# 실험 문제 2
# 운모의 복굴절

이 실험에서는 운모(편광 광학 부품에 널리 쓰이는 결정)의 복굴절을 잰다.

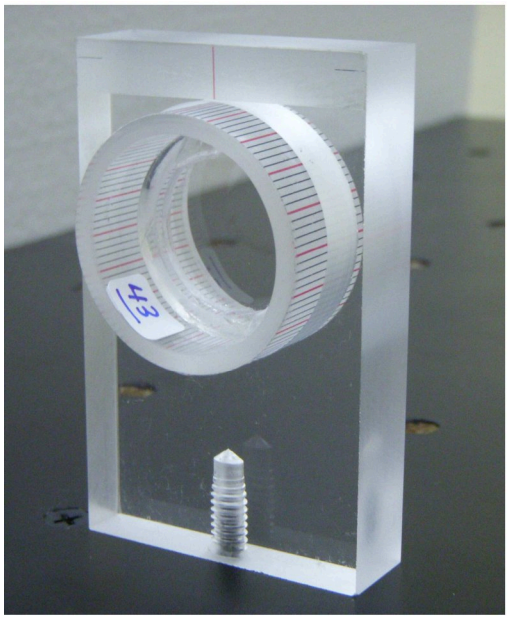
## 준비물

1), 2), 3) 항목 외에 다음을 쓴다.

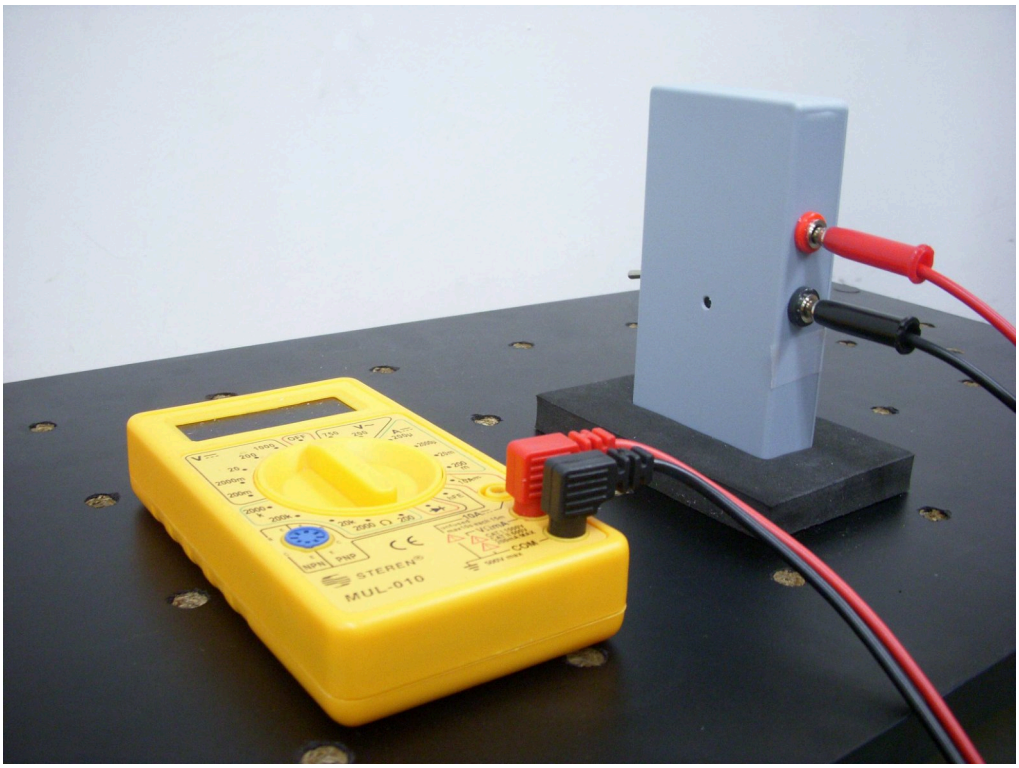
14) 슬라이드 홀더에 단 편광 필름 두 장. 각각에 아크릴 받침이 따로 있다(표지 J). 다는 방법은 사진을 보라.
15) 숫자 없는 눈금이 있는 플라스틱 원통에 단 얇은 운모판과 원통의 아크릴 받침(표지 K). 다는 방법은 사진을 보라.
16) 광검출기 장비. 플라스틱 상자 속 광검출기, 커넥터, 스펀지 받침. 광검출기의 전압을 재는 멀티미터(표지 L). 다는 방법과 연결 방법은 사진을 보라.
17) 계산기.
18) 흰 색인 카드, 마스킹 테이프, 스티커, 가위, 삼각자 세트.
19) 연필, 종이, 모눈종이.




슬라이드 홀더에 단 편광판과 아크릴 받침(표지 J).



숫자 없는 눈금이 있는 원통에 단 얇은 운모판과 아크릴 받침(표지 K).




플라스틱 상자 속 광검출기, 커넥터, 스펀지 받침. 광검출기의 전압을 재는 멀티미터(표지 L). 그림처럼 연결하시오.

## 현상 설명

빛은 가로 전자기파이며, 그 전기장은 진행 방향에 수직인 평면에 놓여 있고 빛이 나아가는 동안 시간에 따라 진동한다.

전기장의 방향이 시간이 지나도 *한 직선을 따라* 진동하면, 그 파동은 선편광되었다, 또는 간단히 편광되었다고 한다. 그림 2.1을 보라.

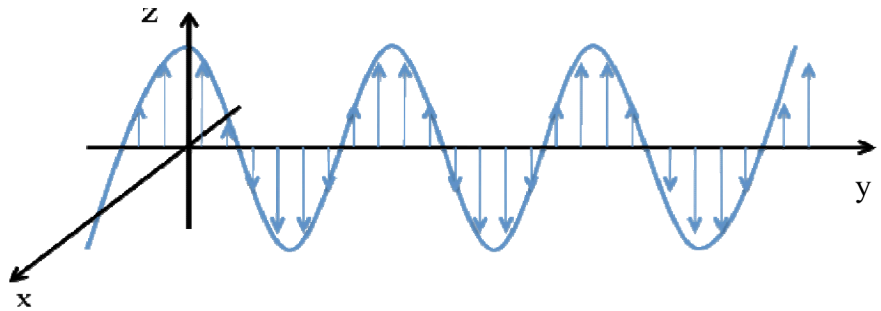



**그림 2.1** $y$ 방향으로 진행하며 $z$ 방향으로 편광된 파동.

편광 필름(또는 간단히 편광판)은 표면에 평행한 특별한 축을 가진 물질로, 투과한 빛은 편광판의 축을 따라 편광되어 나온다. 이 특별한 축을 (+), 그에 수직인 축을 (−)라 하자.

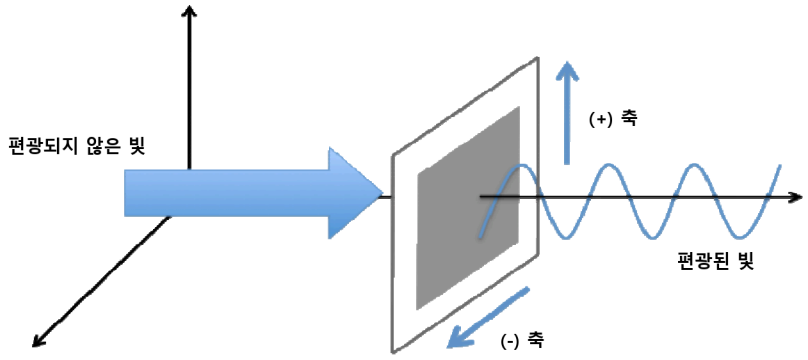



**그림 2.2** 편광되지 않은 빛이 편광판에 수직으로 입사한다. 투과한 빛은 편광판의 (+) 방향으로 편광된다.

(창유리 같은) 흔한 투명 물질은 입사한 빛과 같은 편광의 빛을 투과시킨다. 그 굴절률이 입사파의 방향이나 편광에 달려 있지 않기 때문이다. 그러나 운모를 비롯한 많은 결정은 파동의 전기장 방향에 민감하다. 표면에 수직으로 진행하는 빛에 대해 운모판은 서로 직교하는 두 특성 축을 가지며, 이를 축 1과 축 2라 부르겠다. 이로부터 복굴절이라는 현상이 생긴다.

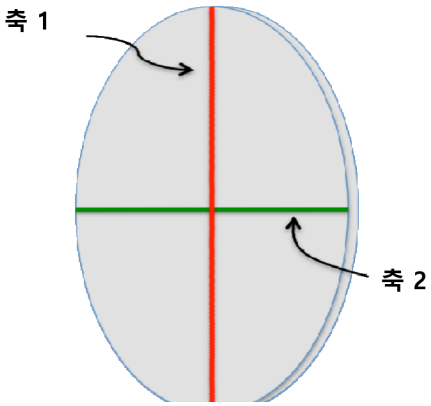



**그림 2.3** 두 축, 곧 축 1(빨강)과 축 2(초록)를 가진 얇은 운모판.

복굴절을 보여 주는 간단한 두 경우를 분석해 보자. **연직 방향으로 편광된** 파동이 얇은 운모판의 한 면에 수직으로 입사한다고 하자.

**경우 1)** 축 1이나 축 2가 입사파의 편광에 평행하다. 투과파는 편광 상태가 바뀌지 않고 지나가지만, 그 진행은 물질의 굴절률이 $n_1$이나 $n_2$인 것처럼 일어난다. 그림 2.4와 2.5를 보라.

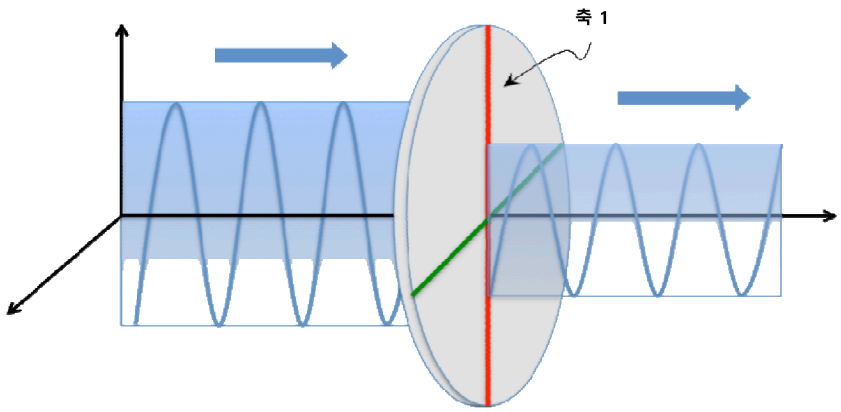



**그림 2.4** 축 1이 입사파의 편광에 평행하다. 굴절률은 $n_1$이다.

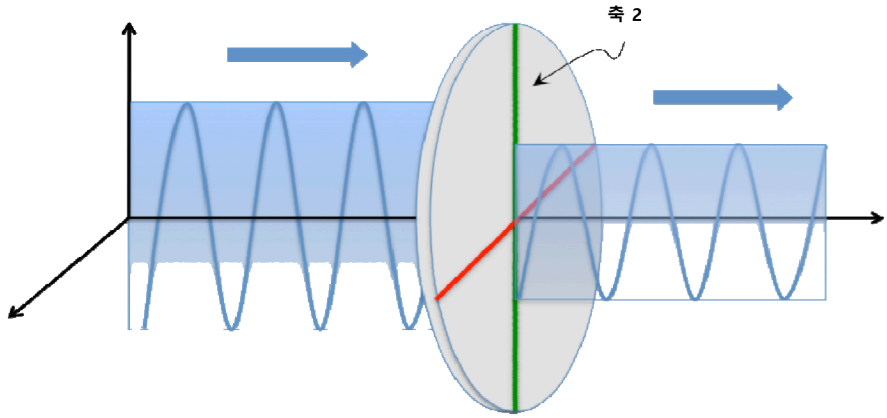



**그림 2.5** 축 2가 입사파의 편광에 평행하다. 굴절률은 $n_2$이다.

**경우 2)** 축 1이 입사파의 편광 방향과 각 $\theta$를 이룬다. 투과한 빛은 더 복잡한 편광 상태를 가진다. 그러나 이 파동은 위상이 다른 두 파동의 *중첩*으로 볼 수 있다. 하나는 입사파의 편광에 **평행**한 (곧 "연직") 편광을 가지고, 다른 하나는 입사파의 편광에 **수직**인(곧 "수평") 편광을 가진다.

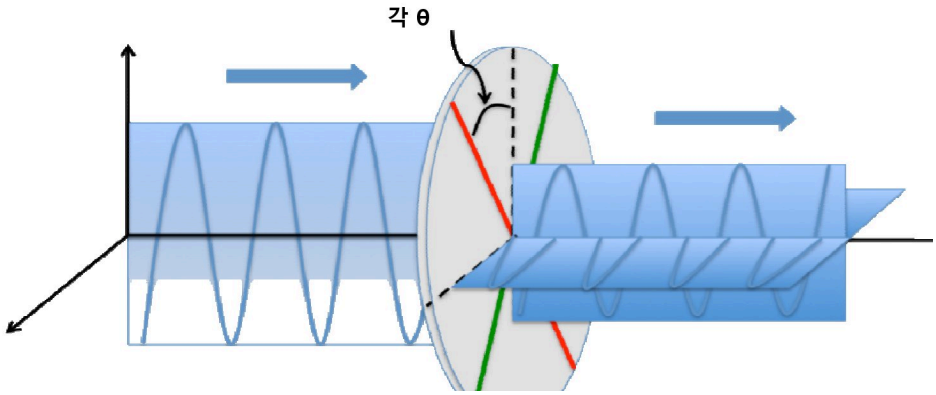



**그림 2.6** 축 1이 입사파의 편광과 각 $\theta$를 이룬다.

입사파의 편광에 *평행*하게 투과한 파동의 *세기*를 $I_P$, 입사파의 편광에 *수직*으로 투과한 파동의 *세기*를 $I_O$라 하자. 이 세기들은 각 $\theta$, 광원의 파장 $\lambda$, 얇은 판의 두께 $L$, 그리고 굴절률 차의 절댓값 $|n_1 - n_2|$에 달려 있다. 이 마지막 양을 물질의 *복굴절*이라 한다. 이 양을 재는 것이 이 문제의 목표이다. 복굴절 물질은 편광판과 함께 빛의 편광 상태를 조절하는 데 쓸모 있다.

광검출기는 편광과 무관하게 입사하는 빛의 세기를 잰다는 점을 밝혀 둔다.

운모가 입사 복사를 흡수하는 것처럼 고려하지 않은 다른 효과들 때문에 $I_P(\theta)$와 $I_O(\theta)$가 각 $\theta$에 의존하는 방식은 복잡하다. 그러나 다음과 같이 정의한 규격화된 세기 $\bar{I}_P(\theta)$와 $\bar{I}_O(\theta)$에 대해서는 근사적이지만 매우 간단한 식을 얻을 수 있다.

$$\bar{I}_P(\theta) = \frac{I_P(\theta)}{I_P(\theta) + I_O(\theta)} \tag{2.1}$$

그리고

$$\bar{I}_O(\theta) = \frac{I_O(\theta)}{I_P(\theta) + I_O(\theta)} \tag{2.2}$$

규격화된 세기는 (근사적으로) 다음과 같이 주어짐을 보일 수 있다.

$$\bar{I}_P(\theta) = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)\sin^2(2\theta) \tag{2.3}$$

그리고

$$\bar{I}_O(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos\Delta\phi)\sin^2(2\theta) \tag{2.4}$$

여기서 $\Delta\phi$는 평행하게 투과한 파동과 수직으로 투과한 파동의 위상차이다. 이 양은 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}|n_1 - n_2| \tag{2.5}$$

여기서 $L$은 얇은 운모판의 두께, $\lambda$는 입사 복사의 파장, $|n_1 - n_2|$는 복굴절이다.

## 실험 장치

**과제 2.1 세기 측정을 위한 실험 장치.** 그림 2.6처럼 광학축 가운데 하나의 각 $\theta$에 따라 투과파의 세기 $I_P$와 $I_O$를 재는 실험 장치를 설계하시오. 광학 테이블 그림 위에 여러 장치의 표지를 적는 방식으로 하시오. 편광판의 방향은 (+)와 (−)의 약속을 따르시오. 설계를 분명히 하는 데 도움이 되도록 간단한 그림을 더 그려도 된다.

> **과제 2.1 a) $I_P$를 위한 장치 (0.5점).**
> **과제 2.1 b) $I_O$를 위한 장치 (0.5점).**

**레이저 빛살 정렬.** 레이저 빛살이 테이블에 평행하고 운모를 든 원통의 중심에 입사하도록 정렬하시오. 흰 색인 카드 하나로 경로를 따라가며 정렬해도 된다. 움직이는 거울로 조금씩 조정할 수 있다.

**광검출기와 멀티미터.** 광검출기는 빛을 받으면 전압을 낸다. 이 전압을 주어진 멀티미터로 재시오. 나오는 전압은 빛의 세기에 선형으로 비례한다. 따라서 세기는 광검출기가 낸 전압으로 보고하시오. 광검출기에 레이저 빛살이 입사하지 않을 때 검출기의 배경 빛 세기를 잴 수 있다. 이것은 1 mV보다 작아야 한다. 세기 측정을 할 때 이 배경을 보정하지 마시오.

**경고:** 레이저 빛살은 부분적으로 편광되어 있지만 어느 방향인지는 알려져 있지 않다. 따라서 세기 읽음이 좋은 편광된 빛을 얻으려면, 다른 광학 장치가 없는 상태에서 투과 세기가 최대가 되도록 편광판의 (+)축이나 (−)축을 연직으로 놓으시오.

## 세기 재기

**과제 2.2 각 설정용 눈금.** 운모를 든 원통에는 각을 맞추는 일정한 눈금이 있다. 가장 작은 간격(곧 연속한 두 검은 선 사이)의 값을 도 단위로 적으시오. (0.25점).

**$\theta$의 영점(근사)과 운모 축의 위치 찾기.** 분석을 쉽게 하려면 각의 알맞은 영점을 찾는 것이 매우 중요하다. 먼저 운모 축 가운데 하나의 위치를 찾아 그것을 축 1이라 부를 것을 제안한다. 이 위치가 원통의 눈금선과 일치하지 않을 것은 거의 확실하다. 따라서 운모 원통에서 가장 가까운 눈금선을 각의 임시 원점으로 생각하자. 이 원점에서 잰 각을 $\bar{\theta}$라 하자. 아래에서 $\theta$의 영점 위치를 더 정확히 내도록 요구할 것이다.

**과제 2.3 $I_P$와 $I_O$ 재기.** 필요하다고 생각하는 만큼 많은 각 $\bar{\theta}$에서 세기 $I_P$와 $I_O$를 재시오. 측정값을 표 I에 보고하시오. $I_P$와 $I_O$는 운모 원통의 같은 설정, 곧 고정된 각 $\bar{\theta}$에서 재도록 하시오. (3.0점).

**과제 2.4 $\theta$의 알맞은 영점 찾기.** 축 1의 위치가 각 $\theta$의 영점을 정한다. 위에서 말했듯이 축 1의 위치는 운모 원통의 눈금선과 거의 확실히 일치하지 않는다. 각의 영점을 찾으려면 그래프로 해도 되고 수치로 해도 된다. 극대나 극소 근처의 관계는 다음과 같은 포물선으로 근사할 수 있음을 인식하시오.

$$I(\bar{\theta}) \approx a\bar{\theta}^2 + b\bar{\theta} + c$$

포물선의 극소 또는 극대는 다음에서 일어난다.

$$\bar{\theta}_m = -\frac{b}{2a}\,.$$

어느 방법을 택하든, 과제 2.3의 표 I에 있는 $\bar{\theta}$의 모든 값을 $\delta\theta$만큼 옮겨, 이제 알맞은 영점에서 잰 각 $\theta = \bar{\theta} + \delta\theta$로 쓸 수 있게 된다. 옮김 $\delta\theta$의 값을 도 단위로 적으시오. (1.0점).

## 데이터 분석.

**과제 2.5 알맞은 변수 고르기.** 위상차 $\Delta\phi$를 구하는 분석에 $\bar{I}_P(\theta)$나 $\bar{I}_O(\theta)$를 고르시오. 쓸 변수를 밝히시오. (0.5점).

**과제 2.6 데이터 분석과 위상차.**

- 표 II에 분석에 필요한 변수들의 값을 적으시오. 보정한 각 $\theta$를 쓰도록 하시오. 불확도를 포함하시오. 모눈종이에 변수들을 그리시오. (1.0점).
- 위상차 $\Delta\phi$를 얻는 데 필요한 데이터 분석을 하시오. 결과를 불확도와 함께 보고하시오. 분석에 쓴 식이나 공식을 적으시오. 결과를 그래프로 그리시오. (1.75점).
- 위상차 $\Delta\phi$의 값을 불확도와 함께 라디안으로 계산하시오. 구간 $[0, \pi]$에서 위상차의 값을 구하시오. (0.5점).

**과제 2.7 복굴절 $|n_1 - n_2|$ 계산하기.** 위상차 $\Delta\phi$에 $N$이 정수일 때 $2N\pi$를 더하거나 위상의 부호를 바꾸어도 세기의 값은 바뀌지 않는다는 것을 알 수 있을 것이다. 그러나 복굴절 $|n_1 - n_2|$의 값은 바뀐다. 따라서 과제 2.6에서 구한 $\Delta\phi$ 값으로 복굴절을 바르게 계산하려면 다음을 고려해야 한다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}|n_1 - n_2| \qquad \text{만약} \quad L < 82 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}$$

또는

$$2\pi - \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}|n_1 - n_2| \qquad \text{만약} \quad L > 82 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}$$

여기서 여러분이 쓴 운모판의 두께 $L$의 값은 그것을 든 원통에 적혀 있다. 이 수는 마이크로미터 (1 마이크로미터 = $10^{-6}$ m) 단위이다. $L$의 불확도는 $1 \times 10^{-6}$ m로 잡으시오. 레이저 파장으로는 문제 1에서 구한 값을 쓰거나, 가시광선 스펙트럼에서 빨강의 범위로 보고된 $620 \times 10^{-9}$ m와 $750 \times 10^{-9}$ m의 평균값을 써도 된다. $L$과 $\lambda$의 값, 그리고 불확도를 포함한 복굴절 $|n_1 - n_2|$를 적으시오. 불확도를 계산하는 데 쓴 공식을 포함하시오. (1.0점).