

DMT 공정을 이용한 S45C 구조용강 위 Inconel 718 초합금 단일 비드 적층시 열전달 특성 분석에 관한 연구

이광규*, 안동규*[#], 김우성**, 이호진**

*조선대학교 기계공학과, **한국생산기술연구원 대경본부 극한가공기술그룹

A Study on the Heat Transfer Characteristics of Single Bead Deposition of Inconel 718 Superalloy on S45C Structural Steel Using a DMT Process

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

^{*}School of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.,

^{**}Extreme Fabrication Technology Group, Daegyeong Regional Div., Korea Institute of Industrial Technology

(Received 22 April 2020; received in revised form 25 June 2020; accepted 28 June 2020)

ABSTRACT

The heat transfer phenomenon in the vicinity of the irradiated region of a focused laser beam of a DMT process greatly affects both the deposition characteristics of powders on a substrate and the properties of the deposited region. The goal of this paper is to investigate the heat transfer characteristics of a single bead deposition of Inconel 718 powders on S45C structural steel using a laser-aided direct metal tooling (DMT) process. The finite element analysis (FEA) model with a Gaussian volumetric heat flux is developed to simulate a three-dimensional transient heat transfer phenomenon. The cross-section of the bead for the FEA is estimated with an equivalent area method using experimental results. Through the comparison of the results of the experiments and those of the analysis, the effective beam radius of the bottom region of the volumetric heat flux and the efficiency of the heat flux model for different powers and travel speeds of the laser are predicted. From the results of the FEA, the influence of the power and the travel speed of the laser on the creation of a steady-state heat transfer region and the formation of the heat-affected zone (HAZ) in the substrate are investigated.

Key Words : Heat Transfer Characteristics(열전달 특성), Single Bead (단일 비드), DMT Process (DMT 공정), Inconel 718 Superalloy(Inconel718 초합금), S45C Structural Steel(S45C 구조용강)

1. 서 론

최근 금속 적층 제조 (Additive Manufacturing :

AM) 공정 기술이 급격히 발달함에 따라, 금속 적층 제조 공정의 산업적 적용이 매우 증가하고 있다^[1]. 금속 적층 제조 공정중 에너지 제어형 적층 (Directed Energy Deposition : DED) 공정은 금속 기저부 위에 레이저 또는 전자빔과 같은 고에너지 열원을 조사하여 용융지 (Molten pool)를 생성하

Corresponding Author : smart@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7043, Fax: +82-62-230-7243

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고, 이 용융지에 금속 분말을 공급하여 용융지의 열과 열원의 열을 이용하여 분말을 용융/고화 (Solidification) 시켜서 적층 비드를 생성한다^[12]. 그 후 이 적층 비드를 적층 경로에 따라 각 층별로 반복적으로 생성하여 3차원 금속 제품을 제작한다. 에너지 제어형 적층 공정의 대표적인 공정들로는 LENS (Laser Engineered Net Shaping) 공정, DMD (Direct Metal Deposition) 공정, DMT (Laser-aided Metal Rapid Tooling) 공정등을 들 수 있다^[1,3].

에너지 제어형 적층 공정은 최근 전세계 주요 조작기계 산업체 중심으로 개발/출시되고 있는 하이브리드 가공기 (Hybrid Machine) 의 기반 적층 공정으로 활용되고 있어 기술적/산업적 중요성이 더욱더 부각되고 있다^[4]. 에너지 제어형 적층 공정의 기본 원리에 따라 열원이 조사되어 적층 비드가 생성되는 영역 주위의 열전달 현상은 비드의 생성뿐만 아니라 적층 제품의 제품 품질과 기계적/재료적 특성을 결정하게 된다^[5]. 그러므로, 에너지 제어형 적층 공정에서 비드 생성 영역 주위의 열전달 현상에 대한 분석/고찰은 적층 제품 품질 향상을 위한 주요 연구 내용이다^[5,6]. 이러한 이유로 최근 여러 연구자들에 의하여 에너지 제어형 적층 제조 공정에서 발생하는 열전달 현상에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있다.^[7-12] Riqing 등은 LENS 공정을 이용하여 316 스테인레스강 적층시 얇은 벽 모델에 대한 유한요소 해석과 CCD 카메라를 이용한 실험 결과를 이용하여 적층시 열전달 현상에 대해 고찰하였다^[7]. Michaleris 는 적층 공정시 발생하는 열전달 현상을 모델링하기 위하여 유한요소 기법을 조사하고 비활성 요소를 이용한 유한요소 기법을 제안하였다^[8]. Hofmeister 등은 LENS 공정을 이용하여 316 스테인레스강 및 H13 분말 적층시 적층부 주위 열전달 현상에 대하여 실험적으로 고찰하였다^[9]. Peyre 등은 DMD 공정을 이용한 Ti-6Al-4V 분말 적층시 발생하는 열전달 현상과 용융지 생성 특성에 대한 유한요소해석을 상용 소프트웨어인 COMSOL을 이용하여 수행하였다^[10]. Heigel 등은 LENS 공정을 이용한 Ti-6Al-4V 분말 다층 적층에서 발생하는 열전달 현상 해석을 위한 경계조건 영향성을 해석적으로 고찰하였다^[11].

Chua 등은 와이어 공급형 DED 공정에서 Ti-6Al-4V 분말 단일 적층시 열원의 침투 깊이와 효율 도출 방법에 대한 고찰을 수행하였다^[12].

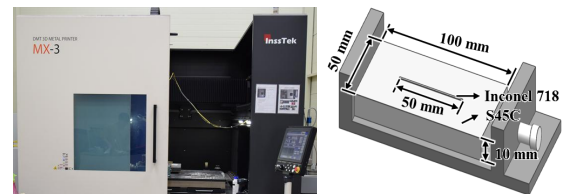
이 연구에서는 DMT 공정을 이용한 S45C 구조용강 위 Inconel 718 초합금 단일 비드 적층시 열전달 특성을 3차원 비정상 열전달 및 비선형 잔류응력 유한요소 해석 (Finite element analysis : FEA) 을 통하여 분석/고찰하고자 한다. 유한요소 해석을 위한 열원 및 해석 모델 도출 방법에 대한 고찰을 수행하며, 레이저 출력 및 이송 속도가 정상상태 열전달 구간 및 열 영향부 형성에 미치는 영향에 대해 분석/고찰 하였다.

2. 적층 실험과 유한요소해석

2.1 적층 실험 및 비드 등가 단면 도출

유한요소 해석 모델을 도출하기 위해 Fig. 1과 같이 DMT 장비인 MX-3 모델을 이용하여 100 × 50 × 10mm³ 크기의 기저부위 50mm 단일 비드 적층 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 기저부 재료는 구조용강인 S45C 이며, 적층에 사용된 분말 재료는 Ni 계열 초합금인 Inconel 718 을 사용하였다. 레이저 출력 (Laser power : P) 및 이송 속도 (Travel speed : V) 에 대한 영향성을 분석하기 위하여 레이저 출력 300W 및 400W 와 이송 속도 14.2mm/s 및 16.7mm/s 두 가지 조건을 적용하여 실험을 진행하였다. 적층 공정 진행시 산화 방지를 위하여 불활성 가스인 아르곤 (Ar) 가스를 이용해 보호가스 분위기를 형성하였다.

Fig. 2는 적층 변수에 따라 제작된 시편을 절단한 후 질산이 5% 함유된 나이탈 (Nital) 용액으로 에칭한 시편을 현미경으로 관찰한 결과이다. 단면



(a) DMT machine (MX-3) (b) Experimental set-up

Fig. 1 Schematics of the experimental set-up

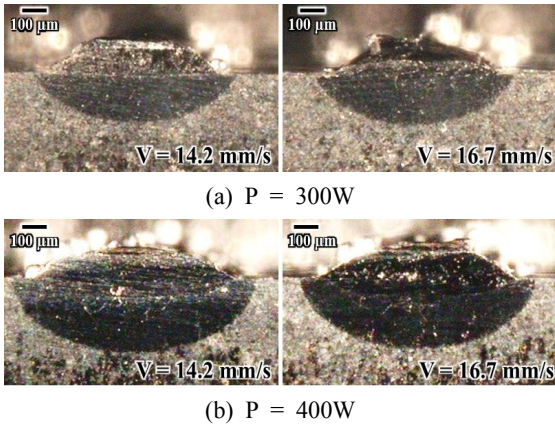


Fig. 2 Results of deposition experiments

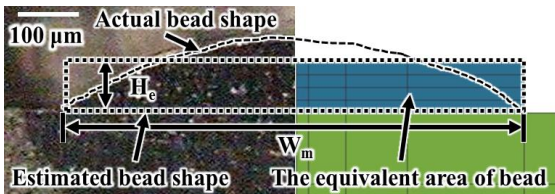


Fig. 3 Estimation methodology of an equivalent area of bead in FE model

Table 1 Measured area and width of beads and the estimated equivalent height of bead for different deposition conditions

P (W)	V (mm/s)	A_m (mm ²)	W_m (mm)	H_c (mm)
300	14.17	0.077	0.702	0.110
300	16.67	0.057	0.657	0.087
400	14.17	0.073	0.843	0.086
400	16.67	0.071	0.809	0.087

부 비드 형상을 관찰한 결과 레이저 이송 속도가 증가할수록 비드의 폭 및 높이는 감소하며, 레이저 출력이 증가할수록 비드의 폭 및 높이는 증가한다. 적층 조건에 따라 나타나는 비드 형상이 다르기 때문에 CATIA를 이용하여 각 조건별 비드 단면적을 도출한 후 식 (1)을 이용하여 비드 등가 높이를 도출하였다.

$$H_c = A_m / W_m \quad (1)$$

여기서 H_c , A_m 및 W_m 은 각각 비드 등가 높이, 평균 비드 단면적 및 평균 비드 폭이다.

실험과 해석 모델 비드의 체적을 동일하게 하기 위해 Fig. 3과 같이 비드 등가 높이와 평균 비드 폭을 이용하여 비드 등가 단면을 도출하였다. 도출된 비드 등가 단면 데이터는 Table 1과 같다.

2.2 유한요소해석 모델

적층 공정의 유한요소 해석 모델 도출을 위하여 Fig. 4와 같이 온도 의존 물성 데이터 적용, 대류 계수 계산, 유한요소 격자 형성 및 레이저 열원 모델링을 수행하였다. 비정상 유한요소 해석에서는 Fig. 5와 같은 각 재료의 온도 의존 밀도 (Temperature dependent density : ρ), 온도 의존 열전도도 (Temperature dependent thermal conductivity :

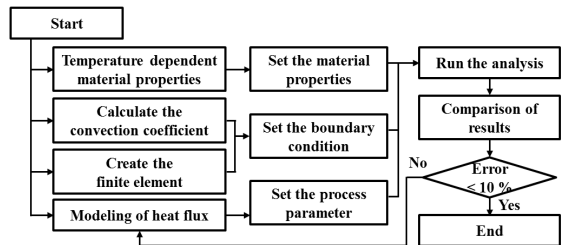
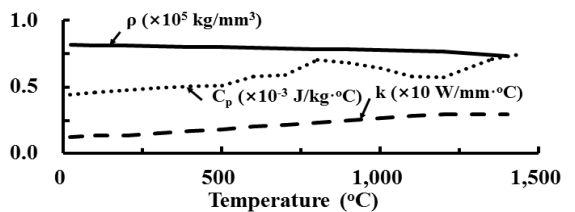
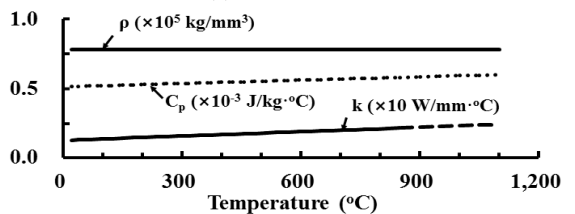


Fig. 4 Process of create to model of finite element analysis



(a) Inconel 718



(b) S45C

Fig. 5 Temperature-dependent material properties

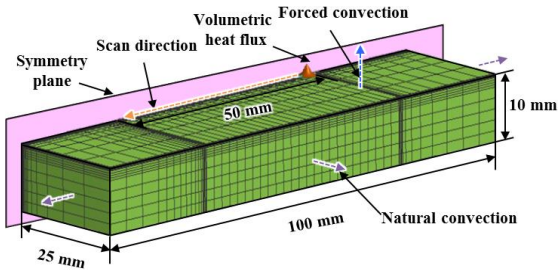


Fig. 6 Boundary conditions for FEAs

k) 및 온도 의존 비열 (Temperature dependent specific heat : C_p) 이 적용되었다.

유한요소 해석 모델의 경계조건은 Fig. 6과 같이 적용하였다. 체적 열원은 경로를 따라서 이동하며 적층 공정 중 시편의 산화를 방지하기 위한 보호 가스 분사를 고려하여 해석 모델의 상부에는 강제 대류 조건을, 측면부에는 자연대류 경계조건을 계산하여 적용하였다. 해석 모델은 적층 경로를 기준으로 대칭이므로 해석 시간을 고려하여 대칭 경계조건을 적용하였다. 해석모델의 유한요소 격자는 가우시안 분포를 가지는 체적 열원 및 국소부위에 일어나는 DMT 공정의 열전달 특성을 고려하여 도출하였다. 해석 모델의 절점 및 유한요소 격자는 모든 해석 조건에서 동일하게 생성하였다.

레이저 열원을 수학적으로 모델링하기 위하여 열원의 에너지 분포를 가우시안 (Gaussian) 분포로 가정하였으며 레이저의 횡축 모드는 TEM₀₀로 가정하였다. 레이저의 시편 두께 방향 에너지 분포는 레이저 최대 침투 깊이 (Penetration depth) 까지 선형적으로 감소한다고 가정하였다. 레이저를 조사함과 동시에 동 축으로 분말이 공급되며 비드가 생성되므로 해석 모델의 열원은 체적 열원 (Volumetric heat flux) 으로 가정하였다. 이와 같은 가정과 열원의 이동 및 실제로 열원이 적용되는 열효율 (Efficiency of heat)을 고려하여 식 (2)와 같은 이동 체적 열원 식을 도출하였다.

$$Q = \eta \cdot Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{(x - V \times t)^2 + y^2}{r_z^2}\right) \quad (2)$$

여기서 η , Q_0 , x , t , y 및 r_z 는 각각 열원의 효율,

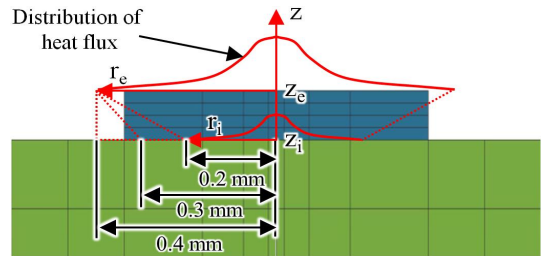


Fig. 7 Schematics of application of heat flux to the FE model

Table 2 Conditions for FEAs

Parameter of Heat flux			Process parameter	
r_e (mm)	r_i (mm)	η	P (W)	V (mm/s)
0.4	0.20-0.39	0.3-0.5	300, 400	14.2, 16.7

열원 강도 (Heat source intensity), x 좌표, 시간, y 좌표 및 깊이에 따른 열원의 유효 반경 (Effective radius) 이다.

깊이에 따른 열원의 유효반경은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$r_z = \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e}(z - z_e) + r_e \quad (3)$$

여기서 r_i , r_e , z_e 및 z_i 는 각각 열원의 상부 유효 반경, 열원의 하부 유효 반경, 열원 상부의 z 위치 및 열원 하부의 z 위치이다.

체적 열원이 비드 상부에서 기저부까지 적용된다고 가정하였을 때 해석 모델에 적용되는 열원은 Fig 7과 같다. 열원의 하부 반경 및 효율 등 해석 모델에 적용되는 열원 변수 및 공정변수는 Table 2 와 같다. 열원의 상부 반경이 하부 반경과 동일할 경우 열원이 적용되지 않기 때문에 열원 하부 반경 변수는 상부 반경의 절반인 0.20부터 가장 근접한 0.39까지 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상 상태 도출

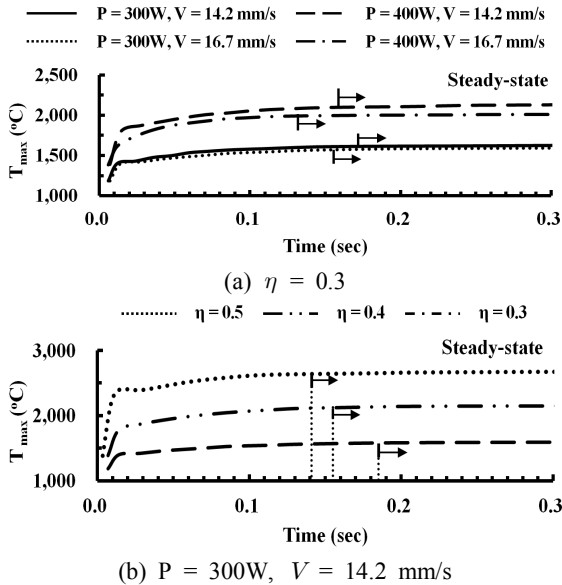


Fig. 8 Comparison results of maximum temperature according to the analysis parameters

적층 공정을 진행할 경우 레이저를 조사함에 따라 적층부의 온도는 급격하게 증가하게 되고 연속적으로 적층을 진행할 경우 온도 변화가 거의 없는 정상 상태 (Steady-state) 에 도달하게 된다. 비정상 상태 (Transient) 에서는 해석 결과를 비교 분석하기 어렵기 때문에 Fig. 8 과 같이 열원의 효율, 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 해석 모델의 최대 온도 (Maximum temperature : T_{max}) 비교 결과를 도출하고 해석 조건에 따른 정상 상태 구간을 도출하였다. 해석 모델의 정상 상태는 각 스텝 에서 도출된 최대 온도와 이전 스텝에서 도출된 최대 온도의 차이가 $5^{\circ}C$ 이하일 경우로 정의하였다. Fig. 8 (a) 와 같이 동일한 열원 효율 조건에서 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 최대 온도를 비교한 결과 동일한 레이저 출력에서 이송 속도가 증가할수록, 동일한 이송 속도에서 레이저 출력이 증가할수록 정상 상태에 도달하는 시간이 감소하였다. Fig. 8 (b) 와 같이 동일한 레이저 출력 및 이송 속도에서 최대 온도를 비교한 결과 열원의 효율이 증가할수록 정상 상태에 도달하는 시간은 감소하는 것을 알 수 있었다. 모든 해석 조건에서 0.2sec 이상 적층을 진행할 경우 정상 상태에

도달 하였으며 해석 결과는 정상 상태 구간에서 열 영향부를 기준으로 비교 분석하였다. 열 영향부는 기저부에 재결정 온도 이상 열이 가해지는 경우 금속 조직 변화에 의해 나타나므로 해석 결과는 기저부인 S45C 소재의 재결정 온도 ($738^{\circ}C$) 를 기준으로 도출하였다.

3.2 체적 열원 하부 유효 반경 도출

Fig. 9 는 열 영향부의 형상비 (Aspect ratio : Φ) 를 기준으로 열원의 하부 유효 반경 및 효율에 따른 해석 결과를 비교한 그래프이다. 열 영향부의 형상비는 식 (4) 를 이용하여 도출하였다.

$$\Phi = H_{W,A} / H_{D,A} \quad (4)$$

여기서 $H_{W,A}$ 및 $H_{D,A}$ 는 각각 열 영향부의 폭 및 깊이이다.

모든 공정 조건에서 열원의 효율이 증가할 경우 열원의 하부 유효 반경 증가에 따른 영향은 감소하게 되며 열 영향부의 형상비는 2에 가깝게 도출되었다. 이는 열원의 효율이 증가할 때 입열량이 증가하게 되며 이에 따라 열 확산이 빠르게 일어나 깊이 방향으로 더 깊게 침투하기 때문으로 사료된다. 열원 효율이 0.3인 경우 열원의 하부 유효

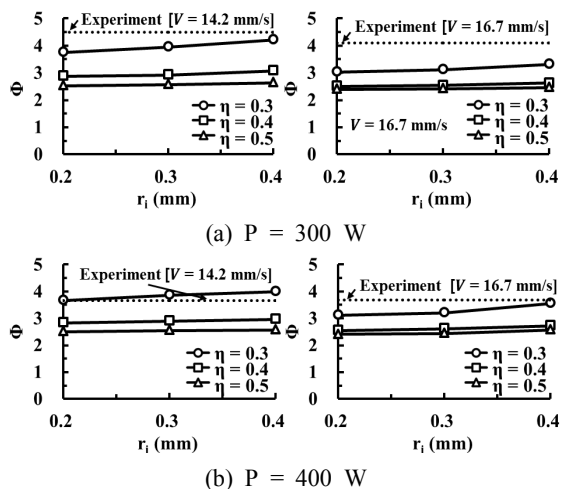


Fig. 9 Measurement results of the aspect ratio of HAZ according to the analysis parameters

반경이 증가함에 따라 열 영향부의 형상비는 증가하게 되며 실험 결과에 근접하게 된다. 따라서 실험과 해석의 오차를 줄이기 위해서는 적절한 열원의 효율을 적용하고 체적 열원의 하부 유효 반경은 상부 유효 반경과 거의 근접하게 설정해야 한다는 것을 알 수 있었다.

3.3 열원 효율 도출

열원의 적정 효율을 도출하기 위해 열원의 효율에 따른 해석을 수행하고 식 (5) 및 (6)을 이용하여 열영향부 폭 오차율 (Error rate of HAZ width : E_W) 및 깊이 오차율 (Error rate of HAZ depth : E_D) 을 Fig. 10과 같이 도출하였다.

$$E_W(\%) = \frac{H_{W,E} - H_{W,A}}{H_{W,A}} \times 100 \quad (5)$$

$$E_D(\%) = \frac{H_{D,E} - H_{D,A}}{H_{D,A}} \times 100 \quad (6)$$

여기서 $H_{W,E}$ 및 $H_{D,A}$ 는 각각 실험에서 도출된 열 영향부 폭 및 해석에서 도출된 열 영향부 깊이이다.

열원 의 효율 변화에 따라 열 영향부 폭 오차율보다 깊이 오차율이 더 크게 변화하며 모든 공

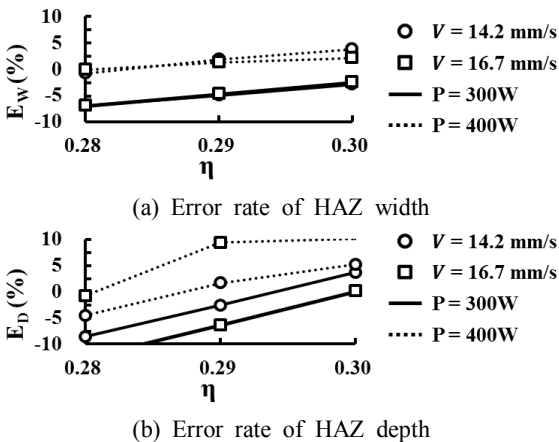


Fig. 10 Error rates according to process parameters and efficiency of heat flux

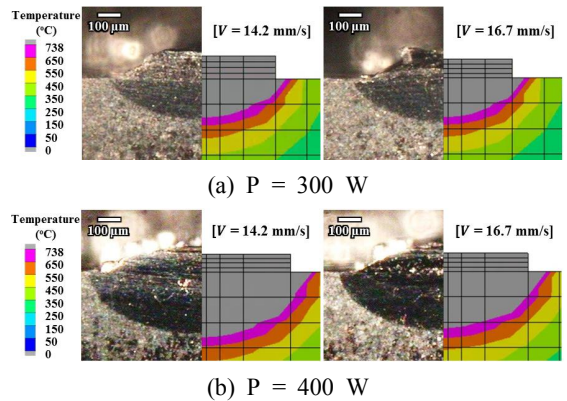


Fig. 11 Comparison results of experiments and analysis according to process parameters

정 조건에서 열원의 효율 0.29를 적용할 경우 열 영향부 폭 및 깊이의 오차율은 모두 10% 이내로 도출되어 열원의 적정 효율은 0.29인 것을 알 수 있었다. Fig. 11은 실험 결과의 열 영향부와 해석의 738°C 온도 분포를 비교한 결과이며 해석 결과가 실험 결과와 유사함을 알 수 있다.

3.4 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 열전달 특성 분석

Fig. 12는 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 해석 결과이다. Fig. 12 (a) 및 (b)와 같이 레이저 출력 300W 조건에서 이송 속도 변화에 따라 열 영향부 깊이 및 최대 온도 차이가 크게 나타나지 않았다. 반면 Fig. 12 (c) 및 (d)와 같이 레이저 출력 400W 조건에서는 이송 속도가 증가할 때 열 영향부의 폭, 깊이 및 최대온도 모두 감소하였다. 이를 통해 열 영향부의 폭, 깊이 및 최대 온도는 레이저 출력이 클수록 이송 속도 변화에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

Fig. 13은 레이저 출력과 이송 속도의 비율인 단위 길이당 에너지 (Energy per unit length : β) 를 기준으로 열 영향부의 폭, 길이 및 깊이 변화를 비교 분석한 결과이다. 단위 길이당 에너지는 식 (7)을 이용하여 도출하였다.

$$\beta(J/mm) = \frac{P}{V} \quad (7)$$

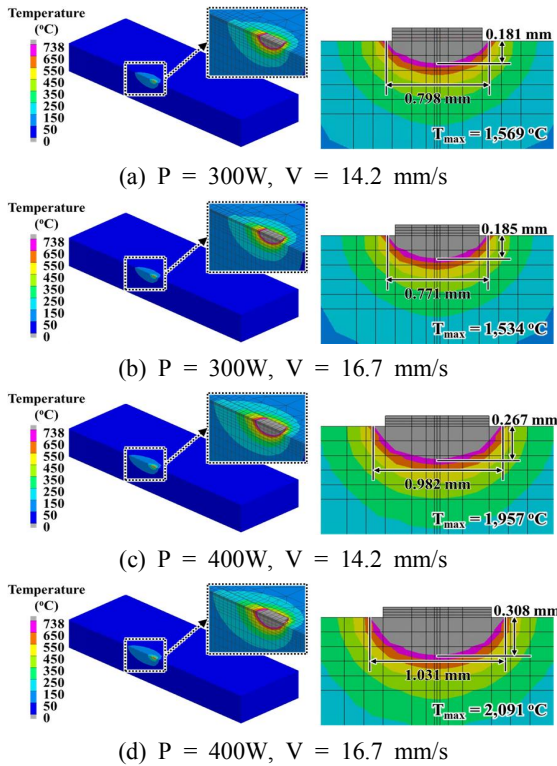


Fig. 12 Analysis result applying the appropriate efficiency of the heat flux

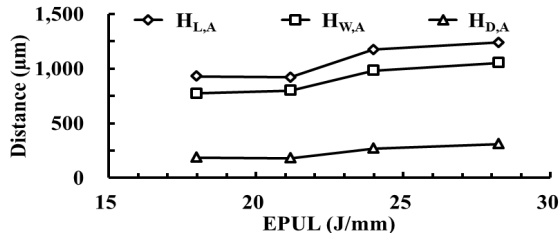


Fig. 13 Comparison results of HAZ according to energy per unit length

단위 길이당 에너지는 레이저 출력 증가 및 이송 속도 감소에 따라 증가하며 단위 길이당 에너지가 증가함에 따라 열 영향부의 폭, 깊이 및 길이는 증가하게 된다. 단위 길이당 에너지가 21이하인 경우 열 영향부의 크기 변화가 거의 없었으며 21에서 24로 증가할 경우 열 영향부의 크기가 큰 폭으로 증가하였다. 이는 이송 속도 감소에 비

해 레이저 출력 증가가 열 영향부 크기 증가에 더 큰 영향을 주기 때문으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 DMT 공정의 단일 비드 적층시 유한요소 해석 모델을 도출하고 3차원 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 유한요소 해석을 수행하고 실험 결과와 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저 출력, 이송 속도 및 열원의 효율에 따른 최대 온도 비교 결과 열원의 효율, 레이저 출력 및 이송 속도가 증가할 경우 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 모든 해석 조건에서 0.2sec 이상 적층을 진행할 경우 최대 온도 변화는 5°C 이하로 정상 상태에 도달하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 열원의 효율 0.3에서 체적 열원의 하부 유효 반경이 증가할수록 열원의 형상비도 증가하였으며 실험 결과에 근접한 열 영향부가 도출되었다. 이를 통해 실험과 해석의 오차를 줄이기 위해서는 적절한 열원 효율을 적용하고 체적 열원의 하부 유효 반경을 상부 유효반경과 거의 근접하게 설정해야 하는 것을 알 수 있었다.
- 3) 열원의 효율에 따른 해석 결과 열원의 효율 변화에 따라 열 영향부 폭 오차를 보다 깊이 오차가 더 크게 변화하며 모든 공정 조건에서 열원의 효율 0.29를 적용할 경우 열 영향부 폭 및 깊이의 오차는 모두 10% 이내로 도출되어 열원의 적정 효율은 0.29인 것을 알 수 있었다.
- 4) 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 해석 결과 레이저 출력이 크거나 이송 속도가 작은 경우 열 영향부의 폭, 깊이 및 최대 온도는 크게 도출되었다. 또한 레이저 출력이 큰 경우에 이송 속도 변화에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.
- 5) 단위 길이당 에너지를 기준으로 열 영향부의 폭, 길이 및 깊이 변화를 비교 분석한 결과 이송 속도 감소에 의한 단위 길이당 에너지 증가

에 비해 레이저 출력에 의한 단위 길이당 에너지 증가가 열 영향부 형성에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 기반으로 DMT 공정의 열전달 특성 분석 대한 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 “발전수요부품 국산화를 위한 3D 프린팅 상용화 기술개발(3/3)” (과제번호 : KM200083) 의 지원으로 수행한 연구결과의 일부임

REFERENCES

1. 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.
2. Dass, A. and Moridi, A., "State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design," *Coatings*, Vol. 9, No. 7, pp. 1-26, 2019.
3. Dinda, G. P., Dasgupta, A. K. and Mazumder, J., "Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 509, No. 16, pp. 98-104, 2019.
4. Joseph, M. F., Shokrani, A., Stephen, T. N. and Dhokia, V., "Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 101, No. 8, pp. 79-101, 2016.
5. Amine, T., Joseph, W. N. and Liou, N., "An investigation of the effect of direct metal deposition parameters on the characteristics of the deposited layers," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 3, pp. 21-34, 2014.
6. Wang, L., Felicelli, S., Gooroochurn, T., Wang, P. T. and Horstemeyer, M. F., "Optimization of the LENS® process for steady molten pool size," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 474, No. 19, pp. 148-156, 2008.
7. Riqing, Y., John, E. S., Zheng, B., Zhou, Y. and Enrique, J. L., "Numerical modeling of the thermal behavior during the LENS® process," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 478, No. 7, pp. 47-53, 2006.
8. Michaleris, P., "Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 86, No. 6, pp. 51-60, 2014.
9. Hofmeister, W., Griffith, M., Ensz, M. and Smugeresky, J., "Solidification in Direct Metal Deposition by LENS Processing," *JOM*, Vol. 53, No. 9, pp. 30-34, 2001.
10. Peyre, P., Aubry, P., Fabbro, R., Neveu, R. and Longuet, A., "Analytical and Numerical Modelling of the Direct Metal Deposition Laser Process," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 41, No. 2, pp. 1-10, 2008.
11. Heigel, J. C., Michaleris, P. and Reutzler, E. W., "Thermo-mechanical Model Development and Validation of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V," *Additive Manufacturing*, Vol. 5, pp. 9-19, 2015.
12. Chua, B., Lee, H. J., Ahn, D. G. and Kim, 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, No. 2, pp. 211-217, 2018.