



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](#)

2020 년 2 월
석사학위 논문

LENS 공정을 이용한 인코넬718
분말과 S45C 기저부의 이종 재료
적층에서의 적층 특성 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

김 현 식

**LENS 공정을 이용한 인코넬718
분말과 S45C 기저부의 이중 재료
적층에서의 적층 특성 분석**

**A Study on Deposition Characteristics of Inconel718 Powders
on S45C Substrates Using a Laser Engineered Net Shaping
(LENS) Process**

2020 년 2 월 25 일

조선대학교 대학원

기계공학과

김 현 식

LENS 공정을 이용한 인코넬718
분말과 S45C 기저부의 이중 재료
적층에서의 적층 특성 분석

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2019 년 11 월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

김 현 식

김현식의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 한길영 (인)

위원 조선대학교 교수 오동욱 (인)

위원 조선대학교 교수 안동규 (인)

2019 년 11 월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	iv
NOMENCLATURES	vii
ABSTRACT	viii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
제 2 절 연구 목적 및 방법	3
제 2 장 Laser Engineered Net Shaping (LENS) 공정 및 대면적 적층 시편 설계/제작 방법	5
제 1 절 Laser Engineered Net Shaping (LENS) 공정	5
제 2 절 대면적 적층 시편 설계 및 제작	6
제 3 장 대면적 적층에서의 적층 특성 고찰	8
제 1 절 적정 적층 조건 도출을 위한 적층 비드 시험	8
1. 적층 비드 시험 방법	8
2. 적층 비드 시험 결과 및 고찰	11
3. 적정 적층 비드 생성 조건 선정	18

제 2 절 적정 공정 조건을 이용한 다열 및 다층 비드 제작	19
1. 다열 및 다층 비드 생성 시험 방법	19
2. 다열 및 다층 비드 생성 시험 결과 및 고찰	21
제 3 절 대면적 적층 시편 제작 및 시험	23
1. 대면적 적층 시험 방법	23
2. 대면적 적층 시험 결과 및 고찰	25
가. 시편의 비파괴 외부 균열 검사	26
나. 시편의 비파괴 내부 균열 검사	27
제 4 장 3차원 유한요소해석을 이용한 적층 특성 분석	28
제 1 절 3 차원 유한요소해석 모델 개발	28
제 2 절 물성데이터 도출	30
제 3 절 열원 모델 개발	32
제 4 절 3차원 열전달 특성 분석	34
1. 정상상태 열전달 구간에서 열원의 적정 효율 데이터 도출	34
2. 열전달 특성 분석	37
가. 단일 비드에서의 열전달 특성 분석	38
나. 2 열 비드에서의 열전달 특성 분석	38
다. 5 열 비드에서의 열전달 특성 분석	40
라. 4층 적층 비드에서의 열전달 특성 분석	42
마. 대면적 적층에서의 열전달 특성 분석	45
제 5 절 3차원 열응력 특성 분석	47

1. 3차원 유한요소해석 모델 개발 및 물성데이터 도출 -----	47
2. 열응력 특성 분석 -----	48
가. 단일 비드에서의 열응력 특성 분석 -----	49
나. 2 열 비드에서의 열응력 특성 분석 -----	52
다. 5 열 비드에서의 열응력 특성 분석 -----	55
라. 4 층 적층비드에서의 열응력 특성 분석 -----	56
제 5 장 결론 및 향후 과제 -----	61
References -----	62

LIST OF TABLES

Table 1	Representative DED process -----	1
Table 2	Chemical composition of the substrate and powders -----	4
Table 3	Dimension of substrate -----	6
Table 4	Specifications of LENS equipment -----	8
Table 5	Conditions of experimental -----	9
Table 6	Surface roughness of substrate -----	10
Table 7	Specification of powders -----	10
Table 8	Influence of the power of laser and feed rate of powders on the formation of the deposition bead -----	16
Table 9	Selection of proper deposition conditions -----	17
Table 10	Conditions of deposition experiments -----	21
Table 11	Width and depth of the deposited bead and molten pool for different deposition cases -----	23
Table 12	Conditions of three-dimensional FE analysis -----	29
Table 13	Proper efficiencies of different cases -----	36

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Schematic diagram of DED process -----	2
Fig. 2	Microstructures and cracks in the vicinity of the deposited region by a DED process -----	3
Fig. 3	Schematic diagram of LENS process -----	5
Fig. 4	Deposition head and monitoring system of the molten pool of a LENS process ---	6
Fig. 5	Set-up and results of hardness tests for the substrate -----	7
Fig. 6	Pre-operation of the substrate to deposit Inconel718 powders -----	7
Fig. 7	Experimental set-up -----	8
Fig. 8	Sand blasting apparatus -----	9

Fig. 9 Video microscope system (Xi-Cam) -----	10
Fig. 10 Specimen of a single layer deposition -----	11
Fig. 11 Effects of feed rate of powder on the formation of the deposited bead -----	15
Fig. 12 Influence of feed rate of powders on angle of bead -----	15
Fig. 13 Deposition window to fabricate the deposited bead -----	17
Fig. 14 Section view of the specimen for proper deposition conditions -----	17
Fig. 15 Deposition ratio of proper deposition conditions -----	18
Fig. 16 Design of specimens for deposition experiments -----	20
Fig. 17 Experimental procedure -----	21
Fig. 18 Concept of the overlap ratio -----	22
Fig. 19 Results of deposition experiment -----	22
Fig. 20 Design of specimen and deposition path for the deposition experiment with a large area -----	24
Fig. 21 Results of deposition experiments with a large area -----	25
Fig. 22 Measured regions by optical microscope -----	26
Fig. 23 Morphologies of external surface of specimens -----	26
Fig. 24 X-ray CT system -----	27
Fig. 25 X-ray CT images for different dimensions of specimen (Hardness of substrate = 40 HRC) -----	27
Fig. 26 Model of a three-dimensional finite element analysis -----	28
Fig. 27 Bead shapes for different FE models -----	29
Fig. 28 Temperature dependent thermal properties -----	32
Fig. 29 Temperature dependent emissivity of Inconel 718 -----	32
Fig. 30 Schematic diagram of heat source -----	33
Fig. 31 Estimated steady-state heat transfer region -----	34
Fig. 32 Temperature distribution for different deposition cases ($\eta = 1.0$) -----	35
Fig. 33 Influence of efficiency of heat flux on the width and the depth of the molten pool -----	36
Fig. 34 Comparison of the formation of the molten pool for experiment and that for analysis -----	37
Fig. 35 Temperature distributions for different substrate hardnesses (Single bead) -----	38
Fig. 36 Interpass time and diagram of deposition (Double bead) -----	39
Fig. 37 Temperature distributions for different substrate hardnesses (Double bead) -----	39
Fig. 38 Interpass time and type of deposition path -----	40

Fig. 39 Temperature distributions for different substrate hardnesses and deposition paths
 (Quintuple bead) ----- 41
 Fig. 40 Temperature-time curves for different substrate hardnesses and deposition paths
 (Quintuple bead) ----- 42
 Fig. 41 Measured region of heat transfer analysis for multiple layers ----- 43
 Fig. 42 Temperature distributions for different substrate hardnesses and deposition paths
 (Multiple layers) ----- 44
 Fig. 43 Temperature-time curves for different substrate hardnesses and deposition paths
 (Multiple layers) ----- 45
 Fig. 44 Temperature distributions for the case of depositions with a large area ----- 46
 Fig. 45 Temperature-time curves for the case of depositions with a large area ----- 46
 Fig. 46 Temperature dependent mechanical properties ----- 48
 Fig. 47 Vertical displacement distributions for multiple layers ----- 49
 Fig. 48 Boundary condition for deposition and cooling stages (Single bead) ----- 50
 Fig. 49 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Single bead) - 51
 Fig. 50 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Single bead) --- 51
 Fig. 51 Measured region of 1st principal stress ----- 53
 Fig. 52 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Double bead) - 53
 Fig. 53 Measured region of Von Mises stress ----- 54
 Fig. 54 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Double bead) - 54
 Fig. 55 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Quintuple bead)
 ----- 55
 Fig. 56 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Quintuple bead)
 ----- 56
 Fig. 57 Measured region of 1st principal stress (Multiple layers) ----- 57
 Fig. 58 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Multiple layers) 57
 Fig. 59 Measured region of Von Mises stress (Multiple layers) ----- 58
 Fig. 60 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Multiple layers) 58
 Fig. 61 1st principal stress curve during deposition process (Multiple layers) ----- 59
 Fig. 62 Tensile strength-temperature curves for different cooling rates ----- 60
 Fig. 63 Result of Von Mises maximum stress for multi layer (40 HRC) ----- 60

NOMENCLATURES

- F : Feed rate of powder
- P : Power of laser
- \varnothing_d : Deposition ratio
- ρ : Density of Inconel718 powder
- A : Area of single bead section
- V : Travel speed
- W_b : Width of deposition bead
- W_h : Height of deposition bead
- ρ_1 : Temperature dependent density
- C_p : Temperature dependent specific heat
- k : Temperature dependent thermal conductivity
- T_s : Surface temperature
- T_∞ : Environmental temperature
- ε : Emissivity
- σ_s : Stefan-Boltzmann constant
- Q_0 : Maximum power intensity of laser
- x : X position of laser
- y : Y position of laser
- z : Z position of laser
- η : Efficiency of laser
- r_e : Top radius of heat flux
- r_i : Bottom radius of heat flux
- z_e : Top position of heat flux
- z_i : Bottom position of heat flux
- E : Temperature dependent elastic modulus
- σ_y : Temperature dependent yield strength
- ν : Temperature dependent poisson's ratio
- α : Temperature dependent thermal expansion

ABSTRACT

A Study on Deposition Characteristics of Inconel718 Powders on S45C Substrates Using a Laser Engineered Net Shaping(LENS) Process

Hyun Sik Kim

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

Department of Mechanical Engineering

Graduated School of Chosun University

A laser engineered net shaping (LENS) process is one of directed energy deposition (DED) processes. The LENS process has been widely used to deposit superalloy on a metallic substrate. The quality of the deposited region depends upon deposition characteristics between the deposited material and the substrate. The goal of this thesis is to investigate deposition characteristics of Inconel 718 powders condition is obtained from deposition experiments for a single bead. Using the proper deposition condition, several specimens with a large deposition area are fabricated. In order to simulate a thermo-mechanical behavior in the vicinity of the deposited region by a LENS process, a finite element (FE) model with a moving heat flux is developed using a SYSWELD. The heat source for the deposition depth. A gaussian distribution is adopted to simulate in-plane intensity distribution of the heat flux. Temperature dependent thermal and mechanical properties considering a phase change are applied to the FE model. Repeated FE analyses are carried out to investigate heat transfer phenomenon and residual stress evolution during deposition and cooling stages for cases of in-plane depositions, including a single bead, a double bead, a quintuple bead, and out-of-plane depositions with four layers. From the results of FE analyses, the effects of the deposition strategy on temperature distributions and thermal histories in the vicinity of the deposited region. In addition, the influence of the substrate hardness on residual stress distributions of the deposited region and the substrate is examined.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 관련 연구

산업혁명이 시작된 이래, 국가의 산업화는 제조업을 통해 이루어졌다.¹⁾ 제조업은 일자리 창출, 부 및 삶의 질 향상을 창출하는 전 세계 국가의 산업화를 위한 중요한 기술이다. 21세기 정보 디지털화의 지속 가능한 개발에 대한 수요의 발전은 4차 산업혁명을 통해 제조업을 대량 생산에서 고객 맞춤형 대량생산으로 변화 시켰다.^{2,3)} 적층제조 (Additive Manufacturing : AM) 공정은 4차 산업혁명의 7 가지 핵심 요소 중 하나이다.⁴⁾

적층제조공정은 Computer Aided Design (CAD) 및 Computer Aided Manufacturing (CAM)을 이용하여 재료를 Layer-by-layer 형식으로 제품을 생성하여 기하학적 복잡성을 갖는 3 차원 부품을 제조하기 위한 공정이다.⁵⁻⁷⁾ 전통적인 제조방식 (Conventional Manufacturing : CM) 에 비해 여러 가지 가공 단계 없이 복잡한 모양의 형상을 제작할 수 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 따라서 적층제조공정은 공정은 자동차, 가전, 항공 우주 및 복잡한 고비용 구성요소를 생산하는 산업에 활발히 연구가 진행되고 있다.^{11,12)} 또한, 대형 부품의 제조비용을 줄이기 위해 전통적인 제조방식과 함께 사용할 수 있어 균열이나 마모된 부품의 수리에 적층제조공정 중 하나인 에너지 제어형 적층 (Directed Energy Deposition : DED)공정 을 사용할 수 있다.¹²⁻¹⁵⁾ 에너지 제어형 적층 공정은 Table 1 과 같이 공급 방식에 따라 2 가지 방식으로 분류된다.¹⁶⁻¹⁹⁾ 에너지 제어형 적층 공정은 Fig. 1 과 같

Table 1 Representative DED processes

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

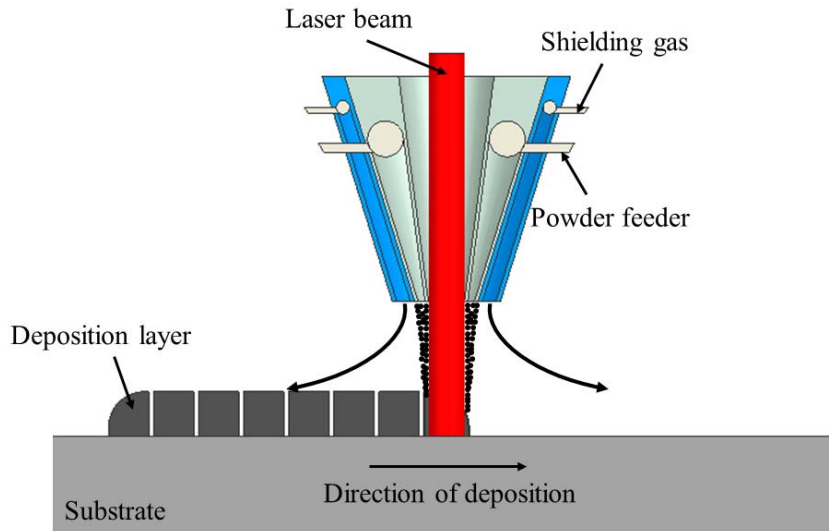


Fig 1. Schematic diagram of a DED process

이 레이저나 전자빔과 같은 고온의 열원을 사용하여 기저부를 가열하고 기저부를 용해시키며 동시에 기저부 용융풀에 물질을 용융시키기 위하여 에너지를 집중시키는 공정이다.²⁰⁻²²⁾ 레이저와 전자빔 같은 고온의 열원을 사용하기 때문에 1,300 °C 이상의 고열이 짧은 시간에 발생하고 이로 인해 적층 과정 중 급속가열 및 급속냉각의 열 이력 (Thermal history)이 반복적으로 나타나기 때문에 적층부와 적층 경계부에 국부적인 열 특성 불균형 및 잔류응력을 발생시킨다. 따라서 적층 영역 주위의 열전달 특성 (Heat transfer characteristics)은 Fig. 2 와 같이 적층부의 미세조직과 재료 성분을 변경시켜 적층제품의 변형과 잔류응력 발생에 영향을 미치기 때문에 열전달 현상에 대한 분석과 이를 통한 공정제어 기술이 연구되어야 한다.²³⁾ 하지만 실험으로 적층중의 열전달 현상을 고찰하기에는 비용이 많이 들고 어렵기 때문에 효율적인 대안으로 3 차원 유한요소해석 (Three-dimensional finite element analysis)을 이용한 열전달 및 열응력 특성분석이 필요하다.²⁴⁻²⁷⁾ 직접식 에너지 적층 공정과 3 차원 유한요소해석을 이용한 특성분석에 관련된 선행 연구는 다음과 같다.

Liang Wang 등은 레이저 출력 (Power of laser), 이송 속도 (Travel speed of laser) 및 적층 비드간 시간 (Interpass time) 의 공정변수를 이용하여 유한요소해석과 제작된 최종부품의 온도분포, 미세구조 및 경도변화의 영향성을 분석하였다.²⁸⁾ Yuhong Xiong 등은 LENS 공정의 열적 거동을 연구하기 위해 in situ 카메라를 이용하여 용융풀 부근의

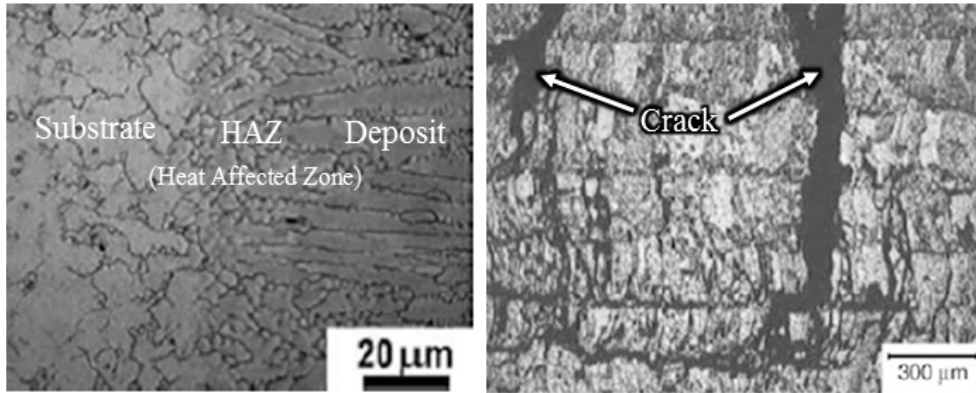


Fig 2. Microstructures and cracks in the vicinity of the deposited region by a DED process

온도 구배와 냉각속도의 특성을 조사한 후 유한요소해석의 결과와 비교하였다.²⁹⁾ H. Qi 등은 LENS 공정을 이용하여 Inconel718 분말로 제작된 시편에 열처리를 진행하여 미세구조 및 인장강도 시험을 통해 기계적 특성분석을 수행하였다.³⁰⁾ V.D. Manvatkar 등은 LENS 공정을 이용한 H13 공구강의 적층에서 온도분포 및 비드의 특성을 추정하기 위한 3 차원 유한요소해석을 통한 접근법 도출을 수행하였다.³¹⁾

제 2 절 연구 목적 및 방법

적층제조공정기술은 전통적인 제조방식에 비해 재료와 에너지 사용량을 줄일 수 있기 때문에 효율성과 유연성이 향상 되어 활발히 연구가 진행되고 있다. 적층제조 공정의 광범위한 상용화는 용융풀의 크기, 미세 조직, 공정 변수에 따른 잔류응력 및 기타 공정 결과를 예측할 수 있다. 제품의 형상을 정확하게 제작하려면 용융풀 크기 제어가 필요하며 용융풀 크기는 공정 정밀도를 결정한다. 신뢰성 있고 반복 가능한 기계적 특성을 생성하기 위해서는 미세조직 제어가 필요하다. 응력완화 후 처리가 발생할 때까지 부분 형상을 유지하기 위해 잔류응력제거가 필요하다.³²⁻³⁵⁾ 또한, 3 차원 유한요소해석을 이용한 열전달/열응력 특성분석의 예측은 실험적으로 얻기 힘든 열전달 특성을 분석하기 위하여 전 세계적으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 적층 중 발생하는 열원의 형상을 파악하는 것은 어렵기 때문에 적절한 체적 열원의 도출이 필요하다. 그러나 열원 모델에 조정되어야 하는 변수가 많기 때문에 측정이 수행되기 전에 열원 모델에 대한 효율과

열 유속 분포를 가정해야 한다. 또한 자연대류 및 강제대류 계수를 가정하거나 무시하기 때문에 유한요소해석의 부정확성을 초래한다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서 유한요소해석 모델 개발을 위한 체계적인 방법이 필요하다. 본 논문의 주요 목적은 LENS 공정을 이용한 S45C 기저부위 Inconel718 분말 적층시 적층특성을 분석하는 것이다. 적층에 사용된 재료의 조성비는 Table 2 와 같다. LENS 공정을 이용하여 S45C 기저부위 Inconel718 분말의 적층 특성을 파악하기 위하여 레이저 출력 (Power of laser) 및 분말 공급량 (Feed rate of Powder) 의 조건에 따른 단일 비드 실험을 통하여 적정 적층 조건을 도출하고자 한다. 선정된 적정 적층 조건을 이용하여 다열/다층 적층실험을 수행 후 생성된 단면의 비드 프로파일을 도출하여 상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD 를 이용하여 3 차원 유한요소해석 모델을 개발하고자 한다. 3 차원 유한요소해석 모델링 개발에는 열원의 효율과 침투 깊이를 고려한 가우시안 분포를 가정한 3 차원 체적 열원을 도출하고자 한다. 또한, 산화방지 가스를 이용한 강제대류와 자연대류의 조건과 온도 의존 물성을 도출하고자 한다. 기저부 경도와 적층 경로에 따른 영향성을 3 차원 유한요소해석을 이용하여 분석하고자 한다. 최종적으로 S45C 기저부의 크기 및 경도에 따른 Inconel 718 분말 적층시 영향성을 분석하기 위하여 적층 실험을 수행 후 광학현미경과 X-ray CT 를 이용하여 외/내부의 결함검사를 진행하고자 한다.

Table 2 Chemical compositions of the substrate and powders

Material	Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Cu
S45C	Base	0.4438	0.247	0.757	0.0019	0.015	0.005	0.010
Inconel718	Bal	0.047	0.24	0.111	0.0022	18.34	53.19	0.079

제 2 장 Laser Engineered Net Shaping (LENS) 공정 및 대면적 적층 시편 설계/제작 방법

제 1 절 Laser Engineered Net Shaping (LENS) 공정

LENS 공정이란 DED 공정 중 하나로 금속 소재의 분말을 레이저 에너지를 이용하여 재료를 선택적으로 용해 및 응고시켜 층 대 층 (layer-by-layer) 으로 적층하는 원리로 CAD 에서 생성된 3 차원 모델링 데이터를 이용하여 원하는 형상의 제품을 생성하는 공정으로 Fig. 3 과 같다. 불활성 가스 챔버, 레이저 및 4개의 노즐이 일체형으로 많은 재료를 효과적으로 적층이 가능하다. Fig. 4 와 같이 5축 빔 전송장치 시스템은 어느 방향에서든 적층을 가능하게 할 수 있으며, 비드의 높이와 용융 풀 영역을 모니터링하기 위한 시스템은 일정한 적층 특성을 유지하기 위해 적층 변수를 동적으로 변경하는데 사용이 가능하다. 밀폐된 불활성 가스 챔버에서 재료를 처리하기 때문에 산

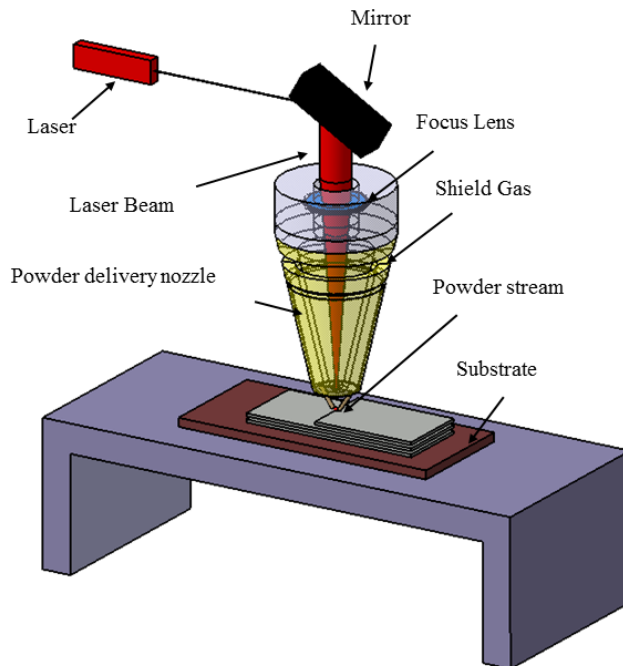


Fig 3. Schematic diagram of LENS process

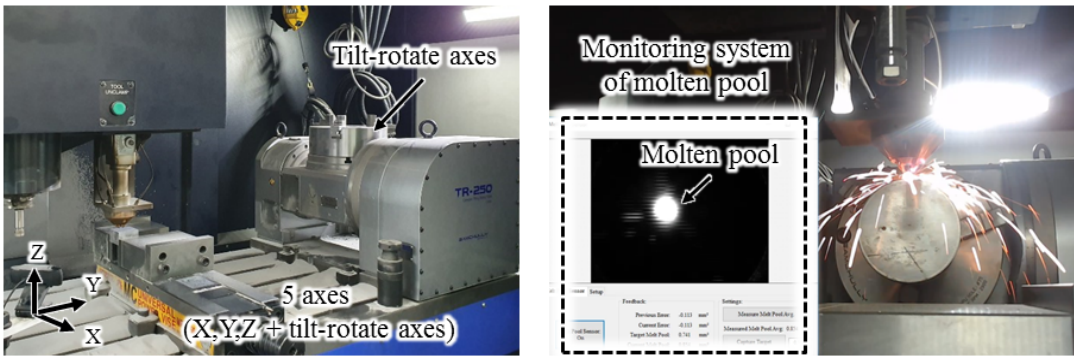


Fig 4. Deposition head and monitoring system of the molten pool of a LENS process

소 제거, 가스 재순환 시스템은 산소 농도를 10 ppm 근처 또는 그 이하로 유지하기 위하여 사용한다.²³⁾ 이러한 LENS 공정은 일반 산업용 금속 분말의 사용이 가능하고 제작 가능한 제품의 크기가 크고 레이저를 이용한 금속의 완전 용융과 응고로 인하여 제품밀도가 높고 기존의 3 차원 형상위에 적층이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

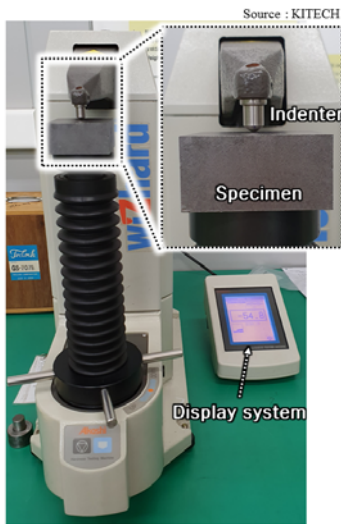
제 2 절 대면적 적층 시편 설계 및 제작

금속 적층 제조를 이용하여 적층을 할 경우 적층부의 크기 및 기저부의 경도에 따라 균열/변형 등의 분석이 필요하다. LENS 공정을 이용한 적층 시편의 크기는 기저부 Table 3 과 같다. 기저부의 열처리 는 침탄법을 이용하여 수행하였다. 초기 시편과 침탄 열처리를 이용 하여 표면의 경도를 Fig. 5 (a) 의 로크웰 경도 시험기를 사용하여 측정 한 결과는 Fig. 5 의 (b) 와 같다. 초기 시편은 로크웰 경도 C 스케일 (HRc) 의 범위를 벗어나 로크웰 경도 B 스케일로 측정하였다. 3 번의 측정 결과 88.7 HR_B, 89.3 HR_B 및

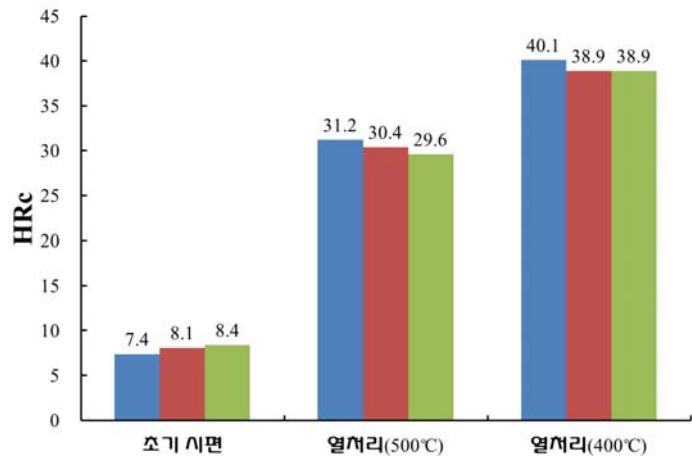
Table 3 Dimension of substrate

Dimension		
Width (mm)	Length (mm)	Height (mm)
50	50	30
60	60	30
70	70	30

89.5 HR_B 로 평균값은 89.2 HR_B 로 측정되었다. ASTM E-140-120b 를 이용하여 C 스케일로 환산한 결과 8.0 HR_C 값을 가지는 것으로 도출되었다.³⁶⁾ 침탄 열처리를 이용하여 열처리를 한 시편은 30.4 HR_C 및 39.3 HR_C 으로 측정되었다. 따라서 측정된 결과를 바탕으로 8 HR_C, 30 HR_C 및 40 HR_C 로 도출하였다. 설계된 시편의 높이는 적층시 발생하는 열 변형을 고려하여 30 mm 로 설계하였다. 시편의 제작 절차는 Fig. 6 과 같다.



(a) Rockwell hardness tester



(b) Measured hardness of substrate

Fig 5. Set-up and results of hardness tests for the substrate

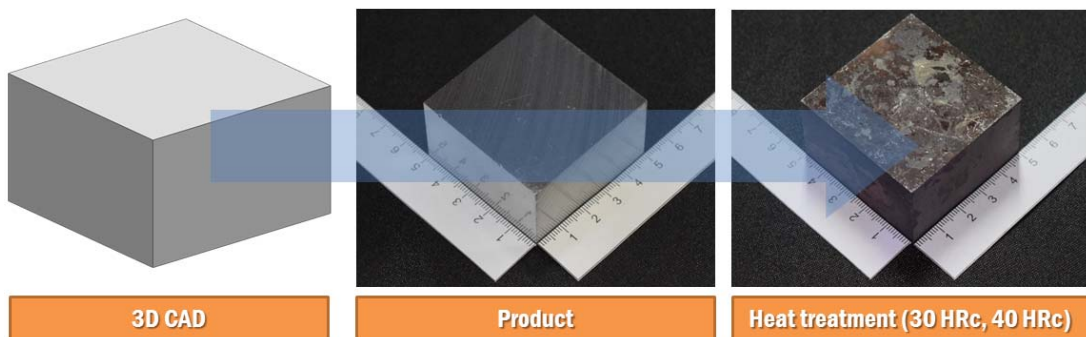


Fig 6. Pre-operation of the substrate to deposit Inconel718 powders

제 3 장 대면적 적층에서의 적층 특성 고찰

제 1 절 적정 적층 조건 도출을 위한 적층 비드 시험

1. 적층 비드 시험 방법

LENS 공정을 이용하여 적층을 하기 위해서는 적정 적층 조건이 필요하다. 적층 조건이 적절하게 최적화되지 않고 에너지 밀도가 부족한 경우 적층부에서 균열이 발생할 수 있고 과량의 에너지를 이용하면 재료 기화와 키흔링이 발생할 수 있다.³⁷⁾ 따라서 적정 적층 조건을 찾는 조건별 비드 생성 실험이 필수적이다. 공정 조건을 도출하기 위한 실험에는 한국생산기술연구원에 있는 Fig. 7 의 화천기계와 5 축 CNC 시스템에 Optomec 사의 DED 헤드가 부착된 하이브리드 DED 시스템을 이용하여 수행하였다.

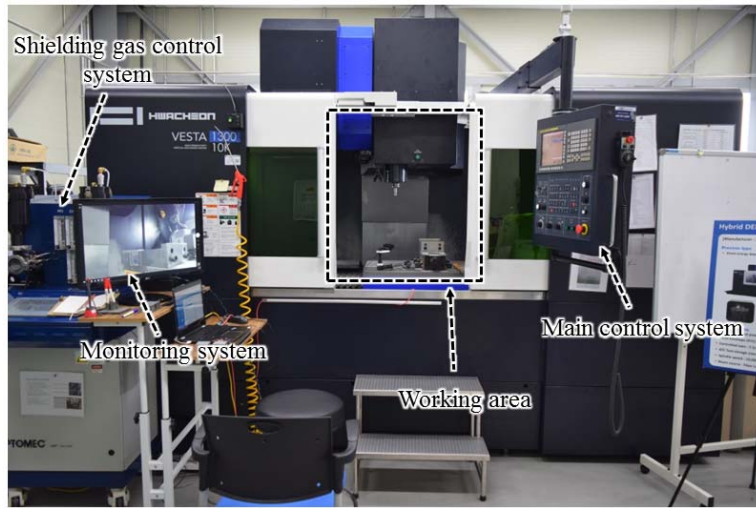


Fig 7. Experimental set-up

Table 4 Specifications of LENS system

Allowable deposition area (m)	Controlled axes	Travel speed (m/min)	Power of laser (kW)	Spindle speed (rpm)
1.3 × 0.6 × 0.6	5 (Laser head x,y,z + tilt-rotate 2 axes)	~40	1	10,000

Table 5 Conditions of experimental

Feed rate of powder (F, g/min)	Power of laser (P, W)	Travel speed (mm/min)
5.8 - 12.6	250 - 500	1,000

장비의 사양은 금속 소재를 적층소재로 사용하고 적층이 가능한 최대 크기는 1.3 m × 0.6 m × 0.6 m 이다. 이송 속력은 최대 40 m/min 까지 사용할 수 있으며 레이저 열 원으로는 Fiber laser 를 사용하고 최대 회전 속력은 10,000 rpm 으로 Table. 4 와 같다. 적층에 사용된 적층 조건은 이송 속력은 1,000 mm/min 으로 고정 시킨 후 분말 공급 량 6 가지 조건과 레이저 파워 6 가지 조건으로 범위는 Table. 5 와 같다. 산화방지를 위하여 사용된 가스의 종류는 아르곤이다. 실험을 위하여 제작된 시편은 한국생산기술 연구원에 Fig. 8 의 장비를 이용하여 적층이 진행되는 시편의 표면에 샌드 블라스팅 (Sand blasting) 처리를 수행하여 적층부의 표면 거칠기가 주는 영향을 제거하고 일정한 적층 비드를 얻기 위해 수행하였다. 샌드 블라스팅 처리를 하기 전인 초기시편 기저부와 샌드 블라스팅이 적용된 기저부 표면 거칠기는 Table. 6 과 같다. 조건별로 생성된 비드의 길이는 정상상태를 고려하여 40 mm 로 수행하였다. 적층이 진행되는 분말 재료의 종류와 입자크기는 Table. 7 과 같다. 각 조건별로 제작된 비드의 폭과 높이 및 용융부의 폭과 깊이를 Fig. 9 의 광학현미경을 이용하여 분석하기 위해 절단 후 단면을 0.2 mm 폴리싱 한 후 Nital (Etanol + Nitric acid, 5%) 용액을 이용하여 에칭 후에 단면을 분석하였다.



Fig 8. Sand blasting apparatus

Table 6 Surface roughness of substrate

	Initial substrate	After sand blasting
R_a (μm)	0.4	0.9
R_z (μm)	2.2	8.1

Table 7 Specification of powders

Powder	Diameter of powder (μm)
Inconel718	50 - 150

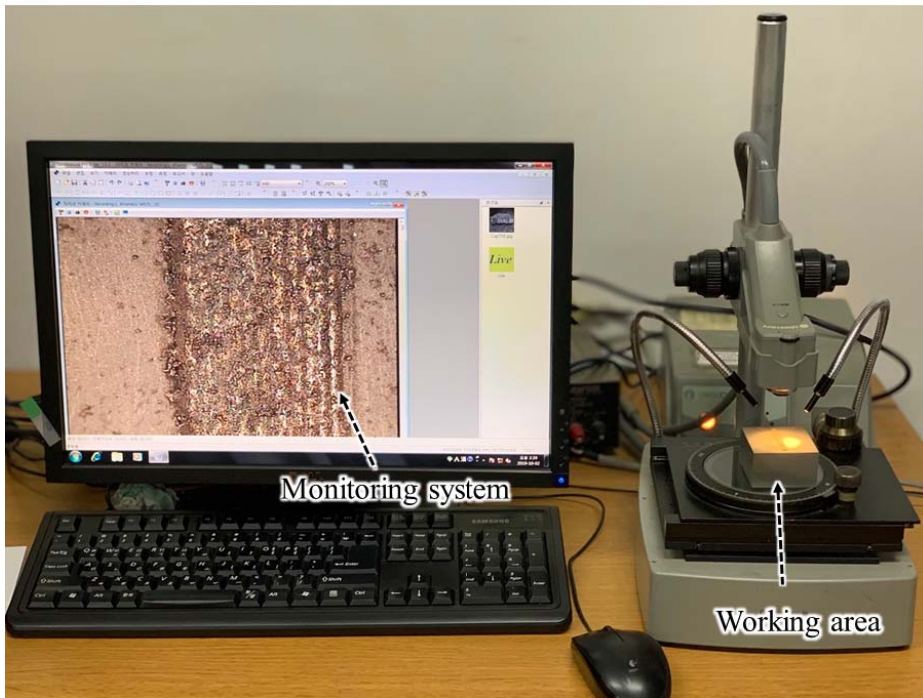


Fig 9. Video microscope system (Xi-Cam)

2. 적층 비드 시험 결과 및 고찰

LENS 공정을 이용한 Inconel718 분말의 적층 적층 조건을 도출하기 위한 시험의 결과는 Fig. 10 과 같다. 실험에 적용된 모든 적층 공정변수에서 비드가 제작되었다. 그러나 Fig. 11 에서 조건별로 생성된 비드의 단면을 관찰한 결과 비드의 폭과 높이 및 용융부의 폭과 깊이는 모두 다르게 제작되었다. 실험 후 제작된 비드의 폭과 두께 및 용융부의 폭과 깊이를 분석하기 위한 시편의 단면부의 측정 결과는 Table. 8 과 같다. Fig. 11 의 (a) 에서는 레이저 파워 (Power of laser : P) 250 W 인 조건에서 적층 비드의 기저부 용입 깊이가 약 100 μm 이하로 관찰되었다. 또한 레이저 파워 300 W 조건인 Fig. 11 의 (b) 에서 적층 비드의 기저부 용입 깊이가 약 128 μm 이하로 측정되었다. 이 결과로부터 이들 조건에서는 적층비드와 기저부 사이의 결합 면적이 작아서 기저부와와의 결합이 다소 약할 것으로 사료되었다. 레이저 파워가 350 W 이상인 조건에서는 적층비드와 용입 깊이가 130 μm 이상으로 측정되었다. Fig. 11 의 (c) 에서는 분

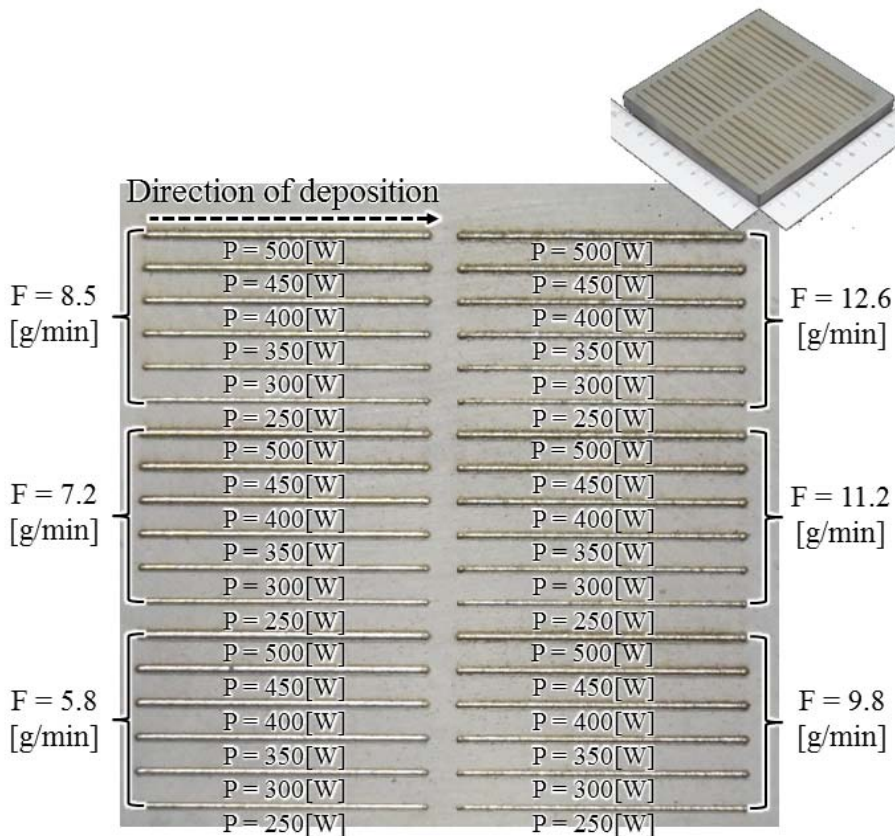
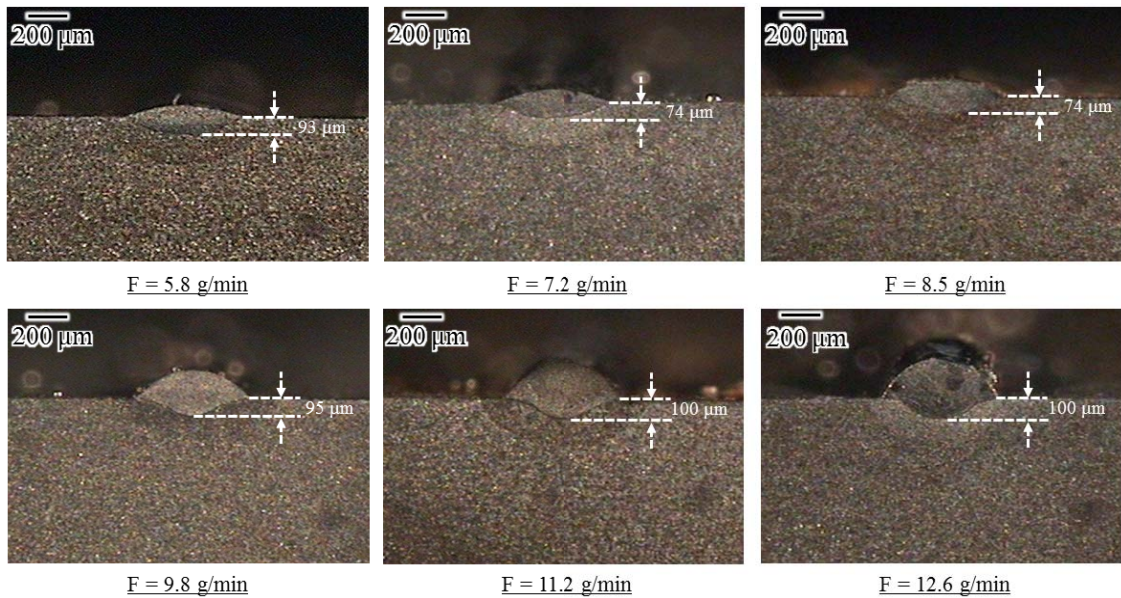


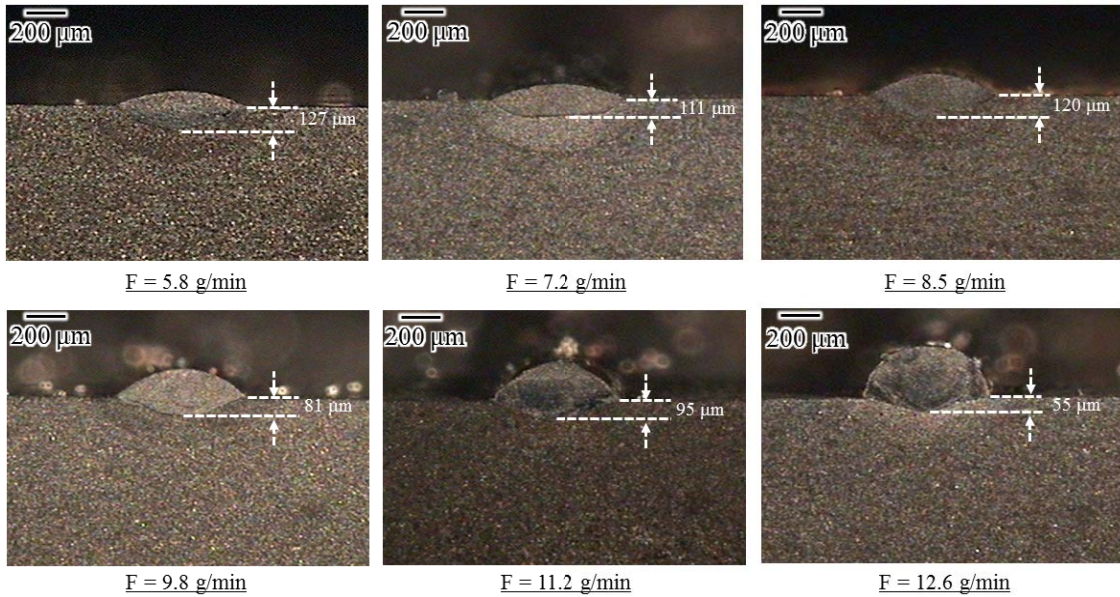
Fig 10. Specimen of a single layer deposition

말공급량 (Feed rate of powder : F) 이 높을수록 용융부가 불안정한 것으로 관찰 되었다. Fig. 11 의 (d) 에서는 분말공급량이 낮을 때 공급되는 분말의 양보다 공급되는 레이저의 파워가 더 많기 때문에 용융부가 부분적으로 더 많은 열을 받아 용융부가 불안정한 것으로 관찰 되었다. Fig. 11 의 (e) 에서는 분말공급량 $F = 12.6 \text{ g/min}$ 을 제외한 모든 조건에서 용융부가 불안정한 것으로 관찰되었다. Fig. 11 의 (f) 에서는 모든 조건에서 용융부의 편심현상이 관찰되어 레이저 파워가 500 W 이상일 때 분말공급량에 관계없이 용융부가 불안정한 것으로 사료되었다. 또한 적층 적층 공정변수를 도출하기 위하여 Fig. 12 와 같이 생성된 비드의 적층각도를 측정하였다. 측정 결과 적층 각도는 모든 조건에서 60° 이하로 측정되어 안정적으로 생성된 것을 확인하였다.

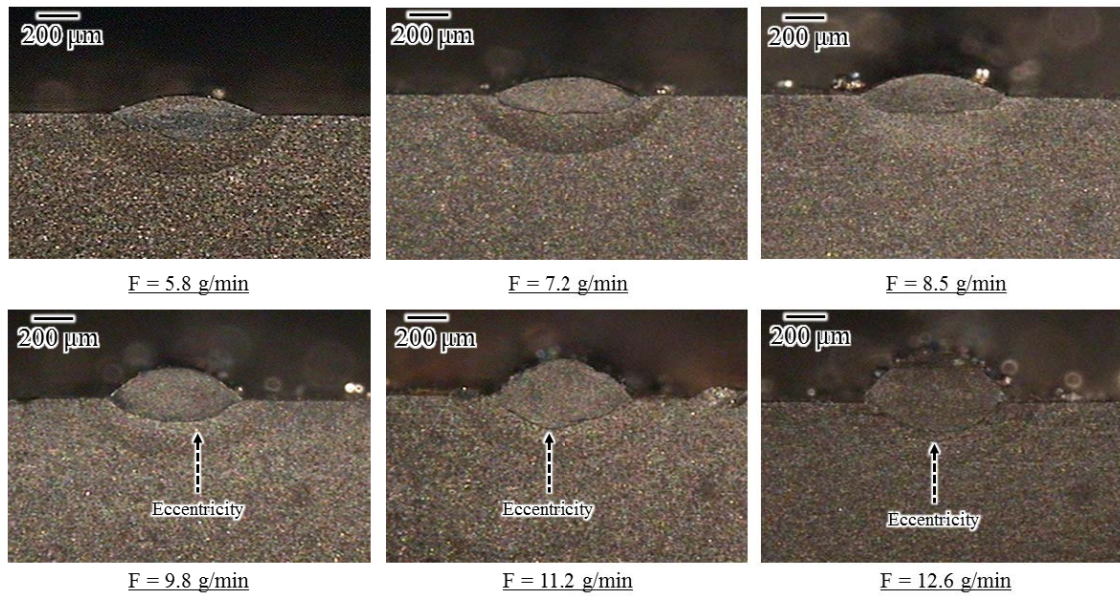
위 결과들로부터 Fig. 13 과 같이 LENS 공정을 이용해 S45C 기저부위 Inconel718 분말 적층시 비드의 단면 형상이 양호하게 생성되는 영역 (Deposition window) 을 도출할 수 있었다. 도출된 영역에서 생성된 비드의 높이를 고려하여 Table. 9 와 Fig. 14 와 같이 3 가지의 적용 가능한 단일 비드 생성 조건을 도출할 수 있었다.



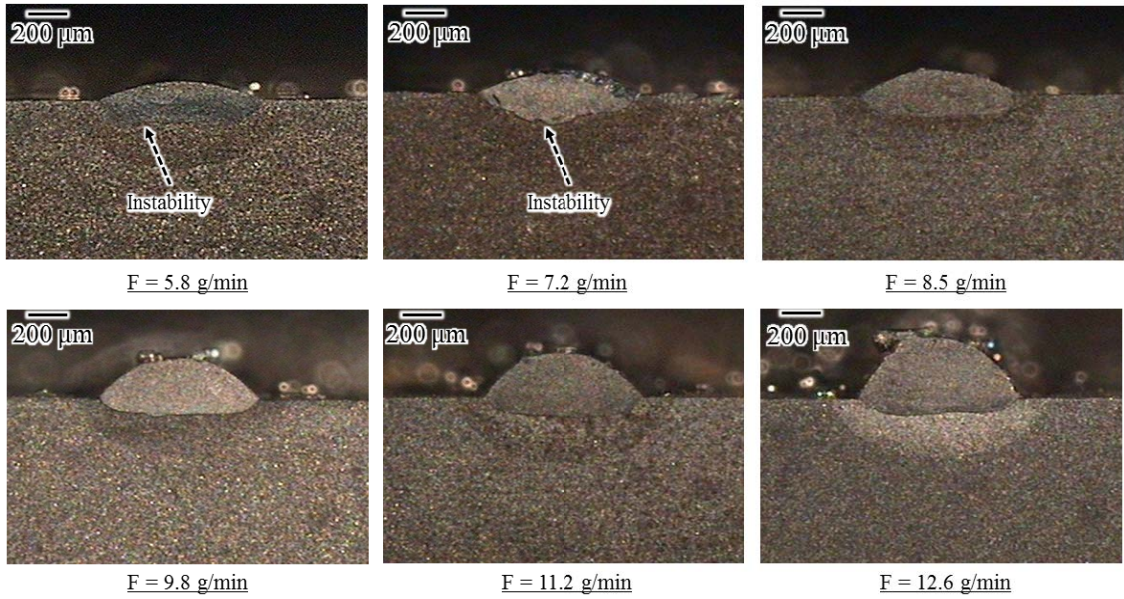
(a) Power of laser = 250 W



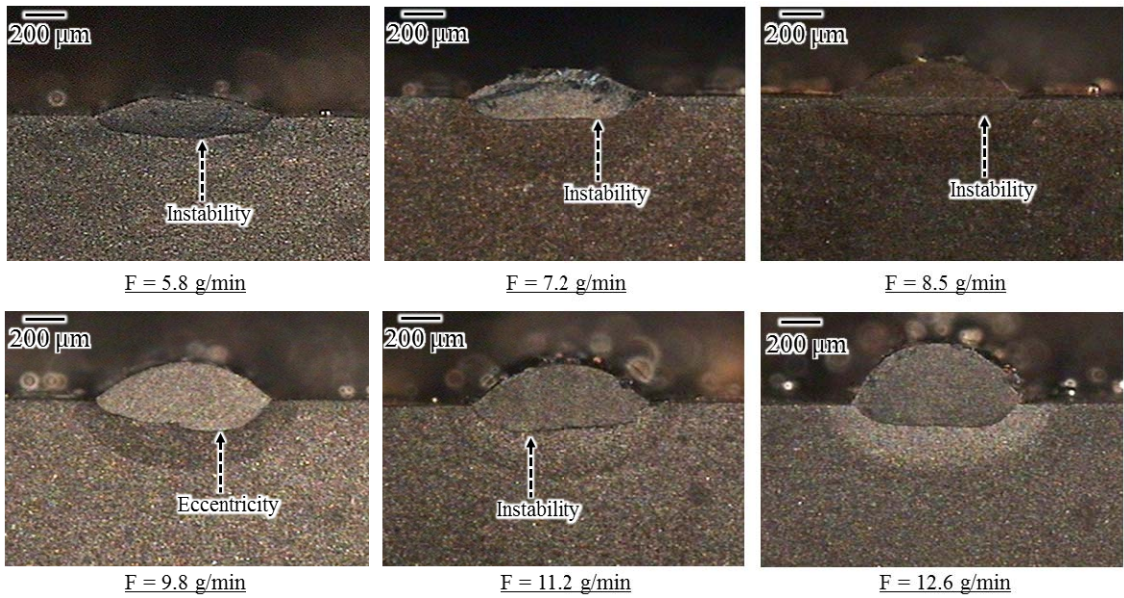
(b) Power of laser = 300 W



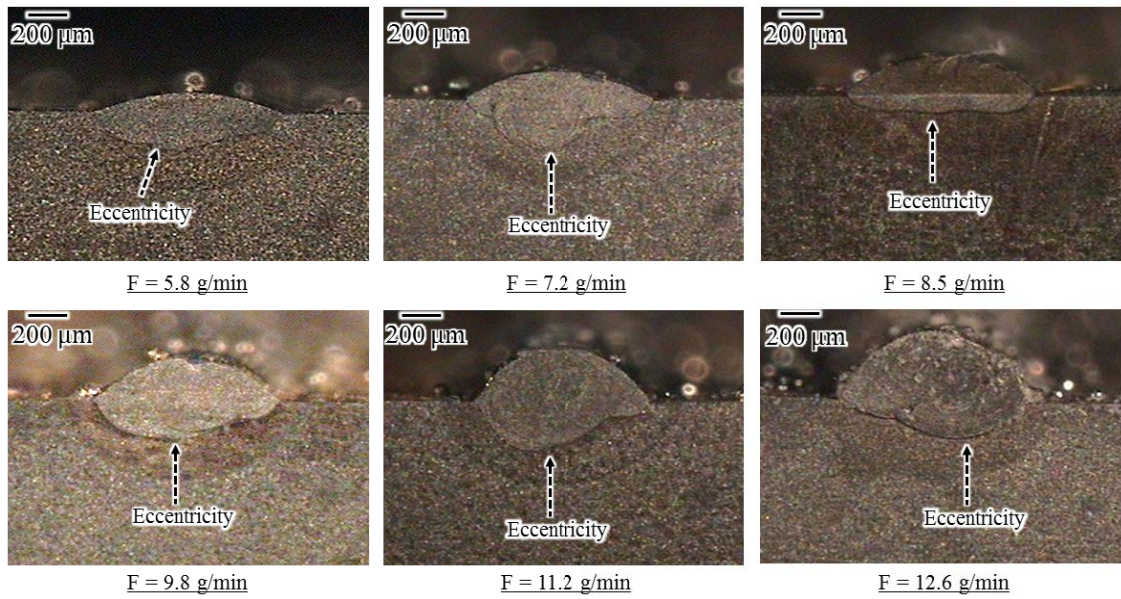
(c) Power of laser = 350 W



(d) Power of laser = 400 W



(e) Power of laser = 450 W



(f) Power of laser = 500 W

Fig 11. Effects of feed rate of powder on the formation of the deposited bead

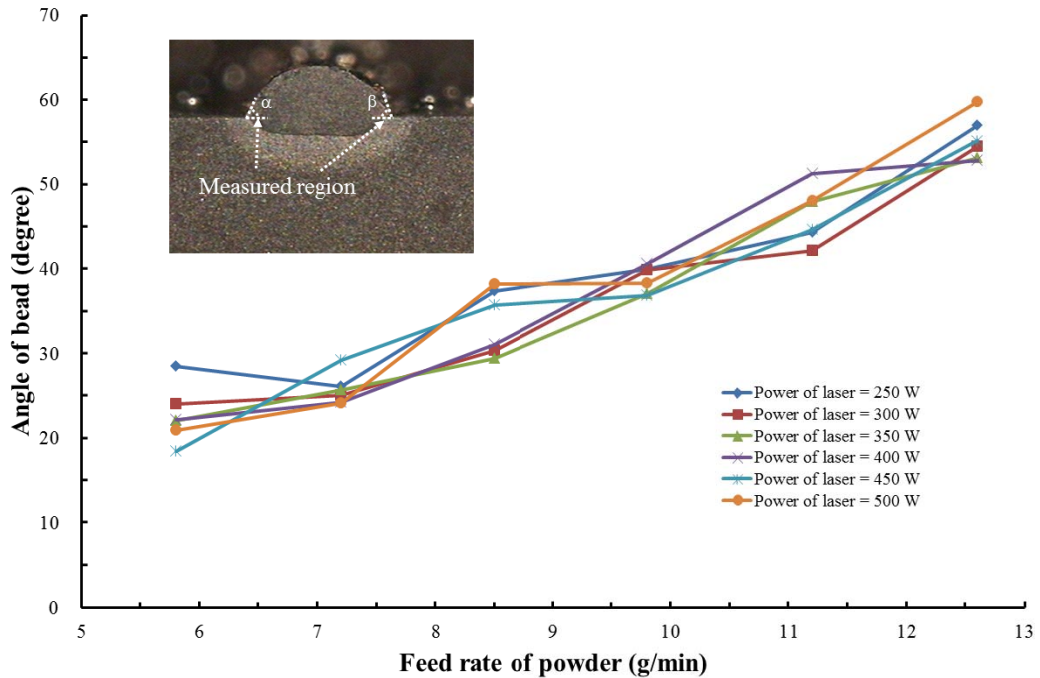


Fig 12. Influence of feed rate of powders on angle of bead

Table 8 Influence of the power of laser and feed rate of powders on the formation of the deposited bead

Power of laser (W)	Feed rate of powder (g/min)	Width of bead (μm)	Height of bead (μm)	Width of molten pool (μm)	Depth of molten pool (μm)
250	5.8	588	70	875	220
	7.2	590	75	873	241
	8.5	588	92	886	247
	9.8	596	128	886	237
	11.2	611	129	900	241
	12.6	632	212	882	243
300	5.8	675	67	973	271
	7.2	676	87	998	278
	8.5	689	122	1,038	290
	9.8	693	142	1,005	271
	11.2	699	182	1,031	277
	12.6	694	222	1,084	264
350	5.8	768	80	1,066	284
	7.2	768	101	1,098	312
	8.5	758	122	1,063	317
	9.8	756	155	1,082	317
	11.2	755	200	1,095	311
	12.6	760	239	1,082	318
400	5.8	835	81	1,154	338
	7.2	836	101	1,137	332
	8.5	829	139	1,152	325
	9.8	829	181	1,153	328
	11.2	831	231	1,224	329
	12.6	852	267	1,178	337
450	5.8	913	97	1,234	356
	7.2	923	128	1,227	364
	8.5	917	158	1,204	327
	9.8	907	192	1,224	349
	11.2	906	237	1,268	354
	12.6	912	284	1,250	363
500	5.8	967	101	1,357	365
	7.2	993	131	1,346	396
	8.5	974	170	1,355	375
	9.8	980	212	1,314	386
	11.2	967	254	1,279	392
	12.6	984	305	1,340	399

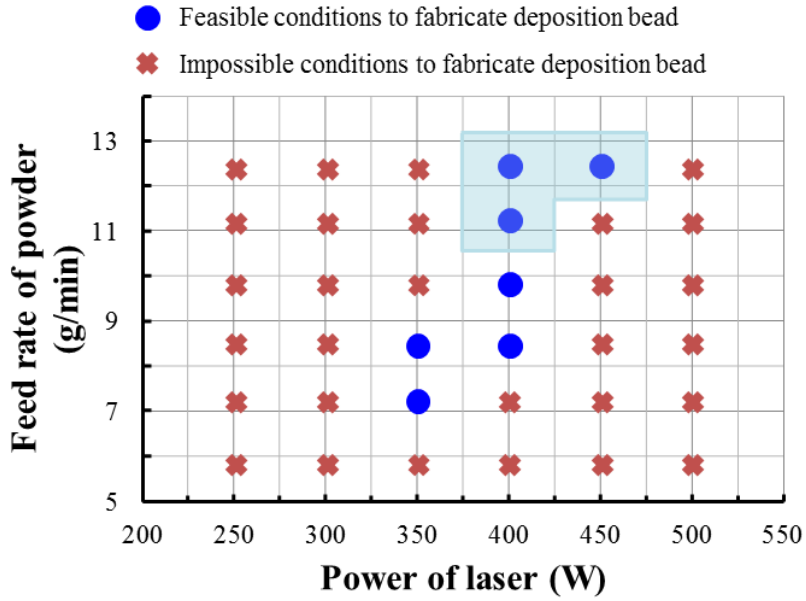
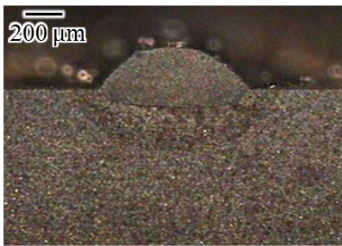


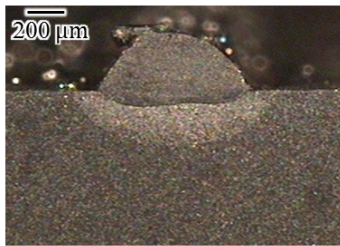
Fig 13. Deposition window to fabricate the deposited bead

Table 9 Selection of proper deposition conditions

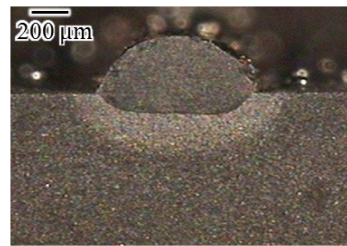
No.	Power of laser (W)	Feed rate of Powders (g/min)
1	400	11.2
2	400	12.6
3	450	12.6



$P = 400 \text{ W}, F = 11.2 \text{ g/min}$



$P = 400 \text{ W}, F = 12.6 \text{ g/min}$



$P = 450 \text{ W}, F = 12.6 \text{ g/min}$

Fig 14. Section view of the specimen for proper deposition conditions

3. 적층 적층 비드 생성 조건 선정

Table. 9 과 Fig. 14 와 같이 선정된 3 가지의 적층 조건에서 최종적으로 1 가지의 적층 조건을 선정하기 위하여 Fig. 15 와 같이 적층비를 도출하였다. 적층비의 도출 식은 식 (1) 과 같이 정의할 수 있다.

$$\varnothing_d = \frac{\rho \cdot A \cdot V}{F} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, ρ , A , V 및 F 는 각각 Inconel718 분말의 밀도, 제작된 비드의 단면적, 이송 속력 및 적층시 공급되는 Inconel718 분말의 양이다. LENS 공정에서 적절한 비드 생성 조건은 생산성을 고려하여 적층비를 고려하여야 한다. 도출된 적층비의 결과로부터 LENS 공정을 이용하여 S45C 기저부 위에 생성되는 Inconel718 분말의 적정 적층 조건은 분말 공급량 과 레이저 파워는 각각 12.6 g/min, 450 W 로 선정하였다. 선정된 조건의 비드의 폭, 높이 용융부의 폭 및 깊이는 각각 912 μm , 284 μm , 1,250 μm 및 364 μm 이다.

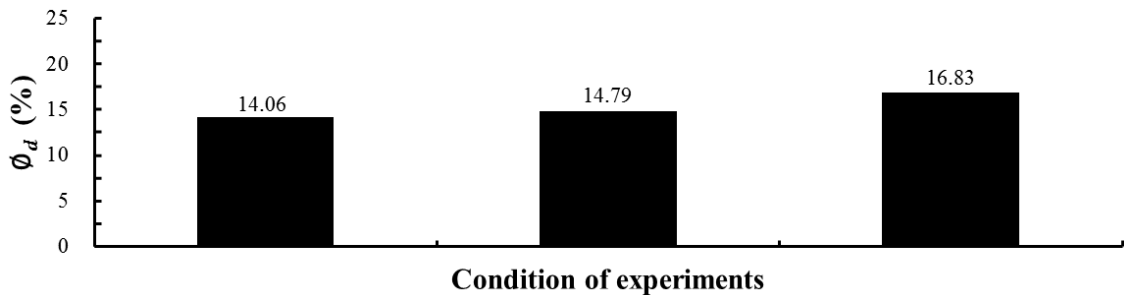
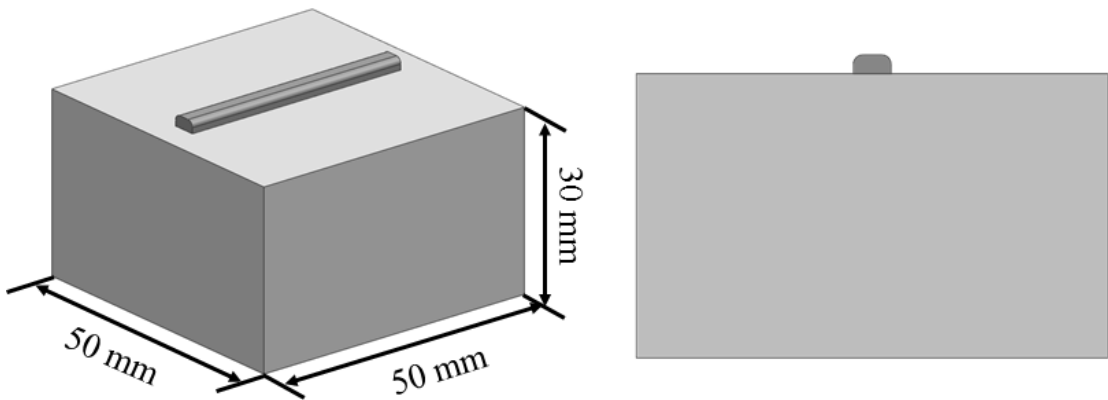


Fig 15. Deposition ratio of proper deposition conditions

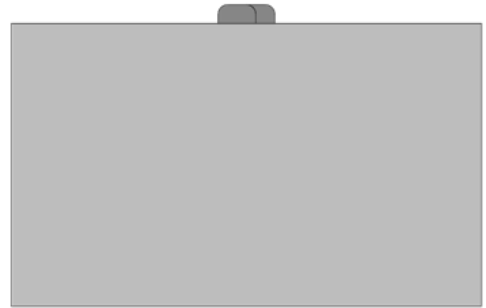
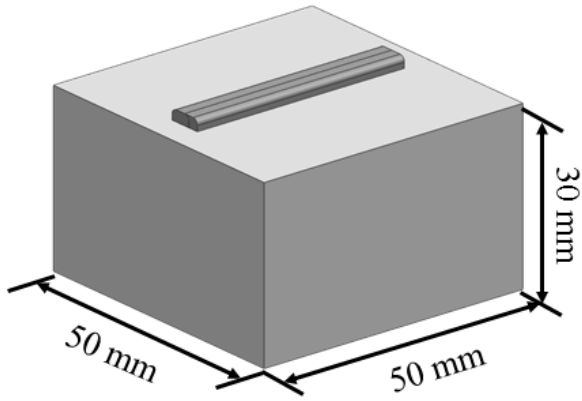
제 2 절 적정 공정 조건을 이용한 다열 및 다층 비드 제작

1. 다열 및 다층 비드 생성 시험 방법

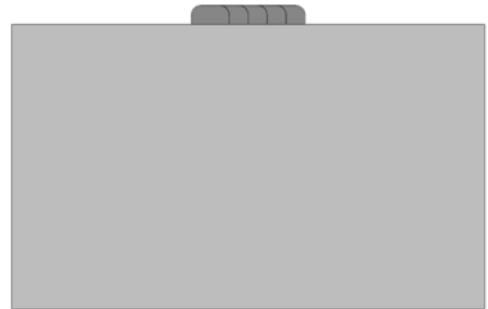
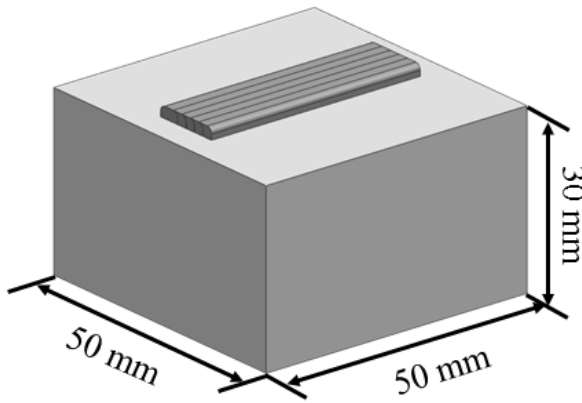
LENS 공정을 이용하여 적층비드의 특성을 분석하기 위해 3장에서 도출된 적정 적층 조건을 이용하여 다열 및 다층 적층 실험을 수행하였다. Fig. 16 (a), (b), (c) 및 (d) 에서와 같이 단일비드 (Single bead), 2 열 비드 (Double bead), 5 열 비드 (Quintuple bead) 및 4 층 적층 비드 (Multiple layers) 로 각각 설계하였다. 단일 비드에서는 적층된 비드 1 개의 비드 크기 및 열원의 효율을 도출하기 위하여 설계하였다. 2 열 비드에서는 적층되는 중첩률 (Overlap ratio) 과 적층되는 2 번째 비드에서의 열원 효율을 도출하기 위해서 설계하였다. 5 열 비드에서는 적층된 비드의 평균 폭을 도출하기 위하여 설계하였다. 마지막으로 4 층 적층 비드 에서는 적층된 비드의 평균 높이를 도출하기 위하여 설계하였다. 각각의 비드의 길이는 정상상태를 고려하여 40 mm 로 실험을 수행하였다. 다열 및 다층 적층 실험 수행 절차로는 Fig. 17 과 같이 시편을 설계하고 적층되는 기저부 표면에 샌드 블라스팅 처리를 수행한 후에 Fig. 7 의 LENS 장비를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 실험조건은 Table. 10 과 같다. 최종적으로 적층 실험을 수행 후 적층된 비드의 적층 특성을 분석하기 위하여 Fig. 9 의 광학 현미경을 이용하여 파괴분석을 수행하였다.



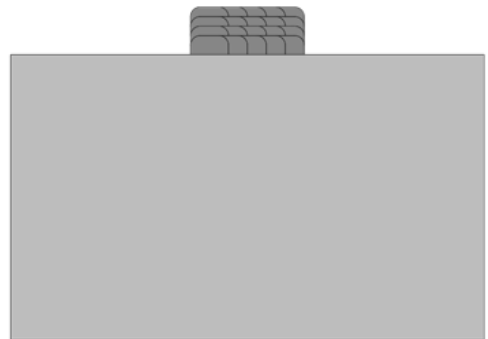
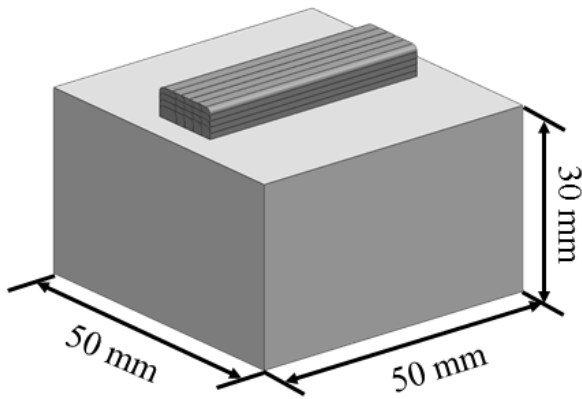
(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Quintuple bead



(d) Multiple layers

Fig. 16 Design of specimens for deposition experiments

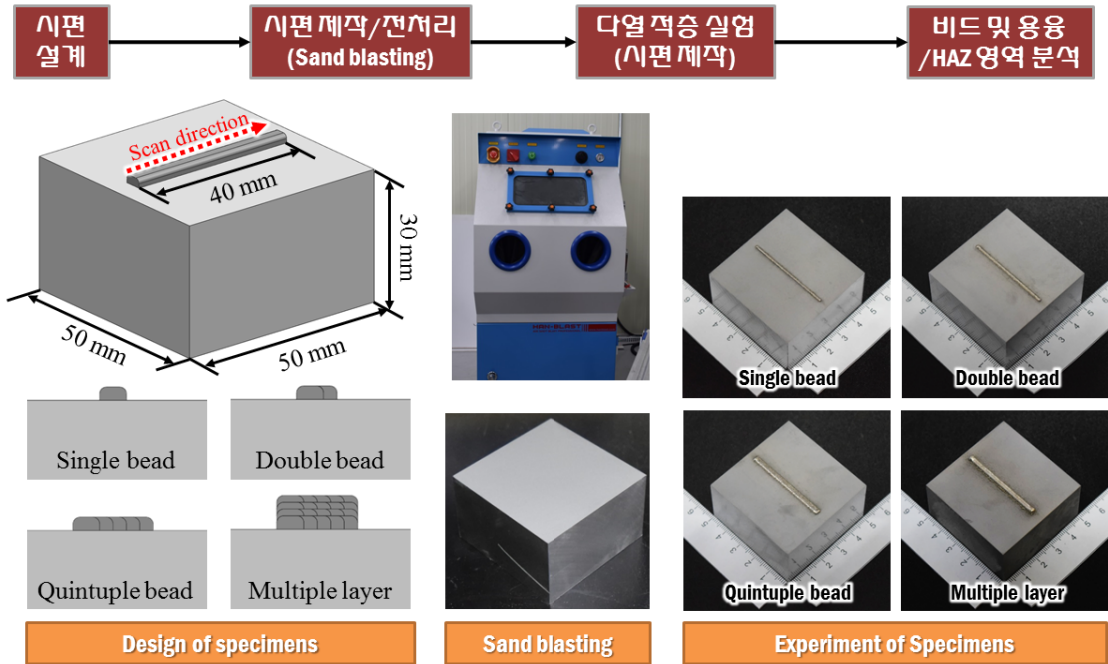


Fig. 17 Experimental procedure

Table 10 Conditions for deposition experiments

Material	Power of laser (W)	Stand off distance (mm)	Feed rate of powder (g/min)	Travel speed (mm/min)	Spot size of laser (μm)	Shield feeder gas flow rate (L/min)
Inconel718	450	9.6	12.6	1,000	700	7

2. 다열 및 다층 비드 생성 시험 결과 및 고찰

LENS 공정을 이용하여 다열 및 다층 비드 생성 시험을 수행 후 적층된 비드의 단면 형상은 Fig. 19 와 같다. 적층된 모든 실험에서 비드의 균열이 나타나지 않고 적층이 되었다. 실험 후 제작된 비드의 폭과 높이 및 용융부의 폭과 깊이는 각각 Table. 11 과 같다. 단, 여기서 열 영향부 (Heat Affected Zone : HAZ) 는 용융부로 가정한다. Fig. 19 (a) 에서 제작된 비드의 폭과 높이는 각각 924 μm 및 182 μm 이다. Fig. 19 (b) 에서 제작된 비드의 폭과 높이는 각각 1,403 μm 및 300 μm 와 같으며 중첩률을 식 (2) 와 같이 정의할 수 있다.³⁸⁾

$$\text{Overlap ratio (\%)} = (1 - \text{scan line spacing } (\mu\text{m}) / \text{deposited width } (\mu\text{m})) \times 100 \quad (2)$$

여기서, scan line 및 width 는 Fig. 18 과 같이 도출된다.

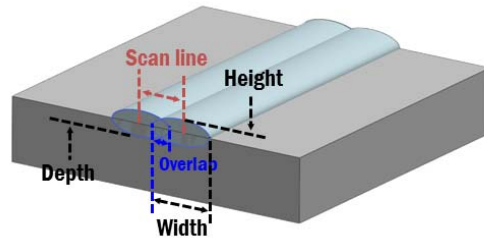
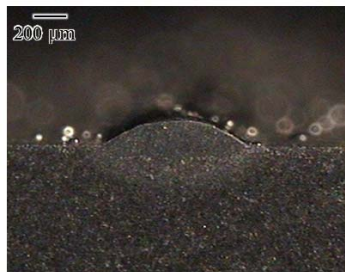


Fig. 18 Concept of the overlap ratio

식 (2) 을 이용하여 중첩률을 도출한 결과 약 50 % 로 도출되었다. Fig. 19 (c) 에서 제작된 비드의 폭과 높이는 각각 2,726 μm 및 408 μm 와 같으며 비드 1 개의 평균 폭은 545 μm 으로 도출되었다. Fig. 19 (d) 에서 제작된 비드의 폭과 높이는 각각 2,664 μm 및 1,490 μm 와 같으며 비드 1 개의 평균 높이는 372 μm 으로 도출 되었다.



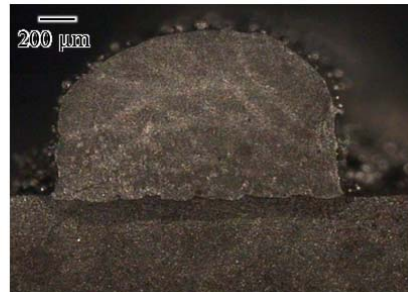
(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Quintuple bead



(d) Multiple layers

Fig. 19 Results of deposition experiment

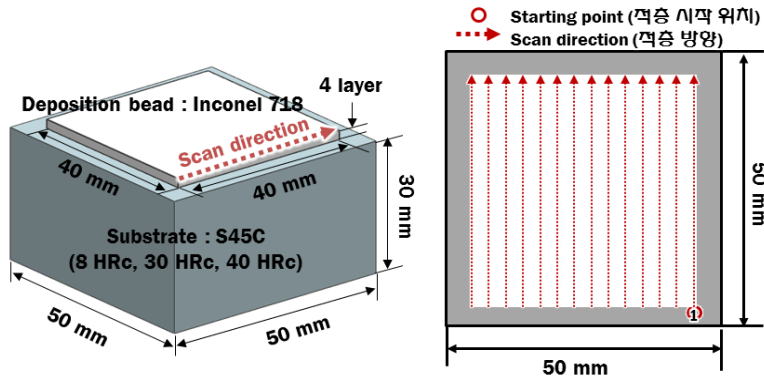
Table 11 Width and depths of the deposited bead and molten pool for different deposition cases

Case	Power (W)	Travel Speed (mm/min)	Width of bead (μm)	Height of bead (μm)	Width of molten pool (μm)	Depth of molten pool (μm)
Single bead	450	1,000	924	182	1,190	287
Double bead	450	1,000	1,403	300	1,731	290
Quintuple bead	450	1,000	2,726	408	2,986	268
Multiple layers	450	1,000	2,664	1,490	2,908	247

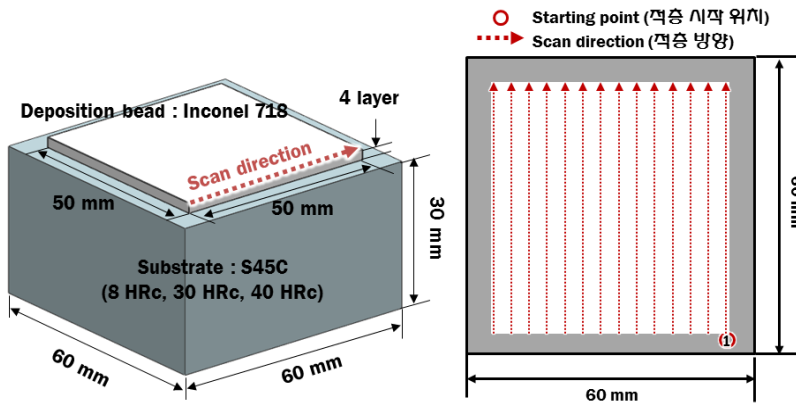
제 3 절 대면적 적층 시편 제작 및 시험

1. 대면적 적층 시험 방법

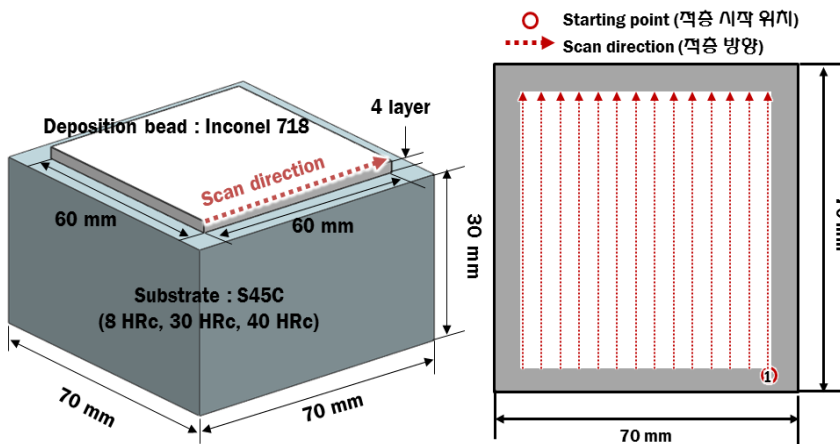
LENS 공정을 이용하여 이중재료 적층의 특성을 분석하기 위해 3 장에서 도출된 적정 적층 조건을 이용하여 대면적 적층 시험을 수행하였다. Fig. 20 (a), (b) 및 (c) 와 같이 S45C 기저부의 크기 및 경도에 따른 적층 특성을 분석하기 위해 총 9 가지로 설계하였다. 적층 실험에는 Fig. 7 의 LENS 장비를 이용하여 실험을 수행하였고 Fig. 8 의 샌드 블라스팅 장비를 이용하여 적층부 표면에 샌드 블라스팅 처리를 수행하였다. 실험에 적용된 실험조건은 Table. 10 과 같다. 적층 방향은 9 가지 종류 모두 같은 단일 방향으로 적층을 진행하였다. 적층부의 크기는 적층의 안정성을 확보하기 위하여 기저부의 크기에서 각각 5 mm offset 하여 적층을 수행하였다. 최종적으로 적층 실험을 수행 후 적층 특성을 분석하기 위하여 비파괴 외/내부 검사를 수행하였다.



(a) Dimension of Substrate (50 mm × 50 mm)



(b) Dimension of Substrate (60 mm × 60 mm)



(c) Dimension of Substrate (70 mm × 70 mm)

Fig. 20 Design of specimen and deposition path for the deposition experiment with a large area

2. 대면적 적층 시험 결과 및 고찰

LENS 공정을 이용하여 기저부의 크기 및 경도에 따른 대면적 이중 재료의 적층 실험 결과는 Fig. 21 과 같다. 제작된 9 가지의 Type 모두 외부 균열 없이 제작이 된 것으로 관찰되었다. 또한 적층 방향이 단일 방향이기 때문에 적층 방향의 양 끝은 시편의 중앙보다 높이가 높은 것을 확인할 수 있는데 이러한 결과는 양 끝 부분이 과도 열 전달이 진행되기 때문으로 사료된다.

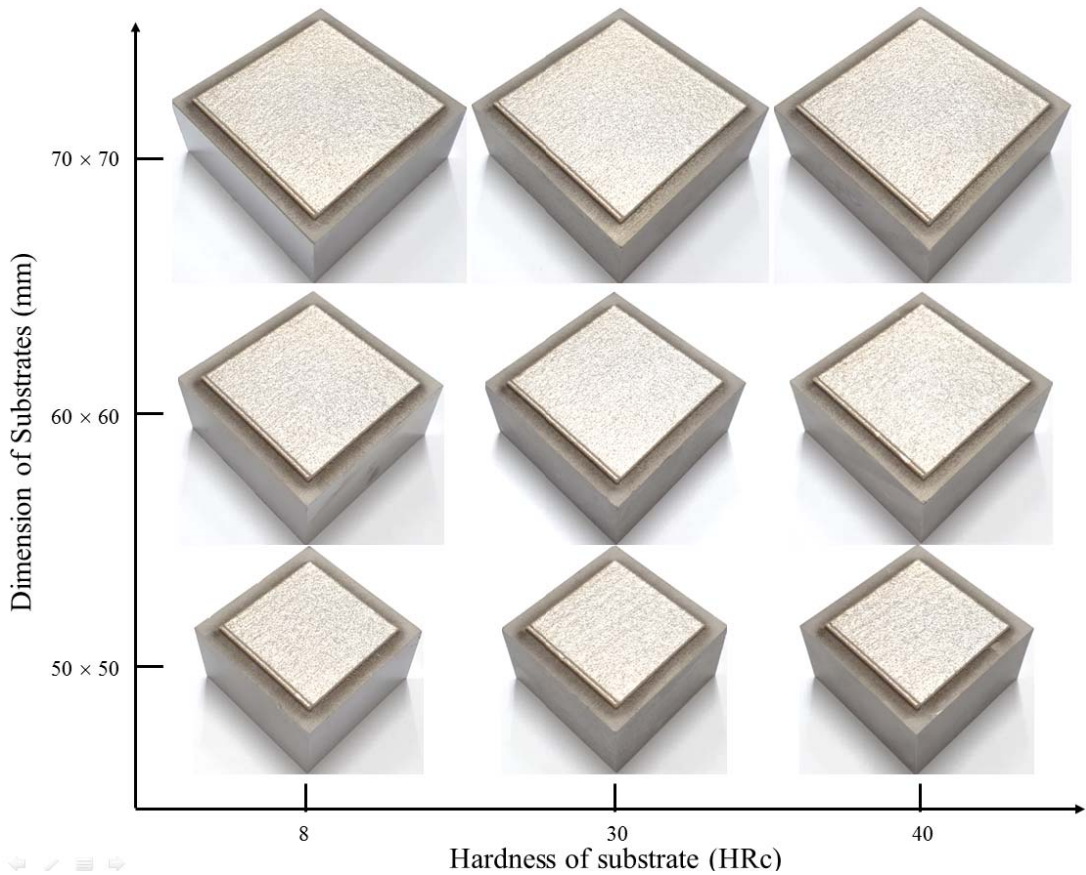


Fig. 21 Results of deposition experiments with a large area

가. 대면적 시편의 비파괴 외부 균열 검사

기저부 경도와 적층부의 크기에 따른 대면적 적층 시편에 대하여 Fig. 9 의 광학현미경인 Xi-cam을 이용하여 적층 경계부의 외부 결함 발생 여부에 대하여 분석하였다.

기저부 경도가 높을수록 균열이나 결함이 생기는 확률이 높기 때문에 기저부 경도가 가장 높은 시편에 대하여 외부 균열 검사를 수행하였다. 측정위치는 Fig. 22 와 같이 적층부의 각 모서리에서 관찰하였고 관찰 결과는 Fig. 23 과 같이 적층 후 적층부 주위에 용융되지 못한 분말들과 레이저에 의한 그을림만 발견되었으며 외부의 균열 및 결함은 발생하지 않음을 알 수 있었다.



Fig. 22 Measured regions by optical microscope

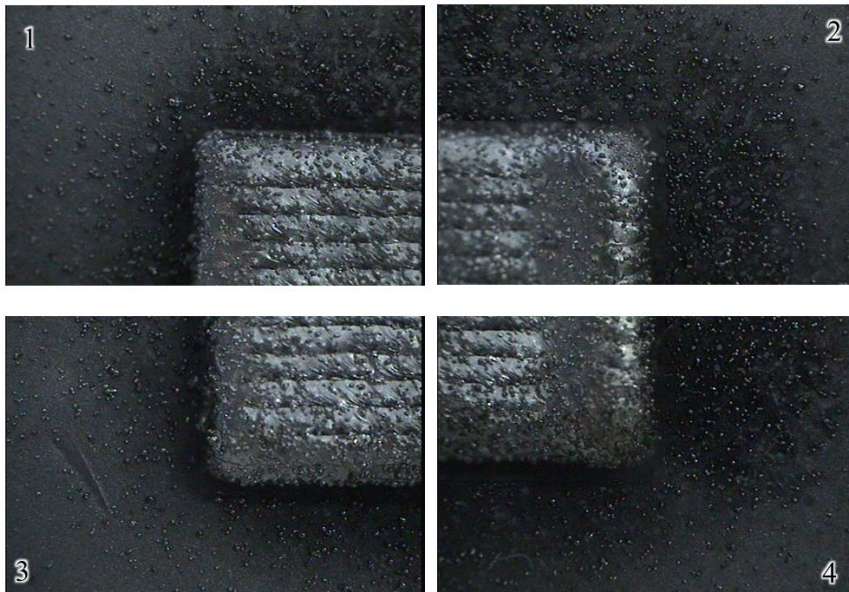


Fig. 23 Morphologies of external surface of specimens

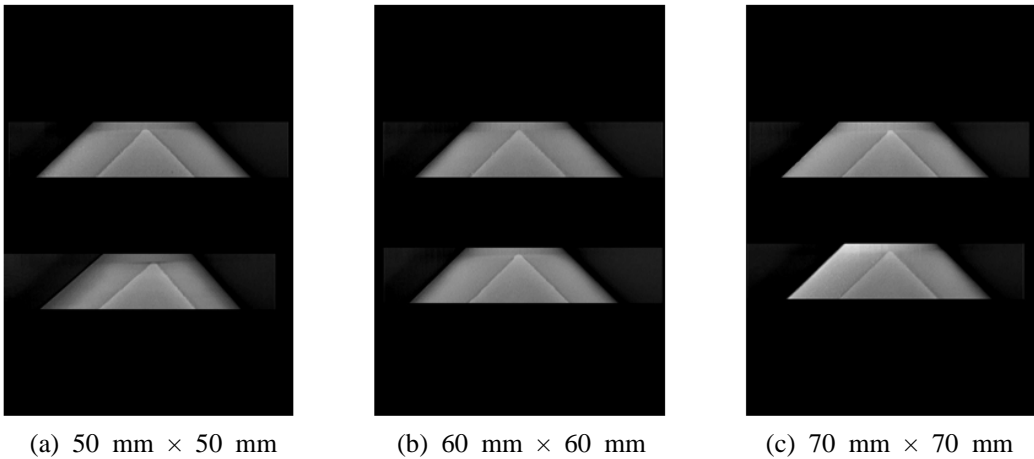
나. 대면적 시편의 비파괴 내부 균열 검사

기저부 경도와 적층부 크기에 따른 대면적 적층시편에 대하여 Fig. 24 와 같은 미세 초점 3 차원 X-ray CT 장비 (SMX-255CT, 원광대학교)를 이용하여 내부 결함 발생여부에 대하여 분석하였다.

기저부 경도가 가장 높은 시편에서 결함 및 균열이 발생할 것으로 예상되어 적층부의 경계부에 대하여 높이방향으로 71 μm 마다 내부 투과를 수행한 결과 Fig. 25 와 같이 모든 조건에서 내부 결함 발생 없이 적층이 된 것을 알 수 있다.



Fig. 24 X-ray CT system



(a) 50 mm \times 50 mm

(b) 60 mm \times 60 mm

(c) 70 mm \times 70 mm

Fig. 25 X-ray CT images for different dimensions of specimen

(Hardness of substrate = 40 HRc)

제 4 장 3 차원 유한요소해석을 이용한 적층 특성 분석

제 1 절 3 차원 유한요소해석 모델 개발

LENS 공정을 이용한 금속 적층제조 공정의 적층 특성 분석을 위하여 3 차원 유한요소해석 모델을 개발하였다. 3 차원 유한요소해석 모델 개발에 사용된 프로그램은 SYSWELD 이다. 유한요소해석 모델링에는 2 가지의 가정을 하였다. 첫 번째, 실온은 20 °C 이다. 두 번째, 시편의 초기온도는 상온이다. 유한요소해석 모델은 Fig. 26 과 같이 설계하였다. 유한요소해석 모델의 크기는 실험의 기저부 크기와 같은 50 mm × 50 mm × 30 mm 이다. 기저부 경도는 총 3 가지로 8 HRc, 30 HRc 및 40 HRc 에 대하여 각각 설계하였다. 해석 모델에 적용된 비드의 크기는 다열 및 다층 적층 실험 결과와 같은 비드크기로 모든 조건에 대하여 개별적으로 생성하였고 격자수와 절점수는 Fig. 27 과 같고 해석 시간을 고려하여 에너지가 집중되는 비드 주위의 유한요소는 조밀하게 형성되도록 편향된 요소를 적용하였다. 적층부의 상면은 산화방지를 위한 보호가스 중 아르곤 가스를 이용한 강제대류 조건을 부여하였으며 기저부의 측면에는 자연대류 조건을 부여하였다. 또한 경계조건으로는 실제 실험에서 부여하였던 고정 조건을 사이드와 바닥에 각각 부여하였다. 해석에 적용된 공정 변수는 Table. 12 와 같다. 해석모델에 적용된 기저부와 비드의 재료는 각각 S45C 와 Inconel718 이다.

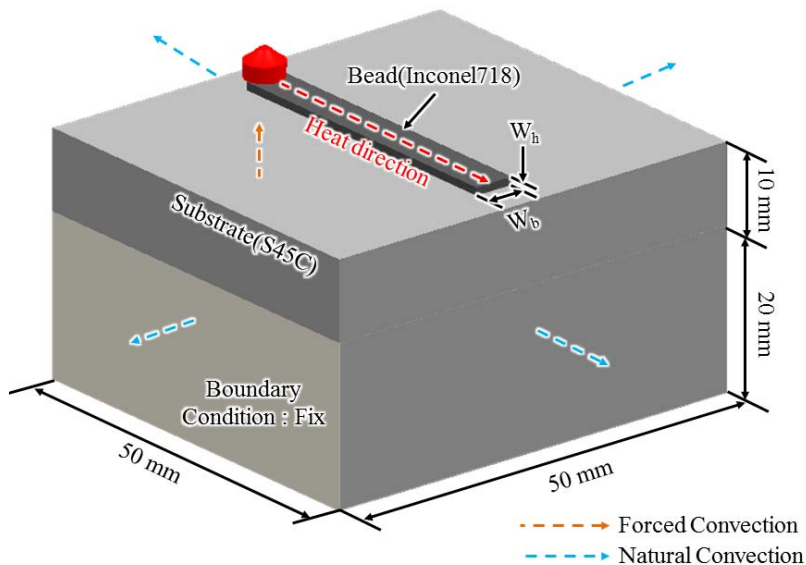
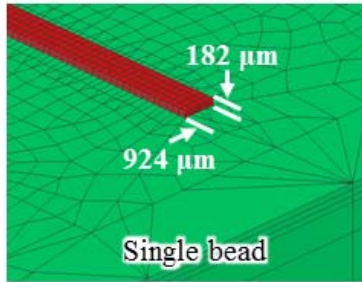
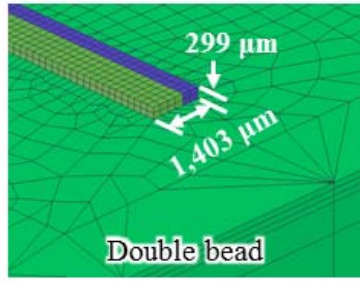


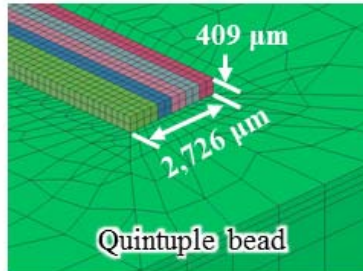
Fig. 26 Model of a three-dimensional finite element analysis



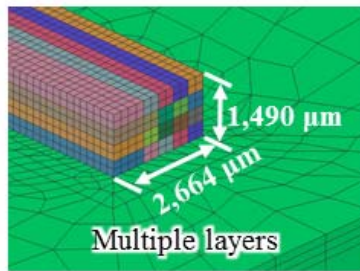
No. elements = 26,456 EA
 No. nodes = 27,963 EA



No. elements = 29,288 EA
 No. nodes = 31,238 EA



No. elements = 35,816 EA
 No. nodes = 39,021 EA



No. elements = 54,512 EA
 No. nodes = 58,830 EA

Fig. 27 Bead shapes for different FE models

Table 12 Conditions of three-dimensional FE analysis

Power (W)	Travel speed (mm/s)	Interpass time (sec)	Type of shielding gas	Spot size of laser (μm)	Overlap ratio (%)
450	16.67	1.25	Argon	700	50

제 2 절 물성데이터 도출

LENS 공정을 이용한 금속 적층 제조 공정의 열전달 특성 분석을 하기 위해 3 차원 유한요소해석을 수행하고자 한다. LENS 공정의 레이저를 이용하여 금속 적층을 수행할 경우 금속 가열과 금속 냉각이 이루어지기 때문에 공정 진행 중 금속의 상태가 변화할 경우 용융부의 열전달 특성이 변화하게 된다. LENS 공정을 이용한 금속 적층 제조 공정 열전달 해석 모델에서는 이와 같은 적층부의 상태 변화를 고려하기 위해 온도가 고려된 열전달 해석용 물성데이터를 도출하고자 한다. 열전달 해석에 필요한 물성 데이터는 온도 의존 밀도 (Temperature dependent density : ρ_1), 온도 의존 비열 (Temperature dependent specific heat : C_p) 및 온도 의존 열전도도 (Temperature dependent thermal conductivity : k) 이다. 온도 의존 물성치는 Fig. 28 과 같이 기저부의 재료인 S45C 는 JmatPro 소프트웨어를 이용하여 온도 의존 물성을 도출하였다. 비드의 재료인 Inconel718 은 프로그램 SYSWELD 에 있는 온도 의존 물성을 사용하였다. 또한 대류 및 복사와 같은 열전달 경계조건은 표면으로부터 열 손실에 기여한다. 대류 (q''_{con}) 에 의한 열 손실은 식 (8) 과 같이 뉴턴의 냉각 법칙에 의해 정의된다.^{24,39)}

$$q''_{con} = h_{con}(T_s - T_{\infty}) \quad (8)$$

여기서, h_{con} , T_s 및 T_{∞} 은 각각 대류계수, 표면온도 및 주변 온도이다. 복사 (q''_{rad}) 로 인한 열 손실은 식 (9) 과 같이 Stefan-Boltzmann constant 에 기초한 열 유속으로 정의된다.^{24,39)}

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma_s(T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (9)$$

여기서, ε , 및 σ_s 은 각각 물질의 방사율과 Stefan-Boltzmann constant 이다. Stefan-Boltzmann constant 는 $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 이다. 식 (8) 은 식 (9) 에서와 같이 뉴턴의 냉각 법칙의 형태로 식 (10) 과 같이 다시 정의된다.^{24,39)}

$$q''_{rad} = h_{rad}(T_s - T_{\infty}) \quad (10)$$

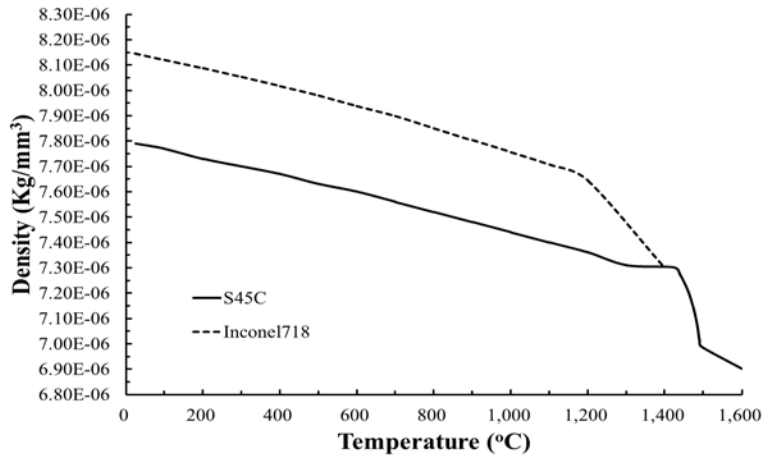
여기서 h_{rad} 는 복사 계수이다. h_{rad} 는 식 (11) 과 같이 정의된다.^{24,39)}

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma_s (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (11)$$

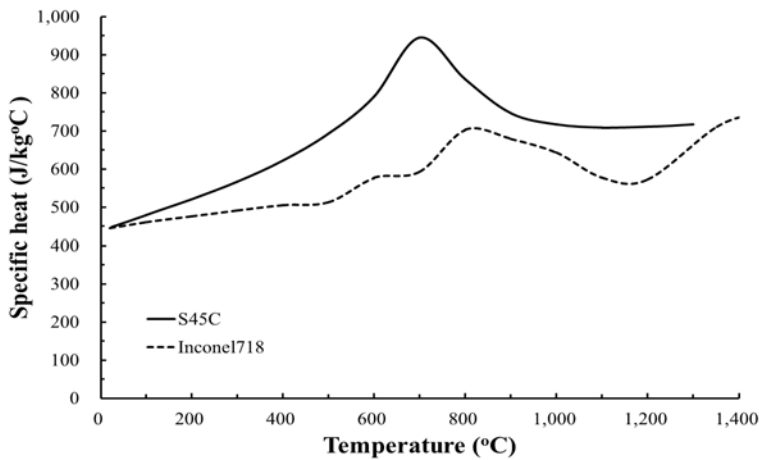
대류 및 복사에 의한 열 손실은 식 (12) 와 같이 1 차 방정식으로 정의할 수 있다.

$$q''_{\text{loss}} = (h_{\text{con}} + h_{\text{rad}})(T_s - T_\infty) \quad (12)$$

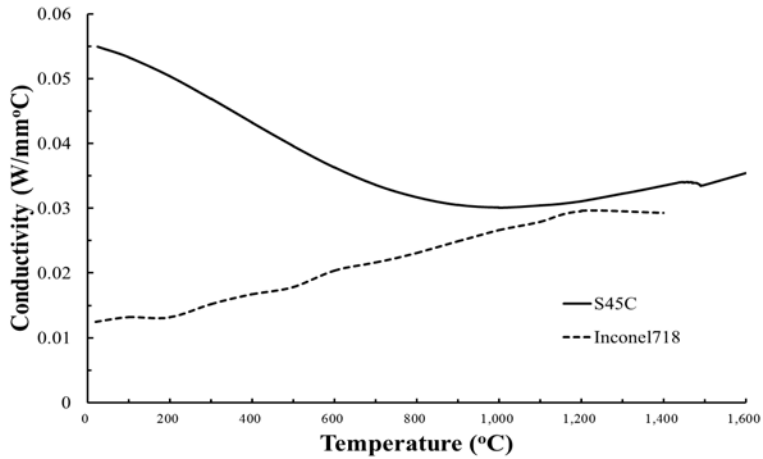
아르곤 보호가스에 의한 강제 대류를 계산하기 위해 Inconel718 소재의 방사율을 선형 추세선을 사용하여 Fig. 29 와 같이 도출 하였다.⁴⁰⁾



(a) Temperature dependent density



(b) Temperature dependent specific heat



(c) Temperature dependent thermal conductivity
 Fig. 28 Temperature dependent thermal properties

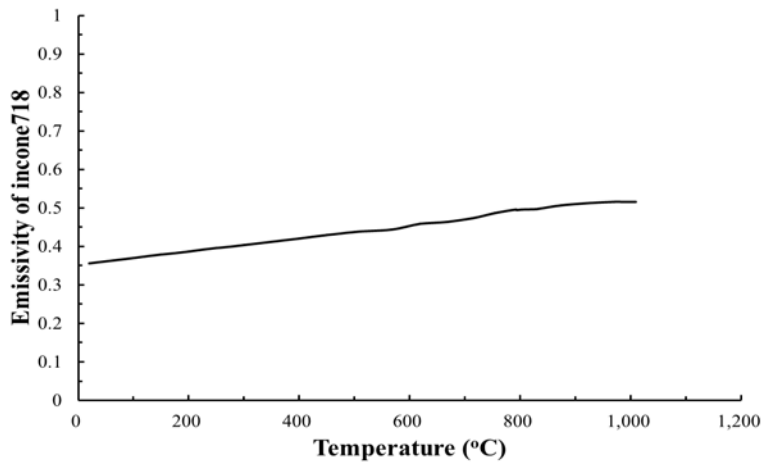


Fig. 29 Temperature dependent emissivity of Inconel718

제 3 절 열원 모델 개발

LENS 공정의 열원인 레이저를 수학적으로 모델링하기 위하여 에너지 분포를 가우시안 (Gaussian) 분포로 가정하였고 레이저의 횡축 모드 (Transverse Electromagnetic Mode : TEM) 는 TEM₀₀ 모드로 가정하였다.⁴¹⁾ 이러한 2 가지의 가정을 이용하여 식 (13), (14) 및 (15) 와 같이 레이저 열원 (Heat flux) 의 기본 모델링 식을 도출하였다.^{24,42)}

$$Q(x, y, z) = \eta \cdot Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{X^2 + Y^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (13)$$

$$Q_0 = \frac{P}{\pi r_e^2 (z_i - z_e)} \quad (14)$$

$$r_0(z) = r_e + \left(\frac{z - z_e}{z_i - z_e}\right)(r_i - r_e) \quad (15)$$

여기서, Q_0 , X , Y , $r_0(z)$, η , P , r_e , r_i , z , z_e , 및 z_i 는 각각 표준 열원 강도 (Normalized heat source intensity), x 좌표, y 좌표, 깊이에 따른 레이저의 유효직경, 효율, 레이저 빔 파워, 열원 모델 상부의 유효반경, 열원 모델 하부의 유효반경, z 좌표, 열원 모델 상부의 z 방향 위치 및 열원 모델 하부의 z 방향 위치이다.

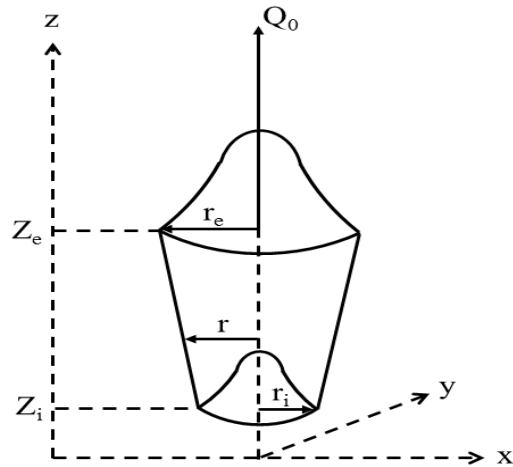


Fig. 30 Schematic diagram of heat source²⁴⁾

사용된 체적 열원 모델의 개념도는 Fig. 30 과 같다. 물질에 흡수되는 실제 열은 파장의 반사 및 물질의 증발로 인해 열원의 실제 전력보다 작기 때문에 이러한 예측할 수 없는 손실은 열원의 효율을 이용하여 고려하여야 한다.²⁴⁾

제 4 절 3 차원 열전달 특성 분석

1. 정상상태 열전달 구간에서 열원의 적정 효율 데이터 도출

각 조건별 열원의 적정 효율 데이터를 도출하기 위해 열원 효율에 따른 용융부의 폭 및 깊이 변화를 실험 결과와 비교 및 분석하였다. 여기서 열 영향부는 용융부로 가정하였다. 열원의 효율은 용융 영역의 폭과 깊이를 기준으로 선정하였다. 해석 결과의 온도분포는 기저부인 S45C 의 용융 온도인 1,520 °C 를 기준으로 하였다. 각 조건별로 시간에 따른 용융부 최대 온도 변화를 이용하여 적층 공정 중 정상상태 열전달 구간을 Fig. 31 과 같이 도출하였다. 정상상태 기준은 시간에 따른 최대 온도 변화가 1 °C 이하인 경우로 선정하였다. 레이저 열원의 위치가 3.4 mm 이하인 경우에는 용융부 최대 온도가 증가하여 과도 열전달이 진행되며 레이저 열원의 위치가 3.4 mm 이상인 경우에는 정상상태 열전달이 진행되었다. 해석결과는 정상상태인 20 mm 에서 최대 용융폭 및 깊이를 기준으로 도출하였다. 각 조건별로 3 차원 열전달 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 용융부의 크기가 10 % 이내의 오차율을 가지는 효율 범위를 각 조건별로 Fig. 33 의

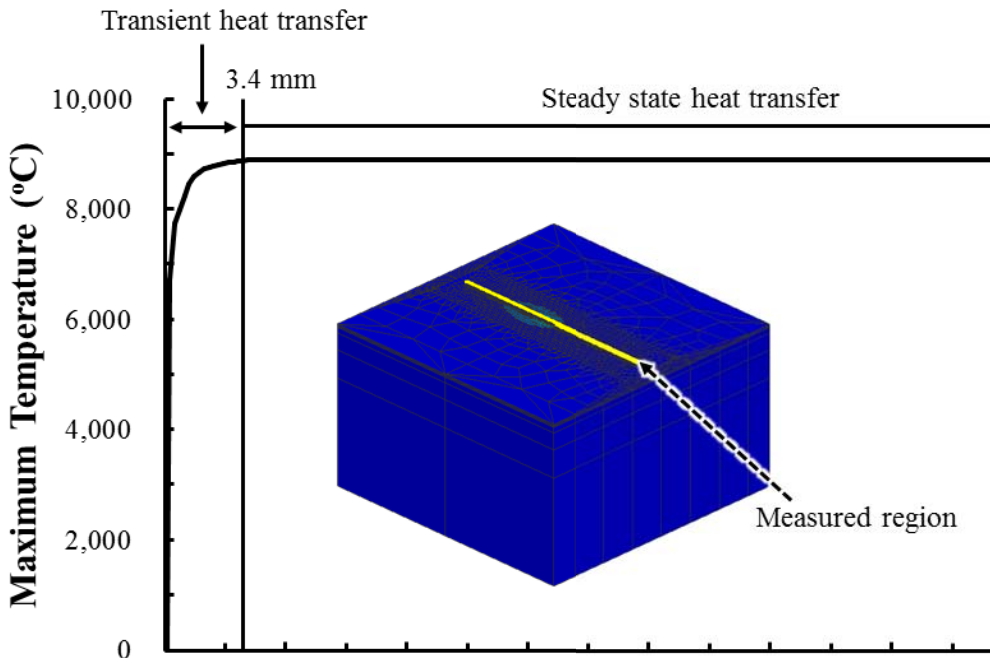


Fig. 31 Estimated steady-state heat transfer region

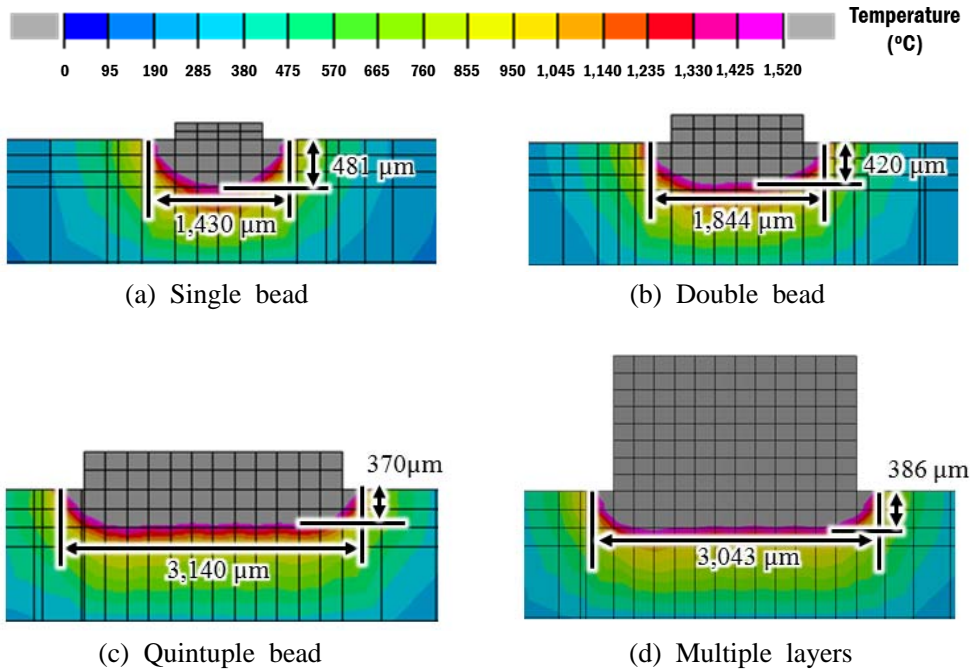


Fig. 32 Temperature distribution for different deposition cases ($\eta = 1.0$)

(a), (b), (c) 및 (d) 와 같이 도출 하였다. 도출한 결과 적정 효율에서 해석을 진행하기 위하여 효율 범위 내에서 적정 효율을 Table. 13 과 같이 단일 비드에서는 0.63, 2 열 비드에서는 0.80, 5 열 비드에서는 0.80 마지막으로 4층 적층 비드에서는 0.77 로 선정 하였다. 열원의 적정 효율은 각 조건별로 다르게 나타나지만 단일 비드를 제외한 나머지 조건에서는 열원의 효율이 비슷하게 나타났다. 이러한 이유는 2 열 비드부터는 Overlap ratio 가 50 % 로 적용되면서 적층되는 패턴이 같기 때문으로 사료된다. 적층 영역의 열전달 특성데이터 변화 분석을 위해 각 조건별 용융부의 크기가 10 % 이내의 효율을 가지는 효율 구간에서 해석을 수행하였다. 적층 영역의 열전달 특성 데이터 변화 분석을 위하여 각 조건별 적정효율을 적용하여 3 차원 열전달 해석을 수행 후 Fig. 34 와 같이 실험결과와 비교하였다. 각 조건별 열원의 효율에 따른 해석 결과를 볼 때 오차율 10 % 이내로 실험 결과와 유사한 해석을 수행하였음을 알 수 있었다.

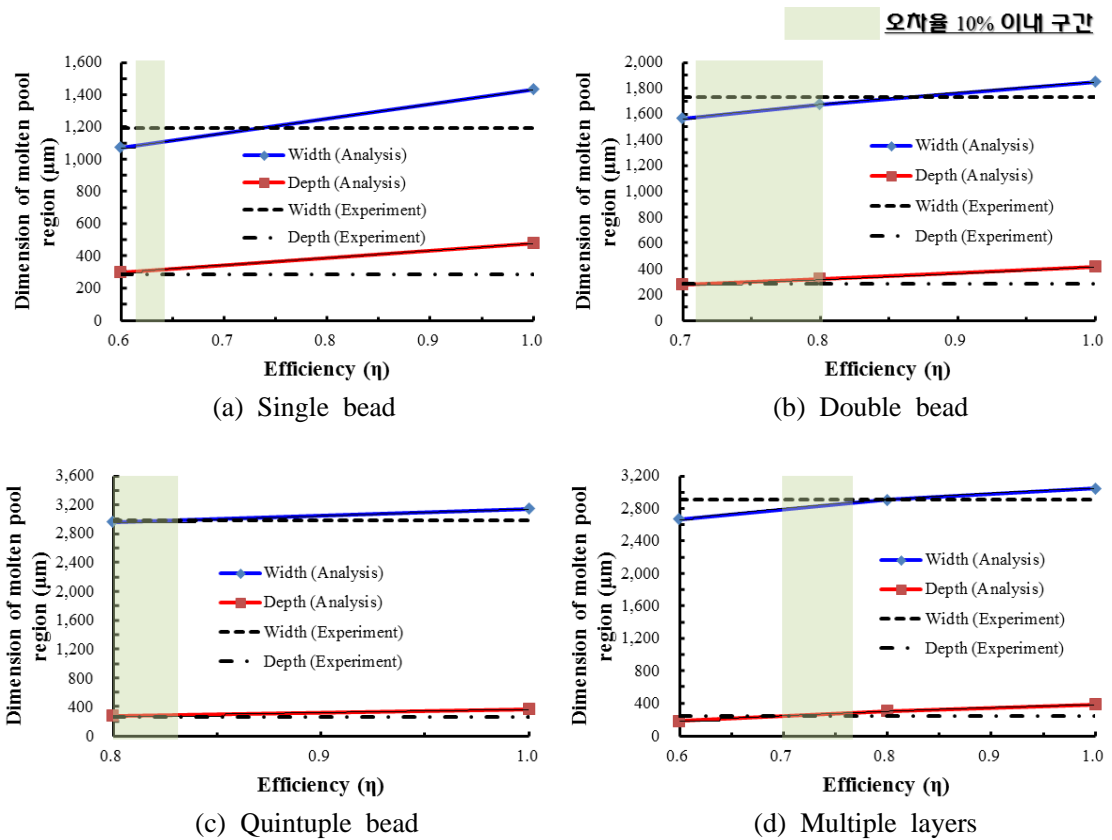
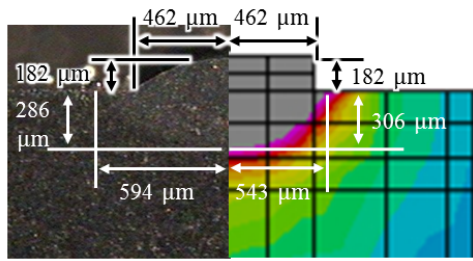


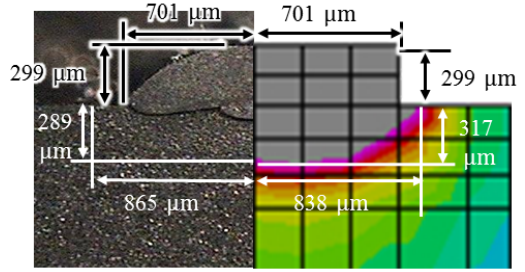
Fig. 33 Influence of efficiency of heat flux on the width and the depth of the molten pool

Table 13 Proper efficiencies of different deposition cases

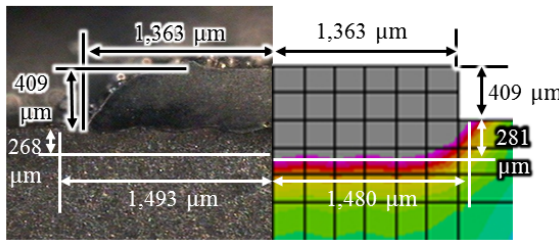
Conditions	Single bead	Double bead	Quintuple bead	Multiple layers
Efficiency (η)	0.63	0.80	0.80	0.77



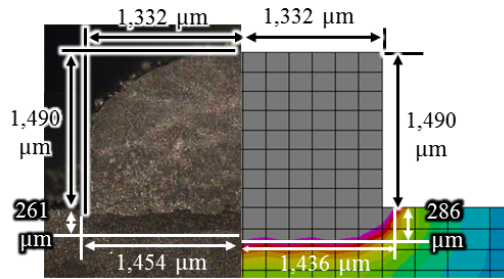
(a) Single bead



(b) Double bead



(c) Quintuple bead



(d) Multiple layers

Fig. 34 Comparison of the formation of the molten pool for experiment and that for analysis

2. 열전달 특성 분석

열전달 특성 분석을 하기 위해 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 열전달 특성 분석으로는 단일 비드, 2 열 비드, 5 열 비드 및 4 층 적층 비드 에서 기저부 S45C 의 경도 (8 HRc, 30 HRc 및 40 HRc) 에 따른 열전달 특성 분석을 수행하였고 5 열 비드부터는 적층 경로에 따라서 변화하는 열전달 특성 분석을 수행하였다. 마지막으로 대면적 적층에서의 열전달 특성 분석을 수행하였다. 열전달 특성 분석으로는 첫 번째로 적층이 진행될 때 정상상태 열전달 구간에서 적층부 상면의 온도 분포와 재결정 온도까지 미치는 온도 분포를 분석하였다. 두 번째로 적층이 진행될 때 첫 번째 열에서의 재결정 온도까지 미치는 영향성을 분석하였다.

가. 단일 비드에서의 열전달 특성 분석

Fig. 35 (a), (b) 및 (c) 는 3 차원 열전달 유한요소해석 결과로부터 도출된 기저부 경도에 따른 단일 적층 비드 주위의 온도분포 변화를 나타내었다. 열원의 중심으로부터 적층 방향으로 열이 미치는 범위를 측정된 결과 기저부 경도 8 HRc 의 경우 10.8 mm, 기저부 경도 30 HRc 의 경우는 10.9 mm 그리고 기저부 경도 40 HRc 의 경우는 10.9 mm 로 측정되었다. 또한 재결정 온도까지 미치는 범위를 측정된 결과 3 가지의 조건 모두 1.8 mm 로 측정되었다. 측정 결과 기저부 경도에 따른 열전달 특성은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 사료되었다. 이러한 결과는 S45C의 경도별 물성은 온도의존 열전달 물성에는 변화가 거의 없기 때문으로 사료되었다.

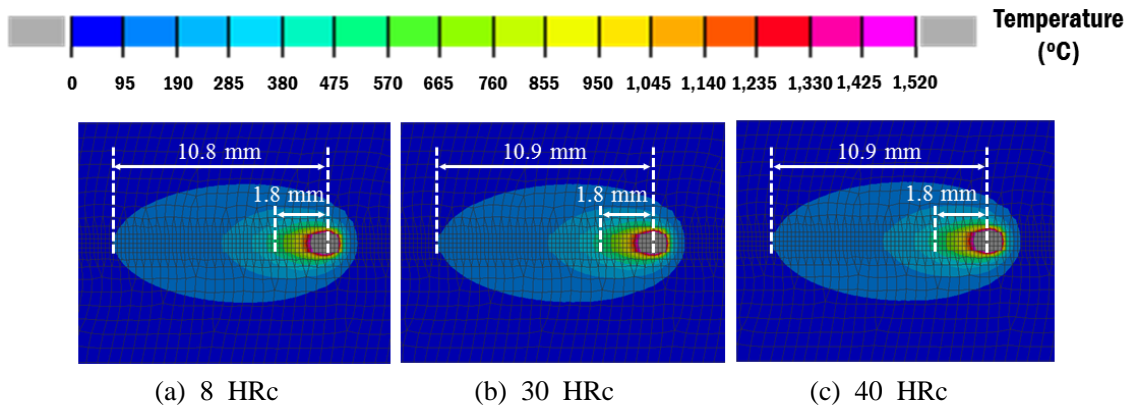


Fig. 35 Temperature distributions for different substrate hardnesses (Single bead)

나. 2 열 비드에서의 열전달 특성 분석

2 열 비드에서의 기저부 경도에 따른 열전달 특성 분석을 수행하기 위해서 Fig. 36 과 같이 적층 비드간 시간으로는 1.25 초를 가지고 첫 번째 비드의 적층과 두 번째 비드의 적층이 진행될 때 적층부 상면의 온도 분포를 기저부 경도별로 측정된 결과는 Fig. 37 (a), (b) 및 (c) 와 같다. 열원의 중심으로부터 적층 방향으로 열이 미치는 범위를 측정된 결과 기저부 경도 8 HRc 의 경우 첫 번째 열이 진행될 때 13.8 mm, 두 번째 열이 진행될 때 14.9 mm 로 측정되었다. 두 번째 열의 적층이 진행될 때 온도분포는 1.1 mm 증가하였다. 그 이유는 짧은 적층 비드간 시간으로 인하여 온도의 영향을 받은 것으로 사료되었다. 또한 재결정 온도까지 미치는 범위를 측정된 결과 첫 번째 열은 2.5 mm, 두 번째 열은 2.6 mm 로 영향은 거의 없는 것으로 측정되었다. 기저부

경도 30 HRc 및 40 HRc 의 경우 온도 분포와 재결정 온도까지 미치는 범위를 측정 한 결과는 동일하게 측정되었다. 기저부 경도가 변화할 때 도 짧은 적층 비드간 시간으로 인하여 온도 분포에는 영향을 미치지 만 재결정 온도까지의 미치는 영향은 거의 없는 것으로 예측되었다.

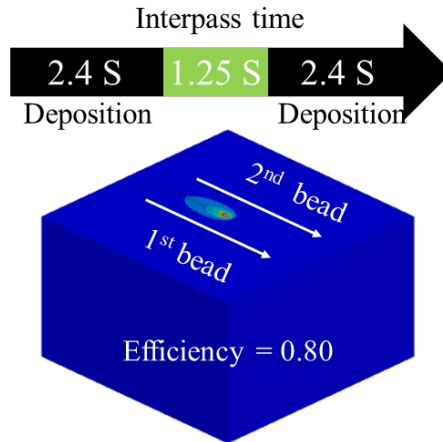


Fig. 36 Interpass time and diagram of deposition (Double bead)

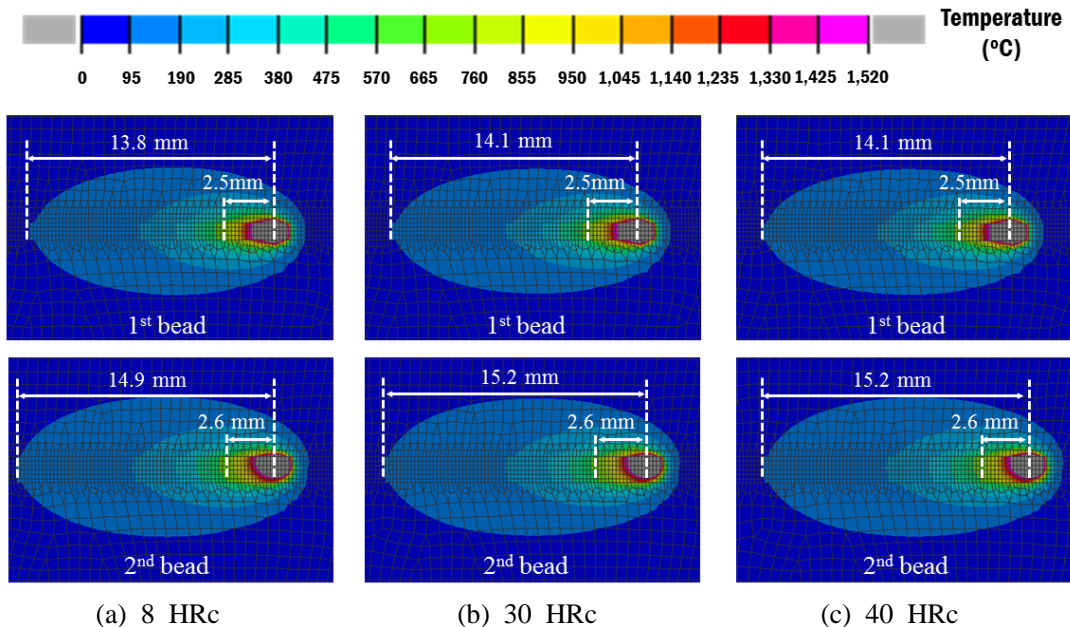


Fig. 37 Temperature distributions for different substrate hardnesses (Double bead)

다. 5 열 비드에서의 열전달 특성 분석

5 열 비드에서의 기저부 경도에 따른 열전달 특성 분석을 수행하기 위해서 Fig. 38 과 같이 적층 비드 사이의 적층 비드간 시간은 1.25 초로 부여하였고 단일 방향의 적층 경로를 가지는 Uni-direction 과 교차 적층 경로를 가지는 Alternative-direction 에 따른 열전달 특성 분석을 수행하였다. 수행 결과 Fig. 39 (a) 와 같이 S45C 의 기본경도인 8 HRc 및 단일 적층 방향에서 열원의 중심으로부터 적층 방향으로 열이 미치는 범위를 측정 한 결과 첫 번째 열이 적층될 때 14.2 mm, 두 번째 열이 적층될 때 15.6 mm, 세 번째 열이 적층될 때 16.2 mm, 네 번째 열이 적층될 때 16.8 mm 이고 마지막으로 다섯 번째 열이 적층될 때는 17.3 mm 로 측정되었다. 적층 방향의 수직으로 적층이 진행될 때 적층부 상면의 온도분포는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 재결정 온도까지 미치는 온도 범위를 측정 한 결과 첫 번째 열이 적층될 때 2.9 mm 로 측정되었고 두 번째, 세 번째, 네 번째 및 다섯 번째 열이 적층될 때는 모두 동일하게 3.0 mm 측정되었다. 적층 방향의 수직으로 적층이 진행될 때 재결정 온도까지 미치는 범위는 영향이 거의 없는 것으로 예측 되었다. Fig. 39 의 (b) 및 (c) 와 같이 기저부 경도 30 HRc 및 40 HRc 에서 온도분포와 재결정온도 까지 미치는 범위를 측정 한 결과는 동일하게 측정되었다. 또한 Fig 39 의 (a) 및 (d) 와 같이 S45C 의 기본 경도인 8 HRc 에서 경로에 따른 열전달 특성 변화를 분석한 결과 적층부 상면의 온도분포는 첫 번째 열의 적층이 진행될 때를 제외한 모든 경우에서 단일 적층 방향의 온도 분포보다 증가하는 것으로 측정되었다. 하지만 재결정 온도까지 미치는 범위는 동일한 것으로 측정되었다.

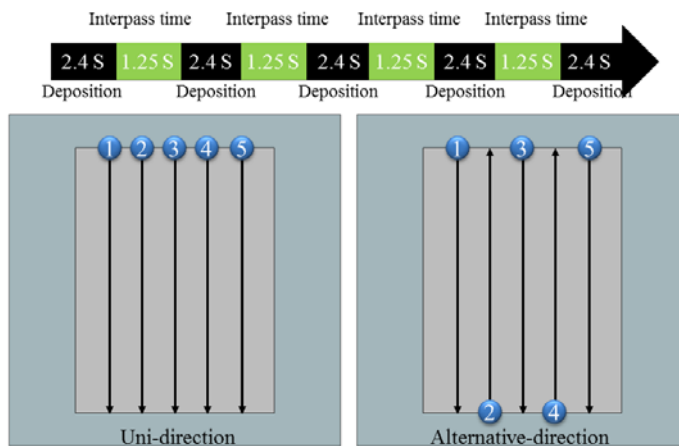


Fig. 38 Interpass time and type of deposition path

Fig. 40 과 같이 5 열 비드에서 기저부 경도에 따른 적층이 적층 방향의 수직 방향으로 진행될 때 첫 번째 열에서의 재결정 온도에 미치는 범위를 도출하였다. 도출한 결과 기저부 경도 및 경로에 관계없이 세 번째 열의 적층이 진행될 때까지 재결정 온도 이상의 열이 영향을 주는 것으로 예측되었다.

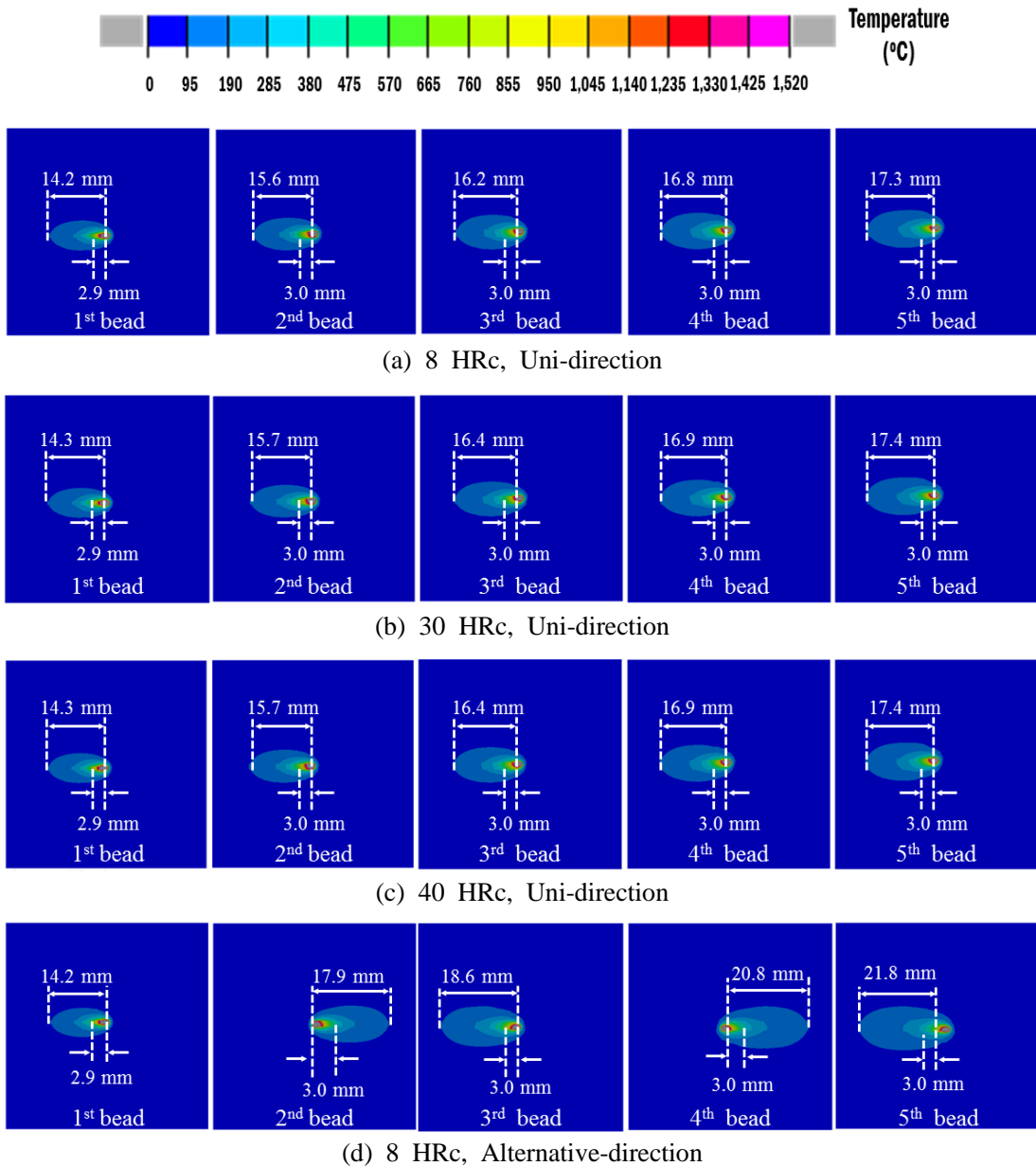


Fig. 39 Temperature distributions for different substrate hardnesses and deposition paths (Quintuple bead)

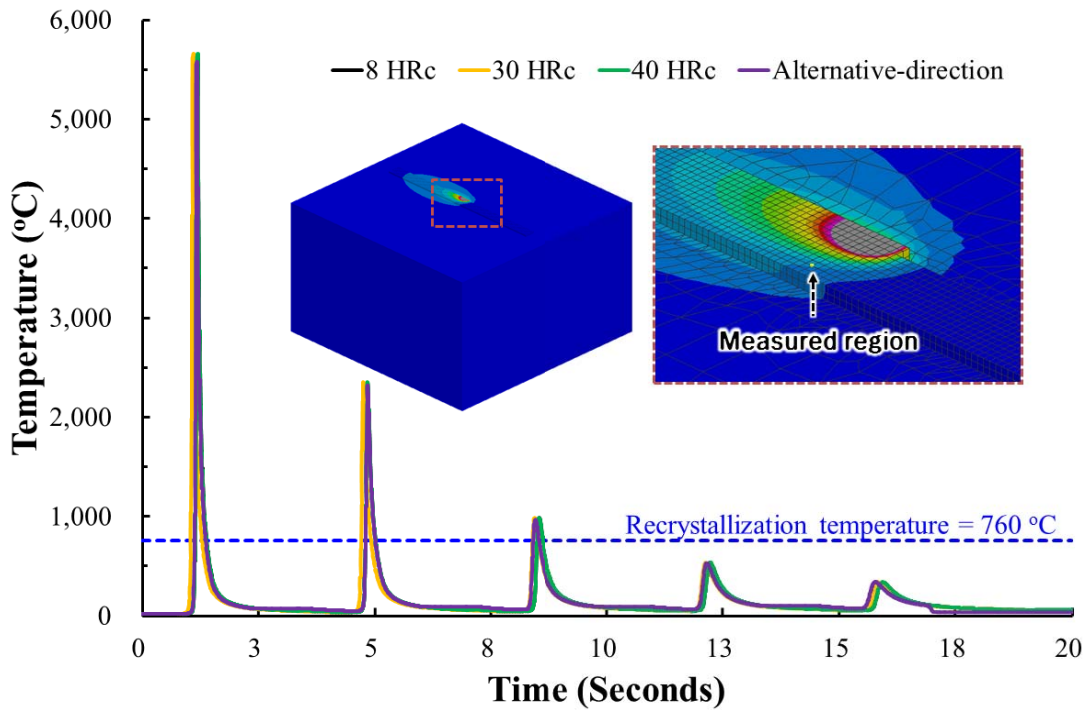


Fig. 40 Temperature-time curves for different substrate hardnesses and deposition paths (Quintuple bead)

라. 4 층 적층 비드에서의 열전달 특성 분석

Fig. 41 과 같이 적층 방향의 높이 방향으로의 기저부 경도와 경로에 따른 열전달 특성 분석을 하기 위해 Fig. 42 와 같이 측정하였다. 경로는 Fig. 38 과 같이 단일 적층 방향 경로 및 교차 적층 경로로 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 각 비드 사이의 적층 비드간 시간은 1.25 초이다.

Fig. 42 의 (a) 와 같이 S45C 기본 경도인 8 HRc 및 단일 적층 방향에서 열원의 중심으로부터 적층방향으로 열이 미치는 범위를 측정된 결과 첫 번째 층이 적층될 때는 13.8 mm, 두 번째 층이 적층될 때 18.1 mm, 세 번째 층이 적층될 때 27.0 mm 마지막으로 네 번째 층이 적층될 때 38.2 mm 측정되었다. 적층방향의 높이 방향으로 적층이 될 때 온도 분포는 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 재결정 온도까지 미치는 온도 범위를 측정된 결과 첫 번째 층이 진행될 때 2.9 mm, 두 번째 층이 적층될 때 4.8 mm, 세 번째 층이 적층될 때 4.9 mm 마지막으로 네 번째 층이 적층될 때

6.1 mm 로 측정되었다. 적층이 적층방향의 높이 방향으로 진행될 때는 재결정 온도까지 영향을 크게 미치는 것을 예측할 수 있었다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 적층이 진행될 때 적층 비드간 간격이 1.25 초로 매우 짧기 때문에 열의 이력이 남아 있기 때문으로 사료되었다. Fig. 42 의 (b) 및 (c) 와 같이 기저부 경도 30 HRc 및 40 HRc 에서 온도 분포와 재결정 온도까지 미치는 범위를 측정된 결과는 동일하게 측정되었다. 또한 Fig. 42 의 (d) 와 같이 기저부 경도 8 HRc 에서 경로에 따른 열전달 특성 변화를 분석한 결과 적층부 상면의 온도 분포는 첫 번째 층의 적층이 진행될 때를 제외한 모든 경우에서 단일 적층 방향의 온도 분포보다 증가하는 것으로 측정되었다. 하지만 재결정 온도까지 미치는 온도 범위는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 측정되었다.

Fig. 43 과 같이 4 층 적층 비드에서 기저부 경도에 따른 적층이 적층 방향의 높이 방향으로 진행될 때 첫 번째 열에서의 재결정 온도에 미치는 범위를 도출하였다. 도출한 결과 기저부 경도 및 경로에 관계없이 네 번째 층의 세 번째 열의 적층이 진행될 때까지 재결정 온도 이상의 열로 영향을 받는 것으로 도출되었다.

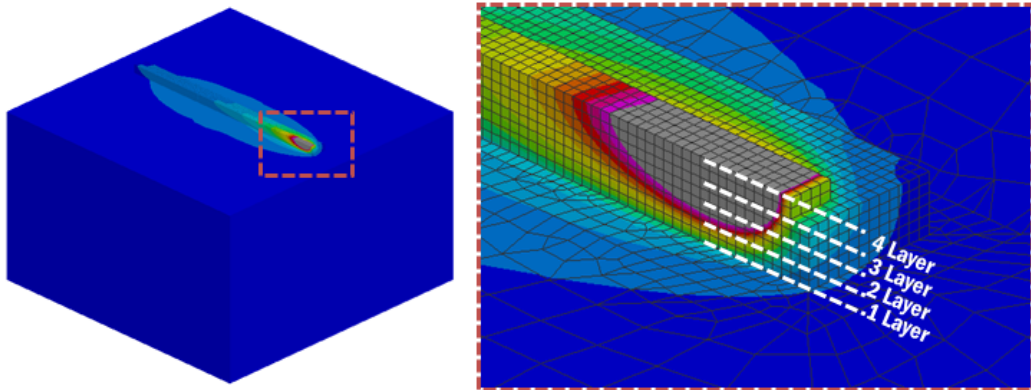


Fig. 41 Measured region of heat transfer analysis for multiple layers

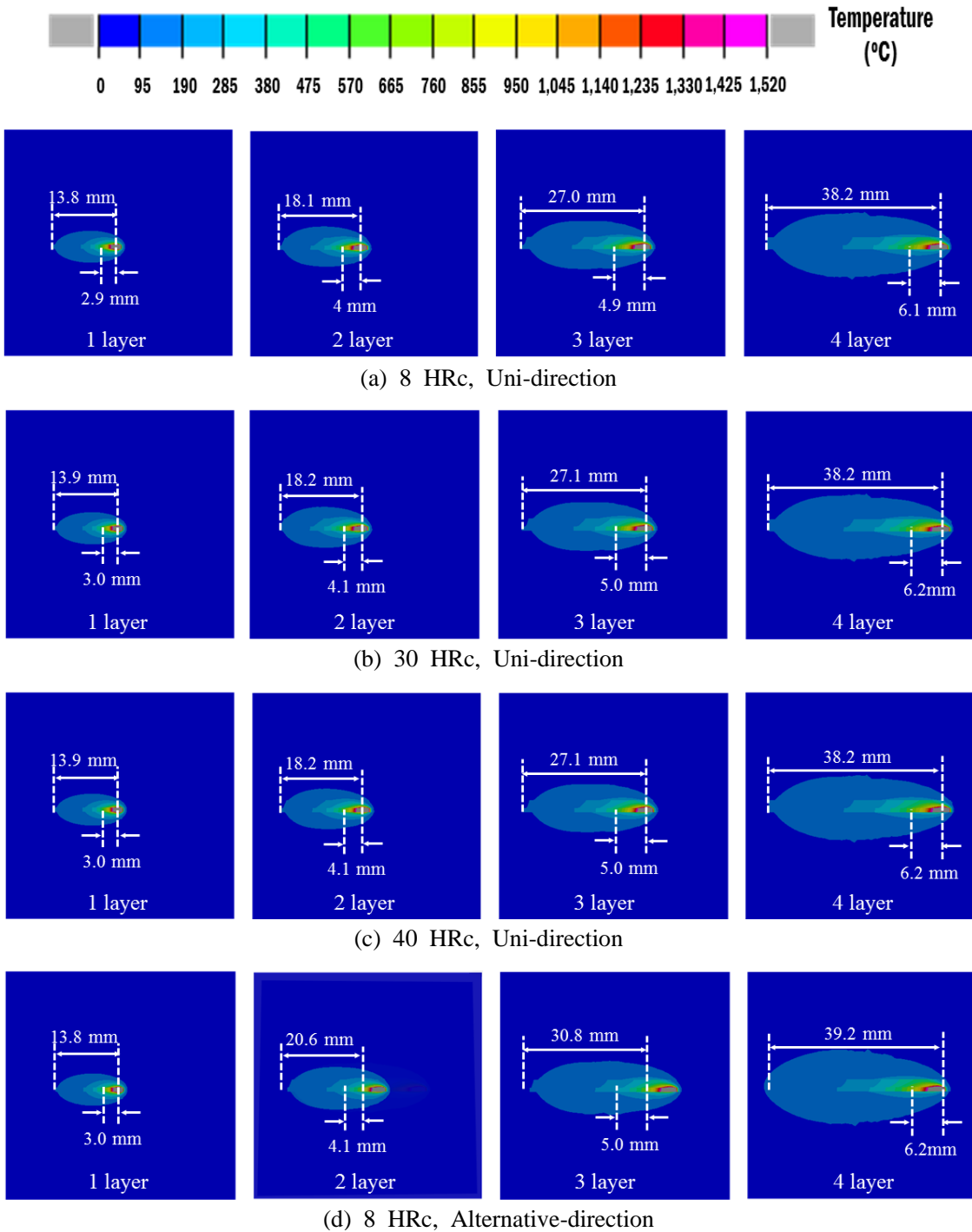


Fig. 42 Temperature distributions for different substrate hardnesses and deposition paths (Multiple layers)

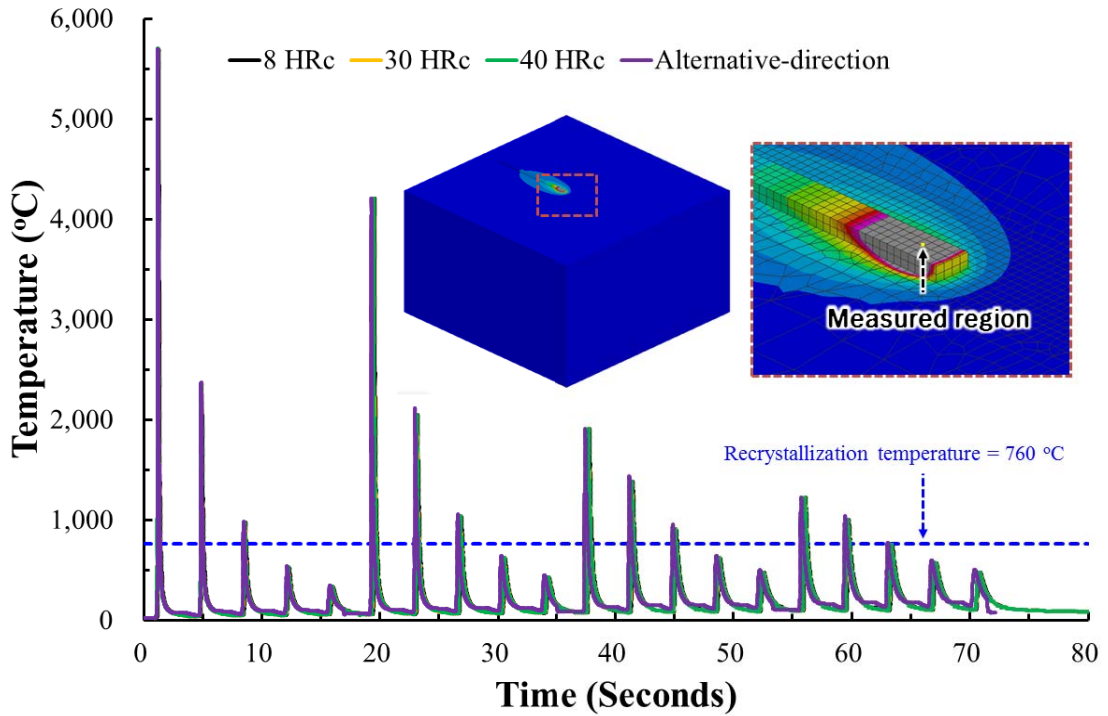


Fig. 43 Temperature-time curves for different substrate hardnesses and deposition paths (Multiple layers)

마. 대면적 적층에서의 열전달 특성 분석

Fig. 44 는 3 차원 열전달 유한요소해석 결과로부터 도출된 대면적 적층에서 온도 분포를 나타내었다. 해석 결과로부터 적층이 1 ~ 8 열 까지 적층이 진행될 때에는 기저부에 영향을 거의 미치지 않지만 16 열 이상의 적층이 진행될 때부터 진행되는 열이 많을수록 열의 축적으로 인하여 약 168 °C 의 열이 기저부 전체에 예열의 영향을 주는 것으로 예측되었다. 또한 56 열 이상의 적층이 진행될 때부터 진행되는 열이 많을수록 260 °C 의 열이 다음 비드 적층시 영향을 주는 것으로 예측되었다.

Fig. 45 와 같이 대면적 적층에서 적층이 적층 방향의 수직 방향으로 진행될 때 첫 번째 열에서의 재결정 온도에 미치는 범위를 도출하였다. 도출한 결과 다열 비드에서와 마찬가지로 세 번째 열의 적층이 진행될 때까지 재결정 이상의 열이 영향을 주는 것으로 도출되었다. 또한 그래프에서도 마찬가지로 적층이 진행될수록 첫 번째 열의 온도가 점점 상승하는 것으로 도출되었다.

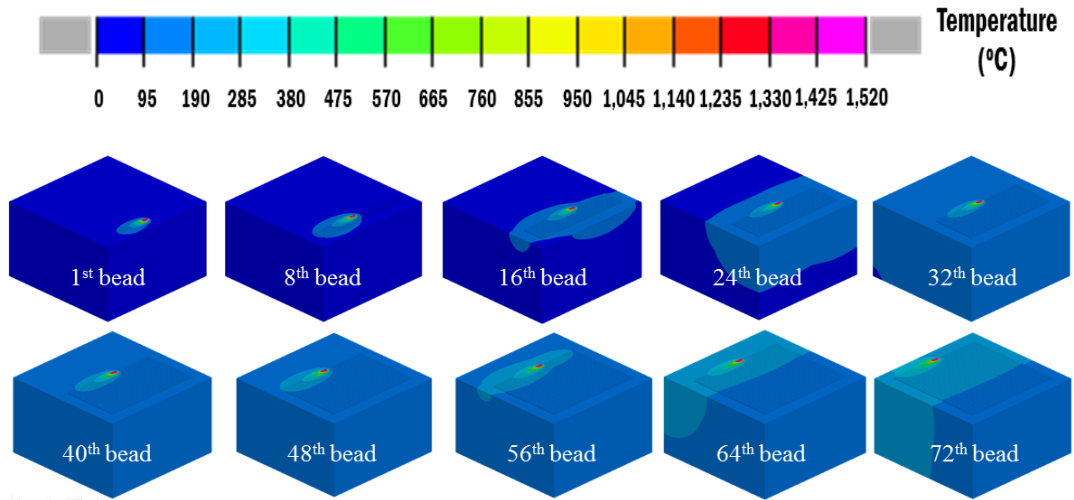


Fig. 44 Temperature distributions for the case of depositions with a large area

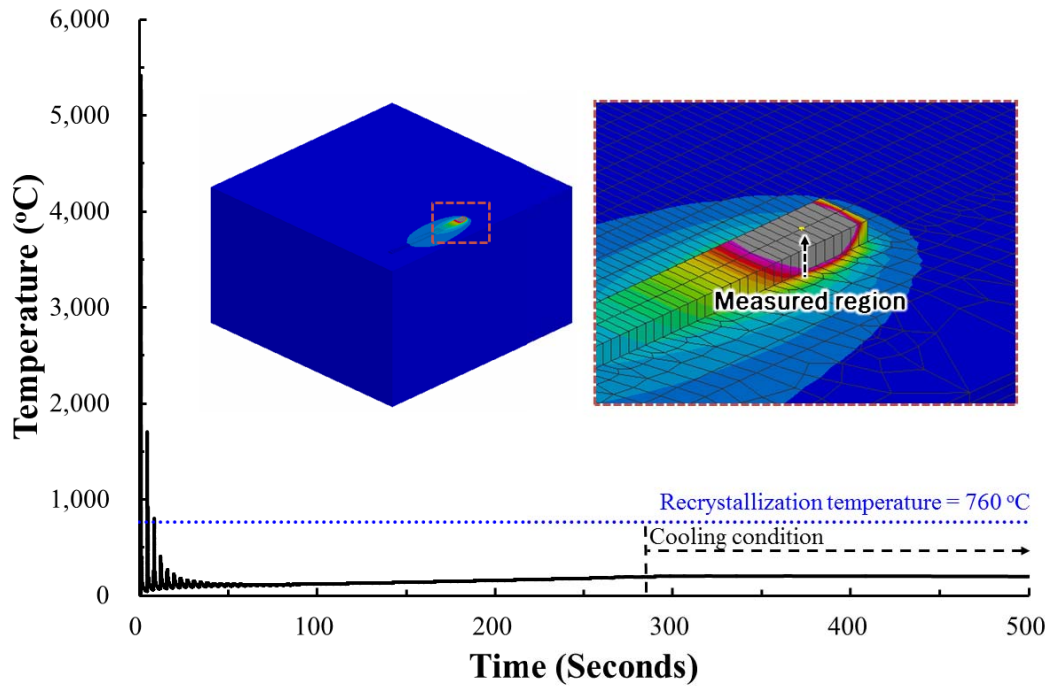
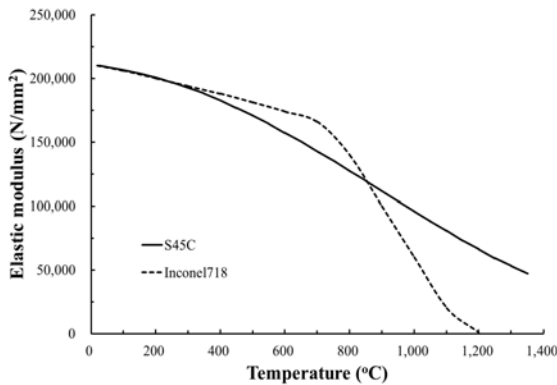


Fig. 45 Temperature-time curves for the case of depositions with a large area

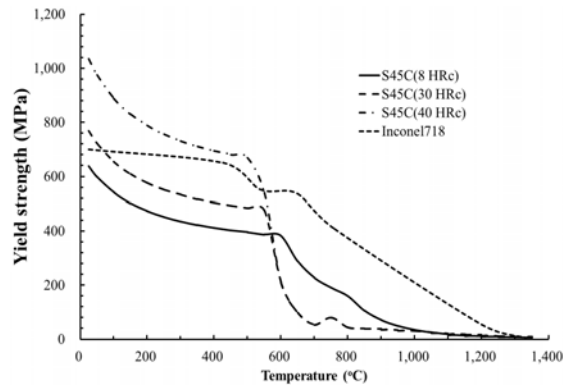
제 5 절 3 차원 열응력 특성 분석

1. 3 차원 유한요소해석 모델 개발 및 물성데이터 도출

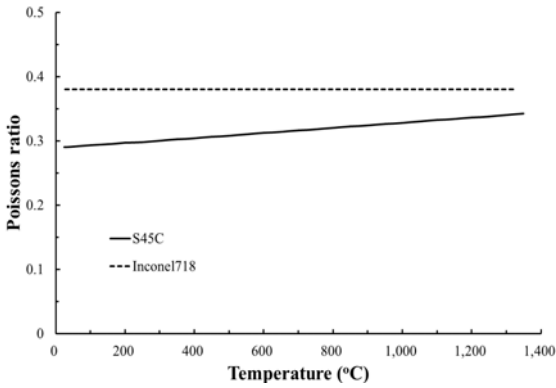
유한요소해석을 이용하여 LENS 공정 중 열전달 특성 분석을 수행하였다. 또한 공정 중 일어나는 미세조직의 변화, 경도, 왜곡 및 잔류응력 등의 중요한 정보를 예측하기 위하여 유한요소해석을 이용한 열응력 특성 분석을 수행하고자 한다. 유한요소해석의 모델은 4 장 1 절 Fig. 26 및 Fig. 27 과 동일하게 모델링을 수행하였다. 또한 경계 조건으로는 실제 실험과 동일하게 적층이 종료된 후 10 초까지 적층 방향의 양 사이드에 고정 조건 (Clamping condition) 을 부여하고 10 초 후에 고정 조건을 제거하여 해석을 수행하였다. LENS 공정을 이용한 금속 적층 제조 공정 열응력 해석 모델에서는 이와 같은 적층부의 상태 변화를 고려하기 위해 온도가 고려된 열응력 해석용 물성 데이터를 도출하고자 한다. 열응력 해석에 필요한 물성데이터는 온도 의존 탄성계수 (Temperature dependent elastic modulus : E), 온도 의존 항복강도 (Temperature dependent Yield strength : σ_y), 온도 의존 푸아송 비 (Temperature dependent Poisson's ratio : ν), 온도의존 열팽창계수 (Temperature dependent thermal expansion : α) 및 온도 의존 응력-변형률 선도 (Temperature dependent stress-strain curve) 이다. 온도 의존 물성치는 Fig. 46 과 같이 기저부의 재료인 S45C 는 프로그램 JmatPro software 를 사용하여 온도 의존 물성을 도출하였다. 비드의 재료인 Inconel718 은 프로그램 SYSWELD 에 있는 온도 의존 물성을 사용하였다.



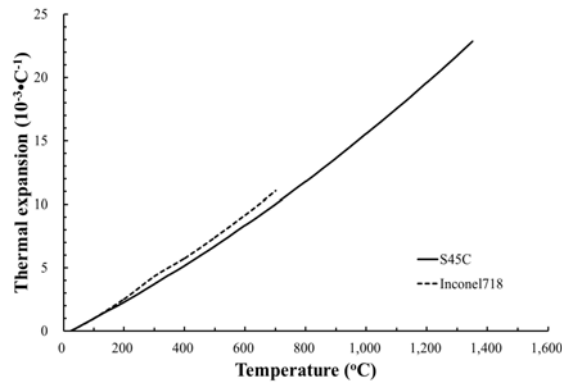
(a) Elastic modulus



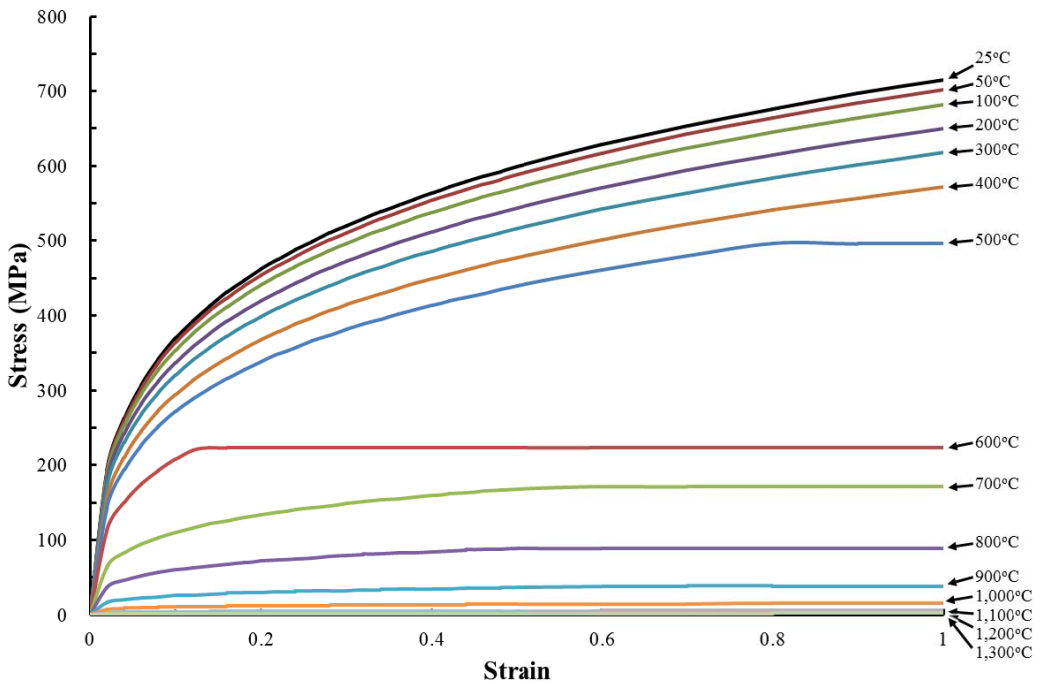
(b) Yield strength



(c) Poisson's ratio



(d) Thermal expansion



(e) Stress-strain curve of S45C

Fig. 46 Temperature dependent mechanical properties

2. 열응력 특성 분석

잔류 응력 및 열응력 특성 분석을 하기위해 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 열응력 특성 분석으로는 단일 비드, 2 열 비드, 5 열 비드 및 4층 적층 비드에서 기저부 S45C 의 경도 (8 HRc, 30 HRc 및 40 HRc) 에 따른 열응력 특성 분석을 수행하였다. 열응력 특성 분석으로는 시편을 설계할 때 열에 의한 변형을 고려하여 설계하였기 때

문에 열에 의한 변형이 가장 많을 것으로 예상되는 4층 적층 비드에서 Fig. 47 과 같이 수직 방향 변형 (Vertical displacement) 을 측정된 결과 최댓값은 0.03 mm 이고 최솟값은 -0.05 mm 로 아주 미세한 것으로 측정되어 열에 의한 변형을 제외한 각 지점에서 인장과 압축을 판단하고 각 값을 비교하기 위한 주응력 (1st principal stress) 및 물체의 각 지점에서 물체의 파괴를 예측하는 등가 응력 (Von Mises stress) 의 분포와 최댓값의 변화를 측정하였다.

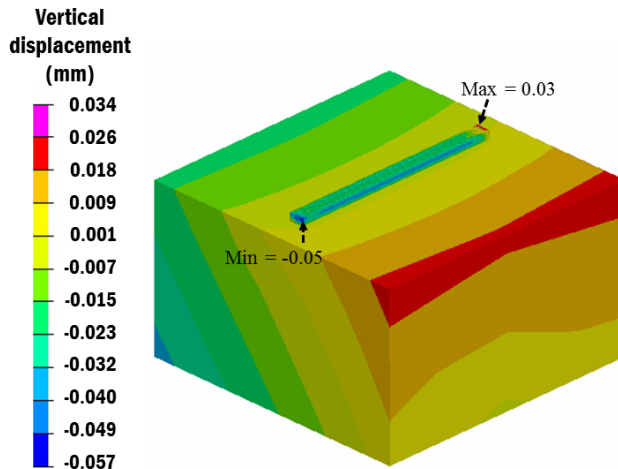


Fig. 47 Vertical displacement distributions for multiple layers

가. 단일 비드에서의 열응력 특성 분석

Fig. 48 는 3 차원 유한요소해석을 이용하여 열응력 분석을 하기위한 단일 비드의 유한요소해석 중 부여하였던 경계조건의 시간이다. 적층 시간은 실험과 동일한 2.4 초 이고 양 사이트에 부여하였던 고정 조건은 실험과 동일하게 10 초로 부여하였고 냉각 시간은 487.6 초로 자연대류 조건을 부여하였다.

Fig. 49 의 (a) 는 2.4 초 적층 후 3 차원 열응력 유한요소해석 결과로부터 도출된 기저부 경도에 따른 단일 적층 비드 주위 주응력의 분포와 최댓값이다. Fig. 49 의 (b) 는 적층, 고정조건 및 자연 대류 조건으로 인한 냉각 공정까지 모든 공정이 끝난 후 3 차원 열응력 유한요소해석 결과로부터 도출된 기저부 경도에 따른 단일 적층 비드 주위의 주응력의 분포와 최댓값을 도출한 결과이다. 도출한 결과 적층이 끝난 후 주응력 값은 기저부 경도 8 HRc 에서는 1,068 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 1,367 MPa

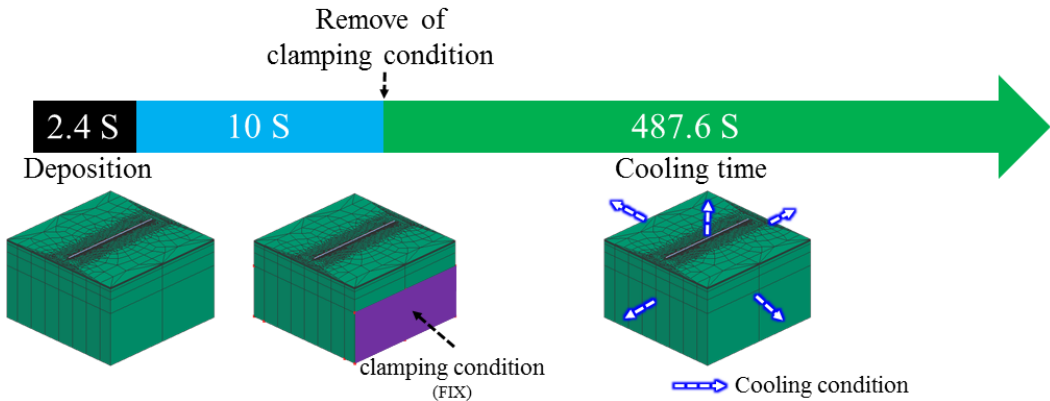


Fig. 48 Boundary conditions for deposition and cooling stages (Single bead)

및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,620 MPa 로 측정되었고 모든 공정이 끝난 후 주응력 값은 기저부 경도 8 HRc 에서는 1,186 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 1,540 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,840 MPa 로 측정되어 모든 공정이 끝난 후에 주응력 값이 높을 것으로 예측되었다.

Fig. 50 의 (a) 는 2.4 초 적층 후 3 차원 열응력 유한요소해석 결과로부터 도출된 기저부 경도에 따른 단일 적층 비드 주위의 등가 응력의 분포와 최대값이다. Fig. 50 의 (b) 는 적층, 고정조건 및 자연 대류 조건으로 인한 냉각 공정까지 모든 공정이 끝난 후 3 차원 열응력 유한요소해석 결과로부터 도출된 기저부 경도에 따른 단일 적층 비드 주위의 등가응력의 분포와 최대값을 도출한 결과이다. 도출한 결과 적층이 끝난 후 등가 응력값은 기저부 경도 8 HRc 에서는 893 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 1,118 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,311 MPa 로 측정되었고 모든 공정이 끝난 후 등가 응력 값은 기저부 경도 8 HRc 에서는 902 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 1,126 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,318 MPa 로 측정되어 모든 공정이 끝난 후에 등가응력 값이 높을 것으로 예측되었다. 따라서 주응력 및 등가응력 분포와 최대값은 모든 공정이 끝난 후의 열응력이 적층 후 열응력보다 더 크기 때문에 모든 공정이 끝난 후의 열응력 특성을 비교 분석하였다.

Fig. 49 의 (b) 와 Fig. 50 의 (b) 는 냉각 공정까지 끝난 후의 기저부 경도별 응력 분포 및 최대응력 값이다. 기저부 경도가 높을수록 최대 응력의 값은 증가하는 것으로 도출되었다. 따라서 기저부 경도가 낮을 때 보다 높을 때 균열이나 결함 발생확률이 높을 것으로 사료되었다.

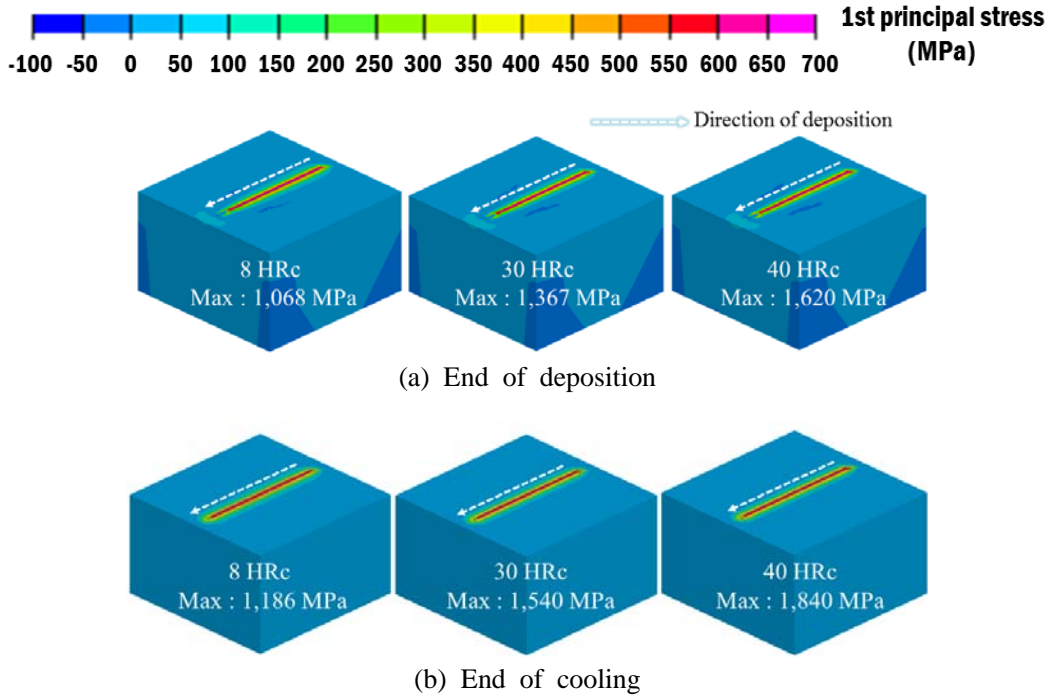


Fig. 49 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Single bead)

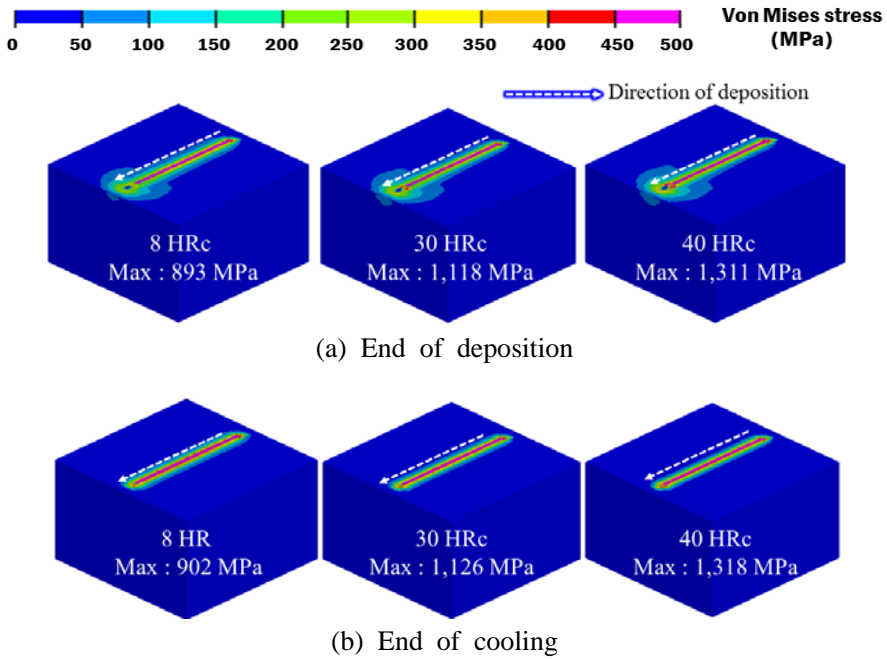


Fig. 50 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Single bead)

나. 2 열 비드에서의 열응력 특성 분석

Fig. 51 은 적층이 시작되는 지점과 적층이 끝나는 지점의 주응력 값을 측정한 위치이다. 측정한 결과는 Fig. 52 와 같다. Fig. 52 의 (a) 는 모든 공정이 끝난 후 생성된 비드 위에서의 주응력 값을 측정한 결과 기저부 경도 8 HRc 에서는 810 MPa, 기저부 경도 30 HRc 및 40 HRc 에서는 동일하게 811 MPa 로 측정되었다. 비드 위에서의 주응력 값은 기저부 경도에 관계없이 일정한 것으로 예측되었다. Fig. 52 의 (b) 는 모든 공정이 끝난 후 적층이 시작되는 비드의 경계부에서 측정한 주응력 값이다. 측정 결과 기저부 경도 8 HRc 에서는 1,198 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 1,368 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,573 MPa 로 측정되었다. Fig. 52 의 (c) 는 모든 공정이 끝난 후 적층이 끝나는 비드의 경계부에서 측정한 주응력 값이다. 측정 결과 기저부 경도 8 HRc 에서는 1,017 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 1,057 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,140 MPa 로 측정되었다. Fig. 53 은 적층이 시작되는 지점과 적층이 끝나는 지점의 등가 응력 값을 측정한 위치이다. 측정한 결과는 Fig. 54 와 같다. Fig. 54 의 (a) 는 모든 공정이 끝난 후 생성된 비드 위에서의 등가 응력 값을 측정한 결과 기저부 경도 8 HRc 에서는 730 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 731 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 732 MPa 로 측정되었다. 비드 위에서의 등가 응력 값은 기저부 경도에 관계없이 일정한 것으로 예측되었다. Fig. 54 의 (b) 는 모든 공정이 끝난 후 적층이 시작되는 비드의 경계부에서 측정한 등가 응력 값이다. 측정 결과 기저부 경도 8 HRc 에서는 843 MPa, 기저부 경도 HRC 30 에서는 957 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 1,071 MPa 로 측정되었다. Fig. 54 의 (c) 는 모든 공정이 끝난 후 적층이 끝나는 비드의 경계부에서 측정한 등가 응력 값이다. 측정 결과 기저부 경도 8 HRc 에서는 841 MPa, 기저부 경도 30 HRc 에서는 901 MPa 및 기저부 경도 40 HRc 에서는 940 MPa 로 측정되었다. Fig. 52 및 Fig. 54 의 (a) 와 (b) 를 비교한 결과로부터 비드 위에서보다 비드 주위의 응력값이 더 높기 때문에 생성되는 비드에서보다 비드 주위의 경계에서 균열이나 결함의 발생 확률이 더 높을 것으로 사료되었다. 또한 Fig. 52 및 Fig. 54 의 (b) 와 (c)를 비교한 결과로부터 적층이 끝나는 지점에서 비드 주위에서보다 적층이 시작되는 지점에서 비드 주위의 응력값이 더 높기 때문에 적층이 시작되는 비드 주위의 경계부에서 균열이나 결함의 발생 확률이 더 높을것으로 사료되었다.

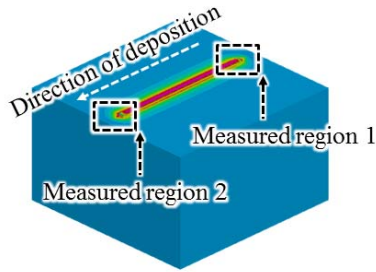
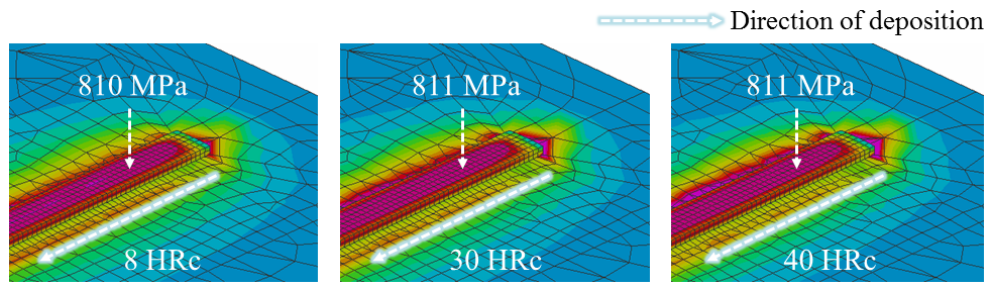
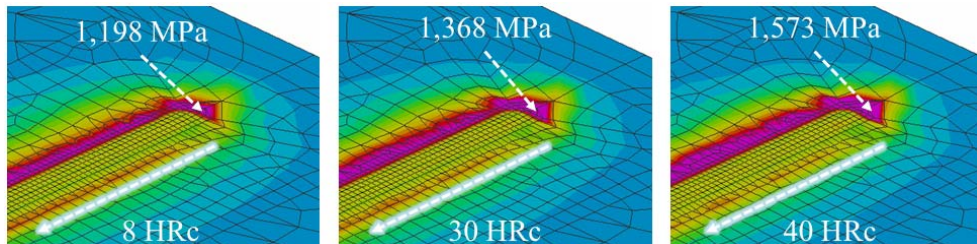


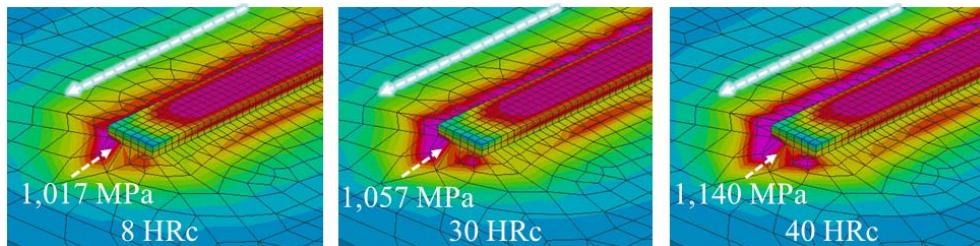
Fig. 51 Measured region of 1st principal stress



(a) 1st principal stress value on deposition bead of measured region 1



(b) 1st principal stress value on substrate of measured region 1



(c) 1st principal stress value on substrate of measured region 2

Fig. 52 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses
(Double bead)

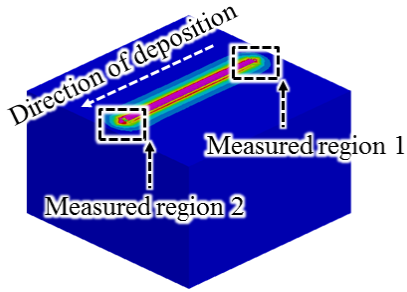


Fig. 53 Measured region of Von Mises stress

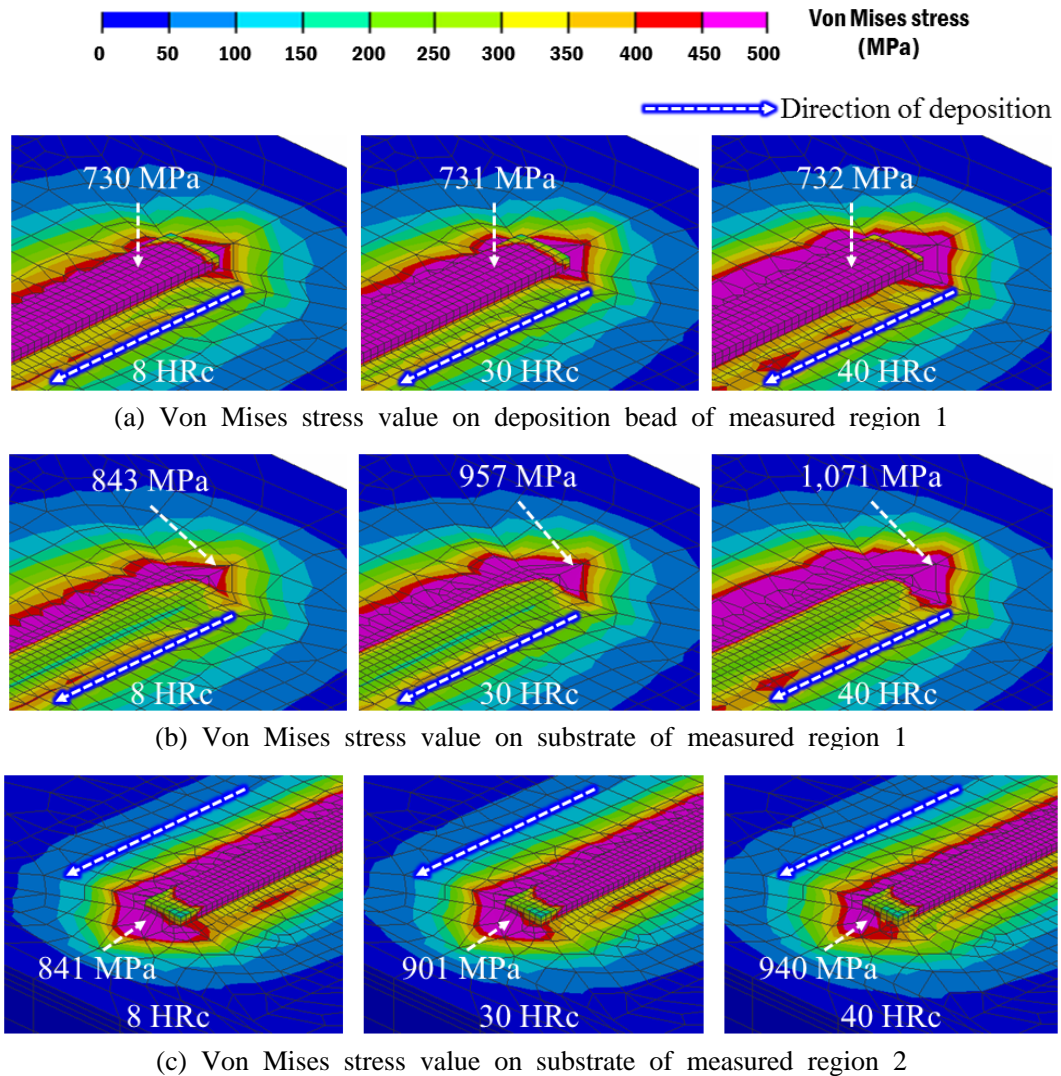


Fig. 54 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Double bead)

다. 5 열 비드에서의 열응력 특성 분석

Fig. 55 및 Fig. 56 은 각각 기저부 경도별 적층이 시작되는 비드 주위의 기저부에서 주응력 및 등가 응력 값을 측정된 결과이다. 측정 결과 기저부 경도가 가장 높은 40 HRc 에서 가장 높은 응력을 가지는 것으로 예측되었다. 또한 첫 번째로 생성되는 비드 주위의 응력값이 가장 클 것으로 예측되었다.

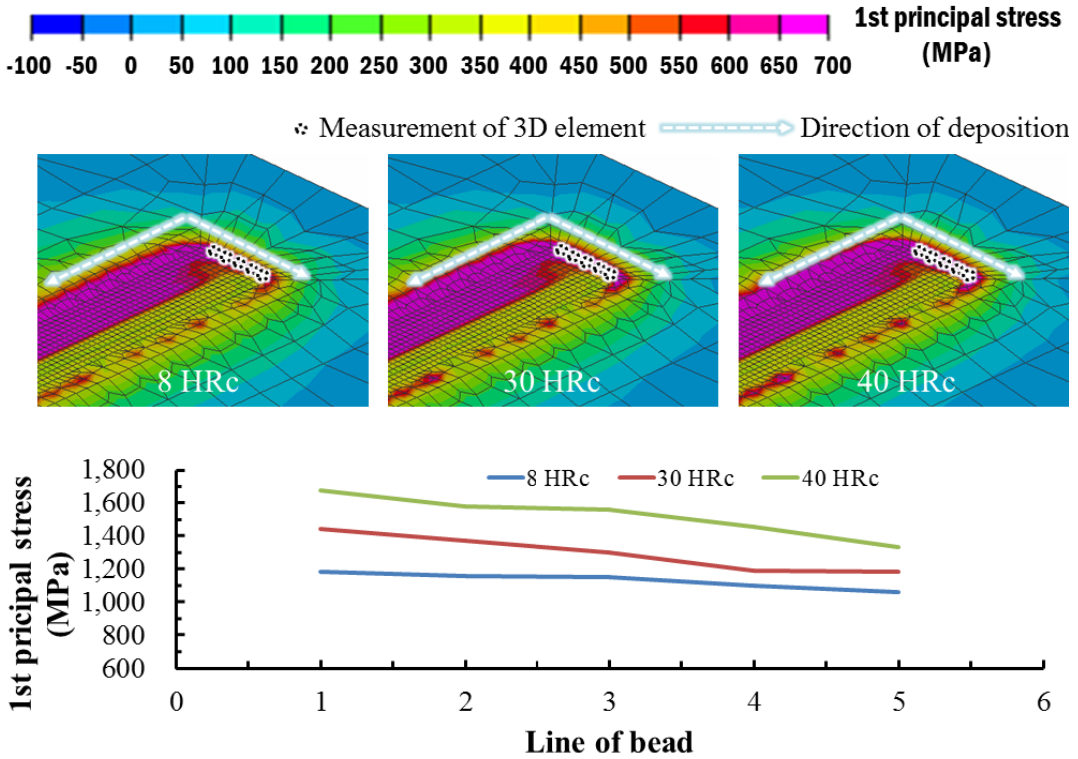


Fig. 55 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Quintuple bead)

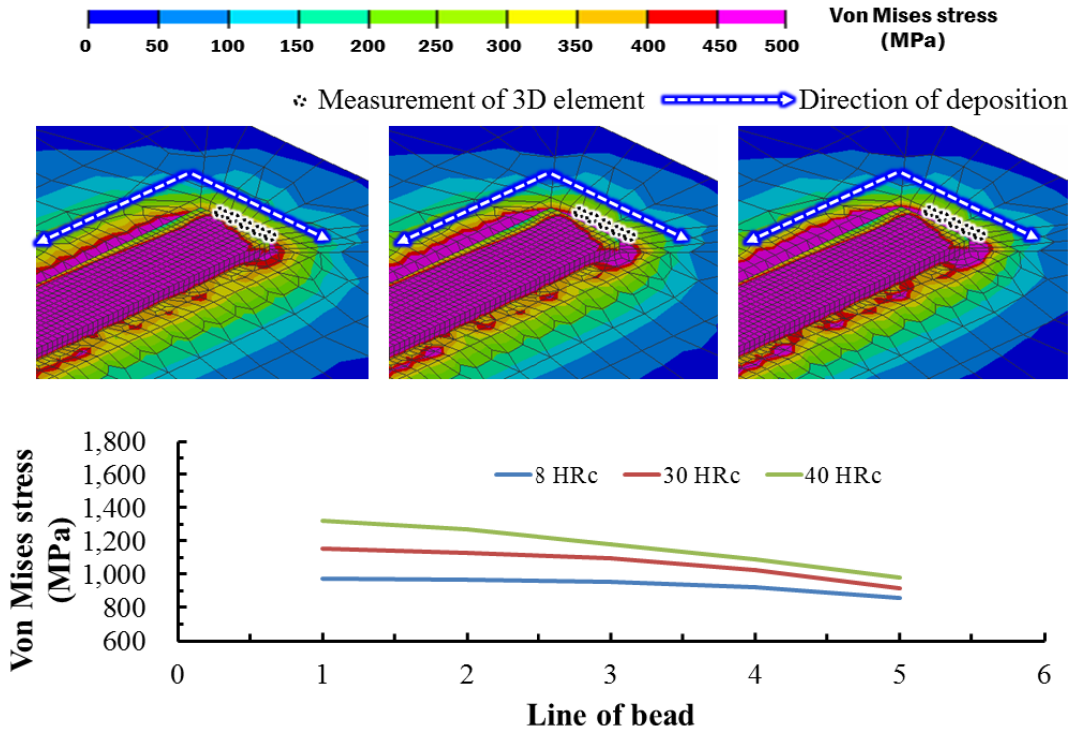


Fig. 56 Von Mises stress distributions for different substrate hardnesses (Quintuple bead)

라. 4 층 적층 비드에서의 열응력 특성 분석

Fig. 57 은 4 층 적층 비드에서 적층이 시작되는 비드 주위의 기저부에서 주응력 값을 측정한 위치이다. 측정한 결과는 Fig. 58 과 같다. 기저부 경도별로 적층이 시작되는 비드 주위에서 기저부의 주응력 값을 측정한 결과 기저부 경도가 높을수록 응력 값은 높은 것으로 측정되었고 기저부 주위의 주응력 값은 모든 경계에서 응력 값이 비슷한 것으로 예측되었다.

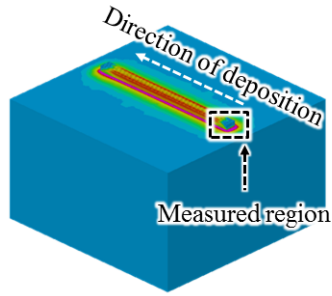


Fig. 57 Measured region of 1st principal stress (Multiple layers)



Measurement of 3D element Direction of deposition

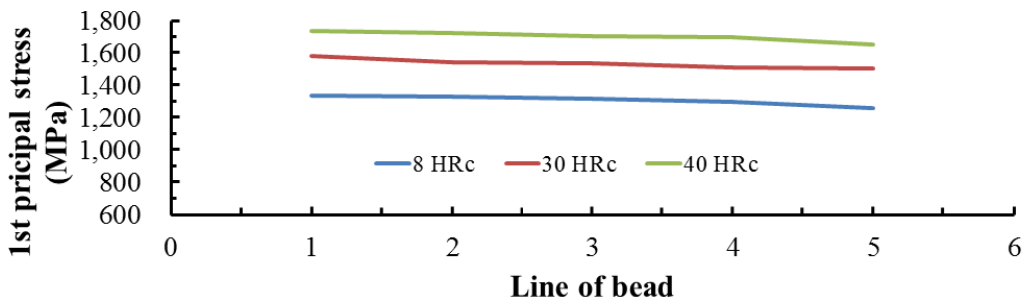
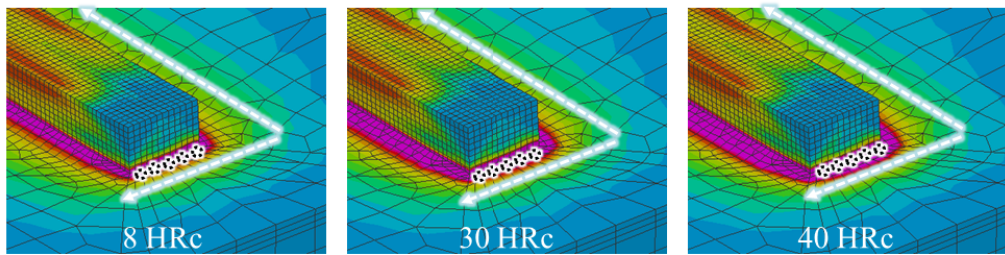


Fig. 58 1st principal stress distributions for different substrate hardnesses (Multiple layers)

Fig. 59 는 4 층 적층 비드에서 적층이 시작되는 비드 주위의 기저부에서 등가 응력 값을 측정된 위치이다. 측정된 결과는 Fig. 60 과 같다. 기저부 경도별로 적층이 시작되는 비드 주위에서 기저부의 등가 응력 값을 측정된 결과 기저부 경도가 높을수록 응력 값은 높은 것으로 측정되었고 기저부 주위의 등가 응력 값은 모든 경계에서 응력 값이 비슷한 것으로 예측되었다.

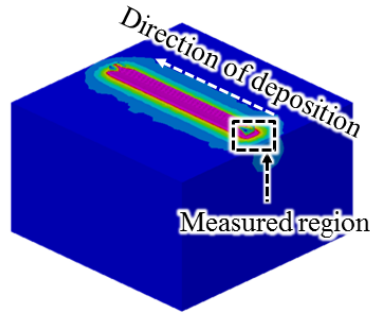


Fig. 59 Measured region of Von Mises stress (Multiple layers)

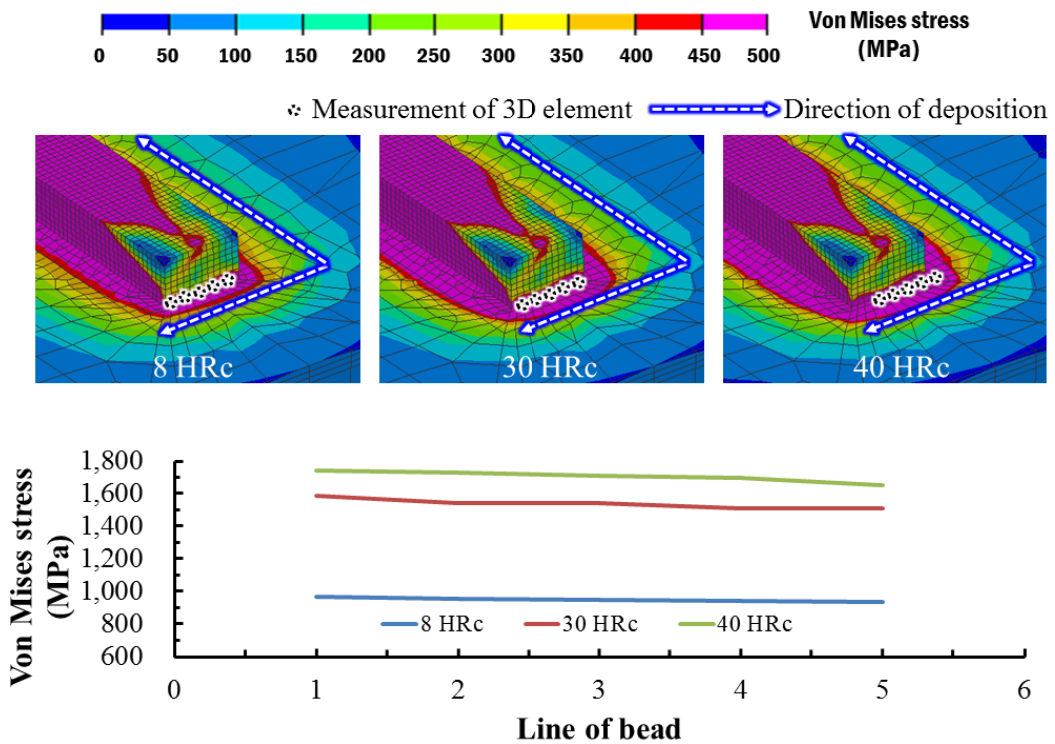


Fig. 60 Von Mises stress distributions for different substrate hardesses (Multiple layers)

위의 해석 결과를 바탕으로 Fig. 61 과 같이 적층된 비드의 경계부에서 측정된 주응력 값을 도출하였다. 도출 결과 층이 증가할수록 주응력 값은 증가하는 경향을 나타내었지만 응력 값의 변화는 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 층이 증가할수록 응력 값은 무제한 증가하는 것이 아니라 일정 층 이상 적층 시 정상상태를 보일 것으로 사료된다.

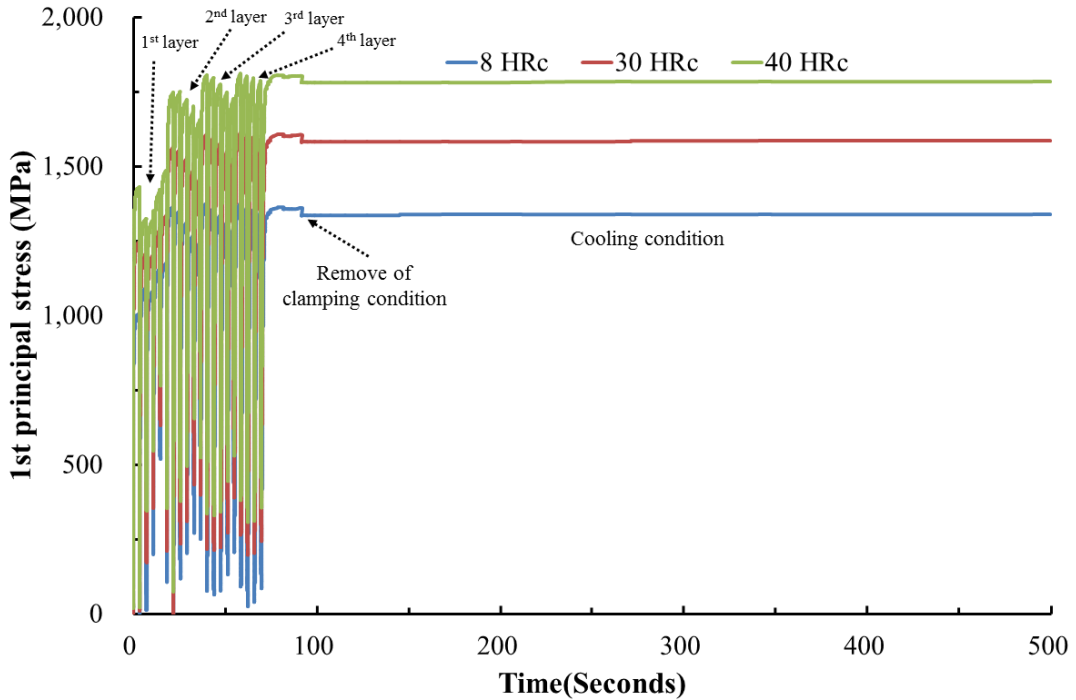


Fig. 61 1st Principal stress curve during deposition process (Multiple layers)

Fig. 62 는 S45C 소재의 냉각 속도에 따른 인장 강도 (Tensile strength) 를 JmatPro 소프트웨어를 사용하여 도출하였다. 냉각 속도가 급격해질수록 높은 항복 강도가 도출되었다. 온도 100 °C 가 1 초 동안 냉각이 될 경우 인장 응력 값은 약 2,000 MPa 이다. LENS 공정의 경우 1,300 °C 이상의 열이 급속가열 및 급속 냉각이 이루어지기 때문에 더 높은 인장 강도 값을 가질 것이라고 예상된다. Fig. 63 은 기저부의 결함이나 균열이 가장 클 것으로 예상되는 S45C 의 경도 40 HRc 인 4 층 적층 비드에서 냉각 공정까지 끝난 후 등가 응력의 최댓값은 1,870 MPa 로 측정되었다. 따라서 공정이 끝난 후에 균열이나 결함은 없을 것으로 사료되었다.

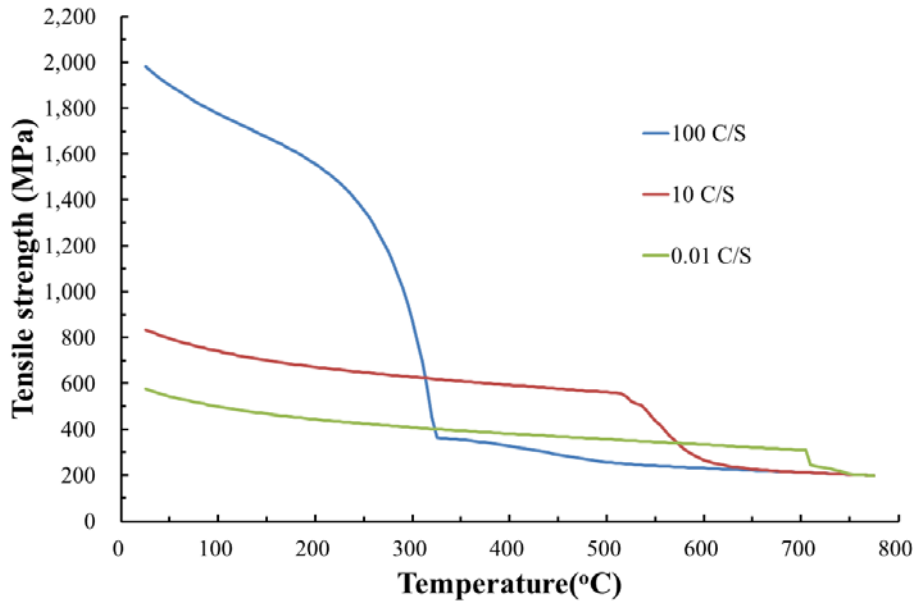


Fig. 62 Tensile strength-temperature curves for different cooling rates

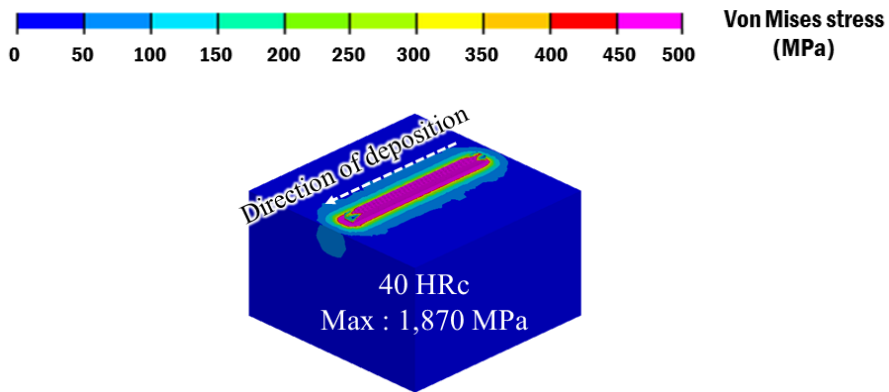


Fig. 63 Result of Von Mises maximum stress for multiple layers (40 HRc)

제 5 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 LENS 공정을 이용하여 S45C의 기저부 위에 Inconel 718 분말의 이중 재료 적층시 적층 특성 분석을 수행하기 위하여 적정 적층 조건을 찾기 위한 실험을 수행하였다. 수행한 결과 레이저 파워 450 W 및 분말 공급량 12.6 g/min 의 조건을 선정하여 단일 비드, 2 열 비드, 5 열 비드 및 4 층 적층 비드의 실험을 수행하였다. 단일 비드의 실험을 수행하여 생성된 비드의 폭과 높이를 도출하였고 3 차원 유한요소해석을 위한 열원의 효율을 도출하였다. 2 열 비드의 실험을 수행하여 Overlap ratio 를 약 50 % 로 도출하였고 3 차원 유한요소해석에 적용하였다. 또한 두 번째 비드의 적층이 진행될 때의 열원의 효율은 단일 비드와 비교하여 도출할 수 있었다. 5 열 비드 실험을 수행하여 생성된 비드의 평균 폭을 도출하였고 마지막으로 4 층 적층 비드의 실험을 수행하여 생성된 비드의 평균 높이를 도출하였다. 또한 기저부 경도와 적층부 크기에 따른 적층 특성을 분석하기 위하여 기저부 경도 8 HRc, 30 HRc 및 40 HRc 의 3 가지 조건과 적층부 크기 40 mm × 40 mm, 50 mm × 50 mm 및 60 mm × 60 mm 의 3 가지 조건에서 실험을 수행하여 적층시 생기는 결함 및 균열의 특성을 분석하고자 외/내부의 균열 및 결함 실험을 수행하였다.

LENS 공정을 이용하여 Inconel718 분말의 이중재료 적층시 3 차원 유한요소해석을 이용하여 열전달 및 열응력의 특성을 분석하기 위하여 해석 모델을 개발하였다. 또한 S45C 와 Inconel 718 분말의 온도 의존 물성을 도출하여 해석에 적용하였다. 3 차원 유한요소해석을 이용하여 기저부 경도와 적층경로가 열전달 특성 및 영응력 특성에 미치는 영향성에 대하여 분석 및 고찰하였다.

본 연구에서 제안된 LENS 공정을 이용한 S45C 기저부위 Inconel 718 분말의 이중재료 적층시 적층 특성분석을 위하여 다음과 같은 향후 연구가 필요할 것으로 사료된다.

첫 번째로 대면적 적층에서 생성된 시편에 대한 기계 및 금속 특성 분석을 수행하고 기저부 경도와 크기에 따른 보다 양호한 기계 및 금속 특성 분석이 필요할 것으로 사료된다.

두 번째로 대면적 적층비드의 높이에 따른 적층 특성 분석과 기저부의 각도에 따른 적층 특성이 필요할 것으로 사료된다.

세 번째로 대면적 적층시 3 차원 유한요소해석을 이용하여 열응력 특성분석을 위하여 해석시간을 고려한 Imposed thermal cycle 의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Jovane. F., Yoshikawa. H., Alting. L., Boer. C. R., Westkamper. E., Williams. D., Tseng M., Seliger. G., and Paci. A. M., "The Incoming Global Technological and Industrial Revolution towards Competitive Sustainable Manufacturing," *CIRP Annals*, Vol. 57, No. 2, pp. 641-659, 2008
2. Yao. X., and Lin. Y., "Emerging Manufacturing Paradigm Shifts for the Incoming Industrial Revolution," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, No. 5-8, pp. 1665-1676, 2016
3. Thompson, M. K. et al. "Design for additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints," *CIRP Annals*, Vol. 65, No. 2, pp. 737-760, 2016
4. Li. G., Hou. Y., and Wu. A., "Fourth Industrial Revolution: Technological Drivers, Impacts and Coping Methods," *Chinese Geographical Science*, Vol. 27, No. 4, pp. 626-637, 2017
5. Ahn. D. G., "Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 3, pp. 381-395, 2016
6. Levy. G. N., Schindel. R., and Kruth. J. P., "Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives," *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 2, pp. 589-609, 2003
7. Cheah. C., Chua. C., Lee. C., Feng. C., and Totong. K., "Rapid Prototyping and Tooling Techniques: A Review of Applications for Rapid Investment Casting," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 25, No. 3-4, pp. 308-320, 2005
8. Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A. M., and King, W. E, "Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones," *Additive Manufacturing Technology*, Vol. 108, pp. 613-628, 2017
9. Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N., and Yadollahi, A, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part 1: Transport phenomena, modeling and diagnostics," *Additive Manufacturing Technology*, Vol. 8, pp. 36-62, 2015

10. Caiazzo, F., "Additive manufacturing by means of laser-aided directed metal deposition of titanium wire," *Additive Manufacturing Technology*, Vol. 96, pp. 2699-2707, 2018
11. Taminger K. M., and Hafley R. A., "Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing. In: NATO/RTOAVT-139 specialists meeting on cost effective manufacture via net shape processing," 2006
12. Gockel, J., Beuth, J., and Taminger, K., "Integrated Control of Solidification Microstructure and Melt Pool Dimensions in Electron Beam Wire Feed Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V," *Additive Manufacturing*, Vol. 1-4, pp. 119-126, 2014
13. Sames. W., List. F., Pannala. S., Dehoff. R., and Babu. S., "The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing," *International Materials Review*, Vol. 61, No. 5, pp. 315-360, 2016
14. Gu, D., "Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 15-71, 2015
15. Ahn. D. G., "Hardfacing Technologies for Improvement of Wear Characteristics of Hot Working Tools: A Review," *Int J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 7, pp. 1271-1283, 2013
16. Hofmann. D. C., Roberts. S., Otis. R., Kolodziejska. J., Dillon. R. P., Suh. J., Shapiro. A. A., Liu. Z. K., and Borgonia. J. P., "Developing Gradient Metal Alloys through Radial Deposition Additive Manufacturing," *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 1, 2015
17. Ding. D., Pan. Z., Cuiuri. D., and Li. H., "Wire-Feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 1-4, pp. 465-481, 2015
18. Williams. S. W., Martina. F., Addison. A. C., Ding. J., Pardal G., and Colegrove. P., "Wire + Arc Additive Manufacturing," *Materials Science and Technology*, Vol. 32, No. 7, pp. 641-647, 2016
19. Fuentek., "NASA's EBF3: The Future of Art-to-Part Manufacturing," NASA's EBF3: The Future of Art-to-Part Manufacturing, Available at: <https://dougfooster.me/wp-content/uploads/2018/03/ebf3-fuentek-blog.pdf>.
20. Ahn. D. G., "Applications of Laser Assisted Metal Rapid Tooling Process to Manufacture of Molding & Forming Tools: State of the Art," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 5, pp. 925-938, 2011

21. Faazier. W. E., "Metal Additive Manufacturing: A Review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, pp. 1917-1928, 2014
22. Sames, W., List. F., Pannala, S., Dehoff. R., and Babu. S., "The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing," *International Materials Reviews*, Vol. 61, No. 5, pp. 315-360, 2016
23. Gibson. I. et al. "Directed Energy Deposition Processes," *Additive Manufacturing Technologies*, Vol. 10, pp. 245-268, 2015
24. Chua, B. L., "Investigation of Development of Thermo-Mechanical Analysis Method for a Wire Feeding Type Directed Energy Deposition Process," Published doctor dissertation, Department of Mechanical Engineering of Chosun University, 2019
25. Yang. Q., Zhang. P., Cheng. L., Mig. Z., Chyu. M., and To. A. C., "Finite Element Modeling and Validation of Thermomechanical Behavior of Ti-6Al-4V in Directed Energy Deposition Additive Manufacturing," *Additive Manufacturing*, Vol. 12, pp. 169-177, 2016
26. Denlinger. E. R., Heigel. J. C., and Michaleris. P., "Residual Stress and Distortion Modeling of Electron Beam Direct Manufacturing Ti-6Al-4V," *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 10, pp. 1803-1813, 2015
27. Chua. B. L., Lee. H. J., Ahn. D. G., and Kim. J. G., "Influence of Process Parameters on Temperature and Residual Stress Distributions of the Deposited Part by a Ti-6Al-4V Wire Feeding Type Direct Energy Deposition Process," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, No. 11, pp. 5363-5372, 2018
28. Wang. L., Felicelli. S., "Process Modeling in Laser Deposition of Multilayer SS410 Steel," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, pp. 1028-1037, 2007
29. Xiong. Y. et al. "In situ Thermal Imaging and Three-Dimensional Finite Element Modeling of Tungsten Carbide-Cobalt during Laser Deposition," *Journal of Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 5419-5429, 2009
30. Qi. H., Azer. M., and Ritter. A., "Studies of Standard Heat Treatment Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Net Shape Manufactured Inconel718," *Journal of Metals & Materials Society and ASM*, Vol. 40, No. 10, pp. 2410-2422, 2009

31. Manvatkar. V. D., Gokhale. A., Reddy. G. J., and SavithaA. De. U., "Investigation on Laser Engineered Net Shaping of Multilayered Structures in H13 Tool Steel," Journal of Laser Applications, Vol. 27. No. 3, 2015
32. Beuth J., and Klingbeil N., "The role of process variables in laser-based direct metal solid freeform fabrication," JOM, Vol. 53, pp. 36-39, 2001
33. Vasinonta. A., Beuth. J., and Griffith. M., "Process maps for predicting residual stress and melt pool size in the laser-based fabrication of thin-walled structures," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 129, pp. 101-109, 2007
34. Fox. F., and Beuth. J., "Process mapping of transient melt pool response in wire feed E-beam additive manufacturing of Ti-6Al-4V," Freeform fabrication proceedings, pp. 675-683, 2013
35. Beuth. J., Fox. J., Gockel. J., Montgomery. C., Yang. R., Qiao. H., Soylemez. E., Reeseewatt. P., Anvari. A., Narra. S., and Klingbeil. N., "Process mapping for qualification across multiple direct metal additive manufacturing processes," Solid freeform fabrication proceedings, pp. 655-665, 2013
36. Hardness Testing ASM International, Metal Park OH, 1897
37. Dass. A., and Moridi. A. "State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design," Journal of Additive Manufacturing to Materials Design, Vol. 9, No. 7 pp. 1-26, 2019
38. Hogn. M. H., Min. B., and Kwon. T. Y., "The Influence of Process Parameters on the Surface Roughness of a 3D-Printed Co-Cr Dental Alloy Produced via Selective Laser Melting," Applied Sciences, Vol. 6, No. 12, pp. 401-411, 2016
39. Incropera. F. P., DeWitt. D. P., Bergman. T. L., and Lavine. A., "Incropera's Principles of Heat and Mass Transfer," John Wiley & Sons, Global Ed., 2017
40. Benjamin. P. K., Shawn E. N., Kyle. L. W., Tushar. K. G., Robert. V. T., and Sudarshan K. L., "Total Hemispherical Emissivity of Inconel 718," Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol. 287, pp. 11-18, 2015
41. Roberts. I. A., Wang. C. J., Esterlein. R., Stanford. M., and Mynors. D. J., "A Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Temperature Field during Laser Melting of Metal Powders in Additive Layer Manufacturing," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, No. 12-13, pp. 916-923, 2009

42. Yang. S. J. et al., "Determination of the Optical and the Thermal Properties of an Absorbing Medium by Using Infrared Thermometry," Journal of the Korean Physical Society, Vol. 69, No. 12, pp. 1744-1749, 2016

감사의 글

지금의 석사 학위 논문을 완성하기까지 여러 가지로 많은 도움을 주신 분들에게 진심어린 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

가장 먼저 학부생이었던 CATIA 팀일때 부터 좋은 길로 갈 수 있도록 지도를 해주시고 항상 저의 부족한 모습을 채워주시기 위해 가르침을 주시고 어려운 일이 있을때는 항상 먼저 다가오셔서 좋은 말씀해주셨던 안동규 교수님께 진심으로 감사하다는 말씀 드리고 싶습니다. 교수님의 가르침대로 매사에 적극적으로 열심히 살도록 하겠습니다. 또한, 대학원 생활을 하면서 마주치면 웃으면서 좋은 말씀 해주시고 석사 학위 논문의 심사과정을 거치면서 여러 가지 조언과 지도를 해주셨던 한길영 교수님과 오동욱 교수님께 감사의 말씀드립니다.

전산 설계 실험실의 선배님들께도 감사의 말씀 드리고 싶습니다. 이상훈 선배님, 김민수 선배님, 김진석 선배님, 문경제 선배님, 변경원 선배님, 정광운 선배님, 김대원 선배님, 김현우 선배님, 남경흠 선배님, 박승화 선배님, 송동한 선배님, 김세훈 선배님, 박민우 선배님, 조창규 선배님, 선향선 선배님, 안영수 선배님, 정우철 선배님, 박나라 선배님, 이호진 선배님, 국대선 선배님, 김동인 선배님, 장용훈 선배님 그리고 bihlii chua 선배님 모두에게 감사의 말씀 드립니다. 항상 후배를 위해 응원과 격려를 해주시고 많은 조언을 해주신 덕분에 무탈하게 석사학위를 받을 수 있었습니다. 특히 같이 생활하면서 옆에서 많은 가르침을 주신 이호진 선배님, 장용훈 선배님 그리고 bihlii chua 선배님에게 다시 한번 감사하다고 말씀드리고 싶습니다. 또한 대학원 생활하면서 힘들 때나 좋을 때 언제나 옆에서 같이 화내고 웃으면서 항상 힘이 되어 주었던 광규형에게 감사하다고 말하고 싶습니다. 그리고 바쁠 때 대신하여 많은 도움을 준 김호, 백선호, 황안재 그리고 hassan humayun 에게 감사하다고 말하고 싶습니다.

그리고 연구를 진행할 수 있도록 언제나 장비를 사용하게 해주셨던 한국생산기술연구원의 손용 박사님, 이협 박사님, 이호영 연구원, 박혜진 연구원에게 감사의 말씀 드립니다.

마지막으로 처음에는 반대하셨지만 끝까지 믿고 기다려주시고 응원해준 우리 가족에게 진심으로 감사하다고 말씀 드리고 싶습니다.

2019 년 12 월 김 현 식