금속 적층제조된 대형 실린더 부품의 열변형에 미치는 적층 높이 및 재료 특성 영향에 관한 해석

이슬비* · 방태양* · 김우종** · 강민철***,† · 최윤석*,††

*부산대학교 재료공학과

**대건테크

***3D프린팅연구조합

Numerical Study on Effect of the Building Height and Material Properties on Thermal Distortion of Large Cylinders Manufactured through Laser Powder Bed Fusion

Seulbi Lee*, Tae Yang Bang*, Woojong Kim**, Mincheol Kang***,†, and Yoon Suk Choi*,††

*School of Materials Science & Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

**Daeguntech, Changwon, 51389, Korea

***3D Printing Research Organization, Seongnam, 13488, Korea

†Corresponding author: †mkang@3dpro.or.kr, ††choiys@pusan.ac.kr

(Received April 5, 2021; Revised April 28, 2021; Accepted May 7, 2021)

Abstract

The laser powder bed fusion technique involves depositing layers by selectively melting a material. This leads to rapid melting and solidification, followed by repeated reheating and remelting. The complex thermal hysteresis and resultant thermal gradient inevitably cause thermal stress and distortion in additively manufactured products. The thermal stress and distortion lead to dimensional inaccuracies, defects such as delamination and cracking, and finally, adverse effects on the product life. In this study, a thermomechanical analysis of a large cylinder (hollow shape, with a height of 750 mm, an outer diameter of 500 mm, and a thickness of 20 mm) was performed using the finite element method to investigate the effects of building height and material properties on thermal distortion. Specifically, the evolution of thermal distortion was systematically interpreted with the thermal hysteresis. Depending on the building height of the cylinder, the thermal hysteresis was influenced by the bed plate and the thermal effect of the predeposited and postdeposited layers. In addition, the thermal distortion tendencies of Ti-6Al-4V and Inconel 718 metal powders were examined based on the material properties, particularly thermal diffusivity. The maximum thermal distortion occurred at approximately 100 mm below the top surface of the cylinder for both materials. Moreover, the thermal distortion of the Ti-6Al-4V was more significant than that of Inconel 718 because of the lower thermal diffusivity of the former.

Key Words: Powder bed fusion, Thermo-mechanical analysis, Thermal distortion, Thermal hysteresis, Material properties, Metal powders

1. 서 론

적층제조(Additive manufacturing)는 3차원 CAD (computer-aided design) 파일에 기반하여 금속, 플

라스틱, 세라믹 등의 소재를 layer-by-layer 방식으로 제작하는 공정이다. ASTM F2792 에서는 적층제조 기술을 총 7가지로 분류하고 있으며, 이들 중 Powder bed fusion (PBF)은 금속 분말을 수십 μm 두께로 도포한 분말 베드에 고에너지 열원을 조사하여 선택적으

로 용융 및 응고시켜 적층하는 방식이다. PBF는 금속 적층제조 기술 중에서 높은 정밀도를 가지고 복잡한 형상의 제품을 제작할 수 있는 장점이 있다. PBF는 레이저, 전자 빔과 같은 고에너지 열원을 사용하여 금속 분말을 용융-응고시키는 작업을 연속적으로 수행한다. 이때, 금속 분말의 용융-응고는 마이크로 스케일의 국부적인 영역에서 밀리 초(ms) 이내에 발생하기 때문에, 급격한 온도 변화와 함께 주변 영역과 큰 열 구배를 유발한다. 또한, Layer-by-layer 적층 과정으로 인해 열원에 의한 직접적인 열영향(용융-응고) 뿐 아니라 주변 tracks 및 layers 적층으로 인한 간접적인 열영향으로 재 용융, 재 가열, 재 냉각에 의한 복잡한 열이력이 나타난다¹⁾. 이러한 열적 현상에 의해 소재는 팽창 및 수축 과정에서 열응력과 변형이 수반된다. 고에너지 열원을 사용하는 적층제조 공정에서 열응력과 변형의 발생은 필연적이며, 이로 인해 적층제조된 제품의 기하학적 정밀도가 감소하고, 더 나아가 뒤틀림, 박리, 균열과 같은 결함을 발생시켜 제품 수명에도 영향을 미친다²⁻⁸⁾.

따라서, 적층제조 공정시 열응력과 변형을 최소화하기 위해 실험과 전산해석을 이용하여 열원의 출력, 스캔 속도, 스캔 전략, 분말 베드 두께 등에 대한 공정 변수 최적화 연구가 진행되고 있다. 하지만, 실험을 통한 공정 변수 최적화는 실험을 수행하는데 상당한 시간과 비용이 소모되기 때문에, 설계 단계에서 전산해석이 주로 활용된다. 전산해석은 스케일에 따라 마이크로/메조 스케일 해석과 매크로 스케일 해석으로 구분한다⁹⁾. 마이크로/메조 스케일 해석은 Single track 및 multi-tracks/layers 적층을 모사하며, 용융풀(melt pool) 스케일에서 열응력 및 변형에 미치는 공정변수¹⁰⁻¹⁵⁾ 및 소재 특성^{11,12)} 등의 영향을 연구한다. 비교적 정확한 해석이 가능하지만, 실제 적층 부품의 복잡한 형상과 크기를 반영하는 해석을 수행하는 데 상당한 계산 비용이 필요하기 때문에 기초적인 연구로서 활용된다.

매크로 스케일 해석은 Multi-scaling law를 활용하여 비교적 합리적인 계산 비용으로 부품 스케일에서 해석을 진행한다¹⁶⁻²⁰⁾. 그 결과, 실제 부품과 공정을 잘 반영한 열 분포, 열응력 및 변형 정도를 예측할 수 있다. 적층제조 공정에서 발생하는 열응력 및 변형은 소재 특성과 함께 적층 공정 중의 열이력에 대한 이해를 바탕으로 한 접근이 필요하다. 특히, 제품의 크기가 대형화되고 형상이 복잡해질수록, 적층 위치 별 공정 중의 열 이력 또한 복잡해지고 이는 위치 별 열응력 및 변형 경향이 달라지는 것을 의미한다.

적층제조 공정 중의 열응력 및 변형 예측에 관한 연

구 동향을 살펴보면, T. Mukherjee et al.^{11,12)}의 연구에서 마이크로/메조 스케일 해석을 통해 용융풀 스케일에서 Stainless steel 316, Ti-6Al-4V, Inconel 718, Inconel 625 소재의 열변형 경향을 분석하였다. M. Yakout et al.¹⁸⁾의 연구는 매크로 스케일에서 Stainless steel 316L, Ti-6Al-4V, Invar 36 소재의 잔류응력에 미치는 소재 특성에 대해 고찰하였다. A.J. Dunbar et al.¹⁷⁾의 연구에서는 매크로 스케일에서 적층제조 공정 동안 열변형 거동을 분석하였다. 즉, 대부분의 연구는 마이크로/메조 스케일 해석을 통한 용융풀 스케일에서 열분포, 열응력 및 변형 예측을 수행하였다. 하지만, 용융풀 스케일에서 예측한 결과는 실제 적층제조 공정 중의 복잡한 열이력에 의한 열응력 및 변형 거동과 상이하기 때문에 실제 부품의 열응력 및 변형 예측은 매크로 스케일에서 수행되어야 한다. 또한, 매크로 스케일에서 수행한 대부분의 연구들은 열이력에 대한 고려없이 열변형 거동을 분석하였다. 따라서, 매크로 스케일에서 위치 별 열이력을 고려한 열변형 예측 및 이해에 관한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 유한요소해석(Finite element method, FEM)을 사용하여 Ti-6Al-4V와 Inconel 718 금속 분말을 이용한 대형 실린더 적층제조 시 발생하는 열변형을 예측하고, 적층 위치 별 열이력과 함께 열변형 발생 경향 및 거동을 분석하였다. 또한, 적층 소재 특성이 열변형에 미치는 영향을 함께 고찰하였다.

2. 해석 방법

본 연구의 해석대상이자 적층부인 실린더 형상은 외경 지름 500 mm, 내경 지름 460 mm으로 두께 20 mm이며, 높이는 750 mm이다. 적층방식은 Laser-PBF(L-PBF) 방식으로 bed plate 형상은 가로, 세로, 높이가 800 mm × 800 mm × 30 mm인 직육면체이다. 실린더의 유한요소모델은 총 242,400 개의 육면체 요소로 구성되었으며, 요소의 크기는 5.0 mm로 실린더 두께의 1/4에 해당하는 크기이다. Bed plate의 유한요소모델은 총 19,200 개이며, 그 크기는 10.0 mm이다. 모델 형상 및 유한요소모델은 Fig. 1에 나타났다.

적층 재료는 Ti-6Al-4V 와 Inconel 718을 사용하였다. 이들 소재는 적층제조 공정에서 자주 사용되는 소재로서, Ti-6Al-4V는 높은 비강도, 내부식성, 생체 친화성 등이 우수하여 우주/항공, 바이오 분야에서 활용되며^{21,22)}, 니켈기 합금인 Inconel 718은 우수한 고온기계적 특성과 내부식성 등으로 인해 우주/항공 분야에서 사용된다²²⁾. 유한요소해석에서 재료의 비선형성을 고려하기 위해 온도에 따른 비선형 물성을 적용하였다.

Fig. 1 Geometries for the substrate and cylinder deposit for FEM simulation of L-PBF

해석에 사용한 Ti-6Al-4V와 Inconel 718의 열적 물성과 기계적 물성은 적층제조된 소재에서 확보되었으며, 이들 물성은 Fig. 2, 3에 각각 나타냈다. Bed plate 열적 물성은 General steel의 선형 물성을 적용했으며, 밀도 $7,850 \text{ Kg/m}^3$, 열팽창계수 $1.2\text{E-}5 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, 열전도도 $60.5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 비열 $434 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다.

열-응력 연성해석을 수행하기 위해 상용 유한요소해석 Solver인 ANSYS Additive Suite (Workbench Additive)를 사용하였다. 적층제조 공정의 Layer-by-layer 적층 방식을 해석에 반영하기 위해 각 층을 구성하는 요소의 추가 및 제거 방법(element birth and death

Fig. 2 Temperature dependent material thermal properties for Ti-6Al-4V and Inconel 718, (a) density, (b) coefficient of thermal expansion, (c) conductivity, and (d) specific heat. The data was adopted from material library in ANSYS workbench

Fig. 3 Temperature dependent mechanical properties for Ti-6Al-4V and Inconel 718: (a) Yield strength and (b) Young's modulus. The data was adopted from material library in ANSYS workbench

method)을 사용하였다. 이는 적층부인 실린더의 요소들을 모두 모델링하고, 순차적으로 각 Layer를 구성하는 요소들을 비활성 상태에서 활성 상태로 전환하면서 적층되는 현상을 구현하는 방식이다.

본 연구와 같이 대형 제품의 적층 공정을 모사하는데 해석에 소요되는 시간과 비용이 막대하다. 따라서 합리적인 해석 시간과 전산비용 고려하기 위해, ANSYS Additive Suite는 해석상 (i)-(iii) 와 같은 가정을 반영하고 있다²³⁾.

(i) 물리적으로 유사한 열이력을 가지는 연속적인 Layers를 대표적인 하나의 layer(superlayer)로 통합하여 해석에 반영

(ii) 스캔 방식에 따른 열 효과가 전체 부품의 열변형에 미치는 영향은 미미함. 스캔 방식을 따로 고려하지 않고, 각 Superlayer가 활성화되면 동시에 가열되고 냉각되는 방식으로 열해석을 수행. 이때, Layer의 가열 온도는 소재의 녹는점으로 설정하여, 불완전 용융과 레이저 키홀(keyhole) 현상이 발생하지 않는 최적화된 공정 변수를 설정하였다고 가정

(iii) 분말 베드 내 미 용융 분말 영역을 유한요소로 모델링하기보다는, 적층부와 미 용융 분말의 경계면에서 분말에 의한 열손실을 고려한 대류 경계 조건을 사용

열-응력 연성 해석에서 열 해석을 먼저 수행하며, 열 해석에 사용된 지배 방정식은 식 (1) 과 같다^{17,24)}.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot q(r, t) + Q(r, t) \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도, C_p 는 비열(Specific heat), T 는 온도, t 는 시간, q 는 열 유속(heat flux), Q 는 단위 체적당 내부 발열 속도(volumetric internal heat generation rate), r 은 기준 좌표계를 의미한다. 이때, 열 유속 q 는 온도에 따른 열전도계수 k 와 온도 T 를 포함하는 Fourier 열전도 관계식인 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$q = -k\nabla T \quad (2)$$

복사에 의한 열전달은 Stefan-Boltzmann 법칙으로부터 구한 식 (3)을 통해 계산하였다. ε 은 방사율(Surface emissivity), σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, T_s 는 표면 온도이다.

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

대류에 의한 열전달은 Newton의 냉각 법칙을 통해

계산했으며 (식 (4)), 이때 h 는 열 전달 계수이다.

$$q_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

초기온도와 냉각 기준온도는 모두 상온(22 ℃)이다.

적층제조 공정은 고 에너지 열원에 의한 급격한 용융과 응고의 반복적인 과정으로 진행된다. 따라서 적층제조 공정의 구조해석은 불균일한 온도 분포에 의해 열응력이 발생하고, 이는 주요한 하중으로 작용한다. 열전달 해석으로부터 각 절점(Nodal point)에서 시간에 따른 온도분포를 구할 수 있고, 이에 상응하는 열 변형률(thermal strain)이 계산된다. 따라서, 열응력 및 변형은 비선형 과도(Non-linear transient) 열탄소성 문제로서 계산되며, 다음의 지배 방정식으로 나타낼 수 있다²⁰⁾.

식 (5)는 응력 평형 방정식이며, σ 는 응력을 의미한다.

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \quad (5)$$

응력 σ 는 식 (6)의 구성방정식으로 표현되며, C 는 탄성강성행렬(Elastic stiffness matrix)이다.

$$\sigma = C\varepsilon_e \quad (6)$$

전체 변형률 ε (Total strain)은 탄성 변형률 ε_e (elastic strain), 소성 변형률 ε_p (plastic strain), 열 변형률 ε_{th} (thermal strain)의 합이며 (식 (7)), 이때 열 변형률 ε_{th} 은 식 (8)-(10)를 통해 계산된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{th} = \varepsilon_{th} j \quad (8)$$

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T^{ref}) \quad (9)$$

$$j = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (10)$$

α 는 열팽창 계수, T^{ref} 는 기준 온도이다.

소성 변형률은 Von-mises 항복 기준과 Prandtl-Reuss flow 법칙을 사용하여 계산된다.

$$f = \sigma_m - \sigma_y(\varepsilon_q T) \leq 0 \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_q a \quad (12)$$

$$a = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right)^T \quad (13)$$

f 는 항복 함수(Yield function), σ_m 는 Mises 응력, σ_y 는 항복 응력, ε_q 는 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain), a 는 flow vector이다.

구속 조건은 Bed plate 밑면을 고정시켰으며, 해석에 사용한 적층 공정 조건과 경계 조건은 Table 1에 정리하였다. 해석 결과로부터 실린더 높이 100, 400, 650 mm에서 외경에 위치한 절점에서 측정된 열이력과 방사 방향(Radial direction)으로 발생한 변형 경향을 분석하였다. 또한, 적층 소재 별로 이들의 경향을 비교 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

적층 완료 후 방사 방향으로 변형 경향을 이해하기 위해 x축으로 발생한 변형을 Fig. 4(a)에 도식화했다. 변형 전의 실린더 형상 (본래 설계했던 형상)을 회색 음영으로 함께 표시했다. 이를 기준으로, Ti-6Al-4V와 Inconel 718로 적층된 실린더 모두 실린더의 중

Table 1 Machine settings, build conditions, and cooldown conditions used in the present study

Machine settings		Build conditions		Cooldown conditions	
Deposition thickness	0.04 mm	Preheat temp.	22 °C	Room temp.	22 °C
Hatch spacing	0.13 mm	Gas convection coefficient	1E-5 W/mm ² ·°C	Gas convection coefficient ^(b)	1E-5 W/mm ² ·°C
Scan speed	1,200 mm/s	Powder convection coefficient	1E-5 W/mm ² ·°C	Powder convection coefficient	1E-5 W/mm ² ·°C
Dwell time	10 s	Powder property factor ^(a)	0.01		

^(a) A knockdown factor used to estimate the powder properties compared to solid material properties

^(b) In the cooldown step, the convection is applied only to the top layer

Fig. 4 (a) Simulated distortion contours and (b) distortion profiles as a function of the cylinder height for Ti-6Al-4V and Inconel 718. Herein, distortions along the x-axis were indicated in this figure

심축을 향하여 대칭적으로 변형된 것을 알 수 있다. 여기서 주목할 점은 두 소재의 실린더 높이에 따른 변형 경향이 유사하다는 것이다. Fig. 4(b)는 실린더 높이에 따른 변형 정도를 그래프로 나타냈다. Fig. 4로부터 관찰되는 실린더 높이 별 변형 경향을 다음과 같이 I-IV 구간으로 구분하여 요약하였다.

- I. 실린더 높이 약 80 mm 이하: Bed plate 근처에서 변형이 극히 적으며, 높이가 증가함에 따라 변형 정도가 점차 증가
- II. 실린더 높이 약 80-120mm: 구간 I의 증가 경향 이후, 높이가 증가함에 따라 변형 정도가 점차 감소
- III. 실린더 높이 약 120-550 mm 구간: 일정한 변형이 관찰되는 구간
- IV. 실린더 높이 약 550-750 mm 구간: 높이가 증가함에 따라 변형이 증가하여, 높이 약 650 mm에서 최대 변형이 관찰됨. 이후 점차적으로 변형이 감소

전체적인 변형 정도는 Ti-6Al-4V가 Inconel 718에 비해 더 큰 것을 알 수 있다 (Fig. 4(a)). 따라서 본 연구는 적층제조 공정 중 실린더의 변형 거동을 살펴보고, 이를 바탕으로 실린더 높이 별, 소재 별 변형 경향을 확인하였다.

3.1 적층제조 공정 중 변형 거동 이해

Fig. 5는 Ti-6Al-4V 실린더의 높이 400 mm (구간 III에 해당)에서 측정된 열이력과 x축으로 변형거동을 함께 나타낸 것이다. 열이력 곡선을 먼저 살펴보면, 첫번째 Heat cycle은 측정 위치의 layer 적층에 해당하는 용융-응고를 의미한다. 이후 직상의 Layer 적층

Fig. 5 Deformation behavior with thermal hysteresis as the deposition proceeds, at the 400 mm height for Ti-6Al-4V cylinder

에 의해 재 용융-재 응고가 발생하고, 계속해서 가열-냉각의 과정을 반복적으로 겪게 된다. 적층이 진행됨에 따라 가열-냉각에 의한 온도구배는 점차 감소하고, 적층이 끝난 후 상온으로 냉각된다.

열이력과 함께 x축으로의 변형 거동을 살펴보면 열이력의 반복적인 용융/가열-냉각 과정에서 실린더 중심축을 향한 변형과 완화가 반복된다. 이때 변형은 냉각에 의한 변형이 지배적이며, 적층 공정 동안 실린더 중심축을 향한 변형이 축적된다. Heat cycle의 열 구배가 줄어들면 변형의 발생 정도는 점차 감소하여 최대 변형을 나타낸다. 이후 변형이 다소 감소하는데 이는 해당 측정 위치와 주변영역과 열 구배가 사라지고 정적 평형상태가 되면서 변형 재분배(Strain redistribution)가 발생한 것으로 사료된다. 즉, 적층 공정 동안 구간 III의 변형 거동은 열변형 축적-최대 변형-변형 재분배를 겪는다.

3.2 실린더 높이에 따른 변형 경향 분석

실린더 높이에 따른 변형 경향은 높이 별 열이력에 영향을 받으며, 측정 위치를 기준으로 Bed plate, 기 적층된 층(pre-deposited layers)과 이후 적층되는 층(post-deposited layers)의 열영향을 받게 된다. 이때, 분말 베드보다 Bulk 상태인 bed plate에 의한 열전도가 크기 때문에 bed plate는 heat sink로 작용한다^{11,25)}. 즉, Bed plate에 가까운 영역일수록 열구배가 감소하고 이는 열변형률의 감소로 이어진다 (구간 I).

Bed plate에서 멀어지면 기 적층된 층과 이후 적층되는 층에 의한 열영향만을 고려할 수 있다. Fig. 6은 실린더 높이 100, 400, 650 mm에서 측정된 열이력을 나타낸 것이다. 해당 높이들은 구간 II, III, IV를 각각 대표한다. 3.1의 실린더 높이 400 mm의 관찰 결과를 바탕으로 100 mm과 650 mm에서의 열이력과 변형 거동을 비교 분석하였다. 실린더 높이 400 mm에 비해, 100 mm의 열이력은 용융에 대응하는 첫번째와 두번째 Heat cycle의 최대 온도를 제외하고 전체적인 온도 분포가 낮다. 이는 기 적층된 층의 열 축적(Heat accumulation) 정도가 적어, 열 구배 증가와 열변형률 및 변형 증가를 야기한다. 구간 IV는 이후 적층되는 층이 다른 구간에 비해 적어 3.1에서 관찰되는 열변형 축적-최대 변형-변형 재분배에 이르는 Heat cycles이 충분히 가해지지 않는다. 실린더 높이 650 mm (실린더 높이 기준 87%)의 경우 해당 위치에서 최대 변형이 발생하는 시점에서 적층이 완료되고, 이후 변형 재분배를 유발할 열(적층)이 가해지지 않아 실린

Fig. 6 Thermal hysteresis at the height of 100, 400, and 650 mm for the deposition of Ti-6Al-4V cylinder. The inset is the magnified thermal hysteresis in the temperature range of 22 °C to 200 °C

Fig. 7 Trend of distortion (along the x-axis) as a function of the cylinder height in L-PBF process, on the basis of understanding the thermal effects

더에서 가장 높은 변형이 발생한다.

이와 같은 실린더 높이 별 변형 경향 및 거동을 Fig. 7에 요약 정리하였다.

3.3 적층 소재 별 실린더 변형 경향 분석

Fig. 4에서 알 수 있듯이 Ti-6Al-4V로 적층 된 실린더가 Inconel 718에 비해 x축으로 발생한 변형이 전체적으로 더 크다. 두 소재 모두 최대 변형은 실린더 높이 약 650 mm에서 관찰되며, Ti-6Al-4V와 Inconel 718의 최대 변형 정도는 각각 2.2 mm (외경 반지름 대비 0.88%) 와 1.7 mm (0.68%)이다.

실린더 적층 소재에 따른 변형 거동을 확인하기 위해, 실린더 높이 400 mm에서 Ti-6Al-4V와 Inconel 718의 열이력과 변형 거동을 Fig. 8에 함께 나타냈다. 용융-응고에 해당하는 첫번째, 두번째 Heat cycle의

최대온도는 Ti-6Al-4V 와 Inconel 718 소재의 녹는 점에 해당하는 1,650 °C 와 1,260 °C 이다. 이후 Heat cycles에서 주목할 점은 초기 heat cycles은 Ti-6Al-4V의 최대온도가 높았지만, 점차 줄어들어 Inconel 718의 최대 온도가 더 높아진다. 해석상 각 소재의 녹는점까지 가열되도록 설정하였고, 이로 인해 Ti-6Al-4V가 Inconel 718에 비해 더 높은 온도로 가열됨에도 불구하고 heat cycles의 냉각 최저 온도는 Ti-6Al-4V가 Inconel 718에 비해 더 낮다. 이러한 열이력의 경향은 소재의 열적 특성을 바탕으로 이해할 수 있다. 열적 특성은 열전도도(k), 밀도(ρ), 비열(C_p)의 영향을 고려한 열확산도(Thermal diffusivity, D)로 대표된다. 열확산도는 식 (14)로 표현되며, Ti-6Al-4V와 Inconel 718의 온도에 따른 열확산도는 Fig. 9에 함께 나타냈다.

Fig. 8 Comparison of the deformation behavior and thermal hysteresis between Ti-6Al-4V and Inconel 718 at the 400 mm cylinder height

Fig. 9 Thermal diffusivity as a function of temperature, for Ti-6Al-4V and Inconel 718

$$D = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (14)$$

열확산도가 큰 경우 열전달에 있어 열전도가 지배적이고, 이는 적층 공정 중에 가해지는 국부적 열이 빠르

게 전달되어 열 구배가 감소한다. 즉, Inconel 718이 Ti-Al-4V에 비해 더 큰 열확산도를 가지기 때문에, Fig. 8에서 관찰되는 바와 같이 시간에 따른 열 구배가 Ti-6Al-4V에 비해 작다는 것을 알 수 있다. 또한, 열이력의 2,3,4... 번째 Heat cycle의 온도는 기준 layer 보다 1,2,3... 층 아래 layer의 온도로 대변될 수 있다. 단, 본 연구와 같이 적층 높이에 따른 적층 형상이 바뀌지 않고, 구간 III과 같이 기 적층되는 층과 이후 적층되는 층의 열영향이 일정한 구간에만 적용된다. 즉, 공간에 따른 열구배(Spatial thermal gradient) 또한 Inconel 718이 더 작다는 것을 의미한다. Fig. 10은 적층이 완료된 후 Ti-6Al-4V와 Inconel 718의 실린더에 작용하는 응력 분포를 보여준다. Ti-6Al-4V와 Inconel 718 실린더에 인가되는 최대 응력은 실린더 높이 650 mm에서 관찰되며, 각각 1,117 MPa 과 704 MPa이다. Fig. 2, 3, 8, 9, 10을 종합하여 열응력($\sigma_{th} = E\epsilon_{th} = E\alpha\Delta T$)에 영향을 미치는 소재 물성을 비교하면 Inconel 718의 탄성계수와 열팽창계수가 Ti-6Al-4V보다 크지만, Ti-6Al-4V의 온도구배가 유의미하게 더 크다는 것을 알 수 있다. 즉, Inconel718 대비 Ti-6Al-4V는 낮은 열확산도에 의한 높은 열 구배에 지배적인 영향을 받아 Fig. 4, 10과 같이 더 큰 변형과 열응력을 가지게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 열-구조 연성 해석을 통해 적층제조 공정으로 제작되는 대형 실린더의 높이와 적층 소재에 따른 열변형 경향을 분석하였고, 다음의 결론을 얻었다.

1) 열변형은 열원에 의한 직접적인 열영향과 함께 Bed plate, 기 적층된 층, 이후 적층된 층의 열영향에 의해 결정되며, 구간 III을 기준으로 변형은 변형 축적

Fig. 10 Von-Mises stress contours after completing the deposition process for Ti-6Al-4V and Inconel 718

-최대변형-변형 재분배의 과정을 겪는다.

2) 실린더 높이에 따른 x 방향으로 최대 변형은 실린더 최종 높이 기준 87% 위치에서 발생하며, 이는 이후 적층되는 층의 열영향이 충분하지 않아 변형 재분배가 발생하지 못한 결과이다.

3) Ti-6Al-4V는 Inconel 718에 비해 낮은 열확산도로 인한 큰 열 구배를 가지며, 이는 더 큰 열변형을 야기하는 주요 원인으로 작용한다.

감사의 글

본 연구는 민군협력진흥원 민군겸용기술개발사업의 “비행체 저가화 및 성능향상을 위한 대형(800mm급) 및 정밀($\pm 15\mu\text{m}/200\text{mm}$ 급) 금속 3D 프린팅 기술 및 제조 공정 개발” 과제와 산업통상자원부 전략적핵심소재기술개발 사업 (과제번호: 10077677) 지원으로 수행되었습니다.

ORCID: Seulbi Lee: <https://orcid.org/0000-0002-3938-4684>

ORCID: Tae Yang Bang: <http://orcid.org/0000-0003-2039-9090>

ORCID: Mincheol Kang: <https://orcid.org/0000-0002-7463-0051>

ORCID: Yoon Suk Choi: <http://orcid.org/0000-0003-4201-2379>

References

1. S. Lee, J. Kim, D. S. Shim, S. H. Park, and Y. S. Choi, Micro-Cracking in Medium-Carbon Steel Layers Additively Deposited on Gray Cast Iron Using Directed Energy Deposition, *Met. Mater. Int.* 26 (2020) 708. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00589-5>
2. K. Kempen, B. Vrancken, S. Buls, L. Thijs, J. Van Humbeeck, and J. P. Kruth, Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans.* 136 (6) (2014) 061026. <https://doi.org/10.1115/1.4028513>
3. W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *Int. Mater. Rev.* 61(5) (2016) 315. <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>
4. S. Lee, J. Kim, J. Choe, S. W. Kim, J. K. Hong, and Y. S. Choi, Understanding Crack Formation Mechanisms of Ti-48Al-2Cr-2Nb Single Tracks During Laser Powder Bed Fusion, *Met. Mater. Int.* 27 (2020) 78. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00770-1>
5. D. Oh, Y. Kang, G. Kim, S. Park, and S. Song, Effect of HIP Process on Fatigue Performance for SS 316L Manufactured by PBF, *J. Weld. Join.* 39(1) (2020) 41. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.1.4>
6. J. Heo, Y. Li, and J.-H. Lee, Prediction of Plate Deformation by Multi-line Heating using SDB Method, *J. Weld. Join.* 37(1) (2019) 40. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.1.5>
7. J. Kim, I. Im, J. Kim, and J. Suh, Welding Residual Stress Evaluation and Process Optimization of CTBA Trailing Arm using Finite Element Analysis, *J. Weld. Join.* 36(4) (2018) 63. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.4.8>
8. D.-K. Kim and W. Woo, Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress in High Melting Point Metals Processed by 3D Printing, *J. Weld. Join.* 36(6) (2018) 14. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.6.3>
9. M. Bayat, C. G. Klingaa, S. Mohanty, D. De Baere, J. Thorborg, N. S. Tiedje, and J. H. Hattel, Part-scale thermo-mechanical modelling of distortions in Laser Powder Bed Fusion - Analysis of the sequential flash heating method with experimental validation, *Addit. Manuf.* 36 (2020) 101508. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101508>
10. B. K. Panda and S. Sahoo, Thermo-mechanical modeling and validation of stress field during laser powder bed fusion of AlSi10Mg built part, *Results Phys.* 12 (2019) 1372. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.002>
11. T. Mukherjee, W. Zhang, and T. DebRoy, An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, *Comput. Mater. Sci.* 126 (2017) 360. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2016.10.003>
12. T. Mukherjee, J. S. Zuback, A. De, and T. DebRoy, Printability of alloys for additive manufacturing, *Sci. Rep.* 6 (2016) 1. <https://doi.org/10.1038/srep19717>
13. B. Cheng, S. Shrestha, and K. Chou, Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, *Addit. Manuf.* 12 (2016) 240. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.007>
14. G. Vastola, G. Zhang, Q. X. Pei, and Y. W. Zhang, Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling, *Addit. Manuf.* 12 (2016) 231. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.010>
15. J. Kim, S. Lee, J. K. Hong, N. Kang, and Y. S. Choi, Calibration of Laser Penetration Depth and Absorptivity in Finite Element Method Based Modeling of Powder Bed Fusion Melt Pools, *Met. Mater. Int.* 26 (2020) 891. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00599-3>
16. P. Bian, X. Shao, and J. Du, Finite element analysis of thermal stress and thermal deformation in typical part during SLM, *Appl. Sci.* 9(11) (2019) 2331. <https://doi.org/10.3390/app9112231>
17. A. J. Dunbar, E. R. Denlinger, M. F. Gouge, and P. Michaleris, Experimental validation of finite element modeling for laser powder bed fusion deformation, *Addit. Manuf.* 12 (2016) 108. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.08.003>
18. M. Yakout, M. A. Elbestawi, S. C. Veldhuis, and S. Nangle Smith, Influence of thermal properties on residual stresses in SLM of aerospace alloys, *Rapid*

- Prototyp. J.* 26(1) (2020) 213.
<https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2019-0065>
19. T. Mayer, G. Brändle, A. Schönenberger, and R. Eberlein, Simulation and validation of residual deformations in additive manufacturing of metal parts, *Heliyon* 6(5) (2020) e03987.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03987>
 20. L. A. Parry, I. A. Ashcroft, and R. D. Wildman, Geometrical effects on residual stress in selective laser melting, *Addit. Manuf.* 25 (2019) 166.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.026>
 21. S. Liu and Y. C. Shin, Additive manufacturing of Ti6-Al4V alloy: A review, *Mater. Des.* 164(15) (2019) 107552.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>
 22. C. Körner, Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - A review, *Int. Mater. Rev.* 61(5) (2016) 361.
<https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>
 23. Information on ANSYS Workbench Additive Manufacturing Analysis Guide, *ANSYS, Inc.* PA, USA (2021)
<https://www.ansys.com>
 24. M. Gouge and P. Michaleris, Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing, *Butterworth-Heinemann* (2018) 19-38.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811820-7.00003-3>
 25. S. Yagi and D. Kunii, Studies on effective thermal conductivities in packed beds, *AIChE J.* 3(3) (1957) 373.
<https://doi.org/10.1002/aic.690030317>