

DED 공정을 이용한 S45C 위 Hastelloy X 분말 적층 시 기저부 상과 경사각이 적층부 인근 열전달 특성에 미치는 영향에 관한 연구

백선호*, 이광규*, 안동규*[#], 김우성**, 이호진**

*조선대학교 기계공학과, **한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹

Influence of Substrate Phase and Inclination Angle on Heat Transfer Characteristics in Vicinity of Hastelloy X Regions Deposited on S45C via Directed Energy Deposition

Sun-Ho Baek*, Kwang-Kyu Lee*, Dong-Kyu Ahn*[#], Woo-Sung Kim**, Ho-Jin Lee**

*Department of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.

**Smart Manufacturing Technology R&D Group, KITECH

(Received 23 August 2021; received in revised form 15 September 2021; accepted 17 September 2021)

ABSTRACT

The use of additive manufacturing processes for the repair and remanufacturing of mechanical parts has attracted considerable attention because of strict environmental regulations. Directed energy deposition (DED) is widely used to retrofit mechanical parts. In this study, finite element analyses (FEAs) were performed to investigate the influence of the substrate phase and inclination angle on the heat transfer characteristics in the vicinity of Hastelloy X regions deposited via DED. FE models that consider the bead size and hatch distance were designed. A volumetric heat source model with a Gaussian distribution in a plane was adopted as the heat flux model for DED. The substrate and the deposited powder were S45C structural steel and Hastelloy X, respectively. Temperature-dependent thermal properties were considered while performing the FEAs. The effects of the substrate phase and inclination angle on the temperature distributions and depth of the heat-affected zone (HAZ) in the vicinity of the deposited regions were examined. Furthermore, the influence of deposition paths on depths of the HAZ were investigated. The results of the analyses were used to determine the suitable phase and inclination angle of the substrate as well as the appropriate deposition path.

Keywords : Directed Energy Deposition(에너지 제어 용착), Heat Transfer Characteristics(열전달 특성), Phase(상), Inclined Angle(경사각), Deposition Path(적층 경로)

1. 서 론

최근 기술이 발전됨에 따라 국제적인 환경문제에 관한 관심 증가 및 규제에 의해 금속 적층 제조

(metal additive manufacturing : MAM) 공정을 이용한 제품의 수리 (repair) 및 재제조 (remanufacturing) 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾. 금속 적층 제조 공정의 하나인 에너지 제어 용착 (directed energy deposition : DED) 공정은 금속 기저부 위 전자빔 및 레이저와 같은 고밀도의 에너지를 적층하고자 하는 부위에 조사하여 용융지 (Melt-pool)를 생

Corresponding Author : smart@chosun.ac.kr

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

성하고, 용융된 기저부 위에 금속 분말 또는 금속 선재를 공급/용융시켜 새로운 층 (new layer) 을 형성시키고 앞서 형성된 층 (precious layer) 위에 층을 형성시키는 과정을 반복하여 3차원의 금속제품을 제작하는 공정이다^[4]. DED 공정은 다중 분말 공급식 호퍼를 이용하여 다양한 금속 분말을 이용하여 적층 공정이 가능하며 동일 또는 이종 재료를 손쉽게 적층할 수 있는 특징을 가지고 있다^[4,5]. DED 공정은 평면 또는 곡면에 3축 또는 5축 적층이 가능하다. 이러한 이유로 DED 공정은 제품 보수/재제조에 매우 많이 활용되고 있다^[5,6]. 대표적인 DED 공정에는 LENS (laser energy net shaping) 공정, DMD (direct metal deposition) 공정, DMT (laser-aided metal rapid tooling) 공정 등이 있다.

DED 공정을 이용한 적층 공정 중 급속 가열 및 냉각의 열 이력으로 잔류응력 및 변형과 같은 문제가 발생한다. 이러한 잔류응력 및 변형은 적층부 주위에 일어나며 이와 같은 문제점을 해결해야 한다.^[7] DED 공정을 이용하여 적층 공정을 수행할 시 적층되는 제품의 경도 및 적층 방향에 따라 상이한 열 이력이 발생하기 때문에 위 공정을 실제 제품에 적용하기 위해서는 기저부의 형상 및 경로에 따른 열전달 현상 분석이 필요하다.^[8]

Heigel 등은 DED 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 소재의 적층 중 온도 측정을 수행하였다. 이를 자연 대류 및 강제 대류 조건이 각각 적용된 열-기계 해석모델을 개발하여 비교하여 유한요소 해석모델에 강제 대류 효과를 고려해야 함을 고찰하였다^[9]. Yong 등은 레이저 클래딩 (laser cladding) 공정을 이용하여 단일 비드 적층을 수행하고 적층 유한요소 해석을 진행하여 실험과 해석 모델의 단면비교를 수행하였다. 실험을 통해 측정된 열 영향부 (heat affected zone : HAZ) 를 기반으로 유한요소 해석 모델에서 열 영향부의 온도 범위를 도출하였다^[10]. Chua 등은 DED 공정을 이용하여 적층된 단일 비드와 유한요소 해석을 통해 도출된 HAZ를 비교하여 적절한 열원의 효율과 열원의 침투 깊이 도출에 관한 연구를 수행하였다^[11].

DED 공정을 이용하여 적층을 하기 위해서는 3차원 열전달 특성 분석이 필요하다. 특히 적층 부위의 경사각도 및 기저부의 상 분포는 적층 공정 중 발생하는 열전달 특성을 변화시키고, 적층 방향에 따라

열전달 특성 또한 변화하기 때문에 조건별 열전달 특성 변화에 대한 분석 및 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 DED 공정을 이용하여 상 분포 별 평면 및 경사 형상의 기저부 위 적층 시 발생하는 열전달 현상을 3차원 열전달 유한요소 해석을 통해 비교/분석하였다. 열전달 해석을 통해 기저부 상을 선정하였고 적층 경로에 따른 열전달 현상을 해석적으로 고찰하였다. 본 연구의 해석모델에는 적층 중 및 적층 후 발생하는 자연 대류 및 강제 대류와 열 손실이 함께 고려된 등가 열손실계수가 적용되었으며 재료의 온도 의존 물성 데이터가 적용되었다. 해석모델을 이용하여 적층 조건에 따른 적층부 인근에서 발생하는 열 이력 및 온도 분포 등 열전달 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 경사 적층 해석모델 설계

2.1 각도 별 기저부 설계

Fig. 1은 기저부 경사 각도에 따른 적층 영역 열전달 특성 분석을 위한 기저부의 형상이다. 기저부의 경사 각도의 정의는 Fig. 1 (a)와 같으며 기저부의

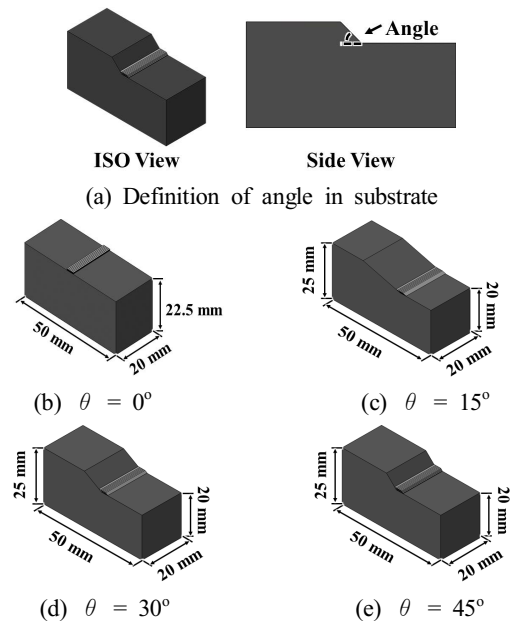


Fig. 1 Design of the substrates

상 분포 및 경사각도 조건과 비교하기 위한 평면 적층 기저부 형상은 Fig. 1 (b)와 같이 설계하였다. 유한요소 해석에 사용된 공정조건 중 레이저의 출력과 이송 속도는 각각 400W 및 850mm/min를 적용하였다.

2.2 유한요소 해석

유한요소 해석은 상용 소프트웨어인 SYSWELD V15.5를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 2는 기저부 경사각도 별 적층 공정에 대한 유한요소 해석 모델이다. 기저부는 S45C 강을 적용하였으며, 적층 비드는 Hastelloy X 재료를 적용하였다.

적층 방향은 경사면에서 시작하여 평면에서 적층이 끝나는 D₁ 경로와 평면에서 시작하여 경사면에서 적층이 끝나는 D₂ 경로로 적층 해석을 진행하였으며 D₁ 및 D₂ 경로는 모두 교차 방향 (alternative direction) 으로 적층을 진행하였으며 시작점에 다른 적층 경로에 따른 적층 방향은 Fig. 2 (e)와 같다.

적층 조건에 대한 적층 비드의 폭, 첫 번째 층의 두께, 이후 적층되는 두 번째, 세 번째 및 네 번째 층의 두께와 해치 거리 (hatch distance) 는 Table 1과 같이 적용하여 생성하였다. 경사가 없는 기저부 위 적층 비드는 육면체 격자 (hexahedral elements) 로 생성하였으며 경사가 있는 기저부 위 적층되는 비드는 적층 높이 및 경사각을 고려하여 육면체 격자로 생성하였다.

레이저 열원은 플랫폼 탑 (flat-top) 형상에 가까운 가우시안 (gaussian) 분포의 체적 열원 (volumetric heat flux) 모델을 이용하여 해석모델에 적용하였다. 식 (1)은 식 (2)의 제한된 조건에서만 적용되도록 하였다. 열원의 침투 깊이 (penetration depth) 는 적층되는 비드의 층별 높이와 같이 설정하였다.^[12]

Table 1 Characteristics dimensions of FE models

Bead width (mm)	Bead thickness (mm)		Hatch distance (mm)
	1 st layer	2 nd -4 th layer	
0.86	0.1	0.25	0.5

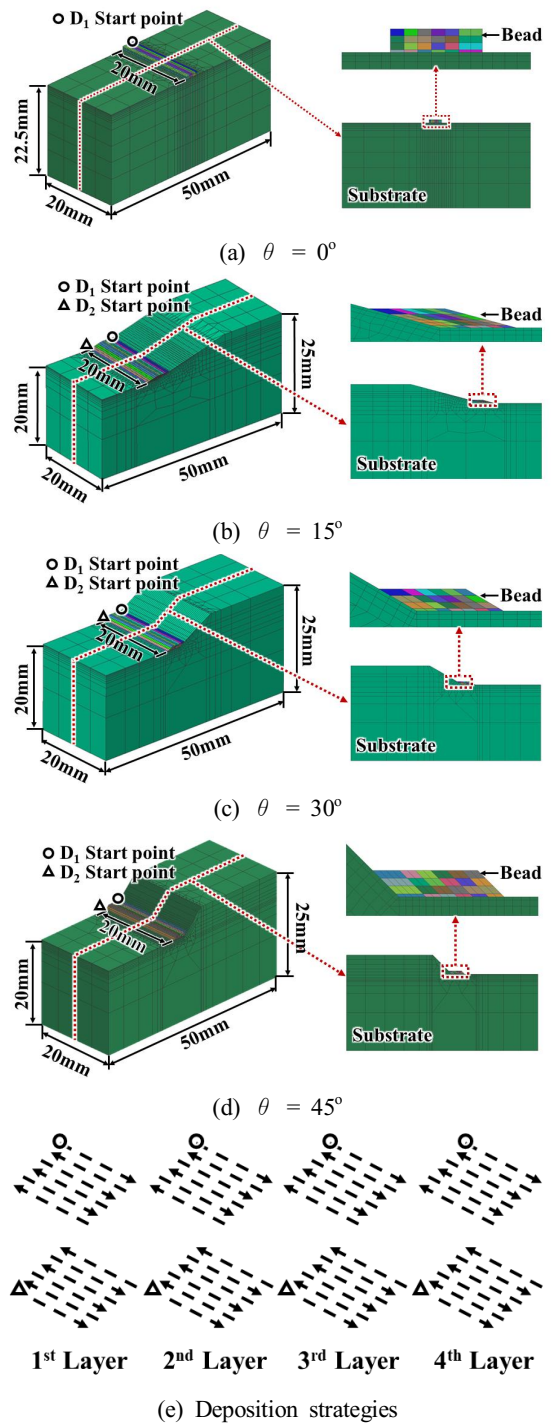


Fig. 2 FE models for different substrate designs

$$\dot{Q} = \frac{\eta E}{\delta \pi r^2 v} \text{Exp}\left(-\frac{x^2 + (y - vt)^2}{16r^2}\right) \quad (1)$$

여기서 \dot{Q} , η , E , δ , v , x 및 y 는 각각 선형 열원 강도, 열원 효율, 레이저 파워, 열원 침투 깊이, 열원의 이송 속도, x 좌표 및 y 좌표이다.

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

Fig. 3은 적층 공정 중 발생하는 경계 조건이다. 유한요소 모델 측면에는 온도 의존 자연 대류 경계 조건을 적용하였다. 적층 영역인 기저부 상면에는 보호 가스인 아르곤 가스 분사에 의한 강제 대류와 적층 공정 중 발생하는 방사에 의한 열 손실을 동시에 고려하기 위해 식 (3)과 같이 등가 열 손실 (equivalent heat loss) 을 적층 공정 중 해석모델의 상면에 적용하였다^[13,14]. 적층 공정 후 냉각 (cooling) 중에는 유한요소 모델 전면에 온도 의존 자연 대류 경계 조건을 적용하였다.

$$\bar{h}_{eq} = \bar{h}_{fc} + \epsilon \sigma (T_{sf}^2 + T_a^2)(T_{sf} + T_a) \quad (3)$$

여기서 \bar{h}_{eq} , \bar{h}_{fc} , ϵ , σ , T_{sf} 및 T_a 는 각각 등가 열 손실 계수, 강제 대류 계수, 방사율, 스테판-볼츠만 상수, 표면 온도 및 주변 온도이다.

Figs. 4와 5는 유한요소 해석에 필요한 기저부 S45C 재료와 적층 비드 Hastelloy X 재료의 온도 의존 밀도, 온도 의존 열전도도 및 온도 의존 비열 데이터이다. S45C는 상변화에 따른 변화를 고려하기 위하여 상변화에 따른 열 물성 데이터를 사용하

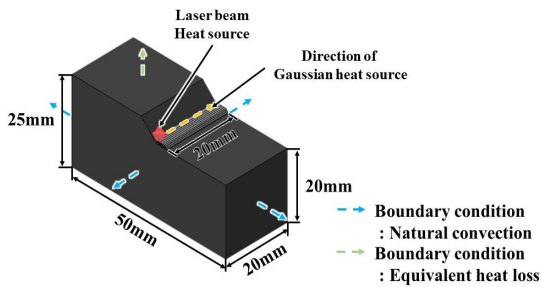
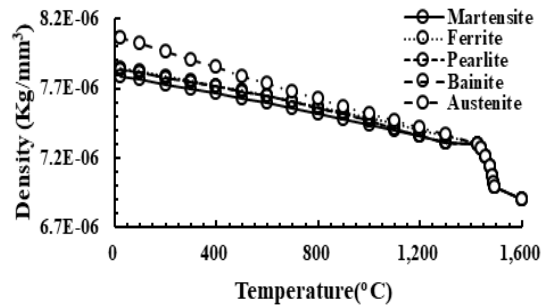
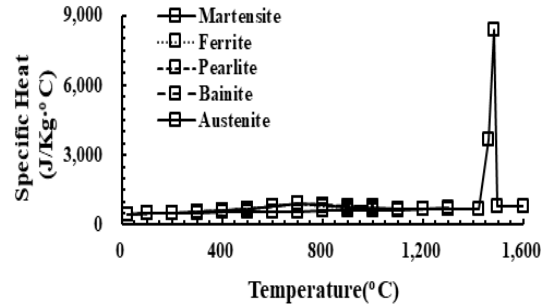


Fig. 3 Boundary conditions for FEAs

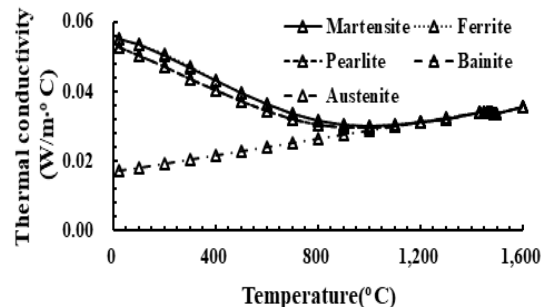
였다. 기저부의 상 분포에 따른 적층 시 열전달 특성 분석을 위하여 기저부의 상 분포는 열처리의 정도에 따른 열 영향부를 예측하기 위하여 페라이트 50%와 펄라이트 50%, 펄라이트 50%와 베이나이트 50% 및 베이나이트 100%로 구성된 S45C 물성을 적용하였다. 적층 분말인 Hastelloy X의 상은 단입상인 Gamma 상으로 가정하였다. 위와 같은 열 물성 데이터는 SYSWELD 및 JMatPro 소프트웨어를 통해 산출되었다^[15,16].



(a) Density

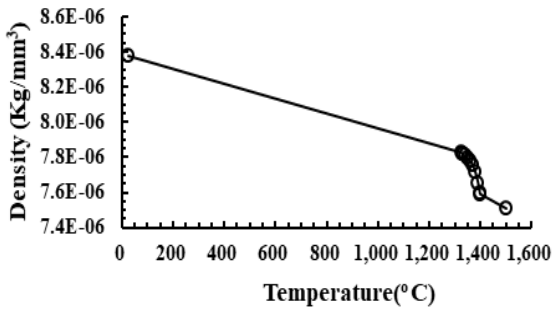


(b) Specific heat

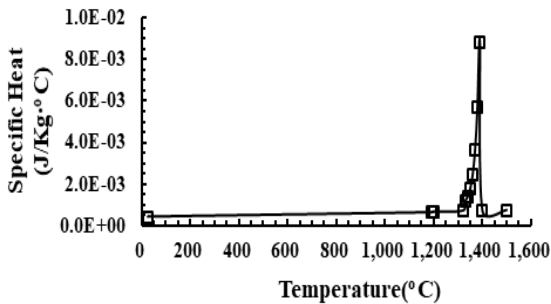


(c) Thermal conductivity

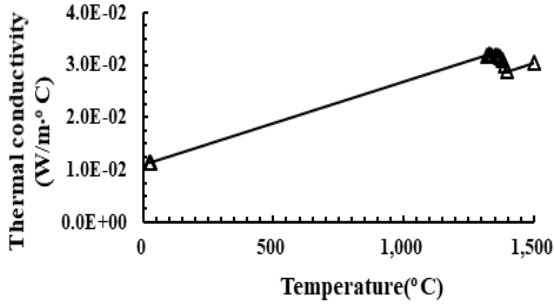
Fig. 4 Thermal properties of S45C



(a) Density



(b) Specific heat



(c) Thermal conductivity

Fig. 5 Thermal properties of Hastelloy X

3. 결과 및 고찰

3.1 기저부 상 및 경사각에 따른 적층부 인근 열전달 특성 변화

3차원 유한요소해석 결과를 이용하여 기저부 상과 경사각에 따른 적층 수직 방향의 깊이 ($D_{HAZ,A}$)와 경사부 수직 방향 깊이 ($D_{HAZ,B}$) 변화를 고찰하였다. Fig. 6은 $D_{HAZ,A}$ 와 $D_{HAZ,B}$ 의 정의이다.

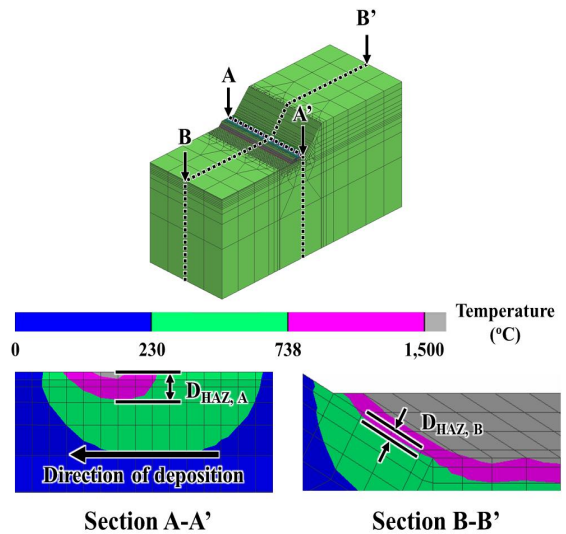
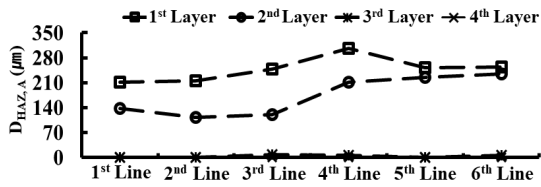


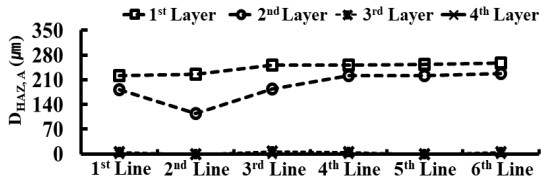
Fig. 6 Definition of $D_{HAZ,A}$ and $D_{HAZ,B}$

기저부 상 및 경사각에 따른 적층부 인근 열전달 특성 변화 고찰에서는 Fig. 2와 같이 D_1 경로를 적용하였고 적층 경로는 교차 방향으로 적용하였다. Fig. 7은 적층 시 기저부 경사각도 및 상별 유한요소 해석으로 예측된 열 영향부 $D_{HAZ,A}$ 의 그래프이다.

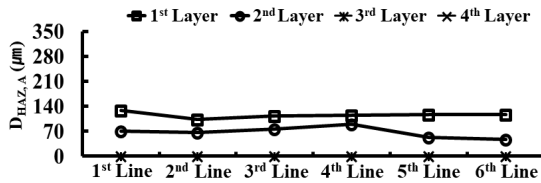
열 영향부 예측결과 첫 번째 층과 두 번째 층 적층 시 적층 방향의 수직 방향 기저부에는 열 영향부가 발생 될 것으로 예측되었지만 세 번째 층 적층 시 기저부의 온도는 열 영향부 이상의 온도에 도달하지 않을 것으로 예측되어 두 번째 층까지의 열 영향부를 비교하였다. 페라이트 50%와 펄라이트 50% 및 펄라이트 50%와 베이나이트 50%로 구성된 상을 갖는 기저부에서 예측된 열 영향부는 동일한 경향을 보이며 베이나이트 100% 상의 기저부에서 발생 될 것으로 예측된 열 영향부는 상대적으로 열 영향부 깊이가 낮음을 알 수 있었다. 모든 기저부 조건에서 세 번째 열 적층 이후 $D_{HAZ,A}$ 가 증가할 것으로 예측되었으며 이는 적층량이 증가함에 따라 열이 누적되었음을 알 수 있었다. 적층 각도가 증가할수록 적층 방향의 수직 방향의 열 영향부 $D_{HAZ,A}$ 는 깊을 것으로 예측되었으며, 평면 적층에서 가장 깊은 $D_{HAZ,A}$ 가 산출되는 것을 알 수 있었다.



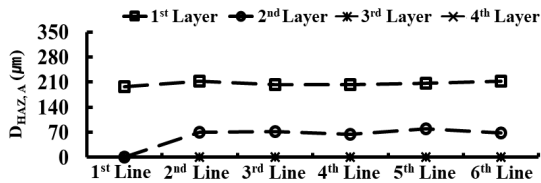
(a) $\theta = 0^\circ$, ferrite 50% and pearlite 50%



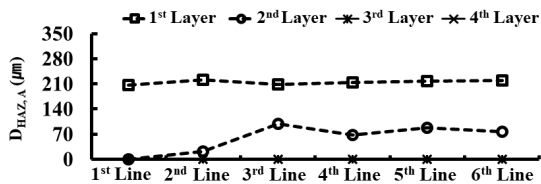
(b) $\theta = 0^\circ$, pearlite 50% and bainite 50%



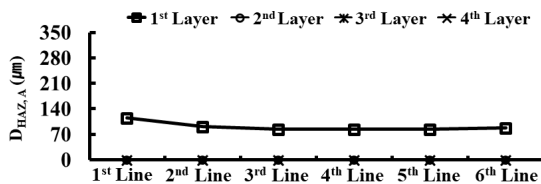
(c) $\theta = 0^\circ$, bainite 100%



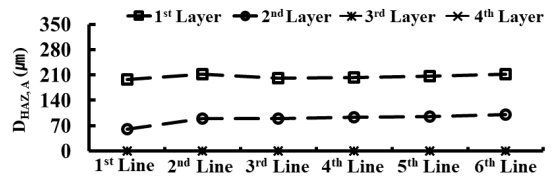
(d) $\theta = 15^\circ$, ferrite 50% and pearlite 50%



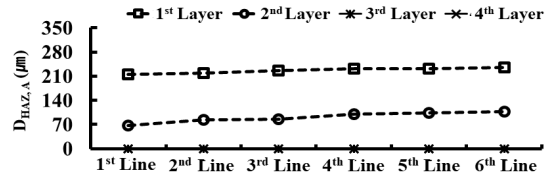
(e) $\theta = 15^\circ$, pearlite 50% and bainite 50%



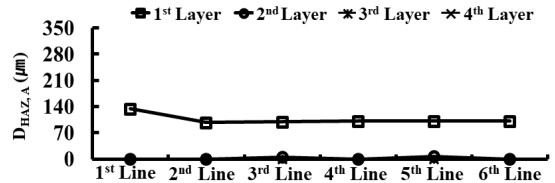
(f) $\theta = 15^\circ$, bainite 100%



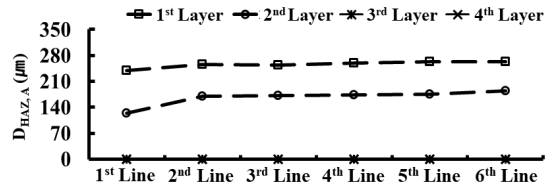
(g) $\theta = 30^\circ$, ferrite 50% and pearlite 50%



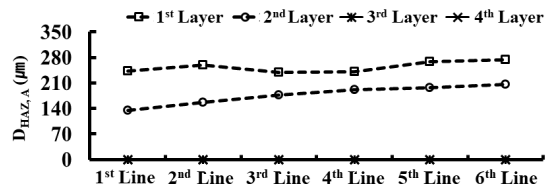
(h) $\theta = 30^\circ$, pearlite 50% and bainite 50%



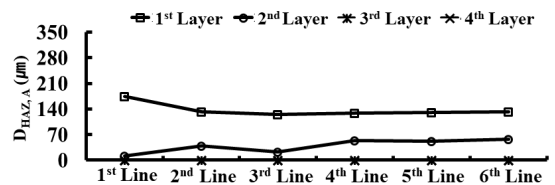
(i) $\theta = 30^\circ$, bainite 100%



(j) $\theta = 45^\circ$, ferrite 50% and pearlite 50%



(k) $\theta = 45^\circ$, pearlite 50% and bainite 50%



(l) $\theta = 45^\circ$, bainite 100%

Fig. 7 Depth of heat affected zone (D_{HAZA}) in a flat surface

기저부의 경사각도 (θ) 및 상 분포에 따른 $D_{HAZ,B}$ 의 예측결과는 Fig. 8 과 같다. Fig. 2 (a)의 경우 평면 적층이기 때문에 $D_{HAZ,B}$ 가 나타나지 않기 때문에 경사 형상의 기저부 위 적층 시 경사면에 발생하는 열 영향부를 비교하였다. 기저부 경사각도 15° 일 때 $D_{HAZ,B}$ 는 가장 깊게 발생할 것으로 예측되었으며 기저부의 경사 각도가 증가할수록 경사면에 수직인 방향의 열 영향부의 깊이는 감소할 것으로 예측되었다. 페라이트 50%와 펄라이트 50% 및 펄라이트 50%와 베이나이트 50%로 구성된 상을 갖는 기저부 위 적층 시 $D_{HAZ,B}$ 의 측정결과는 유사한 경향을 보였지만 베이나이트 100% 상의 기저부에서 측정한 $D_{HAZ,B}$ 는 상대적으로 낮은 열 영향부를 보일 것으로 예측되었다. 적층 높이에 따른 경사면의 열 영향부 깊이가 기저부 상에 따라 다르게 나타났으며 열 영향부 깊이는 기저부의 상에 영향을 미칠 것으로 예측되었다.

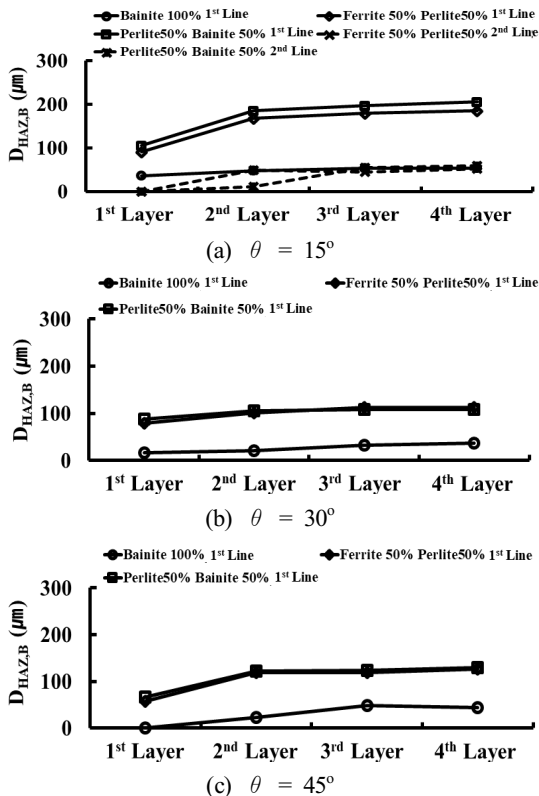


Fig. 8 Depth of heat affected zone ($D_{HAZ,B}$) in the inclined surface

Fig. 9는 기저부 상 및 경사각에 따른 열 영향부 분포이다. Fig. 9와 같이 기저부의 상이 페라이트 50%와 펄라이트 50%인 평면 위 적층 시에는 불균일한 열 영향부가 발생할 것으로 예측되었고 모든 경사각도 조건에서 기저부 상이 페라이트 50%와 펄라이트 50% 및 펄라이트 50%와 베이나이트 50%로 구성된 기저부보다 베이나이트 100%로 구성된 상을 갖는 기저부일 때 열 영향부의 깊이가 더 작을 것으로 예측되었다. 이 결과를 통해 S45C 강의 상 중 베이나이트가 많으면 입열량을 감소시킬 수 있고 베이나이트가 매우 적으면 불균일한 열 영향부가 나타남을 알 수 있었다.

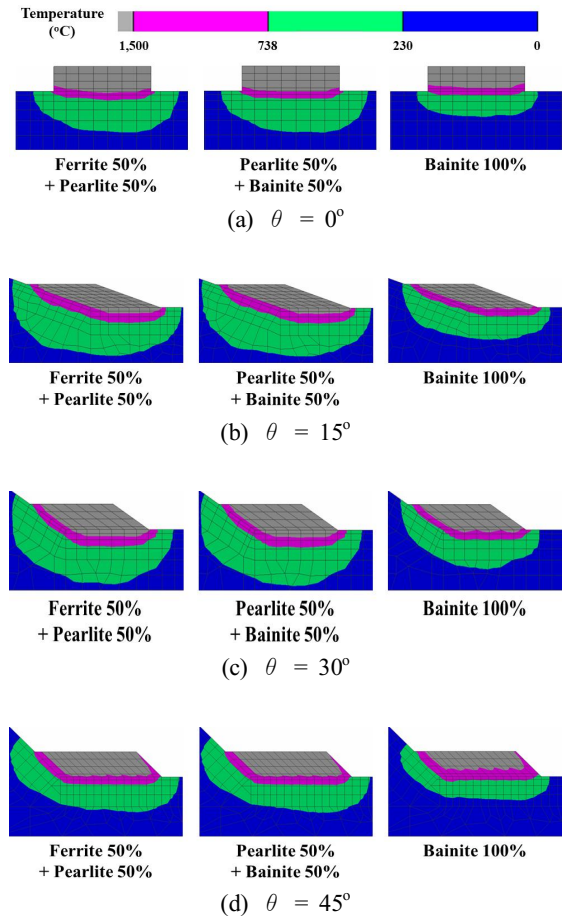


Fig. 9 Influence of phase and inclined angle of the substrate on temperature distributions in the vicinity of the deposited region

3.2 적층 경로에 따른 적층부 부근 열전달 특성 변화

위 결과를 통해 열 영향부가 균일하게 분포하고, 입열량의 감소가 적은 필라이트 50%와 베이나이트 50%로 구성된 상의 기저부를 기준으로 경사 형상 기저부 위 적층 시 적층 경로에 따른 적층 영역 열전달 특성 분석을 수행하였으며 적층 경로는 Fig. 2의 D₂ 경로로 교차 방향 적층 해석을 수행하였다. 이때 발생하는 열 영향부 D_{HAZA}는 Fig. 10과 같으며 앞서 수행한 기저부 경사각도 별 D₁ 경로의 유한요소 해석 결과와 비교를 진행하였다.

필라이트 50%와 베이나이트 50%로 구성된 상을 가지는 S45C 기저부의 경사각도 (θ) 별 D₁ 경로 및 D₂ 경로 적층 시 발생하는 열 영향부 D_{HAZA} 비교 결과는 Fig. 10과 같다. 첫 번째 층 적층 시 기저부 경사각도 15°의 경우 적층 방향에 따라 열 영향부의 깊이가 30° 및 45°에 비해 큰 차이를 보였으며 D₁ 방향일 때 더 낮은 열 영향부가 발생할 것으로 예측되었다.

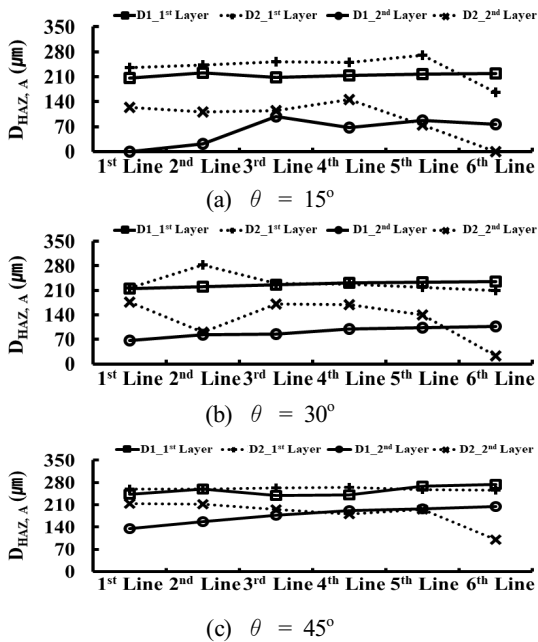


Fig. 10 Effects of the deposition direction on the depth of heat affected zone ($D_{HAZ,A}$) in a flat surface

두 번째 층 적층 시 기저부 경사각도 45°를 제외하고는 적층 방향에 따라 열 영향부의 깊이 차이가 크게 나타났으며 모든 경사각 조건에서 D₂ 방향으로 적층 시 열 영향부가 증가하다가 여섯 번째 비드 적층 시 열 영향부가 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, 경사 기저부 위 D₁ 및 D₂ 경로 적층 시 열전달 해석 결과 비교를 통해 연속적인 적층에 의한 D_{HAZA}의 열 영향부 깊이는 적층 방향에 의한 영향이 있는 것을 유한요소 해석을 통해 알 수 있었다.

Fig. 11은 D₁ 및 D₂ 경로 적층 시 열 영향부 D_{HAZB}의 측정결과 비교 그래프이다. 적층 경로에 따라 D₁ 경로 적층일 때에는 첫 번째 비드, D₂ 경로 적층일 때에는 마지막 비드 적층 시 경사면 위에 적층되며, 모든 경사각도 및 적층 방향 조건에서 적층 되는 층이 증가할수록 D_{HAZB}는 증가할 것

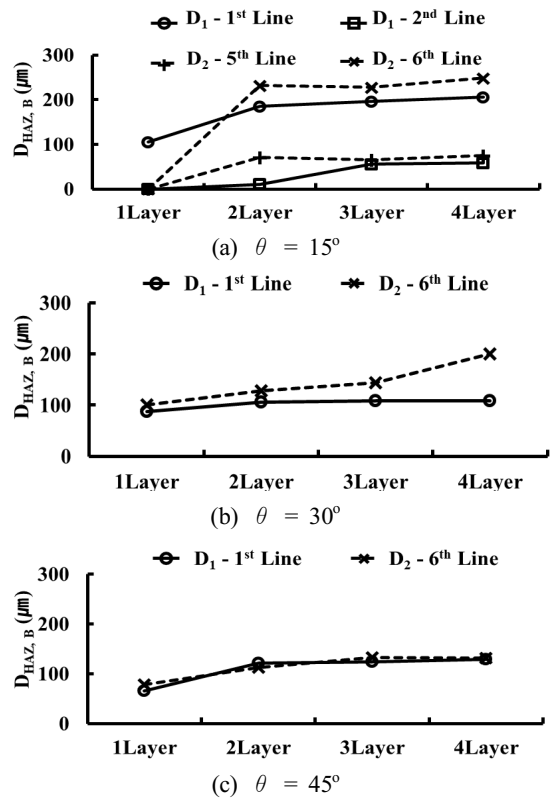


Fig. 11 Effects of the deposition direction on the depth of heat affected zone ($D_{HAZ,B}$) in the inclined surface

으로 예측되었다. 기저부 경사각도 15°일 때 D₁ 경로 적층일 경우 두 번째 비드, D₂ 경로 적층일 경우 다섯 번째 비드 적층 시 기저부에 열 영향부가 발생하며 적층 층이 증가할수록 열 영향부의 깊이 또한 증가할 것으로 예측되었다. 해석 결과를 통해 적층이 증가할수록 열 누적으로 인한 열 영향부가 증가함을 알 수 있었으며, 경사 각도가 작을수록 기저부의 경사면에 닿는 비드의 표면적이 증가하므로 이로 인한 열 영향부의 영향을 알 수 있었다.

3.3 적층 기저부 상, 기저부 경사각 및 적층 경로

기저부 상 및 경사각도 별 적층 해석을 통해 기저부에 발생할 것으로 예측된 열 영향부의 깊이와 온도 분포를 확인하였다. 평면 및 경사 기저부 위 적층 해석 결과 첫 번째 층 및 두 번째 층 적층 시 열 영향부가 발생할 것으로 예측되었으며 두 번째 층 적층 이후 세 번째 층 적층부터는 열 영향부 D_{HAZA}는 발생하지 않을 것으로 예측되었다. 페라이트 50%와 펄라이트 50% 및 펄라이트 50%와 베이 나이트 50% 상의 기저부 위 적층할 경우 동일한 경향으로 나타날 것으로 예측되었으며, 베이나이트 100% 상의 기저부 위 적층 시 상대적으로 작은 열 영향부가 발생할 것으로 예측되었다. 예측된 결과는 열 영향부 D_{HAZB} 역시 동일하게 예측되었다.

기저부 상 및 경사에 따른 적층 시 발생할 것으로 예측된 온도 분포는 페라이트 50%와 펄라이트 50% 적층 시 불균일 한 온도 분포가 발생 될 것으로 예측되었으며 펄라이트 50%와 베이나이트 50% 상의 기저부 위 적층할 경우 적절한 열 영향부 깊이와 고른 온도 분포가 나타날 것으로 예측되었다. 베이나이트 100% 기저부 위 적층 시 온도 분포는 상대적으로 낮게 발생할 것으로 예측되었으며 열 영향부 이상의 온도가 상대적으로 낮게 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

앞선 연구를 통하여 안정적으로 적층 될 것으로 예측된 펄라이트 50%와 베이나이트 50% 상의 경사 기저부 위 D₁ 및 D₂의 적층 경로로 적층 시 발생하는 열 영향부를 예측하였다. D₁ 및 D₂ 경로 적층 역시 두 번째 층 적층까지 열 영향부 D_{HAZA}가 발생

될 것으로 예측되었으며 기저부 경사 각도가 클수록 경로에 의한 열 영향부의 차이가 크지 않을 것으로 예측되었다. 이는 경사면에서 발생하는 열 영향부인 D_{HAZB} 역시 마찬가지였으며 기저부 경사각도 45°일 때 경로의 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 DED 공정을 이용하여 상 분포 별 경사 각도가 있는 S45C 기저부 위 Ni계 초합금 소재인 Hastelloy X 적층 시 발생하는 열전달 특성을 유한요소 해석을 통해 분석 및 고찰하였다. 또한, 선정된 상 분포를 기준으로 경사 각도를 가지는 기저부 위 적층 경로 별 적층 시 발생하는 열전달 특성을 분석 및 고찰하였다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 기저부의 상 분포 및 경사각도 별 적층 결과 페라이트 50%와 펄라이트 50%의 상 분포를 가지는 S45C 기저부에서는 불균일한 열 영향부를 보였으며 펄라이트 50%와 베이나이트 50%의 상 분포를 가지는 기저부에서 가장 안정적인 열 영향부 깊이를 보이며, 열 영향부의 깊이가 기저부의 상에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 적층 공정 전 적층 되는 기저부 표면에 적절한 열처리는 균일한 열 영향부를 가지게 할 수 있음을 알 수 있었다.

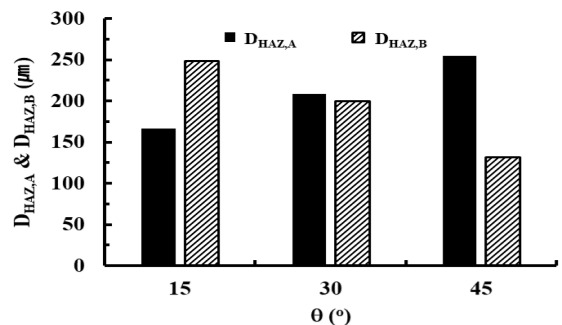


Fig. 12 Comparison of heat affected zones (D_{HAZA} and D_{HAZB}) according to the angle of the inclined surface

둘째, 기저부 경사각도 별 적층 방향에 따른 열 전달 특성 분석 결과 기저부 경사가 감소할수록 적층 비드와 경사면의 접촉 면적 증가로 인해 경사면에 발생하는 열 영향부가 증가함을 확인할 수 있었고 적층 방향에 수직 한 열 영향부는 감소함을 확인할 수 있었으며 기저부의 경사각도 별 적층 방향에 수직 한 열 영향부 및 경사면에 수직 한 열 영향부의 비교 그래프는 Fig. 12와 같다.

셋째, 적정 기저부 상, 기저부 경사각 및 적층 경로 선정 결과 기저부의 상별 열 영향부의 깊이 및 온도 분포가 다르게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 적층하고자 하는 S45C 기저부에는 적절한 열처리 공정이 필요함을 알 수 있었다. 높은 경사 형상의 기저부 위 적층은 적층 경로에 크게 의존하지 않음을 알 수 있었고, 낮은 경사각에서는 D₁ 경로 적층을 통하여 고른 열 영향부가 발생함을 알 수 있었다.

향후 적정 기저부 경사각과 적층 경로를 도출하기 위하여 평면 및 경사 적층 실험과 추가적인 3차원 열-기계 연계 해석을 수행하여 DED 공정을 이용한 평면 및 경사 적층 시 발생하는 열 이력 및 잔류응력 발생 특성 분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한 기저부 경사각에 따른 열원 중심 사이의 수직 거리를 고려한 해석 모델을 추가적으로 개발하여, 적층 공정에 대한 열-기계 연계 해석 결과의 정확도를 향상 시키고자 한다.

후 기

“이 논문은 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비(KM200083)에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Wahab, D. A., & Azman, A. H., “Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives, Processes”, Processes, Vol. 7, No. 11, pp. 802, 2019.
2. Saboori, A., Abersa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M. and Fino, P., “Application of Directed Energy Deposition-based Additive Manufacturing in Repair,” Applied sciences, Vol. 9, No. 16, pp. 3316, 2019.
3. Kim, B. S., Kim, J. S., Lee, S. H., Song, J. Y., Park, H. Y., “A Study on Failure Mode Analysis of Machining Center”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 74-79, 2001.
4. Ahn, D. G., “Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 703-742, 2021.
5. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., & Newkirk, J., “Aerospace Applications of Laser Additive Manufacturing,” Laser Additive Manufacturing, pp. 351-371, 2017.
6. 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. 3, No. 4, pp. 381-395, 2016.
7. Pinkerton, A. J., Wang, W., Li, L., “Component Repair Using Laser Direct Metal Deposition,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 222, No. 7, pp. 827-836, 2008.
8. Yang, Y., Gong, Y., Qu, S., Xin, B., Xu, Y., Qi, Y., “Additive/subtractive Hybrid Manufacturing of 316L Stainless Steel Powder: Densification, Micro-hardness and Residual Stress,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 33, No. 12, pp. 5797-5807., 2019.
10. Yong, Y., Fu, W., Deng, Q., Chen, D., “A Comparative Study of Vision Detection and Numerical Simulation for Laser Cladding of Nickel-Based Alloy,” Journal of Manufacturing Processes, Vol. 28, pp. 364-372, 2017.
11. Chua, B. L., Lee, H. J., Ahn, D. G., Kin, J. G., “Investigation of Penetration Depth and Efficiency

- of Applied Heat Flux in a Directed Energy Deposition Process with Feeding of Ti-6Al-4V Wires,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, 2018.
12. Kim, D. A., Lee, K. K., Ahn, D. G., “Investigation into the Effects of Process Parameters of DED Process on Deposition and Residual Stress Characteristics for Remanufacturing of Mechanical Parts,” Transactions of materials Processing, Vol. 30, pp. 109~118, 2021.
 13. Chua, B. L., Ahn, D. G., “Estimation Method of Interpass Time for the Control of Temperature during a Directed Energy Deposition Process of a Ti-6Al-4V Planar Layer,” Materials, Vol. 13, pp. 418, 2020.
 14. Lee, K. K., Ahn, D. G., “Investigation into Transient Heat Transfer Characteristics during Multibeads Deposition Using a DED Process,” Korean Soc. Mech. Eng., Vol. 45, No. 4, pp. 301~309, 2021.
 15. SYSWELD, <https://www.esi-group.com/products/welding-assembly> (accessed 2, June., 2019)
 16. JMatPro, <https://www.senteseoftware.co.uk/jmatpro> (accessed 24, Aug., 2019)