

3차원 부품 레이저 용접용 스캐너 광학 최적설계

최해운*.#

*계명대학교 기계공학과

Optimization of Optics Design for 3D Laser Scanner

Hae Woon Choi*.#

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

(Received 31 March 2020; received in revised form 25 April 2020; accepted 1 May 2020)

ABSTRACT

In this paper, we present the results of our research to perform 3D laser scanning functions by adding a focusing lens to a conventional 2D laser scanner. For the optical design, the ray-tracing technique was used along with a total of four lenses as the variable incident focusing lens, the collimating lens, and the F-Theta lens. As design variables, the curvature of the incident focusing lens (Lens #1) was assumed to be us , l mm and $sumed$ mm, and the incident angles were set at 0 rad, l . In addition, the distance between the focusing lens and the collimating lens was set to vary from 5 mm to 15 mm. When the incident focal length was varied from 5 mm to 15 mm, the exit focal length was calculated to vary from 67.5 mm to 56.8 mm for the lens with $R = 100$ mm and from 108.5 mm to 99.0 mm for the lens with $R = 150$ mm. When the incident angle was 0° , the focal aberration was only slightly observable at $10\mu m$ in both the x- and y-direction. At 7.5° was the focal aberration of approximately $20\sim 50\mu m$ was measured at $20\mu m$. To investigate the chromatic aberration of the designed optical device, the distortion of the focus was observed when the 550 nm beam was simulated on lens designed for a 980 nm wavelength.

Key words : Laser beam(레이저 빔), Optics(광학설계), Optimization(최적화), Laser scanner(레이저 스캐너), 3D welding(3차원 용접)

1. 서 론

고밀도 에너지 열원으로 레이저가 산업계 전반에서 광범위하게 사용이 되고 있다. 특히 자동차 부품에서는 높은 신뢰성과 더불어 원가절감의 이유로 기존 전기저항용접(ERW) 및 아크용접(MIG 및 TIG)에서 레이저 용접으로 빠르게 대체 되고 있다^[1-2]. 레이저 빔은 국소영역에 높은 집속도로

에너지를 소입하기 때문에 열영향 영역을 최소화 할 수 있고, 깊은 용입으로 인해서 용접부의 신뢰성을 기할 수 있다. 고밀도 집속으로 레이저 용접 공정은 용접성에 미치는 소재의 영향도가 낮고, 용접부 강도가 우수하여 자동차 부품 및 조립용접에 널리 사용되고 있다^[1-4]. 비슷한 이유로 전자빔 용접도 많이 사용되고 있지만, 진공환경 구축 및 자기장 영향에 따른 높은 소재 관리의 문제로 인해 레이저 용접으로의 생산기술이 전향되고 있다.

레이저 용접에 있어서 빔을 편향하는 장치로 레이저 스캐너가 사용 되어지고 있는데, 레이저 스

Corresponding Author : hwchoi@gw.kmu.ac.kr

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

캐너는 레이저 장치와 연동이 되어서 열원제어와 더불어 레이저빔을 고속으로 용접부위에 전달해주는 장치이다⁵⁻⁶⁾.

Fig. 1에서 도시된 바와 같이 레이저 스캐너는 한 쌍의 정밀모터인 갈바노미터(Galvanometer)로 레이저 빔을 편향하고, 편향된 빔을 F-theta 렌즈로 초점위치에 보정해주는 구조로 되어 있다⁶⁾.

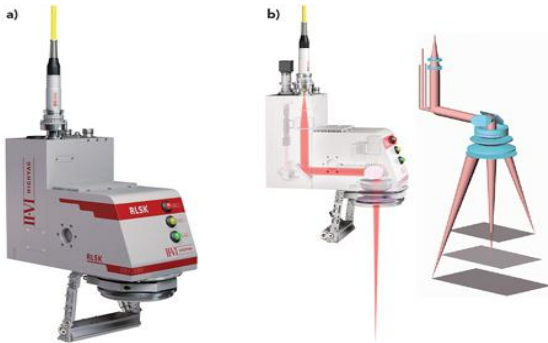
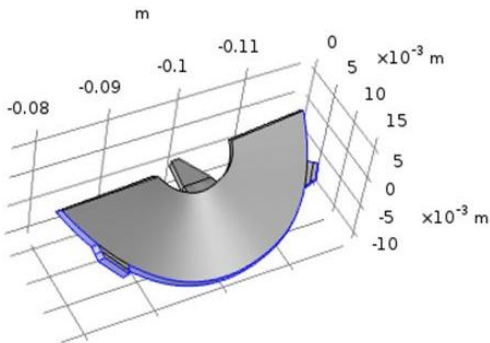


Fig. 1 3D Laser Scanner⁷⁾



(a) Welded blade



(b) 3D model for simulation

Fig. 2 3D blade in automotive parts

Fig. 2와 같은 3차원 부품의 용접에 있어서는 기존 2차원 스캐너로서는 초점을 보정 할 수가 없어서, XY 방향뿐만 아니라 Z방향(Focal depth)으로의 제어도 요구된다. 이러한 기능수행을 위해서 2차원 F-Theta 렌즈를 초점거리에 따라 다르게 교체해주어야 하지만, F-Theta 렌즈는 매우 고가이며, 작업 시 실시간으로 교체하는 것은 사실상 불가능하다.

본 논문에서는 2차원 레이저 스캐너에 추가적으로 초점렌즈(Focusing Lens)를 장착하여, 3차원 레이저 스캐너에 준하는 기능을 수행 할 수 있도록 레이저 스캐너 광학부품을 최적화하는 기술에 대한 연구결과를 보고한다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션

광학설계에는 광선추적(Ray Tracing)기법에 기반한 소프트웨어 ZEMAX를 사용하였으며, 기본 렌즈 조합은 Fig. 3에 도시 되었다. Fig. 3a에 나타난 바와 같이 렌즈는 총 4개로 최소 설계 되었으며, ZEMAX DB에서 ZBASE (P-002)를 기반으로 최적화 모델을 수정하여 설계하였다⁶⁾.

빔은 0°와 7.5°로 입사되도록 설정하였으며, 파장은 980nm와 550nm로 설정하였다. 4개의 렌즈는 각각 다음과 같이 구성되었다. Lens #1은 가변렌즈로서 입사 초점렌즈이며, Lens #2는 콜리메이팅 렌즈이며, Lens #3 ~ #4는 표준 F-Theta 렌즈로 구성 되었다.

Table 1에 기술된 바와 같이, 렌즈설계 데이터로 Face(좌, 우면), Curvature(곡률), Distance(렌즈가 거리), Material(재질)가 주 입력변수로 사용되었다. 렌즈의 곡률이 양수(positive)인 것은 볼록렌즈(Convex)를 의미하고, 음수(negative)인 것은 오목렌즈(Concave)를 의미한다.

렌즈의 재료는 표준 DB에서 F2와 SF1으로 한정하였으며, 입력변수에서 렌즈의 곡률은 Table 1과 같이 고정하고, 초점렌즈인 #1 렌즈와 콜리메이팅 렌즈인 #2와의 간격을 입력변수로 설정하였으며, 모니터링 결과 값은 F-theta 렌즈 세트의 마지막 렌즈인 #4과 초점위치 까지의 거리로 설정하였다.

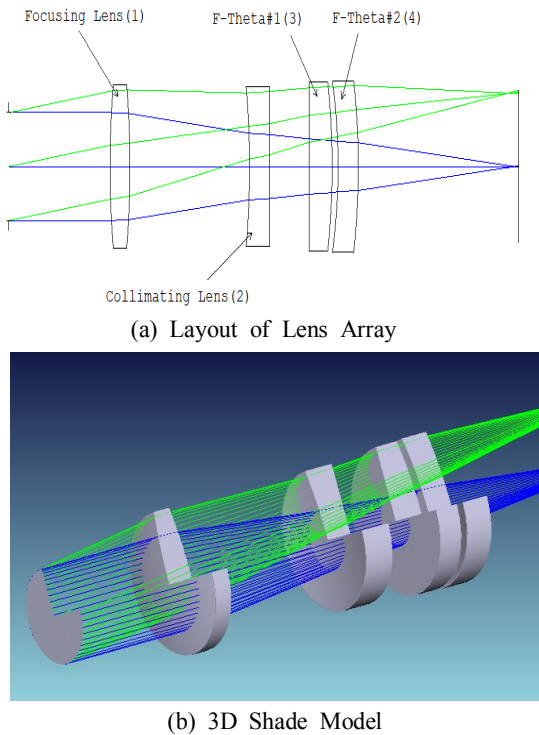


Fig. 3 Array of Lens series

Table 1 Lens Design Data (unit: mm)

| Lens | Curvature | Dist. | Mat'l | Idx |
|------|-------------|-------|-------|------|
| 1 | L 100/150 | 5.0 | F2 | 1.46 |
| | R -100/-150 | Var. | | |
| 2 | L -90.8 | 5.0 | F2 | |
| | R -1749.2 | 10.0 | | |
| 3 | L Inf. | 5.7 | SF1 | 1.7 |
| | R -79.8 | 1.5 | | |
| 4 | L -64.1 | 5.1 | SF1 | |
| | R -77.6 | Var. | | |

초기 변수 값을 설정 후, ZEMAX 최적화 (Optimization) 기능을 거쳐서 최적 초점거리 즉, 렌즈 #4와 초점위치 거리를 추적관찰 하였으며, ZEMAX의 최적화 과정은 변수설정에 따른 무한 단순반복(Iteration) 방법이며, Third aberration theory와 local 및 global 최적화 알고리즘을 사용하여 계산을 하였다^{[6],[8]}.

Lens #1의 곡률은 자유롭게 설계 할 수 있으나, 상용렌즈의 곡률을 기반으로 설계하는 것이 생산 비용을 최소화 할 수 있다. 본 논문에서는 $\pm 100\text{mm}$ 및 $\pm 150\text{mm}$ 의 경우를 가정하였으며 각 렌즈의 제원 및 설계 데이터는 Table 1에 상세히 설명 되었다.

입사각과 더불어 레이저 빔의 파장도 입력변수로 설정이 되었는데, 파장은 폴리머 접합에 가장 많이 사용되는 다이오드 레이저의 파장인 980nm를 가정하였으며, 렌즈의 색수차 영향을 알아보기 위해서 녹색 영역의 파장인 550nm의 파장을 입력 변수로 설정 하였다.

설계된 광학장치의 성능을 알아보기 위해서 다양한 초점위치에서 MTF와 초점수차 등을 평가하였으며, 입사각 0°와 7.5°와 파장 980nm와 550nm를 이용하여 상대오차를 계산하였다.

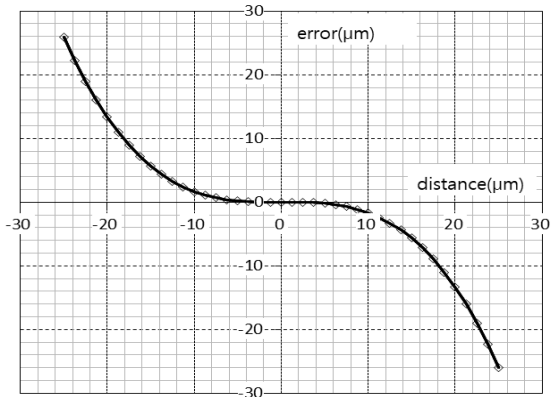
3. 결과

투과된 빔은 Lens #1과 Lens #2의 간격을 5 ~ 15mm 범위 내에서 통과하면서 진행이 되어, 레이저빔이 집속되는 위치 즉, 초점위치에 도달하게 된다. 이때, 최적의 초점으로 계산되는 거리 즉 초점거리를 추적 관찰하였으며, 초점위치에서의 초점수차를 계산하였다. 초점수차 계산을 위해서 각 입사각 별 초점왜곡도(abberation or error) 값을 비교하였고, 파장별 왜곡도도 비교분석 하였다.

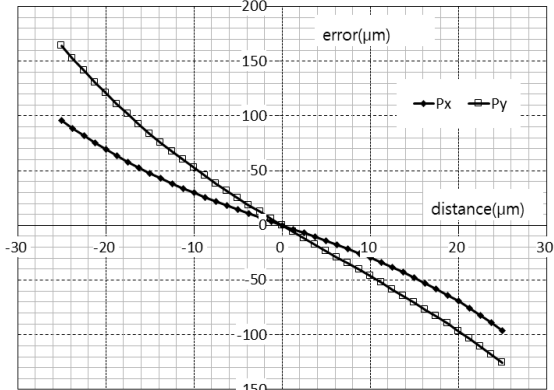
또한, Modular Transfer Function (MTF)를 이용하여 렌즈의 광학특성을 분석 하였다. MTF는 렌즈의 성능을 평가하는 척도의 하나로 초점에서의 선명도를 계산하여, 초점 위치에서의 이미지 재현도를 객관적으로 나타낼 수 있는 척도이다.

Fig. 4(a)(b)에 입사각이 각각 0°와 7.5°의 경우에 대한 초점 위치에서의 초점 수차를 분석한 결과를 도시하였다(상대오차 값). 또한, Fig. 4(c)에서는 980nm와 550nm의 파장에서 발생하는 색수차를 비교분석 하였다.

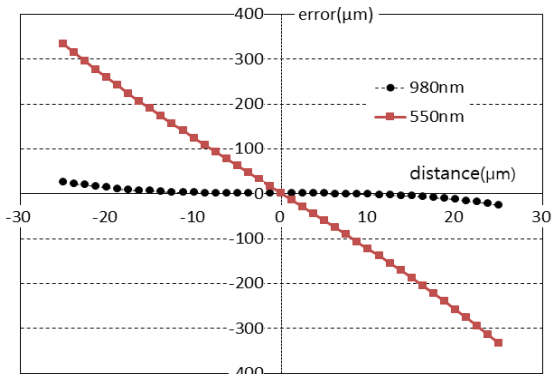
Fig 4a에 나타난 바와 같이, 0°의 경우 x 방향과 y 방향 모두 20 μm 이내에서는 초점왜곡이 거의 없었고, 이후에는 다소 벗어나는 경향을 보였다. 동일한 조건에서 입사각이 7.5°로 변한 경우가 Fig.



(a) Transverse Aberration for 0° incidence



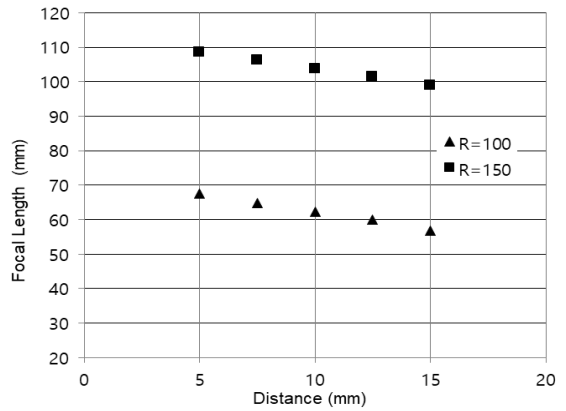
(b) Transverse Aberration for 7.5° incidence



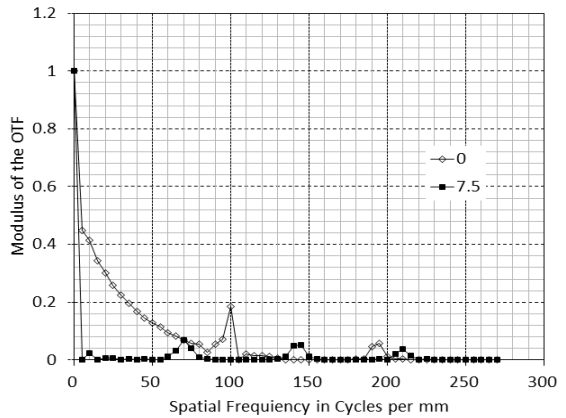
(c) Aberration comparison

Fig. 4 Aberration of lens on target

4b에 도시되었는데, 중심부에서부터 왜곡이 시작되어서 10 μ m 벗어난 범위에서 25 ~ 50 μ m 정도의 초점수차가 계산되었다(Fig 4b).



(a) FL vs. Distance for without focusing lens



(b) Polychromatic Diffraction MTF

Fig. 5 Lens performance test results

구면 곡률로 설정된 100mm와 150mm에서 초점 수차가 다소 상이하게 나타났지만, 전체적인 범위 내에서 큰 차이는 발생되지 않았다. 또한 원형 렌즈 특성으로 인해서 축대칭(Axis symmetry)으로 오차가 동일하게 발생되었다.

980nm 파장으로 설계된 렌즈에 550nm의 레이저 빔이 입사되었을 때는 초점의 왜곡이 심하여서, 색수차가 많이 발생되었다 (Fig. 4c). 일반적으로 레이저 가공시 매질에 따라 파장이 특정(NIR 영역 - 1064nm, VIS영역 - 532nm 등) 되는데, 본 연구에서는 NIR 다이오드 레이저 980nm를 기준으로 하여 VIS 영역인 550nm를 예시하여 비교하였다.

3차원 수용도를 보기 위해서 렌즈 #1과 #2의 거

리 변화에 따른 초점거리를 계산하였다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 초점렌즈(Lens #1) 거리를 5 ~ 15mm 범위에서 가변하였을 때 초점거리(Lens #4와 초점위치)가 연동되어 가변 되는 것을 알 수 있었다.

앞서 기술한 바와 같이, 입력변수는 Lens #1과 Lens #2 사이의 거리와 Lens #1의 구면곡률로 설정하였는데, 이때 입사 초점거리(Distance)에 따른 출사 초점거리(FL)의 계산결과가 Fig. 5a에 도시되었다.

입사 초점렌즈 거리를 5 ~ 15mm로 가변하였을 때, 출사 초점거리는 R=100mm인 경우 67.5mm ~ 56.8mm 범위에서 계산되었고, R=150mm의 경우 108.5mm ~ 99.0mm 범위에서 계산되었다. 이를 통해서 렌즈의 곡률에 따라서 초점거리에 대한 가변 영역을 자유롭게 설정할 수 있음이 확인되었다. 즉 초점거리가 100mm 내외일 경우는 곡률이 150mm인 렌즈를 사용하고, 초점거리가 60mm 내외인 경우는 곡률이 100mm인 렌즈가 사용될 수 있음이 계산적으로 도출 될 수 있었다.

최적맞춤(curve fitting)을 통해서, R=100mm일 때와 R=150mm 경우의 함수는 각각 식(1)과 식(2)와 같이 계산 할 수 있었다. 즉, 출사 초점거리에 따른 입사 초점거리, 가변범위, 렌즈 곡률계산이 가능하며, 렌즈설계의 중요 데이터가 될 수 있다.

$$R=100, y = -1.052x + 72.8, R^2 = 0.9974 \quad (1)$$

$$R=150, y = -0.948x + 113.28, R^2 = 0.9998 \quad (2)$$

여기서, y는 출사 초점거리, x는 입사 초점거리이며, R은 신뢰도이다.

MTF (Modulation Transfer Function)을 통해서 설계된 렌즈의 성능을 평가하였으며, 결과가 Fig. 5b에 정리되었다. MTF 분석한 결과 가 Fig. 5b에 도시되었는데, 입사각이 0°인 경우 대부분 18 cycles/mm에 위치하고 7.5°인 경우는 20 cycles/mm 근처로 계산 되었다.

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 2차원 레이저 스캐너에 초점렌즈를 추가하여, 3차원 레이저 스캐너 기능을 수행하도록 광학부품을 설계하였다. 광학설계에는 광선 추적기법을 사용하였고, 총 4개의 렌즈를 사용하여, 입사 초점렌즈, 콜리메이팅 렌즈 및 F-Theta 렌즈 기능을 수행하도록 설계 하였다.

입사 초점렌즈의 곡률은 ±100mm 및 ±150mm로 가정하였고, 입사각 0°와 7.5°조건에서 입사 초점렌즈와 콜리메이팅 렌즈 사이의 간격을 5 ~ 15mm로 가변 하도록 설정하였다. 결과적으로, 입사 초점렌즈 거리를 5 ~ 15mm로 가변하였을 때, 출사 초점거리는 R=100mm인 경우 67.5 ~ 56.8mm, R=150mm의 경우 108.5 ~ 99.0mm 범위에서 계산되었다.

입사각이 0°의 경우 x 방향과 y 방향 모두 20µm에서는 초점수차가 거의 없었고, 7.5°의 경우에는 10µm 벗어난 범위에서 25 ~ 50µm 범위의 초점수차가 계산이 되었다. 설계된 광학장치의 색수차를 알아보기 위해서 980nm 파장으로 설계된 렌즈에 550nm의 빔을 가정하여 시뮬레이션 하였을 때 초점의 왜곡이 심하게 발생되었다.

후 기

본 연구는 연구재단 이공분야 기초연구사업 (2019R1F1A1062594) 지원으로 이루어졌습니다.

REFERENCES

1. Kessler, F., "Fiber Laser Welding in the Car Body Shop," Journal of Welding and Joining, Vol. 31, No. 4, pp. 17-22, 2013.
2. Wang, P., Chen, X., Pan, Q., Madigan, B. and Long, J., "Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87, pp. 3081-3091, 2016.
3. Mohammadpour, M., Yazdian, N., Yang, G., Wang, H., Carlson, B. and Kovacevic, R., "Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing

- of aluminum to galvanized steel,” Optics and Laser Technology, 98, pp. 214-228, 2018.
4. Lee, S. T., Park, S. G., and Choi, H. W., “CFRP Laser Joining Computer Simulation in a Parallel Kinematic Machine,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 1, pp.77-82, 2017.
 5. Park, J. U., Lee, J. B., An, G. B., Kim, S. M. and Seo, H. W., “Characteristic of Welding Rotational Deformation in Laser Welding of Thin Steel Sheet,” Journal of Welding and Joining, Vol. 36, No. 6, pp.1-7, 2018.
 6. ZEMAX-EE, Web information, zemax.com, May. 2015.
 7. II-VI laser company web site,
<https://www.ii-vi.com/laserenterprise-careers/>
 8. Choi, H. W., “Analysis of Optical Characteristics of Oil Immersion Lens in Aqueous Environment,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 11, pp.18-23, 2019.
 9. Park, J. D., Kim, S. Y., Han, M. S. and Jeon, E. C., “Application of Automatic Design Program for Aspheric Lens Design,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 6 No. 3, pp.3-8, 2007.