

# 무지개

자연의 빛이 만드는 아름다운 장면으로 노을과 무지개가 있다. 땅에서부터 하늘로 솟아오른 둥근 색 띠의 모습으로 인해 무지개는 땅과 하늘 또는 인간과 신을 이어주는 다리, 전령, 약속 등으로 신화화되었다. 주로 비가 온 후에 해가 나오면서 나타나기에 무지개가 물과 연관되어 있다는 것은 일찍부터 알려졌다. 우리말에서도 물에서 ‘크’이 탈락하고 둥근 문을 뜻하는 지개가 합쳐서 ‘무지개’가 되었다. 파란 하늘과 노을은 대기가 햇빛으로 빛은 예술이라면 무지개는 햇빛이 물방울을 만나서 펼쳐지는 예술이다.

## 물방울이 햇빛으로 무지개를 만드는 원리

무지개는 보기에 아름다울 뿐만 아니라 빛이 가진 직진, 반사, 굴절, 분산, 간섭, 편광 등의 성질을 모두 보여주는 자연현상이다. 때문에 빛의 예술뿐만 아니라 과학을 보여주기에 더없이 좋은 소재다.



▲ <그림 1> 무지개는 보기에 아름다울 뿐만 아니라 빛이 가진 직진, 반사, 굴절, 분산, 간섭, 편광 등의 성질을 모두 살펴볼 수 있어 과학을 보여주기에 더없이 좋은 소재다

학을 보여주기에 더없이 좋은 소재다. 무지개를 자세히 들여다보면 생각했던 것보다 더 많은 것을 발견할 수 있다. <그림 1>의 무지개를 살펴보자. 처음에는 선명한 둥근 색 띠(1차 무지개)가 들어오겠지만, 자세히 보면 그 위에 그보다는 어두운 다른 색 띠(2차 무지개)가 있다. 그리고 두 색 띠의 색의 배열순서가 반대로 되어 있는데 두 색 띠 사이는 다른 부분보다 조금 어둡게 (알렉산더 암흑띠) 보인다. 1차 무지개의 바로 아래쪽에는 반복해서 울긋불긋한 띠가 (과잉 무지개) 보일 때도 있다.

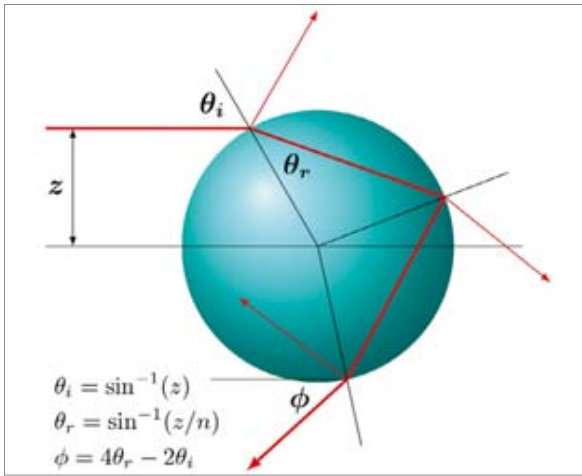
공기 중에 떠 있는 물방울이 어떻게 햇빛으로 무지개를 만들까? 먼저 물방울이 작은 크기의 공 모양이라고 생각하자. <그림 2>에서 보듯이 물방울에 들어온 빛은 중심으로부터 거리에 따라 입사각이 달라지고 다른 경로로 굴절과 반사가 일어나서 들어온 방향과는 다른 방향으로 물방울을 빠져나간다. 입사각이 너무 커지거나 반사가 거듭 되면 빛의 손실로 세기가 약해지기 때문에, 우리 눈에 보이는 1차와 2차 무지개는 물방울의 안쪽 면에서 두 번 반사된 후 나온 빛에 의해 만들어진다.

물방울은 한 방향(햇빛의 방향)에서 들어온 빛을 여러 방향으로 흩어 놓는데, 우리는 왜 특정한 방향에서 무지개색 띠를 보게 되는 것일까? 이것이 무지개의 가장 중요한 비밀

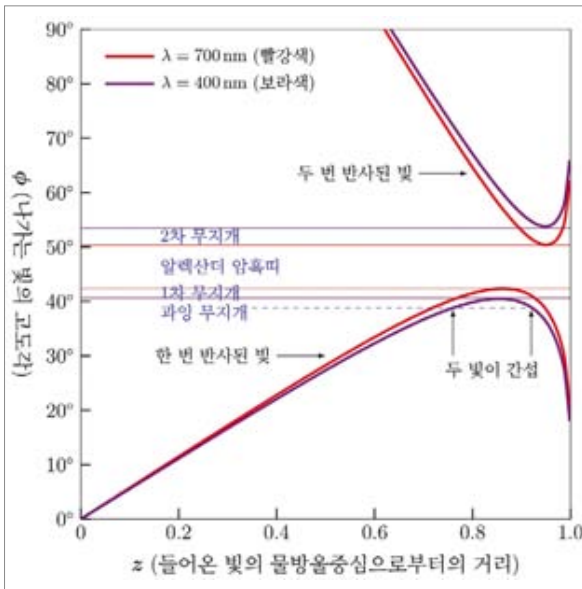


글\_김항배 | 한양대학교 물리학과 교수 hbkim@hanyang.ac.kr

서울대학교 물리학과 졸업 후 동대학원에서 입자물리학 이론으로 박사학위를 받았다. 입자물리학 현상론, 우주론, 암흑 물질, 우주선 등의 주제로 다수의 논문을 발표했으며, 입자천체물리학과 우주론에 대한 연구를 하고 있다.



▲ <그림 2> 물방울에 들어온 빛은 중심으로부터 거리에 따라 입사각이 달라지고 다른 경로로 굴절과 반사가 일어나서 들어온 방향과 다른 방향으로 물방울을 빠져나간다



▲ <그림 3> 빛이 들어온 방향의 중심으로부터 거리에 따라 나오는 방향이 어떻게 바뀌는지 보여주는 그래프

인데, 물방울이 특정한 방향으로 더 많은 빛을 내보내기 때문이다.

### 최대각이 되는 방향에서 더 많은 빛 나와

<그림 3>은 빛이 들어온 방향의 중심으로부터 거리에 따라 나오는 방향이 어떻게 바뀌는지를 보여주는 그래프다. 기하광학으로 이 함수를 구할 수 있다.

반지름에 대한 중심으로부터 거리 비를  $z$ 라 하면 입사각은  $\theta_i = \arcsin(z)$ 이고, 굴절각은 물의 굴절률을  $n$ 이라 하면  $\theta_r = \arcsin(\sin(\theta_i)/n)$ 이 된다. 한 번 반사되어 나오는 방향의 각은  $\phi_1 = 4\theta_r - 2\theta_i$  이고, 두 번 반사되어 나오는 방향의 각은  $\phi_2 = 80^\circ - 6\theta_r + 2\theta_i$ 가 된다.

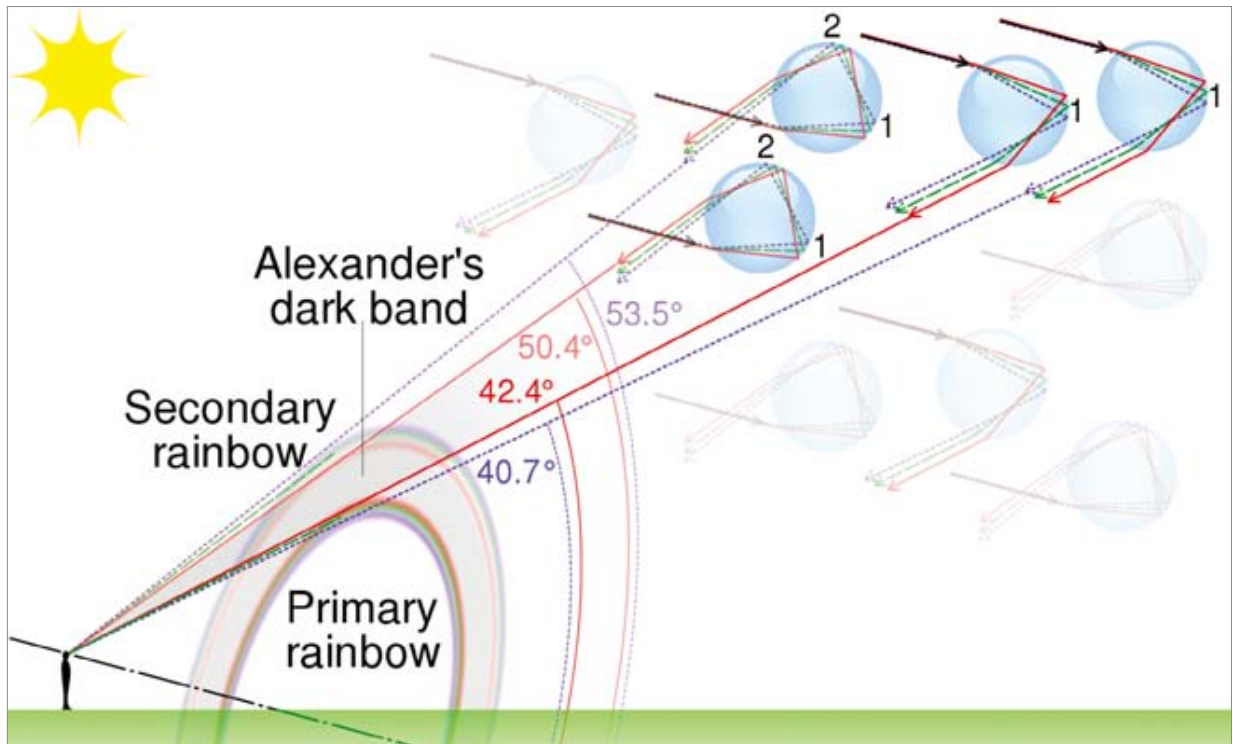
한 번 반사되고 나오는 빛의 방향은 들어온 빛이 중심에서 멀어질수록 각이 커지다가 최대각에 도달한 후 다시 줄어드는데, 최대각이 되는 방향에서 상대적으로 더 많은 빛이 나온다. 데카르트는 일정하게 촘촘한 간격으로 들어오는 빛의 진행경로들을 그려봄으로써 이런 사실을 확인했다. 만약 데카르트가 미분을 알았다면 다음과 같이 명확하게 이해할 수 있었을 것이다. 거리  $z$ 와  $z+dz$  사이로 들어오는 빛의 양은  $z$ 에 관계없이  $dz$ 에만 비례한다. 빛의 양을  $z$ 의 함수에서 빛이 나가는 방향  $\phi$ 의 함수로 바꾸면  $dz = (dz/d\phi)d\phi = d\phi/(d\phi/dz)$ 가 된다. 최대각은  $d\phi/dz = 0$ 이 되는 방향이므로 이 방향 부근에서 나가는 빛의 양은 상대적으로 훨씬 커지게 된다.

햇빛은 여러 파장의 빛이 섞여 있는 빛이고, 물의 굴절률은 빛의 파장에 따라서 달라진다. 우리의 눈이 볼 수 있는 빛은 파장이 700nm(빨간빛)에서 400nm(보라빛)까지이다. 물의 굴절률은 700nm에서 1.331인 반면 400nm에서는 1.344로 커진다.

굴절률의 차이로 빛의 파장에 따라서 최대각의 크기도 달라진다. ( $d\phi/d\theta_i = 0$ 을 풀어서 최대각이 되는 입사각과 최대각의 크기를 알 수 있다) 빨간빛의 최대각은  $42.4^\circ$ 고 보라색 빛의 최대각은  $40.7^\circ$ 로, 이 사이에서 각 색의 빛은 각자의 최대각 방향으로 더 많은 나가게 돼서, 우리는 각 방향에서 특정한 색의 빛을 주로 보게 된다. <그림 4>와 같이 우리의 눈에는 각 색의 최대각 방향에 있는 물방울들이 내보내는 빛이 들어와서 무지개로 보이기 때문에 최대각이 큰 순서로 위에서 아래로 색이 배열된다.

### 과잉 무지개에서 간섭무늬가 나타나는 이유

2차 무지개가 만들어지는 원리는 1차 무지개와 같지만, <그림 3>에서 보듯이 두 번 반사된 빛은 가장 많이



▲ <그림 4> 1차 무지개에서 빨간빛의 최대각과 2차 무지개의 빨간빛의 최소각 사이의 물방울에서 반사되어 나오는 빛이 없는 방향이어서 상대적으로 어둡게 보이는데 이를 알렉산더 암흑띠라 부른다 (출처 : <https://en.wikipedia.org/wiki/Rainbow>)

나오는 방향이 최대각이 아니라 최소각이다. 빨간빛의 최소각  $50.4^\circ$ 와 보라빛의 최소각은  $53.5^\circ$  사이에서 색의 순서가 1차 무지개와는 반대로 배열된다.

1차 무지개에서 빨간빛 최대각과 2차 무지개의 빨간빛 최소각 사이는 물방울에서 반사되어 나오는 빛이 없는 방향이어서 상대적으로 어둡게 보이는데, 이것을 알렉산더 암흑띠라 부른다. 과잉 무지개의 반복되는 띠는 빛의 간섭 현상에 의한 간섭무늬이다. 역시 <그림 3>으로부터 어떻게 간섭이 일어나는지 이해할 수 있다. 1차 무지개의 최대각보다 조금 작은 각도에서는 중심으로부터 거리가 조금 다르게 들어온 이웃한 두 빛이 같은 방향으로 나간다. 두 빛 사이의 거리가 결맞음이 있을 정도로 가까우면 두 빛의 경로차에 의해 나오는 빛에서는 간섭이 일어난다. 경로차는 두 빛 사이의 거리, 굴절률, 그리고 물방울의 크기로 결정된다. 만약 물방울의 크기가 다양하면 물방울마다 보강간섭이 일어나는 파장이 다르므로 간섭의 효과는 눈에 보이지 않게 된다. 물방울의 크기가 전체

적으로 비슷하면 나오는 각도에 따라 특정 파장의 빛에서 보강간섭이 일어나고, 이것이 일정 각도 간격으로 반복되는 간섭무늬가 나타나는 것이다.

#### 편광필터로 더 선명한 무지개 사진 찍을 수 있어

눈으로만 보아서는 알 수 없는 무지개의 또 다른 특징은 무지개의 빛이 등근 색 띠의 접선 방향으로 편광이 되어 있다는 것이다. 빛이 물방울 안에서 반사될 때 반사면에 수평 방향으로서는 부분 편광이 되고, 특정 각(브루스터 각)에서는 완전 편광이 된다. 무지개를 만드는 빛의 경로가 이 각에 가까워서 강한 편광이 되는 것이다. 그래서 카메라로 무지개를 찍을 때 편광필터를 활용하면 더 선명한 사진을 찍을 수 있다. 무지개의 생성은 물방울의 크기와는 어느 정도 무관하지만, 물방울의 크기가 아주 작아지면 빛의 회절 효과가 커지면서 색의 구별이 흐려지게 된다. 그래서 작은 물방울로 된 안개가 만드는 무지개는 등근 흰색 띠로 나타난다. 