



## 하이브리드 L-PBF 적층 제조 공정의 조형 특성 평가

이필호<sup>a,\*</sup>, 송여울<sup>a</sup>, 김용래<sup>a</sup>, 허세곤<sup>a</sup>, 이창우<sup>b</sup>

## Evaluation of Shape Properties in Hybrid Laser-powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process

Pil-Ho Lee<sup>a,\*</sup>, Yeo-Ul Song<sup>a</sup>, Yongrae Kim<sup>a</sup>, Segon Heo<sup>a</sup>, Chang-Woo Lee<sup>b</sup><sup>a</sup> Department of 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials<sup>b</sup> Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 6 November 2023

Revised 15 November 2023

Accepted 15 November 2023

## Keywords:

Additive manufacturing

Laser powder bed fusion

Hybrid process

Process characterization

## ABSTRACT

In this study, the integration of hybrid laser-powder bed fusion (L-PBF) technology in STS316L manufacturing, combining L-PBF and milling processes, was investigated. A hybrid L-PBF system was developed to explore various process variables, such as laser output, scan speed, and hatching interval. It was determined that energy density is crucial for realizing a specimen's relative density exceeding 99.5%. Milling experiments revealed insights from the L-PBF process characterization, including the emergence of defects in radial cutting depth and improved surface quality in axial cutting depth with increased depth. This research has the potential to revolutionize component fabrication in industries such as defense, medical care, mold making, and aerospace. The integration of hybrid L-PBF and milling processes offers enhanced precision and superior surface quality in STS316L stainless steel component production, meeting diverse application demands.

## 1. 서론

최근 적층 제조(additive manufacturing, AM) 공정은 제조 혁신과 제4차 산업 혁명의 핵심으로 다양한 산업 분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 금속 적층 제조 기술에 대한 관심이 계속해서 높아지면서 제조 산업에서의 응용이 점점 확대되고 있다. 적층 제조 기술은 기존의 제조 공정으로는 만들 수 없었던 형태를 생산할 수 있는 능력을 갖추고 있으며, 적층 제조를 통한 맞춤형 설계를 통해 기존 부품보다 성능을 극대화할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 특히 최근에는 레이저 분말 베드 용융법(L-PBF, laser powder bed fusion) 기술의 산업 적용이 확대되고 있어, L-PBF로 생산된

제품의 정밀도와 표면 품질 향상에 대한 다양한 시장 수요가 발생하고 있다. 특히 최근 적층 제조기술의 장점을 극대화 하고 단점을 최소화 하기 위한 하이브리드 제조기술과 관련된 다양한 연구들이 수행되고 있으며 대표적으로는 레이저 직접 에너지 용착(L-DED, laser directed energy deposition)과 밀링(milling) 및 쇼트피닝(shot peening)이 결합된 하이브리드 L-DED와 L-PBF와 밀링 공정이 결합된 하이브리드 L-PBF 형태의 시도들이 알려져 있다<sup>1-3)</sup>. 다양한 하이브리드 적층 제조와 관련된 연구들 가운데 사용자의 복잡한 조형, 형상 정밀도 및 표면 품질의 요구를 충족시킬 수 있는 하이브리드 L-PBF 장비의 개발 및 상용화가 가장 활발하게 이루어지고 있다<sup>6-8)</sup>. 하이브리드 L-PBF 공정이란 L-PBF 적층 공정을

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7786

E-mail address: pilho\_lee@kimm.re.kr (Pil-Ho Lee).

반복적으로 수행하면서 주기적으로 밀링 가공 공정이 개입하여 사용자가 높은 품질의 표면을 원하는 적층 면을 가공하는 방식으로 제품의 복잡 형상의 구현 및 높은 수준의 기계 정밀도 획득이 가능한 장점이 있다.

하이브리드 L-PBF기술의 상기한 다양한 장점들로 인하여 적용한 연구가 진행되고 있는데 David 등은 상용 하이브리드 L-PBF 장비를 적용하여 머레이징 강으로 격자구조 형상의 제작과 관련된 연구를 수행하였으며 하이브리드 L-PBF 공정으로 제작된 시편의 경우 밀링공정으로 인하여 L-PBF 표면의 시편 표면의 미세한 결함 및 균열을 감소시켜 제품의 기계적 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다<sup>[9]</sup>. Yin 등은 하이브리드 L-PBF 공정 계획 분석과 관련된 실험 및 이론적 연구를 수행하였으며 구현할 수 있는 공정의 제약조건, 공차, 모델 분석 및 재구성 등을 통한 통합 정밀 제조방법에 대한 분석을 수행하였다<sup>[10]</sup>. 또한 Shukri 등과 Alex등은 각각 하이브리드 L-PBF 기술을 적용하여 정밀 노즐 및 쿼터웨이브 공진기의 제작에 활용한 연구를 수행하였으며 하이브리드 L-PBF의 도입으로 인하여 해당 제품들의 성능 향상을 확인할 수 있었다<sup>[11]</sup>. 상기한 문헌조사에서 하이브리드 L-PBF 공정 특성 분석에 대한 연구는 제한적임을 알 수 있는데, 하이브리드 L-PBF 공정은 일반적인 밀링 및 L-PBF 공정과는 다르게 매번 새롭게 생성되는 가공 면의 절삭과 적층 공정이 교차로 수행되기 때문에 밀링 공정 직후 역구배 형상 및 가공 버(burr)가 형성된 표면에 대한 L-PBF 공정이 불가피하며 이는 제품의 치명적인 불량을 야기할 수 공정 변수에 따른 적층 형상의 특성 분석이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 하이브리드 L-PBF 공정 시 밀링 공정 변수에 따른 적층시편의 형상 특성 분석이 수행되는데 우선 구축된 하이브리드 L-PBF 적층제조 시스템을 이용한 적층제조 시험을 수행하며 상대밀도 분석을 통하여 적정 L-PBF 공정변수를 도출한다. 도출된 L-PBF 공정조건에서 다양한 축방향 및 반경방향 절삭 깊이에 따른 시편의 조형형상 특성 분석 및 교찰이 수행된다.

## 2. 하이브리드 L-PBF 적층 제조 시스템 구성

### 2.1 실험 장치 구성

하이브리드 L-PBF 적층 제조 및 밀링 가공 공정 특성을 규명하기 위하여 시스템을 개발하였다. Fig. 1는 구현된 단일베드 형태의 하이브리드 PBF 적층 제조 시스템으로서 Fig. 1(a)와 같이 PBF 적층 제조를 담당하는 영역과 3축 CNC 밀링 가공을 담당하는 영역으로 분리되어 있으며 적층 및 가공 최대 영역은 400×400×330 mm<sup>3</sup>이다. 본 시스템의 CNC 밀링 가공기의 적층영역 개입을 위하여 500 mm 이상의 광학적 작업거리(working distance)의 확보가

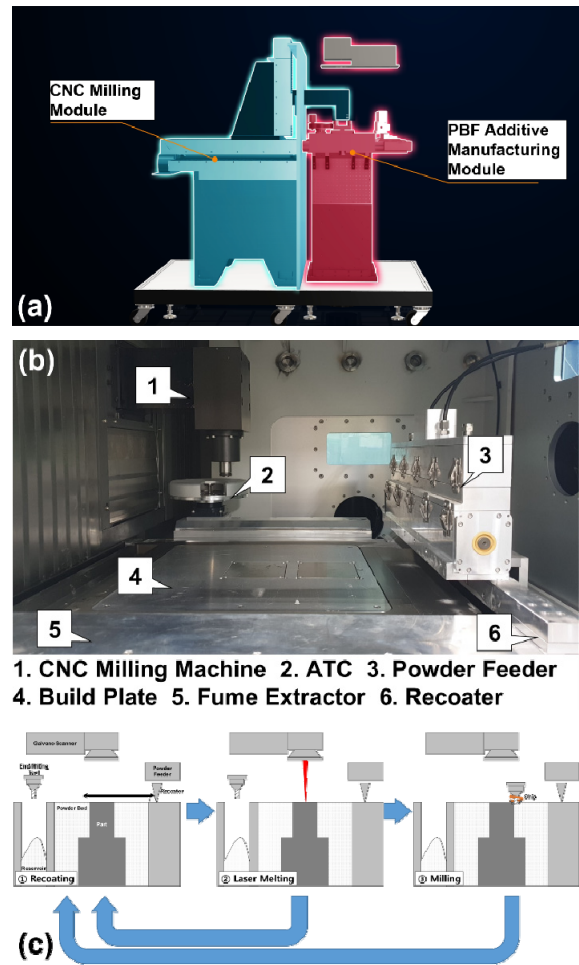


Fig. 1 Experimental setup (a) Schematic diagram of hybrid L-PBF system (b) Configuration of build room chamber (c) Schematic diagram of hybrid L-PBF process

필요한데, 이를 위하여 3차원 갈바노 스캐너(AXIALSCAN-30, Raylase)가 적용되었다. Fig. 1(b)는 실제 적층 제조 및 밀링 가공이 수행되는 빌드룸(build room)의 구성을 보여주고 있으며, 적층 테이블, 흡 유동장치, 분말 공급장치 및 밀링용 스펀들 등으로 구성되어 있으며 Fig. 1(c)와 같이 L-PBF 및 밀링 공정을 반복적으로 수행하게 된다.

## 3. 하이브리드 L-PBF 적층 제조 공정특성

### 3.1 실험 조건 및 설계

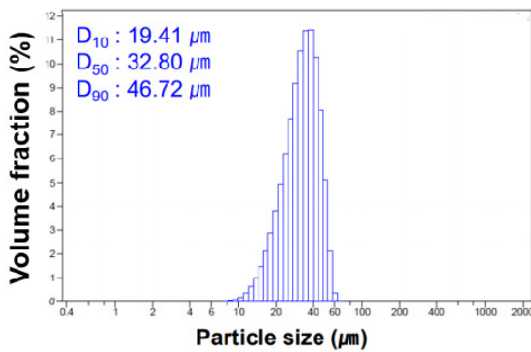
앞 장에서 설명한 하이브리드 L-PBF 실험 장치의 적정 적층 제조 조건을 선정하기 위하여 L-PBF 적층 제조 공정 특성 분석 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 Table 1과 같이 레이저 출력, 해칭 간격 및 레이저 스캔 속도 3가지 변수를 3가지 수준으로 선정하여 27가지 조건으로 10×10×10 mm<sup>3</sup> 크기의 직육면체 시편을 조형하

**Table 1 Experimental design**

Index	Low	Middle	High
Laser power (W)	70	100	130
Hatching distance (μm)	80	90	100
Scan speed (mm/sec)	800	1000	1200

**Table 2 Experimental conditions**

Material	Stainless steel 316L
Layer thickness	30 μm
Printing cube size	10 × 10 × 10 mm <sup>3</sup>
Base plate	Stainless steel 316L
Inert gas condition	Ar gas, O <sub>2</sub> < 500 PPM



**Fig. 2 Size distribution of STS 316L powder**

**Table 3 Size distribution of STS 316L powder**

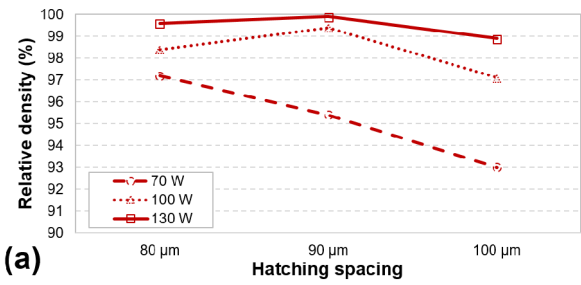
Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	P
Bal.	18~20	8~12	≤ 2	≤ 0.75	≤ 0.03	≤ 0.045
Bal.	18.22	9.36	0.99	0.45	0.021	0.025

는 실험을 수행하였으며 이 때 공칭 에너지 밀도는 19.4~67.7 J/mm<sup>3</sup> 이다. 구체적인 실험 조건은 Table 2와 같다. 실험 후 관측 인자는 샘플의 상대 밀도이며 아르키메데스 법을 이용하여 측정하였다<sup>[12]</sup>. 실험에 사용된 분말은 스테인리스 316L 강으로 입자의 평균입도 및 조성 정보는 Fig. 2 및 Table 3과 같다.

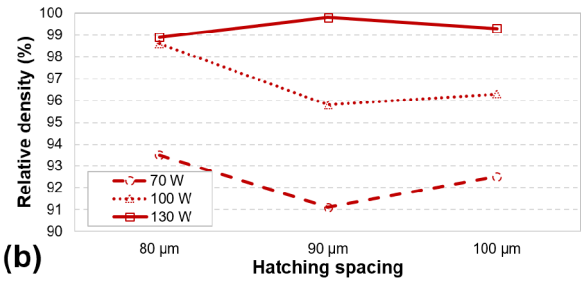
### 3.2 L-PBF 적층 제조 시편의 상대밀도 결과

조형된 시편의 상대밀도 측정 결과는 Fig. 3과 같으며, 27가지 조건에서 91.1~99.9% 수준을 보임을 확인할 수 있으며 조형된 시편의 형상은 Fig. 4와 같이 27가지 시험조건 전체에서 직육면체 형태로 설계와 동일하게 조형됨을 알 수 있었다. 실험결과 시편의 상대밀도는 전반적으로 레이저 출력에 의하여 가장 크게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 공칭 에너지 밀도( $E_v$ , volumetric energy density)의 개념의 도입을 통해서 경향성을 설명할 수 있다.

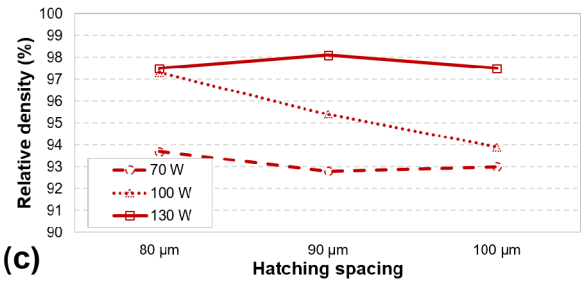
$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$



**(a)**

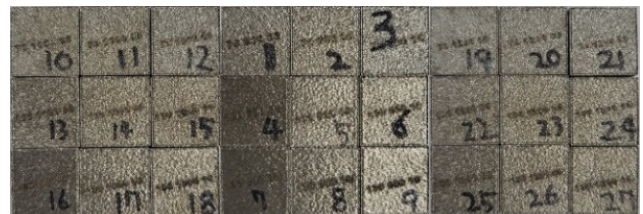


**(b)**



**(c)**

**Fig. 3 Relative density of L-PBF specimens with varying scan speed (a) 800 mm/sec (b) 1000 mm/sec (c) 1200 mm/sec**



**Fig. 4 Shape of L-PBF specimens**

여기서  $P$ ,  $v$ ,  $h$ ,  $t$ 는 각각 레이저 출력, 스캐닝속도, 해칭간격, 적층 레이어 두께를 의미한다.  $E_v$ 는 일반적으로 상대밀도의 비례적 경향성 보이는 것으로 알려져 있고 본 연구에서도 동일한 경향성을 따르고 있으나 과도한 에너지가 투입에 의하여 상대 밀도의 감소가 발생하기도 하였다. 이는 적정 수준의 에너지 투입 시 파우더 베드면의 분말재료가 적절히 용융되어 시편의 밀도가 증가할 수 있으나 과도한 수준의 에너지가 투입될 경우 모재 및 분말의 기화에 의한 영향으로 볼 수 있다<sup>[13]</sup>. 다음 장에서 수행하게 되는 하이브리드 L-PBF 가공실험에서는 조형성, 빠른 제조 시간 및 99.8%의 상대 밀도를 확보할 수 있는 레이저 출력 130W, 스캔 속도 1000 mm/s 및 해칭 간격 90 μm을 적정 공정조건으로

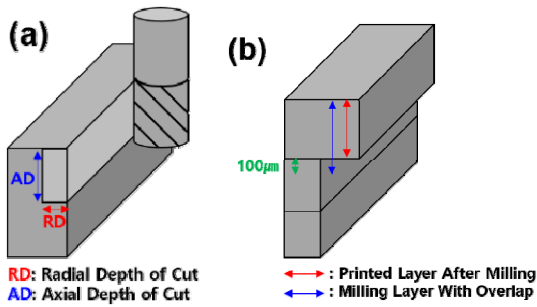


Fig. 5 Schematics of side milling process (a) Depth of cut (b) Overlap

선정하였다.

#### 4. 하이브리드 L-PBF 적층 제조 절삭특성

##### 4.1 실험 조건 및 설계

기계가공 공정 조건에 따른 가공 표면품질을 비교하기 위하여 하이브리드 L-PBF 적층 제조 실험을 수행하였다. 우선 앞 장에서 도출된 적층 프린팅 공정 조건인 레이저 출력 130 W, 스캔속도 1000 mm/s 및 해칭간격 90 µm 공정조건에서 3×15×6 mm<sup>3</sup> 크기로 조형된 직육면체 시편 측면의 상향 절삭이 수행되었으며 공정

Table 4 Experimental design

Run	Radial depth of cut (µm)	Axial depth of cut (µm)
1	0	400
2	100	400
3	200	400
4	300	400
5	0	700
6	100	700
7	200	700
8	300	700
9	0	1000
10	100	1000
11	200	1000
12	300	1000

의 도식도는 Fig. 6과 같다. 본 실험은 Fig. 5(a)와 같이 반경방향 절삭 깊이(radial depth of cut) 및 축방향 절삭 깊이(axial depth of cut)에 따른 절삭 특성을 분석하였으며 실험설계 및 조건은 Table 4 및 Table 5와 같다. 반경방향 절삭 깊이의 경우 공칭 치수에 대한 절삭 깊이를 의미한다. 적층 시편은 용융풀(melt pool)의 직경 및 파우더베드면의 분말이 직경 편차 등의 효과로 인하여 갈바노스캐너의 제어 지령상 크기보다 50~100 µm 수준 외곽이 더

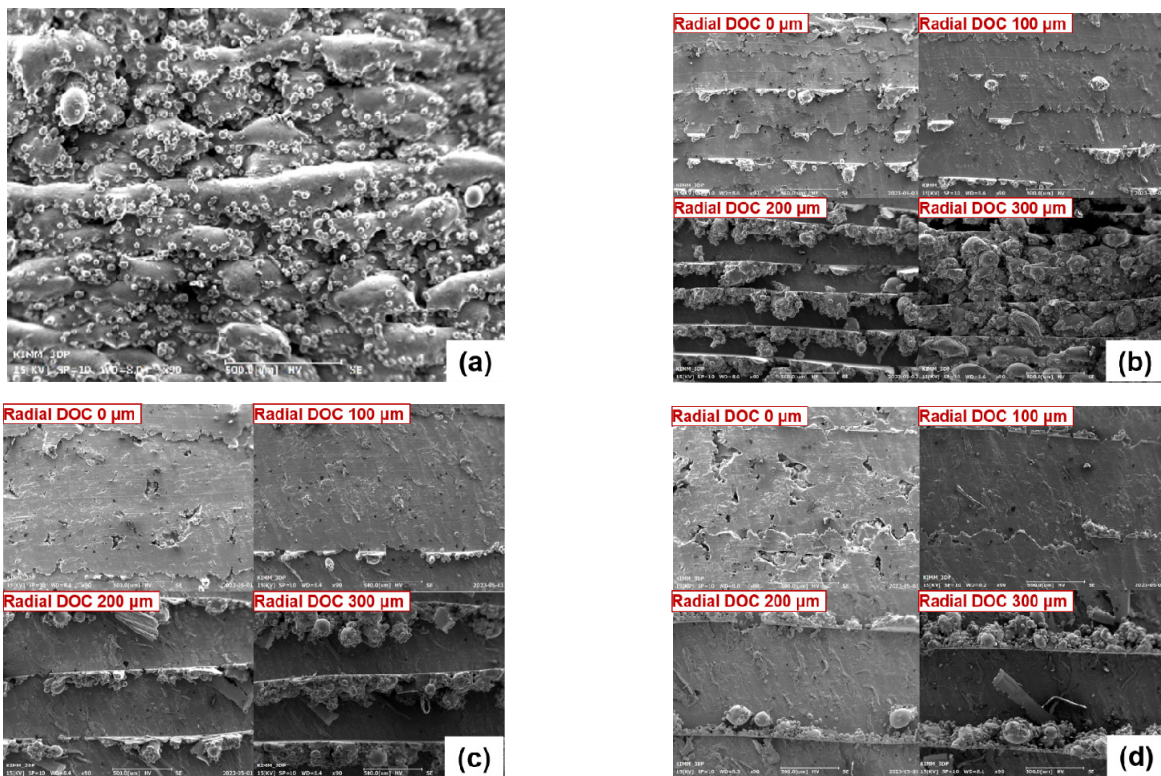


Fig. 6 SEM images of L-hybrid PBF specimens (a) L-PBF surface without milling (b) Axial depth of cut 400 µm (c) Axial depth of cut 700 µm (d) Axial depth of cut 1000 µm

**Table 5 Experimental conditions**

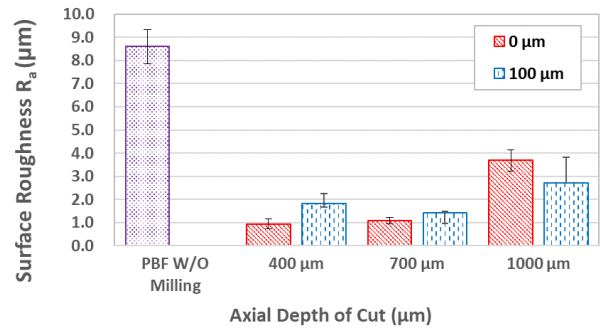
Index	Value
Material	Stainless steel 316L (HANA AMT)
PBF laser power	130 W
PBF scan speed	1000 mm/s
PBF hatching distance	90 $\mu\text{m}$
Inert gas condition	Ar gas, $\text{O}_2 < 500$ PPM
Milling tool	TiSiN carbide, Flat, 2 Flute D=2 mm
Milling type	Side milling
Axial milling overlap	100 $\mu\text{m}$
Spindle speed	10000 RPM
Workpiece feed rate	240 mm/min

크게 조형된다. 따라서 실제 반경 방향의 절삭 깊이는 상기한 효과에 의하여 정확히 정의하기 어렵고 편차의 발생이 불가피 하다. 축방향 절삭 깊이의 경우 Fig. 5(b)와 같이 실제 이전 가공을 수행한 후 적층이 누적된 두께보다 100  $\mu\text{m}$ 를 더 축방향으로 하강 및 중첩하여 수행하였는데 이는 중첩이 없을 경우 가공면에 발생하는 버(burr)가 심각한 적층 불량을 발생시키기 때문이다.

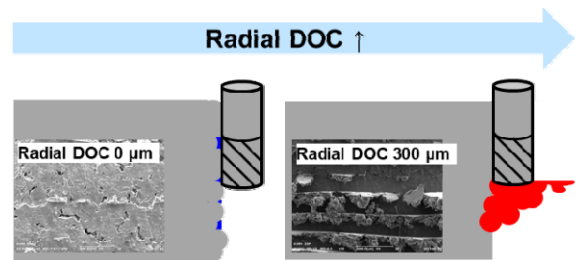
**4.2 하이브리드 L-PBF 적층 제조 절삭특성 결과**

조형된 시편의 가공 면을 Fig. 6와 같이 전자주사현미경 촬영을 통해서 상대 비교 하였으며 Fig. 6(a)는 기준이 되는 미가공 적층면의 형상이다. Fig. 6(b)는 매 10회 적층 후 밀링 가공을 수행한 축방향 절삭 깊이 400  $\mu\text{m}$ 의 결과로서 반경 방향 절삭 깊이에 따른 시편 표면 형상 차이가 매우 상이하게 나타났다. 반경 방향 절삭 깊이가 0  $\mu\text{m}$ 인 경우 절삭층에서 발생하는 버 및 분말의 용착면이 일부 나타났으며 기공면이 다수 관측되었다. 반경방향 절삭 깊이가 100  $\mu\text{m}$ 인 경우 전체 시편 중 가장 용착이 적게 나타났으며 일부 기공이 확인되었다. 반면 반경 방향 절삭 깊이가 200  $\mu\text{m}$  및 300  $\mu\text{m}$ 의 경우 가공 경계층 사이에 용착된 버와 분말이 확연하게 나타나는 것을 관측하였다. Fig. 6(c) 및 (d)는 각각 20회 및 30회 적층 후 밀링 가공을 수행한 축방향 절삭 깊이 700  $\mu\text{m}$  및 1000  $\mu\text{m}$ 의 결과로서 Fig. 6(b), (c) 및 (d)를 상대 비교하였을 경우 축방향 절삭 깊이가 커질수록 동일한 반경 방향 절삭 깊이 조건에서 시편의 표면 용착면이 감소하는 경향성을 보이는 것을 알 수 있었다. 그러나 반경 방향 절삭 깊이 200  $\mu\text{m}$  및 300  $\mu\text{m}$ 의 경우 확연한 버와 분말 용착층을 확인할 수 있었다. 실험결과 반경 방향 절삭 깊이의 표면 용착 현상에 대한 영향이 매우 큰 것으로 확인되었고 특히 200  $\mu\text{m}$  이상의 절삭 깊이에서는 영향이 더욱 두드러지는 것으로 확인되었다.

표면 형상에 대한 정량적 분석을 위하여 접촉식 표면조도계 (SV-3000, Mitutoyo)를 이용하여 측정된 밀링 가공 방향 표



**Fig. 7 Surface roughness of L-hybrid PBF specimens**



**Fig. 8 Effect of radial depth of cut on surface quality**

면조도  $R_a$  값은 아래의 Fig. 7과 같이 확인할 수 있으며, 반경 방향 절삭 깊이 400  $\mu\text{m}$ 의 경우 용착 경계면과 가공면의 높이 차이가 크기 때문에 조도측정이 불가능 하였다. 조도 측정 결과 밀링가공의 개입에 의하여 표면조도의 개선효과가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 표면조도 결과 값은 전자주사현미경 촬영 결과와 유사한 경향성을 보이고 있어 하이브리드 L-PBF 공정에서 축방향 절삭 깊이의 설정이 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

절삭 깊이에 따른 표면 형상의 변화에 대한 고찰을 수행하였으며 절삭 깊이에 대한 영향은 Fig. 8과 같이 추정할 수 있다. 우선 절삭 깊이가 충분하지 않을 때 다수 관측되는 기공형상의 경우 L-PBF 공정으로 적층된 거친 표면을 충분히 절삭하지 않아 발생하는 기공으로 추정 할 수 있다. 반면 반경방향 절삭 깊이가 200  $\mu\text{m}$  이상일 경우 밀링 가공 후 레이저 용융이 발생하는 층의 최외각면이 밀링 가공 버 및 분말 도포층으로만 형성되어 있는 위치에 해당하기 때문에 이러한 부위에 부분적 용착 불량이 발생하게 되는 것으로 추정할 수 있었다. 축방향 절삭 깊이의 경우 절삭 깊이가 커 질수록 L-PBF 공정 적층 회수 대비 밀링 가공의 개입 회수의 비율이 적기 때문에 용착면 및 버의 형성이 형성이 적게 발생하고 이로 인하여 전체 밀링 가공면에서 이러한 불량의 양상이 적게 보이는 것으로 추정할 수 있다. 12가지 모든 실험조건에서 용착면 및 버의 생성이 확인되었는데 이는 본 연구에서 설정한 100  $\mu\text{m}$  보다 깊은 오버랩 깊이가 필요한 것으로 분석할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 L-PBF 시스템에서 구현하기 어려운 정밀 및 표면품질의 구현을 위하여 밀링공정이 개입할 수 있는 하이브리드 L-PBF 시스템을 개발하였으며 이를 이용한 스테인리스 316L의 기초적인 공정 변수 연구가 수행되었다. 해당 시스템을 이용한 L-PBF 공정의 레이저 출력, 스캔속도 및 해칭간격의 변수를 다르게 하였을 때 시편의 밀도가 에너지 밀도의 영향을 받아 다르게 나타남을 확인 할 수 있었으며 99.5% 이상의 상대밀도 확보 할 수 있음을 알 수 있었다. 하이브리드 L-PBF 밀링특성 분석에서는 L-PBF 공정 특성분석에서 도출한 적정 적층공정 조건으로 적층된 시편의 측면 상향 밀링 가공 실험이 수행되었으며 반경 방향 절삭 깊이 및 축방향 절삭 깊이에 따른 가공시편의 표면 품질을 분석하였다. 분석결과 공칭 반경방향 절삭 깊이가 0  $\mu\text{m}$ 일 경우 적층면의 미삭 영역으로 인한 기공이 나타나는 것을 확인하였으며 200  $\mu\text{m}$  이상으로 깊어질 경우 시편 테두리 영역에서 기존 적층면이 제거된 면에 적층이 수행되기 때문에 부분적으로 적층 품질이 조악하게 나타나는 것을 확인하였으며 이는 일반적인 L-PBF 공정에서 역구배 형상의 적층 시 발생하는 불량률의 경향과 매우 유사함을 확인하였다. 축방향 절삭 깊이의 경우 절삭 깊이가 커질수록 용착면 및 버의 형성이 적게 발생하는 것을 확인하였다. 또한 향후 연구에서 축방향 가공 오버랩 영역의 최적화가 필요함을 알 수 있었다.

## 후 기






본 연구는 산업통상자원부와 방위사업청의 재원으로 민간협력진흥원에서 수행하는 민간겸용기술개발사업의 지원(19-CM-AE-14)을 받아 수행한 연구의 결과입니다.

## References

- [1] Yang, Y., Gong, Y., Li, C., Wen, X., Sun, J., 2021, Mechanical Performance of 316 L Stainless Steel by Hybrid Directed Energy Deposition and Thermal Milling Process, *J. Mater. Process. Technol.*, 291 117023, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.117023>.
- [2] Dávila, J. L., Neto, P. I., Noritomi, P. Y., Coelho, R. T., Da Silva, J. V. L., 2020, Hybrid Manufacturing: A Review of the Synergy Between Directed Energy Deposition and Subtractive Processes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 110 3377-3390, <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06062-7>.
- [3] Yamazaki, T., 2016, Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining, *Procedia CIRP*, 42 81-86, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>.
- [4] Zhang, X., Huang, S., Li, D., Geng, J., Yang, F., Li, Q., 2022, An Approach to Improve the Microstructure and Mechanical Properties: A Hybrid Manufacturing of Laser Directed Energy Deposition and Shot Peening, *Addit. Manuf.*, 55 102686, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102686>.
- [5] Dezaki, L. M., Serjouei, A., Zolfagharian, A., Fotouhi, M., Moradi, M., Ariffin, M. K. A., Bodaghi, M., 2022, A Review on Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Directed Energy Deposition (DED) Process, *Advanced Powder Materials*, 1:4 100054, <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2022.100054>.
- [6] Flynn, J. M., Shokrani, A., Newman, S. T., Dhokia, V., 2016, Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools – Research and Industrial Developments, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 101 79-101, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.
- [7] Rautio, T., Mäkikangas, J., Mustakangas, A., Järvenpää, A., 2022, Module Platform for Hybrid PBF-LB Manufacturing, *J. Laser Appl.*, 34:4 042018, <https://doi.org/10.2351/7.0000722>.
- [8] Popov, V. V., Fleisher, A., 2020, Hybrid Additive Manufacturing of Steels and Alloys, *Manuf. Rev.*, 7 6, <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020005>.
- [9] Sommer, D., Esen, C., Hellmann, R., 2023, Static and Dynamic Mechanical Behaviour of Hybrid-PBF-LB/M-Built and Hot Isostatic Pressed Lattice Structures, *Materials*, 16:9 3556, <https://doi.org/10.3390/ma16093556>.
- [10] Wang, Y., Chen, Y., Wen, C., Huang, K., Chen, Z., Han, B., Zhang, Q., 2023, The Process Planning for Additive and Subtractive Hybrid Manufacturing of Powder Bed Fusion (PBF) Process, *Mater. Des.*, 227 111732, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111732>.
- [11] Riensche, A., Carriere, P., Smoqi, Z., Menendez, A., Frigola, P., Kutsaev, S., Araujo, A., Matavalam, N. G., Rao, P., 2023, Application of Hybrid Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing to Microwave Radio Frequency Quarter Wave Cavity Resonators, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 124 619-632, <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10547-y>.
- [12] ASTM, 2023, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle, B962-23, American Society for Testing

and Materials, USA.

- [13] Zhao, R., Chen, C., Wang, W., Cao, T., Shuai, S., Xu, S., Hu, T., Liao, H., Wang, J., Ren, Z., 2022, On the Role of Volumetric Energy Density in the Microstructure and Mechanical Properties of Laser Powder Bed Fusion Ti-6Al-4V Alloy, *Addit. Manuf.*, 51 102605, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102605>.

	<p><b>Pil-Ho Lee</b> Senior Researcher in Korea Institute of Machinery &amp; Materials. His research interest is Process and System Development of Additive Manufacturing System. E-mail: pilho_lee@kimm.re.kr</p>
	<p><b>Yeo-Ui Song</b> Senior Researcher in Korea Institute of Machinery &amp; Materials. Her research interests are Computer-aided Engineering and Structural Optimization. E-mail: yeoulsong@kimm.re.kr</p>
	<p><b>Yongrae Kim</b> Engineer in Korea Institute of Machinery &amp; Materials. His research interest is Additive Manufacturing Equipment Development. E-mail: yongrae@kimm.re.kr</p>
	<p><b>Segon Heo</b> Principal Researcher in the Department 3D Printing, Korea Institute of Machinery &amp; Materials(KIMM). His research interest is Process Simulation and Additive Manufacturing. E-mail: heo@kimm.re.kr</p>
	<p><b>Chang-Woo Lee</b> Director in the Advanced Manufacturing System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM). His research interest is Metal 3D Printer. E-mail: lcwleji@kimm.re.kr</p>