

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.7.681

레이저 직접금속성형기술을 이용한 금형재 표면보수 특성 연구

손영명* · 장정환* · 주병돈* · 임홍섭* · 문영훈†

(2009년 2월 24일 접수, 2009년 5월 28일 수정, 2009년 6월 1일 심사완료)

Characterization of Direct Laser Metal Forming Technology for the Restoration of Mold Surface

Young-Myung Son, Jeong-Hwan Jang, Byeong-Don Joo, Hong-Sup Yim and Young-Hoon Moon

Key Words : Direct Laser Metal Forming(레이저 직접 금속 성형), Fiber Laser(파이버 레이저), AISI H13 (열간 금형강)

Abstract

Direct laser metal forming technology was applied to restore the damaged mold surface. In order to estimate melting characteristics of the 20 μm Fe-Cr-Ni powder, single layer experiments were performed at various levels of heat input. The process window of the 20 μm Fe-Cr-Ni powder provided feasible process parameters for the smooth regular surface. The cross hatching scanning strategy on the multiple layer experiment was performed to reduce the thickness non-uniformity of edge portions compared with the one direction scanning. To estimate the coherence between the melted powder and the basemetal, the tendency of hardness distribution has been observed. The hardness of the melted and the remelted zone was distributed from 400HV to 600HV. It is over 2 times compared of the hardness of the basemetal. Experimental results show that the mold restoring process using direct laser metal forming can be successfully applied in the mold repair industry.

1. 서 론

금형 혹은 공구가 손상되었을 때, 일반적으로 용접 공정을 이용하여 보수하고 있으나, 보수 후 제품의 열화가 자주 발생하고 보수용접을 위해 금형의 예열(pre-heat treatment) 및 후 열처리(post-heat treatment)가 필요하며 후 가공 시간이 많이 소요된다.^(1,2) 레이저 직접금속성형기술(Direct Laser Metal Forming: DLMF)은 기능성 금속 소재를 사용

하여 컴퓨터에 저장되어 있는 3 차원 형상의 기하학적 자료로부터 직접 3 차원 형상의 제품 또는 제품생산에 필요한 공구를 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 신개념의 직접금속성형기술로써 DLMF 기술을 사용할 경우, 별도의 열처리 없이 금형의 손상된 표면을 기존의 용접공정에 비해 짧은 시간에 보수 및 재생이 가능하다. 레이저가 갖고 있는 열 특성상, 기존의 육성용접에 의한 금형보수 분야에서 단점으로 지적되어 온 고열용접 후 모재와 용접부위 간의 기계적 성질의 저하, 그리고 열투무늬의 발생과 같은 문제점들을 수반하지 않으므로 금형의 직접적인 보수 시에 보다 더 효과적으로 활용할 수 있다.⁽³⁻⁶⁾ 본 연구에서는 파이버(fiber) 레이저를 이용한 DLMF 기술을 금형의 보수에 적용하기 위하여 사출 열간 금형으로 널리 쓰이는 AISI H13(열간 금형강)을 대상재료로 선택하였고,

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형 가공연구센터

E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

TEL : (051)512-2472 FAX : (051)512-1722

* 부산대학교 기계공학부

용융재료로는 내산화성, 내고온 부식성, 고온강도를 유지하는 20 μm Fe-Cr-Ni 합금 분말을 선택하였다. 금형보수를 위해 다양한 레이저 공정변수 조건에서의 단층(single layer)적층 실험을 통하여 레이저 주사 후 20 μm Fe-Cr-Ni 분말의 표면 거동 분석을 실시하여 적층 가능 범위를 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 다층(multiple layer)적층 실험을 실시하여, 주사방법에 따른 적층 중심부와 끝단부의 두께 불 균일비(thickness non-uniformity ratio)를 분석하였고, 적층부(melted powder zone)와 재용융부(remelted zone)의 두께, 경도와 조직, 결합의 양호성 등을 분석하여 DLMT의 금형보수 적용 가능성을 평가 하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 장치

본 연구에 사용된 AISI H13은 열 충격 및 열 피로에 강하며, 내마모성과 내열성에 강점이 있어 가공용 공구나 정밀금형 및 열처리 금형에 쓰이며⁽⁷⁾ 화학성분은 Table 1과 같다. 용융용 분말 소재로 20 μm Fe-Cr-Ni 분말을 실험에 사용하였고 분말의 성분은 Table 2와 같다. 본 연구에서 사용된 장치는 Fig. 1에 나타내었다. 열원인 파이버 레이저는 IPG사의 YLR-200을 사용하였고, 파장은 1.07 μm , 최대출력은 200W이고 빔 직경은 80 μm 로 정밀금형의 금형보수에 적용이 가능하다. 그리고 레이저 주사방식을 조절하는 장치인 scanner는 SCANLAB사의 hurrySCAN[®]20을 사용하였다. 작업 부의 산화방지를 위해 N₂ generator를 설치하여 N₂ 분위기를 유지 하였다. z축의 이동 조절이 가능한 실린더는 최소 10 μm 제어 가능하다.

2.2 단층 적층 실험

분말소재의 레이저 출력과 주사속도에 따른 표면 적층 거동을 분석하기 위하여 금형강 AISI H13에 Fig. 2와 같이 100 μm 높이로 분말을 도포한 후 레이저 주사 간격(fill spacing)은 60 μm 로 고정하고 레이저 출력(50, 100, 150, 200(W))과 주사속도(33.6~439.2(mm/s))를 변경하며 10mm \times 10mm의 정사각형으로 레이저를 주사하여 출력과 속도에 따른 20 μm Fe-Cr-Ni 분말의 표면용융형태와 매끄러운 표면을 형성하는 출력에 따른 입열량의 범위를 알아보기 위한 실험을 실시하여 상관관계를 비교 하였다.

2.3 다층 적층 실험

앞선 단층 실험을 실시하여 구해진 출력과 입열

Table 1 Chemical composition of AISI H13

Element	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	V	Mn	C
Wt.%	Bal.	5.2	1.3	1.23	1.12	1.1	0.41	0.41

Table 2 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

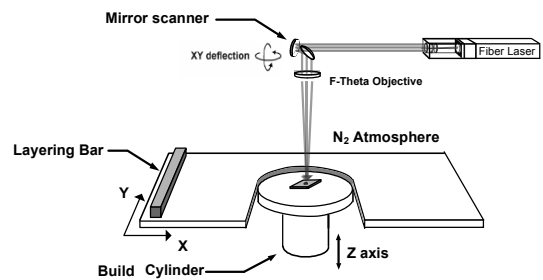


Fig. 1 Schematic drawing of the laser system

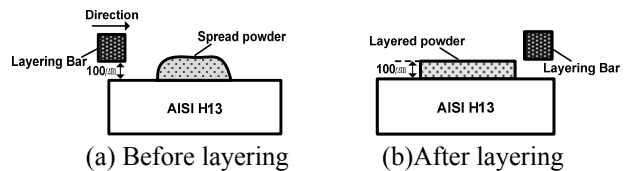


Fig. 2 Schematic drawing of the layering method

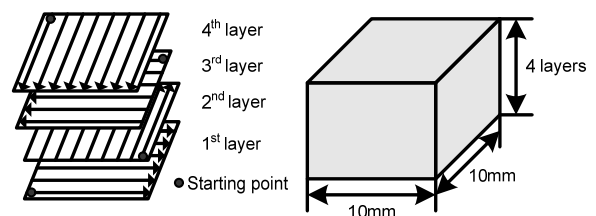


Fig. 3 Illustration of the cross-hatching technique and the specification of specimen

량에 따른 process window를 바탕으로 매끄러운 표면을 형성하는 조건인 레이저 출력 200W, 레이저 주사속도 219.6mm/s, 레이저 주사 간격 60 μm 로 4층을 적층하는 다층실험을 실시 하였고 이때 층간 레이어 두께(layer thickness)는 50 μm 로 하였다. Fig. 3은 크로스 헤칭 주사(cross hatching scanning)방식을 보여주는데, 일 방향 주사(one direction scanning) 방식 적용시 시작점에서의 양끝 부분의 분말이 용융되어 상대적으로 두꺼운 층을

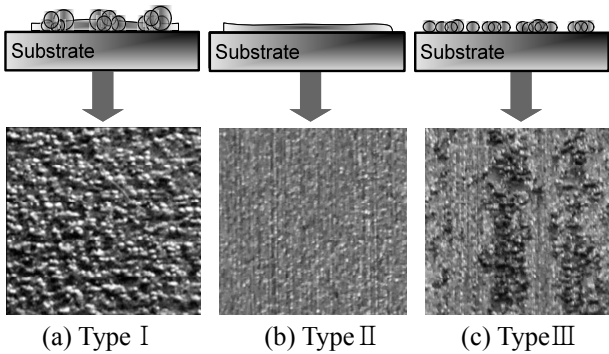


Fig. 4 Different types of surface patterns

연게 되고 이 작업이 반복될 경우 시작부의 적층 두께가 상대적으로 높아지게 되어 적층의 한계를 가지기 때문에 크로스 헤칭 주사방식으로 적층을 용이하게 하였다. 본 실험에서는 시작점을 0, 90, 180, 270로 바뀌가면서 다층실험을 실시하여 크로스 헤칭의 영향도를 알아 보았다. 시편 절단 후 폴리싱하여 Nital(5%)시약으로 부식시킨 후 광학 현미경을 사용하여 적층부와 재용융부의 깊이와 미세조직을 측정하였고, 경도시험은 마이크로 비커스 경도시험기를 사용하여 0.05kg의 하중을 적용시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단층 적층 실험

식 (1)은 레이저 에너지 밀도 계산식이다.⁽⁸⁾

$$\text{Heat Input}(\text{J}/\text{mm}^2) = P/D \times V \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P &= \text{laser power (W)} \\ D &= \text{spot diameter (mm)} \\ V &= \text{scan rate (mm/s)} \end{aligned}$$

여기서 P는 레이저 출력(W), D는 빔의 직경(mm), V는 주사속도(mm/s)를 의미한다. 단층 적층 시 나타나는 표면패턴을 크게 3가지의 표면패턴으로 Fig. 4에 나타냈으며 에너지 밀도 크기는 Type I > Type II > Type III 순이며 표면 평균 거칠기가 1 μm 이하일 경우 Type II로 판별하였다. Fig. 4(a)의 Type I의 경우 'balling' 현상으로 용융된 분말이 표면장력으로 인하여 구형의 형태를 가진 상태에서 응고된 형태이다.

이러한 현상은 레이저의 에너지 밀도가 높은 범위에서 나타나며 에너지 밀도가 높을수록 분말의 용융시 표면이 불안정하기 때문에 'balling' 현상이

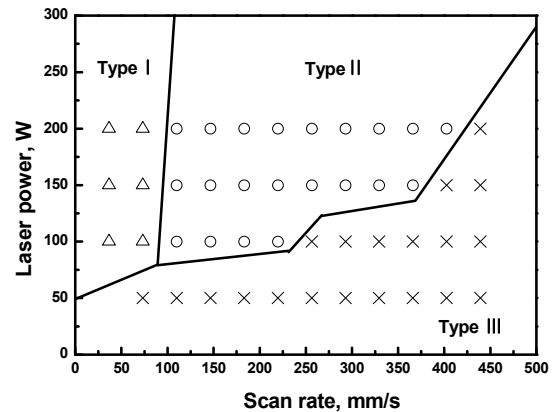


Fig. 5 Process window of 20 μm Fe-Cr-Ni powder at various laser parameters

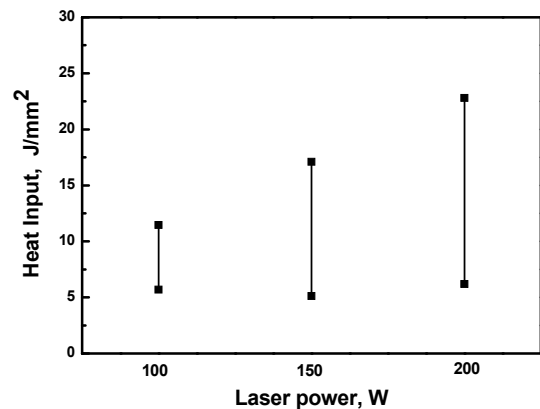


Fig. 6 Heat input for Type II according to the laser power

두드러진다. Type I의 'balling'의 높이가 레이어 간격 이상으로 나타날 경우, 다음 적층을 위한 분말의 도포가 불가능하다. Fig. 4(b)의 Type II는 매끄러운 표면형상으로 적정한 용융조건이라는 것을 알 수 있다. 다음 적층을 위한 분말의 도포가 가능하여 Type II 범위에서만 다음 층의 균일한 적층 실험이 가능하다. Fig. 4(c)의 Type III는 분말을 용융시키기 위한 충분한 에너지가 공급되지 않았을 때 나타나는 현상으로 분말간의 결합이 미미하다. 이런 결합부족은 분말 도포 시에 분말 높이의 불균형을 발생시켜 적층을 어렵게 한다. 만약 적층되어 응착 되더라도 용융부에 기공, 크랙 등의 내부결함을 가지게 된다. Fig. 5는 20 μm Fe-Cr-Ni 분말의 레이저 출력과 주사속도에 따른 표면 형상의 범위를 보여준다. 이 결과를 참고로 Type I 형상의 범위에서 좀 더 낮은 레이저 출력과 빠른 주사속도에서의 작업을 통하여 Type II의 표면형상을 얻을 수가 있으며, Type III의 범위에서는

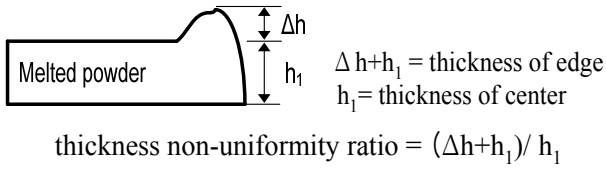


Fig. 7 Schematic drawing of thickness non-uniformity ratio

Type I 과는 반대로 레이저의 출력을 높이고 주사 속도를 느리게 조절한다면 Type II의 매끄러운 표면형상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 6 은 Type II의 매끄러운 표면의 형성을 위한 레이저 출력에 따른 입열량의 범위를 보여준다. 매끄러운 표면을 형성하는 레이저 출력에 따른 입열량의 범위가 다른 것을 알 수 있는데, 출력이 증가할수록 매끄러운 표면을 갖는 입열량의 범위는 넓게 형성되는 것을 알 수 있었다. Fig. 5 와 Fig. 6 을 통해 본 연구에서 다층 적층을 위한 적절한 표면인 Type II의 표면형상을 형성하기 위한 평균 조건은 출력 100(W) 일 때 주사속도 109 ~ 219.6(mm/s) 입열량 5.69 ~ 11.46(J/mm²), 출력 150(W) 일 때 주사속도 109.6 ~ 366(mm/s) 입열량 5.12 ~ 17.10(J/mm²), 출력 200(W) 일 때 주사속도 109.6 ~ 402.6(mm/s) 입열량 6.20 ~ 22.81(J/mm²) 이다.

3.2 다층 적층 실험

앞선 단층 적층 실험의 결과 중 매끄러운 표면의 형성을 위한 적절한 조건이라 할 수 있는 Type II의 실험조건 중 레이저 출력 200W, 레이저 주사 속도 219.6mm/s, 레이저 주사 간격 60 μm로 4층을 적층하는 다층 적층 실험을 실시 하였고 이때 층간 레이어 간격은 50 μm 로 고정하였다. 시편 적층 시에 레이저 일 방향 주사방법을 사용할 경우 적층부 전체치수의 오차 정도가 크고 집중된 열에 의한 휨 변형이 발생하게 되며 작업이 반복될 경우 끝단부가 돌출되어 적층이 더 이상 불가능하게 된다.⁽⁹⁾ 이러한 현상을 해결하기 위하여 레이저 주사 방법을 달리하였다. 즉, 주사 시작점을 0, 90, 180, 270° 로 시계 반대 방향으로 회전하면서 적층하는 크로스 헤칭 주사방법을 실시하였다.

그 결과 일 방향주사 시 약 280 μm 대였던 오른쪽 끝단부의 높이가 약 160 μm 대로 약 45%로 감소 하였고, 왼쪽 끝단부에서는 일 방향주사 시 약 130 μm, 크로스 헤칭 시 약 170 μm 의 평균높이로 형성되었다. 일 방향주사 시 왼쪽 끝단부의 적층 높이가 오히려 낮게 형성 되어 끝단부 간의 높이 차이가 약 150 μm 가 되며 50% 이상의 차이를

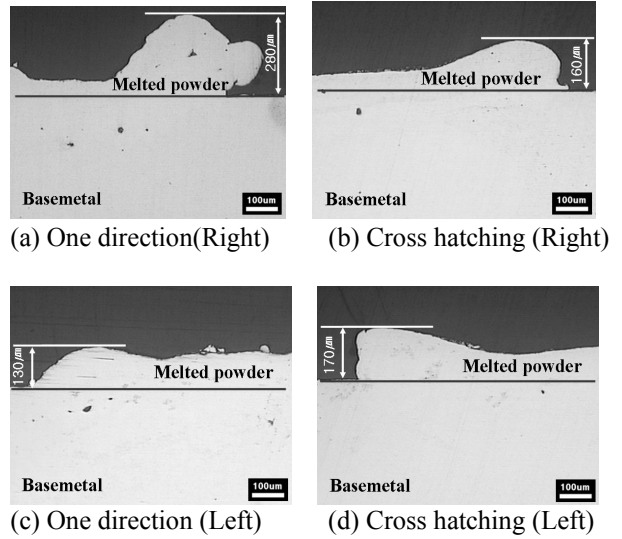


Fig. 8 Cross sectional shapes according to scan strategies

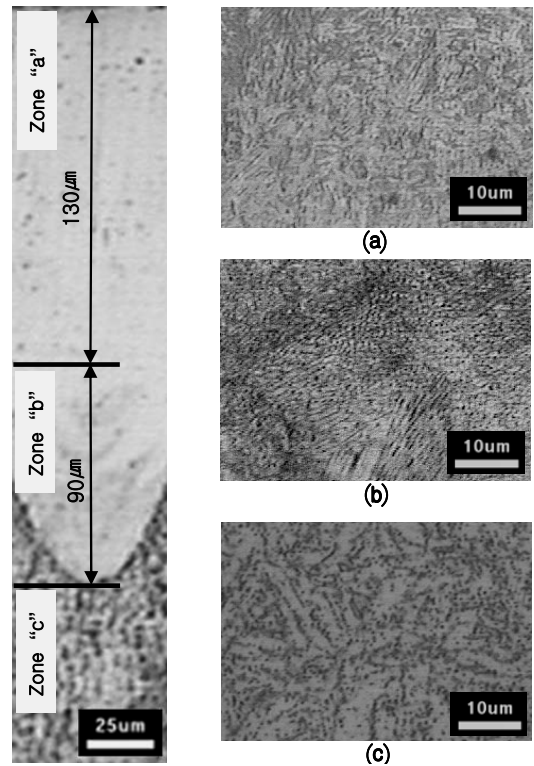


Fig. 9 Microstructure of the laser processed specimen

보였으며 중심부 두께(약 130 μm)와의 두께 불균일비도 약 2.1로 나타나 일 방향 주사방법의 문제점을 확인 할 수 있었다. 그러나 크로스 헤칭 주사시 끝단부 간의 높이차이는 약 2% 정도이며 중심부 높이(약 130 μm)와의 두께 불균일비도 약 1.3으로 줄일 수가 있어 보다 정밀한 적층이 가능하였다. Fig. 7 은 중심부와 끝단부의 두께 불균일비

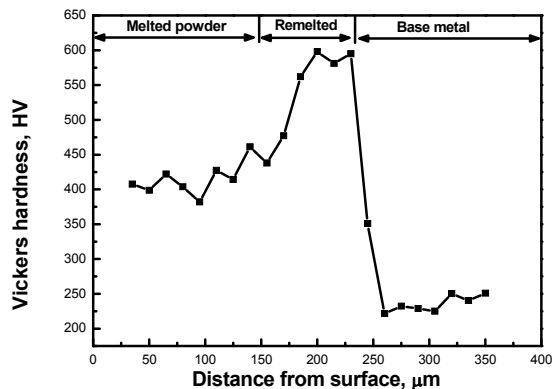


Fig. 10 Vickers hardness distribution of specimen

를 나타내는 도식도이며 두께 불 균일비가 1에 가까울수록 중심부와 끝단부의 적층오차가 적다. Fig. 8은 크로스 해칭 방법의 사용유무에 따른 분말 적층부의 끝단부 형상을 보여준다. Fig. 9의 사진 (a), (b), (c)는 적층된 시편의 조직 특성에 따른 부위별 단면 조직을 보여주는데, 사진 (a), (b), (c)는 각각 Zone “a,” Zone “b,” Zone “c”의 미세조직이다.

- Zone “a”: 적층부로 레이저에 의해 20 μm Fe-Cr-Ni 분말이 용융되어 급속응고 되는 부분으로 수지상정(dendritic)⁽¹⁰⁾을 형성
- Zone “b”: 재용융부로 모재인 AISI H13이 레이저에 의해 용융된 후 급속 응고되는 부분으로 적층부보다 미세한 수지상정⁽¹⁰⁾을 형성
- Zone “c”: AISI H13의 모재부 (basemetal zone) 조직

Fig. 10은 표면으로부터 35 μm 지점에서 345 μm 까지 15 μm 간격으로 경도를 3번 측정하여 평균 경도값의 분포를 보여 준다. 적층부의 평균 경도는 약 400HV이며 재용융부의 경도는 약 450~600HV의 범위로 나타났으며, 모재부의 경도는 약 200HV로 나타났다.

재용융부의 경우 모재와의 경계에서부터 약 50 μm 까지는 경도가 약 600HV로 나타났으며 적층부로 갈수록 경도가 점점 줄어들어 약 450HV 나타내는데 이는 적층 시 재가열로 인한 일종의 템퍼링 효과가 나타난 것으로 판단된다. 그리고 적층부에서 모재부에 이르기까지 경도 분포가 경향성을 보임을 알 수 있는데 이를 통해 적층부에서 모재부에 이르기까지 결합의 양호함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 레이저 직접금속성형기술을 금형강의 금형보수 분야에 적용하기 위하여 다양한 레이저 공정변수에 따라 20 μm Fe-Cr-Ni 분말 적층 실험을 실시하여 적층부의 특성에 대해 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었고, 금형강의 금형보수에 레이저 직접금속성형기술 적용에 대한 가능성을 제시 하였다.

(1) 단층 적층 실험을 통하여 20 μm Fe-Cr-Ni 분말의 레이저 출력과 주사 속도에 따른 3가지 표면 패턴 (Type I: balling 과 거친 표면, Type II: 매끄러운 표면, Type III: 결합부족 표면)의 범위에 대해 알 수 있었고, 매끄러운 표면을 형성하는 레이저 출력에 따른 입열량의 범위는 다르며, 출력이 증가할수록 매끄러운 표면을 형성하는 입열량의 범위는 넓어졌다.

(2) 크로스 해칭 주사방식을 적용하여 끝단부간의 높이차이를 약 2%의 오차범위로 적층할 수 있었고, 끝단부와 중심부 높이와의 두께 불 균일비도 약 1.3으로 줄일 수가 있어 보다 정밀한 적층이 가능하였다.

(3) 적층부의 평균 두께는 약 130 μm , 재용융부의 평균 두께는 약 90 μm 이며 수지상정을 형성하였다.

(4) 적층부의 평균 경도는 400HV 재용융부의 경도는 약 450HV대에서 약 600HV대까지 다양하게 나타났고, 모재부의 평균 경도 약 200HV와 비교할 때 약 2배 이상 높게 나타났다. 적층부에서 모재부에 이르기까지의 경도 분포의 경향성을 통해 적층부, 재용융부 모재부 간의 결합의 양호성을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Capello, E. and Previtali, E. B., 2006, “The Influence of Operator Skills, Process Parameters and Materials on Clad Shape in Repair Using Laser Cladding by Wire,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.174, pp.223~232.

- (2) Seo, J. H., Woo, S. S., Kim, D. J., Seok, M. S., Hwang, J. S. and Kim, E. J., 2002, "Application of DMT Technology for Restoring the Damaged Tools," *Korea Society of Laser Processing Spring annual Meeting*, pp.17~26.
- (3) Vedani, M., 2004, "Microstructural Evolution of Tool Steels after Nd-YAG Laser Repair Welding," *Journal of Materials Science*, Vol.39, pp.241~249.
- (4) Jiang, W. and Molian, P., 2001, "Nanocrystalline TiC Powder Alloying and Glazing of H13 Steel Using a CO₂ Laser for Improved Life of Die-casting Dies," *Surface and Coatings Technology*, Vol.135, 139~149.
- (5) Vedani, M., Previtali, B., Vimercati, G. M., Sanvito, A. and Somaschini, G., 2007, "Problems in Laser Repair-Welding a Surface-treated Tool Steel," *Surface & Coatings Technology*, Vol.201, pp.4518~4525.
- (6) Sun, Y., Sunada, H. and Tsujii, N., 2001, "Crack Repair of Hot Work Tool Steel by Laser Melt Processing," *ISIJ International*, Vol. 41, pp.1006~1009.
- (7) Shin, H. J., Yoo, Y. T., Ahn, D. G. and Shin, B. H., 2006, "The Surface Heat Treatment of Die Steel SKD61 using CW Nd:YAG Laser," *Proceeding of KSME 2006 Spring Annual Meeting*, pp. 3080~3085.
- (8) Jeon, B. C. and Kim, J. D., 1998, "Selective Laser Sintering by CO₂ Laser," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.15, pp.18~25.
- (9) Morgan, R., Sutcliffe, C. J. and O'neill, W., 2004, "Density Analysis of Direct Metal Laser Re-melted 316L Stainless Steel Cubic Primitives," *Journal of Materials Science*, Vol.39, pp.1195~1205.
- (10) Grum, J. and Slabe, J. M., 2003, "A Comparison of Tool-repair Using CO₂ Laser Surfacing and Arc Surfacing," *Applied Surface Science*, Vol. 208~209, pp. 424~431.