

Fe-Ni-Cr 분말의 선택적 레이저 소결 적층시 공정변수에 따른 조형특성

주병돈¹ · 장정환¹ · 임홍섭¹ · 손영명¹ · 문영훈[#]

Effect of Process Parameters on Forming Characteristics of Selective Laser Sintered Fe-Ni-Cr Powder

B. D. Joo, J. H. Jang, H. S. Yim, Y. M. Son, Y. H. Moon

(Received February 23, 2009)

Abstract

Selective laser sintering is a kind of rapid prototyping process whereby a three-dimensional part is built layer wise by laser scanning the powder. This process is highly influenced by powder and laser parameters such as laser power, scan rate, fill spacing and layer thickness. Therefore a study on fabricating Fe-Ni-Cr powder by selective laser sintering has been performed. In this study, fabrication was performed by experimental facilities consisting of a 200W fiber laser which can be focused to 0.08mm and atmospheric chamber which can control atmospheric pressure with argon. With power increase or energy density decrease, line width was decreased and line surface quality was improved with energy density increase. Surface quality of quadrangle structure was improved with fill spacing optimization.

Key Words : Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting, Direct Fabrication, Fiber Laser, Fe-Ni-Cr Powder

1. 서 론

선택적 레이저 소결(selective laser sintering, SLS)은 초기에 시제품의 디자인 검증, 조립성 평가 등을 위해 한정적으로 사용되던 기술로 금속이나 세라믹 분말재료를 단독 혹은 상호 혼합하여 마스터 모델없이 직접 금속 조형하는 레이저 직접 금속 성형융합기술(hybridized laser direct metal powder forming)이다[1~2]. 금속재료 부품의 생산에 이 기술을 적용하면 원하는 강도와 인성을 갖춘 부품을 제작 할 수 있으며 이러한 방법을 적용한 연구는 다품종 소량생산으로 변화하고 수명주기가 단축되고 있는 최근 미세성형산업의 환경변화에 유연하게 대처 할 수 있다는 장점이 있어 자동차 산업, 우주 항공 산업 등 고기능 재료를 필

요로 하는 산업으로의 적용이 용이하다[3~4]. 이러한 SLS 공정에 있어서는 분말 및 레이저와 관련된 다양한 요인이 영향을 미친다. 분말은 성분 및 입도, 형태 등에 따라 동일한 입열에 대해 결합경향이 다양한 형태로 나타나게 된다. 레이저의 종류 및 품질에 따라 입열 경향이 달라지게 되고 또한 레이저 출력(power), 주사속도(scan rate), 선간 간격(fill spacing), 적층두께(layer thickness) 등의 공정변수에 따라 분말거동에 직접적으로 영향을 미치게 된다[5~6]. 본 연구에서는 레이저 공정에 사용되는 다양한 종류의 레이저들 중 시스템의 부피가 작고 유지비용이 거의 들어가지 않으며, 다른 레이저 열원에 비하여 레이저 발진 효율이 높으며, 우수한 빔 품질을 가지는 장점이 있는 파이버 레이저(fiber laser)를 이용하여 실험을 수행하였

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

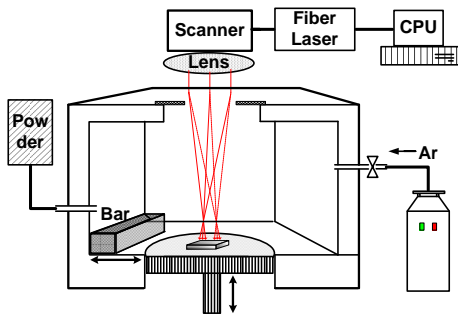


Fig. 1 Schematic drawing of laser system

다[7]. AISI H13 tool steel 의 표면에 Fe-Ni-Cr 분말을 적층하고 공정변수에 따른 표면의 품질을 평가하고 이를 바탕으로 각각의 인자들이 조형특성에 미치는 영향을 분석하고 조형특성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1에 본 연구에 사용한 직접식 금속 적층 장치의 개략도를 나타내었다. 열원을 공급하기 위한 레이저 시스템으로 IPG사의 YLR-200 기종의 파이버 레이저를 이용하였으며, 파장 1.07 μ m, 최대출력 200W의 특징을 가진다. 레이저의 집속 및 이송을 담당하는 스캐너(scanner)는 SCANLAB사의 hurrySCAN® 20을 사용하였다. 집속을 통한 빔직경은 80 μ m이고 초점거리는 420mm이며 240 × 240mm²의 크기로 레이저를 이송 할 수 있다. 스텝핑 모터(steping motor)를 통해 Z-축 방향으로의 정밀한 이동이 가능한 스테이지(stage)와 분말 도포를 위한 레이어바(layer bar)가 설치되어 있으며, 최소 적층 가능한 분말의 두께는 10 μ m이다. 표면의 산화를 방지하기 위해 질소(N₂) 또는 아르곤(Ar) 분위기 조성이 가능한 챔버(chamber)를 설치 하였으며, 레이저, 스캐너 및 다른 모든 시스템은 산업용 PC를 통해 제어된다.

2.2 실험방법

레이저출력, 주사속도, 적층높이, 선간간격에 따른 분말의 거동을 알아보기 위해 다층 선형상 적층 실험 및 다층 사각형상 적층 실험을 실시하였다. 모재부로는 AISI H13 금형강을 이용하였으며 모든 실험은 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분

Table 1 Chemical composition of Fe-Ni-Cr powder

Element	Fe	Ni	Cr	Al	Si	Cu	S	M _o
Wt.(%)	77.94	15.69	3.96	0.76	0.72	0.32	0.24	0.12

Table 2 Experimental conditions of line sintering test

Power(W)	50, 100, 200
Scan rate(mm/s)	3.66 ~ 366
Layer thickness(mm)	0.1, 0.2, 0.4

Table 3 Experimental conditions of quadrangle sintering test

Power(W)	200
Scan rate(mm/s)	146.6
Fill spacing(mm)	0.03~0.18
Layer thickness(mm)	0.02, 0.1

위에서 수행하였다. 실험에 사용한 분말은 약 20 μ m의 직경을 가지는 Fe-Ni-Cr 분말 이었으며, 분말의 구성 성분은 Table 1에 나타내었다.

2.2.1 다층 선형상 적층 실험

레이저 공정에 영향을 미치는 중요 인자인 레이저출력, 주사속도, 적층두께를 변수로 설정하여 다층의 선형 형상을 적층하는 실험을 수행하였다. 실험 조건은 선행되어 수행된 단층 형성 실험의 결과를 바탕으로 주사속도의 범위를 좁혀 실시하였으며 모재부 위에 분말을 균일하게 도포하고 10mm 길이의 선형으로 레이저를 주사하고 이를 반복하여 5층의 선형 형상을 적층하였다. 이미지 분석 프로그램(TDI Plus 5.0)을 이용하여 형성된 선의 형상 및 선폭에 대한 분석을 실시하였으며 세부적인 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

2.2.2 다층 사각형상 적층 실험

Table 3 에 나타낸 바와 같이 다양한 선간간격으로 사각형상 적층 실험을 실시하였으며 적층횟수 및 적층두께 또한 변수로 설정하여 실험을 진행하였다. 레이저 출력 및 주사속도는 앞선 결과를 바탕으로 설정하였으며 선간간격 및 적층횟수, 적층두께에 따른 표면 조도와 실제 적층 높이를 측정, 분석하였다. 이를 바탕으로 표면 조도 및 형상을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 다층 선형상 적층 실험

3.1.1. 에너지 밀도에 따른 결합특성

레이저 출력 50~200W, 주사속도 3.66~366mm/s의 구간에서 5층의 선을 적층한 후 분석을 수행하였으며 조사시간(pulse duration)과 진동수(pulse frequency), 빔직경(spot diameter)은 각각 0.02ms, 50kHz, 0.08mm로 고정하였다. 식 (1)은 에너지 밀도 계산식[8]을 나타내며 에너지 밀도에 따른 결합 여부를 분석하여 Fig. 2에 나타내었다.

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

H = energy density (J/mm²)

P = laser power (W)

τ = pulse duration (s)

f = pulse frequency (Hz)

D = spot diameter (mm)

v = scan rate (mm/s)

적층두께가 0.1mm일 경우 5.6J/mm², 0.2mm일 경우 8.5J/mm², 0.4mm일 경우 17J/mm² 이상의 에너지 밀도에서 결합이 이루어졌다. 적층두께가 증가할수록 하부층과의 결합을 위해서는 깊은 범위까지 에너지가 전달되어야 하고 결합을 위한 최소 에너지 밀도가 증가하게 된다. 즉 적층두께가 증가할수록 높은 출력, 낮은 주사속도를 필요로 하게 되며 적층두께가 낮을수록 결합을 통한 구조물 형성에 유리함을 확인 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가장 넓은 범위의 에너지 밀도에서 결합이 이루어진 적층두께 0.1mm에 대하여 추가적인 분석을 수행 하였다.

3.1.2. 에너지 밀도에 따른 선폭 및 형상

적층두께 0.1mm에서 수행된 실험에 대하여 선폭 및 형상에 대한 분석을 수행하였다. 각 조건에서 적층된 시편은 30개의 지점에서 선폭을 측정하여 평균 값을 선폭으로 간주하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 에너지 밀도일 때 레이저 출력이 200W일 경우 100W의 경우보다 선폭은 약 0.02mm 낮게 나타났으며 이는 출력 증가에 따른 주사속도의 증가 때문이다. 출력이 2배 증가할 경우 동일한 에너지 밀도를 갖기 위해서는 주사속도 또한 2배 증가하게 되고 조사시간은 1/2로

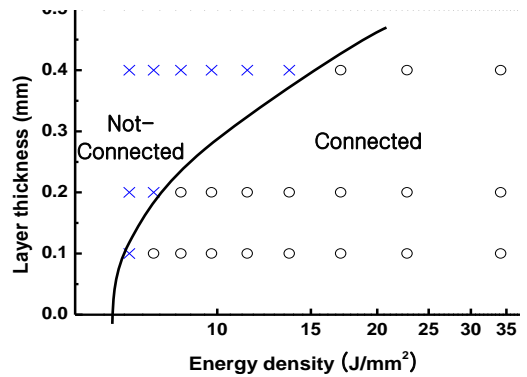


Fig. 2 Process window for various laser parameters

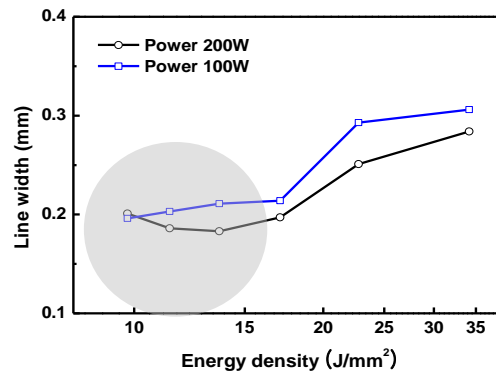


Fig. 3 Line width of laser sintered line(Layer thickness = 0.1mm)

감소하게 된다. 조사시간의 감소로 인해 선평방향으로의 열전달이 억제되고 선평이 감소하게 된다.

에너지 밀도에 따른 경향을 살펴보면 선평은 레이저 출력에 상관없이 동일한 경향을 나타낸다. 17J/mm² 이하의 에너지 밀도에서는 선평은 큰 변화가 없이 100W의 출력에서는 약 0.190mm, 200W의 출력에서는 약 0.216mm로 일정하나 17J/mm² 이상일 경우 급격히 증가하게 된다. 에너지 밀도가 17J/mm² 보다 낮을 경우 공급된 에너지는 레이저가 조사된 부분만을 용융시키고 주변부의 분말과는 네킹(necking)형태의 결합이 이루어져 비교적 얇은 선이 형성되나 에너지 밀도가 17J/mm² 보다 클 경우 주변부로의 열전달이 증가하게 되고 열전달로 인해 주변부의 분말이 용융될 수 있는 에너지 밀도를 기준으로 선평은 급격히 증가하게 된다.

적층된 선은 형상이 불연속적인데 최대선평과 최소선평, 평균선평을 이용하여 수치가 클수록 거

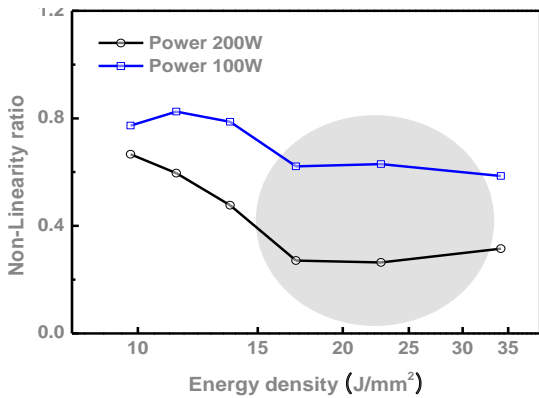


Fig. 4 Non-Linearity ratio of laser sintered line(Layer thickness = 0.1mm)

칠고 불규칙한 표면을 나타내는 비선형비(non-linearity ratio)를 정의하여 표면 형상의 특성을 수치화시켜 나타내었다.

$$\text{비선형비} = \frac{\text{최대선폭} - \text{최소선폭}}{\text{평균선폭}} \quad (2)$$

Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 200W 의 출력으로 성형을 수행했을 때 100W 의 출력으로 성형을 수행한 결과보다 비선형비가 낮았으며 에너지 밀도가 증가함에 따라 비선형비는 점차 감소하며 17J/mm² 이상의 에너지 밀도에서는 일정하게 유지 되었다. 출력이 높을 때 비선형비가 낮은 이유는 앞서 설명한 바와 같이 출력이 높은 경우 주사시간이 짧아 주변으로의 열전달이 억제되고 불링 및 네킹결합이 감소하여 상대적으로 우수한 표면을 가지게 되기 때문이다. 또한 에너지 밀도가 낮은 경우 네킹을 통한 선의 형성으로 인해 비선형비가 높고 용융을 통한 결합이 이루어져 네킹결합이 억제되는 17J/mm² 이상의 에너지 밀도에서 우수한 표면을 가지게 된다.

앞선 결과들은 200W 의 레이저출력에서 에너지 밀도를 17J/mm² 이하로 유지함으로써 선폭을 감소시킬 수 있으며 에너지 밀도를 17J/mm² 이상으로 유지함으로써 선의 형상을 향상시킬 수 있음을 보여준다. Fig. 5 는 최적화된 조건으로 선을 형성한 결과로 0.1mm 의 적층두께, 200W 의 레이저 출력, 146.4mm/s 의 주사속도였으며 이때의 선폭은 0.177mm 였다. 0.177mm 의 선폭은 레이저빔 직경의 약 2.2 배로 이 결과는 이전의 연구들이 보여준 결과와 일치한다[9].

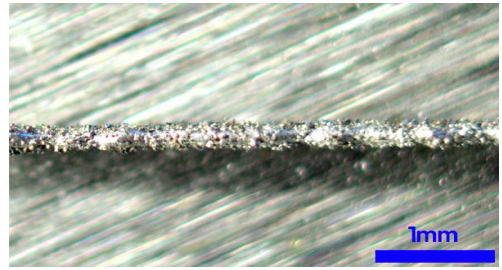


Fig. 5 Laser sintered line with optimized condition



Fig. 6 Laser sintered structure

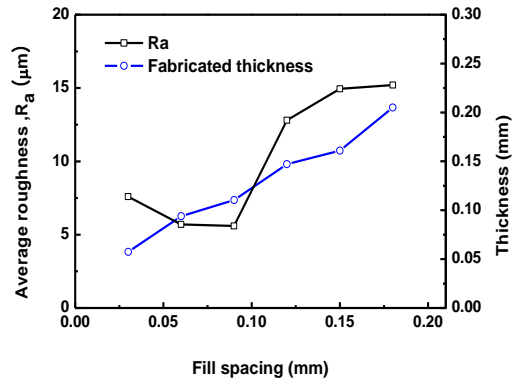


Fig. 7 Ra and fabricated thickness for fill spacing

3.2 다층 사각형상 적층 실험

3.2.1. 선간간격에 따른 조도 및 두께

다층 선형상 형성 실험에서 최적화 시킨 변수인 적층두께 0.1mm, 레이저출력 200W, 주사속도 146.4mm/s를 이용하여 다층 사각형상 적층 실험을 실시하였다. Fig. 7은 선간간격 0.03~0.18mm의 범위에서 각각의 조건에 대해 5층을 적층한 후 측정된 조도 및 두께를 나타내며 Fig. 8은 적층된 단면의 형상을 나타낸다. 선간간격이 0.09mm일 때 평균표면조도 Ra가 5.38µm로 가장 낮게 나타났으며 선간간격이 지나치게 좁은 경우 물결형상의 표면이 형성되어 조도가 다소 증가 하고 선간간격이 지나치게 넓은 경우 각각의 선들간의 간격이 생

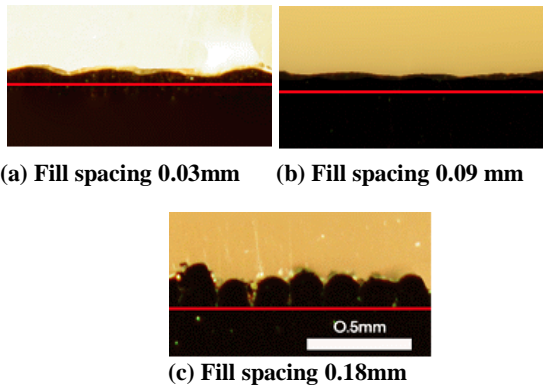


Fig. 8 Sectional images of sintered layer

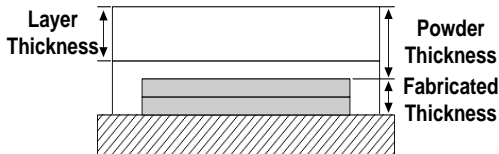


Fig. 9 Schematic drawing of thickness

겨 조도가 급격히 증가 하였다. 실제 적층된 높이의 경우 선간간격이 0.03mm에서 0.18mm로 증가함에 따라 0.05mm에서 0.21mm로 증가하였다. 적층된 높이가 가장 높은 선간간격 0.18mm의 경우에도 0.21mm의 높이를 나타내어 5번에 걸쳐 공급된 총 분말의 두께 0.5mm에 비해 훨씬 낮아 용융을 통한 적층 수행시 실제 적층두께에 대한 분석이 필요함을 알 수 있다.

3.2.2. 적층횟수에 따른 조도 및 두께

선간간격 0.06, 0.12mm, 적층두께 0.02, 0.1mm로 하여 1~5층을 적층하였을 때의 조도를 Fig. 10에 나타내었다. 선간간격이 빔직경의 약 0.75배인 0.06mm인 경우 비교적 낮은 범위인 2.6~5.7 μ m의 조도를 나타내었으며 약 1.5배인 0.12mm인 경우 3.5~12.8 μ m의 범위를 나타내었다. 선간간격 0.06mm로 실험을 수행했을 경우 우수한 조도를 얻을 수 있었던 것은 중첩을 통해 반복적으로 레이저를 조사함으로써 소결(sintering) 또는 용융(melting) 공정 후 표면조도를 향상시키기 위하여 수행하는 레이저 연마(laser polishing)의 효과를 얻을 수 있었기 때문으로 판단된다. 선간간격이 0.12mm인 경우 중첩이 없으므로 인해 레이저 연마의 효과가 나타나지 않으며 상대적으로 높은 조도를 나타내었다. 또한 적층횟수의 증가와 함께 조도는

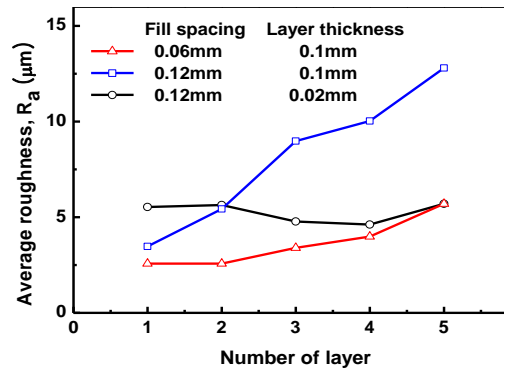


Fig. 10 R_a for number of layer

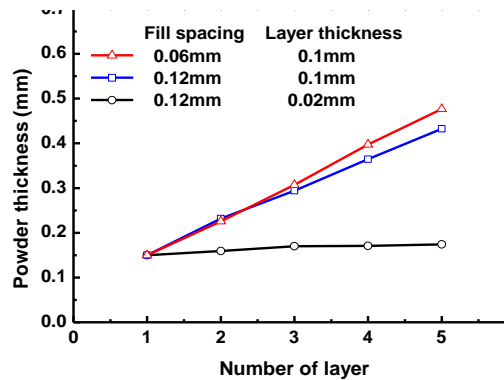


Fig. 11 Powder thickness for number of layer

나빠졌는데 이는 실제 분말의 높이 증가에 의한 것으로 판단된다.

선간간격이 0.12mm일 때 적층두께 0.02mm, 0.1mm인 경우에 대하여 1~5층을 적층한 조도는 적층두께 0.02mm인 경우 5.7 μ m, 적층두께 0.1mm인 경우 12.8 μ m로 적층두께 0.02mm인 경우 적층두께가 0.1mm보다 50% 이하로 감소하였다. 또한 적층두께가 0.02mm일 때의 조도는 적층횟수와 상관없이 4.7~5.7 μ m로 우수하고 고른 분포를 보였다. 이는 레이저 주사시의 실제 분말 높이에 의한 것으로 실제 적층이 이루어져 증가한 형상의 높이와 공급된 분말의 높이 차이에 의한 현상이다. Fig. 11에 나타낸 분말의 실제 두께에서 알 수 있듯이 적층두께가 0.02mm일 경우 실제 형상이 적층되는 높이와 공급된 분말의 높이가 비슷해 약 0.15mm 정도로 일정한 분말두께를 유지하지만 적층두께가 0.1mm일 경우 실제 형상이 적층되는 높이는 약 0.03mm인데 반해 공급되는 분말의 두께는 0.1mm로 한층의 공정을 수행할 때 마다 분말의

두께가 약 0.07mm씩 증가하게 된다. 따라서 1층을 적층 할 때 0.15mm였던 분말의 두께는 5층 적층 시 0.43mm로 증가하게 되고 두꺼운 분말 두께로 인해 표면의 형상이 나빠지게 된다.

4. 결 론

(1) 선 형상의 적층 시 레이저출력은 높을수록 선폭 감소 및 선형상 향상에 유리하며 에너지 밀도의 감소는 선폭 방향으로의 열전달을 줄임으로써 선폭을 감소시키고 에너지 밀도의 증가는 선의 형상을 향상시킬 수 있다.

(2) 사각 형상의 적층 시 선간간격이 지나치게 좁은 경우 물결형상의 표면이 형성되어 조도가 다소 증가 하고 선간간격이 지나치게 넓은 경우 각각의 선들간의 간격이 생겨 조도가 급격히 증가한다.

(3) 사각 형상의 적층 시 도포하는 분말의 두께는 실제 적층되어 증가한 구조물의 높이와 동일하게 능동적으로 제어되어야 한다. 왜냐하면 분말이 과도하게 공급될 경우 도포된 분말의 두께가 적층횟수의 증가와 함께 점차 증가하게 되어 표면의 조도는 나빠지기 때문이다.

후 기

본 연구는 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)인 한국학술진흥재단(KRF-2007-521-d00206)의 일부 지원과 교육과학기술부/한국과학기술재단 국가핵심 연구센터사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] M. M. Dewidar, 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.

- [2] 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 Transactions on Automations Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 73~80.
- [3] B. Vandenbroucke, J. P. Kruth, 2007, Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medican parts, Rapid Prototyping Journal, Vol. 13/4, pp. 196~203.
- [4] K. A. Mumtaz, P. Erasenthiran, N. Hopkinson, 2008, High density selective laser melting of Waspaloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 195, pp. 77~87.
- [5] I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov, 2007, Parametric analysis of the selective laser melting process, Applied Surface Science, Vol. 253, pp. 8064~8069.
- [6] A. Simchi, F. Petzoldt, H. Pohl, 2001, Direct Metal Laser Sintering: Material Considerations and Mechanisms of Particle Bonding, Int. J. Powder Metall., Vol. 37, No. 2, pp. 49~61.
- [7] Y. Kawahito, T. Terajima, H. Kimura, T. Kuroda, K. Nakata, S. Katayama, A. Inuoue, 2008, High-power fiber laser welding and its application to metallic glass Zr55Al10Zi5Cu30, Materials Science and Engineering:B, Vol. 148, pp. 105~109.
- [8] B. C. Jeon, J. D. Kim, 1998, Selective Laser Sintering by CO2 Laser, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, pp. 18~25.
- [9] A. J. Pinkerton, L. Li, 2008, Direct additive laser manufacturing using gas- and water-atomised H13 tool steel powders, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 25, pp. 471~479.