

모든 3차 수차를 영으로 하고 Central Obscuration이 최소화된 극자외선 리소그라피용 5-반사광학계

이동희 · 이상수

한국과학기술원 물리학과

(1993년 11월 24일 받음)

축소배율($M = +1/5$)을 갖는 극자외선(deep ultra-violet) 리소그라피용 5-반사광학계를 설계하였다. 우선 모든 3차 수차를 영으로 하는 수치적인 해를 반사경이 구면인 경우에 대해서 구하였다. 이렇게 하여 구한 3차원적인 분포를 하는 해의 영역에서 잔류수차량과 MTF에 큰 영향을 주는 central obscuration이 될 수 있는 한 적은 해들을 선택하여 마지막 두 반사경을 비구면화 하였다. 이 중 최종적인 해로서 선택한 것은 central obscuration이 약 25%이고 광원을 ArF 엑시머 레이저(파장 $0.193 \mu\text{m}$)로 하는 nearly incoherent illumination($\sigma = 1$)인 경우 NA가 0.45이며 분해능이 50% MTF 기준치와 초점심도 $0.8 \mu\text{m}$ 에 대해 약 650 cycles/mm 정도인 성능을 갖는 시스템이 되었다.

I. 서 론

현재 투영 리소그라피 광학계에서는 보다 높은 해상력을 얻기위한 시도가 꾸준히 전개되고 있다. 이러한 방법으로는 투영렌즈의 개량에 의한 렌즈의 고 NA(numerical aperture)화, 광원의 단파장화 그리고 다층레지스터(Multilayer Resist: MLR) 사용, 콘트라스터 보강층(Contrast Enhancement Layer: CEL) 및 고 γ 레지스터의 사용에 의한 공정상수(k_1)의 감소에 의한 고해상력화 등이 있다.^[1-4] 특히 $0.248 \mu\text{m}$ (KrF) 또는 $0.193 \mu\text{m}$ (ArF)의 엑시머 레이저 파장 및 soft X-ray으로의 단파장화에 의한 고해상력화에 있어서는 굴절광학계는 매질의 광흡수, 광분산에 의한 광투과율 감소, 색수차 등에 의한 문제로 한계를 가지게 된다. 이러한 문제점은 반사광학계에서는 쉽게 극복되어진다.

투영 축소 노광 반사광학계에 대해서 본 연구실에서 많은 연구가 있었다.^[5-8] 축소배율($M = +1/5$)을 가지면서 Cassegrainian inverse Cassegrainian 형상으로 구성되는 4-반사광학계들이었는데 5개의 3차수차 중에서 4개를 영으로 하는 수치적인 해에서 출발하여 비구면화 되어졌다. 이들의 NA는 0.25~0.38 정도로 비교적 작고, 반사광학계의 큰 결점으로 인식되고 있는 central obscuration에 대한 고려가 미비하였다.

본 연구에서는 4-반사광학계의 작은 NA를 극복하기 위해 5-반사광학계를 제안하였다. 반사경의 증가로 늘어

난 설계변수에 의해 모든 3차수차가 제거된 수치적인 해와 이들의 3차원적인($d_0-d_1-c_2$) 영역의 분포를 구할 수 있었다. 이들 중 잔류수차량과 MTF에 영향을 주는 central obscuration이 적은 해들을 선택해서, 고 NA화를 위하여 마지막 두 반사경에 대하여 비구면화를 하였다. 이와같이 하여 최종적으로 결정된 축소배율 $M = +1/5$ 를 갖는 5-반사광학계는 NA: 0.45, object field diameter: 26 mm, 초점심도: $0.8 \mu\text{m}$ 이내에서 nearly incoherent illumination($\sigma = 1$)^[9-11]의 $0.193 \mu\text{m}$ (ArF 엑시머 레이저) 파장의 광원에 대해 MTF 50%의 기준^[12]에서 분해능 약 650 cycles/mm을 갖게 되었고 central obscuration은 약 25% 정도이었다. 여기서 σ 는 projection system에서 stop위에 맺힌 조명광원의 반경과 projection system의 stop의 반경의 비로 정의된다.^[9-11]

II. 모든 3차 수차가 제거된 5-구면 반사광학계에 대한 해법

그림 1(a)은 5-반사광학계를 나타낸다. 여기서 조리개(aperture stop)은 4번째 반사경에 있고 주광선(principal ray)은 이 조리개에서 광축과 각 β 를 이룬다. 여기서 주어지는 조건은 축소배율 $M = +1/5$ 를 가지며 모든 3차수차($S_i, i = I, II, III, IV, V$)^[13]가 영인 것이다. 따라서 배율 조건과 수차계수식에 의한 필요한 연립방정식은 Gaussian 괄호($[]$)^[14]를 사용하여 설계변수 c_i, d_{i-1} ($i = 1,$

2, 3, 4, 5)로 표현하면 다음과 같다.

$$S_I = 2u_0^4 \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i g_{2i-1}^2 a_i^2 = 0, \quad (1)$$

$$S_{II} = 2u_0^3 \beta \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i g_{2i-1}^2 a_i b_i = 0, \quad (2)$$

$$S_{III} = 2u_0^2 \beta^2 \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i g_{2i-1}^2 b_i^2 = 0, \quad (3)$$

$$S_{IV} = -2u_0^2 \beta^2 g_0^4 \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i = 0, \quad (4)$$

$$S_V = 2u_0 \beta^3 \sum_{i=1}^5 (-1)^i [c_i g_{2i-1}^2 b_i^3 / a_i - c_i g_7^2 b_i / a_i] = 0, \quad (5)$$

$$M = 1/g_{10} = 1/5, \quad (6)$$

단

$$\begin{aligned} g_1 &= [d_0], \\ g_3 &= [d_0, 2c_1, -d_1], \\ g_5 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2], \\ g_7 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ g_8 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4], \\ g_9 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4], \\ g_{10} &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4, 2c_5]. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= [d_0, c_1], \\ a_2 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -c_2], \\ a_3 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, c_3], \\ a_4 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -c_4], \\ a_5 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4, c_5]. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= [c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ b_2 &= [-c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ b_3 &= [c_3, -d_3], \\ b_4 &= 1, \\ b_5 &= [d_4, c_5]. \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 c_i 는 각 반사경의 곡률(curvature)이고, d_i 는 각 반사경 사이의 거리이다(그림 1(a)). u_0 는 초기 근축 광선(initial paraxial ray)의 초기 근축각이고, β 는 주광선(principal ray)이 물체점(object point)에서 출발할 때 조리개 위치에서 광축과 이루는 각도이다. Petzval sum이 영인 조건인 식 (4)를 다시 적어보면,

$$c_5 = -c_1 + c_2 - c_3 + c_4, \quad (10)$$

이고, 식 (6)을 정리하면

$$d_4 = \frac{M^{-1} - 2c_5 g_7 - g_8}{2c_5 g_8} \quad (11)$$

이 된다. 따라서 원하는 5-구면 반사경계는 식(1), (2), (3), (5), (10), (11)을 연립하여 풀면 구할 수가 있다.

III. 5-구면 반사광학계의 수치 해와 Modulation Transfer Function(MTF)

5-구면 반사광학계는 10개의 설계변수를 가진다. 전 장의 연립방정식 6개에 의해 4개의 자유변수가 남겨지게 되나 전체 시스템의 scaling을 위해 $c_1 = -1$ 로 두면 결국 자유변수는 3개로 둘 수 있다. 이 세 자유변수를 d_0, d_1, c_2 로 하여 본 논문을 진행시키고자 한다. c_1 의 부호가 마이너스인 것은 5-구면 반사경계의 전반부 두 반사경이 Cassegrainian계 또는 Gregorian계임을 나타낸다. d_0, d_1, c_2 좌표계에서 수치적인 해의 영역을 나타내기 위해서는 전 장에 주어진 6개의 연립방정식을 순차적으로 주어지는 d_0, d_1, c_2 에 대하여 optimization기법^[16]으로 프로그래밍 되어진 컴퓨터 계산에 의해 연립으로 풀어야 한다. 6개의 연립방정식을 푸는데 필요한 알고리즘은 그림 2에 나와 있다. 이 때 주어진 d_0, d_1, c_2 에서 해가 존재하게 되면 d_0, d_1, c_2 좌표계에 해의 영역으로 기록되어지게 된다. 그러나 실용적인 5-구면 반사경계이기 위해서는 다음의 여러가지 조건들이 부과되어야 한다.

$$\begin{aligned} (1) \quad & d_1 < 0, \quad d_3 < 0, \quad d_2 > 0, \quad d_4 > |d_3|, \quad d_1 + d_2 + d_3 > -d_0, \\ & \frac{|d_5|}{2} < d_4 + d_3. \end{aligned}$$

(2) $vig_1 < 0.7, \quad vig_2 < 0.7$. 여기서 vig_1 은 2번째 반사경에 의한 1번째 반사경에서의, vig_2 는 3번째 반사경에 의한 4번째 반사경에서의, central obscuration을 나타내고 있는데, object의 광축상으로부터의 광선 중 $(vig_i)^2 \times 100\%$ ($i=1, 2$) 만큼의 광선이 막힘을 뜻하는데 이 vig_1 와 vig_2 는 해를 얻는 과정 중에서 실제적인 광선추적에 의해 결정하게 된다.

(3) $h_1 < h_2$ (단 $t = d_1 + d_2 + d_3 < 0$ 인 경우에 한함). 이는 3번째와 4번째 반사경을 지나는 ray들이 1번째 반사경에 의해 막히지 않아야 함을 뜻한다. 여기서 h_1 은 c_1 의 가장자리를 입사하면서 스쳐지나가는 Ray-A의 높이이고, h_2 는 3번째 반사경에서 4번째 반사경을 지나갈 때 h_1 의 높이를 켄 위치에서의 Ray-B의 높이를 나타낸다(그림 1(b)참조). Ray-A는 광축상의 object를 출발한 광선중 입사동의 가장자리(full-margin)를 진행하는 광선을, Ray-B는 입사동의 0.7가장자리(0.7 margin)를 진행하는 광선

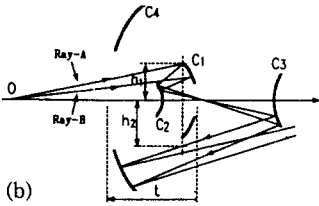
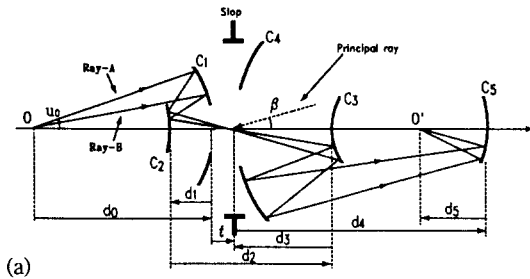


그림 1. (a) Typical configuration of a five spherical mirror system with a stop at the vertex of the fourth mirror surface. (b) In case of $t < 0$, the relation between h_1 and h_2 . (Ray-A, Ray-B: the rays from the axial object point through the full margin of the entrance pupil and through the 0.7 margin of the entrance pupil, respectively).

을 의미한다.

이러한 조건에 의하여 얻은 결과가 그림 3에 나타나 있다. 그림 3(a)는 존재하는 원하는 5구면 반사경계의 해의 영역을 c_2-d_1 좌표계에서 나타내고 있고, (b)는 d_0-d_1 좌표계에서, (c)는 d_0-c_2 좌표계에서 나타내고 있다. 모든 해의 앞의 4개의 반사경은 모두 Cassegrainian inverse Cassegrainian 형태를 나타낸다. 그림 3(b), (c)에서 I-그룹 II-그룹으로 해의 영역이 구분되는데 시스템의 NA를 0.4 초점거리(f)를 -100 mm로 했을 때 I-그룹에서는 잔류 5차 구면수차량이 약 $-223 \sim 30 \mu\text{m}$ 의 범위를 가지고 있으며, II-그룹은 약 $33 \sim 2700 \mu\text{m}$ 의 범위를 가지고 있다. 특히 I-그룹의 오른쪽 넓은 부분에서는 잔류 5차 구면수차량의 값의 부호가 바뀌고 있기 때문에 5차 구면수차까지를 영으로 하는 5구면 반사경계의 수치적인 해를 얻을 수 있을 가능성이 있다고 하겠다. 이들 중에서 활용 가능한 시스템이 되기 위한 여러가지 조건들을 다시 고려한 적절한 해들을 선택하여 보다 높은 분해능을 가지기 위한 최적화 작업을 하여야 한다. 여기서 고려한 부가적인 조건에는 전체 시스템의 크기가 200 cm를 넘지 않을 것, 가장 큰 반사경의 반경 크기가 50 cm를 넘지 않을 것, vig_1 또는 vig_2 가 작을 것 등이 있다. central obscuration과 관련이 있는 vig_1 , vig_2 는 분해능을 결정

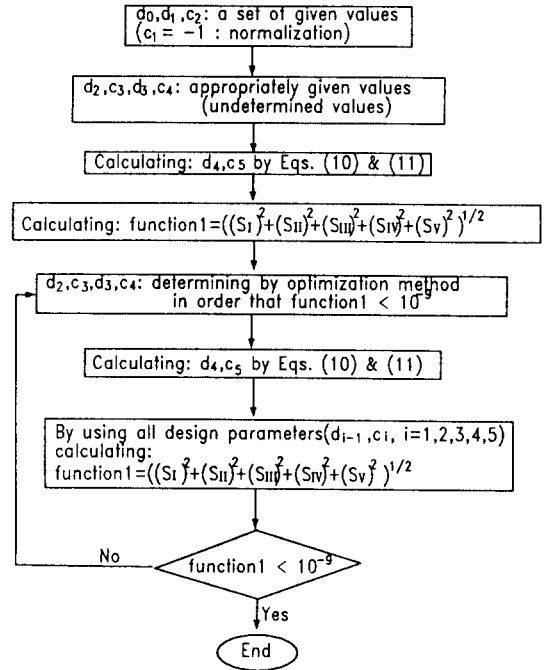


그림 2. Flow chart for solving the simultaneous equations of five spherical mirror systems.

하는데 매우 중요한 요소로 작용하게 된다. 그림 4에는 우리 시스템에서의 vig_i 값에 따르는 MTF(modulation transfer function) 값의 분포를 coherence factor(σ) 1.0에서 보여주고 있다.^[9,10] 여기서 우리는 central obscuration이 클수록 분해능이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 central obscuration이 분해능을 결정하는데 중요한 요소로 작용함을 알 수 있으며 이에 따라 우리는 무엇보다도 $vig_i (i=1,2)$ 가 작은 해를 초기해로서 선택하였다. 그림 5에는 이렇게 하여 선택된 많은 해 중에서 비구면화에 의해 최종적인 시스템으로 선택되는 해의 초기해로서 NA: 0.4, f : -100 mm, object-field-size: 26 mm의 조건에서의 잔류 유향광선 수차를 나타내고 있는데, 이는 그림 3의 A ($d_0=2.2$, $d_1=-0.39$, $c_2=-0.85$)에 위치하고 있고, central obscuration이 약 25% ($vig_1=0.50$, $vig_2=0.49$)인 해로서 비교적 $vig_i (i=1,2)$ 가 작은 해이다. 다음장에서 기술할 최종적인 해는 이 'A'를 초기해로 하여 얻은 것이 된다. 그림 5(a)는 5차 이상의 잔류 구면수차에 의한 잔류 구면수차가 $120 \mu\text{m}$ 정도로 남아있음을 보여주고 있다. 또한 잔류 코마도 아직 꽤 남아있다. 그러나 왜곡수차는 full-field에서 0.2 nm 정도인데 이는 리소그라피 광학에서의 요구를 충분히 만족시킬 정도로 작다.^[16,17] Astigmatism도 full-field에서 $0.02 \mu\text{m}$ 정도로 충분히

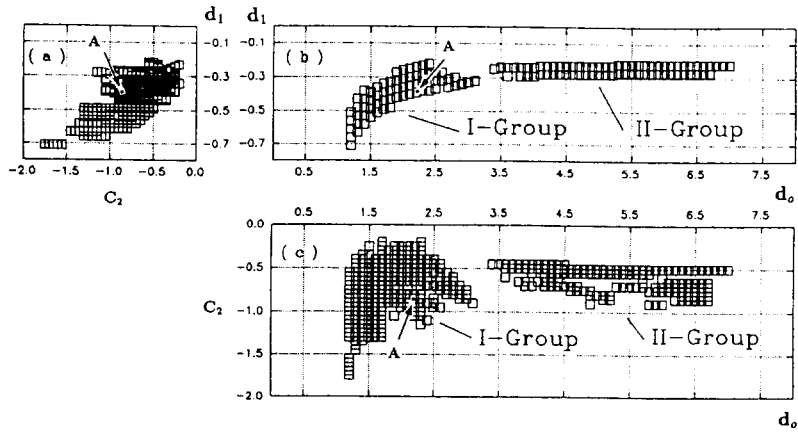


그림 3. Lateral views of the 3-dimensional solution domain for the five spherical mirror systems which are free from all third order aberrations ((a): d_1 - c_2 domain, (b): d_0 - d_1 domain, (c): d_0 - c_2 domain).

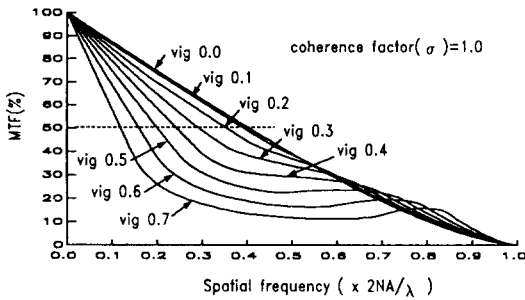


그림 4. Theoretical MTF according to various central obscurations ($vig=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ and 0.7) at the coherence factor $\sigma=1.0$.

작다. 이러한 경향은 그림 3의 I-그룹의 모든 영역의 해가 공통적으로 가지는 특징이다. 그러므로 보다 높은 NA를 가지는 5반사광학계를 위해선 잔류구면 수차와 코마의 제거가 필요하다.

IV. 비구면화에 의한 잔류 고차 수차 보정

비구면의 표현은 다음과 같다.

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2 y^2}} + a_4 y^4 + a_6 y^6 + a_8 y^8 + a_{10} y^{10} + \dots \quad (12)$$

여기서 y 는 주변 광선(marginal ray)의 입사고, c 는 각 반사경의 곡률, a_i ($i=4, 6, 8, 10$)는 접구면으로부터의 변형을 표현하는 비구면 계수이다. 전장의 활용가능한 시스템이기 위한 부과조건이 고려된 여러해에 대해서

여러가지 경우의 조합에 의해 반사경의 비구면화를 시도하였으나 4번째와 5번째 면의 비구면화가 가장 잔류 수차의 제거에 효과적이었음을 알 수 있었다. 4번째면은 잔류 구면수차의 제거에 아주 효과적이었는데 이는 조리개가 위치한 면의 비구면화는 구면수차에의 영향이 제일 크다는 사실과 관계가 있다. 5번째면의 비구면화는 잔류 코마의 제거에 아주 효과적이었다. 이들 4, 5번째의 면의 비구면화로 다른 수차에의 영향은 별로 없었다는 것 또한 이들 면에의 비구면화를 선택한 이유가 된다. 비구면화는 감쇠 최소 자승법을 이용한 optimization 기법^[18,19]으로 이행하였다. 이 optimization 과정에서 우리는 전장에 기술된 활용가능한 시스템이 되기위한 조건을 성립시키는 것과 더불어 광축상의 object의 시스템 투과 광선들에 대한 비광축상의 object에서의 시스템 투과 광선들의 비(ratio)를 75% 이상으로 하고, 잔류 수차량이 될 수 있으면 작게되는 시스템을 구하도록 하였다. 이러한 조건을 충족시키는 최적 시스템은 그림 3의 'A'의 해의 비구면화에 의해 얻을 수 있었다. 마지막으로 상 공간의 telecentricity를 만족하기 위해 시스템의 조리개를 제 1초점점으로 이동하였다. 그림 6에는 이렇게 하여 구한 최종적인 비구면 5반사광학계를 보여주고 있다. 여기서 두 axial ray(full marginal, 0.50 marginal)의 경로도 함께 보이고 있다. 비구면화 하기 전후의 이 시스템에 대한 data가 표 1, 2에 나타나 있고, 구성 반사경의 clear aperture와 hole diameter의 data가 표 3에 나타나 있다. 그림 7은 잔류 유향광선 수차를 보여주고 있다. NA 0.45에서 구면수차는 $0.20 \mu m$ 정도[그림 7(a)]로 상당히 작다. 0.45의 NA는 ArF 엑시머 레이저의 193 nm의

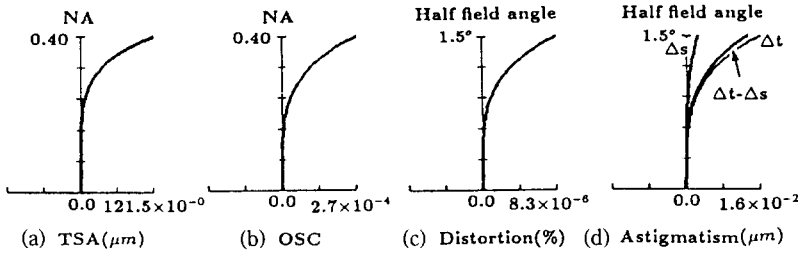


그림 5. (a), (b), (c) and (d) are the residual finite ray aberrations of the five spherical mirror system A in Fig. 3 with the focal length of -100 mm and the full object field size of 26 mm for ArF excimer laser beam (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offence against sine condition, Δt : tangential ray aberration, Δs : sagittal ray aberration, and astigmatism: $\Delta t - \Delta s$).

과장에 대해서 $0.26 \mu\text{m}$ 의 Airy disk에 해당한다. 시계각 (field angle)은 3° 정도인데 이는 초점거리 -100 mm에 대해 object field diameter가 26.2 mm 정도에 해당한다. 이 시스템의 왜곡수차량은 full field에서 약 0.3 nm 정도이다[그림 7(c)]. 상공간에서의 광축에 대한 주광선의 방향 cosine은 2.1×10^{-5} [그림 7(e)]인데 충분히 telecentric하다고 할 수 있다. 그림 7(f)는 전 시계각에 따라 광학계를 투과하는 광선들의 상대적인 광량비(시계각이 0.00 인 경우의 광량을 100% 로 할 때)를 도시한 것인데 full field에서 약 76.4% 정도이다. 그림 8은 반시계각(half field angle) 0.0° , 1.0° , 1.5° 인 경우에 대하여 최적상면에서 전후로 $0.20 \mu\text{m}$ 간격으로 상면을 이동시켰을 경우(5개의 defocused image position)의 spot diagram을 보여주고 있다. 이것은 대부분의 ray들이 $0.8 \mu\text{m}$ 의 초점 심도에 대하여 $0.26 \mu\text{m}$ 의 Airy disk의 원안으로 들어가고 있음을 보여주고 있다. 이 그림에서 원들은 ArF 엑시머 레이저 파장($\lambda = 0.193 \mu\text{m}$)에 대한 Airy disk(반경: $0.26 \mu\text{m}$)을 나타낸다. 그림 9은 이 시스템의 최적상면에서의 nearly incoherent illumination($\sigma = 1.0$)에 대한 MTF를 나타내고 있다. 여기서 우리는 초점심도 $0.8 \mu\text{m}$, 50% MTF criterion^[13]에 대해서 약 650 cycles/mm의 분해능을 가짐을 알 수 있다. 특히 축상 상점에 대해서는 회절한계의 성능을 가짐을 알 수 있고 최대의 분해능은 약 930 cycles/mm임을 알 수 있다.

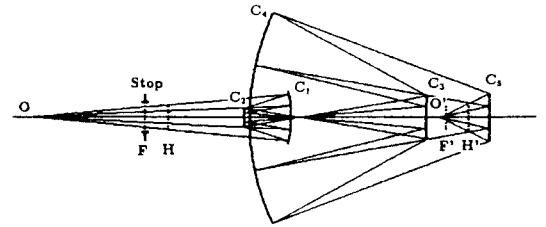


그림 6. Configuration of the aspherized five mirror system (c_4, c_5 are aspherical) of which NA is 0.45 , the system-length is 200 cm and the radius of the largest mirror is 46.55 cm. The stop of the system lies on the first focal plane. (F, F': 1st and 2nd focal plane, H, H': 1st and 2nd principal plane).

V. 결 론

본 논문에서는 모든 3차 수차를 영으로 하는 조건에서 배율 $+1/5$ 를 갖는 5구면 반사광학계에 대한 해를 구하였다. 이 해들의 $d_0-d_1-c_2$ 좌표 공간에서의 3차원 분포와 central obscuration 등 여러가지 특성들을 고려하여 하나의 해를 선택할 수 있었고, 유한광선 수차에 대한 최적화 기법에 의한 마지막 두 반사경의 비구면화와 조리개의 제 1초점면으로의 이동으로 상공간에서 충분히 telecentricity를 만족하고 최소의 잔류수차를 가지며 보

표 1. Initial spherical mirror design data before aspherization of the five spherical mirror system corresponding to the point A in Fig. 3, which is free from all third order aberrations with a stop at the vertex of fourth mirror surface ($f = -10$ cm).

	Object	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Curvature(cm^{-1})		-0.0193464	-0.0164445	0.0167380	0.0090408	-0.0047953
Distance(cm)	113.716142	-20.158771	78.648466	-76.431689	104.254390	

표 2. Design data of the aspherized five mirror system for ArF excimer laser line ($f' = -10$ cm).

	Object	Stop	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Curvature(cm ⁻²)			-0.0193464	-0.0164445	0.0167380	0.0090426	-0.0047953
Distance(cm)	49.999998	63.716133	-20.158769	78.648459	-76.431682	104.254380	

	Aspherical coefficients			
	a ₄ (cm ⁻³)	a ₆ (cm ⁻⁵)	a ₈ (cm ⁻⁷)	a ₁₀ (cm ⁻⁹)
Fourth surface	9.416019 × 10 ⁻¹²	-7.325971 × 10 ⁻¹⁴	-9.426896 × 10 ⁻¹⁸	-3.278487 × 10 ⁻²¹
Fifth surface	-1.552337 × 10 ⁻⁹	-1.851210 × 10 ⁻¹⁰	4.204004 × 10 ⁻¹³	-5.549186 × 10 ⁻¹⁶

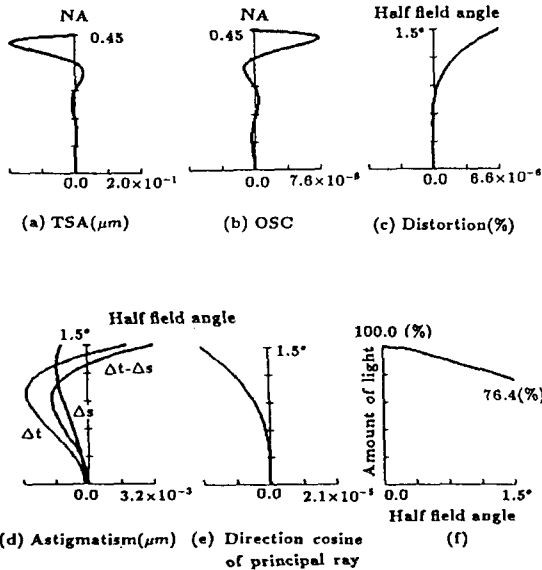


그림 7. (a), (b), (c) and (d) are the residual finite ray aberrations of the aspherized five mirror system with the focal length of -100 mm, the object-field-size of 26 mm and NA of 0.45 for ArF excimer laser beam, (e) is the direction cosine of principal ray in the image space, and (f) is the relative amount of light passing through the system. (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offence against sine condition, Δt : tangential ray aberration, Δs : sagittal ray aberration, and astigmatism: $\Delta t - \Delta s$).

다 큰 NA를 갖는 5반사광학계를 얻을 수 있었다. -100 mm의 초점거리와 ArF 엑시머 레이저 파장 $0.193 \mu\text{m}$ 에 대하여 구한 최종적인 광학계는 central obscuration이

표 3. Diameters of clear apertures and holes of the mirrors for the system given by Table 2 (unit: cm).

	Stop	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Clear aperture	9.04	23.57	8.28	19.52	93.10	21.44
Hole diameter	0.00	8.28	0.00	0.00	23.57	0.00

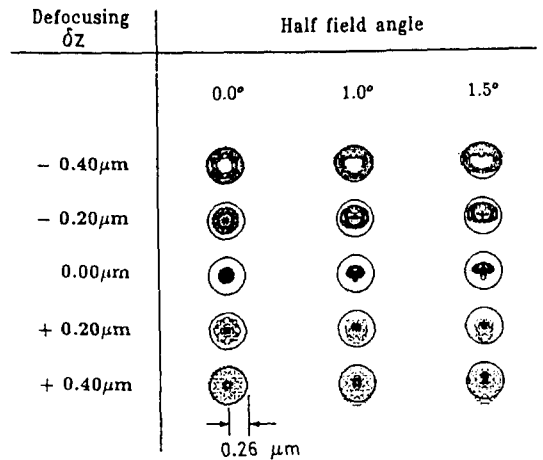


그림 8. Spot diagrams of the aspherized five mirror system for three half field angles at five defocused image positions. The depicted circle is the Airy disk (radius $R = 0.26 \mu\text{m}$) for ArF excimer laser beam.

약 25%, NA가 0.45, 초점심도가 $0.8 \mu\text{m}$ 이며, image-field-diameter가 5.2 mm이고, nearly incoherent illumination ($\sigma = 1.0$)과 50% MTF 기준치에서 분해능이 약 650 cycles/mm 정도인 성능을 갖는 시스템이 되었다.

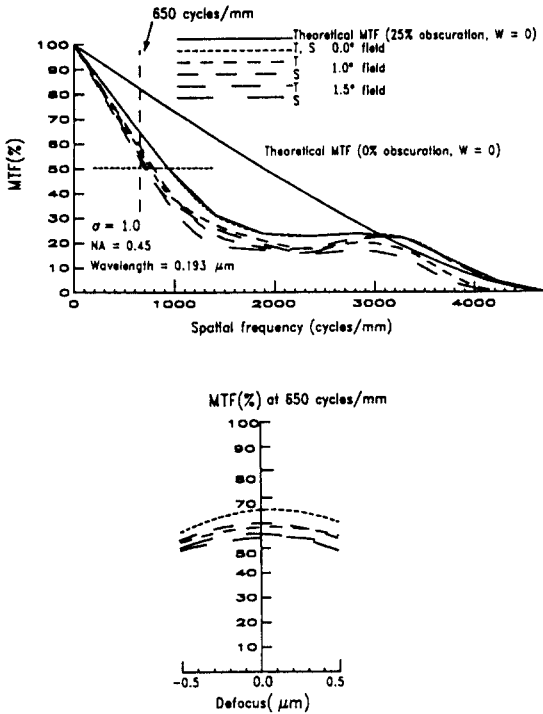


그림 9. MTF through frequency (cycles/mm) and through focus of the aspherized five mirror system for three half field angles at the Gaussian image position in case of the coherence factor $\sigma = 1.0$. (W: residual aberration).

참 고 문 헌

[1] H. L. Stover, "Lens specification and distortions", SPIE, **772**, 2(1987).
 [2] G. E. Fuller, "Optical Lithography Status", Solid State Technology, **30**(9), 113(1987).
 [3] S. Okazaki, "Lithographic Technology for Future ULSIs", Solid State Technology, **34**(11), 77 (1991).
 [4] 이용민, 배남진, "노광기술의 현황 및 광노광기술의 한계", 전자자료 **5**, 92(1989).
 [5] S. C. Park and S. S. Lee, "Four-Mirror Optical

System for UV Submicrometer Lithography", Opt. Eng., **30**(7), 1023(1991).
 [6] J. T. Kim, H. J. Kong, and S. S. Lee, "Improved four-mirror optical system for deep-ultraviolet submicrometer lithography", Opt. Eng. **32**(3), 536 (1993).
 [7] 김종태, 공홍진, 이상수, "4개의 수차가 보정된 유한 물체점을 갖는 4-구면 반사경계의 설계 및 수차 해석", 한국광학회지, **2**, 127(1991).
 [8] 조영민, 이상수, 박성찬, "Deep UV 마이크로 리소그래피용 Stepper를 위한 4구면 반사경계", 한국광학회지, **2**, 186(1991).
 [9] M. P. Rimmer and B. R. Irving, "Calculation of partially-coherent imagery", International Lens Design Conference (SPIE Vol. 237) (OSA, Washington, 1980) pp. 150-157.
 [10] 田邊容由, "ステッパ光學系における超解像技術の比較", 光學, **21**(6), 415(1992).
 [11] 福田宏, 岡崎信次, "超解像光リソグラフィ", 光學, **19**(5), 290(1990).
 [12] C. Wang and D. L. Shealy, "Differential equation design of finite-conjugate reflective systems", Appl. Opt., **32**(7), 1179(1993).
 [13] 이상수, 기하광학 (교학연구소, 서울, 1985) 제 4장.
 [14] K. Tanaka, "Paraxial theory in Optical design in terms of Gaussian brackets", Progress in Optics, Vol. XXII, E. Wolf ed.(North-Holland, Amsterdam, 1986) pp. 63-111.
 [15] R. W. Daniels, An Introduction to Numerical Methods and Optimization Techniques(North-Holland, New York, 1978) Chap. 8.
 [16] B. J. Lin "The Path to Subhalf-Micrometer Optical Lithography", SPIE, **922**, 256(1988).
 [17] R. Hirose, "New g-line Lens for Next Generation", SPIE, **1088**, 178(1989).
 [18] Joseph Meiron, "Damped Least Squares Method for Automatic Lens Design", J. Opt. Soc. Am., **55**(9), 1105(1965).
 [19] 이종웅, 이상수, "수차함수의 2차 미분계수를 감쇠항으로 하는 감쇠최소자승법에 의한 사진렌즈계의 설계", 새물리, **27**(1), 8(1987).

**Five Mirror System with Minimal Central Obscuration and All Zero
3rd Order Aberrations Suitable for DUV Optical Lithography**

Dong Hee Lee and Sang Soo Lee

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Taejon 305-701, Korea*

(Received: November 24, 1993)

A five mirror system with a reduction magnification($M = +1/5$) is designed for DUV optical lithography. First, for spherical mirror systems, the numerical solutions of all zero 3rd order aberrations are derived and the 3-dimensional shape of the solution-domain is obtained. In these solutions, we select solutions which have as less residual aberrations and smaller central obscuration as possible and the aspherization is carried out to the last two spherical mirrors to obtain a system that has as higher NA as possible. Finally we obtain the system of which NA is 0.45, the central obscuration is about 25% and the resolution is about 650 cycles/mm at the 50% MTF value criterion and the depth of focus of 0.8 μm for the nearly incoherent illumination ($\sigma = 1.0$) and the wavelength of 0.193 μm (ArF excimer laser line).