

# Study on the optimization of additive manufacturing process parameters to fabricate high density STS316L alloy and its tensile properties

Yeonghwan Song<sup>†</sup>

Functional Materials and Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gangneung 25440, Korea

(Received December 7, 2023)

(Revised December 14, 2023)

(Accepted December 14, 2023)

**Abstract** To optimize the process parameters of laser powder bed fusion process to fabricate the high density STS316L alloy, the effect of laser power, scanning speed and hatching distance on the relative density was studied. Tensile properties of additively manufactured STS316L alloy using optimized parameters was also evaluated according to the build direction. As a result of additive manufacturing process under the energy density of 55.6 J/mm<sup>3</sup>, 83.3 J/mm<sup>3</sup> and 111.1 J/mm<sup>3</sup>, high density STS316L specimens was suitably fabricated when the energy density, power and scan speed were 83.3 J/mm<sup>3</sup>, 225 W and 1000 mm/s, respectively. The yield strength, ultimate tensile strength, and elongation of STS316L specimens in direction perpendicular to the build direction, show the most competitive values. Anisotropic shape of the pores and the lack of fusion defects probably caused strain localization which result in deterioration of tensile properties.

**Key words** STS316L, Additive manufacturing, 3D printing, Relative density, Tensile properties

## 고밀도 STS316L 합금 적층 성형체의 제조공정 최적화 및 인장 특성 연구

송영환<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 강원본부 기능성소재부품연구그룹, 강릉, 25440

(2023년 12월 7일 접수)

(2023년 12월 14일 심사완료)

(2023년 12월 14일 게재확정)

**요약** STS316L 합금의 Laser powder bed fusion 공정 최적화를 위하여 Laser power, Scan speed 및 Hatching distance의 공정조건을 제어하면서 투입 레이저 에너지 밀도와 조형체의 상대밀도와의 상관관계를 연구했고, 최적조건으로 제작된 조형체의 적층 방향에 따른 인장특성 변화를 분석했다. STS316L 분말을 에너지밀도가 55.6 J/mm<sup>3</sup>, 83.3 J/mm<sup>3</sup> 및 111.1 J/mm<sup>3</sup>인 조건에서 적층 성형한 결과, 투입 레이저 에너지밀도가 83.3 J/mm<sup>3</sup>이며, Power 및 Scan speed 각각 225 W, 1000 mm/s인 조건에서 가장 안정적으로 고밀도 STS316L 샘플을 제작할 수 있었다. 최적공정조건을 이용해 적층 방향과 인장방향이 각각 0°, 45°, 90°인 인장시험편을 제작하여 인장특성을 비교한 결과 적층 방향과 인장방향이 수직인 시험편의 항복강도, 인장강도 및 연신율이 가장 우수한 것이 확인되었다. 적층 방향과 수직 방향으로의 이방성을 가지는 기공 및 Lack of fusion 결함이 응력집중을 야기하여 인장특성을 열화 시키기 때문인 것으로 추정된다.

### 1. 서론

STS316L 합금은 스테인리스강 중 경면 확보가 용이하고 내식성이 우수하여 의료기기용 소재와 더불어 건축 자재, 화학 플랜트 부품, 항공기 부품 등으로 활용도가 매우 광범위하다[1-3]. 특히 3D프린팅 기술을 활용하여 기존 가공 공정으로 제조할 수 없는 복잡 형상이나, 거

대표면을 가지는 구조체를 쉽게 제조할 수 있고, 다품종 소량생산에 적합한 공정상의 특징을 가지고 있기 때문에, 자동차나 항공기의 부품 경량화, 이산화탄소 포집 설비 또는 수소 생산 플랜트의 촉매 지지체 개발과 같은 형상 최적화를 활용한 분야, 개인맞춤형 의료기기와 같은 다 품종 소량생산의 장점을 극대화할 수 있는 분야에 활용하기 위한 STS316L의 3D프린팅 공정 최적화에 관한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 금속 3D프린팅을 위한 여러 공정 중에서도 Laser를 활용한 Laser powder bed fusion(L-PBF) 공정의 공정 최적화에 대한 많은 연구가

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: yhsong0105@kitech.re.kr

진행되고 있다[4-6].

L-PBF 공정에서 주요 공정변수로는 Power, Scan speed 및 Hatching distance가 있으며, 각각의 공정변수와 조형체 상대밀도와와의 상관성을 분석하고, 공정변수의 변화에 따른 미세조직 및 기계적 특성을 Data base화하여 확보하는 것은, 향후 새로운 목표 물성을 달성하는데 있어서 3D프린팅 공정조건 제어가 유효한지를 판정하는 중요한 가이드라인으로 활용될 수 있다[7,8]. 또한, 3D프린팅 부품을 As-built 상태로 제조하여 활용하기 위해서는 적층 방향에 따른 적층 성형품의 기계적 특성 이방성에 대한 이해가 필수적이다[9-11].

따라서 본 연구에서는 STS316L 합금을 사용하여 고밀도 적층 성형 조형체 제작을 위한 L-PBF 공정조건 최적화를 목적으로 Laser power, Scan speed 및 Hatching distance가 조형체의 상대밀도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 본 연구결과 도출된 L-PBF 최적 공정조건으로 제작한 STS316L 합금의 적층 방향에 따른 인장특성 변화를 분석하기 위하여 적층 방향과 인장방향이 각각 0°, 45°, 90°인 인장시험편을 제조하여 인장특성을 평가했다.

## 2. 실험 방법

고밀도 STS316L 조형체 제작조건 확립을 위해 에너지 밀도가 각각 55.6 J/mm<sup>3</sup>, 83.3 J/mm<sup>3</sup> 및 111.1 J/mm<sup>3</sup>인 조건에서 L-PBF 공정장비(Farsoon, SLM 271M)를 사용하여 12(W)×12(L)×17(H)mm<sup>3</sup> 크기의 조형체를 제작하였다. 각각의 공정조건이 상대밀도에 미치는 영향을 분석하기 위해 먼저 Hatching distance를 0.09 mm로 고정하고 Power 및 Scan speed의 변화가 상대밀도에 미치는 영향을 분석한 후, Power가 225 W로 동일한 조건하에서 Scan speed와 Hatching distance의 변화와 조형체의 상대밀도와와의 상관성을 분석하였다. 상대 밀도는 제조된 조형체를 적층 방향과 평행한 방향으로 절단한 후 단면을 경면 연마하여 이미지를 획득하고, 자체 코딩한 영상분석 소프트웨어를 사용하여 회색조로 변환된 단면 이미지 20장의 상대밀도 값을 얻었다. 또한, 도출된 최적 조건으로 적층 방향이 인장방향대비 0°, 45°, 90°인 STS316L 인장시험편을 제조했으며, 만능재료 시험기를 사용하여 인장시험을 수행한 후 적층 방향과 인장방향과의 상관성을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

조형체의 상대밀도와 Power와 Scan speed 조건과의 상관성 평가를 위해 Table 1과 같이 Hatching distance를

Table 1

L-PBF processing parameters along with energy densities, to study the effect of laser power and scanning speed on the relative density (Hatching distance = 0.09 mm)

SPL No.	Power (W)	Scan speed (mm/s)	Energy density (J/mm <sup>3</sup> )
1	75	500	55.6
2	150	1000	
3	188	1250	
4	225	1500	
5	300	2000	
6	112	500	83.3
7	225	1000	
8	281	1250	
9	337	1500	
10	450	2000	
11	150	500	111.1
12	225	750	
13	300	1000	
14	375	1250	
15	450	1500	

0.09 mm로 고정하고 에너지 밀도가 각각 55.6 J/mm<sup>3</sup>, 83.3 J/mm<sup>3</sup> 및 111.1 J/mm<sup>3</sup>인 조건 하에서 Scan speed를 500~2000 mm/s 범위에서 Power를 변경하여 STS316L 조형체를 제작했다. 각각의 공정조건으로 제작한 시편의 단면 영상분석을 위해 회색조로 변조한 단면 이미지 사진을 Fig. 1에 나타냈으며, 각 이미지 좌측상단에 상대 밀도를 표기했다. 동일한 에너지 밀도 조건에서 Scan speed가 증가할수록, 높은 상대밀도를 나타내는 것을 확인했으며, 에너지 밀도가 83.3 J/mm<sup>3</sup>, Power 및 Scan speed가 각각 225 W, 1000 mm/s인 조건에서 99.8 %의 가장 높은 상대밀도를 보였다. 또한 에너지 밀도가 55.6 J/mm<sup>3</sup>인 조건에서 Scan speed의 변화에 따른 상대밀도의 변화량이 큰 것을 확인 할 수 있었다. 이는 조형체의 상대밀도가 낮은 에너지밀도 조건에서는 Scan speed의 변화에 따른 에너지 밀도 보상을 위한 Power의 증감에 보다 민감하게 변화했다는 것을 시사한다.

Table 2는 225 W의 동일한 Power 조건에서 Scan speed와 Hatching distance를 제어하여 에너지 밀도를 각각 55.6 J/mm<sup>3</sup>, 83.3 J/mm<sup>3</sup> 및 111.1 J/mm<sup>3</sup>인 조건으로 제작한 조형체의 상대밀도와 Scan speed 및 Hatching distance와의 상관성을 분석하기 위한 실험 조건을 나타냈으며, 각각의 조건에서 제작한 STS316L 조형체의 단면 미세조직 사진을 Fig. 2에 비교했다. 에너지 밀도의 크기 별 Scan speed 및 hatching distance의 변화에 따른 미세조직상의 결정립 크기 및 용융 풀 크기의 뚜렷한 변화 경향은 관찰되지 않았다. Scan speed가 1500 mm/s 이상인 조건에서 에너지 밀도가 83.3 J/mm<sup>3</sup> 이하인 경우 Lack of fusion 결함이 증가되는 경향을 보였으며,

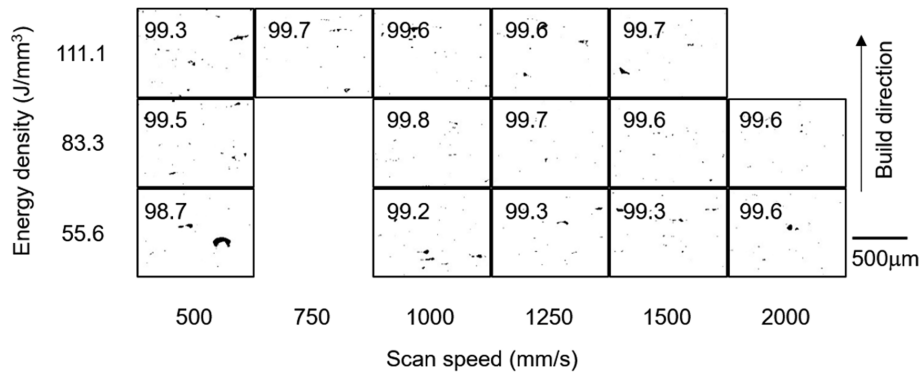


Fig. 1. Relative density and cross-sectional representative images of L-PBFed STS316L alloy with different laser power and scanning speed (Hatching distance = 0.09 mm).

Table 2  
L-PBF processing parameters along with energy densities, to study the effect of scanning speed and hatching distance on the relative density (Laser power = 225 W)

SPL No.	Scan speed (mm/s)	Hatching distance (mm)	Energy density (J/mm <sup>3</sup> )
16	750	0.180	
17	1000	0.135	
18	1500	0.090	55.6
19	1750	0.077	
20	2000	0.067	
<hr/>			
21	500	0.180	
22	750	0.120	
23	1000	0.090	83.3
24	1250	0.072	
25	2000	0.045	
<hr/>			
26	500	0.135	
27	750	0.090	
28	1000	0.068	111.1
29	1250	0.054	
30	1500	0.045	

대부분의 조건에서 Lack of fusion 및 용융 풀의 수축으로 인한 기공 결함이 관찰되었다. 이러한 결과는 동일 에너지 밀도 하에서 Scan speed 증가에 의한 에너지밀

도 보상을 위해 제어하게 되는 Hatching distance의 폭이 고밀도 조형체 제작에 적합할 정도로 충분하지 않다는 것을 의미하며, Hatching distance를 변수로 하는 상대밀도 제어는 Power 및 Scan speed를 조정하여 에너지 밀도를 제어하는 방법보다 비효율 적이라는 것을 시사한다.

Figure 3은 앞서 실험한 전체 시험편의 상대밀도 분석 결과를 에너지밀도 별로 나타낸 그래프이다. 에너지 밀도가 111.1 J/mm<sup>3</sup>인 경우 각 변수의 제어범위가 감소함에 따라 공정조건에 따른 상대밀도 값의 산포가 확연히 감소하는 에너지밀도 의존성을 보였다. Figure 4(a)는 전체 시험편의 상대밀도 분석결과를 Scan speed의 함수로 나타낸 결과를 보여준다. 모든 에너지밀도 조건하에서 상대밀도가 1000 mm/s 부근에서 최대값을 보이며 변곡점을 가지는 유사한 변화경향을 보였으나 2000 mm/s 조건에서는 Power로 에너지밀도를 제어한 경우와 Hatching distance로 에너지밀도를 제어한 경우의 에너지밀도 편차로 인해 산포가 커지는 결과를 보였다. 반면 전체 시험편의 상대밀도 분석결과를 Hatching distance의 함수로 나타낸 Fig. 4(b)는 결과를 보면 에너지밀도 별 최대 상대밀도를 얻은 Hatching distance 값이 에너지밀도의 감소와 함께 감소하는 경향을 보였다.

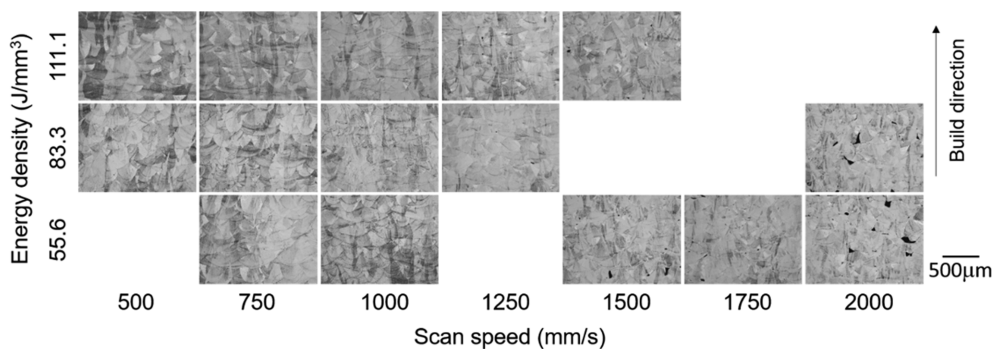


Fig. 2. Representative cross-sectional microstructures of L-PBFed STS316L alloy with different scanning speed and hatching distance (Laser power = 225 W).

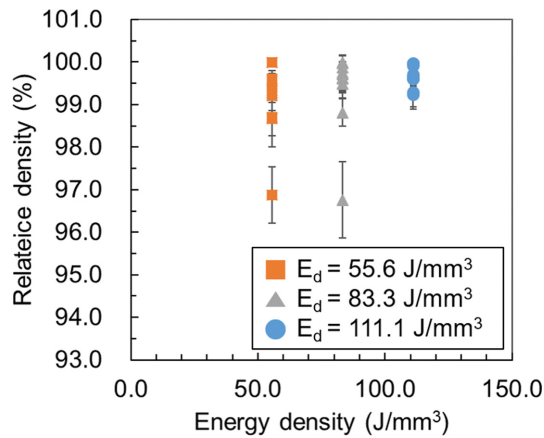


Fig. 3. Deviation of relative density of L-PBFed STS316L specimens fabricated with different energy density.

위 결과들을 바탕으로 가장 높은 상대밀도를 나타내는 STS316L 조형체의 제조 공정조건은 에너지 밀도가 111.1 J/mm<sup>3</sup>인 경우로 확인되었다. 하지만, Fig. 5에서 확인할

수 있듯이 동일 Scan speed 조건에서 조사된 Laser에 의해 용융된 STS316L 분말이 표면에 비산되어 응착되는 spatter 양이 에너지 밀도가 높아질수록 증가하는 경향이 있기 때문에 내부 기공 결함이 생성될 가능성이 높아진다[12-14]. 따라서 본 연구결과 확인된 최적 공정조건은 투입에너지밀도가 83.3 J/mm<sup>3</sup>이며, Power, Scan speed 및 Hatching distance가 각각 225 W, 1000 mm/s 및 0.09 mm인 조건으로 결정했다.

최적 공정조건으로 제작한 STS316L 조형체의 적층 방향 별 인장특성을 분석하기 위해, 적층 방향이 인장방향대비 0°, 45°, 90°인 STS316L 인장시험편을 제작하여 인장시험을 수행한 결과 획득한 응력 변형곡선을 Fig. 6에 나타냈으며, 각각의 인장 특성을 Table 3에 정리했다. 적층 방향과 수직인 방향으로의 항복강도와 인장강도가 가장 높게 나왔고, 연신율은 인장방향과 평행한 방향에서 가장 높았다. 적층 방향이 인장방향과 45°인 경우 항복강도와 인장강도는 적층 방향과 인장방향인 0°인 샘플과 유사하였으나 연신률이 급격히 감소하는 특성을 보였

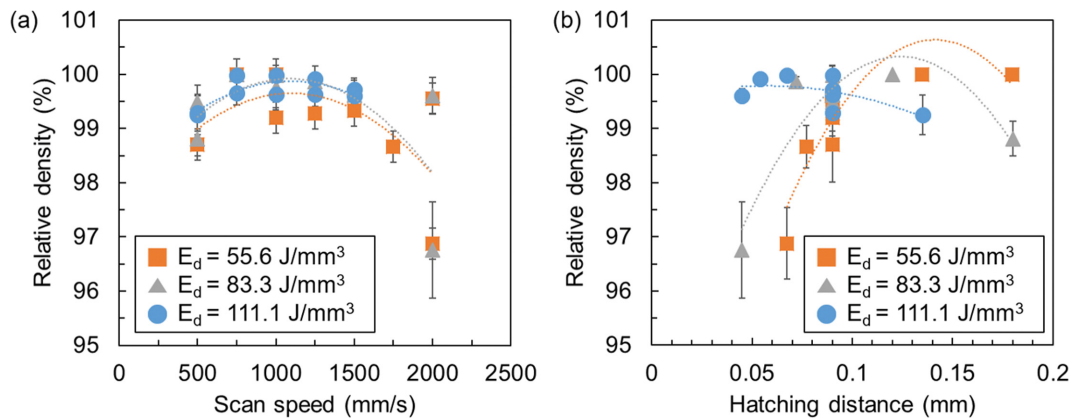


Fig. 4. Change of relative density of as-built STS316L specimens fabricated with different energy density; (a) as a function of scanning speed, (b) as a function of hatching distance.

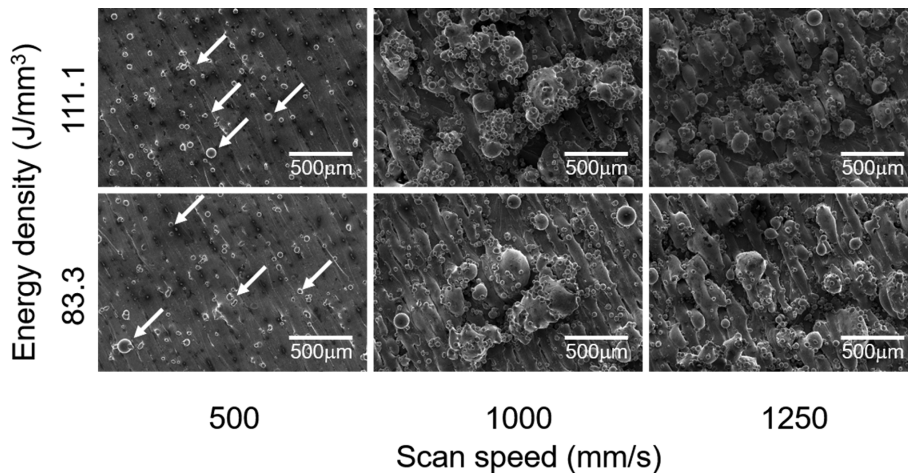


Fig. 5. Changes in the amount of single and agglomerated spatters (white arrow) with high and low energy density conditions.

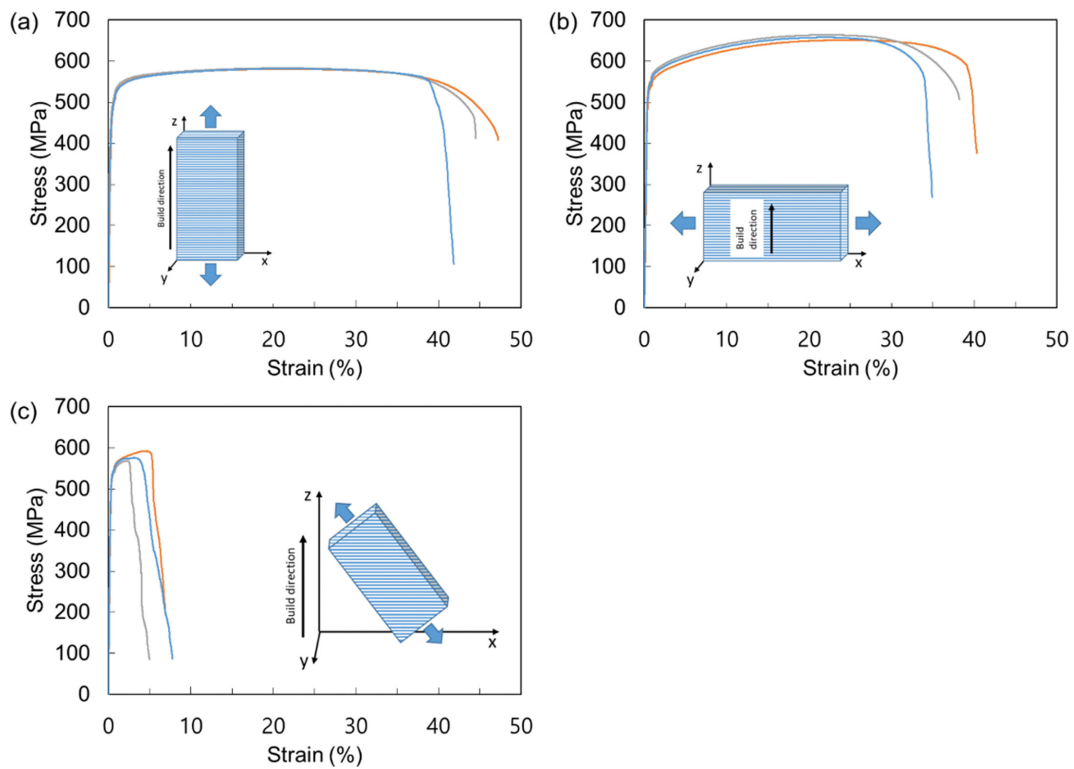


Fig. 6. Tensile stress-strain curves of L-PBFed STS316L specimens; (a) Tensile direction // build direction, (b) Tensile direction  $\perp$  build direction, (c) Tensile direction  $\angle 45^\circ$  build direction.

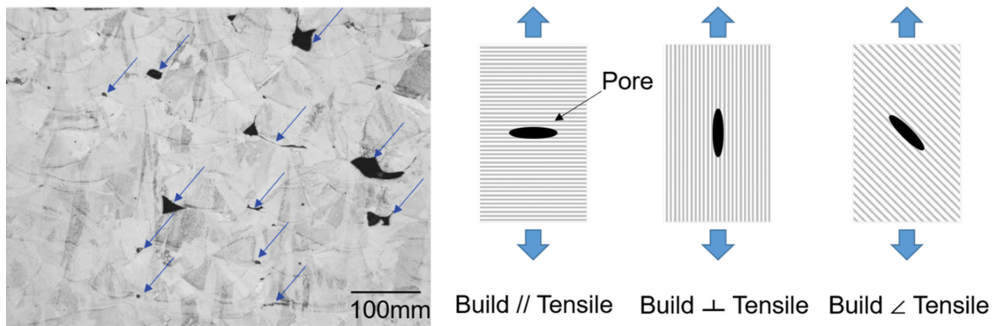


Fig. 7. Microstructure and defect shape (blue arrow) of L-PBFed STS316L specimens.

Table 3  
Tensile properties of L-PBFed samples along with build directions

Tensile directions	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Strain (%)
Build // Tensile	471.3 ± 1.5	581.7 ± 1.2	44.7 ± 2.5
Build $\perp$ Tensile	531.7 ± 5.8	657.3 ± 6.0	37.7 ± 2.5
build $\angle 45^\circ$ Tensile	531.3 ± 3.8	578.7 ± 12.2	6.7 ± 1.5

다. 이러한 적층 방향이 인장방향과  $0^\circ$  및  $45^\circ$ 인 시험편의 낮은 강도 특성과 연신을 저하는 Fig. 7에 나타난 내부결함 관찰 사진과 인장시험 모식도에 나타난 바와 같이, 공정 중 국부적으로 생성된 Lack of fusion 결함 또는 기공결함의 형상이 적층 방향과 수직방향으로 긴 형

상 이방성을 가지기 때문에 국부적인 응력집중 사이트로 작용하여 인장특성을 열화 시키기 때문으로 판단된다 [15]. 반면, 인장시험편 내부에 존재하는 형상 이방성을 가지는 결함의 장축 방향이 인장방향과 평행하게 정렬된  $90^\circ$  시험편의 경우 결함 주변의 응력집중, 주변 결함과 shear band 형성 및 crack 발생이 억제되기 때문에 세 조건 중 가장 높은 강도특성을 보이는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

L-PBF 공정 중 투입 에너지 밀도와 조형체의 상대밀도와의 상관관계 분석을 통한 고밀도 STS316L 조형체

제작을 위해 Laser power, Scanning speed 및 Hatching distance의 변화에 따른 STS316L 조형체의 상대밀도 변화를 분석했다. 투입 레이저 에너지밀도가  $83.3 \text{ J/mm}^3$ 이며, Power 및 Scan speed 각각 225 W, 1000 mm/s인 조건에서 가장 안정적으로 고밀도 STS316L 샘플을 제작할 수 있었다. 고밀도 3D프린팅 조형체 제작 공정조건을 이용해 인장방향을 기준으로 적층 방향이 각각  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 인 인장시험편을 제작하여 인장특성을 비교한 결과 적층 방향과 인장방향이 수직인 시험편의 항복강도, 인장강도 및 연신율이 가장 우수한 것이 확인되었다. 이러한 결과는 조형체에 존재하는 적층 방향과 수직 방향으로의 이방성을 가지는 기공 및 Lack of fusion 결함이 인장하중이 인가되는 방향과  $45^\circ$  및  $90^\circ$ 인 조건에서 응력집중을 야기하여 인장특성을 저하시키기 때문인 것으로 추정된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국생산기술연구원의 기업수요기반생산기술실용화사업(JA-23-0014)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [ 1 ] A.F. Padilha and P.R. Rios, "Decomposition of austenite in austenitic stainless steels", *ISIJ Int.* 42 (2002) 325.
- [ 2 ] B. Al-Mangour, "Powder metallurgy of stainless steel: state-of-the art, challenges, and development", (Noba Science Publishers, 2015).
- [ 3 ] R. Song, J. Xiang and D. Hou, "Characteristics of mechanical properties and microstructure for 316L austenitic stainless steel", *J. Iron. Steel Res. Int.* 18 (2011) 53.
- [ 4 ] L. Hao, S. Dadbakhsh, O. Seaman and M. Felstead, "Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development", *J. Mater. Process, Technol.* 209 (2011) 5793.
- [ 5 ] T. Larimian, M. Kannan, D. Grzesiak, B. Al-Mangour and T. Borkar, "Effect of energy density and scanning strategy on densification, microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel processed via selective laser melting", *Mater. Sci. Eng. A* 880 (2020) 138455.
- [ 6 ] J. Ghorbani, J. Li and A.K. Srivastava, "Application of optimized laser surface re-melting process on selective laser melted 316L stainless steel inclined parts", *J. Manuf. Process* 56 (2020) 726.
- [ 7 ] M.S. Pham, B. Dovygy and P.A. Hooper, "Twinning induced plasticity in austenitic stainless steel 316L made by additive manufacturing", *Mater. Sci. Eng. A* 704 (2017) 102.
- [ 8 ] J. Liu, Y. Gao, Y. Fan and W. Zhou, "Fabrication of porous metal by selective laser melting as catalyst support for hydrogen production microrreactor", *Int. J. Hydrog. Energy* 45 (2020) 10.
- [ 9 ] J.M. Jeon, J.M. Park, J.H. Yu, J.G. Kim, Y. Seong, S.H. Park and H.S. Kim, "Effects of microstructure and internal defects on mechanical anisotropy and asymmetry of selective laser-melted 316L austenitic stainless steel", *Mater. Sci. Eng. A* 763 (2019) 138152.
- [10] Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu and S.B. Tor, "Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review", *Mater. Des.* 139 (2018) 565.
- [11] J.J. Lewandowski and M. Seifei, "Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties", *Annu. Rev. Mater. Sci.* 46 (2016) 151.
- [12] G. Dursun, S. Ibekwe, G. Li, P. Mensah, G. Joshi and D. Jerro, "Influence of laser processing parameters on the surface characteristics of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting", *Mater. Today: Proc.* 26 (2020) 387.
- [13] S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik and W.E. King, "Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones", *Acta Mater.* 108 (2016) 36.
- [14] A. Sola and A. Nouri, "Microstructural porosity in additive manufacturing: The formation and detection of pores in metal parts fabricated by powder bed fusion", *J. Adv. Manuf. Process.* 1 (2019) 10021.
- [15] N. Iqbal, E. Jimenez-Melero, U. Ankalkhope and J. Lawrence, "Microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated using selective laser melting", *MRS Adv.* 4 (2019) 2431.