

RGB 레이저 가시화를 위한 축대칭 구면 $f\theta$ 렌즈 설계 및 프로젝션응용

이영민^{*☒}, 최해운^{**}

^{*}한국폴리텍VI대학 컴퓨터응용금형과, ^{**}계명대학교 기계자동차공학부

A Study of $f\theta$ Lens Design for Axisymmetric Spherical Surface for RGB Laser Display and its applications

Y. M. Lee^{*☒}, H. W. Choi^{**}

^{*}Dept. of Computer Aided Dies and Mold, Korea PolytechnicsVI

^{**}Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.

Abstract

The design of a telecentric $f\theta$ lens with a field of view (FOV) 30° and an effective focal length of 1000mm is presented. The optical stop is placed at the front plane and the design is based on a geometric ray tracing technique, and the designed system consists of a series of convex and concave lenses. The designed $f\theta$ lens showed a considerable reduction in weight with a simplified structure and resulted in a good performance in the designated FOV. Detail analysis of rays is also presented. 653nm (red laser), 586nm (green laser), and 468nm (blue laser) were simulated as a light source and image illuminating source. The developed optical design requires 7 pieces of lenses made of SF1, N-FK56, N-LAK33, and BK7 glass materials. With optimal parametric design, the effective focal length was calculated to be 974.839mm which is very close to the initial design target. For the manufacturing purpose, the dimensions of lens curvature and thickness were truncated with error ranging 0.1% to 3.2%. As a result, the overall error was calculated to be 3.2% which can be still tolerable for display, laser material, and machining processing.

Keywords: Axisymmetric(축대칭), Spherical surface(구면), FOV(시야각), Machining processing(기계 가공), Laser material Processing(레이저 가공)

1. 서론

1.1 연구의 목적 및 배경

태양광 아래에서 가시성 확보가 필요한 차량용 영상장치 및 디스플레이 장치에서 기존 LED 광이나 음극선 광원의 한계를 갖는다. 이러한 배경 조명의 한계를 극복하기 위해 레이저 사용을 고려해 볼 수 있는데, 단색성을 지니는 레이저의 특성 때문에 일반 디스플레이 장치와는 다르게 설계되어야 하고, 간섭성에 의한 이미징 노이즈를 최소화하는 설계기법이 필요하다.¹⁻⁷

레이저는 단색성을 띄고 있어서 일반 백색광과

비교했을 때 칼라재현의 한계성을 지니고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 적색(red color), 녹색(green color), 그리고 청색(blue color)을 혼합하여 칼라 재현을 시도하고 있으며, RGB색의 제어를 통해 일정 수준의 자연색 재현이 가능할 것으로 기대된다.

레이저 빔은 단색 파장의 특성으로 인하여 렌즈의 곡률이나 거리 등에 굴절률이 민감히 반응하고, 렌즈의 곡률 정밀도에 따라서 최종화질의 선명도에 차이가 난다. 이러한 영향은 디스플레이뿐만 아니라 산업체에서 많이 사용하고 있는 가공용 장비에도 적용이 되며, 시스템의 용도에 맞는 최적의 광학부품 설계가 제품의 품질에 직접적인 영향을 미치게 된다.³⁻⁷

이미지를 선명하게 개선하거나 가공부품의 정밀

투고일 : 2011년 4월 21일 심사완료일 : 2011년 6월 3일

게재승인일 : 2011년 6월 21일

교신저자 : 이영민 ☒ yml123@hanmail.net

도를 높이기 위해 색수차(chromatic aberration) 나 구면 수차(spherical aberration) 개선을 시도하는데, 주로 몇 개의 광학렌즈를 조합하여 개선하는 경우가 많다. 이럴 경우 첫째, 렌즈를 통과하면서 반사 및 산란에 의한 에너지 손실이 많이 발생하고 둘째, 렌즈의 개수 증가로 인한 무게가 급증하게 된다. 결과적으로 더 많은 입력 에너지 공급과 강인한 렌즈 홀더 설계가 부가적으로 필요로 하게 된다. 렌즈의 개수가 증가하게 되면, 색수차 및 구면수차는 개선할 수 있지만, 가공비용과 기타 부대비용의 상승을 가져 올 수 있다.

일정 각도로 입사될 경우 왜곡이 되고 광축을 벗어날 경우 초점위치가 평면이 아닌 곡면을 이루게 된다. 이럴 경우 초점위치에서 레이저 빔이 물체에 조사되지 않으므로 디스플레이에서는 이미지 왜곡이 발생하게 되고, 가공공정에서는 에너지 강도가 부족해 지나친 열발생이나 가공불량으로 이어질 수 있다.⁴

f-θ 렌즈는 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 것으로, 일정각도의 형태로 입력되는 빛을 렌즈를 통해서 원거리 중심보정(telecentric)을 하고 동일 초점거리를 가지는 빛으로 집속하는 렌즈를 일컫는다. 일반적인 상용화된 범용형태의 f-θ 렌즈가 Fig. 1에 도시되어 있다.

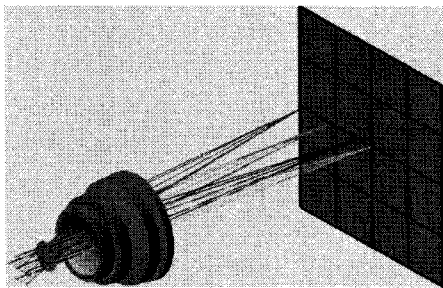


Fig. 1 The concept of f-θ lens.⁸

본 논문에서는 656nm, 588nm, 486nm의 파장을 가지는 적색, 녹색, 청색 레이저를 조사하여 초점거리 약 1000mm를 가지는 렌즈를 최적설계하는 방법과 특성실험에 대한 결과를 소개한다. 최적설계의 조건은 사용렌즈의 개수를 최소화 하면서, 최대 입사각이 15° 범위 내에서 왜곡도가 최소화 되도록 하였다. 또한, 물질에 따라 파장흡수도가 다른 바이오품질을 위해서 다파장에서도 왜곡률이 작은 렌즈를 설계하기 위해서 RGB 삼색광에 모두적용이 가능한 렌즈설계를 목표로 하

였다. 마지막으로, 가상이미지를 시뮬레이션하여 형상 왜곡도가 최소화될 수 있도록 광학장치를 설계함을 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 광학설계의 이론적 배경

Fig. 1에서 제시된 바와 같이 광축방향에 직교하는 축의 방향을 r축이라 정의하면 f-θ 특성(f-θ error, E)은 식(1)과 같이 정의할 수 있고,

$$E = \frac{r - f\theta}{f\theta} \times 100\% \quad (1)$$

여기서 r은 상높이, f는 초점거리, θ는 주사각을 말하며, fθ는 광축 중심에서 초점거리를 반지름으로 하는 원호의 길이 말한다. 또한, 초점 평면 왜곡도(spot unevenness, U)는 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$U = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

여기서 d_{max}와 d_{min}은 각각 최대 최소 초점직경을 말한다. 렌즈 설계 시 중요한 변수는 렌즈의 곡률(radius of curvature), 렌즈의 재질, 그리고 렌즈 간의 간격이라고 할 수가 있다. 본 논문에서 렌즈 곡률 및 간격은 변수로 설정하고 초점거리 1000mm를 목표상수로 정한 뒤 ZEMAX-EE (Engineering Edition) 광학 소프트웨어를 사용해서 최적의 곡률 및 간격을 계산하였다. 굴절률이 서로 다른 물질을 통과하는 레이저의 경우 Snell's 법칙으로 빛의 방향을 예측할 수 있으며 벡터 형태로 표현을 하면 식(3)과 같다.¹

$$\begin{aligned} \cos\theta_1 &= \vec{n} \cdot (-\vec{I}) \\ \cos\theta_2 &= \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 (1 - (\cos\theta_1)^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 θ₁은 입사각(angle of incidence) θ₂는 출사각(angle of refraction), n₁과 n₂는 각 재료의 굴절계수, 벡터 **n**과 **I**는 입사평면의 수직 벡터와 입사되는 빛의 수직된 벡터함수를 의미하며 기호에 대한 상세한 설명은 Fig. 2에 기술되어 있다.

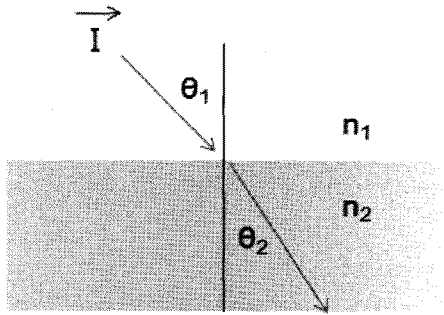


Fig. 2 Notation for laser beam incidence.

곡률반경 및 거리와 함께 중요한 변수 중의 하나는 재료의 종류인데, 본 실험에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 SF3, N-FK56, N-LAK33, BK7을 사용했으며 파장에 따른 굴절률을 Table 1에 정리하였다.

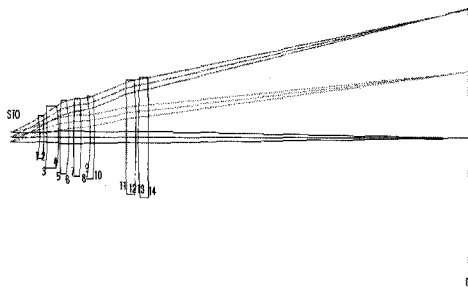
Table 1 Index of refraction for wavelength⁹

Wavelength	656nm	588nm	486nm
SF3	1.731	1.742	1.758
N-FK56	1.433	1.435	1.437
N-LAK33	1.750	1.754	1.764
BK7	1.523	1.517	1.514

2.2 실험의 방법

실험을 위해 사용한 광시뮬레이션 소프트웨어는 ZEMAX-EE 버전을 사용했으며, 입력 파장에 따른 광학렌즈 재료의 각각의 굴절계수는 Table 1과 같이 설정하였고, 입사각은 ±15° 범위로 설정을 하였다. 제한 조건으로는 최종 초점거리를 1000mm로 설정하고, 곡률과 거리는 변수로 지정하였다.

기초 시뮬레이션을 통해서 이미지의 선명도 향상과 수차의 최소화를 위해 총 7개의 축대칭 구면렌즈로 최종 설정하였다. ZEMAX-EE에 설정한 렌즈 데이터 값이 Fig. 3에 도시되어 있다.



(a) Geometric lens locations

Surf. Type	Radius	Thickness	Glass
OBJ Standard	Infinity	Infinity	
STO Standard	Infinity	90.000	
2 Standard	-109.769	12.870	SF3
3 Standard	-709.220	10.110	
4 Standard	-297.619	37.430	N-FK5
5 Standard	-171.233	4.360	
6 Standard	1449.275	27.870	N-LAK14
7 Standard	-206.612	15.000	
8 Standard	1282.051	21.460	N-FK5
9 Standard	-751.880	30.000	
10 Standard	-209.205	13.000	SF3
11 Standard	-581.395	100.000	
12 Standard	Infinity	30.000	BK7
13 Standard	-1086.957	8.000	
14 Standard	1086.957	30.000	BK7
15 Standard	Infinity	1000.000	
IMA Standard	Infinity	-	

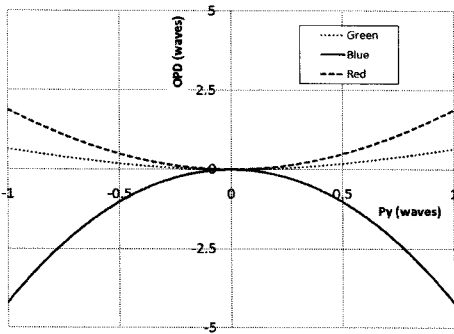
(b) Lens geometric data

Fig. 3 Index of lens surfaces and geometry.

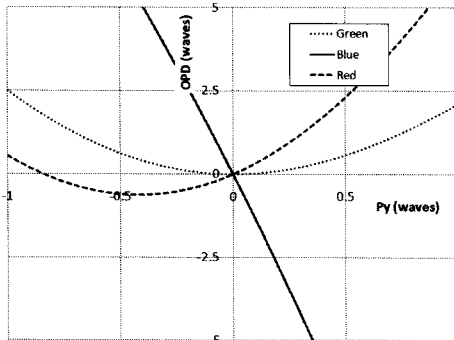
2.3 실험의 결과

2.3.1 입사에 따른 광선의 왜곡도 분석

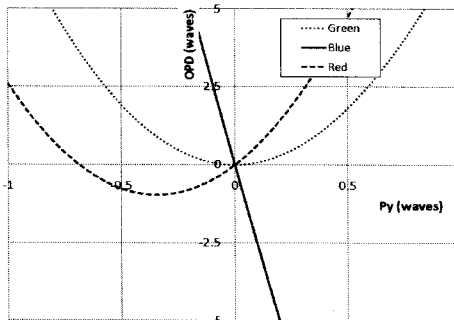
서로 다른 파장을 가지는 레이저 빔을 각각 다른 입사각도로 조사 했을 때의 분석결과를 그림에서 도시했다. 입사각도가 0°, 7.5°, 15°일 때의 각각의 광선이 가지는 왜곡도를 알아보기 위해 빔궤적 차이(optical path difference; OPD)를 y축으로 분석해 보았으며, 그 결과가 Fig. 4에 도시되어 있다. 이때 광선의 특성상 x방향의 왜곡도(Px)는 그 차이가 크지 않아 생략하였으며, y방향의 왜곡도(Py)만 Fig. 4에 표시하였다. 왜곡도란 이상적인 위치에서의 벗어난 정도를 말하며 단위는 파장(wave)으로 나타내었다. 파장별 시뮬레이션 결과 0°에서의 왜곡은 적색 레이저(656nm)와 녹색 레이저(588nm)는 2파장이내, 청색 레이저(486nm)에서는 4파장 범위에서 미미하게 왜곡이 발생하였다(Fig. 4(a)). 7.5° 입사각도의 경우 x축 방향의 왜곡은 0°에서의 왜곡과 비슷하게 나타났으나, y축 방향으로서는 적색 레이저는 5파장을 벗어났고, 녹색 레이저는 2파장이내, 청색레이저는 15파장 범위까지 벗어났다(Fig. 4(b)). 15° 입사각도의 경우 x축 방향의 왜곡은 0°에서의 왜곡과 비슷하게 나타났으나, y축 방향으로서는 적색, 녹색, 청색 모두 왜곡범위가 심하게 나타났다.



(a) OPD for 0°



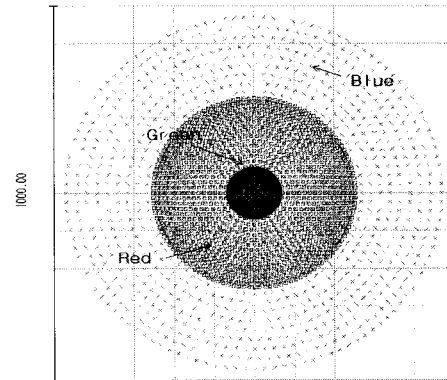
(b) OPD for 7.5°



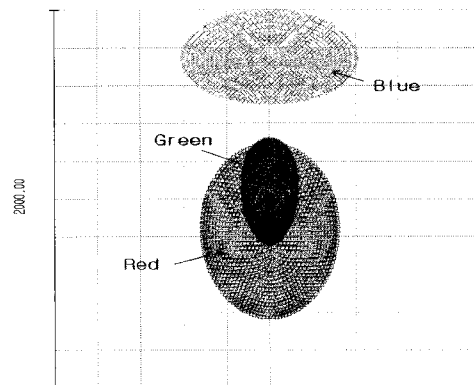
(c) OPD for 15°

Fig. 4 Optical path difference plot(x axis - P_y , y axis - OPD).

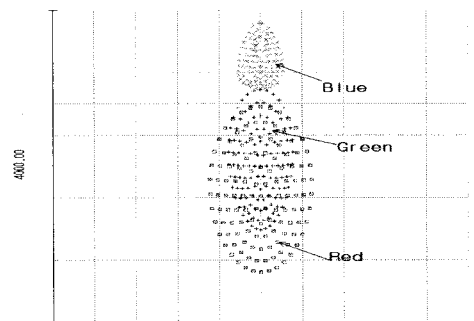
이미지 위치에서의 초점왜곡에 대한 분석을 실시하였으며 입사각도에 따른 왜곡량이 Fig. 5에 도시되어 있다. 초점위치에서의 분포는 0°에서는 최대 8 μm 범위에서 형성됨을 볼 수가 있었고, 7.5°에서는 최대 16 μm 범위, 그리고 15° 입사각에서는 약 32 μm 범위로 분포하는 것을 알 수가 있었다. 정확한 RMS 및 GEO 반경은 Table 2에 정리하였다. 여기서, GEO란 주광선(chief ray)을 포함하여 모든 광선을 포함하는 영역을 말한다. 결과적으로 15° 범위의 영역에서 반경 16 μm 정도의 왜곡이 발생하므로 디스플레이용으로 사용 시 약간의 이미지 흔들림이 발생할 수 있지만 육안으로 불편을 느낄 만큼의 양은 아닐 것으로 분석된다.



(a) Spot for incidence angle of 0° (unit: μm)



(b) Spot for incidence angle of 7.5° (unit: μm)



(c) Spot for incidence angle of 15° (unit: μm)

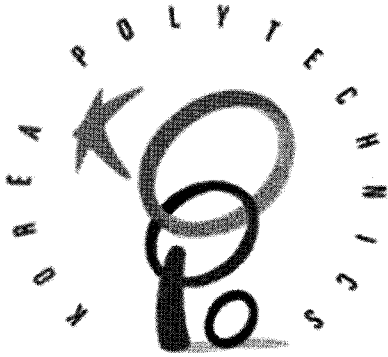
Fig. 5 Spot diagram plot.

Table 2 RMS and GEO spot radius data for the incidence angles

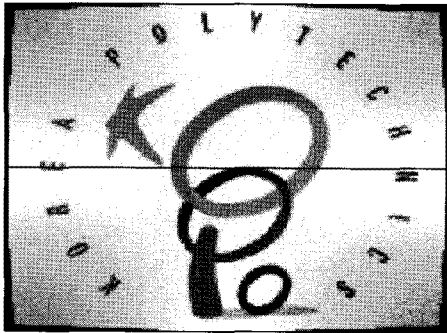
Inc. (°)	0°	7.5°	15°
RMS Rad (μm)	235.288	501.251	952.483
GEO Rad (μm)	469.757	995.437	1839.54

마지막으로 개발된 광학계를 시험하기 위해 실제 이미지를 테스트하였다. 시험에 사용한 이미지는 한국폴리텍대학 로고이며, 원래의 이미지와 시뮬레이션후의 이미지가 Fig. 6에 도시되어 있다. 가시영역 400nm(자색)-700nm(적색) 전 구간의 이미지가 비교적 선명하게 맺힘을 알 수가 있었다.

에지부분이 일부 왜곡이 발생하였는데, 이는 앞 절에서 분석된 것과 같이 15° 영역에서 발생하는 빛 왜곡현상 때문에 발생하는 것으로 분석되며, 가로방향의 에지 부분의 어두운 명암도 일부 개선되어야 할 사항으로 판단된다.



(a) Original image



(b) Projected image

Fig. 6 Image simulation.

초점거리는 목표로 했던 1000mm에 전반적으로 양호하게 근접한 974.839mm로 계산되었다. 오차는 계산상의 오차와 주광선 계산 시 발생하는 오차에서 기인된 것으로 판단된다. 광학기기 제작 시 곡률반경의 소수점이하 숫자를 간략화하고, 공간의 수치를 가급적 간략화하기 위해 실제 계산된 값에서 소수점을 간략화해서 시뮬레이션후의 초점거리 변화를 알아보았으며 렌즈의 반경에 대한 간략 데이터 내역과 렌즈 두께에 대한 간략 데이터 내역을 Table 3,4에 각각 요약하였다. 또한 각각의 적용값에서 실제값을 뺀 값을 계산하여 오차를 계산하였다.

$$\text{오차} = \frac{\text{실제값} - \text{적용값}}{\text{실제값}} \times 100\% \quad (4)$$

Table 3 True vs. optimized lens radius data and errors

Item	True value (mm)	Optimized value (mm)	Error (%)
STO	Inf.	Inf.	-
2	-109.769	-110	0.2
3	-709.22	-710	0.1
4	-297.619	-298	0.1
5	-171.233	-171	0.1
6	1449.275	1450	0.1
7	-206.612	-206	0.3
8	1282.051	1282	0.0
9	-751.88	-752	0.0
10	-209.205	-209	0.1
11	-581.395	-581	0.1
12	Inf.	Inf.	Inf.
13	-1086.957	-1087	0.0
14	1086.957	1087	0.0
15	Inf.		

Table 4 True vs. optimized lens gap data and errors

Item	True value (mm)	Optimized value (mm)	Error (%)
STO	90	90	0
2	12.87	12.9	0.2
3	10.11	10	1.1
4	37.43	37	1.2
5	4.36	4.5	3.2
6	27.87	28	0.5
7	15	15	0
8	21.46	22	2.5
9	30	30	0
10	13	13	0
11	100	100	0
12	30	30	0
13	8	8	0
14	30	30	0
15	1000	974.839	2.5

결과에서 나타난 바와 같이, 소수점에 대한 정리를 하여 오차범위가 각각 0.1-3.2% 범위로 나타났지만, 5번 렌즈의 오차는 3.2%로 적지 않은 누적오차가 계산되었다. 통상적으로 기계가공 시 발생하는 오차는 수십 마이크로미터를 넘지 않기 때문에 렌즈 곡률 및 렌즈 두께에 대한 적용값은 적절한 가정이라 판단된다. 따라서 조립된 광학 장치의 누적 오차 3.2%는 최대 오차라고 가정해 해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 RGB 레이저 빔 최적화 디스플레이를 위한 $f-\theta$ 렌즈 최적화를 위한 기하학적 설계에 대한 연구 결과를 수록하였다. $f-\theta$ 렌즈는 일정각도 범위 내에서 이미지 및 레이저 빔의 왜곡을 최소화할 수 있는 장점이 있지만, 다단의 광학부품을 지나면서 에너지 손실이 발생하고, 렌즈의 무게가 무거워지는 단점이 발생 하지만 이미지 선명도 향상과 수차를 최소화하기 위한 렌즈 시스템을 최적화하였다.

설계 결과 서로 다른 파장별로 굴절계수를 지니는 광학렌즈 총 7매를 사용하여 입사각 0° , 7.5° , 그리고 15° 를 지나는 레이저 빔 통과 시 왜곡이 각각 $8\mu\text{m}$, $16\mu\text{m}$, 그리고 $32\mu\text{m}$ 범위 내에 위치하는 렌즈를 최적화할 수 있었다.

도출된 렌즈의 곡률반경 및 두께의 오차값을 계산하고, 가공의 편의를 위해서 소수점 첫째자리로 절사 또는 반올림하여 설계한 결과 전체적으로 0.1%에서 3.2% 정도의 오차가 발생하였고, 최대 누적오차는 3.2% 정도로 환산되었다.

개발된 광학시스템은 디스플레이용이나 레이저 및 기계가공용 $f-\theta$ 렌즈로 사용이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) H. Wu, Z. Wang, R. Fu and J. Liu, "Design of a hybrid diffractive achromatized telecentric F-Theta lens," *Optik*, 117, pp. 271-276, 2006.
- 2) J. Alda, J. Rico-Garcia, J. Lopez-Alonso, B. Lail and G. Boreman, "Design of Fresnel lenses and binary-staircase kinoforms of low value of the aperture number," *Optics communications*, 260, pp. 454-461, 2006.
- 3) A. Miks, J. Novak, and P. Novak, "Third-order design of aspheric spectacle lenses", *Optik*, 121, pp. 2097-2104, 2010.
- 4) C. Wen, K. Yuan, P. Chou, J. Huang, and C. Lee, "An F-theta lens design for bio-medical system: Laser scanning microarray reader," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 37, No. 1, pp. 1367-1376, 2006.
- 5) 김상석, 정상화, 김현옥, 김혜정, "F-theta 렌즈 금형코어 형상정도 향상에 관한 연구", 한국정밀공학회, 2005년 추계학술대회 논문집, pp. 777-780, 2005
- 6) 임천석, "Laser Scanning Unit용 광학계 설계," 한국광학회지, 제10권, 제1호, pp. 15-20, 1999.
- 7) 김상석, "레이저 빔 프린터용 F-theta Lens 개발," 한국재료공학회지, 제19권, 제4호, pp. 386-390, 2006.
- 8) http://www.fzgf.com/pro_oc.htm 기술자료
- 9) ZMAX-EE, reference manual, ZEMAX Development Corporation, Oct. 2010.