

4개의 수차가 보정된 유한 물체점을 갖는 4-구면 반사경계의 설계 및 수차해석

김종태 · 공홍진 · 이상수

한국과학기술원 물리학과

(1991년 8월 2일 접수)

축소 배율(×5)을 갖고, Seidel 3차 수차중 구면수차(spherical aberration), 코마(coma), 비점수차(astigmatism) 및 왜곡수차(distortion)가 제거된 4-구면 반사경계를 해석적인 방법으로 구하고, 설계변수에 따른 광학계의 구조적 특성, vignetting 그리고 Petzval 상면만곡수차에 대한 수치적인 해석을 하였다. 이렇게 구한 4개의 수차가 보정된 유한 물체점을 갖는 4-구면 반사경계의 N.A.와 half field angled은 각각 0.2, 1.5°이다.

I. 서 론

반사경계는 비교적 쉽게 대구경으로 제작이 가능하고, 색수차가 없는 장점이 있어 천체 망원경용의 광학계로 많이 사용되어 왔으나, 근래에 와서는 적외선, 영역의 결상계, 고출력 laser의 집속광학계로도 많이 활용되고 있다. 지금까지 알려진 반사경계중에서 구면만으로 구성되고 구면수차와 코마수차가 동시에 보정된 구면경계로는 2구면경계인 inverse cassegrain 계^[1,3], 반사경이 광축에 대하여 기울어져 있는 4-구면경계^[4]등이 사용 목적에 따라 몇가지 보고 되고 있지만 모두 천체 망원경에 사용되는 것들로서 고차 수차가 충분히 제거되지 않았으며, 시계각이 작아 유한 물체점을 갖는 결상 광학계로서는 적합하지 않다. 그러나 유한 물체점을 갖는 lithography용 구면 반사광학계는 2구면 중심 반사경계인 Perkin Elmer Micralign series^[5,6]와 고차 비구면 반사경계를 이용한 연구가 보고되고 있다.^[7] 일반적으로 반사경을 이용한 lithography용 결상계는 유효 field size가 작기 때문에 scan and repeat technique을 이용하고 있다. 본 논문에서는 축소 배율(×5)을 갖고 Seidel 3차 수차중 구면수차, 코마, 비점수차 및 왜곡수차가 제거된 4-구면 반사경계를 해석적인 방법으로 구하고, 설계변수에 따른 광학계의 구조적 특성, vignetting 그리고 Petzval 상면만곡수차에 대한 수치적인 해석을 하였다. 이렇게 얻은 유한 물체점을 갖는 anastigmatic, distortion-free

4-구면 반사경계의 N.A.와 half field angle은 각각 0.2, 1.5°이다.

II. Anastigmatic distortion-free조건을 만족하는 4구면 반사경계의 해법

일반적으로 광학계는 매질의 굴절률 n_i , 각면의 곡률 c_i , 각면의 거리 d_i 로 표시할 수 있다. 광학계의 Seidel 3차 수차계수는 광축상의 물점을 출발하여 광학계의 조리개(stop)의 가장자리 끝을 스치는 주변광선(marginal ray)과 비축상의 물점을 출발하여 조리개의 중심을 지나는 주광선(principal ray)의 근축광선 추적치들로 부터 구할 수 있다. 구면 광학계에서 Seidel 3차 수차계수는 광학면에서 주변광선에 대한 근축 입사고 h_j , 근축각 u_j , 굴절률변량 A_j , 그리고 주광선에 대한 근축 입사고 h^p_j , 굴절률변량 B_j 들로 다음과 같이 표현된다.^[8]

구면수차	$S_I = \sum_j A_j^2 h_j \Delta(u/n),$
코 마	$S_{II} = \sum_j A_j B_j h_j \Delta(u/n),$
비점수차	$S_{III} = \sum_j B_j^2 h_j \Delta(u/n),$
Petzval 상면만곡	$S_{IV} = H^2 \sum_j \frac{1}{n_j} = H^2 P$
왜곡수차	$S_V = \sum_j (B_j/A_j) [H^2 P_j + B_j^2 h_j \Delta(u/n)]$

단, P 는 Petzval sum $P = \sum b_j = -\sum c_j \Delta(1/n)_j$

H 는 Larange 굴절불변량 $H = Bh - Ah^p$

4-구면 반사광학계의 Seidel 수차계수를 구하기 위하여 제 3면에 조리개가 존재한다고 가정하고, 수차계수와 배율을 Gauss 괄호^[9]를 사용하여 표현하면 다음 식과 같이 표현된다(Fig. 1 참조).

$$S_I = -2u_o^4(X - c_1 g_7^2 a_4^2) \tag{1}$$

$$S_{II} = -2\beta u_o^4(Y - c_1 g_7^2 a_4 b_4) \tag{2}$$

$$S_{III} = -2\beta^2 u_o^2(Z - c_1 g_7^2 b_4^2) \tag{3}$$

$$S_{IV} = -2H^2(c_1 - c_2 + c_3 - c_4) \tag{4}$$

$$S_V = 2\beta^2 u_o [W - c_1 b_4 (g_5^2 - b_4^2 g_7^2) / a_4] \tag{5}$$

$$M = 1/m = 1/[d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4] \tag{6}$$

여기서

$$X = c_1 a_1^2 g_1^2 - c_2 a_2^2 g_3^2 + c_3 a_3^2 g_5^2,$$

$$Y = c_1 a_1 b_1 g_1^2 - c_2 a_2 b_2 g_3^2 + c_3 a_3 b_3 g_5^2,$$

$$Z = c_1 a_1^2 g_1^2 - c_2 a_2^2 g_3^2 + c_3 a_3^2 g_5^2,$$

$$W = c_1 b_1 (g_5^2 - b_1^2 g_1^2) / a_1 - c_2 b_2 (g_5^2 - b_2^2 g_3^2) / a_2 \text{ 이고,}$$

$$g_1 = [d_o],$$

$$g_3 = [d_o, 2c_1, -d_1]$$

$$g_5 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2],$$

$$g_7 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3],$$

$$a_1 = [d_o, c_1],$$

$$a_2 = [d_o, 2c_1, -d_1, -c_2],$$

$$a_3 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, c_3],$$

$$a_4 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -c_4],$$

$$b_1 = [c_1, -d_1, -2c_3, d_2],$$

$$b_2 = [-c_2, d_2],$$

$$b_3 = 1,$$

$$b_4 = [-d_3, -c_4] \text{ 이다.}$$

식에서 H 는 Lagrange invariant, []는 Gauss 괄호이고 X, Y, Z, W 는 d_3, c_4 에 무관한 함수이다. 따라서 anastigmatic, distortion free system이 되기 위해서는 식 (1), (2), (3)과 (5)의 계수가 동시에 zero이 되어야 한다. 일정한 축소 배율을 갖고 구면수차가 zero이 될 조건으로부터 아래와 같은 설계변수 c_4, d_3 를 구할 수 있다.

$$c_4 = a_4^2 (g_6 - m)^2 / 4X \tag{7}$$

$$d_3 = (m - g_6 + 2c_1 g_5) / 2c_1 g_6 \tag{8}$$

여기서

$$g_4 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2],$$

$$g_6 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3] = 2c_3 g_5 + g_4 \text{ 이다.}$$

또한 구면수차가 zero일때 코마수차가 zero일 조건으로부터 $a_4 Y = b_4 X$ 를 얻을 수 있고, 계산을 통하여 c_3 이하의 변수(d_o, c_1, d_1, c_2, d_2)로 정리하면 다음과 같은 식의 방정식을 구할 수 있다.

$$q_1 c_3^2 + q_2 c_3 + q_3 = 0 \tag{9}$$

여기서

$$q_1 = 4(g_4 - m)g_5^2$$

$$q_2 = 2(3g_4^2 - m^2 - 2mg_4)g_5^2 - 16Yg_5,$$

$$q_3 = 8(X - g_4 Y) + (g_4^3 + m^3 - m^2 g_4 - mg_4^2)g_5 \text{ 이고,}$$

$$X_1 = c_1 a_1^2 g_1^2 - c_2 a_2^2 g_3^2,$$

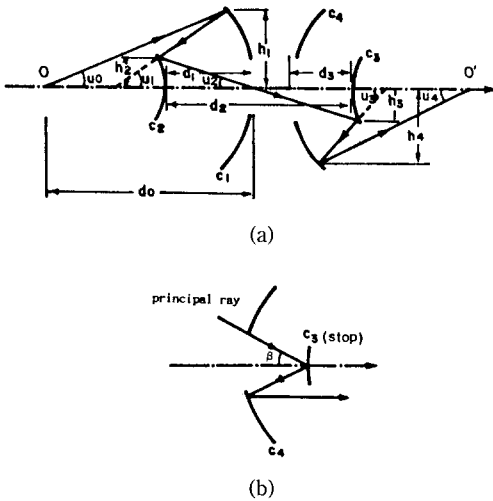


Fig. 1. (a) Typical configuration of the four-spherical-mirror system with Cassegrainian-inverse Cassegrainian system and (b) the path of principal ray on the stop.

$$Y_1 = c_1 a_1 b g_1^2 - c_2 a_2 b g_3^2,$$

$$Z_1 = c_1 b_1^2 g_1^2 - c_2 b_2^2 g_3^2$$

이다.

또한 구면수차, 코마수차가 zero일때 비점수차가 zero가 되기 위해서는 다음 식을 만족 시켜야 한다.

$$XZ - Y^2 = 0 \tag{10}$$

X, Y, Z는 각각 설계변수 $d_0, c_1, d_1, c_2, d_2, c_3$ 의 함수이므로 식 (10)를 c_3 에 대하여 정리하면

$$s_1 c_3^3 + s_2 c_3^2 + s_3 c_3 + s_4 = 0 \tag{11}$$

이 되고,

$$s_1 = g_5^4 Z_1,$$

$$s_2 = 2(Z_1 g_4 - Y_1) g_5^3,$$

$$s_3 = (X_1 + Z_1 g_4^2 - 2Y_1 g_4) g_5^2,$$

$$s_4 = X_1 Z_1 - Y_1^2 \text{이다.}$$

마지막으로 구면수차, 코마수차, 비점수차가 zero 일때 왜곡수차가 zero이되기 위해서는

$$W = (c_3 g_5^2 Y - YZ) / X \tag{12}$$

을 만족해야 한다.

식 (9)와 (11)을 연립하여 c_3 에 대하여 풀면

$$c_3 = [q_3(q_1 s_2 - q_2 s_1) - q_1^2 s_4] / [q_1(q_1 s_3 - q_2 s_1) - q_2(q_1 s_2 - q_2 s_1)] \tag{13}$$

이다.

여기서 $q_i, s_i (i=1,2,3,4)$ 는 설계변수 d_0, c_1, d_1, c_2, d_2 의 함수이다. 따라서 일정한 배율(=1/m)을 갖고, anastigmatic, zero-distortion 조건을 만족시키는 4-구면 반사 광학계는 식 (7), (8), (9), (11), (12)을 동시에 만족하며, 식 (7), (8), (9), (11), (12)을 만족하는 광학계는 anastigmatic, zero-distortion 조건을 만족한다. 우선 식 (13), (8), (7)로 부터 연차적으로 설계변수 c_3, d_0, c_4 에 대한 값을 쉽게 구할 수 있으나, 식 (9), (12)를 동시에 만족하도록 설계변수, c_2, d_2 의 값을 구하는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 2개 이상의 고차 연립 방정식의 해를 구하는 데는 optimization 기법이 적절하므로^[10] 본 논문에서는 식 (9)와 식 (12)으로 주어지는 연립 방정식의 해를 optimization 기법으로 computer를 이용하여 구하였다.

III. Anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면 반사경계의 수치해석

8개의 설계변수중 임의의 값 d_0, c_1, d_1 에 대해 식 (7), (8), (9), (11), (12)을 만족 하도록 설계변수 c_2, d_2, c_3, d_3, c_4 를 결정하며 4-구면 반사경계는 일정한 배율 M를 갖고, anastigmatic, distortion-free 조건을 만족한다. 4-구면 반사광학계를 다룰때 아무런 제한조건 없이 광학계를 조사하는 것은 어려운 일이며, 물리적으로 타당한 범위만을 정하여 조사해야 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 제한조건에 대하여 anastigmatic, distortion-free 4-구면 반사광학계의 존재 범위를 조사 하였다.

광학계의 배율은 5×이며, 이것은 물체의 크기를 1/5로 축소 하여 상면에 결상 시키는 광학계로서 식 (6)에서 $M = +1/5$ 즉 $m = +5$ 에 해당된다.

제 1반사면의 곡률 $c_1 = -1$ 로 정하여 그 크기로 광학계의 크기를 규격화 하였다.

물점과 제 1면 사이의 거리 d_0 는 $2 < d_0 < 8$ 사이에서 0.05 간격으로 해를 조사 하였으며, $-0.4 < d_1 < -0.15$ 범위에서 0.005 간격으로 조사 하였다. 또한 실질적인 광학계가 구성될 수 있는 $d_2 > |d_1|, d_3 < 0$ 인 수렴계만 선택 하였다. 그 결과 anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면 반사광학계가 존재 하는 범위를 $c_1 = -1$ 일때 변수 d_0, d_1 에 대하여 그림 2(a)에 나타내었다. 실제로 그림 1(a)에 나타난 영역은 모두 cassegrainian-inverse cassegrainian형 반사광학계 이다. 그림 2(b)는 상면만곡수차가 각각의 d_0 값에 대한 제 1면과 제 2면 사이의 거리변수 d_1 에 대해 어떻게 변화하는가를 도식적으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면 반사 광학계는 변수 d_0, d_1 의 모든 값에 대하여 상면곡 수차가 보정되지 못한다. 그림 2(c)는 4-구면 반사광학계에서 제 1면과 제 4면 사이의 거리 $th (= d_1 + d_2 + d_3)$ 와 거리변수 d_1 과의 관계를 나타내고 있으며, $th < 0$ 인 경우는 제 2면과 제 3면 사이에 folding mirror를 사용하여 광선의 경로를 꺾어 주어야 하므로 전반 2반사경과 후반 2반사경은 동일한 광축을 갖지 않는다. 이러한 광학계는 vignetting 및 alignment에서 취약점을 가지므로 본 연구에서는 $th < 0$ 인 경우는 제외시켰다. 그림 2(d)는 제 1면의 입사고에 대한 제 4면의 입사고의 비 $|h_4/h_1|$ 를 나타낸 것이다. 광학계를 구성하는 광학면 중에서 다른 면에 비하여 한면에서 광선의 입사고가 지나치게 높으면 광학계는 대개 고차 구면수차의 영향을 크게 받는다.

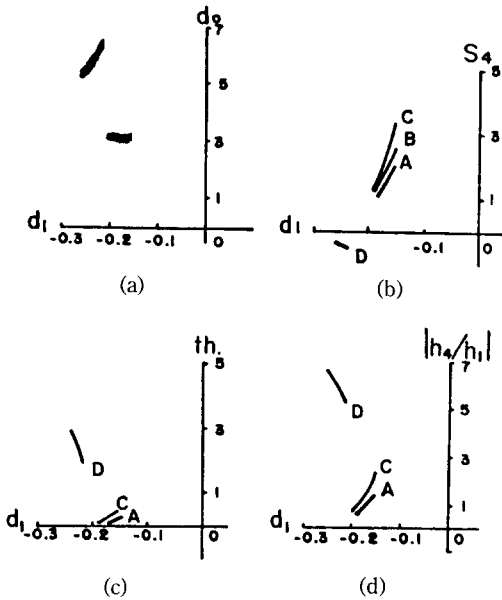


Fig. 2. Analysis of the distortion free, anastigmatic four-spherical-mirror system with $c_1 = -1$. (a) Region where the useful systems exit. (b) Behavior of $S_4(S'PH^2)$, (c) Behaviors of $th(=d_1 + d_2 + d_3)$, and (d) Behavior of $|h_4/h_1|$ as a function of d_1 for given d_0 's. (A: $d_0=3.1$, B: $d_0=3.15$, C: $d_0=3.17$, D: $d_0=5.1\sim6.4$).

IV. Anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면반사광학계의 수차해석

Seidel 3차 수차이론에 의해 구한 anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면 반사 광학계는 damped least square method에 의한 최적화 과정을 통하여 성능을 향상 시킨다. 이렇게 해서 얻어진 4 반사광학계중 성능이 우수한 것을 선택하여 그 설계 자료를 표 1에 나타내었다. 표 1에 주어진 광학계는

Table 1. Design data of the normalized anastigmatism, distortion free four spherical mirror system with stop at third mirror surface. ($f' = -1.0$ cm)

Object	Mirror No.					
	En. Pupil	I	II	III	IV	
Curvature		-0.848133	-0.577962	0.037321	0.142945	
Distance	5.003000	1.474736	-0.279344	3.751559	-3.455021	8.432096

Table 2. Clear apertures and hole diameters of the mirrors for the four spherical mirror system given by Table 1(in cm)

	Mirror No.				
	En. Pupil	I	II	III	IV
Clear aperture	0.40	0.51	0.29	0.45	3.31
Hole diameter	0.00	0.33	0.00	0.00	2.45

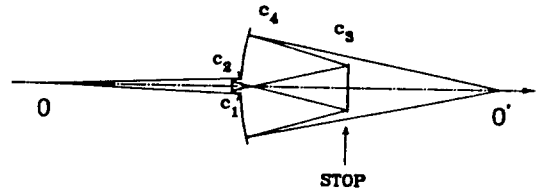


Fig. 3. Configuration of the normalized distortion free, anastigmatic four-spherical-mirror system. The stop of the system lies at the third mirror surface. ($f' = -1.0$ cm).

초점거리 $f' = -1$ cm에 대해 규격화 되었으며, 최적 상면에서 N.A.(numerical aperture)가 0.2이고, 반사계각이 1.5° 이다. 표 2는 각 반사면에서의 clear apertures와 hole diameter를 나타내고 있다. 그림 3은 표 1에서 주어진 광학계의 실물 형태를 축소하여 그린것으로 축상 물질을 출발하여 조리개의 가장자리를 스치는 주변광선을 광선추적하여 나타낸것으로 광축에 대하여 대칭이 되도록 그린것이다. 그리고 그림 4(a)~(d)는 KrF excimer laser과장(248 nm)에서 anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면 반사광학계의 유한광선 수차 특성을 나타내었는데 그림에서 볼 수 있듯이 N.A. 및 반사계각이 각각 0.2, 1.5° 이내에서 구면수차, 코마, 비점수차 및 왜곡수차가 충분히 보정되어 있다. 그림 4(e)는 상공간에서의 주광선의 방향여현(L_{pr}' , M_{pr}' , N_{pr}')중에서 y축 방향여현(M_{pr}')을 나타낸 것인데 $M_{pr}' = 0$ 이면 주광선

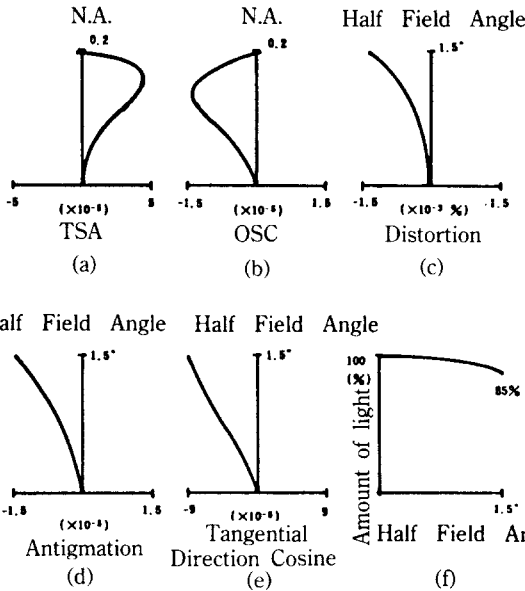


Fig. 4. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations (e) tangential direction cosine of principal ray in image space, and (f) relative amount of light in image plane. (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offense against sine condition).

은 상공간에서 광축에 평행하게 진행하게 되어 완벽한 telecentric optical system이 된다. 실제로 본 광학계는 최대 $|M_{pr}'|$ 값이 9×10^{-5} 정도로 작으므로 충분히 telecentric condition을 만족 시킨다. 그림 4 (f)는 상면에 대한 강도 분포의 균일성(illumination uniformity)에 관계되는 양으로서 축상 물점에서 출발한 광선들에 대한 비축 물점에서 나온 광선들이 상면에 도달하는 광선의 수의 비를 나타낸 것으로 최대 반시계각 1.5° 에서는 약 85% 정도가 도달된다. 그리고 그림 5은 표 1에서 주어진 광학계와 표 2에서 주어진 각 반사면의 clear aperture와 hole diameters (1면과 4면의 구멍)에 대하여 상면에서의 광학계의 spot diagrams이다. 이 그림은 최적 상면에서 반시계각이 $0^\circ, 1.0^\circ, 1.5^\circ$ 에 대하여 $1 \mu\text{m}$ 간격으로 상면을 전후로 이동시켰을 경우의 각각에 해당하는 spots을 보여 주고 있으며, 그림 5에 나타낸 원은 248 nm 파장을 갖는 KrF excimer laser에 대한 Airy disk의 크기(반경 $0.76 \mu\text{m}$)이고, spot들이 Airy disk원 이내로 들어오므로 DOF(depth of focus) $4 \mu\text{m}$ 이내에서

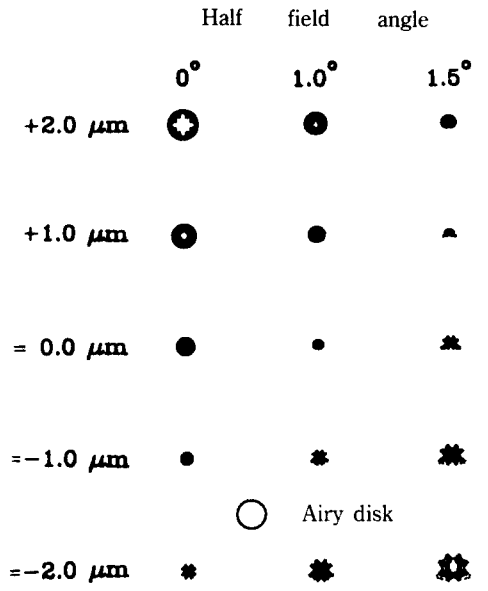


Fig. 5. Spot diagrams of the four-spherical-mirror system normalized to $f = -1.0 \text{ cm}$ for three field angles at five defocused image positions. The circle shows the Airy disk size(radius $R=0.76 \mu\text{m}$) for KrF excimer laser beam ($\lambda=248 \text{ nm}$).

본 광학계는 회절 한계의 성능을 갖는다. 이상을 종합해 볼 때 4-구면 반사광학계는 N.A.와 half field angle이 각각 0.2, 1.5° 이며, DOF는 $4 \mu\text{m}$ 이고 KrF excimer laser 광원에 대해 회절 한계 이내로 수차가 보정되어 있다.

V. 결 론

Anastigmatic, distortion-free 조건을 만족하는 4-구면 반사광학계를 Seidel 3차 수차 내에서 해석적으로 다루고, 그 수치해를 구하였다. 또한 잔류수차를 제거하기 위하여 최적화 기법을 이용하여 N.A. 0.2와 half field angle 1.5° 이내에서 모든 수차를 회절한계 이내로 제거 하였다. 반사경을 이용한 결상계는 단파장화 하여도 색수차를 고려할 필요가 없는 유용한 결상계 이므로 본 광학계는 고분해능을 요구하는 Micro-lithography용 광학계 설계의 초석이 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Rosin, *Appl. Opt.* **7**, 1482 (1968).
- [2] C. G. Wymann, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 572 (1969).
- [3] O. N. Stavroudis, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**, 741 (1967).
- [4] D. R. Shafer, *Appl. Opt.*, **17**, 1072 (1978).
- [5] A. Offner, *Opt. Eng.*, **14**, 130 (1975).
- [6] M. V. R. K. Murty, *Opt. Eng.*, **14**, 326 (1985).
- [7] S. C. Park and S. S. Lee, *Proc. of SPIE*, 1319, 633 (1990).
- [8] H. H. Hopkins, *Wave Theory of Aberrations*, (Clarendon Pres, Oxford, 1950).
- [9] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics*, (Interscience Pub, New York, 1958).
- [10] 박성찬, 박사학위 청구논문, UV Submicron Lithography를 위한 4반사 광학계의 설계 및 수차해석, 한국과학기술원, 서울 (1991).

**Design and Aberration Analysis of Four-Spherical Mirror System
Corrected for 4 Aberrations**

Jong Tae Kim, Hong Jin Kong and Sang Soo Lee
Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received: August 2, 1991)

We have obtained the analytic solutions of the four spherical mirror system free from the Seidel third order aberrations which are spherical aberration, coma, astigmatism, and distortion, Vignetting, Petzval field curvature, and optical properties according to the design parameters are numerically investigated and optimized. The numerical aperture of this system is 0.2 and the half field angle is 1.5° .