

# 열-기계 연계 해석을 이용한 에너지 제어 용착 및 담금질 공정으로 제작된 시편의 잔류응력 특성 분석

황안재\*, 이광규\*, 안동규\*<sup>#</sup>

\*조선대학교 기계공학과

## Investigation of Residual Stress Characteristics of Specimen Fabricated by DED and Quenching Processes Using Thermo-mechanical Analysis

An-Jae Hwang\*, Kwang-Kyu Lee\*, Dong-Gyu Ahn\*<sup>#</sup>

\*School of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.

(Received 29 September 2021; received in revised form 22 October 2021; accepted 24 October 2021)

### ABSTRACT

Complicated residual stress distributions occur in the vicinity of a deposited region via directed energy deposition (DED) process owing to the rapid heating and cooling cycle of the deposited region and the substrate. The residual stress can cause defects and premature failure in the vicinity of the deposited region. Several heat treatment technologies have been extensively researched and applied on the part deposited by the DED process to relieve the residual stress. The aim of this study was to investigate the residual stress characteristics of a specimen fabricated by DED and a quenching process using thermomechanical analyses. A coupled thermomechanical analysis technique was adopted to predict the residual stress distribution in the vicinity of the deposited region subsequent to the quenching step. The results of the finite element (FE) analyses for the deposition and the cooling measures show that the residual stress in the vicinity of the deposited region significantly increases after the completion of the elastic recovery. The results of the FE analyses for the heating and quenching stages further indicate that the residual stress in the vicinity of the deposited region remarkably increases at the initial stage of quenching. In addition, it is observed that the residual stress for quenching is lesser than that after the elastic recovery, irrespective of the deposited material.

**Keywords:** Directed Energy Deposition(에너지 제어형 용착), Quenching(담금질), Thermo-mechanical Analysis (열-기계 연계 해석), Residual Stress(잔류 응력), Deposited Material(적층 재료)

### 1. 서 론

적층 제조 (Additive Manufacturing: AM) 공정은 3 차원 CAD 데이터를 기반으로 재료를 층별로 쌓아

올려 3차원의 제품을 제조하는 방법으로 1984년 미국의 Charles W. Hull 이 광조형 (Stereolithography: SL) 공정을 개발한 이후 많은 발전을 이루고 있다<sup>[1-2]</sup>. 적층 제조 공정은 작동 원리와 적층 재료에 따라 공정 방식이 다양하게 나뉘며, 액조 광중합 공정 (Vat photopolymerization: VP), 재료 압출 공정 (Material extrusion: ME), 재료 분사 공정 (Material

# Corresponding Author : smart@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7043, Fax: +82-62-230-7234

jetting: MJ), 판재 적층 공정 (Sheet lamination: SL), 접착제 분사 공정 (Binder jetting: BJ), 분말 베드 용해 공정 (Powder bed fusion: PBF) 및 에너지 제어형 적층 공정 (Directed energy deposition: DED) 등으로 구분된다<sup>[3]</sup>. 에너지 제어형 용착 공정은 레이저나 전자빔을 사용하여 기저부 (Substrate) 를 용융시켜 용융풀 (Melt pool) 을 생성한 후 급속 분말 (Metal powder) 을 분사하여 적층부를 생성시키는 공정이다<sup>[4]</sup>. 에너지 제어형 용착 공정에서는 기저부에 열원이 부가됨에 따라 급속 가열 및 냉각의 열이력이 반복적으로 나타난다. 이로 인하여 적층부와 적층 경계부에 복잡한 3차원 잔류응력 분포를 발생시킨다<sup>[4]</sup>. 이 잔류응력은 적층부 인근에 균열, 파손 및 변형 등 제품의 결함을 발생시킬 수 있다<sup>[5-9]</sup>. 그러므로, 잔류응력의 저감은 에너지 제어형 용착 공정의 해결해야 할 과제 중 하나이다<sup>[5-9]</sup>.

적층 제조 공정 후 잔류 응력의 저감을 위한 방법 중 대표적인 방법으로 HIP (Hot isostatic pressing) 공정 및 담금질-풀림 (Quenching and tempering : Q-T) 열처리 (Heat treatment) 공정을 들 수 있다<sup>[10-12]</sup>. 적층 제품의 열처리 공정 중 담금질에 의하여 적층부 인근에 균열, 파손 및 과도 변형이 발생할 수 있다<sup>[10-12]</sup>. 이와 같은 이유로 에너지 제어형 용착 공정으로 제작된 제품의 담금질-풀림 열처리 중 담금질 후의 적층부 인근에 발생하는 잔류응력 특성 변화에 관한 연구가 필요하다.

Lewandowski 등은 금속 적층 제조 공정으로 제작된 시편에 후열처리를 부가한 경우, 시편의 기계적 특성과 조직 변화에 미치는 영향들을 분류 조사하였다<sup>[10]</sup>. Brandl 등은 후열처리된 선재 공급식 (Wire feeding type) 에너지 제어형 용착 공정으로 제작된 Ti-6Al-4V 블록의 기계적 특성과 조직 변화에 대한 고찰을 수행하였다<sup>[13]</sup>. Park 등은 AISI H13 과 D2 금형강 기저부위에 분말 공급식 (Powder feeding type) 에너지 제어형 용착 공정으로 동일 금속 재료를 적층한 후 Q-T 열처리를 수행하였을 때, 적층부 인근의 경도 및 조직 변화에 대하여 실험적으로 고찰하였다<sup>[14]</sup>. Sui 등은 Laser engineered net shaping 공정으로 제작된 시편을 열처리한 후 조직 변화에 대한 연구를 수행하였다<sup>[15]</sup>. 금속 적층 제조 공정으로 제작된 제품의 열처리에 따른 적층 제품

특성 변화에 관련된 연구들은 대부분 실험적 연구에 집중되어 있다. 그러나 적층 제조 공정으로 제작된 제품의 열처리 과정에 대한 해석적 접근에 대한 연구는 문헌상에서 거의 찾아보기 어렵다.

이 연구에서는 열-기계 연계 유한 요소 해석 (Finite element analysis : FEA) 을 이용하여 에너지 제어형 용착 공정으로 적층후 담금질 공정을 수행한 시편의 잔류 특성 변화를 해석적으로 분석/고찰하고자 한다. 적층, 냉각, 탄성 회복 (Elastic recovery), 가열 및 담금질 단계가 연계된 재시작 계산법 (Restart computation) 기반의 열-기계 연계 해석 기법을 제안하고자 한다. 해석 결과를 이용하여 냉각과 탄성 회복 후의 적층부 인근의 잔류 응력 변화를 분석하였다. 또한 적층후 시편 가열과 담금질 단계에서의 적층 재료에 따른 잔류 응력 발생 특성 변화를 비교/분석하였다.

## 2. 유한요소 해석 모델 설계

### 2.1 적층 공정 및 담금질 공정 연계 해석 모델 설계

Fig. 1은 적층, 냉각, 탄성 회복, 가열 및 담금질 공정을 연계한 열-기계 해석 절차이다. 냉각과 스프링백이 포함된 적층 공정 해석을 위해 재료 선정, 기저부 및 적층부 설계, 공정 변수 선정 및 열원 모

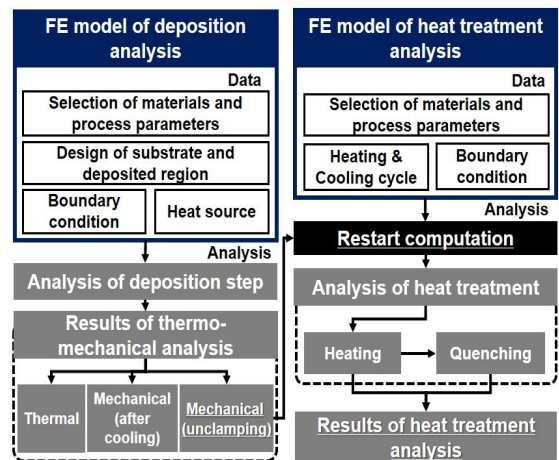


Fig. 1 Flowchart of thermo-mechanical analyses

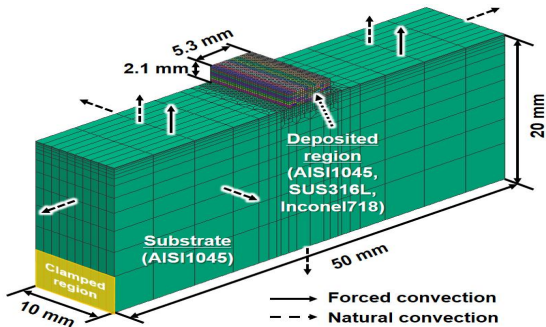


Fig. 2 FE model and boundary conditions for deposition, cooling and elastic recovery analyses

델링을 포함 경계 조건 부여를 수행하였다. 적층 공정에 대한 열-기계 연계 해석을 통해 적층 시편 내부의 온도 및 열응력 분포/이력 데이터를 예측하였다. 가열 및 담금질 공정 해석을 위해 공정 변수 선정, 경계 조건 부여, 가열 및 냉각 이력 산출을 수행하였다. 열처리 공정 해석은 적층 공정 해석 결과 예측된 탄성 회복 이후의 적층 시편 내부의 온도와 열응력 데이터를 이용하여 초기 조건을 설정하였다. 이 초기 조건을 기준으로 열처리 해석을 위한 CCT 선도등 새로운 물성데이터와 열처리시 열 이력 및 열처리 경계 조건을 부여하여 재시작 계산법으로 가열과 담금질 단계에 대한 열-기계 연계 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 적층 공정 해석을 위한 3차원 유한요소 해석 모델이다. 기저부와 적층부의 크기는 각각 50mm × 10mm × 20mm 및 5.3mm × 2.1mm × 10mm이다. 적층부의 최대 적층 층수는 9층 (Layer)으로 설계하였다. 적층 층수가 9층인 해석 모델에서 사용된 요소수와 절점수는 각각 41,336개와 22,210개 이다. 열-기계 연계 해석시 적층 층수가 적층과 담금질 공정 완료후 시편 내부 잔류 응력 분포에 미치는 영향을 고려하기 위하여 적층 층수가 3층, 6층 및 9층인 경우에 대한 적층, 냉각, 탄성 회복, 가열 및 담금질 연계해석을 수행하였다.

적층에 사용되는 레이저는 식 (1)과 같이 평면에서는 준 가우시안 분포를 가지는 체적 열원으로 가정하였다<sup>[16]</sup>. 최대 침투 깊이 ( $\delta$ )에서의 열원 직경이 열원 조사 면에서의 직경과 동일하다고 가정하였다.

Table 1 Conditions for FE analyses

Laser	P (W)	350	
	$\delta$	$t_b$	
	V (mm/min)	1,000	
Gas & Powder	$\eta$	0.35	
	$F_s$ (L/min)	7	
Bead	F (L/min)	10.3	
	$H_d$ (mm)	0.5	
	$t_b$ (mm)	1 <sup>st</sup> Layer	0.135
		2 <sup>nd-9<sup>th</sup></sup> Layer	0.25
w (mm)	0.78		

열원의 침투 깊이는 적층 비드의 한층 두께로 가정하였다.

$$\dot{Q} = \frac{\eta P}{\pi r^2 \delta V} \exp\left(-\frac{x^2 + (y - Vt)^2}{16r^2}\right) \quad (1)$$

여기서  $\dot{Q}$ ,  $\eta$ , P, r,  $\delta$ , x, y, V 및 t는 각각 열원의 선형 에너지 강도, 열원 효율, 레이저 출력, 열원 유효 반경, 열원 침투 깊이, x 좌표, y 좌표, 열원 이송 속도 및 시간이다.

열-기계 연계 해석에 사용된 적층 조건은 Table 1과 같다. 적층 비드의 두께 ( $t_b$ )의 경우 첫 번째 층은 0.135mm이고 두 번째 층부터 아홉 번째 층까지 0.25mm이다. 레이저 출력 (P)과 이송 속도 (V)는 각각 350W와 1,000mm/min이다. 열원 침투 깊이 ( $\delta$ )는 비드 두께 ( $t_b$ )와 같다. 첫 번째 적층 비드의 폭 (w)은 0.78mm이며 연속되는 비드 사이의 비드 중심간 거리 (Hatching distance :  $H_d$ )는 0.5mm이다. 보호 가스 분사량 ( $F_s$ )과 파우더 분사량 (F)는 각각 7l/min과 10.3l/min이다. 적층부 재료는 AISI1045, SUS316L 및 Inconel718의 3가지로 선정하였다. 기저부 재료로는 구조용 탄소강인 AISI1045를 사용하였다.

적층 공정이 진행되는 동안 보호 가스인 아르곤 가스가 기저부 상면에 분사되면서 강제대류가 발생하고 레이저에 의한 적층재료와 기저부 용융 과정에서 복사 열전달이 발생한다. 그래서 적층 해석 모델의 기저부 상면에는 강제 대류와 복사 조건을 모두 고려한 등가 열손실 모델(Equivalent heat loss model)을 적용하였다. 각 적층 재료별 온도 의존 등가 열손실 계수 ( $h_{eq,f}$ )는 식 (2)을 이용하여 산출하였다. 강제 대류 계수 ( $h_f$ ) 계산시 분말 분사량

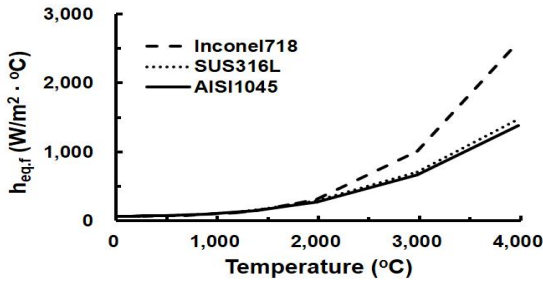


Fig. 3 Coefficients of equivalent heat loss model for different deposited model

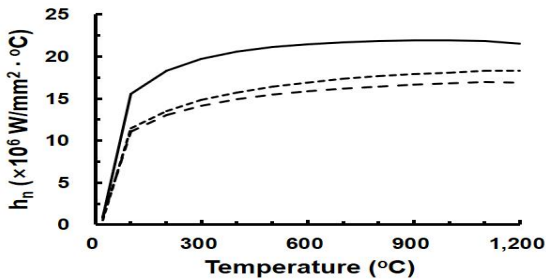


Fig. 4 Natural convection coefficients

보호 가스 분사량 ( $F_s$ )만 고려하였다. 각 적층 재료 별로 예측된 온도 의존 등가 열손실 계수는 Fig. 3 과 같다. 해석 모델의 측면에는 자연 대류 조건을 적용하였으며, 해석에 적용된 온도자연 대류 계수는 Fig. 4와 같다. 적층 공정이 완료된 후 해석 모델에 자연 대류를 적용하여 해석 모델이 500초 동안 자연 냉각 되도록 하였다.

$$h_{eq,f} = h_f + \varepsilon \sigma_s (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (2)$$

여기서  $h_{eq,f}$ ,  $h_f$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma_s$ ,  $T_s$  및  $T_\infty$  는 각각 등가열 손실 계수, 강제대류 계수, 방사율, 스테판-볼츠만 상수, 표면 온도 및 주위 온도이다<sup>[7]</sup>.

냉각 단계 해석 완료 후 모델에 추가된 고정 조건 (Clamping condition)을 제거한 스프링 백 해석을 수행하여 탄성 회복 (Elastic recovery) 이 고려된 해석 모델 내부 잔류 응력 분포를 예측하였다. Fig. 5 는 가열과 담금질 단계에 대한 열-기계 해석을 위한 3차원 유한 요소 해석 모델이다. 해석 모델의 크기, 요소수 및 절점수는 적층 공정 해석 모델과 동일하다. 가열과 담금질 단계에 대한 열-기계 연계에서는 모델에 고정 경계 조건을 제거한 Unclamp

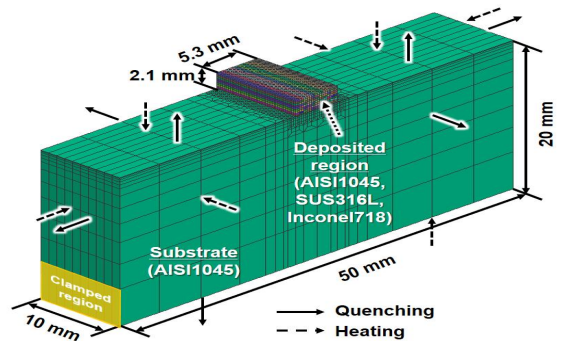


Fig. 5 FE model for heating quenching analyses

Table 2 Conditions of heating and quenching steps

$T_h$ (°C)	$t_h$ (seconds)	Quenching Oil	$T_q$ (°C)	$t_q$ (seconds)
850	10,800	QUENCH V	80	1,800

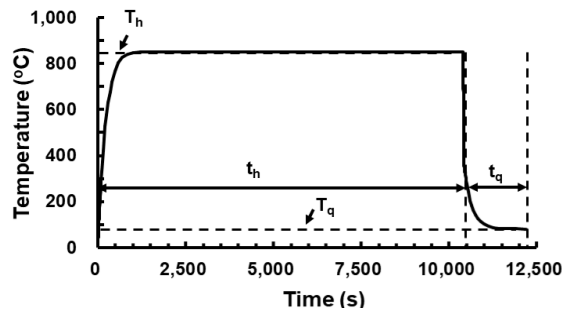


Fig. 6 Temperature histories for heating and quenching steps

경계 조건을 적용하여 해석을 수행하였다. 또한, 해석 모델의 모든 면에서 균일 가열 및 균일 냉각이 적용된다고 가정하였다.

가열 및 담금질 단계의 열-기계 연계 해석 시 적용된 열 이력은 Table 2 및 Fig. 6과 같다. 가열 및 담금질 단계의 열-기계 연계 해석에서는 모델을 850°C로 10,800초 동안 가열한 후, 80°C를 유지하고 있는 담금질 기름 (Quenching oil)인 QUENCH V에 1,800초 동안 냉각시키는 것으로 열 이력 곡선을 생성하였다.

적층부와 기저부 재료의 온도 의존 열 물성 및 기계적 특성 데이터는 상용 프로그램인 JMat Pro를 이용하여 도출하였다.



### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 3.1 적층, 냉각 및 탄성 회복에 따른 잔류 응력 변화

적층부 인근의 잔류응력 분포를 고찰한 결과, Fig. 7과 같이 적층, 냉각 및 탄성 회복 완료 후에 AISI1045와 Inconel718을 적층한 경우에는 최대 잔류응력이 적층부와 기저부의 경계에서 발생하지만, SUS316L 을 적층한 경우에는 적층부와 기저부의 경계 바로 아래에서 최대 잔류응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 이용하여 적층 재료와 적층 층수에 따른 적층부 인근의 잔류 응력 분포 변화 분석은 적층부 인근의 기저부에 대해서 중심으로 수행하였다.

Fig. 8, 9 및 10은 열-기계 연계 해석 결과 도출된 적층 및 냉각/스프링 백 완료후의 적층부 인근 기저부의 잔류응력 분포 및 최대 주응력(1st principal stress)의 최대값 변화이다.

AISI1045와 SUS316L를 기저부위에 적층만 수행한 경우에는 Fig. 8 및 9와 같이 적층 층수가 증가할수록 기저부 내부에 발생하는 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 Inconel718을 AISI1045 기저부위에 적층만 수행한 경우에는 적층 층수가 증가할수록 기저부 내부에 발생하는 잔류응력이 증가하는 것을 알 수 있었다.

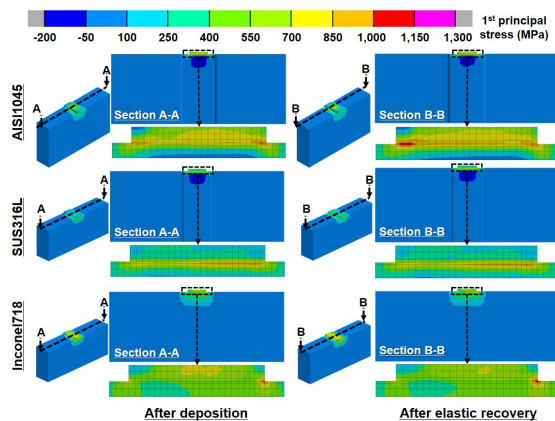
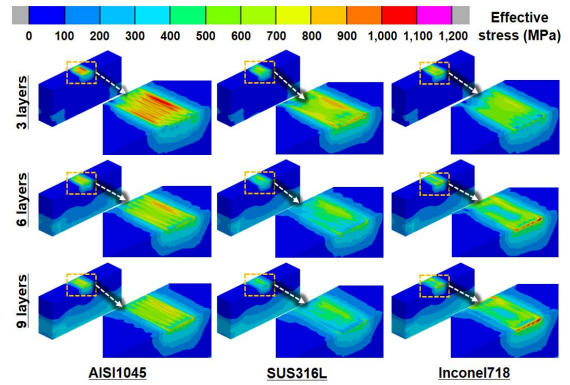
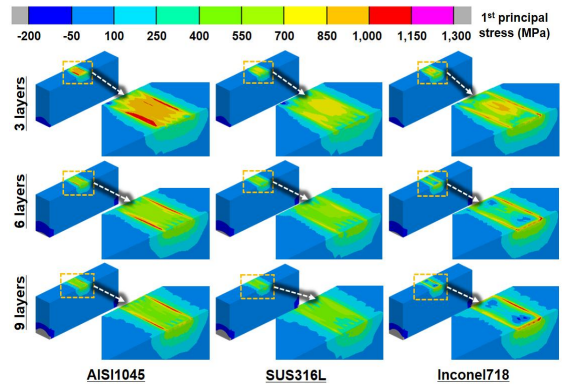


Fig. 7 Residual stress distributions in the vicinity of the deposited region for different deposited materials (After deposition of 3 layers)



(a) Effective stress distribution



(b) 1<sup>st</sup> principal stress distribution

Fig. 8 Effects of the deposited material and the number of layers on residual stress distributions in the substrate (after deposition)

SUS316L 재료를 적층할 경우에는 최대 잔류응력 발생 위치가 적층부와 기저부의 경계 바로 아래 영역이어서, 기저부 잔류 응력 분포인 Fig. 8에서는 SUS316L을 적층한 경우가 AISI1045와 Inconel718을 적층한 경우보다 작은 값의 잔류응력이 나타났다. 3층 정도로 적층 층수가 적을 때에는 AISI1045와 SUS316L을 적층한 경우가 Inconel718을 적층한 경우보다 최대 주응력의 최대값이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 적층 층수가 9층으로 증가하였을 때에는 Inconel718을 적층한 경우가 AISI1045와 SUS316L을 적층한 경우보다 최대 주응력의 최대값이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

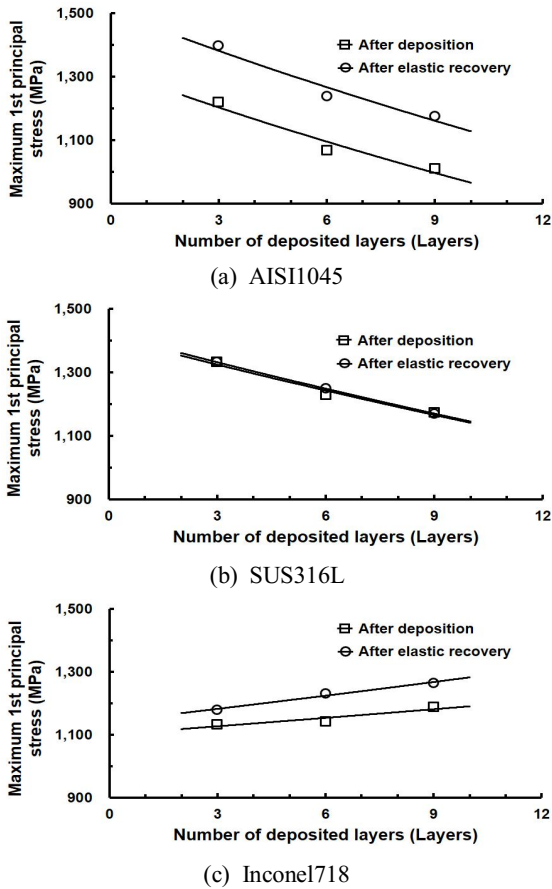


Fig. 9 Comparison of maximum 1<sup>st</sup> principal stress after deposition and that after elastic recovery

Fig. 10은 열-기계 해석 결과 예측된 냉각과 탄성회복이 완료된 후 적층부 인근의 잔류 응력 분포를 변화이다. 탄성 회복이 완료된 후에 적층부 인근의 압축 잔류 응력이 감소하고 인장 잔류 응력이 증가하여 적층부 인근의 잔류응력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 탄성 회복에 의하여 기저부의 아랫 부분의 압축 잔류 응력은 감소하고, 기저부와 적층부의 경계인 기저부 상부의 인장 잔류 응력은 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 같이 탄성 회복이 완료된 후에도 AISI1045와 SUS316L를 적층한 경우에는 적층 층수가 증가할수록 최대 주응력의 최대값이 감소하고, Inconel718를 적층한 경우에는 적층 층수가

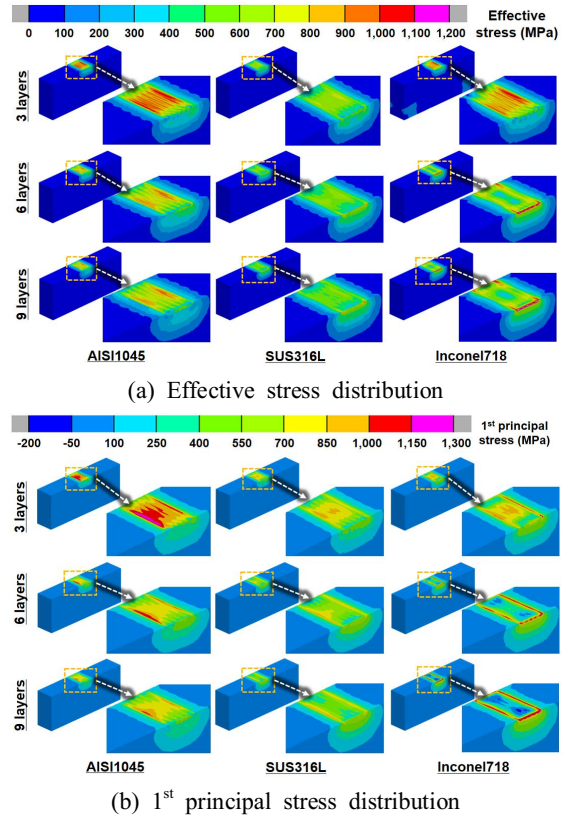


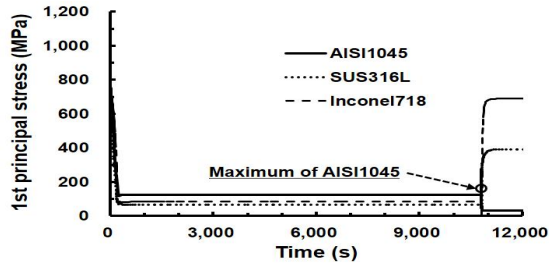
Fig. 10 Effects of the deposited material and the number of layers on residual stress distributions in the substrate (after elastic recovery)

증가할수록 최대 주응력의 최대값이 감소하는 경향은 변하지 않았다. 그러나 AISI1045와 Inconel718를 적층한 경우 탄성 회복에 의하여 최대 주응력 최대값은 증가하지만, SUS316L를 적층한 경우에는 냉각과 탄성회복에 의한 적층부 인근의 최대 주응력 최대값 변화는 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 SUS316L 적층시에는 최대 잔류응력 발생 위치가 적층부와 기저부 경계의 아래 부분에 위치하여 탄성 회복에 의한 인장 잔류응력 증가량이 작지만, AISI1045와 Inconel718 재료를 적층한 경우에는 최대 잔류응력이 적층부와 기저부의 경계 부근에서 발생하여 탄성 회복에 의한 인장 잔류응력 증가량이 상대적으로 크기 때문에 사료된다.

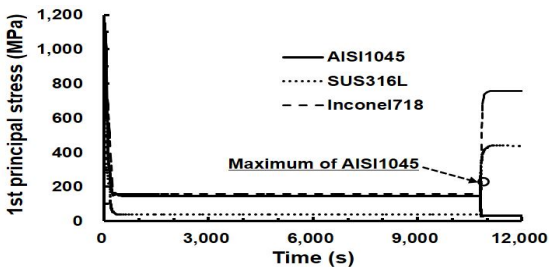
탄성 회복이 완료된 후에도 3층 적층의 경우 AISI1045와 SUS316L를 적층한 경우의 최대 주응력의 최대값이 Inconel718를 적층한 경우의 최대 주응력의 최대값 보다 크게 예측되었다. 그러나, 9층 적층의 경우에는 Inconel718를 적층한 경우의 최대 주응력의 최대값이 AISI1045와 SUS316L를 적층한 경우의 최대 주응력의 최대값 보다 크게 산출되었다. 이 결과로부터 기저부의 재료와 다른 재료를 적층할 경우 적층되는 층수가 증가할수록 탄성 회복 완료 후 적층부 인근의 잔류 응력 증가로 인한 균열/파단 발생의 가능성이 증가하는 것을 알 수 있었다.

### 3.2 가열과 담금질에 따른 잔류 응력 특성 변화

Fig. 11과 12는 가열과 담금질 단계들에 대한 열-기계 연계 해석 결과 예측된 잔류 응력 이력 (Residual stress history)와 담금질 완료 후 기저부의 잔류 응력 분포이다. Fig. 11과 같이 적층 층수에 관계없이 가열 단계에서는 탄성 회복 후 생성된 잔류 응력이 이완되는 것을 알 수 있었다.

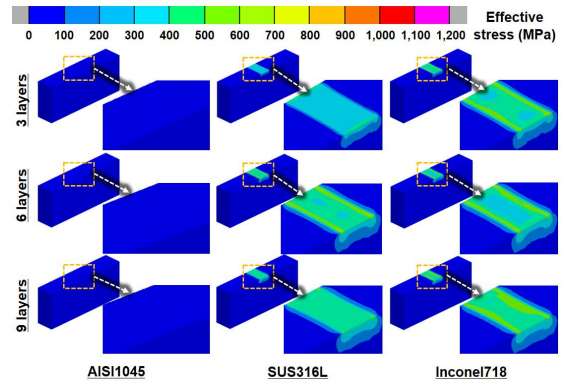


(a) Deposition of 3 layers

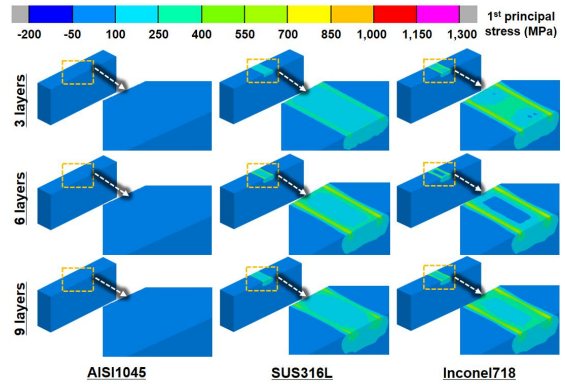


(b) Deposition of 9 layers

Fig. 11 Residual stress histories at the location of maximum 1<sup>st</sup> principal stress after quenching



(a) Effective stress distribution

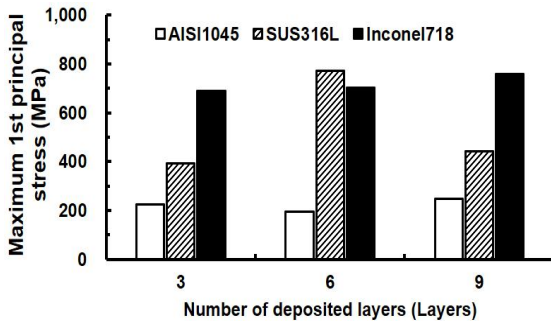


(b) 1<sup>st</sup> principal stress distribution

Fig. 12 Effects of the deposited material and the number of layers on residual stress distributions in the substrate (after quenching)

또한 담금질 단계에서 기저부의 잔류 응력이 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11과 같이 AISI1045 재료를 적층 재료로 사용한 경우에는 담금질 단계가 시작되는 시점에서 가열과 담금질 단계의 최대 잔류응력이 발생한 후, 담금질 단계에서는 진행되는 동안 잔류 응력이 가열 단계보다 더 감소하는 것을 알 수 있었다. 이로 인하여 AISI1045 재료를 적층한 경우 Fig. 12와 같이 담금질 완료 후 기저부에 잔류 응력이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 11 및 12와 같이 SUS316L과 Inconel718를 적층한 경우에는 AISI1045를 적층한 경우와 달리 담금질이 시작되는 영역에서 잔류 응력이 급격히 증가한 후, 담금질 온도가 안정되는 구간에서 최대 잔류



**Fig. 13 Influence of the deposited material and the number of layer on maximum 1<sup>st</sup> principal stress in the substrate (after quenching)**

응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. AISI1045 재료를 적층한 경우에는 담금질 단계 완료 후 기저부 전체에서 최대 주응력 기준 -50 MPa에서 100MPa 범위의 아주 작은 잔류 응력이 발생하였다. SUS316L과 Inconel718 재료를 적층한 경우에는 Fig. 12와 같이 잔류 응력이 적층부 인근으로 집중되는 것을 알 수 있었다. SUS316L과 Inconel718를 적층한 경우에는 최대 잔류 응력 발생 영역이 기저부 최상면의 적층부 가장자리 영역으로 예측되었다.

Fig. 13과 같이 AISI1045 재료를 적층한 경우 해석을 수행한 적층 층수 범위에서 담금질에 의해 발생하는 최대 주응력의 최대값은 196-249MPa 범위이며, 적층 층수가 9층 일 때 가장 큰 최대 주응력이 예측되었다. SUS316L 재료를 적층한 경우 담금질 단계에서 발생하는 최대 주응력의 최대값이 392-441MPa 범위로 산출되었으며, 적층 층수가 6층 일 때 가장 큰 최대 주응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. Inconel718 재료를 적층한 경우에는 담금질 단계에서 발생하는 최대 주응력의 최대값이 689-758MPa 범위이며, 적층 층수가 증가할수록 최대 주응력 최대값이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11, 12 및 13로부터 적층 재료에 관계없이 담금질 단계에서 예측된 최대 잔류 응력은 탄성 회복 후 산출된 잔류 응력 보다 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 DED 공정으로 제품을 적층할 경우 후 열처리 단계보다 적층 후

냉각 및 탄성 회복 단계에서 적층부 인근에 파손과 결함이 발생할 가능성이 더 높다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 열-기계 연계 유한 요소 해석 (Finite element analysis : FEA)을 이용하여 에너지 제어형 용착 공정으로 적층후 담금질 공정을 수행한 시편의 잔류 특성 변화를 해석적으로 분석/고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 적층, 냉각, 탄성 회복, 가열 및 담금질 단계가 연계된 재시작 계산법 기반의 열-기계 연계 해석 기법을 제안하였다. 이 해석 기법을 이용하여 AISI1045, SUS316L 및 Inconel718를 적층부 재료로 적용한 경우에 대한 적층부와 기저부의 각 단계별 잔류 응력을 예측할 수 있었다.

둘째, 적층, 냉각 및 탄성 회복 단계들에 대한 해석을 통하여 각 적층 재료별 최대 잔류 응력 발생 위치를 예측할 수 있었다. 탄성 회복에 의하여 적층부의 인근의 잔류 응력의 재분포가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 AISI1045와 Inconel718를 적층한 경우에는 탄성 회복 후에 적층 완료 후 보다 높은 잔류 응력이 발생하지만, SUS304를 적층한 경우에는 탄성 회복 전후의 잔류 응력이 거의 유사한 것을 알 수 있었다.

셋째, 가열 및 담금질 단계에 대한 열-기계 연계를 통하여 가열/담금질 단계의 잔류 응력 이력 및 분포를 예측할 수 있었다. 가열과 담금질 단계의 최대 잔류응력이 발생하는 시점이 AISI1045 재를 적층 경우에는 담금질 단계가 시작되는 시간이며, SUS316L과 Inconel718를 적층한 경우에는 담금질 온도가 안정되는 시간임을 알 수 있었다.

넷째, 담금질 단계와 탄성 회복 후에서 발생하는 최대 잔류 응력을 비교한 결과로부터, DED 공정으로 제품을 적층할 경우 후 열처리 단계보다 적층 후 냉각 및 탄성 회복 단계에서 파손과 결함이 발생할 가능성이 더 큰 것을 알 수 있었다.

향후, 각 적층 재료별 적층 실험과 잔류 응력 측정을 통하여 적층부 인근의 잔류 응력 발생 특성을 고찰하고자 한다. 또한, 실험 결과 도출된 적



층 특성 데이터, 온도 분포/이력 및 잔류 응력 데이터를 이용하여 해석 모델을 최적화하여 열-기계 연계 해석 결과의 신뢰도를 향상 시키고자 한다.

## 후 기

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 한국산업 기술평가관리원(KEIT)가 연구비를 지원한 “다중 소재 DED 금속 3D 프린팅 기술기반 중대형 국방 부품의 재생 및 기능 강화 제조기술 개발 (과제 번호 : 20009839)” 과제 및 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구과제인 “고효율 성형 금형 제조를 위한 고경도 재료 및 초합금 대체적 적층 기술 개발 (No. NRF-2019R1A2C1006741)” 과제의 연구 결과중 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Gebhardt, A., Understanding Additive Manufacturing, Hanser, pp. 2-16, 2011.
2. Bandyopadhyay, A. and Bose, S., Additive manufacturing : future of manufacturing in a flat world, CRC Press, pp. 2-5, 2015.
3. Ahn, D. G., “Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review,” International J. of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 381-395, 2016.
4. Ahn, D. G., “Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 703-742, 2021.
5. Cho, J. R., Lee, B. Y., Moon, Y. H., and Van Tyne, C. J., “Investigation of Residual Stress and Post Weld Heat Treatment of Multi-pass Welds by Finite Element Method and Experiments,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155—156, pp. 1690-1695, 2004.
6. Wu, A. S., Brown, D. W., Kumar, M., Gallegos, G. F., and King, W. E, “Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual stresses in 316L Stainless Steel,” Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 45, pp. 6260-6270, 2014.
7. Fergani, O., Berto, F., Welo, T., and Liang, S. Y., “Analytical Modelling of Residual Stress in Additive Manufacturing,” Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 40, pp. 971-978, 2017.
8. Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., and Guo, Y. B., “Residual Stress in Metal Additive Manufacturing,” Procedia CIRP, Vol. 71, pp. 348-353, 2018.
9. Yang, Y., Gong, Y., Qu, S., Xin, B., Xu, Y., and Qi, Y., “Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of 316L Stainless Steel Powder: Densification, Microhardness and Residual stress,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, pp. 5797-5807, 2019.
10. Lewandowski, J. J. and Seifi, M., “Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties,” Annual Review of Materials Research, Vol. 46, pp. 151-186, 2016.
11. Fujishima, M., Oda, Y., Ashida, R., Takezawa, K., and Kondo, M., “Study on Factors for Pores and Cladding Shape in the Deposition Processes of Inconel 625 by the Directed Energy Deposition (DED) Method,” CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 46, pp. 200-204, 2017.
12. Mantri, S. A., Alam, T., Zheng, Y., Williams, J. C., and Banerjee, R., “Influence of Post Deposition Annealing on Microstructure and Properties of Laser Additively Manufactured Titanium Copper Alloys,” Additive Manufacturing, Vol. 32, 101067, 2020.
13. Brandl, E., Palm, F., Michailove, V., Viehweger, B., and Leyens, C., “Mechanical Properties of

- Additive Manufactured Titanium (Ti-6Al-4V) Blocks Deposited by a Solid-state Laser and Wire,” *Materials and Design*, Vol. 32, No. 10, pp. 4665-4675, 2011.
14. Park, J. S., Lee, M. -G., Cho, Y. -J., Sung, J. H., Jeong, M. -S., Lee, S. -K., Choi, Y., -J., and Kim, D. H., “Effect of Heat Treatment on the Characteristics of Tool Steel Deposited by the Directed Energy Deposition Process,” *Metal and Materials International*, Vol. 22, No. 1, pp. 143-147, 2016.
  15. Sui, S., Chen, J., Li, Z., Li, H., Zhao, X., and Tan, H., “Investigation of Dissolution Behavior of Laves Phase in Inconel 718 Fabricated by Laser Directed Energy Deposition,” *Additive Manufacturing*, Vol. 32, 101055, 2020.
  16. Kim. H., "A Study on Residual stress Characteristics Dependent on the Deposition Strategy in a Large Volume Deposition of Inconel 718 Using a DED Process," A Thesis for a Master's, Chosun National University, Republic of Korea, 2021.
  17. Kim. H., Lee. K. K., Ahn. D. G. and Lee. H., "Effective of Deposition Strategy and Preheating Temperature on Thermo-Mechanical Characteristics of Inconel 718 Super-Alloy Deposited on AISI 1045 Substrate Using a DED Process," *Journal of MDPI*, Vol. 14, 2021.
  18. Solic. S, Podgornik. B, and Leskovsek. V., "The Occurrence of Quenching Cracks in High-Carbon Tool Steel Depending on the Austenitizing Temperature," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 92, pp. 140-148, 2018.