

Fe-Ni-Cr 코팅층 형성을 위한 SLS 공정변수의 최적화

주병돈¹, 장정환¹, 임홍섭¹, 손영명¹, 문영훈[#]

Optimization of selective laser sintering process parameter for Fe-Ni-Cr coating fabrication

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

Abstract

Selective laser sintering(SLS), a kind of rapid prototyping technology, can provide a process to form many types of coatings. Coated layers by selective laser melting are highly influenced by substrate, powder and laser parameters such as laser power, scan rate, fill spacing and layer thickness. Therefore an attempt to fabricate Fe-Ni-Cr coating on AISI H13 tool steel has been performed by selective laser sintering. In this study, Fe-Ni-Cr coating was produced 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 Ar. With power increase or energy density decrease, line width was decreased and line surface quality was improved with energy density increase. Surface quality of coating layer was improved with fill spacing optimization or layer thickness decrease.

Key Words : Selective laser sintering, Selective laser melting, Laser coating, Fe-Ni-Cr powder

1. 서론

선택적 레이저 소결법(selective laser sintering, SLS)은 금속이나 세라믹 분말재료를 단독 혹은 상호 혼합하여 마스터 모델없이 직접 급속 조형하는 레이저 직접급속 성형융합기술이다[1]. 선택적 레이저 소결법을 코팅층 형성에 이용하면 모재부와는 다른 특성을 가지는 다양한 표면층을 얻을 수 있다. 내부식성, 강도 및 경도, 내마멸성 등 용도에 따라 필요한 특성을 부여 할 수 있으며 폴리머, 세라믹, 금속 등의 다양한 재료를 이용할 수 있고 국부적으로 필요한 부분에만 코팅층을 형성 할 수도 있어 자동차 산업, 우주 항공 산업, 의료 산업 등 고기능 재료를 필요로 하는

산업으로의 적용이 용이하다[2~3]. 하지만 선택적 레이저 소결 공정은 분말 및 레이저와 관련된 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 분말은 성분 및 입도, 형태 등에 따라 동일한 입열에 대해 결합경향이 다양한 형태로 나타나게 되며 또한 레이저의 종류 및 품질에 따라 입열 경향이 달라지게 되고 레이저 출력(power), 주사속도(scan rate), 선간간격(fill spacing), 적층두께(layer thickness) 등의 공정변수에 따라 분말거동에 직접적으로 영향을 미치게 된다[4~5]. 따라서 본 연구에서는 200W급 파이버 레이저(fiber laser)를 이용하여 AISI H13 금형강의 표면에 Fe-Ni-Cr 코팅층을 형성하였으며 우수한 품질의 코팅층을 형성하기 위한 레이저 출력, 주사속도, 선간간격 및 적층두께의 최적화에 대하여 분석하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과

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

2. 실험 방법

2.1 실험장치

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. 스테핑 모터(steping motor)를 통해 Z-축 방향으로의 정밀한 이동이 가능한 스테이지(stage)와 분말 도포를 위한 레이더바(layer bar)가 설치되어 있으며, 최소 적층 가능한 분말의 두께는 10 μ m이다. 표면의 산화를 방지하기 위해 아르곤(Ar) 분위기 조성이 가능한 챔버(chamber)를 설치 하였으며, 레이저, 스캐너 및 다른 모든 시스템은 산업용 PC를 통해 제어된다.

2.2 선형상 적층 실험

레이저 공정에 영향을 미치는 중요 인자인 레이저출력, 주사속도를 변수로 설정하여 AISI H13 금형강의 표면에 Fe-Ni-Cr계의 다층의 선형 형상을 적층하는 실험을 수행하였다. 실험 조건은 선형되어 수행된 단층 형성 실험의 결과를 바탕으로 레이저출력 100W, 200W, 주사속도 3.66 ~ 366mm/s, 적층두께 0.1mm로 설정하였다. 모재부위에 분말을 균일하게 도포하고 10mm 길이의 선형으로 레이저를 주사하고 이를 반복하여 5층의 선형 형상을 적층하였으며 이미지 분석 프로그램(TDI Plus 5.0)을 이용하여 형성된 선의 형상 및 선폭에 대한 분석을 실시하였다.

2.3 코팅층 형성 실험

AISI H13 금형강의 표면에 Fe-Ni-Cr 계의 코팅층을 형성하는 실험을 수행하였다. 선간간격 0.03 ~ 0.18mm 으로 실험을 실시하였으며 적층두께 또한 변수로 설정하여 실험을 진행하였다. 레이저 출력 및 주사속도는 앞선 결과를 바탕으로 설정하였으며 선간간격 및 적층두께에 따른 표면 조도와 실제 적층 높이를 측정, 분석하였다. 이를 바탕으로 코팅층의 표면 품질을 향상 시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 선형상 적층 실험

레이저 출력 100W, 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 선폭 및 형상을 분석하였다.

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

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)

각 조건에서 적층된 시편은 30개의 지점에서 선폭을 측정하여 평균 값을 선폭으로 간주하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

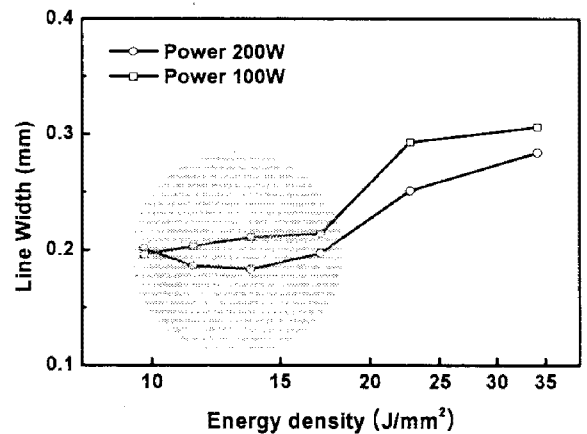


Fig. 1 Line width of laser sintered line (Layer thickness = 0.1mm)

동일한 에너지 밀도일 때 레이저 출력이 200W 일 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 주사시간은 1/2로 감소하게 된다. 주사시간의 감소로 인해 선폭방향으로의 열전달이 억제되고 선폭이 감소하게 된다.

에너지 밀도에 따른 경향을 살펴보면 선폭은

레이저 출력에 상관없이 동일한 경향을 나타낸다. $17\text{J}/\text{mm}^2$ 이하의 에너지 밀도에서는 선폭은 큰 변화가 없이 100W 의 출력에서는 약 0.190mm , 200W 의 출력에서는 약 0.216mm 로 일정하나 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 이상일 경우 급격히 증가하게 된다. 에너지 밀도가 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 보다 낮을 경우 공급된 에너지는 레이저가 주사된 부분만을 용융시키고 주변부의 분말과는 necking(necking)형태의 결합이 이루어져 비교적 얇은 선이 형성되나 에너지 밀도가 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 보다 클 경우 주변부로의 열전달이 증가하게 되고 열전달로 인해 주변부의 분말이 용융될 수 있는 에너지 밀도를 기준으로 선폭은 급격히 증가하게 된다.

적층된 선은 형상이 불연속적인데 최대선폭과 최소선폭, 평균선폭을 이용하여 수치가 클수록 거칠고 불규칙한 표면을 나타내는 비선형비(non-linearity ratio)를 정의하여 표면 형상의 특성을 수치화시켜 나타내었다.

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

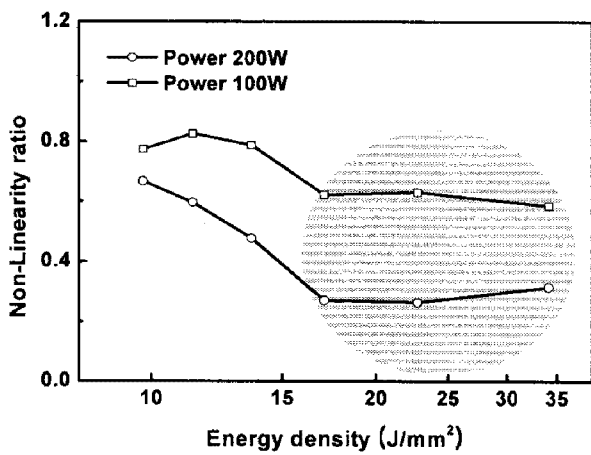


Fig. 2 Non-Linearity ratio of laser sintered line (Layer Thickness = 0.1mm)

Fig. 2 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 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 이상의 에너지 밀도에서는 일정하게 유지 되었다. 출력이 높을 때 비선형비가 낮은 이유는 앞서 설명한 바와 같이 출력이 높은 경우 주사시간이 짧아 주변부로의 열전달이 억제되고 불링 및 necking결합이 감소하여 상대적으로 우수한 표면을 가지게 되기 때문이다. 또한 에너지 밀도

가 낮은 경우 necking을 통한 선의 형성으로 인해 비선형비가 높고 용융을 통한 결합이 이루어져 necking결합이 억제되는 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 이상의 에너지 밀도에서 우수한 표면을 가지게 된다.

앞선 결과들은 200W 의 레이저출력에서 에너지 밀도를 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 이하로 유지함으로써 선폭을 감소시킬 수 있으며 에너지 밀도를 $17\text{J}/\text{mm}^2$ 이상으로 유지함으로써 선의 형상을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

3.2 코팅층 형성 실험

선형상 형성 실험에서 최적화 시킨 변수인 적층두께 0.1mm , 레이저출력 200W , 주사속도 $146.4\text{mm}/\text{s}$ 를 이용하여 코팅층 형성 실험을 실시하였다.

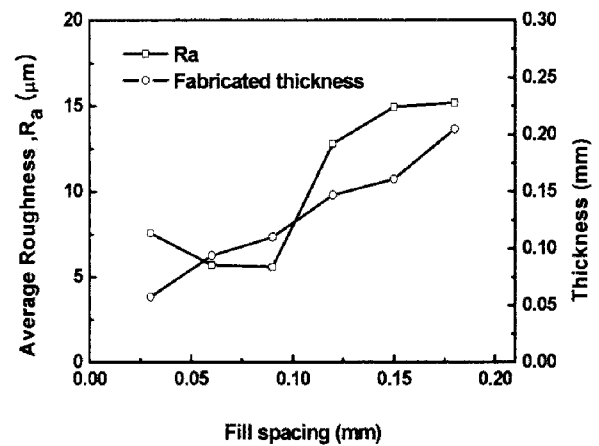


Fig. 3 Surface roughness and fabricated thickness for fill spacing

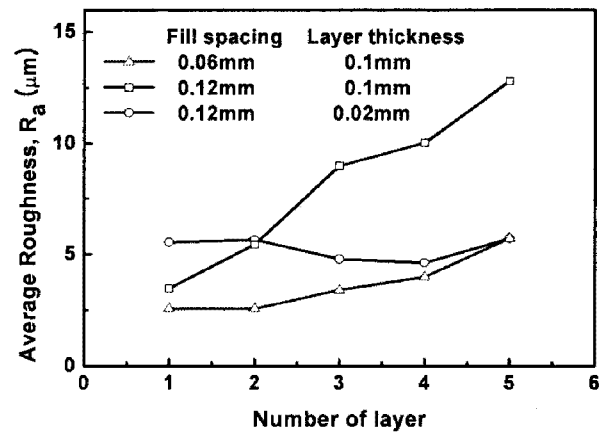


Fig. 4 Surface roughness for number of layer

Fig. 3은 선간간격 $0.03 \sim 0.18\text{mm}$ 의 범위에서 각각의 조건에 대해 5층을 적층한 후 측정된 조건 및 두께를 나타낸다. 선간간격이 0.09mm 일 때 평

균표면조도 R_a 가 $5.38\mu\text{m}$ 로 가장 낮게 나타났으며 선간간격이 지나치게 좁은 경우 물결형상의 표면이 형성되어 조도가 다소 증가하고 선간간격이 지나치게 넓은 경우 각각의 선들간의 간격이 생겨 조도가 급격히 증가하였다. 실제 적층된 높이의 경우 선간간격이 0.03mm 에서 0.18mm 로 증가함에 따라 0.05mm 에서 0.21mm 로 증가하였다. 적층된 높이가 가장 높은 선간간격 0.18mm 의 경우에도 0.21mm 의 높이를 나타내어 5번에 걸쳐 공급된 총 분말의 두께 0.5mm 에 비해 훨씬 낮아 용융을 통한 적층 수행시 실제 적층두께에 대한 분석이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 적층두께가 0.1mm 일 때 선간간격이 빔직경의 약 0.75배인 0.06mm 인 경우 비교적 낮은 범위인 $2.6 \sim 5.7\mu\text{m}$ 의 조도를 나타내었으며 약 1.5배인 0.12mm 인 경우 $3.5 \sim 12.8\mu\text{m}$ 의 범위를 나타내었다. 선간간격 0.06mm 로 실험을 수행했을 경우 우수한 조도를 얻을 수 있었던 것은 중첩을 통해 반복적으로 레이저를 주사함으로써 소결(sintering) 또는 용융(melting) 공정 후 표면조도를 향상시키기 위하여 수행하는 레이저 연마(laser polishing)의 효과를 얻을 수 있었기 때문으로 판단된다. 또한 적층횟수의 증가와 함께 조도는 나빠졌는데 이는 실제 분말의 높이에 의한 것으로 판단된다.

선간간격이 0.12mm 일 때 적층두께 0.02mm , 0.1mm 인 경우에 대하여 5층을 적층한 조도는 적층두께 0.02mm 인 경우 $5.7\mu\text{m}$, 적층두께 0.1mm 인 경우 $12.8\mu\text{m}$ 로 적층두께 0.02mm 인 경우 적층두께 0.1mm 보다 50% 이하로 감소하였다. 또한 적층두께가 0.02mm 일 때의 조도는 적층횟수와 상관없이 $4.7 \sim 5.7\mu\text{m}$ 로 우수하고 고른 분포를 보였다. 이는 레이저 주사시의 실제 분말 높이에 의한 것으로 실제 적층이 이루어져 증가한 형상의 높이와 공급된 분말의 높이 차이에 의한 현상이다. 적층두께가 0.02mm 일 경우 실제 형상이 적층되는 높이와 공급된 분말의 높이가 비슷해 일정한 분말 두께를 유지하지만 적층두께가 0.1mm 일 경우 실제 형상이 적층되는 높이에 비해 과도한 분말이 공급되고 두꺼운 분말 두께로 인해 표면의 형상이 나빠지게 된다.

4. 결론

(1) 선 형상의 적층 시 에너지밀도의 감소는 선

폭 방향으로의 열전달을 줄임으로써 선폭을 감소시키고 에너지 밀도의 증가는 선의 형상을 향상시킬 수 있다.

(2) 코팅층의 형성시 선간간격이 지나치게 좁은 경우 물결형상의 표면이 형성되어 조도가 증가하고 선간간격이 지나치게 넓은 경우 각각의 선들간의 간격이 생겨 조도가 급격히 증가한다.

(3) 코팅층의 형성시 선형상 적층을 통해 레이저 출력 및 주사속도를 최적화시킬 수 있고 주사간격 및 적층두께의 최적화를 통해 표면품질을 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)인 한국학술진흥재단(KRF-2007-521-d00206)의 일부 지원과 교육과학기술부/한국과학재단 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] B. Vandenbroucke, J. P. Kruth, 2007, Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts, Rapid Prototyping Journal, Vol. 13/4, pp. 196~203.
- [3] K. Maeda, T. H. C. Childs, 2004, Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings, Journal of materials processing Technology, Vol. 149, pp. 609~615.
- [4] I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov, 2007, Parametric analysis of the selective laser melting process, Applied Surface Science, Vol. 253, pp. 8064~8069.
- [5] 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.