

# 적층장비와 분말이 L-PBF 기반 스테인리스 스틸 316L 적층소재의 기계적 물성에 미치는 영향

오 동 진\*<sup>†</sup> · 강 용 준\* · 김 기 동\*

\*한국재료연구원 접합기술연구소

## Effect of Additive Machines and Powders on Mechanical Properties of Stainless Steel 316L Manufactured by L-PBF

Dongjin Oh\*<sup>†</sup>, Youngjun Kang\*, and Kidong Kim\*

\*Department of Joining Technology, Korea Institute of Materials Science, Changwon, 51508, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author: odj3315@kims.re.kr

(Received July 27, 2022; Revised August 16, 2022; Accepted August 25, 2022)

### Abstract

Recently, additive manufacturing (AM) has been a useful technology to fabricate complex parts. However, more consideration and technological developments are required for the expansion of the AM process in various industries. In particular, verification for repeatability and reproducibility of AM parts are very difficult issues when the AM parts are used in specific industries, such as nuclear and aerospace. In this respect, the change in the mechanical properties according to the relationship between AM parameters, machines, and powders is a very important area of research. In this study, four different L-PBF machines and three different powders from different suppliers were used to fabricate stainless steel 316L AM materials using same or similar AM parameters. In addition, tensile tests were conducted on all AM materials to obtain mechanical properties. The test results confirmed that differences in the mechanical properties were observed in the same AM process parameters of different machines and powder conditions.

Key Words: Additive manufacturing, Mechanical properties, AM parameter, SS 316L, AM machine and powder

## 1. 서 론

적층제조는(Additive Manufacturing, AM) 전통적인 생산방법인 주조, 단조, 압출 등과 달리 금속, 비금속 소재를 한 층(layer)씩 쌓아 올려 3차원 부품을 제작하는 공정이다. 높은 생산성과 설계의 자유도, 다품종 소량생산이 가능하다는 측면에서 우주항공, 자동차, 의료 등 다양한 분야에서 적층제조 기술 적용을 위한 연구가 진행되고 있으며, 대표적인 금속 적층제조 기술로는 powder bed fusion (PBF)과 direct energy deposition (DED)이 있다<sup>1,2)</sup>. PBF의 경우, 작

업 베드 일정 높이(수십 um)의 분말층에 레이저 또는 전자빔을 조사하여 부품을 만드는 방식이며 정밀한 조형이 가능하다는 장점을 가지고 있다. DED의 경우, 레이저 열원과 함께 분말 또는 와이어를 분사하여 적층하는 방식으로 PBF 공정 대비 빠른 공정속도와 대형 부품 제작이 가능하다는 장점이 있다<sup>3-5)</sup>. 상기 AM 공정들은 부품의 용도와 목적에 맞게 산업계에서 사용되고 있으며, 부품의 건전성 확보와 기계적 물성 향상을 위한 공정 최적화 관련 연구도 활발히 수행되고 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 다양한 분야에서의 적용을 위해 AM 공정변수 변화에 따른 기계적 강도, 내부 기공(porosity) 및 밀도(density) 변화에 관한 연구가 수행되었다. 대부분의 연구에서는 laser power, layer

thickness 등 공정변수로 계산이 가능한 에너지 밀도 (energy density) 기준으로 강도의 증감, 기공(porosity) 발생 여부 등을 확인하였으며, stainless steel, Ni alloy, Ti alloy 등 다양한 분말을 사용하여 공정변수의 영향을 분석하였다<sup>6-10)</sup>. 주요 연구결과로는 취성과 피로 연성파괴는 어떠한 임계 에너지 밀도로 구분될 수 있으며 임계 에너지 밀도 이상인 경우, 에너지 밀도가 증가함에 따라 항복, 인장 강도는 증가하고 연신율은 감소한다는 연구결과들이 있다. 이러한 결과들을 바탕으로 최근에는 주요 AM 분말(SS 316L, Ni alloy 등)로 제작된 부품의 강도와 연신율 모두 만족할 수 있는 최적 공정을 찾기 위한 연구가 수행되고 되고 있으며 공정을 정리하여 optimal AM parameter map을 제시하고 있다<sup>10)</sup>. 또한, 적층 부품들의 적용성 확보를 위해 구조물 설계의 필수 요소인 피로, 파괴 특성을 평가하기 위한 연구들도 활발히 진행되고 있다<sup>11)</sup>.

적층소재의 기계적 물성 확보를 위한 공정 최적화와 함께 AM 부품 적용성 확대의 측면에서 재현성과 관련된 연구는 중요한 부분을 차지한다. 적층공정은 설계 디지털화를 통해 여러대의 장비를 사용하여 모듈 단위로 부품을 제작가능하다는 장점을 가지고 있으나 장비에 따라 제작되는 모듈의 특성이 달라질 수 있다는 단점이 있다. 즉, 동일한 장비를 사용하고 유사한 공정변수를 적용하더라도 적층제조 부품의 특성상 재현성을 확보하는 것은 어려우며, 적층공정이 전통적인 부품 제작 방법을 대체하기 위해서는 재현성과 관련된 연구가 우선적으로 수행되어야 한다. 하지만, 지금까지 수행된 연구들은 기계적 강도와 에너지 밀도와의 관계를 통해 최적 공정변수 도출하기 위한 연구가 대부분이며, 장비, 분말 변화에 따른 재현성, 재현 적층소재의 건전성에 관한 연구는 미비한 상황이다. 이에 최근 국외 연구기관에서는 다양한 장비에 1가지 분말을 적용하여 물성을 평가하였으나, 초기 연구 수준에서 머물러 있는 상황이다<sup>12)</sup>. 국내의 경우 피로, 파괴와 관련된 연구는 일부 진행되고 있으나 부품의 재현성을 위한 연구는 전무한 상황이며 적층공정의 적용성 확대를 위해 재현성 관련 연구가 시급한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 L-PBF 장비, SS 316L 분말 변화에 따른 재현성을 확인하기 위해 인장시험을 수행하였다. 적층소재 제조에 제조사가 다른 4가지 장비와 3종류의 분말을 사용하였으며, 동일한 공정변수를 적용하여 시편을 제작하여 물성을 평가하였다.

## 2. 사용 재료

### 2.1 분말 조성 및 사용 장비

본 연구에서는 장비 및 분말 변경에 따른 물성 변화를 평가하기 위해 SS 316L 분말을 사용하였다. 사용된 분말은 4가지로 상용 SS 316L 분말인 CL 20ES, LSN F316L, Laserform stainless 316L 및 Chang-sung 316L을 사용하여 적층 소재를 제작하였으며, 각 분말 조성은 Table 1에 정리하여 나타내었다. 또한, 적층 소재 제작에 사용된 L-PBF 장비는 3종류의 제조사의 4개 장비로써 concept laser 의 M1, M2, 3D systems의 DMP 320와 Sodick의 OPM 250L를 사용하여 소재를 적층하였다. 완성된 시편에 대해 HIP, stress relieving 등 후처리 공정은 수행하지 않았으며, 기계 가공을 통해 시험편을 제작하였다.

### 2.2 공정 조건 및 시험편 형상

본 연구에서는 동일한 공정 조건을 각각 다른 장비와 분말에 적용하여 기계적 특성을 평가하였다. 이때, 공정 조건에 따른 에너지 밀도 변화와 기계적 물성과의 상관관계를 분석하기 위해 추가적인 공정 조건을 선정하였다. M1 장비로 CL 20ES 분말을 사용하여 A, B 조건으로 적층 시편을 제작하였고, M2 장비로는 LSN F316L 분말을 사용하여 C ~ F 조건으로 적층 시편을 제작하였다. 상세한 적층 조건은 Table 2에 정리하여 나타내었다. Table 2에 나타난 바와 같이, B 와 C 공정 조건과 장비 제조사는 동일하나 사용된 분말의 제조사는 다르며 E와 G, F와 H 는 공정 조건은 동일하나 각각 다른 장비와 분말을 사용하였다.

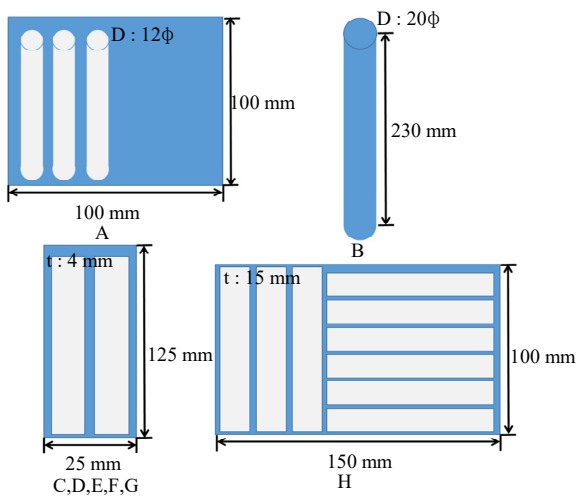
시편들의 적층 방향은 Z 방향(vertical direction)

**Table 1** Chemical composition of SS 316L powders (unit : %)

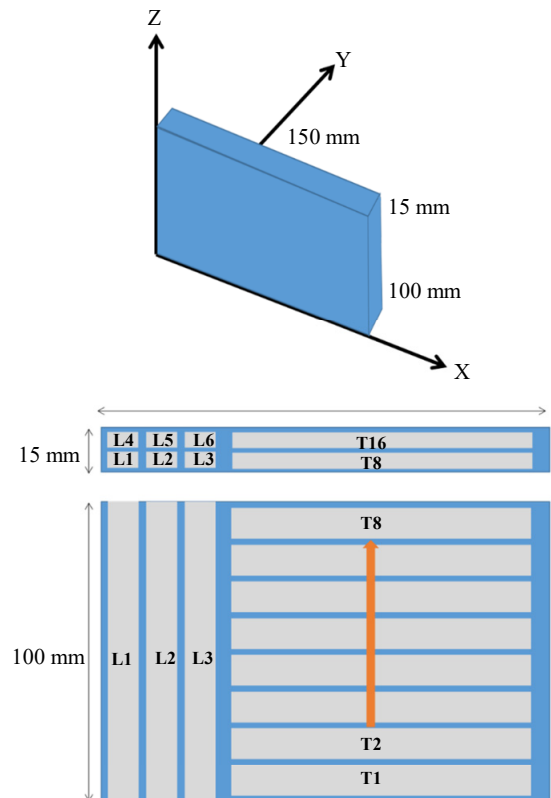
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	Fe
CL 20ES	16.5-18.5	10.0-13.0	2.0-2.5	≤2.0	≤1.0	≤0.045	≤0.03	≤0.03	Bal.
LSN F316L	17	12	2.5	≤2.0	≤0.75	-	≤0.03	-	Bal.
Laserform stainless 316L	16.5-18.5	10.0-13.0	2.0-2.5	≤2.0	≤1.0	≤0.045	≤0.03	≤0.03	Bal.
Chang-sung 316L	17	12	2.0	≤2.0	≤0.5	-	≤0.03	-	Bal.

**Table 2** AM parameters for test specimens

Machine (No.)	Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Layer thickness (mm)	Hatch spacing (mm)	Energy density ( $J/mm^3$ )
M1 (A)	180	800	0.03	0.105	71.43
M1 (B)	180	600	0.025	0.15	80
M2 (C)	180	600	0.025	0.15	80
M2 (D)	250	600	0.025	0.15	111.1
M2 (E)	300	900	0.03	0.1	111.1
M2 (F)	370	1350	0.05	0.09	60.9
DMP 320 (G)	300	900	0.03	0.1	111.1
OPM 250L (H)	370	800	0.05	0.1	92.5

**Fig. 1** Dimension of AM materials

으로 적층하여 제작하였으며, 적층 시편의 크기는 Fig. 1에 정리하여 나타내었다. Fig. 1과 같이, 시편 형상이 적층 시편의 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하기 위해 봉상 및 판상 시편을 가공할 수 있도록 적층 시편의 크기를 결정하였다. 인장 시험은 ASTM E8에 따라 기계 가공하여 제작된 봉상 및 판상 적층 시편과 강도 비교를 위해 Wrought 소재 시편을 각각 인장 속도 1 mm/min으로 수행하였다<sup>13)</sup>. A, B는 각각 봉상 소형 시편(gage length 25 mm)과 봉상 표준 시편(gage length 50 mm)을 제작하여 시험을 수행하였으며, C ~ H는 ASTM E8의 gage length 25 mm를 가지는 판상 소형 시편을 제작하여 인장 시험을 수행하였다. H의 경우, 시편의 채취 위치에 따른 강도 변화를 분석하기 위해 적층 방향(Z direction)으로 6개의 시편, 적층 방향에 수직인 방향(X direction)으로 16개의 시편을 Fig. 2와 같이 채취하여 시편을 제작하였다. 또한, 시편 형상에 따른 물성 변화를 확인하기 위해 D ~ F 조건에서 봉상 소형 시편(gage

**Fig. 2** Location of test specimen for H condition

length 25 mm)을 제작하여 평가하였다.

### 3. 실험 결과

우선, 시편 채취 위치에 따른 강도 변화를 확인하기 위해 H 시편의 각 위치에서 채취한 시편 인장 시험 결과를 정리하였다. L1~L6위치에서 채취한 시편의 항복강도와 인장강도는 각각 488~515 MPa, 533~543 MPa 범위를 나타내었으며 시편의 채취 위치에 따른 차이가 거의 없었으나, 아래 Fig. 3과 같이 T1~T16 위치에서의 강도는 약간의 차이를 보였

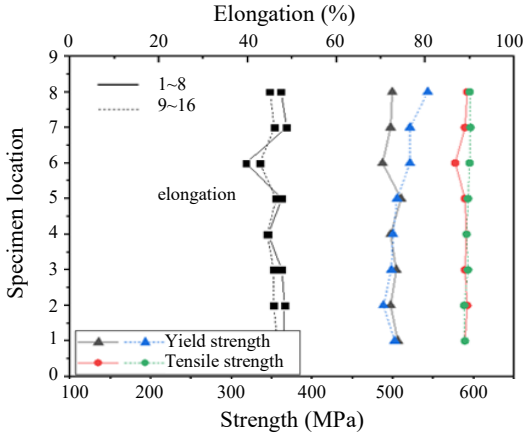


Fig. 3 Test results for test specimen of H condition in each location

다. 특히, 항복강도의 경우 적층시편 상부로 갈수록 일정하지 않는 강도가 나오는 것을 확인 했으며, 그 차이는 약 40 MPa 정도이다. 이는, 시편의 크기가 부품 단위로 커진다면 채취 위치에 따라 강도가 달라질 가능성이 존재함을 나타내며, 강도의 균일화를 위한 추가적인 공정이 필요할 수 있음을 의미한다.

에너지 밀도 변화에 따른 강도 변화를 분석하기 위해 식 (1)과 같은 체적 에너지 밀도(Volume Energy Density, VED)를 계산하여 A ~ G 조건에 따른 인장 시험 결과와 함께 Table 3에 정리하여 나타내었다.

$$VED \left( \frac{J}{mm^3} \right) = \frac{\text{Laser power (W)}}{\text{Scanning speed} \left( \frac{mm}{sec} \right) \times \text{Hatch spacing (mm)} \times \text{Layer thickness (mm)}} \quad (1)$$

인장 시험 결과를 살펴보면, 적층소재들은 wrought 소재 대비 높은 항복강도와 비슷한 인장강도를 가지지만 낮은 연신율을 보인다. ASTM F3184에서 제시하

고 있는 스테인리스 적층 소재의 최소 요건(인장 강도 515 MPa, 항복 강도 205 MPa, 연신율 30% 이상)과 비교하면 A, B, G, H는 강도, 연신율을 만족한다<sup>14)</sup>. 그러나 나머지 조건(C, D, E, F)들은 항복, 인장 강도는 만족하나 연신율은 낮은 값을 가지는 것을 확인하였다. 장비와 분말이 적층소재 강도에 미치는 영향을 분석하기 위해, 공정조건이 동일하나 장비와 분말이 다른 경우의 물성 차이를 분석하였다. 같은 장비, 동일 공정에 분말만 다른 B와 C의 경우, B의 항복, 인장 강도 및 연신율이 C보다 높게 나타남을 확인하였다. 또한, 동일 공정에 장비와 분말 모두 달라지는 E와 G의 경우도 앞선 경우와 같은 강도, 연신율 특성을 보였다. 이는, 동일한 공정이라도 장비 또는 분말이 달라지면 강도 측면에서 물성의 차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

시험편의 형상, 크기에 따른 강도 차이를 분석하기 위해 B~D 조건의 판상 시험편, 봉상 시험편 인장 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 나타남과 같이, 봉상 시험편의 항복, 인장강도 및 연신율과 같은 인장 물성이 판상 시험편의 물성보다 높게 나타났다. B와 C 조건에서는 항복, 인장강도가 큰 폭으로 증가하였으나, D 조건에서는 다소 작은 증가 폭이 나타났다. 또한,

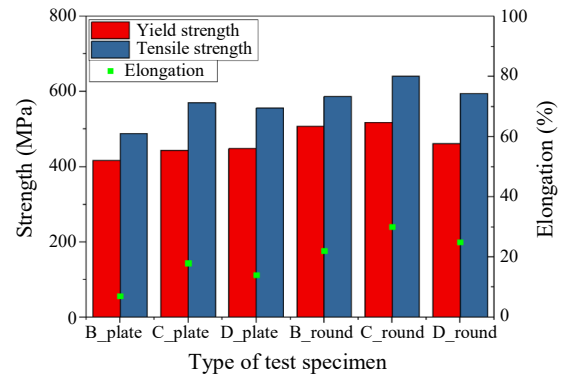


Fig. 4 Test results for B, C and D condition

Table 3 Result of tensile tests

Machine (No.)	Energy density (J/mm <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
M1 (A)	71.43	574	669	39
M1 (B)	80	560	647	34
M2 (C)	80	479	578	11
M2 (D)	111.1	417	488	7
M2 (E)	111.1	444	570	18
M2 (F)	60.9	449	556	14
DMP 320 (G)	111.1	446	577	49
OPM 250L (H)	92.5	504	539	61
Wrought SS 316L	-	266	593	64

이와 유사하게 연신율도 D 조건에서 증가폭이 다소 작음을 확인하였다. 이는, 같은 공정조건이라도 시험편의 형상 및 크기가 변화하면 소재의 강도 특성이 달라질수 있음을 의미 하며, 부품의 강도 확인을 위해서는 형상 및 크기가 변화할때마다 부품에서 시험을 채취하여 강도를 평가해야 정확한 물성 파악을 할 수 있을 것으로 판단된다.

에너지 밀도 변화에 따른 강도, 연신율의 변화를 분석하기 위해 Fig. 5~6과 같이 정리하여 나타내었다. Fig. 5와 같이, 인장 시험을 통해 확보한 강도 물성들을 에너지 밀도에 따른 그래프로 정리해보면 일정한 경향없이 데이터가 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 적층 소재의 인장 물성들은 동일한 에너지 밀도(동일 공정)를 가지더라도 장비 및 분말에 따라 차이가 발생함을 의미하며, 연신율 측면에서는 더 큰 차이가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 에너지 밀도에 따른 인장 특성 변화를 분석하기 위해, ASTM 요건을 만족하지 못하는 데이터들을 제거하여 Fig. 6에 정리하여 나타내었다. 나타난 바와 같이, 에너지 밀도가 증가함에 따라 항복 강도와 인장 강도는 감소하고 연신율은 증가

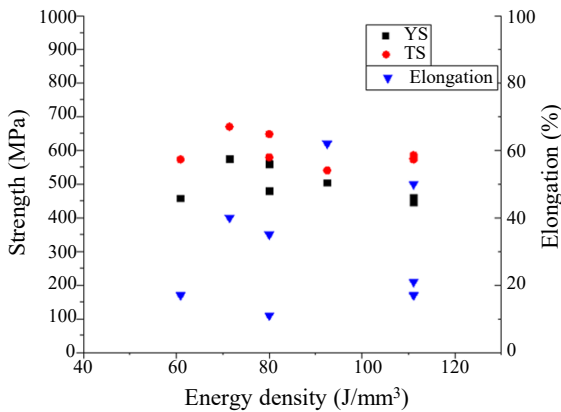


Fig. 5 Distribution of test data based on energy density

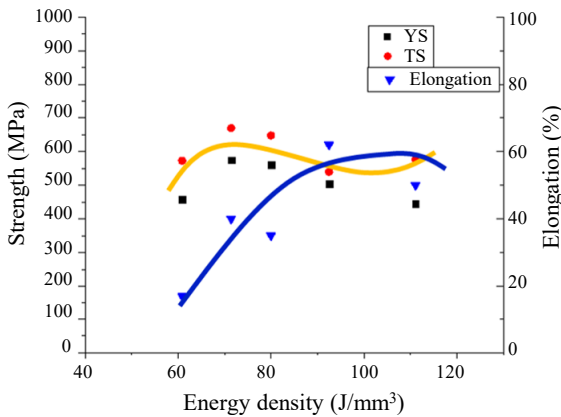


Fig. 6 Distribution of test data based on energy density without fail data

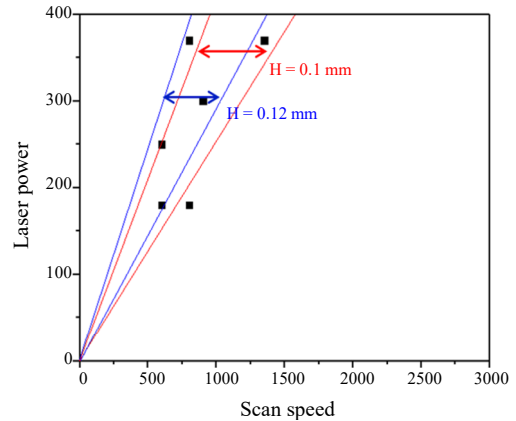


Fig. 7 AM parameter in this study on the optimal parameter curve<sup>15)</sup>

하는 경향이 나타났다. 이때, 임계 에너지 밀도는 강도가 급격하게 변화는 지점과 ASTM standard에서 제시하고 있는 연신율 30% 이상을 취성과 연성을 구분하는 기준으로 하였으며, 약 60 ~ 70 J/mm<sup>3</sup>의 범위에서 취성파괴에서 연성파괴로 전환되는 임계 에너지 밀도가 나타남을 확인하였다.

본 시험을 통해 확보한 데이터들과 최근 연구된 적층 소재 공정 관련 논문에서 제시한 최적 공정 조건과 비교해 보았다<sup>15)</sup>. 논문에서는 SS 316L 적층소재를 laser power 200 ~ 300 W, scan speed 600 ~ 1000 mm/s, hatch spacing 0.05, 0.1, 0.12 mm, layer thickness 0.04 mm 조건에서 제작하여 평가를 수행하였으며 안정된 공정 조건으로 에너지 밀도 범위 62.5~104.2 J/mm<sup>3</sup>를 제시하고 있다. 최적 공정 조건은 laser power와 scan speed의 상관관계로 표시하고 있으며, Fig. 7의 파란선과 빨간선으로 나타낼 수 있다. 나타난 바와 같이, 제작 공정들은 hatch spacing이 조금 차이가 있기는 하나 laser power 180 W, scan speed 800 mm/s 인 경우를 제외하면 모두 stable melting 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 제작 공정들이 문헌의 stable melting 범위에 포함되지만 실제 시험 결과들은 장비, 분말에 변경에 의해 ASTM 요건을 만족하지 못한 인장 물성도 나타났으므로, 최적 공정 개발 시 장비, 분말에 대한 충분한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 실험 고찰

본 연구에서는 장비 및 분말의 변화에 따른 동일 또는 유사한 공정변수로 제작한 적층소재의 인장 특성의 변화를 평가, 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 동일한 공정이라도 장비와 분말이 변경되면 기계적 강도

도 변화되는 것을 확인하였다. 그 이유를 살펴보면, 우선 공정변수는 동일하지만 각 장비마다 적층 방법 (scanning strategy)이 다른 것을 고려할 수 있다. 주요 적층 방법으로는 일방향 적층(Uni-directional scanning), 양방향 적층(Bi-directional scanning), 체스보드 적층(Chessboard scanning), 교차 적층 (Stripes scanning) 등이 있으며, 각 적층 방법에 따라 기계적 물성은 달라진다는 연구가 최근 수행되었다<sup>15,16)</sup>. 이는, 부품 제작에 있어 건전성을 확보하기 위해서는 에너지 밀도를 계산하기 위한 적층 변수(laser power, scan speed 등)뿐만 아니라 적층 방법도 중요한 변수로서 고려해야함을 의미한다. 또 다른 인자로서 장비 차이로 발생하는 냉각 속도의 영향이 있다. 장비 베드의 크기와 불활성 가스 공급량은 적층 소재의 냉각 속도와 응고 속도에 영향을 주어 동일한 공정으로 제작된 소재라도 기계적 강도와 잔류응력에 차이가 발생하게 된다<sup>15,16)</sup>. 마지막으로 분말의 불균질화로 인한 물성 차이가 발생할 수 있다. 각 제조사에서 제작하는 분말들은 화학적 조성에서 조금씩의 차이가 있으며, 적층 제조라는 변수가 많은 공정을 만나게 되었을 때 기계적 강도의 차이를 야기할 수 있다. 이와 같이, 동일한 공정 변수(동일한 에너지 밀도)를 가지고 적층소재를 제작하더라도 장비, 분말, 적층 방법, 시편 크기 등 다양한 요소들에 의해 기계적 강도들은 달라질 수 있으며, 적층 제조 방식 부품의 건전성, 재현성을 확보하기 위해서는 상기 요소들을 고려한 평가 방법이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 L-PBF로 제작된 SS 316L 적층 소재들의 공정 변수에 따른 기계적 강도를 평가하였다. 장비 및 분말 변경에 따른 물성 변화 분석을 통해 적층 소재의 재현성을 확인하였으며, 주요 결론을 아래에 정리하였다.

1) 적층 소재 시험편 채취 위치에 따른 강도 변화와 동일 공정에 의해 제작된 판상 및 봉상 시험편의 인장 물성의 현저한 변화가 확인되었다. 이는, 시편의 크기가 부품 단위로 증가할 경우, 시편의 채취 위치와 부품의 크기 및 형상에 따라 강도가 균일하지 않음을 의미한다. 따라서, 부품의 건전성을 평가하기 위해서는 가장 강도가 약한 부분을 특정하여 평가해야하고, 강도 균일화를 위한 추가적인 공정이 필요할 것으로 판단된다.

2) 동일 적층공정에 다른 장비와 분말을 사용하여 적층소재를 제작하고 평가를 수행하였다. 평가 결과,

동일한 공정으로 제작된 소재라도 각각 다른 인장 물성을 나타내었다. 이는, 동일 공정, 동일한 에너지 밀도 범위라도 장비 및 분말이 다르면 기계적 강도는 일정하지 않음을 의미한다. 따라서, 동일한 공정이라도 장비와 분말이 달라지면 적층소재의 기계적 강도를 재평가해야만 할 것으로 판단된다.

3) ASTM 요건을 만족하지 못하는 데이터들을 제거하여 분석한 결과, 에너지 밀도가 증감함에 따라 항복, 인장 강도는 감소하고 연신율은 증가하는 경향이 나타났다. 또한, 문헌에서 제시하고 있는 최적 공정 선도와 비교한 결과 ASTM 요건을 만족하지 못하는 데이터들은 최적 공정 선도에 일치하지 않은 결과를 나타내었다. 따라서, 최적 공정 선도를 제시할 경우, 장비와 분말을 특정해야만 적절할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업통산자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20017640)

ORCID: Dongjin Oh: <https://orcid.org/0000-0002-6685-0169>

## Reference

1. Y. M. Wang, T. Voisin, J. T. Mckeown, J. Ye, and N. P. Calta, Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility, *Nat. Mater.* 17 (2018) 63-70. <https://doi.org/10.1038/nmat5021>
2. J. H. Byun and S. M. Cho, Trend of metal 3D printing by Welding, *J. Weld. Join.* 34 (4) (2016) 1-8. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.4.1>
3. D. K Kim and W. Woo, Neutron diffraction measurement of residual stress in high melting point metals processed by 3D printing, *J. Weld. Join.* 36 (6) (2018) 14-20. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.6.3>
4. O. Fergani, A. Bratli Wold, and F. Berto, V. Brotan and M. Bambach, Study of the effect of heat treatment on fatigue crack growth behaviour of 316L stainless steel produced by selective laser melting, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 41 (2018) 1102-1119. <https://doi.org/10.1111/ffe.12755>
5. W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: A review, *J. Mater. Eng. Perf.* 23 (6) (2014) 1917-1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
6. A. Yadollahi and N. Shamsaei, Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities, *Int J. Fatigue.* 98 (2017) 14-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.001>
7. T. H. Lee, M. J. Kang, J. H. Oh, and D. H. Kam,

- Parametric Study of STS 316L deposition with arc and wire additive manufacturing, *J. Weld. Join.* 36(3) (2018) 23-30.  
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.3.4>
8. J. C. Yoon, M. G. Lee, C. Y. Choi, D. H. Kim, M. S. Jeong, Y. J. Choi, and D. H. Kim, Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in 17-4PH Stainless Steels Fabricated by PBF and DED Processes, *J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng.* 17 (2) (2018) 83-88.  
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.2.083>
  9. J. Suryawanshi, K. G. Prashanth, and U. Ramamurty, Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel, *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 696 (2017) 113-121.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.058>
  10. M. Yakout, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis, Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L, *J. Mater. Process Technol.* 266 (2019) 397-420.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.006>
  11. J. J. Lewandowski and M. Seifi, Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties, *Annu. Rev. of Mater. Res.* 46 (2016) 151-186.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024>
  12. M. A. Obeidi, S.M. Ui Mhurchadha, and R. Raghavendra, A. Coway, C. Souto, D. Tormey, I. Ui. Aha and D. Brabazon, Comparison of the porosity and mechanical performance of 316L stainless steel manufactured on different laser powder bed fusion metal additive manufacturing machines, *J. Mater. Res. Technol.* 13 (2021) 2361-2374.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.027>
  13. ASTM E8/E8M-16a, Standard test methods for tension testing of metallic materials, *American Society for Testing and Materials (ASTM)* (2016).
  14. ASTM F3184-16, Standard specification for additive manufacturing stainless steel alloy (UNS S31603) with powder bed fusion, *American Society for Testing and Materials (ASTM)* (2016).
  15. O. O. Salman, F. Brenne, T. Niendorf, J. Eckert, K. G. Prashanth, T. He, and S. Scudino, Impact of the scanning strategy on the mechanical behavior of 316L steel synthesized by selective laser melting, *J. Manuf. Process*, 45 (2019) 255-261.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.010>
  16. P. Yadav, O. Rigo, C. Arvieu, and E. Lacoste, Microstructural and mechanical aspects of AlSi7Mg0.6 alloy related to scanning strategies in L-PBF, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 120 (2022) 6205-6223.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-09127-x>