

光生物学의 最近動向

宋 悒 淳

〈美国 Texas Tech 大学校 化学科 教授〉

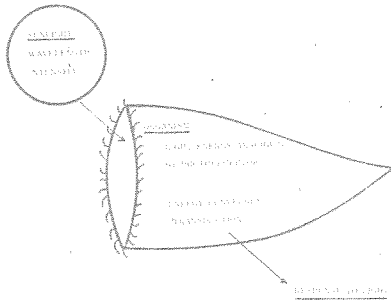


「本論文은 지난 5월 26~29일 濟州大学에서 개최
됐던 「光生物学國際워크숍」의 總說講演의 要旨를
要約整理한 內容이다. (편집자註)

◇序 論

生命体는 細菌에서부터 高等動植物에 이르기
까지 햇빛의 직접 혹은 간접적인 영향을 받지
않은 것이 거의 없다고 해도 과언이 아니다. 생
명의 起源만 봐도 太陽光線이 없었다면 이地球
上에 生命体가 생기지 않았을 것이다.

생명체가 빛과 相互作用을 하고 빛의 에너지를
이용하는 現象은 여러가지가 있다. 빛에 대



〈그림 1〉 光線에 대한 生物体의 反應列: 나팔벌레
(stentor)의 光선회로반응

한 生物界의 反應現象을 究明하는 學問이 비교
적 최근에 體系化되어 世界各國의 研究室에서
활발한 研究活動이 이루어지고 있다. “光生物
學” 및 “光生化學”이라고 불리우는 이 部門學問
의 原理的인 개념을 간단히 살펴본 다음 筆者의
研究課題를 예로 들어 光生物学의 最近研究動
向의 일면을 소개 하고자 한다.

◇光線에 대한 生物体의 反應

우선 生命体가 햇빛에 대해 어떻게 직접적인
반응을 나타내는가 하는 機作(mechanism)을 알

아보자.

太陽光線中의 特정한 波長과 強度를 가진 햇
빛이 生物体에 있는 光受容体分子(Photorecep-
tor)에 의해서 흡수된다. 흡수된 햇빛, 즉 光
에너지 혹은 光陽子에너지(Photon energy) 는
다른 형태의 에너지로 變換될 수 있다. 이렇게
生物体内에서 한 형태의 에너지가 다른 형태의
에너지로 變換되는 과정을 energy transduction
이라고 부른다. 光에너지의 變換에는 여러가지
가 있으며 따라서 光線에 대한 生物体의 反應
에도 여러가지가 있다.

〈그림 1〉은 나팔벌레와 光線回避反應(Photo-
phobic response)의 예를 간단히 나타낸 것이
다. 나팔벌레는 陰地에서 우회전하던 선모를 광
선에 노출되는 순간 좌회전시키며, 이러한 갑작
스런 선모운동방향의 변화에 의해 水泳을 정지
하게 되고 이어서 햇빛을 회피하는 방향으로 수
영방향을 바꾸게 된다. 이것은 나팔벌레가 가
지고 있는 光受容体分子가 赤色波長의 光線을
흡수한 후 그 光에너지를 細胞内에서 利用可能
한 형태의 에너지로 變換시키기 때문이다. 즉
光에너지가 細胞内에서 電氣化學的인 에너지로
變換되며 이 에너지는 선모의 운동방향을 바꾸
는 데 원동력이 되어 결국 力學的인 에너지로
變換된 것이다.

光生物学의 反應의 始初過程(Primary proc-
ess)은 生物体의 光受容体分子에 의해 特정한
波長과 強度의 光線이 흡수되므로써 시작된다.
〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 光受容体分子는
光線을 흡수함으로써 에너지가 낮은 바닥상태

◇光受容体分子의 역할

들뜬상태의 光受容体分子은 저장된 에너지를 이용하여 光生物學的 反應過程을 시작하게된다. 그러면 光受容体分子의 초기반응 과정은 어떠한 기작에 의해서 일어나는가? 〈그림 4〉를 이용하여 간략한 윤곽을 살펴보자.

대부분의 光受容体分子은 단백질이나 細胞膜에 결합되어 있다고 가정할 수 있다. 따라서 광수용체가 특정한 波長의 光線을 흡수하여 들뜬상태가 되면 그에따른 반응에 의해 단백질이나 세포막에 구조적인 변화를 가져오게 할 수 있다. 예를 들면, 들뜬상태의 光受容体分子의 分極性(polarizability, f)이 바닥상태에 비해 더 커지거나 더 작아질 수 있다. 이것은 分子의 크기가 바닥과 들뜬상태에서 서로 큰 차이를 나타내는 것을 의미한다. 따라서 光受容体가 크고 작아짐에 따라 光受容体分子가 결합하고 있는

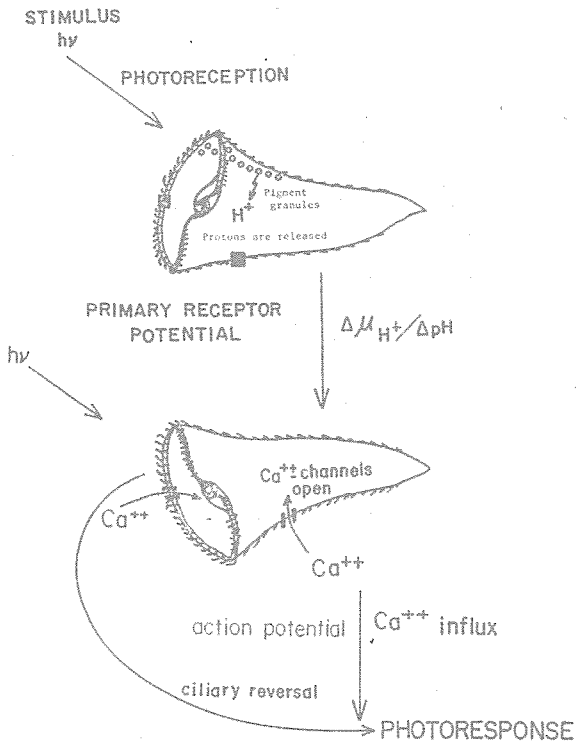
蛋白質이나 細胞膜의 構造도 동시에 변화할 수 있고, 그 機能의 변화까지도 유인될 수 있다. 이러한 단백질이나 세포막의 변화가 다시 세포 내의 여러 과정을 거쳐 결국에는 光生物學的 反應에 이르는 것이 아닌가 생각된다. 실제로 분극성이 광선흡수에 의해 달라지는 예는 많이 있으나 이 機作이 특별한 生命体에 의해 이용되고 있는지는 아직 발표된 바가 없다. 다만 carotenoid를 광수용체로 하는 생물체에서는 위의 기작을 이용하고 있을 가능성이 없지는 않다.

光受容体分子가 특정한 파장의 광선을 흡수하면 분자의 분극성 뿐만 아니라 분자의 쌍극성 모멘트(dipole moment, μ)도 그 크기가 달라질 수 있다. 〈그림 4〉에서는 분자의 바닥상태에서 전혀 없었던 쌍극자가 들뜬상태가 되면 새로 생기는 것을 예시하였다. 이렇게 쌍극자가 생기는 것은 흡수된 광선에너지가 分子內에 고르지않게 再分布되어, 따라서 分子內 電子의 分布가 한쪽으로 밀려 陽이나 陰 電荷를 띠게 되기 때문이다. 들뜬상태가 電荷를 띠므로써 주위의 단백질이나 세포막의 쌍극자와 靜電氣의 相互作用(electrostatic interaction)을 일으키게 되고 그에 따른 구조적인 변화도 가능하게 된다. 실제로 이러한 현상이 특수한 光生物學的 反應에 쓰여지고 있는지는 아직도 究明되어 있지 않고 있다.

光受容体分子가 광에너지를 흡수하여 그 자체의 分子構造와 모양이 변화될 수 있다. 이러한 分子의 構造變化와 더불어 蛋白質이나 膜의 構造및 機能에 變化를 가져올 수 있다. 視覺의 光受容体分子인 rhodopsin은 들뜬상태에서 바로 이러한 반응을 일으킨다.

Halobacterium의 光受容体分子의 경우에도 비슷한 반응을 보인다.

光受容体分子의 들뜬상태는 前述한 바와 같이 그 電子分布狀態가 바닥상태와 전혀 다를 수가 있다. 그 결과로 酸基의 수소이온(H^+) 解離度가 훨씬 증가될 수도 있어서, 들뜬상태의 光受容体分子가 쉽게 수소이온을 배출할 수 있게 된다. 수소이온 배출이 細胞膜의 한쪽으로부터



〈그림 5〉 Stentor (나팔벌레)의 광생물학적 반응의 기작

이루어진다. Halobacterium의 경우처럼 細胞膜을 사이에 두고 PH차를 가지오게 할 수 있다. 이러한 PH 차는 前述한 바와 같이 有用한 형태의 에너지에 해당한다. 나팔벌레의 光回避反應도 PH차를 이용한 것이다.

植物의 屈光性이나 Euglena의 趨光성은 光受容體 flavin에 의해 흡수되는 靑色波長의 光線에 대한 반응인데 이때 flavin의 역할은 들뜬상태에서 電子를 基質分子(substrate)에서 받아들여 cytochrome과 같은 電子受容體에나 전달해주는 것이 아닌가 추측되고 있다. 그러나 확실한 機作은 아직 불명치 않다. 일반적으로 들뜬상태에서 電子가 오고가는 반응을 光酸化還元反應(photo-redox)이라 불리우는데 光合成時葉綠素의 역할도 해당된다고 볼 수 있다.

〈그림 4〉의 가장 밑에 示되어 있는 光受容體分子는 Phytochrome이다. 이 경우에는 生理的으로 완성이 없는 Pr형의 Phytochrome이 赤色波長인 660nm의 光線을 흡수하므로써 들뜬상태를 거쳐 生理的活性이 있는 Pfr형으로 바뀌진다. Pr이 Pfr로 되는 반응의 가장 중요한 결과는 Pfr의 色素分子가 원래의 Pr의 蛋白質表面位置에서 離脫해나가므로써, Pfr 蛋白質에 새로운 表面을 마련한다는 것이다. 이 表面은 細胞核膜과 결합하는 데 쓰여져 Pfr의 작용을 細胞核內로 전달하는 始初反應에 기여하는 것이라고 추측된다.

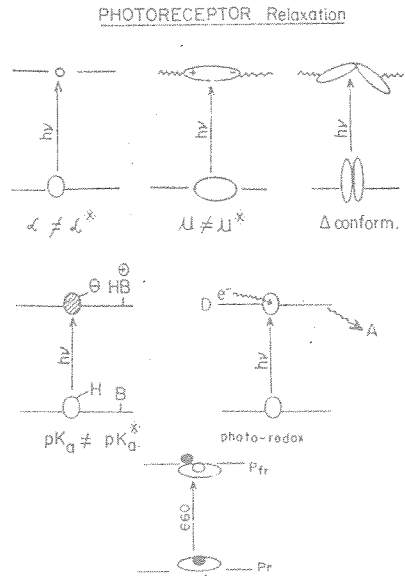
◇ 나팔벌레의 光回避反應

前述한 바와 같이 나팔벌레의 에너지轉換反應은 赤色波長의 빛을 흡수하는 stentorin에 의해 그 과정이 시작된다.

〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 나팔벌레의 선모 逆回轉(ciliary reversal)은 두 단계로 나누어서 설명할 수 있다.

첫단계는 色素粒膜에 결합되어 있는 stentorin이 光線을 흡수하여 들뜬상태가 되고 수소이온이 解離해 나가는 과정이다. 解離된 수소이온은 色素粒膜의 외부로, 즉 細胞質 쪽으로 배출되어 細胞內의 PH를 낮추어준다. 수소이온

이 들뜬상태에서가 바닥상태에서 보다 더 쉽게 離脫하는 것은 〈그림 4〉에 示되었다.



〈그림 4〉 광수용체 분자의 들뜬상태와 작용

두번째 단계는 細胞內 PH가 낮아짐에 따라 細胞의 膜電位(membrane potential)가 無極化(depolarize)되며, 동시에 細胞外의 Ca^{2+} 이온이 細胞內로 투입된다. 투입된 Ca^{2+} 이온은 선모운동을 조절하는 構造蛋白質과 결합하므로써 그 立体構造가 변화하고 드디어는 선모운동이 역방향으로 된다.

이러한 과정은 결국 stentorin에 의해 흡수된 광에너지가 電氣化學的인 에너지로 변화되었음을 뜻한다. 電氣化學的 에너지는 세포막전위차의 형태로 나타나며 이를 實驗的으로 측정할 수 있다. 나팔벌레 세포 안에서 0.0002mm 정도의 전극을 삽입한 다음 세포를 광선에 노출시켰을 때 변화하는 膜電位差를 측정할 수 있다. 光線에 의해 변화된 膜電位는 活動膜電位(action potential)의 형태로 나타난다.

◇ Phytochrome에 의한 植物의 光反應

植物의 發芽, 葉綠素合成, 開花 등 여러가지 生理的現象이 赤色光線에 반응하여 일어나는데

이들 다양한 光反應의 共通點은 660nm의 光線에 의해 나타나는 植物의 반응이 730nm의 光線에 의하여 無効 혹은 原狀態로 복귀된다는 점이다. 이것은 Phytochrome 光受容體分子에 의해 결정된다. Phytochrome에는 生理적으로 活性이 없는 Pr과 活性이 있는 Pfr 두가지 형태가 있다. 660nm 光線은 Pr을 Pfr로 바꿔주며 따라서 Pfr이 여러가지 植物의 光反應을 誘引한다. Pfr은 730nm 光線에 의해 Pr로 돌아감으로써 植物의 반응을 可逆적으로 무효시키거나 정지시킨다. Pfr은 불안정하여 730nm 光線없이도 Pr로 되돌아 간다.

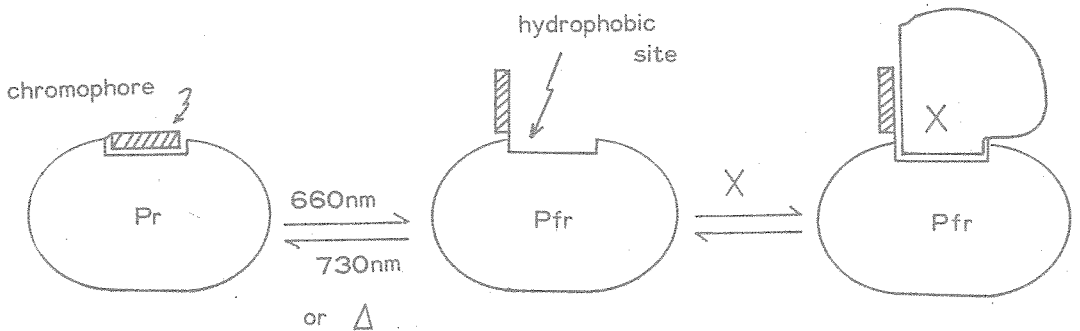
赤色光線에 대한 植物의 반응은 신속한 반응과 느린반응으로 나누어 진다. 前者는 Pfr이 細胞原形質膜을 그 作用點으로 하고 있으며 後者는 核膜을 통한 작용이다. 核膜에 결합한 Pfr은 核膜酵素를 활성화시켜 가령 CAMP 같은 物質을 合成한다. 合成된 物質은 核内の 遺傳

因子 gene(DNA)을 활성화시킴으로써 mRNA를 생산하고, mRNA는 植物의 光反應에 필요한 酵素蛋白質合成情報를 가지고 있어서 특이한 단백질합성을 유도하는 것이다.

그러면 Pfr은 어떻게 細胞의 原形質膜이나 核膜에가서 결합하는가? 지난 몇년동안의 筆者研究室의 實驗結果를 <그림 6>에 간추려 표시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Pr이 Pfr로 되는 가장 중요한 變化는, 色素分子의 蛋白質表面上的 위치가 바뀌고 따라서 Pfr分子에는 새로운 蛋白質表面이 노출된다. 이 表面은 疎水性으로서 같은 疎水性의 脂質과 蛋白質로 되

어있는 細胞膜과 결합하는데 관여하는 것이다.

그러나 植物의 光反應(發芽, 開花, 結實, 生合成等)을 궁극적으로 보이기까지는 수많은 과정이 따라야 하는데 이러한 과정들은 아직도 未知의 研究分野로 남아있다.



<그림 6> Pr이 660nm광선에 의해 Pfr이 되면 세포막과 결합할 수 있는 표면이 Pfr의 단백질 위에 생긴다. X는 세포막을 표시 한것임.

◇놀라운 速度로 일어나는 光生化学 反應

光生物学的反應의 초기과정 연구에 두가지 방법이 특히 유용한 역할을 한다. 그 하나는 분자의 에너지상태(들뜬상태)를 규명하는 分光學的方法과 또 하나는 들뜬상태의 化學反應을 규명하는 光化學이다. 특히 10조분의 1秒 내지 1억분의 1秒 안에 일어나는 光受容體分子의 初期過程을 측정할 수 있는 超速度分光法의 발달

은 특기할만하다. 이 分光法의 應用例를 몇개 들어보자.

綠色植物이나 光合成細菌에 의한 光合成初期過程이 초속도분광법에 의해 규명되고 있다. 葉綠素의 초기과정은 엽록소의 電子를 電子受容體 物質에나 전달하는 반응이다. 이 반응은 엽록소의 들뜬상태에서 일어나며 그 速度는 7조분의 1초 이내라는 것이 최근에 알려졌다. 이렇게 놀라운 超速度로 초기반응이 일어난다

는 것은 生物체가 흡수한 光에너지를 가장 효율 있게 이용할 수 있다는 사실을 의미하는 것이다. 葉綠色의 경우 초속도로 빠른 초기반응과 정은 탄산가스를 炭水化合物로 還元하기 까지의 光合成過程을 끌고 나가는 데 필요한 첫단계가 된다.

Halobacteria의 ATP 光合成 初期過程도 植物의 광합성초기과정과 마찬가지로 매우 빠른 속도 즉 1조분의 1초 이내에 일어나고 있음이 알려졌다. Halobacterium의 光受容체分子는 動物의 視覺色素 蛋白質과 흡사한 bacteriorhodopsin이다. Rhodopsin의 초기과정은 들뜬상태로부터 bathorhodopsin이 생기는 光異性化反應(Photoisomerization)인데 이 반응도 6조분의 1초라는 놀라게 짧은 시간안에 일어난다. 動物의 視覺이 매우 약한 光線까지도 感知할 수 있음은 rhodopsin의 초기과정이 빠르고 효율성이 크기 때문이다.

動物의 rhodopsin에 해당하는 植物의 “視覺” 色素는 앞에서 기술한 phytochrome 이라 할 수 있다. Phytochrome의 초기광반응도 10조분의 1초라는 초속도로 일어나고 있음이 筆者의 實驗室에서 究明되었다. 이렇게 빠른 速度의 반응은 rhodopsin의 초기과정과 비슷하다. 이 사실은 植物의 感光性이 動物의 視覺과 마찬가지로 效能이 높음을 의미하는 것이며, 따라서 視覺의 경우와 비슷하게 매초당 30,000 photons/cm²의 약한 光線強度에 대해서도 植物이 光生物學的 反應을 할 수 있다는 사실을 설명해준다.

나팔벌레의 光回避反應도 그 光受容체分子의 初期反應過程이 1,000억분의 1초 정도로 빠른 速度로 진행되고 있음이 알려졌다. Stentorin

의 초기반응은 앞에서 지적한 바와같이 Stentorin의 들뜬상태에서부터 수소이온이 解離해나가는 반응이다.

이렇게 超速度의 光反應過程이 일어나는 것은 生物체가 光에너지를 최대한 效率의으로 이용하고 있기 때문이다. 다시 말하면, 超速度의 初期反應過程이 없이는 光受容체分子의 들뜬상태는 그 에너지를 다른 과정에 의해 낭비해 버릴 것이다. 가령 熱로 變換되거나 螢光으로 兪光해 버릴 것이다.

◇ 光生物學的의 應用

紙面關係로 光生物學的의 應用面은 한두가지 例만 지적하기로 하겠다.

光生物學應用에 있어서 유망한 분야중의 하나는 太陽에너지의 이용이다. 太陽에너지의 이용에는 光化學的인 방법으로 에너지를 수확, 저장하는 방법과 光合成效率이 높은 植物에 의해 燃料용 炭水化合物를 생산하거나 石油化合物을 農業的으로 생산하는 方法(고무나무 해베아, 유로비아 등의 栽培)이 있다.

이와 관련해서 Phytochrome의 역할을 人工的으로 조절함으로써 種子의 發芽, 開花 및 結實의 시기를 조절하고 수확을 촉진시킬 수 있을 것이다.

紫外線이나 可視光線을 이용해서 治病하는 光醫學分野의 연구도 활발하다. 環境汚染問題 解決에도 光生物學은 중요한 역할을 하고 있다. 즉 環境의 質的評價에는 微生物이나 下等動物의 生態狀況을 조사함으로써 가능하게 된다. 이러한 應用分野를 光生態學(Photoecology) 이라고 부르고 있어 光生物學分野도 각각 전문적인 분야로 細分되어 가고있다.

성실한자 불만없고 안일한자 만족없다.