

# 선택적 레이저 용융 공정으로 제작된 SUS316L 시편의 에너지밀도 및 비드 중첩률에 따른 기계적 특성 변화 분석

이동욱\*, 김우성\*, 성지현\*, 김철\*\*, 이호진\*<sup>#</sup>

\*한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹, \*\*경북대학교 기계공학부

## Impact of Energy Density and Bead Overlap Ratio of a SUS316L Specimen Fabricated using Selective Laser Melting on Mechanical Characteristics

Dong Wook Lee\*, Woo Sung Kim\*, Ji Hyun Sung\*, Cheol Kim\*\*, Ho Jin Lee\*<sup>#</sup>

\*Smart Manufacturing Technology R&D Group, Korean Institute of Industrial Technology,

\*\*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook University.

(Received 23 April 2021; received in revised form 11 May 2021; accepted 31 May 2021)

### ABSTRACT

Investigations of process parameters are essential when fabricating high-quality parts using additive manufacturing. This study investigates the change in the mechanical characteristics of a SUS316L specimen fabricated using selective laser melting based on the energy density and bead overlap ratio. The SUS316L powder particles were spherical and 35  $\mu\text{m}$  in size. Single-bead and hexahedral shape deposition experiments were performed sequentially. A single bead experiment was performed to obtain the bead overlap ratios for different laser parameters utilizing laser power and scan speed as experimental parameters. A hexahedral shape deposition experiment was also performed to observe the difference in mechanical properties, such as the internal porosity, surface roughness, and hardness, based on the energy density and bead overlap ratio of the three-dimensional printed part. Laser power, scan speed, overlap ratio, and layer thickness were chosen as parameters for the hexahedral shape deposition experiment. Accordingly, the energy density applied for three-dimensional printing, and the experimental parameters were calculated, and the energy density and bead overlap ratio for fabricating parts with good properties have been suggested.

**Key Words** : Selective Laser Melting(선택적 레이저 용융 공정), Additive Manufacturing(적층제조), Process Parameter(공정변수), Stainless Steel(스테인리스 스틸)

## 1. 서 론

# Corresponding Author : hlee3@kitech.re.kr

Tel: +82-53-580-0114, Fax: +82-53-580-0120

3D 프린팅은 4차 산업혁명의 핵심기술 중 하나로서 전 세계적으로 큰 주목을 받고 있다. 금속, 플라스틱 및 음식 등 다양한 재료에 대한 3D 프린팅

공정들이 개발 및 상용화되었으며 현재도 꾸준히 개발되고 있다. 선택적 레이저 용융(Selective laser melting : SLM) 공정은 분말베드용해(Powder bed fusion : PBF) 공정 중 하나로서 레이저 열원으로 분말 형태의 소재를 완전 용융 및 응고시켜 3차원 형상 제품을 제조하는 공정이다<sup>[1-3]</sup>.

SLM 공정은 전통 생산 공정 대비 높은 설계 자유도 및 낮은 재료사용비(Buy to fly ratio)를 가지며 다른 금속 3D 프린팅 공정 대비 변형 및 잔류응력이 낮은 특징을 가지고 있다. 또한, 소재를 완전 용융하기 때문에 기계적 특성이 원소재와 유사하여 기계부품 제작에 사용하기 적합하다. SLM공정은 자동차, 전자, 의료 산업과 같이 다품종 소량 생산을 요구하는 다양한 산업에서 활용되고 있으며 일부 폴리머 재료의 경우 대량 생산에도 적용되고 있다<sup>[2-5]</sup>.

스테인리스강(Stainless steel) SUS316L 소재는 내부식성, 내열성 및 용접성이 우수하여 산업 수요가 높은 재료이다. 3D 프린팅 공정을 활용하여 SUS316L 제품을 성공적으로 제작하기 위해서는 공정 변수에 대한 연구가 필요하다. 부적합한 공정 조건이 적용될 경우 적층 제품 내 층간박리, 기공, 형상 무너짐, 기계적 물성 저하 등 다양한 결함이 발생되기 때문이다<sup>[6-9]</sup>.

L.N.Carter<sup>[10]</sup> 및 Simchi<sup>[11]</sup>는 SLM 공정에서 레이저 출력 및 스캔속도를 이용하여 에너지 밀도를 도출 하였으며 소재별 에너지밀도와 기공률의 상관관계에 대한 연구를 수행하였다. T.Peng<sup>[12]</sup> 및 Thijs<sup>[13]</sup>는 제품 제작 특성에 직접적인 영향을 미치는 변수가 에너지밀도라고 주장하였다. 그들의 연구에서는 에너지 밀도에 따른 제품 제작특성 및 미세조직 변화를 고찰하였다. D.Zhang<sup>[14]</sup>은 SLM 공정에서 적층 공정 변수에 따른 금속 조직 변화 분석에 대한 연구를 수행하였다. Kempen<sup>[15]</sup>는 SLM 밀도 표면 품질과 같은 물리적 특성과 생산성과 경제적 측면을 고려한 공정연구를 수행하였다.

대부분 연구에서는 장비 시스템에서 직접적으로 조절 가능한 변수인 레이저 출력, 스캔속도, 해칭간격 및 적층 높이 등을 사용하여 에너지 밀도를 주요 변수로 선정하고 이에 대한 영향성을 고찰하고 있다. 그러나, 적층 제품의 특성을 면밀히 분석 및

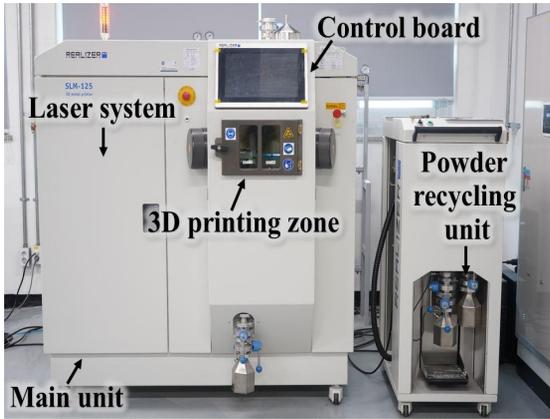
고찰하기 위해서는 열원 변수에 따른 적층 비드 폭 변화가 함께 고려되어야 하며 이를 통해 계산된 비드 중첩률이 함께 고찰되어야 한다<sup>[16,17]</sup>.

본 연구에서는 SLM 공정으로 제작된 SUS316L 시편의 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 기계적 특성 변화를 분석하고자 한다. 이를 위하여 적층 공정 변수에 따른 육면체 시편 제작 실험을 수행하고자 한다. 육면체 시편 제작 실험의 변수는 레이저 출력, 비드 중첩률, 스캔 속도, 적층 높이며 비드 중첩률은 단일선 비드 적층 실험을 수행하여 도출하고자 한다. 육면체 시편 제작 실험 결과를 통하여 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 내부 기공률, 표면 조도, 경도변화를 분석 및 고찰하고자 한다. 이 결과들로부터 SUS316L 소재를 SLM 공정으로 제작하기 위한 적층 에너지 밀도 및 비드 중첩률 범위를 제시하고자 한다.

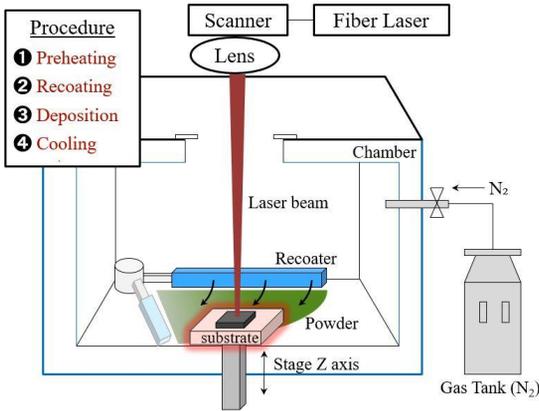
## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장비 및 소재

실험에 사용된 장비는 REALIZER 사의 SLM-125 장비이며 장비 사진 및 개략도는 Fig. 1과 같다. 적층 공정은 예열, 분말공급, 적층, 냉각 순서로 진행된다. SLM-125 장비는 공정중 산화 및 온도제어를 위하여 챔버 시스템을 사용하고 있다. 예열 단계에서는 챔버 내부에 질소 가스를 주입하여 내부 잔존 산소량을 0.3% 이하로 낮추어 불활성 가스 분위기로 유지하였다. 그 후 적층 공정 중 분말의 용착성을 향상시키기 위하여 적층 기판을 30분 동안 150℃ 수준으로 가열하였으며 가열 후 시스템 내 열평형 상태를 유도하기 위하여 1시간 동안 온도를 유지하였다. 분말 공급 단계는 리코터(Recoater)를 회전시켜 챔버 내부에 공급된 분말을 예열된 적층기판 위로 이송하였다. 적층 공정은 레이저 시스템을 통하여 적층 기판 위에 도포된 분말을 선택적으로 용융 및 응고시키는 공정이다. SLM-125 장비의 열원 종류, 직경, 최대출력 및 파장은 각각 Ytterbium fiber laser, 72 $\mu$ m, 400W 및 1,076nm이다. 냉각 공정은 시편 제작 후 시편의 조직 안정화 및 취출시 고온산화 억제를 위하여 적용되었으며 3시간 동안 진행되었다.



(a) PBF type 3D printing system



(b) Schematic of 3D printing system

Fig. 1 Experimental set-up

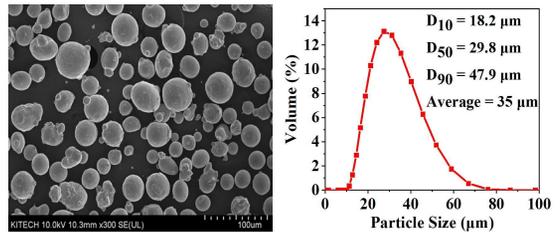
실험에 사용된 소재는 SUS316L 소재의 성분비는 Table 1과 같다. 분말의 크기는 평균 35 $\mu$ m이며, 분말 형상 및 입도 측정 결과는 Fig. 2와 같다. 분말 형상은 Hitachi 사의 SU8020 장비 FE-SEM을 통하여 측정하였다. D10, D50 및 D90은 각각 측정된 분말의 누적 분율이 10%, 50% 및 90% 일 때의 분말 크기이다. 입도분석은 LD(Laser Diffraction) 방식의 Malvern 사의 Mastersizer-3000 장비를 사용하여 측정하였다.

## 2.2 실험 방법 및 절차

SLM 공정으로 제작된 SUS316L 시편의 에너지

Table 1 Material composition of the SUS316L powder (Wt.%)

Fe	Cr	Mo	Ni	C
Bal.	17.76	2.28	12.62	0.02



(a) SEM image

(b) Particle size

Fig. 2 Shape and size distribution of the SUS316L powder

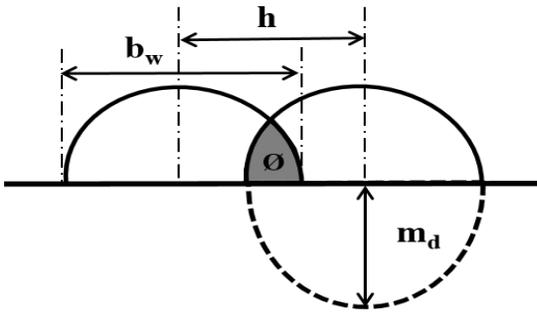
밀도 및 비드 중첩률에 따른 기계적 특성 변화 분석하기 위하여 두 단계에 걸친 실험을 진행하였다. 첫번째 단계는 단일 비드 적층 실험이다. 단일 비드 적층 실험은 레이저 출력 및 스캔 속도에 따른 적층 비드의 형상변화를 분석하고 육면체형상 적층시 적용되는 비드 중첩률을 계산하기 위하여 진행되었다. 단일 비드 적층 실험은 두 가지의 실험 변수를 완전요인 배치하여 총 9가지 조건에 대한 실험을 수행하였으며 그 범위는 Table 2와 같다. 단일 비드의 길이는 100mm이다. 단일 비드 적층 실험을 통하여 적층 비드 상면과 단면을 측정하여 레이저 출력 및 스캔 속도에 따른 비드의 치수 및 특징 변화를 분석한 후 비드 중첩률에 따른 비드간 거리를 도출 하였다. 비드 중첩률 도출한 개략도는 Fig. 3과 같으며, 비드 중첩률 계산에 사용된 수식은 식 (1)과 같다.

Table 2 Experiment parameters for the single bead deposition experiment

Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Layer thickness ( $\mu$ m)
100, 150, 200	500, 1,000, 1,500	40

**Table 3 Experiment parameters for the hexahedron shape deposition experiment**

Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Layer thickness (μm)	Overlap ratio (%)
100, 150, 200	500, 1,000, 1,500	30, 40, 50	0, 25, 50

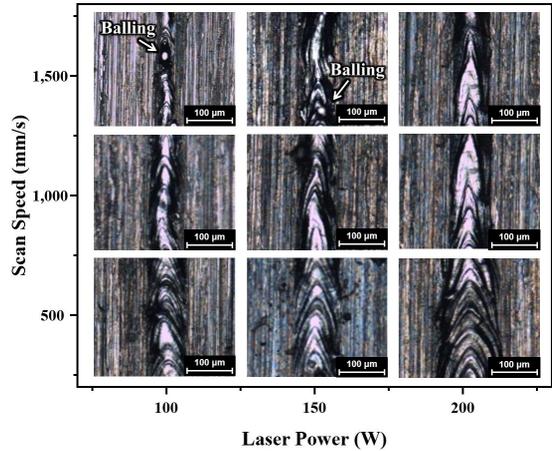


**Fig. 3 Scheme of the geometrical parameters to estimate the overlap ratio**

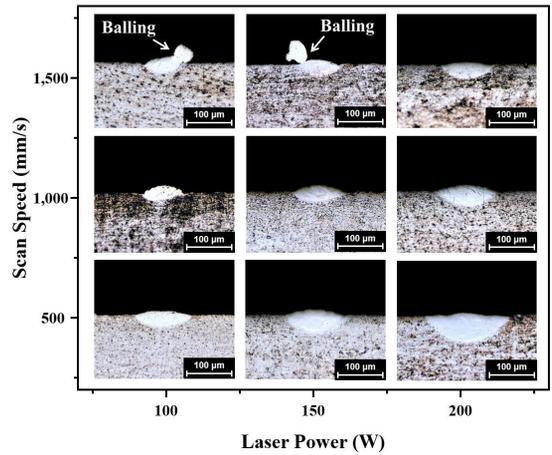
$$\phi(\%) = \frac{b_w - h}{h} \quad (1)$$

여기서  $\phi$ ,  $b_w$ ,  $h$ , 및  $m_d$  는 각각 비드 중첩률, 비드 폭, 비드간 거리 및 용융 깊이 이다. 비드간 거리는 비드 간 중간선의 간격이다. 단일 비드 형상 및 치수 변화 분석에는 Zeiss사의 SteREO, V20 장비 광학 현미경(Optical microscopy)을 사용하였다.

두번째 단계는 육면체형상 적층 실험이다. 육면체 형상 적층 실험은 에너지 밀도 및 비드 중첩률이 제작에 미치는 영향성을 분석하기 위하여 진행되었다. 육면체형상 적층 실험은 네 가지 변수를 완전요인 배치하여 총 81가지 조건에 대한 실험을 수행하였으며 실험 변수 및 범위는 Table 3과 같다. 육면체형상 적층 시편의 크기는 10mm × 10mm × 2mm이다. 비드간 중첩률은 단일 비드 적층 실험을 통하여 도출한 레이저 출력 및 스캔 속도에 따라 변화하는 비드 폭이 고려된 비드간 거리를 적용하였다. 육면체형상 적층 실험을 통하여 적층 공정 변수가 시편 형상, 내부 기공률, 표면 조도, 및 경도 변화에 미치는 영향을 분석 하였다.



(a) Surface shape of deposited bead



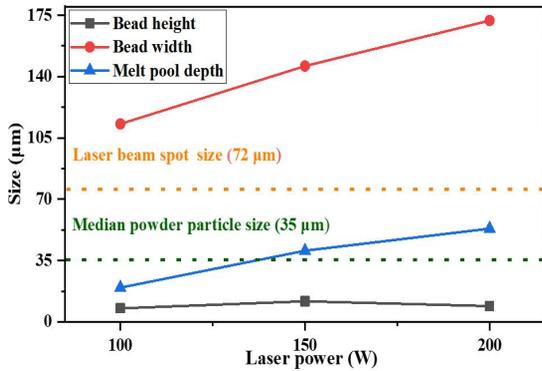
(b) Sectional shape of deposited bead

**Fig. 4 Morphology of single track bead for different laser power and scan speed**

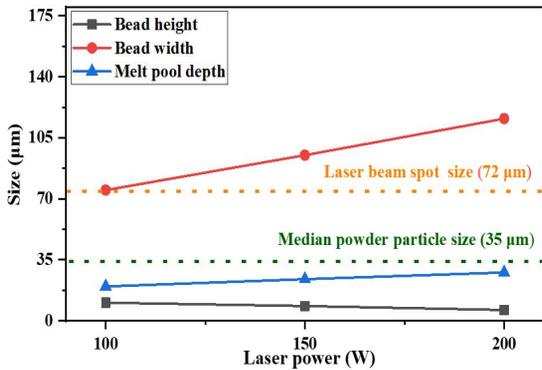
또한, 이 결과로부터 적층공정에 적용된 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 적층 시편 특성 변화를 분석/고찰 하였다. 에너지 밀도 계산에 사용된 수식은 식(2)<sup>[18]</sup>와 같다.

$$E_d(J/mm^3) = \frac{P}{L_t \cdot V_s \cdot h} \quad (2)$$

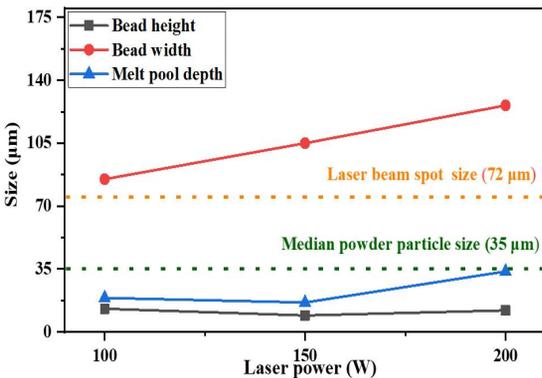
여기서  $P$ ,  $L_t$ ,  $V_s$ , 및  $h$  는 각각 레이저 출력, 적층 높이, 스캔 속도, 및 비드간 거리이다.



(a) Scan speed : 500 mm/s



(b) Scan speed : 1,000 mm/s



(c) Scan speed : 1,500 mm/s

Fig. 5 Dimension of deposited bead according to Laser power and scan speed

시편 형상, 내부 기공률 및 표면조도 분석에는 광학 현미경 및 Olympus사의 OLS4100-SAA 장비 다초점 현미경(Confocal microscopy)을 사용하였다.

경도는 적층 시편의 단면 중앙부에서 기공을 피하여 측정 되었으며, Matsuzawa사의 AMT-X7FS 장비 마이크로 비커스 경도(Micro vickers hardness) 시험기로 측정 하였다. 경도 측정시 적용 하중은 1 N 이며 압입자의 종류 및 대면각도는 피라미드형 다이아몬드 및 136° 이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 레이저 출력 및 스캔속도에 따른 적층 비드 형상 및 치수 변화 분석

단일 비드 적층 실험을 통하여 도출된 레이저 출력 및 속도에 따른 적층 비드의 형상 변화 분석 결과는 Fig. 4와 같다. 모든 조건에서 단일 비드 적층이 가능함을 확인 할 수 있었다. 그러나 스캔 속도가 1,500 mm/s 이며 레이저 출력이 100W 및 150W인 조건에서는 용융 풀이 불연속으로 분리되는 볼링(balling) 결함<sup>[19]</sup>이 발생 하는 것을 Fig. 4(a)의 결과로부터 확인 할 수 있었다. 해당 조건 들에서는 비드 적층에 적용된 열원 에너지가 부족 하기 때문에 사료된다. 또한 Fig. 4(b)의 결과로부터 볼링 결함이 발생 한 경우에는 적층 비드가 언더컷(Undercut) 형상으로 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 단일 비드 적층 실험을 통하여 도출된 레이저 출력 및 속도에 따른 적층 비드의 치수 변화 분석 결과는 Fig. 5와 같다. 해당 실험 구간에서는 적층 비드의 폭이 레이저 출력 및 스캔속도에 따라 레이저 빔 직경 대비 125 - 239% 크기로 생성되며 스캔속도 및 레이저 출력이 각각 500mm/s 및 200W인 조건에서 172μm로 가장 넓게 측정되었다.

적층 비드 폭은 레이저 출력이 증가하거나 스캔 속도가 감소할 경우 증가하였다. 이는 레이저 출력 및 스캔 속도가 감소할 경우 입열량이 증가되기 때문으로 사료된다. 모든 실험조건에서 적층 비드 폭이 레이저 빔직경 보다 크게 생성되었다. 이는 열전도에 의해 레이저 빔이 적용된 영역 주변이 함께 용융되었기 때문이다.

비드 높이는 공정 조건에 따라 초기 분말 공급 높이의 16 - 50% 수준으로 측정되었으며 비선형

적 거동을 가짐을 확인 할 수 있었다. 최소 적층 비드 높이는 스캔속도 및 레이저 출력이 각각 1,500mm/s 및 200W인 조건에서 약 6 $\mu$ m로 관찰 되었다. 모든 공정 조건에서 적층 비드의 높이가 초기 분말 공급 높이보다 낮게 생성되는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 비체적이 큰 분말층이 용융 및 적층 단계를 거쳐 적층 비드로 변화하면서 비체적이 감소하기 때문으로 사료된다.

용융 깊이는 스캔 속도가 1,000mm/s 이상이 이상인 구간에서는 변화 곡선의 기울기가 -0.05 - 0.34 수준으로 레이저 출력에 따라 변화하는 비선형적 거동을 가짐을 확인할 수 있었다. 스캔 속도가 500mm/s인 구간에서는 레이저 출력에 따른 용융 깊이 변화 기울기가 최대 0.42 수준까지 소폭 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 레이저 출력, 스캔속도 및 비드 중첩률에 따른 적정 비드 간격 도출

레이저 출력 및 스캔속도에 따른 적층 비드 형상 및 치수 변화 분석 결과를 활용하여 비드 중첩 비율, 레이저 출력, 스캔 속도에 따른 적정 비드 간격을 Fig. 6과 같이 도출 하였다. 이 결과는 육면체형상 적층 실험에 활용하기 위하여 도출 하였으며 적층 높이 40 $\mu$ m인 실험결과를 활용하였다.

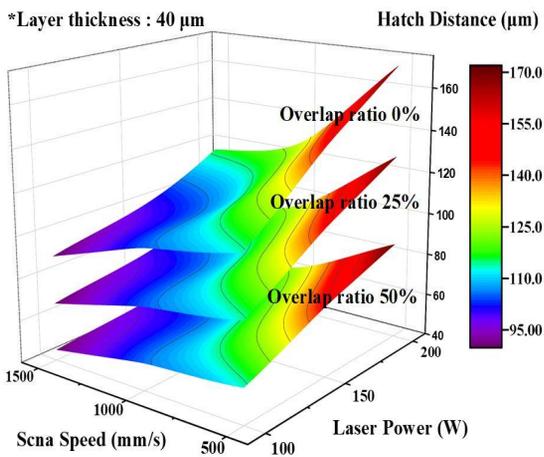


Fig. 6 Hatch distance for different overlap ratio, scan speed and laser power

### 3.3 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 적층 시편 기계적 특성 변화분석

#### 3.3.1 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 적층 시편 내부 기공률 특성

SLM 공정으로 육면체 형상을 적층하고 레이저 출력, 스캔 속도, 적층 높이, 및 비드 중첩 비율에 따른 시편의 기공률을 Fig. 7과 같이 측정하였다. 기공의 형성 원인은 분말 층에 가해지는 열에너지가 모든 분말을 녹이기에 충분하지 않아 기공내부에 녹지 않은 분말이 잔존함으로 인해 생기게 된다. 이 같은 현상으로 형성된 기공은 층간기공으로 불리며 그 크기는 레이저 출력, 스캔속도 및 비드 중첩률에 따라 달라지게 된다. 에너지 밀도가 20 - 60J/mm<sup>3</sup>인 구간에서는 공정 조건에 따라 적층 시편의 기공률이 0.01 - 56.63% 수준으로 측정되었다. 에너지 밀도가 60 - 78J/mm<sup>3</sup>인 구간에서는 공정 조건에 따라 적층 시편의 기공률이 0.01 - 12.37% 수준으로 측정되었다. 그러나 에너지 밀도가 78J/mm<sup>3</sup> 이상인 구간에서는 에너지 밀도 수준에 상관없이 기공률이 0.51% 이하로 감소하였다. 이 결과로부터 SUS316L 적층 시편의 기공을 억제하기 위해서는 에너지 밀도를 78J/mm<sup>3</sup> 이상 적용하여야 함을 확인할 수 있었다.

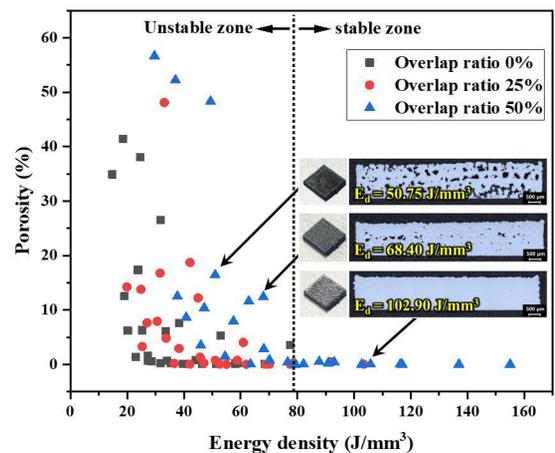


Fig. 7 Porosity of hexahedron specimen according to energy density and overlap ratio

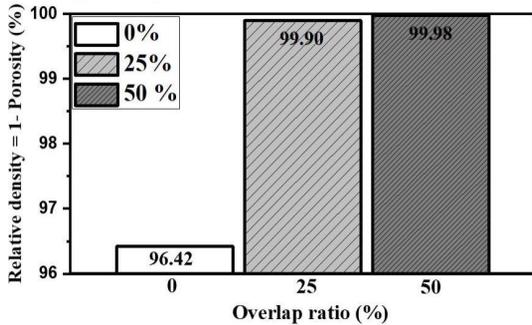


Fig. 8 Comparison results of relative density for different overlap ratio

Fig. 8은 에너지 밀도가 약 78J/mm<sup>3</sup> 일 때 비드 중첩률에 따른 상대밀도 비교 결과이다. 이 구간에서는 비드 중첩률이 0%에서 25%로 증가할 때 적층 시편 상대밀도가 3.48% 소폭 개선되었다.

비드 중첩률이 25%에서 50%로 증가할 경우에는 적층 시편 상대 밀도가 0.08%로 개선되었다. 이 결과들로부터 내부 기공을 억제하는 적층 시편을 제작하기 위해서는 비드 중첩률이 25% 되어야 함을 알 수 있었다. 비드 중첩률이 50% 일 때 시편 상대밀도가 가장 우수하지만 생산성을 고려할 때 25%의 비드 중첩률을 활용하는 것이 적합한 것으로 판단되었다.

### 3.3.2 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 적층 시편 표면 조도 특성

에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 적층 시편의 평균 표면 조도(Ra) 변화 특성을 Fig. 9와 같이 분석하였다. 50J/mm<sup>3</sup> 이하의 에너지 밀도가 낮은 구간에서는 표면 조도 측정이 불가능한 실험군에 대한 데이터는 제외하여 분석하였다. 에너지 밀도가 10 - 50J/mm<sup>3</sup>인 구간에서는 공정 조건에 따라 적층 시편의 표면조도가 0.3 - 5.1 $\mu$ m 범위로 측정되었다. 에너지 밀도가 50 - 78J/mm<sup>3</sup>인 구간에서는 공정 조건에 따라 적층 시편의 표면조도가 0.6 - 4.3 $\mu$ m 범위로 측정되었다. 에너지 밀도가 78J/mm<sup>3</sup> 이상인 구간에서는 최대 표면 조도가 1.5 $\mu$ m로 측정되었다. 표면 조도와 에너지밀도의 상관관계를 선형회귀분석한 결과 추세선의 기울기는

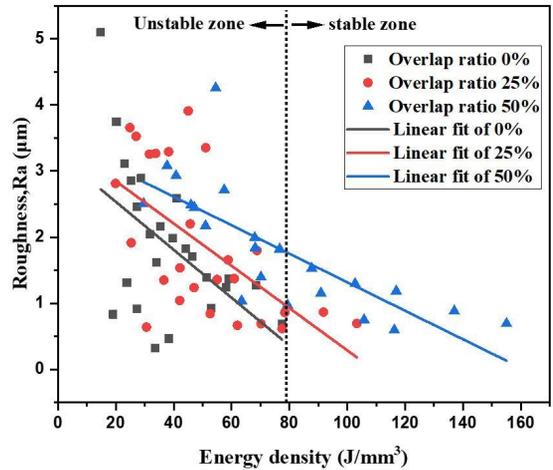


Fig. 9 Surface roughness of hexahedron specimen according to energy density and overlap ratio

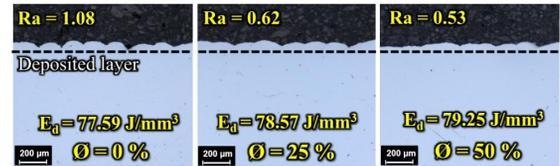


Fig. 10 Sectional images of surface for hexahedron specimen for different overlap ratio

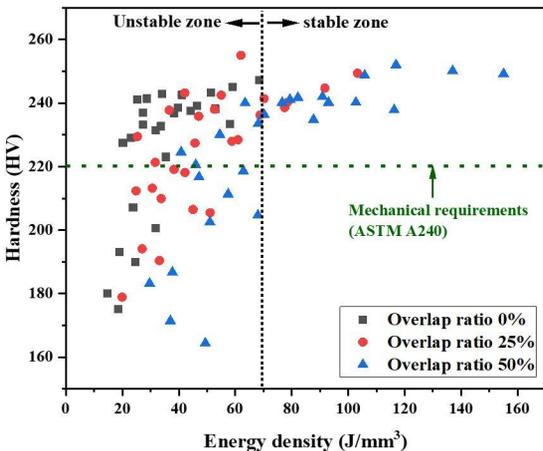
비드 중첩률이 0, 25 및 50% 일 때 각각 -0.04, -0.03 및 -0.02로 나타났다. 이 결과들로부터 SUS316L 적층 공정은 에너지 밀도가 증가함에 따라 표면조도 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 적층에 사용된 에너지밀도가 증가함에 따라 적층 표면의 요철부가 완전 용융되었기 때문으로 사료된다.

에너지 밀도가 약 78J/mm<sup>3</sup> 일 때 비드 중첩률에 따른 적층 표면 형상을 비교한 결과는 Fig. 10과 같다. 비드 중첩률이 0%인 경우 적층 표면에 비드 형상이 반복적으로 생성되었으며 표면조도가 1.08 $\mu$ m로 측정되었다. 비드 중첩률이 25%인 경우 적층 표면의 비드형상이 일부 중첩되어 생성되었으며 표면조도가 0.62 $\mu$ m로 측정되었다. 비드 중첩률이 50%인 경우 적층 표면의 비드를 구분하기

어려웠으며 표면조도가  $0.53\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이 결과들로부터 비드 중첩률 조절을 통하여 적층 시편의 표면 품질 개선이 가능하나 비드 중첩률이 25% 이상인 경우에는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3.3 에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 적층 시편 경도 특성

에너지 밀도 및 비드 중첩률에 따른 시편 경도 특성을 Fig. 11과 같이 분석하였다. 에너지 밀도가  $70\text{J}/\text{mm}^3$  미만인 영역에서는 시편 경도가 164 - 255HV



고려하면 25%가 적합함을 알 수 있었다.

4. 시편 경도는 에너지 밀도가 70J/mm<sup>2</sup>인 수준에서 비드 중첩 비율과 관계없이 ASTM 240 규격에서 요구되는 경도 수준 이상을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 PBF 공정으로 적층된 SUS316L 시편의 공정변수에 따른 인장, 피로 및 부식 특성을 분석하고 변수 간 상관관계 분석 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 (KITECH EO-21-0009)과 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (과제번호:20009839) 의 연구비 지원으로 수행한 연구입니다.

## REFERENCES

1. Attar, H., Prashanth, K. G., Chaubey, A. K., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S. and Eckert, J., "Comparison of wear properties of commercially pure titanium prepared by selective laser melting and casting processes", *Materials Letters.*, Vol. 142, pp. 28-41, 2015.
2. Mower, T. M., Long, M. J., "Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials", *Mat. Sci. Eng, A-Struct.*, Vol. 651, pp. 198-213, 2016.
3. Mumtaz, K. A., Hopkinson, N., "Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping", *Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 279-287, 2010.
4. Choi, J. W., Kim, H. C., "3D Printing Technologies - A Review", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8, 2015.
5. Miranda, G., Faria, S., Bartolomeu, F., Pinto, E., Mederia, S., Mateus, A., Carreira, P., Alves, N., Silva, F. S., Carvalho, O., "Predictive models for physical and mechanical properties of 316L stainless steel produced by selective laser melting", *Materials Science and Engineering : A*, Vol. 657, pp. 43-56, 2016.
6. Yadroitsev, I., Smurov, I., "Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders", *Physics Procedia*, Vol. 12, Part A, pp. 264-270, 2011.
7. Kang, M. C., Ye, D. H., Go, G. H., "International Development Trend and Technical Issues of Metal Additive Manufacturing", *J. of Welding and Joining*, Vol. 34, No. 4, pp. 9-16, 2016.
8. Hu, Z., Zhu, H., Zhang, H., Zeng, X., "Experimental investigation on selective laser melting of 17-4PH stainless steel", *Opt. Laser Technology.*, Vol. 87, pp. 17-25, 2017.
9. Lin, X., Cao, Y., Wu, X., Yang, H., Chen, J., Huang, W., "Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel", *Mat. Sci. Eng, A-Struct.*, Vol. 553, pp. 80-88, 2012.
10. Carter, L. N., Wang, X., Read, N., Khan, R., Aristizabal, M., Essa, K., Attallah, M. M., "Process optimisation of selective laser melting using energy density model for nickel based superalloys", *Materials Science and Technology*, Vol. 32, pp. 657-661, 2016.
11. Simchi, A., Pohl, H., "Effect of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 359, pp. 119-228, 2003.
12. Peng, T., Chen, C., "Influence of energy density on energy demand and porosity of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 5, pp. 55-62, 2018.
13. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Van Humbeeck, J., Kruth, J.-P., "A Study of the

- Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V”, *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 9, pp. 3303-3312, 2010.
14. Zhang, D., Feng, Z., Wang, C., Wang, W., Liu, Z., Niu, Wen., “Comparison of microstructures and mechanical properties of Inconel 718alloy processed by selective laser melting and casting”, *Materials Science and Engineering : A*, Vol. 724, pp. 357-367, 2018.
  15. Kempen, K., Thijs, L., Humbeecke, J., Kruth, J.-P., “Processing AlSi10Mg by Selective Laser Melting: Parameter optimization and material characterization”, Vol. 31, pp. 917-923, 2015.
  16. Hong, M. H., Min, B. K., Kwon, T. Y., “The Influence of Process Parameters on the Surface Roughness of a 3D-Printed Co-Cr Dental Alloy Produced via Selective Laser Melting”, *Applied Sciences.*, Vol. 6, No. 12, pp. 401-411 2016.
  17. Dong, Z., Liu, Y., Wen, W., Ge, J., Liang, J., “Effect of hatch spacing on melt pool and as-built quality during selective laser melting of stainless steel: Modeling and experimental approaches”, *Materials*, Vol. 12, No. 50, 2019.
  18. Maamoun, AH., Xue YF., Elbestawi, MA., Veldhuis, SC., “The Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 and AlSi10Mg Alloys”, *Materials*, Vol. 12, No. 12, 2019.
  19. Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, Li., Jinang, W., “Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 59, pp. 1025-1035, 2012.