

# 에너지 제어 용착을 이용한 스테인리스 316L의 적층 특성 및 기계적 물성 평가

양승원<sup>\*,\*\*</sup>, 이협<sup>\*\*</sup>, 심도식<sup>\*.#</sup>

<sup>\*</sup>한국해양대학교, <sup>\*\*</sup>한국생산기술연구원

## Deposition Characteristics and Mechanical Properties of Stainless Steel 316L Fabricated via Directed Energy Deposition

Seung-weon Yang<sup>\*,\*\*</sup>, Hyub Lee<sup>\*\*</sup>, Do-Sik Shim<sup>\*.#</sup>

<sup>\*</sup>Department of Ocean Advanced Materials convergence Eng., Korea Maritime & Ocean University,

<sup>\*\*</sup>Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial technology(KITECH)

(Received 17 November 2020; received in revised form 13 January 2021; accepted 09 April 2021)

### ABSTRACT

Directed energy deposition (DED) is an additive manufacturing technology involving a focused high-power laser or electron beam propagating over the substrate, resulting in melt pool formation while simultaneously supplying metal powder to the melt pool area to deposit the material. DED is performed to repair and strengthen parts in various applications, as it can be easily integrate local area cladding and cross-material deposition. In this study, we characterize stainless steel 316 L parts fabricated via DED based on various deposition conditions and geometries to widen the application of DED. The deposition characteristics are investigated by varying the laser power and powder feed rate. Multilayer deposition with a laser power of 362 W and a powder feed rate of 6.61 g/min indicate a height closest to the design value while affording high surface quality. The microhardness of the specimen increases from the top to the bottom of the deposited area. Tensile tests of specimens with two different deposition directions indicate that horizontally long specimens with respect to a substrate demonstrate a higher ultimate tensile strength and yield strength than vertically long specimens with lower elongation.

**Key Words** : Directed Energy Deposition(DED), Stainless Steel 316L, Hardness(경도), Tensile Properties(인장 특성), Microstructure(미세조직)

## 1. 서 론

적층 제조 공정(additive manufacturing, AM)은 기

존 절삭가공과는 달리 폴리머, 금속, 세라믹 등의 다양한 소재를 한 층씩 쌓아 올려 3차원 형상을 제작하는 공정이다<sup>[1]</sup>.

대표적인 금속 적층 제조 공정으로는 고출력 레이저(laser) 또는 전자빔(electron beam)을 이용해 베드 위에 도포된 금속 분말을 선택적으로 용융 시켜

# Corresponding Author : think@kmou.ac.kr

Tel: +82-51-410-4354, Fax: +82-51-404-4350

적층하는 선택적 용융 적층 방식(powder bed fusion, PBF)과 레이저 또는 전자빔과 금속 분말을 동시에 공급하여 적층하는 에너지 제어 용착 방식(directed energy deposition, DED)이 있다<sup>2, 10)</sup>. 에너지 제어 용착 공정은 고에너지의 레이저 빔을 금속 재료 위에서 이송시키면서 동시에 빔 집속 영역에 금속 분말을 공급함으로써 용융과 급속 냉각 과정을 통해 소재를 적층하는 제조 기술이다. 에너지 제어 용착 공정은 국부 영역 적층과 이종 소재 적층에 용이하여 다양한 응용분야에서 부품 보수(repair) 및 강화(hardfacing)에 활용되고 있으며, 최근에는 기존의 절삭 가공기에 적층 가공기를 결합함으로써 하나의 플랫폼에서 절삭과 적층을 작업할 수 있는 절삭/적층 하이브리드(hybrid) 공정 기술이 주목받고 있다. 하이브리드 공정에서는 일반적으로 적층 소재에 대한 절삭 공정이 동반된다. 용융 후 급속냉각을 거치는 적층 부품은 기존 가공재와는 다른 물리적 특성을 가지고 있다. 따라서 적층 소재에 대한 절삭 공정 최적화를 위해서는 적층 소재의 기계적 물성(mechanical properties)에 대한 면밀한 분석이 선행되어야 한다.

그러나 상용되고 있는 합금 공구강 분말 소재는 매우 제한적이며 분말야금(powder metallurgy)과 적층 제조라는 상이한 공정에 대한 적합성 검증 또한 부족하다<sup>3)</sup>. 금속 분말 적층으로 제조된 부품을 활용하기 위해서는 제조 과정의 신뢰성과 재현성을 보장할 수 있어야 하기 때문에 이에 따라, 적층 제조를 이용한 레이저 적층 공정에 대한 세부 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다<sup>4)</sup>. Seo 등은 AISi12 분말의 에너지 제어 용착 공정 조건에 따른 적층 특성을 분석하였다<sup>5)</sup>. Kim 등은 스테인리스 316L(STS 316L)과 Inconel 718 분말을 이용한 레이저 적층 표면 및 단면 특성을 분석하였다<sup>4)</sup>. Liu 등은 반응표면법(surface response method)을 통해 공정 변수에 따른 기계적 특성을 분석하여 최적 공정 조건을 얻었다<sup>6)</sup>. Lee 등은 층간 온도 및 냉각 시간, 적층 속도, 적층 방향, CTWD(contact tip to work distance) 등의 공정평가를 진행하였으며, 이에 따른 기계적 물성을 평가하여 아크 열원을 이용한 에너지 제어 용착 공정의 적층 제조 적용성을 보여주었다<sup>7)</sup>.

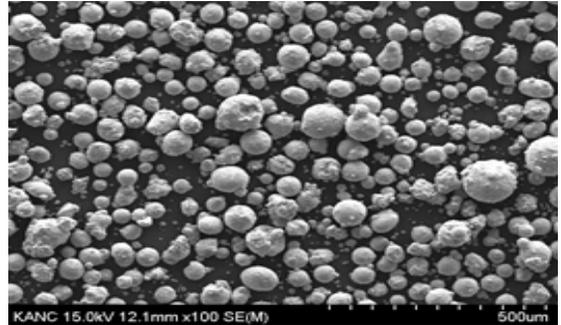


Fig. 1 SEM image of stainless steel 316L powder

본 연구에서는 스테인리스 316L 소재에 대한 에너지 제어 용착 적층 가능성을 검토한 후 적층 시에 나타나는 특성에 대해 관찰하고자 한다. 스테인리스 316L은 내식성과 열영향부의 내입계부식성이 우수하여 부식이 발생하기 쉬운 환경에도 많이 사용되고 있으며<sup>8)</sup>, 고온강도 및 용접한 상태에서 내입계 내식성이 우수하다는 특징이 있다<sup>4)</sup>. 따라서 본 연구에서는 스테인리스 316L 소재에 대한 에너지 제어 용착 적층 가능성을 검토한 후 적층 시에 나타나는 특성에 대해 관찰하고자 한다. 에너지 제어 용착 주요 공정 변수로는 레이저 출력(laser power), 분말 공급량(powder feed rate), 이송 속도(travel speed), 가스 공급량(gas flow rate) 등이 있으며 이러한 공정 변수들의 조합은 적층 형상뿐만 아니라 금속 야금학적 특성에 영향을 준다<sup>5)</sup>. 대표적인 공정 변수인 레이저 출력과 분말공급량에 따른 적층 특성을 관찰하였다. 멀티 레이어(multi-layer) 적층을 통해 적층 형상과 적층 시 나타날 수 있는 결함을 관찰하였으며, 설계 높이와 최종 적층 높이의 비교를 통해 스테인리스 316L 분말의 공정 조건을 도출하였다. 또한, 적층 방향에 따른 적층 시편의 인장 시험과 경도 시험을 진행하였으며, 이와 함께 미세조직을 관찰하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

본 연구에서는 모재와 금속 분말로 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 316L을 사용하였다.

**Table 1 Chemical composition of stainless steel 316L powder (wt%)**

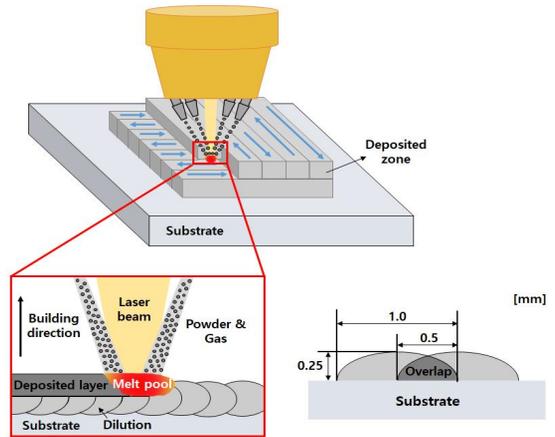
Element	Powder
C	0.011
Si	0.56
Mn	1.03
P	0.007
S	0.007
Ni	10.38
Cr	17.04
Mo	2.41
Cu	0.03

Fig. 1은 TLS社(독일)에서 공급하는 스테인리스 316L 분말의 형태를 보여주며, 지름은 53~130 μm이다. 금속 분말에 대한 유도 결합 플라즈마 질량 분석(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP) 진행 후, 이에 대한 화학적 조성비를 Table 1에 나타내었다. 모재(substrate)는 금속 분말과 동일한 소재로, 길이 100 mm, 너비 100 mm, 그리고 두께 10 mm의 사각 블록을 사용하였다.

## 2.2 에너지 제어 용착(directed energy deposition)

본 연구에 사용된 레이저 에너지 제어 용착 장비인 Hybrid DED 3D printer LENS System 장비는 Optomec社(USA)에서 개발되었으며, 공정 개념도(Fig. 2)와 함께 실제 장비 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 모재 표면으로 고에너지의 레이저 빔이 조사되어 용융풀(melt pool)을 형성함과 동시에 용융풀에 공급된 분말이 용융과 급속 냉각되면서 설계된 경로를 따라 하나의 층(layer)이 형성된다. 이를 반복함으로써 높이 방향으로 layer by layer 형태로 적층시켜 나간다.

실험에 사용된 장치는 1 kw의 파이버(fiber) 레이저 시스템이 포함되어 있으며, 주축의 3축 이송과 테이블의 2축 회전으로 이루어진 장비이다. 에너지 제어 용착 헤드(head)에는 레이저 광학계를 포함하여 분말 운반 가스를 통해 분말을 분사하는 4개의



**Fig. 2 Schematic diagram of directed laser deposition**

측면 노즐(lateral nozzle)로 구성되며, 분말 공급량은 2개의 분말 호퍼(hopper)를 갖는 분말 공급 장치(powder feeder)를 통해 조절 가능하다. 공정 중 산화 방지를 위해 에너지 제어 용착 헤드 중심부에서 레이저빔과 동축으로 불활성 기체인 아르곤(Argon)을 분사하며, 분말 운반 가스 역시 아르곤을 사용한다. 광학계를 거쳐 모재에 입사되는 레이저 빔의 반치폭(FWHM) 직경은 1.0 mm이며, 모재 표면으로부터 9.6 mm 떨어진 노즐에서 분사된 분말이 용융풀 영역으로 공급된다.

## 2.3 공정 조건

스테인리스 316L 분말의 적층 특성을 관찰하기 위한 공정 변수 범위를 Table 2에 나타내었다. 한 층의 적층 두께(layer thickness)는 0.25 mm이며, 비드 폭의 50%를 중첩하여 0° 방향으로 스캔을 시작하여 비드 폭의 50%(0.5 mm)를 중첩하도록 Zigzag 방법으로 스캔하며, 각 층마다 스캔 방향을 90°로 회전시켜, 각 층의 스캔 각도가 0° - 90° - 180° - 270°의 순서로 반복되도록 z축 방향으로 적층한다. 에너지 제어 용착 공정 중 레이저 조사에 의해 공급되는 에너지는 모재에 용융풀을 형성하고 공급되는 금속 분말을 용융시킬 수 있을 만큼 충분해야 한다.

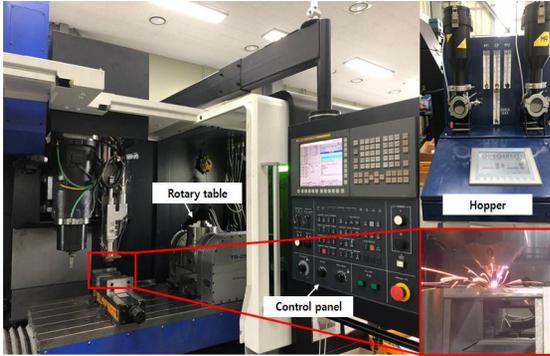


Fig. 3 Hybrid DED 3D printer used for experiments

Table 2 Processing conditions

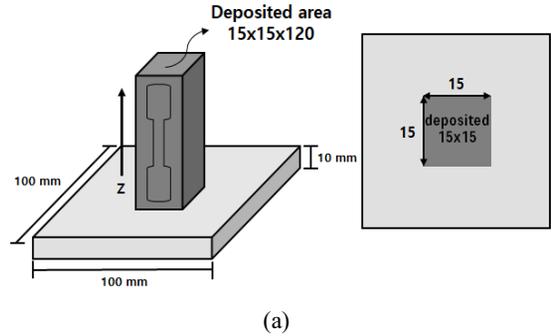
Process parameter	
Laser power (W)	248, 306, 362, 414, 473, 552, 602
Powder feed rate (g/min)	6.61, 8.3, 10.1, 11.8
Travel speed (mm/min)	1000
Powder gas (l/min)	7
Coaxial gas (l/min)	30

이를 좌우하는 주요 물리량은 에너지 플루언스 (energy fluence), 단위 면적당 분말 공급량이며, 이는 레이저 출력, 빔 직경, 이송 속도, 분말 공급량 등의 공정변수에 의해 결정된다<sup>[5]</sup>. 에너지 밀도와 분말 공급 밀도는 각각 아래의 식(1)과 (2)로 표현된다. 여기서 P는 레이저출력 (J/sec),  $D_b$ 는 레이저 빔의 직경(mm), V는 이송 속도(mm/sec), 그리고 G는 분말 공급량(g/sec)을 나타낸다.

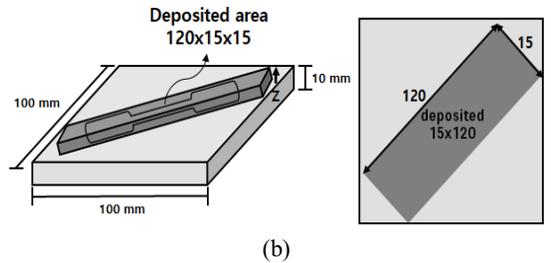
$$E(J/mm^2) = \frac{P}{D_b \times V} \quad (1)$$

$$F(g/mm^2) = \frac{G}{D_b \times V} \quad (2)$$

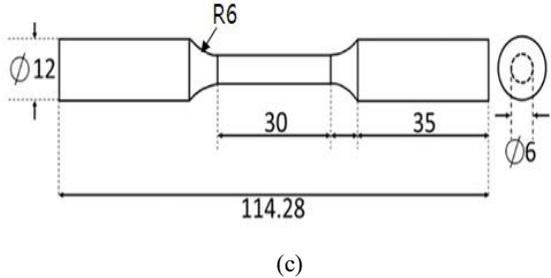
본 연구에서는 레이저 출력과 분말 공급량을 공정변수로 설정하여 멀티 레이어 적층을 통해 안정된 적층 형상과 결함이 없는 최적 공정 조건을 탐색하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Preparation of (a) vertical tensile specimens, (b) parallel specimen, and (c) specimen dimensions (unit: mm)

## 2.4 시험편 전처리 및 시험 방법

Fig. 4는 인장 시험편 제작을 위해서 모재에 스테인리스 316L 금속 분말을 적층하여 제작되는 샘플에 대한 모식도이다. 인장 시험편은 모재에 대한 적층 방향을 고려하여 2가지 형태로 제작하였다. 동일부피 시험편에 대해 단면적 15×15 mm<sup>2</sup>을 높이 방향으로 120 mm 적층한 시험편(Fig. 4(a))과 단면적 120×15 mm<sup>2</sup>을 높이 방향으로 15 mm 적층한 시험편(Fig. 4(b))으로 구분하였다. 이러한 두 가지 형태의 시험편은 인장 방향에 대한 상대적 적층 방향의 영향을 알아보기 위함이다.

인장 시험은 Shimadzu 社의 AGS-X 300KN 장비를 사용하여 5 mm/min 속도로 진행되었다. 각 조건당 5회의 반복 실험을 진행하였으며, 실험 결과는 이들의 평균값으로 나타내었다. 또한 주사전자현미경(SEM, FEI Hong Kong Company 社 NNS-450)을 이용하여 인장시편의 파단면을 관찰하였다. 경도 시험편은 13×13×13 mm<sup>3</sup>의 크기로 제작되었다. 경도 시험은 마이크로 비커스(micro-Vickers) 경도기(Duramin-40)를 이용하였으며, 각 조건당 3회의 반복 실험을 진행하였고 동일한 9개의 수평 위치에서 수직 방향으로 25번 측정하였다. 하중은 0.5 kgf, 하중 시간 10초로 설정하였다.

시험편 전처리를 위해, #220~#2000의 SiC 연마지와 3, 1 μm 연마천을 사용하여 시편의 표면을 연마하였으며, 광학현미경(ZEISS Vert.A1)을 통해 표면 결함을 관찰하였다. 시편 에칭을 위해 HCl 5 ml, HNO<sub>3</sub> 5 ml, 증류수 15 ml의 혼합액을 사용하여 에칭하였으며, 에칭된 단면의 미세조직은 전자주사현미경을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 멀티 레이어 적층 및 특성 관찰

공정 조건에 따른 적층 형상과 적층 시 나타날 수 있는 결함을 관찰하였다. 시편은 가로 10 mm, 세로 20 mm, 높이 1.5 mm 크기로 적층하였으며, 레이어 슬라이싱 두께(layer slicing thickness)는 0.25 mm로, 전체 6 레이어 적층을 진행하였다. Fig. 5는 적층 조건에 따른 적층 양상 모식도로써 스테인리스 316L 금속 분말로 적층된 영역을 보여준다. 도출한 최적 공정 조건과 그 이외의 조건에서 공정변수 변화에 따라 적층품의 단면에서 관찰되는 적층 품질 양상을 나타내었다. 레이저 출력과 분말 공급량이 모두 높을 경우, 실제 적층 높이가 설계 높이보다 큰 과적층(over-deposition)이 관찰되었다. 두 변수가 모두 낮을 경우, 낮은 에너지 밀도와 낮은 레이저 출력으로 용융되는 분말량이 줄어들게 되며, 공급되는 분말량도 작기 때문에 설계 높이보다 낮게 적층 되었다(under-deposition). 분말 공급량에 비해 레이저 출력이 너무 낮을 경우, 분말이 용

융될 수 있는 에너지가 부족하여 레이어와 레이어 사이의 적층이 이루어지지 않고 점선처럼 적층 경로를 따라 레이어가 분리되는 현상(layer delamination)이 나타났다. 분말 공급량에 비해 레이저 출력이 높을 경우 높은 에너지 밀도로 적층 도중 용융풀이 형성되는 과정에서 가스가 빠져나오지 못하는 키홀(keyhole) 기공이 발생되었다.

적층 조건에 따른 적층 높이를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 레이저 출력이 높아질수록 적층 높이는 증가하였는데, 이는 일정하게 공급되는 분말 양에 대해서 높은 레이저 출력이 가해질수록 많은 양의 분말이 용융되는 것으로 설명된다. 일부 고출력·고분말양 조건에서는 높이 양상이 불안정한 경향을 보이는데, 이는 설계 높이인 1.5 mm를 훨씬 넘어서는 높이 적층으로 인해, 마지막 레이어 적층 시 노즐과 적층 표면 사이의 거리가 가까워지는 것이 영향을 미친 것으로 보인다. 한편, 분말 공급량이 증가할수록 대부분의 조건에서 적층 높이가 증가하는 경향이 나타났으며, 설계 높이인 1.5 mm를 넘어서는 일부 조건에서는 적층 높이가 고분말양 조건에서는 오히려 감소하기도 했는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 설계 높이를 넘어서는 적층 조건에서 적층이 불안정한 양상을 보인 것으로 추정된다.

Fig. 7은 조건에 따른 적층 시편들의 단면을 나타낸다. 각 시편 단면의 좌측 하단에는 사용된 분말 공급량 조건, 실제 적층 높이(mm), 그리고 진밀도(%)를 표시하였다. 모든 조건에서 미세한 기공이 관찰되었으나, 균열(crack)은 관찰되지 않았다.

에너지 제어 용착 공정에서 각 분말에 대한 공정 조건을 선정함에 있어서 여러 가지 요인들을 고려하게 된다. 대표적으로, 설계 높이 대비 실제 적층 높이, 최상단 레이어의 표면 상태, 그리고 기공이나 균열과 같은 내부 결함 존재 여부를 판단하게 된다. 이와 같은 요인을 고려해볼 때, 본 실험을 통해서 레이저 출력 362 W, 분말 공급량 6.61 g/min, 이송 속도 1000 mm/min 조건으로 적층할 경우, 최종 설계 높이 1.5 mm가 구현되었으며, 양호한 적층 표면과 함께 내부의 결함을 최소화시킬 수 있었다. 따라서, 실험에 사용된 분말과 장비에 대한 공정 조건을 Table 3과 같이 선정하였다.

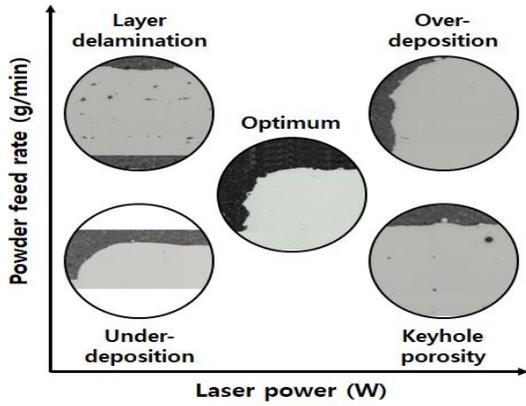
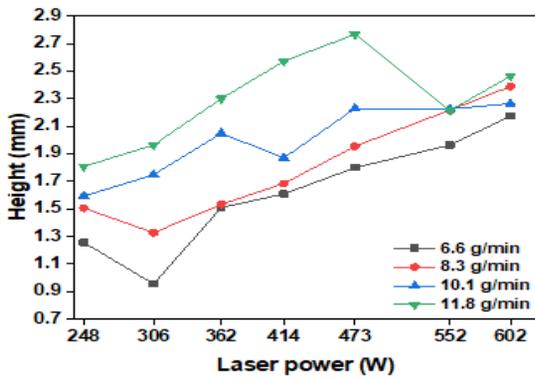
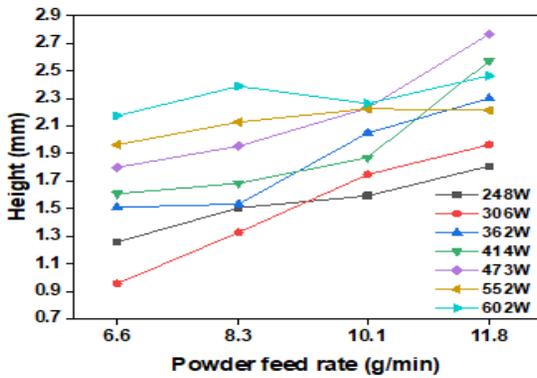


Fig. 5 Schematic Diagram of deposited shapes according to process conditions



(a)

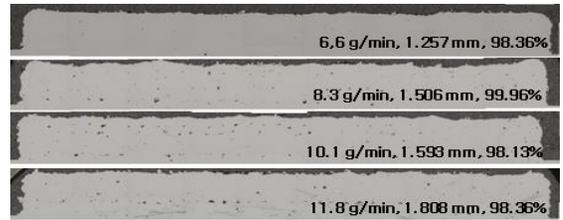


(b)

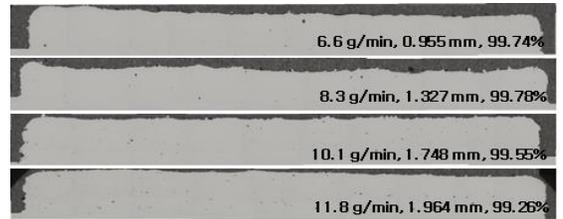
Fig. 6 Deposited heights at different (a) laser powers and, (b) powder feed rates

Table 3 Optimized parameter values for stainless steel 316L powder for the design layer thickness of 0.25 mm

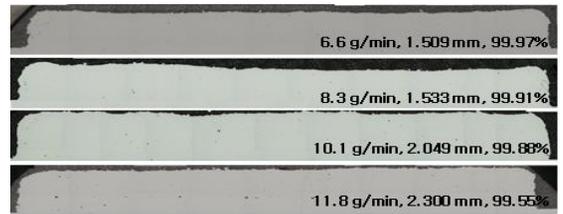
Process parameter	
Laser power (W)	362
Powder feed rate (g/min)	6.6
Laser traverse speed (mm/min)	1000
Powder gas (l/min)	7
Coaxial gas (l/min)	30



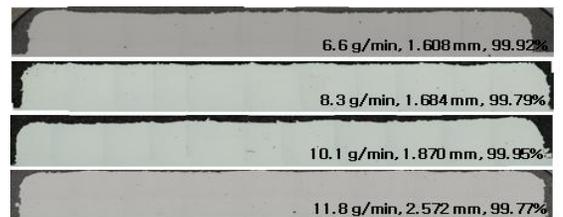
(a)



(b)



(c)



(d)

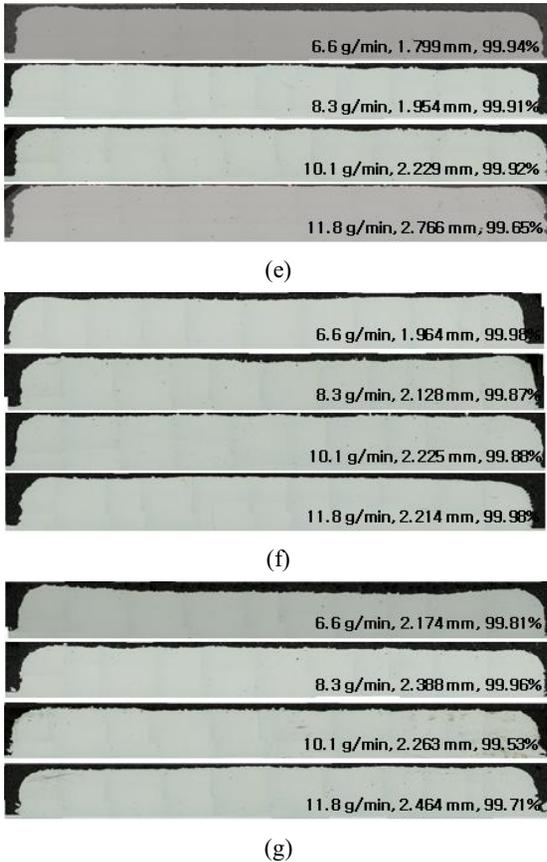


Fig. 7 Cross-sections of deposited regions at different conditions: laser powers of (a) 248W, (b) 306W, (c) 362W, (d) 414W, (e) 473W, (f) 552W, and (g) 602W

### 3.2 마이크로 경도 (Microhardness)

앞서 선정된 스테인리스 316L의 공정 조건을 사용한 적층 시편에 대해 경도 시험을 진행하였다. 적층된 시편 상단에서 0.6 mm 간격으로 수직 방향으로 측정하였으며, 1.2 mm 간격으로 수평 방향의 경도도 측정하였다. 그 결과를 Figs. 8(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 모재의 경도는 202-212 HV로 일반적인 스테인리스 316L의 최대 경도 200 HV와 비슷하게 나타났다. 적층 시편을 높이 방향에 대해 3등분 하여 구분했을 때(Fig. 8(a)), 상단의 경도는 평균 201 HV이며, 적층부 하단의

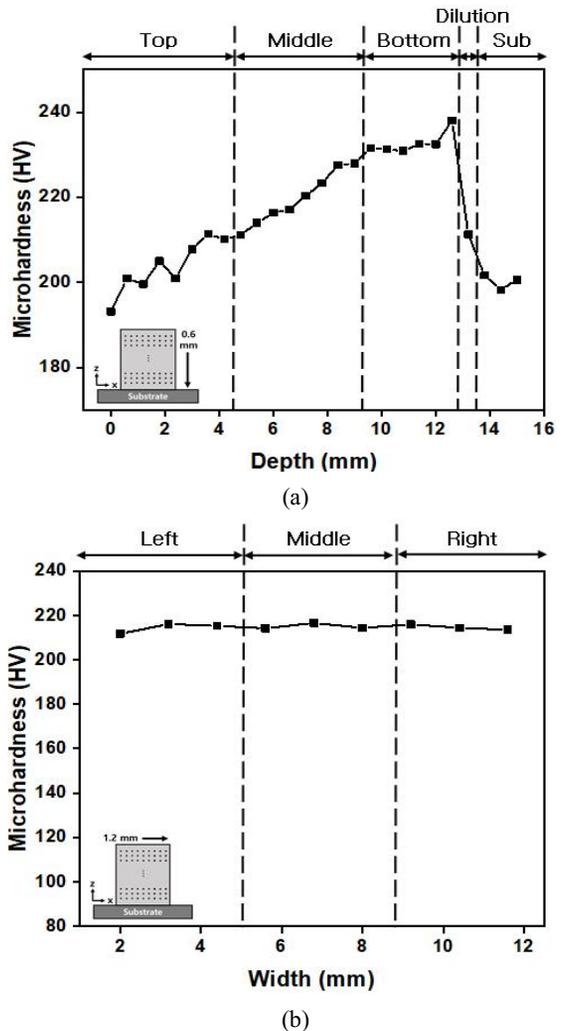
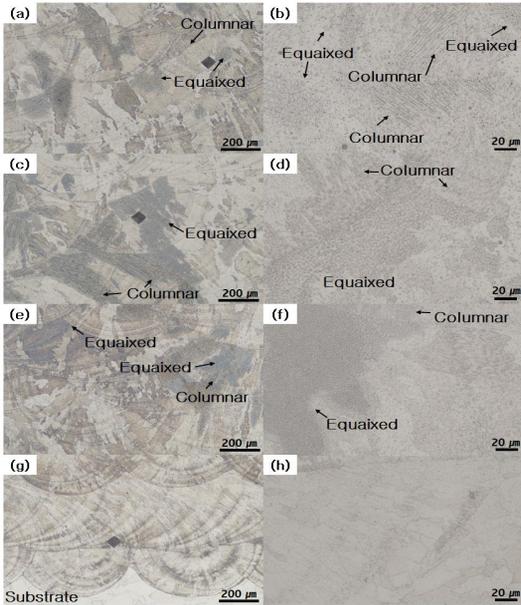


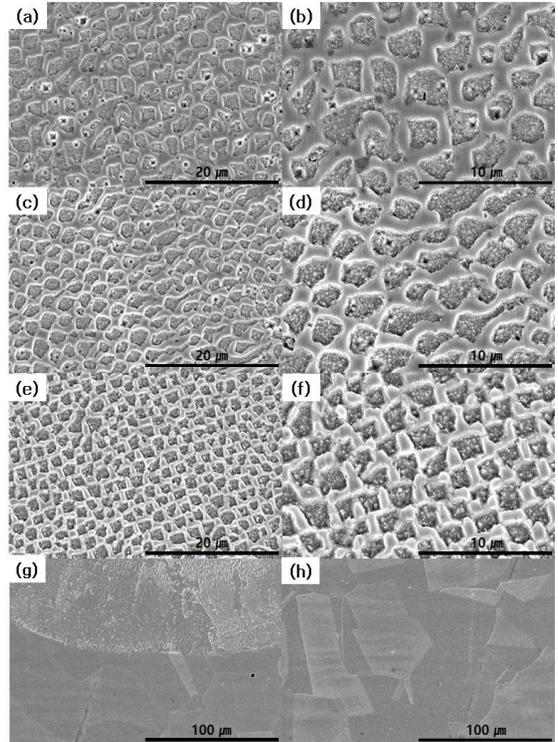
Fig. 8 Hardness distributions in (a) vertical and (b) horizontal directions

경도는 평균 238 HV로, 적층 상단에서 하단으로 갈수록 경도는 증가하였다. 이는 에너지 제어 용착 공정 중에 레이저에 의한 가열 및 냉각 속도가 위치에 따라 다른 것으로 설명된다<sup>[5]</sup>. 한편 적층부 좌측의 경도는 평균 214 HV, 우측의 경도는 평균 212 HV를 보였으며, 편차는 측정 불확도를 고려했을 때 유의미한 차이를 보이지 않았다(Fig.8(b)).



**Fig. 9** OM images of deposited region at different positions: (a-b) top region, (c-d) middle region, (e-f) bottom region, and (g-h) dilution

높이 방향으로의 경도 변화에 대한 원인 분석을 위해 적층부에서의 미세조직(microstructure)을 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 적층 비드(bead) 내 결정립이 주상형(columnar)에서 등축정(equiaxed) 형태로 바뀌는 경향을 보인다. 등축정 결정립은 공정 중에 급속 응고에 의한 균질한 핵 생성이 일어났음을 보여준다. 또한 비드 경계부(bead boundary)에서는 주상형 결정립이 많이 분포하고, 비드 내부에는 등축정 형태의 결정립이 많이 분포하고 있다. 특히, 적층 상단에서 하단으로 갈수록 결정립 크기가 작아지며, 모양도 균일하게 바뀌어 가는 것을 확인할 수 있다. 적층 하단부에서는 적층 과정 중에 모재로 열이 급속하게 빠져나가는 것으로 인해 냉각 속도가 빠르기 때문에 상대적으로 작은 결정립으로 구성된다. 이에 반해 적층 중앙이나 상단에서는 계속해서 적층이 진행되면서 일정량의 입열이 있기 때문에 하부 적층 레이어의 영향으로 열이 빠져나가는 속도가 느려지게 된다. 이러한 적층 높이



**Fig. 10** SEM images of deposited region at different positions: (a-b) top region, (c-d) middle region, (e-f) bottom region, (g) dilution, and (h) substrate

별로 생기는 냉각 속도의 차이에 의해서, 적층 하단부로 갈수록 미세한 등축정 결정립이 주로 분포하게 되고, 이로 인해 적층 하단의 경도가 증가하게 된다. 희석부에서는 주상형과 등축정의 덴드라이트(dendrite)는 발견되지 않았으며, 모재와 비슷한 미세조직을 나타내고 있다.

### 3.3 인장 특성

Fig. 11과 Table 4는 수직 방향과 수평 방향으로 제작된 인장 시험의 결과를 보여준다. 수평 적층 시편의 평균 최대 인장강도는 662 MPa, 항복강도는 496 MPa, 연신율은 51.4 %로 나타났으며, 수직 적층 시편의 평균 최대 인장강도는 615 MPa, 항복강도 376 MPa, 연신율은 58.8 %로 나타났다. 수평 적층 시편이 수직 적층 시편보다 최대 인장강

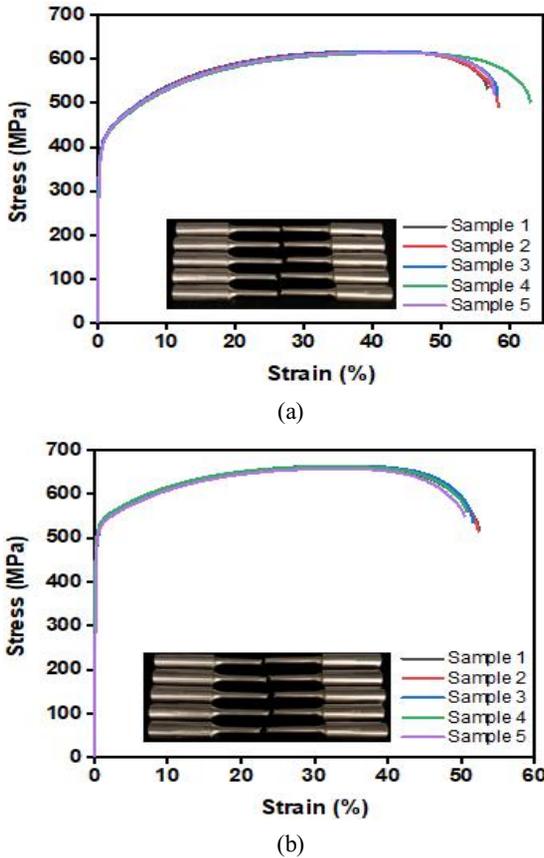
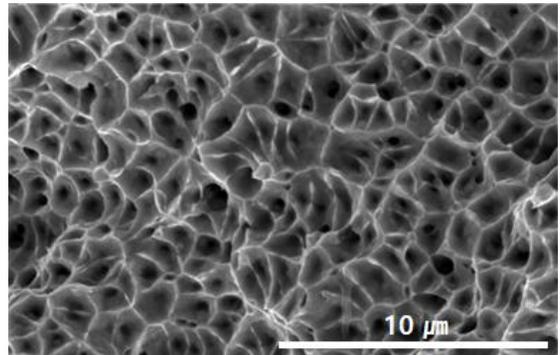


Fig. 11 Stress-strain curves of (a) vertical and (b) parallel specimens

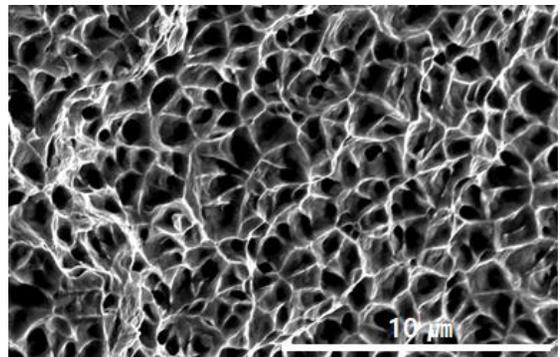
도 47 MPa, 항복강도 120 MPa 높게 나타났으며 연신율은 7.4 % 포인트 낮게 나타났다. 이러한 현상은 Fig. 12에 나타낸 것처럼, 각 방향에 대한 인장 시험 후의 파단면으로부터 알 수 있다. 두 조건의 시편에서 모두 딩플(dimple)이 관찰된 것으로 보아 연성 파괴(ductile fracture)가 발생되었다. 수직 적층 시편의 딩플의 크기가 수평 적층 방향보다 상대적으로 크기가 넓고 깊은 것을 알 수 있는데, 이는 수직 방향으로 제작된 시편이 수평 적층 시편보다 인장강도가 낮음을 뒷받침해준다<sup>[9]</sup>. 적층 방향에 따른 인장 특성은 적층 방향과 인장 방향의 관계에 따른다. 수직으로 적층한 시편의 경우, 인장 하중이 적층된 레이어들을 분리하는 방향으로 수직응력이 작용하게 된다. 따라서, 수평 적층

Table 4 Tensile properties of the STS 316L at vertical and parallel specimens

	Vertical	Parallel
Ultimate Tensile strength (MPa)	615	662
Yield strength (MPa)	376	496
Elongation to failure (%)	58.8	51.4



(a)



(b)

Fig. 12 Fractured surfaces of (a) vertical and (b) parallel specimens

시편에 비해서 상대적으로 낮은 강도를 나타내게 된다. 이러한 적층 방향에 따른 이방성(anisotropy)은 적층 제조를 통한 부품 설계 시에 고려해야 되는 특성이라고 할 수 있다. 즉, 적층 제조된 부품의 주응력(principal stress) 작용 방향을 고려하여, 적층 방향과 방위(orientation)를 결정하여야 할 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 직접 에너지 적층 공정에 스테인리스 316L 분말을 적용하는데 있어 공정 조건에 따른 적층 특성과 적층 제조된 소재의 인장 특성을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 멀티 레이어 적층 시 주요 공정 변수인 레이저 출력과 분말 공급량에 따른 적층 형상을 비교 관찰하였으며, 그 결과 레이저 출력 362 W와 분말 공급량 6.6 g/min의 조건에서 양호한 적층 품질을 얻을 수 있었다.
2. 적층 하단부로 갈수록 결정립 크기가 작아짐을 확인하였고, 이로 인해 경도가 증가함을 확인하였다.
3. 적층 방향에 따른 적층 소재의 인장시험 결과, 수평 적층 시편의 항복강도, 최대 인장강도가 수직 적층 시편보다 높게 나타났으며 연신율은 낮게 나타남을 확인하였다. 이는 적층 방향에 따라 인장 특성이 달라지는 이방성을 의미하며, 적층 방향 또한 하나의 주요 변수가 될 수 있으므로 이에 따른 평가가 필요하다.

이상의 연구로부터 스테인리스 316L 분말 적층의 주요 공정 변수에 대한 조건을 도출하였으며, 이러한 결과를 통해 스테인리스 316L 소재를 활용한 부품 제작을 위한 에너지 제어 용착 공정의 활용 가능성을 확인하였다. 향후 에너지 제어 용착 공정을 이용해 제작된 스테인리스 316L의 열처리 조건에 따른 기계적 특성을 평가하는 연구가 필요로 할 것으로 보인다.

## 후 기

“이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(NO. 20193310100030, 3D 프린팅 공정 제어 및 설계 최적화 기법(DfAM) 적용을 통한 F급 이상의 고효율 냉각터빈 고온부품 기술 개발)과 한국생산기술연구원 기관주요사업 ”Add-on 모듈 탑재를 통한 지능형 뿌리공정 기술개발(kitech EO-20-0017)“의 지원을 받아 수행된 연구임.”

## REFERENCES

1. Oh, W. J., Son, Y., Son, J. Y., Shin, G. W. and Shim. D. S., "Effect of Groove Shapes on Mechanical Properties of STS316L Repaired by Direct Energy Deposition," *Jorunal of Korea society For Technology of Plasticity*, Vol. 29, No. 2, pp. 103-112, 2020.
2. Park, S. H. and Shim, D. S., "Additive Manufacuting Tehcnology & Engineering," Hongpub, pp. 215, 2018.
3. "Development of a High Performance Powder sMaterials for Metal 3D Printing", (2017) [http://www.ndsl.kr/ndsl/commons/uttl/ndslOriginalV](http://www.ndsl.kr/ndsl/commons/uttl/ndslOriginalView.do?dbt=TRKO&cn=TRKO201800002124)iew.do?dbt=TRKO&cn=TRKO201800002124(accessed 17, Dec., 2017)
4. Hwang, J. H., Shin, S. S., Lee, J. H., Kim, S. W. and Kim, H. D., "A Study on Surface and Cross-section Properties Depending on the Process Parameters of Laser Deposition with Metal Powder (SUS 316L and Inconel 718)," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 35, No. 3, pp. 28-34, 2017
5. Seo, J. Y., Yoon, H. S., Lee, K. Y. and Shim. D. S., "Study on Effects of Direct Laser Melting Process Parameters on Deposition Characteristics of ALSi12 powders," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 27, No. 5, pp. 314-322, 2018.
6. Liu, Q., Wang, Y., Zheng, H., Tang, K., Li, H., & Gong, S., "TC17 titanium alloy laser melting deposition repair process and properties," *Optics & Laser Technology*, Vol. 82, pp. 1-9, 2016.
7. Lee, T. H., Kang, M. J., Oh, J. H., Kam, D. H., "Parametric Study of STS 316L Deposition with Arc and Wire Additive Manufacturing," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 36, No. 3, pp. 23-30, 2018.
8. Ro, J. S., Sanseong, C. H., Umarov, R., Pyun, Y. S. and Amanov, A., "A Study on the Effect of UNSM Treatment on the Mechanical and Tribological Properties of STS 316L Printed by

- Selective Laser Melting," Tribology and Lubricants, Vol. 34, No. 6, pp. 270-278, 2018.
9. Oh, D. G., Kang, Y. J., Kim, G. D., Park, S. Y., and Song, S. W., "Effect of HIP Process and Fatigue Performance for SS 316L Manufactured by PBF," Journal of Welding and Joining, Vol. 38, No. 1, pp. 469-474. 2020.
  10. Lee, I. H., Kim, H. C., and Ahn, D. G., "Korean Terminologies for Additive Manufacturing according to the ISO/ASTM 52900 Standard," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 37, No. 12, pp. 929-936, 2020.