

서론

본 연재는 2004년에 전남대 광기술인력교육센터에서 한국광학회에 학부 1-2학년생을 위한 광공학 교재에 대해서 연구 의뢰한 연구결과물을 2006년 2월 청문각을 통하여 발간한 "현대광공학 개론"이라는 제목의 교재를 요약한 것이다. 이 연재물은 이 분야의 입문을 하고자 하는 사람과 타 전공을 통하여 광공학 분야로 진입하는 회원들을 위한 안내서로서 광학 및 광공학의 기본을 제공하고 이 분야의 흥미를 유발함으로써 앞으로 이 분야에 대한 흥미로운 교육과 지속적인 연구를 할 수 있도록 해주는데 그 목적이 있다.

본 연재물은 기하광학, 파동광학, 레이저광학, 광섬유광학, 광통신 및 광소자의 5개 분야에 걸쳐서 7명의 집

로는 기하학적으로 취급된다. 여기서 광선이란 전파되는 빛의 등위상면(파면)에 수직하게 진행되는 가상의 선을 의미한다. 이러한 기하광학은 일상생활에서 자주 접할 수 있는 각종 광학기기 및 최근의 정보기기용 광모듈의 설계 및 평가 등에 이론적인 핵심원리를 제공하는 중요한 실용 학문으로써, 컴퓨터 연산기술의 급속한 발달에 따라 현재 많은 각광을 받고 있다.

기하광학과 관련된 광제품들로는 망원경, 현미경, 카메라, 각종 광 계측기기 등과 같은 순수 광기기에서부터 최근의 CD 또는 DVD용 각종 pick-up 장치, 레이저 프린터용 엔진, 빔 프로젝터 엔진, 3차원 디스플레이, HMD(Head Mount Display)나 HUD(Head Up Display, 전방현시장치), 휴대폰용 소형 카메라, 누진 다초점 렌즈, 웹 카메라, 초고속 통신용 무선 광 송수신

광학과 교육

현대광공학 개론 I : 기하광학

임천석, 조재홍*

필진(조재홍 교수(한남대학교), 이민희 교수(인하대학교), 임천석 교수(한남대학교), 김석원 교수(울산대학교), 이은성 박사(한국표준과학연구원), 권일범 박사(한국표준과학연구원), 이종창 교수(홍익대학교))이 집필한 내용을 9회에 걸쳐서 본 교재의 내용을 축약하여 보여주고자 한다. 그러므로 독자들이 이 연재내용을 통하여 다소라도 광학 및 광공학에 대하여 흥미를 가지고 이 연재 내용보다 고급인 여타 상급교재나 논문을 보는데 도움이 되었으면 한다.

제1장 기하광학

기하광학이란 빛의 전파를 기하학적으로 다루는 학문으로써, 전파되는 빛은 광선의 다발로 정의되고, 이의 행

모들, 의료용 광학기기(예, 검안기) 등과 같은 정보기기 응용 제품에 이르기까지 다양하다. 요즈음에는 상기의 광 제품들 외에 비결상 광학계와 같은(LCD의 후면조명계(Back Light Unit), 램프, LD, LED 광원을 사용하는 조명모듈 등) 분야에도 기하광학은 이론적인 근간을 제공한다.

1.1 근축광학

기하광학은 크게 수차가 없는 근축광학과 수차론 두 부분으로 나눌 수 있는데, 근축광학은 곧 설명하게 될 스넬의 굴절법칙에서 $\sin\theta$ 혹은 $\sin\theta'$ 을 θ 와 θ' 으로 근사하여 다루는 것에서 유래한 말이다. 즉 $\sin\theta \approx \theta$ 는 근축영역에서만 합당한 근사가 되기 때문이다. 수차론은 점광원에서 출발한 광선들이 한점으로 모이지 않고 광학계에 의해 흩

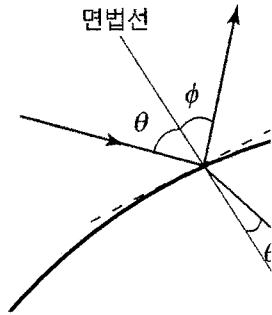


그림 1.1 반사 및 굴절법칙($n(n')$)

어지는 현상을 다루는 이론으로써 1.4절에서 자세히 설명한다.

1.1.1 반사와 굴절

반사는 일상생활에서 자주 관찰되는 현상으로써, 거울에 의한 반사, 물 표면에 의한 반사, 손가락의 앞뒷면에 의한 반사 등 여러 가지 반사현상들이 있다.

반사란 빛이 한 매질에서 다른 매질로 전파해 갈 때, 경계면에서 일부의 빛이 입사방향과 반대로 반사법칙에 맞게 되돌아가는 현상을 말하고(그림 1.1 참조), 식(1.1)로 표현한다.

$$n\theta = n'\phi \quad (1.1)$$

여기서 n 과 n' 는 매질의 굴절률(굴절률은 진공중의 광속을 물질내의 광속으로 나눈값임)인데, 반사의 경우 $n = -n'$ 이므로, $\phi = -\theta$ 가 된다.

굴절이란 빛이 경계면상에서 그림 1.1과 같이 스넬의 굴절 법칙에 따라 꺾여서 진행되는 현상을 말하고(그림 1.1 참조), 식(1.2)로 표현된다.

$$n \sin\theta = n' \sin\theta' \quad (1.2)$$

1.1.2 부호규약

기하광학에서는 광선을 추적할 때 광학면 및 광선의 부호를 미리 정의하여 추적하도록 하는데, 이는 부호규약 없이 광선추적이 진행되면, 렌즈의 매수가 증가하면 할수록 최종 추적된 결과를 해석하기가 매우 어렵게 되기 때문이다. 여기에서는 다음과 같은 부호규약을 따른다.

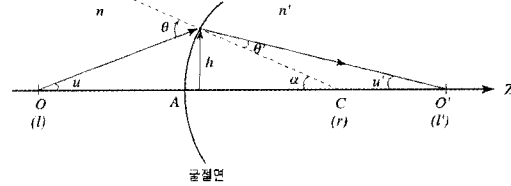


그림 1.2 단일면의 근축 굴절방정식

(a) 모든 빛은 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하는 것을 원칙으로 한다.

(b) 각 경계면의 정점에 광축방향을 x 축으로 하고 위로 y 축으로 하는 직각좌표계를 구성하여 모든 광선의 위치나 사물의 위치를 이 좌표계의 부호대로 정한다.

(c) 광선추적에서 각도들은 2가지 종류가 있는데, 하나는 광선이 광축과 이루는 각이고, 또 다른 하나는 광선이 법선과 이루는 각이다. 굴절전후에 광축과 이루는 각 $u_i (=h_i/l_i)$, $u'_i (=h_i/l'_i)$ 과 면 법선과 이루는 각 i, i' 는 각각 광선을 기준으로 광축(또는 면 법선)에 이르는 회전이 시계방향이면 양, 반시계 방향이면 음으로 정의된다(CODE V 및 미국에서 발간되는 전문서적들). 그런데 이상수 교수의 기하광학에서는 u_i 와 u'_i 이 l_i, l'_i, h_i 로 표현되기 때문에 부호 일치를 위해 광선을 기준으로 광축에 이르는 회전이 시계방향이면 음, 반시계 방향이면 양으로 정의하고, i 와 i' 는 미국식 부호를 따른다. 본 글에서는 이상수 교수의 기하광학 부호를 따르도록 한다.

(d) 빛의 진행방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되는 경우, 굴절률, 떨어진 거리, 초점거리의 부호를(a)의 부호규약에 반대의 부호를(즉 음의 부호를) 추가한다.

1.1.3 단일면의 근축 굴절 방정식 및 얇은 렌즈 방정식

근축광선에 대한 스넬의 법칙은 $n\theta = n'\theta'$ ($\theta, \theta' < 0$)이다. 여기에서 $\theta' = -\alpha + u'$ 이고 $\theta = -\alpha + u$ 이므로 이 식은 $n(-\alpha + u) = n'(-\alpha' + u')$ 이 되고, 이를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$n'u' - nu = \alpha(n' - n) = ch(n' - n) = kh \quad (1.3)$$

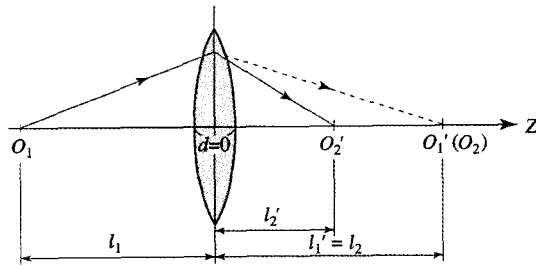


그림 1.3 얇은 렌즈의 결상방정식

여기서 $k = c(n' - n)$ 으로 정의하고 굴절능이라 부른다. 통상 광학 설계에서 굴절능의 단위는 mm의 역수 (mm^{-1})로 표현되는데, 안경 광학에서는 m의 역수 (m^{-1}), 즉 디옵터(Diopter)단위를 주로 쓴다.

식(1.3)은 다음과 같이 표현하기도 한다.

$$n' \frac{h}{l'} - n \frac{h}{l} = kh \rightarrow \frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = k \quad (1.4)$$

단일면에서의 근축굴절방정식을 얇은 렌즈로 확장하자. 먼저 두개의 면에서의 근축굴절방정식을 구하고 각 면의 굴절능을 각각 k_1 과 k_2 라고 하면 두개의 얇은 렌즈 결상 방정식이 얻어진다.(그림 1.3 참조). 이 두 식에서 $n_1' = n_2, l_1' = l_2$ (얇은 렌즈) 이므로 이를 대입하고 l_2 를 소거하면, 결과적으로 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = k \quad (1.5)$$

여기서 $l_2 = l', l_1 = l, n_2' = n', n_1 = n$ 으로 바꾸었으며, l 과 l' 는 렌즈(주요점)에서부터 각각 물체 및 상까지의 거리이고, n 는 물체측 굴절률, n' 는 상측 굴절률이다.

한편 얇은 렌즈의 결상방정식 식(1.5)로부터 초점거리를 다음과 같이 수학적으로 정의할 수 있다.

$$\text{제1초점거리: } \lim_{l' \rightarrow +\infty} \left(\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} \right) = - \frac{n}{f} = k \quad (1.6)$$

$$\text{제2초점거리: } \lim_{l \rightarrow -\infty} \left(\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} \right) = \frac{n'}{f'} = k \quad (1.7)$$

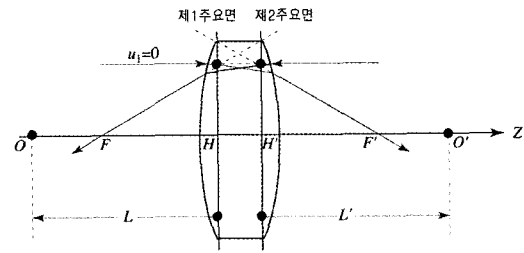


그림 1.4 두꺼운 렌즈에서의 주요점 및 주요면

여기서 제 1초점거리는 f 로 표현되고, 제 2초점거리는 f' 으로 표현된다. 그리고 각각의 초점은 F_1, F_2 또는 F, F' 으로 표현한다. 그러면 얇은 렌즈에서 물체와 상 사이의 관계를 주는 얇은 렌즈 결상방정식(가우스 결상공식)은 다음과 같다.

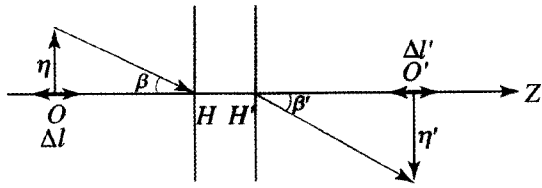
$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = k = \frac{n'}{f'} = - \frac{n}{f} \quad (1.8)$$

1.1.4 광선작도

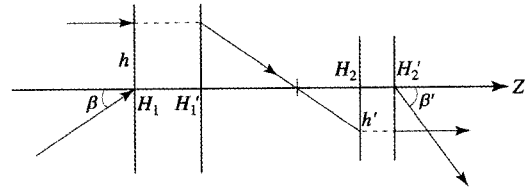
구면렌즈(凹凸) 및 거울(凹凸)에서 광선을 작도하는 문제는 대단히 중요한데, 상의 위치 및 크기를 다음 3가지의 광선으로부터 대략 알 수 있다.(a) 물체에서 출발하여 광축과 평행하게 나아가는 광선은 렌즈(거울)와 부딪힌 후, 초점을 통과한다.(b) 물체에서 출발하여 초점을 통과한 후 렌즈(거울)와 부딪힌 광선은 평행하게 진행한다.(c) 렌즈의 경우, 물체에서 출발하여 렌즈의 중심(주요점)을 통과한 광선은 굴절 없이 직진한다. 거울의 경우, 물체에서 출발하여 거울의 중심에 부딪힌 광선은 광축에 대해 입사 및 반사각이 같다.

1.1.5 두꺼운 렌즈

두꺼운 렌즈 또는 렌즈계에서 주요점이 결정되면 렌즈(계)는 주요점 위에 세워진 두개의 주요면으로 재구성할 수 있고, 이로부터 복잡 렌즈계는 두개의 주요면으로 간단히 다룰 수 있다(그림 1.4 참조). 즉 두꺼운 렌즈 또는 렌즈계의 결상 방정식은 물체 위치와 상의 위치를 주요면 H, H'으로부터 측정하면 얇은 렌즈와 동일한 형태의 방정식(식(1.9))으로 물체 및 상의 위치가 표현된다.



(a) 횡배율 및 종배율



(b) 각배율

그림 1.5 배율

$$\frac{n'}{L'} - \frac{n}{L} = K \quad (1.9)$$

여기서 K 는 두꺼운 렌즈의 굴절능이고(d_1 은 렌즈 두께), $K = k_1 + k_2 - \frac{d_1}{n}$ k_1, k_2 로 주어진다.

두께가 없는 얇은 렌즈($d_1 \approx 0$)에서는 제1주요점 H 와 제2주요점 H' 의 위치가 동일하다.

1.1.6 배율

배율은 물체와 상간의 크기 비를 나타내는 척도로 값이 1보다 작으면 축소배율이고 1보다 크면 확대배율이다. 그리고 배율의 부호가(+)이면 정립상이고(-)이면 도립상이다. 이에 물체의 크기를 상의 크기로 나눈, 즉 물체까지의 거리(l)를 상까지의 거리(l')로 나눈 횡배율(M_T , Transverse magnification) 다음과 같이 정의한다.(그림 1.5(a) 참조)

$$M_T = \frac{l'}{l} \quad (1.10)$$

그리고 실제로 물체는 부피를 가지므로 물체의 광축 방향으로는 경상 크기를 나타내는 종배율(M_L , Longitudinal magnification)도 중요하다. 얇은 렌즈의 결상 방정식 $n'/l' - n/l = k$ 의 양변을 미분하면 $(n'/l'^2)\Delta l' = (n/l^2)\Delta l$ 이 되고 양변에 h^2 을 곱하면 $n'u'^2\Delta l' = nu^2\Delta l$ 이 된다. 이로부터 종배율은 다음과 같다.

$$M_L = \frac{\Delta l'}{\Delta l} = \frac{nu^2}{n'u'^2} = M_T^2 \text{ (공기중에서)} \quad (1.11)$$

그리고 물체의 거리를 정할 수 없는 무초점계(망원경)에서는 횡배율 대신에 각배율(M_A , Angular magnification)을 정의하는데 다음과 같다.(그림 1.5(b) 참조)

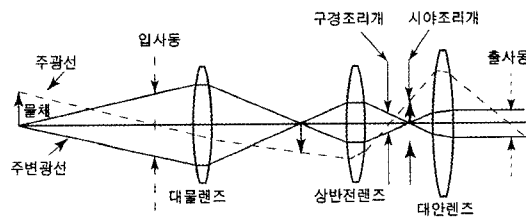


그림 1.6 구경조리개와 시야조리개

$$M_A = \frac{\beta'}{\beta} = \frac{h}{h'} \quad (1.18)$$

1.2 조리개와 구경

1.2.1 조리개

그림 1.6에서처럼 구경조리개(aperture stop)는 렌즈계에 입사하는 광량을 조절하는 조리개로서, 렌즈계에 장착되어 광량(축상 물점에서 출발한 광선다발 기준)을 조절할 수도 있고 렌즈 구경자체가 구경조리개가 될 수도 있다. 즉, 명확히 구경조리개가 설치되어 있지 않으면 렌즈들 중 광량을 제한하는 렌즈구경이 구경조리개가 된다. 시야 조리개(field stop)는 결상되는 상의 크기를 조절하는 조리개로서 물체 위 또는 1차 결상된 상면 위에 있을 수 있다.

1.2.2 구경과 비네팅

렌즈구경들이 충분히 크지 않기 때문에 비축상에서 출발한 광선다발의 일부가 차단되는 현상이 종종 발생하는데 이를 비네팅(vignetting, 비축광량부분차폐)이라 한다. 비네팅은 물체축의 화각이 매우 큰 렌즈(특히, 카메라

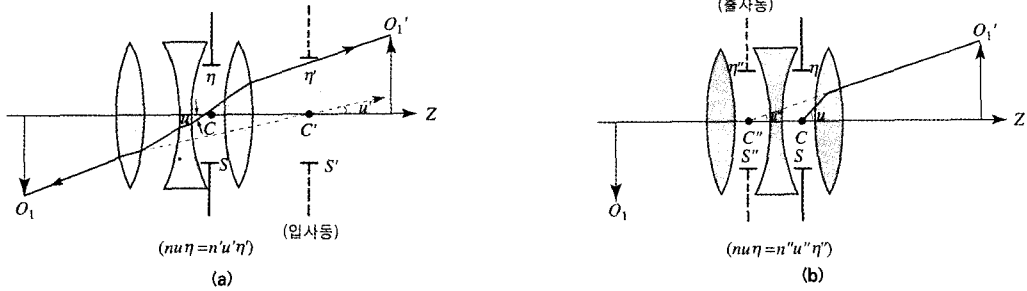


그림 1.7 입사동과 출사동의 위치 및 크기 관계

라용 렌즈)들에서 빈번히 발생하며, 렌즈 곡률의 제한으로 인해 큰 화각에서 충분히 큰 구경을 확보하지 못함으로써 일어나거나, 또는 광학 설계시 비축수차를 줄이기 위해 의도적으로 비네팅을 만들기도 한다. 일반적으로 비네팅이 발생하면 중심 근처의 상의 밝기에 비해 주변 밝기가 저하되므로 주의를 요한다.

1.2.3 입사동과 출사동

통상 구경조리개의 상을 입사동과 출사동이라 하는데 그림 1.7과 같이 조리개 앞 부분의 렌즈부에 의해 결상되는 구경조리개의 상을 입사동이라 하고, 조리개 뒷 부분의 렌즈부에 의해 결상되는 구경조리개의 상을 출사동이라 한다. 즉, 물체쪽에서 바라다본 구경조리개의 크기가 입사동의 크기이고 상면쪽에서 바라다본 구경조리개의 크기가 출사동의 크기가 된다. 입사동은 광선다발이 들어가는 입구로써 중요한 의미를 가지고, 출사동은 광선다발이 렌즈계를 통과한 후 출사하는 면으로써 파면의 변형을 나타내는 기준면으로 활용된다.

한편 물체와 상측에서 바라본 시야조리개의 상을 입사창 및 출사창이라 하는데, 광학적으로는 입사창이 물체 크기보다 크거나 같으면 전체화각을 다 보는 것이 되고 작으면 전체화각 중 일부분만 보는 것이 된다. 이는 출사창과 상과의 관계에서도 성립한다.

1.2.4 F-수와 수치구경

상 밝기의 척도를 나타내는 광학량으로써 F-수와 NA(Numerical Aperture, 수치구경)를 들 수 있는데 F-수는 주로 카메라 렌즈에서 많이 사용되고, NA는 현미경 대물렌즈에서 많이 사용된다.

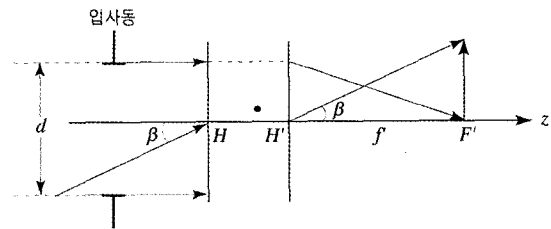


그림 1.8 F-수

그림 1.8에서와 같이 상면에서 단위면적당 광량 = $\pi (d/2)^2 / \pi (f' \beta)^2 \propto (1/F - \text{수})^2$ 으로 표현하여 F-수를 다음과 같이 정의한다.

$$F\text{-수} = \frac{f'}{d} \quad (1.12)$$

$(F\text{-수})^2$ 이 상 밝기에 역 비례함을 유의하면 사진노출 시간이 F-수의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 그러므로 보통 F-수를 렌즈의 "빠르기(speed)"로 표현하기도 하는데, F/1.4 렌즈는 F/2 렌즈보다 약 2배 빠르다(F-수는 F/#의 형태로 표현한다.). 보통 카메라 렌즈의 조리개는 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22 등의 F-수를 갖는다.

수치구경 NA는 그림 1.9와 같이 물체공간의 NA와 상공간의 NA로 구분되어지고 물체공간에서는 $NA = n \sin \theta \equiv NA$ 로, 상공간에서는 $NA = n' \sin \theta' \equiv NA'$ 로 정의한다. 물체공간의 NA와 상공간의 NA'은 라그랑주의 불변량과 횡배율 M_T 로부터 $NA' = NA / M_T$ 임을 알 수 있다. 일반적으로 NA는 상공간의 NA를 의미하나, 현미경 대물렌즈의 NA는 물체공간의 NA를 기준으로 표시한다.

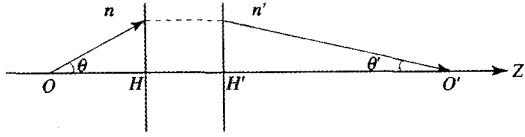


그림 1.9 수치구경

식(1.12)로 주어진 F-수와 수치구경은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$F\text{-수} = \frac{n'}{2NA'} \quad (1.13)$$

1.3 광학유리

광학유리는 일반 유리와는 달리 기포나 불순물이 없고, 균질하게 매우 엄격한 공정조건하에서 제조되는데 굴절률과 아베상수($V = (n_d - 1)/(n_F - n_C)$)에 따라 크게 크라운 유리(crown glass)와 플린트 유리(flint glass)로 나눌 수 있다. 여기서 아베상수는 분산에 반비례하는 값으로써 V 값이 크면 분산은 작다.

크라운 유리의 구성 성분은 SiO₂ 70%, Na₂O 20%, CaO 10%이고 굴절률은 1.5~1.6정도, V 값은 50~70 정도의 특성을 갖는다. 그리고 플린트 유리는 SiO₂ 50%, Na₂O 10%, PbO 40%의 구성 성분으로 되어 있고, 굴절률은 1.7~1.9정도, V 값은 20~40 정도의 특성을 갖는다. 참고로 창유리의 굴절률은 보통 1.514에서 1.52정도이다.

광학설계에 사용하는 광학유리들을 굴절률(y축)과 아베상수(x축)로 배열한 그래프가 광학유리들의 지도인데 보통 비슷한 광학상수를 갖고, 화학적 조성비가 비슷한 것들끼리 묶어서 BK, K, KF, F, SF 영역(이는 미국 쇼트사 제품을 기준으로 하였음) 등으로 구별한다. 이러한 구분명과 제품명들은 광학유리 제작회사마다 서로 다르게 사용하므로 그 광학적 특성만을 비교하여 동일여부를 확인한다.

1.4 수차

기하광학을 크게 두 개의 주제로 나눌 수 있는데 하나는 앞에서 설명한 가우스 광학이고 또 다른 하나는 수차(aberration, 收差)이론이다. 기하광학이란 본디 렌즈 설계시 더 좋은 결상을 위한 필요로부터 발달한 학문인데, 그 핵심내용은 주로 수차와 관계되는 것들이다. 수차라 함은 의미 그대로 수렴하는 차이를 말하는데, 좋은 렌즈(계)일수록 물체의 한 점으로부터 출발한 광선다발이 렌즈를 통과한 후 한 점으로 수렴하게 된다. 만약 한 점으로 수렴하지 않으면 수차라고 하는 결상 저하가 일어나게 된다.

1.4.1 수차의 분류

(1) 파면수차와 광선수차

동일 위상으로 된 파의 면을 파면이라고 하는데, 렌즈계를 통과한 후 일반적으로 수차가 없는 구면파면은 수차를 가지는 비구면 파면으로 변환된다. 파면의 관점에서 수차를 논할 수도 있고, 또는 실제 상면 상에 결상되는 광선의 위치 차이에 의해 논의 할 수도 있다. 즉 파면수차와 광선수차는 서로 연관관계가 있는데, 상호간에 유명한 니오베(Nijboer) 관계식에 의해 치환 가능하다(임천석 저, "기하광학" (테크 미디어, 서울, 2003)).

(2) 자이델(Seidel) 3차 수차와 고차수차

단색광 수차는 주요수차(primary aberration)라고 부르는 자이델 3차 수차와 고차수차로 나눌 수 있는데, 자이델 3차 수차는 스넬의 굴절법칙 중 사인값들을 이항정리로 전개한 아래 식(1.14)에서 θ의 3승 항까지만 고려하여 광선들의 결상 위치를 결정하고, 고차수차는 5승 이상의 항까지 고려하여 결상 위치를 결정한다.

$$n(\theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots) = n'(\theta' - \frac{\theta'^3}{3!} + \frac{\theta'^5}{5!} - \frac{\theta'^7}{7!} + \dots) \quad (1.14)$$

(3) 단색광수차와 색수차

단색광에 의한 수렴(발산)의 차이는 5가지의 수차로 구분하는데 종류로는 구면수차(spherical aberration), 코

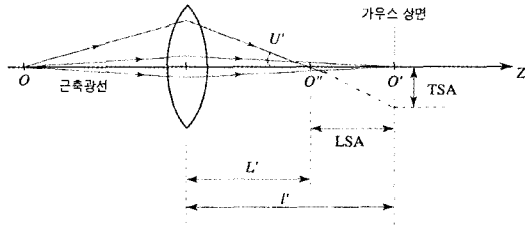


그림 1.10 구면수차

마(coma), 비점수차(astigmatism), 상면만곡(field curvature), 왜곡수차(distortion)가 있다. 여기서 수차들은 특히 구면수차는 종방향(광축방향)과 횡방향(광축과 수직방향)으로 구분할 수 있는데 종 방향의 구면수차를 종구면수차(LSA)라고하고, 횡 방향의 구면수차를 횡구면수차(TSA)라고 한다(그림 1.10 참조).

레이저광을 사용하는 렌즈계가 아니면 일반적으로 임의의 파장대역에서 주로 작동하게 되는데, 이 때 각 파장별로 수렴하는 차이가 발생하고 이를 색수차라 한다.

위에서 언급한 5가지의 단색광 수차들에 있어서도 색수차가 각 파장별로 모두 발생함에 유의하기 바란다. 전통적으로 망원경, 현미경, 카메라 렌즈계에서는 헬륨 d라인(0.5876 μm) 또는 나트륨 D라인(0.5893 μm)을 기준으로 수소 F 라인(0.4861 μm)과 C라인(0.6563 μm)에 대해 색수차를 계산한다. 하지만, 요즘의 컴퓨터를 이용한 자동설계에서는 수은 e라인(0.5461 μm)을 기준으로 C라인, F라인, d라인, 수은 g라인(0.4358 μm)의 색수차를 계산하기도 한다.

(4) 축상수차와 비축수차

위에서 언급한 단색광 수차는 축상(on-axis) 물점에 의한 수차와 비축(off-axis) 물점에 의한 수차로 구분할 수 있는데 구면수차는 축상수차이고 나머지 수차들(코마, 비점수차, 상면만곡, 왜곡수차)은 비축수차이다.

1.4.2 광선수차의 관점에서 본 5가지 단색광수차

(1) 구면수차

구면수차는 광축상의 물점이 상면에서 결상될 때 근축영역의 상점 또는 가우스 상점(무한물체에서는 초점)과 근축외의 상점과의 차이로써 아래와 같이 정의된다.

$$\text{종구면수차(LSA)} \quad L' - l' \quad (1.15)$$

$$\text{횡구면수차(TSA)} \quad LSA \tan U' \quad (1.16)$$

그리고 이러한 구면수차(TSA)는 렌즈 상에 입사하는 높이(입사고)의 3승에 비례하여 커진다.

(2) 코마

코마(coma)는 비축상의 한 점에서 출발한 광선다발이 주광선의 결상점에 대해 상면 상에서 혜성(comet)의 꼬리 모양으로 퍼지는 형태에서 기원되어 명명되었다. 이 수차는 화각에 비례하는 수차이므로(단, 자이델 3차 수차) 망원경 및 현미경 렌즈계에서 주요수차가 된다. 보통 화각이 작은 렌즈계에서는 구면수차와 코마수차가 제일 중요하며 나머지 수차들은 화각의 2승, 3승에 비례(자이델 3차 수차)하여 줄어들므로 전체 수차의 기여도는 상대적으로 매우 작은 편이다. 한편 코마수차(자이델 3차 수차)에서는 자오면 방향의 수차값이 구결면 방향의 수차값 보다 3배 크며(즉, 1T=3S), 혜성 꼬리부분의 퍼지는 각은 60°이다

(3) 비점수차

비축상의 점물체의 상이 옆으로 길쭉한 타원 모양이거나 위로 길쭉한 타원모양으로 결상되는 수차로써 원인은 자오면 방향의 초점과 구결면 방향의 초점이 주광선상에서 서로 다른 위치에 초점을 가지기 때문이다. 비점수차가 발생할 때 자오상점(T-focus)과 구결상점(S-focus) 사이에 자오면 방향의 수차와 구결면 방향의 수차가 같게 되는 위치가 존재하는데, 이곳에서 원판형태의 수차가 만들어지고, 이를 최소착란원(circle of least confusion)이라 한다.

(4) 상면만곡

상면만곡은 자이델 3차 수차에서 페츠발(Petzval) 만곡수차라고 하기도 하는데 렌즈계를 통과한 후 상면이 휘게되는 현상으로써 일회용 필름 카메라에서는 종종 필름면을 상면만곡 수차에 맞추어 구부려 놓아 상면만곡수차가 최소가 되도록 한다.

(5) 왜곡수차

왜곡수차는 배율수차라고 하기도 하는데 물체의 위치

별로 배율이 달라지는 수차이고 물체 화각의 3승에 비례 (자이텔 3차 수차)하는 수차이므로 카메라 같은 화각이 큰 렌즈계에서 뚜렷이 나타난다. 만약 자이텔 3차의 왜곡 수차만 있는 렌즈계라면 물체점에서 출발한 모든 광선다 받은 상면 상에서 주광선의 결상점에 다 모이는데, 가우스 상점과는 화각의 3승에 비례하는 위치차이를 가진다. 이러한 왜곡수차의 크기는 왜곡수차(절대크기) = $G - O_1'$ 또는 왜곡수차(%) = $\frac{G - O_1'}{G} \times 100$ 으로 표현하는데, G 는 가우스 상점, O_1' 는 주광선의 상점이다.

왜곡수차는 2가지의 형태를 가질 수 있는데, 물체의 상이 원래의 배율보다 확대되는 실패(pincushion)형의 양의 왜곡수차 또는 축소되는 단지(barrel)형의 음의 왜곡수차가 있다.

1.4.3 색수차

색수차는 종색수차(axial 또는 longitudinal chromatic aberration)와 횡색수차(lateral 또는 transverse chromatic aberration)로 나눌 수 있다. 수소 F 라인의 광선이 광축과 만나서 이루는 상점까지의 거리를 L_F' 이라고 하고, C 라인의 광선이 광축과 만나서 이루는 상점까지의 거리를 L_C' 이라고 하면 종색수차는 $L_F' - L_C'$ 이다. 반면에 비축상의 물점에서 나온 F 라인의 광선이 만든 상점에서 광축까지의 수직 높이차를 O_F' 이라고 하고, 비축상의 물점에서 나온 C 라인의 광선이 만든 상점에서 광축까지의 수직 높이차를 O_C' 이라고 하면 횡색수차는 $O_F' - O_C'$ 이다.

구면수차를 수소 F라인과 C라인에 대해 스넬의 법칙으로 광선추적하면 이를 구면색수차(spherochromatism)라고 하고, 왜곡수차에 대해 계산하면 배율색수차라고 한다(횡색수차≡배율색수차). 그리고 종색수차가 보정된 후, 즉 C와 F라인이 합 초점 후, d 또는 D라인과의 차이를 2차 스펙트럼(secondary spectrum)이라 부른다.

통상 망원경 대물렌즈용 이중 접합렌즈의 종색수차 소거조건은 다음과 같다.

$$\frac{k_1}{v_1} + \frac{k_2}{v_2} = 0 \quad (1.19)$$

여기서 k_1 과 k_2 는 각 렌즈의 굴절능이다.

제 2장 광학기기

2.1. 확대경 및 접안경

확대경은 돋보기라고도 하며 물체를 주어진 배율만큼 확대하는 작용을 하는데, 이 원리는 현미경과 망원경의 접안경에도 그대로 사용된다. 그래서 접안경 역시 넓은 의미에서는 확대경이다. 확대경 및 접안경의 배율은 각 배율(M_A)로 정의하고 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{각배율 } M_A &= \frac{\text{렌즈를 통해 물체를 바라보는 각}}{\text{맨눈으로 물체를 바라보는 각}} \\ &= \frac{25}{f'} \quad (\text{눈의 조절작용이 없을 때}) \\ &= \frac{25}{f'} + 1 \quad (\text{눈의 조절작용이 있을 때}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

(1) 눈의 조절작용이 없을 때의 확대경 배율

그림 2.1과 같이 명시거리에서 물체를 바라보는 각 $\tan\theta = -n/25$ 로 주어지고, 렌즈를 통해 바라보는 각 $\tan\theta' = -n/f'$ 으로 주어지므로 정의에 의해 다음과 같이 된다.

$$M_A = \frac{\tan\theta'}{\tan\theta} = \frac{25}{f'} \quad (2.2)$$

(2) 눈의 조절작용이 있을 때의 확대경 배율

눈의 조절작용이 있을 때는 상의 위치가 $-\infty$ 가 아니고 -25cm 되므로 그림 2.1에서 보듯이 렌즈 방정식 $1/l' - 1/l = 1/f'$ 으로부터 물체위치를 구하면 배율을 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_A &= \frac{\tan\theta''}{\tan\theta} = \frac{\left[\frac{n(f'+25)}{-25f'} \right]}{\left[\frac{n}{-25} \right]} = \frac{(f'+25)}{f'} \\ &= \frac{25}{f'} + 1 \end{aligned} \quad (2.3)$$

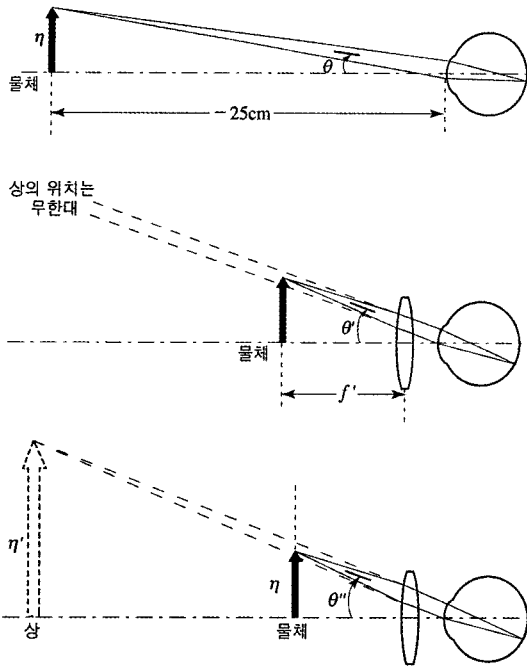


그림 2.1 확대경 및 접안경의 배율

(3) 접안경

접안경은 크게 2가지로 나눌 수 있는데 호이겐스(Huygens)형 접안경과 램스덴(Ramsden)형 접안경으로 구분한다. 둘의 차이는 시야조리개의 위치차이에 있는데, 눈에 가까운 L_2 렌즈의 초점에 시야조리개가 있으면 호이겐스형 이라 하고, L_1 및 L_2 합성렌즈의 초점에 시야조리개가 있으면 램스덴형이라 한다.

호이겐스형은 보통 렌즈를 간단히 구성하므로 수차가 보정된 관찰 가능한 시야각이 그리 크지 않지만 L_1 과 L_2 렌즈의 분리거리 $d = (f'_1 + f'_2)/2$ 로써 본질적으로 우수한 색수차 소거 능력을 가진다. 그러므로 고급현미경에서 3가지 또는 그 이상의 파장에서 물색화된 대물경(apochromat objective)과 함께 이용되기도 한다.

램스덴형은 시야조리개의 위치에 눈금을 가지는 십자망(reticle)을 설치하기 용이하므로 각 종 계측기에 많이 쓰이는데 다양하게 많이 발전하여 왔고 특히 화각이 큰 여러 종류의 접안경이 대부분 램스덴형이다.

2.2 망원경

(1) 망원경의 원리

망원경은 맨눈으로는 잘 관측 할 수 없는 멀리 떨어져 있는 물체나 천체를 확대하여 보는 광학기기로써, 크게 갈릴레이형과 케플러형으로 나눌 수 있다. 그림 2.2(a)와 같이 멀리 떨어져 있는 물체의 1차 상이 대물렌즈에 의해 접안경의 초점위치에 맺히고 이를 접안경으로 확대하여 관찰하는 것이다. 망원경계는 무초점계가 됨을 주의하여 기억할 필요가 있다.

갈릴레이 형은 주로 오페라 하우스나 야구장에서 흔히 사용하는 간단한 구성의 망원경으로 배율은 보통 3~4배 정도로 제한되고 정립 허상을 보게 된다(그림 2.2(b)). 한편 고배율의 고급 망원경에서는 케플러형을 쓰는데, 여기에서는 도립 실상을 관찰하게 되므로 보통 대물렌즈와 접안경의 사이에 상반전용 렌즈계(그림 2.2(c))나 프리즘을 설치한다.

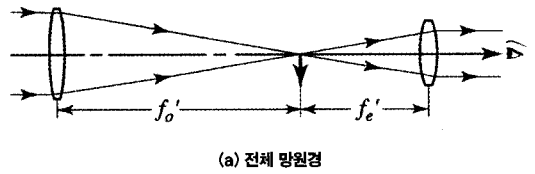
망원경의 배율은 각배율로 식(2.4)와 같이 주어지고(그림 2.4 참조), 맨눈으로 볼 때에 비해 광을 모을 수 있는 능력인 집광력은 식(2.5)로 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{각배율} &= \frac{\text{내부상을 바라보는 각}}{\text{물체를 바라보는 각}} = \frac{\beta_e}{\beta_o} = \frac{f'_e}{f'_o} \\ &= \frac{\text{입사동의직경}}{\text{출사동의직경}} = \frac{h}{h'} \quad (nh\beta = n'h\beta_e) \end{aligned} \quad (2.4)$$

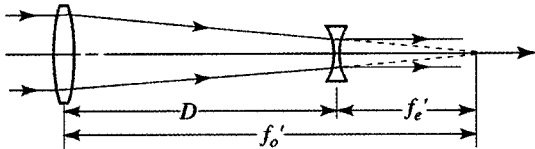
$$\text{집광력} = \frac{(\text{입사동 직경}^2)}{(\text{눈의 동공지름}^2)} = \frac{(\text{입사동 직경}^2)}{(7)^2} \quad (2.5)$$

(2) 망원경의 종류

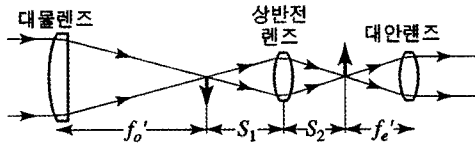
망원경에는 굴절망원경 외에도 반사망원경과 굴절과 반사를 동시에 이용하는 혼합(catadioptric) 망원경이 있다. 먼저, 반사망원경으로써는 뉴턴형(그림 2.4), 카세그레인(Cassegrain)형, 그레고리(Gregory)형 망원경을 들 수 있다. 뉴턴형은 주경만 사용하여 결상하기 때문에 구면수차 및 코마 수차를 잘 보정 할 수 없어서 상의 질은 그리 좋지 않다.



(a) 천체 망원경



(b) 갈릴레이형 망원경



(c) 지상 망원경(케플러형)

그림 2.2 망원경의 작동원리

그러나 주경 및 부경을 사용하는 카세그레인형 및 그레고리형의 망원경은 구면수차와 코마를 어느 정도 보정할 수 있어서 뉴턴형보다는 좀 더 나은 결상 특성을 보인다. 그리고 카세그레인형이 상면만곡 특성에서는 그레고리형보다 우수하므로 일반적으로 천체 망원경에서는 카세그레인형을 주로 사용하는데, 허블(Hubble) 망원경도 카세그레인 형이다. 반사 망원경은 굴절 망원경과는 달리 경량 및 대구경화 할 수 있어서 천체 망원경 또는 인공위성용으로 주로 사용되지만, 굴절 망원경에 비해 화각이 작고(1/5~1/10배), 중심차폐(obscurtion)에 의한 광량 손실이 크다는 것이 단점이다.

반사굴절계는 순수 반사경계보다 설계 자유도가 커지므로 고차 수차 보정도 가능한데, Mangin형, 공심(concentric)형, 슈미트(Schmidt)형 반사경 등이 있다. Mangin 형 및 공심형에서는 각 면의 곡률 C_1, C_2, C_3 는 같은 곡률 중심 C 를 중심으로 하는 구면들이다. 슈미트형 반사경은 비구면 보정판을 사용하는 광학계로써 이론적으로는 대단히 좋은 성능(큰 화각에서도 F/0.5와 같이 우수한 설계가 가능)을 가지고 있지만 실제 보정판 제작

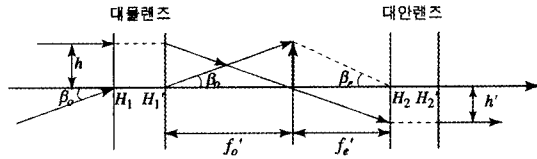


그림 2.3 망원경의 배율

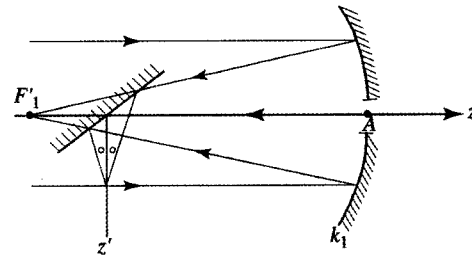


그림 2.4 기본 반사경계

이 어려운 단점이 있다. 그러나 현대의 정밀가공기술의 도움으로 실제 제작이 가능하게 되었으므로 천체 망원경 및 인공위성추적용 등에 활용된다.

2.3 현미경

현미경은 확대경과 같이 근거리의 물체를 확대하는 광학기기인데 확대경과는 동작원리에서 조금 차이가 있는데, 먼저 미소물체(10 μ m)를 대물렌즈에 의해 1차적으로 확대하고(10배~100배) 확대된 1차의 도립실상을 접안경의 초점에 둬으로써 10배정도 확대하여 본다. 보통 광학현미경의 최대 배율은 1000배(대물렌즈의 배율 100배 \times 접안경의 배율 10배) 정도이다. 그림 2.5와 같이 현미경에서는 대물렌즈의 배율을 정의할 때 경통길이라고 하는 특별한 양을 도입하는데 통상 160mm정도이고 대물렌즈의 후방초점에서 1차 도립실상의 결상 위치까지이다.

배율 = 대물렌즈의 배율 \times 접안경의 배율

$$= \frac{160mm}{f_o'} \times \frac{250mm}{f_e'} \quad (2.6)$$

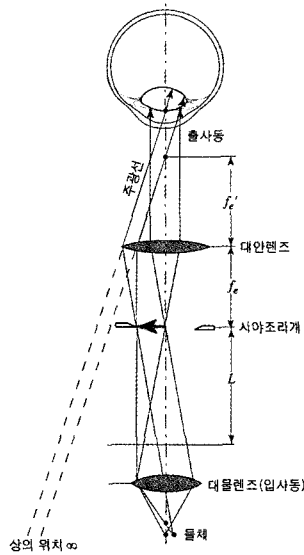


그림 2.5 기본적인 복합 현미경

통상 대물렌즈의 초점거리는 2~16mm정도이고 접안경의 초점거리는 25mm정도이므로, 만약 대물렌즈의 초점거리 $f_o' = 16\text{mm}$, 접안경의 초점거리 $f_e' = 25\text{mm}$ 로 두면 $M = -10 \times 10 = -100$ 배가 된다.

현미경에서 대상물체의 화각을 계산해 보면 물체크기를 $10\mu\text{m} (10 \times 10^{-3} \text{mm})$, 대물렌즈의 초점거리를 5mm로 두면 화각 $10 \times 10^{-3} / 5 = 2 \times 10^{-3} \text{rad} \approx 0.1^\circ$ 정도이다.

2.4 카메라

카메라의 대표적인 구조는 찍는 렌즈와 눈으로 물체를 보는 렌즈가 하나로 일치하는 일안 리플렉스(single lens reflex, SLR) 카메라이다. 카메라의 구조는 물체를 출발한 광이 더블 가우스(double Gauss)형의 카메라 렌즈를 통과한 후 셔터에 의해 작동되는 45° 기울어진 반사경에 의해 필름면 또는 스크린면에 결상되는데, 스크린 위의 물체상은 광경로를 90° 로 꺾어 주는 펜타프리즘에 의해 뷰 파인더(접안경)에 전달된다. 참고로 일안이란 말은 싱글렌즈 즉 카메라 렌즈를 의미하고, 리플렉스는 반사 즉 45° 기울어진 반사경을 의미하는데, 하나의 카메라 렌즈를 사용해서 촬영과 초점조절을 동시에 한다는 의미이다.

SLR 카메라는 35mm 필름을 사용하고, 필름의 대각선 길이와 초점거리는 거의 같게 두므로 화각은 $\tan^{-1}(1/2) \approx 26.56 \times 2 \approx 53^\circ$ 이다. 보통 표준 SLR 렌즈는 50mm 정도의 초점거리를 가지고 화각은 53° 정도인데 화각의 크기에 따라 광각(wide angle) 및 망원(telephoto)으로 나눈다. 일반적으로 교환렌즈를 카메라 앞에 붙이면 28mm(광각)~105mm(망원)까지 초점거리를 바꿀 수 있고 이로 인해 화각이 27° (망원)~ 84° (광각) 정도까지 변한다. 즉 가까이 있는 대상물의 사진은 광각렌즈로 찍을 수 있고, 멀리 있는 대상물은 망원렌즈로 찍을 수 있다.