[논문] 한국소성가공학회지, 제 24 권 제 4 호, 2015
Transactions of Materials Processing, Vol.24, No.4, 2015
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.24.4.272

레이저 메탈 디포지션 변수에 의한 표면경도 특성 분석

김원혁[1] · 정병훈[1] · 박인덕[2] · 오명환[3] · 최성원[3] · 강대민[#]

Surface Hardness as a Function of Laser Metal Deposition Parameters

W. H. Kim, B. H. Jung, I. D. Park, M. H. Oh, S. W. Choi, D. M. Kang
(Received February 11, 2015 / Revised May 4, 2015 / Accepted May 14, 2015)

Abstract

The characteristics of the laser metal deposition parameters were studied to enhance the deposition efficiency using a diode pumped disk laser. STD61 hot tool steel plate and Fe based AISI M2 alloy were used as a substrate and powder for the laser metal deposition, respectively. Among the laser metal deposition parameters the laser power, track pitch and powder feed rate were used to estimate the deposition efficiency. From the experimental results, the deposition efficiency was shown to be excellent when 1.8kW laser power 500um track pitch and 10g/min of the powder feed rate were used. For this optimal condition the average hardness of the deposition track was approximately 830HV, and this value is 30~50% better than the hardness of the commercially produced tool steel after heat treatment.

Key Words : Laser Metal Deposition, STD61, M2 Powder, Track, Hardness

1. 서 론

자동차, 조선, 항공 산업 분야에서 내마모성 등 기계적 특성을 필요로 하는 부품을 제조하기 위한 금형 및 공구는 매우 중요하다[1]. 이러한 고강도 부품을 가공하기 위해 기존 소재에 고경도를 위한 합금 원소들을 첨가하여 고성능의 금형을 개발하고 있지만, 아주 고가의 합금 원소인 Cr, Mo, V, W 등이 첨가됨에 따라 금형 소재 자체의 비용이 상당히 증가하는 단점이 있다[2~3]. 이에 제조비용을 절감시키기 위해서 금형 및 공구 표면에 침탄, 질화 등 복합표면개질 방법을 통하여 금형 표면의 기계적 특성을 향상시키고 있지만, 이는 대부분 고진공 상태에서 표면처리가 이루어지기 때문에 표면개질 시간이 길어지게 되어 생산성에 한계가 있다[4~5]. 또한 복합표면개질 방법은 장시간이 소요됨에도 불구하고, 경화층의 두께가 얇고, 모재와의 결합력이 낮아 장기적으로 사용 시에 경화층과 모재의 계면에서 박리가 되는 문제점이 발생할 수 있다[6].

현재 레이저에 의한 표면처리기술의 개발은 기술고도화 필요에 따라 내식성, 내열성, 내마모성 등 재료표면의 성능을 고급화하기 위해 더욱 절실히 요구되고 있다. 이와 같은 상황에서 표면처리기술이 급속히 개발되어 도입되고 있는 실정으로, 이 중 가공용 레이저기술은 1970년대부터 CO_2 레이저가 주로 절단, 구멍 뚫기 등의 용도에 이용되어 왔지만[7~8], 최근 레이저 고유의 고밀도 에너지를 이용하여 금속의 표면처리에 응용하는 새로운 레이저 처리기술이 개발되고 있다[7~10]. 이러한 레이저를 이용한 금속표면처리의 방법 중 레이저클래딩을 이

1. 엔케이에스㈜ 기술연구소
2. 한국기계연구원 부산레이저기술지원센터
3. 부산대학교 재료공학부
Corresponding Author : Pukyong National University, E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

Table 1 Chemical composition of the STD61 and AISI M2 (wt.%)

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Cu	W
STD61	0.32	0.20	0.80	4.75	0.30	1.10	0.80	0.25	-
AISI M2	0.97	0.20	0.20	4.11	-	4.90	1.80	-	6.30

용한 표면처리의 목적은 모재 자체의 기본적인 성질을 유지하면서 외부의 격한 환경에 견딜 수 있는 표면층을 형성하는 것이다. 하지만 일반적으로 레이저 및 관련 유틸리티의 성능 한계로 인하여 저출력 및 저속의 조건으로 실험을 수행하여 실제 양산에 적용하기에는 다소 무리가 있다[9~10].

본 연구에서는 STD61 소재에 AISI M2 파우더를 사용하여 12m/min 고속으로 레이저 출력, 파우더 공급량 및 트랙 이행거리에 따른 레이저클래딩(이하 LMD라 칭함) 변수의 특성분석을 위해 미세조직관찰과 경도분석을 행하고자 한다.

2. 실 험

2.1 파우더 및 실험장치

Table 1은 실험에 사용되었던 모재와 파우더의 화학조성을 나타낸다. 실험을 위한 모재로는 STD61 열간금형강 소재를 사용하였다. 파우더는 C 함량이 1% 정도 함유되며, Cr, Mo, V, W을 첨가하여 내마모성과 경도를 향상시킨 Fe 계열 파우더의 일종인 AISI M2로서 입자 크기는 평균 30um 수준이다.

여기서 Cr은 α-phase에 고용되어 열적강도를 증가시키고, Cr 함량이 4% 첨가될 경우 각 상의 고용강화 효과로 인하여 템퍼링 시에 내마모성을 증가시킨다. 또한 Mo은 2~3% 정도 첨가될 경우 일부 α-phase에 고용과 Mo_2C 카바이드(Carbide) 석출상 형성으로 높은 경도와 열적강도가 증가한다. 아울러 V에 의한 V_4C_3 카바이드는 내마모성에 영향을 미치고, 높은 열적안정성을 가지며, 600℃ 온도에서 템퍼링 시에 V_4C_3 카바이드 석출상 분율이 증가하여 열적안정성이 증가한다. 이 외에 W 함량은 5~8% 첨가될 경우 Fe_3W_3C의 강화상이 입계에 존재하여 경도가 향상된다고 알려져 있다[2~3]. 기본적으로 STD61 모재에는 파우더에 포함되지 않은 Ni 성분이 포함되어 있고, AISI M2 파우더에는 모재에 포함되지 않은 W 성분이 포함되어 있다[11~12].

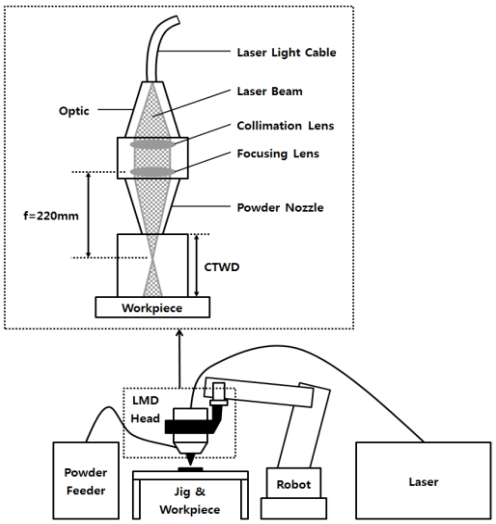


Fig. 1 Schematic diagram of the laser metal deposition system

Fig. 1은 LMD 시험장치의 대략적인 구성을 나타낸다. 여기서 보면 LMD 기초 실험을 위한 LMD 장치는 레이저용접 헤드, 파우더 공급장치, 파우더 노즐로 크게 3파트로 구성하였고, LMD를 위한 레이저 발진기는 독일 Trumpf의 Diode Pumping에 의한 4kW급 디스크레이저인 TruDisk 4001 모델을 사용하였다. 발진기로부터 발생된 레이저빔은 코어 직경 600um의 광케이블에 의하여 전송되며, 레이저용접 헤드와 파우더 노즐을 통하여 시험편인 STD61 모재의 표면에 집속된다. 콜리메이션(Collimation) 렌즈와 초점 렌즈에 의한 레이저빔의 초점거리는 220mm이다.

2.2 실험 조건

Table 2는 LMD 실험을 위한 파라미터와 그의 범위를 나타낸다.

여기서 작업거리, LMD 헤드의 경사각, 레이저빔 초점위치, LMD 헤드의 이동속도, 파우더 이송가스 및 이송가스 유량, LMD 적층 수 등을 고정변수로 두고, 레이저 출력, 파우더 공급량, 트랙피치를 변화하였다. Fig. 2는 LMD 공정모식도를 나타낸 것으로 트랙 길이를 30mm으로 하여 총 12-Pass로 Single-Layer 공정으로 실험하였다.

파우더는 디스크 회전 방식의 공급장치를 사용하였고, 이송가스를 이용하여 파우더의 융착효율을 향상시키기 위하여 파우더 노즐로 공급하였다. Table 3은 LMD 트랙의 두께 편차를 최소화하고, 트랙 이행거

Table 2 The laser metal deposition condition

Parameter	Unit	Range
Laser power	kW	1.6~2.4
Contact tip to work distance	mm	16
Tilt angle of LMD head	°	0
Focal position of laser beam	mm	±0
Travel speed of LMD head	m/min	12
Powder feed rate	g/min	8~12
Track pitch	um	400~700
Powder carrier gas	-	Ar
Carrier gas flow rate	ℓ/min	10
Track distance	mm	30
Track pass	pass	12
Track layer	layer	1

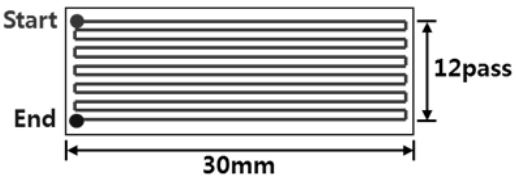


Fig. 2 The laser metal deposition method

리와 LMD 트랙의 경도를 향상시키기 위해 레이저 출력을 1.6~2.4kW, 트랙 이행거리를 400~700um, 파우더 공급량을 8~12g/min으로 설정하였다. 시험편인 STD61 모재는 지그 테이블에 고정하였고, LMD 헤드의 위치와 이동속도 및 이행거리 등은 LMD 헤드가 장착된 산업용 로봇을 사용하여 정확히 조절하였다. 아울러 실험의 오차를 최대한 줄이기 위하여 작업거리, 초점위치, 이동속도, 이행거리, 파우더 공급량 및 이송가스 유량 등 모든 LMD 실험은 모두 PLC(Programmable Logic controller)로 제어하였다. 여기서 레이저 발진기를 포함한 파우더 공급장치 및 로봇을 원격통신으로 제어하기 위해서 프로피버스-인터페이스(Profibus Interface)를 사용하여 전체적으로 인터그레이션(Integration) 작업을 수행하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 출력과 공급량에 따른 트랙 표면 및 단면

Fig. 3은 출력, 공급량 및 피치에 따른 LMD 실험을

Table 3 The ideal condition for laser metal deposition test

Laser power (kW)		1.6	1.8	2.0	2.4
Track pitch (um)	400	Test			
	450	Test	Test		
	500		Test	Test	
	550			Test	
	600				Test
	700				Test
Power feed rate (g/min)	8 (2.5rpm)	Test			
	10 (3rpm)	Test	Test	Test	
	12 (3.5rpm)				Test

수행한 시험편의 단면 광학이미지를 나타낸 것으로서, 전체적으로 LMD 트랙의 융착금속 내에서는 기공과 균열 같은 결함은 관찰되지 않았다.

레이저 출력을 1.6kW로 고정한 상태에서 트랙 이행거리를 400um에서 450um으로 증가시켰을 경우에 동일 LMD 트랙 이행 수당 LMD 트랙 너비가 증가한 것을 알 수 있다. 또한 파우더 공급량을 8g/min에서 10g/min로 변화시켰을 경우에 LMD 트랙 너비에는 큰 차이가 없는 것으로 보이지만, 융착금속 내의 파우더 혼입량이 증가하였기 때문에 LMD 트랙 경도는 향상될 것으로 판단된다. 파우더 공급량을 10g/min로 고정한 상태에서 레이저 출력을 1.6kW에서 1.8kW로 증가 및 트랙 이행거리를 450um에서 500um로 증가시킨 경우와 레이저 출력을 1.8kW에서 2.0kW로 증가 및 트랙 이행거리를 500um에서 550um으로 증가시킨 경우에 LMD 트랙의 두께가 증가한 것을 확인할 수 있다.

아울러 거시적인 관점에서 LMD 트랙의 최소와 최대 두께의 차이가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있고, 레이저 출력을 2.0kW에서 2.4kW로 증가 및 파우더 공급량을 10g/min에서 12g/min로 변화시켰을 경우에 LMD 트랙의 두께가 현저히 증가할 뿐만 아니라 동일 LMD 트랙 이행수당 LMD 트랙 너비도 뚜렷이 드러날 정도로 두드러지게 증가한 것을 알 수 있다.

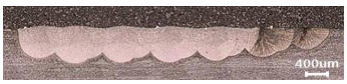
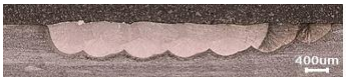
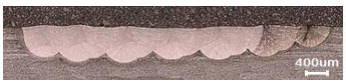
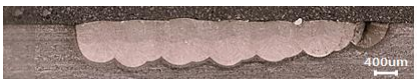
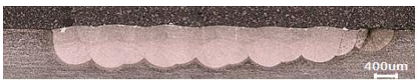
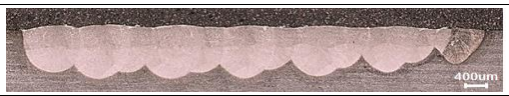
Power (kW)	Feeding (g/min)	Pitch (um)	Surface	Cross-section	Track width (mm)
1.6	8	400			6.12
1.6	8	450			6.79
1.6	10	400			6.04
1.6	10	450			6.72
1.8	10	450			6.78
1.8	10	500			7.24
2.0	10	500			7.31
2.0	10	550			7.91
2.4	12	600			8.96
2.4	12	700			10.15

Fig. 3 The track surface and cross-section according to laser power, powder feed rate and track pitch

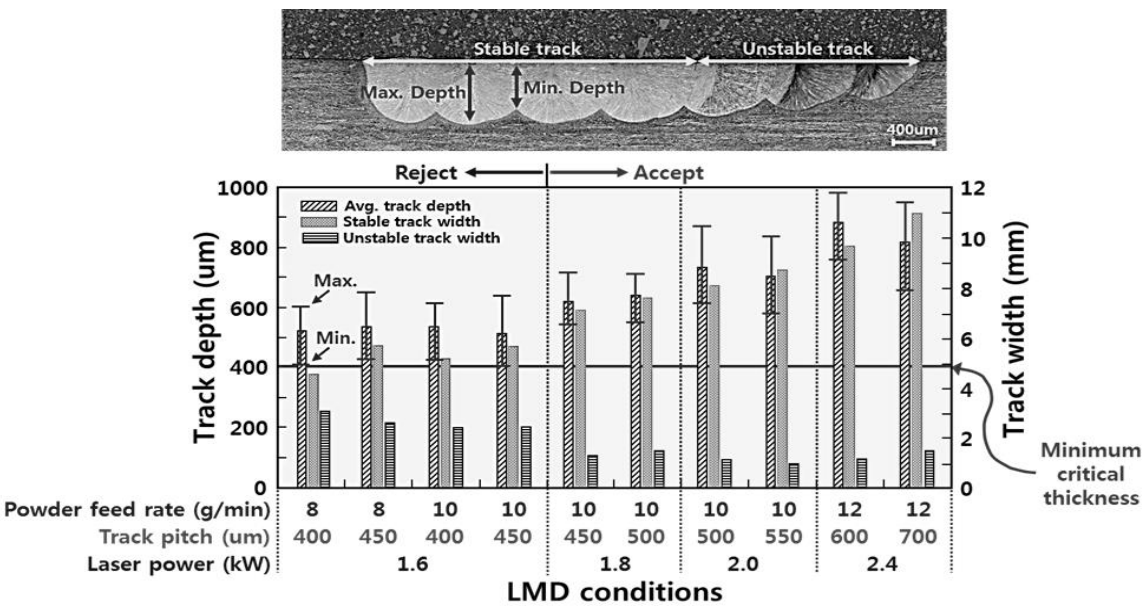


Fig. 4 Track depth and width according to laser power, track pitch and powder feed rate

또한 전반적으로 레이저 출력 및 트랙 이행거리가 증가함에 따라서 LMD 트랙 너비가 비례하여 증가하는 것을 알 수 있고, 전체적으로 LMD 트랙 내부에서는 기공 및 균열 등의 결함은 관찰되지 않았다. 다만 레이저 출력 1.6kW 조건에서 트랙 두께가 주변에 비하여 평균 이하인 불안정트랙이 발생한 것은 LMD 공정 시작 시에 저출력으로 인하여 소재가 충분하게 입열량을 공급받지 못했기 때문인 것으로 생각되며, 레이저 출력이 1.8kW 이상에서는 불안정트랙이 현저히 줄었고, 고출력일수록 전체 트랙 너비에서 불안정트랙이 차지하는 비율은 두드러지게 감소하는 경향을 보였다.

3.2 트랙 단면 두께 분석

Fig. 4는 모든 LMD 트랙 단면에 대해서 최대 및 최소 두께를 측정한 값을 나타낸 것으로서 모든 조건에서 LMD 트랙의 최소 두께는 최소 임계두께인 400um 수준을 초과하였고, 레이저 출력과 파우더 공급량이 증가함에 따라서 최소 두께도 증가하였다. 아울러 레이저 출력이 증가할수록 소재가 충분하게 입열량을 공급받기 때문에 불안정트랙은 감소하였다. 또한 레이저 출력이 2.4kW인 경우가 1.8kW 및 2.0kW 조건보다 LMD 트랙의 두께가 증가한 것은 레이저 출력이 증가함에 따라서 모재의 입열량이 증가함과 동시에 용융액상의 부피도 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 트랙 경도 분석

일반적으로 LMD 공정에 따른 트랙 형성 과정에서 트랙이 중첩되면, 선행 레이저빔에 의해 생성된 트랙이 후행 레이저빔에 의해 열을 한 번 더 받아서 중첩되는 트랙은 재용융 된다. 이 때 트랙이 중첩되면서 용융부와 재용융부의 경도가 서로 상이할 수 있기 때문에 Fig. 5와 같이 트랙 너비(Transverse) 방향의 경도와 트랙 깊이(Longitudinal) 방향의 경도를 측정하여 분석하였다.

Fig. 6은 파우더 공급량에 따라서 트랙의 경도 변화를 확인한 것으로 그래프에서 알 수 있듯이 모든 조건에서 현재 금형강에 적용되고 있는 STD61 및 STD11 소재의 열처리 후 경도보다 현저히 증가하였다. 특히 파우더 공급량이 8g/min에서 10g/min로 증가하였을 경우 트랙 경도 또한 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 파우더 내 원소 중에서 LMD

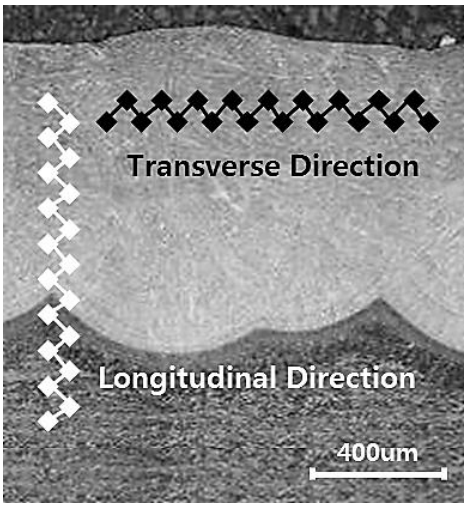


Fig. 5 Schematic diagram for measurement method of hardness test

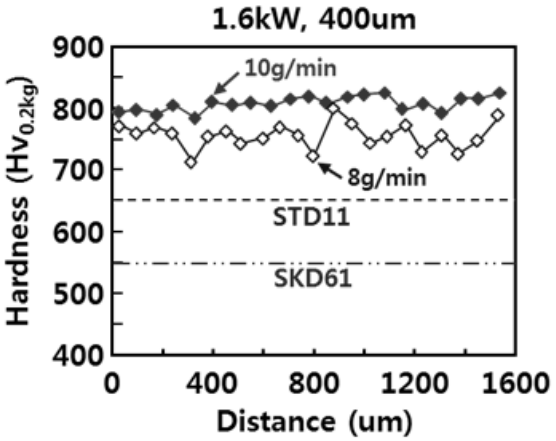


Fig. 6 Hardness distribution of transverse direction according to powder feed rate

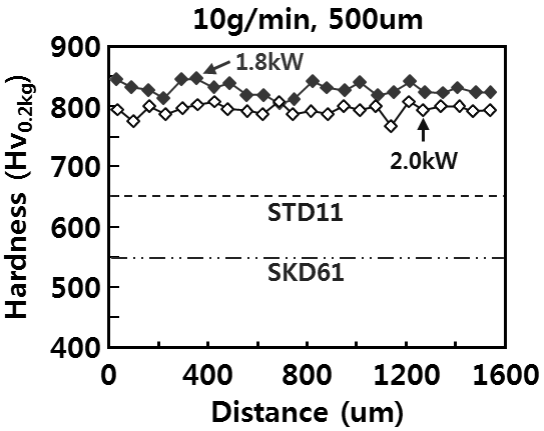


Fig. 7 Hardness distribution of transverse direction according to laser power

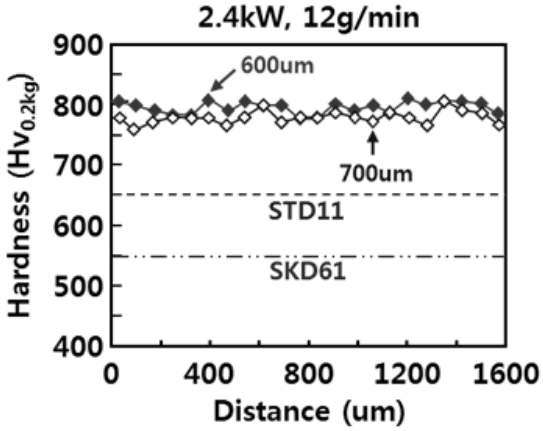


Fig. 8 Hardness distribution of transverse direction according to track pitch

트랙의 경도를 향상시키는 C, Mo, V, Cr의 함량이 증가하기 때문인 것으로 추측된다. 또한 파우더 공급량이 증가함에 따라서 LMD 트랙 표면부의 경도 편차는 현저히 감소하는 경향을 보인 것은 LMD 공정 시에 파우더 성분이 트랙 내부에 균일하게 분포되기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 파우더 공급량과 트랙 이행거리를 고정한 상태에서 레이저 출력을 변화시켰을 경우 트랙의 표면경도를 나타낸 것이다. 그래프와 같이 레이저 출력이 2.0kW인 경우가 1.8kW 조건보다 경도가 약 50Hv 정도 감소하였다. 이는 레이저 출력이 증가함에 따라서 모재의 용융이 증가하게 되고, 아울러 동일 파우더 공급량일 경우에 단위 면적당 C, Mo, V, Cr의 농도가 낮아지기 때문에 경도가 감소하는 것으로 추측된다.

Fig. 8은 레이저 출력과 파우더 공급량을 고정한 상태에서 트랙 이행거리를 변화시켰을 경우의 트랙의 표면경도를 나타낸 것이다. 그래프와 같이 트랙의 이행거리가 증가하더라도 표면경도 변화는 거의 없는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통하여 트랙 이행거리는 경도보다는 LMD 트랙의 두께에 더 영향을 미치는 인자라는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 레이저 출력, 트랙 이행거리, 파우더 공급량 변화에 따른 LMD 트랙의 깊이 방향에 대한 경도 분포를 나타낸 것이다. LMD 공정의 조건 변화와는 무관하게 LMD 트랙의 깊이 방향 경도는 모든 조건에서 800Hv 수준으로 거의 일정한 값을 보여 이는 파우더가 LMD 트랙의 용착부에 균일하게 분포되어 있다는 것을 나타낸다. 하지만 레이저

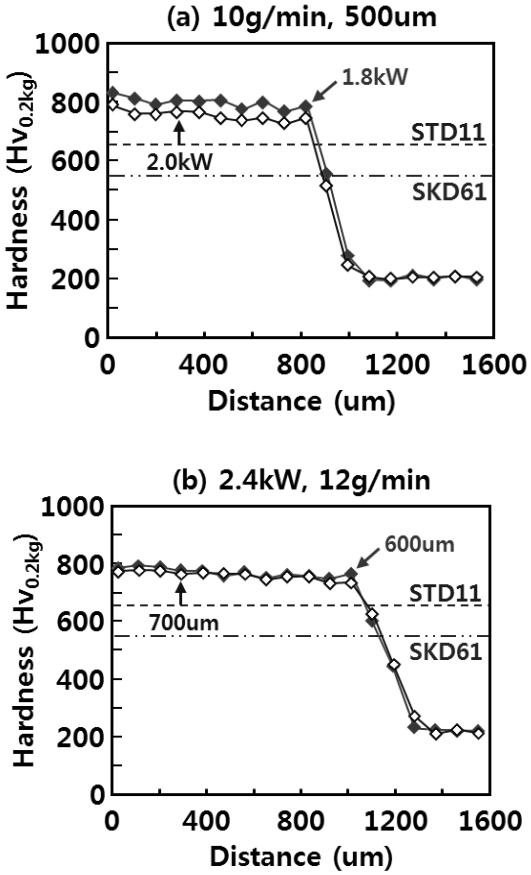


Fig. 9 Hardness distribution of longitudinal direction according to laser power, track pitch and powder feed rate : (a) 10g/min-500um and (b) 2.4kW-12g/min

출력이 1.8kW인 경우가 좀 더 고출력 조건에 비해 조금이나마 경도가 향상된 결과를 보였다. 이는 레이저 출력이 증가함에 따라서 모재의 용융이 증가하게 되고, 아울러 동일 파우더 공급량일 경우에 단위 면적당 C, Mo, V, Cr의 농도가 낮아지기 때문에 경도가 감소하는 것으로 생각된다.

이러한 경도 분석 결과에 의하여 Fe 계열의 AISI M2 파우더의 가장 적합한 LMD 공정 조건은 레이저 출력 1.8kW, 트랙 이행거리 500um, 파우더 공급량 10g/min 조건이 최적 조건으로 생각되고, 이러한 최적 조건에서 LMD 트랙의 융착금속 내부 전체 경도 측정을 통한 융착금속의 실질적인 기계적 특성을 확인 및 평가하기 위해 Fig. 10과 같이 Hardness Mapping 장비인 AMG43 모델을 이용하여 하중 200g 조건으로 LMD 트랙의 융착금속 내부 전체 영역에 대하여 경도를 측정하였다.

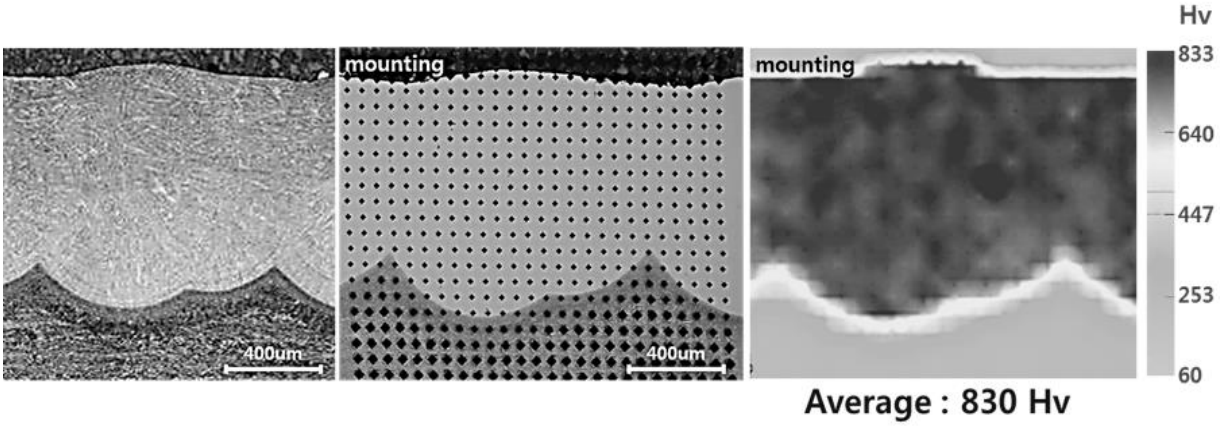


Fig.10 Hardness mapping in LMD track according to laser power 1.8kW, track pitch 500um and powder feed rate 10g/min

경도 측정 결과에서 트랙의 융착금속 내부 전체 영역에서 평균 830Hv 수준의 경도가 측정되었고, 트랙의 융착금속과 모재 근처의 경도는 표면부 및 내부의 경도보다 작게 측정되었지만, 모재보다 높은 약 700Hv 이상의 경도가 나타났다. 이것은 기존 금형강에 적용되고 있는 STD61 및 STD11 소재의 열처리 후 경도보다 전체 영역에서 균일하게 약 30~50% 정도의 기계적 특성이 향상된 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 AISI M2 파우더를 사용하여 레이저출력, 파우더 공급량 및 트랙 이행거리에 따른 LMD 기초 특성 분석을 행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 레이저 출력이 증가함에 따라서 모재의 입열량과 트랙의 두께가 증가하였고, 이와 함께 안정트랙은 증가하였다.

(2) 레이저 출력, 트랙 이행거리 및 파우더 공급량을 인자로 하는 LMD 최적 조건은 LMD 비드 두께가 최소 400um 이상이 되는 레이저 출력 1.8kW, 트랙 이행거리 500um, 그리고 파우더 공급량 10g/min 조건으로 나타났다.

(3) LMD 최적조건에서 측정된 트랙의 평균 경도는 기존 상용화되어 있는 금형강 대비 약 30~50% 정도 향상된 값을 가지며, 레이저 출력, 파우더 공급량, 트랙 이행거리와 상관없이 모든 조건에서 LMD 트랙 내부에 기공 및 균열 등 결함이 발견되지 않았다.

후 기

본 연구는 2014년도 중소기업청을 통해 중소기업 기술혁신개발사업의 지원을 받아 수행된 연구로 (S2086435), 이에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] Y. S. Chang, 2007, Evaluation of the Productivity and Environmental Effects of Laser Aided Direct Metal Deposition Process for Remanufacturing, Clean Technol., Vol.13, No.3, pp. 228~234.

[2] S. Q. Wang, K. M. Chen, X. H. Cui, Q. C. Jiang, B. Hong, 2006, Effect of Alloying Elements on Thermal Wear of Cast Hot-Forging Die Steels, J. Iron. Steel Res. Int., Vol.13, No. 5, pp. 53~59.

[3] W. Zhang, 2012, Research on Microstructure and Property of Fe-VC Composite Material Made by Laser Cladding, Physics Procedia, Int. Conf. Solid State Devices Mater. Sci., Vol.25, pp. 200~204.

[4] C. Mitterer, F. Holler, F. Ustel, D. Heim, 2000, Application of Hard Coatings in Aluminium Die Casting - Soldering, Erosion and Thermal Fatigue Behaviour, Surf. Coat. Technol., Vol.125, No. 1~3, pp. 233~239.

[5] O. Salas, K. Kearns, S. Carrera, J. J. Moore, 2003, Tribological Behavior of Candidate Coatings for Al Die Casting Dies, Surf. Coat. Technol., Vol. 172, No. 2~3, pp. 117~127.

[6] H. Forati Rad, A. Amadeh, H. Moradi, 2011, Wear

Assessment of Plasma Nitrided AISI H11 Steel, Mater. Des., Vol. 32, No. 5, pp. 2635~2643.

[7] H. Gedda, 2000, Laser Surface Cladding - A Literature Survey, Tech. Rep.

[8] N. H. Kang, Y. G. Yoo, 2007, Laser Cladding Technology in Overlay Welding, J. Korean. Weld. Joining. Soc., Vol. 25, No.1, pp. 7~8.

[9] G. Telasang, J. Dutta. Majumdar, G. Padmanabham, I. Manna, 2014, Structure-property Correlation in Laser Surface Treated AISI H13 Tool Steel for Improved Mechanical Properties, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 599, pp. 255~267.

[10] Z. Zhang, P. Lin, D. Cong, S. Kong, H. Zhou, L. Ren, 2014, The Characteristics of Treated Zone Processed by Pulsed Nd-YAG Laser Surface Remelting on Hot Work Steel, Opt. Laser Technol., Vol. 64, pp. 227~234.

[11] C. Navas, A. Conde, B. J. Fernandez, F. Zubiri, J. de Damborenea, 2005, Laser Coatings to Improve Wear Resistance of Mould Steel, Surf. Coat. Technol., Vol. 194, No. 1, pp. 136~142.

[12] S. H. Yeh, L. H. Chiu, W. C. Lo, C. L. Huang, 2011, Influence of Vacuum Heat Treatment and Salt-Bath Nitrocarburization on the Corrosion Behavior of JIS SKD61 and DH31S Hot Work Steels, Adv. Mater. Res., Vol. 154~155, pp. 1165~1169.