

# AISI M2 파우더를 이용한 SKD61 재질의 레이저 메탈 디포지션 기초 특성 분석

김원혁\*, 정병훈\*, 오명환\*\*, 최성원\*\*, 강대민\*\*\*,#

\*엔케이에스(주) 기술연구소, \*\*부산대학교 재료공학부, \*\*\*부경대학교 기계공학과

## Effect analysis in Laser Metal Deposition of SKD61 using AISI M2 power

Won-Hyuck Kim\*, Byung-Hun Jung\*, Myeong-Hwan Oh\*\*,  
Seong-Won Choi\*\*, Dae-Min Kang\*\*\*,#

\*NKS, Co.,Ltd., \*\*Department of Material & Metal, PUSAN NATIONAL UNIV.,

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, PUKYONG NATIONAL UNIV.

(Received 14 January 2015; received in revised form 2 March 2015; accepted 15 May 2015)

### ABSTRACT

In this study, AISI M2 powder was selected primarily through various pieces of 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. An SKD61 hot work steel plate and AISI M2 powder were used as a substrate and powder for laser metal deposition, respectively. Experiments for the laser metal deposition were carried out by changing the laser power and track layer. The quality of the track surface and cross-section after applying the single-layer method was better than that obtained from applying the multi-layer method. As the laser power increased, the track thickness was increased, and the surface roughness deviation was decreased. In laser power condition of 1.6kW, the maximum hardness of the deposition track was 790Hv. This value was 40% better than the hardness of the SKD61 after heat treatment.

**Key Words** : AISI M2 Powder(철계 파우더), SKD61(열간금형강), Laser Metal Deposition(레이저 메탈 디포지션), Track(트랙), Layer(적층)

## 1. 서 론

현재 상용화된 금속의 여러 복합표면개질 방법은 고진공 상태에서 표면처리가 이루어지기 때문에 표면개질의 공정 시간이 길어지게 되어 생산성이 저하된다.

또한 공구 작동은 형상에 따라서 부위별 가해지는 압력이 다르기 때문에 부위별로 수명이 다르고, 표면개질 피막의 파손위치도 국부적으로 발생하게 되지만, 현재 상용화되고 있는 질화처리 등의 복합표면개질 방법은 이러한 파손 위치에 대한 국부적인 수리에 한계가 있다.

이에 레이저에 의한 표면처리기술은 기술고도화 필요에 따라 중요한 문제로 대두되고 있고, 재료표면의 성능을 고급화하기 위해 표면처리기술의 개

# Corresponding Author : dmkgang@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6134

받은 더욱 절실히 요구되는 상황에서 새로운 표면 처리기술로서 급속히 개발 및 도입되고 있는 실정이다.

한편, 가공용 레이저로써 1970년대부터 CO<sub>2</sub> 레이저가 주로 절단, 구멍 뚫기 등의 용도에 이용되어 왔지만, 최근 레이저 고유의 고밀도 에너지를 이용하여 금속의 표면처리에 응용하는 새로운 레이저 표면처리기술이 개발 및 응용되어 레이저를 이용한 금속 표면처리의 방법으로는 경화, 합금화, 클래딩 등이 실용화되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 레이저 클래딩을 이용한 표면처리법은 레이저 합금화와는 달리 용가재의 성질을 잘 살릴 수 있으며, 모재의 표면층만 녹여 용융접합을 행함으로써 모재의 변형을 줄일 수 있다. 아울러 레이저 클래딩 기술은 레이저 장치 가격이 높다는 것을 제외하면, 종래의 금속표면 처리방법에 비해 레이저의 특성상 급속 가열 및 냉각이 가능하여 열영향부의 정밀 제어가 용이하고 파손 위치에 대한 국부적인 수리도 가능하다는 뛰어난 장점이 있다<sup>[2]</sup>.

본 연구에서는 AISI M2 파우더를 이용하여 Single-layer 방법과 Multi-layer 방법에 의해 클래딩된 SKD61 열간금형강의 레이저 메탈 디포지션(이하 LMD라 칭함) 기초특성을 분석하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 파우더 조성 및 시편

Fig. 1은 레이저 클래딩 기술 모식도를 나타낸 것으로서, 고출력 레이저빔을 금속 표면에 조사하여 순간적으로 용융풀을 생성시키고, 동시에 외부로부터 분말금속형태의 파우더를 공급하여, 금속 표면에 완전히 다른 화학조성과 미세조직을 갖는

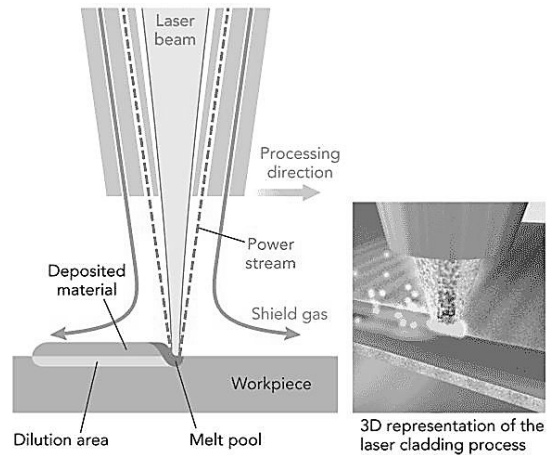


Fig. 1 Schematic diagram of the laser metal deposition process

새로운 육성층을 형성시키는 기술로서 실험에 사용된 모재와 파우더의 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 첨가원소 중 Cr은  $\alpha$ -phase에 고용되어 열적강도를 증가시키고, Cr 함량이 5% 이상일 경우 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 카바이드(Carbide) 석출상이 형성되어  $\alpha$ -phase 내 고용강화 효과를 약화시키고, 아울러 내마모성을 감소시킨다<sup>[3,4]</sup>. W 함량은 5~8% 첨가될 경우 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C의 강화상이 입계에 존재하여 경도가 향상된다고 알려져 있어, 상기의 타당성 분석을 토대로 C 함량이 1% 정도 함유되며, Cr, Mo, V, W을 첨가하여 내마모성과 경도를 향상시키고자 하였고, 이에 상용화된 파우더 중 가장 조성이 유사한 Fe 계열 파우더의 일종인 AISI M2 파우더<sup>[5]</sup>를 선정하였다. AISI M2 파우더의 입자 크기는 평균 28.65 $\mu$ m 수준이며, 최대 입자크기는 약 150 $\mu$ m이다. LMD 공정의 조건별 기초실험을 위한 모재로는 300mm(w) × 200mm(l) × 20mm(t) 크기의 SKD61 열간금형강<sup>[6]</sup> 소재를 절단하여 사용하였다.

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

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

## 2.2 실험장치

Fig. 2는 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. 이 장치에 있는 발전기로부터 발생된 레이저빔은 코어 직경 600 $\mu$ m의 광케이블에 의하여 전송되며, 레이저용접 헤드와 파우더 노즐을 통하여 시험편인 SKD61 모재의 표면에 집속된다. 콜리메이션(Collimation) 렌즈와 초점 렌즈에 의한 레이저빔의 초점거리는 220mm이고, 레이저 파장은 1030nm이다. 레이저빔 직경은 이론적으로 1mm 정도가 되도록 파우더 노즐 팁과 모재 표면과의 거리인 작업거리를 유지하였다. 시험편 표면에서 레이저빔 초점까지의 거리인 초점 위치가 변화함에 따라서 시험편 표면에서 레이저빔의 직경이 변화하게 되고, 이러한 레이저빔의 직경은 레이저 강도에 영향을 미치고<sup>[7]</sup>, 레이저 강도(Intensity;  $J \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1}$ )는 온도를 상승시켜 입열량을 증대시킨다<sup>[8]</sup>. 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( $\pm 0$ mm) 초점거리에 고정하고, 실험을 수행하였다.

## 2.3 실험조건

Table 2는 실험에 사용된 LMD의 고정변수 및 독립변수 조건을 나타낸 것으로서, 레이저 출력 변화에 따른 LMD 공정을 각 레이저 출력 조건별로 트랙 길이 100mm 및 30-Pass의 Single-Layer 및 Multi-Layer 방법으로 실험을 실시하였다. 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)로 제어하였다. 이에 레이저 발전기를 포함한 파우더 공급장치 및 로봇을 원격통신으로 제어하기 위해서 프로피버스-인터페이스(Profibus Interface)를 사용하여 전체적으로 인터그레이션(Integration) 작업을 수행하

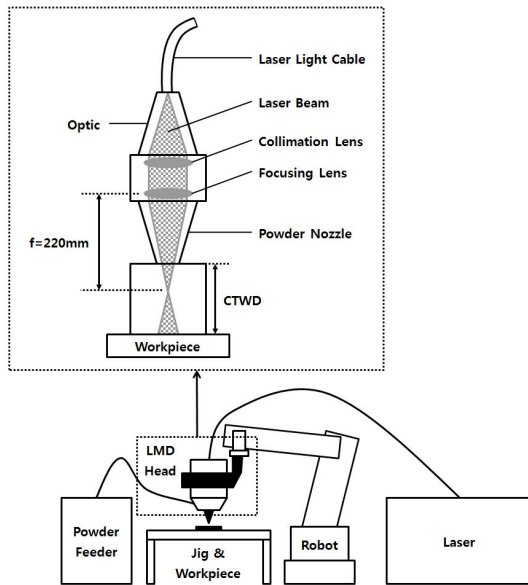


Fig. 2 Schematic diagram of the laser metal deposition system

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	$\pm 0$
Travel speed of LMD head	m/min	12
Powder feed rate	g/min	8
Track pitch	$\mu$ m	500
Powder carrier gas	-	He
Carrier gas flow rate	ℓ/min	10
Track distance	mm	100
Track pass	pass	30
Track layer	layer	1~6

였다. 이 때 공급되는 파우더는 디스크 회전 방식의 공급장치를 사용하였고, 이송가스는 He를 이용하여 파우더 노즐로 공급하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 Single-layer 방법에 따른 트랙 표면 및 단면

Fig. 3은 LMD 실험을 Single-Layer 방법이 적용된 레이저 출력에 따른 트랙 표면 및 단면 사진을 나타낸다. 여기서 보면 레이저 출력이 증가함에 따라서 표면조도 편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 레이저 출력 0.5~0.8kW 정도로 낮은 경우

에는 표면에 검은색 반점의 기공이 관찰되었다. LMD 적용 시편의 트랙을 수직면으로 절단한 후의 단면을 광학현미경관찰 및 분석하였으며, 레이저 출력 변화와 상관없이 모재의 열영향부는 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 레이저 출력이 증가함에 따라서 LMD 트랙두께가 증가하고, LMD 트랙의 최소와 최대 두께의 편차가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 LMD 공정 적용 시에 트랙 이행거리가 500um로 인하여 저출력의 경우에 모재의 용융을 거의 시키지 않기 때문에 두께 편차가 심하지만, 고출력의 경우 높은 모재로의 입열로 인해 모재를 충분히 용융시키기 때문에 LMD 두께 편차가 감소하는 것으로 판단된다. 특히 레이저 출력 1.1kW 적용 LMD 트랙의 경


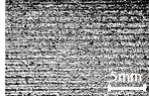
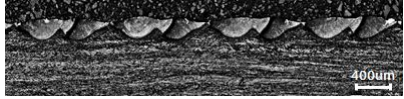
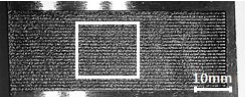
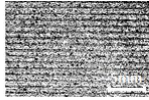
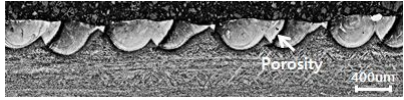
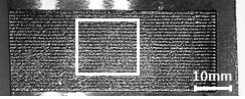
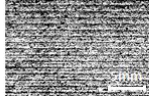

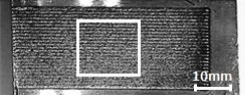


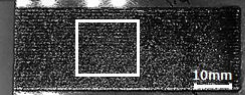


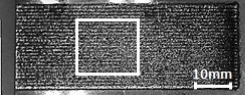
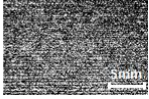
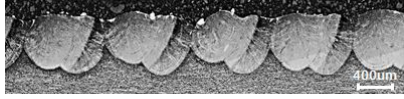
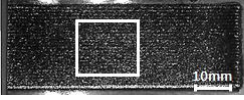
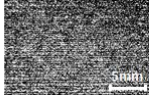
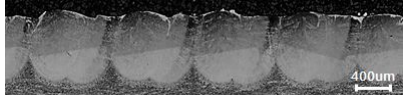
Layer	Power (kW)	Surface (10mm / 5mm)		Cross-section (400um)
1	0.5			
	0.6			
	0.8			
	1.1			
	1.2			
	1.4			
	1.6			

Fig. 3 The track-surface and cross-section after applying single-layer by laser power

우 LMD 트랙 내부에 크랙 및 기공과 같은 문제점이 다량 발생하였고, 레이저 출력 1.4kW 및 1.6kW 조건에서는 크랙 및 기공이 거의 발생하지 않았다.

### 3.2 Multi-layer 방법에 따른 트랙 표면 및 단면

Fig. 4는 저출력에서의 얇은 LMD 트랙 두께를 고출력 적용 시의 트랙 두께 수준으로 보상하기 위한 LMD 공정 조건을 파악하기 위하여 Single-Layer가 적용된 LMD 실험에서 크랙 발생 정도가 가장 적은 레이저 출력 0.8kW 조건을 전후하여 Multi-Layer를 적용한 LMD 실험을 실시한 결과이다. 여기서 Multi-layer 방법을 적용하기 위해 레이저 출력 변화에 따른 2-Layer 및 6-Layer를 적용하여 적용 시편의 단면을 광학현미경으로 관찰하였다. 결과에서 특히 6-Layer 적용 트랙의 두께는 800um 수준으로 매우 두꺼운 결과를 보였지만

Multi-Layer 적용 LMD 공정 시에 모든 조건에서 LMD 트랙 내부에 크랙 및 기공이 다량 발생한 것이 확인되었다. 이는 레이저의 빠른 가열 및 냉각 속도에 의해 용착금속의 압축과 팽창응력으로 인하여 크랙이 발생하는 것으로 판단되며, Fe 계열 AISI M2 파우더의 경우에 다량의 합금원소가 포함되어있기 때문에 Multi-Layer 적용 LMD 공정 시에 크랙 발생이 더욱 용이한 것으로 분석된다.

### 3.3 트랙 두께 측정

Single-Layer 방법과 Multi-Layer 방법을 적용하여 트랙표면과 단면을 분석한 결과 Multi-Layer 방법을 적용한 LMD 트랙 대비 Single-Layer 방법이 트랙의 품질이 양호하였으며, 이에 Single-Layer 적용 LMD 실험에서 레이저 출력에 따른 트랙 두께 및 크랙 발생 정도를 측정하였다. 측정 방법은 시험편 전체에서 측정 가능한 트랙을 10um 간격으로 측정하여 최대, 최소, 평균 두께를 분석하였다. 레이저가 저

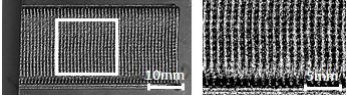
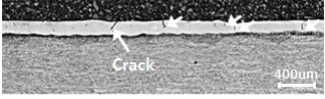
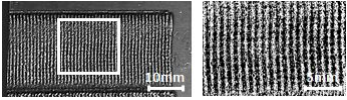
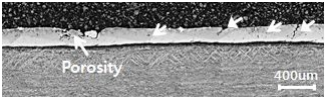
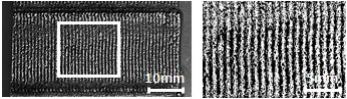
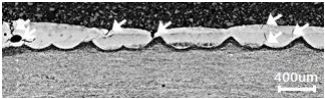
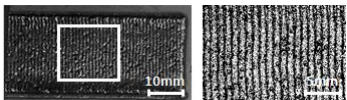

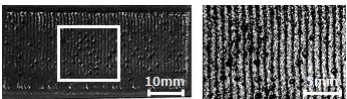
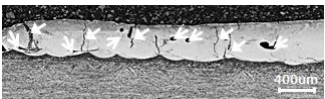
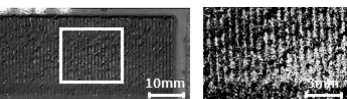

Layer	Power (kW)	Surface (10mm / 5mm)	Cross-section (400um)
2	0.5		
	0.6		
	0.8		
	1.1		
	1.2		
6	0.8		

Fig. 4 The track-surface and cross-section after applying multi-layer by laser power

출력인 경우에 LMD 트랙 두께는 최소 10um 수준으로 LMD 공정을 Single-Layer 실시할 경우 충분한 두께를 확보하지 못하였고, 반대로 레이저가 고출력인 경우에 평균 두께는 400um 정도를 상회하였다. 하지만 최소 두께의 경우 위치에 따라서 편차가 발생하였으며, 최소 두께가 200um 수준으로 금형에 적용 가능한 예상 최소 두께인 400um 수준을 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 LMD 공정 적용 시에 트랙 이행거리 간격이 500um 수준으로 넓기 때문에 두께 편차가 크게 발생하는 것으로 분석되며, 트랙 이행거리에 따른 LMD 트랙의 최소 및 평균 두께에 관한 상관관계 분석이 중요한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 레이저 출력에 따른 LMD 트랙 두께 및 편차와의 관계를 나타낸다. 레이저 출력 1.4kW 조건에서 평균적으로 트랙 두께는 약 520um, 트랙 너비는 약 860um 수준이고, 레이저 출력 1.6kW 경우에 트랙 두께는 약 650um, 트랙 너비는 약 990um 수준이었다. 전반적으로 레이저 출력 1.6kW 조건이 1.4kW 대비 레이저 에너지가 모재로의 충분한 입열로 인해 모재를 충분히 용융시키기 때문에 전반적으로 LMD 트랙 깊이와 높이가 크고, LMD 트랙 너비가 넓은 것을 알 수 있다.

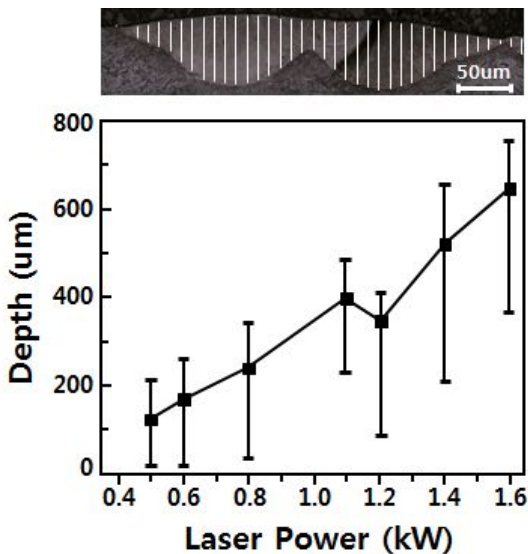


Fig. 5 Track depth by laser power

### 3.4 트랙 경도 측정

Fig. 6에서와 같이 레이저 출력 1.6kW 조건에서 트랙 3개를 기준으로 경도를 측정하였으며, 최대 경도는 약 790Hv 수준이고, 최소 경도는 약 680Hv 정도로 경도 편차를 가지며, 그 경향이 위치에 따라 규칙성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 레이저 출력 1.4kW 조건에서 최대와 최소 경도는 각각 770Hv 및 590Hv 정도로써, 레이저 출력 1.6kW 조건보다 조금 낮은 것을 확인할 수 있으며, 경도 분포 경향은 레이저 출력 1.6kW 경우와 매우 유사한 분포를 가졌다. 레이저 출력 1.6kW 조건의 LMD 트랙 경도는 기존 상용화되어 있는 SKD61 열간금형강의 열처리 후 경도인 550Hv 대비 최소 20% 이상 및 최대 40% 정도 향상된 값을 가진다. 이는 레이저 출력이 증가할수록 충분한 입열량으로 인하여 M2 파우더의 W, Mo, V 같은 경도 향상의 주요 원소가 LMD 용착금속 내부에 좀 더 균일하게 용융 및 분포되기 때문인 것으로 판단된다.

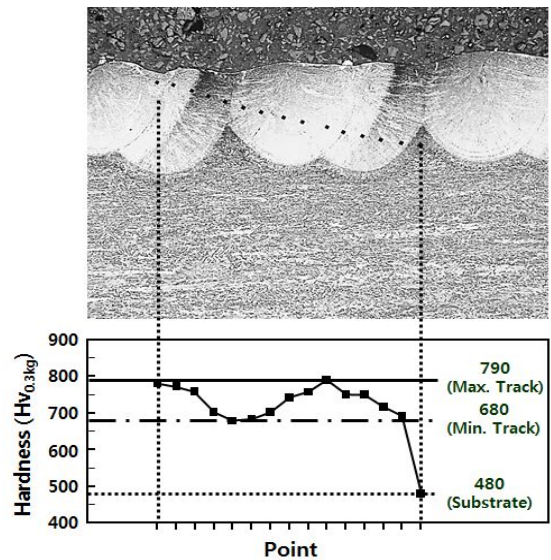


Fig. 6 Track depth by laser power

## 4. 결론

본 연구에서는 경도와 내마모성이 우수한 AISI M2 파우더를 사용하여 SKD61 열간금형강에 LMD

기초 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) Multi-Layer 방법은 레이저의 빠른 가열 및 냉각속도에 의해 용착금속의 다발적인 압축과 팽창응력으로 인하여 크랙이 발생하지만, Single-Layer 방법은 이러한 응력과정의 일회성으로 끝나기 때문에 LMD 트랙표면과 단면 특성이 우수한 것으로 판단된다.
- (2) Single-layer 방법에서 저출력의 경우에 모재의 용융을 거의 시키지 않기 때문에 LMD 두께 편차가 심하지만, 고출력의 경우 모재로의 높은 입열로 인하여 모재를 충분히 용융시키기 때문에 LMD 두께 편차가 감소하였다.
- (3) 레이저 출력이 증가할수록 레이저 에너지가 모재로의 충분한 입열로 인해 모재를 충분히 용융시키기 때문에 전반적으로 LMD 트랙 깊이와 높이가 크고, LMD 트랙 너비가 넓게 나타났다.
- (4) 레이저 출력 1.6kW 조건의 LMD 트랙 경도는 기존 상용화되어 있는 SKD61 경도 대비 20~40% 정도 향상된 값을 가지는데, 이는 레이저 출력이 증가할수록 충분한 입열량으로 인하여 W, Mo, V 같은 주요 원소가 LMD 용착금속 내부에 좀 더 균일하게 용융 및 분포되기 때문인 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 산학공동기술혁신사업에 의하여 지원되었음

## REFERENCES

1. G. M. Kim, S. Y. Yang and S. D. Choi, 2010, "Characteristic of Strengthening for Press Die