

레이저 용융 금속 적층 시 결함 방지를 위한 혼합 분말 적층에 관한 연구

심도식[#] · 이육진¹ · 이슬비² · 최윤석² · 이기용¹ · 박상후³

A Study on the Laser Melting Deposition of Mixed Metal Powders to Prevent Interfacial Cracks

D. S. Shim, W. J. Lee, S. B. Lee, Y. S. Choi, K. Y. Lee, S. H. Park

(Received August 1, 2017 / Revised November 17, 2017 / Accepted January 3, 2018)

Abstract

Direct energy deposition (DED) technique uses a laser heat source to deposit a metal layer on a substrate. Many researchers have used the DED technique to study the hardfacing of molds and dies. The aim of this study is to obtain high surface hardness and a sound bonding between the AISI M4 deposits and a substrate utilizing a mixed powder that contains M4 and AISI P21 powders. To prevent interfacial cracks between the M4 deposits and the substrate, the mixed powder is pre-deposited onto a JIS S45C substrate, before the deposition of M4 powders. Interfacial defects occurring between the deposits and substrate and changes in the microhardness of the intermediate layer were examined. Observations of the cross-sections of deposited specimens revealed that the interfacial cracks appeared in samples with one and two mixed layers regardless of the mixture ratio. However, the crack was removed by increasing the mixture ratio and the number of intermediate layers. Meanwhile, the microhardness in the mixed layer was found to decrease with increasing ratio of P21 powder in the mixture and that in the upper region of the deposited layers was approximately 800 HV, which was attributed to various alloying elements in the M4 powder.

Key Words : Laser Melting Deposition, High Speed Steel, Microhardness, EPMA

1. 서론

레이저 용융 금속 적층(direct energy deposition) 기술은 고출력 레이저 에너지를 이용하여 모재 위에 분사된 금속 분말을 녹여 적층하는 방식의 3차원 제조 기술로, 치밀한 조직과 우수한 기계적 특성 구현이 가능한 장점으로 인해 금형 표면 강화(die/mold hardfacing), 리모델링(remodeling), 보수(repair)와 같이 금형 산업 분야에서의 적용이 증가하고 있다[1]. 이

러한 DED 기술을 통한 금형 강화 시 요구되는 기계적 물성으로는 경도, 내마모성, 인성이 대표적이다. 이러한 요구 특성을 만족시키기 위해 다양한 합금 원소를 포함하는 공구강을 적용하여 금형 강화를 시도하고 있다[2]. 특히, 최근에는 차량의 경량화를 위해 차체의 초고장력 강판 적용 비율이 증가하고 있는데, 이러한 배경에서 우수한 기계적 물성을 가지는 금형 표면 강화 기술이 주목을 받고 있다[3]. 초고장력 강판의 프레스 금형에 대한 표면 강화를

1. 한국생산기술연구원

2. 부산대학교 재료공학부

3. 부산대학교 기계공학부

Corresponding Author : Korea Maritime and Ocean University, E-mail: think@kmou.ac.kr

위해서는, 높은 경도와 내마모성이 요구되며, 이를 위해 고속도 공구강 금속 분말을 사용한 표면 강화 연구가 시도되고 있다[4]. 하지만, M4와 같은 고속도 공구강 분말을 적층하는데 있어 높은 탄소 함유량과 급속 냉각을 거치면서 형성되는 마르텐사이트(martensite) 조직은 소재의 취성으로 인해 적층 과정에서 크랙과 결합 분리(debonding)와 같은 결함이 발생하게 된다[5]. 따라서 모재 예열과 같은 전처리 공정[6, 7] 등을 이용하여 M4 분말을 적층하기도 하지만, 모재의 예열은 강도와 인성과 같은 기계적 성질을 저하시키는 원인이 되기도 한다.

본 연구는 혼합 분말을 이용한 중간층이 적용된 금속 표면 강화 기술에 관한 것이다. 예열 공정없이 M4 분말의 적층 결함을 제거하고, 동시에 기계적 성질을 향상시키기 위해, 상대적으로 우수한 연성을 지닌 저탄소 합금 분말인 AISI P21 분말을 M4 분말과 혼합하여 중간층의 역할로 모재 위에 적층하고, 그 위에 M4 분말을 적층하였다. 이에 따라 혼합 분말을 이용한 중간층의 높이와 혼합 비율에 따른 결합 발생 유무를 확인하고, 혼합층 적용에 따른 경도와 성분 분석을 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1 레이저 용융 금속 적층 기술

DED 공정은 Fig. 1과 같이 고출력 레이저 빔을 국부적으로 모재에 조사하여 모재 표면에 용융풀을 형성하고, 동시에 분말 공급 장치로부터 분말 가스를 통해 실시간으로 금속 분말을 용융풀에 공급한다. 모재와 파우더가 용융되어 혼합된 용융풀은 급속 응고되어 치밀하고 미세한 조직을 갖는 금속층이 형성되게 된다. MX-CAM 을 통해 적층하고자 하는 3차원 CAD 모델을 일정한 두께로 슬라이싱(slicing)하고, 이로부터 산출된 2차원 단면을 line by line 방식을 통해 한 층을 적층하게 된다. 그 위 층은 90도 교차하여 단면 적층을 반복함으로써, layer by layer 방식으로 3차원 형상이 만들어진다.

2.2 사용 재료

본 연구에서는 고속도 공구강 M4 분말과 금형강으로 많이 활용되고 있는 P21분말을 사용하였다. P21의 경우 M4 분말에 비해 경도는 낮지만 상대적으로 높은 인성을 가진다. 각각의 금속 분말은

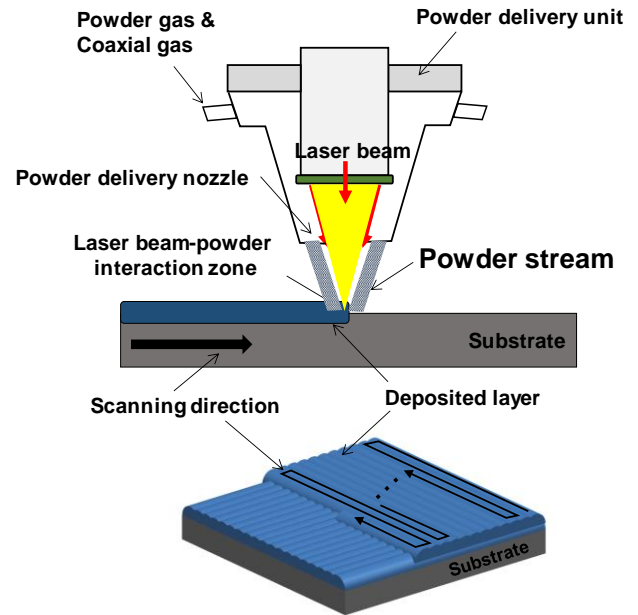


Fig. 1 Schematic diagram of direct energy deposition

Table 1 Chemical composition of materials

Element (wt %)	Materials used		
	AISI M4	AISI P21	JIS S45C
C	1.33	0.20	0.46
Mn	0.26	0.30	0.65
Si	0.33	0.30	0.27
Cr	4.25	0.25	0.25
Ni	0.3	4.00	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
Al		1.10	

CARPENTER사에서 Gas atomizer를 통해 제조되며, 직경 53 μ m~150 μ m 범위의 구형(spherical) 분말을 사용하였다. 기지재(matrix)는 M4분말이며, 여기에 저탄소 합금강인 P21 분말을 혼합하여 사용하였다. 혼합 비율은 30~70%이며, 분말 전용 혼합기에 1시간 동안 혼합을 한 후 사용하였다. 모재는 JIS S45C 이며, 이는 탄소를 0.46% 함유한 탄소강재로 강도와 경도를 요구하는 기계 부품 및 구조용 재료로 사용되고 있다. 모재는 적층 전에 상면을 매끄럽게 연삭하고, 세척 후 건조시켜 사용하였다. Table 1에는 본 연구에 사용된 각 소재에 대한 화학적 조성비를 나타내고 있다.

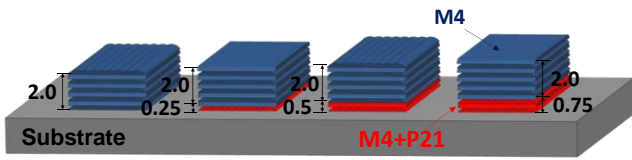


Fig. 2 Deposition of intermediate layers using M4 and P21 mixture

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

2.3 적층 조건

앞서 언급한대로 M4와 P21의 혼합 분말을 이용하여 중간층을 적용한 M4 적층 시편을 제작하였다. 모재 위에 가로 10mm, 세로 20mm, 그리고 높이 2.0 mm의 크기로 M4 분말을 적층 하되, 중간층의 높이에 따른 결합 발생 여부를 확인하기 위해 Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 중간층의 높이를 0.25, 0.5, 0.75 mm(1 layer는 0.25mm)로 하여 적층한 뒤 M4 분말을 이어서 적층하였다. 모재는 길이 100mm, 너비 50mm, 두께 10mm의 사각 블록이다.

본 연구에 사용된 고출력 레이저의 빔의 직경은 약 1mm로, 이를 통해 적층된 단일 비드의 폭은 약 1.0mm, 높이 0.25mm이며, 비드 폭의 50%인 0.5mm 씩 중첩하여 헤드가 지그재그 방향으로 움직이며 적층을 진행한다(Fig. 1). 산화 방지를 위해 보호가스(shield gas)로 argon gas를 사용하며, 모재와 노즐 간의 간격은 9mm이다. 이외에 레이저 출력과 분말 공급량 등의 공정 조건은 Table 2에 나타난 바와 같다.

3. 실험 결과

3.1 중간층 높이 및 혼합 비율의 영향

혼합 분말을 이용한 중간층 적용에 따른 M4 분말의 적층 특성을 관찰하기 위해, 적층 시편을 절단하여 모재와 적층부 간 계면을 광학현미경을 통해 확인하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 중간층을

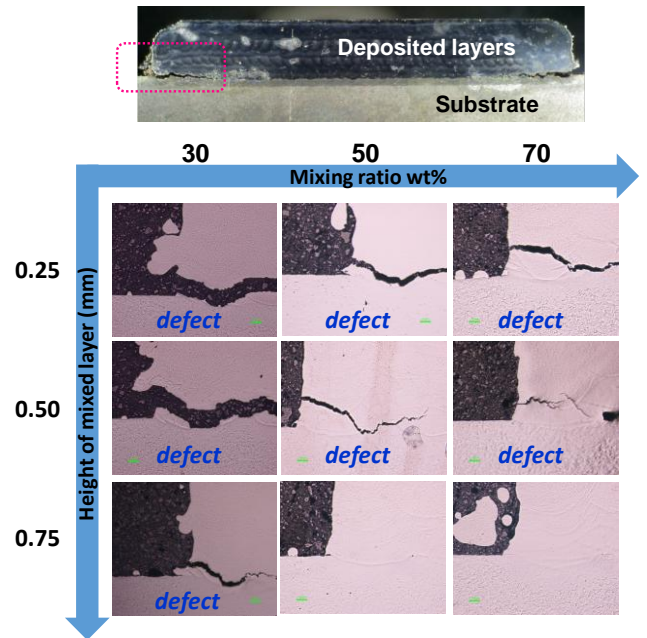


Fig. 3 Effect of height of intermediate layers and mixing ratio

적용하지 않은 적층 시편은 적층부와 모재 간의 계면(interface)에서 심각한 크랙 발생으로 인해 적층부가 탈락(debonding)되었다.

한편, 그림에서와 같이 혼합 비율에 상관없이 중간층의 높이가 0.5mm 이하인 경우에는 모든 시편에서 계면 결함(interface flaw)이 발생하였다. 반면, 혼합 비율 50%와 중간층의 높이가 0.75mm 이상이 될 경우에는 계면 크랙이 발생되지 않음을 확인 할 수 있었다. 계면에서의 크랙 발생 및 debonding은 계면에서의 접합 강도(bonding strength)가 낮을 경우에 발생하게 되며, 이는 계면 주변에서 발생하는 열응력(thermal stress)에 기인한다. 이와 같은 열응력은 모재의 열팽창계수($11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)와 적층 소재의 열팽창계수($9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)간 차이에 의해 발생되기도 하며, 모재와 적층부 간의 냉각 속도(cooling rate) 차이에도 의해서도 발생되게 된다. 냉각 속도 차이의 경우, 냉각 과정에서 적층 소재의 수축 변형이 모재에 의해 구속되면서 응력이 발생하는 것으로, 이러한 응력이 계면 부근에 작용하게 되면 결국 미세 크랙(microcrack)이 발생하게 된다. 이러한 계면에서의 크랙은 하중 작용 시 빠르게 진전되어, 기계적 강도를 저하시키게 된다. 다시 말해, 계면에서의 결합은 냉각 속도 차이에 따른 모재와 적층부 간의 연성

(ductility)-취성(brittleness) 부정합(inconsistency)에 의해서 발생하는 것으로, P21 소재는 이러한 계면에서의 응력 완화 효과를 가지고 있으며, 일정 이상의 혼합 비율과 혼합 중간층의 높이가 필요함을 실험 결과를 통해 확인할 수 있었다.

3.2 경도(microhardness) 비교

P21 분말을 혼합한 중간층의 적용이 경도에 미치는 영향을 분석하기 위해 비커스 경도계를 이용하여 P21 혼합 비율과 중간층 높이에 따른 경도 값을 측정하였다. 적층부 표면에서부터 시편 깊이 방향으로 0.1mm 간격, 총 20개 지점에서의 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에는 중간층의 높이가 0.75 mm(3 layers)일 때, P21의 혼합 비율에 따른 경도 값이며, Fig. 4(b)는 P21의 혼합 비율이 70% 일 때, 중간층의 높이에 따른 경도 분포를 나타내고 있다. 적층 상부, 즉, M4 분말만 적층된 영역의 경도는 평균 800Hv 정도를 나타내고 있으며, 이는 중간층 적용없이 M4 분말만 적층할 경우와 동일한 결과이다. 하지만, 혼합 분말이 적용된 중간층과 그 상단부에서는 혼합 비율이 증가하고, 중간층의 두께가 두꺼울수록 경도가 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한대로, P21의 소재 특성 상 탄소함유량이 M4에 비해 적으며, 레이저 조사에 따른 급속 용융 및 급속 응고에도 불구하고 중간층 적층 구간에서는 마르텐사이트 조직보다는 수지상(dendritic) 조직이 두드러지게 나타나기 때문이다. 이러한 경향은 P21의 함유량이 높을수록 증가한다. 하지만 P21의 혼합에 따른 경도 감소에도 불구하고 M4 분말이 적층된 상부 표면에서는 여전히 높은 경도를 유지하고 있으며, 이는 앞서 서론에서 언급한대로 P21의 혼합에 의해 M4 분말의 적층성을 향상시키면서, 동시에 M4 분말을 이용한 표면 경화 효과를 얻을 수 있는 방법으로 활용될 수 있음을 보여주는 결과이다. 단, P21이 혼합된 중간층의 높이가 높을수록 M4 적층 영역의 일정 구간까지 P21 분말 특성이 영향을 미치게 되므로, P21 혼합 분말을 이용한 중간층을 적층한 이후에 M4 분말의 적층 높이를 일정 값 이상으로 적층을 해야 M4 분말의 고경도 특성을 가질 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에 따르면 0.5mm 이상의 M4 분말을 적층할 경우 M4 분말의 고경도 특성을 표면에 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

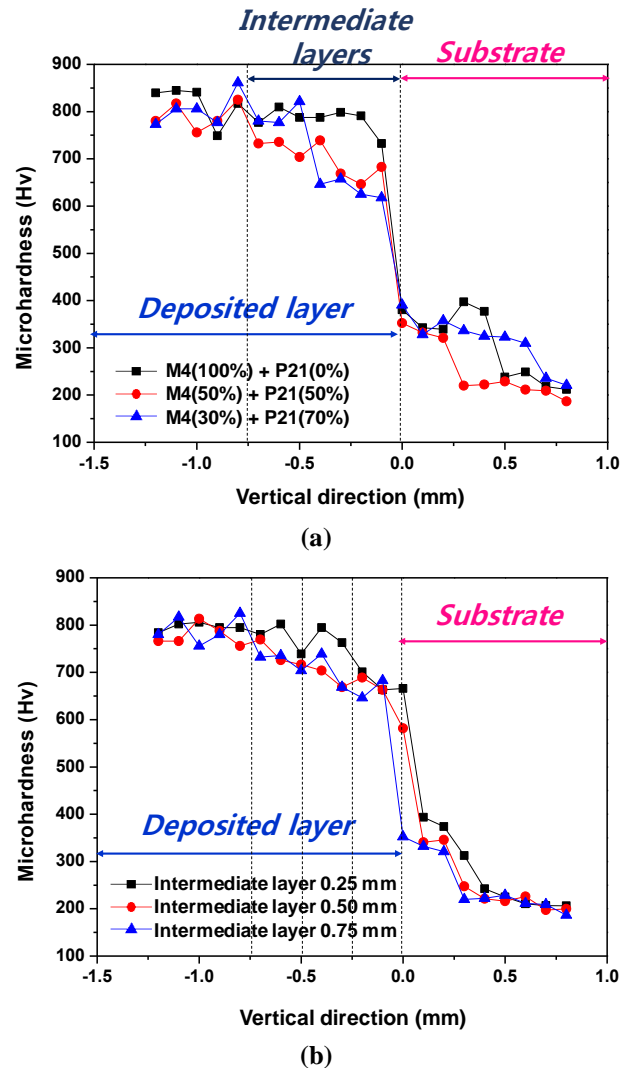


Fig. 4 Microhardness distribution at different (a) mixing ratios and (b) heights of intermediate layers

3.3 중간층 혼합비 변화에 따른 미세조직 및 화학적 조성 분석

Fig. 3에서 관찰된 것처럼, P21 50%의 혼합 조성 결과 중간층을 0.75mm 이상 적층할 경우 계면 결함 발생을 방지할 수 있었다. 본 연구에서는 결함이 발생하지 않으면서도 표면 경도를 최대한 확보할 수 있도록 P21이 70% 함유된 중간층을 두 층으로 0.5mm 적층한 후 세 번째 층의 P21의 혼합 비율을 각각 50%, 30%로 낮추어 P21에 의한 경도 감소 효과를 최소화하고자 하였으며, Fig. 5에서와 같은 세 가지의 시험편을 제작하였다.

실험 결과, 중간층 최상단층(세번째 층)의 P21 분율을 30%로 낮추는 경우에도 결함은 관찰되지 않았

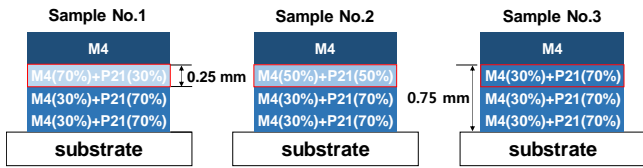


Fig. 5 Schematics of deposited layers in samples used for microstructure and chemical analysis

으며, 이는 Fig. 3에서 P21이 70%로 두개의 중간층(두께 0.5mm)을 적용한 경우 결합이 발생한 실험결과와 대비하여 볼 때, 세 번째 층에 P21을 소량만 함유하여 소재의 연성을 높여주는 것 만으로도 적층 계면에서의 결합을 방지할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 6은 Fig. 5에 도시된 샘플들을 전자주사현미경 및 전자빔 미세분석(electron probe micro-analysis, EPMA)을 통해 미세조직 및 화학적 조성을 분석한 결과이다. 각 그림의 왼편에 나타난 사진은 전자주사현미경의 후방산란전자(backscattered electron)을 이용하여 적층시험편의 단면을 관찰한 것으로, 후방산란전자의 특성상 화학적 조성에 따라 contrast가 다르게 보이기 때문에 모재(사진 최하단) 및 중간층, 그리고 M4층(사진 최상단)을 명확하게 구별할 수 있다. 반복된 적층에 따른 비드의 형상 및 비드의 겹침(overlap) 역시 관찰된다.

적층면의 두께방향으로 EPMA를 통해 화학적 조성의 변화를 샘플별로 각 3회 측정된 결과를 Fig. 6의 전자현미경 사진 오른쪽에 도시하였다. Sample No.3에 비해 Sample No.1 및 Sample No.2의 경우 중간층 최상단에 P21 분율이 낮아지면서 M4의 조성에 더욱 가까워 지는 것을 확인할 수 있었다. 특히, Sample No.3의 경우 중간층과 가까운 M4층에서 V, W, Mo 등의 합금원소 비율이 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 M4 분말 적층과정에서 아랫면 혼합층의 remelting 및 용융부의 대류 현상, 그리고 적층 시 높은 온도에 의한 합금원소들의 확산에 의한 것으로 판단되며, 이로 인해 중간층과 가까운 M4층의 경도를 낮추는 것으로 예상된다. 한편, Sample No.3이 중간층 최상단까지 P21이 70%로 혼합된 조건인 반면에 Sample No.1와 Sample No.2의 경우 중간층 최상단의 P21 비율이 낮기 때문에 M4층의 합금원소에 미치는 영향이 상대적으로 작은 경향으로 관찰된다.

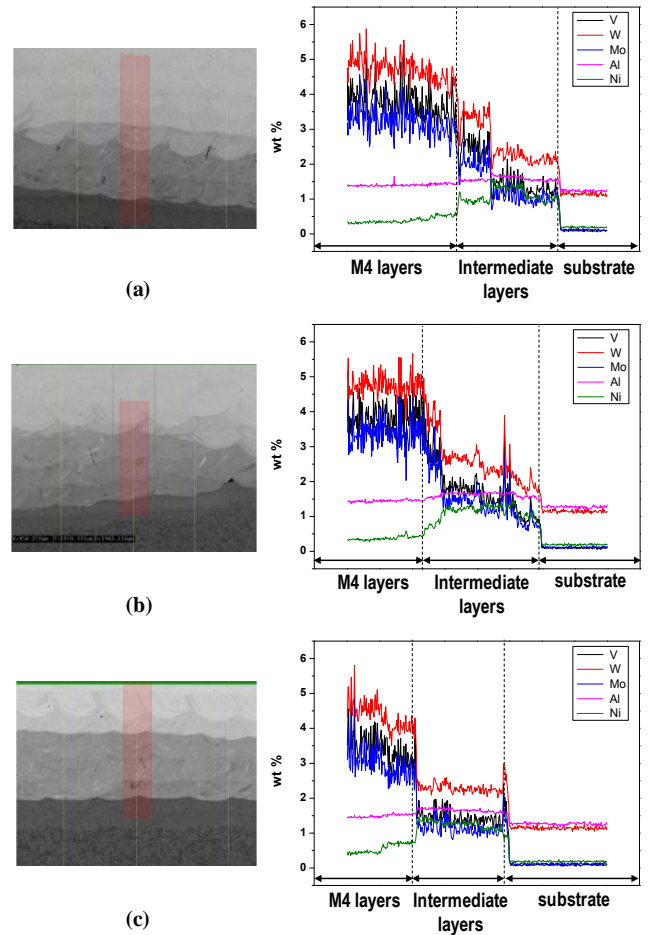


Fig. 6 Evolutions of alloying elements in the deposited layers along thickness direction: (a) Sample No.1, (b) Sample No.2 and (c) Sample No.3

Fig. 7에는 각 원소별 EPMA mapping을 실시하여 시험편별로 도시하였다. 합금원소중 W와 V, Mo의 경우 P21에는 거의 없는 원소이나 M4에는 다량 함유되어 있는 원소로, 적층된 각 층에 따라 중간층에는 일부 존재하고 M4층에 주로 분포하는 것을 확인할 수 있다. Sample No.1와 Sample No.2의 경우 중간층 최상단에도 M4분말이 다량 섞여서 적층되었기 때문에 W 등의 합금원소 분율이 Sample No.3에 비해 높은 것 역시 확인할 수 있다.

한편, 합금원소 중 Ni의 경우에는 모재 및 M4에는 극미량만이 함유되어 있고 P21 분말에는 다량 포함되어 있는 합금원소이다. 따라서 확산 등에 의해 층별 조성이 섞이지 않을 경우에는 M4층에는 거의 존재하지 않고 P21이 혼합된 중간층에만 존재할 것으로 판단된다. 하지만 그림에서 나타난 것처럼

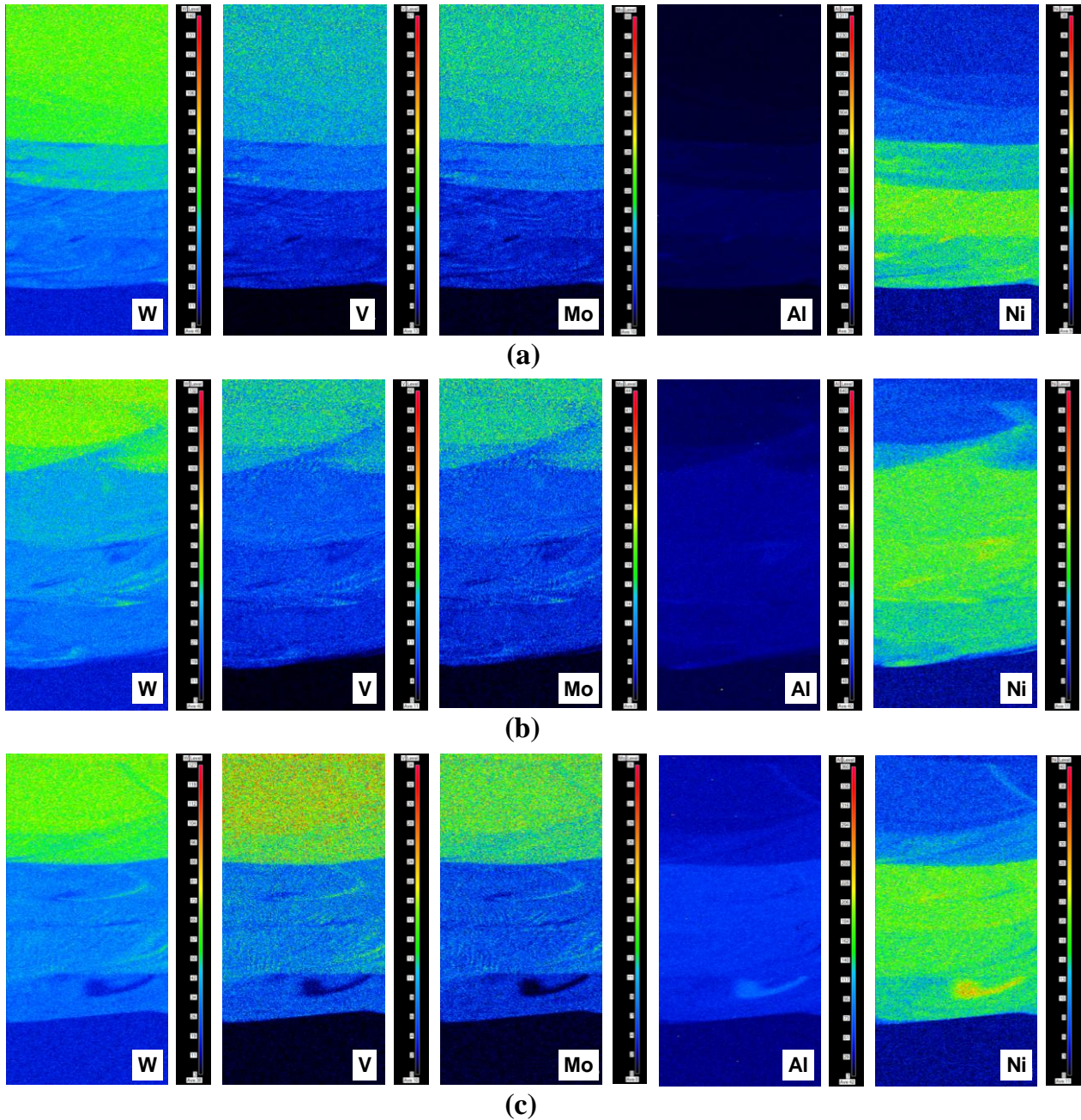


Fig. 7 EPMA mapping for W, V, Mo, Al and Ni: (a) Sample No.1, (b) Sample No.2 and (c) Sample No.3

Sample No.3의 경우 M4층 최하단부에 상당량의 Ni 이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 앞서 Fig. 6에서도 나타난 바와 같이 용융부의 대류현상, remelting 및 확산에 의한 것으로 사료된다. M4층 최하단의 Ni 함량은 중간층 상단에 P21 분율을 낮춤에 따라 점차 줄어드는 것 역시 확인할 수 있으며, 따라서 M4층 하단부의 조성을 목표조성에 가깝

게 유지하여 보다 적은 두께의 M4 적층으로도 높은 표면경도를 가질 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 용융 금속 적층 공정에서 높은 탄소함유량을 가진 고속도 공구강 분말을 금

속 표면 강화에 적용하는데 있어서, 계면 결함을 방지하기 위해 혼합 분말을 이용한 중간층 삽입에 대한 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) S45C 모재 위에 M4 분말 적층 과정에서 발생하는 계면 크랙(interfacial crack)을 방지하기 위해 P21 분말을 혼합한 중간층을 적용하였으며, P21 분말 혼합 비율 70wt%와 높이 0.75mm 이상의 중간층 조건에서 결함 방지 효과를 확인하였다.

(2) 중간층 적용 시 P21 분말의 혼합 비율과 중간층의 높이가 증가할수록 중간층과 일부 M4 적층 영역에서의 경도가 감소하였으나, M4 분말만 적층된 표면에서의 경도는 800Hv 이상의 높은 경도가 나타남을 확인하였다.

(3) 0.5mm의 중간층을 P21 분말 혼합 비율 70wt%로 적층한 후 상단에 0.25mm의 중간층을 추가 적층하면서 P21 함량을 30%로 줄이는 경우에도 결함 방지 효과가 있음을 확인하였다.

(4) 미세조직 및 화학적조성 분석을 통해 중간층 최상단의 P21 함량을 줄일 경우 M4층 최하단의 합금 원소가 목표조성대로 유지되는 경향을 관찰하였으며, 따라서 P21의 함량을 줄이면 M4층의 고경도를 유지하는 데에도 도움이 될 것으로 판단된다.

이상의 연구로부터, 금형 등과 같이 표면에 높은 경도를 요구하는 금속 부품에 M4 분말을 활용하여 적층-강화시키는데 있어, 상대적으로 높은 연성과 낮은 탄소함유량을 가진 금속 분말을 혼합하여 중간층으로 활용함으로써 적층성과 표면 경도를 동시에 향상시킬 수 있는 하드페이싱(hardfacing)으로의 응용이 가능함을 확인하였다. 향후에는 표면 경도 뿐만 아니라, P21 분말의 혼합 중간층을 이용할 경우 강도와 인성과 같은 기계적 특성 변화를 관찰하고자 한다. 또한, 다양한 적층 조건(적층 면적/높이, 모재 종류/크기)과 공정 변수에 따른 중간층에서의 특성 변화를 관찰할 예정이며, 본 연구에 사용된 P21의 다양한 분말을 이용한 중간층 삽입에 대한 적용성을 평가할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국해양대학교 산학융합지구구성사업단 산학협력R&D과제(과제번호 N0001629)를 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi, A. Ghosh, 2000, Closed Loop Direct Metal Deposition; Art to Part, Opti. Laser. Eng., Vol. 34, No. 4, 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. Tech., 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] G. Y. Baek, G. Y. Shin, E. M. Lee, J. H. Yu, K. Y. Lee, S. H. Park, D. S. Shim, 2017, Proc. 2nd 7th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, Kor. Soc. Mech. Eng., Jeju, Korea, p. 66.
- [5] E. M. Lee, G. Y. Shin, K. Y. Lee, H. S. Yoon, D. S. Shim, 2016, Study of High Speed Steel AISI M4 Powder Deposition using Direct Energy Deposition Process, Trans. Mater. Process., Vol. 25, No. 6, pp. 353~358.
- [6] 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.
- [7] D. S. Shim, G. Y. Baek, E. M. Lee, 2017, Effect of Substrate Preheating by Induction Heater on Direct Energy Deposition of AISI M4 Powder, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 682, pp. 550~562.