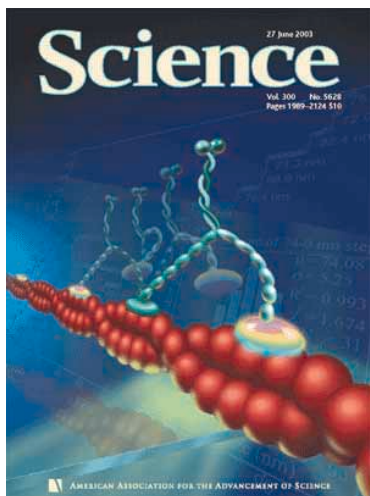


물질내 현상의 원리를 밝힌다

글_ 정현식 서강대학교 물리학과 교수 hcheong@sogang.ac.kr



근육의 수축 등 단백질의 운동에 관여하는 단백질 분자모터의 운동을 분광학적으로 규명한 일리노이대학 하택집 교수의 연구를 커버스토리로 소개한 사이언스지 표지

기획연재순서

- ④ 21세기의 수학
- ⑤ 21세기의 천문학
- ⑥ 21세기의 해양학
- ⑦ 21세기의 지질학
- ⑧ 21세기의 생태학
- ⑨ 21세기의 기상학
- ⑩ 21세기의 생명과학
- ⑪ 21세기의 생물정보학
- ⑫ 복잡성의 과학
- ⑬ 재료과학
- ⑭ 고고학
- ⑮ 결정학
- ⑯ **광과학**

지난 4월 19일에는 아인슈타인의 서거 50주기와 아인슈타인의 주요 논문 세 편이 발표된 ‘기적의 해’ 2005년을 기념하는 세계 물리의 해 국제 행사의 일환으로 아인슈타인이 생애를 마친 미국 프린스턴에서 출발한 빛이 지구를 한 바퀴 도는 ‘세계 빛 축제’의 국내 행사가 전국적으로 열렸었다. 흔히 아인슈타인 하면 상대성 이론을 떠올리지만, 아인슈타인은 빛이 날개의 에너지를 갖는 빛알(광양자, 광자)로 구성되어 있다는 광양자설을 1905년에 발표한 그의 광전자효과 논문에서 제시하여 그 공로로 노벨상을 수상하였다. 그뿐만 아니라, 물질에 의한 빛의 흡수와 방출을 기술하는 ‘아인슈타인의 A와 B 계수’를 제시하여 그 후 개발된 레이저 작동원리의 기초가 되는 이론을 정립하기도 하였다. 현대 광과학이 다루는 많은 분야에서 빛알의 개념을 사용하고, 실제 광과학 연구의 중요한 도구로 레이저가 광범위하게 사용되고 있다는 점에서, 아인슈타인이 광과학의 기초에 기여한 영향을 무시할 수 없을 것이다.

보다 짧은 레이저 펄스 개발이 관건

‘광과학’은 빛과 관련된 자연현상을 연구하는 과학의 모든 분야를 통틀어서 일컫는다. 하지만 구체적으로는 광과학이라는 용어가 아직 제대로 정립되지도

않았고, 어디까지가 광과학의 범주에 들어가는지도 불분명한 현실이다. 영어로 광과학에 해당하는 용어는 ‘Photonics’와 ‘Optical Science’가 있다. ‘Photonics’의 사전적 정의는 ‘빛과 관련된 연구를 하는 모든 분야의 학문’으로서 광과학의 개념과 일치하지만, 실제로는 광전자기술의 개념과 거의 구분 없이 사용되기 때문에 과학적 측면보다는 기술적 측면에서 더 많이 사용되는 용어이다. 반면에 ‘Optical Science’라고 하면 전통적인 광과학 이에서 파생된 물리학의 범위를 주로 일컫기 때문에 광과학 전체를 지칭하기에는 부족한 점이 있다.

광과학의 범위에 해당하는 학문분야는 물리학에서 빛 자체의 특성 및 빛과 물질의 상호작용을 빛의 관점에서 다루는 광과학과 빛을 이용하여 물질의 특성을 규명하는 분광학의 분야가 있다. 화학에서는 빛과 화학반응을 연구하는 광화학이 있고, 생물학에서는 생물체와 빛의 상호작용을 연구하는 광생물학이 있다. 하지만 이들 각 분야의 연구영역의 경계가 모호하고, 실제로 많은 경우에 둘 또는 그 이상의 분야에 걸친 연구가 이루어지고 있기 때문에, 이 분야는 그야말로 요즘 유행하는 ‘융합학문’이라고 할 수 있다.

광학은 물리학의 전통적인 분야이다. 분광학처럼 광학도 빛과 물질의 상호작용

용을 다루지만, 광학에서는 그 관심의 초점이 빛에 있다. 빛의 반사나 굴절, 흡수 등을 다루는 고전적인 광학에 비해 현대광학에서 다루는 범위는 훨씬 다양하다. 우선 각종 레이저를 개발하는 연구를 들 수 있다. 레이저는 백열등과 같은 광원과 달리 에너지와 진행 방향이 똑같은 빛알로 이루어진 빛살을 만들기 때문에 광과학에서 다루는 많은 연구에서 중요한 도구로 사용된다. 따라서 광과학의 발전을 위해서는 여러 가지 기능을 가진 레이저를 개발하고 활용하는 것이 무엇보다도 중요하다. 레이저 개발 연구의 주요 과제는 레이저의 출력을 향상시키고, 레이저 빛의 파장을 다양하게 제어하며, 레이저 펄스의 길이를 짧게 해서 시간분해능을 높이는 것이다. 이 중에서 광과학에의 응용 측면에서 가장 집중적으로 연구되는 것은 시간분해능을 높이는 것이다.

레이저를 이용하여 물질 내부에서 일어나는 변화를 높은 시간분해능으로 조사하기 위해서는 짧은 레이저 펄스가 필수적이다. 최근 20여 년간에 걸쳐 짧은 레이저 펄스를 만드는 기술은 눈부신 발전을 거듭하여 최근에는 1펨토초(10^{-15} 초) 이하의 짧은 펄스를 만드는데 성공하였다. 1펨토초 이하의 짧은 펄스는 아토초(10^{-18} 초) 단위로 나타낸다. 지속시간이 1펨토초인 펄스는 그 길이가 300

nm밖에 되지 않는데, 가시광선 빛의 파장이 400~700nm라는 것을 감안하면, 이런 펄스는 빛의 1주기보다도 짧은 시간 지속되는 그야말로 놀라울 정도로 짧은 펄스이다. 이렇게 보다 짧은 펄스를 낼 수 있는 레이저를 개발하는 연구는 현대 레이저 물리학의 최첨단 프런티어 중의 하나이다.

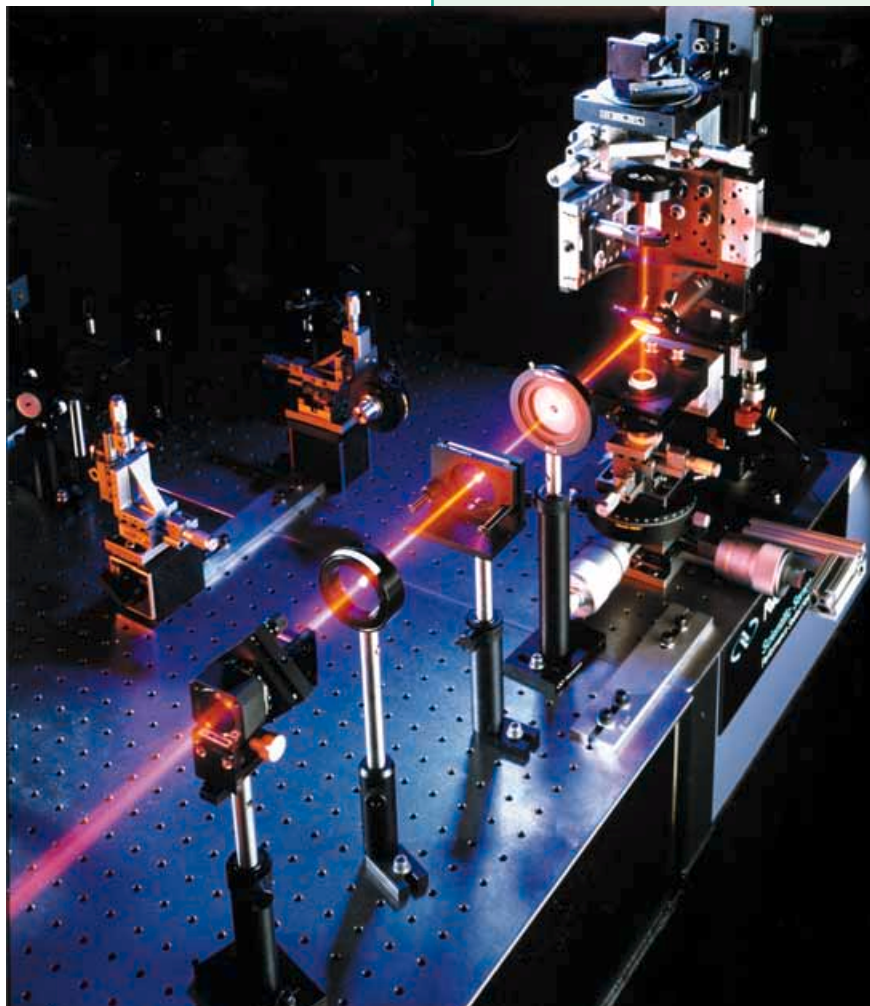
‘음의 굴절’ 현상 갖는 물질 찾아야

광학의 또 다른 중요한 연구분야는 비선형광학 현상의 연구이다. 빛이 물질과 상호작용을 할 때, 들어가는 빛의 세기와 나오는 빛의 세기가 비례하는 현상을 선형광학현상이라고 하고, 나오는 빛의 세기가 들어가는 빛의 세기의 제곱이나 세제곱 등 높은 차수에 비례하는 경우를 비선형광학 현상이라고 한다. 이러한 비선형광학현상에서는 들어가는 빛의 에너지가 합해져서 새로운 파장의 빛이 생기기도 하고, 들어가는 빛이 서로 다른 에너지를 갖는 빛으로 갈라져서 두 개 이상의 파장을 갖는 빛으로 변환되기도 한다. 이러한 비선형광학 현상을 이용하면 단일 파장의 레이저로부터 다양한 파장의 레이저빛을 만들어 낼 수도 있다. 그런데 보통의 물질에서는 비선형광학 현상이 매우 약하게 일어나므로, 상대적으로 큰 비선형광학 특성을 보이는 물질을 찾는 것이 중요한 연구 분야 중 하나

이다.

최근에는 비선형광학 현상과는 조금 다르지만, ‘음의 굴절’을 보이는 물질에 대한 탐구가 큰 관심을 끌고 있다. 이런 물질을 이용하면, 보통 물질과 달리 평평한 모양으로도 마치 렌즈처럼 빛을 모을 수 있기 때문에 많은 응용 가능성이 있을 것으로 기대된다. 그러나 아직까지는 마이크로파의 파장영역에서만 이런 물질이 실험적으로 입증되었을 뿐 가시광선 영역에서는 아직도 실현되지 않고 있다. 이밖에도 빛알 사이의 상관성을 이용하여 광컴퓨터 또는 양자컴퓨터에 활용할 단위 소자 및 제어방법론을 개발하는 양자광학의 분야도 있다.

빛을 이용하여 물질 내부에서 일어나는 현상을 탐구하고 물질의 특성을 알아내는 학문의 분야를 분광학이라고 한다. 사실 광과학 연구의 대부분은 분광학이라고 해도 과언이 아닐 정도로 분광학의 범위는 넓다. 분광학 측정에서는 측정하고자 하는 대상 물질에 빛을 쬐어주고, 그 물질에서 반사 또는 산란되거나, 물질을 투과하는 빛을 빛알의 에너지, 즉 빛의 파장에 따라 측정한다. 분광학을 통하여 알아낼 수 있는 물질의 특성은 물질의 결정구조, 에너지 구조, 유전율, 자성구조 등 실로 다양하다. 우리 눈이 사물의 색깔을 구별하는 것도 일종의 분광측정이라 할 수 있다.



공초점 방법을 이용하여 수백nm 정도의 분해능으로 분광측정을 하는 장치

분광측정은 현대과학의 초기부터 광범위하게 사용되어 왔다. 최근 분광학 연구의 새로운 경향은 전통적인 분광측정을 지금까지보다는 훨씬 좋은 공간 및 시간분해능과 훨씬 높은 감도로 측정하는 기술을 개발하는 것이다. 렌즈를 이용하여 집광하면, 빛의 파동성에 의한 회절(에돌이)현상 때문에 대략 빛의 파장 크기 이하로 빛을 모을 수가 없는데, 이를 빛의 회절한계 또는 에돌이한계라고 한다. 최근의 분광학 연구에서는 이러한 회절한계를 극복하여 빛의 파장보

다 훨씬 작은 크기에서 일어나는 현상을 분광학적으로 측정하려는 시도가 관심을 받고 있다. 이를 위해서 끝을 100nm 정도로 가늘게 만든 광섬유를 이용하는 근접장현미경 방법을 사용한다든지, 원자현미경 등의 탐침이나 금 또는 은나노입자 등에 의해 분광신호가 크게 증폭되는 현상을 이용하여 수십nm 범위의 분해능을 얻기도 한다.

또한 위에서 언급한 극히 짧은 펄스를 레이저를 이러한 기술과 결합하여 높은 공간분해능과 시간분해능을 동시에 얻기 위한 기술도 개발하고 있다. 최근에는 고립된 반도체 양자점 한 개에서 방출되는 날개의 빛알을 구분하여 측정할 수 있을 정도의 높은 시간 및 공간 분해능이 가능해졌다. 이와 같이 광과학의 여타분야에서 많이 활용되는 첨단기술들은 주로 물리학 분야에서 많이 개발되고 있다.

광화학·광생물학의 대표 사례 ·· 스모그, 광합성

전통적인 광화학에서는 빛을 흡수한 물질의 화학반응, 또는 화학반응의 결과 일어나는 발광현상 등을 연구한다. 대기 중의 오염물질인 탄화수소나 이산화질소 등이 태양의 자외선과 반응해 각종 유해물질을 만들어서 생기는 광화학스모그가 우리 주위에서 볼 수 있는 광화학 반응의 대표적인 예이다. 이밖에도 햇볕을 쬐인 종이의 색이 바랜다든지, 빛에 의해 사진필름에 반응이 일어나서 사진이미지가 저장되는 것도 모두 광화학 반응의 일종이다. 이런 광화학 반응

에서는 빛알을 흡수한 반응물질이 빛알의 에너지에 해당하는 에너지를 받아 안정된 바닥상태에서 불안정한 여기상태로 전이하고, 이러한 여기상태의 반응물질이 화학반응을 쉽게 일으키게 되는 것이다.

최근에는 첨단 레이저기술이 광화학 분야 연구와 결합되면서, 예전에는 그 반응속도들이 너무 빨라 규명하기 어려웠던 들뜬 상태의 분자내 또는 분자간에 이루어지는 에너지 전달, 전자 또는 양성자나 기타 이온의 전달 등과 같은 새로운 광화학적 현상이 발견되고, 그 원리에 대한 연구가 활발해지고 있다. 위에서 언급한 첨단 고분해 분광학 연구방법을 사용하여 단일 분자를 격리하여 그 전자 여기구조나 화학반응을 펄초 단위의 시간분해능으로 규명하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

광생물학은 생물학의 분야 중에서 빛과 생명체 사이의 상호작용을 연구하는 분야를 말한다. 광생물학적 과정의 대표적인 예는 바로 식물이 이산화탄소와 물로부터 탄수화물을 합성하는 광합성이다. 즉, 생태계를 유지하는 먹이사슬의 첫단계인 광합성에 필요한 에너지를 빛이 제공하는 것이다.

빛이 망막의 시신경과 상호 작용할 때 발생하는 전기신호를 뇌가 처리하여 우리가 보게 된다. 또한 일부 생물들이 보이는 주광성이나, 식물이 자랄 때 해가 있는 방향으로 휘는 것, 낮의 길이에 따라 꽃이 피는 것도 빛에 의한 자극에 생물이 반응하는 것으로서 빛을 감지하는 광수용체에서 발생하는 화학적 변화에

생물체가 반응하는 것이다. 이렇게 빛에 대해 생명체가 반응하는 메커니즘을 규명하는 것은 광생물학 연구의 중요한 분야이다. 빛에 대한 반응이 이보다 좀 더 미묘한 경우도 있다. 예를 들어 어두운 곳에서 오래 지내면 기분이 침울해진다든지 날씨가 좋은 날 밝은 태양 아래에 나가면 기분이 좋아진다든지 하는 경우이다. 이런 것은 흔히 심리적인 것이라고 생각하지만, 그런 심리적인 변화도 빛에 대한 인체의 반응에서 오는 것이라는 점에서 넓은 의미에서 광생물학의 연구대상이 된다.

생체내 단백질·세포운동 측정 가능해져

황달에 걸린 신생아에게 빛을 쬐는 치료를 하는 것처럼 빛이 질병의 치료에 활용되는 경우도 종종 있다. 반면 자외선을 많이 쬐면 피부암이 생길 확률이 커지고, 피부의 노화나 시각기능의 감퇴가 빨라지기도 한다. 뿐만 아니라 자외선은 세포내에서 돌연변이를 일으키거나 유전자를 파괴하고, 생체균형에 중요한 화학물질들에 변화를 일으키기도 한다. 빛에 의한 유익한 효과의 원리를 찾아내어 그런 효과를 활용하는 방법을 개발하고, 유해한 효과의 원인을 규명하여 그런 위험으로부터 생명체를 보호하는 방법을 개발하는 것도 광생물학의 중요한 과제이다. 반딧불이나 발광박테리아와 같은 일부 생물은 스스로 빛을 내보낸다. 이런 생물들이 내부의 화학적 반응에 의해 빛을 생성하는 과정을 설명하고, 그 과정을 제어하고자 하는 연구도 광생물학의 흥미로운 분야이다.

최근에는 광생물학 분야에서도 첨단 고분해 분광기술을 사용하여, 실제 생체 안에서 일어나는 생화학적 반응과 각종 단백질 및 세포의 운동 등을 측정할 수 있게 되었다. 예를 들어, 근육의 수축 등 단백질의 운동에 관여하는 단백질 분자 모터의 운동을 1.5nm의 높은 공간분해능을 가진 분광학기술을 사용한 측정을 통해, 근육이 수축될 때 실제로 단백질 분자들이 어떻게 움직이는지를 처음으로 규명하기도 했다.

광과학의 범주에 드는 물리학, 화학, 생물학의 연구 분야와 연구의 대상은 차이가 있을지라도 사용하는 방법에는 상당한 유사성이 있다. 실제로 최근 들어 학문간 영역의 경계가 불명확해지면서 서로 융합되는 경향이 많아지고 있는데, 특히 광과학 분야에서는 분야 사이의 밀접한 협력이 최근 발전의 원동력이 되고 있다. 이러한 융합과 협력연구의 경향은 계속 이어질 것으로 보여, 앞으로는 개별적인 광학, 분광학, 광화학, 광생물학의 분야가 아니라 통합적인 ‘광과학’ 분야로 발전해 나갈 것으로 예상된다. 이런 광과학 분야에서의 주요 과제는 높은 시간 및 공간 분해능을 갖는 측정방법을 개발하고, 이를 이용하여 생체 물질을 포함한 각종 물질내에서 일어나는 물리적, 화학적, 생물학적 현상의 원리를 구체적으로 규명하는 것이 될 것이다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 물리학과를 졸업 후, 미국 하버드대학교에서 물리학 석사와 박사학위를 받았다. 미국 국립재생에너지연구소 책임연구원을 지냈으며, 현재 한국물리학회 학술 실무이사를 겸임하고 있다.