

# AlSi12 분말의 직접 레이저 용융 적층 시 공정 조건에 따른 적층 특성에 관한 연구

서자예<sup>1</sup> · 윤희석<sup>2</sup> · 이기용<sup>3</sup> · 심도식<sup>4#</sup>

## Study on Effects of Direct Laser Melting Process Parameters on Deposition Characteristics of AlSi12 powders

J. Y. Seo, H. S. Yoon, K. Y. Lee, D. S. Shim

(Received July 16, 2018 / Revised September 7, 2018 / Accepted September 10, 2018)

### Abstract

AlSi12 is a heat-resistant aluminum alloy that is lightweight, corrosion-resistant, machinable and attracting attention as a functional material in aerospace and automotive industries. For that reason, AlSi12 powder has been used for high performance parts through 3D printing technology. The purpose of this study is to observe deposition characteristics of AlSi12 powder in a direct energy deposition (DED) process (one of the metal 3D printing technologies). In this study, deposition characteristics were investigated according to various process parameters such as laser power, powder feed rate, scan speed, and slicing layer thickness. In the single track deposition experiment, an irregular bead shape and balling or humping of molten metal were formed below a laser power of 1,000 W, and the good-shaped bead was obtained at 1.0 g/min powder feed rate. Similar results were observed in multi-layer deposition. Observation of deposited height after multi-layer deposition revealed that over-deposition occurred at all conditions. To prevent over-deposition, slicing layer thickness was experimentally determined at given conditions. From these results, this study presented practical conditions for good surface quality and accurate geometry of deposits.

**Key Words** : Direct laser melting, AlSi12 powder, Multi-layer deposition, Slicing layer thickness

## 1. 서 론

최근 알루미늄 합금 분말을 이용하여, 3D 프린팅 기술을 통해 고기능성 부품을 제작하기 위한 기술적 시도가 활발히 진행되고 있다. 간단한 형상의 부품에 대한 알루미늄 합금 3D 프린팅 제작 부품에 대한 성공적 적용 사례가 알려지면서, 그 활용 분야 및 적용 부품이 다양해지고 있다. 하지만, 알루미늄 분말에 대한 3D 프린팅은 대부분 powder bed fusion (PBF) 방식의 적층 기술에만 국한되어 있다. 금속

적층 기술 중 또 다른 방식의 기술인 직접 레이저 용융 적층 (direct energy deposition) 기술은 PBF 방식과 비교하여 국부 영역 적층을 통한 부품 표면 강화(hardfacing) 및 부품 보수(repair) 등의 용도로 유용하게 활용될 수 있기 때문에 DED 기술을 이용한 알루미늄 분말 적층 기술 또한 그 기술적 수요가 점차 증대될 것으로 보인다[1]. DED 기술은 고출력 레이저 빔 에너지를 이용하여 모재 위에 분사된 금속 분말을 녹여 적층하는 방식의 3 차원 적층 제조 기술로, 치밀한 조직과 우수한 기계적 특성 구현이 가능하다[2,3]. 하지만, 3D 프린팅에 사용하는 알루미늄 소재의 경우 알루미늄 고유의 고반사 특성과 다양한 합금 성분의 영향으로 인해 알루미늄 분말을 이

1. 전남대학교 기계공학부 석사과정  
2. 전남대학교 기계공학부 교수  
3. 한국생산기술연구원 서남지역본부 수석연구원  
4. 한국해양대학교 해양신소재융합공학과 조교수  
# Corresponding Author : Korea Maritime and Ocean University, 조교수, E-mail: think@kmou.ac.kr

용한 DED 적층 기술은 아직 미미한 수준이다[4]. 또한 금속의 종류에 따라 에너지를 흡수하는 특성은 다른데, 티타늄과 같이 에너지 흡수율이 높은 금속은 적층 제조 기술의 대상 소재로 많이 활용되고 있는 반면, 알루미늄은 상대적으로 에너지 흡수 특성이 낮아 적층성이 낮은 소재로 알려져 있다.

M. Pilloz et al.은 알루미늄 합금분말에 Si 와 Ni 을 각각 혼합하여 DED 공정과 유사한 레이저 클래딩(laser cladding) 기법을 사용한 분말 적층을 시도하였다. 그 결과, Si 첨가를 통해 기공이 없는 균일한 표면을 갖게 되지만, Ni 의 첨가는 고경도의 금속간의 화합물 형성과 함께 적층 표면에 기공을 나타내는 것을 확인하였다[5].

A. Singh et al.은 Al-Si 합금과 직접 레이저 금속 증착 기술을 이용하여 해치 패턴과 단일 벽 패턴의 스캐닝으로 적층 실험 후, 인장시험을 진행하였다. 적층 시편의 미세 구조는 99.9%의 고밀도의 구조를 보였으며, 인장 시험 샘플은 225 MPa 의 인장강도와 9.4%의 연신율을 보였다. 이러한 연구는 직접 레이저 금속 적층법이 열변형이나 굽힘 없이 Al-Si 합금을 기능성 부품에 성공적으로 적용할 수 있다는 가능성을 보였다[6].

알루미늄 합금 중 AlSi12 는 고온용 알루미늄 재료로써 경량성, 내식성, 가공성 등이 우수하여[7,8] 항공 우주와 자동차 산업 분야의 기능성 재료로서 주목을 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 고부가가치 부품에 대한 국부 영역 강화 및 부품 보수의 목적으로 AlSi12 분말에 대한 DED 적층 가능성을 검토해보고자 하며, 이를 위해 적층 시에 나타나는 적층 특성을 관찰하고자 한다. DED 공정의 주요 공정 변수로는 레이저 출력(laser power), 분말 공급량(powder feed rate), 레이저 이송 속도(scanning speed), 가스량(gas flow rate) 등이 있다. 이러한 공정 변수들의 조합은 적층 형상의 기하학 및 기계적, 그리고 금속야금학적 특성에 영향을 주게 되는데[9,10], 본 연구에서는 대표적인 공정 변수인 레이저 출력과 분말 공급량, 이송 속도 그리고 레이어 슬라이싱 두께(layer slicing thickness)에 따른 적층 특성을 분석하였다. 또한 단일 선(single line) 적층과 다중 면(multi-layer) 적층 후의 적층 표면을 관찰하였으며, 설계 높이와 최종 적층 높이간의 비교를 통해 AlSi12 분말에 대한 DED 공정 조건을 도출하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 직접 레이저 용융 적층 기술

DED 공정은 Fig. 1 과 같이 고출력 레이저 빔을 국부적으로 모재에 조사하여 모재 표면에 용융풀을 형성하고, 동시에 분말 공급 장치로부터 분말 가스를 통해 실시간으로 금속 분말을 용융풀에 공급한다. 모재와 분말이 용융되어 혼합된 용융풀은 급속 응고되면서 치밀하고 미세한 조직을 갖는 금속층이 형성되게 된다. MX-CAM 을 통해 적층하고자 하는 3차원 CAD 모델을 일정한 두께로 슬라이싱(slicing)하고, 이로부터 산출된 2 차원 단면을 가장자리(pocket)에서 시작하여 지그재그 방향으로 내부(contour)를 line by line 방식으로 채워 나가면서 한 층을 적층하게 된다. 그 위 층은 90° 교차하여 면 적층을 반복함으로써, layer by layer 방식으로 3 차원 형상이 만들어진다.

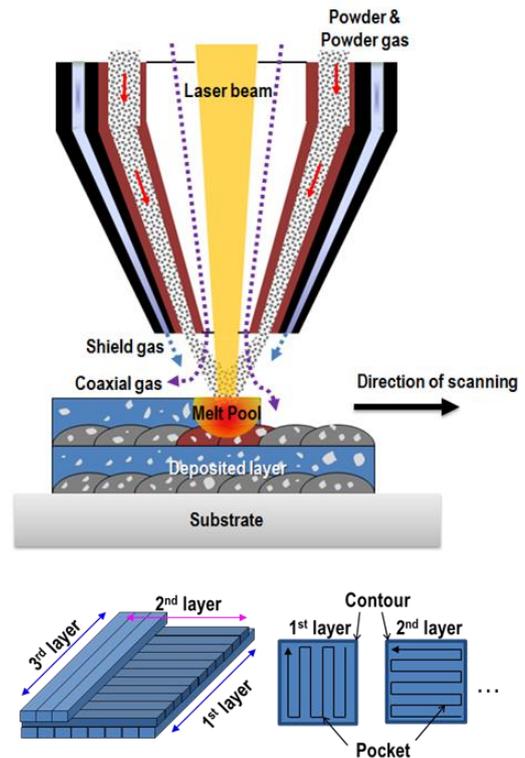


Fig. 1 Schematic diagram of direct energy deposition

### 2.2 사용 재료

본 연구에서 사용된 AlSi12 분말은 AlSi12 합금을 용해하여 가스 분무법(gas atomizing)으로 분말화 하였으며, 직경 75~140  $\mu\text{m}$ 의 구형 분말로 제조된 것을

사용하였다. 이 소재는 용접용 알루미늄 합금으로, 고온 균열에 대한 저항이 강하나 낮은 연성을 특징으로 한다. 또한 모재(base metal or substrate)는 6000계 알루미늄 합금인 AlMg1SiCu를 사용하였다. AlMg1SiCu 또한 우수한 내식성, 강도성, 용접성을 가지고 있어 해수용 기자재로 많이 적용되고 있는 소재이며, 길이 100mm, 너비 50mm, 그리고 두께 10mm의 사각 블록으로 절단하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 모재와 분말에 대한 화학적 조성비는 Table. 1에 나타난 바와 같다.

**Table 1 Chemical compositions of materials used**

Element (wt %)	Materials used	
	AlSi12 powder	AlMg1SiCu substrate
Si	11.0-13.0	0.4-0.8
Fe	0.8	0.7
Cu	0.3	0.15-0.4
Zn	0.2	0.15
Mn	0.15	0.25
Mg	0.1	0.8-1.2
Etc.	0.15	0.5
Al	Bal.	Bal.

## 2.3 공정 조건

앞서 언급한대로 공정 변수에 따른 AlSi12 분말의 적층 특성을 관찰하기 위한 주요 공정 변수의 범위는 Table 2에 나타난 바와 같다. 이외에도 레이저의 빔의 직경은 약 1.0 mm로, 이를 통해 단일 선으로 적층된 비드의 폭은 약 1.0 mm로, 비드 폭의 50%인 0.5 mm씩 중첩하여 지그재그 방향으로 이동하며 적층을 진행한다(Fig. 1). 산화 방지를 위해 보호 가스(shield gas)로 argon gas를 사용하였으며, 모재와 노즐 간의 간격은 9 mm이다. DED 공정 동안, 레이저 조사에 의해 공급되는 에너지는 모재에 용융풀을 형성할 뿐만 아니라 금속 분말을 용융시키기에 충분하여야 한다. 이러한 에너지는 레이저 출력, 이송 속도에 의해 결정되며, 레이저 빔의 직경 당 특정 에너지(E)로 표현된다. E는 에너지 밀도(energy density)라고 하며, 아래의 식(1)과 같이 표현된다.

$$E(\text{J}/\text{mm}^2) = \frac{P}{vD} \quad (1)$$

여기서, P는 레이저 출력(W 또는 J/s), v는 이송 속도(mm/s), D는 레이저 빔의 직경(mm)이다. 한편, 분말 공급 밀도(powder feed density, F) 또한 적층 특성과 품질에 주요한 영향을 주며, (2)과 같은 식으로 표현된다.

$$F(\text{g}/\text{mm}^2) = \frac{G}{vD} \quad (2)$$

여기서, G는 분말 공급량(g/s)이다.

위 식에서와 같이 레이저 출력과 분말 공급량은 각각 소재에 공급되는 에너지 밀도와 분말 공급 밀도를 결정하는 주요한 공정 변수이다. 따라서 본 연구에서는, 먼저 단일 선 적층 실험을 통해 안정된 용융풀과 일정한 비드를 형성하는 레이저 출력과 분말 공급량의 수준을 선정하도록 한다.

**Table 2 Processing conditions**

Process parameter	Units	
Laser power	W	500-1200
Powder feed rate	g/min	Contour 0.9-7 Pocket 0.9-4.5
Scanning speed	mm/min	550-1050
Slicing layer height	mm	0.25-1.0

## 3. 실험 결과

### 3.1 단일 선(single track) 적층

#### 3.1.1 레이저 출력별 비교

AlSi12 분말을 이용하여 단일 선 적층에 있어, 레이저 출력별로 나타나는 비드의 특성을 분석하기 위해, 출력을 500W부터 1200W까지 100W의 간격으로 각 3회씩 반복 적층을 수행하였다. 이 때 분말 공급량은 7 g/min로 고정하였다. 레이저 출력의 변화에 따라 단일 선으로 적층된 결과가 Fig 2에 나타나 있다. 그림에서와 같이 500W 일 때에는 일정한 폭으로 연결된 비드가 형성되지 않았는데, 이는 레이저 출력이 낮을 경우 공급되는 분말 대비 충분한 에너지가 공급되지 않았기 때문에 연속적으로 용융풀이 형성되지 않게 된다. 그림에서와 같이 레이저 출력이 높아질수록 모재에 형성되는 용융풀은 증가하지만, 900W까지는 여전히 연속적인 비드를 형성하지 못하고 있다. 하지만, 레이저 출력이 1000W와

1100W 인 경우에는 비드의 끊김 현상이 사라지며 연속적인 비드 라인을 형성하였다. 하지만, 1200W 이상의 출력에서는 용융풀이 과도하게 형성되어, 적층 비드의 폭이 급격하게 증가되었다. 이상의 결과로부터 단일 선 적층의 경우, 1000W와 1100W 범위의 레이저 출력에서 안정된 비드 라인이 생성됨을 확인할 수 있었다.

고에너지의 열원을 작은 초점으로 맞추어 집적시키더라도, 에너지의 일부는 분말과 모재 표면에 닿기 전에 손실되기도 하며, 표면에서 반사되거나, 그리고 모재 등에 흡수되어 열로서 방출되기도 한다. 이러한 손실 에너지 외에 흡수된 에너지는 분말과 모재를 가열시키고, 충분히 밀도가 높다면 결국 용융풀을 만들어낸다. 따라서, 연속적인 비드 형성을 위해서는 충분한 에너지가 공급되어 용융풀이 생성되어야 한다. 또한 과도한 에너지 집중은 소재를 일부 기화(evaporation)시키기도 하며, 이는 오히려 연속적인 비드 형성에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 따라서 위의 실험 결과는 레이저 출력과 용융풀 생성 간의 이러한 물리적 상호 관계를 잘 설명해주고 있다.

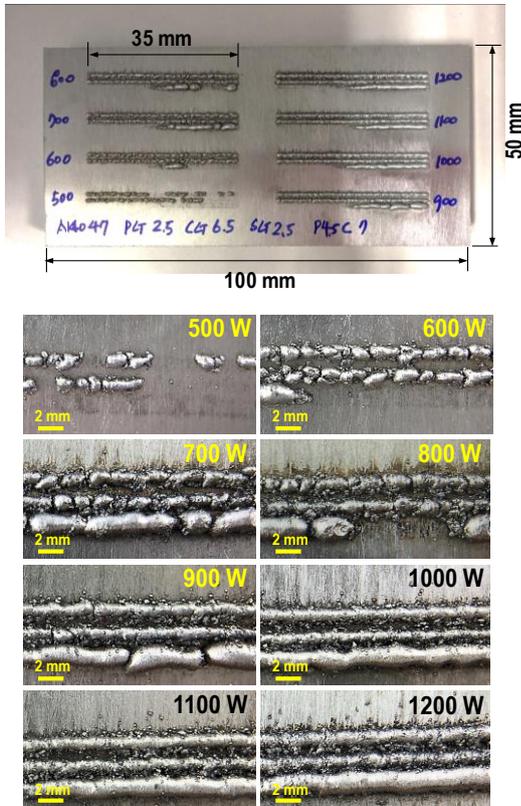


Fig. 2 Single track deposition at different laser powers.

### 3.1.2 분말 공급량별 비교

앞서 레이저 출력별 실험에서 고정값으로 한 분말 공급량 7.0 g/min에 대해서 과도한 크기의 비드 폭이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 분말 공급량을 낮추어, 2.5g/min, 1.5g/min, 그리고 1.0g/min 과 같이 변화시켜 선 적층 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig 3에 나타내었다. 분말 공급량 2.5g/min인 경우, 연속적으로 적층된 비드가 나타나고 있지만, 그 폭과 높이가 일정치 않은 결과를 보이고 있다. 이에 반해, 분말 공급량 1.5g/min의 조건에서는 적층 비드의 폭과 높이가 일정하게 형성되었음을 확인할 수 있었다.

선 적층을 중첩(overlap)시켜 반복하게 되면 하나의 면(layer)이 형성되므로, 멀티 레이어 적층 과정에서의 적층 특성은 결국 단일 선 적층에서의 결과에 영향을 받게 된다. 이상의 단일 선 적층 실험에서 확인한 바와 같이, 균일한 비드 형상과 연속적인 비드 라인을 얻을 수 있는 조건으로 레이저 출력 1000-1100W과 분말 공급량 약 1.5g/min 의 수준이 도출될 수 있었다.

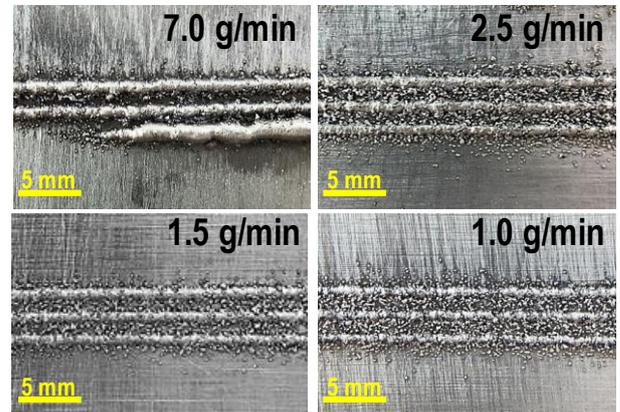


Fig. 3 Single track deposition at different powder feed rates.

## 3.2 Multi-layer 적층

### 3.2.1 공정 변수에 따른 적층 표면

단일 선 적층 시 레이저 출력 및 분말 공급량 조건에 따른 적층 특성을 확인하였으며, 그 결과를 토대로 멀티 레이어 적층 특성을 관찰하였다. 이를 위해 가로, 세로, 그리고 높이를 각각 10mm, 10mm, 1.5mm의 크기로 하는 육면체 적층을 실시하였다. 여기서 슬라이싱 레이어 두께는 0.25 mm이며, 따라서 1.5mm의 높이 적층을 위해서 총 6개의 레이어가

적층되게 된다.

Fig. 4에 나타낸 결과에서와 같이, 낮은 출력(800-900W)에서는 단일 선 적층 시 나타난 불연속적 비드가 멀티 레이어 적층에서도 동일하게 나타나면서, 결국 구름(cloud) 형상의 적층 표면이 형성됨을 알 수 있다. 이에 반해, 1000W와 1100W에서는 매끈한 표면의 멀티 레이어 적층이 가능함을 확인할 수 있었다.

이러한 레이저 출력에 따른 적층 표면의 특성은 앞서 설명된 에너지 밀도에 따른 용융풀 생성 상호작용과 함께, 생성된 용융풀의 유동 특성에도 연관이 있어 설명될 수 있다. 높은 에너지 밀도는 활발한 용융풀의 흐름을 유도하며, 이전에 적층된 응고층과의 융합(fusion)을 도와준다. 또한, 용융풀 내의 유체 흐름과 용융풀 위의 기화된 금속 흐름이 매우 역동적이기 때문에 깨끗한 표면을 형성하게 한다. 하지만, 낮은 에너지 밀도에 의해 생성된 용융풀은 활발한 대류 운동보다는 표면 장력에 의한 원인으로 balling 현상이나 구름 모양의 적층 표면을 생성시키는 것으로 분석된다.

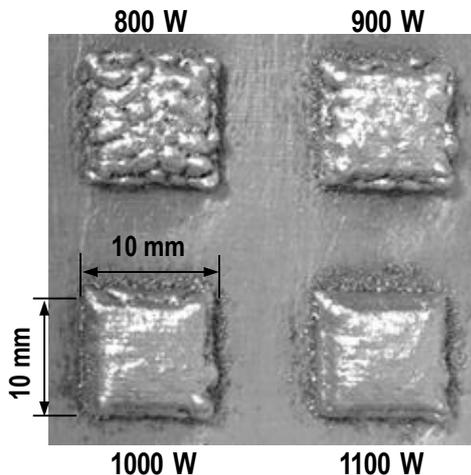


Fig. 4 Multi-layer deposition at different laser powers.

분말 공급량에 따른 적층 표면을 비교하기 위해 Fig 5와 같이 1.5 g/min, 1.0 g/min, 그리고 0.9 g/min의 조건에서 멀티 레이어 적층을 수행하였다. 분말 공급량이 적을 경우(0.9g/min), 부족한 분말 공급량으로 인해 적층 표면이 불량함을 확인할 수 있으며, 특히 모서리에는 balling 현상이 나타나고 있다. 또한 1.5 g/min 조건에서는 과도한 양의 분말 공급으로 인해 중앙 부위의 배부름 현상이 나타나고 있음을

알 수 있다. 이러한 현상은 단일 선 적층에서와 마찬가지로, 레이저 출력이 일정할 경우에는 용융풀에 공급되는 분말량에 의해 적층 비드의 높이가 결정되기 때문이다. 이에 반해, 1.0g/min 조건에서는 모서리의 balling 현상이나 중앙의 배부름 현상이 나타나고 있지 않으며, 가장 우수한 표면을 나타내고 있다.

금속 분말에 대한 레이저 용융된 적층재의 표면 특성은 소재 종류, 분말 조건, 그리고 적층 조건에 따라 다양한 형태로 나타난다. 위의 실험 결과에서는 레이저 출력과 분말 공급량이 낮을 경우, 용융풀이 부족하여 거칠거나 불규칙한 표면을 만들게 되었다. 금속의 유동성은 이러한 공정 조건에 따라 다양하게 나타나며, 용융풀과 최종 적층물의 표면 특성을 변화시키게 됨을 확인할 수 있었다.

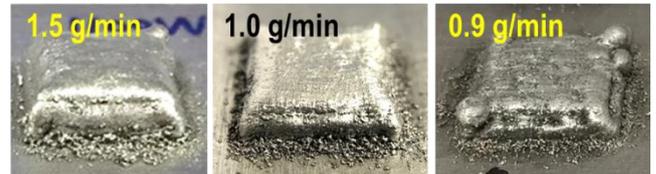


Fig. 5 Multi-layer deposition at different powder feed rates.

### 3.2.2 이송 속도에 따른 적층 높이

AlSi12 분말에 대한 선 적층과 멀티 레이어 적층을 통해 비드 형상과 적층 표면을 관찰하여 레이저 출력(1000-1100W)과 분말 공급량(1.0g/min)에 대한 적정 수준을 도출하였다. 하지만, 그러한 조건에서 적층된 단일 선 적층에서의 적층 비드와 멀티 레이어의 적층 높이가 과적층으로 인해 설계 높이보다 높아지는 결과를 보였다. 따라서 주어진 레이저 출력과 분말 공급량 조건에서 적층 높이를 설계 높이와 동일하게 만들기 위한 조건 선정이 필요하다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 주어진 레이저 출력과 분말 공급량에서, 설계된 적층 높이를 얻기 위해서는, 먼저 식 (1)과 (2)에 포함되어 있는 노즐의 이송 속도를 조절할 수 있다. 노즐 이송 속도를 통해서 원하는 설계 높이를 맞출 수가 없을 경우에는 슬라이싱 레이어 두께를 조절함으로써 최종적으로 설계 높이를 맞출 수가 있게 된다. 여기서 슬라이싱 레이어 두께는 Fig. 8(a)에 나타낸 바와 같이, 주어진 목적 형상을 높이 방향으로 슬라이싱하여 2차원 단면 정보를 추출하는 과정에서 슬라이싱 두께를 결정하게

되면, 이 값에 따라 전체 적층 레이어 수가 결정되게 된다. 예를 들어 적층 설계 높이가 2mm, 슬라이싱 두께가 0.25mm일 경우, 적층 레이어 수는 8개가 된다.

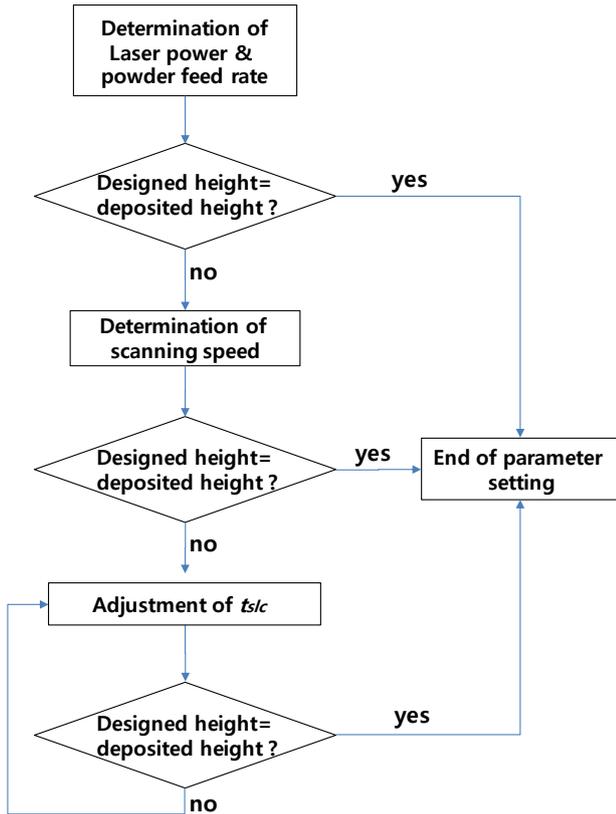


Fig. 6 Flow chart for determination of process parameters.

앞선 결과에서와 같이, 일정한 이동 속도로 더 큰 레이저 출력을 적용할수록 용융 풀이 더 커지게 된다. 반대로, 일정한 레이저 출력에서 이송 속도를 높일수록 용융 영역을 더 길고 얇게 만들 것이며, 결국 용융이 일어나지 않게 된다. 이송 속도를 낮추어 용융 풀의 크기를 증가하게 되면, 과잉 입열량(heat input)으로 인해 열응력/변형이 생기거나 적층 정밀도가 감소된다. 따라서 적절한 수준의 이송 속도 선정이 필요하게 된다.

먼저 설계된 적층 높이를 맞추기 위해 이송 속도 별 멀티 레이어 적층 실험을 수행하였다. 이송 속도를 550 mm/min 에서 1,050 mm/min까지 100 mm/min의 간격으로 변화시키면서 적층 실험을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에 나타낸

결과는 앞선 멀티 레이어 적층 실험과 동일한 크기의 육면체 형상을 적층한 후 중앙에서 절단하여 단면을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 이송 속도가 빨라질수록 공급되는 분말량과 에너지가 낮아지기 때문에 최종 적층 높이는 낮아짐을 확인할 수 있다. 하지만 이송 속도를 1050mm/min까지 증가시켜도 설계 높이(1.5mm)보다는 여전히 과적층이 발생되고 있음을 알 수 있다.

낮은 이송 속도 조건에서는 과도한 에너지와 분말이 공급되기 때문에 중앙 부근의 배부름 현상이 발생되었다. 이에 반해, 이송 속도가 높을 경우에는 적층된 최상단의 표면이 불규칙하게 형성이 되고 있다. 이는 모서리 부분에서 나타나는 balling 현상과, 중앙 부근보다 외곽 contour에서의 적층이 많아지면서 생긴 현상으로 볼 수 있다. 한편, 이송 속도 850mm/min에서는 비교적 균일한 최상단의 표면 품질이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 최종 적층 높이를 설계 높이로 맞추기 위해서는 이송 속도로는 한계가 있으며, 따라서 슬라이싱 레이어 두께의 제어가 필요함을 알 수 있다.

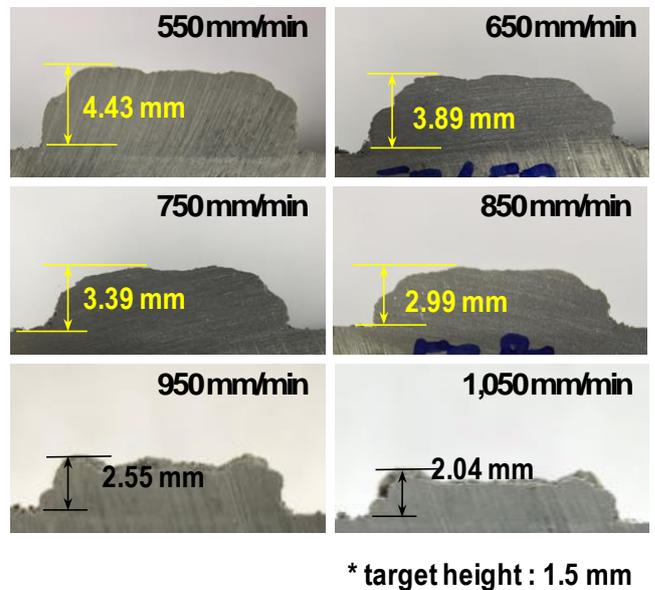


Fig. 7 Deposited heights in multi-layer deposition at different scanning speeds.

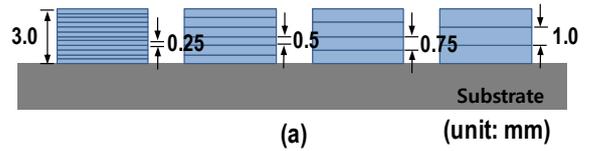
### 3.2.3 슬라이싱 레이어 두께에 따른 적층 높이

슬라이싱 레이어 두께( $t_{slc}$ )를 이용하여 최종 적층 높이를 맞추기 위해 Fig. 8(a)와 같이 레이어 두께를

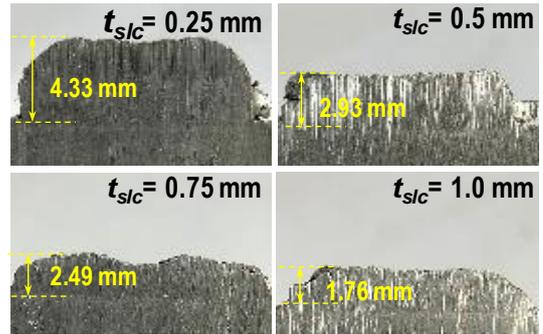
0.25mm에서 1.0mm까지 0.25mm 간격으로 변화시키며 적층한 후에, 최종 적층 높이와 설계 높이(3mm)를 비교하였다. 앞선 실험을 통해 도출해낸 공정변수(레이저 출력 1000-1100W, 분말공급량 1.0g/min, 이송 속도 850mm/min)들을 고정값으로 설정하였으며, 레이저 출력의 경우에는 1000W와 1100W일 때의 두 가지 경우로 적층 실험을 진행하였으며, 그 결과가 Fig. 8(b)와 (c)에 나타나 있다. 그림에서와 같이 레이저 출력 두 가지 모두에서 레이어 두께를 0.5 mm로 설정하였을 때 최종 적층 높이가 설계 높이에 가장 근사한 결과를 보이고 있다. 레이어 두께가 0.5mm보다 작거나 클 경우에는 각각 과도한 적층(over-deposition)과 부족한 적층(under-deposition)이 발생하였다. 이러한 이유는 하나의 레이어에 대한 적층 높이는 에너지 공급 밀도와 분말 공급 밀도에 따라 달라지게 되는데, 즉 에너지 공급 밀도(E)와 분말 공급 밀도(F)가 높아지면 적층되는 레이어 두께는 증가할 것이며, 반대로 낮아진다면 두께는 감소하게 될 것이다. 따라서 앞선 실험을 통해 도출해낸 레이저 출력, 분말 공급량, 이송 속도 조건의 조합에서 실제 적층되는 레이어의 높이를 슬라이싱 레이어 두께로 설정해야 한다는 것을 의미한다. 이러한 슬라이싱 레이어 두께( $t_{slc}$ )를 결정하는 과정을 Fig. 9에 나타내었다. 적층 특성을 고려하여 우선 에너지 공급 밀도(E)와 분말 공급 밀도(F)를 결정 한 뒤, 이러한 조건에서의 단일층 적층 두께( $t_{dep}$ )을 확인한다. 확인된 단일층 적층 두께( $t_{dep}$ )와 동일하게 슬라이싱 레이어( $t_{slc}$ )로 적용하여 멀티 레이어를 적층하게 되면, 과적층이나 부족한 적층이 없이 멀티 레이어에서의 설계 높이를 맞출 수가 있게 되는 것이다.

본 연구에서 대상으로 한 AlSi12 분말의 경우, 레이저 출력 1000-1100W, 분말공급량 1.0g/min, 이송 속도 850mm/min로 적층할 경우 적층되는 하나의 레이어의 두께는 약 0.5mm이며, 이 값을 슬라이싱 레이어 두께로 설정할 경우, 최종 설계 높이를 맞출 수 있게 되는 것이다.

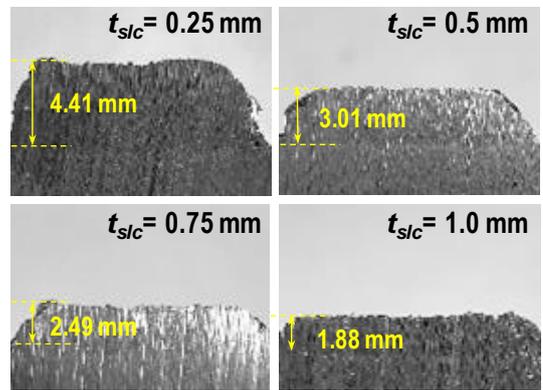
이상의 실험에서는 AlSi12 분말에 대해서 주요 공정 변수에 따른 적층 특성을 비교 분석하였다. 그 결과, 우수한 적층 표면 품질과 정밀한 적층 높이를 얻을 수 있는 최종 DED 공정 조건은 Table 3에 나타낸 바와 같다.



\* target height : 3.0 mm



(b)



(c)

Fig. 8 (a) Multi-layer deposition with different  $t_{slc}$  (a) at 1000 W and (b) 1100 W laser power.

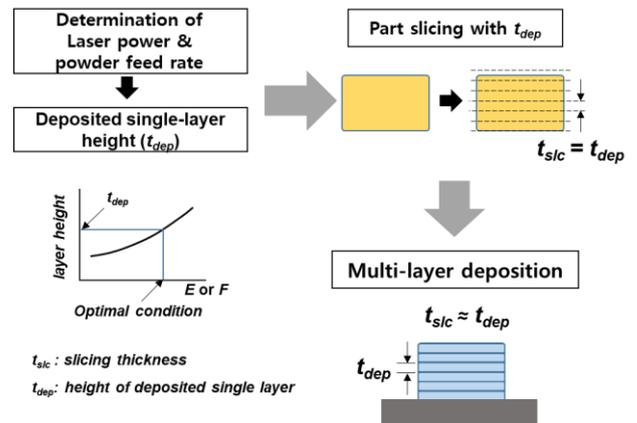


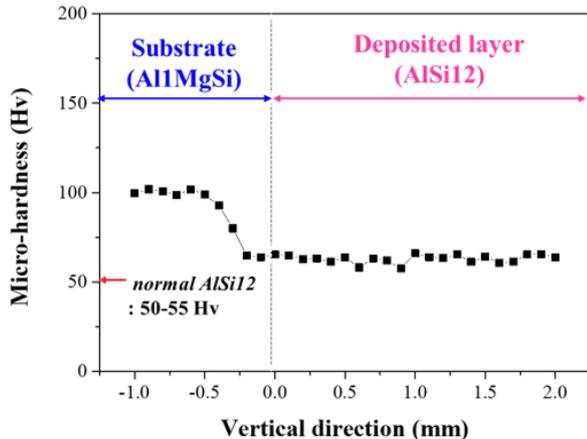
Fig. 9 Procedure for determination of slicing layer height

**Table 3** Finally established parameters in DED processing for AlSi12 powder

Process parameter	Units	
Laser power	W	1100
Powder feed rate	g/min	Contour 1.0 Pocket 1.0
Scanning speed	mm/min	850
Slicing layer height	mm	0.5

### 3.3 마이크로 경도(micro-hardness)

앞서 언급된 AlSi12 공정조건을 사용하여 적층한 소재의 경도를 관찰하기 위해 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 모재와 적층부의 경도 값을 측정하였다. 시편 깊이 방향으로 0.1 mm 간격으로 총 31개 지점에서의 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 모재인 AlMg1Si에서는 100-105Hv의 수치를 나타냈으며, 일반적인 AlMg1Si의 경도인 75Hv보다 25-30 정도 높은 수치를 나타내었다. 이는 DED 공정 중에 분말과 모재 표면에 조사되는 레이저에 의한 가열 효과라고 볼 수 있다. 한편, AlSi12 분말이 적층된 영역에서의 평균 경도는 63Hv 수준으로, 일반적인 AlSi12의 벌크 소재 경도인 50-55Hv와 유사함을 확인할 수 있었다.

**Fig. 10** Hardness distributions on the cross-section of the deposited AlSi12

## 4. 결론

본 연구에서는 직접 레이저 용융 적층 공정에서 알루미늄 합금인 AlSi12 분말을 적용하는데 있어 공

정조건에 따른 적층 특성을 비교 분석하였으며, 그로부터 도출된 결과는 다음과 같다.

(1) AlMg1Si 모재 위에 AlSi12 분말을 적용한 단일 선 적층 과정에서, 레이저 출력과 분말 공급량에 따른 비드 폭과 균일성을 확인하였으며, 그 결과 레이저 출력 1000W-1100W, 분말 공급량 1.0-1.5 g/min의 범위에서 양호한 선 적층이 나타남을 확인하였다.

(2) Multi-layer 적층에서도 마찬가지로 주요 공정 변수인 레이저 출력과 분말 공급량에 따른 적층 품질을 비교 분석하였으며, 그 결과 1000W-1100W에서의 레이저 출력과 1.0 g/min의 분말 공급량에서 안정된 적층 상태를 나타냄을 확인하였다.

(3) 상기 레이저 출력과 분말공급량 조건에서 발생하는 과적층 현상을 해결하기 위해, 슬라이싱 레이어 두께에 따른 최종 적층 높이를 확인한 결과, 슬라이싱 레이어 두께가 0.5mm일 때 설계 높이에 가장 근접한 적층 높이를 얻을 수 있었다.

이상의 연구로부터 AlSi12 분말 적층에 있어 주요 공정 변수들의 유효 조건을 도출하였으며, 이러한 결과는 알루미늄 소재의 장점을 활용할 수 있는 부품에 DED 공정을 적용하기 위한 응용 연구에 대한 기초 데이터로 활용될 수 있을 것이다. 향후에는 DED 공정에 알루미늄 합금 분말을 이용할 경우, 다양한 적층 조건에 따른 적층 소재의 기계적 특성을 평가하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단의 신진연구지원사업(과제번호: NRF-2017R1C1B5076047)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, Opti. Laser. Eng. Vol. 34, No. 4-6., pp. 397-414.
- [2] M. C. Kang, D. H. Ye, G. H. Go, 2016, International Development Trend and Technical Issues of Metal

- Additive Manufacturing, J. Welding and Joining, Vol. 34, No. 4, pp. 9~16.
- [3] C. Navas, A. Conde, B. J. Ferná ndez, F. Zubiri, J. de Damborenea, 2015, Laser Coatings to Improve Wear Resistance of Mould Steel, Surface and Coatings Technol., Vol. 194, pp. 136~142.
- [4] K. I. Kim, 2016, Metal Materials for 3D Printing: Opportunities for Manufacturing Innovation and Future Market, KISTI Market report, pp. 1~5.
- [5] M. Pilloz, J. Pelletier, A. Vannes, A. Bignonnet, 1991 Laser Cladding on Aluminium Base Alloys, Journal de Physique IV Colloque, Vol. 1, pp. C7-117~C7-120.
- [6] A. Singh, A. Ramakrishnan, G. Dinda, 2017, Fabrication of Al-11.2Si Components by Direct Laser Metal Deposition for Automotive Applications, J. Welding and Joining, Vol. 35, No. 4, pp. 67~73
- [7] E. L. Rooy, 1988, Metals Handbook, ASM Int., Ohio, Vol. 15, pp. 743~770.
- [8] J. R. Davis, 1993, ed.: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Int., Ohio, pp. 627~633.
- [9] R. Chou, J. Milligan, M. Paliwal, M. Brochu, 2015, Additive Manufacturing of Al-12Si Alloy Via Pulsed Selective Laser Melting, JOM, Vol. 67, No. 3, pp. 590~596.
- [10] G. P. Dinda, A. K. Dasgupta, J. Mazumder, 2012, Evolution of Microstructure in Laser Deposited Al-11.28%Si Alloy, Surface and Coatings Technol., Vol. 206, No. 8-9, pp. 2152~2160.