ISSN(print) 1226-5012
J Korean Ophthalmic Opt Soc. 24(4):447-454, December 2019
http://dx.doi.org/10.14479/jkoos.2019.24.4.447

Design of Telecentric F-theta Lens for 532 nm Wavelength Laser

Seung-Hwan Park[1,a], Sun-Dong Kim[2,b], and Dong-Hee Lee[3,c,*]

[1]Dept. of Biomedical Engineering, Eulji University, Professor, Seungnam 13135, Korea
[2]Dept. of Energy IT Engineering, Graduate School of Far East University, Student, Eumseong 27601, Korea
[3]Dept. of Visual Optics, Far East University, Professor, Eumseong 27601, Korea
(Received December 2, 2019: Revised December 12, 2019: Accepted December 13, 2019)

Purpose: In this study, a telecentric F-theta lens is designed for a 532 nm wavelength laser. **Methods:** To design the telecentric F-theta lens for satisfying the user's conditions, the following parameters are noted: the diameter of the laser beam does not exceed 11 mm, the spot diameter of the imaging point is no more than 10 μm, the thickness of the optical system does not exceed 112 mm, the working distance is approximately 197 mm, and the diagonal length of the effective imaging square is not less than 111 mm. We used a method of gradual optimization while increasing the number of lenses, starting from the configuration of two lenses with (–, +) refractive powers and applying the user conditions mentioned above as the constraint conditions upon separating the two X Y galvanomirror driving angles into nine states. **Results:** The optimized telecentric F-theta lens consists of six lenses wherein the symbols of the refractive powers are in the order (–, +, –, +, +, +), and the compositions of materials are in the order (NLAF2, NLAF2, NSF4, NLAF2, NLAK12, NSK16). This system has a line width resolution of 50.0 lps/mm (@ 30% MTF value), focal length of approximately 162.7 mm, working distance of 197.0 mm, area of the effective image plane of approximately 78.7 × 78.7 mm^2, and maximum galvanomirror driving angle of ± 6.93°. **Conclusions:** In this study, we developed a telecentric F-theta lens with EFL of 162.7 mm by dividing the combination of two galvanomirror driving angles into nine states and by using the method of minimizing the finite ray aberrations and the telecentricities of the principal rays in these nine states. The developed lens can be applied in through-hole making machines, laser marking machines, and 3D printing equipments, etc.

Key words: 532 nm wavelength laser, F-theta lens, Through-hole making machine, 3D printing, Telecentricity

서 론

요즈음 산업계에는 여러 파장의 레이저의 빔을 에너지원으로 하는 3D 프린팅 장비, 레이저 마킹기, 레이저 홀 가공 및 커팅기가 많이 사용된다. 10.6 μm 파장의 CO_2 레이저는 나무, 플라스틱, 가죽 등의 마킹 및 커팅에, 1064 nm 파장의 파이버 레이저는 철 금속 및 비철금속 대부분의 마킹 및 커팅에, 532 nm 파장의 그린 레이저는 열 영향이 적어야 하는 재질의 마킹 및 커팅에, 355 nm 파장의 UV 레이저는 열 영향이 적고 정밀한 마킹 및 커팅이 필요한 곳에 적합하다고 알려져 있다.[1] 따라서 532 nm 파장의 레이저로는 ABS 수지, 달걀 표면, PVC, 세라믹 램프, 돌 등에 마킹이 가능하고, 유리표면의 펀칭이 가능하다. 특히 안경산업 분야에서는 무테 안경렌즈의 가장자리 홀 가공, 안경테의 템플 내측의 기호 마킹, 안경렌즈 가장자리 표면의 마킹 등에 사용할 수 있다.[2]

이러한 레이저를 이용한 가공장비를 만들기 위해서는 레이저 빔을 원하는 작업공간에 스캔하기 위한 레이저 빔 스캔 광학계가 필요한데 여기에는 광원으로서의 레이저, 레이저 빔의 직경을 원하는 크기로 확대하기 위한 빔 익스팬더, 레이저 빔을 원하는 방향으로 조사하기 위한 스캐너, 스캐너를 통과한 레이저 빔을 작업공간에 집속하기 위한 F-theta 렌즈 등이 필요하게 된다.[3-9]

본 논문에서는 앞으로 안경산업 등에 적용될 레이저 마킹기 및 가공기의 국산화에 기여하고자 532 nm 파장의 레이저에 적합한 텔레센트릭[10] F-theta렌즈의 설계를 주제로 다루고자 한다. 광학 설계는 OPTICAL RESEARCH ASSOCIATES 사의 CodeV를 사용하였다.

대상 및 방법

1. 안경산업에 적용될 레이저 가공기의 특징

CO_2 레이저는 유리 및 CR39 레진과도 잘 반응하기 때문에 안경렌즈의 마킹 작업에 효과적으로 적용할 수 있지

*Corresponding author: Dong-Hee Lee, TEL: +82-043-880-3808, E-mail: dhlee99@hanafos.com
Authors ORCID: [a]https://orcid.org/0000-0002-3600-9811, [b]https://orcid.org/0000-0003-0936-5295, [c]https://orcid.org/0000-0001-7655-0058

만,[4] 무테 안경을 조제가공할 경우에는 안경렌즈 가장자리에 관통홀을 뚫어야하는데 파장이 10.6 μm인 레이저의 가공정밀도는 0.532 μm 레이저에 비하여 떨어지는게 일반적이다. 안경관련 부품을 가공할 수 있는 SLS(Selective Laser Sintering), SLM(Selective Laser Melting), DMLS(Direct Metal Laser-Sintering) 등 3D 프린팅 장비의 F-theta 렌즈[4]에서도 파장이 짧은 레이저 빔을 사용하는 것이 소량 다품종 생산품의 정밀도를 향상시키는데 도움이 될 것이다. 이는 분해능이 파장에 비례한다는 사실에서 충분히 인식할 수 있다.[11,12] 또한 깊이가 수 mm에 이르는 관통홀도 안경렌즈 면에 수직방향으로 경사지지 않게 뚫어주는 것이 무테 안경테의 장착된 안경렌즈를 파손시키지 않고 오래 사용할 수 있도록 하는데 유리하다. 이렇게 레이저 입사면에 수직으로 관통홀을 뚫기 위해서는 텔레센트릭 광학계가 필요하게 된다.

2. 관통홀 가공에 적합한 레이저용 F-theta 렌즈의 조건

레이저 가공장비 장비에는 대부분 Fig. 1과 같은 구조의 스캐닝 광학계[4,9]가 사용되는데, 회전 구동축이 서로 직교하도록 배치된 갈바노미러 X, Y는 서로 연동되어 주기적으로 특정한 각도 이내로 왕복 회전진동하게 함으로써 레이저 빔을 결상면에서 특정 범위의 영역에 주사하도록 만들어준다. 이 때 레이저 빔을 주사하기 위해 사용되는 일반적인 F-theta렌즈는 $H = f \times \theta$의 식에 의해 만들어지는 상의 높이를 가진다.[4]

그러나 Fig. 2A에서와 같이 일반적인 F-theta렌즈는 레이저빔의 입사각도가 선행적으로 증가할 때($\theta_1 \rightarrow \theta_2$) 결상면에 도달하는 집속된 레이저 빔의 높이도 비례해서 증가

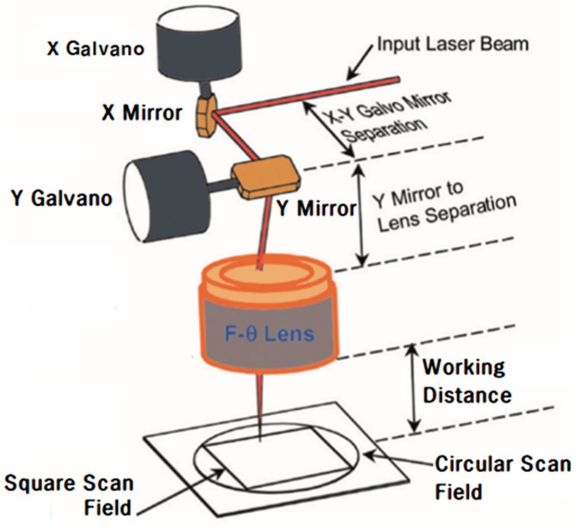

Fig. 1. 3D configuration showing the role of the F-theta lens in the optical scanning system. This figure is revised and cited from references [4,9].

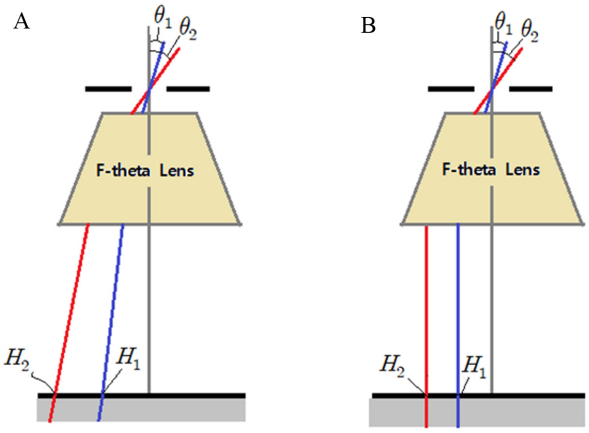

Fig. 2. Diagram showing the difference between a general F-theta system (A) and a telecentric F-theta system (B).

($H_1 \rightarrow H_2$)하지만 Fig. 2A에서와 같이 결상면에 깊이가 있는 물체에 관통홀을 뚫으려면 관통홀 중심축의 각도가 결상면의 광축에서 멀어지는 위치일수록 점점 더 경사지게 될 수밖에 없다. 이는 결상면에 수직으로 구멍을 뚫어야하는 가공에서는 적합하지 않는 장치가 될 것이다. 이를 극복하기 위해서는 Fig. 2B와 같은 텔레센트릭 F-theta렌즈가 필요하다. 이 렌즈는 Fig. 2B와 같이 레이저빔의 입사각도가 선행적으로 증가할 때($\theta_1 \rightarrow \theta_2$) 결상면에 도달하는 집속된 레이저 빔의 높이도 비례해서 증가($H_1 \rightarrow H_2$)함과 동시에 레이저 입사빔의 주광선이 결상면에 수직으로 입사하고 있다. 이러한 광학계는 관통홀을 가공할 때 가공 관통홀이 결상면의 어느 위치에서나 항상 관통홀의 축이 결상면에 수직으로 유지할 수 있게 된다. 이 때 관통홀의 축이 결상면에 수직으로 유지하는 정도는 F-theta렌즈의 telecentricity에 의해 좌우 되는데, 이는 F-theta렌즈의 광축과 F-theta렌즈를 통과하는 주광선이 이루는 각으로 표현된다.

3. 532 nm 파장 레이저용 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 초기 설계조건 도출

사용자가 제시한 532 nm 파장 레이저용 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 개발 스펙은 Table 1에 나타나 있다. 레이저 입사빔은 최대 직경 11 mm 이내이고, 스캔하고자 하는 최대 상면의 크기는 대각선 방향으로 110 mm인 정사각형이다. 개발하고자 하는 F-theta 렌즈의 유효초점거리(Effective Focal Length)를 EFL로 하고, Fig. 2에서와 같이 최대 스캔 반각을 θ_2라고 한다면,

$$FFL \times \theta_2 = \frac{110}{2}\text{mm} \quad (1)$$

관계식이 성립한다. 따라서 최대 스캔각 반각 θ_2과 EFL은

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

Distance between galvanomirrors A & B	≈18.0 ± 2.0 mm
Distance between galvanomirror B and first surface of 1st lens	≈42.0 ± 2.0 mm
Effective input beam diameter	≤ 11 mm
Working distance (BFL)	197.0+1.0 mm
Diagonal size of square image	≈110 ± 2.0 mm
Distance between first surface of 1st lens and 2nd surface of last lens	≤ 112.0 mm
Spot diameter of Image point	≤ 10 μm
Max telecentricity (deg)	≤ 2.0
Light source (green laser) wavelength	532 nm

Table 1과 같은 설계자의 요구조건을 충족하도록 서로 상보적으로 최적화 과정 중에서 결정되어져야 한다. 만약 최대 스캔 반각 θ_2가 결정되면, X 갈바노미러의 구동각을 $\pm\phi_x$, Y 갈바노미러의 구동각을 $\pm\phi_y$로 한다면

$$\sqrt{(2\phi_x)^2+(2\phi_y)^2}=\theta_2 \quad (2)$$

와 같은 관계식이 성립하기 때문에 두 갈바노미러의 구동각을 쉽게 결정할 수 있게 된다.

Table 1에서 제시하는 결상점 spot의 지름이 10 μm이기 때문에 이 광학계가 가져야하는 분해능 선폭은 $\frac{1}{0.01mm}\div 2$ = 50.0 lps/mm이 되어야 함을 알 수 있다. 이는 본 설계의 텔레센트릭 F-theta렌즈가 일반적으로 고려되는 MTF(Modulation Transfer Function) 기준값 30%에서 50.0 lps/mm 분해능[11-13] 이상을 가지도록 설계되어야 함을 나타낸다.

일반적으로 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격과 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격이 작을수록 설계되어질 F-theta 렌즈의 유효 사이즈가 작게 되고 제거해야할 광선수차크기도 작게 된다. 따라서 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격과 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격은 Table 1에 제시된 최소의 값으로 최적화를 시작할 필요가 있게 된다. 즉 본 연구에서는 두 갈바노미러 X, Y 사이의 간격을 16 mm로, 갈바노미러 Y와 F-theta 렌즈의 1면과의 간격을 40 mm로 하는 구속조건(constraints)을 가지고 초기설계 최적화를 진행하였다.

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

1) Distance between galvanomirrors X & Y	= 16.0 mm
2) Distance between galvanomirror Y and first surface of 1st lens	= 40.0 mm
3) EFL = BFL	= 197.0 mm
4) Distance between first surface of 1st lens and 2nd surface of last lens	≤112.0 mm
5) Diagonal size of effective image field	= 110 mm
6) Initial $\phi_{x_{\max}}$ ($\phi_{x_{\max}}=\phi_{y_{\max}}$)	= ± 5.66°

설계 초기조건으로 필요한 EFL(Effective Focal Length)은 Table 1에 주어진 사용자 스펙의 값으로 식(1)에 의해 결정해야 하나, 최대 스캔각 반각 θ_2가 결정되어야만 EFL이 결정될 수 있다. 최대 스캔각 반각 θ_2을 Table 1에 제시된 값으로 결정할 수 없기 때문에 본 논문에서는 초기설계에 필요한 EFL을 Table 1에 제시된 BFL(Back Focal Length) 값과 같도록 하여 우선 초기 최적화를 진행하였다. 이 때 계산된 X 갈바노미러의 구동각 $\pm\phi_x$, Y 갈바노미러의 구동각 $\pm\phi_y$은 식(1), 식(2)에 의해 각각 ±5.66°로 계산된다. 여기에는 스캔 상면이 정사각형일 때 성립하는 최대 $\phi_x(\phi_{x_{max}})$과 최대 $\phi_y(\phi_{y_{max}})$가 같다는 상황을 적용하였다. Table 2에는 지금까지 설정한 초기설계의 구속조건을 제시하고 있다.

초기 최적화 작업을 하기 전에 갈바노미러 X, Y의 구동각을 Table 3과 같이 최대 구동각의 100%와 60%의 각의 조합으로 9가지 상태로 나누고, 이 9가지 상태의 유한광선 수차를 최소화하는 최적화 작업을 진행하여 사용자의 요구조건을 만족시키는 광학계를 설계하였다. 이 때 초기에 EFL =BFL로 설정하였던 것이 최적화 과정에서 EFL<BFL로 바뀌게 되기 때문에 Table 2의 구속조건 중 갈바노미러 최대 구동각도 바뀌게 된다.

4. 532 nm 파장 레이저용 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 최적화 설계

사용자의 설계 요구 스펙 중 532 nm 레이저 빔 결상점 spot의 지름이 10 μm이라는 것은 분해능의 기준인 Airy disk = $0.61\frac{\lambda}{NA}$ [12,14,15]의 값이 10 μm가 되도록 하는 것과 같다. 이는 또 개구수(NA : Numerical Aperture)가 NA = $\frac{D}{2\times f'}$ [12] = 0.0326이 되도록 하는 것과 같다.

조기 최적화에서 EFL과 BFL이 같은 값을 갖도록 하여 최적화를 시작하였기 때문에 유효입사동의 크기(D)는 2 × 197.0 × 0.0326 = 12.8 mm로 계산되는데, 이를 초기 입

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

Driving states	X0Y0	X0Y2	X2Y0	X2Y2	X0Y1	X1Y0	X1Y1	X1Y2	X2Y1
Ratio for maximum driving angle $\phi_{a_{\max}}$ (@ galvano X)	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.60	0.60	0.60	1.00
Ratio for maximum driving angle $\phi_{b_{\max}}$ (@ galvano Y)	0.00	1.00	0.00	1.00	0.60	0.00	0.60	1.00	0.60

사동의 크기로 하여 최적화를 진행하였다. 갈바노미러의 구동 회전각이 선행적으로 증가할 때 결상면에서의 결상점 spot의 결상 높이(Fig. 2에서 H_1, H_2)를 선행적으로 증가하도록 하는 구속조건(F-theta렌즈의 특성을 나타내는 필수 구속조건[7])도 최적화의 Merit-function의 한 구성요소로 설정하였다. Table 3의 9가지 갈바노미러 구동각 상태에서 결상점의 spot 크기가 100 μm 이하가 되도록 하는 구속조건도 최적화의 Merit-function의 한 구성요소로 추가하였다. 특히 본 설계의 광학계는 텔레센트릭 광학계이므로 Table 3의 9가지 갈바노미러 구동각 상태에서의 결상면에 입사하는 주광선의 telecentricity를 영으로 하는 구속조건이 필요한데, 이 조건도 최적화의 Merit-function의 한 구성요소로 추가하였다.

최적화를 위한 초기 렌즈는 F-theta의 일반적인 렌즈 구성 조건인 (–, +)굴절력을 갖는 2매 렌즈의 조합으로 최적화를 진행하였다.[7] 이렇게 진행된 최적화에서는 Table 1에 제시된 원하는 성능이 나오지 않았기 때문에 렌즈를 추가하는 방법으로 최적화 변수를 추가하여 나갔다. 결국 (–) 굴절력을 갖는 렌즈를 메니스커스 타입의 3장의 렌즈로 분리하였고, (+)굴절력을 갖는 렌즈도 3장의 렌즈로 분리하였을 경우 원하는 성능이 나오는 최적화가 이루어졌다. 렌즈의 굴절력 구성은 (–, +, –, +, +, +)로 되었고, 초자는 (NLAF2, NLAF2, NSF4, NLAF2, NLAK12, NSK16)로 구성되었고, 마지막은 보호창으로 BK7을 사용하였다. 이렇게 사용할 수 있는 변수를 추가하여 최적화한 결과 최적화가 되어 갈수록 EFL < BFL 관계가 확실해지고 있음을 확인할 수 있었다. 초기 설계 시 EFL 값을 추정할 수 없었기 때문에 EFL=BFL로 두고 최적화를 진행하였으나, Table 2에 제시된 성능을 만족하는 설계 데이터를 얻었을 때는 EFL = 162.7 mm가 되어 BFL보다 짧아지게 되었다. 최종적으로 설계된 F-theta 렌즈의 ray tracing은 Fig. 3에, 설계 데이터는 Table 4에 나타나 있다.

X, Y 갈바노미러의 최대 구동각 $\phi_{a_{\max}}$, $\phi_{b_{\max}}$는 최적화 작업 초기에는 ±5.66°이었으나, 유효초점거리 EFL이 최적화 과정에서 짧아짐에 따라, 사용자가 제시한 Table 2의 5)항의 구속조건인 유효 상면의 크기를 만족하기 위해, 최

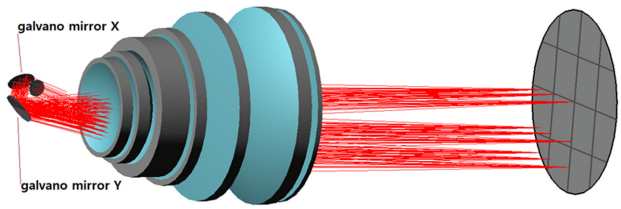

Fig. 3. 3D ray tracing on the designed telecentric F-theta lens system.

Table 4. Optimized design data of the telecentric 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	20.000		Refract	5.3000
2	Sphere	Infinity	0.000		Reflect	8.5951
3	Sphere	Infinity	–16.000		Refract	5.4589
4	Sphere	Infinity	0.000		Reflect	10.2680
5	Sphere	Infinity	60.000		Refract	9.4067
6	Sphere	–57.3143	7.500	NLAF2	Refract	26.5285
7	Sphere	–64.7504	2.000		Refract	29.4269
8	Sphere	–69.4529	13.000	NLAF2	Refract	30.1912
9	Sphere	–49.5362	3.749		Refract	33.1252
10	Sphere	–49.7933	6.000	NSF4	Refract	33.4708
11	Sphere	Infinity	4.703		Refract	41.3191
12	Sphere	–313.58	16.000	NLAF2	Refract	42.9288
13	Sphere	–93.9829	2.457		Refract	46.3394
14	Sphere	705.5256	21.000	NLAK12	Refract	54.1049
15	Sphere	–138.027	6.152		Refract	55.6981
16	Sphere	135.1718	13.000	NSK16	Refract	58.1844
17	Sphere	188.0748	13.4396		Refract	57.0377
18	Sphere	Infinity	3.000	BK7	Refract	56.9555
19	Sphere	Infinity	197.000		Refract	56.9203
Image	Sphere	Infinity	–0.0623		Refract	

Table 5. Changed values of driving angles (ϕ_a, ϕ_b) of galvanomirrors for the optimized telecentric F-theta lens

Driving states		X0Y0	X0Y2	X2Y0	X2Y2	X0Y1	X1Y0	X1Y1	X1Y2	X2Y1
Initial values before optimization (deg)	ϕ_a	0	0	5.66	5.66	0	3.40	3.40	3.40	5.66
	ϕ_b	0	5.66	0	5.66	3.40	0	3.40	5.66	3.40
Final values after optimization (deg)	ϕ_a	0	0	6.93	6.93	0	4.16	4.16	4.16	6.93
	ϕ_b	0	6.93	0	6.93	4.16	0	4.16	6.93	4.16

Table 6. Telecentricities of driving states of galvanomirrors for the optimized telecentric F-theta lens

Driving states	X0Y0	X0Y2	X2Y0	X2Y2	X0Y1	X1Y0	X1Y1	X1Y2	X2Y1
Telecentricity (direction cosine)	1.00000	0.99959	0.99999	0.99977	0.99981	0.99999	0.99983	0.99966	0.99988

Table 7. First optical characteristics of the optimized telecentric F-theta lens

Distance between galvanomirrors X & Y	= 18.0 mm
Distance between galvanomirror Y and first surface of 1st lens	= 42.0 mm
Working distance (BFL)	= 197.0 mm
Distance between first surface of 1st lens and 2nd surface of last lens	= 112.0 mm
Diagonal size of effective image field	= 111 mm
Max driving angle of galvano mirror $\phi_{a_{max}}$	= ± 6.93°
Effective focal length (EFL)	= 162.7 mm
Effective input beam diameter	= 10.6 mm
Max telecentricity (deg)	≤ 1.64

대 구동각 $\phi_{a_{max}}$, $\phi_{b_{max}}$는 점점 더 커지게 되어 ±6.93°로 최적화가 되었다. Table 5는 최적화에 사용한 9가지의 X, Y 갈바노미러 구동각의 변화 상태를 보여준다. 최적화된 텔레센트릭 F-theta렌즈의 9가지의 갈바노미러 구동각 상태에서의 telecentricity와 1차광학량을 Table 6, 7에서 확인할 수 있다.

결과 및 고찰

최적화에 사용한 갈바노미러 X, Y의 9가지 구동상태에 대하여 최적화된 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 상면에서의 spot diagram, MTF, 유한광선 수차 등의 특성을 Fig. 4~6에서 보여주고 있다. Table 5의 9가지 갈바노미러 구동상태에서의 spot diagram이 Fig. 4에 나타나 있다. 그림에서의 원은 Airy disk의 크기를 보여주는데 이 값은 $0.61\frac{\lambda}{NA}$ [12]로 계산된 것으로 지름이 약 10 μm임을 확인할 수 있다. 이 값은 Table 7의 최적화된 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 1차광학량으로 계산된 광학계의 NA=0.0326와 사용하는 레이저의 파장(λ) 532 nm를 사용하여 계산된다.

Fig. 5는 갈바노미러 X, Y의 구동상태가 X0Y0, X2Y0, X1Y2, X2Y1 등의 4가지 상태일 때의 MTF 값을 보여주고 있다. 이 4가지 상태의 결정은 기준이 되는 가장 이상적인 상태인 X0Y0 상태와 Fig. 4의 Spot diagram에서 빔의 분포가 가장 많이 퍼져있어서 분해능이 가장 좋지 않을 것으로 판단되는 3가지로 결정한 것이다. 이 중에서 MTF 성능은 갈바노미러 구동상태가 X2Y1에서 가장 낮은 것으로 판단된다. 이 X2Y1 상태에서 MTF 30%의 값을 기준으로 한다면, 최적화 설계된 텔레센트릭 F-theta의 분해가능한 선폭은 50.0 lps/mm 이상임을 확인할 수 있다. 이는 결상면에서의 spot 크기 10 μm에 해당한다.

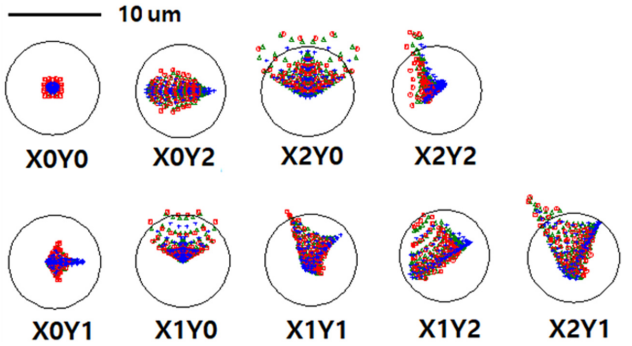

Fig. 4. Spot diagramS of the designed telecentric F-theta lens system in the nine driving states of the galvano-mirrors.

Fig. 6은 Fig. 5의 4가지 갈바노미러 구동상태에 해당하는 유한광선 수차를 보여주고 있다. 갈바노미러 X2Y1 구동상태인 D에서의 유한광선 수차량이 갈바노미러 X2Y0 구동상태인 B에서의 유한광선 수차량과의 비교에서 Y-FAN에서는 유사하고 X-FAN에서는 오히려 더 잘 보정된 것으로 보이지만, Fig. 5에서 MTF의 성능은 D가 훨씬 좋지않는 것으로 보인다. 이는, 두가지 상태에서의 X 갈바노미러 구동상태가 구동각이 6.93°으로 최대로 같지만, Y 갈바노미러의 X2Y0 구동상태에서는 구동각이 0.0°이고 X2Y1 구동상태에서는 구동각이 4.16°로 구동되어 레이저 빔이 렌즈로 입사할 때 입사하는 유효구경이 X2Y1 상태에서 줄어드는 비네팅(vignetting)이 나타나서 분해능이 줄어드는

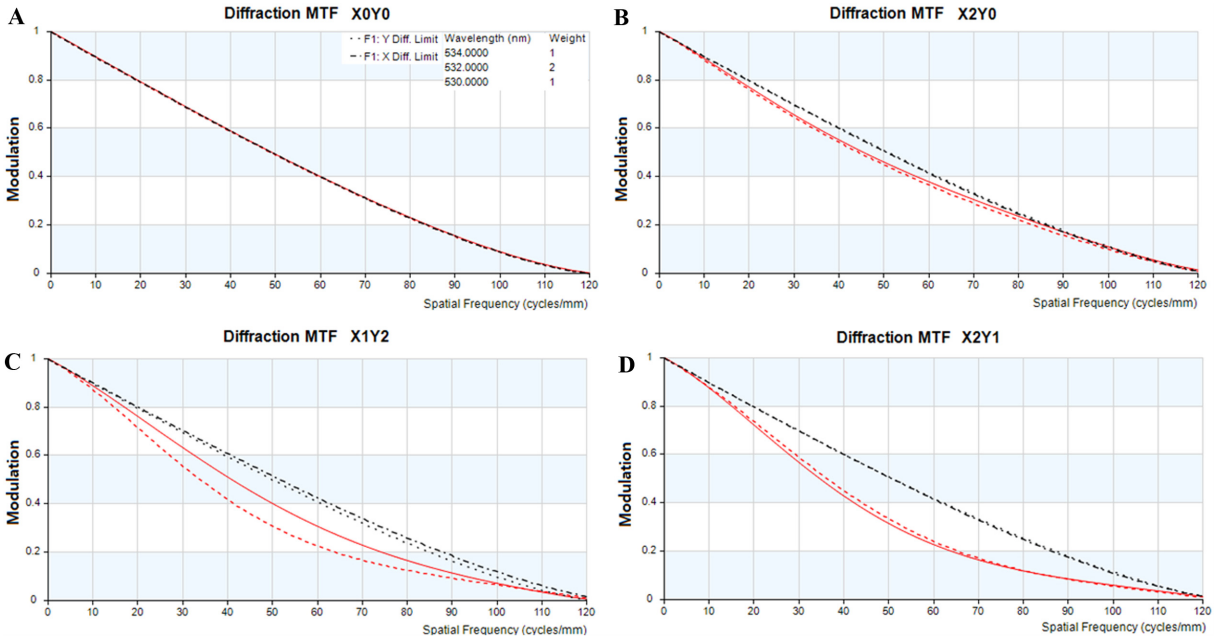

Fig. 5. MTF of the designed telecentric F-theta lens system in the four driving states.

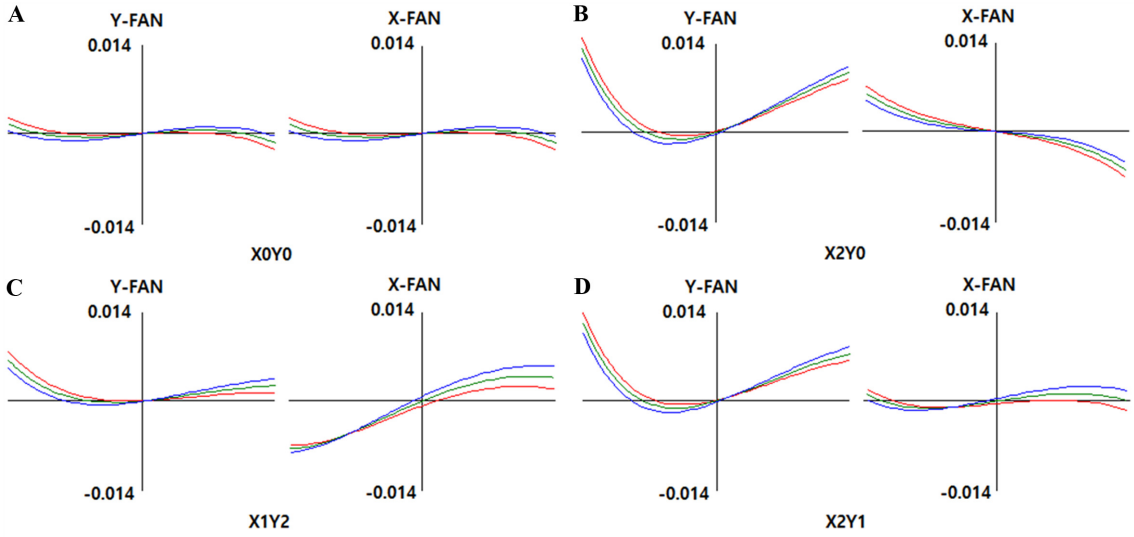

Fig. 6. Diagram of finite ray aberrations of the designed telecentric F-theta lens system in the four driving states.

효과[16]로 보인다.

Table 6에서는 9가지 갈바노미러 구동상태에서의 telecentricity를 보여주고 있는데, 이 중에서 telecentricity가 가장 큰 구동상태가 X0Y2에서 0.99959를 나타낸다. 이를 각도로 환산해보면 $COS^{-1}(0.99959) = 1.64^{o}$인데 이는 Table 1에서 제시된 사용자의 요구 스펙을 충족하는 것으로 판단된다.

유효 결상면의 면적은 갈바노미러 X, Y의 구동각이 최대 ±6.93°이고, 초점거리가 162.7 mm이므로 $(2\times(162.7\times\frac{6.93\times2}{180}\times\pi))^2$에서 약 $78.7\times78.7\ mm^2$로 계산된다.

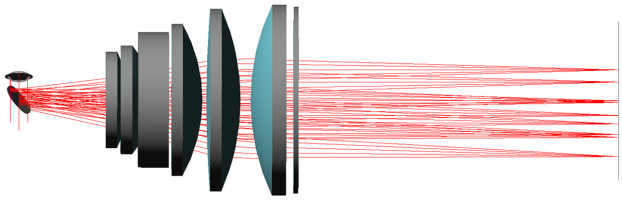

Fig. 7. Arrangment configuration for lens productions of the optimized telecentric F-theta lens.

결 론

본 논문에서는 532 nm 파장의 빔을 방출하는 레이저를 이용하는 레이저 가공기에 사용될 텔레센트릭 F-theta 렌즈

를 설계해 보았다. 설계되어진 텔레센트릭 F-theta 렌즈는 굴절력의 분포가 (–, +, –, +, +, +)로 되었고, 초자는 (NLAF2, NLAF2, NSF4, NLAF2, NLAK12, NSK16)로 구성되었으며, 마지막 렌즈는 보호창으로 BK7을 사용하였다. 본 광학계는 분해 선폭이 50.0 lps/mm(@ 30% MTF) 이상인 광학계가 됨을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 설계되어진 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 측면도를 보여주고 있는데, 이 렌즈는 입사 레이저빔의 직경을 최대로 10.6 mm까지 허용한다.

본 연구에서는 갈바노미러 구동각을 9가지 상태로 나누고, 이 들 각각에 대한 1차광학량, 유한광선 수차 및 주광선의 telecentricity를 사용자의 제작 스펙이 충족되도록 제어하는 최적화 방법을 사용하여 사용자의 요구조건에 맞는 광학계를 설계할 수 있었다. 이렇게 하여 최적화 설계된 텔레센트릭 F-theta 렌즈는 유효초점거리(EFL) 약 162.7 mm, 작업거리(BFL) 약 197.0 mm, 유효결상면 면적 약 78.7 × 78.7 mm^2, 최대 갈바노미러 구동각 ±6.93°를 갖는 광학계가 되었다.

REFERENCES

[1] SMTEDU. Laser Marking, 2019. https://cafe.naver.com/smtedu/114058(11 September 2019).

[2] Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd. 532 nm Laser Marking Machine, 2016. http://www.cnilaser.com/laser_marking_system_Green.htm(11 September 2019).

[3] 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. DOI: https://doi.org/10.14479/jkoos.2016.21.4.401

[4] Lee JS, Lee DH. Development and design of F-theta lens for 10.6 μm CO_2 laser. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2019; 24(2):161-167. DOI: https://doi.org/10.14479/jkoos.2019.24.2.161

[5] THORLABS. F-Theta Scan Lenses, 2012. https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?objectgroup_id=6430 (2 November 2016).

[6] OptoSigma. fθ-75-10600, 2016. https://www.global-opto-sigma.com/en_us/Catalogs/gno/?from=page&pnoname=f-theta-10600&ccode=W3203&dcode=&gnoname=f%CE%B8-75-10600(2 November 2016).

[7] Laikin M. Lens design, 4th Ed. New York: CRC Press, 2007;245-251.

[8] Araki T, Hirai T, Kyotani T. Development of F-theta lens for UV lasers. SEI Tech Rev. 2009;69:59-65.

[9] II-VI INFRARED. Scanning Laser System Optics, 2009. http://www.iiviinfrared.com/CO2-Laser-Optics/scanning-laser-system-optics.html(2 May 2019).

[10] Opto Engineering. Telecentric Lenses Tutorial, 2009. https://www.opto-e.com/resources/telecentric-lenses-tutorial(2 December 2019).

[11] O'Shea DC. Elements of modern optical design, 1st Ed. New York: John Wiley & Sons, 1985;282-305.

[12] Smith WJ. Modern optical engineering, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2008;188-195.

[13] Synopsys. Code V Optical Design Software, 2013. https://www.synopsys.com/optical-solutions/codev.html(27 May 2019).

[14] Malacara D, Malacara Z. Handbook of optical design, 2nd Ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2004;418-421.

[15] Jenkins FA, White HE. Fundamentals of optics, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 1976;315-337.

[16] Lee DH. Design and evaluation of the five mirror optical system for DUV submicron lithography. PhD Thesis. KAIST, Daejeon. 1994;20-27.

532 nm 파장 레이저용 텔레센트릭 F-theta 렌즈의 설계

박승환[1], 김순동[2], 이동희[3,*]

[1]을지대학교 의료공학과, 교수, 성남 13135
[2]극동대학교 대학원 에너지IT공학과, 학생, 음성 27601
[3]극동대학교 안경광학과, 교수, 음성 27601

투고일(2019년 12월 2일), 수정일(2019년 12월 12일), 게재확정일(2019년 12월 13일)

목적: 본 연구는 532 nm 파장의 레이저용 텔레센트릭 F-theta 렌즈 설계에 관한 것이다. **방법**: 레이저 빔의 직경 11 mm 이내, 결상 점의 spot 직경 10 μm 이내, 광학계의 두께 112 mm 이내, telecentricity 2.0° 이내, 작업거리 약 197 mm, 유효 결상 정사각형 면적의 대각선 길이 약 111 mm 이상인 사용자 조건을 만족하는 텔레센트릭 F-theta렌즈를 설계하기 위해, 두 X Y 갈바노미러 구동각을 9가지 상태로 분리하고, 상기 사용자 조건을 구속조건으로 하여 두 매의 (–,+) 굴절력의 구성에서 출발하여 렌즈 매수를 늘리면서 점진적으로 최적화하는 방법을 사용하였다. **결과**: 최적화되어진 텔레센트릭 F-theta 렌즈는 굴절력의 부호가 (–, +, –, +, +, +)의 순서이고, 초자의 구성이 (NLAF2, NLAF2, NSF4, NLAF2, NLAK12, NSK16)의 순서로 되는 6매의 렌즈로 구성되었다. 분해 가능한 선폭은 50.0 lps/mm(@ 30% MTF)이며, 유효 초점거리는 약 162.7 mm이며, 작업거리는 약 197.0 mm이며, 유효결상면 면적이 약 8.7 × 78.7 mm^2이며, 갈바노미러의 최대 구동각이 ± 6.93°인 특성을 가지게 되었다. **결론**: 본 연구에서 우리는 두 X Y 갈바노미러 구동각의 조합을 9가지 상태로 나누고, 각 구동각 상태에서의 유한광선 수차 및 주광선의 telecentricity를 최소화하는 방법을 사용하여, 초점거리가 162.7 mm인 텔레센트릭 F-theta 렌즈를 개발하였다. 개발된 렌즈는 관통홀 가공기, 마킹기, 3D 프린팅 장비 등에 사용될 수 있다.

주제어: 532 nm 파장 레이저, F-theta 렌즈, 관통홀 가공기, 3D 프린팅, Telecentricity