

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.3.213>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

소형 2차원 레이저 스캐너용 F-theta 렌즈 역설계

최 해 운*†

* 계명대학교 기계자동차공학과

Reverse Design of F-Theta Lens for Compact Laser Scanner

Hae Woon Choi*†

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.

(Received November 11, 2016 ; Revised December 5, 2016 ; Accepted November 7, 2016)

Key Words: Laser Welding(레이저 용접), Laser Scanner(레이저 스캐너), Reverse Engineering(역설계)

초록: 리모트 용접용 2D 스캐너 F-theta 렌즈의 역설계가 광선 추적기법을 사용하여 수행이 되었다. 렌즈의 곡면 및 렌즈간 거리를 변수로 설정하고 초점거리를 Marginal Ray Height 로 설정하여, 상용 광선추적기법 프로그램을 사용하여 무한반복 최적화를 수행 하였다. 최종목표 값을 설정 후 Merit Function에 정의된 기준에 따라, 최종 초점거리와 초점의 크기를 최종 목표 값 가중치로 설정하였다. 최적화된 렌즈는 총 4매이며, 벤치마킹된 상용렌즈의 초점거리(185mm) 보다는 다소 근거리인 137mm로 최적화 되었지만, 초점의 크기는 레이저 입사각에 따라 RMS 기준 $1.3\mu\text{m}$, $6.2\mu\text{m}$ 그리고 $16.1\mu\text{m}$ 로 계산 되었으며, 이는 상용렌즈에 근접하는 성능을 구현한다. 입사각별 왜곡도를 중첩 하여서 비교 분석한 결과, 입사각 0°와 12.5°에서는 기존 렌즈와 거의 유사한 형태로 나타나는 것을 볼 수가 있어, 본 연구에서 제안된 역설계기법이 사용자 환경에 따라서 효과적으로 적용되어 최적설계가 이루어질 수 있을 것으로 기대가 된다.

Abstract: In this study, a reverse design of the F-theta lens was proposed for a 2D scanner in remote welding applications. The curvature and distance of the lens were set as variables, and the focal length of the lens was set as the marginal ray height. The ZEMAX commercial software was used to perform a simulation with unlimited iterations for the optimization process. The target value was optimized using the internal Merit function with the weight factors of focal length and spot diameter. The number of lenses was four, and the focal length obtained from the results was 135mm that is slightly less than that of the commercial lens, which is set with a focal length of 185 mm. The calculated spot diameters are $1.3\mu\text{m}$, $6.2\mu\text{m}$, and $16.1\mu\text{m}$ for 0°, 12.5° and 23° of incident laser beam, respectively. It is expected that an optimized lens design is possible by performing the reverse design of a lens by the ray tracing method.

- 기호설명 -

- θ : 레이저빔의 입사각(SI unit: radian)
- f : 렌즈의 초점 거리(SI unit: mm)
- D : 렌즈 설계 시 발생한 실제 값(SI unit: mm)
- d : 렌즈 설계 시 목표 값(SI unit: mm)

1. 서 론

생산공정의 효율성 및 용접공정의 고속화로 인

해 레이저 스캐너를 이용한 리모트 용접이 생산 현장 전반에 적용이 되고 있다. 이러한 고생산성 시스템의 도입으로 인해서 양산속도가 가속화됨과 동시에, 불필요한 지그나 고가의 이송장치가 필요 없기 때문에 원가절감은 물론 최종제품의 가격까지 낮출 수 있는 장점이 되고 있다.⁽¹⁻³⁾

이러한 리모트 용접을 가능하게 해주는 핵심요소는 뛰어난 레이저 열원제어 기술과 레이저빔을 빠른 시간에 편향하도록 가능하게 해주는 장치인 레이저 스캐너의 구성이다. 레이저 스캐너는 크게 내부에 빔을 편향해주는 장치인 갈바노미터

† Corresponding Author, hwchoi@kmu.ac.kr

(Galvanometer)와 편향된 입사레이저빔이 초점위치에서 왜곡되는 것을 보정해주는 장치인 F-theta 렌즈로 구성되어 있다.⁽⁴⁾

F-theta 렌즈는 일정각도 범위 내에서는 레이저빔의 초점거리를 편향각도와 상관없이 보정해주는 역할을 함으로서, 집속밀도를 일정하게 해줄 수 있으며, 균일하고 안정도 용접이 가능하게 해주는 역할을 해주고 있다. 일반적인 렌즈의 경우, 입사각에 따라 출사빔이 일정각도와 초점거리에서 집속이 되기는 하지만, 초점거리가 많이 달라지게 된다(Fig. 1A). 이러한 초점왜곡을 보정하기 위해서 Flat Field 스캐닝렌즈도 개발되었지만(Fig. 1B), 초점위치의 비선형성 때문에 사용에 한계가 존재하게 된다.

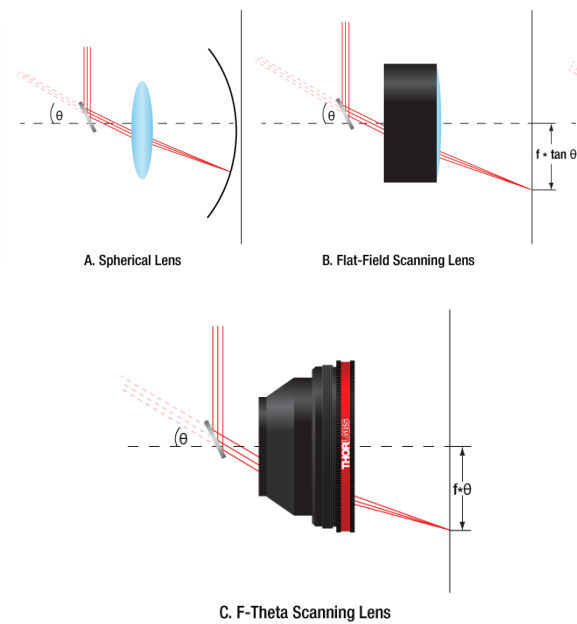


Fig. 1 The Concept of F-theta scanning lens⁽⁵⁾

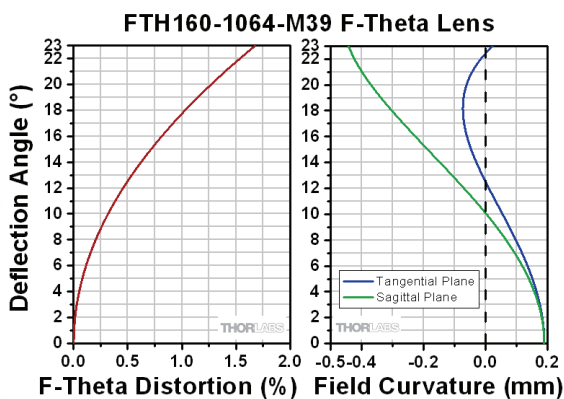


Fig. 2 Example of lens deflection angle⁽⁵⁾

F-Theta 렌즈(Fig. 1C)는 이러한 문제를 해결한 진보된 렌즈로서 초점의 위치는 초점거리와 입사각(radian)값의 곱(product)의 특성을 보이므로, 2차원 평면가공에서 매우 유용하게 사용될 수 있다. 이러한 기술이 발달되어, 최근에는 단순 2차원 보정 뿐만 아니라 3차원 거리까지 보정해주는 3차원 스캐너도 산업현장에서 적극 활용이 되고 있다.

시중에 출시되고 있는 F-theta 렌즈는 렌즈의 핵심기능에 대한 사양으로서, 초점거리, 최대편향각도, 2차원 스캔영역, 입사광의 직경 및 빔의 왜곡도에 대한 정보를 제공한다(Fig. 2). 사용자들은 이러한 렌즈 성능자료(Lens Performance Data)를 바탕으로 응용기계에 다양한 형태로 적용을 하는데, 필요에 따라서 초점거리, 초점크기 및 빔왜곡 등에 대한 제반 값을 변형하여, 렌즈 성능을 적용환경에 따라 최적화 해야 할 필요가 있다. 이러한 최적화 설계를 위해서는 렌즈의 재질을 비롯하여 형상(Geometry) 정보가 필요한데, 렌즈공급자는 대부분의 정보를 공개하지 않고 있다.

본 연구에서는 상용 F-Theta 렌즈의 성능자료(Performance Data)를 근거로 역설계하여, 사용자의 환경에 맞는 F-Theta 렌즈를 설계하는 방법에 대해 연구한 결과를 보고한다.

2. 본 론

2.1 벤치마킹 F-Theta 렌즈

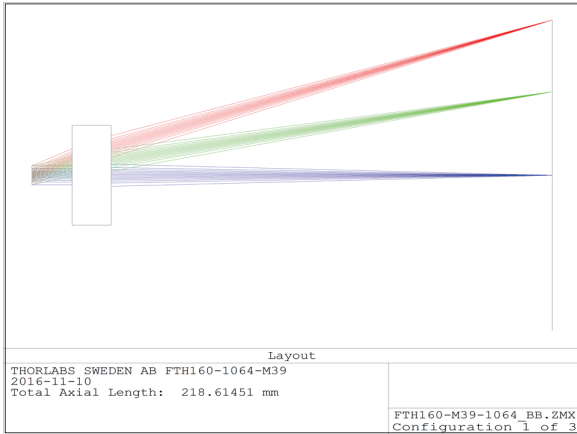
렌즈 역설계 후의 성능평가를 비교하기 위하여, 기존 상용 F-Theta 렌즈 중 초점거리가 160 mm이고 근적외선 영역의 파장인 1064nm에 최적 설계된 특정모델 FTH160-1064-M39(Thorlabs Inc.

Table 1 F-Theta lens specification⁽⁵⁾

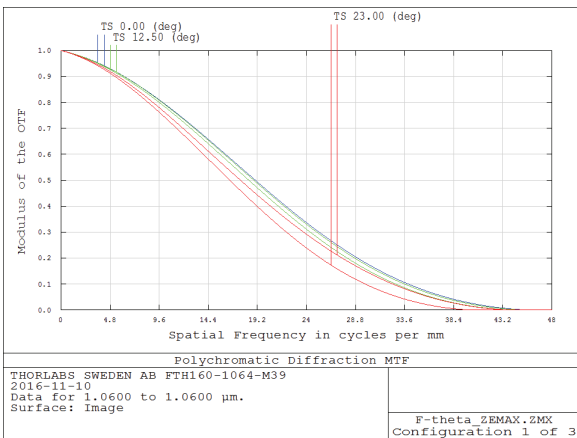
Effective Focal Length (EFL)	160 mm
Scan Angle (Max)	±20°
Scan Length (Max)	111.7 mm
Scan Field (Max)	79 x 79mm
Beam Diameter	8 mm
Spot Size	39 μm
F-Theta Distortion (Max)	1.30%
Working Distance	181.0 mm
Flange Focal Length	194.1 mm
Lens Length	12 mm (0.47")
Mounting Threads	M39 x 1.0

USA)을 설정하였으며, 상세사양은 Table 1에 정리되어 있다. 앞 절에서 기술된 바와 같이 대부분의 상용렌즈는 기본적인 성능데이터는 주어지지 않지만, 세부렌즈 형상은 Fig. 3(a)와 같이 블랙박스 로 감추어져 있다.

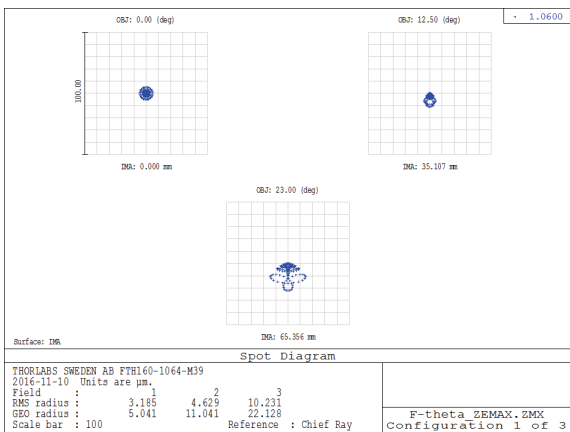
제공된 데이터를 이용 상용 광선추적 소프트웨어



(a) Layout of rays(Inc. Angle 0°, 12.5°, 23°)



(b) Polychromatic diffraction MTF



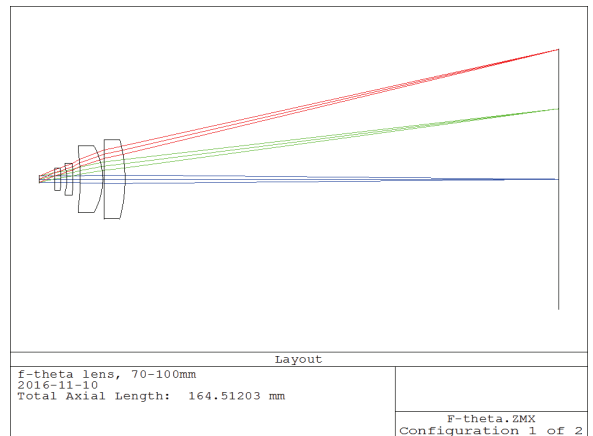
(c) Spot diagram

Fig. 3 Lens performance results

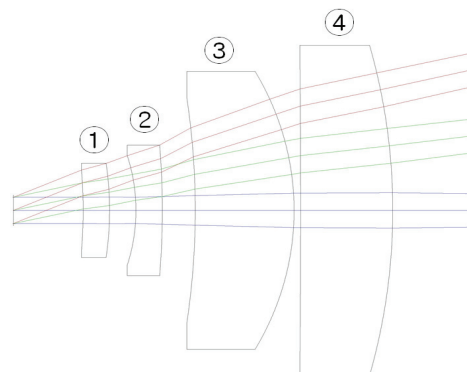
어(ZEMAX)를 통해 렌즈의 상세성능을 확인한 결과가 Fig. 3에 도시되었다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 투과된 빔은 초점거리 185mm 지점에 맺히고, Modular Transfer Function(MTF)를 이용하여 이상적인 구면렌즈와 비교 한 결과[Fig. 3(b)], 입사각이 0°와 12.5°인 경우는 대부분 5 cycles/mm에 위치하고, 23°의 경우는 25 cycles/mm 근처로 계산되었다. 또한, 초점의 크기는 입사각(0°, 12.5°, 23°)에 따라 RMS 기준 3.2 μ m, 4.6 μ m 그리고 10.2 μ m로 시뮬레이션되었다[Fig. 3(c)].

2.2 F-Theta 렌즈설계

렌즈 설계시 초점거리를 100mm로 설정하였으며, 초기설계 내용을 바탕으로 하여 렌즈는 총 4매를 기준으로 하였다. 일반적으로 3매의 렌즈로도 F-theta 렌즈의 효과를 낼 수도 있으나, 초점크기에 대한 제반사항을 고려한 결과, 4매로 설정을 하였다(Fig. 4). 설계된 렌즈는 일정량의 곡률을 가지도록 되어 있으며, 각 렌즈의 곡면 및 렌즈간 거리를 변수(Variable)로 설정하고, 굴절률



(a) Layout of lens



(b) Lens ID

Fig. 4 Lens design configuration

Table 2 Lens design data (unit: mm)

Lens #	Face	Curvature	Dist.*
1	Left	-37.78	1.89
	Right	-26.10	1.89
2	Left	-14.30	1.89
	Right	-64.31	2.36
3	Left	-61.00	7.08
	Right	-21.43	0.47
4	Left	-1176.47	6.60
	Right	-48.36	137.33

1.6, 초점거리를 Marginal Ray Height로 설정하여, ZEMAX-EE 버전을 사용하여 무한반복 최적화를 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 도출된 결과 값의 렌즈 좌우면 곡률 값이 Table 2에 정리되었다.⁽⁶⁾

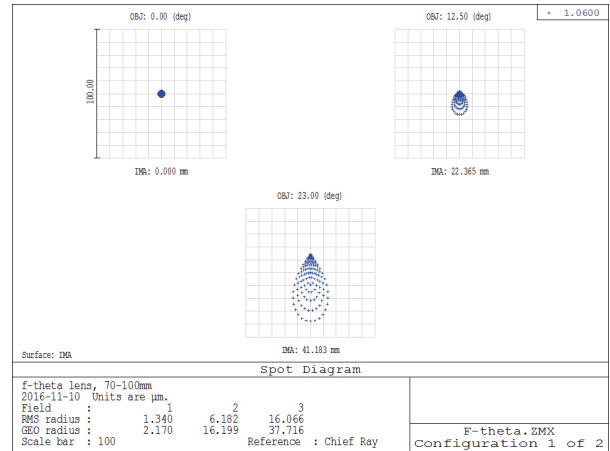
최적화는 렌즈의 성능조건을 설정 후 Merit Function에 정의된 기준에 따라서 이루어졌다. 적용된 알고리즘에는 지역최적화기법(Damped Least Squares and Orthogonal Descent) 법과 전역최적화기법(Global Search and Hammer)가 적용되었다. 렌즈설계 최적화에 대한 기법에 대해서는 수많은 선행연구가 선행연구자들에 의해서 진행이 되었으며, 상용소프트웨어에서는 정확도와 시뮬레이션시간을 감안하여 다양한 알고리즘을 개발하여 사용자들에게 제공하고 있다.

식 (1)과 같이 단순 계산하여 차이 값을 최소화할 수도 있지만, 식 (2)와 같이 Merit Function을 이용하여 여러 가지 구속조건과 최종 값을 정의하고 실행을 하면 좀 더 정확한 값을 도출할 수 있다. Merit Function은 최소자승법과 유사한 형태로 각 항목에 사용자가 지정한 가중치를 최종 값과의 차이 값과 곱한 후 전체 합이 최소화 될 수 있도록 하여, 이상렌즈에 가깝도록 설계 하는 것이다. 이상적으로는 0이지만, 실제로 무한 반복형태로 발산할 수 있기 때문에, 몇몇 변수들의 범위를 선정하여서 실용적인 설계 값을 얻도록 설계하였다.

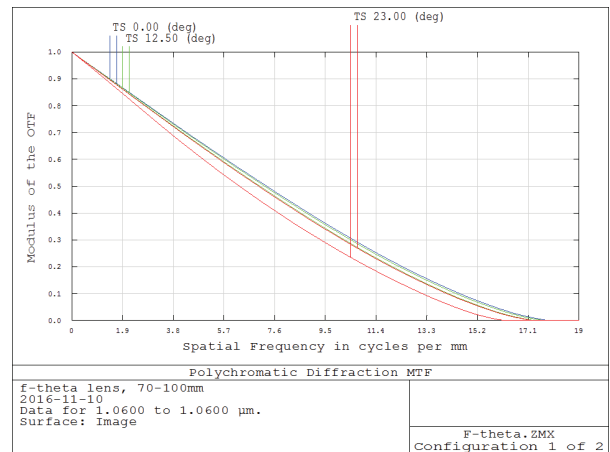
$$Differential\ error = \frac{Pl(J) - Pl(J-1)}{Pl(J-1)} \quad (1)$$

$$Merit\ Function = \sum_{i=1}^n W_i (D_i - d_i)^2 \quad (2)$$

여기에서, $Pl(J)$ 는 J 번째 ray의 광축길이이며,



(a) Spot diagram



(b) Polychromatic diffraction MTF

Fig. 5 Lens simulation analysis

Merit Function에 사용된 D_i 는 실제 값, d_i 는 해당 항목의 목표 값이며, 다양한 값으로 설정이 될 수가 있는데, 초점거리, 특정위치에서의 초점크기 및 Wavefront가 그 대표적인 예가 될 수 있다. 본 연구에서는 입사각이 0°와 12.5° 그리고 23°로 조사되었을 때, 초점평면에서 최소 초점크기를 가지도록 설계목표를 정하였다.

3. 결 과

설계된 렌즈의 성능을 비교검증 하기 위하여, 벤치마킹에 사용 렌즈와 동일항목에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 설계항목에서 가장 Weight Factor가 높았던 것이 최종 지점에서의 Spot Diameter이며, 여기에 대한 결과 값이 Fig. 5(a)에 도시되었다. 초점의 크기는 입사각(0°, 12.5°, 23°)에 따라 RMS 기준 1.3μm, 6.2μm 그리고 16.1μm

로 시뮬레이션 되었다. 계산된 결과는 상용 렌즈에 비해서 입사각이 0°와 12.5°에서는 다소 개선된 결과를 보였으나, 23°에서는 일부 왜곡되는 결과가 나타났다. MTF 시뮬레이션의 경우도 입사각이 0°와 12.5°인 경우는 대부분 1.9 cycles/mm에 위치하고, 23°의 경우는 10 cycles/mm 근처로 계산되어서, 상용렌즈보다 일부 개선이 된 것으로 나타났다.

다만, 초점거리의 경우, 상용렌즈의 경우 185mm로 다소 원거리로 설정되었지만, 새로 설계된 렌즈의 경우는 137mm로 다소 근거리로 설정되었다. 근거리 설정으로 인해서 f#가 줄어드는 효과가 있어서, 렌즈의 초점거리가 상대적으로 작아질 수 있는 장점이 있지만, 근거리 초점으로 인한 생산가공시 간섭 등의 불리한 점도 상존하고 있다.

또한, 입사각별 x방향 및 y방향 렌즈의 왜곡도(Aberration)을 보기 위해서 상용렌즈(Commercial)와 설계렌즈(Designed)의 왜곡도를 겹침 하여서 비교 분석하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 렌즈의 왜곡도는 거의 유사한 형태로 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 특히, 입사각 0°와 12.5°의 경우는 거의 동일형태로 분석이 되었다.

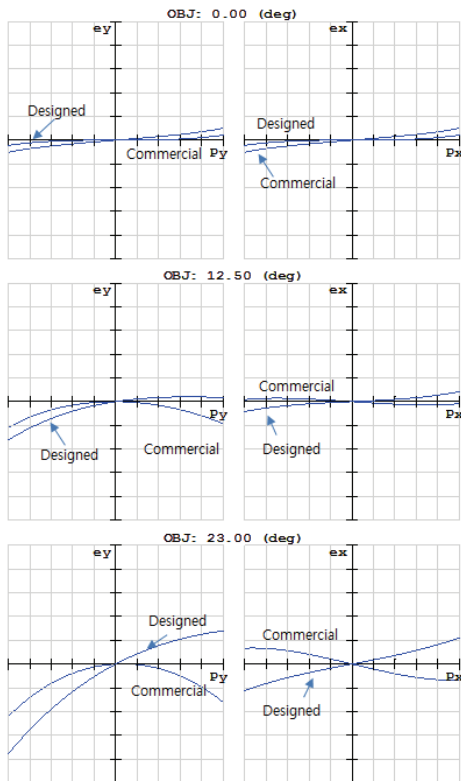


Fig. 6 Comparison of lens aberration (Unit: 10µm per grid)

4. 결론

본 연구에서는 리모트 용접용 2D 스캐너 F-theta 렌즈의 구조를 이해하고, 사용자 환경에 맞게 렌즈를 역설계하기 위한 분석방법에 대한 연구를 보고하였다. 렌즈설계는 광선추적 기법을 사용하는 상용소프트웨어를 사용하였고, 각 렌즈의 곡면 및 렌즈간 거리를 변수(Variable)로 설정하고 초점거리를 Marginal Ray Height로 설정하여, ZEMAX-EE 버전을 사용하여 무한반복 최적화를 수행 하여서 도출하였다. 이때 최적화는 렌즈의 성능조건을 설정 후 Merit Function에 정의된 기준에 따라서 이루어졌으며, 최종 초점거리와 초점의 크기를 최종 목표 값 가중치 설정하였다.

최적화를 위해서 렌즈는 총 4매가 사용되었고, 초점거리는 상용렌즈(185mm)보다 다소 근거리인 137mm로 최적화되었다. 시뮬레이션 결과 초점의 크기는 레이저 입사각(0°, 12.5°, 23°)에 따라 RMS 기준 1.3µm, 6.2µm 그리고 16.1µm로 계산되었으며, 이는 상용렌즈에 비해서 0°와 12.5°에서는 우수한 결과를 보였으나, 23° 입사각 조건에서는 다소 왜곡이 되었다. 입사각별 왜곡도(Aberration)를 겹침 하여서 비교 분석한 결과, 입사각 0°와 12.5° 기준 렌즈와 거의 유사한 형태로 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 본 연구를 통해서 상용렌즈에 대한 성능데이터를 기준으로 역설계기법이 효과적으로 검증될 수 있음을 알게 되었으며, 사용자 환경에 따라서 최적설계를 하여 맞춤형 렌즈제작이 추가적으로 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국연구재단 일반연구지원사업(NRF-2015R1D1A1A01060648)으로 지원되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Martínez, S., Lamikiz, A., Ukar, E., Callej, Arrizubieta, A. and Lacalle, L., 2017, "Analysis of the Regimes in the Scanner-based Laser Hardening Process," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 90, pp. 72~800.
- (2) Miyagia, M., Zhanga, X., Kawahitob, Y. and Katayama, S., 2017, "Surface Void Suppression

- for Pure Copper by High-speed Laser Scanner Welding," *Journal of Materials Processing Technology*, 240, pp. 52~59.
- (3) Choi, H. and Yoon, S., 2015, "Laser Welding Analysis for 3D Printed Thermoplastics and Polyacetate Polymers," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 7, pp. 701~706.
- (4) Shi, H., Yoo, S. and Choi, H., 2015, "Optimum Design and Characterization of F-Theta Lens by a 3D Printer(I)," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14 No. 4, pp. 43~48.
- (5) Technical Data for F-Theta Lens, 2017, "FTH160-1064-M39," Thorlabs Cat. www.thorlabs.com.
- (6) ZEMAX-EE, Web information, www.funako.com May. 2015.