

# 기저부 경사각과 깊이가 에너지 제어형 용착 공정으로 보수된 영역의 열 및 잔류응력 특성에 미치는 영향 고찰

김단아\*, 이광규\*, 안동규\*.#

\*조선대학교 기계공학과

## A Study on the Influence of the Inclined Angle and Depth of the Substrate on Thermal and Residual Stress Characteristics in the Vicinity of the Repaired Region by a Directed Energy Deposition Process

Dan-A Kim\*, Kwang-Kyu Lee\*, Dong-Gyu Ahn\*.#

\*School of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.

(Received 10 March 2022; received in revised form 24 April 2022; accepted 28 April 2022)

### ABSTRACT

The design of the substrate significantly affects the thermal history and the residual stress formation in the vicinity of a repaired region by a directed energy deposition (DED) process. The occurrence of defects in the repaired region depends on the thermal history and residual stress formation. The objective of this study was to investigate the influence of the inclined angle and depth of the substrate on the thermal and residual stress characteristics in the vicinity of a repaired region by a DED process through two-dimensional finite element analyses (FEAs). The temperature and residual stress distributions in the vicinity of the repaired region were predicted according to the combination of the inclined angle and depth of the substrate. The effects of the inclined angle and depth on the depth of the heat affected zone and the maximum value of the residual stress were examined. A proper combination of the inclined angle and depth of the substrate was estimated to decrease the residual stress in the vicinity of the repaired region.

**Keywords** : Directed Energy Deposition Process(에너지 제어형 용착 공정), Inclined Angle(경사각), Depth(깊이), Thermal Characteristics(열 특성), Residual Stress Characteristics(잔류응력 특성)

### 1. 서 론

현대 기술이 발전하면서 발생한 폐기물 및 자원

고갈과 같은 환경 문제는 해결해야 할 중대한 문제 중 하나이다<sup>[1]</sup>. 환경 문제 해결과 관련하여 최근 기계 제조 관련 분야에서는 적층 제조(AM: additive manufacturing) 공정을 이용한 부품 보수(repair) 및 개조(retrofit)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 보수 및 개조는 손상이 발생한 영역을 제거한

# Corresponding Author : smart@chosun.ac.kr

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

후 기존 형상과 동일한 형상으로 형상 복원을 함과 동시에 향상된 성능을 가지도록 제품을 제작하는 것이다<sup>[3]</sup>. 보수/개조는 새로운 부품을 사용하지 않아 제품의 제작비용/시간 절감이 가능하며, 자원 재활용을 통하여 자원 고갈을 감소시킬 수 있다<sup>[4]</sup>. AM 공정은 기저부 위에 동일/이종 재료를 적층할 수 있는 특징이 있어 불규칙한 손상이 발생한 기계 부품의 보수에 사용되고 있다<sup>[5]</sup>. AM 공정 중 하나인 에너지 제어형 용착(DED : directed energy deposition) 공정은 임의의 위치에 목적하는 형상으로 적층할 수 있어 작고 불규칙한 손상 복구에 유리하다. 특히 이종 소재를 적용할 경우 보수/개조부의 내마모성/내부식성을 향상시킬 수 있다<sup>[6]</sup>. 에너지 제어형 용착 공정은 기저부 위에 전자빔 또는 레이저빔과 같은 고에너지 열원을 조사하여 용융지(molten pool)를 생성함과 동시에 분말 및 와이어 등의 재료를 공급하여 재료를 용융/응고시키며 한층씩 적층하는 공정이다<sup>[7]</sup>. 에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 손상부를 복구할 경우 적층 중 급속 가열/냉각에 의해 잔류응력이 발생하게 되고, 이 현상에 의해 적층 경계부 인근에 균열 및 파손이 발생하게 된다<sup>[8]</sup>. 이와 같은 현상을 해결하기 위해 적층 공정 수행 시 적층부 인근의 열 및 잔류응력 특성 변화 분석이 필요하다<sup>[9]</sup>. 또한, 기저부 형상에 따른 열 및 잔류응력 특성 변화 분석도 필요하다.

Raju 등은 두께 2mm의 인장 시험 시편에 폭 20mm, 깊이 4.5mm의 홈을 제작하고 LMD 공정을 이용하여 이송 속도에 따라 적층하였을 때 미세조직을 분석하고 적절한 이송 속도를 선정한 후 시편의 상, 경도 및 인장 특성을 고찰하였다<sup>[10]</sup>. Lei 등은 레이저 클래딩 공정을 이용하여 손상된 임펠러 블레이드를 보수하기 위해 유한요소 해석(FEA : finite element analysis)을 이용하여 열전달 및 잔류응력 특성 변화를 고찰하고 실제 보수 실험을 통해 손상 복구된 제품의 조직, 경도 및 인장 특성을 분석하였다<sup>[11]</sup>. Song 등은 SUS 304 시편에 깊이가 4mm인 사다리꼴 홈을 제작한 후 레이저 클래딩 공정을 이용하여 SUS 316L 분말로 적층하고, 그 위에 텅스텐 카바이드 분말의 양을 변수로 선정하여 적층하였을 때 시편의 미세조직, 경도 및 인성을 비교/분석하였다<sup>[12]</sup>. Paydas 등은 지름 80mm의 곡선

형상의 홈을 제작하고 공정 조건을 변수로 선정한 후 레이저 클래딩 공정을 이용하여 보수 하였을 때 접합 특성, 미세조직, 경도, 적층 중 열 이력 및 인장 특성에 대해 비교/분석하였다<sup>[13]</sup>. Soffel 등은 기저부 경사각 45°의 사다리꼴 홈을 가지는 시편을 제작하고 접합성을 높이기 위해 레이저 재용융(laser remelting) 후 DMD(direct metal deposition) 공정을 이용하여 보수하였을 때 접합 특성을 고찰하였다<sup>[14]</sup>. Lee 등은 세 가지 타입의 축(shaft)을 보수하기 위해 각각의 적층 형상을 설계하고 에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 보수한 후 보수된 축의 적층 형상, 미세조직, 경도 및 효율성을 고찰하였다<sup>[15]</sup>.

에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 기계 부품을 보수할 경우 손상 부위 제거 후 적층 시 잔류응력 발생을 최소화할 수 있는 기저부 형상 설계가 필수적으로 수행되어야 한다. 그러나 DED 공정으로 부품 보수시 적층부 인근의 잔류응력 발생을 최소화하기 위한 기저부 경사각과 깊이 조합에 따른 적층부 인근의 열 및 잔류응력 특성 변화에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

이 연구에서는 에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 기계 부품을 보수할 때 기저부 경사각과 깊이가 보수된 영역의 열 및 잔류응력 특성 변화에 미치는 영향을 2차원 유한요소해석을 통하여 분석/고찰하였다. 기저부 경사각( $\theta$ )과 깊이( $\psi$ )에 따른 적층부 인근의 온도 분포, 최대 잔류응력 및 잔류응력 분포를 비교/분석하였다. 해석 결과들로부터 잔류응력 측면의 적정 기저부 경사각과 깊이를 선정하였다.

## 2. 유한요소 해석 모델 설계

### 2.1 기저부 형상 설계

Fig. 1은 2차원 FEA 모델 제작을 위한 기저부 형상의 개념도이다. Fig. 1의 2차원 단면은 정상상태 열전달이 발생하는 적층 방향으로 긴 3차원 기저부 형상의 중앙부에서 도출하였다. 기저부 경사각( $\theta$ )이 작을 경우 적층량이 증가하고 기저부 경사각이 클 경우 적층 공정 중 레이저 헤드가 기저부에 충돌할 수 있어, 이 연구에서는 기저부 경사각은 30°와 45°로

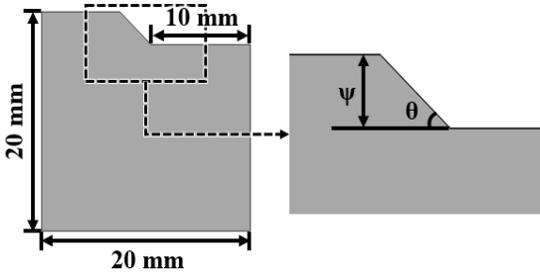


Fig. 1 Design of substrate

선정하였다. 기저부 깊이(ψ)는 적층량을 고려하여 2mm, 3mm 및 4mm로 선정하였다. 선정된 기저부 경사각 및 깊이에 따라 기저부 형상은 총 6가지로 설계하였다. 기저부와 적층부 재료는 각각 기계 구조용 강으로 사용되는 AISI 1045와 내마모성 우수한 Inconel 718로 선정하였다.

## 2.2 유한요소 해석 모델 생성

Fig. 2는 열-기계 연계 해석을 위한 FEA 모델 및 경계 조건이다. 기저부 경사각과 깊이의 조합에 따라 총 6가지의 해석 모델을 생성하였다. 해석 모델은 해석 시간 및 메모리를 고려하여 2차원 모델로 생성하였다. 해석 모델에 적용된 비드 특성 데이터는 Table 1과 같다<sup>[16]</sup>. 기저부 깊이 2mm, 3mm 및 4mm에 대한 적층 비드의 층수는 각각 11, 15 및 19층 이었다. 모든 해석 모델에서 적층 비드의 마지막 두 층은 과적층(over stacking)으로 정의 하였다. 과적층의 수직 방향 높이는 0.5mm이다. 생성된 FE 모델의 기저부 경사각과 깊이 조합별 적층 면적은 Table 2와 같다.

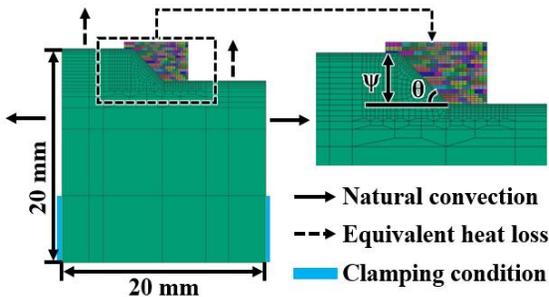


Fig. 2 FE model and boundary conditions

Table 1 Characteristics dimensions of the bead<sup>[16]</sup>

Bead width (μm)	Hatch distance (μm)	Layer thickness (μm)	
		1 <sup>st</sup> layer	the other layers
1,000	500	135	250

적층 중 해석 모델의 측면 및 바닥면에는 자연 대류 조건이 적용되었다. 자연 대류 계수는 식 (1)을 이용하여 산출되었다<sup>[17]</sup>. 상면에는 아르곤 가스에 의한 강제 대류와 자연 대류를 동시에 고려한 등가 열손실(equivalent heat loss) 조건이 적용되었다. 등가 열손실 계수는 식 (2)를 이용하여 예측되었다<sup>[17]</sup>. 적층 중 해석 모델의 양쪽 하단에는 고정(clamp) 조건이 적용되었으며, 적층 공정이 완료 후 고정부 제거(unclamp)와 함께 냉각이 진행되도록 하였다. 냉각 시간은 5,000초로 설정하여 적층부의 충분한 냉각이 이루어지도록 하였다. 냉각 시간 동안 해석 모델의 모든 면에는 자연 대류 조건이 적용되었다. 예측된 자연 대류 계수 및 등가 열손실 계수는 각각 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

$$h_n = \frac{Nu \times k}{L} \quad (1)$$

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

여기서  $h_n$ ,  $Nu$ ,  $k$ ,  $L$ ,  $h_{eq,f}$ ,  $h_f$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ ,  $T_s$  및  $T_\infty$  는 각각 자연 대류 계수, 넬셀 수, 공기의 열전도도, 특성 길이, 등가 열손실 계수, 강제 대류 계수, 방사율, 스테판-볼쯔만 상수, 표면 온도 및 대기 온도이다.

Table 2 Areas of the deposition region (mm<sup>2</sup>)

ψ (mm) \ θ (°)	2	3	4
30	13.6	21.8	31.7
45	10.1	15.6	22.1

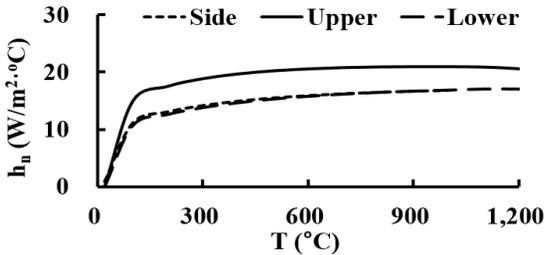


Fig. 3 Natural convection coefficients

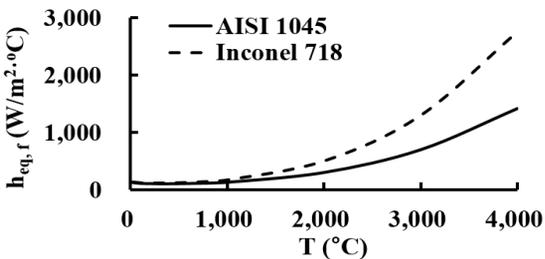


Fig. 4 Equivalent heat loss coefficients

Table 3은 FEA에 사용된 적층 조건이다. 레이저 출력 (P), 이송 속도 (V), 레이저 직경( $\Phi$ ), 아르곤 가스 공급률 (G) 및 분말 공급률 (F)는 각각 350W, 1,000mm/min, 1.0mm, 10.3g/min, 및 30/min이다<sup>[16]</sup>. 열원 효율은 2차원 FEA를 진행하고 열원 효율 별 열영향부(HAZ : heat affected zone)를 3차원 FEA 결과물 기준으로 비교하여 오차율이 가장 적게 나타나는 것을 해석 모델의 열원 효율로 선정하였다. 이 FEA에 사용된 열원 효율( $\eta$ )은 Table 3과 같이 0.28이다.

레이저 열원은 식 (3)과 같이 플랫 탑(flat-top) 형상에 가까운 가우시안(gaussian) 분포의 체적 열원(volumetric heat flux)으로 가정하였다<sup>[9]</sup>. 열원의 침투 깊이(penetration depth)는 비드의 한층 높이로 가정하였다. 레이저 열원의 적용 범위는 식 (4)와 같다. 열원은 수직방향으로 적용하였다. Fig. 5는 열-기계

Table 3 Deposition conditions<sup>[16]</sup>

P (W)	V (mm/min)	$\Phi$ (mm)	G (g/min)	F (l/min)	$\eta$
350	1,000	1.0	10.3	30	0.28

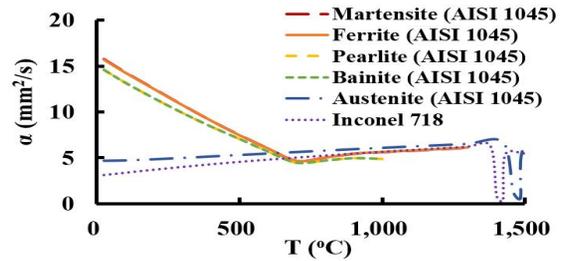
연계 해석을 위해 FE모델에 적용된 기저부 재료인 AISI 1045와 적층부 재료인 Inconel 718의 온도 의존 열-기계 물성들이다. AISI 1045 및 Inconel 718의 온도 의존 열-기계 물성 데이터는 각각 JMAT Pro 및 SYSWELD 소프트웨어에서 산출되었다<sup>[18,19]</sup>.

$$\dot{Q} = \frac{\eta P}{\delta \pi r^2 V} \text{Exp}\left(-\frac{x^2 + (y - Vt)^2}{16r^2}\right) \quad (3)$$

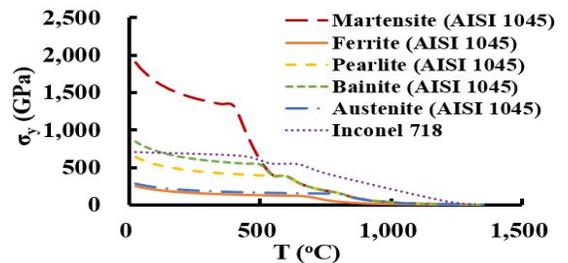
여기서  $\dot{Q}$ ,  $\delta$ ,  $x$  및  $y$ 는 각각 선형 열원 강도, 열원 침투 깊이,  $x$  좌표 및  $y$  좌표이다.

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq r \text{ and } \delta \leq z \leq 0 \quad (4)$$

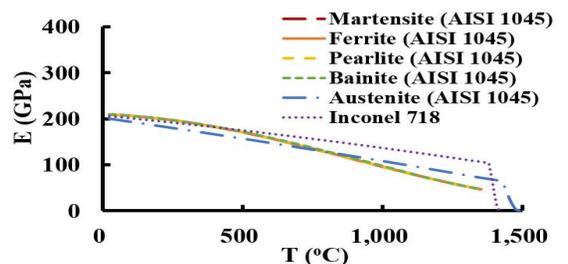
여기서  $z$ 는  $z$  좌표이다.



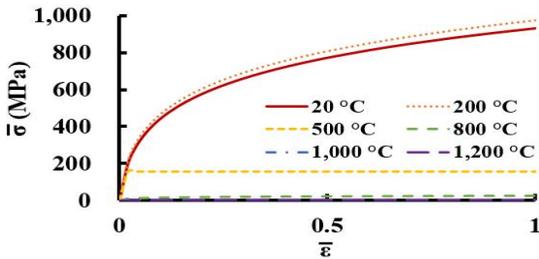
(a) Thermal diffusivity



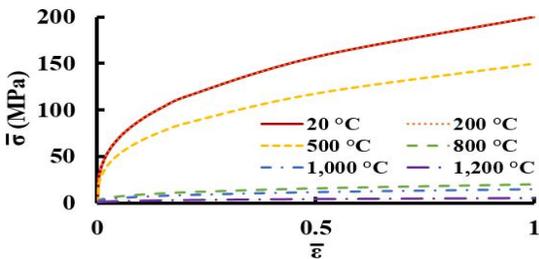
(b) Yield strength



(c) Elastic modulus



(d) Stress-Strain curves (Martensite, AISI 1045)



(e) stress-strain curves (Inconel 718)

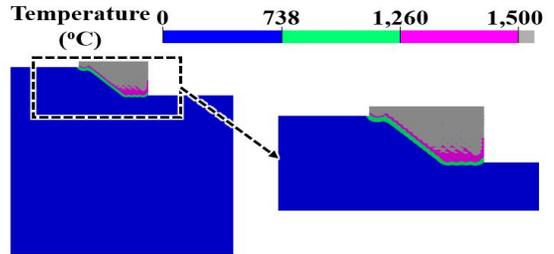
Fig. 5 Thermo-mechanical properties<sup>[18,19]</sup>

### 3. 결과 및 고찰

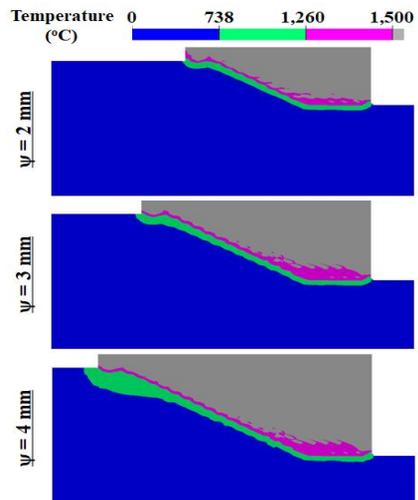
#### 3.1 열 특성

FEA 를 통하여 기저부 경사각과 깊이에 따른 적층부 인근의 온도 분포를 Fig. 6과 같이 도출하였다. AISI 1045의 완전 액상 시작 온도(liquidus temperature)의 절반에 해당되는 738°C와 고상 마지막 온도(solidus temperature)인 1,260°C 사이의 온도가 형성된 영역(녹색 영역)을 열영향부(HAZ: heat affected zone)로 가정하였다<sup>[16]</sup>.

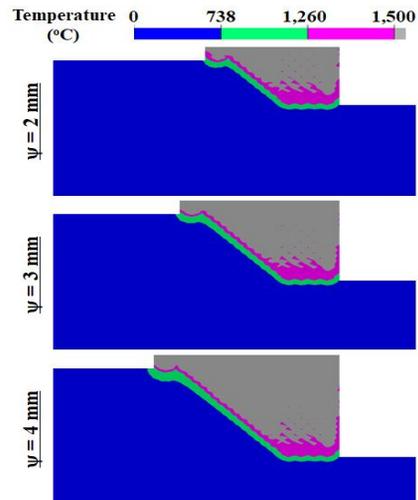
Fig. 6(b) 및 (c)와 같이 기저부 경사각이 감소하고 기저부 깊이가 증가할수록 열영향부의 범위가 넓어지는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 기저부 경사각이 감소하고 기저부의 깊이가 증가할수록 적층면적이 증가하고 이로 인하여 실질적으로 기저부에 투입되는 열량이 증가하기 때문으로 생각되었다. 적층부 수평 방향 최외곽 영역에서는 기저부내 HAZ의 깊이가 가장 적게 예측되었다. 기저부 하단부의 평면 영역보다 기저부 상단부로 올라가면서 HAZ의 깊이가 깊어지는 현상이 나타났다. 이 현상은 보수를 위한 적층을 기저부 하단부부터 시작하여



(a) Measured region ( $\theta = 45^\circ$  and  $\psi = 3$  mm)



(b)  $\theta = 30^\circ$



(c)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 6 Influence of the inclined angle and the depth of the substrate on temperature distributions

순차적으로 기저부 상단부로 올라감으로써, 해당 경사부의 적층시작시 초기 온도가 증가하게 되어 상단부로 올라갈수록 기저부의 HAZ 깊이가 증가하는 것으로 사료 되었다.

Fig. 7은 기저부 경사각과 깊이에 따른 경사면 모서리 영역들에서의 HAZ 깊이 변화이다. Fig. 7(a)은 경사부 각 모서리 영역에서의 HAZ 깊이 측정 위치이다. 기저부 경사면 하부 모서리의 HAZ 최대 깊이( $\psi_{1,HAZ}$ )는 Fig. 7(b)와 같이 기저부 경사각이 30°의 경우 44-45 $\mu\text{m}$  범위이고, 기저부 경사각이 45°인 경우는 98-110 $\mu\text{m}$  범위로 예측 되었다. 이 결과로부터 기저부 하부 모서리의 HAZ 깊이는 기저부 경사각의 증가를 통해 감소 시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 그러나 기저부 깊이가 기저부 하부 모서리부 HAZ 깊이의 변화에 미치는 영향은 매우 작은 것을 알 수 있었다.

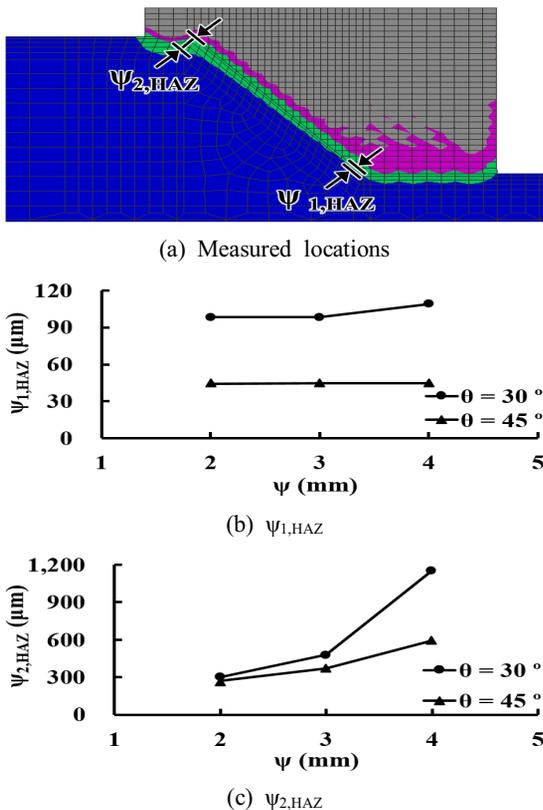


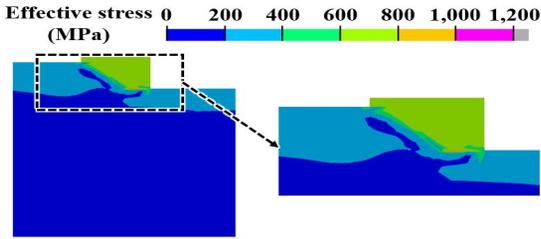
Fig. 7 Effects of the inclined angle and the depth on the depth of HAZ for corners

Fig. 7(c)와 같이 기저부 경사각이 감소하고 깊이가 증가할수록 기저부 경사면 상부 모서리의 HAZ 최대 깊이( $\psi_{2,HAZ}$ )가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 기저부 경사각이 감소하고 깊이가 증가할수록 적층 면적이 증가하고, 이로 인하여 적층시 기저부에 열이 누적되어 해당 부분 적층시 기저부의 초기온도가 증가하기 때문으로 사료 되었다. 기저부 경사각이 30°인 경우에는 기저부 깊이가 2mm에서 4mm로 증가할 때,  $\psi_{2,HAZ}$ 가 303 $\mu\text{m}$ 에서 1,156 $\mu\text{m}$ 로 약 3.8배 정도 증가하였다. 기저부 경사각이 45°인 경우에는 기저부 깊이가 2mm에서 4mm로 증가할 때,  $\psi_{2,HAZ}$ 가 270 $\mu\text{m}$ 에서 596 $\mu\text{m}$ 로 약 2.2배 정도 증가하였다. 이 결과로부터 기저부 경사각과 깊이가 기저부 경사면 상부 모서리의 HAZ 깊이에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있었다. 또한, 이 연구에서 적용된 기저부 설계 범위에서는 기저부 경사각보다 기저부 깊이가 기저부 경사면 상부 모서리의 HAZ 형성에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있었다.

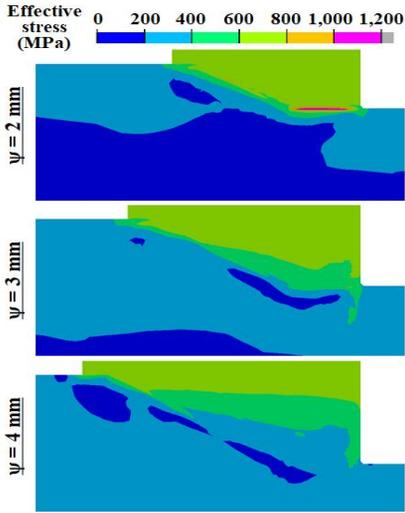
### 3.2 유효 응력 특성

Fig. 8은 FEA 결과 예측된 기저부 경사각과 깊이의 조합에 따른 적층부 인근의 유효 응력(effective stress) 분포이다. Fig. 8(a)는 유효 응력 분포를 분석한 영역을 나타내었다. Figs. 8(b) 및 (c)와 같이 모든 기저부 설계 조건에서 기저부의 하단에 위치한 평면부 인근에서 최대 유효 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 최대 유효 응력이 발생하는 영역은 기저부 하단 평면부와 적층부 경계에서 기저부 깊이 방향 바로 아래의 기저부 모서리쪽에 형성되는 것을 알 수 있었다.

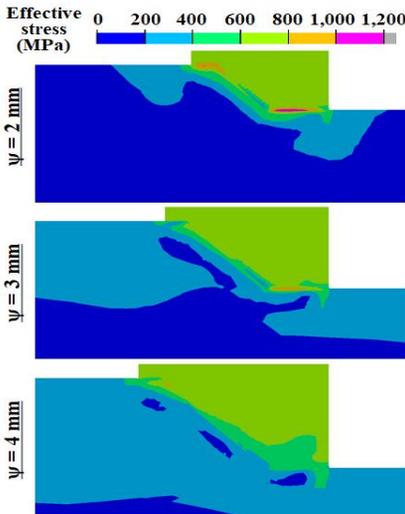
기저부 깊이가 증가할수록 적층부 인근에 발생하는 유효 응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 열 특성 분석을 통하여 기저부 깊이가 증가할수록 적층 비드수가 증가하여 상부 적층시 적층부 인근의 온도가 증가하는 것 알 수 있었다. 이 현상으로 인하여 기저부 깊이 증가시 적층부 인근에 템퍼링 (tempering) 효과가 증대되어 적층부 인근의 유효 응력이 감소하는 것으로 사료 되었다. 기저부 경사각이 증가할수록 적층부 인근에 발생하는 유효 응력의 크기는 증가하고 발생 영역은 감소하는 것을



(a) Measured region ( $\theta = 45^\circ$  and  $\psi = 3$  mm)



(b)  $\theta = 30^\circ$



(c)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 8 Effects of the inclined angle and the depth on effective stress distributions

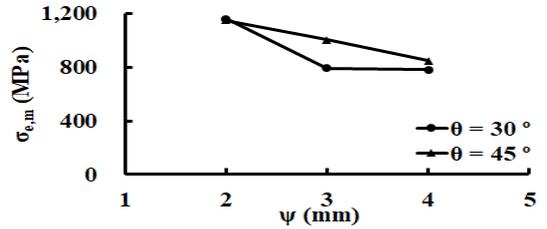


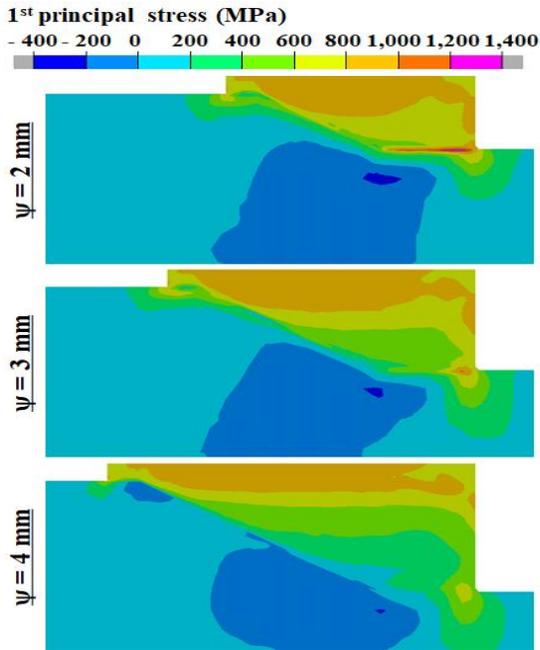
Fig. 9 Effects of the inclined angle and the depth on the maximum effective stress ( $\sigma_{e,m}$ )

알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이  $30^\circ$ 에서  $45^\circ$ 로 증가할 경우 기저부 상부 모서리 영역의 유효 응력이 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 기저부 경사각이 증가할수록 적층부 인근의 잔류 응력 집중도가 증가하고, 이로 인한 파손 발생 확률이 증가하는 것을 알 수 있었다.

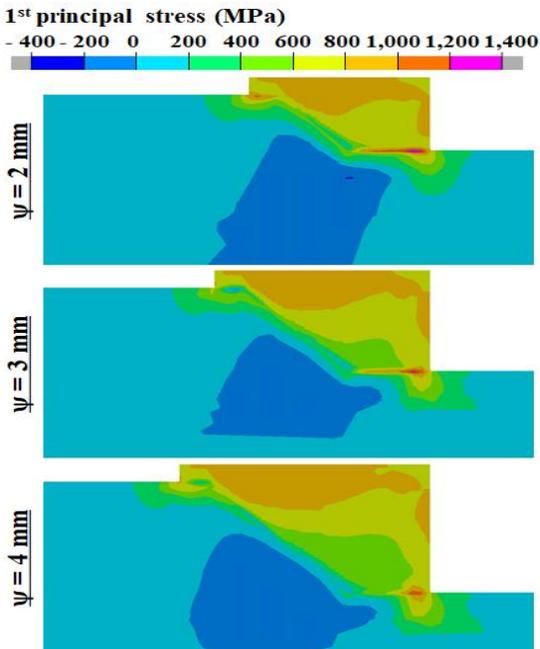
Fig. 9는 기저부 경사각과 깊이에 따른 최대 유효 응력( $\sigma_{e,m}$ ) 변화이다. 기저부 깊이가 증가할수록 최대 유효 응력은 감소하는 경향을 나타내었다. 기저부 경사각이  $45^\circ$ 인 경우에는 기저부 깊이가 증가할수록 최대 유효 응력이 거의 선형적으로 감소하였다. 기저부 경사각이  $30^\circ$ 인 경우에는 기저부 깊이가 2mm에서 3mm 증가할 때 최대 유효 응력이 1,160MPa에서 794MPa로 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 깊이가 2mm인 경우는 해석에 적용된 두가지 기저부 경사각 조건에서 최대 유효 응력이 거의 유사하였다. 그러나, 기저부 깊이가 2mm를 초과할 경우 기저부 경사각이  $30^\circ$ 인 경우가 기저부 경사각이  $45^\circ$ 인 경우보다 최대 유효 응력이 작게 예측되었다. 이 결과들로부터 경사각이  $30^\circ$ 이고 깊이가 3mm 이상인 기저부 설계가 적층부 인근 유효 응력 측면에서 바람직할 것으로 사료 되었다.

### 3.3 주응력 특성

Fig. 10은 기저부 경사각과 깊이의 조합에 따른 적층부 인근의 최대 주응력(1st principal stress) 분포 변화이다. 최대 주응력 분포 분석은 Fig. 8(a)의 유효 응력 분포 분석 영역과 동일한 영역에서 수행되었다. 최대 주응력의 최대값이 발생하는 영역은 기저부 하단 평면부와 적층부 경계에서 기저부 깊이 방향 바로 아래의 적층부 최외곽쪽에 형성되는 것을 알 수 있었다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 10 Effects of the inclined angle and the depth on 1<sup>st</sup> principal stress distributions

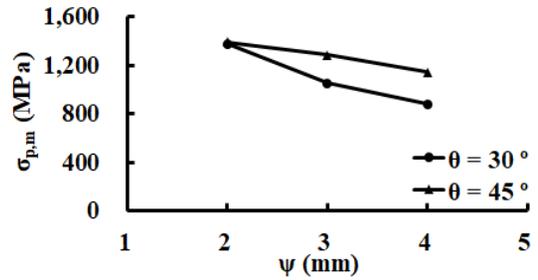


Fig. 11 Effects of the inclined angle and the depth on the maximum 1<sup>st</sup> principal stress ( $\sigma_{p,m}$ )

Fig. 10(a) 및 (b)와 같이 기저부 깊이가 증가할수록 최대 주응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 3.2절에 고찰한 바와 같이 기저부 깊이 증가시 적층부 인근에 템퍼링 효과가 증대되어 적층부 인근의 최대 주응력이 감소하는 것으로 사료되었다. 기저부 깊이가 증가함에 따라 기저부 하부 모서리의 압축 응력이 감소하고 기저부 상부 모서리 인장 응력이 감소하는 특성이 관찰되었다. 유효 응력 분포 분석시와 같이 기저부 경사각이 증가할수록 최대 주응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 기저부 깊이가 2mm이고 기저부 경사각이 45°인 경우에는 기저부 상부 모서리 영역에 과도 잔류 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 기저부 경사각 및 깊이에 따른 최대 주응력 최대값 ( $\sigma_{p,m}$ )의 변화이다. 최대 주응력 최대값은 기저부 깊이가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 기저부 깊이가 2mm인 경우에는 기저부 경사각이 30°인 경우와 45°인 경우가 거의 유사한 최대 주응력 최대값을 나타내었다. 그러나, 기저부 깊이가 3mm인 경우에는 기저부 경사각이 30°인 경우의 최대 주응력 최대값이 45°인 경우의 최대 주응력 최대값 보다 약 18% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 깊이가 4mm인 경우에는 기저부 경사각이 30°인 경우의 최대 주응력 최대값이 45°인 경우의 최대 주응력 최대값 보다 약 23% 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 기저부 경사각이 30°이고 기저부 깊이가 3mm 이상인 경사각과 깊이가 조합이 최대 주응력 특성 측면에서 추천되는 기저부 설계로 사료되었다.

### 3.4 적정 기저부 경사각 및 깊이 선정

3.2절 및 3.3절에서 기저부 경사각과 깊이 조합에 따른 적층부 인근의 잔류 응력 특성 변화를 분석하였다. 그 결과 기저부 깊이가 증가할수록 적층부 인근에 발생하는 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각을 45°에서 30°로 감소시킬 때 적층부 인근의 잔류 응력이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각이 30°인 경우 기저부 깊이를 2mm에서 3mm 이상으로 증가시키면, 유효 응력과 최대 주응력 최대값이 각각 약 31%와 23% 이상 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 이 연구에서 적용한 기저부 경사각과 깊이 조합 중 30°의 기저부 경사각과 3mm 이상의 기저부 깊이를 가지는 기저부 설계를 적정 기저부 설계안으로 선정할 수 있었다.

## 4. 결 론

에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 기계 부품을 보수할 때 기저부 경사각과 깊이가 보수된 영역의 열 및 잔류응력 특성 변화에 미치는 영향을 분석/고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기저부 경사각이 감소하고 기저부 깊이가 증가할수록 HAZ 영역이 증가하는 것을 알 수 있었다. 기저부 깊이 증가에 따라 기저부 상부 모서리의 HAZ 최대 깊이가 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다.

둘째, 기저부 경사각이 감소하고 기저부 깊이가 증가할수록 적층부 인근의 잔류응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히 기저부 깊이가 2mm에서 3mm로 변화할 때, 적층부 인근 잔류응력이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 연구에 사용된 6가지 기저부 경사각과 깊이 조합 중에서 가장 낮은 잔류 응력 분포가 예측된 기저부 경사각 30°와 기저부 깊이 3mm 이상의 조합을 적정 기저부 설계로 선정할 수 있었다.

향후 에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 기저부 경사각 및 깊이에 따른 보수 실험을 수행하고, 실험-해석 결과를 비교를 통해 신뢰도 높은 FE 모델을 도출할 예정이다. 이 FE 모델을 이용하여 추가적 FEA를 수행하여 최적 기저부 형상 설계를 제

시하고자 한다.

## 후 기

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구비로 지원된 “국산 CNC 기반 산업기계 재제조 스펙업 및 보급·확산 기반 조성” 사업에 의하여 연구되었음.(No.20206310200010)

## REFERENCES

1. Dipesh, P., Suela, K. and Basudeb, S., “Green Process Engineering as the Key to Future Processes,” Processes, Vol. 2, No. 1, pp. 311-332, 2014.
2. Nurhasyimah, A. A., Nur, A. A. A., Dzuraidah, A. W. and Abdul, H. A., “Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration : Current status and future outlook for remanufacturing,” Journal of Cleaner Production, Vol. 296, 2021.
3. Kim, D. A., Lee, K. K. and Ahn, D. G., “Investigation into the Effect of Process Parameters of DED Process on Deposition and Residual Stress Characteristics for Remanufacturing of Mechanical Parts,” Transactions of Materials Processing, Vol. 30, No. 3, pp. 109-118, 2021.
4. Wahab, D. A. and Azman, A. H., “Additive Manufacturing for Repair and Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives,” Process, Vol. 7, No. 11, 2019, Article 802.
5. Anand, K. S., Rajkumar, V., Nagesha, B. K., Amit, K. T., Sanjay, B. and Suresh, T. N., “Single crystal metal deposition using laser additive manufacturing technology for repair of aero-engine components,” Mater. Today: Proc., Vol. 45, No. 6, pp. 5395-5399, 2021.
6. Lee, K. K., Ahn, D. G., Kim, W. S. and Lee, H. J., “A study on the Heat Transfer Characteristics of Single Bead Deposition of Inconel 718 Superalloy on

- S45C Structural Steel Using a DMT Process,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 8, pp. 56-63, 2020.
7. Ahn, D. G., “Direct Metal Additive Manufacturing Process and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review,” *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, Vol. 3, No. 4, pp. 381-395, 2016.
  8. Hwang, A. J., Lee, K. K. and Ahn, D. G., “Investigation of Residual Stress Characteristics of Specimen Fabricated by DED and Quenching Process Using Thermo-mechanical Analysis,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 12, pp. 113-122, 2021.
  9. Baek, S. H., Lee, K. K., Ahn, D. G., Kim, W. S. and Lee, H. J., “Influence of Substrate Phase and Inclination Angle on Heat Transfer Characteristics in Vicinity of Hastelloy X Regions Deposited on S45C via Directed Energy Deposition,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 10, pp. 27-37, 2021.
  10. Remesh, R., Muthukannan, D., Vijay, P., Shweta V. and Rajendran, R., “Microstructural and mechanical characterization of Ti6Al4V refurbished parts obtained by laser metal deposition,” *Materials Science and Engineering*, Vol. 643, No. 3, pp. 64-71, 2015.
  11. Xu, L., Cao, H., Liu, H. and Zhang, Y., “Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 90, pp. 1383-1392, 2017.
  12. Lijun, S., Guangcheng, Z., Hui, X., Xianfeng, X. and Simeng, L., “Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, No. 1, pp. 116-124, 2016.
  13. Paydas, H., Mertens, A., Lecomte-Beckers, J. and Tchoufang, T. J., “Laser cladding as repair technology for Ti-6Al-4V alloy: Influence of building strategy on microstructure and hardness,” *Materials & Design*, Vol. 85, pp. 497-510, 2015.
  14. Fabian, S., Yunong, L., Dominik, K., Sergei, E. and Konrad, W., “Laser Remelting Process Simulation and Optimization for Additive Manufacturing of Nickel-Based Super Alloys,” *Materials*, Vol. 15, No. 7, pp. 1-15, 2022, Article 177.
  15. Lee, Y. S., Lee, M. K., Sung, J. H., Hong, M. P., Son, Y., An, S., Jeong, O. C. and Lee, H. J., “A Study on the Method and Application of Shaft Repair using Directed Energy Deposition Process,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 9, pp. 1-10, 2021.
  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,” *Master Course Thesis*, Chosun University, Republic of Korea, pp. 23, 2021.
  17. Chua, B. L., “Investigation of Development of Thermo-Mechanical Analysis Method for a Wire Feeding Type Directed Energy Deposition Process,” *Ph.D. Thesis*, Chosun University, Republic of Korea, pp. 92-98, 2019.
  18. Sente Software, 2001, JmatPro®, Sente Software Ltd., Guildford, UK (accessed June 2, 2019).
  19. ESI-Group, 1973, SYSWELD, Paris, France (accessed July 9, 2021).