

# Powder Bed Fusion 방식 금속 적층 제조 방식 기술 분석

황인석\*, 신창섭\*<sup>#</sup>

\*충북대학교 바이오시스템공학과

## Status Quo of Powder Bed Fusion Metal Additive Manufacturing Technologies

In-Seok Hwang\*, Chang-Seop Shin\*<sup>#</sup>

\*Department of Biosystems Engineering, Chungbuk National University.

(Received 30 May 2022; received in revised form 16 June 2022; accepted 24 June 2022)

### ABSTRACT

Recently, metal additive manufacturing (AM) is being investigated as a new manufacturing technology. In metal AM, powder bed fusion (PBF) is a promising technology that can be used to manufacture small and complex metallic components by selectively fusing each powder layer using an energy source such as laser or an electron beam. PBF includes selective laser melting (SLM) and electron beam melting (EBM). SLM uses high power-density laser to melt and fuse metal powders. EBM is similar to SLM but melts metals using an electron beam. When these processes are applied, the mechanical properties and microstructures change due to the many parameters involved. Therefore, this study is conducted to investigate the effects of the parameters on the mechanical properties and microstructures such that the processes can be performed more economically and efficiently.

**Keywords** : Metal Additive Manufacturing(금속적층제조), Powder Bed Fusion(분말 소결), Selective Laser Melting(선택적 레이저 용융), Electron Beam Melting(전자빔 용해)

### 1. 서 론

전통적인 금속가공 방법에는 압연, 단조, 절삭, 압출 등의 방법이 있다<sup>[1]</sup>. 적층제조기술은 3차원 물체를 만들어 내기 위해 원료를 여러 층으로 쌓거나 결합시키는 기술이다. 입체 (3D) 프린팅이 작동하는 방식으로 즉, 모든 입체 (3D) 프린터는 컴퓨터의 지시에 따라 원료를 층 (layer)으로 겹쳐 쌓아서 3차원

의 물체를 만들어 낸다. 고체의 열가소성 플라스틱, 금속 분말, 모래 등의 재료를 이용한다. 제품화 단계에서 금형을 제작하는 등 중간 과정이 전혀 필요 없다. 따라서, 즉각적인 수정 작업이 가능해 제품의 개발 주기 및 비용의 효율성을 높여 준다.

또한 기존 전통 방식으로 제조가 불가능한 특수한 형상을 설계하고 제조할 수 있다. 하지만 아직은 관련 장비 및 재료가격이 비싸고 대량생산이 힘들다는 한계가 있다.

다기종 소량 생산 방식의 노지 작업용 농업기계 관련 연구<sup>[2-9]</sup> 중 부품 생산에 활용이 될 수 있으면

# Corresponding Author : [shinchang7@cbnu.ac.kr](mailto:shinchang7@cbnu.ac.kr)

Tel: +82-43-261-2584, Fax: +82-43-271-4413

경제성 측면에서 유리할 수 있다.

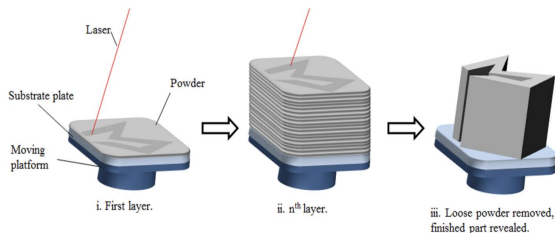
본 논문에서는 금속 적층제조기술의 공정 중 Selective Laser Melting(SLM), Electron Beam Melting(EBM)에 있어 공정의 parameter가 재료의 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

## 2. 분말 소결 공정

### 2.1 Selective laser melting

SLM은 AM 공정 중에서 가장 널리 사용되는 Powder bed fusion processes 중 하나이다. 이름에서 알 수 있듯이 SLM은 금속 분말을 녹이고 융합하는 레이저를 사용한다. 파이버 레이저(fiber laser)를 에너지원으로 사용하고 공정은 불활성 가스로 채워진 챔버(chamber)에서 수행된다. 얇은 분말 층이 기관 또는 이전에 침전된 층 위에 침전되고 레이저 빔이 용해되어 분말 입자를 선택적으로 융합한다. 결합이 없는 부품을 제작하려면 여러 공정 한도를 잘 조정해야 한다. 중요한 공정 parameter는 레이저 출력, 레이저 스캔 속도, 해치 거리, 해치 오버랩, 해치 스타일 등이며, 부품의 기계적 특성에도 상당한 영향을 미친다.

SLM 분말은 단일 재료 분말 또는 합금 분말의 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 단일 재료 분말은 순수 티타늄과 같은 한 종류의 금속으로 구성된다. 이 경우 거의 100%의 부품 밀도가 나타나지만, 높은 열 응력으로 인해 균열이 발생할 수 있다. 합금 분말은 Ti-6Al-4V와 같은 합금 재료와 강철 분말로



**Fig. 1 Concept of SLM process. (i) High-power laser melts selective areas of the powder bed. (ii) Process is repeated for successive layers. (iii) Loose powder removed and finished part revealed<sup>[10]</sup>**

구성된다. SLM의 큰 장점은 티타늄, 알루미늄, 구리 등 비철 금속을 가공할 수 있다는 것이다. 하지만, 공정에서 높은 에너지를 사용하기 때문에 부품 수축과 함께 용융점의 불안정성 문제가 발생한다.

### 2.2 Electron beam melting

EBM은 SLM 공정과 매우 유사하다. 그러나 EBM 공정은 SLM 공정과 몇 가지 차이가 있다. 전자빔은 레이저 대신 분말 입자를 녹이고 융합하는데 사용된다. 파우더 베드는 고온으로 유지되며, 빌드 작업 완료 후 파우더 베드를 냉각하기 위해 하루 정도의 냉각 시간이 필요하다. EBM 공정에는 빔 파워, 빔 스캐닝 속도, 빔 포커스, 빔 직경, 빔 라인 간격, 플레이트 온도, 예열 온도 및 스캔 방법을 포함한 더 많은 공정 parameter가 포함된다. 공정 parameter의 최적화는 SLM 공정보다 어렵기 때문에 제한된 재료만 사용된다. Zn, Mg, Pb, Bi 등 휘발성 성분을 가진 합금은 폭발할 가능성이 있어 가공하지 않는 것이 좋다. EBM 공정은 다소 느리고 부품을 만드는데 많은 비용이 든다. 또한, 구조에 따라 제한적이다. 그러나, 기관보다 더 큰 크기의 부품을 제작할 수 있다. 단, 부품의 초기 층의 크기는 기관의 크기보다 작아야 한다. EBM 공정은 SLM 공정과 달리 진공상태에서 이루어진다. 따라서, 부품의 산화는 일반적으로 방지된다. 또한, EBM 공정은 porosity를 형성하지 않는다.

## 3. Selective Laser Melting

### 3.1 Build orientation

표본은 다양한 적층 방향 즉, Fig. 2(a)와 같이 수직(90°), 수평(0°), 45°로 제작되었다. 잔류 응력은 각 적층 방향에 대해 5개의 다른 지점 (Fig. 2(b))에서 측정된 값이다.

인장 시험에 대한 SLM 및 가공된 316L 스테인리스강 시료의 반응은 Table 1에 요약되어 있다. 모든 제조 방향에서 SLM 표본에 대해 유사한 항복 강도가 나타나 있으며 범위는 520MPa (수직) ~ 577MPa (수평)이다. 가공된 316L의 항복 강도 (320MPa)는 다른 SLM 표본의 강도보다 상당히 낮다.

**Table 1 Summary mechanical properties determined for specimens herein<sup>[3]</sup>**

Specimen	Yield strength(Mpa)	Ultimate tensile strength(Mpa)	Elongation(%)
vertical	520	620	75
Horizontal	577	688	65
45°	536	660	62
Wrought	331	641	70

그러나 가공된 316L에 대한 최종 인장 강도 (UTS) 는 수평, 45° 및 수직 표본과 평균 620~688 MPa 범위에서 유사하다. 모든 316L 스테인리스강 시료는 62% 이상의 연신율로 좋은 연성을 보였으며 SLM의 적층 방향 전체에 걸쳐 약간의 편차가 있다.

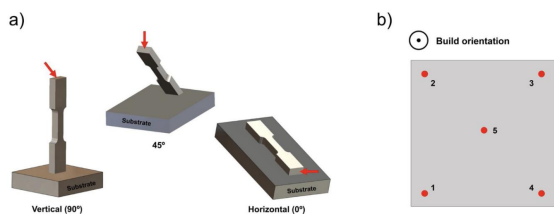
Fig. 3과 같이 각 316L 스테인리스강 표본에 대하여 잔류 응력이 나타났으며 수평 ( $-160.6 \pm 47.8$  MPa)과 수직 ( $-112.5 \pm 32.5$  MPa) 표본은 압축응력이 나타났다. 반면에 45° ( $183.7 \pm 59$  MPa)표본에 대해 인장 잔류 응력이 나타났다.

SEM 분석에서 수집한 이미지에서 Fig. 4에서 나타난 것과 같이 316L 스테인리스강 표본의 적층 방향에 따라 입자 형태와 크기가 달라진다. 수평표본 (Fig. 4(b))에서는 긴 알갱이가 나타나고, 수직표본

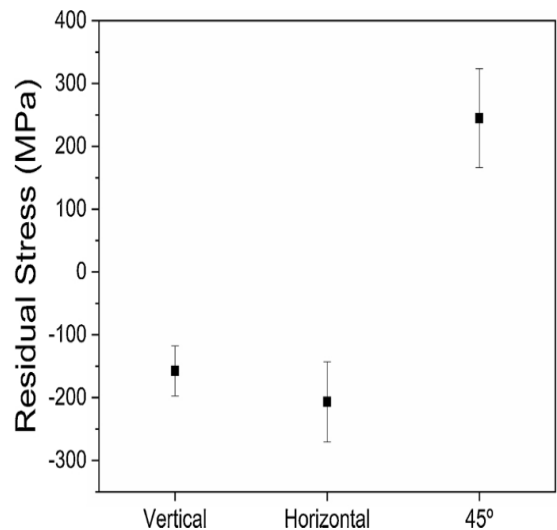
(Fig. 4(a))과 45°표본 (Fig. 4(c))에서는 더 작은 알갱이가 나타난다. Fig. 4와 같이 모든 표본에서 AM 합금의 일반적인 결함인 다공성이 있다.

일반적으로 이 다공성은 가공된 316L 스테인리스강 구성 요소에는 존재하지 않는다. 가공된 316L SEM 영상촬영 (Fig. 4(d))에서 검출된 검은 점은 이 합금에서 일반적으로 관찰되는 황화망간 (MnS) 포함물이다.

SLM 316L 스테인리스강 표본과 그 가공품에 대한 미세구조 영상도 EBSD (Fig. 5)이 나타나 있다. 45° SLM 316L 스테인리스강 시료는 수직, 수평 방향에 비해 작은 알갱이가 검출되었다<sup>[11]</sup>.



**Fig. 2 (a) Build orientations studied for selective laser melted 316L tensile specimen produced: vertical (90°), horizontal (0°) and 45° relative to build substrate. The red arrows highlight the cross-sections utilised for microstructure characterisation and polarisation testing for each tensile specimen. (b) Points gauged to obtain the average residual stress value for each build orientation specimen<sup>[3]</sup>**



**Fig. 3 Residual stress measured for the selective laser melted 316L specimens in their as-built state as a function build orientation<sup>[11]</sup>**

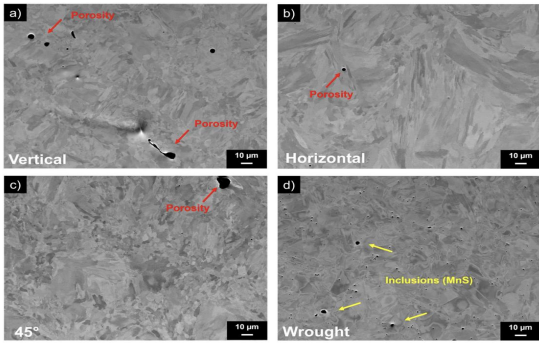


Fig. 4 Secondary electron micrographs for the 316L stainless steel samples. (a) vertical orientation, (b) horizontal orientation, (c) 45° orientation<sup>[11]</sup>

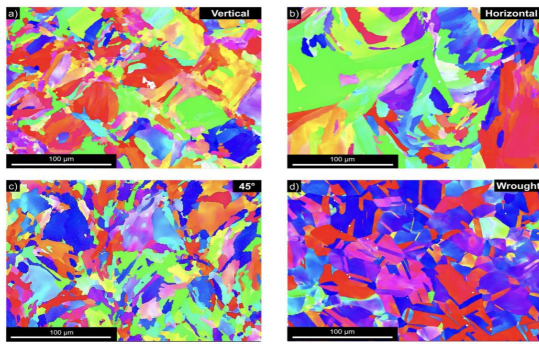


Fig. 5 Electron backscatter diffraction with unique grain colour images for the 316L stainless steel samples. (a) vertical orientation, (b) horizontal orientation, (c) 45° orientation, and, (d) wrought 316L<sup>[11]</sup>

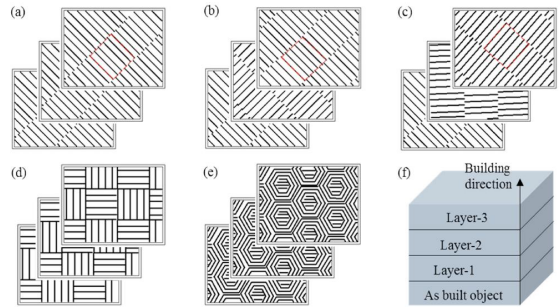


Fig. 6 Schematic diagram of scanning strategies (a)S1; (b)S2; (c)S3; (d)S4; (e)S5; (f)building direction<sup>[4]</sup>

### 3.2 Scanning strategy

SLM 공정 중 부분 스캔 방법 (island scanning strategy)은 SLM 제작 부품 내에서 잔류 응력이 낮아지고 기계적 특성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. SLM 제작 표본의 성능에 대한 계층 간 다른 회전 각과 하위 영역의 스캔 패턴의 영향을 알기 위해 5개의 스캔 방법을 나타냈다.

Table 2와 같이 표본 S1, S2, S3, S4은 2000 μm x 2000 μm 크기의 직사각형 패턴이고 표본 S5에는 대각선 길이가 2000 μm인 육각 패턴이다. S1, S2, S3의 인접 층간의 스캔 방향은 연속된 층 사이의 다른 회전 각도(0°, 90°, 47°)로 평행하다. S4의 인접 층의 스캔 방향은 회전 없이 교대로 진행된다. 두 층 사이의 회전은 시계 반대 방향을 따라 진행된다.

Table 2 Scanning strategies<sup>[12]</sup>

Number	Scanning pattern	Scanning direction	Rotation angle
S1	Rectangle	parallel	0°
S2	Rectangle	parallel	90°
S3	Rectangle	parallel	47°
S4	Rectangle	Alternating	0°
S5	Hexagon	Inside to out	0°

S5의 스캔 방향은 안쪽에서 바깥쪽이다.

다섯 가지 스캔 방법에 따른 인장 곡선은 Fig. 7에 나타나 있다. S1, S2, S3의 인장 곡선은 탄성 변형이 생기는 강도가 유사하지만 인장 강도 및 연성이 일정하지 않아 스캔 방법이 재료의 인장 특성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. S3는 인장 강도 및 연성이 가장 높다. 두 번째로 좋은 것은 S5이고 제일 안좋은 것은 S4이다. 다른 스캔 방법과 비교하여 S3의 스캔 방법(47°의 층간 회전각)은 시료의 인장 특성 개선에 영향을 미치는 것으로 보여진다. 일반적으로 강도-연성 균형으로 인해 재료의 강도는 증가하지만 재료의 연성은 감소시키는 경

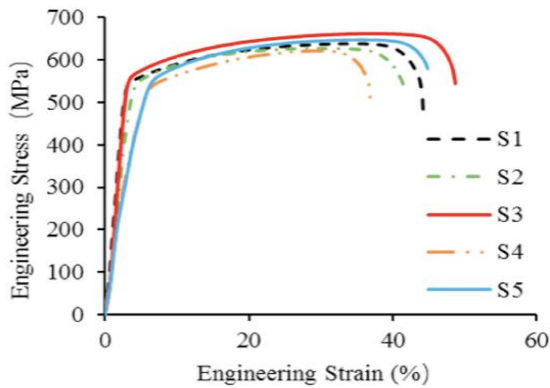


Fig. 7 Tensile curves under different scanning strategies<sup>[12]</sup>

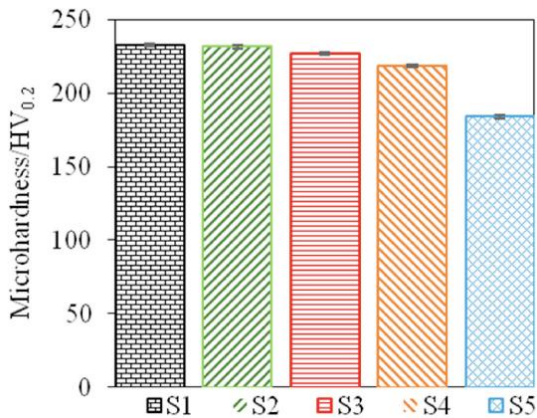


Fig. 8 Average vickers hardness under different scanning strategies<sup>[12]</sup>

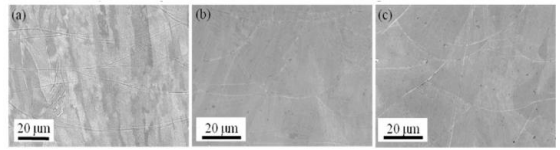


Fig. 9 Cross-section morphology at 800x magnification (a)S1; (b)S2; (c)S3<sup>[12]</sup>

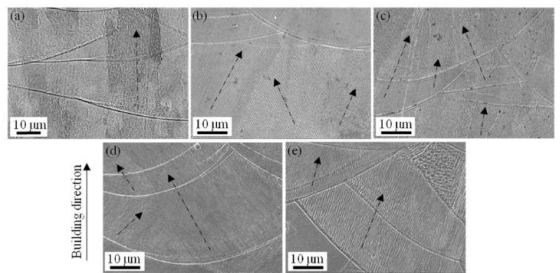


Fig. 10 Microstructure morphology at 2000x magnification (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) S5<sup>[12]</sup>

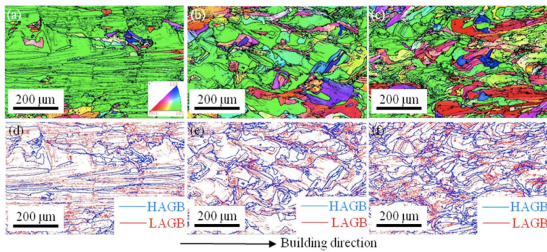
향이 있다. 하지만, S3는 고강도 및 고연성을 모두 가지고 있다.

5개 표본의 평균 미소 경도는 Fig. 8에 나타나 있다. S1, S2, S3의 평균 미소 경도 값은 유사하고 높은 반면 S4의 미소 경도 값은 조금 낮았지만 앞의 세 값과 비슷하다. 하지만, S5의 평균 미소 경도 값은 가장 낮았다. 직사각형 패턴을 사용하는 스캔 방법이 육각형 패턴보다 높은 미소 경도를 얻을 수 있음을 보여준다.

다른 회전각을 가진 표본의 단면 형태는 Fig. 8에 나와 있다. Fig. 9에서 S1의 용융지 폭 (molten pool width)은 S2 및 S3의 폭보다 크다. 이는 두 층 사이의 회전이 용융지의 열 유동장을 변화시켰음을 보여준다.

Fig. 10는 5개 표본의 미세 구조이다. 주로 주상 구조와 미세한 세포 구조로 이루어져 있다. Fig. 10(a)에서 주상 구조는 S1의 적층 방향을 따라 성장하는 반면 S2의 주상 구조는 적층 방향과 일치하지 않는다. S3 내에서 주상 구조의 성장 방향은 Fig. 10(c)와 같이 더욱 무질서하다. SLM 제작 표본 내 미세 구조의 성장 방향은 용융지의 열 전달 방향에 영향을 받으며, 이는 레이저의 스캔 방향을





**Fig. 11 EBSD mapping indicating grain morphology and orientation of SLM-built samples (a) S1; (b) S2; (c) S3<sup>[12]</sup>**

따라가는 열 구배와 적층 방향을 따라가는 열 구배의 조합에 따라 달라진다. 연속된 층 사이에 회전각을 적용할 때, 용융지 내의 열 전달 방향이 이전 층과 다르기 때문에 주상 구조 성장이 바뀐다. S4와 S5의 주상형 성장은 표본들의 적층 방향을 따라가지 않으며, S5의 입자 크기도 다른 것들보다 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 6을 보면 육각형 패턴의 스캔 방법에서 용융지는 단위 면적당 더 많은 에너지를 흡수한다고 추론할 수 있다. 실제로 육각형 패턴을 사용한 스캔 전략 중에 용융지는 많은 양의 열 에너지를 흡수하고 냉각 속도는 느리다. 동시에, 열 흐름의 방향이 지속적으로 변화하여, 무질서한 구조 성장, 빠른 입자 성장률 및 큰 입자 크기를 나타낸다.

SLM 구축 검체의 결정학적 형태를 추가로 나타내기 위해 Fig. 11과 같이 표본 S1, S2 및 S3의 입자 방향, 입자 크기 및 입자 경계를 평가했다. S1의 <101> 방향 입자(녹색)의 비율은 S2 및 S3보다 높으며 S2의 <101> 방향 입자 비율은 S3보다 높다. Fig. 11(a)에서 입자의 주상 성장이 S1의 적층 방향과 일치한다. 그러나 S2와 S3의 입자 성장은 적층 방향과 평행하지 않다. 그 이유는 두 층 사이의 회전이 주상 입자의 상압 성장을 파괴하고 작은 크기와 무작위 방향으로 균등한 입자를 형성하기 쉽기 때문이다. Fig. 11(d), (e) 및 (f)를 비교하여 S3가 S1과 S2보다 더 많은 입자 경계를 가지고 있음을 알 수 있다.

평균 입자 크기와 입자 경계의 분율은 Table 3에 나와 있다. S1의 입자 크기가 가장 크고 S2의 입자 크기가 S3보다 크다. 이것은 두 층 사이의 회전이

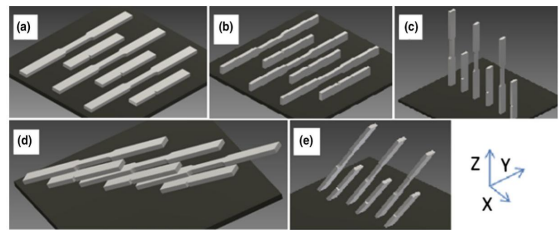
미세조정 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 또한 회전각이 작을수록 입자가 미세해진다. 또한 S1의 입자 경계 면적의 분율은 가장 낮지만 소각 입계면 부분(LAGB, 2° - 10°)이 가장 높다<sup>[12]</sup>.

EBSD 결과에 따르면 S3는 가장 미세한 입자와 가장 많은 입자의 경계를 가지고 있다. 이것은 S3의 고강도 및 연성을 설명하는데 사용될 수 있다<sup>[13]</sup>.

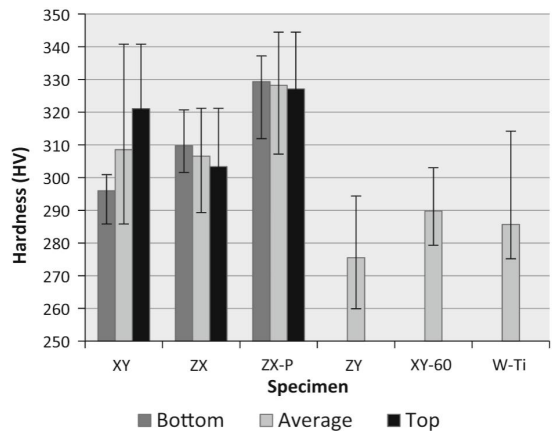
## 4. Electron Beam Melting

### 4.1 Build orientation

EBM 표본은 Fig. 12과 같이 다른 방향으로 제작되었다.



**Fig. 12 Different build orientations studied: (a) XY, (b) ZX, (c) ZY, (d) 30° to XY plane and (e) 60° to XY plane<sup>[14]</sup>**



**Fig. 13 Bar chart showing microhardness (HV) test result for EBM and wrought Ti-6Al-4V. Error bar denotes standard deviation<sup>[6]</sup>**

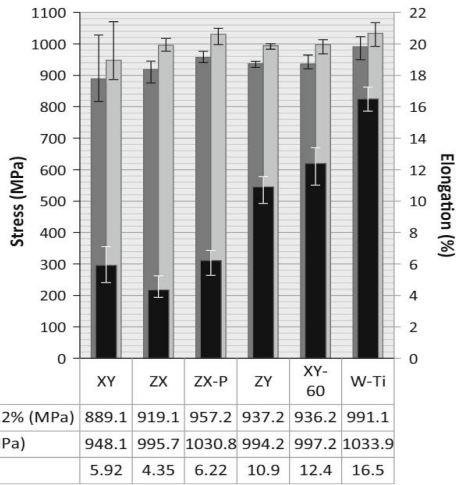


Fig. 14 Bar chart showing tensile test results for EBM and wrought Ti-6Al-4V. Error bar denotes standard deviation<sup>[14]</sup>

Fig. 13은 미세경도 시험으로 수집된 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. EBM 표본은 ZY 표본을 제외한 모든 방향에서 단조보다 높은 경도를 보여 준다. Fig. 14는 모든 표본의 인장 시험 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 빌드 방향이 parameter가 아닌 ZX와 ZX-P (additional preheating step before hatch melting)를 비교하면 미세 구조와 기계적 특성 간의 관계를 확인할 수 있다. ZX-P는 가장 높은 UTS (1030.8MPa)와 YS (957.2MPa)을 나타냈다. ZX의 UTS와 YS는 ZX-P보다 약 40MPa 정도 낮았다. 연신율도 ZX-P가 높았다<sup>[14]</sup>. Fig. 15은 두 가지 모양 (notched and unnotched)과 세 가지 두께를 가진 여섯 개의 서로 다른 시험 표본을 수직 (Z축을 따라)으로 제작해 나타낸 것이다<sup>[15]</sup>.

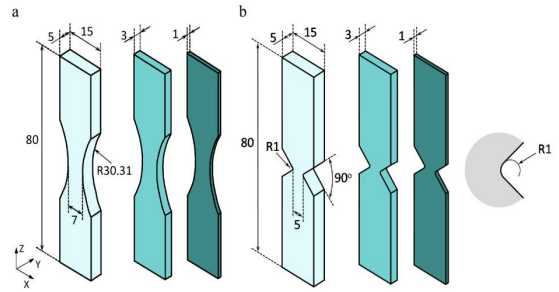


Fig. 15 Geometrical dimensions of the test specimens, (a) unnotched specimens, (b) notched specimens (unit: mm)<sup>[15]</sup>

## 4.2 Build thickness and geometry

### 4.2.1 Microstructure

광학 현미경 검사에서 얻은 서로 다른 세로면 (XZ 및 YZ)과 횡단면(XY)의 EBM 표본의 미세구조는 Fig. 16에 나와 있다. Fig. 16b와 c의 광학 이미지는 적층 방향을 따라 길쭉한 prior  $\beta$  입자<sup>[16]</sup>를 가진 EBM 표본의 기동 미세 구조를 보여준다. Fig. 17의 높은 광도 관찰 결과 EBM 표본에 중요한 불균일 미세 구조가 나타났다. 세 가지 주요 미세 구조(lamella<sup>[17]</sup> 및 basketweave  $\alpha + \beta$  입자와 equiaxed  $\alpha$  입자)가 표본에서 관찰되었다.

Fig. 18은 다양한 두께의 표본 내 서로 다른 미세 구조의 차이를 보여준다. 순단면에서 동일한 두께의 노치 표본과 unnotched 표본의 동일한 미세 구조 때문에, 제시된 결과는 unnotched 표본에서만 선택되었다. 광학 사진에 따르면, lamella 입자는 주로 prior  $\beta$  입자의 경계 주변에 존재하고 basketweave와 equiaxed 입자는 주로 prior 입자의 안쪽 영역에서 관찰되었다. EBM 표본의 두께를 1mm에서 5mm로

Table 3 Average grain size and the fraction of grain boundaries<sup>[12]</sup>

	S1	S2	S3
Grain size, $\mu\text{m}$	24.7	22.8	21.4
Fraction of HAGBs, %	12.4	16.2	17.2
Fraction of LAGBs, %	27.9	25.5	24.6
Fraction of grain boundary area, %	26.9	27.1	35.6

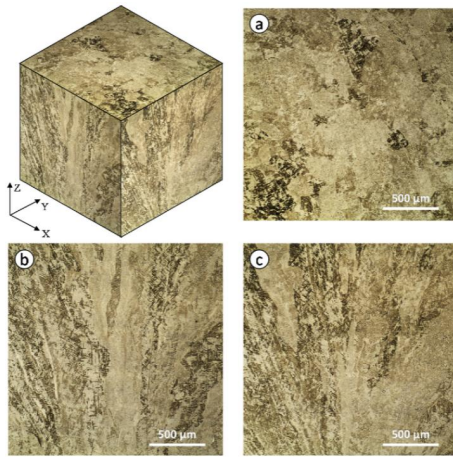


Fig. 16 Microstructure pattern of columnar prior  $\beta$  grains in different sections perpendicular (a) and parallel (b,c) to the build direction (Zaxis)<sup>[15]</sup>

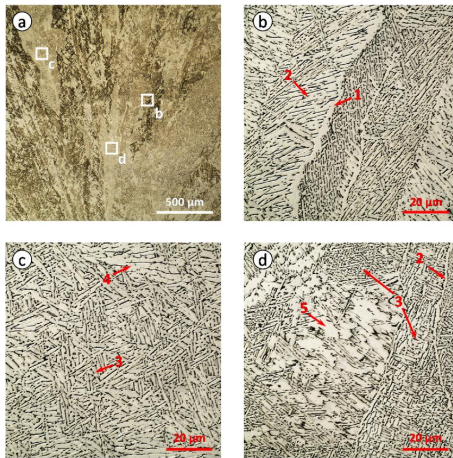


Fig. 17 Representative illustration of various microstructural features within the prior  $\beta$  grains in the specimen with 3mm thickness. The microstructural features are shown by number; (1)  $\alpha$  layer formed at prior  $\beta$  grain boundary, (2)  $\alpha$  lamellar formed along the prior  $\beta$  grain, (3) basketweave morphology including  $\alpha$  colonies, (4) large  $\alpha$  lamellar within the prior grain, (5) equiaxed  $\alpha$  grains<sup>[15]</sup>

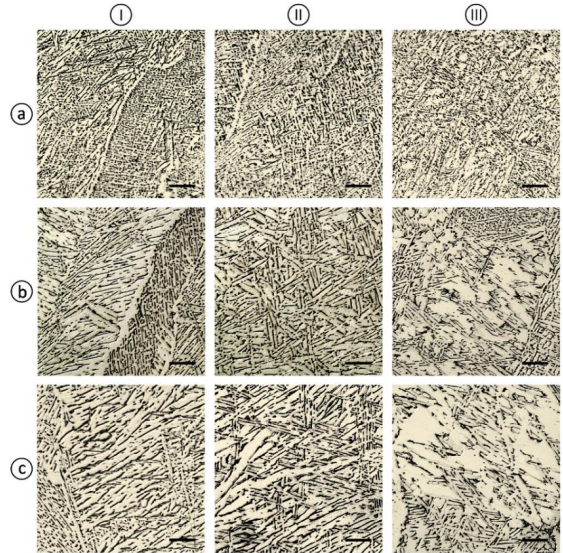


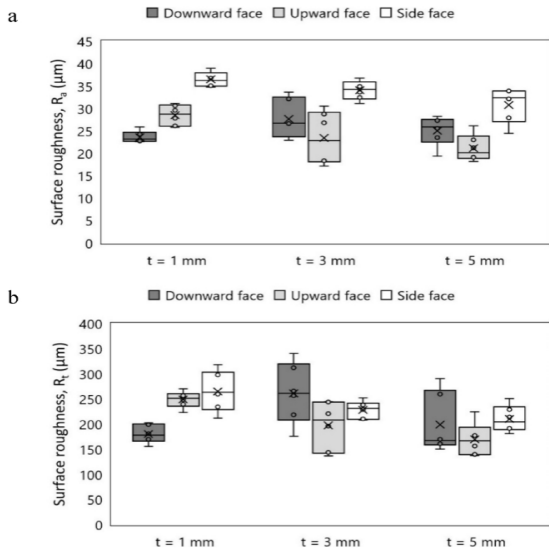
Fig. 18. Comparative illustration of (I) lamellar, (II) basketweave, and (III) large  $\alpha$  grains in the specimens with (a) 1mm thickness, (b) 3mm thickness, and (c) 5mm thickness. (Scale bar = 10  $\mu\text{m}$ )<sup>[15]</sup>

증가시킴으로써  $\alpha$  lamella의 폭과 길이가 증가하는 경향이 있다. 이 경우, basketweave 미세 구조에서 lamella 특징도 관찰되었다. 두께가 3mm에서 5mm로 증가한 후 두꺼운 표본에서 더 큰 미세 구조가 관찰되었다. 이 경우, 광학 사진에서 가장 큰 입자는 Figure 18c에서 보여준다.  $\alpha$  lath 폭 측정은 5, 3, 1mm 제조 두께의 표본에서  $\alpha$  lath 폭에 대한 중앙값 1.9, 1.3 및 0.7  $\mu\text{m}$ 을 밝혀 이전의 관측을 뒷받침한다<sup>[15]</sup>.

#### 4.2.2 Surface roughness

Fig. 19는 제조 두께가 다른 노치형 표본에서 얻은 표면 거칠기 값을 나타낸다. 표면 형태 및 표면 거칠기 결과에 따르면, 표본의 제조 두께가 증가하면 세 면의 표면 거칠기가 낮아졌다. 1mm 제조 두께 표본의 아래 표면은 동일한 시편의 다른 기하학적 구조 및 다른 면에 비해 표면 거칠기 값이 낮았다. 제조 두께가 3mm와 5mm인 시료의 경우, 아래쪽 면은 위쪽 면에 비해  $R_a$ 가 높다<sup>[15]</sup>.

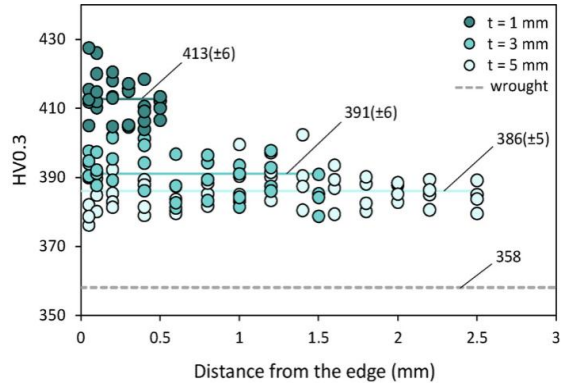




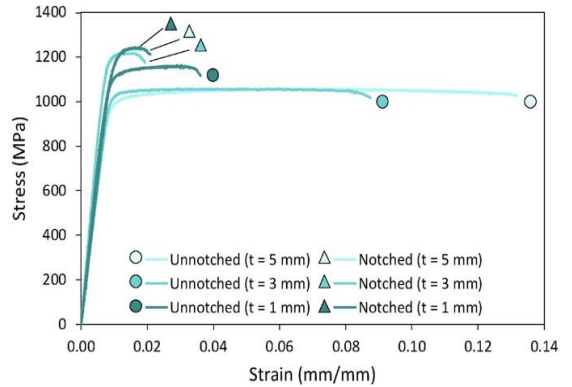
**Fig. 19** Surface roughness of notched EBM specimens; (a) the arithmetic average of the roughness profile,  $R_a$ , (b) the maximum peak to valley height of roughness profile,  $R_t$ <sup>[15]</sup>

**4.2.3 Microhardness**

미세경도 실험의 결과는 Fig. 20에 나타냈다. 실험 데이터에 따르면 EBM 표본은 두께가 1, 3, 5mm인 표본에 대해 각각 평균 미세경도 값이 413, 391 및 386으로 거의 일정한 미세경도 추세를 나타낸다. 1mm 표본에 대한 최대 미세경도 값이 발생한다<sup>[15]</sup>.



**Fig. 20** Microhardness data of EBM specimens compared with wrought material<sup>[15]</sup>



**Fig. 21** Representative monotonic engineering stress-strain curves for the studied geometries<sup>[15]</sup>

**Table 4** Average tensile properties of the tested specimens<sup>[15]</sup>

	Unnotched specimen			Notched specimen		
	t=5mm	t=3mm	t=1mm	t=5mm	t=3mm	t=1mm
Tensile strength, MPa	1046	1065	1161	1224	1219	1239
Elongation at failure, %	12.9	8.9	3.5	1.8	1.9	2.2

#### 4.2.4 Tensile test

Fig. 21은 실험 표본에서 얻은 대표적인 스트레스 변형 곡선을 비교한다. 각 표본에 대해 시험한 표본 3개의 평균 인장 특성은 Table 4에 제시되었다. Unnotched 표본의 실험 결과로 층의 두께가 작을수록 부품의 인장 강도가 약간 높을 뿐 아니라 연신율도 상당히 낮아진다는 것을 알 수 있다<sup>[15]</sup>.

### 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 분말 소결 방식 금속 적층 제조 방식 중 보고되고 있는 SLM, EBM에 있어서 공정의 parameter가 재료의 특성에 미치는 영향에 대한 연구들을 분석하였다. SLM, EBM 모두 공정의 parameter를 최적화하여 강도 및 연성이 향상된 샘플을 얻을 수 있다. 두 공정 모두 적층 방향에 따라 항복강도와 인장강도에 약간의 편차가 있었다. SLM은 수평방향으로 적층했을 때 항복강도와 인장강도가 높은 값이 나타났고, EBM은 수직으로 적층했을 때 항복강도와 인장강도가 높은 값이 나타났다. SLM은 층마다 47°씩 회전하면서 적층할 때 강도와 연성이 좋았다. 이러한 이유는 Low Angle Grain Boundary (LAGB)의 분율이 높은 데에서 기인한 것으로 추정된다. 따라서, LAGB이 SLM 제작시료의 기계적 물성 향상에 기여할 것으로 예상된다. EBM은 제작 두께가 증가함에 따라 연신율이 크게 증가했다.

PBF 공정은 많은 기술 발전이 이루어졌지만, 여러 parameter에 따라 성능은 여전히 개선되어야 한다. 성능을 예측하려면 재료와 각 공정에 대해 많은 지식이 필요하다. parameter에 따라 기계적 물성과 미세구조가 어떻게 변화하는지 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한, PBF 상용화를 위한 연구도 꾸준히 진행되면서, 머지않아 기존 전통 방식으로 제조가 불가능한 특수한 형상을 PBF 방식을 활용하여 우수한 품질로 제조가 가능해지고, PBF 공정은 금속 제조 방식 중 경제적이고 효율적인 금속 가공 방법 중 하나로 되어 농업기계 부품 제조를 포함한 다양한 제품군의 부품 제조 기술 향상에 기여할 것으로 기대된다.

### Acknowledgement

“이 논문은 2019학년도 충북대학교학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2019)”

### REFERENCES

1. Kang, M. C., Ye, D. H. and Go, G. H., “International Development Trend and Technical Issues of Metal Additive Manufacturing,” *Journal of Welding and Joining*, Vol. 34, No. 4, pp. 9-16, 2016.
2. Jang, S. G., Woo, D. G., and Kim, T. H., “Development of Motor-Driven Convenience Equipment for Harvesting Chili Peppers on Bare Ground,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, No. 1, 2020.
3. Song, H. S., and Kim, Y. Y., “Determination of the Properties of the Rubber Mounted Under the Agricultural Tractor Rollover Protective Structure Cabin Using a Hyperelastic Tensile Test and Finite Element Analysis,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, No. 3, 2020.
4. Hwang, S. J., Kim, J. H., and Nam, J. S., “Factorial Experiment for the Collecting Device of an Agricultural By-product Collector,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, No. 3, 2020.
5. Kim, B. S., Han, H. W., and Park, Y. J., “Experimental Analysis of Noise Characteristics of Electric Agricultural Utility Terrain Vehicle Gearbox,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, No. 3, 2020.
6. Saha, K. K., Hossain, A., Hoque, M. A., Jahan, M. A. H. S., Ahmed, S., and Timsina, J., “Development and Performance Evaluation of a Two-Wheeled Power-Tiller Multi-row Weeder,” *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 1, 2021.

7. Shafaei, S. M., Loghavi, M., and Kamgar, S., "Analytical Description of Power Delivery Efficiency of Front Wheel Assist Tractor in Tillage Works," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 3, 2021.
8. Koo, Y. M., and Kang, Y. S., "Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor-Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 46, No. 4, 2021.
9. Jang, S. G., Woo, D. G. and Kim, T. H., "Development of Motor-Driven Convenience Equipment for Harvesting Chili Peppers on Bare Ground," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 45, No. 1, 2020.
10. Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E. and Sing, S. L., "Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications," *Applied Physics Review*, Vol. 2, No. 4, 2015.
11. Sander, G., Babu, A. P., Gao, X., Jiang, D. and Birbilis, N., "On the Effect of Build Orientation and Residual Stress on the Corrosion of 316L Stainless Steel Prepared by Selective Laser Melting," *Corrosion Science*, Vol. 179, 2021.
12. Song, Y., Sun, Q., Guo, K., Wang, X., Liu, J. and Sun, J., "Effect of Scanning Strategies on the Microstructure and Mechanical Behavior of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 793, 2020.
13. Maaß, R., Van Petegem, S., Grolimund, D. and Van Swygenhoven, H., "A Strong Micropillar Containing a Low Angle Grain Boundary," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, No. 13, 2007.
14. Bruno, J., Rochman, A. and Cassar, G., "Effect of Build Orientation of Electron Beam Melting on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 26, pp. 692-703, 2017.
15. Razavi, S. M. J., Van Hooreweder, B. and Berto, F., "Effect of Build Thickness and Geometry on Quasi-static and Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Produced by Electron Beam Melting," *Additive Manufacturing*, Vol. 36, 2020.
16. Neikter, M., Akerfeldt, P., Pederson, R. and Antti, M. L., "Microstructure Characterisation of Ti-6Al-4V from Different Additive Manufacturing Processes," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 258, 2017.
17. Zhang, C., Hu, K., Zheng, M., Zhu, W. and Song, G., "Effect of Surface Nanocrystallization on Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloys with Bimodal and Lamellar Structure," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 813, 2021.