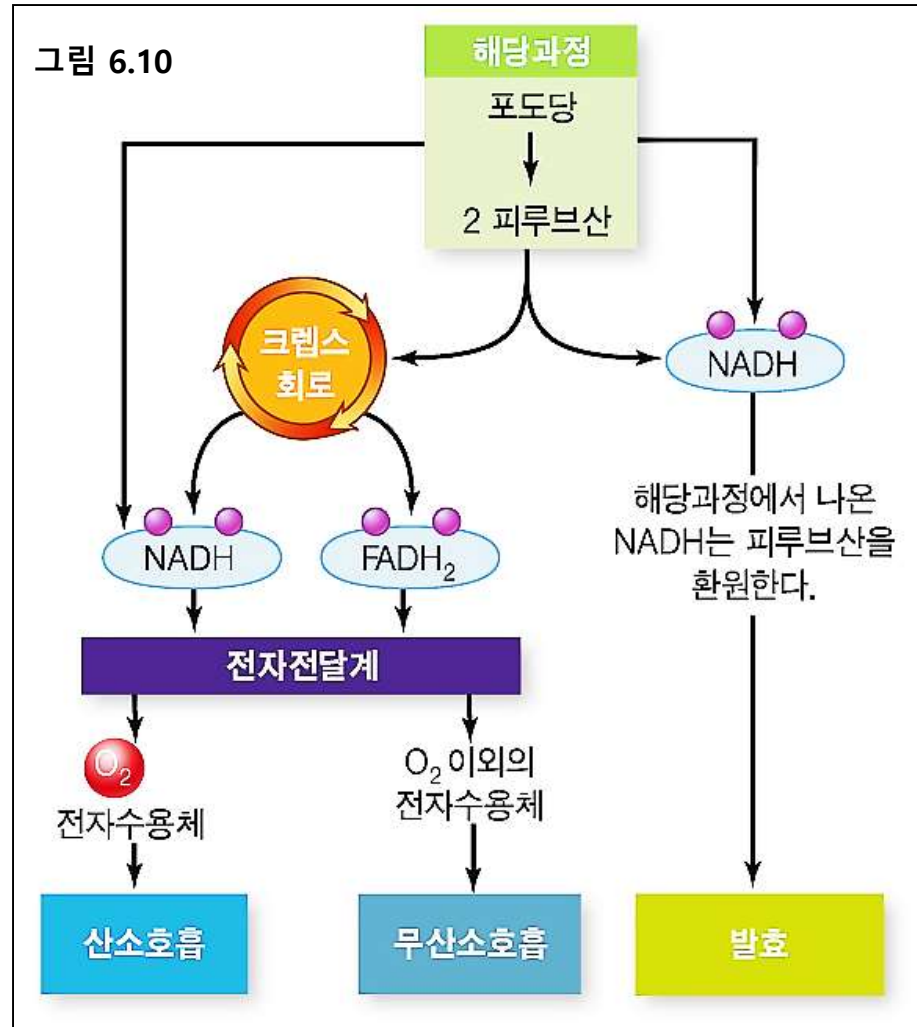
- 음식물은 소화되어, 아미노산, 포도당, 지방산, 글리세롤의 단량체로 흡수 되는데,
- 단백질은 해당과정, 아세틸CoA, 크렙스회로의 여러 지점으로 들어가 ATP를 생성한다
- 지방산은 20개 이상의 탄소를 가지고 있어 어떤 다른 음식물 분자보다 그램당 더 많은 에너지를 가진다
- ✓ 2 탄소 조각은 지방조직에 에너지 용도로 저장



6.8 산소를 필요로 하지 않는 에너지 생산경로

무산소호흡은 대체 전자수용체를 사용한다

- 산소호흡은 전자전달계의 마지막 단계에서 산소를 사용 하지만,
- 산소를 필요로 하지 않는 호흡은 무산소 호흡과 발효이다
- 무산소 호흡은 전자전달계에서 산소(O_2) 이외의 대체 전자수용체를 사용한다
- 대체 전자수용체는 NO_3^- (질산염), SO_4^{2-} (황산염), CO_2 (이산화탄소)이다
 - 질산염 → 질소가스(N_2) 방출
 - 황산염 → 황화수소(H_2S) 방출
 - 이산화탄소 → 메탄가스(CH_4) 방출
- 에너지 ATP 수율은 산소호흡 보다 낮다
- 세균과 고세균이 사용한다.

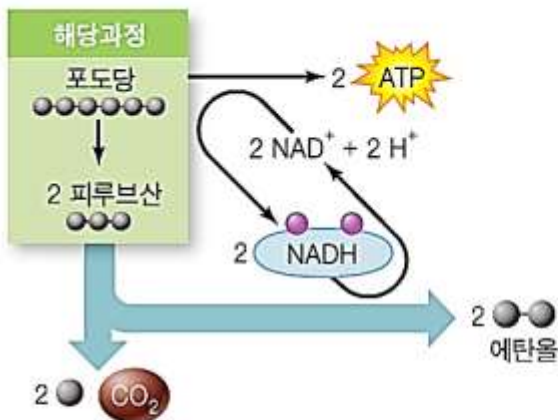


발효생물은 해당과정에서만 ATP를 얻는다

- 산소 호흡의 해당과정에서 생성된 NADH의 전자는 피루브산을 산화시키며 전자전달계에서 사용하지만, 발효는 모두 사용하지 않는다
- 발효는 해당과정에서 ATP를 생산하며, 산업적으로 중요하다
- 알코올발효(alcoholic fermentation): 효모
- 젖산발효(lactic acid fermentation): 젖산 간균(*Lactobacillus*), 사람의 근육세포

그림 6.11

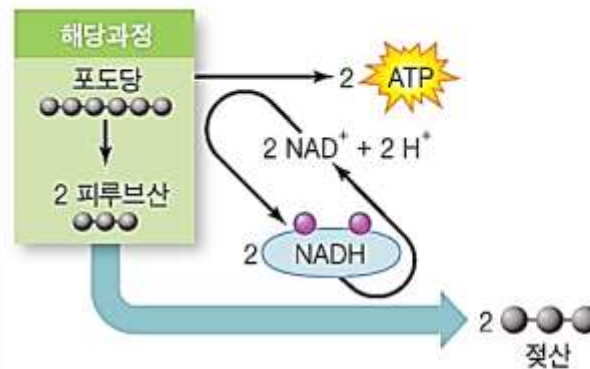
(A) 알코올발효



맥주 발효

투입	산물
2 포도당	2 에탄올 + 2 CO ₂
2 NAD ⁺	2 NADH + 2 H ⁺

(B) 젖산발효



요구르트의 젖산간균
1 μm SEM
(색칠한 것)

투입	산물
2 포도당	2 젖산
2 NAD ⁺	2 NADH + 2 H ⁺

발효에 의한 CO₂ 생산

- 밀폐된 용기에 설탕과 함께 첨가한 효모는 CO₂를 생산하여 스포이드를 부풀게 한다
설탕 농도가 25% 이상이 되면 고 농도로 효모가 죽으므로 발효를 잘 하도록 하려면
농도 조절이 중요하다
- 빵을 만들 때 알코올 발효로 발생하는 CO₂는 빵을 부풀게 한다



용어