

유한 물체거리를 갖는 코마수차가 보정된 2 반사경계의 곡률선형방정식

황석주 · 임천석 · 조재홍[†]

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
 ㊦ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2007년 1월 26일 받음, 2007년 2월 16일 수정본 받음)

원리적인 다양한 장점에도 불구하고 취급이 복잡하고 고차 연립방정식으로 표현되는 현실적 제한으로 인하여 실제 설계과정에서 잘 적용하지 않는 자이텔 3차 수차를 이용하여 구한 코마수차 계수식으로부터 근사적인 제로조건을 만족하는 유한 물체거리를 갖는 코마수차가 제거된 2반사경계의 초기설계에 유용한 곡률선형방정식을 유도하고 그 특징을 조사한다. 즉 주경과 부경의 곡률, 주경과 부경사이의 거리, 유효초점거리로 표현된 변형된 코마수차계수로부터 코마수차계수가 제거되는 조건에서 설계변수를 구하기 위해 전산수치해석 후 나온 데이터를 기반으로 주경과 부경사이의 선형관계가 나타나는 곡률선형방정식을 구하는 것이다. 이는 유한 물체의 코마수차가 보정된 2 반사경계에서 약간의 대수적인 계산만으로 최적화의 초기 입력 데이터를 손쉽게 구할 수 있는 것을 의미한다.

주제어 : Curvature linear equation, Aberrations, Two mirror system, Initial optical design

I. 서 론

최적화를 위한 초기 입력 데이터를 구하는 방법 중 자이텔 3차 수차를 이용하는 해석적인 접근법은 원리적 측면에서 볼 때 가장 통찰적이고 체계적인 방법이지만 설계과정에서 현실적으로 잘 사용하지 않는다. 이는 이 방식이 복잡한 수차식들을 유도하고 정리해야하며 설계변수들 간의 복잡한 결합을 풀고 이해해야하기 때문이다.^[1,2] 그러나 이러한 단점에도 불구하고 자이텔 3차 수차이론의 장점 때문에 간단한 렌즈계나 렌즈모듈의 초기설계에 자이텔 3차 수차이론에 의한 다양한 해석적 접근법이 제안되고 있다.^[3]

최근에 자이텔 3차 수차계수를 무한 물체의 경우 2 반사경계에 간편하고 쉽게 효과적으로 활용할 수 있는 연구가 발표되었다.^[4] 통상적으로 이러한 반사경계에서 제일 중요한 수차는 구면수차와 코마수차이며,^[1,2] 기존의 논문에서 무한 물체거리를 갖는 2 반사경계에 대해 주경과 부경의 곡률 간에 선형성이 있는지를 검토한 결과 일반화된 구면수차와 코마수차가 거의 제로가 되는 조건에 한정된 곡률선형방정식이 라고 하는 다루기 쉬운 단순한 형태의 방정식을 얻었다.^[4]

이러한 무한 물체에 대한 결과를 확장한 결과, 유한 물체거리를 갖는 2반사경계에 대해서도 자이텔 3차의 구면수차가 거의 제로가 되는 조건에 한정된 곡률선형방정식도 최근에 발표되었다.^[5] 이 논문에서는 앞서 연구된 결과에 이어서 유한 물체거리를 갖는 2반사경계에서 자이텔 3차의 코마수차가 보정된 조건의 일반화된 곡률선형방정식도 존재함을 밝히고, 이 식의 특징을 조사하고자 한다. 우선 자이텔 3차의 코마수차계수를 유도하고, 유도된 코마수차계수를 전산수치

로 해석하여 설계변수들의 값을 구한다. 이렇게 얻어진 설계 변수들 중 주경과 부경의 곡률 간에 선형성을 확인하기 위해 그래프를 그린 후 선형 피팅(linear fitting)을 하여 곡률선형 방정식을 유도하고자 한다.

II. Seidel 3차의 코마수차계수의 유도

여러 개의 면이 있을 때 일반적인 근축광선 추적식은 다음과 같이 주어진다.^[6-11]

$$\begin{aligned} n'_i u'_i - n_i u_i &= k_i h_i \\ n'_i &= n_{i+1} \\ u'_i &= u_{i+1} \\ h_{i+1} &= h_i - d_i u'_i \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 식을 사용하여 1면(주경)과 2면(부경)에 대해 광선추적을 하면 아래와 같다.

1면(주경)에 대한 광선 추적 :

$$\begin{aligned} n'_1 u'_1 - n_1 u_1 &= k_1 h_1 \\ \text{단, } n'_1 &= -1, \quad n_1 = 1, \quad k_1 = c_1(n'_1 - n_1) = -2c_1, \quad u_1 = \frac{h_1}{d_0} \text{ 이다.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -u'_1 - \frac{h_1}{d_0} &= -2c_1 h_1 \\ u'_1 &= 2c_1 h_1 - \frac{h_1}{d_0} \end{aligned} \quad (2)$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u'_1 = h_1 - d_1 \left(2c_1 h_1 - \frac{h_1}{d_0} \right) = h_1 \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) \quad (3)$$

2면(부경)에 대한 광선 추적 :

[†] E-mail: jhjo@hanmam.ac.kr

$$n'_2 u'_2 - n_2 u_2 = k_2 h_2$$

단, $u_2 = u'_1$, $n_2 = n'_1 = -1$, $n'_2 = 1$, $k_2 = c_2(n'_2 - n_2) = 2c_2$ 이다.

$$\begin{aligned} u'_2 + u'_1 &= 2c_2 h_1 \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) \\ u'_2 &= -2c_1 h_1 + \frac{h_1}{d_0} + 2c_2 h_1 \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) \\ &= -2c_1 h_1 + \frac{h_1}{d_0} + 2c_2 h_1 - 4c_1 c_2 d_1 h_1 + \frac{2c_2 h_1 d_1}{d_0} \\ &= 2h_1 \left(c_2 - c_1 - 2c_1 c_2 d_1 + \frac{c_2 d_1}{d_0} \right) + \frac{h_1}{d_0} \end{aligned} \quad (4)$$

(3)과 (4)식에서 $d_0 = -\infty$ 로 놓으면 2 반사경계의 유효초점 거리(EFL)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$EFL = \frac{n'_2}{K} = \frac{h_1}{u'_2} = \frac{1}{2(c_2 - c_1 - 2c_1 c_2 d_1)} \quad (5)$$

여기서 K는 총 굴절능 $\left(\frac{n'}{f}\right)$ 이다. 이 때 계산의 편의를 위해서 (5)식을 다음과 같이 바꿔준다.

$$c_2 - c_1 - 2c_1 c_2 d_1 = \frac{1}{2EFL} \equiv E \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{E + c_1}{1 - 2c_1 d_1} \quad (7)$$

(2)식~(7)식을 활용하여 코마수차 계수를 표현하면 다음과 같다.

코마수차 계수^[12~15] :

$$\begin{aligned} S_{II} &\equiv \sum A_i B_i h_i \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_i \\ &= A_1 B_1 h_1 \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_1 + A_2 B_2 h_2 \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_2 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A_i 는 각 면에서의 축상의 근축광선에 대한 반사(또는 굴절)불변량이고, B_i 는 각 면에서의 주광선에 대한 반사(또는 굴절)불변량이며, Δ 는 반사전후의 변화를 의미하며, 이들은 아래와 같이 각 변수들로 표현할 수 있다.

$$A_1 \equiv n_1 (c_1 h_1 - u_1) = n_1 \left(c_1 h_1 - \frac{h_1}{d_0} \right) = h_1 \left(c_1 - \frac{1}{d_0} \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_2 &\equiv n_2 (c_2 h_2 - u_2) = -c_2 h_1 \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) + \left(2c_1 h_1 - \frac{h_1}{d_0} \right) \\ &= h_1 \left(c_1 - E - \frac{c_2 d_1}{d_0} - \frac{1}{d_0} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$B_1 = n_1 (c_1 h_1^p - u_1^p) = -\beta \quad (\because h_1^p = 0, u_1^p = \beta) \quad (11)$$

$$h_2^p \equiv h_1^p - d_1 u_1^p = d_1 \beta \quad (12)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= n_2 (c_2 h_2^p - u_2^p) = -(c_2 h_2^p - u_2^p) \\ &= -(c_2 d_1 \beta + \beta) = -\beta (c_2 d_1 + 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_1 &\equiv \left(\frac{u}{n} \right)'_1 - \left(\frac{u}{n} \right)_1 \\ &= -2c_1 h_1 + \frac{h_1}{d_0} - \frac{h_1}{d_0} = -2c_1 h_1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta \left(\frac{u}{n} \right)_2 &\equiv \left(\frac{u}{n} \right)'_2 - \left(\frac{u}{n} \right)_2 = u'_2 + u_2 = u'_2 + u'_1 \\ &= 2h_1 \left(c_2 - c_1 - 2c_1 c_2 d_1 + \frac{c_2 d_1}{d_0} \right) + \frac{h_1}{d_0} + 2c_1 h_1 - \frac{h_1}{d_0} \\ &= 2h_1 \left(c_2 - 2c_1 c_2 d_1 + \frac{c_2 d_1}{d_0} \right) = 2h_1 \left(E + c_1 + \frac{c_2 d_1}{d_0} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

(9)식~(14)식까지를 (8)식에 대입하여 다음과 같은 코마수차 계수식을 최종적으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{II} &= \left[- \left(c_1 h_1 - \frac{h_1}{d_0} \right) h_1 (-2c_1 h_1) \beta \right] \\ &\quad + \left[-h_1 \left(c_1 - E - \frac{c_2 d_1}{d_0} - \frac{1}{d_0} \right) \beta (c_2 d_1 + 1) \right. \\ &\quad \left. \times h_1 \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) 2h_1 \left(E + c_1 + \frac{c_2 d_1}{d_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

또는,

$$\begin{aligned} \frac{S_{II}}{h_1^3} \beta &= 2c_1 \left(c_1 - \frac{1}{d_0} \right) + 2 \left(E - c_1 + \frac{c_2 d_1 + 1}{d_0} \right) \\ &\quad \times (c_2 d_1 + 1) \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) \left(c_1 + E + \frac{c_2 d_1}{d_0} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

수치해석을 용이하게 하기 위하여 (7)식을 (16)식에 대입하면 다음과 같은 형태로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{S_{II}}{h_1^3} \beta &= 2c_1 \left(c_1 - \frac{1}{d_0} \right) + \\ &\quad + \left(1 - 2c_1 d_1 + \frac{d_1}{d_0} \right) \left(1 + \frac{(E + c_1) d_1}{1 - 2c_1 d_1} \right) \\ &\quad \times \left(c_1 - E - \frac{1}{d_0} - \frac{(E + c_1) d_1}{d_0 (1 - 2c_1 d_1)} \right) \left(E + c_1 + \frac{(E + c_1) d_1}{d_0 (1 - 2c_1 d_1)} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

이와 같이 (17)식에서 보듯이 설계변수들인 주경과 부경의 곡률(c_1, c_2) 및 주경과 부경사이의 거리(d_1), 물체거리(d_0), 유효초점거리의 역수(E)로 코마수차 계수식을 유도할 수 있다.

III. 유한물체거리를 갖는 2 반사경계에서 코마수차가 보정된 해

II장에서는 근축광선추적과 자이델 3차 수차이론을 사용하여 코마수차계수를 유도하였다. (자오면) 코마수차가 (1/2)

S_{II} 이기 때문에 $\frac{S_{II}}{h_1^3} \beta$ 가 거의 0이 되는 S_{II} 값을 찾게 되면

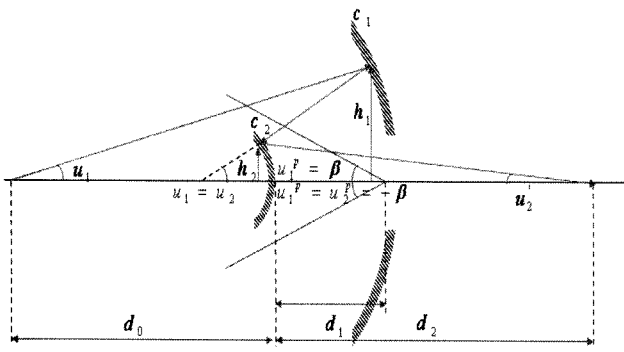


그림 1. 유한 물체거리를 갖는 2 반사경계에 대한 광선추적도

표 1. 유한 물체거리를 갖는 2 반사경계에서 코마수차가 보정된 설계변수들의 값. (단, 물체거리는 유효초점거리로 두고 유효초점거리는 1 m로 두었다.)

줄번호	$c_1 (m^{-1})$	$d_1 (m)$	$c_2 (m^{-1})$
1	-7.0	0.001556	-6.361395
2	-6.5	0.001897	-5.855571
3	-6.0	0.002346	-5.349394
4	-5.5	0.002949	-4.842895
5	-5.0	0.003779	-4.336132
6	-4.5	0.004955	-3.829229
7	-4.0	0.006681	-3.322424
8	-3.5	0.009326	-2.816160
9	-3.0	0.013612	-2.311233
10	-2.5	0.021103	-1.809114
11	-2.0	0.035700	-1.312568
12	-1.5	0.069683	-0.827096
13	-1.0	0.184575	-0.365190
14	-0.5	0.000000	0.000000
15	0.5	-0.587401	0.629961
16	1.0	-1.000000	0.500000
17	1.5	-0.478254	0.821436
18	2.0	-0.200947	1.385973
19	2.5	-0.098081	2.012878
20	3.0	-0.053674	2.647412
21	3.5	-0.031985	3.268246
22	4.0	-0.020360	3.869692
23	4.5	-0.013659	4.452624
24	5.0	-0.009563	5.019960
25	5.5	-0.006934	5.574810
26	6.0	-0.005177	6.119833
27	6.5	-0.003962	6.657159
28	7.0	-0.003096	7.188434

그 값은 코마수차가 보정된 값이라 할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석을 위해 C언어와 Mathematica를 이용하였다. 두 개의 프로그램을 사용하여 데이터를 상호비교하여 최적화된 데이터를 구하였다.

코마수차가 제거되는 값을 찾기 위하여 설계변수 중에서

물체거리(d_0)를 유효초점거리(EFL)로 두고 그 유효초점거리를 1로 고정 후 주경의 곡률을 $+10 \text{ m}^{-1}$ 에서 -10 m^{-1} 까지 0.5 m^{-1} 의 간격으로 변화시켰다. 이러한 변수를 바꾸는 과정에서 (17)식으로부터 주경과 부경사이의 거리를 구하기 위해서 수치해석을 실시한다. 그러면 주경에 곡률에 따라 주경과 부경사이의 거리를 구할 수 있다. 그 후 데이터를 (7)식에 대입하여 부경의 곡률을 구한다. 위에서 구한 데이터로 다시 BFL을 계산할 수 있고 주경과 부경의 반경에 대한 비를 구할 수 있다.

표 1은 물체거리는 유효초점거리로 두고 유효초점거리는 1로 두고 계산한 유한 물체거리를 갖는 2 반사경계에서 코마수차가 보정된 설계변수들의 값을 보여준다. 두 번째 칸은 주경의 곡률(c_1)로 -7.0 m^{-1} 에서 7.0 m^{-1} 까지이며, 세 번째 칸과 네 번째 칸은 주경과 부경 사이의 거리(d_1)와 부경의 곡률(c_2)을 계산한 결과이다. 표 1에서 살펴보면 1번부터 14번 줄까지의 경우는 주경과 부경의 곡률이 음수이기 때문에 카세그레인(Cassegrain) 형 반사경계임을 알 수 있다. 그러나 이 경우 주경의 반경보다 부경의 반경 더 크기 때문에 광학적인 구조가 적절하지 못하기 때문에 이는 실제의 망원경계가 될 수 없으므로 본 논문의 고려 대상에서 제외한다. 특히 14번 줄의 경우에는 주경과 부경의 위치가 같으므로 역시 현실적으로 불가능한 구조가 된다. 이와 같이 곡률이 음수인 카세그레인 형 반사경계는 구조적인 문제로 제외되며, 곡률이 양수인 역카세그레인(inverse-Cassegrain) 형 반사경계만 온전한 해가 된다. 이 결과는 앞서 연구된 무한물체거리를 갖는 2반사경계에서와의 결과와 유사하다.^[4] 코마수차가 소거되는 해를 살펴보면 곡률이 음수인 경우는 물리적인 해가 존재하지 않고, 곡률이 양수인 경우에만 해가 존재한다는 것을 알 수 있다.

IV. 유한물체거리를 갖는 코마수차가 보정된 2 반사경계의 곡률선형방정식

III장에서 구한 데이터를 잘 살펴보게 되면 주경의 곡률과 부경의 곡률이 거의 비슷한 경향을 보이게 된다. 그래서 주경과 부경의 곡률간의 상관관계를 알아보기 위해 선형맞춤(Linear Fitting)을 하게 되었다. 여기서 선형성이라 함은 선형성의 상관계수의 오차가 1%범위일 때 그 그래프가 선형성을 보인다고 할 수 있다. 일반적인 선형방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$y = \alpha \cdot x + \beta \tag{18}$$

여기서 α 는 기울기를 뜻하며 β 는 절편을 뜻한다. 이러한 조건을 만족하는 선형맞춤(Linear Fitting)된 그래프가 아래의 그림 2이다.

즉, 그림 2에서 보듯이 코마수차가 보정된 유한 물체거리 (여기에서는 1 m)를 갖는 2 반사경계의 주경과 부경 간의 곡

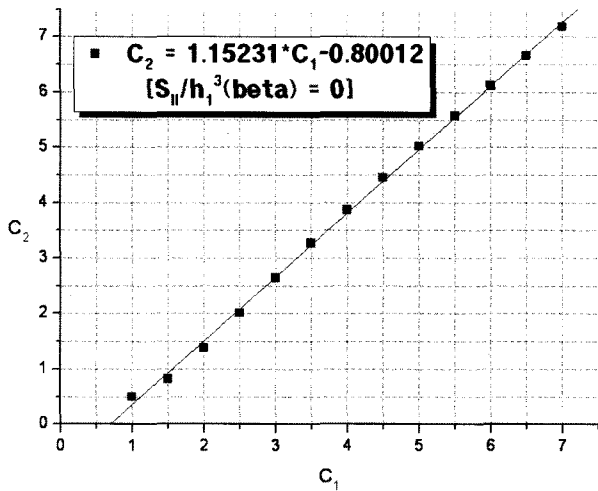


그림 2. 역카세그레인(inverse-Cassegrain) 형 반사경계에 대한 데이터들의 선형성.

물에 대한 선형성은 곡률선형방정식이라는 (18)식을 통해서 정의된다.^[5]

$$c_2 = 1.15231 c_1 - 0.80012 \quad (\text{Inverse-Cassegrain}) \quad (18)$$

여기서 상관계수(correlation coefficient)는 0.999이다. 이러한 선형성은 주경의 곡률이 $-10^{13} \sim 10^{13}$ 사이에서 지속적으로 나타나지만, 이 곡률이 증가할수록 주경과 부경사이의 거리가 거의 0이 되며 이러한 광학적인 구조는 현실적으로 제작이 불가능하기 때문에 표 1에서 주어진 주경의 곡률 범위로 제한하여 곡률선형방정식의 가용범위를 정하였다.

그러나 이러한 제한적인 조건을 가지고 있지만 고차의 자이텔 3차 수차를 이용하여 간단한 선형방정식인 곡률선형방정식을 찾아내었고 앞서 연구된 결과^[4,5]들과 같은 결과를 도출할 수 있었다. 무한물체거리를 갖는 2반사경계에서 같이 코마수차가 제거되는 설계변수들은 역카세그레인 반사경계에서만 존재한다는 것을 알 수 있으며, 무한물체거리를 갖는 2 반사경계와 유한물체거리를 갖는 2반사경계에서 코마수차가 제거된 주경과 부경의 곡률사이에 선형성이 존재한다는 것을 알 수 있게 되었다.

결과적으로 모든 참고문헌 [4,5]의 연구결과와 본 논문의 결과를 함께 고려할 경우, 2 반사경계에서는 유한 물체거리와 무한 물체거리의 모든 경우에 있어서 구면수차와 코마수차가 제거된 주경의 곡률과 부경의 곡률들 사이에는 제한적이지만 올바른 광학적 구조를 가지는 선형성이 존재한다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 유한 물체거리를 0.5 m에서부터 100 m까지 여러 가지로 바꾸어 그림 2의 선형성을 조사한 결과이다. 무한 물체거리를 대상으로 한 참고문헌 [4]를 포함한 그림 6의 결과로 보아서 모든 유한 물체거리에서도 c_1 과 c_2 사이의 선형성이 유지됨을 알 수 있었다.

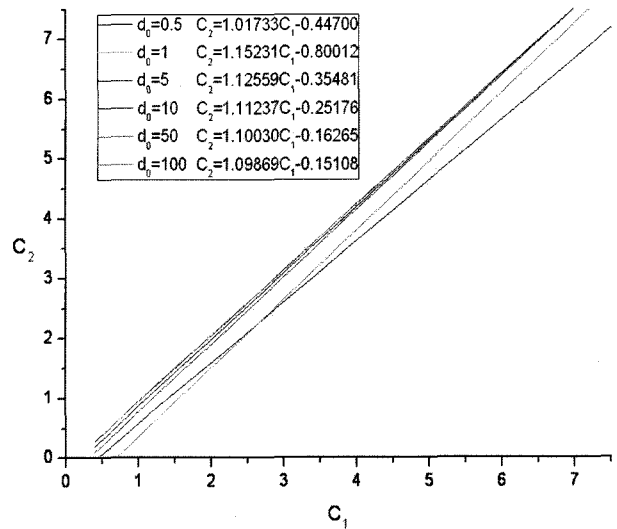


그림 3. 코마수차가 제거된 역카세그레인 반사경계에서 다양한 물체거리(d_0)에 따른 c_1 과 c_2 의 선형성.

(18)식은 참고문헌 [4]번의 무한 물체거리인 경우까지 포함한 주경과 부경의 곡률간의 선형성을 나타낸 간단한 선형 방정식이지만 이는 근축광선추적과 자이텔 3차 수차의 고찰을 통하여 구한 결과이다. 이는 유한 물체거리를 갖는 2 반사경계의 코마수차를 보정하는 복잡한 과정의 결과인데, 이 결과가 대수적으로 매우 단순해졌고 취급이 간단하여 누구나 이해가 명료하게 된다는 것이다. 2 반사경계의 최적화의 초기 입력 데이터를 손쉽게 구할 수 있다는 장점이 있으며, 이로부터 직관적으로 코마수차가 보정된 2 반사경의 형태를 이해할 수 있다.

V. 결 론

원리적인 다양한 장점에도 불구하고 취급이 복잡하고 고차 연립방정식으로 표현되기 때문에 실제 설계과정에서 잘 사용하지 않는 자이텔 3차 수차를 이용하여 구한 코마수차 계수식으로부터 근사적인 제로조건을 만족하는 유한 물체거리를 갖는 코마수차가 제거된 2반사경계의 초기설계에 유용한 곡률선형방정식을 유도하고 그 특징을 조사하였다. 그 결과 주경과 부경의 곡률, 주경과 부경사이의 거리, 유효초점거리로 표현된 변형된 코마수차계수를 코마수차계수가 제거되는 조건에서 설계변수를 구하기 위해 전산수치해석 후 나온 데이터를 기반으로 주경과 부경사이의 선형관계가 나타나는 곡률선형 방정식을 유도할 수 있었다. 이는 유한 물체의 코마수차가 보정된 2 반사경계에서 약간의 대수적인 계산만으로 최적화의 초기 입력 데이터를 손쉽게 구할 수 있는 것을 의미한다. 이러한 연구결과는 무한 물체거리에 한정하였던 참고문헌 [4]의 결과를 유한 물체거리로 확장한 결과로 볼 수 있으며, 동일한 경우에 대한 구면수차에 대해서 유도한 곡률선형방정식^[5]을 코마수차까지도 확장이 가능함을 밝힌

결과이다.

참고문헌

- [1] 임천석, 기하광학(테크 미디어, 서울, 2003), Chap. 4.
 [2] 이상수, 기하광학(교학연구사, 서울, 1995), Chap. 4.
 [3] 류재명, “Gaussian bracket을 이용한 반도체 부품 검사용 다중배치 현미경 광학계의 설계 및 수차분석”, (한남대학교 박사학위 청구논문, 대전, 2005) pp 152~172.
 [4] Rim Cheon Seog, “Curvature Linear Equation of a Two-Mirror System with an infinite Object Distance” J. Korean Phy. Soc. Vol. 46, No. 2, pp. 448~454. (2005).
 [5] 이정기, 임천석, “유한 물체 거리를 갖는 2반사경계의 곡률 선형 방정식” 한국광학회지 Vol. 16, No. 5, pp. 423-427, (2005).
 [6] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering* (McGraw Hill Co. Inc., Boston, 2001), Chap. 3.
 [7] Sung Chan Park and Sang Soo Lee, *Opt. Eng.* Vol. 30, pp. 1023, (1990).
 [8] R. Kingslad, *Lens Design Fundamentals* (Academic Press, New York, 1978), p. 322.
 [9] K. Tanaka, *Paraxial Theory in Optical Design in Terms of Gaussian Brackets, in Progress in Optics XXIII*, edited by E. Wolf(North-Holland, Amsterdam, 1986), p.63.
 [10] Jong Tae Kim, Hong Jin Kong and Sang Soo Lee, *Opt. Eng.* Vol. 32, pp. 536 (1993).
 [11] R. H. Hopkins, *Military Standardization Hand Book Optical Design*, (MIL-HDBK-141, 1962) Chap. 5.
 [12] W. T. Welford, *Aberrations of the Optical Systems* (Adams Hilger Ltd., Bristol, 1986) pp. 130.
 [13] H. A. Buchdahl, *Optical Aberration Coefficients* (Oxford University Press, London, 1954)
 [14] P. Mouroulis and J. Macdonald, *Geometrical Optics and Optical Design* (Oxford University Press, New York, 1997), Chap. 8.
 [15] Jurgen R. Meyer-Arendt, *Introduction to Classical and Modern Optics* (Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1995).

Curvature Linear Equation of a Coma Corrected Two-Mirror System with Finite Object Distance

Seok Ju Hwang, Cheon Seog Rim and Jae Heung Jo[†]

Department of Applied Optics and Electromagnetics, College of Natural Sciences, Hannam University, Daejeon 306-791

[†]E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

(Received January 26, 2007, Revised manuscript February 16, 2007)

We derived analytically the generalized curvature linear equation useful in the initial optical design of a two-mirror system with finite object distance, including an infinite object distance from paraxial ray tracing and Seidel third order aberration theory for coma coefficient. These aberration coefficients for finite object distance were described by the curvature, the inter-mirror distance, and the effective focal length. The analytical equations were solved by using a computer with a numerical analysis method. Two useful linear relationships, determined by the generalized curvature linear equations relating the curvatures of the two mirrors, for the cancellation of each aberration were shown in the numerical solutions satisfying the nearly zero condition ($<10^{-10}$) for each aberration coefficient. These equations can be utilized easily and efficiently at the step of initial optical design of a two-mirror system with finite object distance.

OCIS code : 080.1010, 080.3620, 220.3620.