

초점보정 렌즈설계 및 3D 프린터 이용 가공 특성평가(II)

윤성철*, 신현명**, 최해운**,#

*계명대학교 기계공학과 대학원, **계명대학교 기계자동차공학과

Optimum Design and Characterization of F-theta lens by a 3D Printer(II)

Sung-Chul Yoon*, Hyun Myung Shin**, Hae-Woon Choi**,#

*Graduate school of Mechanical Engineering, Keimyung University

**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

(Received 10 April 2015; received in revised form 26 May 2015; accepted 12 June 2015)

ABSTRACT

The fabrication of a focal length-correcting lens called the F-theta lens was performed by a 3D printer. The fabricated lenses were characterized by transmittance and reflectance measurements. The optical properties of the lens, such as scattering or transmittance efficiency, were analyzed with respect to the wavelength (red, green, and blue) and the surface roughness of the lens. There was almost no shape aberration on the focus location of 0 degrees, but elliptical focus shapes were found at 1 and 2 degrees of the laser incidence angle. The developed process is expected to be used for the quick fabrication of lenses with low costs and quick turn-out. By improving the surface roughness during postprocessing, the optical properties are expected to be comparable to commercial lens quality.

Key Words : Ray Tracing(광선추적), 3D Print(3D 프린트), F-theta Lens(초점보정렌즈), Optics Design(광학설계), Laser(레이저)

1. 서 론

레이저 광원을 이용한 가공이 산업계 전반에서 많이 활용이 됨에 따라, 생산성 향상을 위한 고속 가공기법이 많이 개발되었다^[1,2]. 특히, 2차원 미러를 고정도(High precision) 모터 즉, 갈바노미터(Galvanometer)에 장착하여 xy방향으로 최고 16m/sec(초점위치 기준)으로 고속가공하는 레이저 스캐너가 리모트 용접 및 마킹 분야 전반에 활용이 되고 있

다^[1-2]. 이러한 레이저 광원을 원하는 방향으로 조향한 후 초점을 맺히게 하기 위해서는 각도에 따른 초점보상을 해주는 특별한 렌즈가 필요한데, 그것이 바로 F-theta 렌즈이다. F-theta 렌즈는 일련의 렌즈조합으로 이루어지는데, 통과 레이저의 파장과 각도 그리고 초점의 거리에 따라서 그 렌즈설계와 가공정도가 결정이 된다(Fig. 1)^[3,4].

3D 프린터 개발은 생산기술의 혁명을 가져왔다. 특히, 기존 RP의 시제품 레벨 생산능력에서 벗어나 다품종 소량 시장에서 3D 프린터는 소량생산까지 그 범위를 확대하였다.

Corresponding Author : hwchoi@kmu.ac.kr

Tel: +82-53-580-5216, Fax: +82-53-580-6067

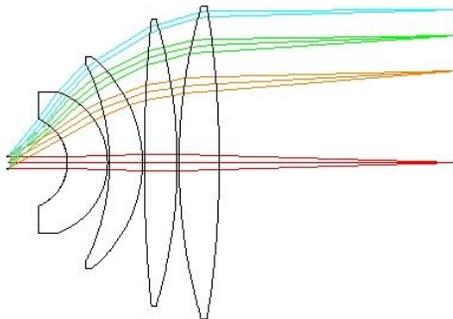
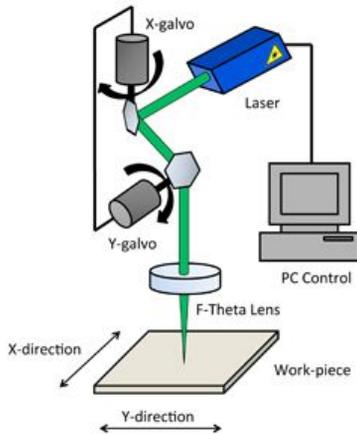


Fig. 1 The concept of laser scanner and F-theta lens

또한, 3D 프린터의 정밀도향상으로 인해서 저비용 렌즈가공도 가능 할 것으로 기대가 되어 조명용 또는 저출력 가공용 F-theta 렌즈 생산도 가능할 것으로 기대가 된다.

본 논문에서는 보급형 초점보상 렌즈 제작을 위해서 3D 프린터를 사용한 가공사례와 그 특성에 관한 연구결과를 소개하고자 한다.

2. 본문

2.1 형상모델링 및 가공장치

설계된 렌즈는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 3D 모델링 소프트웨어인 CATIATM로 렌즈형상을 설계한

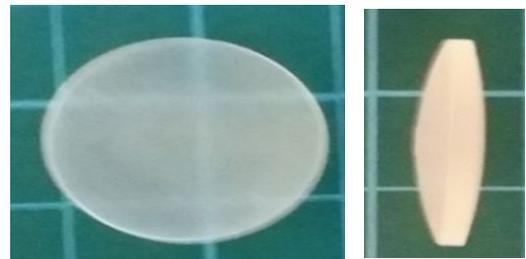
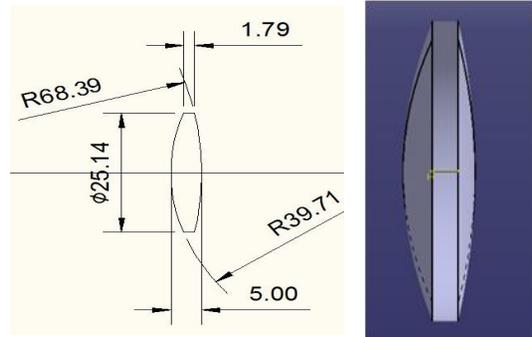


Fig. 2 Lens design and fabrication

후 3D 프린터로 제작하였다. 실험에 사용된 3D 프린터 소재는 PROJET HD3500 (3D systems Inc., USA)에서 제작이 되었으며, 소재(Mold)는 우레탄 계열의 Urethane acrylate oligomers(20 ~ 40%), Ethoxylated bisphenol A diacrylate (15 ~ 35%), 그리고 Tripropyleneglycol diacrylate (1.5 ~ 3%)로 구성되어 있다. 3D 프린트가 완료된 후 서포터 제거를 위한 후처리 공정이 오븐과 초음파 세척기에서 시행되었다.

사용된 3D 프린터의 방식은 MJP(Multi-Jet Printing)로서, 기능테스트, 빠른 생산, 빠른 공구 등을 제작할 목적으로 단시간에 높은 정밀도를 가지는 부품을 인쇄하는 데 적합하다. 가공정밀도는 HD(High Definition) 모드와 UHD(Ultra High Definition) 모드로 나뉘는데, 정밀도의 범위는 0.025 ~ 0.05mm 이다. 가공범위는 최대 298 × 185 × 203mm 이며, 가공시간은 제품의 형상과 크기에 따라서 수분에서 수십 시간까지 소요가 된다.

Table 1 Parameters for lens design (unit: mm)

| # | Radius | Thick | Mat'l | Semi-Dia. |
|---|--------|-------|-------|-----------|
| 0 | Inf. | Inf. | | Inf. |
| 1 | 39.7 | 5.0 | N-BK7 | 12.6 |
| 2 | -68.4 | 7.5 | | 12.4 |
| 3 | -45.0 | 3.0 | SF4 | 10.7 |
| 4 | -187.9 | 80.1 | | 10.5 |
| 5 | Inf. | | | 3.6 |

연구를 위해서 사용한 광시뮬레이션 소프트웨어는 ZEMAX-EE^[5,6] 버전을 사용하였으며, 입력 파장을 RGB로 설정하고, 레이저 빔의 입사각을 축대칭으로 ±2° 범위로 설정을 하였다. 렌즈매수는 2매로 하였고, 렌즈 재질은 미러나 렌즈 substrate로 가장 많이 사용하고 있는 BK7과 SK계열을 사용하여서 설계 하였으며 ZEMAX-EE로 최적화된 parameter를 Table 1에 정리하였다.

사용된 재료는 열경화성 수지에 자외선영역(UV)의 광을 해당되는 부분에 조사하여 소결 공정에 의해 경화되는 방식이고, 플라스틱 재료 층에 각각의 캐리어를 사용하는 왁스를 플랫폼 상에 증착하고, UV 광에 의해 재료는 최종 경화된다.

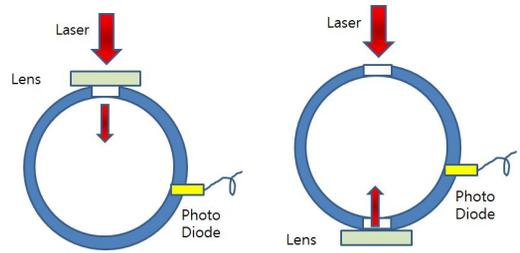
실험에 사용된 소재는 반투명의 폴리우레탄이며 열경화성은 아니지만 질기고 화학약품에 잘 견디는 특성을 가진 고분자 화합물이다. HD 또는 UHD 제작모드에 따라 적층 높이가 각각 다르며, HD모드인 경우는 적층 높이는 통상 32µm, UHD모드 적층 높이가 29µm로 출력이 되며 각 모드에 따라 서포터의 생성이 다르다.

서포터의 생성으로 인해서 샘플의 유분이 발생하게 되며, 유분의 차이에 따라 표면 거칠기 및 레이저 투과, 반사율이 달라지므로 본 실험에서는 두 가지 제작 모드를 이용하여 샘플을 제작하였다.

2.2 투과 및 반사실험

시제품의 가공결과 및 광학특성을 알아보기 위해 투과 및 산란 실험을 수행하였다. 일반적으로 레이저빔이 물질표면에 입사가 되면, 일부는 반사 또는 투과가 되고, 나머지는 흡수가 되어 물질 내부에서

다시 산란이 된다. 산란이 되거나 물질에 흡수가 된 레이저는 재료의 가공에 기여하게 되고, 이를



(a) Transmittance (b) Reflectance
Fig. 3 Optical property measurement

계산하면 가공에 필요한 에너지와 가공형태를 예측 할 수 있다. 반사나 투과의 양은 쉽게 계산이 되지만 물질내에 흡수된 빛의 양 중에서 산란과 완전흡수를 구분하는 일은 대단히 어렵다.

내부의 다중산란(multiple scattering) 현상을 분석하기 위하여 반사와 투과량을 측정하여 간접적으로 물질내에서 산란의 정도를 예측한다. 이러한 산란 예측 방법들이 몇몇 선행연구에 의해서 제안되었는데, 대표적인 이론이 Kubelka-Munk 이론(two-flux assumption), Richard-Mudgett 그리고 T. Burger의 이론이다.

본 실험에서는 적분구를 사용하여 데이터를 수집하고, 제시된 이론을 배경으로 해석하였다. 측정에 사용된 detector는 photo diode (Thorlabs, SM05PD2B)로서 빛의 강도에 따라서 전류가 발생하는 구조로 되어 있다.

여러 이론 중 Richard Mudgett 22 flux 이론과 Kubelka-Munk 이론을 조합하여서 다음과 같은 결과를 도출 할 수 있다.

$$\frac{K}{S} \approx \frac{2}{(3a_0 - a_1)/4} \frac{\mu_a}{\mu_s} \quad (1)$$

여기서, K와 S는 Kubelka 흡수 및 산란 계수이며, a₀ 와 a₁ 는 위상함수계수 (phase function coefficients), 그리고 μ_a와 μ_s 흡수 및 산란소멸계수이다. 등방성 물질의 경우 a₀=1 와 a₁ = 0 정의 되므로, 식 (1)은 아래와 같이 간략하게 재정의 될 수 있다^[7,8].

$$\frac{\mu_a}{\mu_s} \approx \frac{3}{8} \frac{K}{S} \quad (2)$$

또한 Kubelka-Munk 이론에 따르면 Kubelka-Munk 산란 및 흡수상수의 비율 (K/S)는 무한 반사율(R_∞)에서 아래와 같은 식으로 정리될 수 있다.

$$F(R_\infty) = \frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (3)$$

결과적으로 투과율과 반사율을 측정하면 식 (1), (2) 그리고 (3)에 의해서 내부 흡수도도 예측할 수 있다.

3D 프린터를 이용하여 UHD모드, HD모드 각 5개의 샘플을 제작하고 가시광선의 영역인 RGB로 설정하여 레이저의 파장, 3D 프린터 제작모드에 따라 투과율, 반사율을 측정 분석하였다 (Fig. 4, 5).

Red Laser를 사용하여 투과율을 조사하였다. UHD모드에서 오목일 때 평균 투과율 93.5%, 표준편차 0.5%를 보였고, 볼록일 때 평균 투과율 91.6%, 표준편차 0.7%를 보였다. 이에 반해 HD모드에서는 오목일 때 평균 투과율 88.1%, 표준편차 2.3%를 보였으며, 볼록일 때는 평균 투과율 83.5%, 표준편차 3.6%의 분포를 보였다.

Red Laser를 이용하여 반사율은 다음과 같이 분석이 되었다. UHD모드에서 오목한 면의 평균 반사율은 6.2%, 표준편차 0.3%를 보였고, 볼록일 때 평균 반사율은 4.9%로 측정되었으며 표준편차 0.2%로 분석되었다. 이에 반해 HD모드에서는 오목일 때 평균 반사율 5.5%, 표준편차 0.2%로 측정이 되었으며, 볼록일 때 평균 반사율 5.5%, 표준편차 0.4%로 분석이 되었다.

3D 프린터의 제작모드 모드에 따라 샘플들은 UHD모드일 때 투과율 및 반사율이 높은 것으로 나타난다. 이러한 이유는 UHD모드일 때 적층 레이어가 HD모드일 때보다 더 치밀하게 증착이 되어서 일 것으로 판단된다. 또한, 서포터에 의해 유분발생이 되기 때문에 HD모드는 표면이 거칠어 UHD모드와 비교하였을 때 투과율 및 반사율이 떨어질 것으로 고찰된다.

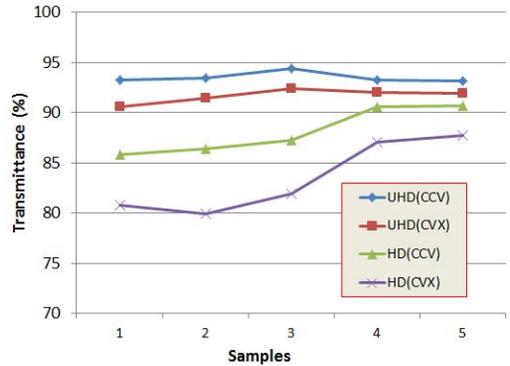


Fig. 4 Transmittance measurement

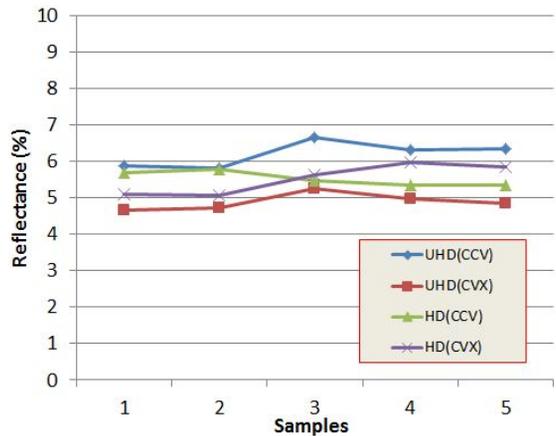


Fig. 5 Reflectance measurement

형상뿐만 아니라 레이저의 파장에 따라 투과율 및 반사율의 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. UHD모드에서 Green Laser 오목 일 때 평균 투과율 91.4% 평균 반사율 8.2%, 볼록 일 때 평균 투과율 90.5% 평균 반사율 7.0%로 나타났다. 동일한 조건에서 Blue Laser의 경우에는 오목 일 때 평균 투과율 80.2% 평균 반사율 6.7%, 볼록 일 때 평균 투과율 71.8% 평균 반사율 5.3%로 나타났다.

결과적으로 Red Laser의 파장일 때 Green, Blue Laser 파장일 때 보다 투과율 및 반사율이 높은 것을 확인 할 수 있었다.

2.3 초점실험 및 결과

투과율 및 반사율이 높은 파장대의 Red Laser를 이용하여 렌즈를 배치하여 Fig. 6에 나타난 것처럼 장치를 구성하여 초점실험을 하였다. Lens 2번의 초점위치는 시뮬레이션을 통해 최적 위치 80.1mm로 설정하였으며, Lens 1번의 위치는 Lens 2번에서 7.5mm 상부에 배치하였다 (Fig. 6).

초점 각도는 Acu Angle을 이용하여 0°, 1°, 2°로 초점실험을 진행하였으며, 렌즈는 3D 프린터로 제작된 UHD모드를 선택 하여 왜곡도를 분석하였다. 먼저 각도 0~2°에 따라 초점실험을 진행하면서 초점을 육안으로 관찰하였는데, 이론초점보다 상이 잘 맺히지 않는 것이 확인 되었다. 이는 3D 프린터가 출력될 때 서포터의 영향 (산란)으로 분석이 되며, 이는 UHD모드 일 때도 플랫폼과 맞붙는 부분에는 서포터로 인한 유분으로 인해서 산란이 많이 일어나는 것을 확인 할 수 있었다.

하지만, 빔의 왜곡은 0°일 때는 축에 나란히 입사하면서 빔의 왜곡이 거의 없었으며, 1°, 2°일 때 x축 방향으로 일부 왜곡이 되는 것을 볼 수 있었다. 즉 0°일 때는 원의 모양에서 각도를 변화 시키면서 타원형으로 형성되는 것을 볼 수 있었다 (Fig. 7).

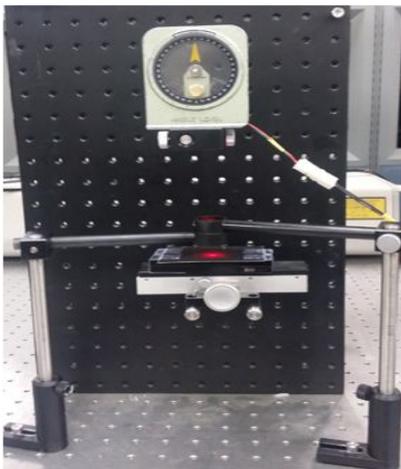
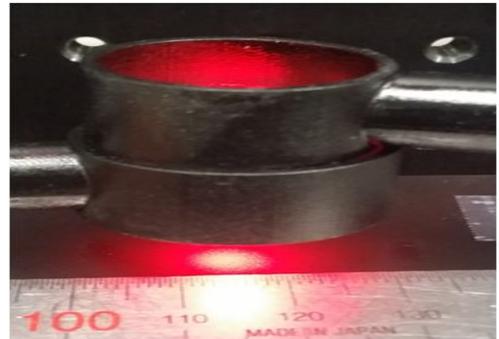
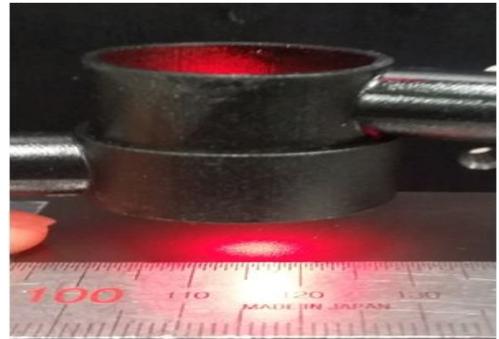


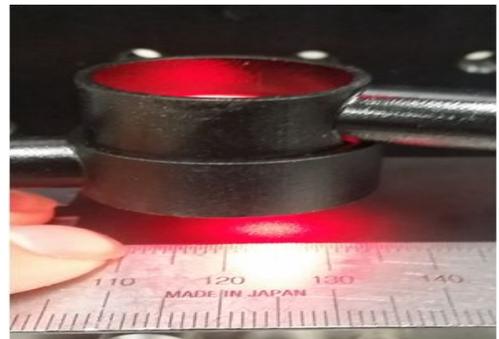
Fig. 6 Focus experiment setup



(a) 0° incidence



(b) 1° incidence



(c) 2° incidence

Fig. 7 Experiments of laser focusing

3. 결론 및 고찰

본 연구에서는 초점보정용 렌즈를 위한 광학계 최적설계에 대한 결과로서 3D 프린트된 초점보정 렌즈에 대한 가공특성을 평가하였다. Red, Green 그리고 Blue 레이저를 사용하여서 투과 및 반사도 실

험을 하였고, 0°에서 2° 범위의 일정각도 범위내에서 초점현상을 분석하였다.

결과적으로 Red Laser의 파장일 때 Green, Blue Laser 파장일 때 보다 투과율 및 반사율이 높은 것을 확인 할 수 있었는데, 이는 상대적으로 파장이 긴 것에 기인할 것으로 분석이 된다.

초점 실험에서 빔의 왜곡은 0°일 때 거의 없었으나, 입사각이 1°, 2°일 때 x축 방향으로 일부 왜곡이 되는 것을 볼 수 있었으며, 0°일 때는 원의 모양에서 각도를 변화 시키면서 타원형으로 형성되는 것을 볼 수 있었다.

3D 프린터로 간이 제작된 렌즈의 경우 투과 및 반사로 인한 손실은 일반렌즈보다 많았지만, 각도 및 파장에 따른 렌즈의 왜곡의 특성은 크지 않았다. 상대적으로 저렴하고 다양한 종류의 렌즈를 제작하기에 3D 프린터가 사용될 수 있을 것으로 기대가 되며, 향후 표면 정도를 후처리하여 개선하면 일반렌즈와도 비교 될 수 있을 정도의 효율이 나올 것으로 기대가 된다.

REFERENCES

1. Shin, B. S. and Lee, J. H., "Basic Experimental Investigations to UV Laser Micro-Machining of Nano-Porous Alumina Ceramic Material," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 1, pp. 62~67, 2012.
2. Yang, S. Y, Choi, S. D, Choi, M. S. and Chun, C. M., "Characteristics of Surface Hardened Press Die Materials by CO₂ Laser Beam Irradiation," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 1, pp. 31~37, 2011.
3. Wu, H., Wang, Z., Fu, R. and Liu, J., "Design of a hybrid diffractive/refractive achromatized telecentric f-h lens," Optik - International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 117, No. 6, pp. 271~276, 2006.
4. Han, S B. and Choi, H. W., "Dual Laser Beam Joining Process for Polymers in Automotive Applications to Reduce Weights," Journal of Korean Welding and Joining Society, Vol. 31, No. 4., pp. 23~27, 2013.
5. Alda, J., Rico-Garcia, J., Lopez-Alonso, J., Lail, B. and Boreman, G., "Design of Fresnel lenses and binary-staircase kinoforms of low value of the aperture number," Optics communications, 260, pp. 454-461, 2006.
6. Haghighatzadeh, A. and Saadat, S., "Theoretical modeling of the divergence of a flat-topped beam from a two-stage beam shaper into a conical intensity profile after propagation in free space," Optics Communications, 313, pp. 49-55, 2014
7. Mudgett, A., "Multiple scattering calculations for technology," Vol. 10, No. 7, pp. 1485~1502, 1971.
8. Burger, T., Ploss, H., Ebel, S. and Fricke, J., Diffuse reflectance and transmittance spectroscopy for the quantitative determination of scattering and absorption coefficients in quantitative power analysis, Applied Spectroscopy, Vol. 51, No. 9, pp. 1323~1329, 1997.
9. ZEMAX-EE, Web information, www.funako.com May. 2015.