



# Development and Design of F-theta Lens for 10.6 $\mu\text{m}$ CO<sub>2</sub> Laser

Jea-Seong Lee<sup>1</sup> and Dong-Hee Lee<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Information & Telecommunication, Graduate School of Far East University, Student, EumSeong 27601, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Visual Optics, Far East University, Professor, EumSeong 27601, Korea

(Received June 2, 2019; Revised June 13, 2019; Accepted June 14, 2019)

**Purpose:** This study focuses on the design and development of an F-theta lens for a 10.6  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> laser. **Methods:** In order to design the F-theta lens satisfies the user's requirements that the diameter of the using laser beam is within 20 mm, the spot diameter of the imaging point is not more than 100  $\mu\text{m}$ , the thickness of optical system is not more than 35 mm, the working distance is about 138.4 mm, and the effective imaging diameter is not less than 70.7 mm, we used eight variables that are four radii of curvatures, three distances between lens surfaces, and an effective focal length (EFL) to optimize the F-theta lens, after separating the two galvanomirror driving angles into eight states. **Results:** The optimized F-theta lens for CO<sub>2</sub> lasers consists of two lenses in which the symbols of the refraction power are in the order of (-)(+). The characteristics of this system have the resolving line width of 5.0 lps/mm (@35% MTF value), the focal length of about 125.4 mm, the working distance of 138.4 mm, the effective imaging diameter of 70.7 mm, and the maximum galvanomirror driving angle of  $\pm 5.73^\circ$ . **Conclusions:** In this study, by the method of dividing the combination of two galvanomirror driving angles into eight states, and by using the eight variables consisting of four radii of curvatures, three distances which include the distance between lenses, the two thicknesses of lenses, and an EFL for optimization variables, we were able to develop the F-theta lens with the EFL of 125.4 mm for CO<sub>2</sub> lasers, that could be used in laser marking machines or 3D printing equipments.

**Key words:** 10.6  $\mu\text{m}$  laser, F-theta lens, Marking machine, 3D printing, Ray aberration

## 서 론

현대에 있어서 CO<sub>2</sub> 레이저의 빔을 에너지원으로 하는 레이저 마킹기 또는 3D 프린팅 장비가 많이 사용된다. 요즘 들어서 안경산업 분야에서도 이러한 장비의 도입이 활발해지고 있다. 특히 안경렌즈 표면 또는 측면에의 마킹은 렌즈 자체가 투명하기 때문에 렌즈 소재에 에너지 흡수성이 좋은 CO<sub>2</sub> 레이저를 많이 사용하고 있다. 그리고 CO<sub>2</sub> 레이저의 발진 파장인 10.6  $\mu\text{m}$  파장은 안경테에도 흡수가 잘되기 때문에 안경테의 템플 내측에 여러 가지 기호를 새길 때도 사용할 수 있음이 밝혀져 있다. 또한 소량의 다양한 디자인의 패션 액세서리, 안경 프레임의 림, (반)무테의 브릿지, 써몬트테의 림 윗커버 등의 생산에 사용할 수 있는 3D 프린터의 일종인 SLS(selective laser sintering), SLM(selective laser melting), DMLS(direct metal laser sintering) 등<sup>[1-5]</sup>의 장비에도 CO<sub>2</sub> 레이저를 에너지원으로 하는 스캐닝광학계(scanning optical system)를 사용하고 있다.

이러한 스캐닝광학계의 광학적 구성은 일반적으로 레이

저 광원, 빔익스팬더(beam expander), 갈바노스캐너(galvano scanner), F-theta 렌즈 등으로 구성되어 있다.<sup>[6-12]</sup> 국내의 레이저 마킹기 또는 3D 프린팅 장비 제조업체들은 이들 부품을 대부분 해외 부품 제작 업체들에서 수입하여 제품을 만들고 있는 실정이다. 특히 이들 장비의 핵심 광학 부품인 CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈는 전체 제품에서 원가에서 차지하는 비중이 높기 때문에 국내 레이저 마킹기 및 3D 프린팅 장비 제조업체들이 국산화를 시도하려고 많은 노력을 하고 있다.

이에 본 논문에서도 CO<sub>2</sub> 레이저의 발진 파장인 10.6  $\mu\text{m}$  파장에 적용될 F-theta 렌즈를 설계 개발하여 레이저 마킹기 및 3D 프린팅 장비의 국산화에 조금이라도 기여하고자 한다. 광학 설계는 CodeV(OPTICAL RESEARCH ASSOCIATES 사)를 사용하였다.

## 대상 및 방법

### 1. CO<sub>2</sub> 레이저 광원용 스캐닝 광학계

1964년 Patel에 의해서 처음으로 CO<sub>2</sub> 분자를 여기시켜

\*Corresponding author: Dong-Hee Lee, TEL: +82-043-880-3808, E-mail: dhlee99@hanafos.com

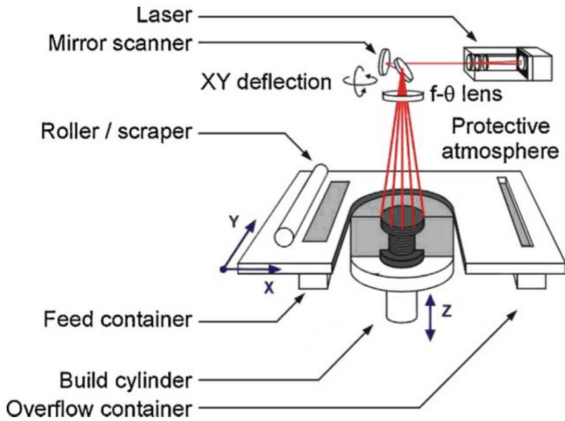


Fig. 1. 3D configuration of the optical system of SLS apparatus shows the relationship between the F-theta lens and galvanomirrors. This figure was obtained from reference.<sup>[2]</sup>

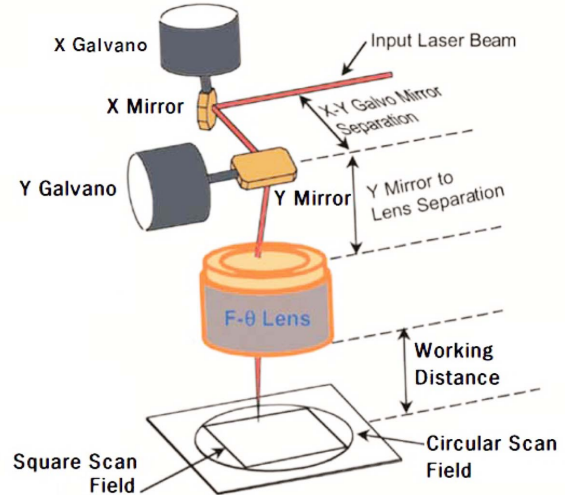


Fig. 2. 3D configuration shows the role of the F-theta lens in the scanning optical system. This figure was revised and obtained from reference.<sup>[12]</sup>

적외선을 얻는 레이저가 발전<sup>[13]</sup>되었고 그 이후 많은 발전을 하여 오늘날 고효율의 CO<sub>2</sub> 레이저가 많은 산업 및 의료 분야에 이용되고 있다. 요즘 산업 분야에서는, CO<sub>2</sub> 레이저가 고효율의 고출력 빔을 만들 수 있고 가공소재에 에너지 흡수율이 높은 특성을 가지고 있기 때문에, 마킹기 및 3D 프린팅 장비의 스캐닝 광학계의 광원으로 CO<sub>2</sub> 레이저를 많이 사용하고 있는 실정이다. 특히 CO<sub>2</sub> 레이저는 가시영역의 파장의 빔을 방출하는 레이저 또는 1064 nm 파장의 Nd:YAG 레이저<sup>[14]</sup>에 비해 유리 및 투명 플라스틱(CR39 레진)과도 잘 반응하기 때문에 안경산업에 있어서 안경렌즈의 마킹 작업에 효과적으로 적용할 수 있다. 또한 요즘 SLS, SLM, DMLS 등의 3D 프린팅 장비로 기존의 다이캐스팅 또는 사출에 의해 생산하던 안경 프레임의 림, (반)무테의 브릿지, 써몬트테의 림 윗커버 등을 소량으로 다양한 디자인을 가지도록 직접적으로 생산하고자 하는 시도가 진행되고 있다. 여기에 사용되는 광원도 가격대비 출력이 높은 CO<sub>2</sub> 레이저가 가장 효과적인 것<sup>[11]</sup>으로 알려져 있다.

마킹기 및 3D 프린팅 장비(Fig. 1)에는 반드시 Fig. 2와 같은 스캐닝 광학계가 사용되는데, 여기서 갈바노미러 X, Y는 레이저 광원에서 진행되는 레이저 빔을 2번 꺾고, 각각 서로 직교하는 회전진동 축을 기준으로 특정한 각도 이내에서 서로 연동되어 회전진동 함으로써 F-theta 렌즈에 입사하는 빔들이 결상면에서 특정 범위의 영역에 레이저 빔을 주사하도록 만들어준다. 이 때 F-theta 렌즈는 일반 결상광학계의 상의 높이  $x = f \times \tan \theta$ 를 만들어 내는 것이 아니라  $x = f \times \theta$ 를 만들어 내어 갈바노스캐너의 회전진동 각이 선형적으로 증가할 때 결상면에서의 상의 높이  $x$ 도 선형적으로 증가하도록 하여 일반적인 결상광학계일 때의 실패형 왜곡<sup>[6-9]</sup>의 발생을 억제하는 것을 특징

으로 하고 있다.

2. CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈의 설계 조건

CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈를 개발하려고하는 업체는 CO<sub>2</sub> 레이저 광원을 하나 사용하여 한쪽에는 레이저 마킹기를 운용할 수 있고 또 다른 한쪽에는 3D 프린팅 장비를 운용하는 기능을 가진 장비를 개발하고자 한다. 이러한 두 가지 기능을 가지는 장비를 콤팩트 사이즈로 만들기 위해서는 가능한 한 F-theta 렌즈의 초점거리가 짧아야 한다. 사용자가 원하는 CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈의 개발 스펙은 Table 1과 같다. 여기서 보면 CO<sub>2</sub> 레이저의 입사빔의 크기가 직경 20 mm 이내이고, 결상하고자 하는 결상면의 크기가 대각선 길이로 70.7 mm인 정사각형이다. 따라서 한 축의 갈바노미러의 구동(구동각  $\pm \theta$ )으로 F-theta 렌즈를 통과한 레이저 빔이 결상면에서 약 50.0 mm의 영역을 스캔(레이저 빔 스캔각  $\pm 2\theta$ )해야 함을 알 수 있다. 즉, 개

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

Distance between galvanomirror A & B	$\leq 21.0 \pm 2.0$ mm
Distance between galvanomirror B and first surface of 1 <sup>st</sup> lens	$\leq 26.0 \pm 2.0$ mm
Effective input beam diameter	$\leq 20.0$ mm
Working distance (BFL)	138.0 $\pm$ 1.0 mm
Diagonal size of square image	$\leq 70.7$ mm
Distance between first surface of 1 <sup>st</sup> lens and 2 <sup>nd</sup> surface of last lens	$\leq 35.0$ mm
Spot diameter of Image point	$\leq 100$ $\mu$ m

발하고자 하는 F-theta 렌즈의 유효초점거리(effective focal length)를 EFL로 한다면,

$$EFL \times 2\theta = \frac{50}{2} \text{ mm} \quad (1)$$

관계식이 성립한다.

결상면이 정사각형이라면 서로의 구동축이 수직인 두 갈바노미러의 구동각은 같아야 함을 알 수 있다. 또한 결상점의 스폿지름이 100 μm인 것은 분해능 선폭으로 계산하면  $\frac{1}{0.1 \text{ mm}} \div 2 = 5.0 \text{ lps/mm}$ 에 해당된다. 따라서 본 개발에서 설계되어질 F-theta 렌즈는 일반적으로 고려되는 MTF(modulation transfer function) 기준값 30%에서 5.0 lps/mm 이상의 분해능<sup>[15-17]</sup>이 유지되는 광학계를 설계하면 된다는 것을 알 수 있다.

### 3. CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈의 초기 설계조건 도출

일반적으로 10.6 μm 파장의 빔을 통과시키는 광학 초자는 ZnSe, ZnS, Ge, KBr, NaCl 등이 있으나, KBr과 NaCl은 수분에 약하고, Ge는 가시영역의 파장에서 불투명하다는 단점<sup>[18]</sup>이 있다. 적절한 소재로 ZnSe와 ZnS이 될 수 있는데, 이 중에서 ZnSe는 열충격에 높은 내성을 가지며 열흡수가 적다고 알려져 있어서 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 레이저용 렌즈 설계 초자로 ZnSe를 채택<sup>[18]</sup>하고자 한다.

본 연구에서는 Table 1에 제시된 사용자의 스펙을 만족하기 위해 다음 요소들을 고려하여 초기설계를 하였다. 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격과 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격이 클수록, 갈바노미러 X, Y에서 렌즈로 입사하는 레이저 광선들이 F-theta 렌즈의 광축에서 벗어나게 되어 유효 렌즈 사이즈가 커지게 된다. 이 때 Table 1에 제시된 사용자의 스펙을 만족하기 위해서는 제거해야할 광선수차도 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격과 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격이 늘어남에 따라 커지게 된다. 따라서 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격과 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격을 최소화하여 제거해야할 광선수차가 늘어나는 것을 최소화할 필요가 있다. 즉 본 연구에서는 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격과 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격을 각각 19 mm, 24 mm로 고정하여 최적화 변수의 구속조건(constraints)으로 하였다.

F-theta 렌즈의 결상면이 정사각형이라면 갈바노미러 X의 구동각  $\theta_a$ 와 갈바노미러 Y의 구동각  $\theta_b$ 은 같은 값을 가질 것이고, 레이저 빔이 F-theta 렌즈에 입사할 때 광축에서 상하 좌우로 스캔하여 입사하는 각은 갈바노미러 X의 구동각  $\theta_a$ 와 갈바노미러 Y의 구동각  $\theta_b$ 의 두 배가 된다. 본 설계에서 이를 적용하면 갈바노미러 X의 최대 구동각  $\theta_{a_{max}}$ 와 갈바노미러 Y의 최대 구동각  $\theta_{b_{max}}$ 과 F-theta 렌즈 EFL과 유효 결상면의 대각선 크기( $Dia_A$ )에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$2 \times EFL \times \sqrt{(2\theta_{a_{max}})^2 + (2\theta_{b_{max}})^2} = 4\sqrt{2} \times EFL \times \theta_{a_{max}} \quad (2)$$

여기서, F-theta 렌즈의 결상면이 정사각형이기 때문에  $\theta_{a_{max}} = \theta_{b_{max}}$  를 적용하였다.

실제 설계 초기조건으로 EFL(effective focal length)이 필요하나 Table 1에 나타난 사용자 스펙에는 EFL이 주어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 초기설계에 EFL 수치를 BFL 수치와 같게 하여 최적화를 진행하였다. 이 때 계산된 갈바노미러의 구동각은 Table 1에서  $Dia_A = 70.7 \text{ mm}$ 이므로, 이들을 식 (2)에 대입하면  $\theta_{a_{max}} = 0.09024 \text{ radian} = 5.17^\circ$ 이 된다. Table 2에서는 이렇게 해서 결정된 초기설계의 구속조건을 나열하고 있다.

본 연구에서는 두 갈바노미러 X, Y의 구동각을 8가지 상태로 나누고, 이 들 각각에 대한 1차광학량 및 유한광선 수차를 제어하여 최적화하는 방법으로 사용자의 요구조건을 만족시키는 광학계를 설계하였다. 이 때 유효초점거리가 최적화 과정에서 바뀌게 되기 때문에 Table 2의 구속조건 5)에 의해 갈바노미러 최대 구동각도 바뀌게 된다.

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

Distance between galvanomirror X & Y	= 19.0 mm
Distance between galvanomirror Y and first surface of 1 <sup>st</sup> lens	= 24.0 mm
Working distance (BFL)	= 138.5 mm
Distance between first surface of 1 <sup>st</sup> lens and 2 <sup>nd</sup> surface of last lens	≤ 35.0 mm
Diagonal size of effective image field	= 70.7 mm
Initial $\theta_{a_{max}}$ ( $\theta_{a_{max}} = \theta_{b_{max}}$ )	= ± 5.17°

Table 3. Relationship between the driving states and the driving angle of galvanomirrors

Driving states	X0Y0	X0Y2	X2Y2	X2Y2	X0Y1	X1Y1	X2Y1	X1Y2
Ratio for maximum driving angle $\theta_{a_{max}}$ (@ galvanomirror X)	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.52	1.00	0.52
Ratio for maximum driving angle $\theta_{b_{max}}$ (@ galvanomirror Y)	0.00	1.00	0.00	1.00	0.52	0.52	0.52	1.00

Table 4. Optimized design data of the F-theta lens obtained from CodeV S/W

Surface #	Surface Type	Y Radius	Thickness	Glass	Refract Mode	Y Semi-Apert
Object	Sphere	Infinity	Infinity		Refract	
Stop	Sphere	Infinity	15.0000		Refract	8.1000
2	Sphere	Infinity	0.0000		Reflect	12.7967
3	Sphere	Infinity	-19.0000		Refract	8.2648
4	Sphere	Infinity	0.0000		Reflect	14.0747
5	Sphere	Infinity	24.0000		Refract	12.1166
6	Sphere	-50.3430	10.0000	ZNSE	Refract	17.0117
7	Sphere	-53.3430	10.0000		Refract	19.8801
8	Sphere	-534.7374	5.0000	ZNSE	Refract	22.5950
9	Sphere	-165.0870	0.0000		Refract	23.0189
10	Sphere	Infinity	138.4348		Refract	23.1264
Image	Sphere	Infinity	-1.6000		Refract	35.3144

그래서 최대 구동각의 100%와 52%의 각의 조합으로 갈바노미러 구동각을 Table 3과 같이 8가지 상태로 나누어 설정하여 최적화를 진행하였다.

4. CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈의 최적화 설계

사용자가 요구하는 개발 스펙 중 레이저 빔의 결상점 분해능의 기준인 Airy disk  $= 0.61 \frac{\lambda}{NA}$  [16,19,20]이 결상점의 spot 크기인 100 μm가 되도록 하려면 NA(numerical aperture)  $= \frac{D}{2 \times f}$  [16] = 0.0646이 되어야 한다. 초기 설계 조건에서 EFL=BFL로 시작하였기 때문에 유효입사동의 크기(D)는  $2 \times 138.5 \times 0.0646 = 8.947$  mm로 계산되는데, 이를 초기 입사동의 크기로 하여 최적화를 진행하였다. 갈바노스캐너의 회전전동 각이 선형적으로 증가할 때 결상면에서의 상의 높이 x를 선형적으로 증가하도록 하는 구속조건(이는 F-theta 렌즈의 특성을 가지기 위한 필수 구속조건<sup>[8]</sup>)  $x = f \times \theta$ 도 최적화의 Merit-function의 한 구성요소로 설정하였다. 결상점의 spot 크기가 100 μm 이하가 되도록 하는 구속조건도 Merit-function의 한 구성요소로 추가하였다.

최적화 초기 렌즈는 일반적인 F-theta 렌즈 구성 조건인 (-), (+)굴절력을 갖는 조합으로 최적화를 진행하였다.<sup>[8]</sup>

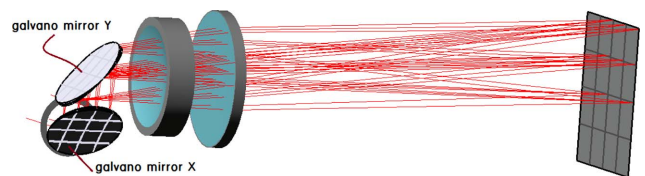


Fig. 3. 3D ray tracing on the designed F-theta lens system.

최적화 변수로는 곡률반경 4개, 렌즈 두께 및 렌즈사이의 거리 3개, EFL 등 8개를 변수로 하여 진행하였다. 이렇게 하여 최적화 작업을 진행한 결과 일반적인 F-theta 렌즈와 마찬가지로 최적화가 되어 갈수록 BFL > EFL 관계가 확실해지고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 초기 설계 시 BFL을 구속조건으로 하고 EFL = BFL로 두고 최적화를 진행하였으나, 최종 설계한 EFL은 125.4 mm로 BFL보다 짧아졌다. 최종적으로 결정된 시스템의 설계 데이터는 Table 4와 같고 ray tracing은 Fig. 3에 나타나 있다.

갈바노미러 X, Y의 최대 구동각  $\theta_{a_{max}}, \theta_{b_{max}}$ 는 초기에는  $\pm 5.17^\circ$  이었으나, 유효초점거리 EFL이 최적화되면서 짧아짐에 따라 구속조건을 만족하기 위해,  $\pm 5.73^\circ$ 로 최적화되었다. 이 때 최적화에 사용한 8가지의 갈바노미러 구동각의 변화를 Table 5에서 확인할 수 있다. Table 6

Table 5. Showing the changed values of driving angles ( $\theta_a, \theta_b$ ) of galvanomirrors for the optimized F-theta lens

Driving states		X0Y0	X0Y2	X2Y2	X2Y2	X0Y1	X1Y1	X2Y1	X1Y2
Initial values before optimization (deg)	$\theta_a$	0	0	5.17	5.17	0	2.69	5.17	2.69
	$\theta_b$	0	5.17	0	5.17	2.69	2.69	2.69	5.17
Final values after optimization (deg)	$\theta_a$	0	0	5.73	5.73	0	2.98	5.73	2.98
	$\theta_b$	0	5.73	0	5.73	2.98	2.98	2.98	5.73

Table 6. First optical characteristics of the optimized F-theta lens

Distance between galvanomirror X & Y	= 19.0 mm
Distance between galvanomirror Y and first surface of 1 <sup>st</sup> lens	= 24.0 mm
Working distance (BFL)	= 138.4 mm
Distance between first surface of 1 <sup>st</sup> lens and 2 <sup>nd</sup> surface of last lens	= 25.0 mm
Diagonal size of effective image field	= 70.7 mm
Max driving angle of galvano mirror $\theta_d$	= $\pm 5.73^\circ$
Effective focal length (EFL)	= 125.4 mm
Effective input beam diameter	$\leq 16.2$ mm

은 이렇게 최적화된 F-theta 렌즈의 1차광학량을 보여주고 있다.

**결과 및 고찰**

Fig. 4~6에서는 여러 가지 갈바노미러 X, Y의 구동상태에 대하여 최적화된 F-theta 렌즈 결상면에서의 spot 다이어그램, MTF 특성, 유한광선 수차 특성을 보여주고 있다. Fig. 4는 Table 5의 8가지 갈바노미러 구동상태에서의 spot 다이어그램을 나타낸다. 그림에서 보이는 원은 Airy disk를 나타내며 이 값은  $0.61 \frac{\lambda}{NA}$  [13]로 구할 수 있다. 이 값을 Table 6의 최종 최적화된 1차광학량으로 계산하면 설계된 광학계의 NA가 0.0646이고 사용하는 레이저의 파장( $\lambda$ )이

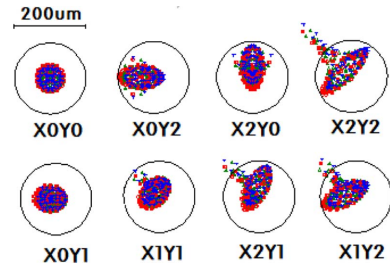


Fig. 4. Spot diagram of the designed F-theta lens system in the eight driving states of galvanomirrors.

10.6  $\mu\text{m}$ 이기 때문에 약 100  $\mu\text{m}$ 로 계산된다.

Fig. 5는 갈바노미러 X, Y가 X0Y0, X2Y2, X2Y0, X1Y1 4가지 구동상태일 때의 MTF 값을 보여주고 있다. MTF 성능은 갈바노미러 X, Y가 최대각  $\pm 5.73^\circ$ 로 구동되는 상태인 X2Y2에서 가장 낮았다(Fig. 5(b)). X2Y2 상태에서 MTF 35%의 값을 기준으로 한다면, 본 설계의 F-theta의 분해가능한 선폭은 5.0 lps/mm 임을 확인할 수 있다. 이는 결상면에서의 spot 크기 100  $\mu\text{m}$ 에 해당한다. 따라서 본 설계는 Table 1에서의 사용자의 분해능 요구조건을 충족하고 있다고 평가할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서의와 같은 4가지 갈바노미러 구동상태에서의 유한광선 수차를 보여주고 있다. 갈바노미러 X, Y의 최대 구동상태인 X2Y2에서 유한광선 수차량은 다른 구동상태에서의 수차량보다 광학계의 주변부에서 많음을 확인할 수 있는데 이는 Fig. 5의 b) X2Y2 상태의 MTF 커브에 잘 반영되어 나타나 있다.

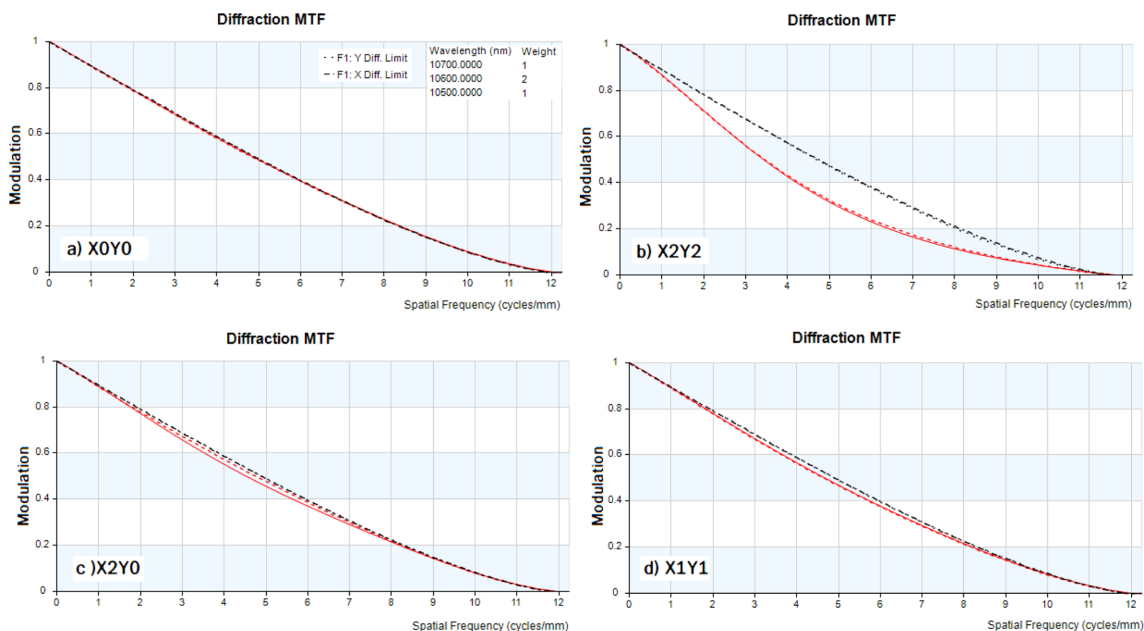


Fig. 5. MTF curve of the designed F-theta lens system in the four driving states.

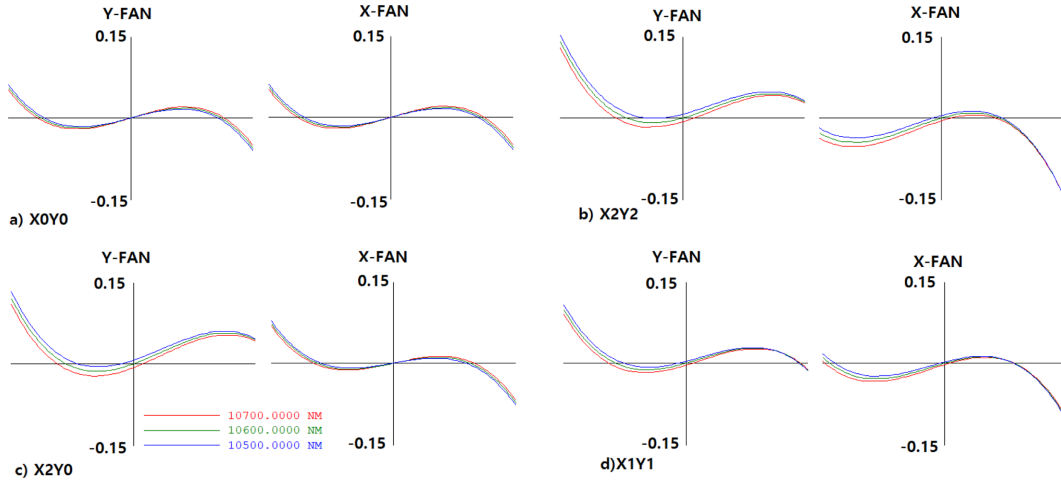


Fig. 6. Diagram of finite ray aberration of the designed F-theta lens system in the four driving states.

**결론**

본 논문에서는 10.6  $\mu\text{m}$  파장의 빔을 방출하는 CO<sub>2</sub> 레이저 광원을 사용하여 한쪽에는 레이저 마킹기를 운용할 수 있고 또 다른 한쪽에는 3D 프린팅 장비를 운용하는 기능을 가진 장비에 사용될 F-theta 렌즈를 설계 제작해 보았다. 설계되어진 F-theta 렌즈는 굴절력의 분포가 광원에서 (-), (+) 순서로 배치된 두 장의 ZnSe 재료의 초자로 구성되었으며, 분해 가능한 선폭은 5.0 lps/mm(@35% MTF) 인 광학계가 됨을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 설계되어진 F-theta 렌즈의 제작도면을 보여주고 있고, Fig. 8은 제작되어진 F-theta 렌즈가 갈바노미러 스캐닝 장치에 장착된 모습을 보여주고 있으며, Fig. 9는 실제 제작된 F-theta 렌즈의 외관 모습을 보여주고 있다. 설계되어진 F-theta 렌즈는 입사 레이저빔의 직경은 최대로 16.2 mm까지 허용한다. 본 연구에서는 갈바노미러 구동각을 8가지 상태로 나누고, 이 들 각각에 대한 1차광학량 및 유효광선 수치를 제

어하는 최적화 방법을 사용하여 사용자의 요구조건을 만족시킬 수 있는 시스템을 설계할 수 있었는데, 최적화 설계된 F-theta 렌즈는 유효초점거리(EFL) 약 125.4 mm, 작업거리(BFL) 약 138.4 mm, 유효결상면 직경 약 71 mm, 최대 갈바노미러 구동각  $\pm 5.73^\circ$ 를 갖는 광학계가 되었다.

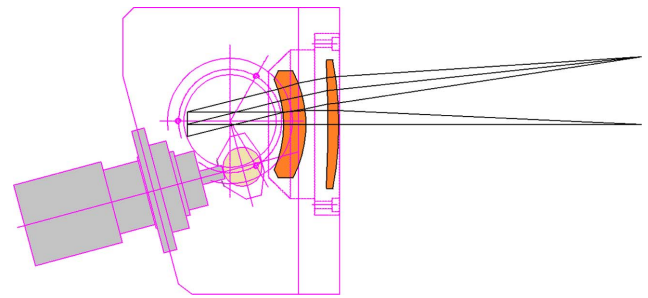


Fig. 8. Placement configuration of the designed F-theta lens in the galvano scanner system.

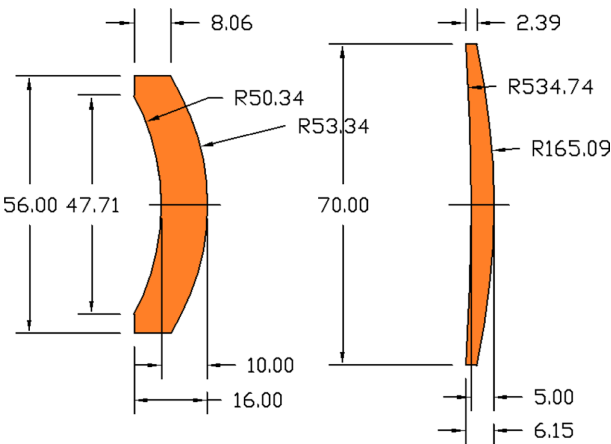


Fig. 7. Data drawing for production of the optimized F-theta lens.

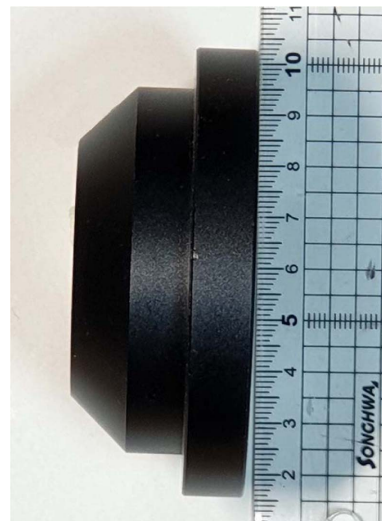


Fig. 9. Configuration of the designed F-theta lens manufactured by the design data in Table 4.

## REFERENCES

- [1] Kruth JP, Wang X, Laoui T, Froyen L. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Autom.* 2003;23(4): 357-371.
- [2] Shahzad K, Deckers J, Zhang Z, Kruth JP, Vleugels J. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering. *J Eur Ceram Soc.* 2014;34(1):81-89.
- [3] Adekanye A, Mahamood RM, Akinlabi ET, Owolabi MG. Additive manufacturing: the future of manufacturing. *Mater Technol.* 2017;51(5):709-715.
- [4] Karia MC, Popat MA, Sangani KB. Selective laser melting of Inconel super alloy-a review. *AIP Conf Proc.* 2017; 1859(1):020013.
- [5] DMLS Technology. DMLS Machines, 2012. <https://dmls-technology.com/dmls-machines/>(1 March 2019).
- [6] Thorlabs. F-Theta Scan Lenses, 2012. [https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?objectgroup\\_id=6430](https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?objectgroup_id=6430)(2 November 2016).
- [7] SIGMAKOKI. f $\theta$ -75-10600, 2015. [https://www.global-optosigma.com/en\\_jp/Catalogs/gno/?from=page&pname=f-theta-10600&ccode=W3203&dcode=&gname=f%CE%B8-75-10600](https://www.global-optosigma.com/en_jp/Catalogs/gno/?from=page&pname=f-theta-10600&ccode=W3203&dcode=&gname=f%CE%B8-75-10600)(17 June 2019).
- [8] Laikin M. Lens design, 4th Ed. New York: CRC Press, 2007;245-251.
- [9] Wells Research INC. FAQ: Distortion, 2013. <http://well-research.com/pdfs/distortion.pdf>(2 November 2016).
- [10] Sintec Optronics Pte Ltd. Optical Calculation in Laser Marking System, 2007. <http://www.sintecoptronics.com/ref/BeamSpotDiameterOfMarkingSystem.pdf>(2 November 2016).
- [11] Araki T, Hirai T, Kyotani T. Development of f-theta lens for UV lasers. *SEI Tech Rev.* 2009;69:59-65.
- [12] II-VI INFRARED. Scanning Laser System Optics, 2009. <http://www.iiviinfrared.com/CO2-Laser-Optics/scanning-laser-system-optics.html>(2 May 2019).
- [13] Patal CKN, Kerl RJ. Laser oscillation on X1 $\Sigma^+$  vibrational-rotational transitions of CO. *Appl Phys Lett.* 1964; 5(4):81-83.
- [14] Lee DH, Park SH. Design and development of f-theta lens for 1064 nm laser. *J Korean Ophthalmic Opt Soc.* 2016; 21(4):401-407.
- [15] O'Shea DC. Elements of modern optical design, New York: John Wiley & Sons, 1985;282-305.
- [16] Smith WJ. Modern optical engineering: the design of optical systems, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2008;188-195.
- [17] Synopsys. Code V Optical Design Software, 2013. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html>(27 May 2019).
- [18] Edmund Optics Inc. The Correct Material for Infrared (IR) Applications, 2011. <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/the-correct-material-for-infrared-applications/>(14 March 2019).
- [19] Malacara D, Malacara Z. Handbook of Optical Design, 2nd Ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2004; 418-421.
- [20] Jenkins FA, White HE. Fundamentals of optics, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2001;315-337.

10.6  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈의 설계 개발이제성<sup>1</sup>, 이동희<sup>2,\*</sup><sup>1</sup>극동대학교 대학원 정보통신학과, 학생, 음성 27601<sup>2</sup>극동대학교 안경광학과, 교수, 음성 27601

투고일(2019년 6월 2일), 수정일(2019년 6월 13일), 게재확정일(2019년 6월 14일)

**목적:** 본 연구는 10.6  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈 설계 개발에 관한 것이다. **방법:** 사용 레이저 빔의 직경 20 mm 이내, 결상 점의 spot 직경 100  $\mu\text{m}$  이하, 광학계의 두께 35 mm 이내, 작업거리 약 138.4 mm, 유효 결상 직경 약 71 mm 이내의 사용자 요구조건을 만족하는 F-theta 렌즈를 설계하기 위해, 두 갈바노미러 구동각을 8가지 상태로 분리하고, 곡률반경 4개와 렌즈 두께 및 렌즈사이의 거리 3개와 EFL 등 8개의 변수를 F-theta 렌즈 최적화에 사용하였다. **결과:** 최적화되어진 CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈는 굴절력의 부호가 (-)(+)의 순서로 구성되는 2개의 렌즈로 구성되었다. 분해 가능한 선폭은 5.0 lps/mm (@35% MTF)이며, 유효 초점거리는 약 125.4 mm이며, 작업거리는 약 138.4 mm이며, 유효결상직경이 약 71 mm이며, 갈바노미러의 최대 구동각이  $\pm 5.73^\circ$ 인 특성을 가지게 되었다. **결론:** 본 연구에서 우리는 두 갈바노미러 구동각의 조합을 8가지 상태로 나누는 방법과 곡률반경 4개와 렌즈 두께 2개 및 렌즈사이의 거리와 EFL 등 8개를 최적화 변수로 사용함으로써 레이저 마킹기 또는 3D 프린팅 장비에 사용될 수 있는 125.4 mm의 EFL을 갖는 CO<sub>2</sub> 레이저용 F-theta 렌즈를 개발할 수 있었다.

**주제어:** 10.6  $\mu\text{m}$  레이저, F-theta 렌즈, 마킹기, 3D 프린팅, 광선수차