

광학개론(13)

굴절률의 측정

삼양광학공업주식회사

정해빈 박사

18. 굴절률의 측정

광학재료의 선정에 있어서 가장 먼저 검토해야 할 사항은 사용하고자하는 파장에서의 투명도와 굴절률일 것이다. 특히 굴절률은 광학계 설계에 있어서 가장 중요한 요소이다. 이러한 굴절률 측정방법도 초점거리의 측정방법과 마찬가지로 여러 가지 방법들이 있는데, 이중에서 갖고 있는 설비나 요구되는 정확도에 따라서 적절한 방법을 선택하면 된다.

18.1 현미경을 이용한 방법

시냇물이나 연못 바닥에 놓여있는 조약들을 바라보면 빛의 굴절현상 때문에 그것이 실제 놓여있는 위치보다 관측자에게 더 가깝게 보인다. 이렇게 가깝게 보이는 정도는 그 매질(이 경우에는 시냇물 또는 연못물)의 굴절률과 직접적인 관계가 있으므로 실제의 거리와 눈에 보이는

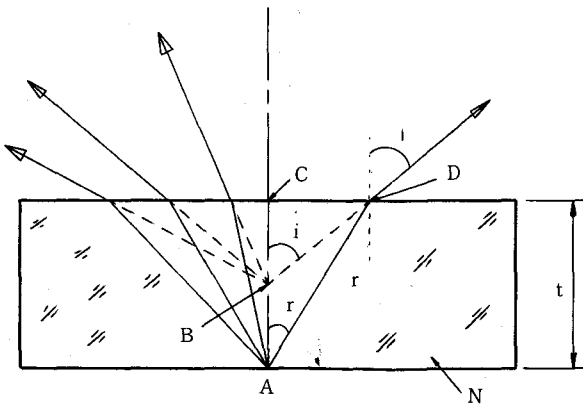
거리간의 차를 정량적으로 측정함으로써 투명한 액체나 연마된 투명 고체 평판의 굴절률을 간단하게 측정할 수 있다.

먼저 측정 원리에 대해서 알아보자. 그림(18-1)에서 물체 A를 광학적으로 밀한 매질(optical dense medium)을 통해서 보면 허상 B에 위치하고 있는 것처럼 보인다. 이때 이 밀한 매질의 굴절률을 n 이라 하고, 그 두께를 t 라 하자. 계산을 편리하게 하기 위하여 물체 A를 정면으로 바라본다고 가정하자. 그림(18-1)의 오른쪽의 법선(法線)에 대해서 각도 r 을 가지고 점 A에서 나오는 임의의 광선 A를 보였다. 이 광선은 매질과 공기의 경계면에서 굴절을 일으켜 법선과 i 의 각도를 이루며 매질로부터 나오게 되어 측정자의 눈에는 마치 점 B에서 나온 것처럼 보이게 된다. 즉, 떠보이게 된다. 따라서 이러한 값들간에는 다음과 같은 관계식들이 성립하게 된다.

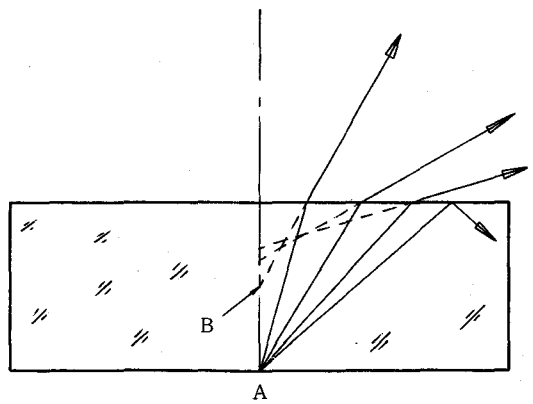
$$n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (\text{스넬의 법칙으로부터 유도됨}) \quad (18-1)$$

$$\cong \frac{\tan i}{\tan r} \quad (\text{작은 각도 } i \text{와 } r \text{에 대해서 성립함}) \quad (18-2)$$

또한, 그림(18-1)로부터



<그림 18-1>



<그림 18-2>

$$\tan i = \frac{CD}{CB} \quad (18-3)$$

$$\tan i = \frac{CD}{CA} \quad (18-4)$$

가 성립한다. 따라서,

$$\begin{aligned} n &= \frac{CA}{CB} \\ &= \frac{t}{CB} \\ &= \frac{(\text{매질의 두께})}{(\text{겉보기 깊이})} \end{aligned} \quad (18-5)$$

가 된다. 이제 t와 CB의 값만 측정할 수 있으면 그 매질의 굴절률을 (18-5)식을 써서 구할 수 있다. 이때 필요한 장비로는 높이를 잴 수 있는 눈금이 붙어있는 현미경이 있다.

측정은 다음과 같은 순서로 진행된다.

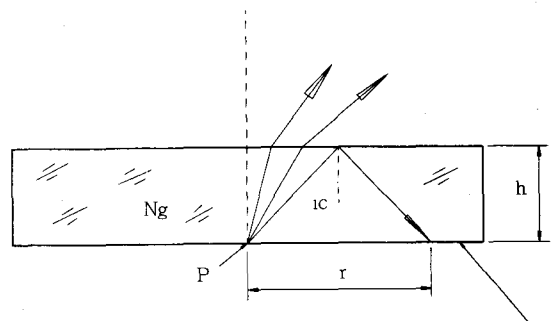
- ① 현미경 재물대(stage) 위의 중심부에 십자선 또는 점이 찍혀 있는 종이를 올려놓는다.
- ② 현미경의 초점을 종이 위 표시에 정확히 맞춘 후 이때의 현미경 높이를 기록한다.
- ③ 그 다음 측정하고자하는 샘플을 재물대 위의 종이위에 놓고 종이위의 표시가 선명히 보이도록 초점을 맞춘다.
- ④ 이 두번째 높이를 기록한다.
- ⑤ 끝으로 현미경을 움직여서 측정하고자하는 샘플의 윗면에 정확히 초점을 맞춘다.
- ⑥ 이때의 높이를 기록한다.
- ⑦ 이러한 측정값들로부터 매질의 두께와 겉보기 깊이를 알아내고 (18-5)식을 써서 굴절률을 계산해 낸다.

이 방법에서의 주된 오차요인은 입사각과 굴절각의 사인값이 그 각각의 탄젠트값과 가정에 있는데 있다. 그림(18-1)이 이러한 가정하에서의 빛의 굴절을 나타내고 있으며, 그림(18-2)는 더 실제적인 상황을 나타내고 있다. 이러한

가정에 의한 오차를 최소화하기 위해서는 현미경의 시야를 매우 좁은 범위로 제한해 주어야 한다. 하지만, 시야를 줄여주게 되면 피사체 심도가 깊어지게 되어 정확한 초점을 잡기 어렵게 된다. 적절한 배율과 시료의 두께를 택하면 이러한 근사에 의한 오차가 작게 되는데, 높은 정밀도의 측정은 어렵다.

18.2 Pfund의 방법

Pfund의 방법은 내부 전반사(內部 全反射)가 일어나기 시작하는 임계각을 측정하여 그 매질의 굴절률을 알아내는 방법이다. 이 방법은 연마된 투명 고체 평판이나 측정용 평판(measuring plate)을 이용하여 이보다 낮은 굴절률을 갖는 액체의 굴절률 측정에 사용할 수 있다. 액체의 굴절률 측정시에는 1cm³ 정도의 시료를 필요로 한다.



<그림 18-3>

임계각을 재기 위하여 그 단면을 그림(18-3)에 보인 바와 같이 작고 밝은 조명을 샘플 또는 측정용 평판의 아랫면에 페인트 칠이 되어 있는 부분에 해준다. P점에 도달한 빛은 페인트 칠이 되어 있는 면에 의하여 산란되어 모든 방향으로 나아가게 된다. 이렇게 산란된 빛의 일부는 임계각보다 작은 입사각으로 판의 윗면에 도달하게 되며, 그 결과 일부는 투과하고 일부는 반사하게 된다. 반면에 임계각과 같거나 그보다 큰 각도로 입사한 광선은 모두 내부 반사를 일으키

게 되어 그림(18-4)와 같이 페인트 칠이 된 면에 아주 선명한 밝은 빛의 원을 그리게 되며, 그 내부는 주변보다 어둡게 된다. 이때 어두운 부분의 지름은 고체 평판의 두께, 고체 평판의 굴절률, 그리고 고체 평판위에 바른 액체의 굴절률 등에 달려 있게 된다. 고체 평판만 있는 경우라면 그 굴절률 n_s 는

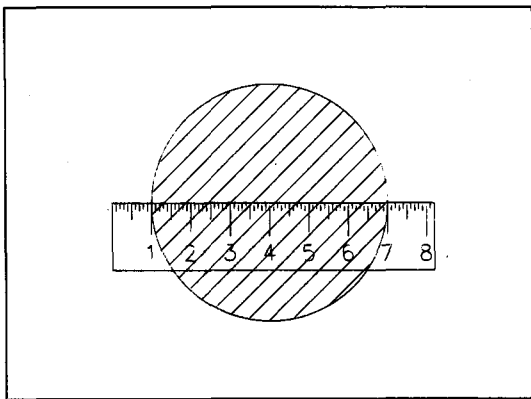
$$n_s = \frac{\sqrt{D_s + 16t^2}}{D_s} \quad (18-6)$$

로 주어진다. 이때 D_s 는 어두운 원의 지름, t 는 고체 평판의 두께이다. 또, 액체의 층이 측정용 평판 위에 깔려 있는 경우라면 그 액체의 굴절률 n_e 는

$$n_e = \frac{n_s \cdot D_e}{\sqrt{D_e^2 + 16t^2}} \quad (18-7)$$

로 주어진다. 이때 D_e 는 측정용 평판위에 액체가 깔려 있을 때의 어두운 원의 지름이다.

이 방법은 실제로는 주로 액체의 굴절률을 측정하는데 사용된다. 그 이유는 유리등과 같은 고체의 굴절률 측정시에 샘플을 충분한 크기로 준비하는 것이 어렵기 때문이다.



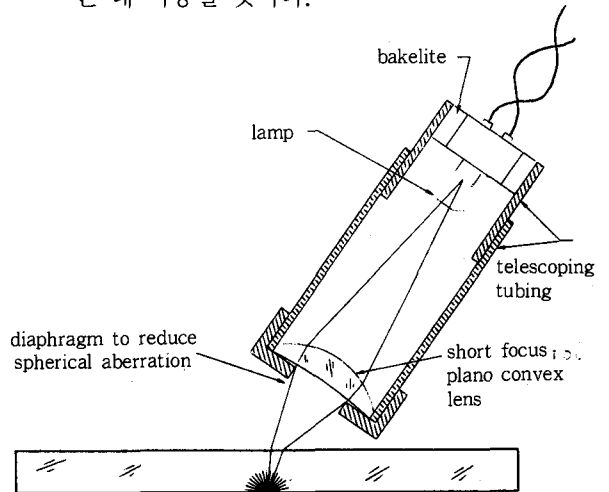
<그림 18-4>

측정은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- ① 실제로 측정하는데 있어서는 약간의 장비가 필요하다. 유리판(또는 고체 평판)은

10cm×10cm 정도의 크기에 5~6mm 정도의 두께가 적당하다. 이때 유리판의 굴절률은 반드시 측정하고자하는 액체의 굴절률보다 커야 한다.

- ② 이 유리판의 밑바닥에 밀리미터 눈금의 얇은 플라스틱 자를 붙여 놓는다. 이때 플라스틱 자의 눈금이 유리판의 중앙부를 지나도록 한다.
- ③ 자를 붙인 후에는 한 귀퉁이만 남겨 놓고 아랫면 모두(자도 포함해서)를 흰색 페인트로 칠을 한다. 이때 칠을 하지 않고 남겨놓은 귀퉁이는 유리판의 두께를 측정하는데 이용할 것이다.



<그림 18-5>

- ④ 그림(18-5)는 간단한 조명기구를 보이고 있다. 이 조명기구는 금속제의 파이프 한 쪽 끝에 초점거리 5cm 정도의 평볼록렌즈를 놓고 다른 한 쪽 끝에 램프를 놓은 형태로 되어 있다. 또한 렌즈의 앞에는 조리개를 설치하여 렌즈의 구경을 작게 해줌으로써 구면수차를 작게 해주고 있다. 빛의 반사를 막기 위하여 파이프와 조리개의 내부는 검은 색을 칠해 주고, 램프도 끝부분의 작은 구경만 남겨 놓고 나머지는 검게 칠한다.

- ⑤ 이 조명기구를 그림(18-5)와 같이 설치한다. 이때 산광(散光)의 발생을 최소화해야 한다. 그렇지 않으면 어떤 경우에는 검은 부분의 구별이 어려운 수가 있다.
- ⑥ 유리판을 아세톤 등으로 잘 닦아서 구리 스나 지문 또는 그 밖의 오염물을 제거한다.
- ⑦ 이제 조명기구를 움직여서 유리 밑면에 칠해진 하얀 페인트의 중앙부에 가능한 작은 광점(光點)이 생기도록 한다. 그러면 그림(18-4)와 같은 형상이 나타날 것이다.
- ⑧ 이러한 빛에 의한 고리의 지름을 가능한 정확하게 측정한다. 돋보기 등을 사용하면 도움이 될 것이다.
- ⑨ 이제 굴절률을 측정하고자하는 액체 1cm³ 정도를 유리판 위에 붓고 빛에 의해 만들어지는 고리의 지름을 측정한다.
- ⑩ 유리판의 두께를 마이크로미터를 써서 정밀하게 측정한다.
- ⑪ 이러한 측정값들을 이용하여 (18-6)식, 또는 (18-7)식을 써서 유리 또는 액체의 굴절률을 알아낼 수 있다.

18.3 Brewster각 측정에 의한 방법

빛이 두 매질의 경계면에서 반사될 때 입사광 진폭에 대한 반사광 진폭비는 p파와 s파에 대해서 각각 다음과 같이 주어진다.

$$r_s = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (18-8)$$

$$r_p = \frac{-n^2\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (18-9)$$

이때 n은 두 매질간의 상대굴절률로

$$n = \frac{n_2}{n_1} \quad (18-10)$$

로 정의되는데, 첫번째 매질이 공기인 경우 n은 두번째 매질의 굴절률이 된다. 또한 θ 는 입사각(또는 반사각)이다.

(18-9)식을 살펴보면 다음과 같은 조건을 만족시키는 특별한 각 θ_B 에서 p파의 반사가 0이 됨을 알 수 있다.

$$\theta_B = \tan^{-1} n \quad (18-11)$$

이때 이 각도 θ_B 를 브루스터 각(Brewster angle)이라 한다. 예를 들어 굴절률 1.5인 유리에 대한 공기에서 유리로 빛이 진행할 때(external reflection의 경우)의 브루스터 각은

$$\theta_B = \tan^{-1}(1.5) \cong 57^\circ \quad (18-12)$$

이고, 반대로 유리에서 공기로 빛이 진행할 때(internal reflection)의 브루스터 각은

$$\theta_B = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1.5}\right) \cong 33^\circ \quad (18-13)$$

이 된다.

따라서 이와 같이 P-파가 없어지는 각도를 측정하면 이로부터 (18-11)식을 써서 굴절률 n을 알아낼 수 있다.

이러한 측정시에 필요한 준비물은 다음과 같다.

- ① 램프
- ② 편광판 또는 니콜 프리즘
- ③ 미터자
- ④ 측정하고자하는 시료(필요없는 반사광을 막기 위하여 한 쪽 면을 검게 해준 것이 바람직함)

측정 순서는 다음과 같다.

- ① 테이블 위 15~30cm쯤 되는 곳에 램프를 설치한다.
- ② 테이블 위에 검은 종이나 천을 놓고 그 위에 굴절률을 측정하고자하는 시료를 올려 놓는다. 이때, 광선의 입사각도가 대략적으로 브루스터 각이 되는 위치에 놓도록 한다. 테이블 위의 검은 종이나 천은

테이블 표면에서의 빛의 반사를 막아주어 측정을 용이하게 한다.

- ③ 반사된 빛을 편광판을 통해 보면서 편광판을 회전시켜 빛의 강도가 가장 약해지는 각도를 찾아낸다.
- ④ 이제 샘플을 광원(램프)으로부터 멀어지거나 가까워지도록 밀거나 당겨서 입사각을 변화시켜 준다.
- ⑤ 이렇게 하면서 다시 광량이 최소가 되는 위치를 찾아낸다. 이 점은 상당히 정확하게 알아낼 수 있다.
- ⑥ 대부분의 램프는 발광 부분이 넓으므로 램프 필라멘트의 발광 부분중에서도 밝기가 최소로 보이는 유리위의 점을 찾아내어 그 위치를 표시해 둔다.

⑦ 이때 이 점에서 램프까지의 수평 및 수직 거리를 재어서 이로부터 $\tan\theta$ 의 값을 알아낸다.

⑧ 이제 원하는 굴절률 n 은

$$n = \tan\theta \quad (18-14)$$
 로 구해진다.

이상에서 설명한 3가지 방법은 측정 방법이 간단하고 특별한 측정 도구가 없어도 된다는 점에서 편리하여 생산 현장 등에서 유리 재료의 선별 등에 이용하기에 편리하지만, 광학 설계를 위한 굴절률 값의 측정 방법으로는 정밀도에 문제가 있다. 다음 호에는 전문 장비를 사용하여 정밀하게 굴절률을 측정하는 방법에 대해서 설명하도록 하겠다.

광학연구 room

極道追跡

홍콩 뉴웨이브의 기수 '허안화' 감독에 의해 일본 울로케로 제작된 영화 極道追跡.

유덕화, 종초홍, 이시다, 준이찌가 엮는 사랑과 우정의 대드라마가 감독 허안화의 치밀한 연출력에 의해 짜임새 있게 전개되는 개성과 군더더기 없는 편집과 스토리가 갖고 있는 재미가 이루어진 다이내믹한 영화이다.

화(유덕화)는 공부를 원하는 어머니의 뜻을 거역하지 못해 일본 유학을 떠나기로 한다. 하지만 학업에 정진하지 못하고 일본에서 취직해 생활하며 공부는 부업정도로만 생각한다.

일본에는 홍콩에서의 오랜 친구 '명'과 '장직'이 있다. '명'은 출세하려는 야심을 품고 홍콩에서 일본으로 건너온 것으로 일본의 야쿠자 조직에 들어가 그 조직의 보스 여동생과 결혼한다. 그러나 '장직'은 '명'과는 달리 건실한 청년으로서 실종된 여자친구를 찾기 위해 일본으로 오게 된 것이다.

'화'는 '장직'과 함께 '명'의 아내가 경영하는 술집에 놀러갔다가 그 곳에서 만난 '철란'을 좋아하게 되나 그녀는 이미 야쿠자 조직의 일원인 '천야'의 애인이었다... 7월에 개봉될 예정이다.