광학개론(17)

-오토콜리메이터-

정해빈박사/
삼양광학공업주식회사
부설연구소

19.4 각도 측정

프리즘이나 광학 쐐기(optical wedge)와 같이 평면으로 이뤄진 광학부품에서는 평면과 평면이 이루는 각도의 정확성이 중요하다. 이러한 각도를 측정하기 위하여 오토콜리메이터가 흔히 사용된다. 오토콜리메이터를 쓰면 다른 보조물이 없이도 0도, 45도, 90도 등을 손쉽고 정확하게 측정할 수 있다. 또한, 특수한 각도에 대해서도 기준물을 가지고 있는 경우 이 기준물과의 비교 측정에 의해 손쉽게 각도를 측정할 수 있다.

19.4.1 0도의 측정

평행평면판의 평행도나 광학쐐기(optical wedge)의 편각을 측정하는 것이 0도를 측정하는 경우에 해당한다. 이 경우에는 그림 (19-6)과 같이 검사하고자 하는 평행평면판(또는 광학쐐기)에 오토콜리메이터의 광속을 수직하게 입사시켜 첫번째 면과 두번째 면에서 반사되어 되돌아 온 빛에 의해 생기는 두 상(像)간의 각도 차이로써 두 면이 이루는 각도를 알 수 있다.

문제를 다루기 쉽게 하기 위하여 오토콜리메이터에서 나온 빛이 첫번째 면에 수직하게 입사하여 이 면에서 반사된 뒤 동일한 경로로 되돌아 간다고 하고, 이때의 두번째 면에서 반사된 광성의 경로를 추적해보면 다음과 같다.

우선, 첫번째 면의 점 A에 입사한 광선은 반사된 후 원래의 경로를 그대로 뒤집어 가게 된다. 그 결과 상은 오토콜리메이터 접안렌즈에 달려있는 표판의 중심에 맺히게 된다. 한편 점 A에서 투과된 광선은 두번째 면의 점 B에서 반사되어 원래의 광선과 2ε만큼 각도가 틀어져서 되돌아가게 된다. 이 광선이 다시 첫번째 면에 도달하게 되는 점을 C라 하자. 점 C에서 빛은 굴절을 일으키며 나아가게 된다. 이때, 굴절된 광선이 첫번째 면의 수직선과 이루는 각도를 θ라 하면 스넬의 법칙에 의해

$$n\sin(2\varepsilon)=\sin\theta \qquad (19-8)$$

의 관계가 성립한다. 이때 만일 라디안으로 나타낸 어떤 각 θ가 작을 경우에는

$$\sin\theta = \theta \qquad (19-9)$$

로 근사할 수 있으므로, (19-8)식을 다시 써주면

$$2\cdot n\cdot \varepsilon = \theta \qquad (19-10)$$

가 된다. 즉, θ는 각도의 오차와 평행평면판 또는 광학쐐기를 만들어 준 재료의 굴절률값과 관

계가 있음을 알 수 있다.

대부분의 오토콜리메이터에는 위의 식에서 θ에 해당하는 겉보기 각도 오차 눈금이 접안렌즈의 초평면상에 새겨져 있으므로 이 각도값을 읽어서 평형평면판의 평행 오차각 또는 광학쐐기의 편각을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\theta}{2n} \qquad (19-11)$$

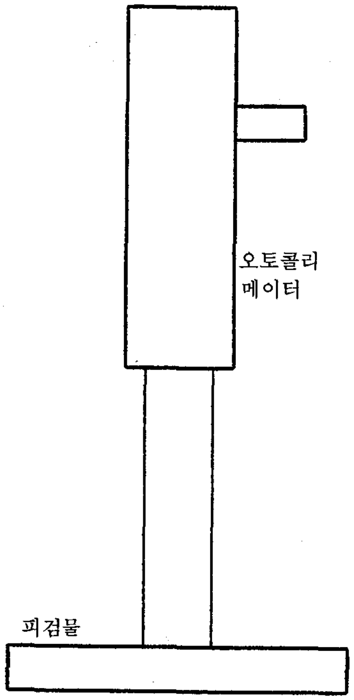


그림 19－6. 오토콜리메이터를 이용한 평행 평면판의 평행도 검사

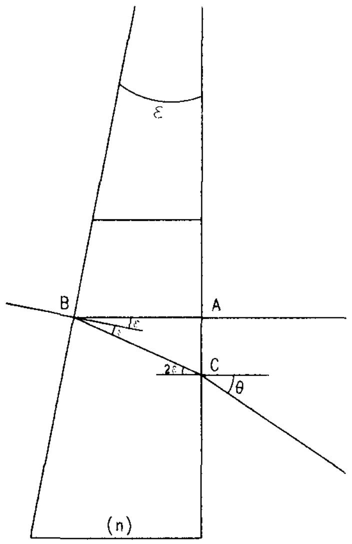


그림 19－7. 광학 쐐기에서의 오토콜리메이터 빔의 반사

19.4.2 직각도의 측정

쌍안경이나 스폿팅 스코프 (spotting scope)에 흔히 사용되는 포로 프리즘의 경우는 그림 (19－8)과 같이 프리즘에서 직각을 이루는 면들이 아래로 향하도록 V－블록을 준비하고 그 위에 검사하고자 하는 프리즘을 놓는다. 이때 프리즘의 긴 면에서 왼쪽 반으로 들어간 광선과 오른쪽 반을 들어간 광선이 내부에서 반사된 후 오토콜리메이터로 되돌아 와 만들어주는 상간의 겉보기 각도 오차를 측정하고, 이 값으로부터 프리즘의 굴절률과 반사시의 효과 등을 고려하여 실제 각도 오차를 구해준다.

겉보기 각도 오차와 실제 각도 오차간의 관계식을 그림 (19－9)를 써서 유도해 보자.

프리즘 긴 면의 오른쪽 반에서 들어와 직각을 이루는 두 면에서 각각 반사된 후 왼쪽 반으로 나가는 편이각(deviation angle)을 따져 보자. 점 A에 입사된 빛은 굴절된 후 i′의 굴절각을 가지고 진행한다고 하면, 이 때 i와 i′ 사이에는

$$i = ni' \qquad (19-12)$$

의 관계가 성립한다. 이 빛이 굴절 후 점 B에서 프리즘의 직각을 이루는 면중 하나에 도달한다고 하자. 이때 빛은 프리즘 면과 $(\frac{\pi}{4}+i'-\theta)$의 각도를 이루며 반사하여 반대면의 점 C에 이른다. 이 빛은 다시 점 C에서 프리즘 면과 $(\frac{\pi}{4}+i'-\varepsilon+\theta)$의 각도를 이루며 반사하여 점 D에 이른다. 점 D에서는 굴절을 일으키며, 이때 굴절 후의 각도를 S라 하면,

$$n(2\varepsilon+i')=\delta \qquad (19-13)$$

의 관계식이 스넬의 법칙으로부터 성립한다. 이때 앞에서 이미 언급하였듯이 $ni'=i$이므로

$$\delta=2n\varepsilon+i \qquad (19-14)$$

가 되고, 이 광선과 원래 i의 각을 갖고 입사한 광선간의 편이각은 $2n\varepsilon$가 된다.

한편, 이 방법에 의한 프리즘 각도 검사에서는 오른쪽 반으로 입사하여 왼쪽 반으로 나오는 광선의 편이각과 동일한 양의 편이각의 왼쪽 반으로 입사하는 광선에 대해서도 발생하므로 오토콜리메이터로 측정되는 겉보기 각도 오차는 2배가 된다. 즉, 편이각 Δ는

$$\Delta=4n\varepsilon \qquad (19-15)$$

이 된다. 따라서 실제 각도 오차 ε은 측정값인 겉보기 각도 오차 Δ로부터

$$\varepsilon=\frac{\Delta}{4n} \qquad (19-16)$$

로 구해지게 된다.

그림 (19-8)과 같은 빛의 경로를 써서 측정하는 것은 단순히 프리즘의 각도오차가 허용공차안에 들어와 있는지를 검사하는 데는 대단히 편리하지만 각도가 90도보다 큰지 작은지를 아는 데는 불편하다. 또한, 이 방법으로는 더브 프리즘(dove prism)과 같은 프리즘을 검사할 때, 오토콜리메이터의 구경이 커야 한다는 결점이 있다.

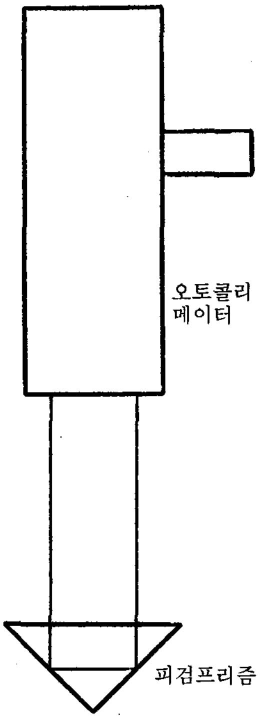


그림 19-8. 오토콜리메이터를 이용한 프리즘 직각도 검사

각도가 90도보다 큰지 작은지를 알고자 할 때에는 그림 (19-10)과 같이 긴 면의 어느 한 반쪽으로만 빛을 보내 그 반쪽면에서 되돌아와 만드는 상과 프리즘 안에서 반사를 일으킨 후 다른 반쪽면에서 반사되어 되돌아오는 빛에 의한 상간의 상대적인 위치와 거리로써 각도가 90도보다 큰지 작은지를 함께 알 수 있다. 이때에도 겉보기 각도오차와 실제 각도오차간에는 (19-16)식과 같은 관계가 성립한다.

19.4.3 45도의 측정

직각 프리즘에서 45도 각도를 측정하고자 하는 경우에는 그림 (19-11)과 같은 빛의 경로를 써서 측정한다. 이때 기준이 되

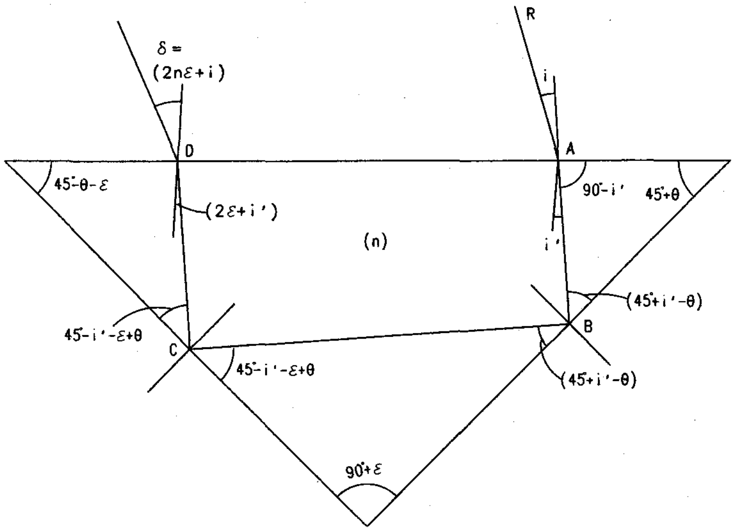
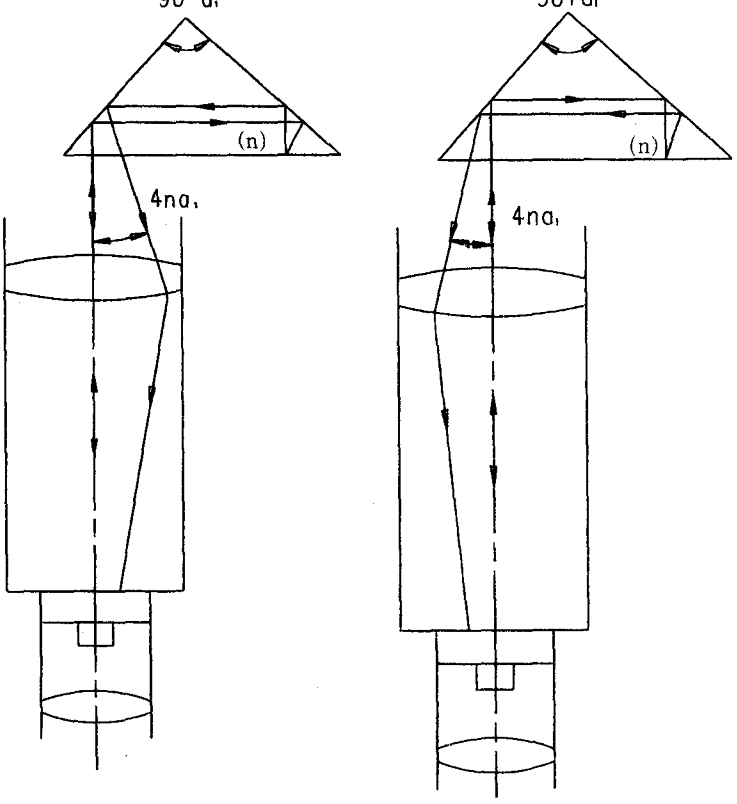


그림 19-9. 직각도 검사의 원리



(a) 각도가 90도보다 작을 때　　　b) 각도가 90도보다 클 때

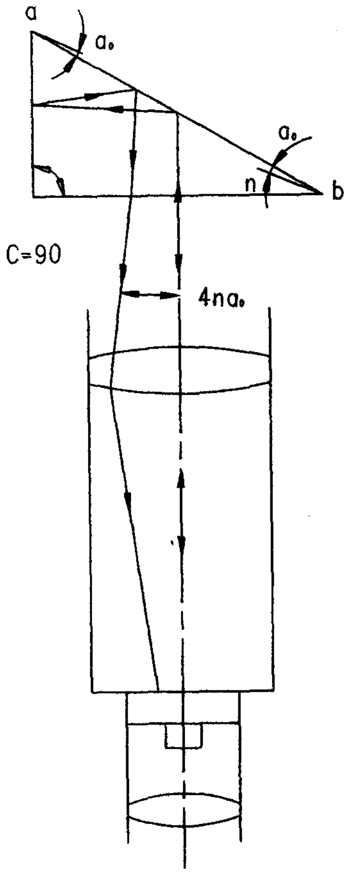
그림 19-10. 오토콜리메이터를 이용한 프리즘 직각도 검사

는 상은 오토콜리메이터에서 나온 빛이 오토콜리메이터를 향한 면에서 반사되어 되돌아 와 형성하는 상이다. 이 상과 이 면을 투과한 후 빗면(길이가 긴 면)에서 전반사를 일으키고 처음 면에 대해 수직한 면에서 반사되어 되돌아 와 다시 빗면에서 반사를 일으킨 후 오토콜리메이터로 돌아온 빛에 의한 상간의 상대적인 위치와 그 거리로써 각도오차의 크기와 부호를 알 수 있다. 이와 같이 측정된 겉보기 각도오차와 실제 각도오차 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

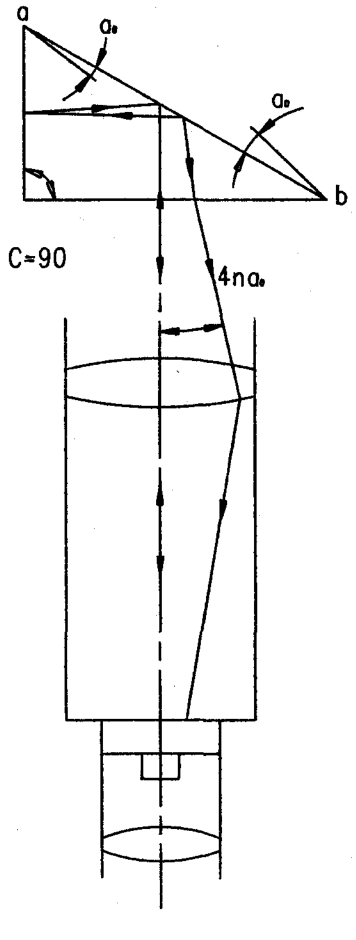
$$\varepsilon = \frac{\Delta}{4n} \qquad (19-17)$$

19.4.4 Roof-Pechan 프리즘의 Roof면 직각도 검사

그림 (19-12)와 같은 프리즘을 roof-pechan 프리즘이라 하며, 보조 프리즘과 한 쌍이 되어 쌍안경에서 뒤집어진 상을 바로 잡아주는 용도로 사용된다. 이 때, 마치 지붕과 같은 형상을 갖는 서로 직각을 이루는 두 면을 roof면이라 한다. 이 roof면간의 각도가 90도보다 크면 상이 2개



(a) 각도가 45도보다 작을 때



b) 각도가 45도보다 클 때

그림 19－11. 오토콜리메이터를 이용한 프리즘의 45도 각도 검사

로 나뉘져 보이게 되고, 90도보다 작으면 중앙부에 상이 겹치는 부분이 생기게 된다. 따라서 사람의 눈에 이러한 현상이 눈에 띠지 않게 하기 위해서는 각도오차가 ±5초 이내에 있게 하는 것이 바람직하다.

이 roof면간의 각도가 직각인지 여부도 오토콜리메이터를 이용하여 측정할 수 있다. 즉, 이 프리즘의 roof면이 아닌 다른 한 면에 대한 수직선으로부터 어떤 각도 θ만큼 기울어진 방향으로 오토콜리메이터에서 나온 평행광을 보내주면 그림 (19－13)에서 보인 것과 같은 경로를 따라 빛이 진행하여 오토콜리메이터로 되돌아오게 된다. 이 과정에서 빛은 roof면을 그림 (19－13)의 A면에 먼저 도달하게 되는 광선과 B면에 먼저 도달하게 되는 광선으로 나뉘게 되어 오토콜리메이터에서 2개의 상을 맺게 된다. 이때 이 두 상간의 거리가 겉보기 각도오차에 해당하게 된다. 이때의 겉보기 각도오차를 Δ라 하고 프리즘 재료의 굴절률을 n이라 하면, 실제 roof면간의 각도오차 ε은

$$\varepsilon=\frac{\Delta}{4n} \qquad (19-18)$$

로 주어진다.

이와 같이 측정이 간단하지만 이러한 특수한 현상(즉, 광선이 원래의 경로로 되돌아가게 하는 현상)이 일어나게 하는 각도를 알아내어 이 각도로 설치하는 것이 직관적으로 떠오르지 않기 때문에 이 방법의 사용을 어렵게 생각하는 사람이 많다. 이제 이 특수한 각도 θ의 값을 구해보기로 하자.

Roof면에서 반사된 빛이 처음 진행해 오던 방향으로 되돌아와야 하므로 각AEF는 직각이 되어야 한다. 따라서

$$\angle AFE=90° - 66° = 24° \qquad (19-19)$$

가 되며, 반사의 법칙에서

$$\angle BFD=24° \qquad (19-20)$$

$$\angle BDF=180° - 24° - 48° = 108° \qquad (19-21)$$

가 된다. 따라서 점 D에서 굴절을 일으킨다고 할 때 입사각은 18°가 되며, 스넬의 법칙에서

$$n \cdot \sin(18°)=\sin\theta \qquad (19-22)$$

가 된다. 따라서 θ는

$$\theta=\arcsin(n \cdot \sin 18°) \qquad (19-23)$$

가 된다. 간혹 프리즘의 각도가 그림 (19－13)에 표시된 값과 다소 다를 수가 있으므로 주의를 요한다.

프리즘의 재료로는 BK－7 (n=1.5168)이 주로 사용되므로, 이때의 θ값을 구해보면

$$\theta = \arcsin(1.5168 \times \sin 18°) = 27.951° \qquad (19-24)$$

가 된다.

통상적으로는 오토콜리메이터와 프리즘을 올려놓는 대의 위치를 고정시켜 놓고, 이 대위에 프리즘이 놓이는 위치를 표시해 놓음으로써 보다 쉽게 측정을 할 수 있다. 대의 재료는 나무와 같이 프리즘에 흠집을 내지 않을 물건으로 하는 것이 좋다.

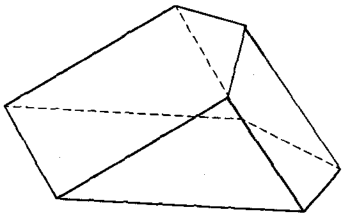


그림 19-12. 루프 페찬 프리즘

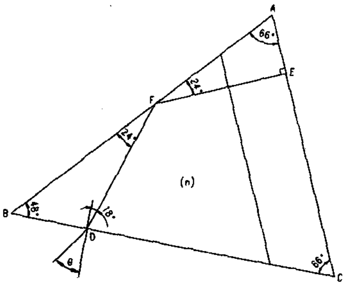


그림 9-13. 루프면의 직각도 검사

19.4.5 기준물을 이용한 각도 측정

앞에서 설명한 바와 같이 0도, 45도, 90도와 같은 특수각을 갖는 프리즘의 각도를 측정하는 경우에는 프리즘 자체에 있는 면들에서 반사되어 되돌아오는 빛들에 의해 생기는 상들을 이용하여 손쉽게 그 각도를 측정할 수 있다. 그러나, 40도나 35도와 같은 일반각의 경우에는 오토콜리메이터 자체만으로는 각도 측정이 되지 않는다. 이러한 경우에는 18.4절에서 이미 소개한 바 있는 분광계(spectrometer)를 써서 프리즘의 꼭지각을 측정하는 것이 가장 정확하게 각도를 측정할 수 있는 방법이다. 하지만 이러한 방법은 분광계의 가격도 비싸고 측정에 소요되는 시간도 길기 때문에 생산현장에서 사용하기에는 부적합하다. 따라서 이런 일반각을 갖는 프리즘을 분광계를 써서 각도를 측정해 가며 정밀하게 제작하고 이 기준 프리즘과 작업물을 비교 측정하는 방법으로 프리즘의 각도를 측정한다. 즉, 그림 (19-14)와 같이 기준면(통상적으로는 광학 평면을 사용한다) 위에 기준 프리즘과 피측정 프리즘을 나란히 놓고, 오토콜리메이터를 써서 두 개의 프리즘 면에서 반사되어 되돌아오는 빛에 의한 상들의 위치를 비교하므로써 피측정물의 각도오차를 알아낼 수 있다. 그림 (19-15)에서 보듯이 각각의 프리즘에 의한 상간의 겉보기 각도오차가 Δ라면, 겉보기

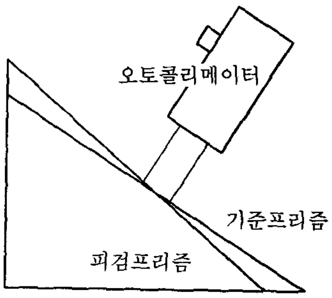


그림 19-14. 프리즘 각도의 비교 검사

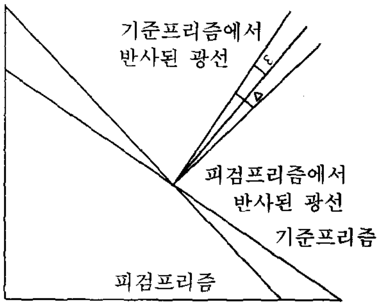


그림 19-15. 기준 프리즘과 피검 프리즘에 의한 반사광선이 이루는 각도

오차 Δ와 실제 각도오차 ε간에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{2} \qquad (19-22)$$

이 식에서 알 수 있듯이 이 방법에서는 프리즘 재료의 굴절률과 무관하다. 그 이유는 앞서 말한 다른 방식에서는 프리즘 내부를 광선이 지나가게 되므로 굴절률이 높을수록 겉보기 각도 오차가 커지게 되지만, 이 방식에서는 프리즘 표면에서 반사가 일어나므로 굴절률과 무관하게 되는 것이다.