



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월
석사학위 논문

**DED 공정을 이용한
인코넬 718 대체적 적층 시
경로 의존 잔류응력 특성분석**

조선대학교 대학원
기계공학과
김 호

**DED 공정을 이용한
인코넬 718 대체적 적층 시
경로 의존 잔류응력 특성분석**

**A Study on Residual Stress Characteristics Dependent on
the Deposition Strategy in a Large Volume Deposition of
Inconel 718 Using a DED Process**

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

김 호

DED 공정을 이용한
인코넬 718 대체적 적층 시
경로 의존 잔류응력 특성분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

김 호

김 호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 한 길 영



위 원 조선대학교 교수 김 창 래



위 원 조선대학교 교수 안 동 규



2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES v
LIST OF FIGURES v
NOMENCLATURES ix
ABSTRACT xi

제 1 장 서론 1
 제 1 절 연구 배경 및 관련 연구 1
 1. 연구 배경 1
 2. 에너지 제어형 적층 (Direct Energy Deposition) 공정 5
 3. 관련 연구 7
 제 2 절 연구 목적 및 방법 9
 1. 연구 목적 9
 2. 연구 방법 10

제 2 장 3차원 유한요소 해석을 이용한 적층 경로 선정 및 도출 방법 13
 제 1 절 저층 적층 유한요소해석을 위한 데이터 도출 및 모델생성 13
 1. 물성 데이터 도출 13
 가. 기저부 및 적층부 물성 데이터 도출..... 13
 나. 강제 대류 및 자연 대류 경계조건 데이터 도출..... 15

2. 열원 모델 개발.....	20
3. 적층 경로 및 저층 적층 유한요소 모델 개발.....	21
가. 적층 경로 개발	21
나. 저층 적층 유한요소 해석 모델 개발	22
제 2 절 저층 적층 유한요소 해석을 통한 적정 적층 경로 후보 선정	24
1. 열응력 해석 결과 및 분석	24
가. Alternative-direction Type 응력분포 비교 분석	24
나. Uni-direction Type 응력분포 비교 분석	26
2. 적정 적층 경로 후보 선정	28
제 3 절 다층 적층 유한요소 해석을 통한 적정 적층 경로 선정	30
1. 다층 적층 유한요소 해석모델 개발	30
2. 열응력 해석 결과 및 분석	31
가. 적층 경로별 Von-Mises Stress 비교 분석	33
나. 적층 경로별 1 st Principal Stress 비교 분석	34
3. 적층 층별 최대 응력 비교 분석 및 적정 적층 경로 선정 ...	35
제 3 장 다층 및 대체적 적층 시편 설계 및 제작 ..	38
제 1 절 다층 적층 시편 설계 및 제작	38
1. 다층 적층 시편 설계	38
2. 다층 적층 시편 제작	39

제 2 절 대체적 적층 시편 설계 및 제작	42
1. 대체적 적층 시편 설계	42
2. 대체적 적층 시편 제작	43
제 3 절 다층 및 대체적 적층 시 열 이력 측정 실험	44
1. 열 이력 측정 실험 방법 및 실험	44
2. 열 이력 측정 실험 결과 및 고찰	45
제 4 장 유한요소 해석을 이용한 다층 및 대체적 적층 특성 고찰	52
제 1 절 유한요소 해석 모델 도출	52
제 2 절 열전달 해석 결과 및 분석	54
1. 다층 적층 모델 열전달 해석 및 열 이력 비교 분석	54
가. Alternative direction type 2 적용 다층 적층 모델	54
나. Alternative direction type 5 적용 다층 적층 모델	56
2. 대체적 적층 모델 열전달 해석 및 열 이력 비교 분석	58
가. 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델	58
나. 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델	60
제 3 절 열응력 해석 결과 및 분석	63
1. 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델 열응력 해석 결과 및 분석	63
2. 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델 열응력 해석 결과 및 분석	65
3. 적층 후 냉각 진행 시 고정 경계조건에 따른 열응력 해석 결과	

및 비교 분석	67
가. 다층 적층 모델 열응력 해석 결과 및 비교 분석	67
나. 대체적 적층 모델 열응력 해석 결과 및 비교 분석	69
제 4 절 다층 적층 시편의 기저부 예열온도에 따른 열응력 해석	73
1. 기저부 예열온도별 열응력 해석 결과 및 비교 분석	73
가. 예열온도별 Von-Mises Stress 비교 분석	75
나. 예열온도별 1 st Principal Stress 비교 분석	76
2. 적정 예열온도 선정	76
 제 5 장 결론 및 향후 과제	79
Reference	84

LIST OF TABLES

Table 1 Classification of additive manufacturing according to working principle	2
Table 2 Classification of DED processes	5
Table 3 Chemical Compositions of the substrate and powder	10
Table 4 Characteristics of dimensions of bead	23
Table 5 Maximum stress of multi layer deposited model	35
Table 6 Specification of LENS processes	40
Table 7 Experimental condition for Inconel 718 powders	40
Table 8 Experimental condition for multi-layers deposition (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2, 5)	40
Table 9 Experimental condition for large-volume deposition (Deposition areas = 20 mm × 20 mm, 30 mm × 30 mm and number of layers = 31 layer, 15 layer and Alternative direction type 2, 5)	43
Table 10 Compositions of FE model for different deposited models	53

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematic diagram of DED porcesses	5
Fig. 2 Defects of parts fabricated by the metal AM process	9
Fig. 3 Flowchart of research works	11
Fig. 4 Temperature dependent material properties of s45c and inconel 718	14
Fig. 5 Temperature dependent material properties of argon and air	15
Fig. 6 Temperature dependent coefficient of forced convection	16
Fig. 7 Temperature dependent coefficient of natural convection for different surface of substrate	17
Fig. 8 Emissivity of inconel 718	19
Fig. 9 Temperature dependent of equivalence forced convection coefficient	20

Fig. 10 Heat flux model of laser	20
Fig. 11 Deposition strategy (Alternative and uni directions)	22
Fig. 12 Finite element model of low deposited layer model	23
Fig. 13 Distributions of Von-mises stress for alternative direction deposition	24
Fig. 14 Distributions of 1 st principal stress for alternative direction deposition	25
Fig. 15 Distributions of Von-Mises stress for uni direction deposition	26
Fig. 16 Distributions of 1 st principal stress for uni direction deposition	27
Fig. 17 Maximum stress for different deposition strategies	28
Fig. 18 Finite element model of multi deposited layer and deposition strategy	30
Fig. 19 Influence of different deposition strategies on Von-mises stress distributions of multi layer deposited models	31
Fig. 20 Influence of different deposition strategies on 1 st principal stress distributions of multi layer deposited models	32
Fig. 21 Distributions of Von-Mises stress for multi layer deposited models	33
Fig. 22 Distributions of 1 st principal stress for multi layer deposited models	34
Fig. 23 Comparison of maximum Von-Mises stress for different deposition strategies	36
Fig. 24 Comparison of maximum 1 st principal stress for different deposition strategies	36
Fig. 25 Design of specimen for multi-layer deposition	38
Fig. 26 Experimental set-up	39
Fig. 27 Clamping condition of specimens	39
Fig. 28 Results of deposition strategy type 2	41
Fig. 29 Results of deposition strategy type 5	41
Fig. 30 Design of specimen for large-volume deposition	42
Fig. 31 Results of large-volume deposition (20 mm × 20 mm)	43
Fig. 32 Results of large-volume deposition (30 mm × 30 mm)	43
Fig. 33 Data logger and thermocouple	44
Fig. 34 Experiment set up of temperature measurements using thermocouple	44
Fig. 35 Attached locations of thermocouples	45
Fig. 36 Measured thermal histories for alternative deposition stratege (Alt type 2, Areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer)	46
Fig. 37 Measured thermal histories for alternative deposition stratege (Alt type 5, Areas = 10 mm	

× 10 mm and number of layers = 17 layer) 47
 Fig. 38 Measured thermal histories for alternative deposition stratege (Alt type 5, Areas = 20 mm
 × 20 mm and number of layers = 31 layer) 49
 Fig. 39 Measured thermal histories for alternative deposition stratege (Alt type 5, Areas = 30 mm
 × 30 mm and number of layers = 15 layer) 50
 Fig. 40 Finite element model of large volume deposited model 52
 Fig. 41 Estimated locations of thermal histories (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number
 of layers = 17 layer and Alternative direction type 2, 5) 54
 Fig. 42 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition
 areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction
 type 2) 55
 Fig. 43 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition
 areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction
 type 5) 57
 Fig. 44 Estimated locations of thermal histories (Deposition areas = 20 mm × 20 mm, 30 mm
 × 30 mm and number of layers = 31 layer, 15 layer and Alternative direction type 5)
 58
 Fig. 45 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition
 areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction
 type 5) 59
 Fig. 46 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition
 areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction
 type 5) 61
 Fig. 47 Distribution of residual stresses (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers
 = 31 layer and Alternative direction type 5) 63
 Fig. 48 Residual stress distributions of maximum stress region (Deposition areas = 20 mm × 20 mm
 and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5) 64
 Fig. 49 Distribution of residual stresses (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers
 = 15 layer and Alternative direction type 5) 65
 Fig. 50 Residual stress distributions of maximum stress region (Deposition areas = 30 mm × 30 mm
 and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5) 66

Fig. 51 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2) 67

Fig. 52 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5) 68

Fig. 53 Distributions of 1st principal stress (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2) 68

Fig. 54 Distributions of 1st principal stress (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5) 69

Fig. 55 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5) 70

Fig. 56 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5) 70

Fig. 57 Distributions of 1st Principal stress (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5) 71

Fig. 58 Distributions of 1st Principal stress (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5) 71

Fig. 59 Influence of different preheating temperatures on Von-mises stress distributions (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5) 73

Fig. 60 Influence of different preheating temperatures on 1st Principal stress distributions (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5) 74

Fig. 61 Von-mises stress distribution of deposited region for different preheating temperatures 75

Fig. 62 1st Principal stress distribution of deposited region for different preheating temperatures 76

Fig. 63 Comparison of maximum Von-Mises stress at each layer for different preheating temperatures 77

Fig. 64 Comparison of maximum 1st principal stress at each layer for different preheating temperatures 77

NOMENCLATURES

- ε : Emissivity
- η : Efficiency of heat flux
- ν_k : kinematic viscosity
- σ_s : Stefan-Boltzmann constant
- ρ : Temperature dependent density
- α : Temperature dependent thermal expansion
- Ar : Application area
- C : Shape coefficient of heat flux
- C_P : Temperature dependent specific heat
- D : Diameter of nozzle
- E : Temperature dependent elastic modulus
- g : Gravitational acceleration
- H : Distance between nozzle and substrate
- \bar{h}_{forced} : Average forced convection coefficient
- $\bar{h}_{natural}$: Average natural convection coefficient
- $\bar{h}_{eq,f}$: Average equivalent forced convection coefficient
- k : Temperature dependent thermal conductivity
- L_c : Characteristic length
- N_a : Average nusselt number
- P : Power of heat flux
- Pr : Prandtl number
- \dot{Q}_t : Total heat loss rate
- \dot{Q}_{forced} : Heat loss rate induced by the forced convection
- \dot{Q}_{rad} : Heat loss rate induced by the radiation
- Q_0 : Maximum power intensity of heat flux
- Re : Reynolds number

Ra : Rayleigh number

$r(Z)$: heat flux coverage

r_e : Top radius of heat flux

r_i : Bottom radius of heat flux

T_s : Surface temperature

T_∞ : Environmental temperature

T_f : Film temperature

t : Time

v : Scan speed of heat flux

x : X position of heat flux

y : Y position of heat flux

z : Z position of heat flux

z_e : Top position of heat flux

z_i : Penetration depth

ABSTRACT

A Study on Residual stress Characteristics Dependent on the Deposition Strategy in a Large Volume Deposition of Inconel 718 Using a DED Process

Kim Ho

Advisor : Prof. Ahn Dong-Gyu, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Directed Energy Deposition (DED) processes selectively dissolve and solidify the material using a high density energy source to produce a desired product. In the DED processes a sudden variation of the thermal history, including rapid heating and cooling in taken place in the vicinity of the deposited region. the sudden variation of the thermal stress causes an excessive residual stress in the vicinity of the deposition region. The residual stress provokes undesired deformation and premature cracking of the fabricated part. The residual stress increased when the deposition volume augmented. In order to overcome these problems, it is necessary to analyze residual stress characteristics during the deposition of material using DED process. The goal of this thesis is to investigate on the effects of the deposition strategy on residual stress characteristics in a large volume deposition of Inconel 718 using a DED process. Various candidate deposition strategies were selected through the investigation of previous research works. In order to select appropriate deposition strategies, repeated thermo-mechanical analyses were performed for thin-layer depositions. Using the results of thermo-mechanical analyses for thin-layer depositions, two appropriate deposition strategies and two comparative deposition strategies for a large volume deposition were obtained. In addition, an optimum deposition strategies for a large volume deposition was estimated from the comparison of residual stress distributions for different deposition strategies. Large volume deposition experiments were carried out to obtain thermal histories during the deposition using the DED process. In order to obtain a proper

thermo-mechanical analysis model, thermal histories of thermo-mechanical analyses were compared to those of experiments. Finally, the influence of preheating temperature on residual stress distributions was examined to obtain a proper preheating temperature of the substrate.

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

1. 연구 배경

산업혁명은 18세기 증기기관이 발달하며 농업과 수공업 위주의 경제에서 기계를 사용하는 제조업 위주의 경제로 전환된 제1차 산업혁명을 시작으로 다양한 기술적 발전을 통해 발전해 왔다.¹⁾ 그 후 전기에너지의 발달에 따른 대량생산 사회로 전환된 제2차 산업혁명, 20세기 후반 컴퓨터와 인터넷 등 전자기기의 발달로 지식정보 사회를 가져온 제3차 산업혁명으로 차례로 발달해 왔다.²⁾ 이와 같은 산업혁명의 발전은 기술혁신으로 생산성을 극대화 시켜 산업, 경제 및 사회 전체에 큰 변화를 가져왔고, 현재 우리 사회는 O2O (Online to Offline) 기반의 제4차 산업혁명에 접어들어 또 한번의 기술적 전환기를 맞이하고 있다.³⁾

제4차 산업혁명은 2016년 1월에 주최된 제46회 세계경제포럼 (World Economic Forum)에서 처음으로 언급되었으며 빅 데이터 분석, 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷, 자율 주행 기술, 3D 프린팅 (3D printing) 기술 등의 주요 기술혁신을 내포한다.¹⁾⁴⁾ 제4차 산업혁명의 주요 기술혁신 중 하나인 3D 프린팅 기술은 2013년 초 미국 버락 오바마 대통령의 국정 연설에서 3D 프린팅을 미국 제조업을 부흥시키는 방법론으로 언급된 이후로부터 현재까지 3D 프린팅 기술에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 이와 동시에 이 기술에 관련 원천 특허권이 만료되어 전 세계적으로 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁴⁾⁵⁾

3D 프린팅은 일반적으로 대중들에게 알려진 명칭이며, 학술적 정식 명칭은 적층 제조 (Additive manufacturing : AM) 공정이다.⁶⁾ 적층 제조 공정이란 CAD (Computer-Aided Design) 및 CAM (Computer Aided Manufacturing)을 이용하여 3차원 디지털 모델링 데이터로부터 원하는 형상의 제품을 다양한 방법의 적층 방법을 통해 3차원의 제품을 제조하는 방법이다.⁶⁾⁷⁾ 적층 제조 공정은 전통 가공 공정인 성형 공정 (Forming process) 이나 기존의 재료를 절삭 또는 드릴을 통해 입체물을 제조 및 조립하는 방식

인 재료 제거 가공 공정 (Cutting process) 과는 다르게 재료를 층별로 쌓아 올려서 (Layer-by-layer deposition) 제품을 생성하는 공정을 말한다. 적층 제조 공정은 앞에서 말한 기술적 특성으로 인해 기존의 제조 공정 대비 가공 단계가 줄어 공정 시간 및 비용을 줄일 수 있으며, 복잡한 형상을 제작하기에 용이하다. 이와 같은 장점으로 인해 기존의 제조 공정 대체 및 적층 제조 공정과의 융합에 관한 연구가 진행되고 있다.⁶⁻⁸⁾ 더욱이 제조 분야뿐만 아니라 다양한 연구 분야와의 결합성도 우수하여 현재 전 세계에서 여러 분야에서 연구개발을 활발히 진행 중이다.⁹⁻¹³⁾

적층 제조 공정은 미국의 Charles W. Hull 이 개발한 최초의 적층 제조 공정인 광경화수지 (Stereolithography : SLA) 조형 공정을 시작으로 오랜 기간 동안 다양한 연구를 통해 현재에 이르러서는 적층 공정의 방식 및 적층 재료에 따라 다양한 공정들이 개발 및 상용화 되었다.¹⁴⁾¹⁵⁾ 이러한 적층 제조 공정은 미국재료시험협회 (American society for testing materials : ASTM)에서 공정 수행 방식 및 적층 재료에 따라 광중합 방식, 소재 압출 방식, 재료 분사 방식, 판재 적층 방식, 분말 베드 용해 방식, 접착제 분사 방식, 에너지 제어형 적층 방식으로 총 7 가지로 분류되며, 각 적층 방식별 세부 적층 공정 및 적층 가능 재료는 Table 1 과 같다.¹⁶⁾¹⁷⁾

Table 1 Classification of additive manufacturing according to working principle⁷⁾¹⁶⁾¹⁷⁾

AM Process	Definition	Type of material	Related technologies
Binder jetting	an AM in which a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials.	Polymer/ Metallic/ Ceramic	3D Printing (3DP), Powder bead and inkjet head (PBIH)
Directed energy deposition	an AM in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited.	Metallic	Laser Metal Deposition (LMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), Electron Beam Freeform Fabrication (EBF)
Material extrusion	an AM in which material is selectively dispensed through a nozzle or orifice	Polymer	Fused Deposition Modelling (FDM), Fused Filament Fabrication (FFF)
Material jetting	an AM in which droplets of build material are selectively deposited.	Polymer	Polyjet, Multi-Jet Modeling (MJM), Projet
Powder bed fusion	an AM in which thermal energy selectively fuses regions of a powder bed.	Polymer/ Metallic/ Ceramic	Selective Laser Sintering (SLS), Selective laser melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM)
Sheet lamination	an AM in which sheets of material are bonded to form an object.	Polymer/ Metallic/ Ceramic	Laminated Object Manufacture (LOM), Selective Deposition Lamination (SDL), Ultrasonic Consolidation (UC)
Vat photo-polymerization	an AM in which liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization.	Polymer	Stereolithography apparatus (SLA), Digital Light Processing (DLP)

광중합 (Vat Photopolymerization) 방식은 7가지 적층 제조 공정 중 가장 오래된 방식으로 광경화 (Photopolymer) 소재를 큰 용기에 분포시키고 조형판 (Building plate) 에 빛을 조사하여 국부적으로 경화시켜 적층을 진행하는 방식이다. 수조에 광경화 소재가 충분히 담겨 있어야지 적층이 진행되기 때문에 공정 수행에 큰 비용이 책정되며, 기기 및 재료관리의 어려움과 재료의 유해성과 같은 단점을 가진다. 종류로는 SL (Stereolithography : SL) 공정 및 디지털 광조형 (Digital light process : DLP) 공정이 있다.¹⁸⁾¹⁹⁾

재료 압출 (Material Extrusion : ME) 방식은 플라스틱 필라멘트 (filament) 와 같은 열가소성 물질은 부분적으로 가열한 후 노즐을 통하여 조형판위에 압출시키며 한 층씩 적층하여 제품생성을 수행하는 공정이다.²⁰⁾ 다른 적층 제조 공정에 비해 다양한 소재 적용이 가능하며 시스템 설비 구축이 간단하고 저렴하다는 장점이 있다. 용착 조형 (Fused Deposition Modeling : FDM) 공정이 재료 압출 공정에 속한다.²¹⁾

박판 적층 (Sheet lamination : SL) 방식은 재료를 얇은 필름형태로 가공하여 열 또는 접착제를 이용하여 한층 씩 붙여가며 적층하는 공정이다. 재료를 압출해가며 매 층을 적층하는 FDM 공정과는 다르게 박판 형태로 한층 전체를 한 번에 적층하기 때문에 공정 속도가 빠르다는 장점이 있다.²²⁾

재료 분사 (Material jetting : MJ) 방식은 액체 타입의 광경화 수지를 노즐을 통하여 조형판 위에 분출시키고 자외선램프를 이용하여 경화시켜 적층을 진행해 제품을 생성하는 공정이다. 적층 속도가 빠르며 표면부의 품질이 높다는 장점이 있지만, 설비 구축 비용 및 재료의 비용이 고가이고 강도가 좋지 않아 넓은 방면에 적용이 어렵다는 단점이 있다. 광경화수지 제팅 (Photopolymer jetting : Polyjet) 공정과 다중 제팅 (Multi Jet Modeling : MJM) 공정이 재료 분사 공정에 속한다.²³⁾²⁴⁾

접착제 분사 (Binder Jetting : BJ) 방식은 조형판 위에 고르게 분포시킨 후 분말 재료 위에 액상의 접착제를 국부적으로 분사시켜 분말 재료를 원하는 형상으로 경화시켜 적층을 진행해 제품을 생성하는 공정이다. 적층을 위한 결합 시 접착제를 사용하기 때문에 제품의 강도가 다른 방식에 비해 높지 않기 때문에 내구성 보장을 위해 후처리 가공이 반드시 필요한 것이 단점이다.²⁵⁾

분말 베드 용해 (Powder Bed Fusion : PBF) 방식은 분말 형태의 폴리머, 금속 및 세라믹 재료를 베드위에 도포시킨 후 고출력 에너지원 (레이저, 전자빔)으로 재료를 선택적으로 소결시키거나 용해 및 응고시켜 적층을 진행해 제품을 생성하는 공정이다. 분말 베드 용해 방식의 장점은 제조과정 중에 오버행 (overhangs)과 언더컷에 대한 결합

부위를 보완할 수 있다는 것이다. 이와 같은 장점으로 인해 분말 베드 용해 방식은 다른 적층 방식들에 비해 작고, 복잡한 부품을 제조하는데 알맞은 기술이다.²⁶⁾²⁷⁾ 대표적인 공정으로는 직접식 금속 레이저 소결 (Direct Metal Laser Sintering : DMLS), 선택적 레이저 소결 (Selective Laser Sintering : SLS), 전자빔 용해 (Electron Beam Melting : EBM), 레이저 큐징 (Laser Cusing) 공정이 있다.²⁸⁾

에너지 제어형 적층 (Directed Energy Deposition) 방식은 레이저나 전자빔과 같은 고밀도 에너지원으로 금속분말 또는 선재 (Wire) 형태로 가공된 재료를 용해 및 응고시켜 적층을 진행해 제품을 생성하는 공정이다. 에너지 제어형 적층 방식은 재료의 형태에 따라 종류가 나뉘며, LENS (Laser Engineered Net Shaping), DMD (Direct Metal Deposition), WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), EBF (Electron Beam freeform Fabrication) 공정이 있다.²⁹⁾³⁰⁾

2. 에너지 제어형 적층 (Directed Energy Deposition : DED) 공정

에너지 제어형 적층 (Directed Energy Deposition : DED) 공정은 금속 적층 제조 (Metal Additive Manufacturing) 공정 중 한 종류이다. 레이저 (Laser) 또는 전자빔 (Electron Beam)을 에너지원으로 사용하여 기저부 (Substrate)를 용융시켜 용융풀 (Molten Pool)을 생성한 후 금속분말 (Powder) 또는 금속 선재 (Wire) 형태의 재료를 연속적으로 공급 및 용융시켜 적층부 (기저부 또는 앞서 형성된 층) 위에 생성시키는 과정을 반복적으로 수행하여 제품을 제작하는 공정이다. 에너지 제어형 적층 공정은 공급되는 재료의 형태에 따라서 Table 2에서처럼 분류되며, Feeding Type 별 공정의 개념도는 Fig. 1 과 같다.⁷⁾³¹⁾

Table 2 Classification of DED processes

Feeding Type	Powder		Wire	
	Deposition Process	Laser Engineered Net Shaping (LENS)	Direct Metal Deposition (DMD)	Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

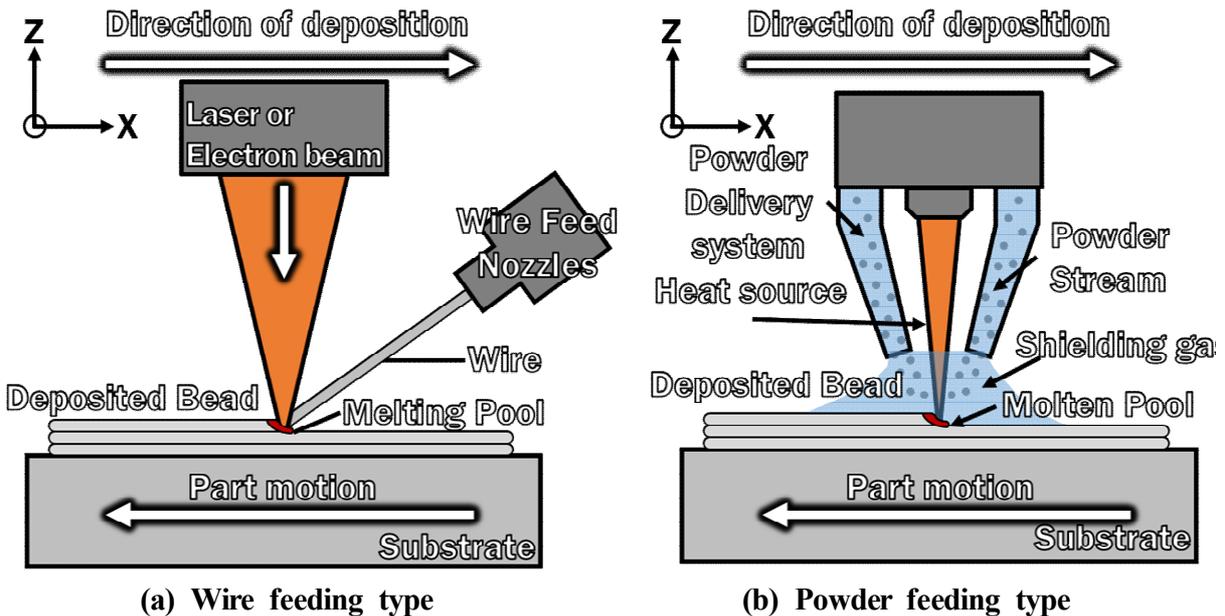


Fig 1. Conceptual diagram of DED process

에너지 제어형 적층 공정 중 와이어 공급형 적층 공정은 시간당 적층 속도가 빠르다는 장점이 있고, 분말 대비 소재의 가격이 저렴하기 때문에 저비용으로 부품 생산이 가능하며, 방산부품 분야의 연구가 활발하게 진행되고 있다.³³⁾ 에너지 제어형 적층 공정 중 금속분말 공급형 적층 공정의 장점은 적층 공정 진행 시 다중 분말 호퍼 (Multipowder hoppers)를 사용하여 단일 분말뿐만 아니라 이중 및 다중 금속분말까지의 사용이 가능하며, PBF 공정과 비교해서 다축 (Multiple-axis) 가공이 가능하다. 이러한 장점으로 박막구조체, 오버홀링 (Overhauling), 내부 채널형태의 부품과 같은 복잡한 구조물을 지지대 (Support) 없이 제조할 수 있어 터빈 블레이드, 블리스크 및 엔진 연소 챔버와 같은 고가의 항공우주 부품을 보수하는 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다.²⁶⁾³²⁾

에너지 제어형 적층 공정을 이용해 금속 재료를 사용하여 적층을 수행할 경우 레이저 또는 전자빔과 같은 고밀도 및 고온의 열원에 의하여 1,300℃ 이상의 고열이 짧은 시간 동안 발생한다. 이로 인해 적층 과정 중 기저부와 적층 비드 (Bead) 영역의 주위에 급속 가열과 급속 냉각과 같은 열 이력 (Thermal history) 이 반복적으로 나타나게 된다. 이로 인해 적층부와 적층 경계부에 열 특성 불균형이 발생하고, 금속의 팽창과 수축에 의한 잔류응력이 발생해 최종 제품의 변형 및 균열 발생 등의 문제를 발생시키는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 열전달, 열응력 및 잔류응력 발생에 관한 분석과 이를 통한 공정제어 기술이 활발하게 연구되고 있다.³⁵⁾

3. 관련 연구

적층 공정 후 발생하는 잔류응력에 의한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되어왔다.

2015 년 Heigel 등은 DED 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 소재로 적층 시편제작 후 유한요소 해석모델을 생성하였다. 열-기계적 모델 개발과 강제대류 효과를 고려한 해석을 통해 대류 조건 적용에 관한 연구를 수행하였다. 강제대류 적용이 유한요소 해석에서의 열 이력에 영향을 미친다는 결과를 유추해내 유한요소 해석모델에서 강제대류 효과를 고려해야 함을 도출했다.³⁶⁾

2020 년 Saboori 등은 DED 공정을 이용하여 Stainless Steel 316L 소재 적층 시 제품의 적층 경로를 두 가지로 설정해 적층을 진행하였다. 이후 적층 경로별 제품의 표면 조도 측정 및 홀 드릴링 기법을 사용해 제품 상부 및 측면의 잔류응력 분포를 도출하였다. 적층 경로 변화에 따라 표면 조도 및 잔류응력이 변화함을 도출하고 적층 경로 조정이 표면 조도 및 잔류응력을 감소시킬 수 있음을 도출하였다.³⁷⁾

2020 년 Denny 등은 DED 공정을 이용하여 적층 경로 변화에 따른 Inconel 718 소재의 적층 시편을 제작하고 미세조직 비교 및 피로 균열 전파 실험을 진행하여 피로 균열 전파를 분포를 도출하였다. 이를 통해 적층 경로에 따라 미세조직 결정립 크기와 피로 균열 전파 저항이 다르게 나타남을 도출하였다.³⁸⁾

2002 년 K. Dai 등은 유한요소 해석프로그램인 ANSYS 를 통해 Nickel 소재를 적층 시 적층 경로가 제품의 최종 형태에 미치는 영향을 제품의 변형 및 주응력을 도출을 통해 적층 경로의 방향이 제품의 변형 방향성에 영향을 미치는 것을 도출하였고, 최종적으로 제품의 변형을 저감 시키기 위한 적층 경로를 개발하였다.³⁹⁾

2020 년 Kandice 등은 DED 공정을 이용해 Stainless Steel 316L 소재를 정육면체 형상으로 가공 후 4가지 적층 경로가 적층 형상, 미세구조 및 물리적 기계적 특성에 미치는 영향에대한 연구를 수행하였다. 결과적으로 제품의 경도는 적층 경로에 따라 달라지며, Stepover 의 간격이 좁을수록 제품의 경도가 높아지며, 제품의 표면 조도 또한 Stepover 의 간격이 좁을수록 좋아지는 것을 도출하였다.⁴⁰⁾

2016 년 Jun 등은 EBM 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 소재의 단일, 6 층 및 11 층 적층 시편을 제작하고 3차원 유한요소 해석을 통해 공정의 특성을 분석하였다. 홀 드릴링 기법 및 중성자 회절 기법을 사용하여 각 시편의 잔류응력을 측정하고 해석 및 실

험 결과 와 비교하여 적층 층에 따른 잔류응력 변화를 도출하고 예열이 적층 시 변형 및 잔류응력을 감소시킬 수 있음을 도출하였다.⁴¹⁾

2017년 Shim 등은 DED 공정을 이용하여 high-speed tool steel M4 powder를 적층 시 induction heater를 통한 기저부의 예열 기법을 이용하여 적층 시편을 제작한 후 제품의 경도, 열 이력 측정 및 인장 시편제작을 통한 인장 실험을 통해 예열공정이 기저부와 적층부의 결합력을 향상 시키는 것과 잔류응력을 감소시키는 효과를 가지는 것을 도출 하였다.⁴²⁾

각 관련 연구에서는 DED 공정을 이용하여 적층 공정을 진행시에 다수의 적층 경로를 적용하여 각각의 경로에 따른 미세조직, 피로 균열 전파, 표면 조도, 잔류응력 변화 및 경도의 변화를 실험적인 기법을 통해 분석하였다. 예열 기법을 이용하여 적층 공정을 진행시 제품의 잔류응력, 경도, 변형률 및 결합력 등의 특성을 실험적인 기법을 통해 분석하였다. 위와 같은 관련 연구 조사 결과 적층 경로와 기저부 예열에 따라 잔류응력을 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만 실험적인 방법은 시간 및 비용이 많이 소모되기 때문에 유한요소 해석을 통해 잔류응력의 발생을 사전에 예측할 수 있는 해석모델 개발 및 기법 개발이 필요하다. 그렇지만 현재까지 유한요소 해석을 통한 적층 경로가 잔류응력에 미치는 영향과 예열 기법이 잔류응력에 미치는 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 적층 경로에 따른 열-기계 해석을 을 통해 적정 적층 경로를 선정하였고, 적층 경로의존 잔류응력 특성분석을 수행하였으며, 적정 적층 경로를 적용한 예열 기법을 적용했을 시의 열-기계 해석을 통해 적정 예열온도를 선정하였다.

제 2 절 연구 목적 및 방법

1. 연구 목적

금속 적층 제조 공정은 기존의 제조방식 대비 조립비용 등을 크게 낮출 수 있다는 장점이 있지만, 층 단위로 적층을 진행하는 Layer-by-layer 기법에 의해 거친 표면, 내부 기공 발생 및 잔류응력 발생과 같은 문제점이 나타난다. 적층 공정 이후에 나타나는 거친 표면 상태로 인해 후가공이 필수적으로 요구된다. 내부 기공의 경우 제품의 밀도를 감소시키며 기계적 특성을 저하시킬 수 있다. 잔류응력의 경우 Fig 2. 와 같이 제품의 변형, 균열 및 파괴의 주요 원인이 되며 가장 치명적인 문제점이다. 적층 공정 이후 나타난 거친 표면은 절삭 및 연삭과 같은 후처리 공정을 통해 개선될 수 있다. 내부 기공 발생의 경우 고밀도 에너지를 통해 완전 용융시키는 DED 공정에서는 거의 발생하지 않는다. 잔류응력 발생의 경우 앞서 말한 것과 같이 제품의 품질에 치명적인 문제가 되기 때문에 이를 개선하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

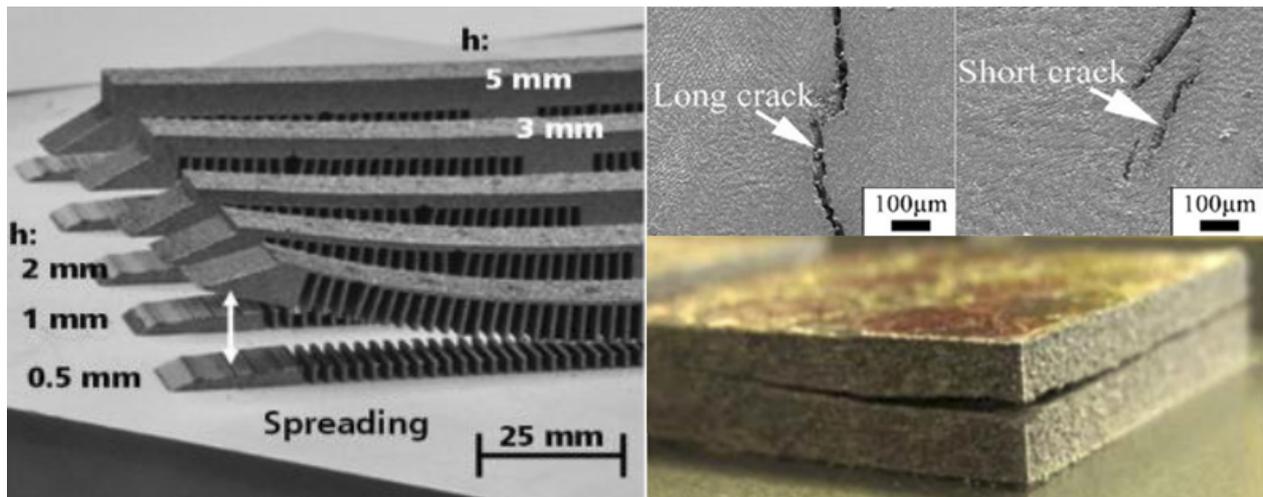


Fig 2. Defects of parts fabricated by the metal AM process⁴³⁾⁴⁴⁾

잔류응력 발생 문제를 개선 하기위한 방법은 크게 공정 중 제어 (In-situ process control) 방법과 공정 후 제어 (Post-process control) 방법 그리고 동시 적용 가능한 하이브리드 공정제어 (Hybrid process control) 방법으로 나뉜다. 공정 중 제어 방법으로는

예열 (Preheating), 공정제어 (Process planning) 방식 등이 있다. 공정 후 제어 방법으로는 후 열처리 (Post heat treatment process) 방법 및 후가공 방법이 있다. 하이브리드 공정제어 방법에는 간접적으로 적층부에 영향을 주는 레이저 피닝 (Laser peening), 초음파 피닝 (Ultrasonic peening), 쇼트 피닝 (Shot peening) 등이 있으며, 직접적으로 적층부에 영향을 주는 롤링 (Rolling), 버니싱 (Burnishing) 공정 등이 있다.⁴³⁾ 피닝 제어 방법 또는 롤링, 버니싱 공정은 효과적으로 잔류응력을 제어할 수 있으나 적층 장비에 추가적인 장비장착으로 장비 단가가 상승해 경제적 측면에서 좋지 않다. 후 열처리 방법은 적층 공정 이후에 추가로 수행되기 때문에 생산 속도 측면에서 좋지 않다. 이에 비해 적층 경로 제어 및 예열 기법을 통한 잔류응력 개선 방법은 다른 방법들에 비해 접근성이 좋으며, 경제적인 방법이기 때문에 적층 경로 변화와 예열에 따른 잔류응력 특성을 분석할 필요가 있다.

본 연구의 주요 목적은 에너지 제어형 적층 공정을 통해 S45C 기저부위 Inconel 718 소재 대체적 적층 시 발생하는 잔류응력 문제를 해결하기 위해 적정 적층 경로를 선정하고 적층 경로 의존 잔류응력 특성을 분석하고자 한다. 실험을 통해 분석하기 어려운 적정 적층 경로 선정을 유한요소 해석 진행하여 적층 경로에 따라 발생하는 잔류응력을 도출한 후 비교 및 분석을 통해 대체적 적층 시 적합한 적층 경로를 선정하고자 한다. 후에 도출된 적정 적층 경로를 적용한 다층 및 대체적 시편을 제작하고 그에 따른 유한요소 해석을 진행하여 잔류응력 특성을 분석하고, 추가로 예열온도별 유한요소 해석 진행을 통해 적정 예열온도를 선정하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구를 진행하기 위한 기저부 및 적층 소재는 각각 S45C 및 Inconel 718 금속분말이며, 각각의 조성비는 Table 3과 같다. 이와 같은 소재를 유한요소해석에 적용하기 위한 온도의존 물성 데이터는 물성 계산 프로그램인 JmatPro 프로그램을 이용하여 도출하였으며, 유한요소 해석에는 SYSWELD 를 사용하여 유한요소 해석을 진행하였다.

Table 3 Chemical compositions of the substrate and powder

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Mo	Co	Other
Inconel 718	55	21	BAL	0.080	0.350	0.350	0.3	3.3	1	< 5.0
S45C	0.005	0.015	BAL	0.444	0.757	0.247	0.010	-	-	< 0.1

본 연구의 흐름도는 Fig. 3과 같은 순서로 진행된다.

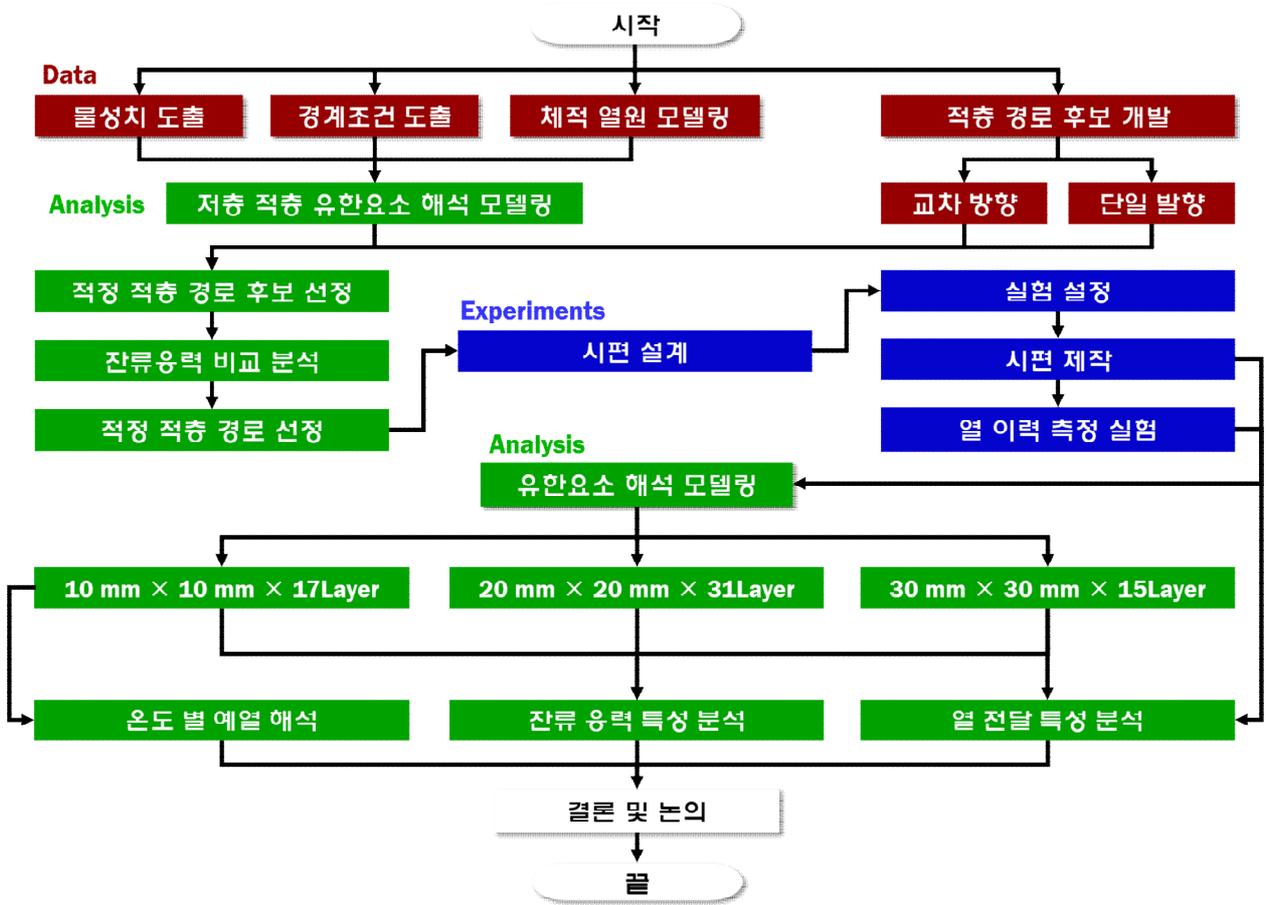


Fig 3. Flowchart of research works

제 2 장에서는 3차원 유한요소 해석을 이용해 적층 경로를 선정하기 위해 첫 번째로 유한요소 해석을 위한 데이터를 도출하고 해석모델을 생성하였다. 재료의 화학 조성과 물성 계산 프로그램인 JmatPro 를 이용하여 온도의존 물성 데이터를 도출하였다. 공정 수행에 따른 대류 및 복사 열전달에 의한 열 손실을 고려하여 자연대류 계수, 강제대류 계수 및 복사를 고려한 등가 강제대류 계수를 도출하였다. 이후 적층 경로를 개발하였고 이러한 적층 경로를 적용하여 적정 적층 경로를 선정하기 위한 유한요소 해석모델을 생성하였다. 열응력 해석을 통해 각각의 적층 경로별 응력분포 비교를 통해서 적층 경로가 제품의 응력분포에 미치는 영향을 고찰하였고, 적정 적층 경로 후보를 선정하였다. 앞서 선정한 적정 적층 경로 후보 중 적정 적층 경로를 선정하기 위하여 다층 적층 유한요소 해석모델을 개발하였다. 이후 열응력 해석을 통해 적층 경로가 다층 적층 모델의 응력분포에 미치는 영향을 고찰하였으며, 각각의 후보별 응력분포

도출 및 비교 분석을 통해 적정 적층 경로를 선정하였다.

제 3 장에서는 적정 적층 경로를 적용한 다층 및 대체적 적층 시편을 설계하고 DED 장비를 이용해 다층 및 대체적 적층 시편을 제작하였다. 적층 공정 중 열 이력 도출을 위해 열전대(Thermocouple)를 사용하여 열 이력 측정 실험을 진행하였고 각각의 도출된 열 이력의 변화에 대해 고찰하였다.

제 4 장에서는 유한요소 해석모델을 이용하여 열전달 및 열-기계 해석을 진행하고 해석 결과를 도출하였다. 다층 적층 해석모델에서는 열 전대를 통해 도출된 열 이력과의 비교를 통해 적층 경로별 열 이력의 특성을 분석하였으며, 적층 공정 이후 냉각 시 고정 경계조건의 유무가 다층 적층 제품의 잔류응력 및 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 대체적 적층 해석모델에서도 열 전대를 통해 도출된 열 이력과의 비교를 통해 열 이력 특성을 분석하였고, 각각의 열응력 해석 결과를 통해 대체적 적층 시 적층 경로가 응력분포에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 유사 체적 적층 시 제품의 높이 및 제품의 너비가 응력분포에 미치는 영향을 고찰하였고 적층 공정 이후 냉각 시 고정 경계조건의 유무가 대체적 적층 제품의 잔류응력 및 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 다층 적층 모델의 기저부에 예열온도를 적용한 후 열응력 해석을 진행해 적정 예열온도를 선정하였다.

제 5 장에서는 각 장에서 도출된 결과를 종합하여 대체적 적층 시 적층 경로 의존 잔류응력 특성을 분석하고 향후 과제를 제시하였다.

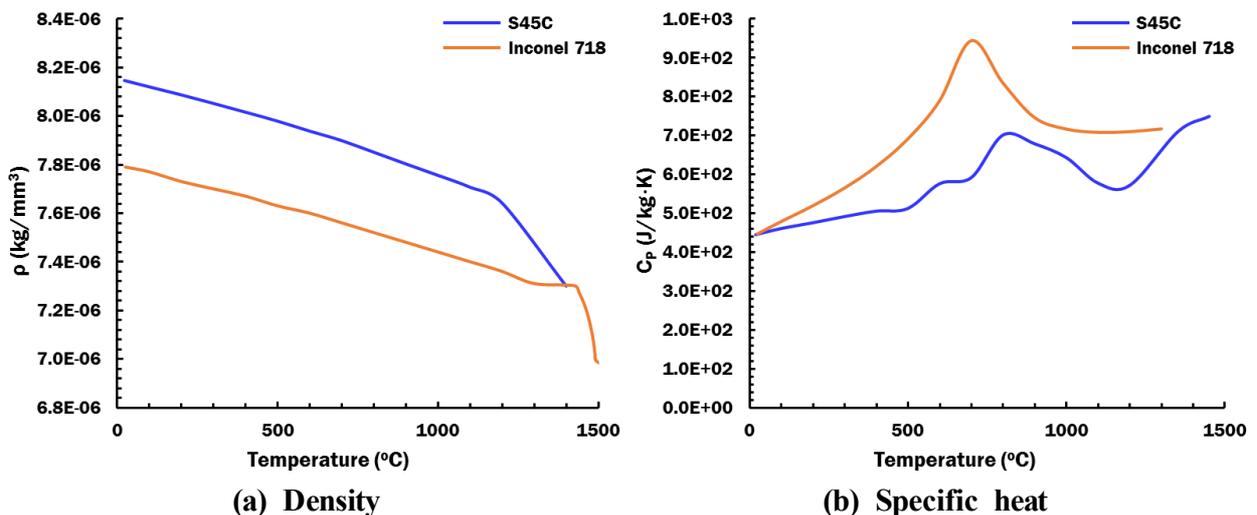
제 2 장 3차원 유한요소 해석을 이용한 적층 경로 선정 및 도출 방법

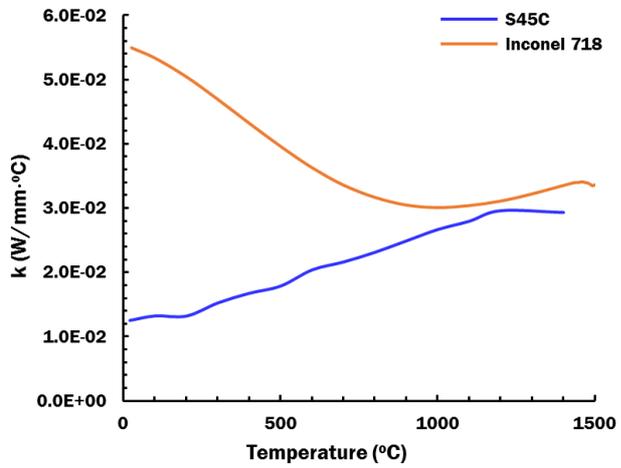
제 1 절 저층 적층 유한요소 해석을 위한 데이터 도출 및 모델 생성

1. 물성 데이터 도출

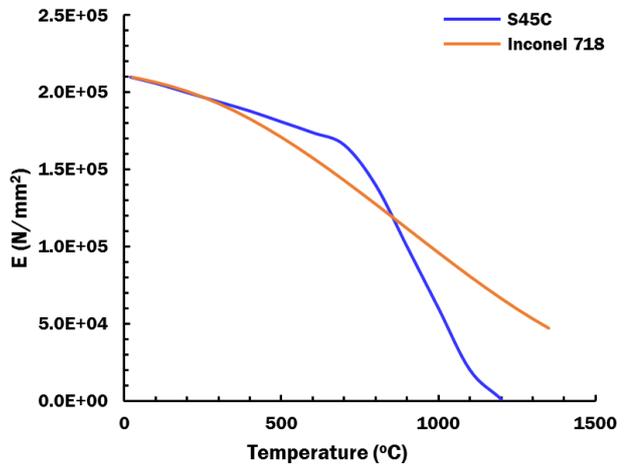
가. 기저부 및 적층부 물성 데이터 도출

DED 공정을 이용해 금속 적층 제조 공정 진행 시 급속 가열 및 급속 냉각에 의해 적층부와 기저부의 열전달, 미세조직, 왜곡 및 경도와 잔류응력 등의 변화가 발생하게 된다. 이러한 변화를 예측하기 위하여 3차원 유한요소 해석을 통해 열전달 및 열응력 특성 분석이 필요하며, 기저부와 적층부의 온도 의존 물성 데이터 도출이 필요하다. 기저부의 물성인 S45C 와 적층부 물성인 Inconel 718의 온도의존 물성 데이터의 제공처는 고온 물성 계산 소프트웨어인 JmatPro를 이용하여 Fig.4 와 같이 도출하였다.

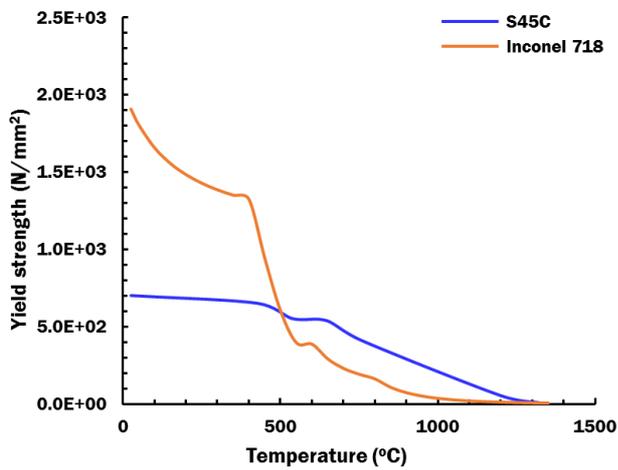




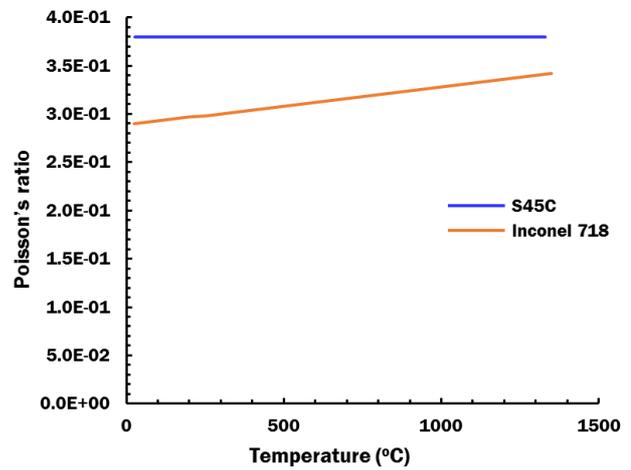
(c) Thermal conductivity



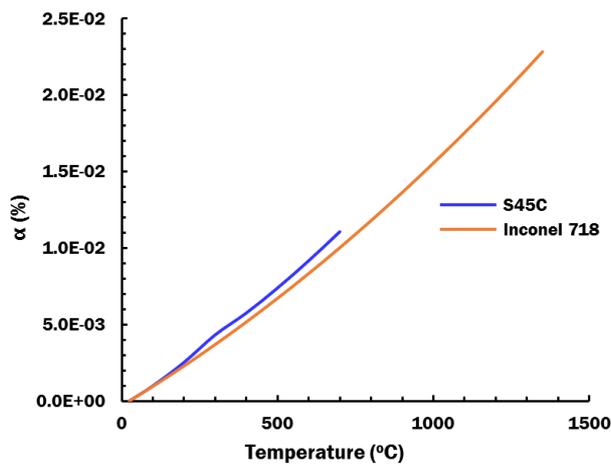
(d) Elastic modulus



(e) Yield strength



(f) Poisson's ratio



(g) Thermal expansion coefficient

Fig. 4 Temperature dependent material properties of s45c and inconel 718

열전달 및 열응력 해석에 필요한 물성 데이터는 온도의존 밀도 (Temperature dependent density : ρ), 온도의존 비열 (Temperature dependent specific heat : C_p), 온도의존 열전도도 (Temperature dependent thermal conductivity : k), 온도의존 탄성계수 (Temperature dependent elastic modulus : E), 온도의존 항복강도 (Temperature dependent Yield strength), 온도의존 푸아송비 (Temperature dependent Poisson's ratio), 온도의존 열팽창계수 (Temperature dependent thermal expansion : α) 와 같은 열물성 및 기계 물성 데이터가 필요하다.

나. 강제대류 및 자연대류 경계조건 데이터 도출

에너지 제어형 적층 공정이 진행되는 동안 적층부와 기저부에는 대류 및 복사에 의한 열 손실이 발생하게 된다. 대류 열 손실은 강제대류와 자연대류에 의한 열 손실로 나뉘게 되며, 시편의 총 열 손실에 영향을 미치게 된다. 강제대류의 경우 보호 가스 분위기 형성 및 분말 분사를 위해 적층 중 시편 상부에 분사되는 아르곤 (Argon) 가스에 의해 발생하게 된다. 시편의 측면 및 하부에는 항상 자연대류가 발생하게 되며, 적층 공정 중 레이저가 조사되지 않는 시간과 냉각(Cooling) 시간에는 시편 상부에도 자연대류가 발생하게 된다.

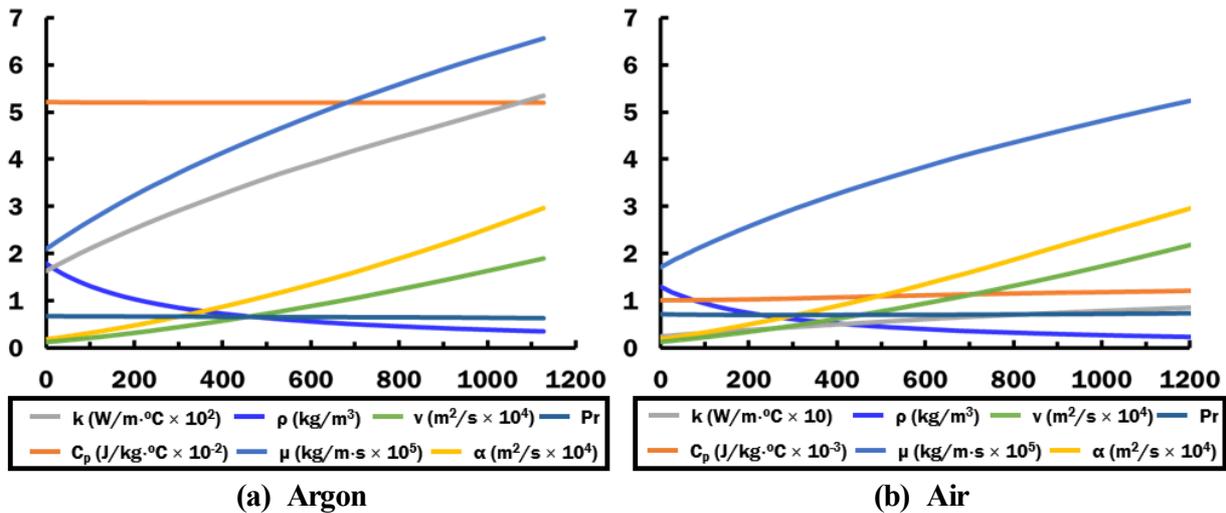


Fig. 5 Temperature dependent material properties of argon and air

각각의 강제대류 계수는 Fig.5 (a)와 같이 아르곤 가스의 온도의존 물성 데이터를 이용

하였으며, 자연대류 계수는 Fig.5 (b)와 같이 공기의 온도의존 물성 데이터를 이용하여 도출하였다. 강제대류는 분사되는 아르곤 가스가 표면에 충돌 후 기저부 상면에 강제 대류를 발생시키므로 Impinging jet 모델을 참고하여 식 (1) - (2)를 통해 도출하였다.

$$\bar{h}_{forced} = \frac{N_a \times k}{D} \quad (1)$$

여기서 N_a , k 및 D 는 각각 평균 너셀수, 유체의 열전도도 및 노즐의 직경이다. 평균 너셀수의 경우 식 (2)를 통해 계산된다.

$$N_a = 4Re^{0.5}Pr^{0.42} \left[\frac{2Ar^{0.5}(1-2.2Ar^{0.5})}{1+0.2(\frac{H}{D}-6)Ar^{0.5}} \right] (1+0.005Re^{0.55})^{0.5} \quad (2)$$

여기서 Re , Pr , Ar , H 및 D 는 각각 레이놀즈 수, 프란텔 수, 노즐의 적용 면적, 노즐부터 작용면까지의 거리 및 노즐의 직경을 뜻한다.

Fig. 4 (a) 및 식 (1) - (2)를 적용해 도출한 평균 강제대류 계수는 Fig. 6 과 같다.

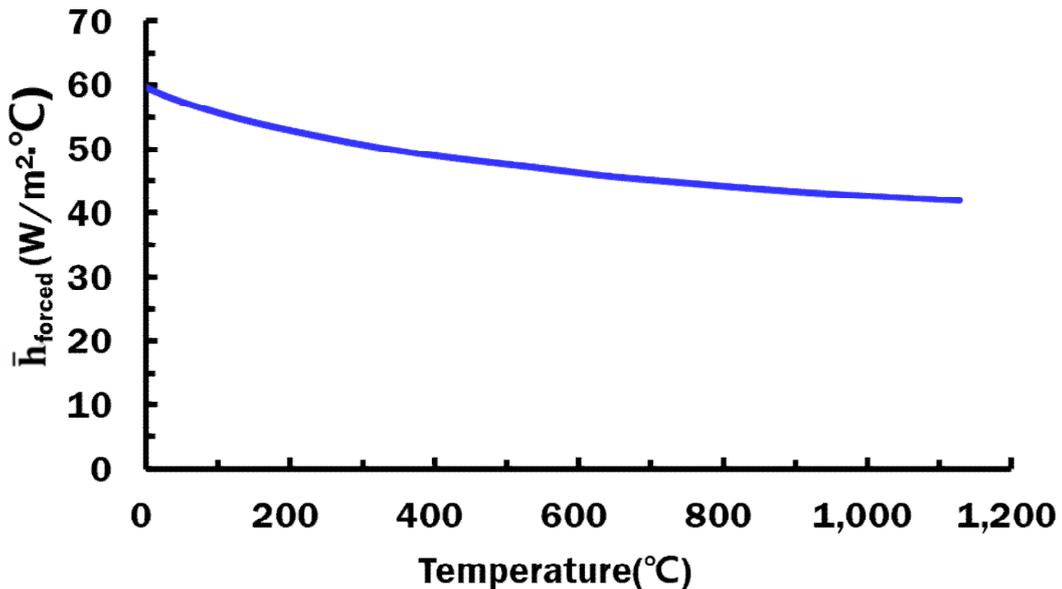


Fig. 6 Temperature dependent coefficient of forced convection

자연대류는 기저부의 상부에만 영향을 미치는 강제대류와는 다르게 기저부의 상면과 벽면으로 구분되기 때문에 각각을 구분하여 식 (3) - (7) 을 통해 도출하였다.

$$\bar{h}_{natural} = \frac{N_a \times k}{D} \quad (3)$$

여기서 N_a , k 및 D 는 각각 평균 너셀수, 유체의 열전도도 및 노즐의 직경 이다. 자연대류에서 평균 너셀수는 적용 면이 상면일 때는 식 (4), 벽면일 때는 식 (5)를 적용하여 도출하였다.

$$N_a = [0.65 + 0.36Ra^{1/6}]^2 \quad (1 < Ra < 1.5 \times 10^9) \quad (4)$$

$$N_a = 0.68 + \frac{0.67Ra^{1/4}}{[1 + (0.429/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (10^{-1} < Ra < 10^9) \quad (5)$$

여기서 Ra 는 식 레일리 (Rayleigh) 수로 식 (6)과 같이 계산된다.

$$Ra = \frac{g(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu_k \cdot \alpha \cdot T_f} \quad (6)$$

여기서 g , T_s , T_∞ , L_c , ν_k , α 및 T_f 는 각각 중력가속도, 표면의 온도, 표면 바깥 온도, 특성 길이, 공기의 동적 점성도, 공기의 열 확산도 및 대류 경계층의 유체 온도의 근사치를 뜻하며, T_f 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (7)$$

Fig. 4 (b) 및 식 (3) - (7)을 적용해 도출한 평균 자연대류 계수는 Fig. 7 과 같다.

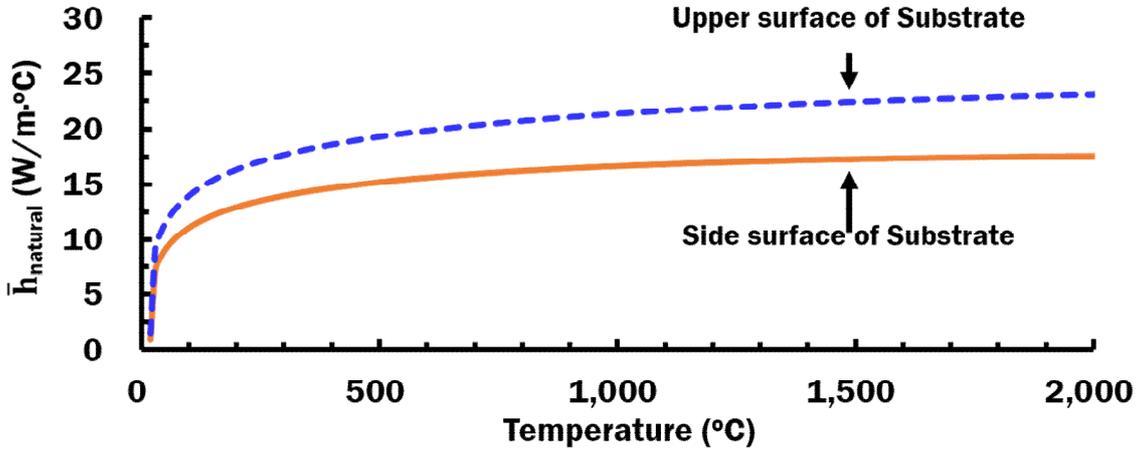


Fig. 7 Temperature dependent coefficient of natural convection for different surface of substrate

열 손실은 대류 및 복사와 같은 경계조건에 영향을 받는다. 대류 현상에 의한 영향은 앞서 도출한 강제 및 자연대류의 영향을 받는다. 복사에 의한 영향은 사실 낮은 온도에서의 복사열 손실은 그 영향이 적어 고려하지 않지만, 적층 공정 진행 중 레이저가 조사되는 부위는 높은 열을 받기 때문에 복사 열전달에 의한 효과를 고려할 필요가 있다. 따라서 대류 현상 및 복사를 함께 고려하는 등가 강제대류 계수를 도출하였다.

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_{forced} + \dot{Q}_{rad} \quad (8)$$

여기서 \dot{Q}_t , \dot{Q}_{forced} 및 \dot{Q}_{rad} 는 각각 공정 중 발생하는 총 열 손실, 대류에 의한 열 손실 및 복사에 의한 열 손실을 뜻하며, \dot{Q}_{forced} 및 \dot{Q}_{rad} 는 각각 식 (9) 및 (10)에 의해 계산된다.

$$\dot{Q}_{forced} = h_{forced}(T_s - T_\infty) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon\sigma_s(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (10)$$

여기서 ϵ 및 σ_s 는 소재의 방사율 및 스테판 볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수 [$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$] 이다. 식 (10)은 Newton의 냉각법칙에 의거 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{rad} = h_{rad}(T_s - T_\infty) \quad (11)$$

h_{rad} 는 식 (10)을 이용해 식 (12)로 나타낼 수 있으며, 이를 이용해 총 열 손실은 식 (13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{rad} = \epsilon\sigma_s(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_t = (h_{forced} + h_{rad})(T_s - T_\infty) \quad (13)$$

식 (7) - (12)를 통해 대류 및 복사를 고려한 등가 강제대류 계수를 식 (13)으로 도출하였다.

$$h_{eq,f} = h_{forced} + \epsilon\sigma_s(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (14)$$

온도의존 등가 강제대류 계수를 도출하기 위해 적층부 소재 Inconel 718 의 방사율을 Fig. 8 과같이 도출하였다. 기저부 소재 S45C의 방사율은 단일 방사율인 0.28 을 적용하였다. 도출된 방사율과 등가 강제대류 계수를 통해 온도의존 등가 강제대류 계수를 Fig. 9 와같이 도출하였다.

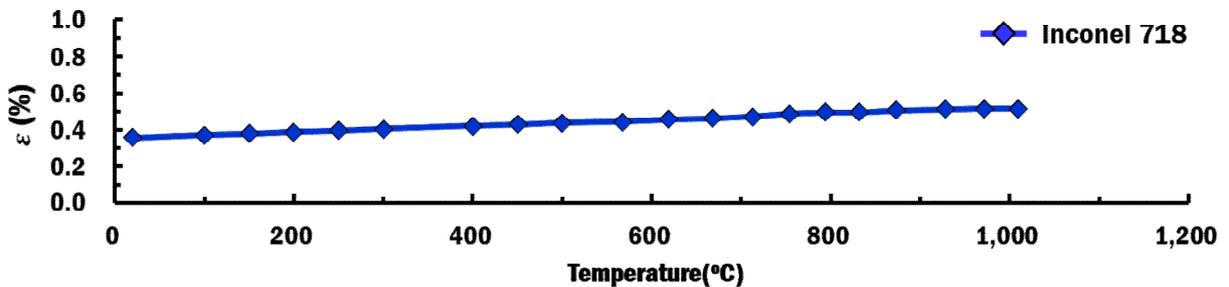


Fig. 8 Emissivity of inconel 718

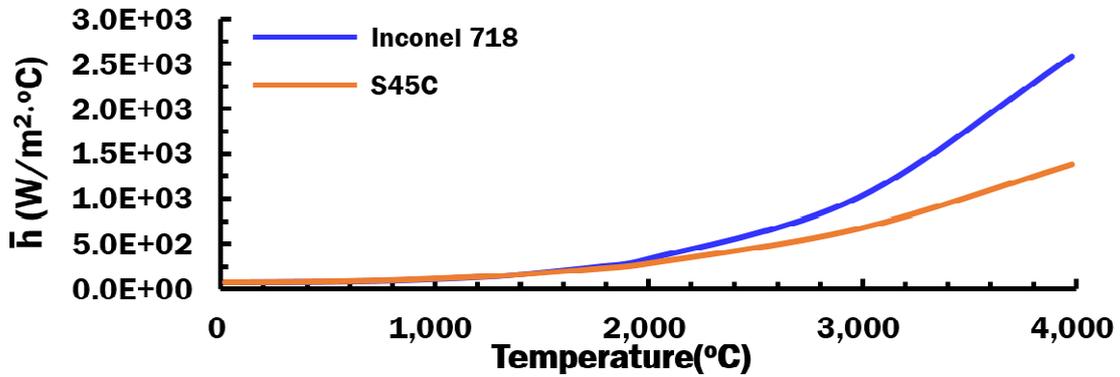


Fig. 9 Temperature dependent of equivalence forced convection coefficient

2. 열원 모델 개발

본 연구에서는 에너지 제어형 적층 공정 중 LENS (Laser Engineered Net Shaping) 공정을 이용한다. LENS 공정은 적층 공정을 진행할 때 Laser 열원을 사용한다. 레이저의 모드는 종모드 (Longitudinal mode)와 횡모드 (Transverse mode)로 나뉘며, LENS 공정은 횡모드를 사용한다. 횡모드는 전기장 및 자기장이 공진기 축에 수직인 모드로 TEM (Transverse electromagnetic mode)라 부르며 TEM_m 와 같이 표기한다. 첨자 m 및 n 은 방출되는 레이저 빔을 가로지르는 x 축과 y 축의 수이며, 레이저 빔이 나뉘는 패턴에 따라 TEM 모드가 분류된다. 그 중 TEM₀₀ 모드는 가장 높은 에너지 밀도 및 최고 휘도 등의 특징을 가지기 때문에 열원 모델의 횡모드를 TEM₀₀ 모드로 가정하였다.

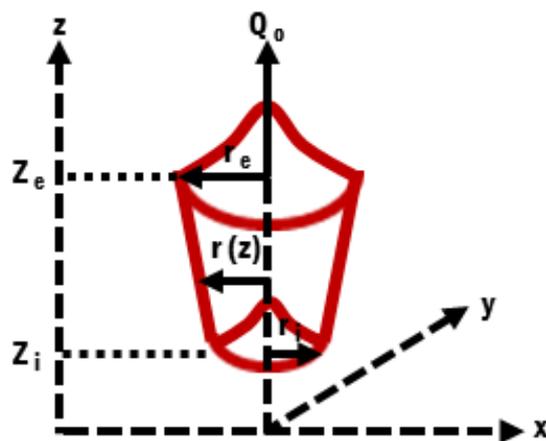


Fig. 10 Heat flux model of laser

열원 모델의 에너지 분포는 레이저를 수학적으로 모델링 하기 위해 가우시안 (Gaussian) 분포로 가정하였다. 위 두 가지 사항을 고려하여 Fig. 10 과 같이 레이저 열원 (Heat flux)을 생성하였으며 식 (14), (15) 및 (16)과 같이 체적 열원의 식을 도출하였다. Fig. 10 에서 r_e, r_i, z_e 및 z_i 는 각각 열원 모델 상부, 하부 유효 반경, 열원 모델 상부 위치 및 침투 깊이 (Penetration depth)이다. 열원의 반경은 실제 적층 공정에서 사용한 열원의 크기를 적용하였으며, 열원의 상부 위치는 열원이 적용되는 비드 상부 그리고 열원의 침투 깊이는 비드 높이만큼으로 설정하였다.

$$Q(x, y, z) = \eta \cdot Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + (y - vyt)^2}{C \cdot r^2(Z)}\right) \quad (14)$$

$$Q_0 = -\frac{P}{\pi r_e^2 (z_i - z_e)} \quad (15)$$

$$r(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} (z - z_e) \quad (16)$$

식 (14), (15) 및 (16)에서 $\eta, Q_0, x, y, z, v, t, C, r(Z)$ 및 P 는 각각 효율, 표준 열원 강도, x, y 및 z 좌표, 속도, 시간, 형상계수, 침투 깊이에 따른 적용 범위 및 레이저 빔 파워이다. 본 연구에 사용되는 열원의 형상계수는 16이며, 이를 통해 계산된 열원의 형상은 Flat Top 형상으로 적용되었다. 이렇게 생성된 체적 열원은 설정된 경로를 따라 이동하며 적용하게 되고, 실제 열은 파장의 반사와 물질의 증발로 인해 실제 전력보다 적게 적용된다. 이렇게 예측할 수 없는 열 손실은 앞서 언급한 열원의 효율을 이용하여 고려한다.

3. 적층 경로 및 저층 적층 유한요소 모델 개발

가. 적층 경로 개발

본 연구에서는 적층 경로 의존 잔류응력 특성을 분석하기 위하여 몇 가지 기준점을 바탕으로 적층 경로를 개발하였다. 첫 번째 단층 적층 진행 시 단일방향 (Uni-direction)

과 교차 방향 (Alternative-direction)의 비교, 두 번째 다층 적층 진행 시 층간 적층 경로가 수직 교차할 때와 평행한 경우의 비교, 세 번째 다층 적층 진행 시 층간 적층 경로의 시작점과 종료지점이 반전된 경우 비교이다. 이렇게 세 가지 기준점을 두고 Fig. 11과 같이 단일방향 적층 경로 8가지와 교차 방향 적층 경로 8가지 총 16가지의 적층 경로를 개발하였다.

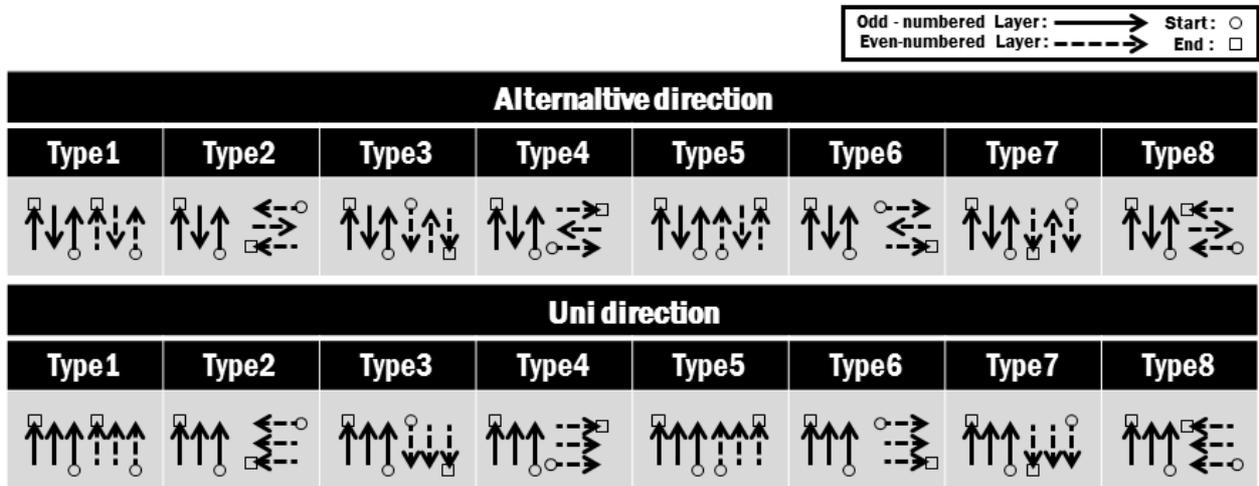


Fig. 11 Deposition strategy (Alternative and uni directions)

나. 저층 적층 유한요소 해석모델 개발

저층 적층 유한요소 해석을 통해 잔류응력을 저감 시키기 위한 적층 적층 경로 후보를 선정하기 위해 fig. 12와 같이 저층 적층 모델의 유한요소 해석모델을 개발하였다. 유한요소 해석모델의 개발에는 ESI사의 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 SYSWELD 15.5를 사용해 생성하였다. 유한요소 해석모델의 규격은 다음과 같이 구성되었다. 첫 번째로 기저부(Substrate)의 크기는 시편의 크기에 및 형상에 따라서 열전달효과가 상이하게 나타나게 된다. 기저부의 두께가 얇은 박판일 경우 적층 공정 진행 시 기저부의 변형이 크게 발생하게 된다. 이러한 이유로 적층 공정 진행 시 기저부의 변형을 최소화하기 위해 기저부의 크기를 50 mm × 50 mm × 30 mm로 선정하였다. 적층부(Deposition region)는 총 2 Layer로 구성되었으며 각각의 적층 Bead 크기 및 적층 Layer 두께는 Table 4의 한국생산기술연구원을 통해 제공된 데이터를 사용하였다. Layer의 적층 면적은 10 mm × 10 mm로 적용하였고, 각 Layer의 두께는 첫 번째 Layer는 0.135 mm, 두 번째 Layer는 0.25 mm로 구성하였다. 적층 Bead는 가장 처음

적층 되는 Bead의 너비는 0.78 mm, 이후 적층 되는 Bead의 너비는 Hatching distance 인 0.5 mm를 적용하였다.

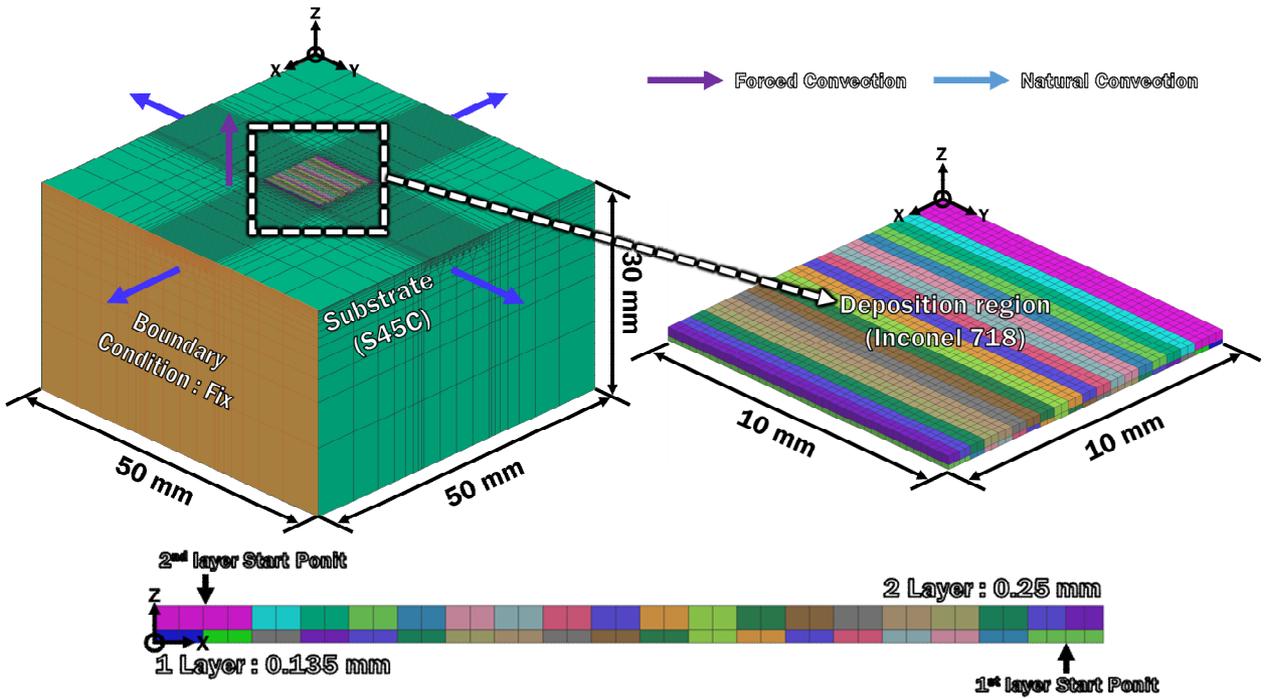


Fig. 12 Finite element model of low deposited layer model

Table 4 Dimensional characteristics of bead (Source : KITECH)

Bead width (μm)	Hatching distance (μm)	Bead height (μm)	Layer thickness (μm)
780	500	135	250

유한요소 해석모델에 적용된 경계조건으로는 실제 적층 공정진행 시에 적용되는 대류 현상을 고려하여 모델의 상면에는 적층 진행 중 산화 방지를 위해 분사되는 아르곤 가스의 강제대류, 모델의 옆면에는 대류 현상에 의한 자연대류 계수를 적용하였다. 모델의 양 끝단 Y-Z 면에는 실제 적층 공정진행 시 사용된 고정 경계조건을 부여하였다. 위와 같은 설계를 통해 제작된 저층 적층 유한요소 해석모델의 절점 및 유한요소 격자의 수는 각각 31,088 및 41,092개로 구성되었다.

제 2 절 저층 적층 유한요소 해석을 통한 적정 적층 경로 후보 선정

1. 열응력 해석 결과 및 분석

저층 적층 유한요소 해석을 통해 적정 적층 경로 후보를 도출하기 위해 Fig. 11 에서 도출한 단일방향 적층 경로 8가지와 교차 방향 적층 경로 8 가지 총 16 가지의 적층 경로를 Fig. 12 에 적용하여 열-기계 연계 해석을 수행하였다. 해석 결과는 유효 응력 (effective stress) 및 주응력 (1st principal stress)를 기준으로 도출하였다. 모든 경로 조건에서 유효 응력과 주응력의 최대값은 시편 상면을 기준으로 깊이 방향 0.1 mm 지점에서 도출되었다. 따라서 적층 경로에 따른 해석 결과는 시편 상면 기준 0.1 mm 깊이에서 도출된 유효 응력과 주응력 분포를 이용하여 비교 분석하였다.

가. Alternative-direction Type 응력분포 비교 분석

Fig. 13 은 Alternative-direction type 적층 시 적층 경로별 유효 응력분포를 비교한 결과이다.

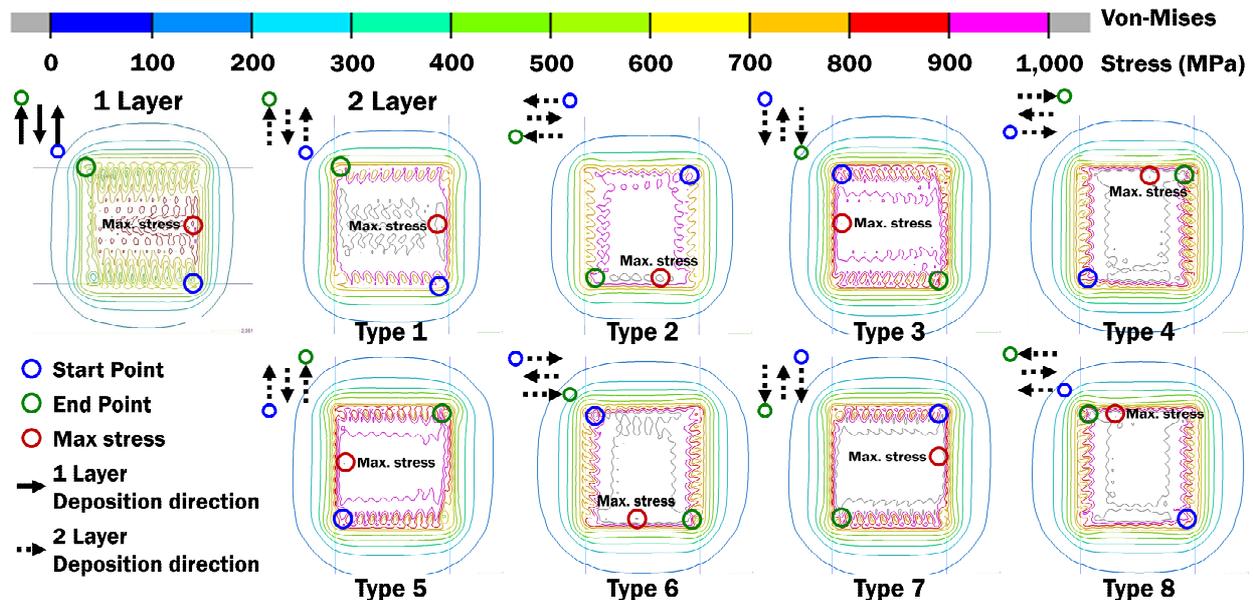


Fig. 13 Distributions of Von-mises stress for alternative direction deposition

단층 적층을 진행할 경우 첫 번째 적층 비드의 중앙부에서 최대 유효 응력이 발생하

였으며, 2층 적층 후 도출된 응력분포에 비하여 적층부 중앙에 높은 응력분포가 나타난다. 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 평행할 경우 2층 첫 번째 적층 비드 중앙부 아래에서 최대 유효 응력 값이 도출되었으며, Fig. 13의 Type 1, 3, 5 및 7과 같다. 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 직교할 경우 2층의 마지막 적층 비드 중앙부 아래에서 최대 유효 응력 값이 도출되며, Fig. 12의 Type 2, 4, 5 및 8과 같다. 각 Type별 유효 응력의 분포 비교 결과 적층 경로가 평행 또는 직교함에 따라 유사한 유효 응력분포가 도출되었으며, 최대 유효 응력 발생 지점 또한 유사하게 도출되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통해 적층 경로의 방향에 따라 적층 경계부의 유효 응력분포가 달라짐을 알 수 있으며, 적층 경계부의 외곽지점에서 높은 유효 응력분포가 도출됨을 알 수 있었다.

Fig. 14은 Alternative-direction type 적층 시 적층 경로별 주응력 분포를 비교한 결과이다.

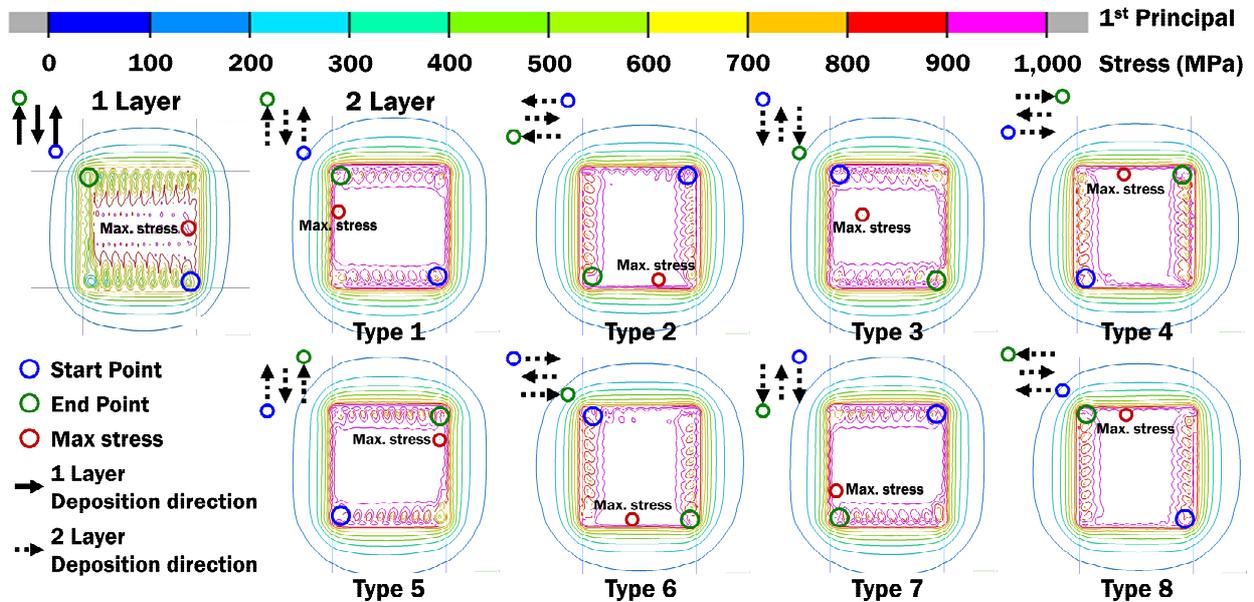


Fig. 14 Distributions of 1st principal stress for alternative direction deposition

단층 적층을 진행할 경우 유효 응력 해석 결과와 유사한 위치인 첫 번째 적층 비드의 중앙부에서 최대 주응력이 발생하였으며, 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 평행할 경우 2층 최대 유효 응력 값의 위치와 반대 위치에서 최대 주응력 값이 도출되었으며, Fig. 14의 Type 1, 3, 5 및 7과 같다. 2층 적층 시 적층 진행 방향

이 단층 적층 진행 방향과 직교할 경우 앞서 도출된 유효 응력분포와 유사한 위치에서 최대 주응력이 도출되며, Fig. 14의 Type 2, 4, 6 및 8과 같다. 결과적으로 전 Type에서의 최대 주응력은 2층의 마지막 적층 비드의 아래에서 발생하게 된다. 앞서 도출된 유효 응력 및 주응력 분포의 결과를 통해 적층 경로에 따라 유효 응력의 최댓값이 발생하는 위치는 변화지만 주응력의 최댓값이 발생하는 위치는 동일하며 모두 적층부 가장 자리에서 최댓값이 나타나는 것을 알 수 있다.

나. Uni-direction Type 응력분포 비교 분석

Fig. 15는 Uni-direction type 적층 시 적층 경로별 유효 응력분포를 비교한 결과이다.

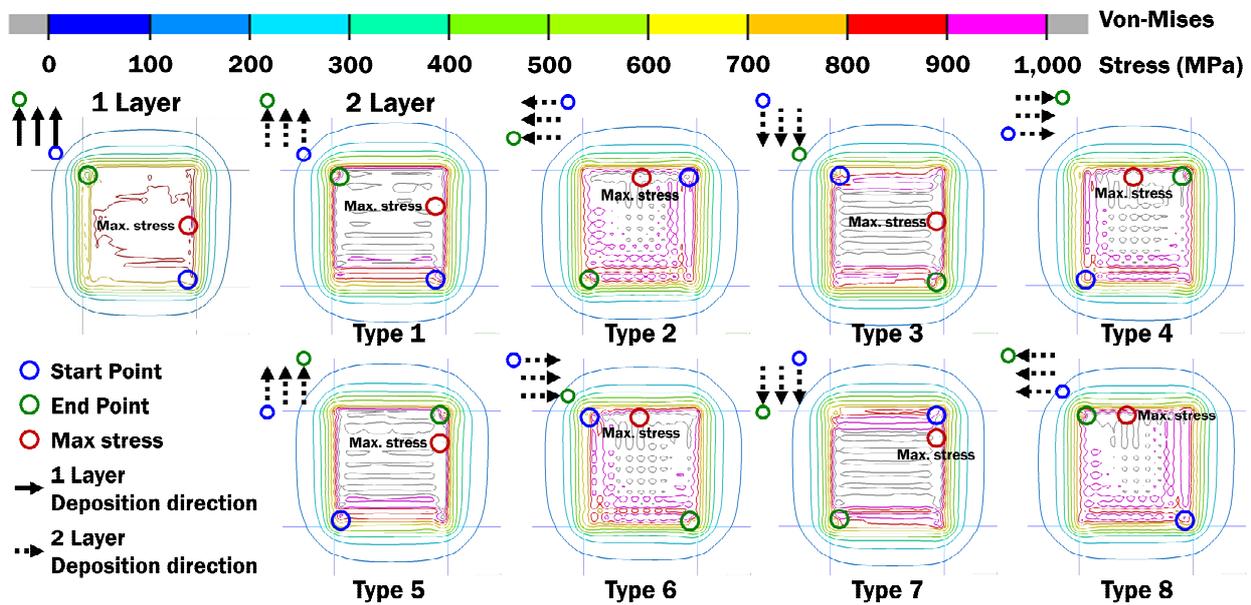


Fig. 15 Distributions of Von-Mises stress for uni direction deposition

단층 적층을 진행할 경우 첫 번째 적층 비드의 중앙부에서 최대 유효 응력이 발생하였으며, Alternative-direction type과는 다르게 적층부 내부 및 적층 경계면 모두 높은 유효 응력분포가 나타난다. 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 평행할 경우 2층 첫 번째 적층 비드 중앙부 아래에서 최대 유효 응력 값이 도출되었으며, Fig. 15의 Type 1, 3, 5 및 7과 같다. 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 직교할 경우 1층의 적층이 끝나는 영역의 중간 위치에서 최대 유효 응력 값이 도출되며, Fig. 15의 Type 2, 4, 6 및 8과 같다. 각 Type 별 유효 응력의 분포 비교 결과

Alternative-direction type과 유사하게 적층 경로가 평행 또는 직교함에 따라 각각 유사한 유효 응력분포가 도출되었으며 최대 유효 응력 발생 지점 또한 유사하게 도출되지만, 비교적 유효 응력분포가 균일하지 않은 것을 알 수 있었다.

Fig. 16는 Uni-direction type 적층 시 적층 경로별 주응력 분포를 비교한 결과이다.

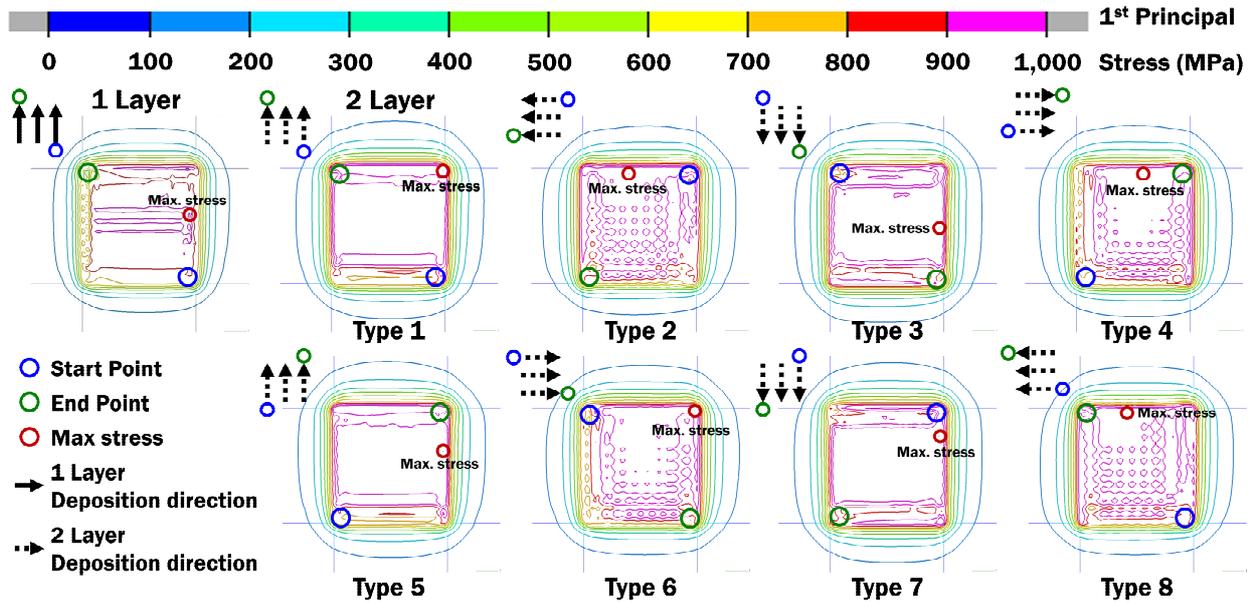


Fig. 16 Distributions of 1st principal stress for uni direction deposition

단층 적층을 진행할 경우 최대 유효 응력 값의 위치와 유사한 위치인 첫 번째 적층 비드 중앙부에서 최대 주응력이 도출되었으며, 유효 응력분포 도출 결과와 유사하게 적층부 내부 및 적층 경계면 모두 높은 주응력 분포가 나타난다. 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 평행할 경우 앞서 도출된 유효 응력분포와 유사한 위치에서 최대 주응력이 도출되며, 같은 유형에 Type 1을 제외한 Fig. 16의 Type 3, 5 및 7과 같다. 2층 적층 시 적층 진행 방향이 단층 적층 진행 방향과 직교할 경우 앞서 도출된 유효 응력분포와 유사한 위치에서 최대 주응력이 도출되며, 같은 유형에서 Type 6을 제외한 Fig. 16의 Type 2, 4 및 8과 같다. 각 Type 별 주응력 비교 결과 유효 응력분포의 결과와 유사하게 평행 또는 직교함에 따라 각각 유사한 주응력 분포가 도출되었으며, 최대 유효 응력 발생 지점 또한 유사하게 도출되는 것을 알 수 있었다.

앞서 도출된 Alternative 및 Uni-direction type의 유효 응력 및 주응력 분포의 결과를 통해 Alternative-direction Type의 응력분포는 적층 경로의 영향을 받지만, 전반적으로 균일한 응력분포를 가짐을 알 수 있으며, 그에 비해 Uni-direction Type의 응력분포는

전반적으로 불균일한 응력분포를 가짐을 알 수 있었다. 또한, 단층 적층에서 적층 경로가 다를 경우 응력분포가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 다층 적층에서 적층 경로의 방향에 따라 적층부의 유효 응력분포와 도출되는 최대 응력 값의 위치가 달라지며, 적층 경계부의 외곽지점에서 높은 유효 응력분포가 도출됨을 알 수 있다.

2. 적정 적층 경로 후보 선정

Fig. 17은 적정 적층 경로 후보를 선정하기 위해서 총 16가지 적층 경로를 적용한 저층 적층 유한요소 해석 결과에서 Type 별 최대 유효 응력 및 주응력 값을 도출한 후 비교한 결과이다.

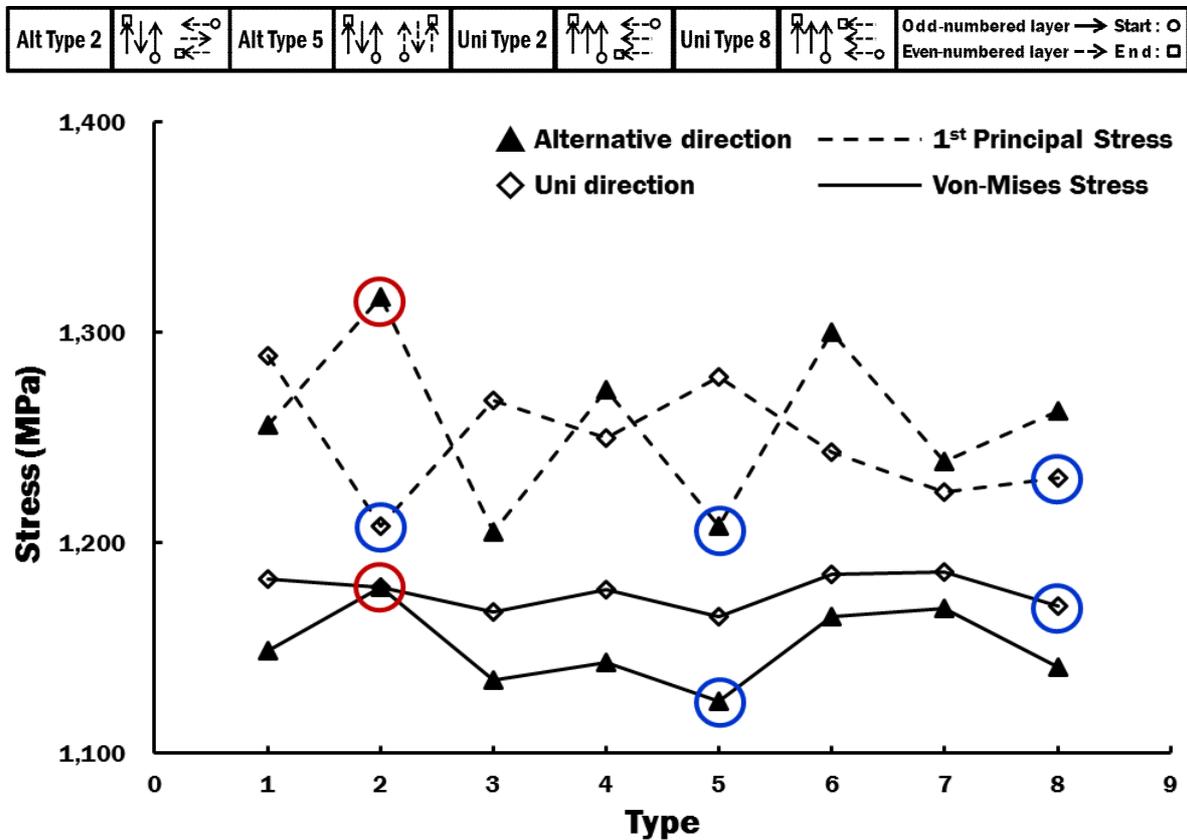


Fig. 17 Maximum stress for different deposition strategies

Alternative-direction Type의 도출된 최대 유효 응력 및 주응력 값은 Uni-direction Type 보다 대체적으로 낮은 값을 가지며, Alternative-direction Type에서는 적층 진행 방향이 1층의 진행 방향과 평행한 경우 유효 응력 및 주응력 값이 낮게 도출되며, Uni

-direction type에서는 적층 진행 방향이 1층의 진행 방향과 직교할 경우 유효 응력 및 주응력 값이 낮게 도출된다. 이와 같은 결과를 통해 적정 적층 경로 후보로는 Alternative direction Type 2 및 Type 5, Uni direction Type 2 및 Type 8 총 4가지 적층 경로를 적층 경로 후보로 도출하였다. 교차 방향의 Type 5, 단일방향의 Type 2 및 Type 8은 다른 적층 경로보다 유효 응력 및 주응력 모두 낮게 도출되어 적층 경로 후보로 선정하였고, 교차 방향의 Type 2의 경우는 주응력이 다른 적층 경로 후보 중 최대 응력 값을 가져 비교군으로 선정하였다.

제 3 절 다층 적층 유한요소 해석을 통한 적정 적층 경로 선정

1. 다층 적층 유한요소 해석모델 개발

저층 적층 유한요소해석을 통해 선정된 적정 적층 경로의 후보중 가장 적절한 적층 경로를 선정하기 위해 Fig. 18 과 같이 다층 적층 유한요소 해석모델을 개발하였다. 해석모델의 개발에는 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 SYSWELD 15.5 를 사용하였다. 유한요소 해석모델의 규격은 다음과 같다. 기저부는 저층 적층 해석모델과 동일하게 50 mm × 50 mm × 30 mm 로 적용하였다. 적층부는 총 17 Layer 로 구성되었으며 각각의 Layer의 면적은 10 mm × 10 mm 이고, Layer 및 적층 비드의 형상은 저층 적층 해석과 동일하게 Table 4의 실제 적층실험에서 사용된 LENS 공정의 비드 형상을 고려하여 적용하였다. 유한요소 해석에 사용된 열원 및 경계조건은 저층 적층 모델과 동일하게 적용하였다. 유한요소 해석모델의 총 Path 수는 323 Path 이며, 절점 및 유한요소 격자의 수는 각각 55,840 및 111,172개로 구성되었다. 다층 적층 모델은 Fig. 18 에 표기한 적정 적층 경로 후보 4가지를 적용하여 총 4유형의 유한요소 해석을 진행하였다.

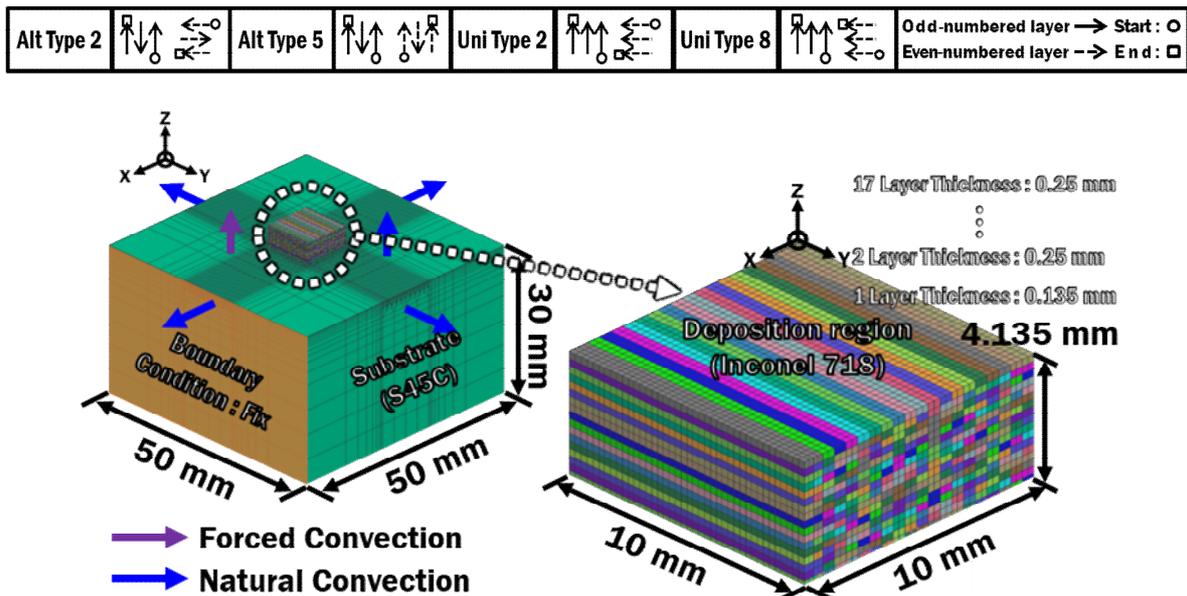


Fig. 18 Finite element model of multi deposited layer and deposition strategy

2. 열응력 해석 결과 및 분석

저층 적층 유한요소 해석을 통해 선정된 4가지 후보 중 적정 적층 경로를 도출하기 위해 각각의 경로를 Fig. 18 과 같은 다층 적층 유한요소 해석모델에 적용해 열-기계 연계 해석을 수행하였다. 유한요소 해석 결과는 Fig. 19 및 20 과 같으며, 유효 응력 (Effective stress) 및 주응력 (1st principal stress) 을 기준으로 도출하였다.

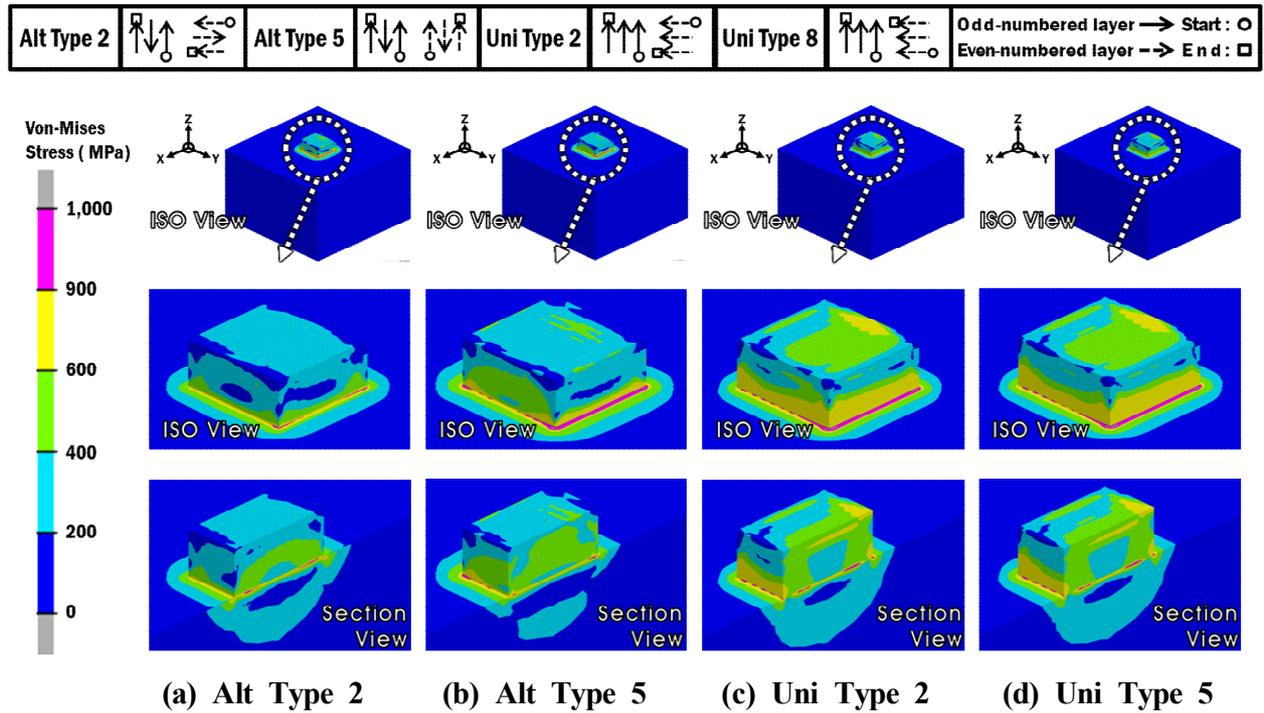


Fig. 19 Influence of different deposition strategies on Von-mises stress distributions of multi layer deposited models

Fig. 19 는 다층 적층 모델의 적층 경로별 유효 응력분포를 비교한 결과이다. Alternative direction type 2 및 5 를 적용한 다층 적층 모델인 (a) 및 (b) 에서는 저층 적층 모델의 유한요소 해석의 결과와 동일하게 층간 적층 경로의 직교 및 평행으로 각기 다르기 때문에 각각의 적층부 유효 응력분포가 상이하게 도출되었다. Uni direction type 2 및 8 을 적용한 다층 적층 모델인 (c) 및 (d) 에서는 두 적층 모델의 층간 적층 경로가 평행한 것으로 일치하기 때문에 각각의 적층부 유효 응력분포가 유사하게 도출되었다. 적층부 영역의 유효 응력분포는 Alternative direction type 은 적층부에 낮은 값의 유효 응력분포를 보이며, Uni direction type 은 적층부에서 높은 유효 응력분포가 나

타난다. 기저부 영역에서는 모든 적층 경로 조건에서 동일하게 유효 응력이 거의 나타나지 않으며, 모든 적층 경로 조건에서 동일하게 적층부와 기저부 사이의 적층 경계면에서 높은 응력이 발생한다. 또한, Section view에서 적층부 및 기저부의 유효 응력분포를 보면 Alternative direction type 5를 적용한 적층 모델에서 적층부 및 기저부에 유효 응력분포가 가장 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 최대 유효 응력의 최댓값은 저층 적층 유한요소 해석의 결과와 같이 모든 적층 경로에서 동일하게 시편 상면을 기준으로 깊이 방향 0.1 mm 지점에서 도출되었다. 따라서 적층 경로에 따른 유효 응력분포 결과를 비교 분석하기 위해 Fig. 21 과 같이 시편 상면 기준 0.1 mm 깊이에서 각각의 유효 응력분포를 도출하였다.

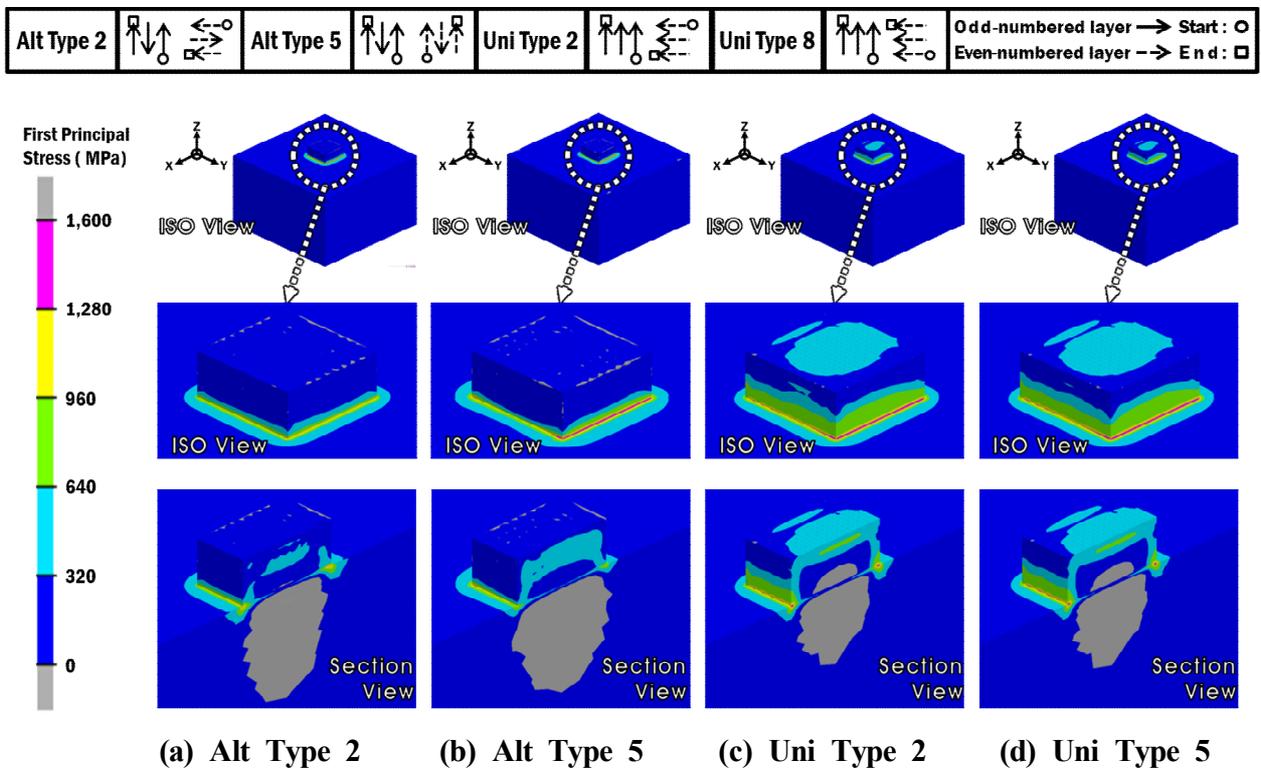


Fig. 20 Influence of different deposition strategies on 1st principal stress distributions of multi layer deposited models

Fig. 20 은 다층 적층 모델의 적층 경로별 주응력 분포를 비교한 결과이다. 앞선 유효 응력분포의 도출결과와 같이 Alternative direction type 2 및 5 를 적용한 다층 적층 모델인 (a) 및 (b) 에서는 저층 적층 모델의 유한요소 해석의 결과와 동일하게 층간 적

층 경로의 직교 및 평행으로 각기 다르기 때문에 각각의 적층부 주응력 분포가 상이하게 도출되었다. Uni direction type 2 및 8 을 적용한 다층 적층 모델인 (c) 및 (d) 에서는 두 적층 모델의 층간 적층 경로가 평행한 것으로 일치하기 때문에 각각의 적층부 주응력 분포가 유사하게 도출되었다. 적층부 영역의 주응력 분포 또한 도출된 유효 응력 분포와 동일하게 Alternative direction type 은 적층부에 낮은 값의 주응력 분포를 보이며, Uni direction type 은 적층부에서 높은 주응력 분포가 도출된다. 기저부 영역에서는 모든 적층 경로 조건에서 동일하게 주응력이 거의 나타나지 않으며, 모든 적층 경로 조건에서 동일하게 적층부와 기저부 사이의 적층 경계면에서 높은 주응력이 발생한다. 또한, Section view에서 기저부의 주응력 분포를 보면 Alternative direction type 의 적층 경로를 적용한 (a) 및 (b) 에서 압축응력 분포가 크게 도출되며, Uni direction type 을 적용한 (c) 및 (d) 에서는 압축응력 분포가 적게 도출된다. 그러나 적층부를 보면 (c) 및 (d) 는 적층부 내부에 압축응력 분포가 도출되는 것을 볼 수 있다. 최대 주응력의 최대값은 저층 적층 유한요소 해석의 결과와 같이 모든 적층 경로에서 동일하게 시편 상면을 기준으로 깊이 방향 0.1 mm 지점에서 도출되었다. 따라서 적층 경로에 따른 주응력 분포결과를 비교 분석하기 위해 Fig. 22 와 같이 시편 상면 기준 0.1 mm 깊이에서 각각의 주응력 분포를 도출하였다.

가. 적층 경로별 Von-Mises Stress 비교 분석

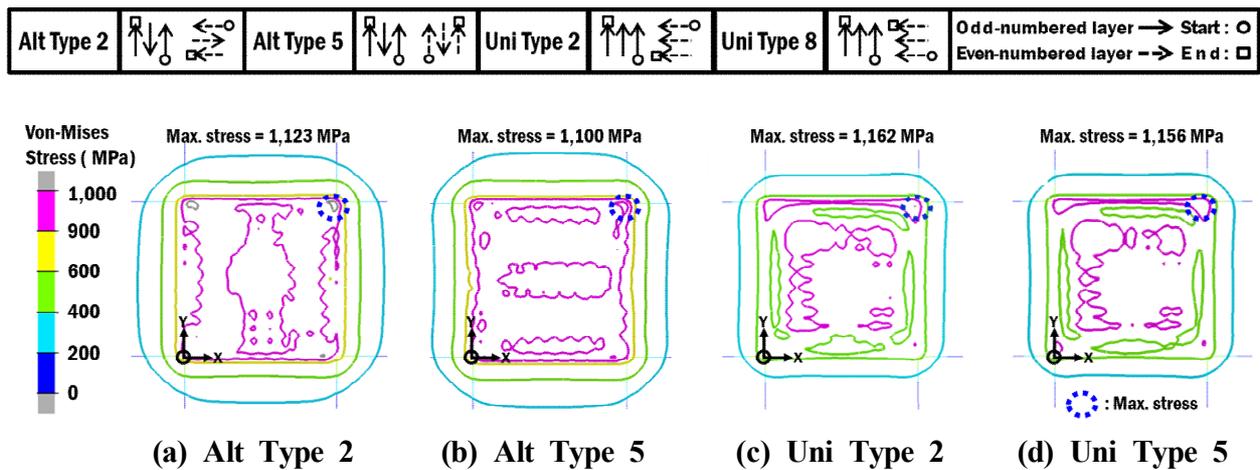


Fig. 21 Von-Mises stress distributions for multi layer deposited models

Fig. 21 은 적정 적층 경로 후보별 유효 응력분포를 비교한 결과이다. 다층 적층 유

한요소 해석의 유효 응력의 분포는 저층 적층 유한요소 해석 유효 응력분포와 같이 층간 적층 경로가 평행 또는 직교함에 따라 다른 응력분포가 나타난다. 따라서 저층 적층뿐만 아니라 다층 적층에서도 적층 경로의 방향에 따라 유효 응력의 분포가 달라짐을 알 수 있다. 반면에, Uni-direction type 2 및 8의 유효 응력분포를 보면 단일방향으로 적층할 때 적층 시작점과 종료지점의 반전은 유효 응력의 분포에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 최대 유효 응력 값의 위치는 저층 적층 유한요소 해석의 결과에서는 각각의 적층 경로마다 상이 하게 나타났다. 이와 다르게 다층 적층 모델의 유한요소 해석 결과 모든 적층 경로의 최대 유효 응력 값의 위치가 첫 번째 적층 Path 가 끝나는 지점에서 최대 유효 응력 값이 도출된다. 적층 경로별로 도출된 최대 유효 응력 값 또한 저층 적층 유한요소 해석의 결과와 같이 Alternative-direction type 이 Uni-direction type 보다 낮게 나타났으며, Uni-direction type 2 의 경로를 가지는 다층 적층 유한요소 모델의 유효 응력이 1,162MPa 로 가장 크게 나타났으며, Alternative-direction type 5 의 경로를 가지는 다층 적층 유한요소 모델의 유효 응력이 1,100MPa 로 가장 작은 유효 응력 값을 가진다.

나. 적층 경로별 1st Principal Stress 비교 분석

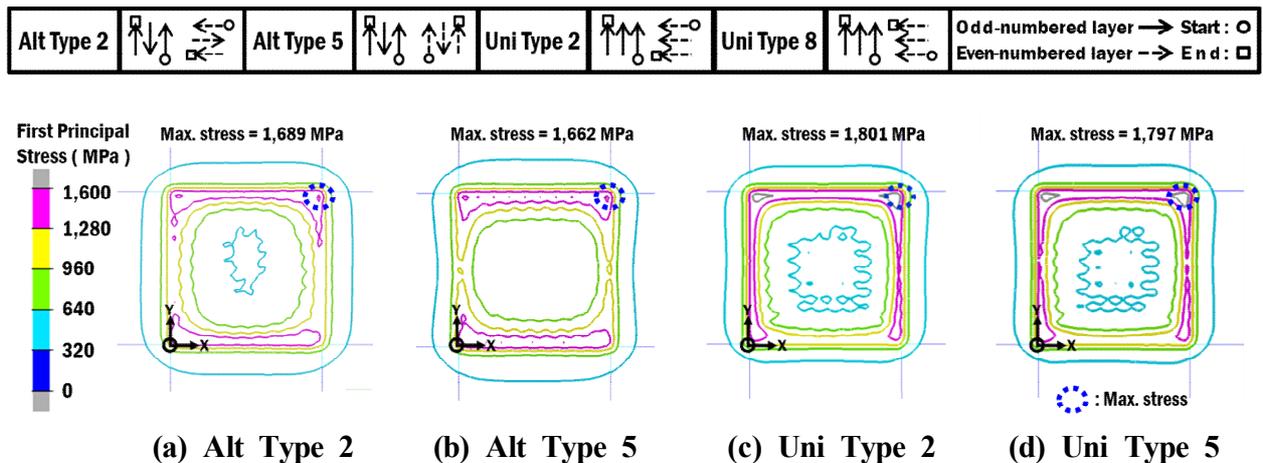


Fig. 22 1st principal stress distributions for multi layer deposited models

Fig. 22 는 적정 적층 경로 후보별 주응력 분포를 비교한 결과이다. 다층 적층 유한요소 해석의 주응력 분포는 저층 적층 유한요소 해석의 주응력 분포와 같이 층간 적층 경로가 평행 또는 직교함에 따라 다른 응력분포가 나타난다. 따라서 유효 응력분포의

결과와 동일하게 다층 적층에서도 적층 경로의 방향에 따라 주응력의 분포가 달라짐을 알 수 있다. 유효 응력분포의 결과와 동일하게 Uni-direction type 2 및 8 의 유효 응력 분포를 보면 적층 시작점과 종료지점의 반전은 주응력 분포에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 최대 주응력 값의 위치 또한 최대 유효 응력 값과 동일한 위치인 첫 번째 적층 Path 가 끝나는 지점에서 최대 주응력 값이 도출된다. 적층 경로별로 도출된 최대 주응력 값 또한 저층 적층 유한요소 해석의 결과와 같이 Alternative-direction type 이 Uni-direction type 보다 낮게 나타났으며, Uni-direction type 2 의 경로를 가지는 다층 적층 유한요소 모델의 주응력이 1,801MPa 로 가장 크게 나타났으며 Alternative-direction type 5 의 경로를 가지는 다층 적층 유한요소 모델의 주응력이 1,662MPa 로 가장 작은 유효 응력 값을 가진다.

앞서 도출된 각 적층 경로별 유효 응력분포 및 주응력 분포결과를 통해 다층 적층 진행 시 적층 경로의 방향은 응력의 분포에 영향을 미치지만, 최대 응력 값의 위치에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 다층 적층 시에도 Alternative-direction type 이 낮은 최대 응력 값을 가지기 때문에 Alternative-direction type 이 더 우수한 적층 경로일 것으로 사료 된다.

3. 적층 층별 최대 응력 비교 분석 및 적정 적층 경로 선정

적정 적층 경로 후보로 선정된 4 가지 적층 경로 중에서 적정 적층 경로를 선정하기 위해서 적층 경로별 최대 유효 응력 및 주응력 도출과 경로별 층간 최대 응력을 비교 분석하였다. Table 5 는 다층 적층 유한요소 해석모델의 적층 경로별 최대 응력 값이다. 최대 유효 응력과 최대 주응력 모두 Alternative-direction type 5 의 최대 응력 값이 가장 낮게 도출되었고, Uni-direction Type 2 의 경우 유효 응력과 주응력 값이 모두 가장 큰 값으로 도출되었다.

Table 5 Maximum stress of multi layer deposited model

	Alt-Type 2	Alt-Type 5	Uni-Type 2	Uni-Type 8
Von-Mises stress (MPa)	1,123	1,110	1,162	1,156
1st Principal stress (MPa)	1,689	1,652	1,801	1,797

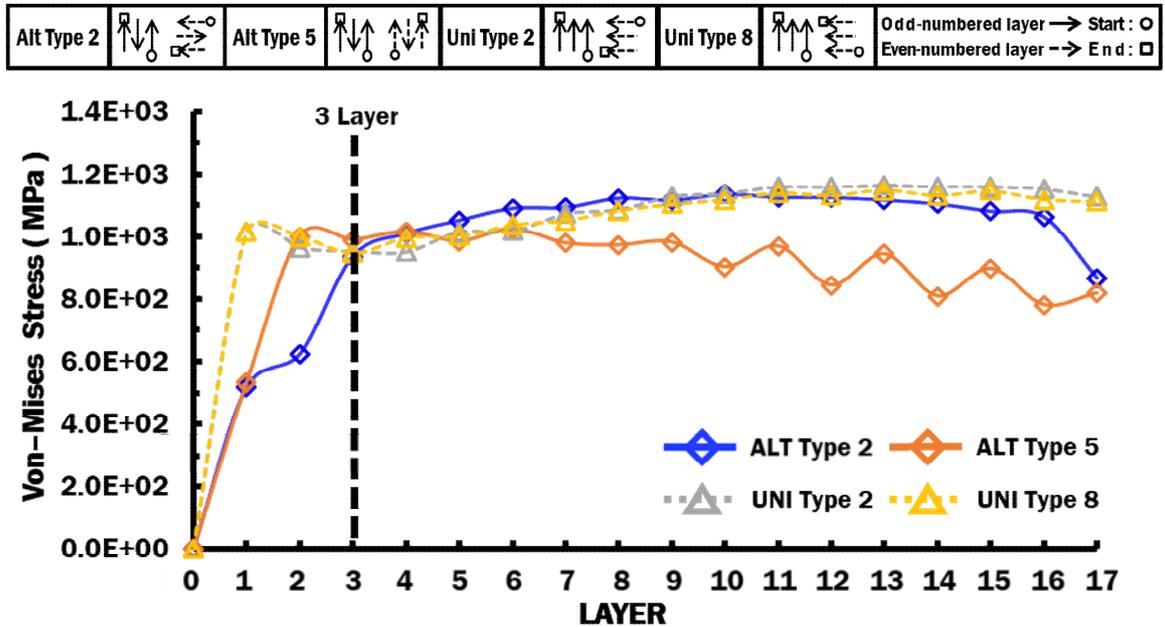


Fig. 23 Comparison of maximum Von-Mises stress for different deposition strategies

Fig. 23 은 다층 적층 유한요소 해석모델의 경로별 최대 유효 응력 지점의 층간 유효 응력분포를 비교한 결과이다. 각 경로별 유효 응력 값은 적층 층수 3 층을 기준으로 Alternative-direction type 2 및 5 는 3 층 적층 이전에서는 유효 응력의 값 모두 증가했지만, 3 층 적층 이후로는 유효 응력의 값이 감소한다. 반면에 Uni-direction type 2 및 8 의 경우 3 층 이후로 적층이 진행될수록 유효 응력의 값이 증가하는 것을 볼 수 있다.

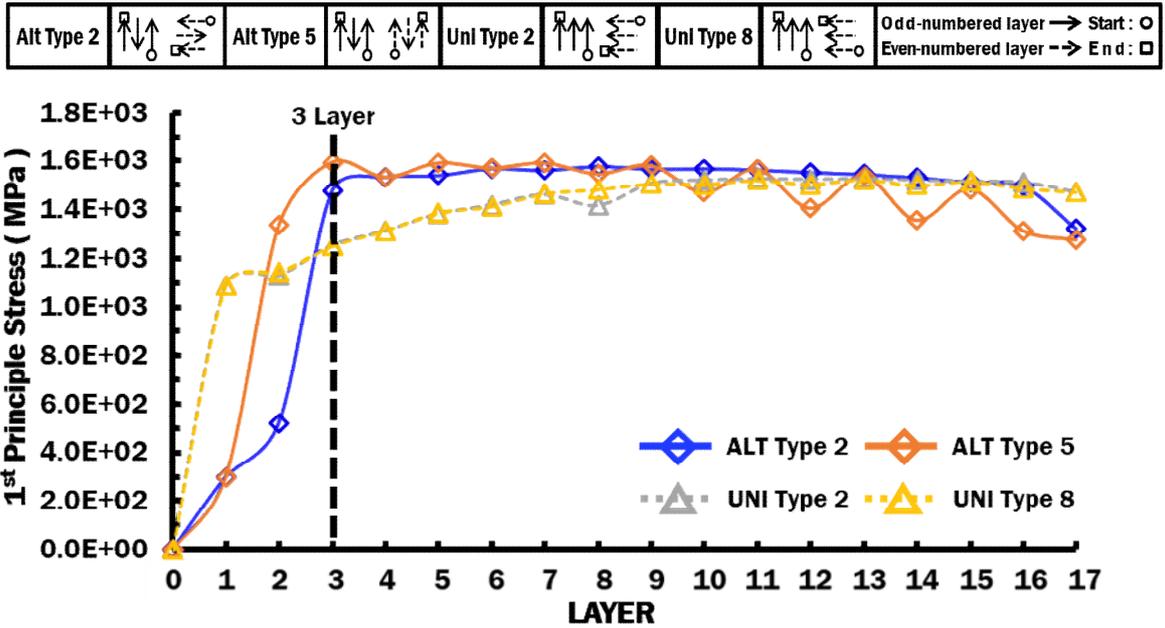


Fig. 24 Comparison of maximum 1st principal stress for different deposition strategies

Fig. 24 는 다층 적층 유한요소 해석모델의 경로별 최대 주응력 지점의 층간 주응력 분포를 비교한 결과이다. 각 경로별 주응력 값 또한 유효 응력 값과 유사하게 적층 층수 3 층을 기준으로 Alternative-direction type 2 및 5 는 3 층 적층 이전에서는 주응력의 값 모두 증가했지만, 3층 적층 이후로는 주응력의 값이 감소하며, Uni-direction type 2 및 8 의 주응력 값의 경우에도 유효 응력 값과 유사하게 3 층 이후로 적층이 진행될 수록 주응력의 값이 증가함을 볼 수 있다.

앞서 도출된 각 적층 경로별 유효 응력분포 및 주응력 분포결과를 통해 다층 적층 시에도 Alternative-direction type 의 경로가 Uni-direction type 의 경로보다 잔류응력 값이 낮게 나타나는 것을 알 수 있으며, 유효 응력 및 주응력의 최대값 비교와 최대 응력 지점에서의 층간 응력분포의 비교를 통해 Alternative-direction type 5 가 대체적 적층 시 가장 적합한 적층 경로임을 알 수 있다.

제 3 장 다층 및 대체적 적층 시편 설계 및 제작

제 1 절 다층 적층 시편 설계 및 제작

1. 다층 적층 시편 설계

다층 적층 시 발생하는 잔류응력 및 적층 특성을 분석하기 위해 다층 (Multi-Layer) 적층 시편을 Fig. 25 와 같이 설계하였다. 기저부의 두께는 적층 공정

진행 시 열전달로 인한 기저부의 변형이 쉽게 일어나지 않도록 30 mm 로 설계하였고, 기저부의 면적은 50 mm × 50 mm 로 설계하였다. 적층 높이는 실제 적층 시 첫 번째 층의 적층 높이인 0.134 mm 및 평균 적층 높이인 0.25 mm 와 실제 적층 가공 공정 진행 시 후처리 진행을 고려하여 4 mm 이상의 적층을 진행하기 위해 적층 높이를 4.135 mm 로 설계하였다. 적층 진행 위치는 기저부 중앙에 위치하도록 설계하였다. 다층 적층 시 적층 경로는 저층 및 다층 적층의 유한요소 해석의 결과에 따라 선정한 적층 적층 경로인 Alternative-direction type 5 를 적용하였고, 또한 동일 적층 모델에서 적층 경로에 따른 열 이력의 변화를 도출하기 위해 Alternative-direction type 2 를 추가로 적층 경로에 포함하여 다층 적층 시편의 설계를 진행하였다.

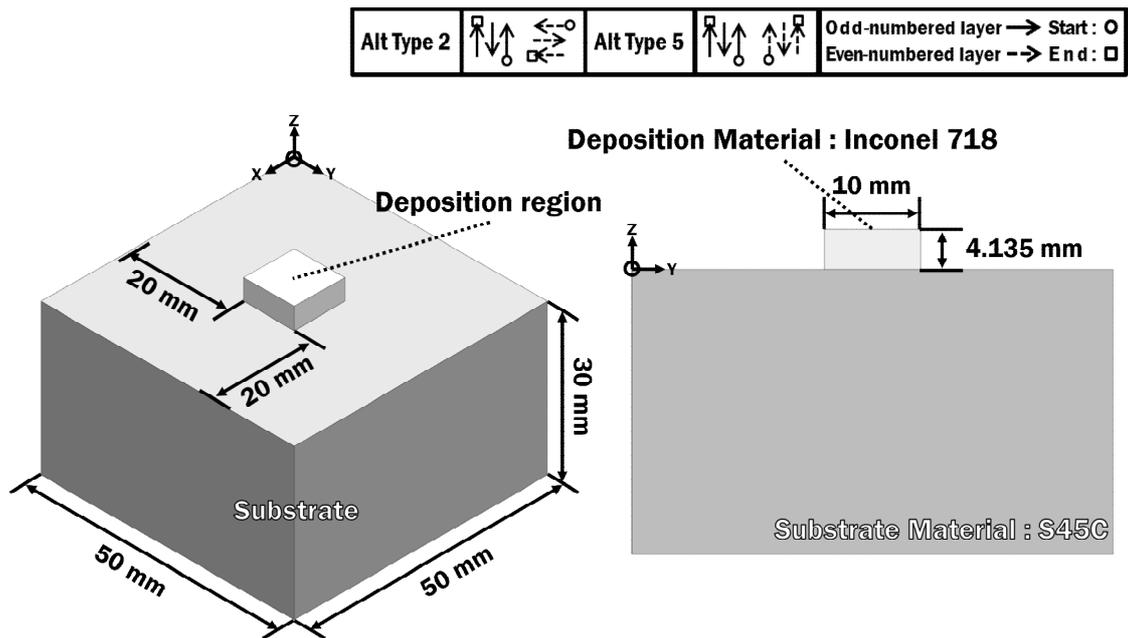


Fig. 25 Design of specimen for multi-layer deposition

2. 다층 적층 시편 제작

시편의 제작은 한국생산기술연구원의 (주)화천기계의 5축 CNC 장비인 VESTA 1300 과 Optomec 사의 LENS 공정 헤드가 결합 된 하이브리드 (Hybrid) 적층 제조 장비를 사용하여 시편제작을 진행하였다. 하이브리드 DED 장비 및 세부 장비는 Fig. 26 과 같다. 적층 공정진행 중 시편 고정은 Fig. 27 과 같이 진행하였다.

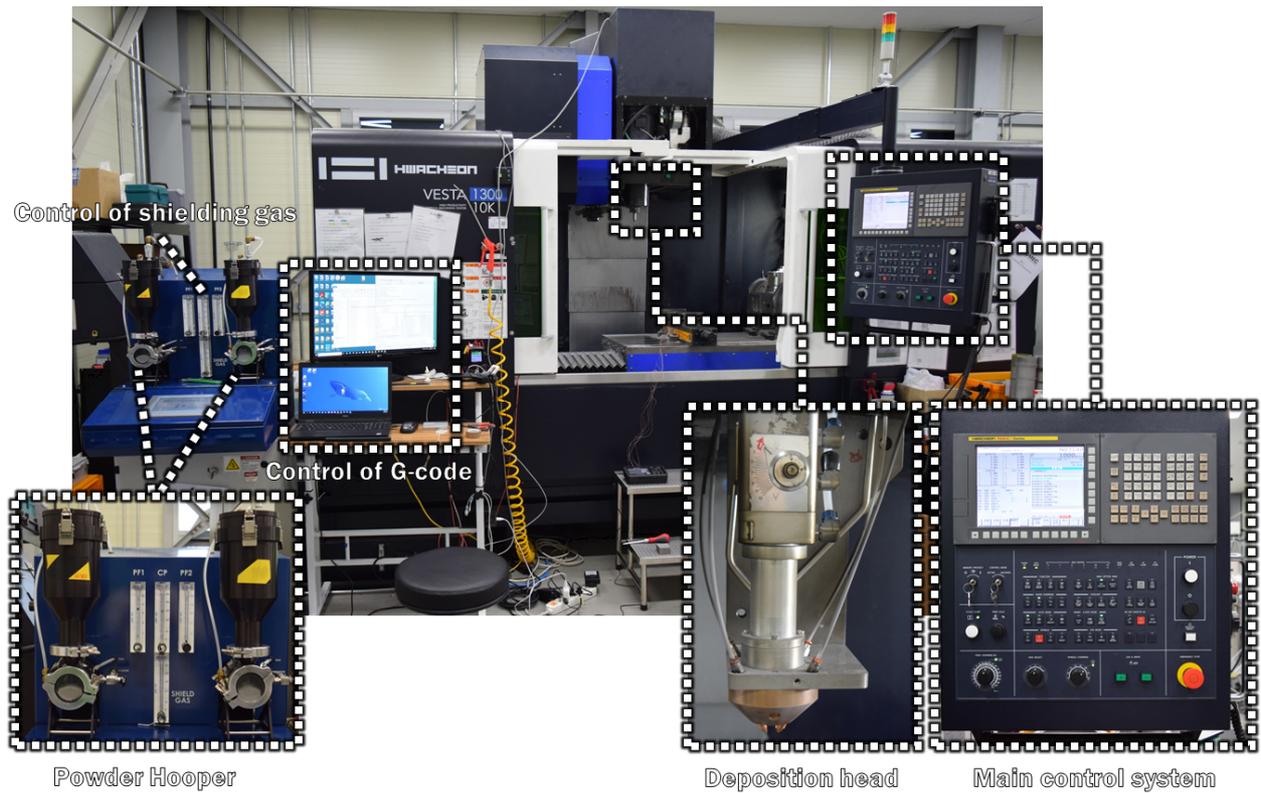


Fig. 26 Experimental set-up

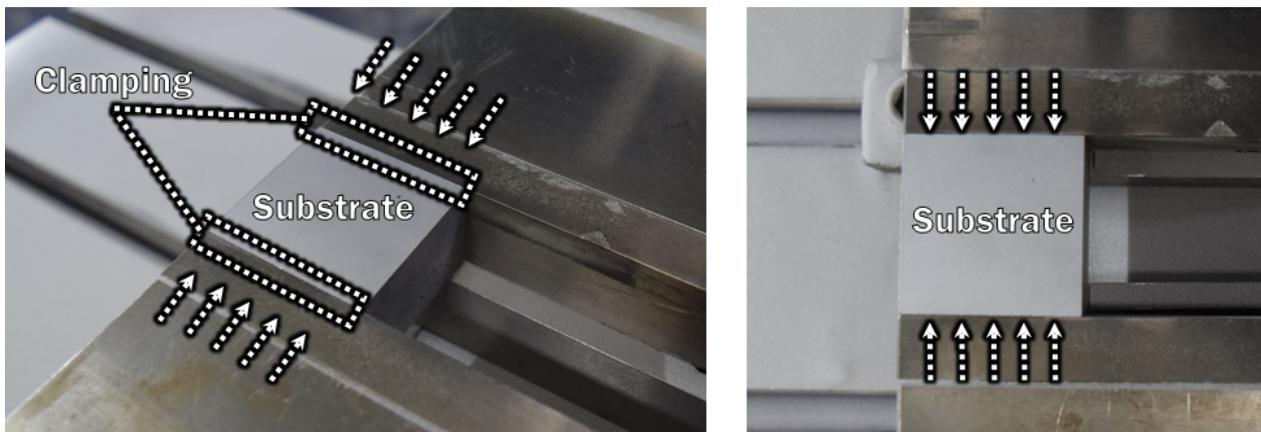


Fig. 27 Clamping condition of specimens

장비의 사양은 Table 6 과 같다. 적층이 가능한 최대 크기는 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m 이며, 레이저 헤드 3 축 주축 회전 2 축으로 총 5 축 가공이 가능하다. 이송 속력은 최대 3 m/min 까지의 속력을 가지며, 레이저 열원으로는 Fiber laser 를 사용하고 최대 1 kW 의 출력을 낼 수 있다. Inconel 718 적층 시 사용된 적층 조건은 Table 7과 같이 1,000 mm/min 의 이송 속도, 350 W 의 레이저 파워 및 10.3 g/min 의 분말 공급량으로 설정 후 적층 공정을 진행하였다. 적층 진행 전 시편제작에 사용되는 기저부는 샌드블라스팅처리를 진행하였다

Table 6 Specifications of LENS processes

Allowable deposition area (m)	Controlled axes	Travel speed (m/min)	Power of laser (kW)	Spindle speed (rpm)
0.5 × 0.5 × 0.5	5 (Laser head x,y,z + tilt-rotate 2 axes)	3	1	10,000

Table 7 Experimental condition for Inconel 718 powders

Feed rate of Powder (F, g/min)	Power of laser (W)	Travel speed (mm/min)
10.3	350	1,000

적층실험은 Table 8 과 같이 진행하였다. 실험 번호의 첫 번째 숫자는 적층 되는 면적을 뜻하며, 중간의 숫자는 선정된 적층 경로를 뜻하고 마지막 숫자는 실험 반복 횟수를 뜻한다.

Table 8 Experimental condition for multi-layers deposition (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2, 5)

No.	10-2-1	10-2-2	10-2-3	10-2-4	10-5-1	10-5-2	10-5-3	10-5-4
Deposition Area (mm)	10 × 10	10 × 10	10 × 10	10 × 10	10 × 10	10 × 10	10 × 10	10 × 10
Deposition Strategy	Type 2	Type 2	Type 2	Type 2	Type 5	Type 5	Type 5	Type 5

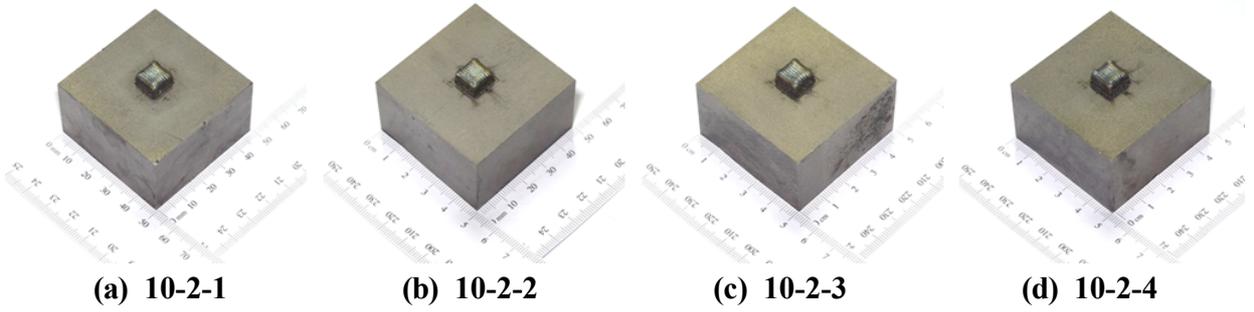


Fig. 28 Results of deposition strategy type 2

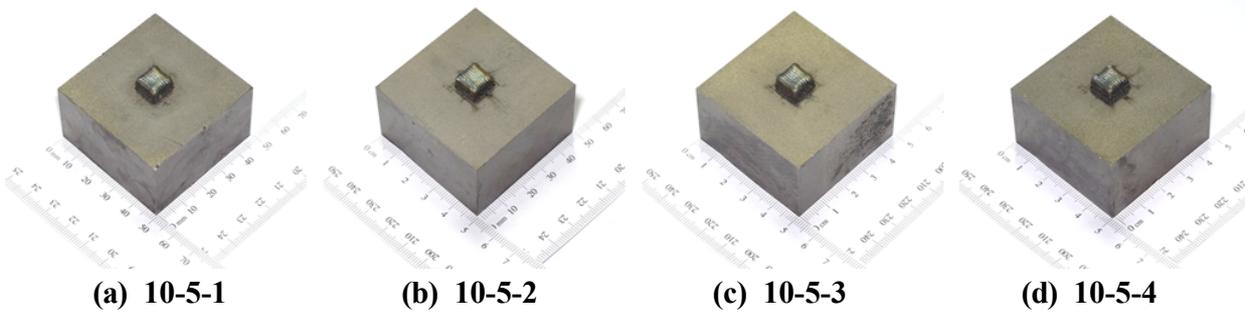


Fig. 29 Results of deposition strategy type 5

다층 적층 시편제작 결과는 Fig. 28 및 29 와 같다. 총 8 가지 실험 모두 적층부 및 기저부에 균열이 생기지 않고 제작이 완료되었다. 적층부의 양 끝부분이 중앙보다 높이가 높게 나타나며, 이러한 결과는 양 끝부분에 과도 열전달이 진행되기 때문으로 사료 된다.

제 2 절 대체적 적층 시편 설계 및 제작

1. 대체적 적층 시편 설계

대체적 적층 시편의 설계는 유사 체적 적층 시 적층 높이 및 면적의 변화에 따른 잔류응력의 특성을 비교하기 위해 총 두 종류의 적층 면적을 설계하였다. 각각의 규격은 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 31\text{ Layer}$, $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 15\text{ Layer}$ 이다. 각각 $3,054\text{ mm}^3$ 및 $3,271\text{ mm}^3$ 의 체적을 가지며, 설계된 각각의 대체적 적층 시편은 Fig. 30의 (a) 및 (b)와 같다. 기저부의 크기는 이전의 다층 적층실험에서 적용한 것과 동일한 크기인 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 로 설계되었다. 적층 진행 위치 또한 다층 적층실험과 동일하게 기저부 상면의 중앙에 위치하도록 설계하였다.

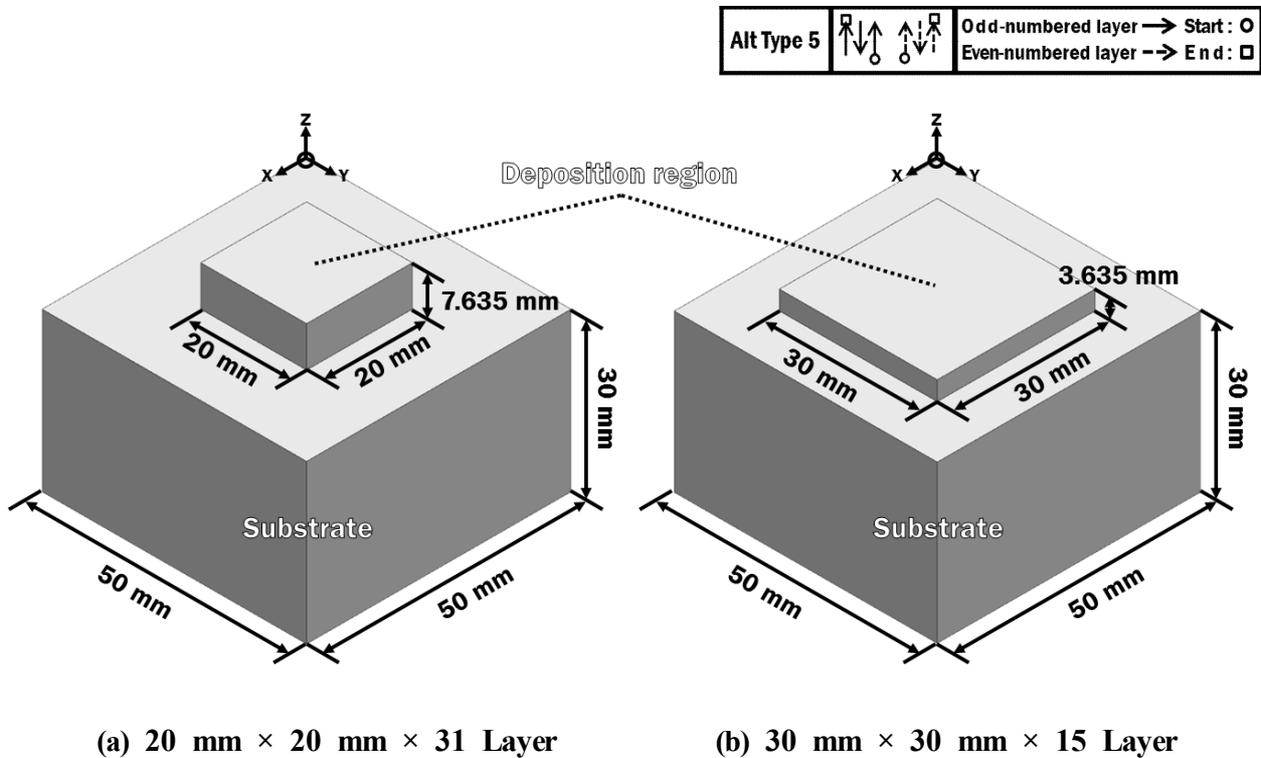


Fig. 30 Design of specimen for large-volume deposition

대체적 적층 시 적층 경로는 저층 및 다층 적층의 유한요소 해석 및 적층실험 결과에 따라 선정된 적정 적층 경로 Alternative direction type 5를 사용하였다. 각각 홀수 층의 경로와 짝수 층의 경로가 교차되며 적층이 진행된다.

2. 대체적 적층 시편 제작

다층 적층실험과 공정변수를 동일하게 적용해 적층실험을 진행하였다. 적층실험은 Table 9 와 같이 진행하였다. 실험 번호의 첫 번째 숫자는 적층 되는 면적을 뜻하며, 중간의 숫자는 선정된 적층 경로를 뜻하고 마지막 숫자는 적층 반복 횟수를 뜻한다.

Table 9 Experimental condition for large-volume deposition (Deposition areas = 20 mm × 20 mm, 30 mm × 30 mm and number of layers = 31 layer, 15 layer and Alternative direction type 2, 5)

No.	20-5-1	20-5-2	20-5-3	20-5-4	30-5-1	30-5-2	30-5-3	30-5-4
Deposition Area (mm)	20 × 20	20 × 20	20 × 20	20 × 20	30 × 30	30 × 30	30 × 30	30 × 30
Deposition Strategy	Type 5							

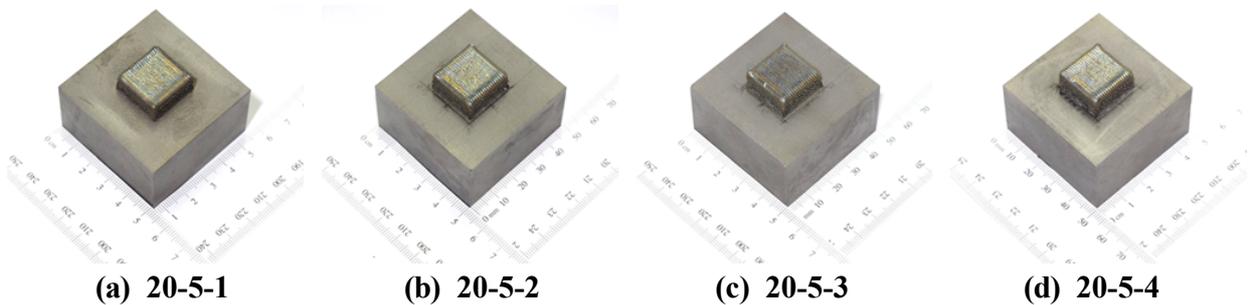


Fig. 31 Results of large-volume deposition (20 mm × 20 mm)

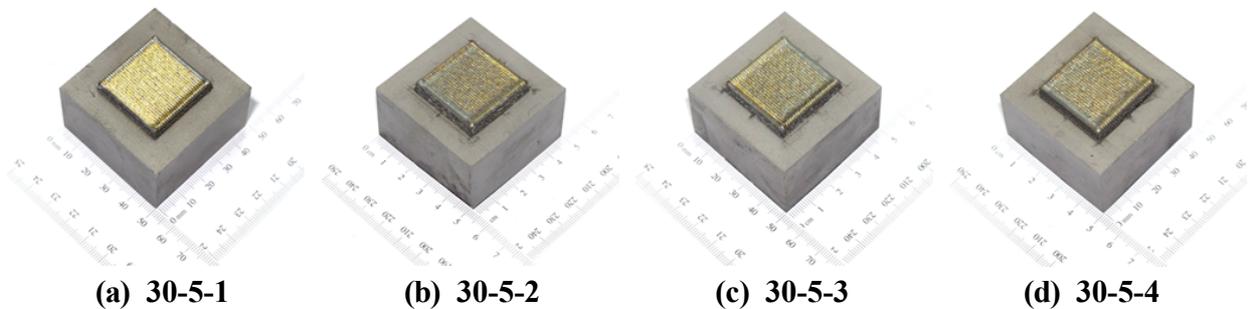


Fig. 32 Results of large-volume deposition (30 mm × 30 mm)

LENS 공정을 이용하여 대체적 적층 시 시편의 결과는 Fig. 31 및 32 와 같다. 총 8 가지 실험 모두 적층부 및 기저부에 균열이 생기지 않고 제작이 완료되었다. 적층부의 양 끝부분이 중앙보다 높이가 높게 나타나며, 이러한 결과는 양 끝부분에 과도 열전달이 진행되기 때문으로 사료 된다.

제 3 절 다층 및 대체적 적층 시 열 이력 측정 실험

1. 열 이력 측정 실험 방법 및 실험

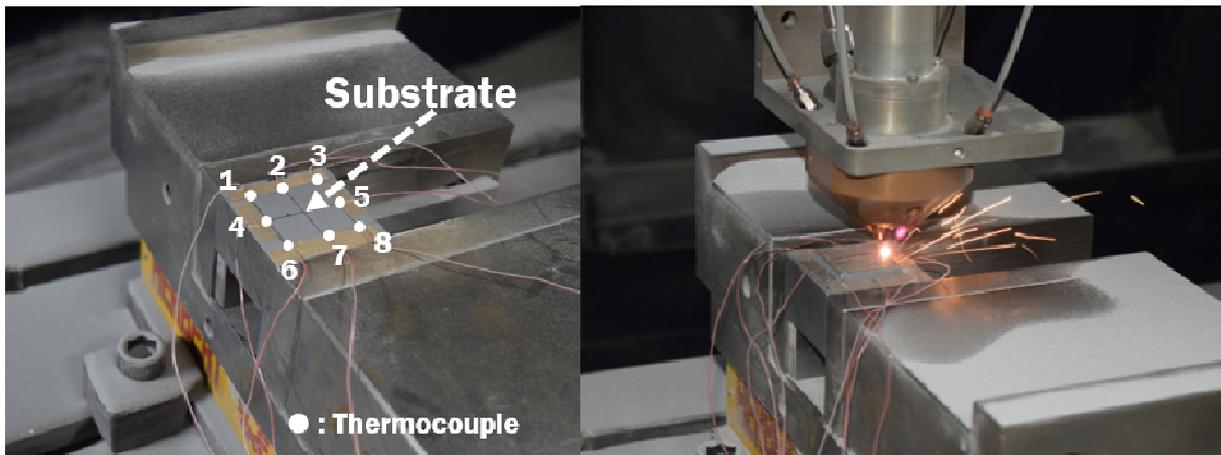
LENS 공정을 이용하여 다층 및 대체적 적층 시 시편에 나타나는 열 이력을 측정하기 위해 열 이력 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 장비는 Fig. 33 과 같다. Data logger는 GRAPHTEC 사의 midi LOGGER GL240 을 사용하였다. Thermocouple 은 OMEGA사의 -200℃ ~ 750℃ 범위의 온도 측정이 가능한 J-Type Thermocouple 을 사용하여 실험을 진행하였다. 실험의 Setup 및 실험 진행 사진은 Fig. 34 와 같다.



(a) Data logger

(b) Thermocouple

Fig. 33 Data logger and thermocouple



(a) Experiment Set up

(b) Temperature measurements

Fig. 34 Experiment set up of temperature measurements using thermocouple

열 이력을 측정하기 위한 적층 모델별 열전대 부착 위치는 Fig. 35 와 같다. 적층 영역 전체의 열 이력을 도출하기 위해서 10 mm × 10 mm × 4.135 mm 적층 모델의 열전대 부착 위치는 적층부 중앙 기준 6 mm 간격으로 총 8 포인트 측정, 20 mm × 20 mm × 7.635 mm 적층 모델의 열전대 부착 위치는 적층부 중앙 기준 11 mm 간격으로 총 8포인트 측정, 30 mm × 30 mm × 3.635 mm 적층 모델의 열전대 부착 위치는 적층부 중앙 기준 16 mm 간격으로 총 8 포인트 측정을 진행한다.

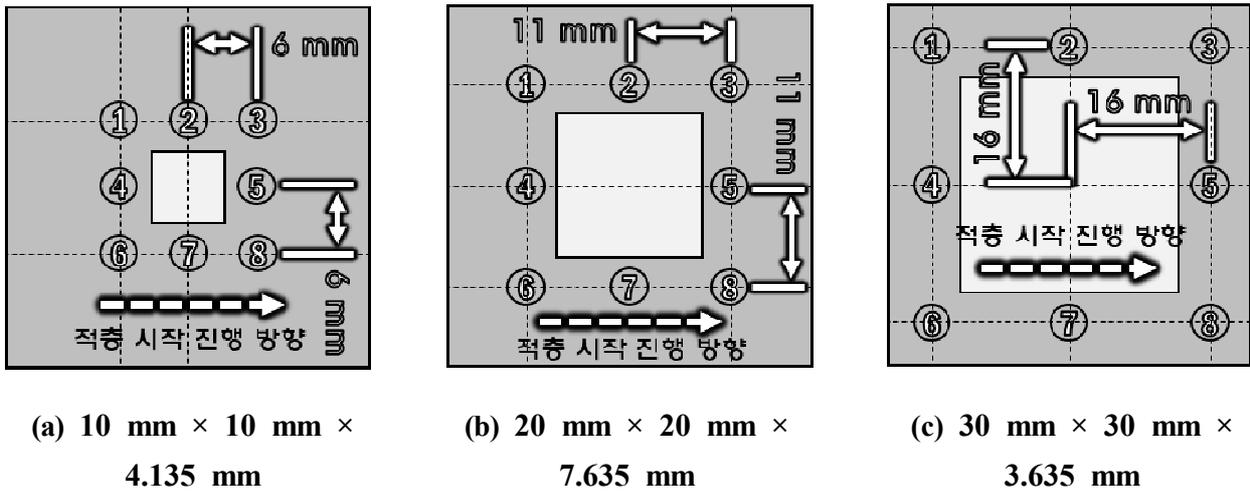
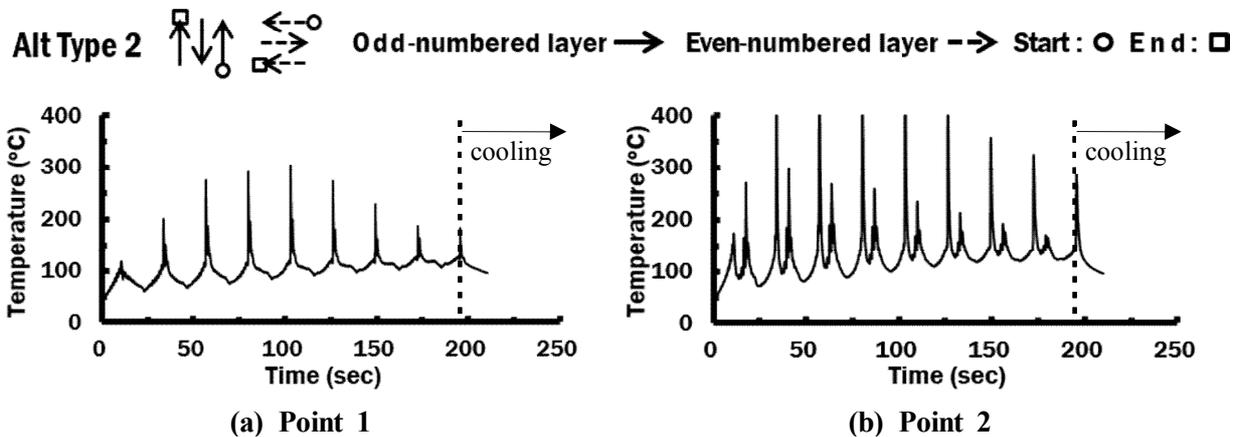


Fig. 35 Attached locations of thermocouples

2. 열 이력 측정 실험 결과 및 고찰

적층 진행 시 적층 경로에 따른 열 이력을 도출하기 위해 Fig. 34 및 Fig. 35 와 같이 측정 실험을 진행하였고, 실험 결과는 측정 모델별로 Fig. 36, 37, 38 및 39 와 같다



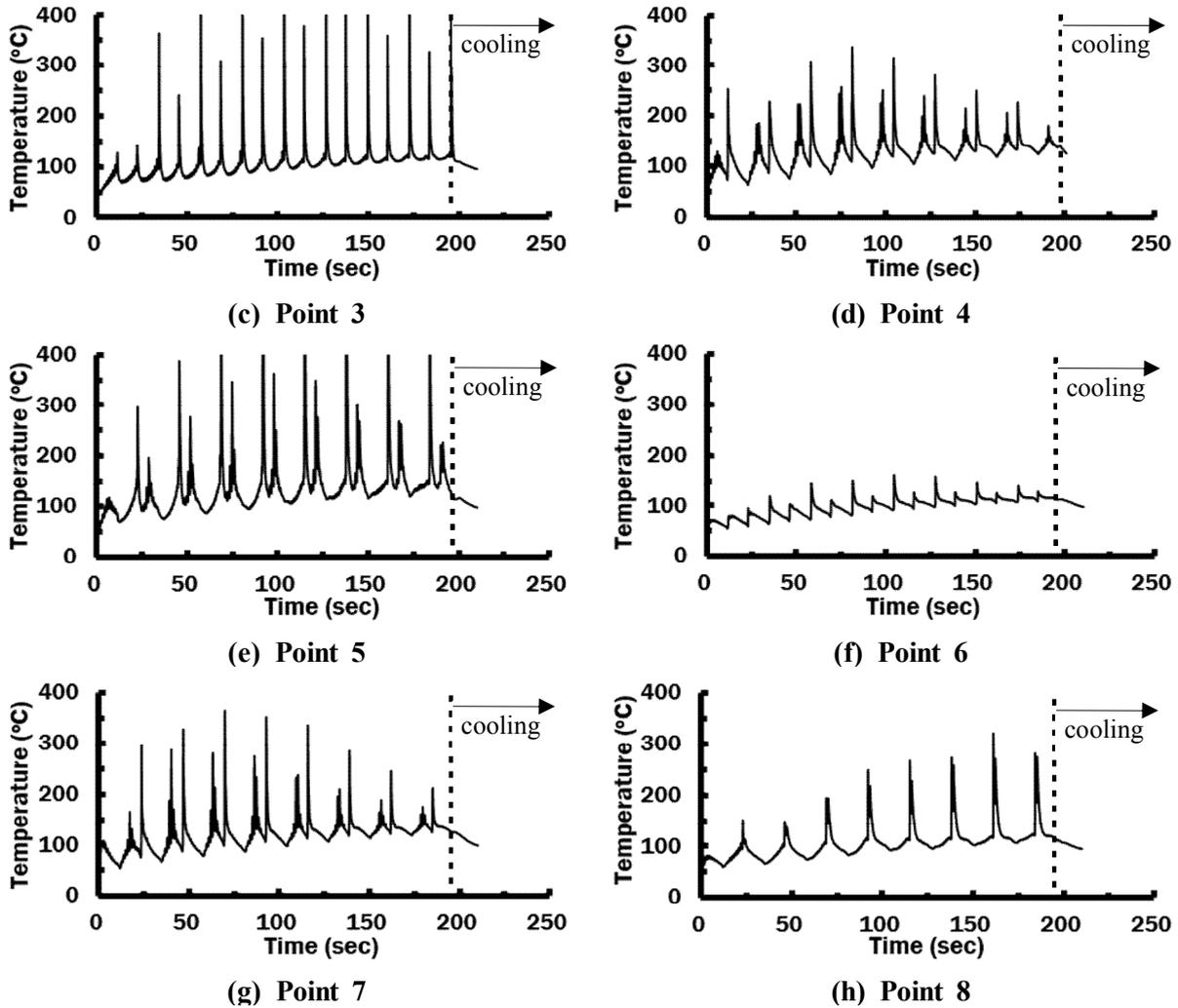


Fig. 36 Measured thermal histories for alternative deposition stratege (Alt type 2, Areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer)

Fig. 36 은 적층 경로 Alternative-direction type 2 를 이용하여 적층을 진행한 10 mm × 10 mm × 17 Layer 모델의 열 이력 도출 결과이다. 열 이력 측정결과 온도 값이 200°C 이상의 결과가 나오는 부분은 열원이 적층 영역을 벗어나 기저부에 열을 직접 가한 결과이다. 총 적층 시간은 198.3 초이며 마지막 층의 적층이 Point 1, 2 및 3 이 위치한 면에서 끝나기 때문에 Point 1, 2 및 3 의 마지막 열 이력과 적층 종료 시간이 맞게 된다. 각 측정 위치별 열 이력을 보면 Point 1 과 Point 8 에서는 한 층의 적층이 끝나는 위치에서 약 1 초의 시간 동안 급격한 열 이력이 두 번 나타난다. 나머지 측정 위치인 Point 2, 3, 4, 5, 6 및 7 에서는 한 층의 적층이 끝날 때마다 급격한 열 이력이 나타나는 것을 알 수 있다.

Alt Type 5  Odd-numbered layer → Even-numbered layer --> Start : ○ End : □

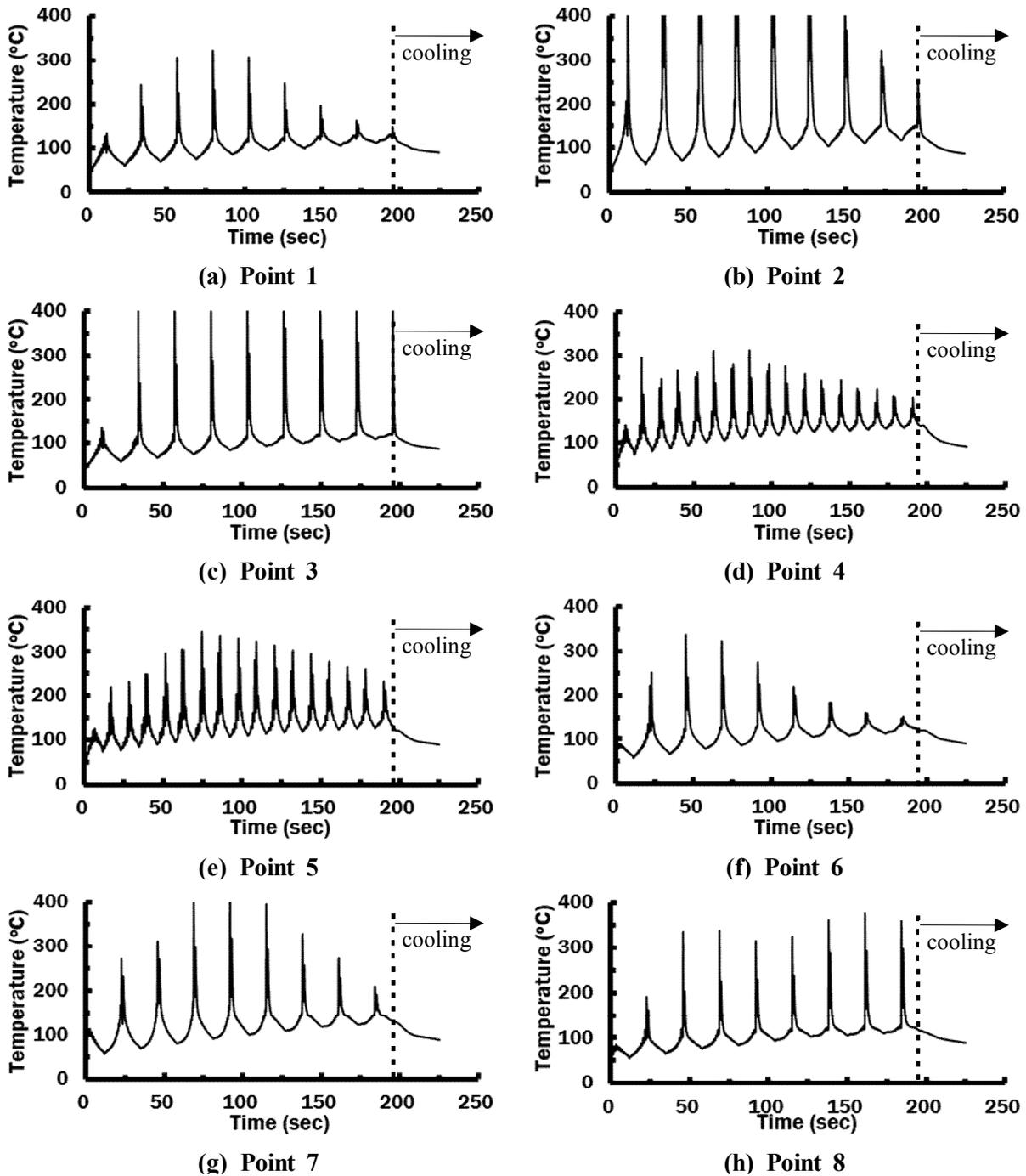


Fig. 37 Measured thermal histories for alternative deposition strategy (Alt type 5, Areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer)

Fig. 37 은 적층 경로 Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 10 mm

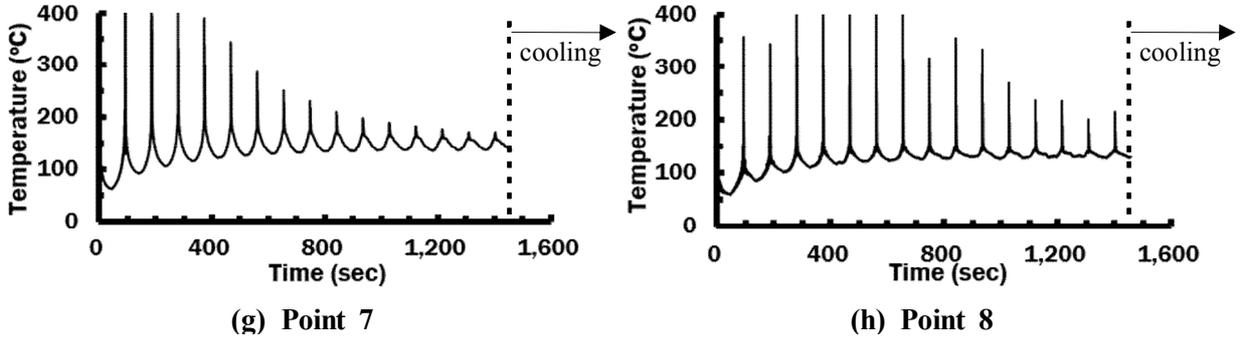
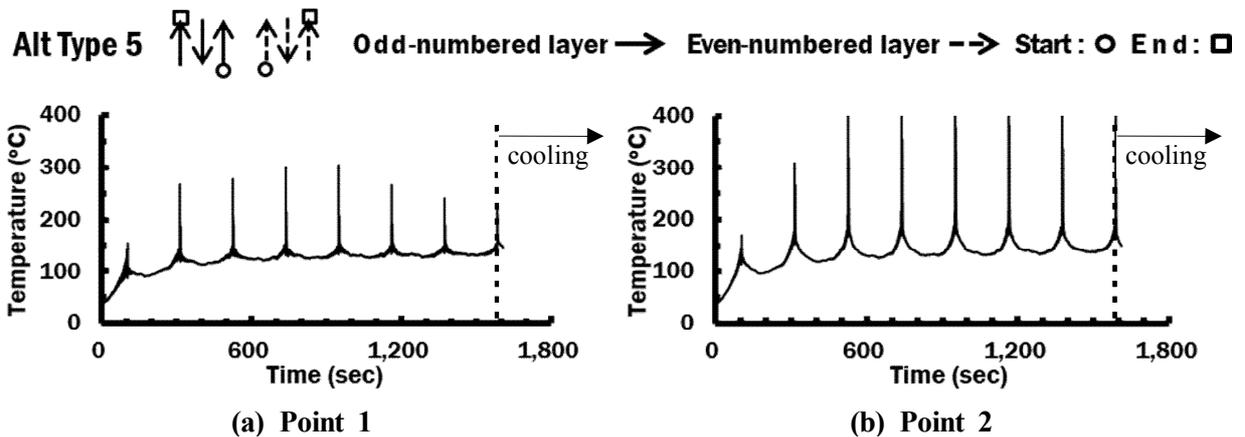


Fig. 38 Measured thermal histories for alternative deposition strategy (Alt type 5, Areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer)

Fig. 38 은 적층 경로 Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 20 mm × 20 mm × 31 Layer 모델의 열 이력 도출결과이다. Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 10 mm × 10 mm × 17 Layer 모델의 결과와 같이 열 이력 측정결과 온도 값이 200°C 이상의 결과가 나오는 부분은 열원이 적층 영역을 벗어나 기저부에 열을 직접 가한 결과이다. 총 적층 시간은 1,512.8 초이며, 앞서 도출된 두 열 이력 도출결과와 마찬가지로 마지막 층의 적층이 Point 1, 2 및 3 에서 끝나기 때문에 Point 1, 2 및 3 의 마지막 열 이력과 적층 종료 시간이 맞게 된다. Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 20 mm × 20 mm × 31 Layer 모델의 열 이력 또한 Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 10 mm × 10 mm × 17 Layer 모델의 열 이력 도출결과와 같이 측정 Point 4, 5 를 제외한 Point 1, 2, 3, 6, 7 및 8 지점에서 짧은 시간 동안 급격한 열 이력이 발생한다. 이러한 결과로 열 이력은 같은 적층 경로에서는 서로 유사한 열 이력 패턴이 나타남을 알 수 있다.



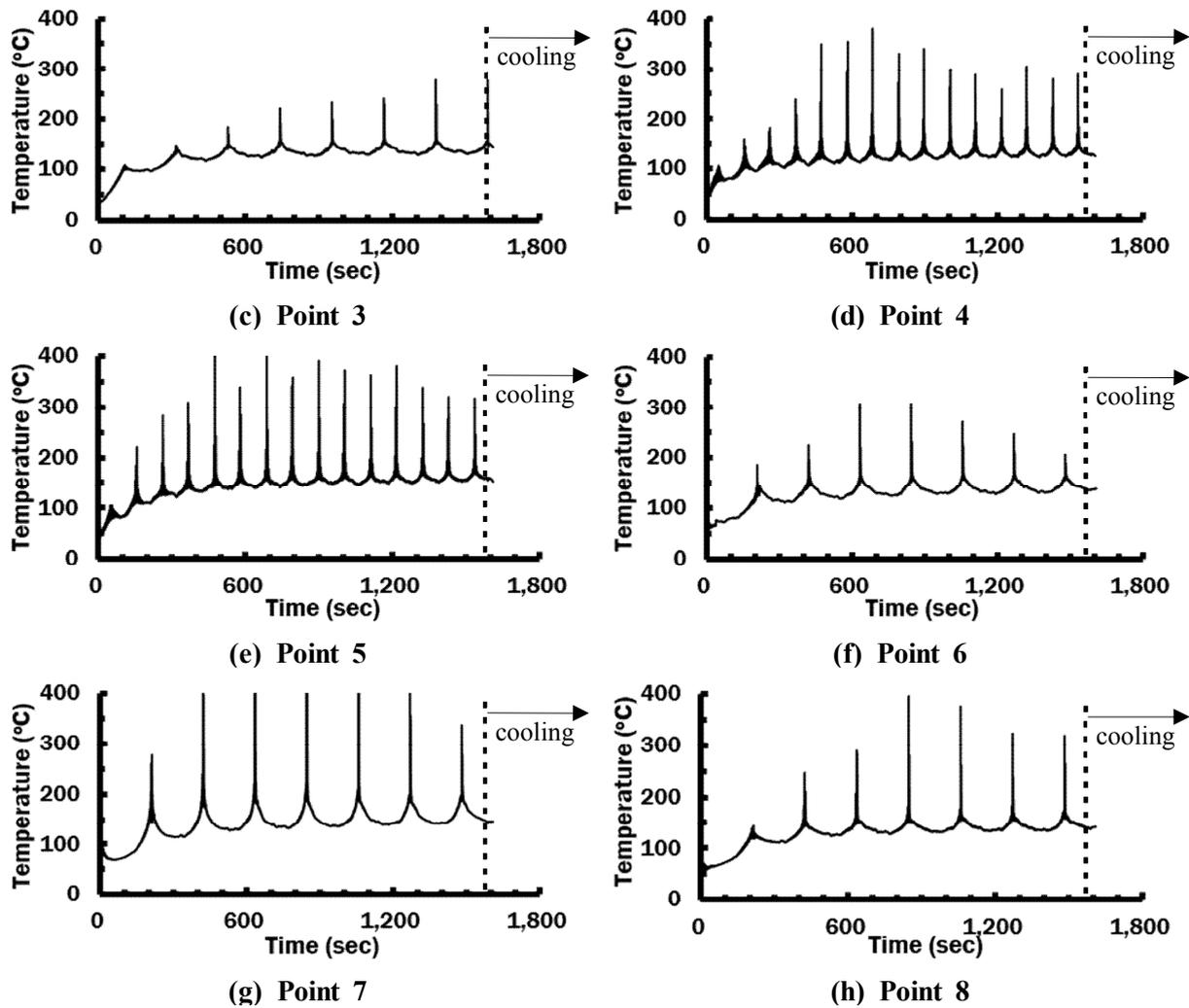


Fig. 39 Measured thermal histories for alternative deposition strategy (Alt type 2, Areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer)

Fig. 39 는 적층 경로 Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 30 mm × 30 mm × 31 Layer 모델의 열 이력 도출결과이다. 앞서 Alternative-direction type 5 적층 경로를 이용하여 적층을 진행한 10 mm × 10 mm × 17 Layer 및 20 mm × 20 mm × 31 Layer 모델과 같이 열 이력 측정결과 온도 값이 200°C 이상의 결과가 나오는 부분은 열원이 적층 영역을 벗어나 기저부에 열을 직접 가한 결과이다. 총 적층 시간은 1,623 초이며, 앞서 도출된 열 이력 도출결과들과 마찬가지로 마지막 층의 적층이 Point 1, 2 및 3에서 끝나기 때문에 Point 1, 2 및 3 의 마지막 열 이력과 적층 종료

시간이 맞게 된다. 앞서 Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 2 가지 모델의 열 이력 패턴과 같이 측정 Point 4, 5 를 제외한 Point 1, 2, 3, 6, 7 및 8 지점에서 짧은 시간 동안 급격한 열 이력이 발생한다. 앞서 도출된 열 이력 도출결과로 열 이력은 적층 경로에 의존적임을 알 수 있다.

제 4 장 유한요소 해석을 이용한 다층 및 대체적 적층 특성 고찰

제 1 절 유한요소 해석모델 도출

1. 해석모델 도출

열 이력 도출결과 비교 및 대체적 적층 시 잔류응력 특성분석을 위해 Fig. 40 의 (a) 및 (b) 와 같은 대체적 적층 유한요소 해석모델을 생성하였다.

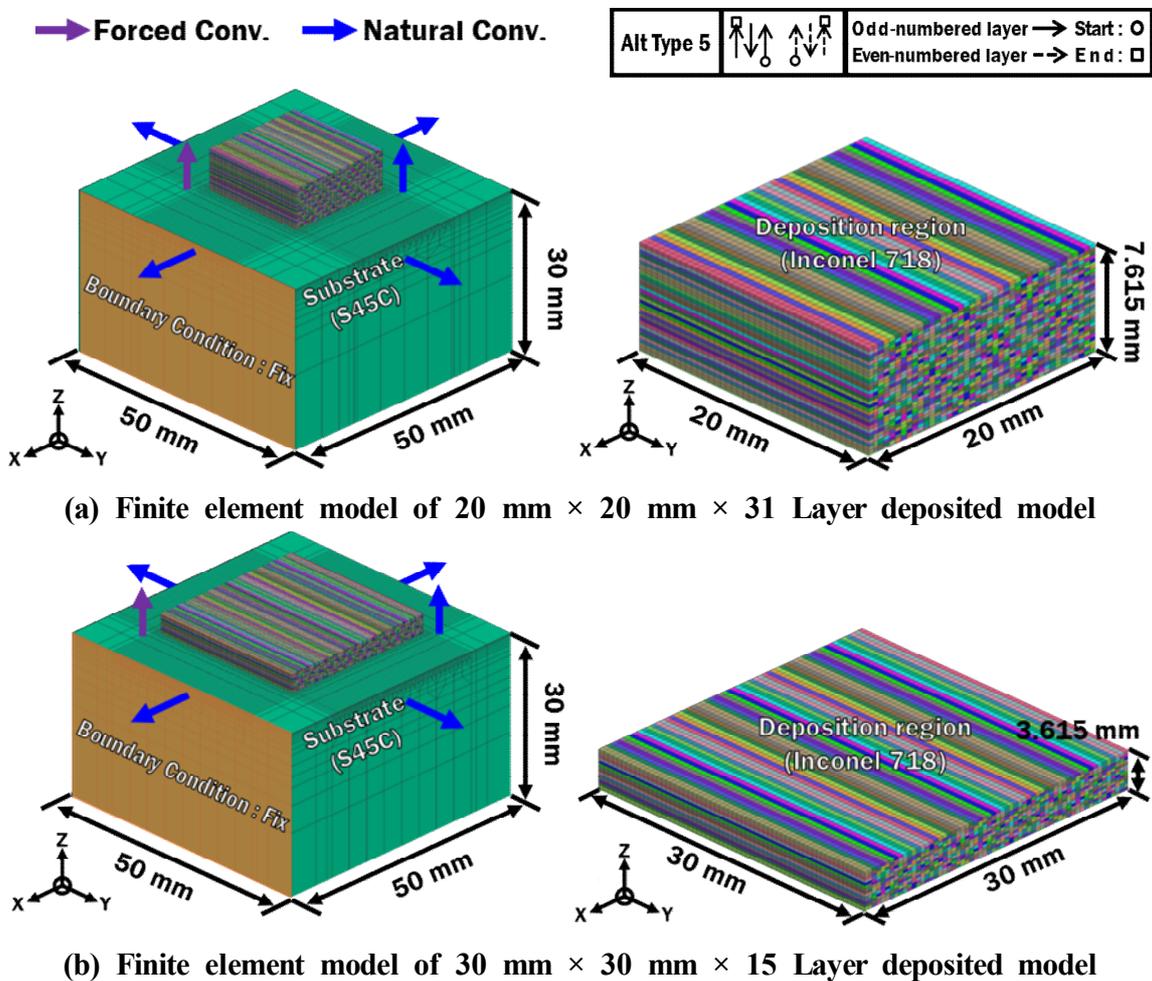


Fig. 40 Finite element model of large volume deposited model

각각의 유한요소 해석모델의 도출에는 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 SYSWELD 15.5 를 사용하였다. 각각의 유한요소 해석모델의 기저부의 크기는 저층 및 다층 해석 모델과 동일하게 50 mm × 50 mm × 30 mm 로 적용하였다. 적층부의 체적은 (a) 및 (b) 각각 20 mm × 20 mm × 7.635 mm 및 30 mm × 30 mm × 3.635 mm 이다. Layer 및 적층 비드의 형상은 저층 및 다층 해석모델과 동일하게 Table 4 의 실제 적층실험 에서 사용된 LENS 공정의 비드 형상을 고려하여 적용하였다. 유한요소 해석모델에 적용된 경계조건으로는 실제 적층 공정 진행 시에 적용되는 대류 현상을 고려하여 모델 의 상면에는 적층 진행 중 산화 방지를 위해 분사되는 아르곤 가스의 강제대류, 모델 의 옆면에는 대류 현상에 의한 자연대류 계수를 적용하였다. 모델의 양 끝단 Y-Z 면에 는 실제 적층 공정 진행 시 사용된 고정 경계조건을 부여하였다. 유한요소 해석모델의 적층 Layer, Path, 절점 및 격자 수는 Table 10 과 같이 총 Path 수는 각각 1,209 및 885 Path 이며, 절점 수는 각각 71,509 및 88,206 개이며, 유한요소 격자의 수는 각각 201,844 및 178,868 개로 구성되었다. 각각의 대체적 적층 모델은 Alternative direction type 5 적층 경로를 적용하여 유한요소 해석을 진행하였다.

Table 10 Compositions of FE model for different deposited models

Type of deposited model	Deposition strategy	Layer (EA)	Path (EA)	Nodes (EA)	Elements (EA)
20 mm × 20 mm × 7.635 mm	Alternative direction type 5	31	1,209	71,509	201,844
30 mm × 30 mm × 3.635 mm	Alternative direction type 5	15	885	88,206	178,868

제 2 절 열전달 해석 결과 및 분석

1. 다층 적층 모델 열전달 해석 및 열 이력 비교 분석

이전에 진행된 10 mm × 10 mm × 17 Layer 적층 모델의 유한요소해석 결과와 실제 열 이력 도출결과 비교를 위해 Fig. 41 과 같이 열 이력을 측정할 위치와 동일한 위치 적층부 중앙 기준 6 mm 간격으로 총 8 지점의 Node 에서 열 이력을 도출하였다. 유한 요소 해석 결과를 통해 도출된 Alternative-direction type 2 및 5 적층 경로의 열 이력과 열전대 측정을 통해 도출된 열 이력을 Fig. 42 및 43 와 같이 비교하였다.

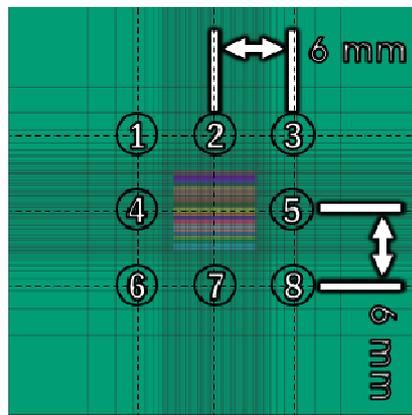
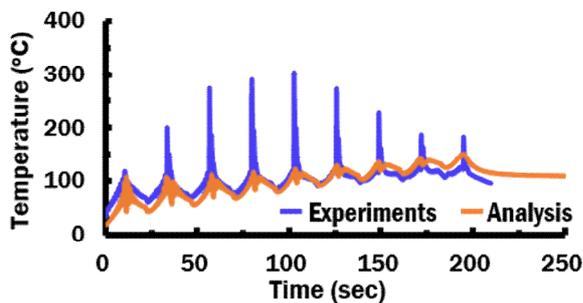


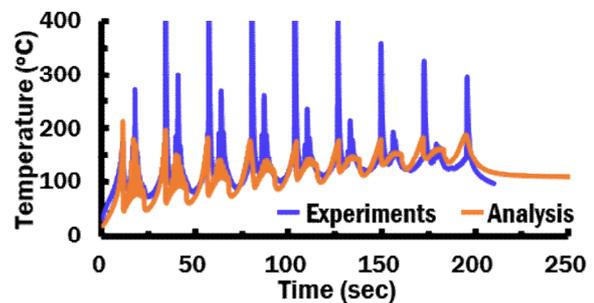
Fig. 41 Estimated locations of thermal histories (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2, 5)

가. Alternative direction type 2 적용 다층 적층 모델

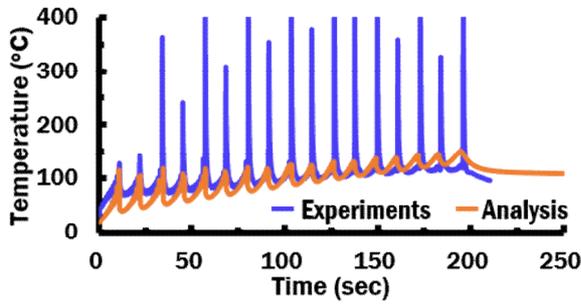
Alt Type 2 Odd-numbered layer → Even-numbered layer → Start: ○ End: □



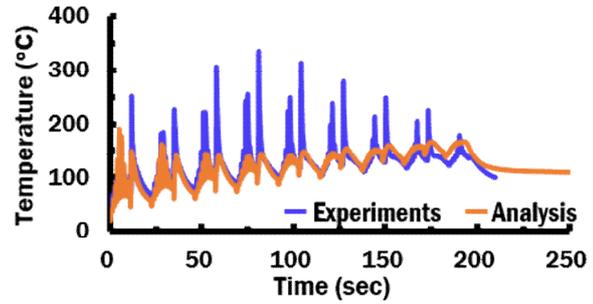
(a) Point 1



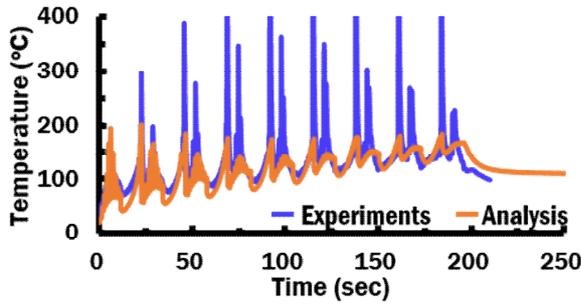
(b) Point 2



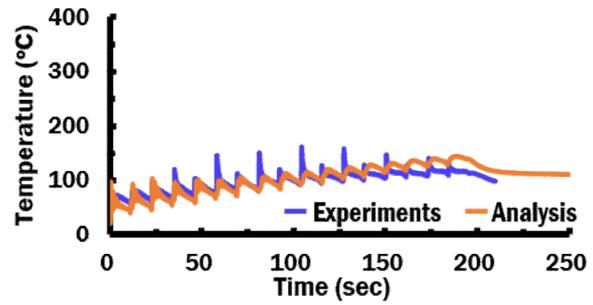
(c) Point 3



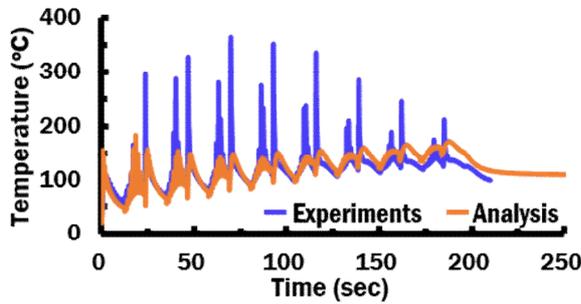
(d) Point 4



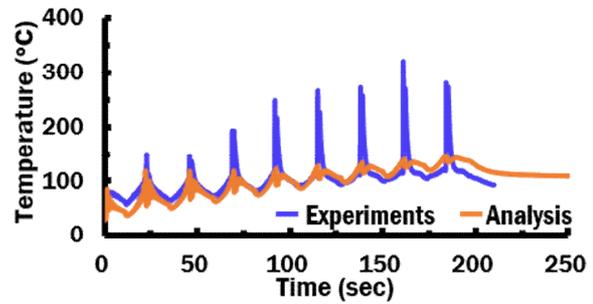
(e) Point 5



(f) Point 6



(g) Point 7



(h) Point 8

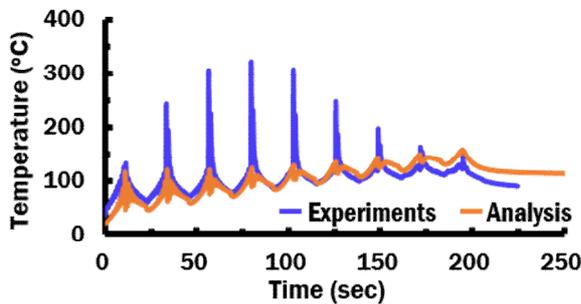
Fig. 43 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2)

Fig. 42 는 적층 경로 Alternative-direction type 2 를 이용하여 적층을 진행한 10 mm × 10 mm × 17 Layer 모델의 열전대를 통해 도출된 열 이력 결과와 유한요소 해석을 통해 도출된 열 이력 결과를 비교한 결과이다. 실제 도출된 열 이력에서 약 200°C 이상의 값들은 적층이 진행될 때 적층 영역의 끝부분에서 레이저의 포인트가 적층 영역을 벗어나 기저부를 가열해서 도출된 열 이력이므로 유한요소 해석에서 도출된 열 이력과 비교 시 제외하고 비교 분석을 진행하였다. 도출된 두 열 이력을 비교한 결과 적층 시간에 따른 온도 상승 및 감소하는 이력은 일치하지만, 온도의 차이가 발생한다. 이러한

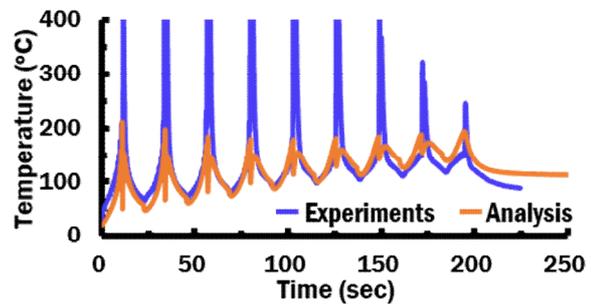
온도 차는 최대 온도 지점에서 오차를 25% 미만으로 나타낸다. 적층 초기구간의 적층이 처음 진행되는 0 초대의 격차가 생기는 이유는 실제 적층실험에서는 적층을 다 회 진행 시 기저부를 고정시키는 Clamping 기구로 열전달 현상이 일어 열이 축적되게 되고 축적된 열이 다음 적층실험의 기저부에 영향을 미쳐 초반 적층 구간의 온도 격차가 발생하게 된 것으로 사료 된다. 적층 종료 시점에서의 온도 격차는 실제 적층 공정에서는 주변 경계조건에 의한 지속적인 열 손실 때문으로 적층 후반부로 갈수록 온도가 일정해지며, 적층 진행 시 열전달 해석 결과로 도출된 열 이력은 기저부 주위 열 손실이 적용되지 않아 적층 간 기저부 온도가 증가하는 것을 알 수 있다.

나. Alternative direction type 5 적용 다층 적층 모델

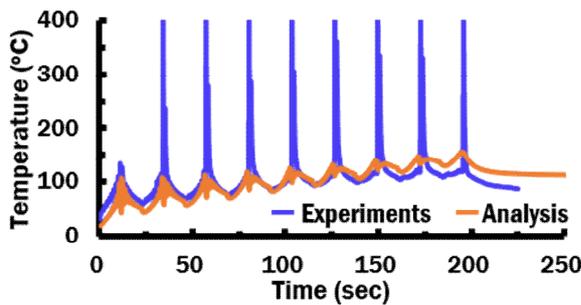
Alt Type 5  Odd-numbered layer → Even-numbered layer → Start : ○ End : □



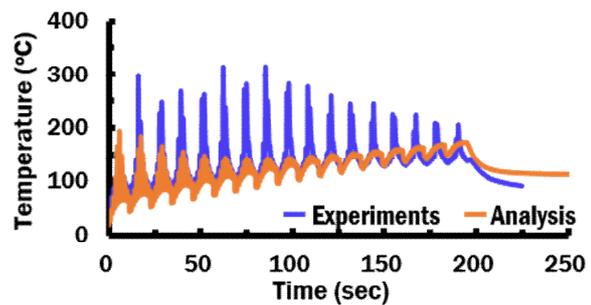
(a) Point 1



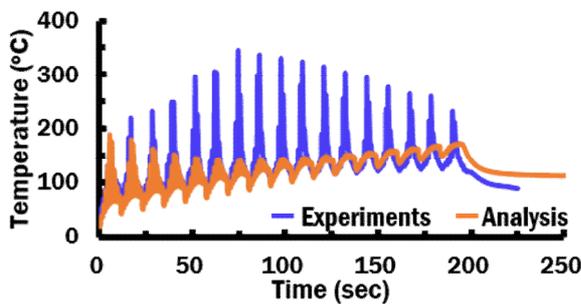
(b) Point 2



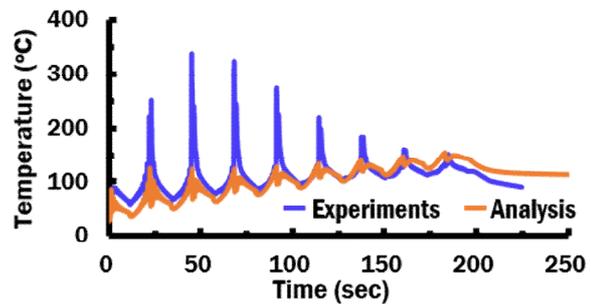
(c) Point 3



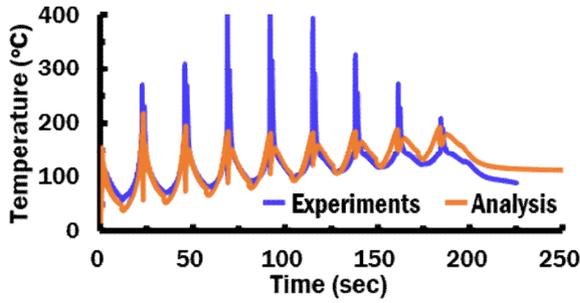
(d) Point 4



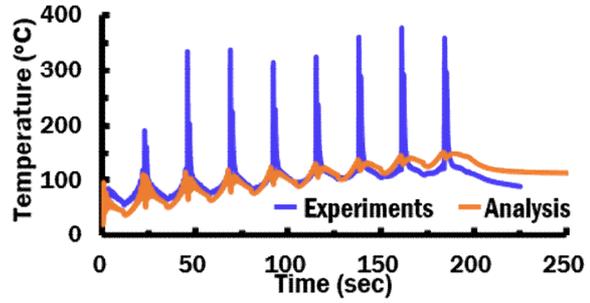
(e) Point 5



(f) Point 6



(g) Point 7



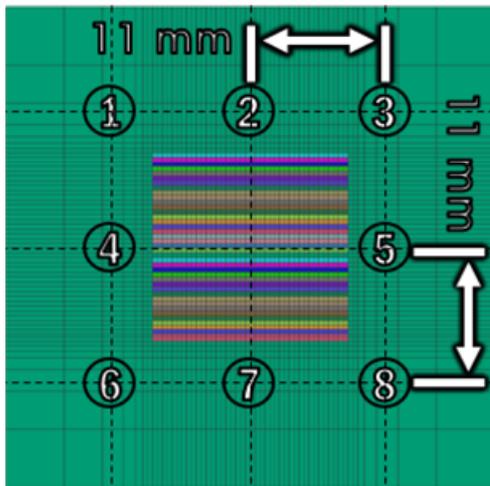
(h) Point 8

Fig. 43 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5)

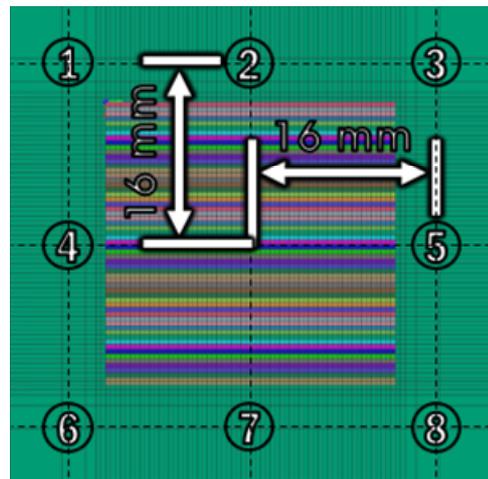
Fig. 43 은 적층 경로 Alternative-direction type 5 를 이용하여 적층을 진행한 10 mm × 10 mm × 17 Layer 모델의 열전대를 통해 도출된 열 이력 결과와 유한요소 해석을 통해 도출된 열 이력 결과를 비교한 결과이다. 앞선 결과와 마찬가지로 실제 도출된 열 이력에서 약 200°C 이상의 값들은 적층이 진행될 때 적층 영역의 끝부분에서 레이저의 포인트가 적층 영역을 벗어나 기저부를 가열해서 도출된 열 이력이므로 유한요소 해석에서는 적용되지 않는 부분이므로 이를 배제 후 비교를 진행하였다. 도출된 두 열 이력을 비교한 결과 Alternative-direction type 2 적층 경로의 결과와 같이 적층 시간에 따른 온도 상승 및 감소하는 이력은 일치하지만, 온도의 차이가 발생하며, 이러한 온도 차는 최대 온도 지점에서 오차율 25% 미만으로 나타난다. 이러한 오차는 앞서 비교한 Alternative-direction type 2 와 같이 실제 적층실험에서 적층을 다 회 진행 시 기저부를 고정시키는 Clamping 기구에 적층이 진행될수록 열전달 현상이 일어나서 기구에 열이 축적되게 되고 축적된 열이 다음 적층실험의 기저부에 영향을 미쳐 초반 적층 구간의 온도 격차가 발생하게 된다. 적층 종료 시점에서의 온도 격차는 실제 적층 공정에서는 주변 경계조건에 의한 지속적인 열 손실 때문으로 온도가 적층 후반부로 갈수록 온도 차가 일정해지며, 적층 진행 시 열전달 해석 결과로 도출된 열 이력은 대류 계수를 통한 기저부 주위 열 손실이 적용되지 않아 적층 간 기저부 온도가 증가하는 것을 알 수 있다.

2. 대체적 적층 모델 열전달 해석 및 열 이력 비교 분석

다층 적층 모델의 열 이력 비교와 같이 대체적 적층 모델의 열 이력 비교를 위해 Fig. 44 의 (a) 및 (b) 와 같이 열 이력을 측정할 위치와 동일한 위치의 적층부 중앙 기준 11 mm 및 16 mm 간격으로 총 8 지점의 Node 에서 열 이력을 도출하였다. 이후 유한요소 해석 결과를 통해 도출된 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델과 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델의 열 이력과 실제 열 전대를 사용해 측정된 열 이력을 Fig. 45 및 46 과 같이 비교하였다.



(a) 20 mm × 20 mm × 31 Layer deposited model

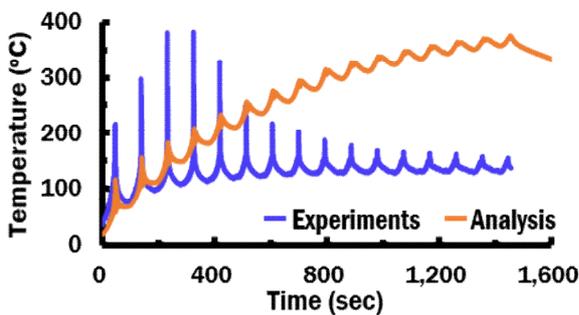


(b) 30 mm × 30 mm × 15 Layer deposited model

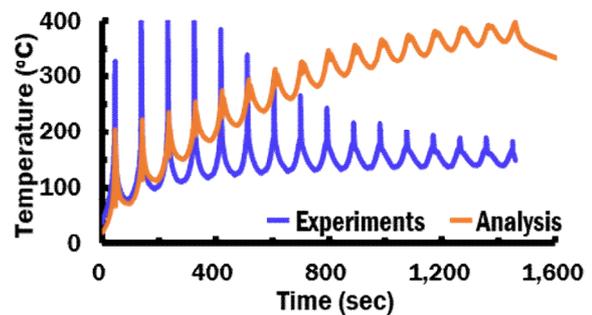
Fig. 44 Estimated locations of thermal histories (Deposition areas = 20 mm × 20 mm, 30 mm × 30 mm and number of layers = 31 layer, 15 layer and Alternative direction type 5)

가. 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델

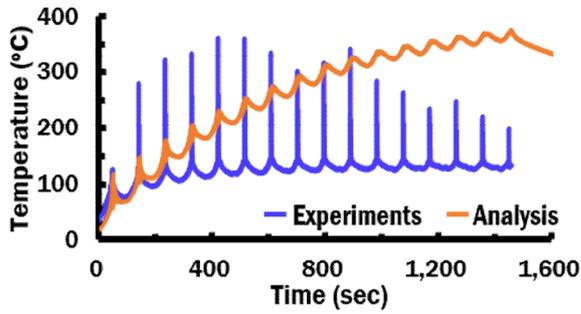
Alt Type 5 Odd-numbered layer → Even-numbered layer → Start: ○ End: □



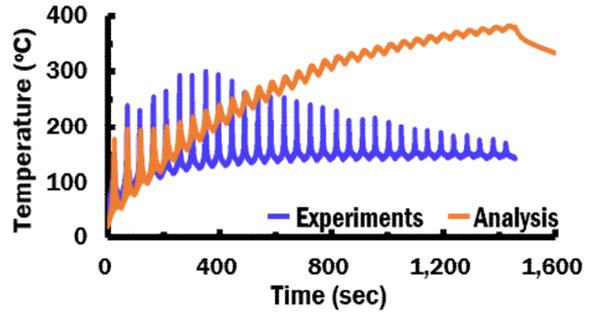
(a) Point 1



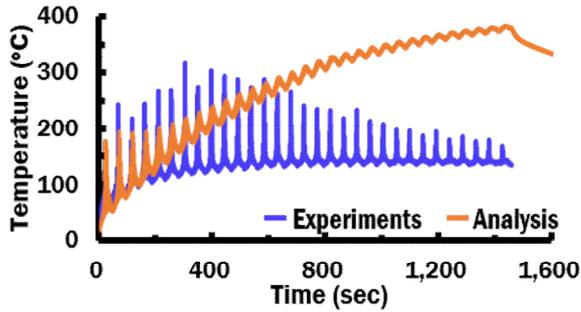
(b) Point 2



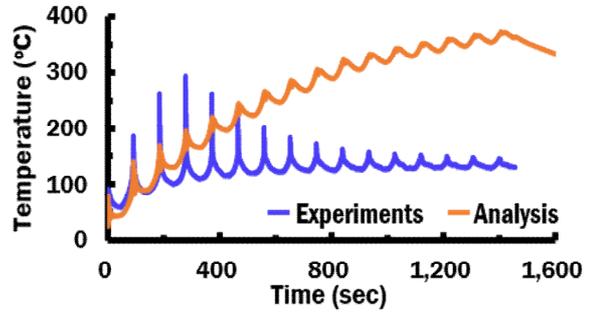
(c) Point 3



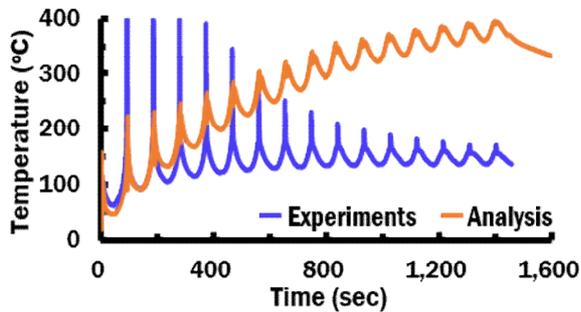
(d) Point 4



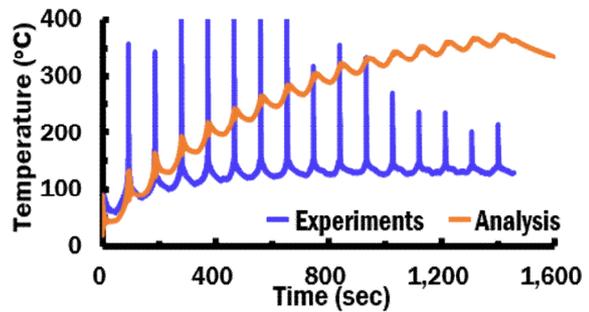
(e) Point 5



(f) Point 6



(g) Point 7



(h) Point 8

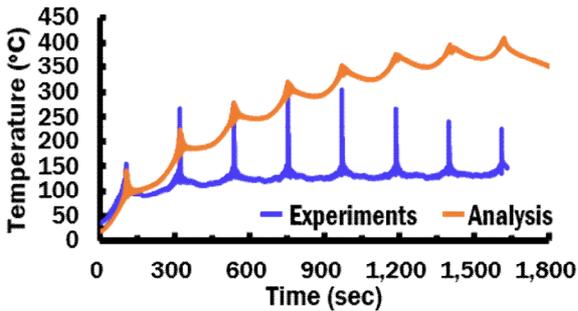
Fig. 45 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5)

Fig. 45 는 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 유한요소 해석을 통한 열 이력과 열전대 측정을 통한 열 이력 결과를 비교한 결과이다. 앞선 10 mm × 10 mm × 17 Layer 모델의 열 이력 비교 결과와 마찬가지로 실제 도출된 열 이력에서 약 200°C 이상의 값들은 적층이 진행될 때 적층 영역의 끝부분에서 레이저의 포인트가 적층 영역을 벗어나 기저부를 가열해서 도출된 열 이력이므로 유한요소 해석에서는 적용되지 않기 때문에 이를 배제 후 비교를 진행하였다. 도출된 두 열 이력을 비교한 결과 적층 시간에 따른 온도 상승 및 감소하는 이력은 일치하지만, 각 지점에서의 온도 격차가

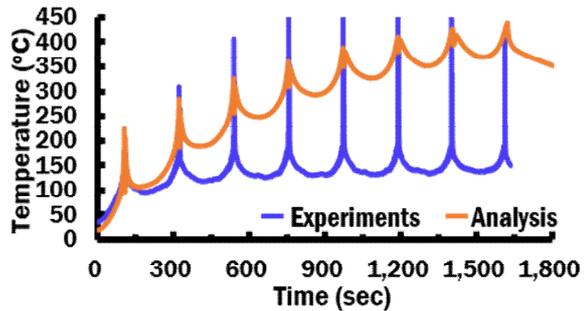
발생한다. 적층 진행 중 초기구간인 200 초까지는 측정값 및 해석 값의 온도 격차가 거의 나타나지 않지만 200 초 이후로 온도 격차가 점점 증가하여 적층 종료지점에서는 매우 큰 온도 격차가 도출된다. 이러한 온도 격차의 발생 이유는 유한요소 해석에서는 모델의 Node 를 통해 고정 조건을 부여하지만, 실제 적층 과정 중 시편을 Clamp 를 사용해 고정 경계조건을 준 후에 적층을 진행한다. 이때 시편을 고정하는 Clamp 는 단열 소재가 아닌 일반 소재의 금속이기 때문에 적층이 진행되는 동안 Clamp로 열전달 현상이 일어나게 된다. 이러한 현상은 단기간 적층에는 크게 영향을 주지 않기 때문에 적층 초기구간인 200초까지는 측정값 및 해석 값의 온도 격차가 크지 않지만, 현재 진행한 대체적 적층과 같이 오랜 시간 적층이 이루어지는 경우 적층을 통해 기저부로 전달되는 열을 지속적으로 Clamp 및 주변에 빼앗기게 되고 기저부의 온도는 일정 온도 이상으로 상승하지 못하게 된다. 유한요소 해석에서는 이러한 Heat sink 가 적용되지 않기 때문에 기저부의 온도가 적층이 진행됨에 따라 점진적으로 증가하게 되고 결과적으로 측정값과 해석 값의 온도 격차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

나. 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델

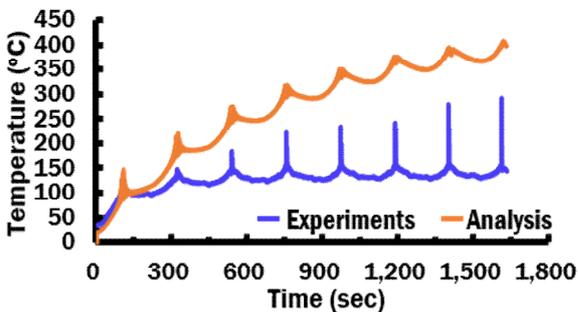
Alt Type 5  Odd-numbered layer → Even-numbered layer → Start : ○ End : □



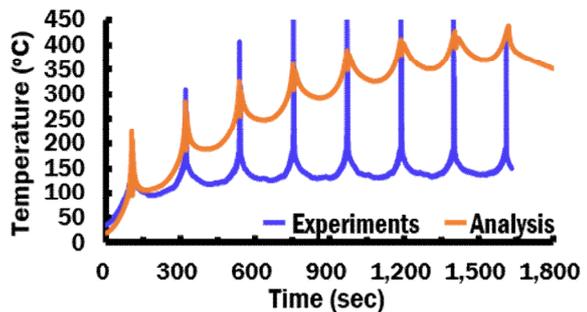
(a) Point 1



(b) Point 2



(c) Point 3



(d) Point 4

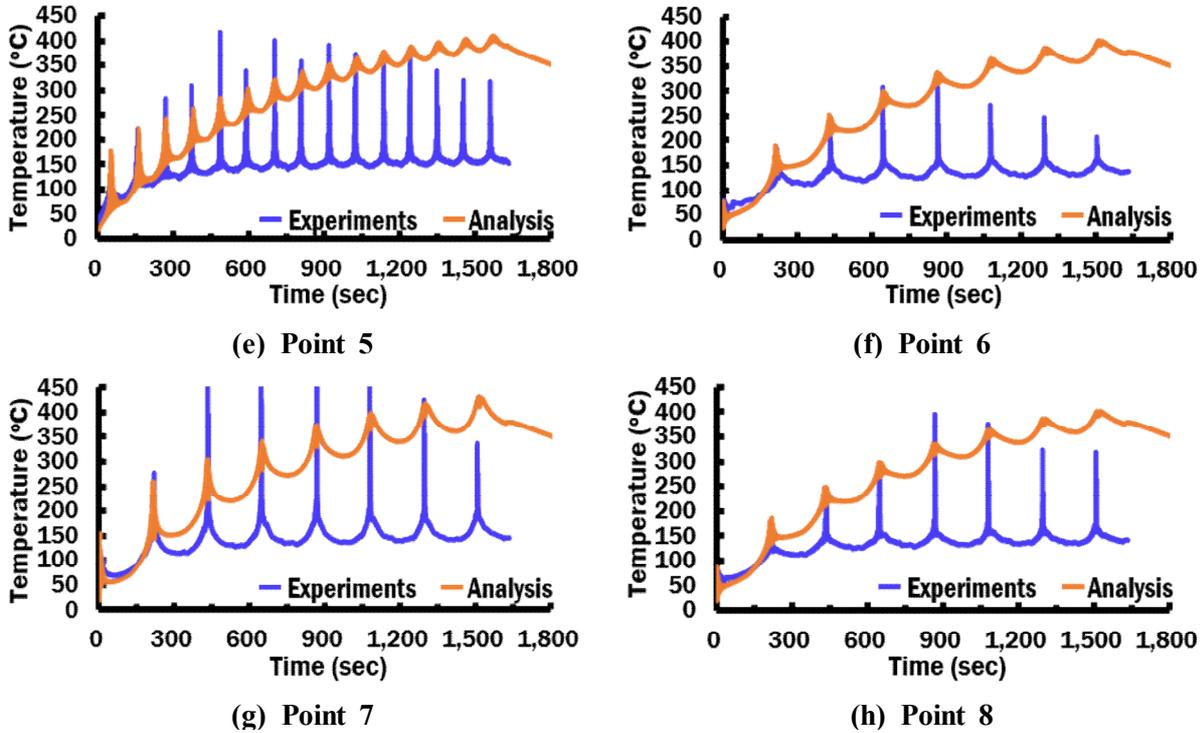


Fig. 46 Comparison of thermal history for experimental and those of FE analyses (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5)

Fig. 46 은 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델의 유한요소 해석을 통한 열 이력과 열전대 측정을 통한 열 이력 결과를 비교한 결과이다. 앞선 10 mm × 10 mm × 17 Layer 및 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 열 이력 비교 결과와 마찬가지로 실제 측정을 통해 도출된 열 이력에서 약 200°C 이상의 값이 나타난다. 이러한 온도는 적층이 진행될 때 적층 영역의 끝부분에서 레이저의 포인트가 적층 영역을 벗어나 기저부를 직접 가열해서 온도가 급격히 상승한 열 이력이므로 유한요소 해석에서는 적용되지 않기 때문에 이를 배제 후 비교를 진행하였다. 도출된 두 열 이력을 비교한 결과 이전의 결과들과 동일하게 적층 시간에 따른 온도 상승 및 감소하는 이력은 일치하지만, 각 지점에서의 온도 격차가 발생한다. 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델에서도 적층 진행 중 초기구간인 200 초까지는 측정값 및 해석 값의 온도 격차가 거의 나타나지 않지만, 200 초 이후로 온도 격차가 점점 증가하여 적층 종료지점에서는 매우 큰 온도 격차가 도출된다. 이러한 온도 격차의 발생 이유는 앞서 언급한 것과 같이 유

한요소 해석에서는 모델의 Node 를 통해 고정 조건을 부여하지만, 실제 적층 과정 중 시편을 Clamp 를 사용해 고정 경계조건을 준 후에 적층을 진행한다. 이때 시편을 고정하는 Clamp 는 단열 소재가 아닌 일반 소재의 금속이기 때문에 적층이 진행되는 동안 Clamp 로 열전달 현상이 일어나게 된다. 이러한 현상은 단기간 적층에는 크게 영향을 주지 않기 때문에 적층 초기구간인 200 초까지는 측정값 및 해석 값의 온도 격차가 크지 않지만, 현재 진행한 대체적 적층과 같이 오랜 시간 적층이 이루어지는 경우 적층을 통해 기저부로 전달되는 열을 지속적으로 Clamp 및 주변에 빼앗기게 되고 기저부의 온도는 일정 온도 이상으로 상승하지 못하게 된다. 유한요소 해석에서는 이러한 Heat sink 가 적용되지 않기 때문에 기저부의 온도가 적층이 진행됨에 따라 점진적으로 증가하게 되고 결과적으로 측정값과 해석 값의 온도 격차가 나타나는 것을 알 수 있다. 앞서 10 mm × 10 mm × 17 Layer, 20 mm × 20 mm × 31 Layer 및 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델에서 도출된 측정값과 해석 값의 온도 격차는 두 가지 방법으로 해결이 가능할 것으로 사료 된다. 첫 번째로 실제 적층 시 Clamp 기구의 소재를 단열재를 사용해 기저부의 열 손실을 막는 방법이다. 두 번째로 유한요소 해석 진행 시 Heat Sink 설정을 통하여 기저부에 실제 공정 중 발생하는 열 손실과 같이 지속적인 열 손실이 일어나도록 설정하는 방법이다. 향후 연구에서는 앞서 언급한 두 가지 방법을 통해 대체적 적층 시 발생하는 열 이력과 유한요소 해석을 통해 도출된 열 이력의 차이를 줄여 본 해석의 타당성을 높일 계획이다.

제 3 절 열응력 해석 결과 및 분석

1. 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델 열응력 해석 결과 및 분석

대체적 적층 모델 중 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 열응력 특성을 분석하기 위하여 유한요소 해석을 진행하였다. 해석의 결과는 fig. 47 과 같으며, (a) 유효응력 (Effective stress) 및 (b) 주응력 (1st principal stress) 분포를 기준으로 도출하였다.

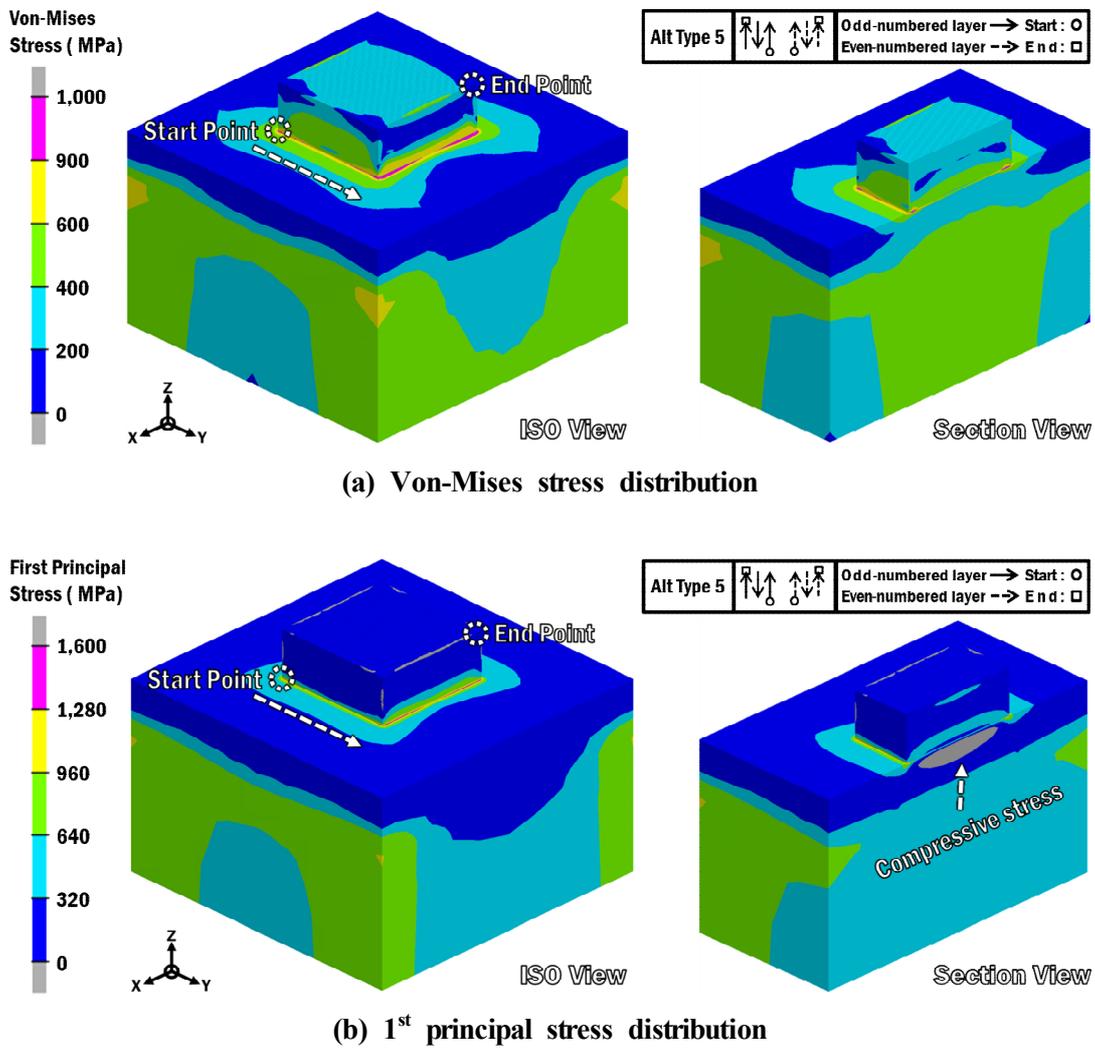


Fig. 47 Distribution of residual stresses (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5)

유효 응력 및 주응력 분포 도출결과 다층 적층 모델의 응력분포결과인 Fig. 19 및 20 과는 다르게 유효 응력 및 주응력의 발생 범위가 적층부와 기저부의 경계면 영역에서 기저부 전체로 증가한 것을 볼 수 있으며, 기저부 내부에 발생하는 압축응력의 범위는 감소한 것을 알 수 있다. 이렇게 잔류응력의 분포가 기저부 전체로 넓어졌지만, 적층부와 기저부의 경계면에서 높은값의 응력분포를 갖는 것은 다층 적층 모델과 동일하게 도출되었다. 다층 적층 모델의 해석에서는 최대 유효 및 주응력이 기저부 상면에서 깊이 방향으로 0.1 mm 구간에서 발생했지만, 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 해석에서는 최대 유효 및 주응력이 기저부 상면 즉 정확히 적층부와 기저부의 사이에서 최대 응력이 도출되었고, Fig. 48 과 같이 도출된 응력분포와 최대 응력을 기준으로 비교 분석하였다.

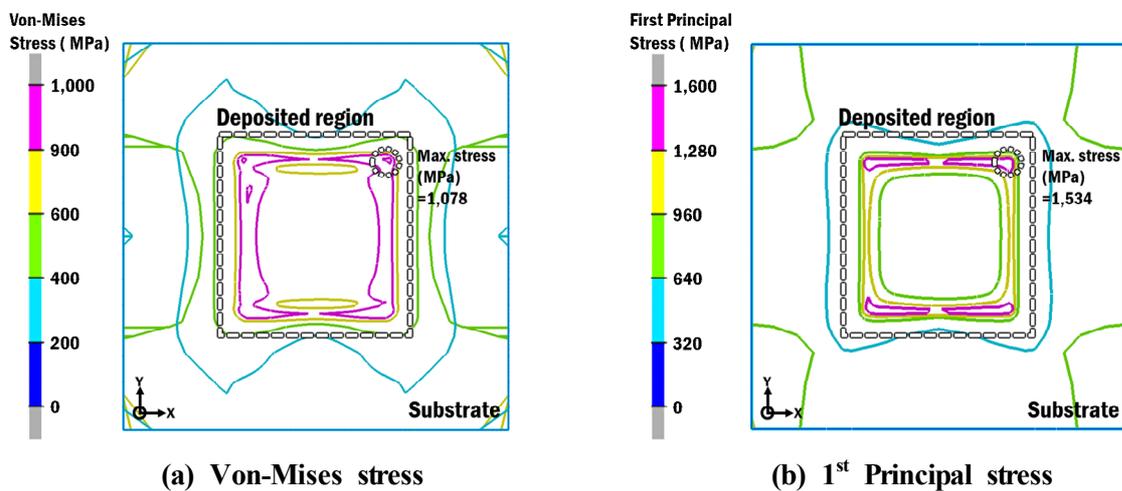
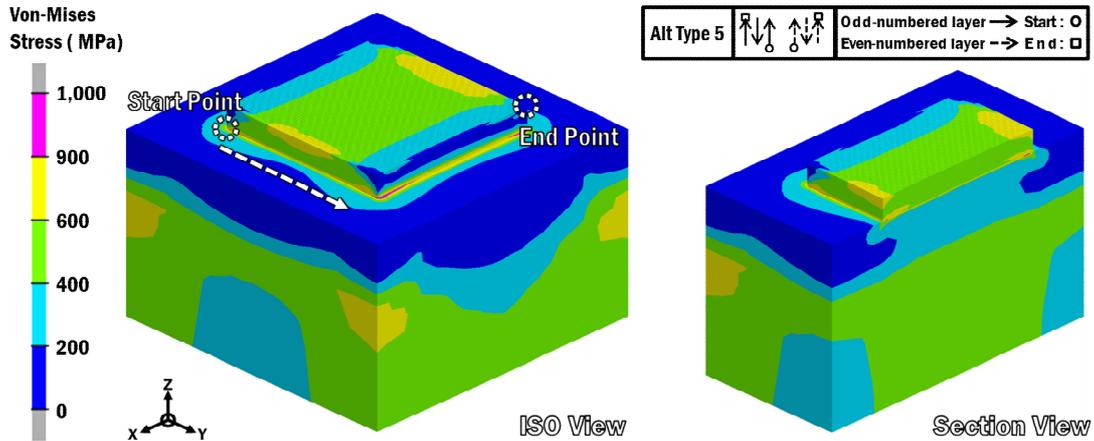


Fig. 48 Residual stress distributions of maximum stress region (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5)

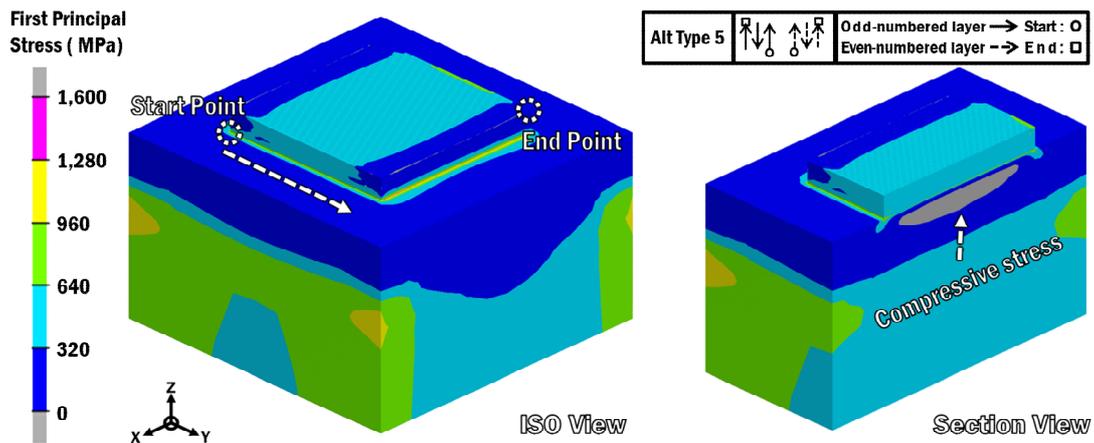
20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 유효 응력 및 주응력의 분포는 적층부의 가장자리 영역에서 높은 분포를 보인다. 각각의 최대 응력 값은 유효 응력은 1,078 MPa, 주응력은 1,534 MPa 로 나타났으며, 최대 응력 값의 위치는 다층 적층 모델의 응력분포 도출결과와 동일 하게 첫 번째 적층 Path 가 끝나는 지점에서 최대 응력 값이 도출된다. 또한, 다층 적층 모델의 유효 응력분포와는 다르게 900 MPa 이상의 분포가 대폭 감소하였다. 이러한 현상은 다층 적층에 비해 상대적으로 적층 시간이 긴 대체적 적층으로 인해 지속적으로 기저부에 열이 주입되어 기저부의 온도를 상승시키고, 이러한 온도 상승으로 잔류응력이 감소한 것으로 사료 된다.

2. 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델 열응력 해석 결과 및 분석

대체적 적층 유한요소 해석 중 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델의 열응력 특성을 분석하기 위하여 열응력 해석을 진행하였고, 해석의 결과는 Fig. 49 과 같으며, (a) 유효 응력 (Effective stress) 및 (b) 주응력 (1st principal stress) 분포를 기준으로 도출하였다.



(a) Von-Mises stress distribution



(b) 1st principal stress distribution

Fig. 49 Distribution of residual stresses (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5)

유효 응력 및 주응력 분포 도출결과 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 응력

분포결과인 Fig. 47 과 동일하게 유효 응력 및 주응력의 발생 범위가 적층부와 기저부의 경계면 영역 및 기저부 전체인 것을 알 수 있으며, 기저부 내부의 압축응력의 범위는 적층 면적에 따라 증가한 것을 알 수 있다. 다층 적층 모델 및 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 응력분포와 같이 적층부와 기저부의 경계면에서 높은값의 응력 분포를 갖는다. 이러한 결과를 통해 적층 체적의 증가에 따라 잔류응력의 발생 범위가 증가하지만, 가장 높은 잔류응력은 적층 경계부에서 도출되는 것을 알 수 있다. 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 최대 응력 도출 위치와 동일하게 30 mm × 30 mm × 15 Layer 모델의 해석에서도 최대 유효 및 주응력이 기저부 상면의 적층부와 기저부의 사이에서 최대 응력이 도출되어, Fig. 50 과 같이 도출된 응력분포와 최대 응력을 기준으로 비교 분석하였다.

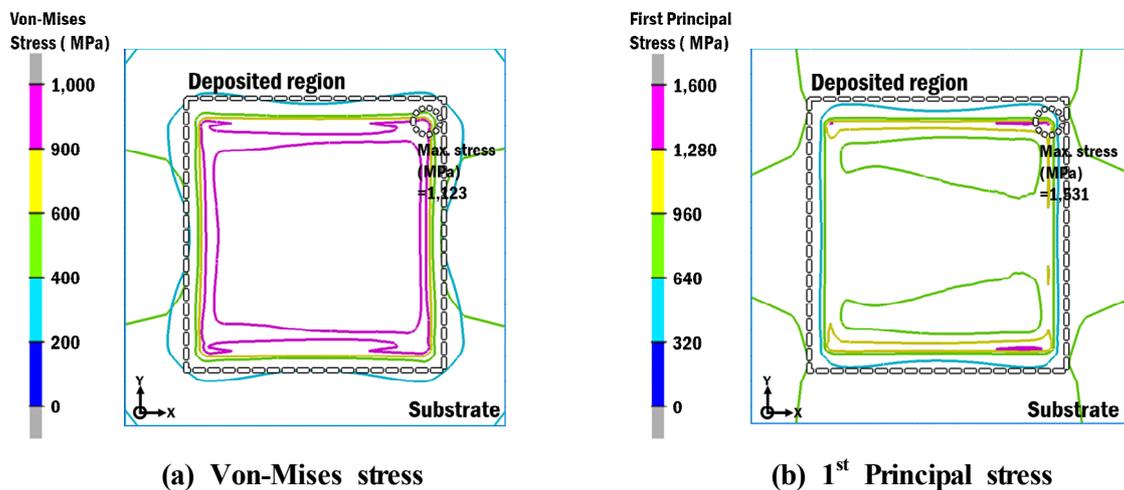


Fig. 50 Residual stress distributions of maximum stress region (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5)

30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델의 유효 응력 및 주응력의 분포는 다층 적층 모델 및 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 응력분포와 동일하게 적층부의 가장자리 영역에서 높은 분포를 보인다. 각각의 최대 응력 값은 유효 응력은 1,123 MPa, 주응력은 1,531 MPa 로 나타났으며, 최대 응력 값의 위치 또한 다층 적층 모델 및 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델의 응력분포와 동일하게 첫 번째 적층 Path가 끝나는 지점에서 최대 응력 값이 도출된다. 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델에서도 다층 적층 모델의 유효 응력분포와는 다르게 900 MPa 이상의 분포가 대폭 감소하였

다. 이러한 현상은 다층 적층에 비해서 상대적으로 적층 시간이 긴 대체적 적층으로 인해 지속적으로 기저부에 열이 주입되어 기저부의 온도를 상승시키고, 이러한 온도 상승으로 잔류응력이 감소한 것으로 사료 된다. 적층 경계부에 나타나는 잔류응력 분포를 정리해보면, 단층 적층 모델의 적층 경계부의 응력분포에서는 900 MPa 이상의 잔류응력 분포가 적게 나타났지만, 저층 적층 모델에서는 증가하였다. 이후의 대체적 적층 모델에서는 900 MPa 이상의 잔류응력 분포가 대폭 감소하였다. 이러한 결과로 다층 적층 시 적층 경계부의 잔류응력은 증가하지만, 일정 체적 이상에서는 감소해 일정한 응력분포를 보일 것으로 사료 된다.

3. 적층 후 냉각 진행 시 고정 경계조건에 따른 열응력 해석 결과 및 비교 분석

냉각과정 중 제품에는 열응력으로 인한 잔류응력 발생 및 변형이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력과 변형은 고정 경계조건 유무에 따라 다른 양상의 가지게 된다. 현재 적층실험을 진행한 다층 적층 모델과 대체적 적층 모델은 유한요소 해석에서는 냉각 시 고정 경계조건 상태를 유지하며 냉각을 진행했지만, 실제 공정에서는 적층 종료 후 냉각과정 진행 시 고정 경계조건을 제거한 후 냉각을 진행하였다. 이러한 두 가지 조건의 냉각과정을 비교하기 위해 냉각 시 고정 경계조건 유무에 따른 유한요소 해석을 진행하였다.

가. 다층 적층 모델 열응력 해석 결과 및 비교 분석

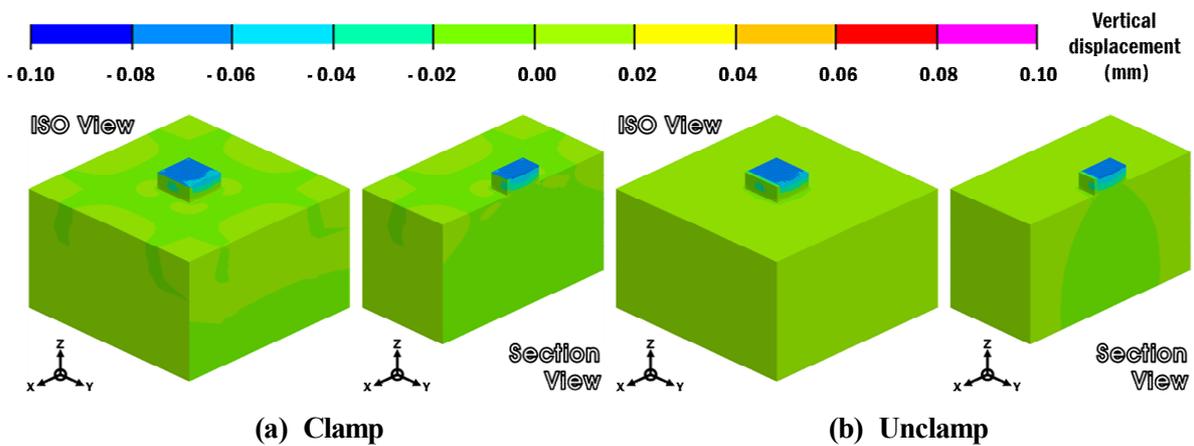


Fig. 51 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2)

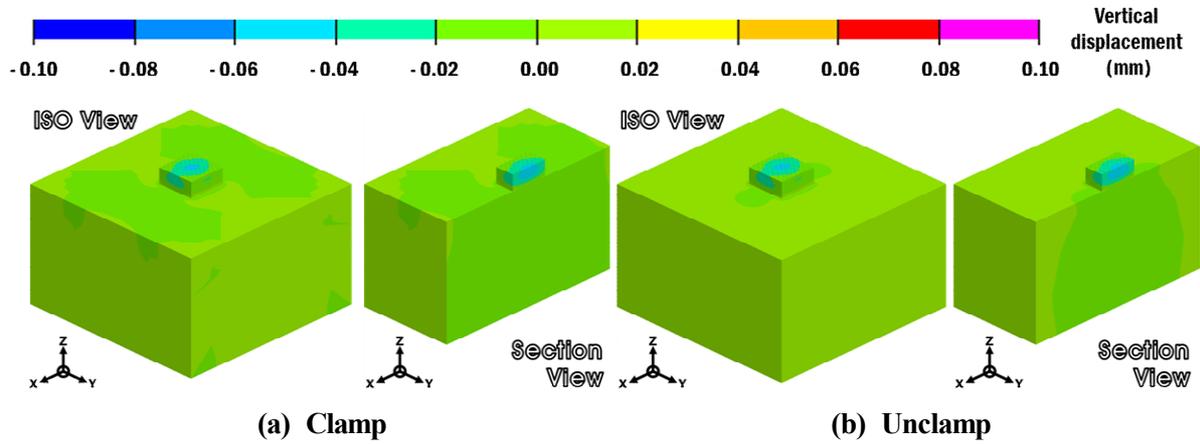


Fig. 52 (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5)

실제 적층 완료된 후의 다층 적층 시편은 제품 하단에 미세하게 볼록한 형상이 나타난다. 이러한 변형을 파악하기 위해 고정 경계조건 유무에 따른 Z 축 변위를 다층 적층 모델에서 적층 경로에 따라 각각 Fig. 51 및 52 와같이 도출하였다. 다층 적층 시편의 Clamp 유무에 따른 변위 도출결과 Alternative direction type 2 및 5 모두 고정 경계조건을 가지는 (a) 에서는 기저부 상단 및 기저부 내부에서 최소 - 0.02 mm 의 변위를 가지며, 적층 모델 하단 전체에 - 0.02 mm 의 변위가 발생한다. 고정 경계조건을 제거한 (b) 에서는 Alternative direction type 2 및 5 모두 기저부 상단 및 외부에 변위가 거의 발생하지 않고 기저부 내부에 - 0.02 mm 의 변위가 발생하며, (a) 의 변위 분포와는 다르게 기저부 중심으로 집중되는 변위 분포를 보인다. 이러한 결과로 인해 실제 다층 적층 시편의 제품 하단에 볼록한 현상이 발생하는 것으로 사료 된다.

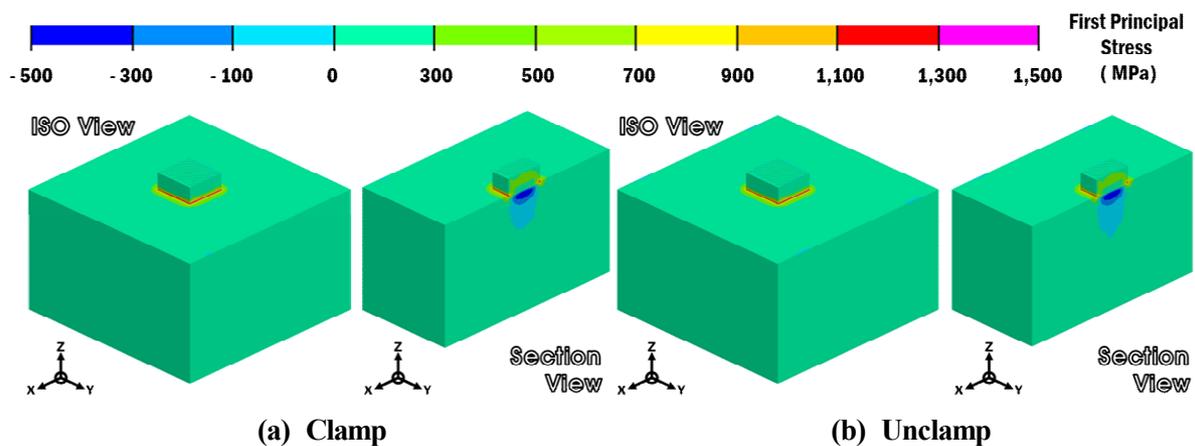


Fig. 53 Distributions of 1st Principal stress (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 2)

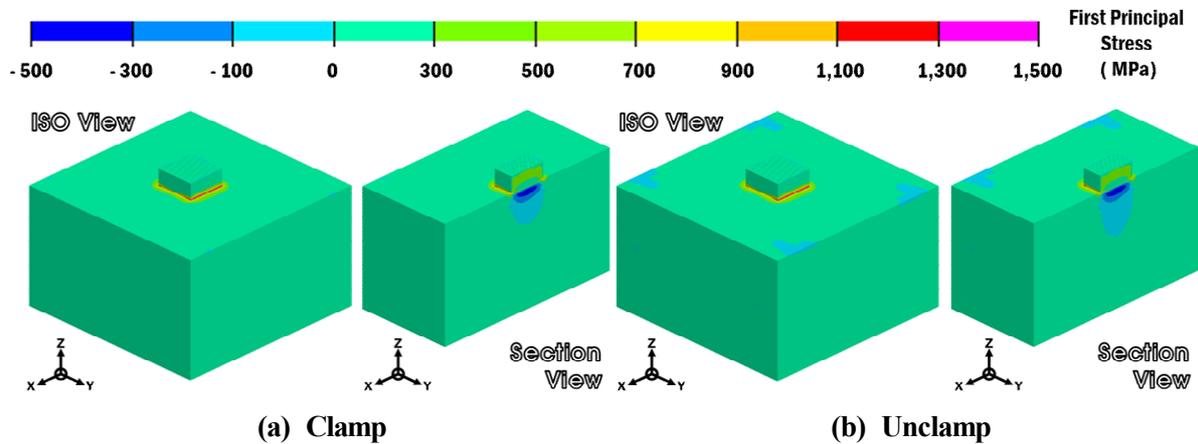


Fig. 54 Distributions of 1st Principal stress (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5)

Fig. 53 및 54 는 적층 공정 후 냉각 진행 시 고정 경계조건의 유무에 따른 주응력 분포를 비교한 결과이다. Alternative direction type 2 및 5 모두 고정 경계조건을 가지는 (a) 에서는 기저부 상면, 하단 및 외부에 주응력 분포가 거의 나타나지 않는다. 적층 경계부에서 높은 주응력 분포를 보이며, 바로 밑의 기저부에서 최저 압축응력이 발생하며 각각 - 515.2 MPa 및 - 465.3 MPa 의 압축응력 값을 가진다. 고정 경계조건을 제거한 (b) 에서는 Alternative direction type 2 및 5 모두 기저부 상면의 국소부위에 압축응력이 발생하며 적층 경계부에서 높은 주응력 분포를 보인다. 적층 경계부 하단에서 동일하게 최저 압축응력이 발생하며, 고정 경계조건을 가지는 해석모델 대비 압축응력의 분포가 기저부 하단으로 더 넓게 발생한다. 이와 같은 결과를 통해 고정 경계조건 없이 냉각과정 진행 시 기저부 하단으로 집중되는 변위로 인해 기저부 내부의 적층 경계면 하단의 압축응력 분포를 증가시키는 것으로 사료 된다.

나. 대체적 적층 모델 열응력 해석 결과 및 비교 분석

앞선 다층 적층 모델의 경우 실제 적층 완료된 후의 다층 적층 시편은 제품 하단에 미세하게 볼록한 형상이 나타났지만, 대체적 적층 모델인 20 mm × 20 mm × 31 Layer 및 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델에서는 제품의 하단에서 다층 적층 시편과 같은 변형이 발견되지 않았다. 이러한 변형을 파악하기 위해 고정 경계조건 유무에 따른 Z 축 변위를 대체적 적층 모델에서 각각 Fig. 55 및 56 과같이 도출하였다.

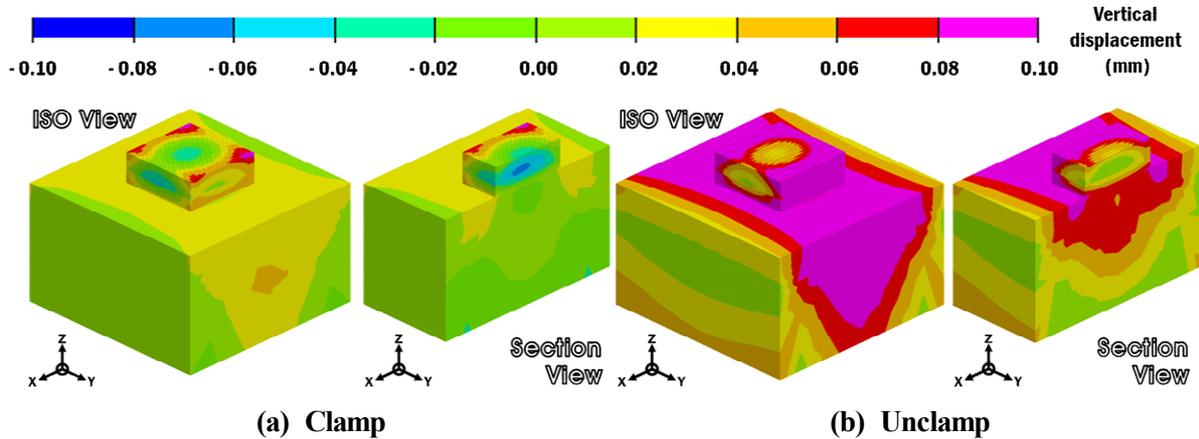


Fig. 55 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5)

20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델에서 고정 경계조건을 가지는 (a) 변위 분포는 제품의 상면 및 양쪽 X-Z 면에서 제품의 상부 방향으로 최대 0.09 mm의 변위 값이 발생하며, 제품 하단부에 최소 변위 값인 -0.07 mm의 변위 값이 도출된다. 이러한 변위 분포는 제품 하단의 변형이 발생하지 않는 실제 제품의 형상과는 다른 결과를 보인다. 고정 경계조건을 제거한 (b) 변위 분포는 앞서 고정 경계조건을 가지는 (a)와 유사하게 제품의 상부 방향으로 변위가 발생하지만 (a)의 경우보다 넓은 범위에서 변위가 발생하며, 최대 0.11 mm의 변위 값이 도출된다. 제품의 하단부에는 (a)와는 다르게 제품 하단부 방향의 변위가 발생하지 않는다.

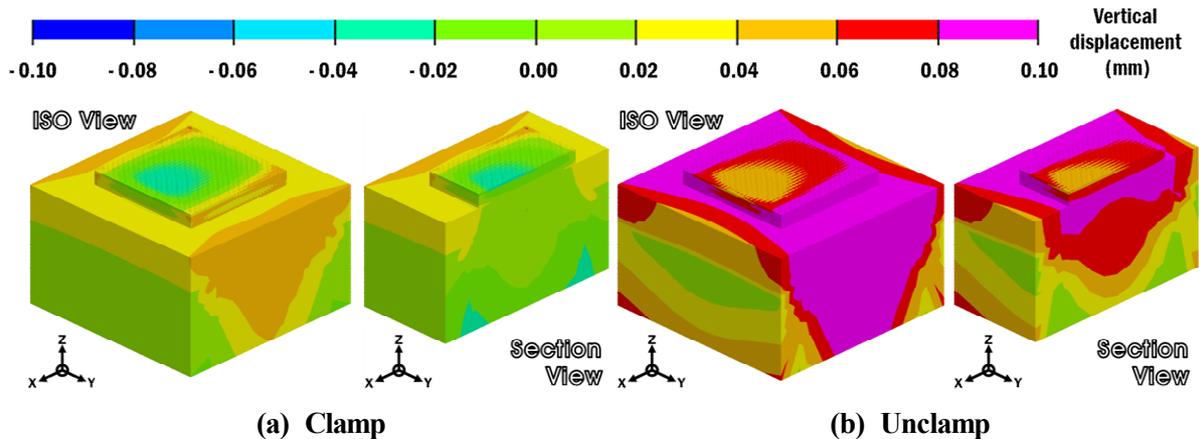


Fig. 56 Distributions of vertical displacements (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5)

30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델의 변위 분포는 앞서 20 mm × 20 mm × 31 Layer 적층 모델과 동일하게 고정 경계조건을 가지는 (a)에서는 제품의 하단에 최소 변위 값인 -0.04 mm의 변위 값이 도출되어 실제 제품의 형상과는 다른 결과를 보인다.

다. 고정 경계조건을 제거한 (b) 에서는 제품 상면 방향의 변위 값이 증가하였으며, 제품 하단부 방향의 변위가 발생하지 않는다. 앞선 두가지 대체적 적층 모델의 결과를 통해 실제 공정과 같이 고정 경계조건을 제거 후 냉각과정을 진행할 경우 실제 제품의 변형과 동일한 변형이 발생함을 알 수 있었다.

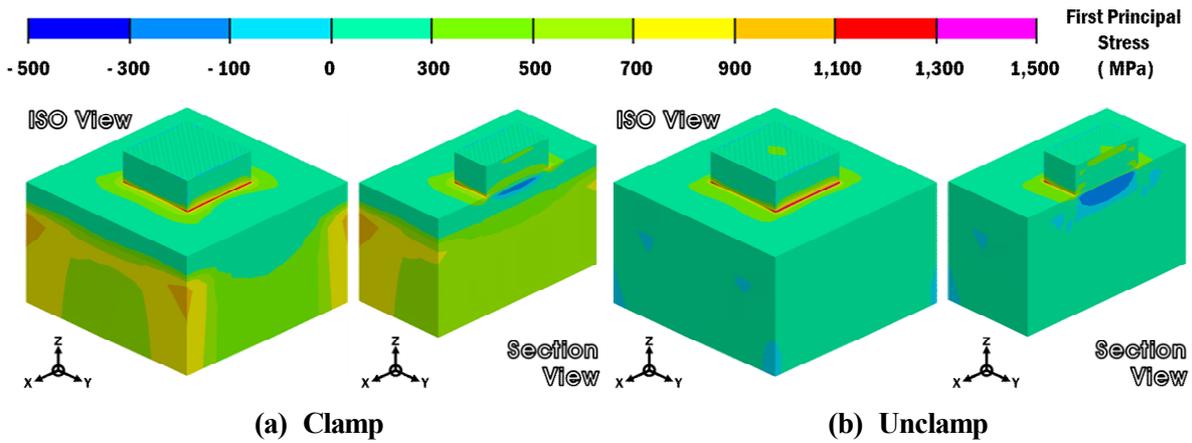


Fig. 57 Distributions of 1st Principal stress (Deposition areas = 20 mm × 20 mm and number of layers = 31 layer and Alternative direction type 5)

Fig. 57 및 58 은 적층 공정 후 냉각 진행 시 고정 경계조건 유무에 따른 주응력 분포를 비교한 결과이다. 20 mm × 20 mm × 31 Layer 및 30 mm × 30 mm × 15 Layer 적층 모델 모두 고정 경계조건을 가지는 (a) 에서는 적층 경계부 및 기저부 전체에 주응력 분포가 발생하지만, 고정 경계조건을 제거한 (b) 에서는 기저부 영역에서는 주응력 분포가 거의 나타나지 않는다. 그렇지만 적층 경계부 하단에서 최저 압축응력이 발생하며, 고정 경계조건을 가지는 해석모델 대비 압축응력의 분포가 기저부 하단으로 더 넓게 발생한다.

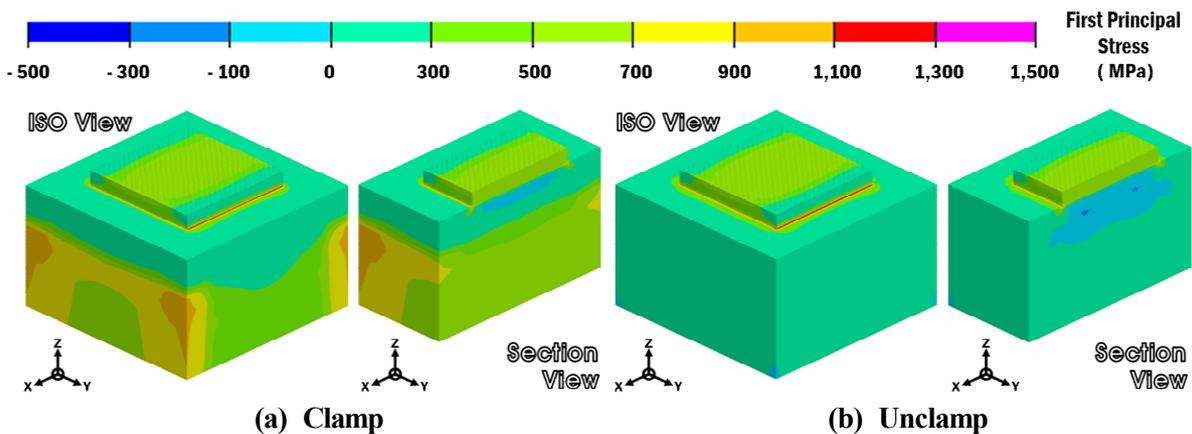


Fig. 58 Distributions of 1st Principal stress (Deposition areas = 30 mm × 30 mm and number of layers = 15 layer and Alternative direction type 5)

이와 같은 결과를 통해 대체적 적층 모델에서 고정 경계조건 없이 냉각과정 진행 시 기저부 영역의 주응력 분포는 감소하지만, 기저부 내부의 적층 경계면 하단에서 발생하는 압축응력 분포를 증가하기 때문에 제품의 균열 및 변형에 더욱 취약할 것으로 사료된다.

제 4 절 다층 적층 시편의 기저부 예열온도에 따른 열응력 해석

1. 기저부 예열온도별 열응력 해석 결과 및 비교 분석

유한요소 해석을 통해 예열 기법이 적층 모델의 잔류응력 분포에 미치는 영향과 적층 공정 진행 시 적용될 적정 예열온도를 도출하고자 한다. 예열을 적용할 모델은 적정 적층 경로로 선정된 Alt-Type 5 적층 경로를 열전대를 통해 측정된 열 이력과 유한요소 해석을 통해 도출한 열 이력의 격차가 가장 적게 나타난 10 mm × 10 mm × 17 Layer 적층 모델을 선정하였다. 유한요소 해석 모델링, 열원 및 경계조건은 fig. 17과 동일하며, 기저부의 시작 온도를 변수로 설정해 각각 20℃, 100℃, 150℃ 및 200℃ 총 4가지의 온도를 선정하여 유한요소 해석을 진행하였다. 해석 결과는 Fig. 59, 60, 61 및 62 와 같다.

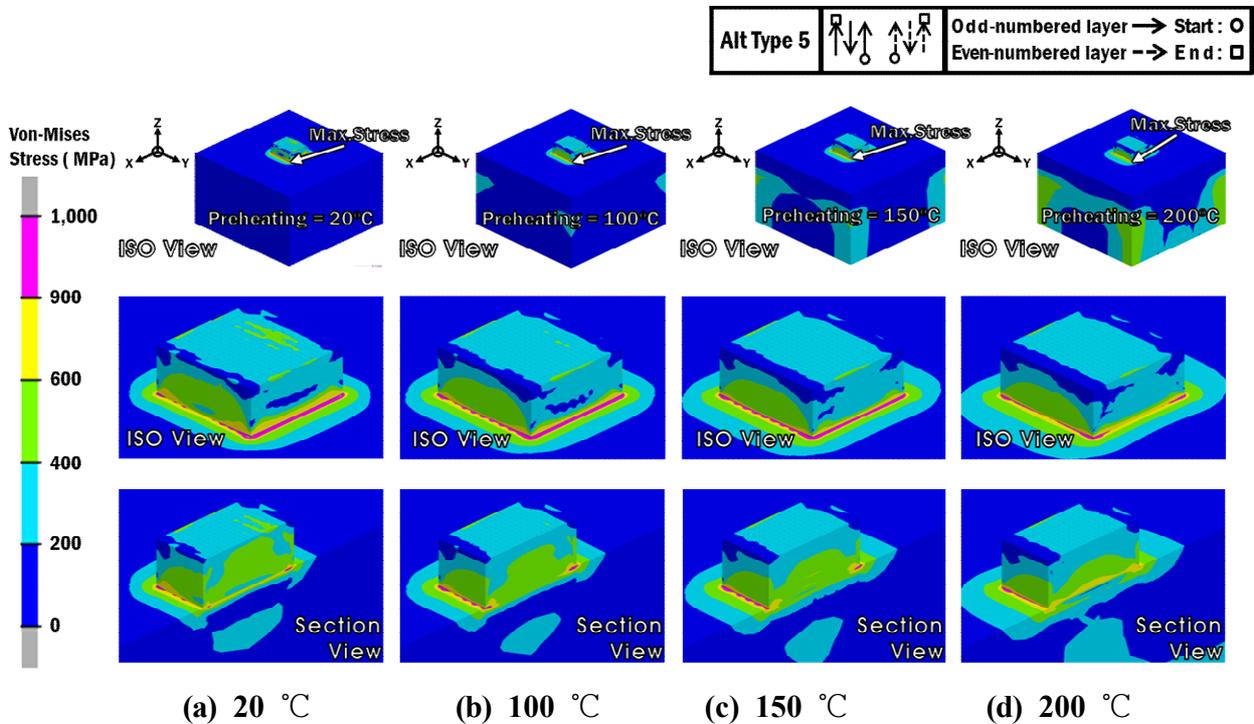


Fig. 59 Influence of different preheating temperatures on Von-mises stress distributions (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5)

Fig. 59 는 예열온도별 유효 응력분포를 비교한 결과이다. 예열온도별 열응력 해석

결과 예열온도가 증가함에 따라 유효 응력의 발생 범위가 기저부 전체로 증가하며, 적층부 내부의 유효 응력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 예열온도가 높은 적층 모델일 수록 전체적인 유효 응력이 감소하지만 적층부와 기저부의 경계면에서 높은 유효 응력 분포가 발생하는 것은 모든 적층 모델에서 동일하게 적용된다. 최대 유효 응력의 최대 값은 모든 예열온도에서 동일하게 시편 상면을 기준으로 깊이 방향 0.1 mm 지점에서 도출되었다. 따라서 예열온도에 따른 유효 응력분포 결과를 비교 분석하기 위해 Fig. 61 과같이 시편 상면 기준 0.1 mm 깊이에서 각각의 유효 응력분포를 도출하였다.

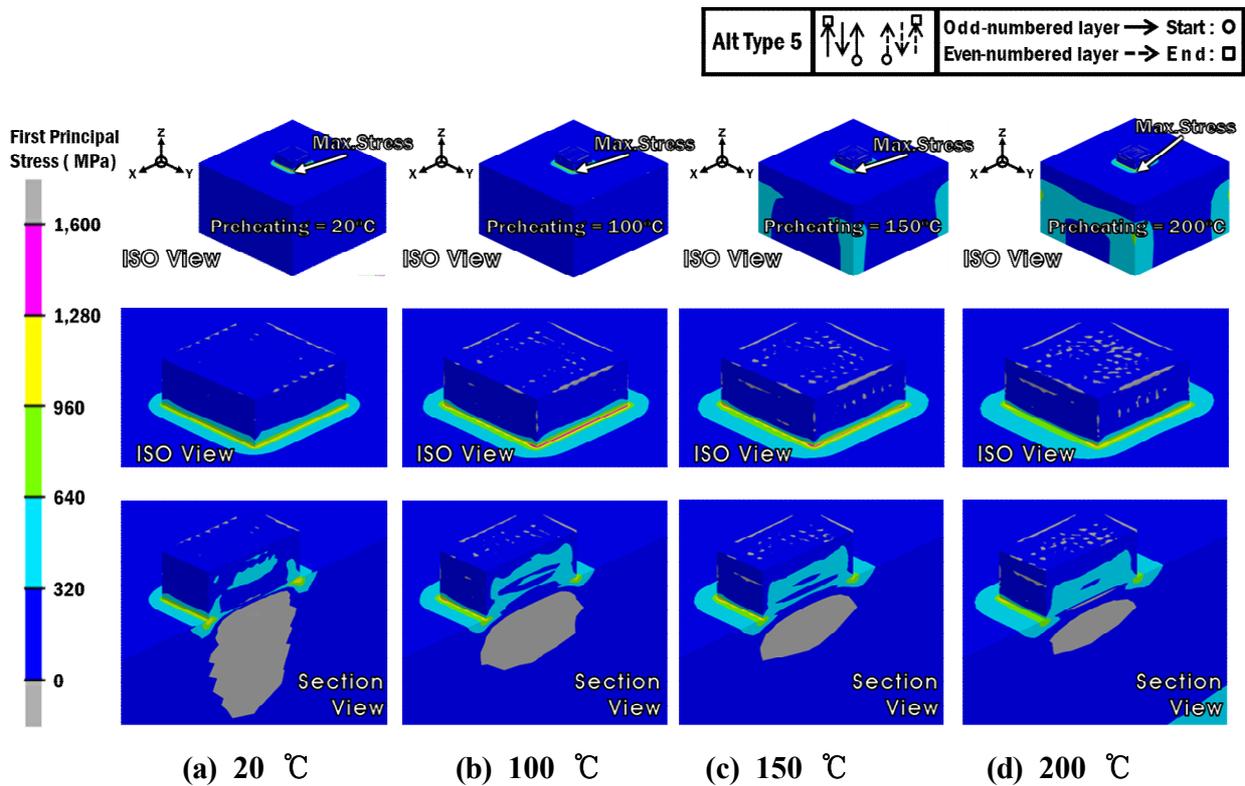


Fig. 60 Influence of different preheating temperatures on 1st principal stress distributions (Deposition areas = 10 mm × 10 mm and number of layers = 17 layer and Alternative direction type 5)

Fig. 60 은 예열온도별 주응력 분포를 비교한 결과이다. 예열온도별 열응력 해석 결과 유효 응력분포와 동일하게 예열온도가 증가함에 따라 주응력의 발생 범위가 적층 경계부 부근에서 기저부 전체로 증가한다. 적층 모델의 Section view 를 보면 예열온도가 증가함에 따라 적층부 내부의 인장 응력이 증가하며, 적층부하단에 위치한 기저부

내부의 압축응력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 적층부와 기저부의 경계면에서 높은 주응력 분포가 발생하는 것 또한 유효 응력분포와 동일하게 나타난다. 이러한 결과를 통해 예열온도의 증가가 유효 응력분포에서는 좋은 효과를 보이지만 주응력 분포에서는 오히려 예열온도의 증가가 적층부 내부의 인장 응력을 증가시키므로, 적정 예열온도를 찾는 것이 중요할 것으로 사료 된다. 최대 주응력의 최대값은 모든 예열온도에서 동일하게 시편 상면을 기준으로 깊이 방향 0.1 mm 지점에서 도출되었다. 따라서 예열온도에 따른 주응력 분포 결과를 비교 분석하기 위해 Fig. 62 과같이 시편 상면 기준 0.1 mm 깊이에서 각각의 주응력 분포를 도출하였다.

가. 예열온도별 Von-Mises Stress 비교 분석

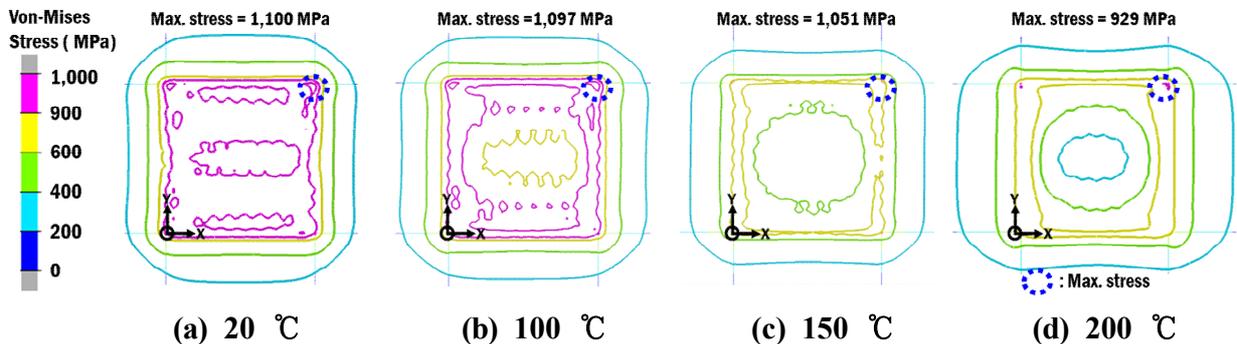


Fig. 61 Von-mises stress distribution of deposited region by preheating temperature

Fig. 61 은 적층 경계부에서의 예열온도별 유효 응력분포를 도출한 결과이다. 적층 경계부의 유효 응력분포는 예열온도의 상승에 따라 감소해 예열온도 150°C 부터는 적층 경계부 내부에 900 MPa 이상의 유효 응력분포가 거의 도출되지 않는 것을 볼 수 있다. 적층 경계부에서 최대 유효 응력 값의 위치는 모든 예열온도의 최대 유효 응력 값의 위치가 첫 번째 적층 Path 가 끝나는 지점에서 최대 유효 응력 값이 도출되며, 기저부의 예열온도가 증가할수록 최대 유효 응력 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로 예열온도의 증가는 유효 응력의 감소로 이어지지만, 최대 유효 응력 값의 위치에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 현재까지 예열온도 200°C 에서 유효 응력은 929 MPa 로 가장 낮은 최대 유효 응력 값이 나타나며, 이후 적층의 진행함에 따른 유효 응력분포를 보기 위해 최대 유효 응력 지점에서의 층간 유효 응력분포를 Fig. 63 과 같이 도출하였다.

나. 예열온도별 1st Principal Stress 비교 분석

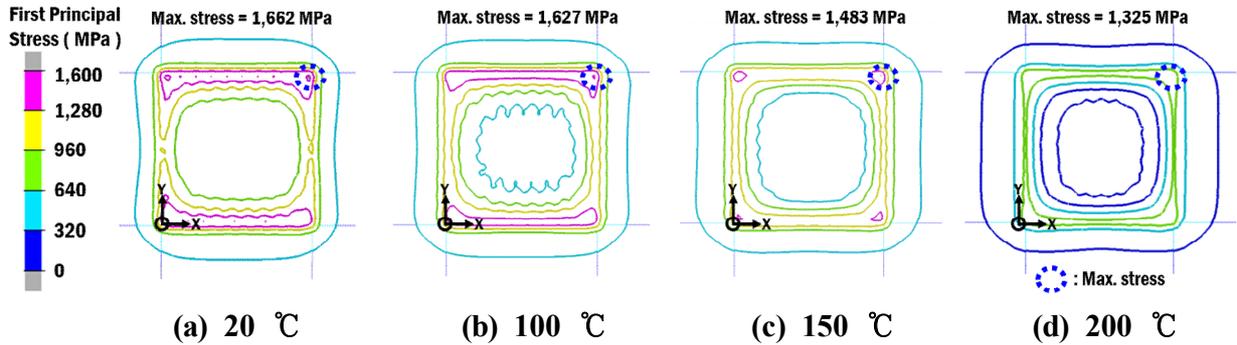


Fig. 62 1st principal stress distribution of deposited region by preheating temperature

Fig. 62 는 적층 경계부에서의 예열온도별 주응력 분포를 도출한 결과이다. 적층 경계부의 주응력 분포는 유효 응력분포 비교 결과와 동일하게 예열온도의 상승에 따라 주응력 값이 감소함을 보인다. 모든 예열온도에서 적층 경계부의 최대 주응력 값의 위치 또한 최대 유효 응력 값과 동일한 위치인 첫 번째 적층 Path 가 끝나는 지점에서 최대 주응력 값이 도출된다. 또한, 기저부의 예열온도가 증가할수록 최대 주응력 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 적층 경계면의 주응력 분포 비교 결과로 예열온도의 증가는 주응력 값의 감소로 이어지지만, 최대 주응력 값의 위치에는 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 현재까지는 예열온도 200 °C 에서 1,325 MPa 로 가장 낮은 최대 주응력 값이 나타난다. 이후 최대 주응력 지점에서의 적층의 진행함에 따른 주응력 분포 변화를 보기 위해 최대 주응력 지점에서의 층간 주응력 분포를 Fig. 64 와 같이 도출하였다.

2. 적정 예열온도 선정

Fig. 63 은 다층 적층 유한요소 해석모델의 예열온도별 최대 유효 응력 지점의 층간 유효 응력분포를 비교한 결과이다. 이전의 적층 경계부에서의 유효 응력분포 비교에서 결과적으로 예열온도 200 °C 에서 최대 유효 응력 값이 가장 낮게 도출 되었다. 앞서 도출된 결과와 동일하게 최대 유효 응력 지점의 층간 유효 응력분포 비교 결과에서도 냉각시간 이후 결과에서 예열온도 200 °C 에서 최대 유효 응력 값이 가장 낮게 도출된다.

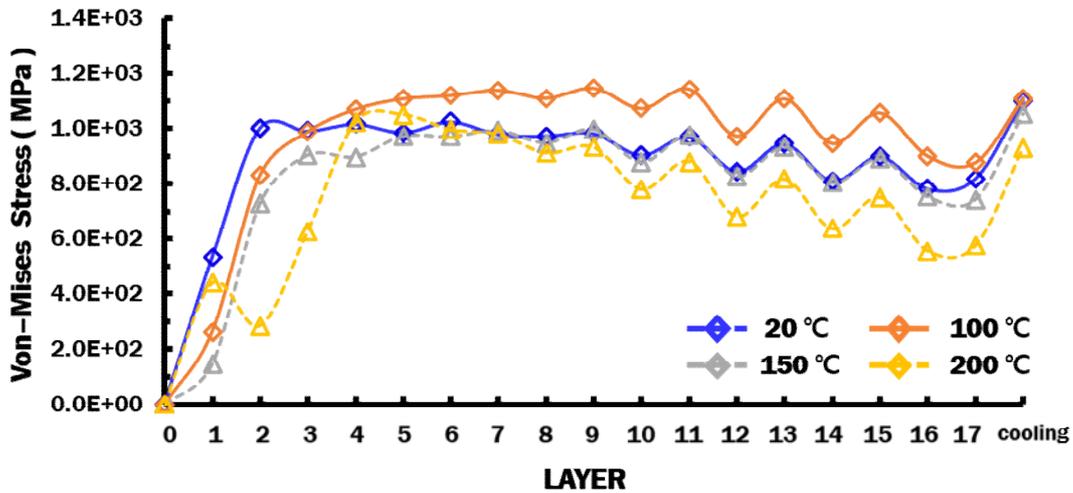


Fig. 63 Comparison of maximum Von-Mises stress at each layer for different preheating temperatures

그러나 적층 종료 후 유효 응력 값이 낮게 도출되지만, 적층 진행 중 4 층 적층 완료 지점에서 유효 응력 값이 급격하게 상승하는 양상을 보인다. 예열온도 200°C 는 적층 종료 이후 유효 응력 값이 낮게 도출되지만 앞서 도출된 것과 같이 유효 응력이 급격히 상승한 지점이 존재한다. 이러한 지점에서 적층부 및 기저부에 균열 또는 변형을 발생시킬 가능성이 존재하기 때문에 예열온도 200°C 는 적정 예열온도로 보기 어렵다.

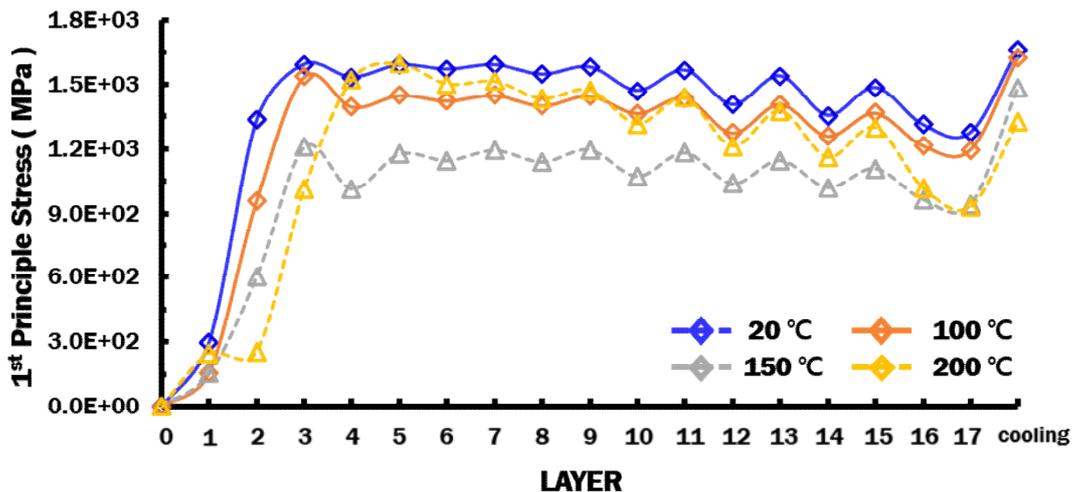


Fig. 64 Comparison of maximum 1st principal stress at each layer for different preheating temperatures

Fig. 64 는 다층 적층 유한요소 해석모델의 예열온도별 최대 주응력 지점의 층간 주응력 분포를 비교한 결과이다. 유효 응력분포와 동일하게 주응력 분포 또한 적층 경계

부에서 주응력 분포 비교 시 예열온도 200℃ 에서 최대 주응력 값이 가장 낮게 도출되었다. 최대 주응력 지점의 층간 주응력 분포 비교 결과에서도 냉각시간 이후 결과에서 예열온도 200℃ 를 적용한 적층 모델에서 최대 주응력 값이 가장 낮게 도출된다. 그러나 앞서 유효 응력분포 비교에서 언급한 것과 같이 적층 종료 후 주응력 값이 낮게 도출되어도 이미 주응력이 급격히 상승한 구간에서 적층부 및 기저부에 균열 또는 변형을 발생시킬 수 있다. 예열온도 200℃ 를 적용한 적층 모델의 경우 유효 응력분포에서와 동일하게 4층 구간에서 급격한 주응력 상승을 보여 예열을 진행하지 않은 예열온도 20℃ 를 적용한 적층 모델의 주응력 값과 비등한 주응력 값을 가진다. 이러한 급격한 유효 응력 및 주응력 값의 분포를 통해 예열온도 200℃ 는 적정 예열온도로 선정하기 어렵다. 그에 비해 예열온도 150℃ 의 층간 유효 응력 및 주응력 분포도출 결과를 보면 적층 진행 중 유효 응력과 주응력 값의 상승 폭이 다른 예열온도에 비해 완만하며, 예열온도 200℃ 를 제외하면 냉각시간 이후 결과에서 가장 낮은 응력 값을 보이기 때문에 150℃ 가 예열온도가 가장 적합한 온도임을 알 수 있다.

제 5 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 DED 공정을 이용하여 Inconel 718 소재를 S45C 기저부 위에 대체적 적층 시 적층 경로 변화에 따른 제품의 잔류응력 특성분석을 수행하기 위하여 열응력 유한요소 해석을 통한 적층 경로 후보 선정 및 적정 적층 경로 선정과 선정된 경로를 적용한 다층 및 대체적 적층과 열전대를 통한 적층 공정 중 열 이력 측정을 수행하였고, 열전달 및 열응력 유한요소 해석을 통해 다층 및 대체적 적층 시 경로 의존 잔류응력 특성에 관한 연구를 수행하였다. 앞서 언급된 과정을 통한 연구결과와 유한요소 해석 관점에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 적층 경로 의존 잔류응력 특성을 분석하기 위하여 몇 가지 기준점을 바탕으로 적층 경로 후보를 선정하였다. 첫 번째 단층 적층 진행 시 단일방향 (Uni-direction)과 교차 방향 (Alternative-direction)의 비교, 두 번째 다층 적층 진행 시 층간 적층 경로가 수직 교차할 때와 평행한 경우의 비교, 세 번째 다층 적층 진행 시 층간 적층 경로의 시작점과 종료지점이 반전된 경우 비교 이렇게 세 가지 기준점을 두고 단일방향 적층 경로 8가지와 교차 방향 적층 경로 8가지 총 16가지의 적층 경로 후보를 선정하였다.

적층 경로 후보 선정 후 적정 적층 경로를 도출하기 위해 10 mm × 10 mm × 2 Layer 의 적층부를 가지는 저층 적층 모델의 해석모델을 생성 후 앞서 세 가지 기준점을 통해 선정한 총 16가지의 적층 경로를 적용하여 열응력 해석을 진행 후 적층 경로가 적층 모델의 유효 응력 및 주응력의 분포에 미치는 영향성을 분석 및 고찰 하였다. 결과적으로 Alternative-direction Type의 응력분포는 적층 경로의 영향을 받지만, 전반적으로 균일한 응력분포를 가짐을 알 수 있었으며, 그에 비해 Uni-direction Type의 응력분포는 전반적으로 불균일한 응력분포를 가짐을 알 수 있었다. 또한, 단층 적층에서 적층 경로가 다를 경우 응력분포가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 다층 적층에서 적층 경로의 방향에 따라 적층부의 유효 응력분포와 도출되는 최대 응력 값의 위치가 달라지며, 적층 경계부의 외곽지점에서 높은 유효 응력분포가 도출됨을 알 수 있었다. 또한 분석 및 고찰의 결과로부터 적정 적층 경로 후보 4가지 Alternative direction type 2, 5 및 Uni direction type 2, 8 과 같은 총 4가지의 적정 적층 경로 후보를 선정하였다.

다층 적층 해석을 통해 선정된 4가지 후보 중 적정 적층 경로를 선정하였다. 다층

적층 해석모델은 적층 경로가 다층 적층 시 응력분포에 미치는 영향성을 분석 및 고찰하기 위한 목적을 가진다. 저층 적층 해석모델과의 비교를 위해 기저부 및 적층부의 너비는 동일하지만 적층 높이를 상승시켜 10 mm × 10 mm × 17 Layer 의 적층부의 규격을 가진 유한요소 해석모델을 생성 후 앞서 선정한 4가지 적층 경로를 적용해 열응력 해석을 진행 후 다층 적층 시 적층 경로가 응력분포에 미치는 영향성을 분석 및 고찰하였다. 다층 적층 진행 시 Alternative direction type 은 적층부에 유효 응력분포가 크게 나타나지 않지만 Uni direction type 은 적층부에 유효 응력분포가 크게 나타남을 알 수 있었다. 다층 적층 진행 시 Alternative direction type 적층부 내부 낮은 인장 응력분포를 보이지만, Uni direction type 은 적층부 및 기저부에 압축응력이 발생해 변형 및 균열에 더 취약할 것으로 사료 되었다. 적층 경계면의 유효 및 주응력 분포 분석 및 고찰을 통해 다층 적층 시에도 저층 적층 응력분포와 동일하게 적층 경로의 방향이 응력의 분포에 영향을 미치며, 최대 응력 값의 위치에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 유효 응력분포 및 주응력 분포결과를 통해 다층 적층 시에도 Alternative-direction type 의 경로가 Uni-direction type 의 경로보다 잔류응력 값이 낮게 나타나는 것을 알 수 있으며, 유효 응력 및 주응력의 최대값 비교와 최대 응력 지점에서의 층간 응력분포의 비교를 통해 Alternative-direction type 5 가 대체적 적층 시 가장 적합한 적층 경로임을 알 수 있었다.

다층 및 대체적 적층실험을 진행하였다. 각각의 적층실험에서는 저층 및 다층 적층의 유한요소 해석의 결과에 따라 선정한 적정 적층 경로인 Alternative-direction type 5 를 적용하였다. 다층 적층에서는 동일 적층 모델에서 적층 경로에 따른 열 이력의 변화를 도출하기 위해 Alternative-direction type 2 를 추가로 적층 경로에 포함하여 다층 적층실험을 진행하였다. 대체적 적층에서는 유사 체적 적층 시 적층 높이 및 면적의 변화에 따른 잔류응력의 특성을 비교하기 위해 각각 20 mm × 20 mm × 31 Layer, 30 mm × 30 mm × 15 Layer 의 체적을 가지는 적층 시편을 제작하였으며, 각각 3,054 mm³ 및 3,271 mm³ 의 체적을 가진다.

다층 및 대체적 적층실험 진행 중 Thermocouple을 이용해 적층 시 발생하는 열 이력을 도출 및 분석하였다. 다층 적층 모델의 열 이력 도출 및 분석 결과를 통해 동일 적층 모델에서 적층 경로에 따라 열 이력이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 대체적 적층 모델의 열 이력 도출 및 분석 결과를 통해 동일한 적층 경로를 이용해 적층 진행 시 체적 변화에 관계없이 유사한 열 이력을 가짐을 알 수 있었다.

다층 및 대체적 모델의 열전달 해석을 통해 도출된 열 이력과 열전대 측정을 통해

도출된 열 이력의 비교 및 분석을 통해 열 전달 해석을 통한 열 이력에서도 적층 경로에 따라 열 이력이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 측정 및 해석을 통한 열 이력 비교 시 적층 시간에 따른 온도 상승 및 감소하는 이력은 일치하지만, 온도 격차 발생하였다. 이러한 온도 격차의 발생 이유는 유한요소 해석에서는 모델의 Node 를 통해 고정 조건을 부여하지만, 실제 적층 과정 중 시편을 Clamp 를 사용해 고정 경계조건을 준 후에 적층을 진행한다. 이때 시편을 고정하는 Clamp 는 단열 소재가 아닌 일반 소재의 금속이기 때문에 적층이 진행되는 동안 Clamp 로 열전달 현상이 일어나게 된다. 유한요소 해석에서는 이러한 Heat sink 가 적용되지 않기 때문에 기저부의 온도가 적층이 진행됨에 따라 점진적으로 증가하게 되고 결과적으로 측정값과 해석 값의 온도 격차가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 단기간 적층에는 크게 영향을 주지 않기 때문에 비교적 짧은 적층 시간을 가지는 다층 적층 모델에서는 온도 격차가 크지 않지만, 오랜 시간 적층이 이루어지는 대체적 적층 모델의 경우 적층을 통해 기저부로 전달되는 열을 지속적으로 Clamp 및 주변에 빼앗기게 되고 기저부의 온도는 일정 온도 이상으로 상승하지 못하게 되고 이러한 차이가 해석을 통한 열 이력과 큰 온도 격차를 발생시킨다. 도출된 측정값과 해석 값의 온도 격차는 두 가지 방법으로 해결이 가능할 것으로 사료 된다. 첫 번째로 실제 적층 시 Clamp 기구의 소재를 단열재를 사용해 기저부의 열 손실을 막는 방법이다. 두 번째로 유한요소 해석 진행 시 Heat Sink 설정을 통하여 기저부에 실제 공정 중 발생하는 열 손실과 같이 지속적인 열 손실이 일어나도록 설정하는 방법이다.

다층 및 대체적 모델의 열응력 해석을 통해 적층 체적이 증가할수록 유효 응력 및 주응력의 발생 범위가 적층부와 기저부 경계면 부근에서 기저부 전체로 확대되는 것을 알 수 있었다. 가장 높은 잔류응력이 발생하는 위치는 적층 체적과 관계없이 적층부와 기저부의 경계면에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 동일 적층 경로를 사용할 때 최대 응력 값의 발생 위치는 적층 체적과 관계없이 모두 일정한 위치에서 발생하는 것을 알 수 있었으며, 20 mm × 20 mm × 31 Layer 및 30 mm × 30 mm × 15 Layer 의 최대 응력 값의 비교 결과 유사 체적 적층 시 적층 높이가 상승할수록 적층 경계면에 발생하는 최대 응력 값이 감소하는 것을 알 수 있었다.

적층 공정 종료 후 냉각 시 고정 경계조건 유무에 따른 열응력 해석을 통해 다층 적층 모델에서는 고정 경계조건 제거 후 냉각 시 변위가 기저부의 중앙으로 집중되는 변위로 인해 기저부 내부의 적층 경계면 하단의 압축응력 분포를 증가시키는 것으로 사료 된다. 대체적 적층 모델에서는 고정 경계조건 제거 후 냉각 시 기저부의 응력분포는 감소

하지만, 적층 경계부의 압축응력이 증가하기 때문에 제품의 변형 및 균열에 더 취약할 것으로 사료된다. 앞선 두가지 결과로 적층 공정 종료 후 냉각 시에는 고정 경계조건을 유지하며 냉각을 진행하는 것이 바람직할 것으로 사료 된다.

다층 적층 시편의 기저부 예열온도에 따른 열응력 해석을 통해 예열온도가 증가함에 따라 유효 및 주응력의 발생 범위가 기저부 전체로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 예열온도의 증가는 유효 응력분포에서는 좋은 효과를 보이지만 주응력 분포에서는 오히려 예열온도의 증가가 적층부 내부의 인장 응력을 증가시키는 결과가 나타나, 적정 예열온도를 찾는 것이 중요할 것으로 사료 되었다. 적층 경계부의 응력분포 비교 및 분석을 통해 예열온도가 증가할수록 적층 경계부의 유효 응력 및 주응력 값이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 최대 응력 값의 도출 위치는 예열온도 변화에도 일정한 위치에서 발생하는 것을 볼 수 있었다. 최대 유효 응력 및 주응력 지점에서의 층간 응력분포에서는 층간 발생하는 응력의 분포 비교 진행하였다. 그 결과로 유효 응력 및 주응력 분포에서 급격한 응력값의 상승을 보이는 예열온도 200℃ 는 적정 예열온도로 선정하기 어렵고, 그에 비해 예열온도 150℃ 의 층간 유효 응력 및 주응력 분포는 적층 진행 중 유효 응력과 주응력 값의 상승 폭이 다른 예열온도에 비해 완만하며, 예열온도 200℃ 를 제외하면 냉각시간 이후 결과에서 가장 낮은 응력 값을 보이기 때문에 예열온도 150℃를 적정 예열온도로 선정하였다.

본 연구를 통해 진행한 DED 공정을 이용한 인코넬 718 대체적 적층 시 경로 의존 잔류응력 특성분석을 바탕으로 다음과 같은 향후 연구가 필요할 것으로 사료 된다.

첫 번째로 적층이 완료된 다층 및 대체적 적층 시편의 파괴 및 비파괴 잔류응력 측정을 통한 잔류응력 특성분석이다. 홀 드릴링 기법을 이용한 잔류응력 측정 및 X 선 회절 기법을 이용한 비파괴 잔류응력 측정을 진행하여 이 두 가지 결과를 유한요소 해석을 통해 도출된 잔류응력과의 비교 및 분석이 되어야 한다.

두 번째로 기저부의 특징 형상에 따른 잔류응력 발생 특성분석이다. 본 연구에서는 기저부 형상을 육면체로 설정하였고 상면의 평탄한 지점에서 다층 및 대체적 적층을 수행해 연구를 진행하였다. 하지만 실제 금형 제작 시에는 기저부 형상이 일정하지 않기 때문에 현재까지 도출된 잔류응력 특성이 적용되지 않을 수 있기 때문에, 이러한 점을 미연에 방지하고자 기저부의 특징 형상에 따라 적층 공정진행 시 잔류응력의 특징 분석이 필요하다.

세 번째로 기저부 특징 형상에 따른 적정 적층 경로개발이다. 현재 평탄한 면에서의 다층 및 대체적 적층 시 적정 경로를 도출했지만, 기저부의 형상이 바뀔 경우 예를

들어 얇은 기저부 형상에서 다층 및 대체적 적층 진행 시 잔류응력 분포의 변화 및 기저부의 변형이 발생할 수 있기 때문에 적층 형상에 적합한 적정 적층 경로 개발이 필요하다.

이 외에도 적층 후 잔류응력 저감을 위한 가공 및 열처리, 잔류응력 저감을 위한 적층 형상 고찰, 열처리와 잔류응력의 상관관계 등의 연구를 통해 적층 시 발생하는 잔류응력 및 변형 등의 문제점을 해결하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료 된다.

REFERENCES

1. Deane, Phyllis (1965). "The First Industrial Revolution" Cambridge University Press
2. A third industrial revolution M Janicke, K Jacob - Long-term governance for social-ecological ..., 2013 - books.google.com
3. 이민화. (2017). 제4차 산업혁명의 선진국 사례와 한국의 대응전략. 선진화 정책시리즈, 14-107.
4. Schwab K, 2016. The Fourth Industrial Revolution. Switzerland:World Economic Forum, 25P38
5. Wohlers, T. T. and Caffrey, T., "Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report," Wohlers Associates, 2017.
6. Wohlers, T. T. and Caffrey, T., "Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report," Wohlers Associates, 2017.
7. Ahn, D. G., "Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review," Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech., Vol. 3, pp. 381-395, 2016.
8. Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N., and Yadollahi, A, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part 1: Transport phenomena, modeling and diagnostics," Additive Manufacturing Technology, Vol. 8, pp. 36-62, 2015
9. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., and Zhang, S., "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering," Comput. Aided. Des., Vol. 69, pp. 65-89, 2015.
10. Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., and Kainuma, Y., "Trends and Research Challenges in Remanufacturing," Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Tech., Vol. 3, No. 1, pp. 129-142, 2016.
11. Ko, H., Moon, S. K., and Hwang, J., "Design for Additive Manufacturing in Customized - 169 - Products," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 16, No. 11, pp. 2369-2375, 2015.

12. Taminger K. M., and Hafley R. A., "Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing. In: NATO/RTOAVT-139 specialists meeting on cost effective manufacture via net shape processing," 200612. Gockel, J., Beuth, J., and Taminger, K., "Integrated
13. Mueller, B., "Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing," *Assembly Automation*, Vol. 32, No. 2, 2012.
14. Balletti, C., Ballarin, M., Guerra, F., "3D printing: State of the art and future perspectives", *Journal of Cultral Heritage*, Vol.26, pp.172-182, 2017.
15. Frketic, J., Dickensa, T., and Ramakrishnan, S., "Automated Manufacturing and Processing of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites: An Additive Review of Contemporary and Modern Techniques for Advanced Materials Manufacturing," *Addit. Manuf.*, Vol. 14, pp. 69, 86, 2017.
16. ASTM F2792-12a, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," 2012.
17. ASTM INTERNATIONAL, "Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies", <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm> (Accessed 1 November 2019)
18. 3D GURU, "Vat Photopolymerization", <http://www.3dguru.co.kr/bbs/newsroom/9988> (Accessed 8 October 2019)
19. Cooke, M. N., Fisher, J. P., Dean, D., Rimnac, C., and Mikos, A. G., "Use of Stereolithography to Manufacture Critical?Sized 3D Biodegradable Scaffolds for Bone in Growth," *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, Vol. 64, No. 2, pp. 65-69, 2003.
20. Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., and Roberson, D. A., "Characterizing the Effect of Additives to ABS on the Mechanical Property Anisotropy of Specimens Fabricated by Material Extrusion 3D Printing," *Addit. Manuf.*, Vol. 6, pp. 16-29, 2015.
21. Dietmar W. et. al., "Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling", *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol.55, Issue2, PP. 203-216, 2001.
22. About Additive Manufacturing-Sheet Lamination, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>, (Accessed 5 November 2019)

23. Cooper, K. G., "Rapid Prototyping Technology," Marcel Dekker., 2001.
24. Leo Greguric, "What Is Material Jetting 3D Printing Simply Explained", <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>, Mar 21 2019, (Accessed 12 October 2019)
25. Xin, X., Meteyer, S., Perry, N., and Zhao, Y. F., "Energy and Material Flow Analysis of Binder-Jetting Additive Manufacturing Processes," *Procedia CIRP*, Vol. 15, pp. 19-25, 2014.
26. R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk, "Aerospace applications of laser additive manufacturing" Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, United States (2017) 351-371
27. Christophe, C., "Selective Laser Melting Process," WO. Patent, No. 2014154901 A1, 2014.
28. Gratton, A. "Comparison of Mechanical, Metallurgical Properties of 17-4PH Stainless Steel between Direct Metal Laser Sintering(DMLS) and Traditional Manufacturing Methods, Proceedings of The National Conference, (2012) 29-31
29. Froes, F. H. and Dutta, B. "The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys," *Adv. Mat. Res.*, Vol. 1019, pp. 19-25, 2014.
30. Thomas Duda, L. Venkat Raghavan, "3D Metal Printing Technology" *IFAC-Papers On Line* 49-29 (2016) 103-110
31. Ahn, D. G., Park, S. H., and Kim, H. S., "Manufacture of an Injection Mould with Rapid and Uniform Cooling Characteristics for the Fan Parts using a DMT Process," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 11, No. 6, pp. 915-924, 2010.
32. R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk, "Aerospace applications of laser additive manufacturing" Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, United States (2017) 351-371
33. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H., "Wire-Feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 81, Nos. 1-4, pp. 465-481, 2015.
34. Sames, W., List. F., Pannala, S., Dehoff. R., and Babu. S., "The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing," *International Materials Reviews*, Vol. 61, No. 5, pp. 315-360, 2016

35. Gibson. I. et al. "Directed Energy Deposition Processes," Additive Manufacturing Technologies, Vol. 10, pp. 245-268, 2015
36. Heigel, J. C., Michaleris, P., & Reutzel, E. W., “ Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V”. Additive Manufacturing, Vol. 5, P.P. 9-19, 2015.
37. Saboori, A., Piscopo, G., Lai, M., Salmi, A., & Biamino, S. (2020). An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition. Materials Science and Engineering: A, 780, 139179. doi:10.1016/j.msea.2020.139179
38. J. Denny, A.N. Jinoop, C.P. Paul, R. Singh, K.S. Bindra, Fatigue Crack Propagation Behaviour of Inconel 718 Structures Built using Directed Energy Deposition based Laser Additive Manufacturing, Materials Letters (2020)
39. Dai, K., & Shaw, L. (2002). Distortion minimization of laser-processed components through control of laser scanning patterns. Rapid Prototyping Journal, 8(5), 270-276. doi:10.1108/13552540210451732
40. Kandice S.B. Ribeiro, Fabio E. Mariani, Reginaldo T. Coelho, A Study of Different Deposition Strategies in Direct Energy Deposition (DED) Processes, Procedia Manufacturing, Volume 48, 2020, Pages 663-670, ISSN 2351-9789
41. Jun Cao, Michael A. Gharghouri, Philip Nash, Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates, Journal of Materials Processing Technology, Volume 237, 2016, Pages 409-419, ISSN 0924-0136
42. Do-Sik Shim, Gyeong-Yun Baek, Eun-Mi Lee, Effect of substrate preheating by induction heater on direct energy deposition of AISI M4 powder, Materials Science and Engineering: A, Volume 682, 2017, Pages 550-562, ISSN 0921-5093
43. Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. Procedia CIRP, 71, 348-353. doi:10.1016/j.procir.2018.05.039
44. T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback, T. Mukherjee, J.W. Elmer, J.O. Milewski, A.M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang, Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties, Progress in Materials Science, Volume 92, 2018, Pages 112-224, ISSN 0079-6425

45. Zheng, B., Haley, J. C., Yang, N., Yee, J., Terrassa, K. W., Zhou, Y., ... Schoenung, J. M. (2019). On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition. *Materials Science and Engineering: A*, 138243. doi:10.1016/j.msea.2019.138243
46. Li, C., Liu, Z. Y., Fang, X. Y., & Guo, Y. B. (2018). Residual Stress in Metal Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 71, 348-353. doi:10.1016/j.procir.2018.05.039

감사의 글

길다고만 생각했던 석사과정이 너무 빠르게 흘러 어느덧 석사 학위 논문을 작성하게 되었습니다. 석사과정 및 석사 학위 논문 작성을 진행하는 동안 많은 분들의 도움을 받았고 이 자리를 빌어 도움을 주신 분들께 감사의 말씀을 올리고자 합니다. 가장 먼저 저의 지도 교수님이신 안동규 교수님께 감사한 말씀을 올리고 싶습니다. 학부생 시절 수업을 계기로 교수님 휘하에서 공부와 연구를 시작하게 되었고 많은 것들을 배워 이렇게 졸업을 앞두게 되었습니다. 교수님께서 항상 이끌어주신 덕분에 여기까지 올 수 있었습니다. 앞으로 사회에 나가서도 평소 교수님의 가르침대로 매사에 겸손한 마음과 수동적이 아닌 능동적인 태도로 임하도록 하겠습니다. 바쁘신 일정 중에도 항상 될 때마다 좋은 말씀 아끼지 않고 많은 지도를 해주신 한길영 교수님께도 감사의 말씀 드리고 싶습니다. 논문에 대한 조언을 아끼지 않고 해주신 김창래 교수님께도 감사의 인사를 드립니다. 교수님들께서 해주신 지도와 조언 덕분에 이 논문을 완성 시킬 수 있었습니다. 항상 감사드립니다.

앞서 사회에 먼저 나가 후배들을 이끌어주시는 전산 설계 실험실의 선배님들께도 감사의 말씀 드리고 싶습니다. 이상훈 선배님, 김진석 선배님, 문경재 선배님, 변경원 선배님, 정광운 선배님, 김대원 선배님, 김현우 선배님, 남경흠 선배님, 박승화 선배님, 송동한 선배님, 김세훈 선배님, 박민우 선배님, 조창규 선배님, 선향선 선배님, 안영수 선배님, 정우철 선배님, 박나라 선배님, 이호진 선배님, 국대선 선배님, 김동인 선배님, 장용훈 선배님 그리고 *bihlii chua* 선배님 모든 실험실 선배님들에게 감사의 인사를 올립니다. 항상 선배님들께서 뒤에서 든든하게 받쳐주셔서 저를 비롯한 실험실원 모두가 연구에 정진할 수 있었습니다.

그리고 연구를 진행할 수 있도록 바쁜 시간에도 장비를 사용할 수 있게 해주셨던 한국생산기술연구원의 손용 박사님, 이협 박사님, 양승원 연구원님, 항상 친절하게 시편 열처리에 도움을 주신 하남열처리의 민수홍 이사님, 잔류응력 측정에 도움을 주신 한국자동차연구원의 조범지 연구원님, SYSWELD 프로그램 사용 시 많은 도움을 주신 ESI 민경욱 대리님께 감사 인사를 전하고 싶습니다.

실험실 생활을 함께한 실험실원들에게도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 학부생 때부터 함께 지금까지 함께 지내면서 항상 많은 것을 알려주고 도움을 주며, 매년 후배를 먼저

챙겨주는 광규형에게 정말 감사함을 전하고 싶습니다. 또한, 졸업 후에도 찾아와서 응원해 준 현식이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 후배로 들어와서 힘든 일에도 군말 없이 도와주는 선호와 안재 그리고 단아에게 매우 고마운 마음을 전하고 싶습니다. 또한, 영어에 많은 도움을 준 Aliyev Alissultan, 학부생이지만 항상 열심히 도와주는 성훈이와 지원이, 실험실은 다르지만 석사과정 동기로서 매번 중요한 일마다 도와주며 챙겨준 준혁이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 함께 동고동락 한만큼 실험실 밖에서도 오랫동안 연락하며 인연을 이어나가면 좋겠습니다.

그리고 바쁜 생활 중에도 먼저 연락해 응원과 힘을 주는 친구들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 제가 하는 일은 무엇이든지 믿어주시고 묵묵히 응원해주며 챙겨주시는 부모님과 누나들에게 말로는 다하지 못할 감사함을 전하며, 앞으로도 이러한 믿음과 응원에 보답할 수 있도록 더욱 노력하도록 하겠습니다. 감사합니다.

2020 년 12 월 11 일 김 호