



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](#)

2022년 2월
석사학위 논문

에너지 제어형 용착 공정을 이용한
공작기계 부품 보수시 적층부와
기저부 형상이 보수부 인근의
잔류응력 특성에 미치는 영향성 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

김 단 아

에너지 제어형 용착 공정을 이용한
공작기계 부품 보수시 적층부와
기저부 형상이 보수부 인근의
잔류응력 특성에 미치는 영향성 분석

**A study on the influence of deposition and substrate
shapes on residual stress characteristics in the vicinity of
the repaired region of parts for machine tools using a
DED process**

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

김 단 아

에너지 제어형 용착 공정을 이용한
 공작기계 부품 보수시 적층부와
 기저부 형상이 보수부 인근의
 잔류응력 특성에 미치는 영향성 분석

지도교수

안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교대학원

기계공학과

김 단 아

김 단 아의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 창 래



위 원 조선대학교 교수 이 정 원



위 원 조선대학교 교수 안 동 규



2021년 12월

조선대학교대학원

목 차

LIST OF TABLES	v
LIST OF FIGURES	vi
NOMENCLATURES	x
ABSTRACT	xii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
1. 연구 배경	1
2. 에너지 제어형 용착 (DED) 공정	5
3. 선행 연구	7
제 2 절 연구 목적 및 방법	9
1. 연구 목적	9
2. 연구 방법	10
제 2 장 기저부 경사 각도, 코너부 반경 및 적층 형상에 따른 잔류응력 특성 분석	13
제 1 절 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 잔류응력 특성 분석	13
1. 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 3차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출	13

- 가. 코너부 반경에 따른 기저부 형상 개발 13
- 나. 코너부 반경에 따른 3차원 유한요소 해석 모델 개발 15
- 다. 온도의존 물성 데이터 도출 20
- 라. 경계 조건 데이터 도출 23
- 마. 열원 모델 30
- 2. 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 잔류응력 비교 분석
..... 32
- 가. 유효 응력 비교 및 분석 32
- 나. 주응력 비교 및 분석 35
- 제 2 절 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 잔류응력 특성
분석 38
- 1. 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 3차원 유한요소 해석을
위한 모델 개발 및 데이터 도출 38
- 가. 적층 형상에 따른 비드부 형상 개발 38
- 나. 적층 형상에 따른 3차원 유한요소 해석 모델 개발 38
- 다. 경계 조건 데이터 도출 42
- 2. 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 단일 방향 적층 시
잔류응력 비교 분석 44
- 가. 유효 응력 비교 및 분석 44
- 나. 주응력 비교 및 분석 49
- 3. 기저부 경사 각도에 따른 **Alternative** 방향 적층 시 잔류응력
비교 분석 54
- 가. 유효 응력 비교 및 분석 54
- 나. 주응력 비교 및 분석 59
- 4. 적정 적층 방향 선정 63

5. 기저부 경사 각도에 따른 2차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 잔류응력 비교 분석	66
가. 기저부 경사 각도에 따른 2차원 유한요소 해석 모델 개발	66
나. 경계 조건 데이터 도출	67
다. 유효 응력 및 주응력 비교 및 분석	68
6. 3차원 및 2차원 유한요소 해석 결과 비교	69
제 3 장 기저부 절삭 깊이 및 기공 위치에 따른 잔류 응력 특성 분석	71
제 1 절 기저부 절삭 깊이에 따른 잔류응력 특성 분석	71
1. 기저부 절삭 깊이에 따른 2차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발	71
가. 기저부 절삭 깊이에 따른 기저부 형상 개발	71
나. 기저부 절삭 깊이에 따른 2차원 유한요소 해석 모델 개발	72
다. 경계 조건 데이터 도출	75
2. 기저부 절삭 깊이에 따른 잔류응력 비교 분석	77
가. 유효 응력 비교 및 분석	77
나. 주응력 비교 및 분석	80
제 2 절 기공 위치에 따른 잔류응력 특성 분석	84
1. 기공 위치에 따른 2차원 유한요소 해석 모델 개발	84
2. 기공 위치에 따른 잔류응력 비교 분석	85
가. 유효 응력 비교 및 분석	85
나. 주응력 비교 및 분석	88

제 4 장	공작기계 부품 보수 실험 및 결과	92
제 1 절	기초 적층 시편 설계 및 실험 설정	92
1.	기저부 및 적층 재료 선정	92
2.	적층 시편 설계	93
제 2 절	기초 적층 실험 조건 선정 및 실험 설정	94
1.	기초 적층 실험 조건 선정	94
2.	기초 적층 실험 설정	95
제 3 절	기초 적층 시편 제작 및 비드 특성 데이터 도출	96
1.	단일 비드 시편 제작 및 비드 특성 데이터 도출	96
2.	다열 및 다층 비드 시편 제작	99
제 4 절	시편 설계 및 제작	101
1.	공작기계 부품 보수 시편 설계	101
가.	적층 재료 선정	101
나.	적층 시편 설계	102
2.	적층 실험 조건 선정 및 실험 설정	103
가.	적층 실험 조건 선정	103
나.	적층 실험 설정	104
3.	공작기계 부품 보수 시편 제작	105
제 5 장	결론 및 향후 과제	106
Reference		113

LIST OF TABLES

Table 1	Classification of additive manufacturing according to the process	2
Table 2	Classification of DED process according to feeding type	5
Table 3	Characteristic dimensions of the deposition bead	16
Table 4	Volume of the bead	16
Table 5	Number of nodes and 3D elements of FE models	19
Table 6	Chemical compositions of the substrate and powder	20
Table 7	Parameter of heat flux	31
Table 8	Number of path depending on the deposition shapes	40
Table 9	Volume of the bead (Deposition shapes)	40
Table 10	Number of nodes and 3D elements of FE models of deposition shapes	42
Table 11	Number of nodes and 2D elements of FE models of deposition shape	67
Table 12	Comparison of total simulation time of 3D and 2D FE analysis	70
Table 13	Comparison of memory of 3D and 2D FE analysis	70
Table 14	Number of nodes and 2D elements of FE models of depth	73
Table 15	Number of path depending on the depth	74
Table 16	Number of layer depending on depth	74
Table 17	Area of the bead (Depth)	74
Table 18	Chemical compositions of substrate and powder	93
Table 19	Particle distribution of substrate and powder	93
Table 20	Experimental conditions	94
Table 21	Experimental conditions (repair experiments)	103

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematic diagram of DED process	5
Fig. 2 Defects of products manufactured by the metal AM process	9
Fig. 3 Flowchart of research works	10
Fig. 4 Definition of groove angle and radius of corner	13
Fig. 5 Designs of groove angle and radius of corner	14
Fig. 6 Bead meshes according to groove angle	15
Fig. 7 FE models for thermo-mechanical analysis	17
Fig. 8 FE models according to groove angle and radius of corner	17
Fig. 9 Temperature dependent material properties of S45C	20
Fig. 10 Temperature dependent material properties of Inconel 718	22
Fig. 11 Application region of the convection on the surface of the substrate	23
Fig. 12 Temperature dependent material properties of air	24
Fig. 13 Temperature dependent material properties of argon	24
Fig. 14 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces	25
Fig. 15 Temperature dependent forced convection coefficient	27
Fig. 16 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces	27
Fig. 17 Temperature dependent emissivity of S45C and Inconel 718	28
Fig. 18 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient	29
Fig. 19 Heat flux model of laser	30
Fig. 20 Intensity distribution of heat flux	31
Fig. 21 Distribution of effective stress according to groove angle and radius of corner	32
Fig. 22 Effective stress distribution in the specimen ($\theta = 30^\circ$, $R = 5$ mm)	33
Fig. 23 Effective stress of corner section according to groove angle and radius of corner	33
Fig. 24 Maximum effective stress according to groove angle and radius of corner	34
Fig. 25 Distribution of first principal stress according to groove angle and radius of corner	35

Fig. 26 First principal stress distribution in the specimen ($\theta = 30^\circ$, $R = 5$ mm) 36
 Fig. 27 First principal stress of corner section according to groove angle and radius of corner 36
 Fig. 28 Maximum first principal stress according to groove angle and radius of corner 37
 Fig. 29 Designs of bead shapes according to deposition shapes 38
 Fig. 30 Bead meshes according to deposition shapes 39
 Fig. 31 FE models for thermo-mechanical analysis of deposition shape 40
 Fig. 32 FE models according to deposition shapes 41
 Fig. 33 Application region of the convection on the surface of the substrate for deposition of bead shapes 42
 Fig. 34 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces (Deposition shapes) 43
 Fig. 35 Temperature dependent forced convection coefficient (Deposition shapes) 43
 Fig. 36 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient (Deposition shapes) 43
 Fig. 37 Effective stress distribution of uni direction according to the deposition shapes 44
 Fig. 38 Effective stress measurement location according to the deposition shape 45
 Fig. 39 Effective stress of each section according to the deposition shapes 45
 Fig. 40 Define the two start points in the A - A' section 47
 Fig. 41 Define the two end points in the C - C' section 47
 Fig. 42 Effective stress at each section according to the deposition shapes 48
 Fig. 43 First principal stress distribution of uni direction according to the deposition shapes 49
 Fig. 44 First principal stress measurement location according to the deposition shape 50
 Fig. 45 First principal stress of each section according to the deposition shapes 50
 Fig. 46 First principal stress at each section according to the uni direction of the deposition shapes 52
 Fig. 47 Effective stress distribution of alternative direction 54
 Fig. 48 Effective stress of each section of the alternative direction 55

Fig. 49 Define the two start points in the A - A' section of the alternative direction 56

Fig. 50 Define the four end points in the C - C' section of the alternative direction 57

Fig. 51 Effective stress at each section according to the alternative direction of the deposition shapes 58

Fig. 52 First principal stress distribution of alternative direction 59

Fig. 53 First principal stress of each section of the alternative direction 60

Fig. 54 First principal stress at each section according to the alternative direction of the deposition shapes 62

Fig. 55 Define the three start points in the A - A' section for selection of the deposition direction 63

Fig. 56 Define the four end points in the C - C' section for selection of the deposition direction 63

Fig. 57 Effective stress at each point according to the deposition direction 64

Fig. 58 First principal stress at each point according to the deposition direction 65

Fig. 59 2D FE models according to groove angle 66

Fig. 60 2D bead meshes according to groove angle 67

Fig. 61 Effective stress distribution of 2D analysis 68

Fig. 62 First principal stress distribution of 2D analysis 68

Fig. 63 Comparison of effective stress of 3D and 2D analysis 69

Fig. 64 Comparison of first principal stress of 3D and 2D analysis 69

Fig. 65 Definition of substrate slope angle and depth 71

Fig. 66 Designs of substrate according to groove depth 72

Fig. 67 2D FE models according to depth 73

Fig. 68 Application region of the convection on the surface of the substrate for deposition of depth 75

Fig. 69 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces (Depth) 75

Fig. 70 Temperature dependent forced convection coefficient (Depth) 76

Fig. 71 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient (Depth) 76

Fig. 72 Effective stress according to depth	77
Fig. 73 Maximum effective stress according to depth	78
Fig. 74 Measurement point of effective stress	79
Fig. 75 Effective stress history according to depth	79
Fig. 76 First principal stress according to depth	81
Fig. 77 Maximum first principal stress according to depth	82
Fig. 78 Measurement point of first principal stress	82
Fig. 79 First principal stress history according to depth	83
Fig. 80 FE models according to pore	85
Fig. 81 Effective stress according to pore	86
Fig. 82 Effective stress for occur of pore	87
Fig. 83 Measurement point of effective stress (Pore)	87
Fig. 84 Effective stress history according to pore	88
Fig. 85 First principal stress according to pore	89
Fig. 86 First principal stress for occur of pore	90
Fig. 87 First principal stress history according to pore	91
Fig. 88 Shaft of parts for machine tools	92
Fig. 89 Specimen design of deposition experiments	93
Fig. 90 DED process machine for deposition experiment	95
Fig. 91 Set-up for the deposition	95
Fig. 92 Experiment results of single bead	96
Fig. 93 Effects of the power and the scan speed of single bead	98
Fig. 94 Section of 5 lines deposition	99
Fig. 95 Section of 2 layers deposition	100
Fig. 96 Section of 4 layers deposition	101
Fig. 97 The damaged parts of the shaft	102
Fig. 98 Specimen design of repair experiments	102
Fig. 99 Processed specimens	103
Fig. 100 Set-up for the deposition (repair)	104
Fig. 101 Repaired specimens	105
Fig. 102 After cutting the Repaired specimens	105

NOMENCLATURES

- α : thermal diffusivity
 α_e : thermal expansion
 ε : Emissivity
 η : Efficiency of heat flux
 μ : Dynamic viscosity
 ν : Poisson's ratio
 ν_k : kinematic viscosity
 ρ : Density
 σ : Stefan-Boltzmann constant
 σ_E : Effective stress
 $\sigma_{E, \max}$: Maximum effective stress
 σ_F : First principal stress
 $\sigma_{F, \max}$: Maximum first principal stress
 σ_Y : Yield strength
 v : Scan speed of heat flux
 A_r : Application area
 C : Shape coefficient of heat flux
 C_p : Specific heat
 D : Diameter of nozzle
 E : Young's modulus
 g : Gravitational acceleration
 H : Distance between nozzle and substrate
 $\bar{h}_{eq, f}$: Average equivalent forced convection coefficient
 \bar{h}_f : Average forced convection coefficient
 \bar{h}_n : Average natural convection coefficient
 k : Thermal conductivity

L_c : Characteristic length

Nu : Nusselt number

\overline{Nu} : Average nusselt number

P : Power of heat flux

Pr : Prandtl number

Q_0 : Maximum power intensity of heat flux

$\dot{Q}_{loss,f}$: Heat loss rate induced by the forced convection

$\dot{Q}_{loss,r}$: Heat loss rate induced by the radiation

$\dot{Q}_{loss,t}$: Total heat loss rate

R : Radius of application

Ra : Rayleigh number

Re : Reynolds number

$r(Z)$: heat flux coverage

r_e : Top radius of heat flux

r_i : Bottom radius of heat flux

T_f : Film temperature

T_s : Surface temperature

T_∞ : Environmental temperature

t : Time

V_e : Average speed of flow

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 the influence of deposition and substrate shapes on residual stress characteristics in the vicinity of the repaired region of parts for machine tools using a DED process

Kim Dan A

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

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, the need for manufacturing has been emphasized worldwide due to environmental problems. Machine tool parts that cause irregular damage can extend the life of existing products with low cost and materials using a laminated manufacturing process. A direct energy deposition (DED) process, which is one of the additive manufacturing processes, is advantageous in remanufacturing because a molten-pool be generated of a high energy heat source and a metal powder or a metal wire can be supplied to form a desired shape. However, in the DED process, rapid heating and cooling around the deposition region generates rapid heat history, resulting in residual stress. In this paper is to analyze the influence of deposition and substrate shapes on residual stress characteristics in the vicinity of the repaired region of parts for machine tools using a DED process and to select a groove type that can reduce stress concentration and residual stress. After that, a substrate for repairing machine tool parts is designed and manufactured in an appropriate groove shape. Three-dimensional thermo-mechanical analysis according to the groove angle and corner radius was conducted to analyze the residual stress according to the groove angle and corner radius to predict the residual stress distribution of each shape. A three-dimensional thermo-mechanical analysis according to the groove angle and deposition type was performed to predict the residual stress distribution near the repair by deposition type. Subsequently, two-dimensional finite element analysis model were produced and thermo-mechanical analysis was conducted to compare the differences with the results of three-dimensional analysis. In addition, a two-dimensional thermo-mechanical analysis according

to the base groove depth and groove shape was performed to predict the residual stress distribution according to the groove depth and groove shape. A two-dimensional analysis model according to the pore position was generated and thermo-mechanical analysis was performed to predict the residual stress distribution according to the pore position. Finally, a basic experiment was conducted by determining the substrate and the deposition material, and a substrate for repairing machine tool parts was manufactured. The groove shape of the machine tool parts repair substrate is designed to be an appropriate groove shape derived from two-dimensional and three-dimensional finite element analysis. After manufacturing the sample, the deposition characteristics of the machine tool parts repair deposition were investigated through deposition type, pore, and hardness analysis.

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

1. 연구 배경

18세기 영국에서 증기기관이 발달하고 제1차 산업혁명이 시작됨에 따라 농업과 수공업 중심의 사회는 제조업 위주의 사회로 바뀌었고 그로부터 약 100 여 년간 지속적인 기술적 발전이 이루어졌다.¹⁾ 19세기 중반부터 20세기 초반에는 전기, 석유 등이 발달하여 제2차 산업혁명이 일어남에 따라 대량 생산 사회가 도래하였으며, 20세기 후반에는 전자기기와 인터넷 등의 발달로 제3차 산업혁명이 일어나 지식정보 사회로 발전하였다.²⁾ 현재는 정보 통신 기술의 발달로 제4차 산업혁명에 들어서 기술적 전환기를 맞이하고 또 한 번의 사회적 변화를 앞두고 있다.³⁾

세계경제포럼 (World economic forum) 에서 처음 언급된 제4차 산업혁명은 빅 데이터, 인공지능, 자율 주행, 로봇 공학, 3D 프린팅 (3D printing) 등의 기술을 포함하고 있다.^{4,5,6)} 그중 3D 프린팅 기술은 2013년 미국 국정 연설에서 버락 오바마 전 대통령이 제조업의 혁신이라고 힘담준 후 현재까지 재제조, 항공 우주, 의료, 식품 등 여러 산업 분야에서 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁷⁾

대중적으로 사용되는 3D 프린팅이라는 명칭은 학술적으로 적층 제조 (Additive manufacturing : AM) 공정이라 한다. 적층 제조 공정은 CAD (Computer aided design) 및 CAM (Computer aided manufacturing) 을 통한 3차원 모델링 데이터를 바탕으로 여러 적층 방법을 통해 원하는 형상의 3차원 제품을 제작하는 공정이다.^{8,9)} 이는 흔히 사용되는 성형 공정 (Forming process) 과 재료 제거 공정 (Cutting process) 과는 다르게 재료를 층별 (Layer-by-layer) 로 쌓아 올리기 때문에 복잡한 형상을 쉽게 제작할 수 있으며, 공정 시간과 비용을 줄일 수 있다.¹⁰⁻¹¹⁾ 이러한 특징으로 성형 및 재료 제거 공정 등을 대신하거나 적층 제조 공정과의 융합을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{8,9)}

최초의 적층 제조 공정은 1984년 출원된 광경화수지 (Stereolithography : SLA) 조형 공정이며, 이를 상용화한 3D 프린터는 1987년 SLA-1이라는 이름으로 출시되었다.^{12,13)}

적층 제조 공정은 미국 재료 시험 협회 (American Society for Testing Materials : ASTM) 및 국제표준화기구 (International Organization for Standardization : ISO) 에서 공정 수행 방식에 따라 7가지로 분류하였으며, 분류된 방식의 명칭은 각각 액조 광중합 (Vat photopolymerization) 방식, 분말 베드 용해 (Powder bed fusion) 방식, 재료 압출 (Material extrusion) 방식, 박판 적층 (Sheet lamination) 방식, 접착제 분사 (Binder jetting) 방식, 재료 분사 (Material jetting) 방식, 에너지 제어형 용착 (Directed energy deposition) 방식이다. 각 공정의 원리와 대표되는 기술은 Table 1 과 같다.^{14,15,17)}

Table 1 Classification of additive manufacturing according to the process¹⁴⁻¹⁸⁾

Additive manufacturing process	Signification	Type of material
Vat photopolymerization	Liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization.	Polymer
Powder bed fusion	Thermal energy selectively fuses region of a powder bed.	Polymer/ Metallic/ Ceramic
Material extrusion	Material is selectively dispensed through a nozzle or orifice.	Polymer
Sheet lamination	Sheets of material are bonded to form an object.	Polymer/ Metallic/ Ceramic
Binder jetting	A liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials.	Polymer/ Metallic/ Ceramic
Material jetting	Droplets of build material are selectively deposited.	Polymer
Directed energy deposition	Focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited.	Metallic

액조 광중합 방식은 적층 제조 공정의 7가지 방식 중 가장 오래된 방식으로, 광경화성 수지에 특정 파장의 빛을 조사하여 경화시켜 적층하는 방식이다. 이는 위의 7가지 방식 중 가장 오래된 방식이지만, 레이저를 사용하기 때문에 완성된 제품의 표면이 매끄럽고 정밀도가 높다. 하지만 적층하기 위해서는 수조에 재료를 담아야 하기 때문에 높은 비용이 요구되며 관리가 어렵다. 대표적인 공정으로는 DLP (Digital light processing), SLA (Stereo lithography apparatus) 가 있다.^{19,20)}

분말 베드 융해 방식은 대표적인 금속 적층 제조 공정 중 하나로, 세라믹, 금속 및 폴리머와 같은 분말 형태 소재에 레이저 및 전자빔 등의 고출력 에너지 열원을 조사하여 용융 또는 소결시켜 적층하는 방식이다. 이는 적층 과정 중 언더컷 (Under-cut) 또는 오버행 (Overhangs) 에 대한 결함을 보수할 수 있으며, 다른 방식에 비해 비교적 형상이 작고 복잡한 제품을 제작하는 데 유리하다. 대표적인 공정으로는 재료 접합 방식에 따라 SLS (Selective laser sintering), DMLS (Direct metal laser sintering) 가 있다.²¹⁾

재료 압출 방식은 필라멘트 (filament) 등의 열가소성 재료를 가열한 후 노즐을 통해 압출시켜 적층하는 방식이다.²²⁾ 이 방식은 적층 시 지지대 (Support) 가 필요하며 후처리 작업이 필요하다는 단점이 있다. 또한, 제작 속도가 느리고 표면이 비교적 매끄럽지 않다. 하지만 다양한 소재를 사용할 수 있으며 가격이 저렴하기 때문에 사용이 용이하여 산업, 교육뿐 아니라 가정에서도 사용된다. 대표적인 공정으로는 FDM (Fused deposition modeling) 이 있다.²³⁾

박판 적층 방식은 레이저로 얇은 종이, 금속 판재 및 박판 등을 절단한 후 접착제 또는 열을 이용하여 붙여 한 층씩 적층하는 방식이다. 다른 방식과는 달리 한 층을 접합하여 적층하기 때문에 적층 속도가 빠르지만, 레이저를 이용하여 재료를 절단하는 과정에서 화재의 위험성이 있다.²⁴⁾

접착제 분사 방식은 분말 재료에 접착제를 국부적으로 분사하여 분말을 결합하면서 적층하는 방식이다. 분말을 접착시켜 적층하므로 열에 대한 영향을 받지 않고 여러 색상과 소재를 적용할 수 있으며 빠르게 적층할 수 있다. 하지만 접착제를 사용하므로 제품의 강도가 약하다는 단점이 있다.^{25,26)}

재료 분사 방식은 액체 광경화성 수지를 소형 판 위에 분사한 후 자외선램프로 경화시켜 적층하는 방식이다.²⁷⁾ 공정 특성에 의해 여러 색상을 적용할 수 있으며 적층 속도가 빠르고 표면이 비교적 매끄럽지만, 기계 및 적층 소재가 고가이고 강도가 약하다는 단점이 있다. 대표적인 공정으로는 Polyjet (Photopolymer jetting), MJP (Multijet printing) 이 있다.²⁸⁾

에너지 제어형 용착 방식은 고밀도 에너지원인 전자빔, 레이저, 플라즈마 아크 등을 이용하여 금속 선재 (Wire) 또는 금속 분말 (Metal powder) 을 용해 후 응고시켜 적층하는 방식이다. 3축 및 5축 적층이 가능하고 원하는 곳에 원하는 형상으로 적층할 수 있어 형상의 자유도가 높고 제품의 수리 및 보수에 유리하다. 대표적인 공정으로는 DMT (Direct metal tooling), DMD (Direct metal deposition), LENS (Laser engineered net shaping), WAAM (Wire and arc additive manufacturing) 등이 있다.^{9,10,29)}

위와 같은 산업의 발전과 더불어 세계적으로 자원 및 환경보전에 관한 관심이 높아지고 있으며, 재사용 및 재활용의 중요성이 증가함과 동시에 일반 산업기계 분야에서는 기계 부품에 대한 재제조 (Remanufacturing) 의 필요성이 증가하고 있다.³⁰⁾ 재제조란 손상 및 폐기 단계에 있는 제품 또는 부품 등을 보수 및 재조립하여 최초의 제품에 가까운 성능으로 재제작하는 것이다.³¹⁾ 재제조는 기계 부품의 사용 수명을 증가시키고 버려지는 자원을 감소시킬 수 있어 자원 보존 및 환경보전에 큰 도움을 주며, 특히 공작기계의 경우 대형 부품들이 사용되어 재제조 효과를 크게 얻을 수 있다.^{32,33)}

2. 에너지 제어형 용착 (DED) 공정

적층 제조 공정 중 하나인 에너지 제어형 용착 (Directed energy deposition : DED) 공정은 금속 모재 위에 전자빔 (Electron beam) 또는 레이저 (Laser) 와 같은 에너지를 조사하여 용융풀 (Molten-pool)을 생성시키고, 동시에 금속 분말 (Metal powder) 또는 금속 선재 (Metal wire) 를 공급하여 한 층씩 적층시켜 원하는 형상의 제품을 제작하는 공정이다. 에너지 제어형 용착 공정은 크게 금속 분말 타입과 금속 선재 타입으로 나뉘며, 각각의 대표적인 공정 및 적층 특성은 Table 2 와 같고, 각 공정 개념도는 Fig. 1 과 같다.^{10,34)}

Table 2 Classification of DED process according to feeding type^{35,36,37)}

Feeding type	Powder	Wire
Deposition Process	Laser engineered net shaping (LENS)	Electron beam freeform fabrication (EBF)
Layer thickness (μm)	100 - 380	500 - 1,270
Deposition rate (g/min)	6.5	up to 330

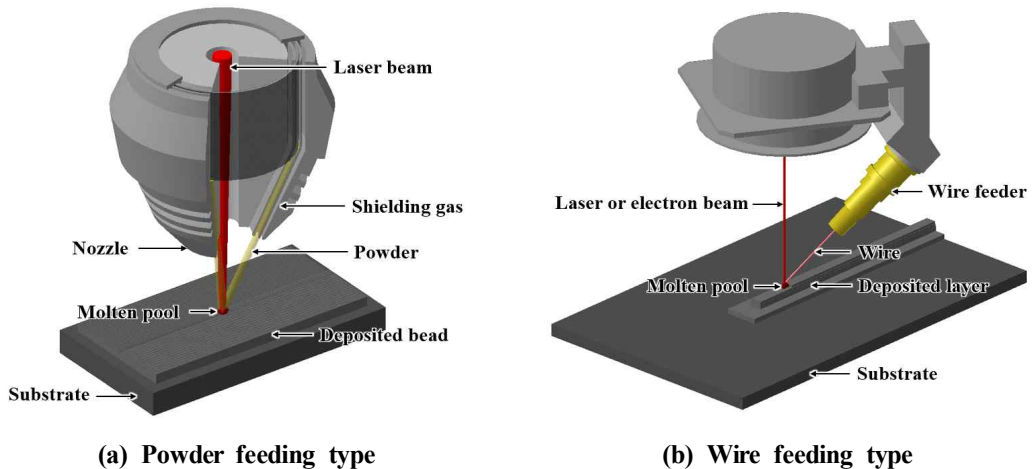


Fig. 1 Schematic diagram of DED process

에너지 제어형 용착 공정 중 금속 분말을 이용하여 적층하는 공정은 한 가지 분말뿐 아니라 다중 분말 호퍼 (Multipowder hoppers) 를 이용하여 여러 가지 금속 분말을 이용한 적층이 가능하다. 또한, 다축 (Multiple axis) 가공이 가능하여 복잡한 형상도 쉽게 제작할 수 있어 공작기계 및 항공 우주 부품을 수리 및 보수하는 연구가 진행되고 있다.³⁸⁾ 금속 선재를 이용하여 적층하는 공정은 금속 분말을 이용하는 공정보다 적층 속도가 빠르고, 소재 가격이 저렴하여 비교적 적층 시간 및 비용 감소에 유리하다.³⁷⁾

에너지 제어형 용착 공정은 적층 시 적층 부에 짧은 시간 동안 전자빔 또는 레이저와 같은 고밀도 에너지원의 공급으로 1,000 °C 이상의 높은 열을 받게 되고, 그 후 급속 냉각이 진행된다.³⁹⁾ 적층 시 반복되는 이러한 급속 가열 및 냉각은 금속의 팽창과 수축을 반복하게 하며 이는 적층 부 인근에 열 특성 불균형 및 잔류응력을 발생시킨다. 이러한 공정 특성으로 인해 완성된 최종 제품은 변형, 균열 및 파손 등의 문제가 발생하며, 이를 개선하기 위해 열응력 및 잔류응력 발생을 예측하고 제어하는 연구가 진행되고 있다.^{10,40)} 또한 불규칙한 손상이 있는 부품의 경우 적층부 및 기저부 형상에 따라 적층 특성과 잔류응력의 변화가 크게 나타나기 때문에 재제조를 하기 위한 홈 (Groove) 형상에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.⁴¹⁾

3. 선행 연구

적층 공정이 진행될 때와 그 후 발생하는 잔류응력의 문제를 예측하고 해결하기 위해 많은 연구가 진행되었으며, 재제조를 위한 적층 및 잔류응력 특성에 관한 연구도 함께 진행되어왔다.

2012년 Graf 등은 Ti-6Al-4V 티타늄 합금을 이용해 홈 형상에 따라 LMD 공정으로 적층하였을 때 적층 특성을 분석 및 고찰하였다. U 형상의 홈의 경우 V 형상의 홈보다 적층량이 적었으며 두 형상 모두 적층 후 결함이 나타나지 않았다.⁴²⁾

2014년 Hua 등은 유한요소 해석을 이용해 기계 부품 수리 및 보수를 위한 단일 비드 적층 시 레이저 빔 직경, 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 적층부 온도 및 잔류응력 변화를 고찰하였다. 그 결과 레이저 빔 직경이 작고 레이저 출력이 크며 이송 속도가 느릴수록 열 영향을 받는 영역의 깊이가 깊게 나타났다.⁴³⁾

2016년 Lei 등은 손상된 임펠러 블레이드를 보수하기 위해 유한요소 해석을 이용해 적층 시 열전달 및 잔류응력 변화를 고찰하였으며, 레이저 클래딩 (Laser cladding) 공정을 이용해 실제 임펠러 블레이드를 보수하여 경도 및 인장 물성 변화를 분석하였다.⁴⁴⁾

2018년 Zhang 등은 V 형상의 홈을 각도에 따라 적층하였을 때 기저부 경사 각도별 인장 강도 및 적층 특성을 고찰하였다. 기저부 경사 각도에 따라 인장 강도의 차이는 발생하지 않았으며, 45° 홈과 75° 홈의 경우 균열 발생 없이 적층되었고 90° 홈의 경우 기공이 발생하는 것을 확인하였다.⁴⁵⁾

2018년 Li 등은 레이저 클래딩 공정으로 기계 부품 보수를 위해 연주강 (Ductile cast iron) 기저부에 Ni-Cu 합금을 홈 형상 및 적층 경로에 따라 적층하고 적층부의 조직, 상 및 기계적 특성 변화를 고찰하였다. 경도는 측정 높이에 따라 달라지며, 원형 홈을 지그재그 방향으로 적층하였을 때 잔류응력이 가장 낮고 균열이 적게 나타났다.⁴¹⁾

2019년 Zhu 등은 레이저 클래딩 공정으로 H13 분말을 적층하여 기어를 보수할 때 중첩률 (Overlap ratio) 과 적층 경로에 따른 적층 형태, 인장 강도 및 경도의 변화를 고찰하였다. 중첩률의 경우 20%, 적층 경로의 경우 단일 방향으로 적층할 경우 접합 및 적층 특성이 우수함을 도출하였다. 보수한 시편의 평균 인장 강도는 기존 시편보다 낮았지만, 기저부와 동일 소재로 적층한 것보다는 높게 나타났다.⁴⁶⁾

2019년 Oh 등은 DMT 공정을 이용하여 홈 깊이 및 형상에 따라 적층하고 보수된 부품의 접합 특성, 적층 형상, 경도 및 인장 강도 변화를 고찰하였다. 홈 깊이가 1.0 mm 및 2.0 mm 보다 0.5 mm 의 경우 적층 시 균열이 없고 경도 및 인장 강도가 높게 나타났다.⁴⁷⁾

선행 연구에서는 기계 부품을 수리 및 보수하기 위한 기저부 형상 설계 시 홈 모양, 깊이 및 홈 각도를 고려한 단일 방향의 설계를 했지만, 실제 손상복구 시에는 이와 함께 코너부 반경에 따른 설계 및 적층 형상에 따른 설계도 함께 고려되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 코너부 반경과 함께 적층 형상, 기저부 경사 각도 및 기저부 절삭 깊이에 따른 모양을 설계하고 유한요소 해석 모델을 제작하였다. 그 후 열-기계 연계 해석을 통해 각 해석 모델의 잔류응력을 비교 및 분석하였다.

제 2 절 연구 목적 및 방법

1. 연구 목적

적층 제조 (Additive Manufacturing : AM) 공정은 재료를 층별로 쌓아 올려 복잡한 형상을 제작할 수 있으며, 기존 공정들에 비해 공정 시간과 비용을 줄일 수 있다. 하지만 층별로 쌓아 올리기 때문에 내부 기공이 발생할 수 있으며, 적층 표면이 거칠고 잔류응력이 발생하는 문제점이 있다.¹⁰⁾ 이러한 문제점은 완성된 제품의 밀도를 감소시킬 뿐 아니라 Fig. 2 와 같이 균열 및 파손을 발생시킨다.

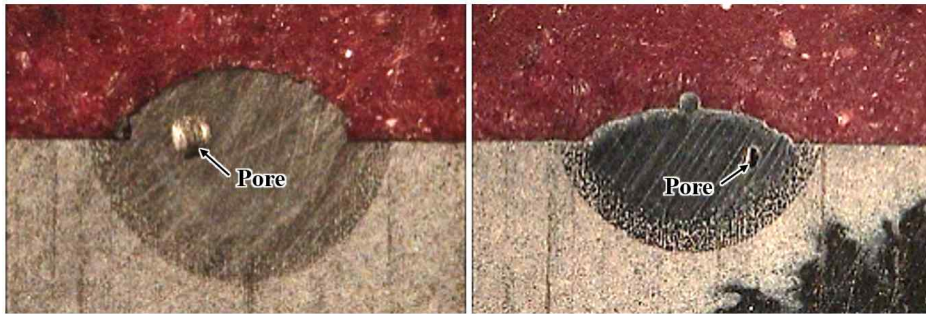


Fig. 2 Defects of products manufactured by the metal AM process

금속 적층 제조 공정을 이용하여 균열 또는 파손이 발생한 부분을 수리 및 보수 할 경우 홈 깊이와 형상 등에 따라 접합 특성이 다르게 나타난다.⁴⁷⁾ 따라서 접합 특성을 높이고 잔류응력을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 연구에서는 에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 공작기계 부품을 보수 하였을 때 적층부와 기저부 형상이 보수부 인근의 잔류응력 특성에 미치는 영향을 분석하고 잔류응력을 저감시킬 수 있는 적층부 및 기저부 형상을 찾고자 한다. 적층부는 적층 형상에 따라 세 가지로 나누어 해석하며, 기저부 형상은 기저부 경사 각도와 코너부 반경에 따른 형상, 기저부 절삭 깊이 및 기공 발생 위치에 따른 해석을 진행하고자 한다. 또한, 기초 적층 실험을 진행하고 적정 적층 조건을 선정한 뒤 적정 기저부 형상 및 깊이를 적용해 공작기계 부품 보수 시편을 제작하고자 한다.

2. 연구 방법

에너지 제어형 용착 공정을 이용하여 공작기계 부품을 보수하였을 때 적층부와 기저부 형상이 보수부 인근의 잔류응력에 미치는 영향을 분석하기 위해 흠 형상에 따른 잔류응력 특성 분석을 수행하고 적정 흠 형상을 도출하였다. Fig. 3 은 본 논문의 연구 흐름도이다.

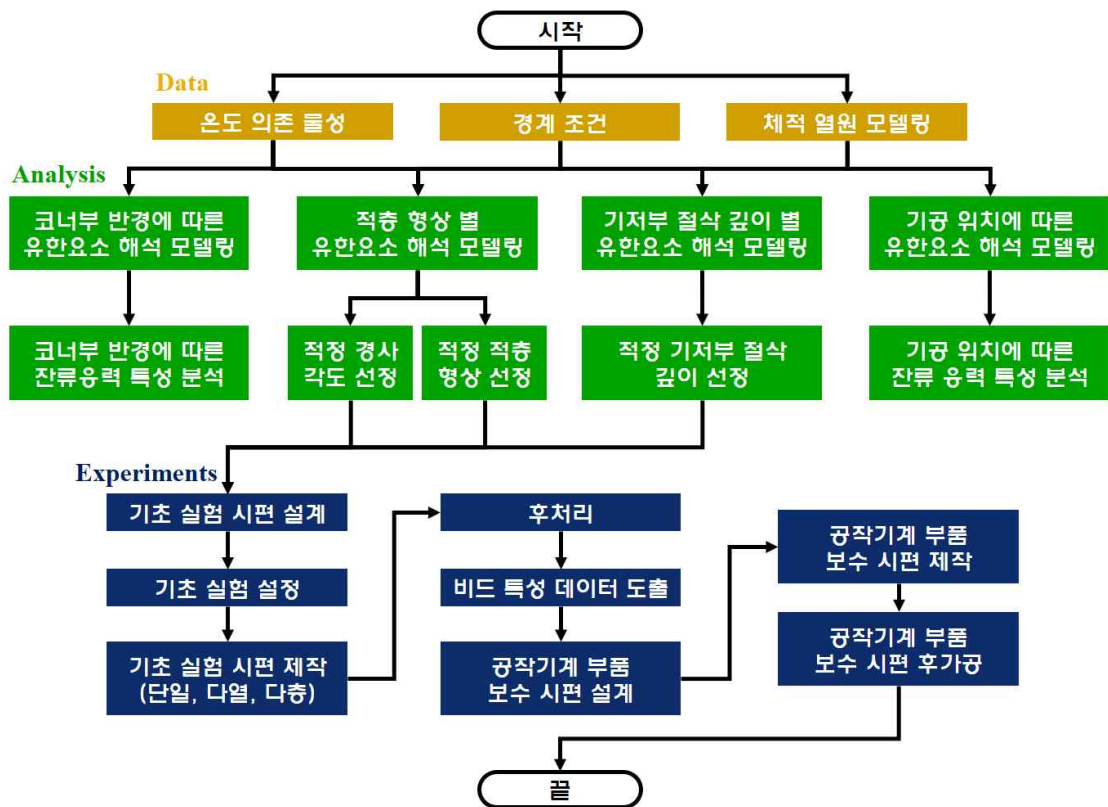


Fig. 3 Flowchart of research works

제 2 장에서는 상용 소프트웨어인 SYSWELD V15.5 를 이용하여 기저부 경사 각도, 코너부 반경 및 적층 형상에 따른 잔류응력 특성 분석을 진행하였다. 잔류응력 특성 분석을 위해 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 3 차원 유한요소 해석 모델을 개발하고 온도 의존 물성 및 경계 조건 데이터를 도출하였다. 해석 모델에 적용할 체적 열원을 모델링하고 유한요소 해석 모델에 적용하여 열-기계 연계 해석을 수행하였다. 해석 결과를 기반으로 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 유효 응력 및 주응력 분포를 비교 분석하였다. 또한, 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 잔류응력 특성 분석을 위해 적층 형상에 따른 기저부 및 비드부 형상을 개발하고 3 차원 유한요소 해석 모델을 개발하였다. 기저부 형상에 따른 경계 조건 데이터를 도출하여 각 형상 별 유한요소 해석 모델에 적용하였다. 적층 방향은 단일 방향과 지그재그 방향인 Alternative 방향으로 선정하였다. 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 잔류응력 비교 분석을 통해 적정 기저부 경사 각도 및 적층 형상을 선정하였다. 3차원 유한요소 해석 결과와 2차원 유한요소 해석 결과를 비교하여 2차원 유한요소 해석 모델의 타당성을 검증하였다.

제 3 장에서는 기저부 절삭 깊이 및 기공 발생 위치에 따른 잔류응력 특성 분석을 진행하였다. 기저부 절삭 깊이에 따른 잔류응력 특성 분석을 위해 2 차원 유한요소 해석 모델을 기반으로 깊이를 변경해가며 열-기계 연계 유한요소 해석을 수행하였다. 기저부 절삭 깊이에 따른 잔류응력 비교 분석을 통해 기저부 절삭 깊이 변화에 따른 잔류응력 변화를 고찰하고 응력 이력을 분석하였다. 이후 기저부 절삭 깊이의 2 차원 유한요소 해석 모델을 기반으로 기공 발생 위치를 가정하여 기공 위치에 따른 2 차원 유한요소 해석 모델을 개발하였다. 그 후 열-기계 연계 해석을 수행하고 기공 발생 위치에 따른 잔류응력 비교 분석을 통해 기공 발생이 잔류응력에 미치는 영향성을 고찰하였다.

제 4 장에서는 공작기계 부품 보수를 위한 시편을 제작하였다. 기초 적층 시편 설계 및 실험 설정에서는 기저부 및 적층부 재료를 선정하고 적층 시편을 설계하였다. 기초 적층 시편 제작을 위해 레이저 출력, 이송 속도, 분말 분사율, 보호 가스 분사율, 비드 중심간 거리, 비드 층간 거리 등과 같은 기초 적층 실험 조건을 선정하고 기초 적층 실험을 설정하여 단일, 다열 및 다층 적층 시편을 제작하였다. 단일 비드 기초 실험을 통해 제작된 시편은 폴리싱 및 에칭과 같은 후처리를 통해 비드 형상, 열 영향부 (Heat affected zone : HAZ), 혼합층 (Dilution) 의 데이터를 취득하고 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 적층 특성 변화를 고찰하였다. 이를 통해 적정 공정 변수를 선정하고

다열 및 다층 실험에 적용하였다. 다층 적층 실험 시 비드 층간 거리 조절을 통해 적정 비드 층간 거리를 선정하였다. 그 후 정해진 기저부 경사 각도, 기저부 절삭 깊이 및 적층 데이터를 통해 공작기계 부품 형태에 가까운 시편을 보수하였다.

제 5 장에서는 각 장의 결과를 종합하고 공작기계 부품 보수 시 적층부와 기저부 형상이 보수부 인근의 잔류응력 특성에 미치는 영향을 분석한 후 향후 과제를 제시하였다.

제 2 장 기저부 경사 각도, 코너부 반경 및 적층 형상에 따른 잔류응력 특성 분석

제 1 절 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 잔류응력 특성 분석

1. 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 3차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출

가. 코너부 반경에 따른 기저부 형상 개발

기저부 경사 각도와 코너부 반경에 따른 잔류응력 특성을 분석하기 위해 기저부 경사 각도와 코너부 반경에 따라 총 12 가지의 기저부 형상을 개발하였다. 기저부 형상의 개념도는 Fig. 4 와 같으며 기저부 경사 각도 및 코너부 반경별 기저부 형상은 Fig. 5 와 같다. 기저부 경사 각도 (θ) 의 경우 15° , 30° 및 45° 이며 코너부 반경 (R) 의 경우 3 mm, 5 mm, 8 mm 및 10 mm 를 적용하였다.

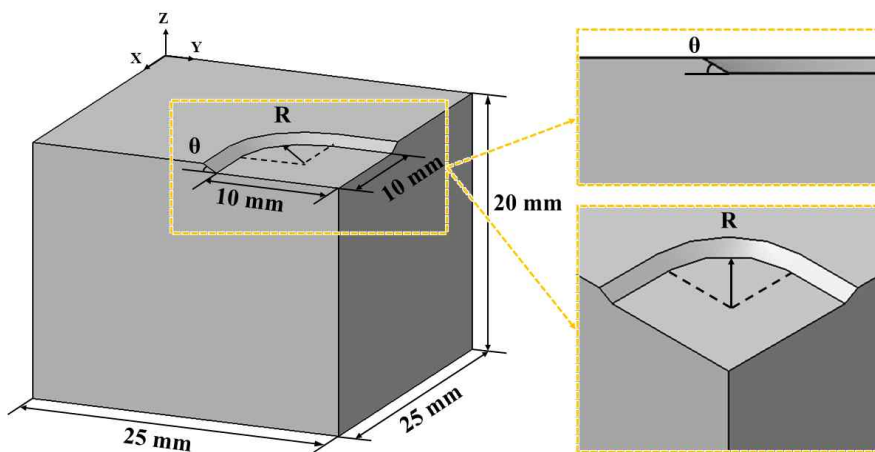


Fig. 4 Definition of groove angle and radius of corner

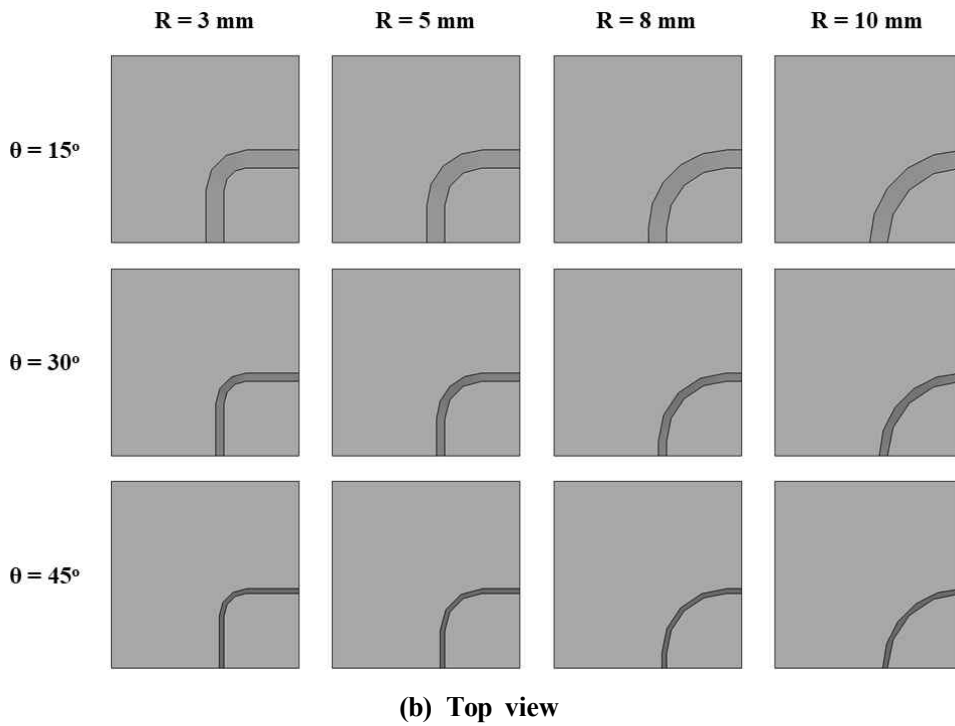
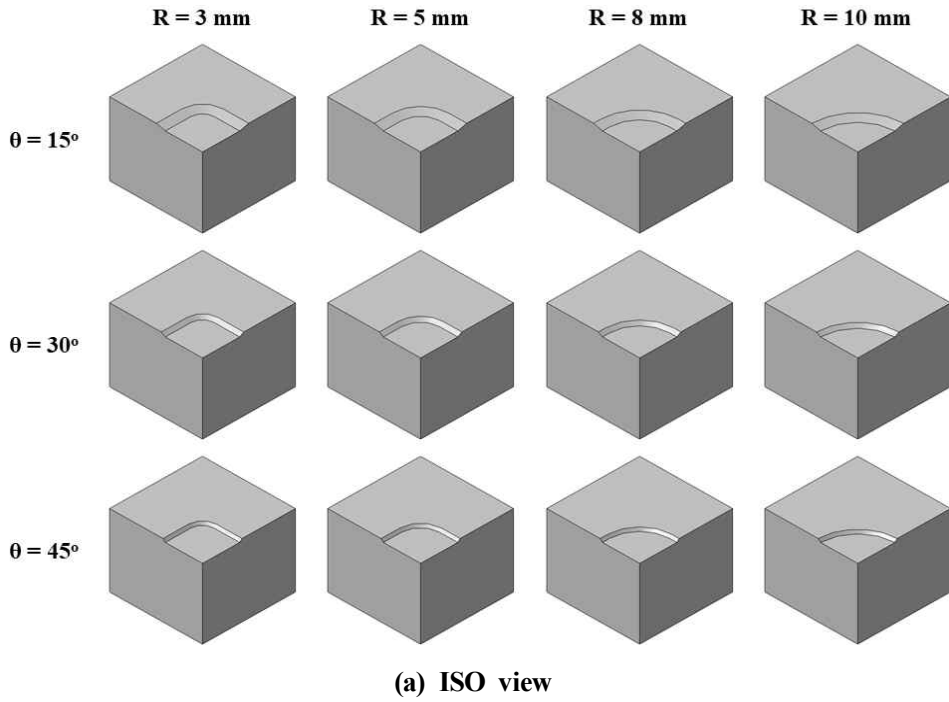


Fig. 5 Designs of groove angle and radius of corner

나. 코너부 반경에 따른 3차원 유한요소 해석 모델 개발

개발된 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 기저부 형상을 바탕으로 총 12 가지의 유한요소 해석 모델을 개발하였다. Fig. 6 은 기저부 경사 각도에 따른 비드부의 유한요소 격자이다. 비드는 총 4 층이며 마지막 층의 경우 과적층 하기 위해 적층부 앞 1 mm 를 추가하여 제작하였다. 실제 첫 번째 비드 너비는 0.78 mm 이지만, 다음 층에 쌓이는 비드 너비를 고려하여 1.0 mm 로 가정하였다. 따라서 모든 층의 첫 번째 비드 너비는 1.0 mm 이며, 그 후 적층 되는 비드의 너비는 해치 (Hatch) 거리인 0.5 mm 를 적용하였다. 각 층의 높이는 첫 번째 층의 경우 0.135 mm 이며, 두 번째 층 이후로는 0.25 mm 를 적용하였다. 유한요소 해석 모델의 형상 치수는 Table 3 와 같으며 한국생산기술연구원 (KITECH) 에서 제공된 데이터를 이용하였다.

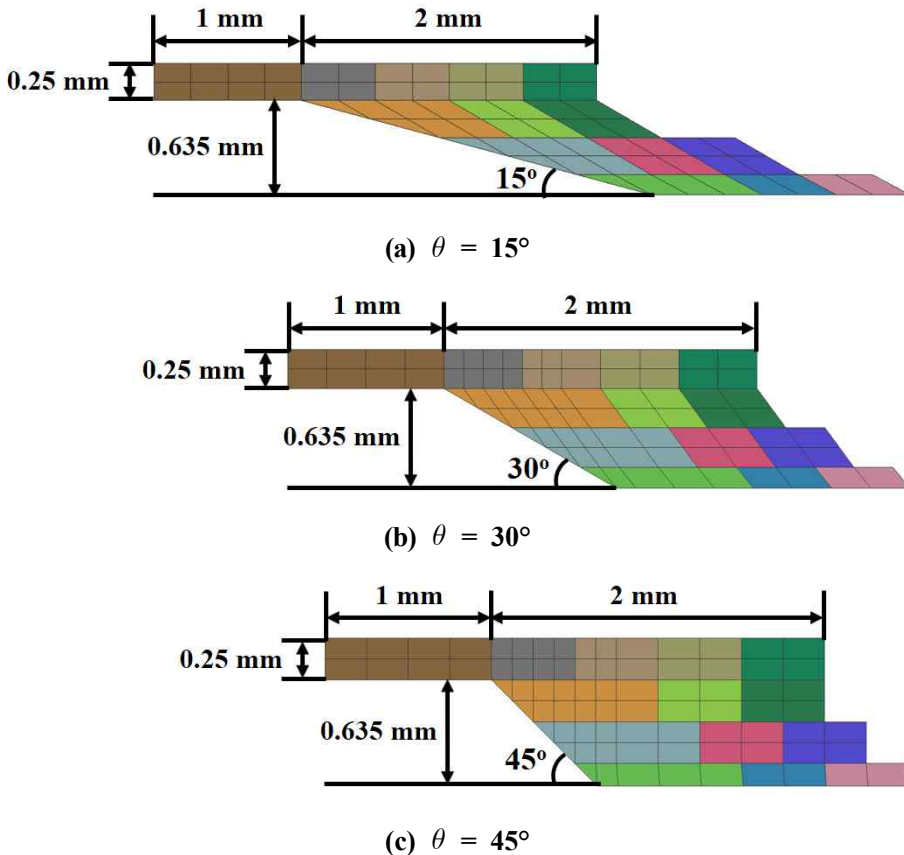


Fig. 6 Bead meshes according to groove angle

Table 3 Characteristic dimensions of the deposition bead (provided by KITECH)

Bead width (μm)	Hatching distance (μm)	Bead height (μm)	Layer thickness (μm)
1,000	500	135	250

Table 4 Volume of the bead

	R = 3 mm	R = 5 mm	R = 8 mm	R = 10 mm
$\theta = 15^\circ$	37.86 mm ³	36.25 mm ³	33.83 mm ³	32.22 mm ³
$\theta = 30^\circ$	36.44 mm ³	34.76 mm ³	32.25 mm ³	30.58 mm ³
$\theta = 45^\circ$	35.45 mm ³	33.77 mm ³	31.26 mm ³	29.59 mm ³

Table 4 는 기저부 경사 각도 및 코너부 반경 별 비드 부의 체적이다. 기저부 경사 각도 15° 의 경우 코너부 반경 3 mm 부터 10 mm 까지 각각 37.86 mm³, 36.25 mm³, 33.83 mm³ 및 32.22 mm³ 이며, 기저부 경사 각도 30° 의 경우 코너부 반경 3 mm 부터 10 mm 까지 각각 36.44 mm³, 34.76 mm³, 32.25 mm³ 및 30.58 mm³, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 코너부 반경 3 mm 부터 10 mm 까지 각각 35.45 mm³, 33.77 mm³, 31.26 mm³ 및 29.59 mm³ 이다. 비드 부의 체적은 기저부 경사 각도가 낮고 코너부 반경이 작아질수록 높게 나타났다. 이는 기저부 경사 각도가 낮을수록 코너를 돌 때 적층해야 하는 면적이 넓어지며, 코너부 반경이 작을수록 직선 구간이 길어지면서 적층량 또한 많아지기 때문이다. Fig. 7 은 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 열-기계 연계 해석을 위한 3차원 유한요소 해석 모델이다. 해석 모델의 크기는 25 mm × 25 mm × 20 mm 이며, 바닥 면의 5 mm 범위와 바닥 면으로부터 5 mm 범위의 옆면에 고정 경계 조건이 적용되었다. 적층부의 기저부 경사 각도는 Fig. 8 과 같이 15° , 30° 및 45° 로 설정하였으며 홈 형상은 꼭짓점으로부터 가로 및 세로 각각 10 mm 로 설정하였다. 코너부 반경은 3 mm, 5 mm, 8 mm 및 10 mm 로 설정하였다.

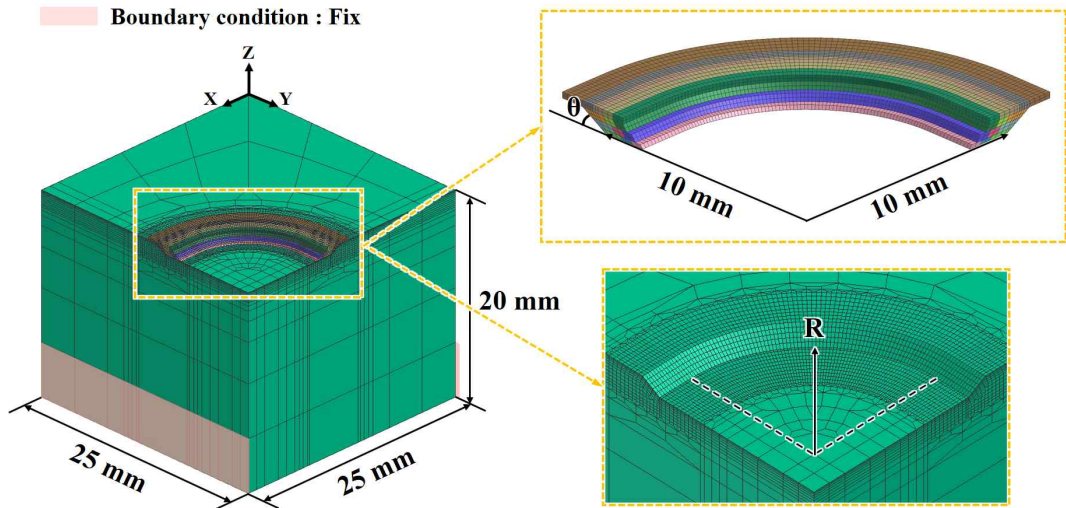
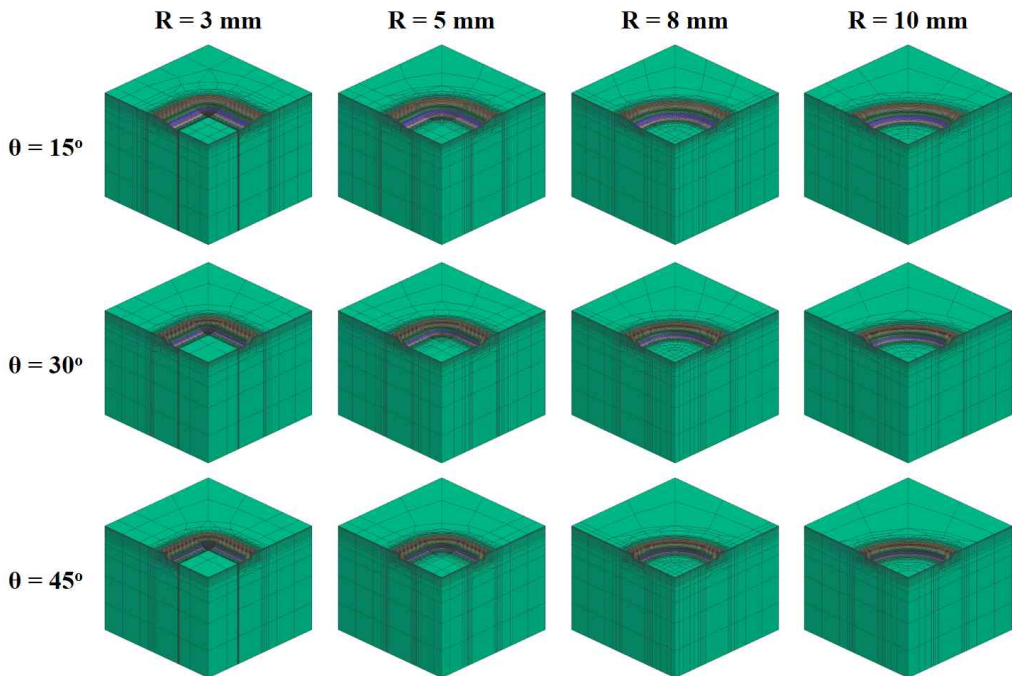
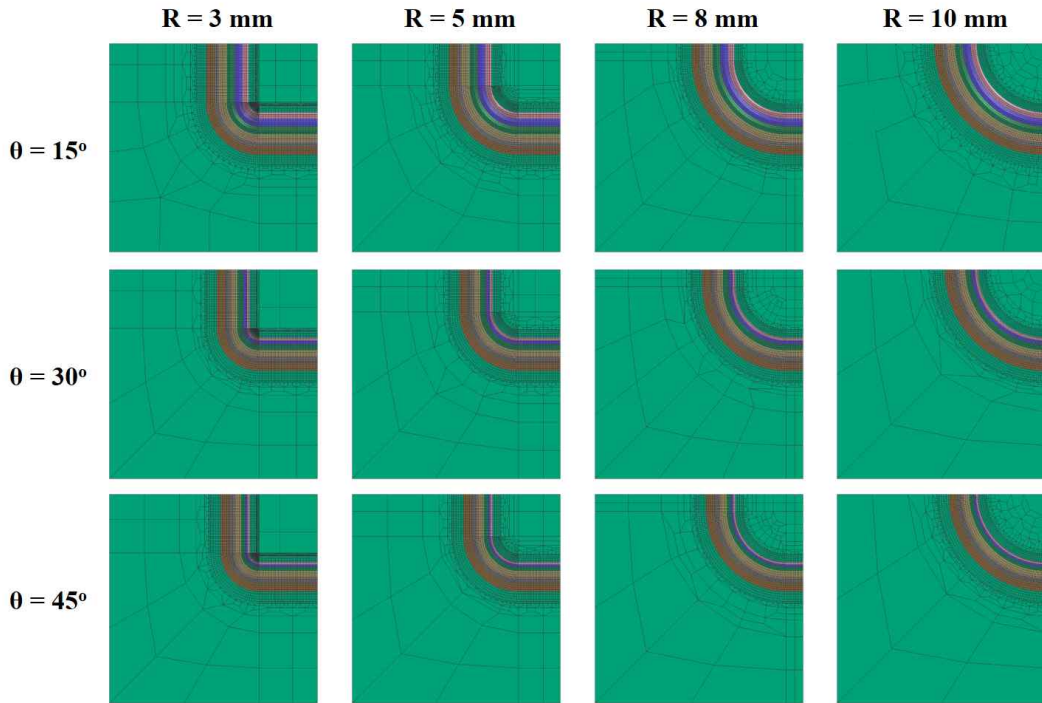


Fig. 7 FE models for thermo-mechanical analysis



(a) ISO view



(b) Top view

Fig. 8 FE models according to groove angle and radius of corner

Fig. 8 는 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 유한요소 해석 모델이며, 각 유한요소 해석 모델의 절점 (Node) 의 개수와 3차원 요소 (Element) 의 개수는 Table 5 와 같다. 코너부 반경이 증가할수록 절점 및 3차원 요소의 개수는 감소하며 이는 코너부 반경이 작아질수록 급격한 형상 변화에 의해 마지막 층 경사부에 위치한 비드의 요소 길이를 열원이 적용될 수 있도록 설정하였기 때문이다. 플랫폼 (Flat-top) 형상에 가까운 가우시안 (Gaussian) 열원을 적용하기 위해서는 열원의 직경 내에 적어도 4 개 이상의 절점이 포함되어야 한다. 4 개 이상의 절점이 포함되지 않는 경우 열원의 형상을 모사하기 어렵기 때문이다.

Table 5 Number of nodes and 3D elements of FE models

Type of deposition model		Nodes (EA)	3D Elements (EA)
$\theta = 15^\circ$	R = 3 mm	56,792	53,841
	R = 5 mm	54,332	51,457
	R = 8 mm	46,828	44,343
	R = 10 mm	43,584	41,273
$\theta = 30^\circ$	R = 3 mm	57,510	54,569
	R = 5 mm	53,351	50,543
	R = 8 mm	47,185	44,602
	R = 10 mm	41,949	39,701
$\theta = 45^\circ$	R = 3 mm	52,666	49,968
	R = 5 mm	49,573	46,916
	R = 8 mm	43,734	41,318
	R = 10 mm	40,601	38,352

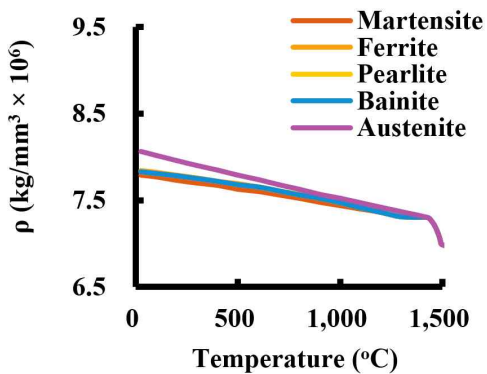
다. 온도의존 물성 데이터 도출

본 연구 진행을 위한 기저부 및 적층부 소재는 각각 S45C 및 Inconel 718 이다. 각 소재의 화학 조성은 참고문헌 조사를 통해 도출하였으며 Table 6 과 같다.

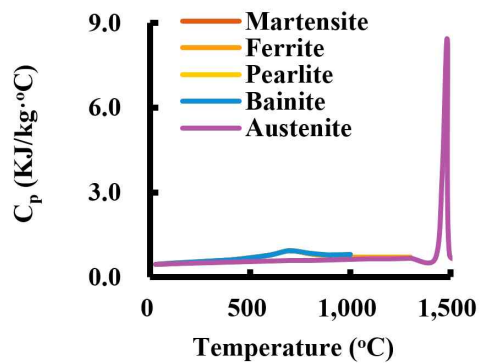
Table 6 Chemical compositions of the substrate and powder¹⁸⁾

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Mo	Co	Other
Inconel 718	55	21	Bal.	0.08	0.35	0.35	0.3	3.3	1	< 5.0
S45C	0.005	0.015	Bal.	0.444	0.757	0.247	0.01	-	-	< 0.1

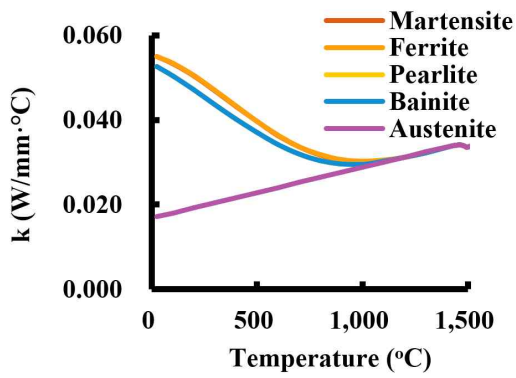
소재의 화학 조성을 이용하여 물성 데이터 도출 프로그램인 JmatPro V12.0 을 통해 밀도 (Density : ρ), 열전도도 (Thermal conductivity : k), 비열 (Specific heat : C_p), 영계수 (Young's modulus : E), 푸아송비 (Poisson's ratio : ν), 항복강도 (Yield strength : σ_Y), 열 변형 (Thermal expansion : α_e) 등과 같은 온도의존 열 및 기계 물성 데이터를 도출하였다. S45C 의 경우 온도 변화에 따라 변화하는 상 (Phase) 을 고려하기 위해 상 별 온도의존 물성 데이터를 도출하였다. Inconel 718 의 경우에는 단일 상으로 가정하여 데이터를 도출하였다. 도출된 온도의존 열 및 기계 물성 데이터는 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같다.



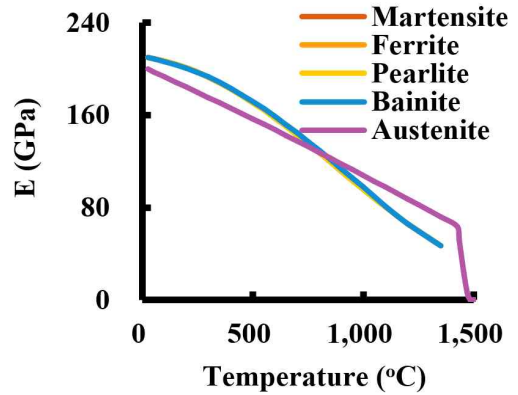
(a) Density



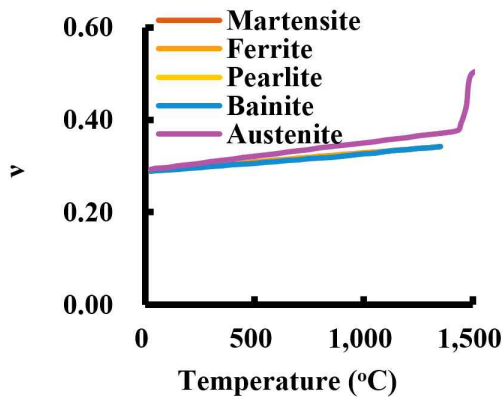
(b) Specific heat



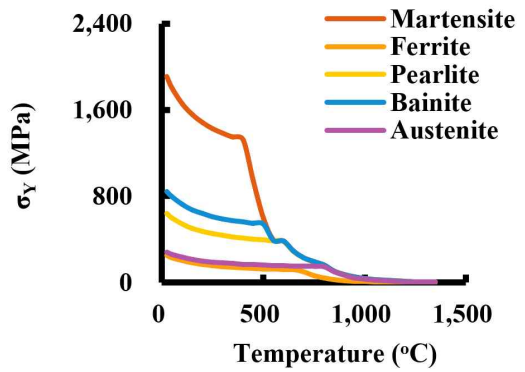
(c) Thermal conductivity



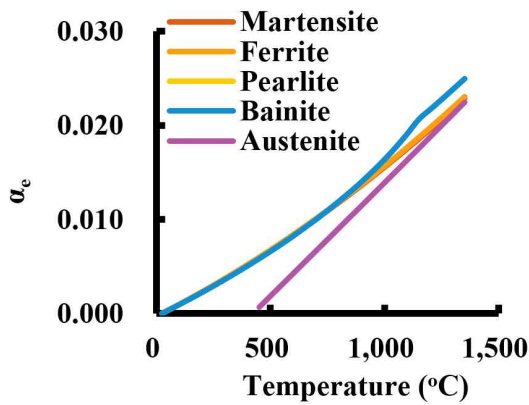
(d) Young's modulus



(e) Poisson's ratio

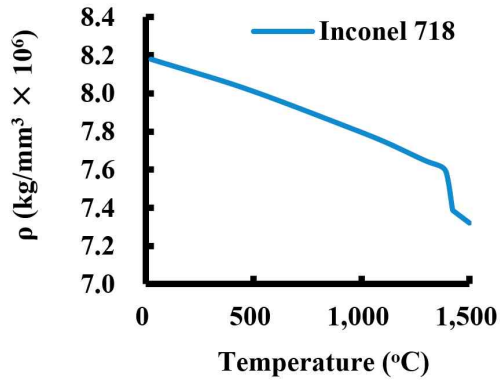


(f) Yield strength

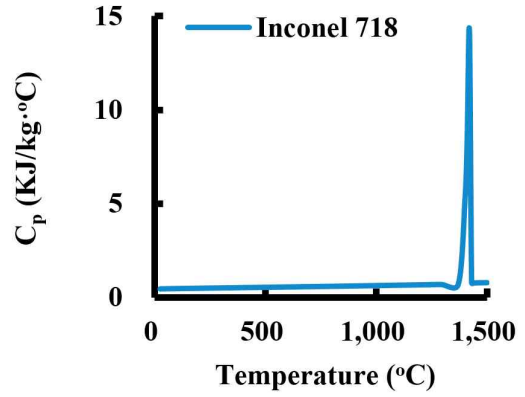


(g) Thermal expansion

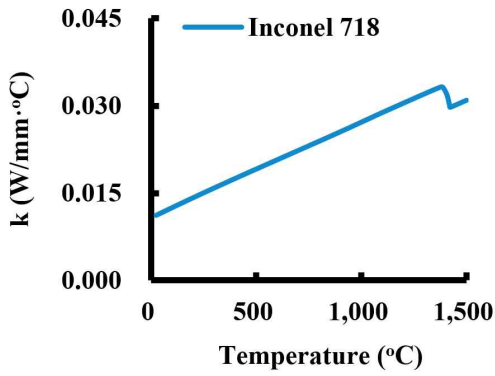
Fig. 9 Temperature dependent material properties of S45C



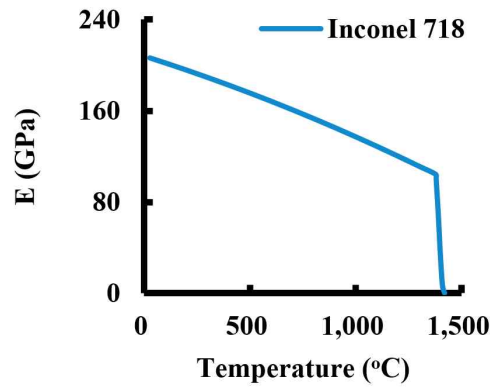
(a) Density



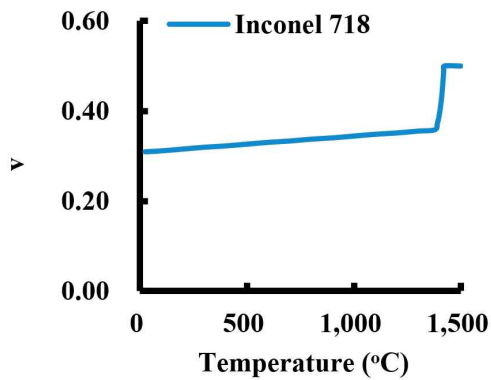
(b) Specific heat



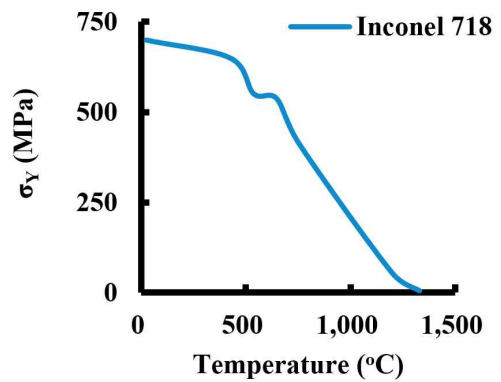
(c) Thermal conductivity



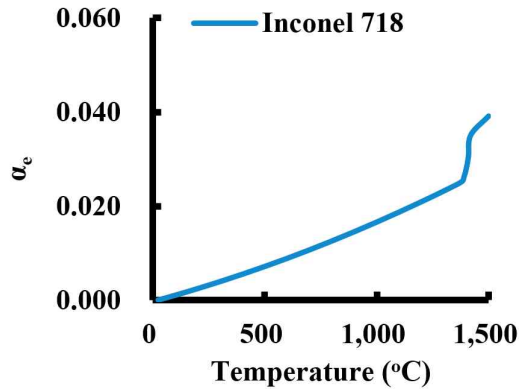
(d) Young's modulus



(e) Poisson's ratio



(f) Yield strength



(g) Thermal expansion

Fig. 10 Temperature dependent material properties of Inconel 718

라. 경계 조건 데이터 도출

적층 해석의 경계 조건은 Fig. 11 과 같이 구분된다. 적층 중 해석 모델의 상부에는 노즐에서 분사되는 보호 가스인 아르곤 (Ar) 가스에 의해 강제대류에 의한 열 손실이 발생하며 측면 및 하부에는 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한, 레이저에 의한 급격한 온도 증가는 복사에 의한 열 손실을 함께 고려할 필요가 있다. 적층 후에는 강제대류가 발생하지 않으므로 모든 면에 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다. 이러한 열 손실을 고려하기 위해 공기 (Air) 및 아르곤 온도 의존 물성 데이터를 우선적으로 도출하였으며 Fig. 12 및 Fig. 13 과 같다.

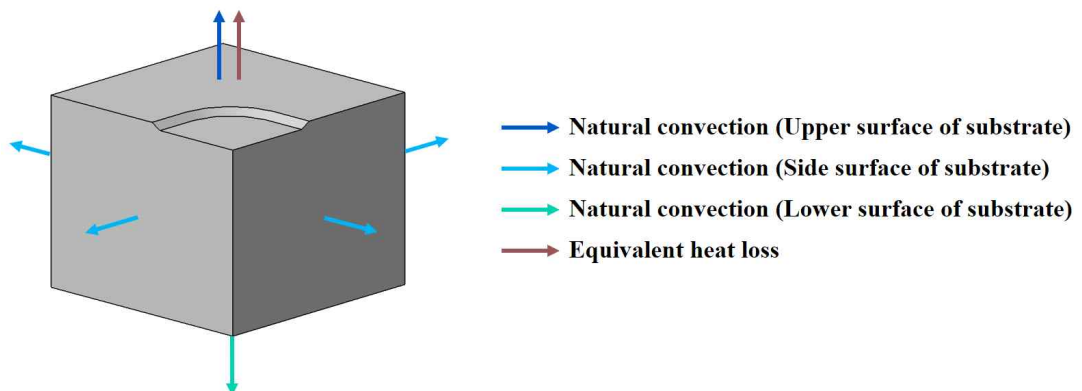


Fig. 11 Application region of the convection on the surface of the substrate

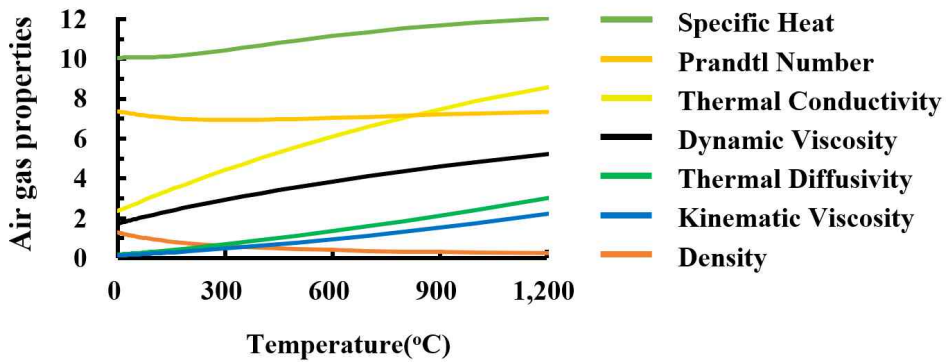


Fig. 12 Temperature dependent material properties of air¹⁶⁾

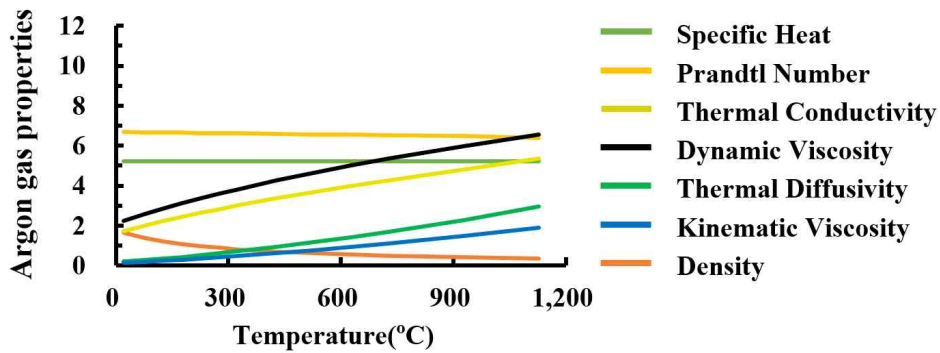


Fig. 13 Temperature dependent material properties of argon¹⁶⁾

유한요소 해석에 적용된 온도의존 자연대류 계수는 참고문헌 조사를 통해 아래 식 (1), (2), (3), (4) 및 (5) 를 이용하여 계산하였다.⁴⁸⁾ 기저부의 수직 면의 경우 식 (1), 상면의 경우 식 (2), 하부의 경우 식 (3) 을 이용하여 계산하였다.

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (Ra < 10^9) \quad (1)$$

$$Nu = 0.54Ra^{1/4} \quad (2)$$

$$Nu = 0.52Ra^{1/5} \quad (3)$$

여기서 Nu, Ra 및 Pr 은 각각 넛셀수 (Nusselt number), 레일리수 (Rayleigh number), 프란틀수 (Prandtl number) 이다. 레일리수는 식 (4) 와 같이 계산된다.

$$Ra = \frac{g(T_S - T_\infty)L_C^3}{\nu_k \alpha T_f} \quad (4)$$

여기서 g , T_S , T_∞ , L_C , ν_k , α 및 T_f 는 각각 중력가속도 (Gravitational acceleration), 표면 온도 (Surface temperature), 대기 온도 (Ambient temperature), 특성 길이 (Characteristic length), 동점성 계수(kinematic viscosity), 열 확산 계수 (Thermal diffusivity) 및 대류 경계층의 유체 온도의 근사치이다. 대류 경계층의 유체 온도의 근사치는 식 (5) 와 같이 계산된다. 최종적으로 도출된 자연대류 계수는 Fig. 14 와 같다.

$$T_f = \frac{T_S + T_\infty}{2} \quad (5)$$

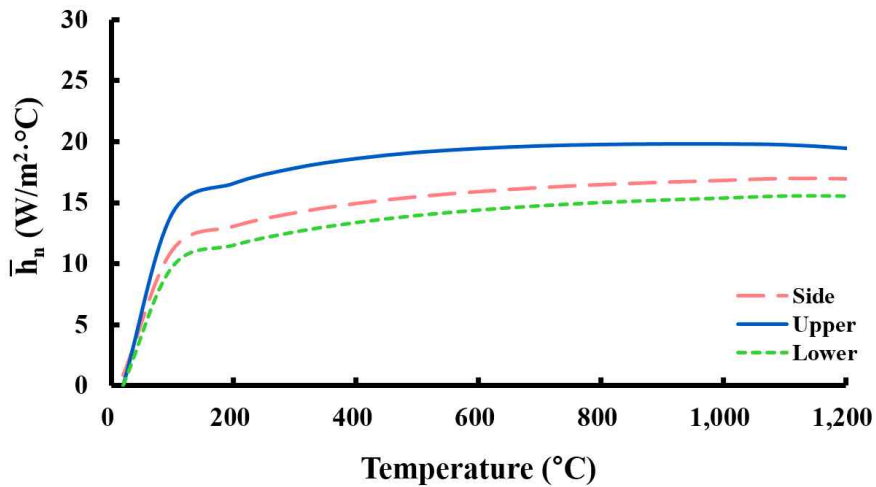


Fig. 14 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces

유한요소 해석에 적용된 온도의존 강제대류 계수는 참고문헌 조사를 통해 아래 식 (6), (7), (8), (9) 및 (10) 을 이용하여 계산하였다.⁴⁸⁾

$$\bar{h}_f = \frac{\overline{Nu} \times k}{D} \quad (6)$$

여기서 \bar{h}_f , \overline{Nu} , k 및 D 는 각각 평균 강제대류 계수, 평균 넛셀수, 열전도도 및 노즐의 지름이다. 평균 넛셀수의 경우 식 (7) 을 통해 계산된다.

$$\overline{Nu} = Pr^{0.42} \left[\frac{2Ar^{0.5}(1-2.2Ar^{0.5})}{1+0.2(H/D-6)Ar^{0.5}} \right] [2Re^{0.5}(1+0.005Re^{0.55})^{0.5}] \quad (7)$$

여기서 Ar , H 및 Re 는 각각 적용 면적, 노즐과 표면 사이 거리 및 레이놀즈수 (Reynolds number) 이다. 평균 넛셀수는 적용 면적 0.004 에서 0.04 사이, 노즐과 표면 사이 거리와 노즐 직경의 비는 2 에서 12 사이, 레이놀즈수는 2,000 에서 400,000 사이에서 적용된다. 적용 면적, 레이놀즈수 및 프란틀수는 아래 식 (8), (9) 및 (10) 과 같이 계산된다.

$$Ar = \frac{D^2}{4 \times R^2} \quad (8)$$

$$Re = \frac{Ve \times D}{\nu_k} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (10)$$

여기서 R , Ve , μ 는 각각 적용 반경, 유동 평균 속도 및 유체의 점성 계수 (Dynamic viscosity) 이다. 최종적으로 도출된 강제대류 계수는 Fig. 15 와 같다.

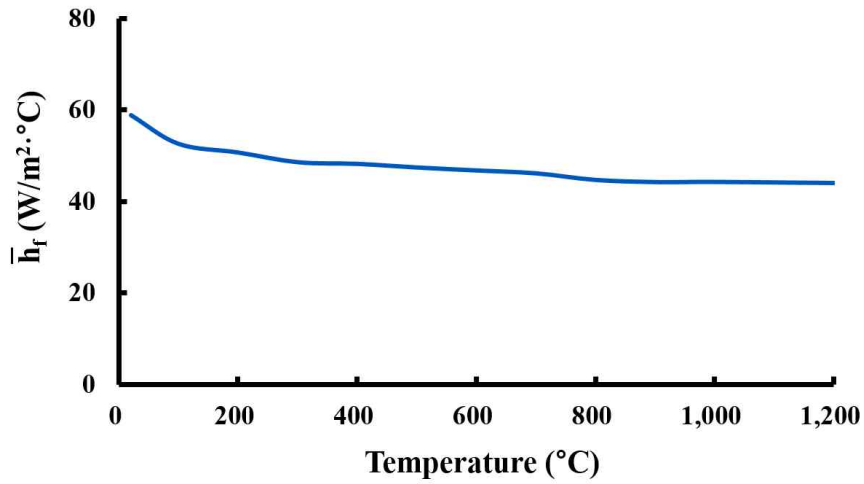


Fig. 15 Temperature dependent forced convection coefficient

적층 공정 중에는 Fig. 16 과 같이 보호 가스 분사에 의한 강제대류 발생 및 레이저에 의한 급격한 온도 증가로 복사로 인한 열 손실이 발생한다. 따라서 적층 공정 중에는 복사에 의한 열전달 효과를 고려해야 한다. 등가 열 손실 계수는 (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) 및 (18) 을 이용하여 계산하였다.¹⁶⁾

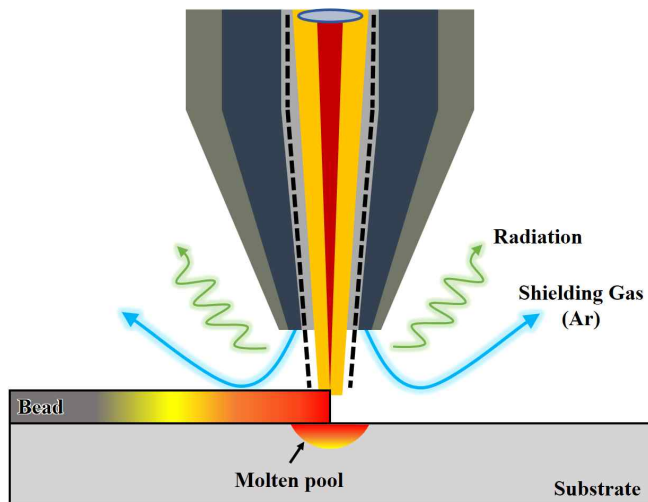


Fig. 16 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces

$$\dot{Q}_{loss,t} = \dot{Q}_{loss,f} + \dot{Q}_{loss,r} \quad (11)$$

여기서 $\dot{Q}_{loss,t}$, $\dot{Q}_{loss,f}$ 및 $\dot{Q}_{loss,r}$ 는 각각 공정 중 발생하는 총 열 손실, 강제대류에 의한 열 손실 및 복사에 의한 열 손실이다. 강제대류에 의한 열 손실 및 복사에 의한 열 손실은 아래 식 (12) 및 (13) 을 통해 계산된다.

$$\dot{Q}_{loss,f} = \bar{h}_f(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{loss,r} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (13)$$

여기서 ϵ 및 σ 는 각각 방사율 (Emissivity) 및 슈테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수이다. 해석에서 사용된 S45C 및 Inconel 718 의 방사율은 Fig. 17 과 같으며 슈테판-볼츠만 상수는 $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2K^2)$ 이다.

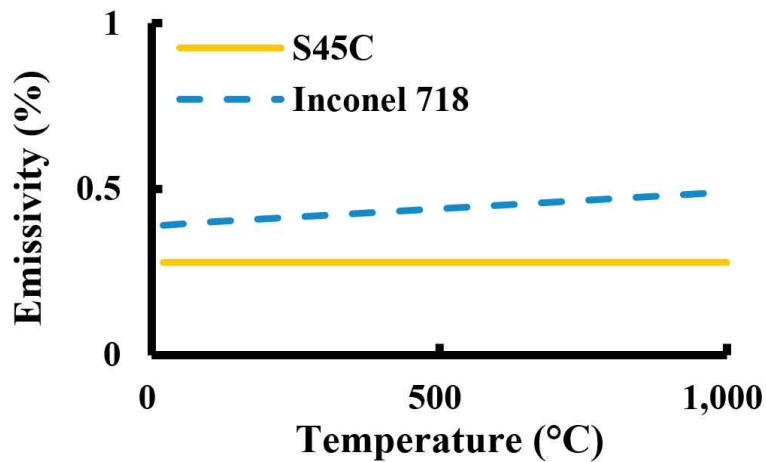


Fig. 17 Temperature dependent emissivity of S45C and Inconel 718

식 (11), (12) 및 (13) 는 식 (14) 와 같이 나타낼 수 있으며, 이는 계산을 통해 다시 (15) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{loss,t} = \bar{h}_f(T_s - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{loss,t} = \bar{h}_f(T_s - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)(T_s - T_\infty) \quad (15)$$

식 (15) 의 일부분은 아래 식 (16) 과 같이 나타낼 수 있으며, $\bar{h}_{eq,f}$ 를 식 (17) 과 같이 가정하면, 최종적으로 등가 열 손실 계수 식은 (18), 총 열 손실 식은 식 (19) 로 표현된다.¹⁶⁾

$$\bar{h}_r = \epsilon\sigma(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (16)$$

$$\bar{h}_{eq,f} = \bar{h}_f + \bar{h}_r \quad (17)$$

$$\bar{h}_{eq,f} = \bar{h}_f + \epsilon\sigma(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{loss,t} = \bar{h}_{eq,f}(T_s - T_\infty) \quad (19)$$

위 식을 이용하여 도출된 등가 열 손실 계수는 Fig. 18 과 같다.

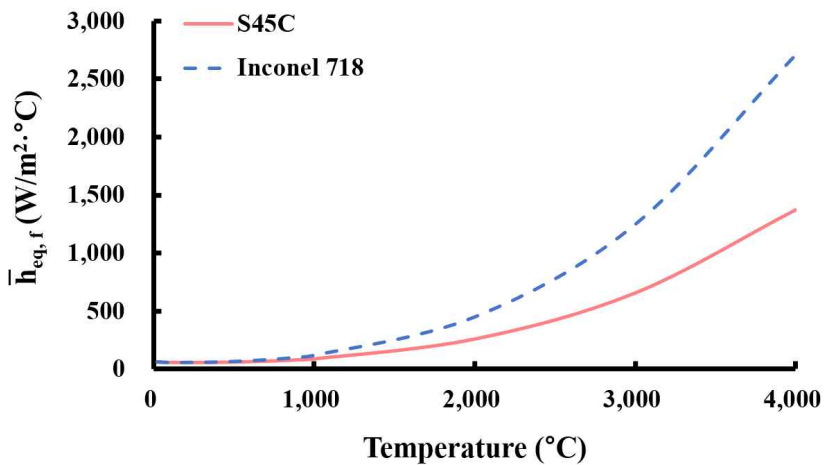


Fig. 18 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient

마. 열원 모델

레이저 모드는 종축 모드 (Longitudinal electromagnetic mode) 및 횡축 모드 (Transverse electromagnetic mode) 로 나뉜다. 횡축 모드는 TEM_{mn} 으로 표기되며 첨자인 m 및 n 은 각각 레이저 빔을 가로지르는 x 축 및 y 축 개수이다. 그중 TEM_{00} 는 최고 에너지 밀도를 가지며, 초점거리 바깥에서도 그 형상을 유지할 수 있다.⁴⁹⁾ 따라서 열원은 TEM_{00} 로 가정함과 동시에 레이저를 수학적으로 모델링 하기 위해 Fig. 19 와 같이 가우시안 (Gaussian) 형상으로 가정하였다.

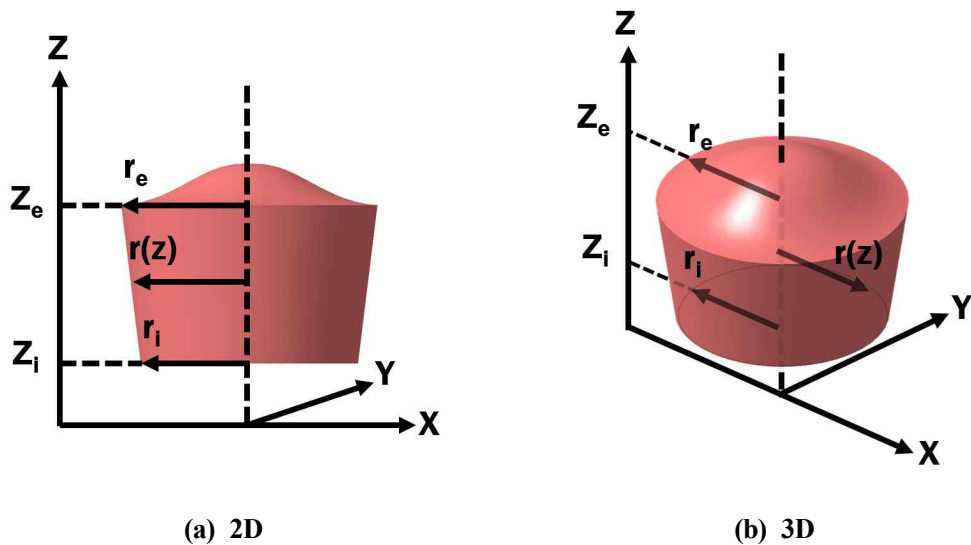


Fig. 19 Heat flux model of laser

여기서 z_i , z_e , r_i 및 r_e 는 각각 열원의 침투 깊이 (Penetration depth), 상부 위치, 하부 반경 및 상부 반경이다. 체적 열원은 유한요소 해석에서 설정된 경로를 따라 이동하며 열원 반경은 실제 실험에서 사용된 레이저 빔 반경을 적용하였다. 열원의 상부는 비드 상부에 위치하였고, 침투 깊이는 비드 높이로 설정하였다. 본 체적 열원의 모델링 식은 식 (20) 과 같으며 표준 열원 강도는 식 (21), 침투 깊이에 따른 레이저의 유효 범위는 식 (22) 와 같다.¹⁶⁾

$$Q(x, y, z) = \eta \times Q_0 \times \exp\left(-\frac{x^2 + (y - v_y t)^2}{C \times r(z)^2}\right) \quad (20)$$

$$Q_0 = -\frac{P}{\pi r_e^2 (z_i - z_e)} \quad (21)$$

$$r(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} (z - z_e) \quad (22)$$

여기서 η , Q_0 , x , y , z , δ , v , t , C 및 $r(z)$ 은 각각 열원의 효율, 표준 열원 강도, x 좌표, y 좌표, z 좌표, 침투 깊이, 속도, 시간, 열원 형상계수 및 침투 깊이에 따른 레이저의 유효 범위이다.

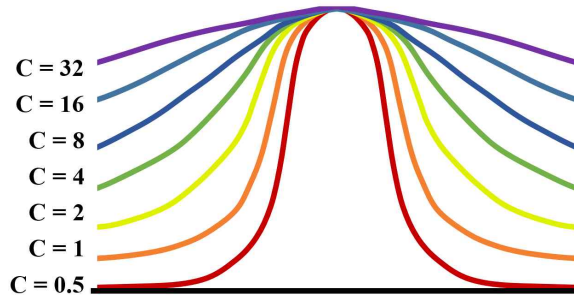


Fig. 20 Intensity distribution of heat flux⁵⁰⁾

열원의 형상은 열원 형상계수인 C 값에 따라 변하며 Fig. 20 과 같다. 본 연구에서 사용된 열원 형상은 플랫폼 (Flat top) 형상에 가까운 가우시안 (Gaussian) 형상이다.

Table 7 Parameter of heat flux

Parameter	r_e (mm)	r_i (mm)	δ (mm)	C
Value	0.500	0.499	Bead height	16

Table 7 은 유한요소 해석 모델에 적용된 열원의 변수이다. 열원의 상부 직경은 1.0 mm 이며 열원의 하부 직경은 열원의 상부 직경과 거의 유사한 크기로 설정하였다. 열원의 침투 깊이는 비드 높기와 같으며 열원 형상계수는 16 을 적용하였다. 공정 중 발생하는 물질의 증발 및 파장의 반사 등의 변수에 의해 실제 열원은 예측할 수 없는 열 손실이 발생하고 실제 전력보다 적게 적용된다. 이러한 열 손실은 열원의 효율을 이용하여 고려하였다.

2. 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 잔류응력 비교 분석

가. 유효 응력 비교 및 분석

Fig. 21 는 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 유효 응력 분포이다. 유효 응력은 적층부 주변에서 크게 발생하였으며 기저부 경사 각도와 코너부 반경에 따른 유효 응력 분포 차이는 거의 없었다.

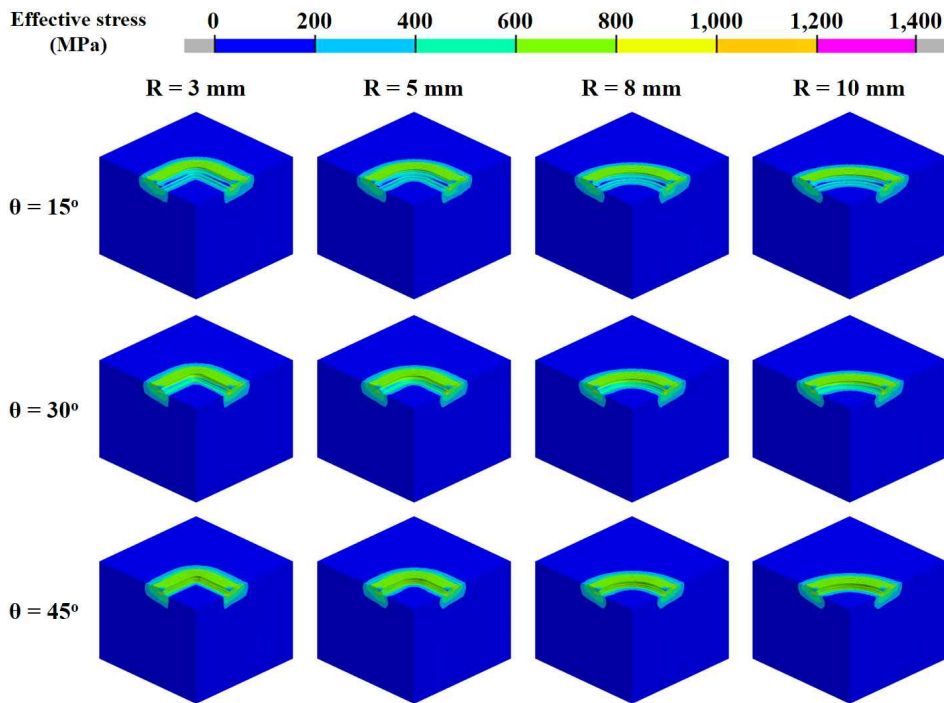


Fig. 21 Distribution of effective stress according to groove angle and radius of corner

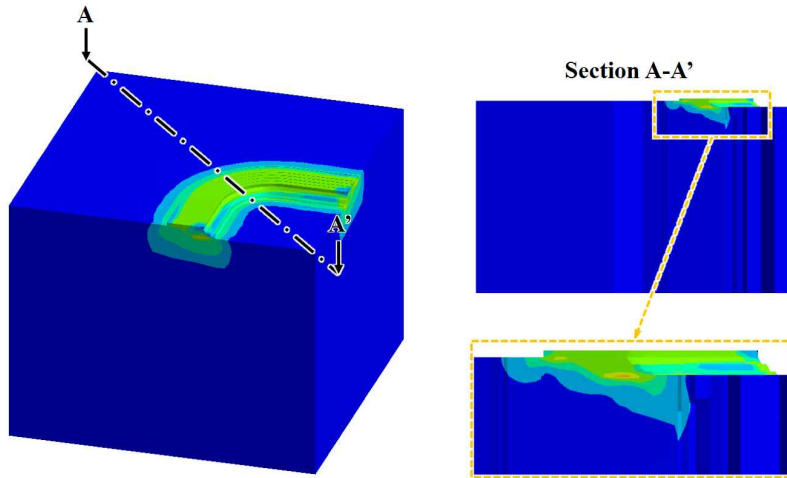


Fig. 22 Effective stress distribution in the specimen ($\theta = 30^\circ$, $R = 5$ mm)

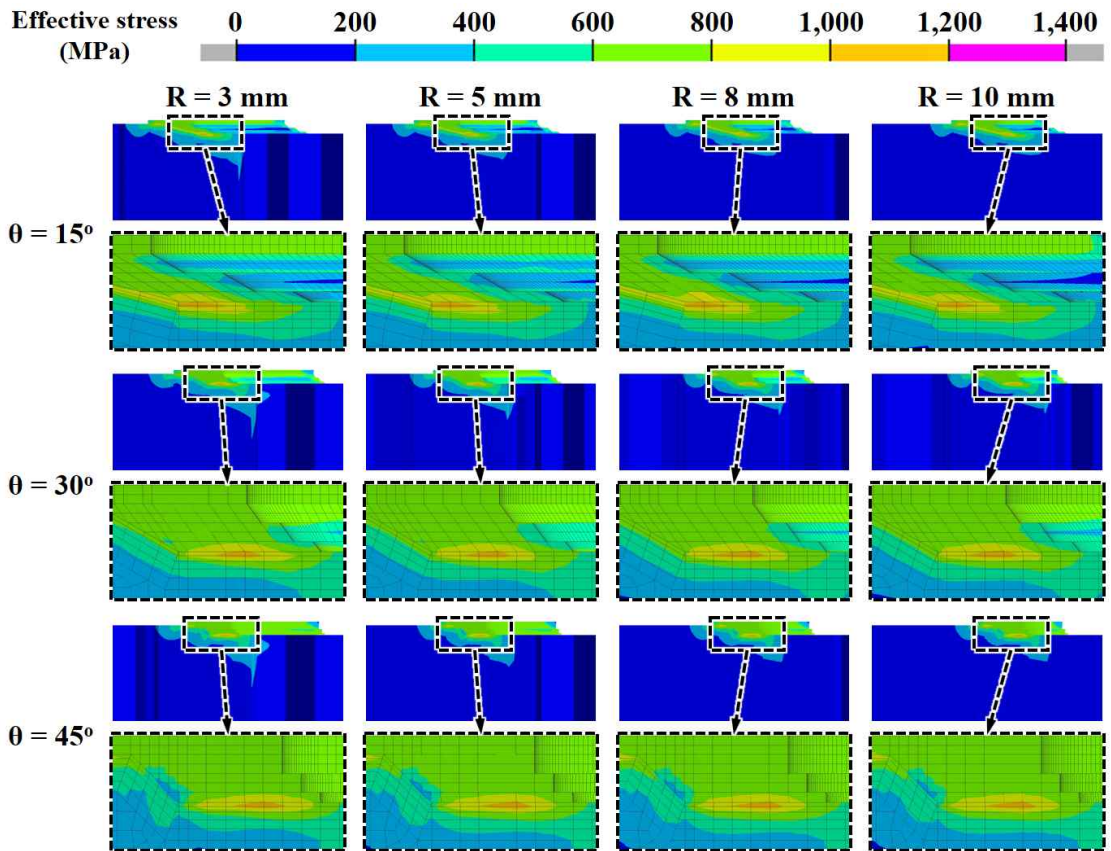


Fig. 23 Effective stress of corner section according to groove angle and radius of corner

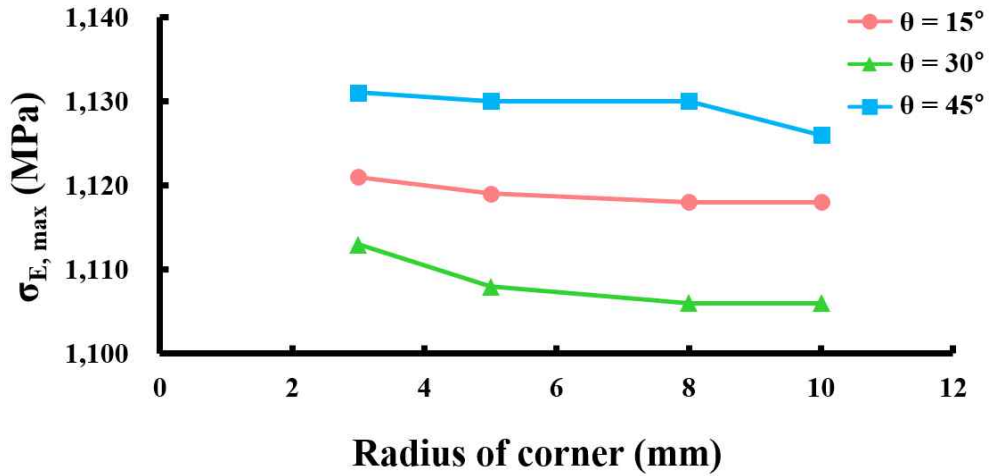


Fig. 24 Maximum effective stress according to groove angle and radius of corner

기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 최대 유효 응력은 모두 코너부의 비드 밑 기저부에서 발생하였다. 따라서 코너부 단면의 유효 응력 분포를 보기 위해 Fig. 22 와 같은 방법으로 Fig. 23 과 같이 각 단면에서의 유효 응력을 비교 분석하였다. Fig. 23 에서 도출된 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 최대 유효 응력 값은 Fig. 24 와 같다. 최대 유효 응력은 모든 코너부 반경 조건에서 기저부 경사 각도 45° 가 가장 높게 도출되었고 기저부 경사 각도 30° 의 경우 가장 낮게 도출되었다. 기저부 경사 각도 45° 의 경우 급격한 형상 변화로 인해 다른 각도에 비해 최대 유효 응력이 높게 도출된 것으로 사료 되며, 기저부 경사 각도 30° 의 경우 15° 보다 완만하지 않지만, 적층량 감소로 인해 기저부 경사 각도 15° 보다 최대 유효 응력이 낮게 도출된 것으로 사료 된다. 또한, 모든 기저부 경사 각도 조건에서 최대 유효 응력은 코너부 반경이 작아질수록 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 코너부 반경이 작아짐에 따라 형상이 급격하게 변하기 때문으로 사료 된다. 최대 유효 응력은 기저부 경사 각도가 45° 이고 코너부 반경이 3 mm 의 경우 1,131 MPa 로 가장 크게 도출되었으며, 기저부 경사 각도가 30° 이고 코너부 반경이 10 mm 의 경우 1,118 MPa 로 가장 낮게 도출되었다.

나. 주응력 비교 및 분석

Fig. 25 는 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 주응력 분포이다. 주응력은 유효 응력과 마찬가지로 적층부 주변에서 크게 발생하였으며 기저부 경사 각도와 코너부 반경에 따른 주응력 분포 차이는 거의 없었다. 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 최대 주응력은 모두 코너부의 비드 밑 기저부에서 발생하였다. 따라서 코너부 단면의 주응력 분포를 보기 위해 Fig. 26 과 같은 방법으로 Fig. 27 과 같이 각 단면에서의 주응력을 비교 분석하였다.

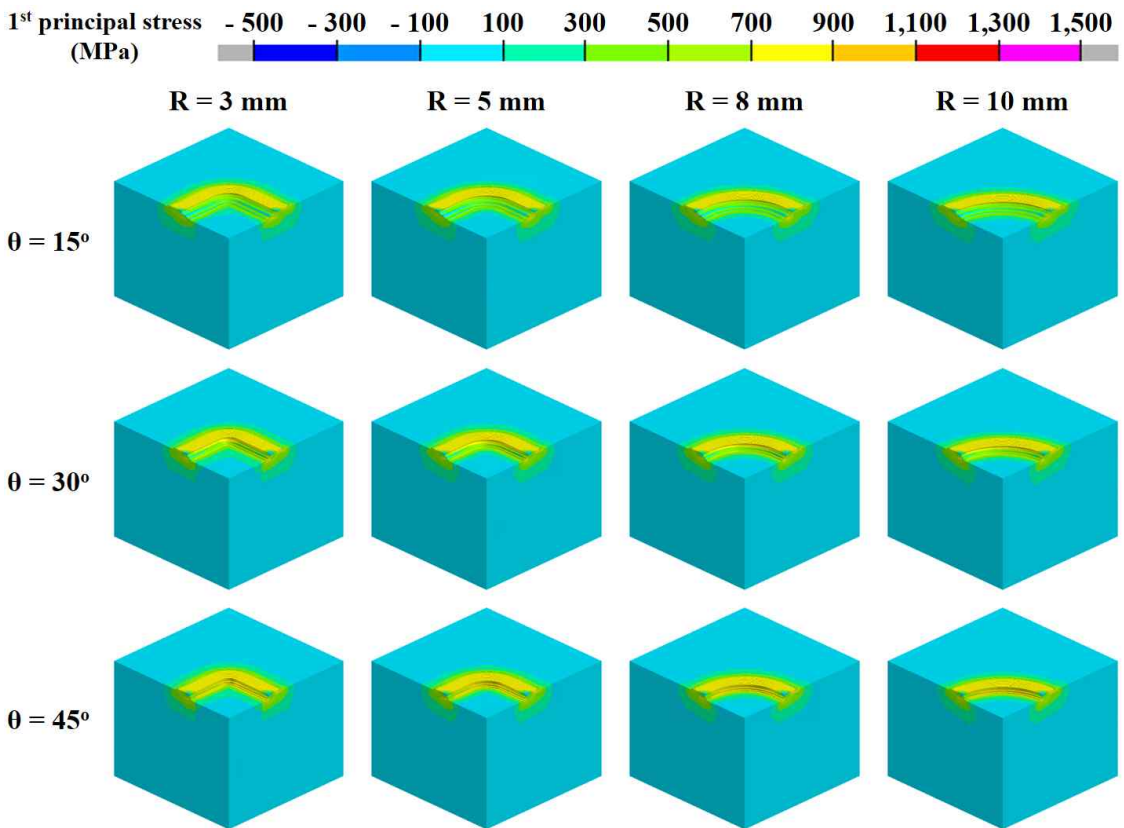


Fig. 25 Distribution of first principal stress according to groove angle and radius of corner

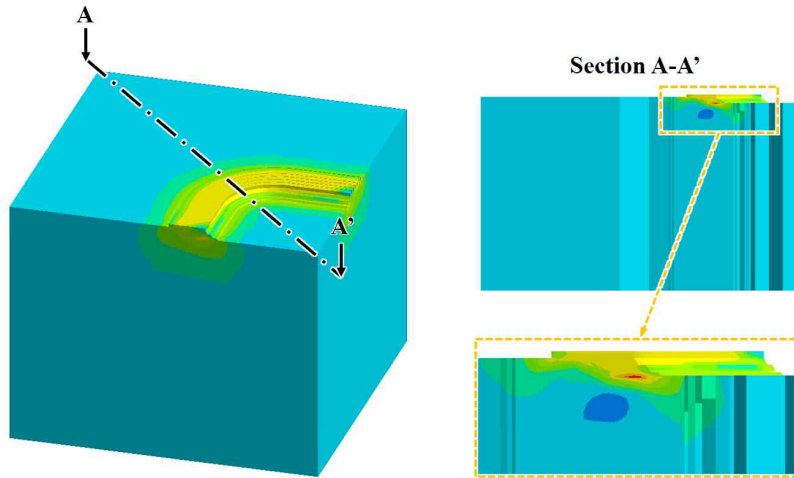


Fig. 26 First principal stress distribution in the specimen ($\theta = 30^\circ$, $R = 5$ mm)

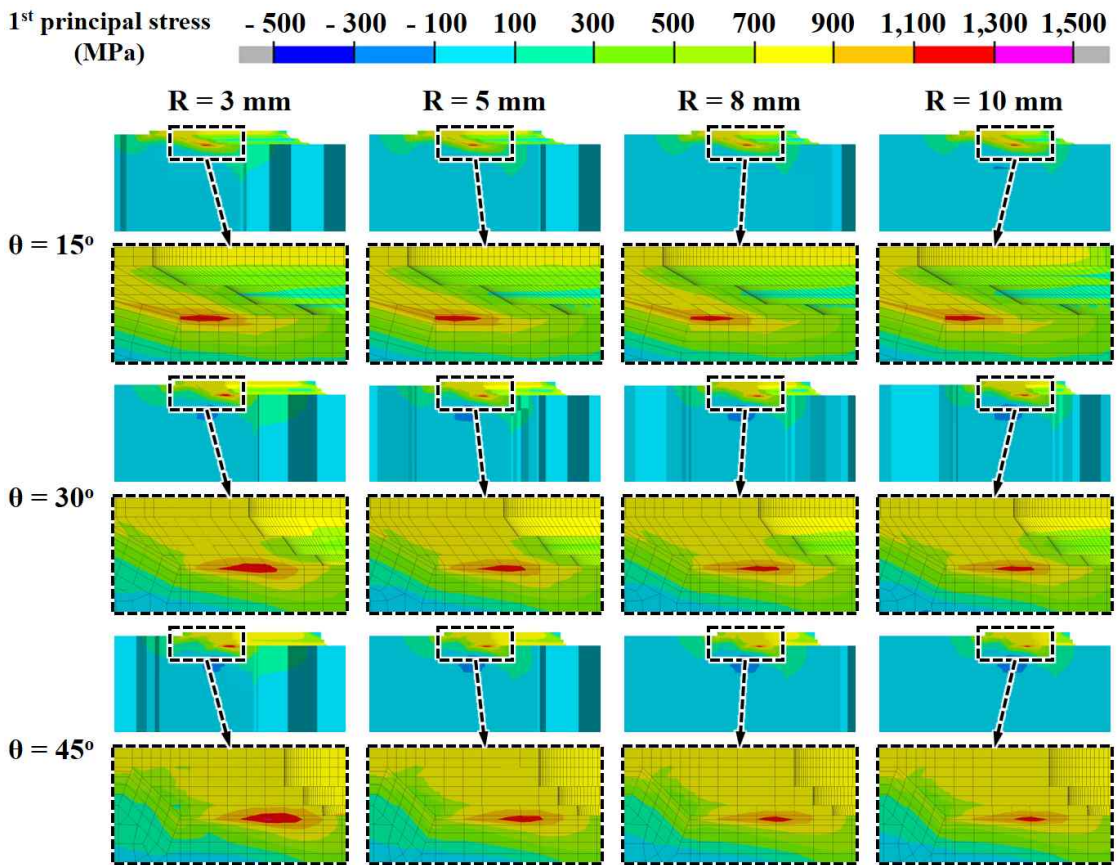


Fig. 27 First principal stress of corner section according to groove angle and radius of corner

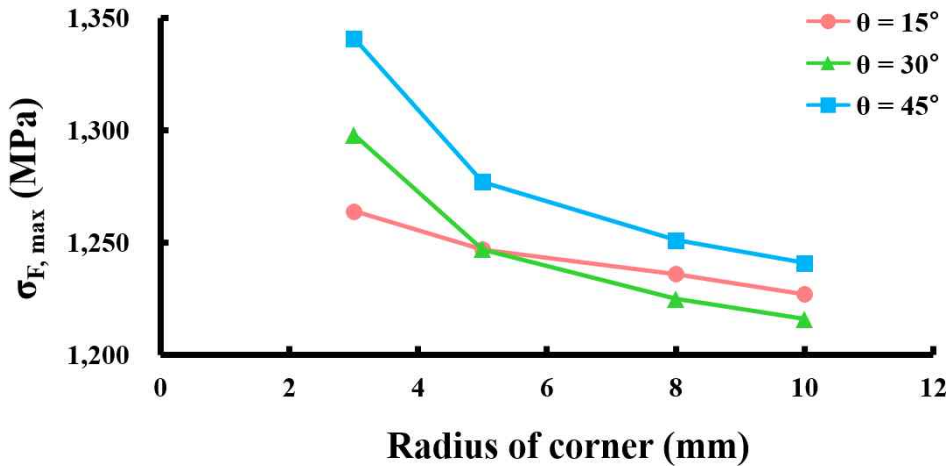


Fig. 28 Maximum first principal stress according to groove angle and radius of corner

Fig. 27 에서 도출된 기저부 경사 각도 및 코너부 반경에 따른 최대 주응력 값은 Fig. 28 과 같다. 최대 주응력은 최대 유효 응력과 마찬가지로 모든 코너부 반경 조건에서 기저부 경사 각도 45° 가 가장 높게 도출되었다. 기저부 경사 각도 45° 의 경우 급격한 형상 변화로 인해 다른 각도에 비해 최대 유효 응력이 높게 도출된 것으로 사료 된다. 또한, 모든 기저부 경사 각도 조건에서 최대 주응력은 코너부 반경이 작아질수록 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 코너부 반경이 작아짐에 따라 코너부에서 형상이 급격하게 변하기 때문으로 사료 된다. 최대 주응력은 기저부 경사 각도가 45° 이고 코너부 반경이 3 mm 의 경우 1,341 MPa 로 가장 크게 도출되었으며, 기저부 경사 각도가 30° 이고 코너부 반경이 10 mm 의 경우 1,216 MPa 로 가장 낮게 도출되었다.

기저부 경사 각도 15° 의 경우 동일한 모양으로 적층시킬 때 다른 경우에 비해 적층량이 월등히 많고 30° 에 비해 잔류응력 또한 높기 때문에 적층 시간과 잔류 응력을 고려하여 다음 절 부터는 기저부 경사 각도 15° 를 제외한 기저부 경사 각도 30° 및 45° 해석만을 진행하였다.

제 2 절 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 잔류응력 특성 분석

1. 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 3차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출

가. 적층 형상에 따른 비드부 형상 개발

적층 형상에 따른 잔류응력 특성을 분석하기 위해 적층 형상에 따라 총 3 가지의 비드부 형상을 개발하였다. 비드부 형상의 개념도는 Fig. 29 와 같다. Type. 1 의 경우 과적층 부를 제외한 모든 층의 비드 수가 동일하여 층이 올라갈수록 경사가 지는 형상이며, Type. 2 의 경우 2 층까지 비드 끝단부가 수직으로 세워지는 형상이다. Type. 3 의 경우 비드 끝단부가 모두 수직으로 세워지는 형상으로 적용하였다.

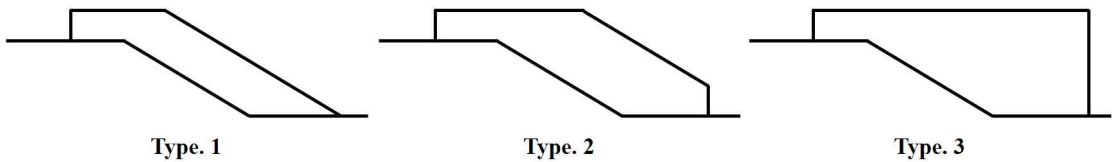


Fig. 29 Designs of the bead shapes according to deposition shapes

나. 적층 형상에 따른 3차원 유한요소 해석 모델 개발

개발된 적층 형상에 따른 비드부 형상을 바탕으로 총 6 가지의 유한요소 해석 모델을 개발하였다. Fig. 30 은 적층 형상에 따른 비드부의 유한요소 격자이다. 비드는 총 5 층이며 마지막 2 층의 경우 과적층 하기 위해 적층부 앞에 1 mm 를 추가하여 제작하였다. 유한요소 해석 모델의 비드부 형상 치수는 제 2 장의 제 1 절에 적용하였던 Table 3 와 같이 적용하였다.

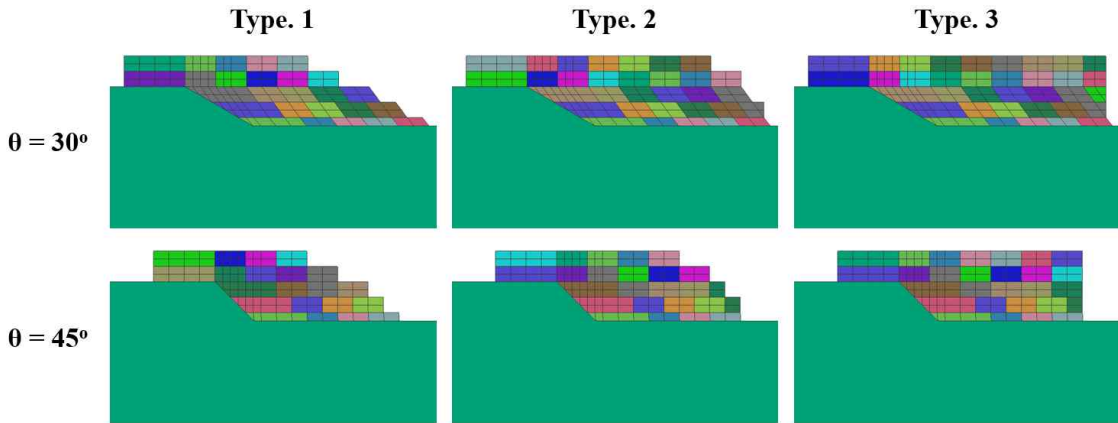


Fig. 30 Bead meshes according to deposition shapes

Fig. 30 중 Type. 1 비드부의 경우 경사가 지는 형상을 모사하기 위해 과적층 부위를 제외한 1 층에서 3 층 까지 비드 개수를 동일하게 적용하였으며 과적층 부위의 경우 경사 형상을 따라가기 위해 5 층 비드 개수는 4 층 비드 개수에서 한 개를 제외하였다. Type. 2 비드부의 경우 2 층까지 비드 끝단부가 수직으로 세워지는 형상을 모사하기 위해 2 층 비드 끝단부를 수직으로 세웠으며 그 위로는 경사진 형상을 위해 과적층 부위를 Type. 1 과 동일하게 5 층 비드 개수를 4 층 비드 개수에서 한 개를 제외하도록 설정하였다. Type. 3 의 경우 비드 끝단부가 모두 수직으로 세워지도록 설정하였다. 이와 같이 설정된 최종 Path 수는 기저부 경사 각도 30° 의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 26 Path, 32 Path 및 36 Path 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 21 Path, 25 Path 및 28 Path 이다. 또한, 각 Type 별 비드의 체적은 Table 9 와 같이 기저부 경사 각도 30° 의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 69.18 mm³, 83.39 mm³, 90.95 mm³ 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 57.83 mm³, 65.33 mm³, 74.08 mm³ 이다. 해석에 사용된 기저부 및 적층부 소재는 각각 S45C 및 Inconel 718 이다. 각 소재의 화학 조성은 Table 6 과 같으며, 온도의존 열 및 기계 물성 데이터는 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같다.

Table 8 Number of path depending on the deposition shapes

	Type 1	Type 2	Type 3
$\theta = 30^\circ$	26	32	36
$\theta = 45^\circ$	21	25	28

Table 9 Volume of the bead (Deposition shapes)

	Type 1	Type 2	Type 3
$\theta = 30^\circ$	69.18 mm ³	83.39 mm ³	90.95 mm ³
$\theta = 45^\circ$	57.83 mm ³	65.33 mm ³	74.08 mm ³

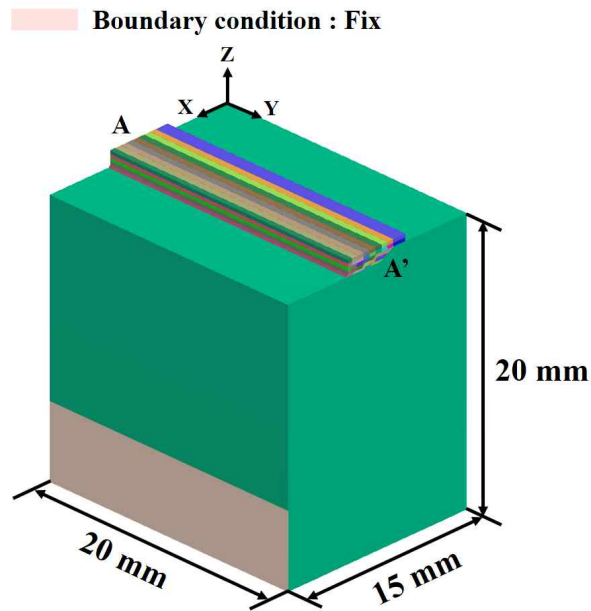


Fig. 31 FE models for thermo-mechanical analysis of deposition shape

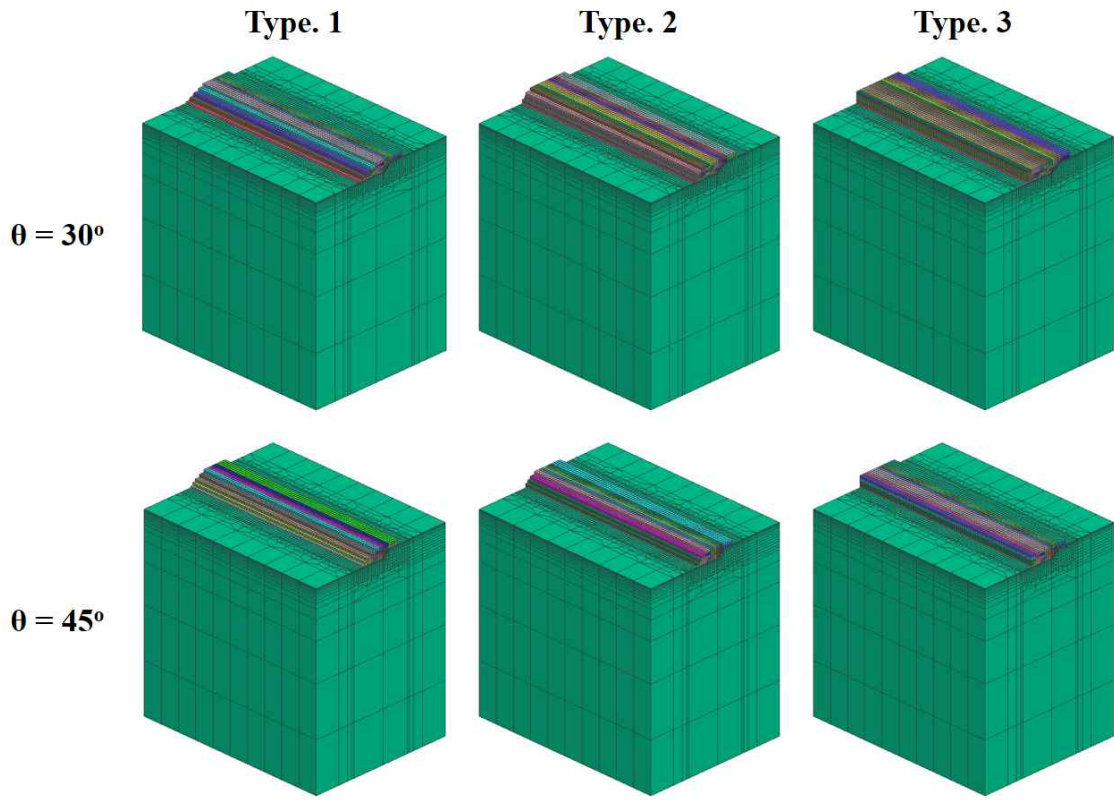


Fig. 32 FE models according to deposition shapes

Fig. 31 은 적층 형상에 따른 열-기계 연계 해석을 위한 3차원 유한요소 해석 모델이다. 해석 모델의 크기는 $15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 이며, 바닥 면의 5 mm 범위와 바닥 면으로부터 5 mm 범위의 옆면에 고정 경계 조건이 적용되었다. 적층부의 기저부 경사 각도는 Fig. 32 와 같이 30° 및 45° 로 설정하였으며 적층부 형상은 총 세 가지로 설정하였다. 적층 시작 위치는 모든 층을 Fig. 31 의 A 지점에서 시작하여 A' 지점으로 진행 후 다음 비드 적층 방향은 단일 방향과 Alternative 방향으로 설정하였다. 각 유한요소 해석 모델의 절점 (Node) 의 개수와 3차원 요소 (Element) 의 개수는 Table 10 과 같다. 기저부 경사 각도 45° 에서 30° 로 갈수록, Type. 1 조건에서 Type. 3 조건으로 갈수록 절점과 3차원 요소 수는 증가하였다. 이는 비드 개수가 증가함에 따라 절점과 3차원 요소 수가 증가하기 때문이다.

Table 10 Number of nodes and 3D elements of FE models of deposition shapes

Type of deposition model		Nodes (EA)	3D Elements (EA)
$\theta = 30^\circ$	Type. 1	47,844	45,100
	Type. 2	49,788	47,020
	Type. 3	51,084	48,300
$\theta = 45^\circ$	Type. 1	43,308	40,780
	Type. 2	44,280	41,740
	Type. 3	45,414	42,860

다. 경계 조건 데이터 도출

적층 해석의 경계 조건은 Fig. 33 과 같이 구분된다. 적층 중 해석 모델의 상부에는 노즐에서 분사되는 보호 가스인 아르곤 (Ar) 가스에 의해 강제대류에 의한 열 손실이 발생하며 측면 및 하부에는 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한, 레이저에 의한 급격한 온도 증가는 복사에 의한 열 손실이 함께 고려된다. 적층 후에는 강제대류가 발생하지 않으므로 모든 면에 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다.

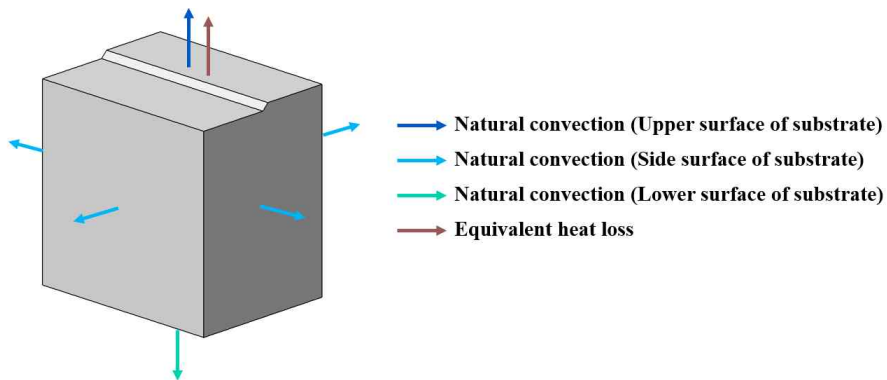


Fig. 33 Application region of the convection on the surface of the substrate for deposition of bead shapes

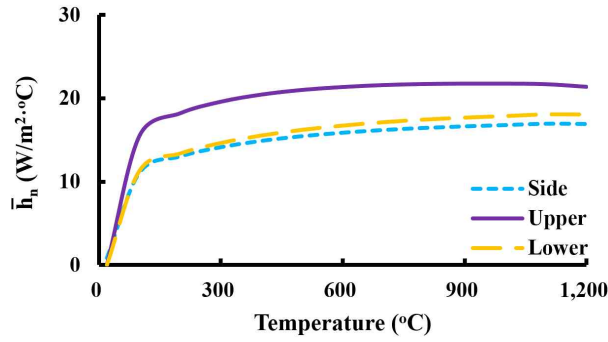


Fig. 34 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces (Deposition shapes)

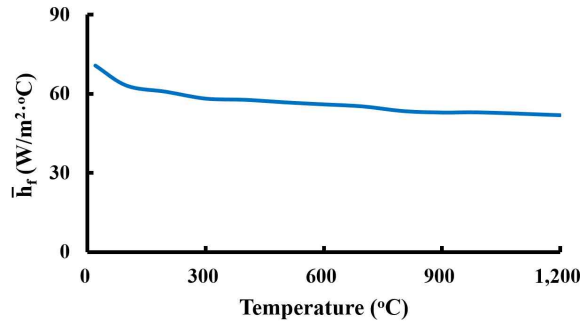


Fig. 35 Temperature dependent forced convection coefficient (Deposition shapes)

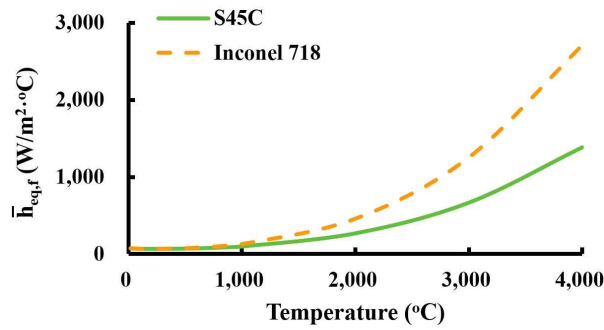


Fig. 36 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient (Deposition shapes)

자연대류, 강제대류 및 등가 열 손실 계수는 식 (1) - (19) 를 이용하여 계산된 온도 의존 데이터를 이용하였다. 계산된 자연대류, 강제대류 및 등가 열 손실 계수는 각각 Fig. 34, Fig. 35 및 Fig. 36 과 같다.

2. 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 단일 방향 적층 시 잔류응력 비교 분석

가. 유효 응력 비교 및 분석

Fig. 37 은 적층 형상에 따른 단일 방향 적층 시 유효 응력 분포이다. 유효 응력은 적층부 주변에서 크게 발생하였으며 적층 형상에 따른 유효 응력 분포 차이는 크게 발생하지 않았다.

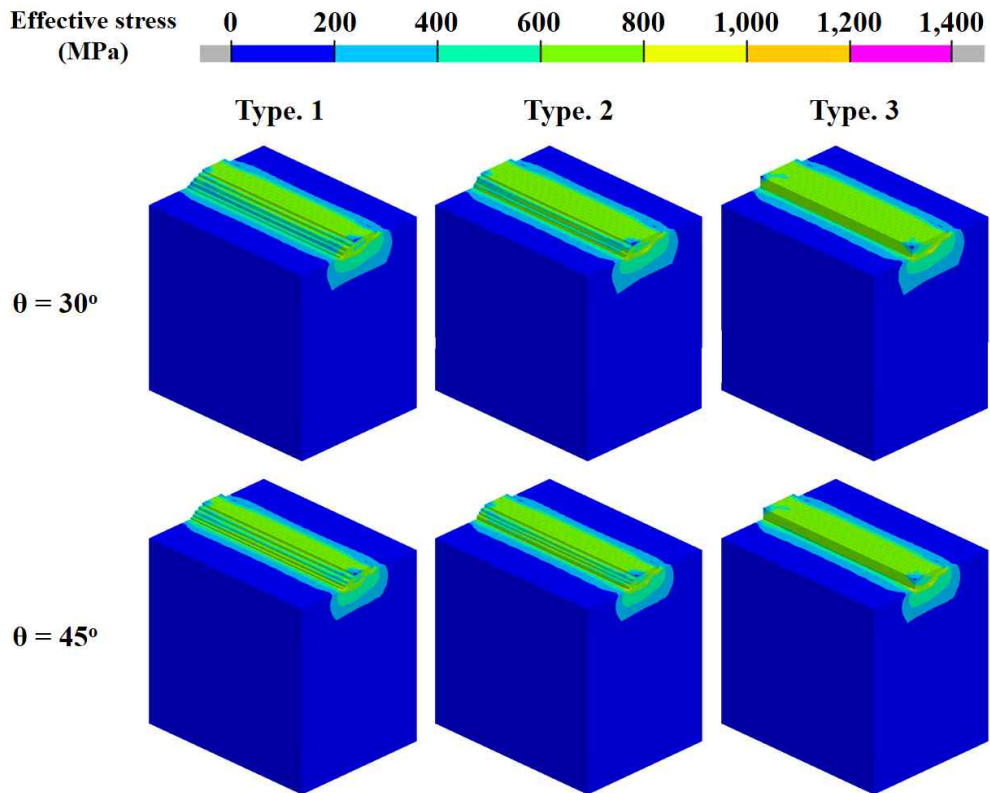


Fig. 37 Effective stress distribution of uni direction according to the deposition shapes

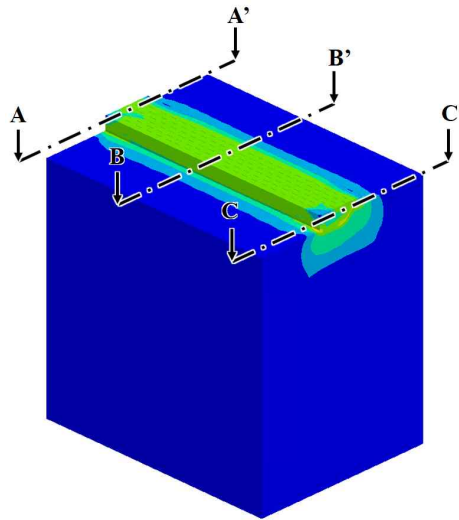
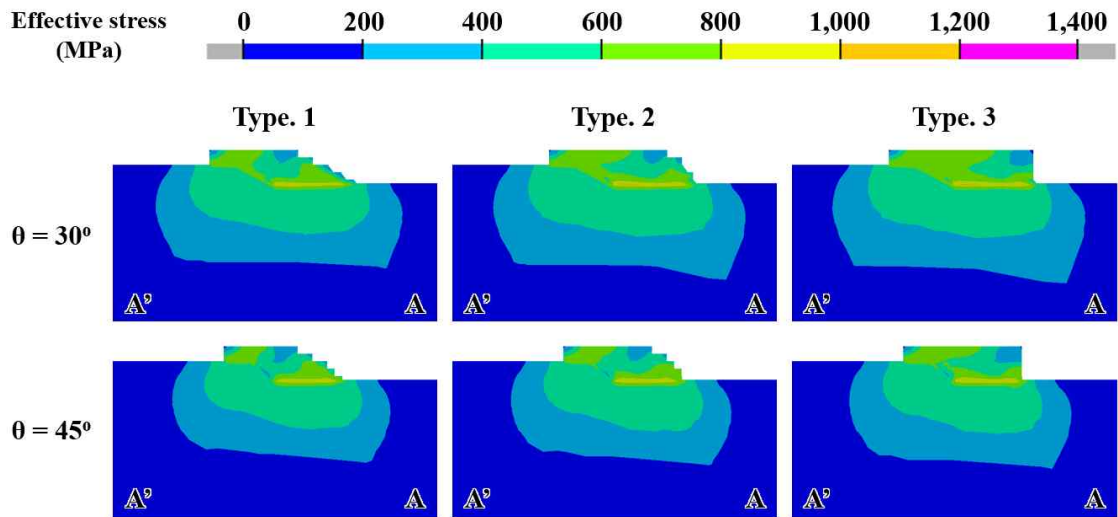


Fig. 38 Effective stress measurement location according to the deposition shape

Fig. 38 은 적층 형상에 따른 유효 응력 측정 위치이다. A - A' 단면은 적층 시작 지점을 나타내며 B - B' 단면은 적층 중간 지점을 나타낸다. C - C' 단면은 적층 끝 지점을 나타내며 각 지점의 단면 및 유효 응력 분포는 Fig. 39 와 같다.



(a) Effective stress distribution of A - A' section

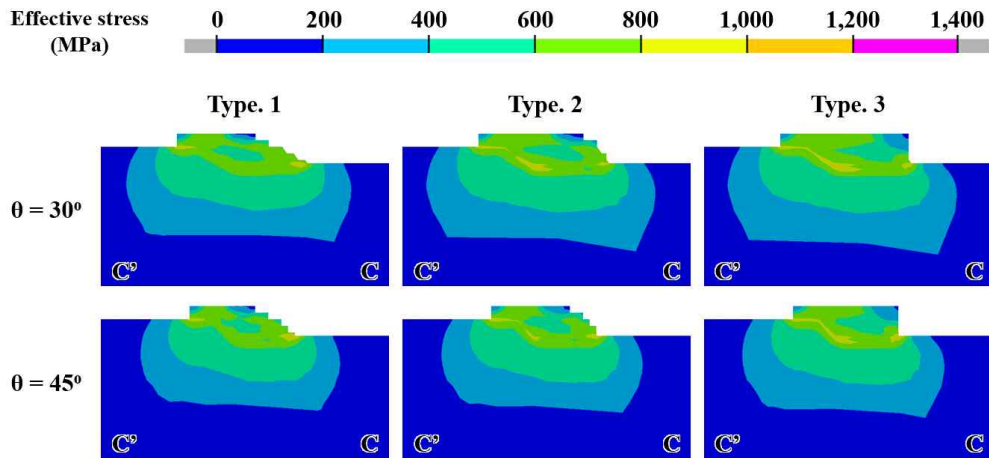
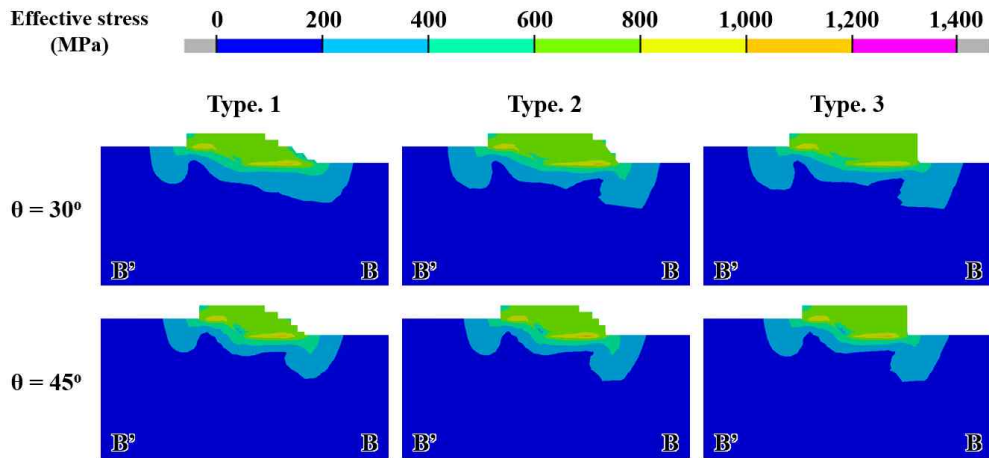


Fig. 39 Effective stress of each section according to the deposition shapes

각 지점의 유효 응력 분포는 시작 및 끝 지점과 중간 지점의 경향이 다르게 나타났다. 시작 및 끝 지점의 경우 유효 응력이 낮고 넓게 분포 되었으며 중간 지점의 경우 유효 응력이 높고 좁게 분포되었다. 각 단면의 최대 유효 응력은 적층 중간 지점에서는 비드 밑 기저부에서 발생하였으며, 적층 시작 지점과 끝 지점에서는 최대 유효 응력 발생 위치가 달라 각 지점의 최대 유효 응력이 발생한 두 위치의 값을 비교 분석하였다. 적층 시작 지점의 측정 위치는 Fig. 40 과 같으며, 적층 끝 지점의 측정 위치는 Fig. 41 과 같다.

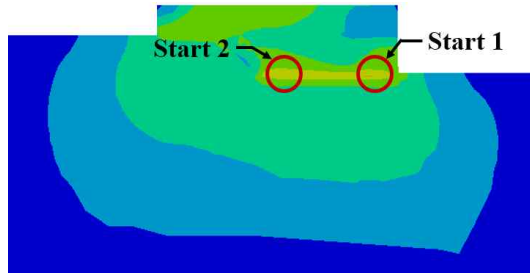


Fig. 40 Define the two start points in the A - A' section

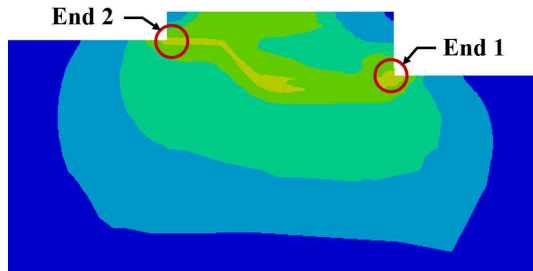
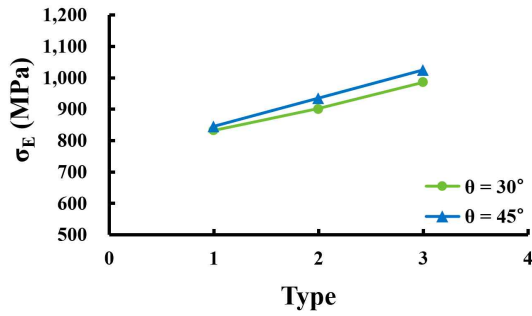
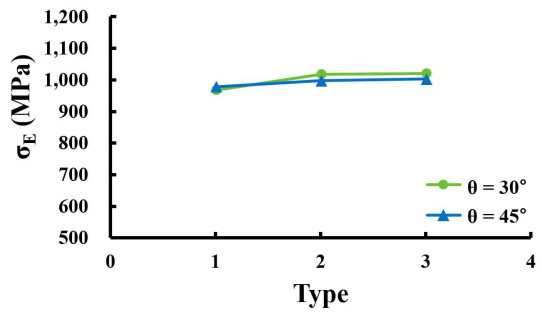


Fig. 41 Define the two end points in the C - C' section

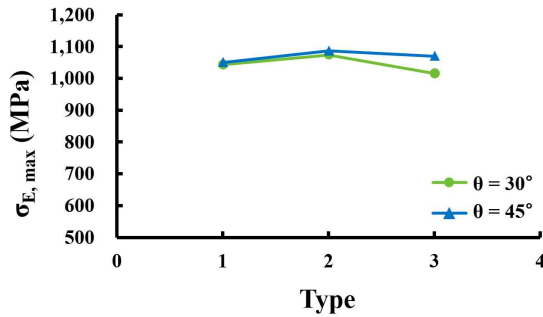
각 지점의 최대 유효 응력은 Fig. 42 와 같다. Fig. 42 의 (a) 는 적층 시작 지점의 Start 1 위치의 유효 응력이며 Fig. 42 의 (b) 는 적층 시작 지점의 Start 2 위치의 유효 응력이다. Start 1 위치 및 Start 2 위치 모두 Type 3 로 갈수록 유효 응력 값이 증가했다. Fig. 42 의 (c) 는 적층 중간 지점의 최대 유효 응력이다. 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 유효 응력 값이 가장 높게 도출되었다. Fig. 42 의 (d) 는 적층 끝 지점에서 End 1 위치의 유효 응력이며 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 유효 응력 값이 가장 낮게 도출되었다. Fig. 42 의 (e) 는 적층 끝 지점에서 End 2 위치의 유효 응력이며 각 Type 에 따른 유효 응력의 차이는 크게 나타나지 않았다. 이를 바탕으로 모든 조건의 단면을 비교한 결과 Type. 2 에서 가장 높은 유효 응력이 도출되었다. 이는 Type. 1 의 경우 적층량이 가장 적어 유효 응력 값이 낮게 도출됐을 것으로 사료 되며, Type. 3 의 경우 적층량 증가로 열 이력을 반복적으로 받으면서 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되어 응력 집중이 완화됐을 것으로 사료 된다. 또한, 적층 시작 지점과 적층 끝 지점이 적층 중간 지점보다 유효 응력이 비교적 낮은 이유는 적층 시 시작 및 끝 지점에는 더 높은 열을 받게 되고 이에 따른 변형이 커져 응력이 작게 나타난 것으로 사료 된다.



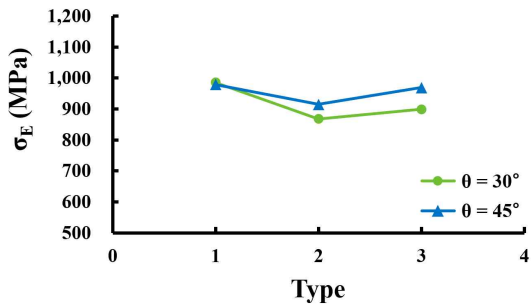
(a) Start 1 of A - A' section



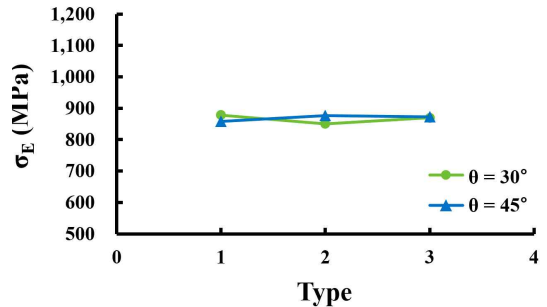
(b) Start 2 of A - A' section



(c) B - B' section



(d) End 1 of C - C' section



(e) End 2 of C - C' section

Fig. 42 Effective stress at each section according to the uni direction of the deposition shapes

나. 주응력 비교 및 분석

Fig. 43 은 적층 형상에 따른 단일 방향 적층 시 주응력 분포이다. 주응력은 유효 응력과 동일하게 적층 부 주변에서 크게 발생하였으며 적층 형상에 따른 주응력 분포 차이는 크게 발생하지 않았다. Fig. 44 는 적층 형상에 따른 주응력 측정 위치이다. A - A' 단면은 적층 시작 지점을 나타내고 B - B' 단면은 적층 중간 지점을 나타내며 C - C' 단면은 적층 끝 지점을 나타낸다.

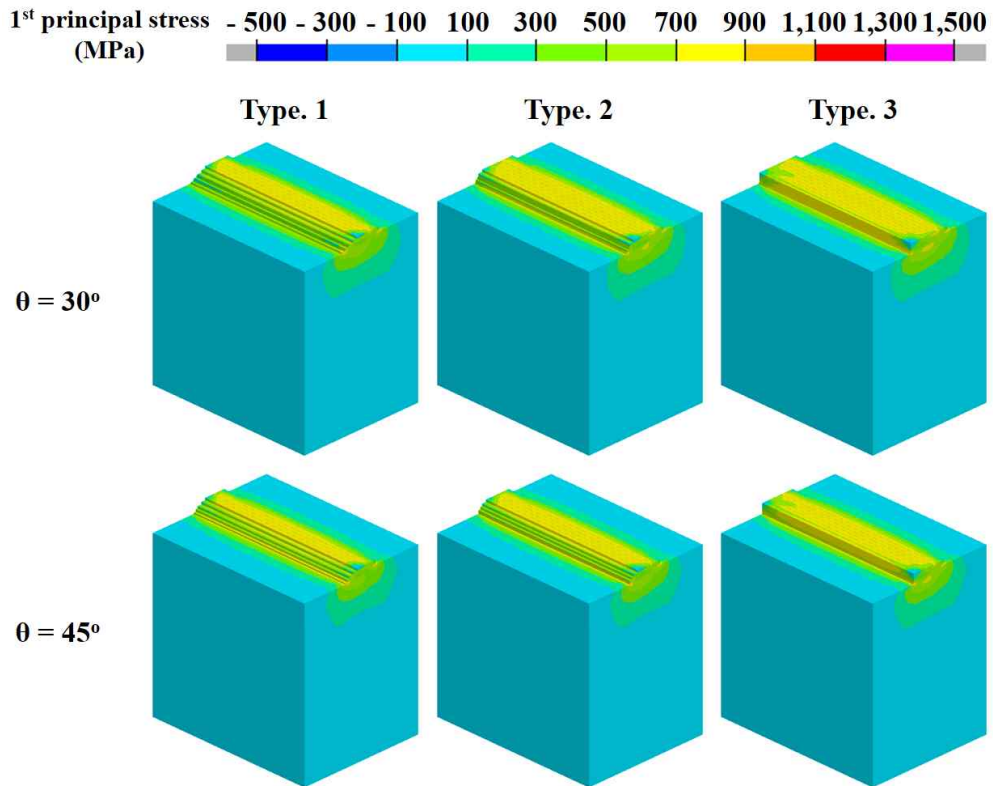


Fig. 43 First principal stress distribution of uni direction according to the deposition shapes

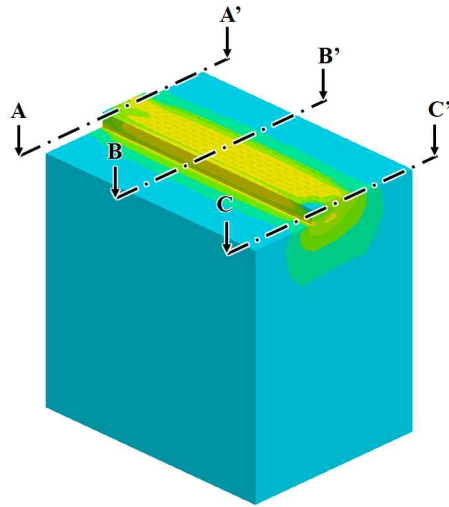
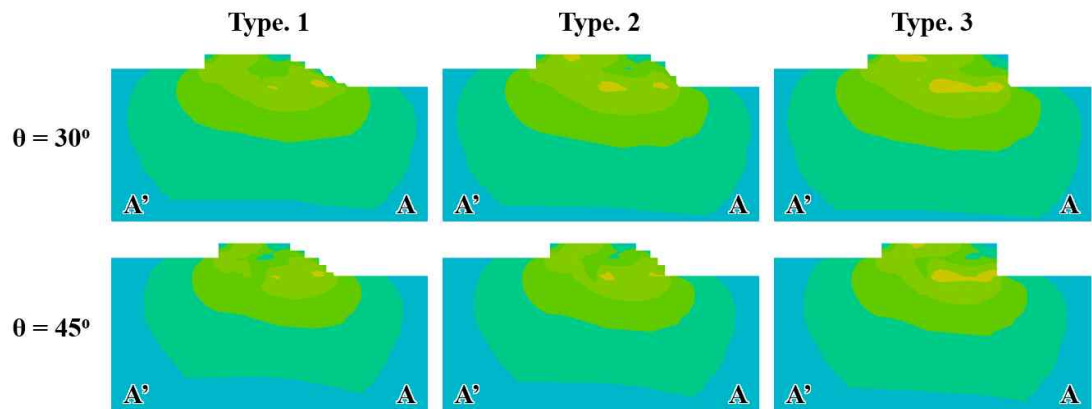
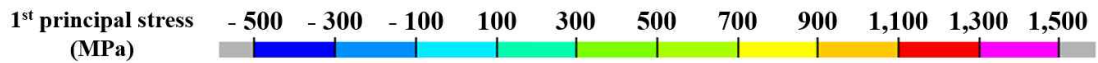
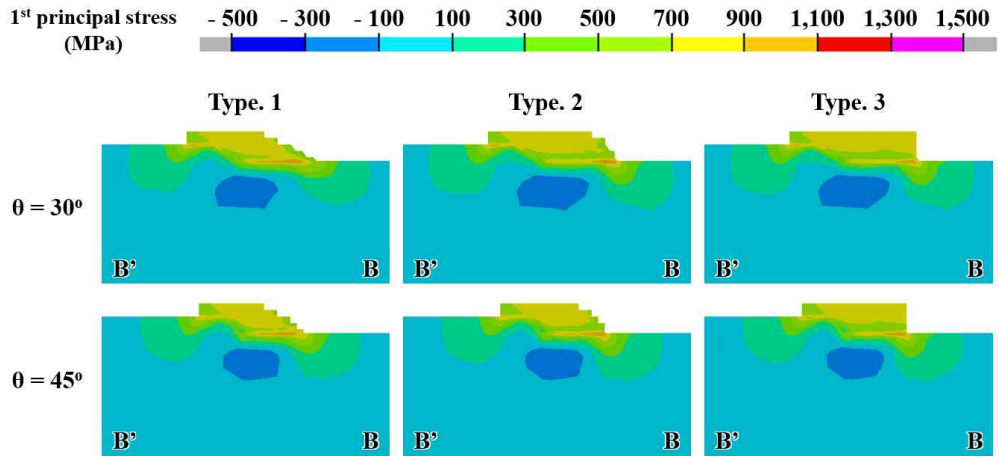


Fig. 44 First principal stress measurement location according to the deposition shape

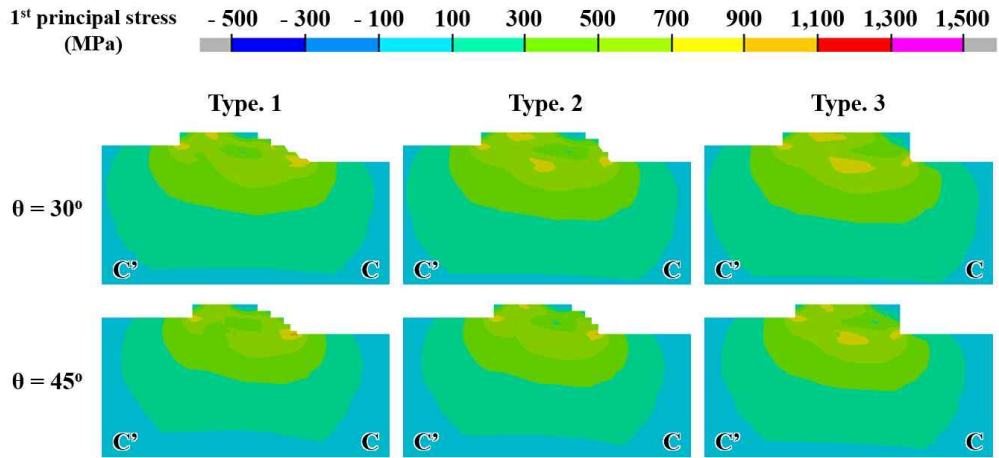
각 지점의 단면 및 주응력 분포는 Fig. 45 와 같다. 단면의 주응력 분포는 유효 응력과 마찬가지로 시작 및 끝 지점과 중간 지점의 경향이 다르게 나타났다. 시작 및 끝 지점의 경우 주응력이 낮고 넓게 분포 되었으며 중간 지점의 경우 주응력이 높고 좁게 분포됨과 동시에 비드 밑 기저부에 압축 응력이 발생하였다.



(a) First principal stress distribution of A - A' section



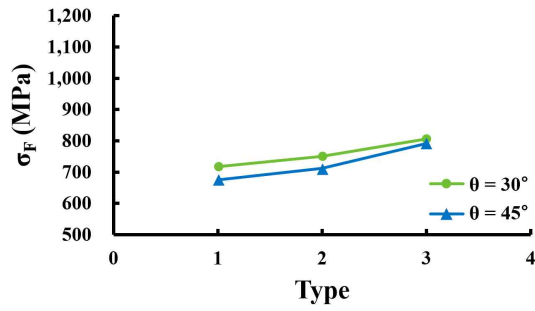
(b) First principal stress distribution of B - B' section



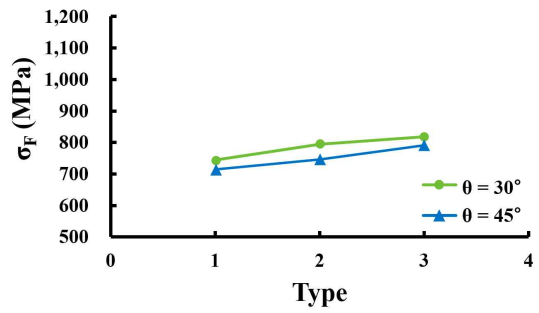
(c) First principal stress distribution of C - C' section

Fig. 45 First principal stress of each section according to the deposition shapes

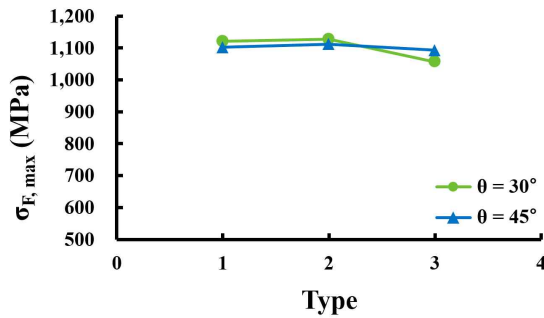
각 단면의 최대 주응력은 적층 중간 지점에서는 비드 밑 기저부에서 발생하였으며, 적층 시작 지점 및 적층 끝 지점에서는 최대 주응력 발생 위치가 다르게 나타났다. 따라서 적층 시작 지점 및 적층 끝 지점에서는 각 지점의 최대 주응력이 발생한 두 위치의 값을 비교 분석하였다. 적층 시작 지점의 측정 위치는 Fig. 40 과 같으며, 적층 끝 지점의 측정 위치는 Fig. 41 과 같다.



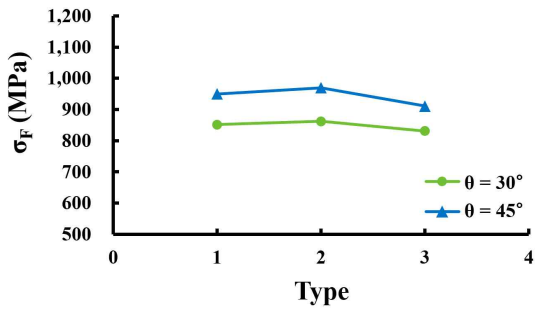
(a) Start 1 of A - A' section



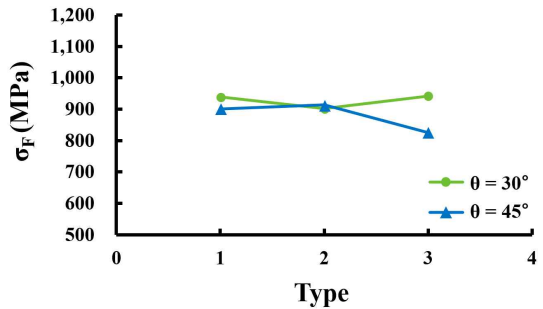
(b) Start 2 of A - A' section



(c) B - B' section



(d) End 1 of C - C' section



(e) End 2 of C - C' section

Fig. 46 First principal stress at each section according to the uni direction of the deposition shapes

각 지점의 주응력 값은 Fig. 46 과 같다. Fig. 46 의 (a) 는 적층 시작 지점의 Start 1 위치의 주응력이며, Fig. 46 의 (b) 는 Start 2 위치의 주응력이다. 적층 시작 지점은 측정 위치에 관계 없이 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 3 의 주응력 값이 가장 높게 도출되었다. Fig. 46 의 (c) 는 적층 중간 지점의 최대 주응력이며, 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 주응력 값이 가장 높게 나타났다. Fig. 46 의 (d) 는 적층 방향의 끝 지점에서 End 1 위치의 최대 주응력이며 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 주응력 값이 가장 높게 도출되었다. Fig. 46 의 (e) 는 적층 방향의 끝 지점에서 End 2 위치의 최대 주응력이며 기저부 경사 각도 30° 에서는 Type. 3 의 값이, 기저부 경사 각도 45° 에서는 Type. 2 의 값이 가장 높게 도출되었다. 이처럼 C - C' 단면에서 적층 특성이 다르게 나타나는 이유는 기저부 경사 각도 30° 에서 적층 끝 지점에서의 최대 주응력 발생 위치가 절삭부의 기저부가 아닌 과적층 비드 경계부에서 발생하였기 때문으로 사료 된다. 각 지점의 주응력을 비교하였을 때 주응력 값은 적층 시작 및 끝 지점보다 적층 중간 지점에서 월등히 높게 발생하였다. 그 중 Type. 2 의 주응력 값이 가장 높게 도출되었는데, 이는 Type. 1 의 경우 적층량이 가장 적어 주응력 값이 낮게 도출됐을 것으로 사료 되며, Type. 3 의 경우 적층량 증가로 열을 반복하여 받아 열 이력이 많아져 응력 집중이 완화됐을 것으로 사료 된다.

3. 기저부 경사 각도에 따른 Alternative 방향 적층 시 잔류응력 비교 분석

가. 유효 응력 비교 및 분석

Fig. 47 은 Alternative 방향 적층 시 유효 응력 분포이다. Alternative 방향 적층 시 유효 응력은 단일 방향 적층 시 유효 응력 분포 범위와 비슷하였다. 유효 응력은 Fig. 38 과 같이 단일 방향 측정 위치와 동일한 위치에서 Start, Mid 및 End 지점의 단면의 유효 응력을 비교 분석하였다. 각 지점의 단면 및 유효 응력 분포는 Fig. 48 과 같다.

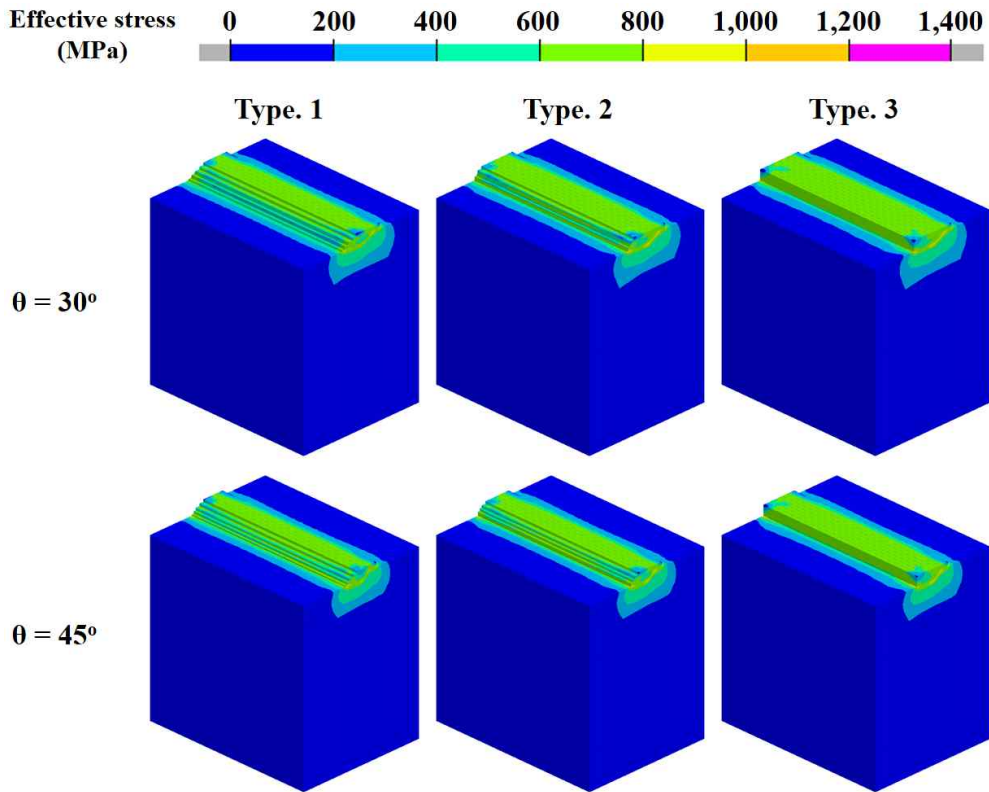
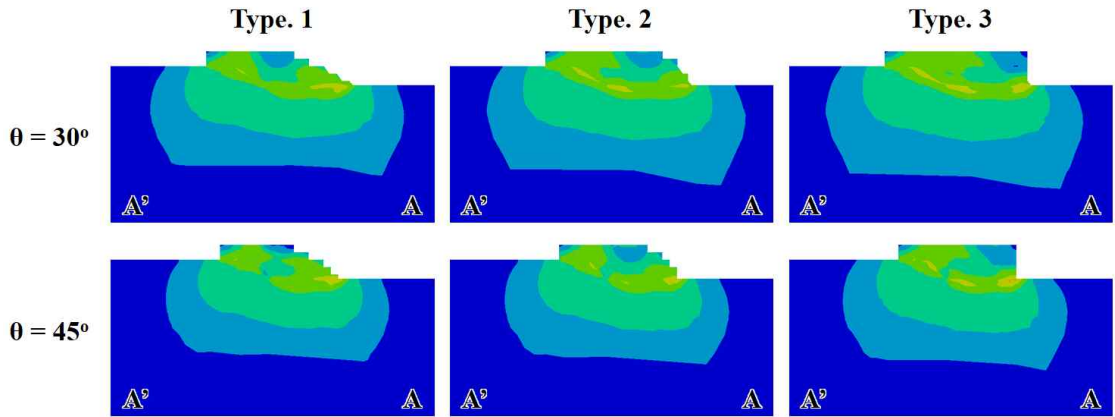
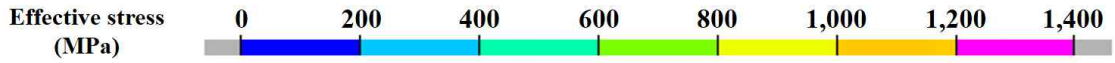
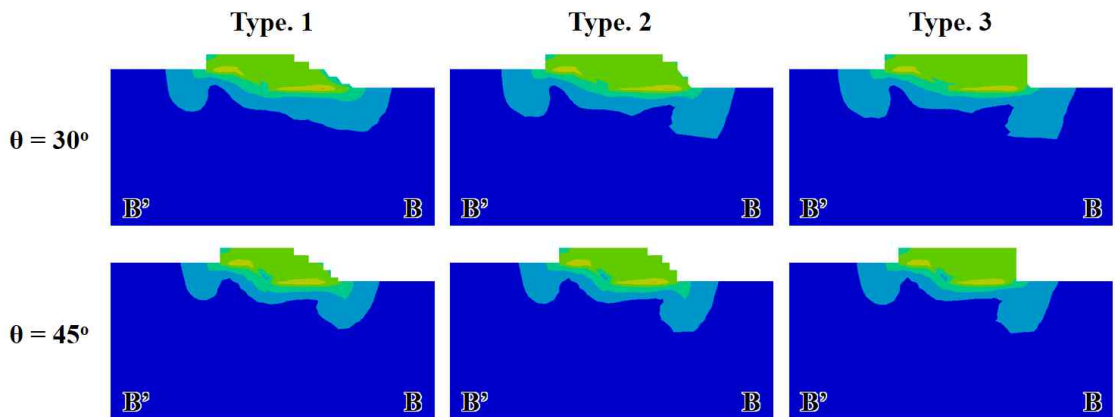


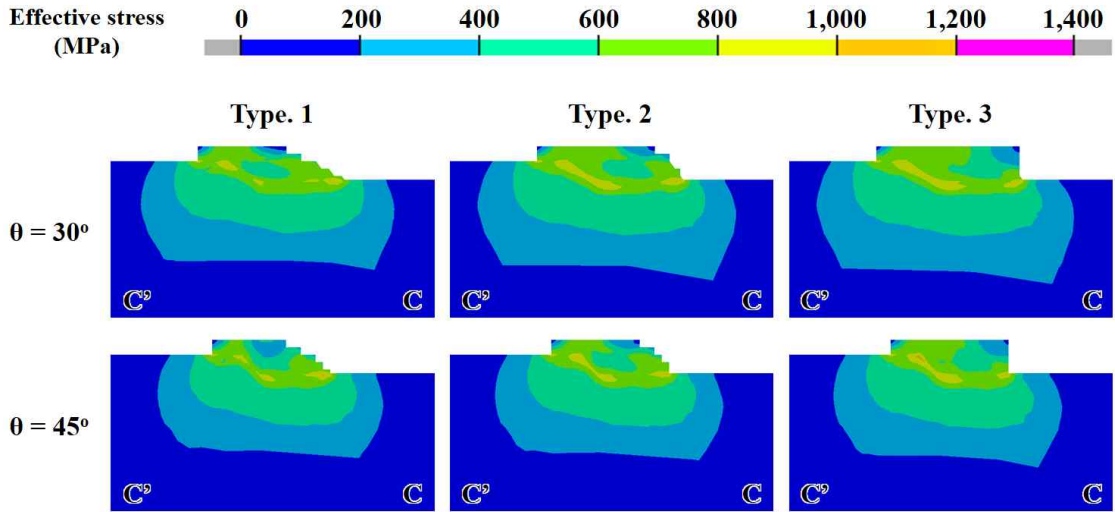
Fig. 47 Effective stress distribution of alternative direction



(a) Effective stress distribution of A - A' section



(b) Effective stress distribution of B - B' section



(c) Effective stress distribution of C - C' section

Fig. 48 Effective stress of each section of the alternative direction

각 단면의 최대 유효 응력은 적층 중간 지점에서는 비드 밑 기저부에서 발생 하였으며, 적층 시작 지점과 끝 지점에서는 최대 유효 응력 발생 위치가 달라 각 지점의 최대 유효 응력이 발생한 위치의 값을 모두 비교 분석하였다. A - A' 의 측정 위치는 Fig. 49 와 같으며, C - C' 의 측정 위치는 Fig. 50 과 같다.

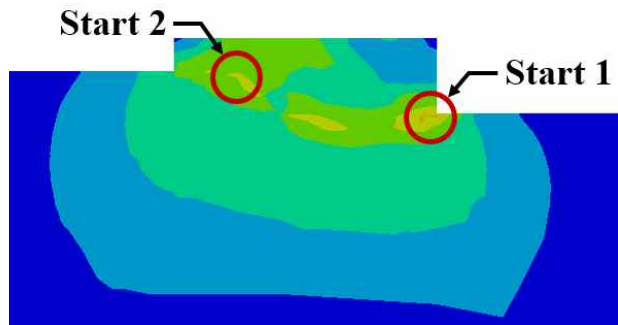


Fig. 49 Define the two start points in the A - A' section of the alternative direction

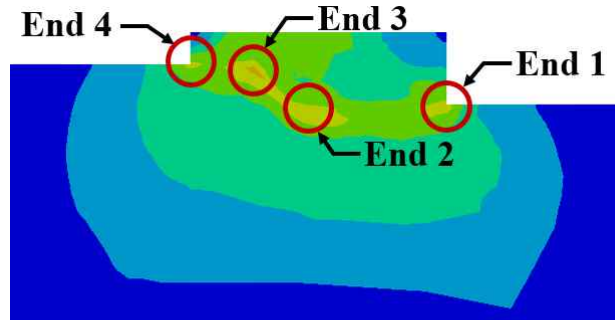
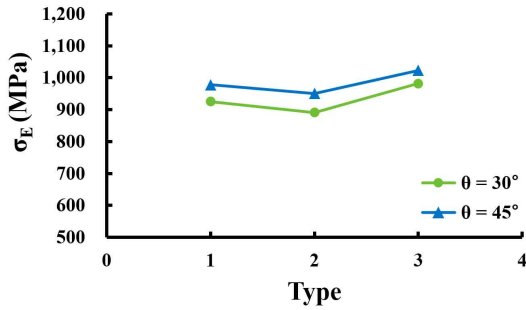
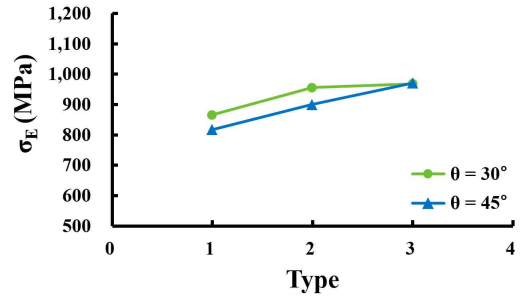


Fig. 50 Define the four end points in the C - C' section of the alternative direction

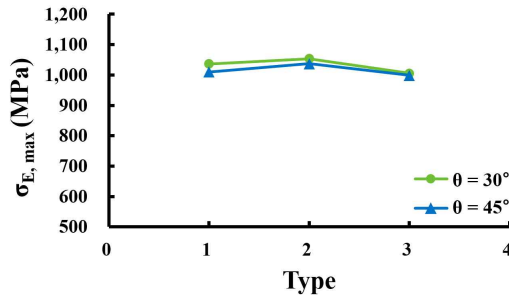
각 지점의 최대 유효 응력은 Fig. 51 와 같다. Fig. 51 의 (a) 는 적층 시작 지점의 Start 1 위치의 유효 응력이며 Fig. 51 의 (b) 는 적층 시작 지점의 Start 2 위치의 유효 응력이다. Start 1 위치인 적층 끝단 부 수직 부분에서는 Type 2 에서 가장 작은 유효 응력 값을 나타냈으며, Start 2 위치인 기저부 형상 변화 지점에서는 적층량이 많아짐에 따라 유효 응력도 함께 증가하였다. 이는 Type 2 의 최대 유효 응력 발생 위치가 Start 2 지점이기 때문에 Type 1 및 Type 3 의 최대 유효 응력이 발생한 Start 1 지점에서는 비교적 낮게 나타난 것으로 사료 된다. Fig. 51 의 (c) 는 적층 중간 지점의 최대 유효 응력이며, 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 유효 응력 값이 가장 높게 도출되었다. 이는 Type 3 의 경우 적층량이 많아짐에 따라 기저부에 열 이력이 많아지게 되고 따라서 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되며 응력이 완화되었기 때문으로 사료 된다. Fig. 51 의 (d), (e), (f) 및 (g) 는 각각 적층 끝 지점에서 End 1, End 2, End 3 및 End 4 위치의 유효 응력이다. 최대 유효 응력은 기저부 경사 각도 30° 의 Type 1, Type 2 및 기저부 경사 각도 45° 의 Type 1 의 경우 End 1 위치에서, 기저부 경사 각도 30° 의 Type 3 의 경우 End 2 위치에서 발생하였다. 기저부 경사 각도 45° 의 Type 2 및 Type 3 는 End 3 위치에서 최대 유효 응력이 발생하였다. 이를 통해 기저부 경사 각도마다 적층량이 증가하면서 최대 유효 응력 발생 위치가 점차 올라가는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 51 (d) 의 경우 End 1 위치에서 최대 유효 응력이 발생한 기저부 경사 각도 30° 의 Type 1, Type 2 및 기저부 경사 각도 45° 의 Type 1 의 값이 높게 발생하였으며, Fig. 51 (e) 의 경우 End 2 위치에서 최대 유효 응력이 발생한 기저부 경사 각도 30° 의 Type 3 의 값이, Fig. 51 (f) 의 경우 End 3 위치에서 최대 유효 응력이 발생한 기저부 경사 각도 45° 의 Type 2 및 Type 3 의 값이 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다.



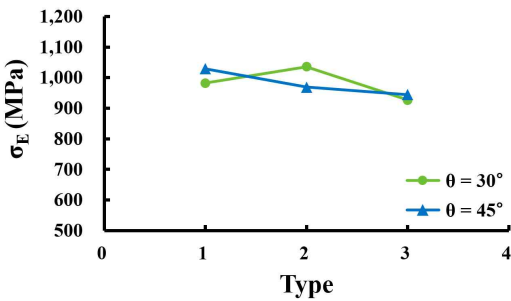
(a) Start 1 of A - A' section



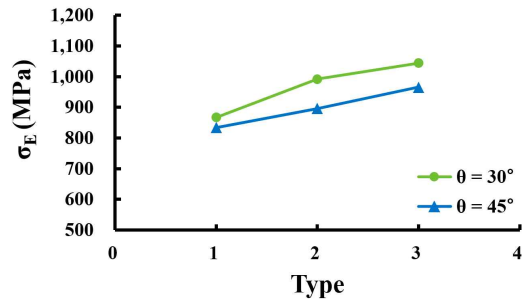
(b) Start 2 of A - A' section



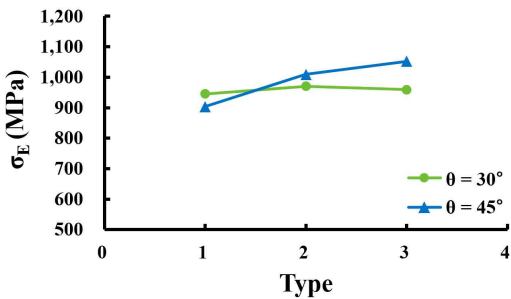
(c) B - B' section



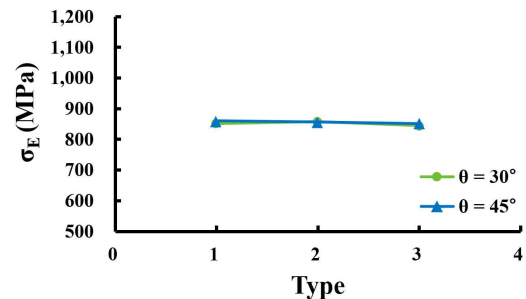
(d) End 1 of C - C' section



(e) End 2 of C - C' section



(f) End 3 of C - C' section



(g) End 4 of C - C' section

Fig. 51 Effective stress at each section according to the alternative direction of the deposition shapes

나. 주응력 비교 및 분석

Fig. 52 는 Alternative 방향 적층 시 주응력 분포이다. 주응력은 적층 부 주변에서 크게 발생하였으며, 단일 방향 적층 시 주응력 분포 범위와 유사하다. Fig. 39 와 같이 단일 방향과 동일한 위치에서 Start, Mid 및 End 지점의 단면의 주응력을 비교 분석하였다. 각 지점의 단면 및 주응력 분포는 Fig. 53 과 같다.

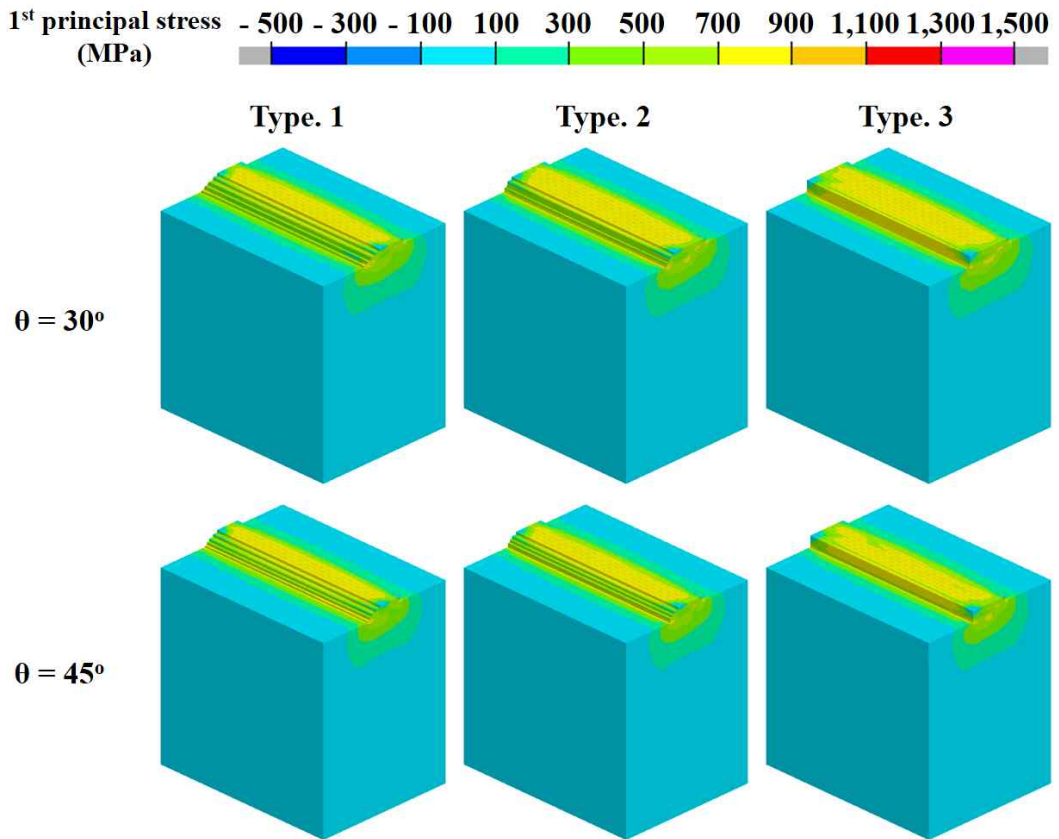
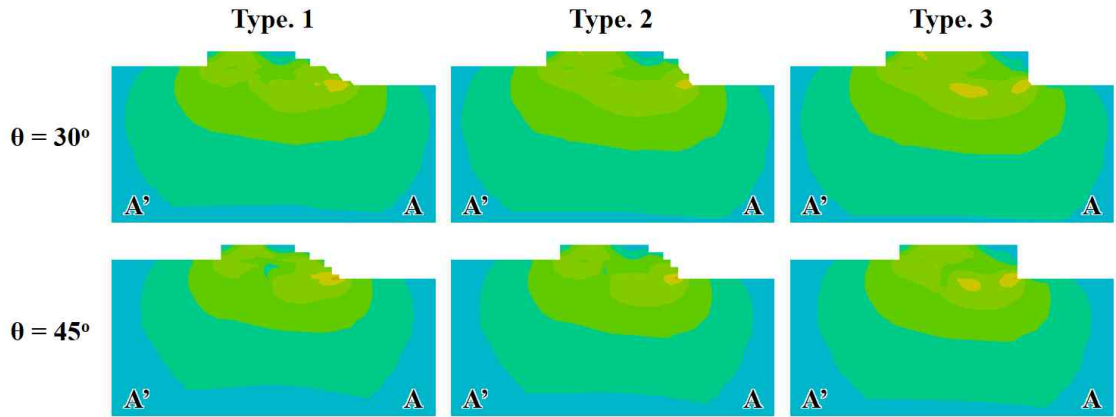
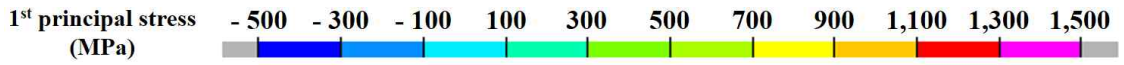
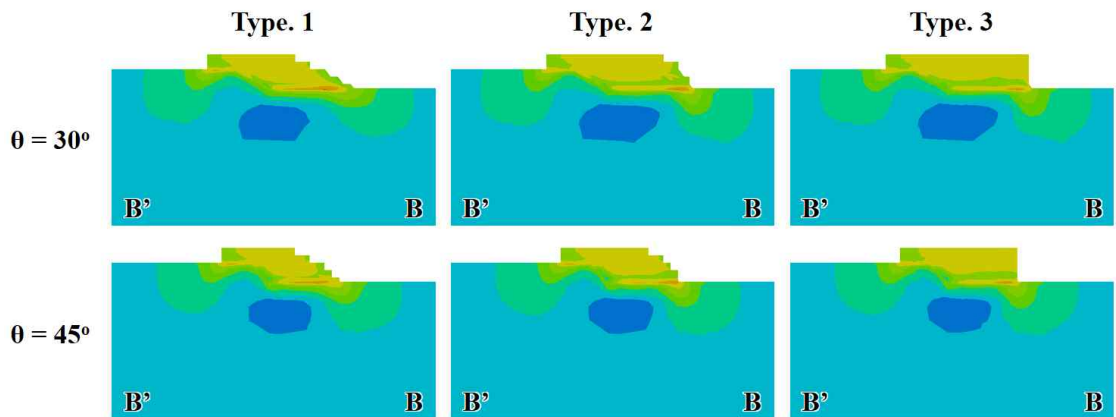
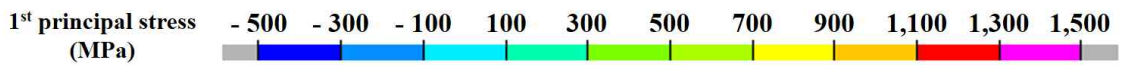


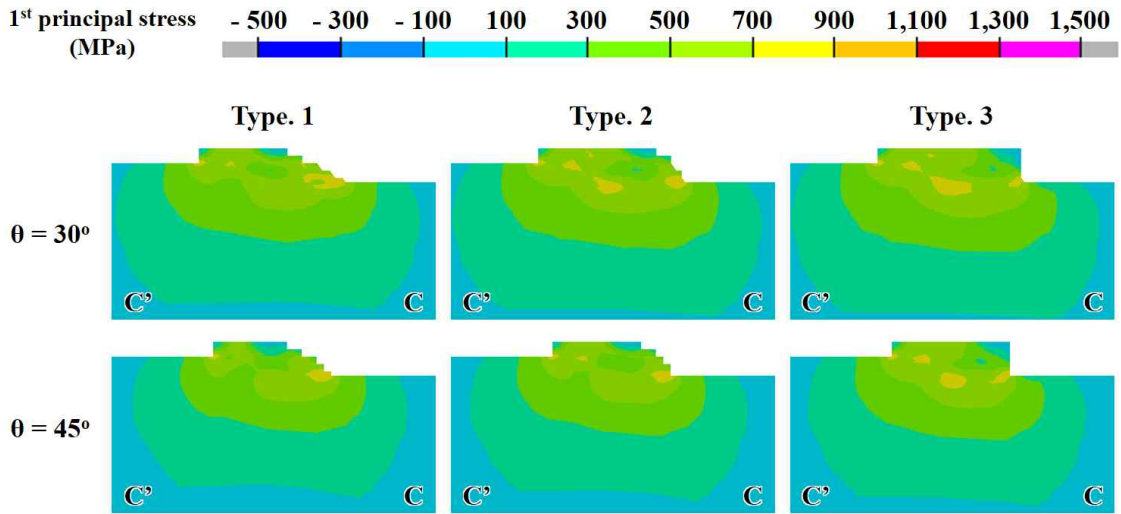
Fig. 52 First principal stress distribution of alternative direction



(a) First principal stress distribution of A - A' section



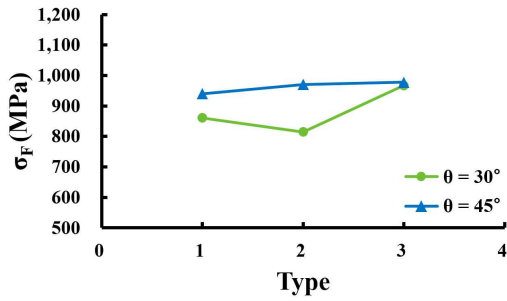
(b) First principal stress distribution of B - B' section



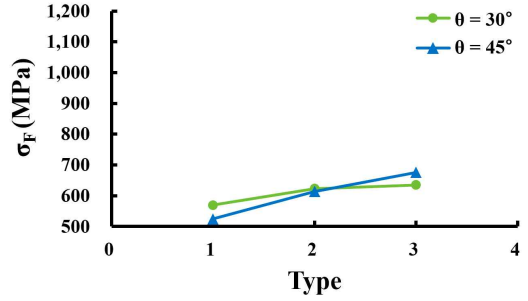
(c) First principal stress distribution of C - C' section

Fig. 53 First principal stress of each section of the alternative direction

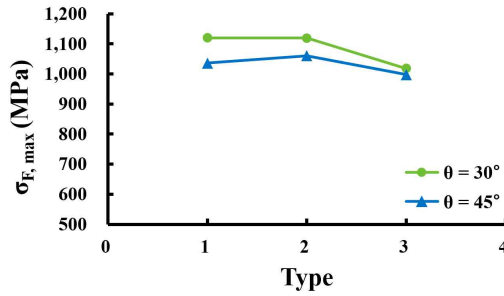
각 지점의 최대 주응력은 Fig. 54 와 같다. Fig. 54 의 (a) 는 적층 시작 지점에서 Start 1 위치의 주응력이며 Fig. 54 의 (b) 는 Start 2 위치의 주응력이다. 적층 시작 지점의 최대 주응력은 유효 응력과 달리 모든 조건에서 Start 1 위치에서 발생하였다. 따라서 Start 2 위치의 주응력이 Start 1 위치의 주응력보다 현저히 낮은 것을 확인할 수 있다. Fig. 54 의 (c) 는 적층 중간 지점의 최대 주응력이며, 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 에서 가장 높게 도출되었다. 이는 Type 1 의 경우 적층량이 적어 주응력 값도 작게 도출되었을 것으로 사료 되며, Type 3 의 경우 적층량이 많아짐에 따라 기저부에 열 이력이 많아져 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되며 응력이 완화되었을 것으로 사료 된다. Fig. 54 의 (d), (e), (f) 및 (g) 는 각각 적층 끝 지점에서 End 1, End 2, End 3 및 End 4 위치의 주응력이다. 최대 주응력은 각 조건에 따라 큰 차이가 나타나지 않았으며, 모든 조건에서 End 4 위치에서 발생하였다. 이는 과적층이 시작되는 위치로서 기저부와 수직인 형상이기 때문에 급격한 형상 변화에 의해 응력이 집중된 것으로 사료 된다.



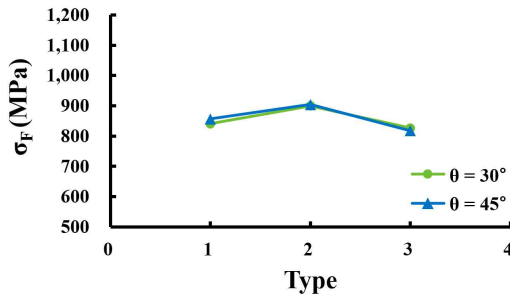
(a) Start 1 of A - A' section



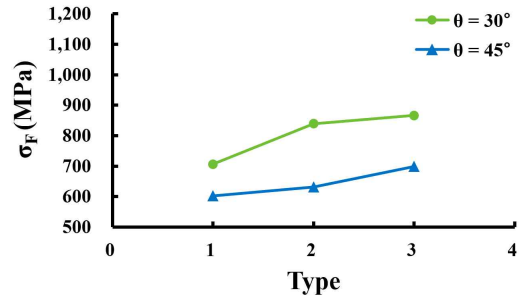
(b) Start 2 of A - A' section



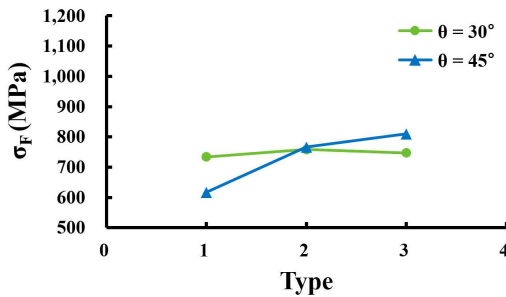
(c) B - B' section



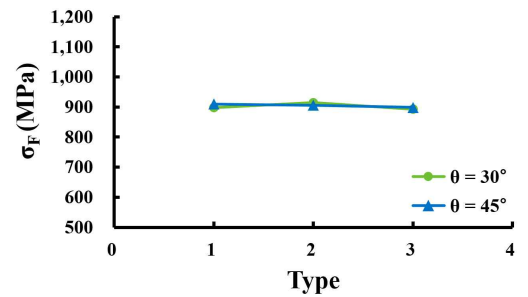
(d) End 1 of C - C' section



(e) End 2 of C - C' section



(f) End 3 of C - C' section



(g) End 4 of C - C' section

Fig. 54 First principal stress at each section according to the alternative direction of the deposition shapes

4. 적정 적층 방향 선정

단일 방향과 Alternative 방향 중 적정 적층 방향을 선정하기 위해 적층 방향에 따른 잔류응력 해석 결과를 비교 분석하였다. 적층 시작 지점과 적층 끝 지점의 경우 단일 방향과 Alternative 방향의 응력 발생 위치가 달라 Fig. 55 및 Fig. 56 과 같이 적층 시작 지점의 경우 적층 끝단부인 Start 1, 기저부 경사 각도 부근인 Start 2 및 기저부 경사부와 과적층 아래 3 곳의 위치에서 비교 및 분석하였다. 적층 끝 지점의 경우 적층 끝 지점 아래 기저부인 End 1, 기저부 경사 각도 부근인 End 2, 과적층 아래 기저부인 End 3 및 과적층 비드와 기저부 사이인 End 4, 총 4 곳의 위치에서 비교 및 분석하였다. 각 조건에 따른 단일 방향과 Alternative 방향의 최대 유효 응력 및 최대 주응력은 Fig. 57 및 Fig. 58 과 같다.

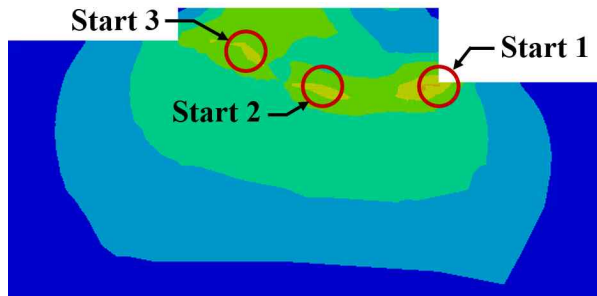


Fig. 55 Define the three start points in the A - A' section for selection of the deposition direction

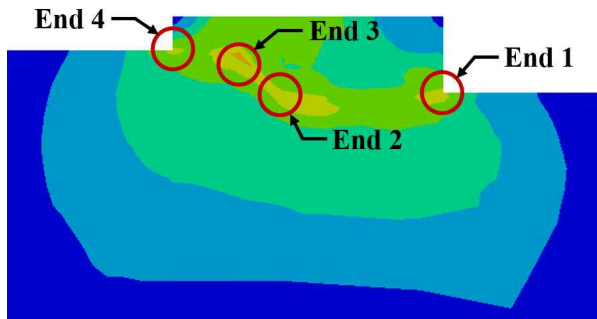


Fig. 56 Define the four end points in the C - C' section for selection of the deposition direction

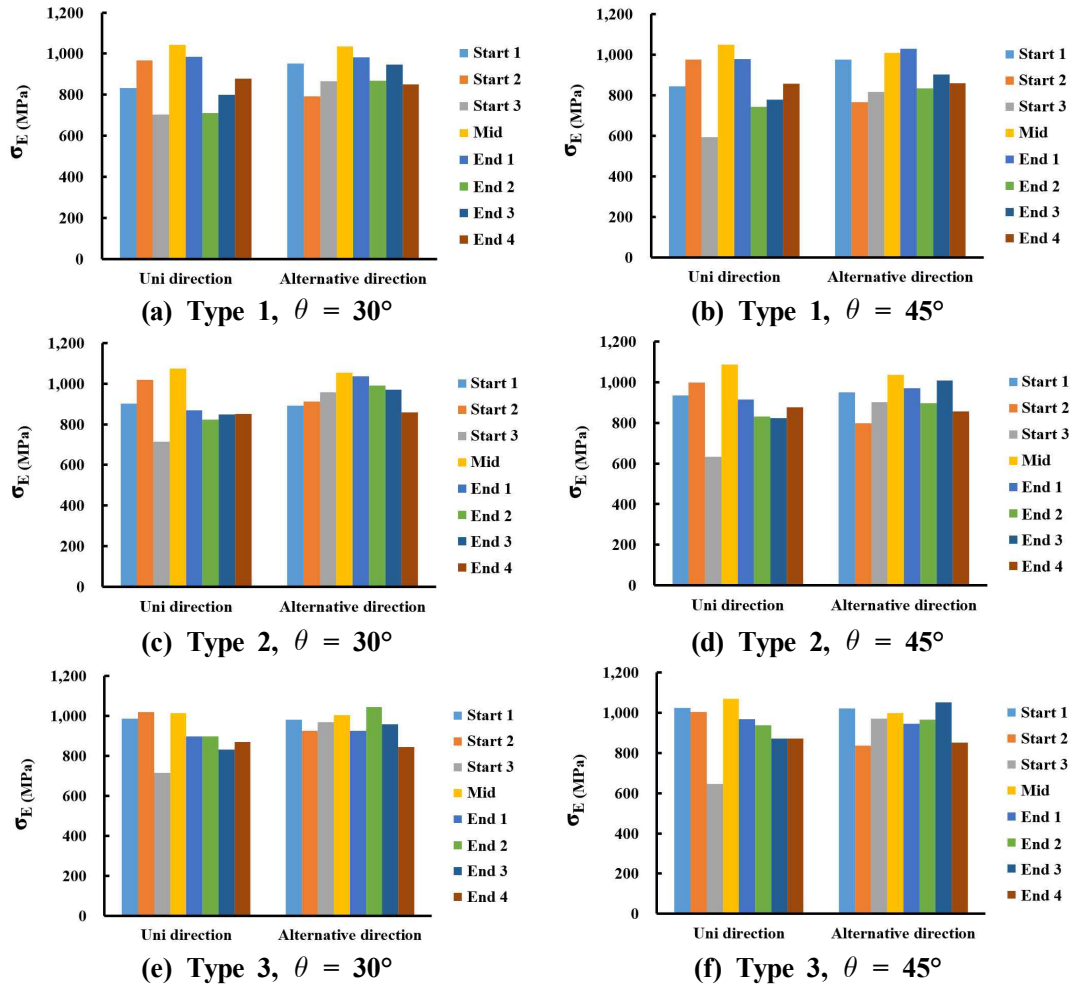


Fig. 57 Effective stress at each point according to the deposition direction

Fig. 57 은 단일 방향 및 Alternative 방향 적층 시 각 지점 및 위치 별 유효 응력을 나타낸 그래프이다. 각 조건의 최대 유효 응력을 비교한 결과 단일 방향으로 적층했을 경우 기저부 경사 각도에 상관없이 적층 중간 지점인 Mid 단면에서 최댓값을 가졌다. Alternative 방향으로 적층했을 경우 기저부 경사 각도 30° 및 45° 의 Type 3 는 End 단면에서 최댓값을 가졌으며, 나머지 조건의 경우 Mid 단면에서 최댓값을 가졌다. 각 조건의 최대 유효 응력은 단일 방향보다 Alternative 방향의 경우 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 모든 조건에서 단일 방향 적층보다 Alternative 방향 적층 시 측정 지점 및 위치에 따른 유효 응력 값의 차이가 더 작은 것을 알 수 있다.

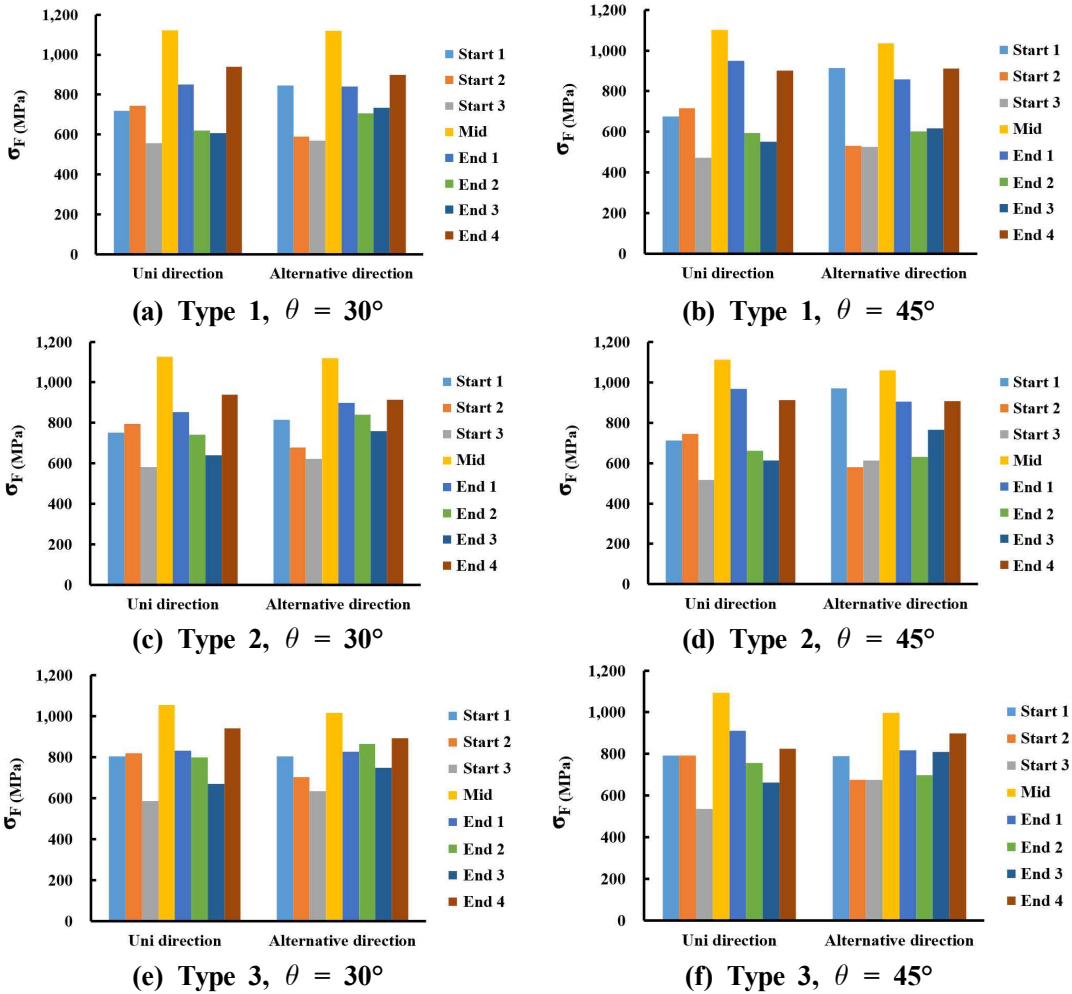


Fig. 58 First principal stress at each point according to the deposition direction

Fig. 58 은 단일 방향 및 Alternative 방향 적층 시 각 지점 및 위치 별 주응력을 나타낸 그래프이다. 각 조건의 최대 주응력을 비교한 결과 모든 조건에서 기저부 경사 각도 및 적층 방향에 상관없이 적층 중간 지점인 Mid 단면에서 최댓값을 가졌다. 각 조건의 최대 주응력은 단일 방향보다 Alternative 방향의 경우 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 모든 조건에서 단일 방향보다 Alternative 방향 적층 시 측정 지점 및 위치에 따른 주응력 값의 차이가 더 작은 것을 알 수 있었다. 따라서 유효 응력과 주응력을 모두 고려하여 보았을 때 잔류응력 값이 더 낮게 도출되는 Alternative 방향을 적정 적층 방향으로 선정하는 것이 좋을 것으로 사료 된다.

5. 기저부 경사 각도에 따른 2차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 잔류응력 비교 분석

가. 기저부 경사 각도에 따른 2차원 유한요소 해석 모델 개발

2 차원 및 3 차원 유한요소 해석 결과 비교를 위해 2 차원 유한요소 해석 모델을 설계하였다. 해석 모델의 기저부 및 비드 크기는 Type. 3 모델과 동일하며 Fig. 59 와 같다. Fig. 60 은 기저부 경사 각도에 따른 비드부의 유한요소 격자이다. Type. 3 비드 형상과 같이 적층 비드는 총 5 층이며, 마지막 2 층의 경우 과적층 하기 위해 적층부 앞에 1 mm 를 추가하여 제작하였다. 유한요소 해석 모델의 비드부 형상 치수는 제 2 장의 제 1 절에 적용하였던 Table 3 와 동일하게 적용하였다.

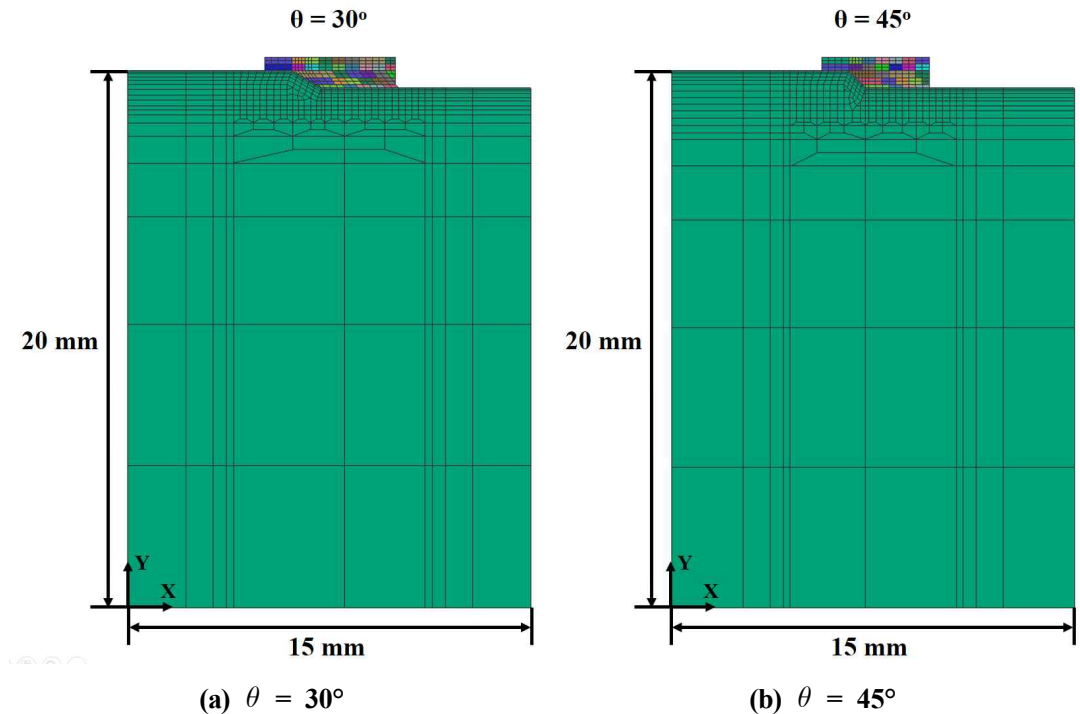


Fig. 59 2D FE models according to groove angle

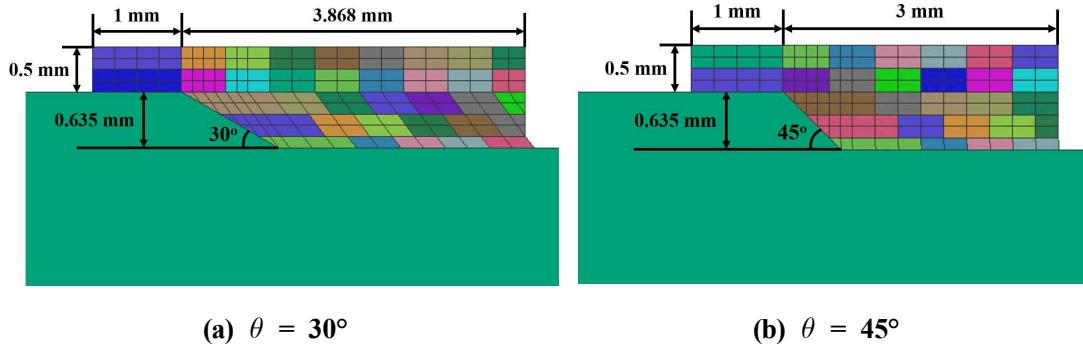


Fig. 60 2D bead meshes according to groove angle

Table 11 Number of nodes and 2D elements of FE models of deposition shape

Type of deposition model	Nodes (EA)	2D Elements (EA)
$\theta = 30^\circ$	689	645
$\theta = 45^\circ$	619	577

각 2 차원 유한요소 해석 모델의 절점 (Node) 의 개수와 2 차원 요소 (Element) 의 개수는 Table 11 과 같다. Table 10 의 3 차원 해석 모델 절점 및 요소 개수와 비교하면 현저히 감소한 것을 확인할 수 있다.

나. 경계 조건 데이터 도출

적층 중 해석 모델의 상부에는 노즐에서 분사되는 보호 가스인 아르곤 (Ar) 가스에 의한 열 손실이 발생하며, 측면 및 하부에는 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한, 레이저에 의한 급격한 온도 증가는 복사에 의한 열 손실이 함께 고려된다. 2 차원 유한요소 해석 경계 조건은 Type. 3 의 3 차원 유한요소 해석 모델과 동일하게 fig. 33 과 같이 구분된다. 따라서 동일한 경계 조건이 적용되므로 자연대류, 강제대류 및 등가 열 손실 계수는 각각 Fig. 34, Fig. 35 및 Fig. 36 과 같다.

다. 유효 응력 및 주응력 비교 및 분석

Fig. 61 은 Type. 3 형상의 2 차원 유한요소 해석 시 적층 방향의 중간 단면의 유효 응력 분포를 나타내며, Fig. 62 은 Type. 3 형상의 2 차원 유한요소 해석 시 적층 방향의 중간 단면의 주응력 분포를 나타낸다. 최대 유효 응력 및 최대 주응력은 3 차원 유한요소 해석의 중간 단면 결과와 동일하게 비드 밑 기저부에서 발생하였다.

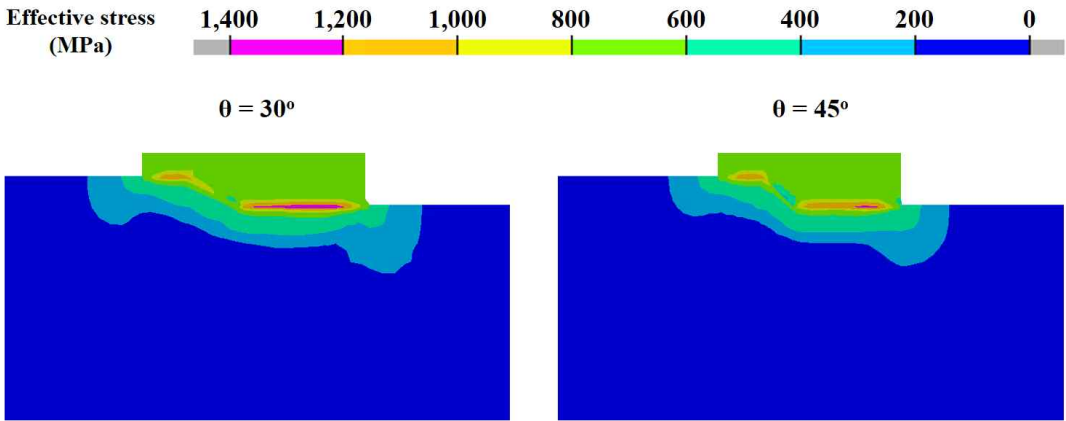


Fig. 61 Effective stress distribution of 2D analysis

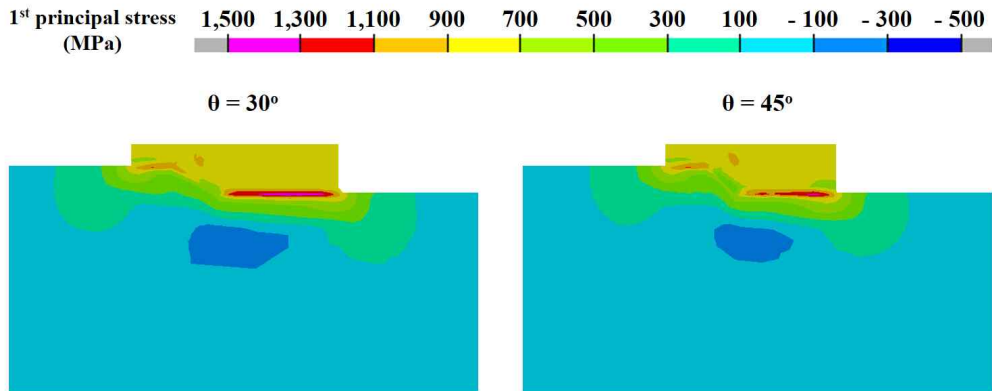


Fig. 62 First principal stress distribution of 2D analysis

6. 3차원 및 2차원 유한요소 해석 결과 비교

Fig. 63 은 3 차원 및 2 차원 유한요소 해석 결과의 최대 유효 응력 값을 비교한 그래프이며, Fig. 64 는 3 차원 및 2 차원 유한요소 해석 결과의 최대 주응력 값을 비교한 그래프이다. 응력은 변형에 대한 저항으로 3 차원 유한요소 해석의 경우 길이 방향의 변형이 가능하지만, 2 차원 유한요소 해석의 경우 길이 방향의 변형이 불가능하므로 3 차원 유한요소 해석의 잔류응력 값보다 2 차원 유한요소 해석의 잔류응력 값이 더 높게 도출되었다. 이러한 특징으로 인해 2 차원 유한요소 해석은 3 차원 유한요소 해석보다 안전성 측면에서 더 보수적이라는 특징을 가진다.

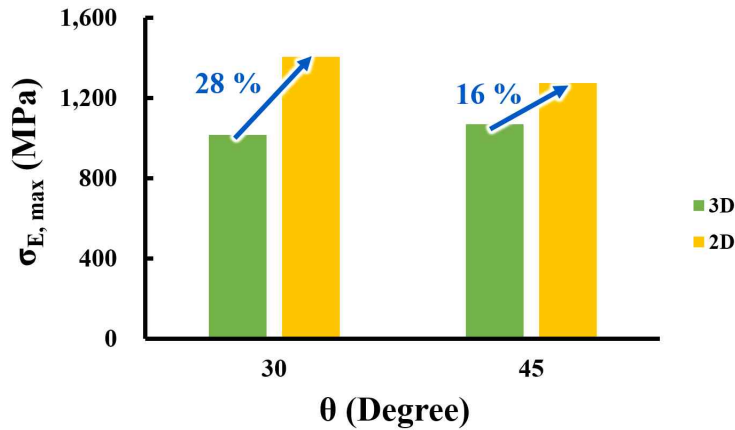


Fig. 63 Comparison of effective stress of 3D and 2D analysis

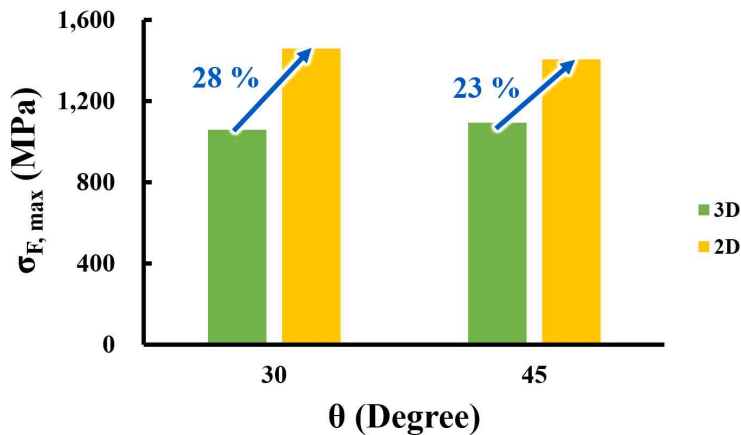


Fig. 64 Comparison of first principal stress of 3D and 2D analysis

Table 12 Comparison of total simulation time of 3D and 2D FE analysis

	3D simulation times (Hours)	2D simulation times (Hours)
$\theta = 30^\circ$	46	0.8
$\theta = 45^\circ$	34	0.6

Table 13 Comparison of memory of 3D and 2D FE analysis

	Memory of 3D analysis (MB)	Memory of 2D analysis (MB)
$\theta = 30^\circ$	7,720	117
$\theta = 45^\circ$	5,484	91

Table 12 는 3 차원 및 2 차원 유한요소 해석의 해석 시간 비교이며, Table 13 은 3 차원 및 2 차원 유한요소 해석 결과 파일의 메모리 비교이다. 해석 시간 및 메모리는 모두 2 차원 유한요소 해석에서 3 차원 유한요소 해석보다 매우 낮은 값을 가졌다. 따라서 안정성, 해석 시간 및 메모리 측면에서 보았을 때 2 차원 유한요소 해석이 3 차원 유한요소 해석보다 더 유리하다는 것을 확인할 수 있었다.

제 3 장 기저부 절삭 깊이 및 가공 위치에 따른 잔류응력 특성 분석

제 1 절 기저부 절삭 깊이에 따른 잔류응력 특성 분석

1. 기저부 절삭 깊이에 따른 2차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발

가. 기저부 절삭 깊이에 따른 기저부 형상 개발

흙 절삭 깊이 (D) 에 따른 잔류응력 특성을 분석하기 위해 기저부 경사 각도 (θ) 와 기저부 절삭 깊이 (D) 에 따라 총 6 가지의 기저부 형상을 개발하였다. 기저부 형상의 개념도는 Fig. 65 와 같으며 이너 (Inner) 형상으로 가정하였다. 기저부 경사 각도 및 깊이 별 기저부 형상은 Fig. 66 과 같다. 기저부 경사 각도 (θ) 의 경우 30° 및 45° 두 가지를 적용하였으며, 기저부 절삭 깊이 (D) 의 경우 2 mm, 3 mm 및 4 mm 세 가지를 적용하였다.

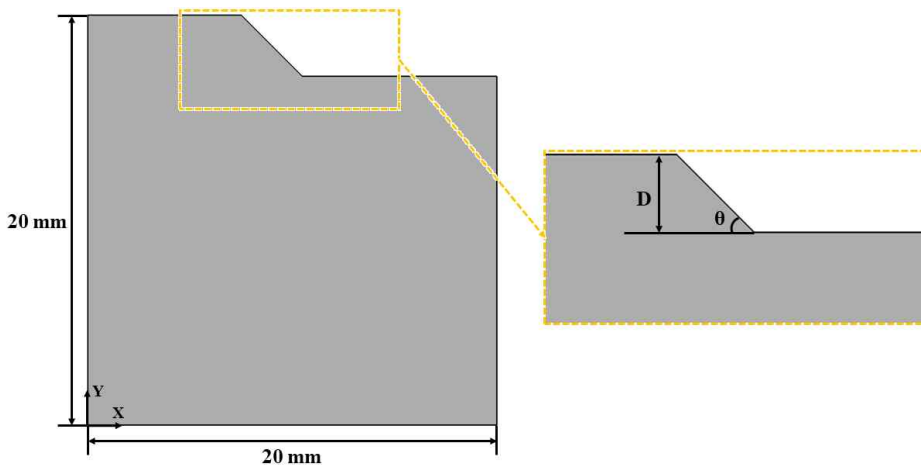


Fig. 65 Definition of substrate slope angle and depth

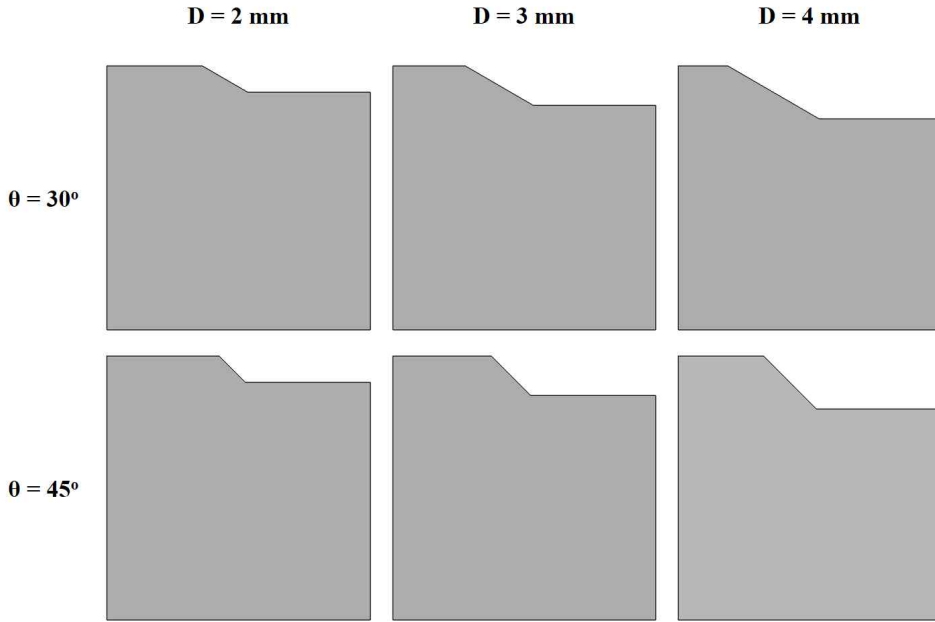


Fig. 66 Designs of substrate according to depth

나. 기저부 절삭 깊이에 따른 2차원 유한요소 해석 모델 개발

개발된 기저부 경사 각도 및 절삭 깊이에 따른 기저부 형상을 바탕으로 총 6 가지의 유한요소 해석 모델을 개발하였다. Fig. 67 은 기저부 경사 각도 및 절삭 깊이에 따른 열-기계 연계 해석을 위한 2 차원 유한요소 해석 모델이다. 해석 모델의 크기는 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 이며, 적층 방향의 길이는 20 mm 로 가정하였다. 바닥 면의 5 mm 범위와 바닥 면으로부터 5 mm 범위의 옆면에 고정 경계 조건이 적용되었다. 마지막 두 층의 경우 과적층을 하기 위해 적용하였으며, 적층부 앞에 1 mm 를 추가하여 제작하였다. 유한요소 해석 모델의 비드 형상 치수는 Table 3 와 같다. 적층 방향은 잔류 응력이 비교적 낮게 나타나는 Alternative 방향으로 적층하였다. 각 해석 모델의 절점 및 2 차원 요소 개수는 Table 14 과 같다. 해석에 사용된 기저부 및 적층부 소재는 각각 S45C 및 Inconel 718 이다. 각 소재의 화학 조성은 Table 6 과 같고, 온도의존 열 및 기계 물성 데이터는 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같다.

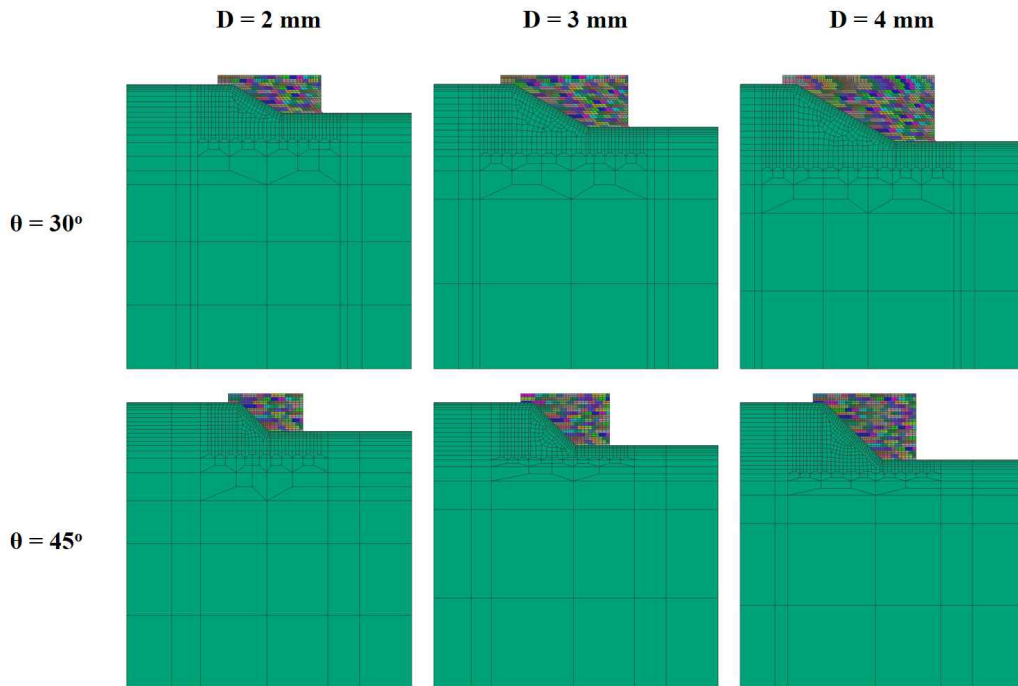


Fig. 67 2D FE models according to depth

Table 14 Number of nodes and 2D elements of FE models of depth

Type of depth model		Nodes (EA)	2D Elements (EA)
$\theta = 30^\circ$	D = 2 mm	1,691	1,195
	D = 3 mm	2,460	1,680
	D = 4 mm	3,420	2,293
$\theta = 45^\circ$	D = 2 mm	1,414	1,023
	D = 3 mm	1,896	1,325
	D = 4 mm	2,611	1,847

Table 15 Number of path depending on the depth

	D = 2 mm	D = 3 mm	D = 4 mm
$\theta = 30^\circ$	112	182	268
$\theta = 45^\circ$	77	119	169

Table 16 Number of layer depending on depth

	D = 2 mm	D = 3 mm	D = 4 mm
Layers	11	15	19

Table 17 Area of the bead (Depth)

	Type 1	Type 2	Type 3
$\theta = 30^\circ$	13.62 mm ²	21.79 mm ²	31.74 mm ²
$\theta = 45^\circ$	10.06 mm ²	15.56 mm ²	22.06 mm ²

Fig. 67 과 같이 제작된 최종 Path 수는 Table 15 와 같이 기저부 경사 각도 30° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 112 Path, 182 Path 및 268 Path 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 77 Path, 119 Path 및 169 Path 이다. 기저부 절삭 깊이에 따른 비드 층 수는 Table 16 과 같이 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 각각 11 층, 15 층, 19 층이다. 또한, 기저부 절삭 깊이 별 비드의 체적은 Table 17 과 같이 기저부 경사 각도 30° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 13.62 mm², 21.79 mm², 31.74 mm² 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 10.06 mm², 15.56 mm², 22.06 mm² 이다.

다. 경계 조건 데이터 도출

적층 해석의 경계 조건은 Fig. 68 과 같이 구분된다. 적층 중 해석 모델의 상부에는 노즐에서 분사되는 보호 가스인 아르곤 (Ar) 가스에 의해 강제대류에 의한 열 손실이 발생하며 측면 및 하부에는 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한, 레이저에 의한 급격한 온도 증가는 복사에 의한 열 손실이 함께 고려된다. 적층 후에는 강제대류가 발생하지 않으므로 모든 면에 자연대류에 의한 열 손실이 발생한다.

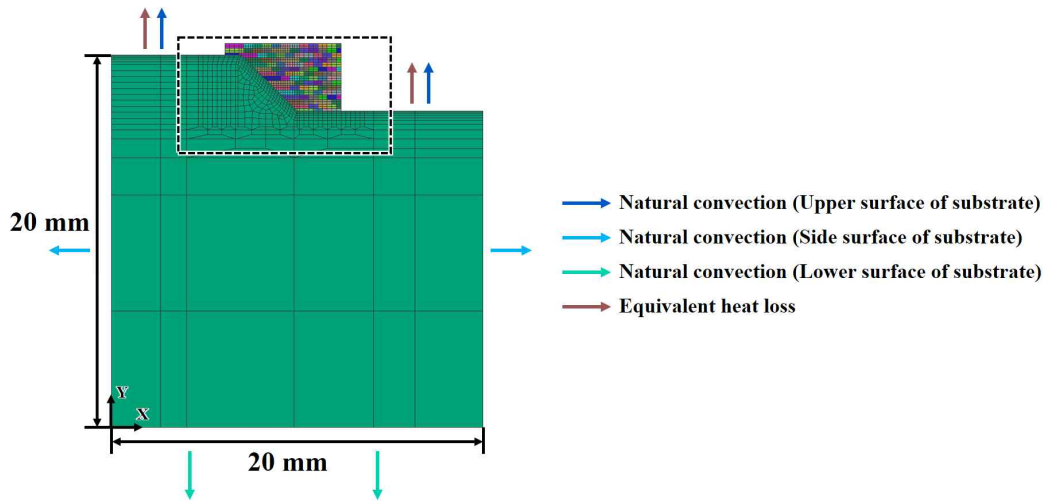


Fig. 68 Application region of the convection on the surface of the substrate for deposition of depth

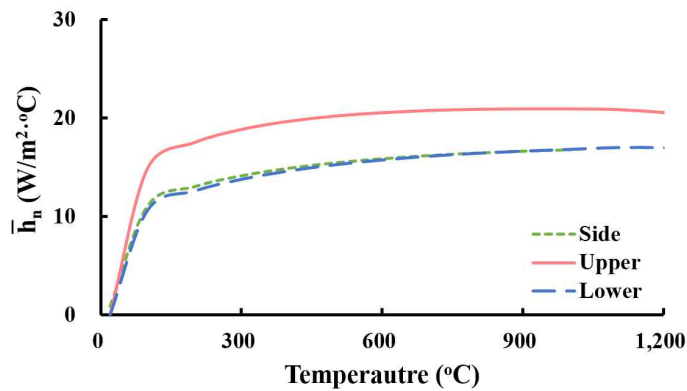


Fig. 69 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces (Depth)

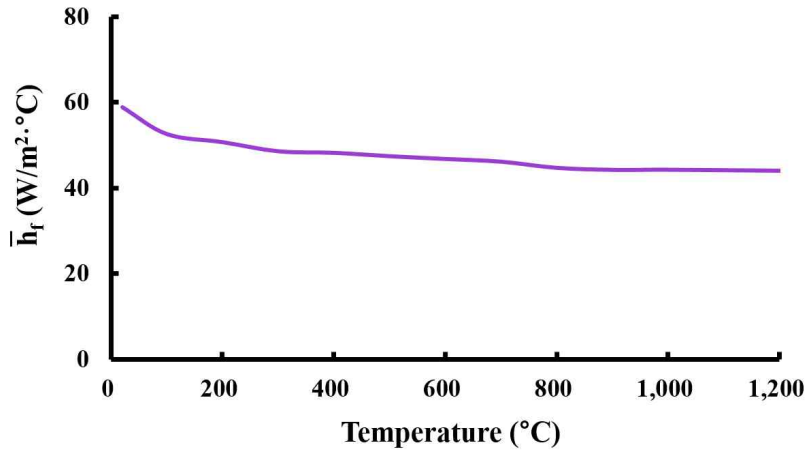


Fig. 70 Temperature dependent forced convection coefficient (Depth)

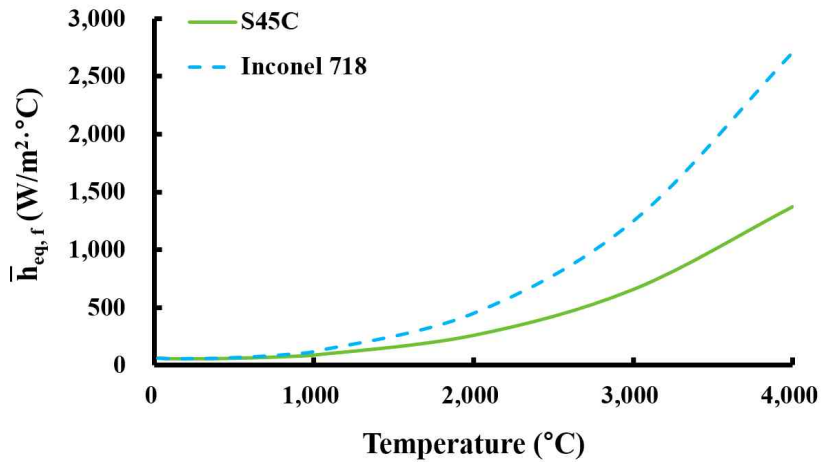


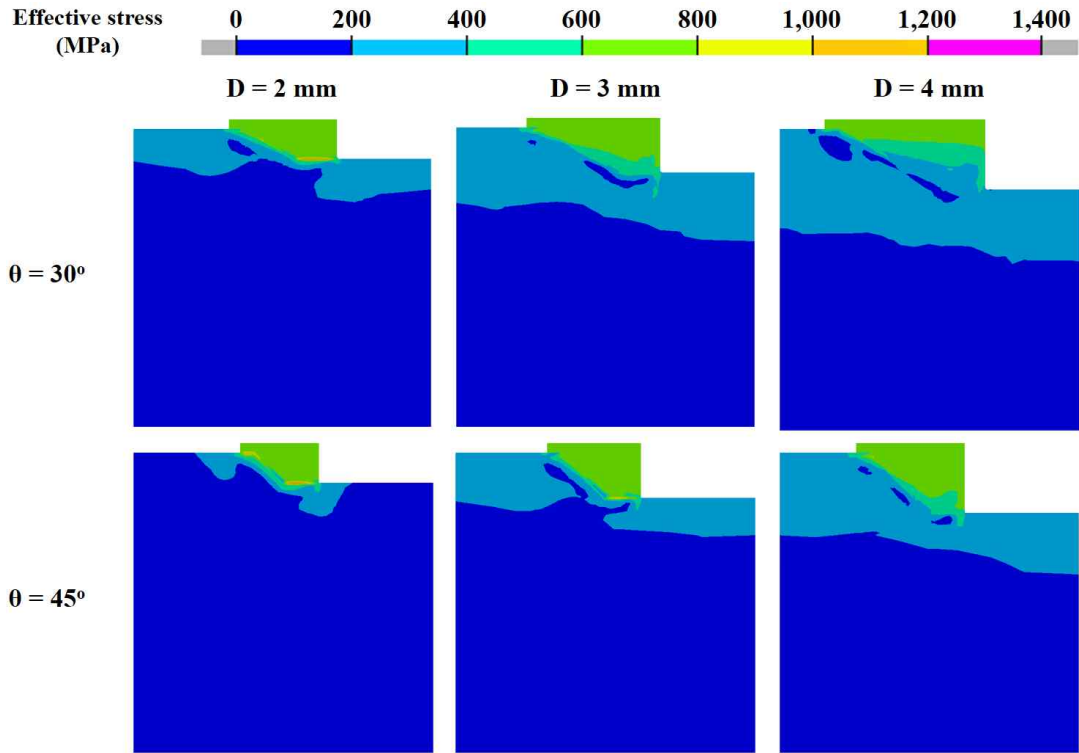
Fig. 71 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient (Depth)

자연대류, 강제대류 및 등가 열 손실 계수는 식 (1) - (19) 를 이용하여 계산된 온도 의존 데이터를 이용하였다. 계산된 자연대류, 강제대류 및 등가 열 손실 계수는 각각 Fig. 69, Fig. 70 및 Fig. 71 과 같다.

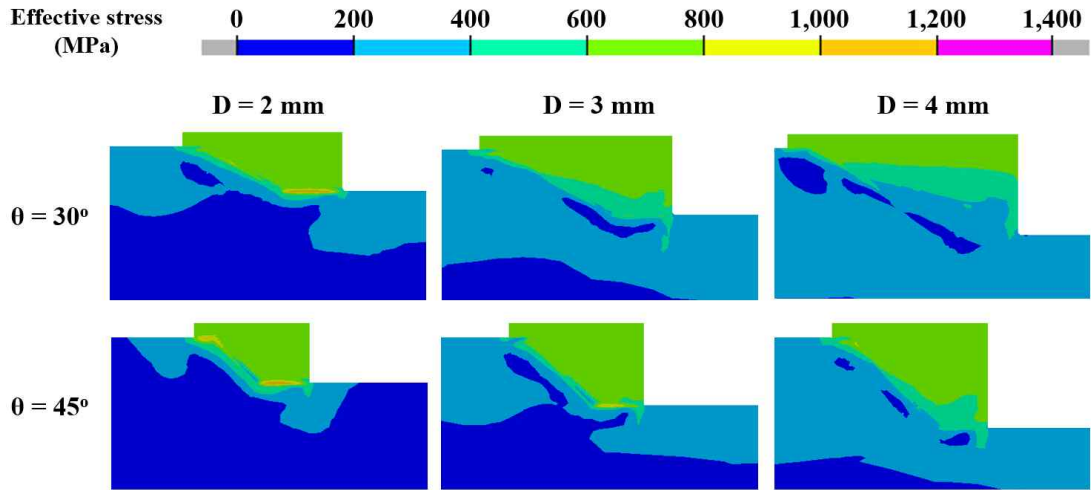
2. 기저부 절삭 깊이에 따른 잔류응력 비교 분석

가. 유효 응력 비교 및 분석

Fig. 72 의 (a) 는 기저부 경사 각도 및 절삭 깊이에 따른 유효 응력 분포이며, Fig. 72 의 (b) 는 비드부를 확대한 유효 응력 분포이다. 유효 응력은 깊이에 따라 적층부 및 기저부에 크게 발생하였다가 깊이가 깊어질수록 최대 유효 응력 발생 위치가 비드쪽으로 올라가는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Effective stress distribution



(b) Magnify of bead vicinity

Fig. 72 Effective stress according to depth

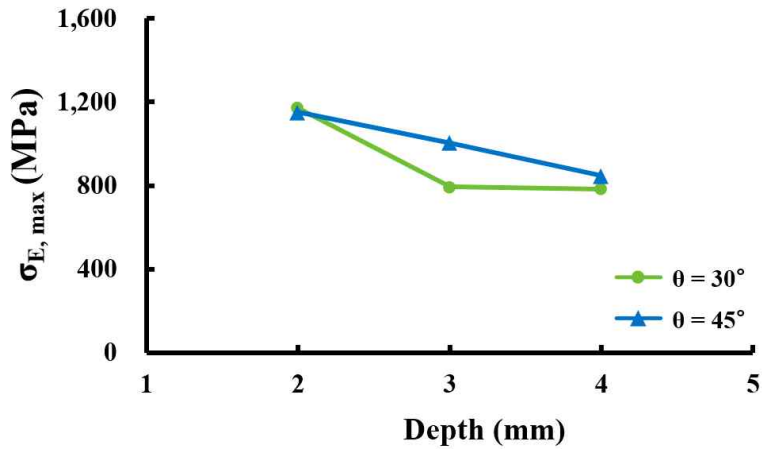


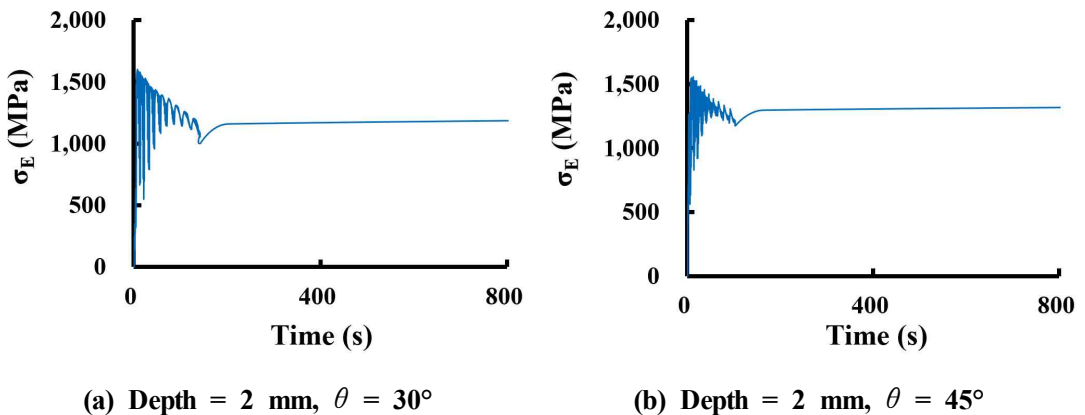
Fig. 73 Maximum effective stress according to depth

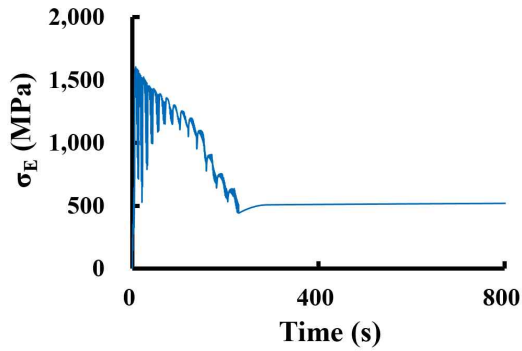
Fig. 73 은 깊이에 따른 최대 유효 응력 값이다. 최대 유효 응력의 경우 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 낮게 도출되었다. 이는 적층량이 많아짐에 따라 열 이력 또한 많아져 기저부의 유효 응력이 감소하였기 때문으로 사료 된다. 따라서 이를 증명하기 위해 Fig. 74 와 같이 적층 중 최대 유효 응력이 걸리는 위치에서의 유효 응력의 이력을 각각 도출하였다.

Fig. 75 는 적층 중 최대 유효 응력이 걸리는 위치에서의 유효 응력 이력이며, 적층이 진행될수록 모든 조건에서 유효 응력이 급격히 증가했다가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 적층 시 발생된 최대 유효 응력은 기저부 경사 각도 30° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 1,602 MPa, 1,604 MPa 및 1,604 MPa 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 1,555 MPa, 1,557 MPa 및 1,559 MPa 이다. 기저부 경사 각도에 따른 최대 유효 응력 값의 차이는 있었지만, 기저부 절삭 깊이에 따른 최대 유효 응력 값의 차이는 미미하게 나타났다. 또한, 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 적층량 증가에 의해 적층이 완료되는 시간이 증가하고, 따라서 열 이력이 많아지며 유효 응력이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 기저부 경사 각도가 낮을수록 깊이가 깊어짐에 따라 적층량이 급격히 증가하여 유효 응력 또한 깊이에 따른 감소 폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

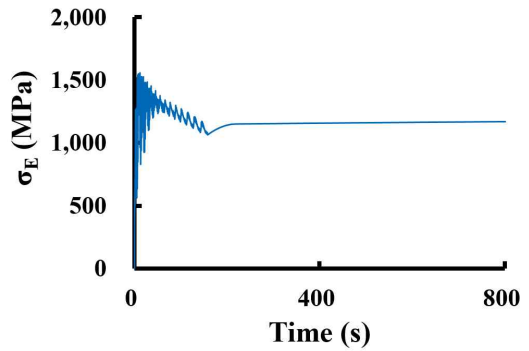


Fig. 74 Measurement point of effective stress

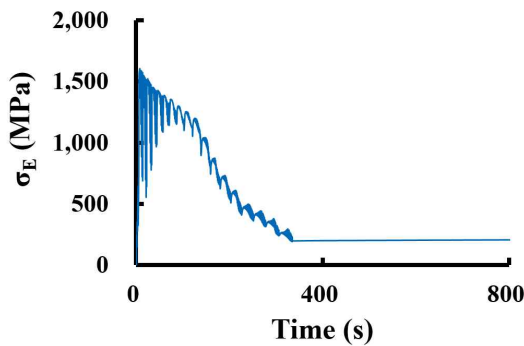




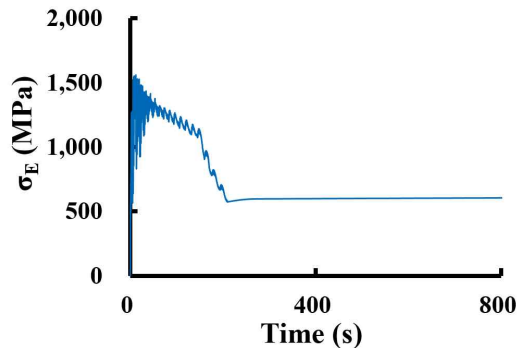
(c) Depth = 3 mm, $\theta = 30^\circ$



(d) Depth = 3 mm, $\theta = 45^\circ$



(e) Depth = 4 mm, $\theta = 30^\circ$



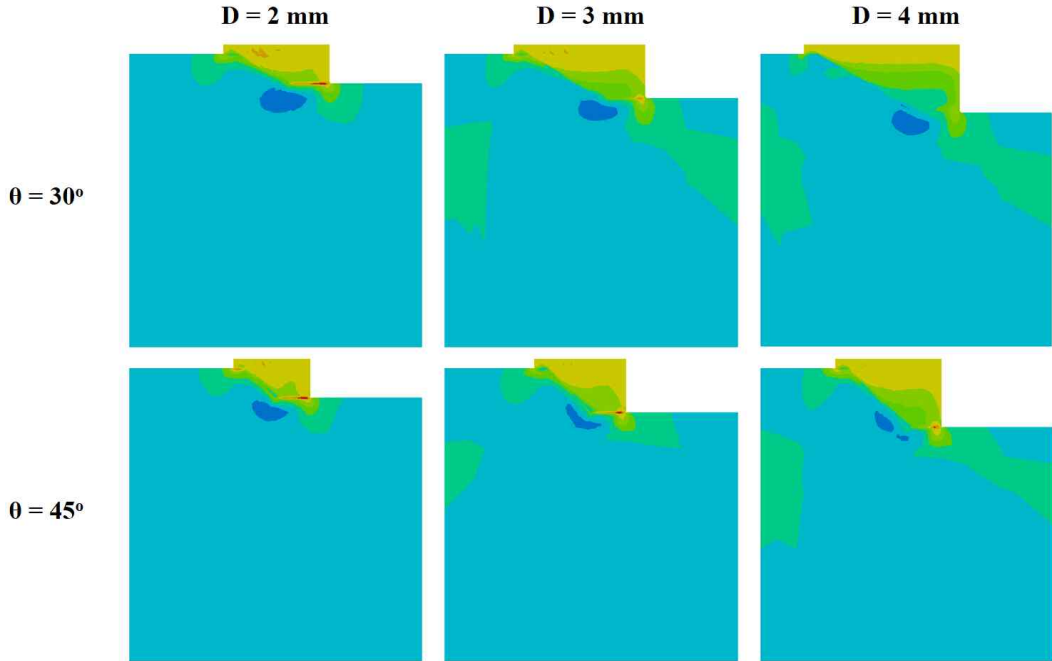
(f) Depth = 4 mm, $\theta = 45^\circ$

Fig. 75 Effective stress history according to depth

나. 주응력 비교 및 분석

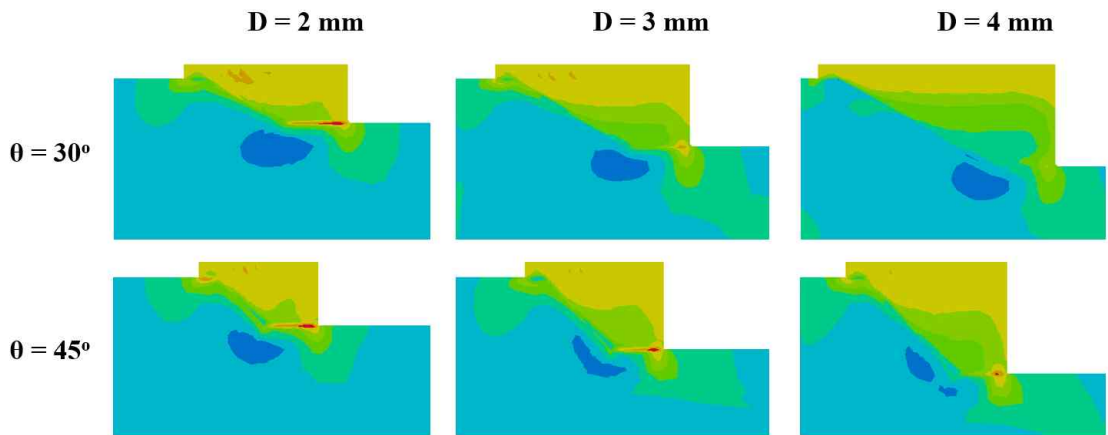
Fig. 76 의 (a) 는 기저부 경사 각도 및 절삭 깊이에 따른 주응력 분포이며, Fig. 76 의 (b) 는 비드부를 확대한 주응력 분포이다. 주응력은 적층부 및 기저부에 발생하였다. Fig. 77 은 깊이에 따른 최대 주응력 값이다. 최대 주응력의 경우 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 낮게 도출되었다. 이는 적층량이 많아짐에 따라 열 이력 또한 많아져 기저부의 주응력이 점차 감소하였기 때문으로 사료 된다. 따라서 이를 증명하기 위해 Fig. 78 과 같이 적층 중 최대 주응력이 걸리는 위치에서의 주응력의 이력을 각각 도출하였다.

1st principal stress (MPa) - 500 - 300 - 100 100 300 500 700 900 1,100 1,300 1,500



(a) First principal stress distribution

1st principal stress (MPa) - 500 - 300 - 100 100 300 500 700 900 1,100 1,300 1,500



(b) Magnify of bead vicinity

Fig. 76 First principal stress according to depth

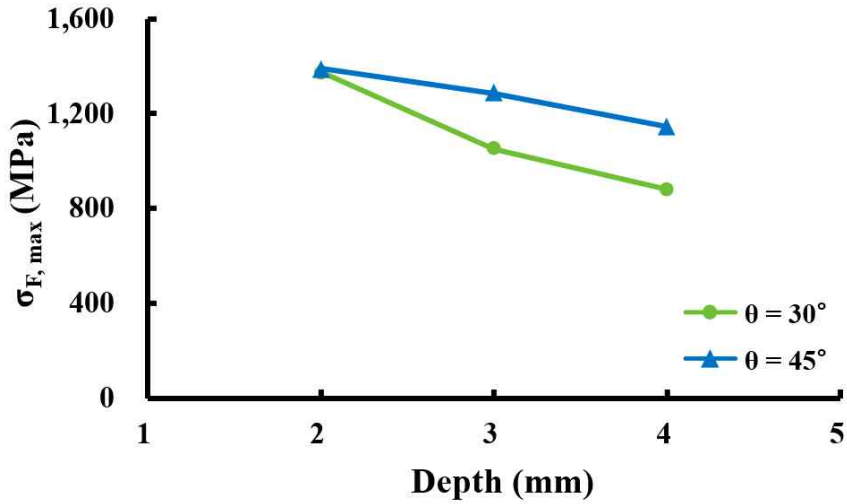


Fig. 77 Maximum first principal stress according to depth

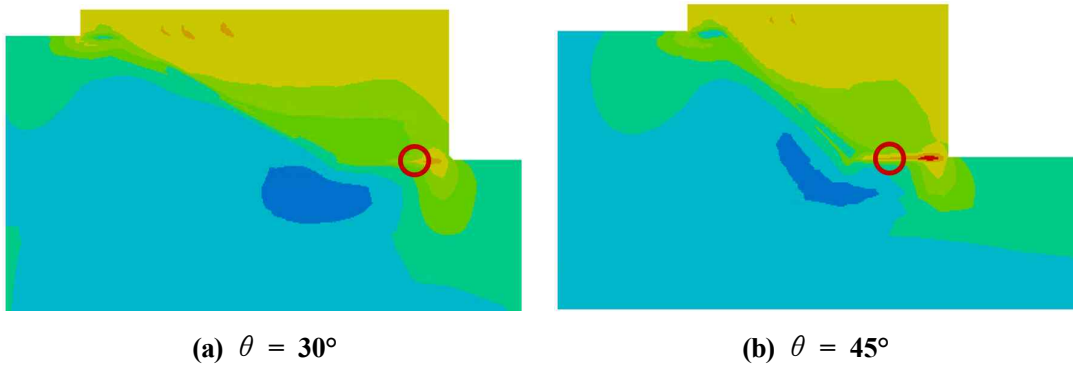
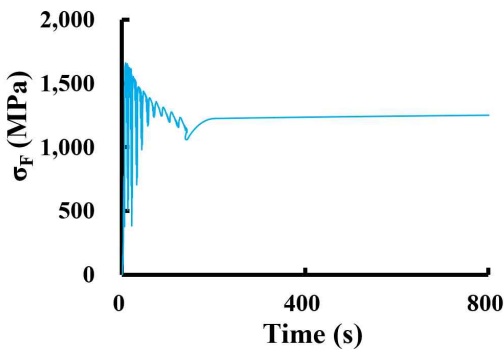


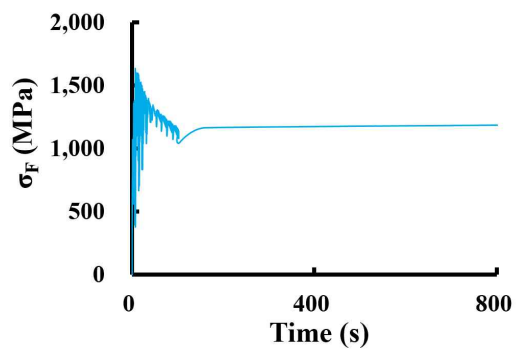
Fig. 78 Measurement point of first principal stress

Fig. 79 는 적층 중 최대 주응력이 걸리는 위치에서의 주응력 이력이다. 적층이 진행될수록 모든 조건에서 주응력이 급격히 증가했다가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 적층량 증가에 의해 적층이 완료되는 시간이 증가하고, 이에 따른 열 이력이 많아지면서 깊이가 깊어짐에 따라 주응력이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 적층 시 발생된 최대 주응력은 기저부 경사 각도 30° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 1,663 MPa, 1,673 MPa 및 1,673 MPa 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 1,633 MPa, 1,639 MPa 및 1,640 MPa 이다. 기저부 경사 각도에 따른 최대

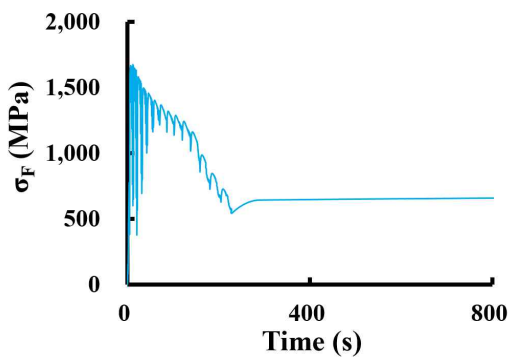
주응력 값의 차이는 있었지만, 기저부 절삭 깊이에 따른 최대 주응력 값의 차이는 기저부 경사 각도에 따른 차이보다 작게 나타났다. 또한, 기저부 경사 각도가 낮을수록 깊이가 깊어짐에 따라 적층량이 급격히 증가하기 때문에 기저부 경사 각도 30°의 경우 기저부 경사 각도 45°보다 주응력 감소 폭이 더 크게 나타났다. 따라서 기저부 절삭 깊이는 적층 중 각 조건의 최대 유효 응력 및 최대 주응력의 차이가 크지 않기 때문에 잔류응력 측면에서 가장 낮게 나타나는 기저부 경사 각도 30° 및 기저부 절삭 깊이 4 mm가 가장 좋은 조건일 것으로 사료 된다.



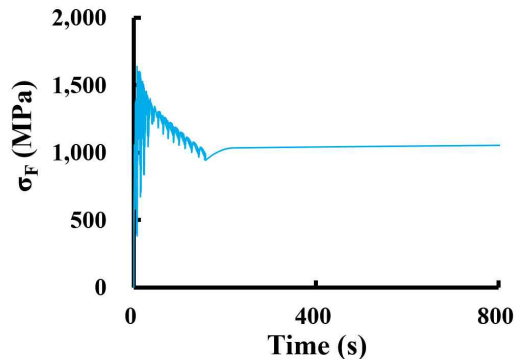
(a) Depth = 2 mm, $\theta = 30^\circ$



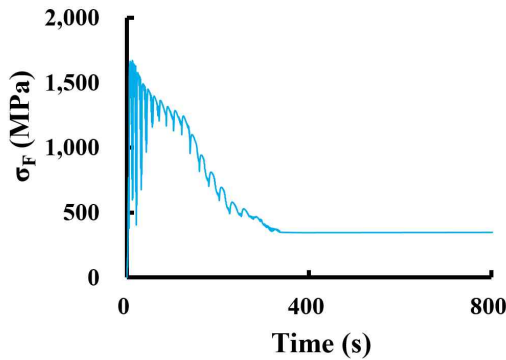
(b) Depth = 2 mm, $\theta = 45^\circ$



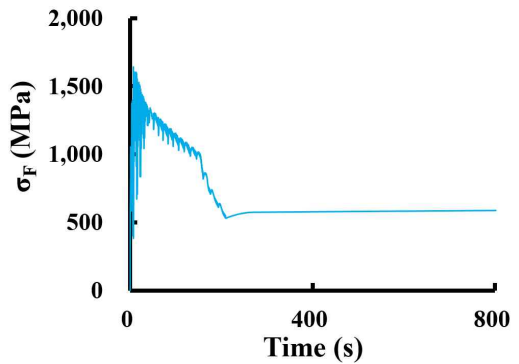
(c) Depth = 3 mm, $\theta = 30^\circ$



(d) Depth = 3 mm, $\theta = 45^\circ$



(e) Depth = 4 mm, $\theta = 30^\circ$



(f) Depth = 4 mm, $\theta = 45^\circ$

Fig. 79 First principal stress history according to depth

제 2 절 기공 위치에 따른 잔류응력 특성 분석

1. 기공 위치에 따른 2차원 유한요소 해석 모델 개발

제 1 절에서 진행하였던 기저부 절삭 깊이에 따른 유한요소 해석 결과 4 mm 의 깊이에서 가장 작은 잔류응력이 도출되었다. 따라서 기저부 절삭 깊이 4 mm 에서 기공이 발생하였을 때 잔류응력을 비교 및 분석하기 위해 Fig. 80 의 (a) 및 (b) 와 같이 기공 발생 위치에 따른 유한요소 해석 모델을 개발하였다. 기공 발생 위치는 각 기저부 절삭 깊이마다 비드부와 기저부로 총 4 가지 조건을 선정하였으며, 각각의 위치는 적층 중 비드부와 기저부에서 최대 잔류응력이 발생한 위치로 선정하였다. 유한요소 해석 모델 크기는 Fig. 67 에서 기저부 절삭 깊이 4 mm 의 모델과 동일하며, 적용되는 대류 조건 또한 동일하다. 해석에 적용된 기저부 및 적층부 소재는 각각 S45C 및 Inconel 718 이며, 각 소재의 화학 조성은 Table 6 과 동일하다. 해석에 사용된 온도 의존 열 및 기계 물성 데이터는 Fig. 9 및 Fig. 10 과 같다.

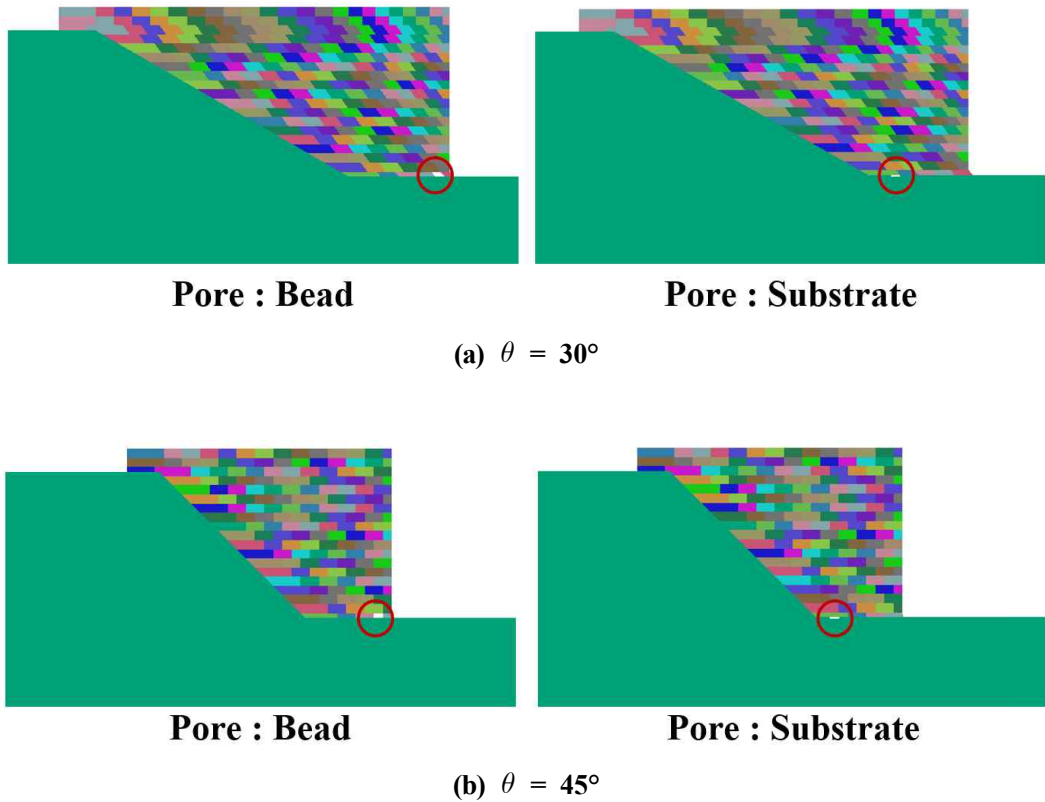


Fig. 80 FE models according to pore

2. 기공 위치에 따른 잔류응력 비교 분석

가. 유효 응력 비교 및 분석

Fig. 81 의 (a) 는 기공 위치에 따른 유효 응력 분포이며, Fig. 81 의 (b) 는 비드부를 확대한 유효 응력 분포이다. 기공이 없는 경우와 비교하였을 때 기공이 비드부에 있는 경우 및 기공이 기저부에 있는 경우 모두 유효 응력 분포의 차이는 크게 발생하지 않았다.

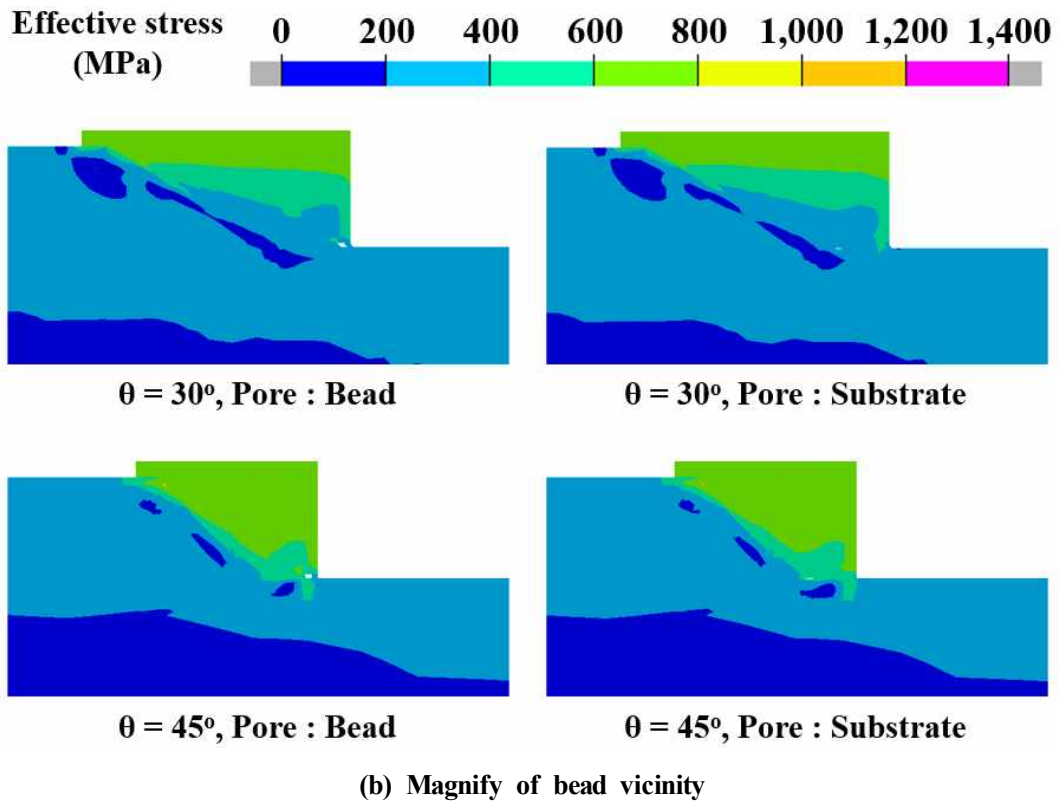
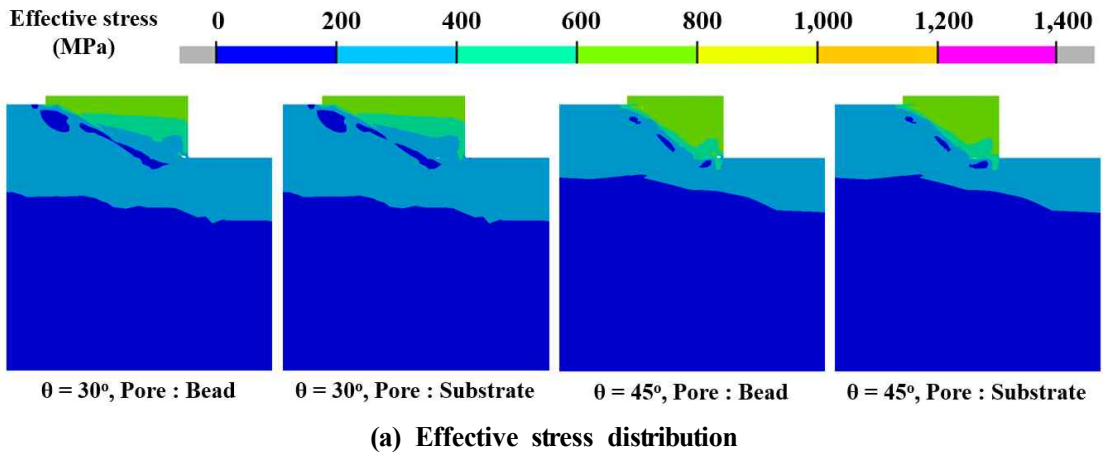


Fig. 81 Effective stress according to pore

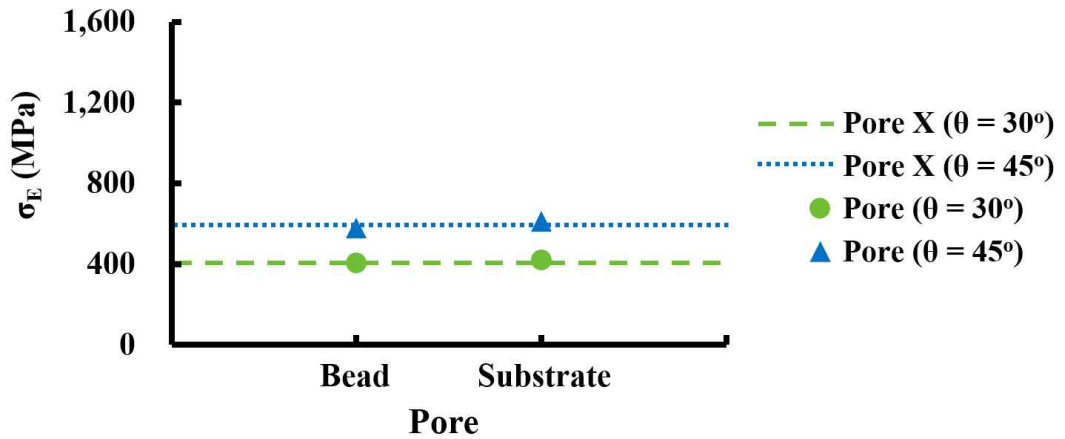


Fig. 82 Effective stress for occur of pore

Fig. 82 는 기공 발생 위치에 따른 유효 응력 그래프이다. 점선은 기공이 발생하지 않았을 시 유효 응력을 나타내며, 동그라미 및 세모는 각각 기공이 발생하였을 때 기저부 경사 각도 30° 및 45° 를 나타낸다. 기공 발생 유무 및 기공 발생 위치에 따른 유효 응력 차이는 크게 발생하지 않았다. 이는 적층량이 많아짐에 따라 열 이력도 함께 많아져 기저부의 유효 응력이 완화되면서 최대 유효 응력 값이 기저부가 아닌 비드부에서 발생하였기 때문으로 사료 된다. 이처럼 적층 중 최대 유효 응력 발생 위치와 냉각 (Cooling) 후 발생 위치가 다르기 때문에 Fig. 83 와 같이 적층 중 최대 유효 응력이 발생한 위치의 열 이력을 도출하였다.

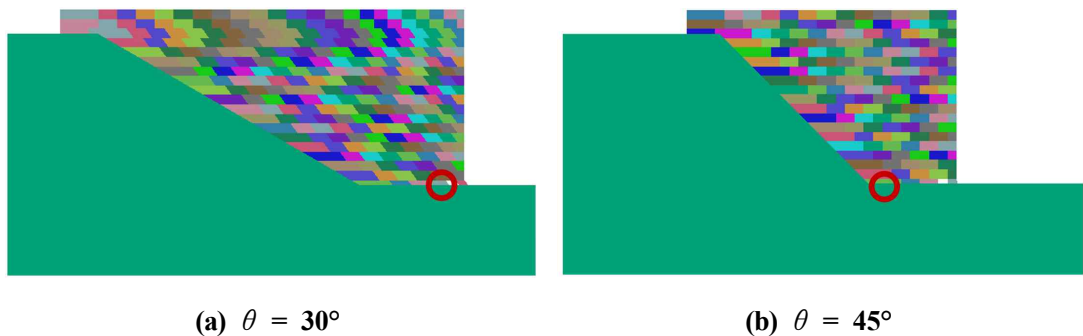


Fig. 83 Measurement point of effective stress (Pore)

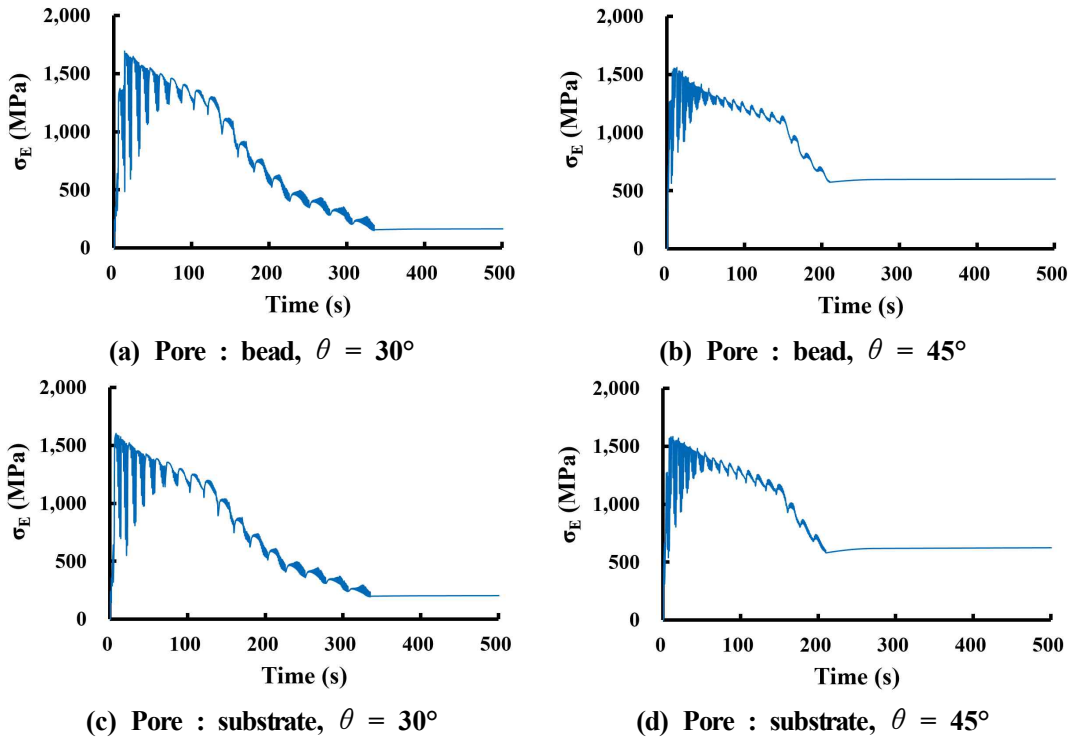


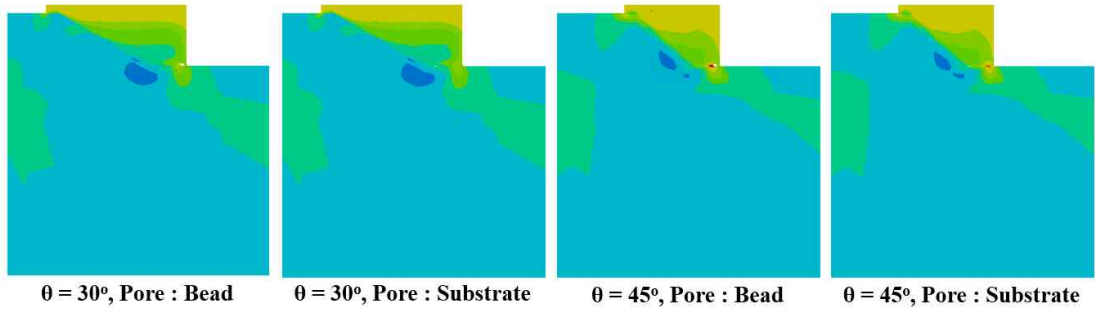
Fig. 84 Effective stress history according to pore

Fig. 84 는 기저부 경사 각도 및 기공 발생 위치에 따른 유효 응력의 이력이다. 적층 과정에서 최대 유효 응력은 기저부 경사 각도 30° 에서 기공이 비드부에 발생하였을 경우 1,692 MPa 로 가장 높게 나타났다. 또한, 모든 조건에서 적층이 시작되면서 유효 응력은 급격히 증가했다가 적층이 진행될수록 열 이력을 받으며 완화되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열 이력이 많아져 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되었기 때문이다.

나. 주응력 비교 및 분석

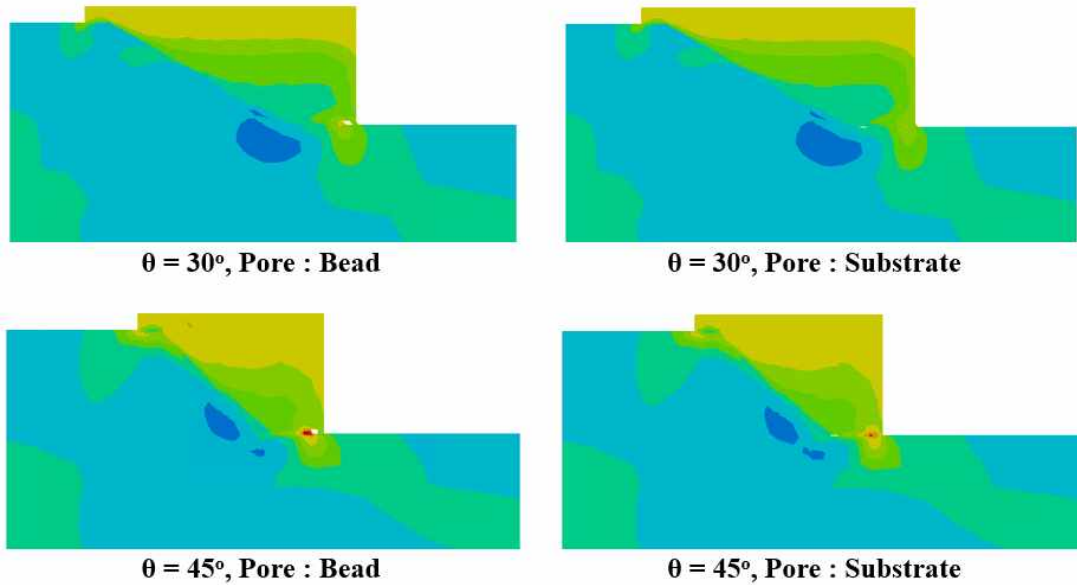
Fig. 85 의 (a) 는 기공 위치에 따른 주응력 분포이며, Fig. 85 의 (b) 는 비드부를 확대한 주응력 분포이다. 기공이 없는 경우와 비교하였을 때 기공이 비드부에 있는 경우 및 기공이 기저부에 있는 경우 모두 주응력 분포 차이는 크게 나타나지 않았다.

1st principal stress (MPa) - 500 - 300 - 100 100 300 500 700 900 1,100 1,300 1,500



(a) First principal stress distribution

1st principal stress (MPa) - 500 - 300 - 100 100 300 500 700 900 1,100 1,300 1,500



(b) Magnify of bead vicinity

Fig. 85 First principal stress according to pore

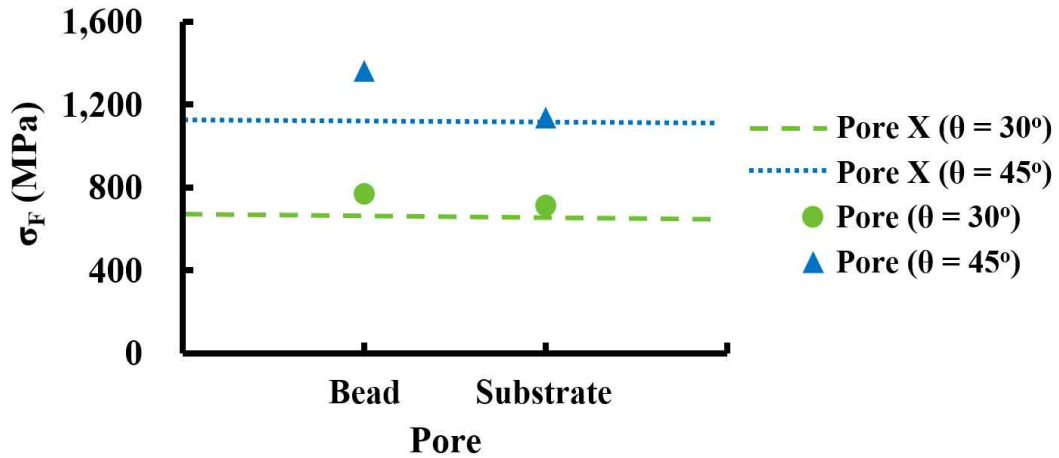


Fig. 86 First principal stress for occur of pore

Fig. 86 은 기공 발생 위치에 따른 주응력 그래프이다. 점선은 기공이 발생하지 않았을 시 주응력을 나타내며, 동그라미 및 세모는 각각 기공이 발생하였을 때 기저부 경사 각도 30° 및 45° 를 나타낸다. 기공 발생 유무 및 기공 발생 위치에 따른 주응력 차이는 기공이 기저부에 발생한 경우보다 비드부에 발생했을 경우 더 차이가 크게 나타났다. 이는 적층 중 최대 응력이 걸리는 비드에 기공이 발생했다고 가정한 곳 인근에서 최대 주응력이 발생했기 때문으로 사료 된다. 또한, 기저부에 기공이 발생하였다고 가정한 곳 인근은 비드부에 기공이 발생하였다고 가정한 곳 인근보다 주응력이 작게 나타나 기공이 발생하지 않았을 경우의 주응력과 비교적 큰 차이가 나타나지 않았을 것으로 사료 된다. 따라서 적층 중 발생하는 최대 주응력 값을 확인하기 위해 Fig. 83 과 같이 적층 중 최대 주응력이 발생한 위치의 열 이력을 도출하였다.

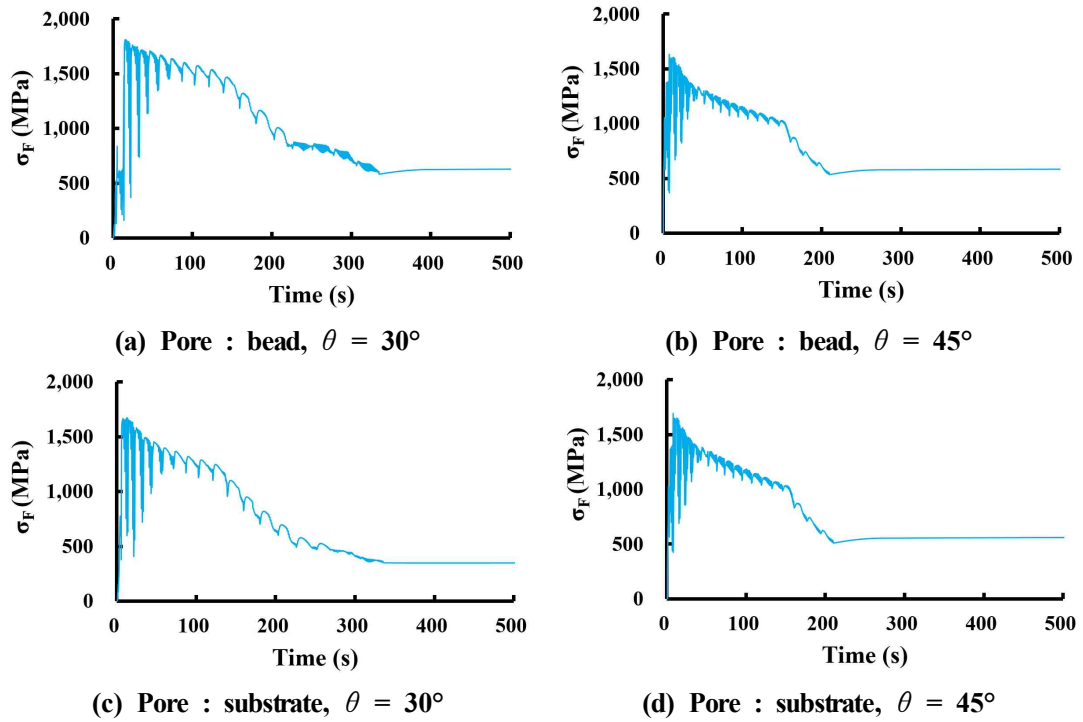


Fig. 87 First principal stress history according to pore

Fig. 87 은 기저부 경사 각도 및 기공 발생 위치에 따른 주응력의 이력이다. 적층 과정에서 최대 주응력은 최대 유효 응력과 마찬가지로 기저부 경사 각도 30° 에서 기공이 비드부에 발생하였을 경우 가장 높게 나타났다. 또한, 모든 조건에서 주응력은 적층이 시작되면서 급격히 증가했다가 적층이 진행될수록 열 이력을 받으며 완화되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기공이 기저부에 생기는 것보다 비드부에 생길 경우가 적층 중 최대 응력 및 잔류응력 측면에서 더 좋지 않을 것으로 사료 된다.

제 4 장 공작기계 부품 보수 실험 및 결과

제 1 절 기초 적층 시편 설계 및 실험 설정

1. 기저부 및 적층 재료 선정

기저부 재료는 Fig. 88 과 같이 공작기계 부품 중 하나인 샤프트 (Shaft) 의 소재를 분석한 결과 도출된 S45C 로 선정하였으며, 적층 재료는 부품 보수 시 접합성을 높이기 위해 기저부와 같은 재료인 S45C 로 선정하였다. 기계구조용 탄소강인 S45C 는 기계적 성질이 우수하고 가공성 및 용접성이 우수하여 일반적으로 가장 많이 사용되는 강재 중 하나이다. 기저부 및 적층 분말인 S45C 의 화학 조성은 Table 18 과 같으며 적층 분말 크기는 Table 19 와 같다. 또한, 적층 분말의 탭 밀도 (Tab density) 는 4.2 g/cm^3 이며, 유량 (Flow ability) 은 24.7 s/50g 이다.



(a) side view of shaft



(b) ISO view of shaft

Fig. 88 Shaft of parts for machine tools

Table 18 Chemical compositions of substrate and powder⁵¹⁾

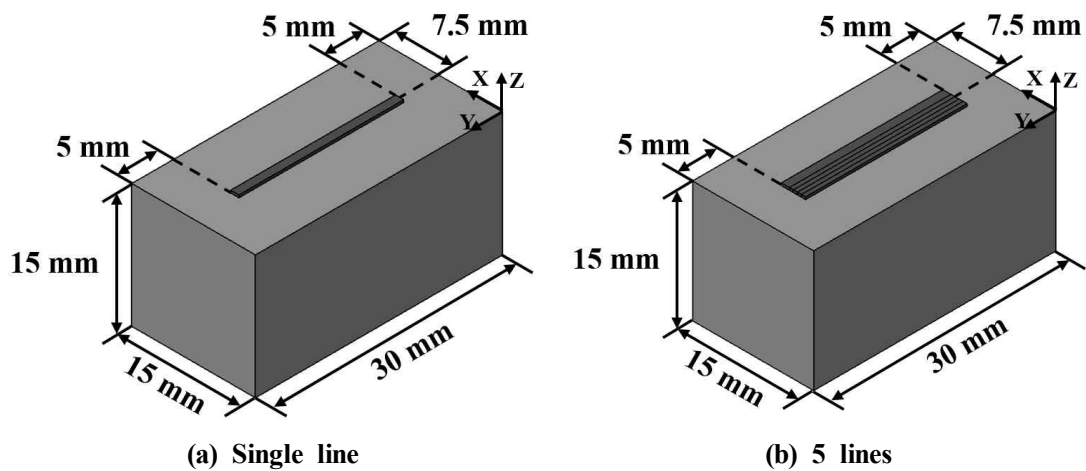
Material (%)	Mo	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ni	P	S	O
S45C	0.23	0.84	Bal.	0.42	0.25	0.78	1.86	0.009	0.005	≤ 0.016

Table 19 Particle distribution of substrate and powder⁵¹⁾

D10	D50	D90
53 μm (4.25 %)	Bal.	150 μm (2.25 %)

2. 적층 시편 설계

S45C 동종 재료 적층 특성 고찰을 위해 Fig. 89 와 같이 단일, 5열, 2층, 4층 및 다층 적층 시편을 설계하였다. 비드 적층 방향은 모두 Alternative 방향으로 진행하였으며 적층량은 시편 중심으로부터 대칭이 되도록 설계하였다. 시편 부피 (Volume) 와 적층량에 따라 열전달 특성이 다르게 나타나므로 이를 고려하여 단일 및 5열 적층의 경우 시편 두께를 15 mm 로 선정하였으며, 2층, 4층 및 다층 적층의 경우 시편 두께를 20 mm 로 선정하였다.



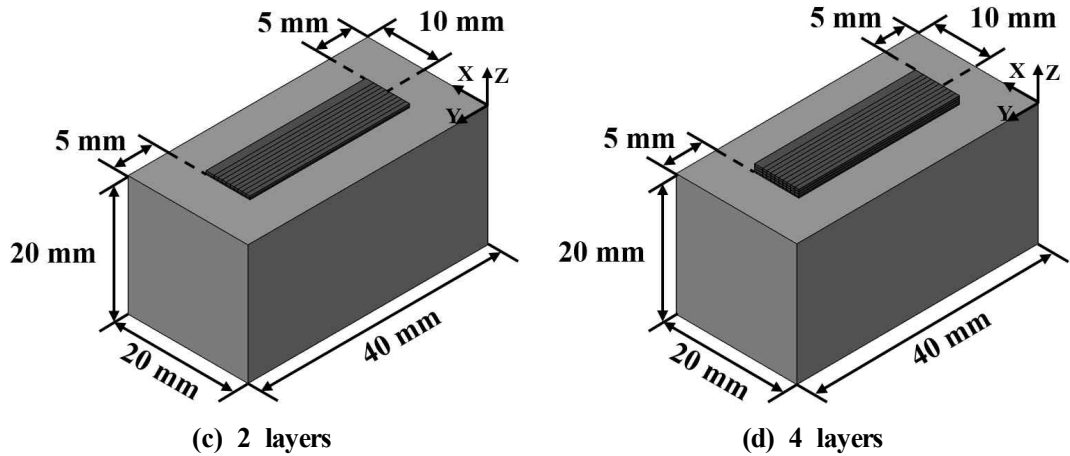


Fig. 89 Specimen design of deposition experiments

제 2 절 기초 적층 실험 조건 선정 및 실험 설정

1. 기초 적층 실험 조건 선정

Table 20 은 기초 적층 실험에서 단일 및 5열 적층 시 사용된 공정 조건이다. 레이저 출력과 이송 속도의 범위는 각각 400 - 1,000 W 및 600 - 1,200 mm/min 이다. 적층 실험에 적용된 분말 공급률은 5 g/min 이며, 적층 공정 중 적층부 인근 산화 방지를 위해 분사된 아르곤 가스 공급률은 10 ℓ/min 이다. 또한 비드 중심간 거리 (Hatch distance) 는 0.7 mm 이며 비드 층간 거리 (Scan distance) 는 0.3 mm 이다.

Table 20 Experimental conditions

Laser power (W)	Scan speed (mm/min)	Feed rate of powder (g/min)	Feed rate of shielding gas (ℓ/min)	Hatch distance (mm)	Scan distance (mm)
400 - 1,000	600 - 1,200	5	10	0.7	0.3

2. 기초 적층 실험 설정

기초 적층 실험은 Fig. 90 과 같이 Doosan 의 DVF 8000-AML 장비를 이용하였으며, 실험을 위한 Set-up 은 Fig. 91 과 같다. 시편은 양쪽 끝 수직 부분의 5 mm 범위와 아랫부분의 양쪽 끝 5 mm 범위를 고정한 상태에서 진행되었다.

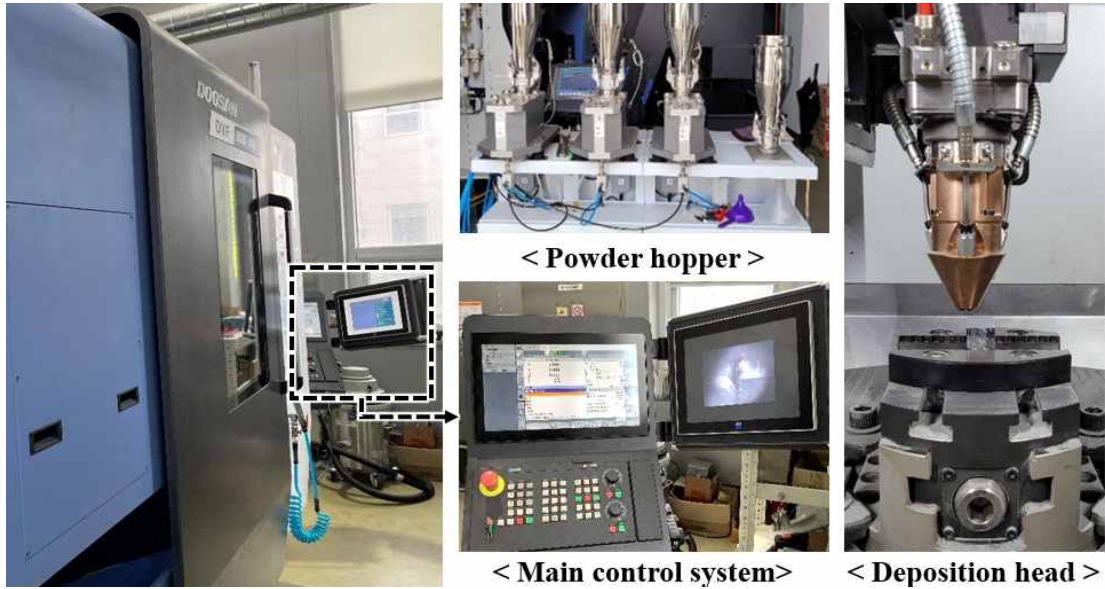


Fig. 90 DED process machine for deposition experiment

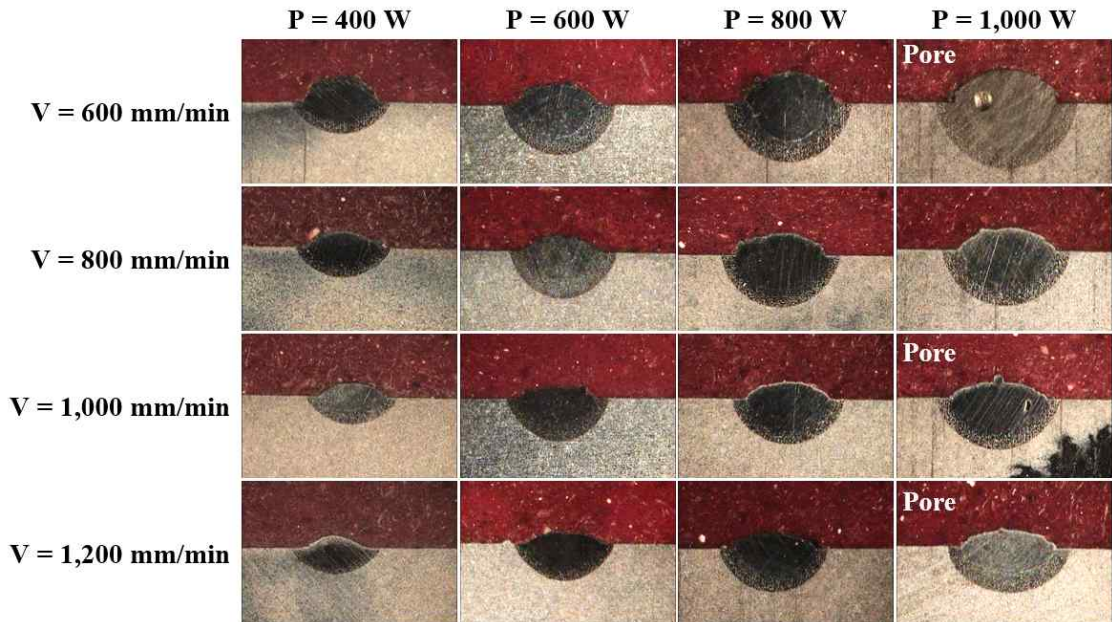


Fig. 91 Set-up for the deposition

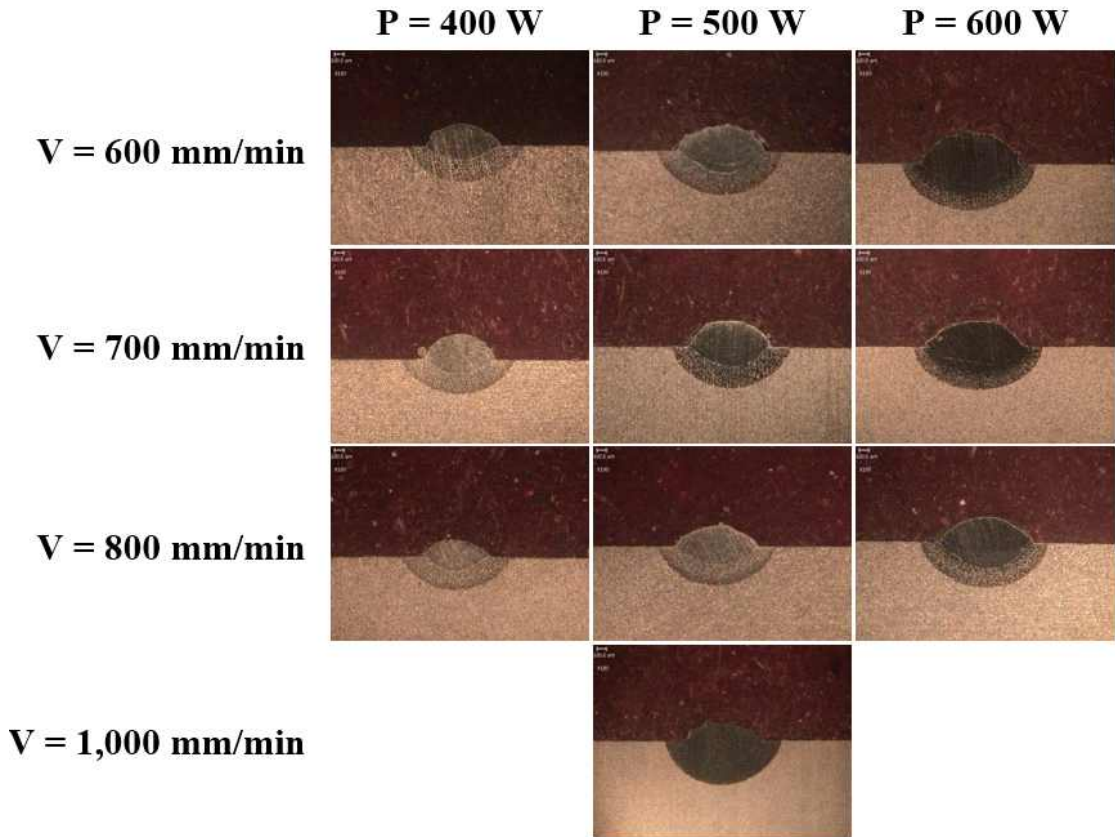
제 3 절 기초 적층 시편 제작 및 비드 특성 데이터 도출

1. 단일 비드 시편 제작 및 비드 특성 데이터 도출

Fig. 92 의 (a) 는 각 조건별로 기초 적층 시편인 단일 비드 시편을 제작하고 적층 중간부를 절단하여 후처리 한 단면을 조건별로 나타낸 모습이다. P 는 레이저 출력을 나타내며, V 는 이송 속도를 나타낸다. 단면을 분석한 결과 기저부와 적층부의 소재가 동일 소재임에도 불구하고 혼합층 (Diluted region) 및 열 영향부 (Heat affected zone : HAZ) 를 명확히 확인할 수 있었다. 비드 크기는 레이저 출력이 증가할수록, 이송 속도가 감소할수록 크게 나타났다. 레이저 출력 1,000 W 의 경우 거의 모든 이송 속도 조건에서 기공 (Pore) 이 발생하였다. 따라서 레이저 출력 400 - 600 W, 이송 속도 600 - 800 mm/min 의 범위에서 재실험을 진행하였다.



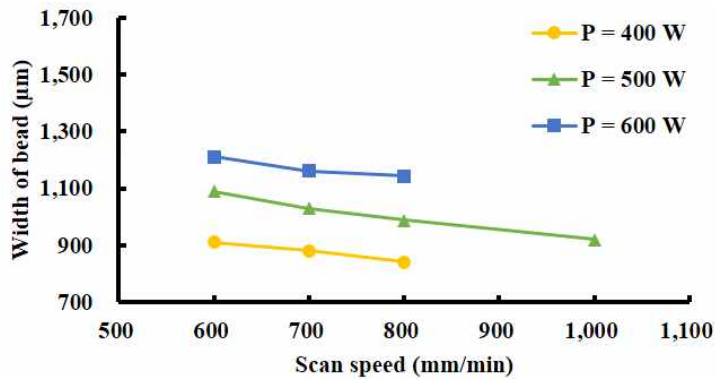
(a) First experiment



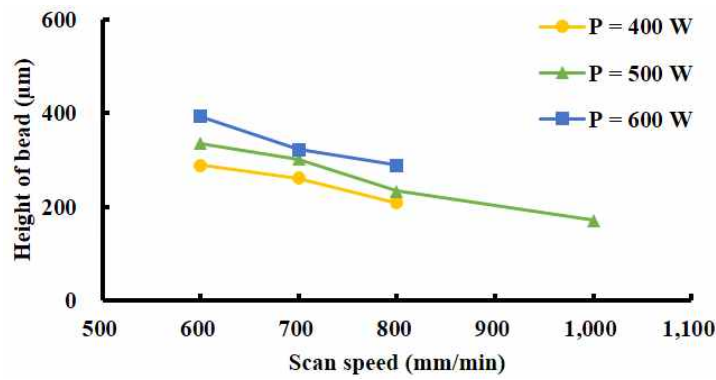
(b) Second experiment

Fig. 92 Experiment results of single bead

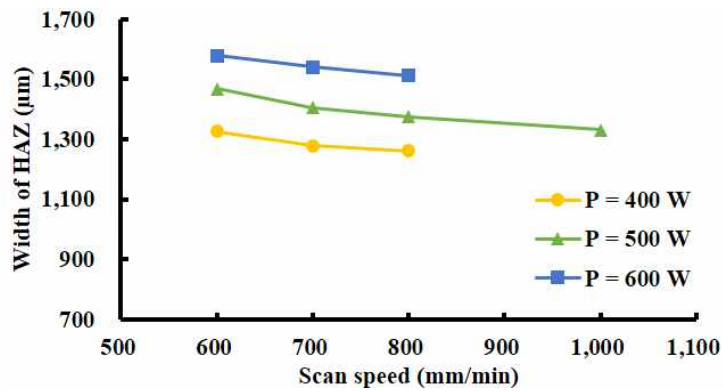
Fig. 92 의 (b) 는 각 조건별로 재실험한 결과이다. Fig. 92 의 (a) 와 동일하게 적층 방향의 중간 지점을 절단하여 후처리 한 후 단면을 나타냈다. Fig. 93 은 Fig. 92 (b) 의 조건 별 비드 및 열 영향부 크기를 측정된 결과이다. 비드 및 열 영향부 크기를 비교 분석한 결과 레이저 출력이 감소하고 이송 속도가 빨라짐에 따라 비드 및 열 영향부의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 비드 형상 (shape) 은 모든 조건에서 무너지지 않았으며, 기공 또한 발생하지 않았다. 따라서 다음 조건들을 이용해 다열 실험을 진행하였다.



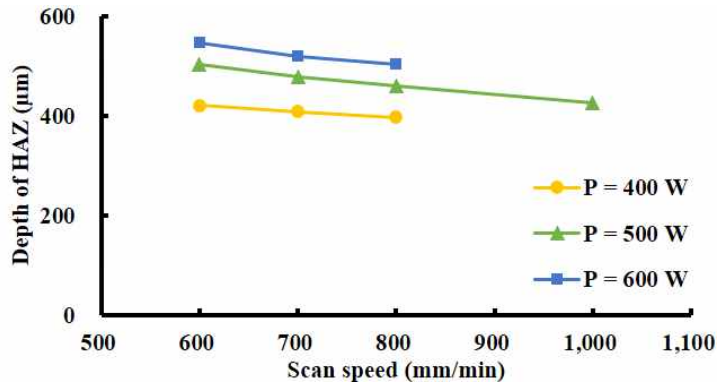
(a) Width of bead



(b) Height of bead



(c) Width of HAZ



(d) Depth of HAZ

Fig. 93 Effects of the power and the scan speed of single bead

2. 다열 및 다층 비드 시편 제작

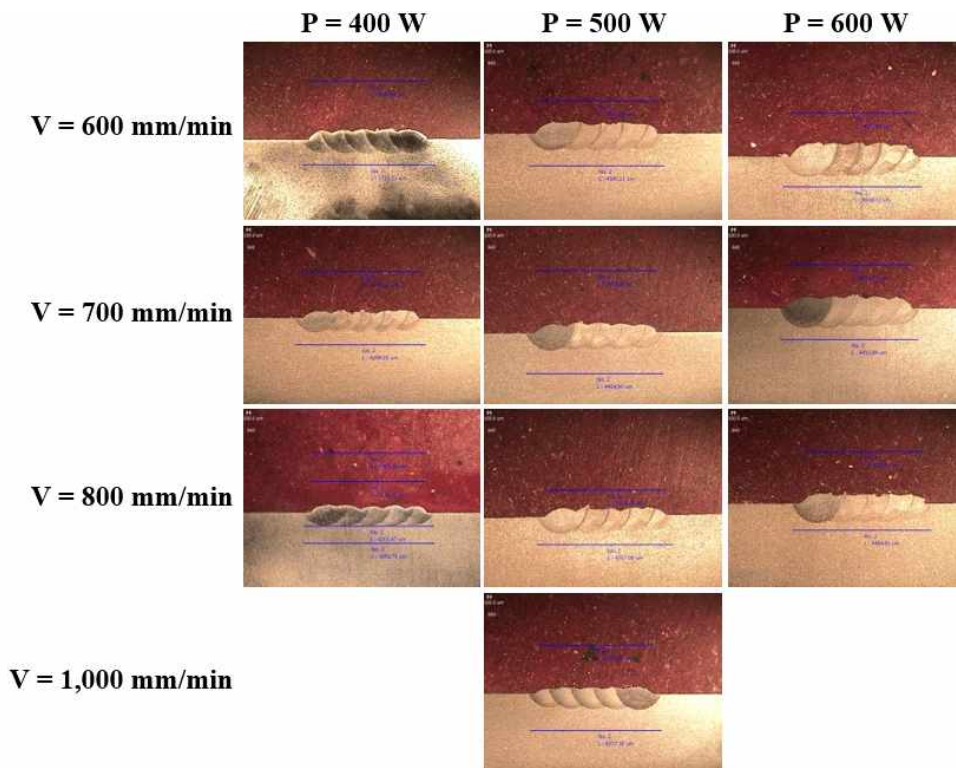


Fig. 94 Section of 5 lines deposition

Fig. 94 는 레이저 출력 및 이송 속도에 따른 5 lines 적층 결과이다. 적층 조건은 Table 20 과 같으며, 적층 결과 레이저 출력 400 W 의 경우 각 비드 사이 간격이 멀어 비드 전체의 높이가 일정하지 않았다. 이와 같은 경우 층을 더 높게 쌓으면 각 층 사이에 기공이 발생할 확률이 높아진다. 레이저 출력 600 W 의 경우 레이저 출력 400 W 보다는 비드 전체적인 높이가 일정하였지만, 비교적 적층 시작 지점보다 적층 마지막 비드의 높아 비드가 올라타는 경향이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 따라서 비드 높이 및 형상이 가장 적절한 레이저 출력 500 W, 이송 속도 1,000 mm/min 의 조건을 적정 적층 조건으로 선정하였다.

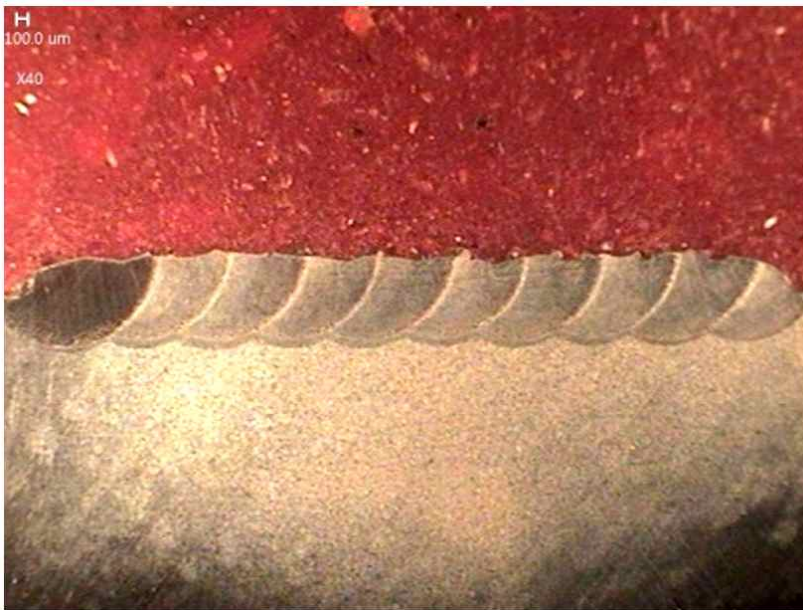


Fig. 95 Section of 2 layers deposition

Fig. 95 는 레이저 출력 500 W 와 이송 속도 1,000 mm/min 조건을 이용하여 비드 10 line 을 2 층으로 쌓은 시편의 적층 중간부를 절단한 후 후처리 하여 나타낸 단면이다. 기공은 발생하지 않았으며, 비드 높이 또한 전체적으로 완만한 형상을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

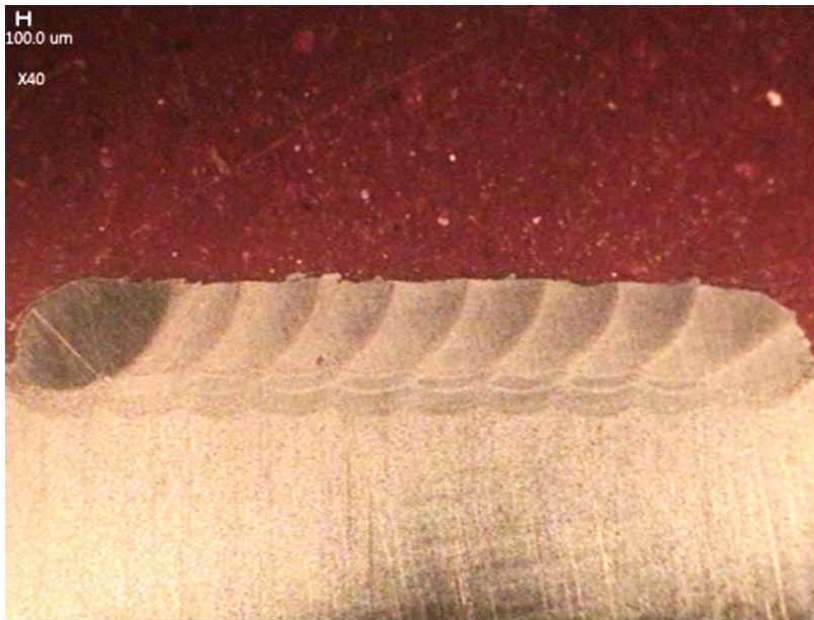


Fig. 96 Section of 4 layers deposition

Fig. 96 은 레이저 출력 500 W, 이송 속도 1,000 mm/min 조건을 이용하여 비드 10 lines 를 4 층으로 쌓은 시편의 중간부를 절단한 후 후처리하여 나타낸 단면이다. Fig. 95 와 마찬가지로 결함은 나타나지 않았으며, 비드 높이 또한 전체적으로 완만한 형상을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

제 4 절 시편 설계 및 제작

1. 공작기계 부품 보수 시편 설계

가. 적층 재료 선정

기저부 및 적층부 재료는 공작기계 부품 중 하나인 샤프트 (Shaft) 의 소재를 분석한 결과 도출된 S45C 로 선정하였다. 선정된 S45C 의 화학 조성은 Table 18 과 같으며, 적층 분말 크기는 Table 19 와 같다.

나. 적층 시편 설계

Fig. 97 은 공작기계 부품 중 하나인 샤프트 (Shaft) 의 손상 부위이다. 이와 동일한 형태로 Fig. 98 과 같이 공작기계 부품 보수 실험 시편을 설계하였다. 절삭부 크기는 실제 손상 부위를 고려하여 큰 손상부와 작은 손상부를 보수할 수 있도록 두 가지 절삭 크기의 시편을 각각 설계하였다. 절삭 형태는 해석 결과에 따라 잔류응력 발생이 가장 적은 기저부 경사 각도 30° 에서 기저부 경사 깊이 4 mm 를 선정하였다. 실제 제작된 공작기계 부품 보수 시편은 Fig. 99 와 같다.



Fig. 97 The damaged parts of the shaft

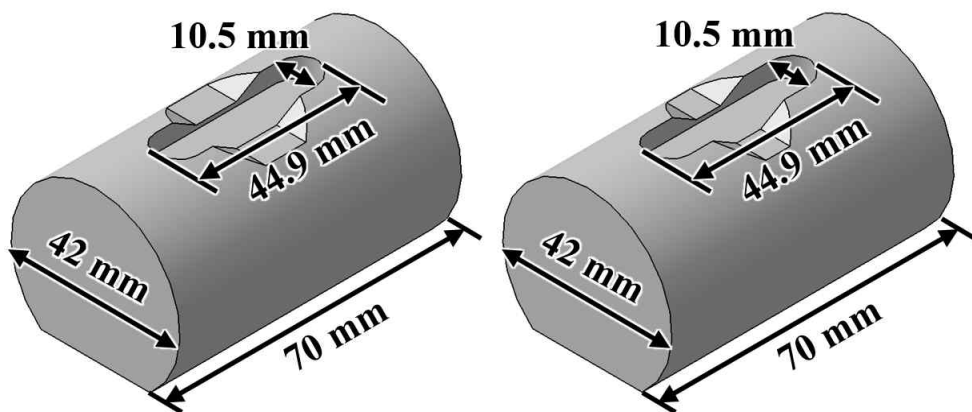


Fig. 98 Specimen design of repair experiments



Fig. 99 Processed specimens

2. 적층 실험 조건 선정 및 실험 설정

가. 적층 실험 조건 선정

공작기계 부품 보수 실험 시 사용된 공정 조건은 Table 21 과 같다. 실험에 적용된 레이저 출력과 이송 속도는 각각 500 W 및 1,000 mm/min 이며, 분말 공급률은 5 g/min 이다. 적층 공정 중 적층부 인근 산화 방지를 위해 분사된 아르곤 가스 공급률은 10 ℓ/min 이며, 비드 중심간 거리 (Hatch distance) 는 0.7 mm, 비드 층간 거리 (Scan distance) 는 0.3 mm 이다.

Table 21 Experimental conditions (repair experiments)

Laser power (W)	Scan speed (mm/min)	Feed rate of powder (g/min)	Feed rate of shielding gas (ℓ/min)	Hatch distance (mm)	Scan distance (mm)
500	1,000	5	10	0.7	0.3

나. 적층 실험 설정

공작기계 부품 보수 실험은 기초 적층 실험과 동일한 Doosan 의 DVF 8000-AML 장비를 이용하였으며 Fig. 90 과 같다. 실험을 위한 Set-up 은 Fig. 100 과 같으며, 시편은 양쪽 끝 수직 부분의 5 mm 범위와 아랫부분의 양쪽 끝 5 mm 범위를 고정된 상태에서 진행되었다. 적층은 Alternative 방향으로 진행되었으며, 기저부 경사 각도가 있는 면을 따라 적층이 진행되었다.



Fig. 100 Set-up for the deposition (repair experiments)

3. 공작기계 부품 보수 시편 제작

Fig. 101 은 공작기계 부품 보수 시편 제작을 완료한 모습이다. 적층은 형상이 무너지는 곳 없이 적절히 적층된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 102 는 제작된 공작기계 부품 보수 시편 중 한 쪽을 절삭 가공을 통해 절삭하여 본래의 형상으로 만든 모습을 나타낸다. 보수된 부위에 결함은 발생하지 않았으며, 기존의 샤프트 (shaft) 형태와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

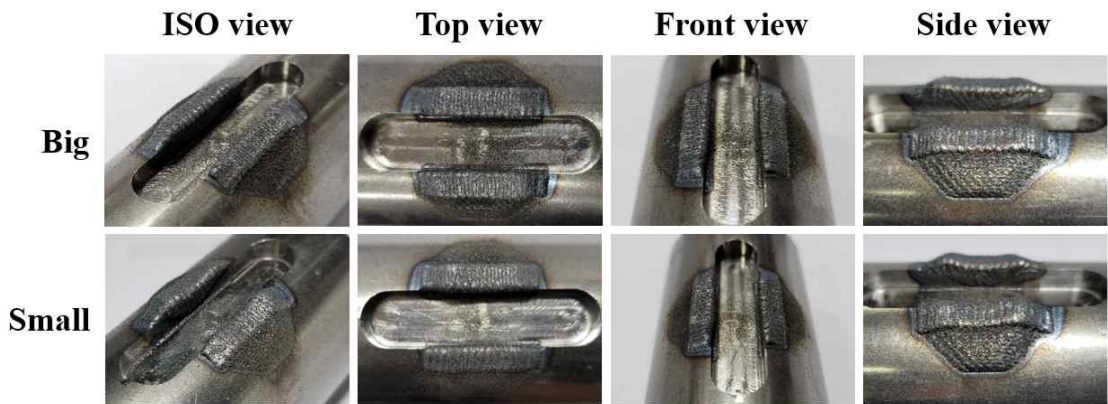


Fig. 101 Repaired specimens

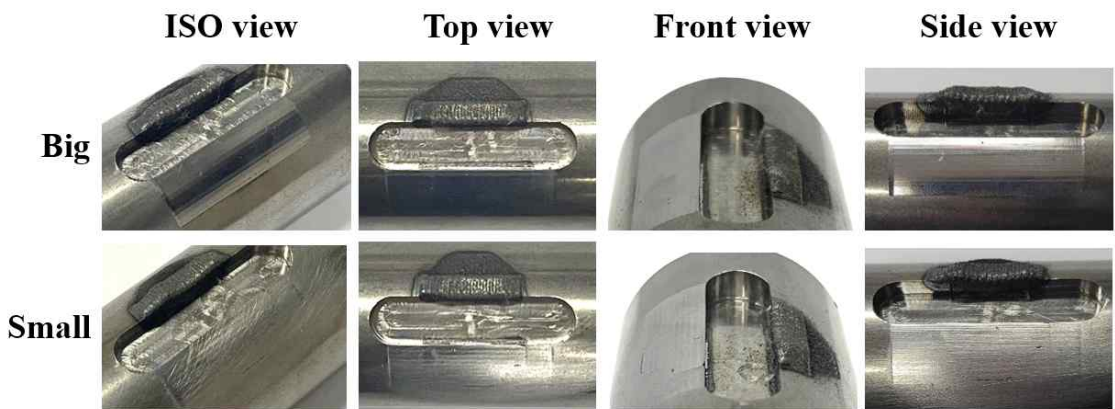


Fig. 102 After cutting the Repaired specimens

제 5 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 DED 공정을 이용한 공작기계 부품을 보수 시 기저부와 적층부 형상이 보수부 인근의 잔류응력 특성에 미치는 영향성을 분석하기 위해 기저부와 적층부의 형상에 따른 유한요소 해석 모델을 제작하고 열-기계 연계 해석을 통해 각 모델의 잔류응력을 비교 분석하였다.

기저부 형상에 따라서는 가장 먼저 코너부 반경에 따른 유한요소 해석을 진행하기 위해 기저부 경사 각도 (θ) 에 따라 15° , 30° 및 45° 와 코너부 반경 (R) 에 따라 3 mm, 5 mm, 8 mm 및 10 mm 를 선정하고 이에 따른 총 12 가지의 기저부 형상을 모델링하였다. 기저부 깊이는 3층 깊이인 0.635 mm 로 가정하였으며 적층 후 본래 형태로 만드는 절삭 가공을 위해 적층부 앞 1 mm 부터 과적층 층을 제작하였다. 적층 소재는 기저부의 경우 S45C 소재를, 적층부의 경우 Inconel 718 소재를 적용하였다. 열-기계 연계 해석 결과 기저부 경사 각도와 코너부 반경에 따른 유효 응력 및 주응력의 분포 차이는 크게 발생하지 않았다. 최대 잔류응력의 비교를 위해 적층 방향의 중간 지점을 잘라 단면의 잔류응력을 도출하였고, 그 결과 총 12 가지의 조건에서 최대 유효 응력 및 최대 주응력은 모두 비드 밑 기저부에서 발생하였다. 도출된 잔류 응력 값을 비교한 결과 유효 응력과 주응력 모두 코너부 반경이 증가할수록 잔류응력 값은 감소하였다. 이는 코너부 반경이 감소함에 따라 형상이 급격히 변화하여 응력이 집중되었기 때문으로 사료 된다. 기저부 경사 각도 (θ) 에 따라서는 각도가 30° 일 때보다 15° 의 경우가 잔류응력이 더 높게 나타났다. 이는 경사부 각도가 30° 일 때보다 15° 의 경우 더 완만하여 형상 변화가 적지만, 적층량이 증가하여 경사부 각도가 30° 일 때보다 15° 의 경우 잔류응력이 더 높게 나타났을 것으로 사료 된다. 각 조건별 적층량인 적층 체적은 기저부 경사 각도 15° 의 경우 코너부 반경 3 mm 부터 10 mm 까지 각각 37.86 mm^3 , 36.25 mm^3 , 33.83 mm^3 및 32.22 mm^3 이며, 기저부 경사 각도 30° 의 경우 코너부 반경 3 mm 부터 10 mm 까지 각각 36.44 mm^3 , 34.76 mm^3 , 32.25 mm^3 및 30.58 mm^3 . 기저부 경사 각도 45° 의 경우 코너부 반경 3 mm 부터 10 mm 까지 각각 35.45 mm^3 , 33.77 mm^3 , 31.26 mm^3 및 29.59 mm^3 이다.

적층 형상에 따라서는 과적층 부를 제외한 모든 층의 비드 수가 동일하여 층이 올라갈수록 경사가 지는 형상, 2 층까지 비드 끝단부가 수직으로 세워지는 형상 및

비드 끝단부가 모두 수직으로 세워지는 형상 세 가지를 선정하였고, 기저부 경사 각도의 경우 이전 해석에서 15°의 경우 다른 각도에 비해 적층량이 월등히 많고 잔류 응력 또한 비교적 높기 때문에 적층량과 잔류응력을 고려하여 기저부 경사 각도는 30° 및 45° 두 가지를 선정하였다. 기저부 경사 각도 (θ)와 적층 형상에 따라 총 6가지의 해석 모델을 제작하였으며, 적층 방향의 경우 단일 방향으로 가정하였고 Alternative 방향과의 비교를 위해 Alternative 방향의 해석도 함께 진행하였다. 각 Type 별 Path 수는 기저부 경사 각도 30°의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 26 Path, 32 Path 및 36 Path 이며, 기저부 경사 각도 45°의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 21 Path, 25 Path 및 28 Path 이다. 각 Type 별 비드부의 체적은 기저부 경사 각도 30°의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 69.18 mm³, 83.39 mm³ 및 90.95 mm³ 이며, 기저부 경사 각도 45°의 경우 Type. 1 부터 Type. 3 까지 각각 57.83 mm³, 65.33 mm³ 및 74.08 mm³ 이다. 유한요소 해석 결과 기저부 경사 각도 (θ) 및 Type 에 따른 유효 응력 및 주응력 분포 차이는 거의 발생하지 않았다. 적층 시작, 적층 중간 및 적층 끝 지점의 잔류응력 비교를 위해 각 단면에서의 잔류응력을 비교 및 분석하였다. 먼저 단일 방향 적층 시 적층 시작 지점의 모든 위치에서 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type 1 에서 Type 3 로 갈수록 유효 응력 값이 높게 도출되었다. 적층 중간 지점에서는 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 유효 응력 값이 가장 높게 나타났다. 또한, 모든 조건의 단면을 한꺼번에 비교한 결과 Type. 2 에서 가장 높은 유효 응력이 도출되었다. 이는 Type. 1 의 경우 적층량이 가장 적어 유효 응력 값이 낮게 나타났을 것으로 사료 되며, Type. 3 의 경우 적층량 증가로 열 이력을 반복적으로 받으면서 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되어 응력 집중이 완화됐을 것으로 사료 된다. 또한, 적층 시작 지점과 적층 끝 지점이 적층 중간 지점보다 유효 응력이 비교적 낮은 이유는 적층 시 시작 및 끝 지점에는 더 높은 열을 받게 되고, 이에 따른 변형이 커져 응력이 작게 나타난 것으로 사료 된다. 단일 방향 적층 시 최대 주응력은 적층 중간 지점에서는 비드 밑 기저부에서 발생하였으며, 적층 시작 지점 및 적층 끝 지점에서는 최대 주응력 발생 위치가 다르게 나타났다. 따라서 각각 최대 주응력이 발생한 위치 모두 주응력을 측정하였으며, 적층 시작 지점에서 주응력은 측정 위치와 관계없이 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 3 의 주응력 값이 가장 높게 도출되었다. 적층 중간 지점에서는 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 주응력 값이 가장 높게 나타났다. 이는 Type. 1 의 경우 적층량이 가장

적어 주응력 값이 낮게 도출됐을 것으로 사료되며, Type. 3 의 경우 적층량 증가로 열을 반복하여 받아 열 이력이 많아져 응력 집중이 완화됐을 것으로 사료 된다. 적층 방향의 끝 지점에서 End 1 위치의 주응력은 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 주응력 값이 가장 높게 도출되었으며, End 2 위치에서는 기저부 경사 각도 30° 에서는 Type. 3 의 값이 가장 높게 나타났고, 기저부 경사 각도 45° 에서는 Type. 2 의 값이 가장 높게 나타났다. 이처럼 적층 끝 지점에서 주응력 특성이 다르게 나타나는 이유는 기저부 경사 각도 30° 에서 최대 주응력 발생 위치가 절삭부의 기저부가 아닌 과적층 비드 경계부에서 발생하였기 때문으로 사료 된다. Alternative 방향의 경우 유효 응력 값을 비교한 결과 Start 1 위치인 적층 끝단 부 수직 부분에서는 Type 2 에서 가장 작은 유효 응력 값을 나타냈으며, Start 2 위치인 기저부 형상 변화 지점에서는 적층량이 많아짐에 따라 유효 응력도 함께 증가하였다. 이는 Type 2 의 최대 유효 응력 발생 위치가 Start 2 지점이기 때문에 Type 1 및 Type 3 의 최대 유효 응력이 발생한 Start 1 지점에서는 비교적 낮게 나타난 것으로 사료 된다. 적층 중간 지점의 경우 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 의 유효 응력 값이 가장 높게 도출되었다. 이는 Type 3 의 경우 적층량이 많아짐에 따라 기저부에 열 이력이 많아지게 되고 따라서 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되며 응력이 완화되었기 때문으로 사료 된다. 적층 끝 지점에서 최대 유효 응력은 기저부 경사 각도 30° 의 Type 1, Type 2 및 기저부 경사 각도 45° 의 Type 1 의 경우 End 1 위치에서, 기저부 경사 각도 30° 의 Type 3 의 경우 End 2 위치에서 발생하였으며, 기저부 경사 각도 45° 의 Type 2 및 Type 3 는 End 3 위치에서 최대 유효 응력이 발생하였다. 이를 통해 기저부 경사 각도마다 적층량이 증가하면서 최대 유효 응력 발생 위치가 점차 올라가는 것을 확인하였다. 최대 주응력은 적층 시작 지점에서는 모든 조건에서 Start 1 위치에서 발생하였다. 적층 중간 지점에서는 기저부 경사 각도 30° 및 45° 모두 Type. 2 에서 가장 높게 도출되었다. 이는 Type 1 의 경우 적층량이 적어 주응력 값도 작게 도출되었을 것으로 사료되며, Type 3 의 경우 적층량이 많아짐에 따라 기저부에 열 이력이 많아져 오히려 응력이 완화된 것으로 사료 된다. 적층 끝 지점의 최대 주응력은 모든 조건에서 End 4 위치에서 발생하였으며, 각 조건에 따른 주응력 값의 차이는 크게 발생하지 않았다. 단일 방향과 Alternative 방향 중 적정 적층 방향을 선정하기 위해 적층 방향에 따른 잔류응력 해석 결과를 비교 분석한 결과 각 조건의 최대 유효 응력 및 주응력은 단일 방향보다 Alternative 방향의 경우 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 모든 조건에서 단일 방향 적층보다 Alternative 방향

적층 시 측정 지점 및 위치에 따른 유효 응력 및 주응력 값의 차이가 더 작은 것을 알 수 있었다. 따라서 잔류응력 값이 더 낮게 도출되고 측정 위치에 따른 응력 값의 차이가 작은 Alternative 방향을 적층 적층 방향으로 선정하였다.

다음으로 2 차원 및 3 차원 유한요소 해석 비교를 위해 적층 끝단부 수직 형태인 2차원 유한요소 해석 모델을 제작하였다. 기저부 경사 각도는 이전 해석과 동일하게 30° 및 45° 를 적용하였다. 2 차원 및 3 차원 유한요소 해석 비교 결과 3 차원 해석 보다 약 16 % ~ 28 % 증가한 값이 도출되었다. 이는 3 차원 유한요소 해석의 경우 길이 방향의 변형이 가능하지만, 2 차원 유한요소 해석의 경우 길이 방향의 변형이 불가능하여 변형에 대한 저항이 높아지며 잔류응력 값이 높게 도출되었을 것으로 사료 된다. 이러한 특징으로 인해 2 차원 유한요소 해석이 3 차원 유한요소 해석보다 안전성 측면에서 더 보수적이라는 것을 확인할 수 있었다. 2 차원 및 3 차원 유한요소 해석 시간 및 해석 결과 메모리를 비교하였을 때 2 차원 유한요소 해석에서 3 차원 유한요소 해석보다 매우 낮은 값을 가졌다. 따라서 안전성과 해석시간 및 해석 결과 메모리를 모두 비교해 보았을 때 2 차원 유한요소 해석이 3 차원 유한요소 해석보다 더 유리하다는 것을 확인할 수 있었다.

기저부 경사 각도 (θ) 에 따라 30° 및 45° 2 가지를, 기저부 절삭 깊이 (D) 에 따라 2 mm, 3 mm 및 4 mm 3 가지를 선정하여 총 6 가지의 기저부 형상을 개발하고 유한요소 해석 모델을 제작하였다. 절삭 깊이에 따른 적층 층 (Layer) 수는 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 각각 11 층, 15 층 및 19 층 이다. 또한, 적층 비드 수는 기저부 경사 각도 30° 의 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 각각 112 path, 182 path 및 268 path 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 각각 77 path, 119 path 및 169 path 이다. 적층 면적은 기저부 경사 각도 30° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 각각 13.62 mm², 21.79 mm², 31.74 mm² 이며, 기저부 경사 각도 45° 의 경우 기저부 절삭 깊이 2 mm 부터 4 mm 까지 각각 10.06 mm², 15.56 mm², 22.06 mm² 이다. 2 차원 유한요소 해석 모델의 절점 및 요소 수는 기저부 절삭 깊이가 증가할수록 함께 증가하였다. 이는 깊이가 증가함에 따라 적층 되는 비드 수가 증가하기 때문이다. 유효 응력은 깊이에 따라 적층부 및 기저부에 크게 발생하였다가 깊이가 깊어질수록 최대 유효 응력 발생 위치가 비드 쪽으로 올라가는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 잔류응력은 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 낮게 도출되었다. 이는 기저부 깊이가 깊어짐에 따라 적층량이 많아지고 이와 함께 열 이력도 많아져 기저부의 잔류응력이 감소했기 때문으로 사료 된다. 따라서 적층 시간에 따른 잔류

응력 이력을 확인하기 위해 각 조건의 최대 응력이 걸리는 부위의 응력 이력을 확인하였다. 그 결과 유효 응력과 주응력 모두 적층이 진행될수록 모든 조건에서 응력이 급격히 증가했다가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 기저부 경사 각도 30°의 경우 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 적층량이 경사 각도 45°보다 급격히 증가하는데, 이에 따라 잔류응력 감소 폭도 기저부 절삭 깊이가 깊어질수록 크게 나타났다. 따라서 기저부 절삭 깊이는 잔류응력 측면에서 가장 낮게 나타나는 4 mm가 가장 좋은 조건일 것으로 사료 된다.

기저부 절삭 깊이에 따른 유한요소 해석 결과 깊이 4 mm의 경우 가장 낮은 잔류응력이 도출되어 4 mm에서 기공이 생겼을 시 잔류응력 값을 비교 분석하기 위해 비드부와 기저부의 기공 위치를 각각 선정하였다. 기공 위치는 기저부 절삭 깊이 4 mm 해석 결과에서 최대 응력이 걸리는 위치로 선정하였으며, 그 지점의 요소(Element)를 제거한 후 해석을 진행하였다. 그 결과 기공 발생 유무에 따른 잔류응력 분포에 따른 차이는 거의 발생하지 않았지만, 기공이 비드부에 발생하였을 때 주응력 값이 기저부에 기공이 생겼을 때의 주응력 값보다 훨씬 높게 도출되었다. 또한, 유효 응력 이력 및 주응력 이력의 경우 기저부 경사 각도 30°에서 비드부에 기공이 생겼을 시 적층 중 최대 응력이 가장 높게 도출되었다. 이를 통해 기공이 기저부에 생겼을 때보다 비드부에 생기는 것이 더 최대 응력 및 잔류응력 측면에서 좋지 않을 것으로 사료 된다.

해석에서 선정된 적층 적층 조건을 바탕으로 공작기계 부품 보수 실험을 진행하기 위해 기초 적층 시편을 설계하고 실험하였다. 기저부 재료는 공작기계 부품 중 하나인 샤프트 (Shaft)의 소재를 분석한 결과 도출된 S45C로 선정하였으며, 적층 재료는 부품 보수 시 접합성을 높이기 위해 기저부와 같은 재료인 S45C로 선정하였다. S45C 동종 재료 적층 특성 고찰을 위해 단일 비드, 5 열, 2 층, 4 층 및 다층 적층 시편을 설계하였으며, 비드 적층 방향은 모두 Alternative 방향으로 설정하였다. 또한, 실험 시 사용된 공정 조건의 경우 레이저 출력 400 - 1,000 W 범위, 이송 속도의 600 - 1,200 mm/min 범위, 분말 공급률 5 g/min 및 아르곤 가스 공급률 10 ℓ/min이 적용되었다. 기초 적층 시편 제작은 Doosan의 DVF 8000-AML 장비를 이용하였으며, 시편은 양쪽 끝 수직 부분의 5 mm 범위와 아랫부분의 양쪽 끝 5 mm 범위를 고정된 상태에서 진행되었다. 기초 적층 실험 결과 기저부와 적층부의 소재가 동일 소재임에도 불구하고 혼합층 (Diluted region) 및 열 영향부 (Heat affected zone : HAZ)를 명확히 확인할 수 있었다. 또한, 비드 크기는 레이저 출력이 증가할수록,

이송 속도가 감소할수록 크게 나타났다. 하지만 레이저 출력 1,000 W 의 경우 거의 모든 이송 속도 조건에서 기공 (Pore) 이 발생하여 레이저 출력 400 - 600 W, 이송 속도 600 - 800 mm/min 의 범위에서 재실험을 진행하였다. 재실험 결과 기공은 발생하지 않았으며, 비드 형상도 무너짐 없이 적층 되었다. 따라서 동일한 조건들을 이용하여 다열 실험을 진행하였다. 적층 결과 레이저 출력 400 W 의 경우 각 비드 사이 간격이 멀어 비드 전체의 높이가 일정하지 않았으며, 레이저 출력 600 W 의 경우 레이저 출력 400 W 보다는 비드 전체적인 높이가 일정하였지만, 적층 시작 지점보다 적층 마지막 비드가 비교적 높게 나타났다. 따라서 비드 높이 및 형상이 가장 적절한 레이저 출력 500 W 에서 이송 속도 1,000 mm/min 의 조건을 적정 적층 조건으로 선정하고 다층 실험을 진행하였다. 다층 실험은 10 lines 으로 2 층과 4 층 실험을 진행하였다. 적층 결과 기공 및 결함은 발생하지 않았으며, 비드 높이 또한 전체적으로 완만한 형상을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 공작기계 부품 보수 시편은 공작기계 부품 중 하나인 샤프트 (Shaft) 의 크기와 동일하게 설계 하였으며, 절삭부의 크기는 실제 손상 부위를 고려하여 큰 손상부와 작은 손상부를 보수할 수 있도록 두 가지 절삭 크기의 시편을 각각 설계하였다. 절삭 형태는 해석 결과에 따라 잔류응력 발생이 가장 적은 기저부 경사 각도 30° 에서 기저부 경사 깊이 4 mm 로 설계하였다. 공작기계 부품 보수 실험은 시편의 양쪽 끝 수직 부분의 5 mm 범위와 아랫부분의 양쪽 끝 5 mm 범위를 고정한 상태에서 진행되었다. 적층은 Alternative 방향으로 진행되었으며, 기저부 경사 각도가 있는 면을 따라 적층이 진행되었다. 적층 실험 결과 적층은 형상이 무너지는 곳 없이 적절히 적층된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 공작기계 부품 보수 시편 중 한 쪽을 절삭 가공을 통해 본래의 형상으로 만들었고, 절삭 후 모습은 기존의 샤프트 (shaft) 모습과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 진행된 에너지 제어 용착 공정을 이용한 공작기계 부품 보수시 적층부와 기저부 형상이 보수부 인근의 잔류응력 특성에 미치는 영향성 분석을 바탕으로 아래와 같은 연구가 추가로 진행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

첫 번째로 선정된 기저부 경사 각도와 기저부 절삭 깊이에서의 기저부 가공 모양에 따른 잔류응력 특성 분석이다. 기저부 가공 모양에 따른 유한요소 해석 모델을 제작하고 열-기계 연계 해석을 통한 잔류응력 특성 분석이 필요하다.

두 번째로 공작기계 부품 보수 실험을 진행한 시편의 적층 특성 분석 및 잔류응력 측정 실험이다. 보수된 공작기계 부품 보수 시편의 기계적 특성 및 내구성 등의 분석이 필요하며, 잔류응력 측정을 통해 측정된 잔류응력 결과와 유한요소 해석을

통한 잔류응력 결과의 비교 및 분석이 필요하다.

이 외에도 잔류응력을 감소시키기 위해 적층 전후로 공작기계 부품 보수 시편에 적용되는 열처리에 관한 연구가 필요할 것으로 사료 되며, 이에 따른 잔류응력 비교 분석도 이루어져야 할 것으로 사료 된다. 또한, 열처리를 진행했을 경우와 열처리를 진행하지 않았을 경우에 대한 잔류응력, 내구성 및 기계적 특성에 대한 비교 분석이 필요할 것으로 사료 된다.

REFERENCES

1. Paul A. D., “Two Centuries of American Macroeconomic Growth From Exploitation of Resource Abundance to Knowledge-Driven Development,” SIEPR, Stanford University, Stanford, 2001.
2. Naboni, R., Paoletti, I., “The Third Industrial Revolution,” SpringerBriefs in Applied Sciences and Technol., Vol. 7, No. 27, pp. 7-27, 2014.
3. Min, X., Jeanne, M. D., Kim, S. H., “The Fourth Industrial Revolution : Opportunities and Challenges,” Int. J. Financial Research, Vol. 9, No. 2, pp. 92-95, 2018.
4. Klaus Schwab “The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond,” World Economic Forum, 2016.
5. Lee, I., Lee, K. C., “The Internet of Things (IoT): Applications, investment, and challenges for enterprises,” Business Horizons, Vol. 58, Issue. 4, pp. 431-440, 2015.
6. Steenhuis, H. J., Fang, X., Ulusemre, T., “Global Diffusion of Innovation during the Fourth Industrial Revolution the Case of Additive Manufacturing, 3D Printing,” Int. J. Innovation and Technol. Management, Vol. 17, No. 1, 2019.
7. 성지현, “발전수요부품 국산화를 위한 3D 프린팅 상용화 기술개발,” J. Electrical World Montly Magazine, pp. 25-30, 2019
8. Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G., “Additive manufacturing methods and modelling approaches : a critical review,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 83, pp. 389-405, 2016.
9. 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.
10. Ahn, D. G., “Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art,” Int. J. Precision Eng. and Manufacturing-Green Technol., Vol. 8, pp. 703-742, 2021.
11. Popovich, A., Sufiarov, V., “Metal Powder Additive Manufacturing,” Intech open science, pp. 215-236, 2016

12. 3D SYSTEMS, “Our Story,” <https://www.3dsystems.com/our-story> (Accessed 26 February 2021)
13. 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,” *Additive Manuf.*, Vol. 14, pp. 69-86, 2017.
14. ASTM INTERNATIONAL, “Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies,” <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm> (Accessed 2 March 2021)
15. ASTM F2792-12a, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” 2012. (Accessed 2 March 2021)
16. Chua, B. L., “Investigation of Development of Thermo-Mechanical Analysis for a Wire Feeding Type Directed Energy Deposition Process,” Doctoral dissertation, Chosun university, Gwang-Ju 2019.
17. Jang, K. N., Choi, S. N., Lee, S. H., “Consideration for Application of 3D Printing Technology to Nuclear Power Plant,” *Transactions of the Korean Soc. of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 16, No. 1, pp. 117-124, 2020
18. Kim. H., “A Study of Residual Stress Characteristics Dependent on the Deposition Strategy in a Large Volume Deposition of Inconel 718 Using a DED Process”, Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2021.
19. Peak. S. H., “Introduction of 3D Printing Technology & Application,” *KIC NEWS*, Vol. 18, pp. 1-10, 2015.
20. 3D GURU, “Vat Photopolymerization”, <http://www.3dguru.co.kr/bbs/newsroom/9988> (Accessed 19 March 2021)
21. 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*, pp. 29-31, 2012.
22. 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.
23. Pearson. A., “The history of 3D printing,” <https://www.stratasys.com/explore/article/>

3d-printing-history#_ga=2.48400483.416570070.1614326187-623322918.1614326187
 (Accessed 2 March 2021)

24. About Additive Manufacturing Sheet Lamination, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>, (Accessed 19 March 2021)
25. Varotsis. A. B., “Introduction to binder jetting 3D printing,” <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/> (Accessed 2 March 2021)
26. 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.
27. Y. L. Yap., C. Wang., S. L. Sing., V. Dikshit., W. Y. Weong., J. Wei., “Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks,” *Precision Eng.*, Vol. 50, pp. 275-285, 2017.
28. G. Leo “What Is Material Jetting? - 3D Printing Simply Explained”, [https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/#:~:text=Material%20jetting%20\(MJ\)%20is%20one,to%20the%202D%20inkjet%20process.](https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/#:~:text=Material%20jetting%20(MJ)%20is%20one,to%20the%202D%20inkjet%20process.) (Accessed 3 March 2021)
29. Froes, F. H. and Dutta, B. “The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys,” *Adv Mat Res*, Vol. 1019, pp. 19-25, 2014.
30. Rahito, S. W., Wahab, D. A., Azman, A. H., “Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing : An Overview from Object Design and System Perspectives,” *Processes*, Vol. 7, No. 11, pp. 802, 2019.
31. Kim, B. S., Kim, J. S., Lee, S. H., Song, J. Y., Park, H. Y., “A Study on Failure Mode Analysis of Machining Center,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 18, No. 6, pp. 74-79, 2001.
32. Y. Lahrou, D. Brissaud, “A Technical Assessment of Product/Component Re-manufacturability for Additive Remanufacturing,” *Procedia CIRP*, Vol. 69, pp. 142-147, 2018.
33. J. Foster, C. Cullen, S. Fitzpatrick, G. Payne, L. Hall, J. Marashi, “Remanufacture of Hot Forging Tools and Dies using Laser Metal Deposition with Powder and a Hard-facing Alloy Stellite 21,” *J. Remanufatur.*, Vol. 9, pp. 189~203, 2019.
34. Lee. I. H., Kim, H. C., Ahn. D. G., “Korea Terminologies for Additive Manufacturing according to the ISO/ASTM 52900 Standard,” *J. Korea Soc. for Precis. Eng.*, Vol. 37, pp. 929-936, 2020.

35. Hofmann, D. C., Roberts, S., Otis, R., Kolodziejska, J., Dillon, R. P., Suh, J., Shapiro, A. A., Liu, Z.-K., and Borgonia, J.-P., “Developing Gradient Metal Alloys through Radial Deposition Additive Manufacturing,” *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 1, 2015.
36. Fuentek, “NASA’s EBF3: The Future of Art-to-Part Manufacturing,” NASA’s EBF3: The Future of Art-to-Part Manufacturing, Available at: https://www.nasa.gov/centers/johnson/techtransfer/technology/MSC-23518-1_EBF3.html
37. 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, pp. 465-481, 2015.
38. Liu. R., Wang. Z., Sparks. T., Liou. F., Newkirk. J., “Aerospace Applications of Laser Additive Manufacturing,” *Laser Additive Manufacturing*, pp. 351-371, 2017.
39. Kang. N., Lin. X., M. El Mansori., Lu. J. L., Coddet. C., Huang. W. D., “On the effect of the thermal cycle during the directed energy deposition application to the in-situ production of a Ti-Mo alloy functionally graded structure,” *Additive Manufacturing*, Vol. 31, 2020.
40. Gibson. I. et al., "Directed Energy Deposition Processes," *Additive Manufacturing Technologies*, Vol. 10, pp. 245-268, 2015.
41. Y. Li, S. Dong, S. Yan, X. Liu, P. He, B. Xu, “Surface Remanufacturing of Ductile Cast Iron by Laser Cladding Ni-Cu Alloy Coatings,” *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 347, pp. 22~28, 2020.
42. B. Graf, A. Gumenyuk, M. Rethmeier, “Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys,” *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 376-381, 2012.
43. L. Hua, W. Tian, W. Liao, C. Zeng, “Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress Distribution for Laser Cladding Remanufacturing, *Advances in Mechanical Engineering*,” Vol. 6, 2014.
44. X. Lei, C. Huajun, L. Hailong, Z. Yubo, “Study on Laser Cladding Remanufacturing Process with FeCrNiCu Alloy Powder for Thin-wall Impeller Blade,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 90, pp. 1383~1392, 2016.
45. X. Zhang, T. Pan, W. Li, F. Liou, “Experimental Characterization of a Direct Metal Deposited Cobalt-Based Alloy on Tool Steel for Component Repair,” *JOM*, Vol 71, pp. 946-955, 2019.
46. L. Zhu, S. Wang, H. Pan, C. Yuan, X. Chen, “Research on Remanufacturing Strategy

- for 45 Steel Gear using H13 Steel Powder Based on Laser Cladding Technology,” J. Manuf. Process., Vol. 49, pp. 344~354, 2020.
47. Oh, W. J., Lee, W. J., Kim, M. S., Jeon, J. B., Shim, D. S., “Repairing Additive-manufactured 316L Stainless Steel using Direct Energy Deposition,” Opt. Laser Technol., Vol. 117, pp. 6~17, 2019.
 48. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Incropera’s PRINCIPLES OF HEAT AND MASS TRANSFER, Wiley, 2017.
 49. Chang-hasnain. C. J., Orenstein. M., Von Lehmen. A., Florez. L. T., Harbison. J. P., Stoffel. N. G., “Transverse mode characteristics of vertical cavity surface-emitting lasers,” Applied Physics Letters, Vol. 57, pp. 218-220, 1990.
 50. Lee, K. K., “Investigation into Dissimilar Deposition Characteristics between Superalloy Powders and S45C Steel Using a Laser-Aided Direct metal Rapid Tooling (DMT) Process”, Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2019.
 51. KOREA POWDER, “3D Printer Metal Powder”, <http://koreapowder.com/36>, 2021

감사의 글

멀게만 느껴졌던 석사학위 논문이 끝이 나고 감사의 글을 남기게 되었습니다. 가장 먼저 2017년 겨울 CATIA 팀을 시작으로 지금까지 4년이라는 긴 시간 동안 한결같은 마음으로 지도해주시고 이끌어주신 안동규 교수님께 감사 인사를 드리고 싶습니다. 석사과정 동안 연구 결과가 원하는 대로 나오지 않아 힘들어 도망가고 싶을 때도 많았지만 항상 학생을 우선적으로 생각해주시고 살피주시는 교수님이 있어 무사히 석사과정을 마무리할 수 있었습니다. 졸업 후 사회에 진출하여서도 교수님의 가르침을 바탕으로 제가 맡은 일에 최선을 다하고 책임 질 수 있는 사람이 되도록 하겠습니다. 다음으로 졸업 논문을 지도해주신 김창래 교수님과 이정원 교수님께 감사의 말씀 올립니다. 또한, 석사 생활을 응원해주시고 격려해주신 한길영 교수님께도 감사의 말씀 올립니다. 모든 교수님의 지도와 격려가 저에게는 정말 많은 힘이 되었습니다.

함께 생활하고 연구하였던 실험실 인원들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. CATIA 팀에서 선후배 사이로 알게 된 후 지금까지 옆에서 챙겨주고 응원해준 광규 오빠, 1년간 같이 실험실 생활을 했던 호 오빠, CATIA 팀 팀원으로 만나 매일 같이 봤던 선호 오빠와 안재 오빠, 1년 이상 함께 실험실 생활을 해오며 항상 서로 배려하고 챙겨주었던 Aliyev Alissultan, 성훈이 오빠, 지완이 오빠, 대학교 생활을 병행하면서도 굶은일 마다하지 않고 도와주는 정현이 오빠와 동일이에게 감사의 말을 전합니다. 같은 실험실은 아니지만 CATIA 팀 때부터 봐오고 함께 석사 생활을 한 강민이 오빠에게도 감사의 말을 전합니다.

먼저 졸업하시고 사회에서 후배들을 이끌어주시는 전산설계실험실 선배님들께도 감사 인사를 드리고 싶습니다. 이상훈 선배님, 김민수 선배님, 김진석 선배님, 문경제 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, BihLii Chua 선배님, 김현식 선배님 모든 실험실 선배님들께 감사드립니다.

연구 진행에 도움을 주신 분들께도 감사 말씀드립니다. 시편 가공에 도움을 주신 한독정공 김용복 대표님, 장비 사용에 도움을 주신 자동차부품연구원 박민경 연구원님, SYSWELD 사용에 도움을 주신 민경욱 대리님과 이지선 부장님께 감사드립니다.

대학교를 졸업하고 힘든 취업 준비와 바쁜 직장 생활 중에도 꾸준히 연락해준 친구들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 서로 바쁘고 코로나로 인해 전처럼 자주 보지는 못 하였지만, 친구들의 응원이 큰 힘이 되었습니다.

마지막으로 가족들에게 가장 큰 감사의 말을 전하고 싶습니다. 제가 태어나고부터 지금까지 집안의 가장으로 무거운 책임감을 가지고 쉼 없이 살아오셨을 아버지, 몸상해가면서도 우리 삼남매 낳아주시고 키워주신 어머니. 아버지와 어머니의 청춘이 저와 동생들을 키우며 지나간 것 같아 항상 미안하고 고맙습니다. 쑥스러워 말로 하지는 못하지만 늘 고맙고 사랑합니다. 군대 가서도 꼬박꼬박 연락해주는 둘째에게도 고맙고 사랑한다는 말 전하고 싶고, 집에 갈 때마다 졸졸 따라다니는 막내에게도 고맙고 사랑한다는 말 전하고 싶습니다.

2021 년 12 월 김 단 아