



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](#)

2023년 8월
석사학위 논문

**DED 공정을 이용한 SCM440 기저부
위 G6 분말 적층시 기저부 형상과
적층 전략이 적층 영역 열-기계
특성에 미치는 영향**

조선대학교 대학원

기계공학과

양지완

**DED 공정을 이용한 SCM440 기저부
위 G6 분말 적층시 기저부 형상과
적층 전략이 적층 영역 열-기계
특성에 미치는 영향**

**A study on the influence of the substrate shape and the
deposition strategy on thermo-mechanical characteristics
of the deposited region to deposit G6 powders on
SCM440 substrate using a DED process**

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

양지완

DED 공정을 이용한 SCM440 기저부
위 G6 분말 적층시 기저부 형상과
적층 전략이 적층 영역 열-기계
특성에 미치는 영향

지도교수

안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함




2023년 4월

조선대학교대학원

기계공학과

양 지 완

양 지 완의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>김 창 래</u> 
위 원	조선대학교	교수	<u>이 정 원</u> 
위 원	조선대학교	교수	<u>안 동 규</u> 

2023년 5월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	v
LIST OF FIGURES	v
NOMENCLATURES	ix
ABSTRACT	xi
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
1. 연구 배경	1
2. Directed Energy Depositon (DED) 공정	5
3. 선행 연구	7
제 2 절 연구 목적 및 방법	9
1. 연구 목적	9
2. 연구 방법	11
제 2 장 적층 경로 방향 적층시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석	13
제 1 절 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석	13
1. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출	13
가. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 모델 형상 개발	13

나. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 적층부 모델 비교	16
다. 2차원 유한요소 해석 모델 개발	19
라. 온도의존 물성 데이터 도출	20
마. 경계 조건 데이터 도출	23
바. 열원 모델	30
사. 실험 시편을 통한 해석 모델 도출/비교	32
2. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석	34
가. 주응력 위치 비교 및 분석	34
나. 주응력 이력 및 크기 비교 및 분석	38
다. 변형 위치 비교 및 분석	42
라. 변형 이력 및 크기 비교 및 분석	45
3. 직선 보수 적층 시 2 차원 및 3 차원 특성 비교 및 분석	49
가. 직선 보수 적층 시 3 차원 유한요소 해석 모델 개발	49
나. 경계 조건 데이터 도출	50
다. 주응력 특성 비교 및 분석	51
라. 해석 시간 및 해석 용량 비교 및 분석	55
제 2 절 축 대칭 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석	56
1. 축 대칭 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출	56
가. 축 대칭 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 모델 형상 개발	56
나. 2차원 유한요소 해석 모델 개발	58
다. 경계 조건 데이터 도출	59
2. 내측 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 및	

분석	62
가. 주응력 위치 비교 및 분석	62
나. 주응력 이력 및 크기 비교 및 분석	66
다. 변형 위치 비교 및 분석	70
라. 변형 이력 및 크기 비교 및 분석	73
3. 외측 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석	77
가. 주응력 위치 비교 및 분석	77
나. 주응력 이력 및 크기 비교 및 분석	81
다. 변형 위치 비교 및 분석	85
라. 변형 이력 및 크기 비교 및 분석	88
4. 축 대칭 보수 적층 시 내경에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석	92
가. 내경에 따른 2 차원 유한요소 해석 모델 개발	92
나. 경계 조건 데이터 도출	93
다. 주응력 특성 비교 및 분석	94
제 3 절 적층 경로 방향에 따른 적층시 열-기계 특성 비교 및 분석	97
제 3 장 적층 전략에 따른 열-기계 특성 분석	99
제 1 절 적층 방향에 따른 열-기계 특성 분석	99
1. 적층 방향에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 비교 및 열-기계 특성 분석	99
가. 적층 방향에 따른 모델 비교 분석	99

나. 주응력 특성 비교 및 분석	101
제 2 절 Interpass time 에 따른 열-기계 특성 분석	104
1. Interpass time 에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 비교 및 열-기계 특성 분석	104
가. Interpass time 에 따른 모델 비교 분석	104
나. 주응력 특성 비교 및 분석	106
제 3 절 Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 분석	108
1. Interlayer time 에 따른 3차원 유한요소 해석을 위한 모델 비교 및 열-기계 특성 분석	108
가. Interlayer time 에 따른 모델 비교 분석	108
나. 주응력 특성 비교 및 분석	110
제 4 장 기공 위치에 따른 열-기계 특성 분석	112
제 1 절 기공 위치에 따른 열-기계 특성 분석	112
1. 기공 위치에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 열-기계 특성 분석	112
가. 기공 위치에 따른 2 차원 유한요소 해석 모델 개발	112
나. 주응력 특성 비교 및 분석	113
제 5 장 결론 및 향후 과제	116
Reference	119

LIST OF TABLES

Table 1	Classification of additive manufacturing according to working principle	2
Table 2	Classification of DED process according to feeding type	5
Table 3	Size of Substrate (straight repair)	14
Table 4	Area of the bead	17
Table 5	Number of paths, nodes and elements of FE models	18
Table 6	Chemical compositions of the substrate and powder	20
Table 7	Experimental conditions (provided by DN Solution)	32
Table 8	Characteristic dimensions of the deposition bead (provided by DN Solution)	32
Table 9	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to straight repair ($\theta = 30^\circ$)	41
Table 10	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to straight repair ($\theta = 45^\circ$)	42
Table 11	Displacement value during elastic recovery and cooling process according to straight repair ($\theta = 30^\circ$)	48
Table 12	Displacement value during elastic recovery and cooling process according to straight repair ($\theta = 45^\circ$)	48
Table 13	Number of nodes and elements for 3D FEA	49
Table 14	Direction of deposition	49
Table 15	Maximum 1 st Principal stress value for 2D and 3D FEA	54
Table 16	Total simulation time for 2D and 3D FEA	55
Table 17	Results file memory sizes 2D and 3D FEA	55
Table 18	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to inside repair ($\theta = 30^\circ$)	69
Table 19	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to inside repair ($\theta = 45^\circ$)	70
Table 20	Displacement value during elastic recovery and cooling process according to inside repair ($\theta = 30^\circ$)	76
Table 21	Displacement value during elastic recovery and cooling process according to inside repair ($\theta = 45^\circ$)	76

Table 22	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to outside repair ($\theta = 30^\circ$)	84
Table 23	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to outside repair ($\theta = 45^\circ$)	85
Table 24	Displacement value during elastic recovery and cooling process according to outside repair ($\theta = 30^\circ$)	91
Table 25	Displacement value during elastic recovery and cooling process according to outside repair ($\theta = 45^\circ$)	91
Table 26	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to inner diameter	95
Table 27	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to deposition direction	102
Table 28	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to interpass time	106
Table 29	Definition of interlayer time	109
Table 30	Maximum 1 st principal stress value during deposition process according to interlayer time	111

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Conceptual diagram of DED process by feeding type	5
Fig. 2	Defects of products manufactured by the metal AM Process	9
Fig. 3	Flowchart of research works	11
Fig. 4	Definition of chamfer angle and Substrate shape (straight repair)	14
Fig. 5	Substrate shape	15
Fig. 6	Finite element meshes for different characteristic shapes	17
Fig. 7	finite element analysis model of 2D (straight repair)	20
Fig. 8	Temperature dependent thermal-mechanical properties of substrate (SCM440)	21
Fig. 9	Temperature dependent thermal-mechanical properties of powder (Gridur 6)	22

Fig. 10 Application region of the convection on the surface of the substrate (2D FEA straight repair) 23

Fig. 11 Temperature dependent material properties of air 24

Fig. 12 Temperature dependent material properties of argon 24

Fig. 13 Temperature dependent natural convection coefficient (straight repair) 26

Fig. 14 Temperature dependent forced convection coefficient (straight repair) 27

Fig. 15 Heat loss due to Forced convection and radiation 28

Fig. 16 Temperature dependent emissivity of SCM440 and G6 29

Fig. 17 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient 30

Fig. 18 Heat flux model of laser 30

Fig. 19 Intensity distribution of heat flux 31

Fig. 20 Single & Multi bead shape and efficiency 33

Fig. 21 Temperature distribution comparison according straight repair ($\theta = 30^\circ$) 35

Fig. 22 Temperature distribution comparison according straight repair ($\theta = 45^\circ$) 36

Fig. 23 Effect of maximum 1st principal stress between processes according straight repair ($\theta = 30^\circ$) 37

Fig. 24 Effect of maximum 1st principal stress between processes according straight repair ($\theta = 45^\circ$) 38

Fig. 25 1st principal stress history according to the angle (straight repair) 40

Fig. 26 1st principal stress history for 300 sec according to the angle (straight repair) .. 41

Fig. 27 Influence of angle and depth of deposited region and length on maximum 1st principal stress (straight repair) 42

Fig. 28 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according straight repair ($\theta = 30^\circ$) 43

Fig. 29 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according straight repair ($\theta = 45^\circ$) 44

Fig. 30 Time history of displacements according to the angle (straight repair) 46

Fig. 31 Time history of displacements for 300 sec according to the angle (straight repair) 47

Fig. 32 Influence of angle and depth of deposited region and length on displacements (straight repair) 48

Fig. 33 Finite element analysis model of 3D (straight repair) 50

Fig. 34 Application region of the convection on the surface of the substrate (3D FEA straight repair) 51

Fig. 35 1st principal stress distribution of 2D&3D FEA 52

Fig. 36 1st principal stress history of 2D&3D FEA 53

Fig. 37 Maximum & After cooling 1st principal stress comparison of 3D and 2D FEA · 54

Fig. 38 Definition of chamfer angle and Substrate shape (rotation repair) 57

Fig. 39 Finite element analysis model of 2D (rotation repair) 59

Fig. 40 Application region of the convection on the surface of the substrate (rotation repair) 60

Fig. 41 Temperature dependent natural convection coefficient (rotation repair) 61

Fig. 42 Temperature distribution comparison according inside repair ($\theta = 30^\circ$) 63

Fig. 43 Temperature distribution comparison according inside repair ($\theta = 45^\circ$) 64

Fig. 44 Effect of maximum 1st principal stress between processes according inside repair ($\theta = 30^\circ$) 65

Fig. 45 Effect of maximum 1st principal stress between processes according inside repair ($\theta = 45^\circ$) 66

Fig. 46 1st principal stress history according to the angle (inside repair) 68

Fig. 47 1st principal stress history for 1,000 sec according to the angle (inside repair) · 69

Fig. 48 Influence of angle and depth of deposited region and length on maximum 1st principal stress (inside repair) 70

Fig. 49 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according inside repair ($\theta = 30^\circ$) 71

Fig. 50 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according inside repair ($\theta = 45^\circ$) 72

Fig. 51 Time history of displacements according to the angle (inside repair) 74

Fig. 52 Time history of displacements for 1,000 sec according to the angle (inside repair) 75

Fig. 53 Influence of angle and depth of deposited region and length on displacements (inside repair) 76

Fig. 54 Temperature distribution comparison according outside repair ($\theta = 30^\circ$) 78

Fig. 55 Temperature distribution comparison according outside repair ($\theta = 45^\circ$) 79

Fig. 56 Effect of maximum 1st principal stress between processes according outside repair ($\theta = 30^\circ$) 80

Fig. 57 Effect of maximum 1st principal stress between processes according outside repair ($\theta = 45^\circ$) 81

Fig. 58 1st principal stress history according to the angle (outside repair) 83

Fig. 59 1st principal stress history for 2,000 sec according to the angle (outside repair) 84

Fig. 60 Influence of angle and depth of deposited region and length on maximum 1st principal stress (outside repair) 85

Fig. 61 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according outside repair ($\theta = 30^\circ$) 86

Fig. 62 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according outside repair ($\theta = 45^\circ$) 87

Fig. 63 Time history of displacements according to the angle (outside repair) 89

Fig. 64 Time history of displacements for 1,000 sec according to the angle (outside repair) 90

Fig. 65 Influence of angle and depth of deposited region and length on displacements (outside repair) 91

Fig. 66 Analysis model according to inner diameter 92

Fig. 67 Finite element analysis model of 2D (inner diameter) 93

Fig. 68 Temperature dependent natural convection coefficient (inner diameter) 94

Fig. 69 Effect of maximum 1st principal stress between processes according inner diameter 95

Fig. 70 Influence of inner diameter on maximum 1st principal stress 96

Fig. 71 Effect of maximum 1st principal stress between processes 97

Fig. 72 Deposited volume & Deposited time 98

Fig. 73 Maximum 1st principal stress & Maximum displacement 98

Fig. 74 Finite element analysis model of 2D (deposition direction) 99

Fig. 75 Definition of deposition direction 100

Fig. 76 Temperature dependent natural convection coefficient (deposition direction) 101

Fig. 77 Effect of maximum 1st principal stress between processes according deposition direction 103

Fig. 78 Influence of deposition direction on maximum 1st principal stress 103

Fig. 79 Schematic of interpass time during deposition for 2D finite element analysis model 105

Fig. 80 Temperature dependent natural convection coefficient (Interpass time) 105

Fig. 81 Effect of maximum 1st principal stress between processes according interpass time 107

Fig. 82 Influence of interpass time on maximum 1st principal stress 107

Fig. 83 Schematic of interlayer time during deposition for 2D finite element analysis model 109

Fig. 84 Temperature dependent natural convection coefficient (Interlayer time) 110

Fig. 85 Effect of maximum 1st principal stress between processes according interlayer time 111

Fig. 86 Influence of interlayer time on maximum 1st principal stress 111

Fig. 87 Definition of location of pore for 2D finite element analysis model 113

Fig. 88 Temperature dependent natural convection coefficient (location of pore) 113

Fig. 89 Effect of 1st principal stress according pore location on the flat surface 114

Fig. 90 Influence of pore location on the flat surface on after cooling 1st principal stress 114

Fig. 91 Effect of 1st principal stress according pore location on the inclined surface ... 115

Fig. 92 Influence of pore location on the inclined surface on after cooling 1st principal stress 115

NOMENCLATURES

- θ : Substrate angle
 D : Substrate depth
 L : Substrate length
 ρ : Temperature dependent density
 k : Temperature dependent thermal conductivity
 C_p : Temperature dependent specific heat
 E : Temperature dependent young's modulus
 ν : Temperature dependent poisson's ratio
 σ : Temperature dependent yield strength
 N_u : Nusselt number
 R_a : Rayleigh number
 P_r : Prandtl number
 g : Gravitational acceleration
 T_s : Surface temperature
 T_∞ : Ambient temperature
 L_c : Characteristic length
 ν_k : kinematic viscosity
 α : Thermal diffusivity
 T_f : Film temperature
 \bar{h}_n : Natural convection coefficient
 \bar{h}_f : Forced convection coefficient
 \bar{Nu} : Average nusselt number
 k : Heat conduction of a fluid
 D : Diameter of a nozzle
 R_e : Reynolds number
 A_r : Application area
 H : Distance between nozzle and substrate

V_e : Average speed of flow

D_h : Diameter of nozzle

ν : Kinematic viscosity

μ : Absolute dynamic viscosity

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

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

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

ϵ : Emissivity

σ_{sb} : Stefan-Boltzmann number

\bar{h}_r : radiation coefficient

$\bar{h}_{eq,f}$: equivalent forced convection coefficient

z_i : Penetration depth

z_e : Top position of heat flux

r_i : Bottom radius of heat flux

r_e : Top radius of heat flux

η : Efficiency of heat flux

Q_0 : Maximum power intensity of heat flux

x : X position of heat flux

y : Y position of heat flux

z : Z position of heat flux

v : Scan speed of heat flux

t : Time

C : Shape coefficient of heat flux

$r(z)$: heat flux coverage

Q : Maximum strength of a heat flux

P : Power of heat flux

δ : Laser Penetration Depth

R : Distance from reference point

ABSTRACT

A study on the influence of the substrate shape and the deposition strategy on thermo-mechanical characteristics of the deposited region to deposit G6 powders on SCM440 substrate using a DED process

Yang Ji Wan

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

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Directed energy deposition (DED) processes can create three-dimensional metallic parts through layer-by-layer deposition of metallic materials with types of powder and wire on the metallic substrate. A rapid temperature change is taken place in the vicinity of the deposited region for the deposition. The rapid temperature change subsequently provokes an excessive residual stress in the vicinity of the deposited region. Especially, in the section where the deposition shape changes rapidly, the stress concentration phenomenon occurs and the deformation and cracking tend to intensify. The goal of this study is on the influence of the substrate shape and the deposition strategy on thermo-mechanical characteristics of the deposited region to deposit G6 powders on SCM440 substrate using a DED process. In addition, we would like to select an optimal substrate shape and the deposition strategy to reduce residual stress. Characteristic data related to the formation of the deposited region and corresponding deposition conditions for the FE model are provided by DN solutions Inc.. To select a finite element analysis model according to substrate shape, candidates were selected for substrate inclination angle, deposition height, and deposition length, and a 2D analysis model for straight lines and curves was designed according to the Z-axis direction. The validity of the two-dimensional interpretation was derived through the comparison of two-dimensional and three-dimensional interpretations. Temperature-dependent thermo-mechanical properties of G6 and SCM440 considering phase changes are obtained from JMat Pro.

Software. The laser beam is assumed to be moving volumetric heat source with gaussian intensity distribution in a plane and penetration depth. Residual stress was predicted and compared according to substrate shape through thermal-mechanical analysis, and the reason for high residual stress was investigated through thermal history. For two-dimensional analysis according to the deposition strategy, the residual stress distribution was confirmed and the displacement was compared through thermal-mechanical analysis by adjusting the deposition path, interpass time, interlayer time, and distance to the reference point. Finally, a finite element analysis model was created according to the pores generated between deposition, and the changes in internal stress during product damage were compared and analyzed by comparing the existing analysis model and thermal-mechanical characteristics.

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

1. 연구 배경

산업혁명은 18 세기 증기기관이 발달하며 농업과 수공업 위주의 경제에서 기계를 사용하는 제조업 위주의 경제로 전환된 제 1 차 산업혁명을 시작으로 다양한 기술적 발전을 통해 발전해 왔다.¹⁾ 그 후 전기에너지의 발달에 따른 대량 생산 사회로 전환된 제 2 차 산업혁명, 20 세기 후반 컴퓨터와 인터넷 등 전자기기의 발달로 지식정보 사회를 가져온 제 3 차 산업혁명으로 차례로 발달해 왔다.²⁾ 이와 같은 산업혁명의 발전은 기술혁신으로 생산성을 극대화시켜 산업, 경제 및 사회 전체에 큰 변화를 가져왔고, 현재 우리 사회는 O2O (Online to Offline) 기반의 제 4 차 산업혁명에 접어들어 또 한번의 기술적 전환기를 맞이하고 있다.³⁾

제 4 차 산업혁명은 2016 년 1 월에 주최된 제 46 회 세계경제포럼 (World Economic Forum) 에서 처음으로 언급되었으며 빅 데이터 분석, 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷, 자율 주행 기술, 3D 프린팅 (3D printing) 기술 등의 주요 기술혁신을 내포한다.¹⁾⁻⁴⁾ 제 4 차 산업혁명의 주요 기술혁신 중 하나인 3D 프린팅 기술은 2013 년 초 미국 버락 오바마 대통령의 국정 연설에서 3D 프린팅을 미국 제조업을 부흥시키는 방법론으로 언급된 이후로부터 현재까지 3D 프린팅 기술에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 이와 동시에 이 기술에 관련 원천 특허권이 만료되어 전 세계적으로 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁴⁾⁵⁾

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

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

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

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

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

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

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

박판 적층 (Sheet lamination : SL) 방식은 재료를 얇은 필름 형태로 가공하여 열 또
 는 접착제를 이용하여 한층 씩 붙여가며 적층하는 공정이다. 재료를 압출해가며 매 층
 을 적층하는 FDM 공정과는 다르게 박판 형태로 한층 전체를 한 번에 적층하기 때문
 에 공정 속도가 빠르다는 장점이 있다.²²⁾

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

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

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

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

에너지 제어형 용착 (Directed Energy Deposition) 방식은 레이저나 전자빔과 같은 고밀도 에너지원으로 금속 분말 (Metal powder) 또는 금속 선재 (Metal Wire) 형태로 가공된 재료를 용해 및 응고시켜 적층을 진행해 제품을 생성하는 공정이다. 에너지 제어형 적층 방식은 재료의 형태에 따라 종류가 나뉘며, LENS (Laser Engineered Net Shaping), DMD (Direct Metal Deposition), WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), EBF (Electron Beam freeform Fabrication) 공정이 있다.⁹⁾¹⁰⁾²⁸⁾

2. Directed Energy Depositon (DED) 공정

에너지 제어형 용착 (Directed Energy Deposition : DED) 공정은 적층 제조 (Additive Manufacturing) 공정 중 하나이며, 방식은 다음과 같다. 고에너지의 레이저 (Laser) 또는 전자빔 (Electron beam) 을 기저부 (Substrate) 에 조사하여 순간적으로 용융시켜 용융풀 (Molten-pool) 을 생성하고 동시에 금속 분말 (Metal powder) 및 금속 선재 (Metal wire) 를 공급하여 한층 또는 그 위에 층을 쌓아 올려 금속제품을 제작하는 공정이다. 에너지 제어형 용착 공정의 대표적인 공정으로는 금속 분말 타입과 금속 선재 타입이 있으며, 둘의 특성은 Table 2와 같고, 개념도는 Fig. 1 과 같다.¹⁰⁾²⁹⁾

Table 2 Classification of DED process according to feeding type³⁰⁻³²⁾

Feeding type	Wire		Power	
Deposition Process Technologies	Electron Beam freeform Fabrication (EBF)	Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)	Direct Metal Deposition (DMD)	Laser Engineered Net Shaping (LENS)
Layer thickness (mm)	500 - 1,270	1,500 - 2,500	150 - 350	100 - 380

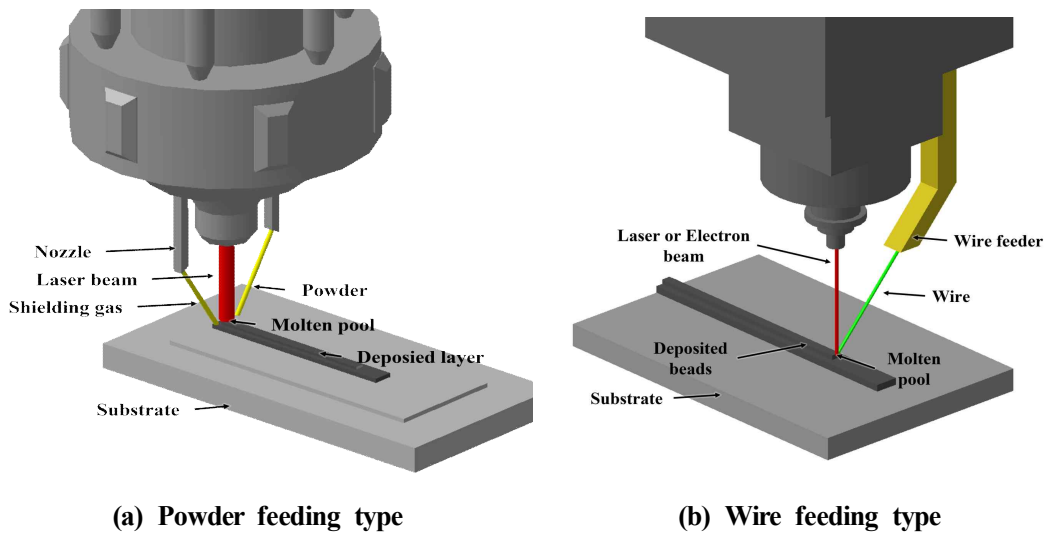


Fig. 1 Conceptual diagram of DED process by feeding type

에너지 제어형 용착 공정 중 금속 선재를 공급하여 적층하는 방식은 제품 제작을 진행할 때에 있어 소재가 저렴하기에 비용을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한, 적층 속도가 금속 분말을 공급하는 방식에 빠르다. 금속 분말을 공급하여 적층하는 방식은 한 가지의 금속 분말 또는 다중 분말 호퍼 (Multipowder hoppers) 를 이용한 여러 금속 분말을 이용한 적층이 가능하다. 또한, 다축 (Multiple axis) 가공이 가능하기에 복잡한 형상을 지지대 없이 제작 및 보수가 가능하다. 이러한 장점들로 인해 공작기계, 항공기 및 터빈 등 여러 분야에서 수리 또는 보수에 대한 연구가 진행되고 있다.³³⁾³⁴⁾

에너지 제어형 용착 공정의 단점은 다음과 같다. DED 적층 시 고 에너지의 레이저 또는 전자빔을 사용하기에 기저부 및 적층부에 1,500 °C 이상의 높은 열이 짧은 시간 공급되다 급격하게 냉각된다.³⁵⁾ 적층 과정 중 팽창과 수축을 반복하게 된 금속제품은 기저부와 적층부 인근에 열 특성 불균형 및 잔류응력이 발생하게 된다. 이러한 과정을 거친 금속제품은 변형 및 균열의 문제가 발생하고 심한 경우 파손까지 발생한다. 이러한 단점을 해결하기 위해 열응력특성 불균형 및 잔류응력의 특성을 예측 및 제어하는 기술이 연구되고 있다.¹⁰⁾³⁶⁾³⁷⁾ 또한, 기저부 형상에 따른 열 특성 불균형 및 잔류응력의 변화가 크게 나타나기에 이에 대한 연구가 진행되고 있다.³⁸⁾

3. 선행 연구

DED 공정 진행 중과 후에 발생하는 잔류응력을 유한 요소 해석을 통해 예측하고 감소시키기 위한 많은 연구가 진행되었다. 유한 요소 해석을 통해 기저부 형상에 따른 잔류응력 특성 비교 및 잔류응력 감소를 위한 적층 전략에 대한 선행 연구는 다음과 같다.

2018년 Li 등은 기저부 그루브 형상에 따라 QT500-7 연성 주철 위 Ni-Cu 합금 분말을 적층하여 균열 분포를 조사하였다. 또한 적층 방향을 한 방향과 교차 적층 방향으로 설정하여 비교하고 잔류응력 및 균열을 줄이는 방향은 교차 적층 방향이라는 점을 도출하였다. 본 논문을 통해 적층 진행 시 단일 방향보다는 교차 적층 방향이 더 잔류응력을 줄이는 방법이라는 것을 알아내었다.³⁹⁾

2018년 Zhang 등은 수리를 위한 목적으로 Co-Ni-Cr-W 경질 표면 합금 Wallex 50 을 H13 공구강에 적층하였다. 기저부 경사각이 45°, 75°, 90°로 다른 V자형으로 설계하였으며, 적층 실험 후 인장시험과 미세 경도 측정을 진행하였다. 이를 통해 기저부 경사각이 90°인 경우 레이저가 수직 영역의 재료를 제대로 녹일 수 없기에 기저부와 접합되지 않아 적층이 제대로 진행되지 않고, 기공이 많이 발생했음을 조사하였다. 본 논문을 통해 기저부 형상을 90°로 설정하지 않아야 한다는 것을 알아내었다.⁴⁰⁾

2019년 Li 등은 WAAM(Wire and Arc Additive Manufacturing) 공정을 이용하여 원형 적층시 홀 드릴링 방법을 통해 제품의 잔류응력 및 열 응력에 대한 연구를 수행하였다. 유한요소 해석을 이용한 시뮬레이션 결과 원형 특성으로 인해 적층 시작 부근 및 끝 부분 근처에서 최대 응력의 존재를 확인하였다. 이를 통해 원형 적층 해석 진행시 적층 시작 및 끝 부분을 조사해야 한다는 것을 알아내었다.⁴¹⁾

2019년 Lu 등은 DED 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 기저부 위 동일 합금 적층을 진행하였다. DED 공정을 통해 제작한 제품의 변위량과 유한요소 해석을 통해 예측된 변위량을 비교하였다. DED 공정을 통해 제품 적층 시 변위 위치를 선정하여 유한요소 해석에 적용하였다. 이를 통해 적층량에 따른 변위를 비교해야 한다는 것을 알아내었다.⁴²⁾

2020년 Jardin 등은 DED 공정을 이용하여 SCM440 강 위 M4 분말 적층을 진행하였으며, 유한요소 해석을 통해 레이저 전력, 열 용량, 열 전도성에 따른 제품의 미세구조 및 열 이력을 비교하였다. 이를 통해 유한 요소 분석에 의해 예측된 열 및 변위 이력과 실제 값을 비교하여 미세구조와 성공적으로 상관 관계를 맺었고, 적층 층에 따라 불균일한 세 포형 입자에 대해 설명하였다. 이를 통해 해석 진행시 적절한 변수를 적용하여 해석을 진

행해야 한다는 것을 알아내었다.⁴³⁾

2021년 Lu 등은 DED 공정을 이용하여 적층 진행 시 잔류 응력을 최소화하기 위해 기저부 구조의 설계를 최적화하는 방법을 제안하였다. 적층 시 응력 집중 지점에서의 균열을 방지하기 위해 기저부의 상면과 적층 벽 사이의 반올림 각도 (θ) 를 $15^\circ - 75^\circ$ 까지 설정하고, 라운딩 반경을 2 - 10 mm 로 설정하여 비교하였다. 이를 통해 반올림 각도 (θ) 가 45° 일 때 잔류응력의 최소화와 균열 방지를 위한 최선의 선택임을 도출하였다. 본 논문을 통해 기저부 형상에 대해 각도를 최대 45° 로 설정해야 한다는 것을 알아내었다.⁴⁴⁾

2021년 Kim 등은 유한요소 해석 (Finite element analysis : FEA) 을 통해 기저부 경사 각도에 따른 3 차원 해석 모델과 2 차원 해석 모델의 비교를 통해 안정성, 해석 시간 및 컴퓨터 메모리 측면에서 보았을 때 2 차원 유한요소 해석이 3 차원 유한 요소 해석보다 더 유리하다는 것을 검증하였다. 본 논문을 통해 2 차원 유한요소 해석과 3 차원 유한요소 해석을 비교하고 2 차원 유한요소 해석의 타당성을 제시해야 한다는 것을 알아내었다.⁴⁵⁾

2022년 Arana 등은 WAAM (Wire and arc additive manufacturing) 공정을 통해 고강도 알루미늄 합금의 적층을 진행하였다. 적층 중 층간 시간 (Interlayer time) 을 적용과 비적용으로 나눠 실험을 진행하였으며 층간 시간을 적용하지 않을시 균일하게 분포된 미세 구조를 얻을 수 있으며, 층간 시간을 적용 시 기둥 모양의 수직상 입자가 나타난다는 것을 알아내었다. 본 논문을 통해 기저부 적층 전략에 대해 층간 시간을 조절하여 해석 시 잔류응력에 미치는 영향에 대해 조사해야 한다는 것을 알아내었다.⁴⁶⁾

선행 연구에서는 DED 공정 및 그 하위 공정과 유한요소 해석의 시뮬레이션을 비교/분석 하였다. 이 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 제품의 균열 발생시 절삭 후 적층을 하는 과정에서 절삭하는 각도, 깊이 및 길이에 따라 적층되는 양이 달라지기 때문에 이를 고려하여 형상을 제작하고, 이에 따른 유한요소 해석을 진행하였다. 또한 적층 전략과 적층 후 발생하는 기공의 위치에 따른 유한 요소 해석을 진행하여 잔류응력을 비교하였다.

제 2 절 연구 목적 및 방법

1. 연구 목적

적층 제조 공정 (Additive manufacturing : AM) 은 제거 가공 공정 (Cutting process) 과는 다르게 재료를 층별로 쌓아 올려서 제품을 생성하는 공정이며, 이를 통해 지지대 없이 복잡한 형상을 제작할 수 있다. 또한 제품을 만드는 과정에서 발생하는 산업 폐기물이 적다는 경제적 장점이 있다. 하지만 공정 중 발생하는 급속 가열 및 냉각으로 인한 기저부 및 적층부의 잔류응력, 층별로 쌓아 올리는 방식에서 발생하는 기공 및 적층 표면의 거침 등의 단점이 있다. 이러한 단점으로 인해 완성된 금속제품에서 변형 및 균열이 발생하고 끝내 파손되는 문제점을 야기한다.⁴⁷⁾⁴⁸⁾ 또한 적층 형상이 급변하는 구간에서는 접합 특성이 변하고 응력 집중 현상이 발생하게 된다. 마지막으로 적층 전략을 생략하고 적층하는 경우 기저부와 적층부 사이에 균열이 발생하여 제대로 접합하지 못하게 된다. Fig. 2 는 공정 중 발생하는 결함이다.



Fig. 2 Defects of products manufactured by the metal AM Process⁴³⁾

적층 제조 공정 중 발생하는 적층 표면의 거침은 적층 후 절삭 및 연삭의 후처리 과정을 거쳐 개선 시킬 수 있다. 또한, 공정 중 발생하는 적층 특성 및 잔류응력에 대한 예측 및 개선을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

이 연구에서는 에너지 제어형 용착 공정을 이용한 SCM440 기저부 위 G6 분말 적층 시 기저부 형상과 적층 전략이 적층 영역 열-기계 특성에 미치는 영향에 대해 분석하

고 잔류응력을 감소시킬 수 있는 최적의 적층 형상 및 적층 전략을 찾고자 한다. DN Solution 사의 적층 시편을 토대로 비드의 크기를 조사하여 해석 모델을 만들고 실험과 해석의 데이터 비교를 통해 효율값을 도출한다. 2 차원 적층 진행 시 기저부 경사 각도 (θ) 에 따른 잔류응력 감소를 위해 30° , 45° 의 경사면에 깊이 4mm - 8 mm, 길이 5 mm - 9 mm 로 적층을 수행하여 적절한 적층 경사 각도, 깊이 및 길이를 선정하고, 적층 경로 방향 적층 시 직선 보수, 내측 보수 및 외측 보수에 따른 최적의 형상을 찾고자 한다. 다음으로는 2 차원 해석과 3 차원 해석의 비교를 통해 타당성을 제시하고자 한다. 2 차원 해석의 타당성을 제시한 후 내경에 따른 잔류응력을 비교하고자한다. 다음 최적의 적층 전략을 찾기 위해 적층경로 및 비드간 이동시간 (Interpath time) 및 층간 이동시간 (Interlayer time) 을 조절하여 열-기계 특성 비교 후 최적의 기저부 형상 및 적층 전략을 선정하고자 한다. 마지막으로 적층 후 기공의 위치에 따라 잔류응력을 비교하고자 한다.

2. 연구 방법

에너지 제어형 용착 공정을 진행하기 위해 기저부 및 적층 분말의 소재는 SCM440 및 G6 금속 분말이다. 위 소재의 온도의존 물성 데이터는 상용 프로그램인 JmatPro V12.0 프로그램을 이용하여 도출하였으며, 에너지 제어형 용착 공정을 모사하기 위한 유한 요소 해석은 상용 프로그램인 SYSWELD V16.0 을 사용하여 진행하였다. 이 연구의 흐름도는 Fig. 3 과 같이 진행된다.

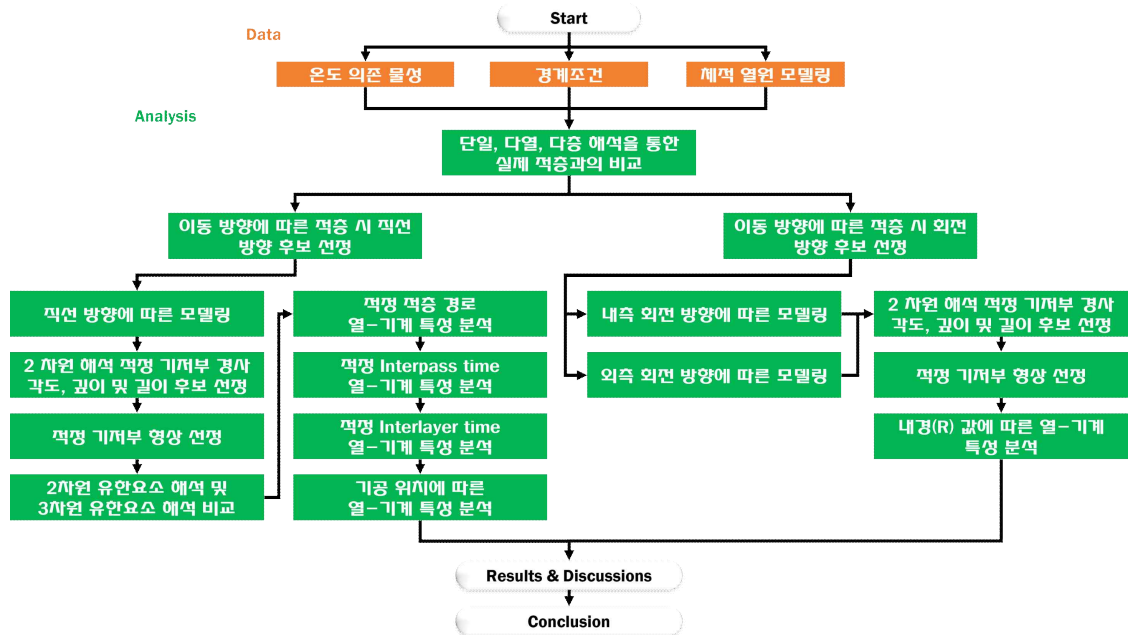


Fig. 3 Flowchart of research works

제 2 장 에서는 적층 경로 방향 적층시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성을 분석하였다. 제 1 절에서는 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성을 분석하였다. 기저부 형상을 기저부 각도, 깊이 및 길이로 나뉘 총 18개의 2 차원 유한요소 해석 모델을 설계하였다. 온도의존 물성 데이터, 경계 조건 및 열원 모델을 적용하여 해석을 진행하였으며, DN Solution 사의 실험 시편의 데이터를 기반으로 해석 모델을 만들고 실험과 해석의 비교를 통해 열원 효율을 도출하였다. 기저부 각도, 깊이 및 길이에 대한 2 차원 해석을 진행하였으며, 주응력 및 변형을 비교 분석하여 최적의 각도, 깊이 및 길이를 선정하였다. 또한 2 차원 해석과 동일한 크기의 3 차원 해석 모델을 설계하였으며, 2 차원

해석과 3 차원 해석의 주응력, 해석 시간 및 해석 용량을 비교하여 2 차원 해석의 타당성을 제시하였다. 제 2 절에서는 축 대칭 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석을 진행하였다. 축대칭 방향에 따라 내측 보수와 외측 보수로 나뉘 설계하였으며, 기저부 각도, 깊이 및 길이에 따른 36 가지 2 차원 해석 모델을 만들었다. 해석 모델의 경계 조건을 제외한 열원 및 온도의존 물성 데이터는 그대로 사용하였으며, 내측 보수와 외측 보수에 따른 해석을 진행하여 열 이력 및 주응력을 비교 분석하였다. 다음으로 내경에 따라 해석을 진행하였으며, 해석 모델의 경계 조건을 제외한 열원 및 온도의존 물성 데이터는 그대로 사용하여 최적의 형상을 조사하였다. 제 3절에서는 적층 경로 방향에 따른 적층시 열-기계 특성 비교 및 분석을 진행하였다. 직선, 내측 보수 및 외측 보수에 대하여 동일한 적층 모델의 적층량, 적층 시간, 주응력, 변형 등을 비교 분석하였다.

제 3 장에서는 적층 시 발생할 수 있는 상황에 따라 적층 전략을 나뉘었으며, 적층 전략에 따른 2 차원 열-기계 특성 분석을 진행하였다. 제 1 절에서는 적층 경로에 따라 한 방향 적층과 교차 적층을 진행하였으며, 이에 따른 해석 모델을 선정하고 열-기계 해석을 통해 잔류응력을 비교 분석하였다. 제 2 절에서는 경로간 시간 (Interpass time) 에 따라 해석을 진행하였다. 여기서 경로간 시간 (Interpass time) 은 적층 비드가 생성되고 다음 비드로 이동할 때 발생하는 시간이다. 적층 중 경로간 시간 (Interpass time) 이 증가할수록 잔류응력의 변화를 비교하기 위한 기저부 형상을 개발하였으며, 열-기계 해석을 통해 열이력 및 주응력 비교를 진행하였다. 제 3 절에서는 층간 시간 (Interlayer time) 에 따른 해석을 진행하였다. 층간 시간 (Interlayer time) 은 한 층의 비드가 생성되고 새로운 층으로 이동할 때 발생하는 시간이다. 층간 시간 (Interlayer time) 이 증가할수록 잔류응력의 변화를 비교하기 위한 기저부 형상을 개발하였으며, 열-기계 해석을 통해 열이력 및 주응력 비교를 진행하였다.

제 4 장에서는 적층 중 기공이 발생했을 때를 가정하여 기공 위치를 적층 영역에서 선정하여 열-기계 특성 분석을 진행하였다. 기공 발생 위치는 비드 중 하나를 해석에서 제외하여 진행하였으며, 옆으로 한 칸씩 이동하고, 위로 한 칸씩 이동하여 설계하였다. 열-기계 해석을 통해 기공 발생 위치에 따라 냉각이 끝난 후의 주응력을 비교하였다.

제 5 장에서는 적층 경로 방향 (직선 보수, 내측 보수, 외측 보수), 기저부 형상 (기저부 각도, 깊이 및 길이), 적층 전략 (적층 경로, Interpass time 및 Interlayer time) 및 기공의 위치에 따른 해석을 종합하여 DED 공정을 이용한 SCM 440 기저부 위 G6 분말 적층 시 최적의 형상 및 적층 전략을 제시하였다.

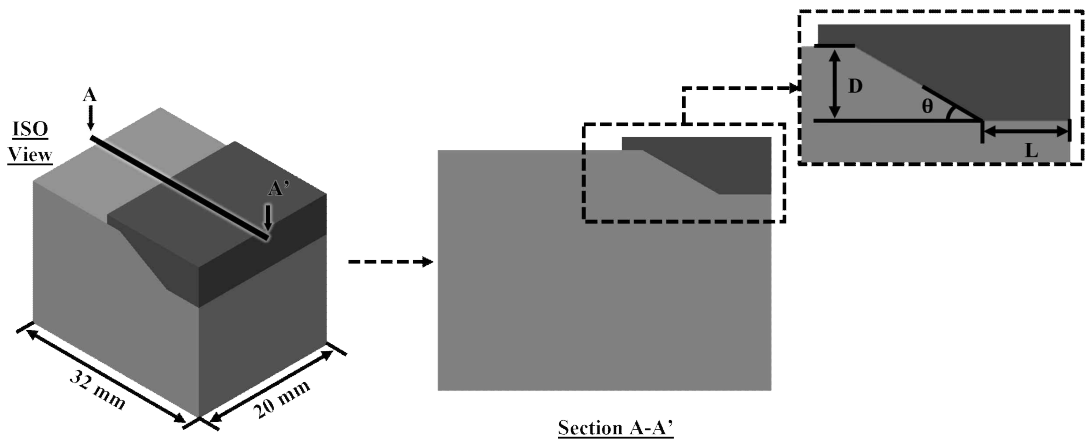
제 2 장 적층 경로 방향 적층시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석

제 1 절 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석

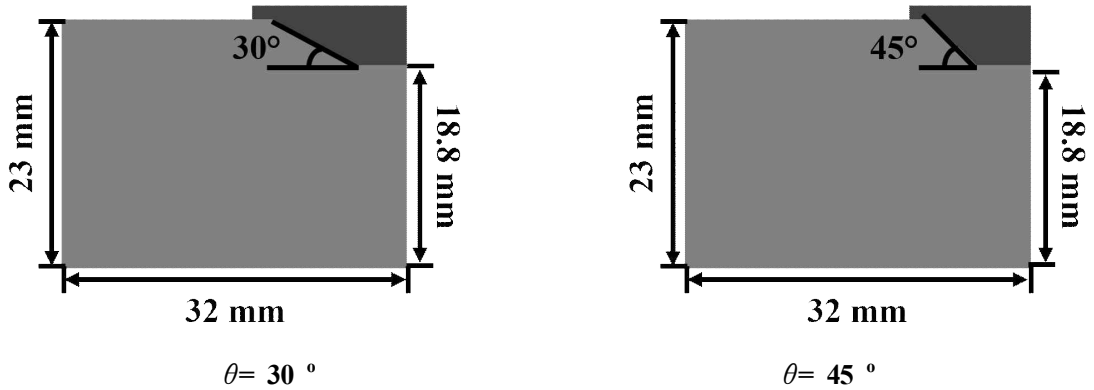
1. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출

가. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 모델 형상 개발

직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성을 분석하기 위한 해석 모델은 다음과 같다. Fig. 4 (a) 는 직선 보수 적층시 기저부 각도(θ), 기저부 깊이(D) 및 기저부 길이(L) 에 대한 설명 및 형상의 개념도이다. (b) 는 경사 각도 30°, 45° 에 따른 기저부 크기 비교이다. 비교 대상은 적층부 깊이 4 mm, 적층부 길이 5 mm 이며 30°, 45° 모두 동일한 기저부를 설계하였다. 기저부의 크기는 Table 3 과 같으며 기저부 경사 각도, 깊이 및 길이를 고려하여 설정하였다.



(a) Definition of chamfer angles



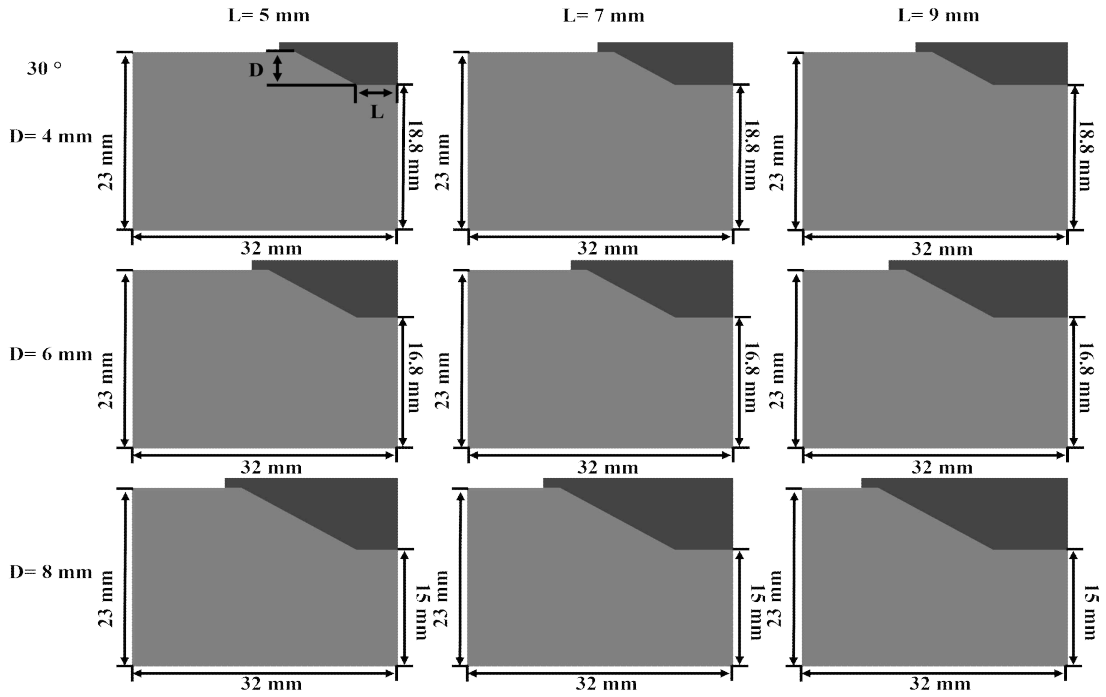
(b) Comparison between 30 ° and 45 °

Fig. 4 Definition of chamfer angle and Substrate shape(straight repair)

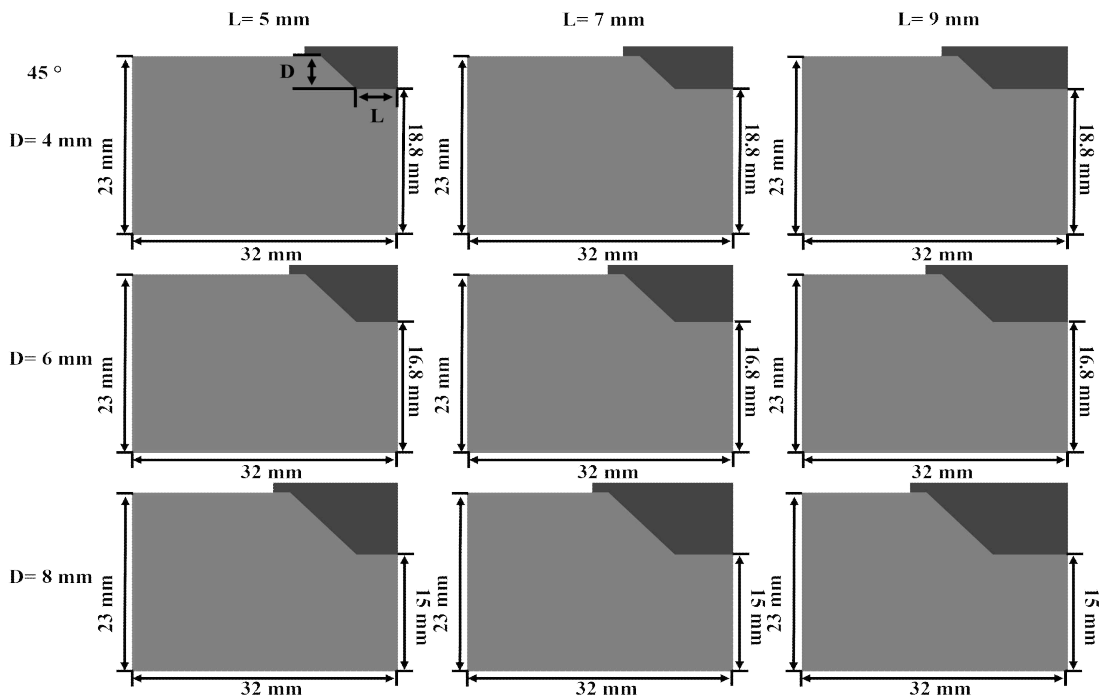
Table 3 Size of Substrate (straight repair)

			Left	Bottom	Right
30 °, 45 °	D = 4 mm	L = 5 mm	23 mm	32 mm	18.8 mm
		L = 7 mm			
		L = 9 mm			
	D = 6 mm	L = 5 mm			16.8 mm
		L = 7 mm			
		L = 9 mm			
	D = 8 mm	L = 5 mm			15 mm
		L = 7 mm			
		L = 9 mm			

Fig. 5 는 경사 각도 30 ° 와 45 ° 의 기저부 형상이다. 적층부 깊이 (D) 4 mm, 6 mm, 8 mm, 적층부 길이 (L) 5 mm, 7 mm, 9 mm 로 총 18 가지의 후보군으로 설계하였다. 적층부 깊이에 따라 4 mm 에서는 우측 길이 18.8 mm 로 설정하였고, 6 mm 에서는 우측 길이 16.8 mm 로 설정하였고, 8 mm 에서는 우측 길이 15 mm 로 설정하였다. 동일한 기저부에 적층량에 따라 각도, 깊이 및 길이를 제거하여 설계를 진행하였다.



(a) Substrate shape of $\theta = 30^\circ$

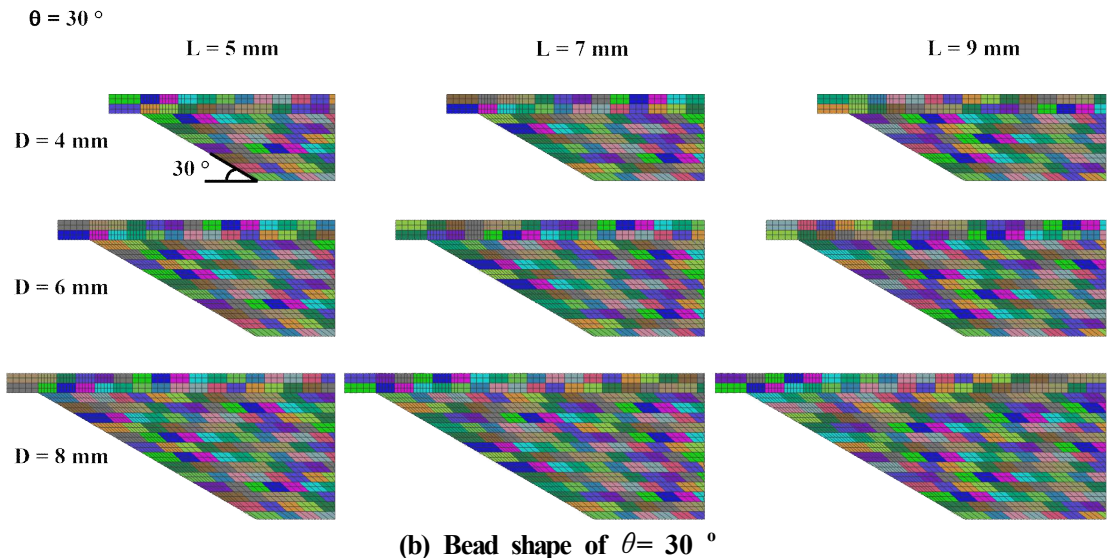
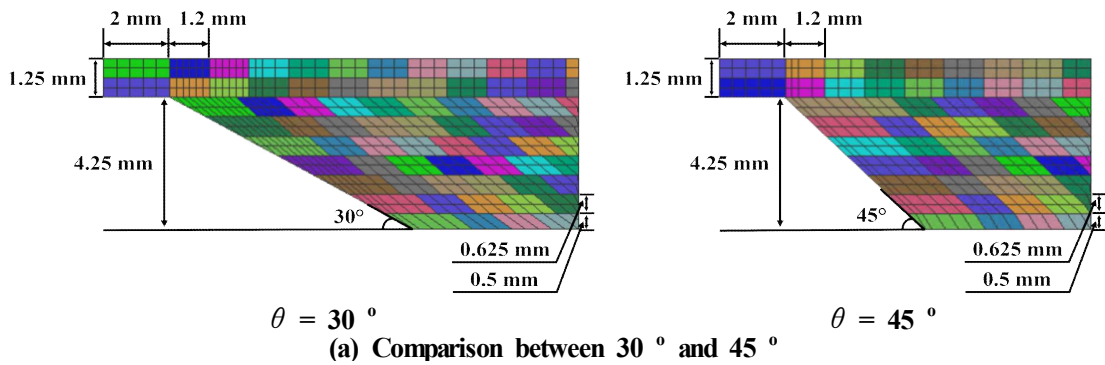


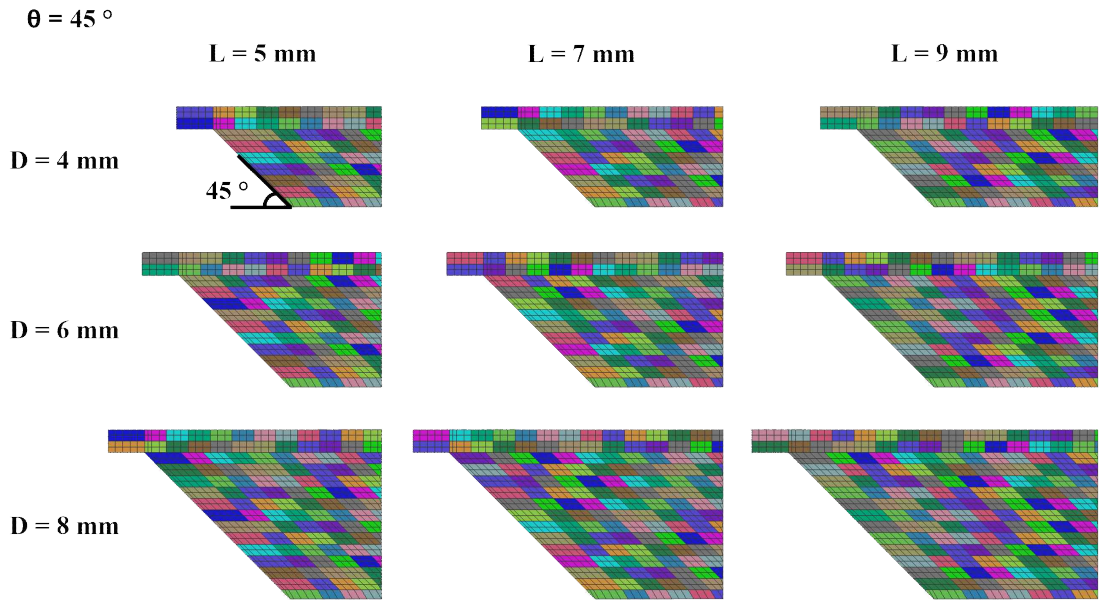
(b) Substrate shape of $\theta = 45^\circ$

Fig. 5 Substrate shape

나. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 적층부 모델 비교

열-기계 특성을 분석하기 위해 기저부 경사각, 적층 깊이 및 길이에 따른 기저부 형상을 바탕으로 총 18 가지의 유한요소 해석 모델을 개발하였다. Fig. 6 은 기저부 형상에 따른 적층부의 유한요소 격자이다. 적층 비드의 폭은 2.0 mm, 해치 거리 (Hatch distance) 는 1.2 mm, 첫 번째 층의 두께는 0.5 mm, 두 번째 층부터의 두께는 0.625 mm 이다. 적층 비드의 총 층수는 적층 깊이 4 mm 에서 9 층, 6 mm 에서 12 층, 8 mm 에서 15 층으로 적층되었다. 마지막 층의 경우 후처리를 위해 1.25 mm 추가하여 설계하였다.





(c) Bead shape of $\theta = 45^\circ$

Fig. 6 Finite element meshes for different characteristic shapes

Table 4 Area of the bead

			30 °	45 °
Area	D = 4 mm	L = 5 mm	54.8 mm ²	44.3 mm ²
		L = 7 mm	65.8 mm ²	55.3 mm ²
		L = 9 mm	76.8 mm ²	66.3 mm ²
	D = 6 mm	L = 5 mm	83.4 mm ²	65.8 mm ²
		L = 7 mm	98.2 mm ²	80.6 mm ²
		L = 9 mm	112.9 mm ²	95.3 mm ²
	D = 8 mm	L = 5 mm	116.9 mm ²	90.7 mm ²
		L = 7 mm	135.6 mm ²	109.2 mm ²
		L = 9 mm	154.0 mm ²	127.7 mm ²

Table 4 는 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 유한요소 격자의 면적이다. 기저부 경사 각도 30 ° 의 경우 적층 깊이 4 mm 의 길이 5 mm 부터 9 mm 까지 54.8 mm², 65.8 mm², 76.8 mm², 적층 깊이 6 mm 의 길이 5 mm 부터 9 mm 까지 83.4 mm², 98.2 mm², 112.9 mm², 적층 깊이 8 mm 의 길이 5 mm 부터 9 mm 까지 116.9 mm², 135.6 mm², 154.0 mm² 이며, 각도 45 ° 의 경우 적층 깊이 4 mm 의 길이 5 mm 부터 9 mm 까지 44.3 mm², 55.3 mm², 66.3 mm², 적층 깊이 6 mm 의 길이 5 mm 부터 9

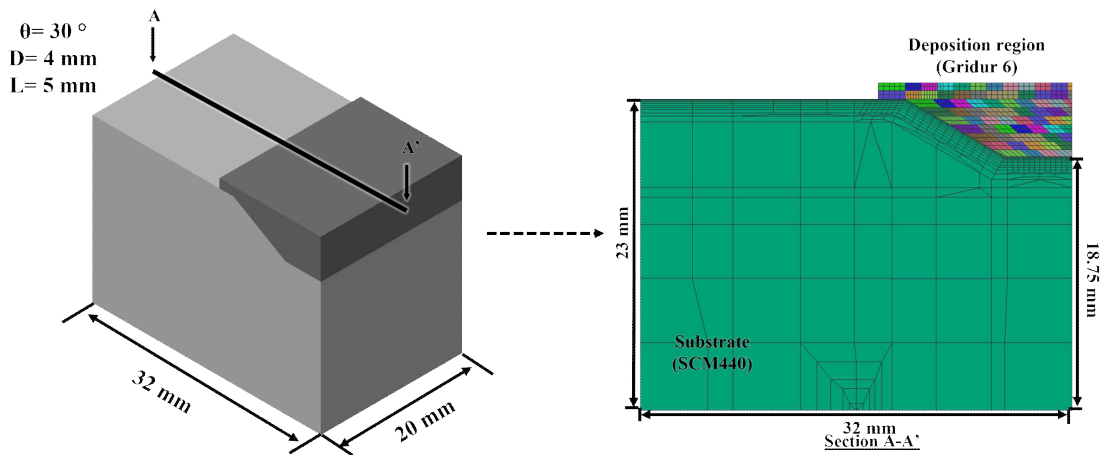
mm 까지 65.8 mm², 80.6 mm², 95.3 mm², 적층 깊이 8 mm 의 길이 5 mm 부터 9 mm 까지 90.7 mm², 109.2 mm², 127.7 mm² 이다. 유한요소 격자의 면적은 경사 각도가 낮고 적층 깊이 및 길이가 길수록 높게 나타났다. Table 5 는 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 유한요소 격자의 Path, Nodes 및 Elements 이다. 기저부 각도가 낮을수록 Path, Nodes 및 Elements 수가 적었으며, 기저부 깊이 얇을수록, 기저부 길이가 짧을수록 Path, Nodes 및 Elements 수가 적었다. 기저부 각도 30 ° 의 경우 기저부 깊이 4 mm, 기저부 길이 9 mm 일 때가 기저부 깊이 6 mm, 기저부 길이 5 mm 일 때보다 Path, Nodes 및 Elements 수가 적었지만 기저부 각도 45 ° 의 경우 기저부 깊이 4 mm, 기저부 길이 9 mm 일 때가 기저부 깊이 6 mm, 기저부 길이 5 mm 일 때보다 Path, Nodes 및 Elements 수가 많았다.

Table 5 Number of paths, nodes and elements of FE models

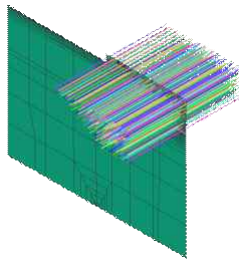
			Paths (EAs)	Nodes (EAs)	Elements (EAs)
30 °	D = 4 mm	L = 5 mm	73	1,019	974
		L = 7 mm	88	1,161	1,112
		L = 9 mm	102	1,299	1,249
	D = 6 mm	L = 5 mm	112	1,393	1,345
		L = 7 mm	133	1,565	1,513
		L = 9 mm	153	1,733	1,680
	D = 8 mm	L = 5 mm	160	1,847	1,796
		L = 7 mm	187	2,054	1,999
		L = 9 mm	211	2,247	2,191
45 °	D = 4 mm	L = 5 mm	58	871	826
		L = 7 mm	73	1,013	964
		L = 9 mm	89	1,151	1,101
	D = 6 mm	L = 5 mm	87	1,116	1,068
		L = 7 mm	104	1,287	1,236
		L = 9 mm	128	1,456	1,403
	D = 8 mm	L = 5 mm	118	1,404	1,352
		L = 7 mm	143	1,606	1,550
		L = 9 mm	172	1,804	1,747

다. 2차원 유한요소 해석 모델 개발

Fig. 7 은 2 차원 유한요소 모델이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm, 기저부 길이 5 mm 로 설정하여 유한요소 해석 모델을 개발한 것이며, (b) 는 적층 길이에 대한 설명이다. (c) 는 CATIA V5 로 만든 모델과의 비교를 통해 비교한 적층 길이에 대한 설명이다. 적층 방향은 교차 방향으로 적층을 진행하였다.



(a) 2D finite element analysis model



(b) 2D finite element analysis model deposition pass

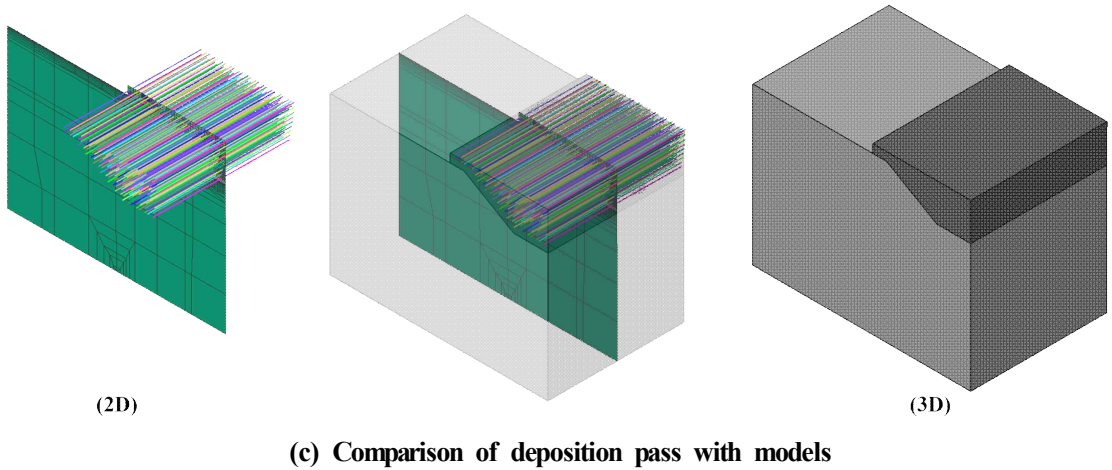


Fig. 7 Finite element analysis model of 2D (straight repair)

라. 온도의존 물성 데이터 도출

기저부 및 적층부 소재는 SCM440 및 G6 이다. 각 소재의 화학 조성은 상용 소프트웨어인 JmatPro V12.0 를 이용하여 도출하였으며 Table 6 과 같다.

Table 6 Chemical compositions of the substrate and powder⁴⁹⁾

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Mo	Co	Other
SCM440	0.070	1.040	BAL	0.380	0.640	0.180	0.120	0.150	-	< 0.1
Gridur6	-	0.930	BAL	0.400	0.380	0.230	-	-	-	-

열전달 및 열응력 해석을 하기 위한 기저부 재료인 SCM440 의 밀도 (Temperature dependent density : ρ), 열전도도 (Temperature dependent thermal conductivity : k), 비열 (Temperature dependent specific heat : C_p) 과 같은 온도의존 열 물성 데이터와 영계수 (Temperature dependent young's modulus : E), 푸아송 비 (Temperature dependent poisson's ratio : ν), 항복강도 (Temperature dependent yield strength : σ) 와 같은 온도의존 기계 물성 데이터를 상용 소프트웨어인 JmatPro V12.0 를 이용하여 도출하였으며 도출된 결과는 Fig. 8 과 같다.

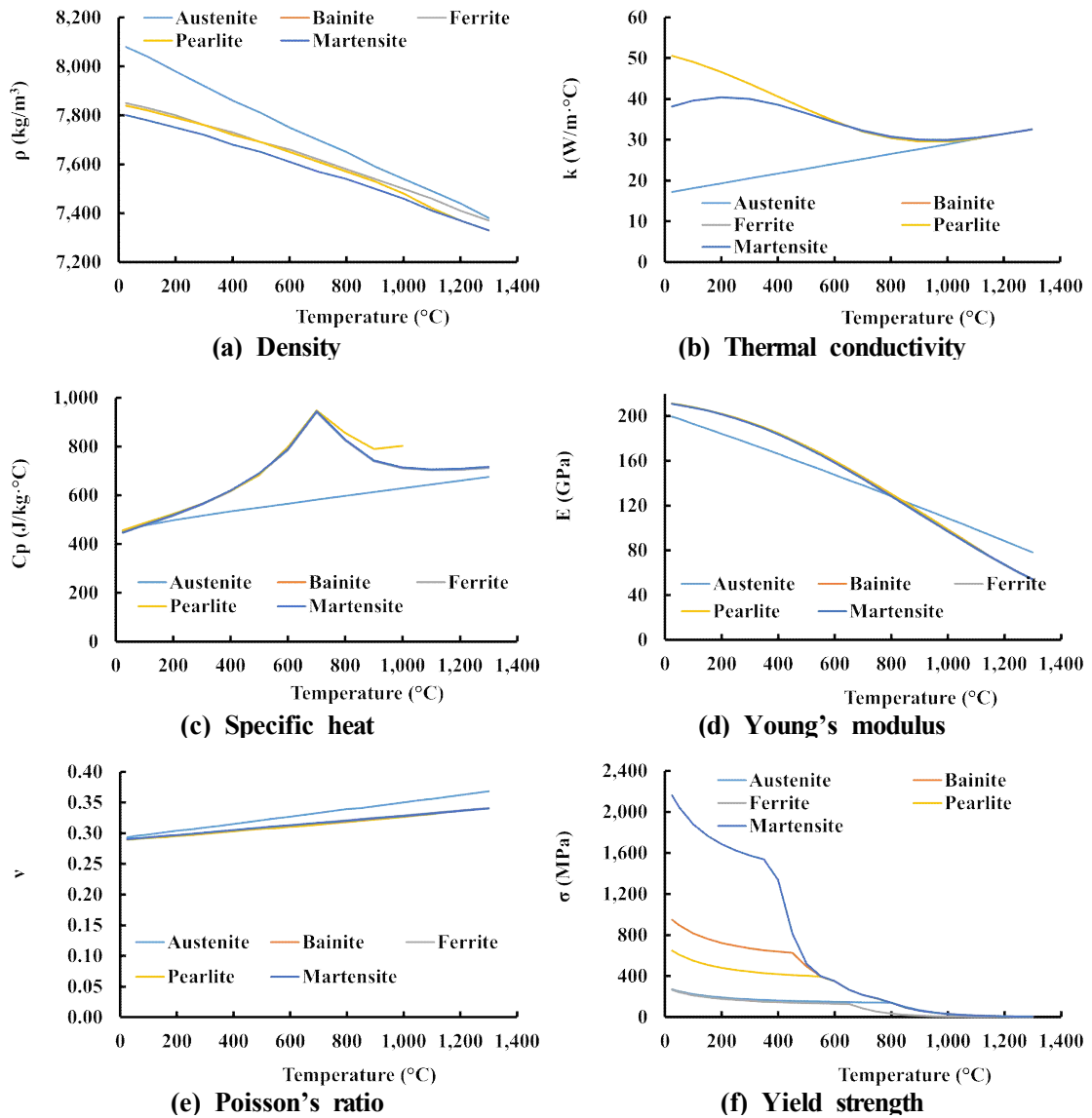


Fig. 8 Temperature dependent thermal-mechanical properties of substrate (SCM440)

열전달 및 열응력 해석을 하기 위한 적층 분말 재료인 Gridur6의 밀도 (Temperature dependent density : ρ), 열전도도 (Temperature dependent thermal conductivity : k), 비열 (Temperature dependent specific heat : C_p) 과 같은 온도의존 열 물성 데이터와 영계수 (Temperature dependent young's modulus : E), 푸아송 비 (Temperature dependent poisson's

ratio : ν), 항복강도 (Temperature dependent yield strength : σ) 와 같은 온도의존 기계 물성 데이터를 상용 소프트웨어인 JmatPro V12.0 를 이용하여 도출하였으며 도출된 결과는 Fig. 9 와 같다.

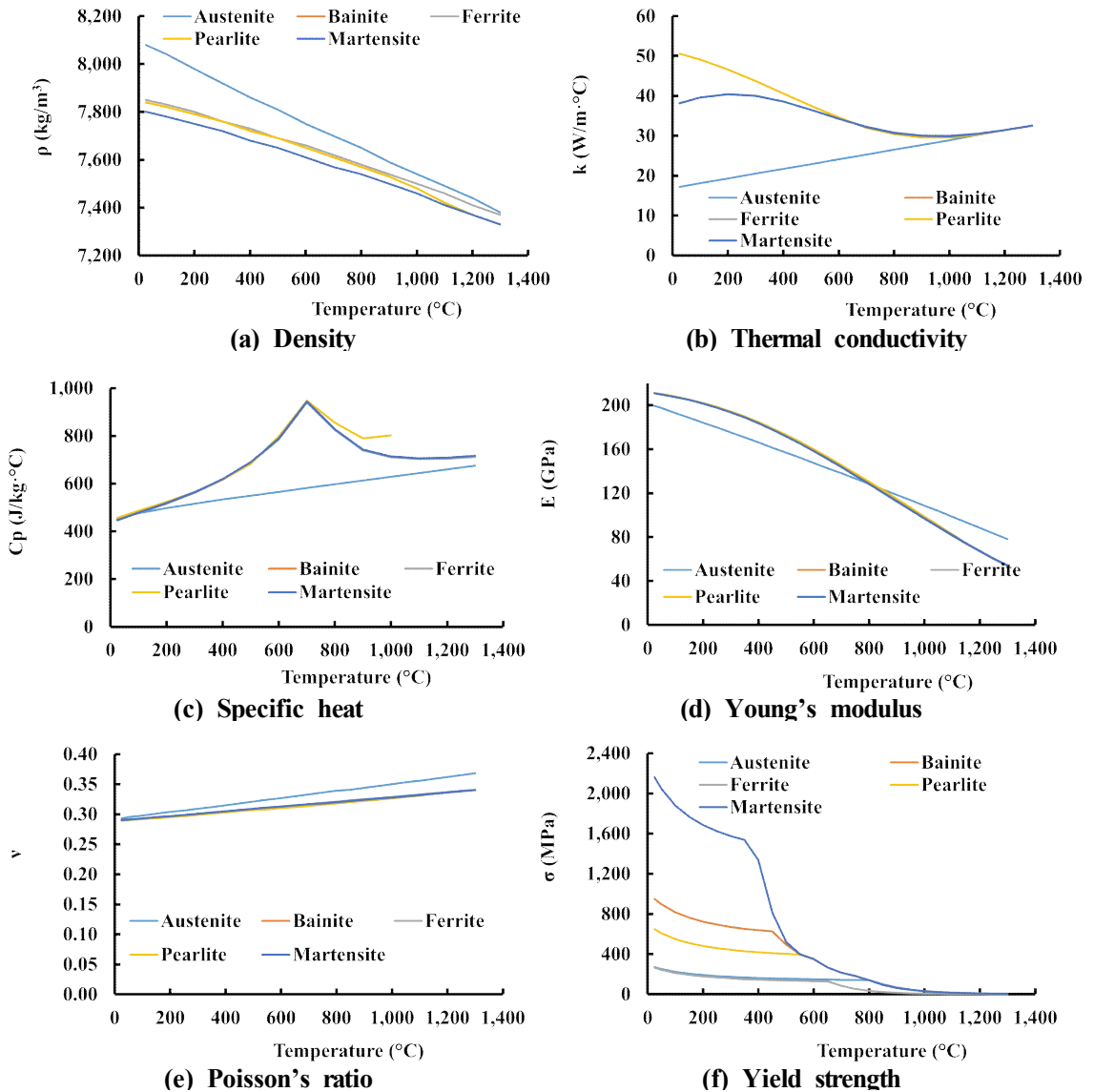


Fig. 9 Temperature dependent thermal-mechanical properties of powder (Gridur 6)

마. 경계 조건 데이터 도출

유한요소 해석을 위한 경계 조건은 Fig. 10 과 같이 구분된다. 자연대류가 상하좌우면으로 적용되며, 열 손실에 따른 값이 상면에 적용된다. 고정 조건은 하단으로부터 5 mm 로 적용하였으며, 2 차원 유한요소 해석 모델은 4 면에 자연대류가 적용되었다. DED 공정에 따른 적층 중 해석 모델의 상부에는 노즐에서 분사되는 보호 가스인 아르곤 (Ar) 가스로 인한 강제 대류에 의한 열 손실이 발생한다. 자연 대류는 공정 진행 및 종료 이후에도 계속적으로 발생하며, 기저부의 좌측면과 우측면의 경우 기저부 깊이에 따라 크기 차가 있기에 이를 적용하여 자연대류를 다르게 대입하였다. 풀림조건의 경우 기저부의 가운데로 잡았으며, 자연대류의 온도의존 물성 데이터는 공기의 온도 물성 데이터이고 Fig. 11 과 같으며, 아르곤 가스의 온도의존 물성 데이터는 Fig. 12 와 같다.

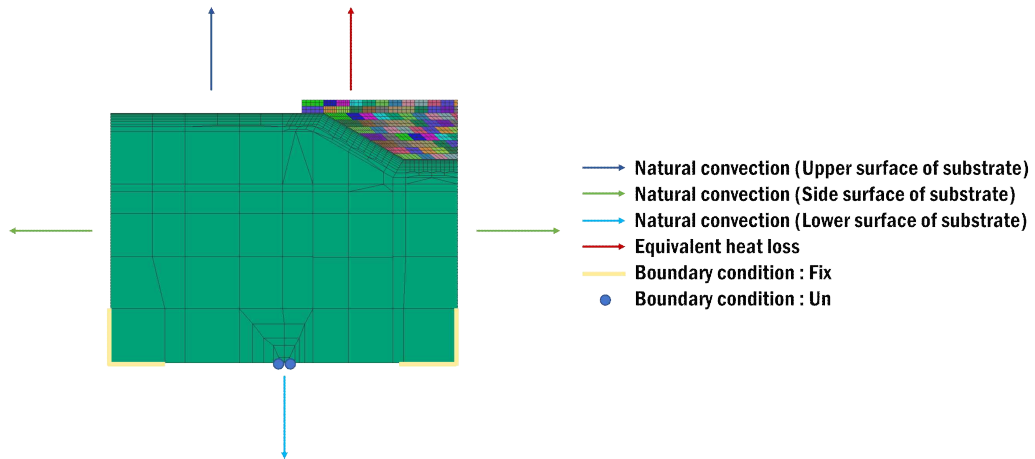


Fig. 10 Application region of the convection on the surface of the substrate (2D FEA straight repair)

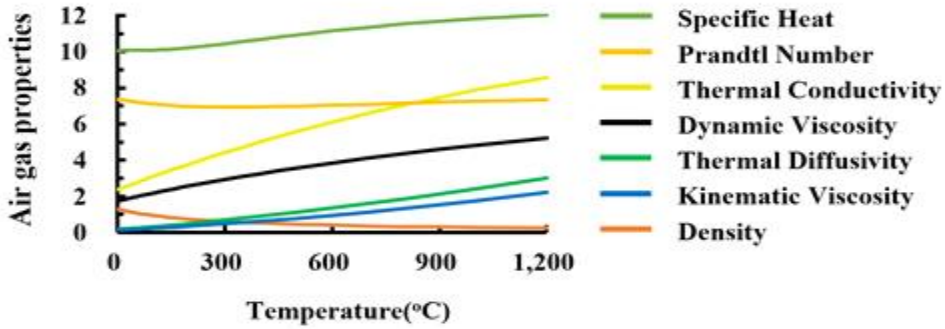


Fig. 11 Temperature dependent material properties of air⁵⁰⁾

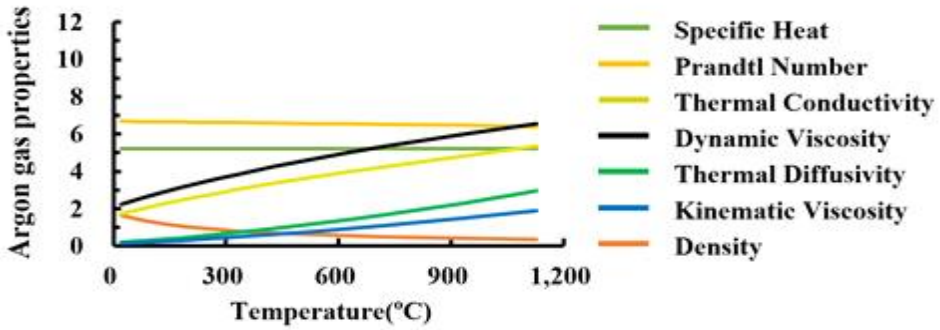


Fig. 12 Temperature dependent material properties of argon⁵⁰⁾

유한요소 해석을 위한 자연 대류 계수(\bar{h}_n)는 기저부의 상면, 하면, 수직면으로 구분하여 각각의 경우를 식 (1), (2), (3) 으로 계산하였다. 기저부의 상면은 식 (1), 하면은 식 (2), 수직면은 좌, 우측면이며 식 (3) 과 같은 계산식을 적용하였다.⁵⁰⁾

$$N_u = 0.54 R_a^{0.25} \quad (1)$$

$$N_u = 0.52 R_L^{0.2} \quad (2)$$

$$N_u = 0.68 + \frac{0.67 Ra^{0.25}}{[1 + (0.492/Pr)^{0.5625}]^{0.444}} \quad (Ra < 10^9) \quad (3)$$

여기서 N_u , R_a 및 P_r 은 넛셀수 (Nusselt number), 레일리수 (Rayleigh number), 프란틀수

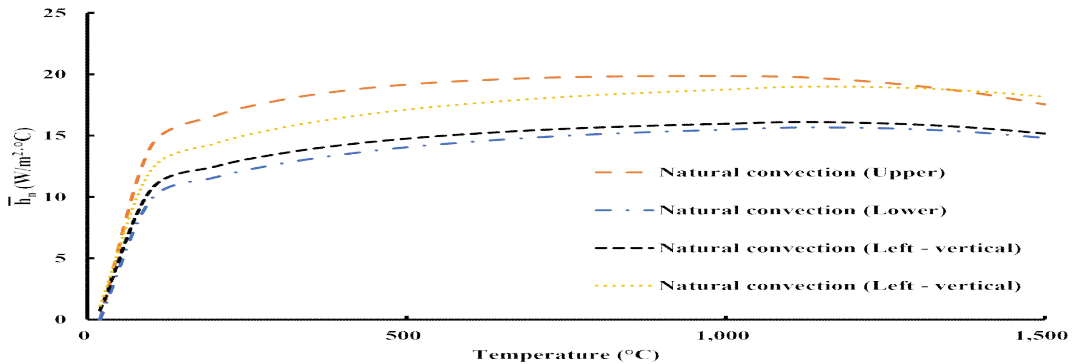
(Prandtl number) 이며 레일리 수 (Ra) 는 식 (4) 과 같은 계산식을 적용하였다.

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

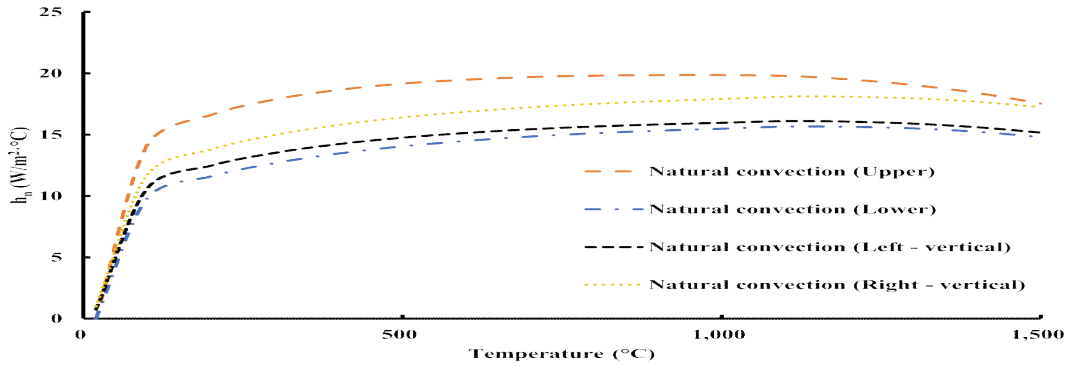
여기서 g , T_s , T_∞ , L_c , ν_k , α 및 T_f 는 각각 중력가속도 (Gravitational acceleration), 표면 온도 (Surface temperature), 대기 온도 (Ambient temperature), 특성 길이 (Characteristic length), 동점성 계수(kinematic viscosity), 열 확산 계수 (Thermal diffusivity) 및 대류 경계층의 유체 온도의 근사치이다. 대류 경계층의 유체 온도의 근사치는 식 (5) 와 같이 계산된다.

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

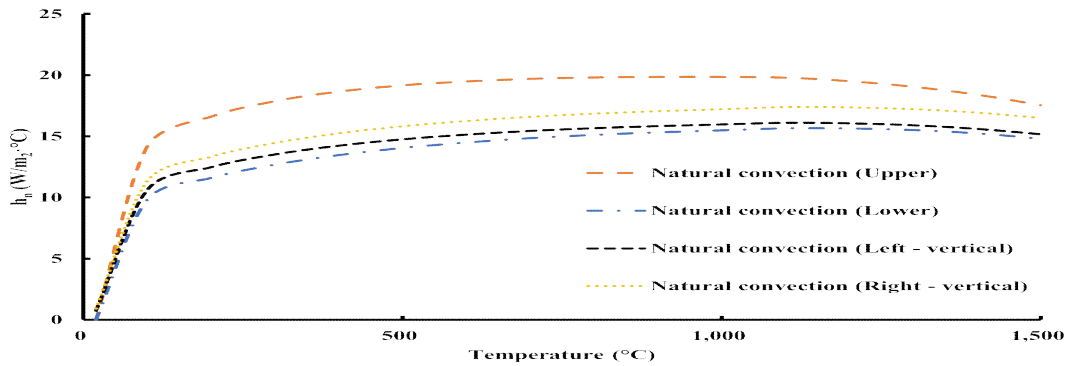
식 (1) 부터 (5) 까지로 부터 계산된 기저부의 수직면 및 상면, 하면에 대한 자연 대류 계수는 Fig. 13 과 같다. (a) 는 기저부 깊이 4 mm 에 의해 우측면 길이가 18.8 mm 에 의한 계산 값, (b) 는 기저부 깊이 6 mm 에 의해 우측면 길이가 16.8 mm 에 의한 계산 값, (c) 는 기저부 깊이 8 mm 에 의해 우측면 길이가 15 mm 에 의한 계산값이다.



(a) Substrate depth 4 mm



(b) Substrate depth 6 mm



(c) Substrate depth 8 mm

Fig. 13 Temperature dependent natural convection coefficient (straight repair)

유한요소 해석을 위한 강제 대류 계수(\bar{h}_f)는 기저부 상면에서 발생하며 그 경우를 식 (6)을 통해 계산하였다.⁵⁰⁾

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

여기서 \bar{h}_f , \bar{N}_u , k 및 D 는 각각 평균 강제 대류 계수, 평균 너셀 수, 유체의 열전도 및 노즐의 지름이다. 평균 너셀 수의 경우 식 (7) 과 같은 계산식을 적용하였다.⁵⁰⁾

$$\bar{N}_u = P_r^{0.42} \left[\frac{2A_r^{0.5}(1-2.2A_r^{0.5})}{1+0.2\left(\frac{H}{D}-6\right)A_r^{0.5}} \right] [2R_e^{0.5}(1+0.005R_e^{0.55})^{0.5}] \quad \left(\begin{array}{l} 2000 < R_e < 400,000 \\ 2 < H/D < 12 \\ 0.004 < A_r < 0.04 \end{array} \right) \quad (7)$$

여기서 Re , Pr , Ar 및 H 는 각각 레이놀즈 수, 프란텔 수, 적용 면적, 노즐 입구와 표면 사이의 거리이다. 레이놀즈 수, 프란텔 수, 적용 면적은 식 (8), (9), (10) 과 같은 계산식을 적용하였다.⁵⁰⁾

$$Re = \frac{V_e \times D_h}{\nu} \quad (8)$$

$$Ar = \frac{D_h^2}{4 \times R^2} \quad (9)$$

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

여기서 V_e , D_h , ν , R 및 μ 는 각각 유동 평균 속도, 노즐의 직경, 유체의 동점성계수 (Kinematic viscosity), 적용 반경 및 유체의 점성 계수 (Absolute dynamic viscosity) 이다. 식 (6) 부터 (10) 까지로부터 계산된 기저부의 상면에 대한 강제 대류 계수는 Fig. 14 와 같다.

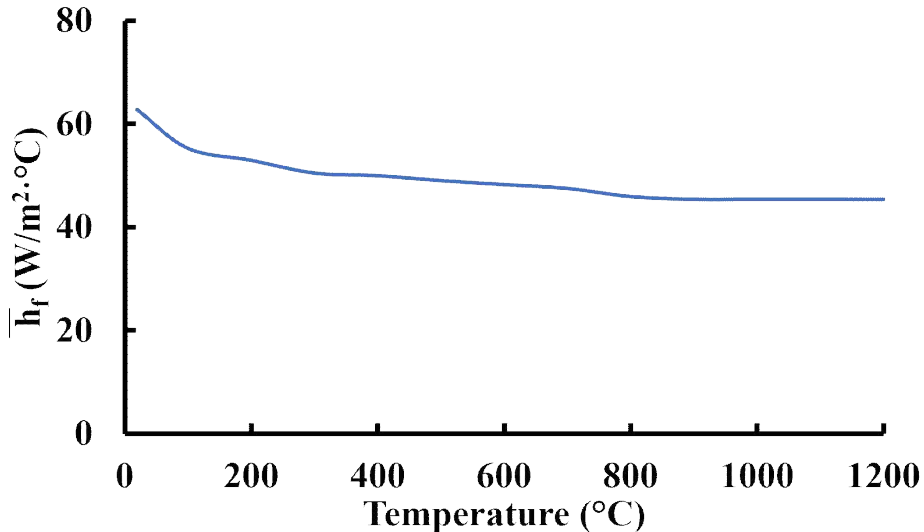


Fig. 14 Temperature dependent forced convection coefficient (straight repair)

대류 현상에 의한 열 손실과 별개로 공정 중에는 고에너지의 레이저 빔을 조사하기 때문에 복사에 의한 열 손실을 고려해야 한다. Fig. 15 는 보호 가스 분사에 의한 강제 대류 발

생 및 복사에 의한 열 손실에 대한 그림이다. 복사에 의한 열 손실 계수의 경우를 식 (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) 및 (18) 로 계산하였다.⁵⁰⁾

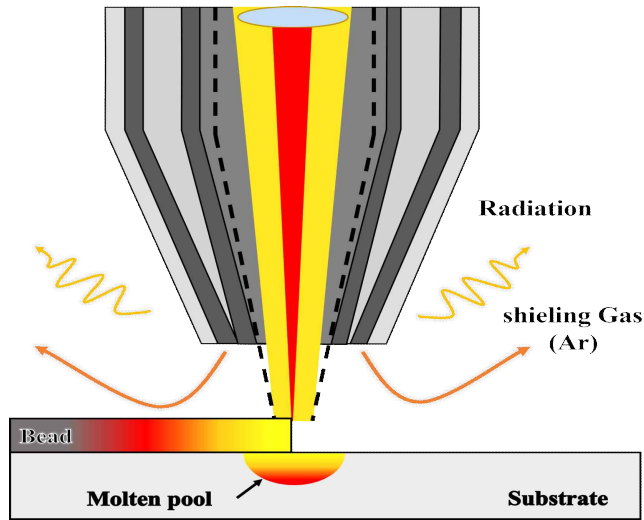


Fig. 15 Heat loss due to Forced convection and radiation

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

여기서 $\dot{Q}_{loss,t}$, $\dot{Q}_{loss,f}$ 및 $\dot{Q}_{loss,r}$ 는 DED 공정에서 적층 중 발생하는 총 열 손실, 강제 대류에 의한 열 손실 및 복사에 의한 열 손실이다. 강제 대류에 의한 열 손실은 식 (12), 복사에 의한 열 손실은 (13) 과 같은 계산식을 적용하였다.

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

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

여기서 ϵ 및 σ_{sb} 은 방사율 및 슈테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수이다. 해석에 사용된 SCM440 및 G6 방사율 (Emissivity) Fig. 16 과 같다. 슈테판-볼츠만 상수는 [$\sigma_{sb} = 5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^2)$] 이며 식 (11) 에서 (13) 까지 정리하면 식 (14) 과 같다.

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

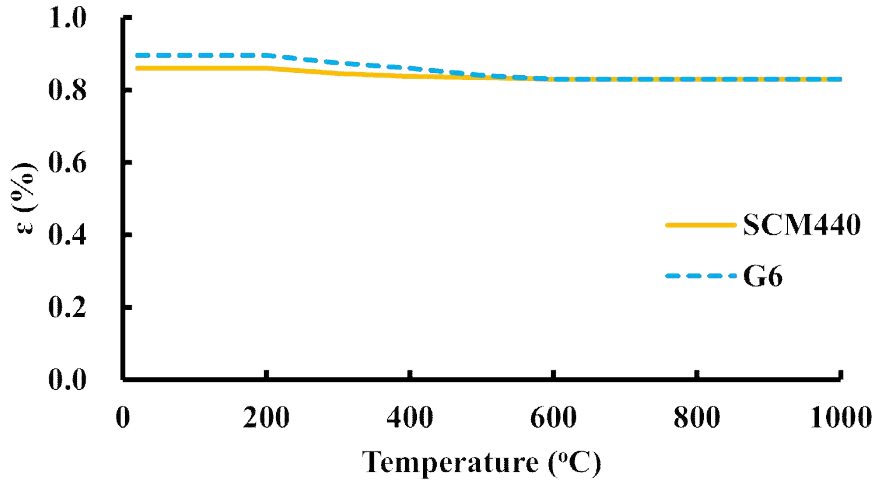


Fig. 16 Temperature dependent emissivity of SCM440 and G6

복사에 의한 열 손실인 식 (13) 은 Newton의 cooling 법칙에 따라 식 (15) 로 표현될 수 있다.⁵⁰⁾

$$\dot{Q}_{loss,r} = \bar{h}_r(T_s - T_\infty) \quad (15)$$

식 (13) 과 (15)을 통해 방사선계수 (\bar{h}_r) 를 구할 수 있으며, 그 식은 (16) 과 같다. 또한 등가 열 손실 계수($\bar{h}_{eq,f}$) 을 식 (17)과 같이 나타내어 계산하면 식 (18) 은 등가 열 손실 식으로 계산되며 이로 인한 등가 열 손실 계수는 Fig. 17 과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

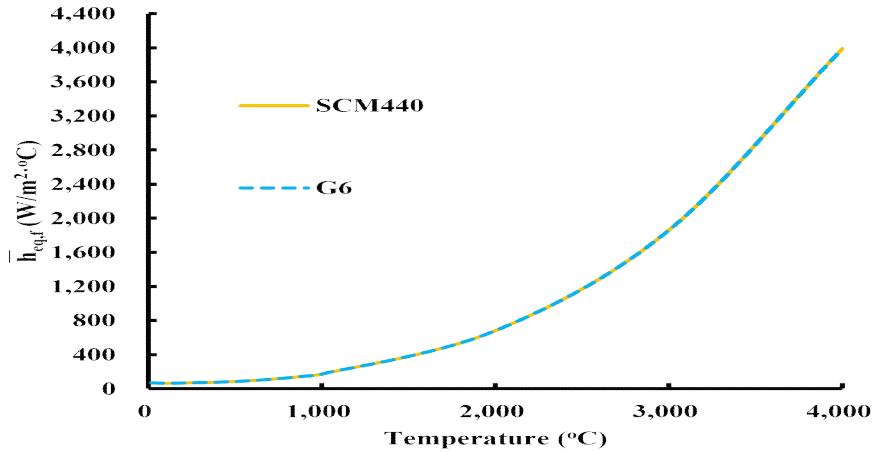


Fig. 17 Temperature dependent equivalence heat loss coefficient

바. 열원 모델

본 연구에서는 DED 공정을 묘사하는 해석이므로 고에너지의 레이저 빔을 레이저 열원으로 사용하게된다. 레이저 모드는 종축 모드와 횡축 모드로 나뉘며, 횡축 모드 (Transverse electromagnetic mode : TEM) 의 TEM_{mn} 에서 m 과 n 은 첨자로 x 축 및 y 축 개수이다. 그 중 TEM₀₀ 은 최고 에너지 밀도 및 최소 초점의 크기를 가지며, 초점거리 외에서도 형상의 유지가 가능하다.⁵¹⁾ 레이저를 TEM₀₀ 으로 가정하면서 가우시안 (Gaussian) 형상으로 가정하여 에너지 분포 및 열원의 형상을 수학적으로 모델링 하였다. Fig. 18 은 열원 모델 형상이다.

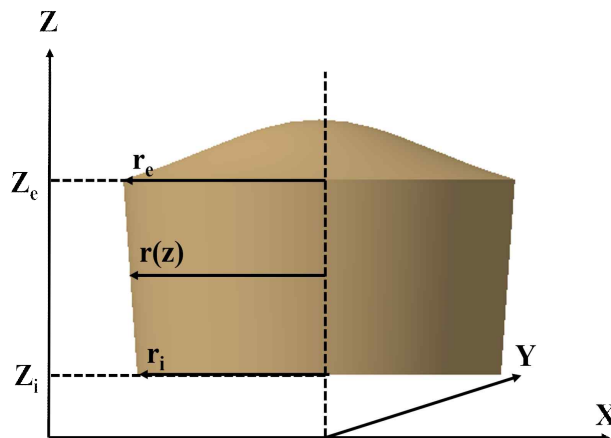


Fig. 18 Heat flux model of laser

여기서 z_i , z_e , r_i 및 r_e 는 열원의 침투 깊이 (Penetration depth), 열원 모델의 상부 위치, 열원의 하부 유효 반경 및 열원의 상부 유효 반경이다. 해석에 적용한 열원의 상부 유효 반경의 크기는 실제 DED 공정의 레이저 빔 반경의 크기를 적용하였으며, 열원의 상부는 적층 비드의 상부와 같은 위치에 설정하였다. 또한 열원의 침투 깊이는 비드의 높이의 반대값을 적용하였다. 해석에 사용된 레이저 모델링 식은 (19), 표준 열원 강도 식은 (20), 열원의 최대 강도 식은 (21), 침투 깊이에 따른 레이저 적용 범위 식은 (22) 와 같다.

$$Q(x,y,z) = \eta \cdot Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + (y-vyt)^2}{C \times r(z)^2}\right) \quad (19)$$

$$Q_0 = -\frac{P}{\pi r_e^2 (z_i - z_e)} \quad (20)$$

$$Q = \frac{3P}{\pi \delta (r_i^2 + r_e r_i + r_e^2)} \quad (21)$$

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

여기서 η , Q_0 , x , y , z , v , t , C , $r(z)$, Q , P 및 δ 는 열원의 효율, 표준 열원 강도, x 좌표, y좌표, z 좌표, 속도, 시간, 열원 형상계수, 침투 깊이에 따른 레이저 유효 범위, 열원의 최대 강도, 레이저 파워 및 침투 깊이이다.

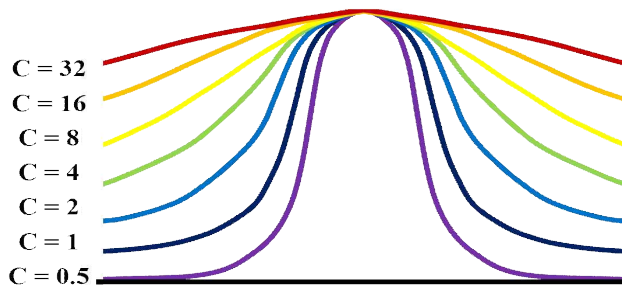


Fig. 19 Intensity distribution of heat flux

Fig. 19 는 열원의 형상이며, 열원 형상계수인 C 값에 따라 변한다. 본 연구에서 사용된 열원 형상은 가우시안 (Gaussian) 형상이며 이에 따라 형상계수 C 값은 0.5 를 사용하였다.⁴⁵⁾ 열원의 상부 직경은 2.0 mm 로 적용하고 열원 상부 반경과 하부 반경이 거의 동일하게 설정되었다. 실제 공정에서 발생하는 열원은 공정 중 발생하는 물질의 증발 및 파장의 반사 등 다양한 변수로 인해 예측할 수 없는 열 손실이 발생한다. 이는 실제 전력보다 적게 적용되기 때문에 예측할 수 없는 열 손실은 열원의 효율을 이용하여 고려하였다.

사. 실험 시편을 통한 해석 모델 도출/비교

유한요소 해석 모델을 적용하기 위한 형상 치수는 DN Solution 사에서 실험을 통하여 받았으며, Table 7, 8 과 같다.

Table 7 Experimental conditions (provided by DN Solution)

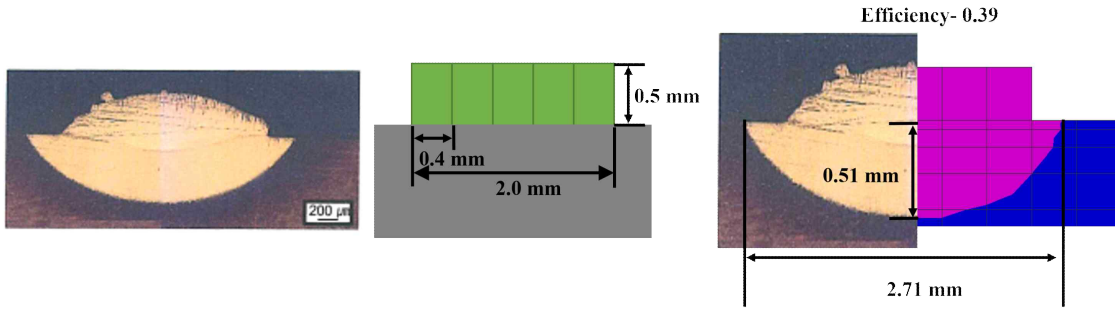
Powder feed rate (g/min)	Shielding gas (L/min)	Carrier gas (L/min)	Scan speed (mm/min)
11.8	8	3	1,400

Table 8 Characteristic dimensions of the deposition bead (provided by DN Solution)

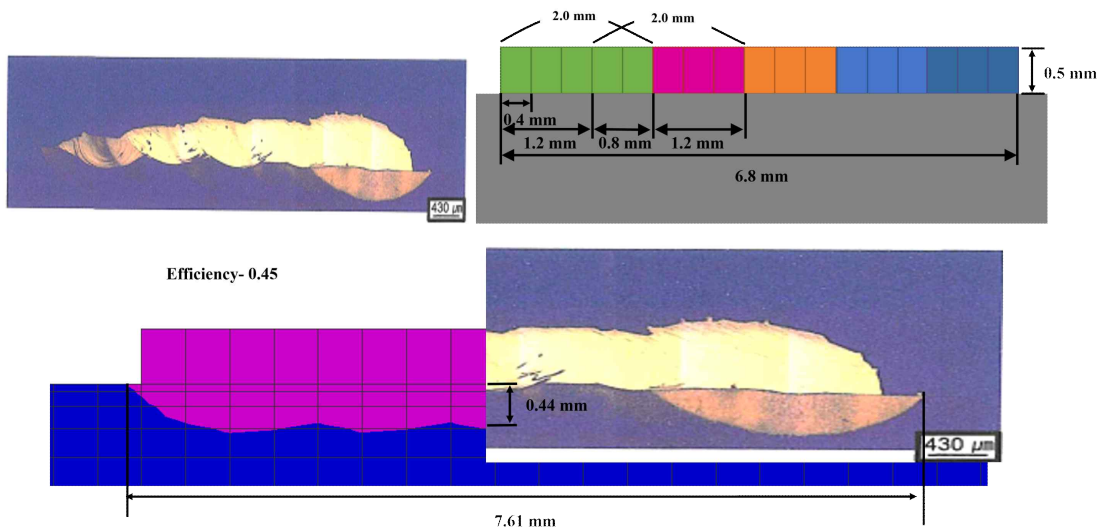
Bead width (μm)	Hatching distance (μm)	Bead height (μm)	Layer thickness (μm)
2,000	1,200	500	625

Fig. 20 은 실험을 통해 적층된 단일, 다열 시편과 시편을 토대로 효율을 구하기 위해 제작한 해석 모델이다. 열 해석을 통해 해석 모델의 효율을 구하였으며, 효율은 시편과 해석 모델의 열 영향부 크기를 비교하여 도출하였다. 단일 비드의 열 영향부 폭은 2.71 mm, 깊이는 0.51 mm 로 나타났다. 이를 토대로 해석 모델에 효율을 대입하여 10 % 이내의 효율 중 가장 가까운 0.39 로 선정하였다. 다열 비드의 경우 열 영향부 폭은 7.61 mm, 깊이는 0.44 mm 로 나타났다. 이를 토대로 해석 모델에 효율을 대입하여 10 % 이내의 효율 중 가장 가까운 0.45 로 선정하였다. 해석의 HAZ 를 도출하고 시편과의 비교를 통해 적절한 효율을 찾아내었으며, 다음 장에서는 해석을 토대로 기

저부 각도에 따른 해석 모델을 선정하고자 한다.



(a) Single bead shape and efficiency



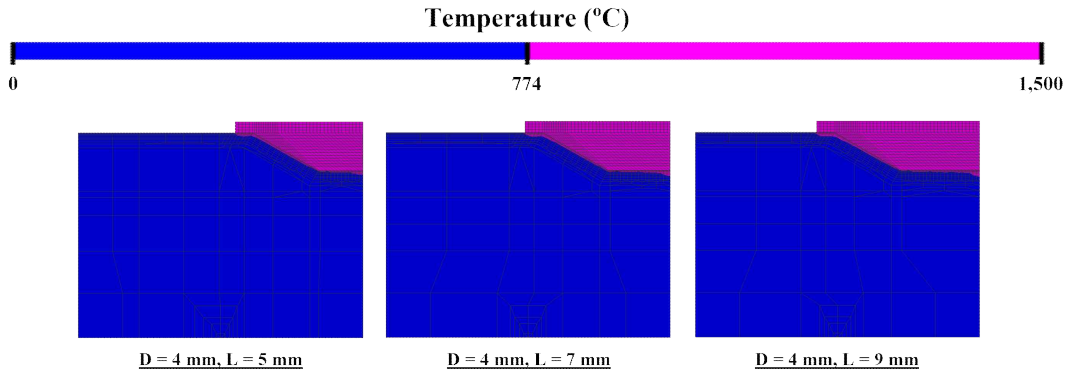
(b) Multi bead shape and efficiency

Fig. 20 Single & Multi bead shape and efficiency

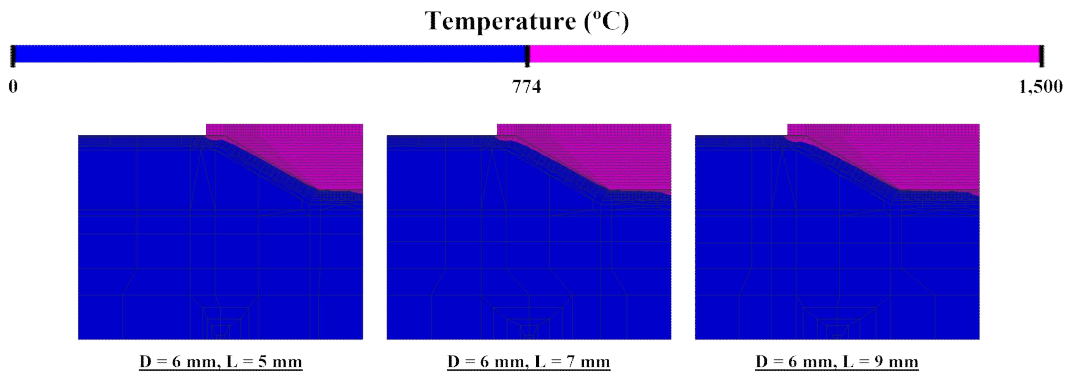
2. 직선 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석

가. 주응력 위치 비교 및 분석

Figs. 21 과 22 는 2 차원 유한요소 해석을 통한 직선 보수 적층시 각도에 따른 열전달 특성이다. Fig. 21 은 기저부 각도 30° 형상이며, Fig. 22 는 기저부 각도 45° 형상이다.



(a) $\theta = 30^\circ$, D = 4 mm



(b) $\theta = 30^\circ$, D = 6 mm

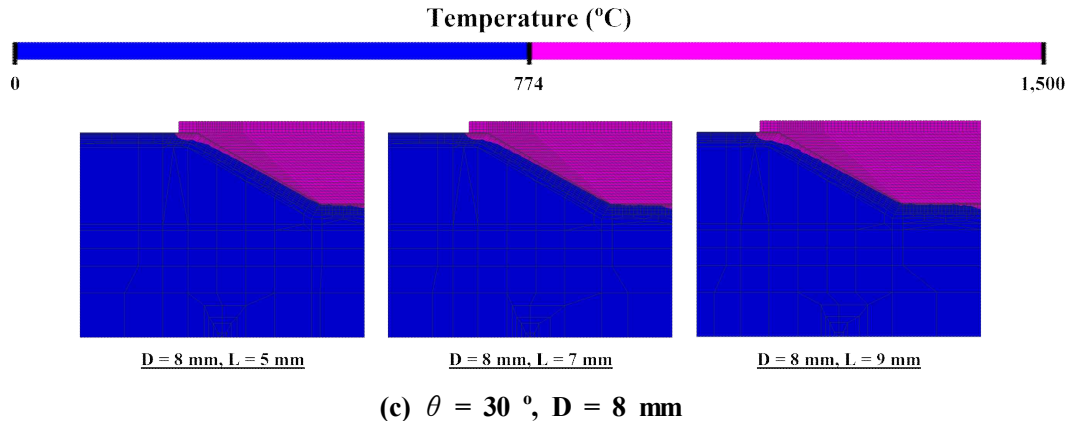
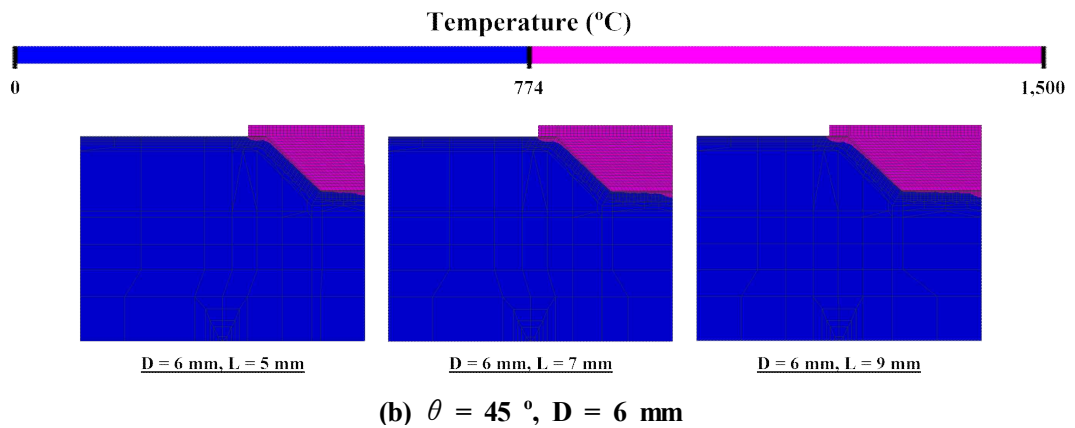
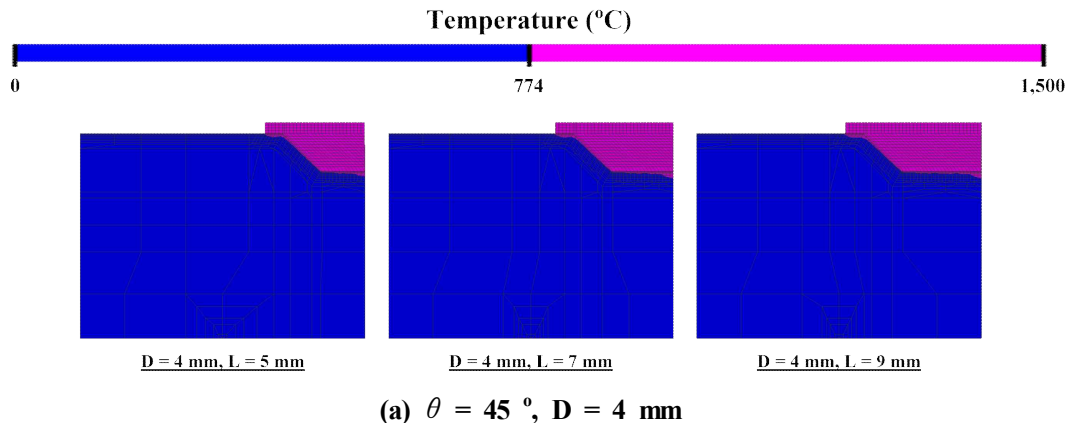


Fig. 21 Temperature distribution comparison according straight repair ($\theta = 30^\circ$)



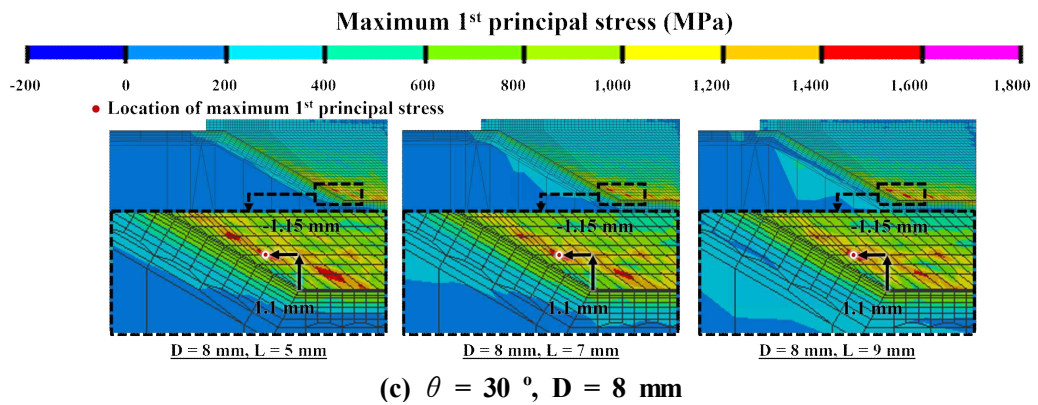
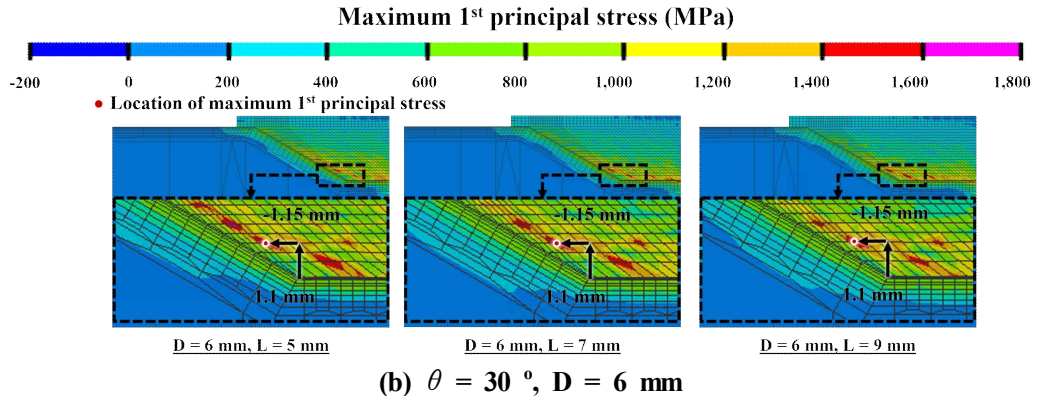
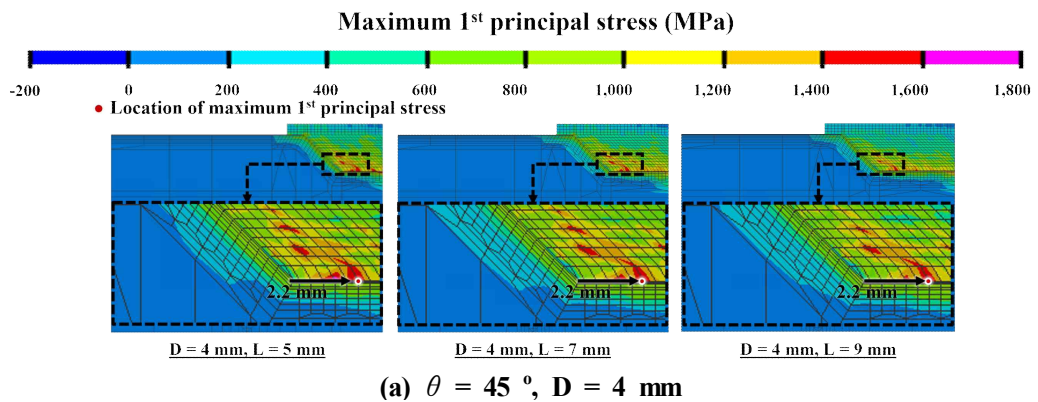


Fig. 23 Effect of maximum 1st principal stress between processes according straight repair ($\theta = 30^\circ$)



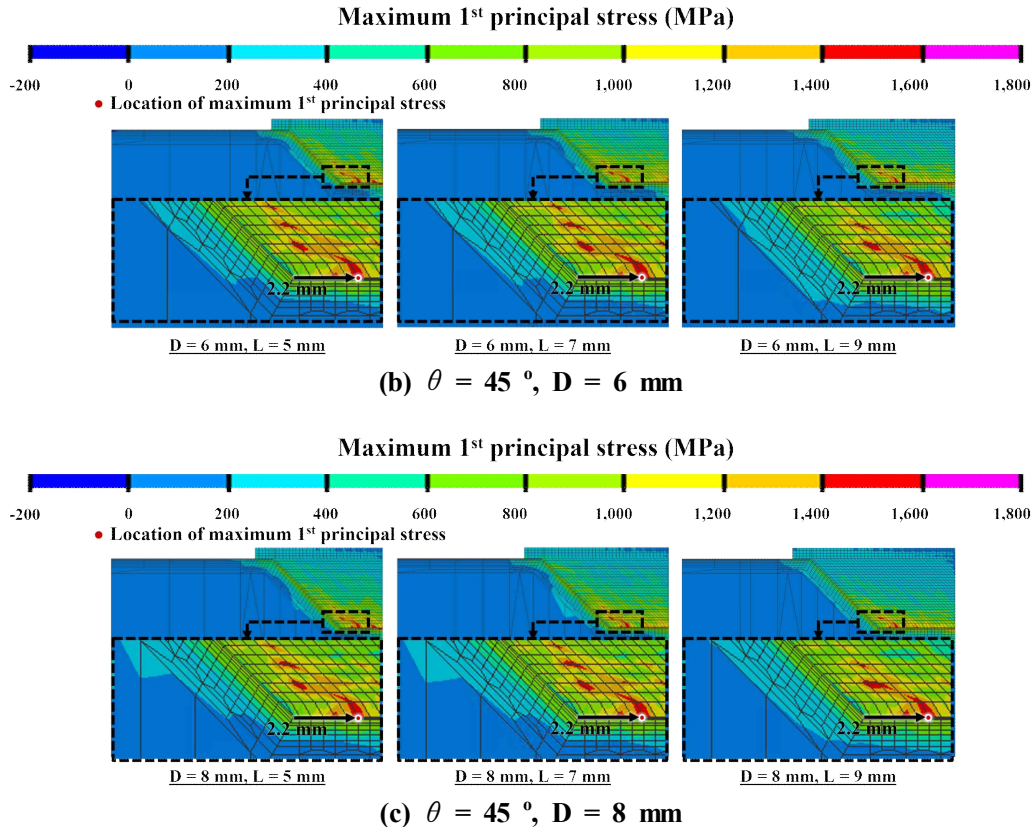
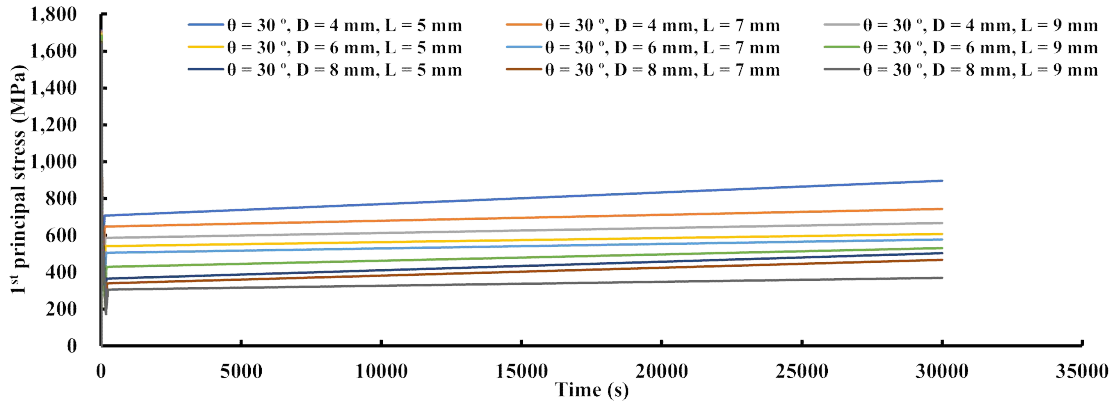


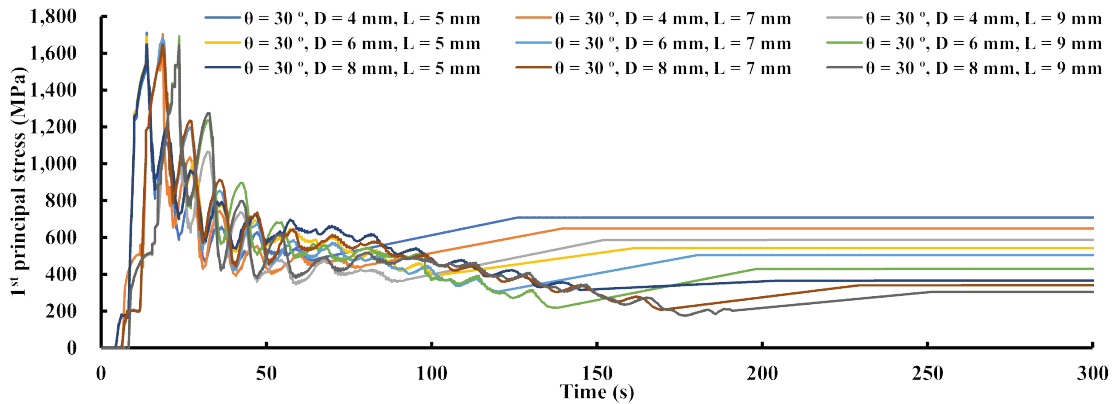
Fig. 24 Effect of maximum 1st principal stress between processes according straight repair ($\theta = 45^\circ$)

나. 주응력 이력 및 크기 비교 및 분석

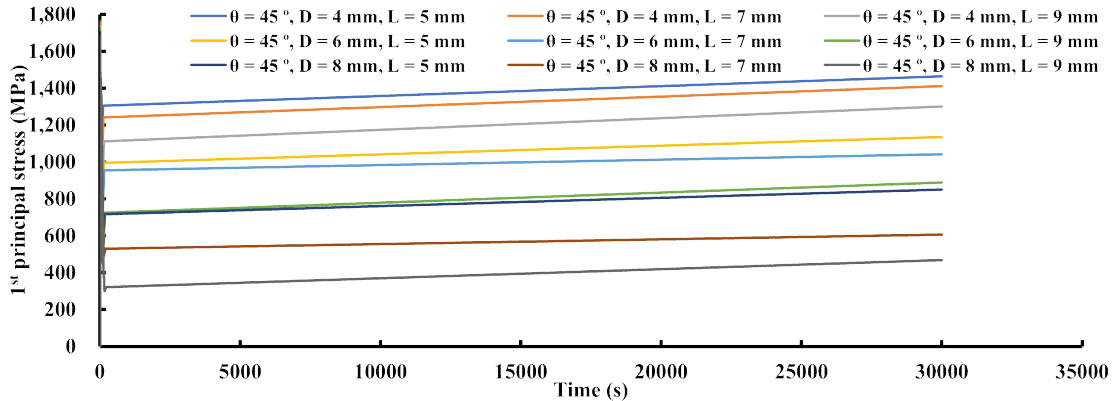
Fig. 25 는 2 차원 유한요소 해석을 통한 직선 보수 적층시 각도에 따른 주응력 이력에 대한 그래프이다. Fig. 25 에서 (a) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 300 초까지의 시간선이다. (c) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (d) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 300 초까지의 시간선이다.



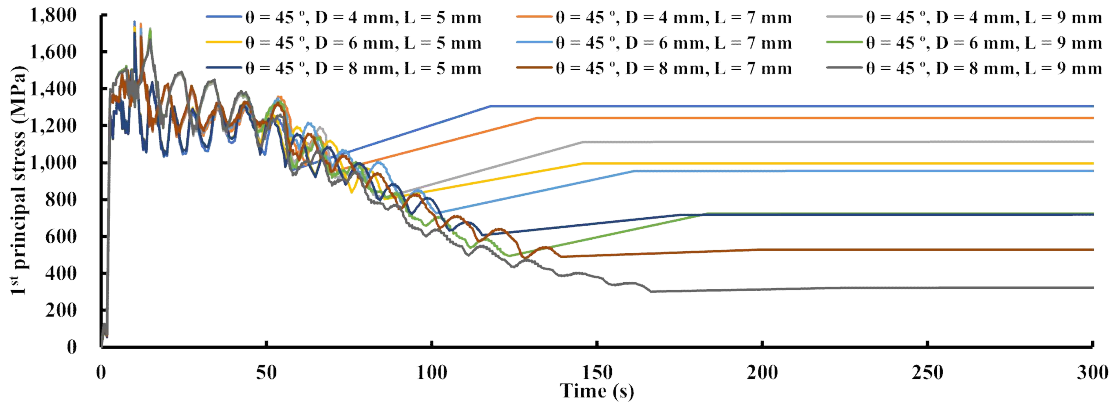
(a) 1st principal stress history for 35,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(b) 1st principal stress history for 300 sec ($\theta = 30^\circ$)



(c) 1st principal stress history for 35,000 sec ($\theta = 45^\circ$)



(d) 1st principal stress history for 300 sec ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 25 1st principal stress history according to the angle (straight repair)

Fig. 26 은 직선 보수 적층시 각도에 따른 18 가지 주응력 이력에 대해 기저부 각도 및 깊이에 따라 분류한 그래프이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (b) 는 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (c) 는 기저부 각도 30° , 깊이 8 mm 에 대한 그래프, (d) 는 기저부 각도 45° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (e) 는 기저부 각도 45° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (f) 는 기저부 각도 45° , 깊이 8 mm 에 대한 그래프이다. Table 9 와 10 은 공정 중 최대 주응력의 값을 표로 정리한 것이다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 1,744 MPa, 길이 7 mm 에서 1,689 MPa, 길이 9 mm 에서 1,647 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 30° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 1,703 MPa, 길이 7 mm 에서 1,681 MPa, 길이 9 mm 에서 1,646 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 1,693 MPa, 길이 7 mm 에서 1,679 MPa, 길이 9 mm 에서 1,603 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 1,763 MPa, 길이 7 mm 에서 1,754 MPa, 길이 9 mm 에서 1,728 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 1,732 MPa, 길이 7 mm 에서 1,723 MPa, 길이 9 mm 에서 1,718 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 1,702 MPa, 길이 7 mm 에서 1,683 MPa, 길이 9 mm 에서 1,666 MPa 로 나타났다. 공정 간 최대 주응력 발생 시간은 기저부 깊이와는 관계없이 각도 및 길이에 따라 다르게 나타났다. 기저부 각도 30° 및 길이 5 mm 의 경우 13.79 초, 기저부 각도 30° 및 길이 7 mm 의 경우 18.71 초, 기저부 각도 30° 및 길이 9 mm 의 경우 23.68 초에 최대 주응력이 발생했으며, 기저부 각도 45° 및 길이 5

mm 의 경우 10.13 초, 기저부 각도 45 ° 및 길이 7 mm 의 경우 12.07 초, 기저부 각도 45 ° 및 길이 9 mm 의 경우 14.827 초에 최대 주응력이 발생했다. 최대 주응력 발생 시간은 기저부 각도가 클수록 빠른 시간에 나타났으며, 길이가 길어질수록 느린 시간에 나타남을 알 수 있었다. Fig. 27 은 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 직선 보수 적층시 공정 간 발생한 최대 주응력의 값 변화이다. 기저부 각도가 감소함에 따라 최대 주응력 크기는 감소하였다. 또한 기저부 깊이 및 길이가 증가함에 따라 공정 간 발생한 최대 주응력은 더 낮게 나타났다. 기저부 깊이에 비해 기저부 길이에 따른 최대 주응력 감소 폭이 더 작은 것을 바탕으로 기저부 깊이가 최대 주응력 감소에 대해 더 영향력이 있다는 것을 알 수 있었다.

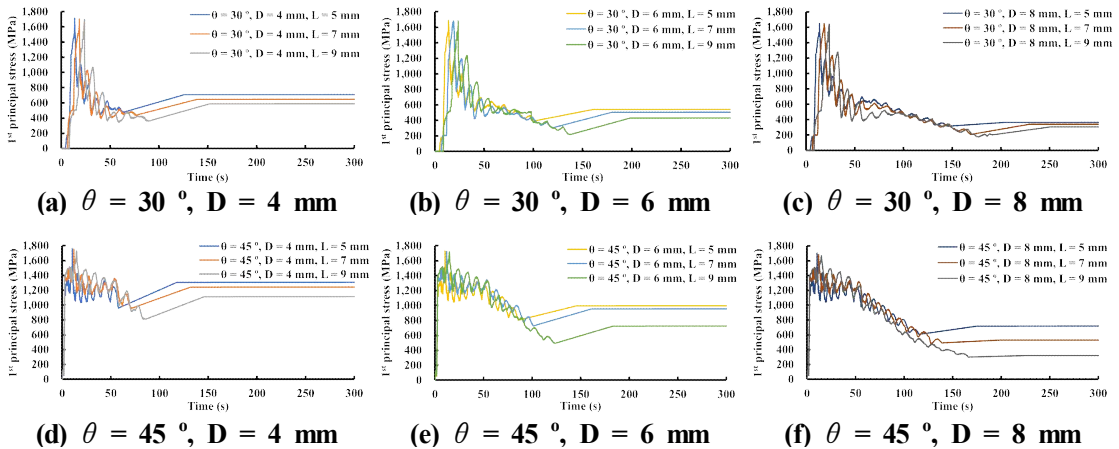


Fig. 26 1st principal stress history for 300 sec according to the angle (straight repair)

Table 9 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to straight repair ($\theta = 30^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 30^\circ$	L = 5 mm	1,710 MPa	1,689 MPa	1,647 MPa
	L = 7 mm	1,703 MPa	1,681 MPa	1,646 MPa
	L = 9 mm	1,693 MPa	1,679 MPa	1,643 MPa

Table 10 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to straight repair ($\theta = 45^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 45^\circ$	L = 5 mm	1,763 MPa	1,732 MPa	1,702 MPa
	L = 7 mm	1,754 MPa	1,723 MPa	1,683 MPa
	L = 9 mm	1,728 MPa	1,718 MPa	1,666 MPa

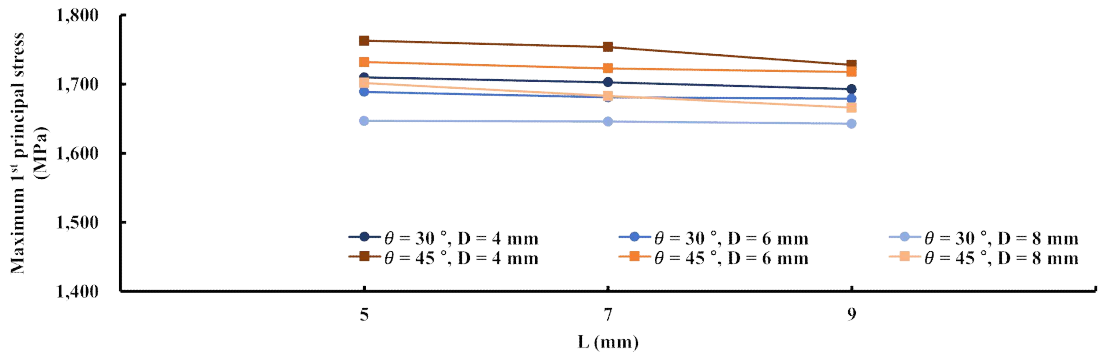


Fig. 27 Influence of angle and depth of deposited region and length on maximum 1st principal stress (straight repair)

다. 변형 위치 비교 및 분석

Figs. 28 과 29 는 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 직선 보수 적층시 적층이 끝난 후 발생한 변형 발생 위치 및 분포이다. Fig. 28 의 경우 기저부 30° 에 따른 분포이며, Fig. 29 의 경우 기저부 45° 에 따른 분포이다. 변형 특성을 자세하게 알아보기 위하여 깊이에 따라 나누었으며, Figs. 31 과 32 에서 (a) 는 4 mm, (b) 는 6 mm, (c) 는 8 mm 이다. 기저부 30° 및 45° 모두 최대 변형 위치는 적층부 끝단에서 발생하였다. 변형 위치는 기저부 각도, 깊이 및 길이에 따라 바뀌지 않았다.

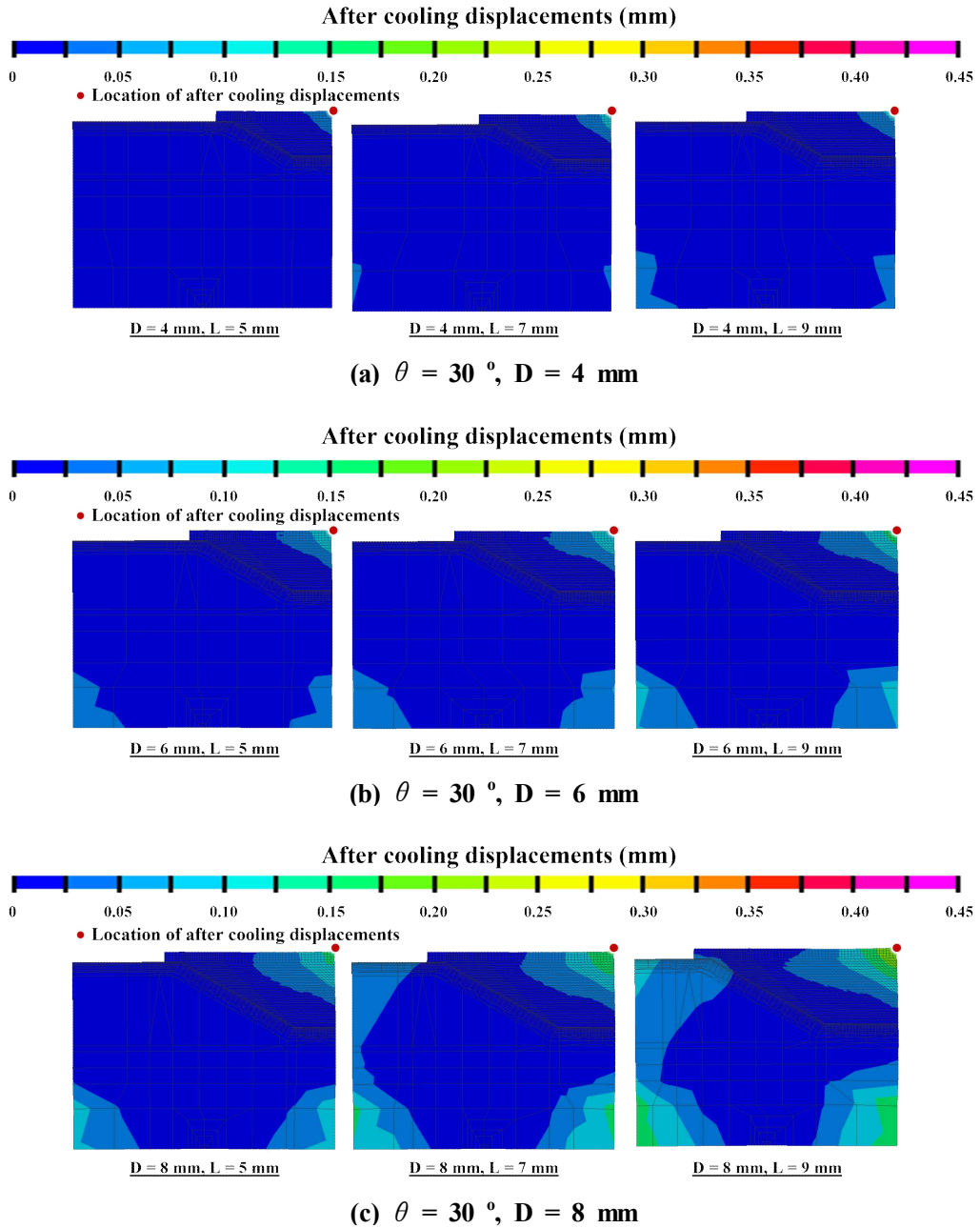


Fig. 28 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according straight repair ($\theta = 30^\circ$)

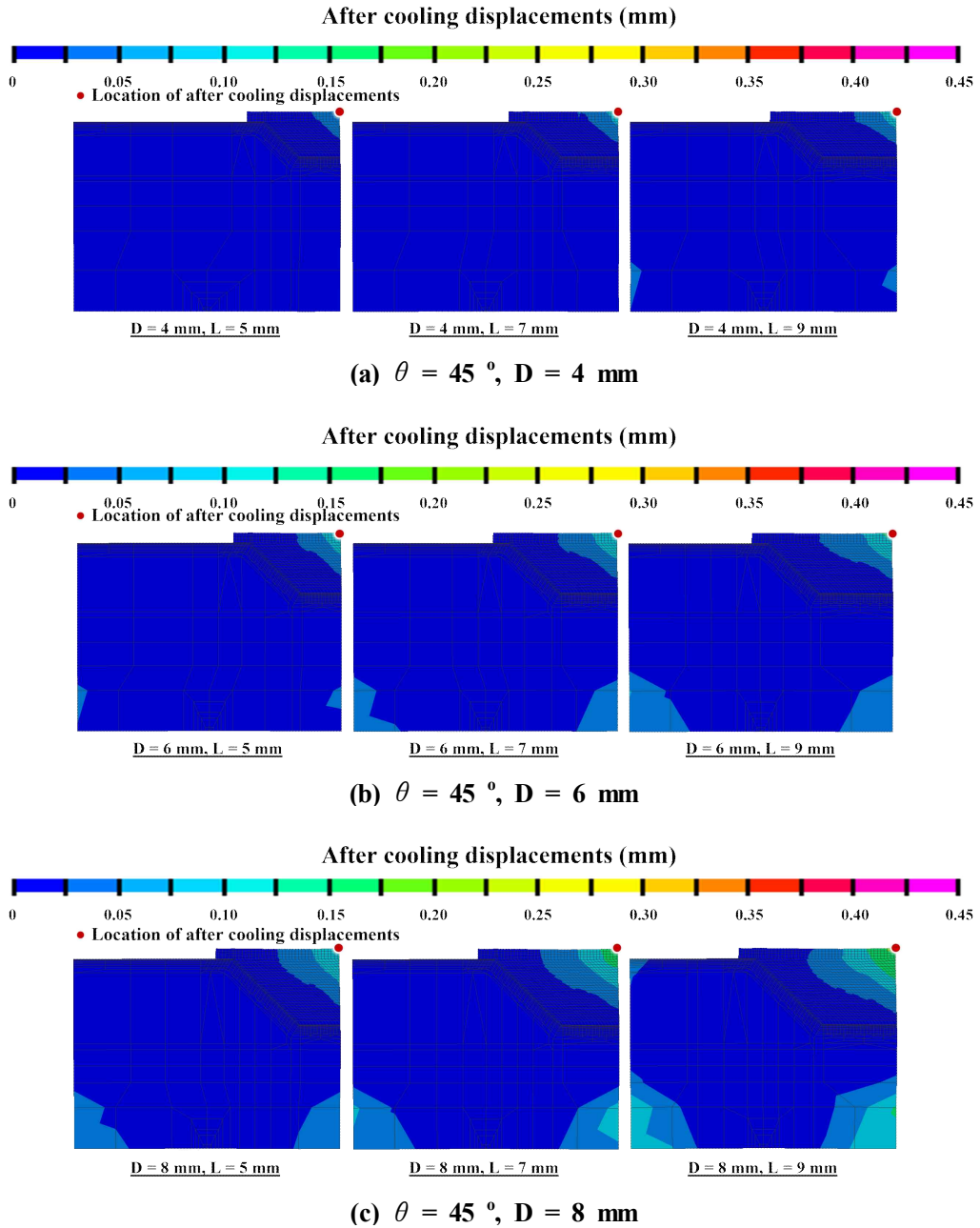
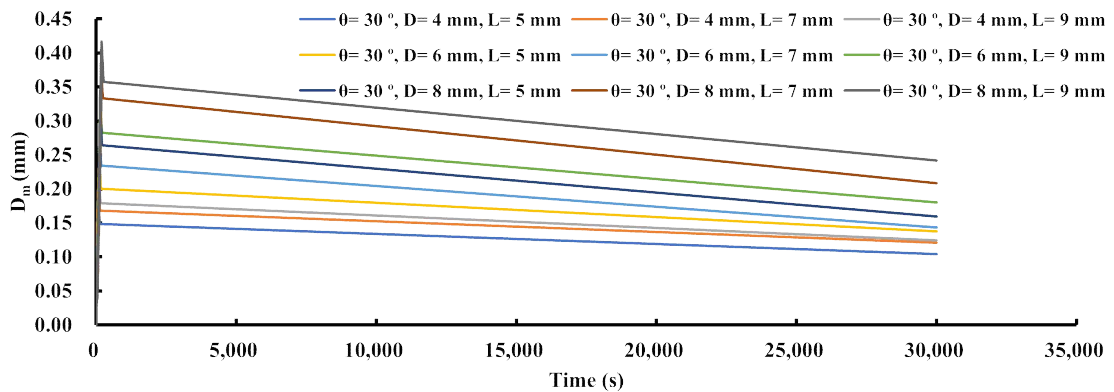


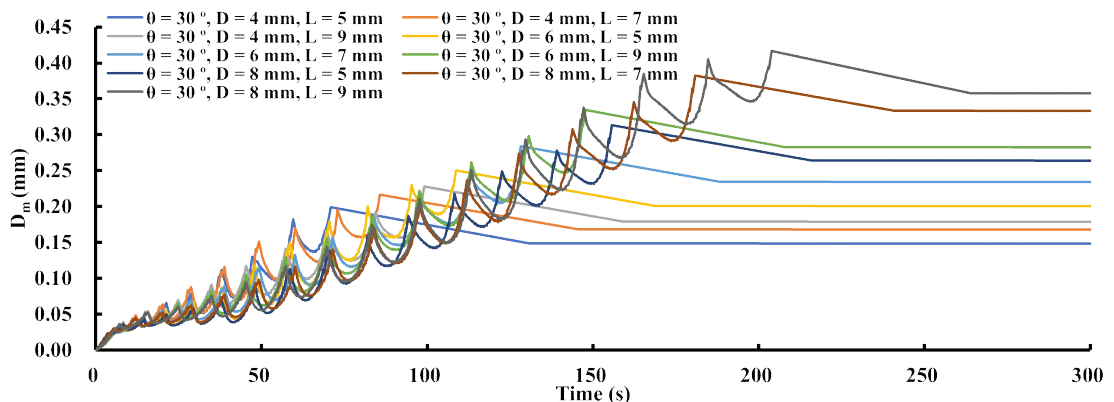
Fig. 29 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according straight repair ($\theta = 45^\circ$)

라. 변형 이력 및 크기 비교 및 분석

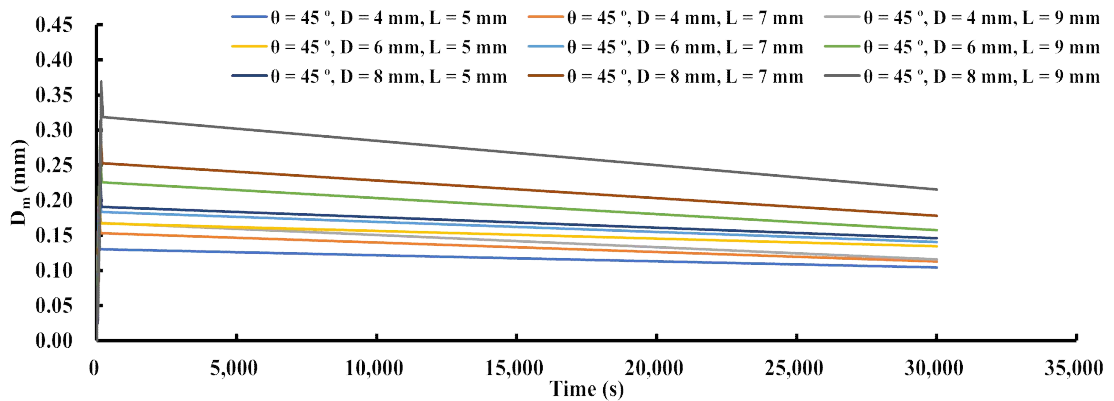
Fig. 30 은 열-기계 연계 해석을 통해 직선 보수 적층시 각도에 따른 변형 이력 그래프이다. Fig. 30 에서 (a) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정 간 변형의 가장 높은값을 볼 수 있는 시간인 300 초까지의 시간선이다. (c) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (d) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정 간 변형의 가장 높은값을 볼 수 있는 시간인 300 초까지의 시간선이다.



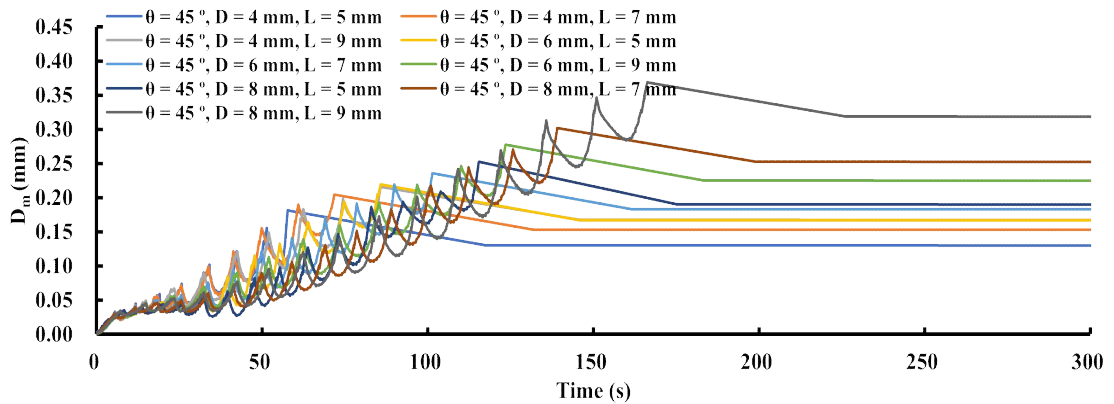
(a) Time history of displacements for 35,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(b) Time history of displacements for 300 sec ($\theta = 30^\circ$)



(c) Time history of displacements for 35,000 sec ($\theta = 45^\circ$)



(d) Time history of displacements for for 300 sec ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 30 Time history of displacements according to the angle (straight repair)

Fig. 31 은 직선 보수 적층시 각도에 따른 18 가지 변형 이력에 대해 기저부 각도 및 깊이에 따라 분류한 그래프이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (b) 는 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (c) 는 기저부 각도 30° 깊이 8 mm 에 대한 그래프, (d) 는 기저부 각도 45° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (e) 는 기저부 각도 45° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (f) 는 기저부 각도 45° 깊이 8 mm 에 대한 그래프이다.

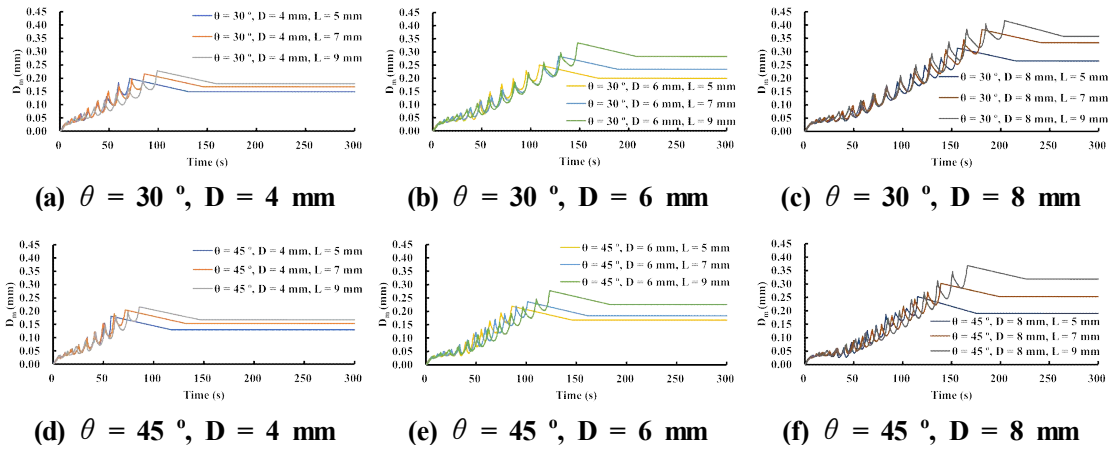


Fig. 31 Time history of displacements for 300 sec according to the angle (straight repair)

Table 11 과 12 는 공정 후 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 변형의 값을 표로 정리한 것이다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.10 mm, 길이 7 mm 에서 0.12 mm, 길이 9 mm 에서 0.12 mm 로 나타났다. 기저부 각도 30° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.14 mm, 길이 7 mm 에서 0.14 mm, 길이 9 mm 에서 0.18 mm 로 나타났다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.16 mm, 길이 7 mm 에서 0.21 mm, 길이 9 mm 에서 0.24 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.10 mm, 길이 7 mm 에서 0.11 mm, 길이 9 mm 에서 0.11 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.13 mm, 길이 7 mm 에서 0.14 mm, 길이 9 mm 에서 0.16 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.15 mm, 길이 7 mm 에서 0.18 mm, 길이 9 mm 에서 0.22 mm 로 나타났다. 최대 변형 발생 시간은 기저부 각도, 깊이 및 길이에 관계 없이 모두 동일하게 적층이 끝난 시점이었다. Fig. 32 은 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 직선 보수 적층시 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 발생한 변형의 값 변화이다. 기저부 각도가 감소함에 따라 변형 크기는 증가하였다. 또한 기저부 깊이 및 길이가 증가함에 따라 변형 크기는 더 크게 나타났다. 기저부 깊이에 비해 기저부 길이에 따른 변형 증가폭이 더 작은 것을 바탕으로 기저부 깊이가 최대 변형 크기 증가에 대해 더 영향력이 있다는 것을 알 수 있었다.

Table 11 Displacement value during elastic recovery and cooling process according to straight repair ($\theta = 30^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 30^\circ$	L = 5 mm	0.10 mm	0.14 mm	0.16 mm
	L = 7 mm	0.12 mm	0.14 mm	0.21 mm
	L = 9 mm	0.12 mm	0.18 mm	0.24 mm

Table 12 Displacement value during elastic recovery and cooling process according to straight repair ($\theta = 45^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 45^\circ$	L = 5 mm	0.10 mm	0.13 mm	0.15 mm
	L = 7 mm	0.11 mm	0.14 mm	0.18 mm
	L = 9 mm	0.11 mm	0.16 mm	0.22 mm

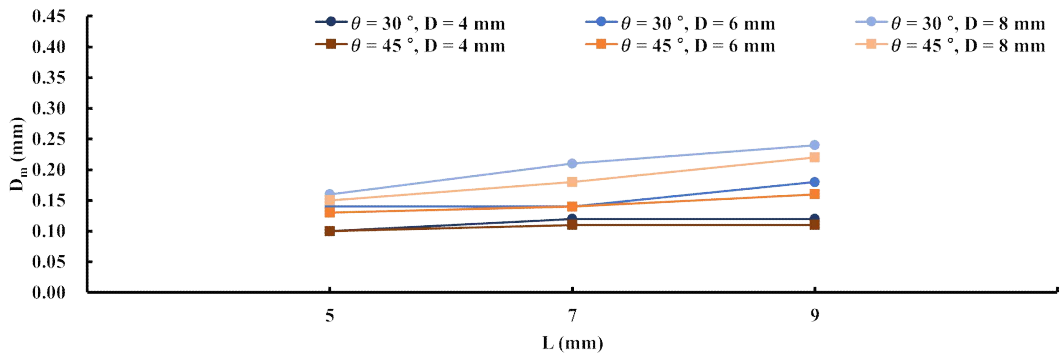
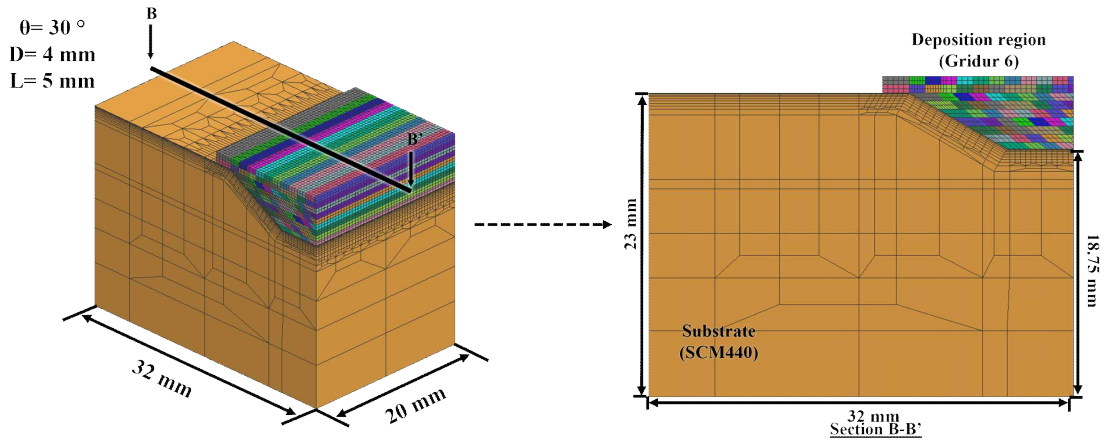
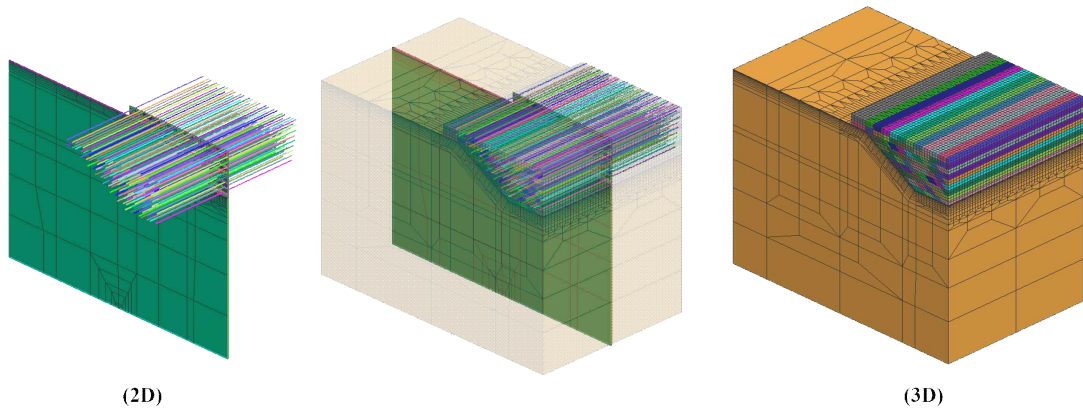


Fig. 32 Influence of angle and depth of deposited region and length on displacements (straight repair)



(a) 3D finite element analysis model



(b) 2D & 3D finite element analysis model deposition pass

Fig. 33 Finite element analysis model of 3D (straight repair)

나. 경계 조건 데이터 도출

유한요소 해석을 위한 경계 조건은 Fig. 34 와 같이 구분된다. 자연 대류가 상하좌우면으로 적용되며, 열 손실에 따른 값이 상면에 적용된다. 고정조건은 하면으로부터 5 mm 로 적용하였으며, 3 차원 유한요소 해석 모델은 2 차원 해석과 동일한 자연대류가 6 면에 적용되었다.

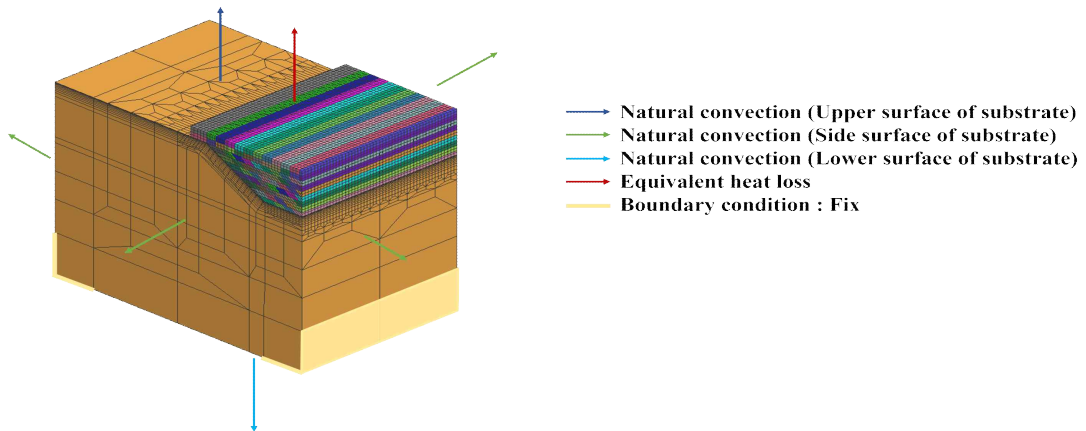
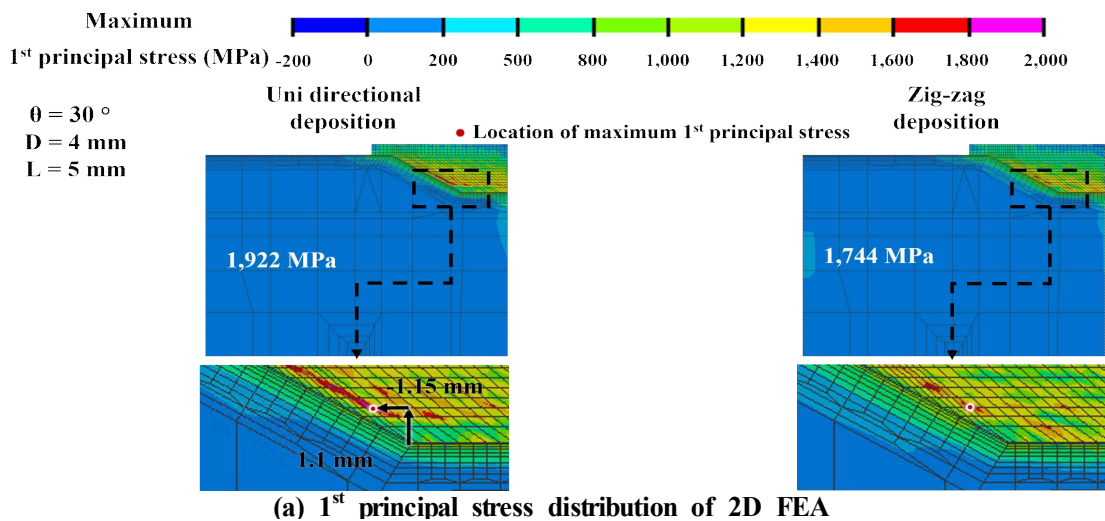
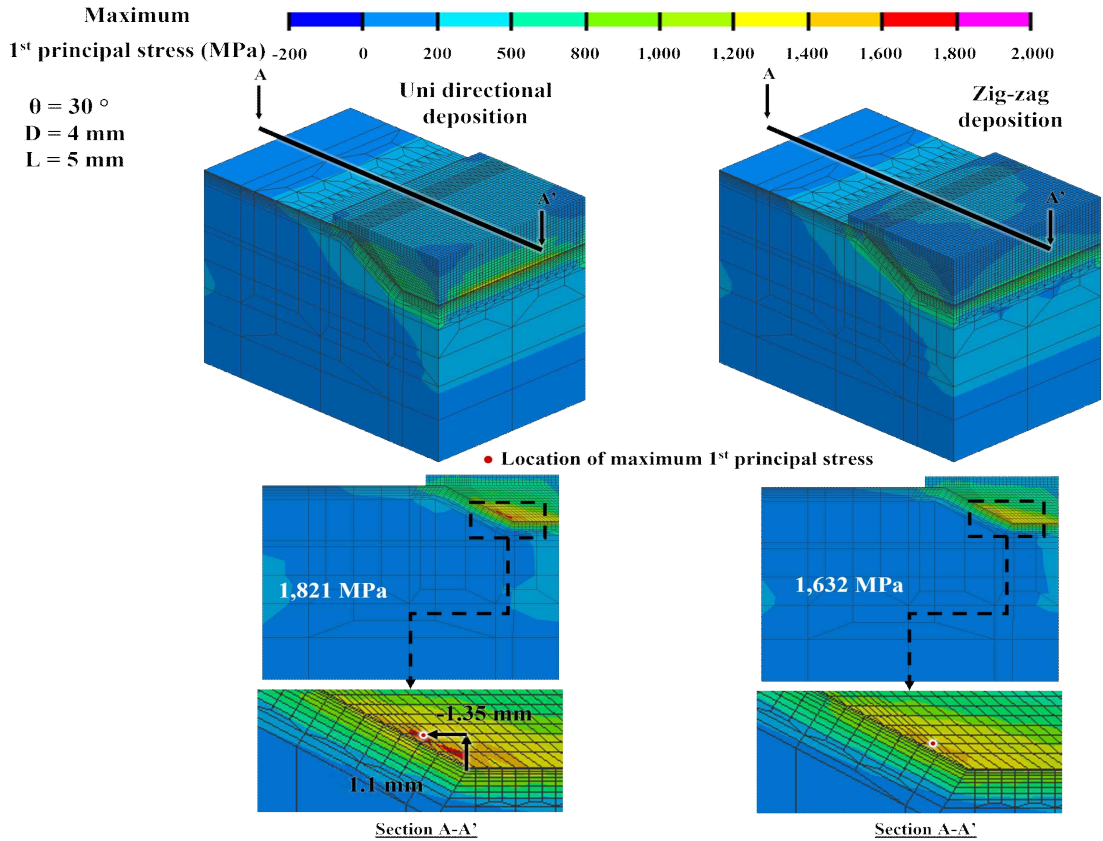


Fig. 34 Application region of the convection on the surface of the substrate
(3D FEA straight repair)

다. 주응력 특성 비교 및 분석

Fig. 35 는 공정 간 최대 주응력의 위치 분포이다. 3D 의 경우 공정 중 정상 상태 영역으로 판단되는 부분을 반으로 잘라 확인하였다. 2D 의 경우 기준점으로부터 수직거리 1.1 mm, 수평거리 1.15 mm 에서 발견되었으며, 3D 의 경우 기준점으로부터 수직거리 1.1 mm, 수평거리 1.35 mm 에서 발견되었다. 조금의 위치 차이는 있었지만 2D 와 3D 모두 최대 주응력의 위치는 적층부에서 발견되었다. 이는 기저부인 SCM 440 과 적층부 G6 의 연신율 및 경도의 차이라고 사료된다.



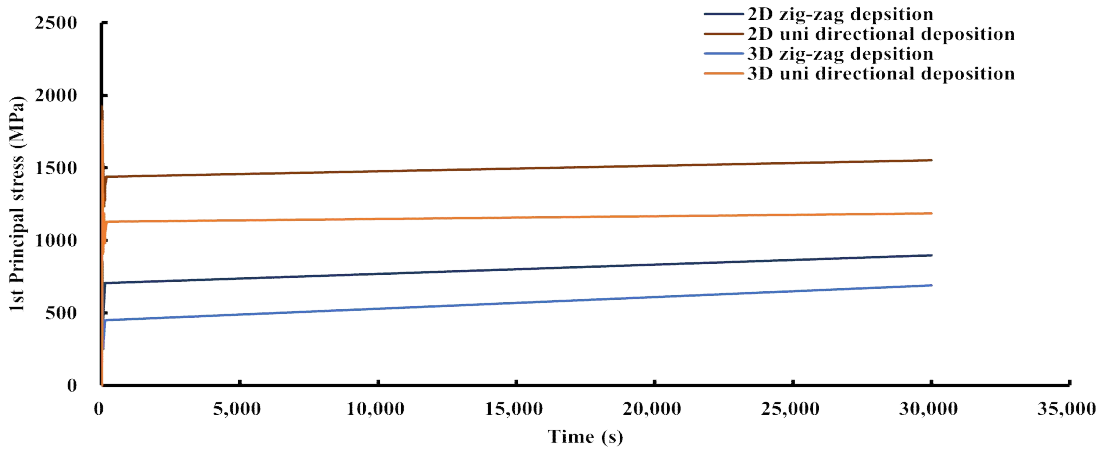


(b) 1st principal stress distribution of 3D FEA

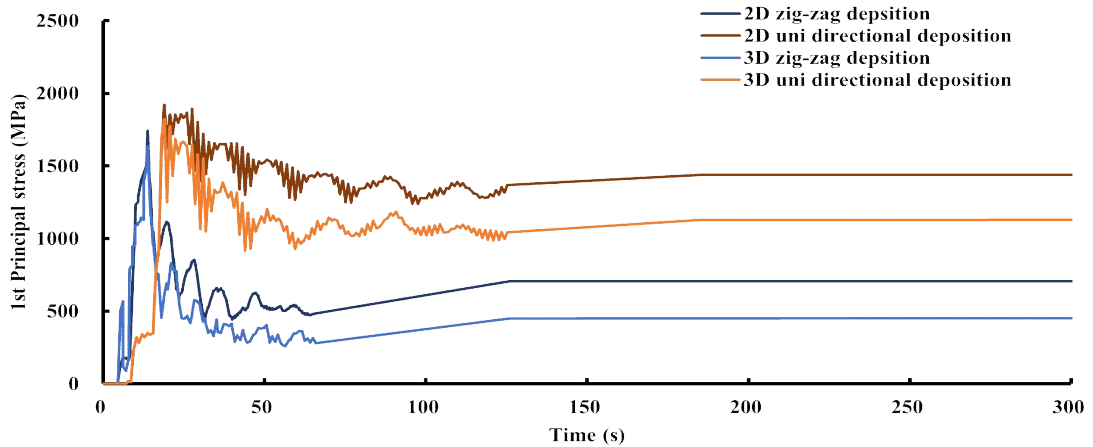
Fig. 35 1st principal stress distribution of 2D&3D FEA

Fig. 36 은 2 차원 및 3 차원 유한요소 해석을 통한 직선 보수 적층 시 주응력 이력 그래프이다. Fig. 36 에서 (a) 는 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 300 초까지의 시간선이다. Table 15 는 공정 중 최대 주응력의 값을 표로 정리한 것이다. 공정 간 발생한 최대 주응력은 2D 의 경우 한 방향 적층 시 1,922 MPa, 교차 적층 방향 적층 시 1,744 MPa 로 나타났다. 3D 의 경우 한 방향 적층 시 1,821 Mpa, 교차 적층 방향 적층 시 1,632 Mpa 로 나타났다. 공정이 끝나고 난 뒤 잔류하는 주응력은 2D 의 경우 한 방향 적층 시 1,554 MPa, 교차 적층 방향 적층 시 896 MPa 로 나타났다. 3D 의 경우 한 방향 적층 시 1,186 Mpa, 교차 적층 방향 적층 시 689 Mpa 로 나타났다. 전체적으로 3D 해석이 2D 해석에 비해 값이 낮게 나타났다. Fig. 37 은 최대 주 응력 값에 대한 차이의 그래프이다. 최대 주 응력의 경우 3D 보다 2D 에서 한 방향 적층의

값이 5.55 % 높게 나타났고 교차 적층의 값은 6.86 % 높게 나타났으며, 공정이 끝나고 난 뒤 잔류응력의 경우 3D 보다 2D 에서 한 방향 적층의 값이 31.02 % 높게 나타났고 교차 적층의 값은 30.04 % 높게 나타났다. 3 차원 해석의 적층이 진행되면서 해당 단면에서 최대 주응력이 발생하였고 2 차원 해석은 3 차원 해석의 해당 단면을 해석하기 때문에 최대 주응력 값이 비슷하였다. 또한 2 차원 해석은 길이 방향 변형이 없기 때문에 3 차원 해석과 주응력이 비슷하다가 최대 주응력 발생 후 차이가 발생하였다. 최대 주응력 발생 시간은 2D 와 3D 모두 한 방향 적층 시 18.99 초, 교차 적층 방향 적층 시 13.78 초로 나타났다. 이는 적층 방향에 따라 비드간 이동시간, 층간 이동시간이 상이해지기 때문으로 확인되었다.



(a) 1st principal stress history for 35,000 sec

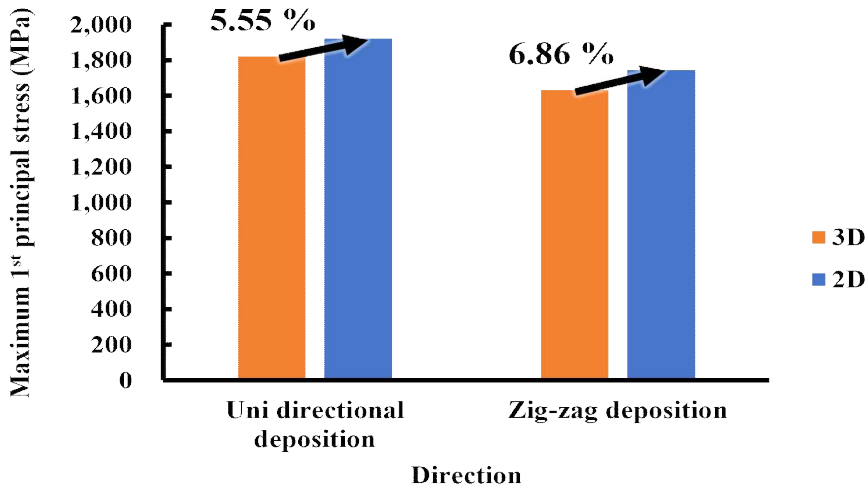


(b) 1st principal stress history for 300 sec

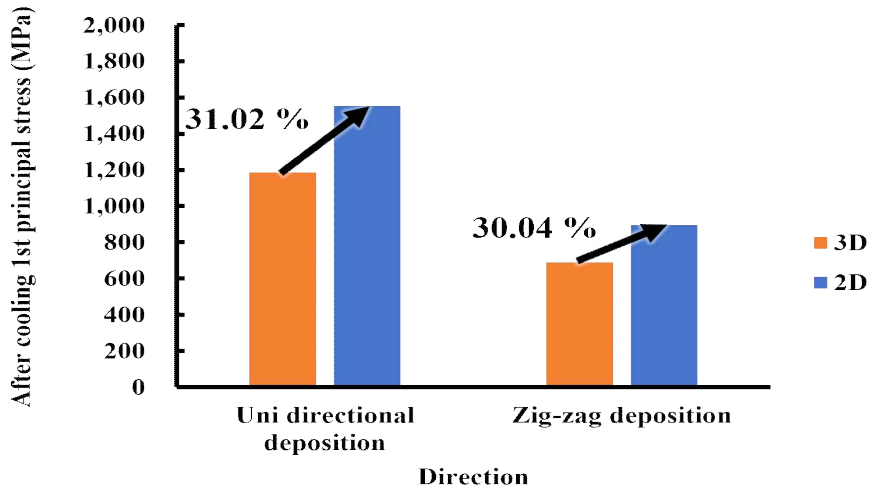
Fig. 36 1st principal stress history of 2D&3D FEA

Table 15 Maximum 1st principal stress value for 2D and 3D FEA

Deposition direction	2D FEA	3D FEA
Zig-zag deposition	1,922 MPa	1,821 MPa
Uni directional deposition	1,744 MPa	1,632 MPa



(a) Maximum 1st principal



(b) After cooling 1st principal

Fig. 37 Maximum & After cooling 1st principal stress comparison of 2D and 3D FEA

라. 해석 시간 및 해석 용량 비교 및 분석

Table 16 과 17 은 2 차원 및 3 차원 유한요소 해석 시간과 해석에 사용한 컴퓨터의 데이터 용량이다. 2 차원 해석의 경우 3 차원 해석에 비해 한 방향 및 교차 적층 해석 진행 시 모두 111 시간 정도 해석에 소요되는 시간이 적다라는 것을 알 수 있었다. 또한 해석에 필요한 컴퓨터 데이터 용량은 2 차원의 경우 3차원에 비해 한 방향 적층 해석 진행 시 13 배, 교차 적층 해석 진행 시 14 배 정도 적다는 것을 알 수 있었다. 2 차원 해석의 경우 3 차원 해석에 비해 값과 위치가 조금 상이하게 나타났지만 해석적으로 비슷한 경향과 위치를 확인할 수 있었다. 또한 해석 시간 및 컴퓨터 데이터 용량을 비교하였을 때 2 차원 해석이 현저하게 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이를 통해 해석을 진행함에 있어 2 차원 유한요소 해석이 3 차원 유한요소 해석보다 더 용이하다는 것을 알 수 있었다.

Table 16 Total simulation time for 2D and 3D FEA

Deposition direction	2D simulation time (Hours)	3D simulation time (Hours)
Zig-zag deposition	5.03	116.02
Uni directional deposition	4.02	115.06

Table 17 Results file memory sizes 2D and 3D FEA

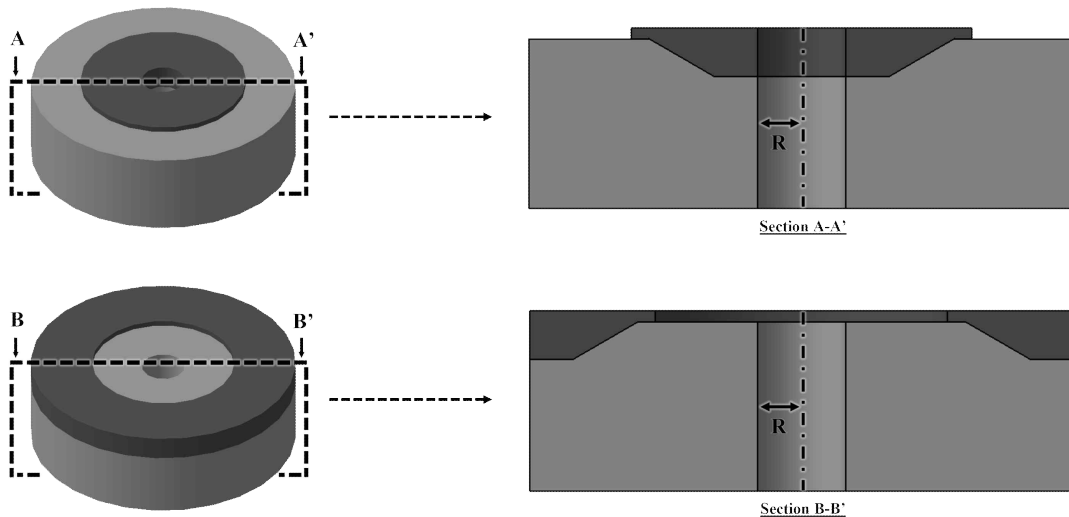
Deposition direction	Memory of 2D FEA (MB)	Memory of 3D FEA (MB)
Zig-zag deposition	31,705	427,078
Uni directional deposition	26,432	381,056

제 2 절 축 대칭 보수 적층시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석

1. 축 대칭 보수 적층시 기저부 형상에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 데이터 도출

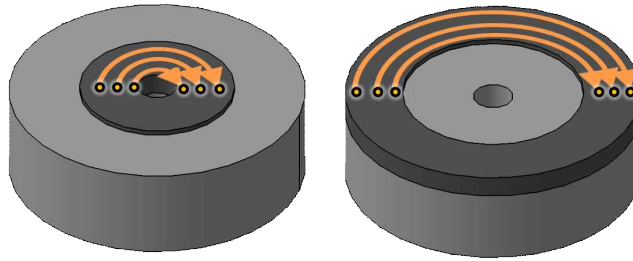
가. 축 대칭 보수 적층시 기저부 형상에 따른 모델 형상 개발

축 대칭 보수 시 기저부 경사 각도 및 적층 형상에 따른 열-기계 특성을 분석하기 위한 해석 모델은 다음과 같다. Fig. 38 (a) 는 축 대칭 보수 적층시 축 대칭 보수에 따라 내측 보수 및 외측 보수로 나누었으며, 내경 (R) 을 5 mm 설계하여 제작하였다. (b) 는 내측 및 외측 보수시 적층 방향이다. 모두 한 방향 적층을 진행하였다. (c) 는 기저부 각도 (θ), 기저부 깊이 (D) 및 기저부 길이 (L) 에 대한 설명 및 형상의 개념도이다. (d) 는 경사 각도 30° , 45° 에 따른 기저부 크기 비교이다. 모두 2 차원 유한요소 해석 시 직선 보수 적층 형상과 동일하게 형상이 나타났다. 기저부의 크기는 직선 보수 적층시 제작한 Table 3 과 같으며, 기저부 각도에 따라 30° , 45° 에 대한 형상은 Fig. 5 와 같다.



(a) Definition of chamfer angles

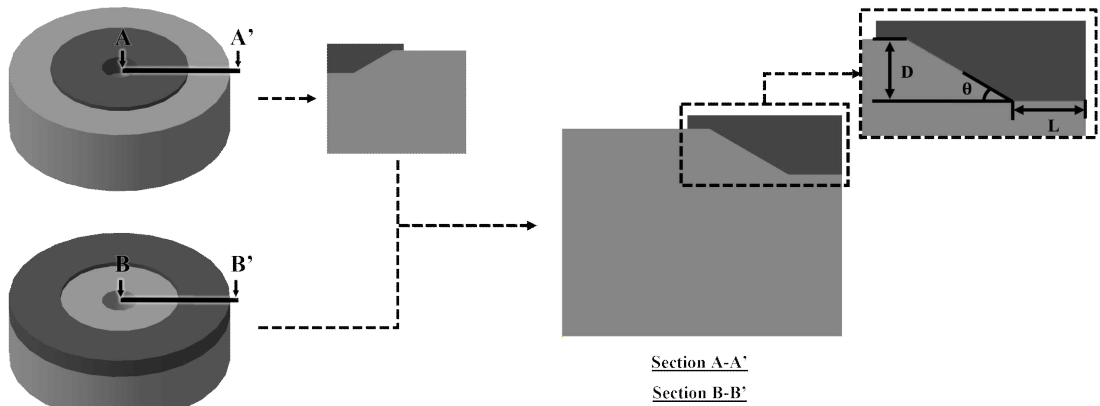
Uni directional deposition



Inside repair

Outside repair

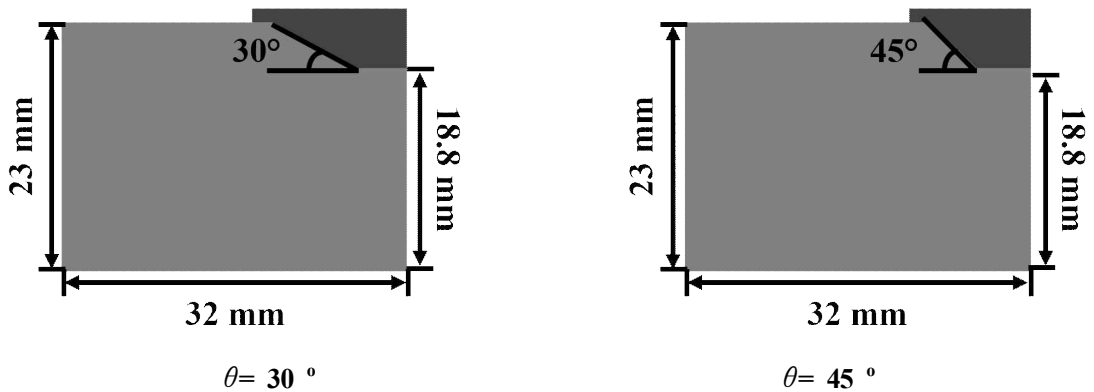
(b) Deposition strategy



Section A-A'

Section B-B'

(c) Definition of chamfer angles



$\theta = 30^\circ$

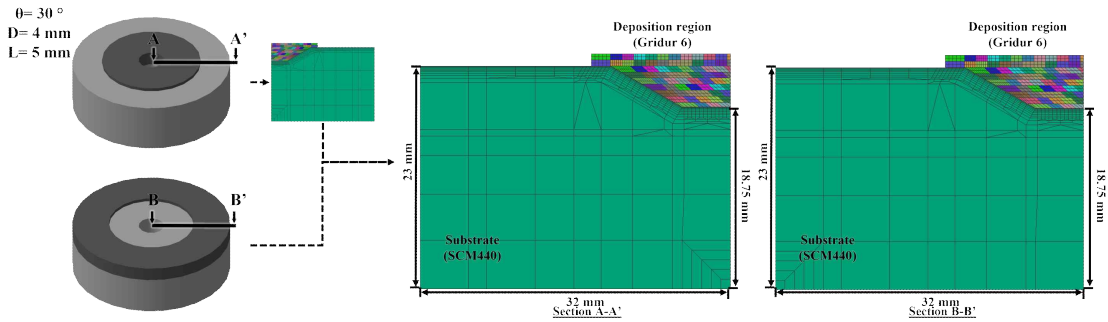
$\theta = 45^\circ$

(d) Comparison between 30° and 45°

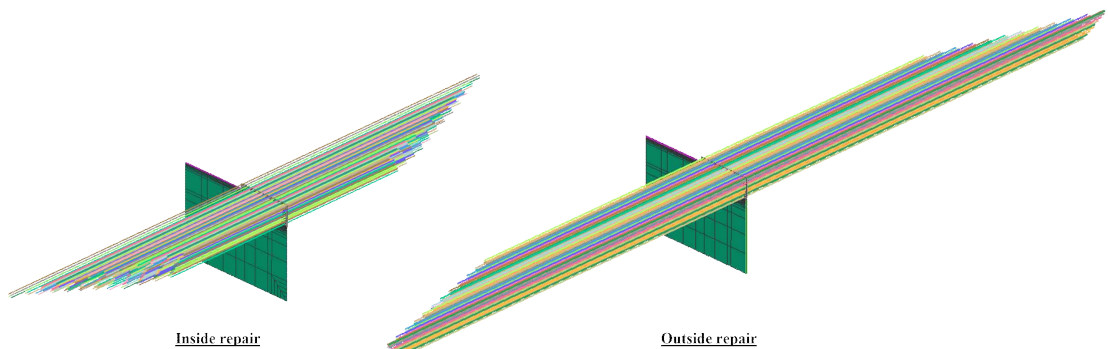
Fig. 38 Definition of chamfer angle and Substrate shape (rotation repair)

나. 2차원 유한요소 해석 모델 개발

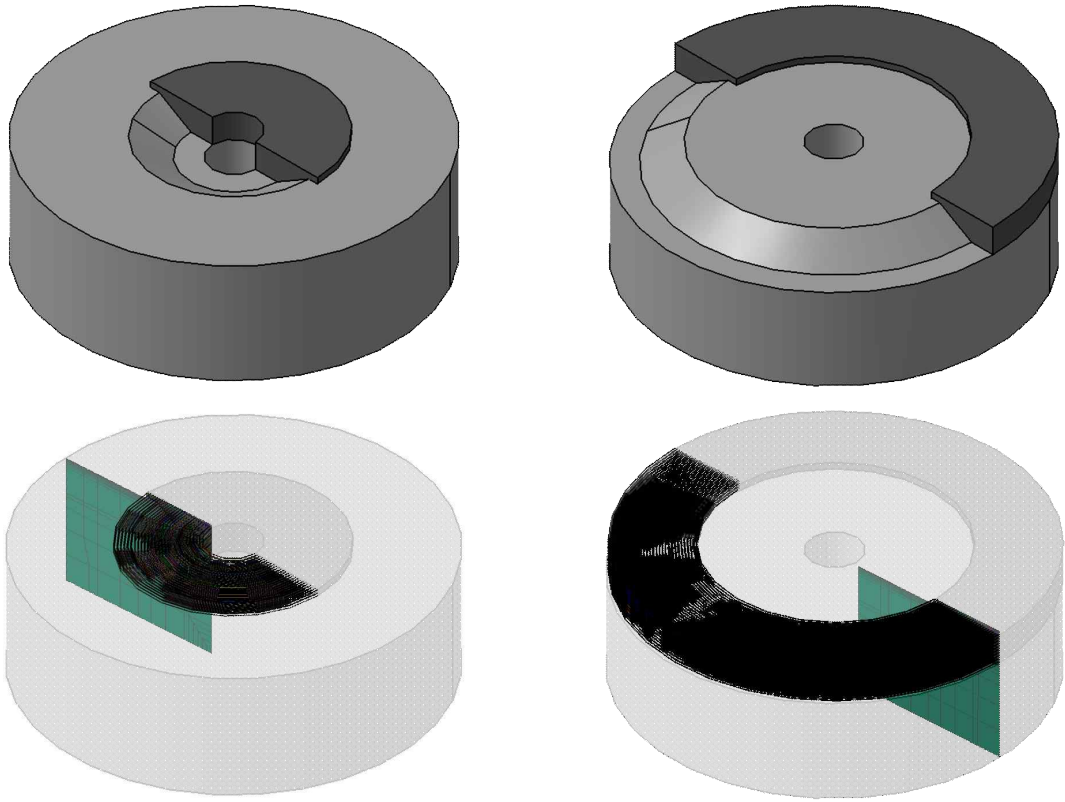
Fig. 39 는 2 차원 유한요소 모델이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm, 기저부 길이 5 mm 로 설정하여 유한요소 해석 모델을 개발한 것이며, (b) 는 적층 길이에 대한 설명이다. (c) 는 CATIA V5 로 만든 모델과의 비교를 통해 비교한 적층 길이에 대한 설명이다. 축 대칭 보수 적층과 직선 보수 적층의 차이는 적층 길이 및 해석 시간이다. 또한 해석할 때 축 대칭 해석을 적용하여 해석을 진행해야 한다. 축 대칭 보수 적층과 직선 보수 적층의 2차원 해석 모델의 형상은 동일하지만 적층 방향은 한 방향 적층이다. 해석 모델의 적층 면적은 직선 보수 적층시 제작한 Table 4 와 같으며 paths, Nodes 및 Elements 의 수는 Table 5 와 같다.



(a) 2D Finite element analysis model



(b) 2D Finite element analysis model deposition pass



Inside repair

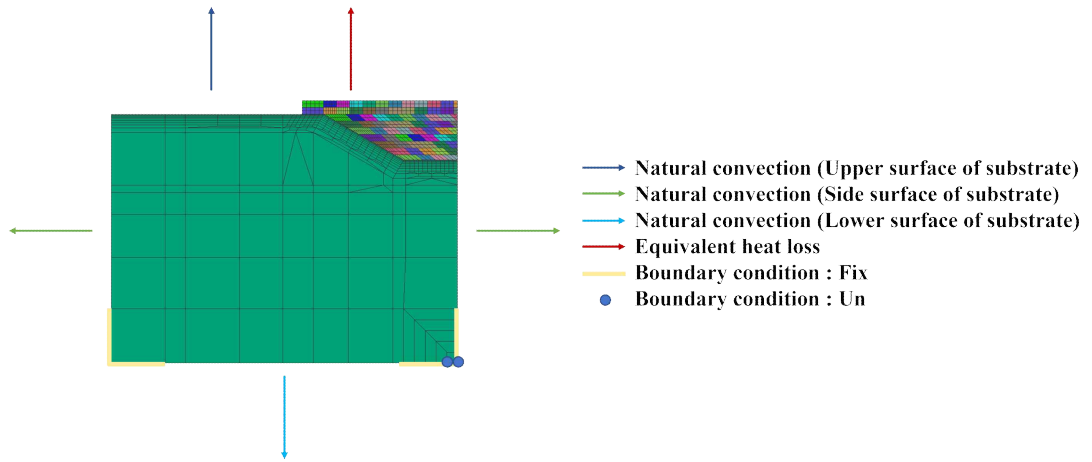
Outside repair

(c) Comparison of deposition pass with models

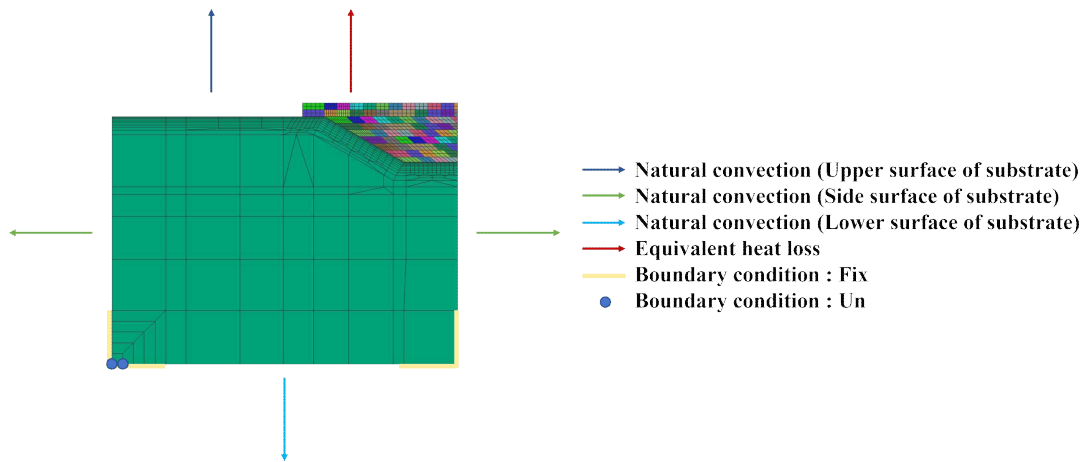
Fig. 39 Finite element analysis model of 2D (rotation repair)

다. 경계 조건 데이터 도출

축 대칭 보수 시 유한요소 해석을 위한 경계 조건은 Fig. 40 과 같다. (a) 는 내측 보수, (b) 는 외측 보수에 대한 경계 조건이다. 자연 대류가 상하좌우 면으로 적용되며, 열 손실에 따른 값이 상면에 적용된다. 고정조건은 아래쪽을 기점으로 5 mm 로 적용 하였으며, 4 면에 자연 대류가 적용되었다. 풀림 조건은 회전 시 내경을 기준으로 내측에 설정하였다. 자연 대류는 공정 진행 및 종료 이후에도 계속적으로 발생하며, 축 대칭 시 기저부의 상면, 하면 및 좌측면과 우측면의 크기 차가 있기에 이를 적용하여 자연 대류를 다르게 대입하였다. 각 조건을 적용한 자연 대류는 Fig. 41 과 같다.

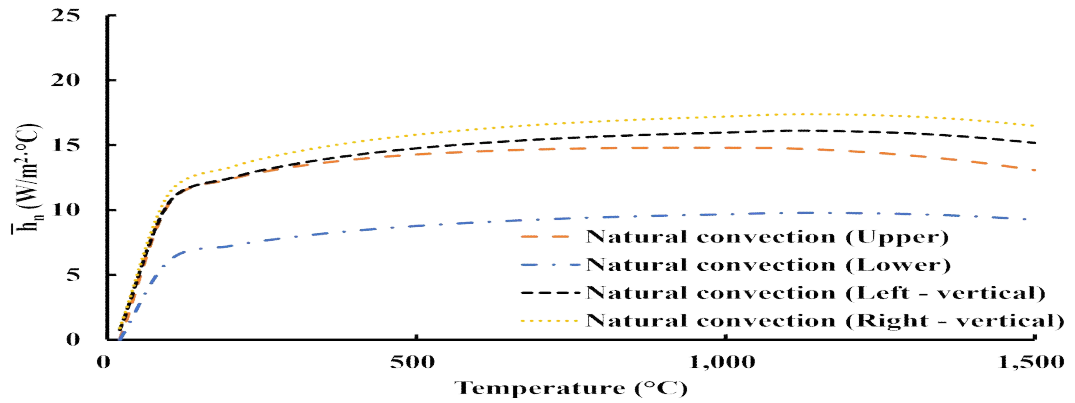


(a) Inside repair

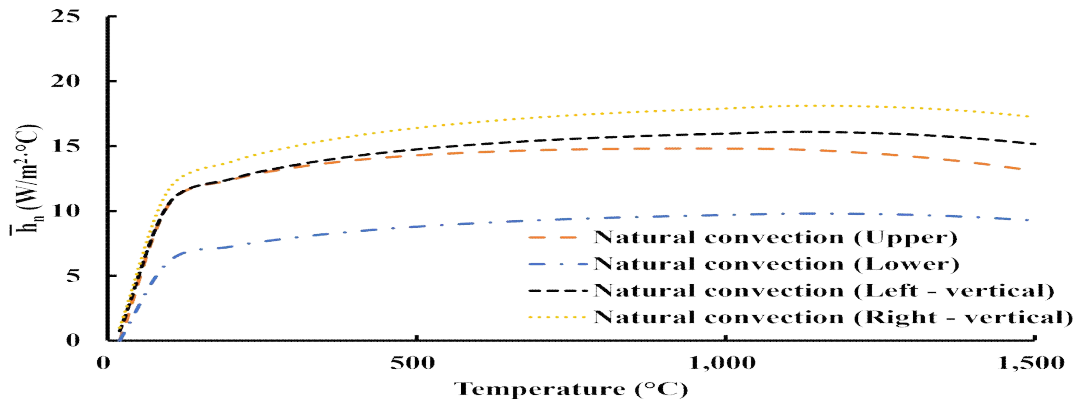


(a) Outside repair

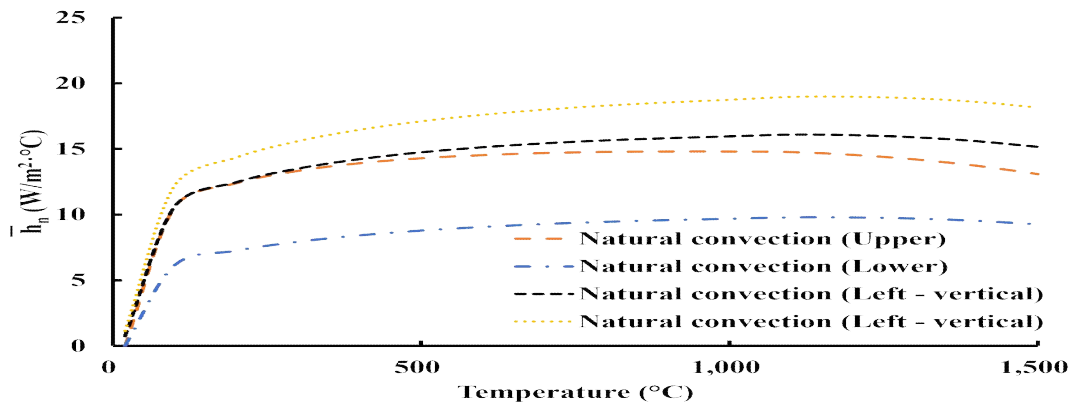
Fig. 40 Application region of the convection on the surface of the substrate (rotation repair)



(a) Substrate depth 4 mm



(b) Substrate depth 6 mm



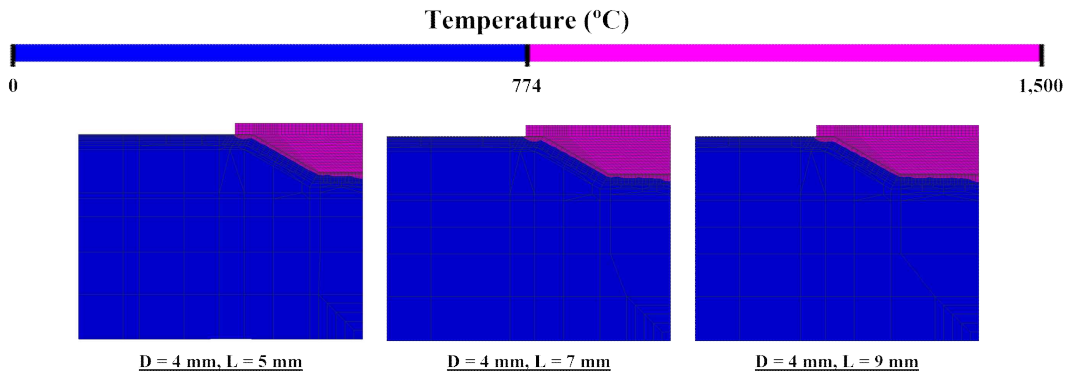
(c) Substrate depth 8 mm

Fig. 41 Temperature dependent natural convection coefficient (rotation repair)

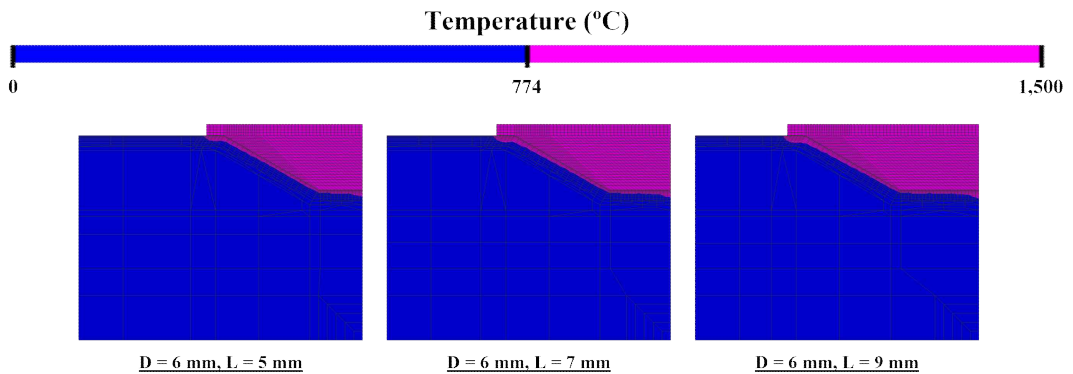
2. 내측 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석

가. 주응력 위치 비교 및 분석

Figs. 42 와 43 은 2 차원 유한요소 해석을 통한 내측 보수 적층시 각도에 따른 열전달 특성이다. Fig. 42 는 기저부 각도 30° 형상이며, Fig. 43 은 기저부 각도 45° 형상이다.



(a) $\theta = 30^\circ$, D = 4 mm



(b) $\theta = 30^\circ$, D = 6 mm

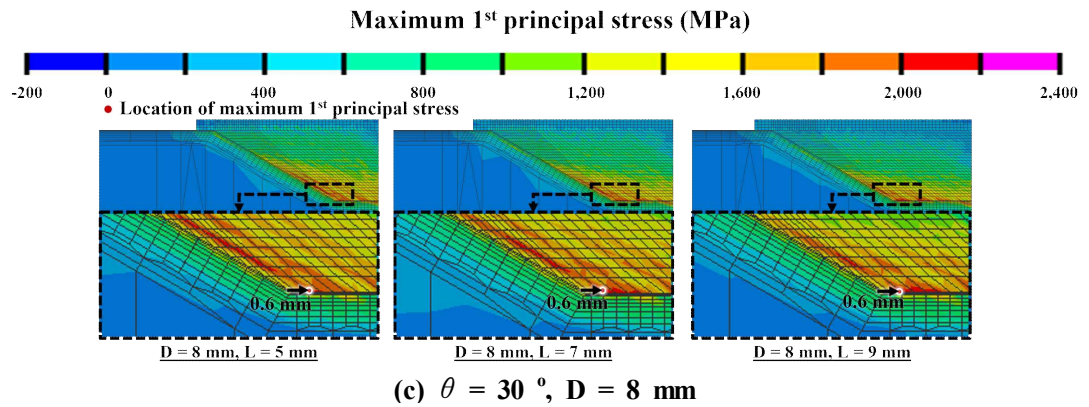
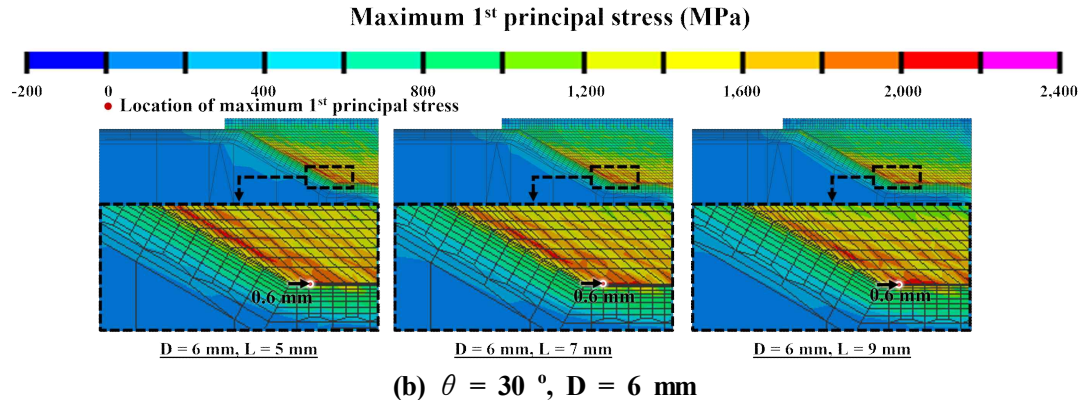
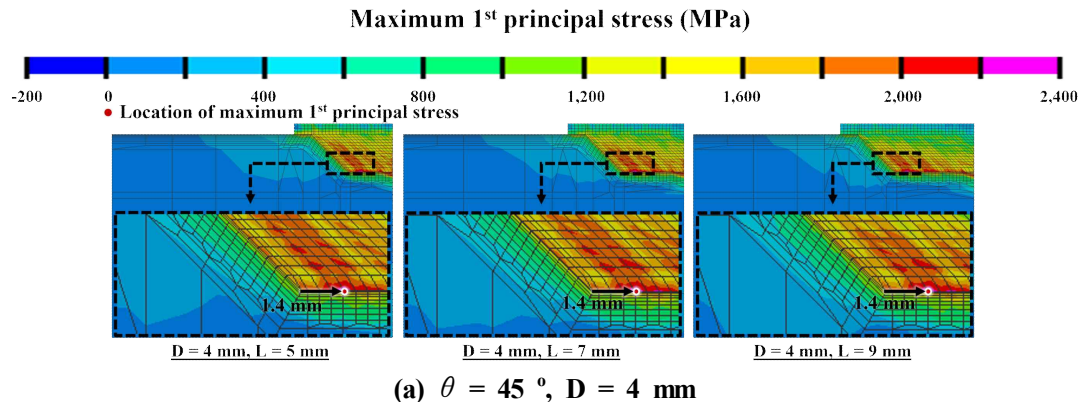


Fig. 44 Effect of maximum 1st principal stress between processes according inside repair ($\theta = 30^\circ$)



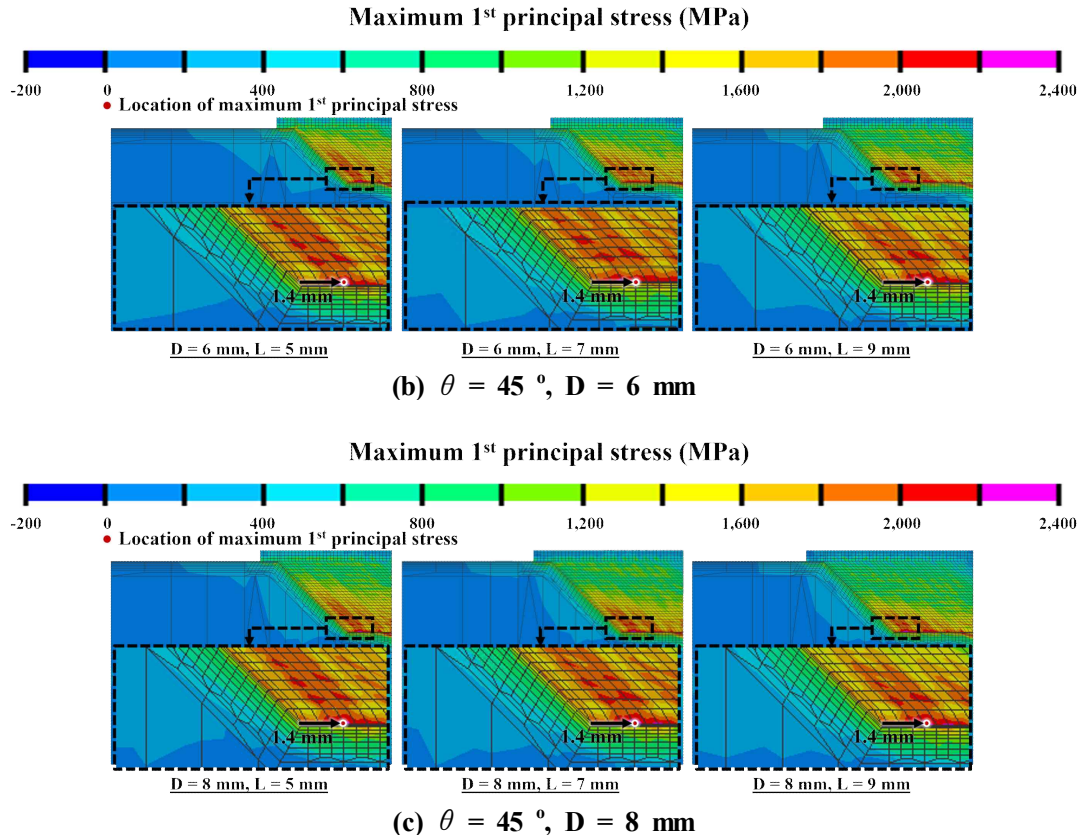
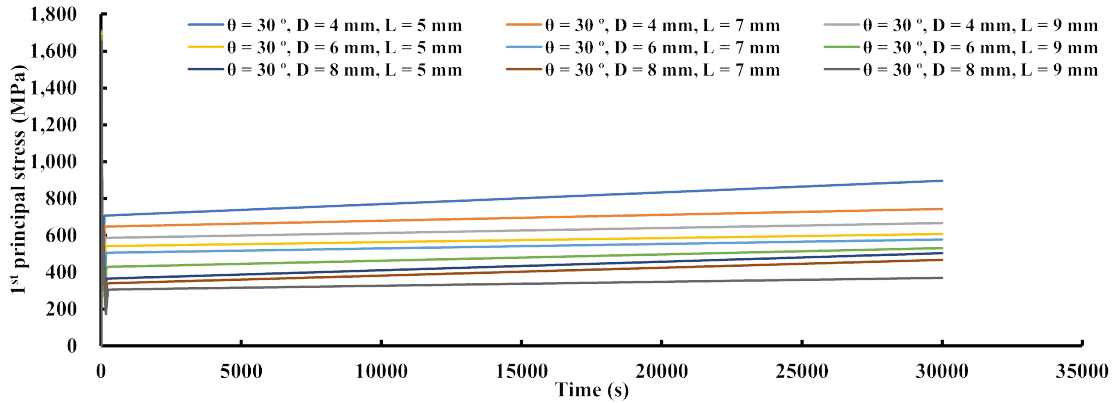


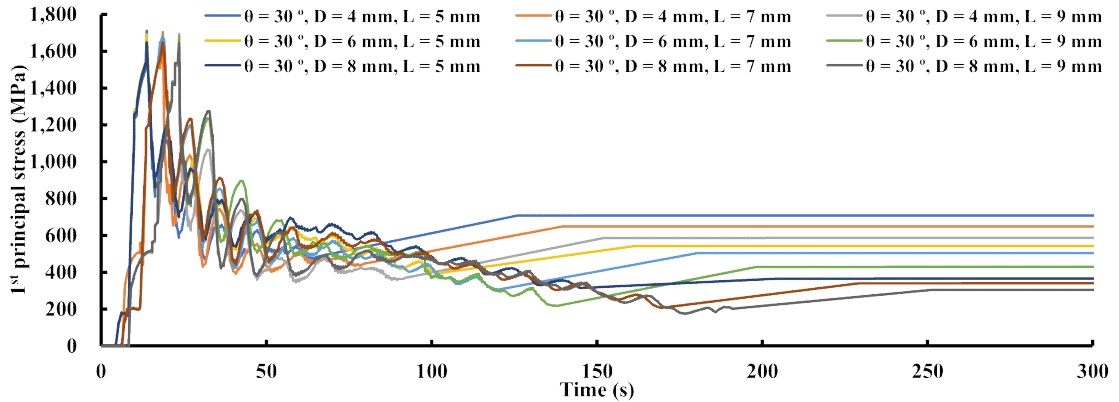
Fig. 45 Effect of maximum 1st principal stress between processes according inside repair ($\theta = 45^\circ$)

나. 주응력 이력 및 크기 비교 및 분석

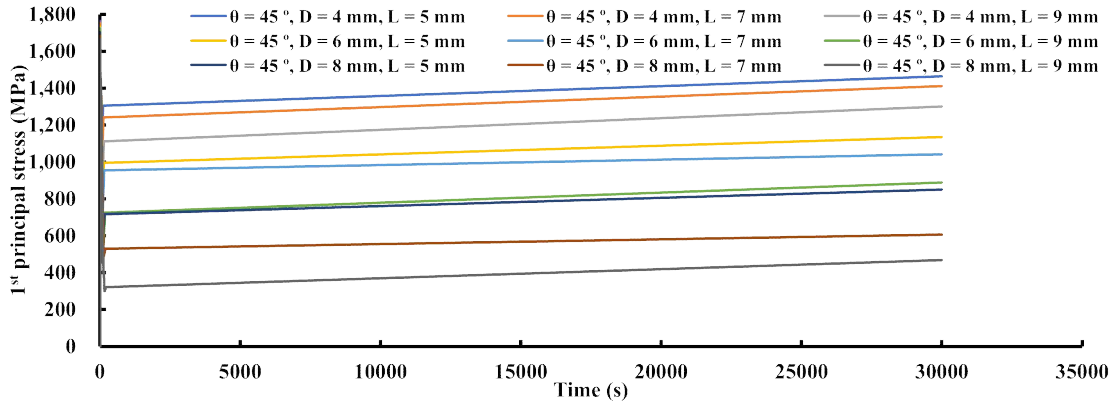
Fig. 46 는 2 차원 유한요소 해석을 통한 내측 보수 적층시 각도에 따른 주응력 이력에 대한 그래프이다. Fig. 44 에서 (a) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 1,000 초까지의 시간선이다. (c) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (d) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 1,000 초까지의 시간선이다.



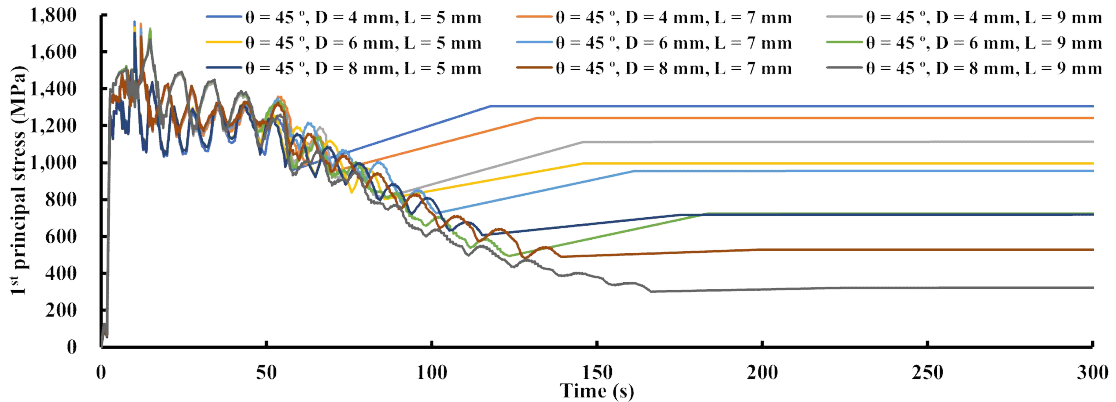
(a) 1st principal stress history for 35,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(b) 1st principal stress history for 1,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(c) 1st principal stress history for 35,000 sec ($\theta = 45^\circ$)



(d) 1st principal stress history for 1,000 sec ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 46 1st principal stress history according to the angle (inside repair)

Fig. 47 은 내측 보수 적층시 각도에 따른 18 가지 주응력 이력에 대해 기저부 각도 및 깊이에 따라 분류한 그래프이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (b) 는 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (c) 는 기저부 각도 30° , 깊이 8 mm 에 대한 그래프, (d) 는 기저부 각도 45° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (e) 는 기저부 각도 45° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (f) 는 기저부 각도 45° , 깊이 8 mm 에 대한 그래프이다. Table 18 와 19 는 공정 중 최대 주응력의 값을 표로 정리한 것이다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,215 MPa, 길이 7 mm 에서 2,205 MPa, 길이 9 mm 에서 2,188 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,198 MPa, 길이 7 mm 에서 2,178 MPa, 길이 9 mm 에서 2,166 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,084 MPa, 길이 7 mm 에서 2,083 MPa, 길이 9 mm 에서 2,079 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,328 MPa, 길이 7 mm 에서 2,301 MPa, 길이 9 mm 에서 2,246 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,278 MPa, 길이 7 mm 에서 2,261 MPa, 길이 9 mm 에서 2,231 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,234 MPa, 길이 7 mm 에서 2,201 MPa, 길이 9 mm 에서 2,124 MPa 로 나타났다. 공정간 최대 주응력 발생 시간은 기저부 깊이와는 관계없이 각도 및 깊이에 따라 다르게 나타났다. 기저부 각도 30° 및 길이 5 mm 의 경우 14.87 초, 기저부 각도 30° 및 길이 7 mm 의 경우 21.78 초, 기저부 각도 30° 및 길이 9

mm 의 경우 29.56 초에 최대 주응력이 발생했으며, 기저부 각도 45도 및 길이 5 mm 의 경우 14.02 초, 기저부 각도 45 ° 및 길이 7 mm 의 경우 20.73 초, 기저부 각도 45 ° 및 길이 9 mm 의 경우 28.30 초에 최대 주응력이 발생했다. 최대 주응력 발생 시간은 기저부 각도가 클수록 빠른 시간에 나타났으며, 길이가 길어질수록 느린 시간에 나타남을 알 수 있었다. Fig. 48 은 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 내측 보수 적층시 공정 간 발생한 최대 주응력의 값 변화이다. 기저부 각도가 감소함에 따라 최대 주응력 크기는 감소하였다. 또한 기저부 깊이 및 길이가 증가함에 따라 공정 간 발생한 최대 주응력은 더 낮게 나타났다. 기저부 깊이에 비해 기저부 길이에 따른 최대 주응력 감소 폭이 더 큰 것을 바탕으로 기저부 깊이가 최대 주응력 감소에 대해 더 영향력이 없다는 것을 알 수 있었다.

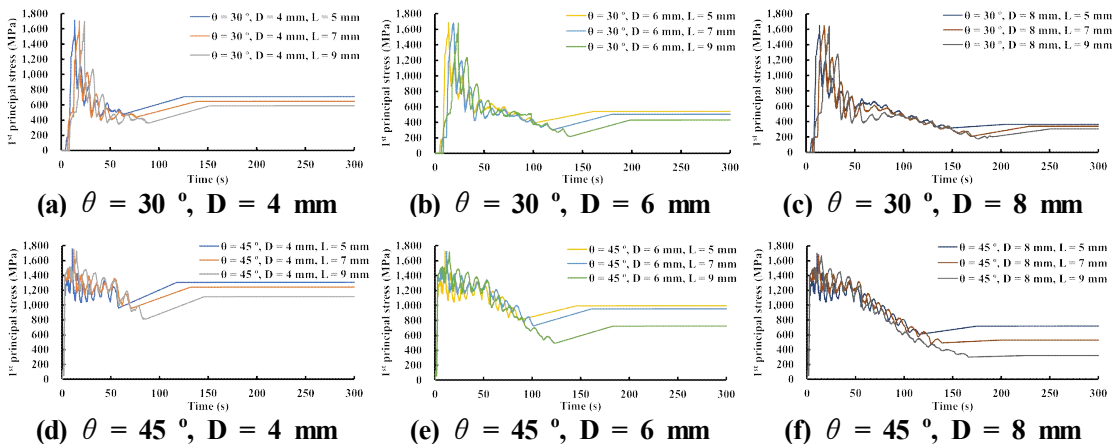


Fig. 47 1st principal stress history for 1,000 sec according to the angle (inside repair)

Table 18 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to inside repair ($\theta = 30^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 30^\circ$	L = 5 mm	2,215 MPa	2,205 MPa	2,188 MPa
	L = 7 mm	2,198 MPa	2,178 MPa	2,166 MPa
	L = 9 mm	2,084 MPa	2,083 MPa	2,079 MPa

Table 19 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to inside repair ($\theta = 45^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 45^\circ$	L = 5 mm	2,328 MPa	2,278 MPa	2,234 MPa
	L = 7 mm	2,301 MPa	2,261 MPa	2,201 MPa
	L = 9 mm	2,246 MPa	2,231 MPa	2,124 MPa

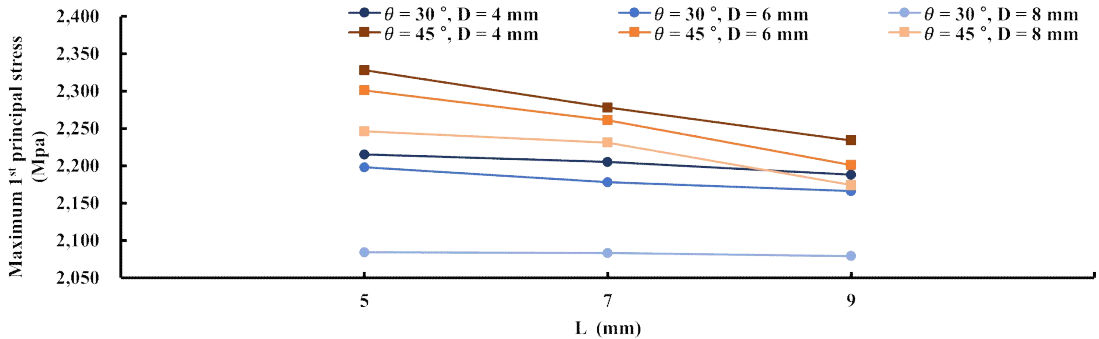


Fig. 48 Influence of angle and depth of deposited region and length on maximum 1st principal stress (inside repair)

다. 변형 위치 비교 및 분석

Figs. 49 와 50 은 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 내측 보수 적층시 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 발생한 변형 발생 위치 및 분포이다. Fig. 49 의 경우 기저부 30° 에 따른 분포이며, Fig. 50 의 경우 기저부 45° 에 따른 분포이다. 탄성 회복 및 냉각 공정 후 기저부 30° 및 45° 모두 기저부 깊이 4 mm, 길이 9 mm 부터 변형 위치 값이 바뀌었다. 이는 적층량이 기저부에 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

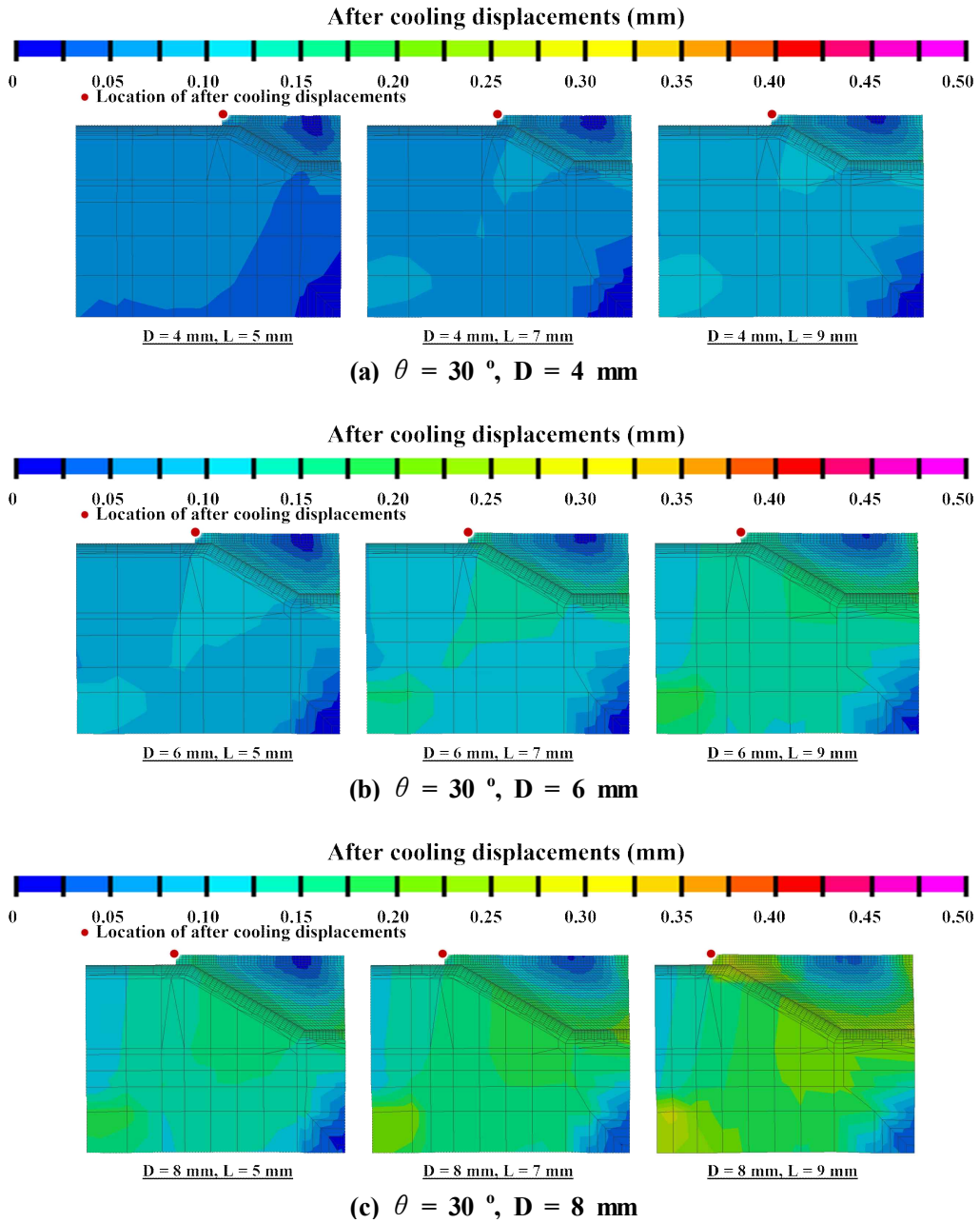


Fig. 49 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according inside repair ($\theta = 30^\circ$)

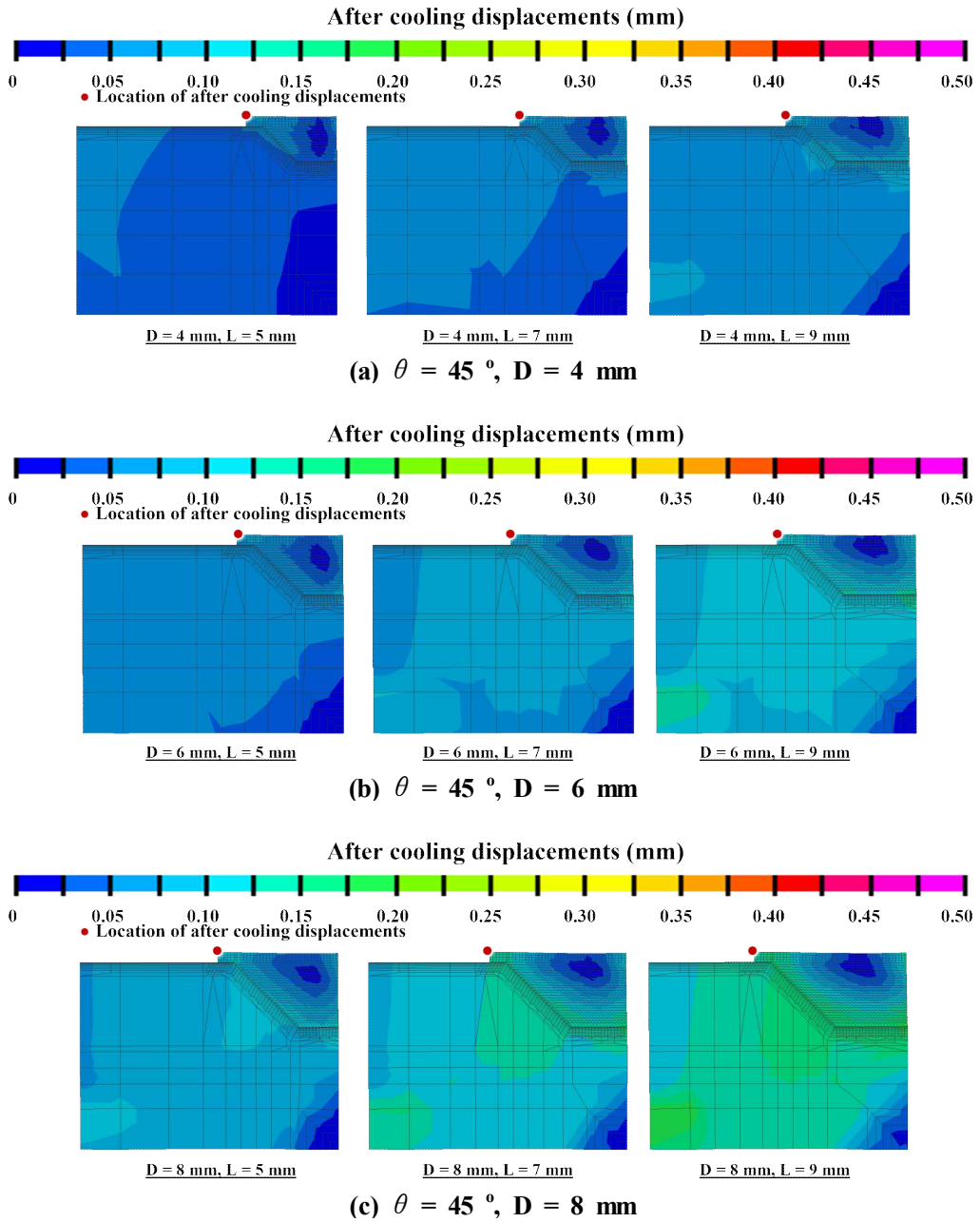
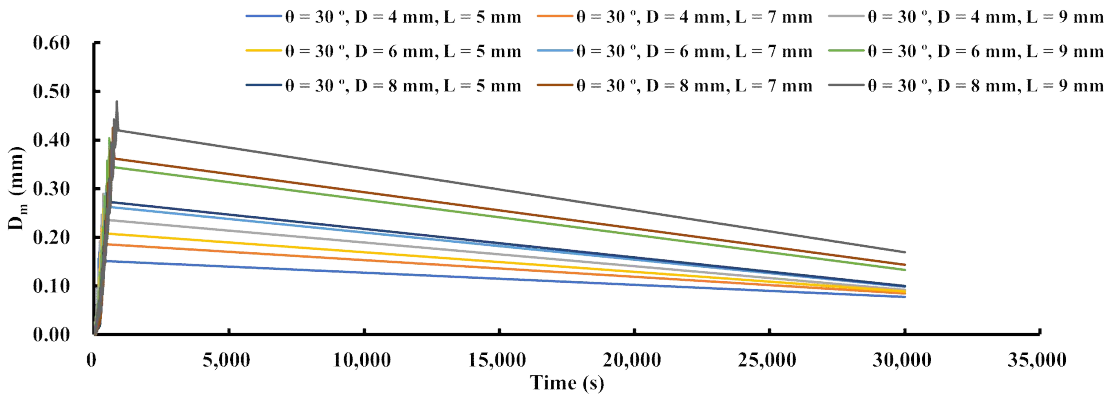


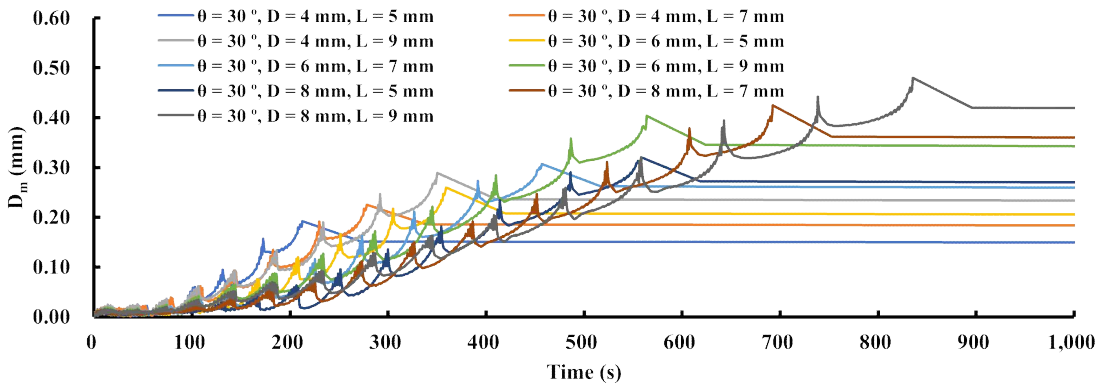
Fig. 50 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according inside repair ($\theta = 45^\circ$)

라. 변형 이력 및 크기 비교 및 분석

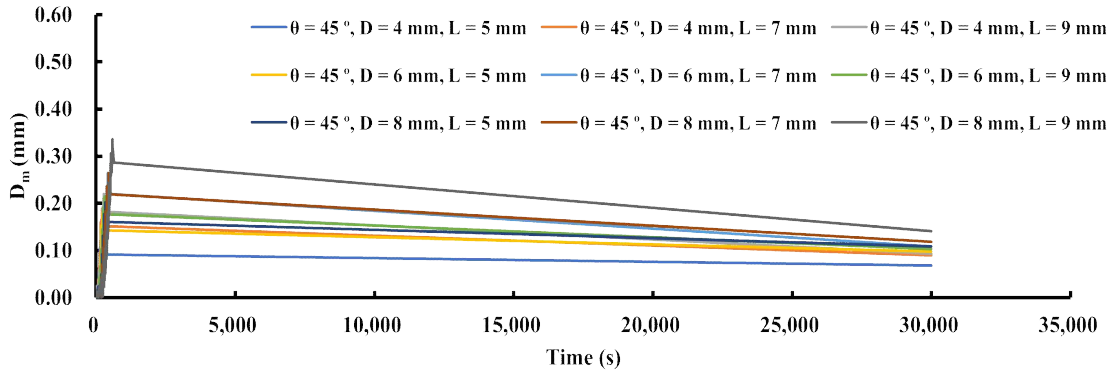
Fig. 51 은 열-기계 연계 해석을 통해 내측 보수 적층시 각도에 따른 변형 이력 그래프이다. Fig. 51 에서 (a) 는 기저부 각도 30 ° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 기저부 각도 30 ° 형상들에 대한 공정 간 변형의 가장 높은값을 볼 수 있는 시간인 1,000 초까지의 시간선이다. (c) 는 기저부 각도 45 ° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (d) 는 기저부 각도 45 ° 형상들에 대한 공정 간 변형의 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 1,000 초까지의 시간선이다.



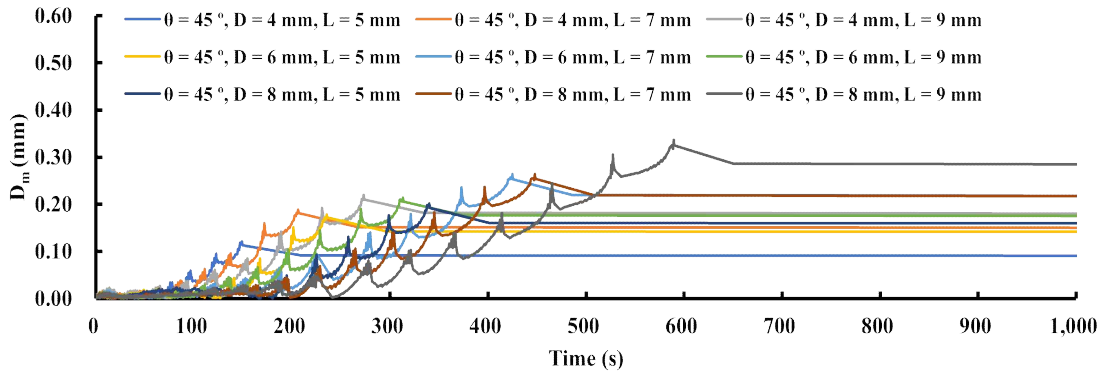
(a) Time history of displacements for 35,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(b) Time history of displacements for 1,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(c) Time history of displacements for 35,000 sec ($\theta = 45^\circ$)



(d) Time history of displacements for for 1,000 sec ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 51 Time history of displacements according to the angle (inside repair)

Fig. 52 는 내측 보수 적층 시 각도에 따른 18 가지 변형 이력에 대해 기저부 각도 및 깊이에 따라 분류한 그래프이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (b) 는 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (c) 는 기저부 각도 30° 깊이 8 mm 에 대한 그래프, (d) 는 기저부 각도 45° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (e) 는 기저부 각도 45° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (f) 는 기저부 각도 45° 깊이 8 mm 에 대한 그래프이다.

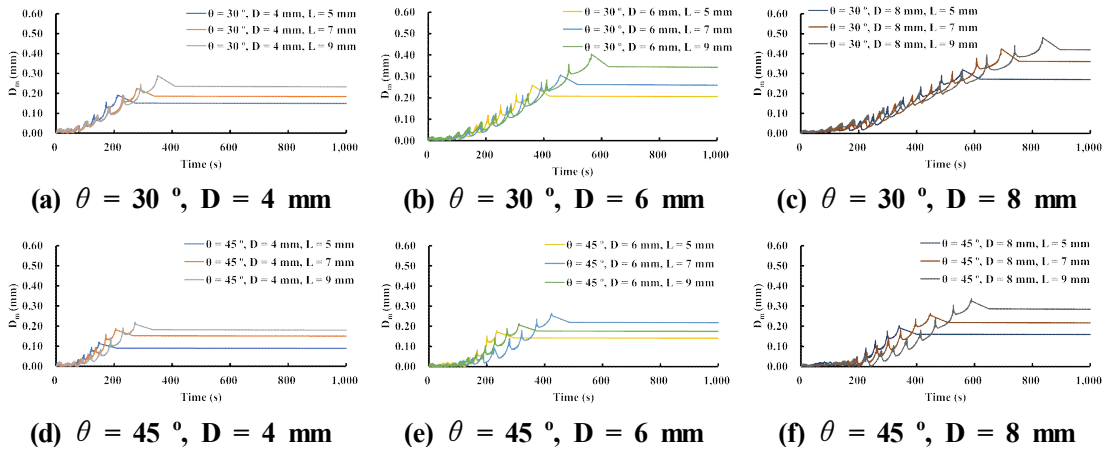


Fig. 52 Time history of displacements for 1,000 sec according to the angle (inside repair)

Table 20 과 21 은 공정 후 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 변형의 값을 표로 정리한 것이다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.11 mm, 길이 7 mm 에서 0.15 mm, 길이 9 mm 에서 0.18 mm 로 나타났다. 기저부 각도 30° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.13 mm, 길이 7 mm 에서 0.16 mm, 길이 9 mm 에서 0.22 mm 로 나타났다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.20 mm, 길이 7 mm 에서 0.25 mm, 길이 9 mm 에서 0.31 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.11 mm, 길이 7 mm 에서 0.14 mm, 길이 9 mm 에서 0.16 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.12 mm, 길이 7 mm 에서 0.14 mm, 길이 9 mm 에서 0.19 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.14 mm, 길이 7 mm 에서 0.17 mm, 길이 9 mm 에서 0.24 mm 로 나타났다. 최대 변형 발생 시간은 기저부 각도, 깊이 및 길이에 관계 없이 모두 동일하게 적층이 끝난 시점이었다. Fig. 53 은 열-기계 연계 해석을 통한 내측 보수 적층시 각도에 따른 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 발생한 변형의 값 변화이다. 기저부 각도가 감소함에 따라 변형 크기는 증가하였다. 또한 기저부 깊이 및 길이가 증가함에 따라 변형 크기는 더 크게 나타났다.

Table 20 Displacement value during elastic recovery and cooling process according to inside repair ($\theta = 30^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 30^\circ$	L = 5 mm	0.11 mm	0.13 mm	0.20 mm
	L = 7 mm	0.15 mm	0.16 mm	0.25 mm
	L = 9 mm	0.18 mm	0.22 mm	0.31 mm

Table 21 Displacement value during elastic recovery and cooling process according to inside repair ($\theta = 45^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 45^\circ$	L = 5 mm	0.11 mm	0.12 mm	0.14 mm
	L = 7 mm	0.14 mm	0.14 mm	0.17 mm
	L = 9 mm	0.16 mm	0.19 mm	0.24 mm

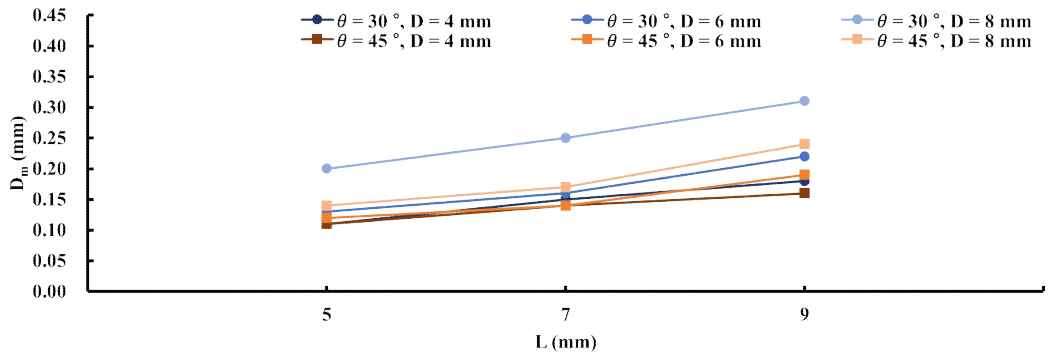
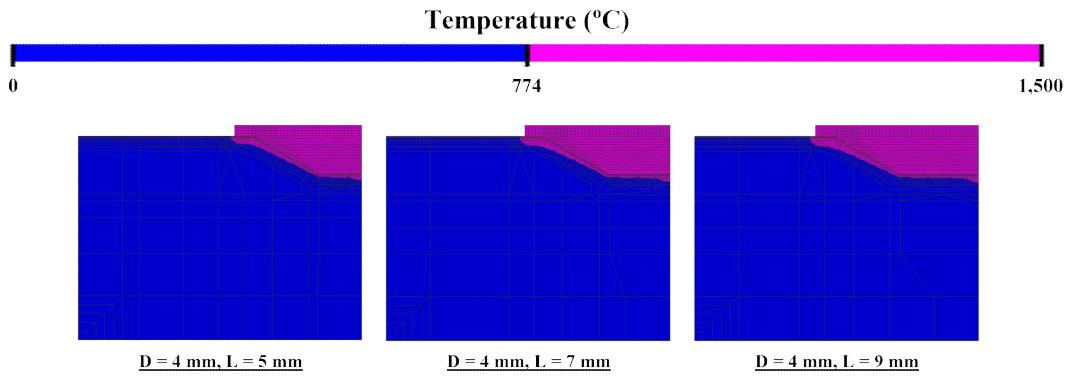


Fig. 53 Influence of angle and depth of deposited region and length on displacements (inside repair)

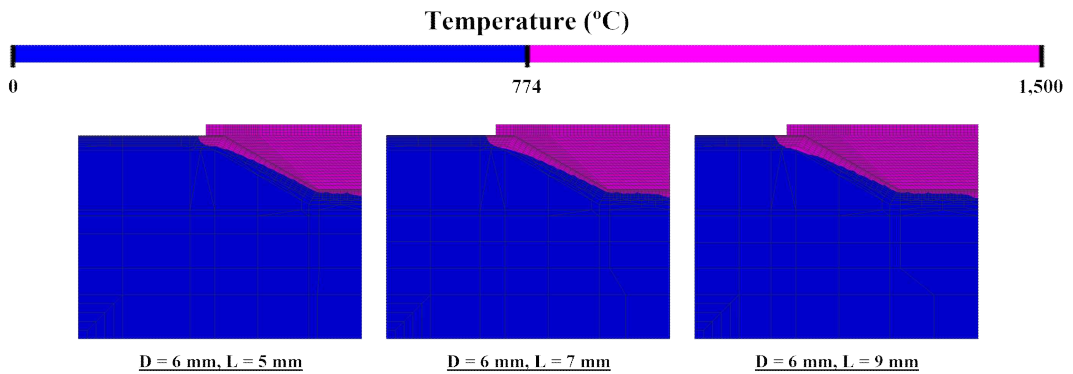
3. 외측 보수 적층 시 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석

가. 주응력 위치 비교 및 분석

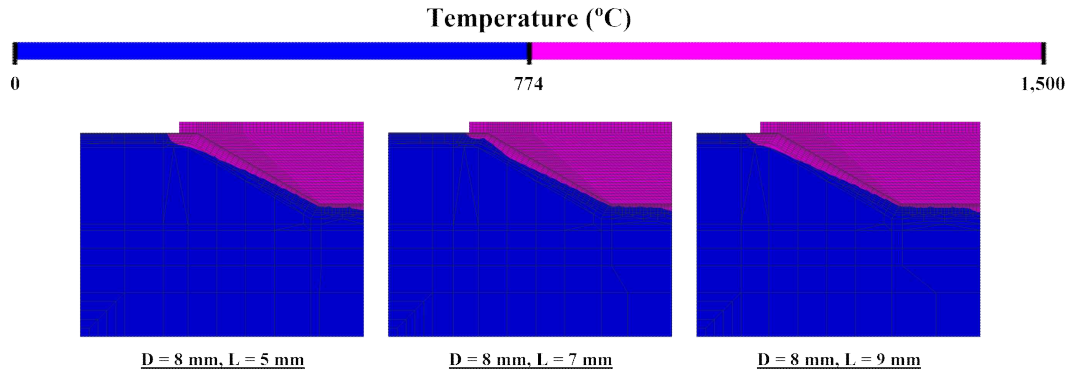
Figs. 54 와 55 는 2 차원 유한요소 해석을 통한 외측 보수 적층시 각도에 따른 열전달 특성이다. Fig. 54 는 기저부 각도 30 ° 형상이며, Fig. 55 는 기저부 각도 45 ° 형상이다.



(a) $\theta = 30^\circ$, D = 4 mm

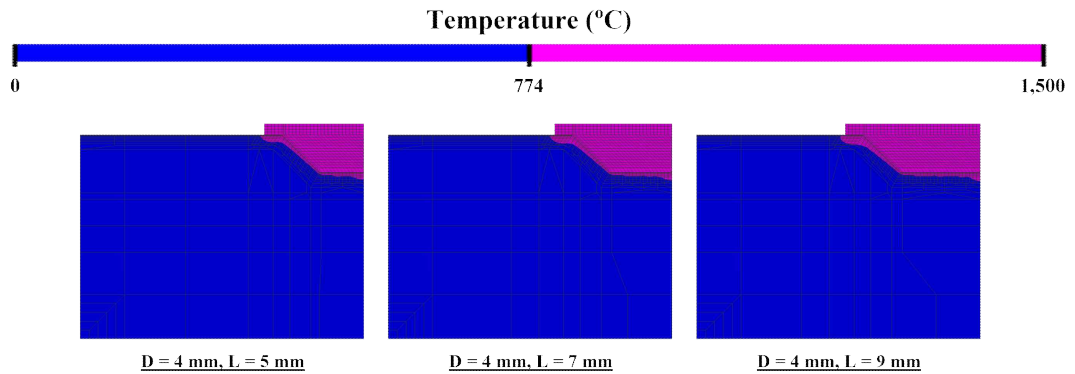


(b) $\theta = 30^\circ$, D = 6 mm

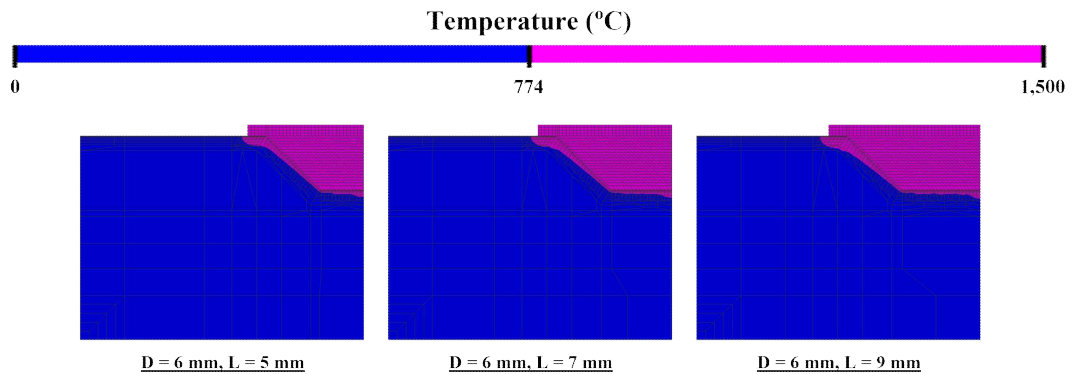


(c) $\theta = 30^\circ$, D = 8 mm

Fig. 54 Temperature distribution comparison according outside repair ($\theta = 30^\circ$)



(a) $\theta = 45^\circ$, D = 4 mm



(b) $\theta = 45^\circ$, D = 6 mm

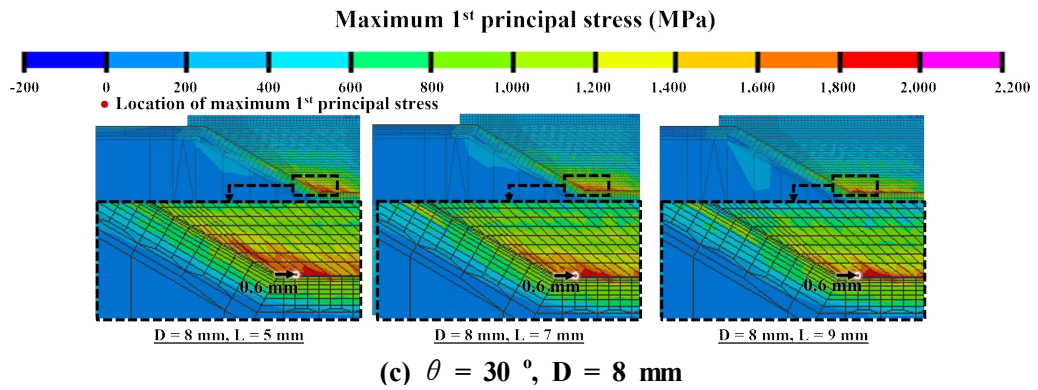
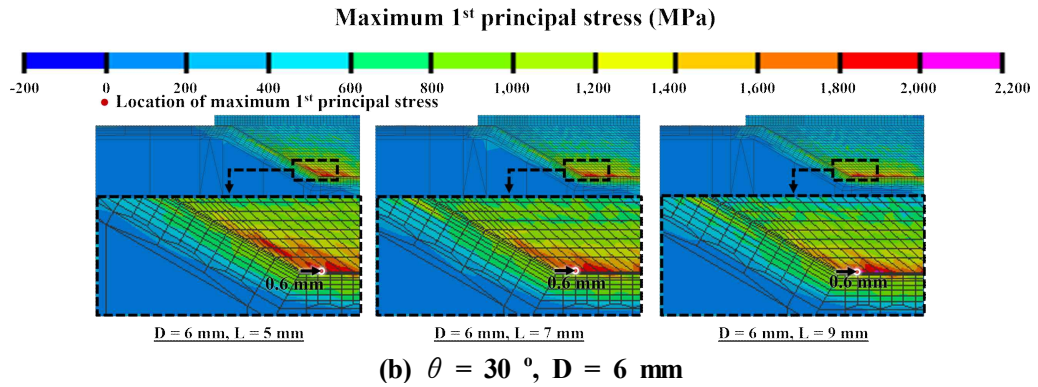
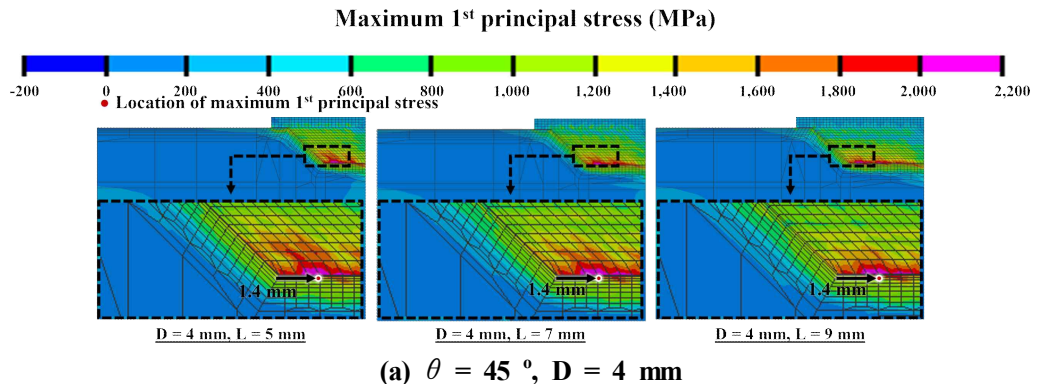


Fig. 56 Effect of maximum 1st principal stress between processes according outside repair
($\theta = 30^\circ$)



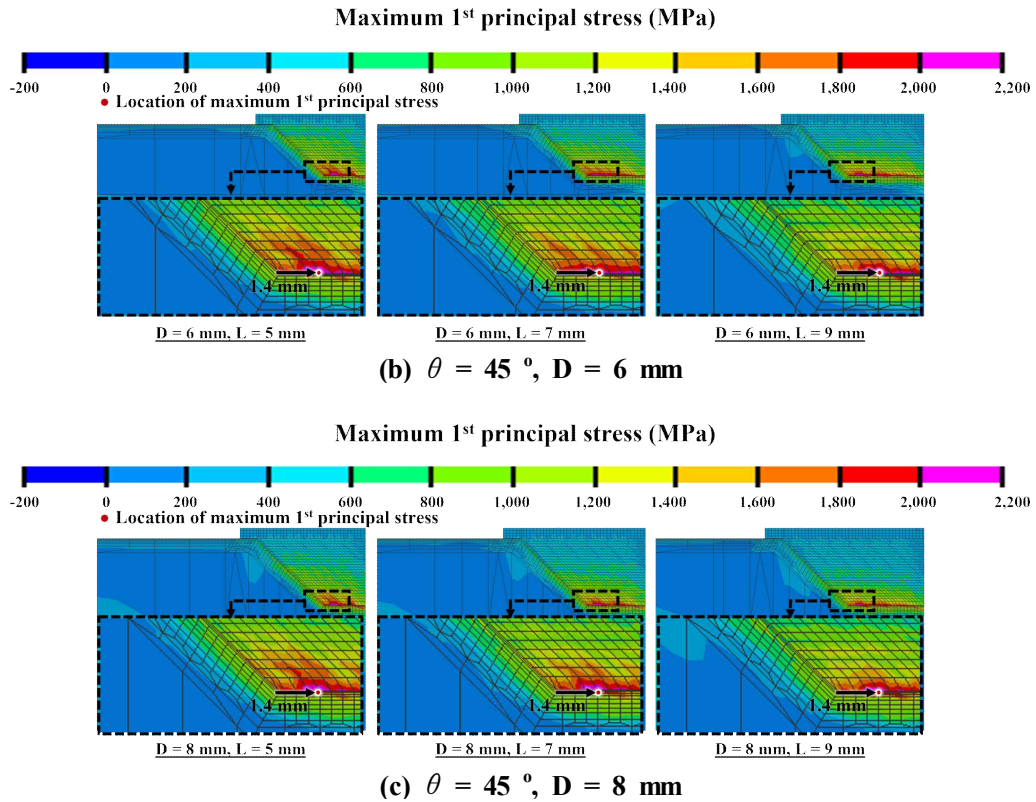
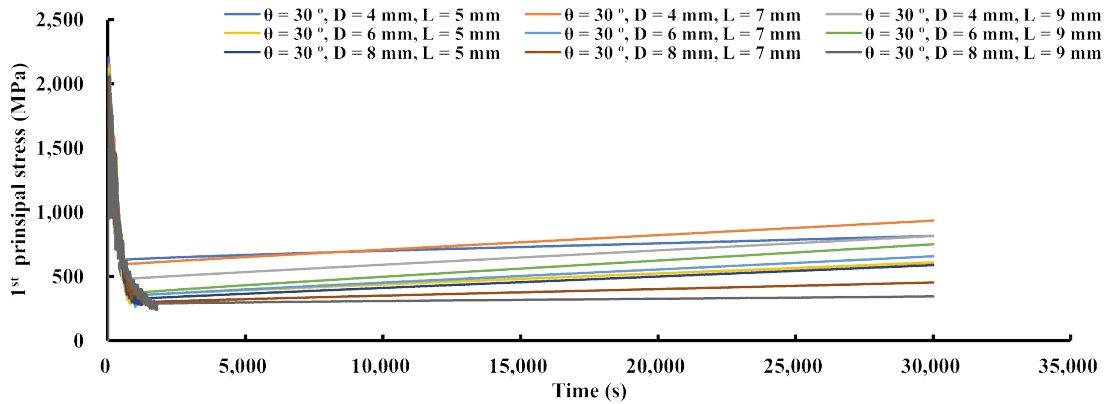


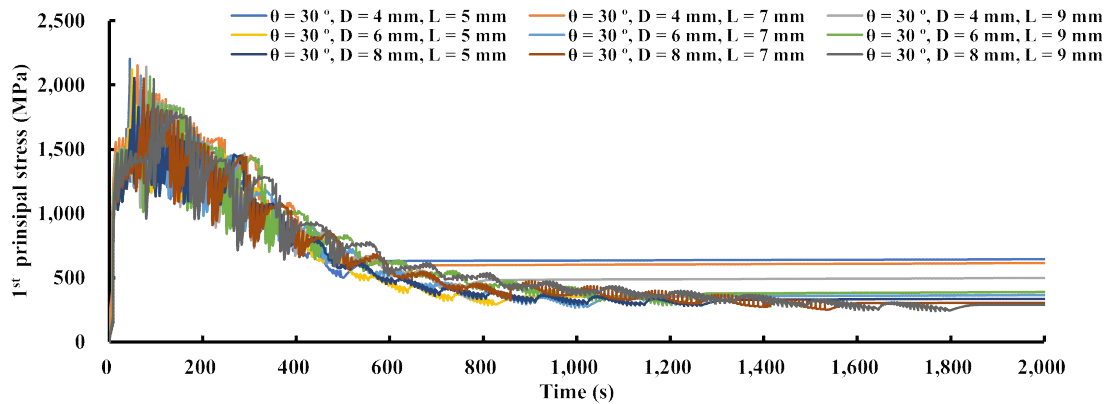
Fig. 57 Effect of maximum 1st principal stress between processes according outside repair ($\theta = 45^\circ$)

나. 주응력 이력 및 크기 비교 및 분석

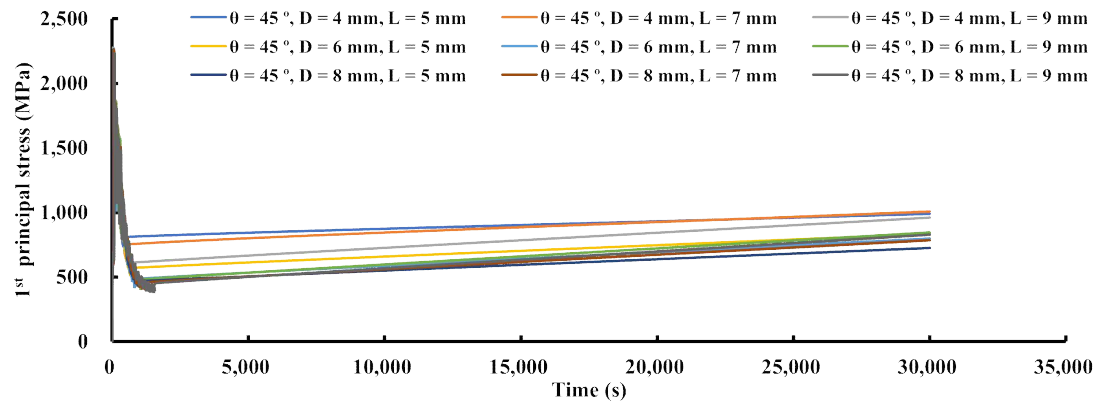
Fig. 58 은 2 차원 유한요소 해석을 통한 외측 보수 적층시 각도에 따른 주응력 이력에 대한 그래프이다. Fig. 58 에서 (a) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 2,000 초까지의 시간선이다. (c) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (d) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정 간 주응력이 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 2,000 초까지의 시간선이다.



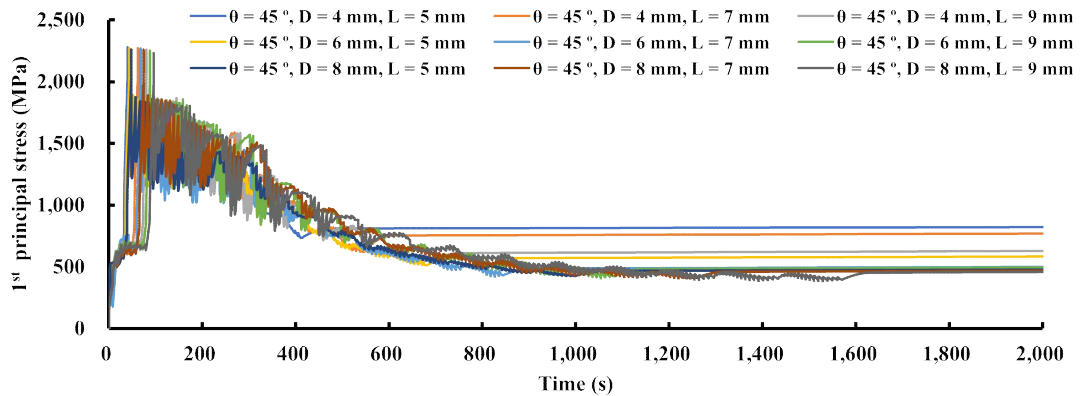
(a) 1st principal stress history for 35,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(b) 1st principal stress history for 2,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(c) 1st principal stress history for 35,000 sec ($\theta = 45^\circ$)



(d) 1st principal stress history for 2,000 sec ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 58 1st principal stress history according to the angle (outside repair)

Fig. 59 는 외측 보수 적층시 각도에 따른 18 가지 주응력 이력에 대해 기저부 각도 및 깊이에 따라 분류한 그래프이다. (a) 는 기저부 각도 30°, 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (b) 는 기저부 각도 30°, 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (c) 는 기저부 각도 30°, 깊이 8 mm 에 대한 그래프, (d) 는 기저부 각도 45°, 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (e) 는 기저부 각도 45°, 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (f) 는 기저부 각도 45°, 깊이 8 mm 에 대한 그래프이다. Table 22 와 23 은 공정 중 최대 주응력의 값을 표로 정리한 것이다. 기저부 각도 30°, 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,191 MPa, 길이 7 mm 에서 2,150 MPa, 길이 9 mm 에서 2,143 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 30° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,115 MPa, 길이 7 mm 에서 2,073 MPa, 길이 9 mm 에서 2,063 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 30°, 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,054 MPa, 길이 7 mm 에서 2,050 MPa, 길이 9 mm 에서 2,042 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45°, 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,253 MPa, 길이 7 mm 에서 2,248 MPa, 길이 9 mm 에서 2,234 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,248 MPa, 길이 7 mm 에서 2,240 MPa, 길이 9 mm 에서 2,226 MPa 로 나타났다. 기저부 각도 45°, 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 2,238 MPa, 길이 7 mm 에서 2,235 MPa, 길이 9 mm 에서 2,208 MPa 로 나타났다. 공정간 최대 주응력 발생 시간은 기저부 깊이와는 관계없이 각도 및 깊이에 따라 다르게 나타났다. 기저부 각도 30° 및 길이 5 mm 의 경우 48.71 초, 기저부 각도 30° 및 길이 7 mm 의 경우 67.28 초, 기저부 각도 30° 및 길이 9

mm 의 경우 87.15 초에 최대 주응력이 발생했으며, 기저부 각도 45도 및 길이 5 mm 의 경우 40.22 초, 기저부 각도 45 ° 및 길이 7 mm 의 경우 61.85 초, 기저부 각도 45 ° 및 길이 9 mm 의 경우 80.29 초에 최대 주응력이 발생했다. 최대 주응력 발생 시간은 기저부 각도가 클수록 빠른 시간에 나타났으며, 길이가 길어질수록 느린 시간에 나타남을 알 수 있었다. Fig. 60 은 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 외측 보수 적층시 공정 간 발생한 최대 주응력의 값 변화이다. 기저부 각도가 감소함에 따라 최대 주응력 크기는 감소하였다. 또한 기저부 깊이 및 길이가 증가함에 따라 공정 간 발생한 최대 주응력은 더 낮게 나타났다. 기저부 깊이에 비해 기저부 길이에 따른 최대 주응력 감소 폭이 더 큰 것을 바탕으로 기저부 깊이가 최대 주응력 감소에 대해 더 영향력이 없다는 것을 알 수 있었다.

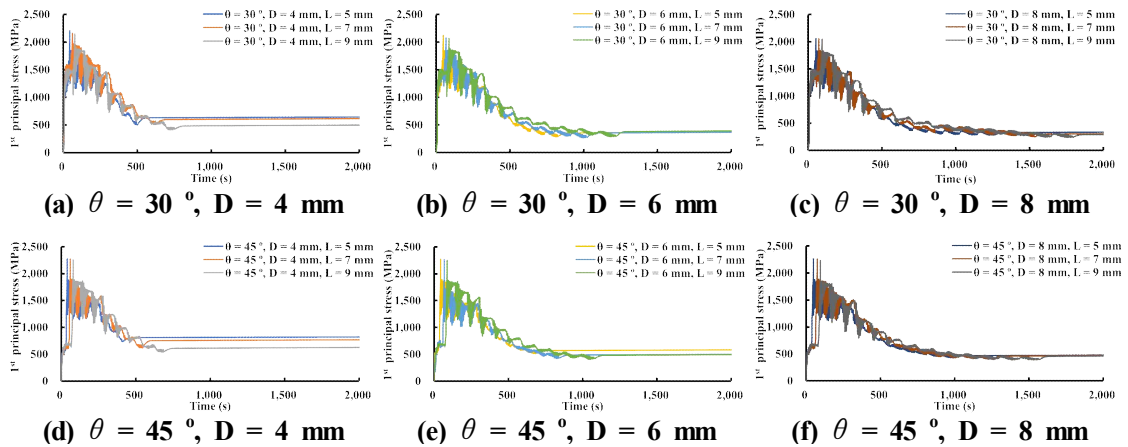


Fig. 59 1st principal stress history for 2,000 sec according to the angle (outside repair)

Table 22 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to outside repair ($\theta = 30^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 30^\circ$	L = 5 mm	2,191 MPa	2,115 MPa	2,054 MPa
	L = 7 mm	2,150 MPa	2,073 MPa	2,050 MPa
	L = 9 mm	2,143 MPa	2,063 MPa	2,042 MPa

Table 23 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to outside repair ($\theta = 45^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 45^\circ$	L = 5 mm	2,253 MPa	2,248 MPa	2,238 MPa
	L = 7 mm	2,248 MPa	2,240 MPa	2,235 MPa
	L = 9 mm	2,234 MPa	2,226 MPa	2,208 MPa

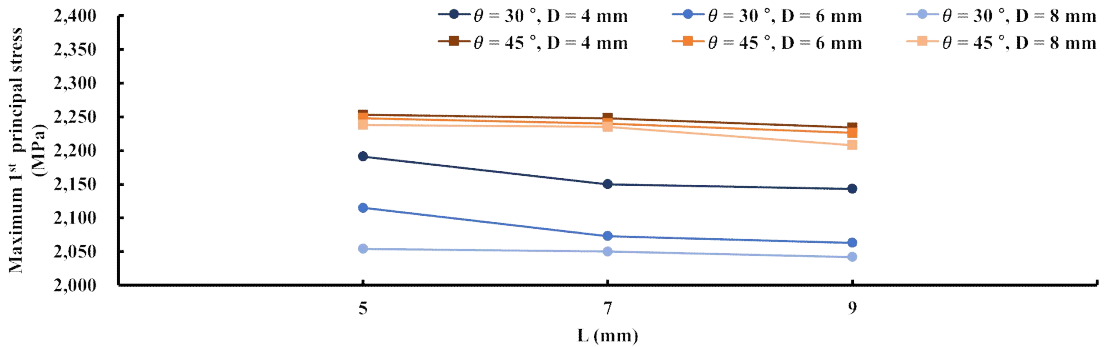


Fig. 60 Influence of angle and depth of deposited region and length on maximum 1st principal stress (outside repair)

다. 변형 특성 비교 및 분석

Figs. 61 과 62 는 열-기계 연계 해석을 통한 각도에 따른 외측 보수 적층시 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 발생한 변형 발생 위치 및 분포이다. Fig. 61 의 경우 기저부 30° 에 따른 분포이며, Fig. 62 의 경우 기저부 45° 에 따른 분포이다. 탄성 회복 및 냉각 공정 후 기저부 30° 및 45° 모두 기저부 깊이 4 mm, 길이 9 mm 부터 변형 위치 값이 바뀌었다. 이는 적층량이 기저부에 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

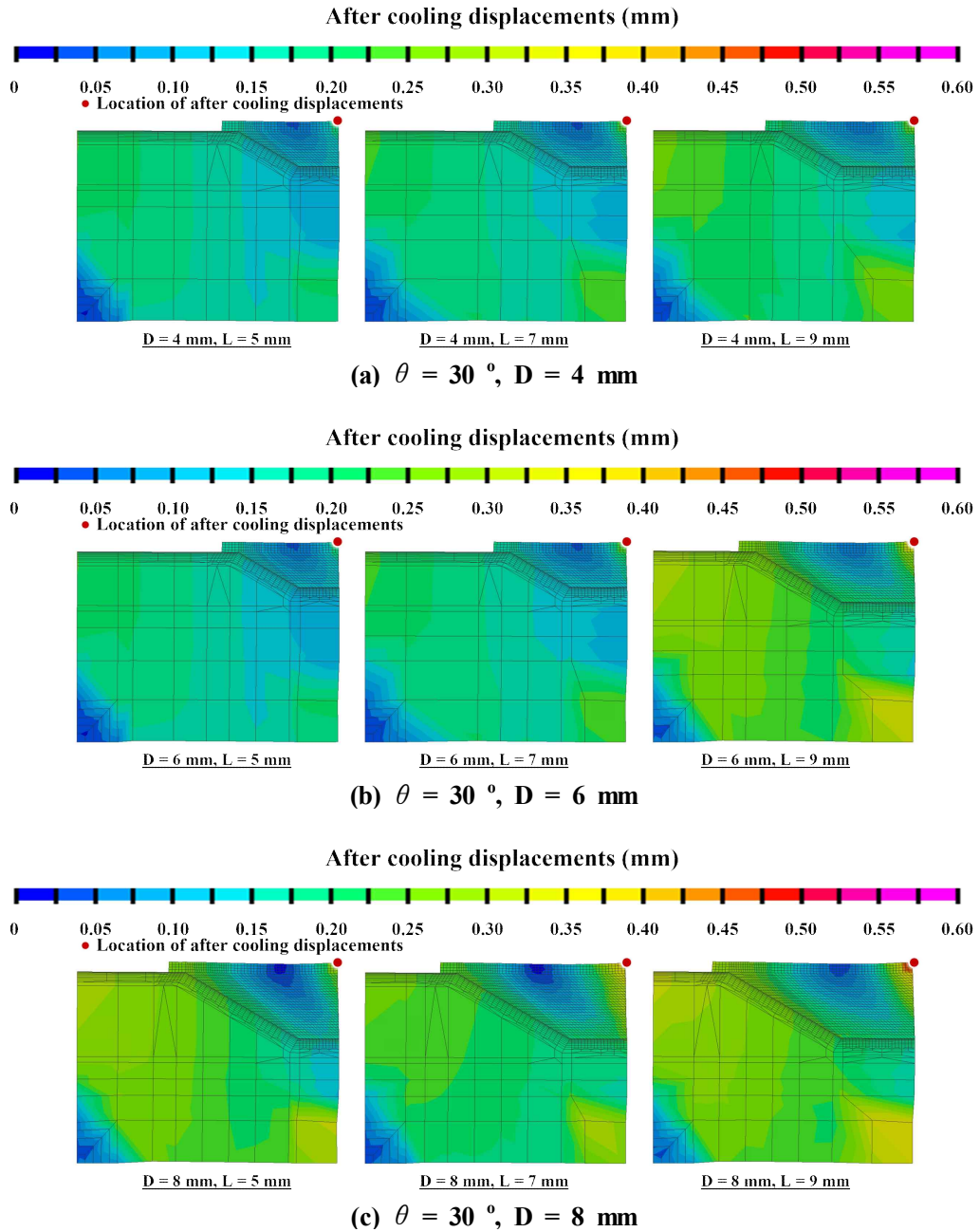


Fig. 61 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according outside repair ($\theta = 30^\circ$)

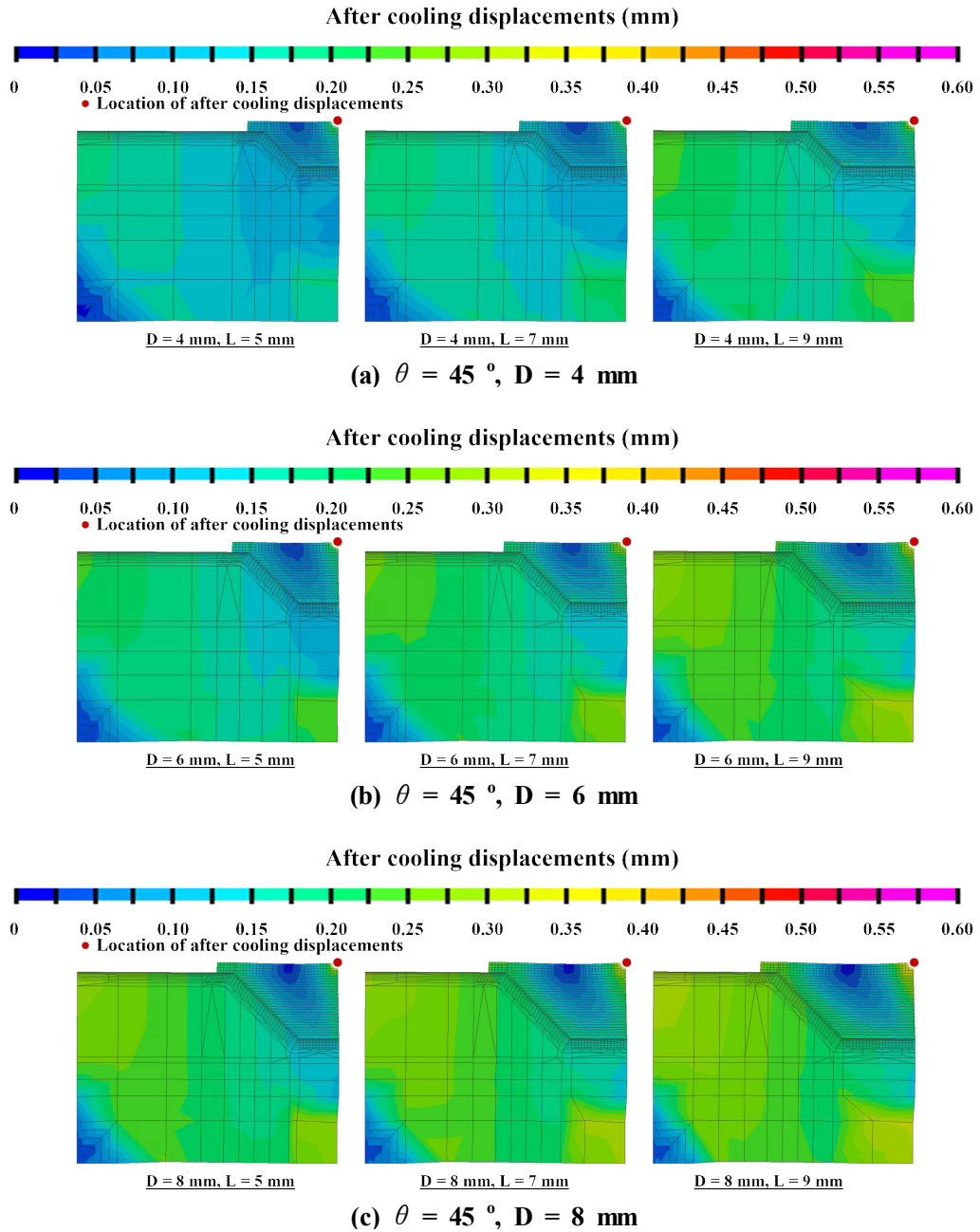
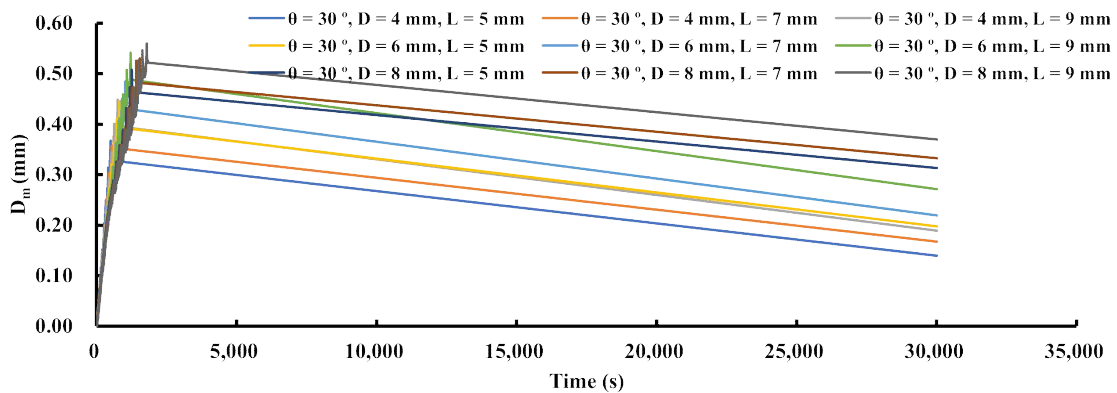


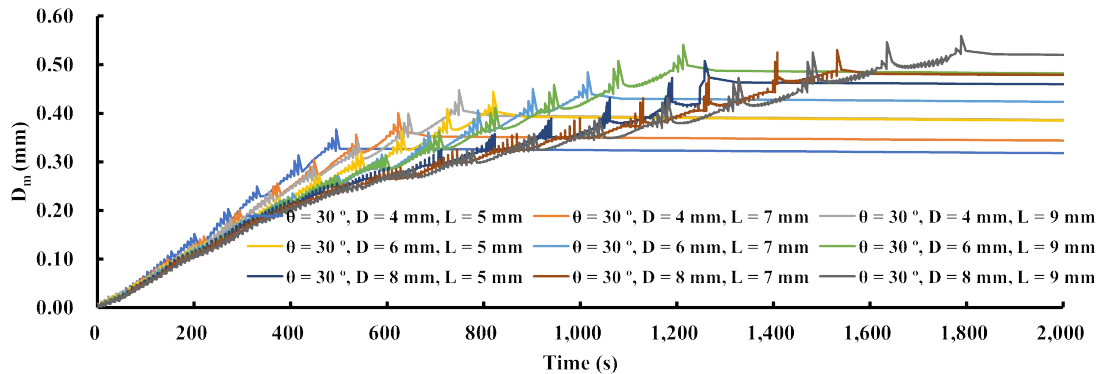
Fig. 62 Effect of displacements distribution after elastic recovery/cooling process according outside repair ($\theta = 45^\circ$)

라. 변형 이력 및 크기 비교 및 분석

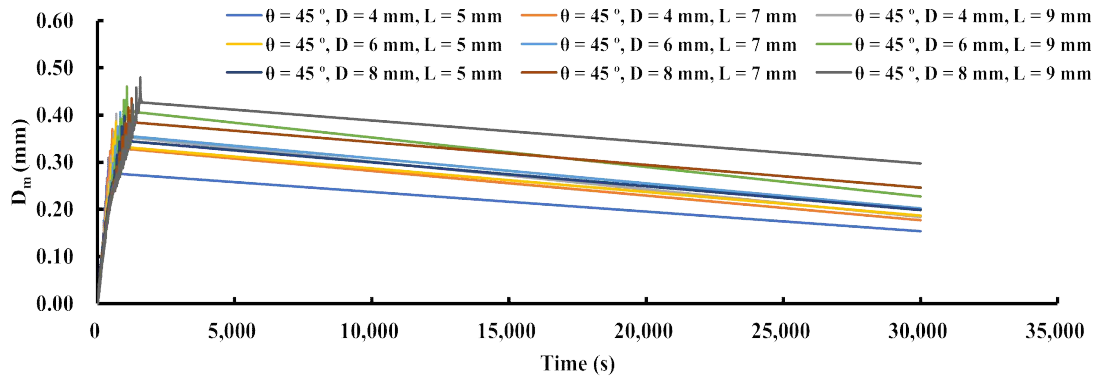
Fig. 63 은 열-기계 연계 해석을 통해 외측 보수 적층시 각도에 따른 변형 이력 그래프이다. Fig. 63 에서 (a) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (b) 는 기저부 각도 30° 형상들에 대한 공정 간 변형의 가장 높은값을 볼 수 있는 시간인 2,000 초까지의 시간선이다. (c) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정이 끝난 시간까지 볼 수 있는 시간인 35,000 초까지의 시간선이며, (d) 는 기저부 각도 45° 형상들에 대한 공정 간 변형의 가장 높은 값을 볼 수 있는 시간인 2,000 초까지의 시간선이다.



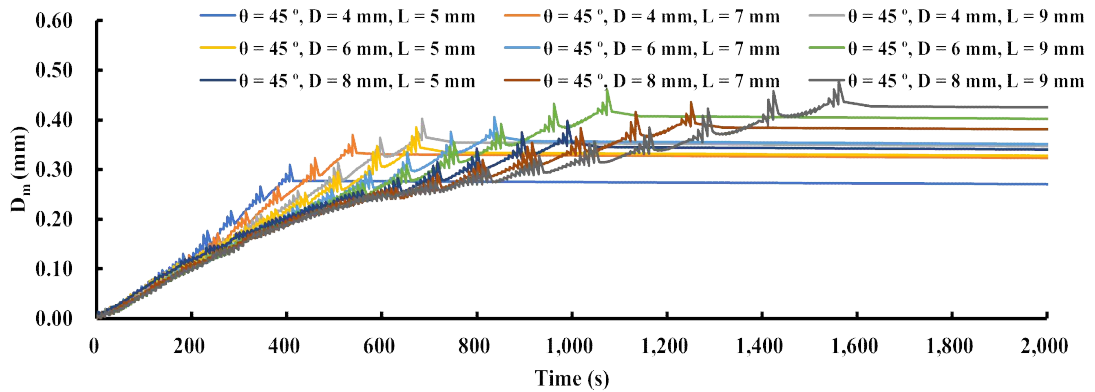
(a) Time history of displacements for 35,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(b) Time history of displacements for 2,000 sec ($\theta = 30^\circ$)



(c) Time history of displacements for 35,000 sec ($\theta = 45^\circ$)



(d) Time history of displacements for 2,000 sec ($\theta = 45^\circ$)

Fig. 63 Time history of displacements according to the angle (outside repair)

Fig. 64 는 외측 보수 적층 시 각도에 따른 18 가지 변형 이력에 대해 기저부 각도 및 깊이에 따라 분류한 그래프이다. (a) 는 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (b) 는 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (c) 는 기저부 각도 30° 깊이 8 mm 에 대한 그래프, (d) 는 기저부 각도 45° , 깊이 4 mm 에 대한 그래프, (e) 는 기저부 각도 45° , 깊이 6 mm 에 대한 그래프, (f) 는 기저부 각도 45° 깊이 8 mm 에 대한 그래프이다.

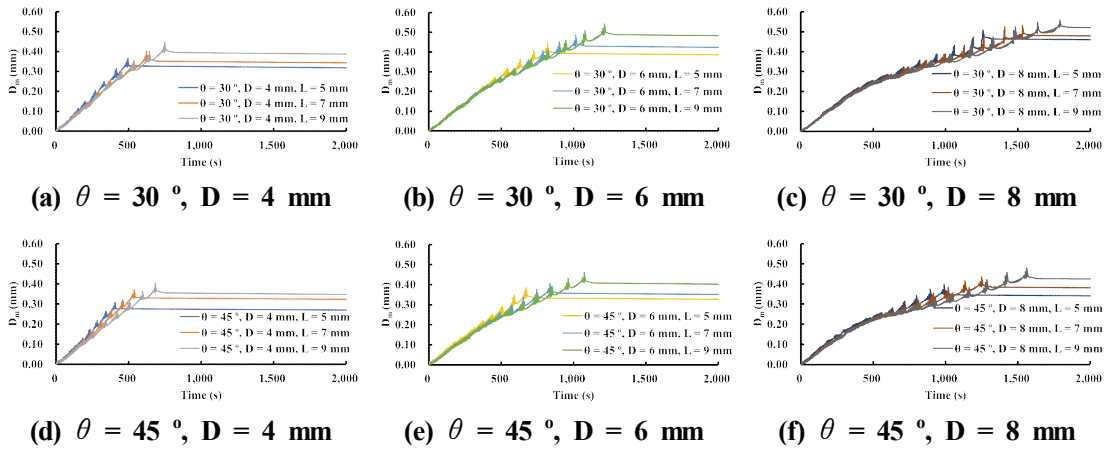


Fig. 64 Time history of displacements for 1,000 sec according to the angle (outside repair)

Table 24 와 25 는 공정 후 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 변형의 값을 표로 정리한 것이다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.33 mm, 길이 7 mm 에서 0.40 mm, 길이 9 mm 에서 0.45 mm 로 나타났다. 기저부 각도 30° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.45 mm, 길이 7 mm 에서 0.48 mm, 길이 9 mm 에서 0.54 mm 로 나타났다. 기저부 각도 30° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.51 mm, 길이 7 mm 에서 0.53 mm, 길이 9 mm 에서 0.56 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 4 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.31 mm, 길이 7 mm 에서 0.37 mm, 길이 9 mm 에서 0.40 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° 기저부 깊이 6 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.39 mm, 길이 7 mm 에서 0.41 mm, 길이 9 mm 에서 0.43 mm 로 나타났다. 기저부 각도 45° , 기저부 깊이 8 mm 의 경우 길이 5 mm 에서 0.40 mm, 길이 7 mm 에서 0.44 mm, 길이 9 mm 에서 0.48 mm 로 나타났다. 최대 변형 발생 시간은 기저부 각도, 깊이 및 길이에 관계 없이 모두 동일하게 적층이 끝난 시점이었다. Fig. 65 은 열-기계 연계 해석을 통한 내측 보수 적층시 각도에 따른 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 발생한 변형의 값 변화이다. 기저부 각도가 감소함에 따라 변형 크기는 증가하였다. 또한 기저부 깊이 및 길이가 증가함에 따라 변형 크기는 더 크게 나타났다.

Table 24 Displacement value during elastic recovery and cooling process according to outside repair ($\theta = 30^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 30^\circ$	L = 5 mm	0.33 mm	0.45 mm	0.51 mm
	L = 7 mm	0.40 mm	0.48 mm	0.53 mm
	L = 9 mm	0.45 mm	0.54 mm	0.56 mm

Table 25 Displacement value during elastic recovery and cooling process according to outside repair ($\theta = 45^\circ$)

		D = 4 mm	D = 6 mm	D = 8 mm
$\theta = 45^\circ$	L = 5 mm	0.31 mm	0.39 mm	0.40 mm
	L = 7 mm	0.37 mm	0.41 mm	0.44 mm
	L = 9 mm	0.40 mm	0.43 mm	0.48 mm

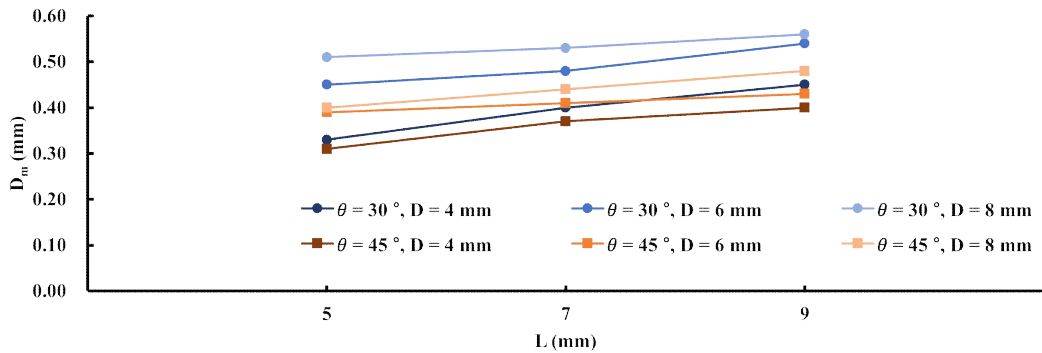


Fig. 65 Influence of angle and depth of deposited region and length on displacements (outside repair)

4. 축 대칭 보수 적층 시 내경에 따른 열-기계 특성 비교 및 분석

가. 내경에 따른 2 차원 유한요소 해석 모델 개발

Fig. 66 은 축 대칭 보수 적층 시 내경에 따른 2 차원 유한요소 해석 모델이다. (a) 는 내측 보수, (b) 는 외측 보수에 대한 해석 모델이다. 중심축을 기준으로 3 mm, 5 mm, 10 mm 로 설정하였으며, 적층 방향은 한 방향 적층으로 진행되었으며, 해석 모델로는 기저부 각도 30°, 깊이 4 mm 및 길이 5 mm 로 설정하였고 Fig. 67 과 같다.

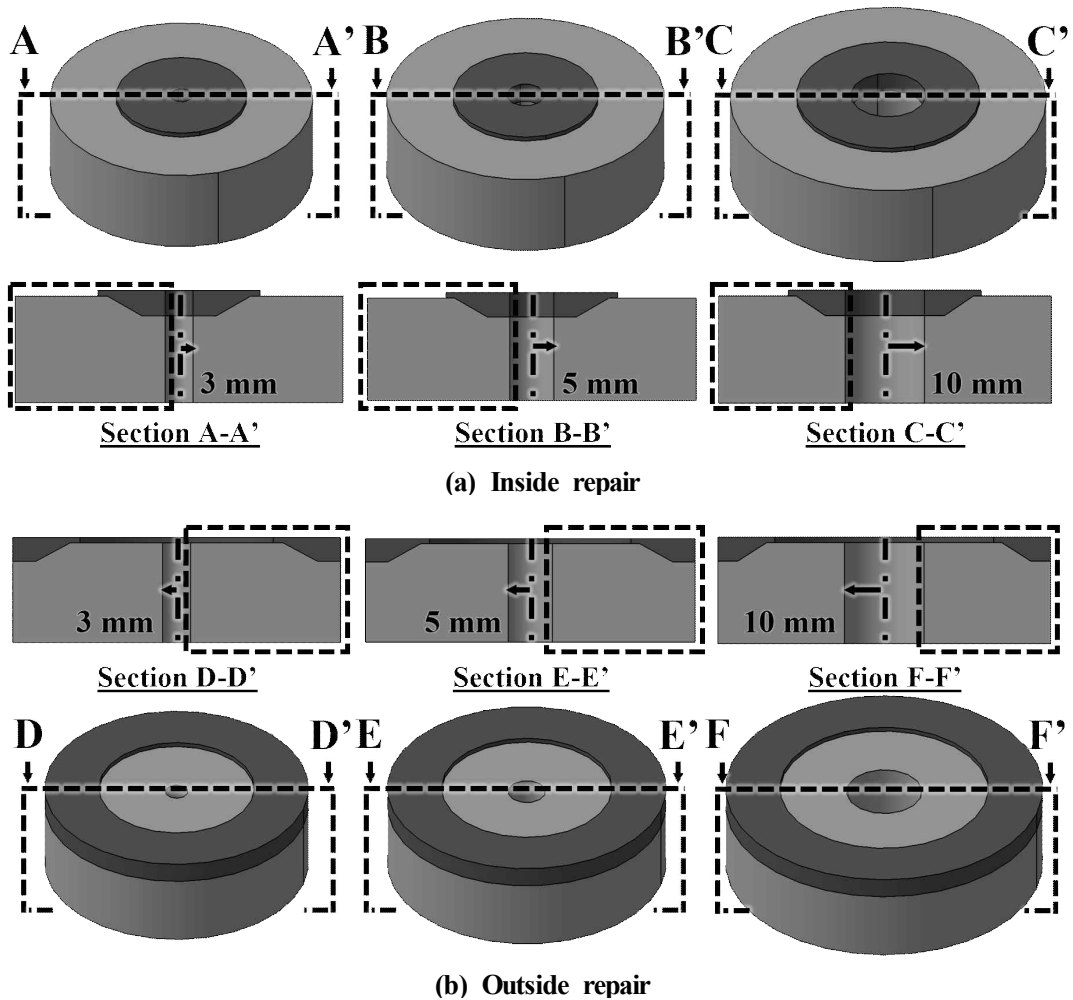


Fig. 66 Analysis model according to inner diameter

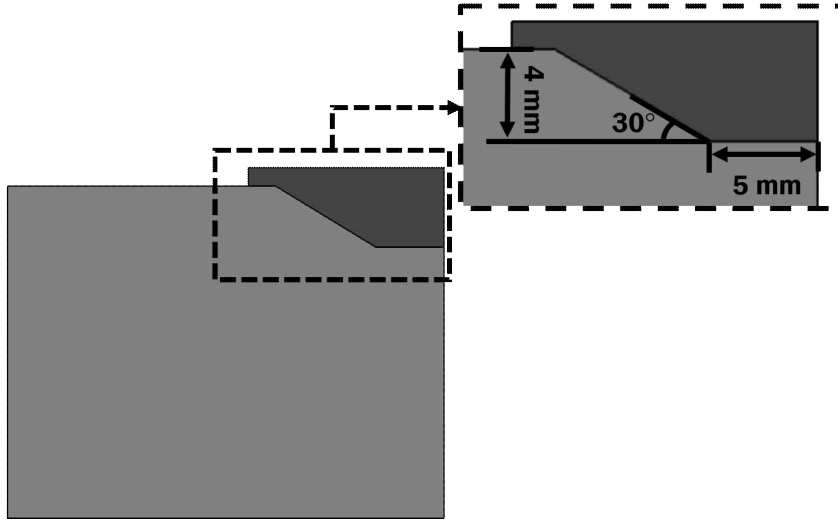
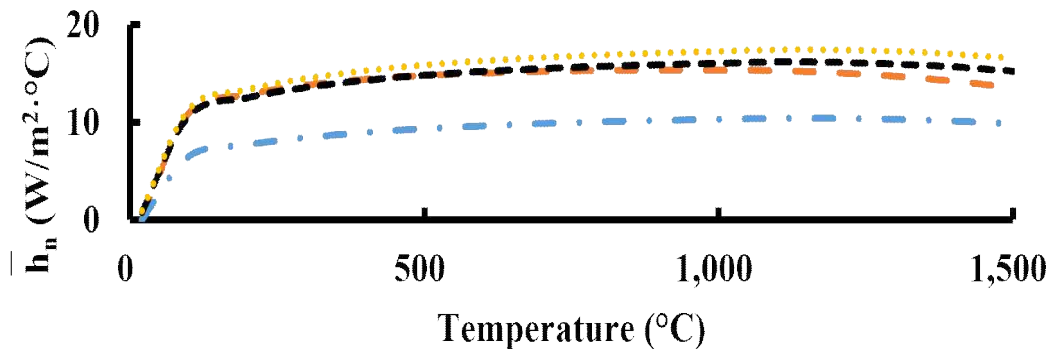


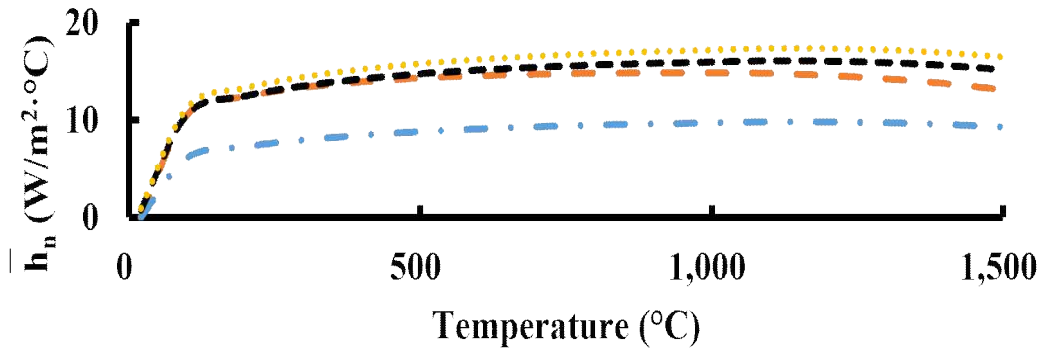
Fig. 67 Finite element analysis model of 2D (inner diameter)

나. 경계 조건 데이터 도출

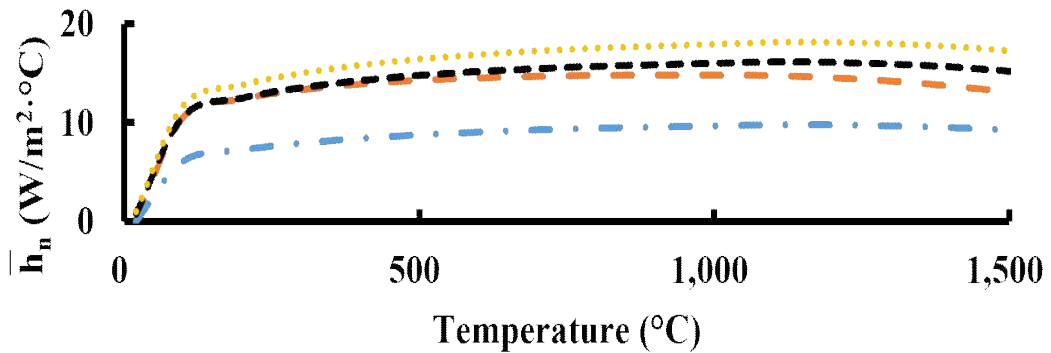
축 대칭 보수 적층 시 내경에 따른 유한요소 해석을 위한 경계 조건은 기존의 해석 모델과 같다. 자연 대류는 공정 진행 및 종료 이후에도 계속적으로 발생하며, 축 대칭 보수 적층 시 내경에 따라 적층량 및 형상이 달라지기 때문에 이를 고려하여 기저부의 상면, 하면에 자연 대류를 다르게 대입하였다. 좌측면과 우측면의 경우 동일하게 적용하였다. 각 조건을 적용한 자연 대류는 Fig. 68 과 같다.



(a) R = 3 mm



(a) R = 5 mm



(a) R = 10 mm

Fig. 68 Temperature dependent natural convection coefficient (inner diameter)

다. 주응력 특성 비교 및 분석

Fig. 69 는 열-기계 연계 해석을 통해 축 대칭 보수 적층시 내경에 따른 공정간 최대 주응력 발생 위치 및 분포이다. Fig. 69 의 (a) 경우 내측 보수 적층시 내경에 따른 분포이며, (b) 의 경우 외측 보수 적층시 내경에 따른 분포이다. 내측 보수와 외측 보수 적층 모두 최대 주응력이 적층부와 기저부 사이에서 발생하였다. 높은 잔류응력 영역의 경우 내경의 길이가 감소할수록 넓게 분포함을 알 수 있었다. Table 26 은 축 대칭 보수 적층시 최대 주응력의 크기를 나타낸표이며, 내측 보수의 경우 내경 3 mm 에서 2,324 MPa, 5 mm 에서 2,215 MPa, 10 mm 에서 2,191 MPa 로 나타났다. 외측 보수의 경우 내경 3 mm 에서 2,217 MPa, 5 mm 에서 2,191 MPa, 10 mm 에서 2,162 MPa 로

나타났다. Fig. 70 은 축 대칭 보수 적층시 최대 주응력의 크기에 대한 그래프이다. 최대 주응력은 동일 형상이지만 내경이 감소할수록 높게 나타났다. 이는 적층 과정에서 열이 빠져나가지 못한 것으로 사료된다. 이를 통해 축 대칭 보수 적층시 내경을 크게 하여 적층을 진행하는 것이 좋다고 판단된다.

Table 26 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to inner diameter

	R = 3 mm	R = 5 mm	R = 10 mm
Inside repair	2,324 MPa	2,215 MPa	2,191 MPa
Outside repair	2,217 MPa	2,191 MPa	2,162 MPa

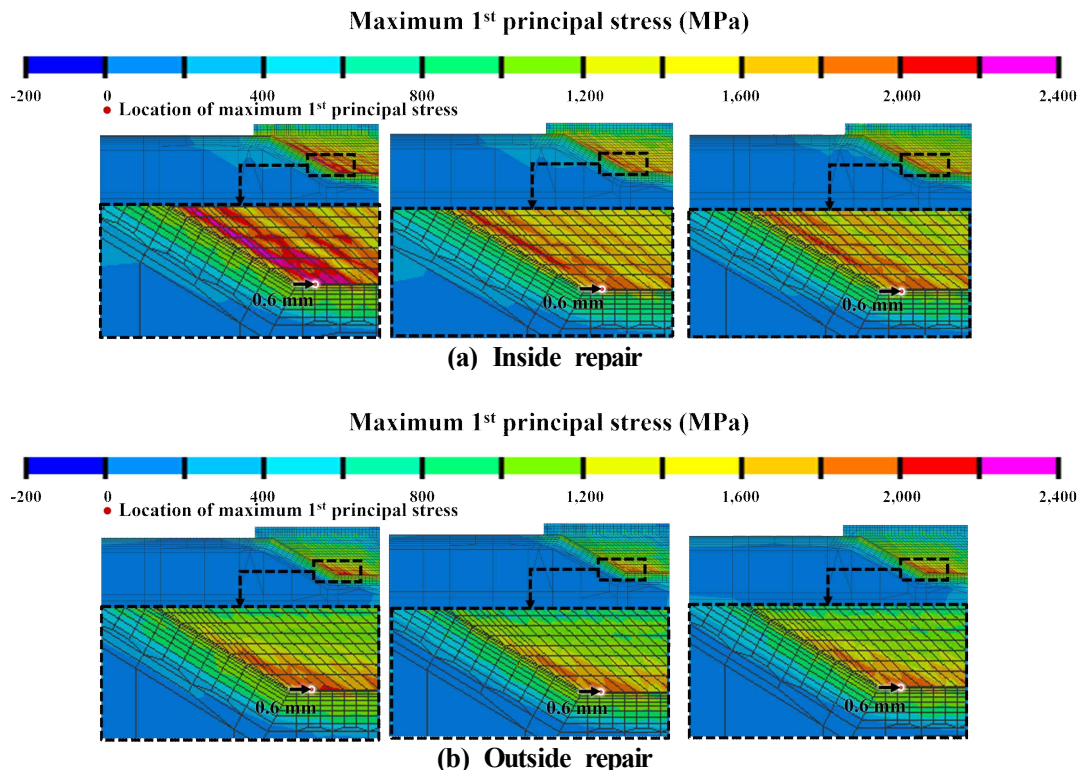


Fig. 69 Effect of maximum 1st principal stress between processes according inner diameter

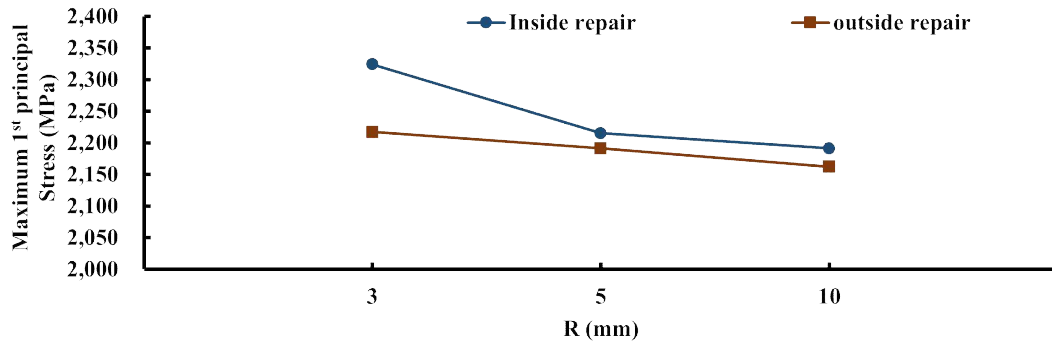


Fig. 70 Influence of inner diameter on maximum 1st principal stress

제 3 절 적층 경로 방향에 따른 적층시 열-기계 특성 비교 및 분석

제 2 장에서는 열-기계 연계 해석을 통해 적층 경로 방향에 따른 적층시 직선, 내측 및 외측 보수에 대해 기저부 형상 (각도, 깊이 및 길이) 에 따른 잔류응력 및 변형 특성에 대해 해석을 진행하였다. 제 3 절에서는 동일한 기저부 각도, 깊이 및 길이를 갖는 형상에 대해 직선, 내측 및 외측 보수 적층시 열-기계 해석을 진행하고자 한다. 해석 모델은 기저부 각도 30°, 기저부 깊이 8 mm, 기저부 길이 9 mm 를 사용하였으며, 직선 보수 해석은 교차 방향, 축 대칭 보수 해석은 한 방향 적층을 적층 방향으로 계산하여 적용하였다. Fig. 71 은 적층 경로 방향에 따른 적층시 직선, 내측 및 외측 보수에 대한 최대 주응력 발생 위치 및 분포이다. 최대 주응력 발생 위치는 직선 보수 해석의 경우 적층부에서 발생하였으며, 축 대칭 보수 해석의 경우 기저부와 적층부 사이에서 발생하였다. 이는 적층량의 차이로 사료되며, 적층량 및 적층 시간에 대한 그래프는 Fig. 72 와 같다. 적층량, 적층 시간은 외측 보수 형상에서 가장 크게 나타났다. Fig. 73 은 적층 경로 방향에 따른 적층시 열-기계 해석을 통해 최대 주응력의 값과 변형 값에 대한 그래프이다. 최대 주응력은 내측 보수 형상에서 가장 크게 나타났으며, 적층 과정에서 열이 빠져나가지 못한 것으로 사료된다. 최대 변형은 외측 보수 형상에서 가장 크게 나타났으며, 적층량이 증가함에 따라 변형이 크게 나타나는 것으로 나타났다. 이를 토대로 최대 주응력 및 변형의 값이 가장 낮은 직선 보수 형상이 최적의 형상으로 선정되었다.

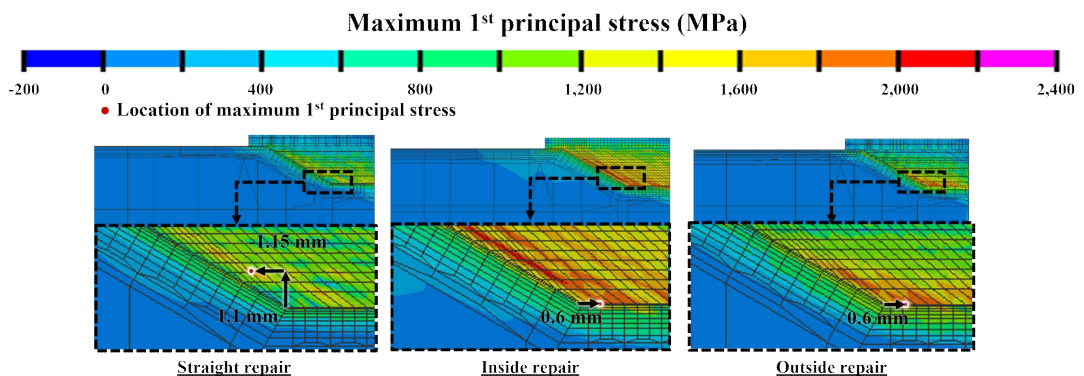
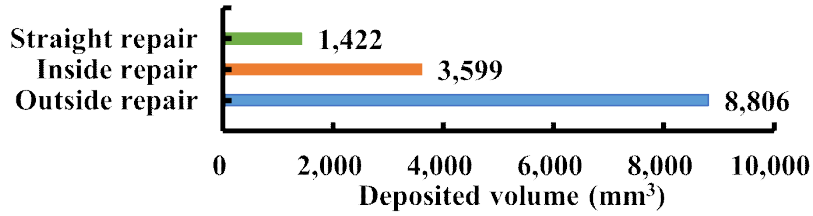
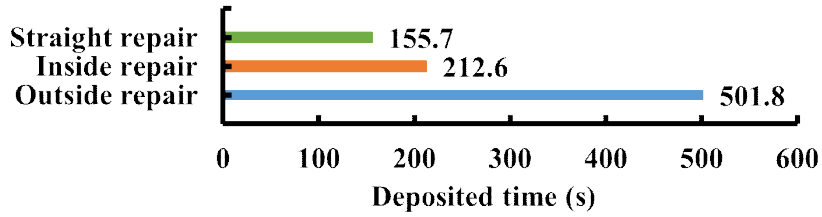


Fig. 71 Effect of maximum 1st principal stress between processes

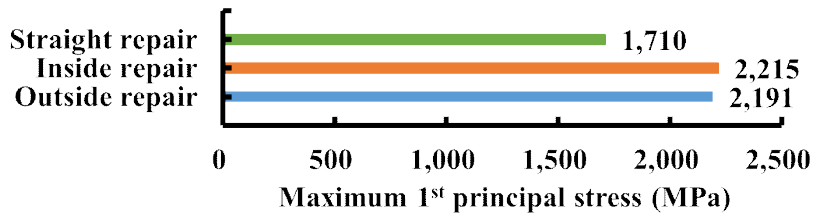


(a) Deposited volume

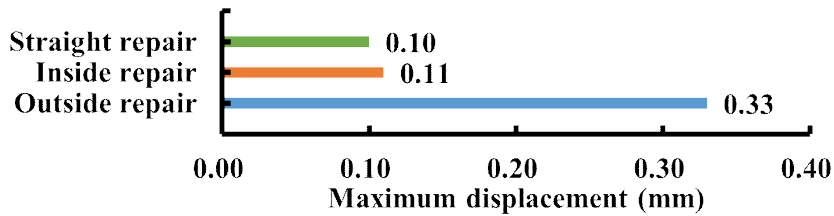


(a) Deposited time

Fig. 72 Deposited volume & Deposited time



(a) Maximum 1st principal stress



(a) Maximum displacement

Fig. 73 Maximum 1st principal stress & Maximum displacement

제 3 장 적층 전략에 따른 열-기계 특성 분석

제 1 절 적층 방향에 따른 열-기계 특성 분석

1. 적층 방향에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 비교 및 열-기계 특성 분석

가. 적층 방향에 따른 모델 비교 분석

제 3 장에서는 직선 보수 적층시 적층 전략에 따른 열-기계 연계 해석을 진행하고자 한다. 적층 전략으로는 적층 방향, Interpass time (경로 간 시간), Interlayer time (층 간 시간) 등으로 나뉘며, 제 1 절에서는 적층 방향에 따른 열-기계 특성 분석을 진행하고자 한다. 불규칙한 기저부 형상 적층시 레이저와 적층 재료 공급 장치인 노즐이 기저부와 충돌할 수 있기 때문에 적층 방향을 한 방향과 교차 방향으로 선정하였다. Fig. 74 는 적층 방향에 따라 한 방향, 교차 방향으로 설계한 2 차원 유한요소 해석 모델이다. Fig 74 (a) 는 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm, 길이 5 mm, (b) 는 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm, 길이 7 mm, (c) 기저부 각도 30° , 깊이 8 mm, 길이 9 mm 에 대한 2 차원 유한 요소 해석 모델이다.

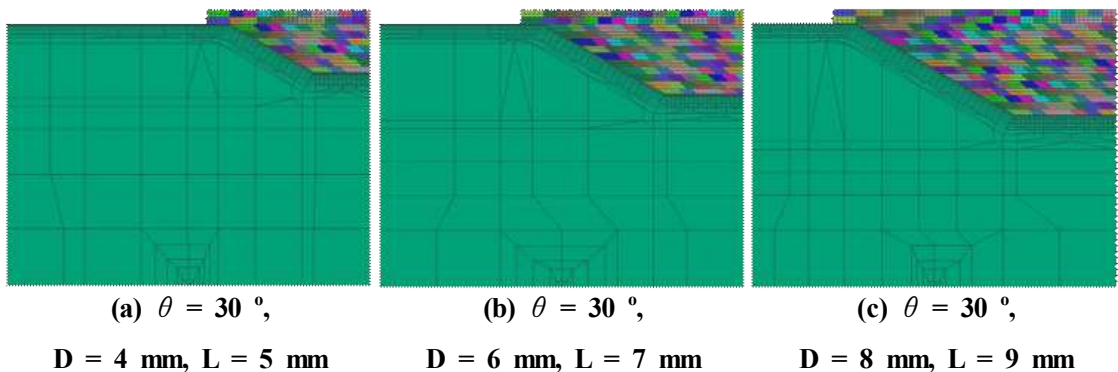


Fig. 74 Finite element analysis model of 2D (deposition direction)

Fig. 75 는 적층 방향에 따라 한 방향, 교차 방향을 설명하는 개념도이다. (a) 는 한 방향에 따른 개념도, (b)는 교차 방향에 따른 개념도이다.

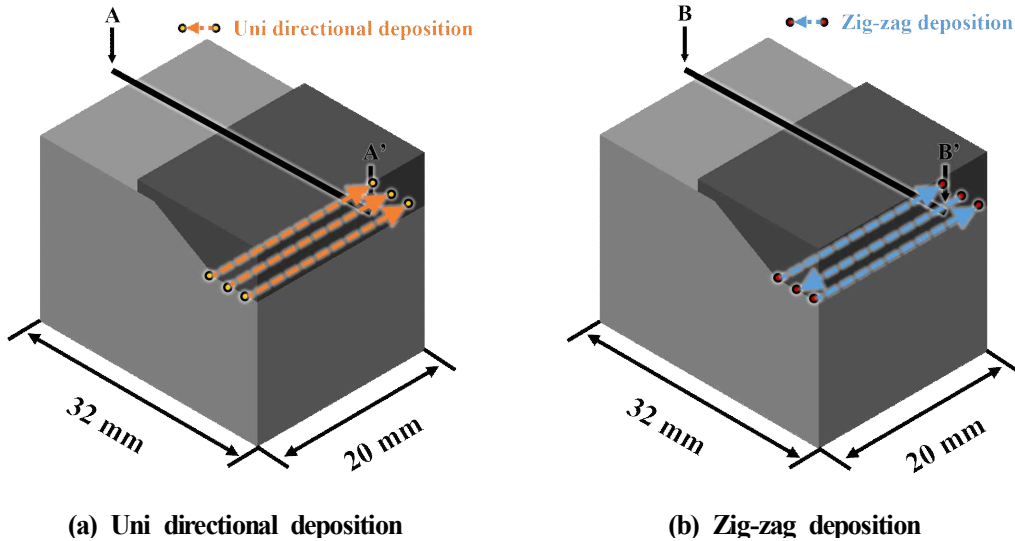
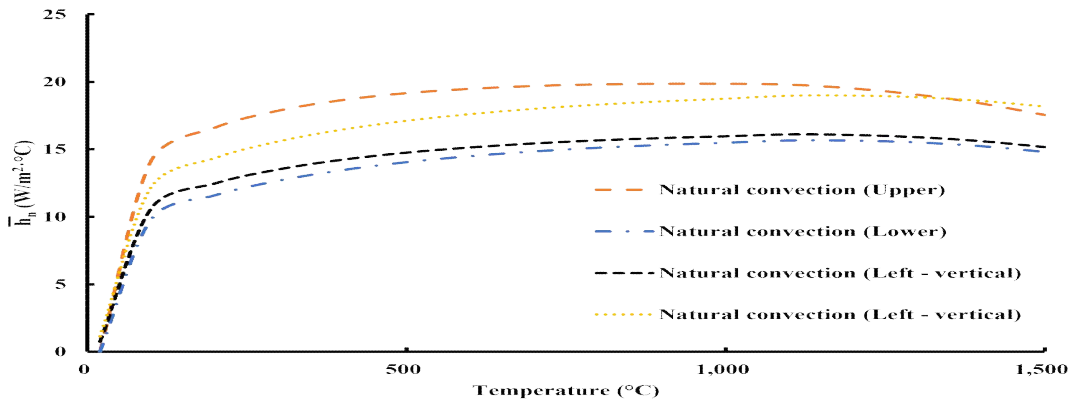
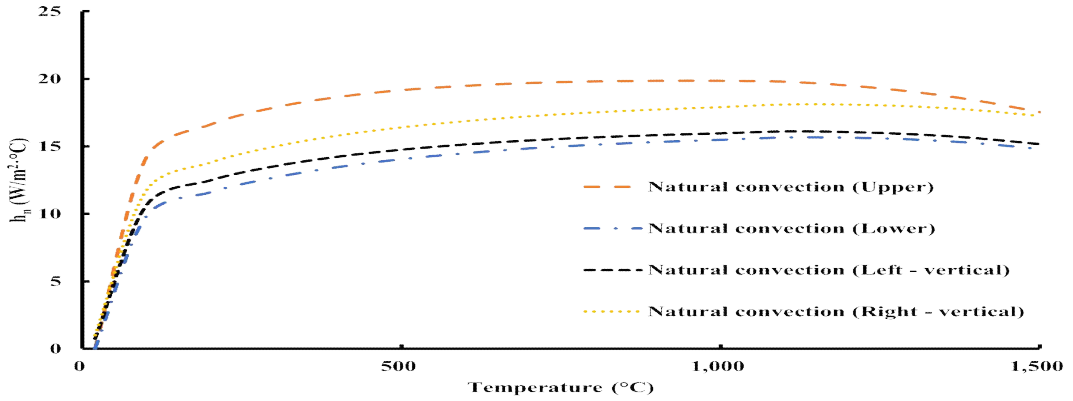


Fig. 75 Definition of deposition direction

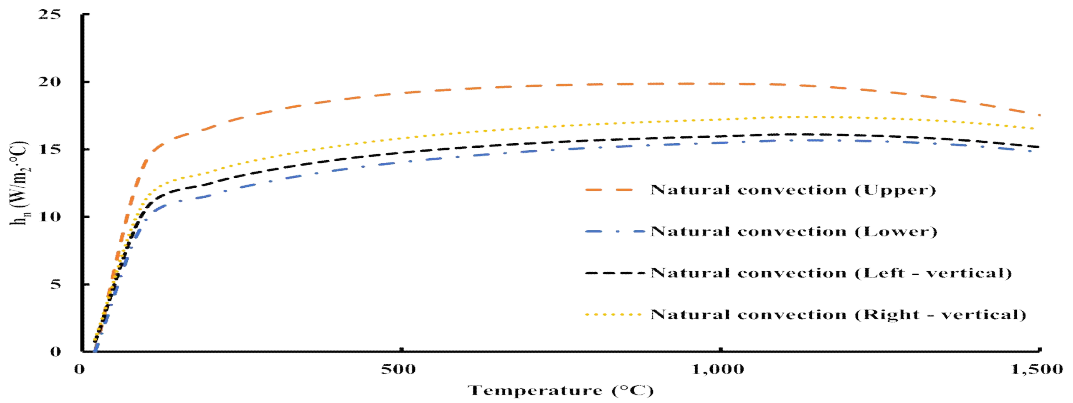
Fig. 76 은 적층 방향에 따라 설계한 2 차원 유한요소 해석 모델의 경계 데이터 조건 이며, (a) 는 기저부 각도 30 °, 깊이 4 mm, 길이 5 mm, (b) 는 기저부 각도 30 °, 깊이 6 mm, 길이 7 mm, (c) 기저부 각도 30 °, 깊이 8 mm, 길이 9 mm 에 대한 경계 데이터 조건이다.



(a) $\theta = 30^\circ$, $D = 4 \text{ mm}$, $L = 5 \text{ mm}$



(b) $\theta = 30^\circ$, $D = 6 \text{ mm}$, $L = 7 \text{ mm}$



(c) $\theta = 30^\circ$, $D = 8 \text{ mm}$, $L = 9 \text{ mm}$

Fig. 76 Temperature dependent natural convection coefficient (deposition direction)

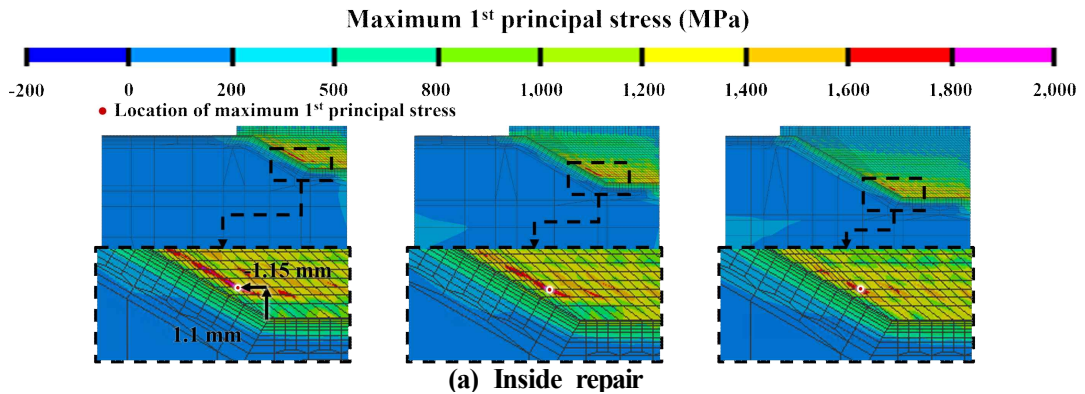
나. 주응력 특성 비교 및 분석

Fig. 77 은 열-기계 연계 해석을 통해 직선 보수 적층시 적층 방향에 따른 공정간 최대 주응력 발생 위치 및 분포이다. Fig 77 의 (a) 경우 한 방향 적층에 따른 분포이며, (b) 의 경우 교차 방향 적층에 따른 분포이다. 모든 형상에서 최대 주응력이 적층부에서 발생하였다. Table 27 은 직선 보수 적층시 적층 방향에 따른 최대 주응력의 크기를 나타낸표이며, 한 방향의 경우 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm, 길이 5 mm 에서 1,922 MPa, 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm, 길이 7 mm 에서 1,876 MPa, 기저부 각도 30° , 깊이 8 mm, 길이 9 mm 에서 1.814 MPa 로 나타났다. 교차 방향의 경우 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm, 길이 5 mm 에서 1,744 MPa, 기저부 각도 30° , 깊이 6 mm, 길이 7

mm 에서 1,634 MPa, 기저부 각도 30°, 깊이 8 mm, 길이 9 mm 에서 1,603 MPa 로 나타났다. Fig. 78 은 직선 보수 적층시 적층 방향에 따른 최대 주응력의 크기에 대한 그래프이다. 최대 주응력은 교차 방향으로 해석한 모델이 한 방향으로 해석한 모델보다 더 낮게 나타났다. 이를 통해 직선 보수 적층시 한 방향으로 적층하는 것보다는 교차 방향으로 적층을 진행하는 것이 좋다고 판단된다.

Table 27 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to deposition direction

	$\theta = 30^\circ$, D = 4 mm, L = 5 mm	$\theta = 30^\circ$, D = 6 mm, L = 7 mm	$\theta = 30^\circ$, D = 8 mm, L = 9 mm
Zig-zag deposition	1,922 MPa	1,876 MPa	1,814 MPa
Uni directional deposition	1,744 MPa	1,634 MPa	1,603 MPa



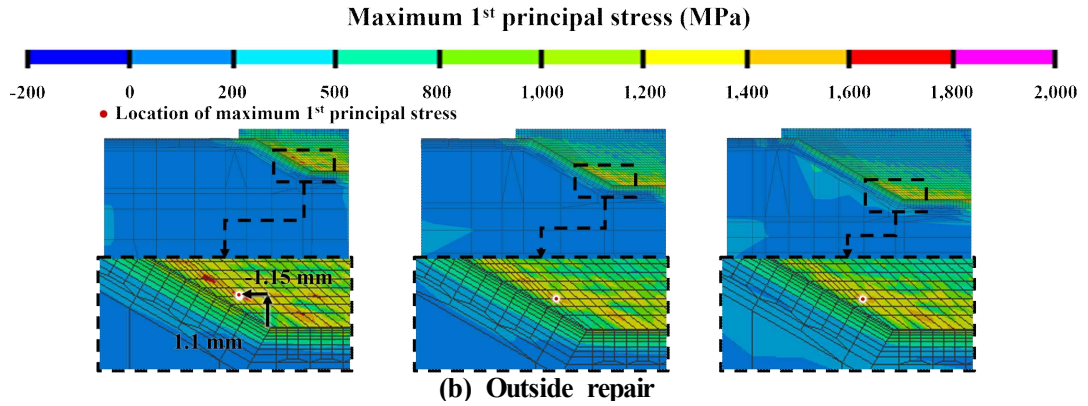


Fig. 77 Effect of maximum 1st principal stress between processes according deposition direction

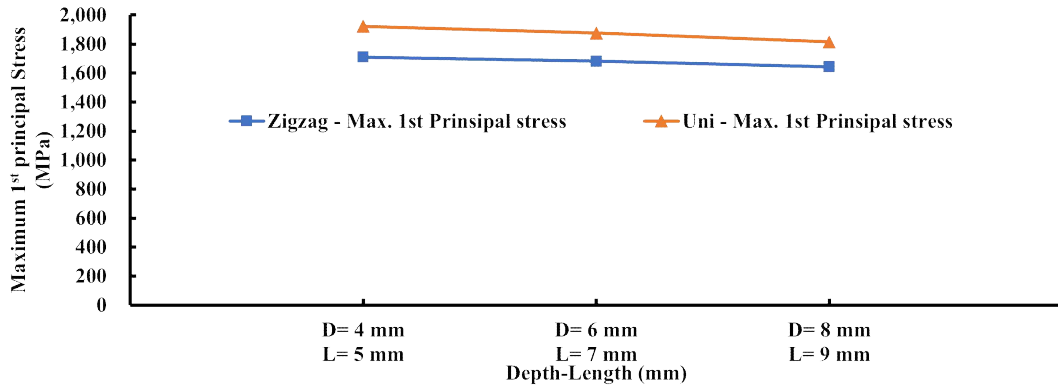


Fig. 78 Influence of deposition direction on maximum 1st principal stress

제 2 절 Interpass time 에 따른 열-기계 특성 분석

1. Interpass time 에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 비교 및 열-기계 특성 분석

가. Interpass time 에 따른 모델 비교 분석

Fig. 79 는 직선 보수 적층시 Interpass time 에 따른 열-기계 해석을 진행하기 위해 설계한 2 차원 유한 요소 해석 모델이다. Interpass time 이란 Fig 79 와 같이 DED 공정 중 레이저가 첫 번째 비드 (Bead) 에 대한 적층이 끝나고 다음 비드 (Bead) 로 이동하는 시간을 말한다. 해석모델은 기저부 경사각 30 °, 깊이 8 mm, 길이 9 mm 로 설정하였으며, 설정 이유는 해당 모델이 적층량이 가장 많기 때문에 적층 시간에 영향을 많이 받을 것으로 사료되었으며, 해석 간 비교가 더 수월할 것으로 판단되기 때문이었다. Interpass time 은 적층 비드간 거리를 레이저 이송 속도로 나누어 0.051 초로 계산되었으며, 기존의 Interpass time 에 0.5 초씩 추가하여 0.5-2.0 초까지 총 4 개의 해석을 진행하였다. 적층 방향은 교차 방향 적층으로 진행하였다. 적층 경계조건은 Fig. 80 과 같으며, 기저부 각도 30 °, 깊이 8 mm, 길이 9 mm 에 대한 경계조건과 동일하다.

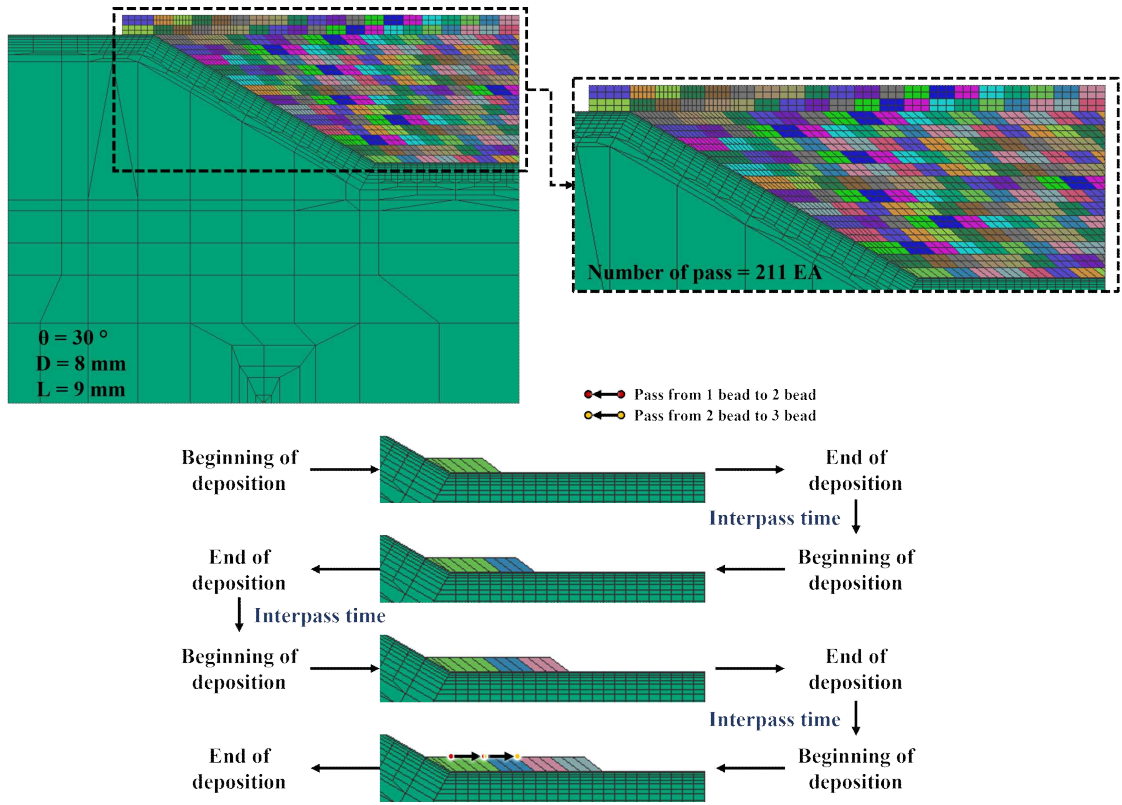


Fig. 79 Schematic of interpass time during deposition for 2D finite element analysis model

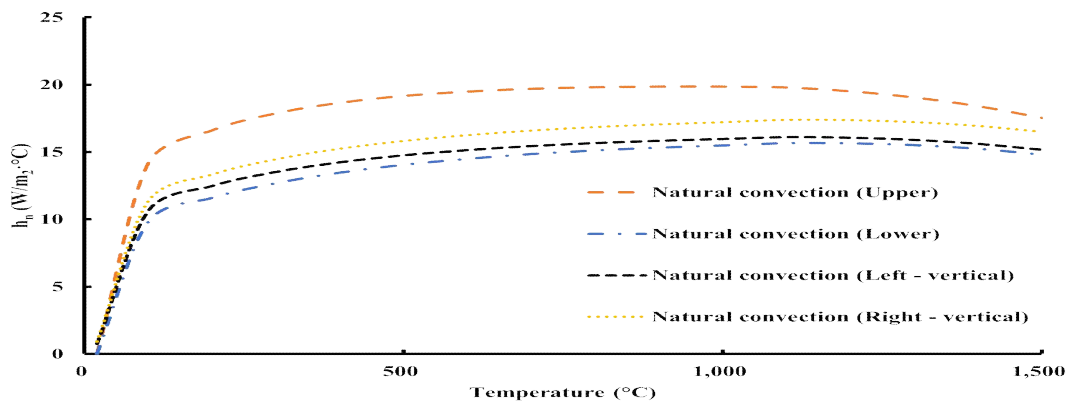


Fig. 80 Temperature dependent natural convection coefficient (Interpass time)

나. 주응력 특성 비교 및 분석

Fig. 81 은 열-기계 연계 해석을 통해 직선 보수 적층시 Interpass time 에 따른 공정 간 최대 주응력 발생 위치 및 분포이다. 모든 형상에서 최대 주응력이 적층부에서 발생하였다. Table 28 은 직선 보수 적층시 Interpass time 에 따른 최대 주응력의 크기를 나타낸 표이며, 기존의 Interpass time 에 대한 최대 주응력은 1,643 MPa, 0.5 초 추가된 경우 1,786 MPa, 1.0 초 추가된 경우 1,812 MPa, 1.5 초 추가된 경우 1,868 MPa, 2.0 초 추가된 경우 1,892 MPa 로 나타났다. Fig. 82 는 직선 보수 적층시 Interpass time 에 따른 최대 주응력의 크기에 대한 그래프이다. 최대 주응력은 기존의 Interpass time 에 대해 시간을 추가할수록 더 높게 나타났다. 이를 통해 직선 보수 적층시 Interpass time 에 대해 시간을 추가하지 않고 적층을 진행하는 것이 좋다고 판단된다.

Table 28 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to interpass time

Interpass time	Initial	+ 0.5 s	+ 1.0 s	+ 1.5 s	+ 2.0 s
Maximum 1 st principal stress (MPa)	1,643	1,786	1,812	1,868	1,892

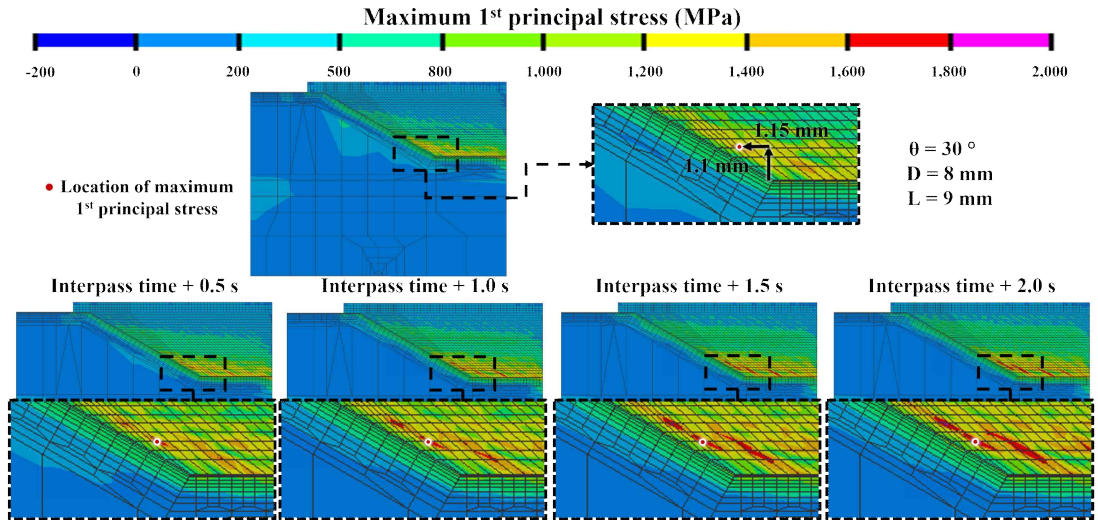


Fig. 81 Effect of maximum 1st principal stress between processes according to interpass time

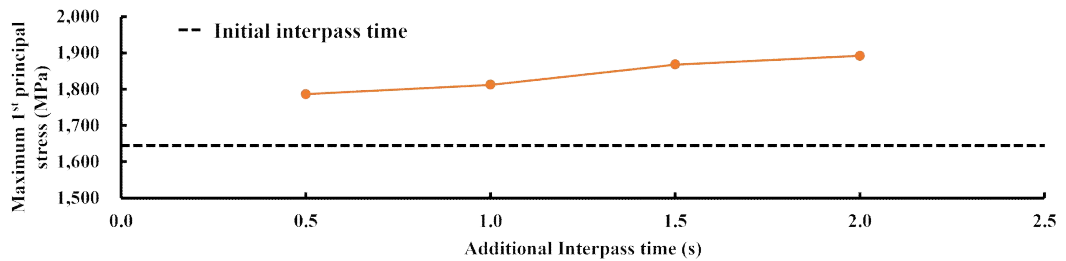


Fig. 82 Influence of interpass time on maximum 1st principal stress

제 3 절 Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 분석

1. Interlayer time 에 따른 3차원 유한요소 해석을 위한 모델 비교 및 열-기계 특성 분석

가. Interlayer time 에 따른 모델 비교 분석

Fig. 83 은 직선 보수 적층시 Interlayer time 에 따른 열-기계 해석을 진행하기 위해 설계한 2 차원 유한 요소 해석 모델이다. Interlayer time 이란 Fig 83 과 같이 DED 공정 중 레이저가 첫 번째 층 (Layer) 에 대한 적층이 끝나고 다음 층 (Layer) 로 이동하는 시간을 말한다. 해석모델은 기저부 경사각 30°, 깊이 8 mm, 길이 9 mm 로 설정하였으며, 설정 이유는 해당 모델이 적층량이 가장 많기 때문에 적층 시간에 영향을 많이 받을 것으로 사료되었으며, 해석 간 비교가 더 수월할 것으로 판단되기 때문이었다. Interlayer time 은 적층 층 간 거리를 레이저 이송 속도로 나누어 각 층이 이동될 때마다 다르게 계산되어 Table 29 와 같이 정리하였다. 기존의 Interlayer time 에 5 초씩 추가하여 5-20 초까지 총 4 개의 해석을 진행하였다. 적층 방향은 교차 방향 적층으로 진행하였다. 적층 경계조건은 Fig. 84 와 같으며, 기저부 각도 30°, 깊이 8 mm, 길이 9 mm 에 대한 경계조건과 동일하다.

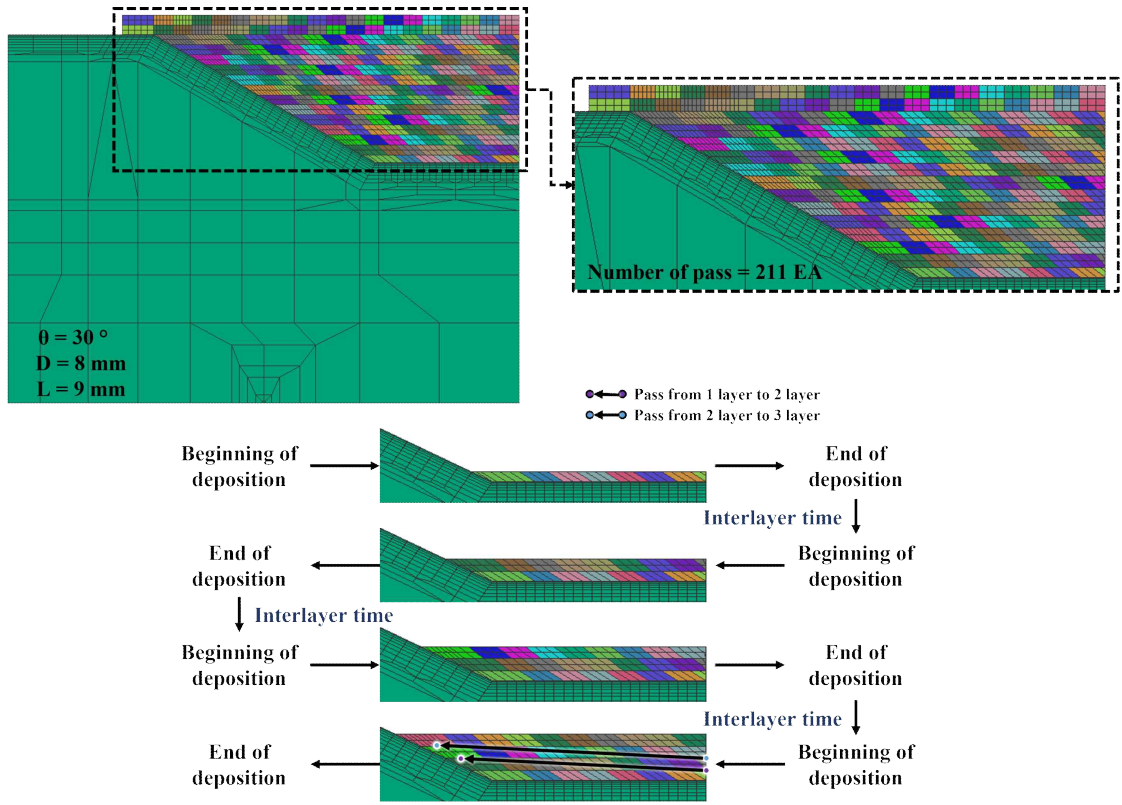


Fig. 83 Schematic of interlayer time during deposition for 2D finite element analysis model

Table 29 Definition of interlayer time

Layer to layer	1 st layer to 2 nd layer	2 nd layer to 3 rd layer	3 rd layer to 4 th layer	4 th layer to 5 th layer
Interlayer time (s)	0.435	0.983	0.988	0.557

Layer to layer	5 th layer to 6 th layer	6 th layer to 7 th layer	7 th layer to 8 th layer	8 th layer to 9 th layer
Interlayer time (s)	1.043	0.647	1.056	0.749

Layer to layer	9 th layer to 10 th layer	10 th layer to 11 th layer	11 th layer to 12 th layer	12 th layer to 13 th layer
Interlayer time (s)	1.172	0.853	1.242	0.946

Layer to layer	13 th layer to 14 th layer	14 th layer to 15 th layer
Interlayer time (s)	1.340	1.011

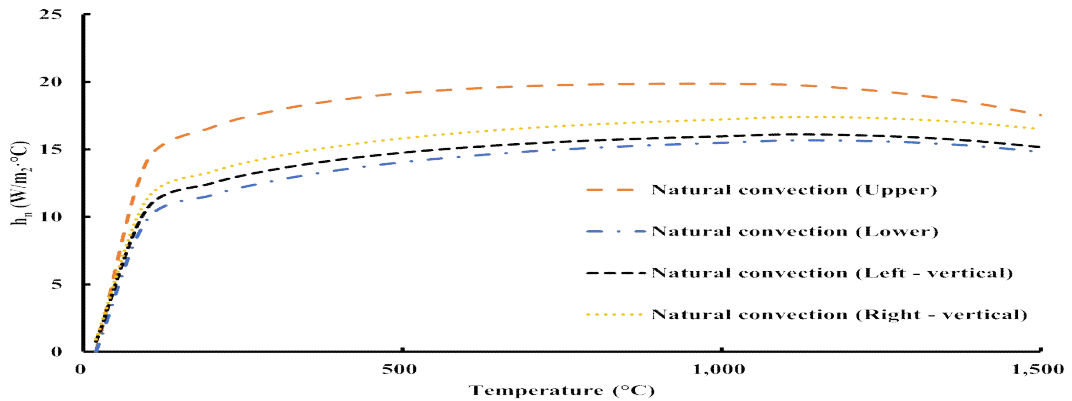


Fig. 84 Temperature dependent natural convection coefficient (Interlayer time)

나. 주응력 특성 비교 및 분석

Fig. 85 는 열-기계 연계 해석을 통해 직선 보수 적층시 Interlayer time 에 따른 공정 간 최대 주응력 발생 위치 및 분포이다. 모든 형상에서 최대 주응력이 적층부에서 발생하였다. Table 30 은 직선 보수 적층시 Interlayer time 에 따른 최대 주응력의 크기를 나타낸 표이며, 기존의 Interlayer time 에 대한 최대 주응력은 1,643 MPa, 5 초 추가된 경우 1,813 MPa, 10 초 추가된 경우 1,863 MPa, 15 초 추가된 경우 1,895 MPa, 20 초 추가된 경우 1,906 MPa 로 나타났다. Fig. 86 은 직선 보수 적층시 Interlayer time 에 따른 최대 주응력의 크기에 대한 그래프이다. 최대 주응력은 기존의 Interlayer time 에

대해 시간을 추가할수록 더 높게 나타났다. 이를 통해 직선 보수 적층시 Interlayer time 에 대해 시간을 추가하지 않고 적층을 진행하는 것이 좋다고 판단된다.

Table 30 Maximum 1st principal stress value during deposition process according to interlayer time

Interlayer time	Initial	+ 5 s	+ 10 s	+ 15 s	+ 20 s
Maximum 1 st principal stress (MPa)	1,643	1,813	1,863	1,895	1,906

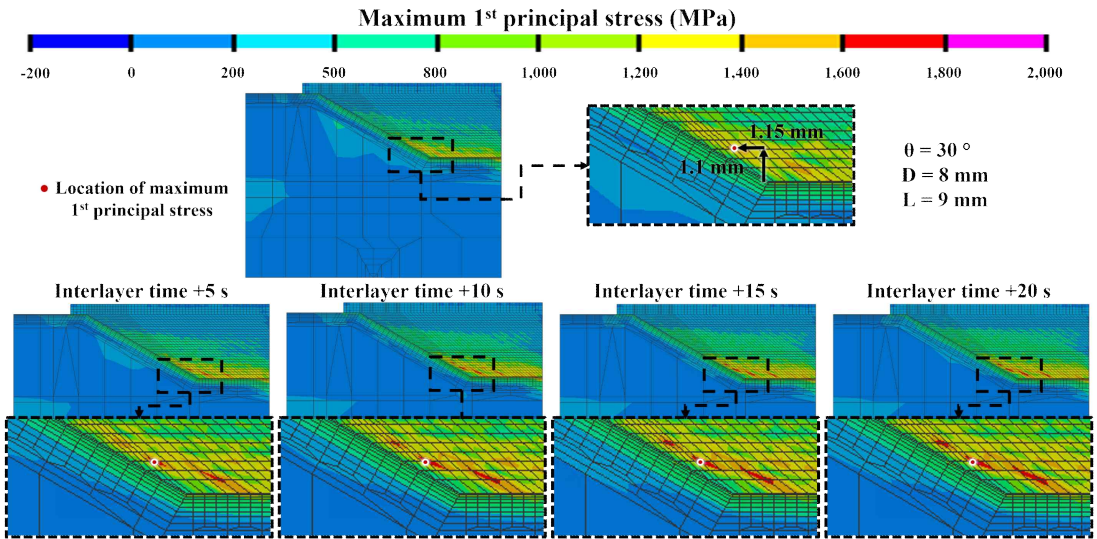


Fig. 85 Effect of maximum 1st principal stress between processes according interlayer time

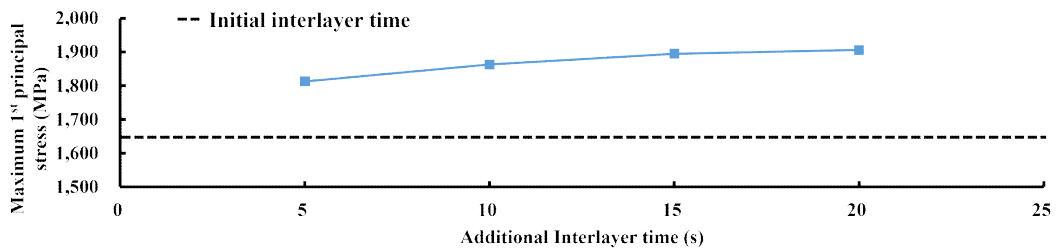


Fig. 86 Influence of interlayer time on maximum 1st principal stress

제 4 장 기공 위치에 따른 열-기계 특성 분석

제 1 절 기공 위치에 따른 열-기계 특성 분석

1. 기공 위치에 따른 2 차원 유한요소 해석을 위한 모델 개발 및 열-기계 특성 분석

가. 기공 위치에 따른 2 차원 유한요소 해석 모델 개발

기공 발생 위치에 따른 열-기계 연계 해석을 진행하기 위해 기저부 각도 30° , 깊이 4 mm, 길이 5 mm 로 설계된 2 차원 유한요소 해석 모델을 선정하였다. 적층 방향으로 교차 방향으로 진행하였으며, 기공 발생 위치는 경사면 방향과 수평 방향으로 나누어 적용하였다. 하나의 유한 요소 격자를 제거하여 기공 발생 위치로 적용하였으며, 수평 방향의 경우 첫 번째 기공의 위치는 기준으로부터 수평 방향으로 0.2 mm, 두 번째 기공의 위치는 0.6 mm, 세 번째 기공의 위치는 1.0 mm, 네 번째 기공의 위치는 1.4 mm, 다섯 번째 기공의 위치는 1.8 mm 로 설정하였다. 경사면 방향의 첫 번째 기공의 위치는 기준으로부터 수직 방향으로 0.5 mm, 두 번째 기공의 위치는 1.125 mm, 세 번째 기공의 위치는 1.75 mm 로 설정하였다. 기공 하나의 크기는 적층을 진행한 비드의 하나의 크기와 같고, Fig. 87 과 같다. 총 유한요소 해석이 진행된 모델은 8 가지로 선정되었으며, 수평 방향의 경우 5 가지, 경사면 방향의 경우 3 가지로 선정하였다. 해석에 적용된 경계 조건은 Fig. 88 과 같으며, 기저부 각도 30° 깊이 4 mm, 길이 5 mm 와 같다.

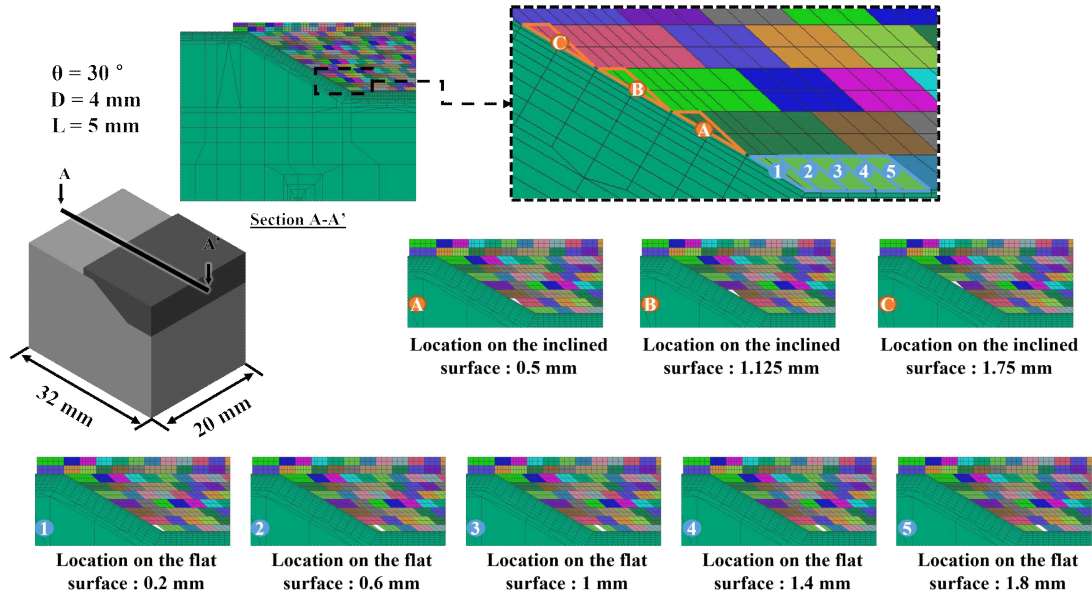


Fig. 87 Definition of location of pore for 2D finite element analysis model

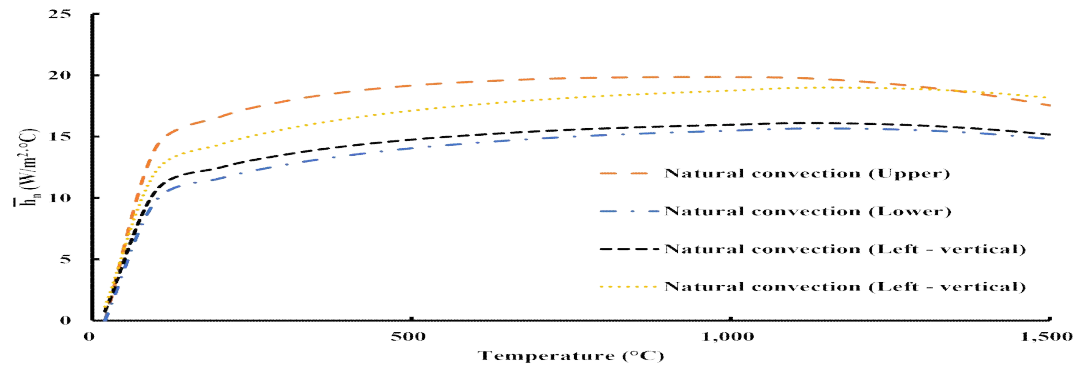


Fig. 88 Temperature dependent natural convection coefficient (location of pore)

나. 주응력 특성 비교 및 분석

Fig. 89 는 열-기계 연계 해석을 통해 수평 방향 기공 위치에 따른 탄성 회복 및 냉각 후 최종 주응력 발생 위치 및 분포이다. 기존의 기공이 없는 해석 모델의 최종 주응력의 발생 위치는 기준으로부터 2.6 mm 지점이었다. 하지만 수평 방향 기공 위치에 따라 최종 주응력 발생 위치는 달라졌으며, 1 번 위치의 경우 0.2 mm, 2 번 위치의 경우 0.6 mm, 3 번 위치의 경우 1.0 mm, 4 번 위치의 경우 1.4 mm, 5 번 위치의 경우

1.8 mm 로 나타났다. 수평 방향으로 기공의 위치가 이동됨에 따라 최종 주응력의 위치는 기공 위치 인근으로 생성되었고 최종 주응력 값이 증가하였다. Fig. 90 은 기공이 없는 냉각후 최종 주응력에 대한 수평 방향 위치에 따른 그래프이다. 기존의 최종 주응력은 431 MPa 인 반면, 1 번 위치의 경우 791 MPa, 2 번 위치의 경우 778 MPa, 3 번 위치의 경우 746 MPa, 4 번 위치의 경우 719 MPa, 5 번 위치의 경우 738 MPa 로 나타났다. 각각 기존의 최종 주응력에 비해 1 번 위치의 경우 83.5 %, 2 번 위치의 경우 80.5 %, 3 번 위치의 경우 73.1 %, 4 번 위치의 경우 66.8 %, 5 번 위치의 경우 71.2 % 로 나타났다.

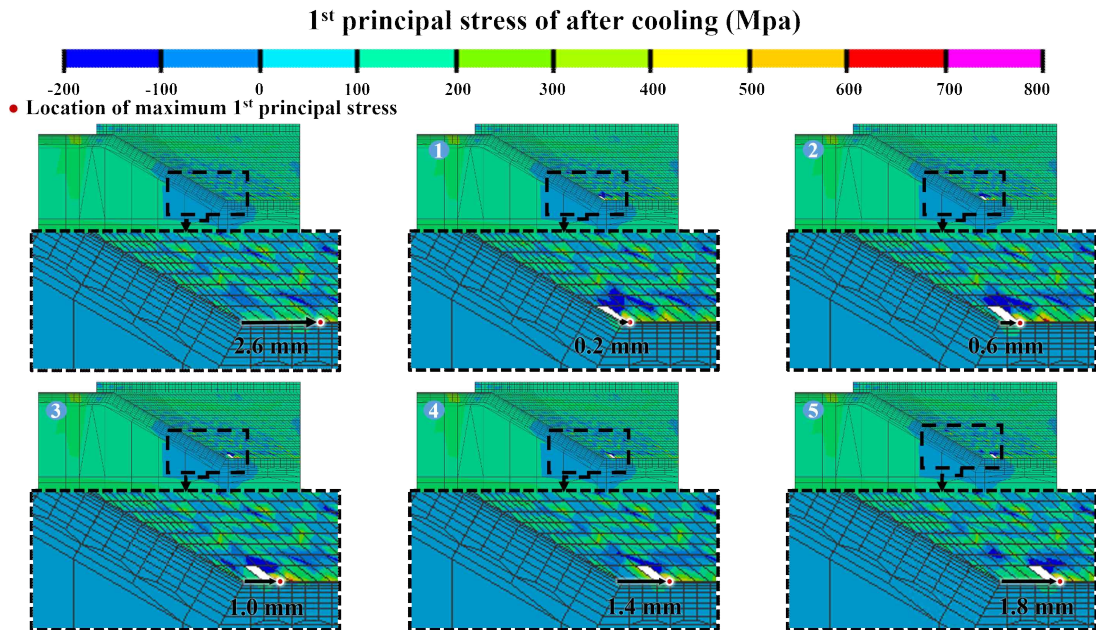


Fig. 89 Effect of 1st principal stress according pore location on the flat surface

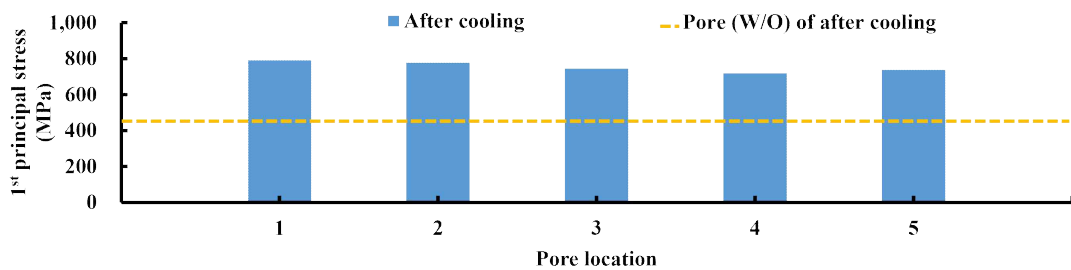


Fig. 90 Influence of pore location on the flat surface on after cooling 1st principal stress

Fig. 91 은 열-기계 연계 해석을 통해 경사면 방향 기공 위치에 따른 탄성 회복 및 냉각 후 최종 주응력 발생 위치 및 분포이다. 기존의 기공이 없는 해석 모델의 최종 주응력의 발생 위치는 기준으로부터 2.6 mm 지점이었다. 경사면 방향으로 해석한 결과 모든 형상에서 최종 주응력의 발생 위치는 기준으로부터 2.6 mm 지점과 동일하였다. 경사면 방향으로 기공의 위치가 이동됨에 따라 최종 주응력의 위치는 변함없었고 최종 주응력 값이 증가하였다. Fig. 92 는 기공이 없는 냉각후 최종 주응력에 대한 경사면 방향 위치에 따른 그래프이다. 기존의 최종 주응력은 431 MPa 인 반면, A 위치의 경우 523 MPa, B 위치의 경우 526 MPa, C 위치의 경우 531 MPa 로 나타났다. 각각 기존의 최종 주응력에 비해 A 위치의 경우 21.3 %, B 위치의 경우 22.0 %, C 위치의 경우 23.2 % 로 나타났다. 위 결과들을 통해 탄성 회복 및 냉각 후 최종 주응력 관점에서 보았을 때 경사면 방향 위치에 따른 기공 발생보다 수평 방향 위치에 따른 기공이 적층 후 균열에 더 결정적인 영향을 미칠 것으로 사료된다.

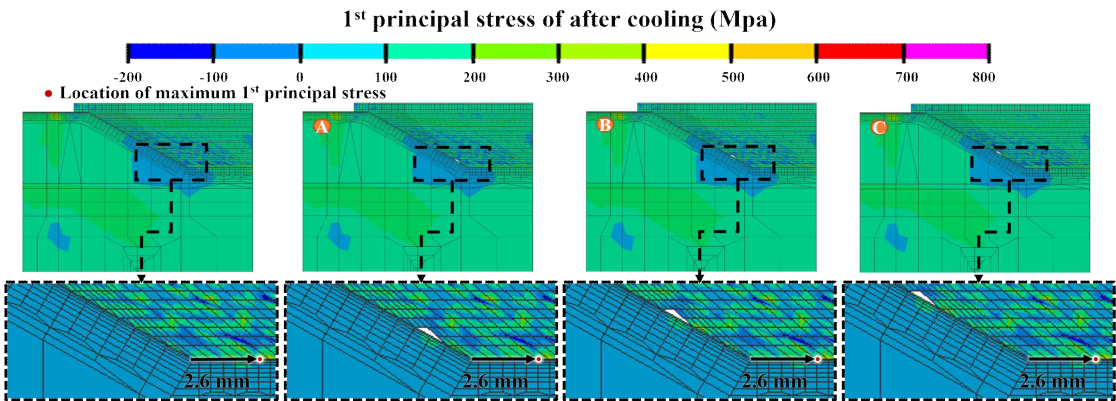


Fig. 91 Effect of 1st principal stress according pore location on the inclined surface

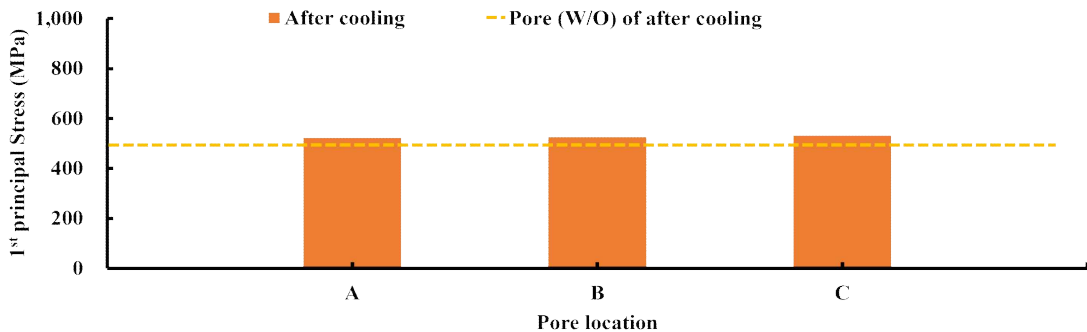


Fig. 92 Influence of pore location on the inclined surface on after cooling 1st principal stress

제 5 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 DED 공정을 이용한 SCM440 기저부 위 G6 분말 적층시 기저부 형상과 적층 전략이 적층 영역 열-기계 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 열-기계 해석을 진행하기 위해 적층 경로 방향에 따라 직선, 내측 및 외측 보수 형상을 설계하였고 기저부 형상에 따라 기저부 경사각, 깊이 및 길이에 따른 유한 요소 해석 모델을 개발하고 최적의 형상을 선정하였다. 또한 적층 영역 잔류응력을 최소화를 위해 적층 전략에 따라 적층 방향, Interpass time 및 Interlayer time 으로 나누어 열-기계 연계 해석을 진행하였다. 이를 통해 적정 적층 전략을 선정하였다. 마지막으로 기공의 위치에 따라 수평 방향 및 경사면 방향으로 나뉘 적층 영역의 열-기계 특성 분석을 위해 기공의 위치 선정 및 유한 요소 해석 모델을 개발하였다. 해석을 진행함에 있어 기저부는 SCM440 강을 사용하였으며, 적층분말은 G6 를 사용하였다. 열-기계 연계 해석을 통해 잔류응력 특성 비교 및 분석 시 잔류 응력의 척도는 주응력으로 선정하였다.

기저부 각도에 따른 유한 요소 해석 결과 기저부 각도 30 ° 및 45 ° 중 경사각이 낮은 30 ° 의 경우가 잔류응력 저감 측면에서 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 기저부 각도가 낮은 30 ° 의 경우 45 ° 의 기저부 형상과 비교 하였을 때 적층량이 증가하여 열 이력이 많아져 응력이 완화됐을 것으로 사료된다. 또한 경사각이 완만함에 따라 기저부 경사면과 기저부 평면의 교차지점 부근에 응력 집중 현상이 감소됐을 것으로 사료된다. 기저부 깊이에 따른 유한 요소 해석 결과 기저부 깊이 4 mm, 6mm 및 8 mm 중 깊이가 깊은 8 mm 의 경우가 잔류응력 저감 측면에서 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 기저부 깊이가 깊은 8 mm 의 경우 다른 형상과 비교 하였을 때 적층량이 증가하여 열 이력이 많아져 응력이 완화됐을 것으로 사료된다. 기저부 길이에 따른 유한 요소 해석 결과 기저부 길이 5 mm, 7mm 및 9 mm 중 길이가 긴 9 mm 의 경우가 잔류응력 저감 측면에서 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 기저부 길이가 긴 9 mm 의 경우 다른 형상과 비교 하였을 때 적층량이 증가하여 열 이력이 많아져 응력이 완화됐을 것으로 사료된다. 적층 경로 방향에 따른 유한 요소 해석 결과 직선 보수, 내측 회전 보수 및 외측 회전 보수 중 직선 보수의 경우가 가장 좋은 조건임을 예측할 수 있었다. 이는 내측 회전 보수의 경우 최대 주응력이 가장 크게 발생하였고, 외측 회전 보수의 경우 변형이 가장 크게 발생하였기 때문이었다. 직선 보수 적층시 2 차원과 3 차원 유한요소 해석을 비교한 결과 주응력 이력을 바탕으로 2 차원 해석은 3 차원

해석의 해당 단면을 해석하였기 때문에 3 차원 해석의 적층이 진행되면서 해당 단면에서 최대 주응력이 발생했기 때문에 최대 주응력 값이 비슷함을 확인하였다. 3 차원 유한 요소 해석은 적층 길이 방향으로 변형이 가능하지만, 2 차원 유한 요소 해석의 경우 적층 길이 방향으로 변형이 불가능하다. 변형의 대한 저항이 큰 2 차원 유한 요소 해석의 잔류 응력이 3 차원 유한 요소 해석보다 높은 잔류 응력을 형성하는 것으로 사료된다. 이를 통한 주응력 이력 또한 2 차원 해석은 길이 방향 변형이 없기 때문에 3 차원 해석과 비슷하다가 최대 주응력이 발생 후 차이가 생겼다. 최대 주응력의 경우 한 방향 적층시 5.55 %, 교차 방향 적층시 6.86 % 차이가 있었으며, 탄성 회복 및 냉각 후 최종 주응력의 경우 한 방향 적층시 31.02 %, 교차 방향의 경우 30.04 % 차이가 발생하였다. 2 차원 유한 요소 해석에서 균열이 발생하지 않는다면 3 차원 유한 요소 해석에서 또한 균열이 발생하지 않을 것으로 사료된다. 마지막으로 해석 시간과 해석 용량의 비교를 통해 3 차원 유한 요소 해석이 2 차원 유한 요소 해석과 비교 하여 높은 해석시간 및 해석데이터의 용량을 소요한다. 따라서 2 차원 유한 요소 해석이 더 보수적으로 해석이 가능하다는 것으로 사료된다. 열-기계 특성 분석시 더 용이하다는 것을 확인할 수 있었다. 축 대칭 보수 적층시 내경에 따른 유한 요소 해석 결과 내경 3 mm, 5mm 및 10 mm 중 내경의 길이가 긴 10 mm 의 경우가 잔류응력 저감 측면에서 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 내경의 길이가 긴 10 mm 의 경우 다른 형상과 비교 하였을 때 적층량이 증가하여 열 이력이 많아져 응력이 완화됐을 것으로 사료된다. 위 결과들을 통해 적층 경로 방향 측면에서는 직선 보수 형상, 기저부 형상 측면에서는 기저부 각도 30°, 깊이 8 mm, 길이 9 mm, 내경 10 mm 가 최적의 형상으로 선정되었다.

적층 전략에 따른 유한 요소 해석 결과 적층 경로 측면에서는 교차 방향 적층의 경우가 한 방향 적층 경로인 경우와 비교하여 해석 결과 모든 형상에서 교차 방향 적층이 낮은 잔류 응력을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. Interpass time 과 Interlayer time 에 따라서는 두 가지의 경우 모두 시간이 추가되어 증가함에 따라 최대 잔류 응력값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Interpass time 의 시간의 증가함에 따라 발생하는 잔류 응력 증가율이 Interlayer time 의 시간의 증가함에 따라 발생하는 잔류 응력 증가율보다 낮게 형성됨을 확인할 수 있었다. 따라서 적층 전략 측면에서는 한 방향 적층보다는 교차 방향 적층을 진행하고, Interpass time 과 Interlayer time 의 시간을 추가하지 않는 것이 균열에 영향을 끼치지 않을 것으로 예측된다.

기공 위치에 따른 열-기계 연계 해석 결과 기공의 위치가 수평 방향인 경우 발생 위

치에 따라 탄성회복 및 냉각후 최종 잔류응력의 위치가 변하였다. 탄성회복 및 냉각후 최종 잔류응력의 경우 모든 위치에서 기존의 값보다 높게 나타났으며, 최소 66 %에서 최대 83 % 까지 증가하였다. 경사면 방향의 경우 발생 위치에 따라 탄성회복 및 냉각후 최종 잔류응력의 위치는 변하지 않았지만, 탄성회복 및 냉각후 최종 잔류응력의 경우 모든 위치에서 기존의 값보다 소량 증가하였다. 기공의 위치에 따른 해석을 통해 수평 방향에 따라 기공이 발생하였을 때가 경사면 방향에 따라 기공이 발생했을 때보다 더 균열에 결정적인 영향을 끼치는 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 DED 공정을 이용한 SCM440 기저부 위 G6 분말 적층시 기저부 형상과 적층 전략이 적층 영역 열-기계 특성에 미치는 영향에 대해 고찰을 바탕으로 후속 연구로 아래와 같은 연구가 추가로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

첫 번째로 기저부 형상에 대해 아크 형상에 따른 열-기계 특성 분석이다. 이에 따라 기저부 각도에 따른 기저부 형상과 아크 형상의 유한 요소 해석 모델을 개발하여 열-기계 연계 해석을 통한 잔류응력 특성 비교 분석이 필요하다.

두 번째로 축 대칭 보수 적층시 내측 및 외측 모두 적층을 진행해야하는 경우에 대한 열-기계 특성이다. 내측과 외측 보수의 경우 먼저 적층을 진행함에 따라 잔류응력 특성이 달라질 것으로 사료되며, 이에 따른 잔류응력 특성 분석이 필요하다.

세 번째로 열-기계 연계 해석으로 도출된 최적의 기저부 형상에 따라 실제 적층을 진행하여, 기저부 시편을 제작 후 적층 실험을 통하여 적층 특성 분석 및 잔류 응력 측정 실험을 통하여 실험과 해석의 잔류 응력 결과의 비교 및 분석이 필요하다.

이 외에도 열처리 및 불규칙 형상 적층을 위한 기저부 형상 및 부품 보수 실험이 진행된 시편의 후처리 가공 전후로 형성된 보수 시편의 기계적 특성 및 잔류 응력 측정 실험을 통하여 비교 및 분석이 필요할 것으로 사료 된다.

REFERENCES

1. N. Crafts, “Explaining the first Industrial Revolution: two views,” *European Review of Economic History*, Vol. 15, Issue. 1, pp. 153-168, 2011.
2. Naboni, R., Paoletti, I., “The Third Industrial Revolution,” *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technol.*, Vol. 7, No. 27, pp. 7-27, 2014.
3. A. Atkeson, P. J. Kehoe, “The Transition to a New Economy After the Second Industrial Revolution,” *NBER Working Paper*, No. 8678, 2001.
4. Klaus Schwab “The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond,” *World Economic Forum*, 2016.
5. Peter, Troxler. “Making the 3rd Industrial Revolution,” *PeterTroxler. net*, 2013
6. 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.
7. S. Sagiroglu., D. Sinanc., “Big data: A review,” *International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 2013
8. 송현우, “ 기획특집: 3D 프린팅 기술: 3차 산업혁명 3D Printing.” *공업화학전망*, 18.1 27-44, 2015
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. Byun, J. G., Cho. S. M., “Trend of Metal 3D Printing by Welding,” *J. Welding and Joining.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1-8, 2016
12. Byun, J. G., Cho. S. M., “Trend of Metal 3D Printing by Welding,” *J. Welding and Joining.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1-8, 2016
13. 3D SYSTEMS, “Our Story,” <https://www.3dsystems.com/our-story> (Accessed 26 February 2021)
14. Amanda, S., Subhi, J. A., “History of 3D Printing.” *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, pp. 1-10, 2018

15. Frketic, J., Dickensa, T., and Ramakrishnan, S., “Automated Manufacturing and Processing of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites: An Additive Review of Contemporary and Modern Techniques for Advanced Materials Manufacturing,” *Additive Manuf.*, Vol. 14, pp. 69-86, 2017.
16. ASTM F2792-12a, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” 2012. (Accessed 2 March 2021)
17. ASTM INTERNATIONAL, “Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies,” <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm> (Accessed 2 March 2021)
18. Peak. S. H., “Introduction of 3D Printing Technology & Application,” *KIC NEWS*, Vol. 18, pp. 1-10, 2015.
19. 3D GURU, “Vat Photopolymerization”, <http://www.3dguru.co.kr/bbs/newsroom/9988> (Accessed 19 March 2021)
20. Pearson. A., “The five benefits of 3D printing”, https://www.stratasys.com/explore/article/five-benefits-of-3d-printing#_ga=2.148088946.416570070.1614326187-623322918.1614326187 (Accessed 2 March 2021)
21. 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)
22. About Additive Manufacturing Sheet Lamination, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>, (Accessed 19 March 2021)
23. 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.
24. 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%20D%20inkjet%20process.](https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/#:~:text=Material%20jetting%20(MJ)%20is%20one,to%20the%20D%20inkjet%20process.) (Accessed 3 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. R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk, “Aerospace applications of laser additive manufacturing” Missouri University of Science and Technology, Rolla, Missouri, United States, pp. 351-371, 2017.

27. 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.
28. Froes, F. H. and Dutta, B. "The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys," Adv Mat Res, Vol. 1019, pp. 19-25, 2014.
29. 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.
30. 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
31. 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.
32. 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.
33. Liu. R., Wang. Z., Sparks. T., Liou. F., Newkirk. J., "Aerospace Applications of Laser Additive Manufacturing," Laser Additive Manufacturing, pp. 351-371, 2017.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Gibson. I. et al., "Directed Energy Deposition Processes," Additive Manufacturing Technologies, Vol. 10, pp. 245-268, 2015.
38. Lee. K. K., Bih. L. C., Ahn. D. G., "Remanufacturing Strategy of Engraved Part Using

- Directed Energy Deposition Process,” *Int. J of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9(6), 1575-1582, 2022
39. 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.
 40. 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.
 41. Li, Rong, Jun Xiong, and Yangyang Lei. "Investigation on thermal stress evolution induced by wire and arc additive manufacturing for circular thin-walled parts." *Journal of Manufacturing Processes*, Vol 40, pp. 59-67, 2019.
 42. Lu, Xufei, et al. "Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by Directed Energy Deposition: Modelling and experimental calibration." *Additive Manufacturing*, Vol 26, pp. 166-179, 2019.
 43. Jardin, Rúben Tome, et al. "Sensitivity analysis in the modelling of a high speed steel thin-wall produced by directed energy deposition." *Metals*, 10.11, 1554, 2020
 44. Lu, Xufei, et al. "Substrate design to minimize residual stresses in Directed Energy Deposition AM processes." *Materials & Design*, 202, 109525, 2021
 45. Kim, D. A., “A study on the Influence of deposition and substrate shape on residual stress characteristics in the vicinity of the repaired region of part for machine tools using a DED process,” Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2019.
 46. Arana, Maider, et al. "Influence of deposition strategy and heat treatment on mechanical properties and microstructure of 2319 aluminium WAAM components." *Materials & Design*, 221, 110974, 2022
 47. Li. L., Zhang. X., Cui. W., Liou. F., Deng. W., Li. W., “Temperature and Residual Stress Distribution of FGM Parts by DED Process: Modeling and Experimental Validation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, pp. 451-462, 2020.
 48. Gordon. J. V., Harden. C. V., Nied. H. F., Vinci. R. P., Harlow. D. G., “Fatigue Crack Growth Anisotropy, Texture and Residual Stress in Austenitic Steel Made by Wire and Arc Additive Ma
 49. Alissultan. A., “A study on the Effects of Deposition Strategies and Shapes on

Thermo-mechanical Characteristics in the Vicinity of the Deposited Region by a DED Process,” Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2019.

50. 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.
51. 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.

감사의 글

길고 길었던 석사과정 학위 논문을 마무리하며 감사의 인사를 올립니다. 대학교 4년과 학생회장때 현장건축이라는 행사를 통해 안동규 교수님과 연을 맺었습니다. 석사 과정에 진학하여 처음에는 아무것도 모르는 저에게 교수님께서 하나하나 가르쳐 주시고 지도해 주셨습니다. 석사과정을 마무리할 때까지 이끌어주시고 격려해주신 안동규 교수님께 감사의 말씀 올립니다. 또한 졸업논문 지도해주신 김창래 교수님과 이정원 교수님께 감사의 말씀 올립니다. 교수님들의 지도와 격려 덕분에 이 논문을 완성 시킬 수 있었습니다. 사회에 나가서도 교수님들의 지도를 생각하며 저의 역량을 발휘하겠습니다.

다음으로 전산 설계 실험실원들에게 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 누구보다 바쁘고 가장 늦게 퇴근하는 광규형, 늘 후배 먼저 생각하고 저의 고민을 해결해주시고 실험실 생활을 가장 오래 함께하면서 좋은 기억 만들어 주셔서 감사합니다. 또한, 실험실 생활을 같이 하며 도와주신 호형, 선호형, 안재형, 단아에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 동기인 성훈이형, 형 덕분에 버틸 수 있었고 같이 고생해서 재밌었고 늘 감사하게 생각한다고 전하고 싶습니다. 다음으로 영어에 많은 도움을 주고 저의 연구에 도움을 많이 주신 Aliyev Alissultan, 그리고 힘들고 꾀은일을 마다하지 않고 열심히 도와주는 동일이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 학사 중 실험실에 들어와 저를 도와주고 고생한 종찬이와 현이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 바쁘신 와중에도 실험실에 오셔서 응원해주는 천정필 형님께도 감사의 말씀 올립니다. 석사과정 중 선, 후배님들이 한명이라도 없었더라면 석사과정이 쉽지 않았을 것입니다. 여러분 덕분에 제가 졸업을 할 수 있었습니다. 정말 진심으로 감사드립니다.

석사과정을 응원해주는 해남 친구들 그리고 대학교 친구들에게 감사의 말씀 전하고 싶습니다. 힘든 시간도 있었지만 친구들의 응원 덕분에 버틸 수 있었던 것 같습니다.

마지막으로 살면서 저에게 반대를 한 번도 하지 않고 늘 믿음으로 저를 지지해주는 아버지와 어머니, 그리고 하나뿐인 우리 형에게 가장 감사하고 사랑한다고 말씀드리고 싶습니다. 사회에 나가서 지금까지 믿음과 응원을 보답하겠습니다. 감사합니다.

2023 년 6 월 양 지 완