

2. 광합성

01. 광합성



초록색의 수플림

이 세상에서 가장 많은 색깔이 초록색이며 우리는 초록색을 생명과 연결시킨다. 식물의 초록색은 엽록소라는 색소 때문이며, 이 색소는 빛에너지를 화학에너지로 바꾸는 과정에서 중심적인 역할을 수행한다. 이 과정을 광합성이라고 하는데, 에너지 전환 뿐 아니라 모든 호기성 생물의 생존에 필요한 산소 역시 이 과정을 통해 발생된다.

따라서 광합성 과정은 종속영양생물의 에너지 원천을 제공하며 동시에 에너지를 발생하는데 필요한 산소까지 공급하는 매우 중요한 역할을 수행하고 있는 것이다. 광합성 과정이 어떻게 일어나며, 자연에서 식물은 어떠한 광합성 전략을 세워 적응하고 있는지 알아보자.

01

광합성

학·습·목·표

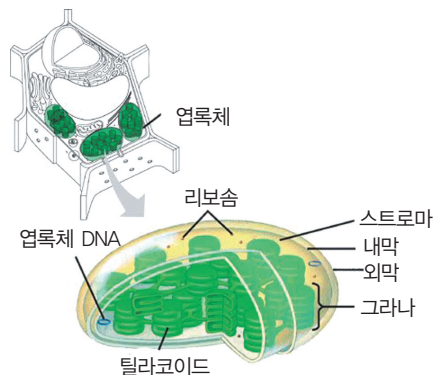
- 명반응과 암반응을 통해 광합성에 영향을 미치는 요인을 설명할 수 있다.
- 광합성을 통해 에너지가 전환되는 과정을 설명할 수 있다.
- 광합성과 호흡을 비교하여 설명할 수 있다.
- 환경에 적응한 식물의 광합성 전략을 설명할 수 있다.

광합성은 생물권에 에너지를 공급한다. 이산화탄소와 물로부터 1분자의 포도당을 만드는데 필요한 자유에너지 변화는 686kcal/mole이다. 이러한 막대한 에너지는 빛에너지로부터 온 것이다. 광합성 과정은 세포호흡 과정과 반대의 화학반응식으로 표기된다.



결국 광합성과 세포호흡은 상호 순환관계이며, 이러한 순환에 의해 지구상의 생명체는 유지된다고 할 수 있다.

엽록소는 식물이나 조류에서 발견되는 세포소기관인 엽록체에 존재하는 색소이다. 엽록체는 미토콘드리아처럼 외막, 내막, 그리고 틸라코이드막을 가지고 있는데, 이 틸라코이드막에 엽록소 분자가 끼워져 있다. 틸라코이드막은 납작한 주머니를 만들어 내강을 가지고 있고 이러한 구조는 차곡차곡 싸여 그라나를 형성한다. 그 이외의 액체가 가득한 공간은 스트로마라고 한다. 틸라코이드막에서 명반응이 일어나고 스트로마에서 암반응이 일어난다.



〈그림 II-15〉 엽록체의 구조

조사하기

엽록체를 가지고 있지 않은 원핵생물의 경우에는 빛을 흡수하는 색소들이 어디에 존재하는지 조사해 보자.

연구하기 1

미래형 식물공장 설계하기

광합성은 광합성 색소를 가지고 있는 생물들이 태양의 빛에너지를 저장하거나 운반할 수 있는 형태의 화학에너지로 전환시키는 과정이다. 지구 생태계를 유지하는 가장 기본적인 반응으로 광합성 생물 뿐만 아니라 그 이외의 다른 생물들의 생명활동을 가능하게 한다. 탐구활동을 통하여 광합성에 영향을 미치는 요인을 분석하고 실제로 적용 가능한 식물 공장을 설계함으로써 광합성의 전체 과정을 이해해보자.

탐구 활동 1

광합성 효율을 인위적으로 증대시킬 수 있을까?

광합성에 영향을 주는 요인을 이해하고, 자연적 혹은 인위적으로 광합성에 영향을 주고 있는 실제 사례를 찾아 분석함으로써 식량위기의 문제점을 진단하고 해결 방법을 제시해보자.

준비물

- 도구: 교재, 참고서적, 인터넷 가능한 컴퓨터

방법 및 절차

- (1) 광합성에 영향을 미치는 요인을 조사하고, 각 요인에 대한 인위적인 변화가 가능한지 조사하자.
- (2) 정상적인 광합성이 일어나기 위한 무생물적 환경요인을 정량적으로 계산해 보자.
- (3) 광합성 산물을 측정하는 방법을 찾아보고, 이들의 경제적 가치를 조사해 보자.
- (4) 온실 및 실내 식물 재배 현황과 실태를 조사하고, 특히 실내 식물 재배 환경에서 소요되는 경비를 조사해 보자.

결과 및 논의

- (1) 조사된 자료를 보고서의 형태로 작성해 보자.

연구과제

- (1) 인구 100명이 생존하는데 필요한 식물의 종류와 식물유래 식량을 정량화하고, 이를 충족시키기 위한 식물의 개체수를 조사해 보자.

탐구 활동 2

광합성 작용을 눈으로 확인하자.

광합성 작용은 여러 반응들이 모인 것이다. 여러 반응들이 종합적으로 진행되는 과정을 실험을 통해 확인함으로써 광합성에 영향을 미치는 요인들의 중요성을 이해해 보자.

준비물

- 재료: 증류수, BTB용액, 염화코발트 종이, 요오드-요오드화칼륨 수용액, 1M HCl, 1M NaOH, 성냥, 검정말, 0.3% NaHCO₃ 수용액
- 기구: 삼각플라스크(100mL, 1L), 비커(100mL, 1L), 메스플라스크(100mL, 1L) 페트리접시, 메스실린더, 약수저, 약포지, 오토피펫, 자석 막대기, 수조, 시험관, 스탠드, 전기스탠드(100W, 200W, 300W, 400W 조절가능), 칼때기, 초시계, 온도계, 표본병, 면도칼, 자(30cm), 분광광도계, 전자 저울, pH 미터, 자석교반기, 조도계

방법 및 절차

- (1) 빛의 세기와 광합성 작용의 관계를 알아보기 위한 실험을 위의 재료와 기구를 이용하여 설계해 보자.
 - ① 가설을 설정해 보자.
 - ② 변인을 설정하고, 변인을 실험에서 구현할 수 있는 방법을 찾아보자.
 - ③ 실험 내용을 그림으로 표현하고, 자료 제시방법을 고안해 보자.
- (2) CO₂ 농도와 광합성 작용의 관계, 온도와 광합성 작용의 관계에 대해 위와 동일한 방법으로 탐구 수행해 보자.

결과 및 논의

- (1) 각각의 실험 결과를 고안한 제시방법으로 작성해보자.
- (2) 각각의 실험 결과로부터 결론을 구체적으로 도출한 후, 처음 세운 가설과의 일치여부를 판단해보자.
- (3) 각 요인에 대한 광합성 최적 조건을 찾아보자.

연구과제

- (1) 실험을 통해 찾은 광합성의 최적 조건을 충족시킬 수 있는 경제적이고 효율적인 장치를 고안해보자.

탐구 활동 8

미래형 식물공장을 설계하자.

탐구활동 1과 2를 통해 알게 된 정보와 지식, 탐구실험 능력을 이용하여 미래형 식물공장을 설계함으로써 어떤 문제를 과학적으로 해결하고자 하는 의지를 함양하고 미래 과학자로서 인류가 직면하고 있는 문제에 적극적으로 참여하는 리더십을 길러, 올바른 과학자의 자질을 갖도록 하자. 또한 산출물 발표 활동을 통해 소통하는 능력과 올바른 토론 능력을 길러보자.

준비물

- 기구: 수행한 실험 자료, 교재, 참고서적, 인터넷 가능한 컴퓨터, B4 용지, 연필, 색연필, 컴퓨터(파워포인트 프로그램 설치된), 프린터, 빔 프로젝트

방법 및 절차

- (1) 조별로 조사하고 탐구실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 적은 공간(10m^2)에서 최대의 광합성 효율이 가능한 식물공장을 설계해 보자.
 - ① 산출물의 형태(파워 포인트 자료 등)를 정해보자.
 - ② 실현 가능한 식물공장을 만들어 보자.
- (2) 조별로 제작한 식물공장 설계도를 발표해 보자.
 - ① 발표 과정은 과학토론의 형식을 띤다.
 - ② 조별로 상호 평가를 실시한다.

결과 및 논의

- (1) 설계 내용에 대한 과학적 근거를 제시하자.
- (2) 녹색생장과 관련지어 설계한 내용을 설명해 보자.

(3) 생태계와 관련지어 설계한 내용의 타당성을 토론해 보자.

연구과제

(1) 자기가 살고 있는 지역에서 자급자족이 가능하기 위한 식물공장을 세운다면, 어느 정도의 규모를 가져하는지 제작한 식물공장 설계도를 이용하여 예측해 보자.

읽을거리 첨단연구

기후변화에 대응한 농업의 진화 : 식물공장

‘식물공장(Plant Factory)’은 빛, 공기, 양분 등을 조절하면서 계획적으로 농산물을 재배하는 시설이다. 비닐하우스보다 한 단계 더 발전한 시설이라고 할 수 있다. 식물공장에서는 기후와 계절에 상관없이 안정적으로 식량을 생산할 수 있으며 당연히 빛, 공기 등을 제어할 수 있는 최첨단 시설이 필요하다. 식물공장을 운영할 때 얻는 장점은 무엇이 있을까?

첫째, 먼저 안정적으로 농산물을 생산할 수 있다.

둘째, 식물공장은 환경에도 도움이 된다.

셋째, 토지의 효과적인 활용이 가능하다.

이러한 장점을 가지게 될 미래의 식물공장은 최첨단 기술의 복합체로 운영된다. 광원은 태양광이 아니라 LED 등을 활용한 인공조명과 공기 및 온도조절기가 자동으로 시설 내 환경을 조절하게 된다. 토양에는 양분을 포함한 배양액이 투여되고, 로봇을 활용한 무인생산 시스템도 도입되어 인간의 손길이 닿지 않는 곳에서 친환경, 무공해 농산물을 대규모로 재배하는 빌딩의 형태가 된다. 현재 많은 나라에서 이러한 식물공장을 건설하고 있고 우리나라도 연구 중에 있다.

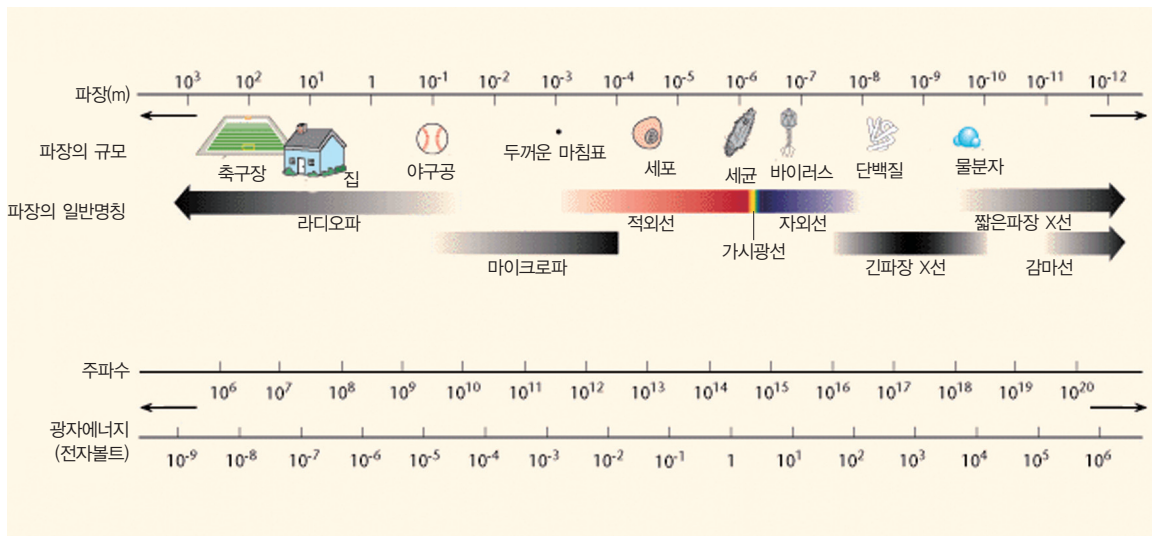
조만간 우리 식탁에도 식물공장에서 생산된 청정한 식물로 요리한 음식이 차려질 것 같다!

토론하기

식물공장의 장점으로 제시된 세 가지의 근거를 구체적으로 생각하여 토론해 보자.

1) 광합성 색소

엽록소를 포함하여 광합성에 관여하는 색소들은 빛에너지를 흡수한다. 태양은 지구상의 모든 생명을 유지하게 하는 근본적인 에너지원이다. 빛은 전자기선을 전기장과 자기장의 진동에 의해 발생하는 파동의 형태로 움직인다. 파장이 짧은 감마선부터 매우 긴 파장의 라디오파로 이루어진 태양광선 중 짧은 범위의 가시광선이 주로 광합성에 필요한 에너지를 제공한다.



〈그림 II-16〉 여러 종류의 파장

조사하기

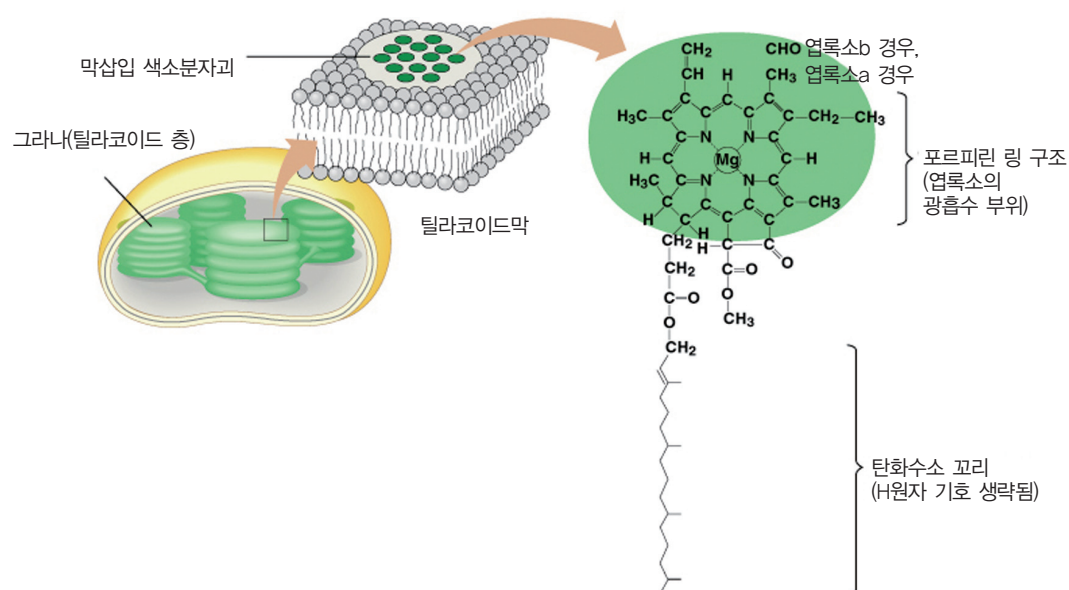
동물들도 광합성 색소처럼 빛을 흡수하는 성질이 있는 분자를 가지고 있다. 동물이 가지고 있는 색소분자와 이들의 특성을 조사하고 광합성 색소와의 차이점을 찾아보자.

- ❖ 흥분 상태의 전자가 가지는 에너지의 운명
- 열방출
햇빛에 의해 아스팔트가 뜨거워지는 경우
- 형광방출
해파리 등의 발광
- 전달
광합성 작용에서의 화학에너지로의 전환

물체에 빛이 부딪히면 통과하거나 반사되거나 흡수될 수 있는데 광합성 색소는 이 중 빛을 흡수할 수 있는 유기분자이다. 물론 완전히 흡수하는 것이 아니고 일부 파장은 반사되는데, 반사되는 파장에 의해 우리는 색을 구별할 수 있게 된다. 광합성 색소가 빛에너지를 흡수하면 색소를 구성하는 일부 전자가 흥분상태인 고에너지 상태가 된다. 이러한 흥분상태는 매우 불안정하기 때문에 전자는 열을 방출하거나 다른 형태의 빛을 방출하고 다시 안정한 상태로 되돌

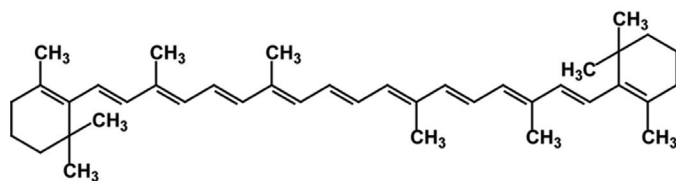
아간다. 하지만 광합성 색소는 이러한 에너지를 다른 안정된 분자로 이동시켜 준다. 즉, 빛에너지를 화학분자의 결합에너지로 전환시킨다.

식물은 여러 종류의 광합성 색소분자를 가지고 있다. 엽록소 a, 엽록소 b와 같은 엽록소 분자들은 녹조류와 식물에서 발견되며 틸라코이드막의 막단백질에 결합되어 존재한다. <그림 II-17>과 같이 엽록소의 포르피린 구조에는 마그네슘이온이 존재하며 고리구조에서 빛에너지를 흡수한 전자가 이동하게 된다.



<그림 II-17> 엽록소 분자의 구조

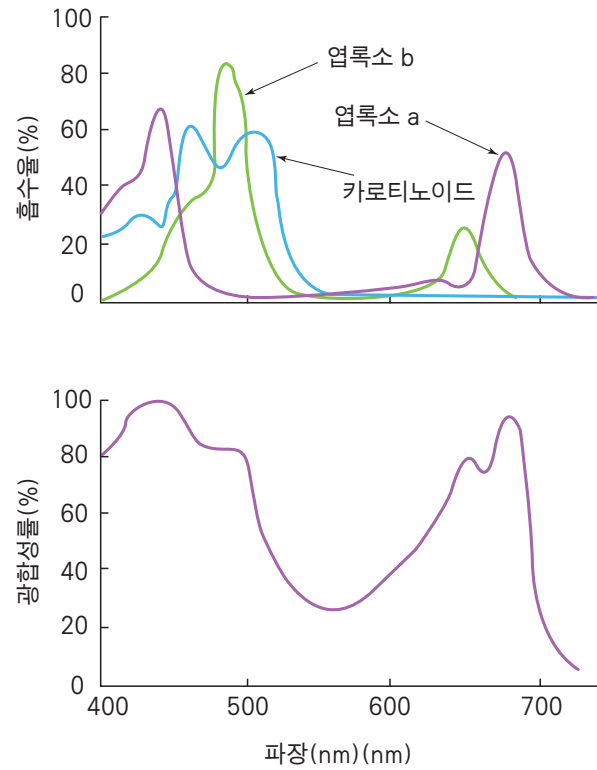
다른 색소인 카로티노이드는 가을에 볼 수 있는 노란색, 주황색, 빨간색을 나타내는 색소이다.



<그림 II-18> 카로티노이드 분자의 구조

광합성 색소의 흡수 파장은 흡수 스펙트럼으로 나타낼 수 있다. 각 종류의 색소는 가시광선 스펙트럼의 서로 다른 영역을 흡수하는데 모든 엽록소는 적색과 청색 파장을 가장 잘 흡수하고 녹색 파장은 잘 흡수하지 못한다. 이에 비해

카로티노이드는 청색과 청녹색 영역의 빛을 잘 흡수한다. 흡수한 파장의 빛과 광합성량의 관계를 나타낸 것이 작용스펙트럼이다. 작용스펙트럼은 파장에 대한 광합성률을 나타내는 것으로 엽록소와 카로티노이드가 잘 흡수하는 파장과 관계가 있음을 알 수 있다.



〈그림 II-19〉 스펙트럼. 위는 흡수, 아래는 작용 스펙트럼이다.

조사하기

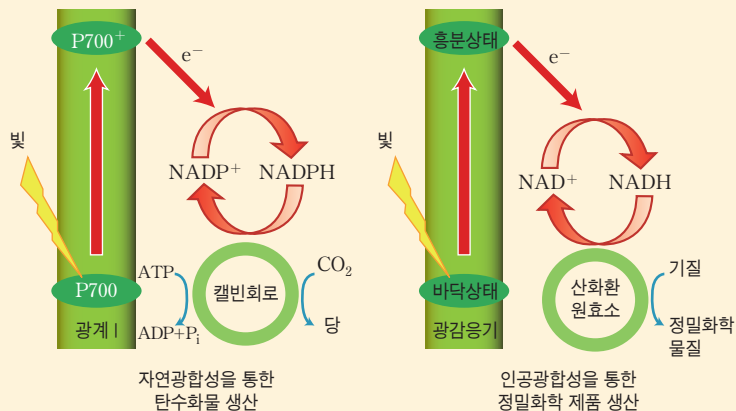
작용 스펙트럼에서 광합성량을 측정할 수 있는 방법을 조사해보자.

읽을거리 첨단연구

KAIST의 연구진은 최근 나노소재를 이용해 자연계의 광합성을 모방한 '인공광합성' 시스템 개발에 성공했다.

이번 기술은 고부가가치의 각종 정밀 의약품들을 태양에너지를 이용해 생산하는 친환경 녹색생물공정 개발로 이어질 전망이다.

식물 등 자연계의 광합성 생물체들은 태양에너지를 화학에너지 형태로 저장하고, 이 화학에너지는 캘빈회로를 통해 생존에 필요한 탄수화물 등 각종 화학물질들을 합성하는데 이용된다.



연구팀은 이와 같은 자연광합성 시스템을 모방, 자연계의 광반응(light reaction) 대신 태양전지 등에서 사용되는 양자점(quantum dot) 등 수 나노 크기의 광감응소재로 빛 에너지를 전기에너지로 전환하고, 자연계의 복잡한 캘빈사이클 대신 산화환원 효소반응을 통해 빛에너지로부터 시작해 최종적으로 정밀화학물질 생산이 가능한 반응 시스템을 개발했다.

현재 세계적으로 지구 온난화와 화석 연료의 고갈이라는 문제를 안고 있는 가운데, 온난화의 원인인 이산화탄소를 배출하지 않고 무제한으로 존재하는 태양에너지를 이용하려는 많은 노력 중 하나로 개발된 이러한 인공광합성기술은 파급효과가 매우 클 것으로 예상된다. 이 연구는 나노과학과 생명공학분야의 창의적인 융합을 통해 새로운 공정기술을 개발하는데 크게 기여했다는 평가를 받고 있다.

조사하기

자연계를 모방하는 과학 활동이나 과학 업적에 대해 조사해 보자.

2) 명반응

❖ 에머슨의 증대효과

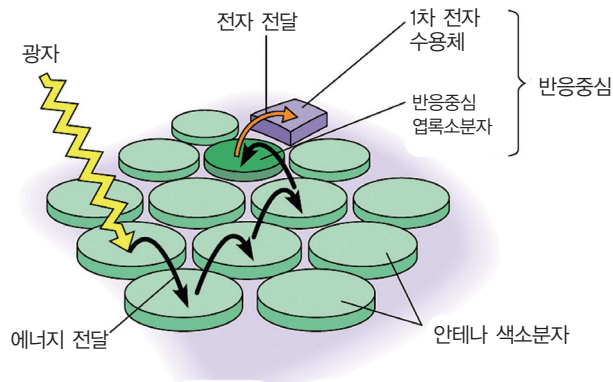
광계 II, I의 존재는 특정 파장의 섬광을 이용하여 증명하였다. 1950년 에머슨(Emerson, R.; 1903~1959)은 특정 파장의 빛을 조류에 조사시켜 광합성률을 측정하였다. 680 nm 혹은 700 nm의 빛을 단독으로 쬔면 광합성률이 낮았지만 두 파장의 빛을 동시에 쬔면 광합성률이 2배로 증가하였다. 이것을 증대효과라고 한다. 나중에 힐(Hill, R.; 1899~1991)과 벤틀은 광합성에 두개의 광활성화 반응이 관여한다고 제안하였고, 이것이 Z 체계 모델로 알려졌다.

❖ P680, P700에서 P 광계(photosystem)를 의미함.

우리 눈에도 빛을 흡수할 수 있는 색소가 망막에 존재한다. 하지만 이들 색소는 빛에너지를 포획하지 못한다. 반면에 광합성 색소는 빛에너지를 포획하여 좀 더 안정한 분자로 옮겨주는 능력을 가지고 있다.

틸라코이드막에는 광계 I과 광계 II라는 색소-단백질 복합체가 존재한다. 광계 I이 II보다 먼저 발견되었지만 광합성의 시작은 광계 II부터 일어난다.

광계는 틸라코이드막에 존재하는 단백질과 수십 개의 색소분자로 이루어진 집광복합체, 그리고 주요 색소분자인 반응중심으로 이루어져 있다. 안테나 복합체라고도 불리는 집광복합체를 구성하는 색소분자는 빛에너지를 직접 흡수하여 공명에너지 전달 방식을 통해 이웃 색소분자로 에너지를 전달한다. 전달된 에너지는 최종적으로 680 nm 혹은 700 nm 파장의 빛을 가장 잘 흡수하는 1쌍의 엽록소 a 분자로 전달된다. 이들 엽록소 a 분자 쌍이 반응중심이며 각각 P680, P700으로 표시한다. P680은 광계 II, P700은 광계 I의 반응중심이 된다.



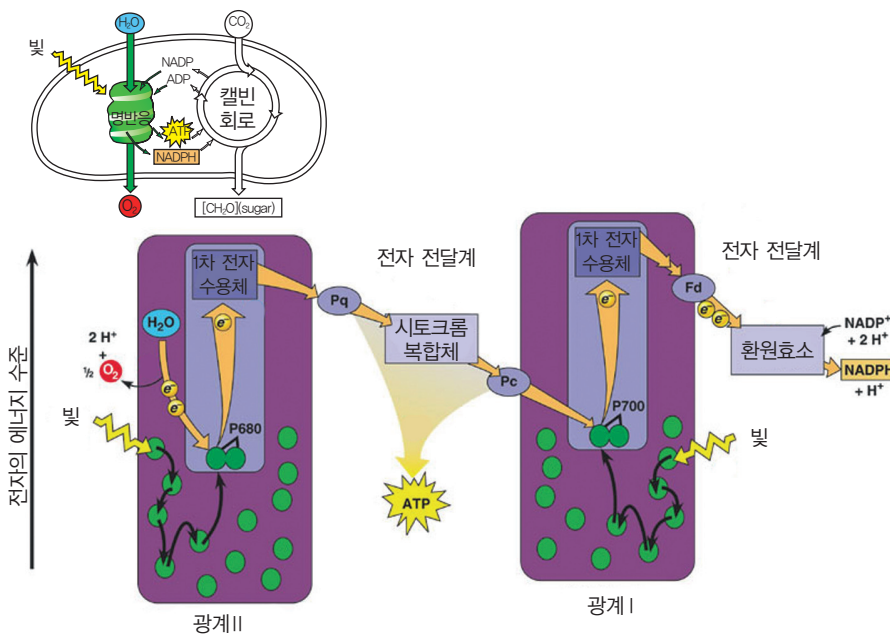
〈그림 II-20〉 집광복합체에서의 에너지 전달

공명에너지로 전달된 에너지는 반응중심의 엽록소 a 분자에서 고에너지 전자를 방출시킨다. 이렇게 방출된 전자는 이웃한 안정된 일차 전자수용체 분자로 순식간에 이동되고 그 다음 전자 전달 분자로 이동되며 명반응이 완성된다. 이 과정 중에 P680을 구성하는 엽록소 a 분자는 전자를 잃게 되는데, 그 빈자리를 물분자의 분해과정에서 생성된 전자가 보충하게 되고 분해과정 동안에 산소가 발생하게 된다. 따라서 광계 II는 물분자를 산화시켜 산소를 발생시키는 유일무이한 단백질 복합체가 된다. 물분자의 산화에는 망간이온이 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다.

일차 전자수용체로 전달된 고에너지 전자는 미토콘드리아 내막의 전자 전달

계와 유사한 틸라코이드막의 전자 전달계로 들어간다. 시토크롬 복합체, 플라스토시아닌을 거친 후 광계 I의 반응중심으로 전자가 이동하면서 방출되는 에너지에 의해 양성자가 틸라코이드 내강으로 능동수송된다. 결국 이러한 능동수송과 물분자의 분해로 틸라코이드 내강은 높은 농도의 양성자를 가지게 되어 틸라코이드막을 경계로 양성자 농도 기울기가 형성된다. 미토콘드리아에서와 마찬가지로의 화학삼투압적 인산화에 의해 ATP가 형성된다.

광계 I의 안테나복합체에 빛에너지가 흡수되면 광계 II와 마찬가지로 P700에서 고에너지 전자가 방출된다. 역시 일차 전자수용체가 방출된 전자를 수용하고, 전자는 페레독신을 거쳐 NADP^+ 환원효소로 이동된다. 이 환원효소에 의해 NADPH가 생성된다. 1분자의 NADPH가 형성될 때 스트로마에서 양성자 1분자가 사용되며, 이 또한 틸라코이드막을 경계로 한 양성자 농도 기울기 형성에 도움을 주게 된다. 전자가 방출된 P700의 엽록소 a는 부족한 전자를 광계 II로부터 얻게 된다.



〈그림 II-21〉 명반응 Z 반응 구조

조사하기

틸라코이드막을 경계로 수소이온농도 구배가 형성될 때 참여하는 수소이온들이 어디서 유래하는지 모두 조사해 보자.

위에서 기술한 과정은 전자가 광계 II에서 광계 I을 거쳐 최종적으로 NADP^+

로 흐르기 때문에 비순환적 전자흐름이라고 말한다. 이 과정은 Z 체계로 알려져 있다. 광계 I에서 방출된 고에너지 전자가 페레독신으로 가지 않고 광계 II의 전자 전달계로 이동하여 계속해서 ATP가 형성되는 순환적 전자흐름도 존재한다. 비순환적 전자흐름에서는 NADPH, ATP 모두 생성되지만 순환적 전자흐름에서는 오로지 ATP만이 생성된다.

생각하기

순환적 인산화과정의 생물학적 의의를 생각해 보자.

3) 캘빈회로

❖ 캘빈회로의 발견

캘빈(Calvin, M.; 1911~1997)과 벤슨(Benson, A.; 1917~)은 1940년대와 1950년대에 탄소동위원소인 ^{14}C 로 표지된 CO_2 를 녹조류인 클로렐라 배양액에 첨가하였다. 매우 짧은 시간동안 광합성이 일어나도록 둔 후, 알코올이 들어있는 용액에 옮겨 반응을 멈추게 하였다. 그 후 세포추출물을 2차원 종이크로마토그래피로 분석하여 암반응 회로를 완성하였다. 이 공로로 이들은 1961년 노벨상을 수상하였다.

캘빈회로는 시트르산 회로와 반대로 탄수화물을 합성하는 회로이다. 공기 중 이산화탄소를 고정하는 단계로 빛에너지를 궁극적으로 화학결합에너지로 전환한다. 일반적으로 광합성 반응식에서는 만들어진 탄수화물이 포도당으로 묘사되지만 실제로는 다른 종류의 탄수화물이 만들어진 후 포도당 등으로 전환된다. 캘빈회로는 3단계로 이루어져 있다. 캘빈회로에는 명반응에서 만들어진 NADPH와 ATP가 사용된다.

첫째, 탄소 고정 단계



이 반응은 Rubisco(RuBP carboxylase/oxygenase)라는 지구상에서 가장 풍부한 효소에 의해 촉매된다.

조사하기

Rubisco가 지구상에서 가장 풍부한 효소로 진화한 이유를 효소활성과 연관지어 조사해 보자.

❖ Bis

Di, two

❖ RuBP

Ribulose biphosphate

❖ 3PG

3-Phosphoglycerate

❖ BPG

Bisphosphoglycerate

❖ G3P

Phosphoglyceraldehyde

둘째, 환원 단계



12분자의 G3P 중 2개가 탄수화물을 만드는데 사용되고, 나머지는 6개의 RuBP가 재생되는데 사용된다.

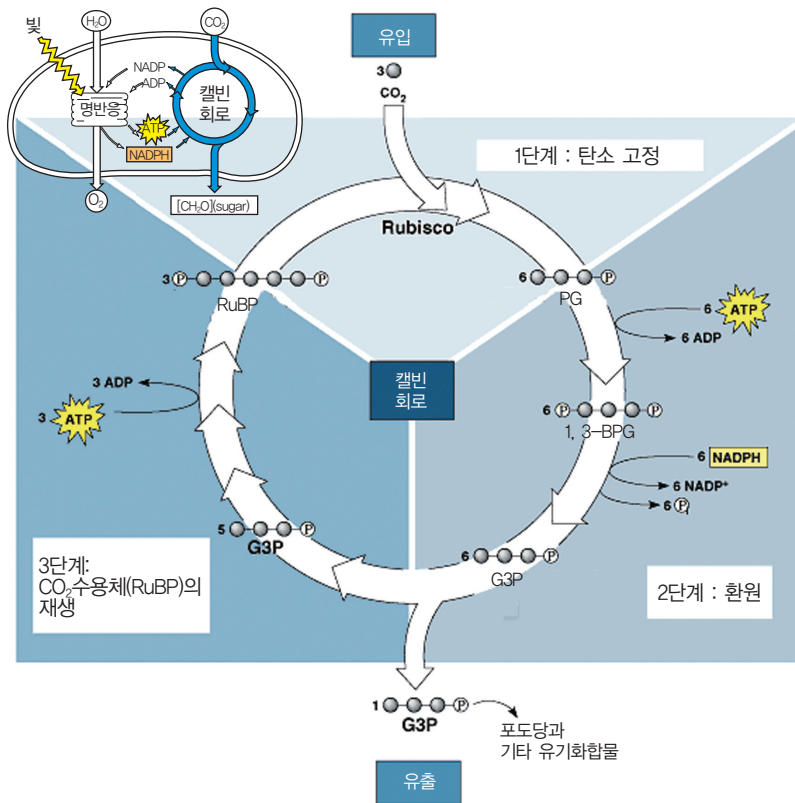
셋째, RuBP의 재생단계



재생된 RuBP는 다시 이산화탄소를 받아들일 수 있으며, 캘빈회로는 계속 진행된다.

생각하기

왜 CO₂를 직접 중합하지 않고 이러한 환원과정을 거쳐야 하는지 생각해 보자.



〈그림 II-22〉 캘빈회로

4) 환경에 적응한 다양한 광합성 작용

위에 기술된 내용은 식물, 조류, 남조류에서 볼 수 있는 일반적인 광합성 작용이다. 하지만 빛의 세기나 온도, 물의 공급 상황과 같은 특정한 환경조건에서는 일반적인 광합성 효율이 달라질 수 있으며, 이러한 환경조건에서 서식하는 식물들은 광합성 효율을 높이기 위해 다양한 광합성 작용을 개발하여 살고 있다.

이산화탄소와 RuBP를 결합해주는 반응을 촉매하는 효소 루비스코는 반응

결과로 세 개의 탄소를 가지는 PG 분자를 2분자 생산한다. 탄소 고정 단계에서 이렇게 탄소 3개를 함유하는 분자를 만드는 식물을 C_3 식물이라고 한다. 하지만 루비스코는 고온건조한 환경 조건에서 산소화 효소로 작용할 수 있으며 그 결과는 아래와 같다.

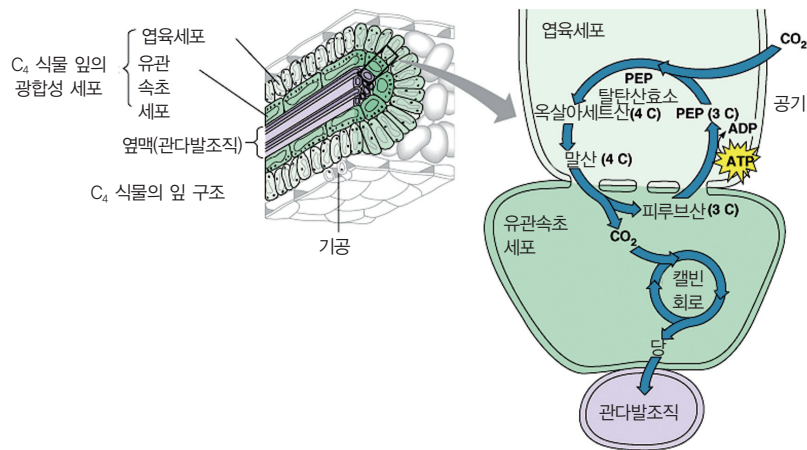


이러한 반응을 광호흡이라고 한다. 식물체 내의 낮은 이산화탄소 농도는 고온 건조한 상태에서 기공이 닫히면서 대기 중의 이산화탄소가 잎 내부로 들어오지 못하기 때문에 형성되며, 반대로 광합성 결과 생성된 산소의 농도는 잎 내부에서 높아지게 된다. 광호흡은 광합성 효율을 감소시키지만 높은 산소농도로 인한 피해로부터 식물을 보호해 주는 이점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 더구나 최근 연구에 의하면 광호흡은 질소동화작용의 효율을 높여 준다고 한다.

1960년대 코르차크(Kortschak)은 사탕수수의 최초 탄소고정 산물이 3PG가 아닌 4탄당이라는 것을 발견하였다. 이러한 식물을 C_4 식물이라고 부른다. 후에 해치(Hatch)와 슬랙(Slack)은 4탄당이 옥살산인 것을 확인하였고, 그 경로를 밝혔다. 이들 C_4 식물은 독특한 조직인 관다발을 둘러싸는 유관속초세포들을 가지고 있다. 대기 중의 이산화탄소가 기공을 통해 엽육세포로 들어오면 이 세포 안에서 PEP 카르복실화 효소에 의해 PEP(Phosphoenolpyruvate)와 결합하여 4탄당인 옥살아세트산이 형성된다. PEP 카르복실화 효소는 산소에 대한 결합력이 없기 때문에 이산화탄소의 농도가 낮아도 이 반응은 잘 일어나게 된다. 옥살아세트산은 다시 수송을 위해 말산으로 바뀐 후 유관속초세포로 이동하여 피루브산과 이산화탄소로 분해되며, 이 때 생성된 이산화탄소는 정상적인 캘빈 회로로 들어가게 된다. 피루브산은 다시 되돌아가 ATP를 소모하여 다시 PEP가 된다. 이러한 과정을 거쳐 유관속초세포 속의 이산화탄소 농도는 높게 유지되기 때문에 이곳에 존재하는 루비스코는 정상적인 암반응 회로를 가동할 수 있게 된다.

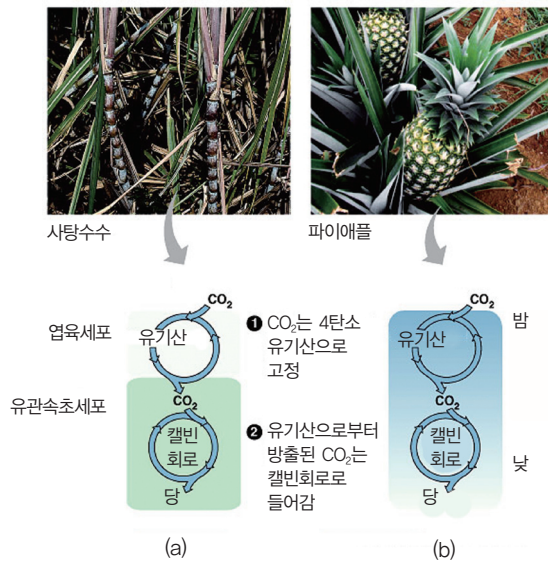
C_4 식물은 C_3 식물보다 여러 면에서 좀 더 유리하며, 낮의 온도가 높고 햇빛이 강한 장소에서 잘 적응한다. C_3 식물은 고온건조한 상태에서 전체 광합성량의 25~50%가 광호흡으로 사라진다. 옥수수, 사탕수수 등은 대표적인 C_4 식물이다. 반면에 한랭한 기후에서는 C_3 식물이 탄소고정 시 에너지가 적게 들기 때문에 다소 유리하며 지구상 약 90% 정도의 식물이 C_3 식물일 것으로 추정된다.

CAM(Crassulacean acid metabolism, 다육성 식물 유기산 대사) 식물은 C_4 식물과 생화학적 반응이 거의 같지만 다른 광합성 적응 양식을 보여준다. 파인

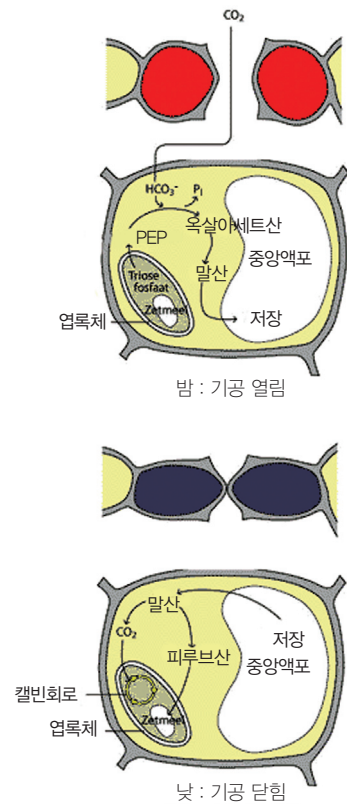


〈그림 II-23〉 C₄ 대사경로

애플, 선인장 같은 다육성 식물은 물의 손실을 최소화하기 위해 낮 동안에 기공을 닫아야 한다. 광합성은 빛의 존재 하에서 일어나는 광의존적인 반응이다. 빛이 있는 낮에 이산화탄소를 흡수하지 못하면 어떻게 광합성이 일어날까? 이들 CAM 식물은 밤에 기공을 열어 이산화탄소를 흡수하여 C₄식물처럼 4탄당의 옥살아세트산을 만든다. 옥살아세트산은 말산으로 전환된 후 밤 동안 액포 속에 축적되고 낮 동안에 분해되어 이산화탄소를 방출하고 캘빈 회로가 작동하게 된다. 결국 C₄식물은 공간적으로, CAM 식물은 시간적으로 반응을 분리시켜 캘빈회로가 정상적으로 잘 작동되도록 해준다고 할 수 있다.



〈그림 II-24〉 C₄식물과 CAM 식물 대사경로 비교. (a)는 C₄, (b)는 CAM 식물의 대사경로이다.



〈그림 II-25〉 CAM 대사경로

생각하기

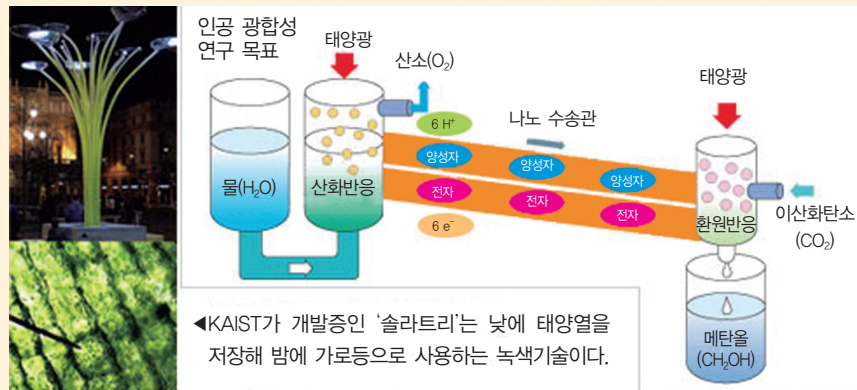
우리 주변에 있는 식물들이 C₄인지 CAM인지 조사하고, 계절에 따라 어떤 식물이 잘 자라는지 연관 지어 생각해보자.

읽을거리 첨단연구

무한 청정에너지 녹색기술의 완결판

전 세계는 화석연료 고갈과 지구 온난화에 따른 기후변화에 대처하기 위해 대체에너지 개발에 상당한 노력을 기울이고 있다. 그러나 대체에너지로 불리는 풍력, 조력, 바이오 에너지 등은 생산 단가가 화석연료에 비해 비싸고 공급량이 부족하다는 단점을 안고 있다. 이런 상황에서 가장 주목받고 있는 에너지원이 태양에너지이다. 태양에너지를 이용한 태양전지나 태양열 발전이 상용화된 상태이지만 경제성과 활용도가 매우 제한적이라는 한계를 갖고 있으며 대안으로 제시되는 것이 인공 광합성이다.

태양열을 이용해서 무기물을 유기물로 생산하는 과정에 주목하며 KAIST에서 '솔라트리' 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있다.



〈그림 II-26〉 KAIST가 개발, 연구 중에 있는 '솔라트리'

인공 광합성은 말 그대로 식물의 광합성 과정을 흉내 내는 것으로, 에너지 문제와 온실 효과에 의한 기후변화에 대한 우려를 말끔히 해결해 줄 것이라는 점에서 기대를 모으고 있다.

인공 광합성을 연구하는 과학자들은 빛을 이용해 무기물로부터 유기물을 생산하는 식물의 능력에 주목하고 있다. 식물은 빛을 이용해 이산화탄소와 물을 가지고 포도당을 합성하고 산소를 배출하는 일련의 생화학반응을 통해 광합성을 한다. 광합성 과정을 화학반응의 관점에서 보면 반응 전의 이산화탄소와 물보다는 반응 후의 물질인 포도당과 산소가 더 많은 에너지를 가진 일종의 흡열반응이라고 볼 수 있다.

식물에서 광합성이 진행될 때 물이 산소와 양성자, 전자로 광분해되며 물분해에서 생성된 양성자를 이용해 수소가스를 생산할 수 있다면 맹물로 움직이는 자동차를 만들 수 있을 것이다. 실제로 인공 광합성을 연구하는 과학자들이 현재 수행하고 있는 연구 분야가 바로 이 부분이다. 다시 말해 물분해 효소, 광화학반응중심, 그리고 수소화 효소의 특성을 갖는 인공광계를 만들어 무한한 청정에너지를 생산하고자 하는 인류의 꿈을 현실화하고 있는 것이다.

독일의 울리히 연구센터에서는 테트라루테늄 착화합물을 촉매로 이용해 물을 분해하는 실험에 성공했는데, 단지 태양광과 촉매를 이용해 물에서 수소를 생산해 냈다. 또한 중국의 지아오통대에서는 잎과 거의 흡사한 역할을 하는 '인공잎'을 만들어 냈다. 이 인공잎은 빛을 엽록소로 정확하게 보낼 수 있는 구조까지 모방해서 기존 방법보다 수소를 3배나 더 많이 생산할 수 있다.

국내에서도 지난해 9월 한국인공광합성연구센터(KCAP)를 설립해 미국의 로렌스 버클리 국립연구소와 협력하고 있으며 미국은 소재 연구를 담당하고 나노기술에 강점을 갖고 있는 우리나라는 조립분야를 연구하고 있다. 이 연구를 통해 KCAP는 10년 내 3% 효율로 태양광을 가지고 이산화탄소와 물을 이용해 메탄올과 같은 액체연료를 만들어 내는 인공광합성 기술을 확보한다는 계획이다. KAIST에서는 '솔라트리(낮에는 태양열을 저장했다가 밤에 가로등으로 사용하는 것)'를 만들어 햇빛에서 전기에너지를 얻는 연구를 진행하고 있다. 이는 직접적인 광합성을 이용한 것은 아니지만 나뭇잎이 최대한 빛을 받기 위한 구조로 배치된 것을 흉내 내어 태양광 발전효율을 최대한 높이하고자 하는 자연을 닮아가는 녹색기술이라고 할 수 있다. 한국과학기술연구원(KIST)도 태양전지와 이차전지, LED 기술을 결합, 햇빛을 통해 전기에너지를 만들어 충전해 쓸 수 있는 태양광나무, '솔라트리(Solar Tree)'를 개발하고 있다.

인공광합성과 관련된 많은 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 아직까지 자연의 광합성을 완벽하게 흉내 낼 수 있는 기술을 가진 나라는 없는 상황이다. 촉매를 이용해 물과 이산화탄소를 분해하는 것과 같이 복잡한 광합성의 각 단계를 모방한 단편적인 기술만 존재한다. 아직은 이렇게 자연광합성의 작은 일부분만을 모방하는데 그치고 있지만 언젠가 인공광합성이 완성되면 인류는 진정한 녹색기술을 얻게 될 것이다.

[한국표준과학연구원]

예상하기

만약 인간이 완벽한 인공 광합성 장치를 만들게 된다면, 우리 사회는 어떻게 변할지 예상해 보자.

정리하기

광합성

- 광합성에 영향을 미치는 중요한 요인에는 빛의 세기와 파장, 온도, CO_2 농도가 있다.
- 명반응은 그라나, 암반응은 스트로마에서 일어난다.
- 광합성 색소는 빛에너지를 흡수하여 다른 유기분자에게 전달해준다.
- 엽록소의 빛의 파장별 흡수율을 흡수 스펙트럼, 파장별 광합성률을 작용 스펙트럼이라고 하며, 두 스펙트럼은 비슷한 양상을 보인다.
- 명반응은 암반응에 선행한다.
- 명반응에서 물의 광분해와 광인산화 반응이 일어나며 광인산화 반응은 화학삼투압적 인산화에 해당된다.
- 빛에너지는 반응중심이 되는 P_{700} 과 P_{680} 를 구성하는 엽록소로부터 전자를 방출시킨다.
- 순환적 광인산화 반응에서는 ATP만, 비순환적 광인산화 반응에서는 ATP와 NADPH가 생성된다.
- 명반응에서 생성된 ATP와 NADPH는 암반응에서 사용된다.
- 캘빈 회로에서 처음으로 형성된 유기분자는 3PG이다.
- C_4 , CAM 식물은 광호흡과 같은 광합성에 불리한 환경에 적응하기 위해 진화된 생리기작을 가지고 있는 식물이다.

1. 다음 제시문은 다(多)전자 광촉매 물질 합성을 통해 인공 광합성 기술을 구현 시킨 내용에 대한 것이다.

KAIST 연구팀은 다전자 광촉매 물질 합성을 통해 인공 광합성 기술을 구현하는 데 성공했다. 인공 광합성 구현의 핵심기술은 태양에너지 대부분을 차지하는 가시광선 영역에서 물로부터 효율적으로 양성자를 발생시키는 것이다. 기존에는 태양에너지의 일부 영역인 자외선 영역과 고가의 백금 촉매를 사용할 때만 물로부터 양성자를 생성시킬 수 있었지만 태양광 중에서 가장 풍부한 가시광 영역에서는 거의 양성자를 생성할 수 없는 한계가 있었다. 연구팀은 타이테니움 원자를 저가 산화물인 니켈 옥사이드 층상 구조에 니켈을 일부 치환시켜 이중 금속으로 구성된 다전자 광촉매 물질을 합성했다. 이번 연구결과는 광반응에서 생성된 양성자와 지구온난화 등의 문제가 되는 이산화탄소와의 추가적인 광반응을 통해 메테인, 메탄올 등의 청정연료로 변환하는 기술로도 응용 가능하다.

제시문의 내용을 근거로 연구팀이 개발한 신기술의 중요성을 논술했보자.

2. 합성작용에는 광합성작용과 화학합성작용이 있다. 두 합성작용의 차이점과 대표적인 생물을 조사하여 생태계에서의 역할에 대해 토의해 보자.