[논문] 한국소성가공학회지, 제 22 권 제 6 호, 2013
Transactions of Materials Processing, Vol.22, No.6, 2013
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.6.334

Direct Laser Melting 공정시 차폐가스가 성형 특성에 미치는 영향

한상욱[1] · 신세계로[1] · 주병돈[1] · 이철환[1] · 문영훈[#]

The Effect of Shielding Gas on Forming Characteristics for Direct Laser Melting

S. W. Han, S. G. R. Shin, B. D. Joo, C. H. Lee, Y. H. Moon
(Received June 26, 2013 / Revised July 24, 2013 / Accepted July 25, 2013)

Abstract

Direct Laser Melting is a prototyping process whereby a 3-D part is built layer wise by melting the metal powder with laser scanning. This process is strongly influenced by the shielding gas and the laser operating parameters such as laser power, scan rate, layering thickness, and rescanning. The shielding gas is especially important in affecting the microstructure and mechanical properties. In the current study, fabrication experiments were conducted in order to analyze the effect of shielding gas on the forming characteristics of direct laser melting. Cylindrical parts were produced from a Fe-Ni-Cr powder with a 200W fiber laser. Surface quality, porosity and hardness as a function of the layering thickness and shield gas were evaluated. By decreasing the layering thickness, the surface quality improved and porosity decreased. The selection of which shield gas, Ar or N_2, to obtain better surface quality, lower porosity, and higher hardness was examined. The formability and mechanical properties with a N_2 atmosphere are better than those parts formed under an Ar atmosphere.

Key Words : Direct Laser Melting, Shielding Gas, Porosity

1. 서 론

최근 제조업계의 산업 동향은 소량의 다품종 생산, 그리고 제품의 사이클은 짧아지고 있는 추세이다. 이로 인해 제품 설계 신속성의 필요가 대두되고 있으며 상품 개발을 단기간 내에 성취 가능한 동시공학 개념이 산업 전반에 응용되고 있다[1, 2]. 쾌속조형 공정 중의 하나인 직접 레이저 용융(Direct Laser Melting: DLM)공정은 컴퓨터로부터 저장된 3차원 CAD 데이터로부터 직접 3차원 형상을 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 공법으로써 금속분말을 얇은 층으로 도포한 후 국부적으로 레이저 빔을 주사하여 용융시킨 후 그 위에 다시 새로운 층을 쌓으면서 원하는 형상 및 제품을 얻을 수 있는 기술이다[3~5]. DLM 공정 시 보호가스는 중요변수 중에 하나로 조형물의 단면형상, 금속의 용융 이행 현상과 레이저 빔의 에너지 분산 등을 방지하는데 중요한 역할을 하며 열전도율을 상승시켜 용융부의 체적을 증가시킬 수 있다[6, 7]. 보통 헬륨 가스, 질소 가스, 이산화탄소 가스, 아르곤 가스 등을 주로 사용하지만 헬륨가스의 경우 공기보다 낮은 밀도로 인해 제품에 오래 머물지 못하고 가격이 비싼 단점이 있다. 이를 보완 하기 위해 최근에는 헬륨가스에 순 아르곤이나 산소, 그 외의 가스를 혼합하여 사용하고 있다[8, 9]. 본 연구에서는 DLM 공정을 이용한 Air, Ar, N_2 차폐가스에서 Fe-Ni-Cr 분말 적층을 실시하였다.

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

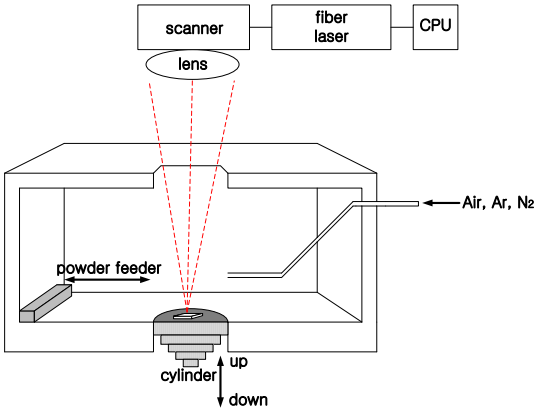


Fig. 1 Schematic drawing of the direct laser melting tooling system

Table 1 Chemical composition of Fe-Ni-Cr powder

Element	Fe	Ni	Cr	Al	Si	Cu	S
Wt. (%)	Bal.	15.69	3.96	0.76	0.72	0.32	0.24

다양한 성형공정변수에 따라 원통기둥을 제작을 통해 적층 가능 범위를 제시 하였다. 또한 적층 횟수, 공극률, 경도 등의 분석을 통해 차폐가스가 분말의 용융 특성에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치 및 재료

Fig. 1에 본 연구에서 사용된 직접 레이저 용융 시스템의 계략도를 나타내었다. 레이저는 IPG사의 파이버(fiber) 레이저 YLR-200을 사용하였으며 최대출력 200W, 파장 1.07μm, 빔 직경 80μm 등의 특징을 가지고 있다. 모든 실험은 Air, Ar, N_2 분위기에서 수행되었으며, 8L/min 유량으로 Ar과 N_2를 공급하였다. 실험에 사용된 모재는 냉간 가공용 금형강인 AISI D2를 사용하였다. 용융제로 사용한 분말은 평균입자가 약 20μm 직경을 가지는 Fe-Ni-Cr 분말을 이용하였으며 Table 1에 화학 조성을 나타내었다.

2.2 원통기둥 적층 실험

DLM 공정 시 차폐가스가 적층 형상에 미치는 영향을 알아보기 위해 지름 10mm, 높이 3mm의 원통기둥 적층 실험을 실시하였다. Fig. 2는 분말 적층 시 레이저 주사 방식을 나타내었다. 일방향 주사를 하게 되면 용융된 적층부의 시작점이 상대적으로 두꺼운 층을 형성하기 때문에 계속해서 적층이 반복

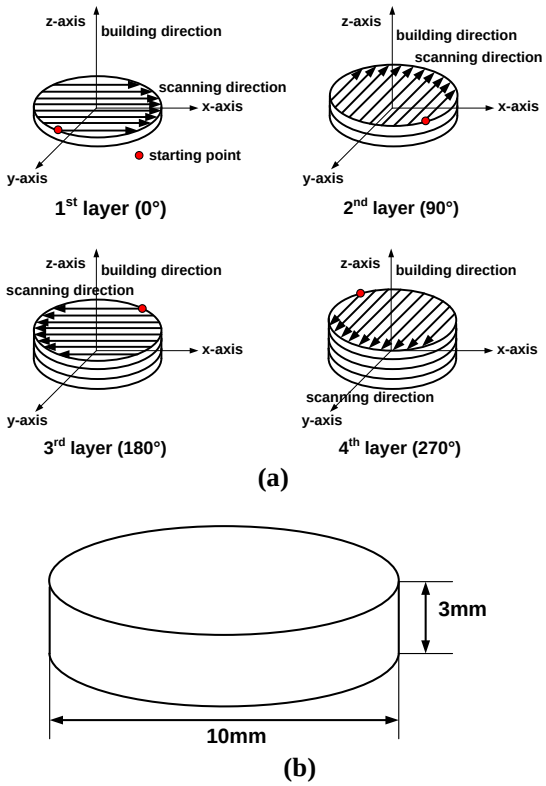


Fig. 2 Schematic of deposition method; (a) cross-hatching technique and (b) deposited final target shape

Table 2 Test condition

Shielding gas	Air, Ar, N_2
Power (w)	100 ~ 200
Scan rate (mm/s)	37 ~ 1757
Powder layer thickness (mm)	0.06, 0.1
Fill spacing (mm)	0.06
Scanning number	2

될 경우 주사 시작점의 두께가 증가하게 되어 적층 한계에 부딪히게 된다. 따라서 크로스 해칭 주사(cross hatching scanning) 방식을 적용하여 시작점을 0°, 90°, 180°, 270°로 회전시켜 적층을 수행하였다. 각각의 차폐 분위기에서 표면에 적층된 분말 사이의 결합을 강하게 하기 위해 모든 실험은 레이저를 2번씩 주사하였으며, 다양한 공정변수에 의한 적층 가능 범위를 분석하였다. 또한, 제작된 원통기둥의 단면부의 표면 연마를 통해 이미지 분석 프로그램(TDI Plus 5.0)을 이용하여 단면부의 형상을 라벨링(labeling)하여 용융부와 미용융부의 단면적을 측정해

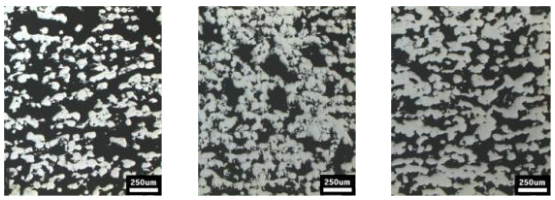
공극률(porosity)을 분석하였다. 각 차폐가스 별 경도 분석을 수행하였으며 세부적인 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 적층 두께에 따른 결합 특성

DLM 공정 시 차폐가스가 적층 형상에 미치는 영향을 알아보기 위해 지름 10mm, 높이3mm의 원통기둥 적층 실험을 실시하였다. 적층두께가 0.1mm일 경우 주사속도 1391~1757mm/s의 모든 범위에서 적층이 가능하였다. Fig. 3은 적층두께가 0.1mm, 주사속도 1391mm/s에서의 단면 형상을 보여 준다. 차폐가스(Air, Ar, N_2) 분위기에서 분말층을 레이저로 용융시켜 계속적인 적층을 수행하여 목표 높이 3mm의 제작이 가능하였지만 두터운 분말 도포 높이 및 빠른 주사속도에 의해 입열되는 에너지양이 적어 도포된 분말층이 충분히 용융 되지 않아 다량의 기공이 발생하였다. 따라서 최소 적층 두께라 판단되는 0.06mm와 다양한 레이저 출력, 그리고 낮은 범주의 주사속도에서 공정변수를 재설정하여 추가적인 실험을 통한 분석을 실시하였다.

Fig. 4는 적층두께가 0.06mm일 때 다양한 레이저 출력 및 주사속도에 의한 차폐가스 별 적층 가능 여부를 분석하여 나타내었다. 모든 차폐 분위기에서 주사속도가 증가, 레이저 출력이 감소할수록 적층이 가능한 범위가 넓어지는 것을 볼 수 있다. Air 분위기에서는 DLM 공정을 이용한 적층을 수행할 경우 Ar, N_2 분위기에 비해서 좁은 범위에서 적층이 가능하였으며, N_2 분위기에서 가장 넓은 범주에서 적층이 이루어 졌다. 본 연구에서는 이러한 원인 규명을 위해 레이저 출력이 200W 일 때를 기준으로 하여 정밀한 분석을 실시하였다. 레이저 출력이 200W일 때 Air 분위기에서는 659mm/s, Ar과 N_2 분위기에서는 각각 293mm/s, 366mm/s이상의 주사속도에서 높이 3mm의 원통기둥 적층이 가능하였다. Air 분위기는 Ar과 N_2 분위기에 비해 주사속도가 549mm/s이하에서 10회 이상의 적층이 불가능하여 적층을 통한 최종 목표 높이의 원통기둥 제작을 할 수가 없었다. 이는 레이저가 도포된 분말층에 주사될 때 레이저 빔 주위의 분말이 열원에 의해 산화되며 레이저 빔이 다음 패스로 이동하게 되면 산화된 분말들이 구형형태(balling)로 결합하여 표면이 응고되기 때문이다.



(a) (b) (c)

Fig. 3 Cross-sectional microstructures at shielding gas; (a) Air, (b) Ar and (c) N_2

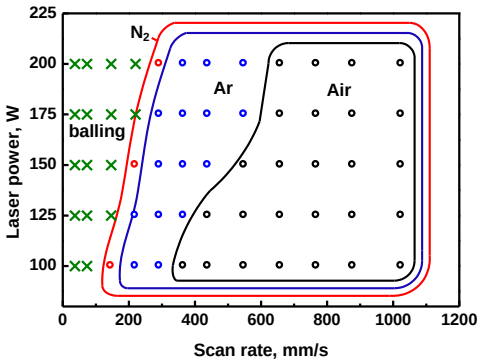
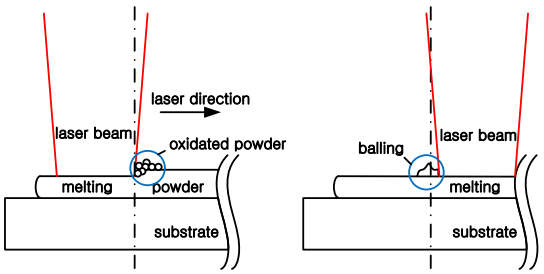
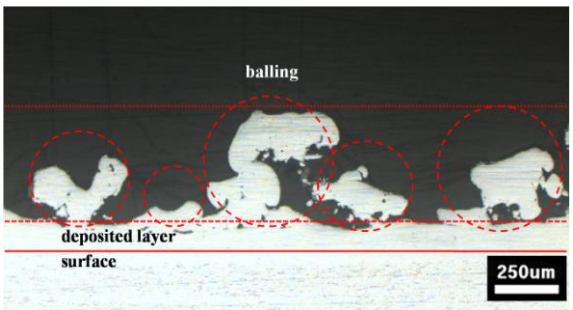


Fig. 4 Process window for shielding gas and scan rate



(a)



(b)

Fig. 5 Balling shape; (a) schematic of balling and (b) layer thickness 0.06mm and scan rate 366mm/s

따라서 볼링발생에 의해 표면조도가 거칠어지게 되어 다음 적층에서의 분말도포가 불가능 하게 된다 (Fig. 5(a)). Fig. 5(b)는 Air 분위기에 적층 두께가

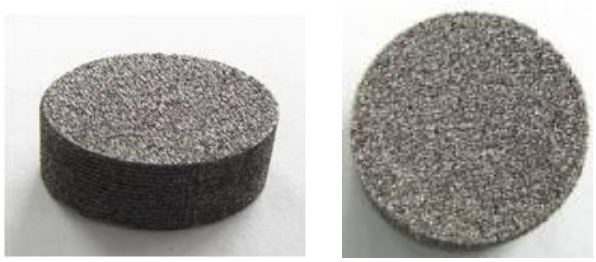


Fig. 6 Fabricated cylinderical part made by direct laser melting process

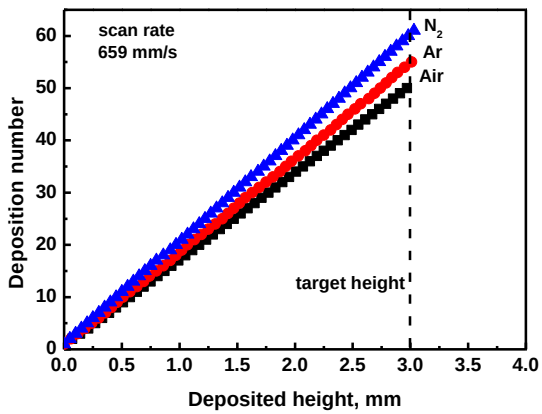


Fig. 7 Deposition number with deposition height; layer thickness 0.06mm and scan rate 659mm/s

0.06mm, 주사속도 366mm/s 일 때 볼링 발생에 의해 다음 적층이 어려운 단면형상을 보여 준다.

Fig. 6은 각 차폐가스 별로 Fe-Ni-Cr 분말의 용융에 의해 제작된 높이 3mm 원통기둥의 형상을 나타낸 것이다. Air 분위기에서는 흑색의 표면을 나타났는데, 이는 레이저 빔이 고르게 도포된 분말층 표면에 주사 될 때 대기의 성분 중 O_2와 반응을 하여 표면 산화가 진행 되었기 때문이다. 반면에 Ar, N_2분위기는 각각 옅은 회색과 짙은 회색의 표면을 확인할 수가 있었는데 레이저 주사를 통한 분말 용융 시 Ar, N_2 성분이 O_2와의 화학적 반응을 방지해 산화가 억제되어 표면이 보호된 거라 판단된다.

Fig. 7은 주사속도가 659mm/s, 적층두께가 0.06mm 일 때 최종 목표 높이 3mm까지 적층을 수행하였을 때의 적층횟수를 나타내었다. 분말의 도포두께가 0.06mm 일 경우 51회의 적층횟수를 가지면 적층높이 3mm에 도달하게 된다. 하지만 N_2 > Ar > Air 순으로 각각 61, 55, 50회의 적층횟수가 측정되었다. Air 분위기는 분말 적층이 진행될수록 표면부 산화에 의해 미세 볼링 발생으로 인해 표면 조도 거칠기가 점차적으로 증가하게 되어 적층두께 0.06mm보다 높은 분말두께에서 다음 적층을 위한 분말의 도포를 할 수가 있었다. 반면에 Ar과 N_2 분위기는 표면이 산화로부터 보호되어 매끄러운 표면을 얻을 수가 있었으며, 레이저 주사 시 분말층이 용융되면서 적층된 분말 두께보다 감소하게 되어 적층횟수가 증가하게 된 것으로 판단된다.

3.2 단면부 차폐가스에 대한 특성

차폐가스가 용융 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 단면부 미세조직을 분석하여 아래의 식(1)로 공극률을 정의해 나타내었다.

$$porosity(\%) = \frac{A_{total} - A_{melting}}{A_{total}} \times 100 \qquad (1)$$

여기서, $A_{melting}$은 융융된 미세조직의 단면적, A_{total}은 용융된 면적과 기공의 면적의 합을 의미한다.

Fig. 8은 주사속도에 따른 차폐가스 별 공극률을 나타내었다. 주사속도 659mm/s일 때 Air, Ar, N_2 분위기에서의 공극률은 각각 25.1%, 17.1%, 15.0%로 가장 낮은 공극률이 측정되었다. Air 분위기는 Ar, N_2 분위기에 비해 약 0.6배 높은 공극률이 분석되었는데, Fig. 7을 비교하여 보게 되면 같은 주사속도라도 산화로 인해 거칠어진 표면으로 인한 적층 횟수의 감소가 공극률 증가의 원인으로 해석된다. 주사속도가 659mm/s에서 1025mm/s로 증가하게 되면 Air, Ar, N_2 분위기 별로 공극률이 각각 34.9%, 31.9, 31.2%로 증가하였다. 즉, 주사속도가 증가하게 되면 도포된 분말을 용융시킬 수 있는 에너지가 감소하여 불충분한 에너지 공급으로 인해 주변부 분말과 결합이 미미한 네킹(necking) 형태의 결합이 이루어지기 때문이다. 용융에 의해 다음 단계의 적층은 가능하지만 낮은 에너지 범위에서는 기공의 양이 증가하게 된다. 반면에 주사속도 659mm/s 보다 감소하게 되면 도포된 분말층에 레이저 주사 시 입열되는 에너지 공급이 증가하여 표면이 거칠어져 다음 적층이 진행될수록 미용융 부분이 발생으로 인해 공극률이 증가하게 된다. 주사속도가 549mm/s보다 감소할 경우 다시 공극률이 감소하게 되는데, 이는 앞서 적층을 수행한 거친 표면 상태를 띄고 있는 하부층에 입열되는 에너지 공급이 더욱 증가하게 되어 재용융이 발생하여 공극률이 감소하게 된 것이라 판단 된다.

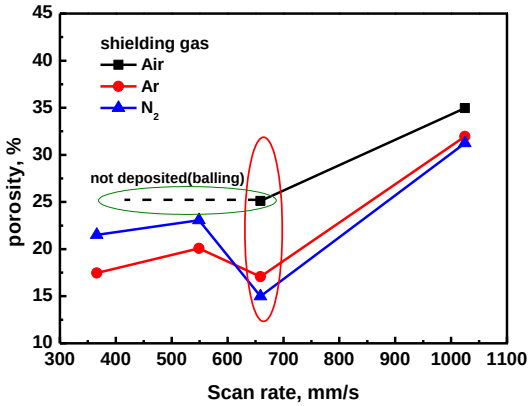


Fig. 8 Porosity at various scan rates with shielding gas

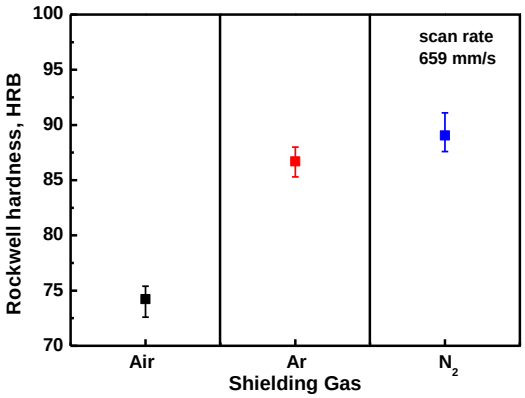


Fig. 9 Average Rockwell hardness for shielding gas

Fig. 9는 공극률이 가장 적었던 주사속도 659mm/s에서 각 차폐 분위기별로 4회 측정한 평균 경도값을 나타내었다. 공극률이 제일 적었던 N_2 분위기에서의 경도는 89HRB로 가장 높은 경도값을 나타내었고, 다음으로 공극률이 낮았던 Ar 분위기는 87HRB의 경도 분포를 보였다. 반면 공극률이 다른 분위기에 비해 높았던 Air 분위기는 74HRB의 경도 분포로 Ar, N_2 분위기보다 낮은 경도분포를 보였다. 따라서 Fe-Ni-Cr 분말 용융을 통한 적층을 수행할 때 Air, Ar에 비해 N_2 분위기에서 정밀한 적층이 가능하였고, 낮은 공극률 및 높은 경도값을 나타난 것에서 알수 있듯이 가장 좋은 성능을 발휘하였다. 하지만 정확한 원인규명을 위해서는 EDX 분석을 통해 차폐가스가 용융층 거동에 미치는 영향에 관한 추가적인 연구가 진행되어야 되어야 한다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 적층을 이용한 구조물 제작 시 차폐가스가 성형 특성에 미치는 영향도를 분석하였으며 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) DLM 공정을 이용한 원통 기둥 제작을 통해 성형 가능 여부의 process window를 구축함으로써 차폐가스(Air, Ar, N_2)에 따른 성형 가능 범위를 알 수 있었으며 N_2 분위기에서 가장 넓은 성형 범위를 확인할 수 있었다.

(2) 동일 주사속도에서, N_2=61>Ar=55>Air=50회 순으로 타겟 높이에 도달할 수 있는 적층횟수를 보였다. Air 분위기의 경우 산화의 영향을 받아 낮은 적층횟수를 나타내었다. 반면 Ar, N_2 분위기는 산화로부터 표면이 보호되어 적층횟수가 증가되었다. 특히 N_2분위기에서 정밀한 적층 수행이 가능하였다.

(3) 주사속도가 659mm/s 일 경우 N_2분위기에서 공극률이 가장 낮았으며 적층횟수와 상관관계가 있음을 확인하였다.

(4) N_2 분위기에서 가장 높은 경도분포의 확인을 통해 Fe-Ni-Cr 분말의 적층을 통한 구조물 제작 시 보호가스 N_2 사용이 기계적 성질 및 성형성 향상에 유리함을 본 논문에서 검증하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] A. Amirsadeghi, M. H. Sohi, SF. K. Bozorg, 2008, Effects of TIG Surface Melting and Chromium Surface Alloying on Microstructure, Hardness and Wear Resistance of ADI, J. Iron. Steel Res. Int., Vol. 15, No. 4, pp. 86~94.

[2] B. D. Joo, J. H. Jang, J. H. Lee, Y. H. Moon, 2009, Effect of Laser Parameters on Sintered Powder Morphology, J. Mater. Sci. Technol., Vol. 26, No. 4, pp. 375~378.

[3] 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.

[4] I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov, 2007, Parametric Analysis of the Selective Laser Melting

Process, Appl. Surf. Sci., Vol. 253, No. 19, pp. 8064~8069.

[5] 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.

[6] 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.

[7] G. Tani, G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, 2007, The Influence of Shielding Gas in Hybrid LASER–MIG Welding, Appl. Surf. Sci., Vol. 253, No. 19, pp. 8050~8053.

[8] G. Campana, A. Ascari , A. Fortunato, G. Tani, 2009, Hybrid Laser-MIG Welding of Aluminum Alloys: The Influence of Shielding Gases, Appl. Surf. Sci., Vol. 255, No. 10, pp. 5588~5590.

[9] T. Sibillano, A. Ancona, V. Berard, E. Schingaro, G. Basile, P. M. Lugara, 2006, A Study of the Shielding Gas Influence on the Laser Beam Welding of AA5083 Aluminium Alloys by In-Process Spectroscopic Investigation, Opt. Lasers Eng., Vol. 44, No. 10, pp. 1039~1051.