

## 선택적 레이저 용융 공정의 공정변수 평가를 위한 용융풀 유한요소 모델

이강현<sup>1)</sup> · 윤군진<sup>\*,1),2)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 기계항공공학부

<sup>2)</sup> 서울대학교 항공우주신기술연구소

## A Finite Element Model of Melt Pool for the Evaluation of Selective Laser Melting Process Parameters

Kanghyun Lee<sup>1)</sup> · Gun Jin Yun<sup>\*,1),2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

<sup>2)</sup> Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Korea

(Received 22 January 2020 / Revised 3 April 2020 / Accepted 17 April 2020)

### Abstract

Selective laser melting(SLM) is one of the powder bed fusion(PBF) processes, which enables quicker production of nearly fully dense metal parts with a complex geometry at a moderate cost. However, the process still lacks knowledge and the experimental evaluation of possible process parameter sets is costly. Thus, this study presents a finite element analysis model of the SLM process to predict the melt pool characteristics. The physical phenomena including the phase transformation and the degree of consolidation are considered in the model with the effective method to model the volume shrinkage and the evaporated material removal. The proposed model is used to predict the melt pool dimensions and validated with the experimental results from single track scanning process of Ti-6Al-4V. The analysis result agrees with the measured data with a reasonable accuracy and the result is then used to evaluated each of the process parameter set.

Key Words : 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting), 용융풀(Melt Pool), 공정변수(Process Parameter), 유한요소 해석(Finite Element Analysis), Ti-6Al-4V

### 1. 서론

적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 기술은 사용자가 입력한 CAD 데이터에 따라 원하는 위치에 재료를 적층하여 3차원 형상을 성형하는 기술로, 정밀정형(near-net shape forming)이 가능하고 높은 설계 자유도를 가지는 것이 특징이다. 이러한 적층 제조 기술은 재

\* Corresponding author, E-mail: [gunjin.yun@sun.ac.kr](mailto:gunjin.yun@sun.ac.kr)  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

료의 적층 방식에 따라 재료 압출(material extrusion), 광 중합(vat photopolymerization), 직접 분사(Directed Energy Deposition, DED), 분말 베드 용융(Powder Bed Fusion, PBF) 등 총 7가지 방식으로 분류된다<sup>[1]</sup>. 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM)은 PBF 방식의 적층 제조 기술 중 하나로, 복잡한 형상의 금속 부품을 높은 효율성과 정밀도로 성형할 수 있어 최근 항공우주, 자동차, 에너지 산업 등, 다양한 산업 분야에서 각광 받고 있다<sup>[2-5]</sup>.

SLM 공정 장비는 Fig. 1과 같이 기본적으로 분말공급 장치와 레이저에 의해 분말이 용융되는 빌드 플랫폼으로 구성되어 있다. 공정이 시작되면 평균 지름 약 15-45  $\mu\text{m}$  크기의 구형 형태의 분말은 분말 공급 장치를 통해 빌드 플랫폼으로 이송되고 수십  $\mu\text{m}$  두께의 얇은 층 형태로 분포된다<sup>[6]</sup>. 이송된 분말은 CAD 데이터에 따라 레이저 빔에 의해 선택적으로 조사되며, 한 층의 레이저 스캔이 끝나면 새로운 분말 층이 공급되게 된다. 이 작업을 반복 수행하여 최종적으로 3차원 물체를 제작할 수 있다.

유사한 금속 3D 프린팅 공정인 선택적 레이저 소결(Selective Laser Sintering, SLS)과 달리, SLM은 공정 중 재료의 완전 용융(full melting)이 일어나게 된다<sup>[7]</sup>. 이로 인해 SLM 공정은 고밀도 부품 제작이 가능하여 상대적으로 높은 기계적 물성을 기대할 수 있다. 또한 용융된 재료는 100-1200 [mm/s]의 레이저 스캔 속도로 인해 약  $10^3$ - $10^8$  [K/s]로 빠르게 냉각되며 균일하고 조밀한 미세구조를 형성하게 된다<sup>[8]</sup>. 따라서 SLM 공정을 적용한 합금은 기존 공법으로 제작된 합금과 비교했을 때 상대적으로 우수한 강도, 인성을 지니게 된다<sup>[9]</sup>. SLM은 이러한 공정 특성과 스테인리스강, 니켈기 초합금, 타이타늄 합금, 알루미늄 합금, 코발트 크롬계 합금 등 다양한 재료에 적용 가능한 점으로 인해 학계의 많은 관심 또한 받고 있다<sup>[10-14]</sup>.

그러나 SLM은 공정 특성상 구형 분말을 고형화(consolidation)시키는 과정을 수반하고, 국부적인 급속 가열/냉각 과정이 일어나 기공 및 잔류응력 형성 등의 문제가 발생한다. 특히, 공정 중 형성되는 용융풀(melt pool)은 부품의 기공률과 표면 거칠기에 큰 영향을 끼치므로 적절한 공정변수를 설정하여 이를 제어하여야 한다<sup>[15]</sup>.

한편, SLM 공정은 다양한 공정변수의 영향을 받기 때문에 공정 제어 및 최적화된 공정 윈도우 확보에 대한 연구는 어려움을 겪고 있다. SLM 공정 변수에는

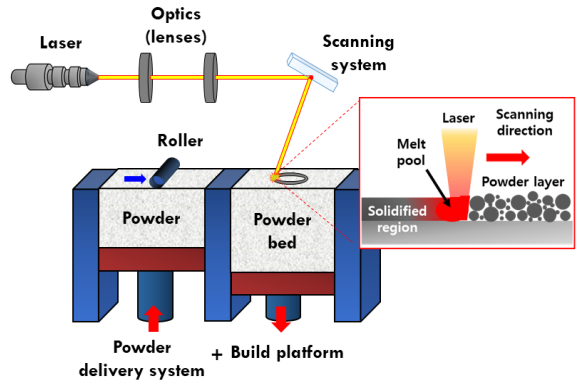


Fig. 1. Schematic diagram of SLM process

레이저 파워(laser power), 스캔 속도(scan speed), 레이저 두께(layer thickness), 헤치 거리(hatch distance) 등이 포함되며, 실험을 통해 각 공정 변수의 영향을 모두 파악하기에는 막대한 비용과 시간이 요구된다. 따라서 이에 대한 해결책으로 SLM 공정의 수치 모델 구축을 통한 해석적 기법들이 최근 연구되고 있다<sup>[15-18]</sup>.

Fu 등<sup>[15]</sup>은 상변화와 온도 의존적인 물성 변화를 고려한 마이크로 스케일 SLM 유한요소해석 모델을 개발하였으며, 재료의 적층을 고려한 온도 이력과 용융풀 크기를 예측하였다. Huessein 등<sup>[16]</sup>은 단일 레이어 SLM 공정 해석 모델을 구축 후, 열-구조 연성해석을 수행하여 용융풀 크기를 비롯한 온도 이력 변화와 잔류 응력 분포를 해석하였다. Ladani 등<sup>[17]</sup>은 용융풀 해석의 정확도 향상을 위해 용융풀 내 이류(advection) 현상을 반영한 액체 상태 재료의 유효열전도도(effective conductivity)를 해석에 적용하였다. Roy 등<sup>[18]</sup>은 두 개의 상태 변수를 사용하여 상변화와 재료의 고형화 정도(degree of consolidation)를 열해석 지배방정식에 반영하고 단일 트랙 스캔 SLM 공정 해석을 수행하였다.

상기한 선행연구들이 제시한 바와 같이 SLM 공정의 용융풀 해석을 통해 충분한 용입 깊이(melt penetration depth)와 용융 폭(melt width)이 형성되는지 확인하여 공정의 안정성을 예측할 수 있다. 하지만 실제 SLM 공정 시에는 열원에 의한 분말-액체-고체(bulk solid) 상태 변화뿐만이 아닌 분말 기공률에 의한 부피 수축 및 고에너지 구간에서의 재료 증발 현상이 일어난다. 이는 레이저와 재료의 상호작용 및 온도 변화에 직접적인 영향을 주기 때문에 Fu<sup>[15]</sup> 등이 지적한 바와 같이 해석 결과와 실제 실험 간 오차 발생의 원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 SLM 공정 변수의 영향 파악

및 결합 예측을 위한 새로운 용융풀 유한요소해석 모델을 제시하고자 한다. 제시한 해석 모델은 재료 상변화를 비롯한 온도 의존적인 물성을 적용하였으며, 분말 층의 부피 수축과 재료 증발을 해석에 고려하였다. 해석은 상용 유한요소해석 툴인 ABAQUS/Standard를 사용하였으며, 열원과 재료 모델을 비롯한 모든 코드는 해당하는 user-subroutine을 통해 작성되었다. 해석 모델 검증을 위해 용융풀 해석 결과와 문헌 실험 결과를 비교하였고, 기존해석 방법과의 성능을 비교 분석하였다. 또한 본 연구에서 제시한 모델을 통한 해석 기반 실공정 윈도우 도출의 가능성을 검토하였다.

## 2. SLM 공정 수치 모델

SLM 공정 중 재료의 온도는 상온에서 재료의 용융 온도까지 변화하며, 재료의 상변화와 극심한 물성 변화가 일어난다. 따라서 SLM 공정 해석을 위해서는 이를 고려하여 재료 모델을 정의해야 한다. 또한 해석 상에서 레이저는 시간 변화에 따른 이동 열원으로 묘사되기 때문에 이를 위한 모델과 코드 작성이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서 제시한 SLM 공정 해석 모델 구축의 상세한 과정은 다음과 같다.

### 2.1 SLM 공정 열원 모델

SLM 공정 해석의 열원은 2차원<sup>[15]</sup>, 또는 3차원<sup>[16-18]</sup> 열유속으로 모델링 된다. 일반적으로 분말 층의 두께는 수십  $\mu\text{m}$ 로 매우 얇아, 분말 층 표면에 작용하는 2차원 열원 모델을 가정하여 계산 비용을 줄일 수 있다. 하지만 레이저에 의한 열에너지는 분말 층의 기공률로 인해 분말 층 표면 밑까지 전달되기에, 본 연구에서는 3차원 체적 열원(volumetric heat source) 모델인 Goldak's semi-ellipsoid 모델<sup>[19]</sup>을 사용하였다.

$$Q(x,y,z,t) = \frac{2A_a P}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{(x+v_x t)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] \quad (1)$$

$A_a$ 는 에너지 흡수율(absorptivity),  $P$ 는 레이저 파워,  $v_x$ 는 스캔 속도,  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{c}$ 는 ellipsoid의 dimension을 의미하며 레이저 스폿 반경(laser spot radius)  $r$ , ellipsoid의 이심률(eccentricity)  $e_c$ , 분말 층의 두께  $d_p$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

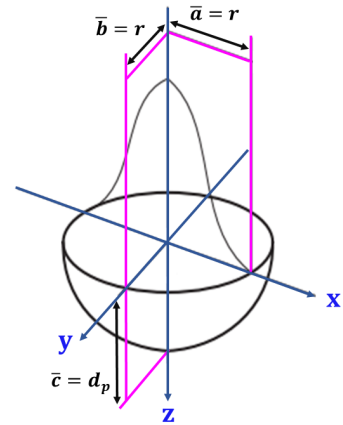


Fig. 2. Goldak's semi-ellipsoid model with SLM process parameters

$$\bar{a} = e_c r, \quad \bar{b} = r/e_c, \quad \bar{c} = d_p \quad (2)$$

이때 이심률  $e_c$ 는 해석의 정확도를 높이기 위해 실험 결과에 기반하여 조정되는 값이다. 하지만 본 논문에서는 주어진 공정 변수와 조건만을 가지고 해석을 수행하기 위해서 이를 1로 설정하고 열원을 모델링하였으며 이에 따른 열원의 형상은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 레이저 빔에 의한 체적 열유속  $Q$ 를 비균일 분포 열유속(nonuniform distributed heat flux)을 정의하기 위한 ABAQUS 서브루틴인 'DFLUX'를 통해 모델링하였다.

### 2.2 SLM 공정 재료 모델

SLM 공정은 공정 특성 상, 초기 분말 상태에서의 고형화 과정과 상변화 과정을 수반하기 때문에 해석을 위해서는 이를 고려하여 재료의 거동을 정의해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 상장(phase field) 모델에 기반한 2개의 상태 변수로 이루어진 에너지 균형 방정식을 적용하였으며 그 식은 다음과 같다<sup>[18]</sup>.

$$\frac{de}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{r},t) + Q(\mathbf{r},t) \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (4)$$

$$e = C_s(\psi) T + \rho(\phi_f) [L_f + (C_l - C_s(\psi))(T - T_{mf})] \quad (5)$$

$$\phi_f = \frac{1}{2} \left\{ \tanh \left[ \frac{A(T - T_{mf})}{(T_f - T_s)} \right] + 1 \right\} \quad (6)$$

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \max[\phi(\mathbf{r}, t'), \psi(\mathbf{r}, t)], \quad 0 \leq t' \leq t \quad (7)$$

$e$ 는 에너지 밀도,  $t$ 는 시간,  $\mathbf{q}$ 는 열유속 벡터,  $\mathbf{r}$ 은 좌표 벡터,  $k$ 는 재료의 열전도도,  $C_s$ 와  $C_l$ 은 각각 고체와 액체 상태에서의 체적 열용량,  $L_f$ 는 용융 잠열(latent heat of melting),  $T$ 은 현재 온도,  $T_{lf}$ 와  $T_s$ 는 각각 용융 구간에서의 액상선 온도(liquidus temperature)와 고상선 온도(solidus temperature)를,  $T_{mf} = (T_{lf} + T_s)/2$ 은 평균 용융 온도(average melting temperature)를 의미한다. 함수  $p$ 는 열역학 충족(thermodynamically consistent) 상장 모델에 기반한 보간 함수(interpolation function)으로 다음과 같이 정의된다<sup>[20]</sup>.

$$p(\phi) = \phi^3(10 - 15\phi + 6\phi^2) \quad (8)$$

$\phi_f$ 는 재료의 상(고상/액상)을 정의하기 위한 상태 변수로 온도 값에 따라  $T < T_s$ 일 경우  $\phi_f = 0$ ,  $T > T_{lf}$ 일 경우  $\phi_f = 1$ ,  $T_s < T < T_{lf}$ 일 경우는 0과 1사이의 값(mushy state)을 가진다.  $A$ 는 상변화 구간의 sharpness를 지정하기 위한 상수로, smooth transition을 위해 본 연구에서는  $A = 5$ 로 설정하였다<sup>[18]</sup>.  $\psi$ 는 재료의 고형화 정도를 나타내기 위한 상태 변수로, 식 (7)과 같이  $\phi_f$ 의 피크 값으로 상변화 이력을 기록하여 porous/dense 상태를 구분할 수 있다.

또한 재료의 증발 잠열(latent heat of evaporation)을 고려하고 액상/기상 상변화 구간을 정의하기 위해 새로운 상태 변수를 정의하여 식 (5)에 다음과 같이 항을 추가하였다.

$$e = C_s(\psi)T + p(\phi_f)[L_f + (C_l - C_s(\psi))(T - T_{mf})] + p(\phi_v)L_v \quad (9)$$

$$\phi_v = \frac{1}{2} \left[ \tanh \left[ \frac{A(T - T_{mv})}{(T_v - T_w)} \right] + 1 \right] \quad (10)$$

이때,  $L_v$ 는 재료의 증발 잠열,  $\phi_v$ 는 재료의 상(액상/기상)을 정의하기 위한 상태변수이며  $T_v$ 는 증발 온도(evaporation temperature),  $T_w$ 는 액상-기상 변화 구간에서의 액상선 온도를 의미하며  $T_{mv} = (T_v + T_w)/2$ 이다. 이에 따른 재료의 초기 상태(initially porous/initially dense)와 온도 변화에 따른 에너지 밀도 변화는 Fig. 3와 같이 계산할 수 있다<sup>[18]</sup>.

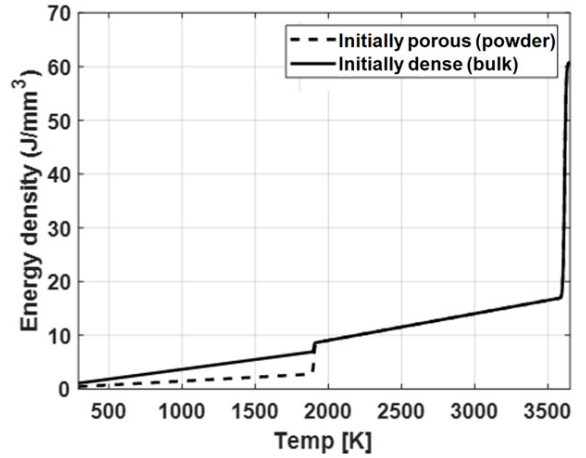


Fig. 3. Energy density-temperature graph of Ti-6Al-4V for different initial states

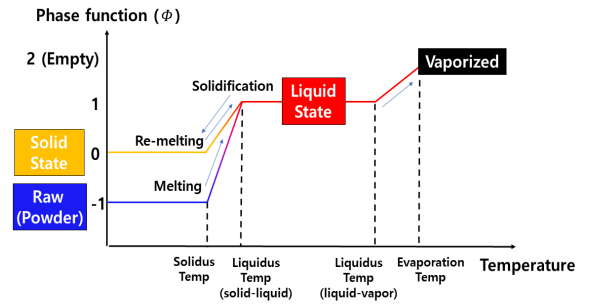


Fig. 4. Material state variation during SLM process

이러한 상태 변수들과 현재 온도 값을 통해 재료의 상태를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 또한 각 물질점에서 재료의 상태를 쉽게 판별하기 위해 phase function  $\phi$ 을 다음과 같이 지정하였다.

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \begin{cases} -1 & (T < T_{lf} : \text{powder phase for initially porous}) \\ 0 & (T < T_{lf} : \text{dense solid phase after melting}) \\ 1 & (T > T_{lf} : \text{liquid melting phase}) \\ 2 & (T > T_v : \text{vaporized(empty space)}) \end{cases} \quad (11)$$

상기한 재료 모델을 해석 상에 적용하기 위해 재료의 열적 거동을 정의할 수 있는 ABAQUS 서브루틴 ‘UMATH’를 사용하여 코드를 작성하였다. 또한 해석 상에서 재료의 상태를 매 시간 증분마다 확인하고 상태변수를 결정하기 위해서 서브루틴 ‘USDFLD’를 사용하였다.

2.3 분말층의 부피 수축 및 증발

SLM 공정 중 분말층은 용융 과정에서 분말 상태 재료의 밀집화 현상이 일어나고<sup>[21]</sup>, 초기 기공률  $\epsilon_0$ 로 인해 일정 부피 만큼 수축하게 된다(Fig. 5). 분말층의 부피가 수축할 경우, 레이저 빔은 표면에 수직인 방향으로 더 깊게 관통할 수 있으며 이는 용융풀 형상에 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 이러한 현상을 해석 상에서 고려하기 위해 분말 층의 재료가 용융 될 경우( $T > T_m$ ), 재료가 수축하였다고 가정하고 해당 요소의 열전도도를 0으로 만들어 비활성화시키는 방법을 사용하였다. 또한 수축한 깊이 만큼을 열유속에 고려하기 위해 식 (1)의 깊이 방향 거리  $z$ 를 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$z = z_0 - \epsilon_0 d_p \tag{12}$$

$z_0$ 는 분말층 표면의 초기 위치를 의미한다.

또한 공정 중, 과도한 에너지 입력으로 증발한 재료

는 아르곤 가스 등에 의해 날아가게 된다<sup>[22]</sup>. 이를 해석에 고려하기 위해 증발( $\phi = 2$ )된 요소 또한 부피 수축과 같은 방식으로 비활성화시키고, 각 요소마다 적층 방향으로 얼마 만큼의 재료 증발이 일어났는지를 확인하여 이를  $z$ 에 고려하면 다음과 같다.

$$z = z_0 - \epsilon_0 d_p - n_v h_e \tag{13}$$

$n_v$ 는 현재요소의 적층 방향에서 증발된 요소의 개수를,  $h_e$ 는 증발한 요소들의 적층 방향 길이를 의미한다. 분말층의 수축과 재료 증발로 인한 깊이 방향 거리는 Fig. 6과 같이 각 요소의 위치에 따라 다르게 적용되며, 상부 요소의 상태가 하부 요소에 적용되는 열유속에 영향을 끼침을 보여준다.

3. SLM 공정 용융풀 해석 및 결과 분석

제시한 용융풀 해석 모델 검증을 위해 예측한 용융풀의 크기를 실험적으로 측정된 용융풀의 크기와 비교할 필요가 있다. Verhaeghe 등<sup>[23]</sup>은 Ti-6Al-4V 재료를 사용하여 각 공정 조건 별로 6번의 SLM 단일 트랙 스캔 실험을 수행하였고, 레이저 파워 변화에 따른 용융풀 크기 변화를 측정하였다. 본 논문에서는 해당 문헌에서 수행한 실험과 같은 공정 변수(Table 1)로 해석을 수행한 후, 문헌 실험 결과에 기반하여 제시한 모델의 성능을 검증하였다.

용융풀 해석을 위해 이동 열유속을 이용한 단일 트랙 스캔 SLM 공정 시뮬레이션을 위한 해석 형상과 초기조건을 Fig. 7과 같이 정의하였고, 해석을 위한 형상은 계산 시간 감소를 위해  $0.530 \times 0.28 \times 0.5$  mm(L × W × H) 크기의 대칭성을 이용한 half-symmetry 모델을 사용하였다. 또한 해석을 통한 공정 변수 평가를 위해 공정 후 각 재료 상태의 부피 분율을 분석하였다.

Table 1. SLM process parameters for analysis

Process parameter	Value
Laser power( $P$ )	20, 40, 60, 80 [W]
Scan speed ( $v_x$ )	200 [mm/s]
Layer thickness ( $h$ )	30 [ $\mu$ m]
Laser radius ( $r$ )	26 [ $\mu$ m]

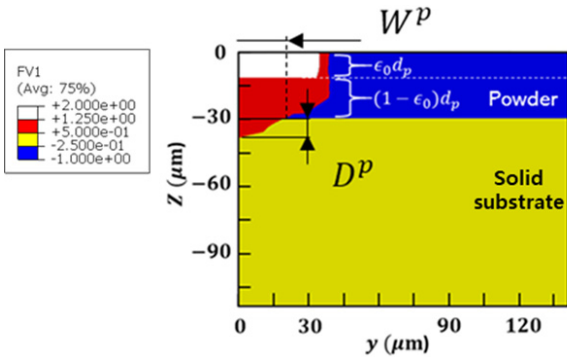


Fig. 5. Phase field with melt penetration depth( $D^p$ ) and width( $W^p$ )

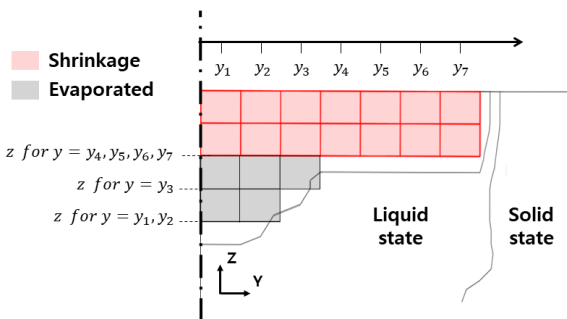


Fig. 6. Variation of distance from the beam center in melt depth direction

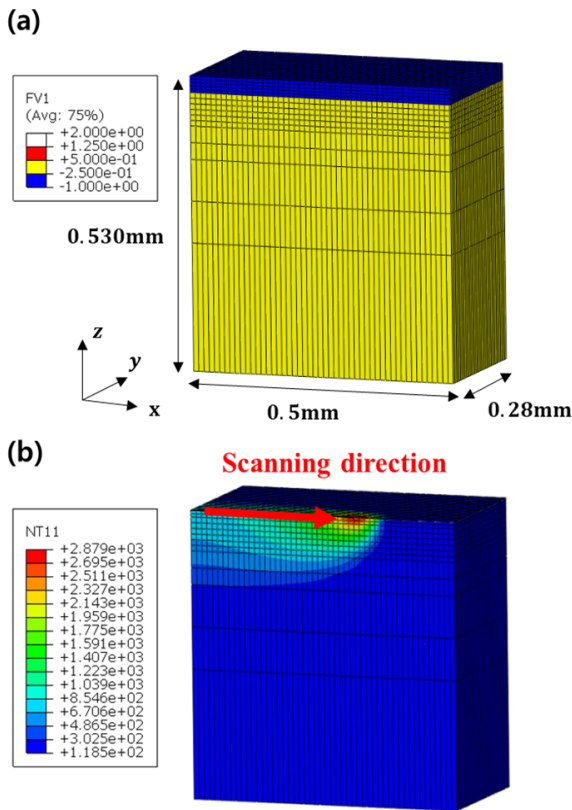


Fig. 7. (a) half-symmetry finite element model of single track laser scanning with initial material states, (b) temperature distribution during laser scanning

### 3.1 용융풀 형성

단일 트랙 스캔 해석을 수행하여 Fig. 5와 같이 용융풀의 형상을 예측할 수 있으며 레이저 파워 변화에 따른 용입 폭과 깊이는 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. 해석 및 실험 결과를 통해, 레이저 파워 증가에 따라 재료에 전달되는 에너지가 증가할수록, 용융풀의 크기 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

한편 20 W, 40 W의 레이저 파워에서는 부피 수축과 증발을 고려한 모델과 그렇지 않은 모델 모두 실험 결과와 비교하여 유사한 용융풀 크기를 예측하였음을 확인할 수 있다. 하지만 부피 수축과 증발을 고려하지 않은 모델의 경우, 용융풀의 크기와 레이저 파워가 거의 선형적인 관계를 보이고 레이저 파워가 증가할수록 실험 결과와의 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 레이저 파워가 증가할수록 재료의 온도

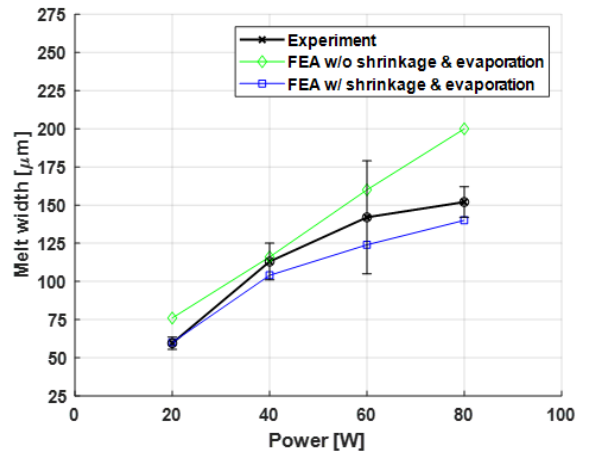


Fig. 8. Melt width with variation of laser power

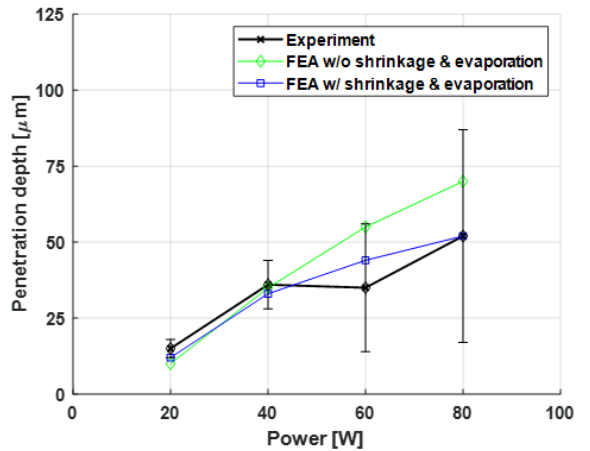


Fig. 9. Melt penetration depth with variation of laser power

가 추가적인 조건 없이 증가하기 때문이며, 예측한 용융풀의 크기 또한 실험 결과와 비교해 더 큰 값을 보임을 알 수 있다. 문헌 실험값과 해당 모델을 통해 예측한 용융 깊이의 평균 오차는 약 32.63 %, 용융 폭의 평균 오차는 약 18.66 %를 보였다.

반면에 부피 수축과 증발을 고려한 모델의 경우, 레이저 파워 증가에 따른 용입 깊이와 용융 폭의 변화가 실험 결과와 더 유사한 경향성과 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 문헌 실험값과 해당 모델을 통해 예측한 용융 깊이의 평균 오차는 약 10.76 %, 용융 폭의 평균 오차는 약 7.34 %로 앞선 모델과 비교해 더 높은 정확도를 보였다. 특히 앞선 모델의 경우, 레이

저 파워 증가와 용융풀의 크기 변화가 거의 선형적인 관계로 이루어졌지만, 부피 수축과 증발을 고려한 모델의 경우는 레이저 파워 증가에 따른 용융풀 크기 변화가 점차 완만해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 높은 레이저 파워로 인해 증발이 일어날 가능성이 높은 60 W, 80 W의 경우에서 더 강조된다. 이러한 현상은 증발 잠열에 의해 재료 온도 상승에 더 많은 에너지가 필요하게 되고, 증발로 인해 해당 요소가 비활성화되면 고온 상태의 재료를 통한 열전도가 제한되는 것으로 설명될 수 있다.

해석 결과를 통해 본 연구에서 제시한 모델이 주어진 공정 조건에서 용융풀 크기 예측의 정확도를 향상할 수 있음을 검증하였다. 그러나 적합한 공정 조건보다 레이저 에너지가 더 증가하고 깊은 용입 깊이가 형성되면, 재료 증발과 반발 압력(recoil pressure)으로 인한 용융 표면 놀림 현상 및 키홀(keyhole) 모드 거동이 나타나 용융풀의 형성 메커니즘이 크게 달라질 수 있다<sup>[24]</sup>. 따라서 후후 과제에서는 제시한 해석 모델의 강건성 향상을 위해 더 넓은 범위의 공정 조건에서 해석 결과를 검증하고, 각 조건에서 어떠한 메커니즘으로 용융풀이 형성되는지 확인할 필요가 있다.

### 3.2 재료 상태 부피 분율

재료 증발에 의한 영향을 더 자세히 파악하고, 공정 변수를 평가하기 위해 레이저 스캔이 끝난 후의 재료 상태를 분석하였다. 레이저 스캔 후, 스캔 트랙 내에서 각 재료 상태의 부피 분율은 나타난 결과는 Fig. 10과 같다.

먼저 20 W의 경우, 용융되지 않은 부분의 부피 분율이 약 7.5 %로 이는 레이저를 통해 전달된 에너지가 필요한 영역을 충분히 용융시키기에는 부족했음을 의미한다. 이와 같이 불충분한 에너지로 재료가 충분히 용융되지 않을 경우, 융합 부족 기공(lack of fusion pore)이 발생하게 된다<sup>[25]</sup>. 따라서 결함을 최소화하기 위해서는 레이저 파워를 증가시키거나 스캔 속도를 감소시킬 필요가 있다. 40 W의 경우, 용융되지 않은 부분 없이 모든 영역이 고형화되는 가장 이상적인 공정 결과를 보여준다. 이는 앞선 20 W 해석 결과에서 얻은 결론과 같이, 에너지 불충분 문제를 레이저 파워 증가를 통해 해결하고 결함을 감소시킬 수 있음을 보여준다. 60 W의 경우, 높은 에너지로 인해 재료의 약 18.8 %가 증발한 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 높은 에너지로 재료의 과도한 증발이 일어날 경우, 기포

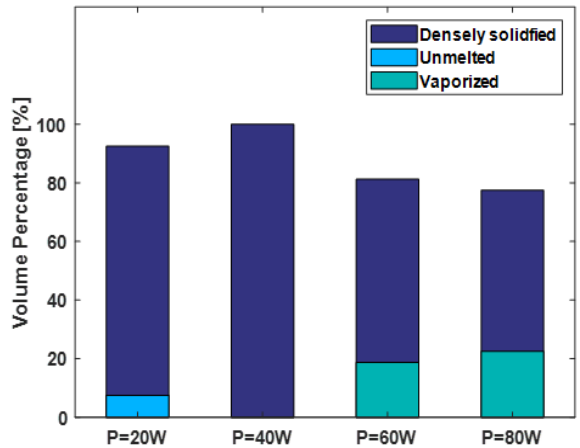


Fig. 10. Volume fraction of each material state with various laser powers

가 트랩 되어 키홀 기공(keyhole pore)이 발생하게 된다<sup>[26]</sup>. 따라서 결함을 최소화하기 위해선 레이저 파워를 감소시키거나 스캔 속도를 줄여 재료에 전달되는 에너지를 감소시켜야 한다. 80 W의 경우는 전달되는 에너지가 더 증가하여 증발한 영역의 부피 분율이 약 22.5 %로 증가한 것을 확인할 수 있다.

이러한 분석은 임의의 SLM 공정 변수 조합이 안정적이거나 결함(에너지 불충분 또는 에너지 과잉)이 있는 공정이라고 판단하는 지표가 될 수 있다. 또한 제시한 해석 모델을 통해 공정 결함이 예측된 경우, 안정적인 공정이 이루어질 수 있도록 공정 변수를 조정하여 적절한 공정 변수 조합을 확보할 수 있음을 보여준다.

## 4. 결론

본 연구에서는 SLM 공정의 용융풀 해석 모델을 제시하고 공정 변수 변화에 따른 용융풀 해석을 수행하였다. 해석 결과, 레이저 파워가 증가할수록 더 큰 용입 깊이와 용융 폭이 형성되고, 재료의 부피 수축과 증발을 고려한 모델이 그렇지 않은 모델보다 더 정확한 용융풀 크기를 예측함을 확인할 수 있었다. 또한 공정 후 스캔 트랙 내의 재료 상태를 분석함으로써 공정 변수를 평가하고, 분석 결과에 따라 공정 변수를 조정하여 결함을 감소시킬 수 있음을 보였다. 이는 제시한 방법을 통해 재료의 융합 부족 현상과 과도한

증발을 예측하여 안정한 공정 윈도우 확보에 기여할 수 있음을 보여준다.

후속 연구로는 실제로 해석 기반 공정 윈도우를 도출하고, 공정 경계에서 SLM 공정으로 시편을 제작하여 밀도 및 기공의 유형을 분석하고자 한다. 또한 해석 결과와 각 공정 변수로 제작한 시편의 기계적 물성을 분석함으로써, 원하는 물성을 얻기 위한 공정 설계 및 최적화에 대한 연구를 진행할 계획이다.

## 후 기

This work was supported by Korea Evaluation Institute of Industrial Technology(KEIT) grant of the Korea government(MOTIE) (No. 20004662, Industrial Technology Innovation Program) and the Institute of Engineering Research at Seoul National University. Authors are grateful for their supports.

## References

- [1] ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies, & ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. Subcommittee F42. 91 on Terminology, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," ASTM International, 2012.
- [2] M. Wong, S. Tsopanos, C. J. Sutcliffe and I. Owen, "Selective Laser Melting of Heat Transfer Devices" Rapid Prototyping Journal, Vol. 13, No. 5, pp. 291-297, 2007.
- [3] P. Rochus, J. Y. Plessier, M. Van Elsen, J. P. Kruth, R. Carrus and T. Dormal, "New Applications of Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing (RP/RM) Technologies for Space Instrumentation," Acta Astronautica, Vol. 61, No. 1-6, pp. 352-359, 2007.
- [4] B. Vandenbroucke and J. P. Kruth, "Selective Laser Melting of Biocompatible Metals for Rapid Manufacturing of Medical Parts," Rapid Prototyping Journal, Vol. 13, No. 4, pp. 196-203, 2007.
- [5] A. T. Clare, P. R. Chalker, S. Davies, C. J. Sutcliffe and S. Tsopanos, "Selective Laser Melting of High Aspect Ratio 3D Nickel-Titanium Structures Two Way Trained for MEMS Applications," International Journal of Mechanics and Materials in Design, Vol. 4, No. 2, pp. 181-187, 2008.
- [6] Majumdar, T., Bazin, T., Ribeiro, E. M. C., Frith, J. E., & Birbilis, N., "Understanding the Effects of PBF Process Parameter Interplay on Ti-6Al-4V Surface Properties," PloS One, 14(8), 2019.
- [7] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh and S. L. Sing, "Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications," Applied Physics Reviews, Vol. 2, No. 4, 041101, 2015.
- [8] S. L. Sing, J. An, W. Y. Yeong and F. E. Wiria, "Laser and Electron-beam Powder-bed Additive Manufacturing of Metallic Implants: A Review on Processes, Materials and Designs," Journal of Orthopaedic Research, Vol. 34, No. 3, pp. 369-385, 2016.
- [9] J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell and Y. Shi, "A Review of Selective Laser Melting of Aluminum Alloys: Processing, Microstructure, Property and Developing Trends," Journal of Materials Science & Technology, Vol. 35, No. 2, pp. 270-284, 2019.
- [10] M. Rombouts, J. P. Kruth, L. Froyen and P. Mercelis, "Fundamentals of Selective Laser Melting of Alloyed Steel Powders," CIRP annals, Vol. 55, No. 1, pp. 187-192, 2006.
- [11] L. Rickenbacher, T. Etter, S. Hövel and K. Wegener, "High Temperature Material Properties of IN738LC Processed by Selective Laser Melting(SLM) Technology," Rapid Prototyping Journal, Vol. 19, No. 4, pp. 282-290, 2013.
- [12] D. Gu, Y. C. Hagedorn, W. Meiners, K. Wissenbach and R. Poprawe, "Selective Laser Melting of In-situ TiC/Ti5Si3 Composites with Novel Reinforcement Architecture and Elevated Performance," Surface and Coatings Technology, Vol. 205, No. 10, pp. 3285-3292, 2011.
- [13] C. Weingarten, D. Buchbinder, N. Pirch, W. Meiners, K. Wissenbach and R. Poprawe, "Formation and Reduction of Hydrogen Porosity during Selective



- Laser Melting of AlSi10Mg,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 221, pp. 112-120, 2015.
- [14] F. S. Schwindling, M. Seubert, S. Rues, U. Koke, M. Schmitter and T. Stober, “Two-body Wear of Cocr Fabricated by Selective Laser Melting Compared with Different Dental Alloys,” *Tribology Letters*, Vol. 60, No. 2, p. 25, 2015.
- [15] C. H. Fu and Y. B. Guo, “Three-dimensional Temperature Gradient Mechanism in Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, No. 6, 061004, 2014.
- [16] A. Hussein, L. Hao, C. Yan and R. Everson, “Finite Element Simulation of the Temperature and Stress Fields in Single Layers Built Without-support in Selective Laser Melting,” *Materials & Design* (1980-2015), Vol. 52, pp. 638-647, 2013.
- [17] L. Ladani, J. Romano, W. Brindley and S. Burlatsky, “Effective Liquid Conductivity for Improved Simulation of Thermal Transport in Laser Beam Melting Powder Bed Technology,” *Additive Manufacturing*, Vol. 14, pp. 13-23, 2017.
- [18] S. Roy, M. Juha, M. S. Shephard and A. M. Maniatty, “Heat Transfer Model and Finite Element Formulation for Simulation of Selective Laser Melting,” *Computational Mechanics*, Vol. 62, No. 3, pp. 273-284, 2018.
- [19] J. Goldak, A. Chakravarti and M. Bibby, “A New Finite Element Model for Welding Heat Sources,” *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15, No. 2, pp. 299-305, 1984.
- [20] S. L. Wang, R. F. Sekerka, A. A. Wheeler, B. T. Murray, S. R. Coriell, R. Braun and G. B. McFadden, “Thermodynamically-consistent Phase-field Models for Solidification,” *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 69, No. 1-2, pp. 189-200, 1993.
- [21] D. Gu, Y. C. Hagedorn, W. Meiners, G. Meng, R. J. S. Batista, K. Wissenbach and R. Poprawe, “Densification Behavior, Microstructure Evolution, and Wear Performance of Selective Laser Melting Processed Commercially Pure Titanium,” *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 9, pp. 3849-3860, 2012.
- [22] C. Pazuon, E. Hryha, P. Forêt and L. Nyborg, “Effect of Argon and Nitrogen Atmospheres on the Properties of Stainless Steel 316 L Parts Produced by Laser-powder Bed Fusion,” *Materials & Design*, Vol. 179, 107873, 2019.
- [23] F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Heulens and L. Pandelaers, “A Pragmatic Model for Selective Laser Melting with Evaporation,” *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 20, pp. 6006-6012, 2009.
- [24] J. Trapp, A. M. Rubenchik, G. Guss and M. J. Matthews, “In Situ Absorptivity Measurements of Metallic Powders During Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing,” *Applied Materials Today*, Vol. 9, pp. 341-349, 2017.
- [25] S. Coeck, M. Bisht, J. Plas and F. Verbist, “Prediction of Lack of Fusion Porosity in Selective Laser Melting Based on Melt Pool Monitoring Data,” *Additive Manufacturing*, Vol. 25, pp. 347-356, 2019.
- [26] S. Shrestha, T. Starr and K. Chou, “A Study of Keyhole Porosity in Selective Laser Melting: Single-Track Scanning with Micro-CT Analysis,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 141, No. 7, 071004, 2019.