

## DED 기술을 이용한 고속도 공구강 M4 분말 적층에 관한 연구

이은미<sup>1</sup> · 신광용<sup>2</sup> · 이기용<sup>2</sup> · 윤희석<sup>1</sup> · 심도식<sup>#</sup>

### Study of High Speed Steel AISI M4 Powder Deposition using Direct Energy Deposition Process

E. M. Lee, G. W. Shin, K. Y. Lee, H. S. Yoon, D. S. Shim

(Received May 26, 2016 / Revised October 24, 2016 / Accepted October 27, 2016)

#### Abstract

Direct energy deposition (DED) is an additive manufacturing technique that involves the melting of metal powder with a high-powered laser beam and is used to build a variety of components. In recent year, it can be widely used in order to produce hard, wear resistant and/or corrosion resistant surface layers of metallic mechanical parts, such as dies and molds. For the purpose of the hardfacing to achieve high wear resistance and hardness, application of high speed steel (HSS) can be expected to improve the tool life. During the DED process using the high-carbon steel, however, defects (delamination or cracking) can be induced by rapid solidification of the molten powder. Thus, substrate preheating is generally adopted to reduce the deposition defect. While the substrate preheating ensures defect-free deposition, it is important to select the optimal preheating temperature since it also affects the microstructure evolution and mechanical properties. In this study, AISI M4 powder was deposited on the AISI 1045 substrate preheated at different temperatures (room temperature to 500°C). In addition, the micro-hardness distribution, cooling rates, and microstructures of the deposited layers were investigated in order to observe the influence of the substrate preheating on the mechanical and metallurgical properties.

**Key Words** : Direct Energy Deposition, High Speed Steel, Preheating

#### 1. 서 론

레이저 용융 금속 적층(direct energy deposition) 기술은 고출력 레이저 에너지를 이용하여 금속분말을 녹여 적층하는 방식의 3차원 제조 기술로, 치밀한 조직과 우수한 기계적 특성 구현이 가능한 장점으로 인해 금형 표면 강화(die/mold hardfacing), 금형 리모델링(remodeling), 금형 보수(repair)와 같이 금형 산업 분야에서의 적용이 증가하고 있다[1]. 이러한 DED 기술을 통한 금형 강화 시 요구되는 기계적 물성으로는 경도, 내마모성, 인성 그리고 접합강도

등이 있다. 그 중 금형 표면의 경도와 내마모성을 향상시키기 위하여 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 바나듐(V) 등과 같은 합금원소를 포함하는 공구강을 이용한 금형 강화 연구가 시도되고 있다[2]. 최근 공구강의 일종인 M2 금속분말을 적용한 금형 표면 강화 연구에 따르면, 기존 상용화되어 있는 금형강 대비 표면 경도가 약 30~50% 정도 향상된 것으로 나타나 금형 강화에 있어서 공구강의 적용이 효과적임을 확인할 수 있다[3]. 그러나, 단일 레이어(layer) 측면에서의 공구강 적층은 심각한 결함 없이 적층이 가능하지만, 적층 높이가 증가할수록 모재와 적층 영

1. 전남대학교 일반대학원 기계공학과

2. 한국생산기술연구원 (KITECH)

# Corresponding Author : KITECH, E-mail: imagineer@kitech.re.kr

역간 계면(interface)에서의 균열(crack) 전파에 의한 결합이 빈번하게 발생한다[4]. 이러한 결합은 최종 제품의 기계적 성능을 저하시키는 문제를 야기하기 때문에 공구장 적층에 있어 계면에서의 균열 발생을 저감하기 위한 연구가 진행되었으며, 가장 대표적인 방법으로는 모재 예열(preheating) 공정이 있다. 모재 예열 공정은 적층 공정 중의 온도 분포를 일정하게 하고, 용융부의 냉각속도를 낮추어 열응력을 감소시켜 변형과 잔류응력의 발생을 저감하는 효과가 있다[5]. 하지만, 이러한 예열 공정은 모재 뿐만 아니라 적층 영역의 기계적 물성을 변화시키기도 한다[6].

따라서, 본 연구에서는 금속 분말 적층 시 예열공정의 영향을 알아보기 위하여 상온부터 500℃까지 예열온도를 달리하여 AISI 1045 기판상에 M4 금속 분말을 1.5mm 높이의 multi-layer로 적층하였으며, 각각의 시편에 대해 적층 계면(interface)에서의 결합력(균열 발생 유무, 기공 발생 등)과 예열온도에 따른 경도 및 미세조직 변화를 관찰하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 레이저 용융 금속 적층 기술

Fig. 1은 레이저 용융 금속 적층 기술의 원리를 나타내고 있다. 고출력 레이저 빔을 국부적으로 조사하여 모재 표면에 용융풀(melting pool)을 형성하고, coaxial powder feeder를 통해 실시간으로 공급된 금속 분말은 용융과 급속응고 과정을 거쳐 치밀한 조직을 가진 금속층(deposited layer)을 형성하게 된다. 이때 금속분말의 이송 및 산화방지를 위하여 powder gas와 coaxial gas를 공급하게 된다. 이러한 layer-by-layer 적층 과정을 반복함으로써 임의의 3차원 형상의 제품을 제작하게 된다.

### 2.2 사용 재료

본 연구에서 사용된 모재(base metal or substrate)는 기계구조용 탄소강 AISI 1045 (JIS S45C)으로, 몰드 베이스에 많이 적용되고 있는 소재이다. 적층에 사용된 금속분말은 AISI M4 분말로 고속도공구강(high speed steel)에 속한다. 고속도공구강은 다양한 종류의 탄화물을 형성하는 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 바나듐(V) 등의 합금원소들을 함유하고 있으며, 고탄소 고합금강으로 내마모성이 우수할 뿐만 아니라 고경도에 비해 인성 또한 우수하여 금형

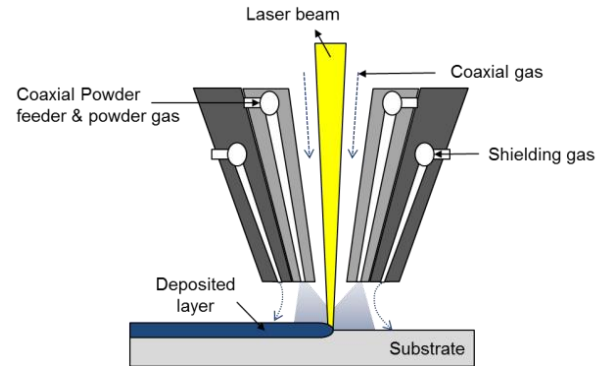


Fig. 1 Schematic diagram of direct energy deposition

Table 1 Chemical composition of materials

Element (wt %)	Materials used	
	AISI M4 powder	AISI 1045 substrate
C	1.33	0.46
Mn	0.26	0.65
Si	0.33	0.27
Cr	4.25	0.25
Ni	0.3	0.25
Mo	4.88	-
W	5.88	-
V	4.12	-
Cu	0.25	0.25
P	0.03	0.04
S	0.03	0.04

및 가공공구 등 내마모 부품 소재로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서 사용한 M4 분말은 M4 합금을 용해한 후 가스 분무법(gas atomization)으로 분말화하여 성형하여 제조하였으며, 직경 53-150 $\mu$ m 사이의 구형 분말을 사용하였다. 모재와 금속분말에 대한 화학적 조성비는 Table 1에 나타난 바와 같다.

### 2.3 적층 조건

본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 면적층을 위하여 단일 적층 트랙(single track) 너비(1.0mm)의 50%인 0.5mm를 중첩하여 line-by-line 방식으로 지그재그(zig-zag) 방향으로 면적층을 하였으며, 단일 layer의 높이는 약 0.25mm로 총 7개의 레이어를 직교 방향으로 교차하면서 layer-by-layer 방식으로 적층하였다. 이와 같은 적층 방식으로 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 100mm×50mm×10mm 크기의 AISI 1045 모재에, 10mm×20mm×1.5mm 크기로 M4 분말을 적층하였다.

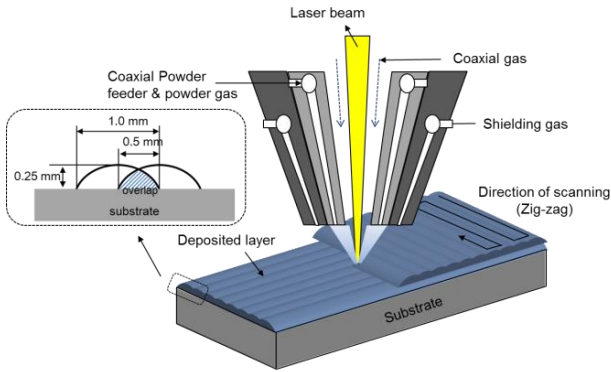


Fig. 2 Laser scanning and multi-layer deposition(unit: mm)

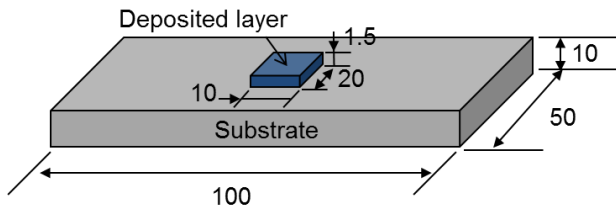


Fig. 3 Dimensions of substrate and deposited part(unit: mm)

Table 2 Processing conditions

Process parameter	Units	
Laser power	W	800
Powder feed rate	g/min	Contour 6.5 Pocket 5.0
Scanning speed	mm/min	850
Powder gas flow rate	L/min	2.5
Coaxial gas flow rate	L/min	8.0

공정조건은 Table 2에 나타난 바와 같으며, 레이저 출력력을 800W로 고정시켰으며 M4 분말의 이송 및 산화방지를 위하여 powder gas와 coaxial gas로 아르곤(Argon) 가스를 공급하였다.

## 2.4 모재 예열(substrate preheating)

DED 공정을 이용한 고속도 공구강 적층 시에는 모재와 적층 영역간의 계면(interface)에서 균열(crack) 전파에 의한 delamination과 같은 결함이 발생하게 된다. 이러한 결함은 이종소재간의 열팽창 계수의 차이 및 급속 응고에 따른 열응력 발생에 기인한 것으로, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 모재의 예열을 통해 냉각 속도(cooling rate)를 낮추어 열응력 발생을 최소화하고자 한다.

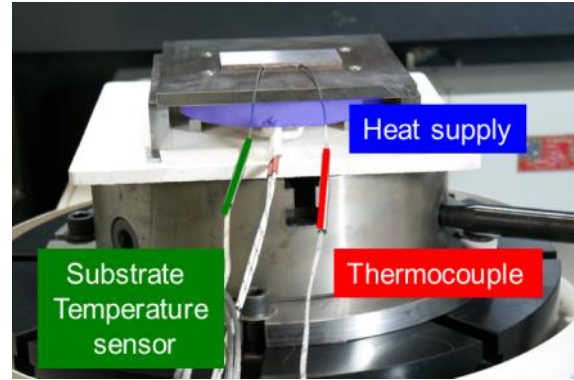


Fig. 4 Substrate preheating and temperature monitoring

니크롬선으로 제작된 히터를 모재의 하부에 두어 가열하였으며, 가열온도는 100, 200, 300, 400, 500℃로 설정하였다. 모재의 예열에 따른 냉각 속도를 비교 관찰하기 위해서는 용융풀의 온도 변화를 직접 측정해야 하지만, 여러 가지 제약 조건으로 인해 용융풀의 직접 측정이 아닌 모재의 온도 변화 관찰을 통해 간접적인 방식으로 냉각 속도를 비교하기로 하였다. 모재의 냉각속도를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 모재의 중앙에 온도 센서를 삽입하여 데이터 로거(data logger)를 통해 측정하였으며, 기관 온도 조절 센서를 이용해 모재의 예열 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 적층 공정이 끝난 뒤에는 히터의 전원을 끄고 모재를 대기 중에서 상온까지 서냉하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 적층 단면 관찰

모재와 적층부간 계면에서의 적층 품질 관찰을 위하여 적층된 시편을 폭 방향으로 절단하여 광학 현미경을 통해 단면부를 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 상온(non-preheating)에서 적층한 시편과 상대적으로 예열 온도가 낮은 100℃ 시편에서 결함이 관찰되었는데, 이는 모재의 열팽창계수( $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )와 적층소재의 열팽창계수( $9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) 차이에 의해 발생하는 열응력에 기인한다. 즉, 적층 영역에서 발생하는 냉각 과정에서의 수축 운동이 모재에 의해 구속되면서 발생하는 것으로, 이는 적층 끝단부의 계면에서 크랙 발생을 유도하게 된다. 특히, 열응력이 크게 발생하거나 적층 면적이 좁을 경우에는 끝단부에서

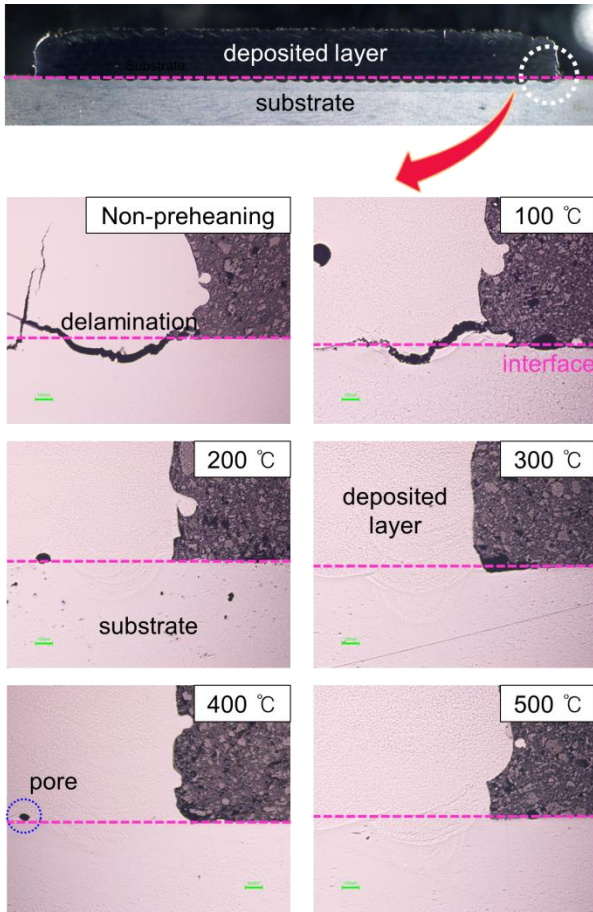


Fig. 5 Effect of preheating temperature on M4 deposited parts

발생된 크랙이 계면 전체로 진전되면서 적층부 탈락(delamination)과 같은 결함이 발생하기도 한다. 이러한 계면에서의 크랙은 하중 작용 시 빠르게 진전되어, 기계적 강도와 인성을 저하시키게 된다. 모재의 예열 온도가 200℃ 이상이 될 경우에는 계면에서의 크랙 발생 없이 양호한 적층 결과물을 얻을 수 있었다. 이러한 결과로부터 M4 분말 적층에 필요한 모재의 예열 온도 하한점을 어느 정도 예측할 수 있으며, 최적의 예열 온도를 선정하기 위해서는 적층부의 기계적 및 금속학적 특징을 동시에 고려해야 한다. 이에 대한 내용은 다음 장에서 다루었다.

### 3.2 모재 온도 변화 관찰

모재 예열 온도에 따른 냉각속도를 관찰하기 위하여 적층 영역 하부에 온도센서를 삽입하고, 데이터 로거를 통해 모재의 온도를 측정하였다. Fig. 6은 모재의 예열온도에 따른 적층 과정에서의 온도 변

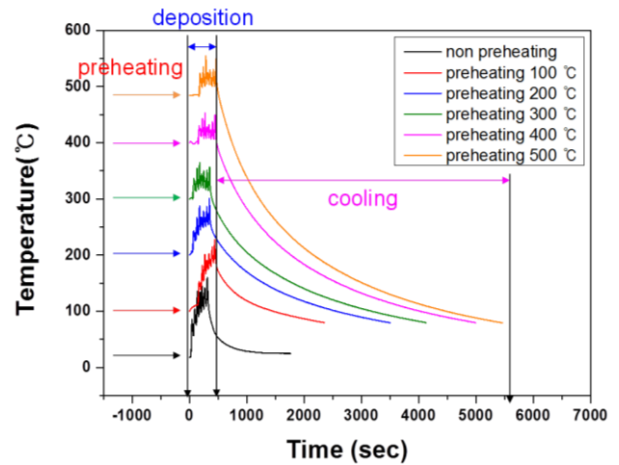


Fig. 6 Temperature changes and cooling rates of preheated substrates

화와, 적층이 종료된 후의 모재의 냉각속도를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 적층 과정 중에는 온도 센서의 상부에 레이저가 통과하는 순간 모재는 급속 가열이 되고, 통과 직후에는 급속 냉각이 되게 되는데, line-by-line 그리고 layer-by-layer 적층이 진행되는 동안 이를 반복하게 된다. 또한 냉각 속도의 경우에는, 상온에서 적층 시 적층이 끝나는 시점부터 모재의 온도는 빠르게 감소하였으나, 모재 예열 온도가 증가할수록 냉각속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해, 적층 계면에서 발생하는 적층 결함은 용융 및 급속 응고 과정에서 발생하는 열응력이 원인이 됨과 동시에, 이는 모재의 예열을 통한 냉각속도의 감소로 개선된 품질을 가지는 M4 분말의 적층이 가능함을 확인할 수 있게 되었다.

### 3.3 미세 조직 관찰

주사전자현미경(SEM)을 이용하여 예열 온도에 따른 적층부의 미세조직 변화를 관찰하였다. Fig. 7은 적층부와 모재 혼합층에서의 예열 온도별 미세조직을 나타내는 것으로, 경계면 부근 혼합층에서는 전형적인 주조 조직인 수지상(dendritic)조직이 관찰되었다. 상대적으로 냉각속도가 빠른 상온 적층에서는 혼합층에서도 마르텐사이트(martensite) 조직이 관찰되었으며, 예열 온도가 증가함에 따라 냉각속도의 감소로 인해 수지상 조직의 간격이 조대(coarse)해짐을 관찰할 수 있었다. 또한 예열온도가 증가할수록 모재와 적층영역의 혼합이 이루어지는 혼합층의 두

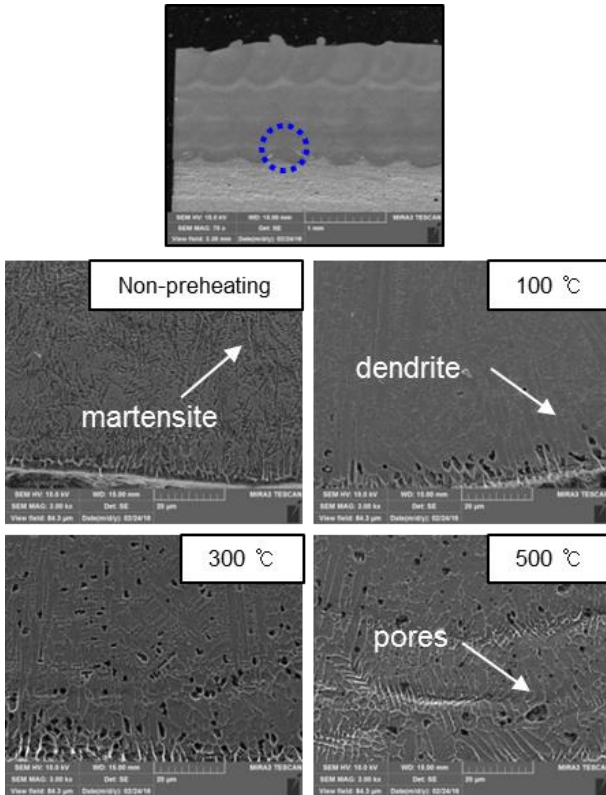


Fig. 7 SEM micrographs showing microstructures at different preheating temperatures

계가 두꺼워지는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 동일한 레이저 출력에도 불구하고 모재의 예열 온도가 증가하면 입열량이 증가하기 때문이며, 이는 두 소재간의 결합력의 감소로 이어지게 된다. 또한 예열온도가 높아질수록 혼합층에서 다수의 기공(pore)이 발견되었는데, 이는 높은 예열 온도의 경우 과도한 입열로 인하여 모재 영역에 용융과 냉각이 과도하게 발생하게 되고 이 과정에서 발생한 불활성 가스(inert gas)가 미처 빠져나가지 못해 혼합층에 잔류하여 생기는 것으로 판단된다[7]. 이러한 다수의 기공들은 크랙 발생 및 진전을 용이하게 하여, 적층 계면에서의 접합강도 및 인성에 영향을 주어 기계적 물성을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 결국 M4 적층을 위한 적정 예열 온도의 선택 시에는 기공 발생 유무와 기계적 특성 변화를 동시에 고려해야 할 것으로 보인다.

### 3.4 예열 온도별 경도 관찰

모재 예열이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 비커스 경도계를 이용하여 예열 온도별

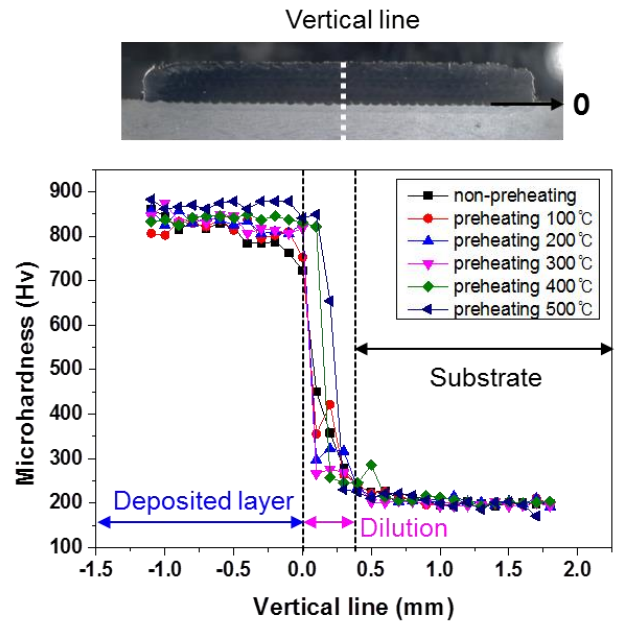


Fig. 8 Microhardness distribution at different preheating temperatures

모재와 적층부의 경도 값을 측정하였다. 시편 깊이 방향으로 0.1mm 간격, 총 30개 지점에서의 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 모재 예열에 가장 많은 영향을 받는 혼합층(dilution)영역에서의 경도 관찰 결과, 예열 온도가 증가할수록 경도가 낮아지는 경향을 확인할 수 있었는데, 이는 Fig. 7에서 나타난 혼합층에서의 미세조직 결과와 같이 고온으로 갈수록 마르텐사이트 조직보다는 수지상 조직을 나타내고 있으며, 또한 고온으로 갈수록 수지상 간격이 조대해진 원인에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 적층 상부 영역에서는 모재 예열에 따른 경도 값에 특별한 경향은 나타나지 않았는데, 이는 상부로 갈수록 모재 예열의 영향보다는 적층부의 냉각속도에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 DED 기술을 이용한 고속도 공구강 M4 분말 적층에 관한 연구를 진행하였다. 적층 특성 분석 결과는 다음과 같다.

(1) DED 기술을 이용한 고속도 공구강의 적층 시, 적층부의 급속응고과정에서 발생하는 열응력에 의한 경계면에서의 크랙 발생을 제거하기 위하여 모

재에 대한 예열공정을 진행하였으며, 모재 예열을 통해 냉각속도 감소로 인한 열응력 완화로 양호한 품질의 적층부 구현이 가능하였으나 불활성 가스로 인한 혼잡층에서 기공이 발생하였다.

(2) 적층부 높이에 따라 모재의 예열 영향에 의한 냉각속도가 달라지기 때문에 위치별로 미세 조직이 상이하게 나타나게 되는데, 최상층부(표면)에서는 예열 영향이 거의 없어 경도는 여전히 높은 값을 유지하고 있다. 따라서 높은 표면 경도가 요구되는 금형의 하드페이싱 용도로 모재 예열 공정이 활용 가능함을 확인할 수 있었다.

이와 같은 연구를 통해 고속도 공구강을 결함없이 적층하기 위해서는 모재의 예열공정이 필수적임을 확인할 수 있었다. 하지만 과도한 예열온도는 혼잡층 영역에서 미세기공과 같은 결함을 발생시키기도 한다. 따라서 DED 기술을 이용한 M4 분말 적층을 통해 금형 표면 강화와 같은 산업적 적용을 위해서는 최적의 예열 온도 범위를 선정하기 위한 추가 연구가 필요할 것이다. 본 연구에서 진행한 예열 온도에 따른 경도와 미세조직 변화뿐만 아니라, 향후에는 금형에서 요구되는 대표적인 기계적 특성인 내마모성, 인성, 접합강도 등과 같은 특성들에 대한 전반적인 비교 분석을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 기관주요사업(JA160024)을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, A. Chosh, 2000, Closed Loop Direct Metal Deposition; Art to Part, Opt. Laser. Eng., Vol. 34, No. 4-6, pp. 397~414.
- [2] G. Telasang, J. Dutta Majumdar, G. Padmanabham, M. Tak, I. Manna, 2014, Effect of Laser Parameters on Microstructure and Hardness of Laser Clad and Temperd AISI H13 Tool Steel, Surf. Coat. Technol., Vol. 258, pp. 1108~1118.
- [3] W. H. Kim, B. H. Jung, I. D. Park, M. H. Oh, S. W. Choi, D. M. Kang, 2015, Surface Hardness as a Function of Laser Metal Deposition Parameters, Trans. Mater. Process. Vol. 24, No. 4, pp. 272~279.
- [4] C. Guo, J. Chen, J. Zhou, J. Zhao, L. Wang, Y. Yu, H. Zhou, 2012, Effect of WC-Ni Content on Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding Ni-base Alloys Coating, Surf. Coat. Technol., Vol. 206, No. 8-9, pp. 2064~2071.
- [5] M. Alimardani, V. Fallah, A. Khajepour, E. Toyserkani, 2010, The Effect of Localized Dynamic Surface Preheating in Laser Cladding of Stellite 1, Surf. Coat. Technol., Vol. 204, No. 23, pp. 3911~3919.
- [6] K. Zhang, S. Wang, W. Liu, R. Long, 2014, Effect of Substrate Preheating on the Thin-wall Part Built by Laser Metal Deposition Shaping, Appl. Surf. Sci, Vol. 317, pp. 839~855.
- [7] K. H. Kang, J. D. Kim, 2011, Zirconia Ceramic Powder Coating of Ti-6Al-4V by Laser Cladding, JKSP, Vol. 28, No. 7, pp. 738~788.