

광합성

22

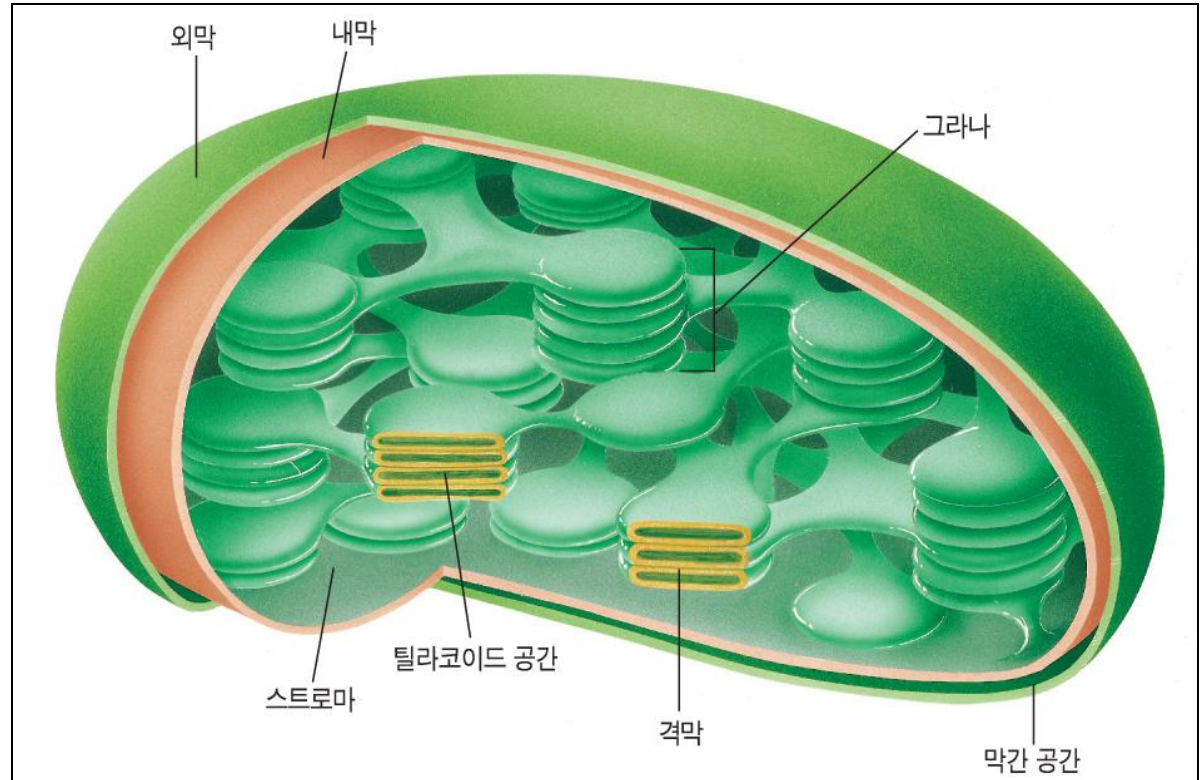
# 광합성이란?

- ①  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2 \rightarrow \rightarrow$  녹말
- ② 명 (light) 반응과 암 (dark) 반응으로 구성
- ③ 엽록체의 클로로필에 의한 빛의 흡수가 화학적 에너지로 전환

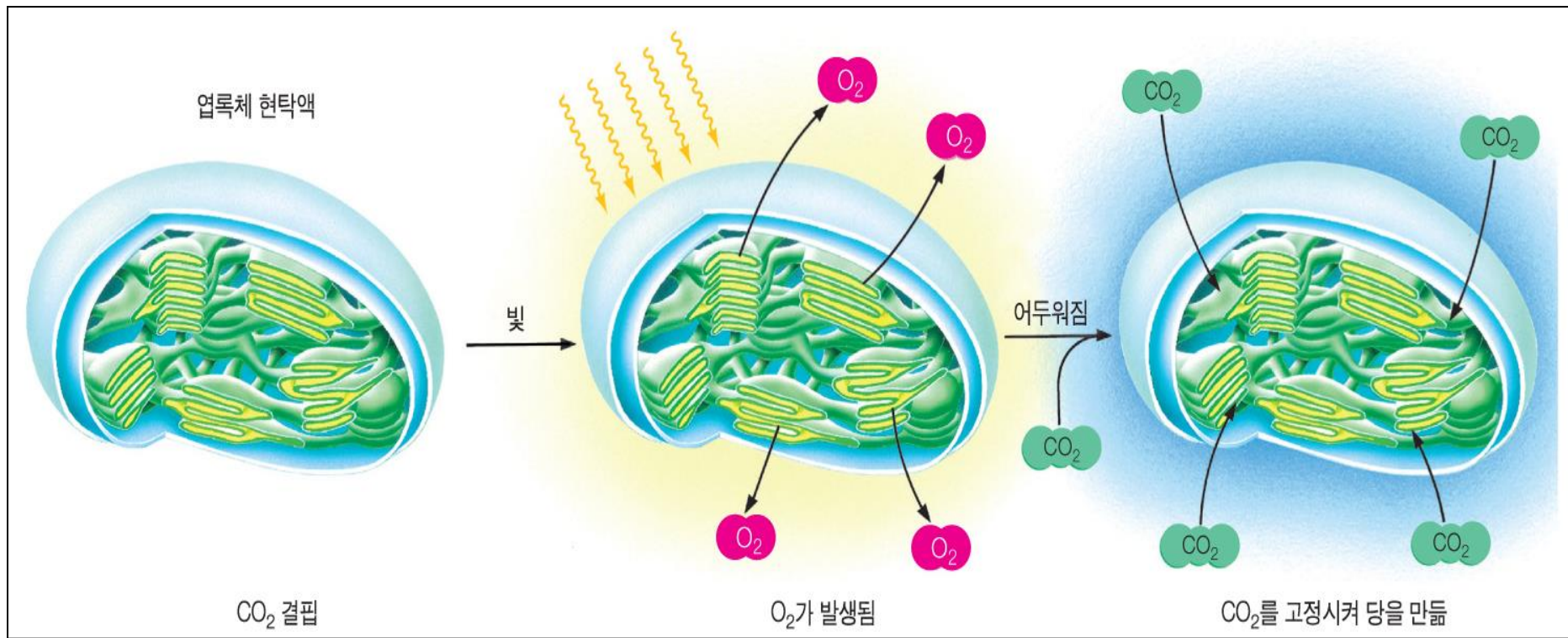
물분자로부터 발생된 전자가 광합성계를 거치는 동안 발생된 proton gradient가 ATP 합성 및 NADPH 합성  
→ 이것은 stroma에서 당 합성에 이용됨

# 그림 22.1 엽록체의 막 구조.

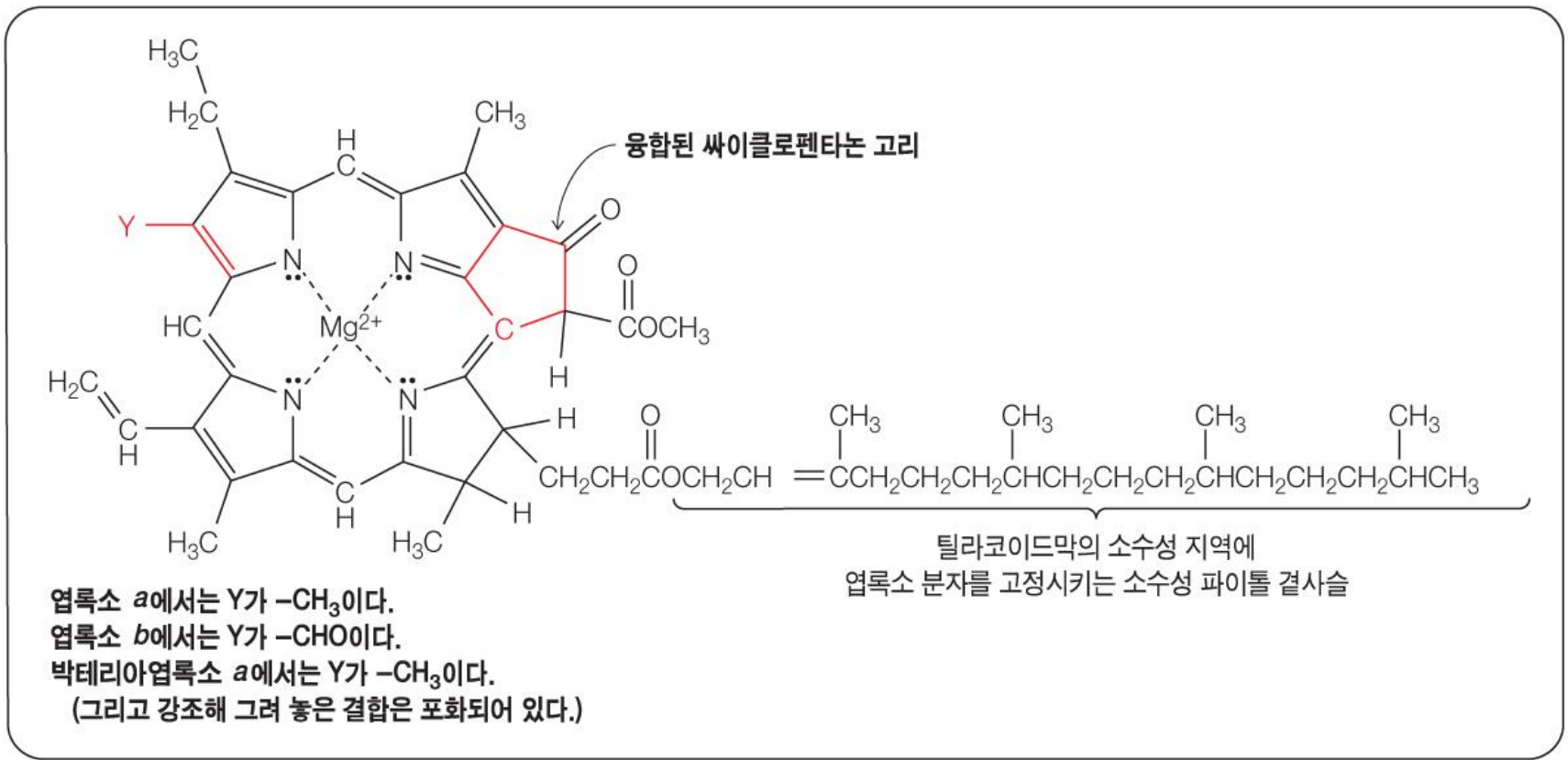
- 그라나
- 스트로마
- 틸라코이드막



**그림 22.2** 광합성의 광-의존성 반응과 광-비의존성 반응. 광-의존성 반응(명반응)은 틸라코이드막과 연관되어 있으며, 광-비의존성 반응(암반응)은 스트로마와 연관되어 있다.



# 그림 22.3 엽록소 a, 엽록소 b와 박테리아엽록소 a의 분자구조.

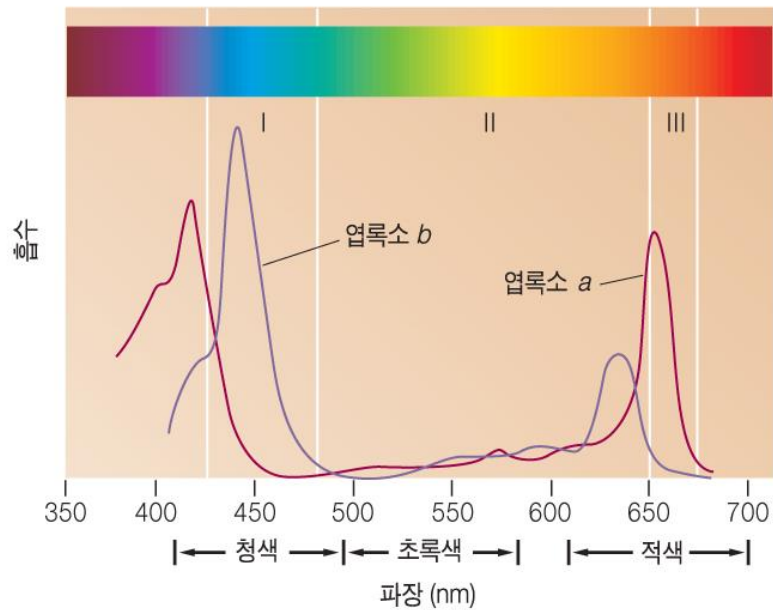


클로로필: Mg porphyrin. 파이톨(Phytol)과 결합한 에스테르  
 클로로필 a : 클로로필 b = 2 : 1 (methyl group : formyl group)

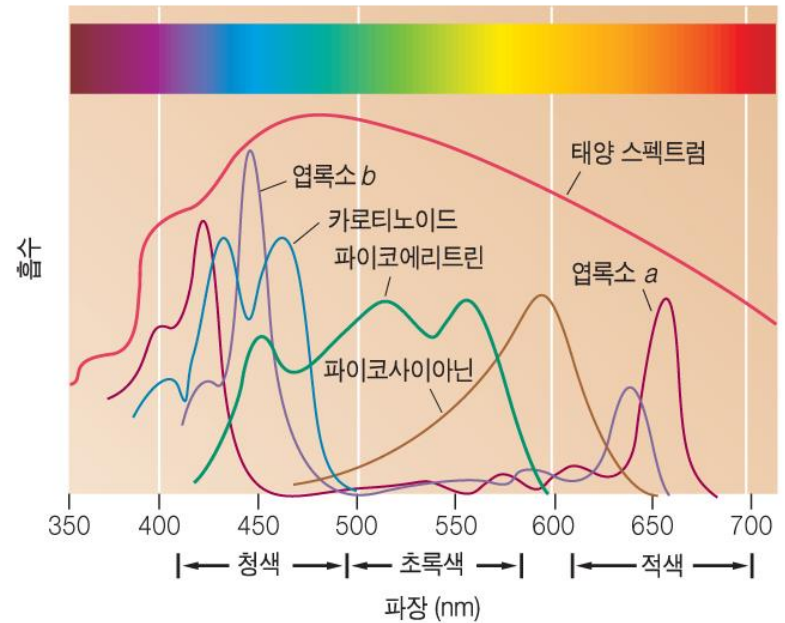
## 클로로필의 역할

- 클로로필에 의한 빛의 흡수는 광합성에 필요한 에너지를 공급한다.
- 기타 색소성분에 의해 흡수된 다양한 파장의 빛은 클로로필로 전달되어 광합성에 활용된다.
- 클로로필 분자(안테나 클로로필)는 빛을 모아 반응중심이라 불리는 광합성계로 전달한다
- 클로로필은 단백질에 결합되어 있다.

# 그림 22.4 엽록소의 가시광선 스펙트럼.



**A** 엽록소 *a*와 *b*에 의한 가시광선의 흡수. I, II, III으로 표시된 곳은 엽록체가 활성을 띠는 스펙트럼 구간이다. 주 흡수 피크에 가까운 I과 III 구간에서 더 높은 활성을 나타낸다. I과 III 구간의 빛이 엽록체에 흡수될 때에는 많은 산소가 생성된다. 일부 보조색소가 빛을 흡수하는 II 구간에서는 활성이 좀 더 낮게 나타나지만 측정 가능한 정도이다.



**B** 보조색소에 의한 빛의 흡수(엽록소 *a*와 *b*의 흡수와 겹쳐서 나타냄). 보조색소는 빛을 흡수하여 그 에너지를 엽록소로 전달한다.

# 빛의 진동수, 파장, 에너지와의 관계



진동수가 제일 높음



진동수가 제일 낮음( $\nu$ )

에너지가 제일 높음



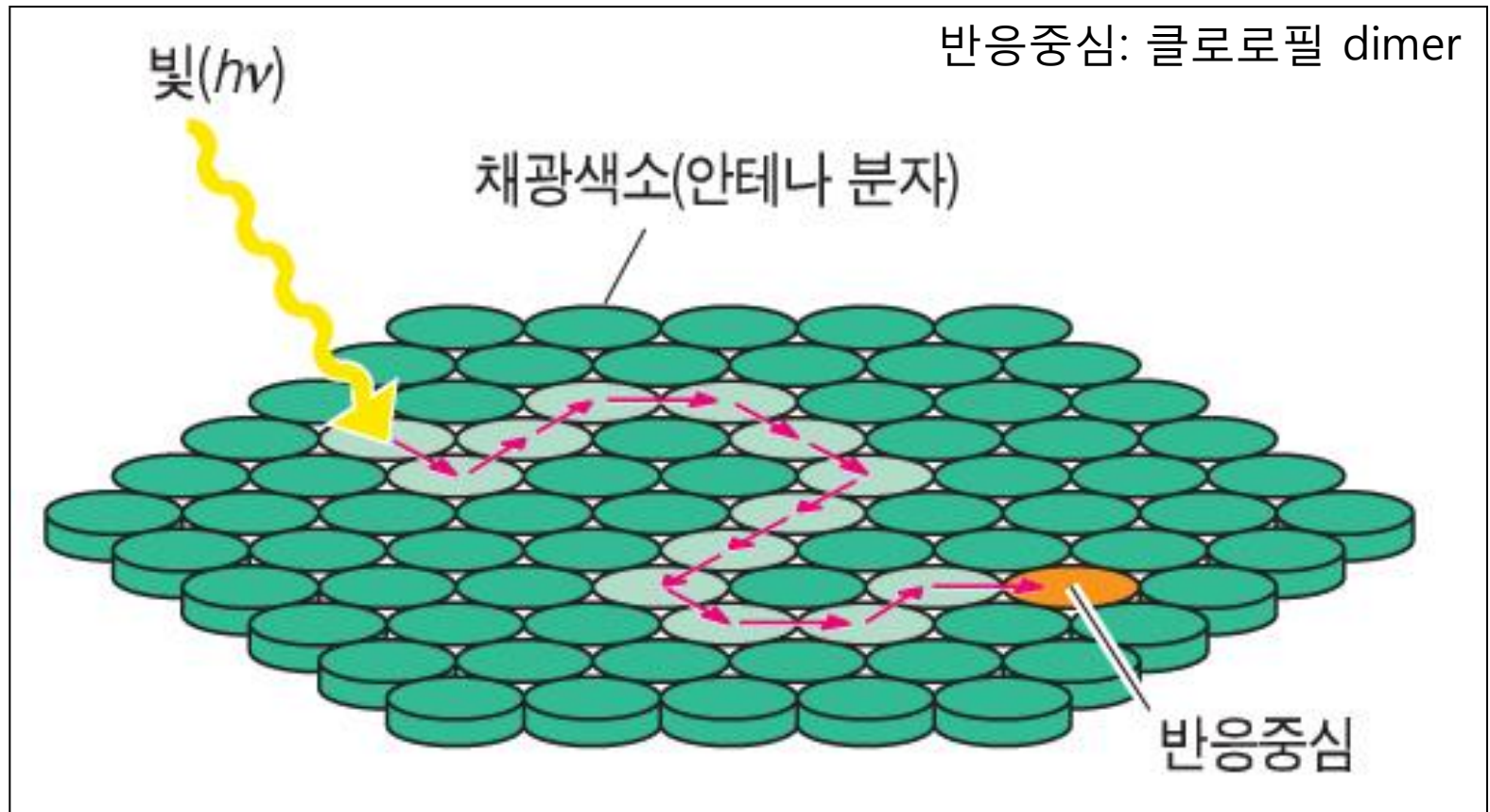
에너지가 제일 낮음( $E$ )

파장이 제일 짧음



파장이 제일 김( $\lambda$ )





**그림 22.5** 광합성 단위체의 개요도. 채광색소 또는 안테나 분자(녹색)는 빛에너지를 흡수하여 반응중심을 구성하고 있는 특수화된 엽록소 2량체(주황색)로 전달한다.

# 광합성이란?

- **명반응:**

electron transfer processes

water is oxidized to produce oxygen

NADP<sup>+</sup> is reduced to produce NADPH

- **암반응:**

electron transfer processes

carbon dioxide is reduced to carbohydrates



## 명반응-Hill reaction, 광인산화반응

- 엽록소가 빛에너지를 흡수하여 ATP와 NADPH의 화학 에너지로 전환하는 과정이다.
- 엽록체의 그라나(틸라코이드 막)에서 일어난다.
- 광합성 색소가 빛에너지를 흡수하여 일어나는 반응이므로 빛이 필요하다.
  
- 물의 광분해 :  $H_2O$ 이 분해되어  $O_2$ 가 방출되는 과정이다.
  
- 광인산화 : 전자의 전달 과정을 통해 암반응에서 포도당을 합성하는 데 필요한 ATP와 NADPH가 생성되는 과정이다.(포도당 1분자당 18 ATP와 12 NADPH 필요)

# 명반응-Hill reaction, 광인산화반응

- 물이 산소로 전환되고 NADPH가 생성되는 과정

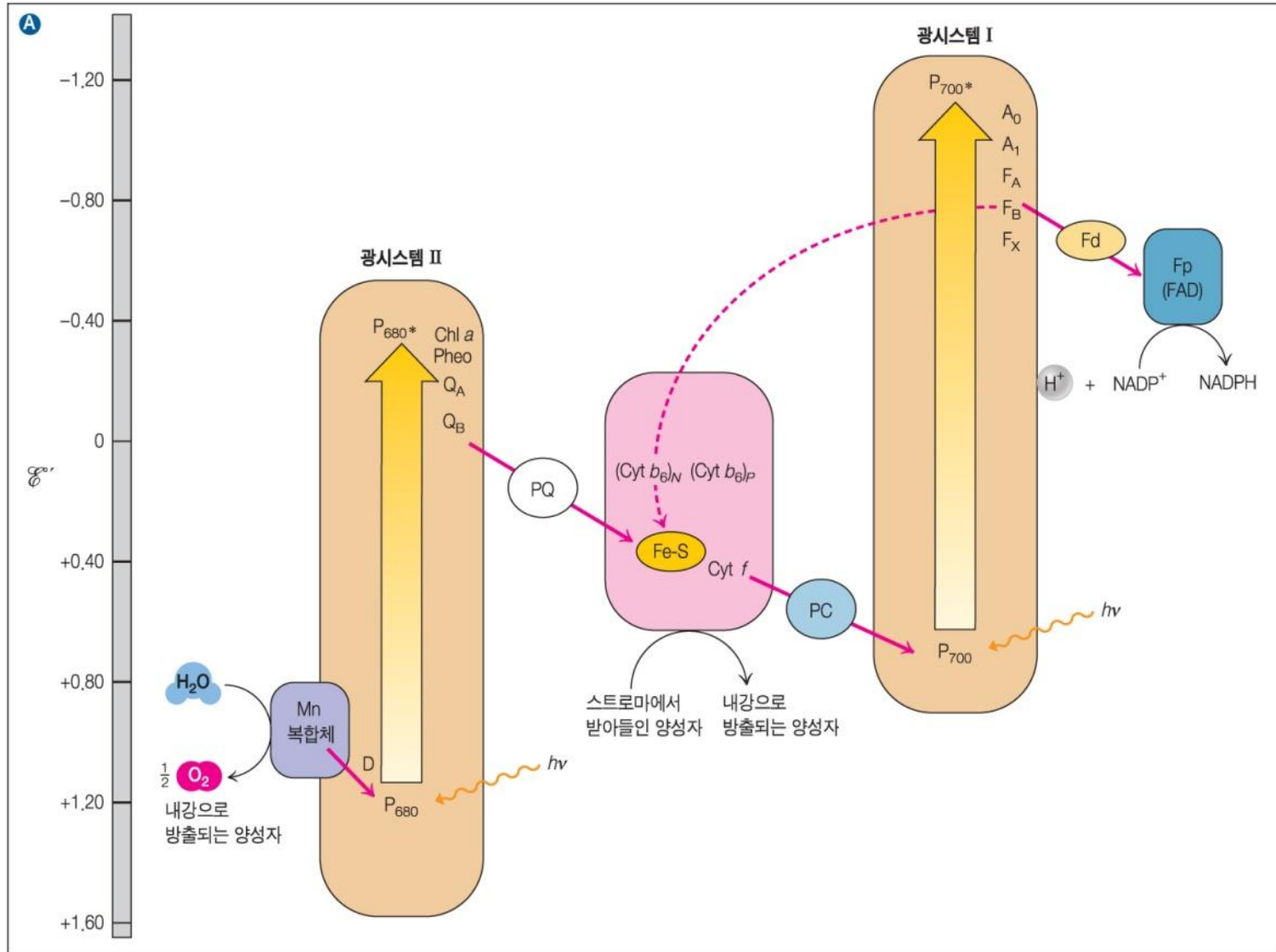


- 광반응계 I (PSI, P<sub>700</sub>) 700nm보다 파장이 짧은 빛을 받아들여 이용함  $\text{NADP}^+ \rightarrow \text{NADPH} + \text{H}^+$

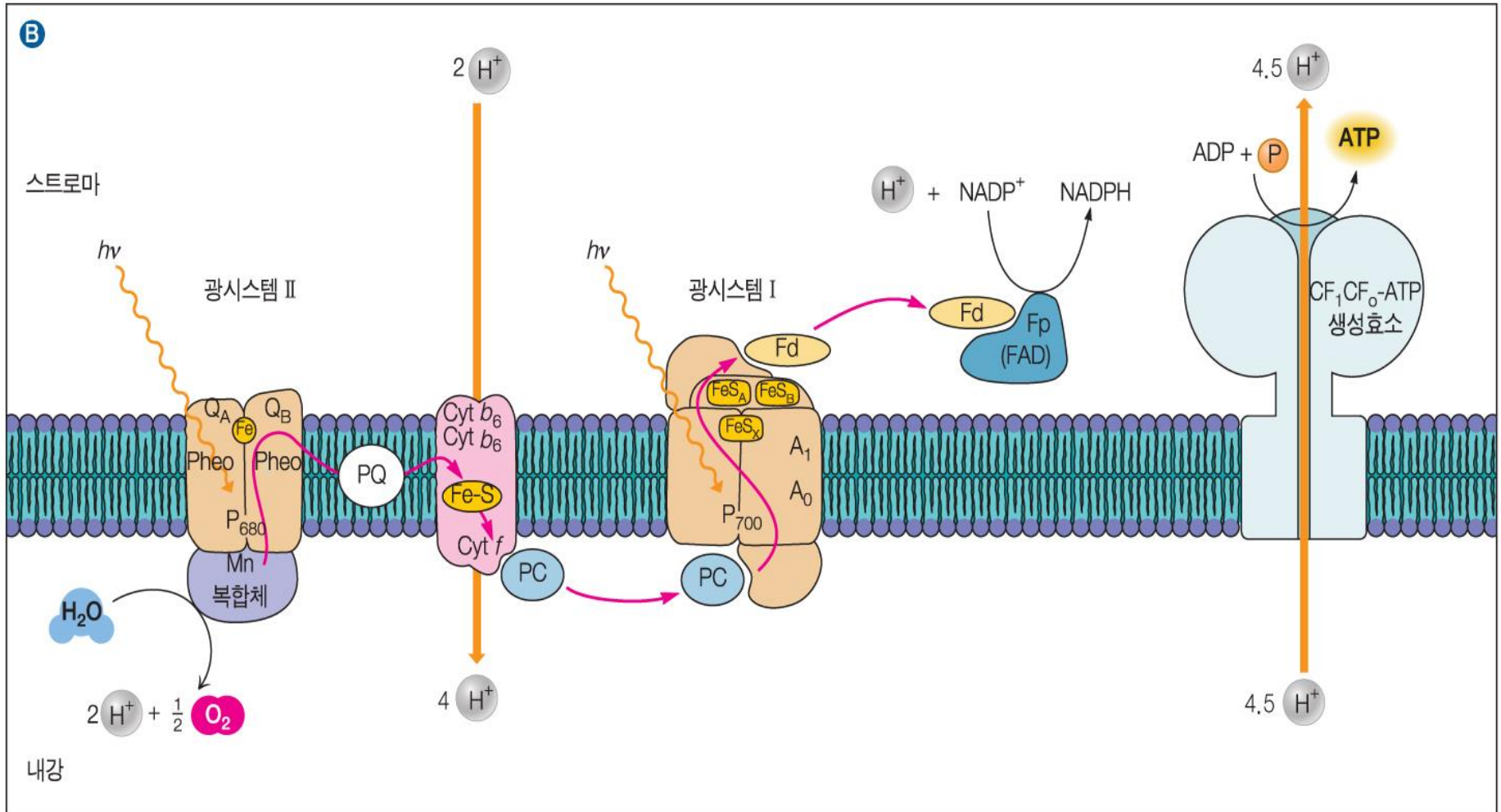
- 광반응계 II (PSII, P<sub>680</sub>) 680nm보다 파장이 짧은 빛을 받아들여 이용함  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2$

- **광인산화:** NADPH로 환원되는 반응이 ATP 인산화 반응과 연결되어 일어난다. ( $\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP}$ )

# 명반응의 3 단계: Z 도표



# 명반응 총 정리

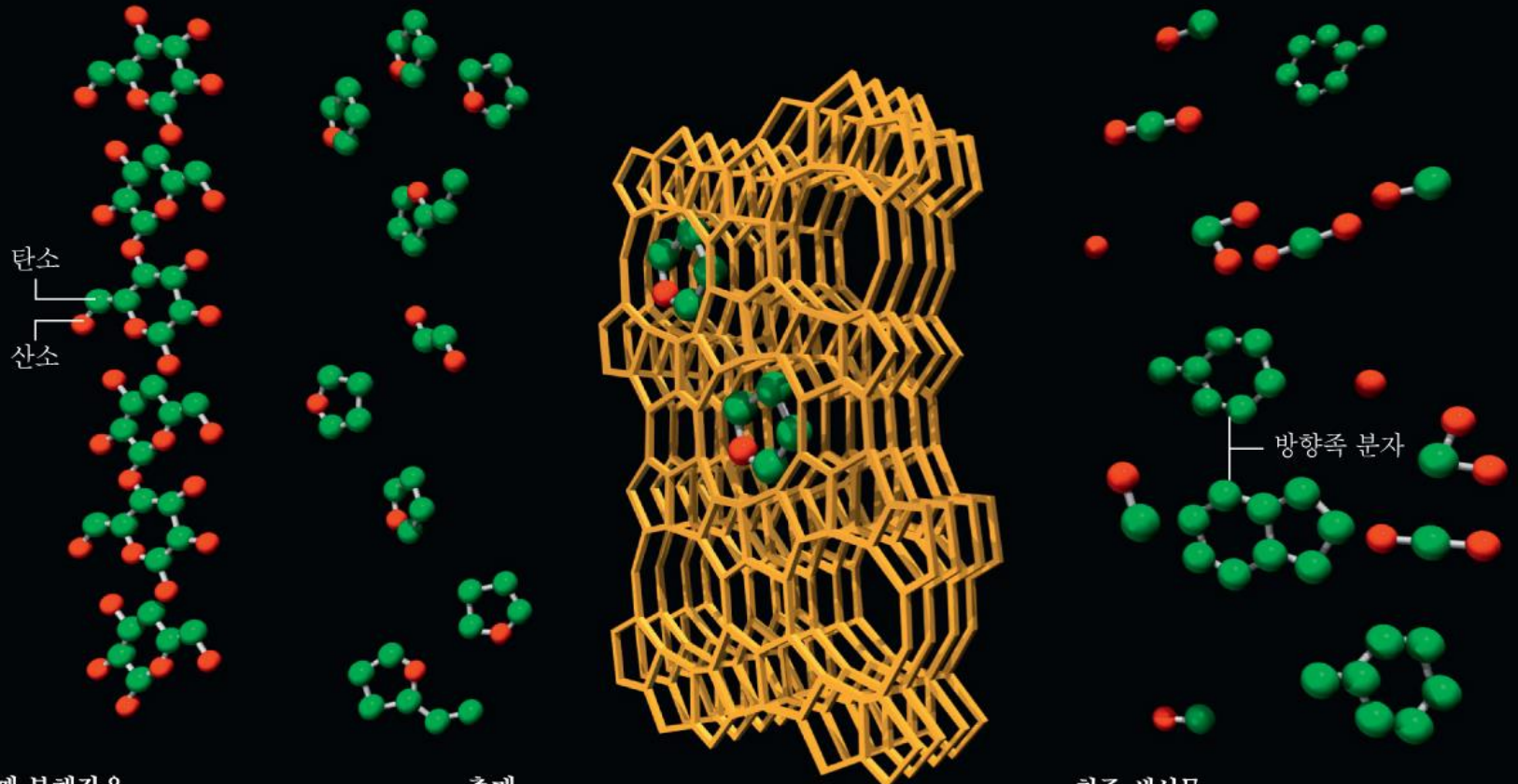


# ATP 합성 기작

- ① 화학삼투이론 ← 산화적인산화 과정
- ② Proton-motive force
- ③  $CF_0$ - $CF_1$  ATP 합성효소에 의해 ATP합성
- ④ 전자전달계: PSI, PSII, cytochrome  $b_{6-f}$  complexes  
soluble carriers PQ and PC
- ⑤ ATP 합성은 빛이 없는 곳에서도 일어난다

# 바이오 연료의 생산: 셀룰로오스를 휘발유로 전환

경제성 ?



## 첫 번째 분해작용

반응기에 넣은 셀룰로오스는 수 초 이내에 500°C로 가열되어, 더 작고 산소가 풍부한 분자로 분해된다.

## 촉매

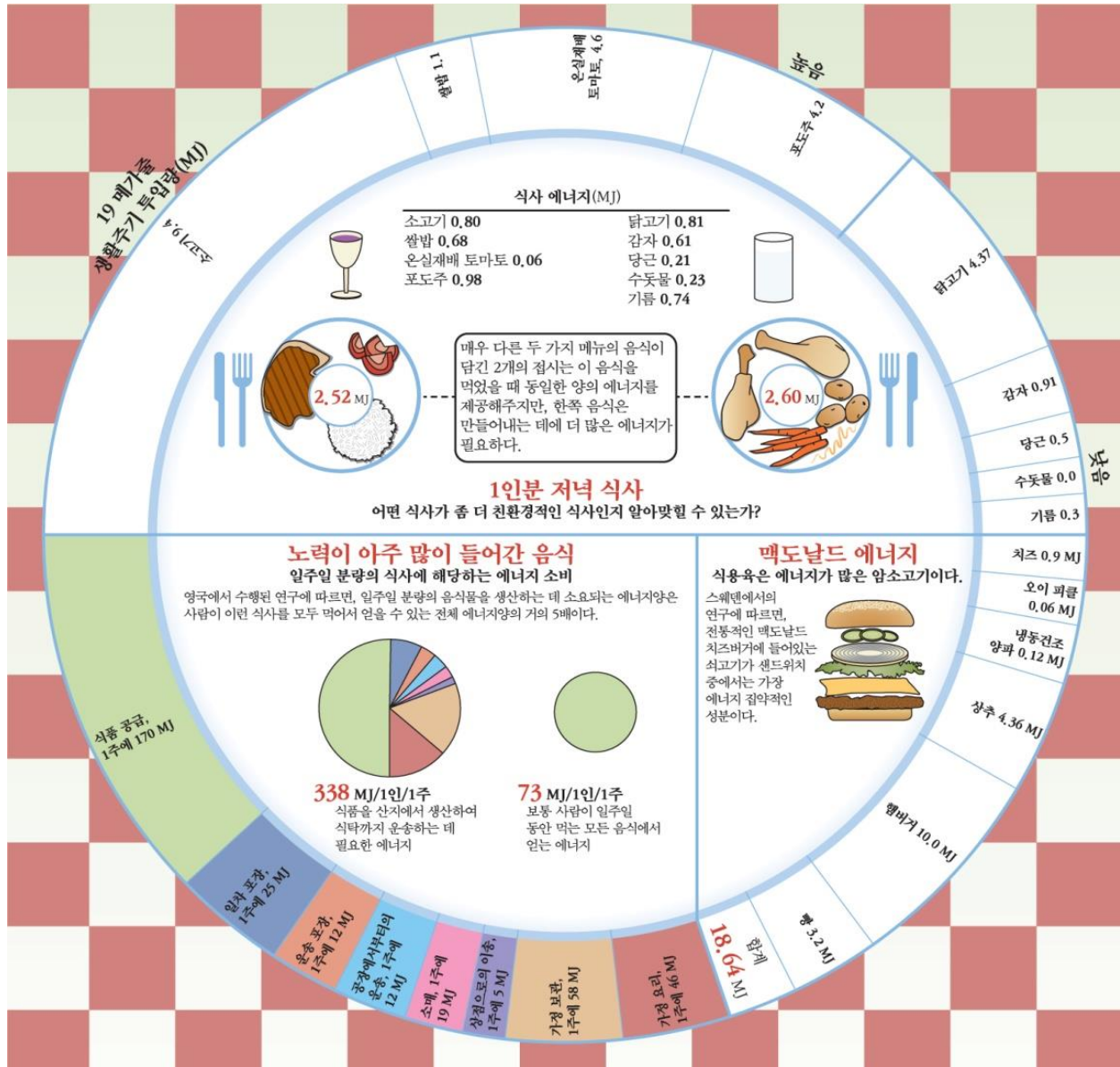
이렇게 분해된 조각들은 정밀한 삼차원 촉매에 꼭 맞게 된다. 이런 촉매는 화학반응을 촉진시켜 셀룰로오스 조각에서 산소를 제거하고 탄소 고리를 만든다. 자세한 화학과정은 아직 잘 모른다.

## 최종 생성물

반응 후에는—반응은 단지 몇 초 만에 끝남—셀룰로오스가 휘발유의 방향족 성분으로 전환된다. 반응 부산물에는 물(표시 안 됨), 이산화탄소, 일산화탄소 등이 들어 있다.



# 식량작물 생산에 필요한 에너지



## 암반응

①  $\text{CO}_2 \rightarrow$  녹말로 전환

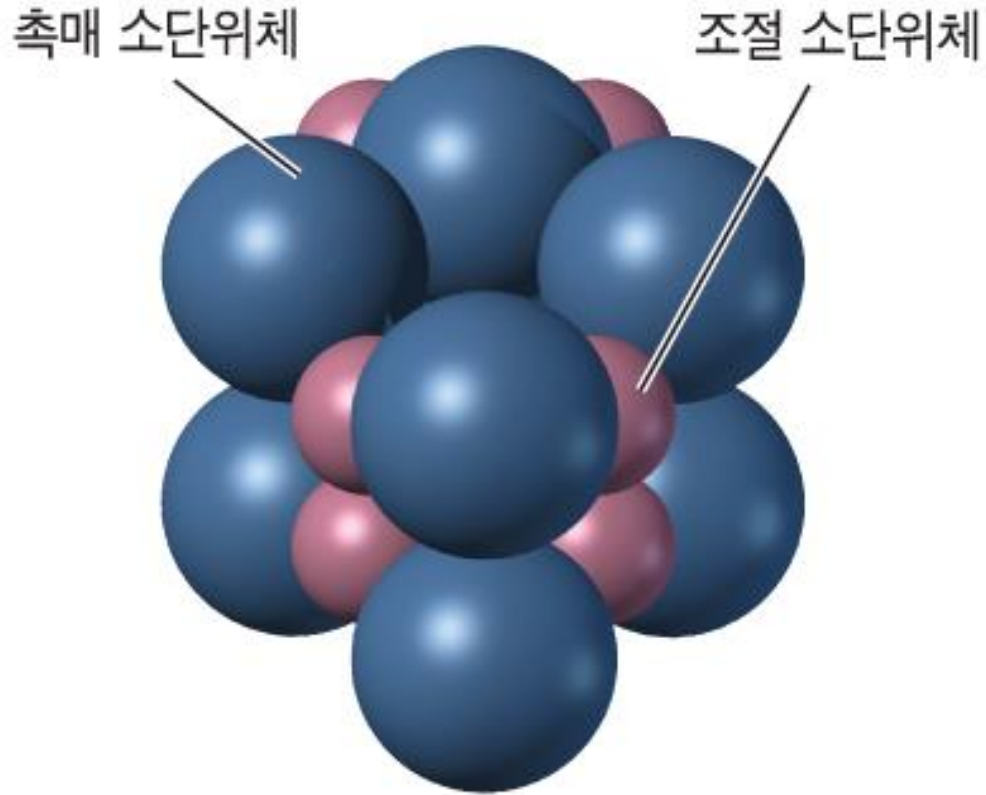


② 캘빈회로 : 1961 노벨화학상

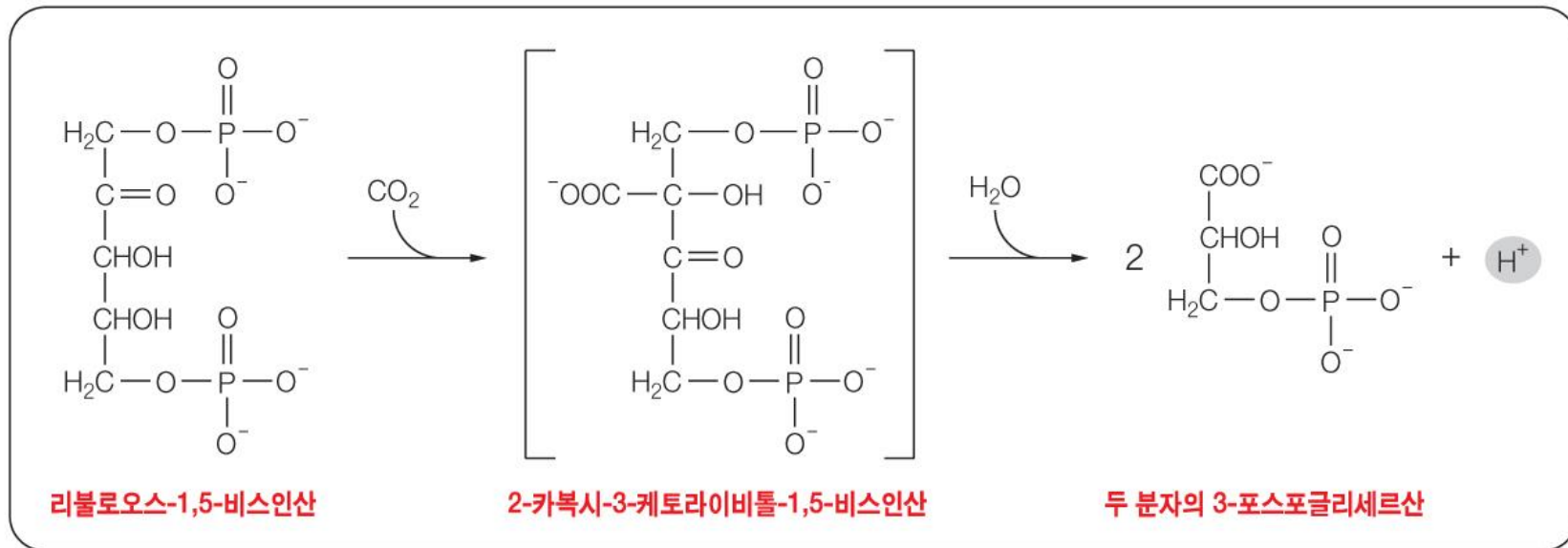
③ 리불로오스 1,5-비스인산 카복실화효소의 역할 발견  
(Ru-1,5-BP carboxylase (루비스코:Rubisco))

- 틸라코이드막에 박혀 스트로마 쪽을 향하고 있다.
- 엽록체 전체 단백질의 15%를 차지
- 자연계에서 가장 많은 양의 단백질
- 분자량 56만 달톤

# 리불로오스 1,5-비스인산 카복실화효소의 소단위체



# 캘빈회로의 첫번째 반응



리불로오스 1,5-비스인산 카복실화효소는 CO<sub>2</sub>와 반응하여 2 분자의 3탄당을 만든다.



# 캘빈회로의 여러 반응

표 22.1 캘빈 회로의 일련의 반응

반응 1~15는 한 분자의 글루코오스를 생성하는 회로를 구성하고 있다. 각 단계의 반응과 이 반응들을 촉매하는 효소를 간단하게 나타냈고, 각 반응에서의 전체 탄소수를 대조하여 나타냈다. 괄호 안의 숫자는 기질과 생성물 분자의 탄소수를 나타낸 것이다. 괄호 앞의 숫자는 균형이 맞는 알짜반응이 일어나기 위해서 각 단계가 몇 번씩 수행되어야 하는지를 화학양론적인 방식으로 나타낸 것이다.

1. 리불로오스 비스인산 카복실화효소/옥시지네이스: $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ RuBP} \rightarrow 12 \text{ 3-PG}$	$6(1) + 6(5) \rightarrow 12(3)$
2. 3-포스포글리세르산 인산화효소: $12 \text{ 3-PG} + 12 \text{ ATP} \rightarrow 12 \text{ 1,3-BPG} + 12 \text{ ADP}$	$12(3) \rightarrow 12(3)$
3. $\text{NADP}^+$ -글리세르알데하이드-3-인산 탈수소효소: $12 \text{ 1,3-BPG} + 12 \text{ NADPH} \rightarrow 12 \text{ NADP} + 12 \text{ G-3-P} + 12 \text{ P}_i$	$12(3) \rightarrow 12(3)$
4. 3탄당인산 이성화효소: $5 \text{ G-3-P} \rightarrow 5 \text{ DHAP}$	$5(3) \rightarrow 5(3)$
5. 알돌레이스: $3 \text{ G-3-P} + 3 \text{ DHAP} \rightarrow 3 \text{ FBP}$	$3(3) + 3(3) \rightarrow 3(6)$
6. 프락토오스 비스인산 탈인산효소: $3 \text{ FBP} + 3 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ F-6-P} + 3 \text{ P}_i$	$3(6) \rightarrow 3(6)$
7. 포스포글루코오스 이성화효소: $1 \text{ F-6-P} \rightarrow 1 \text{ G-6-P}$	$1(6) \rightarrow 1(6)$
8. 글루코오스-6-인산 탈인산효소: $1 \text{ G-6-P} + 1 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 1 \text{ 글루코오스} + 1 \text{ P}_i$	$1(6) \rightarrow 1(6)$

경로의 나머지 부분은 2 F-6-P(12 C), 4 G-3-P(12 C)와 2 DHAP(6 C)에서 6 RuBP 수용체 (30 C)를 재생시키는 과정이다.

9. 케톨전이효소: $2 \text{ F-6-P} + 2 \text{ G-3-P} \rightarrow 2 \text{ Xu-5-P} + 2 \text{ E4P}$	$2(6) + 2(3) \rightarrow 2(5) + 2(4)$
10. 알돌레이스: $2 \text{ E4P} + 2 \text{ DHAP} \rightarrow 2 \text{ SBP}$	$2(4) + 2(3) \rightarrow 2(7)$
11. 시도헵톨로오스 비스인산 탈인산효소: $2 \text{ SBP} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ S-7-P} + 2 \text{ P}_i$	$2(7) \rightarrow 2(7)$
12. 케톨전이효소: $2 \text{ S-7-P} + 2 \text{ G-3-P} \rightarrow 2 \text{ Xu-5-P} + 2 \text{ R-5-P}$	$2(7) + 2(3) \rightarrow 4(5)$
13. 인산5탄당 에피머레이스: $4 \text{ Xu-5-P} \rightarrow 4 \text{ Ru-5-P}$	$4(5) \rightarrow 4(5)$
14. 인산5탄당 이성화효소: $2 \text{ R-5-P} \rightarrow 2 \text{ Ru-5-P}$	$2(5) \rightarrow 2(5)$
15. 포스포리불로오스 인산화효소: $6 \text{ Ru-5-P} + 6 \text{ ATP} \rightarrow 6 \text{ RuBP} + 6 \text{ ADP}$	$6(5) \rightarrow 6(5)$
알짜 반응: $6 \text{ CO}_2 + 18 \text{ ATP} + 12 \text{ NADPH} + 12 \text{ H}^+ + 12 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{글루코오스} + 18 \text{ ADP} + 18 \text{ P}_i + 12 \text{ NADP}$	$6(1) \rightarrow 1(6)$

## 암반응 정리

- ①  $\text{CO}_2$ 는 5탄당인 리불로오스5인산(RuBP)에 결합하여 6탄당이 되어 2개의 3탄당(3-인산 글리세르산: 3-PGA)으로 쪼개어진다.  
이 때 RUBISCO 효소가 관여한다.
- ② 3-PGA 는 광반응에서 생산된 ATP와 NADPH에 의해 환원되어 G3P가 되고 G3P 2분자가 모여 육탄당인 포도당을 합성하는 데 쓰인다.
- ③ 나머지 G3P 분자들은 ATP에 의해 다시 RuBP가 되어  $\text{CO}_2$ 를 받아들인다. → 암반응이 계속된다.

암반응에는 C3 경로와 C4 경로가 있다.  
C3 식물과 C4 식물로 구분된다.

C<sub>3</sub> 식물 : 대부분의 식물

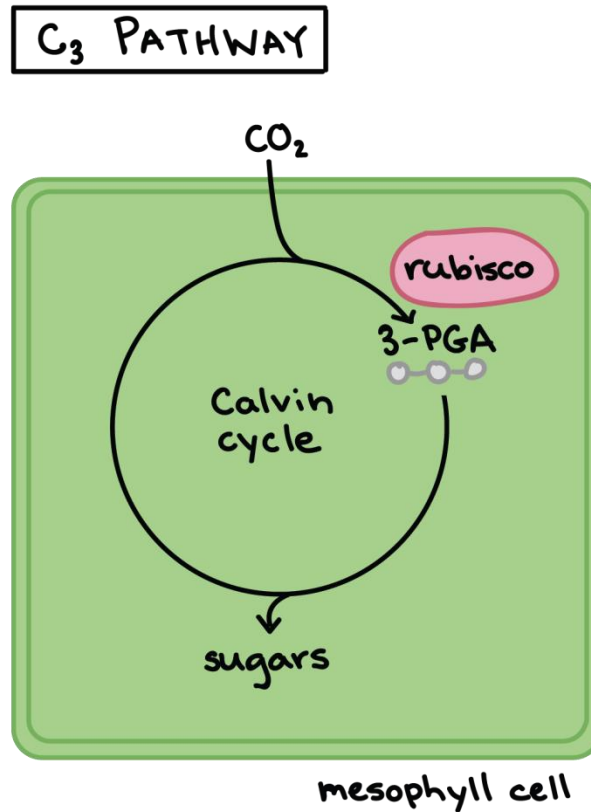
C<sub>4</sub> 식물 : 열대에 자라는 식물

사탕수수, 옥수수, 수수 등  
효율적으로 광합성을 한다.  
설탕이나 녹말 함량이 높다.



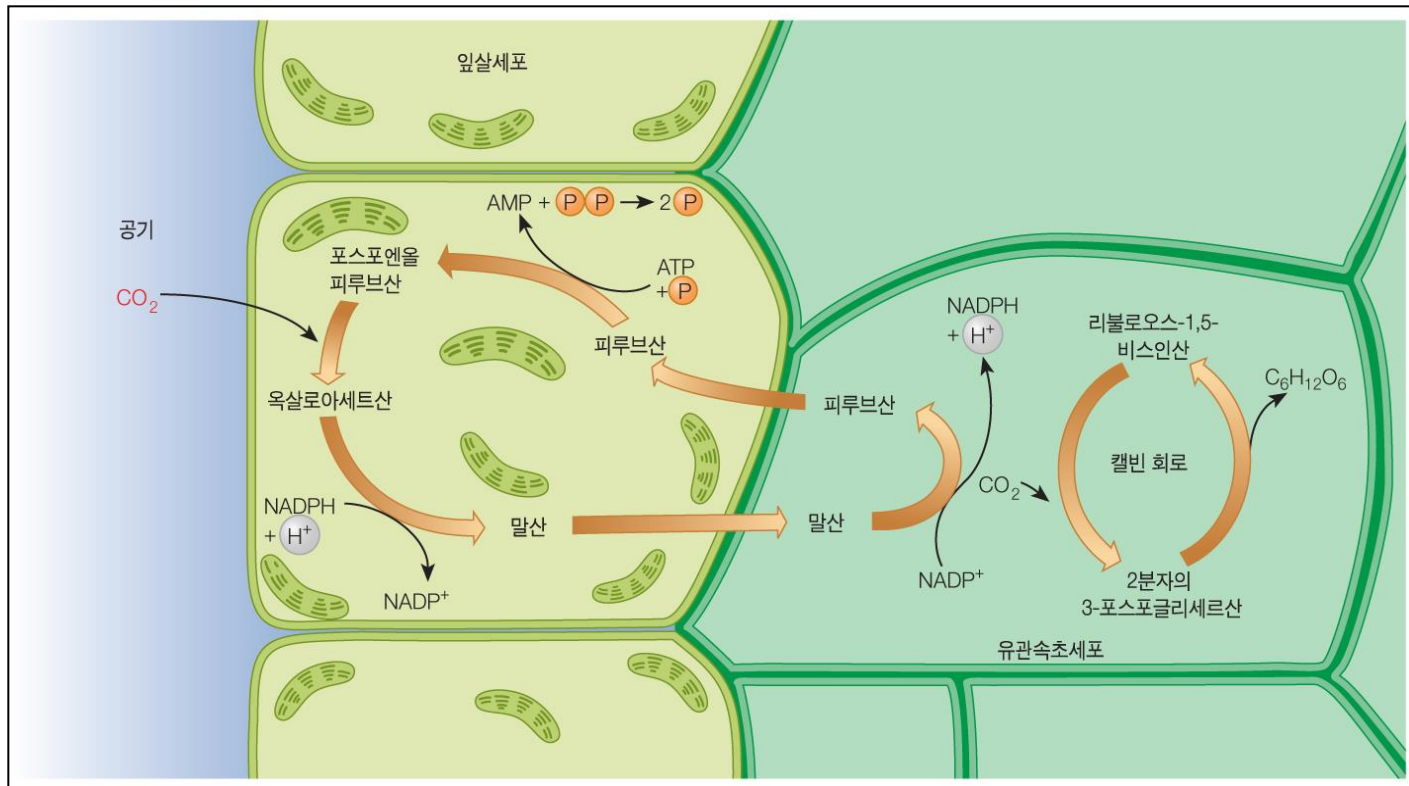
C3식물은 잎살세포에서만 암반응이 일어난다.

- 엽록체가 잎살세포에만 있다.



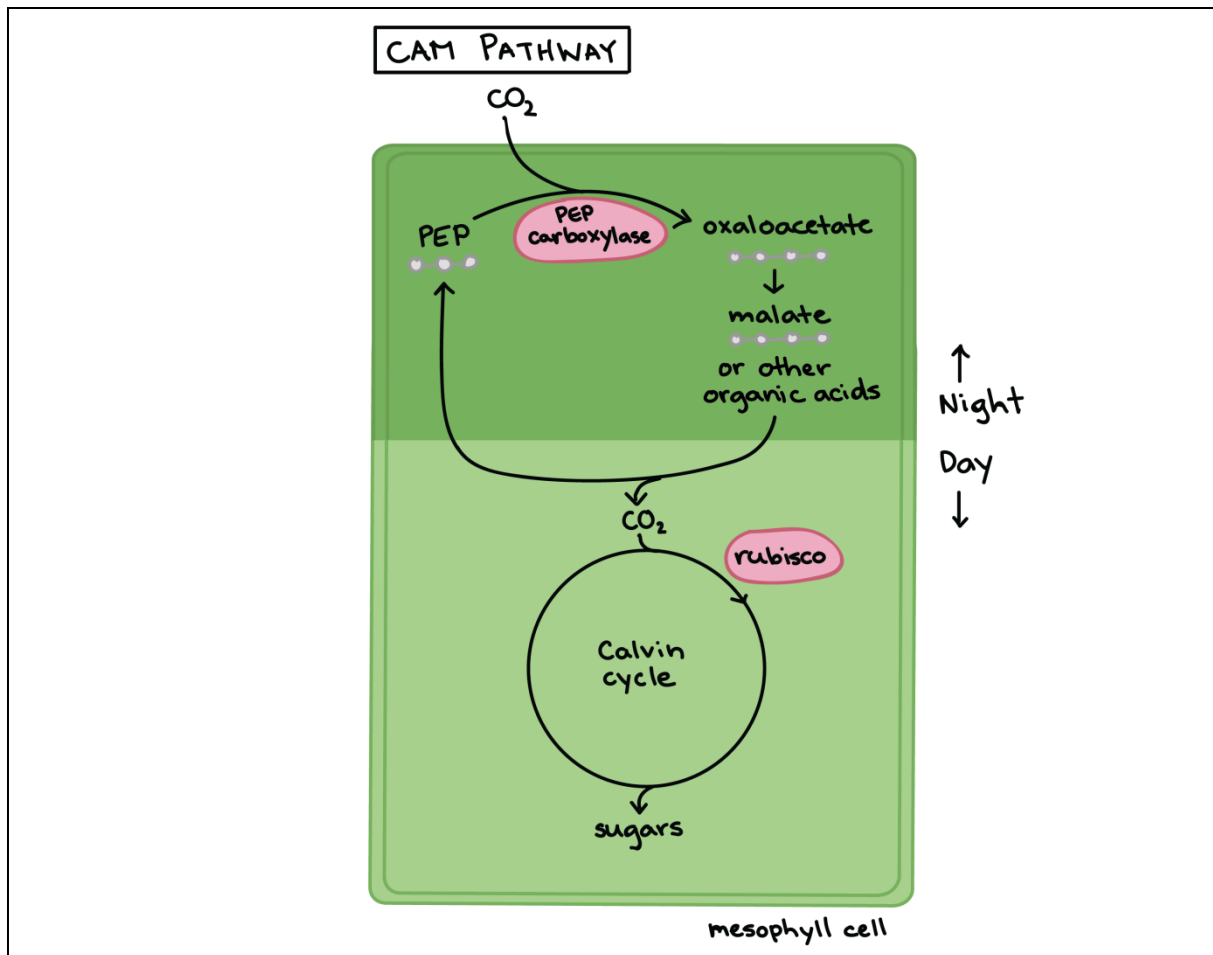
# C<sub>4</sub> 식물의 암반응 경로

암반응에서 탄소 4개짜리 화합물이 만들어진다.  
 잎살세포에서 CO<sub>2</sub> 를 1차적으로 고정하고  
 유관속초세포에서 캘빈회로가 일어난다.  
 엽록체가 잎살세포와 유관속초세포 모두에 있다.



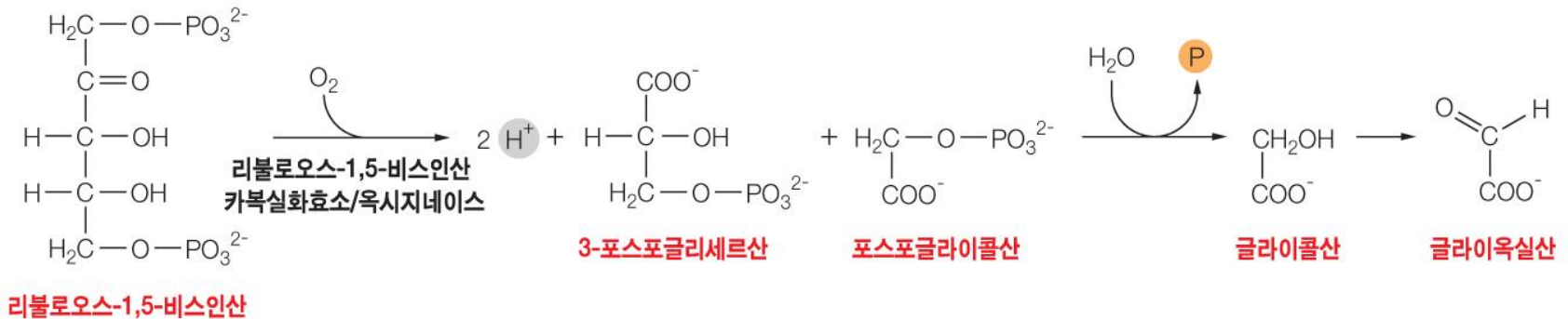
# 선인장의 암반응 (CAM 경로)

밤에 CO<sub>2</sub>를 1차 고정하고 낮에 녹말을 만든다.



# 광호흡이란?

- ① 빛이 있는 곳에서 일어난다.
- ② 리불로오스 1,5-비스인산 카복실화효소가 산소화효소(RUBP1,5-BP oxygenase)로 작용한다.
- ③ CO<sub>2</sub> 농도가 낮으면 산소와 반응하여 리불로오스 1,5-비스인산을 글라이옥시산으로 분해한다.



리불로오스 1,5-비스인산 카복실화효소는 산소화효소로도 작용한다.  
 → CO<sub>2</sub> 대신 산소와 반응하여 광합성의 효율을 떨어뜨린다.

## 광호흡이란?

- ① 광호흡은  $C_3$  식물에서 활발하다.
- ② 광호흡이 활발하면 암반응이 비효율적으로 일어난다.  
→ 녹말 생산이 적어진다.
- ③  $C_4$  식물은 광호흡이 적어 암반응이 효율적으로 일어난다. → 녹말 저장량이 많아진다.
- ④ 그 이유는 식물의 해부도가 다르기 때문이다.
- ⑤ 어떤 역할을 하는지는 알려져 있지 않으나 식물에게 필수적인 과정이다.

## C<sub>4</sub> 식물의 구조

- 기공이 작아 산소의 유입이 적다.
- 잎살세포가 유관속초세포를 둘러싸고 있어 산소와의 접촉을 최소화한다. → 광호흡을 최소화한다.
- 암반응은 잎살세포와 유관속초세포에서 나누어 일어난다.

