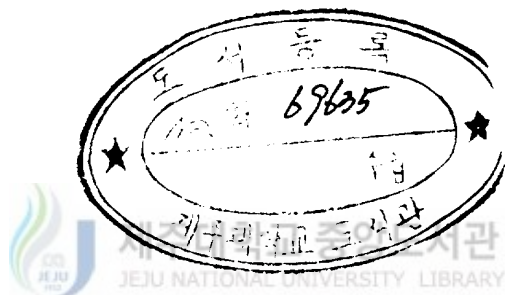


碩士學位 請求論文

무지개 現象에 대한 定性的 考察

指導教授 康 禎 友



濟州大學校 教育大學院

物理教育專攻

李 順 德

1992年 8月

무지개 現象에 대한 定性的 考察

指導教授 康 禎 友

이 論文은 教育學 碩士學位 論文으로 提出함.

1992年 6月 日

濟州大學校 教育大學院 物理教育專攻

提出者 李 順 德



李順德의 教育學 碩士學位 論文을 認准함.

1992年 7月 日

審査委員長

김기영

審査委員

김용우

審査委員

康禎友



< 초 목 >

무지개 現象에 대한 定性的 考察

李 順 德

濟州大學校 教育大學院 物理教育專攻

指導教授 康 禎 友

소나기가 내린후 생기는 무지개는 우리가 흔히 볼 수 있는 1차무지개와 그것보다 좀더높은 하늘에서 가끔볼 수 있는 2차무지개로 되어있다. 1차무지개는 물방울에 의해 한번 내부반사된 광선들로 이루어지며 2차무지개는 두번 내부반사된 광선들로 이루어진다. 그리고 무지개의 기하학적 구조는 무지개 각에 의해 결정되는데 1차무지개는 약 138° 일 때, 2차무지개는 130° 일 때 강하게 산란된다.

1차무지개와 2차무지개 사이의 영역에는 빛이 전혀 도달하지 않으므로 다른 영역의 하늘 보다 어둡게 보이는데 이부분을 알렉산더의 검은띠라 한다.

무지개의 가장 중요한 특징인 일곱가지 무지개색은, 색에따라 굴절률이 다르므로 물방울에 의해 굴절할때 여러색으로 분산되어 나타나는 현상이다.

그리고 1차무지개 안쪽이나 2차무지개 바깥쪽에 생기는 희미한 줄무늬인 과잉무지개는 간섭효과로서 설명 될수 있다.

차 례

국문초록	1
I. 서론	1
II. 이론적 배경	3
1. 반사와 굴절	3
2. 간섭	5
3. 편광	6
III. 무지개의 기하학적 구조	8
IV. 무지개의 생성 원리	10
1. 1차무지개와 2차 무지개	10
2. 무지개의 색	15
3. 알렉산더의 검은띠	17
4. 과잉무지개	17
5. 무지개에 대한 Airy이론	18
6. 무지개의 편광	20
7. 무지개가 호 모양이 되는 이유	22
IV. 결론	24
참고 문헌	26
Abstract	28

I. 서론

우리는 흔히 비가 그친후 관찰자를 중심으로 태양의 반대 방향의 하늘에서 일곱가지 색의 무지개가 생기는 것을 볼 수 있다. 그렇지만 무지개의 생성 원인에 대해서는 단순히 굴절과 전반사동에 의해 생긴다고만 알려져 있어, 1, 2, 3, 4, 5, 6) 무지개에 대한 자세한 설명이 필요하다.

무지개는 우리가 흔히 볼 수 있는 1차무지개(primary rainbow)와 그것보다 더 높은 하늘에서 볼 수 있는 2차무지개(secondary rainbow)로 이루어진다. 그리고 1차무지개와 2차무지개 사이의 어두운 부분을 알렉산더의 검은띠(Alexander's dark band)라 하며, 1차무지개 안쪽이나 2차무지개 바깥쪽에 가끔 보이는 희미한 띠를 과잉무지개(supernumerary rainbow)라 한다.

Aristoteles(B.C 384 - 322)^{7, 8)}는 무지개란 구름에 의한 태양빛의 특이한 반사 형태이고, 빛이 일정한 각도에서 반사되면 원추형의 무지개가 떠 오른다고 하였다. 그 후 1266년 Roger Bacon^{2, 7, 8)}에 의해 무지개의 중심과 무지개광선 사이의 각도가 측정 되었다. 그 각도는 1차무지개가 42°이고, 2차무지개는 1차 무지개보다 하늘에 약 8°정도 더 높이 떠 있어 50°정도가 된다. 따라서 입사광선과 무지개광선 사이의 각도는 180°에서 42°를 뺀 값, 즉 138°가 되는데 이 각도를 무지개 각(Rainbow Angle)이라 한다.

1304년 Theodoric^{7, 8)}은 물로 채워진 등근병을 확대한 물방울로 가정한 실험을 하여 무지개란 구름을 이루는 물방울들에 의한 빛의 집단적인 반사 때문에 생기는 것이라고 주장하므로써 Aristoteles의 가설을 부정하였다. 그 후 1637년 Decartes^{7, 8)}가 똑같은 실험을 하여 Theodoric의 설명을 뒷받침 하였다.

Theodoric과 Decartes에 의해 1차무지개는 물방울로 들어가서 내부면에 의해 한번 반사된 광선들로 이루어지고, 2차무지개는 계속해서 두번 내부 반사된 광선들로 이루어진다고 함으로서 1차무지개와 2차무지개는 설명 할 수 있었다.

무지개의 색에 대해서는 1666년 Newton이 프리즘 실험을 통해 설명하였다. 이와 같이 Decartes와 Newton에 의해 무지개의 주요한 특징을 모두 설명할 수 있었으나 과잉무지개는 설명하지 못했다. 그 후 1803년 Thomas Young^{7, 8)}이 과잉무지개란 빛의 간섭에 의한 것임을 밝혔다.

1938년 Airy⁷⁾는 무지개 영역에서 산란광의 강도를 새로운 수학적 함수로 표현하는 방법을 찾았는데, 이것은 무지개 적분으로 알려져 있다. 이 Airy함수에 의하여 1차무지개와 2차무지개 뿐만 아니라 무지개의 색 및 알렉산더의 검은띠를 정확히 설명할 수 있게 되었다.

이상에서 알아 본 바와 같이 무지개가 생기는 원인을 설명하려면, 반사, 굴절, 간섭, 회절, 편광과 같은 빛의 파동적인 특성뿐만 아니라 입자적 특성까지 고려한 복잡한 이론을 알아야 한다. 그러나 본 논문에서는 정성적인 측면에서 보다 쉽게 무지개의 생성 원인을 알아보기 위하여 II장에서는 무지개를 설명하는데 필요한 간단한 광학적 이론에 대해서 알아보고, III장에서는 무지개의 기하학적 구조에 대해서 알아보겠다. 그런다음 IV장에서는 무지개의 생성 원인에 대해서, 특히 왜 무지개광의 산란강도가 무지개 각 근처에서 최대가 되는지를 유도함으로써 1차무지개와 2차무지개 뿐만 아니라 알렉산더의 검은띠의 생성 원인을 설명해 보려고 한다. 그리고 과잉무지개의 생성 원인과 더불어 Airy함수에 의해 무지개가 어떻게 생성되는지 정성적으로 살펴보고, 마지막으로 무지개들이 왜 호 모양을 하고 있는지에 대해 알아본 다음 V장에서 결론을 맺겠다.

Ⅱ. 이론적 배경

무지개 현상을 설명하는데 필요한 기본적인 이론인 빛의 반사와 굴절, 간섭 및 편광에 대해서만 알아 보겠다 .

1. 반사와 굴절(Reflection and Refraction)

빛은 두 매질로 분리되는 경계면에 입사될 때 빛의 일부는 반사되고 또 다른 일부는 투과된다. 이때의 반사광선은 그림 1에서 보는바와 같이 입사면에 있으며, 경계면에 세운 법선에 대해 반사각(i')과 입사각(i)은 같다. 이런 반사 법칙($i = i'$)은 빛뿐만 아니라 수파, 음파 및 전자기파 등 모든 파동에 대해 적용된다.

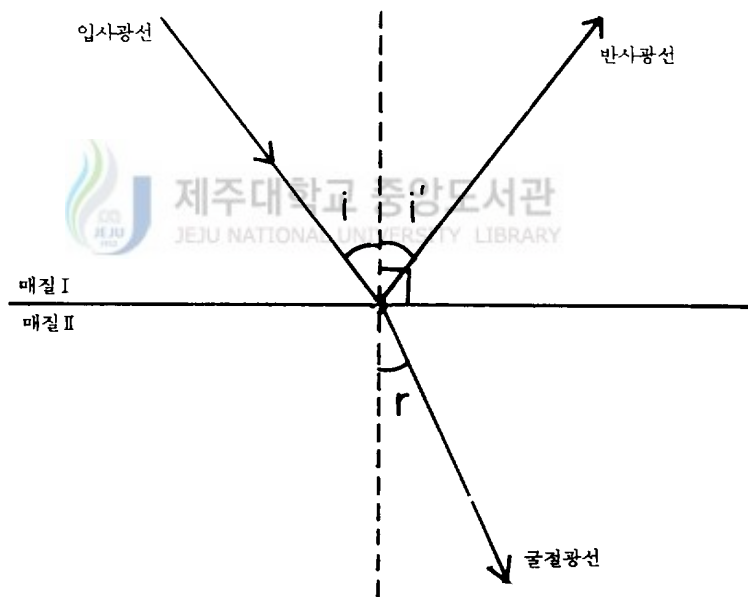


그림 1. 반사와 굴절

투과광선과 경계면에 세운 법선 사이의 각 r 을 굴절각이라 하며, 입사각 i 와

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad \text{----- (1)}$$

인 관계가 있다. 여기서 n_1 과 n_2 는 다음과 같이 정의되는 매질 I과 매질 II의 굴절률(index of refraction)인데,

$$n = c / v \quad \text{----- (2)}$$

이며, v 는 매질 속에서 빛의 속도, c 는 진공중의 빛의 속도이다.

식(1)은 1621년 W. Snell에 의해 알려진 굴절의 법칙으로 Snell의 법칙이라고도 한다. 9.10.11) 식(2)를 이용하면 식(1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sin i / \sin r = n_2 / n_1 = v_1 / v_2 \quad \text{----- (3)}$$

만일 v_2 가 v_1 보다 적으면 n_2 가 n_1 보다 크게 되고, 또 굴절각 r 는 입사각 i 보다 적다. 그러므로 광선은 법선쪽으로 휘게된다. 그런데 식(3)에서 n_1 과 n_2 는 절대 굴절률을 가리키며, $n_2 / n_1 = n_{12}$ 로 표현할 때 상수 n_{12} 를 매질 II의 매질 I에 대한 상대 굴절률이라 한다. 한 매질에 관한 어떤 매질의 굴절률은 일반적으로 빛의 파장에 따라 변한다. 왜냐하면, 파장이 변하면 매질에서의 빛의 속력이 달라지기 때문이다. 광선이 유리면에 어떤 각으로 입사할 때 보다 짧은 파장의 굴절률은 긴파장의 굴절률보다 약간 적다. 그러므로 백색광의 선속이 각 성분색인 파장으로 퍼지거나 분산된다. 12) 파장이 5890 Å(나트륨에서 나온 황색광)인 경우에 진공에 관한 여러가지 물질의 굴절률을 표 19)에 제시 하였다.

표 1. 몇가지 물질의 굴절률 ($\lambda = 5890 \text{ \AA}$)

매 체	굴절률	매 체	굴절률
공 기	1. 003	유리(Zinc Crown)	1. 52
이유화탄소	1. 63	석 영	1. 46
다이아몬드	1. 42	사파이어	1. 77
유리(무거운)	1. 89	소금 결정	1. 53
유리(가벼운)	1. 58	물	1. 33

빛이 유리나 물속에서 공기 속으로 들어 갈 때 굴절되는 경우처럼 n_2 가 n_1 보다 적을때 입사각보다 굴절각이 더 크게 되는데, 굴절각이 90° 가 될 때의 입사각을 임계각(critical angle)이라 한다. 입사각이 임계각 보다 클때는 그림 2에서 보는 바와 같이 경계면에서 전부 반사되어 버리는데 이러한 현상을 전반사(total reflection)라 한다.

Snell의 법칙에서 임계각 θ_c 는

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 \quad \text{---(4)}$$

가 된다.

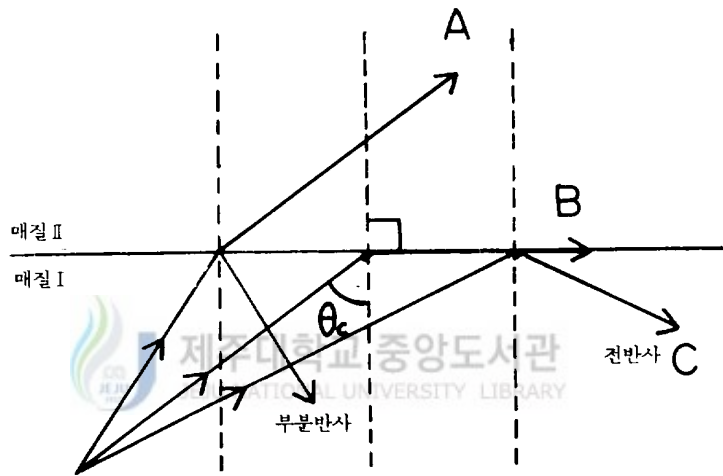


그림 2. 임계각과 전반사

2. 간섭 (Interference)

1803년 Thomas Young에 의해 밝혀진^{13, 14)} 간섭이란, 2개 또는 그 이상의 파가 공간에서 겹쳐지는 경우에 생긴다. 2개 또는 그 이상의 파원에서 나온 파가 한 점에 같은 위상으로 도달하였을 때 진폭이 합쳐지는 현상을 보강간섭(constructive interference)이라 하며, 두 파원으로 부터의 경로차가 파장의

정수배가 될 때 항상 일어난다. 그리고 두 파원으로 부터의 경로차가 반파장이 될 때는 진폭이 상쇄되는데 이러한 현상을 상쇄간섭(destructive interference)라 한다.

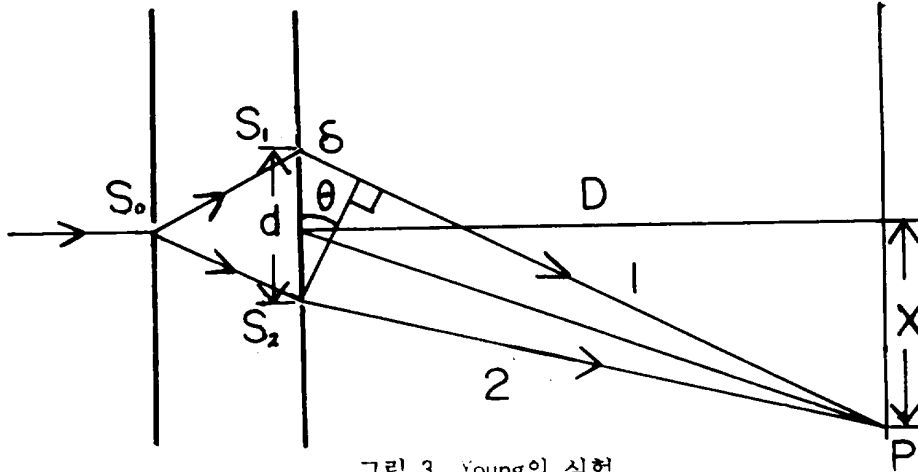


그림 3. Young의 실험

Young의 실험장치는 그림 3에서처럼 좁은 슬릿 S_0 에서 나온 단색광을 인접한 슬릿 S_1 과 S_2 를 지나게 하여 둘로 나뉘어서 스크린에 도달하도록 만들었다. 그리고 스크린의 중심에서 X 만큼 떨어진 P 점에 슬릿 S_1 으로부터 나온 빛은 슬릿 S_2 로부터 나온 빛보다 대략 δ 만큼 더 먼 거리를 지난다. 따라서 P 점은

$$\delta = n\lambda \quad \text{즉, } \delta = 0, \lambda, 1\lambda \dots \dots \dots (\text{단, } n \text{은 정수}) \dots \dots \dots (5)$$

일 때 보강간섭을 일으켜 밝은 무늬가 얻어지고,

$$\delta = (n + 1/2)\lambda \quad \text{즉, } \delta = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2 \dots \dots \dots (6)$$

일 때 상쇄간섭을 일으켜 어두운 무늬가 생긴다. 그리고 간섭무늬가 생기는 위치는 그림 3에서 $D \gg x$ 이고, $\tan \theta \approx \sin \theta$ 라 할수 있으므로 두 삼각형이 닮은꼴임을 이용하여 다음과 같이 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta/d &= x/D, \quad \delta = d \sin \theta \\ x &= D\delta/d \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

3. 편 광 (Polarization)

편광이란 한 방향으로 진동하는 빛을 말하며, 이에 대하여 햇빛이나 전등빛 처

럼 편광되어 있지 않은 빛을 자연광이라 한다. 편광되어 있지 않은 빛을 평면 편광된 빛으로 만드는 방법은 첫째, 편광자(polarizer)를 사용하는 방법이다. 편광이 안된 빛을 편광자를 통과하게 하면 어느 한 방향으로 평면 편광된 빛을 얻을 수 있다. 평면 편광된 빛을 얻는 다른 방법은 반사에 의한 것이다. 빛이 어떤 표면으로 부터 반사될 때 그림 4에서보는 바와 같이 반사면에 대해 수직인 성분과 평행인 성분으로 이루어진 광선이 경계면에 입사하면 수직인 성분은 다른 성분보다 한층 강하게 반사된다.^{7, 13)}

실제로 특수한 입사각에서 반사된 빛은 전적으로 반사면에 수직인 빛들로 구성되는데, 이때의 입사각을 Brewster각이라 한다. 빛이 Brewster각으로 입사할 때 반사광선과 굴절광선은 서로 90°의 각을 이룬다. 이 편광각과 반사 물질의 굴절률 사이의 관계를 구하기 위해 Snell의 법칙을 이용하면

$$n = \sin i / \sin r$$

이고, 편광각에서 $i = \theta_p$ 이므로

$$\theta_p + 90^\circ + r = 180^\circ$$

$$\sin r = \cos \theta_p$$

$$n = \tan \theta_p \quad \text{---(8)}$$

이다. 식(8)과 같이 표현된 굴절률과 편광각 사이의 관계를 Brewster의 법칙 11.13.14)이라 한다.

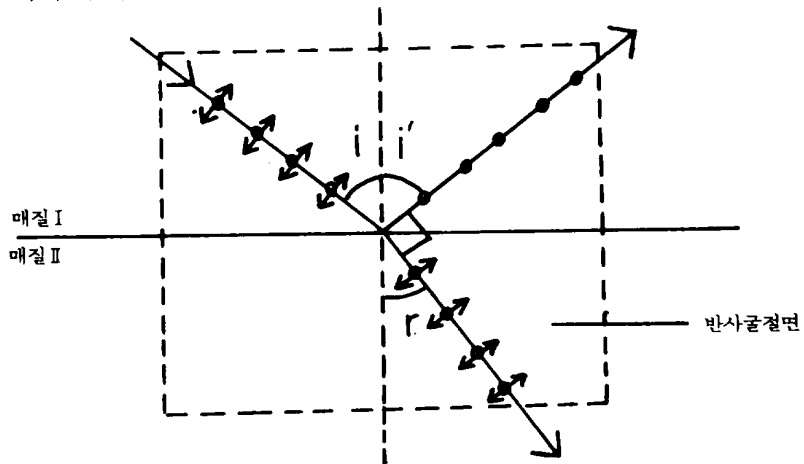


그림 4. Brewster각

Ⅲ. 무지개의 기하학적 구조

무지개는 1차무지개(primary rainbow)와 2차무지개(secondary rainbow)로 되어 있다. 2차무지개는 1차무지개 바깥쪽에 생기며 1차무지개보다 희미하므로 보이지 않는 경우가 많고, 1차무지개와 2차무지개 모두 나타나는 경우 이것을 쌍무지개(double rainbow)^{2, 4, 7)}라 한다.

무지개의 기하학적 구조는 그림 5⁷⁾에서처럼 무지개각에 의해 결정 된다. 1차무지개는 입사광선과 이루는 각이 138°일 때, 2차무지개는 130°일 때 강하게 산란되어 우리 눈에 들어온다.

무지개의 가장 큰 특징은 줄무늬인데, 밝기와 선명도는 어느 정도 변하나 그 색들은 항상 같은 배열을 한다. 즉 가장 안쪽은 보라색이고 점차 남색, 청색의 색조가 나타나서 초록, 노랑, 주황의 순서가 되고, 가장 바깥쪽은 빨간색이 된다. 이것은 햇빛이 물방울 안에서 굴절할 때 색에 따른 굴절률차에 의해 여러 색으로 분산되어 나타나기 때문이다. 1차무지개보다 더 높은 하늘에 있는 2차무지개의 색은 1차무지개와 반대 순서이다. 즉 빨간색은 가장 안쪽이고, 보라색은 가장 바깥쪽이 된다. 그 이유는 2차무지개는 물방울 내부에서 두번 내부반사를 하기 때문에 1차무지개와 반대로 색이 배열되는 것이다. 이 두 무지개 사이의 영역은 다른 부분의 하늘보다 더 어둡다. 2차무지개를 볼 수 없을 때에는 1차무지개 윗부분에 어두운 부분이 생긴다. 이 어두운 부분에 대해서는 A.D 200년에 그리이스 철학자 알렉산더가 처음 연구한 바 있다. 그 후로 이 부분을 알렉산더의 검은띠(Alexander's dark band)라 불린다.⁷⁾

1차무지개의 안쪽이나 2차무지개의 바깥부분에 가끔씩 나타나는 희미한 띠들을 과잉 무지개(super-numerary rainbow)^{4, 7, 8)}라 하는데, 특히 무지개의 가운데 끝 부근에서 뚜렷하게 나타난다.

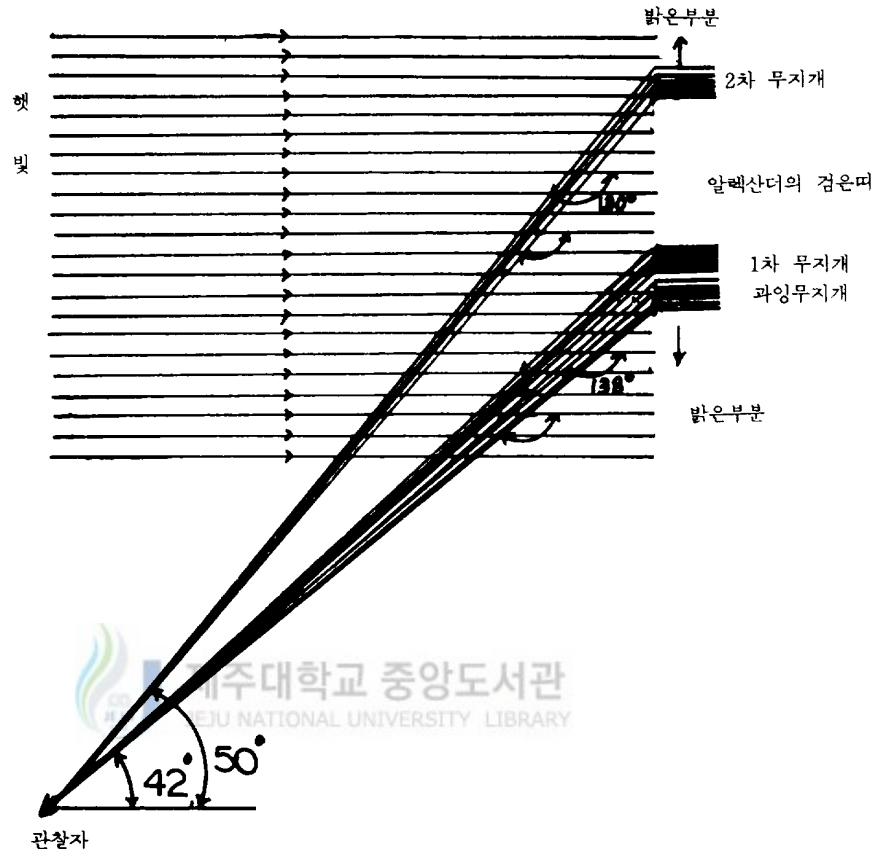


그림 5. 무지개의 기하학적 구조

IV. 무지개의 생성 원리

1. 1차무지개와 2차무지개

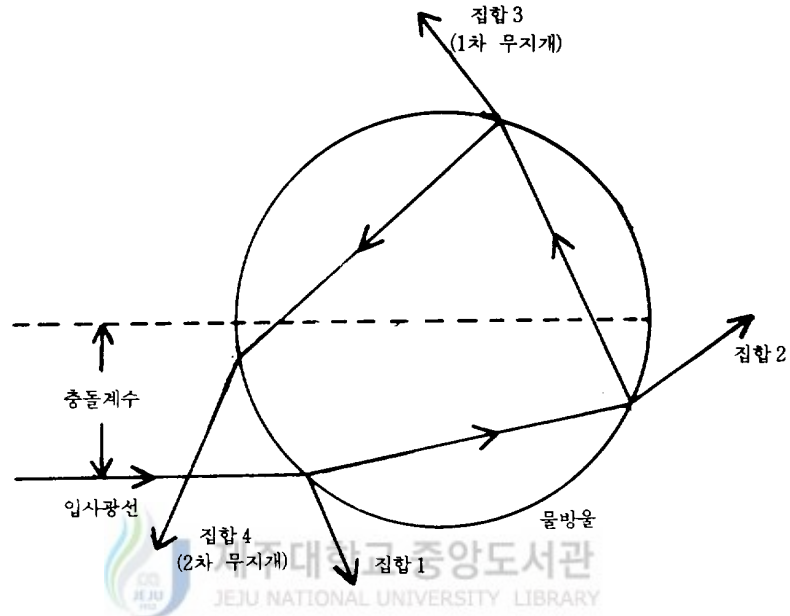


그림 6. 물방울을 통과하는 광선의 경로

하나의 물방울을 통과하는 광선의 경로에 대해 반사와 굴절의 법칙을 적용하면 무지개에 대한 기초적인 분석을 할 수 있다.

물방울은 그림 6과 같이 구형으로 볼 수 있으므로 모든 방향에서 동일하게 보인다. 따라서 하나의 변수로 반사와 굴절을 설명할 수 있다. 그런데 이 변수는 물방울의 중심을 통과하는 축으로 부터 입사광선까지의 거리인 충돌계수 (impact parameter)⁷⁾이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 충돌계수는 입사광선이 중심축과 일치할 때인 0에서부터 입사광선이 원의 접선을 지날때인 물방울의 반지름까지 변한다. 입사광선은 물방울의 표면에서 부분적으로 반사되는데, 이 반

사광을 집합 1이라하며, 반사되고 난 나머지 광선은 물방울을 통과한다. 그리고 다시 물방울 내부면에서 부분적으로 통과되고(집합 2) 나머지는 반사되며, 그 반사광은 다시 물방울 내부면에서 반사되고 통과되며 그 과정이 끊임없이 반복된다. 따라서 집합 1의 광선들은 물방울에 의해 직접 반사된 것이고, 집합 2의 광선들은 물방울을 곧장 통과한 것을 나타낸다. 집합 3의 광선들은 한번 내부 반사를 한후에 물방울을 벗어난 광선들로서 이것들이 1차무지개를 만든다. 그리고 집합 4 광선들은 두번 내부 반사를 한 것으로서 2차무지개를 만든다.

2차무지개가 1차무지개 보다 희미한 이유는 반사를 함에 따라 빛의 일부가 소실되기 때문이다. 더 높은 차원의 무지개들은 좀 더 복잡한 경로에 의한 광선들에 의해 만들어 지지만 너무 희미해서 정상적으로는 볼 수 없다. 각 집합의 산란광선은 충돌계수의 함수로서 그 값이 넓은 범위에 걸쳐져 변한다.

우리가 생각할 때 태양빛은 물방울에 골고루 비춰지므로 사방으로 빛이 산란될 것 같은데, 왜 산란강도가 무지개 각 부근에서 증대 되는가에 대한 문제는 Decartes가 계산 했던 것처럼 광선이 물과 공기의 경계면에 입사하는 각 지점에

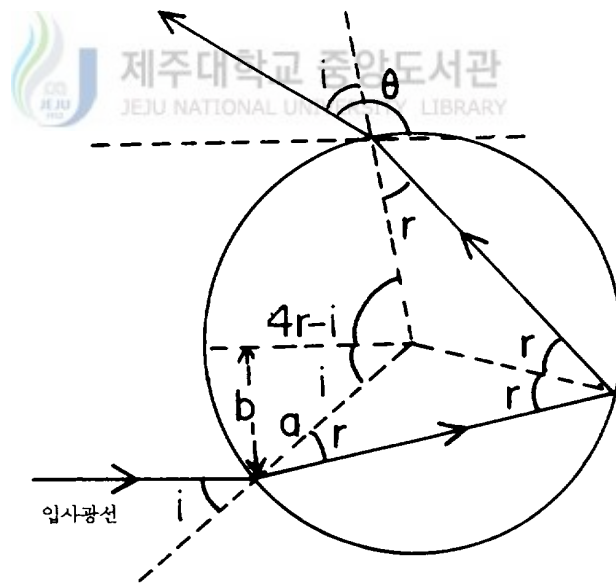


그림 7. 1차무지개의 산란각

서 반사와 굴절의 법칙을 적용함으로써 해결할 수 있다. 따라서 산란강도가 최대가 되는 각을 구하기 위해서는 1차무지개와 2차무지개의 산란각부터 계산해야 한다.

첫번째로 1차무지개의 산란각을 구하기 위해 a 를 물방울의 반지름, b 를 충돌계수라면, 그림 7에서

$$\sin i = b / a \quad \text{----- (9)}$$

이고, Snell의 법칙 $\sin i / \sin r = n$ (단, n 은 공기에 대한 물의 굴절률)에 식(9)를 대입하면,

$$\sin r = \sin i / n = b / na \quad \text{----- (10)}$$

이다. 그림 7에서 산란각 θ 를 구해보면,

$$\theta = 180^\circ - 4r + 2i \quad \text{----- (11)}$$

이며, 이식을 식(9)와 식(10)을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\theta = 180^\circ - 4 \sin^{-1}(b/na) + 2 \sin^{-1}(b/a) \quad \text{----- (12)}$$

산란각이 최소가 되는 경우는 $d\theta/db = 0$ 일 때이므로 충돌계수가

$$b = \{ (4 - n^2) / 3 \}^{1/2} a \quad \text{----- (13)}$$

일 때 산란각은 최소가 된다. 공기에 대한 굴절률이 1.33이므로 $b = 0.86a$ 일 때 최소산란각 137.48° 를 갖는다.

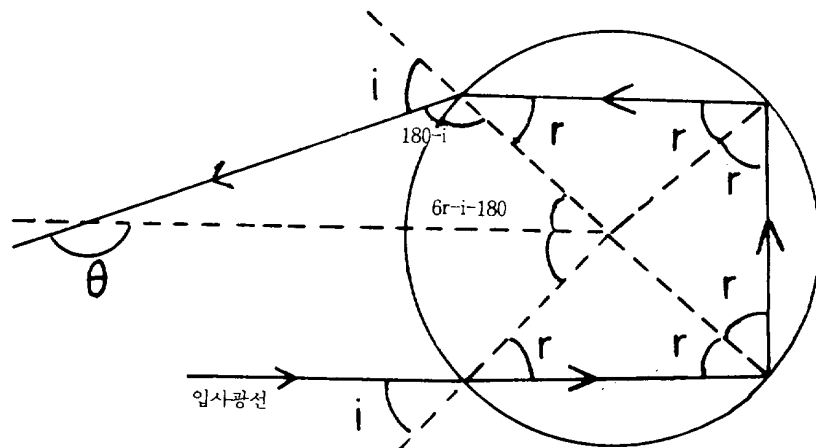


그림 8. 2차무지개의 산란각

두번째로 2차무지개의 산란각 θ 는 그림 8에서 다음과 같다.

$$\theta = 6r - 2i \quad \text{----- (14)}$$

식(9)와 (10)을 이용해서 정리하면

$$\theta = 6 \sin^{-1}(b/na) - 2 \sin^{-1}(b/a) \quad \text{----- (15)}$$

이다. 산란각이 최대가 되는 경우를 구하면, $d\theta/db = 0$ 일 때이므로 2차무지개는 충돌계수가

$$b = \{ (9 - n^2) / 8 \}^{1/2} a \quad \text{----- (16)}$$

일 때 최대 산란각을 갖는다. 공기에 대한 물의 굴절률 값을 대입해서 계산하면 $b = 0.95a$ 일 때 최대 산란각은 129.9° 가 된다.

따라서 1차무지개의 산란각과 2차무지개의 산란각은 식(11)과 식(15)에 의해서 구할 수 있다. 충돌계수에 따른 산란각을 계산한 결과를 표 2에 제시하였다. 이것을 충돌계수와 산란각과의 관계로 나타낸 것이 그림 9이다. 그림 9에서 보는 바와같이 충돌계수가 0일 때 1차무지개 산란광선은 180° 각도로 산란된다. 충돌계수가 증가함에 따라 산란각은 감소하다가 충돌계수가 물방울 반지름의 0.86배가 되면 산란각은 최소가 되고, 그 이상 충돌계수가 증가하면 산란각은 다시 증가한다. 이때 최소가 되는 산란각은 계산한 결과 137.48° 가 되었다.

2차무지개 광선들에 대해서는 충돌계수가 0일 때 산란각은 0이고, 충돌계수가 증가함에 따라 산란각은 증가하다가 충돌계수가 물방울 반지름의 0.95배가 되면 최대의 산란각을 가진다. 그 이상 충돌계수가 증가하면 산란각은 다시 감소한다. 이때 최대 산란각은 계산결과 129.90° 가 되었다.

물방울에는 태양광선의 균일하게 입사되기 때문에 충돌계수는 일정하게 분포된다. 따라서 산란광의 집중도는 산란각이 충돌계수의 변화에 따라 가장 천천히 변화는 곳에서 가장 클 것이다. 즉 변화가 최소가 되는 영역은 산란각들이 최대와 최소가 되는 경우이다. 따라서 산란강도는 무지개각 근처에서 집중되고, 이와 같은 이유로 인해 1차무지개와 2차무지개가 생기는 것이다.

표 2. 충돌계수에 따른 산란각

1차무지개		2차무지개	
충돌계수	산란각(°)	충돌계수	산란각(°)
0	180.00	0	0
0.1a	173.23	0.1a	14.39
0.2a	168.48	0.2a	28.82
0.3a	162.78	0.3a	43.30
0.4a	157.15	0.4a	57.86
0.5a	151.67	0.5a	72.48
0.6a	148.48	0.6a	87.16
0.7a	141.82	0.7a	101.69
0.8a	138.35	0.8a	115.61
0.86a	137.48	0.9a	127.19
0.9a	137.98	0.95a	129.90
0.95a	141.28	0.99a	124.85
a	164.99	a	112.52

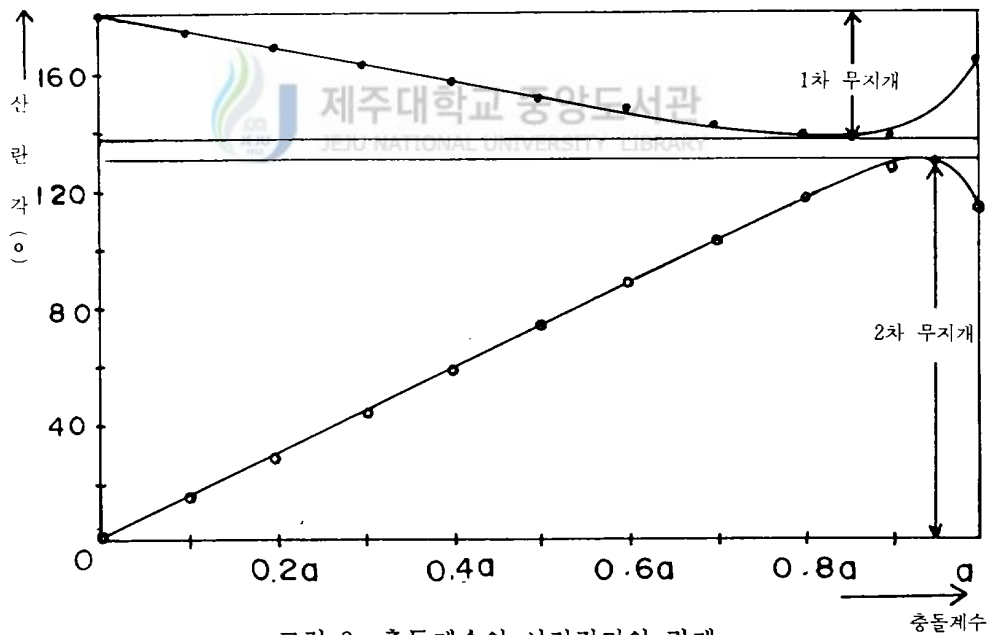


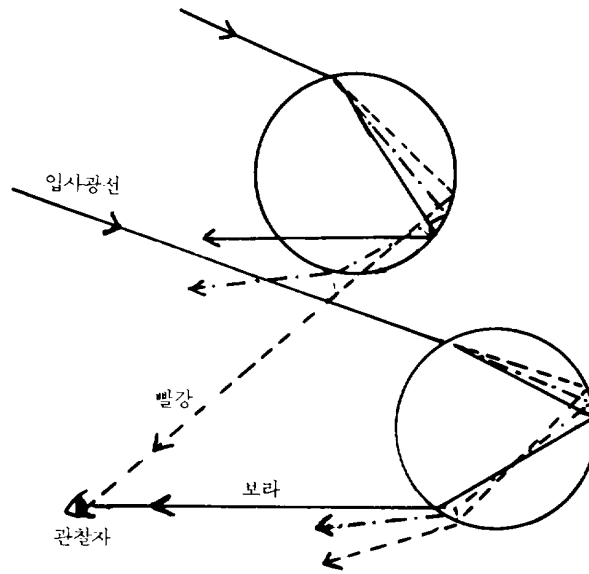
그림 9. 충돌계수와 산란각과의 관계

2. 무지개의 색

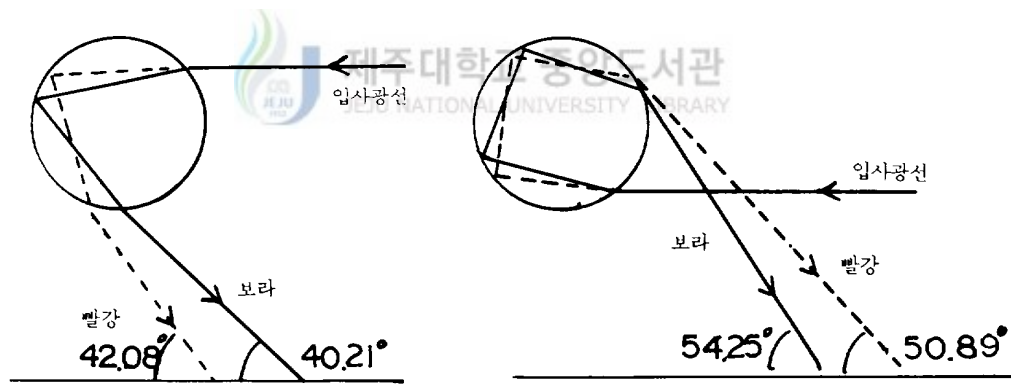
Theodoric 과 Decartes^{5.7.16)}에 따르면 무지개 각 범위에서 어느 순간 하나의 구에 의해 산란된 빛 속에서는 단지 한개의 색만 볼 수 있고, 다른 산란 각도를 찾기 위해 눈을 새로운 위치로 옮기면 차례로 다른 색들이 나타난다고 하였다. 그러므로 무지개 색들은 다른 물방울의 집합체로부터 눈으로 들어 오는 것이다. 그후 무지개의 색에 대해서는 Newton이 프리즘 실험을 이용해서 백색광은 여러색들이 합해진 것일 뿐만 아니라 굴절률이 색에 따라 다르므로 생기는 분산효과로 설명했다.

각 색 또는 빛의 파장은 자신이 무지개 각을 가져야 한다. 즉 하나의 물방울에 의해서는 하나의 색의 무지개를 만들므로, 우리가 자연에서 관찰하는 일곱가지 색의 무지개는 각 하나 하나가 아주 가까이 위치하고 있는 단색 무지개들의 집합인 것이다. 보라색의 공기에 대한 물의 굴절률은 1.346, 빨간색은 1.333으로서^{13.17)} 보라색이 빨간색 보다 굴절율이 크다. 식(12)와 (13)에 의해 1차무지개에서 산란각을 계산해 보면 보라색은 139.79° 이고 빨간색은 137.92° 로서 보라색이 빨간색보다 산란각이 크므로 그림 10에서 처럼 빨간색은 무지개 바깥쪽에, 보라색은 무지개 안쪽에 나타나는 것이다.

2차무지개에서는 식(15)와 (16)을 이용해 산란각을 계산해 보면 빨간색은 129.11° 이고 보라색은 125.75° 로 보라색이 빨간색보다 산란각이 작다. 그러므로 빨간색이 안쪽에, 보라색이 바깥쪽에 배열되어 1차무지개와는 반대로 색이 배열되게 된다. 그리고 1차무지개에서는 빨간색과 보라색의 산란각의 차가 1.87° 인데 이것은 태양광선이 평행하다고 가정 했을때 무지개의 폭이다. 태양의 외관상 각지름 0.5° 를 허용 한다면⁷⁾ 1차무지개의 전체적인 폭은 2.37° 가 된다.



(a) 무지개의 색



(b) 1차무지개

(c) 2차무지개

그림 10. 무지개 색의 배열

3. 알렉산더의 검은띠

1차무지개와 2차무지개 사이의 영역은 다른 부분의 하늘보다 더 어둡게 보이는데 이 영역을 알렉산더의 검은띠라 한다. 이 검은띠에는 빛이 도달하지 않으므로 어둡게 보인다. 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 1차무지개와 2차무지개의 산란각을 계산해보면 1차무지개의 최소 산란각은 약 138° 이고, 2차무지개의 최대 산란각은 약 130° 인데, 그림 9에서 알 수 있듯이 산란각 약 130° 와 138° 사이의 영역에서는 무지개광선이 전혀 도달하지 않게된다. 그러므로 이 부분은 어둡게 보이고 이것을 검은띠라 하는 것이다. 이 결과에 따르면 1차무지개와 2차무지개 사이에는 전혀 광선이 도달하지 않으므로 완전한 암흑이 생길 것이다. 그러나 실제로 검은띠는 완전한 암흑을 나타내지는 않는다. 이러한 사실은 Airy에 의해 설명되었는데, 다음절에서 다루겠지만 빛의 회절현상을 도입함으로써 검은띠는 완전히 암흑이 아니라는 사실을 입증할 수 있었다.

4. 과잉무지개

과잉무지개는 1차무지개의 안쪽 또는 2차무지개의 바깥쪽에 나타나는 것으로서, 이것을 설명 할 수 있는 광학적 이론은 1803년 Thomas Young 에 의해 밝혀진 빛의 간섭현상에 대한 것이다. 물방울에 의해 같은 방향으로 산란된 두 광선은 Young의 실험에서 바늘구멍을 통과하는 빛과 비슷하다. 무지개 각과 비슷한 각도에서 물방울을 통과하는 두 광선의 경로는 거의 비슷하므로 두 광선은 보강간섭을 한다. 각도가 증가함에 따라 두 광선은 경로차가 생기고, 식(6)에서와 같이 그 차가 파장의 $1/2$ 과 같을때 간섭은 완전히 상쇄된다. 그리고 더 큰 각도에서 광선은 다시 보강을 하게 된다. 그 결과 산란된 빛은 강도에 있어서 명암이 교대로 나타나는 주기적 변화를 나타낸다.

그런데 보강이 일어나는 산란각은 두 광선의 경로차에 의해 결정되므로 그 각도는 물방울 반경의 영향을 받는다.^{4.7)} 따라서 과잉무지개의 형태는 무지개

각과는 달리 물방울의 크기에 의존한다. 큰 물방울은 작은 물방울에 비해 총돌 계수에 따라 경로차가 급격하게 커지므로 호(arc)들 사이의 간격이 좁다. 따라서 물방울의 크기가 mm이상인 경우는 이 호들을 거의 구별 할 수 없다. 여기서 왜 이 호들이 무지개 가운데 끝부분에서 잘 관찰 되는지 설명이 된다. 물방울은 떨어짐에 따라 커지므로 아랫 부분은 잘 보이지 않는것이다.

과잉무지개에 대한 Young의 이론은 빛의 파동론에 기초를 두고 있으나, 무지개의 다른 측면이나 검은띠에 대한 그의 예언은 무지개에 대한 일반적인 사실과 일치하지 않는다. 간섭이론은 Decartes나 Newton의 이론처럼 최소한 집합 3과 집합 4의 광선들 만을 고려할 때 이 영역에서 완전한 암흑을 예측했다. 하지만 실제로는 그런 갑작스런 변화는 발생하지 않는다. 왜냐하면 빛의 파동론은 회절에 의해 빛과 그림자 사이의 경계선이 천천히 어두워져야 하기 때문이다. 회절은 장애물의 가장자리에서 빛이나 소리가 굽는 현상인데, 무지개에는 실질적인 장벽은 없으나 1차무지개와 검은띠 사이의 경계는 회절을 나타낸다.

5. 무지개에 대한 Airy의 이론

1838년 무지개에서 산란광의 강도 분포를 측정하려는 시도가 G.B.Airy에 의해 이루어졌다.⁷⁾ 그의 추론은 17세기 Huygens에 의해 형성되고 Fresnel에 의해 만들어진 파동의 전파원리^{10, 11, 13)}에 기초를 두고있다. 이 원리는 파면의 각 점은 새로운 파원으로 간주되고, 이 새로운 파원은 다시 새로운 파면을 만들며 전파된다는 원리다.

Airy는 무지개의 영역에서 산란광의 강도를 새로운 수학적 함수로 표현할 수 있게 되었는데 그것은 무지개 적분으로 알려져 있고, 오늘날 Airy함수⁷⁾라 한다. Airy함수의 수학적 형태보다 물리적 의미에 주안점을 두어 그 결과만 소개하면, Airy에 의해 예견된 강도의 분포는 직선자에 생기는 그림자 가장자리에서 회절된 형태와 비슷하다. 그림 11은 실제 태양스펙트럼을 고려하여 계산한 결과를 나타낸 것은 아니고, Airy이론의 결과를 Young이나 Decartes이론의 결과와

비교하기 위해 무지개의 산란각과 산란광의 강도와의 관계만을 정성적으로 나타낸 것이다. 그림 11에서 보는 바와같이 산란광의 강도가 최대가 되는 지점과 폭은 Young의 간섭 이론에서 예견했던 것과 다소 다르며, Airy이론의 주목할 만한 특징은 무지개광선의 최대강도가 Descartes의 최소 산란각인 무지개 각보다 다소 큰 각도에서 감소된다는 점이다. Descartes 와 Young의 이론은 그림 11에서 처럼 무지개 각에서 강도가 무한대가 되고, 검은띠에서 강도가 0이 된다고 예견했다. 그러나 Airy이론은 어떤 점에서도 강도가 무한대가 되는 경우는 없고, 무지개 각에서 강도는 최대 강도의 1/2보다 적다. 그리고 회절 효과는 무지개의 어두운 부분에서 나타나며 갑작스런 암흑대신에 알렉산더의 검은띠에서 강도가 점차 줄어든다.

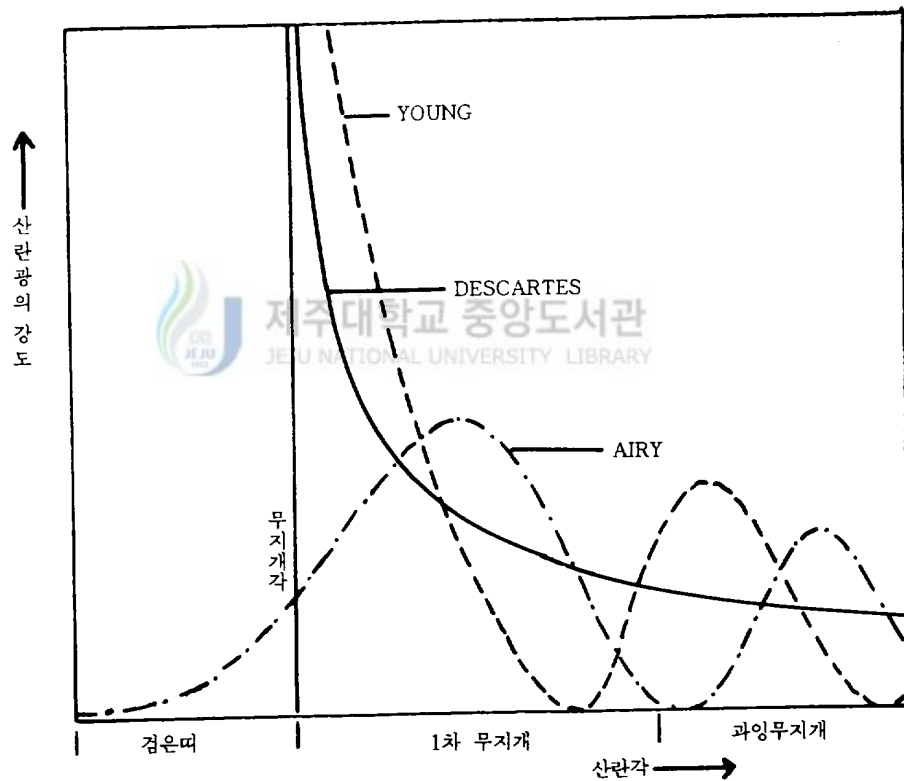


그림 11. 산란각과 산란광의 강도와의 관계

6. 무지개의 편광

지금까지 고려하지 않은 빛의 가장 큰 성질은 편광이다. 반사는 편광 상태를 바꿀 수 있기 때문에 무지개에서 편광이 중요하다.

빛이 물방울의 경계면에 도달했을때 물방울을 통과하는 광선의 내부 반사에 대해 알아보겠다. 입사광선의 편광상태들은 그림 12에서 처럼 반사면에 평행한 성분(R_p)과 수직인 성분(R_s)으로 되어 있는 경우를 생각해 볼 수 있다. 앞의 이론적 배경에서 이 두 편광에 대해 표면의 반사정도는 입사각의 작을때는 아주 적고, 그 값이 굴절률에 의해 결정되는 임계각 근처에서는 급격히 커짐을 알았다. 그리고 임계각 이상에서는 편광에 관계없이 그 광선은 전부 반사된다. 하지만 중간 정도의 입사각에서는 반사정도가 편광에 의존한다. 그림 127)에서 보는 것처럼 입사각이 커짐에 따라 수직으로 편광된 성분의 많은 부분이 반사되고, 반면에 평행한 성분에 대해서는 반사정도가 떨어진다. 특히 Brewster각에서는 평행하게 편광된 부분에 대한 반사정도는 완전히 없어지고 그 빛은 전부 투과된다. 따라서 그 각도에서 입사하는 태양광선에 대해 내부반사 광선은 반사면에 대해 수직이 되게 완전히 편광 된다.

물방울을 통과한 광선이 내부 반사를 하는 경우 Brewster각과 내부 입사각도를 구해보면, 식(8)에 의해 Brewster각 θ_p 는 36.9° 가 됨을 알 수 있다. 그리고 (10)식을 이용하여 1차무지개에서 내부 입사각도를 구해보면 약 40.3° 가 된다. 따라서 무지개 광선의 내부 입사각도는 Brewster각에 가까우므로 무지개 광선은 대부분이 수직이 되게 편광되어 있다고 할 수 있다.

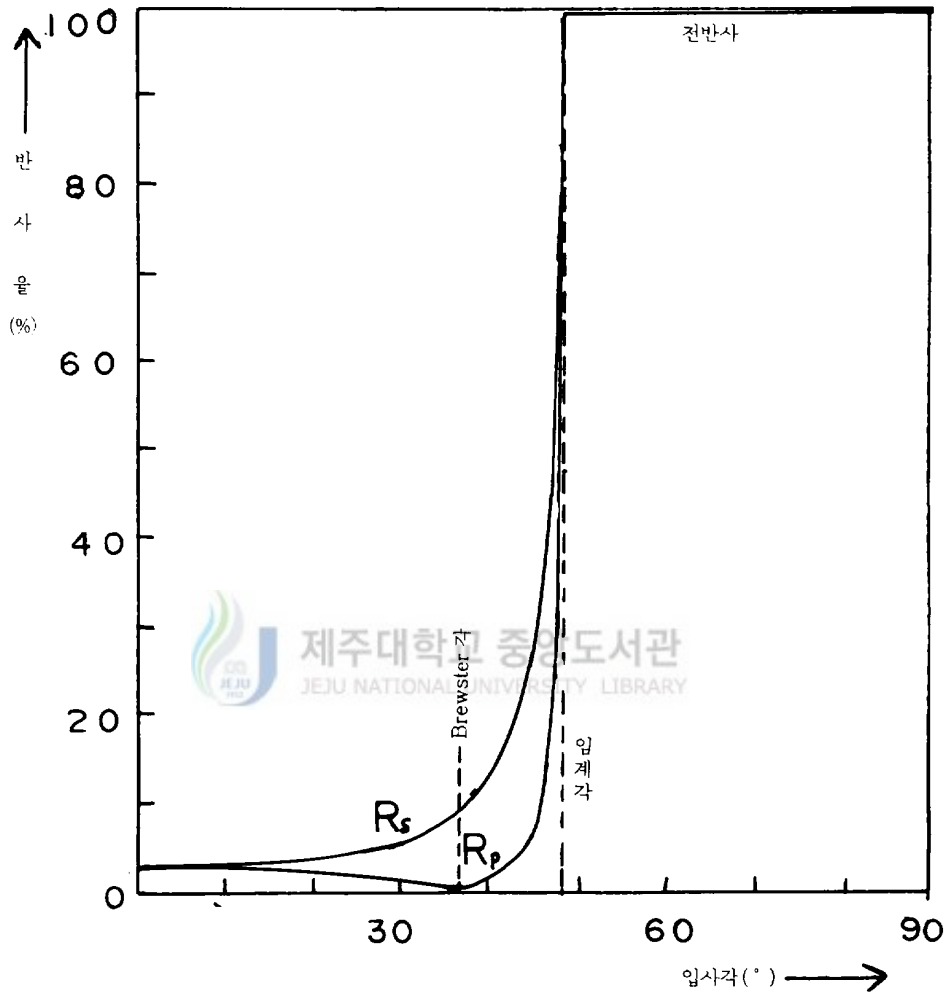


그림 12. 무지개광의 편광

7. 무지개가 호 모양이 되는 이유

우리가 흔히 보는 무지개는 항상 호(arc) 모양을 하고 있다. 그러나 실제로 무지개는 둥근 고리 모양이어야 하는데 지평선에 의해 반쪽이 가려져서 우리에게 보이는 호 모양으로 보이는 것이다. 그러므로 높은 산이나 비행기를 타고 보면 무지개가 고리 모양으로 보인다.

그런데 무지개는 왜 고리 모양이 되는 것인가 라는 문제에 대한 해답은 하나의 물방울에 의해 산란되는 빛들을 조사해 봄으로써 알 수 있다. 물방울에 의해 산란되는 빛의 방향은 태양광선의 입사각에 따라 달라진다. 그러나 물방울을 통과하는 많은 광선을 조사해 보면 한번 내부 반사되어 빠져 나오는 광선의 대부분은 태양의 방향에 대해 42° 방향으로 둥근 고리 모양으로 산란되어 나온다. 즉 물방울들에 의해 빛들의 대부분은 사방 42° 방향으로 산란되어 나오므로 무지개는 고리 모양으로 보이는 것이며, 지평선에 의해 반쪽이 가려져서 무지개는 호 모양으로 보이는 것이다.

그리고 물방울로 입사하는 광선과 물방울로부터 산란되어 눈에 도달하는 광선이 42° 각을 이룰때에만 무지개가 생기므로 공중에서 이러한 위치에 있는 물방울만이 무지개를 만드는 구실을 한다. 그림 13은 이러한 물방울의 위치가 표시

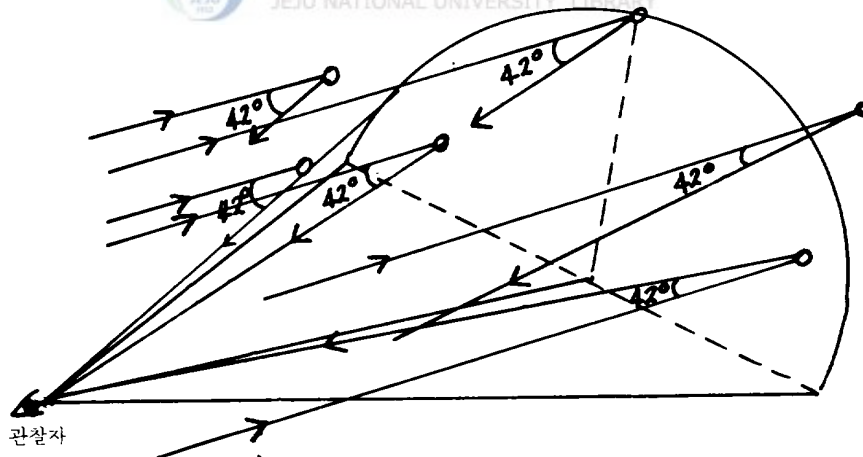


그림 13. 무지개를 만드는 물방울의 위치

되어 있다. 꼭지점이 눈의 위치에 있고 그 축이 눈을 지나며 태양광선에 평행한 방향에 있는 원뿔의 표면 근처에 물방울이 분포되어 있다. 또 어느 물방울로부터 눈에 도달하는 광선도 서로 평행하면서 그 빛은 마치 대단히 먼 곳으로부터 오는 것처럼 보이고 그 빛은 고리 모양으로 보인다. 고리의 지름의 양단과 눈을 연결하는 선이 이루는 각은 42° 의 두배, 즉 84° 이다. 이것이 1차무지개이다.



V. 결 론

지금까지 정성적인 측면에서 고찰해 본 무지개 현상에 대해 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우리가 보통 볼 수 있는 1차무지개는 물방울을 통과한 후 한번 내부 반사한 광선들로 이루어지며, 그것보다 더 높은 하늘에 가끔 보이는 2차무지개는 두번 내부반사한 광선들로 이루어 진다.

둘째, 무지개 각을 계산해 본 결과 1차무지개는 137.48° 에서 최소 산란각을 가지며, 2차무지개는 129.9° 에서 최대 산란각을 갖는다. 그러므로 산란광의 강도는 충돌계수에 따라 산란각의 변화율이 작은 곳에서 제일 크므로 무지개의 산란 강도가 무지개 각 근처에서 집중되는 것이다.

셋째, 1차무지개의 최소 산란각과 2차무지개의 최대 산란각 사이의 영역에는 빛이 전혀 도달하지 않으므로 어둡게 보이는데 이 부분이 알렉산더의 검은띠이다. 그러나 이 부분은 Descartes나 Young이 예언 한 것처럼 완전한 암흑이 아니라 그림자의 경계면이 천천히 어두워지는 것을 알수 있었는데, 이것은 회절현상으로 설명된다.

넷째, 무지개의 가장 큰 특징인 일곱가지 색은 굴절률 차에 의한 분산효과로서 설명 할 수 있다.

다섯째, 과잉무지개는 무지개 각 근처에서 물방울에 의해 산란된 두 광선의 경로차에 의해 보강간섭과 상쇄간섭을 하여 생긴 명암 무늬에 의한 것이다.

여섯째, 무지개 광선이 물방울 내부에서 입사하는 각도는 계산결과 거의 Brewster각에 가까우므로 무지개광의 대부분은 수직광선으로 편광되었음을 알 수 있었다.

마지막으로 무지개가 호 모양을 하는 이유는 물방울에 의해 산란되는 광선은 사방으로 산란되지만 특히 일정한 각도인 42° 방향으로 강하게 산란되므로 관찰

자를 중심으로 42° 각도를 이루는 고리 모양의 무지개가 생긴다. 그러나 실제로는 지평선에 의해 반쪽이 가리워지므로 반쪽인 원호 모양으로 보이는 것이다.

지금까지 무지개 현상들에 대해 정성적으로 알아 보았으나 앞으로는 공기중의 물방울의 밀도와 무지개의 밝기 및 크기와의 관계, 관찰자로 부터 무지개가 생기는 곳 까지의 거리, 그리고 무지개가 생길 수 있는 태양의 고도 등에 대해 더 많은 연구가 이루어져야 한다고 본다.



참 고 문 헌

- (1) 권영대의 3인, 최신 이화학 대사전, 법경출판사, p. 348 (1986).
- (2) 김익달, 과학 대사전, 학원사, pp. 271-272 (1968).
- (3) 권영대의 5인, 세계 과학 대사전, 광학사, p. 343 (1986).
- (4) 동아출판사 백과사전부 編著, 동아 세계 대백과사전, 동아출판사, pp. 342-343 (1987).
- (5) 현종오, 이웅신 編著, 살아있는 과학, 청년사, pp. 93-94 (1988).
- (6) Howard C. Bryant and Nelson Jarmie, The Glory, Scientific, American, July, p. 60 (1974).
- (7) H. Moysé's Nussenzveig, The Theory of the Rainbow, Scientific American, April, p. 116 (1977).
- (8) M. Eugene Rudd, The Rainbow and the Achromatic Telescope : Two Case Studies, The physics teacher, February, p. 82 (1988).
- (9) D. Halliday and R. Resnick, Fundamental of Physics, John Wiley & Sons, Inc., pp. 866-871 (1988).
- (10) Jurgen. R. Meyer - Arendt, Introduction to Classical and Modern Optics, Prentic-Hall, Inc., pp. 187-210 (1984).
- (11) 권영대의 5인 編譯 (Francis A. Jenkins and Harvey E. White 著), 광학, 문운당, pp. 514-517 (1974).

- (12) 김규용외 11인 編譯 (P.A. Tipler & R. Michigan 著), 물리학, 청문각,
pp. 641-657 (1982).
- (13) 정명숙외 9인, 대학 일반 물리학, 삼아사, pp. 555-613 (1982).
- (14) 성백능 編著, 대학 일반 기초 물리학, 반도출판사, pp. 641-647 (1983).
- (15) 신익택외 3인, 新制 微分 積分學, 삼아사, pp. 115-127 (1982).
- (16) 루이스 엠스다인 , 폴 휴이트 共著, 재미있는 물리여행②, 김영사,
pp. 323-325 (1988).
- (17) PSSC 편집위원회, PSSC 물리, 탐구당, pp. 248-250 (1965).



< Abstract >

Brief Discussion on the Rainbow Phenomenon

Lee, Soon-Duck

Physics Education Major

Graduate School of Education, Cheju National University

Cheju, Korea

*Supervised by Professor **Khang, Jeong-Woo***

The single bright arc seen after a rain shower is the primary rainbow and higher in the sky than the primary bow is the secondary one. The primary bow results from one internal reflection inside raindrop and the secondary one two internal reflections.

Rays are strongly scattered at angle of 138 degrees and 130 degrees, giving rise respectively to the primary and the secondary rainbow.

Between those angles very little light is deflected; that region is called Alexander's dark band. The optimum angles are slightly different for each wavelength of light, with the result that the colors are dispersed.

The supernumerary arcs that appear on the inner side of the primary bow; is explained interference effect.

* A thesis submitted to the Committee of the Graduate School of Education, Cheju National University in partial fulfillment of the Requirement for the degree of Master of Education in June, 1992.