

# 광합성 메커니즘 초기 경로 밝혔다

글\_조민행 고려대 화학과 교수 mcho@korea.ac.kr

**다**차원 분광학이란 빛과 물질간의 비선형적인 상호작용을 이용하여 물질의 구조 및 성질에 대한 정보를 얻는 방법이다. 비선형 분광 현상에 대한 이론 및 실험적인 연구는 오랜 역사를 지닌다. 그러나 1초분의 1초 정도의 극초단 적외선, 가시광선, 또는 자외선 레이저 펄스를 이용하여 다차원 분광 현상을 관찰할 수 있다는 이론적 제안은 1990년대 초반에 비로소 발표되었고, 관련된 실험은 1990년대 후반 들어서야 본격적으로 진행되었기 때문에 현재까지도 연구의 양과 질적인 측면은 아직 초보적인 수준에 머물러 있다. 그렇다면 다차원 분광학적 연구가 필요한 이유는 무엇일까.

## 1/1000초보다 느린 생화학적 반응, NMR로 규명

인간의 유전정보를 담고 있는 DNA의 염기서열을 밝히는 인간 지놈 프로젝트가 완결되었고, 그 결과 얻어진 수많은 유전자의 정보를 활용하는 차세대의 연구가 전세계적으로 활발히 추진되고 있다. 특히 단백질의 구조 및 성질에 대한 연구인 프로티오믹스는 그 중에서도 가장 중요한 부분에 해당하는 것으로 인식되고 있다.

단백질과 같이 복잡한 생체 분자 및 다양한 화합물들의 구조를 밝히는 실험 방법들에는 어떤 것들이 있는가. 현재 가장 폭넓게 활용되고 있는 분광 실험법으로는 X-선 회절 분광학과 이차원 핵자기 공명(NMR) 분광학 두 가지를 예로 들 수 있다. 이 방법은 각기 1950, 1980년대에 널리 활용되기 시작해 이제는 타의 추종을 불허하는 실험법으로 인정받고 있으며, 전세계에 대규모의 장비들이 구축되면서 그 활용 범위는 상상을 초월할 정도로 넓어지고 있다.

X-선 회절 실험법은, 단백질과 같은 분자의 결정에 X-선을 조사하고 산란되는 현상을 분석하여 역으로 결정 속에 존재하는 분자의 구조를 규명하는 방법이다. 그런데 이 방법은 구조를 규명하고자 하는 분자가 모여 비교적 큰 결정이 만들어져야 한다는 단점이 있다. 여러 종류의 중요한 단백질 분자들의 결정을 만드는 것이 쉽지 않다는 이유로 이차원 핵자기 공명 분광학이 새로운 대안으로 활용되고 있다. 그러나 이 방법의 경우에도 빠른 시간내에 구조가 변화하는 분자들의 연구에는 적절하지 않다는 단점이 있음이 잘 알려져 있다. 즉, 약 1000분의 1초보다 느리게 구조가 변화하는 경우에

는 시간에 따라 그 분자의 3차원 구조를 추적 규명하는 것이 가능하지만 대부분의 생화학적 반응 및 현상들은 이보다 현저히 빠른 속도로 진행된다.

여기에 언급한 두 가지 방법들은 공간적인 분해능과 정확한 구조 결정에 있어서 대단히 뛰어난 방법임에도 불구하고 각각 나름대로의 단점이 있다. 따라서 새로운 실험법을 찾기 위해 많은 노력이 경주되어 왔다. 그런 점에서 다차원 분광학이라는 것이 제3의 실험법으로 활용될 수 있다고 생각되어 현재 빠른 속도로 발전하고 있다. 그렇다면 다차원 분광학이란 무엇인가.

**기존 실험의 한계를 극복 '다차원 진동분광학'**

다차원 진동 분광학을 예로 설명하면 다음과 같다. 분자들은 원자의 수에 비례해서 진동하는 모드(방식)의 종류가 증가한다. 특히 진동 주파수는 그 분자의 3차원 구조와 밀접한 관계가 있다. 만약 분자의 특정 진동모드와 공명하는 적외선을 분자에 쬐일 경우 분자의 진동에 대한 정보를 스펙트럼으로 얻을 수 있다. 이것이 1차원 분광학이다.

2차원 진동 분광현상이란 일정한 주파수의 진동을 가진 빛을 분자에 쬐이는 것은 동일하지만, 이 때 2가지 종류의 서로 다른 주파수(색)의 빛을 사용하면 1차원 분광학에서는 얻을 수 없는, 서로 다른 2개의 진동 모드 사이의 상관관계까지 얻을 수 있다. 즉 두 모드간 상호작용의 크기를 측정하는 것이 가능하고 그 크기는 분자의 3차원 구조에 따라 민감하게 변화한다. 이 정보를 분석하여 분자의 구조에 대한 정보를 얻는 것이 바로 2차원 분광학이다. 마찬가지로 3가지 종류의 주파수를 사용하면

3차원 분광학이 된다. 실제 실험의 경우 수십 펨토초(1천조분의 1초)의 레이저 펄스를 사용하고 펄스들 사이의 시간 간격을 조절하여 비선형 광학적으로 산란되는 빛의 세기를 측정한다. 그 후 푸리에 변환을 하여 다차원 분광 스펙트럼을 얻는다.

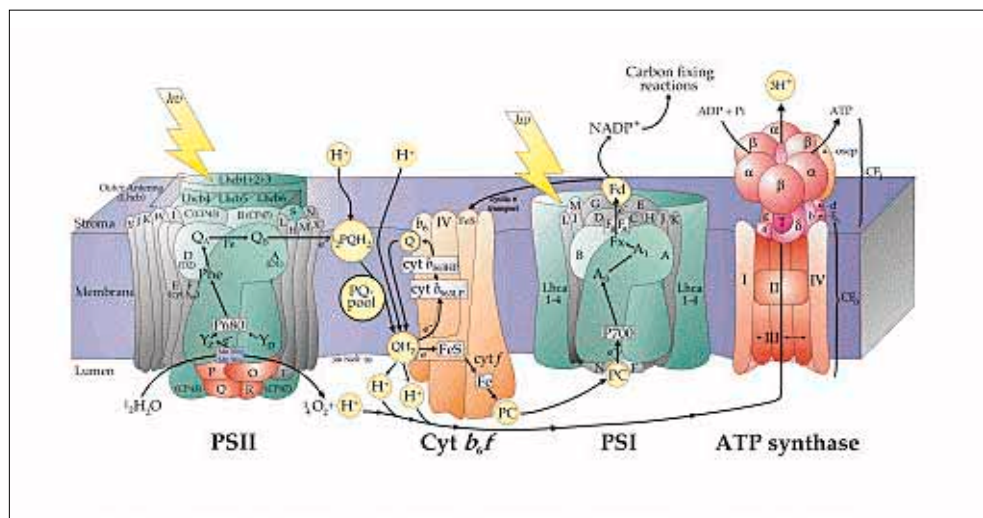
그렇다면 다차원 분광학이 지니는 장점은 무엇일까. TV에 비유하자면 흑백 TV와 컬러 TV의 차이라고 할 수 있다. 흑백 TV와 컬러 TV에서 우리가 보는 영상은 동일하지만 컬러 TV는 흑백 TV보다 색깔이라는 한 차원의 정보를 더 갖고 있다. 이와 마찬가지로 더 나아가 컬러 TV에서 나타나지 않는 입체감이라는 정보를 3D TV가 갖고 있다는 점에서 2차원을 넘어선 다차원 분광학의 개발이 가능해질 것이고, 그것을 통해 얻어낼 수 있는 정보의 양은 훨씬 많아질 것이다.

현재 연구단에서 중점적으로 연구하는 것은 단백질 분자의 3차원 구조를 예측하고 수학적 알고리즘을 통해 단백질 분자의 다차원 스펙트럼이 어떻게 얻어질 것인지를 이론적으로 계산하는 것이다. 연구단의 예측 결과가 실제로 들어맞는지 실험적으로 검증하는 작업은 미국의 위스콘신대, MIT, UC버클리 등의 연구실과 공동연구를 진행하고 있다.

**2차원 분광학 이용 에너지 전이 경로 밝혀**

이2차원 진동 분광학의 경우 분자의 진동 주파수에 해당하는 적외선을 이용하여 스펙트럼을 관찰하고 분자의 구조에 대한 정보를 유추해낸다. 2차원 진동 분광학과 병행해서 진행되고 있는 연구는 2차원 전자 분광학이다. 분자의 진동 대신에 분자에 포함되어 있는 전자의 양자역학적 상태들간의 전이 현상을 분광학적

〈그림 1〉 광합성 반응에 참여하는 단백질 복합체의 구조와 역할



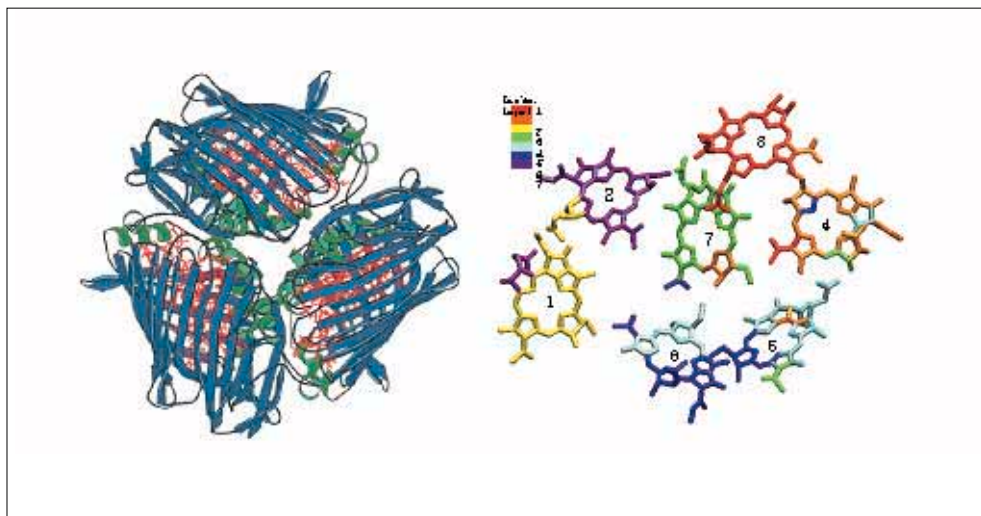
으로 관찰하는데 펨토초의 펄스를 활용하여 2차원 전자 분광 스펙트럼을 얻는 것이 가능하다. 본 연구실과 버클리에 있는 플레밍 교수의 연구실간의 공동연구를 통해 2차원 전자 분광학을 광합성 반응의 초기( $1/10^{12}$ 초 이내)에 일어나는 에너지 이동 현상을 연구하는데 최초로 적용하였으며, 그 연구 결과는 지난 3월 31일자 '네이처' 지에 발표되기도 하였다. 이 논문은 2차원 분광학의 가능성과 이론적 가설을 직접적으로 검증한 예라는 점에서 중요성을 인정받고 있다. 광합성 현상은 빛에너지를 화학에너지로 변환시키는 과정을 말한다(그림 1 참조).

태양으로부터 지구에 도달한 빛의 알갱이인 광양자는 광합성 단백질에 붙어있는 클로로필 분자에 에너지를 전달하고 소멸한다. 이렇게 흡수된 에너지는 여러 분자들 사이를 이동하다 궁극적으로 광합성 반응센터라는 단백질내에서 화학에너지로 전환된다. 물론 지구상의 모든 생명체는 이렇게 저장된 에너지를 이용하여 생명 현상을 유지하고 종의 번식과 진화를 거

듭하고 있다. 네이처에 발표한 논문에서는 여러 다른 광합성 단백질 복합체 중에서 FMO(Fenna-Matthew-Olson) 단백질을 연구 대상으로 선택하였다(그림 2 참조).

광합성 현상의 초기 단계인 에너지 전이 경로와 메커니즘을 규명하는데 2차원 분광학적 연구방법은 타의 추종을 불허하는 정밀도의 시간-공간적 분해능을 가진 도구라는 점이 처음으로 밝혀졌다.

예를 들어 〈그림 1〉에서 위에 있는 두 개의 2차원 스펙트럼은 광합성 단백질이 빛을 흡수한 후 200, 그리고 1천 펨토초가 경과했을 때 얻어진 것들이다. 대각선상에 위치하는 봉우리의 크기와 모양이 시간에 따라 변화하고 있으며 그 이외의 영역에서 관찰되는 봉우리의 크기가 점차 커지는 것이 관찰되고 있다. 아래 두 개의 2차원 스펙트럼은 이 현상을 이론적으로 계산한 것으로써 실험적 관찰과 상당히 일치함을 볼 수 있다. 이 연구를 통해 광합성 현상의 초기 단계인 에너지 전이 경로와 메커니즘이 규명된 것이다.



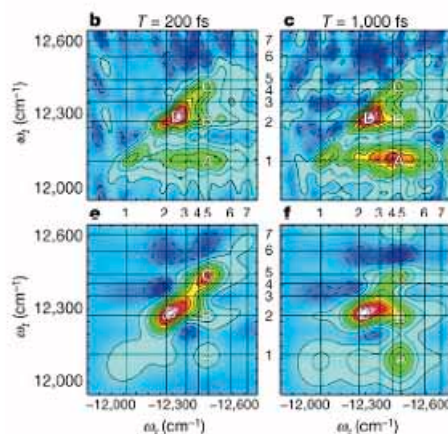
〈그림 2〉 왼쪽 그림은 FMO 광합성 단백질의 3차원 구조이고, 오른쪽 그림은 각 단위체에 내포되어 있는 7개의 클로로필 분자 배열을 서로 다른 색으로 표현하고 있다. 이 때 색의 의미는 상대적인 에너지 준위를 나타내는 것으로서 빨간색으로 그려진 클로로필의 에너지 준위가 가장 낮다.

**자연과학 전반에 걸쳐 다차원 분광학 활용 기대**

종합적인 의미에서의 생명과학이 추구하는 궁극적인 목적은 생명현상을 분자 및 화학의 수준에서 이해하는 것이다. 따라서 종래의 실험 방법으로 해결할 수 없는 수많은 피상적 생물화학 현상들을 미시적인 관점에서 설명할 수 있다면 분자과학으로서의 생명과학을 한 단계 발전시키는 결과를 가져올 것이다.

저명한 물리학자인 다이슨은 자연과학의 발전을 두 가지 측면으로 구분해 분석하였다. 첫째는 새로운 개념의 발견, 즉 패러다임의 변환이라는 과정을 통해 발전한다고 보았고, 두 번째는 새로운 연구 도구의 발견을 통해 가능하다고 했다. 2차원 분광학을 통한 광합성 초기 에너지 전이 경로와 메커니즘 규명은 후자에 해당하는 연구이다.

다차원 분광학적 방법은 광합성 현상뿐 아니라 시간에 따라 변화하는 단백질의 구조, 분자 집합체의 전자 구조 및 에너지 이동 현상, 효소의 반응 동력학, 고체 표면에서의 화학반응 및 진동 동력학 등의 연구와 같이 자연과학 전반



〈그림 3〉 위 두 개의 2차원 전자 분광 스펙트럼은 실험적으로 측정된 것이고, 아래 두 개의 것들은 이론적으로 계산(시뮬레이션)된 것임.

에 폭넓게 활용될 수 있는 새로운 연구방법이 될 것으로 기대되고 있다.



글쓴이는 서울대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 시카고대학교에서 박사학위를 받았고, MIT에서 박사 후 연구원을 지냈다.