

선택적 레이저 용융 공정시 용융 거동에 대한 공정 분석

성민영¹ · 주병돈¹ · 김수희¹ · 문영훈[#]

Process Analysis of Melting Behaviors in Selective Laser Melting Process

M. Y. Sung, B. D. Joo, S. H. Kim, Y. H. Moon

(Received November 3, 2010 / Revised November 17, 2010 / Accepted November 24, 2010)

Abstract

Selective laser melting (SLM) is emerged as a new manufacturing technique to directly fabricate precise parts using metallic materials. The final characteristics of a component fabricated through the SLM process are strongly dependent upon various parameters such as laser power, scan rate and pulse duration, etc. This paper, therefore, focuses on the dimensional characteristics of melted 20 μ m Fe-Cr-Ni powder by fiber laser for the selective laser melting process. With energy density decrease, the height and depth were decreased. Although the conditions are of the same energy density, the shape is different by laser power and scan rate. The shapes at various laser parameters were divided into 3 groups based on depth over height. The smooth regular shape is obtained under the conditions of 50 μ m of powder height and 15-20 μ s of pulse duration. And the laser power influenced the variation of shape more significantly than the scan rate.

Key Words : Selective Laser Melting(SLM), Fiber Laser, 20 μ m Fe-Cr-Ni Powder, Processing Parameters, Melted Shape

1. 서 론

최근 제품의 주기가 짧아짐에 따라 신속한 제작 기술이 요구되면서 대두되고 있는 캐속조형법은 제품의 설계에서 생산에 이르는 기간과 노력을 절감하는 도구로써 사용되고 있다[1~2]. 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting : SLM) 공정은 캐속조형 공정 중의 하나로 3차원의 CAD 도면을 이용하여 물리적 모델을 만드는 공정으로 얇은 층의 분말 재료에 레이저를 주사하여 2차원 단면 형상을 제작하고, 이를 반복하여 3차원의 금속 제품을 성형하는 공정이다[3~4]. SLM 공정의 장점은 기존의 공정 기술로는 어렵거나 불가능했던 복잡한 형상의 시작품이나 제품을 복잡하거나 비싼 장비를 사용하지 않고도 빠르게 제작할 수 있다

는 것이다. 그리고 SLM 공정의 경우 열에 의해 녹는 성질을 가진 금속, 합금, 세라믹 등의 다양한 기능성 소재의 분말을 단독으로 혹은 혼합하여 사용할 수 있어, 다양한 분야에 적용할 수 있으며, 이미 자동차, 전자, 의료 분야에 까지 널리 이용되고 있다[5~6]. SLM 공정은 공정 조건에 많은 영향을 받으며, 공정 조건으로는 레이저의 출력(power), 주사 속도(scan rate), 도포된 분말 높이(powder height) 등이 있다[7]. 본 연구에서는 200W 급 파이버 레이저(fiber laser)를 이용하여 선택적인 레이저 용융 공정시 각각의 공정 변수에 따른 용융 특성을 알아보기 위한 실험을 수행하였으며, 용융재 분말로 20 μ m Fe-Cr-Ni를 선택하였다. 다양한 공정 변수 조건에서의 단층 선형상 형성 실험을 통하여 공정 조건에 따른 용융 특성을 분석하

1. 부산대학교 정밀기계공학과

교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공 연구소, yhmoon@pusan.ac.kr

고, 적정한 형상을 얻을 수 있는 공정 조건을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 용융재 분말로 20 μ m Fe-Cr-Ni 분말을 사용하였으며 분말의 성분은 Table 1과 같다. 연구에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 열원을 공급하기 위한 레이저 시스템으로 IPG 사의 YLR-200 기종의 파이버 레이저를 이용하였으며, 파장 1.07 μ m, 빔 직경 80 μ m, 최대레이저 출력 200W의 특징을 가진다. 레이저의 집속 및 이송을 담당하는 스캐너(scanner)는 SCANLAB사의 hurrySCAN[®]20을 사용하였다. Z-축 방향으로 이동이 가능한 스테이지(stage)와 분말 도포를 위한 레이저바(layer bar)가 설치되어 있다. 표면의 산화를 방지하기 위해 질소(N₂) 분위기 조성이 가능한 챔버(chamber)를 설치 하였으며, 모든 시스템은 산업용 PC를 통해 제어된다.

2.2 단층 선형상 형성 실험

레이저 공정에서 중요 인자인 레이저의 출력과 주사 속도에 따른 분말의 결합 특성을 알아보기 위해 단층의 선형상 용융 실험을 수행하였다. AISI D2 에 20 μ m Fe-Cr-Ni 분말을 80 μ m 높이로 균일하게 도포한 후 10mm 길이의 선형으로 레이저를 주사하였으며, 세부적인 실험 조건은 Table 2 (a)에 나타내었다. 형성된 선형상은 주사가 시작된 부분이 다른 부분보다 높게 형성되기 때문에 중심부(Depth: D₁, Height: H₁)와 시작부(Depth : D₂, Height : H₂)로 나누어 분석하였으며, Fig. 2에 용융된 선형상을 개략도로 나타내었다. 본 실험에서는 중심부의 높이와 깊이를 분석하였으며, 적정 조건을 분류하기 위해 D₁/H₁를 비교하였다. 용융된 선형상의 깊이와 높이의 비(D/H)는 분말 용융에 사용된 에너지와 재용융부 형성에 사용된 에너지의 양을 비교하거나 적층부와 모재간의 결합을 효과적으로 나타내는 척도로 사용된다[8].

2.3 공정 변수에 따른 용융 특성 비교

도포된 분말의 높이, 펄스 지속 시간, 레이저 출력과 주사 속도를 변수로 설정하여 공정 변수에 따른 시작부와 중심부의 적층 형상의 변화를 알아보기 위한 단층 선형상 용융 실험을 수행하

Table 1 Chemical composition of Fe-Cr-Ni powder

Element	Fe	Cr	Ni	Al	Si	S	Mn	Mo
Wt.%	Bal.	18.2	7.6	0.7	0.6	0.3	1.2	0.2

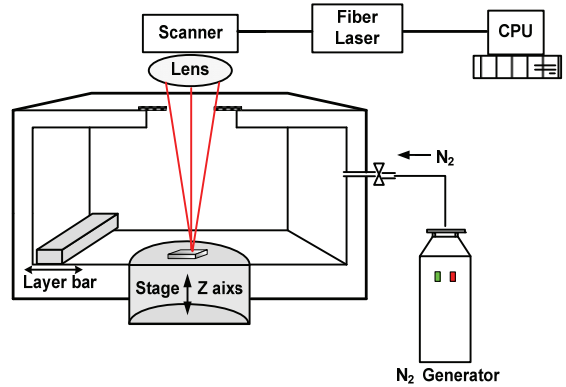


Fig. 1 Schematic drawing of the SLM system

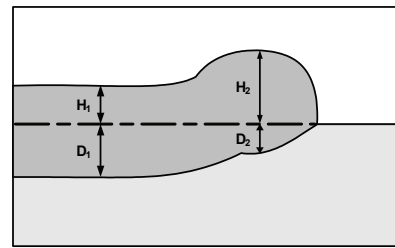


Fig. 2 Schematic drawing of the line shape

Table 2 Experimental conditions of line melting test

	(a)	(b)
Power(W)	50, 100, 150, 200	150, 175, 200
Scan rate(mm/s)	3.66~366	36.6~146.4
Powder height (mm)	0.08	0.02, 0.05, 0.08, 0.11
Frequency (kHz)	50	50
Pulse duration(μ s)	20	5, 10, 15, 20

였다. 앞선 실험을 실시하여 구해진 적정 주사 조건을 바탕으로 주사 조건의 범위를 좁혀 실시하였으며 모재부 위에 분말을 균일하게 도포하고 10mm 길이의 선형으로 레이저를 주사하였다. 용융된 선형상의 시작부와 중심부의 높이와 깊이를 각각 분석하였으며, 이를 바탕으로 Table 2(b)에 나타낸 공정 변수에 따른 용융 특성을 분석하였다. 식 (1)은 레이저 에너지 밀도 계산식이다[9].

여기서, H 는 에너지 밀도(J/mm^2), P 는 레이저 출력(W), τ 는 펄스 지속 시간(s), f 는 주파수(Hz), D 는 빔 직경(mm), v 는 주사속도(mm/s)를 의미한다.

$$H = \frac{P \times \tau \times f}{D \times v} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 단층 선형상 형성 실험

레이저 출력이 50W 일 때, 모든 주사 속도 조건에서 분말이 용융되지 않았고, 주사 속도가 3.66mm/s의 경우, 모든 레이저 출력 조건에서 형상의 형태가 일정하지 못하게 나타났다. 100W의 조건과 150, 200W의 조건에서 주사 속도가 260mm/s 이상일 때는 볼링현상이 나타났다. 이와 같은 조건들에서는 주사 조건에 따른 형상의 변화가 일정하지 않았기에 주사 조건에 따른 높이와 깊이의 분석시 제외하였다.

Fig. 3에 주사 속도와 레이저 출력에 따른 높이(H_1)와 깊이(D_1)의 변화를 나타내었다. 레이저 출력이 증가함에 따라, 혹은 주사 속도가 감소함에 따라 높이와 깊이 모두 증가하는 경향을 보였다. 이는 에너지 밀도의 증가로 입열된 에너지 양이 증가하기 때문이다. 하지만 같은 주사 조건의 변화에서도 높이의 변화폭이 깊이의 변화폭보다 다소 완만하게 나타났다. 주사 조건 내에서 높이의 변화량은 $70\mu m$ 이내에서 나타났지만 깊이의 변화량은 높이 변화량의 2배 이상으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 에너지 밀도가 감소하면서 먼저 열을 받게 되는 분말 부분에서 분말의 용융을 위해 사용되는 에너지 양의 비율이 증가하기 때문이라고 판단된다.

용융된 선형상의 깊이와 높이를 비(D_1/H_1)로 나타내어 조건에 따른 변화를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. D_1/H_1 는 주사 속도가 증가하거나 출력이 감소하여 에너지 밀도가 감소[9]할수록 감소하지만 같은 에너지 밀도의 조건에서라도 주사 조건에 따라 D_1/H_1 가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 같은 에너지 밀도에서라도 레이저 출력이 크고 주사 속도가 빠를 수록 용융된 선형상의 깊이와 높이는 더 크게 나타나는 반면 폭은 더 좁게 나타난다. 이는 같은 에너지 밀도의 조건이지만 레이저 출력이 큰 경우 전달되는 열에너지의 크기가 더 크기 때문에 깊이 방향으로 전달

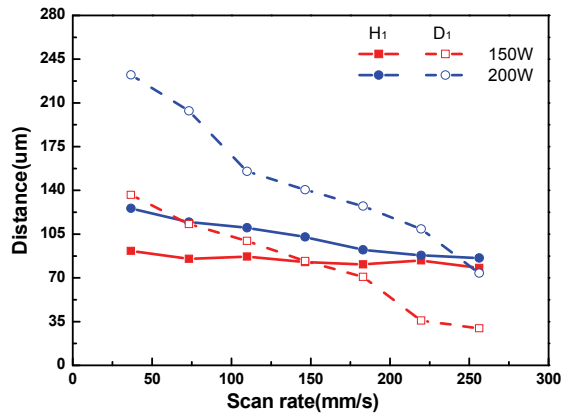


Fig. 3 Dimensional variations of the melted line at various processing parameters

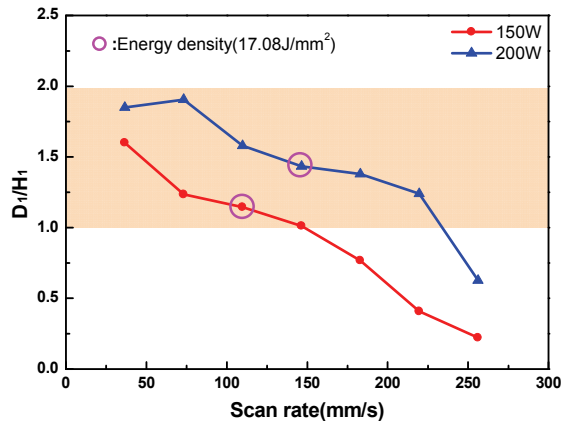
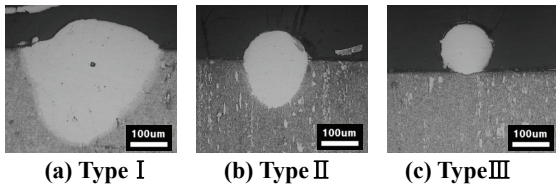


Fig. 4 Influence of the laser power and scan rate on the D_1/H_1

되는 열에너지 양은 증가하지만, 주사 속도가 빠르기 때문에 한 지점에서의 지속 시간이 짧아지게 되면서 열에너지가 주위로 전달되는 시간이 줄어들게 되면서 폭 방향으로 전달되는 열에너지가 줄어들어 나타나는 현상으로 판단된다. 이렇듯 같은 에너지 밀도를 가지더라도 주사 조건에 따라 열에너지의 전달이 다르게 나타나게 되고 형상 역시 다르게 나타나게 된다.

적층된 형상의 D_1/H_1 를 이용하여 형상의 단면을 3가지로 분류하여 Fig. 5에 나타내었다. 에너지 밀도의 크기는 Type I > Type II > Type III 순이며 D_1/H_1 가 1~2 사이인 경우를 Type II로 분류하였다. Type I은 주사시 입열된 입열량이 과도한 상태로, 에너지 밀도가 높으면 재용융부의 넓이가 넓어지고 용융된 분말의 형상이 매끄럽지 못하다. 에너



- Type I ($D_1/H_1 > 2$) : Excessive energy density
- Type II ($1 \leq D_1/H_1 \leq 2$) : Optimum energy density
- Type III ($D_1/H_1 < 1$) : Shortage of energy density

Fig. 5 Cross-sectional views of melted beads

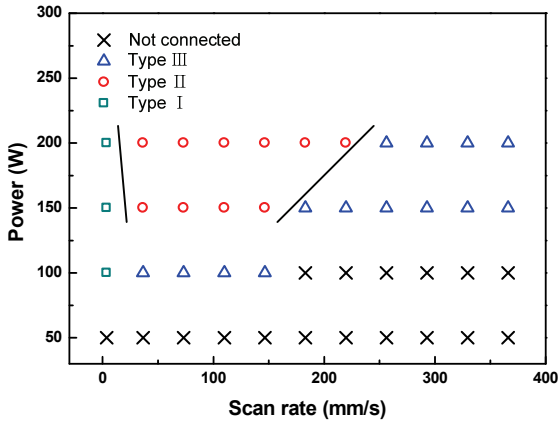


Fig. 6 Process window for laser power and scan rate

지 밀도가 과도하게 높은 경우 분말과 모재가 기화되는 현상이 나타나기도 한다. Type I의 형태는 높은 열에너지가 모재부분에 방출되어 잔류 열응력의 원인이 되며, 심한 경우에는 비틀림이 일어나거나 파괴되기도 한다. 반면, Type III는 입 열량이 부족하여 모재부까지 충분한 열이 전달되지 않아, 재용융부의 깊이가 얇고 폭이 좁게 나타나기 때문에 용융된 분말은 표면 장력에 의해 구형태로 결합하게 된다. 이런 현상을 불링현상이라고 하며, 적층부와 모재부의 결합이 약하기 때문에 이와 같은 형태는 사용되는 기간 동안의 제품의 잔류 수명이 짧아지게 된다[8]. Type II는 에너지 밀도가 적절한 형태로 재용융부와 충분한 결합을 이루고 있고, 형성된 적층부의 형태도 안정된 반원의 형태를 이룬다. Fig. 6에 이 실험의 전체 조건 내에서 Type II의 적층형상을 형성할 수 있는 적정 조건을 나타내었다.

3.2 공정 변수에 따른 용융 특성 비교

공정 변수에 따른 선형상의 변화를 더 자세히 알아보기 위해 Type II의 공정 범위 내에서 추가

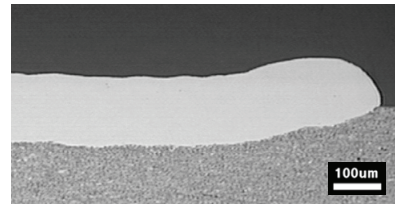


Fig. 7 Cross-sectional view of melted bead

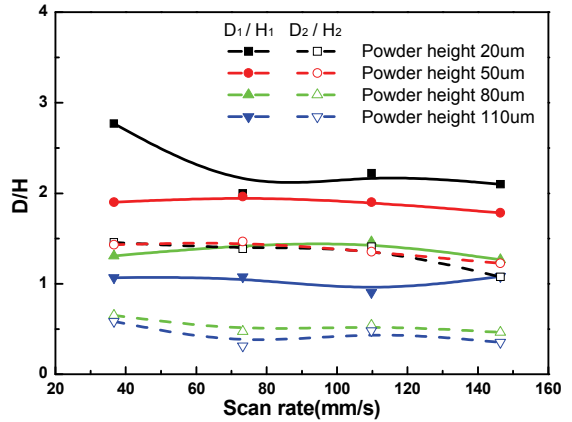


Fig. 8 Influence of the powder height on the line shape (laser power : 150W)

적인 실험을 수행하여 시작부의 깊이(D_2)와 높이(H_2)의 변화도 함께 분석하였다.

Fig. 7과 같이 선형상의 경우 레이저의 주사가 시작되는 부분의 높이는 중심부의 높이보다 높고, 깊이는 중심부의 깊이보다 낮게 나타난다. 시작부의 경우, 실험 재료에 최초로 열이 가해지면서 열 에너지가 분말의 용융에 더 많은 양이 사용되게 되고, 주위로 전달된 열에 의해 그 이후로는 시작 시보다 모재로 전달되는 열에너지의 비율이 증가하게 되어 깊이가 더 깊어지는 것으로 판단된다.

Fig. 8에서는 레이저 출력을 150W로 고정하여 도포된 분말의 높이가 증가할 때의 D/H 를 D_1/H_1 , D_2/H_2 로 나누어 나타내었다. 도포된 분말의 높이가 증가하면서 시작부와 중심부의 높이와 깊이 차이가 크게 나타난다. 이는 분말의 양이 증가하게 되면서 이를 용융시키기 위해 필요한 열에너지의 양 또한 증가하게 되고, 이로 인해 모재로 전달되는 열에너지는 감소하여 재용융부의 크기가 더 작아지기 때문이다. 도포된 분말의 높이가 증가하여 형상의 시작부와 중심부의 높이와 깊이 차이 역시 커지게 되고, D_2/H_2 값은 감소하여 1보다 작게 된다. 이처럼 D_2/H_2 값이 1보다 작아진

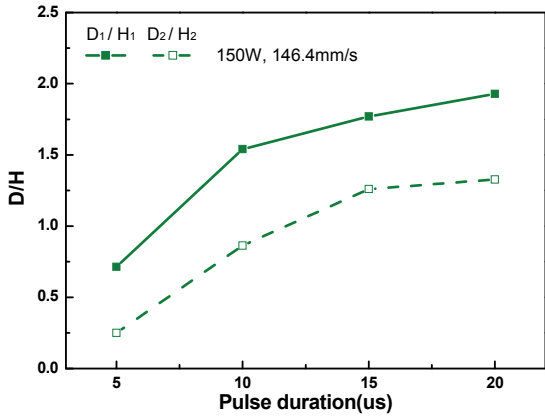


Fig. 9 Influence of the pulse duration on the line shape

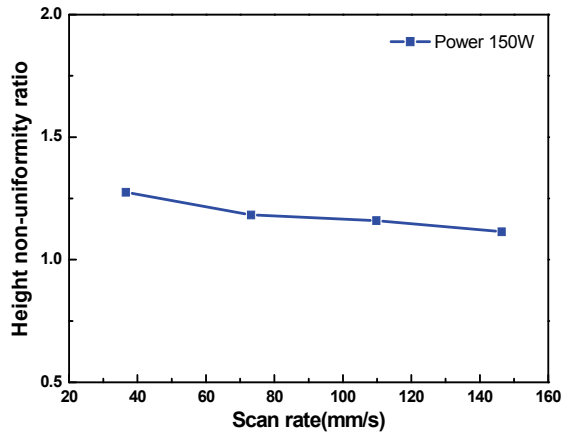


Fig. 11 Height non-uniformity with scan rates

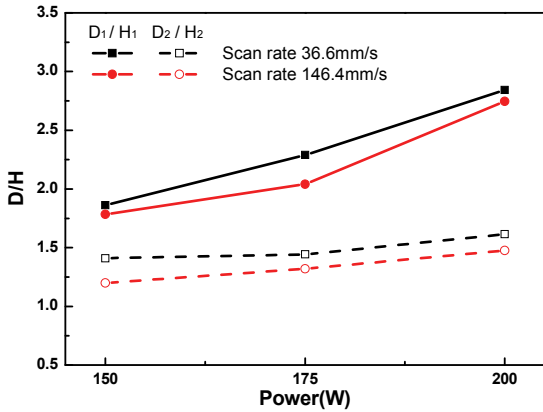


Fig. 10 Influence of the power on the line shape

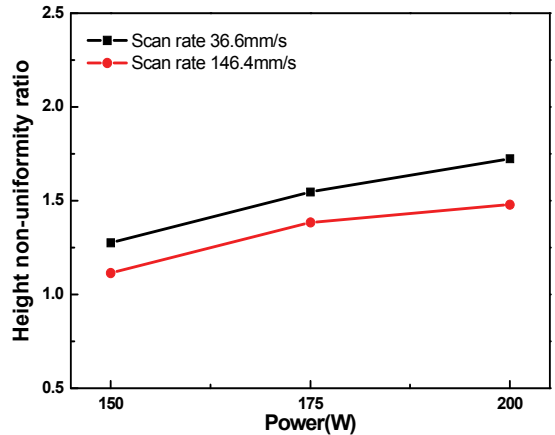


Fig. 12 Height non-uniformity with powers

형상은 그 부분만이 결합력이 떨어지게 되기 때문에 취약 부분이 되게 된다. 그렇기 때문에 D_1/H_1 , D_2/H_2 모두가 Type II의 조건을 만족해야 하고, 그것을 만족시키는 도포된 분말의 높이는 $50\mu\text{m}$ 이다.

도포된 분말의 높이가 $50\mu\text{m}$ 일 때, 펄스 지속 시간과 레이저 출력에 따른 선형상의 D/H를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 레이저 출력과 펄스 지속 시간이 증가할수록 D/H가 증가하는데 이는 에너지 밀도가 증가하기 때문이다. Fig. 9에서 D/H는 펄스 지속시간이 짧은 5~10 μs 에서는 급격하게 증가하다가 펄스 지속시간이 증가할수록 증가폭이 감소한다. 이는 펄스 지속 시간은 짧을수록 레이저 출력이 시간에 따른 변화가 많아지게 되고, 20 μs 는 일정한 출력 수준을 유지하기 때문이다. 이 실험에서는 15 μs 이상을 유지할 때 균일한 선형상을

얻을 수 있었으며 Type II의 조건 역시 만족시키는 것을 확인할 수 있다. 레이저 출력의 경우 D_1/H_1 의 변화가 급격하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 같은 크기의 에너지 밀도를 변화시켰을 때의 변화를 주사 속도에 따른 D_1/H_1 의 변화를 비교해보면, 레이저 출력이 150W에서 200W로 증가시 D_1/H_1 는 0.6정도 증가하지만, 레이저 출력이 150W일 때 주사 속도를 146.4mm/s에서 109.8 mm/s로 변화시키면 D_1/H_1 는 0.17정도가 증가하게 된다. 이를 통해 주사 속도보다 레이저 출력이 형상의 높이와 깊이에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

$$\text{height non-uniformity ratio} = \frac{H_2}{H_1} \quad (2)$$

제품을 만들어 사용시에는 형상의 정밀도가 중

요하기 때문에 공정 변수에 따른 시작부와 중심부의 높이 차이를 식 (2)와 같은 불균일비를 이용하여 나타내어 분석하였다. Fig. 11, 12에 주사 속도와 레이저 출력에 따른 불균일비 변화를 나타내었다. 불균일비는 150W, 146.4mm/s의 조건에서 약 1.11로 가장 낮게 나타났으며, 레이저 출력에 따른 불균일비의 변화폭이 주사 속도에 따른 불균일비의 변화폭보다 크게 나타났다. 이를 통해 선형상의 불균일비 역시 주사 속도보다는 레이저 출력에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 일정한 주사 속도에서의 레이저 출력의 증가는 레이저 주사가 시작되는 순간에 받는 열 에너지의 양의 증가를 뜻하고, 일정한 레이저 출력에서의 주사 속도의 감소는 한 지점에서 일정한 양의 에너지를 받는 시간의 증가를 뜻한다. 시작부의 높이는 주사 시작시 순간적으로 전달된 열에너지 중의 대부분의 양을 분말의 용융에 사용하여 높이가 높게 나타나는 현상이기 때문에 레이저에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 단층 선형상 형성 시 에너지 밀도의 변화에 따른 영향이 형상의 높이보다는 깊이에서 더 크게 나타나며, 같은 에너지 밀도라도 주사 조건에 따라 형상이 다르게 나타내는데 이는 주사 조건에 따라 열에너지 전달이 다르게 나타나기 때문이다.

(2) 레이저 출력과 주사 속도에 따른 선형상의 단면을 선형상의 깊이와 높이의 비(D/H)를 이용하여 분류할 수 있었고, 에너지 밀도가 과도하거나 부족한 경우에는 선형상이 매끄럽지 못하게 나타났다.

(3) 도포되는 분말의 높이가 증가할수록 모든 D/H 값은 감소하였으며, 도포된 분말의 높이는 50 μm 의 경우에 D_1/H_1 , D_2/H_2 모두가 Type II의 조건을 만족하였다.

(4) 펄스 지속 시간이 너무 작을 경우 시간에 따른 레이저 출력의 변화로 용융된 형상이 균일하지 못하다. 본 실험에서는 펄스 지속 시간이 긴 15 μs 이상에서 형상이 균일하면서 D_1/H_1 , D_2/H_2 모두가 Type II의 조건을 만족하였다.

(5) D_1/H_1 과 불균일비의 변화량을 비교해보았을 때, 모두 레이저 출력에 따른 변화가 주사 속도보

다 약 3배 정도 크게 나타났으며, 이를 통해 공정 시 선형상의 변화에 미치는 영향이 주사 속도보다는 레이저 출력에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] W. Zhengying T. Yiping, L. Bingheng, 2003, A rapid manufacturing method for water-saving emitters for crop irrigation based on rapid prototyping and manufacturing, Int. J. Adv. Manu. Technol., Vol. 21, pp. 644~648.
- [2] Y. Ding, H. Lan, J. Hong, D. Wu, 2004, An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping, Rob. Comput. Integr. Manuf., Vol. 20, pp. 281~288.
- [3] K. Osakada, M. Shiomi, 2006, Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 46, pp. 1188~1193.
- [4] 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, pp. 616~622.
- [5] 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, pp. 980~983.
- [6] J. W. Rho, J. H. Kim, C. K. Lee, 2008, An overview of Selective Laser Sintering, J. Kor. Weld. Joining Soc., Vol. 26, No. 4, pp. 34~37.
- [7] A.V. Gusarov, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov, 2007, Heat transfer modeling and stability analysis of selective laser melting, Appl. Surf. Sci., Vol. 254, pp. 975~979.
- [8] E. Capello, B. Previtali, 2006, The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire, J. Mater. Process. Technol., Vol. 174, pp. 223~232.
- [9] B. C. Jeon, J. D. Kim, 1998, Selective Laser Sintering by CO₂ Laser, J. Kor. Soc. Prec. Eng., Vol. 15, pp. 18~25.