# DLM 공정시 공정변수에 따른 내부공극률과 표면조도 변화

김태현<sup>1</sup>·장정환<sup>1</sup>·전찬후<sup>1</sup>·문영훈<sup>#</sup>

### Effect of Process Parameters on Surface Roughness and Porosity of Direct Laser Melted Bead

T. H. Kim, J. H. Jang, C. H. Jeon, Y. H. Moon

(Received October 17, 2011 / Revised November 2, 2011 / Accepted November 8, 2011)

#### Abstract

Direct laser melting(DLM) is promising as a joining method for producing parts for automobiles, aerospace, marine and medical applications. An advantageous characteristic of DLM is that it affects the parent metal very little. The mechanical properties of parts made by DLM are strongly affected by the porosity and surface roughness of the laser melted beads. This is a systematic study of the effects of the porosity and surface roughness of laser melted beads using various processing parameters, such as laser power, scan rate and overlapping ratio of the fill spacing. The specimens were fabricated with 316L and 304L austenitic stainless steel powder. Dense parts with low porosity were obtained at low laser scan speed, as it increased the aspect ratio of the parental material and the depth of penetration. The variations of surface roughness were examined at various processing parameters such as overlapping ratio and laser power.

Key Words : Direct Laser Melting, Fiber Laser, Stainless Steel Powder, Porosity, Surface Roughness

#### 1. 서 론

DLM(direct laser melting)공정은 쾌속 조형 공정 중의 하나로 금형 등의 공구를 사용하지 않고 비 접촉식으로 레이저 빔을 주사하여, 짧은 시간 내 에 정밀한 제품을 제작할 수 있는 기술이다[1]. 또 한 3차원 쾌속조형 및 제작공법중의 하나로써, 3 차원 CAD 데이터를 2차원 데이터로 슬라이스 하 고 2차원 형상의 적층을 통하여 3차원 형상을 얻 을 수 있다. 공정상의 장점으로는 설계 프로세스 에서 작성된 부품의 형상 데이터를 재입력하지 않고 최대한 재이용[2~3]하기 때문에 정확하고 빠 르게 복잡하거나 난해한 형상 제작이 가능하므로 [4], 이를 통한 제품개발 기간의 감소 효과를 얻을 수 있다[5~6]. 시작품 제작에 주로 이용되던 DLM 공정기술은 이용의 폭이 넓어지면서 주형, 의학용 품, 기계부품 등 다양한 실 부품 제작에도 이용 가능성이 높아지고 있으며 경량 구조물 제작의 장점을 가지고 있다[7]. 또한 자동차, 우주항공, 의 료용 부품산업 등의 다양한 분야에서 응용되고 있는 다공성 금속이 제작 가능하다[8~10]. 다공성 금속은 완충재, 방음재, 보온재, 전극재 등에 쓰이 고 있는 기존 재질에 비해 높은 열전도성 그리고 낮은 비중량 등의 기계적 특성을 가진 금속으로

한국소성가공학회지/제20권 제8호, 2011년/575

<sup>1.</sup> 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형 가공 연구소 # 교신저자: 부산대학교 기계공학부, E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

알려져 있다[11]. 이에 본 연구에서는 DLM공정변 수에 따라 스테인리스 304L, 316L분말을 용융시켜 반복 적층을 실시하여 사각 형상의 다공성 금속 을 제작 한 후 공정변수에 따른 내부 공극률과 상부 표면조도의 변화에 대하여 분석하였다.

#### 2. 실험방법

#### 2.1 실험재료 및 장치

실험에 사용된 직접 레이저 용융 시스템 장치 의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 직접 레이저 용 융 시스템은 열원으로 최대출력 200W, 빔 직경 80µm, 파장 1070nm 인 IPG사의 화이버(fiber) 레이 저 YLR-200을 사용하였으며, 본 연구에서 수행한 DLM공정은 분말 용융 시 시험편의 산화방지를 위해 N<sub>2</sub> 발생기(generator)를 설치하여 N<sub>2</sub> 분위기에 서 수행하였다. 금속분말 소재로는 우수한 내부식 성의 강점으로 인해 의료장비, 원자력산업, 식품 공업기기, 석유 화학 산업 등에 널리 사용되는[12] 304L 및 316L 스테인리스 강 분말을 사용하였으 며, 평균입자크기는 150µm로 Table 1에 화학성분을 나타내었다.

#### 2.2 실험방법

2.2.1 선 용융 실험

시험편 제작을 위하여 SUS316L을 모재부로 하 여 150/m 높이로 분말을 도포한 후 레이저 출력 (100,150,200W)과 레이저주사속도(18.3~420.9mm/s) 를 공정 변수로 하여 10mm 길이의 단층 선 용융 실험을 진행하였다. 이미지 분석 프로그램(TDI Plus 5.0)을 사용하여 융융된 선 폭과 깊이에 대한 분석을 수행하였으며, 측정된 선 폭을 바탕으로 공정 변수 별로 도포된 분말이 완전 용융되는 구 간을 정하여 사각 형상 적층 시 공정조건으로 선 택하였다.

#### 2.2.2 사각 형상 적층 실험

Table 2에 단층 선 용융 실험을 통하여 선정하게 된 공정조건을 나타내었다. 이를 바탕으로 가로 5mm, 세로 5mm, 높이 5mm의 다층 사각형상 적 층 실험을 수행하였다. 적층된 각 시험편 내부의 조밀한 정도를 측정하기 위하여 밀도측정을 실시 하였다. 밀도측정은 Precisa의 XB 220A 정밀전자저 울을 통해 공기 중에서의 시험편 무게와 물의 부 력을 이용한 물 속에서의 시험편 무게를 측정하

576 / 한국소성가공학회지 /제20권 제8호, 2011년



Fig. 1 Schematic of direct laser melting system

Table 1 Chemical composition of stainless steel powders(wt.%)

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо
SUS 316L	Bal.	0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	10~14	16~18	2~3
SUS 304L	Bal.	0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	8~12	18~20	-

 
 Table 2 Experimental conditions for fill spacing (overlapping ratio = 1)

Seen and (manuals)	Laser power	Fill spacing (mm)		
Scan rate (mm/s)	(W)	SUS304L	SUS316L	
	100	0.12	0.10	
146.4	150	0.14	0.14	
	200	0.16	0.17	



Fig. 2 Schematic of powder melting on the laser fill spacing; (a) overlapping ratio = 1, (b) overlapping ratio > 1

여 밀도값을 얻는 방법을 수행하였다. 또한, 적층된 시험편 상부의 표면 거칠기를 분석하기 위하여 Mitutoyo사의 DIAVITE DH-6 모델을 이용하여 측정 길이(traversing length)를 4.8mm로 고정시켜 레이저 스캔의 수직방향으로 평균 조도(average roughness, Ra)측정을 실시하였다.

Fig. 2는 레이저 주사 시 레이저 빔 간격(fill spacing)에 따라 분말이 용융되는 폭의 관계를 나 타낸 모식도이다. 위의 모식도에서 X는 레이저 빔 간격,Y는 용융된 폭을 의미한다.

#### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 선 용융 실험

선 용융 실험 시 주사속도에 따른 각 분말의 용융 특성을 평가하기 위해 레이저출력과 주사속 도를 공정변수로 결정하여 실험을 수행하였다.

$$A \cdot R = \frac{H}{W} \tag{1}$$

식 (1)에서 A·R(Aspect Ratio)는 종횡비이고, 레이 저 주사 시 분말이 용융된 비드 폭(W)과 모재에 가해진 용입 깊이(H)를 Fig. 3에 나타내었으며, 레 이저 주사속도에 따른 종횡비를 식 (1)로 계산하 여 Fig. 4에 나타내었다.

SUS316L 과 SUS304L의 종횡비 특성을 비교해 보면 SUS304L의 종횡비는 주사속도 18.3mm/s 에 서 가장 높게 나타났으며, 레이저 출력이 100W, 150W, 200W일 때 각각 0.40, 0.59, 0.80의 값을 나 타내었다.

이에 반해 동일한 주사속도에서 SUS316L 종횡 비의 경우 100W는 0.27, 150W에서는 0.40, 200W의 경우 0.76의 값을 나타내었다. 주사속도가 증가할 수록 종횡비는 감소하는 경향이 나타났으며, 주사 속도가 빠른 경우에서도 SUS316L보다 304L의 종 횡비가 대체적으로 높음을 알 수 있었다.



Fig. 3 Definition of aspect ratio



Fig. 4 Influence of scan rate on the melting width and depth; (a) 304L stainless steel powder, (b) 316L stainless steel powder



Fig. 5 Variation of porosity with heat input

한국소성가공학회지 /제20권 제8호, 2011년/577

레이저 주사속도가 낮은 경우 모재 내부로의 열 침투깊이가 증가하여 보다 깊은 비드를 형성하게 된다. 또한 SUS304L과 SUS316L의 용융점은 약 1400℃로 거의 동일하나, SUS304L의 열팽창계수는 17.3이고 SUS316L은 15.9이다. 이와 같은 열팽창 계수의 차이는 용융 시 시편 내부로의 열 침투 깊이를 다르게 하며, 이에 따른 용입 깊이의 변화 로 인해 종횡비의 차이를 보인다.

## 3.2 사각 형상 적층 실험

3.2.1 선 중복비에 따른 공극률

단층 선 용융 실험을 통하여 각 분말들이 안정 적으로 용융된 조건 내에서 사각 형상 적층 실험 을 수행하였다. 선 중복비는 레이저 주사 간격에 따른 용융된 선 폭의 비로 구하였다. 앞서 나타낸 Fig. 2(a)의 공정을 이용하여 선 중복비가 1인 경우 에 Table 2의 실험조건으로 실험을 수행하였고, 이 에 대한 실험결과는 레이저 주사 시 입열량에 따 른 시험편의 공극률 변화로 Fig. 5에 나타내었다. 입열량은 아래의 식(2)으로 계산되었다[13].

$$E = \frac{P}{D \cdot v} (J / mm^2)$$
 (2)

여기서, E는 에너지 밀도, P는 레이저 출력(W), D 는 레이저 빔 직경(mm), v는 레이저 주사속도 (mm/s)를 의미한다. 입열량이 증가 할수록 각 시험 편의 공극률이 점차 감소하는 경향이 나타났으며, 입열량이 17.08J/mm<sup>2</sup> 일 때의 SUS304L과 SUS316L 의 공극률은 11.41, 12.41%로 가장 낮게 측정되었 다. 이는 입열량이 증가함에 따라 용입깊이 방향 으로의 열전달이 증가하게 되어 내부 공극이 감 소된 것으로 판단된다.

이와 달리 Fig. 6은 레이저 주사 시 Fig. 2(b)의 공정을 이용하여 선 중복비가 1보다 큰 경우에 Table 3의 실험조건으로 수행한 결과이다. 시험편 에 대한 밀도는 아래의 식 (3)를 이용하여 시험편 의 내부 공극률로 나타내었다.

$$Porosity(\%) = \frac{(\rho_{theo} - \rho_{meas})}{\rho_{theo}} \times 100$$
(3)

여기서, *ρ<sub>theo</sub>* 는 이론밀도, *ρ<sub>meas</sub>* 는 측정밀도를 의미한다. SUS304L, SUS316L의 이론밀도는 각각 7.93, 7.98을 기준으로 하였다. 레이저출력이 200W, 주사속도 36.6mm/s인 경우 적층 시 Fig. 7에 나타

578 / 한국소성가공학회지 / 제20권 제8호, 2011년

 Table 3 Experimental conditions for fabrication of rectangular shape

Laser power (W)	100, 150, 200		
Scan rate (mm/s)	36.6, 146.4, 256.2		
Fill spacing (mm)	0.09		



Fig. 6 Variations of porosity and overlapping ratio with scan rate; (a) 304L stainless steel powder, (b) 316L stainless steel powder

낸 바와 같이 시편 한쪽 끝단부의 높이가 다층으 로 진행될수록 높게 생성되어 적층 시 분말 레이 어 바(powder layer bar)를 사용한 분말 도포가 불가 능하여 주사속도 146.4, 256.2mm/s에서의 시편만 적층 할 수 있었다. 이는 최초 레이저 주사 시 분 말에 열이 가해지면서 먼저 열을 받게 되는 분말



Fig. 7 Schematic of the formation of the laser melted beads

부분에서 분말의 용융을 위해서 사용되는 에너지 의 양이 증가하여 이러한 현상이 나타난 것으로 판단된다. 레이저 출력 100W, 주사속도 36.6mm/s 일 때 304L과 316L시편의 공극률은 각각 28.19% 21.75%로 가장 높게 측정되었고, 200W인 경우 주 사속도 256.2mm/s에서 6.55%, 6.85%로 가장 낮게 측정되었다. 또한, 레이저 출력이 높고 분말의 용 융이 안정적인 범위 내에서의 빠른 주사속도일 경우에 공극률이 낮은 경향을 보였다. 이는 선 중 복비가 1인 공정에 비해 1보다 큰 공정에서 분말 이 중복 용융되면서 공극이 줄어드는 현상으로 판단되며, 레이저 출력이 높고 주사속도가 빠른 경우 용융 폭이 조밀하게 내부를 구성하게 되어 공극률이 감소하는 경향이 나타난 것으로 판단된 다. 또한, 200W인 경우의 SUS304L이 SUS316L보 다 공극률이 낮게 측정되었는데, 이는 SUS304L의 열팽창계수가 SUS316L보다 크기 때문에 레이저 출력이 증가함에 따라 용융 시 용입 깊이가 깊어 지게 되어 내부의 공극을 더 감소시킨 것으로 판 단된다.

#### 3.2.2 선 중복비에 따른 표면조도 변화

Fig. 8(a)는 선 중복비 1 인 경우이며, Fig. 8(b)는 레이저 주사 간격이 0.09인 조건에서 선 중복비가 1보다 큰 경우에 각 레이저 출력 별, 레이저 주사 속도에 따른 평균표면조도를 나타낸 그래프이다. (a)경우 레이저 출력이 높아짐에 따라 표면조도는 낮아지는 경향이 나타났다. 동일한 레이저 주사속 도와 간격에서 레이저 출력이 100W인 경우에 비 해서 200W의 폭은 넓게 형성되므로 표면조도가 향상된 것으로 판단된다. 이에 반하여 (b)경우에는 레이저 출력이 높아짐에 따라 평균표면조도는 거 칠게 형성되는 경향이 나타났다. 레이저 주사 간 격은 0.09로 고정되어 있으므로 용융 시 레이저 주사속도가 느릴 때 보다 빠른 경우와 레이저 출



Fig. 8 Variation of the average surface roughness with laser power; (a) overlapping ratio = 1, (b) overlapping ratio > 1

력이 작을 경우에 용융된 비드의 크기가 작게 형 성되어 SUS304L과 SUS316L 분말 모두 공극이 작 은 치밀한 표면을 가지는 경향이 나타난 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

(1) 선 용융 실험 시 레이저 주사속도가 느린 경우 종횡비는 커지고, 모재 내부로 열 침투깊이 가 증가하게 되는데 이러한 영향은 적층 시 공극 률 감소에 영향을 준다.

(2) 다층 적층 시 레이저 주사간격이 용융된 비 드의 폭과 동일 한 경우와 레이저 주사간격이 작

한국소성가공학회지 /제20권 제8호, 2011년/579

을 경우를 비교해볼 때 작을 경우에 용융된 선의 중복되는 현상으로 인하여 공극률의 변화는 레이 저 출력200W 주사속도 146.4mm/s의 같은 공정변 수에서 SUS304L은 약 3%, SUS316L은 약 5% 감 소하였다.

(3) 선 중복비가 1인 경우 1보다 큰 경우에 비 해 동일한 주사속도로 용융 시 레이저 출력이 증 가할수록 용융되는 폭이 넓게 형성되어 보다 좋 은 표면조도를 얻을 수 있다.

(4) DLM공정기술을 이용하여 레이저출력 및 주 사간격, 주사속도 등의 공정변수에 따라서 다공성 금속의 성형이 가능하다.

#### 후 기

본 연구는 2011년도 교육과학기술부/한국과학재 단 국가핵심 연구센터사업의 지원으로 수행되었 습니다.

#### 참 고 문 헌

- 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. M. Son, 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] M. D. Montasser, J. K. Lim, K. W. Dalgarno, 2008, A Comparison between Direct and Indirect Laser Sintering of Metals, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 24, No. 2, pp 227~232.
- 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.

- [5] Y. Ning, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, H. T. Loh, 2006, An Approach to Minimize Building Errors in Direct Metal Laser Sintering, IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., Vol. 3, No. 1, pp. 73~80.
- [6] I. Yadroitsev, I. Smurov, 2010, Selective Laser Melting Technology : From the Single Laser Melted Track Stability to 3D Parts of Complex Shape, Physics Procedia, Vol. 5, Part B, pp. 551~560.
- [7] A. Simchi, 2006, Direct Laser Sintering of Metal Powder: Mechanism, Kinetics and Microstructural Features, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 428, No. 1-2, pp. 148~158.
- [8] P. Fisher, H. Leber, V. Romano, H. P. Karapatis, C. Andre, R. Glardon, 2004, Microstructure of Nearinfrared Pulsed Laser Sintered Titanium Samples, Appl. Phys. A, Vol. 78, No. 8, pp. 1219~1227.
- [9] M. Y. Sung, B. D. Joo, S. H. Kim, Y. H. Moon, 2010, Process Analysis of Melting Behaviors in Selective Laser Melting Process, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 8, pp. 517~522.
- [10] J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers, 2004, Selective Laser Melting of Iron-based Powder, J. Mater. Process. Technol., Vol. 149, No. 1-3, pp. 616~622.
- [11] R. Mogan, C. J. Sutcliffe, W. o'neill, 2004, Density Analysis of Direct Metal Laser Re-melted 316L Stainless Steel Cubic Primitives, J. Mater. Sci., Vol. 39, No. 4, pp. 1195~1205.
- [12] S. Balaji, A. Upadhyaya, 2007, Electrochemical Behavior of Sintered YAG Dispersed 316L Stainless Steel Composites, Mater. Chem. Phys., Vol. 101, No. 2-3, pp. 310~316.
- [13] Y. W. Mo, Y. T. Yoo, B. H. Shin, H. J. Shin, 2006, Welding Characteristics on Heat Input Changing of Laser Dissimilar Metals Welding, Trans. Kor. Soc. Mach. Tool Eng., Vol. 15, No. 2, pp. 51~58.

580 / 한국소성가공학회지 / 제20권 제8호, 2011년