레이저 분말적층 방식을 이용한 금속 3D 프린터 개발 및 티타늄 합금 부품 제조공정 최적화

정원종*, 권영삼**, 김동식*,✉
*포항공과대학교 기계공학과, **(주)쎄타텍

Development of a Metal 3D Printer Using Laser Powder Deposition and Process Optimization for Fabricating Titanium Alloy Parts

Wonjong Jeong*, Young-Sam Kwon, Dongsik kim*,✉**

*Department of Mechanical Engineering, POSTECH, Pohang, 790-784, Republic of Korea
**CetaTech, Seonjin-ri, Yonghyeong-myeon, Sacheon, Gyeongnam, 664-953, Republic of Korea

Abstract

A 3D printer based on laser powder deposition (LPD), also known as DED (direct energy deposition), has been developed for fabricating metal parts. The printer uses a ytterbium fiber laser (1070nm, 1kW) and is equipped with an Ar purge chamber, a three-dimensional translation stage and a powder feeding system composed of a powder chamber and delivery nozzles. To demonstrate the performance of the printer, a tapered cylinder of 320mm in height has been fabricated successfully using Ti-6Al-4V powders. The process parameters including the laser output power, the scan speed, and the powder feeding rate have been optimized. A 3D printed test specimen shows mechanical properties (yield strength, ultimate tensile strength, and elongation) exceeding the criteria to employed in a variety of Ti alloy applications.

Keywords: Near Net Shape(정밀정형), 3D printing(3D 프린팅), Additive manufacturing(적층 가공), Direct energy deposition(DED), Laser Powder Deposition(레이저 분말적층), Ti-6Al-4V alloys(Ti-6Al-4V 합금)

1. 서 론

티타늄 합금은 비강도가 높고 내식성이 뛰어나며 생체 친화성 소재이기 때문에 우주항공, 석유 화학 및 의료 분야에서 사용이 늘어나고 있다. Ti-6Al-4V 합금은 가장 널리 사용되는 티타늄 합금으로서, 우주항공과 의료 분야에서 주로 사용되고 있다. 하지만 티타늄 합금의 절삭가공시, 절삭 공구에 칩이 용착되는 현상이 심하게 발생하며 표면 경화현상으로 고속가공이 어렵다는 단점을 갖고 있으며 우주항공이나 의료분야에 사용되는 티타늄합금 부품들의 형상이 매우 복잡하기 때문에 일반적인 봉재나 판재를 가공하는 경우 소재의 50%이상을 절삭가공으로 제거해야 되기 때문에 소재비와 가공비의 절감을 위한 정밀정형(Near Net Shape)의 일환으로 3D 프린팅기술에 대한 관심이 높아지고 있다[1].

3D 프린팅은 적층 공정(additive manufacturing)을 기반으로 한 가공 방식으로서, CAD (computer aided design) 모델을 이용하여 다른 부가적인 공정 없이 정밀정형을 만들 수 있다는 장점을 가진다. 3D 프린팅 기술은 절삭 공정을 최대한 줄일 수 있어 소모되는 소재의 낭비와 가공비를 절감할 수 있다는 장점을 갖는다[2]. 본 연구에서 이용한 레이저 분말적층(Laser Powder Deposition; LPD)은 Direct energy deposition (DED)의 일종으로 Laser Engineered Net Shaping (LENS), Laser Metal Deposition (LMD), Direct Metal Deposition (DMD) 등으로 불리우며, 금속 분말을 에어로졸 형태로 분사하면서 레이저로 녹여 3차원 형상을 제작하는 방식이다. LPD를 이용하면 대형 부품 제작이 가능하고, 손상된 부품의 수리가 가능한 금속 3D 프린팅 방식이다[3].

투고일 : 2015년 9월 4일 심사완료일 : 2015년 9월 21일
게재승인일 : 2015년 9월 30일
교신저자 : 김동식 ✉ dskim87@postech.ac.kr

LPD 방식을 이용한 Ti-6Al-4V 분말 적층에 대한 연구의 대부분은 공정변수가 적층에 미치는 영향 분석 및 의료용 임플란트 등의 작은 형상을 제작하는 연구에 초점이 맞춰져 있다[4-8]. Kobryn et al.[6]은 laser power, scan speed, feeding rate을 변화시켜 가며 적층된 면에서의 기공(porosity)의 변화를 확인하였으며, Alcisto et al.[7]은 적층 방향에 따라 인장시편을 제작하고 물성의 변화를 확인하였다. Bandyopadhyay et al.[8]은 LPD 방식을 이용하여 기공을 가진 임플란트를 제작하였다.

최근에 LPD 방식을 이용해 대형 항공부품을 제작하려는 연구가 진행되고 있다[2]. 제작된 형상은 수직으로 쌓아 올린 단순한 형상에 그치고 있어 3D 프린팅의 장점을 살리지 못하고 있는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 LPD 방식의 프린터를 개발하고 이를 이용하여 티타늄 합금이 가장 많이 쓰이는 산업인 우주항공 분야의 엔진 배기 시스템에 주로 사용되는 기울기를 가진 콘 모양의 원통을 제작하고자 한다.

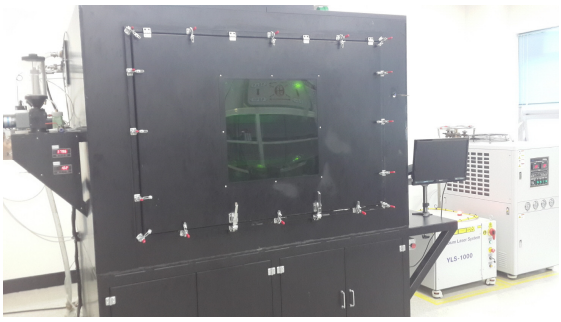

Fig. 1 The image of laser powder deposition system.

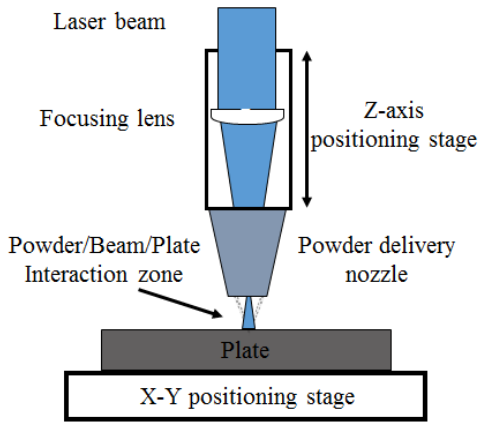

Fig. 2 Schematic diagram of the laser powder deposition system.

2. 실험방법

본 실험에서 사용된 LPD 시스템은 본 연구실에서 자체적으로 구축한 시스템이다. Fig. 1과 Fig. 2는 LPD 시스템의 실제 모습과 간략한 도식도이다. LPD 시스템은 크게 레이저 시스템과 분말 이송시스템으로 구분할 수 있다. 실험에서 사용된 레이저는 1kW fiber 레이저(CW, 1070nm)이며 장치는 빔 전송을 위한 광학계, Ar purge 챔버, 분말 분사 시스템, 3축 스테이지와 각종 센서 및 제어장치 로 구성된다. 금속분말은 독립된 노즐을 통해 Ar 가스와 함께 분사되도록 설계하였다. 본 프린터를 이용하면 최대 500mm 직경과 높이 500mm 크기의 티타늄합금 부품을 불활성 분위기 조건에서 제작할 수 있다.

Ti 합금 시제품의 제작에는 600, 700, 800W의 출력을 이용하였고, 초점 크기는 1.9mm를 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 분말 이송시스템의 경우, 전압을 이용하여 분말 분사량을 조절하였으며, 분말입경이 150μm이하인 구형Ti-6Al-4V 티타늄 합금 분말을 사용하였다. 실험에서 사용한 공정변수들은 Table 1에 간략히 나타내었으며 각각의 공정조건에 대해 적층하고 폭을 측정하였다. 측정결과로부터 분말 효율(catchment efficiency)이 좋은 공정 조건을 이용하여 분말을 적층하여 인장시편을 제작하였다. 인장실험은 최대용량 50kN 인 만능재료시험기를 사용하였으며 적층시편의 성분분석에는 산소/질소/수소 성분 분석기(LECO ONH836)와 탄소/황 분석기(LECO CS744)를 사용하였다.

Table 1 Process parameter

Power (W)	600	700	800
Feeding rate (g/min)	9.6	10.8	12.4
Scan speed (mm/min)	360	480	

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 각 실험 조건에 해당하는 분말 효율을 그래프로 표현하였다. 각각의 속도와 레이저의 세기, 분말 분사량에 따른 적층을 5회 수행하여 높이와 폭을 이용하여 분말 효율을 계산하였다. 분말 효율 계산 결과, 레이저의 세기가 커질수록 분

말 효율은 증가하였으나, 분말 분사량은 일정 수준 이상에서 효율이 증가하지 않고 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 분말 효율이 가장 우수한 실험 조건은 레이저 세기 800W, 속도 360mm/min, 분말 분사량 10.8g/min 이며, 이때의 분말 효율은 약 25% 정도였다.

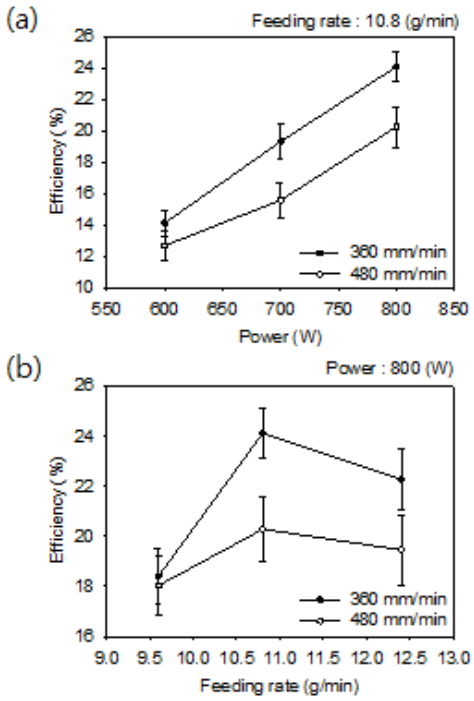

Fig. 3 (a) Effect of power on powder efficiency at feeding rate 10.8 g/min, (b) effect of feeding rate on powder efficiency at power 800 W.

분말 효율이 가장 좋은 공정조건을 이용하여 분말을 적층하여 Fig. 4와 같이 폭 115mm, 높이 40mm 및 두께 5mm의 Ti-6Al-4V 평판을 제작하였다. 이후 제작된 Ti-6Al-4V 평판을 이용하여 Fig. 5의 치수를 갖는 3.8mm 두께의 인장시편을 제작하였으며 이를 이용하여 인장시험과 성분 분석을 수행하였다. 인장시험 결과는 Table 2와 같이 항복강도와 인장강도가 각각 1079MPa과 1107MPa로 ASTM 규격보다 20% 이상 높음을 알 수 있으며 연신율의 경우 7.1 %로 ASTM 규격보다 낮은 70% 수준을 보였다. 연신율의 경우, ASTM 규격 이하의 수치를 가지기 때문에 본 연구실에서 개발한 3D 프린터로 제작된 부품을 상용 부품으로서 사용할 수 없다. 하지만, Table 2에 있는 Alcisto 등[7] 이 본 연구와 유사하게 3D 프린팅으로 제작한 Ti-6Al-4V소재의 물성과 비교하면 본 연구에서 제작된 Ti-6Al-4V소재의 물성이 다소 우수함을 알 수 있으며 Alcisto 등이 추가적으로 수행한 열간 등가압(hot isostatic press, HIP) 공정을 통한 연신율 향상효과를 볼 때 추가적인 HIP공정으로 ASTM 규격 이상의 연신율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구실에서 개발한 3D 프린터를 이용해 제작한 부품은 HIP 공정을 통해 상용 부품으로 사용 가능할 것으로 예상된다. 인장시험 후, 인장시편을 이용하여 성분분석을 수행하였으며 성분분석 결과는 Table 4와 같이 ASTM 규격을 만족함을 알 수 있다.

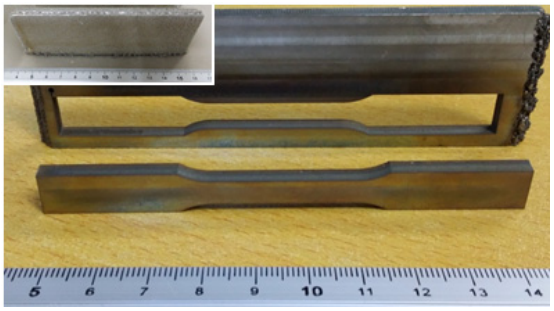

Fig. 4 Fabricated tensile test specimen.

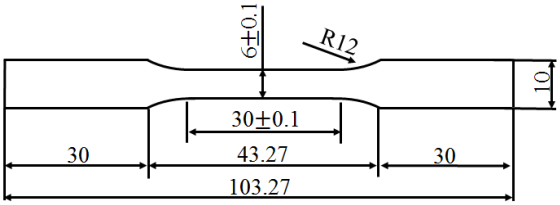

Fig. 5 Geometry of specimen for tensile test.

Table 2 Results of tensile test and requirements of Ti-6Al-4V products

	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Specimen	1079	1107	7.1
Reference Specimen[7]	984	1069	5.4
Reference Specimen with HIP[7]	870	953	11.8
Requirements [ASTM B988]	828	895	10

인장시편을 제작한 공정조건과 동일한 공정 조건을 이용하여 기울기를 가진 원형 튜브 형상을 제작하였으며 Fig. 6은 제작된 원통형 튜브형상을 보여주며 Table 4는 설계된 형상과 제작된 형상의 크기

Table 3 Composition analysis of fabricated specimen and requirements of Ti-6Al-4V

Element(wt%) / Material	O	N	H	C
Specimen	0.15	0.05	0.0047	0.04
Requirements [ASTM B988]	<0.30	<0.05	<0.015	<0.08

를 보여준다. Table 4에서 제작된 원통형 튜브가 설계치와 비교할 때 비교적 정밀하게 제작되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 7은 3D 프린팅의 정밀정형의 효용성을 확인하기 위하여 동일 공정조건으로 제작된 기계가공이 어려운 기울기를 갖는 사각형 튜브 형상을 보여준다.

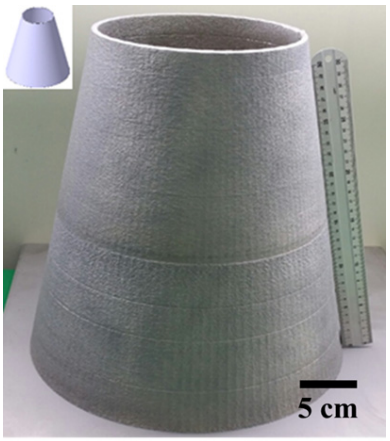

Fig. 6 Fabricated tapered circular tube by LPD process using Ti-6Al-4V powder.

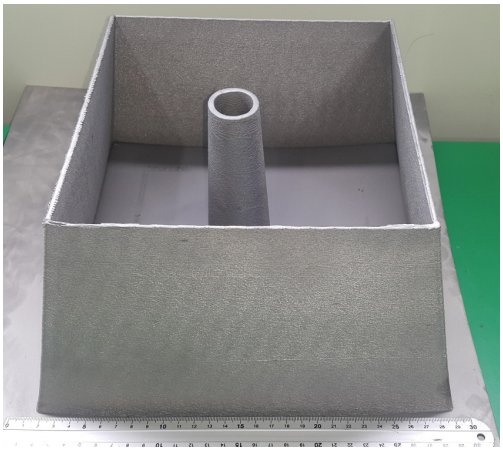

Fig. 7 Fabricated tapered square tube by LPD process using Ti-6Al-4V powder.

Table 4 Size of cylinder model and fabricated cylinder

	Designed cylinder model	Fabricated cylinder
External diameter (upper surface)	137.25	137.4
External diameter (lower surface)	274.5	275.4
Thickness	3.2	4.1
Height	320	320.8

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 3차원 금속 부품 제작이 가능한 레이저 분말 적층(LPD) 방식의 3D 프린터를 자체적으로 개발하였다. 항공우주 분야의 부품소재로 널리 쓰이는 Ti-6Al-4V 금속 소재에 대해 공정을 최적화 하였으며 인장시편을 제작하여 인장시험과 성분분석을 수행하였다. 인장시험 결과, 각종 산업적 응용에 적합한 우수한 기계적 물성을 갖는 것을 확인할 수 있었고 성분분석 결과 역시 기준치를 만족했다. 한편, 기울기를 가진 튜브형상의 Ti-6Al-4V 부품 제작을 통하여 30cm가 넘는 크기의 부품을 부가적인 공정 없이 정밀 제작이 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 3D 프린터는 향후 다양한 연구·개발에 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 ‘레이저 기반 멀티스케일 금속/세라믹 3D 프린팅 기술 개발: 2014R1A2A1A11049453’ 사업과 주식회사 쎄타텍 ‘레이저를 이용한 금속 3D PRINTING 시스템 개발’ 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1) Y. W. Zhai et al., “Novel Forming of Ti-6Al-4V by Laser Engineered Net Shaping”, Materials Science Forum, Vol. 765, 2013.
2) C. Qiu et al., “Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition,” Journal of Alloys and Compounds, Vol. 629, 2015.

3) D. D. Gu et al., “Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms”, International Materials Reviews, Vol. 57, 2012.
4) B. Vamsi Krishna et al., “Low stiffness porous Ti structures for load-bearing implants,” Acta Biomaterialia, Vol. 3, 2007.
5) D. A. Hollander et al., “Structural, mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forming,” Biomaterials, Vol. 27, 2006.
6) P. A. Kobryn et al., “The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V,” Scripta Materialia, Vol. 43, 2000.
7) J. Alcisto et al., “Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V,” Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 20, 2011.
8) A. Bandyopadyay et al., “Application of laser engineered net shaping (LENS) to manufacture porous and functionally graded structures for load bearing implants”, Journal of Materials Science, Vol. 20, 2008.