

## Optimization for high speed manufacturing of Ti-6Al-4V alloy by a selective laser melting technique

Kang Pyo Lee<sup>\*,\*\*</sup>, Kang Min Kim<sup>\*</sup>, Suk Hyun Kang<sup>\*,\*\*\*</sup>, Jun Hyun Han<sup>\*\*</sup> and Kyung Hwan Jung<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>Additive Manufacturing Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gangwon 25440, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Material Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Department of Material Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received October 4, 2018)

(Revised October 10, 2018)

(Accepted October 11, 2018)

**Abstract** Selective laser melting (SLM) technique is one of the additive manufacturing processes, in which functional, complex parts can be directly manufactured by selective melting layers of powder. SLM technique has received great attention due to offering a facile part-manufacturing route and utilizing a hard-to-manufacturing material (e.g. Ti6Al4V). The SLM process allows the accurate fabrication of near-net shaped parts and the significant reduction in the consumption of raw materials when compared to the traditional manufacturing processes such as casting and/or forging. In this study, we focus the high-speed additive manufacturing of Ti6Al4V parts in the aspect of manufacturing time, controlling various process parameters.

**Key words** Additive manufacturing (AM), Selective laser melting (SLM), Ti-6Al-4V, Process condition

## SLM 기술을 이용한 Ti-6Al-4V 합금의 고속 적층 공정 최적화 연구

이강표<sup>\*\*\*</sup>, 김강민<sup>\*</sup>, 강석현<sup>\*,\*\*\*</sup>, 한준현<sup>\*\*</sup>, 정경환<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>한국생산기술연구원 적층성형가공그룹, 강원, 25440

<sup>\*\*</sup>충남대학교 신소재공학과, 대전, 34134

<sup>\*\*\*</sup>한양대학교 신소재공학과, 서울, 04763

(2018년 10월 4일 접수)

(2018년 10월 10일 심사완료)

(2018년 10월 11일 게재확정)

**요약** Selective laser melting(SLM)은 적층 제조 방법 중 하나로서, 분말을 선택적으로 용융하여 기능적이고, 복잡한 형상을 즉각적으로 제작 가능하다는 장점이 있다. Ti-6Al-4V 합금의 경우 높은 용점과 산화문제로 인하여 SLM 공정도입에 어려움을 겪고 있다. 본 연구에서는 SLM 장비를 사용하여 Ti-6Al-4V 파트를 성공적으로 적층하였으며 스캔속도, 레이저 파워의 변수를 조절하여 적층 가능 조건을 도출하였다. 또한 적층된 Ti-6Al-4V 파트의 형상 정밀도, 면밀도 및 기계적특성 평가를 통하여 일반적으로 사용되는 공정조건(스캔 속도 200~700 mm/s)으로 제작된 제작품 물성치와 비교를 통해 Ti-6Al-4V 합금의 고속 적층 영역에서의 최적 공정을 확립하였다.

### 1. 서론

티타늄 합금은 높은 비강도, 내식성 및 생체 친화적인 소재로서 항공/우주용 부품, 인체 삽입용 생체소재, 임플란트 등 고부가가치 산업분야의 제품으로서 널리 사용되고 있다. 특히 Ti-6Al-4V 합금은 낮은 온도에서 높은 비강도를 유지하고, 400°C 이하의 온도 범위에서 구조적

인 안정성과 높은 부식저항 특성으로 인하여 항공/우주 산업소재 등 넓은 분야에서 적용되고 있다[1]. 하지만 Ti-6Al-4V 합금은 대표적인 난삭성 재료이기 때문에, 일반적인 가공방식(선반, 밀링)의 절삭가공을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금을 가공할 경우, 절삭공구에 용착 현상이 쉽게 발생하며, 고속가공 시 표면경화가 발생하는 등 다양한 가공의 문제점으로 가공이 어렵다는 큰 단점을 갖는다[2]. 또한 고부가가치 산업인 항공/우주, 생체소재로 사용되는 Ti-6Al-4V 합금의 경우 복잡한 형상으로 인하여 합금의 성형 시 발생하는 소재의 낭비로 인하여 비용

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: khjung@kitech.re.kr

절감의 해결이 절실하다. 이러한 가공의 문제점을 극복하고 비용절감 및 생산성 향상을 위해 정밀정형(near net shape)이 가능한 금속 3D 프린팅에 대한 관심이 높아지고 있다[3].

3D 프린팅(3d printing)은 3차원 설계 데이터를 기초로 하여 기초 재료를 적층(Layer by layer)하는 방식으로 부가적인 공정 없이 정밀정형(Near net shape)이 가능한 공정이다. 3D 프린팅 공정은 기존의 선반, 밀링, 절삭가공 방식으로는 제작하기 어려운 3차원의 복잡한 형상의 제작이 가능하며, 선택적인 영역의 재료를 용융시켜(melting) 적층하는 방법이기 때문에 불필요한 소재의 낭비를 최대한 절약할 수 있다[4]. 위와 같은 장점으로 기존가공 및 제작법의 단점을 극복할 수 있으나 Ti-6Al-4V 합금의 경우 높은 용점 및 산화문제 등으로 인하여 3D 프린팅을 이용한 최적화된 공정조건에 대한 연구는 어려움을 겪고 있다. 특히 인체 삽입용 생체소재, 임플란트 등 바이오 시장에서의 Ti-6Al-4V 합금 제작품을 적용하기 위해서는 인체마다 서로 다른 형상을 가지기 때문에 우수한 “형상정밀도”가 요구되며, 기존 공정의 생산속도보다 빠른 “생산효율성”을 도출할 수 있는 고속 공정조건도 필수적이다.

본 논문에서는 3D 프린팅 공정 중 Selective laser melting(SLM)를 사용하여 스팟 사이즈(spot size), 레이저 두께(layer thickness), 해치 거리(hatch distance), 오버랩(over lap) 등의 공정변수들은 고정한 후, 레이저 파워(laser power), 스캔 속도(scan speed)를 다양하게 변화시켜 고속영역에서의 최적화된 공정조건을 도출하였다. 제작된 Ti-6Al-4V 제작품의 면밀도, 형상정밀도, 기계적 특성(경도, 연신율, 인장강도)을 면밀히 분석하였으며, 상용 Ti-6Al-4V 합금의 특성과 비교 및 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 Powder bed fusion(PBF) 기반의 SLM

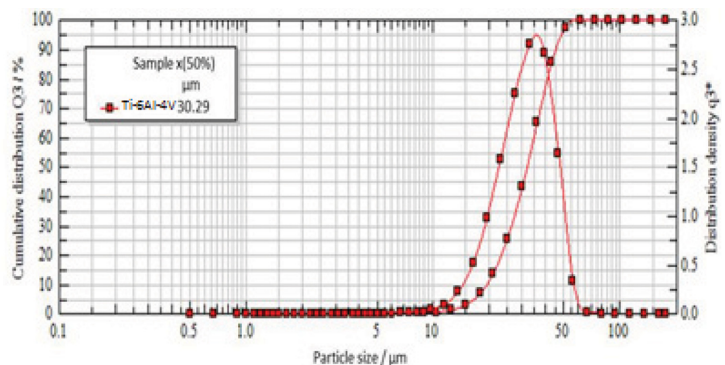
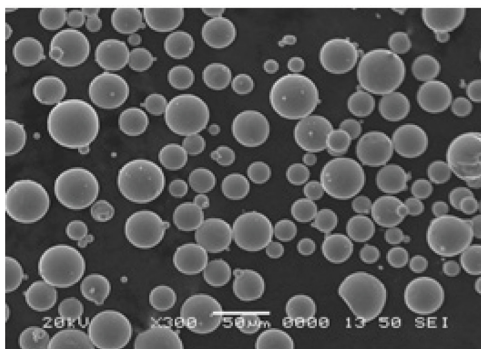


Fig. 1. SEM images of LPW Ti-6Al-4V powder and powder size distribution of LPW Ti-6Al-4V powder.

금속 3D 프린팅 장비로 선택적 레이저 용융 방식의 장비이다. 장비에 장치된 레이저는 Fiber laser 타입으로 최대 1000 W까지 출력이 가능하며 장치는 빔 전송을 위한 광학계, Ar 가스 퍼지 챔버, 각종 센서 및 제어장치로 구성되어 있다. 본 3D 프린터를 사용하면 최대 300 mm × 300 mm × 300 mm 부피의 티타늄 금속 부품을 불활성가스 분위기에서 적층 성형할 수 있다. 본 논문에서 사용한 분말은 LPW 사의 Ti-6Al-4V 분말을 사용하였으며 입도 분석 결과 분말의 크기 20~30 µm로 균일하였으며, 구형의 형상임을 확인할 수 있다(Fig. 1). 위의 3D 프린팅 장비를 사용하여 Ti-6Al-4V 분말을 적층 성형하였고, 분석을 위해 7 mm × 7 mm × 7 mm 크기의 큐브 시편을 각 공정 별로 제작하였다. 제작된 Ti-6Al-4V 시편 제작품의 사이즈를 CAD 파일과 비교하여 형상 정밀도를 분석하였고, 광학현미경을 사용하여 제작된 시편의 기공도를 측정하여 면밀도를 측정하였다. 또한, 비커스 마이크로 경도계를 사용하여 각 공정별 시편의 경도값을 측정하였다. 위 분석결과를 바탕으로 최적 공정조건을 도출하여 인장 시험편을 제작하였고, 만능재료시험기를 사용하여 인장강도와 연신율을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2은 스캔 속도, 레이저 파워 공정조건에 따라 성공적으로 적층된 Ti-6Al-4V 합금의 시편 사진이다. 각각의 공정조건에 따라 제작품의 형상의 차이가 명확히 나타나며, 분말에 유입되는 에너지양이 너무 많거나, 적을 경우 제작품의 형상이 일정하지 않고 옆면이 부풀어 오르거나 표면이 균일하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 제작품 내부에서의(과용융 영역) 균일하지 않은 레이저 적층이 존재하기 때문이며 분말에 가해지는 에너지양이 적거나 많을 때 발생하는 키홀 현상(keyhole effect), 볼링 현상(balling effect)에 의한 것으로 판단된다. 공정조건에 따라서 분말에 가해지는 에너지의 양이 많을 경우

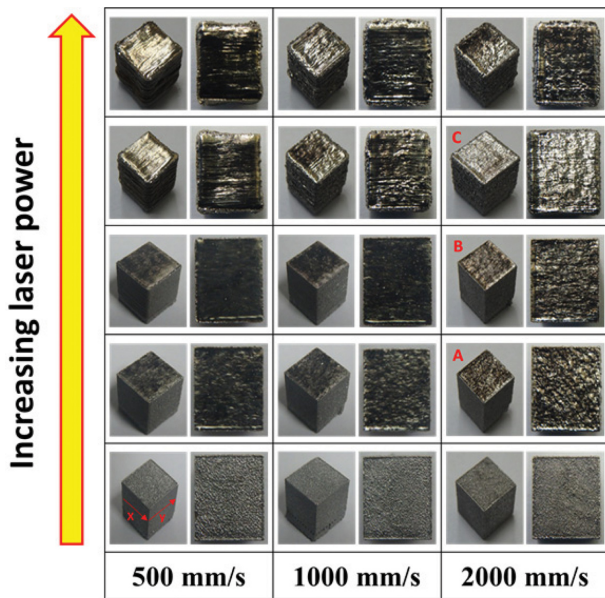


Fig. 2. As-built samples produced in SLM at different conditions.

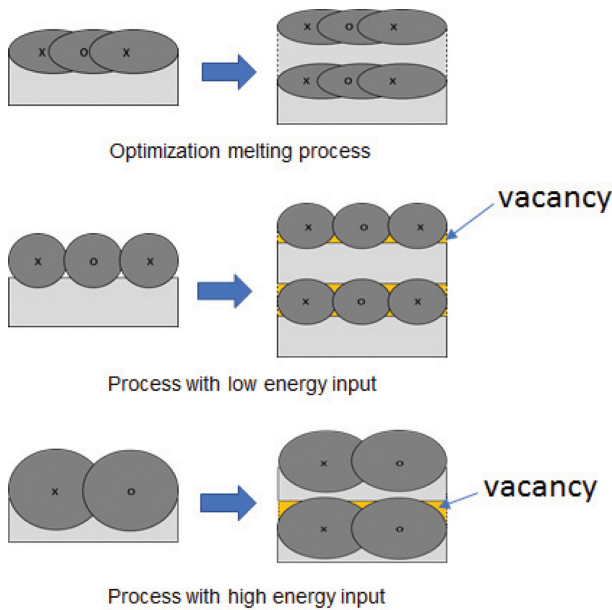


Fig. 3. Representative illustration for the possible mechanism of the balling effect.

(레이저 파워가 높고, 스캔 속도가 느릴 경우) 내부에 기공 현상으로 인하여 기공이 간히게 되고 이는 불 균일한 적층을 발생시킨다고 보고되었다[5]. 또한 레이저 파워가 높고, 스캔 속도가 매우 빠른 경우에는 분말이 녹으면서 발생하는 용융 풀이 빠른 스캔 속도로 인하여 넓은 영역으로 형성이 되고 생성된 용융 풀 내의 내부 표면장력으로 인하여 균일하게 적층 되지 않고 분말이 뭉치게 되는 볼링 현상이 발생하게 되어 다음 레이어의 적층이 균일하지 않게 된다[6]. 이러한 현상을 Fig. 3에 도식화하였다. 적당한 에너지가 분말에 공급될 경우 용융된 레이어

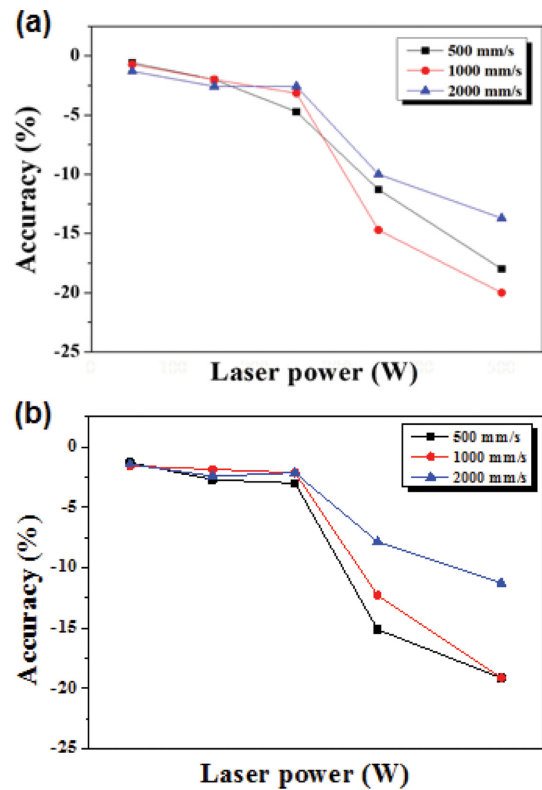


Fig. 4. Accuracy measurement results of Ti-6Al-4V parts.

들의 빈공간이 없이 일정하게 적층이 이루어지지만 에너지의 양이 많아질 경우 언급한 바와 같이 조대하게 생성된 레이어들 사이에 기공이 생성되며 적층 불균형으로 발전하게 된다. 반대로 스캔 속도가 빠르고 레이저 파워가 낮을 경우 분말에 가해지는 에너지의 양이 적어지게 되며 Fig. 3에서 나타내듯이 부분적인 볼링 현상에 의하여 용융된 레이어 사이에 생성된 기공으로 제작품의 형상이 부풀어 오르게 된다.

위의 같은 다양한 현상으로 인하여 제작품의 형상정밀도가 감소하게 된다. Fig. 4는 각 공정조건 별 큐브 제작품의 형상정밀도를 보여주며, 정면을 중심으로 가로방향(X축), 세로방향(Y축)을 측정된 결과 값을 도식화하였다. X, Y축 동일하게 레이저 파워가 일정 영역을 지나고 나서 급격하게 형상정밀도가 감소하는 경향을 보이며, 이는 과용융으로 인한 볼링 현상의 기공 영향인 것으로 판단되며 Fig. 2의 사진과 일치하는 결과이다. 위의 결과를 바탕으로 우수한 형상정밀도를 이끌어 내기 위해서는 공정조건의 최적화가 매우 중요하다고 판단된다.

Fig. 5는 공정조건에 따른 Ti-6Al-4V 시편 제작품의 면밀도를 측정된 결과이다. 용융이 덜 된 영역에서의 면밀도는 83~87%로 측정되었으며, 낮은 에너지가 분말에 공급될 경우 용융되지 않은 분말들을 광학현미경으로 관찰할 수 있으며 제작품 내부에 많은 기공이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 분말내부에 강한 에너지가 가해져서

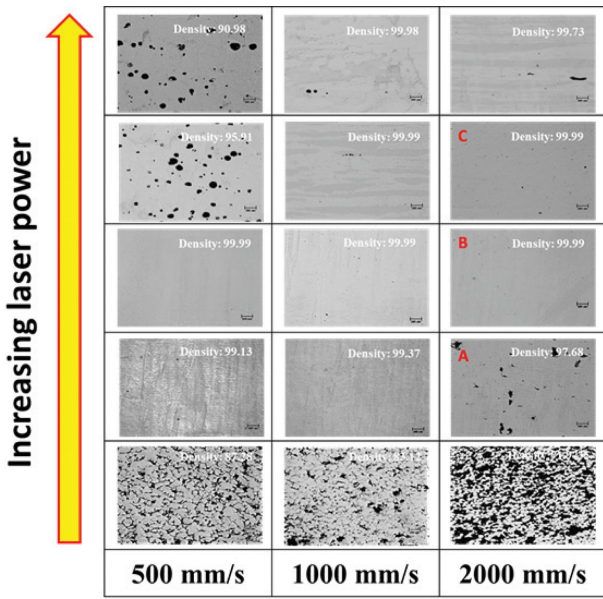


Fig. 5. Optical images of SLM-produced Ti-6Al-4V parts at different conditions.

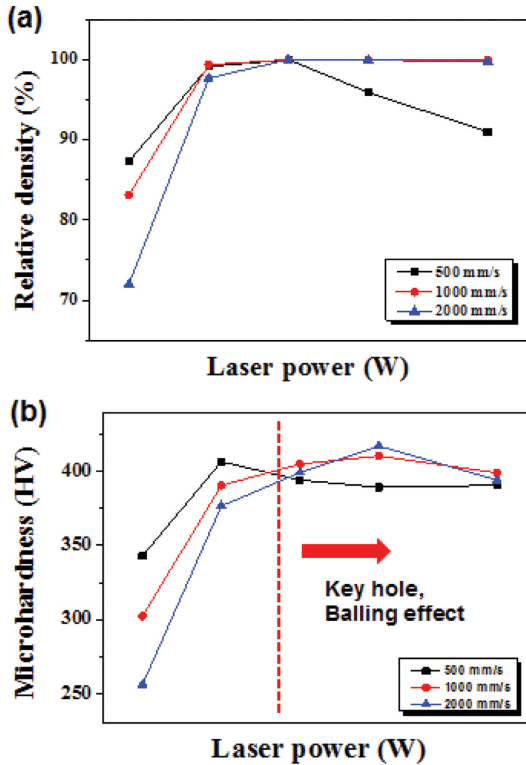


Fig. 6. (a) Density and (b) microhardness results of Ti-6Al-4V parts.

용융이 과하게 일어나는 경우에는 키홀 현상, 볼링 현상에 의한 기공이 관찰되었으며 면밀도는 90~99%로 측정되었다. 각 공정조건별 면밀도와 경도는 Fig. 6에 도식화하였다. 일반적으로 용융이 덜 된 영역에서는 광학 현미경으로 발견된 많은 기공의 영향으로 인하여 면밀도

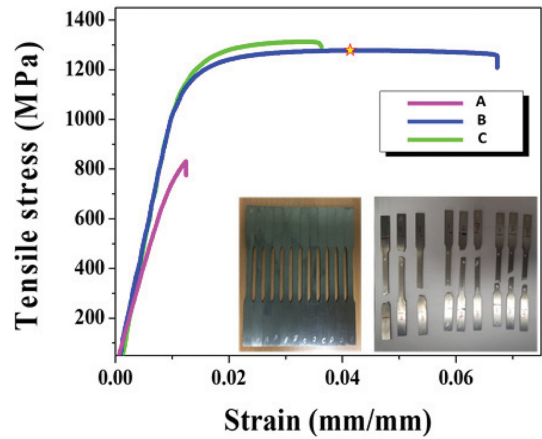


Fig. 7. Stress-Strain plots of Ti-6Al-4V parts.

는 90%를 넘지 못하였으나 과용융 영역에서는 국부적으로 발견되는 기공으로 인하여 면밀도가 90% 이상 영역으로 나타났다(Fig. 6a). 기공이 많은 경우 경도 또한 매우 낮게 측정되었으며, 스캔 속도가 느린 경우 전반적으로 비용융, 완전용융, 과용융 순으로 경도가 점차적으로 증가하였다가 감소하는 경향을 보이지만 스캔 속도가 빠를 경우 과용융 영역에서의 경도 값이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 스캔 속도가 빠를 경우에는 킥 현상에 의한 기공 생성보다는 볼링 현상에 의한 기공 생성이 경도 값에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

형상정밀도와 면밀도측정 결과를 바탕으로 고속 적층 영역(2000 mm/s)에서 적층된 시편 제작품(A, B, C)은 면밀도 97% 이상 형상정밀도 5% 미만으로 측정되었으며, 낮은 적층 속도(500 mm/s, 1000 mm/s)에서 적층된 제작품과 비슷한 결과를 확인하였다. 이는 고속 적층 영역에서의 Ti-6Al-4V 합금의 적층 가능성을 보여준다고 판단되며, 기존 제작 공정(주조, 단조)과의 기계적 특성을 비교해보기 위해 만능재료 시험기를 이용하여 인장 시험을 실시하였다. 표준 인장 시험 규격(ASTM E8)인 길이 110 mm, 너비 10 mm, 및 두께 2 mm의 Ti-6Al-4V 판상 시편을 제작하였으며, 이를 이용하여 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험 결과 Fig. 7과 같이 스캔 속도 2000 mm/s A, B, C 조건에서 최대 인장강도 800, 1268, 1290 MPa로 각각 나타났으며, 우수한 결과를 갖는 B 제작품의 경우 ASTM 규격 단조 및 주조 최대 인장강도(860, 930 MPa)보다 각각 47%, 36% 증가하는 것을 확인하였다.

연신율의 경우 6.7%로 ASTM 규격보다 주조와 단조의 경우 약 16%, 33% 감소하였으며 ASTM 규격의 약 70~80%의 수준을 보였다. Table 1에 나타나듯이 본 연구와 유사하게 3D 프린팅으로 제작된 Ti-6Al-4V 제작품의 물성을 비교했을 때, 스캔 속도는 약 3~10배 정도 빠르지만 유사한 수준의 인장강도 및 연신율을 확인

Table 1  
A summary of scan speed condition via typical SLM process

	Scan speed (mm/s)	UTS (MPa)	Elongation (%)
Cast (ASTMF1108)	-	860	> 8
Wrought (ASTM F1472)	-	930	> 10
Vilaro [7]	600	1206, 1166	7.6, 1.7
Facchini [8]	225	1095	8.1
Mertens [9]	710	1321	2
In this study	2000	1268	6.7 %

할 수 있었으며[7-9], 추가적으로 후처리 공정(열처리, Hot isostatic press(HIP))을 수행할 경우 연신율의 향상을 기대할 수 있기 때문에 본 연구에서 도출한 고속 적층 영역의 공정조건은 매우 우수하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 SLM 방식 금속 3D 프린팅을 이용하여 고속 적층 영역에서의 Ti-6Al-4V 조형체 제작을 통하여 최적 공정조건을 도출하였다. 고속 적층 영역(2000 mm/s)에서 제작된 Ti-6Al-4V 제품은 형상정밀도 오차를 약 5 % 이내, 면밀도 약 99.99 % 우수한 조형성을 확인하였으며, ASTM 규격 주조 및 단조품의 물성과 비교하였을 때 경도와 인장강도는 증가하였고 연신율은 다소 감소됨을 확인하였다. 또한 본 연구대비 낮은 공정속도(200~700 mm/s)로 제작된 Ti-6Al-4V 제품과 비교한 결과 상응하는 기계적 특성을 나타냈다. 이는 고속 적층 공정 최적화를 통하여 우수한 형상정밀도 및 생산성 향상을 확보한 연구결과라 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 산업기술혁신사업으로 지원 받아 수행된 연구 결과입니다. [과제명 : 국방 수요부품 국산화를 위한 금속3D프린팅 제작 및 유지보수 상용화 기술개발].

#### References

- [1] R.R. Boyer, "An overview on the use of titanium in the aerospace industry", Mater. Sci. Eng. A213 (1996) 103.
- [2] W.J. Jeong, Y.S. Kwon and D.S. Kim, "Development of a metal 3D printer and process optimization for fabricating titanium alloy parts", Korean Soc. Mech. Eng. 11 (2015) 1909.
- [3] Z. Yuwei and L. Diana, "Novel forming of Ti-6Al-4V by laser engineered net shaping", J. Mater. Sci. Forum 765 (2013) 393.
- [4] E. Herderick, "Additive manufacturing of metal: A review", Material Science and Technology (MS&T) 16-20 (2011) 1413.
- [5] H. Gong, H. Gu, K. Zeng, J.J.S. Dilip, D. Pal and B. Stucker, "Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder", Conference: Conference: 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (2014).
- [6] Y.F. Shen, D.D. Gu and Y.F. Pan, "Balling process in selective laser sintering 316 stainless steel powder", J. Key. Eng. Mater. 315-316 (2006) 357.
- [7] T. Vilaro, C. Colin and J.D. Bartout, "As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting", J. Metallurg. Mater. Trans. A 42A (2011) 3190.
- [8] L. Facchini, A. Molinari, S. Hoges and K. Wissenbach, "Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders", J. Rap. Proto. 16 (2010) 450.
- [9] A. Mertens, S. Reginster, H. Paydas, Q. Contrepois, T. Dormal, O. Lemaire and J. Lecomte-Beckers, "Mechanical properties of alloy Ti-6Al-4V and of stainless steel 316L processed by selective laser melting: influence of out-of-equilibrium microstructures", J. Pow. Met. 57 (2014) 184.