

# 하늘이 파란빛을 띠는 이유 (Why the sky is blue)

강대현 (Daehyeon KANG)  
(samplemoon@korea.kr)

## 요약(Abstract)

하늘이 파란이유를 형광현상으로 설명한다.  
why the sky is blue is explained by fluorescence.

## 1. 서론

하늘은 왜 푸른가 하는 것은 오랜 옛날부터 많은 사람들이 궁금하게 생각해왔던 질문이었다. 높은 고도에서 천정(zenithal) 방향의 하늘은 분명하게 푸른빛을 띠며, 중간 고도에서도 대개의 경우 하늘은 푸른빛을 나타내곤 한다. 예로부터 하늘이 푸른 이유에 대한 다양한 유형의 설명이 있어 왔다. 우선 근대 과학의 초창기에 많은 과학자들은 빛의 굴절과 반사에 의해서 하늘이 푸른 이유를 설명하려고 했다. 하지만 하늘이 푸른 이유가 빛의 산란에 의한 것이라는 것은 19세기 말에 와서야 분명한 형태로 밝혀졌다. 1871년 영국의 존 윌리엄 스트럿, 즉 제 3대 레일리 경(John William Strutt, from 1881 the third Lord Rayleigh, 1843-1919)은 빛의 산란 이론을 바탕으로 해서 하늘이 푸른 이유를 처음으로 이론적으로 설명했던 것이다.

레이리의 산란 이론에 의하면, 하늘이 푸른 이유는 대기 중에서 빛이 빛의 파장의 약 1/10 이하의 미립자를 통과할 때 생기는 산란의 세기가 파장의 4제곱에 반비례하기 때문이다. 즉 태양 빛이 대기 중을 통과할 때 짧은 파장의 빛일수록 더 많이 산란되기 때문에 하늘이 푸른 빛을 띠게 된다는 것이다. 예를 들어 푸른빛(파장의 길이 400 nm)의 산란율은 붉은빛(파장의 길이 640 nm)에 비해 약 6배 가량 크기 때문에 푸른빛이 더욱 강해지는 것이다. 같은 원리로 해질 무렵과 해뜰 무렵 하늘이 붉은 이유도 설명할 수 있다. 해질 무렵과 해뜰 무렵에 태양 빛은 더욱 먼 거리를 통과해야 하기 때문에 푸른빛은 거의 다 산란되고, 지구에 직접 도달하는 빛은 붉은색이나 주황색을 띠게 된다는 것이다.

## 레이리와 푸른 하늘에 대한 이론적 설명

1871년 존 스트럿은 틴들 효과를 설명하기 위한 이론적인 설명을 제시했다. 이 논문에서 존 스트럿은 빛의 산란의 세기가 파장의 4제곱에 반비례함을 수학적으로 증명하여, 하늘이 푸른 이유를 성공적으로 설명할 수 있었고,

하지만 당시 존 스트럿이 하늘이 푸른 이유를 설명하는 방식은 현재 우리가 하는 설명과는 상당히 다른 것이었다. 그는 현재의 우리처럼 맥스웰의 전자기학적 이론을 바탕으로 자신의 설명을 전개한 것이 아니라, 19세기에 전자기학을 설명할 때 많이 통용되던 고체의 탄성 이론을 이용해서 이 현상을 설명했던 것이다. 1881년 이제는 제 3대 레일리가 된 존 스트럿은 맥스웰의 전자기학을 수용해서 자신이 고체 탄성 이론에 의해 전개했던 이론을 맥스웰의 전자기학으로 대체했다.

## 후기 레일리 이론

초기의 레일리 설명에 의하면 빛이 푸른 이유는 대기중의 먼지와 같은 작은 부유 물질이 존재하기 때문이었다. 즉 초기 레일리의 설명에는 부유 물질이 없으면 대기는 푸른빛을 띠지 않을 것이라는 것이 암묵적으로 포함되어 있었다. 그렇다면 부유 물질이 없는 청명한 하늘도 푸른 것인가? 이에 대한 이론적 설명은 역시 레일리에 의해 주어졌다. 1899년 레일리는 먼지, 수증기 등 부유 물질이 없어도 산소와 질소의 대기 분자들에 의한 산란에 의해서도 하늘이 푸른 현상이 나타날 수 있다는 주장을 내어놓았다. 즉 레일리의 후기 이론에 의하면 아주 깨끗하고 맑은 대기도 빛의 산란에 의해서 푸른 하늘을 나타낼 수 있게 된다. 더욱이 레일리의 후기 이론은 초기 이론과는 달리 현대적인 맥스웰의 전자기학에 바탕을 두고 있었다.

레일리는 자신의 후기 산란 이론에서 부유 물질이 없는 공기 분자들만으로 대기의 투명도를 설명하는 데 충분한가 아닌가 하는 문제를 제기했다. 1906년 이후 부유 물질이 없는 대기 중에서도 푸른 하늘을 나타낼 수 있다는 레일리가 후기에 주장한 내용을 입증하는 몇몇 관측 자료가 나타나기 시작했다. 우선 1906-7년 미국 스미스니언 연구소는 워싱턴과 월슨 산에서 다양한 파장에 걸쳐서 대기의 투명도에 대해 관측했다. 결국 과학자들은 해수면뿐만이 아니라 아주 높은 고도에서 측정한 관측을 통해서 부유 물질이 없을 때도 레일리 산란 이론에서 유도되는 이론적 예측이 유효함을 확인할 수 있게 되었다.

## 푸른 하늘의 실험실 상의 재현

푸른 하늘을 실험실에서 재현하고자 하는 실험은 제1차 세계대전 기간 중 프랑스의 카바네(J. Cabannes), 폴란드의 마리안 스몰루초프스키(Marian Smoluchowski, 1872 -1917), 그리고 존 스트럿(John William Strutt)의 아들이며 아버지가 죽은 1919년부터 제4대 레일리가 되는 로버트 스트럿(Robert John Strutt, 1875-1947)에 의해 체계적으로 실시되었다.

1915년 카바네는 사진 광도계 방법을 사용해서 레일리의 식을 정량적으로 입증하려고 시도해서 레일리 식에 해당하는 몇몇 결과를 얻었다. 1916년에는 스몰루초프스키 역시 푸른 하늘에 관한 레일리 이론을 입증하는 몇몇 실험 결과를 얻었다. 미세한 부유 물질이 없는 순수한 공기에 빛이 투과해서 푸른색을 나타낸다는 것을 실험실에서 가장 확실하게 재현한 사람은 로버트 스트럿이었다. 로버트 스트럿은 진공관 내의 기체 방전의 잔광(afterglow), 밤하늘에 나타나는 야광에 대해 많은 관심을 가지고 연구한 학자였다. 이런 연구와 연관해서 스트럿은 1918년부터 푸른 하늘을 복원하는 일련의 실험 결과를 발표했다. 우선 그는 항공기의 움직임을 추적하기 위해 사용하는 탐조등 빛에서 아주 청명한 밤과 지상에서 높은 고도에서도 빔의 궤적에 따라 매우 여리지만 분명한 푸른빛의 산란 현상이 나타나는 것에 주목했다. 튜브의 실험에서는 먼지가 없는 공기에서 빛이 산란하는 것을 관찰할 수 없었는데, 그 이유는 먼지가 없는 공기에서는 강력한 빔의 궤적이 아주 어두워지기 때문이었다. 이런 난점을 극복하기 위해 로버트 스트럿은 용기 벽에서 빛이 퍼져나가는 것을 최대한 막고, 가능하면 가장 어두운 배경에서 공기를 통과한 빛을 관찰하도록 만들었다. 맑은 날의 조도는 보름달의 밝기에 비해 약 550,000배가 되는 것으로 추정되었다. 따라서 로버트 스트럿은 약 5 마일로 추정되는 대기의 높이의 550,000분의 1에 해당하는 0.58. 인치 두께로 실험실의 공기 층을 축소시키고, 조도를 보름달의 밝기로 유지해 실험을 했다. 이런 일련의 실험 조건을 만족시킨 뒤 마침내

스트럿은 먼지가 없는 공기로 가득 찬 실험실 내에서 푸른 하늘을 재현하는 데 성공했다.

스트럿은 이어 계속된 실험에서 빛의 산란도 조사했는데, 공기를 통과하고 나온 빛이 완전 편광에서 약간 벗어나는 것을 발견했다. 이렇게 완전 편광에서 벗어나는 현상이 나타나는 것은 산소나 질소 분자가 완전히 구형이 아니라 방향성을 지니고 있기 때문이었다. 이처럼 1920년대 초에 이르러 과학자들이 하늘이 푸른 현상을 실험실에서 완전히 재현할 수 있게 되면서, 하늘이 푸른 이유가 레일리 산란에 설명된다고 믿게 되었다.

## 2. 본문

### □ 레일리 산란이론에 제기되는 의문점

빛의 산란이 빛의 진동수의 4제곱에 비례한다면 하늘이 파란색보다 보라색이어야 한다.

보라빛이 파란빛보다 진동수가 상당히 더 높기 때문에 이런 의문이 드는 것이다.

이 의문에 레일리산란이론으로 답하기 곤란한 내용이다.

보라색이 대기 상층에서 다 산란되어 보라색이 안보이게 된다는 보라색이 산란되지만 사람 눈이 파란빛에 감도가 더 높아 보이지 않는다는 학자들의 말을 찾아볼 수가 있다.

하지만 위의 내용은 현실과 맞지않다.

지상의 무지개에 보라빛이 보인다는지, 태양빛을 프리즘에 통과시켜보면 보라빛이 나타난다는지 하는 명백한 증거가 있다.

사람 눈의 감도때문이라는 설도 문제가 있다.

하늘을 카메라로 찍은 사진이나 인공위성에서 찍힌 지구영상을 보면 보라색이 없다.

널리 알려진 것처럼 카메라나 동영상은 진동수가 높은 빛에 더 감도가 훨씬 좋다.

현실적으로 대기중에서 보라빛은 산란이 없다는 증거는 명백하다.

진동수가 더 높은 보라빛을 제치고 하늘이 파란빛인 이유를 설명하기에는

얼핏 그럴듯해 보이지만 레일리 산란이론은 현실과 맞지않다.

고전전자기학을 가시광선처럼 진동수가 높은 전자기파에 적용하는 것은 무리가 있다.

맥스웰방정식에서 하전입자가 진동을 하면서 전자기파를 내보낸다고 한다면 전자기파의 진동수와 하전입자의 진동수는 같은 주파수로 나타나게 된다. 전자기파의 진동수가 작은 경우에는 근사적으로 현실과 맞다고 볼 수도 있다.

오래전 1920년대에 확립된 양자역학에 의하면 빛의 진동수는 2개의 양자상태의 에너지 준위 차에 의해 결정된다는 것이다.

양자역학이 개발된 지 100년이 다 되어가는 지금 고전 전자기학으로 원자 1-2개로 이루어진 물질과 전자기파의 상호작용을 다루는 것은 적절하지 않아 보인다.

대기중에 질소나 산소분자를 고전전자기학을 바탕으로 나온 레일리 산란이론으로 다루기 보다는 양자역학으로 다루어져야 한다고 본다.

### □ 하늘이 파란빛을 띠는 이유

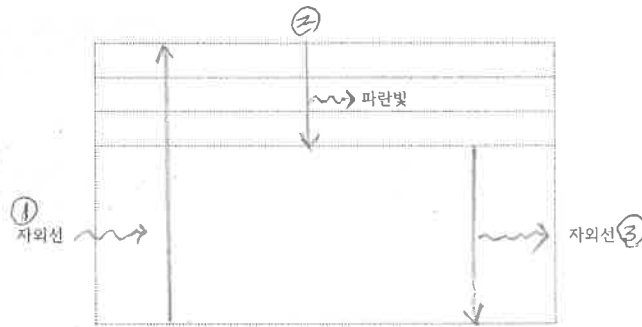
누구나 알고 있지만 하늘은 파란빛이 사방으로 퍼져나가보인다. 이것은 대기를 이루는 질소분자나 산소분자가 태양빛에서 어떤 광자를 흡수하고 파란빛을 방출하기 때문이다.

우리가 일상에서 흔히 보는 형광현상과 원리가 같은 것이다.

대개, 형광은 물질이 높은 진동수의 빛을 흡수했다가 흡수된 진동수보다 낮은 진동수의 빛을 방출하는 것이다. 대기중의 분자가 태양빛에서 자외선을 흡수하고 파란빛을 사방 팔방으로 뿜어내는 현상이다. 이것이 하늘이 파란 이유이다.

하늘이 파란빛만 보이는 이유는 질소나 산소분자의 에너지준위 구조가 그렇게 되어있어서 라고 하면 되겠다. 에너지준위와 더불어 선택율이 그렇게 작용할 수도 있을 것이다.

대기중 분자 1개가 태양빛에서 자외선광자 1개를 흡수하여 들뜬상태가 되고나서 파란빛 광자를 1개를 방출하고 나서 다시 자외선 광자 1개를 방출하며 바닥상태로 돌아가는 구조라고 하면 되는 것이다.



### 3. 결론

해질 무렵이나 지평선에 해가 떠오르때 붉게 보이는 것은 크기가 제법 큰 먼지나 물방울에 의해 파장이 짧은 빛이 흡수가 잘되고 파장이 긴 빛은 흡수가 상대적으로 안되기 때문이라 이해를 하면 맞다고 본다.

그런데 해질 무렵이나 동틀 무렵 해가 있는 반대편인 동쪽이나 서쪽하늘을 보면 하늘은 여전히 파란빛이다. 인공위성에서 본 지구영상에도 파란빛인데 이것은 태양빛이 질소분자나 산소분자로 이루어진 대기층을 지나면서 아주아주 작은 비율로 태양빛이 흡수된다는 것을 의미한다.

양자역학이 등장한 지 100년이 다 되어가는 시점에 고전전자기학을 바탕으로 만들어진 레일리산란을 버리고 하늘이 파란이유를 형광현상으로 설명하자는 바람이다..

### 참고문헌

- (1) 임경순의 물리이야기-레일리와 푸른하늘 - 저자 포항공대 임경순 교수,