

DED 공정을 이용한 ATC 부품의 재제조를 위한 열-기계 특성 고찰

이광규¹ · 안동규^{2,*}

Investigation of Thermo-mechanical Characteristics for Remanufacturing of a ATC Part using a DED Process

K. K. Lee and D. G. Ahn

(Received July 22, 2024 / Revised July 24, 2024 / Accepted July 25, 2024)

Abstract

Interest in remanufacturing of part has significantly increased to reduce used material and energy together. The directed energy deposition (DED) process has widely applied to remanufacturing of the part. An excessive residual stress takes place in the vicinity of the deposited region by the DED process due to rapid heating and rapid cooling (RHRC) phenomenon. The excessive residual stress decreases the reliability of the remanufactured part. Therefore, thermo-mechanical analysis for the remanufacturing of the part is needed to investigate heat transfer and residual stress characteristics in the vicinity of the deposited region. The thermo-mechanical analysis of a large volume deposition is significantly difficult to perform due to the requirement of a long computation time and a large computer memory. The goal of this paper is to investigate thermo-mechanical characteristics for remanufacturing of the ATC part using a DED process. The methodology of the thermo-mechanical analysis for a large volume deposition is proposed. From the results of analysis, heat transfer and residual stress characteristics during deposition and cooling stages are investigated. In addition, the proper deposition strategy from the viewpoint of the residual stress is discussed.

Keywords : Remanufacturing, Directed energy deposition process, ATC part, Thermo-mechanical analysis, Residual stress

1. 서론

최근 지구 온난화에 대응하기 위하여 여러 분야에서 2050년까지 탄소 중립을 실현하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다[1]. 제조업에서는 제품의 지속 가능성 향상을 위해 에너지 소비 감소, 자원 재활용, 잠재 수익 증대 등과 같은 장점을 가지고 있는 재제조(remanufacturing) 기법에 대한 관심이 높아지고 있다[2]. 재제조 공정은 제품을 녹여서 초기화 하지 않고 손상 제품의 분해, 세척, 검사, 수리, 재조립 및 시험/평가 등 일련의 과정을 통해 손상된 제품을 신제품의 성능 또는 그 이상의 성능을 가지

도록 하는 순환 기술이다[3]. 재제조 공정을 다양한 부품을 포함하고 있는 공작 기계에 적용할 경우 자원 절감 및 에너지 저감 효과를 매우 크게 얻을 수 있다[4]. 전통적인 재제조 과정은 손상부에 수작업 기반의 육성 용접 중으로 진행 되었으나, 최근에는 적층 제조 기반의 자동화 공정이 재제조에 많이 활용되고 있다[5]. 금속 적층 제조 공정 중 하나인 에너지 제어형 용착(directed energy deposition: DED) 공정은 고밀도 에너지를 이용하여 기저부에 용융지(melted region)를 생성함과 동시에 금속 분말을 용융지에 분사하여 클래딩 (cladding) 비드를 생성하고, 이 비드를 연속적으로 선-대-선(line-by-line) 적층하여 한층의 금속 평면을 생성한다. 이 과정을 최종층까지 반복하여 3차원 금속 제품을 제작한다[5, 6]. DED는 다양한 분말 재료를 사용할 수 있고, 적층

1. 조선대학교 기계공학과, 박사과정

2. 조선대학교 기계공학과, 교수

#Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Chosun University, E-mail: smart@chosun.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2111-300X

헤드의 동축 노즐 특성에 의하여 기저부 형상에 거의 영향을 받지 않아 불규칙 손상을 가지는 부품의 재제조가 매우 용이한 금속 적층 제조 공정이다[5-7]. 그러나, DED 공정에서는 적층 중에 발생하는 큰 온도 구배와 급속 가열-급속 냉각 메커니즘으로 인하여 적층부 인근의 미세 조직 변화, 기계적 특성 변화 및 과도한 잔류응력이 발생하게 된다[8]. 잔류응력 발생 특성은 재료 성분, 적층 전략, 적층 공정 변수, 예/후열 조건 및 냉각 조건에 매우 의존적이다. 또한, 적층부 인근의 잔류응력은 재제조 부품의 건전성과 신뢰성에 큰 영향을 미친다. 그러므로 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력의 완화/제거하기 위해 열-기계연계 해석을 이용한 잔류응력 발생 메커니즘 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[9-13]. Kim 등은 기계 부품 재제조를 위해 단일 비드 적층 시 DED 공정 조건에 따른 적층 비드 생성 특성 및 단일 비드 생성시 적층 공정 변수에 따른 잔류응력 발생 특성 변화를 고찰하였다[10]. Alissultan 등은 DED 공정을 이용한 모서리부 보수 시 모서리부 곡률과 위치가 잔류응력 발생 메커니즘과 분포에 미치는 영향성을 3차원 열-기계 연계 해석을 이용한 분석/고찰 하였다[11]. Hu 등은 DED 공정을 이용한 다층 적층 실험과 열-기계 연계 해석 결과를 이용하여 층간 냉각 시간과 적층 전략이 잔류 응력 발생에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 그들은 잔류 응력 감소와 균일한 잔류 응력 분포 도출을 위한 방안을 제시하였다[12]. Kiran 등은 DED 공정을 이용하여 제작한 대형 부품의 열-기계 연계 해석을 위해 반복 실험과 해석을 수행 하였으며, 주기적 열 입력 방법과 층별 열 입력 방법을 이용하여 열적 거동 및 잔류 응력 예측하였다[13].

열-기계 연계 해석은 적층/냉각 과정 및 탄성회복 과정의 적층부 인근의 잔류 응력 분포와 최대 잔류 응력을 예측할 수 있는 효과적인 방법인 것으로 제안되고 있다. 하지만, 대형 부품 해석 시 조밀한 격자 형성에 따른 비드 개수 제한과 해석 시간 및 데이터 용량 증가는 열-기계 연계 해석 기법을 DED 공정으로 재제조 된 부품에 적용하기 어렵게 한다.

이 연구에서는 DED 공정 기반 대체적 적층이 적용되는 ATC 부품의 재제조를 위한 열-기계 특성을 분석/고찰하였다. DED 공정을 이용한 대체적 적층

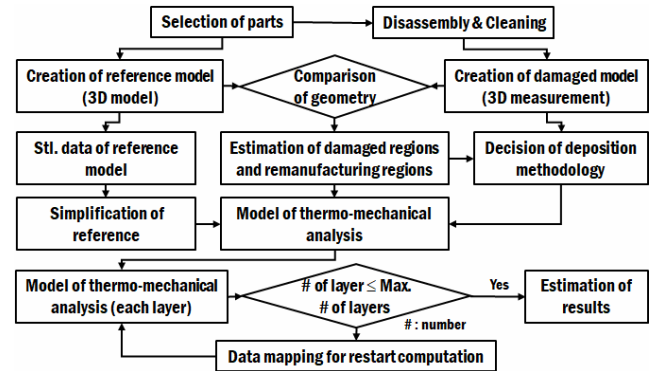


Fig. 1 Flow chart for analysis of remanufactured part

공정에 대한 3차원 열-기계 연계 해석 기법을 고찰하였다. 해석 결과를 이용하여 ATC 부품의 재제조 시 발생하는 열전달 및 잔류 응력 특성에 대하여 분석하였다.

2. 열-기계 연계 해석

Fig. 1은 DED 공정으로 재제조 되는 부품에 대한 열-기계 해석 절차이다. 부품 중에서 재제조 대상 부품을 선정한 후, 이 부품을 분해, 세척 및 검사를 수행하였다. 선정된 부품의 주요 치수 측정과 도면을 이용하여 선정된 부품의 기준 모델(reference model)을 3차원 설계 소프트웨어로 생성하였다. 또한 세척과 검사가 완료된 손상 부품을 3차원 측정기로 측정하여 손상 부품 모델(damaged model)을 생성하였다. 기준 모델과 손상 부품 모델의 3차원 비교를 통하여 손상 영역과 재제조 대상 영역을 도출하였다. 재제조 영역 데이터를 이용하여 적층을 위한 손상 부품 제거 형상 생성과 적층부 적층 기법을 수립하였다. 기준 모델은 .stl 모델로 변경된 후, 열-기계 연계 해석 소프트웨어에 입력하였다. 열-기계 연계 해석을 효율적으로 수행하기 위하여 형상을 단순화 하였다. 이 단순화 모델을 기반으로 열-기계 연계 모델을 생성하였다. 이 연구에서는 해석을 효율적으로 수행하기 위하여 한 개의 층 해석 후 이 데이터를 새로운 층 해석 모델의 초기 조건으로 부여하고, 이 초기 조건을 이용하여 새로운 층의 열-기계 연계 해석을 수행하는 재계산(restart computation) 기법을 활용하였다. 이 과정을 마지막 층까지 반복적으로 수행하고, 그 후 냉각 해석을 수행하여 최종 결과를 도출하였다.

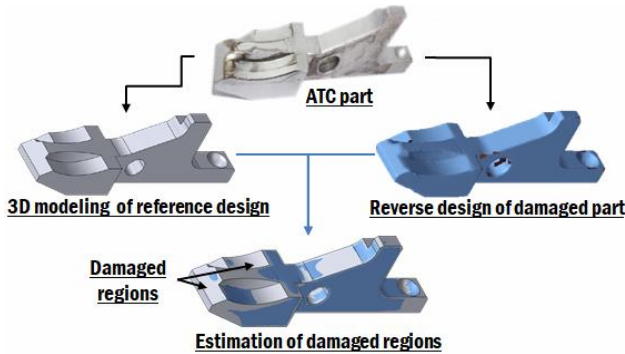


Fig. 2 Procedure to estimate damaged regions

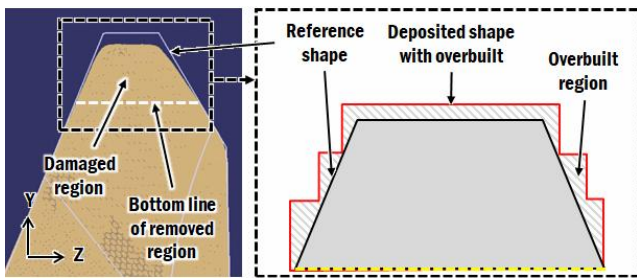


Fig. 3 Design of removed and deposited regions

2.1 부품 선정 및 손상 영역 도출

1990년 일본 SNK사에서 제작된 플래너 밀러인 HF-3M 모델 유닛 중 자동 공구 교환 (auto tool change: ATC) 장치에 장착되는 부품을 재제조 부품으로 선정하였다. 이 부품의 최외곽 치수와 재료는 각각 $168 \times 40 \times 57 \text{ mm}^3$ 과 SCM440이다. Fig. 2는 재제조 대상 부품의 손상 영역 도출 과정이다. 재제조 대상 부품의 3차원 모델링은 기존 도면 치수를 기준으로 CATIA V5R18로 생성하였다. 3차원 측정기는 AICON SMARTSCAN R12 (Hexagon Inc.)으로 수행하였다. 측정 데이터를 3차원 모델링으로 변환하고 형상 비교하기 위하여 Geomagic Control X 소프트웨어 (3D systems Inc.)를 사용하였다. 3차원 측정 데이터와 3차원 부품 설계 데이터를 비교한 결과 Fig. 2와 같이 부품의 끝부분에서 손상 영역이 도출되었다. 이 손상 영역에 대한 재제조를 위하여 Fig. 3과 같이 DED 공정용 적층 설계를 수행하였다. 부품내에서 손상이 발생하지 않은 영역을 기준으로 제거 형상과 적층 형상을 도출하였다. Fig. 3과 같이 적층 후 후처리를 고려하여 1.0 mm 이상의 과적층 (overbuilt) 영역을 생성하였다. 적층량을 감소시키기 위해 Fig. 3과 같이 계단형 적층 형상을 적용하였다.

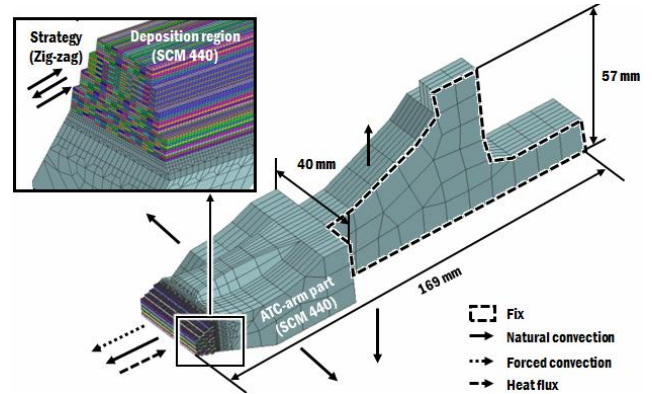


Fig. 4 Model and boundary conditions of thermo-mechanical analysis for remanufacturing

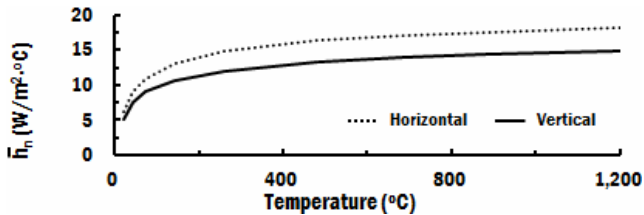
2.2 해석 모델 및 경계 조건

Fig. 4는 DED 공정을 이용한 ATC 부품 재제조 과정에 대한 열-기계 연계 해석 모델과 이 모델에 적용된 경계 조건이다. 열-기계 연계 해석은 상용 소프트웨어 SYSWELD V16.0를 이용하여 수행되었다. SCM440 재료에 대한 상변화가 고려된 열-기계 물성 데이터는 JmatPro 소프트웨어를 활용하여 산출하였다. 과적층 영역이 포함된 열-기계 연계 해석 모델의 전체 치수는 $169 \times 40 \times 57 \text{ mm}^3$ 이며, 적층부의 크기는 $12 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$ 이다. 열-기계 연계 해석용 유한 요소 격자 생성을 위하여 부차적인 형상들인 필렛, 구멍들은 제거하여 해석 모델을 단순화하였다. 해석 격자수를 감소시키기 위해 적층부에 조밀한 해석 격자 형성하고 기저부에는 큰 해석 격자를 생성하는 Local-Global 기법을 사용하였다. 적층부의 층수는 30 층이고 적층 경로수는 399로 적층부를 모델링하였다. 적층 경로는 지그-재그 (zig-zag) 경로를 적용하였다. 열-기계 연계 해석 모델의 절점과 요소의 개수는 각각 123,826개와 434,942 개였다. 열-기계 해석에서는 레이저를 침투 깊이를 가지는 체적 열원 (volumetric heat source)으로 가정하였다[10]. 열원의 초점이 형성되는 평면에서의 열유량 (heat flux) 분포는 가우시안 (gaussian) 분포로 가정하였다[10]. 열-기계 연계 해석에 적용된 적층 공정 조건은 Table 1과 같다.

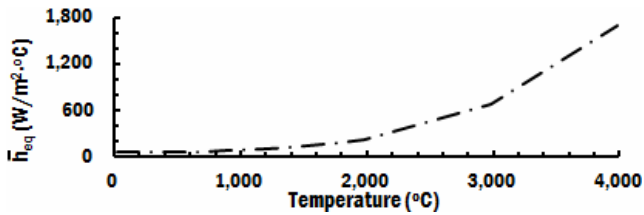
부품의 재제조를 위하여 DED 공정으로 손상부에 적층을 수행할 때는 적층부 상단에 체적 열원과 등가 열손실 모델 (equivalent heat loss model)을 적용하였다[10]. 적층중에는 기저부에 자연 대류 조건을 적용하였다. Fig. 5(a)는 이 연구에 사용된 온도 의존 자연

Table 1 Analysis conditions

Power of laser (W)	Scan speed (mm/min)	Feeding rate of shielding gas (ℓ/min)	Beam diameter (mm)
500	1,000	14.0	1.0



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Temperature dependent natural convection coefficients for different surfaces; (b) Temperature dependent coefficients of the equivalent heat loss model

대류 계수(temperature dependent natural convection coefficient: \bar{h}_n)이며, 이 데이터는 공기 물성을 기준으로 산출되었다. Fig. 5(b)는 해석에 적용된 온도 의존 등가 열손실 계수(temperature dependent coefficient of the equivalent heat model: \bar{h}_{eq})이다. 온도 의존 등가 열손실 계수는 보호 가스인 아르곤(Ar) 가스 데이터와 적층 재료의 방사율을 이용하여 산출되었다. 적층 이후 자연 냉각 시간은 30,000 초를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재제조 부품의 열전달 특성

Fig. 6은 열-기계 연계 해석으로 예측된 각 층별 적층부 주위의 온도 분포이다. Fig. 6에서 적층량이 증가할수록 적층부 인근의 온도가 계속적으로 상승하는 것을 알 수 있었다. 적층이 진행 될수록 이전 적층에 의하여 생성된 잔류 열이, 현재 적층시 기저부와 적층부를 예열하는 것을 알 수 있었다. 열-기계 연계 해석에서 적용된 냉각 시간이 완전히 지난

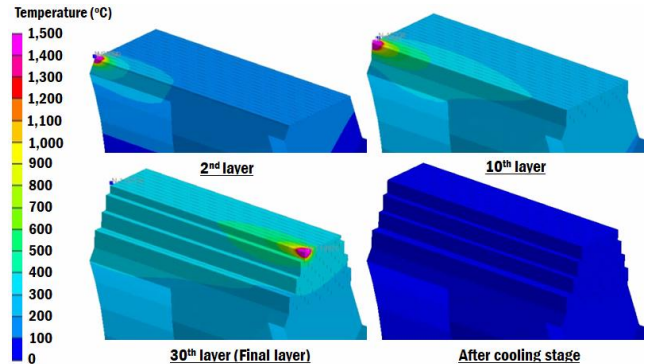


Fig. 6 Temperature distributions for different times

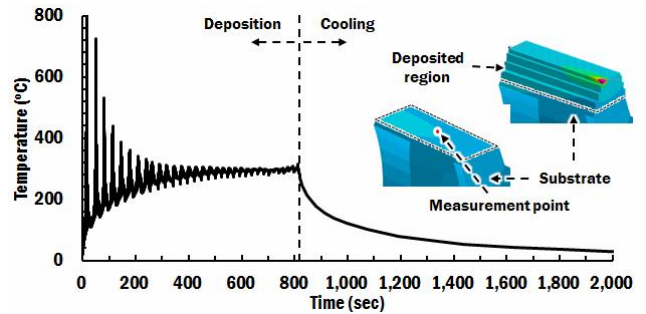


Fig. 7 Temperature history of the center of top surface for the substrate

후에는 Fig. 6과 적층된 부품의 온도가 거의 상온에 가까워지는 것을 알 수 있었다.

적층 경계부의 온도 변화를 예측하기 위하여 Fig. 7과 같이 기저부의 적층 경계면 중앙에서 온도 이력을 도출하였다. 적층 경계면의 온도는 첫 층 적층시 기저부 상단부에 레이저가 직접 조사되기 때문에 사료된다. 또한 이 때에 온도 구배가 가장 크게 나타났다. 이 현상은 첫 층 적층시 기저부가 거의 상온에서 적층 시작되고, 열이 축적 되지 않은 상태에서 적층시 부과된 열이 기저부로 거의 모두 전도되기 때문에 사료된다. 두번째 층 적층시 온도 측정부의 온도가 매우 짧은 시간에 724 °C 까지 급격히 증가하였다. 또한, 두번째 층 적층시 측정 위치의 냉각률 (cooling rate) 은 약 1,991 °C/s로 예측되었다. 적층이 진행될수록 측정점에서의 온도 상승과 냉각률이 점차 감소하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7과 같이 적층량이 증가할수록 측정점의 온도가 계속적으로 증가하여, 적층 완료 후 313 °C 정도로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터

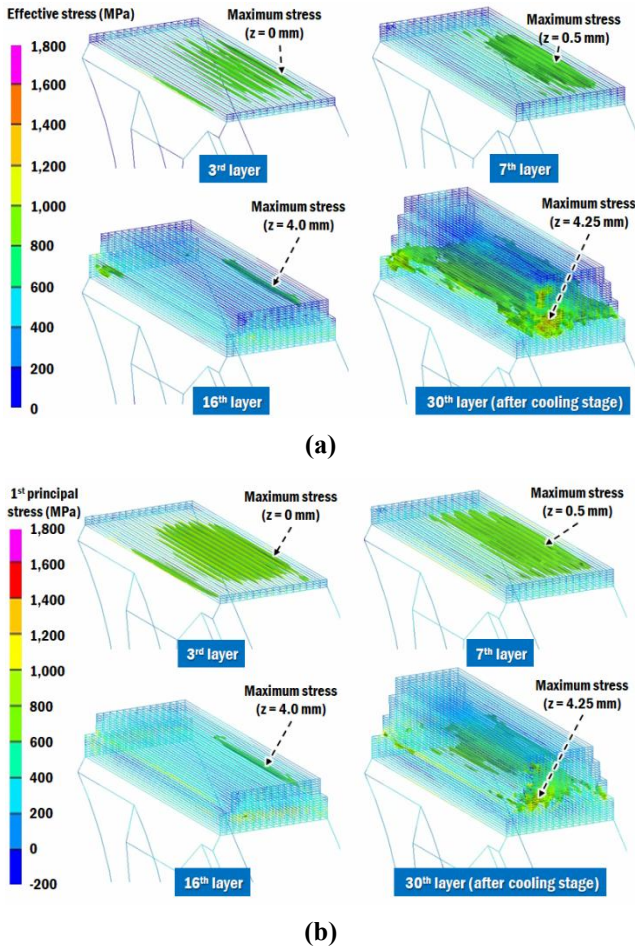


Fig. 8 (a) Effective stress distributions after deposition of each layer; (b) 1st principal stress distributions after deposition of each layer

DED 공정으로 부품 재제조시 적층부와 기저부 사이의 경계부 온도가 일정한 온도로 수렴하는 임계 적층량이 존재하는 것을 알 수 있었다. 적층 완료 후 2,000초 정도까지 자연 냉각을 수행할 경우, 적층부와 기저부 사이에 위치한 경계부 온도가 상온에 거의 도달하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 열-기계 연계 해석에 적용된 적층 후 냉각 시간은 충분한 것을 알 수 있었다.

3.2 재제조 부품의 잔류응력 특성

10 스텝(step)의 열전달 해석을 수행한 이 열 이력을 이용하여 잔류 응력 해석을 수행하였다. 1개 선의 비드를 생성하기 위하여 8번의 반복 잔류 응력 해석을 하였다. Figs. 8(a)와 8(b)는 열-기계 연계 해석으로 예측된 각 층 적층 완료시 적층부와 적층 경

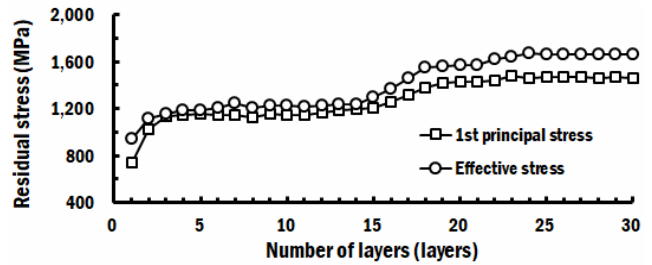


Fig. 9 Histories of residual stress

계부에 발생하는 유효 응력 (effective stress) 과 최대 주응력 (1st principal stress) 분포이다.

Figs. 8(a) 및 8(b)와 같이 적층 층수가 낮을 때에는 잔류 응력 최대값이 경계부에서 발생하였다. 적층되는 층수가 증가할수록 잔류 응력의 최대값이 발생하는 영역의 경계부에서 적층부 방향으로 조금씩 멀어지는 현상이 나타났다. 최종 층 적층 후 경계부로부터 수직방향으로 4.25 mm 정도에 위치한 평면에서 잔류 응력의 최대값이 나타났다. 이 결과로부터 DED 공정으로 대체적 적층을 수행하는 경우에는 적층부 내부에서 최대 잔류 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. Figs. 8(a) 및 8(b)의 최종 층 적층 후 잔류 응력 분포를 고찰한 결과, 적층부에 단차 형상이 포함되어 있을 경우 단차 발생 영역 인근에서도 잔류 응력이 상대적으로 높게 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 열-기계 연계 해석으로 예측된 각 층별 적층시 잔류 응력의 최대값 변화이다. Fig. 9에서 유효 응력이 최대 잔류 응력 보다 크게 예측되는 것을 알 수 있었다. 초기 4층 적층시까지 잔류 응력이 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 초기에 기저부가 상온에서 적층을 시작하게 되어, 기저부가 적층 중 열전달에 의하여 충분히 가열되기 전에는 급속 가열-급속 냉각에 의하여 잔류 응력이 급격히 증가하기 때문으로 사료된다. 5층에서 14층까지 잔류 응력이 거의 일정하게 유지되었다. 14층부터 22층 사이에 잔류 응력이 증가하는 경향을 보이다가 23층 이후에는 최대 잔류 응력 범위에서 일정하게 나타났다.

Fig. 10과 같이 적층된 부품의 냉각 후의 잔류 응력을 SCM440 항복 강도와 비교하여 적층된 부품의 안정성을 분석하였다. 적층부의 조직은 일반적으로 템퍼드 마르텐사이트 (tempered martensite) 조직을 나타낸다[14]. Fig. 10 적층부 항복 강도

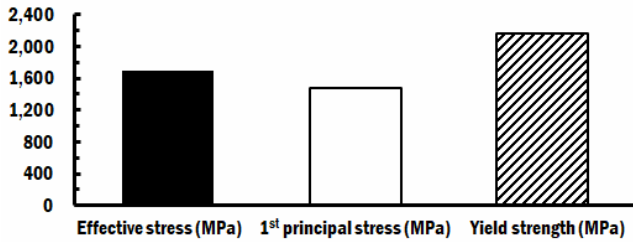


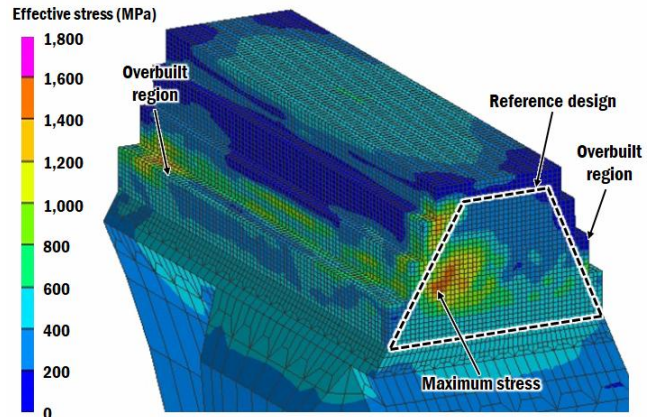
Fig. 10 Comparison of residual stresses and yield strength

(yield strength) 는 SCM440 마르텐사이트 조직의 항복 강도인 2,159 MPa 을 적용하였다[15]. SCM440 의 항복 강도는 JmatPro 소프트웨어에서 산출되었다[15]. Fig. 10의 결과와 같이 냉각이 완료된 후 적층부 인근의 유효 응력과 최대 주응력이 각각 1,695 MPa 과 1,473 MPa 로 SCM440 의 항복 응력인 2,159 MPa 보다 충분히 작은 것을 할 수 있었다. 이 결과로부터 ATC 부품을 재제조 하기 위하여 손상부에 적층을 수행하여도 적층부 인근에 잔류 응력에 의한 소성 변형이 발생하지 않을 것으로 사료된다.

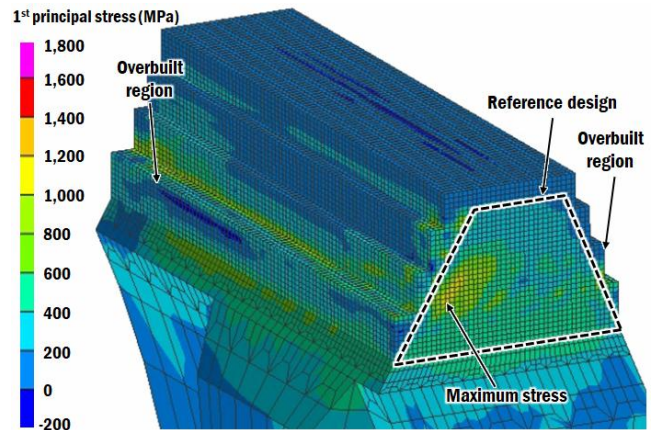
3.3 기존 형상과 잔류 응력 분포 비교

DED 공정을 이용한 부품 재제조 시 손상부에 대한 적층을 완료한 후 과적층 영역의 제거를 포함하는 후처리 공정을 수행하여야 한다. 그러므로 후처리 공정이 완료된 형상에 대한 잔류 응력 분포는 재제조 부품의 건전성에 영향을 미친다. Fig. 11(a)와 11(b)는 ATC 부품의 손상부에 대한 기준 설계와 적층부의 잔류 응력 분포를 비교한 결과이다. 이 비교에 사용된 잔류 응력 분포는 후처리에 의한 잔류 응력 재 분포가 고려되지 않은 적층부의 냉각이 완료된 상태에서의 잔류 응력 분포이다.

Figs. 11(a) 및 11(b)와 같이 최대 잔류 응력 발생 영역이 후처리가 완료된 최종 제품에 포함되었다. 그러나 단차부의 과도 응력 영역은 후가공으로 제거되는 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 최대 잔류 응력 발생 영역이 후처리가 완료된 최종 제품에 포함되지 않게 하기 위해서는 현재 적층 경로를 90° 회전하여 적층부의 폭 방향으로 지그-재그 적층을 수행하는 것이 적절할 것으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 11 (a) Effective stress distributions in the reference design for the remanufactured region; (b) 1st principal distributions in the reference design for the remanufactured region

4. 결론

이 연구에서는 DED 공정 기반 대체적 적층이 적용되는 ATC 부품의 재제조를 위한 열-기계 특성을 분석/고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, DED 공정을 이용한 ATC 부품 재제조를 위한 손상부 도출과 적층부 설계 방법을 개발할 수 있었다. ATC 부품의 재제조를 위한 손상부 적층에 대한 열-기계 연계 해석 모델을 도출할 수 있었다.

둘째, 적층 과정중의 적층부 전체의 평균 온도는 적층이 진행됨에 따라 계속적으로 증가하지만, 경계부의 온도는 적층이 계속적으로 진행됨에 따라 특정 온도로 수렴하는 것을 알 수 있었다. 또한, 적층 완료 후 약 1,200 초 정도 지나면 적층 부품의 온도

가 거의 상온에 가까워지는 것을 알 수 있었다.

셋째, 손상부 재제조 시 최대 잔류 응력이 적층 초기에는 경계부에서 발생하지만, 적층이 진행됨에 따라 적층부 내부로 조금씩 이동하는 것을 알 수 있었다. 최종 적층 후 최대 잔류 응력은 적층부 측면에서 발생하며, 단차가 있는 영역에서도 과도한 잔류 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 적층과 냉각 후에 발생하는 최대 잔류 응력은 SCM440의 항복 응력보다 작게 예측 되었다. 이 결과로부터 재제조 된 부품이 내부 잔류 응력에 의하여 소성 변형이 발생하지 않을 것으로 사료되었다.

넷째, 재제조 부품의 기준 설계와 잔류 응력 분포의 비교를 통해 후처리가 적용된 재제조 부품내 잔류 응력 분포를 고찰하였다. 최대 잔류 응력 발생 영역을 재제조 된 제품 내부에 위치 시키지 않기 위해서 적층 경로의 수정이 필요할 것으로 사료되었다.

향후 추가적인 적층 경로와 기법에 대한 열-기계 연계 해석을 수행하여 ATC 부품의 재제조 시 발생하는 잔류 응력의 최소화 방안을 수립할 예정이다. 또한, 적층 실험과 잔류응력 측정 결과를 열-기계 해석 결과와 비교하여 최적 열-기계 연계 해석 모델을 도출하고자 한다.

후 기

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.RS-2023-00219369) 및 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원 (No.20206310200010) 을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] J. M. Allwood, C. F. Dunant, R. C. Lupton, C. J. Cleaver, A. C. H. Serrenho, J. M. C. Azevedo, P. M. Horton, C. Clare, H. Low, I. Horrocks, J. Murray, J. Lin, J. M. Cullen, M. Ward, M. Salamati, T. Felin, T. Ibell, W. Zho, W. Hawkins, 2019, Absolut Zero, Apollo-University of Cambridge Repository. <https://doi.org/10.17863/CAM.46075>
- [2] I. D'Adamo, P. Rosa, 2016, Remanufacturing in Industry: Advices from the Field, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 86, pp. 2575-2584. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8346-5>
- [3] J. Östlin, E. Sundin, M. Björkman, 2008, Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing, *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 115, No. 2, pp. 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.02.020>
- [4] J. H. Ha, W. S. Woo, Y. H. Roh, C. M. Lee, 2017, A Study on the Development of Standardization Technology for Remanufacturing Process of Used Vertical Machining Center, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 34, No. 8, pp. 517-524. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2017.34.8.517>
- [5] R. D. A. Wahab, A. H. Azman, 2019, Restoration of Remanufacturable Components Using Additive Manufacturing (D. Dao, R. Howlett, R. Setchi, L. Vlacic), *Springer, Cham.*, Vol. 130, pp. 193-198. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04290-5_20
- [6] D. G. Ahn, 2016, Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A, *Int. J. Precis. Eng. Manuf. -GT.*, Vol. 3, No. 4, pp. 381-395. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0048-9>
- [7] R. D. A. Wahab, A. H. Azman, 2019, Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives, *Processes*, Vol. 7, No. 11, pp. 802. <https://doi.org/10.3390/pr7110802>
- [8] A. Saboori, P. G. Piscopo, M. Lai, A. Salmi, S. Biamino, 2020, An Investigation on the Effect of Deposition Pattern on the Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress of 316L Produced by Directed Energy Deposition, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 780, No. 7, pp. 139179. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139179>
- [9] X. Lu, M. Chiumenti, M. Cervera, J. Li, X. Lin, L. Ma, G. Zhang, E. Liang, 2021, Substrate Design to Minimize Residual Stresses in Directed Energy Deposition AM Processes, *Mater. Des.*, Vol. 202, pp. 109525. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109525>
- [10] D. A. Kim, K. K. Lee, D. G. Ahn, 2021, Investigation into the Effects of Process Parameters of DED Process on Deposition and Residual Stress

- Characteristics for Remanufacturing of Mechanical Parts, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 30, No. 3, pp. 109-118. <https://doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.3.109>
- [11] A. Alissultan, K. K. Lee, D. G. Ahn, 2021, Investigation of the Influence of Radius and Corner Position on the Residual Stress Distribution in the Vicinity of the Repaired Region via Directed Energy Deposition by using Finite Element Analysis, *J. Kor. Soc. Manuf. Proc. Eng.*, Vol. 20, No. 7, pp. 33-40. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.07.033>
- [12] Z. Hu, W. Yuan, 2023, Finite Element Analysis for Residual Stress of TB18 Billet Produced by Laser Directed Energy Deposition, *Mater. Res. Express*, Vol. 10, No. 3, pp. 036511. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acc448>
- [13] A. Kiran, J. Hodek, J. Vavřík, M. Urbánek, J. Džugan, 2020, Numerical Simulation Development and Computational Optimization for Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Process, *Materials*, Vol. 13, No. 11, pp. 2666. <https://doi.org/10.3390/ma13112666>
- [14] J. Epp, J. Dong, H. Meyer, A. Bohlen, 2020, Analysis of Cyclic Phase Transformations During Additive Manufacturing of Hardenable Tool Steel by In-situ X-ray Diffraction, *Scr. Mater.*, Vol. 177, pp. 27-31. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.09.021>
- [15] JMatPro, <https://www.sentessoftware.co.uk/jmatpro> (accessed on 31 May 2024)