

# 광학개론(12)

## —초점거리 측정—

삼양광학공업(주)  
정 해 빈 박사

### 17. 초점거리 측정

어떤 렌즈 또는 렌즈계에 의한 결상(結像)에서 물체나 상의 위치, 배율, 시계각 등은 모두 초점거리에 의해서 결정된다. 따라서 초점거리는 렌즈 또는 렌즈계를 규정짓는 가장 중요한 광학상수가 된다. 이러한 초점거리를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있는데, 이 중에서 측정시 요구되는 정밀도, 사용가능한 기구나 장비 등에 따라서 적절한 방법을 선택하게 된다. 이 장에서는 초점거리의 측정 방법과 각 방법의 특징들에 대해서 살펴해보도록 하겠다.

#### 17.1 초점거리 측정에 관한 일반 사항

여기에서 설명하는 방법들은 렌즈가 공기중에 놓여 있을 때의 초점거리를 재는 방법들이다. 만일 렌즈의 상공간(image space) 또는 물체공간(object space)중 어느 한 쪽 또는 양 쪽이 물 등의 다른 매질로 되어 있는 경우에는 그 매질의 굴절률에 의한 효과만큼 보정을 해주게 된다. 따라서 렌즈의 초점거리는 항상 공기중에서 측정하는 것으로 충분하다.

측정에는 사람 눈의 감도가 높은 파장 546.1nm의 수은등 녹색선(e-선)이 가장 많이 쓰이지만 특정 파장에서 사용할 것이 지정되어 있는 렌즈나 특별히 측정하는 빛의 분광특성이

지정되어 있는 렌즈의 경우에는 지정된 광원을 사용한다. 한편, 측정의 정확도가 높지 않아도 되는 경우에는 가시광을 내는 어떤 광원을 사용하더라도 무방하다.

측정시 피검렌즈의 조리개 값은 최대 구경으로 하거나 실제로 가장 많이 사용되는 구경에 놓게 된다. 측정의 정확도가 높지 않아도 되는 경우에는 이 역시 어떤 값에 놓더라도 무방하다.

확대된 상을 만드는 것을 목적으로 하거나 물체와 상간의 거리가 짧은 거리로 고정되어 사용되는 렌즈의 경우에는 입사광속(incident beam)의 입사 방향을 각 렌즈에서 지정되어 있는 방향에서 입사시키도록 한다. 반대 방향으로 입사시킬 경우에 초점거리를 측정할 수 없는 경우가 간혹 발생한다.

사진기용 렌즈와 같이 물체까지의 거리에 따라 피사체 거리를 조정하게 되어 있는 렌즈의 경우에는 거리 눈금을 무한대(infinity)에 맞춘 후 측정하도록 하며, 특별히 물체까지의 거리가 지정되어 있는 경우에는 지정된 값에 맞춘 후 측정한다.

측정에 콜리메타가 사용되는 경우에는 콜리메타 렌즈의 수차가 피검렌즈 초점거리 측정에 영향을 미치는 것을 막을 수 있을 정도로 작아야 하고, 콜리메타에서 나오는 평행 광속(par-

allel beam)의 지름은 피검렌즈의 최대 개구 (또는 측정시 사용되는 개구)보다 충분히 커야 한다.

### 17.2 목측에 의한 측정

어렸을 때 햇빛을 돋보기로 모아 종이를 태우는 장난을 해본 분들은 이 방법의 원리를 쉽게 이해하실 수 있다. 별다른 기구가 필요하지 않으며, 볼록 단렌즈의 초점거리 측정에 적용 가능하다. 단렌즈의 경우에는 대부분 얇은 렌즈로 볼 수 있으므로 초점거리와 후초점거리(back focal length)가 같다고 보고, 렌즈 마지막 면의 정점에서 초점까지의 거리를 초점거리로 가정한다.

측정방법은 먼저 피검렌즈를 손으로 잡고 흰 종이 위에 햇빛(흐린 날이나 어두워진 때 또는 실내에서는 먼 곳에 있는 가로등이나 형광등을 이용해도 무방하다)을 모운다. 렌즈와 종이 사이의 거리를 조정해서 가장 선명하게 상이 맺히도록 한다. 이렇게 해서 초점의 위치가 정해지면 목측(目測)이나 자를 이용해서 렌즈 뒷면의 정점에서 종이까지의 거리를 재어 이 렌즈의 대략적인 초점거리를 얻을 수 있다.

이때 발광체(발광체가 아니더라도 밝게 조명된 물체이면 이용이 가능하지만 발광체인 경우가 상이 선명하여 초점의 위치를 잡기 쉽다)까지의 거리가 멀수록 측정값의 오차가 줄어 드는데, 이들간의 관계는 다음과 같다.

발광체가 무한대에 있는 경우(예를 들어 햇빛을 이용하는 경우)에 우리가 초점거리라 측정한 값  $f_{\infty}$ 와 실제의 초점거리  $f$ 가 서로 일치한다고 하자. 즉, 물체거리  $a = \infty$ 일 때,

$$f_{\infty} = f \quad (17-1)$$

이다. 이제 물체가 유한한 거리  $a = a_0$ 에 있다고 하고, 이때 측정된 초점거리를  $f_0$ 라 하면  $f_0$ 는

$$\frac{1}{a_0} + \frac{1}{f_0} = \frac{1}{f} \quad (17-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{a_0} \\ &= \frac{a_0 - f}{fa_0} \end{aligned} \quad (17-3)$$

$$f_0 = \frac{fa_0}{a_0 - f} \quad (17-4)$$

가 된다. 이 값과  $f_{\infty}$ 와의 차이가 측정값의 오차가 되므로 오차  $\Delta$ 는

$$\begin{aligned} \Delta &= f - f_0 \\ &= f - \frac{fa_0}{a_0 - f} \\ &= \frac{fa_0 + f^2 - fa_0}{a_0 - f} \\ &= \frac{f^2}{a_0 - f} \end{aligned} \quad (17-5)$$

가 된다. 이제 이 식에 물체까지의 거리를 초점거리의 10배가 되는 값을 대입해보면

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{f^2}{10f - f} \\ &= \frac{f}{9} \\ &\approx 0.11f \end{aligned} \quad (17-6)$$

로 약 11%의 오차가 발생함을 알 수 있다.

이 방법에 의한 또 다른 주요한 오차 요인은 단렌즈를 얇은 렌즈라 가정한 데에 있다. 볼록 렌즈의 대표적인 3가지 형태에 대해서 각각 주점의 위치를 표시해보면 그림 17-1과 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 주점의 위치와 정점의 위치가 일치하지 않기 때문에 오차가 발생하게 된다. 앞서의 물체거리에 따른 오차가 물체거리에 따라서 그 값이 달라지는 데 비해서 주점 위치와 정점 위치의 불일치로 인한 오차는 항상 같은 값을 갖게 된다.

세번째의 오차 요인은 초점 위치의 결정시 렌즈의 수차로 인해 정확한 초점의 위치를 결정

하기 어렵다는 데 있다.

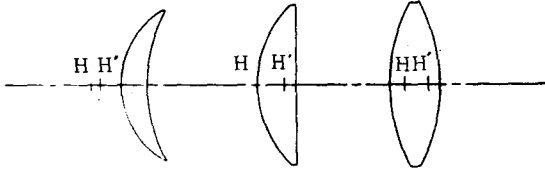


그림 17-1. 단렌즈의 주점 위치

### 17.3 콜리메터를 이용한 측정

이미 초점거리를 알고 있는 콜리메터를 갖고 있는 경우 이 콜리메터보다 초점거리가 짧은 볼록렌즈에 대해서 초점거리를 측정할 수 있다. 물론 이 콜리메터의 초점거리보다 초점거리가 긴 볼록렌즈에 대해서도 초점거리를 측정할 수 있으나 이 경우에는 정확도가 떨어진다.

이미 초점거리를 알고 있는 콜리메터의 초점면에 그 무늬의 크기를 알고 있는 표판을 놓는다. 실제로는 대부분의 콜리메터가 초점면에 표판이 놓이도록 만들어져 있으므로 사용하는 표판 무늬의 크기만을 알아두면 된다.

그 다음 이 콜리메터와 마주 보게 피검 렌즈를 놓고, 표판의 상을 이 렌즈의 초점면에 맺게 한 후 이 상의 크기를 잰다. 그러면 이들 값으로부터 검사하고자하는 렌즈의 초점거리를 다음과 같은 식에 의해서 구할 수 있다.

$$f = f_0 \times \frac{y'}{y} \quad (17-7)$$

이때,

- f : 피검렌즈의 초점거리 (mm)
- f<sub>0</sub> : 콜리메터 렌즈의 초점거리 (mm)
- y : 표판무늬의 크기 (mm)
- y' : 피검렌즈 초점면에서의 상의 크기 (mm)

이제 이 방법에 의한 초점거리 측정 방법을 그림 17-2를 이용하여 설명해 보자.

그림 17-2에서 광선 A는 초점거리 측정시 기준물이 되는 콜리메터 렌즈의 제1주점에 입사하고 있다. 렌즈가 공기중에 놓여 있는 경우에는 주점과 절점의 위치가 일치하므로 결국 이 광선은 절점에 입사한 것이 되고, 이 렌즈를 통과한 후의 광선 A'은 광선 A와 평행하게 된다. 또한 콜리메터 렌즈를 통과한 후 피검렌즈의 제1주점에 입사하는 광선 B'에 대해서 살펴보면 물체점 O'이 콜리메터의 초점면상(정확하게는 제1초점면상)에 있으므로 이 점에서 나온 모든 빛은 콜리메터 렌즈를 통과한 후 서로 평행하게 나아가게 된다. 따라서 그림의 광선 A, A', B'이 모두 평행하게 된다. 또한, 광선 B'과 B''은 피검렌즈를 기준으로 보면 각각 제1절점과 제2절점을 지나가는 광선이 되므로 서로 평행하게 된다. 결국 광선 A와 B''이 광축과 이루는 각도는 동일하게 된다.

이러한 결과로부터 삼각형 H<sub>1</sub>OO'과 H'II'

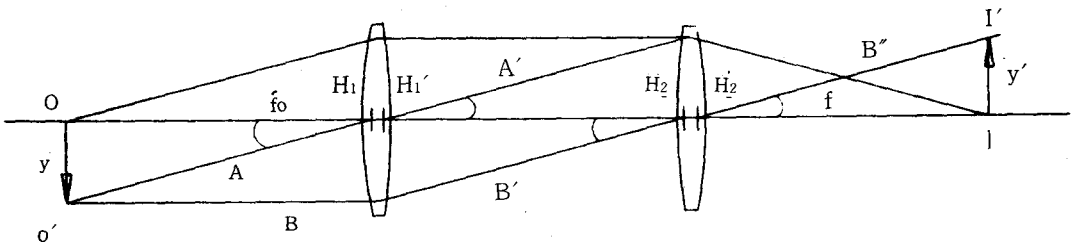


그림 17-2 콜리메터를 이용한 초점거리 측정

이 닦은꼴임을 알 수 있다. 따라서

$$\frac{fo}{f} = \frac{y}{y'} \quad (17-8)$$

이고 구하고자하는 피검렌즈의 초점거리  $f$ 는

$$f = \frac{y'}{y} \times fo \quad (17-9)$$

가 된다.

#### 17.4 먼 곳에 있는 물체를 이용한 측정

피검렌즈로부터 피검렌즈의 예상 초점거리의 1000배 이상의 거리에 있는 물체를 이용하는 방법이다. 이 방법 역시 이보다 가까운 거리에 있는 물체를 이용할 수도 있는데, 이 경우에는 정확도가 떨어지게 된다. 이미 물체의 길이와 물체까지의 거리를 알고 있는 물체를 피검렌즈를 사용하여 결상시킨다. 그 다음 이 상의 크기  $y'$ 을 측정한다. 이때 피검렌즈의 위치에서 물체를 보는 각도  $\alpha$ 를 피검렌즈 최대시계각의 1/10 이하로 제한하는것이 측정의 정확도를 위해서 바람직하다. 이때 구하고자하는 초점거리  $f$ 는

$$f = \frac{y'}{\tan\alpha} \quad (17-10)$$

로 구해진다. 이때  $\tan\alpha$ 는

$$\tan\alpha = \frac{y}{\ell} \quad (17-11)$$

로 주어진다.

이 측정 방법을 이론적으로 살펴 보자.

그림 17-3에서  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 은 서로 같게 된다. 따라서

$$\tan\alpha = \frac{y}{\ell} = \frac{y'}{f} \quad (17-12)$$

이 되고,  $f$ 는

$$f = \frac{y'}{\tan\alpha} \quad (17-13)$$

이 된다. 또한  $\tan\alpha$ 값은  $y/\ell$ 로부터 구해내거나 각도  $\alpha$ 로부터 구해낼 수 있다.

#### 17.5 노달 슬라이드를 이용한 측정

이 방법은 초점거리 측정의 가장 정통적인 방법이라 할 수 있다. 볼록렌즈와 일부 오목렌즈의 초점거리를 측정할 수 있으며, 측정의 정밀도가 높다는 장점을 가지고 있다. 반면에 단점으로서 특수한 장비를 필요로 한다는 점을 들 수 있다.

그림 17-4와 같이 광학대(optical bench) 위에 필요한 것들을 설치한다. 여기에서 광원, 표판, 콜리메터 렌즈는 실제로 있어서는 하나의 경통안에 조립되어 있다. 표판으로서는 흔히 십자선이나 부채살 모양이 사용된다. 이 방법에서는 표판 무늬의 길이를 측정하지 않으므로 부채살 모양의 표판이 더 사용에 편리하다.

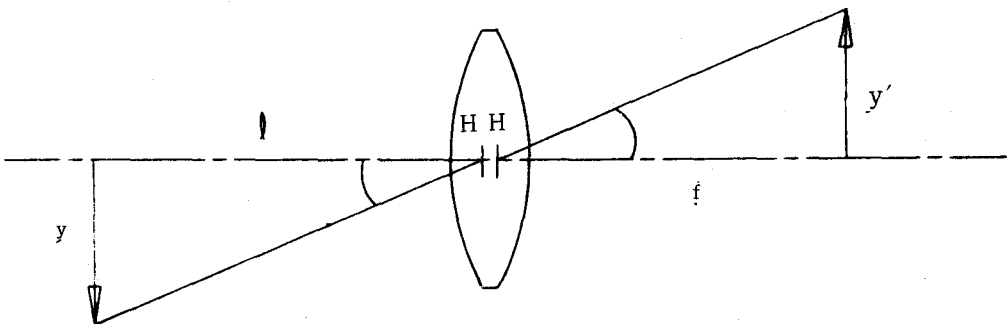


그림 17-3 먼 곳에 있는 물체를 이용한 초점거리 측정

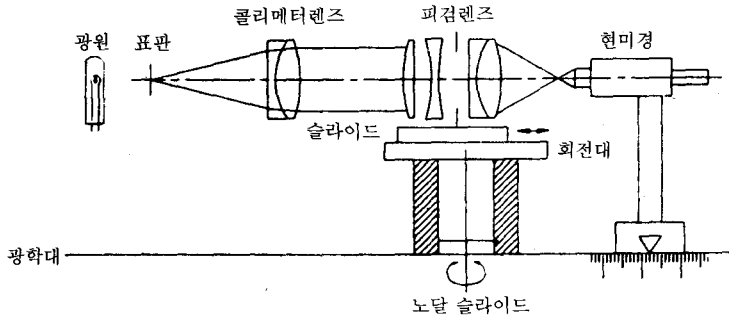


그림17-4 노달 슬라이드를 이용한 초점거리 측정

피검렌즈가 설치되는 때는 전후좌우로의 평행 이동과 회전이 자유롭도록 되어 있는데, 이를 노달 슬라이드(nodal slide)라 한다. 그 뒤에 콜리메터의 광축과 광축을 일치시킨 현미경을 좌우로 이동이 가능한 슬라이드 위에 설치하게 된다. 현미경이 설치된 슬라이드는 원점으로부터의 거리를 측정할 수 있는 장치가 붙어 있다. 이러한 노달 슬라이드를 사용하여 초점거리를 측정하는 방법은 다음과 같다.

- (1) 노달 슬라이드의 회전축을 현미경의 광축이 포함되는 면 안에서 현미경의 광축과 직교시킨다.
- (2) 노달 슬라이드 위에 눈금이나 형상이 새겨져 있는 평면을 현미경의 광축에 수직하게 놓고 노달 슬라이드를 좌우로 이동시켜 가며 노달 슬라이드를 약간 회전시켜도 상의 모습이 변하지 않는 위치를 찾아낸다. 그러면 이 위치가 노달 슬라이드의 회전축 위치이다.
- (3) 이때 현미경이 설치된 슬라이드의 위치값  $a_0$ 를 읽는다. (2)와 (3)의 과정은 광학대 위에 놓인 피검렌즈 이외의 것들이 그대로 있는 동안은 한 번만 측정하여 반복하여 사용할 수 있다. 따라서 이 값을 별도로 적어 두는 것이 좋다.
- (4) 피검렌즈를 콜리메터와 마주 보게 설치하

고 피검렌즈에 의해 맺힌 표판의 상이 현미경을 통해 명확하게 보일 때까지 현미경의 위치를 조정한다.

- (5) 노달 슬라이드의 회전대를 약간 회전시켜도 관측되는 표판의 상이 변화를 나타내지 않을 때까지 피검렌즈의 위치를 노달 슬라이드를 움직여서 조정해준다. 이렇게 위치를 조정해주면 피검렌즈의 절점을 노달 슬라이드의 회전축이 지나가게 된다.
- (6) 이때의 현미경이 설치된 슬라이드의 위치값  $a$ 를 읽는다.
- (7) 그러면 이 렌즈의 초점거리  $f$ 는
 
$$f = a - a_0 \quad (17-14)$$
 로 구해진다. 즉, 제2주점(이 경우는 실제로는 제2절점이지만 제2주점과 제2절점이 일치한다)에서부터 초점까지의 거리를 직접 잴 것이 된다.
- (8) 이제 다시 현미경이 설치된 슬라이드를 좌우로 움직여서 렌즈계의 마지막 면 정점이 뚜렷이 보이는 위치까지 이동시킨다. 렌즈면의 확인이 어려울 때에는 렌즈면에 색연필 등으로 표시를 하여 두면 손쉽게 확인이 가능하다.
- (9) 이때의 현미경이 설치된 슬라이드의 위치값  $b$ 를 읽는다.
- (10) 이 렌즈의 후초점거리는

$$bf \ell = b - a_0 \quad (17-15)$$

로 주어진다.

### 17.6 광속의 폭을 측정하여 초점거리를 측정

앞에서의 방법들은 오목렌즈의 초점거리를 잴 수 없거나 제한된 범위내에서만 잴 수 있었으나 이 방법에서는 볼록렌즈 뿐만 아니라 오목렌즈도 아무 제약없이 잴 수 있다는 장점이 있다.

이 방법에서는 광선의 경로가 눈에 보여야 하므로 가시 영역(visible region)의 레이저광을 사용한다. 광원으로는 통상적인 헬륨-네온 가스 레이저이면 충분하다. 레이저에서 나온 빛은 광속확대기(beam expander)를 이용하여 광속의 지름을 크게 해준다. 이 광속의 크기는 크면 클수록 좋으나 통상적으로 직경 50mm 정도면 충분하다. 이와 같이 확대된 광속의 앞에 2개의 바늘구멍이 뚫린 판을 광속에 수직하게 설치한다. 이때 이 두 구멍간의 거리를  $h$ 라 하자. 이 판을 지난 후 두 개의 바늘구멍을 지난 광선들은 각각 하나의 직선처럼 나아가게 된다. 이 두 광선이 피검렌즈를 지나가게 한 후 위치  $x_1$ 에서 두 광선간의  $h_1$ 과 위치  $x_2$ 에서 두 광선간의 거리  $h_2$ 를 측정한다. 그러면 이 렌즈의 초점거리  $f$ 는

$$f = \left( \frac{x_2 - x_1}{h_1 - h_2} \right) h \quad (17-16)$$

로 주어진다.

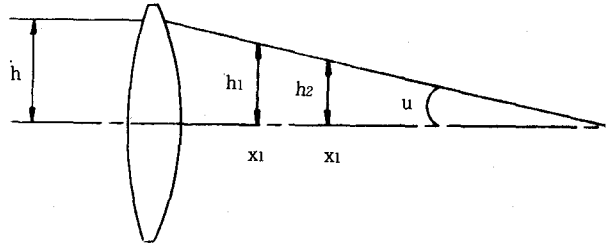


그림 17-6 측정원리

이 측정방법의 원리를 그림 17-6으로 설명해보자. 이 렌즈계의 초점거리  $f$ 는

$$f = \frac{h}{u} \quad (17-17)$$

이고,

$$u = \frac{h_1 - h_2}{x_2 - x_1} \quad (u \text{가 } (+) \text{라고 할때}) \quad (17-18)$$

이므로

$$f = \frac{x_2 - x_1}{h_1 - h_2} h \quad (17-19)$$

이 된다.

간접계를 갖고 있는 경우에는 광속확대기를 사용하지 않고 간접계에서 나오는 평면파를 이용하여 측정하면 보다 높은 정확도를 얻을 수 있다.

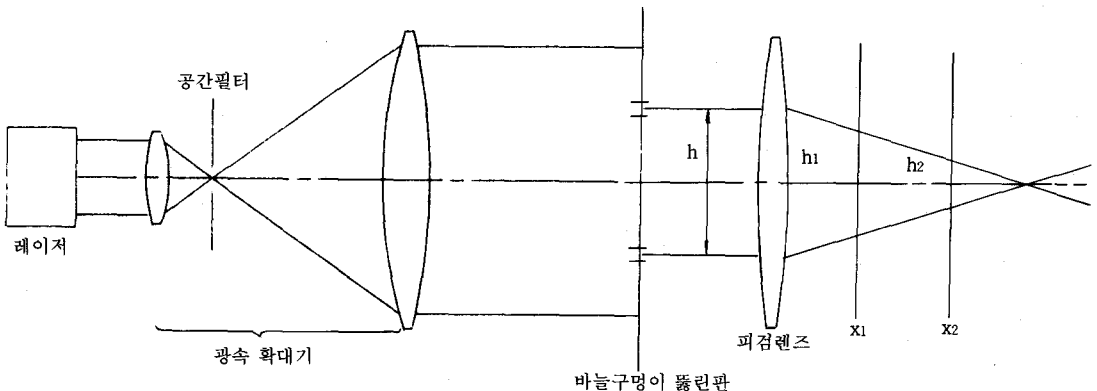


그림 17-5 광속 폭 측정장치의 구성