

# 에너지 밀도 및 분말 증착 밀도를 고려한 직접 에너지 증착법 기반 Ti-6Al-4V 합금의 적층공정 최적화

이유경<sup>a</sup> · 김은성<sup>b</sup> · 천세호<sup>c</sup> · 설재복<sup>a</sup> · 성효경<sup>a</sup> · 오정석<sup>a</sup> · 김형섭<sup>b</sup> · 이태경<sup>c</sup> · 남태현<sup>a</sup> · 김정기<sup>a\*</sup>  
<sup>a</sup>경상국립대학교 나노신소재융합공학과, <sup>b</sup>포항공과대학교 신소재공학과, <sup>c</sup>부산대학교 기계공학부

## Additive Manufacturing Optimization of Directed Energy Deposition-Processed Ti-6Al-4V Alloy using Energy Density and Powder Deposition Density

Yukyeong Lee<sup>a</sup>, Eun Sung Kim<sup>b</sup>, Se-Ho Chun<sup>c</sup>, Jae Bok Seol<sup>a</sup>, Hyokyung Sung<sup>a</sup>, Jung Seok Oh<sup>a</sup>,  
Hyoung Seop Kim<sup>b</sup>, Taekyung Lee<sup>c</sup>, Tae-Hyun Nam<sup>a</sup> and Jung Gi Kim<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Gyeongsang National University,  
Jinju 52828, Republic of Korea

<sup>b</sup>Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH),  
Pohang 37673, Republic of Korea

<sup>c</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

(Received December 2, 2021; Revised December 21, 2021; Accepted December 23, 2021)

**Abstract** The process optimization of directed energy deposition (DED) has become imperative in the manufacture of reliable products. However, an energy-density-based approach without a sufficient powder feed rate hinders the attainment of an appropriate processing window for DED-processed materials. Optimizing the processing of DED-processed Ti-6Al-4V alloys using energy per unit area ( $E_{\text{eff}}$ ) and powder deposition density ( $PDD_{\text{eff}}$ ) as parameters helps overcome this problem in the present work. The experimental results show a lack of fusion, complete melting, and overmelting regions, which can be differentiated using energy per unit mass as a measure. Moreover, the optimized processing window ( $E_{\text{eff}} = 44\sim 47 \text{ J/mm}^2$  and  $PDD_{\text{eff}} = 0.002\sim 0.0025 \text{ g/mm}^2$ ) is located within the complete melting region. This result shows that the  $E_{\text{eff}}$  and  $PDD_{\text{eff}}$ -based processing optimization methodology is effective for estimating the properties of DED-processed materials.

**Keywords :** Directed Energy Deposition, Energy Density, Energy per unit area, Powder Deposition Density, Processing Optimization

### 1. 서 론

Ti-6Al-4V 합금은 높은 강도, 낮은 밀도, 우수한 내식성을 가져 항공우주, 생체의료기기, 스포츠 용품 등 다양한 산업에서 널리 사용되고 있다[1, 2]. 이러한 우수한 특성에도 불구하고 Ti-6Al-4V 합금은 타이타늄과 공구 강 사이의 높은 화학적 반응성으로 인해 가공이 어려워 복잡한 형상 부품의 제조에 한계를 보인다[3]. 최근 이러한 단점

을 극복하기 위해 적용을 시도하는 적층제조법은 전통적인 절삭 가공 기반의 제조 기술과 달리 layer-by-layer로 3차원 형상의 조형체를 제조하는 기술이다. 그 중 레이저 기반의 적층 제조 기술은 고에너지 레이저를 활용해 분말을 용융/응고하는 방식으로 조형체를 제조하는 기술로 다양한 재료를 유연한 제조 공정이 가능하고 기능적으로 등급이 매겨진 재료의 부품 제조가 가능하다[4]. 이 중 대표적인 레이저 기반 적층 제조 기술 중 하나인 직접 에너지

- 이유경·김은성·천세호: 학생, 설재복·성효경·오정석·김형섭·이태경·남태현·김정기: 교수

\*Corresponding Author: Jung Gi Kim, TEL: +82-55-772-1661, FAX: +82-55-772-1661, E-mail: junggi91@gnu.ac.kr

증착법(DED: Directed Energy Deposition)은 고출력 레이저 에너지를 조사하여 국부적인 용융풀을 형성시킨 뒤 용융풀에 금속 분말을 공급하여 적층하는 공정으로 레이저 기반 분말 층 용융법(L-PBF: Laser-Powder Bed Fusion)과 비교하여 훨씬 더 높은 증착 속도와 손상된 부품의 수리가 가능한 이점으로 인해 다양한 산업에서의 중요성이 커지고 있으며, 건전한 조형체 제조를 위한 공정최적화에 관한 연구가 다수 수행되고 있는 상황에 있다.

일반적으로 공정변수(레이저 출력, 스캔 속도, 레이어 두께, 해치 간격, 분말 분급량 등)는 밀도, 경도, 미세조직 변화에 영향을 미치게 되며, 잘못된 공정 설계로 인한 조형체의 내부 균열 및 기공과 같은 결함으로 이어질 수 있다. 그러나, 실험적인 방법에 기인한 공정변수 최적화는 엄청난 양의 데이터베이스를 필요로 하기 때문에 최적 공정조건을 도출하기까지 소요되는 시간 및 비용이 과다하게 요구될 수 있다[5]. 따라서, 상기 문제를 해결하기 위해 공정변수와 재료 특성 간의 관계를 정량적으로 나타내기 위해 에너지 밀도(Energy density) 개념이 도입되어 관련 연구가 다수 이루어지고 있다[6-12]. 현재 DED 공정최적화에 대한 대부분의 연구는 식 (1)과 같이 부피 에너지 밀도를 활용해 기계적 특성을 고려한다[13].

$$VED = \frac{P}{v \times h \times t} \quad (1)$$

여기서 VED는 부피 에너지 밀도( $J/mm^3$ ), P는 레이저 출력(W), v는 스캔 속도(mm/min), h는 해치 간격(mm), t는 레이어 두께(mm)를 나타낸다. 이 식 (1)의 부피 에너지 밀도는 다공성, 기계적 특성 및 표면 마감을 포함한 성형 품질에 대한 에너지 밀도를 조사하기 위해 기존 연구에서

주로 사용되었으며, L-PBF의 경우 비교적 높은 정확도를 보여왔다[14].

그러나 DED 공정을 이용한 조형체 제작 후 부피 에너지 밀도와 비교 시 에너지 밀도와 특성 사이의 관계가 일치하지 않는 경우가 발생하였는데, 이는 기존 부피 에너지 밀도 내에서 분말 분급량(Feed rate)을 고려하지 못해 정량적인 에너지 밀도 예측이 어려운 데에 기인한다. 따라서 DED 처리된 Ti-6Al-4V 합금 분말의 완전 용융을 달성하기 위한 에너지 밀도 설정에 대해 새로운 접근 방식이 제안될 필요가 있다. 특히 DED 공정의 경우 고출력 레이저를 이용한 분말 용융과 이를 연속적으로 적층시켜 코팅층을 제조하는 레이저 클래딩(Laser cladding) 공정과 유사성이 높다[15]. 한편 레이저 클래딩 제어 방법에 있어 다양한 공정변수 중 분말 분급량의 변화가 클래드 층 높이에 따른 미세구조 및 기계적 특성 변화에 영향을 미친다고 보고된 바가 있다[16]. 그러나, 레이저 클래딩 공정에 영향을 미치는 요인에 대한 변수를 DED 공정에 적용한 사례에 대해서는 아직 보고된 바가 없다.

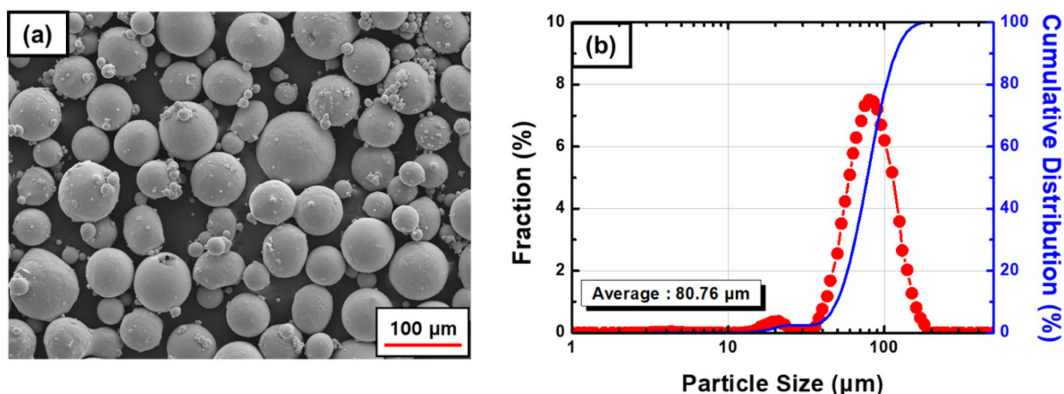
본 연구에서는 레이저 출력, 스캔 속도 및 분말 분급량 변화에 따른 80개의 Ti-6Al-4V 조형체를 조형 후 밀도 및 경도 데이터베이스를 구축하고 공정변수 기반 물성 예측을 위한 모델을 구성하여 분말 분급량을 고려한 DED 공정변수 최적화 가능성에 대해 확인하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에 사용된 Ti-6Al-4V 합금의 화학적 조성을 표 1에 나타내었다. DED 적층에 사용된 분말은 그림 1(a)과 같이 평균 입도  $80 \mu m$ 의 Ti-6Al-4V 상용 합금 분말(MK

**Table 1. Chemical composition of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder for DED**

wt%	Ti	Al	V	Fe	O	N
Ti-6Al-4V	Bal.	6.36	4.06	0.18	0.11	0.02



**Fig. 1. (a) Initial morphology and (b) particle size distribution of the pre-alloyed Ti-6Al-4V powder used for DED.**

Table 2. Detailed processing parameters for Ti-6Al-4V DED coupon samples

	160 W	180 W	200 W	220 W
850 mm/min	(1) 0.4 g/min	(6) 0.4 g/min	(11) 0.4 g/min	(16) 0.4 g/min
	(21) 0.5 g/min	(26) 0.5 g/min	(31) 0.5 g/min	(36) 0.5 g/min
	(41) 0.6 g/min	(46) 0.6 g/min	(51) 0.6 g/min	(56) 0.6 g/min
	(61) 0.7 g/min	(66) 0.7 g/min	(71) 0.7 g/min	(76) 0.7 g/min
890 mm/min	(2) 0.4 g/min	(7) 0.4 g/min	(12) 0.4 g/min	(17) 0.4 g/min
	(22) 0.5 g/min	(27) 0.5 g/min	(32) 0.5 g/min	(37) 0.5 g/min
	(42) 0.6 g/min	(47) 0.6 g/min	(52) 0.6 g/min	(57) 0.6 g/min
	(62) 0.7 g/min	(67) 0.7 g/min	(72) 0.7 g/min	(77) 0.7 g/min
925mm/min	(3) 0.4 g/min	(8) 0.4 g/min	(13) 0.4 g/min	(18) 0.4 g/min
	(23) 0.5 g/min	(28) 0.5 g/min	(33) 0.5 g/min	(38) 0.5 g/min
	(43) 0.6 g/min	(48) 0.6 g/min	(53) 0.6 g/min	(58) 0.6 g/min
	(63) 0.7 g/min	(68) 0.7 g/min	(73) 0.7 g/min	(78) 0.7 g/min
960 mm/min	(4) 0.4 g/min	(9) 0.4 g/min	(14) 0.4 g/min	(19) 0.4 g/min
	(24) 0.5 g/min	(29) 0.5 g/min	(34) 0.5 g/min	(39) 0.5 g/min
	(44) 0.6 g/min	(49) 0.6 g/min	(54) 0.6 g/min	(59) 0.6 g/min
	(64) 0.7 g/min	(69) 0.7 g/min	(74) 0.7 g/min	(79) 0.7 g/min
1000 mm/min	(5) 0.4 g/min	(10) 0.4 g/min	(15) 0.4 g/min	(20) 0.4 g/min
	(25) 0.5 g/min	(30) 0.5 g/min	(35) 0.5 g/min	(40) 0.5 g/min
	(45) 0.6 g/min	(50) 0.6 g/min	(55) 0.6 g/min	(60) 0.6 g/min
	(65) 0.7 g/min	(70) 0.7 g/min	(75) 0.7 g/min	(80) 0.7 g/min

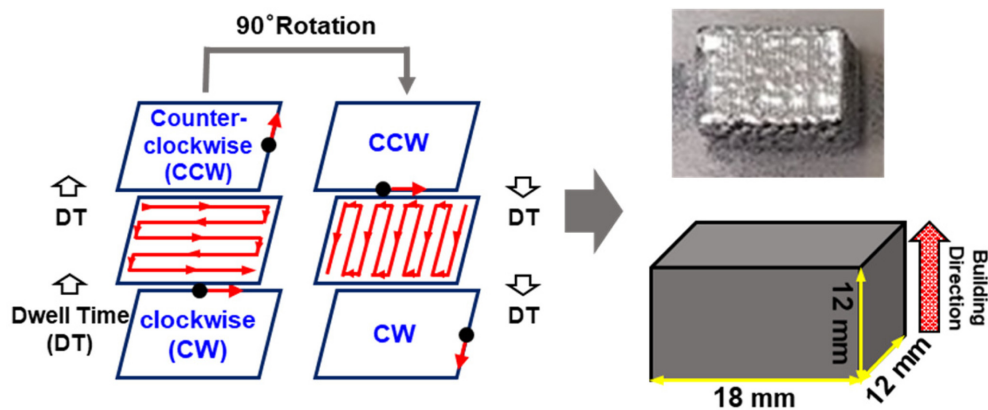


Fig. 2. Schematic of scan strategy and specimen dimensions of Ti-6Al-4V samples.

metal, Korea)이 사용되었다. 해당 분말은 가스 아토마이징(gas atomizing) 공법과 체질(sieving) 과정을 거쳐 제조되었으며, 구형 분말 표면에 아주 작은 금속 입자 분말들이 붙어있는 형태의 위성분말이 다수 존재하는 것으로 확인된다. 그림 1(b)는 레이저 입도 분석기(CILAS 1090 LD Shape Analyzer, 3P Instruments, Germany)를 이용해 측정된 분말 입도 분포를 나타내었으며  $D_{10} = 49.53 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 77.65 \mu\text{m}$ ,  $D_{90} = 118.26 \mu\text{m}$ 로 통상적인 DED용 구형분말과 유사한 입도를 나타내었다.

데이터베이스 구성을 위한 Ti-6Al-4V coupon 조형체는 DED 장비(MX-LAB, Insstek, Korea)를 통해 레이저 출력 160-220 W, 스캔속도 850-1000 mm/min, 분말 분급량 0.4-0.7 g/min을 공정변수로 두고 해치 간격 0.3 mm, 레이어 두께 0.15 mm를 고정으로 하여 80개를 적층하였으며, 표

2는 Ti-6Al-4V coupon 조형을 위한 공정변수를 요약하였다. 스캔 전략의 영향을 최소화하기 위해 그림 2의 개략도와 같이 지그재그 패턴의 레이저 스캔을 contour-filling-contour 공정을 진행하여 각 층별로 90°씩 시계방향으로 회전시키며 적층 조형을 실시하였다. 조형체는 공정변수 영향에 따른 미세구조 및 기계적 특성 평가를 위해 18 mm(가로) × 12 mm(세로) × 12 mm(높이)로 제조되었다. 제조된 Ti-6Al-4V 조형체의 기계적 물성 변화를 파악하기 위해 상대밀도와 경도 측정을 수행하였다. 이 때, 상대밀도는 조형체의 가로, 세로, 높이를 측정하여 단위 부피당 질량을 계산하였으며, 이를 벌크재 Ti-6Al-4V 합금의 밀도  $4.41 \text{ g/cm}^3$ 로 나누어 계산한 값을 사용하였다. 또한 경도 측정은 비커스 미세경도 시험기(HV-114, Mitutoyo, Japan)를 사용하여 적층 방향을 따라 각 시편의 중앙부에

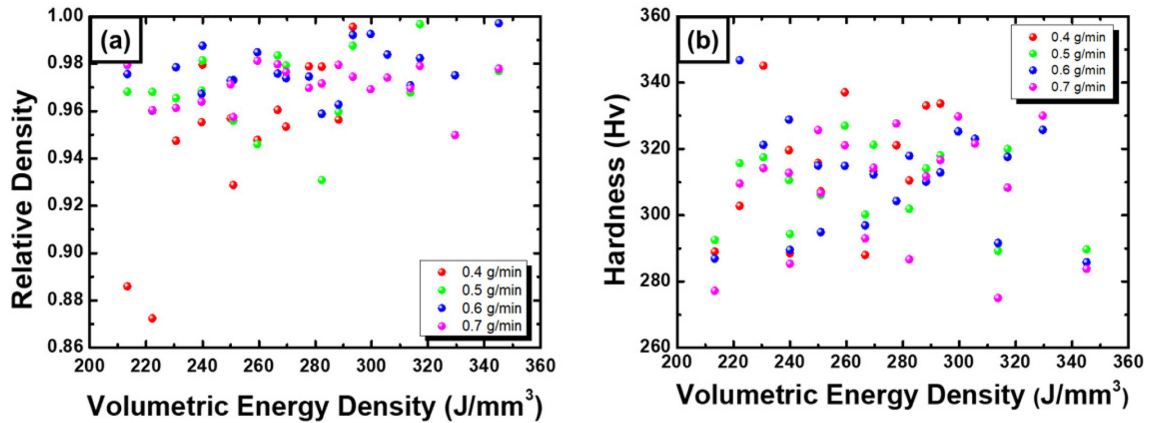


Fig. 3. (a) Relative density and (b) microhardness changes of the Ti-6Al-4V samples as an increase of the volumetric energy density.

서 0.1 kgf의 하중으로 10초 동안 압입하고 5회 측정된 후 절사 평균값을 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

DED 공정최적화 과정에서 공정변수와 조형체 특성 간의 관계를 나타내는 정량적 지표인 부피 에너지 밀도는 식 (1)과 같이 레이저 출력에 비례하며 스캔 속도, 해칭 간격, 레이어 두께와는 반비례 관계에 있다. 따라서, 레이저 출력이 높고 스캔 속도가 느릴수록 에너지 밀도가 높으며, 충분한 에너지 밀도가 주어질 경우 금속 분말의 완전한 용융이 이루어져서 고밀도의 조형체 제작이 가능하다. 그림 3은 부피 에너지 밀도와 조형체의 상대밀도 및 경도와 의 관계를 나타내었다. 그림 3(a)의 상대밀도 결과와 그림 3(b)의 경도 결과에서 볼 수 있듯이 에너지 밀도가 증가함에 따라 상대밀도는 증가하는 반면 경도는 고에너지 밀도 영역에서 다소 감소하는 추세를 확인할 수 있다. 이는 높은 에너지 밀도를 갖는 레이저 기반 적층제조 동안 더 높은 용융풀 온도로 이어짐에 따라 Ti-6Al-4V 합금의 prior  $\beta$  grain 크기가 증가하여 경도가 감소하기 때문이다 [17]. 그림 3(a)의 상대밀도 결과 분말 분급량 0.4 g/min에서 부피 에너지 밀도 증가에 따라 조형체의 상대밀도가 증가함을 확인할 수 있으나 분말 분급량 증가에 따른 상대밀도 경향성 파악은 어려움이 있다. 또한 그림 3(b)의 부피 에너지 밀도와 경도 측정 결과 비교 시, 분말 분급량 변화에 대한 경향성 예측을 식별하기 어려운 점이 있다. 따라서, 그림 3의 결과를 통해 부피 에너지 밀도 내에서 DED 공정에서 대표적 공정변수 중 하나인 분말 분급량이 에너지 밀도 인자에 포함되어 있지 않아 DED 공정에서의 밀도 및 경도 분포 경향성 예측이 어려움을 알 수 있다.

따라서, 분말 분급량을 고려한 밀도 및 경도 분포를 이

해하기 위해 기존 레이저 클래딩 공정에 적용된 계산식을 확장하여 레이저 기반의 DED Ti-6Al-4V 조형체에 적용하고자 하였다. 분말 분급량 뿐만 아니라 레이저 출력, 스캔 속도 세가지 공정변수의 영향에 대해 분석하기 위해 두개의 결합된 변수 즉, 단위 면적당 에너지(Energy per unit area;  $E_{eff}$ ) 및 분말 증착 밀도(Powder deposition density;  $PDD_{eff}$ )를 통해 정의할 수 있다. 단위 면적당 에너지는 전달된 에너지의 척도를 나타내는 변수로 다음 식과 같이 나타낸다[18, 19].

$$\text{Energy per unit area} = \frac{P}{V \times D(H)} \quad (2)$$

여기서 P는 레이저 출력, V는 스캔 속도, D는 레이저 스팟 크기, H는 해칭 간격을 나타내는데, 이때 레이저 스팟 크기는 해칭 간격으로 대체될 수 있으며 단위 면적당 에너지의 단위는  $J/mm^2$ 이다.

분말 증착 밀도는 증착된 분말의 양의 척도를 나타내는 변수로 다음과 같이 계산된다[18, 19].

$$\text{Powder deposition density} = \frac{R}{V \times D(H)} \quad (3)$$

여기서 V, D, H는 이전의 의미를 갖고 R은 분말 분급량을 나타내며 분말 증착 밀도의 단위는  $g/mm^2$ 이다.

이를 바탕으로 레이저 출력, 스캔 속도, 분말 분급량의 공정변수 데이터베이스를 기반으로 식 (2), (3)에 도입하여 단위 면적당 에너지( $E_{eff}$ )와 분말 증착 밀도( $PDD_{eff}$ )에 따라 변화되는 상대밀도와 경도 분포에 대한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그 결과, 공정변수에 따라 상대밀도 및 경도에 편차가 발생함을 확인할 수 있으며 점선과 같이  $E_{eff}$ 와  $PDD_{eff}$  그래프의 기울기 값인 단위 질량 당 에너지와 연관이 있음을 확인할 수 있다. 이전 레이저 기반 분말 용융에

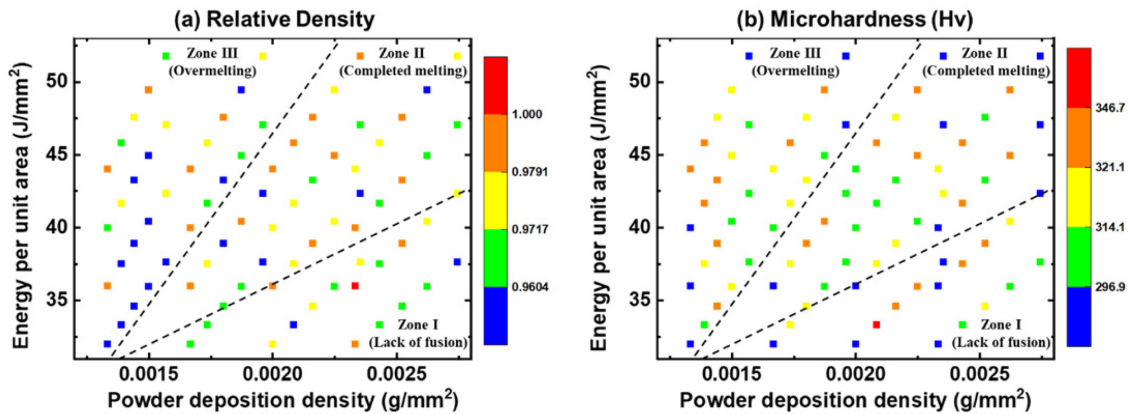


Fig. 4. (a) Relative density and (b) microhardness changes of the Ti-6Al-4V samples as an increase of energy per unit area and powder deposition density. Depending on the relative density and microhardness of Ti-6Al-4V samples, lack of fusions (Zone I), completed melting (Zone II), and overmelting (Zone III) can be divided.

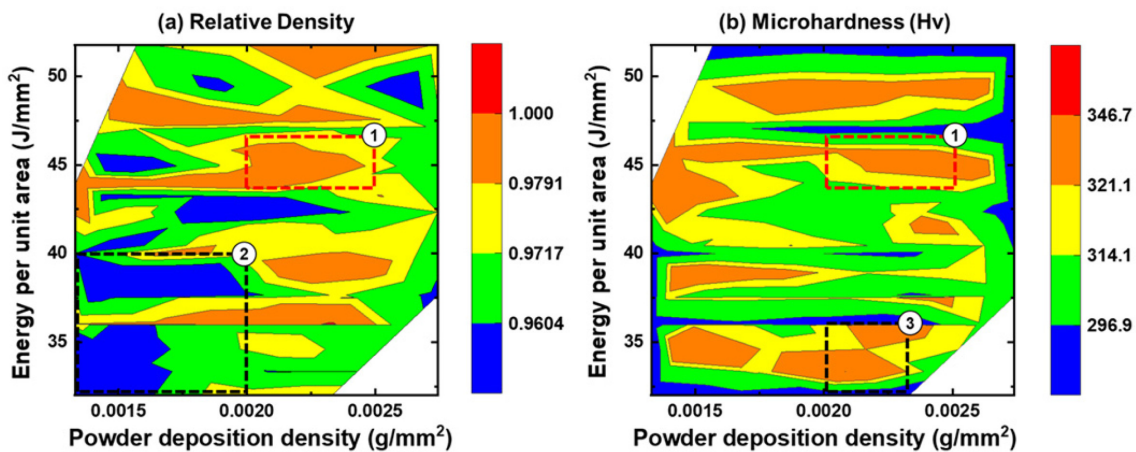


Fig. 5. (a) Relative density and (b) microhardness distribution contour maps of the Ti-6Al-4V alloy as the changes of energy per unit area and powder deposition density.

서는  $E_{\text{eff}}$ 와  $PDD_{\text{eff}}$  그래프의 기울기를 활용하여 레이저 클래딩재의 품질을 나눴으며, 해당 결과에서는 기울기가 증가할수록 단위 분말 당 높은 입열량을 가진다고 해석되었다[18]. 이를 본 연구결과에 적용 시 80개의 데이터베이스는 세가지 영역으로 나눌 수 있다. 첫째로,  $E_{\text{eff}}$ 가 낮고  $PDD_{\text{eff}}$  값이 높아 단위 질량 당 에너지가  $0.485 \text{ J/g}$  이하인 영역(Zone I)에서 대체적으로 낮은 상대밀도 및 경도 분포를 확인할 수 있다. 이 영역에서는 높은 분말 분급량 대비 충분한 에너지가 공급되지 않기 때문에 Lack of fusion과 같은 미세조직학적 결함이 발생되었을 것으로 예상된다[20]. 두번째로, 높은  $E_{\text{eff}}$ 와 함께 낮은  $PDD_{\text{eff}}$  값을 가지고 단위 질량 당 에너지가  $1.378 \text{ J/g}$  이상인 영역(Zone III)은 비교적 높은 경도 값에 비해 낮은 상대밀도를 갖는 것을 확인하였으며, 높은 입열량 대비 낮은 분말 공급량으로 인해 용융풀의 온도가 증가함에 따라 과용융 및 일부 분말의 기화 현상에 기인한 것으로 판단된다. 마지막으로

Zone I과 Zone III 영역 사이에 위치한 Zone II은 충분한 에너지 및 분말 분급량으로 인해 상대적으로 건전한 조형체 제조가 가능한 영역이다.

그러나 그림 4의 경우, 단위 면적당 에너지와 분말 증착 밀도에 따라 대각선으로 영역을 나누어 대체적인 상대밀도와 경도 분포 경향성을 파악한 결과이다. 따라서, 최대 밀도 및 최대경도를 갖는 영역을 도출하기 위해 직관적으로 접근해야 할 필요가 있다고 판단되어 그림 5와 같이 등고선도(Contour map)로 나타내었다. 그림 5(a)의 상대밀도 분포에 따르면  $PDD_{\text{eff}} = 0.0013 \sim 0.002 \text{ g/mm}^2$ ,  $E_{\text{eff}} = 32 \sim 40 \text{ J/mm}^2$ 인 영역(2번 영역)에서 낮은 상대밀도를 갖는 것이 확인되며 이는 앞서 그림 4(a)에서 Zone III 영역에서 확인한 바와 같이 낮은 분말 분급량 대비 높은 입열량으로 인해 에너지 과잉에 의한 과용융에 의한 것임을 알 수 있다. 반면, 그림 5(b)의 경도 분포에서  $PDD_{\text{eff}} = 0.002 \sim 0.0023 \text{ g/mm}^2$ ,  $E_{\text{eff}} = 32 \sim 36 \text{ J/mm}^2$  영역(3번 영역)에서의

높은 경도 분포는 분말 분급량 대비 낮은 레이저 출력을 갖는 구간에서 빠른 냉각속도에 의한 prior  $\beta$  grain의 크기 감소에 기인한다. 상기 결과들을 바탕으로 상대밀도와 경도 분포 데이터베이스를 overlap 시,  $E_{\text{eff}}=44\sim47\text{ J/mm}^2$ 와  $\text{PDD}_{\text{eff}}=0.002\sim0.0025\text{ g/mm}^2$  영역에서 공통적으로 최대밀도 및 최대경도를 갖는 영역(1번 영역)임을 확인할 수 있으며, 이는 표 2의 데이터에서 (52), (59), (60), (79), (80)에 해당된다.

따라서, 미세조직학적 인자 및 과용용으로 인해 단위 면적당 에너지와 분말 증착 밀도가 최소/최대인 영역에서 상대밀도와 경도 분포 결과에 일부 오차가 발생하였으나, 기존 DED 공정에 적용된 부피 에너지 밀도 모델과 달리 레이저 클래딩 공정에 적용된 계산식을 확장하여 분말 분급량 뿐만 아니라 레이저 출력, 스캔 속도 세가지 공정변수의 영향에 대해 최적화 영역을 설정할 수 있음을 확인하였다. 다만, 현재의 연구에서는 분말 분급량을 고려하기 위한 기본 모델 설정 및 실험결과와의 비교만을 수행하였고 분말 분급량을 고려하기 위한 1차원적인 수학적 모델을 구성하는 데에 한계가 있어 2차원 영역에서 중첩된 영역을 확인하는 방식으로 최적화를 수행하였으나 향후 직관적으로 최적화 조건을 인식하기 위해서는 분말 분급량과 에너지 밀도를 모두 고려할 개수 있는 수학적 모델의 구축이 필요할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 레이저 출력, 스캔 속도, 분말 분급량 변화에 따라 레이저 기반 적층제조 공정을 통해 제작된 80개의 Ti-6Al-4V 조형체의 밀도 및 경도 데이터베이스를 기반으로 물성 예측을 위한 모델을 구성하였다. 기존 부피 에너지 밀도와 비교 시 분말 분급량을 고려하지 못해 정량적인 에너지 밀도 예측이 어려웠으나, 레이저 클래딩 공정에 적용된 계산식을 확장하여 단위 면적당 에너지 및 분말 증착 밀도를 통해 밀도 및 경도가 동시에 최적화된 영역을 확인하였다. 본 결과를 통해 레이저 출력, 스캔 속도 뿐만 아니라 분말 분급량을 포함한 DED 공정최적화가 가능하였고, 해당 모델을 기반으로 광범위한 공정변수의 사전 식별을 통해 고밀도, 고강도 조형체 제조가 가능한 공정 예측을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

#### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea

government (MSIT) (2020R1A4A3079417). This work was also financially supported by the Technology Innovation Program (20009993) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE).

#### References

- [1] M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert and C. Leyens: Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, (2003).
- [2] M. J. Donachie: Titanium: A Technical Guide, 2nd ed., ASM International, Materials Park, OH., (2000) 369.
- [3] Z. M. Wang and E. O. Ezugwu: J. Mater. Process. Technol., **68** (1997) 262.
- [4] R. M. Mahamood and E. T. Akinlabi: Lasers Manuf. Mater. Process., **3** (2016) 9.
- [5] P. Ferro, R. Meneghello, G. Savio and F. Berto: Int. J. Adv. Manuf. Tech., **110** (2020) 1911.
- [6] J. Han, J. Yang, H. Yu, J. Yin, M. Gao, Z. Wang and X. Zeng: Rapid Prototyping. J., **23** (2017) 217.
- [7] M. Z. Anna: Metals-Basel., **12** (2019) 2331.
- [8] L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J.V. Humbeeck and J-P. Kruth: Acta Mater., **58** (2010) 3303.
- [9] W. Xu, S. Sun, J. Elambasseril, Q. Liu, M. Brandt and M. Qian: JOM., **67** (2015) 668.
- [10] X. Tian, J. Günster, J. Melcher, D. Li and J.G. Heinrich: J. Eur. Ceram. Soc., **29** (2009) 1903.
- [11] H. Gong, H. Gu, K. Zeng, J. J. S. Dilip, D. Pal and B. Stucker: Solid Free. Fabr. Symp., (2014) 256.
- [12] L. C. Zhang and T. B. Sercombe: Key. Eng. Mater., **520** (2012) 226.
- [13] A. Simchi: Mater. Sci. Eng. A., **428** (2006) 148.
- [14] T. Peng and C. Chan: Int. J. Pr. Eng. Man-Gt., **5** (2018) 55.
- [15] J. D. Majumdar and I. Manna: Sadhana-Acad. P. Eng. S., **28** (2003) 495.
- [16] J. H. Lee, M. H. Suh, J. O. Kim and Y. H. Han: Korean Society of Laser Process., **2** (1999) 34.
- [17] Z. Xiang, M. Yin, G. Dong, X. Mei and G. Yin: Results Phys., **9** (2018) 939.
- [18] S. F. Corbin, E. Toyserkani and A. Khajepour: Mater. Sci. Eng. A., **354** (2003) 48.
- [19] A. Emamian, S. F. Corbin and A. Khajepour: Surf. Coat. Technol., **205** (2010) 2007.
- [20] D. Nursyifaulkhair, N. Park, E. R. Baek and J.-B. L: J. Weld. Join., **37** (2019) 579.