



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 2월  
석사학위 논문

**DED 공정을 이용한 AISI 1045  
기저부위 AISI 1045 분말 대체적  
적층시 적층부와 기저부 형상이  
적층부 인근 열-기계 특성에 미치는  
영향 고찰**

조선대학교 대학원

기계공학과

임 성 훈

**DED 공정을 이용한 AISI 1045  
기저부위 AISI 1045 분말 대체적  
적층시 적층부와 기저부 형상이  
적층부 인근 열-기계 특성에 미치는  
영향 고찰**

**Investigation into the effects of geometries of the  
deposited region and the substrate on  
thermo-mechanical characteristics in the vicinity of the  
deposited region for a large volume deposition of  
AISI 1045 powders on AISI 1045 substrate using a  
DED process**

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

기계공학과

임성훈

**DED 공정을 이용한 AISI 1045  
기저부위 AISI 1045 분말 대체적  
적층시 적층부와 기저부 형상이  
적층부 인근 열-기계 특성에 미치는  
영향 고찰**

지도교수

안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

임 성 훈

## 임 성 훈 의 석사학위논문을 인준함

위원장      조선대학교      교수      김 창 래 

위    원      조선대학교      교수      이 정 원 

위    원      조선대학교      교수      안 동 규 

2022년 12월

조 선 대 학 교 대 학 원

## 목 차

|   |             |
|---|-------------|
| <b>LIST OF TABLES</b> .....   | <b>vi</b>   |
| <b>LIST OF FIGURES</b> .....  | <b>viii</b> |
| <b>NOMENCLATURES</b> .....  | <b>xiii</b> |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>xv</b>   |
| <br>  |             |
| <b>제 1 장 서론</b> .....   | <b>1</b>    |
| 제 1 절 연구 배경 및 관련 연구 .....   | <b>1</b>    |
| 1. 연구 배경 .....  | <b>1</b>    |
| 2. 에너지 제어형 용착 (DED) 공정 .....  | <b>5</b>    |
| 3. 선행 연구 .....  | <b>7</b>    |
| 제 2 절 연구 목적 및 방법 .....  | <b>9</b>    |
| 1. 연구 목적 .....  | <b>9</b>    |
| 2. 연구 방법 .....  | <b>10</b>   |
| <br>  |             |
| <b>제 2 장 유한요소 해석을 이용한 기저부 및 적층부 형<br/>    상에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 분석</b><br>..... | <b>12</b>   |
| 제 1 절 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 열-기계 특<br>성 분석.....                                  | <b>12</b>   |
| 1. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 유한 요소 해석 모델   |             |

|  |    |
|--|----|
| 개발 및 데이터 도출 .....  | 12 |
| 가. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 .....             | 12 |
| 나. 온도 의존 열-기계 물성 데이터 도출 .....                            | 17 |
| 다. 경계 조건 데이터 도출 .....                                    | 17 |
| 라. 열원 모델 .....   | 26 |
| 2. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 분석.....               | 28 |
| 가. 주응력 비교 및 분석 .....                                     | 28 |
| 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성 .....                               | 33 |
| 3. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 변형 특성.....                       | 35 |
| 제 2 절 기저부 끝단 길이에 따른 열-기계 특성 분석 ....                      | 39 |
| 1. 기저부 끝단 길이에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출 .....           | 39 |
| 가. 기저부 끝단 길이에 따른 기저부 및 적층부 형상 설계 .....                   | 39 |
| 나. 기저부 끝단 길이에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 .....                    | 40 |
| 다. 경계 조건 데이터 도출 .....                                    | 42 |
| 2. 기저부 끝단 길이에 따른 열-기계 특성 비교 분석 .....                     | 43 |
| 가. 주응력 비교 및 분석 .....                                     | 43 |
| 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성 .....                               | 48 |
| 3. 기저부 끝단 길이에 따른 변형 특성 .....                             | 51 |
| 제 3 절 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 열-기계 특성 분석 .....           | 56 |
| 1. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출 ..... | 56 |

|   |           |
|---|-----------|
| 가. 기저부 및 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 적층부 및 기저부형상 설계 ..... | 56        |
| 나. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 .....   | 58        |
| 다. 경계 조건 데이터 도출 .....                             | 60        |
| 2. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 열-기계 특성 비교 분석 .....    | 62        |
| 가. 주응력 비교 및 분석 .....                              | 62        |
| 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성 .....                        | 68        |
| <b>제 4 절 축 대칭 형상에 따른 열-기계 특성 분석 .....</b>         | <b>70</b> |
| 1. 축 대칭 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출 .....      | 70        |
| 가. 축 대칭 형상에 따른 적층부 및 기저부 형상 설계 .....              | 70        |
| 나. 축 대칭 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 .....               | 72        |
| 다. 경계 조건 데이터 도출 .....                             | 73        |
| 2. 축 대칭 형상에 따른 열-기계 특성 비교 분석 .....                | 75        |
| 가. 주응력 비교 및 분석 .....                              | 75        |
| 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성 .....                        | 80        |
| <br>  |           |
| <b>제 3 장 적층 기법에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 분석 .....</b>   | <b>82</b> |
| <b>제 1 절 적층 경로에 따른 열-기계 특성 분석 .....</b>           | <b>82</b> |
| 1. 적층 경로에 따른 유한 요소 해석 모델 설계 .....                 | 82        |
| 가. 적층 경로 선정 및 3차원 및 2차원 형상 설계 .....               | 82        |
| 나. 3차원 및 2차원 유한 요소 해석 모델 개발 .....                 | 83        |

|   |            |
|---|------------|
| 다. 경계 조건 데이터 도출 .....   | 85         |
| 2. 적층 경로에 따른 열-기계 특성 비교 분석 .....                                | 86         |
| 가. 적층 경로에 따른 주응력 비교 및 분석 .....                                  | 86         |
| 나. 3 차원 및 2 차원 주응력 비교 및 분석 .....                                | 89         |
| <b>제 2 절 Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 분석 .....</b>              | <b>91</b>  |
| 1. Interlayer time 에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터<br>도출 .....        | 91         |
| 가. Interlayer time 선정 및 유한 요소 해석 모델 개발 .....                    | 91         |
| 나. 경계 조건 데이터 도출 .....   | 92         |
| 2. Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 비교 분석 .....                     | 93         |
| 가. 주응력 비교 및 분석 .....  | 93         |
| 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성 .....                                      | 97         |
| <b>제 3 절 Interpass time 에 따른 열-기계 특성 분석 .....</b>               | <b>98</b>  |
| 1. Interpass time 에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터<br>도출 .....         | 98         |
| 가. Interpass time 선정 및 유한 요소 해석 모델 개발 .....                     | 98         |
| 나. 경계 조건 데이터 도출 .....   | 99         |
| 2. Interpass time 에 따른 열-기계 특성 비교 분석 .....                      | 100        |
| 가. 주응력 비교 및 분석 .....  | 100        |
| 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성 .....                                      | 105        |
| <br>  |            |
| <b>제 4 장 기공 발생 위치에 따른 적층부 인근의 열-기<br/>        계 특성 분석 .....</b> | <b>106</b> |
| <b>제 1 절 기공 발생 위치에 따른 열-기계 특성 분석 .....</b>                      | <b>106</b> |
| 1. 기공 발생 위치에 따른 유한 요소 해석 모델 설계 .....                            | 106        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 가. 기공 발생 위치 선정 및 유한 요소 해석 모델 개발 ..... | 106 |
| 나. 경계 조건 데이터 도출 .....                 | 107 |
| 2. 기공 발생 위치에 따른 열-기계 특성 분석 .....      | 108 |
| 가. 공정중 최대 주응력 비교 및 분석 .....           | 108 |
| 가. 탄성 회복 및 냉각후 최종 주응력 비교 및 분석 .....   | 112 |
| <br>                                  |     |
| 제 5 장 결론 및 향후 과제 .....                | 116 |
| <br>                                  |     |
| Reference .....                       | 119 |

## LIST OF TABLES

|   |    |
|---|----|
| Table 1 Classification of AM processes based on manufacturing materials .....   | 3  |
| Table 2 DED process classification according to feeding type .....  | 5  |
| Table 3 Deposited areas based on deposition shapes .....  | 13 |
| Table 4 Characteristic data of deposition bead for AISI 1045 .....  | 15 |
| Table 5 Number of nodes, 2D elements, part and layer of FE models .....   | 15 |
| Table 6 Process parameters of 2D FE analysis .....  | 16 |
| Table 7 Chemical compositions of AISI 1045 .....  | 17 |
| Table 8 Residual stress maximum value for during deposition .....   | 31 |
| Table 9 Residual stress maximum value for after elastic recovery and cooling .....  | 31 |
| Table 10 Number of nodes and 2D elements of FE models (substrate shapes of $L_1$ ) .....                                  | 41 |
| Table 11 Maximum residual stress during deposition process according to length of $L_1$ .....                             | 46 |
| Table 12 Residual stress maximum value for after elastic recovery and after cooling (according to length of $L_1$ ) ..... | 47 |
| Table 13 Maximum and residual displacements value (according to length of $L_1$ ) .....                                   | 52 |
| Table 14 Deposited areas based on $L_2$ length .....  | 57 |
| Table 15 Number of nodes, 2D elements and part of FE models .....   | 59 |
| Table 16 Maximum residual stress value during deposition process (according to $L_2$ length) .....                        | 63 |
| Table 17 Residual stress maximum value for after elastic recovery and cooling (according to $L_2$ length) .....           | 63 |
| Table 18 Maximum residual stress during deposition process according to R length .....                                    | 76 |
| Table 19 Number of nodes and elements of 3D and 2D FE models .....  | 83 |
| Table 20 Residual stress maximum value for during deposition (deposition directions) .....                                | 88 |
| Table 21 Comparison of total simulation time of 3D and 2D FE analysis .....   | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Table 22 Comparison of results file memory sizes of 3D and 2D FE analysis .....  | 89  |
| Table 23 Residual stress maximum value for during deposition and after elastic recovery and cooling according to interlayer time ..... | 95  |
| Table 24 Residual stress maximum value for during deposition and after elastic recovery and cooling (interpass time) .....             | 102 |

## LIST OF FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Fig. 1 Schematic diagram of DED process .....  | 5  |
| Fig. 2 Cracks observed in the metals deposited by DED .....  | 9  |
| Fig. 3 Flowchart of sequence of research work .....  | 10 |
| Fig. 4 Schematics of deposited shapes .....  | 12 |
| Fig. 5 Designs of deposited shapes and substrate of corner angle .....   | 13 |
| Fig. 6 Mesh structures for each deposition shape .....   | 14 |
| Fig. 7 FE models according to dissimilar deposited shapes .....  | 16 |
| Fig. 8 Deposition strategy of FE analysis (Type 1, $\theta = 30^\circ$ ) .....   | 16 |
| Fig. 9 Temperature dependent material properties of AISI 1045 .....  | 19 |
| Fig. 10 Model for thermo-mechanical analysis (Type 1, $\theta = 30^\circ$ ) .....  | 19 |
| Fig. 11 Temperature dependent material properties of air .....   | 20 |
| Fig. 12 Temperature dependent material properties of argon .....   | 20 |
| Fig. 13 Forced convection coefficients .....   | 21 |
| Fig. 14 Natural convection coefficients .....  | 22 |
| Fig. 15 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces .....  | 23 |
| Fig. 16 Equivalent heat loss coefficient .....   | 25 |
| Fig. 17 Heat flux model of laser .....   | 26 |
| Fig. 18 Intensity distribution of heat flux .....  | 27 |
| Fig. 19 1 <sup>st</sup> principal stress distributions according to deposited shapes and deposition region corner angles .....       | 29 |
| Fig. 20 Effect of deposited shape and inclination angle of deposition region on Excessively stressed regions .....                   | 30 |
| Fig. 21 Influence of corner angle of deposition region and shape of deposited bead on maximum 1 <sup>st</sup> principal stress ..... | 31 |
| Fig. 22 Time histories of 1 <sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value .....       | 33 |
| Fig. 23 1 <sup>st</sup> principal stress distributions at the times of maximum stresses occurrence .....                             | 34 |

Fig. 24 Displacement histories for X and Y directions ..... 35  
 Fig. 25 Time histories of displacements distributions at the occurrence location of the maximum value ..... 36  
 Fig. 26 Maximum and residual displacements for different deposited shapes and slopes of deposition regions ..... 37  
 Fig. 27 Substrate shapes according to  $L_1$  length and deposition region slopes ..... 39  
 Fig. 28 Deposition strategy of FE analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $L_1 = 0$  mm) ..... 40  
 Fig. 29 FE models according to the length of  $L_1$  ..... 41  
 Fig. 30 Model for thermo-mechanical analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $L_1 = 0$  mm) ..... 42  
 Fig. 31 Coefficients of natural convection (according to length of  $L_1$ ) ..... 43  
 Fig. 32 1<sup>st</sup> principal stress distributions according to  $L_1$  and deposition region inclination angle ..... 44  
 Fig. 33 Effect of  $L_1$  length and inclination angle of deposition region on excessively stressed regions ..... 45  
 Fig. 34 Influence of corner angle of deposited region and  $L_1$  length on maximum 1st principal stress ..... 47  
 Fig. 35 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value (according to length of  $L_1$ ) ..... 49  
 Fig. 36 1st principal stress distributions at the time of maximum stress occurrence (according to length of  $L_1$ ) ..... 50  
 Fig. 37 Displacement distributions at the time of maximum displacement occurrence and after cooling process (according to length of  $L_1$ ) ..... 52  
 Fig. 38 Maximum and residual displacements for different deposition region inclination angles and the length of  $L_1$  ..... 54  
 Fig. 39 Displacement histories for X and Y directions (according to length of  $L_1$ ) ..... 55  
 Fig. 40 Schematics of substrate shapes according to  $L_2$  ..... 56  
 Fig. 41 Substrate shapes according to  $L_2$  length and deposition region slopes ..... 57  
 Fig. 42 Mesh structures of FE models for each substrate shape according to  $L_2$  length ..... 58

|  |    |
|--|----|
| Fig. 43 Deposition strategy of FE analysis ( $\theta = 30^\circ$ , $L_2 = 3$ mm)   | 59 |
| Fig. 44 Model for thermo-mechanical analysis ( $\theta = 30^\circ$ , $L_2 = 3$ mm)   | 60 |
| Fig. 45 Natural convection coefficients (according to $L_2$ length)  | 61 |
| Fig. 46 1 <sup>st</sup> principal stress distributions according to $L_2$ and deposition region inclination angle                                | 63 |
| Fig. 47 Natural convection coefficients (according to $L_2$ length)  | 64 |
| Fig. 48 Influence of corner angle of deposited region and $L_2$ length on maximum 1 <sup>st</sup> principal stress                               | 66 |
| Fig. 49 Influence of corner angle of deposited region and $L_2$ length on maximum 1 <sup>st</sup> principal stress after elastic recovery        | 66 |
| Fig. 50 Time histories of 1 <sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 30^\circ$ ) | 68 |
| Fig. 51 Time histories of 1 <sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 45^\circ$ ) | 69 |
| Fig. 52 Substrate shapes according to radius of substrate (R) and deposition region slopes   | 71 |
| Fig. 53 Designs of substrate according to R values and deposition region slopes (2D)   | 71 |
| Fig. 54 FE models according to length of R   | 72 |
| Fig. 55 Deposition strategy of FE analysis ( $\theta = 30^\circ$ , $R = 3$ mm)   | 72 |
| Fig. 56 Model for thermo-mechanical analysis ( $\theta = 30^\circ$ , $R = 3$ mm)   | 73 |
| Fig. 57 Natural convection coefficients according to R length  | 74 |
| Fig. 58 1 <sup>st</sup> principal stress distributions for different R values and deposition region inclination angle                            | 76 |
| Fig. 59 Effect of R length and inclination angle of deposition region on excessively stressed regions  | 78 |
| Fig. 60 Influence of corner angle of deposited region and R length on maximum 1 <sup>st</sup> principal stress                                   | 79 |
| Fig. 61 Time histories of 1 <sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 30^\circ$ ) | 80 |

|  |     |
|--|-----|
| Fig. 62 Time histories of 1 <sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 45^\circ$ ) ..... | 81  |
| Fig. 63 Deposition direction based on substrate shape .....  | 82  |
| Fig. 64 Deposition strategies .....  | 83  |
| Fig. 65 Direction of deposition of 3D FE models based on substrate shape .....   | 84  |
| Fig. 66 Direction of deposition of 2D FE models based on substrate shape .....   | 84  |
| Fig. 67 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces .....  | 85  |
| Fig. 68 Model for thermo-mechanical analysis (2D FE model) .....   | 85  |
| Fig. 69 Model for thermo-mechanical analysis (3D FE model) .....   | 86  |
| Fig. 70 1 <sup>st</sup> principal stress distributions for different deposition direction (3D) .....   | 87  |
| Fig. 71 1 <sup>st</sup> principal stress distributions for different deposition direction (2D) .....   | 87  |
| Fig. 72 Influence of the deposition strategy on the maximum 1 <sup>st</sup> principal stress .....   | 88  |
| Fig. 73 Schematic of interlayer time during deposition for 2D FE analysis ( $\theta = 45^\circ$ , $L_2 = 7$ mm) .....                                  | 90  |
| Fig. 74 Deposited process completion time according to interlayer time .....   | 91  |
| Fig. 75 1 <sup>st</sup> principal stress distributions for different interlayer times .....  | 93  |
| Fig. 76 Excessively stressed regions for interlayer times .....  | 94  |
| Fig. 77 Influence of the interlayer time on the maximum 1 <sup>st</sup> principal stress value .....   | 95  |
| Fig. 78 Stress histories at the location of occurrence of maximum 1 <sup>st</sup> principal stress according to interlayer times .....                 | 96  |
| Fig. 79 Schematic of interpass time during deposition for 2D FE analysis ( $\theta = 45^\circ$ , $L_2 = 7$ mm) .....                                   | 97  |
| Fig. 80 Deposited process completion time according to interpass time .....  | 98  |
| Fig. 81 1 <sup>st</sup> principal stress distributions for different interpass time .....  | 100 |
| Fig. 82 Excessively stressed regions for different interpass time .....  | 101 |
| Fig. 83 Influence of the interpass time on the maximum 1 <sup>st</sup> principal stress .....  | 102 |
| Fig. 84 Stress histories at the location of occurrence of maximum 1 <sup>st</sup> principal stress according to interpass time .....                   | 104 |

Fig. 85 2D FE models structure according to location of pore ( $\theta = 45^\circ$ ,  $L_2 = 7$  mm) ..... 106

Fig. 86 2D Location of pore position in 2D FE models ..... 106

Fig. 87 Excessively stressed regions for location of pore positions ..... 107

Fig. 88 Influence of location of pore on the maximum 1<sup>st</sup> principal stress ..... 108

Fig. 89 Excessively stressed regions for after elastic recovery and after cooling for location of pore ..... 109

Fig. 90 Influence of location of pore on the maximum residual 1<sup>st</sup> principal stress ..... 110

## NOMENCLATURES

- $\alpha$  : Thermal diffusivity  
 $\alpha_e$  : Thermal expansion  
 $\varepsilon$  : Emissivity of AISI 1045  
 $\eta$  : Efficiency of heat flux  
 $\mu$  : Dynamic viscosity  
 $\nu$  : Poisson's ratio  
 $\nu_k$  : Kinematic viscosity  
 $\rho$  : Density  
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant  
 $\sigma_{1p}$  : 1<sup>st</sup> principal stress  
 $\sigma_{1p,m}$  : Maximum 1<sup>st</sup> principal stress  
 $\sigma_Y$  : Yield strength  
 $v$  : Scan speed  
 $Ar$  : Application of area  
 $C$  : Shape coefficient of heat flux  
 $C_p$  : Specific heat  
 $D$  : Diameter of nozzle  
 $E$  : Young's modulus  
 $g$  : Gravitational acceleration  
 $H$  : Distance between nozzle and substrate  
 $\bar{h}_{eq,f}$  : Average of equivalent forced convection coefficient  
 $\bar{h}_f$  : Average of forced convection coefficient  
 $\bar{h}_n$  : Average of natural convection coefficient  
 $k$  : Thermal conductivity  
 $L_c$  : length of characteristic  
 $Nu$  : Nusselt number

$\overline{Nu}$  : Average of nusselt number

$P$  : Power of heat flux

$Pr$  : Prandtl number

$Q_0$  : Maximum power intensity of heat flux

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

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

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

$R$  : Application of radius

$Ra$  : Rayleigh number

$Re$  : Reynolds number

$r(Z)$  : heat flux coverage

$r_e$  : Heat flux of top radius

$r_i$  : Heat flux of Bottom radius

$T_f$  : Ambient temperature

$T_s$  : Surface temperature

$T_\infty$  : Environmental temperature

$t$  : Time

$V_e$  : Average speed of flow

$x$  : X location of heat flux

$y$  : Y location of heat flux

$z$  : Z location of heat flux

$z_e$  : Top location of heat flux

$z_i$  : Penetration depth

## ABSTRACT

### **Investigation into the effects of geometris of the deposited region and the substrate on thermo-mechanical characteristics in the vicinity of the deposited region for a large volume deposition of AISI 1045 powders on AISI 1045 substrate using a DED process**

Yim Sung Hoon

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

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, due to environmental and resource depletion concerns, researchers around the globe are actively involved in research and development of new methodologies to reduce impact of industrial activities on environment. The interest in the field of additive manufacturing (AM) is exponentially increasing due to its repair and remanufacturing capabilities. Repair and remanufacturing of damaged machine tool parts by AM can lower the operational cost by extending the life cycle of the metal parts. Directed energy deposition (DED) is a metal AM process. DED process can deposit metal on straight and inclined surfaces along the arbitrary trajectory. Hence, DED is suitable for repairing and remanufacturing of irregular shape machine parts. However, localized rapid temperature changes occur during deposition process due to high density energy source. The temperature gradients cause residual stress and displacement in remanufactured parts. The aim of this study is to investigate the effect of shape of deposition region, shape of the substrate, deposition strategy and pore location on thermo-mechanical characteristics in the vicinity of repaired region by DED. Finite element analysis (FEA) according to the substrate shape and shape of deposited region was performed in order to analyze thermo-mechanical characteristics of repaired metal parts. Various substrate shapes and deposition region shapes including the angle of inclination of the deposited region, the shape of the substrate with various space at the edge of deposited region, the shape of deposited bead with various width and inner radius of substrate were selected to predict residual stress

and displacement in the vicinity of deposited region. Subsequently, FE analysis of deposition strategy was performed. Proper deposition pattern, interlayer time and interpass time were selected according to residual stress and displacement results. Occurrence of the pores during deposition by DED was considered in this study. Analysis models according to pore location was generated. Thermo-mechanical characteristics depending on pore location were predicted. Finally, proper parameters such as suitable substrate shape, shape of deposited region and proper process parameters were proposed.

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

### 1. 연구 배경

세계 역사의 흐름에 따라 인류의 지식과 문명이 발달 함에 따라 인류의 삶의 질이 비약적으로 상승 하였다. 18세기 영국에서 증기기관을 활용한 기계화 혁명 즉 제 1차 산업혁명이 일어남 에 따라 제조업의 공장생산체제가 도입되었다.<sup>1)</sup> 이를 기점으로 인류가 거처온 역사상 가장 짧은 시기에 급격한 기술적 혁명을 가지게 하는 발판을 마련하였다.<sup>2)</sup> 19세기 중반 20세기 초반에는 전기, 화학 및 석유를 바탕으로 한 제2차 산업혁명으로 대량생산체제가 가능해졌으며 20세기 후반 컴퓨터와 인터넷을 기반으로 한 제3차 산업혁명으로 정보화 및 자동화 시스템이 가능하게 되었다.<sup>3)</sup> 현재 우리는 다음 제4차 산업혁명으로 도약하기 위한 기술적 전환기 한가운데 서있다.<sup>4)</sup>

제4차 산업혁명은 2016년 세계 경제 포럼 (World conomic forum) 에서 처음 논의 되었으며 제3차 산업혁명을 기반으로 기술적 융합으로 사회경제적 변혁을 가져올 것으로 전망된다. 제4차 산업혁명을 이끌어갈 핵심기술로 인공지능, 로봇공학, 사물 인터넷 (Internet of Things), 자율주행, 나노기술, 3D 프린팅 (3D printing) 등 다양한 기술들이 언급되고 있다. 핵심 기술 중 하나인 3D 프린팅은 2013년 미국 오바마 대통령의 국정연설에서 제조혁신을 가져올 기술이라 언급한 후 전 세계가 관심을 가지게 되었다.<sup>5-8)</sup>

3D 프린팅은 적층 제조 (Additive manufacturing : AM) 공정이라고 하며 적층 제조 공정이라 하는 것이 공식 표준 명칭이다. 적층 제조 공정은 CAD (Computer aided design) 및 CAM (Computer aided manufacturing) 을 이용하여 생성된 3D 모델링을 기반으로 적층 재료를 쌓아올려 제품을 제작하는 방법이다.<sup>9)</sup> 적층 제조 공정은 층 (Layer-by-layer) 을 형성하여 제품을 제작하므로 기존의 제조 공정과 비교하여 복잡한 형상을 쉽게 제작이 가능하며 제품 제작에 소요되는 공정 시간과 비용을 줄일 수 있다.<sup>10)</sup> 따라서 기존의 제조 공정을 대체 하기위해 또는 적층 제조 공정과 기존

의 제조 공정을 기술적 융합을 실현 시키기 위한 연구가 활발히 진행 되고 있다.<sup>10,11)</sup>

적층 제조 공정은 1892년 J.E Blanthier 가 제안한 입체모형지도에서 최초로 고안되었으며, 1983년 미국의 Charles W. Hull 이 빛을 이용한 조형 공정인 광경화수지 (Stereolithography : SLA) 에 대한 특허를 등록하였고, 1987년 SLA 를 상용화한 제품 3D Systems 사 의 SLA-1 이 세상에 공개되면서 세상에 최초의 3D 프린터가 등장하게 되었다.<sup>12,13)</sup>

적층 제조 공정에 대한 기술이 발전 함에 따라 다양한 적층 제조 공정들이 개발 및 상용화되었다. 따라서 미국 재료 시험 협회 (American Society for Testing Materials : ASTM) 및 국제표준화기구 (International Organization for Standardization : ISO) 에서 공정 수행 방식 및 적층 재료에 따라 접착제 분사 (Binder jetting), 재료 압출 (Material Extrusion), 재료 분사 (Material Jetting), 판재 적층 (Sheet Lamination), 액조 광경화 (Vat Photopolymerization), 분말 베드 융해 (Powder Bed Fusion), 에너지 제어 용착 (Directed Energy Deposition : DED) 으로 총 7가지 방식으로 분류 하였다.<sup>14,15,16)</sup> 각 공정의 원리 와 재료 및 적용되는 기술은 Table 1과 같다.

**Table 1 Classification of AM processes based on manufacturing materials<sup>15,16,17)</sup>**

| Type of AM process                | Process Principle  | Material                         | Process        |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|----------------|
| <b>Binder jetting</b>             | an AM in which a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials.               | Polymer/<br>Metallic/<br>Ceramic | 3DP<br>CJP     |
| <b>Material extrusion</b>         | an AM in which material is selectively dispensed through a nozzle or orifice                           | Polymer                          | FDM            |
| <b>Material jetting</b>           | an AM in which droplets of build material are selectively deposited.                                   | Polymer                          | MJM<br>Polyjet |
| <b>Sheet lamination</b>           | an AM in which sheets of material are bonded to form an object.  | Polymer/<br>Metallic/<br>Ceramic | LOM<br>VLM     |
| <b>Vat photopolymerization</b>    | an AM in which liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization.    | Polymer                          | SLA<br>DLP     |
| <b>Powder bed fusion</b>          | an AM in which thermal energy selectively fuses regions of a powder bed.                               | Polymer/<br>Metallic/<br>Ceramic | SLS<br>DMLS    |
| <b>Directed energy deposition</b> | an AM in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited | Metallic                         | LENS<br>DMT    |

접착제 분사 (Binder jetting) 방식은 분말 형태의 재료에 제작하고자 하는 형태로 접착제를 선택적으로 분사시켜 분말을 결합시키는 방식이다. 제작 속도가 빠르고 소재와 색상 선택에 자유로운 장점이 있지만 제품의 내구성이 약하다는 단점이 있다.<sup>18,19)</sup>

재료 압출 (Material extrusion : ME) 방식은 노즐 (Nozzle) 또는 오리피스 (Orifice) 를 이용하여 고체상태의 열 가소성 수지의 재료를 가열 후 압출시켜 표면 위에 한 층씩 적층하는 방식이다. 재료 압출 방식의 대표적인 공정으로 FDM (Fused Deposition Modeling) 공정이 있으며 다른 공정에 비해 장비 구축이 쉽고 저렴하여 가장 널리 보급되어 사용되고 있다. 적층 후 서포터 (Support) 를 제거하는 후처리 공정이 필요하며 제작 시간이 오래 걸리며 표면이 매끄럽지 못하다는 단점이 있다.<sup>20)</sup>

재료 분사 (Material Jetting) 방식은 광 경화성 수지 및 왁스 등의 재료를 미세한 방울의 형태로 분사시키고 자외선 램프를 이용하여 경화 시킨 뒤 적층을 수행하는 방식

이다. 높은 해상도의 형상을 제작할 수 있으며 색상의 자유도가 높고 적층 속도가 빠르다는 장점이 있다. 하지만 높은 비용이 들고 제품의 강도가 약하다는 단점이 있다.<sup>21)</sup>

박판 적층 (Sheet lamination) 방식은 가공된 얇은 판 형태의 재료를 용접 또는 접착제를 이용해 한층 씩 접착하여 적층시키는 방식이다. 적층 속도가 빠르지만 기계적 특성이 좋지 않다는 단점이 있다.<sup>22)</sup>

액조 광경화 (Vat Photopolymerization) 방식은 액체 상태의 광경화 (Photopolymer) 소재에 특정 파장의 빛을 조사하여 선택적으로 경화시켜 적층하는 방식이다. 제작물의 정밀도가 높고 표면이 매끄러운 장점을 가지고 있지만 공정 수행에 큰 비용이 들며 재료의 유해성으로 인한 단점을 가진다.<sup>23)</sup>

분말 베드 용해 (Powder Bed Fusion : PBF) 방식은 플라스틱 및 금속 분말을 일정한 두께로 도포 시킨 뒤 고 밀도의 에너지를 사용하여 분말을 선택적으로 용융 또는 소결 시켜 적층하는 방식이다. 대표적인 금속 적층 제조 공정중 하나이며 작고 복잡한 형상의 제품을 제작 하는데 유리하다.<sup>24)</sup>

에너지 제어 용착 (Directed Energy Deposition : DED) 방식은 레이저 및 전자 빔과 같은 고밀도의 에너지를 사용하여 금속 기저부를 용융시켜 용융지 (Molten pool) 를 형성한 후 금속 분말 및 와이어를 공급 및 용융시켜 적층하는 방식이다. 형상의 자유도가 높으며 제품의 강도가 우수한 장점을 가지고 있지만 정밀도가 낮으며 후가공이 필요하다. 대표적인 공적으론 WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), EBF (Electron Beam Freeform Fabrication), LENS (Laser Engineered Net Shaping) 등의 방식이 있다.<sup>10,11)</sup>

## 2. 에너지 제어형 용착 (DED) 공정

에너지 제어형 용착 (Directed energy deposition : DED) 공정은 전자 빔 과 같은 고 밀도의 에너지를 사용하여 금속 기저부를 용융시켜 용융지 (Molten pool) 를 형성 후 금속 분말 (Metal powder) 및 금속 선 (Metal wire) 을 공급 재료로 사용하여 용융 시켜 적층하는 방식이다. DED 공정은 공급 재료에 따라 2가지로 분류 할 수 있다.<sup>10,11,15,25)</sup> 공급 재료에 따른 대표적인 공정은 Table 2 와 같으며 각 공정 별 개념도 는 Fig. 1 과 같다.

Table 2 DED process classification according to feeding type<sup>10,11,15,25)</sup>

| Feeding type              | Powder                              |                               | Wire                                     |  |
|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|--|
| <b>Deposition Process</b> | Laser Engineered Net Shaping (LENS) | Direct Metal Deposition (DMD) | Electron beam freeform fabrication (EBF) | Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) |

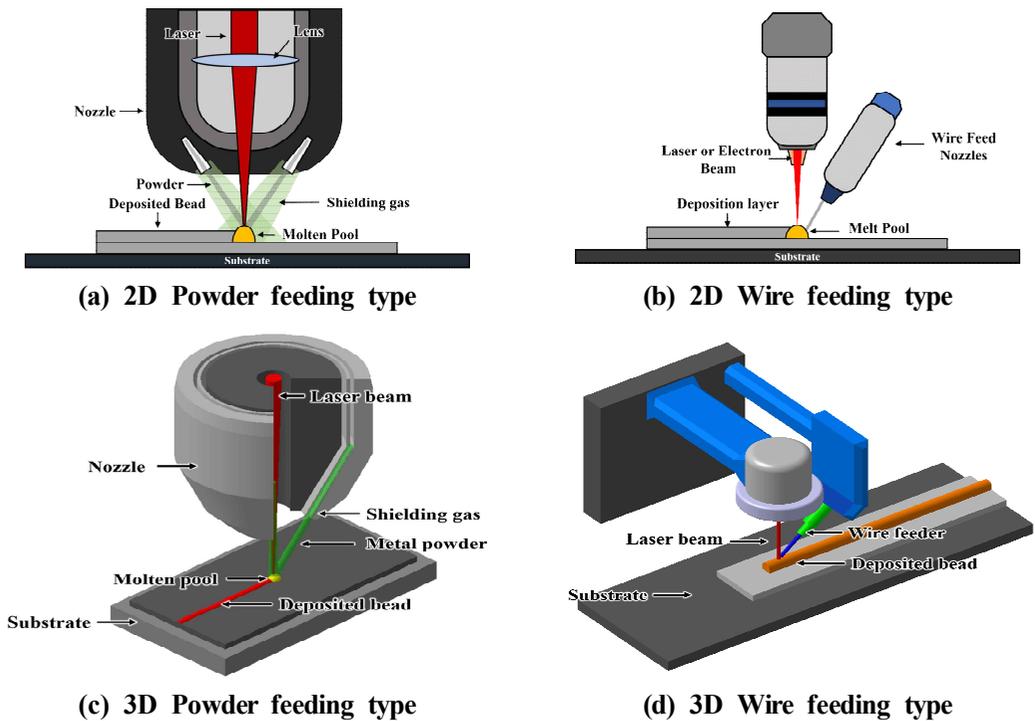


Fig. 1 Schematic diagram of DED process

금속 선을 공급 재료를 사용하여 적층하는 공정은 소재가 저렴하고 제품 제작 속도가 빨라 공정 시간이 적다는 특징이 있다. 금속 분말을 공급 재료로 사용하는 공정은 다중 분말 호퍼 (Multipowder hoppers) 를 이중 및 다중 소재 적층이 가능하고 다 축 (Multiple axis) 적층이 가능하여 지지대 (Support) 없이 적층 공정을 수행하고 복잡한 형상의 제작 및 보수에 용이하다. 이러한 장점으로 금속 분말을 활용한 DED 공정은 공작기계, 항공우주 산업 등 다양한 분야에서 기계 부품의 제작 및 보수에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>26,27,28)</sup>

DED 공정은 적층 수행 시 기저부 위 적층을 하고자 하는 부위에 레이저 및 전자빔과 같은 고밀도의 에어지원을 이용하여 금속 기저부 및 금속 분말을 용융 시켜 적층하는 특성으로 인하여 1,000 °C 이상의 고온의 열이 발생하고 급속도로 냉각이 진행된다.<sup>30)</sup> 이로 인하여 적층 부 인근에 급속 가열 및 급속 냉각이 발생함에 따라 팽창과 수축을 발생시키며 적층 부 인근에 열 특성 불균형과 잔류응력이 발생하는 원인이 된다.<sup>31,32)</sup> 열 특성 불균형과 잔류응력은 적층한 최종 제품의 변형, 균열 및 파손과 같은 기계적 결함이 발생하게 하는 원인이 된다. 이 문제점을 보완하기 위해 적층 시 발생하는 열 불균형과 잔류응력을 분석하고 예측을 통하여 공정을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>33)</sup> 또한 기계부품과 같은 불규칙한 형상을 보수 시 적층부 및 기저부 형상에 따라 적층부 인근에 발생하는 잔류응력 변화가 서로 상이한 분석 결과가 나타나기 때문에 기계 부품 재제조를 위한 적층부 및 기저부 형상에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>34)</sup>

### 3. 선행 연구

금속 적층 공정을 이용한 적층 시 발생하는 기계적 결함을 예측 하고 최적의 적층 조건을 찾기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 금속 적층을 활용한 재제조 시 발생하는 적층 특성 및 열-기계 특성에 관한 연구 또한 동시에 진행되고 있다.

2012년 Graf 등은 티타늄 합금을 이용해 U 형태와 사다리꼴 형태의 홈에 적층 하였을 때 적층 특성을 분석하였고 U 형태와 사다리꼴 형태의 적층 후 경도 변화는 거의 없었으며 결함이 발견되지 않았다.<sup>35)</sup>

2014년 Wilson 등은 터빈 블레이드의 적층을 통한 보수를 수행하였으며 보수가 완료된 터빈 블레이드는 오차율이 매우 적었으며 기존 제품과 거의 일치함을 보였다.<sup>36)</sup>

2018년 Zhang 등은 V자 형상의 홈을 가진 기저부 형상에 적층시 발생하는 적층 특성을 분석하였고, 45° 홈과 75° 홈의 경우 균열 이 발생하지 않았으며 90° 홈의 경우 기공이 발생함을 확인하였다.<sup>37)</sup>

2018년 Li 등은 Ni-Cu 분말을 이용한 적층시 홈 형상 및 적층 경로에 따른 기계적 특성을 분석하였다. 원형 홈 형상 과 Cross Scanning Type 으로 적층시 잔류응력이 낮았으며 균열 또한 적게 나타남을 확인하였다.<sup>38)</sup>

2019년 Oh 등은 316L 분말을 이용한 적층시 기저부 홈 깊이에 따라 발생하는 기계적 특성을 분석하였으며 홈 깊이가 0.5mm 인 경우가 균열이 없으며 경도 및 인장 강도가 매우 우수한 결과를 도출하였다.<sup>39)</sup>

2019년 Zhu 등은 레이저 클래딩 공정을 활용한 H13 분말을 이용하여 기어 보수시 중첩률 (Overlap ratio) 과 적층 경로에 따른 기계적 특성을 분석 하였다. 중첩률 20%, 적층 경로의 경우 단일 방향으로 적층 시 접합 및 적층 특성이 우수함을 도출하였다. 보수한 시편의 평균 인장 강도는 기존 시편보다 낮았지만, 기저부와 동종 소재로 적층을 진행한 제품보단 높게 나타남을 확인 하였다.<sup>40)</sup>

2020년 Oh 등은 DED 공정을 이용한 그루브 형상에 따른 적층부 특성을 분석을 진행하였고, 그루브를 가지는 모재에 기공의 결함이 발견하였으며 모재의 기울기에 따라 기계적 특성이 크게 달라짐을 확인하였다.<sup>41)</sup>

2022년 Kim 등은 DED 공정을 이용한 부품 보수시 기저부 경사각 및 기저부 깊이 에 따른 적층시 보수부 인근에 발생하는 잔류 응력 특성을 분석하였으며 불규칙

형상 시편을 적층하여 적층 특성을 분석 하였다.<sup>42)</sup>

2022년 Aliyev 등은 얇은 외팔보 기저부에 DED 공정으로 얇은 평면 보수층을 생성 할 때 적층 경로에 따른 잔류 응력과 변위 및 비틀림의 변화를 열-기계 연계 해석을 통해 고찰하였다.<sup>43)</sup>

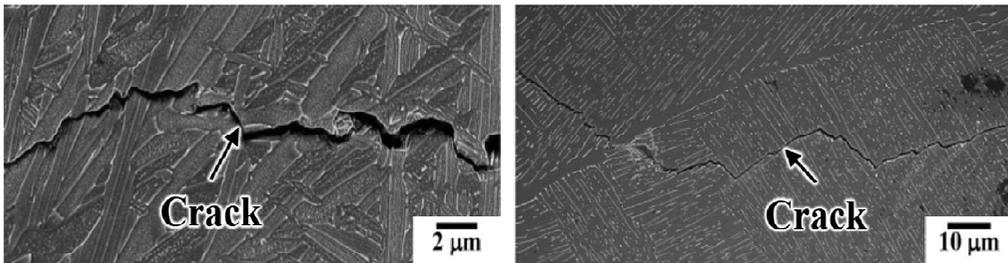
2022년 Lee 등은 부품 보수를 위한 적층 제조 시 기저부 경사각 및 Hatch distance 에 따른 적층 특성을 분석 하였으며 기저부 경사각 15° 의 경우 Valley 가 발생하였고 30° 도 이상인 경우 기공의 크기가 작음을 확인하였다. 또한 Hatch distance 는 0.5mm 의 경우 적층 형상이 높게 쌓였으며 0.9mm 의 경우 Valley 가 발생됨을 관측하였다.<sup>34)</sup>

선행 연구에서는 금속 적층 제조 공정을 활용한 재제조시 보수된 제품의 우수함을 보였으며 적층 공정을 이용한 재제조시 발생하는 적층 특성 분석 및 열-기계 연계 해석의 중요성을 보여준다. 적층 공정은 다양한 공정변수가 존재 한다 기저부 형상의 홈 깊이, 홈 모양, 경사각을 고려한 적층 특성 분석과 적층 경로 및 중첩률 Hatch distance 와 같은 다양한 적층 기법을 적층 설계시 함께 고려되어야 함을 보여주었다. 또한 DED 공정은 공정특성으로 인하여 적층 형상에 자유도를 가진다는 특징 이외에 이종재료 적층이 가능하다는 특징이 있고 선행 연구에서는 이종재료 적층 분석을 진행하였다. 이 연구에서는 적층부와 기저부의 접촉 특성이 우수한 동종소재를 이용한 적층을 분석하고 불규칙 형상 적층을 위한 기저부 형상 및 적층부 형상 에 따른 모양을 설계 하고 적층 형상에 따른 유한 요소 해석 모델을 개발 하였다. 또한 적층 기법과 적층 중 발생하는 기공의 위치에 따른 유한 요소 해석 모델을 개발 하였다. 그 후 열-기계 연계 해석을 통하여 해석 모델의 잔류 응력을 비교 및 분석하여 최적의 적층 기법을 선정해보았다.

## 제 2 절 연구 목적 및 방법

### 1. 연구 목적

적층 제조 공정은 제작하고자 하는 3 차원 형상의 모델을 2 차원의 패턴인 면 대 면 (Layer-by-Layer) 또는 선 대 선 (Line-by-Line) 을 이용하여 제품을 제작 하는 공정으로 기존의 제조 공정과 비교 하였을 재료의 절약과 제품 제작 시간 절약으로 인한 경제성을 얻을 수 있다. 하지만 금속 적층 제조 공정은 적층이 완료된 제품의 표면이 거칠어 후처리 공정을 추가로 수행하여야 한다.<sup>11)</sup> 또한 적층 시 발생하는 적층부 인근의 잔류응력 으로 인하여 완제품의 균열 및 변형과 같은 기계적 결함을 발생 시키는 문제점이 있다. 잔류 응력에 의한 기계적 결함은 Fig. 2 와 같이 적층 된 제품에 균열을 발생시킬 수 있으며 이는 제품의 치명적인 결함을 발생 시킬 수 있다.<sup>42,51)</sup>



**Fig. 2 Cracks observed in the metals deposited by DED<sup>44)</sup>**

재제조 공정은 부품의 재사용, 보수 및 재조립의 조합된 공정으로 부품의 최초의 제품에 가까운 성능으로 재제작 하는 목적을 가지고 있다.<sup>48)</sup> 적층 제조 공정은 노후화된 공작기계 부품의 수리에 적합한 공정이다. 노후화된 부품의 경우 도면의 데이터 누락 및 부품의 단종으로 인한 수리 및 재제조가 어려운 면이있다. 하지만 DED 공정은 적층 형상의 자유도가 높아 불규칙 형상 적층에 유리하며 부품의 수리 및 재제조에 적합하다 할 수 있다.<sup>33)</sup> 따라서 본 연구에서는 재제조 공정에 적용하기 위한 불규칙 손상부 적층시 발생하는 열-기계 특성 분석과 적층 제조 공정의 적층 기법을 선정하여 적층 공정시 발생하는 잔류 응력을 저감시킬수 있는 최적의 적층 기법을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

DED 공정을 이용하여 AISI 1045 기저부 위 AISI 1045 분말 대체적 적층시 적층부와 기저부 형상이 적층부 인근 열-기계 특성에 미치는 영향을 고찰 하기 위해 적층부와 기저부 형상에 따른 열-기계 연계 해석을 수행하고 잔류 응력 특성 비교 분석을 하여 적정 적층부 및 기저부 형상을 도출하였다 또한 적층 기법에 따른 열-기계 연계 해석을 통해 잔류 응력 특성분석을 수행하고 적정 적층 기법 또한 도출하였다. 기공 발생 위치에 따른 해석을 통하여 기공 발생 위치가 적층부 인근에 미치는 영향성 또한 분석 하였다.

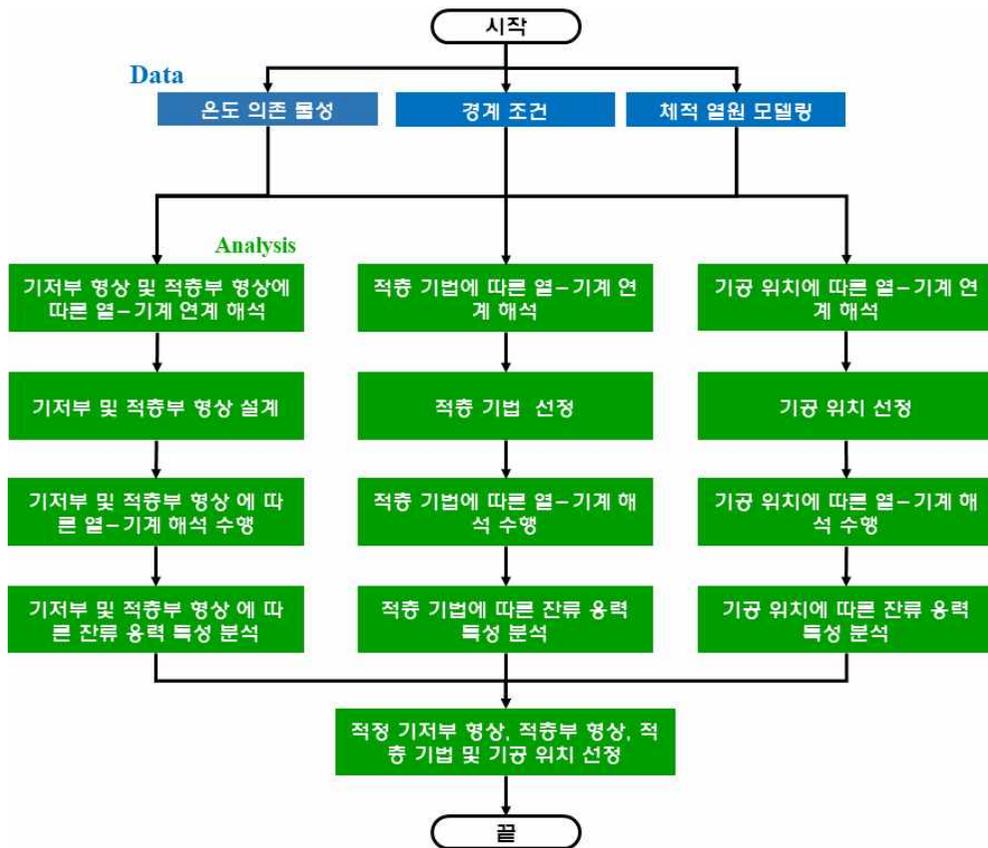


Fig. 3 Flowchart of sequence of research work

제 2 장에서는 상용 소프트웨어인 SYSWELD V16 를 이용하여 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 잔류 응력 특성 분석을 진행 하였으며, 잔류 응력 특성 분석을 위해 기저부 경사각 및 적층부 형상을 선정 하였으며 기저부 경사각과 적층부 형상이 체적은 동일 하나 적층 영역이 각기 다른 조건과 적층부 형상은 동일한 형태의 시편을 기저부 끝단 길이에 따른 형상을 설계 하였으며 적층체적이 많은 적층부 형상을 설계 하여 적층 체적의 증가에 따른 형상을 설계 하였으며 축 대칭의 형상의 기저부 및 적층부 형상을 설계 하였다. 설계된 적층부 및 기저부 형상의 2차원 유한 요소 해석 모델을 개발하고 온도의존 물성 및 경계 조건 데이터를 도출 하였으며 해석에 적용된 열원을 모델링 하여 유한 요소 해석 모델에 적용하여 열-기계 연계 해석을 진행 하였다. 해석에 적용된 적층 방향은 교차 적층 경로를 적용 하였으며 축 대칭 형상의 경우엔 한 방향 적층 경로를 적용 하였다. 해석 결과를 바탕으로 잔류 응력 특성 분석을 진행 하였으며 잔류 응력 저감 측면에서의 우수한 적층부 및 기저부 형상을 선정하였다.

제 3 장에서는 적층 기법에 따른 열-기계 특성 분석을 진행 하였다. 적합한 적층 기법을 선정 하기 위해 조건은 총 3 가지로 선정 하였으며 적층 경로, Interlayer time 및 Interpass time 이다. 적층 경로는 한 방향 적층 과 교차 적층 두 가지의 경로를 선정 하였으며 적층 경로의 열-기계 연계 해석의 경우 3차원 유한 요소 해석 과 2차원 유한 요소 해석을 진행하였으며 잔류 응력 저감 측면에서의 적합한 적층 경로를 선정 및 2차원 유한 요소 해석 모델의 타당성을 검증 하였다. Interlayer time 과 Interpass time 은 적층 이 완료되기 까지 걸리는 시간이 적층부 인근에 미치는 열-기계 특성을 분석하고자 공정중 시간이 추가되도록 유한 요소 해석 모델을 개발 하였다. 열-기계 연계해석을 통하여 Interlayer time 과 Interpass time 을 적층 공정에 적용 하였을 때 가장 적합한 조건을 선정하였다.

제 4 장에서는 기공 발생 위치를 가정하여 기공 위치에 따른 2차원 유한 요소 해석 모델을 개발하였다. 기공의 발생위치에 따라 열-기계 연계 해석을 수행 하였으며 기공 발생 위치에 따른 잔류 응력 특성 분석을 통해 기공 발생이 잔류 응력에 미치는 영향성을 고찰 하였다.

제 5 장에서는 각 장의 결과를 종합하여 불규칙 손상부 적층시 발생하는 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력을 저감 시킬 수 있는 최적의 적층부 형상, 기저부 형상, 적층 경로, Interlayer time, Interpass time 및 기공 발생 위치 조건들을 재제조를 위한 적층시 가장 적합한 적층 기법을 제시 하였다.

## 제 2 장 유한요소 해석을 이용한 기저부 및 적층부 형상에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 분석

### 제 1 절 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 열-기계 특성 분석

#### 1. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출

##### 가. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발

2차원 유한요소 해석을 통하여 기저부 및 적층부 형상에 따른 적층부 인근의 잔류응력 특성 분석을 하기 위하여 기저부 및 적층부 형상에 따른 각기 다른 조건을 선정 하였다. 기저부 형상은 기저부 경사각 ( $\theta$ )  $30^\circ$  와  $45^\circ$  로 선정하였다. 또한 적층부 형상은 3가지의 형상을 선정하였으며 적층부 형상에 따른 3가지 형상은 Fig. 4 와 같으며, Fig. 5 와 같이 총 6개의 모델을 설계 하였다.

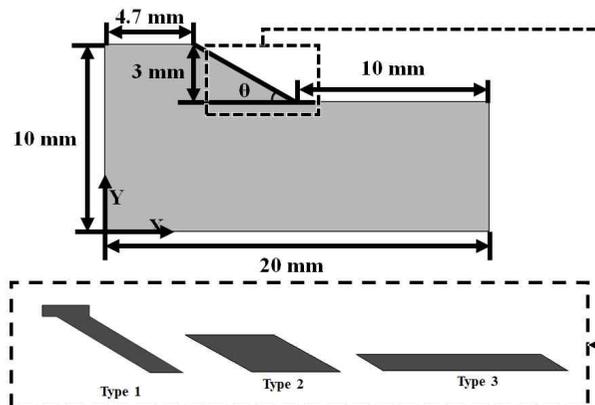
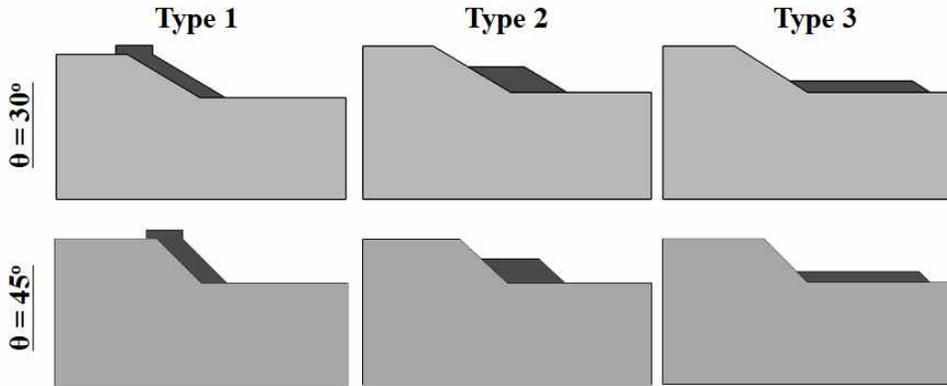


Fig. 4 Schematics of deposited shapes



**Fig. 5 Designs of deposited shapes and substrate of corner angle**

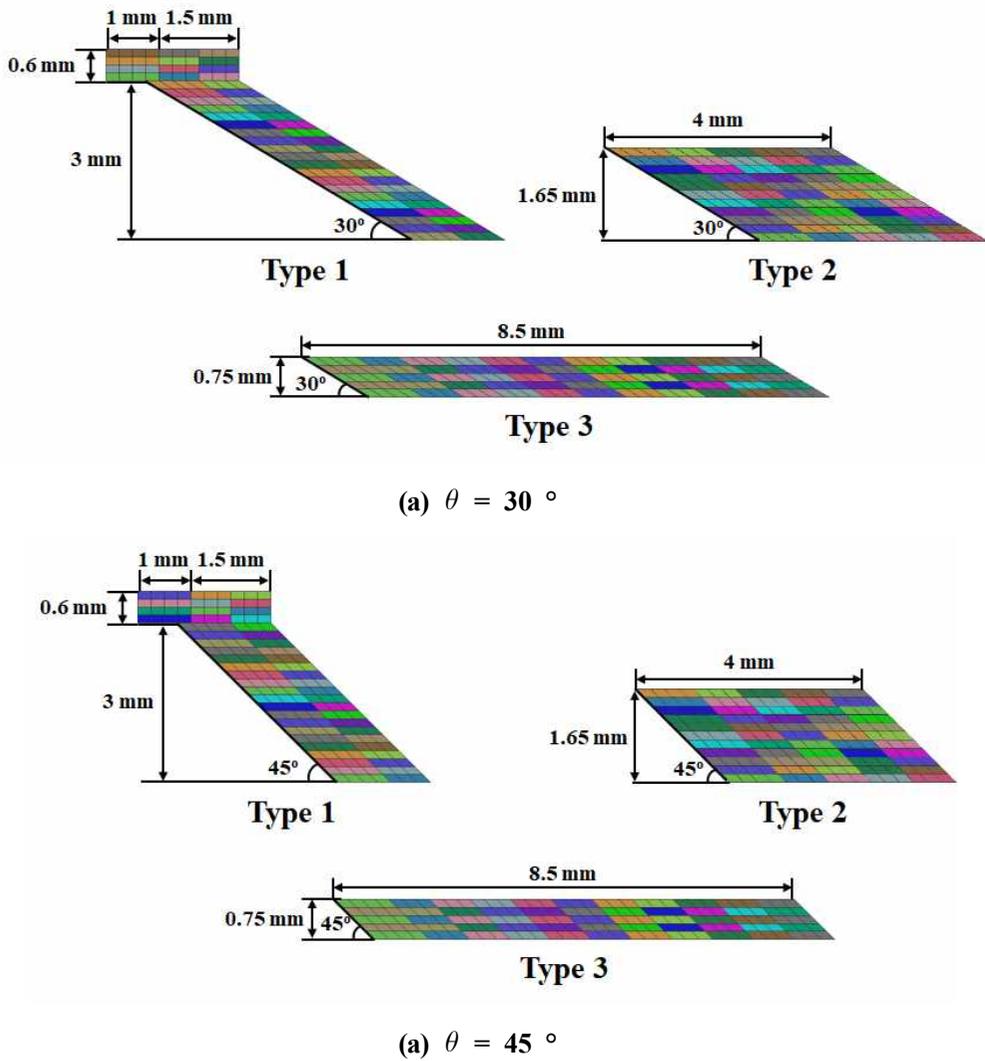
적층 비드 및 적층부 특성 데이터를 이용하여 상용 CAD/CAM 프로그램인 CATIA V5 로 Fig. 4 와 같이 6가지의 각기 다른 모델을 설계하였다. Type 1 은 적층 형상이 기저부 경사면에 얇게 적층부가 형성되는 적층 형상이다. Type 1 의 경우 기저부 경사면 높이인 3 mm 이상의 높이로 적층부를 설계하였다. 이 경우 적층부 상단에 과적층 영역을 생성하여 적층된 제품이 생성이 되면 후가공으로 최종 형상을 제작 할 수 있도록 하였다. Type 2 의 경우 적층부 형상이 기저부의 경사면 과 평면부에 균일하게 형성되도록 설계되었으며, Type 3 의 경우 적층부 형상이 기저부 평면에 얇게 형성하도록 설계되었다.

총 6개의 해석 모델의 적층 면적 (Deposited area) 는 Table 3 과 같이 설계되었다. 또한 적층부 형상에 따른 해석 결과를 비교 및 분석하기 위해 적층 면적은 유사하게 하였다.

**Table 3 Deposited areas based on deposition shapes**

|                     | Type 1              | Type 2              | Type 3              |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\theta = 30^\circ$ | 6.8 mm <sup>2</sup> | 6.6 mm <sup>2</sup> | 6.4 mm <sup>2</sup> |
| $\theta = 45^\circ$ | 6.8 mm <sup>2</sup> | 6.6 mm <sup>2</sup> | 6.4 mm <sup>2</sup> |

설계된 기저부 경사 각도 및 적층부 형상 에 따른 총 6가지의 2차원 유한요소 해석 모델을 개발하였다. 유한요소 해석 모델은 상용 비선형 유한 요소 해석 (Finite element analysis : FEA) 소프트웨어인 SYSWELD V16 를 이용하여 제작 되었다. Fig. 6 은 기저부 경사 각도 및 적층부 형상에 따른 유한 요소 격자 (Mesh) 이다. 한 개의 유한 요소 격자의 폭은 0.25 mm 이며, 높이는 0.15 mm 를 적용하였다. 유한요소 해석 모델에 사용된 적층 비드 및 적층 특성 데이터는 Table 4 와 같다.



**Fig. 6 Mesh structures for each deposition shape**

Type 1 의 경우 적층 제품의 후가공을 고려하여 추가로 적층 높이를 0.75 mm 로 설계 하였으며 적층부 앞 1 mm 를 추가로 제작하였다. 적층 층수는 24 Layer 이며, 한층에 쌓인 적층 비드는 2 Path 이다. 총 적층 비드 수는 52 Path 이다. Type 2 의 경우 적층 층수는 11 Layer 이며, 한층에 쌓인 적층 비드는 5 Path 가 적용되었다. 총 적층 비드 수는 55 Path 이다. Type 3 의 경우 적층 층수는 5 Layer 이며, 한층에 쌓인 적층 비드는 11 Path 가 적용되었다. 총 적층 비드 수는 55 Path 이다. Fig. 7 은 기저부 및 적층부 형상에 따른 유한요소 해석 모델이다. 각 조건의 유한요소 해석 모델의 절점 (Node) 과 2차원 요소 (Element) 및 Path 의 개수와 적층 층수는 Table 5 와 같다.

적층, 탄성 회복 (Elastic recovery) 및 냉각을 포함한 총 공정 시간은 30,000 초로 설정하였으며, 탄성 회복을 시작하는 시간은 적층 완료후 60 초로 선정하였다. Table 6 는 열-기계 연계해석에 적용된 적층 공정 조건이다. 레이저 출력 (P), 레이저 이송 속도 (V), 레이저 반경 (r), 보호 가스 분사량 (G) 및 분말 가스 분사량 (F) 는 각각 500 W, 1,000 mm/min, 0.5 mm, 10 l/min 및 4 l/min 이다.<sup>42)</sup> Fig. 8 은 열-기계 연계 해석에 적용된 적층 경로이다. 적층 경로는 zig-zag 경로이다.

**Table 4 Characteristic data of deposition bead for AISI 1045<sup>42)</sup>**

| Bead width<br>( $\mu\text{m}$ ) | Hatching distance<br>( $\mu\text{m}$ ) | Thickness of each layer<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------------|--|--|
| 1,000                           | 750                                    | $\approx$ 150                                |

**Table 5 Number of nodes, 2D elements, path and layer of FE models**

| Type of deposited shapes |        | Nodes<br>(EAs) | 2D Elements<br>(EAs) | Path<br>(EAs) | Layer |
|--------------------------|--------|----------------|----------------------|---------------|-------|
| $\theta = 30^\circ$      | Type 1 | 748            | 695                  | 52            | 24    |
|                          | Type 2 | 740            | 691                  | 55            | 11    |
|                          | Type 3 | 734            | 685                  | 55            | 5     |
| $\theta = 45^\circ$      | Type 1 | 746            | 696                  | 52            | 24    |
|                          | Type 2 | 738            | 692                  | 55            | 11    |
|                          | Type 3 | 732            | 686                  | 55            | 5     |

Table 6 Process parameters of 2D FE analysis<sup>42)</sup>

| P<br>(W) | V<br>(mm/min) | r<br>(mm) | r(z)<br>(mm) | G<br>(l/min) | F<br>(l/min) |
|----------|---------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 500      | 1,000         | 0.5       | ≈ 0.5        | 10           | 4            |

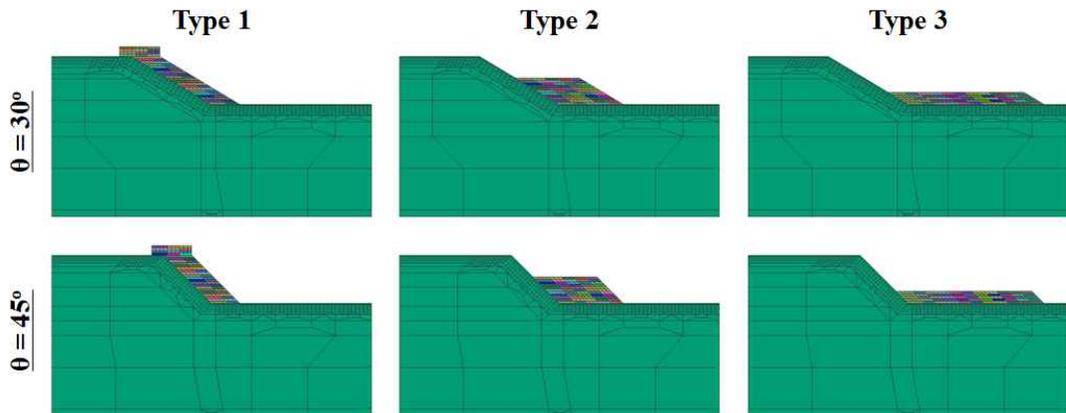


Fig. 7 FE models according to dissimilar deposited shapes

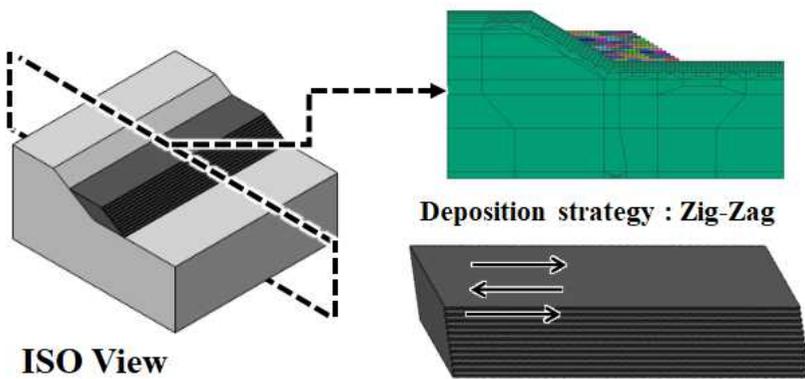


Fig. 8 Deposition strategy of FE analysis (Type 1,  $\theta = 30^\circ$ )

## 나. 온도 의존 열-기계 물성 데이터 도출

본 연구 진행을 위한 기저부 및 적층 분말 재료는 각각 AISI 1045 이며 동종소재를 선택하였다. 소재의 화학 조성은 참고문헌을 통해 도출하였으며 Table 7 과 같다. AISI 1045 재료의 초기 상태는 사전 연구들의 결과를 이용하여 페라이트 (Ferrite) 25% 와 펄라이트 (Pearlite) 75% 로 설정하였다.<sup>42)</sup>

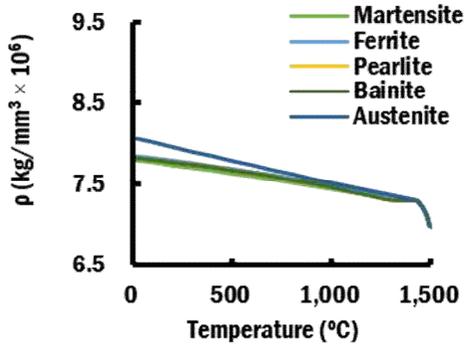
**Table 7 Chemical compositions of AISI 1045<sup>42)</sup>**

| Material (%) | Mo   | Cr   | Fe   | C    | Si   | Mn   | Ni   | P     | S     | O       |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|---------|
| AISI 1045    | 0.23 | 0.84 | Bal. | 0.42 | 0.25 | 0.78 | 1.86 | 0.009 | 0.005 | ≤ 0.016 |

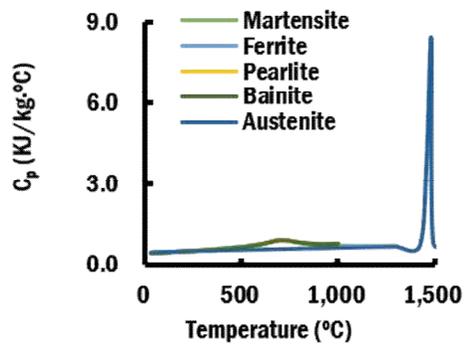
DED 공정을 이용하여 적층 제조 공정을 진행시 AISI 1045 재료의 상 (Phase) 변화가 고려된 온도의존 열-기계 물성 데이터는 Kim 의 연구결과 및 물성 데이터 도출 프로그램인 JmatPro V12.0 을 통하여 도출 된 결과를 이용하였다.<sup>42)</sup> 상 변화를 고려한 온도의존 열-기계 물성데이터는 밀도 (Density :  $\rho$ ), 열전도도 (Thermal conductivity :  $k$ ), 비열 (Specific heat :  $C_p$ ), 영계수 (Young's modulus :  $E$ ), 푸아송비 (Poisson's ratio :  $\nu$ ), 항복강도 (Yield strength :  $\sigma_Y$ ), 열 변형 (Thermal expansion :  $\alpha_e$ ) 의 온도의존 열-기계 물성 데이터이며 Fig. 9 와 같이 도출된 물성 데이터는 다음과 같이 도식 되었다.

## 다. 경계 조건 데이터 도출

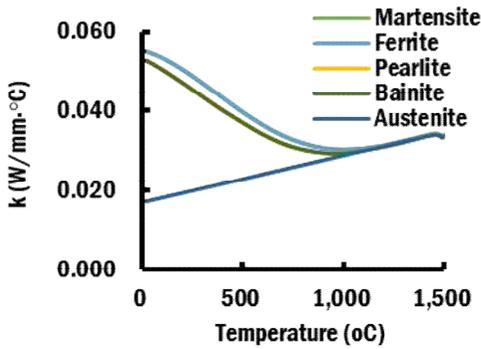
열-기계 연계 유한 요소 해석에 적용된 경계 조건은 Fig. 10 과 같이 적용하였다. 열전달 해석에서 적층 공정중 에는 적층이 진행되는 영역인 기저부의 상면에는 아르곤 (Ar) 가스에 의한 강제 대류와 복사 에 의한 열 손실이 고려되어야 하기에 등가 열손실 모델이 (Equivalent heat loss model) 이 적용 되었다. 기저부 상면을 제외한 모든 기저부 영역에는 온도 의존 자연 대류 (Natural convection) 가 발생 한다고 가정 하였다. 또한 적층이 완료된 후에는 기저부와 적층부 모두 온도 의존 자연



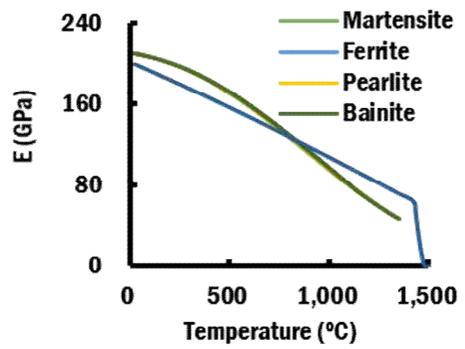
(a) Density



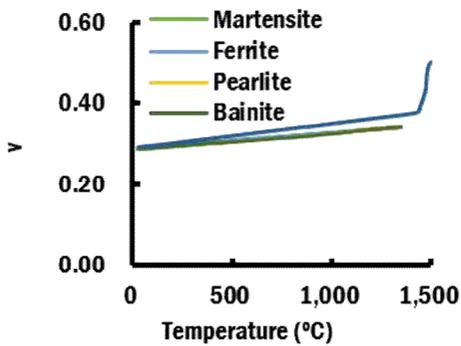
(b) Specific heat



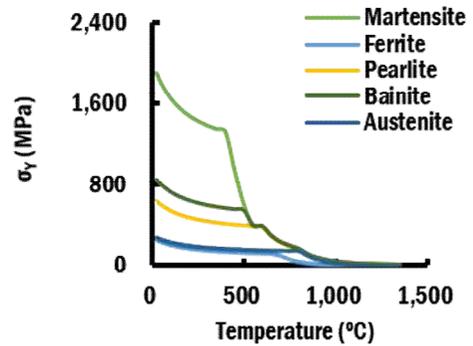
(c) Thermal conductivity



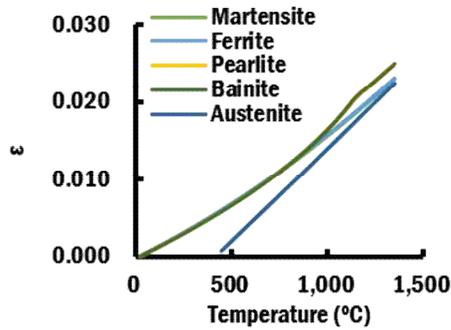
(d) Young's modulus



(e) Poisson's ratio



(f) Yield strength



(g) Thermal expansion

Fig. 9 Temperature dependent properties of AISI 1045<sup>42)</sup>

대류가 발생 한다고 가정 하였다. 위와 같은 온도 의존 강재, 대류 및 등가 열손실이 고려되기 위해선 먼저 공기 (Air) 및 아르곤 의 온도의존 물성 데이터를 도출하였으며 물성 데이터는 Fig. 11 및 Fig. 12 와 같이 그래프로 표현 하였다.

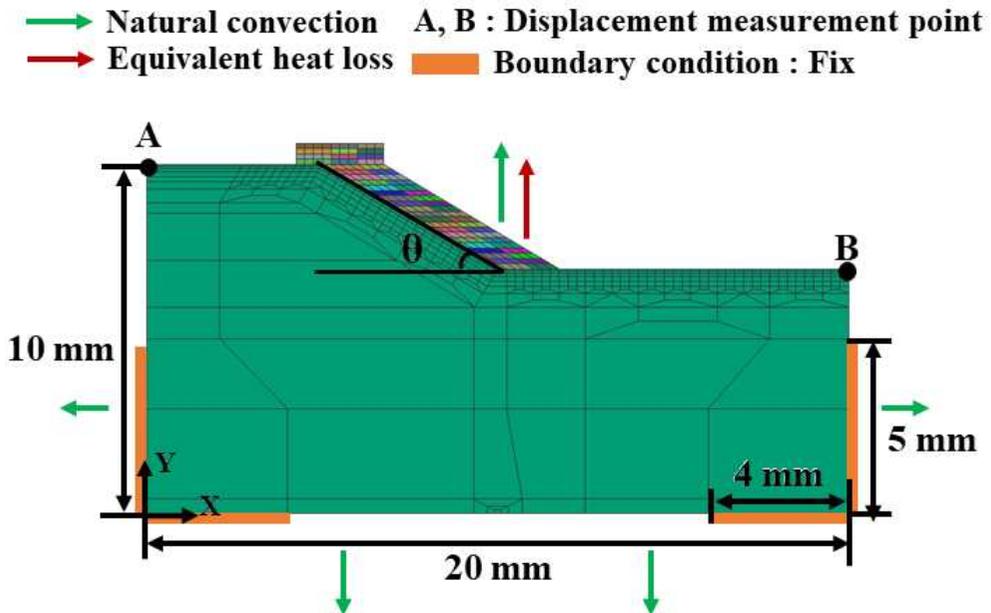


Fig. 10 Model for thermo-mechanical analysis (Type 1,  $\theta = 30^\circ$ )

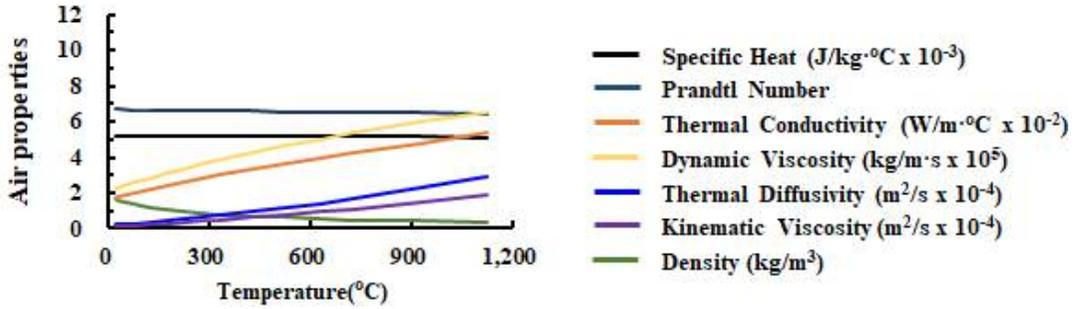


Fig. 11 Temperature dependent material properties of air<sup>45)</sup>

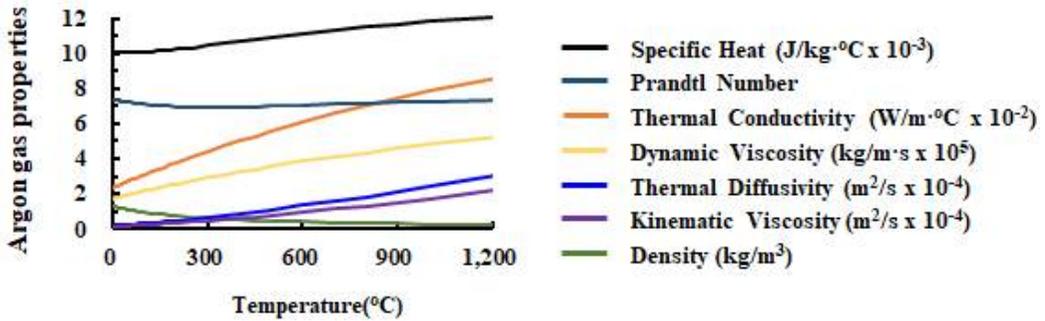


Fig. 12 Temperature dependent material properties of argon<sup>45)</sup>

열-기계 연계 유한요소 해석에 적용된 온도의존 강제대류 계수는 아래의 식 (1), (2), (3), (4) 및 (5) 을 이용하여 계산하였다.<sup>46)</sup>

$$\overline{h}_f = \frac{\overline{Nu} \times k}{D} \quad (1)$$

여기서  $\overline{h}_f$ ,  $\overline{Nu}$ ,  $k$  및  $D$  는 각각 평균 강제대류 계수, 평균 넛셀수, 열전도도 및 노즐의 지름을 뜻한다. 평균 넛셀수는 식 (2) 을 이용하여 계산되었다.

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

여기서  $Ar$ ,  $H$  및  $Re$  는 각각 면적, 노즐과 표면 사이 거리 및 레이놀즈수

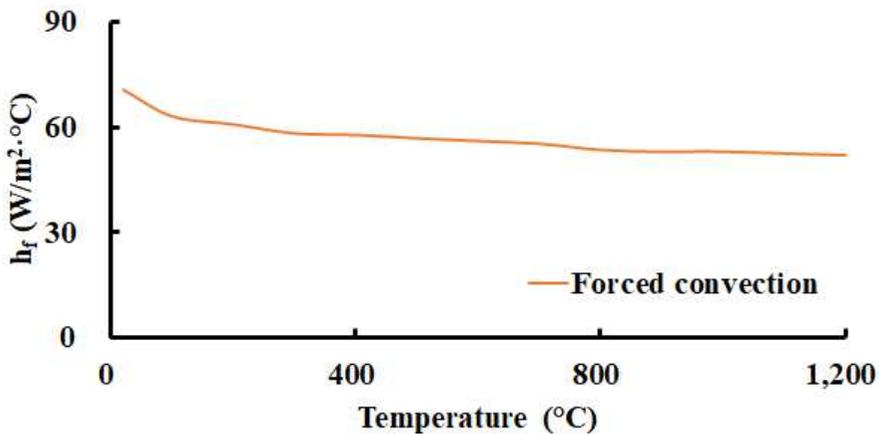
(Reynolds number) 이다. 적용 면적은 0.004 - 0.04 사이에 적용되었으며 노즐과 표면 사이 거리와 노즐 직경의 비는 2 - 12 사이이며 레이놀즈수는 2,000 - 400,000 사이의 범위에서 적용된다. 적용 면적, 레이놀즈수 및 프란틀수는 아래 식 (3), (4) 및 (5) 와 같이 계산된다.

$$Ar = \frac{D^2}{4 \times R^2} \quad (3)$$

$$Re = \frac{Ve \times D}{\nu_k} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (5)$$

여기서 R,  $Ve$ ,  $\mu$  는 각각 적용 반경, 유동의 평균 속도 및 유체의 동점성 계수 (Dynamic viscosity) 이다. 계산된 강제대류 계수는 Fig. 13 와 같다.



**Fig. 13 Forced convection coefficients**

열-기계 연계 유한 요소 해석에 적용된 온도 의존 자연 대류 계수는 아래 식 (6), (7), (8), (9) 및 (10) 을 이용하여 계산되었다.<sup>46)</sup> 기저부의 수직 면의 경우 식 (6), 상면의 경우 식 (7), 하부의 경우 식 (8) 을 이용하여 도출하였다.

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (Ra < 10^9) \quad (6)$$

$$Nu = 0.54Ra^{1/4} \quad (7)$$

$$Nu = 0.52Ra^{1/5} \quad (8)$$

여기서 Nu, Ra 및 Pr 은 각각 넛셀수 (Nusselt number), 레일리수 (Rayleigh number), 프란틀수 (Prandtl number) 이다. 식 (9)를 이용하여 레일리수 식이 계산된다.

$$Ra = \frac{g(T_S - T_\infty)L_C^3}{\nu_k \alpha T_f} \quad (9)$$

여기서  $g$ ,  $T_S$ ,  $T_\infty$ ,  $L_C$ ,  $\nu_k$ ,  $\alpha$  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 경계층에 발생하는 유체 온도의 근사치는 식 (10) 과 같이 계산된다. 최종적으로 계산된 온도 의존 자연 대류 계수는 Fig. 14 와 같다.

$$T_f = \frac{T_S + T_\infty}{2} \quad (10)$$

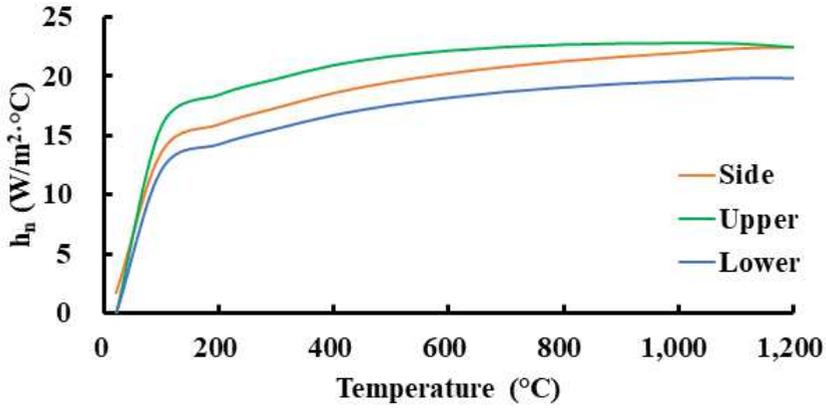


Fig. 14 Natural convection coefficients

적층 공정 중에는 Fig. 15 과 같이 아르곤 가스에 의한 강제 대류 발생 및 복사 에 의한 열손실을 고려해야 하여 등가 열손실 계수가 적용되어야 한다. 등가 열 손 실 계수는 (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17) 및 (18) 을 이용하여 도출하였다.<sup>45)</sup>

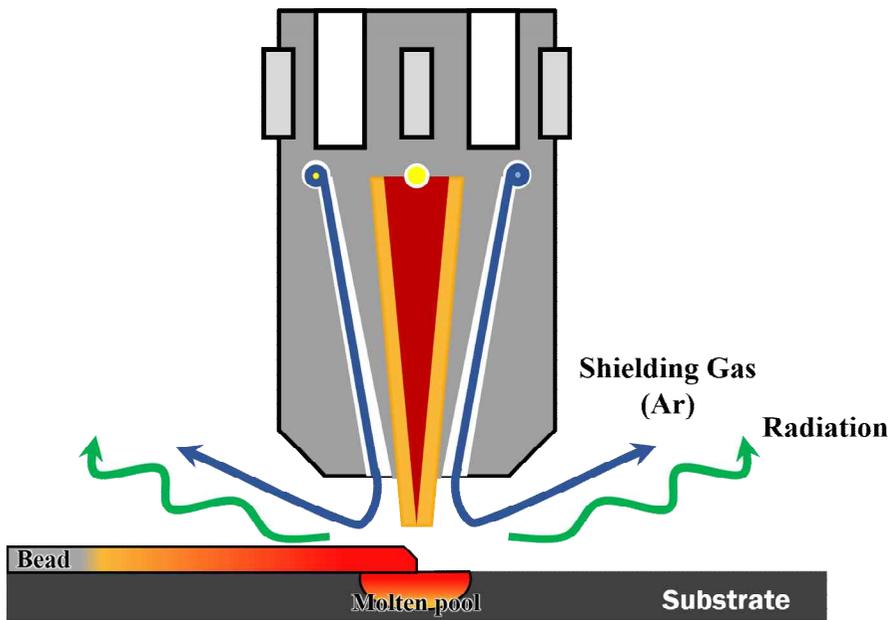


Fig. 15 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces

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

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

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

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

여기서  $\epsilon$  및  $\sigma$  는 각각 방사율 (Emissivity) 및 슈테판-볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수이다. 해석에서 사용된 AISI 1045 방사율은 단일 방사율 값 0.28 을 적용 하였으며 슈테판-볼츠만 상수는  $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2K^2)$  의 값을 적용하였다. 식 (11), (12) 및 (13) 은 식 (14) 와 같이 표현할 수 있으며, 다시 (15) 와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

식 (15) 은 (16) 과 같이 표현될 수 있으며,  $\bar{h}_{eq,f}$  를 식 (17) 과 같이 가정하면, 최종적으로 등가 열 손실 계수 식은 (18), 총 열손실 식은 식 (19) 와 같이 표현 된다.<sup>45)</sup>

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

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

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

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

위 식을 이용하여 계산된 등가 열 손실 계수는 Fig. 16 과 같다.

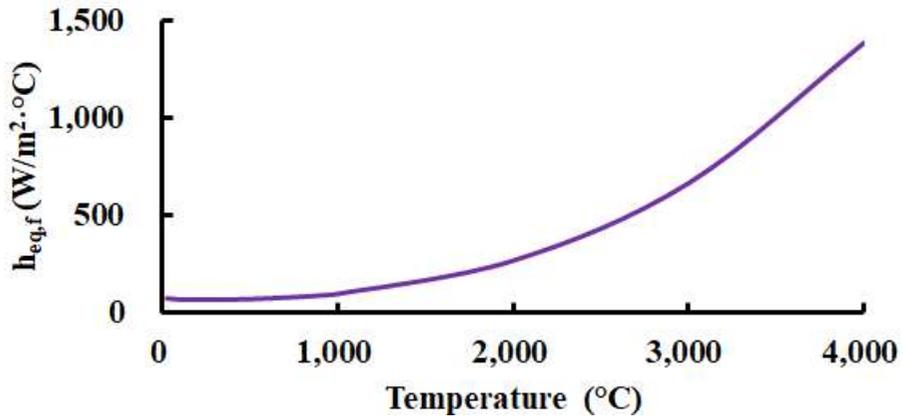


Fig. 16 Equivalent heat loss coefficient

## 라. 열원 모델

DED 공정은 적층 공정을 수행할 때 고밀도의 에너지원인 레이저를 활용하여 적층 공정을 수행한다. 레이저 모드는 종축 모드 (Longitudinal electromagnetic mode) 및 횡축 모드 (Transverse electromagnetic mode) 로 나누어 진다. 레이저 횡축 모드의 TEM00 는 최소 초점 크기와 최고 에너지 밀도를 가지며, 초점거리 바깥에서도 그 형상을 유지할 수 있는 모드 이다.<sup>47)</sup> 따라서 레이저 열원은 TEM00 로 가정하고 가우시안 (Gaussian) 평면 열원 강도 분포와 침투깊이 (Penetration depth)를 가지는 3차원 체적 열원 (Volumetric heat flux) 형상으로 가정하였다.<sup>51)</sup>

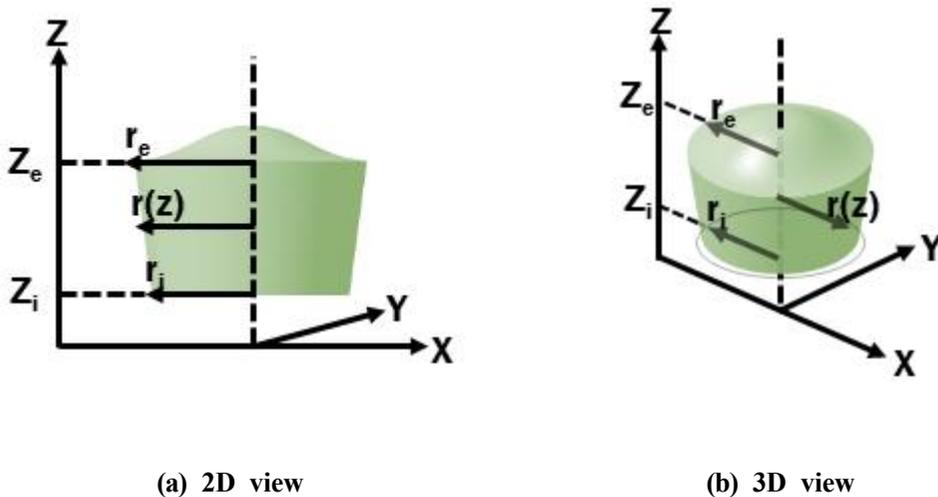


Fig. 17 Heat flux model of laser

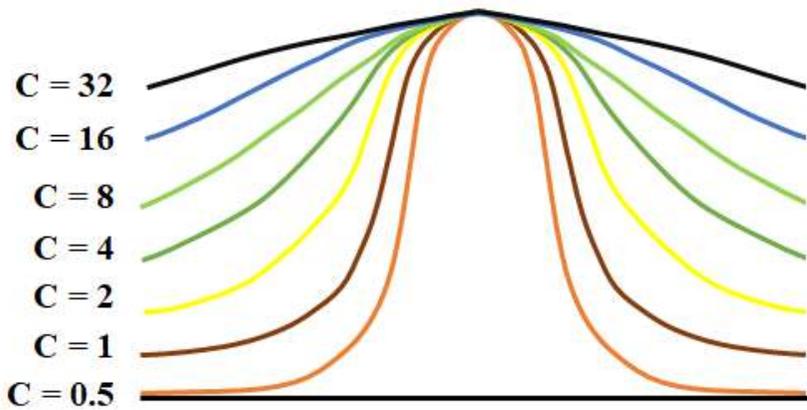
여기서  $z_i$ ,  $z_e$ ,  $r_i$  및  $r_e$  는 각각 열원의 침투 깊이 (Penetration depth), 상부 위치, 하부 반경 및 상부 반경이다. 열원의 침투 깊이는 기저부 평면 영역에서 적층부와 연결된 기저부의 유한요소 격자 1개의 두께를 적용 하였으며 열원의 위치는 유한요소 격자 상부 위치에 설정 하였다.<sup>52)</sup> 열원의 반경은 실제 적층 공정에 사용된 열원의 크기를 적용하였다. 열원 체적 모델링 식은 (14) 와 같으며 열원의 출력 밀도는 (15), 침투 깊이에 따른 레이저 열원 유효 범위는 식 (16) 과 같다.<sup>45)</sup>

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

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

$$r(z) = r_e \quad (16)$$

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



**Fig. 18 Intensity distribution of heat flux<sup>53)</sup>**

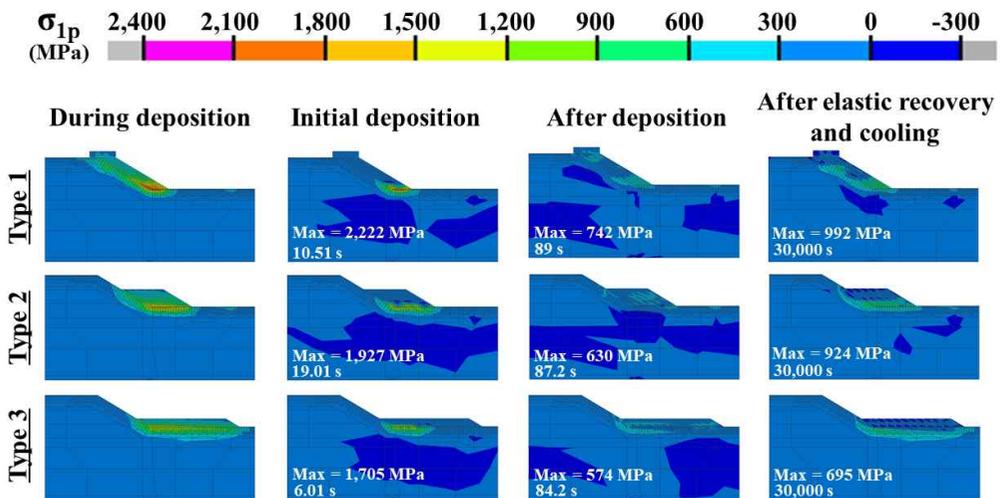
해석에 적용된 레이저 열원의 형상은 형상계수인 C 값에 따라 변화한다.<sup>54)</sup> 해석에 적용된 열원의 형상은 Fig. 20 과 같다. 본 연구에서 사용된 열원 형상은 풀 가우시안 (Full gaussian) 형상이며 형상계수는 0.5 가 적용되었다.

## 2. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 열-기계 특성 비교 분석

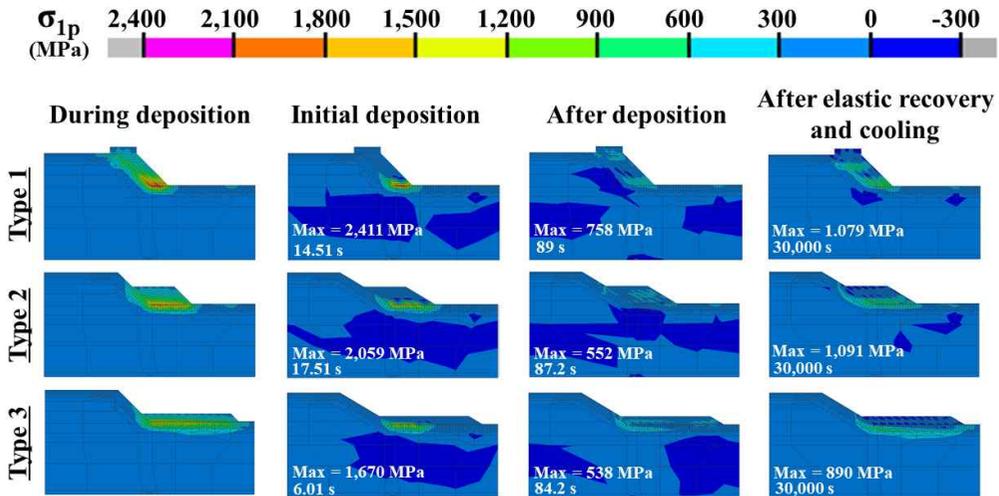
### 가. 주응력 비교 및 분석

열-기계 연계 해석을 이용하여 Fig. 19 와 같이 기저부 경사 각도 및 적층부 형상에 따른 잔류 응력 분포 변화를 예측하였다. 잔류 응력의 척도는 최대 주응력 (1st principal stress) 를 선정하였으며 적층 공정중 (During deposition) 최대 잔류응력 생성 분포와 적층 공정이 완료 된후 탄성 회복 (Elastic recovery) 와 냉각 (Cooling) 이 완료된 시점을 관찰하였다.

Fig. 19 는 열-기계 연계 해석으로 예측된 기저부 경사각 과 적층부 형상에 따른 주응력 분포 이다.  $\sigma_{1p}$  는 주응력이다. 기저부 경사각 과 적층부 형상에 관계없이 적층 공정중 발생하는 잔류 응력은 기저부 경사각 및 적층부 형상과 관계 없이 기저부 와 적층부의 경계면 적층부 인근에 최대 잔류 응력이 형성함을 알 수 있었다. 또한 적층 공정중 발생하는 잔류 응력은 적층 공정이 완료 된후 탄성 회복 과 냉각 이 모두 완료된 시점의 잔류 응력 보다 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 19 1<sup>st</sup> principal stress distributions according to deposited shapes and deposition region corner angles

기저부 경사각 과 적층부 형상에 관계없이 적층부 형상이 Type 1 에서 Type 3 으로 변경될 때 잔류 응력의 크기가 감소하는 것을 알 수 있었다. 적층부 형상이 Type 1 인 경우에는 잔류 응력이 기저부 모서리부 인근에 매우 집중되는 것을 알 수 있었다. 그러나 적층부 형상이 Type 3 인 경우에는 잔류 응력이 기저부의 평면에 넓게 분포 하는 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 적층부 형상이 기저부의 평면부에 적층되는 체적이 증가시킬수록 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력을 저감 시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

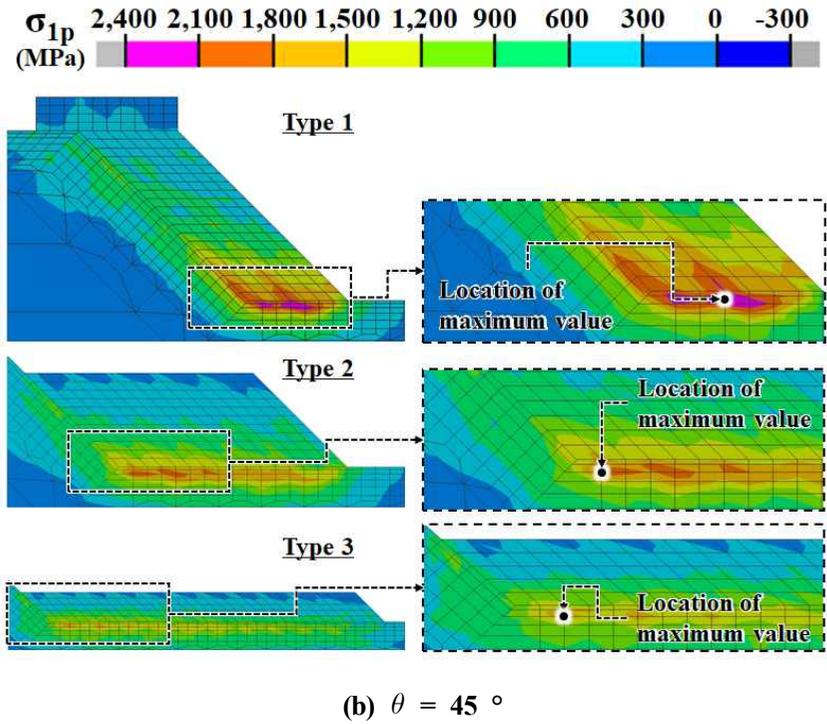
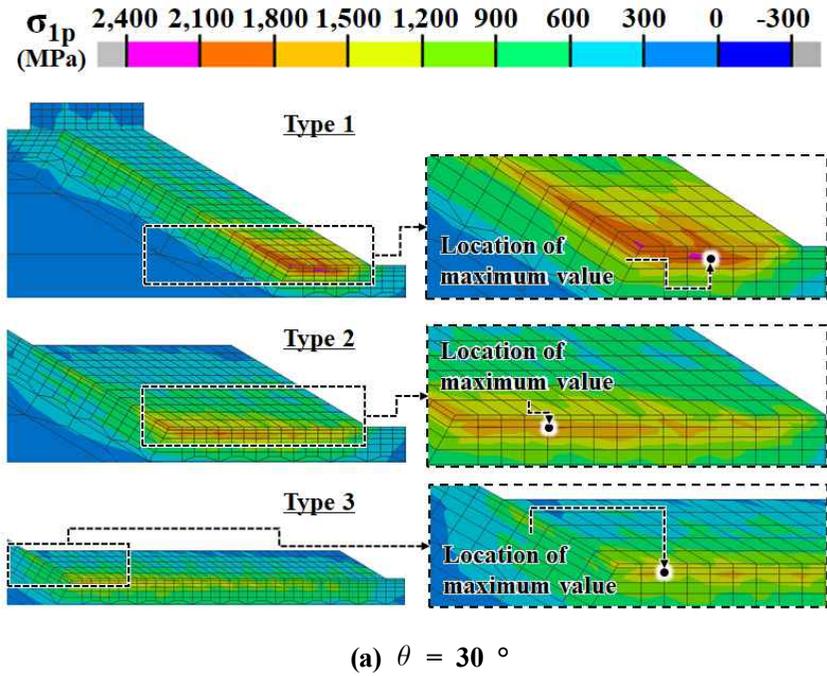


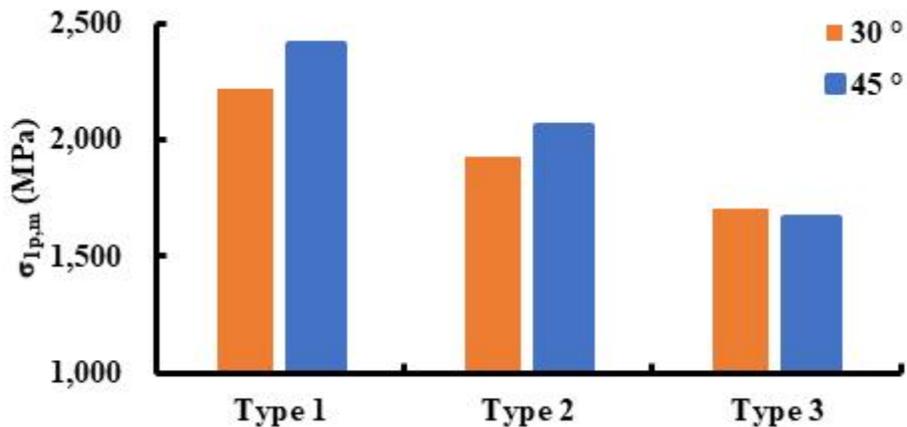
Fig. 20 Effect of deposited shape and inclination angle of deposition region on ESR

**Table 8 Residual stress maximum value for during deposition**

|                     | Type 1    | Type 2    | Type 3    |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|
| $\theta = 30^\circ$ | 2,222 MPa | 1,927 MPa | 1,705 MPa |
| $\theta = 45^\circ$ | 2,411 MPa | 2,059 MPa | 1,670 MPa |

**Table 9 Residual stress maximum value for after elastic recovery and cooling**

|                     | Type 1    | Type 2    | Type 3  |
|---------------------|-----------|-----------|---------|
| $\theta = 30^\circ$ | 992 MPa   | 924 MPa   | 695 MPa |
| $\theta = 45^\circ$ | 1,079 MPa | 1,091 MPa | 890 MPa |



**Fig. 21 Influence of corner angle of deposition region and shape of deposited bead on maximum 1<sup>st</sup> principal stress**

Fig. 20 은 적층 공정중 잔류 응력이 상대적으로 크게 발생하는 과도 잔류 응력 발생 영역 (Excessively stressed region : ESR) 인근의 잔류 응력 분포이다. Fig. 20 과 같이 최대 잔류 응력이 발생하는 영역은 기저부 경사각 과 적층부 형상과 관계 없이 기저부 와 적층부의 경계면의 기저부 방향으로 경계면 바로 아래에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 최대 잔류 응력 발생 위치 (Location of maximum value) 또한 기저부의 경사면과 평면부의 교차지점의 모서리로부터 기저부 평면부

끝단 방향으로 수평거리 1mm 이내에 위치하는 것을 알 수 있었다. 적층부 형상이 Type 1 에서 Type 3 로 변경 됨에 따라 ESR 의 면적이 감소하는 것을 알 수 있었다.

Table 8 은 열-기계 연계 해석으로 예측된 기저부 경사각과 적층부 형상에 따른 최대 주응력의 최대값이다. Table 9 은 열-기계 연계 해석으로 예측된 기저부 경사각과 적층부 형상에 따른 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점에서의 최대 주응력의 최대값이다. 적층중 발생하는 주응력의 최대값과 탄성 회복 및 냉각후 발생하는 주응력의 최대값은 Type 1 에서 Type 3 변경됨에 따라 주응력의 값이 감소함을 알 수 있다.

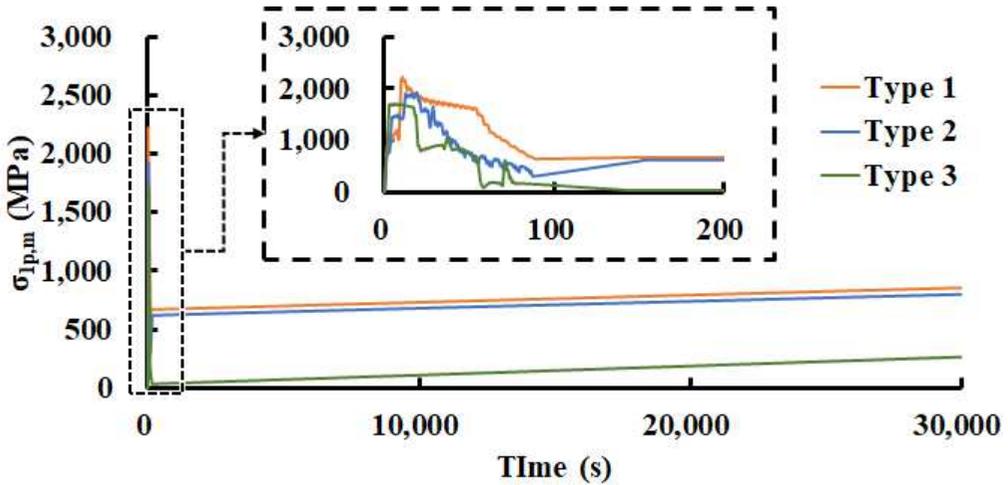
Fig. 21 은 열-기계 연계 해석으로 예측된 기저부 경사각과 적층부 형상에 따른 최대 주응력의 값 변화이다. 기저부의 경사부에 적층량이 많은 Type 1 의 적층 형상이 기저부의 평면부에 적층량이 많은 Type 3 적층 형상보다 최대 주응력의 최대값이 기저부 경사각 30 ° 와 45 ° 에 대하여 각각 30 % 와 44 % 만큼 더 크게 예측 되었다. Type 1 과 2 의 적층 형상에 대해서는 기저부 경사각이 45 ° 인 경우가 기저부 경사각 30 ° 인 경우보다 최대 주응력 값이 6-9 % 가량 높게 산출되었다.

적층 형상이 Type 3 인 경우 기저부 경사각이 낮은 30 ° 인 경우가 45 ° 인 경우보다 2 % 높게 예측되었다. 이 결과로 Type 3 인 경우에는 기저부 경사각과 상관 없이 가장 낮은 잔류 응력이 발생 함을 알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이 증가함에 따라 기저부 평면 적층량 증가에 따른 적층부 인근 잔류 응력 발생량 감소율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

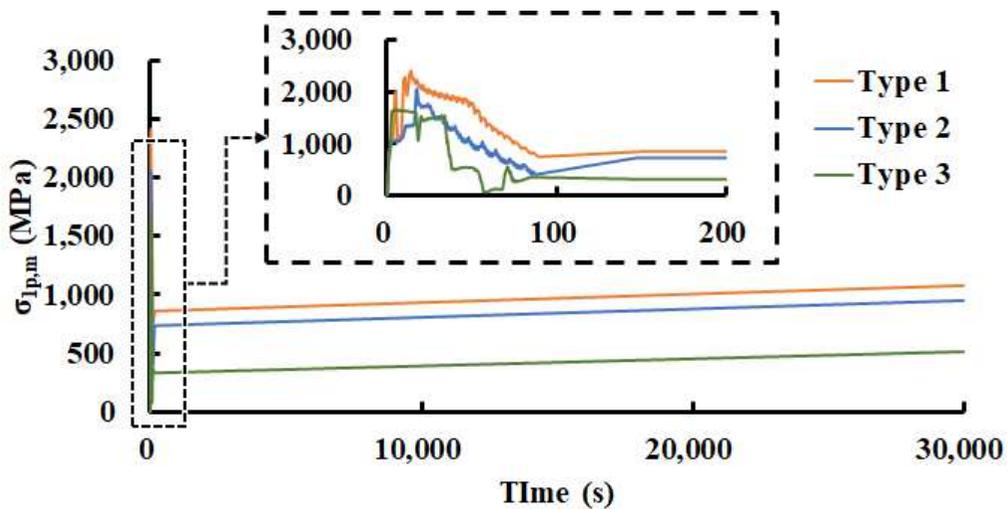
위 결과들로부터 적층 공정중 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력을 저감 시키기 위해서는 기저부의 평면에 적층되는 적층 재료의 양을 증가시키는 방향으로 적층을 수행하여야 함을 알 수 있었다.

나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성

Fig. 22 는 Fig. 20 의 열-기계 연계 해석에서 도출된 최대 잔류 응력 발생 위치에서 측정한 시간에 따른 최대 주응력의 발생 이력이다, Fig. 23 은 최대 잔류 응력 발생 시간에서의 최대 주응력 분포이다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 22 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value

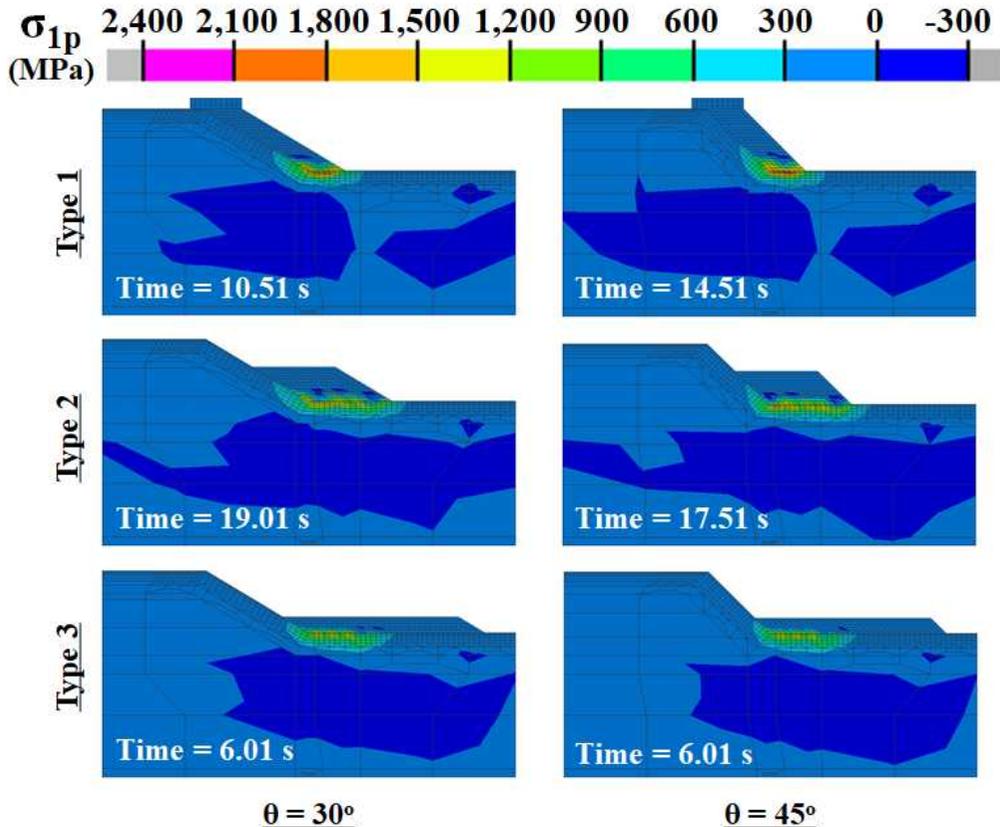
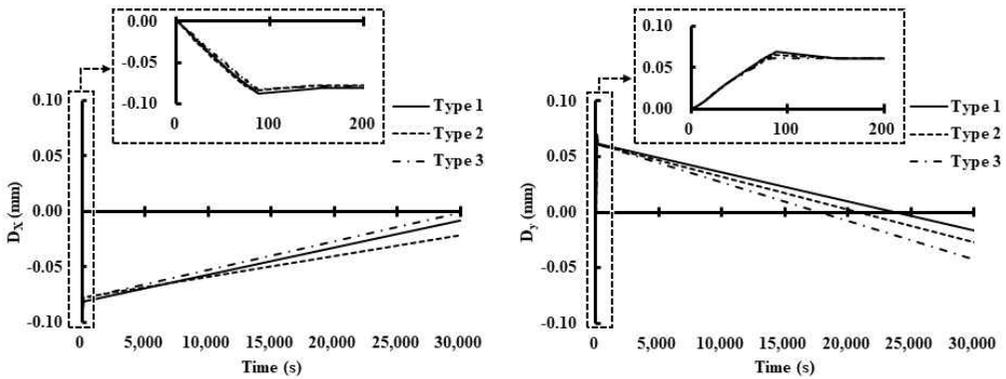


Fig. 23 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the times of maximum stresses occurrence

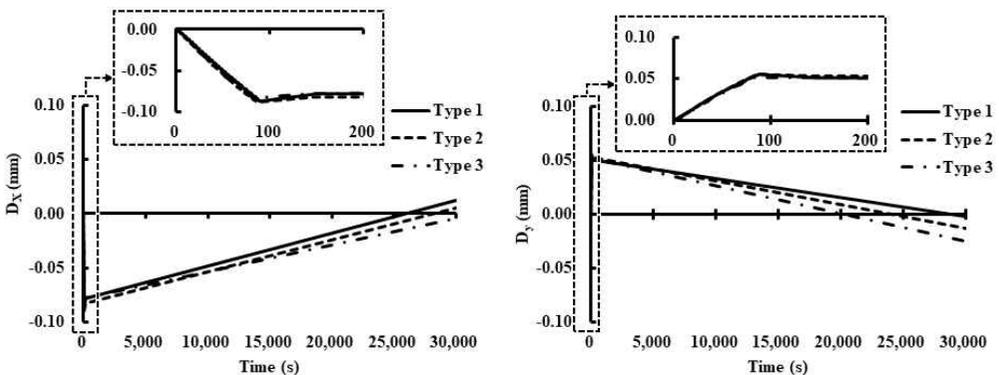
Fig. 22 와 Fig. 23 에서 기저부 경사각 과 적층부 형상과 관계없이 적층 공정 초기에 잔류 응력이 급격하게 증가하며 이에 따라 최대 잔류 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 최대 잔류 응력 발생 시기는 적층 공정 중 적층 초기 단계에서 발생함을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생 후 적층이 완료되는 시점까지 잔류 응력은 점차 감소하는 현상을 나타내었다. 적층 공정이 완료 된 후 해석 모델에 적용된 고정 경계 조건이 제거되고 냉각이 시작함에 따라 잔류 응력이 조금씩 증가 하며 최종적으로 최종 잔류 응력에 도달함을 알 수 있었다. 또한 최대 잔류 응력 발생 시점에서 적층 완료 시점까지 발생하는 잔류 응력의 감소 특성이 적층부 인근의 잔류 응력 형성에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 Type 3 의 경우 기저부 평면에 적층 체적이 많은 경우 적층 완료 후 발생 하는 잔류 응력이 매우 작은 값을 가지며 Type 1 과 Type 2 와 비교시 두드러 지게 적층부 인근의 최종 잔류 응력이 가장 낮게 산출되는 것을 알 수 있었다.

### 3. 기저부 경사각 및 적층부 형상에 따른 변형 특성

Fig. 24 는 열-기계 연계 해석을 통해 도출된 A 점에서의 시간에 따른 변위 이력이다. Fig. 24 에서의  $D_x$  와  $D_y$  는 Fig. 10 에 도시된 A 점의 X 방향 변위와 Y 방향 변위 이다. Fig. 10 과 적층이 완료되는 시점까지는 급격히 변위가 증가하였다. 그러나 적층이 완료된 후 고정 조건을 제거 후 냉각이 시작되는 시점부터는 적층 시 변형한 방향의 반대 방향으로 탄성 회복과 수축이 발생하였다. 이 현상은 적층부 형상 및 기저부 경사각 에 관계없이 발생함을 알 수 있었다. Fig. 24 를 통하여 적층부 형상은 적층 완료 후 탄성 회복과 수축에 의한 변위 감소율에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.



(a)  $\theta = 30^\circ$  (X direction, Y direction)



(b)  $\theta = 45^\circ$  (X direction, Y direction)

Fig. 24 Displacement histories for X and Y directions

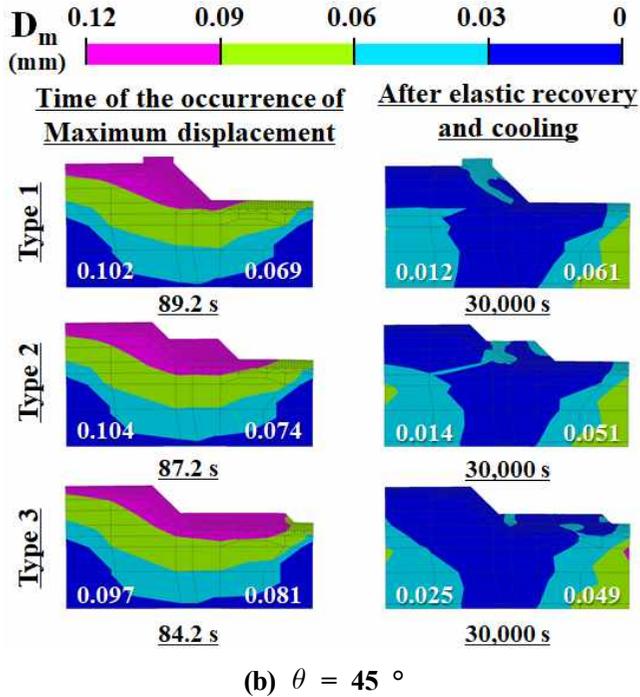
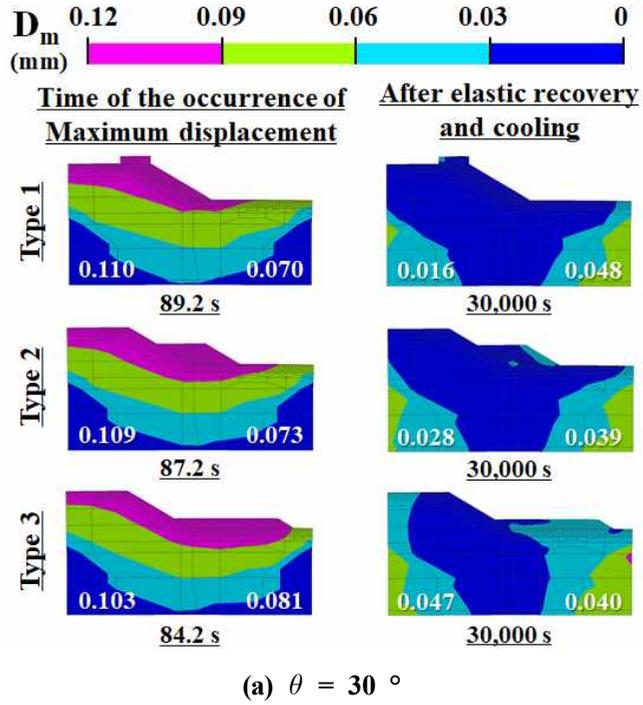
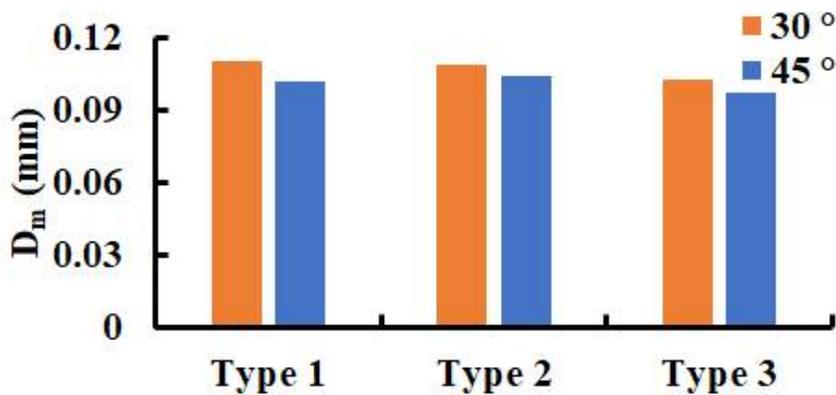


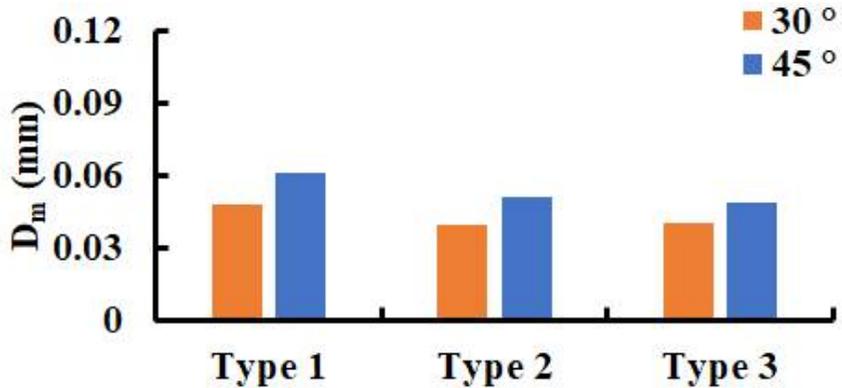
Fig. 25 Time histories of displacements distributions at the occurrence location of the maximum value

Fig. 25 는 적층 형상 및 기저부 경사각에 따른 최대 변형 발생 시점과 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점의 변위 분포 이다. Fig. 25 에서의  $D_m$  은 변위의 절대값 이다. 적층 공정 중 발생하는 적층 시편의 변형은 적층이 진행되는 적층부 인근에서 집중적으로 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 최대 변형 발생 시점은 적층부 형상 및 기저부 경사각과 관계없이 적층이 완료된 시점에서 발생 함을 확인할 수 있었다. 적층부 형상이 Type 1 에서 Type 3 로 변경 될 경우에 최대 변형 발생 시점에서 변위가 0.09 mm 이상 발생하는 변형 영역이 기저부 두께 방향으로 깊이가 깊어짐과 동시에 시편의 적층 형상에 따라 기저부 수평 방향으로 영역이 확장 됨을 알 수 있었다. 또한 동시에 시편의 X 방향으로 좁아지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 25 에서 최대 변위 발생 시점에서는 Fig. 10 에서의 변위 측정 위치인 A 위치가 B 위치 보다 변위가 크게 예측 되었지만 탄성 회복 및 냉각이 모두 완료된 후 시점에서의 잔류 변위는 B 의 위치가 A 의 위치보다 크게 산출되었다. 이 결과를 바탕으로 Fig. 26 과 같이 최대 변위 발생 시점에서는 A 위치에서 변위를 산출 하였으며, 탄성 회복 및 냉각이 모두 완료된 최종 잔류 변위는 B 위치에서 도출하였다.



(a) Maximum displacement (Location A of Fig. 10)



(b) Residual displacement (Location B of Fig. 1)

**Fig. 26 Maximum and residual displacements for different deposited shapes and slopes of deposition regions**

기저부 경사각이 30° 인 경우에서 45° 인 경우로 증가할 때 최대 변위의 변화 범위는 0.103-0.110 mm 에서 0.097-0.104 mm 로 미미하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 적층 형상이 Type 1 에서 Type 3 으로 변경될 경우 매우 작게 변위가 감소하는 것을 알 수 있었다. 적층부 형상이 Type 1 에서 Type 3 으로 변경될 때 B 점의 최종 잔류 변위는 0.039-0.048 mm 에서 0.049-0.061 mm 로 소폭 증가함을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 25 와 같이 기저부 경사각이 30° 인 경우에서 45° 인 경우로 증가하는 경우엔 전체적인 최종 잔류 변위 분포는 소폭 감소하는 것을 알 수 있었다.

기저부 경사각도 및 적층부 형상에 따른 열-기계 연계 해석을 통해 잔류 응력은 적층 공정중 최대 잔류 응력이 발생하며, 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력의 크기는 기저부 평면에 적층 되는 재료의 체적이 증가함에 따라 잔류 응력이 감소 함을 알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이 적은 경우인 30° 인 경우가 45° 인 경우 보다 낮은 잔류 응력을 형성함을 알 수 있었다. 또한 Type 3 인 기저부 평면에 적층 되는 체적이 증가될수록 최대 변위와 최종 잔류 변위가 최소화되는 것을 알 수 있었다. 따라서 적층 수행시 기저부 경사각이 30° 인 기저부에 적층 영역을 기저부 평면으로부터 넓게 적층을 수행 하는 방향으로 진행하는 것이 최적의 적층 기법으로 사료 된다.

## 제 2 절 기저부 끝단 길이에 따른 열-기계 특성 분석

### 1. 기저부 끝단 길이에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출

#### 가. 기저부 끝단 길이에 기저부 및 적층부 형상 설계

2차원 유한요소 해석을 통하여 기저부 끝단 길이에 따른 적층부 인근의 잔류응력 특성 분석을 하기 위하여 기저부 및 적층부 형상에 따른 각기 다른 조건을 선정 하였다. 기저부 형상은 기저부 경사각 ( $\theta$ )  $30^\circ$  와  $45^\circ$  로 선정하였다. 또한 기저부 끝단 길이 형상은 3가지의 형상을 선정하였으며 적층부 형상에 따른 3가지 형상은 Fig. 27 과 같으며 총 6 개의 형상을 설계하였다. 또한 Fig. 27 에서의  $L_1$  은 시편의 적층부 끝으로부터 기저부 끝단 까지의 거리이다.

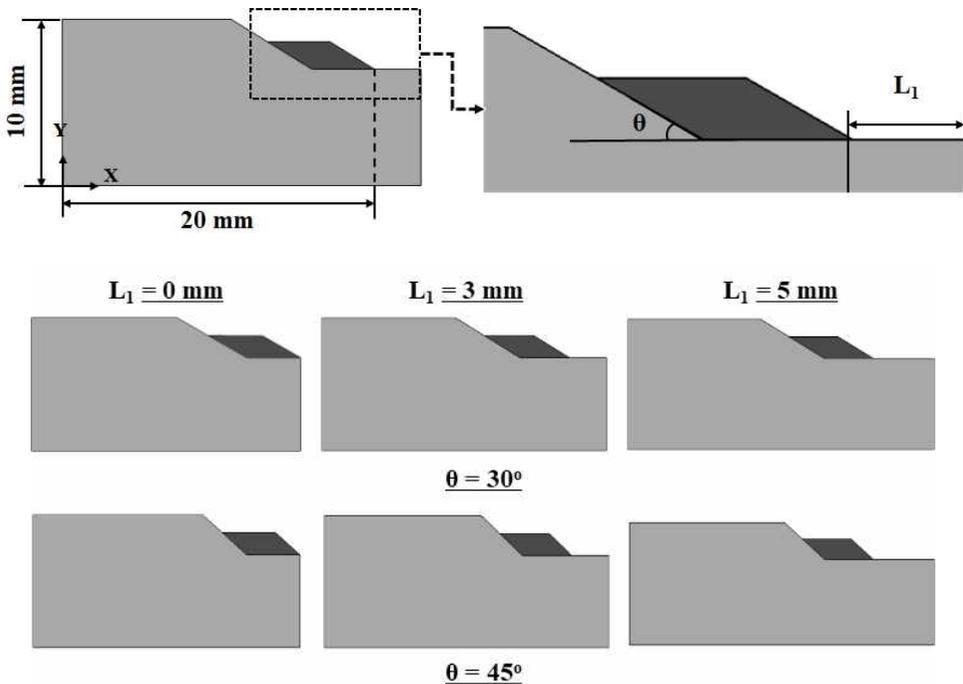


Fig. 27 Substrate shapes according to  $L_1$  length and deposition region slopes

적층부 형상은 제 1절의 Type 2 를 기반으로 제작 하였으며, 기저부 끝단 길이의 형상은 제 1절 과 동일한 특성 데이터를 이용하여 CATIA V5 로 설계 하였다. 기저부 끝단 길이는 0 mm, 3 mm, 5 mm를 선정 하였으며 기저부 끝단 길이가 늘어남에 따라 기저부의 총 길이 또한 같이 증가 하도록 설계 하였다.

#### 나. 기저부 끝단 길이에 따른 유한 요소 해석 모델 개발

유한 요소 해석 모델에 적용된 적층부 형상의 유한 요소 격자는 Fig. 6 의 (a) 및 (b) 의 Type 2 랑 동일하다. 유한요소 해석 모델에 사용된 적층 비드 및 특성 데이터는 Table 2 와 같다. 유한 요소 해석 모델에 사용된 공정 조건은 Table 4 와 같다. Fig. 28 은 열-기계 연계 해석에 적용된 적층 경로이다. 적층 경로는 zig-zag 경로이다. Fig. 29 는 상용 비선형 유한 요소 해석 소프트웨어인 SYSWELD V16 을 이용하여 제작된 해석 모델이다.

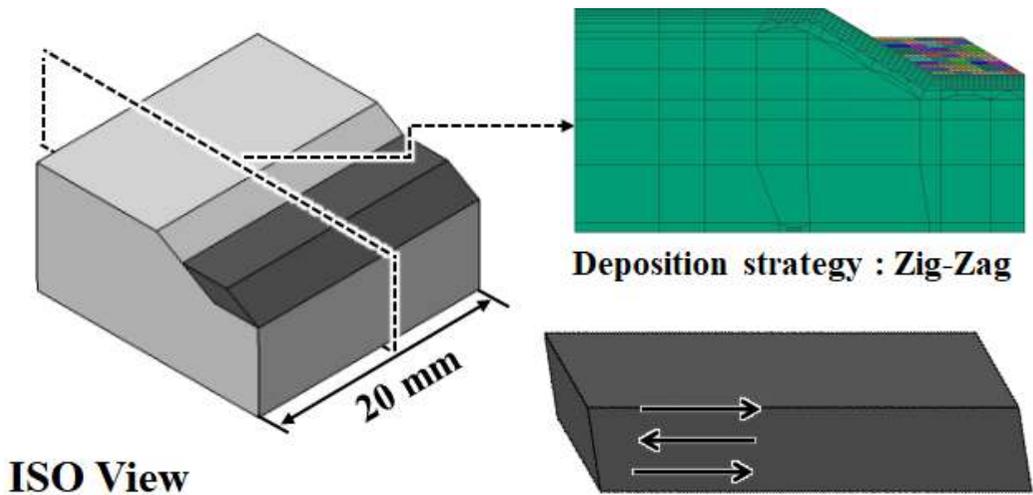


Fig. 28 Deposition strategy of FE analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $L_1 = 0$  mm)

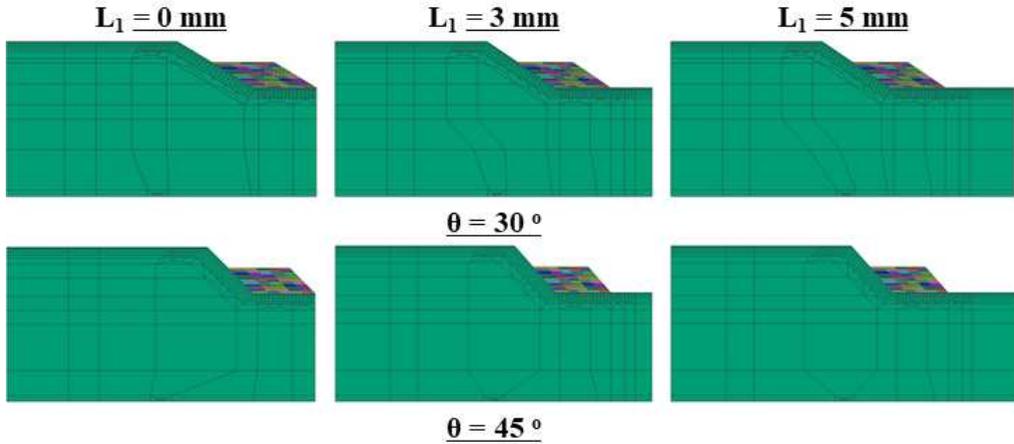


Fig. 29 FE models according to the length of  $L_1$

Table 10 Number of nodes and 2D elements of FE models (substrate shapes of  $L_1$ )

| Type of substrate shapes |                      | Nodes (EAs) | 2D Elements (EAs) |
|--------------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| $\theta = 30^\circ$      | $L_1 = 0 \text{ mm}$ | 596         | 556               |
|                          | $L_1 = 3 \text{ mm}$ | 665         | 624               |
|                          | $L_1 = 5 \text{ mm}$ | 665         | 624               |
| $\theta = 45^\circ$      | $L_1 = 0 \text{ mm}$ | 587         | 550               |
|                          | $L_1 = 3 \text{ mm}$ | 656         | 618               |
|                          | $L_1 = 5 \text{ mm}$ | 656         | 618               |

Table 10 은 제작된 기저부 끝단 길이 별 유한 요소 해석 모델의 절점 및 2 차원 유한 요소 해석 요소 의 개수 이다.  $L_1$  의 길이가 0 mm 인 경우 시편의 길이는 20 mm,  $L_1$  의 길이가 3 mm 인 경우 시편의 길이는 23 mm,  $L_1$  의 길이가 5 mm 인 경우 시편의 길이는 25 mm 이다.

### 다. 경계 조건 데이터 도출

열-기계 연계 유한요소 해석에 적용된 경계 조건은 Fig. 30 과 같이 적용하였다. 열전달 해석에서 적층이 진행 되고있는 시점에서의 기저부 상면에는 아르곤 가스에 의한 강제 대류와 복사에 의한 열 손실이 고려되어야 하기에 등가 열손실 모델이 적용 되었으며, 기저부 상면을 제외한 모든 기저부 영역에는 온도 의존 자연 대류가 발생 한다고 가정 하였다. 또한 적층이 완료된 후에는 기저부 와 적층부 모두 온도 의존 자연 대류가 발생 한다고 가정하였다.

열-기계 연계 유한요소 해석에 적용된 등가 열손실 계수, 강제 대류 계수 및 자연 대류 계수는 Fig. 16, Fig. 13 및 Fig. 31 과 같이 적용되었다. 자연 대류 계수는 기저부 형상에 따라 각각 계산된 값에 의해 다르게 적용되었으며, Fig. 31 은 유한요소 해석에 적용된 조건 별 자연 대류 계수이다.

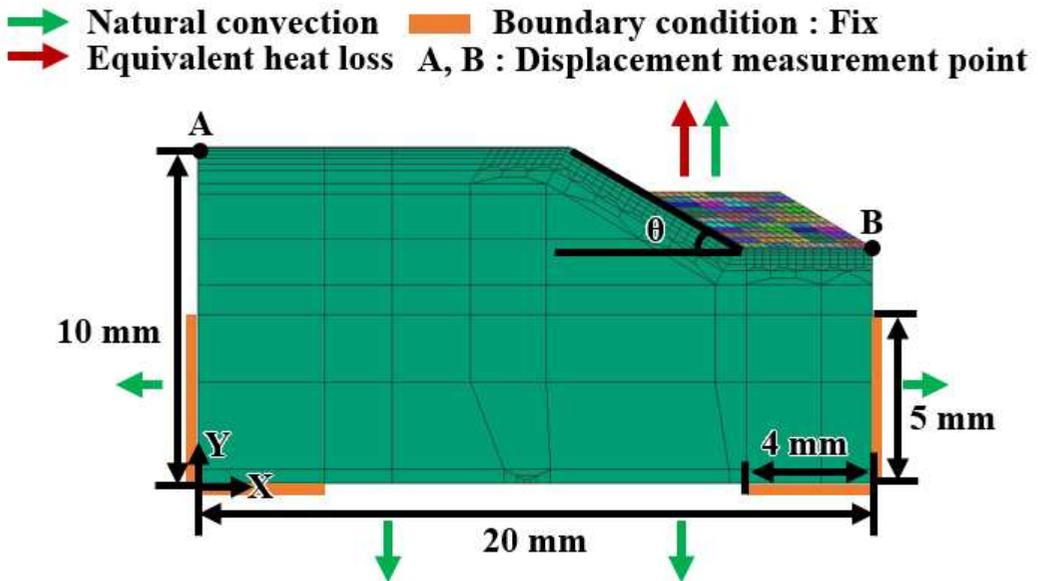


Fig. 30 Model for thermo-mechanical analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $L_1 = 0$  mm)

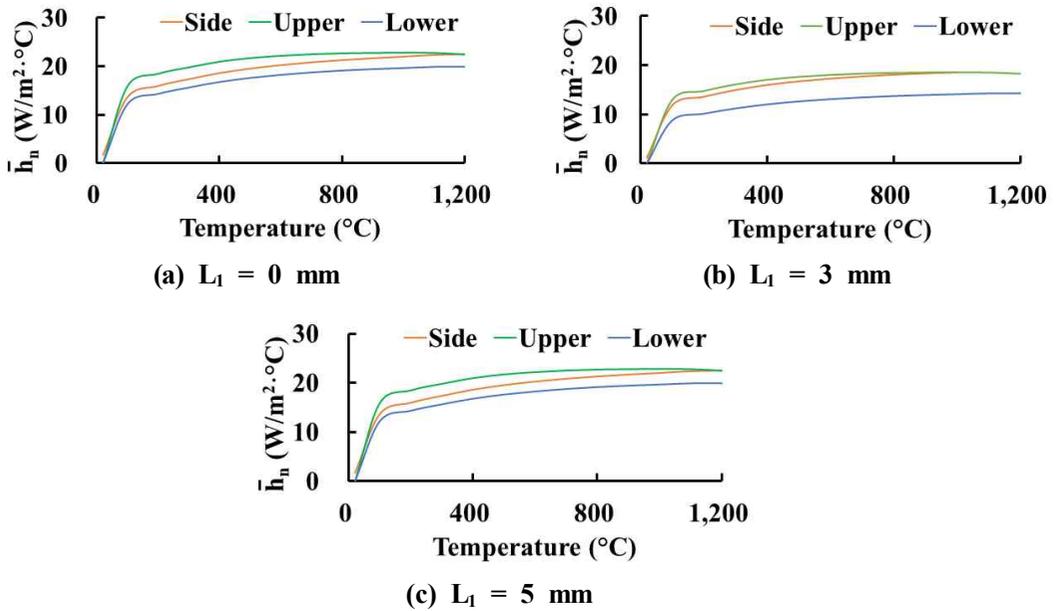


Fig. 31 Coefficients of natural convection (according to length of  $L_1$ )

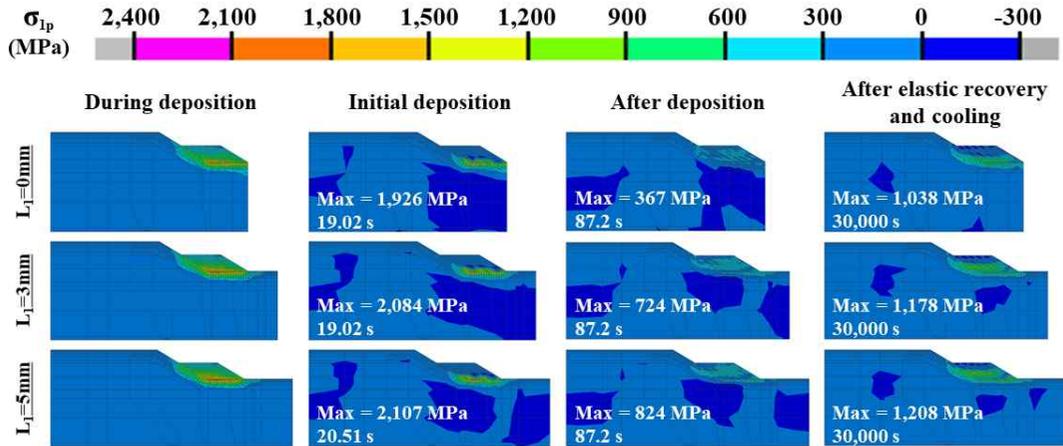
## 2. 기저부 끝단 길이에 따른 열-기계 특성 비교 분석

### 가. 주응력 비교 및 분석

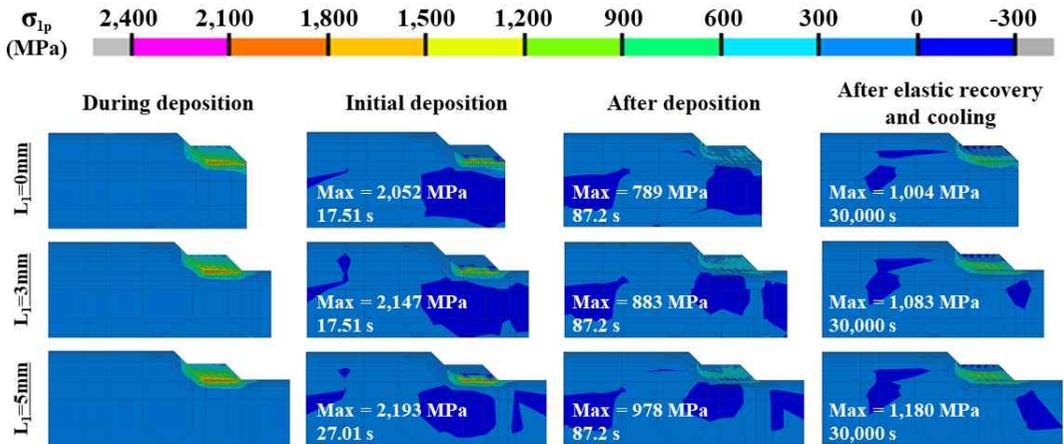
Fig. 32 는 열-기계 연계 해석을 통하여 기저부 끝단 길이에 따른 잔류 응력 변화 분포이다. 잔류 응력의 척도는 최대 주응력을 선정하였다. 기저부 경사 각도 및 기저부 끝단 길이와 관계없이 적층 공정중 발생하는 잔류 응력 분포는 적층 공정 초기에 기저부 평면부와 적층부 경계면의 기저부 방향으로 응력이 집중됨을 확인 할 수 있었다. 적층이 완료된 시점의 잔류 응력은 적층 공정 초기와 비교하여 응력이 현저히 낮아졌으며 탄성 회복 과 냉각이 모두 완료된 시점에서는 적층 공정이 완료된 시점의 잔류 응력 보다 높게 형성 함을 알 수 있었다. 기저부 끝단 길이와 관계 없이 적층 공정중 형성되는 최대 잔류 응력은 기저부 모서리부 인근으로부터 기저부 평면부의 수평 방향으로 좁게 분포 하는 것을 알 수 있었다. 그러나 기저부 경사각도 와 관계 없이 기저부 끝단 길이가 증가 할수록 적층 공정이 종료된 시점

과 탄성 회복 및 냉각 시점에서 형성하는 잔류 응력 값이 높게 형성 하였다.

위 결과들로부터 기저부의 끝단 길이가 증가할수록 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력이 증가함으로 기저부의 끝단 길이가 0 mm 인 경우가 잔류 응력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 32 1<sup>st</sup> principal stress distributions according to  $L_1$  and deposition region inclination angle

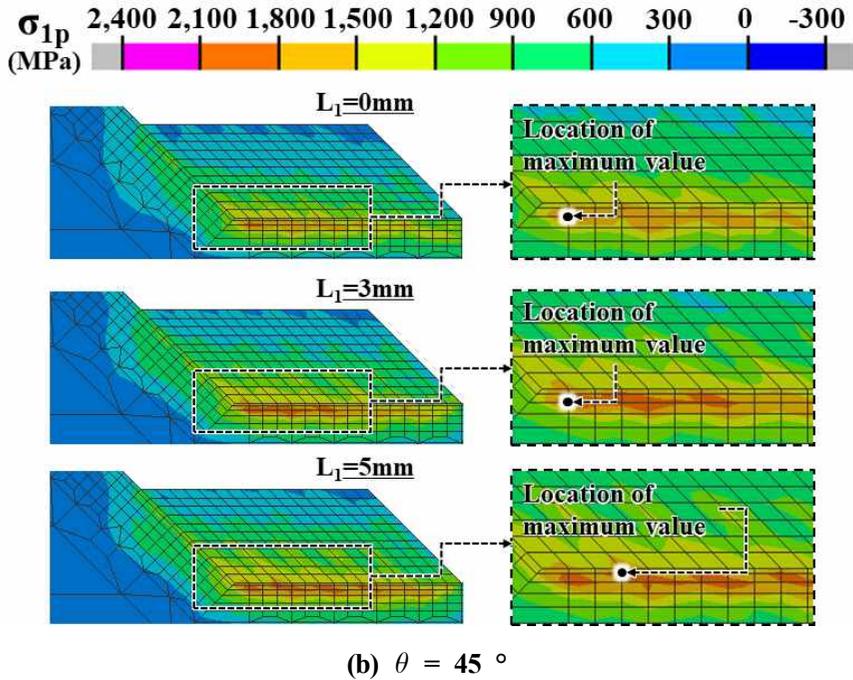
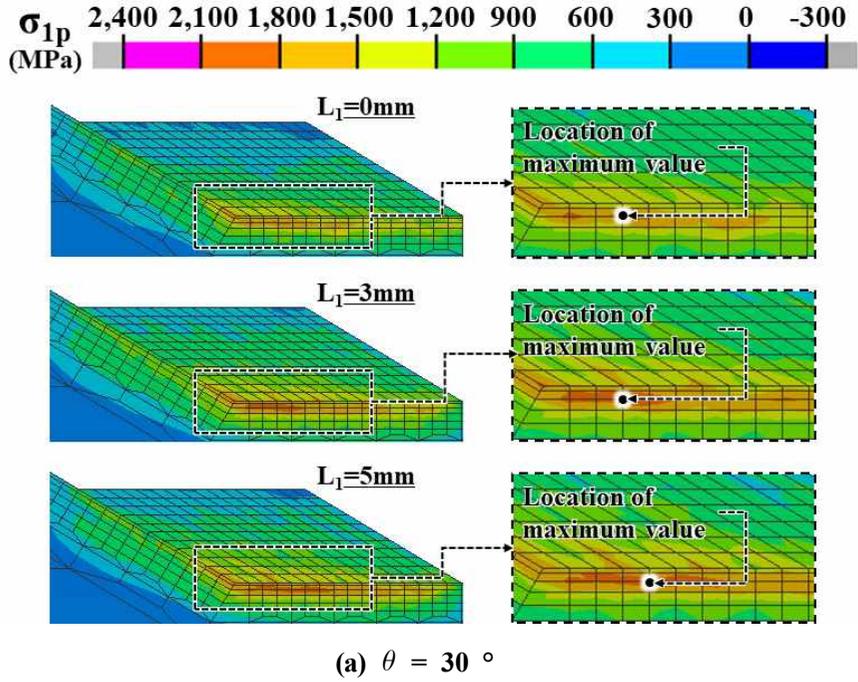


Fig. 33 Effect of  $L_1$  length and inclination angle of deposition region on excessively stressed regions

Fig. 33은 잔류 응력이 상대적으로 크게 발생하는 ESR 인근의 잔류 응력 분포이다. Fig. 33 과 같이 최대 잔류 응력이 발생하는 영역은 기저부 경사각과 기저부 끝단 길이에 관계없이 기저부의 평면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부에 기저부 방향으로 바로 아래에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사각과 관계 없이 기저부의 경사면과 평면이 교차하는 모서리로부터 기저부 평면부 끝단 방향으로 수평거리 1 mm 이하에 위치 함을 알 수 있었다.

최대 잔류 응력 생성 위치는 기저부 경사각이  $30^\circ$  인 경우  $L_1$  의 길이가 0 mm, 3 mm 인 경우엔 0.75 mm 이며, 5 mm 인 경우 1 mm 의 위치에 생성된다.  $45^\circ$  인 경우  $L_1$  의 길이가 0 mm, 3 mm 인 경우엔 0.25 mm 이며, 5 mm 인 경우 0.75 mm 의 위치에 생성되었다.  $L_1$  의 길이가 0 mm에서 5 mm 로 증가할수록 최대 잔류 응력이 발생하는 위치가 기저부 경사면과 평면이 교차하는 모서리로부터 멀어짐을 알 수 있었다.

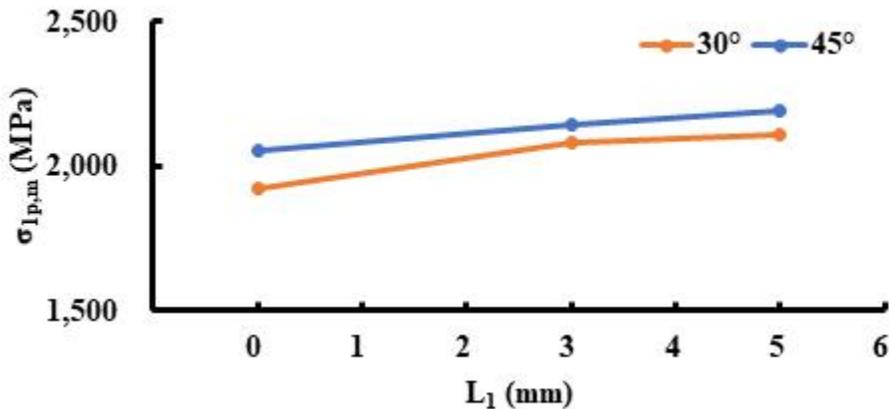
기저부 끝단 길이가 증가함에 따라 ESR 의 면적이 점차 모서리부에서부터 기저부 평면부 끝단 방향으로 점차 확대됨을 알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이  $30^\circ$  에서  $45^\circ$  로 증가할수록 ESR 의 면적이 좁고 가늘게 증가하는 것을 알 수 있었다.

**Table 11 Maximum residual stress during deposition process according to length of  $L_1$**

| Substrate shapes    | $L_1 = 0$ mm | $L_1 = 3$ mm | $L_1 = 5$ mm |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| $\theta = 30^\circ$ | 1,926 MPa    | 2,084 MPa    | 2,107 MPa    |
| $\theta = 45^\circ$ | 2,052 MPa    | 2,147 MPa    | 2,193 MPa    |

**Table 12 Residual stress maximum value for after elastic recovery and after cooling (according to length of  $L_1$ )**

| Substrate shapes    | $L_1 = 0$ mm | $L_1 = 3$ mm | $L_1 = 5$ mm |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| $\theta = 30^\circ$ | 1,038 MPa    | 1,178 MPa    | 1,208 MPa    |
| $\theta = 45^\circ$ | 1,004 MPa    | 1,083 MPa    | 1,180 MPa    |



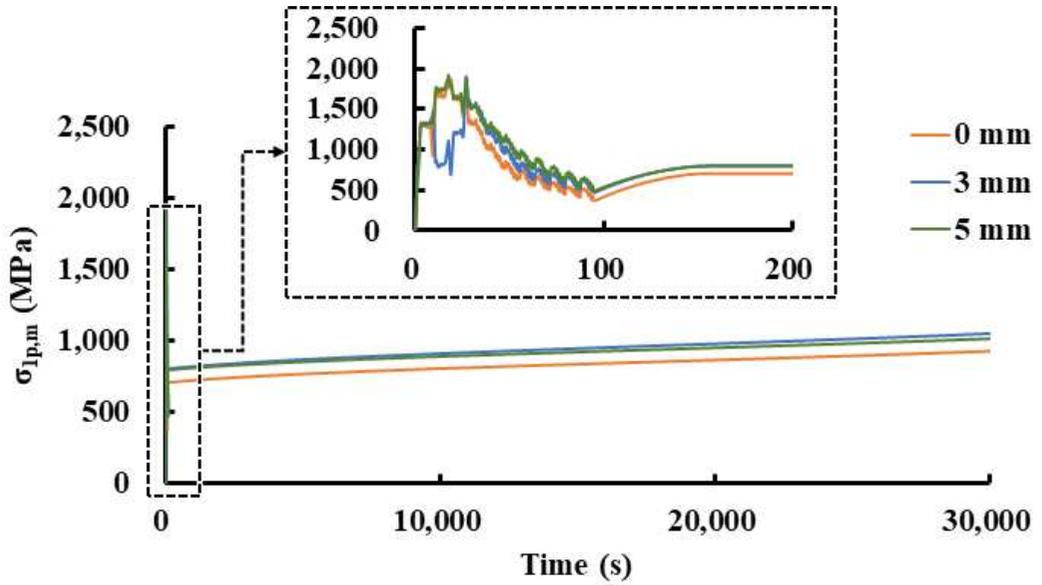
**Fig. 34 Influence of corner angle of deposited region and  $L_1$  length on maximum 1<sup>st</sup> principal stress**

Table 11 는 열-기계 연계 해석 으로 예측된 기저부 경사각과 기저부 끝단 길이에 따른 최대 주응력 값이다. Table 12 은 열-기계 연계 해석 으로 예측된 기저부 경사각과 기저부 끝단 길이에 따른 탄성 회복 및 냉각이 완료된후 주응력 값이다. Fig. 34 는 기저부 끝단 길이에 따른 최대 주응력의 최대값 변화이다. 기저부 의 길이가 가장 큰 5 mm 의 형상이 기저부 길이가 상대적으로 작은 0 mm 의 형상과 비교 하였을 때 최대 주응력의 최대값이 기저부 경사각  $30^\circ$  와  $45^\circ$  에 대하여 각각 약 9 % 와 7 % 크게 예측되었다. 기저부 끝단 길이가 3 mm, 5 mm 의 기저부 형상에 대해서는 기저부 경사각이  $45^\circ$  인 경우가 기저부 경사각이  $30^\circ$  인 경우보다 최대 주응력의 값이 약 3-4 % 정도 크게 산출되었다. 최대 주응력 값이 가장 낮은 기저부 끝단 길이인 0 mm 의 경우 기저부 경사각이  $45^\circ$  인 경우가 기저부

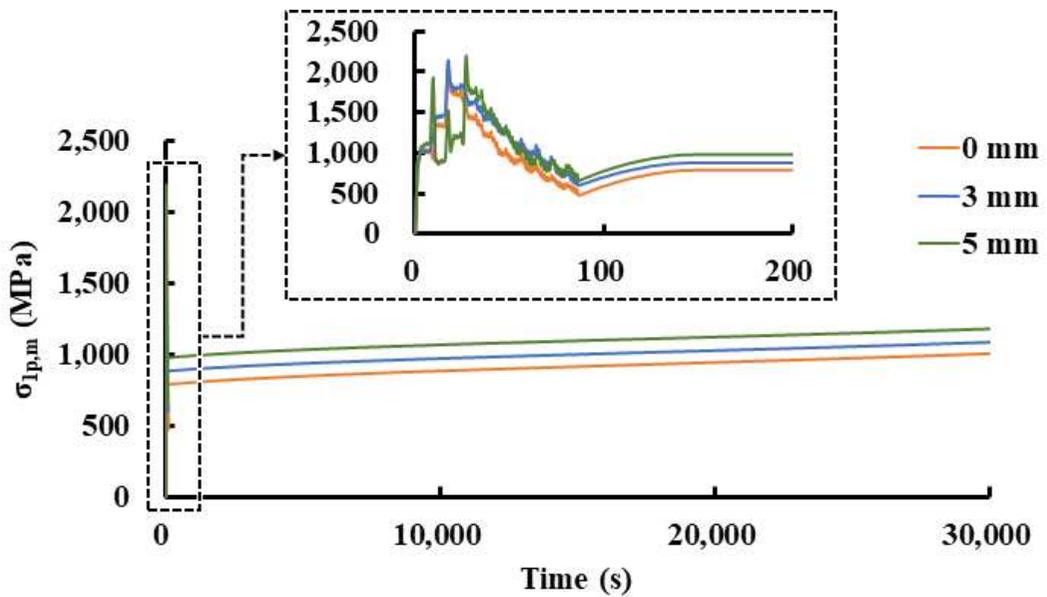
경사각이 30° 인 경우보다 최대 주응력이 약 6 % 높게 예측되었다. 또한 Table 10의 탄성 회복 및 냉각후 발생하는 주응력 값이 또한 기저부 끝단 길이가 증가할수록 주응력 값이 증가하였다. 이 결과들로부터 기저부 끝단 길이가 증가됨에 따라 기저부의 크기가 증가할수록 적층부 인근의 주응력 발생량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이 증가할수록 적층부 인근에 발생하는 주응력 발생량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 기저부 끝단 길이 5 mm의 형상과 0 mm의 형상을 비교 하였을 때 기저부 경사각과 관계 없이 약 14 % 높게 예측되었다. 기저부 경사각이 45° 인 경우가 기저부 경사각이 30° 인 경우보다 잔류 주응력이 3-8 % 낮게 예측되었다. 위 결과들로부터 적층 공정중 적층부 인근의 발생하는 잔류 응력을 감소시키기 위해서는 기저부 끝단 길이가 0 mm 인 기저부 형상을 선정하고 적층을 수행하여야 함을 알 수 있었다.

#### 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성

Fig. 35 는 열-기계 연계 해석을 통해 도출된 Fig. 33 의 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 시간에 따른 최대 주응력의 발생 이력이다. Fig. 36 은 최대 잔류 응력 발생 시간에서의 최대 주응력 분포이다. Fig. 35 에서 기저부 경사각 과 기저부 끝단 길이에 관계없이 적층 초기에 잔류 응력이 급격하게 증가하였다가 적층 공정이 완료 되기 전까지 잔류 응력이 낮아짐을 알 수 있었다. 해석에 적용된 고정 조건이 제거되고 탄성 회복 및 냉각이 진행 되는 동안 잔류 응력이 조금씩 증가하여 최종 잔류 응력 값에 도달함을 확인할 수 있었다. 기저부 끝단 길이 0 mm 인 경우 시간에 따라 변화하는 잔류 응력이 기저부 경사각과 관계 없이 작은 값으로 발생 하여 최종 잔류 응력 또한 낮게 산출되는 것을 알 수 있었다.

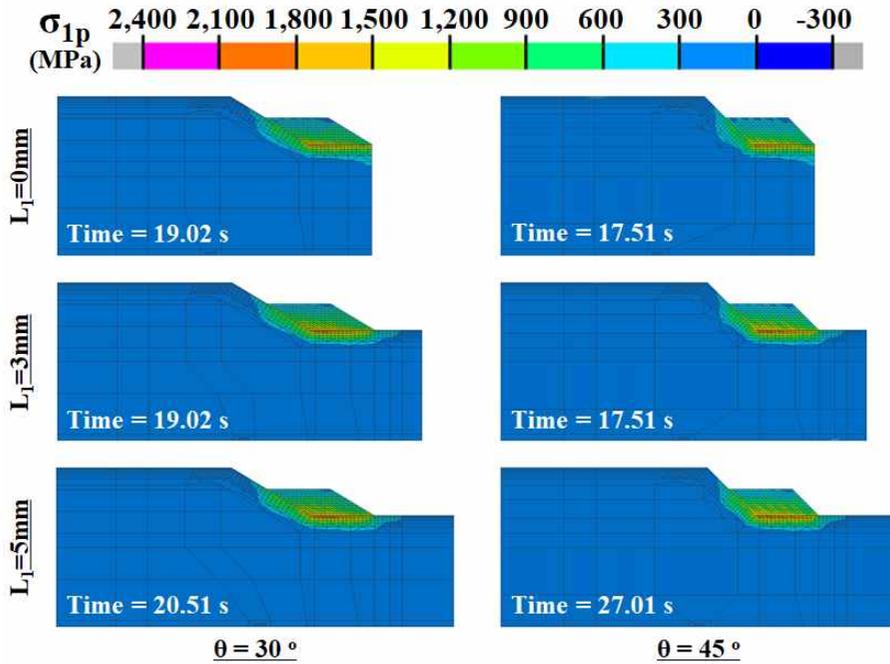


(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 35 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value (according to length of  $L_1$ )



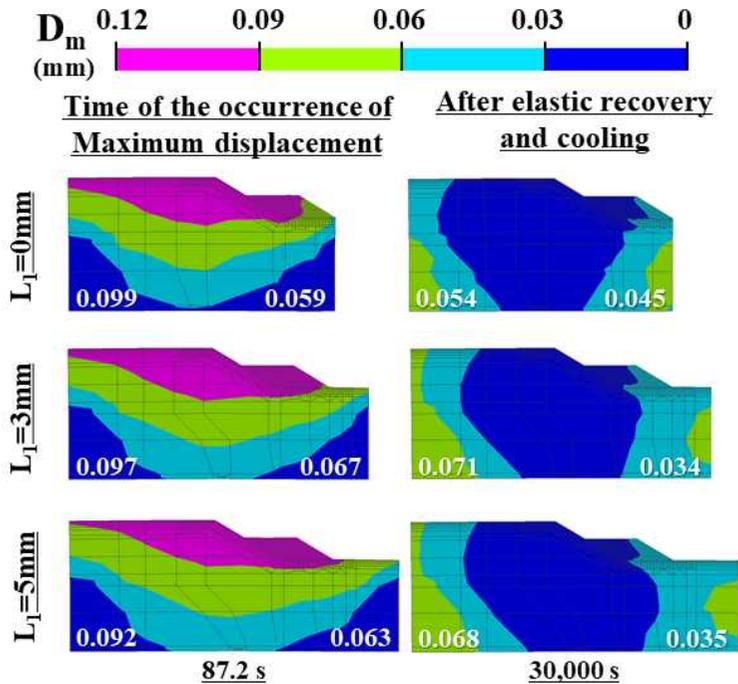
**Fig. 36 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the time of maximum stress occurrence (according to length of  $L_1$ )**

최대 잔류 응력이 발생하는 공정 시간은 Fig. 36 과 같이 17 초 - 27 초 사이에 발생하며 기저부 경사각과 관계없이 최대 잔류 응력 발생 시간은 기저부 끝단 길이가 0 mm, 3 mm 인 경우 동일한 시간에 발생하지만 5 mm 인 경우엔 기저부 끝단 길이가 0 mm, 3 mm 와 비교 하여 기저부 경사각 30 ° 와 45 ° 에 대하여 1 초 와 10 초 정도 발생 시간이 유예됨을 예측할 수 있었다.

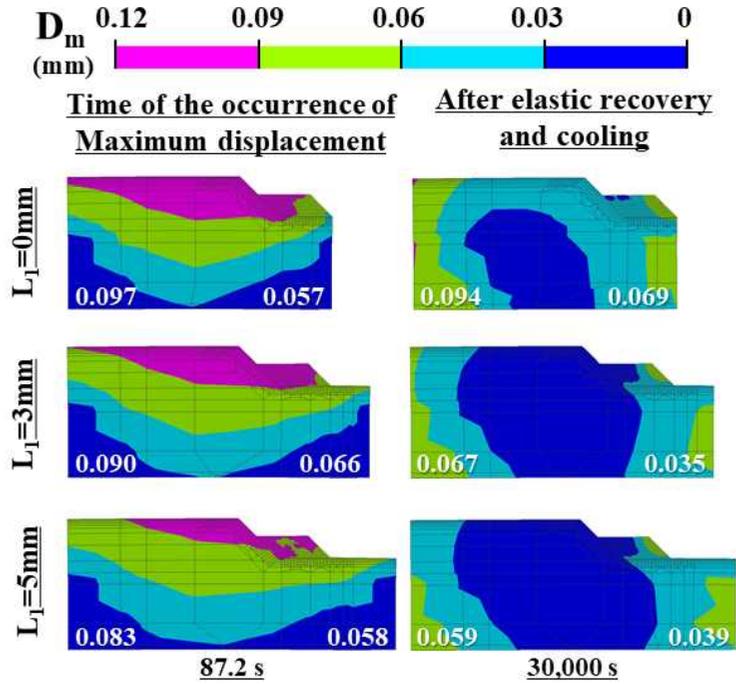
### 3. 기저부 끝단 길이에 따른 변형 특성

Fig. 37 은 기저부 경사각 과 기저부 끝단 길이에 따른 최대 변형 발생 시점 과 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점의 변위 분포 변화이다. Fig. 37 에서의  $D_m$  은 변위의 절대값이다. Table 13 은 변위 측정점인 Fig. 30 에서 A 점 및 B 점의 최대 변위 절대값 및 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점의 변위 절대값이다.

Fig. 37 에서의 적층 공정중 발생하는 시편의 변형은 기저부 경사면과 기저부 경사면의 마주보는 적층부 인근의 영역에서 집중적으로 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 변형 분포를 보면 기저부 경사각  $30^\circ$  인 경우 기저부 끝단 길이가 0 mm 에서 5 mm 로 변경될 경우 최대 변형 발생 시점에서 변위가 0.09 mm 이상 발생하는 영역이 기저부 끝단 수평 방향으로 점차 확대됨을 알 수 있었다. 기저부 경사각  $45^\circ$  인 경우 기저부 끝단 길이가 0 mm 에서 5 mm 로 변경될 경우 변위가 0.09 mm 이상 발생하는 영역이 기저부 경사면의 상부로 집중되어지며 변위 영역이 축소되는 것을 알 수 있었다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

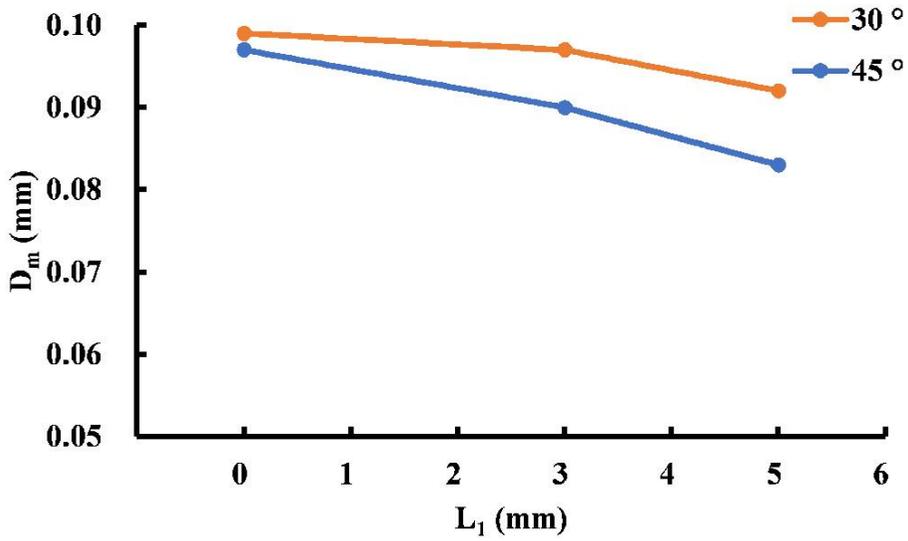
Fig. 37 Displacement distributions at the time of maximum displacement occurrence and after cooling process (according to length of  $L_1$ )

Table 13 Maximum and residual displacements value (according to length of  $L_1$ )

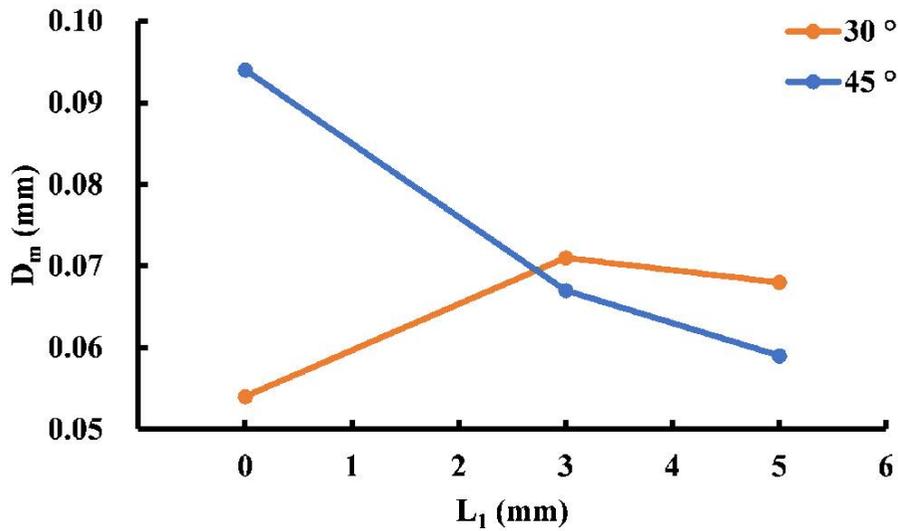
|     |                       | Magnitude (mm) |         |         |         |
|-----|-----------------------|----------------|---------|---------|---------|
|     |                       | Max            |         | Final   |         |
|     |                       | A Point        | B Point | A Point | B Point |
| 30° | L <sub>1</sub> = 0 mm | 0.099          | 0.059   | 0.054   | 0.045   |
|     | L <sub>1</sub> = 3 mm | 0.097          | 0.067   | 0.071   | 0.034   |
|     | L <sub>1</sub> = 5 mm | 0.092          | 0.063   | 0.068   | 0.035   |
| 45° | L <sub>1</sub> = 0 mm | 0.097          | 0.057   | 0.094   | 0.069   |
|     | L <sub>1</sub> = 3 mm | 0.090          | 0.066   | 0.067   | 0.035   |
|     | L <sub>1</sub> = 5 mm | 0.083          | 0.068   | 0.059   | 0.039   |

Fig. 37 에서 최대 변위 발생 시점에서는 Fig. 30 의 A 위치가 B 의 위치보다 변위가 더 크게 예측되었다. 또한 탄성 회복과 냉각이 모두 완료된 최종 잔류 변위도 A 위치가 B 의 위치보다 크게 산출되었다. 이 결과들을 이용하여 Fig. 38 과 같이 최대 변위 발생 시점 및 최종 잔류 변위를 A 위치에서 도출 하였다. Fig. 39 에서 적층이 완료되는 시점까지는 측정 위치의 변위가 급격히 증가하는 것을 예측할 수 있었다. 그러나 고정 조건 제거 및 냉각이 시작되는 시점부터 적층 공정이 활발히 진행중일 때 변형된 방향의 반대 방향으로 탄성 회복과 수축이 발생하였다. 기저부 끝단 길이가 증가함에 따라 달라지는 기저부 형상은 적층 완료 후 탄성 회복과 수축에 의한 변위 감소율에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Table 13 의 변위 A 점의 최댓값은 기저부 끝단 길이가 0 mm 인 경우 기저부 경사각과 관계 없이 가장 큰 변위를 가짐을 예측할 수 있었다. 기저부 끝단 길이 0 mm 에서 5 mm 로 증가 할 때 최대 변위 값은 0.097-0.099 mm 에서 0.083-0.097 mm 로 조금 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각 30 ° 인 경우 기저부 끝단 길이 0 mm 에서 5 mm 로 변경될 때 0.002-0.007 mm 로 조금 기저부 경사각 45 ° 에서의 감소폭이 보다 더 낮은 폭으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각이 30 ° 에서 45 ° 로 증가할 때 최대 변위 값은 0.002 - 0.016 mm 만큼 증가하는 것을 알 수 있었다. A 점에서 측정한 탄성 회복 및 냉각후 발생하는 변위 값은 기저부 경사각 30 ° 인 경우에 0 mm 인 경우가 5 mm 인 경우보다 0.014 mm 낮은 변위값을 예측 할 수 있었으며, 기저부 끝단 길이가 증가함에 따라 최종 잔류 변위값이 증가하였다. 기저부 경사각 45 ° 에서는 기저부 끝단 길이가 증가함에 따라 최종 잔류 변위값이 감소 하였지만 최종 잔류 변위값이 기저부 경사각 30 ° 인 경우 보다 최종 잔류 변위값이 전체적으로 0.005-0.04 mm 높게 발생하는 것을 알 수 있었다.

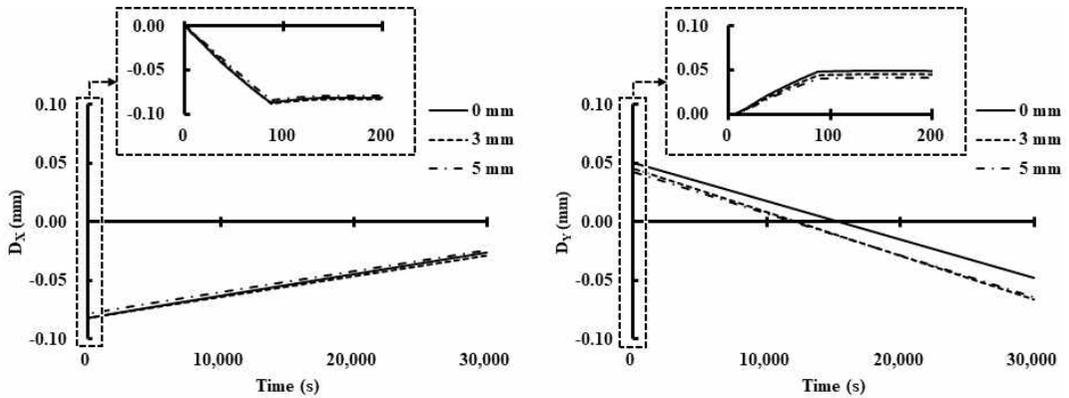


(a) Maximum displacement (Location A of Fig. 30)

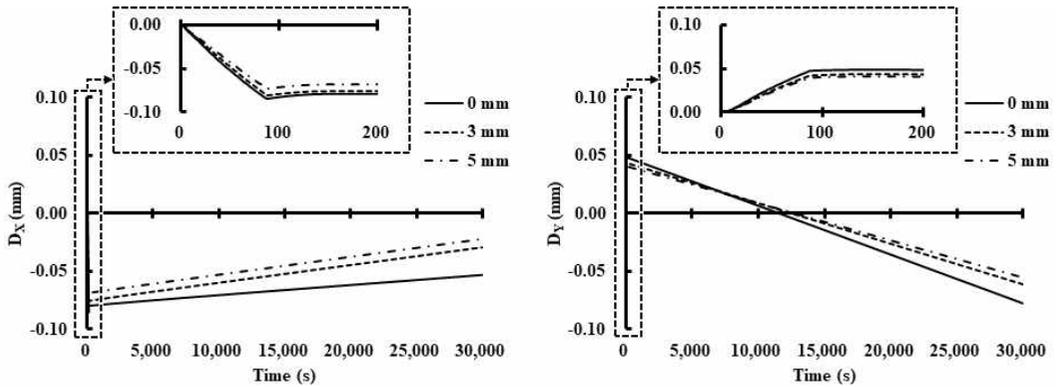


(b) Residual displacement (Location A of Fig. 30)

Fig. 38 Maximum and residual displacements for different deposition region inclination angles and the length of  $L_1$



(a)  $\theta = 30^\circ$  (X direction, Y direction)



(b)  $\theta = 45^\circ$  (X direction, Y direction)

**Fig. 39 Displacement histories for X and Y directions (according to length of  $L_1$ )**

위 결과들을 통하여 기저부 끝단 길이가 증가할수록 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각이 증가할수록 적층부 인근 잔류 응력 발생량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 잔류 응력 및 변형 특성 측면에서 기저부 경사각  $30^\circ$  및 기저부 끝단 길이  $L_1$  의 길이는 0 mm 로 적용 하는 것이 가장 좋은 조건일 것으로 사료된다.

### 제 3 절 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 열-기계 특성 분석

#### 1. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출

##### 가. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 적층부 및 기저부 형상 설계

기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 열-기계 연계 해석을 하기위해 총 8 가지의 기저부 및 적층부 형상을 개발하였다. 기저부 특징은 기저부 경사각에 따라 2 가지의 조건으로 나누었으며 기저부 경사각은  $30^\circ$  및  $45^\circ$  로 선정하였다. 앞서 유한 요소 해석을 통하여 예측했던 열-기계 특성 분석으로 적층부는 기저부의 평면부 면적이 증가하면서 동시에 적층 체적 또한 증가하는 조건을 적용하였으며, 기저부 형상은 기저부 끝단 길이 0 mm 인 기저부 형상을 기반으로 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 적층부 및 기저부 형상을 설계하였다.

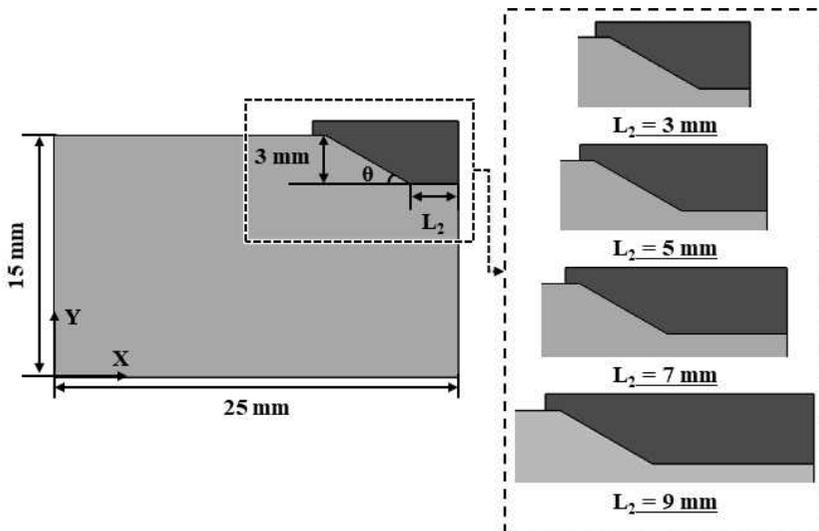
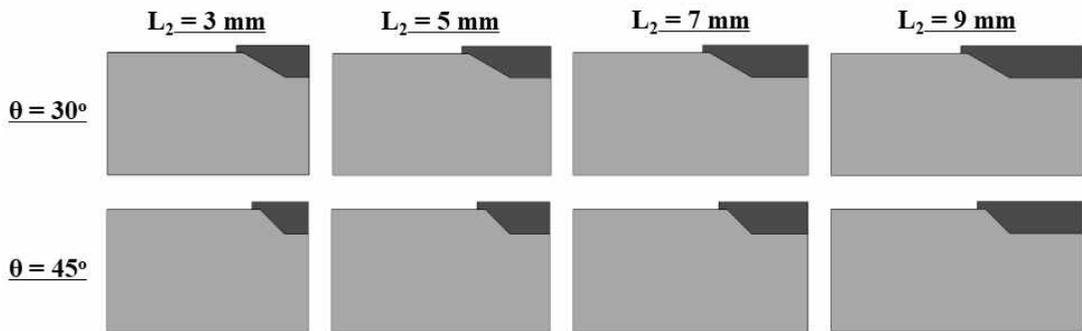


Fig. 40 Schematics of substrate shapes according to  $L_2$

Fig. 40 은 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 적층부 및 기저부 형상의 개념도 이다. 여기서 기저부 모서리부와 기저부 끝단 까지의 거리를  $L_2$  라고 명칭 하였다. 기저부  $L_2$  는 3 mm, 5 mm, 7 mm 및 9 mm 로 선정하였으며  $L_2$  의 길이가 증가함에 따라 적층 체적 및 기저부 길이가 증가하도록 설계하였다. 실제 공작기계 부품 보수 및 재제조를 위하여 기저부 경사각이 적용된 기저부 형상을 최종적으로 사각 형태의 최종 제품을 만들기 위해 적층 영역을 넓게 설계하였다. 또한 모든 적층 시편에 과적층 영역을 생성하였으며 적층 완료후 후가공으로 최종형상을 제작할 수 있도록 하였다. 추가 적층 높이는 0.9 mm 이다. Table 14 는 기저부 경사각 및  $L_2$  에 따른 적층 시편 별 적층 체적이다.  $L_2$  의 길이가 증가 함에 따라 체적이 증가한다. 또한 기저부 경사각이  $30^\circ$  에서  $45^\circ$  로 증가할 때 체적이 약  $5.1 \text{ mm}^2$  감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 기저부 경사각이 낮을수록 적층을 해야하는 면적이 넓어지며 적층량 또한 많아지기 때문이다.



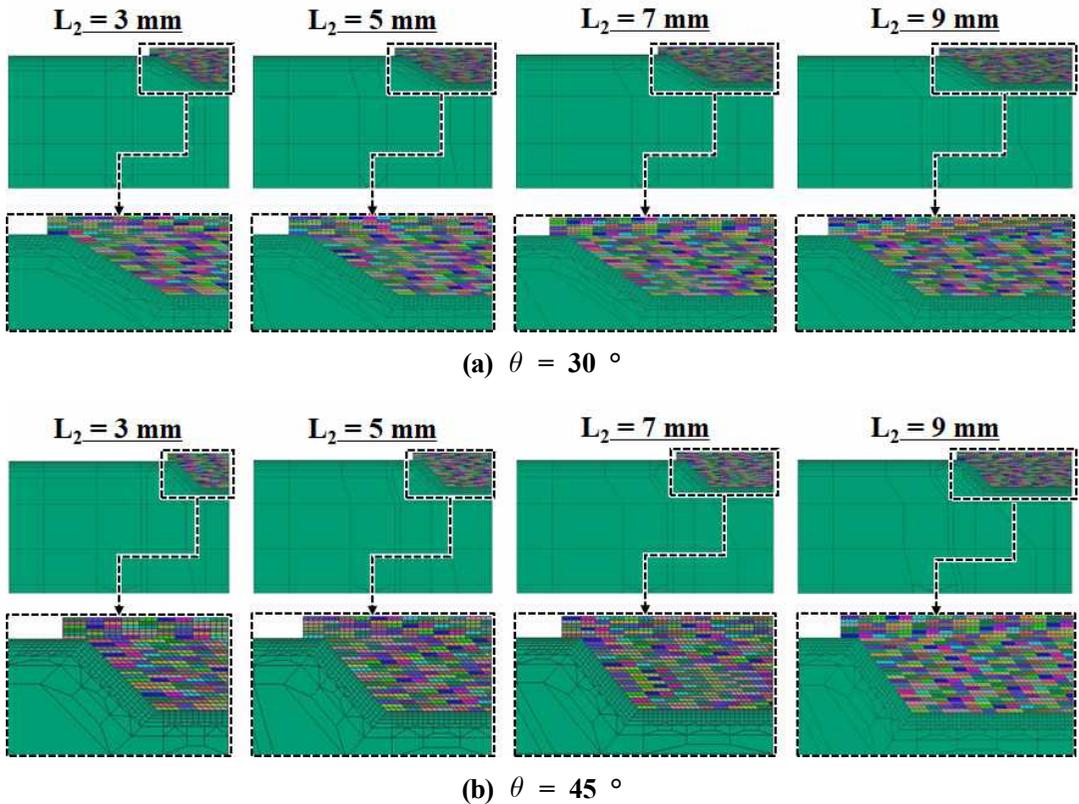
**Fig. 41 Substrate shapes according to  $L_2$  length and deposition region slopes**

**Table 14 Deposited areas based on  $L_2$  length**

| Deposition shapes   | $L_2 = 3 \text{ mm}$ | $L_2 = 5 \text{ mm}$ | $L_2 = 7 \text{ mm}$ | $L_2 = 9 \text{ mm}$ |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\theta = 30^\circ$ | $24.9 \text{ mm}^2$  | $32.6 \text{ mm}^2$  | $40.4 \text{ mm}^2$  | $48.3 \text{ mm}^2$  |
| $\theta = 45^\circ$ | $19.8 \text{ mm}^2$  | $27.6 \text{ mm}^2$  | $35.4 \text{ mm}^2$  | $43.2 \text{ mm}^2$  |

## 나. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 유한 요소 해석 모델 개발

기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 기저부 경사각 및 적층부 형상을 바탕으로 총 8 가지의 유한 요소 해석 모델을 개발 하였다. 2 차원 유한 요소 해석 모델에 적용된 적층 비드 및 특성 데이터는 Table 4 와 같다. 유한 요소 해석 모델에 사용된 공정 조건은 Table 6 와 같다. Fig. 42 는 개발된 2 차원 유한 요소 해석 모델이며 각 유한 요소 해석 모델의 절점의 개수와 2 차원 유한 요소 개수 및 적층 비드 Path 의 개수 는 Table 15 와 같다.

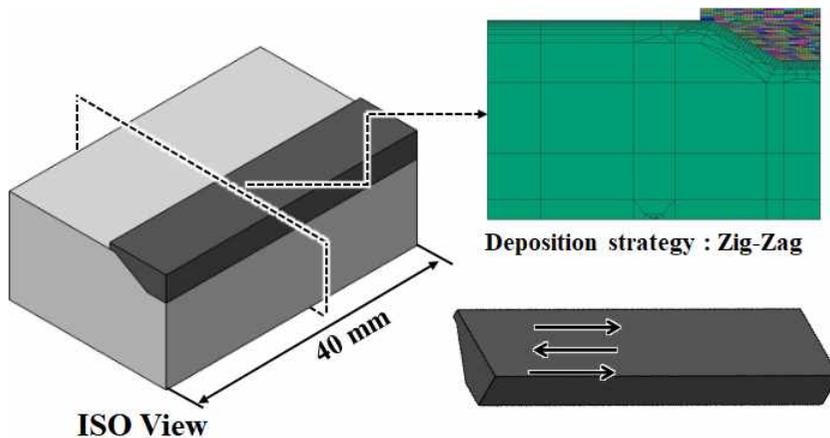


**Fig. 42 Mesh structures of FE models for each substrate shape according to  $L_2$  length**

**Table 15** Number of nodes, 2D elements and path of FE models

| Type of deposited shapes |                      | Nodes (EAs) | 2D Elements (EAs) | Path (EAs) |
|--------------------------|----------------------|-------------|-------------------|------------|
| $\theta = 30^\circ$      | $L_2 = 3 \text{ mm}$ | 1,061       | 1,023             | 222        |
|                          | $L_2 = 5 \text{ mm}$ | 1,331       | 1,290             | 293        |
|                          | $L_2 = 7 \text{ mm}$ | 1,597       | 1,555             | 359        |
|                          | $L_2 = 9 \text{ mm}$ | 1,867       | 1,822             | 430        |
| $\theta = 45^\circ$      | $L_2 = 3 \text{ mm}$ | 942         | 900               | 176        |
|                          | $L_2 = 5 \text{ mm}$ | 1,204       | 1,163             | 247        |
|                          | $L_2 = 7 \text{ mm}$ | 1,474       | 1,423             | 319        |
|                          | $L_2 = 9 \text{ mm}$ | 1,744       | 1,690             | 384        |

2차원 유한 요소 해석에 적용된 기저부 및 적층부 적층 재료의 화학적 조성은 Table 7 과 같으며 해석에 적용된 온도의존 열-기계 물성 데이터는 Fig. 9 와 같다. 해석에 적용된 열원 모델은 제 2 장의 제 1 절에 적용하였던 열원 모델과 동일하다. Fig. 43 과 같이 적층 방향은 Zig-Zag 방향으로 선정하였으며 공작 기계 부품 보수를 위한 3 차원 시편 설계는 40 mm 로 선정하였으며, 유한 요소 해석 모델 제작시 고려되었다.



**Fig. 43** Deposition strategy of FE analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $L_2 = 3 \text{ mm}$ )

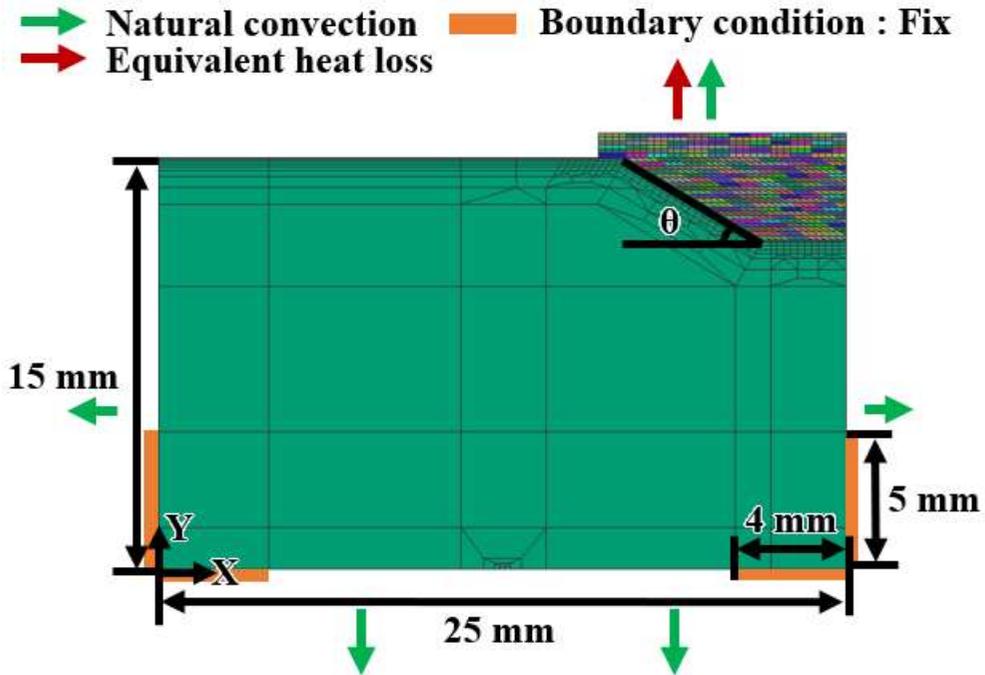
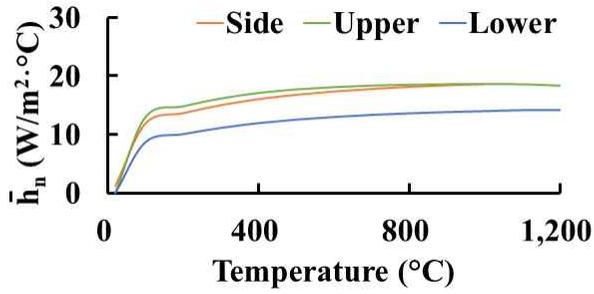


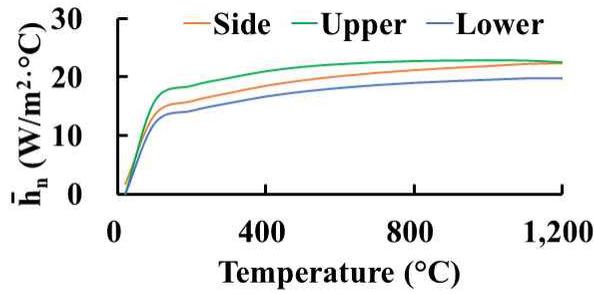
Fig. 44 Model for thermo-mechanical analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $L_2 = 3 \text{ mm}$ )

#### 다. 경계 조건 데이터 도출

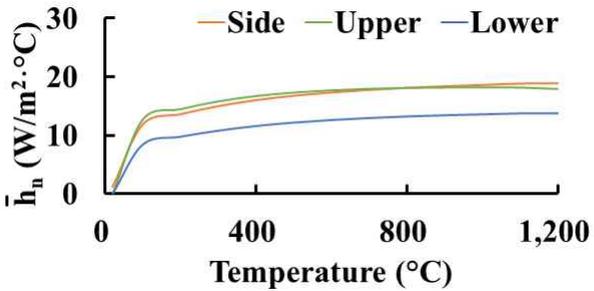
열-기계 연계 유한 요소 해석에 적용된 경계 조건은 Fig. 44 과 같이 적용하였다. 적층이 진행 되고 있는 시점에서의 기저부 상면에는 아르곤 가스에 의한 강제 대류와 복사에 의한 열 손실이 고려하여 등가 열손실 모델이 적용되었으며, 기저부 상면을 제외한 모든 기저부 영역에는 온도 의존 자연대류를 적용 하였다. 또한 적층이 완료된 후에는 기저부 와 적층부 모두 온도 의존 자연대류가 적용되었다. 해석에 적용된 강제 대류 및 등가 열 손실 계수는 Fig. 16 및 Fig. 13 과 동일하다. 자연 대류의 경우 해석 모델의  $L_2$  의 길이에 따라 기저부 길이 및 적층부 길이가 변화 하기 때문에 각 조건에 맞는 온도 의존 자연 대류 계수를 계산하였으며 해석에 적용된 온도 의존 자연대류는 Fig. 45 와 같다.



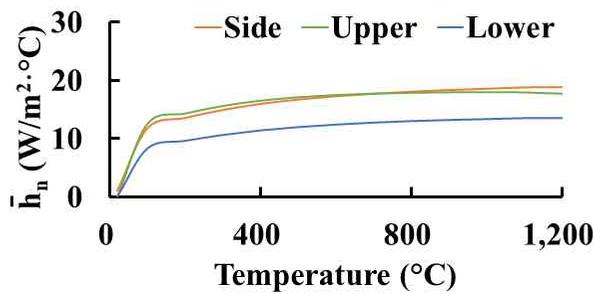
(a)  $L_2 = 3$  mm



(b)  $L_2 = 5$  mm



(c)  $L_2 = 7$  mm



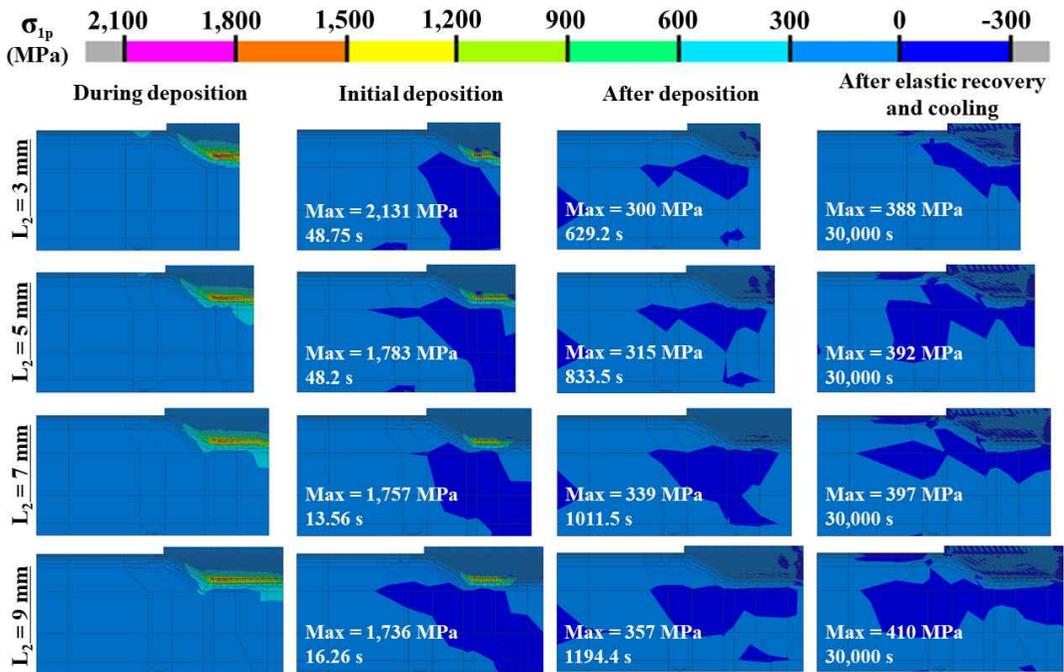
(b)  $L_2 = 9$  mm

Fig. 45 Natural convection coefficients (according to  $L_2$  length)

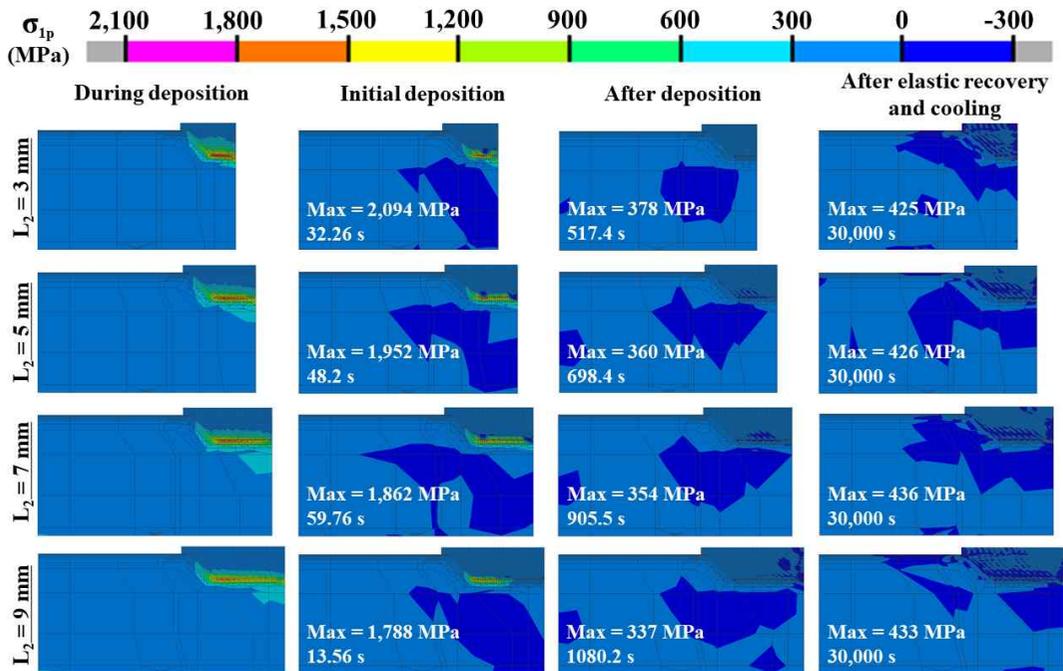
## 2. 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 열-기계 특성 비교 분석

### 가. 주응력 비교 및 분석

Fig. 46 은 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 기저부 및 적층부 형상에 따른 주응력 분포이다. 기저부 및 적층부 형상과 관계없이 공정중 발생하는 잔류 응력이 탄성 회복 과 냉각이 완료된 시점의 잔류 응력 보다 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 총 8 가지의 조건별 해석 모델 동일하게 잔류 응력은 기저부 평면부와 적층부의 경계면에 집중되는 것을 알 수 있었다. 제 2 장의 1 절 및 2 절 의 Fig. 19, Fig. 32 의 잔류 응력 분포와 비교 하였을 때 Fig. 46 의 값이 낮게 산출된것을 확인할 수 있다. 이는 적층량의 증가로 인하여 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되었기 때문이다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

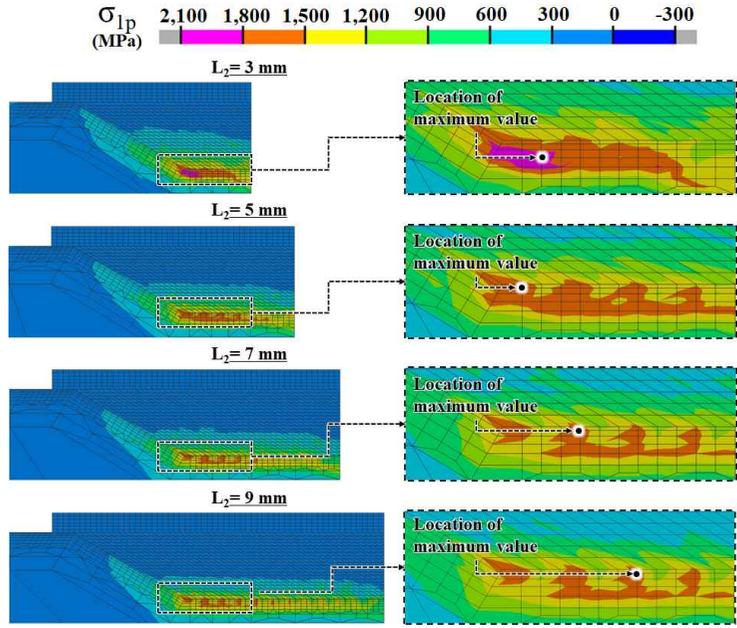
Fig. 46 1<sup>st</sup> principal stress distributions according to  $L_2$  and deposition region inclination angle

Table 16 Maximum residual stress value during deposition process (according to  $L_2$  length)

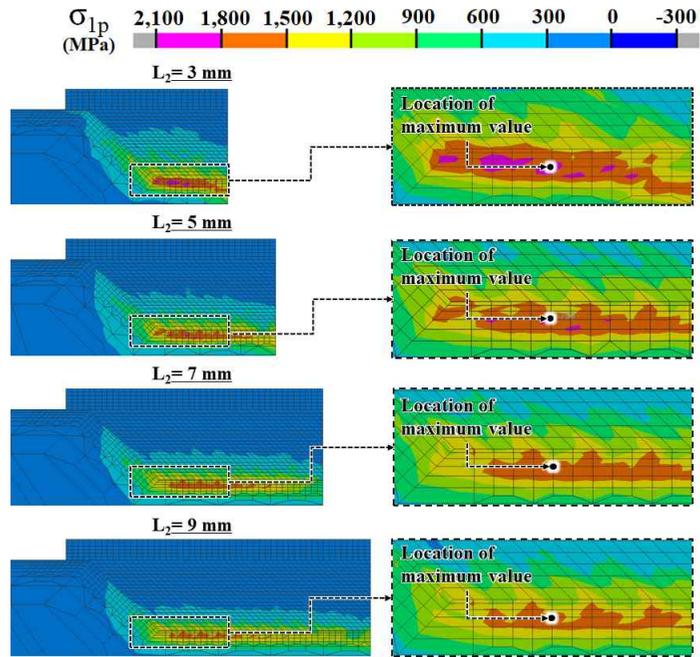
|                     | $L_2 = 3$ mm | $L_2 = 5$ mm | $L_2 = 7$ mm | $L_2 = 9$ mm |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\theta = 30^\circ$ | 2,131 MPa    | 1,783 MPa    | 1,757 MPa    | 1,736 MPa    |
| $\theta = 45^\circ$ | 2,094 MPa    | 1,952 MPa    | 1,862 MPa    | 1,788 MPa    |

Table 17 Residual stress maximum value for after elastic recovery and cooling (according to  $L_2$  length)

|                     | $L_2 = 3$ mm | $L_2 = 5$ mm | $L_2 = 7$ mm | $L_2 = 9$ mm |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\theta = 30^\circ$ | 388 MPa      | 392 MPa      | 397 MPa      | 410 MPa      |
| $\theta = 45^\circ$ | 425 MPa      | 426 MPa      | 436 MPa      | 433 MPa      |



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 47 Effect of  $L_2$  length and inclination angle of deposition region on excessively stressed regions

Fig. 47 은 잔류 응력이 상대적으로 크게 발생하는 ESR 의 잔류 응력 분포이다. 최대 잔류 응력이 발생하는 영역은 기저부 평면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부에 기저부 방향 수직 방향으로 바로 적층부 아래에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각과 관계 없이 ESR 의 면적은 기저부 경계면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부의 기저부 끝단 수평 방향으로 확대됨과 동시에 기저부 수직방향으로 면적이 축소됨을 알 수 있었다. 기저부 경사각  $30^\circ$  인 경우에는  $L_2$  의 길이가 7 mm 인 경우와 9 mm 인 경우 비교를 하였을 때 최대 잔류 응력 발생 영역이 유사하다는 것을 알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이  $30^\circ$  에서  $45^\circ$  로 증가할수록 ESR 의 면적이 두드러지게 증가하는 것을 알 수 있었다.

최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사각  $30^\circ$  인 경우 기저부의 경사면과 평면이 교차하는 기저부 평면부의 끝단 수평방향으로 1.75 mm 이하에 위치하는 것을 알 수 있었다.  $L_2$  의 길이가 3 mm 및 5 mm 인 경우엔 0.25-0.5 mm 의 위치에 생성되었으며  $L_2$  의 길이가 7 mm 및 9 mm 의 경우 각각 1 mm 및 1.75 mm 의 위치에 생성되었음을 확인 할 수 있었다. 기저부 경사각  $30^\circ$  인 기저부 형상에서는  $L_2$  의 길이에 따라 최대 잔류 응력위치가 증가함을 알 수 있었다. 기저부 경사각  $45^\circ$  인 경우  $L_2$  의 길이와 관계없이 1.25 mm 의 위치에 최대 잔류 응력이 생성되었다. 기저부 형상의 경사각이  $45^\circ$  인 경우  $L_2$  의 길이에 종속되지 않고 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

적층 공정중 최대 잔류 응력 발생 시점에서의 최대 잔류 응력값 은 Table 14 와 같다. 탄성 회복 및 냉각 이 종료된 시점에서 최종 잔류 응력값은 Table 15 와 같다. Fig. 48 은 열-기계 연계 해석으로 예측된  $L_2$  의 길이에 따른 최대 주응력의 최대값 변화이다.  $L_2$  의 길이가 3 mm 에서 9 mm 로 증가 할 때 기저부 경사각과 관계 없이 최대 주응력의 최대값이 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각  $30^\circ$  인 경우엔  $L_2$  의 길이가 3 mm 의 해석의 최대 주응력은  $45^\circ$  의  $L_2$  의 길이가 3 mm 경우 보다 Table 14 와 같이 37 MPa (2%) 만큼 높게 예측되었다. 하지만  $L_2$  의 길이가 5 mm, 7 mm, 9 mm 인 경우 기저부 경사각  $30^\circ$  인 경우가  $45^\circ$  인 경우보

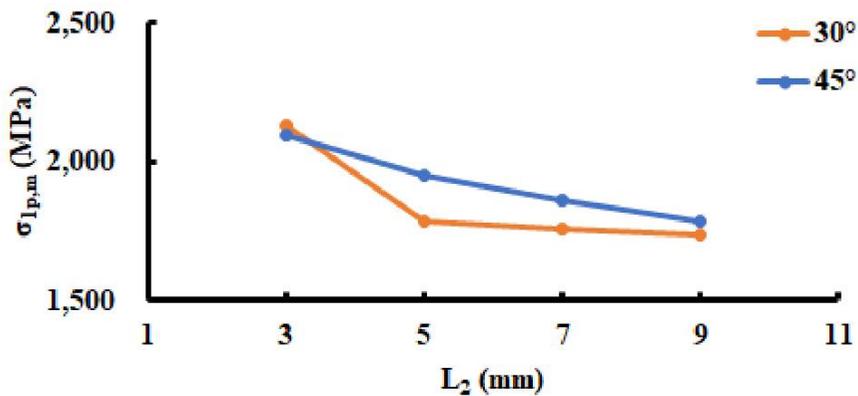


Fig. 48 Influence of corner angle of deposited region and  $L_2$  length on maximum 1<sup>st</sup> principal stress

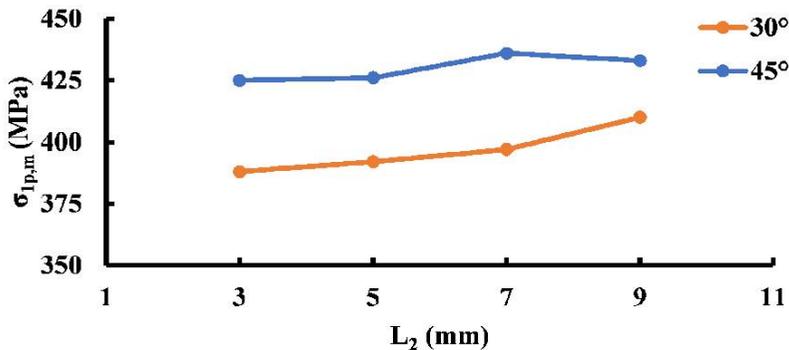


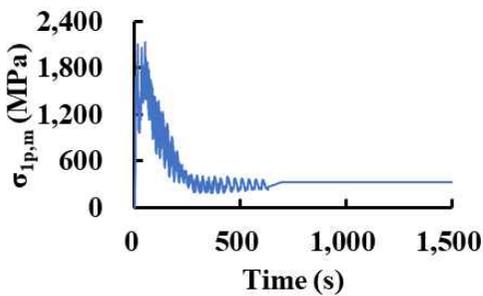
Fig. 49 Influence of corner angle of deposited region and  $L_2$  length on maximum 1<sup>st</sup> principal stress after elastic recovery

다 낮게 도출되었다. 각각 5 mm 의 경우 169 MPa (9.5 %), 7 mm 의 경우 105 MPa (5.9 %), 9 mm 의 경우 52 MPa 만큼의 값이 감소함을 알 수 있었다. 또한 기저부 경사각이 낮은 30 ° 인 경우가 45 ° 인 경우보다 낮게 도출 되었지만 L<sub>2</sub> 의 길이가 증가함에 따라 기저부 경사각에 따른 최대 잔류 응력값의 감소폭이 축소되는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각 45 ° 인 경우 L<sub>2</sub> 의 길이가 증가함과 동시에 두드러 지게 최대 잔류 응력값이 감소하는 경향을 보였지만 기저부 경사각 30 ° 인 경우 L<sub>2</sub> 의 길이가 5 mm 에서 7 mm 로 변경됨에 따라 최대 잔류 응력값이 26 MPa (1.5 %) 만큼 감소 하였고 7 mm 에서 9 mm 로 변경됨에 따라 최대 잔류 응력값은 21 MPa (1.2 %) 만큼 감소하였다. 이에 따라 기저부 경사각 30 ° 인 경우에는 L<sub>2</sub> 의 길이가 5 mm 이상인 경우 최대 잔류 응력값의 감소폭이 매우 적은 것을 확인 할 수 있었다.

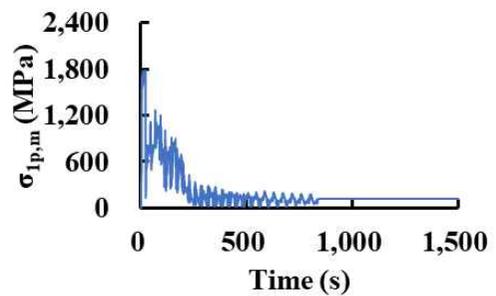
Fig. 49 는 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점에서의 최종 잔류 응력값 변화이다. 최종 잔류 응력값은 최대 잔류 응력값 과는 상반된 결과를 보여주고 있다. 기저부 경사각과 관계없이 L<sub>2</sub> 의 길이가 증가할수록 최종 잔류 응력값 또한 동시에 증가함을 알 수 있었다. 최종 잔류 응력의 증가폭은 기저부 경사각 30 ° 인 경우에는 L<sub>2</sub> 의 길이가 3 mm 에서 9 mm 로 변형될 때 최종 잔류 응력의 증가량은 1-5 % 만큼 증가하였다. 기저부 경사각 45 ° 인 경우에 최종 잔류 응력의 증가량은 0.2-1.8 % 만큼 소폭 증가하였다. 기저부 경사각이 높은 경사각 45 ° 에서의 최종 잔류 응력 증가량이 경사각 30 ° 에서의 증가량 과 비교하여 낮은 값을 예측할 수 있었으나. 최종 잔류 응력값 자체는 경사각 30 ° 의 결과값들이 경사각 45 ° 와 비교하였을 때 현저히 낮게 형성함을 알 수 있었다.

## 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성

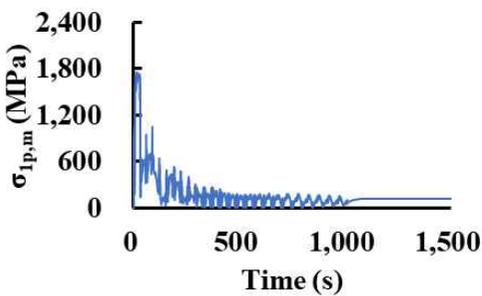
Fig. 50 및 51 은 열-기계 연계 해석에서 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리에 따른 기저부 및 적층부 형상에 따른 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 시간에 따른 최대 주응력 발생 이력이다. 측정 위치는 Fig. 47 에 도시된 유한 요소 절점에서 도출된 주응력 이력을 측정하였다. 기저부 경사각 및 기저부 모서리부와 기저부 끝단 거리와 관계 없이 적층 초기에 잔류 응력이 급격하게 증가하면서 최대 잔류 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력 발생 후 적층이 완료되는 시점까지 잔류 응력이 급격하게 감소하는 현상을 알 수 있었다.  $L_2$  의 길이에 따라 적층 체적이 증가함에 따라 적층 공정 시간 또한 증가함을 알 수 있었다. 또한 잔류



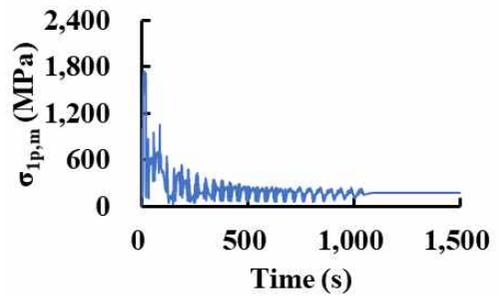
(a)  $L_2 = 3 \text{ mm}$



(b)  $L_2 = 5 \text{ mm}$

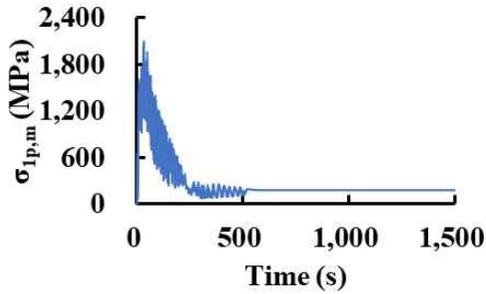


(c)  $L_2 = 7 \text{ mm}$

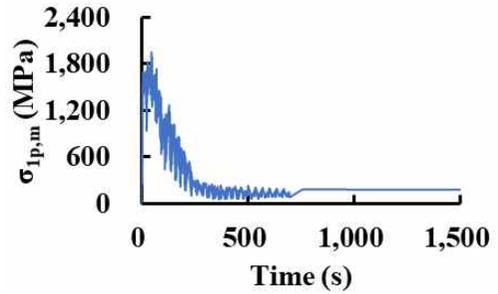


(d)  $L_2 = 9 \text{ mm}$

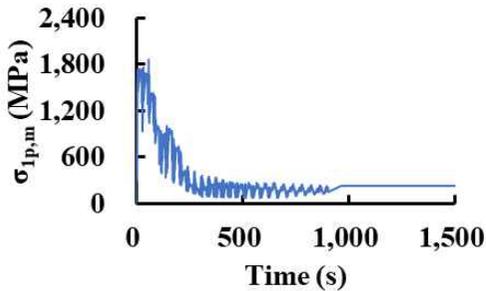
**Fig. 50 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 30^\circ$ )**



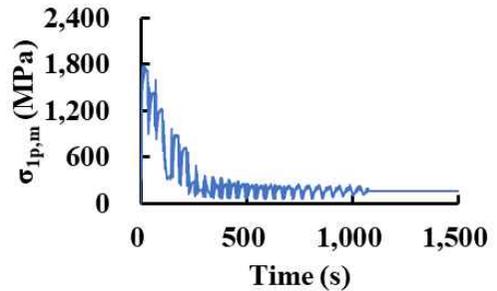
(a)  $L_2 = 3 \text{ mm}$



(b)  $L_2 = 5 \text{ mm}$



(c)  $L_2 = 7 \text{ mm}$



(d)  $L_2 = 9 \text{ mm}$

**Fig. 51 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 45^\circ$ )**

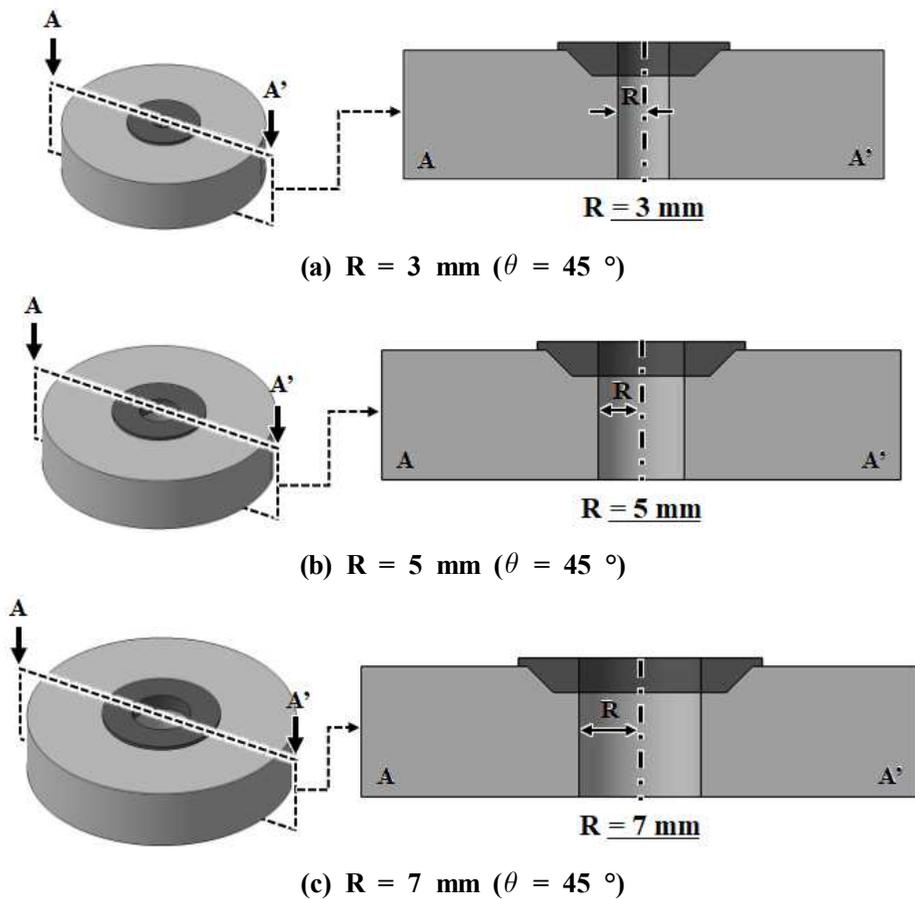
응력이 급격하게 감소하는 구간이 기저부 경사각 및  $L_2$  의 길이에 관계 없이 200-300 초 사이 이후부터 적층 공정이 완료 될 때 까지 일정한 주응력 증가 및 감소 폭을 유지함을 알 수 있었다. 해석 모델의 고정 조건이 해제되고 냉각이 진행되는 동안 잔류 응력은 조금 증가하여 최종 잔류 응력값에 도달하는 것을 알 수 있었다. 제 2 장 1 절 및 2 절의 잔류 응력 이력과 비교 하였을 때 적층 체적이 최종 잔류 응력 크기에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 적층량이 많아 증가함에 따라 발생하는 적층 공정의 모든 시점중 200-300 초 이상 부터 일정한 패턴을 가짐을 알 수 있었다. 위 결과들로부터 기저부 경사각  $30^\circ$  및  $L_2$  의 길이는 5 mm 이상의 조건이 가장 이상적인 조건이라 사료된다.

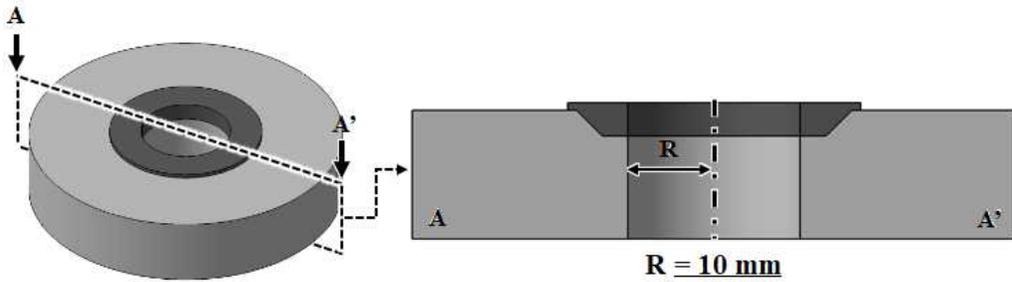
## 제 4 절 축 대칭 형상에 따른 열-기계 특성 분석

### 1. 축 대칭 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출

#### 가. 축 대칭 형상에 따른 적층부 및 기저부 형상 설계

축 대칭 형상에 따른 열-기계 특성을 분석하기 위해 기저부 경사각 과 기저부의 내경 반지름 (R) 에 따라 총 8 가지의 기저부 및 적층부 형상을 개발하였다. 기저부 및 적층부의 개념도는 Fig. 52 와 같다.

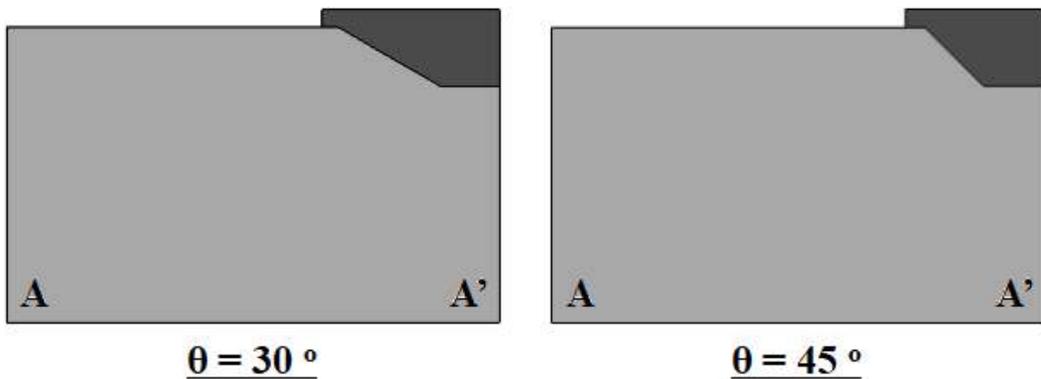




(d)  $R = 10 \text{ mm}$  ( $\theta = 45^\circ$ )

**Fig. 52 Substrate shapes according to radius of substrate (R) and deposition region slopes**

축 대칭 형상에 따른 열-기계 특성을 분석하기 위해 기저부 경사각 과 기저부의 내경 반지름 (R) 에 따른 총 8 가지의 형상은 제 3 절의 조건중 하나인 기저부 경사각  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  의  $L_2 = 3 \text{ mm}$  인 2 차원 단면 형상을 기반으로 축 대칭 형상을 설계 하였다. 유한 요소 해석을 수행시 유한 요소 해석에 걸리는 해석 시간을 고려하여야 한다.  $L_2$  의 길이중 유한 요소 절점, 유한 요소 개수 및 적층 비드수가 적은  $L_2$  의  $3 \text{ mm}$  형상을 기반으로 축 대칭 형상 시편을 설계하였다. 시편 형상은 원통 형상의 기저부 시편 중앙이 비어있는 형태로 설계를 하였으며, 시편 중앙의 내경 반지름 (R) 을 해석 변수로 설정하였으며, R 값에 따라  $3 \text{ mm}$ ,  $5 \text{ mm}$ ,  $7 \text{ mm}$  및  $10 \text{ mm}$  를 설계 하였다. Fig. 53 은 해석 모델에 적용될 2 차원 시편 형상이다.



**Fig. 53 Designs of substrate according to R values and deposition region slopes (2D)**

## 나. 축 대칭 형상에 따른 유한 요소 해석 모델 개발

축 대칭 형상에 따른 적층부 및 기저부 형상을 바탕으로 총 8 가지의 유한 요소 해석모델을 개발하였다. Fig. 54 는 축 대칭 형상에 따른 적층부 및 기저부 형상에 따른 열-기계 연계 해석을 위한 2 차원 유한 요소 해석이다. 해석 모델의 크기는 제 2 장 3 절 의 유한 요소 해석 모델의 크기인 25 mm × 15 mm 이며, 적층 방향 은 Fig. 55 와 같이 한 방향 적층 방향을 선정하였다.

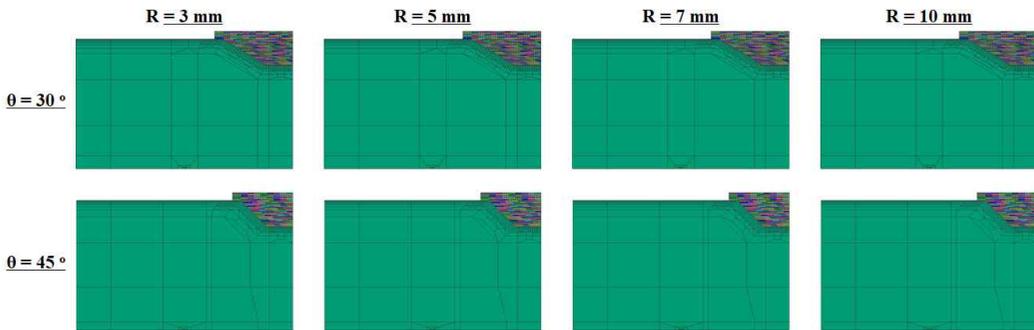


Fig. 54 FE models according to length of R

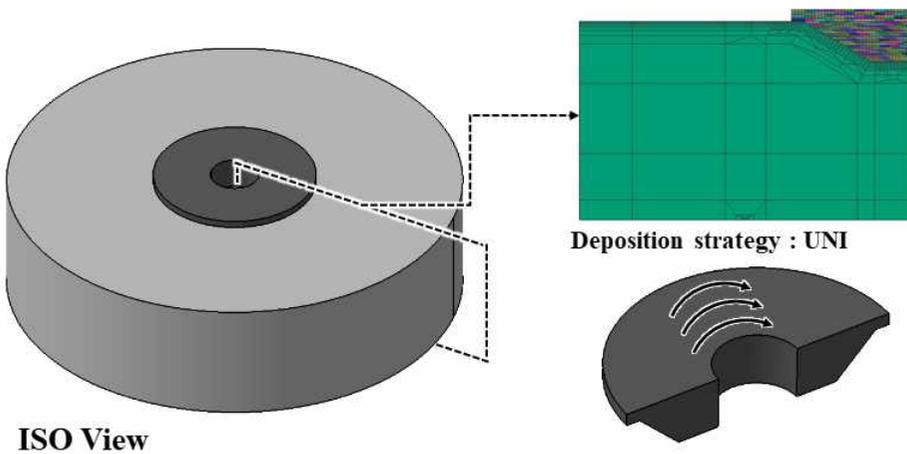


Fig. 55 Deposition strategy of FE analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $R = 3 \text{ mm}$ )

### 다. 경계 조건 데이터 도출

열-기계 연계 해석에 적용된 적층 해석의 경계 조건은 Fig. 56 과 같이 구분된다. 적층 중 기저부 상면에는 아르곤 가스에 의한 강제 대류와 복사에 의한 열 손실이 발생한다. 이를 고려하여 등가 열손실 모델이 적용되었으며, 기저부 상면을 제외한 모든 기저부 영역에는 온도 의존 자연 대류를 적용하였다. 또한 적층이 완료된 후에는 기저부 와 적층부 모두 온도 의존 자연 대류가 적용 되었다. 해석에 적용된 강제 대류 및 등가 열 손실 계수는 Fig. 16 및 Fig. 13 과 동일하다. 적층 해석에 적용된 자연 대류의 경우 해석 모델의 R 값에 따라 기저부 상부 면적 및 적층부 면적이 변화 하기 때문에 각 조건에 맞는 온도 의존 자연 대류 계수를 계산 하였으며 해석에 적용된 온도 의존 자연 대류는 Fig. 57 과 같다.

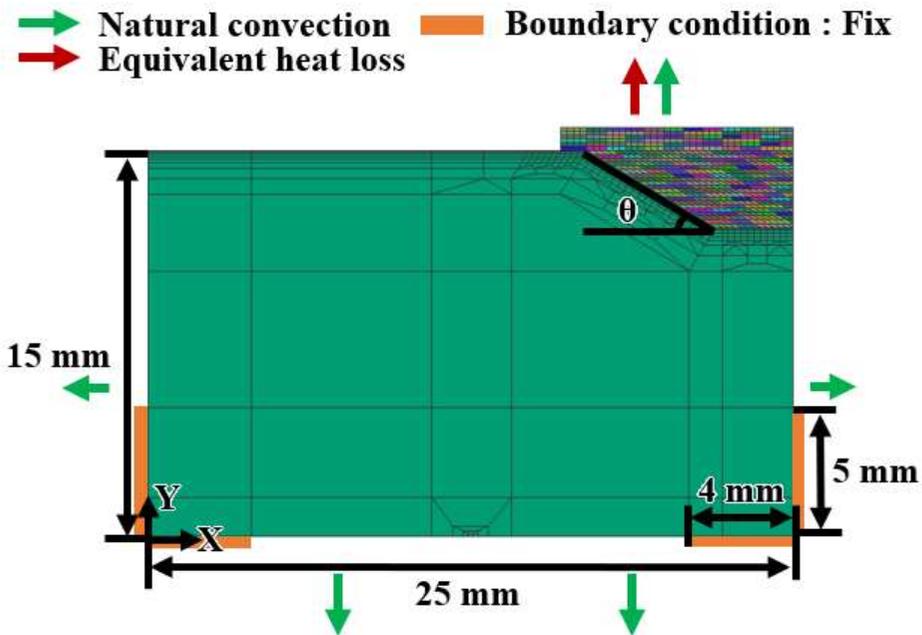
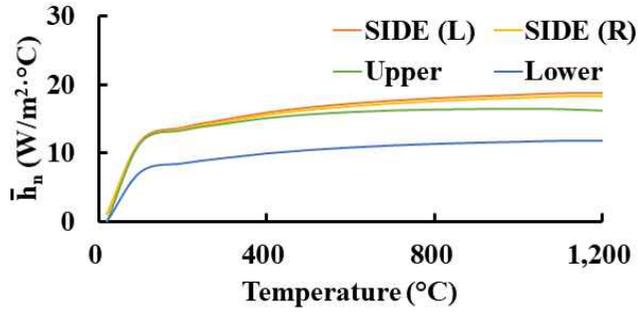
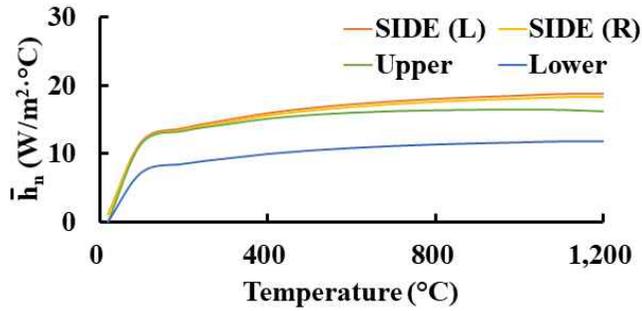


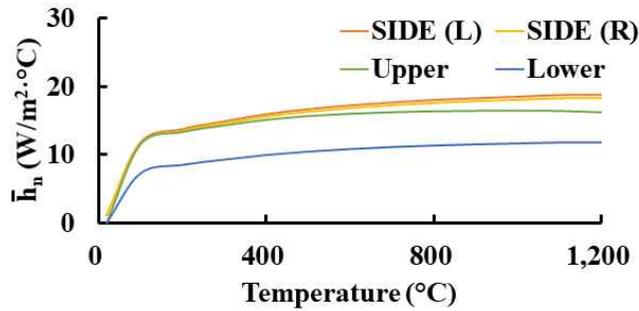
Fig. 56 Model for thermo-mechanical analysis ( $\theta = 30^\circ$ ,  $R = 3 \text{ mm}$ )



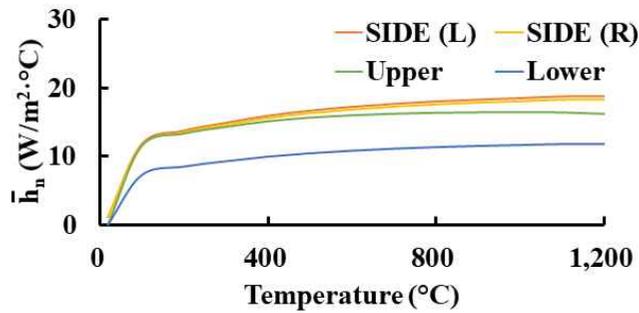
(a) R = 3 mm



(b) R = 5 mm



(c) R = 7 mm



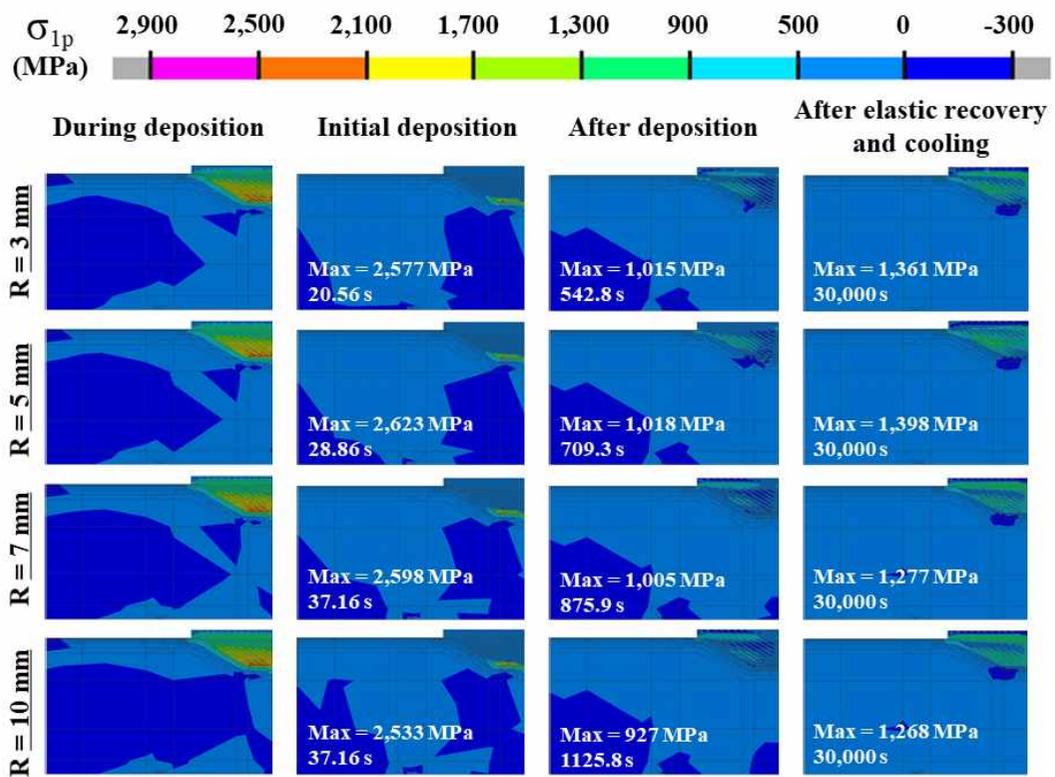
(b) R = 10 mm

Fig. 57 Natural convection coefficients according to R length

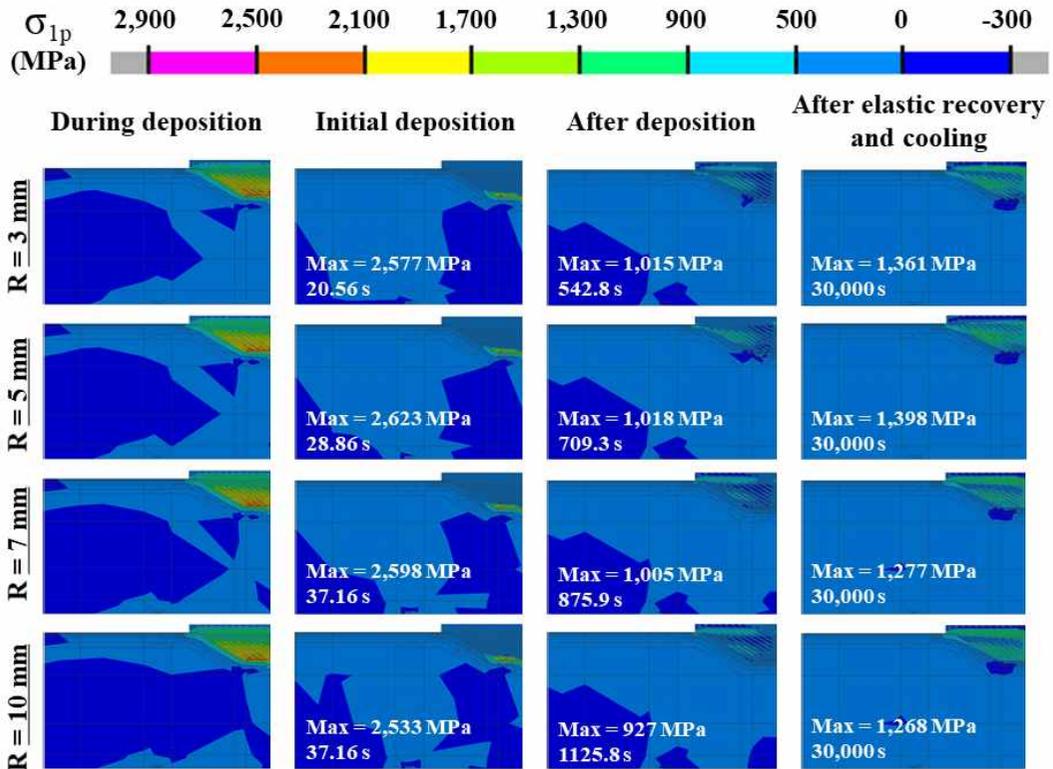
## 2. 축 대칭 형상에 따른 열-기계 특성 비교 분석

### 가. 주응력 비교 및 분석

Fig. 58 은 축 대칭 형상에 따른 기저부 및 적층부 형상에 따른 주응력 분포이다. R 값과 관계없이 공정중 발생하는 잔류 응력이 탄성 회복 과 냉각이 완료된 시점의 잔류 응력 보다 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 총 8 가지의 조건별 해석 모델 동일하게 잔류 응력은 기저부 평면부 와 적층부의 경계면에 집중되는 것을 알 수 있었다. 제 2 장의 3 절 의 Fig. 46 의 잔류 응력 분포와 비교 하였을 때 잔류 응력 분포는 현저히 높게 형성함을 알 수 있었다. 기저부 경사각 30 ° 에서 45 ° 로 증가할 때 전체적인 잔류 응력 분포가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 58 1<sup>st</sup> principal stress distributions for different R values and deposition region inclination angle

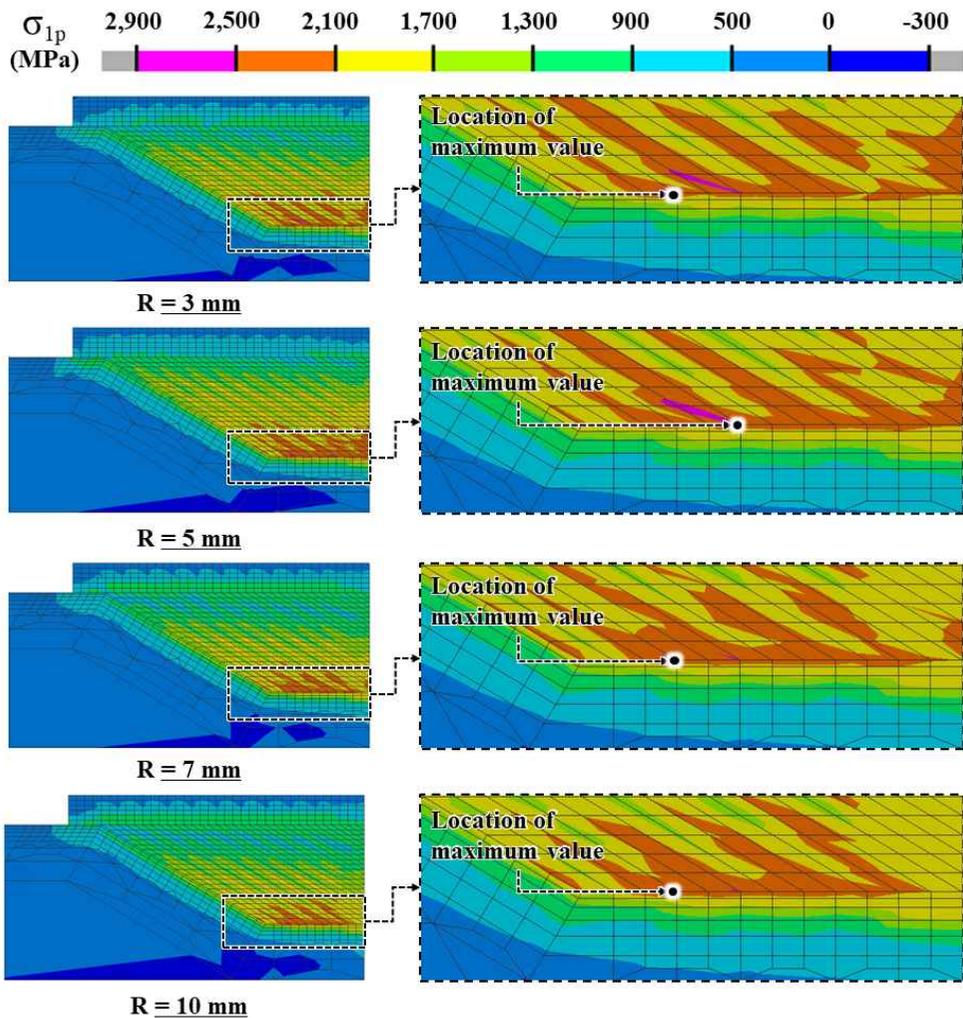
Table 18 Maximum residual stress during deposition process according to R length

|                     | R = 3 mm  | R = 5 mm  | R = 7 mm  | R = 10 mm |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\theta = 30^\circ$ | 2,577 MPa | 2,623 MPa | 2,598 MPa | 2,533 MPa |
| $\theta = 45^\circ$ | 2,576 MPa | 2,820 MPa | 2,775 MPa | 2,674 MPa |

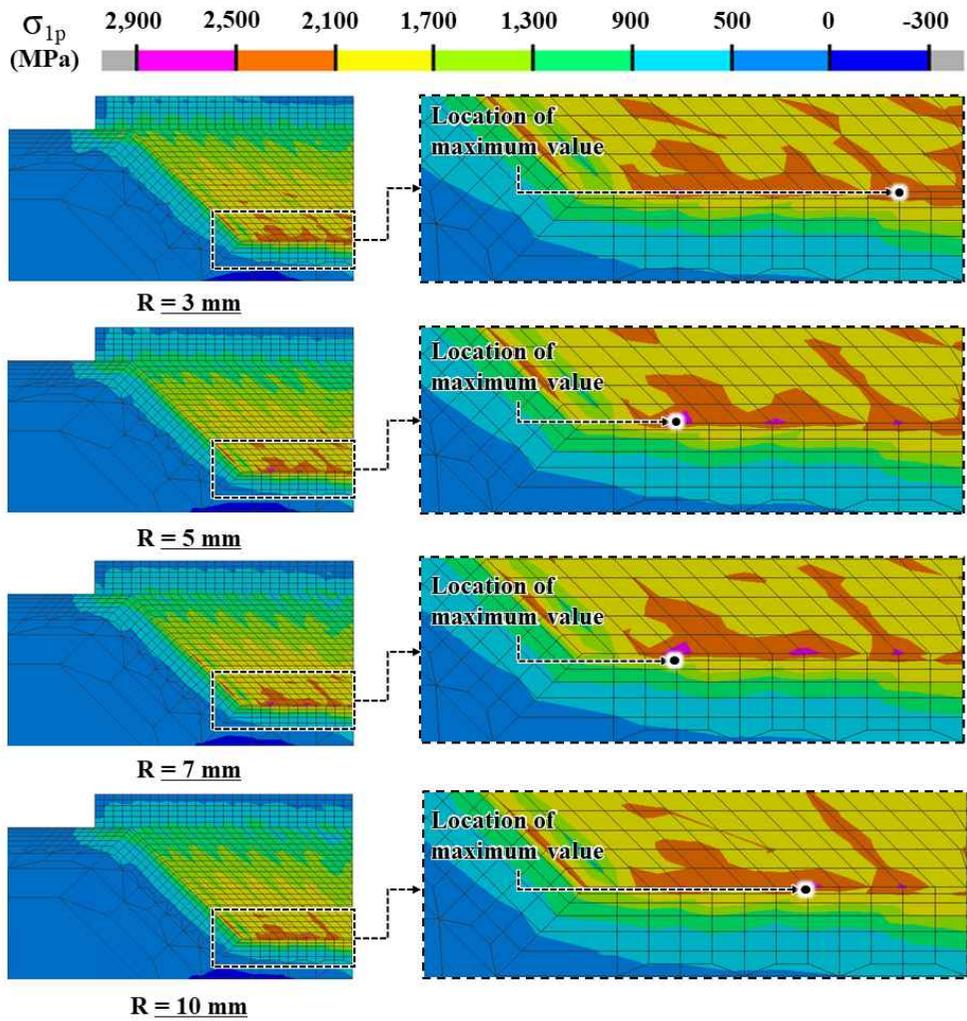
기저부 경사각에 관계없이 기저부 내부 직경 (R) 값이 3 mm 에서 5 mm 로 변경 될 때 잔류 응력 값이 증가하는 것을 알 수 있었다. R 값 5 mm 에서 10 mm 로 변경 될 때 잔류 응력 값은 감소하는 것을 알 수 있었다. 잔류 응력 분포는 기저부 경사면과 모서리부가 교차하는 기저부 끝단 수평방향으로 경계면 위 적층부 방향

으로 높게 분포되는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과들로부터 기저부 및 적층부의 형상이 잔류 응력 분포를 형성하는데 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 59 는 잔류 응력이 상대적으로 크게 발생하는 ESR 인근의 잔류 응력 분포이다. 최대 잔류 응력이 발생하는 영역은 기저부 경사각과 적층부 형상에 관계없이 기저부의 평면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부에 발생하는 것을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사각  $30^\circ$  의 경우 0.75-1.25 mm 이내에 위치하며 기저부 경사각  $45^\circ$  의 경우 0.75-2.5 mm 이내에 위치하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각과 관계없이 R 값이 3 mm에서 5 mm 로 증가



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

**Fig. 59 Effect of R length and inclination angle of deposition region on excessively stressed regions**

할 때 ESR의 면적 또한 증가 하였다. 하지만 R 값이 5 mm에서 10 mm로 증가 할 때 ESR의 면적은 감소함을 알 수 있었다. ESR의 면적은 기저부 경사각 및 R 값과 관계없이 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부에서 기저부 경사면 방향으로 올라타는 현상을 보여주고 있다. 기저부 경사각  $30^\circ$ 에서  $45^\circ$ 로 증가할수록 ESR의 면적이 축소되는 것을 확인할 수 있었다.

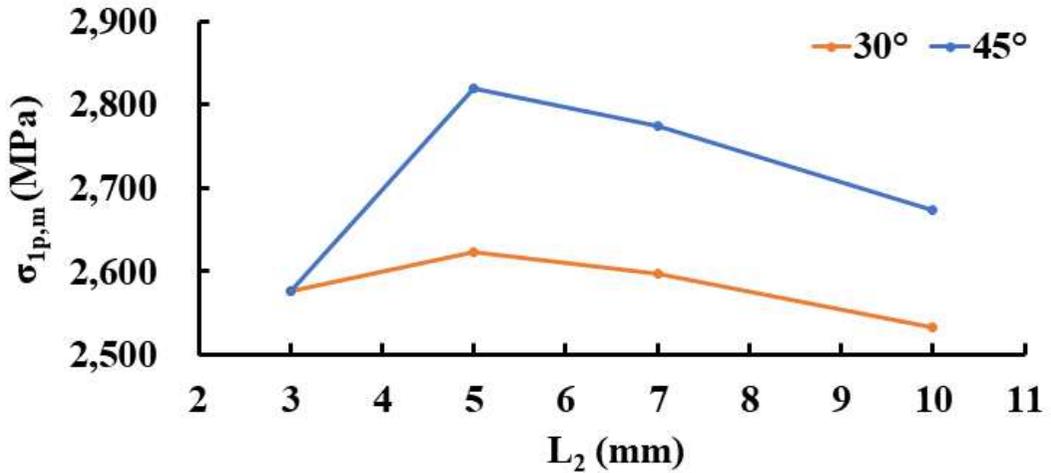
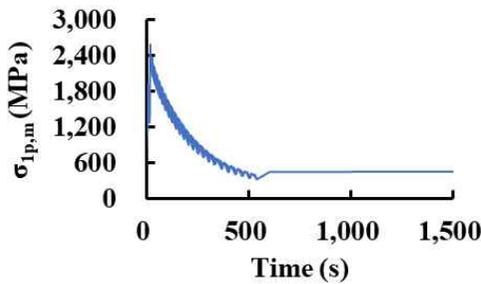


Fig. 60 Influence of corner angle of deposited region and R length on maximum 1<sup>st</sup> principal stress

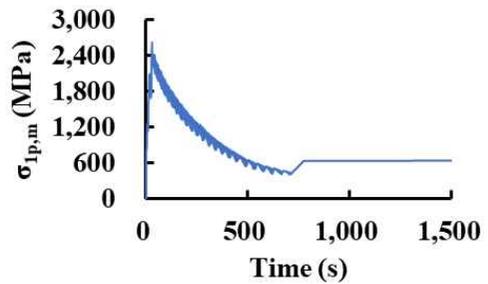
Fig. 60 은 열-기계 연계 해석으로 예측된 축 대칭 형상에 따른 최대 주응력의 최대값 변화이다. R 값이 3 mm 의 경우 기저부 경사각 30 °, 45 ° 에서의 최대 주응력값은 1 MPa 만큼 기저부 경사각 30 ° 의 최대 주응력값이 높게 예측되었다. 하지만 1 MPa 만큼의 차이는 동일한 결과가 기저부 경사각과 관계 없이 최대 주응력 최대값 측면에서 동일하게 예측되었다고 볼 수 있다. R 값이 3 mm 에서 5 mm 로 변경될때 최대 주응력 값이 증가한다. 기저부 경사각 30 ° 의 경우 약 2 % 만큼 상승 하였으며 기저부 경사각 45 ° 의 경우 약 9 % 만큼 상승 함을 알 수 있었다. 기저부 경사각과 관계 없이 R 값이 5 mm 이상 넘어가는 경우 생성되는 최대 주응력 값이 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각 30 ° 의 경우 R 값이 증가함에 따라 1-2 % 만큼 최대 주응력값이 감소하였으며 경사각 45 ° 의 경우 R 값이 증가함에 따라 2-4 % 만큼 최대 주응력값이 감소함을 알 수 있었다. 기저부 경사각은 R 값이 3 mm 인 경우를 제외하곤 5 mm, 7 mm, 10 mm 인 경우엔 기저부 경사각 이 낮은 30 ° 의 경우가 45 ° 와 비교시 각각 7 %, 6 %, 5 % 만큼 최대 주응력값 이 낮게 예측되었다.

## 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성

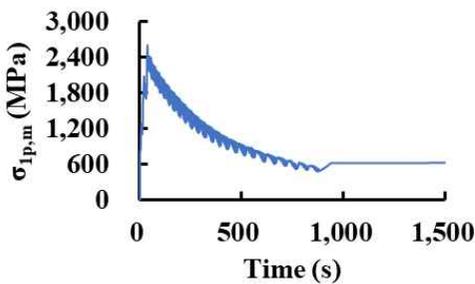
Fig. 61 및 62 는 Fig. 59 의 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 주응력 이력이다. 모든 조건에서 공정 초기에 주응력이 급격하게 증가하였다가 적층이 완료되는 시점까지 급격하게 주응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 해석 모델의 고정 조건이 제거되고 냉각이 진행되는 동안 잔류 응력은 조금씩 증가하여 최종 잔류 응력 값에 도달하는 것을 알 수 있었다. R 값이 증가함에 따라 적층량 및 적층 시간이 증가하고, 이에 따른 열 이력이 많아지면서 주응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 기저부 경사각이 낮은 30 ° 와 45 ° 의 주응력 이력을 비교 하였을 때 기저부 경사각이 낮은 30 ° 인 경우가 45 ° 인 경우보다 적층 면적이 넓어지면서 적



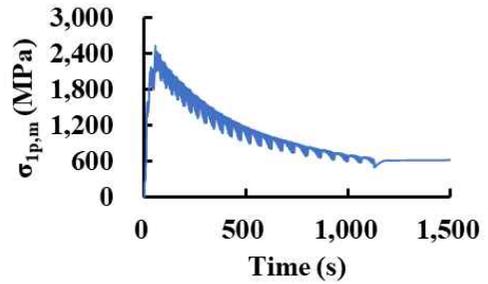
(a) R = 3 mm



(b) R = 5 mm

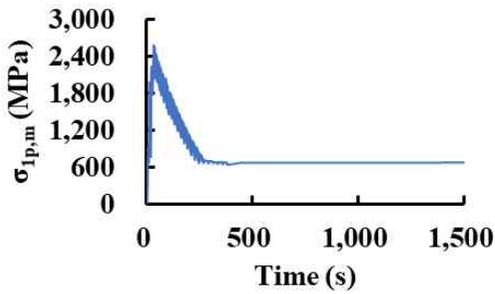


(c) R = 7 mm

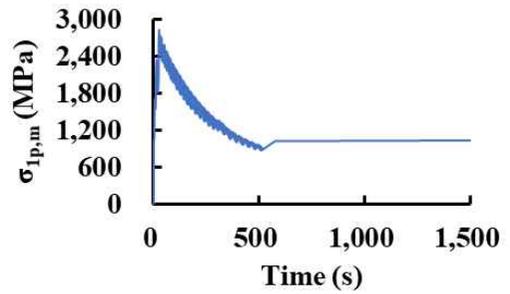


(d) R = 10 mm

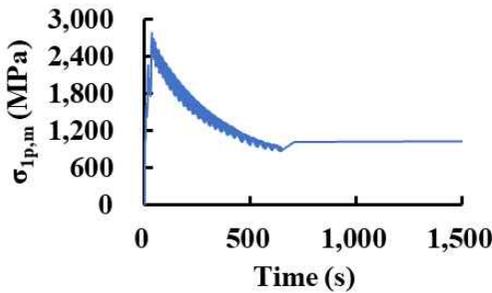
**Fig. 61 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 30^\circ$ )**



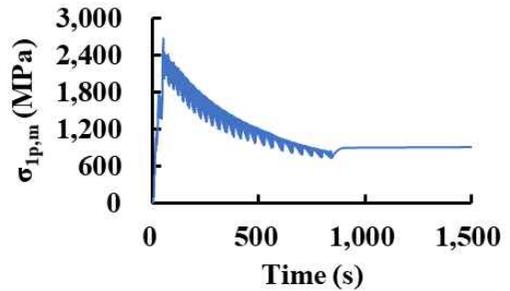
(a) R = 3 mm



(b) R = 5 mm



(c) R = 7 mm



(d) R = 10 mm

Fig. 62 Time histories of 1<sup>st</sup> principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value ( $\theta = 45^\circ$ )

층이 종료되는 시간이 증가함을 알 수 있었다. 기저부 경사각  $30^\circ$  의 경우 기저부 경사 각도  $45^\circ$  보다 주응력 감소 폭이 더 작게 나타났지만 주응력 값들은 기저부 경사각  $30^\circ$  가  $45^\circ$  와 비교 하였을 때 전체적으로 5-7 % 낮게 예측되어 기저부 경사각이 위 결과들로부터 적층 체적이 증가함에 따라 적층시 발생하는 잔류 응력에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 기저부 형상과 관계없이 적층 체적이 증가함과 동시에 이에 따른 열 이력의 증가에 의해 주응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 기저부 경사각  $30^\circ$  및 R 값은 10 mm 인 적층 조건이 잔류 응력 저감 측면에서 가장 좋은 조건이라 사료 된다.

# 제 3 장 적층 기법에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 분석

## 제 1 절 적층 경로에 따른 열-기계 특성 분석

### 1. 적층 경로에 따른 유한 요소 해석 모델 설계

#### 가. 적층 경로 선정 및 3차원 및 2차원 형상 설계

열-기계 특성 분석을 위해 적층 경로 선정 및 적층 경로에 따른 형상을 개발 하였다. 적층 경로는 총 2 가지를 선정하였다. 한 방향 적층인 (UNI direction) 과 교차 방향 적층인 (Zig-Zig direction) 방향으로 선정하였다. 2 가지의 적층 경로로 선택한 이유는 불규칙한 기저부 형상 적층시 DED 공정의 레이저 및 적층 재료 공급 장치인 노즐과 기저부가 서로 충돌하는 상황을 방지하기 위해 불규칙 형상 적층시 한 방향 적층 과 교차 방향 적층 경로를 적용하기 때문이다. 적층 시편은 3 차원 시편 과 2 차원 시편을 설계하였다. 3 차원 시편 설계는 제 2 장의 3 절 기저부

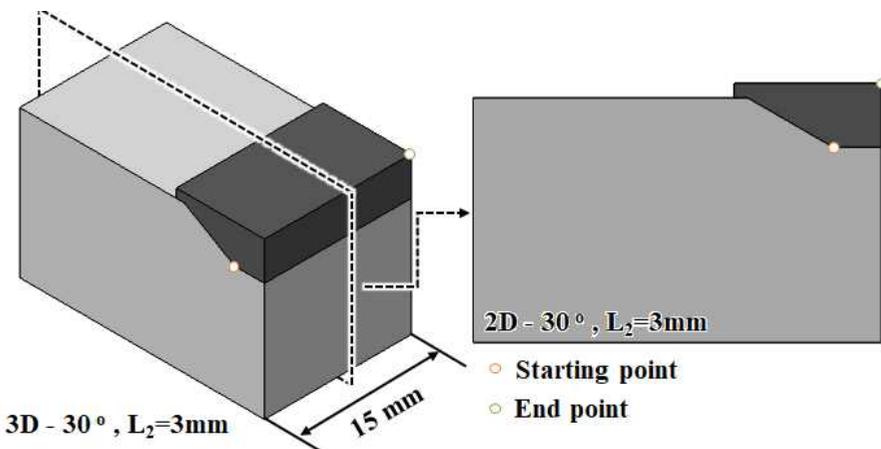


Fig. 63 Deposition direction based on substrate shape

경사각 30 °의 L<sub>2</sub>의 길이 3 mm의 단면 데이터를 기반으로 설계되었다. 2 차원 유한 요소 해석은 3 차원 유한 요소 해석과 비교하여 해석 시간 및 해석 데이터 용량의 큰 차이가 있다. 이를 고려 하여 가장 적층량이 작은 기저부 경사각 30 °의 L<sub>2</sub>의 길이 3 mm의 단면 데이터를 선정하였다.

Fig. 63는 해석에 3 차원 및 2 차원 시편 개념도이다. 제 2장 3 절과 달리 적층 방향 두께는 40 mm가 아닌 해석 시간 및 해석 데이터 용량을 고려하여 15 mm로 축소 시켰다. Fig. 64는 해석에 적용된 적층 경로의 층별 경로 방향이다.

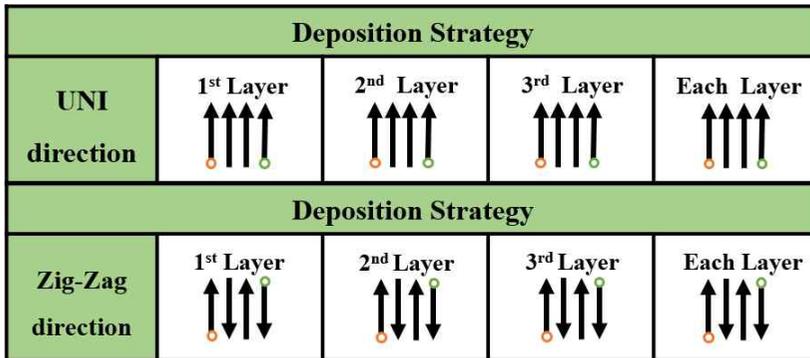


Fig. 64 Deposition strategies

### 나. 3차원 및 2차원 유한 요소 해석 모델 개발

적층 경로에 따른 열-기계 특성 분석을 위해 3 차원 및 2 차원 유한 요소 해석 모델을 개발하였다. 2 차원 및 3 차원 유한 요소 해석 모델에 적용된 적층 비드 및 특성 데이터는 Table 2와 같다. 유한 요소 해석 모델에 사용된 공정 조건은 Table 4와 같다. 유한 요소 해석 모델은 적층 경로별 총 4 가지로 설계되었다.

Table 19 Number of nodes and elements of 3D and 2D FE models

| Type of deponon direction |                   | Nodes (EAs) | Elements (EAs) |
|---------------------------|-------------------|-------------|----------------|
| 3D FE models              | UNI direction     | 31,618      | 29,574         |
|                           | Zig-Zag direction | 31,618      | 29,574         |
| 2D FE models              | UNI direction     | 1,061       | 1,023          |
|                           | Zig-Zag direction | 1,061       | 1,023          |

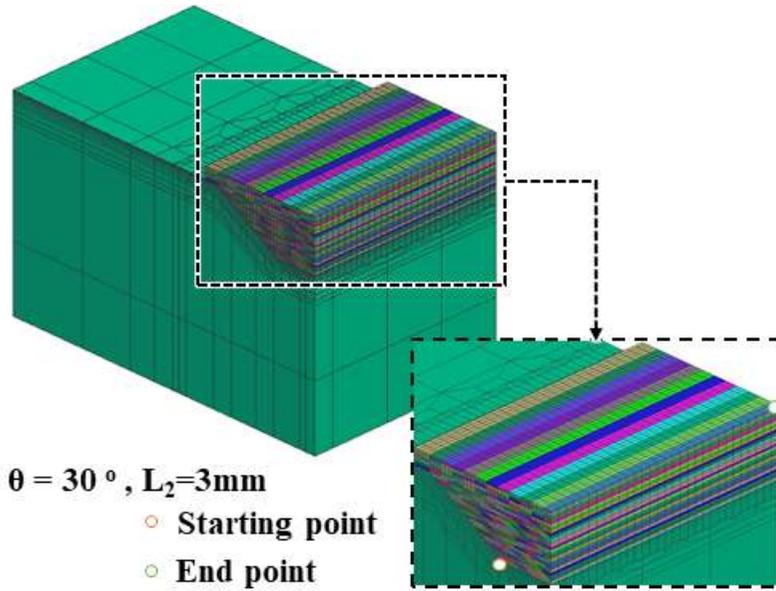


Fig. 65 Direction of deposition of 3D FE models based on substrate shape

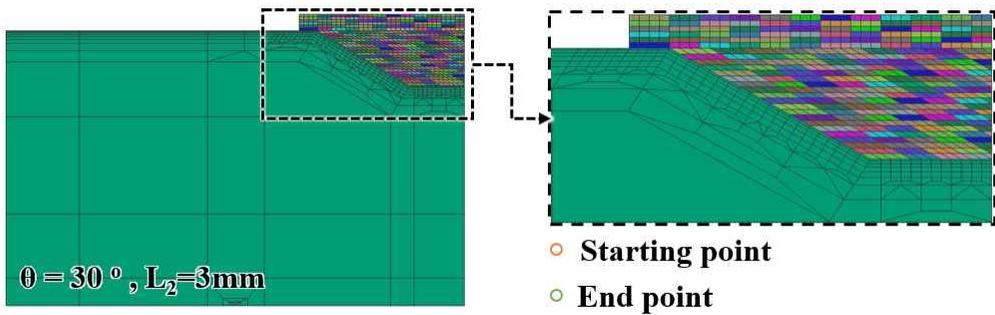


Fig. 66 Direction of deposition of 2D FE models based on substrate shape

Table 19 은 3 차원 및 2 차원 해석 모델의 유한 요소 절점 및 유한 요소 개수이다. 3 차원 모델과 2 차원의 모델을 비교하였을 때 절점 및 유한 요소 개수의 차이는 30 배가량 차이가 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 65 및 Fig. 66 는 적층 경로에 따른 3 차원 및 2 차원 유한 요소 해석 모델이다.

### 다. 경계 조건 데이터 도출

적층 중 해석 모델의 상부에는 적층시 분사되는 보호 가스인 아르곤 가스에 의한 열 손실이 발생하며, 측면 및 하부에는 자연 대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한, 레이저에 의한 급격한 온도 증가는 복사에 의한 열 손실이 함께 고려된다. 2차원 유한요소 해석 경계 조건은 3차원 유한요소 해석 모델과 동일하게 Fig. 67과 같이 구분된다. Fig. 68은 2차원 유한요소 해석 경계 조건이다. Fig. 69은 3차원 유한요소 해석 경계 조건이다.

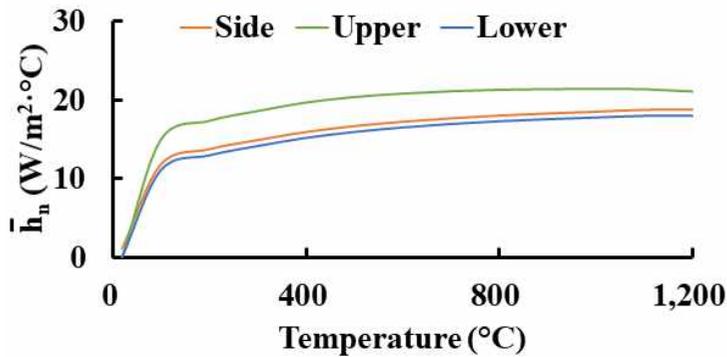


Fig. 67 Temperature dependent natural convection coefficient for different surfaces

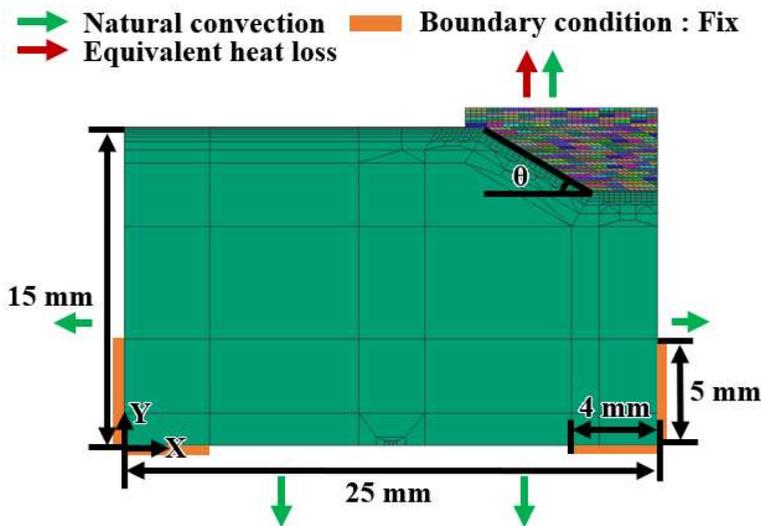


Fig. 68 Model for thermo-mechanical analysis (2D FE model)

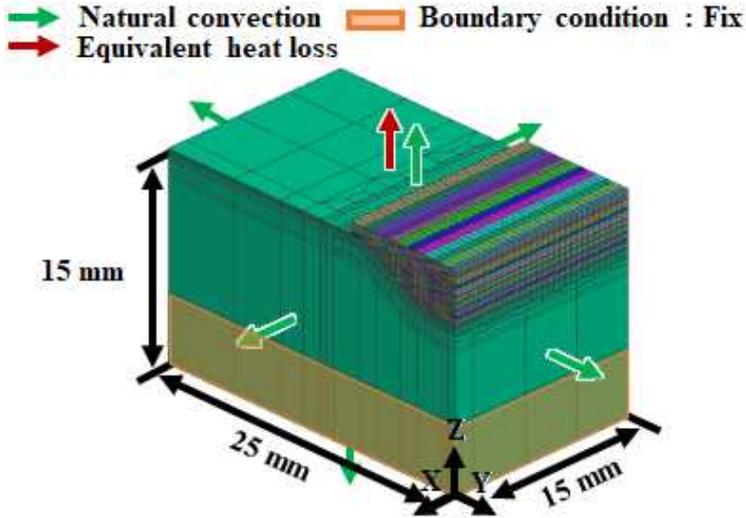


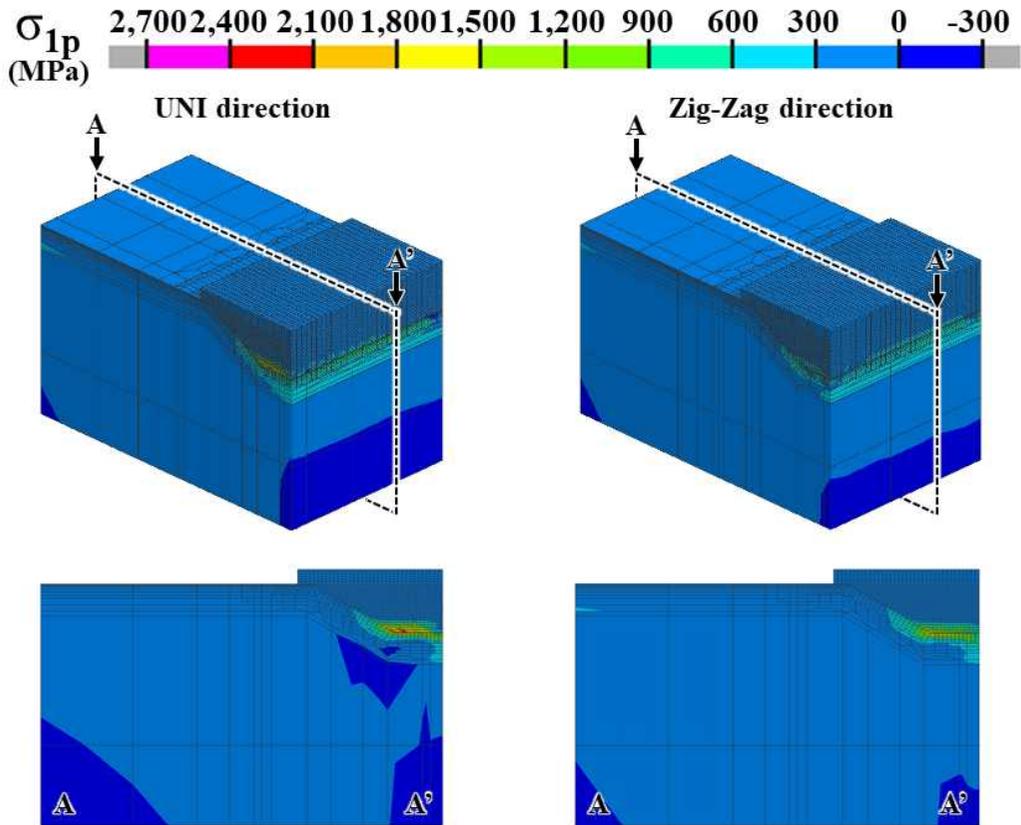
Fig. 69 Model for thermo-mechanical analysis (3D FE model)

## 2. 적층 경로에 따른 열-기계 특성 비교 분석

### 가. 적층 경로에 따른 주응력 비교 및 분석

Fig. 70 는 열-기계 특성 분석을 위해 3 차원 유한 요소 해석을 통해 예측된 적층 경로에 따른 단면 A-A' 의 공정중 주응력 분포이다. 적층 경로와 관계없이 적층 공정중 형성되는 잔류 응력이 기저부 모서리부 인근 및 기저부의 평면부에 넓게 분포 하는 것을 알 수 있었다. 한 방향 적층 경로인 경우와 교차 적층인 경우와 비교 하였을 때 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력이 더 높게 예측되었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 영역은 기저부 평면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부에 기저부 방향 수직 방향으로 바로 적층부 아래에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 3 차원 유한 요소 해석으로 예측된 적층 경로별 최대 주응력은 한 방향 적층 경로는 2,376 MPa 교차 방향 적층 경로는 2,024 MPa 으로 15 % 만큼 생성되는 최대 주응력값이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 71 은 2 차원 유한 요소 해석을 통해 예측된 적층 경로에 따른 공정중 주응력 분포이다. 적층 경로와 관계없이 적층 공

정중 형성되는 잔류 응력이 기저부 모서리부 인근 및 기저부의 평면부에 분포 하는 것을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 영역은 3 차원 유한 요소 해석 과 동일하게 기저부 평면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부에 기저부 방 향 수직 방향으로 바로 적층부 아래에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 2 차원 유한 요소 해석의 경우 한 방향 적층 경로는 2,654 MPa 교차 방향 적층 경로의 경우 2,150 MPa 의 값이 예측되었으며 교차 방향 적층 경로가 한 방향 적층 과 비교하 여 18 % 만큼 낮은 최대 주응력값을 형성하는 것을 알 수 있었다. 이와같은 결과 들을 통하여 적층 경로 중 잔류 응력 저감측면에서 가장 적합한 적층 경로는 교차 방향 적층 경로임을 확인할 수 있었다.



**Fig. 70 1<sup>st</sup> principal stress distributions for different deposition direction (3D)**

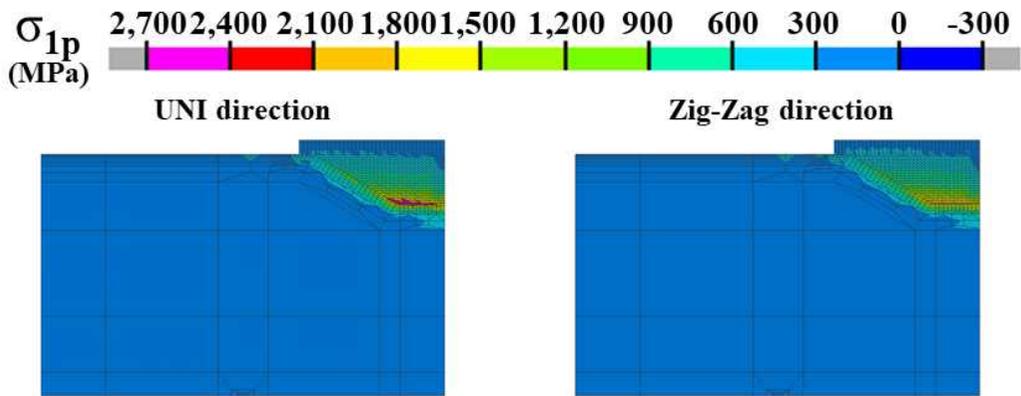
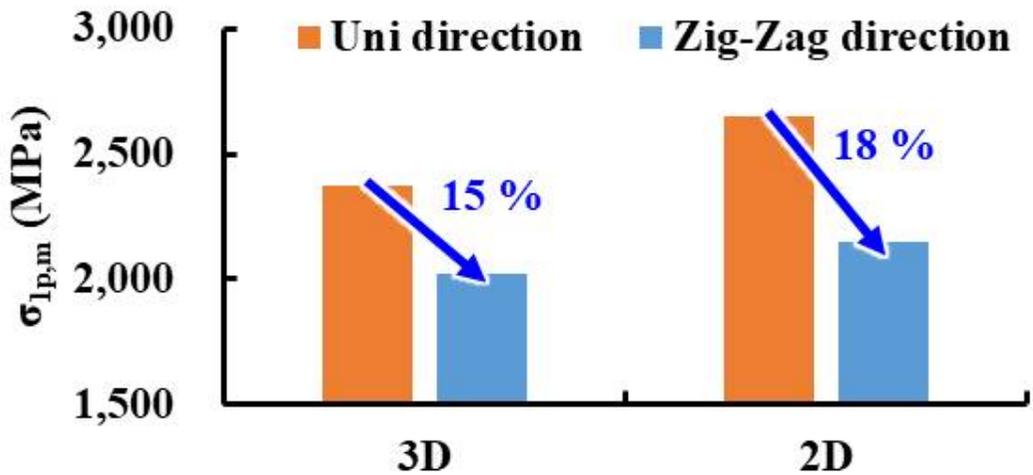


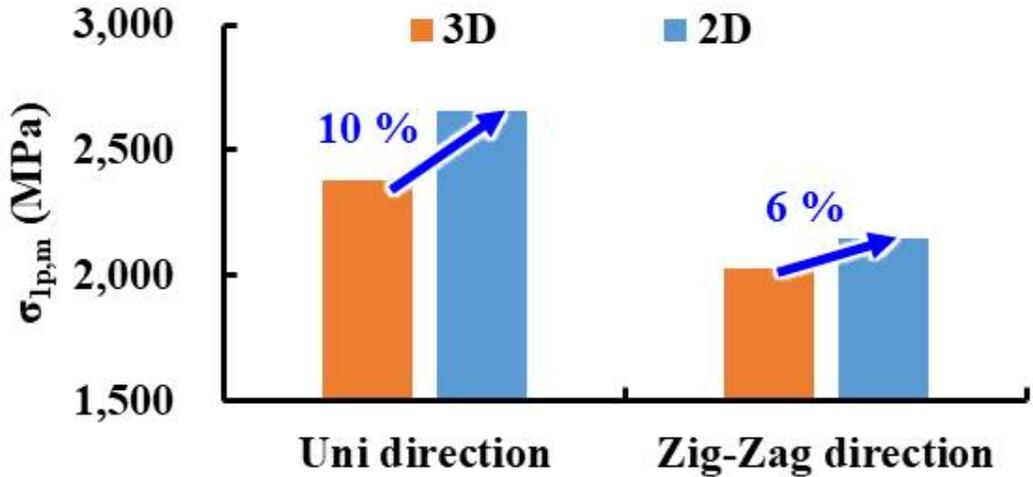
Fig. 71 1<sup>st</sup> principal stress distributions for different deposition direction (2D)

Table 20 Residual stress maximum value for during deposition (deposition directions)

| Deposition direction | 3D FE models | 2D FE models |
|----------------------|--------------|--------------|
| UNI direction        | 2,376 MPa    | 2,654 MPa    |
| Zig-Zag direction    | 2,024 MPa    | 2,150 MPa    |



(a) Maximum residual stress comparison according to deposition strategy



(b) Comparison of 3D and 2D residual stress results

Fig. 72 Influence of the deposition strategy on the maximum 1<sup>st</sup> principal stress

### 나. 3 차원 및 2 차원 주응력 비교 및 분석

Fig. 72 의 (b) 는 3 차원 유한 요소 해석과 2 차원 유한 요소 해석의 적층 경로에 따라 3 차원 과 2 차원의 최대 주응력을 비교한 그래프이다. 3 차원 해석과 2 차원 해석의 최대 주응력 값 변화를 비교 하였을 때 한 방향 적층의 경우 2 차원 해석이 3 차원 해석결과 보다 10 % 높게 값이 도출되었으며 교차 방향 적층의 경우 2 차원 유한 요소 해석이 3 차원 해석결과 보다 6 % 높은 값이 도출되었다. 변형에 대한 저항으로 응력이 형성된다. 3 차원 유한 요소 해석은 적층 길이 방향으로 변형이 가능하지만 2 차원 유한 요소 해석의 경우 적층 길이 방향으로 변형이 불가능 하다 따라서 2 차원 유한 요소 해석이 3 차원 유한 요소 해석의 잔류 응력 값 보다 높게 도출되었으며 유한 요소 해석모델의 온도 의존 등가 열손실 계수 및 자연 대류 계수가 적용되는 영역은 3 차원 해석 모델의 경우 2 차원 면적이 6 면에 적용되며 2 차원 해석의 경우엔 1 차원 선데이터가 4 면에 적용된다. 이에 따라 해석 수행시 냉각이 원활하지 못하다. 따라서 안전성 측면에서 보수적 설계가 가능하여 특징을 가진다. Table 21 와 22 는 3 차원 및 2 차원 유한 요소 해석의 해석 시간과 유한 요소 해석 결과 데이터의 용량 비교이다. 3 차원 유한 요소의 해석의

경우 2 차원 유한 요소 해석과 비교 하여 114 시간 만큼 해석에 소요되는 시간이 더 많음을 알 수 있었다. 또한 해석 수행이 완료가 되고 해석 데이터의 용량은 3 차원 유한 요소 해석과 2 차원 유한 요소 해석과 비교하여 3 차원 해석의 데이터 용량이 확연히 높은 데이터 용량을 가짐을 알 수 있었다. 위 결과로 보수적 설계, 해석 시간 및 데이터 용량을 고려하여 2 차원 유한 요소 해석이 3 차원 유한 요소 해석보다 더 용이 하다는 것을 알 수 있었다.

**Table 21 Comparison of total simulation time of 3D and 2D FE analysis**

| Deposition direction | 3D simulation times (Hours) | 2D simulation times (Hours) |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| UNI direction        | 120                         | 6                           |
| Zig-Zag direction    | 120                         | 6                           |

**Table 22 Comparison of results file memory sizes of 3D and 2D FE analysis**

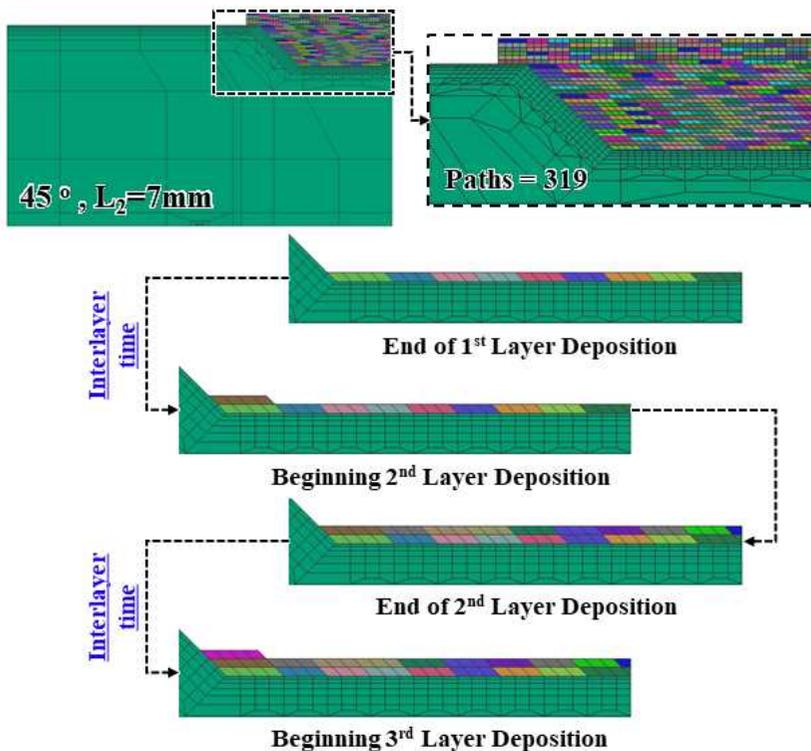
| Deposition direction | Memory of 3D analysis (MB) | Memory of 2D analysis (MB) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| UNI direction        | 539,540                    | 1,138                      |
| Zig-Zag direction    | 551,970                    | 1,120                      |

## 제 2 절 Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 분석

### 1. Interlayer time 에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출

#### 가. Interlayer time 선정 및 유한 요소 해석 모델 개발

Fig. 73 는 Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 분석을 위해 설계된 유한 요소 해석 모델이다. Interlayer time 이란 Fig. 73 에 도식된 것과 같이 적층 공정중 첫 번째 층의 적층이 완료된 후 다음 층 첫 번째 적층이 시작되기까지 걸리는 시간을 나타낸다. 유한 요소 해석 모델은 제 2 장 3 절의 기저부 경사각  $45^\circ$  의  $L_2$  의 길이 7 mm 의 해석 모델을 선정하였다. Interlayer time 에 따른 유한 요소 해석을



**Fig. 73 Schematic of interlayer time during deposition for 2D FE analysis ( $\theta = 45^\circ$ ,  $L_2 = 7 \text{ mm}$ )**

진행하기 위해 적층량이 많은  $L_2$  의 길이 7 mm 이상으로 선정하였으며 해석 시간을 고려하여 기저부 경사각  $45^\circ$  의 7 mm 로 선정하였다.

Fig. 74 은 Interlayer time 에 따른 적층 공정중 적층이 완료되는 적층 층별 시간이다. Interlayer time 의 추가 시간은 5, 10, 30, 60 초 로 선정하였으며 Fig. 74 와 같이 추가된 시간의 증가량에 따라 적층 층수에 따라 적층이 완료되는 시간이 증가함을 알 수 있다.

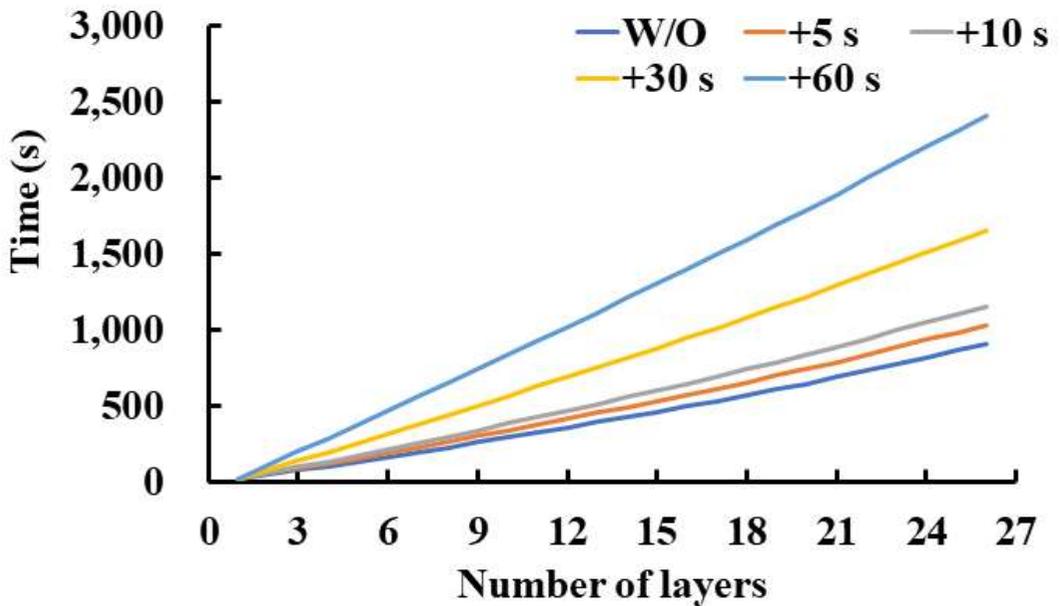


Fig. 74 Deposited process completion time according to interlayer time

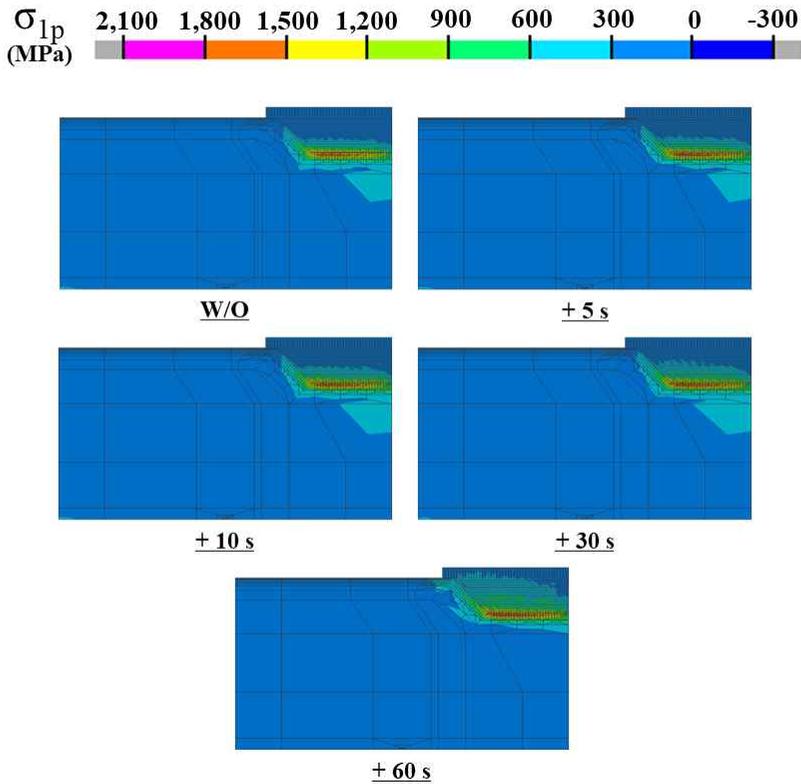
#### 나. 경계 조건 데이터 도출

적층 해석의 경계 조건은 Fig. 44 와 동일하며 해석 모델의 상부에는 적층시 분사되는 보호 가스인 아르곤 가스에 의한 열 손실이 발생하며, 측면 및 하부에는 자연 대류에 의한 열 손실이 발생한다. 적층공정 중에는 복사 에 의한 열 손실이 함께 고려되어 등가열손실 계수가 적용되었다. 해석에 적용된 온도 의존 자연 대류계수는 Fig. 45 의  $L_2$  의 길이 7 mm 랑 동일하다.

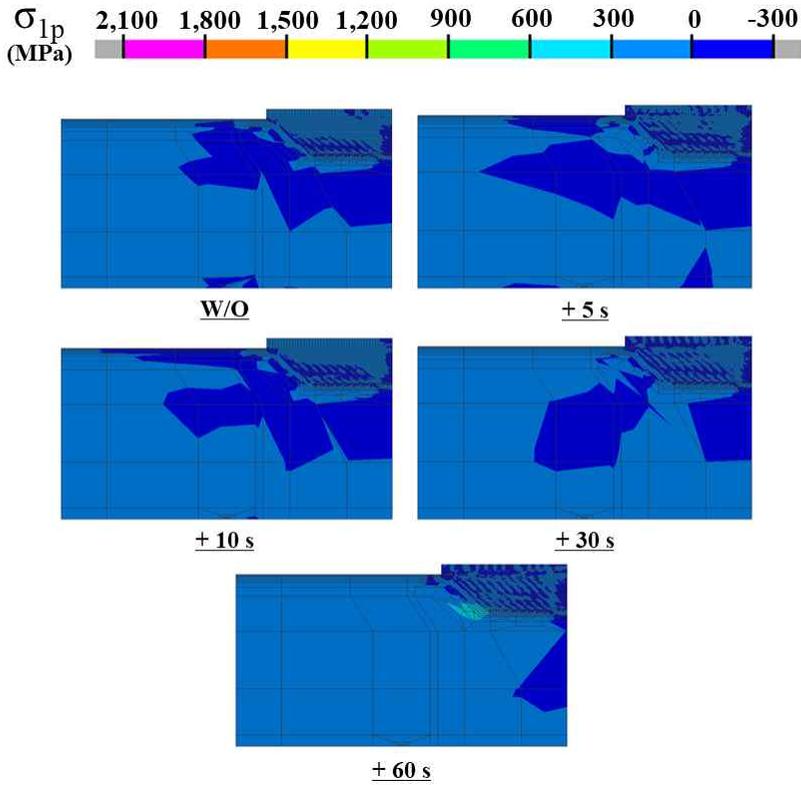
## 2. Interlayer time 에 따른 열-기계 특성 비교 분석

### 가. 주응력 비교 및 분석

Fig. 75 는 Interlayer time 에 따른 예측된 잔류 응력 분포이다. 추가된 Interlayer time 과 관계없이 적층 공정중의 잔류 응력이 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점의 잔류 응력 보다 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 적층 공정중 발생하는 잔류 응력 분포는 Interlayer time 이 증가함에 따라 잔류 응력 크기가 증가하는 것을 알 수 있었다. 기저부 평면 영역중 기저부와 적층부가 접촉하는 경계부의 기저부 방향으로 잔류 응력이 집중 되는 최대 잔류 응력 분포가 형성됨을 알 수 있었다.



(a) Maximum residual stress distribution during deposition



**(b) Maximum residual stress distribution for after elastic recovery and after cooling**

**Fig. 75 1<sup>st</sup> principal stress distributions for different interlayer times**

Fig. 76 은 잔류 응력이 상대적으로 크게 발생하는 ESR 인근의 잔류 응력 분포이다. ESR 의 발생 영역은 기저부 와 적층부 접촉면 기저부 방향으로 아래에 형성하는 것을 알 수 있었다. ESR 의 면적은 Interlayer time 의 증가함에 따라 면적이 소폭 증가함과 동시에 1800-2100 MPa 의 응력이 집중되는 영역이 생성됨을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사면과 평면이 교차하는 모서리로부터 기저부의 평면 영역의 기저부 끝단 방향으로 수평 거리에 1.25 mm 에 위치하였으며 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 전부 동일한 위치에서 생성되었다. 따라서 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 Interlayer time 과는 관계가 없다는 것을 알 수 있었다. Table 23 는 적층 공정중 발생하는 최대 잔류 응력 값과 적층 공정이 완료된 후 탄성 회복 및 냉각이 완료된 최종 잔류 응력 값이다.

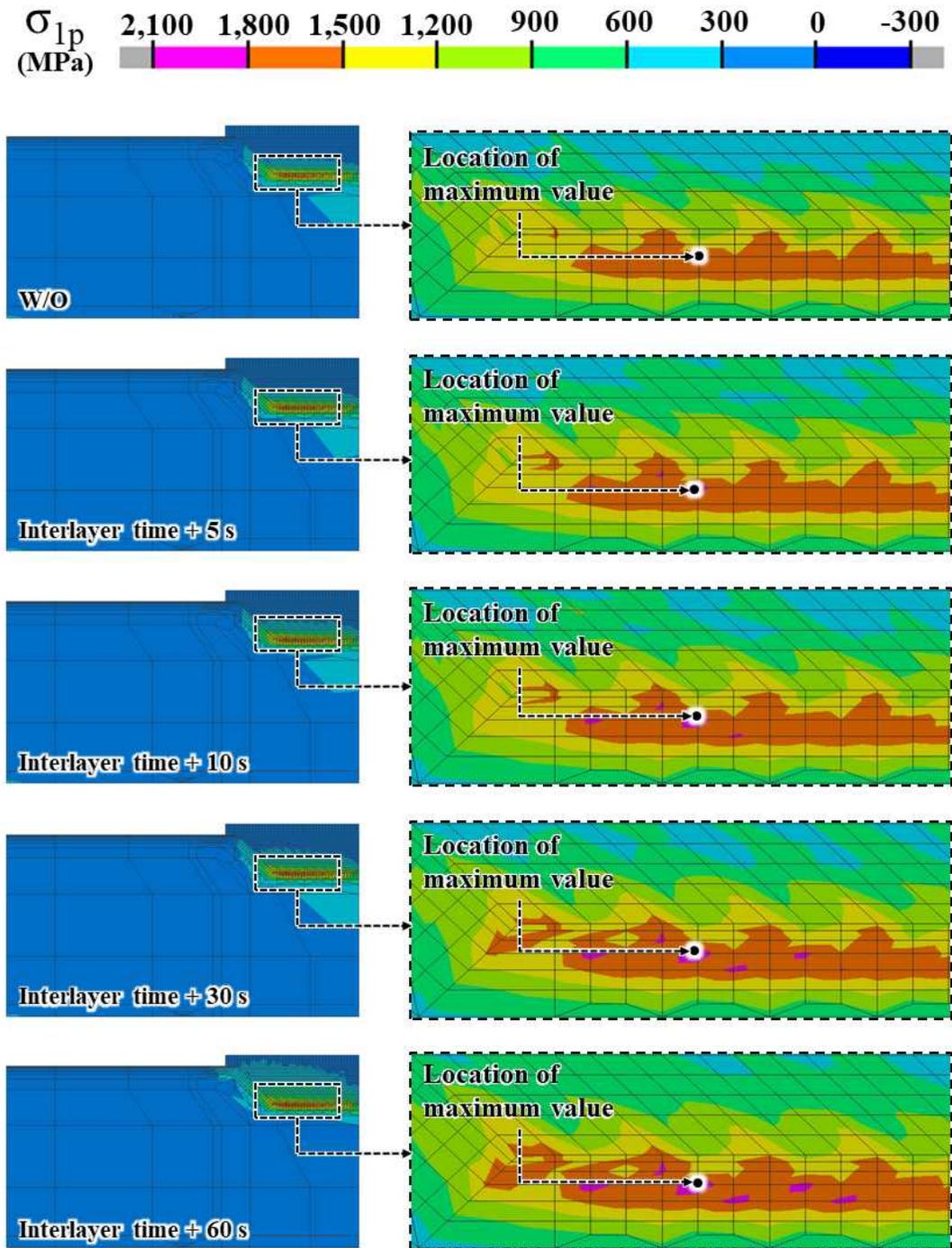


Fig. 76 Excessively stressed regions for interlayer times

Table 23 Residual stress maximum value for during deposition and after elastic recovery and cooling according to interlayer time

| Interlayer time                    | W/O       | +5 s      | +10 s     | +30 s     | +60 s     |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| During deposition                  | 1,862 MPa | 1,913 MPa | 1,923 MPa | 1,967 MPa | 1,976 MPa |
| After elastic recovery and cooling | 436 MPa   | 439 MPa   | 452 MPa   | 455 MPa   | 718 MPa   |

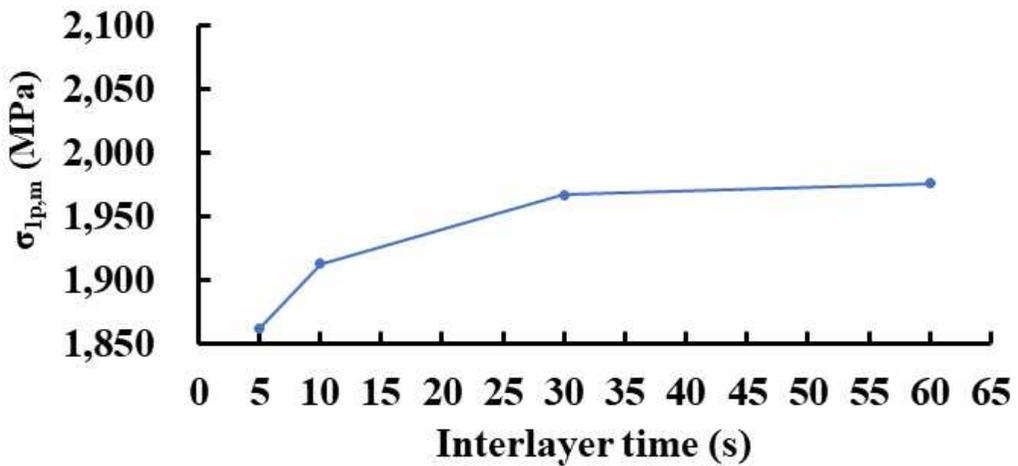
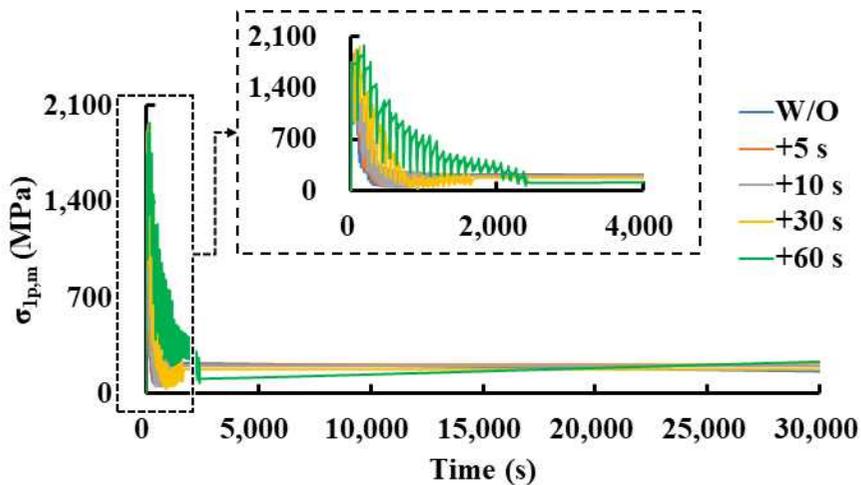


Fig. 77 Influence of the interlayer time on the maximum 1<sup>st</sup> principal stress value

Fig. 77 는 열-기계 연계 해석에서 도출된 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 최대 값 변화이다. Interlayer time 이 5-60 초로 증가할수록 최대값 또한 0.5-3 % 가량 소폭 증가하는 것을 예측할 수 있었다. 하지만 Table 23 의 탄성 회복 및 냉각 후 최종 잔류 응력은 Interlayer time 이 5초에서 30초로 증가할 때 0.7-3 % 가량 최대 주응력 증가량과 비슷하게 주응력이 증가하였지만 30초에서 60초로 증가할 때 약 41 % 만큼 큰 폭으로 최종 주응력이 증가함을 알 수 있었다.

## 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성

Fig. 78 는 열-기계 연계 해석에서 도출된 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 시간에 따른 최대 주응력 발생 이력이다. Interlayer time 이 증가함에 따라 적층 공정 완료 시간이 증가함을 알 수 있었다. 최대 주응력값은 적층 초기에 잔류 응력이 급격하게 증가하면서 최대 잔류 응력이 발생한다. 이에 따라 Interlayer time 이 증가할수록 최대 잔류 응력이 생성되는 적층 초기 급격하게 증가하는 잔류 응력이 증가함을 알 수 있었다. 최종 잔류 응력은 해석 모델의 적층이 완료된 후 고정 조건이 해제되고 냉각이 진행되는 동안 잔류 응력이 조금씩 증가하여 최종 응력값에 도달함을 알 수 있다. Fig. 78 에서 Interlayer time 이 5-60 초로 증가할 때 적층 공정중 적층 초기 급격하게 증가하는 구간을 통과한 후 적층이 완료되기까지 잔류 응력 감소량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 탄성 회복 및 냉각이 진행되며 증가하는 잔류 응력 증가량은 15,000-20,000 초 사이에 잔류 응력값이 역전되며 최종 잔류 응력을 형성하는 데 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 Interlayer time + 60 s 의 경우 큰 폭으로 냉각이 진행되면서 형성하는 잔류 응력 증가폭이 다른 조건에 비해 큰 폭을 형성하고 있음을 알 수 있었다. 위 결과들로 미루어보아 잔류 응력 저감 측면에서 Interlayer time 을 적용하지 않는 적층 기법이 가장 좋은 조건일 것으로 사료 된다.



**Fig. 78 Stress histories at the location of occurrence of maximum 1<sup>st</sup> principal stress according to interlayer times**

### 제 3 절 Interpass time 에 따른 열-기계 특성 분석

#### 1. Interpass time 에 따른 유한 요소 해석 모델 개발 및 데이터 도출

##### 가. Interpass time 선정 및 유한 요소 해석 모델 개발

Fig. 79 는 Interpass time 에 따른 열-기계 특성 분석을 위해 설계된 유한 요소 해석 모델이다. Interpass time 이란 Fig. 76 에 도식된 것과 같이 적층 공정중 첫 번째 비드의 적층이 완료된 후 다음 두 번째 비드가 시작되기까지 걸리는 시간을 나타낸다. 유한 요소 해석 모델은 제 3 장 2 절의 해석 모델과 동일한 모델을 선정하였다.

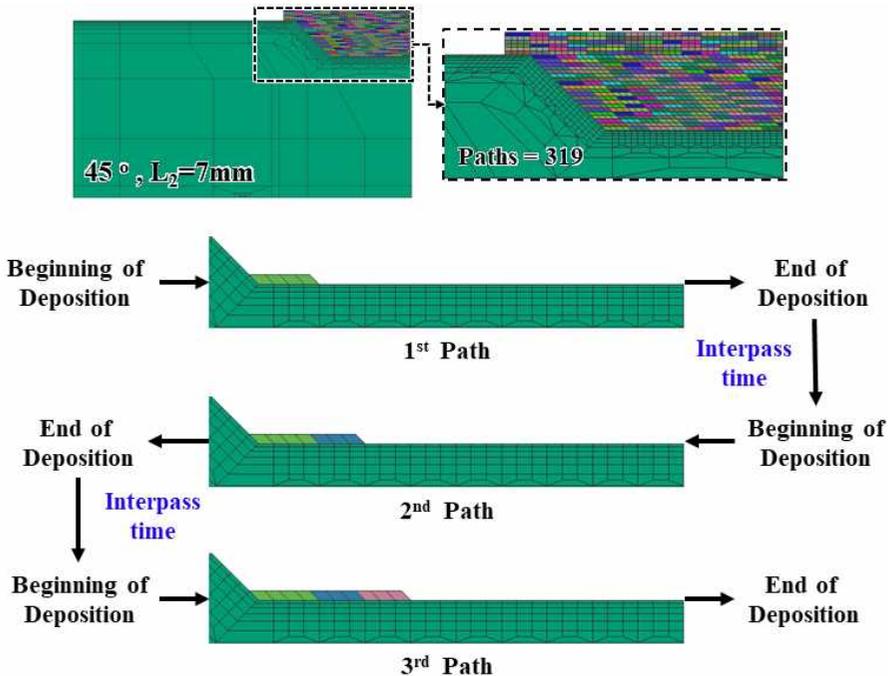
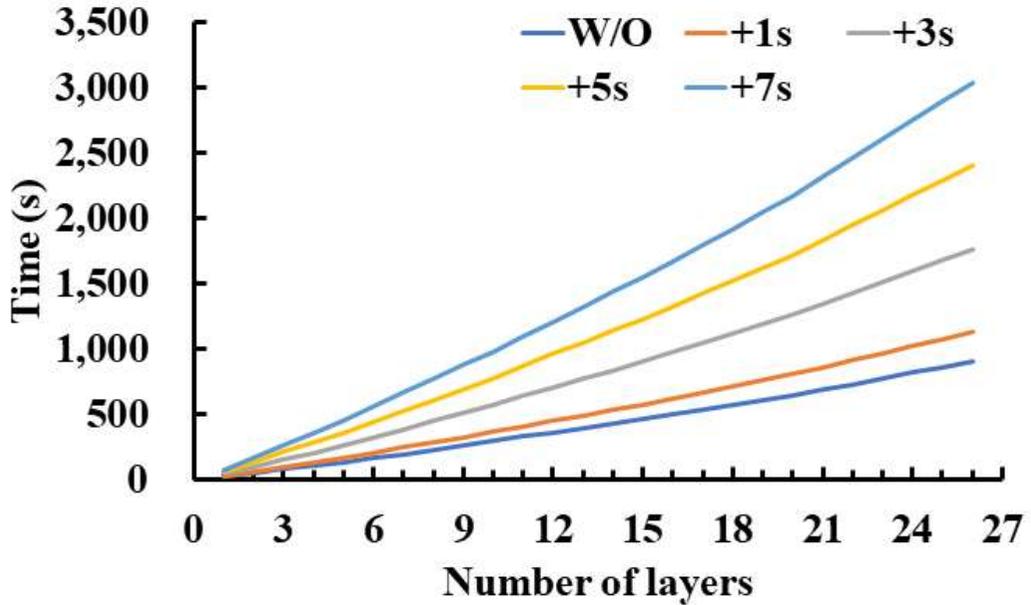


Fig. 79 Schematic of interpass time during deposition for 2D FE analysis ( $\theta = 45^\circ$ ,  $L_2 = 7\text{ mm}$ )



**Fig. 80 Deposited process completion time according to interpass time**

Fig. 80 은 Interpass time 에 따른 적층 공정중 적층이 완료되는 적층 층별 시간 이다. Interpass time 의 추가 시간은 1, 3, 5, 7 초 로 선정하였으며 Fig. 79 와 같이 추가된 시간의 증가량에 따라 적층 층수에 따라 적층이 완료되는 시간이 증가함을 알 수 있다.

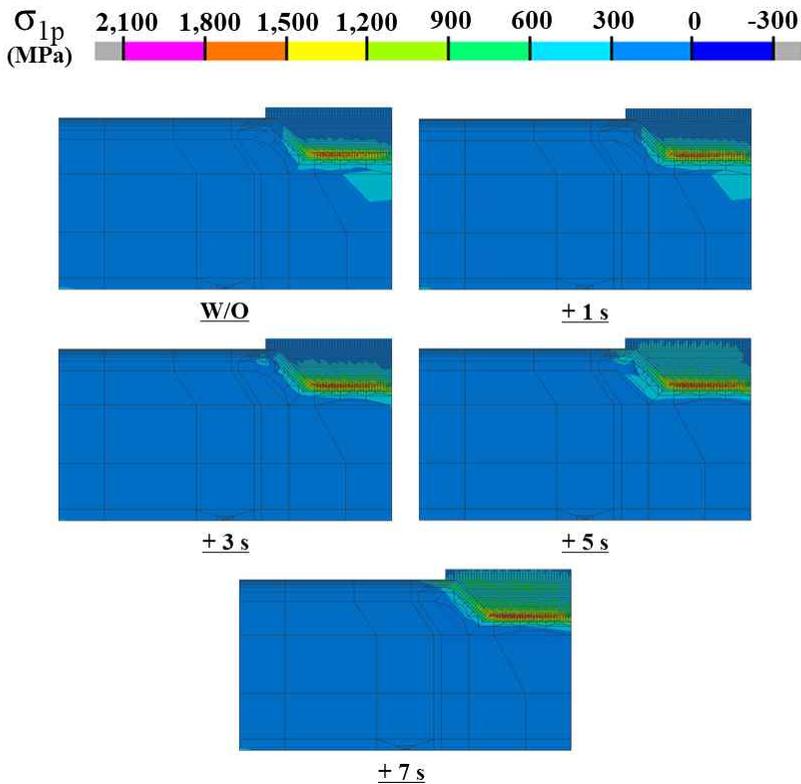
#### 나. 경계 조건 데이터 도출

적층 해석의 경계 조건은 Fig. 44 와 동일하며 해석 모델의 상부에는 적층시 분 사되는 보호 가스인 아르곤 가스에 의한 열 손실이 발생하며, 측면 및 하부에는 자 연 대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한 복사에 의한 열 손실이 함께 고려되어 등가 열손실 계수를 적용하였다. 해석에 적용된 온도 의존 자연대류 계수는 Fig. 45 의  $L_2$  의 길이 7 mm 랑 동일하다.

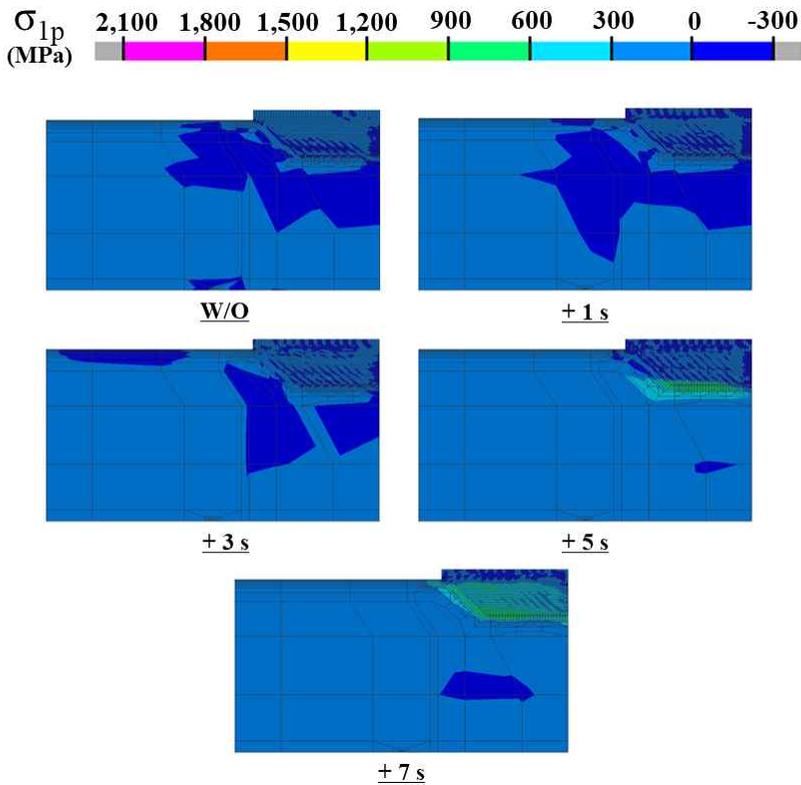
## 2. Interpass time 에 따른 열-기계 특성 비교 분석

### 가. 주응력 비교 및 분석

Fig. 81 는 열-기계 특성 분석을 위해 Interpass time 에 따른 주응력 분포이다. Interpass time 의 증가와는 관계없이 주응력이 기저부 모서리부 인근에 매우 집중되는 것을 알 수 있었다. Interpass time 의 증가함에 따라 적층부와 기저부 접촉면 인근의 집중되는 주응력이 증가함과 동시에 적층부 방향으로 집중되는 주응력 면적이 확대되는 것을 알 수 있었다. 또한 적층 공정중 주응력이 탄성 회복 및 냉각이 완료된 시점의 주응력이 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.



(a) Maximum residual stress distribution during deposition



**(b) Maximum residual stress distribution for after elastic recovery and after cooling**

**Fig. 81 1<sup>st</sup> principal stress distributions for different interpass time**

탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 발생하는 주응력 분포는 Interpass time 이 1-3초로 변경됨에 의해 발생하는 주응력이 집중되는 영역은 큰 차이를 보이지 않고 있다. 3-7 초로 시간이 증가됨에 따라 주응력이 집중되는 영역이 두드러지게 적층부 영역으로 확대되고 있음을 알 수 있다. 이 결과들로부터 Interpass time 이 증가됨에 따라 적층 공정중 발생하는 주응력 및 최종 주응력이 증가됨을 알 수 있었다. Fig. 82 은 적층 공정중 잔류 응력이 상대적으로 크게 발생하는 ESR 인근의 잔류 응력 분포이다. ESR 의 발생 영역은 기저부와 적층부 접촉면 기저부 방향으로 아래에 형성하는 것을 알 수 있었다. ESR 의 면적은 Interpass time 의 증가함에 따라 면적이 소폭 증가함과 동시에 1800-2100 MPa 의 응력이 집중되는 영역이 생성됨을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사면과 평면이 교차하는 모서리부 기저부의 평면 영역의 기저부 끝단 방향으로 수평 거리에 1.25 mm

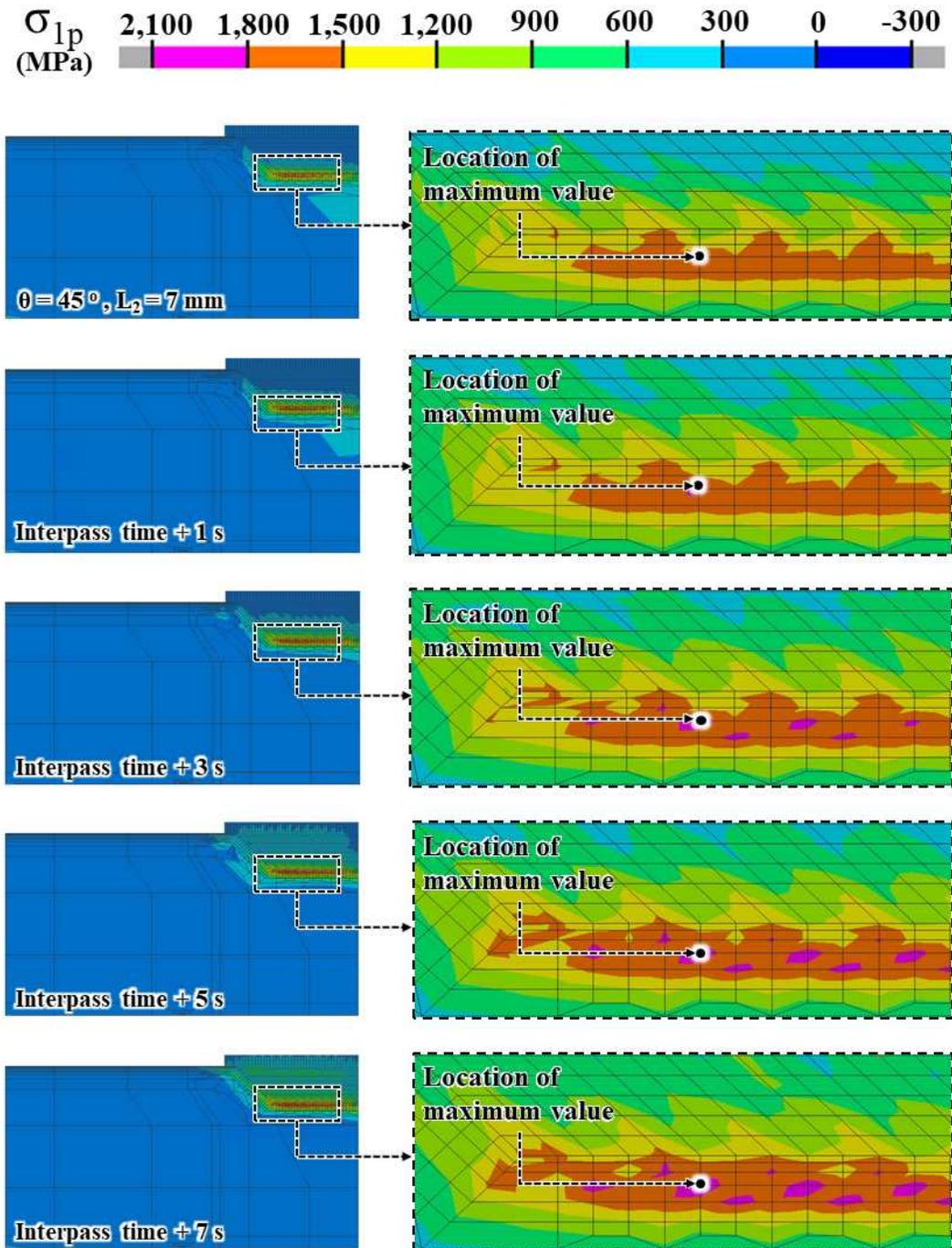
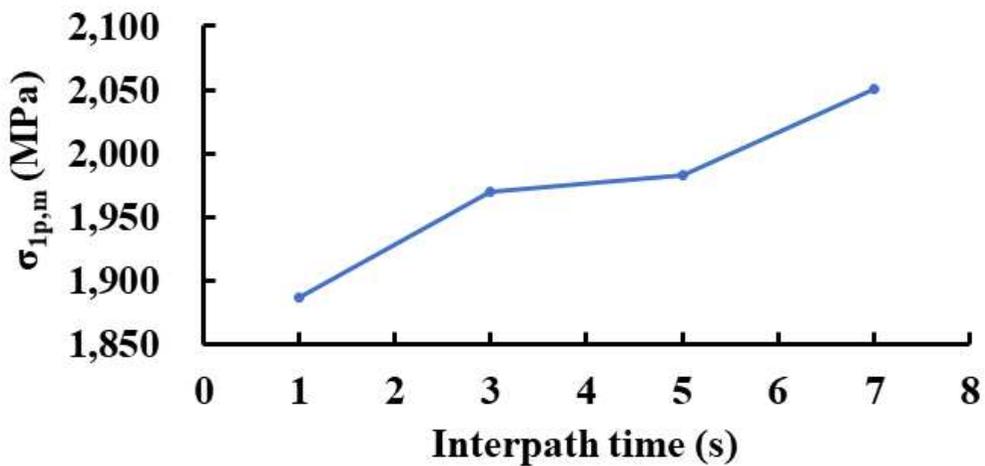


Fig. 82 Excessively stressed regions for different interpass time

에 위치하였으며 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 전부 동일한 위치에서 생성되었다. 따라서 Interpass time 은 최대 잔류 응력의 위치에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. Table 24 는 적층 공정중 발생하는 최대 잔류 응력 값과 적층 공정이 완료된 후 탄성 회복 및 냉각이 완료된 최종 잔류 응력 값이다. 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사면과 평면이 교차하는 모서리로부터 기저부의 평면 영역의 기저부 끝단 방향으로 수평 거리에 1.25 mm 에 위치하였으며, 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 전부 동일한 위치에서 생성되었다. 따라서 Interpass time 은 최대 잔류 응력의 위치에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. Table 24 는 적층 공정중 발생하는 최대 잔류 응력 값과 적층 공정이 완료된 후 탄성 회복 및 냉각이 완료된 최종 잔류 응력 값이다.

**Table 24 Residual stress maximum value for during deposition and after elastic recovery and cooling (interpass time)**

| Interpass time                     | W/O       | +1 s      | +3 s      | +5 s      | +7 s      |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| During deposition                  | 1,862 MPa | 1,913 MPa | 1,923 MPa | 1,967 MPa | 1,976 MPa |
| After elastic recovery and cooling | 436 MPa   | 440 MPa   | 555 MPa   | 981 MPa   | 1,035 MPa |



**Fig. 83 Influence of the interpass time on the maximum 1<sup>st</sup> principal stress**

Fig. 83 는 열-기계 연계 해석에서 도출된 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 최대 값 변화이다. Interpass time 이 1초에서 3초로 변경됨에 따라 4 % 증가하였으며 3 초에서 5초로 변경시 0.6 %, 5초에서 7초로 변경시 3 % 만큼 증가함을 알 수 있다. Interlayer time 의 해석 결과와 비교 결과 Interpass time 에 따른 최대 주응력 값 은 Interlayer time 과 비교하여 1-6 % 만큼 높은 값을 형성함을 알 수 있었다. 또한 최종 잔류 응력의 경우 Interpass time 의 해석결과가 Interlayer time 과 비교하여 0.2-32 % 만큼 높은 주응력 값을 가지고 있음을 알 수 있었다.

## 나. 최대 잔류 응력 발생 이력 특성

Fig. 84 는 열-기계 연계 해석에서 도출된 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 시간에 따른 최대 주응력 발생 이력이다. Interpass time 이 증가함에 따라 적층 공정 완료 시간이 증가함을 알 수 있었다. 최대 주응력값은 적층 초기에 주응력이 급격하게 증가하면서 최대 주응력이 발생한다. 따라서 Interpass time 이 증가할수록 최대 잔류 응력이 생성되는 적층 초기 급격하게 증가하는 잔류 응력이 증가함을 알 수 있었다. 최종 잔류 응력은 해석 모델의 적층이 완료된 후 고정 조건이 해체되고 냉각이 진행되는 동안 잔류 응력이 조금씩 증가하여 최종 응력값에 도달함을 알 수 있다. Fig. 84 에서 Interpass time 이 5, 7 초 의 경우 적층 초기 급격하게 주응력이 증가하는 구간과 탄성 회복 및 냉각후 발생하는 최종 잔류 응력값이 다른 조건과 비교 하여 70-75 % 만큼 높게 최종 잔류 응력값이 형성됨을 알 수 있었다. Fig. 78 의 Interlayer time 의 최대 주응력 이력 그래프와 비교해 보면 Interpass time 의 주응력 이력값이 Interlayer time 과 비교하여 현저히 높은 값을 형성함을 알 수 있다. 이 결과들을 종합하여 잔류 응력 저감 측면에서 Interpass time 의 조건은 추가 시간을 적용하지 않은 기존의 Interpass time 을 적용하는 적층 기법이 가장 좋을 것으로 사료된다,

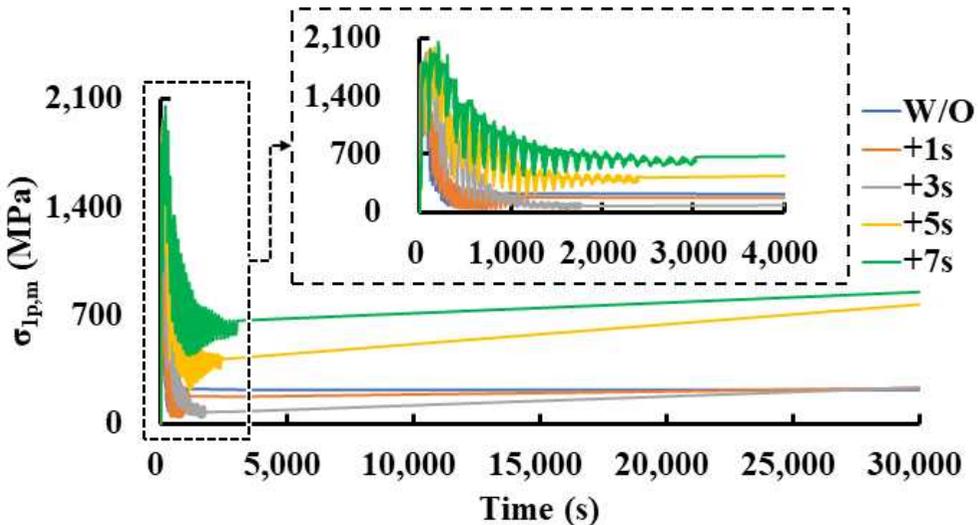


Fig. 84 Stress histories at the location of occurrence of maximum 1<sup>st</sup> principal stress according to interpass time

## 제 4 장 기공 발생 위치에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 분석

### 제 1 절 기공 발생 위치에 따른 열-기계 특성 분석

#### 1. 기공 발생 위치에 따른 유한 요소 해석 모델 설계

##### 가. 기공 발생 위치 선정 및 유한 요소 해석 모델 개발

기공 발생 위치에 따른 열-기계 연계 해석을 진행 하기 위해서 해석 시간 및 적층 면적을 고려하여 제2장 제 3 절의 기저부 경사각  $45^\circ$  의  $L_2$  의 길이 7 mm 의 유한 요소 해석모델을 기공 발생 위치에 따른 유한 요소 해석 모델 개발을 위한 기본 해석 모델로 선정되었다. 기공 발생 위치는 Fig. 85 및 Fig. 86 와 같으며 최초 기공 발생 위치는 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차가 되는 기저부 모서리부를 선정 하였다. 기공 의 크기는 유한 요소 격자 1 개로 선정하였다. 기공의 크기는  $0.25\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$  이며 기공의 위치는 경사면과 평면부가 교차되는 모서리 부로부터 기저부 평면 수평 방향과 기저부 경사면 방향 총 2 가지의 방향을 선정하였다. 기저부 평면 수평 방향의 경우 기저부 경사각  $45^\circ$  의  $L_2$  의 길이 7 mm 의 해석모델의 공정중 최대 주응력이 발생하는 위치를 고려하여 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm, 1.25 mm 의 위치를 선정하였다. 기저부 경사면 방향의 경우 0.3 mm, 0.45 mm, 0.6 mm, 0.75 mm 의 위치를 선정하였다. 총 유한 요소 해석 모델은 9 가지가 개발 되었으며 해석에 적용된 기저부 및 적층재료 소재는 AISI 1045 이며 재료의 화학 조성은 Table 7 과 동일하다. 해석에 사용된 온도의존 열-기계 물성 데이터는 Fig. 9 와 같다.

## 나. 경계 조건 데이터 도출

적층 해석의 경계 조건은 Fig. 44 와 동일하며 해석 모델의 상부에는 적층시 분사되는 보호 가스인 아르곤 가스에 의한 열 손실이 발생하며, 복사 에 의한 열 손실이 함께 고려되어 등가 열손실 계수를 적용하였다. 측면 및 하부에는 자연 대류에 의한 열 손실이 발생한다. 또한 해석에 적용된 온도 의존 자연대류 계수는 Fig. 45 의  $L_2$  의 길이 7 mm 랑 동일하다.

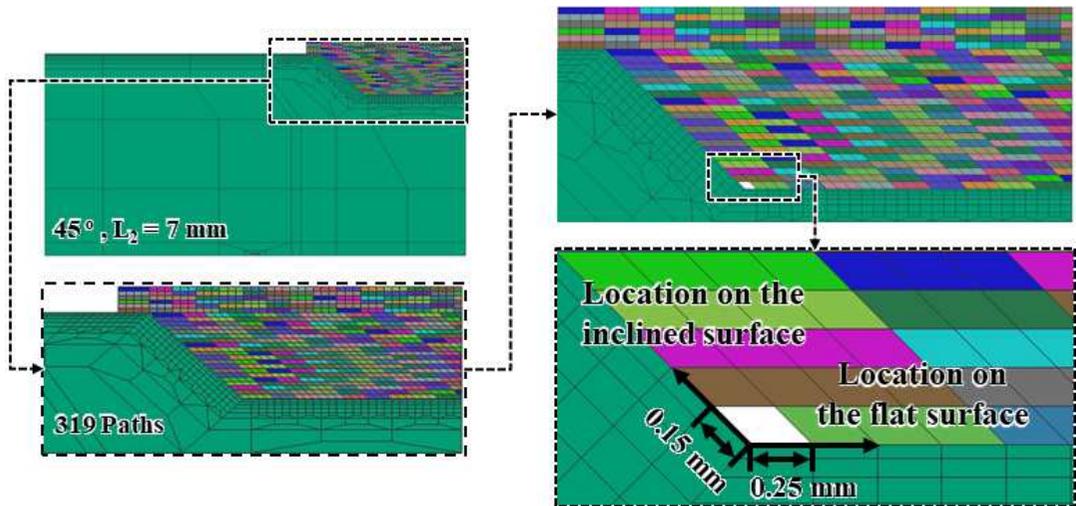
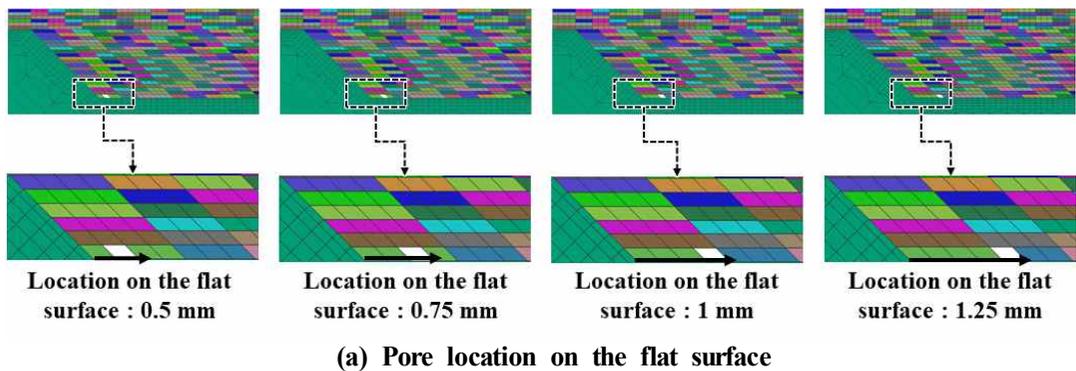
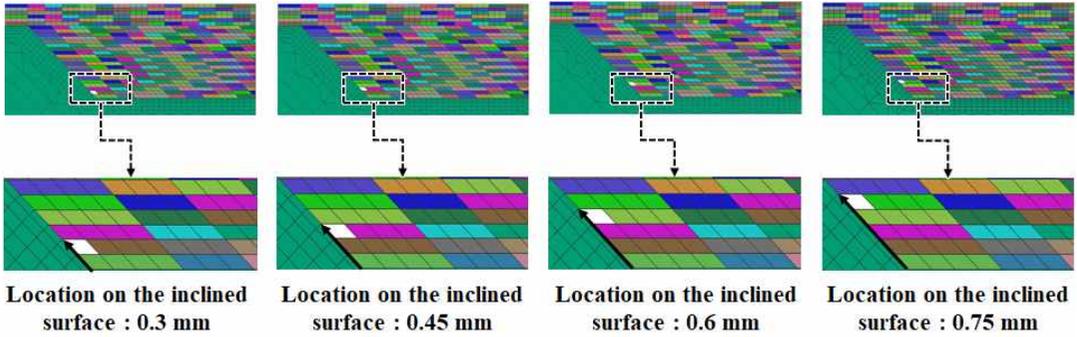


Fig. 85 2D FE models structure according to location of pore ( $\theta = 45^\circ$ ,  $L_2 = 7$  mm)





(b) Pore location on the inclined surface

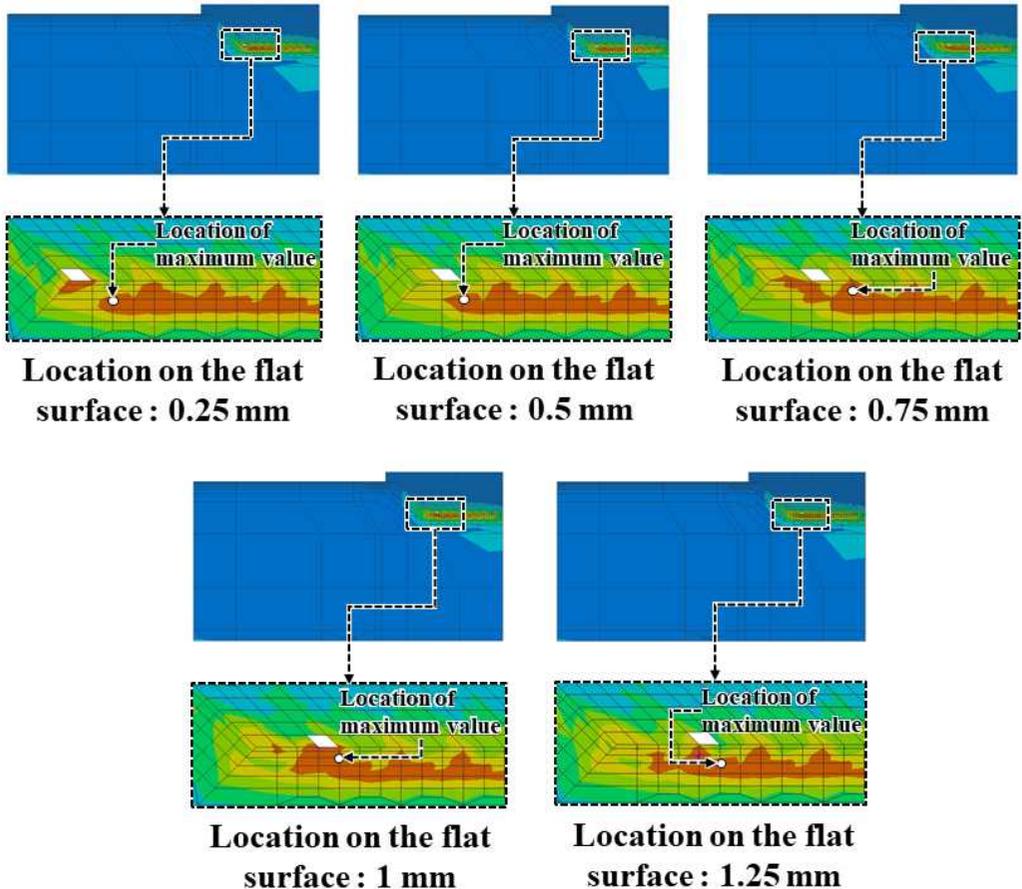
Fig. 86 2D Location of pore position in 2D FE models

## 2. 기공 발생 위치에 따른 열-기계 특성 분석

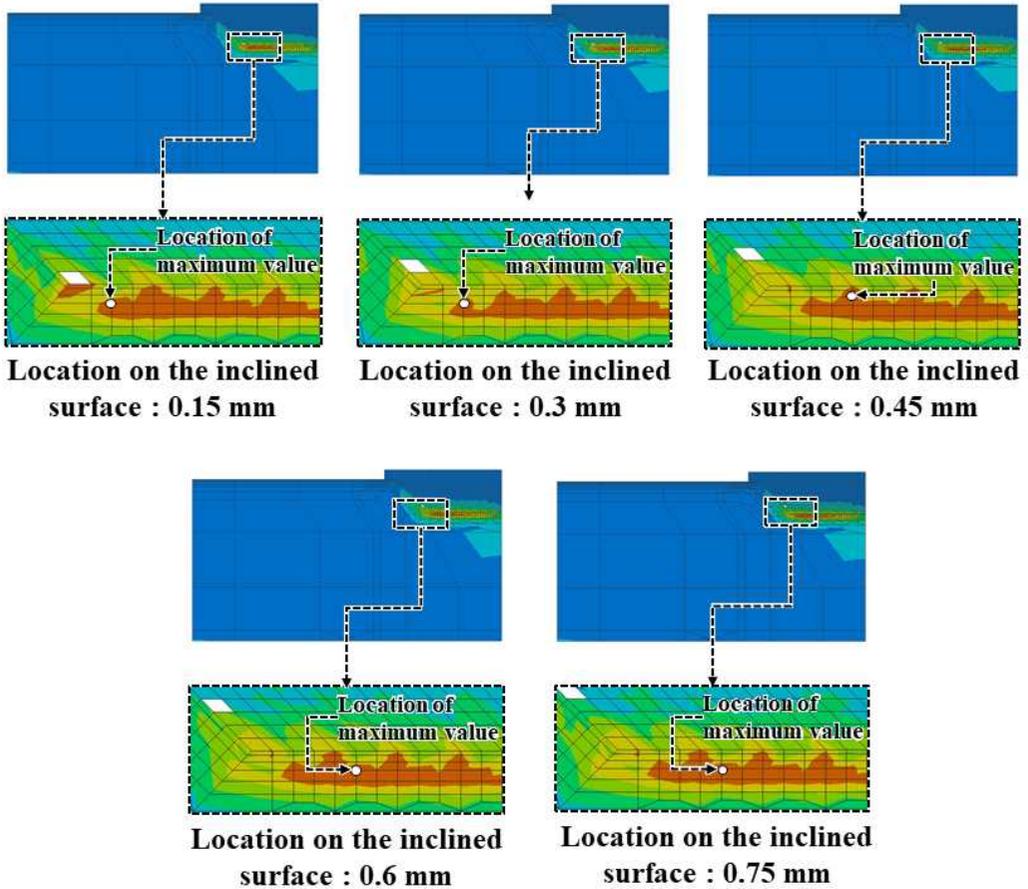
### 가. 공정중 최대 주응력 비교 및 분석

Fig. 87 은 열-기계 연계 해석을 통하여 도출된 공정중 최대 잔류응력 분포 변화를 예측하였다. 기공 위치와는 관계없이 생성되는 응력이 집중되는 영역은 기저부와 적층부 접촉면의 기저부 아래 모서리부 인근에 매우 집중되는 것을 알 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 평면부의 수평 방향으로 이동하는 경우 응력이 과도하게 집중되는 영역이 기공 위치에 따라 변화하는 것은 알 수 있으나 기공 위치에 응력이 과도하게 집중되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이전의 해석 결과와 같이 최대 주응력 생성 위치 또한 적층부와 기저부 접촉면 기저부 방향 수직 방향에 생성됨을 알 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 경사면 방향으로 이동하는 경우 응력이 과도하게 집중되는 영역이 위치에 따라 변화하는 것은 알 수 있으나 최대 잔 크게 영향을 미치지 않는다고 사료된다. 또한 최대 주응력 생성 위치가 기공 위치에 생성되지 않았으며 적층부와 기저부 접촉면 기저부 방향 수직 방향에 생성됨을 알 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 평면부 수평방향 0.25 mm, 기저부 경사면방향 0.15 mm 인 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차지점에 위치하는 경우 과도 응력 집중 영역이 기공의 위치에 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 기저부 평

면 방향 기공위치 0.75 mm, 1 mm 및 1.25 mm 인 경우 과도 응력 집중 영역이 적층부와 기저부 접촉면 기저부 방향 수직 방향에 위치 하기도 하지만 기공위치에 과도 응력 집중 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 기공위치가 기저부 경사면 방향으로 위치하는 경우 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차지점을 제외한 다른 조건들은 과도 응력 집중 영역이 기공이 생성되는 부근에 생성되지 않음을 확인할 수 있었다.



(a) Pore location on the flat surface

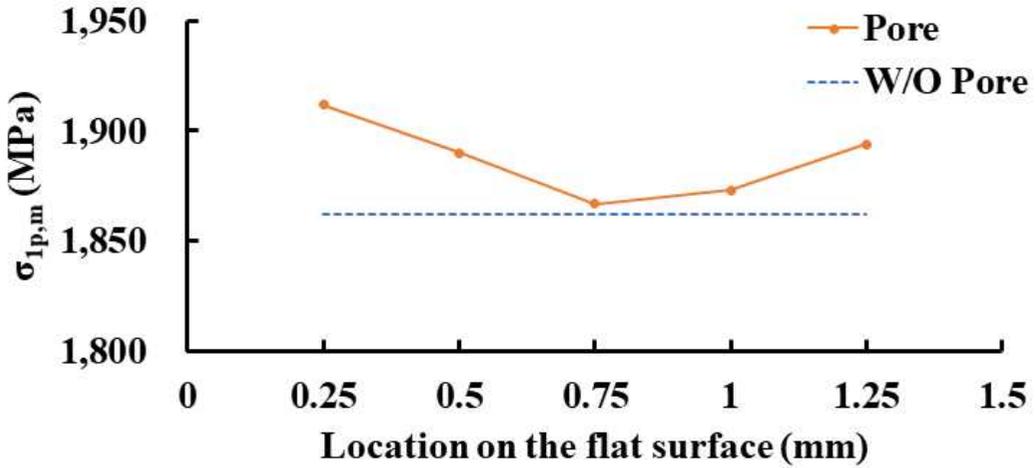


(b) Pore location on the inclined surface

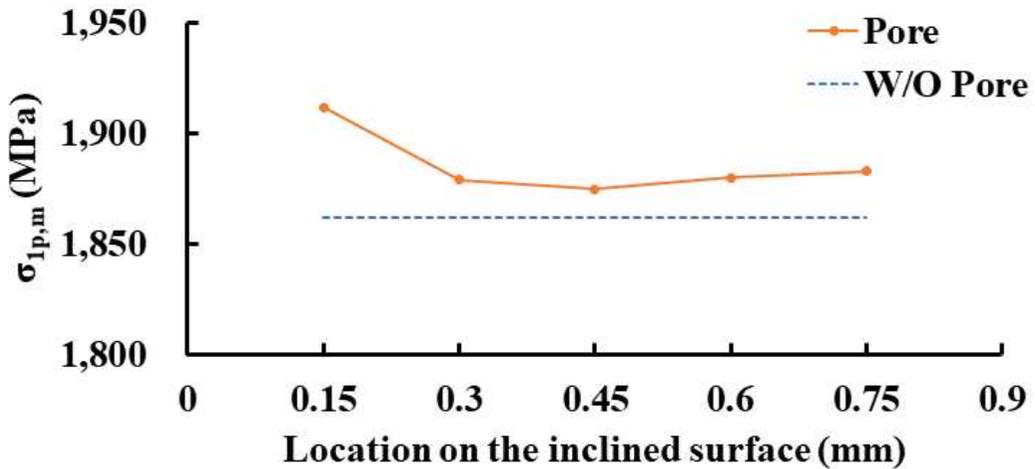
Fig. 87 Excessively stressed regions for location of pore positions

Fig. 88 은 열-기계 연계 해석으로 예측된 기공 위치에 따른 최대 주응력값 변화이다. 기저부 평면부 수평방향으로 이동하는 경우 기공의 위치가 0.25 mm 에서 0.75 mm 로 이동함에 따라 최대 주응력 값이 감소하며 기공의 위치가 0.75 mm 에서 1.25 mm 로 이동함에 따라 감소된 주응력 값이 다시 회복하는 것을 알 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 경사면 방향으로 이동하는 경우 0.15 mm 에서 0.3 mm 로 이동시 최대 주응력 값이 2 % 만큼 감소하였지만 0.3 mm 에서 0.45 mm 이동

하는 경우 0.2 % 만큼 소폭 감소함을 알 수 있었다. 또한 위치가 0.45 mm에서 0.75 mm 로 이동하는 경우 최대 주응력 값이 증가하지만 0.15-0.2 % 만큼 소폭 증가함을 알 수 있었다. 적층부에 형성하는 기공의 위치와 관계없이 기공이 없는 형상 보다 최대 주응력 값이 높게 형성하는 것을 알 수 있었다.



(a) Pore location on the flat surface

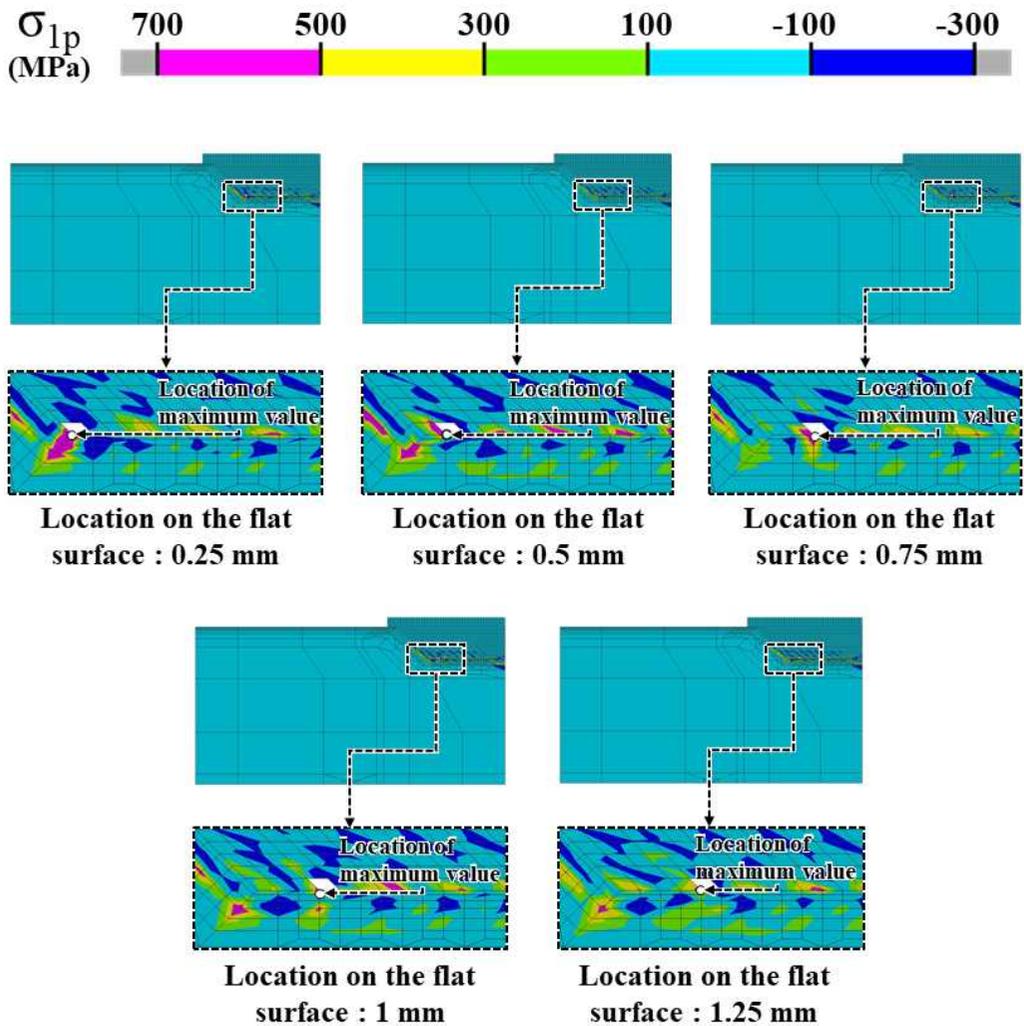


(b) Pore location on the inclined surface

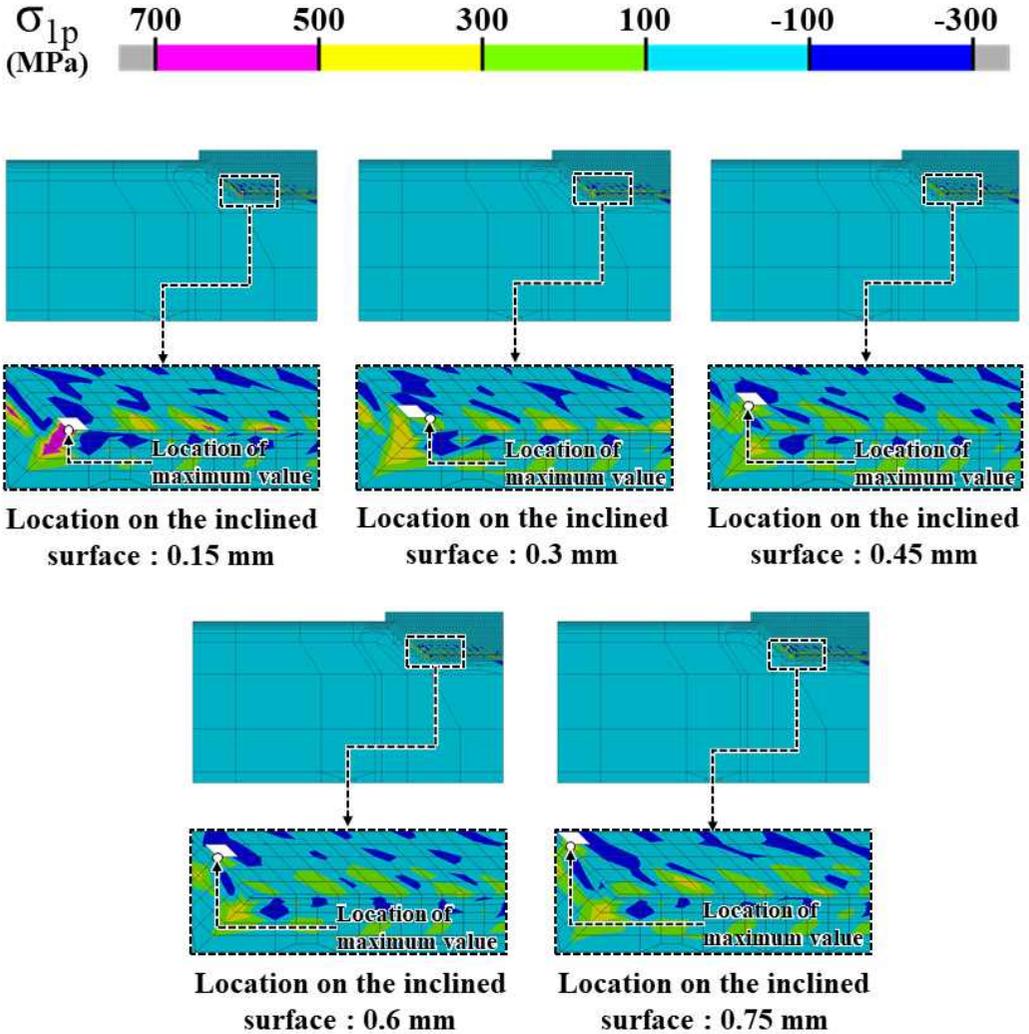
Fig. 88 Influence of location of pore on the maximum 1<sup>st</sup> principal stress

나. 탄성 회복 및 냉각후 최종 주응력 비교 및 분석

Fig. 89 은 열-기계 연계 해석을 통하여 도출된 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 최종 잔류 응력 분포 변화를 예측하였다. 기공의 위치가 기저부 평면부 수평방향 0.25 mm, 기저부 경사면방향 0.15 mm 인 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차지점에서 형성된 기공의 위치가 주응력이 과도하게 집중되어 있는 것을 알 수 있었다. 기저부 평면부의 수평방향으로 기공 위치가 이동됨에 따라 기공 위치 인근에



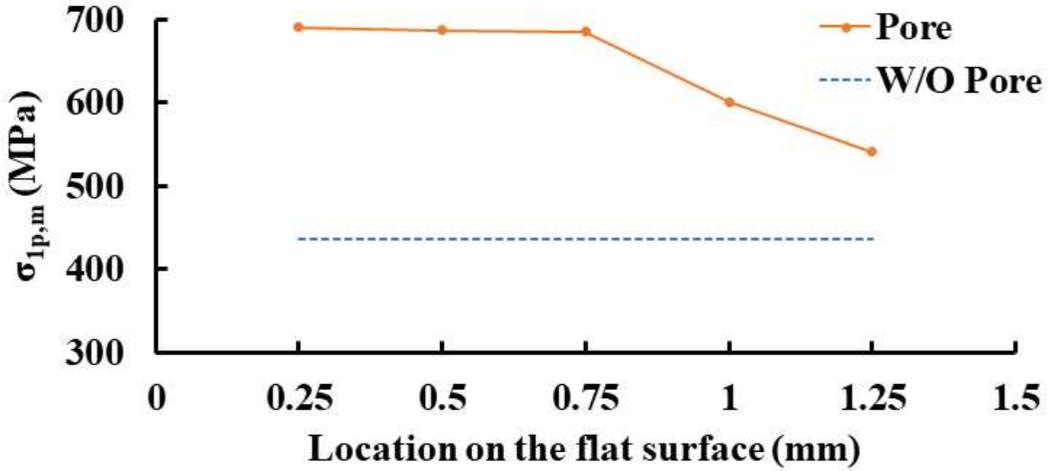
(a) Pore location on the flat surface



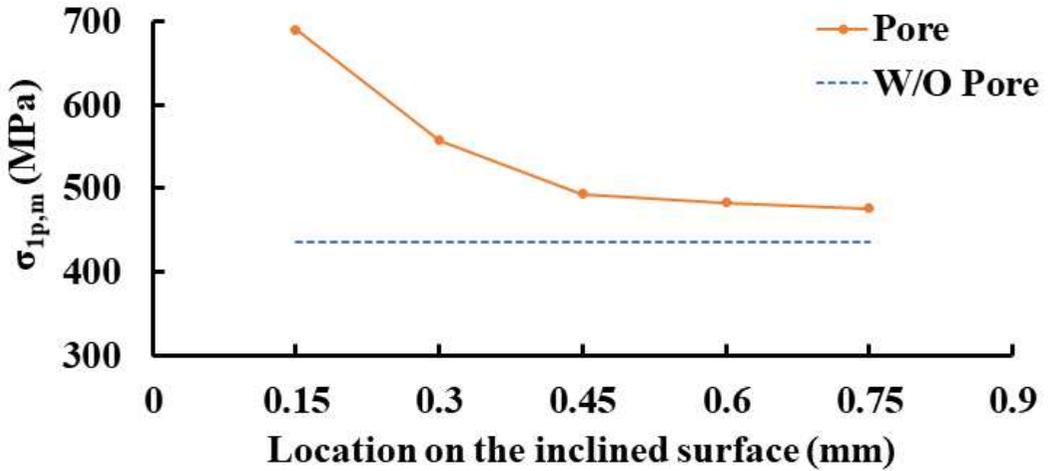
(b) Pore location on the inclined surface

Fig. 89 Excessively stressed regions for after elastic recovery and after cooling for location of pore

생성되는 주응력이 감소함을 알 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 경사면 방향으로 이동됨에 기공 위치 인근에 생성되는 주응력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 평면부 수평방향으로 이동하는 경우가 기공의 위치가 기저부 경사면 방향으로 이동하는 경우보다 높은 주응력을 형성함을 알 수 있었다.



(a) Location on the flat surface



(b) Location on the inclined surface

Fig. 90 Influence of location of pore on the maximum residual 1<sup>st</sup> principal stress

Fig. 90 은 열-기계 연계 해석을 통하여 도출된 기공 위치에 따른 탄성 회복 및 냉각이 완료된 후 최종 주응력 값을 비교한 것이다. 최대 주응력 값은 기공 위치와 관계없이 기저부 평면부 수평방향 0.25 mm, 기저부 경사면방향 0.15 mm 인 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차지점에서 형성된 기공에서 측정된 최종 주응력 값

이 가장 높은 최종 주응력 값을 형성함을 예측할 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 평면부 수평방향으로 이동하는 경우 0.25 mm 에서 0.5 mm 로 위치가 변경됨에 따라 0.5 % 만큼 소폭 감소하였으며, 0.5 mm 의 위치에서 0.75 mm 로 위치가 변경됨에 따라 0.3 % 만큼 소폭 감소하였다. 0.75 mm 의 위치에서 1.25 mm 의 위치로 이동함에 따라 11-14 % 만큼 최종 주응력이 감소함을 알 수 있었다. 기저부 경사면 방향으로 이동하는 경우 0.15 mm에서 0.3 mm 23 % 만큼 주응력이 감소하였으며 0.3 mm 에서 0.45 mm 로 이동할 때 13 % 만큼 감소하였고 0.45 mm 에서 0.75 mm 의 위치로 이동함에 따라 1.5-2 % 만큼 주응력이 낮아짐을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 적층 공정중 기공 위치에 따른 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력은 기공의 위치가 기저부 평면부 수평방향 0.25 mm, 기저부 경사면방향 0.15 mm 인 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차지점에서 형성된 기공이 최대 주응력 및 최종 주응력 값을 가장높게 형성함을 알 수 있었다. 모든 조건에서 기공의 위치가 기저부 경사면과 기저부 평면부의 교차지점에서 멀어짐에 따라 최대 주응력 및 최종 주응력이 완화되는 것을 확인할 수 있었다. 경사면방향으로 기공위치가 생성되었을 때 기공위치가 수평방향에 위치한 경우보다 낮은 잔류 응력을 가짐을 알 수 있었다. 이는 적층 공정중 가장 응력이 집중되는 영역은 적층부 및 기저부 접촉면 수직 방향에 발생하는데 기공의 위치가 적층부 및 기저부의 접촉면에 가까운 만큼 응력이 집중되는 영역에 영향을 미치기 때문에 기공의 위치가 기저부 평면의 수평방향으로 위치한 경우가 잔류 응력이 높게 예측됐을거라 사료된다. 또한 기공이 발생한 해석모델이 기공이 발생하지 않은 해석모델과 비교 하였을 때 주응력 값이 높게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 기저부 경사면 방향으로 기공이 생성되었을 경우 기저부 평면부의 수평방향으로 기공이 생성된 경우보다 낮은 주응력을 가짐을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기공이 기저부 경사면 의 적층부 방향으로 생성되었을 때 적층 중 최대 응력 및 잔류 응력 측면에서 가장 좋은 조건이라 사료 된다.

## 제 5 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 DED 공정을 이용한 AISI 1045 기저부위 AISI 1045 분말 대체적 적층시 적층부와 기저부 형상이 적층부 인근 열-기계 특성에 미치는 영향을 분석 및 고찰하였다. 적층부 인근의 열-기계 특성을 분석하기 위해 적층부 형상 및 기저부 형상에 따른 유한 요소 해석모델을 개발하였고, 적층 기법에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성을 분석하기 위해 열-기계 연계 해석을 통하여 분석하고자 할 적층 기법을 선정 및 유한 요소 해석모델을 개발하였으며, 기공의 위치에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 분석을 위해 기공의 위치 선정 및 유한 요소 해석 모델을 개발하였다. 해석에 적용된 모든 기저부 및 적층재료는 AISI 1045 이다. 열-기계 연계 해석을 통한 잔류 응력 특성 비교 및 분석 시 잔류 응력의 척도는 주응력을 선정하였다.

적층부 형상 및 기저부 형상에 따른 유한 요소 해석 결과 기저부 경사각  $30^\circ$  및  $45^\circ$  중 경사각이 낮은  $30^\circ$  의 경우가 잔류 응력 저감 측면에서 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 기저부 경사각 이 낮은  $30^\circ$  의 경우  $45^\circ$  의 기저부 형상과 비교 하였을 때 적층량이 소폭 증가하며 열 이력이 많아져 응력이 완화됐을 것으로 사료된다. 또한 경사각이 완만함에 따라 기저부 경사면과 기저부 평면의 교차지점 부근에 응력 집중현상이 감소됐을 것으로 사료된다. 적층 면적이 동일하며 적층 영역이 기저부 경사면의 얇게 적층되는 경우와 기저부 경사면과 평면에 균일하게 적층되는 경우 기저부 평면에 얇게 적층되는 경우 3 가지의 적층부 형상에 대한 유한 요소 해석 결과 잔류 응력 및 변형을 고려하여 가장 좋은 조건의 적층부 형상은 기저부 평면에 얇게 적층하는 방법이 가장 좋은 조건임을 예측할 수 있었다. 이는 기저부의 평면에 적층되는 재료의 양이 증가함에 따라 적층부 인근 잔류 응력 발생량 감소율에 영향을 미치기 때문이라 사료된다. 적층부 형상이 동일하며 기저부 길이가 달라지는 기저부 끝단 길이 ( $L_1$ ) 의 열-기계 연계 해석의 결과 기저부 끝단 길이는  $0\text{ mm}$  로 기저부 형상은 적층부 끝단에 맞추어 제작하는 것이 잔류 응력 저감 측면에서 우수한 기저부 형상인 것을 확인할 수 있었다. 이는 기저부 길이가 증가됨에 따라 적층부 인근에 발생하는 적층 완료 시점까지의 잔류 응력 감소율이 길이가 길어질수록 낮아지며 최대 및 최종 잔류 응력에 영향을 미치기 때

문이라 사료된다. 기저부 모서리부와 기저부 끝단길이 ( $L_2$ ) 에 따라서는 적층부 형상은 대체적 적층 기법을 적용하였다. 열-기계 연계 해석결과  $L_2$  의 길이가 증가할수록 적층 공정중 발생하는 최대 잔류 응력값은 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 과도 응력 집중 영역 (ESR) 의 면적 또한 길이가 늘어남에 따라 감소함을 확인 할 수 있었다.  $L_2$  의 길이가 증가됨에 따라 적층향의 증가로 인하여 기저부에 쌓이는 열 이력으로 인하여 기저부가 템퍼링 (Tempering) 되어 응력이 완화됐을 것으로 사료된다.  $L_2$  의 길이가 증가함에 따라 최종 잔류 응력은 소폭 증가하였다. 따라서 잔류 응력 저감 측면에서의 최적의 적층부 및 기저부 형상은 기저부 경사각  $30^\circ$  인 경우의  $L_2$  의 길이가 5 mm 이상인 적층부 및 기저부 형상이 최대 잔류 응력 및 최종 잔류 응력을 고려하였을 때 가장 적합한 형상으로 사료된다. 축 대칭 형상 (R) 값에 따라서는 최대 잔류 응력 생성 위치는 기저부와 적층부의 접촉면에 생성되었다. 가장 높은 잔류 응력을 형성하는 R 값은 5 mm 형상으로 예측 되었으며 R 값이 5 mm 이상으로 증가함에 따라 잔류 응력값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 축 대칭 형상의 기저부에 적층시 R 값이 10 mm 인 적층부 및 기저부 형상이 가장 좋을 것으로 사료된다.

적층 기법에 따른 유한 요소 해석 결과 적층 경로에 따라서는 교차 방향 적층의 경우가 한 방향 적층 경로인 경우와 비교 하여 3 차원 유한 요소 해석과 2 차원 유한 요소 해석 결과 모두 교차 방향 적층이 낮은 잔류 응력을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 2 차원 유한 요소 해석의 잔류 응력 결과값이 3 차원 유한 요소 해석의 잔류 응력 결과 보다 높게 도출되었다. 이는 3 차원 유한 요소 해석은 적층 길이 방향으로 변형이 가능하지만 2 차원 유한 요소 해석의 경우 적층 길이 방향으로 변형이 불가능하다 따라서 변형의 대한 저항이 큰 2 차원 유한 요소 해석의 잔류 응력이 3 차원 유한 요소 해석보다 높은 잔류 응력을 형성하는 것으로 사료된다. 따라서 안전성 측면에서 보수적 설계가 가능하여 특징을 가진다. 또한 3 차원 유한 요소 해석이 2 차원 유한 요소 해석과 비교 하여 높은 해석시간 및 해석 데이터의 용량을 소요한다. 따라서 2 차원 유한 요소 해석이 열-기계 특성 분석시 더 용이하다는 것을 확인할 수 있었다. Interlayer time 및 Interpass time 에 따라서는 두 가지의 경우 모두 시간이 증가함에 따라 최대 잔류 응력 및 최종 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 증가율 보다 높게 형성됨을 확인할 수 있었다. 따라서 잔류 응력이 최소화 되

는 적정 Interlayer time 및 Interpass time 은 추가시간이 적용되지 않은 Interlayer time 과 Interpass time 이 가장 적합한 적층 기법이라 사료된다.

기공 위치에 따른 열-기계 연계 해석 결과 기공의 위치가 기저부 경사면과 기저부 평면 교차지점 모서리부에 위치하는 경우 모든 조건중 가장 높은 최대 잔류 응력과 최종 잔류 응력을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 기공의 위치에 관계없이 위치가 모서리부로부터 멀어짐에 따라 최대 잔류 응력값이 감소하였다가 잔류 응력값이 다시 회복하는 것을 확인 할 수 있었다. 과도 응력 집중 영역에서 형성되는 최대 잔류 응력 위치는 기공의 위치에 따라 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 탄성 회복 및 냉각후 발생하는 최종 잔류 응력의 경우 기공의 위치가 증가함에 따라 최종 잔류 응력값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 기공의 위치가 기저부 평면 수평 방향에 위치하는 경우 기공 발생영역 인근에 과도 응력 집중 영역이 발생하여 높은 주응력 값을 형성함을 알 수 있었다. 이는 최종 잔류 응력을 형성하는데 기공의 위치가 큰 영향을 주었기 때문이라 사료된다. 기공의 위치가 경사면 방향에 위치하는 경우 수평 방향에 위치하는 기공 인근에 발생하는 잔류 응력 값과 비교하여 현저히 낮은 잔류 응력값 이 도출되었다. 따라서 기공이 적층부위치에 생성되었을 때 적층부의 기저부 경사면 방향으로 기공이 발생하는 것이 잔류 응력 측면에서 좋을 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 DED 공정을 이용한 적층시 적층부와 기저부 형상이 적층부 인근 열-기계 특성에 미치는 영향을 분석을 바탕으로 후속 연구로 아래와 같은 연구가 추가로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

첫 번째로 불규칙 손상부 적층을 위한 아크 형상의 기저부 형상에 따른 열-기계 특성 분석이다. 이에 따라 기저부 경사각 에 따른 기저부 형상과 아크 형상 기저부의 유한 요소 해석 모델을 개발하여 열-기계 연계 해석을 통한 잔류 응력 특성 분석이 필요하다.

두 번째로 열-기계 연계 해석으로 도출된 최적의 적층부 형상, 기저부 형상에 따라 실제 적층을 위한 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. Maxine, Berg. Pat, Hudson., “Rehabilitating the industrial revolution,” *Economic History Review*, XLV, pp. 24-50, 1992
2. Naboni, R., Paoletti, I., “The Third Industrial Revolution,” *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technol.*, Vol. 7, No. 27, pp. 7-27, 2014.
3. Min, X., Jeanne, M. D., Kim, S. H., “The Fourth Industrial Revolution : Opportu
4. Peter, Troxler., “Making the 3<sup>rd</sup> Industrial Revolution,” *PeterTroxler. net*, 2013
5. Klaus Schwab “The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond,” *World Economic Forum*, 2016.
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. Steenhuis, H. J., Fang, X., Ulusemre, T., “Global Diffusion of Innovation during the Fourth Industrial Revolution the Case of Additive Manufacturing, 3D Printing,” *Int. J. Innovation and Technol. Management*, Vol. 17, No. 1, 2019.
8. 장석인, “ 제4차 산업혁명 시대의 산업구조 변화 방향과 정책과제.” 국토 제424호, pp. 22-30, 2017
9. 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
10. 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
11. 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.
12. 3D SYSTEMS, “Our Story,” <https://www.3dsystems.com/our-story> (Accessed 26 February 2021)
13. Amanda, S., Subhi, J. A., “History of 3D Printing.” *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*, pp. 1-10, 2018
14. ASTM INTERNATIONAL, “Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies,” <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm> (Accessed 2 March 2021)

15. ASTM F2792-12a, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” 2012. (Accessed 2 March 2021)
16. 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.
17. Jang. G. N., Choi. S. N., Lee. S. H., “Consideration for Application of 3D Printing Technology to Nuclear Power Plant,” J of KPVP., Vol. 16, No. 1, pp. 117-124, 2020
18. Varotsis. A. B., “Introduction to binder jetting 3D printing,” <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/> (Accessed 2 March 2021)
19. Xin, X., Meteyer, S., Perry, N., and Zhao, Y. F., “Energy and Material Flow Analysis of Binder-Jetting Additive Manufacturing Processes,” Procedia CIRP, Vol. 15, pp. 19-25, 2014.
20. Pearson. A., “The history of 3D printing,” [https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history#\\_ga=2.48400483.416570070.1614326187-623322918.1614326187](https://www.stratasys.com/explore/article/3d-printing-history#_ga=2.48400483.416570070.1614326187-623322918.1614326187) (Accessed 2 March 2021)
21. 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.
22. AboutAdditive Manufacturing Sheet Lamination, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>, (Accessed 19 March 2021)
23. Peak. S. H., “Introduction of 3D Printing Technology & Application,” KIC NEWS, Vol. 18, pp. 1-10, 2015.
24. 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.
25. 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/MS-C-23518-1\\_EBF3.html](https://www.nasa.gov/centers/johnson/techtransfer/technology/MS-C-23518-1_EBF3.html)
26. Liu. R., Wang. Z., Sparks. T., Liou. F., Newkirk. J., “Aerospace Applications of Laser Additive Manufacturing,” Laser Additive Manufacturing, pp. 351-371, 2017.

27. Paek. S. H., “Introduction of 3D Printing Technology & Applications” 공업화학 전망, Vol. 18, No. 1, 2015
28. Liu. S., Shin. Y. Y., “Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review,” Materials & Design, Vol. 164, 2019
29. Liu. R., Wang. Z., Sparks. T., Liou. F., Newkirk. J., “Aerospace Applications of Laser Additive Manufacturing,” Laser Additive Manufacturing, pp. 351-371, 2017.
30. 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.
31. Gibson. I. et al., "Directed Energy Deposition Processes," Additive Manufacturing Technologies, Vol. 10, pp. 245-268, 2015.
32. 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.
33. 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.
34. Lee. K. K., Bih. L. C., Ahn. D. G., “Remanufacturing Strategy of Engraved Part Using Directed Energy Deposition Peocess,” Int. J of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9(6), 1575-1582, 2022
35. B. Graf, A. Gumenyuk, M. Rethmeier, “Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys,” Physics Procedia, Vol. 39, pp. 376-381, 2012.
36. Wilson. J. M., “Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis," Journal of Cleaner Production Vol. 80, pp. 170-178, 2014
37. X. Zhang, T. Pan, W. Li, F. Liou, “Experimental Characterization of a Direvtt Metal Deposited Cobalt-Based Alloy on Tool Steel for Component Repair,” JOM, Vol 71, pp. 946-955, 2019.
38. 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.
39. Oh, W. J., Lee, W. J., Kim, M. S., Jeon, J. B., Shim, D. S., “Repairing Additive-manufactured 316L Stainless Steel using Direct Energy Deposition,” *Opt. Laser Technol.*, Vol. 117, pp. 6~17, 2019.
  40. L. Zhu, S. Wang, H. Pan, C. Yuan, X. Chen, “Research on Remanufacturing Strategy for 45 Steel Gear using H13 Steel Powder Based on Laser Cladding Technology,” *J. Manuf. Process.*, Vol. 49, pp. 344~354, 2020.
  41. Oh, W. J., Lee, W. J., Kim, M. S., Jeon, J. B., Shim, D. S., “Effect of Groove Shape on Mechanical Properties of STS316L Repaired by Direct Energy Deposition,” *J of KSTP*, Vol. 29, No. 2, pp. 103-112, 2020
  42. 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.
  43. Alisusulta, A., Lee, K. K., Ahn, D. G., “Effects of Deposition Str,” *Thermo-mechanical Characteristics of Inconel 718 Deposited Region on AISI 1045 Substrate with a Cantilever Structure by LENS Process,” J of Mechanical Science and Technology*, Vol. 36, No. 9, pp. 4695-4705, 2022.
  44. Kim, S., Oh, H., Kim, J. G., “Effect of Annealing and Crack Orientation on Fatigue Crack Propagation of Ti64 Alloy Fabricated by Directed Energy Deposition Process,” *Metals and Materials Int*, Vol. 28, No. 1, pp. 205-215, 2022
  45. 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.
  46. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Incropera’s *PRINCIPLES OF HEAT AND MASS TRANSFER*, Wiley, 2017.
  47. 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.
  48. Kim, B. S., Kim, J. S., Lee, S. H., Song, J. Y., Park, H. Y., “A Study on Failure

- Mode Analysis of Machining Center,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 18, No. 6, pp. 74-79, 2001.
49. Lee, K. K., “Investigation into Dissimilar Deposition Characteristics between Superalloy Powders and S45C Steel Using a Laser-Aided Direct metal Rapid Tooling (DMT) Process,” Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2019.
50. 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 Manufacturing”, Materials Science & Engineering A, Vol. 724, pp. 431-438, 2018.
51. Peak, S. H., “A Study on Effects of Local Characteristics Shapes of the Deposited Region and the Substrate on Thermo-mechanical Behaviors of the Inconel 719 Part Fabricated by a DED process,” Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2021.
52. Kim. H., “A Study of Residual Stress Characteristics Dependent on the Deposition Strategy in a Large Volume Deposition of Inconel 718 Using a DED Process”, Paper of masters degree, Chosun university, Gwang-Ju, 2021.
53. Kim. D. A., “Investigation of the Effects of the Inclined Angle and Corner Radius of the Substrate on Thermo-Mechanical Characteristics in the Vicinity of the Deposited Region for the Repair of Parts Using a DED Process,” J of KSME. A, Vol. 46, No. 6, pp. 553~563, 2022

## 감사의 글

석사학위 논문이 마무리되면서 저를 여기까지 이끌어주고 도움을 주었던 분들에게 감사의 말을 드리하고자 합니다. 2019년 CATIA 팀을 시작으로 지도 교수이신 안동규 교수님과 인연이 시작 되었습니다. 학부 과정부터 4년이라는 시간동안 저를 이끌어 주신 안동규 교수님에게 감사드립니다. 교수님의 지도 덕분에 많이 미숙했던 제가 한걸음 한걸음 성장하게 된 것 같습니다. 제가 많이 미숙하여 교수님께 지적도 많이 받고 연구 결과도 항상 뜻하는대로 나오지 않아 정말 많이 힘들어 석사 과정을 그만 두고 싶었을 때 교수님의 진심어린 조언 덕분에 저의 미숙함을 받아 들이고 한층 더 성숙해지고 단단해질수 있었습니다. 전산 설계 실험실에서 배운 모든 것들은 앞으로 제 인생에서 잊을수 없는 값진 경험이었던거 같습니다. 다음으로 바쁜 와중에 저의 졸업 논문을 지도해주신 김창래 교수님, 이정원 교수님에게 감사의 인사를 올립니다. 또한 석사 생활을 하면서 응원 해주신 한길영 교수님에게도 감사의 인사를 올립니다.

유한 요소 해석을 진행하면서 많은 도움을 주었고 많은 응원을 해준 광규형에게도 감사합니다. 형이 주신 도움이 정말 저에게 큰 힘이 되었습니다. Ali에게도 감사함을 전합니다. 저의 동기 지원이에게도 감사함을 전합니다. 동기가 있어 저에게 큰 힘이 되었습니다. 천정필 형님에게도 감사의 말 전합니다. 형님께서 해주신 격려와 응원이 저에게 큰 힘이 되었습니다. 실험실 후배인 동일이, 현이, 종찬이 정말 좋은 후배가 있어 많은 도움이 되었습니다. 다시 한번 감사 인사를 올립니다. 같은 실험실은 아니지만 CATIA 팀 때부터 인연을 이어온 지운이에게도 감사인사를 올립니다. SYSWELD 사용에 도움을 주신 안장호 부장님에게도 감사 인사를 올립니다.

저의 가족들에게도 감사의 말 전합니다. 대학교 다니면서 경기도에서 광주로 내려와 저의 보금자리와 저에게 사랑을 주셨던 할머니에게 큰 감사의 말을 전합니다. 멀리 떨어져 있어 자주 보지는 못하지만 항상 저를 응원해주고 격려 해주었던 아버지, 어머니에게 감사의 말 전하겠습니다. 또 먼저 대학원에 진학하여 저에게 여러 조언을 해주었던 여동생에게도 감사합니다. 아프신 몸으로도 저를 항상 응원해준 어머니에게 사랑한다는 말 전하고 싶습니다.

2022년 12월 임성훈