

Design and Development of F-theta Lens for 1064 nm Laser

Dong-Hee Lee¹ and Seung-Hwan Park^{2,*}

¹Dept. of Visual Optics, Far East University, EumSeong 369-700, Korea

²Dept. of Biomedical Engineering, Eulji University, SeungNam 461-713, Korea

(Received November 14, 2016: Revised December 11, 2016: Accepted December 12, 2016)

Purpose: To design and develop the f-theta lens for 1064 nm laser. **Methods:** In order to design the f-theta lens that satisfies the user's conditions which are the laser beam diameter of 15 mm, the image point diameter of 30 μm or less, the optical system thickness within 70 mm, the working distance of about 295 mm, and the effective image diameter within about 260 mm, method of setting the galvanomirror driving angles to eight zoom modes was used. **Results:** By optimizing for the galvanomirror driving angles set to the eight zoom modes, we could design the f-theta lens of which characteristics have the effective image diameter within about 260 mm, the sign of the refractive power constructed in order of (+) (-) (+) (+), the resolving line width of 18.8 lps/mm (@ 40% MTF), the focal length of about 254 mm, the working distance of about 295 mm, and the maximum galvanomirror driving angle of $\pm 10.5^\circ$. **Conclusions:** In this study, by using the method to set the galvanomirror driving angles to multiple zoom modes for optimizing the f-theta lens design, we could easily design and manufacture the f-theta lens that satisfies user's requirement.

Key words: 1064 nm laser, F-theta lens, Marking machine, Galvanomirror, Distortion

서 론

요즘 반도체뿐 아니라 휴대전화, 화장품 케이스, 안경테, VR장비, AR장비 등의 소비재에 글자나 무늬를 새길 때 사용하는 기기가 유성잉크 마킹기에서 레이저 마킹기로 빠르게 전환되고 있다. 이는 다양한 산업환경에서 광범위한 범위의 피사체에 빠른 속도로 필요로 하는 다양한 글자 또는 기호를 새길 수 있고, 유성잉크의 경우에는 나타나는 단점인 잉크가 마르기까지의 시간이 지체된다는 점을 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 초기의 레이저 마킹기에 비해 가격이 상당히 저렴해졌다는 점에 있어서 나타나는 현상이다.

이러한 레이저 마킹기는 레이저 소스, 빔확대기(beam expander), 갈바노미러(galvanomirror), f-theta 렌즈 등으로 구성되어 있다.^[1-6] 국내 대부분의 레이저 마킹기 제조업체는 이들 대부분의 부품을 수입해서 조립하고 있는 실정이나, 최근 일부 중견업체들은 이들 부품을 국산화하기 시작하고 있다. 특히 f-theta 렌즈는, 회동하는 평면거울을 갈바노미러로 사용하는 주사광학계에서 주사광이 상면에서 등속으로 주사하도록 하기 위하여 상의 높이가 스캔 각 θ 에 비례하도록 만들어진 렌즈로, 왜곡수차^[1,4]를 발생시켜 등속주사가 이루어

어지게 하는 레이저 마킹기의 핵심 요소이다. 지금까지 국내 제조업체 대부분은 독일의 JENOPTIK, SILLOPTICS, 미국의 II-VI 등에서 수입 사용해오고 있었는데, 최근 국내에서도 다양한 모델에서 국산화가 진행되고 있다.

본 연구도 안경테, 광학장비(VR, AR) 제조업체용으로 레이저 마킹기를 개발하기를 원하는 국내 마킹기 제조업체가 f-theta 렌즈의 설계 개발을 의뢰함으로써 진행하게 되었다. 안경테인 경우에는 열가소성 및 열경화성 수지로 이루어진 템플의 안쪽 마킹이 필요하고, VR장비, AR장비는 하우징(고글부) 외관부의 마킹이 필요하기 때문에 플라스틱 사출물에서 깨끗한 마킹이 가능한 것으로 알려진 Nd:YAG 레이저 1064 nm^[7]의 광원을 채택하기로 하였다.

따라서 본 논문에서는 안경광학 산업계에 이용될 마킹기의 중요 부품인 1064 nm 레이저용 f-theta 렌즈의 설계 개발에 대해 전개하고자 한다. 설계 S/W는 OPTICAL RESEARCH ASSOCIATES 사의 CodeV를 사용하였다.

대상 및 방법

1. 레이저 마킹용 f-theta 렌즈의 개요^[1,2,4,6]

일반적으로 단렌즈(singlet)인 경우에는 Fig. 1(a)와 같이

*Corresponding author: Seung-Hwan Park, TEL: +82-31-740-7216, E-mail: pasuhwa@eulji.ac.kr

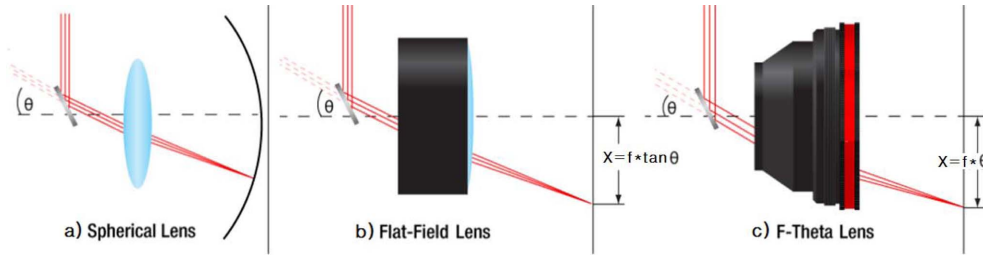


Fig. 1. Comparison of the ordinary lens(a, b) and the f-theta lens(c) in the screen imaging when used in the scanning system. ((a) shows the field curvature induced from the ordinary spherical singlet. (b) shows that the image height is $f \times \tan\theta$ in case of the flat-field lens. (c) shows that the image height is $f \times \theta$ in case of the f-theta lens.) This figure was revised and cited from reference [1].

상면만곡이 제어되지 않기 때문에 무한대의 물체에서 광선이 갈바노미러에 의해서 연속적인 각도 변화로 입사되면 광축과 입사광선이 이루는 각 스캔 각 θ 에 따라 결상되는 상면은 휘어지게 된다. 이러한 단점을 해결한 것이 Fig. 1(b)와 같은 상면만곡을 제거한 Flat-Field 렌즈인데 일반적으로 필름 및 CCD 결상용 렌즈가 채택하고 있는 방식이다. 이러한 렌즈는 무한대에 있는 물체가 필름 또는 CCD 결상면에 왜곡없이 결상되기 위해서는 결상면 상의 높이 x 는 $x = f \times \tan\theta$ (f 는 렌즈의 상측 초점거리, θ 는 조사각도=입사각)를 만족하도록 설계되어지는데, 이러한 설계도 스캔 광학계에는 적용할 수 없다. 즉 스캔 각 θ 와 스캔되는 거리 f 는 tangent 함수의 관계가 있어, 결상면에서의 상의 높이 x 는 스캔 각 θ 에 따라 선형적(linear)으로 변하지 않고 결상면의 중심에서 멀어질수록 상의 높이 x 는 가속을 받아 증가하게 된다. 이는 등속의 스캔 각 θ 입장에서 보면 상의 높이 x 가 높아질수록 점점 더 커지는 현상으로 나타나 마치 실패형 왜곡수차를 가지는 것과 같은 효과를 가져 온다. 이렇게 되면 스캐닝을 하기 위해 회동하는 갈바노미러도 회전각속도가 광축에서 멀어질수록 감소하는 방향으로 제어해야 하기 때문에 구동 모터의 제작에 많은 노력과 비용이 들어가게 된다. 이러한 현상을 렌즈의 설계를 통해 극복하기 위해서는 Fig. 1(c)와 같이 상의 높이 x 를 스캔 각 θ 에 따라 선형적인 관계로 나타나게 해야 하는데, 이렇게 개발된 렌즈가 Fig. 2와 같은 f-theta

lens인 것이다. 이는 렌즈 설계 단계에서 적정 수준의 슬롯형 왜곡을 넣어 앞에서 언급된 상의 높이 x 가 중심에서 멀어질수록 가속되어 증가하는 현상을 상쇄시킬 수 있도록 한 것이다.

2. 레이저 마킹용 f-theta 렌즈의 설계 조건

안경테, 광학장비(VR, AR) 제조업체용으로 레이저 마킹기를 개발하기를 원하는 국내 마킹기 제조업체가 f-theta 렌즈의 설계 개발을 의뢰한 스펙은 Table 1과 같다. 여기서 결상점 지름 $30 \mu\text{m}$ 는 MTF(Modulation Transfer Function)의 선폭으로 계산하면 $\frac{1}{0.03\text{mm}} \div 2 = 16.67 \text{ lps/mm}$ 에 해당한다. 따라서 설계되어질 f-theta 렌즈가 이를 충족시키기 위해서는 일반적으로 고려되는 MTF 40%에서 16.67 lps/mm 이상의 분해능^[8-10]을 가지면 된다.

3. 1064 nm 레이저용 f-theta 렌즈의 초기 설계조건 도출

우리는 상기에 제시된 사용자의 스펙을 만족 할 수 있도록 초기 설계를 하였는데 첫 번째 두 갈바노미러 사이의 간격이 커지면 커질수록 제거해야 할 광선 수차들과 유효 렌즈 사이즈가 커지기 때문에 두 갈바노미러 사이의 간격을 최소로 하여 20 mm로 하였다. 두 번째 갈바노미

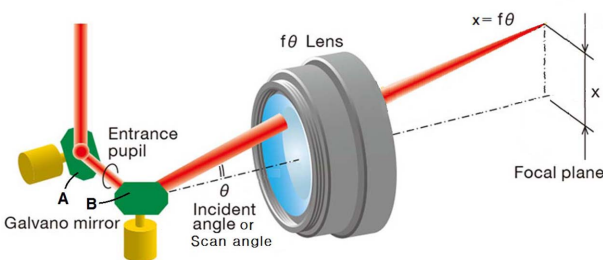


Fig. 2. 3D configuration showed the relation between the f-theta lens and the galvanomirrors. This figure was revised and cited from reference [2].

Table 1. Design specifications of f-theta lens demanded by user

Distance between galvanomirror A & B	$\geq 20 \text{ mm}$
Distance between galvanomirror B and first surface of 1 st lens	$\geq 19.5 \text{ mm}$
Effective input beam diameter	$\geq 15 \text{ mm}$
Working distance (BFL)	$295 \pm 10 \text{ mm}$
Effective input diameter	$\approx 20 \text{ mm}$
Diagonal size of effective image field	$260 \pm 10 \text{ mm}$
Distance between first surface of 1 st lens and 2 nd surface of last lens	$\leq 70 \text{ mm}$
Image point diameter	$\leq 30 \mu\text{m}$

러 B와 1번 렌즈의 1면과의 광축상 거리를 최소화 하여 19.5 mm로 하였다. 이렇게 함으로서 앞에서의 이유와 마찬가지로 제거해야 할 광선 수차들과 유효 렌즈 사이즈가 커지지 않도록 하였다. 작업거리(WD)와 유효 상의 대각 거리(DiaR)에 의해 설계해야 할 갈바노미러 A, B의 구동각 θ_a , θ_b 가 결정되는데 일반적으로 θ_a 와 θ_b 는 같은 양을 갖도록 한다. 또한 실제 레이저 빔이 이 구동각 θ_a , θ_b 에 대해서 스캔하는 각 θ_A , θ_B 는 $\theta_A \approx 2 \times \theta_a$, $\theta_B \approx 2 \times \theta_b$ 의 관계가 있다. 이들 사이의 관계식은 아래와 같으며 피타고라스의 정리를 사용하면 쉽게 유도할 수 있다.

$$2 \times EFL \times \sqrt{(\theta_A)^2 + (\theta_B)^2} = 2\sqrt{2} \times EFL \times \theta_A = \text{DiaR} \quad (1)$$

(단 $\theta_A = \theta_B$ 를 적용함)

실제 사용자에 의해서 주어진 초점거리는 작업거리로 주어지는 BFL(Back Focal Length)만 있기 때문에 이를 EFL(Effective Focal Length)로 환산하여 설계에 이용하여야 한다. 대부분의 f-theta 렌즈는 +메니커스 타입의 렌즈이기 때문에 제 2 주요면이 마지막 렌즈면에서 + 방향(결상면 쪽)으로 치우쳐 있다는 것은 잘 알려진 내용이다.^[3] 이는 참고 문헌 [1]의 f-theta 렌즈에서 EFL이 BFL의 84%~88% 범위에 있다는 것에서 확인할 수 있으며, 이에 우리는 초기 설계의 조건으로 제 2 주요면을 마지막 렌즈면에서 + 방향으로 작업거리(WD=BFL)의 15%의 범위로 하여

$$EFL = 0.85 \times BFL \quad (2)$$

로 계산하여 초기 설계 조건으로 하였다.

이렇게 계산된 EFL은 250.75 mm이고, Table 1에서 DiaR=260 mm이므로, 이들을 식 (1)에 대입하면 $\theta_A = 0.3666 \text{ radian} = 21.0^\circ \approx 2 \times \theta_a$ 가 된다.

Table 2는 이렇게 해서 결정된 초기설계에서의 구속 조건을 제시하고 있다.

4. 1064 nm 레이저용 f-theta 렌즈의 최적화 설계^[10-12]

마지막 보호유리(protecting window)의 두께를 3 mm로 고정하고, Table 2에 제시된 구속조건으로 최적화를 시작하였는데, 처음에는 렌즈의 배치를 (-)(+)(+)(0) 굴절력으로 하여 시작하였으나^[3] 색수차가 상면에서 30 μm 이상으로 과도하게 나타나 첫 번째 렌즈의 총 굴절력을 (-)를 유지한 채로 (+)(-) 굴절력의 분포를 가지는 2장으로 분해

Table 2. Optical constraints for the initial design of our f-theta lens

1) Distance between galvanomirror A & B	= 20 mm
2) Distance between galvanomirror B and first surface of 1 st lens	= 19.5 mm
3) Effective input beam diameter	= 15 mm
4) Working distance (BFL)	= 295±10 mm
5) Distance between first surface of 1 st lens and 2 nd surface of last lens	≤ 70 mm
6) Diagonal size of effective image field	= 260±10 mm
7) θ_A	= ±21.0°
8) EFL	= 250.75 mm

Table 3. Optimized design data of the f-theta lens obtained from CodeV

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Aperture
Object	Sphere	Infinity	Infinity		Refract	○
Stop	Sphere	Infinity	15.0000		Refract	7.5000 ○
2	Sphere	Infinity	0.0000		Reflect	13.2414 ○
3	Sphere	Infinity	-20.0000		Refract	8.0336 ○
4	Sphere	Infinity	0.0000		Reflect	17.7804 ○
5	Sphere	Infinity	19.5000		Refract	15.7109 ○
6	Sphere	-96.1313	7.0000	SF11	Refract	23.4215 ○
7	Sphere	-66.2747	2.1260		Refract	25.3064 ○
8	Sphere	-53.9222	5.5000	BK7_S	Refract	25.5660 ○
9	Sphere	387.7120	6.8110		Refract	31.2597 ○
10	Sphere	1074.3355	13.0000	SF11	Refract	36.6751 ○
11	Sphere	-155.1541	11.2610		Refract	39.4571 ○
12	Sphere	-296.6315	15.0000	SF11	Refract	45.6902 ○
13	Sphere	-116.6080	3.0000		Refract	48.3823 ○
14	Sphere	Infinity	3.0000	BK7_S	Refract	51.7677 ○
15	Sphere	Infinity	295.0813		Refract	52.2599 ○
Image	Sphere	Infinity	0.0000		Refract	130.4559 ○
End Of Data						

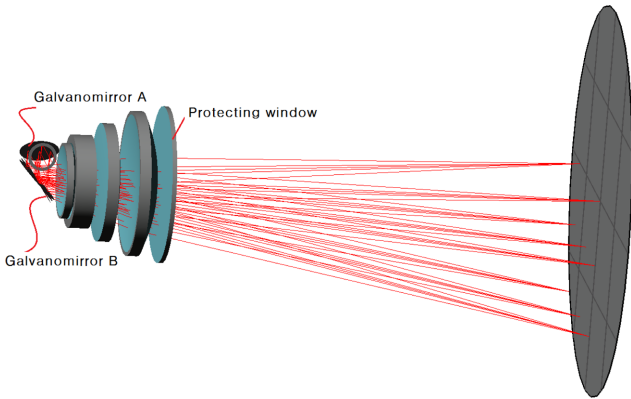


Fig. 3. 3D ray tracing on the new designed f-theta lens system.

하여 색수차를 감소($<20 \mu\text{m}$)시키는 최적화를 진행하였다. 어느 정도 색수차의 감소를 확인한 다음, 다음 단계에서는 초기 구속조건이었던 유효초점거리(EFL)를 변수로 두고 최종 최적화를 진행하였다. 이런 과정을 거쳐서 결정된 시스템의 설계 데이터는 Table 3과 같고 3D 광선추적도는 Fig. 3과 같고 초점거리(EFL)는 Table 3의 데이터에 의해 254.4261 mm 로 계산되었다. 최적화 시 광경로 상 서로 직각으로 구성되어 있는 갈바노미러 A, B의 구동각 θ_a, θ_b 를 각각 $\pm 5.0^\circ, \pm 10.5^\circ$ 로 하였고 이들이 중복되지 않도록 하기 위하여 Table 4와 같은 줌모드 8가지를 설정하여 최적화에 사용하였다. 여기서 Table 4의 surface 2,4는 Table 3에서 갈바노미러의 터미 surface가 설정된 surface 2,4와 같고, Alpha Ti는 갈바노미러 A의 구동각, Beta Ti는 갈바노미러 B의 구동각을 나타낸다. Table 3에서 3번째 면의 두께 부호가 음수인 것은 반사면의 홀수 번 반사로 거리의 부호가 바뀐 것^[10]을 나타낸다. Table 5에는 이들 줌모드 8가지와 갈바노미러의 상대적인 구동각과의 관계를 나타내었다. 이들 8가지 줌모드의 영역을 Fig. 3에서 보면 3/4분면의 광선 추적을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. CodeV의 최적화한 결과의 설계 데이터를 보여주는 Table 3^[10]에서 보면 초차는 SF11, BK7으로 구성되어 있는데 이는 색

수차 제거에 우수한 구성으로 잘 알려져 있는 플린트와 크라운 초차의 조합^[12]으로 판단된다. 또한 Table 3에서 보면 3면과 5면의 두께가 -20 mm 과 19.5 mm 로 되어 있고, 스톱면과 최종 결상면의 세미 유효구경(Semi-Aperture)이 각각 $7.5 \text{ mm}, 130.4559 \text{ mm}$ 로 되어있으며, 상면 바로 앞에 위치한 15번째 면의 두께가 295.0813 mm 로 되어 있다는 것에서 Table 2에서의 구속조건 1), 2), 3), 6)과 4)를 충족하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Table 3에서 보면 렌즈의 전체 두께는 6면에서 14면까지의 두께의 합이므로 66.698 mm 로 계산되고 이는 Table 2의 구속조건 5)을 충족하고 있음을 확인할 수 있다. 최적화되어진 광학계의 초점거리(EFL)가 254.4261 mm 이고 스톱의 반경이 7.5 mm 임을 고려하면 NA(numerical aperture)는 $\frac{7.5}{254.4261} = 0.0295$ 로 계산된다.

결과 및 고찰

Fig. 4에서 보면 Table 5에서의 8가지 줌모드에서의 스폿 다이어그램을 확인할 수 있는데 여기서 보이는 원은 Airy disk를 나타내고 있으며 이의 직경은 $0.61 \frac{\lambda}{NA}$ ^[9]로 나타나는데 앞에서 계산된 설계된 광학계의 NA가 0.0295 이고 사용하는 레이저의 파장(λ)이 $1.064 \mu\text{m}$ 이기 때문에

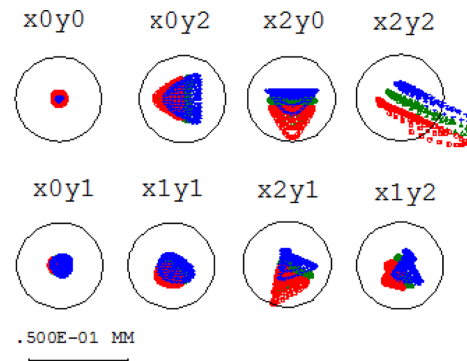


Fig. 4. Spot diagram of the new designed f-theta lens system in the 8 zoom modes.

Table 4. Driving angle configuration of the zoom-modes for using in optimization of CodeV (unit : degree)

Surf ace	Parameter	Zoom - 1	Zoom - 2	Zoom - 3	Zoom - 4	Zoom - 5	Zoom - 6	Zoom - 7	Zoom - 8
1	Lens Tit	x0y0	x0y2	x2y0	x2y2	x0y1	x1y1	x2y1	x1y2
2	2 Alpha Ti	45.0000	45.0000	55.5000	55.5000	45.0000	50.0000	55.5000	50.0000
3	4 Beta Til	45.0000	55.5000	45.0000	55.5000	50.0000	50.0000	50.0000	55.5000
End Of Data									

Table 5. Relationship between the zoom modes and the rotation angle of galvanomirror

Zoom states	xoyo	x0y2	x2y0	x2y2	x0y1	x1y1	x2y1	x1y2
galvanomirror A(deg)	0	0	10.5	10.5	0	5.0	10.5	5.0
galvanomirror B(deg)	0	10.5	0	10.5	5.0	5.0	5.0	10.5

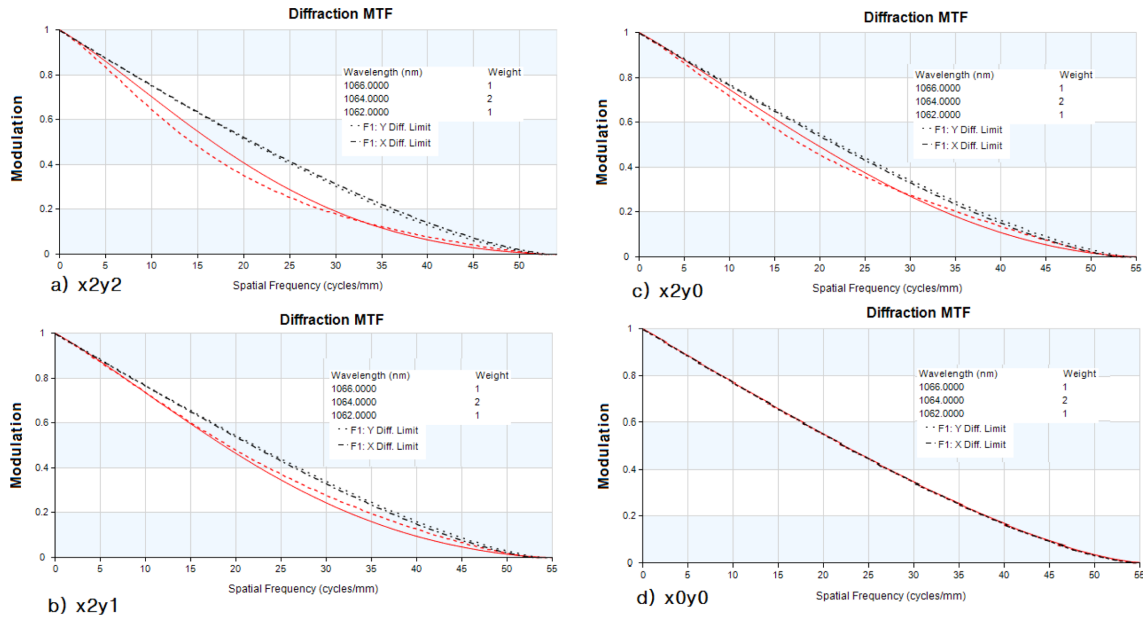


Fig. 5. MTF curve of the new designed f-theta lens system in the 4 zoom modes.

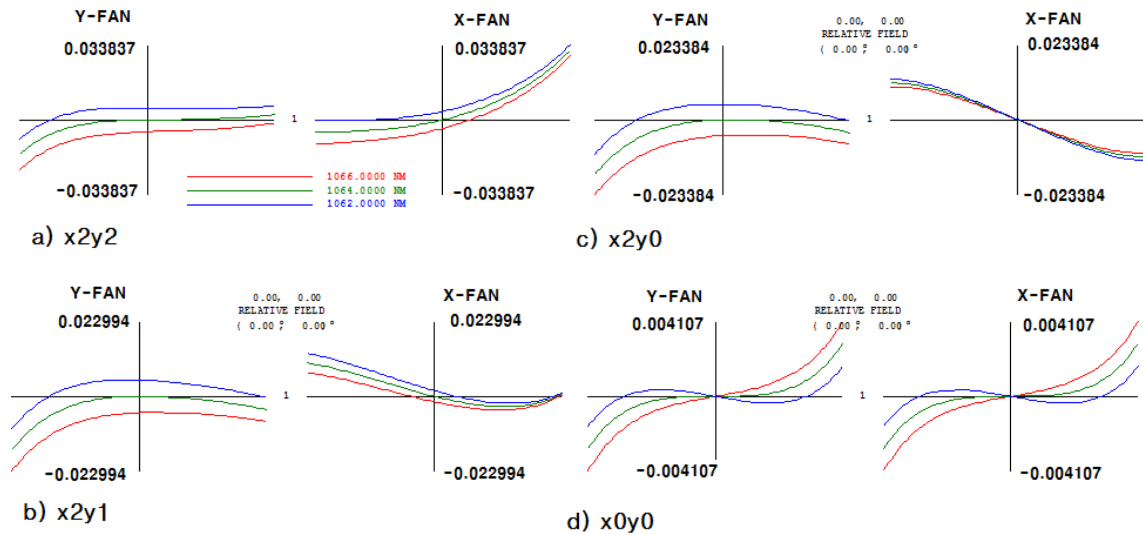


Fig. 6. Diagram of finite ray aberration of the new designed f-theta lens system in the 4 zoom modes.

약 22 μm 로 계산된다. Fig. 5는 Fig. 4의 줌모드 중 스폿 다이어그램이 비교적 큰 x2y2, x2y1, x2y0모드와 수차가 가장 잘 제어된 x0y0모드의 MTF 값을 보여주고 있다. 여기서 보면 MTF가 가장 좋지 않은 줌모드는 x2y2모드임을 확인할 수 있다. 이는 Table 4, 5에서 보면 갈바노미러 A, B가 최대로 구동된 상태임을 확인할 수 있다. x2y2모드에서 MTF 40%에서 분해할 수 있는 선폭이 실선으로 나타나는 자오광선과 점선으로 나타나는 구결광선의 MTF값의 평균치를 취하면 분해가능한 선폭이 18.8 lps/mm 임을 확인할 수 있다.^[10] 이는 결상점 지름 26.6 μm 에 해당하고, Table 1에서 제시된 사용자의 요구조건인 결상점 지름 30 μm 에 해당하는 16.67 lps/mm를 넘어서는 것이기 때문에 사용자의 분해능 요구조건을 충족하는 설계

가 이루어졌다고 판단할 수 있겠다. Fig. 6은 Fig. 5의 4가지 줌모드에서의 유한광선 수차도를 보여주고 있는데, 갈바노미러 A, B의 최대 구동 상태인 x2y2모드에서 유한광선 수차량이 다른 모드에서의 수차량보다 많음을 확인할 수 있고, 이것이 Fig. 5의 x2y2모드의 MTF 값에 영향을 주었음을 확인할 수 있다.^[10]

결론

본 논문에서는 화장품 케이스, 안경테, VR장비, AR장비 등의 소비재에 글자나 무늬를 새길 때 사용하는 레이저 마킹기의 중요 부품인 f-theta 렌즈를 설계 제작해 보았다. Fig. 7은 설계되어진 f-theta 렌즈의 구성도를 보여주고 있

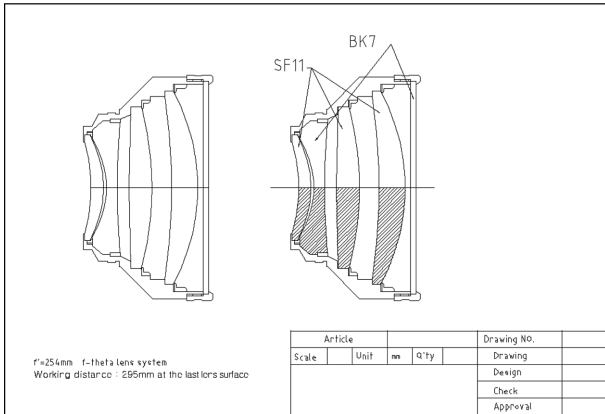


Fig. 7. Sectional view of the f-theta lens system.



Fig. 8. Configuration of the the new designed f-theta lens system manufactured by the design data of Table 3.

고, Fig. 8은 제작되어진 f-theta 렌즈의 외관도를 보여주고 있다. 설계되어진 f-theta 렌즈는 사용하는 레이저의 파장을 1064 nm로 하였고, 입사 레이저빔의 직경을 15 mm로 하였다. 렌즈의 구성은 보호윈도우를 제외하면 굴절력의 부호가 (+)(-)(+)(+)의 순서로 4장으로 이루어졌고, 분해 가능한 선폭은 18.8 lps/mm (@ 40% MTF)임을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 갈비노미러 구동각을 8개 줌모드로 설정하는 방법을 최적화에 이용함으로써 사용자의 요구조건을 만족시키는 초점거리 약 254 mm, 작업거리 약 295

mm, 대각방향의 유효 결상 길이 약 260 mm, 최대 갈바노미러 구동각이 $\pm 10.5^\circ$ 인 f-theta 렌즈를 설계 제작할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 극동대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호 : FEU2015R06).

REFERENCES

- [1] THORLABS. F-Theta Scan Lenses, 2016. https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?objectgroup_id=6430 (2 November 2016).
- [2] OptoSigma. fθ-75-10600, 2016. https://www.global-opto-sigma.com/en_us/Catalogs/gno/?from=page&pname=f-theta-10600&ccode=W3203&dcode=&gname=f%CE%B8-75-10600 (2 November 2016).
- [3] Laikin M. Lens Design, 4th Ed. New York: CRC Press, 2007;245-251.
- [4] Wells Research INC. FAQ: Distortion, 2013. <http://well-research.com/pdfs/distortion.pdf>(2 November 2016).
- [5] Sintec Optronics Pte Ltd. Optical Calculation in Laser Marking System, 2008. <http://www.sintecoptronics.com/ref/BeamSpotDiameterOfMarkingSystem.pdf>(2 November 2016).
- [6] Araki T, Hirai T, Kyotani T. Development of F-Theta lens for UV lasers. SEI Tech Rev. 2009;69:59-65.
- [7] The Sabreen Group Inc. Advancements in Laser Marking of Plastics, 2007. http://www.plasticslasermarking.com/PDJanFeb07_LaserMarking.pdf(2 November 2016).
- [8] O'Shea DC. Elements of modern optical design, 1st Ed. New York: John Wiley & Sons, 1985;282-305.
- [9] Smith WJ. Modern Optical Engineering, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2008;188-195.
- [10] Richard CJ. Code V Reference Manual Version 8.20. California: Optical Research Associates, 1997.
- [11] Gross H. Handbook of optical system: Vol. 1, 1st Ed. New York: WILEY-VCH, 2005;44-53.
- [12] Jenkins FA, White HE. Fundamentals of optics, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 1976;176-184.

1064 nm 레이저용 F-theta 렌즈의 설계 개발

이동희¹, 박승환^{2,*}

¹극동대학교 안경광학과, 음성 369-700

²을지대학교 의료공학과, 성남 461-713

투고일(2016년 11월 14일), 수정일(2016년 12월 11일), 게재확정일(2016년 12월 12일)

목적: 본 연구는 1064 nm 레이저용 f-theta 렌즈 설계 개발에 관한 것이다. **방법:** 레이저 빔의 직경 15 mm, 결상점의 직경 30 μm 이하, 광학계의 두께 70 mm 이내, 작업거리 약 295 mm, 유효결상직경 약 260 mm 이내의 사용자 조건을 만족하는 f-theta 렌즈를 설계하기 위해 갈바노미러 구동각을 8개 줌모드로 설정하는 방법을 사용하였다. **결과:** 8개 줌모드로 설정된 갈바노미러 구동각에 대해서 최적화함으로써 굴절력의 부호가 (+)(-)(+)(+)의 순서로 구성되고, 분해 가능한 선폭이 18.8 lps/mm (@ 40% MTF), 초점거리가 약 254 mm, 작업거리가 약 295 mm, 유효결상직경이 약 260 mm 이내, 최대 갈바노미러 구동각이 $\pm 10.5^\circ$ 인 특성을 가지는 f-theta 렌즈를 설계할 수 있었다. **결론:** 본 연구에서 우리는 갈바노미러 구동각을 다중 줌모드로 설정하는 방법을 f-theta 렌즈 설계의 최적화에 이용함으로써 사용자의 요구조건을 만족시키는 f-theta 렌즈를 쉽게 설계 제작할 수 있었다.

주제어: 1064 nm 레이저, f-theta 렌즈, 마킹기, 갈바노미러, 왜곡수차