

연 재 I
광 학 개 론 (14)
〈굴절률의 측정〉

삼양광학공업주식회사
정해빈 박사

18.4 분광계를 이용한 굴절률 측정

분광계(spectrometer)를 써서 프리즘의 꼭지각(頂角)과 최소편각을 재면 이로부터 굴절률을 구할 수 있는데, 이 방법은 유리 등과 같은 고체의 굴절률을 구하는 보편적인 방법이다. 이 방법의 분해능은 사용되는 분광계의 고니오메터(goniometer : 일종의 각도기) 분해능에 의해서 결정되며, 굴절률 측정 방법 중 가장 정밀도가 높은 방법이다.

하지만 측정때마다 측정하고자하는 시료를 프리즘 형태로 연마해야 하므로 시료를 준비하는 작업 자체가 번거롭고 대부분의 경우에 프리즘이 최종 완성품이 아니므로 파괴적인 측정

방법이 된다는 단점이 있다. 따라서 이 방법은 광학유리 제조회사에서 광학유리 생산시 로트 검사용, 아주 정밀한 광학부품 제작시 입고된 광학재료의 정확한 굴절률 측정용, 연구용 등으로 제한적으로 사용된다.

18.4.1 측정 장치

분광계는 그림 18-6과 같이 생겼으며, 콜리메이터, 망원경, 프리즘대, 고니오메터 등의 주요 부분으로 이루어져 있다.

콜리메이터에는 그 간격을 조정할 수 있는 슬릿이 붙어 있어서 측정시 물체로서 사용된다. 슬릿을 좁게 해줄수록 망원경으로 더욱 가

는 선을 볼 수 있으므로 측정의 정확도가 올라 가지만 너무 가늘게 하면 광량이 부족하게 되어 관측이 어려워지는 수가 있다. 특히 굴절률을 측정하고자 하는 프리즘의 크기가 작은 경우에 광량 부족 현상이 나타나기 쉽다. 콜리메이터의 밑에는 수평각을 조정할 수 있는 나사가 설치되어 있다. 콜리메이터 뒤에는 나트륨 등이나 수은등과 같은 광원이 놓여지며, 슬릿과 이들 광원 사이에 간섭필터를 설치하여 원하는 단색광만을 뽑아내어 측정에 이용할 수 있게 되어 있다. 이때에 사용되는 광원과 파장은 이 연재물에 이미 게재된 바 있는 프라운호퍼선들이다.

망원경에는 수평각을 조절할 수 있는 나사가 밑에 설치되어 있으며, 접안렌즈에는 십자선이나 수직선이 설치되어 있어서 측정할 때 편리하도록 되어 있다. 또한, 대물렌즈와 접안렌즈를 움직여서 십자선까지의 거리를 조정하도록 되어 있다.

프리즘대 밑에는 3개의 조정나사가 붙어 있어서 수평각을 조정할 수 있게 되어 있고, 그 아래에 고니오메터가 설치된다. 고니오메터는 스테인레스 또는 유리로 만들어지는데, 스테인레스제의 경우는 버니어(vernier; 아들자)를 이용하여 각도를 1분 정도까지 측정 가능하며, 유리제의 경우는 이보다 정밀도가 높아서 0.3

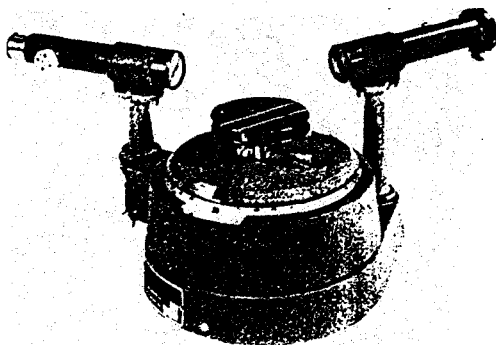


그림 18-6. 스펙트로 메터

초 정도까지 측정 가능한 것도 있다. 2개의 버니어가 180도 간격으로 설치되어 있어 고니오메터가 진원(眞圓)이 아닐 때 발생할 수 있는 측정시의 오차를 줄일 수 있도록 되어 있다. 최근에 나온 분광계에는 각도가 디지털 형태로 전광판에 나타나도록 되어 있어 측정이 편리하도록 되어 있는 것도 있다.

18.4.2 측정 원리

그림 18-7과 같이 삼각 프리즘 ABC의 한 면에 입사각 i 로 입사한 광선은 LMM'T의 경로를 밟게 되는데, 이때 이 광선이 각각의 면 AB, AC의 법선과 이루는 각을 각각 i, r, r', i' 이라 하자. 또 입사광선 LM과 굴절광선 M'T의 연장선이 이루는 각도를 δ 라 하자. 이때 이 각도 δ 를 편각이라 한다. 이 편각 δ 는 입사광선과 프리즘에 의해 굴절된 광선간의 경로차를 나타내는 각도가 된다.

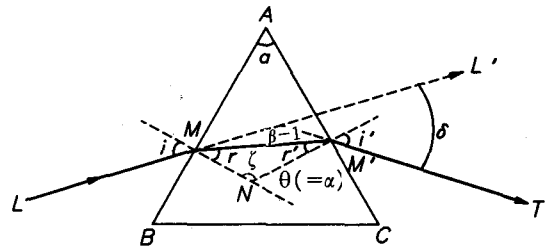


그림 18-7 측정원리

각도 δ 는

$$\begin{aligned} \delta &= \beta + r' \quad (\because \text{삼각형의 외각은 두 내각의 합과 같다.}) \\ &= (i - r) + (i' - r') \\ &= (i + i') - (r + r') \end{aligned} \quad (18-15)$$

이 된다. 한편 프리즘의 꼭지각을 α 라 하면 각

도 θ 는

$$= \arcsin(n \cdot \sin r) + \arcsin\{n(\sin(\alpha - r))\} + \alpha \quad (18-25)$$

$$\theta = 180^\circ - \zeta \quad (18-16)$$

이고, 또한

가 된다. 이때 이 δ 값이 최소가 되는 점을 구하기 위하여 $\frac{d\delta}{dr}$ 을 구해서 이를 0으로 놓으면

$$\begin{aligned} \alpha &= 360^\circ - 180^\circ - \zeta \\ &= 180^\circ - \zeta \end{aligned} \quad (18-17)$$

$$\frac{d\delta}{dr} = \frac{n}{r} \cos r - \frac{n}{(\alpha - r)} \cos r = 0 \quad (18-26)$$

$$r = \alpha - r \quad (18-27)$$

이므로

$$\alpha = 2r \quad (18-28)$$

$$r = \frac{\alpha}{2} \quad (18-29)$$

$$\theta = \alpha \quad (18-18)$$

가 된다. 이때

이 된다. 즉, $r = \alpha/2$ 일 때 편각 δ 는 최소가 된다. 이때의 δ, i, i' 의 값을 각각 δ_0, i_0, i'_0 이라 놓으면,

$$\theta = r + r' \quad (18-19)$$

$$\delta_0 = i_0 - i'_0 - \alpha \quad (18-30)$$

이므로

이고, $r = r' = \alpha/2$ 이므로,

$$r + r' = \alpha \quad (18-20)$$

$$\sin i = n \sin r \quad (18-31)$$

$$\sin i' = n \sin r' \quad (18-32)$$

가 된다. 따라서

$$\delta = (i + i') - \alpha \quad (18-21)$$

으로부터

가 되고, 프리즘의 굴절률을 n 이라 하면 스넬의 법칙으로부터

$$i = i' \quad (18-33)$$

이 되므로,

$$\sin i = n \sin r \quad (18-22)$$

$$\sin i' = n \sin r' \quad (18-23)$$

이므로

$$i_0 = i'_0 = \frac{\delta + \alpha}{2} \quad (18-34)$$

가 얻어진다. 따라서 광선이 프리즘에 대해 대칭적으로 통과할 때 편각이 최소가 되며, 굴절률 n 은

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i'}{\sin r'} \quad (18-24)$$

$$n = \frac{\sin i_0}{\sin r_0} = \frac{\sin \frac{\delta_0 + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (18-35)$$

이 된다. 따라서 위의 편각 δ 를 다시 써주면,

$$\begin{aligned} \delta &= i + i' - \alpha \\ &= \arcsin(n \cdot \sin r) + \arcsin(n \sin r') + \alpha \end{aligned}$$

가 된다. 따라서 프리즘의 꼭지각과 최소편각

을 측정하면 그 굴절률을 식 18-35를 써서 구할 수 있다.

18.4.3 측정 순서

측정은 먼저 분광계의 각 부분의 조정을 행한 후, 시료를 올려놓고 꼭지각과 최소편각을 측정하는 순서로 이뤄진다.

(a) 분광계의 조정

1) 망원경과 콜리메이터의 광축 맞추기

분광계의 망원경은 대물렌즈, 십자선, 접안렌즈의 3부분으로 이루어져 있으며, 그림 18-8과 같이 대물렌즈와 접안렌즈의 십자선으로부터의 거리를 조정할 수 있도록 되어 있다. 접안렌즈의 초점면에는 십자선이 위치하여 대물렌즈에 의한 상의 위치를 알기 쉽도록 되어 있다. 또한, 빛의 경로를 90도 틀어서 조정시에 사용할 수 있도록 45도로 기울어진 플립미러(flip mirror)가 설치되어 있는 것도 있다.

우선 접안렌즈를 돌려서 접안렌즈와 십자선간의 거리를 변화시켜서 측정자의 눈에 십자선이 똑똑히 보이도록 측정자의 시도에 따른 디옵터를 조정하고, 다시 대물렌즈와 접안렌즈간의 거리를 대물렌즈를 돌려서 조정하여 먼 곳에 있는 물체(멀리 떨어져 있는 산이나 건물 등이 주로 이용된다)가 잘 보이도록 조정한다. 이때 눈을 놓는 위치에 상관없이 십자선 위에서 물체의 상이 움직이지 않아야 한다.

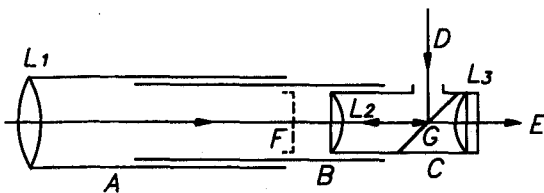


그림 18-8. 분광계 망원경의 구조

2) 망원경의 광축과 고니오메터의 회전축을 맞추주기

오토콜리메이션(auto-collimation) 방법에 의하여 망원경의 광축을 분광계의 회전축에 수직하게 맞추려면 우선 그림 18-9와 같이 프리즘대 위에 평행평면판을 올려 놓은 다음 망원경의 광축을 대략 이것에 수직이 되도록 하고 전등으로 접안렌즈의 구멍 D를 통하여 빛을 넣어 45도로 놓인 유리판 G에서 반사되어 십자선 F를 비취게 한다. 따라서 십자선 F로부터 나온 빛은 P₁면에서 반사되어 다시 F면에 실상 F'이 맺게 된다. 이때 십자선 F와 그 실상 F'이 일치하지 않아 이중으로 보이면 이들이 하나로 일치될 때까지 조정해 준다. 그 다음 망원경을 180도 회전시킨 위치에 돌려 놓고, 위에서와 같은 방법으로 조정해주면 망원경의 광축은 분광계 회전축에 수직하게 된다.

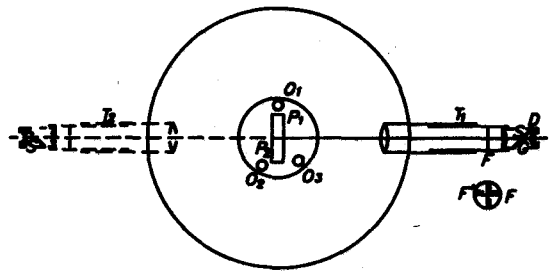


그림 18-9 망원경의 광축조정

3) 콜리메이터의 조정

그림 18-10과 같이 무한원(無限遠)에 맞춘 망원경과 거의 일치하는 직선위에 마주보게 콜리메이터를 놓고 슬릿 뒤에 전등을 켜서 슬릿의 실상 S'이 망원경 접안렌즈의 십자선 위에 생기도록 한다. 그 다음 이 상이 가장 선명하게 보일 때까지 콜리메이터의 대물렌즈를 돌려서 콜리메이터의 슬릿과 대물렌즈 사이의 거리를

조정한다. 이렇게 함으로써 슬릿에서 출발한 빛이 대물렌즈를 통과한 후 완전한 평행광속(parallel beam)이 되게 되어 마치 무한거리에 놓여 있는 물체와 동일한 역할을 하게 된다.

그 다음 슬릿의 상인 S'의 중심선이 망원경 접안렌즈 십자선의 수평, 수직 두 선과 일치하도록 콜리메이터 아래에 있는 나사를 돌려 기울기와 방향을 고쳐 콜리메이터와 망원경의 광축을 일치시켜준다.

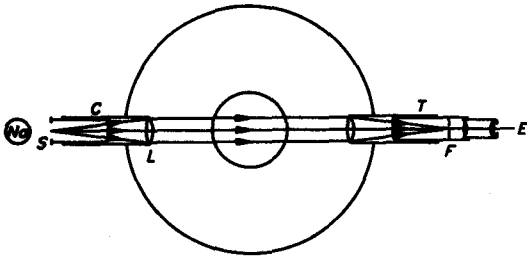


그림 18-10. 망원경과 콜리메이터의 광축을 일치시키기

(b) 측정

1) 프리즘의 꼭지각 측정

그림 18-11과 같이 측정하고자하는 프리즘의 꼭지각 α 가 콜리메이터를 향하게 하고 콜리메이터로 만들어진 평행광속을 프리즘에 비추준다. 이렇게 하면 빛은 프리즘의 꼭지점에서 나뉘어져 일부는 프리즘의 왼쪽면에서 다른 일부는 오른쪽면에서 반사되게 된다. 그 다음 프리즘의 한 면에서 반사된 평행광속을 망원경을 통해 보았을 때 이 광속에 의한 상과 망원경 접안렌즈의 십자선이 일치하도록 하고 이때의 각도 V_1, V_1' 을 2개의 버니어를 써서 각각 읽는다. 다시 망원경을 돌려서 프리즘의 다른 면에서 반사된 빛에 의한 상과 망원경 접안렌즈 십자선이 일치하도록 하고, 이때의 각도 V_2, V_2' 를 읽는다. 이때 망원경의 회전각, 즉, 입사

광선이 프리즘의 양면에 의해서 반사된 두 빛 사이의 각도 B는 $(V_2 - V_1)$ 또는 $(V_2' - V_1')$ 으로 주어지므로 이 두 값의 평균을 B값으로 취한다. 그러면 꼭지각 α 는

$$\alpha = \frac{1}{2}B \quad (18-36)$$

로 주어진다.

이 방법은 굴절률을 구하기 위한 방법으로도 사용되지만 동시에 일반적인 각(직각이나 45도와 같은 특수한 각이 아닌 각)을 갖는 프리즘의 면과 면 사이의 각도를 정밀하게 측정하는 방법으로 사용된다.

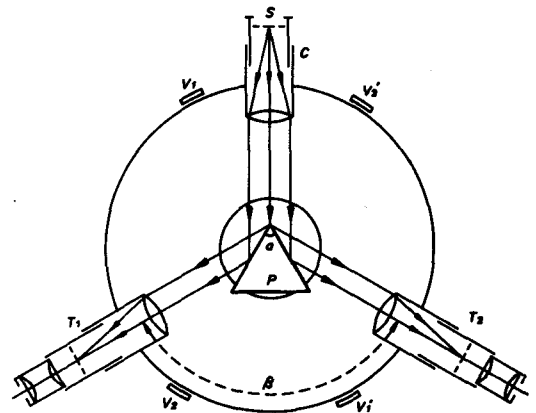


그림 18-11. 프리즘의 꼭지각 측정

2) 최소편각의 측정

그림 18-12와 같이 콜리메이터, 프리즘, 망원경을 설치하고 콜리메이터 슬릿의 상을 망원경 접안렌즈 십자선에 맞춘다. 그 다음 프리즘대를 좌우로 돌리면서 슬릿의 상이 십자선에 대해서 어느 쪽으로 움직이는지를 관찰한다. 이때 입사광선과 굴절광선이 프리즘 꼭지각 α 에 대해서 대칭적이 되도록 입사광이 프리즘에

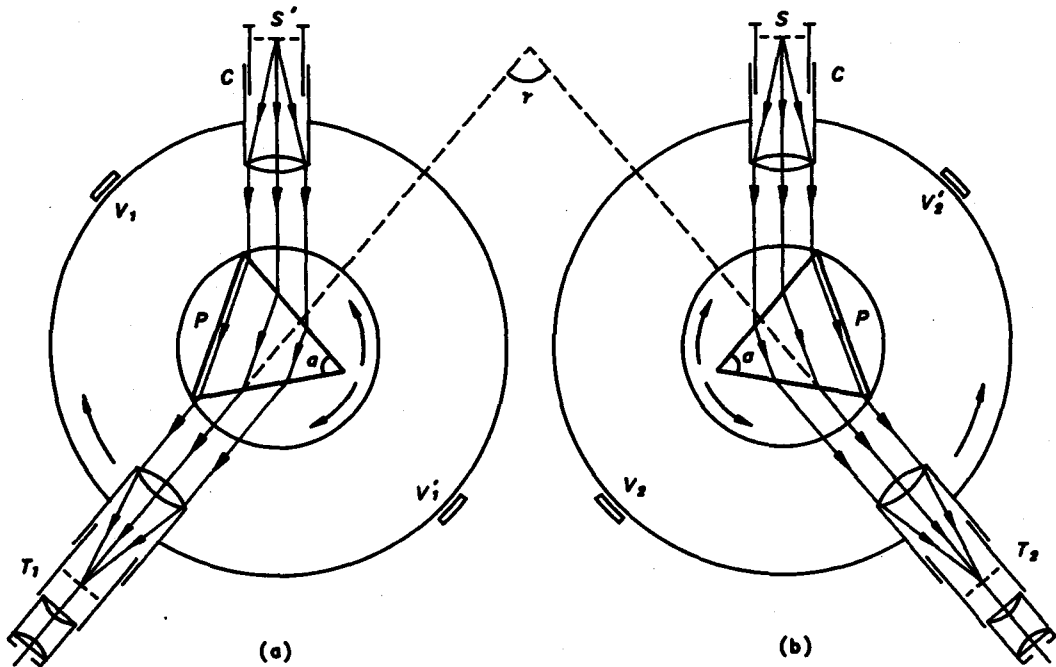


그림 18-12. 최소편각 측정

입사할 때, 즉, 편각이 최소가 될 때는 프리즘을 좌우 어느 쪽으로 돌려 주어도 편각이 증가하는 방향으로 상이 움직이므로 편각이 가장 작게 되도록 맞춰주면 된다. 이때의 망원경 위치 V_1, V_1' 을 읽는다. 다음에는 콜리메이터를 그대로 두고 망원경의 위치를 이동시켜서 반대 방향에 대해 같은 방법으로 최소편각이 나타나는 위치를 잡고 이때의 망원경 위치 V_2, V_2' 을 읽는다. 이제 $(V_2 - V_1), (V_2' - V_1')$ 의 평균값을 C 라 하면 최소편각 δ_0 는

$$\delta_0 = \frac{1}{2}C \quad (18-37)$$

로 주어진다.

이와 같은 과정들을 거쳐서 꼭지각과 최소편각을 알아내면 식 (18-35)를 써서 굴절률 n 을 구해낼 수 있다.

$$n = \frac{\sin i_0}{\sin r_0} = \frac{\sin \frac{\delta_0 + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \quad (18-35)$$

18.4.4 분산값의 측정

다른 파장에서의 굴절률을 알고자 할 때에는 해당하는 파장에 적합한 광원과 필터의 조합을 택하여 슬릿을 조명해주고 동일한 측정 과정을 거치면 된다. 따라서 분산값을 구하고자 할 때에는 프라운호퍼 D-선, F-선, C-선에 해당하는 광원과 필터의 조합을 이용하여 각각의 파장에서 굴절률을 구한 후 아래의 식에 의해서 분산값을 구할 수 있다.

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (18-38)$$