

ArF Excimer Laser용 광학계의 Tolerancing

글 : 이각현, 정해빈, 유현준/ 한국전자통신연구소

한국광학회 광기술분과에서는 지난 9월 9일부터 10일까지 충남 도고 파라다이스호텔에서 제4회 워크샵을 개최했다. 이 날 있던 워크샵에서는 △ 한국 광산업의 현황과 발전전략(홍경희/ 육군사관학교) △ Holographic Head-up Display System의 제작 및 응용기술(정만호/ 한국표준과학원) △ LCD Projector의 개요와 원리(최순철/ 삼성전자) △ 정보영상시스템의 원리와 응용(김병희/ 한국후지필름) △ ArF Excimer Laser용 광학계의 Tolerancing(이각현, 정해빈, 유현준/ 한국전자통신연구소) △ 회절광학계에 의한 대물렌즈의 결상한계 계산(이성목/ 서울대학교) △ CCD를 이용한 실시간 광학계 성능평가기술(이윤우, 조현모, 이인원/ 한국표준과학원) △ 실제현미경용 교변배 대물광학계(이상훈, 이춘근/ 삼성항공)의 논문이 발표되었다.

본보에서는 이들 논문중, ArF Excimer Laser용 광학계의 Tolerancing을 전제하니 관심있는 독자제현의 많은 참고 바란다. -편집자 주-

1. 서 론

반도체 기술의 발전에 따라 선폭의 미세화가 계속되어 256M DRAM에서는 미세선폭 0.25um가 요구되고 있다. 그런데 이제까지의 패턴 형성기술은 축소투영계를 이용한 광노광기술의 발전에 의해 이루어진 것이라고 하여도 지나친 것은 아니었는데, 지금까지는 요구하는 해상도를 만족시키기 위해 수은등의 g-선 또는 i-선을 광원으로 사용하면서 고 NA(Numerical Aperture) 화한 굴절광학계를 사용할 수 있었다. 그러나 더 미세한 패턴을 형성하기 위해 광원이 수은등

에서 엑시머레이저로 전환되면서, 높은 굴절율의 광학재료 개발과 저 수차의 설계기술, 고도로 정밀한 렌즈 가공 및 측정기술이 선행되어야 하는 어려움에 처하게 되었다.

특히 ArF 엑시머레이저를 광원으로 사용하기 위해서는 광학재료가 fused silica만으로 제한되며, 이것도 ArF 엑시머레이저 파장(193nm)에서 흡수율로 인해 광학재료의 두께에 제한이 따르게 되었다. 또한 색수차를 줄이기 위해 광원의 대역폭을 좁게 해야 하는 문제도 있다.

따라서 0.25um 미세 패턴형성을 위해 ArF 엑시머레이저

를 광원으로 하고, 반사경을 이용하여 두번의 반사로 상을 형성하는 Schwarzschild형의 시스템에 보정렌즈를 추가하여 응용 변형한 반사굴절광학계가 하나의 해결책으로 제시되기에 이르렀다. 이 광학계는 굴절광학계 보다 적은 수의 광학부품을 사용하므로써 광학재료의 흡수율 문제와 광원의 대역폭이 좁아야 하는 문제를 동시에 해결할 수 있었다.

한편 설계된 광학계를 제작하고자 할 때 사용되는 부품은 크게, 광학계의 광학적 성능에 직접 영향을 미치는 광학부품과, 광학부품을 지지하고 연결하는 기구부품으로 나눌 수 있

다. 이들 부품을 가공하기 위해서는 부품에 대한 규격과 가공공차를 주게 되는데, 이에 따라 연마 가공된 광학부품과 기구부품을 조립하였을 때, 광학계의 성능이나 기능이 설계 데이터상의 성능과 차이를 나타낼 수 있다. 이들 요소로써는 광학재료의 성질, 부품의 가공 정도, 광학부품과 기구부품의 치수 오차와 편심정도, 그리고 조립시 발생하는 오차 등이다.

이 가공공차를 구하기 위해 광학적으로 Tolerancing을 시행하게 되는데, 이를 통해 가공시의 허용공차를 산출하고, 이를 다시 설계 데이터로 광학적 성능변화를 확인하는 일련의 작업을 수행하게 된다.

본 논문에서는 ArF 엑시머 레이저(193nm)를 조명광원으로 사용하여, 최소 선폭 0.25μm를 형성하는 리소그래피용 노광장비의 광학계 설계내용과 가공 부품들에 대한 가공 오차를 정하기 위해 실시한 Tolerancing에 대해 논하였다.

2 ArF Excimer Laser 스텝퍼용 광학계

2.1. 기본 사항

반도체 제조에 사용되는 노광시스템의 해상도와 초점심도는 회절한계로부터 유도되는

$$R = K_1 \frac{\lambda}{NA} \quad \dots(1)$$

$$DOF = \pm K_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad \dots(2)$$

로 표현된다. 여기서는 수차의 영향은 무시되었으며, λ 는 파장, NA는 광학계의 개구수이며, k_1 과 k_2 는 공정상수이다.

(1)식에서 해상도를 개선하기 위해서는 파장 λ 를 짧게 해주거나, NA를 높여주게 된다. 한편 공정에서 필요로 하는 초점심도 DOF(Depth of Focus)는 NA의 제곱에 비례하여 알아지므로, NA를 높여주는 것보다는 파장을 짧게 해주는 것이 분해능을 높여주면서 DOF를 어느 정도 유지할 수 있다는 점에서 더 바람직하다.

이러한 관점에서 노광장비의 광학계에 사용되는 광원의 파장이 점차 짧아지고 있으며, 그 결과 광리소그래피의 경우 현재 193nm의 출력 파장을 갖는 ArF 엑시머레이저를 조명광원으로 한 새로운 시스템이 연구되고 있다.

그러나 사용하고자 하는 광원의 파장이 짧아짐에 따라 렌즈 등의 광학부품으로 구성되는 광학계가 갖게 되는 문제점은 광학재료의 제한에 따르는 색수차 발생과 광학재료의 투과도 문제이다. 광원으로 수은등을 사용하는 경우 광학재료의 선택에 어려움이 없으나, 단파장인 엑시머레이저로 갈

수록 보통의 광학재료는 투과도가 현저히 나빠지게 된다.

따라서 엑시머레이저의 경우 투과도 측면에서 볼 때 fused silica, LiF, MgF₂, CaF₂ 등만을 사용할 수 있다. 그러나 실질적으로 LiF는 열팽창계수가 크고 조해성이 있어 사용 불가능하고, MgF₂는 복굴절성을 가지고 있으므로 렌즈재료로 사용하기 어렵다. 또한 CaF₂는 열팽창계수가 크고 재질이 약하여 온도 변화에 따른 파손의 위험과 균일성의 문제로 사용할 수가 없다.

따라서 엑시머레이저를 광원으로 할 경우 현재로서는 fused silica가 유일한 광학재료이다.

2.2. 광학계

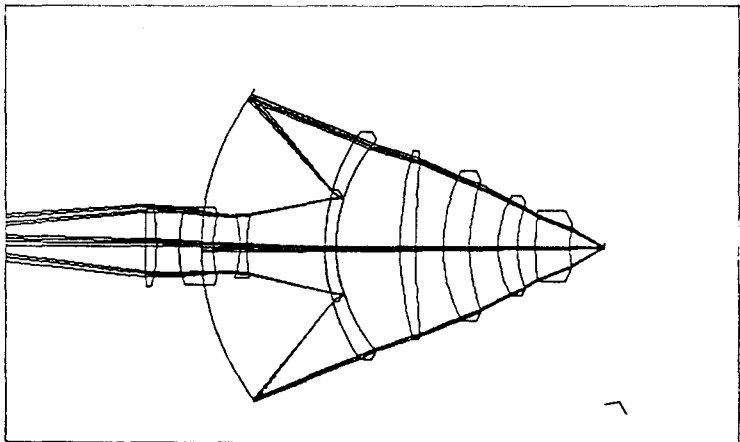
광학계의 설계를 위해 초기 데이터를 Gaussian bracket을 이용한 근축광선 추적을 통하여 계산하였다.

NA 0.5, 축소배율 0.2, 물상간 거리를 300mm로 두면, $d_0 = 225$, $d_1 = -75$, $d_2 = 150$, $R_1 = 75$, $R_2 = 125$ 되는 Schwarzschild 시스템의 반사광학계를 구성할 수 있으며, 이를 출발점으로 하였다.

설계의 진행은 먼저 Schwarzschild 시스템에 대해 초기 설계 데이터를 중심파장 193nm, IMG NA 0.5, 배율 0.2, 물상간 거리를 300mm

(표 1) 광학계의 사양

항목	목표사양	비 고
중심과장	193nm	광원(ArF 레이저)
대역폭	100pm	
축소배율	1:5	배율오차 0.08um
NA	0.5	
DOF	1.2um(요구 목표)	광학계 설계 0.6um
왜곡수차	< 0.05um	0.0033%
분해능	0.25um	MTF 40% 기준(0.25um L/S)
상면만곡	< 0.2um	
출사동 위치	Infinite : Telecentric	



(그림 1) 광학계의 광로도

로 하고, 물체의 높이를 7.5mm 즉, field size 직경 3mm되게 하여 기본적인 광학계 구조를 갖추도록 1차적으로 설계를 진행한 후, 수차의 보정을 위해 필요한 보정렌즈를 차례로 추가하면서 (표 1)의 광학계 사양에 맞게 설계를 진행하였다.

「(표 1) 광학계의 사양」 도표는 11kh6-31 화일에 있음.

실제로 보정렌즈 두께의 합이 두꺼워질수록 수차의 보정 효과는 좋았다. 그러나 두께가 두꺼워지면 내부흡수에 의해 투과도가 떨어지므로 가능한 한 렌즈가 얇도록 하면서 최적화하였다.

설계된 광학계는 full mirror 1장, mangin mirror 1장, 그리고 7장의 보정렌즈로 구성되어 있으며, efl = 59.121mm,

bfl = 15.295mm, 광학계 두께는 187.84mm이고, 전체광로는 353.219mm이다. 광로도는 (그림 1)과 같고, 설계 데이터는 (표 2)와 같다.

Spot diagram 상에서 Airy disk ($A = 0.61 \frac{\lambda}{NA}$) 안에 모든 광선이 들어가는 것을 기준으로 평가해 볼 때 DOF $\pm 0.35\mu\text{m}$ 까지는 회절한계 이내의 성능을 갖고 있다. Diffraction-limited system의 경우에는 수차가 그렇게 큰 의미를 갖지 않으므로 전적으로 MTF값에 의해 분해능이 결정되어진다. MTF값을 가지고 해상력을 판단하는 기준으로서는 MTF값이 0.4 되는 공간주파수(spatial frequency)까지 분해가 가능하다는 경험적 이론을 근거로 할 때 0.25um까지 충분히 분해할 수 있다.

또한 최소선폭 0.25um를 목표로 할 때 왜곡수차의 허용치는 최소 선폭의 1/5 정도 되는 값으로 0.05um이고, 백분율로는 0.003%이다. 설계된 광학계의 왜곡수차는 full field에서 0.00159%로 가장 심하다. 이때를 절대값으로 표시하면 $0.00159\% \times 1500\mu\text{m} = 0.023\mu\text{m}$ 로, 허용치 0.05um보다 적다.

따라서 왜곡 수차의 보정이 잘되어 있는 설계이다.

(표 2) 광학계의 설계 데이터

NO	RADIUS	SEPN	CLR DIAM	MATERIAL
1	326.464	5.000	37.20	Fused silica
2	-84.364	9.938	37.33	Air
3	65.249	15.231	34.82	Fused silica
4	70.192	11.483	30.35	Air
5	-37.944	3.000	28.59	Fused silica
6	84.526	35.000	29.22	Air
7	91.025	5.000	42.41	Fused silica
8(M)	72.827	-5.000	43.08	Fused silica
9	91.025	-55.059	50.45	Air
10(M)	116.818	55.059	140.42	Air
11	91.025	5.000	102.34	Fused silica
12	72.827	28.530	95.36	Air
13	166.711	7.000	84.91	Fused silica
14	455.236	12.235	82.87	Air
15	90.208	11.343	67.50	Fused silica
16	94.037	12.501	59.76	Air
17	46.602	8.560	45.81	Fused silica
18	69.685	7.914	39.50	Air
19	129.624	15.107	32.46	Fused silica
20	51.055	15.295	19.62	Air
21	PLANE			

3. 광학계 Tolerancing

3. 1. 광원의 대역폭

넓은 대역폭의 광원을 사용할 수 있다는 것은 매우 중요한 의미를 지닌다. 굴절 광학계에서는 색수차를 줄이기 위해 아주 좁은 대역폭을 사용할 수 밖에 없다. 그러나 반사광학계에서는 반사경에서 대부

분의 굴절능을 가지므로 굴절 광학계 보다는 매우 넓은 대역폭의 광원을 사용할 수 있다는 것이다. 넓은 대역폭의 광원이 사용 가능하면 레이저의 사용 효율을 높일 수 있게 된다.

광원의 대역폭을 계산하기 위하여 광학계 전체 초점거리를 f_T , 반사경만의 초점거리를 f_M , 렌즈만의 초점거리를 f_L 이라고 할 때, 이 광학계의 초점

거리 f_T 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{f_T} = \frac{1}{f_M} + \frac{1}{f_L} - \frac{d}{F_M F_L n} \dots (3)$$

여기에서 d 는 렌즈만의 제2 주요점과 반사경만의 제1 주요점간의 거리이고, n 은 그 사이의 굴절률이다.

(3)식으로부터 사용 가능한 대역폭을 계산하면, f_M 은 λ 의 존성이 없으므로,

$$-\frac{\delta f_T}{f_T^2 \delta \lambda} = \delta \left(1 - \frac{d}{f_M n}\right) \frac{1}{f_L} +$$

$$\left(1 - \frac{d}{f_M n}\right) \delta \left(\frac{1}{f_L}\right) = \frac{\left(\frac{\delta n}{\delta \lambda}\right)}{f_L (n-1)}$$

$$1 - \frac{d}{f_M n^2} \dots (4)$$

된다.

따라서

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta f_T f_L (n-1)}{f_T^2 \left(\frac{\delta n}{\delta \lambda}\right) \left[1 - \left(\frac{d}{f_M n^2}\right)\right]}$$

$$\left(1 - \frac{d}{f_M n^2}\right) \cong (1+m)$$

$$\Delta \lambda \cong \frac{f_L (n-1) \Delta f}{f_T^2 \left(\frac{dn}{d\lambda}\right) (m+1)} \dots (5)$$

이 된다. 여기에서 Δf 는 Rayleigh criterion depth of focus로 $\Delta f = \pm \frac{\lambda}{2(NA)^2}$ 정의되며, NA 는 반사경을 제외한 렌즈만의 NA_L 과 전체 광학계의 NA_T 의 비에 따라 정의된다.

따라서

$$\Delta \lambda = \frac{f_L (n-1) \lambda}{2 f_T^2 \left(\frac{dn}{d\lambda}\right) (m+1) \left(\frac{NA_L}{NA_T}\right)^2} (6)$$

이다.

그러므로 넓은 대역폭을 가지기 위해서는 광학계의 대부분의 파워를 반사경에 집중시키고, 수차보정을 위하여 추가시킨 보정렌즈만의 초점거리는 길게 즉, 파워를 작게하여야만 한다.

(6)식을 이용하여 설계된 광학계의 이론적인 대역폭을 계산하여 보면 다음과 같다.

$$\Delta\lambda \equiv \frac{f_L(n-1)\lambda}{2f_T^2 \left(\frac{dn}{d\lambda}\right) (m+1) \left(\frac{NA_L}{NA_T}\right)^2}$$

광학계 초점거리 $f_T = 59.121\text{mm}$

광학계 $NA_T = 0.5$

배율 $m = 0.2$

용융석영 굴절률 $n = 1.56077$

렌즈계만의 초점거리 $f_L = 539.496\text{mm}$

렌즈계만의 $NA_L = 0.049$

3 용융석영 분산값 $dn/d\lambda = 0.0031 \text{ nm}^{-1}$

중심파장 $\lambda = 193\text{nm}$

따라서 $\Delta\lambda = \pm 236\text{pm}$ 이다.

그러므로 대역폭은 약 500pm이다.

설계된 광학계의 실제적인 대역폭을 알아보기 위해 용융석영에 대한 파장별 굴절률을 먼저 계산하고, 이를 설계 데이터에 다시 입력시켜 상의 성능변화를 보아가면서 사용 가능한 파장의 범위를 정하였다. 용융석영의 파장별 굴절률은 광학유리 메이커에서 이용하는 다음의 Malitson's dispersion equation을 사용하였다.

(표 1) Malitson's Dispersion Equation에 따른 굴절률 분포

Wavelength (um)	Refractive index	Wavelength (um)	Refractive index
0.1921	1.5622164	0.1931	1.5606103
0.1922	1.5620540	0.1932	1.5604518
0.1923	1.5618920	0.1933	1.5602937
0.1924	1.5617305	0.1934	1.5601359
0.1925	1.5615693	0.1935	1.5599786
0.1926	1.5614085	0.1936	1.5598216
0.1927	1.5612480	0.1937	1.5596651
0.1928	1.5610880	0.1938	1.5595088
0.1929	1.5609284	0.1939	1.5593530
0.1930	1.5607691	0.1940	1.5591975

(표 4) 사용광원의 파장 변화에 따른 성능의 변화(Paraxial data)

사 용 광 원	193nm	193.1nm	193.2nm	193.3nm	193.4nm
굴 절 률	1.5607691	1.5606103	1.5604518	1.5602937	1.5601359
At used Conjugates					
MAG	-0.20000	-0.20000	-0.20000	-0.20000	-0.20001
OBJ NA	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000	0.10000
IMG NA	-0.50000	-0.50000	-0.49999	-0.49999	-0.49998
OBJ DIST	150.084	150.084	150.084	150.084	150.084
IMG DIST	15.2949	15.2949	15.2949	15.2949	15.2949
TRACK	353.219	353.219	353.219	353.219	353.219
THCKNESS	187.840	187.840	187.840	187.840	187.840
IMG HT	-1.50000	-1.50001	-1.50002	-1.50004	-1.50005
IMG ANG	0.46337	0.46242	0.46149	0.46053	0.45962
Entrance Pupil					
DIA	61.8691	61.8599	61.8477	61.8351	61.8232
DIST	141.941	141.907	141.874	141.840	141.807
Exit pupil					
DIA	1065.740	1066.901	1067.993	1069.112	1070.180
DIST	1021.873	1023.009	1024.134	1025.287	1026.386

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684943)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} +$$

$$\frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} \dots (7)$$

이식을 이용하여 용융석영의 파장별 굴절률을 구하여 보면 <표 3>과 같다.

(표 4)는 193nm에서 193.4nm까지의 굴절률을 데이터로 입력하여 성능의 변화를 본 표로, 192.6nm에서 192.9nm까지에 대한 분석은 193nm에 대하여 대칭적으로 나타나므로 생략하였다. (표 4)에서 IMG HT(상의 높이)를 살펴보면, 요구하는 상의 크기가 $\Phi 3\text{mm}$ 의 1/2인 1.5mm인데, 여기서 왜곡수차가 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 이 내이므로, 1.49995~1.50005mm까지가 허용하는 범위이다.

따라서 IMG HT가 1.50005mm 이상되는 광원의 파장영역은 사용할 수 없다. 또한 MTF곡선과 spot diagram을 볼때 193.4nm까지는 큰 변화가 없었다.

따라서 본 광학계에서 사용할 수 있는 대역폭 범위는 192.6nm~193.4nm으로 처음 목표로 한 대역폭 보다 훨씬 넓은 $\pm 400\text{pm}$ 이다. 이론적인 대역폭 약 500pm와의 차이는 초점심도를 계산하는 $\text{DOF} = k_2 \frac{\lambda}{(\text{NA})^2}$ 에서 상수 k_2 를 어떻게 정하느냐에 따라 나타나는 차이이다.

3. 2. 곡률과 면정도(面精度)

각 광학면의 곡률오차는 광

(표 5) 면정도에 따른 각 광학면의 곡률 반경

R0 (곡률반경)	x (유�효반경)	λ	m (무늬의 수)	R
Lens 1. R1 (326.464)	18.6	0.0006328	0.2 0.5 1	326.425 326.367 326.269
Lens 1. R2 (-84.364)	18.67	0.0006328	0.2 0.5 1	-84.367 -84.370 -84.377
Lens 2. R1 (65.249)	17.41	0.0006328	0.2 0.5 1	65.247 65.245 65.240
Lens 2. R2 (70.192)	15.18	0.0006328	0.2 0.5 1	70.189 70.185 70.179
Lens 3. R1 (-37.944)	14.3	0.0006328	0.2 0.5 1	-37.945 -37.947 -37.949
Lens 3. R2 (84.526)	14.61	0.0006328	0.2 0.5 1	84.522 84.515 84.505
Full M. R1 (116.818)	70.21	0.0006328	0.2 0.5 1	116.818 116.817 116.816
Mangin M. R1 (91.025)	51.17	0.0006328	0.2 0.5 1	91.025 91.024 91.023
Mangin R2 (72.827)	47.82	0.0006328	0.2 0.5 1	72.827 72.826 72.826
Lens 4. R1 (166.711)	42.46	0.0006328	0.2 0.5 1	166.709 166.706 166.701
Lens 4. R2 (455.236)	41.44	0.0006328	0.2 0.5 1	455.221 455.198 455.160
Lens 5. R1 (90.208)	33.75	0.0006328	0.2 0.5 1	90.207 80.205 80.203
Lens 5. R2 (94.637)	29.88	0.0006328	0.2 0.5 1	94.636 94.634 94.631

R ₀ (곡률반경)	x (유효반경)	λ	m (무늬의 수)	R
Lens 6. R1 (46.602)	22.91	0.0006328	0.2	46.602
			0.5	46.601
			1	46.600
Lens 6. R2 (69.685)	19.75	0.0006328	0.2	69.685
			0.5	69.683
			1	69.681
Lens 7. R1 (129.624)	16.23	0.0006328	0.2	129.616
			0.5	129.604
			1	129.584
Lens 7. R2 (51.055)	9.81	0.0006328	0.2	51.052
			0.5	51.047
			1	51.038

곡률 값으로 계산하여야 한다. 뉴턴링의 갯수에 따른 곡률의 변화를 알 수 있는 식은 다음의 (8)식과 같다.

여기서 피측정구면의 곡률 반경을 R, 원기의 곡률반경을 R₀라고 하고, 측정에 이용된 빛의 파장을 λ라 하며, 맞추어진 면의 중앙에 반경x의 범위에서 m개의 뉴턴링이 생기면

$$R = R_0 \pm \frac{\lambda}{2} \frac{m}{1 - \sqrt{1 - (\frac{x}{R_0})^2}} \quad \dots(8)$$

학부품들의 파워 변화를 일으켜 초점거리, 후초점 거리, 배율 등 광학적 성능의 변화를 발생시켜 상의 결상능력에 영향을 미친다.

따라서 광학부품의 가공, 검사시에 곡률의 측정은 매우 중요하다. 일반적으로 광학부품을 가공하고 검사할 때 사용되는 곡률의 측정방법은 다양하지만, 정밀한 광학부품의 검사는 표면의 곡률과, 면의 형상을 정밀하게 연마하였는가를 원기(test plate)와 비교하거나, 간섭계를 이용하여 측정한다. 피측정물과 원기 표면을 상호 접촉시키고 단색광을 비추면 뉴턴링 간섭무늬가 접촉면에 나타나게 된다. 뉴턴링의 수가 양 표면의 곡률반경의 차이를 표시하게 되며, 통상 1개가 λ/2에 해당한다. 또 뉴턴링의 일그러짐은 피검광학부품 표면의 연마 상태의 정도(精度)를 나타낸다.

Tolerancing에서는 실제 가공시에 측정할 수 있는 광학면의

(표 6) 곡률 변화에 따른 성능의 변화(Paraxial data)

\곡률정도	0	λ/4	λ/2
data \本數	0本	0.5本	1本
At used Conjugates			
MAG	-0.20000	-0.20000	-0.20001
OBJ NA	0.10000	0.10000	0.10000
IMG NA	-0.50000	-0.50001	-0.49997
OBJ DIST	150.084	150.084	156.067
IMG DIST	15.2949	15.2945	16.9409
TRACK	353.219	353.219	347.918
THCKNESS	187.840	187.840	174.910
IMG HT	-1.50000	-1.49997	-1.50008
IMG ANG	0.46337	0.46339	-0.01301
Entrance Pupil			
DIA	61.8691	61.8699	58.0697
DIST	141.941	141.944	123.340
Exit pupil			
DIA	1065.740	1066.517	836.803
DIST	1021.873	1022.584	805.436
Distortion(%)	-0.00159	-0.00162	-0.01025

이다. (8)식을 이용하여 설계된 각 광학면에 대하여 뉴턴링의 갯수에 따른 곡률반경을 구하여 보면 (표 5)와 같다. (표 5)를 이용하여 각 광학부품면의 가공 정도를 본 데이터에 입력시켜 원하는 사양을 만족시키는 정도를 가공오차의 한계로 잡았다.

(표 6)의 IMG HT(상의 높이)에서 보면, 곡률반경의 공차가 $\lambda/2$ 일때는 -1.50008 로 허용범위를 벗어난다. 뿐만 아니라 왜곡수차의 백분율도 -0.01025% 로 허용범위 $\pm 0.003\%$ 를 훨씬 벗어난다. 그러나 곡률반경의 공차가 $\lambda/4$ 일때는 성능을 만족시키므로 곡률반경의 허용공차는 $\lambda/4$ 이다.

3. 3. 두께 및 편심 공차

광학부품의 두께와 간격링의 오차에 대해서는 ray tracing과 1st-order 수차에 의해 분석이 가능하다. 그러나 두께와 간격링의 오차가 구체적으로 어떠한 변화를 가져오는지를 정확히 나타내고 있는 이론적 계산은 없으며, 단지 ray tracing과 1st-order 수차분석에 의하여 판단되어지고 있다.

광학부품은 통상 2개의 축으로 표시되어진다. 하나는 광축으로 결상의 공식과 관계되는 중요한 축으로 단렌즈에

(표 7) 일반적인 광학 부품에 대한 두께 공차 및 편심공차

Optical element	Thickness(mm)	Diameter(mm)	편심공차
Low cost optical element	± 0.5	± 0.2	$\pm 30 \text{ min}$
Commercial optical element	± 0.25	± 0.07	$\pm 6 \text{ min}$
Precision optical element	± 0.1	± 0.02	$\pm 30 \text{ sec}$
Extra precision optical element	± 0.05	± 0.01	$< \pm 30 \text{ sec}$

서 규정되어지는 렌즈의 양 표면의 곡률중심과 일치하는 선이다.

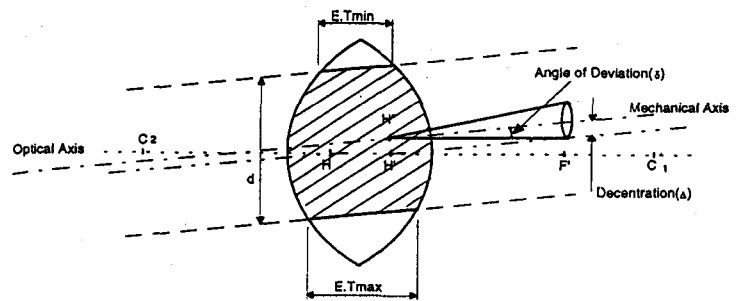
또 하나는 기계축으로 렌즈의 연마나 가공중에 일어나는 렌즈의 중심선으로 정의되며, 렌즈를 센터링할때 회전축이 되며, 렌즈의 마운트시 적용된다. 광축과 기계축이 완전히 일치되는 것이 이상적이나, 실제로는 이 두 축사이에 차이가 발생한다. 이때 편심이 생긴다.

편심은 렌즈의 기계축을 연장할 때 광축과의 각도적인 편차의 상한으로 정의된다. 각

광학부품의 제조회사는 편심 표시를 angle of deviation(δ)과 decentration(Δ)을 혼용하여 사용하기에 편리한 것을 사용하고 있다. 뿐만 아니라 실제로 측정이 쉬운 element wedge를 이용한 deviation(δ)으로 나타내기도 하며 다음과 같이 정의한다. Element wedge를

$$W = \frac{E.T_{max} - E.T_{min}}{d} \quad \dots(9)$$

로 표시하면, element deviation(δ)은



(그림 2) 편심 표시

(표 8) 광학부품의 두께 변화에 따른 성능의 변화(Paraxial data)

두께 변화	0	±0.005mm	±0.01mm
At used Conjugates			
MAG	-0.20000	-0.19999	-0.19976
OBJ NA	0.10000	0.10000	0.10000
IMG NA	-0.50000	-0.50003	-0.50059
OBJ DIST	150.084	150.084	150.084
IMG DIST	15.2949	15.2869	15.16443
TRACK	353.219	353.226	353.232
THCKNESS	187.840	187.855	187.983
IMG HT	-1.50000	-1.49995	-1.49822
IMG ANG	0.46337	0.46398	0.46965
Entrance Pupil			
DIA	61.8691	61.87405	61.90209
DIST	141.941	141.961	142.126
Exit pupil			
DIA	1065.740	1064.857	1051.236
DIST	1021.873	1020.958	1006.962
Distortion(%)	-0.00159	-0.00175	-0.00404

(표 9) Tolerancing 결과값 비교

	ETRI ArF Excimer Laser Optics	Matsushita ArF Excimer Laser Projection Lens	Matsushita ArF Excimer Laser Projection Lens
Type	Catadioptric	Dioptric(5 spherical lens element)	Dioptric(1 aspherical, 5 spherical lens element)
index	2×10 ⁻⁵ (카타로그)	5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵
Bandwidth	800pm	13pm	13pm
Curvature	λ/4	λ/5	λ/5
Surface Irregularity	λ/10	λ/10	λ/20
Element Thickness	±5 um	±10 um	±10 um

$$\delta = W(n-1) \dots (10)$$

로 표현된다.

(표 8)에서 볼 때 광학부품의 두께 변화가 ±0.005mm이면 배율이 -0.19999으로 상높이가 -1.49995가 된다. 이 상높이는 왜곡수차의 허용범위 ±0.05um의 한계값이다.

따라서 이 광학계의 두께 공차는 ±0.005mm이다. 편심의 허용공차는 일반적으로 주어지는 공차 (표 7)을 참고로 30sec로 하였다.

본 시스템에 대한 tolerancing 결과와 Matsushita ArF Excimer Laser Projection miniature 광학계의 tolerancing 결과를 비교한 것을 (표 9)에 나타내었다.

4. 결 론

ArF 엑시머레이저(193nm)를 광원으로 하는 리소그래피용 노광장비에서 최소선폭 0.25um를 만족시킬 수 있는 축소배율 5:1이며 NA=0.5인 반사광학계를 설계하였다.

설계된 광학계는 Schwarzschild system을 기초로 하여 수차보정용 광학렌즈를 추가시킨 형태로 field size는 Φ 3mm 이며, 작업 가능공간이 14mm 이상되고, 물상간 거리가 293.16mm 되도록 설계되었다.

또한 설계된 광학계의 성능은 diffraction-limited MTF를 기준으로 분해능 0.25um가 충



	ETRI ArF Excimer Laser Optics	Matsushita ArF Excimer Laser Projection Lens	Matsushita ArF Excimer Laser Projection Lens
Element Thickness	±5 um	±10 um	±10 um
Element Wedge	0.2'	0.2'	0.2'
Element Decenter	0.5'	3um	1um
Barrel Tilt	0.5'	1.45'	0.15'
MTF at 200lp	0.4	0.398	0.459

충분히 들어오며, DOF는 ±0.35um였다. 그리고 가공 허용공차를 산출하기 위해 광학적으로 tolerancing을 시행하는데, 광학계에 광원으로 사용될 수 있는 대역폭은 ±400pm, 곡률 반경 공차는 λ/4, 두께공차 ±5um, 편심공차 30sec 등이었다.

분하고, 왜곡수차도 0.023um 로 허용범위 0.05um 이내에

휴식공간

불만한 연극

- 듀엣 -

극단 신화에서는 창단 5주년 기념으로 오는 11월 18일부터 12월 31일까지 대학로 인간 소극장에서 창작극 '듀엣'을 공연한다.

창작극 '듀엣'은 김영수 연출, 하희라, 윤주상이 출연하는 작품으로 극단 신화가 창단 5주년을 기념하기 위해 2년 전부터 준비해온 작품이다.

'듀엣'은 원로배우 전준하(윤주상)와 미국에서 석사과정을 마치고 연극계에 갓 입문한 최세리(하희라)라는 두 남·녀배우의 만남과 작업과정을 그린 작품으로 미국이라는 발달된 문화환경속에서 교육받은 발달하고 자신만만한 신인여배우 최세리가 종교적 구도자의 자세로 일생을 연극에 종사한 침착하고 진지한 전준하라는 원로배우를 만나 소극장 공연을 준비하는 현실진행이 공연되는 극중극-오셀로, 안티고네, 인형의 집, 아가씨와 건달들 등을 통해 연습과정의 갈등과 화합이 극중극 속에서 발전하고 해소되는 이중구조를 채택했다.

또한 '듀엣'은 천진난만한 최세리의 연습과 극중극에서 실수연발로 자아내는 폭소와 엄격하고도 자상한 전준하의 지도와 훈련에서 빚어지는 눈물을 통해 세대차이의 벽을 허무는 헌신적인 사랑과 교감, 환경에서 오는 컴플렉스의 극복과 성장을 이야기한다.

* **공연일시**: '94. 11. 18~12. 31(4시 30분 /7시 30분) 단 매주 월요일은 쉽

* **공연장소**: 인간소극장(동승동 대학로)

* **문의전화**: 922-4386 /923-2131

* **관람료**: 1만 5천원