

광통신 변조기용 미세광학소자의 설계

홍 경 희

육군사관학교

(1992년 7월 20일 받음)

광통신에 각종 modulator를 사용할 경우에 대비하여 plano-convex coupling 미세광학소자를 설계하였다. 광섬유에서 회절되는 광을 시준(collimate)시켜 modulate할 수 있도록 하는 시준렌즈와 modulate된 광을 광섬유에 연결시키는 coupling 렌즈를 설계하였다. 광원은 He-Ne 레이저 빔으로하고 렌즈의 초차는 BK-7 크라운계 광학유리로 하였다. 곡률반경과, 거리 및 conic constant가 광학계의 광선수차에 미치는 영향을 조사하였다.

I. 서 론

본 연구에서는 광통신에서 modulator를 사용하기 위한 미세광학렌즈를 설계하였으며 이 때 초차는 굴절률이 균질한 광학유리를 택하였다. 본 광학소자는 앞으로 예칭방법이나 기타 방법으로 국내에서 제작방법을 개발할 예정이다. 미세광학소자를 설계한 조건은 다음과 같다. Fraunhofer 회절을 고려하여 0차 회절광을 기하광학적으로 100% 전송하는 조건으로 설계하였다. 광섬유의 core 직경을 $8\ \mu\text{m}$ 내지 $9\ \mu\text{m}$ 이다. modulator의 유효경을 $300\ \mu\text{m}$ 로 하였다. 이 때 광섬유의 직경은 보다 작은 $8\ \mu\text{m}$ 로 잡고 설계하였다. Fraunhofer 회절에서 회절한계는 Rayleigh criterion에 의하면 $\theta = 1.22\ \lambda/D = 1.22 \times 0.6328/8.0 = 0.096502\ \text{rad}$ 이므로 각도로 환산하면 약 5.529 도이다.^[1] 따라서 그림 1에서 L1렌즈를 설계할 때는 점광원으로부터 여유있게 6도로 발산되는 광을 평행하게 시준하도록 하였다. $300\ \mu\text{m}$ 의 직경으로 $0.6328\ \mu\text{m}$ 의 파장을 갖는 빛이 평행하게 진행될 때 마찬가지로 Fraunhofer 회절에서 0차 회절한계는 $1.22 \times 0.6328/300 = 2.573\ \text{mrad}$ 이므로 시준광의 평행도를 $2.57\ \text{mrad}$ 이내로 허용한다.^[1] 광통신에 이용하고 있는 광섬유에서 다중 모드인 경우에는 수광각(acceptance angle)이 문제가 되어 고려해야 한다. 최대수광각 θ_{max} 은 광섬유 core의 굴절률이 n_c , cladding의 굴절률이 n_1 일 때, $\theta_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_1^2}$ 으로 된다.^[2] 예를 들면 전형적인 광섬유에서 $n_c = 1.62$ 이고 $n_1 = 1.52$ 인 경우 $\theta_{max} = 18.35$ 도이다.^[1] 그러나 단일 모드의 경우에는 회절에 의한 영향만 고려한다. 위에서

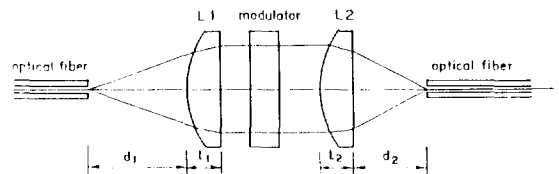


그림 1. Micro optical system for optical communication.

언급한 바와 같이 최대 6도 이하이므로 최대수광각 18.3 도 보다 훨씬 작기 때문에 전혀 문제가 되지 않는다.

II. 계통 확립

Modulator에 이용되는 미세광학계의 개요도는 그림 1과 같다. Gauss광학적으로 곡률반경을 결정하였다. 즉, 곡률반경이 r 이며 곡률이 c , 초차의 굴절률이 n , 렌즈의 굴절능이 k , 렌즈의 제 2초점거리가 f' 이라 할 때, 평볼록렌즈의 곡률반경 $r = f'(n-1)$ 로서 결정된다.^[3,4] 이와 같이 결정된 설계 data를 가지고 유한광선추적으로 광선수차를 계산하였으며 그 계산 결과가 회절한계(diffraction limited) 이내가 되는 범위에서 가장 사용목적에 적합하고 제작이 용이할 것으로 판단되는 값을 취하여 설계하였다. 우선 그림 1에서 L2 렌즈에 대해서 초점거리를 $1.0\ \text{mm}$ 부터 $2.5\ \text{mm}$ 까지 $0.1\ \text{mm}$ 간격으로 곡률반경을 계산하였다. 그 중에서 렌즈의 유효경을 얻는데 적합하고 앞에서 고찰한 회절한계를 고려하여 F/no 가

10 이내가 되는 초점거리의 범위를 고려하였으며 현실적으로는 유한광선추적을 통하여 광선수차특성을 조사하였다. 광선수차를 입사동의 반경을 일정한 비율로 나누어 입사할 경우에 Gauss상 평면상에 도달한 위치로서 나타낸 것이 ray-fan이다. 광선을 x-축상에서만 입사하도록 하여 얻은 ray-fan을 x-ray fan, y-축상에서만 입사하도록하여 얻은 것이 y-ray fan이라 한다. 그러나 시계각이 0일 때에는 렌즈의 회진대칭성 때문에 x-ray fan과 y-ray fan이 동일하다.^[5,6] 그림 2에는 평행광선이 입사할 경우 초점거리가 1.0 mm부터 1.5 mm까지 변화할 때 x-ray fan을 계산한 결과를 그래프로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 초점거리가 1.0 mm인 경우와 1.2 mm인 경우는 X_k 의 절댓값이 $4.0 \mu\text{m}$ 보다 크다. 따라서 서론에서 언급한 바와 같이 회절한계 및 광섬유 core의 직경 $8 \mu\text{m}$ 이내에 광이 집중되려면 최소한 초점거리가 1.3 mm 이상이 되어야 함을 알 수가 있다. L1 렌즈의 유효경이 $300 \mu\text{m}$ 이며 광섬유의 직경이 $8 \mu\text{m}$ 이고 제작상의 허용공차나, 회절광학적 고찰 그리고 경제성을 고려할 때 초점거리 1.5 mm로 하는 것이 가장 적절하다고 판단하였다.

초기에는 렌즈의 두께를 1.5 mm으로 하였다. 본 연구의 설계는 가공방법의 연구에 필요한 simulation 단계이다. 실험적 가공 연구시에는 현미경 슬라이드를 이용할 수도 있기 때문에 슬라이드의 두께가 1.2 mm부터 1.7 mm 까지 이용되고 있음을 감안하였다. 또한 실제 사용시 유리평면에 광섬유의 core가 직접 접촉하는 것이 표면에 흠이 가든가 사용상 불안정한 요소가 많기 때문에 렌즈의 두께를 1.5 mm에서 1.2 mm로 줄였다. 광섬유의 유효경이 $8 \mu\text{m}$ 이므로 L1 렌즈 및 L2 렌즈의 유효경이

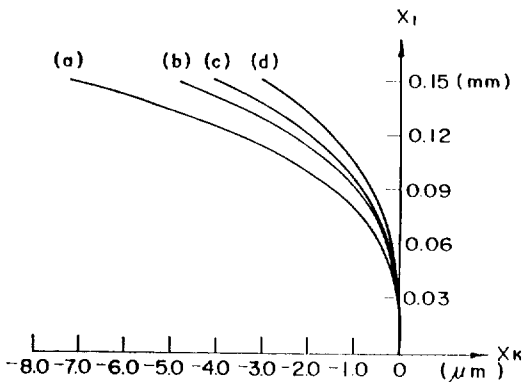


그림 2. x-ray fan for various power.
f=(a) 1.0, (b) 1.2, (c) 1.3, (d) 1.5 (mm).

$300 \mu\text{m}$ 로 하려면 서론에서 언급한 바에 의해서 초점거리 또는 뒷초점거리는 1.5 mm 정도가 되어야 한다.

III. 미세광소자의 설계

1. L1 렌즈의 설계

L1 렌즈는 뒷초점거리가 1.5 mm로 하였다. 초자는 BK-7으로 결정하고 앞에서 얻은 곡률반경을 초기 설계로 하여 미세한 곡률반경의 변화를 주며 유한광선추적을 통하여 x-ray fan 및 시준광의 방향여현을 계산하였다.^[2,6] 광선의 방향여현은 x-축, y-축 및 z-축과 이루는 각의 cosine 값을 말하며 각각 L, M 및 N으로 표기하였다.^[2,6] 가공의 편의와 공차를 고려하여 곡률반경을 0.796 mm로, 두께는 1.2 mm로 결정하였다. 광계통의 선정렬시 depth of focus를 결정하기 위하여 광섬유 끝단으로부터 L1 렌즈까지의 거리 1.5 mm를 기준하였고 앞뒤로 조금씩 이동하며 시준광의 방향여현을 계산하였다. 그 중에서 렌즈의 위치가 앞뒤로 각각 0.01 mm 이동시켰을 때 시준광의 방향여현 L 값을 계산한 결과를 그림 3에 제시하였다. 그림 1에서 렌즈의 유효경 끝단으로 입사하는 광의 광축각 u 는 서론에서 언급하였듯이 실제적으로 회절에 의해 6도가 안된다. 따라서 그림 3에서 나타난 결과를 볼 때 렌즈의 위치는 앞뒤로 0.01 mm 만큼 이동되어도 평행도는 2.5 mrad을 넘지 않는다. 그림 4에는 곡률반경이 $5.0 \mu\text{m}$ 만큼 가감되었을 때의 평행도를 조사한 결과이며 이 때에도 2.5 mrad을 넘지 않는 것으로 볼 수 있다. 가공시 구면으로 제작되지 못하고 변형이

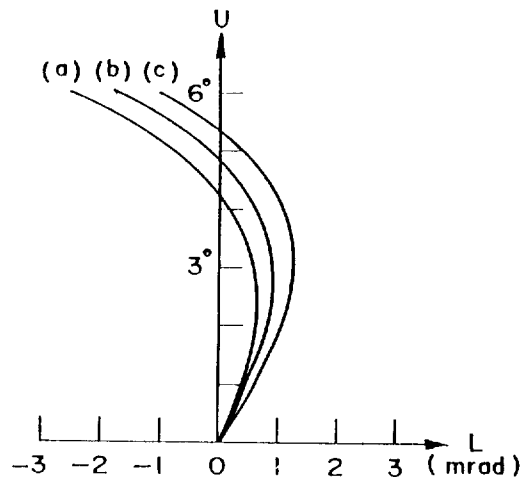


그림 3. Object distance tolerance of L1.
 δd_1 =(a) -0.01, (b) 0.0, (c) 0.01 (mm).

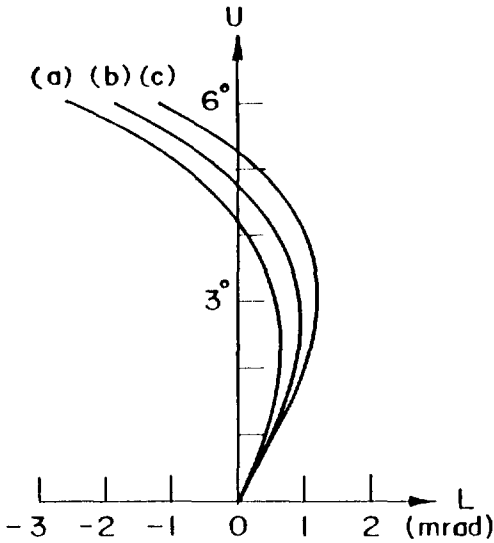


그림 4. Curvature radius tolerance of L1.
 $\delta r_1 = (a) -5.0, (b) 0.0, (c) 5.0, (\mu m)$.

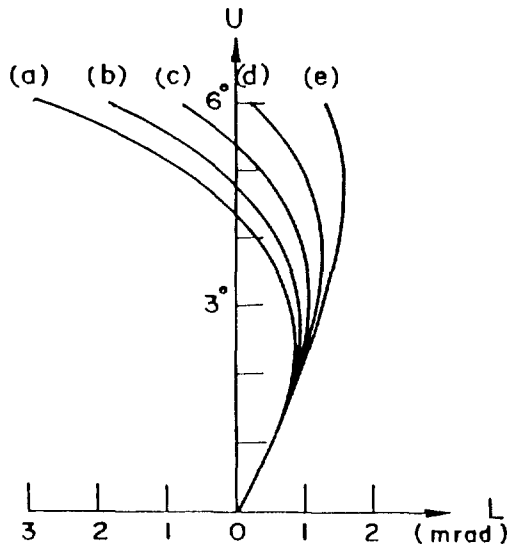


그림 5. Aspheric effects on L1.
 $\kappa = (a) 0.5, (b) 0.0, (c) -0.5, (d) -1.0, (e) -1.5$.

일어날 것을 예상하여 불규칙적인 변형은 예측할 수 없고 계산도 매우 복잡하기 때문에 비구면 효과를 조사하였다. 비구면을 conic surface로 가정하고 이 때의 곡면함수는 z-축을 광축으로 하고 구면 곡률을 c, 그리고 입사각을 γ 라고 할 때 광선과 원추곡면이 만나는 z좌표는

$$z = \frac{c y^2}{1 + \sqrt{1 - (\kappa + 1) c^2 y^2}}$$

으로 쓸 수 있다. 이 때 conic constant, κ 값의 범위가 $\kappa > 0$ 이면 z-축을 단축으로 하는 타원면, $\kappa = 0$ 이면 구면, $-1 < \kappa < 0$ 이면 z-축을 장축으로 하는 타원면, $\kappa = -1$ 이면 포물면, $\kappa < -1$ 이면 쌍곡면을 나타낸다.¹⁷⁾ 그림 5에는 비구면효과를 conic constant로 -1.5로부터 0.5까지 변화시켰을 때에 대해 계산한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 conic constant가 -1.5일 때에 발산각 6도의 경우 시준광의 평행도로부터 벗어나는 오차는 약 3 mrad으로 나타나며 최절한계각 안에서는 2.0 mrad 이 내가 된다고 해석 된다.

허용공차에 대해서는 일반적인 공차는 매우 복잡하고 여기서는 가공기술개발의 가능성 타진으로 고려하여 변수들의 독립적인 공차만을 조사하였다. tilting은 인마가 아니고 기관상에서 etching이나 sputtering방법으로 가공하기 때문에 그다지 문제되지 않을 것으로 보며 surface irregularity는 너무 복잡하고 예측 불허하므로 개발연구시 실험적으로 성능평가 하기로 하고 여기서는 비구면효과로 대치하였다. refractive index의 오차는 10^{-4} 의 오차로서 단일렌즈의 굴절능에 미치는 영향은 매우 작아 무시할 수 있다. 따라서 위에 제시한 변수들의 오차범위는 각 변수의 독립적 허용공차로 볼 수 있다. L1 렌즈의 설계제원과 각 변수들의 독립적인 허용공차는 표 1과 같다.

2. 1.2 렌즈의 설계

L2 렌즈의 유효초점거리를 1.5 mm로 하였다. 초차는 BK-7이며, 렌즈의 두께는 1.2 mm으로서 L1 렌즈와 동일하다. 곡률반경은 0.795 mm이다. 설계방법은 L1 렌즈

표 1. L1 렌즈의 설계제원 및 독립적 허용공차

설계제원	d_1 1.5 mm	r_1 0.796 mm	r_2 infinite	t_1 1.2 mm	κ 0.0
허용공차	δd_1 ± 0.01 mm	δr_1 $\pm 5 \mu m$	-	δt_1 ± 0.05 mm	$\delta \kappa$ -1.5 - 0.5

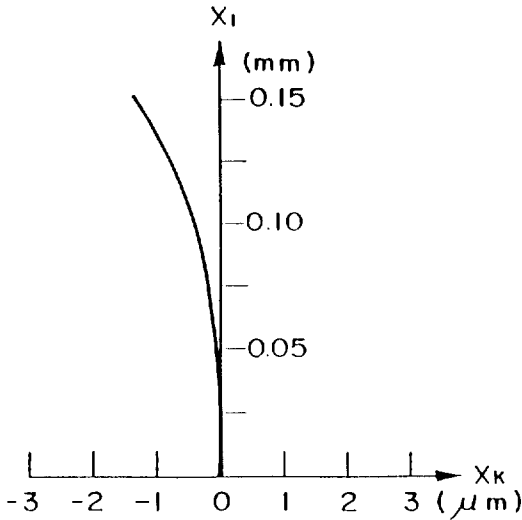


그림 6. Curvature radius tolerance of L2.
 $\delta r_{21} = -5.0 \sim 5.0 (\mu\text{m})$.

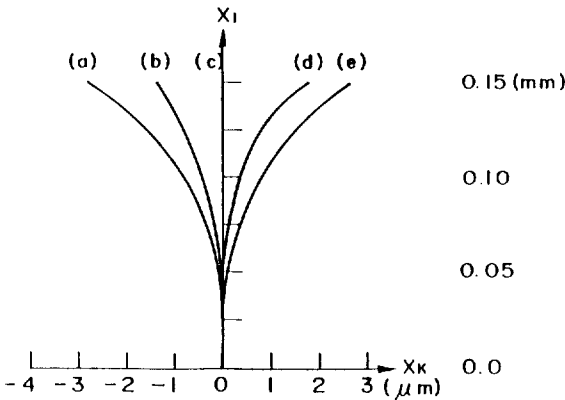


그림 7. Aspheric effects of L2.
 $\kappa = (a) 0.5, (b) 0.0, (c) -0.5, (d) -1.0, (e) -1.5$.

와 유사하나 L2 렌즈에서는 시준광의 방향여현보다는 x-ray fan을 계산하며 그 성능을 평가하였다. 그림 6부터 그림 8에는 L2 렌즈의 설계 변수들에 대한 독립적인 공차를 제시하였다. 그림 6에는 곡률반경이 5.0 μm 로

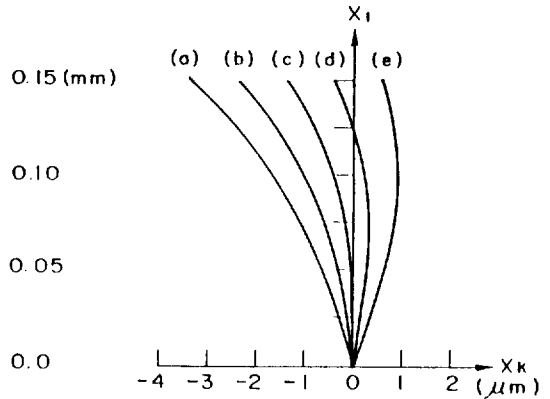


그림 8. Defocussing effect of L2.
 $\delta f = (a) 0.02, (b) 0.01, (c) 0.0, (d) -0.01, (e) -0.02 (\text{mm})$.

가감될 경우 x-ray fan을 계산한 결과가 제시되었다. 그림에서 보는 바와 같이 집속광의 반경이 1.5 μm 이내로서 거의 영향을 주지 않는 정도이며 매우 여유 있는 허용공차를 확인할 수 있다. 그림 7에는 비구면효과를 나타내주고 있으며 conic constant가 -1.5부터 0.5에 이르기까지 집속광의 반경은 3.0 μm 이내로서 회절한계인 4.0 μm 보다 충분히 적다. 그림 8에는 렌즈와 광섬유까지의 거리가 0.751 mm이고 0.02 mm까지 앞뒤로 이동되었을 때에 대한 x-ray fan이 제시되었다. 그림에서 보는 바와 같이 집속되는 광속의 최대반경이 4.0 μm 미만으로 나타나서 회절한계 이내에 들어 온다. L2 렌즈의 설계제원과 설계변수의 독립적인 허용공차는 표 2와 같다.

IV. 결 론

본 연구에서 광통신용 미세광학계를 설계하여 각 변수의 독립적인 허용공차를 조사한 결과 실용적인 가능성이 충분한 것으로 확인 하였다. 국내의 기술로 곡률반경 및 두께의 공차는 각각 2 μm 및 10 μm 는 능히 가공할 수 있으며 비구면의 conic constant의 공차범위도 위에서 조사한 결과 정도이면 매우 폭이 크므로 미세

표 2. L2 렌즈의 설계제원 및 독립적 허용공차

설계제원	d_2 0.751 mm	r_{21} 0.795 mm	r_{22} infinite	t_2 1.2 mm	κ 0.0
허용공차	δd_2 $\pm 0.02 \text{ mm}$	δr_1 $\pm 5.0 \mu\text{m}$	—	δt_2 $\pm 0.05 \text{ mm}$	$\delta \kappa$ $-1.5 \sim 0.5$

광학소자 제작방법의 개발도 그리 힘들지 않을 것으로 판단된다. 앞으로 GRIN렌즈 계통에 관한 연구가 계속 되어야 하고 선진국에서는 광통신 기술과 더불어 micro optics에 대한 기술이 날로 발전하고 있는 바 우리 나라에서도 이 분야의 연구가 보다 더욱 활발하게 진행 되어야 할 것이다.⁸⁾

감사의 말씀

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 목적기초 연구로 수행되었음을 감사합니다.

참 고 문 헌

[1] Hecht, *Optics 2e*, (Addison Wesley, Singapore, 19

87).
[2] Michael K. Barnoski, *Fundamentals of Optical Fiber Communication* (Academic Press, New York, 1976) chap.1.
[3] 이상수, 기하광학, 교학연구사, 1985. p. 61-63.
[4] 홍경희, 한국광학회지, 1, 217 (1990).
[5] 홍경희, Lecture Note, 광학렌즈설계 및 평가, 한국 광학기기협회 제 4 회 광학기술세미나, 1992.
[6] R. E. Hopkins, MIL-HDBK-141 Optical Design, (1962) chap. 8.
[7] Paul Kuttner, SPIE 235, 7 (1980).
[8] Keith H. Wanser and Kristin Lewotsky, Appl. Opt., 30, 5266 (1991).

Micro Lens System Design for the Optical Fiber Communication

Kyung Hee Hong
Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

(Received: July 20, 1992)

A micro lens system was designed for the modulator in optical fiber communication. One was the collimating lens which transferred the diffracted beam from optical fiber to the modulator. The other was the coupling lens which connected the modulated collimating beam to the optical fiber. The light source was He-Ne laser beam. The lens would be made of optical glass BK-7. We determined the tolerance of curvature radius, thickness and conic constant.