

트랙 이행거리에 따른 SKD61 재질의 레이저 메탈 디포지션 기초 특성 분석

Effect Analysis in Laser Metal Deposition of SKD61 by Track Pitch

김원혁* · 정병훈* · 오명환** · 최성원** · 강대민****†

Won-Hyuck Kim*, Byung-Hun Jung*, Myeong-Hwan Oh**, Seong-Won Choi**, Dae min Kang****†

(접수일 : 2014년 6월 17일, 수정일 : 2014년 9월 19일, 채택확정 : 2014년 9월 19일)

Abstract: In this study, AISI M2 powder was selected primarily through various literature in order to improve the hardness and wear resistance. Among the laser metal deposition parameters, laser power was studied to improve the deposition efficiency in the laser metal deposition using a diode pumped disk laser. SKD61 hot work steel plate and AISI M2 powder were used as a substrate and powder for laser metal deposition, respectively. Fixed parameters are CTWD, focal position, travel speed, powder feed rate, etc. Experiments for the laser metal deposition were carried out by changing laser power. Through optical micrographs analysis of cross-section in LMD track, effect of the major parameters were predicted by track pitch. As the track pitch increased, so the reheated zone width, the overlap width and the minimum thickness was decreased. The hardness was decreased in the HAZ area, the hardness in the reheated HAZ area was decreased significantly and regularly in particular.

Key Words : AISI M2 Powder, SKD61, Laser Metal Deposition, Track, Layer, Pitch, Heat Affected Zone

1. 서 론

금속이나 플라스틱의 성형과정은 금형을 이용한 주조, 사출, 단조 및 스탬핑 등 여러 제조 공정을 포함하고 있다. 금형을 사용하는 성형공정은 동일한 형상과 우수한 품질의 제품을 저비용으로 단시간에 대량 제작할 수 있는 장점이 있으나, 금형의 제작을 위해 고정밀도와 표면조도가 필요하

기 때문에 주로 절삭공정에 의해 이루어지며, 고비용에 전문기술이 필요함과 동시에 열악한 사용 환경에 의하여 손상된 금형이나 제품의 설계변경으로 형상이 일부 수정되어 사용할 수 없는 금형은 고가임에도 불구하고 폐기 처리할 수 밖에 없다. 이에 금형수명 및 기계적 성질을 향상시키기 위해 질화처리 등 표면처리 공정을 적용하고 있지만, 현재 상용화된 여러 복합표면개질 방법은

****† 강대민(교신저자): 부경대학교 기계공학과

E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

*김원혁, 정병훈 : NKS, INC

**오명환, 최성원 : 부산대학교 재료공학부

****† Dae-Min Kang(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

E-mail : dmkang@pknu.ac.kr

*Won-Hyuck Kim, Byung-Hun Jung : NKS, INC

**Myeong-Hwan Oh, Seong-Won Choi : PNU, Department of Material & Metal

고진공 상태에서 표면처리가 이루어지기 때문에 표면개질의 공정 시간이 길어 생산성에 한계가 있고 금형의 경제성에도 문제가 있어 최근에는 이러한 점을 해소하기 위해 레이저금속조형(Laser Metal Deposition, LMD) 성형공정기술이 제안되고 있다.

이러한 레이저 금속조형에 대한 연구로는 H. S. Jee등[1]에 의해 신속시작기술 분야에서 효율적으로 사용될 수 있는 신기술인 레이저 직접금속조형 기술을 상세히 소개하고 이를 국내에 적용한 개발사례를 설명하였으며, Y. S. Chang[2]에 의해 금형의 성형공정을 재제조의 측면에서 소재의 제거공정과 부가공정으로 보고 LADMD 공정을 대표적인 소재의 제거공정인 밀링공정과 비교하여 환경영향 및 생산성을 평가하였으나 이에 대한 연구가 너무 불충분하다.

본 연구에서는 경도와 내마모성이 우수한 AISI M2 파우더를 사용하여 크랙 분율 측정, 트랙경도 및 트랙 이행거리에 따른 트랙 두께 등을 측정하여 LMD 기초특성 분석을 행하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 파우더 조성 및 시편

실험에 사용된 모재와 파우더의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 첨가원소 중 Cr은 α -phase에 고용되어 열적강도를 증가시키고, Cr 함량이 5% 이상일 경우 Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ 카바이드(Carbide) 석출상이 형성되어 α -phase 내 고용강화 효과를 약화시키고, 아울러 내마모성을 감소시킨다[3,4]. W 함량은 5~8% 첨가될 경우 Fe_3W_3C 의 강화상이 입계에 존재하여 경도가 향상된다고 알려져 있어 1차적으로 선정된 파우더 조성과 유사한 상용화된 파우더 중 가장 조성이 유사한 Fe 계열 파우더의 일종인 AISI M2 파우더[5]를 선정하였다. AISI M2 파우더의 입자 크기는 평균 28.65 μ m 수준이며, 최대 입자크기는 약 150 μ m이다. LMD 공정의 조건별 기초실험을 위한 모재로는 300mm(w)×200mm(l)×20mm(t) 크기의 SKD61 열간금형강[6] 소재를 절단하여 사용하였고, SKD61 모재에는 파

우더에 포함되지 않은 Ni 성분이 포함되어 있다.

Table 1. Chemical composition of the SKD61 and AISI M2 (wt.%)

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	
SKD61	0.32	0.20	0.80	4.75	0.30	
AISI M2	0.97	0.20	0.20	4.11	-	
Mo	V	Cu	W	P	S	Remark
1.10	0.80	0.25	-	0.03	0.03	Substrate
4.90	1.80	-	6.30	-	-	Powder

2.2 실험장치 및 조건

Fig. 1은 LMD 기초 실험을 위한 레이저 메탈 디포지션 장치의 대략적인 구성도로서 레이저용접 헤드, 파우더 공급장치, 파우더 노즐로 구성하였고, LMD를 위한 레이저 발전기는 독일 Trumpf의 Diode Pumping에 의한 4kW급 디스크레이저인 TruDisk 4001 모델을 사용하였다.

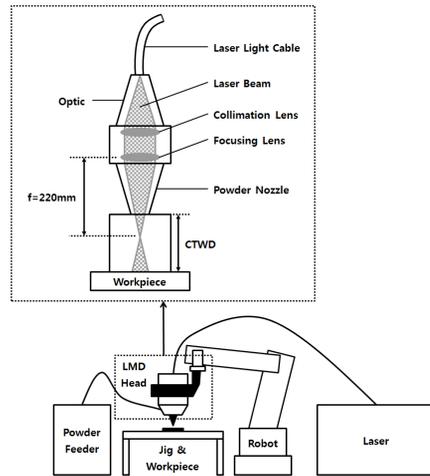


Fig. 1 Schematic diagram of the laser metal deposition system

이 장치에 있는 발전기로부터 발생된 레이저빔은 코어 직경 600 μ m의 광케이블에 의하여 전송되며, 레이저용접 헤드와 파우더 노즐을 통하여 시험편인 SKD61 모재의 표면에 집중된다. 콜리메이션(Collimation) 렌즈와 초점 렌즈에 의한 레이저

빔의 초점거리는 220mm이고, 레이저 파장은 1030nm이다. 레이저빔 직경은 이론적으로 1~2 mm가 되도록 파우더 노즐 팁과 모재 표면과의 거리인 작업거리(CTWD; Contact Tip to Work Distance)를 유지하였다. 시험편 표면에서 레이저빔 초점까지의 거리인 초점위치(Focal Position)가 변화함에 따라서 시험편 표면에서 레이저빔의 직경이 변화하게 되고, 이러한 레이저빔의 직경은 레이저 강도(Intensity; J·cm⁻²·sec⁻¹)에 영향을 미친다[7]. 또한 레이저빔의 직경은 LMD 트랙 너비와 상관관계가 있어 레이저빔의 직경이 작으면 트랙 너비가 작아지게 되고, 레이저빔의 직경이 크면 트랙 너비가 커지게 된다. 본 실험에서는 동일한 트랙 너비 상에서 그 외 조건으로 LMD 실험을 진행하고자 하였으며, 이에 초점위치를 제로(±0mm) 초점거리에 고정하고, 실험을 수행하였다. Table 2는 실험에 사용된 LMD의 조건을 나타낸 것으로 레이저 출력 변화에 따른 LMD 공정을 각 레이저 출력 조건별로 트랙 길이 100mm 및 30-Pass의 Single-Layer 방법으로 실시하였다. 실험을 위해 시험편인 SKD61 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; 프로그램 가능 논리 제어)로 제어하였다. 이에 레이저 발진기를 포함한 파우더 공급장치 및 로봇을 원격통신으로 제어하기 위해서 프로피버스-인터페이스(Profibus Interface)를 사용하여 전체적으로 인티그레이션(Integration) 작업을 수행하였다. 이때 공급되는 파우더는 디스크 회전 방식의 공급장치를 사용하였고, 이송가스를 이용하여 파우더 노즐로 공급하였다.

(Friction)과의 관계를 나타낸다. 크랙 분율은 측정된 전체 길이(L_c)와 크랙의 수(N) 및 길이(C_i)를 이용하여 다음의 식 (1)로 표현된다.

$$Crack\ Friction = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{L_c} \times 100 \quad (1)$$

Table 2 The laser metal deposition condition

Parameter	Unit	Range
Laser power	kW	0.5~1.6
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
Track pitch	um	500
Powder carrier gas	-	Ar
Carrier gas flow rate	ℓ/min	10
Track distance	mm	100
Track pass	pass	30
Track layer	layer	1~6

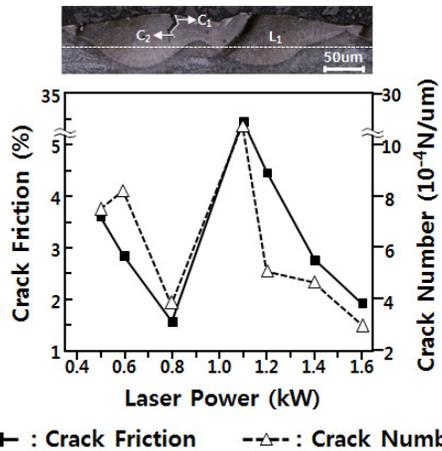


Fig. 2 Crack friction by laser power

여기서 보면 레이저 출력 0.8kW 조건에서 크랙 발생이 가장 적으며, 레이저 출력 1.6kW 및 1.4kW 조건 순이었고, 레이저 출력 1.1kW 조건에서 크랙 발생 정도가 가장 큰 것을 확인할 수 있

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 크랙 분율 측정

Fig. 2는 레이저 출력 변화에 따른 크랙 분율

다. 크랙 발생이 가장 적은 레이저 출력 0.8kW 조건의 경우에 LMD 트랙의 최소 두께가 400um 미만이기 때문에 금형에 적용하기에는 부적절하며, 레이저 출력 1.4kW 및 1.6kW 조건의 경우에 적용 가능성이 충분히 있을 것으로 판단된다.

3.2 트랙 경도 분석

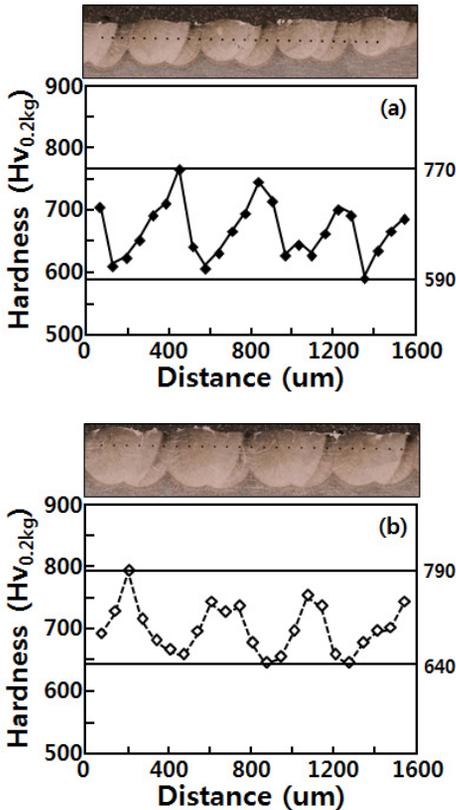


Fig. 3 Hardness distribution of specimens by laser power : (a) 1.4kW and (b) 1.6kW

Fig. 3은 LMD부의 레이저 출력에 따른 경도분포를 나타낸 것으로 레이저 출력 1.4kW 조건에서 최대 경도는 약 770Hv 수준이고, 최소 경도는 약 590Hv 정도로 경도 편차를 가지며, 그 경향이 위치에 따라 규칙성을 가지고 있는 것이 확인되었다. 레이저 출력 1.6kW 조건에서 최대와 최소 경도는 각각 790Hv 및 640Hv 정도으로써 레이저 출력

1.4kW 조건보다 조금 상승한 것을 확인할 수 있으며, 경도 분포 경향은 레이저 출력 1.4kW 경우와 매우 유사한 분포를 가졌다.

Fig. 4는 LMD 트랙 OM 관찰 사진으로서 트랙의 검은색 부분, 즉 선행 Pass에 의해 생성된 HAZ가 후행 Pass에 의해 열을 한 번 더 받은 재가열부에서 경도가 낮아지는 것이 규칙적으로 나타났다. 이는 LMD 공정 시에 선행된 LMD 트랙이 후행되는 LMD 트랙의 레이저 열원에 영향을 받아서 미세조직이 상변태가 발생하여 경도 편차가 발생하는 것으로 생각된다. 기본적으로 출력에 관계없이 트랙 사이의 거리가 증가할수록 후행 Pass에 의해 선행 Pass 트랙이 다시 용융된 중첩(Overlap) 구간 및 HAZ 너비는 감소하였고, HAZ에서 경도 또한 감소하였다. 이에 경도 편차를 최소화하기 위해서 트랙 이행거리 간격을 변화시키고 동시에 경도를 더욱 향상시키기 위하여 레이저 출력 및 파우더 공급량을 변화시켜 추가 LMD 실험을 실시하여야 할 것으로 추측된다.

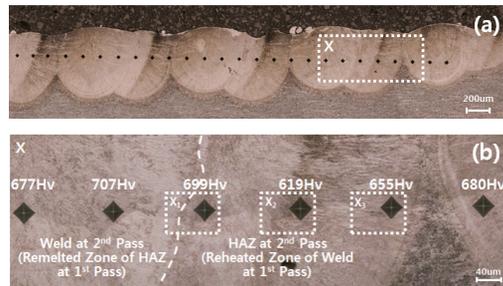


Fig. 4 OM Micrographs of cross-section in LMD track : (a) cross-section of track and (b) magnified image in position X zone

3.3 트랙 이행거리에 따른 트랙 두께 분석

Fig. 5는 LMD 트랙을 OM 관찰한 것으로서 트랙 이행거리에 따른 재가열부 너비, 중첩 너비, 두께를 확인할 수 있다. Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 트랙 이행거리에 따른 트랙두께 분석의 예측 모식도와 프로파일로서, 이는 크랙 및 기공 등 표면부와 내부 결함이 없고, 기계적 특성 향상 및 안정적인 LMD 트랙이 형성되는 출력 1.6kW 적용

Single-Layer 조건을 모식화한 것이다.

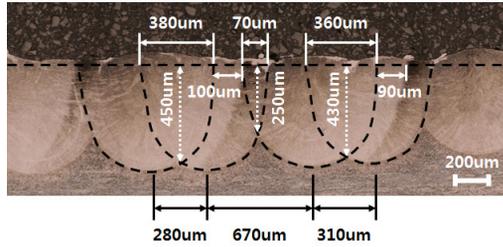


Fig. 5 OM Micrograph analysis of cross-section in LMD track

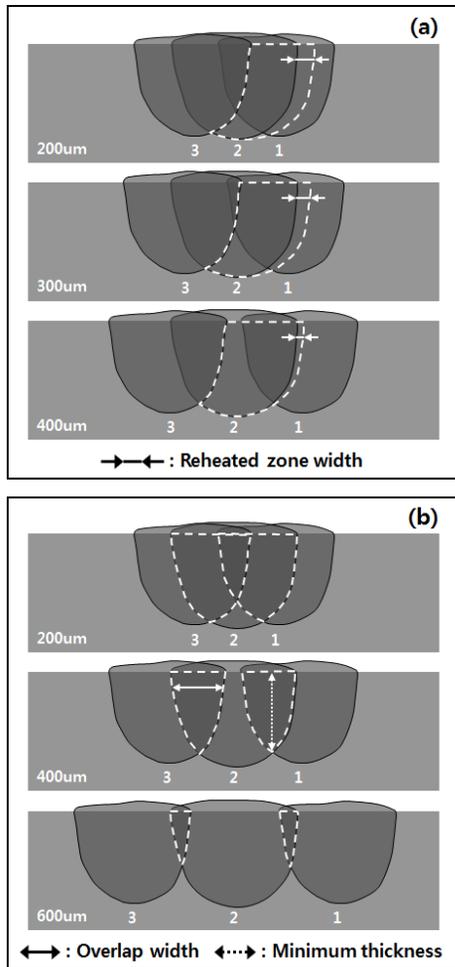


Fig. 6 Predictive schematic diagram of major parameters by track pitch : (a) reheated zone width and (b) overlap width and minimum thickness

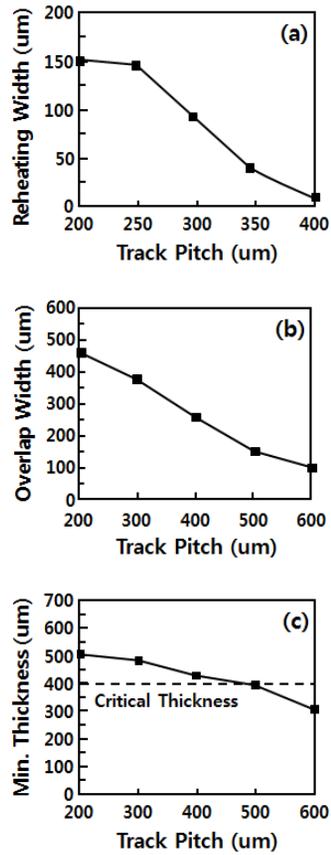


Fig. 7 Predictive profile of major parameters by track pitch : (a) reheated zone width, (b) overlap width and (c) minimum thickness

또한 트랙 사이의 거리에 따라 HAZ와 트랙 두께 분포가 다르기 때문에 재가열부가 적고, 충분한 트랙 두께 확보를 위한 조건 수립이 필요하다. 이에 트랙 이행거리에 따른 LMD 트랙의 재가열부 너비, 중첩 너비 및 금형에 적용 가능한 최소 두께 등을 기초 실험을 통한 LMD 트랙의 단면 분석을 기반으로 예측하였다. 모식도를 통하여 트랙 이행거리에 따른 재가열부 너비를 예측한 결과 400um 정도에서 재가열부가 거의 나타나지 않았다. 아울러 트랙 사이의 거리가 증가할수록 재가열부 너비뿐만 아니라 중첩 너비, 최소 두께가 감소하는 경향을 보였다. 최소 입계 두께를 400um로 설정하고, 재가열부 너비와 트랙의 최소

두께를 고려하면 트랙 사이의 거리는 400~500um 수준이 적절할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 트랙 이행거리를 500um로 설정하였지만, 실제 실험을 통한 트랙 사이 거리는 500um 대비 조금 작은 평균 480um 수준을 보였다. 이는 레이저빔 사이즈 및 장비의 이송 정확도에 의해 트랙 사이 거리가 작게 나타나므로, 실제 실험에서는 이러한 오차를 토대로 트랙 이행거리를 450~550um 사이에서 Feasibility Test 후에 본 실험을 하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경도와 내마모성이 우수한 AISI M2 파우더를 사용하여 LMD 기초특성 분석을 행한 결과는 다음과 같다.

1. 레이저 출력 변화에 따른 크랙 분율과의 관계에서는 레이저 출력 0.8kW 조건에서 크랙 발생이 가장 적게 나타났고, 레이저 출력 1.1kW 조건에서 크랙 발생 정도가 가장 크게 발생하였다.

2. 레이저 출력 1.6kW 조건에서 트랙 표면부 경도는 640~790Hv 사이에 분포하였으며, SKD61 모재 경도인 550Hv 대비 최소 15% 이상의 경도 향상을 보였다.

3. 레이저 출력에 관계없이 트랙 사이 거리가 증가할수록 재가열부 너비 및 중첩 너비는 감소하고, HAZ 영역에서 경도가 감소하였으며, 특히 재가열 HAZ에서 경도가 갑자기 낮아지는 현상이 규칙적으로 나타났다.

4. 트랙 사이 거리가 증가할수록 최소 두께가 감소하는 경향을 보였고, 트랙의 최소 임계 두께인 400um 이상을 만족하기 위해서는 재가열부 너비와 트랙의 최소 두께를 고려하여 트랙 이행거리는 400~500um 수준이 적절하다.

후 기

본 연구는 2013년도 중소기업청을 통해 중소기업 기술혁신개발사업의 지원을 받아 수행된 연구로(S2086435), 이에 감사드립니다.

Reference

1. H. S. Jee and J. H. Suh, 2003, "Laser-Aided Direct Metal Deposition(DMD) Technology", Journal of the Korean CAD/CAM Society, Vol. 8, No. 3. pp. 150-156
2. Y. S. Chang, 2007, "Evaluation of the Productivity and Environmental Effects of Laser Aided Direct Metal Deposition Process for Remanufacturing", Clean Technology, Vol.13, No.3, pp.228-234.
3. S. Q. Wang, K. M. Chen, X. H. Cui, Q. C. Jiang and B. Hong, 2006, "Effect of Alloying Elements on Thermal Wear of Cast Hot-Forging Die Steels", Journal of Iron & Steel Research, International, Vol.13, No.5, pp.53-59.
4. W. Zhang, 2012, "Research on Microstructure and Property of Fe-VC Composite Material Made by Laser Cladding", Physics Procedia, International Conference on Solid State Devices and Materials Science, Vol.25, pp.200~204.
5. C. Navas, A. Conde, B. J. Fernandez, F. Zubiri and J. de Damborenea, 2005, "Laser Coatings to Improve Wear Resistance of Mould Steel", Surface & Coating Technology, Vol.194, No.1, pp.136-142
6. S. H. Yeh, L. H. Chiu, W. C. Lo and C. L. Huang, 2011, "Influence of Vacuum Heat Treatment and Salt-Bath Nitro- carburization on the Corrosion Behavior of JIS SKD61 and DH31S Hot Work Steels", Advanced Materials Research, Vol.154-155, pp.1165-1169
7. H. K. Lee, 2007, "Analysis and Optimization of the Cladding Parameters for Improving Deposition Efficiency in Cladding using a Low Power Pulsed Nd:YAG Laser", Journal of the Korean Welding and Joining Society, Vol.25, No.4, pp.49-57.