광학렌즈 설계 및 평가

홍경희 박사

육군사관학교 교수

제1장 서 론

광학계의 개발생산을 위해서는 어떠한 계통으로 만들 것인가를 설계해야 한다. 설계에 앞서서 주어진 규격과 성능이 결정되어야 하며 이러한 조건을 만족하는 계통으로 설계해 나가야 한다. 또한 설계는 현실적으로 생산가능해야 하며 경제성까지도 고려해야 한다. 따라서 설계자는 가공을 담당하는 실무자와 긴밀한 관계를 가지고 서로 협력해야 한다. 광학계 설계방법에는 여러가지가 있을 수 있다. 어떠한 방법으로 하든 각각 장단점이 있으며 그 나름대로 최선을 다할 뿐이지 특별한 비결의 방법이 따로 존재한다고는 말할 수 없다. 초기에는 calculator를 이용하여 시행착오방법에 의해 설계하였으나 점차로 전자계산기가 발전되면서부터 대부분 전산기를 이용하게 되었고 특히 personnal computer가 발전됨에 따라 pc용 전산프로그램이 많이 개발되고 있다. 아무튼 전산기의 발달로 광학계의 설계에 큰도움이 되었고 많은 발전이 되었다. 방법에 따라 약간의 차이는 있겠지만 대체로 설계의 순서는 다음과 같다. 첫째 주어진 조건, 즉, 규격, 사양, 요구되는 성능을 검토한다. 예를 들면 사용되는 목적, 조명되는 파장, 유효초점거리, F/#, 광통길이, 분해능, OTF특성 등의 요구조건을 고려한다. 둘째 lst order optics에 의해 또는 얇은 렌즈근사법에 의해 각 요소의 굴절능과 요소간의 간격을 결정하여 계통을 확립한다. 요즈음 미국에서는 y-y diagram 2방법으로 계통을 확립하고 있다. 세째로 각 요소가 되는 렌즈의 두께를 부여하여 각면의 곡률을 결정한다. 여기서 얻은 설계사양이 초기설계가 되며 이때 각 요소의 굴절능은 계통확립시에 결정한 얇은 렌즈근사에서와 동일하여야 한다. 두께와 각 면의 곡률이 결정되는 대로 Gauss 광선추적 및 Seidel 제1차 파면수차를 계산하며 최적설계를 찾아 접근한다. 요구하는 파면수차특성을 얻게 되면 이때의 설계변수가 그 다음단계의 초기설계가 된다. 네째로 유한광선추적을 하며 광선수차, ray－fan, encircled energy, spot diagram 또는 OTF를 계산하며 최적설계를 찾아 접근한다. 요구하는 수차특성 또는 기타 결상성능을 만족하면 설계가 끝나며 마지막으로 공정에 필요한 허용공차를 계산하고 도면을 그린다. 이상의 순서를 flow chart에 나타내면 그림1과 같다.

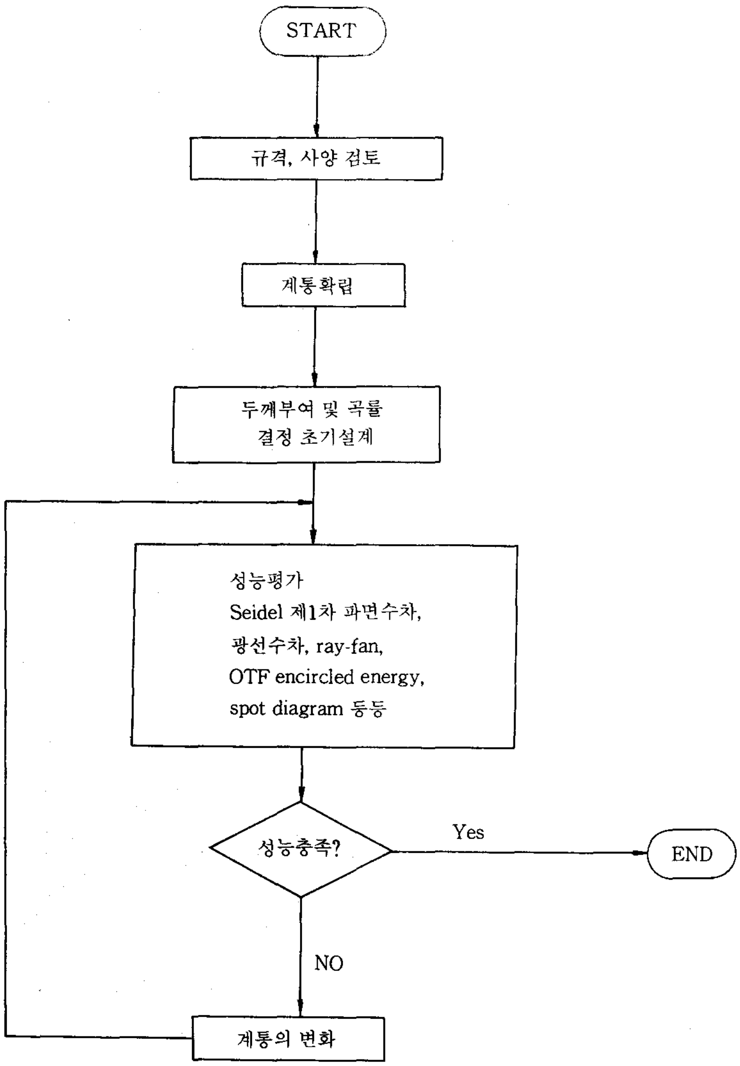

그림 1. 광계통설계의 순서도

제2장 계통의 확립

2.1 기하광학의 부호규약

광파가 진행하여 굴절 또는 반사할 때 광선의 진로를 기술하기 위하여 입사각, 굴절 또는 반사각, 입사고, 물체거리, 상거리 등의 부호를 약정해 둘 필요가 있다. 반사는 굴절의 특별한 경우 즉 특정한 조건하에서 일어나는 현상이라고 볼 수 있으므로 부호규약을 할때에는 굴절을 기준으로 설명한다. 여기에서 결상계의 대칭축 즉 굴절 또는 반사면의 중심의 법선축을 광축 또는 주축이라고 한다.

그림2에서 보는 바와 같이 입사광선과 굴절면이 만나는 점을 P라 하고, 광축과 만나는 점을 B라 하자. 굴절면상의 P점에서의 법선이 광축과 만나는 점을 C라 하고 굴절광선이 광축과 만나는 점을 B' 이라 하자. 또 광축과 굴절면이 만나는 점을 A라 하고 이를 정점이라 한다. P점의 광축으로부터 높이를 입사고라 정의하며 Y로 나타내고 정점A로 부터 B까지의 거리를 물체거리 l, B' 까지의 거리를 l', C까지의 거리를 곡률반경 r, 정점으로부터 P점까지의 수직거리를 ε라 하자. 입사광선과 P점의 법선이 이루는 각을 입사각 i, 굴절광선과 법선이 이루는 각을 굴절각 i' 이라 하자. 또 입사광선과 광축이 이루는 각을 입사광축각 u, 굴절광선과 광축이 이루는 각을 굴절광축각 u', 그리고 법선과 광축이 이루는 각을 법선각 α라 한다. 이때 각 거리와 각의 부호는 아래와 같이 약정한다.

(1) 모든 입사광선은 왼편에서 오른편으로 진행하도록 도시한다.

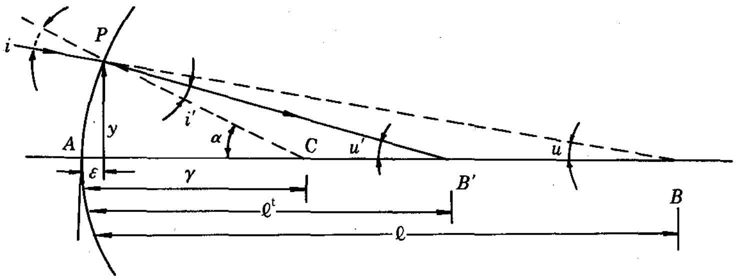

그림 2. 기하광학의 부호규약

(2) 모든 거리와 높이는 정점 A를 원점으로 하는 오른손 좌표계의 부호를 따른다. 즉 y는 P점이 A의 윗쪽에 있으면 +, 아래쪽에 있으면 −이고, r, l, l′ 은 C, B, B′점이 A의 오른쪽에 있으면 +, 왼쪽에 있으면 −가 된다.

(3) 각 u 및 u′ 은 광선을 광축방향으로 회전할 때 반시계방향이면+, 시계방향이면 −이고, 각 α는 법선을 광축방향으로 회전할때, 반시계방향이면+, 시계방향이면 −이며 i 및 i′의 각은 광선을 법선방향으로 회전할 때 시계방향이면 +, 반시계방향이면 −이다.

그림2에서 입사광선이 광축에 가깝게 입사하면 y는 매우 작아지고 따라서 각 u,u′, i,i′ 및 α도 매우 작아지며, 또 ε는 0에 가깝게 되므로

$\alpha=y/r, u=y/l, u'=y/l'$ ⋯(3)

으로 쓸수 있다. 이와 같이 근사할 수 있는 기하광학의 범위를 Gauss광학 또는 lst order optics이라 한다. 기하학적으로 각 α는

$\alpha=u+i=u'+i'$ ⋯⋯⋯⋯⋯(4)

의 관계가 있다. 참고적으로 그림2의 부호는 모두 +이다.

2.2 Gauss 광선추적

광선추적은 굴절법칙으로부터

$n'u'=nu+yk$ ⋯⋯⋯⋯⋯⋯(5)

으로 근사할 수 있고, 기하적으로 입사고의 전환방정식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$y'=y-du$ ⋯⋯⋯⋯⋯⋯⋯(6)

여러면에 대한 Gauss 광선추적의 과정은 아래와 같은 도표로 나타낼 수가 있다.

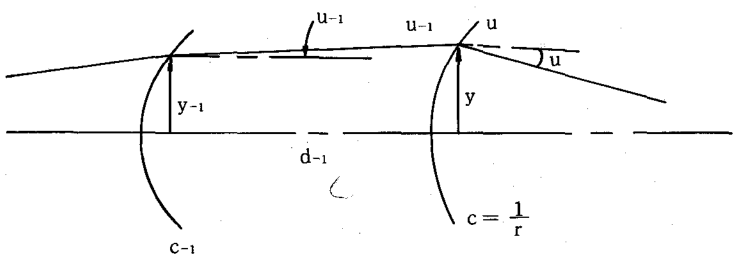

그림 3. Gauss 광선추적

2.3 Gauss광학에 의한 계통 확립

위의 식(4)와 식(5)를 이용하여 Gauss 광선추적이 가능하고 이를 바탕으로 하여 계통을 확립한다. 즉, 각 요소(element)의 굴절능 K와 요소간의 간격 d를 결정할 수 있다. Gauss 광학에 의한 계통확립의 중요성은 아래와 같다.

(1) 계통의 Gauss 광선추적은 수학적으로 간단하다. 따라서 시간이 적게든다.

(2) Gauss 광학에 의한 결상은 대단히 편리한 참고평면을 제공한다.(예 : Gauss 상평면, 초평면 등)

(3) Gauss 광학적인 계산은 상의 수차특성에 대한 제1차 근사값으로 이용된다.

표1에서와 같이 Gauss 광선추적을 할 때 순서를 보면 아래 도표와 같다.

여기서 d_0가 주어지면 임의의 y_1값을 정하여 식(6)에 의해 u_0가 결정된다. 또한 결상

표 1. Gauss 광선추적

계 산 항	면0	면1……j-1	면j……면k
$c = 1/r$			
d			
n			
$K = c(n - n_{-1})$			
$y = y_{-1} + du$			
$nu = n_{-1}u_{-1} + yk$			
$i_{-1} = cy - u_{-1}$			
$i = cy - u$			
$A_{-1} = n_{-1}i_{-1}$			
$A = ni$			
$check = A - A_{-1}$			

effective focal length, $f' = y_1/uk$,
back focal length, $bfl = yk/uk$
$check < 1.0E-6$?

표 2. Gauss 광선추적 및 계통확립의 순서

면 번 호	0		1		2		3 …등
c	C_0		C_1		C_2		C_3
d		d_0		d_1		d_2	
n		n_0		n_1		n_2	
$K = c(n - n_{-1})$			$c_1(n_2 - n_1)$		$c_2(n_3 - n_2)$		
d/n		d_0/n_0		d_1/n_1		d_2/n_2	
y	y_0		y_1		y_2		y_3
n u		n_0u_0		n_1u_1		n_2u_2	

대수적 계산 예:

면 번 호	물체평면		1		상평면
c	0		c_1		0
d		d_0		d_1	
n		n_0		n_1	
$K = c(n - n_-)$	0		$c_1(n_1 - n_0)$		0
d/n		d_0/n_0		d_1/n_1	
y	0		y_1		0
n u		n_0u_0		n_1u_1	

계의 조건으로 d_1을 주어지면 마찬가지로 식(6)에 의해 n_1u_1이 결정되고 이에 따라서 식(5)에 의해 $K_1 = C_1(n_1 - n_0)$이 결정된다. 이와 같이 결상계 설계조건과 설계자의 계획에 의해 Gauss 광학에 의한 계통이 확립되어 진다.

2.4 두께부여 및 초기설계

Gauss 광학에 의해 각 요소의 굴절능과 요소와 요소간의 거리가 결정되었다. 그러면 각 요소는 먼저 얇은 렌즈근사에서 렌즈의 두께를 0으로 간주하기 때문에

$$K_1 = C_1(n-1), K_2 = C_2(1-n),$$
$$K = K_1 + K_2 \quad \cdots\cdots(7)$$

로부터

$$C_1 - C_2 = 1/r_1 - 1/r_2$$
$$= K/(n-1) \quad \cdots\cdots(8)$$

여기서 n은 각 요소렌즈의 초자의 굴절률을 의미한다. 특별한 경우를 제외하고는 각 요소 전후의 굴절률은 공기중으로 1.0이며 각 요소렌즈의 초자는 선정해야 한다.

각 면의 곡률 C_1 및 C_2를 결정하는 것은 간단한 계통인 경우 Seidel lst order 파면수차를 0으로 하는 연립방정식을 풀어 결정할 수 있는 경우도 있고 복잡한 경우에는 얇은 렌즈 근사의 한방법으로 Codington표현식을 이용하여 최적

화기법으로 결정할 수도있다. 일단 곡률이 얇은 렌즈근사에 의해 결정되면 두꺼운 렌즈의 경우 두께를 고려해야 하며 오목렌즈의 경우 중심부의 두께가 최소 유효경의 1/6−1/10 이상이 되어야 한다. 볼록렌즈의 경우 가공의 편의를 고려해서 유효경에다가 mount할 경우와 edging을 고려하여 2mm 정도를 더하여 렌즈의 반경을 고려해야 하며 그 반경을 h라 할때 두께 d는

$d=1/2(C_1-C_2)h^2+0.2$ ······(9)

로 결정한다. 여기서 단위는 cm이며 중심부에 부가한 0.2는 경우에따라 약간 다를 수가 있다. 일단 두께가 부여되면 어느 한쪽 면의 곡률은 수정되어야 얇은 렌즈근사에서 결정한 굴절능을 유지한다. 만약 C_1은 그대로 두고 C_2를 수정한다면 두꺼운 렌즈에서

$K=K_1+K_2-dK_1K_2/n$ ···(10)

의 관계가 있다. 따라서 수정되어야 하는 K_2' 은

$K=K_1+K_2=K_1+K_2'-dK_1K_2'\,1/n$으로부터

$K_2'=K_2/(1-dK_1/n)=C_2'(n-1)$을 구할 수가 있다.

그러므로

$C_2'=C_2/[1-dc_1(n-1)/n]$ ································(11)

로 수정해야 한다.

2.5 Seidel 제1차수차항과 Codington의 표현

파면수차를 전개할때 개구의 위치를 나타내는 변수의 4승항이 Seidel 제1차수차이다.

단색수차는

구면수차$=1/8\,S_I$, $S_I=\Sigma A^2\rho\Delta(u/n)$

코마수차$=1/2\,S_{II}\cos\phi$, $S_{II}=-\Sigma AB\rho\Delta(u/n)$

비점수차$=1/2\,S_{III}\cos^2\phi$, $\Sigma B^2\rho\Delta(u/n)$

상면만곡$=1/4\,S_{IV}+1/4\,S_{III}$, $S_{IV}=H^2\Sigma P_i=H^2P$, 단 P=petzval sum $=-\Sigma 1/r_i\Delta(1/n_i)$

외곡수차$=1/2\,S_V\cos\phi$. $S_V=\Sigma B/A\{H^2P+B^2\rho\Delta(u/n)\}$

종색수차 $C_L=\Sigma A\rho\Delta(\delta n/n)$,

횡색수차 $C_T=\Sigma B\rho\Delta(\delta n/n)$

여기서 $A=ni=n'i'$, $B=ni_p=n'i_p'$, H=Lagrange invariant 이다.

Codington은 형태변수인 x는 법선각 α_1,α_2로 나타내고 굴절변수 Y는 광축각 u_1,u_2'으로 나타내고 있다. 횡배율이 M일 때,

$$X=\frac{\alpha_1+\alpha_2}{\alpha_1-\alpha_2}=\frac{c_1+c_2}{c_1-c_2}$$

$$Y=\frac{u_2+u_1}{u_2-u_1}=\frac{1_1+1_2'}{1_1-1_2'}=\frac{1_1+M}{1-M}$$

으로 놓는다 ············(12)

위의 변수를 이용하여 얇은 렌즈의 Seidel 제1차수차를 다음과 같이 표현하였다.

$$S_I=\frac{1}{4}y^2k^3\left\{\frac{n+2}{n(n-1)^2}X^2-\frac{4(n+1)}{n(n-1)}XY+\frac{n^2}{(n-1)^2}+\frac{3n+2}{n}Y^2\right\}$$

$$S_{II}=\frac{1}{2}Hy^2K^2\left\{\frac{n+1}{n(n-1)}X-\frac{2n+1}{n}Y\right\}$$

······························(13)

$S_{III}=H^2K$

$S_{IV}=K/n$

$S_V=0.0$

$C_L=y^2K/V$

$C_T=0.0$

Gauss 광선추적으로 Seidel 제 1차수차를 계산하기에 앞서서 lst order optics에 의한 계통확립시에 모양변수를 고려하여 optimize가 가능하며 모양변수에 의해 각 면의 곡률이 확정되고 두께를 부여하여 초기설계를 얻을 수가 있다. 초기설계를 가지고 출발하여 각 면을 따라서 Gauss 광선추적을 하며 Seidel 제1차 수차를 계산하며 optimize하고 수차를 최소화하여 유한광추적으로 성능을 평가하며 optimize한다.