

# 금속 3D 프린팅 시스템 구축을 위한 2 kW 급 레이저헤드 광학설계

이주형\*<sup>#</sup>

\*서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

## Optical Design of a 2-kW-Level Laser Head for Metal 3D-Printing Systems

Joohyung Lee\*<sup>#</sup>

\*Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received 22 October 2021; received in revised form 23 November 2021; accepted 29 November 2021)

### ABSTRACT

Metal 3D-printing technology enables the manufacture of complex features or internal structures, which is not possible in fabrication by conventional cutting methods. The most successful types of metal 3D printing have been powder bed diffusion and directed energy deposition, which use laser heads exploiting high-power laser sintering metal powder. In this study, a cost-effective optical design was proposed for a 2-kW-level fiber laser head. Only two commercial lenses, a beamsplitter and a window, are used in the laser head, satisfying the technological requirements. According to the optical design, the spot size was 2.54 mm, and the stand-off distance from the laser head was 295 mm. The intensity distribution was Gaussian. Thus, smooth power sintering was possible without any laser spot marks. Monte Carlo analysis was employed to verify the consistency of the optical performance under conventional assembly tolerance.

**Keywords :** Metal 3D Printing(금속 3D 프린팅), Laser Head(레이저헤드), Optical Design(광학설계)

### 1. 서 론

금속 3D 프린팅 시스템은 기존의 절삭가공에 의존하던 금속재료기반 생산방식을 적층가공(additive manufacturing)을 통해 다양한 형상의 금속부품 생산을 효과적으로 가능하게 하는 기술이다<sup>[1-3]</sup>. 이는 기존의 절삭가공으로 제작이 불가능 하였던 복잡한 형상 및 내부형상을 가지는 부품 구현이 가능하다. 또한 분말

재료를 이용해 형상을 구현하므로 절삭가공 대비 재료의 낭비를 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 이러한 금속 3D 프린팅 기술 중 PBF(Powder bed fusion)과 DED(direct power deposition) 기술이 가장 상업적으로 성공하였으며 이는 모두 고출력 레이저의 에너지를 재료에 전달하여 적층 가공하는 방식이다<sup>[3,4]</sup>.

본 연구에서는 이러한 고출력 레이저 기반의 금속 3D 프린팅에 적용하기 위한 레이저헤드의 광학설계를 수행하고 그 성능을 분석하였다. 2kW의 출력을 가지는 근적외선 레이저의 광에너지를 최소한의 손실로 전달하기 위한 상용광학부품을 선정하였으며 구성된 광학

# Corresponding Author : JLee@seoultech.ac.kr

Tel: +82-02-970-6343, Fax: +82-02-970-8270

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

계의 초점거리, 초평면에서의 레이저의 초점(spot)직경, 초점의 광량분포, 둘러싸인 에너지(encircled energy) 등을 분석하였다. 최종적으로 선정된 광학부품의 제작공차 및 조립 정밀도를 이용하여 레이저헤드 광학계의 공차분석을 수행하였다.

## 2. 광학설계 요구사항

본 연구에서는 금속 3D 프린팅 시스템에 적용하기 위한 레이저헤드를 Fig. 1과 같이 광섬유 레이저 및 광학계로 구성하였다. 광섬유 레이저는 모든 광원이 광섬유를 통해 전송되므로 레이저와 광학계 사이의 정렬이 용이한 장점이 있다. 광섬유에서 통해 자유공간으로 발산하는 빛은 시준렌즈(collimation lens, COL)를 통해 평행빔으로 변환되며 이후 광분할기(beam splitter, BS)를 통과한 후 초점렌즈(focusing lens, FOC)로 입사된다.

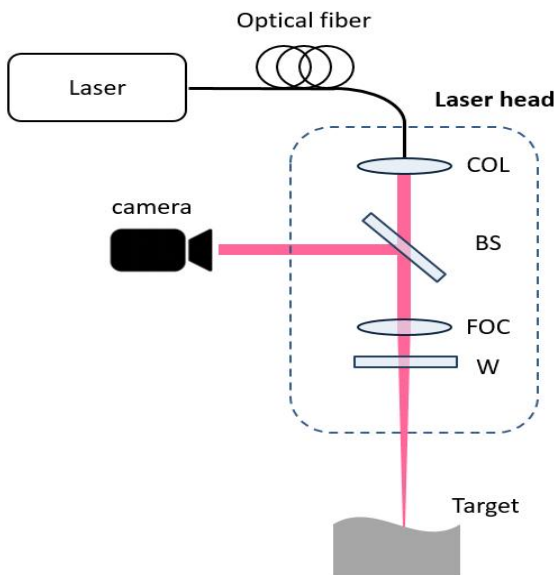
초점렌즈를 통과한 빛은 광학윈도우(window, W)를 통과한 후 가공지점에서 집광되며 광학윈도우는 시스템 운용환경에서 광학계를 오염으로부터 보호하기

**Table 1 Specification of the fiber laser and requirements of the laser head design**

| Laser specification   | Values                 |
|-----------------------|------------------------|
| Wavelength            | 1070nm                 |
| Beam diameter         | 0.3mm                  |
| Beam divergence       | 175mrad                |
| Laser Power           | 2 kW(CW)               |
| Requirements          | Values                 |
| Focused spot diameter | $2.5 \pm 0.1\text{mm}$ |
| Focused beam profile  | Gaussian               |
| Stand-off distance    | $300 \pm 10\text{mm}$  |
| Power loss            | < 1%                   |
| Number of lens        | $\leq 3$               |

위해 적용되었다. 광분할기는 레이저 가공 시 산란되는 빛을 카메라에 전달하기 위해 적용되었으며 해당 카메라는 중적외선 대역의 빛을 검출하여 가공 상태 모니터링을 가능하게 한다. Table 1은 앞서 기술된 레이저헤드에 적용되는 레이저 사양 및 요구사항을 정리한 결과이다. 레이저는 1070nm에서 단파장 빛을 방출하며 2kW 수준의 평균출력을 가진다. 해당 빛은 0.3mm 직경의 다중모드광섬유(multimode optical fiber)를 통해 자유공간으로 진행되며 이때 광섬유의 개구수(numerical number, NA)로 인해 175mrad 수준의 발산각을 가진다.

이러한 레이저를 이용하여 금속 3D 프린팅 시스템 구축을 위해서는 초점지점에서 2.5mm 수준의 초점직경이 요구되며 이때 공차는  $\pm 0.1\text{mm}$  수준이다. 이러한 수 mm 수준의 초점직경은 가공정밀도와 가공시간의 trade-off 조건으로 결정된 요구수치로 초점직경이 작을 경우 가공 정밀도를 향상시킬 수 있지만 대형 부품 가공시 낮은 가공효율을 보일 수 있다. 또한 레이저 가공시 레이저 스팟마크(spot mark)를 최소화하기 위해 초점의 광량분포가 가우시안형태를 보이는 것이 바람직하다. 레이저헤드의 장착 환경을 고려하였을 때 광학윈도우에서 가공지점까지 300mm 수준의 거리(stand-off distance)를 유지해야하며 이때 공차는  $\pm 10\text{mm}$ 이다. 레이저 헤드의 수치구경, 적외선 대역에서의 광학재료 및 코팅조건은 레이저가 집광된 가공지점에서 광출력 손실이 1% 미만이 되도록 선정해야 한다. 또한 레이저헤드의 가격 경쟁력을 위해 3개 이하의 광



**Fig. 1 Schematic of a laser head for a metal 3D printing system. Abbreviations are COL: collimation lens, BS: Beam splitter, FOC: focusing lens, W : window**

학렌즈로 구현해야하며 렌즈부품 확보가 용이한 상용 렌즈로 요구사항을 만족해야 한다.

### 3. 광학설계 결과 및 고찰

제시된 요구사항을 만족하는 레이저헤드의 광학설계 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 레이저헤드와 초점평면까지 경로를 보여주고 있으며 Fig. 2(b)는 레이저 광학계를 확대한 결과이다. 광원의 발산각과 0.3mm의 광섬유 모드유효직경을 반영하는 광원을 Fig. 2(b)의 광원부에 적용하였다. 시준렌즈와 초점렌즈는 Plano-convex 렌즈를 적용하였으며 구면수차(spherical aberrations)를 최소화하기 위해 구면과 평면을 각각 광원과 시준빔을 바라보도록 배치하였다. 렌즈의 재료는 적외선 용융실리카(IR fused silica) 계열이며 렌즈코팅은 1070nm에서 99.7% 투과 성능을 보이는 상용렌즈를 선정하였다. 광분할기는 가공에 활용되지 않는 반사빔을 최소화하면서도 가공지점에서 산란된 빛을 충분히 카메라로 반사시킬 수 있는 Beam sampler를 적용하였다. 해당 평면형태의 광학부품은 두 개의 반사면 중 하나의 반사면에만 저반사 코팅(anti-reflection, AR)이 적용되어 있다. 따라서 AR 코팅면에서는 1070nm 대역에서 99.7% 이상의 투과율을 보이며 AR 코팅이 되지 않은반사면에서는 공정상 발생하는 중적외선의 빛을 카메라 방향으로 반사시키는 것이 가능하다. 적용한 광분할기가 평면이기 때문에 오른쪽으로 2mm의 빔 오프셋이 발생하므로 초점렌즈와 광학윈도우도 해당 오프셋을 적용하였다.

선정된 광학부품을 모두 배치한 뒤 제시된 요구조건을 최적화과정의 merit 함수에 적용하였다. 그 결과 초평면은 광학거울로부터 295mm 지점에 위치하는 것으로 분석되었다. Fig. 3는 초평면에서 초점 특성을 보여주고 있으며 Fig. 3(a)는 2D 광량분포, 그리고 Fig. 3(b)는 단면의 광량분포이다.

Fig. 3(b)와 같이 초평면에서 초점은 ±2mm 영역에서 가우시안 형태의 광량분포를 보여주고 있다. 초점의 직경을 평가하기 위해 Fig. 4와 같이 둘러싸인 에너지(Encircled energy) 분석을 수행하였다.

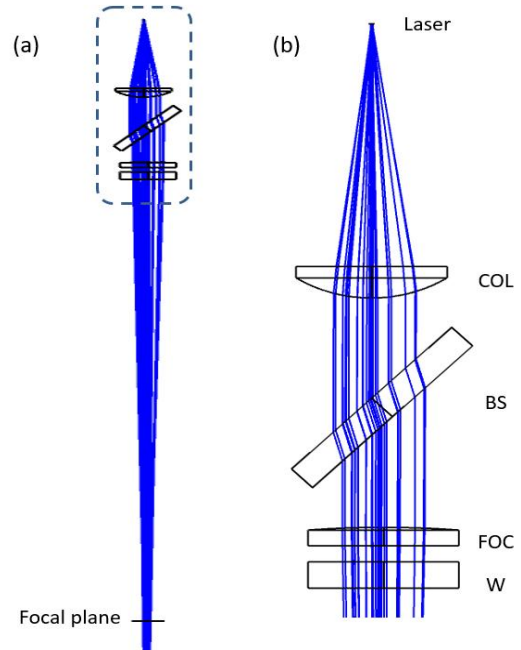
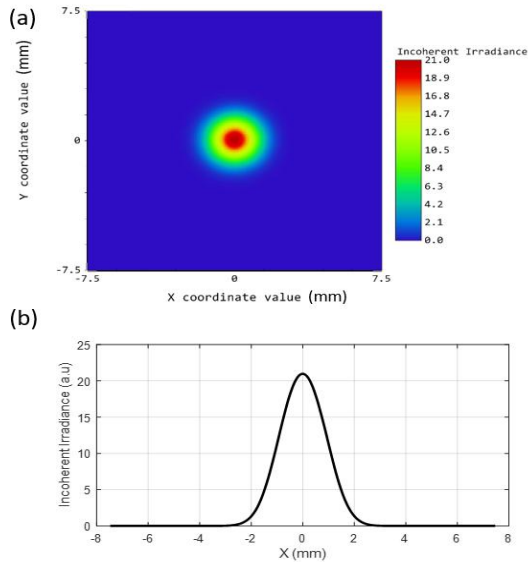
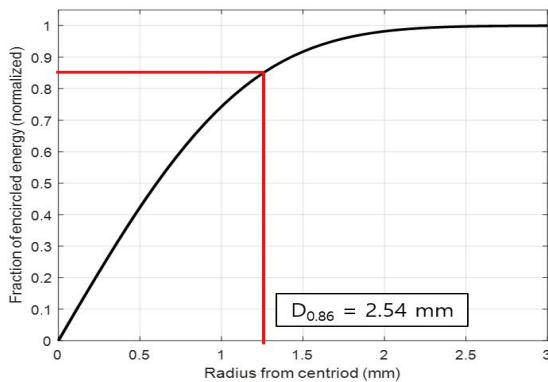


Fig. 2 (a) Optical design of the laser head with satisfying the requirements (b) Magnified diagram of the laser head part

이는 초점의 중앙 지점부터 반경을 증가시키며 광량을 적분하는 방법으로 초점의 광량분포를 기준으로 초점의 직경을 분석할 수 있는 장점이 있다. 통상적으로 86%의 광량이 존재하는 지점을 초점 직경으로 분석할 수 있으며 Fig. 4와 같이 반경기준 1.27mm, 직경기준 2.54mm에 해당한다. 선정된 모든 부품은 Corning의 HPFS 7978(high purity fused silica)이며 해당재료는 1540nm 파장의 연속파 기준으로 1.52kW/cm 이상의 광손상임계점(damage threshold)를 갖는다. 이를 현재 사용하는 1070nm 파장으로 변환할 경우 1.06kW/cm (=1.52×1070/1540)이며 현재 2kW의 평균출력 레이저를 사용할 경우 광학부품을 통과하는 모든 지점에서 빔의 직경이 18.9mm(=2/1.06 × 10)이상이어야 한다<sup>[5]</sup>. 현재 모든 광학계는 1in로 선정하였으며 시준렌즈, 광분할기, 광학윈도우를 지나는 평면파의 직경은 20mm 이상이므로 선정된 재료의 광손상 임계점 이하에 해당이 된다.

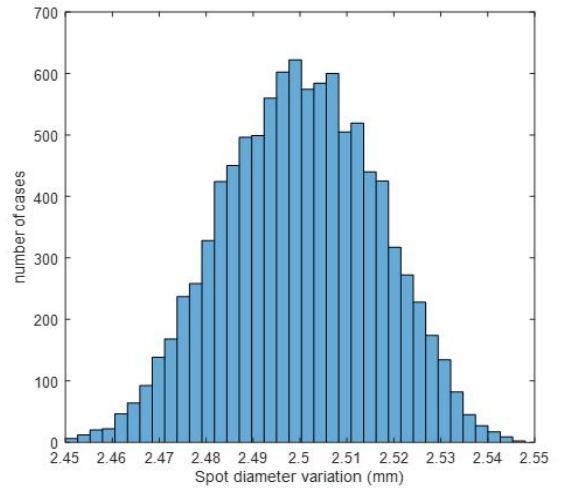


**Fig. 3 (a) Incoherent irradiance distribution of the focused beam. (b) Beam profile of the focused beam**



**Fig. 4 Analysis of encircled energy of the spot(Black). 86 % of the energy exists within 2.54 mm in diameter (Red).**

설계된 레이저헤드 광학계의 공차분석을 위해 Fig. 5와 같이 몬테카를로(Monte-Carlo) 분석을 수행하였다. 조립과정에서 발생할 수 있는 광학부품의 x, y, z 방향의 선형치수공차와 yaw 방향을 제외한 2개의 회전치수공차를 반영하여 초평면에서의 초점직경이  $2.5 \pm 0.1 \text{ mm}$  이내에 들어오는지 평가



**Fig. 5 Monte-Carlo analysis of the laser head design**

하였다. 이때 선형치수공차는  $\pm 0.05 \text{ mm}$ , 회전치수공차는  $\pm 0.1^\circ$ 를 적용하였으며 이는 정밀광학계 조립시 통상적으로 적용할 수 있는 수준의 공차이다. 또한 초평면의 위치를 요구사항과 같이  $\pm 10 \text{ mm}$  영역에서 변경가능하도록 공차분석과정에서 보상자(compensator)로 적용하였다. Fig. 5와 같이 총 10,000번의 계산결과 모든 경우에서 초점직경이 요구사항  $2.5 \pm 0.1 \text{ mm}$ 를 만족하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속 3D 프린팅 시스템 구축을 위해 2kW급 적외선 레이저를 포함하는 레이저헤드 광학계 설계를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 초점거리, 초점직경, 초점의 광량분포 등에 대한 요구사항을 분석하였으며 총 2개의 plano-convex 렌즈와 광분할기, 광학윈도우를 포함하는 광학계를 이용하여 해당 요구사항을 성공적으로 만족하였다. 또한 몬테카를로 분석을 통해 정밀광학계 조립에서 통상적으로 적용 가능한 수준의 공차로 제시된 요구사항을 만족할 수 있음을 증명하였다. 선정된 모든 부품은 저가의 상용부품으로써 해당부품 및 광학설계안을 기반으로 레이저헤드를 구성할 경우 가격경쟁력있는 금속 3D 프린팅 시스템 구축이 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

"이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다."

## REFERENCES

1. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D., "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 143, 2018.
2. Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B., "A review of the current progress and application of 3D printed concrete," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 125, 2019.
3. DebRoy, T., Mukherjee, T., Milewski, J. O., Elmer, J. W., Ribic, B., Blecher, J. J., & Zhang, W., "Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions", *Nature materials*, Vol. 18, No. 10, pp. 1026-1032, 2019
4. Froes, F. H., and B. Dutta., "The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys." *Advanced Materials Research*, Vol. 1019, 2014.
5. Wood, R. M., *Laser-Induced Damage of Optical Materials*, CRC Press, 2003.