

Direct Laser Melting 공정시 분말 형태가 적층 품질에 미치는 영향

이성훈¹ · 길태동¹ · 한상욱¹ · 문영훈[#]

Effect of Powder Morphology on the Deposition Quality for Direct Laser Melting

S. H. Lee, T. D. Kil, S. W. Han, Y. H. Moon

(Received March 11, 2016 / Revised May 9, 2016 / Accepted May 16, 2016)

Abstract

Direct laser melting(DLM) is an additive manufacturing process that can produce parts by solidification of molten metallic powder layer by layer. The properties of the fabricated parts strongly depend on characteristics of the metallic powder. Atomized powders having spherical morphology have commonly been used for DLM. Mechanical ball-milling is a powder processing technique that can provide non-spherical solid powders without melting. The aim of the current study was to investigate the effect of powder morphologies on the deposition quality in DLM. To characterize the morphological effect, the performances of spherical and non-spherical powders were compared using both single- and multi-track DLM experiments. DLM experiments were performed with various laser process parameters such as laser power and scan rate, and the deposition quality was evaluated. The surface roughness, cross-section bead shape and process defects such as balling or non-filled area were compared and discussed in this study.

Key Words : Direct Laser Melting, Mechanical Ball Milling, Atomizing, Powder Morphology, Fiber Laser

1. 서론

분말을 이용한 DLM(direct laser melting) 공정은 3차원 CAD 모델을 이용하여 분말을 층별로(layer-by-layer) 용융 적층시켜 부품을 생산하는 방법[1, 2]으로서, 복잡한 형상을 갖는 부품의 시작품 제작에 주로 이용 되었다. 근래에는 적용의 폭이 넓어지면서 자동차와 항공산업, 주형, 의학용품, 기계부품 등의 분야에도 널리 적용되고 있으며, DLM 공정에 대한 관련 연구도 여러 재료에 대해 지속되어 왔다[3]. Yadroitsev[4], Badrossamay[5], Childs[6]등은 레이저를

이용한 정밀 부품 제조방법에 대한 연구를 통해, 스테인리스 강 및 공구강을 사용한 단일트랙(single-track) 적층 기술을 제안하였다. Lee[7]는 입자 크기가 다른 분말을 사용하여 DLM공정의 특성을 분석하였다.

Jang[8]은 철(fe)계 금속 분말을 레이저 용융을 통해 레이저 출력, 주사속도, 주사간격, 분말 도포 두께에 따른 적층 특성을 분석하였다. Kim[9]은 DLM공정시 공정 변수에 따른 내부 공극률과 표면 조도 변화를 분석하였다. 일반적으로 DLM용 분말은 아토마이징(atomizing)된 구형 분말을 이용하게

1. 부산대학교, 기계공학부 정밀가공시스템/정밀정형 및 금형가공 연구센터

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

되는데 기계적 볼 밀링(mechanical ball milling)된 비구형 분말을 DLM공정에 사용할 수 있다면 분말에 대한 제한이 크게 완화되어 다양한 분말의 적용이 가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 구형 분말, 비구형 분말, 그리고 구형과 비구형 분말을 혼합한 분말 등을 이용하여 DLM공정을 수행함으로써 DLM공정시 분말 형태가 적층 품질에 미치는 영향을 분석하였다. DLM공정 특성 분석을 위해 단일 트랙 용융 시험 및 멀티 트랙(multi-track) 사각형상 용융시험을 실시하였다. 단일 트랙 용융시험은 레이저 출력과 주사 속도 등의 각종 레이저 변수에서 수행하고, 멀티 트랙 용융시험은 각 분말 별로 적층하여 표면 조도를 측정하였고, 적층 단면의 비드 형상과 볼링, 비 층 전영역을 비교 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 레이저 용융 시스템 장치의 도식도이다. 레이저 장치의 최대출력은 200W, 빔 직경 0.08mm, 파장 1.07 μ m인 IPG사의 fiber 레이저 YLR-200을 사용하였으며, 분말 레이어링 두께를 10 μ m로 정밀하게 제어할 수 있는 빌드 실린더를 사용하였다. 스캐너(SCANLAB hurrySCAN 20)는 레이저 발광을 제어하는데 사용하였다. 또한 분말 용융 시 시험편의 산화 방지를 위해 Ar가스 분위기에서 수행하였다. DLM의 절차는 다음과 같다. 먼저, 얇은 분말 층이 시편에 레이어링 바에 의해 도포된다. 둘째로, 금속 분말을 레이저 빔으로 용융해 시편에 부착 또는 하부 금속 층으로 응고된다. 마지막으로 다음 도포를 준비하고 빌드 실린더를 기준면에서 분말 층 하나의 두께만큼 하강시킨다. 상기 절차를 반복하여 목표 형상을 갖는 부품을 DLM공정으로 제조하게 된다.

2.2 재료

본 연구를 위해 사용한 분말은 순수 철 분말로서 구형과 비구형 분말에 대해, 체 진동기(sieve shaker)의 통과 치수를 기준으로 하였으며 평균 입자크기를 각각 20 μ m, 40 μ m, 60 μ m로 분류하였다. Fig. 2에 크기 별로 분류한 분말의 크기분포를 나타내었다. 설정된 평균입자크기 20 μ m의 경우 19~21 μ m에서 구형은

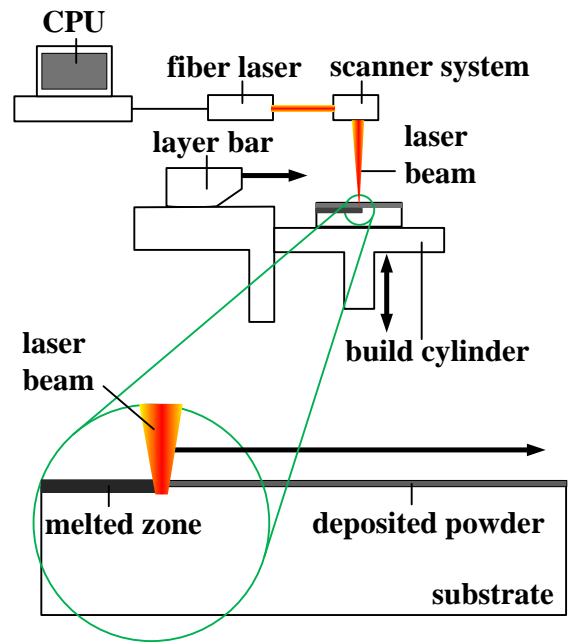


Fig. 1 Schematic of direct laser melting system

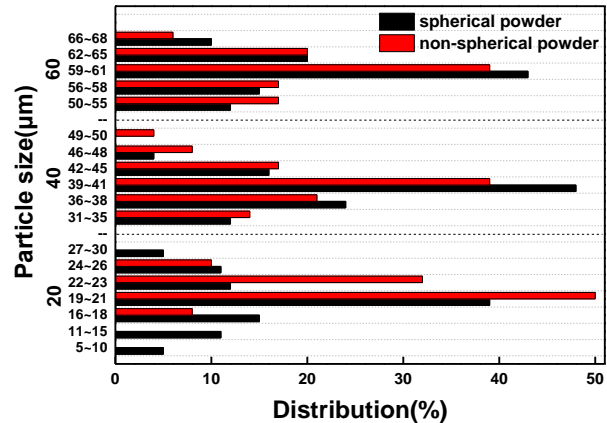


Fig. 2 A graphical representation of particle size distribution

39%와 비구형은 50%, 40 μ m의 경우 39~41 μ m에서 구형은 48%와 비구형은 39%, 60 μ m의 경우 59~61 μ m에서 43%와 39%로 측정되어 각 분포가 큰 범위의 입자크기를 평균입자크기로 설정하였다. Fig. 3에 비구형 분말의 장/단축 비를 나타내었다. 평균 장/단축 비는 입자 크기와 무관하게 약 1.6으로 측정되었다. 구형과 비구형의 혼합효과를 분석하기 위해 Table 1에 나타낸 비율로 혼합분말을 제조하였다. 균일한 혼합분말을 얻기 위해 KMD-1B 볼 밀링기를 사용하였고, 600rpm으로 20분간 시행하였으며 혼합과정을

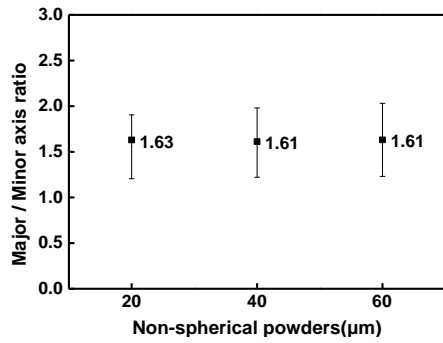


Fig. 3 Major/Minor axis ratio of non-spherical powders

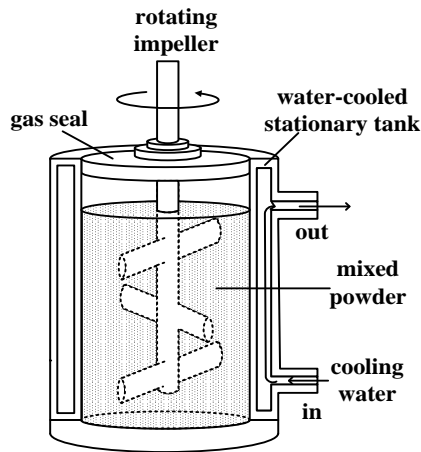


Fig. 4 Schematic drawing of mechanical mixing process

Table 1 Mixing ratio of spherical and non-spherical powders

	spherical powder	non-spherical powder
	size (mixing%)	size (mixing%)
P1	20μm(50%)	20μm(50%)
P2	40μm(50%)	40μm(50%)
P3	60μm(50%)	60μm(50%)
P4	20μm(60%)	60μm(40%)
P5	60μm(40%)	20μm(60%)

Fig. 4에 도식적으로 나타내었다. 모재 시편은 AISI D2 시편을 사용하였고, 화학 조성은 12% Cr, 1.5% C, 1% Mo, 0.45% Mn, 0.35% V and 0.25% Si 이다. 실험 전 모재 시편의 표면을 SiC paper를 사용하여 #400 부터 #2000까지 단계별로 연마하였다. 시험한 시편의 특성 분석을 위해 단면을 절단하여 분석하였다.

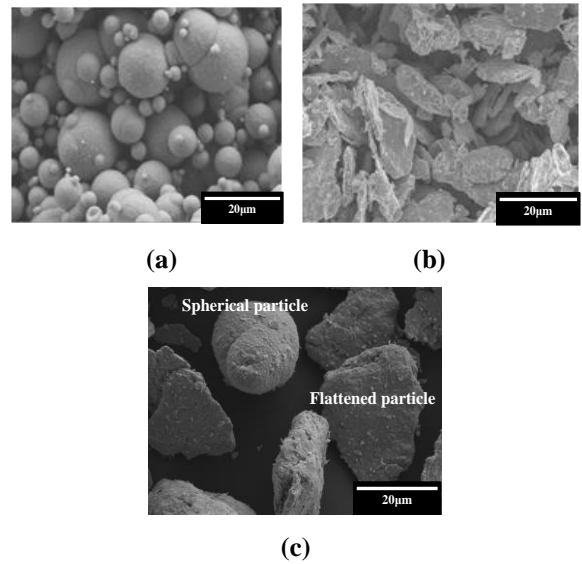
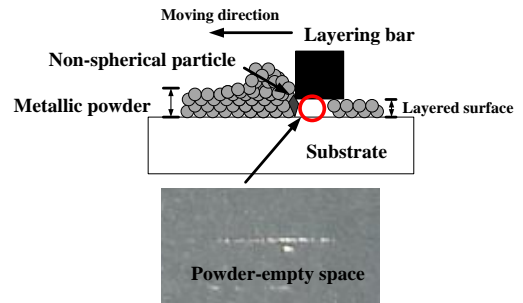
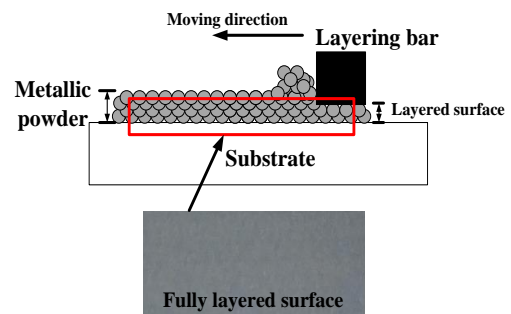


Fig. 5 Morphology of metallic powder ; (a) spherical, (b) non-spherical, (c) mixed



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of layered surfaces; (a) sparsely layered surface, (b) fully layered surface

3. 결과 및 고찰

3.1 분말 모양에 따른 건전성

Fig. 5에 실험에 사용한 분말을 SEM으로 촬영한

사진이다. Fig. 5(a)는 아토마이징으로 제작된 분말이며, (b)는 기계적 볼 밀링으로 제작된 비구형 분말, (c)는 구형과 비구형 분말을 혼합한 것이다. DLM공정을 위해 분말을 평탄하게 만들어 주기 위한 레이저링시 분말의 모양에 따라 레이저링 정도에 큰 차이를 보였다. Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같이 비구형의 분말인 경우, 형상이 상대적으로 불규칙하므로 레이저링 바가 통과할 때 국부적으로 분말의 이동이 연속적이지 못해 레이저링 불량이 발생하는 빈도가 높았다. 구형 분말의 경우에는 Fig. 6(b)에 나타낸 바와 같이 균일한 레이저링 형태를 보였다. 하지만 구형 분말의 경우에도 크기가 40 μm 이상에서는 레이저링 불량이 발생하는 빈도가 상대적으로 증가하였다.

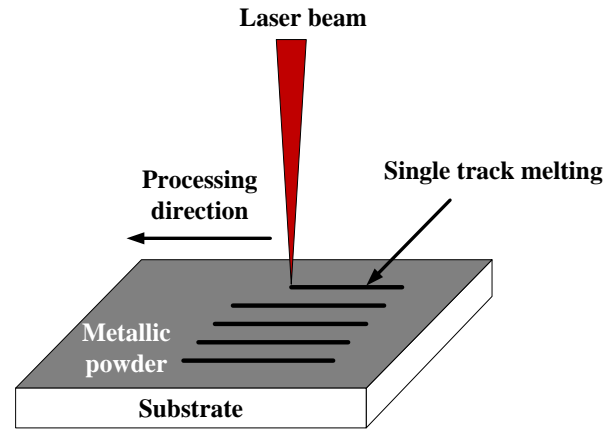
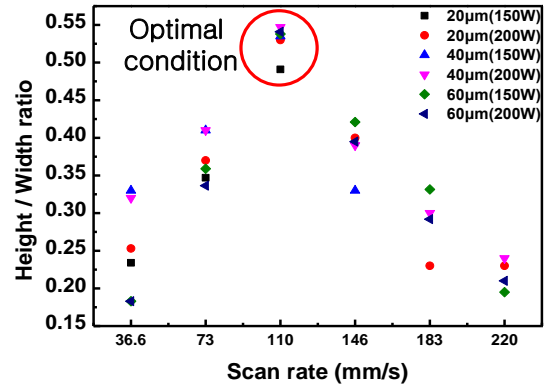


Fig. 7 Schematic of single track melting

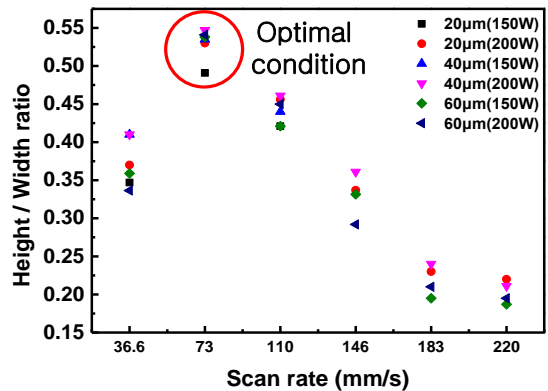
3.2 단일 트랙 용융 실험

DLM 공정으로 제조된 부품의 건전성은 금속 분말의 응고 특성에 의존하므로, Fig. 7에 나타낸 단일 트랙 용융시험을 실시하였다. 시험을 위해 150W와 200W의 레이저 출력, 0.06mm의 빔 직경, 주사속도는 36.6mm/s부터 220mm/s 범위를 설정하였다. 분말의 도포 두께는 분말크기의 1.5 배로 도포하였다. 다양한 레이저 공정변수에 의해 형성된 비드의 폭과 두께는 이미지 이미지 분석 프로그램(TDI plus 5.0)을 이용하여 측정하였다. 형성된 비드의 형상 비(비드 높이/비드 폭)는 약 0.5를 최적 형상으로 간주하였다[10].

단일 트랙 용융 시험을 수행한 결과, 구형 및 비구형 분말 모두 DLM공정을 통해 안정적인 비드를 형성할 수 있었다. Fig. 8은 구형과 비구형 분말의 레이저 출력과 주사속도 별 비드의 형상 비를 나타내었다. Fig. 8(a)는 구형 분말의 레이저 주사속도 별 형상 비를 나타내었으며 최적 조건은 주사속도가 110mm/s일 때 약 0.5의 형상 비를 가진다. Fig. 8(b)는 비구형 분말의 주사속도 별 형상 비를 나타내었으며 최적조건은 73mm/s이다. Fig. 9(a)는 구형 분말을 200W의 레이저 출력 및 110mm/s의 주사속도로 얻어진 단일 트랙의 최적 비드 형상이다. Fig. 9(b)는 비구형 분말을 200W의 레이저 출력에서 73mm/s의 주사속도로 얻어진 단일 트랙의 최적 비드 형상이다. 따라서 최적 비드 형상 비 0.5를 나타내기 위한 레이저 입열 조건 측면에서 비교하면 구형과 비구형 분말간의 차이를 보임을 알 수 있다. 또한 구형



(a)



(b)

Fig. 8 H/W ratio by laser process parameters; (a) spherical powder, (b)non-spherical powder

분말의 비드가 비구형 분말의 비드보다 큰 높이와 폭을 보였는데 이 결과는 유사한 공정조건에서의 Simchi의 결과와 일치한다[11].

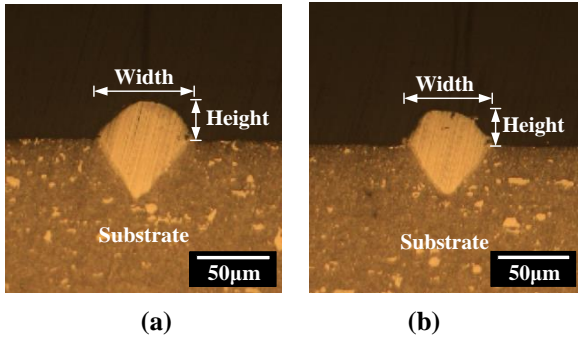


Fig. 9 Bead obtained from single track melting test; (a) spherical powder, (b) non-spherical powder

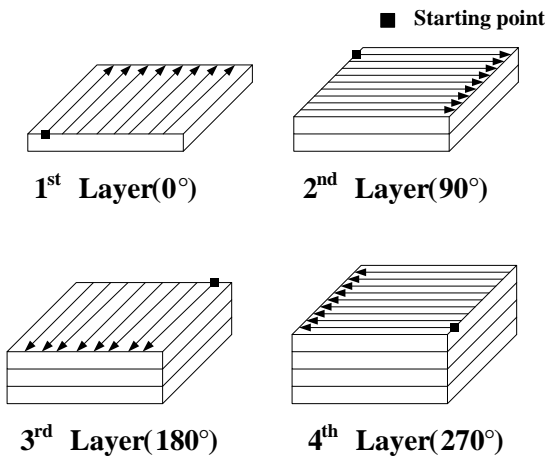


Fig.10 Fabrication of quadrangle structure by cross-hatching technique

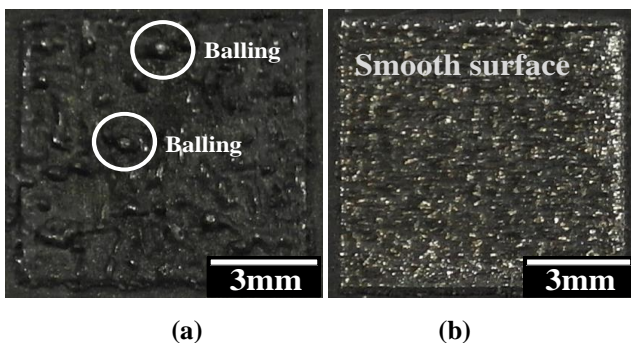
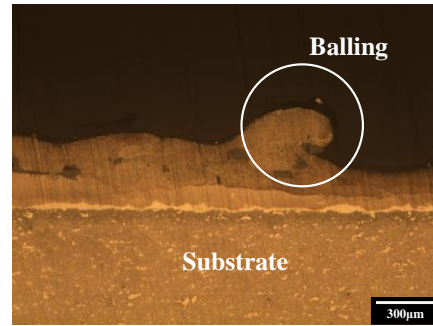


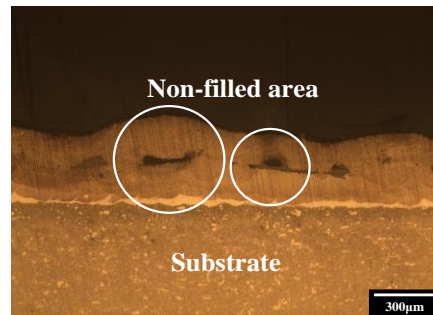
Fig.11 Deposited surface obtained from DLM process; (a) surface showing balling, (b) smooth surface

3.3 멀티 트랙 용융 실험

멀티트랙(multi-track) 용융 특성을 관찰하기 위해 사각형태의 DLM공정을 수행하였다. Fig. 10은 크로스-해칭 기능을 이용하여 사각형 구조를 제작하기 위해 사용된 레이저 스캐닝 패턴을 나타내었다. 멀



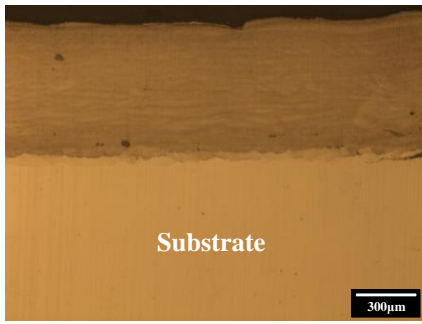
(a)



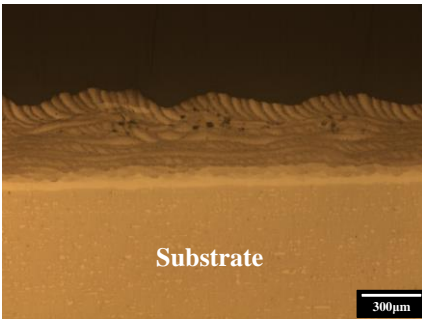
(b)

Fig.12 Defects in cross-section of quadrangle structure; (a) surface showing Balling, (b) non-filled area

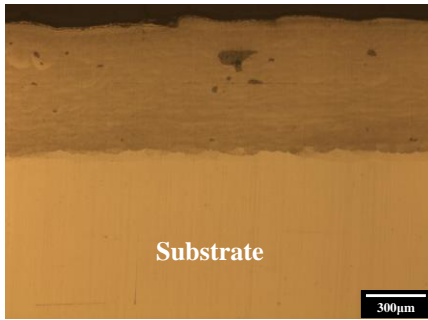
티 트랙 용융 실험을 수행한 결과, 구형 및 비구형 모두 단일 트랙 용융시험에 비해 DLM공정 안정성이 낮게 나타났다. 특히 구형 분말의 경우에 비해 비구형 분말의 DLM 공정이 불안정하여 건전한 비드를 형성하는데 한계를 보였다. Fig. 11(a)에 실험을 통해 얻어진 볼링(balling)형상을 나타내었다. 멀티트랙시험의 경우, 입자 모양과 크기에 따라 특정 층 이상에서 볼링과 같은 결함이 발생 되고, 발생된 볼링으로 인해 후속 고정을 위한 분말의 레이어링이 불가능해지므로 더 이상의 적층이 불가능 하였다. Fig. 11(b)에 볼링이 없는 건전한 면을 나타내었는데 레이어링을 방해할 만한 결함이 없으므로 높은 적층 형상을 얻을 수 있다. Fig. 12에 DLM공정시 발생된 공정 결함을 절단 단면을 통해 나타내었는데, Fig. 12(a)는 볼링 현상을, 12(b)는 비충전 영역을 나타낸다. 이는 분말을 도포한 후 레이어링 바가 통과할 때 비구형분말의 형상 특성으로 인한 레이어링 불량으로 국부적인 빈공간이 발생하게 되고, 분말의 크기와 형태에 따라 분말과 분말 사이의 작은 공간이 발생함에 따라 발생하는 결함이다. 구형 분말의 크기가 40µm이상일 때 7층 이상에서는 그림과 같이



(a)



(b)



(c)

Fig.13 Cross-section of quadrangle structure made by atomized powder (a); sheive shaker (b); mechanically-ball milling(c)

볼링 현상이 발생되고 60µm에서는 1층에서 다음과 같은 현상이 발생하였다. 비구형 분말의 경우, 분말 크기가 40µm이상일 때 2층 이상에서, 60µm에서는 1층에서 볼링현상이 발생한다. 비 충전 영역은 구형 분말보다 비구형 분말의 경우 더욱 빈번하게 발생하였다. Fig. 13은 다른 분말에 비해 비교적 적층이 잘 된 시편의 단면을 분석한 사진이다. Fig. 13(a)는 20µm의 구형 분말을 사용하여 레이저 출력 200W, 주사속도 110mm/s의 조건에서 결함 없이 30층 적층한 사진이다. (b)는 20µm의 비구형 분말로 레이저 출

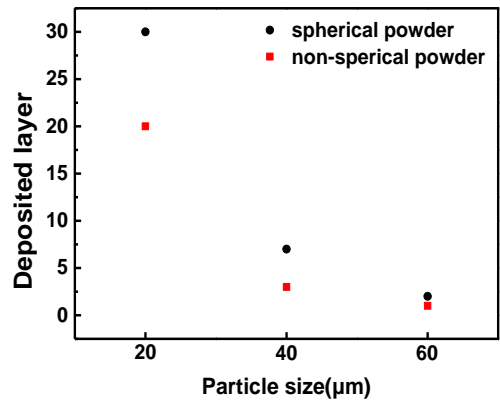


Fig.14 Maximum number of layer that can achieve stable deposition for spherical- and non-spherical powders

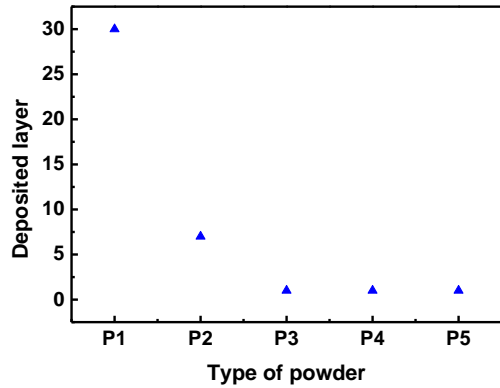


Fig.15 Maximum number of layer that can achieve stable deposition for mixed powders

력 200w, 주사속도 73mm/s의 조건에서 20층 적층한 사진이다. (c)는 20µm의 구형과 20µm의 비구형 분말을 기계적 볼 밀링으로 혼합하여 레이저 출력 200W, 주사속도 110mm/s의 조건에서 30층 적층하였다. 비구형에 비해 구형 분말이 상대적 적층 가능 횟수가 많았고, 구형과 비구형 분말을 혼합하여 적층 후 단면을 분석한 결과 기공률이 구형 분말을 사용하여 적층하였을 때 보다 높았다.

Fig. 14는 구형과 비구형 분말의 안정적인 적층 가능 층수를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이, 구형 분말이 더 높은 층수의 적층을 할 수 있었다. 20µm의 구형분말은 30층을 적층하였고, 비구형 분말은 20층을 적층하였다. 40µm의 구형 분말은 7층을 적층하였고, 비구형 분말은 3층 적층 할 수 있었다. 60µm의 경우 구형과 비구형 분말은 1층 적층시 볼

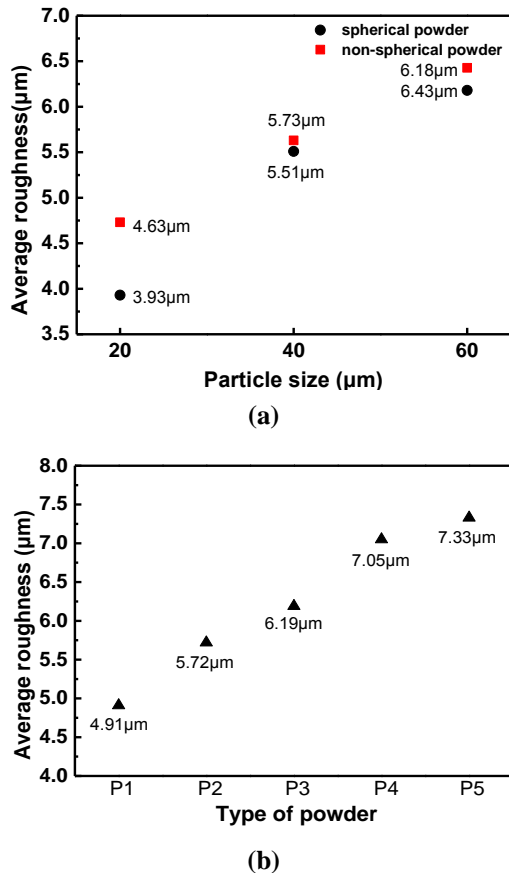


Fig.16 Variation of the average surface roughness; (a) spherical- and non-spherical powders, (b) mixed powders

링 현상과 비충전 영역이 발생하여 실험을 중단하였다. Fig. 15는 혼합한 분말의 안정적인 적층 가능 층수를 나타내었다. 구형 $20\mu\text{m}$ 와 비구형 $20\mu\text{m}$ 를 혼합한 P1분말의 경우 30층을 적층하여 상대적으로 가장 안정적인 DLM형상을 얻을 수 있었고, P2, P3, P4, P5의 경우에는 공정결함이 발생하여 안정적인 적층이 불가능 하였다.

3.4 적층 후 표면 조도 측정

구형과 비구형 분말, 기계적 불 밀링으로 혼합한 분말을 Fig. 14과 Fig. 15에서 나타낸 바와 같이 적층 후 표면 조도를 측정하였다. Fig. 16(a)에 구형과 비구형 분말의 평균 조도를 나타내었고, (b)에 혼합한 분말의 평균 조도를 나타내었다. 구형, 비구형 모두 분말의 입자크기가 작을수록 매끄러운 표면을 보였다. 혼합된 분말의 경우도 혼합한 구형과 비구형 분말의 입자 크기가 작을수록 매끄러운 표면을 얻을

수 있었다. 분말의 크기가 작을수록, 모양이 구형일수록 레이어링시 빈 공간 없이 레이어링이 되기 때문에 볼링 현상이 감소하며 상대적으로 치밀한 표면을 얻을 수 있었다.

4. 결론

200W 레이저 장비를 이용한 Direct Laser Melting 공정시 분말 형태가 적층 품질에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단일 트랙 DLM 공정의 경우, 구형 및 비구형 분말 모두 안정적인 비드를 형성할 수 있었으며 최적 비드 형상 비 0.5를 나타내는 레이저 입열 조건은 구형 및 비구형 분말간의 차이를 보였다.

(2) 적층시 DLM공정의 안정도는 분말의 형태가 구형일수록, 입도가 작을수록, 레이저 출력이 150W보다 200W에서 우수하였다. 구형 분말의 적층 안정도가 비구형에 비해 우수하며, 분말입자크기가 $20\mu\text{m}$ 이하인 경우에는 입자 형상에 무관하게 안정적인 적층이 이루어 졌다.

(3) 분말의 형태가 구형일수록, 입도가 작을수록 균일한 레이어링으로 인해 DLM공정결함의 발생이 감소하며 고밀도의 매끄러운 표면을 얻을 수 있다.

(4) 안정적인 DLM적층을 위해서는 구형 분말의 사용이 유리하며, 비구형 분말을 전적으로 또는 부분적으로 혼합하여 사용하기 위해서는 가능한 한 입자크기가 작은 분말을 사용하여야 한다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부의(미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] J. Y. Jeng, M. C. Lin, 2001, Mold Fabrication and Modification using Hybrid Processes of Selective Laser Cladding and Milling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 110, No. 1, pp. 98~103.
- [2] B. D. Joo, J. H. Jang, H. S. Yim, Y. H. Moon, 2009, Effect of Process Parameters on Forming Characteristics of Selective laser Sintered Fe-Ni-Cr

- Powder, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 3, pp. 262~267.
- [3] F. Abe, K. Osakada, m. Shiomi, K. Uematsu, M. Matsumo, 2001, The Manufacturing of Hard Tools from Metallic Powders by Selective Laser Melting, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 111, No. 1, pp. 210~213.
- [4] I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. Bertrand, I. Smurov, 2007, Strategy of Manufacturing Components with Designed Internal Structure by Selective Laser Melting of Metallic Powder, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 254, No. 4, pp. 980~983.
- [5] M. Badrossamay, T. H. C. Childs, 2007, Further Studies in Selective Laser Melting of Stainless and Tool Steel Powders, *Int J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 47, No. 5, pp. 779~784.
- [6] T. H. C. Childs, C. Hauser, 2005, Raster Scan Selective Laser Melting of the Surface Layer of a Tool Steel Powder Bed, *Proc. Inst. Mech. Eng., B J. Eng. Manuf.*, Vol. 219, No. 4, pp. 379~384.
- [7] J. H. Lee, J. H. Jang, B. D. Joo, H. S. Yim, Y. H. Moon, 2009, Application of Direct Laser Metal Tooling for AISI H13 Tool Steel, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*, Vol. 19, Suppl. 1, pp. s284~s287.
- [8] J. H. Jang, B. D. Joo, C. H. Jeon, Y. H. Moon, 2011, Characterization of the Deposited layer Obtained by Direct Laser Melting of Fe-Cr Based Metal Powder, *Korean J. Met. Mater.*, Vol. 50, No.2, pp. 107~115.
- [9] T. H. Kim, J. H. Jang, C. H. Jeon, Y. H. Moon, 2011, Effect of Process Parameters on Surface Roughness and Porosity of Direct Laser Melted Bead, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 20, No. 8, pp. 575~580.
- [10] S. W. Han, W. J. Ji, Y. H. Moon, 2014, Fabrication of Gear Having Functionally Graded Properties by Direct Laser Melting Process, *Adv. Mech. Eng.*, Vol. 2014, pp. 1~6.
- [11] A. Simchi, 2006, Direct Laser Sintering of Metal Powder: Mechanism, Kinetics and Microstructural Features, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 5, Part B, pp. 551~560.