



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](#)

2019년 2월

석사학위 논문

DMT 공정을 이용한 초합금
분말과 S45C 강의 이종재료
적층 시 적층 특성 고찰

조선대학교 대학원

기계공학과

이 광 규

**DMT 공정을 이용한 초합금
분말과 S45C 강의 이종재료
적층 시 적층 특성 고찰**

**Investigation into Dissimilar Deposition Characteristics between
Superalloy Powders and S45C Steel Using a Laser-Aided Direct
metal Rapid Tooling (DMT) Process**

2019 년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

이 광 규

DMT 공정을 이용한 초합금
분말과 S45C 강의 이종재료
적층 시 적층 특성 고찰

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019 년 11월

조선대학교 대학원

기계공학과

이 광 규

이광규의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 한길영 (인)

위 원 조선대학교 교수 오동욱

위 원 조선대학교 교수 안동규

2019 년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	iv
NOMENCLATURES	x
ABSTRACT	xii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 선행 연구	1
1. 연구 배경	1
2. Laser-aided Directed Metal Tooling (DMT) 공정	4
3. 선행 연구	5
제 2 절 연구 목적 및 연구 방법	6
1. 연구 목적	6
2. 연구 방법	8
제 2 장 이중 재료 적층 시편 설계 및 제작	10
제 1 절 이중 재료 적층 시편 설계 및 제작	10
1. 적층 재료 선정	10
2. 이중 재료 적층 시편 설계	11

3. 기저부 열처리	12
4. 이중 재료 적층 시편 제작	15
가. 이중 재료 시편 제작	15
나. 시편 후처리	18
다. 내부 결합 검사	21
제 3 장 DMT 공정 유한요소 해석을 위한 데이터 도출 및 모델 생성	23
제 1 절 물성 데이터 도출 및 고찰	23
1. 기저부 재료 온도 의존 물성 데이터 도출	23
가. 기저부의 상변화	23
나. 기저부 온도 의존 물성 데이터 도출	26
다. 열처리에 따른 온도 의존 물성 데이터 변화 분석	30
2. 적층부 재료 온도 의존 물성 데이터 도출	32
제 2 절 경계조건 데이터 도출 및 고찰	36
1. 강제 대류 경계조건 데이터 도출	37
2. 자연 대류 경계조건 데이터 도출	39
3. 등가 강제 대류 계수 도출	41
제 3 절 열원 모델 도출 및 고찰	43
1. 체적 열원 모델 도출	43

가. 레이저 열원	43
나. 열원모델 도출을 위한 해석모델 생성	45
제 4 절 유한요소 해석 모델 도출	49
1. 해석 모델 도출	49
제 4 장 유한요소 해석을 이용한 이종재료 적층 특성 고찰	52
제 1 절 열전달 해석 결과 및 분석	52
1. 단일 비드 열전달 해석 결과 분석	52
2. 이열 비드 열전달 해석 결과 분석	58
3. 다열 비드 열전달 해석 결과 분석	62
4. 다층 비드 열전달 해석 결과 분석	71
제 2 절 열응력 해석 결과 및 분석	75
1. 단일 비드 열응력 해석 결과 분석	77
2. 이열 비드 열응력 해석 결과 분석	83
3. 다열 비드 열응력 해석 결과 분석	86
4. 다층 비드 열응력 해석 결과 분석	89
제 5 장 결론 및 향후 과제	92
Reference	95

LIST OF TABLES

Table. 1 Chemical compositions of substrate and powders	10
Table. 2 Dimensions of substrates after heat treatment processes	13
Table. 3 Process parameters	15
Table. 4 Characteristics dimensions of beads and HAZs for different deposited materials	20
Table. 5 Process parameters of finite element analyses	46
Table. 6 Nodes and elements of FE model for different deposited beads	50
Table. 7 Analysis conditions for deposition of double bead	87

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Classification of additive manufacturing processes in ASTM F42	2
Fig. 2 Concept of a DMT process	4
Fig. 3 Defects of fabricated parts by the metal AM process	6
Fig. 4 Flow chart of research works	8
Fig. 5 Specimen design for line deposition experiments	11
Fig. 6 Schematics of deposition experiments with a large area	12
Fig. 7 Substrates after heat treatment processes	13
Fig. 8 Results of hardness tests for heat treated specimens	14
Fig. 9 Experimental set-up	15
Fig. 10 Clamping conditions for deposition experiments	16
Fig. 11 Results of deposition experiments for beads	16
Fig. 12 Results of deposition for experiments (without heat-treatment of substrates)	17
Fig. 13 Result of deposition for experiments (with heat-treatment of substrates at 500 °C)	17

Fig. 14 Result of deposition for experiments (with heat-treatment of substrates at 400 °C)	17
Fig. 15 defects during deposition	17
Fig. 16 Microscope (Xi-Cam)	18
Fig. 17 Post-process of specimen	18
Fig. 18 Formation of beads on the substrate (top view)	19
Fig. 19 Formation of beads on the substrate (cross-section)	19
Fig. 20 X-ray CT system and measurement methodology	21
Fig. 21 Result of defects of inside regions for deposited specimens	22
Fig. 22 Fe-Fe₃C Phase diagram	23
Fig. 23 TTT curves of S45C	24
Fig. 24 Phase change of S45C	25
Fig. 25 CCT curves for S45C material	26
Fig. 26 Temperature dependent material properties of S45C	29
Fig. 27 Relationship of cooling temperature and phase change in TTT curve ..	30
Fig. 28 True stress-strain curves for different heat treatment conditions	31
Fig. 29 Influence of temperature on the weight percent of phase	32
Fig. 30 CCT and TTT curves of Inconel 625	33
Fig. 31 CCT and TTT curves of Stellite 21	33
Fig. 32 Temperature dependent thermal and mechanical properties of Inconel 625 and Stellite 21	34
Fig. 33 True stress-strain curves of inconel 625 and stellite 21	35
Fig. 34 Classification into boundary conditions in deposition and cooling stages	36
Fig. 35 Impinging jet model and properties of the argon gas to estimate the forced convection coefficient	37
Fig. 36 Estimated forced convection coefficients for different temperature	38
Fig. 37 Temperature dependent thermal and mechanical properties of air	40
Fig. 38 Estimated natural convection coefficients for different temperatures and directions	40
Fig. 39 Emissivity of Inconel 625	42
Fig. 40 Estimated equivalence forced convection coefficients for different materials	42

Fig. 41 Visualization of the application of equivalent forced convection coefficients in the vicinity of irradiates region of laser	42
Fig. 42 Heat flux model of laser⁴	43
Fig. 43 Method of mesh generation to configure the heat flux model	45
Fig. 44 Two types of FE model to simulate thermo-mechanical phenomenon during deposition and cooling	45
Fig. 45 Estimated steady-state heat transfer region	46
Fig. 46 Influence of type of FEA model on temperature distribution in the vicinity of the deposited region	47
Fig. 47 Estimation of efficiency of heat flux	48
Fig. 48 Influence of shape coefficient on the intensity distribution of the heat flux and aspect ratio of HAZ	48
Fig. 49 Models of FEAs for different deposited beads (Inconel 625)	49
Fig. 50 Models of FEAs for different deposited beads (Stellite 21)	50
Fig. 51 Bead shapes for different FE models	51
Fig. 52 Comparison of temperature distributions for Inconel 625 powders and those for Stellite 21 Powders	52
Fig. 53 Influence of thermal histories on the phase of the substrate	53
Fig. 54 Phase distributions during the deposition (Inconel 625)	54
Fig. 55 Influence on the temperature distribution on the phase volume of martensite in the substrate (Inconel 625)	54
Fig. 56 Influence of the hardness of the substrate on temperature distributions and phase volume of martensite in the vicinity of the deposited region (Inconel 625)	56
Fig. 57 Influence of the hardness of the substrate on temperature distributions and phase volume of martensite in the vicinity of the deposited region (Stellite 21)	56
Fig. 58 Variation of efficiency of the heat flux according to a successive deposition (Inconel 625)	58
Fig. 59 Variation of temperature distributions in the vicinity of the molten pool according to a successive deposition	59

Fig. 60	Temperature-time curves for the double bead deposition	59
Fig. 61	Influence of the deposition path and the interpass time on temperature distribution in the vicinity of the irradiated region by the heat flux	60
Fig. 62	Effects of the interpass time, the deposition path and the deposition material on the width and the depth of HAZ	61
Fig. 63	Effects of the deposition path and the interpass time on the formation of a low temperature region (Inconel 625)	62
Fig. 64	Influence of the deposition path and the interpass time on the width of HAZ and the deposition direction	63
Fig. 65	Evolution of martensite phase during the deposition of double lines (Inconel 625)	63
Fig. 66	Variation of temperature distribution in the vicinity of the deposited region (Deposition of multi lines, Inconel 625)	64
Fig. 67	Variation of temperature distribution in the vicinity of the deposited region (Deposition of multi lines, Stellite 21)	66
Fig. 68	Temperature distributions and temperature-time curves for different measured regions during the deposition	67
Fig. 69	Variation of volume of martensite in the vicinity of the deposited region according to a successive deposition (deposition of multiple beads, Inconel 625)	68
Fig. 70	Influence of the hardness of the substrate on the volume of martensite (deposition of multiple beads, Inconel 625)	68
Fig. 71	Effects of the deposition path on the volume of martensite in the deposition of multiple beads (Inconel 625)	69
Fig. 72	Effects of the deposition path on the volume of martensite in the deposition of multiple beads (Stellite 21)	69
Fig. 73	Variation of temperature distribution in the vicinity of the deposited region (Deposition of multi layers, Inconel 625)	71
Fig. 74	Variation of the formation of HAZ according to a successive deposition (Inconel 625)	72
Fig. 75	Temperature-time curves for different measured locations	72

Fig. 76	Volume of martensite during a successive deposition of multiple lined and layers	73
Fig. 77	Effects of the heat treatment of the volume of martensite after the depositions of multiple lines and layers (Inconel 625)	74
Fig. 78	Yield strength-temperature curve	75
Fig. 79	Tensile strength-temperature curves for different cooling rates	76
Fig. 80	Residual stress and displacement distributions for different deposition times (Deposition of single bead, Inconel 625)	78
Fig. 81	Comparison of residual stress and displacement distributions of the Inconel 625 deposited region and those of the Stellite 21 deposited region (Deposition of single bead)	80
Fig. 82	Von-Mises stress-time curves for different measured locations (Dposition of single bead)	80
Fig. 83	Influence of the heat treatment of the substrate on residual stress distributions in the vicinity of the deposition region	81
Fig. 84	Effects of the heat treatment of the substrate on the Von-Mises stress-time curves (Inconel 625)	82
Fig. 85	Effects of the heat treatment of the substrate on the Von-Mises stress-time curves (Stellite 21)	82
Fig. 86	Comparison of residual stress distributions of the deposited region by Inconel 625 and those by Stellite 21	83
Fig. 87	Influence of the interpass time, the deposition path and the deposition material on the residual stress in the vicinity of the deposited region (Depoistion of double beads)	84
Fig. 88	Effects of the heat treatment of the substrate on residual stress distributions for the deposition of double bead	85
Fig. 89	Residual stress distributions in the vicinity of the deposited region for the case of the deposition of multiple lines (Inconel 625)	86
Fig. 90	Influence of the deposition path on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines (Inconel 625)	87

Fig. 91 Influence of the deposition path on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines (Stellite 21) 87

Fig. 92 Residual stress distributions for different deposition parts and hardness of the substrate for the case of the deposition of multiple lines (Inconel 625) 88

Fig. 93 Residual stress distributions for different deposition parts and hardness of the substrate for the case of the deposition of multiple layers (Inconel 625) 89

Fig. 94 Effects of the deposited material on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines and layers 90

Fig. 95 Effects of the heat treatment of the substrate on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines and layers (Inconel 625) 91

Fig. 96 Influence of the deposition path on residual stress distribution for the case of the deposition of multiple lines and layers 91

NOMENCLATURES

- P : Power of laser (레이저의 출력)
 v : Scan speed (레이저의 스캔 속도)
 η : Efficiency of laser (레이저의 효율)
 Q_0 : Maximum power intensity of laser (레이저의 최대 출력 강도)
 x : X position of laser (레이저의 x 위치)
 y : Y position of laser (레이저의 y 위치)
 z : Z position of laser (레이저의 z 위치)
 t : Time (시간)
 C : Shape coefficient of laser (레이저의 형상계수)
 $r(Z)$: Laser coverage (레이저의 적용 범위)
 δ : Penetration depth of laser (레이저의 침투 깊이)
 r_e : Top radius of heat flux (열원의 상부 반경)
 r_i : Bottom radius of heat flux (열원의 상부 반경)
 z_e : Top position of heat flux (열원의 상부 위치)
 z_i : Bottom radius of heat flux (열원의 하부 위치)
 $\dot{Q}_{loss,total}$: Total heat loss rate (총 열손실율)
 $\dot{Q}_{loss,forced}$: Heat loss rate induced by the forced convection
 (강제대류에 의한 열손실율)
 $\dot{Q}_{loss,rad}$: Heat loss rate induced by the radiation (복사에 의한 열손실율)
 ϵ : Emissivity (방사율)
 σ : Stefan-Boltzmann's constant (스테판-볼츠만 상수)
 \bar{h}_f : Average forced convection (평균 강제대류계수)
 $\bar{h}_{eq,f}$: Average equivalent forced convection coefficient (평균 등가 강제대류계수)
 \bar{Nu} : Average nusselt number (평균 너셀수)
 Re : Reynolds number (레이놀즈수)
 Pr : Prandtl number (프란틀 수)

- A_r : Application area (적용 면적)
- R_a : Rayleigh number (레이리 수)
- D_h : Diameter of nozzle (노즐의 직경)
- H : Distance between nozzle and substrate (노즐과 기저부 사이 거리)
- V_e : Velocity of fluid (유체의 속도)
- R : Application radius (적용 반경)
- L_c : Characteristic length (특성 길이)
- ν : Kinematic viscosity (동점성계수)
- α : Thermal diffusivity (열확산계수)
- g : Gravitational acceleration (중력 가속도)
- β : Thermal expansion coefficient (열팽창계수)
- ρ : Density (밀도)
- c_p : Specific heat (비열)
- k : Thermal conductivity (열전도도)
- T_s : Surface temperature (표면 온도)
- T_∞ : Environmental temperature (대기 온도)
- T_f : Film temperature (필름 온도)

ABSTRACT

Investigation into Dissimilar Deposition Characteristics between Superalloy Powders and S45C Steel Using a Laser-Aided Direct metal Rapid Tooling (DMT) Process

Lee Kwang Kyu

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

Dept. of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

A directed energy deposition (DED) process is a representative metal additive manufacturing (AM) technology to create a three-dimensional (3D) part with different materials. The quality of the fabricated part with different materials is greatly dependent on deposition characteristics between the deposited region and the substrate. The objective of this thesis is to investigate dissimilar deposition characteristics between super-alloy powders and S45C steel using a laser-aided direct metal rapid tooling (DMT) process through finite element analyses (FEAs). Inconel 625 and Stellite21 super-alloys are chosen as materials of deposited powders. A 3D FE model is created to simulate a thermo-mechanical phenomenon in the vicinity of the deposited region during deposition and cooling. The laser is assumed to be a volumetric heat flux with the gaussian distribution in a plane and the penetration depth. Temperature dependent thermal and mechanical properties, including effects of a phase change, are adopted. A proper efficiency of the heat flux is estimated by comparison of results of FEAs and those of

experiments. Repeated FEAs are carried out using a commercial software SYSWELD. FEAs are performed for cases of in-plane deposition, including a single line, a double line and multiple lines, and out-of-plane depositions. From the results of FEAs, the influence of the deposition path, the deposited material and the interpass time on temperature, micro structure and residual stress distributions in the vicinity of the deposited region is examined. In addition, the effects of the hardness of the substrate on microstructure and residual stress distributions in the substrate are discussed.

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경 및 선행연구

1. 연구 배경

제 4 차 산업혁명은 클라우스 슈바프 (Klaus Schwab) 가 의장으로 있는 2016 년 세계 경제 포럼 (World Economic Forum : WEF) 에서 주창된 용어로 빅 데이터 분석, 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷, 자율 주행 기술, 3 차원 인쇄 및 나노 기술 등의 분야에서 기술 혁신을 말한다.¹⁾ 이 모든 기술이 융합하여 물리학, 디지털, 생물학 분야가 상호 교류하는 제 4차 산업혁명은 종전의 그 어떤 혁명보다도 근본적으로 궤를 달리한다.²⁾ 제 4 차 산업혁명의 기술혁신 분야 중 하나인 적층 제조 (Additive manufacturing : AM) 기술은 1984 년 미국의 Charles W. Hull 이 광경화수지 (Stereolithography : SLA) 조형 방식의 프린터를 발명하고 특허를 받았다.³⁾ 이후 적층 공정의 방식 및 적층 재료에 따라 판재적층 (Sheet Lamination : SL) 방식, 접착제 분사 (Binder Jetting : BJ) 방식, 분말 베드 용해 (Powder Bed Fusion : PBF) 방식 및 에너지 제어형 적층 (Directed Energy deposition : DED) 방식 등 많은 종류의 적층 제조 공정이 개발되었다.⁴⁾ 3 차원 인쇄 기술은 정통적인 물건 제조 방식과는 반대로 재료를 한 층 한 층 쌓아 물건을 만드는 방식이다.⁵⁾ CAD (Computer Aided Design) 및 CAM (Computer Aided Manufacturing) 환경에서 재료를 층별로 적층하여 기하학적으로 복잡한 3차원의 물체를 제조한다.⁶⁻⁷⁾ AM 기술은 공정의 특성으로 인해 기존 제조 공정을 이용하여 제조하기 어려운 기하학적 구조를 갖는 부품의 제조 및 최종 부품 무게 대비 원료 무게의 비율인 Buy-to-fly 비율 개선에 큰 이점을 가지고 있다. 형상 자유도 및 Buy-to-fly 비율의 증가는 제조 공정의 지속 가능성에 대한 중요한 척도인 에너지 절약, 재료 절약 및 수명 연장의 가능성에 기여한다.^{4,8-10)}

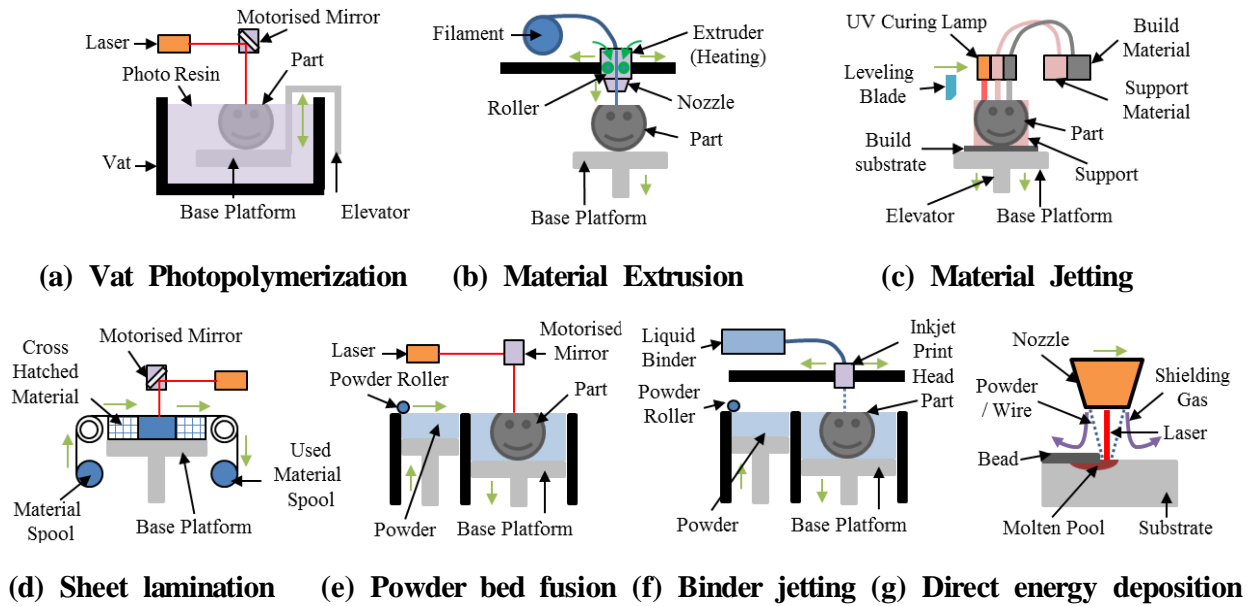


Fig. 1 Classification of additive manufacturing processes in ASTM F42¹¹⁾

AM 공정은 미국재료시험협회 (American society for testing materials : ASTM) F42 및 국제표준화기구 (International Organization for Standardization : ISO) TC 261 에서 공정 수행 방식에 따라 Fig. 1 과 같이 크게 7 가지로 분류하고 있다.¹¹⁾

광중합 방식 (Vat Photopolymerization) 은 특정한 파장의 빛을 조사하면 경화하는 광경화성 수지 (Photopolymer) 에 빛을 조사하여 적층 공정을 수행하는 방식이다. 7 가지 방식 중 가장 오래된 방식이며 레이저를 이용하기 때문에 조형물의 정밀도가 높고 표면이 매끄러운 장점이 있다. 적층 공정을 수행하기 위해서는 수조 (Vat) 에 재료를 충분히 담아야 적층이 가능하며 높은 가격대, 관리의 어려움 및 재료의 유해성과 같은 단점이 있다. 대표적인 공정으로는 SLA (Stereo Lithography Appratus) 및 DLP (Digital Light Processing) 가 있다.¹²⁾

소재 압출 (Material Extrusion) 방식은 필라멘트와 같은 열가소성 물질을 부분적으로 가열하여 노즐을 통해 압출시키며 한 층씩 적층하여 적층 공정을 수행하는 방식이다.¹³⁾ 다양한 소재 적용이 가능하며 가격이 저렴하고 단순한 구조를 가지고 있어 사용이 용이하다는 장점이 있다. 적층 공정을 수행할 때 지지대(Support) 가 필요하고 공정 후 지지대의 제거를 위한 후처리 공정이 필요하며 제작 속도가 느리고 표면 상태가 좋지 않다는 단점이 있다. 대표적인 공정으로는 FDM (Fused Deposition Modeling) 공정이 있다.¹⁴⁾

재료 분사 (Material Jetting) 방식은 광경화성 수지를 프린터 헤드를 이용하여 분출시키고 자외선램프를 이용하여 경화시키며 한 층씩 적층 공정을 수행하는 방식이다. 공정 특성으로 인해 여러 가지 색을 적용할 수 있고 적층 속도가 빠르며 표면상태가 좋다는 장점이 있다. 기계와 재료의 비용이 고가이며 재료 특성상 강도가 좋지 않아 사용이 어렵다는 단점이 있다. 대표적인 공정으로는 MJP (Multijet Printing) 및 Polyjet (Photopolymer Jetting) 등이 있다.¹⁵⁾

판재 적층 (Sheet Lamination) 방식은 얇은 필름형태의 종이, 박판 및 금속 판재 등을 레이저를 이용하여 절단하고, 열이나 접착제를 이용하여 붙여가며 한 층씩 적층시키는 방식이다. 다른 공정과는 다르게 한 층 전체를 접합시켜 공정을 수행하기 때문에 적층 속도가 빠르다는 장점이 있다. 레이저를 이용하기 때문에 종이 및 박판의 절단 과정에서 화재의 위험성이 있으며 금속 판재를 이용하여 제품 제작 시 기계적 특성이 좋지 않다는 단점이 있다.¹⁶⁾

분말 베드 용해 (Powder Bed Fusion) 방식은 분말 형태의 소재를 분말 베드위에 일정한 두께로 이송하여 고 에너지 열원 (레이저, 전자빔 등)을 조사하여 선택적으로 용융 또는 소결시켜 적층 공정을 수행하는 방식이다. 재료를 접합시키는 방식에 따라 SLS (Selective Laser Sintering) 및 SLM (Selective Laser Melting) 으로 구분된다. 고분자 분말을 이용하기도 하지만 금속 분말을 이용하여 적층 공정 수행이 가능하기 때문에 대표적인 금속 적층 제조 공정 중 하나이다.¹⁷⁾

접착제 분사 (Binder Jetting) 방식은 분말 소재 위에 접착제를 분사시켜 분말을 결합시키는 방식이다.¹⁸⁾ 소재 분사 방식과 동일하게 공정 특성으로 인해 여러 가지 색을 적용할 수 있고 적층 속도가 빠르다는 장점이 있다. 결합을 위해 접착제를 이용하기 때문에 사용이 용이하지 않다는 단점이 있다.¹⁹⁾

에너지 제어형 적층 (Direct Energy Deposition) 방식은 고 밀도 에너지원 (레이저, 전자빔, 플라즈마 아크 등) 으로 기저부를 용융시켜 용융풀 (Molten Pool)을 형성하고 용융풀에 금속분말 또는 와이어와 같은 재료를 용융시켜 한 층씩 적층하는 방식이다. 3 축 및 5 축 가공이 가능하여 형상의 자유도가 높고 기존 제품에 적층공정을 수행할 수 있기 때문에 제품의 유지 보수, 기계적 성능향상 및 높은 buy-to-fly 비율을 가진다는 장점이 있다. 고밀도 에너지원 사용으로 인해 적층 중 결함이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 대표적인 공정으로는 DMD (Direct metal deposition), DMT(Laser-aided direct metal tooling), WAMM(Wire-arc additive manufacturing), LENS (Laser engineered net shaping) 등의 공정이 있다.⁴⁾

2. Laser-aided Directed Metal Tooling (DMT) 공정

레이저 직접 금속 조형 (Laser-aided Directed Metal Rapid Tooling : DMT) 공정은 에너지 제어형 적층 (Directed Energy Deposition : DED) 공정 중 하나이다. DMT 공정은 Fig. 2 와 같이 레이저를 기저부에 조사하여 용융풀 (Molten Pool)을 형성시킴과 동시에 금속 분말을 동 축으로 분사하여 완전 용융시켜 적층 공정을 수행한다.²⁰⁾ 적층 공정을 수행하는 동안 적층부의 산화를 방지하기 위해 불활성 가스인 아르곤 (Ar) 가스를 분사하여 보호가스 분위기를 형성한다. 노즐 양 옆에 장착된 카메라를 이용하여 레이저의 위치 및 높이를 측정하고 피드백 시스템을 통해 레이저의 초점을 조절한다. 레이저 초점 조절을 통해 균일하게 열원을 적용하고 일정한 형상의 비드를 생성할 수 있도록 한다. DMT 공정은 공정 특성으로 인해 복잡한 내부 구조를 가지는 금형 제작, 기존 기계부품 수리, 이종 재료 적층을 통한 기계적 특성 향상 등에 큰 장점을 가지고 있다.²¹⁾ 소성 가공, 금속 성형 및 절삭 가공 등의 기존 기계 가공 공정에 대비해 공정의 에너지 효율이 우수하며 사용 공구의 복원 및 재 제조를 통해 재료의 재활용률을 증가시킬 수 있기 때문에 친환경적인 공정이다.⁴⁾ 하지만 레이저 열원에 의한 국부적인 급속 가열 및 냉각과 같은 열전달 현상에 의해 제품의 변형, 균열 및 잔류응력 등의 문제를 발생시킬 수 있다는 문제점이 있다.²²⁾

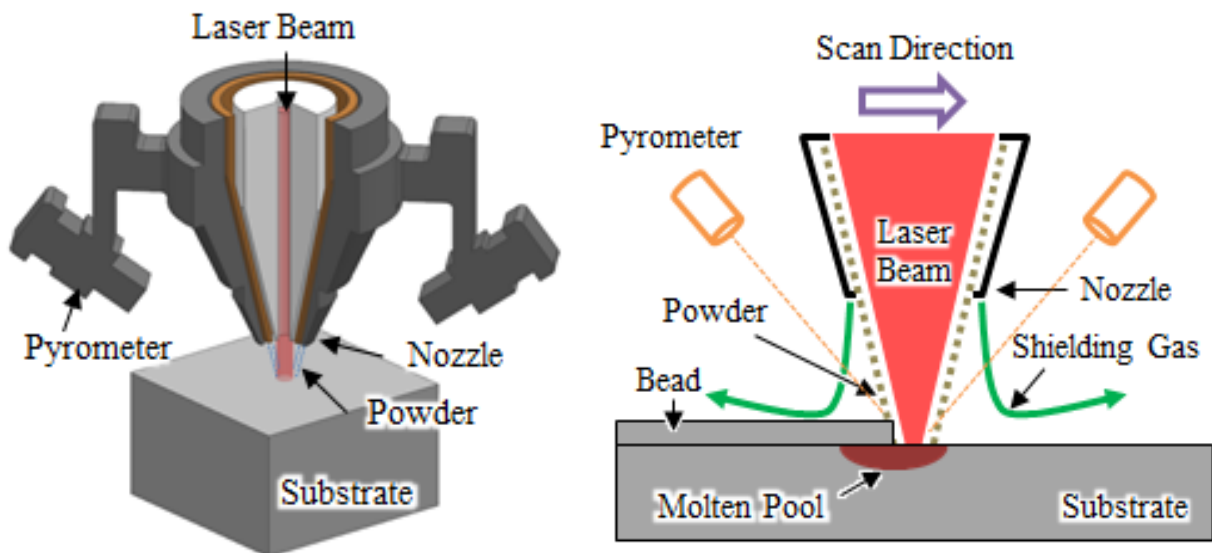


Fig. 2 Concept of a DMT process

3. 선행 연구

적층 공정 진행 시 발생하는 변형, 균열 및 잔류응력 등의 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되었다.

2009 년 Dinda 등은 DMD 공정을 이용하여 레이저 파워 및 스캔 속도에 따른 Inconel 625 적층을 진행하고 미세 경도 및 미세 구조 분석을 수행하였다. 균열, 결합 오류 및 다공성과 같은 결함 분석에 관한 연구를 수행하여 Inconel 625 소재가 적층 재료로 사용하기 좋은 재료임을 분석하였다.²³⁾

2015 년 Heigel 등은 DED 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금의 적층 시편을 제작하고 열역학적 유한요소 해석 모델을 생성하였다. 열-기계적 모델 개발과 강제대류 효과를 고려한 해석을 통해 대류 조건 적용에 관한 연구를 수행하였다. 유한요소 해석 모델에서 강제 대류 효과를 고려해야함을 도출했다.²⁴⁾

2016 년 Jun 등은 EBM 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 의 단일, 6 층 및 11 층 적층 시편을 제작하고 3차원 열-기계 해석을 통해 공정의 특성을 분석하였다. 홀 드릴링 및 중성자 회절 법을 사용하여 각 시편의 잔류응력을 측정하고 해석 및 실험 결과와 비교하여 적층 층에 따른 잔류응력 변화를 도출하고 예열이 적층 시 변형 및 잔류응력을 감소시킬 수 있음을 도출하였다.²⁵⁾

2016 년 Shim 등은 DED 공정에서 레이저 파워, 파우더 송출량, 스캔 속도, 보호가스 송출량에 대한 단층 적층 실험을 수행하였다. 단일 층 높이와 각 변수 사이의 관계를 도출하고 부품 형상, 미세 경도 및 미세 구조의 영향을 도출하였다.²⁶⁾

2018 년 Lia 등은 DED 공정을 이용하여 Ti-6Al-4V 및 Inconel 625 합금 적층 시편을 제작하고 실험적인 방법으로 열 이력을 측정하였다. 열 이력에 따른 적층부 상변화 및 미세구조 변화분석에 관한 연구를 수행하였다. 적층 제조 공정에서의 상변화 및 미세구조 변화의 영향성을 도출했다.²⁷⁾

선행 연구에서 DED 공정을 이용하여 실험적인 방법을 통해 단면 형상, 조직, 열 영향부 및 잔류응력 측정을 하고 특성 분석을 수행하였다. 열전달 및 열응력 해석을 수행하여 특성을 분석하고 실험결과와 비교하였다.

제 2 절 연구 목적 및 연구 방법

1. 연구 목적

금속 적층 제조 공정에서 발생하는 거친 표면, 내부 기공 발생, 잔류응력 발생, 적층 중 균열 및 변형 등의 문제점을 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되어왔다. 금속 적층 제조 공정을 통해 제작된 제품의 거친 표면은 기계적, 물리적, 열적 및 화학적인 영향을 줄 수 있다. 내부 기공 발생은 부품 전체의 밀도를 감소시키고 기계적 특성을 저하시키며 제품의 균열 및 파괴의 원인이 된다. 잔류응력 발생은 적층공정 중 발생하는 것과 공정 후 잔류하는 두 종류로 나뉘지며 공정 중 잔류응력 발생은 Fig. 3 과 같이 변형, 깨짐 및 휨 현상이 발생할 수 있고 공정 후 잔류응력은 제품의 기계적 특성을 저하시키는 원인이 된다. 적층 공정에 따라 발생하는 거친 표면은 절삭, 연마 및 재용융 공정과 같은 후처리 공정을 통해 개선될 수 있다. 내부 기공 발생의 경우 완전 용융시키는 DED 공정에서는 거의 관찰되지 않는다. 하지만 DED 공정은 고밀도 에너지 열원인 레이저를 이용하여 적층 공정을 수행하는 과정에서 국소영역에 발생하는 급속 가열 및 냉각과 같은 급격한 열 이력에 의해 금속의 팽창과 수축이 발생하게 되고 이는 잔류 응력 발생에 원인이 된다.

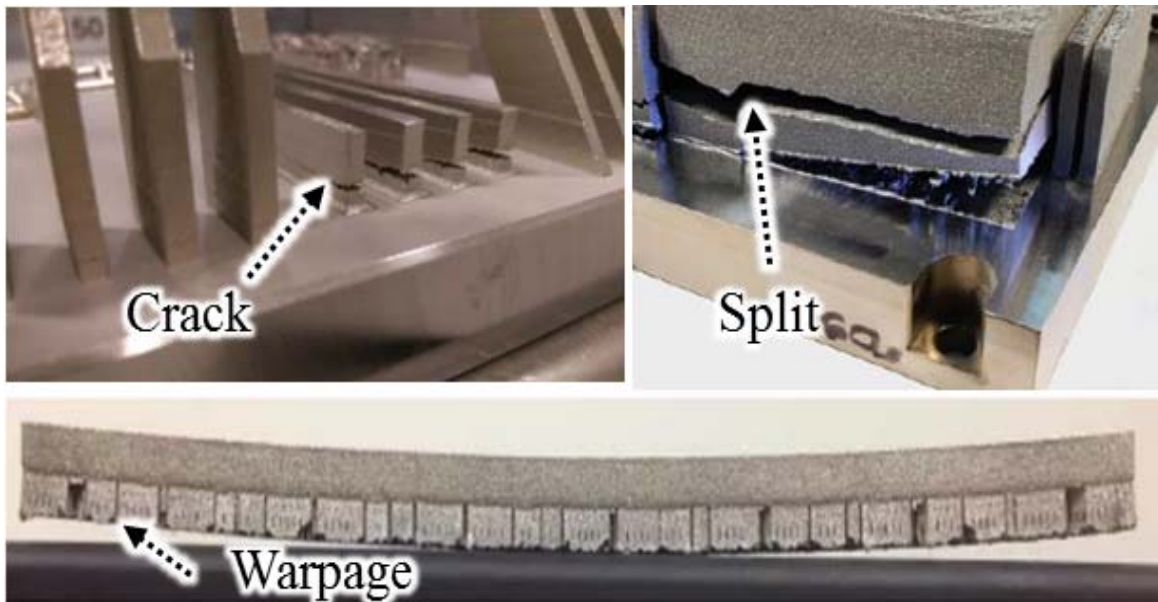


Fig. 3 Defects of fabricated parts by the metal AM process²⁸⁾

이종재료 적층 시 잔류응력에 의한 효과는 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이는 두 재료의 상이한 열적, 물리적 특성에 의한 것으로 적층 공정 수행 시 동일 재료 적층 시 보다 잔류응력에 의한 효과가 더 크게 나타나며 내부 잔류응력에 의해 기계적 특성 저하가 발생할 수 있다. 잔류응력의 해결방법은 기저부를 예열하거나 국부 응력 제거법, 기계적 응력 완화법, 응력제거 풀림 등 여러 가지 방법이 있지만 대표적인 방법으로는 열처리를 통한 방법을 사용한다. 하지만 이종재료의 경우 두 재료의 열 및 기계적 특성이 달라 열처리 공정 중 쉽게 균열이 발생할 수 있다. 이렇듯 이종재료 적층에서의 잔류응력 발생과 같은 문제점은 금속 적층 제조 공정에 치명적인 단점이 될 수 있으며 이를 해결하기 위해서는 금속 적층 제조 공정의 적층 특성을 분석할 필요가 있다.

본 연구는 이종재료 적층에서 발생하는 잔류응력 문제를 해결하기 위해 DMT 공정을 이용하여 Inconel 625 및 Stellite 21 소재의 단일, 이열, 다열, 다층 및 대면적 시편을 제작하고 적층 특성을 분석하고자 한다. 실험에서 분석하기 어려운 온도분포, 상변화 및 응력분포 등을 유한요소 해석을 통해 도출하여 이종재료 적층 시 열전달 및 열응력 과 같은 적층 특성을 분석하고자 한다.

2. 연구방법

이종재료 적층 시 적층 특성을 고찰하기위해 시편 설계, 제작 및 시편 후처리를 수행하고 비드 형상 및 열영향부 데이터를 도출하였다. 시편 설계에 따라 정해진 기저부 및 적층 재료의 온도 의존 물성 데이터는 물성 계산 프로그램인 JmatPro 프로그램을 이용하여 계산하였다.^{29,30)} 유한요소 해석 프로그램인 SYSWELD 를 이용하여 각 시편에 대한 해석 모델을 생성하고 단일, 이열, 다열 및 다층 적층에 대한 열전달 및 열응력 해석을 수행하였다. 본 논문의 연구 흐름도는 Fig. 4 와 같다.

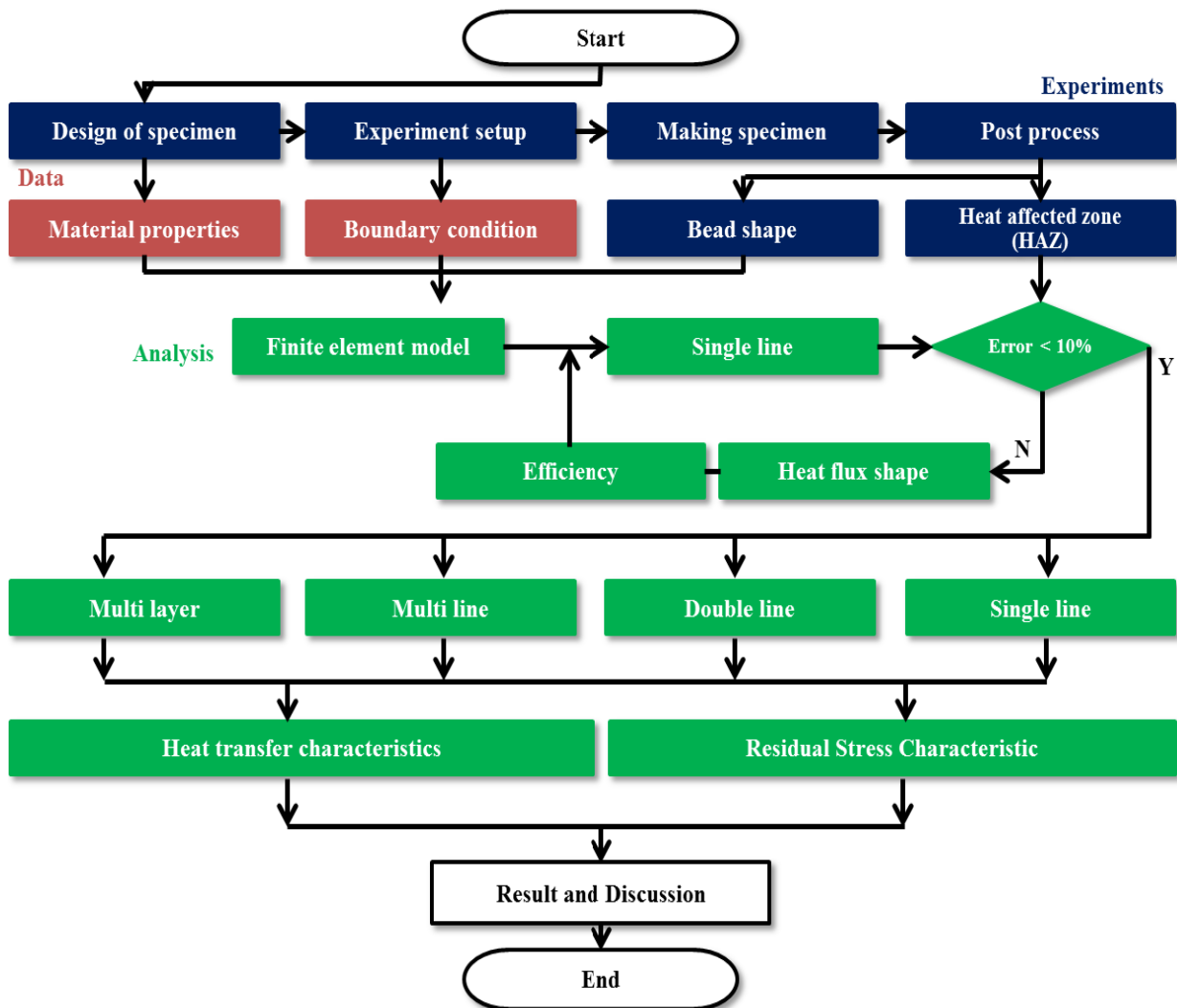


Fig. 4 Flow chart of research works

제 2 장 에서는 시편을 설계하고 DMT 장비를 이용해 단일, 이열, 다열, 다층 및 대면적 적층 시편을 제작하였다. 폴리싱 및 에칭과 같은 후처리 과정 및 현미경 관찰을 통해 비드 형상, 열영향부 (Heat Affected Zone : HAZ) 데이터를 취득하고 이종 재료의 접합 특성을 고찰하였다. 기저부에 담금질 및 뜨임 열처리를 수행하여 경도를 증가시키고 대면적 적층을 통해 열처리에 따른 대면적 적층 시편을 제작하였다.

제 3 장 에서는 유한요소 해석을 위한 데이터를 도출 하고 해석 모델을 생성 하였다. 재료의 화학 조성과 물성 계산 프로그램인 JmatPro를 이용하여 온도 의존 물성 데이터를 도출하였다. 공정 수행에 따른 대류 및 복사 열전달에 의한 열 손실을 고려하여 자연 대류계수, 강제 대류 계수 및 복사를 고려한 등가 강제 대류계수를 도출하였다. 실험을 통해 도출된 비드 형상을 이용하여 단일, 이열, 다열, 다층 및 대면적 유한요소 해석 모델을 생성하였다.

제 4 장 에서는 유한요소 해석 모델을 이용하여 열전달 및 열-기계 해석을 진행 하고 해석 결과를 도출하였다. 단일 비드 해석 모델에서는 열원의 형상, 효율 변화에 따른 해석을 수행하였다. 이열 비드 해석 모델에서는 열원의 효율 변화, 적층시간 간격 및 적층 방향 변화에 따른 해석을 수행하였다. 다열 및 다층 비드 해석 모델에서는 적층 방향에 따른 해석을 수행하였다. 추가로 도출된 열처리 물성 데이터를 이용하여 열처리에 따른 해석을 수행하였다. 단일 비드 해석 모델에서는 열원의 형상, 적정 효율, 상변화, 열전달 및 열응력 특성을 분석하였다. 이열 비드 해석 모델에서는 열원의 효율변화, 적층시간 간격, 적층 방향 및 상변화에 대해 고찰하였다. 다열 비드 해석 모델에서는 평면 적층시 열전달 및 열응력 특성을 고찰하였다. 다층 비드 해석 모델에서는 높이방향 적층에 따른 열전달 및 열응력 특성을 고찰하였다.

제 5 장 에서는 각 장에서 도출된 결과를 종합하여 이종 재료 적층 시 적층 특성을 분석하고 향후과제를 제시하였다.

제 2 장 이종재료 적층 시편 설계 및 제작

제 1 절 이종 재료 적층 시편 설계 및 제작

1. 적층 재료 선정

DMT 공정의 장점인 이종재료 적층을 통한 기계적 성능 향상에 초점을 맞춰 적층 재료를 선정하였다. 기저부 재료는 경제성, 가공성 및 사용용도 등을 고려하여 S45C 로 선정하였으며 적층부 재료는 내식성, 용접성과 같은 적층 용이성과 소재의 기계적 특성을 고려하여 Inconel 625 및 Stellite 21 분말로 선정하였다.

S45C 는 탄소를 0.35-0.5 % 함유한 기계구조용 탄소강으로 기계적 성질이 우수하여 각종 기어, 축, 체인, 롤러, 금형 및 핀 등에 사용되고 있다. 상온 및 고온에서 가공성이 우수하여 소성 가공이 용이하고 대량생산이 가능해 저렴하다는 장점이 있어 많이 사용되고 있다. 열처리를 통해 기계적 강도가 요구되는 수치를 맞춰 사용하는 것이 일반적인 재료이다.

Inconel 625 는 몰리브덴 (Mo) 및 나이오븀 (Nb) 의 첨가에 의해 니켈-크롬 매트릭스가 고용 강화 된 고강도 내식성 재료이다. 산화 및 침탄과 같은 고온 효과뿐만 아니라 심각한 부식 환경에 우수한 저항성을 나타낸다. 해수 응용분야, 항공, 자동차, 원자력 및 용접 등 다양한 분야에서 뛰어난 성능을 나타내어 많이 사용되고 있다. 높은 인장, 크리프 및 파열 강도, 우수한 피로 및 열 피로 강도, 내산화성, 우수한 용접성을 나타내며 극저온 범위부터 982 °C 까지 높은 강도와 인성을 가진다. 높은 강도와 인성을 유지하기위해 용접 후 열처리가 필요하지 않다. 이종 금속에 용접하는데 사용되는 경우 희석률이 줄으면서 특성을 유지한다는 장점이 있다.³¹⁾

Stellite 21 은 크롬 (Cr), 탄소 (C), 텅스텐 (W) 및 몰리브덴 (Mo) 을 포함하는 코발트-크롬-몰리브덴 합금 매트릭스로 구성되어 합금을 강화하고 경도를 높이지만 연성을 감소시키는 고경도 재료이다. 공동현상, 부식, 침식 및 마모에 강한 특성을 나타내며 마모 또는 가공 중에도 표면이 상당히 단단해질 수 있다. 열 및 기계적 충격에 대한 내성이 우수하여 단조 또는 핫 스탬핑 다이를 만드는 데 널리 사용되었다.

부식 및 침식에 강해 주조, 분말 야금 가공 또는 용접 등에 적용 할 수 있다. Stellite 21 의 기계적 특성은 제조 경로 및 후속 열처리에 크게 좌우된다.^{32,33)}

적층에 사용된 분말은 LSN Diffusion 사의 Inconel 625 분말과 Kennametal 사의 Stellite 21 분말이며 분말 사이즈는 모두 45-150 μm 이다. 기저부 및 적층 분말의 화학 조성은 Table. 1 과 같다.

Table. 1 Chemical compositions of substrate and powders

	Ni	Cr	Mo	Fe	Si	Al	Mn	C	Co	Cu	Other
S45C	0.005	0.015	-	BAL	0.247	-	0.757	0.444	-	0.01	< 0.1
Inconel 625	BAL	22.1	9.25	3.59	0.5	0.01	0.5	0.09	0.18	0.07	< 5.0
Stellite 21	2.6	27.5	5.4	2	2	-	-	0.25	BAL	-	-

2. 이종 재료 적층 시편 설계

이종 재료 적층 특성을 고찰하기 위해 Fig. 5 및 Fig. 6 과 같이 단일, 이열, 다열 및 다층 비드 적층 시편과 대면적 적층 시편을 설계하였다.

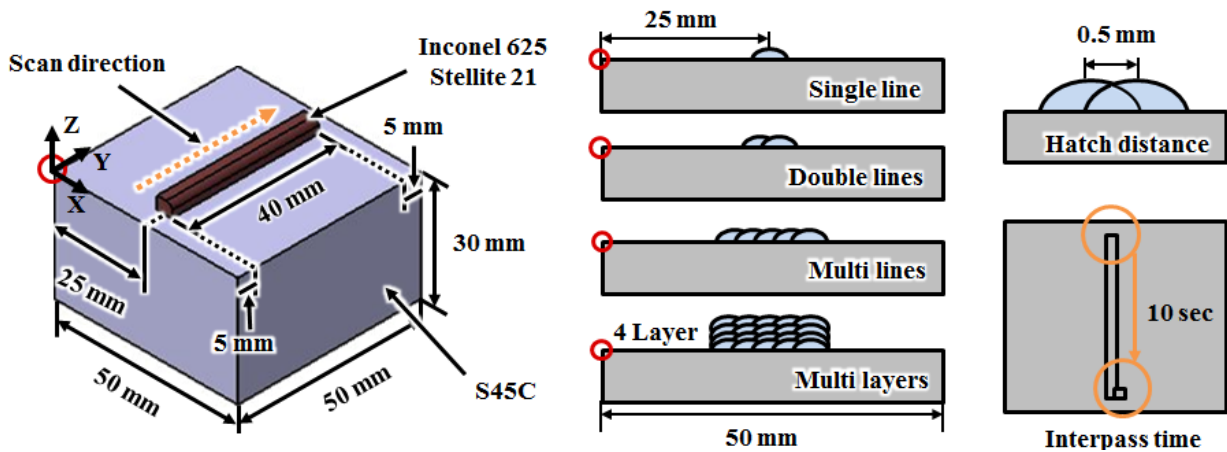


Fig. 5 Specimen design for line deposition experiments

Fig. 5 에서 해칭 간격 (Hatch distance) 은 기존 비드 중심부와 연속적으로 적층된 비드 사이 간격이며 패스간 시간 (Interpass time) 은 기존 비드 적층 후 다음 비드 적층 시 까지 걸리는 시간을 의미한다. 비드 적층 방향은 방향성을 고려

하지 않기 위해 모두 단일 방향으로 진행하였으며 시편 중심에서 대칭이 되도록 설계하였다. 시편 두께에 따라 열전달 특성이 다르게 나타나고 시편 두께가 얇은 박판의 경우 적층 시 변형이 쉽게 일어나기 때문에 이를 고려하여 시편 두께를 30 mm 로 설정하였다.

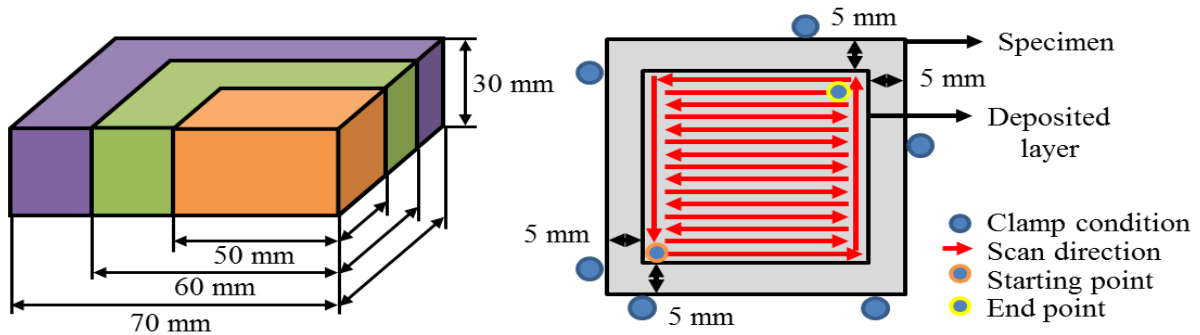


Fig. 6 Schematics of deposition experiments with a large area

적층 면적의 증가에 따른 이종재료 적층 특성 변화를 관찰하기 위해 기저부 크기를 50, 60, 70 mm 로 설정하였으며 모두 동일한 두께로 설계하였다. 시편의 제작 시 경로는 모두 동일한 경로로 설정하였으며 제작된 치구를 이용하여 고정시켰기 때문에 비드 적층 시 고정조건과는 다르게 설정되었다. 적층 높이는 1.5 mm 로 설정하여 총 6 층을 적층 하는 것으로 설계하였다.

3. 기저부의 열처리

열처리 기술은 금속 재료, 기계 부품 및 금형 공구에 요구되는 성질을 부여하기 위해 제조 공정의 중간 또는 최종 단계에 수행하는 열적 조작 기술이다. 금속 또는 합금의 재결정 (Recrystallization), 원자의 확산 및 상 변태 (Phase change)를 이용하는 것으로 일반적인 열처리 방법으로는 불림 (Normalizing), 풀림 (Annealing), 담금질 (Quenching) 및 뜨임 (Tempering) 등이 있다.³⁴⁾ 탄소나 질소를 첨가하여 기계적 특성을 향상시키는 특수 열처리 기술도 있으나 기저부 열처리는 기저부의 화학 조성 변화를 최소화하기 위해 담금질 및 뜨임 열처리를 적용하였다. 담금질 및 뜨임에 따른 기저부의 열처리 결과는 Fig. 7 과 같다.



(a) Without heat treatment (b) With heat treatment at 500 °C (c) With heat treatment at 400 °C

Fig. 7 Substrates after heat treatment processes

담금질은 재료의 경도와 강도를 높이기 위해 수행하는 열처리이다. 재료를 오스테나이트화 온도 (약 738 °C) 이상으로 가열하여 일정시간 유지 후 물, 기름 또는 공기 중에 냉각하여 재료의 경도를 높이는 작업이다. 담금질을 할 경우 경도와 강도 증가와 함께 취성이 생기기 때문에 일반적으로 뜨임 열처리와 함께 사용한다.

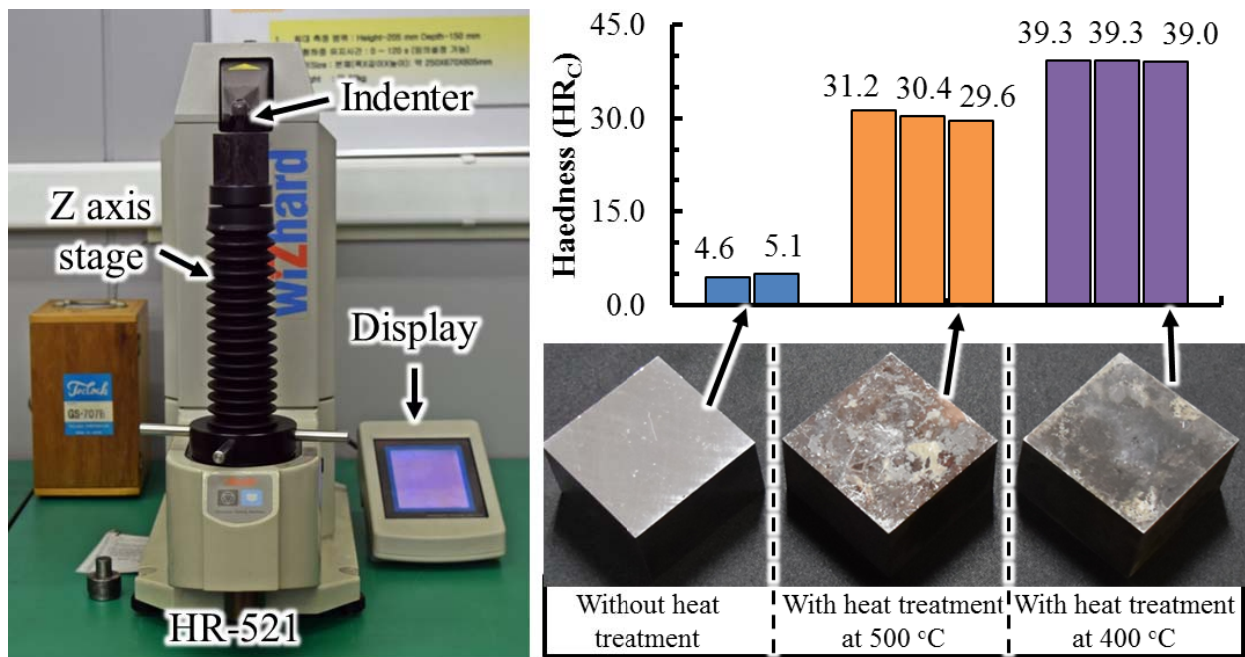
뜨임은 담금질한 강철을 변태점 이하에서 가열하여 일정시간 유지 후 냉각시킴으로써 경도를 감소시키고 연성을 증가시키는 작업이다. 뜨임 온도가 높을수록 경도가 크게 감소하는 경향이 있어 뜨임 온도를 조절함으로써 원하는 기계적 성질을 얻을 수 있다.

열처리에 의한 기계적 성질 향상과 함께 치수 변형과 형상 변형과 같은 시편 변형이 필수적으로 동반된다. 열처리된 기저부의 변형 정도를 분석하기 위하여 전자식 버니어 캘리퍼스를 이용해 측정을 수행하였으며 결과는 Table. 2 와 같다. 측정결과 폭 방향으로 최대 0.2 mm, 길이방향으로 최대 0.28 mm 증가하였고 깊이 방향으로 최대 0.1 mm 감소하였다.

Table. 2 Dimensions of substrates after heat treatment processes

	Without heat treatment	With heat treatment at 500 °C	With heat treatment at 400 °C
Width (mm)	50.06	50.23	50.26
Length (mm)	50.07	50.35	50.24
Depth (mm)	30.16	30.06	30.10

열처리에 따른 시편의 경도 변화를 분석하기 위하여 로크웰 경도 측정을 Fig. 8 과 같이 진행하였다. 각 시편은 무작위로 9 번의 경도를 측정하였으며 측정된 평균 경도를 나타내었다. 경도 측정은 광주 한국생산기술연구원에 있는 로크웰 경도 측정기 HR-521 모델을 사용하였다. 초기하중 10 kgf, 시험하중 150 kgf 및 원뿔형 다이아몬드 압입자를 사용하여 측정을 수행하였다. 500 °C 에서 열처리를 수행한 경우 29.6-31.2 HR_C 로 측정되었으며 400 °C 에서 열처리를 수행한 경우 39.0-39.3 HR_C 로 측정되었다. 열처리를 하지 않은 시편의 경우 로크웰 경도 C 스케일의 적용 범위인 10-70 HR_C 를 벗어난 4.6-5.1 HR_C 로 측정되어 측정값을 신뢰할 수 없었다. 이에 따라 열처리가 되지 않은 시편의 경우 로크웰 경도 B 스케일로 측정하였으며 측정은 1/16 inch 구형 압입자로 초기하중 10 kgf, 시험하중 100 kgf 로 측정하였다. 로크웰 경도 B 스케일로 측정하였을 때 88-90 HR_B로 측정되어 ASTM Designation E-140-12b35) 의 환산표를 적용할 경우 약 6.5-9.0 HR_C 로 예상되었다.



(a) Hardness tester

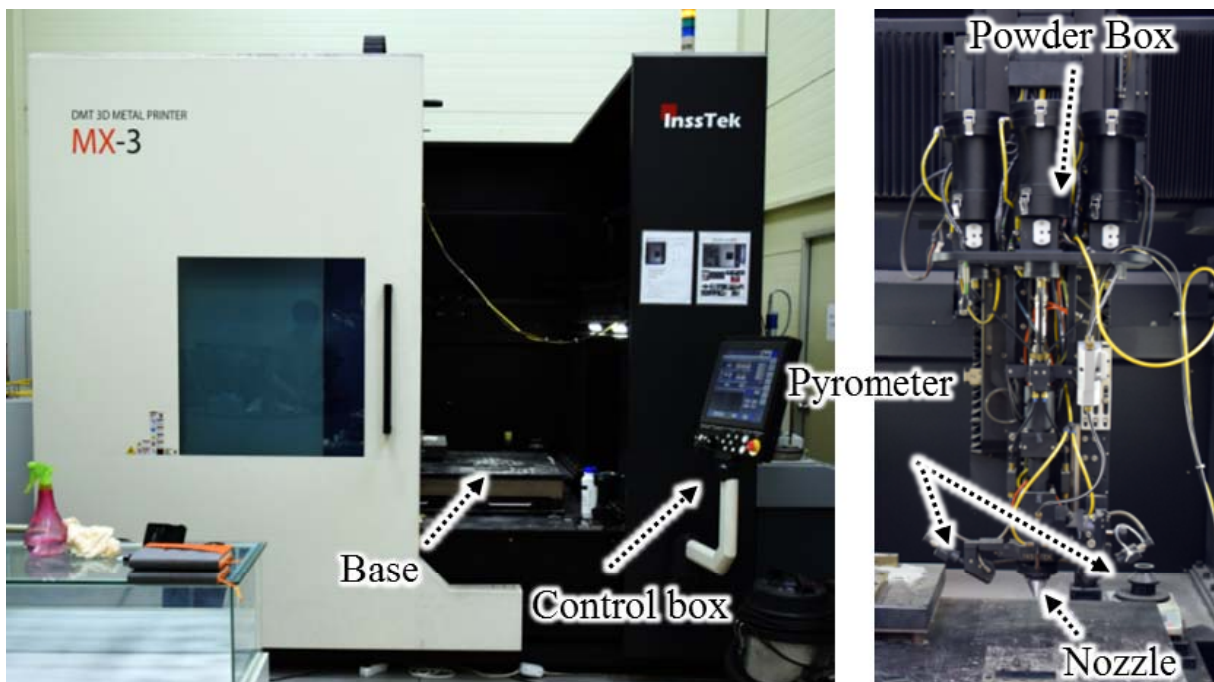
(b) Hardness of heat-treated specimens

Fig. 8 Results of hardness tests for heat treated specimens

4. 이종 재료 시편 제작

가. 이종 재료 시편 제작

비드 적층 시편 제작은 대구 현풍에 위치한 한국생산기술연구원 에서 InssTek 사의 DMT 장비인 MX-3 모델을 이용하여 Fig. 9 와 같이 수행하였다.



(a) DMT machine (MX-3)

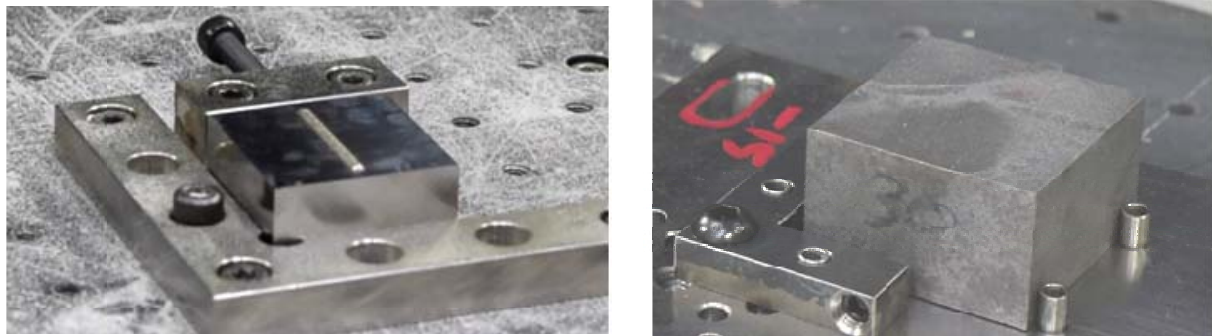
(b) Deposition head



(c) Set-up for the deposition

Fig. 9 Experimental set-up

1 차 적층 실험을 통해 단일, 이열, 다열 및 다층 적층 시편을 제작한 후 2 차 적층 실험을 통해 대면적 적층 시편을 제작하였다. 적층 시편 제작 시 고정 조건은 Fig. 10 과 같으며 사용된 공정 변수는 Table. 3 과 같다.



(a) Bead

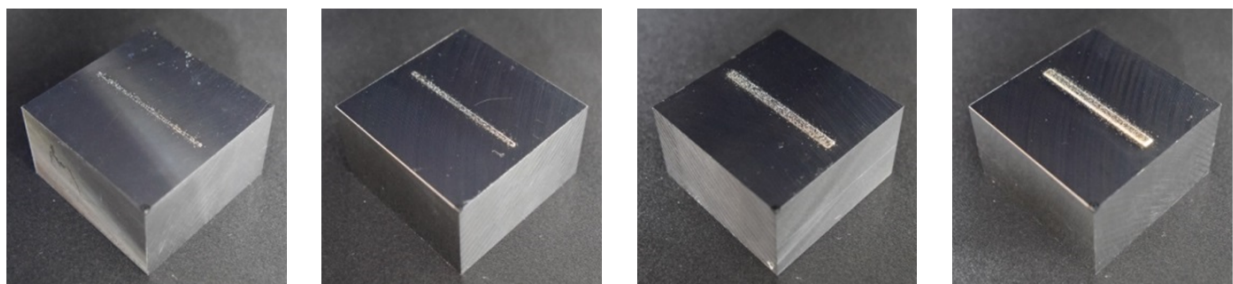
(b) Plane

Fig. 10 Clamping conditions for deposition experiments

Table. 3 Process parameters

Laser power (W)	Scan speed (mm/min)	Feeding rate of powers (g/min)	Feeding rate of shielding gas (L/min)	Hatch distance (mm)	Interpass Time (sec)
400	850	4	11	0.5	10

단일, 이열, 다열 및 다층 적층 시편 제작 결과는 Fig. 11 과 같으며 대면적 시편 및 열처리 된 기저부를 가진 대면적 시편의 적층 결과는 Fig.12, 13 및 14 와 같다.



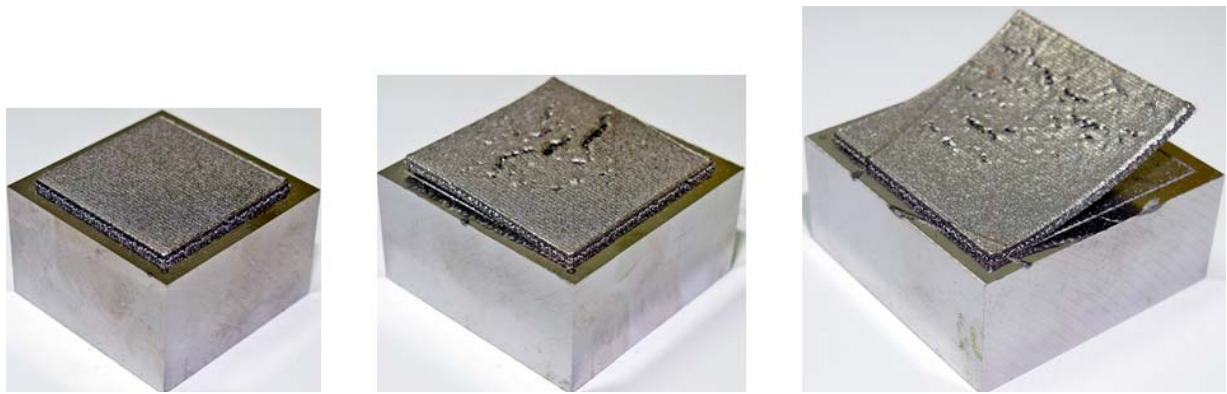
(a) Single line

(b) Double lines

(c) Multi lines

(d) Multi layers

Fig. 11 Results of deposition experiments for beads



(a) 40 mm × 40 mm (b) 50 mm × 50 mm (c) 60 mm × 60 mm

Fig. 12 Results of deposition for experiments without heat-treatment of substrates



(a) 40 mm × 40 mm (b) 50 mm × 50 mm (c) 60 mm × 60 mm

Fig. 13 Result of deposition for experiments (with heat-treatment of substrates at 500 °C)



(a) 40 mm × 40 mm (b) 50 mm × 50 mm (c) 60 mm × 60 mm

Fig. 14 Result of deposition for experiments (with heat-treatment of substrates at 400 °C)

열처리된 시편의 경우 적층이 잘 진행 되었지만 열처리를 하지 않은 시편의 경우 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 및 $60 \times 60 \text{ mm}^2$ 에서 균열 및 변형이 발생하였다.

나. 시편 후처리

제작된 단일, 이열, 다열 및 다층 적층 시편의 형상 및 열영향부 영역을 관찰하기 위해 시편을 절단하고 연마 작업 (Polishing) 및 화학적 부식 (Etching) 과 같은 후처리를 수행하였다. 연마 작업은 800 방, 1,000 방, 2,000 방 순서로 수행하였다. 화학적 부식은 질산 (Nitric acid) 과 에탄올 (Ethanol) 의 화합물인 5 % 농도의 나이탈 (Nital) 용액을 이용하여 수행하였다. 이후 시편의 형상 및 열 영향부 영역을 Fig. 16 의 전자 현미경 Xi-Cam 을 이용하여 Fig. 17, 18 및 Fig. 19 와 같이 관찰하였다.

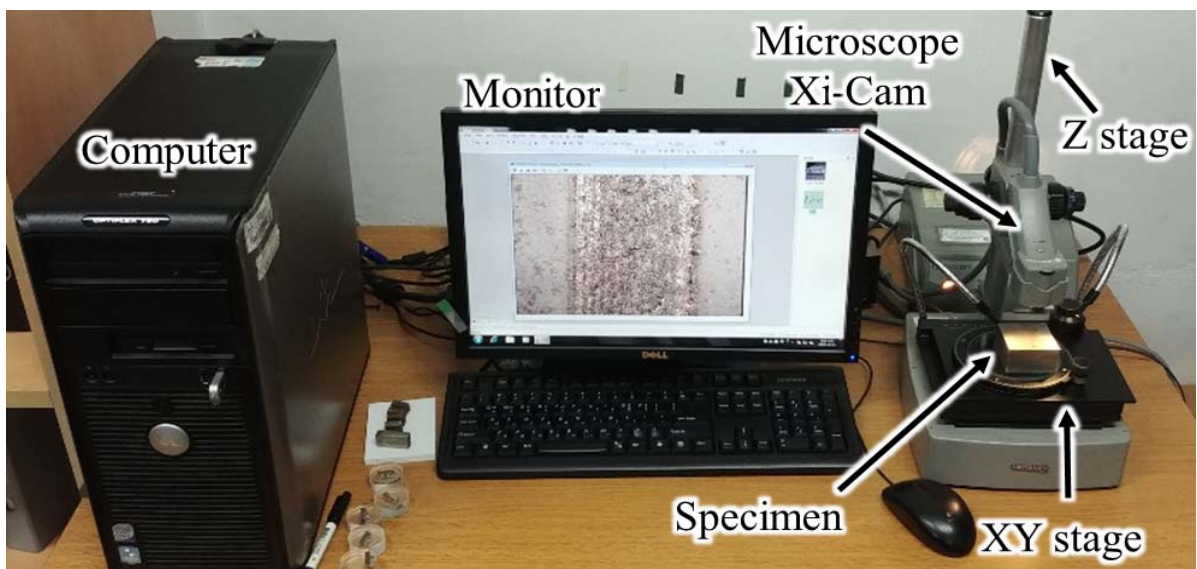
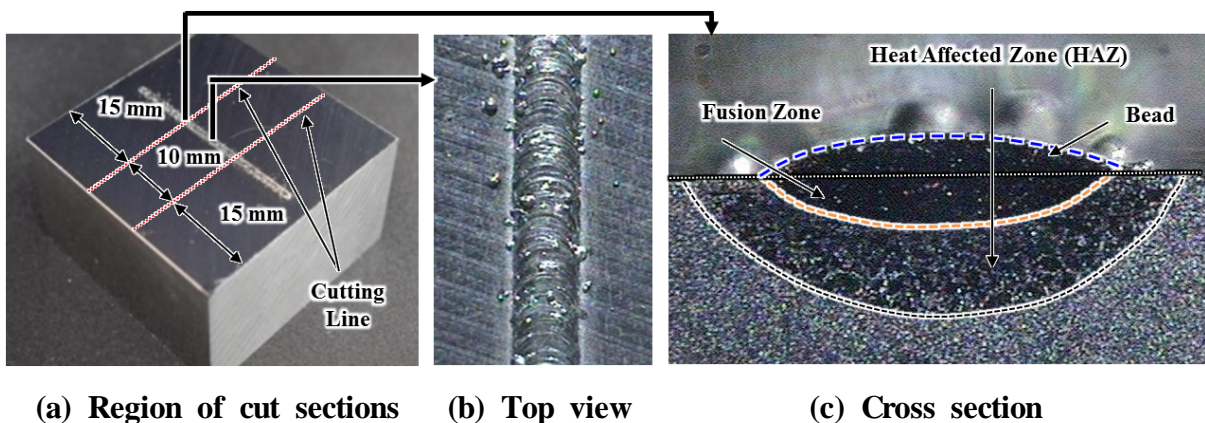
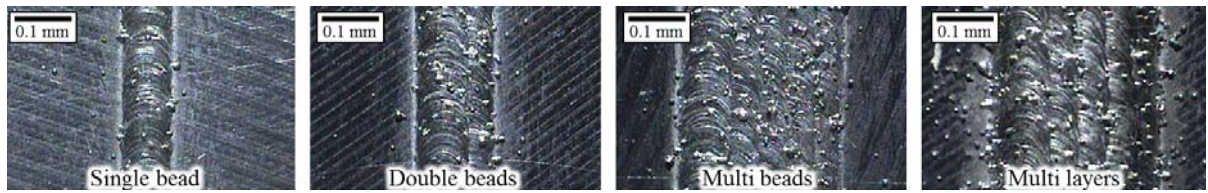


Fig. 16 Microscope (Xi-Cam)

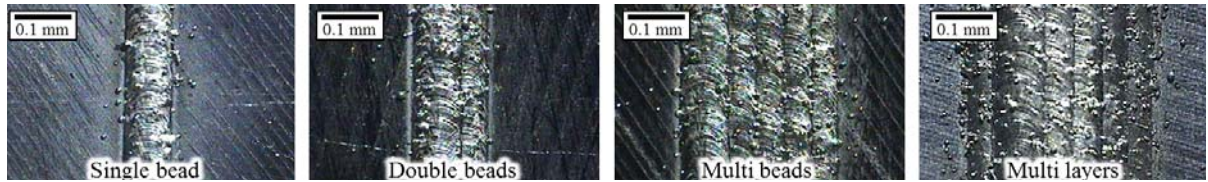


(a) Region of cut sections (b) Top view (c) Cross section

Fig. 17 Post-process of specimen

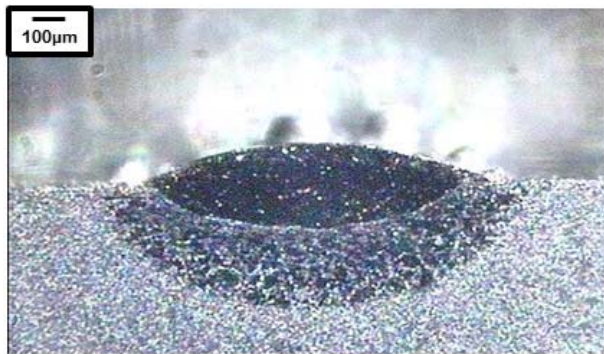


(a) Inconel 625



(b) Stellite 21

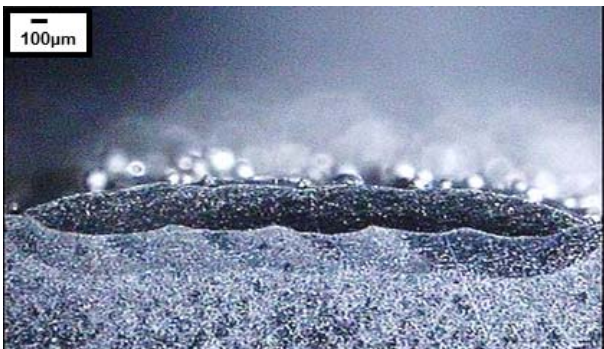
Fig. 18 Formation of beads on the substrate (top view)



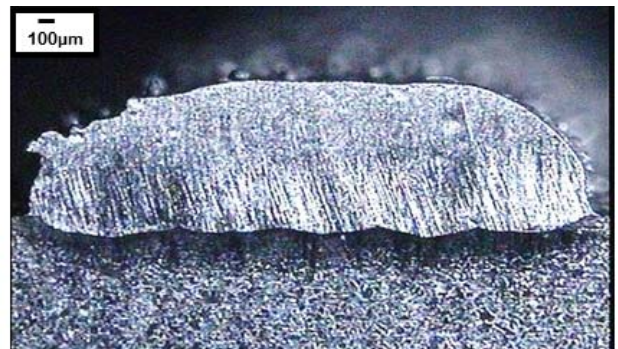
(a) Single lines



(d) Double layers



(c) Multi lines



(d) Multi layers

Fig. 19 Formation of beads on the substrate (cross-section)

Fig. 18 과 같이 시편을 상면에서 보았을 때 용융플 생성에 의해 레이저 진행 방향으로 물결모양의 패턴을 나타내며 일정한 폭으로 적층이 되었고 적층부 주위에 용융되지 못한 분말들이 소결되어 있는 것으로 나타났다. Fig. 19 와 같이 시편

단면을 관찰하였을 때 비드의 폭과 높이, 열영향부의 폭과 깊이를 측정할 수 있었다. 열영향부는 적층 공정의 마지막 비드에서 뚜렷하게 관측되었으며 추가적인 비드 적층과 관계없이 일정한 깊이로 나타났다. 비드 적층 시편의 측정 결과는 Table. 4 와 같다.

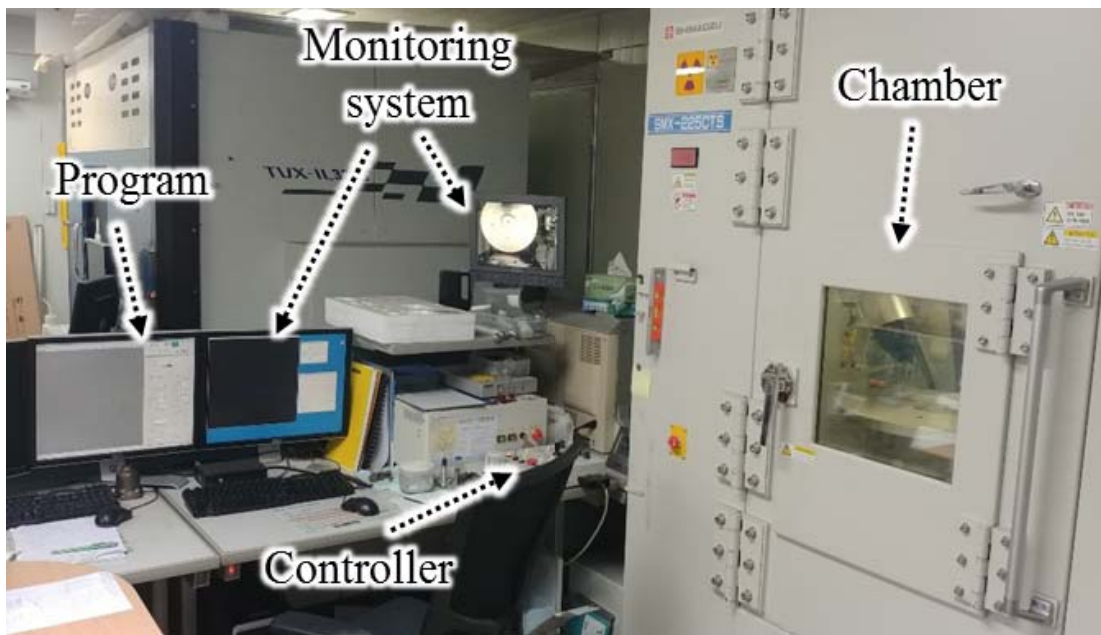
Table. 4 Characteristics dimensions of beads and HAZs for different deposited materials

Type of material	Type of specimen	Bead Width (μm)	Bead Height (μm)	HAZ Width (μm)	HAZ Depth (μm)
Inconel 625	Single line	837	97	1,115	313
	Double lines	1,323	130	1,607	299
	Multi lines	2,904	142	3,042	298
	Multi layers	2,905	683	-	-
Stellite 21	Single line	790	118	1,081	292
	Double lines	1,294	147	1,568	274
	Multi lines	2,858	161	3,050	290
	Multi layers	2,873	712	-	-

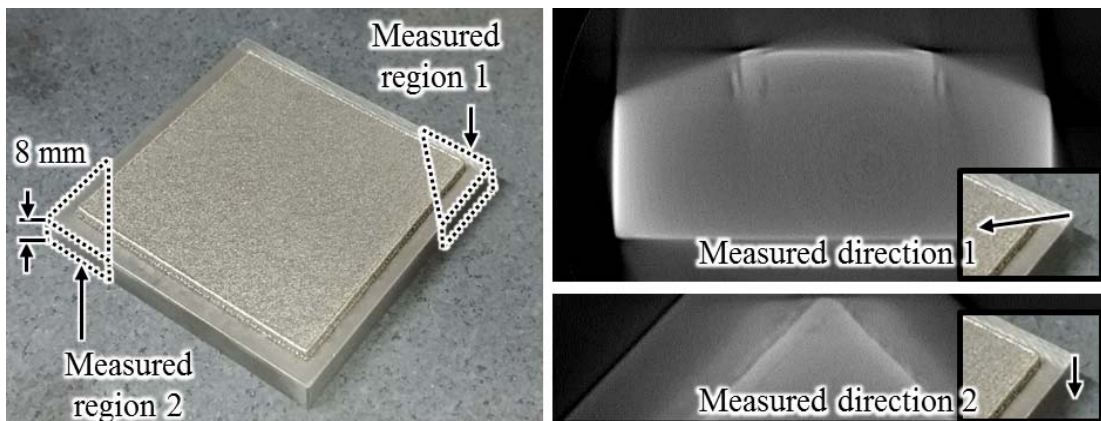
측정결과 단일 비드 적층 후 이열 비드 적층 시 비드 폭은 해치거리 (Hatch distance) 만큼 증가하였고 다열 및 다층 적층까지 동일하게 나타났다. 비드 높이는 단일, 이열 및 다열 적층으로 갈수록 증가하였으며 이는 비드가 겹쳐 쌓이면서 높이가 증가하기 때문으로 사료된다. 열 영향부의 폭은 증가하였지만 깊이 차이는 Inconel 625 적층 시 최대 15 μm , Stellite 21 적층 시 18 μm 로 큰 차이를 보이지 않았다. 동일한 조건에서 재료에 따라 비드의 크기, 열영향부 폭 및 깊이는 다르게 형성 되었고 Stellite 21 소재가 Inconel 625 소재에 비해 폭이 좁게 측정되었으며 높이는 높게 측정되었다. 다층 적층 시편의 경우 열 영향부가 뚜렷하게 나타나지 않아 열 영향부의 폭 및 깊이 측정이 불가능 하였다.

다. 내부 결함 검사

내부 미세 균열 및 기공과 같은 내부 결함 발생 여부를 확인하기 위해 원광대학교 차세대 방사선 산업기술 지역혁신센터에서 보유한 3D X-선 비파괴 검사장치인 SMX-255CT (SHIMADZU) 모델을 이용하여 내부 X-ray CT 촬영을 진행하였다. 측정은 높은 경도와 큰 면적 적층 시에 균열이 발생할 것이라 예상하여 경도 HR_C 40 및 60 × 60 mm² 적층 시편을 사용하였다. 시편 촬영 장비는 Fig. 20 (a) 와 같으며 촬영 범위 및 방향은 Fig. 20 (b) 와 같다.

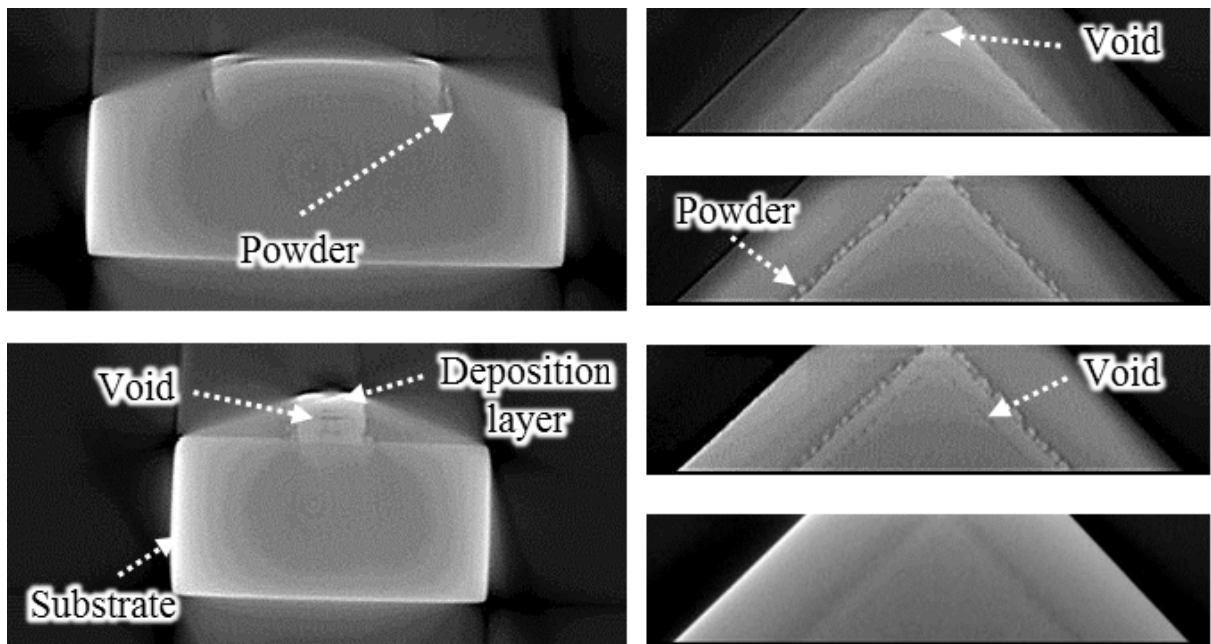


(a) SMX-255CT

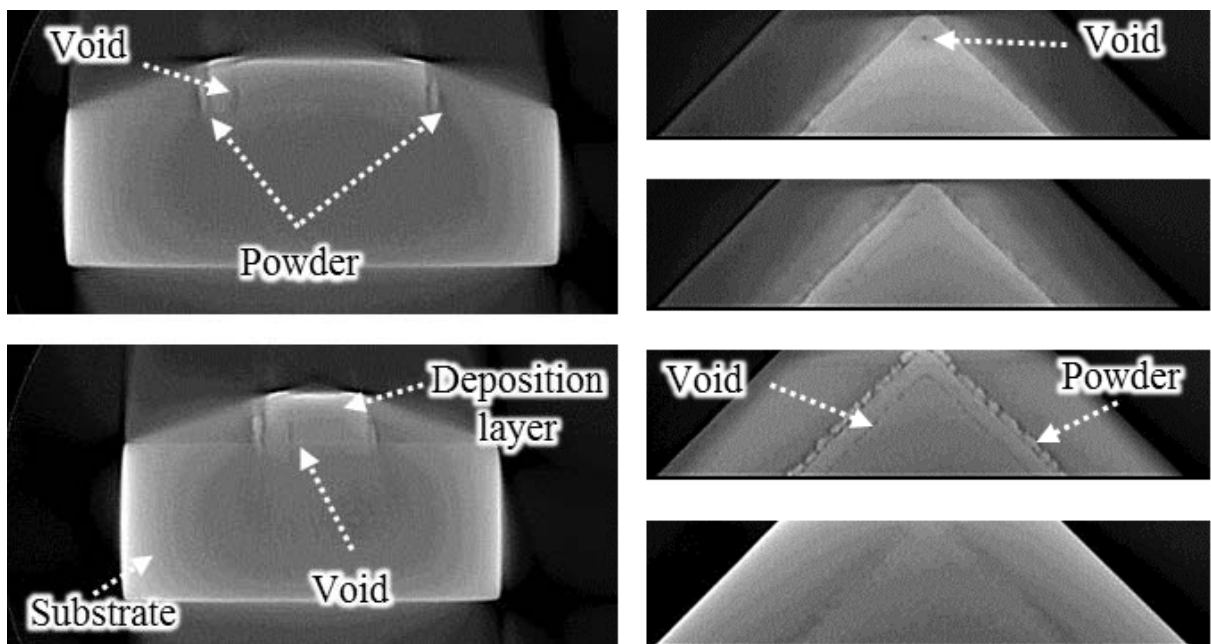


(b) Measured region and direction

Fig. 20 X-ray CT system and measurement methodology



(a) Measured region 1 (In-plane dimension : $60 \times 60 \text{ mm}^2$, 40 HR_C)



(b) Measured region 2 (In-plane dimension : $60 \times 60 \text{ mm}^2$, 40 HR_C)

Fig. 21 Result of defects of inside regions for deposited specimens

적층 시편의 X-ray CT 측정 결과는 Fig. 21 과 같다. 적층부 주변 돌출된 형상은 파우더의 형상이며 외곽 경로를 따라 적층부에 기공이 발생한 것으로 관찰되었다. 외곽 경로를 제외한 적층 경로에서의 기공은 관찰되지 않았으며 적층부와 기저부 사이 경계에서도 마찬가지로 내부 기공은 관찰되지 않았다.

제 3 장 DMT 공정 유한요소 해석을 위한 데이터 도출 및 모델 생성

제 1 절 물성데이터 도출 및 고찰

1. 기저부 재료 온도 의존 물성 데이터 도출

가. 기저부의 상변화

이중 재료 적층 시 적층 특성을 분석하기 위해 기저부의 상변화를 고려하였다. 기저부 재료인 S45C 와 같은 탄소강은 탄소의 함량, 온도 및 냉각 속도에 따라 상과 조직이 변화하기 때문에 상 및 조직 변화를 고려할 필요성이 있다. 탄소의 함량 및 온도에 따른 상변화는 Fig. 22 와 같은 철-탄소 평형상태도 (Iron-carbon equilibrium diagram) 와 같다.³⁶⁾

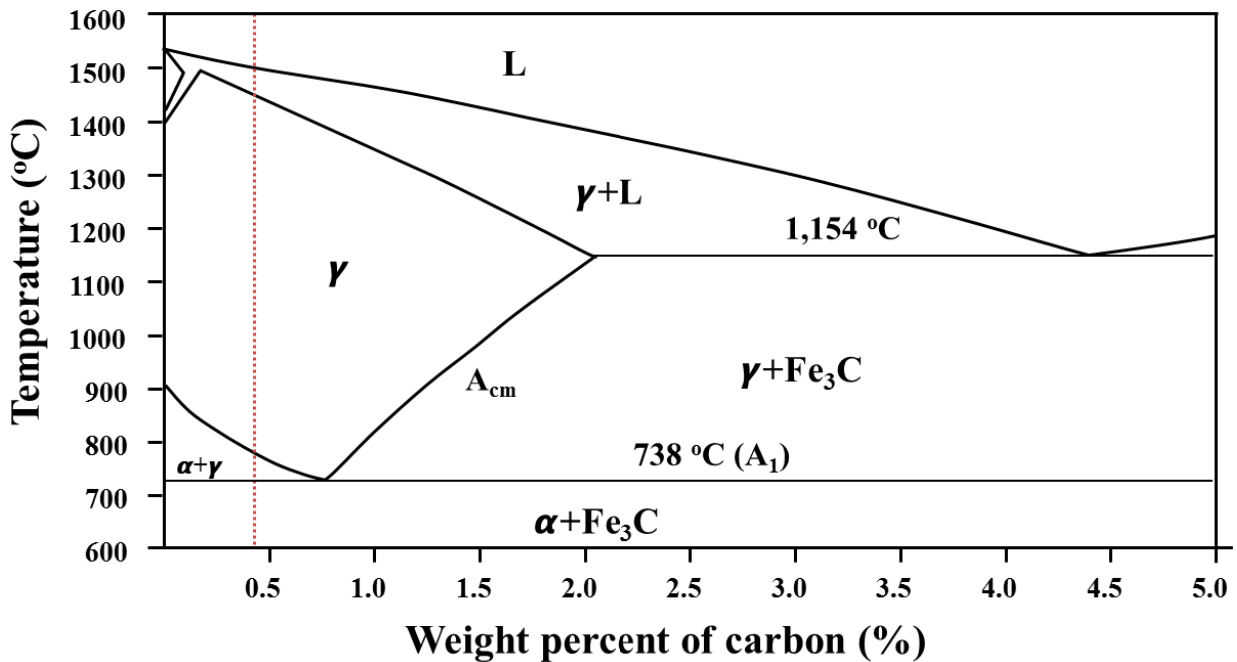


Fig. 22 Fe-Fe₃C Phase diagram³⁶⁾

Fe-Fe₃C 상태도에 따른 S45C 의 기본상은 α (Ferrite) 와 Fe₃C (Cimentite) 가 합쳐진 펄라이트 상이다. 재결정 온도 (738 °C) 를 기점으로 γ (Austenite) 상이 나타나며 γ 와 L (Liquid) 이 함께 나타나는 고용체 상태를 지나 완전 용융되어 액체가 된다. Fe-Fe₃C 상태도는 금속을 서서히 가열 또는 냉각하며 상의 변화를 본 것으로 급격한 냉각 및 연속적인 냉각에 의한 상변화는 고려되지 않는다.

급격한 냉각 및 연속적인 냉각에 의한 상변화를 고려하기 위해 TTT (Time temperature transformation) 곡선 및 CCT (Continuous cooling transformation) 곡선을 고려하였다. 재결정 온도에서 금속을 일정시간 유지하여 오스테나이트화 시키고 단상의 오스테나이트에서 급랭시켜 해당 온도에서 시간에 따른 오스테나이트의 변태를 나타낸 곡선을 TTT 곡선이라 한다. Fe-Fe₃C 상태도와 TTT 곡선과의 관계는 Fig. 23 과 같다. 오스테나이트에서 급랭시키지 않고 연속적인 냉각을 수행할 때 TTT 곡선과는 다른 상변화가 나타나게 되며 연속적인 냉각과 냉각 속도에 따른 상변화를 나타낸 곡선을 CCT 곡선이라 한다.

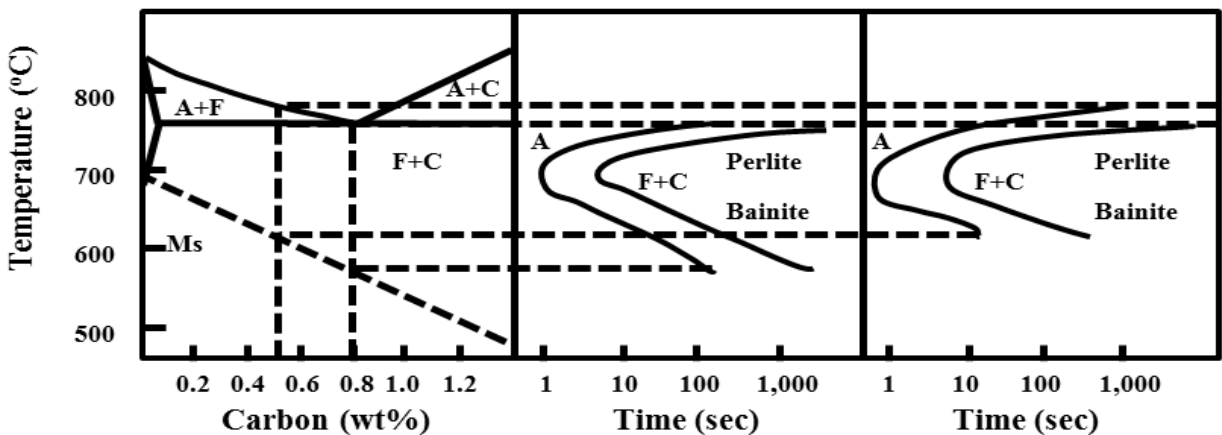
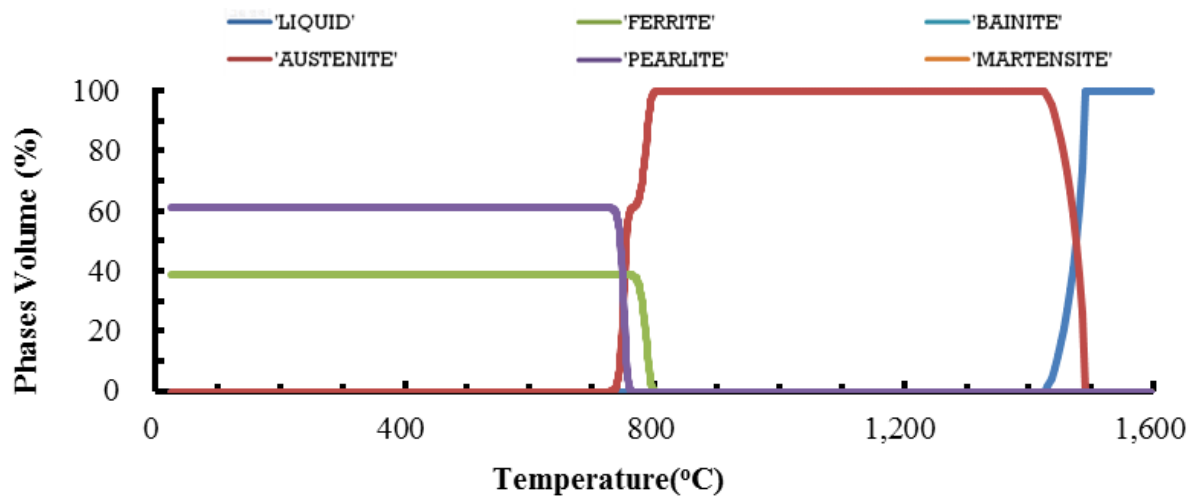
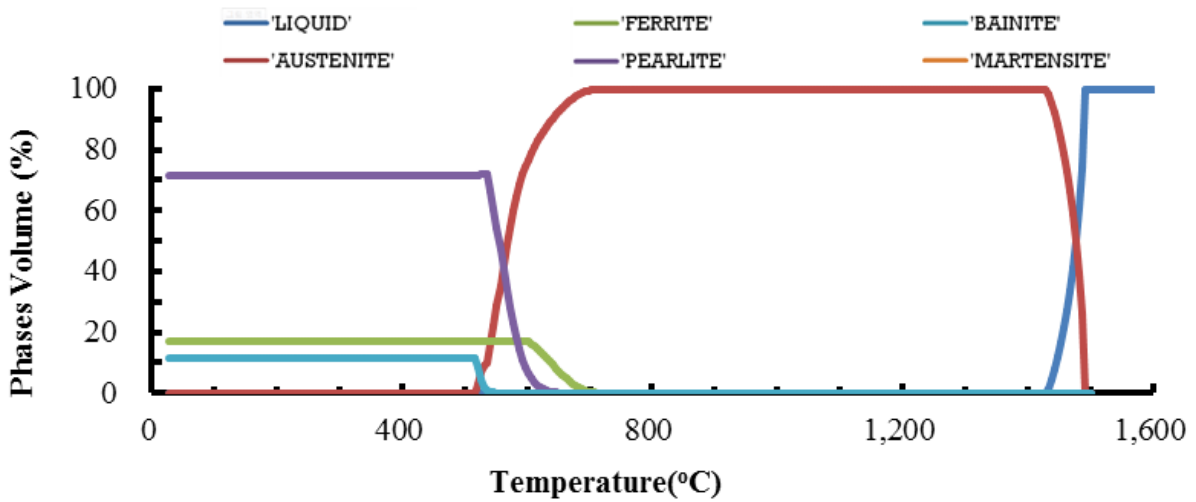


Fig. 23 Relationship between TTT curve and Fe-Fe₃C phase diagram³⁸⁾

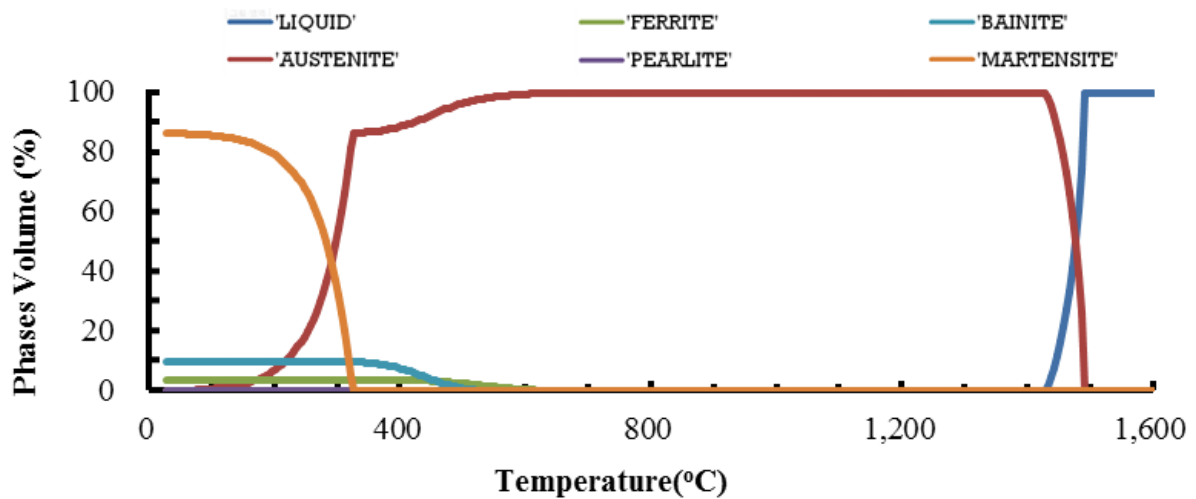
본 연구의 기저부 열처리에 따른 상변화는 TTT 곡선을, 적층 공정 중 열전달에 의한 상변화는 CCT 곡선을 고려하였다. 물성 데이터 프로그램인 JmatPro 를 이용하여 S45C, Inconel 625 및 Stellite 21의 온도 의존 물성 데이터를 도출하였다. 기저부인 S45C 의 가열, 냉각 및 냉각 속도에 따른 기저부의 상변화는 Fig. 24 와 같다.



(a) Heating



(b) Cooling rate = 10 °C/s



(c) Cooling rate = 100 °C/s

Fig. 24 Phase change of S45C

기저부 가열 시 재결정 온도 이하에서는 페라이트 및 펄라이트가 나타나고 재결정 온도 이후에는 오스테나이트 상이 나타났다. 서서히 냉각시킬 경우 베이나이트 상이 나타나고 급격한 냉각 시 마르텐사이트 조직이 나타났다. 가열 및 냉각 시 냉각 속도에 따른 상변화 비교를 통해 계산 결과가 Fe-Fe₃C 상태도와 유사하게 계산되었음을 알 수 있었다. 냉각 속도에 따른 상변화는 Fig. 25 의 CCT 곡선 입력을 통해 해석에 적용하였다.

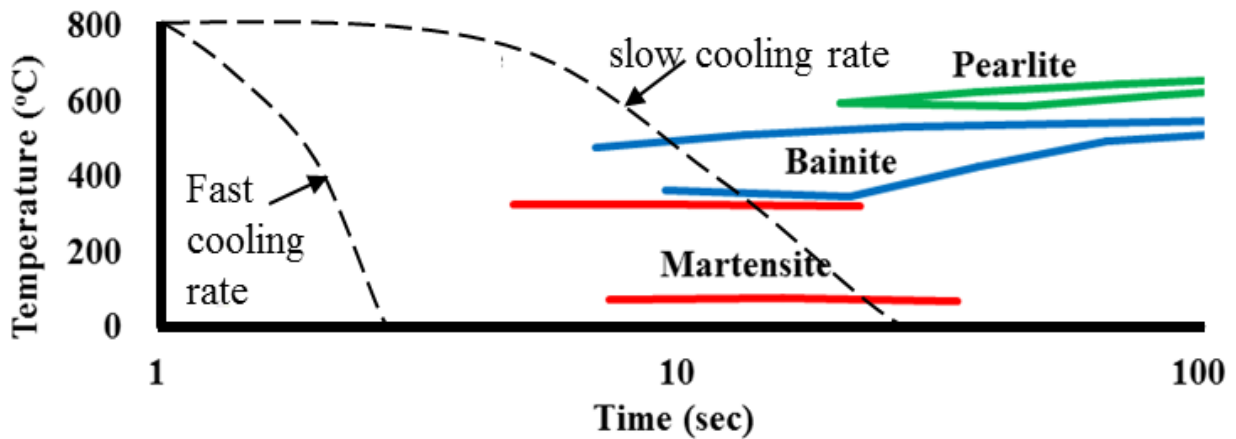
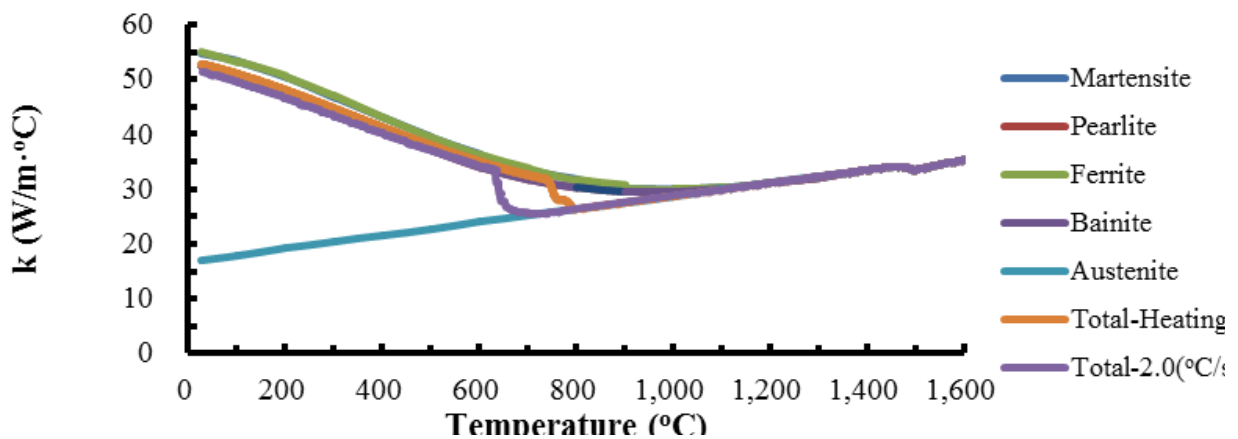


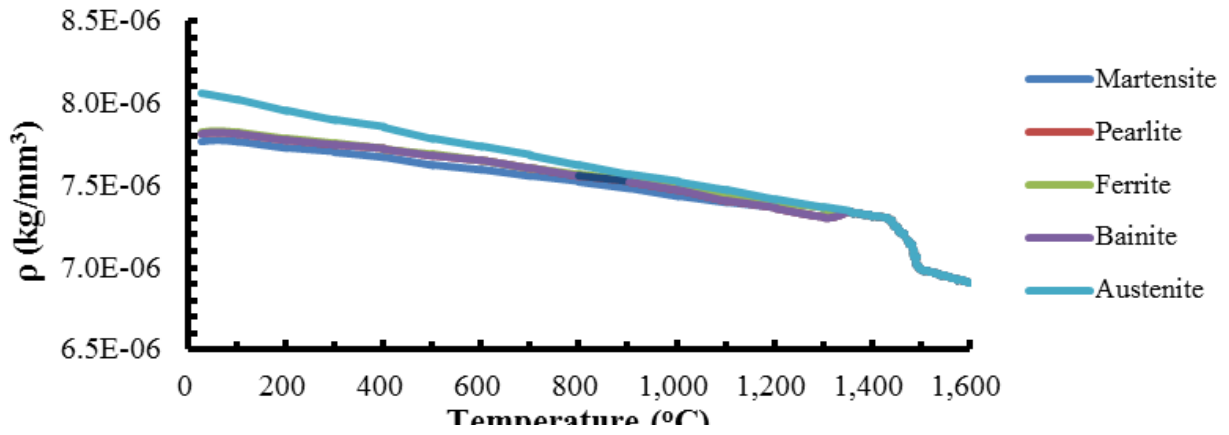
Fig. 25 CCT curves for S45C material

나. 기저부 온도 의존 물성 데이터 도출

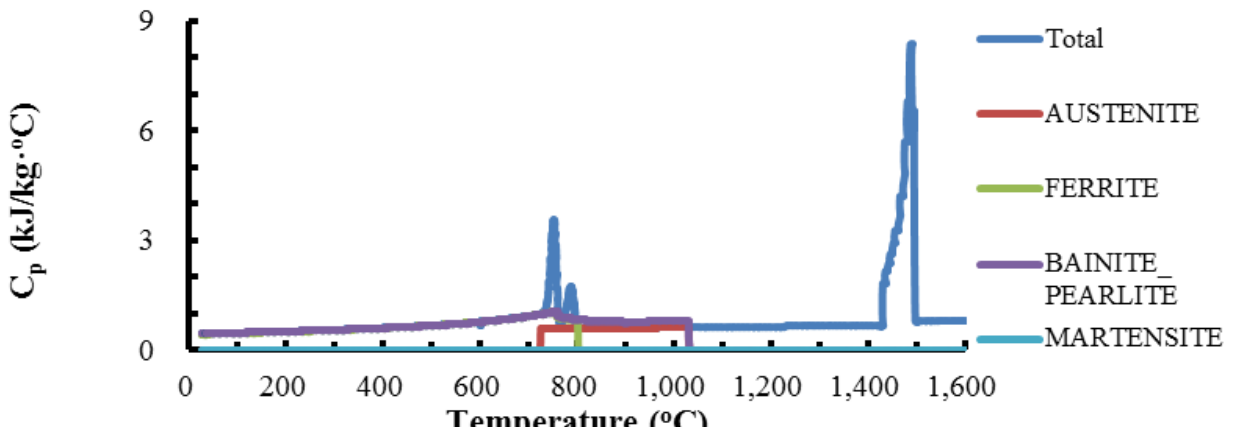
프로그램을 이용해 계산한 S45C 의 온도 의존 물성 데이터는 Fig. 26 과 같다.



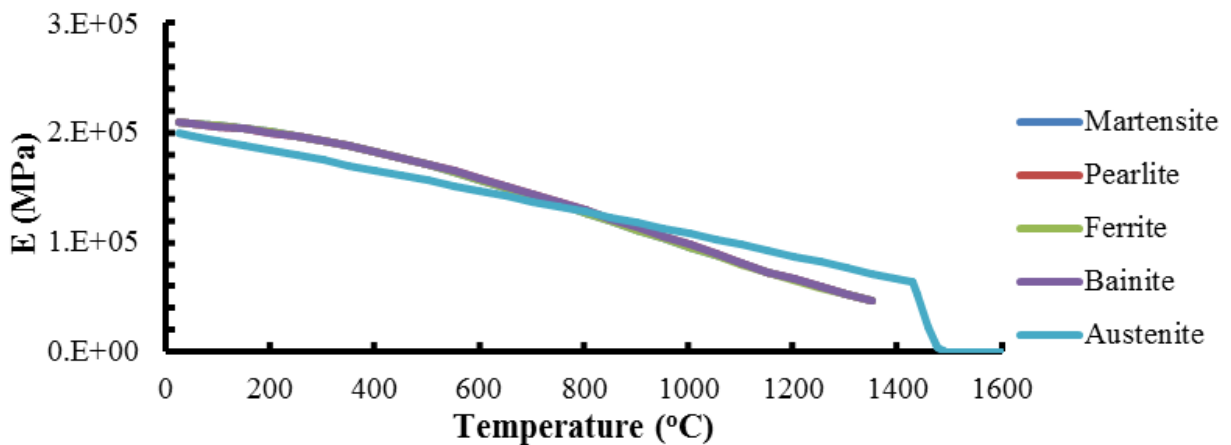
(a) Thermal conductivity



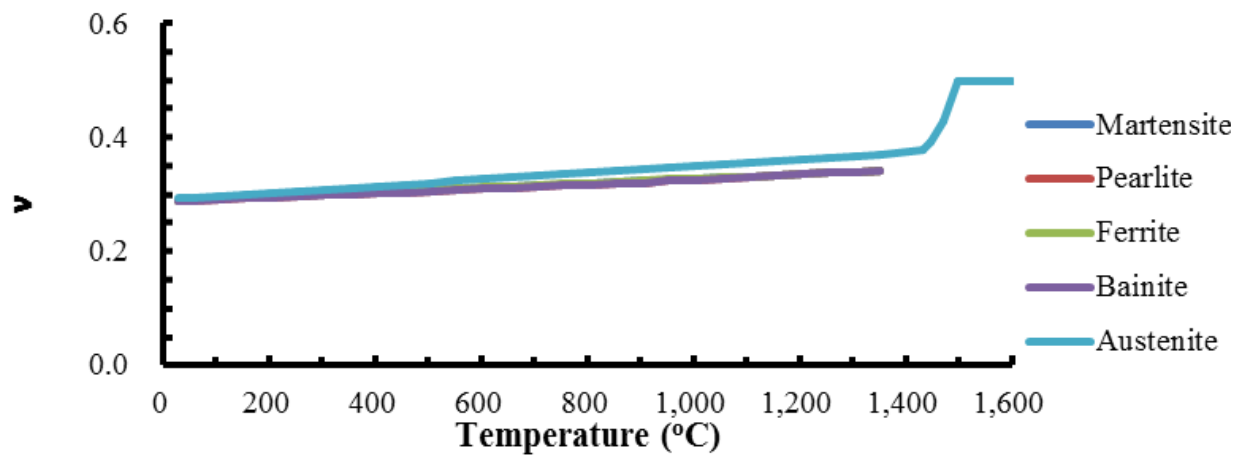
(b) Density



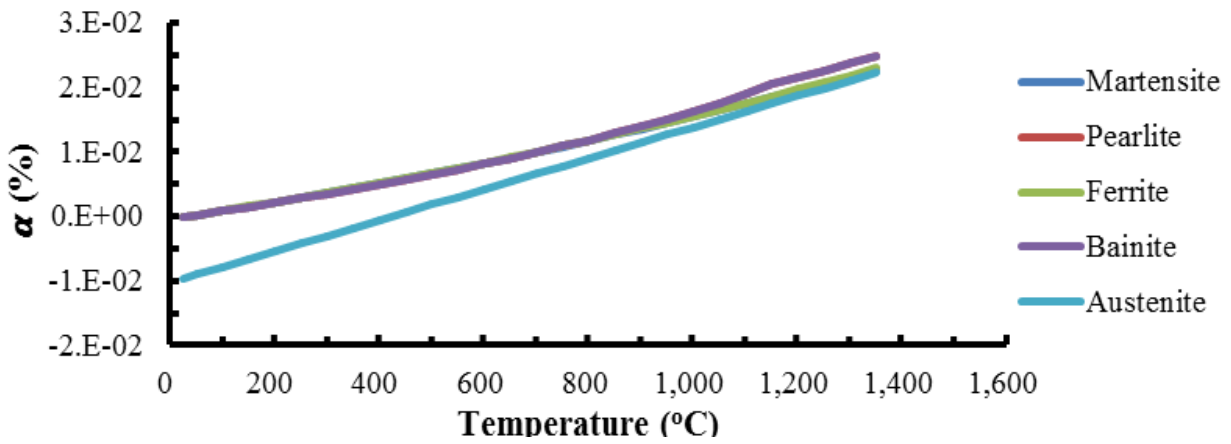
(c) Specific heat



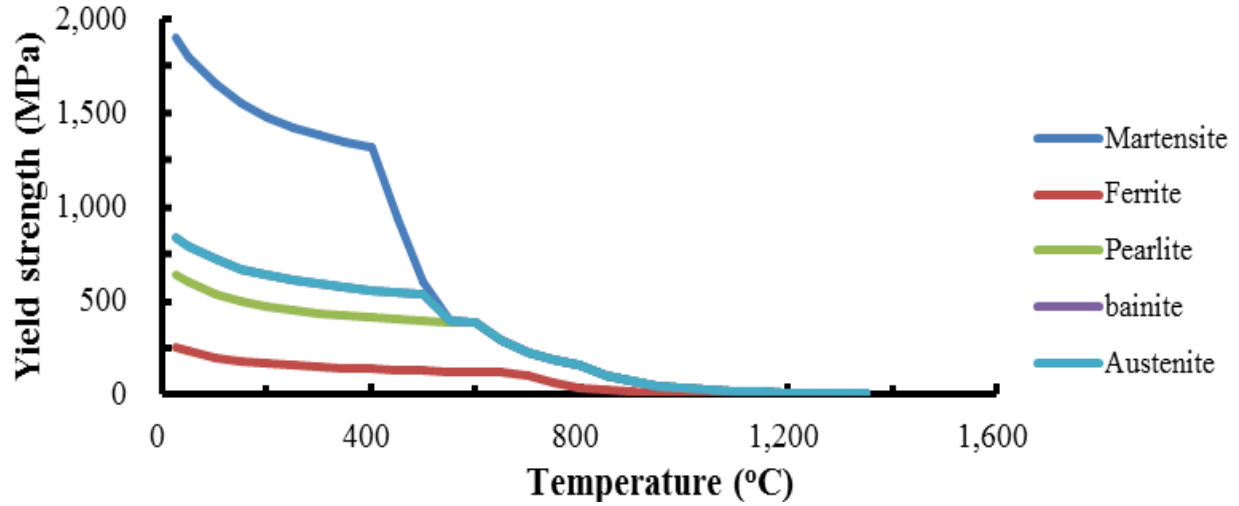
(d) Young's modulus



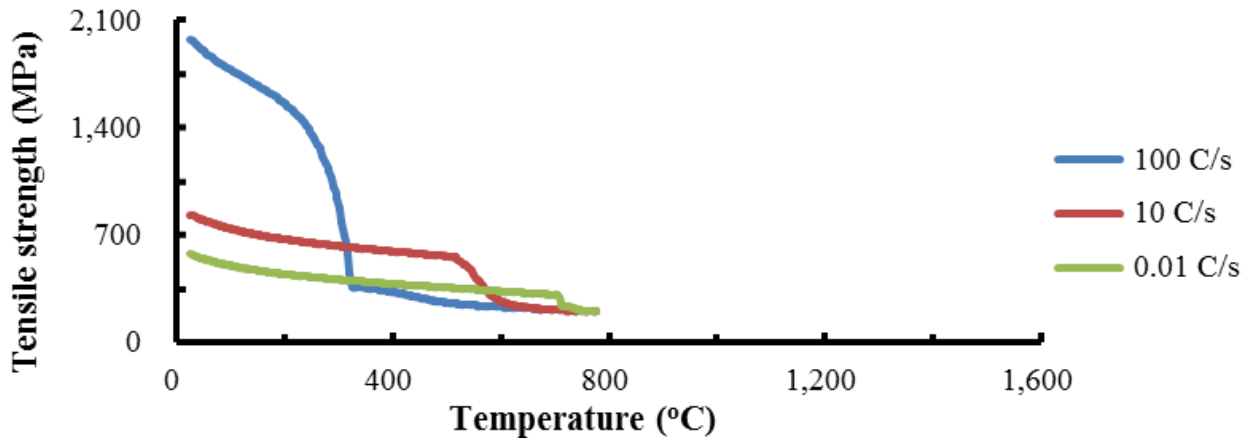
(e) Poisson's ratio



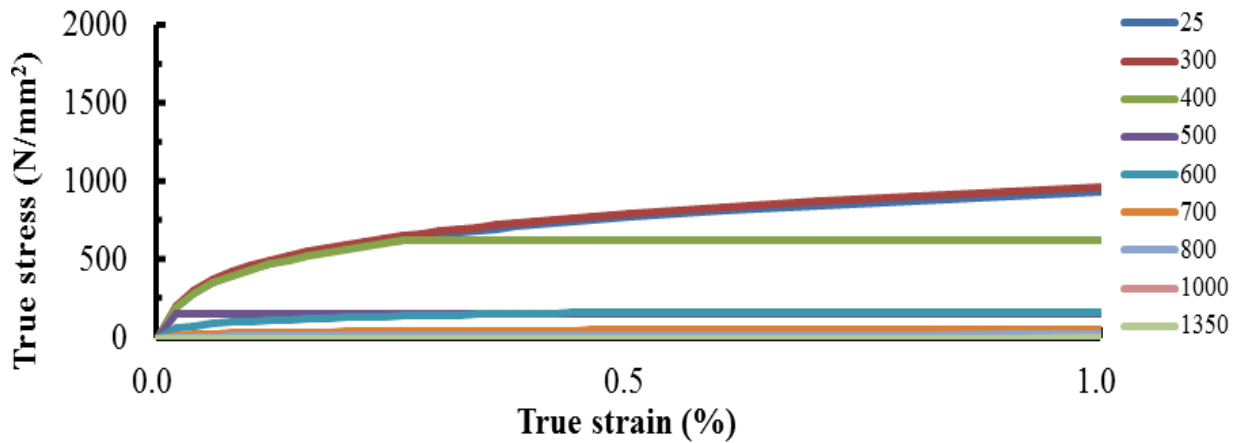
(f) Thermal expansion coefficient



(g) Yield strength



(h) Tensile strength



(i) Stress-strain curve

Fig. 26 Temperature dependent material properties of S45C

열전달 및 열응력 해석을 하기 위해서는 열전도도 (Thermal conductivity : k), 밀도 (Density : ρ) 및 비열 (Specific heat : C_p) 과 같은 열 물성 데이터와 영 계수 (Young's modulus : E), 푸아송 비 (Poisson's ratio : ν), 열팽창계수 (Thermal expansion coefficient : α) 항복 강도 (Yield strength, 및 응력-변형률 선도 (Stress-Strain curve) 와 같은 기계 물성 데이터 입력이 필요하다. 각 상에 대한 온도 의존 물성 데이터는 Fig. 26 (a) 열전도도와 같이 가열 및 냉각에 따라 다르게 적용 되는 것을 알 수 있다. 이는 가열, 냉각 및 냉각 속도별 상변화에 따라 물성의 변화를 고려한 결과이다.

다. 열처리에 따른 온도 의존 물성 데이터 변화 분석

항온 담금질 및 고온 뜨임에 따른 온도 의존 물성 데이터 변화는 Fig. 27 의 S45C 소재의 TTT 선도를 고려하였다.

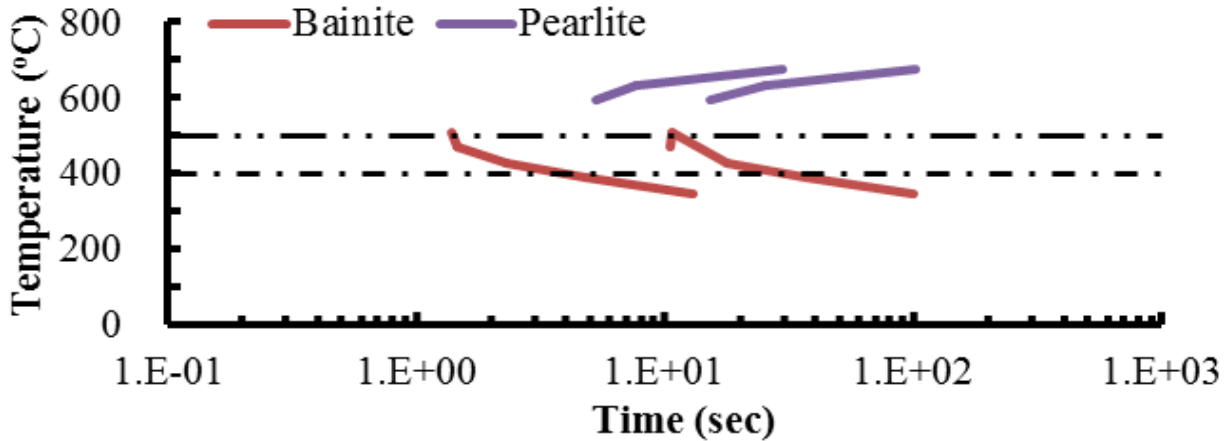
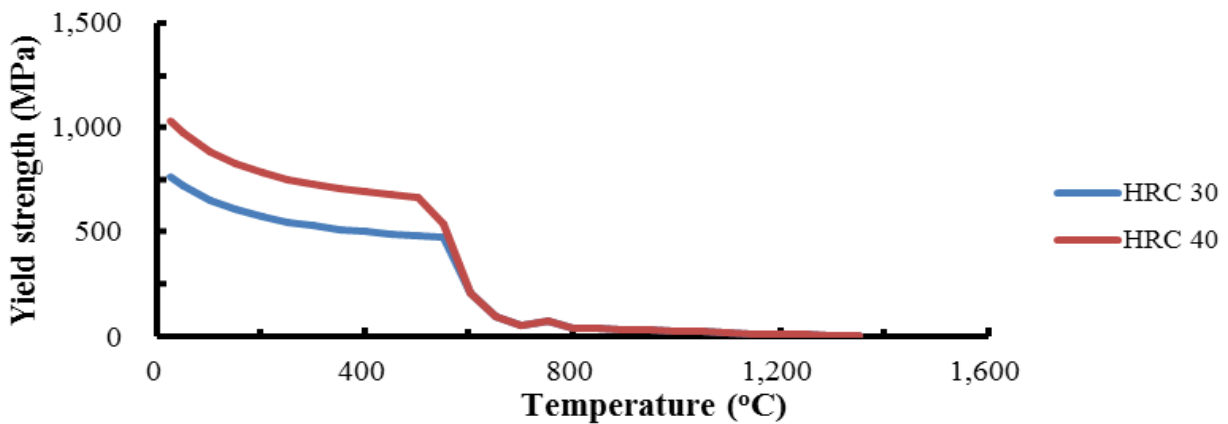
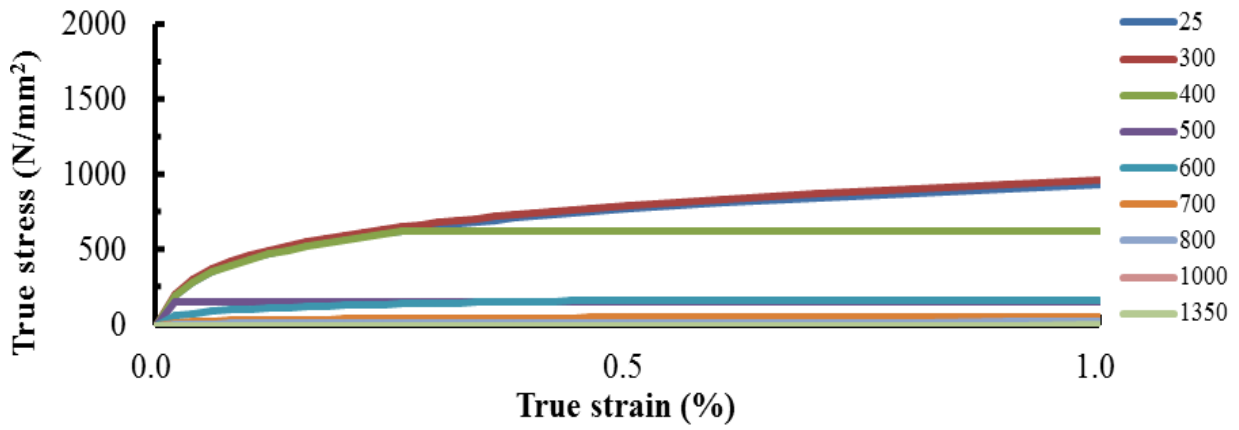


Fig. 27 TTT curves of S45C

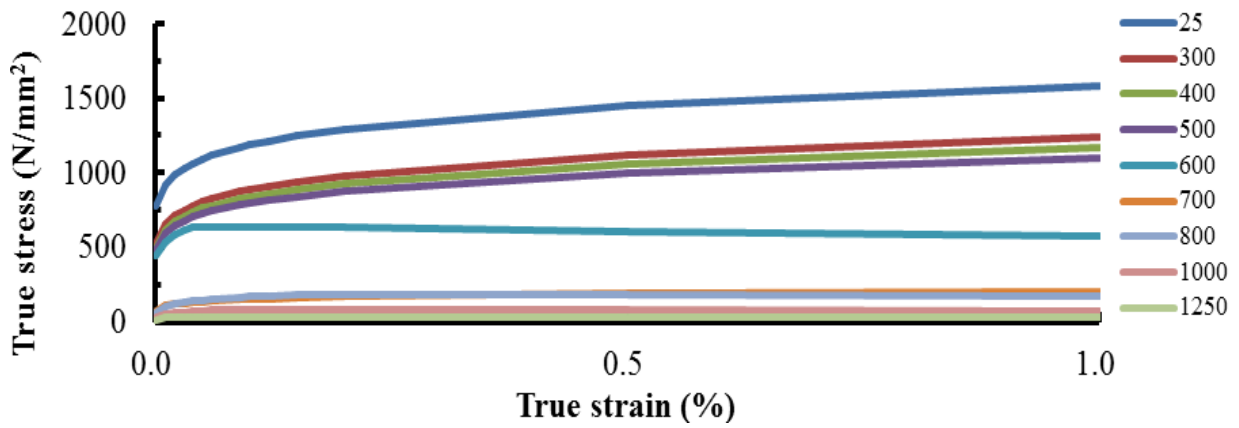
항온 담금질을 통해 얻은 균일한 오스테나이트를 고온 뜨임을 통해 조직을 변화시키는 과정에서 뜨임 온도에 따라 조직은 변화하게 된다. 높은 온도에서 뜨임을 수행 할 경우 상부 베이나이트 조직이 형성되고 낮은 온도에서 뜨임을 수행 할 경우 하부 베이나이트 조직이 형성된다. 상부 베이나이트 조직으로 형성될 경우 연성이 증가하고 하부 베이나이트 조직으로 형성 될 경우 경도가 증가한다. 열처리에 따른 항복 강도 및 응력-변형률 선도는 Fig. 28 과 같다.



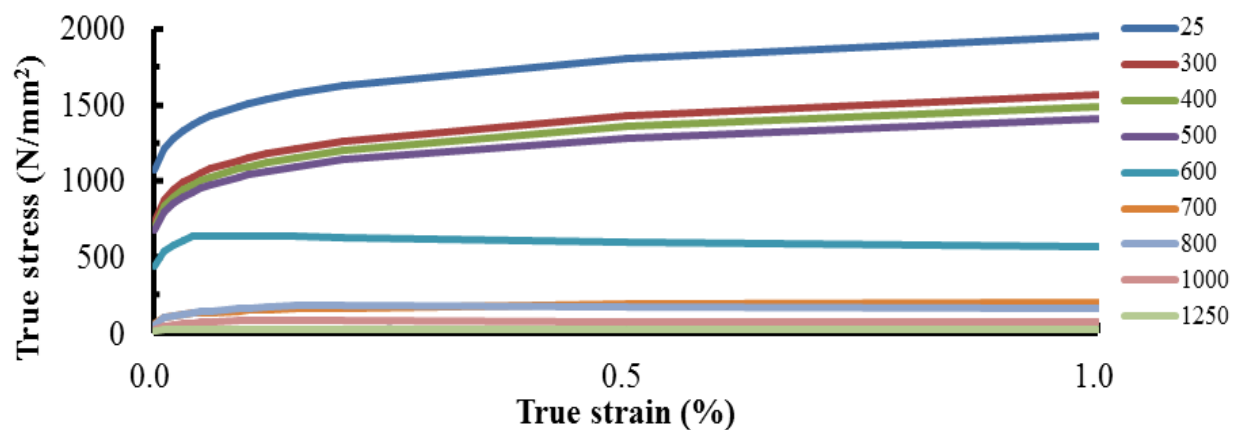
(a) Yield strength



(b) Without heat treatment



(c) Heat treatment at 500°C



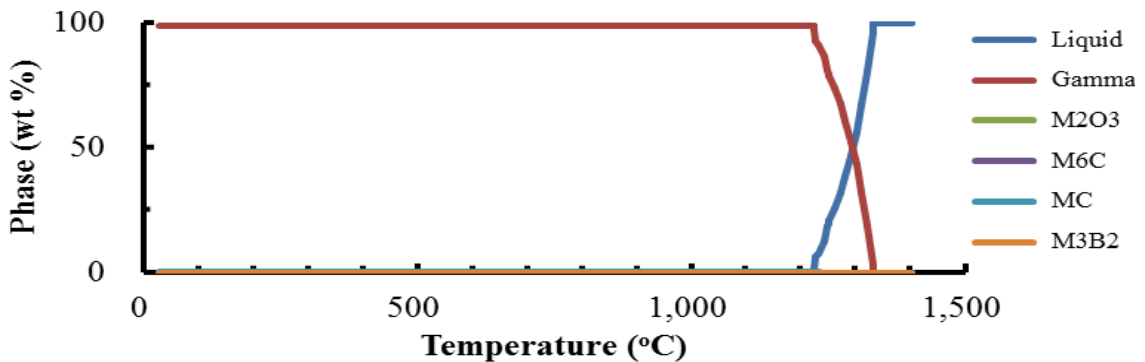
(d) Heat treatment at 400°C

Fig. 28 True stress-strain curves for different heat treatment conditions

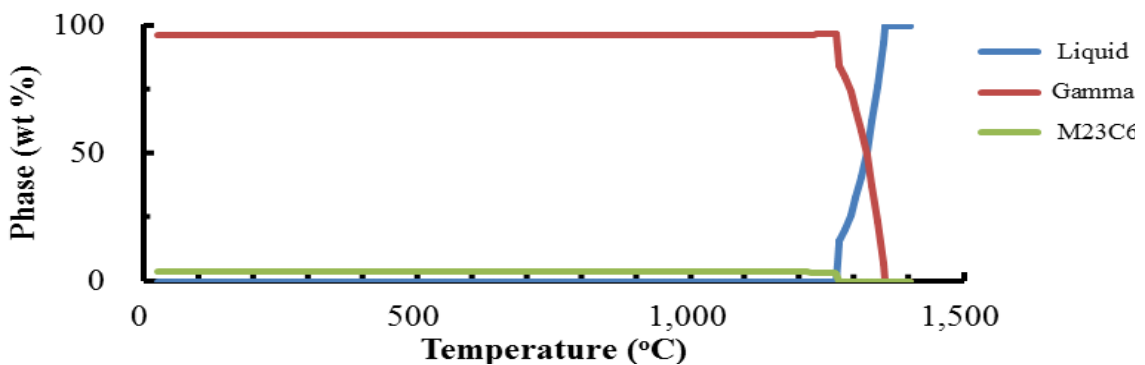
열처리에 따른 변화는 펄라이트와 베이나이트의 형성에 따른 것으로 두 상의 온도 의존 열 물성 데이터의 차이가 거의 없어 온도 의존 열 물성 데이터는 동일하다 가정하였다. 열처리에 따른 기계적 물성 변화는 영률, 푸아송 비 및 열팽창계수에서 큰 차이를 보이지 않아 동일하다 가정하였으며 항복 강도 및 응력-변형을 선도에서 차이가 나타나 열처리에 따른 물성을 비교하였다. 열처리에 따라 경도가 증가할수록 저온 영역의 항복 강도는 증가하였고 600 °C 이상에서는 동일하게 나타났다. 응력-변형을 선도 또한 항복 강도와 같이 경도가 증가함에 따라 저온 영역에서 변형 대비 응력이 증가하였다.

2. 적층부 재료 온도의존 물성 데이터 도출

프로그램을 이용하여 도출한 Inconel 625 와 Stellite 21 의 상 변화는 Fig. 29 와 같다.

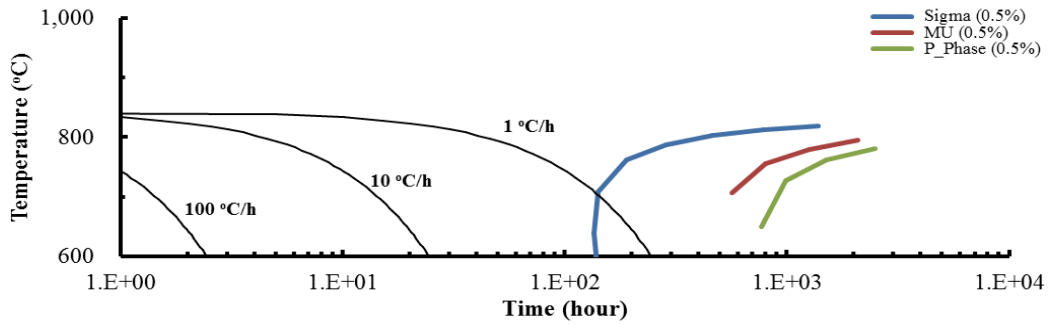


(a) Inconel 625

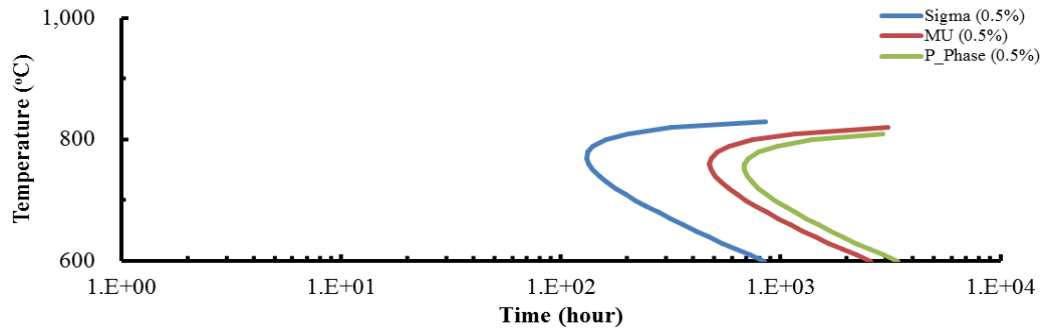


(b) Stellite 21

Fig. 29 Influence of temperature on the weight percent of phase

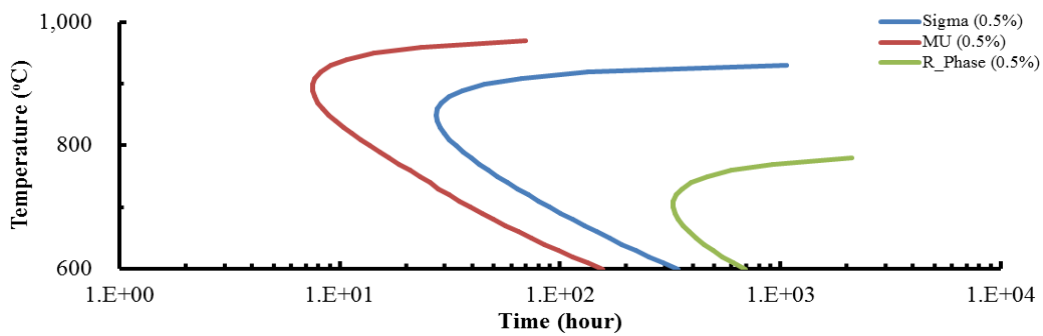


(a) CCT curves

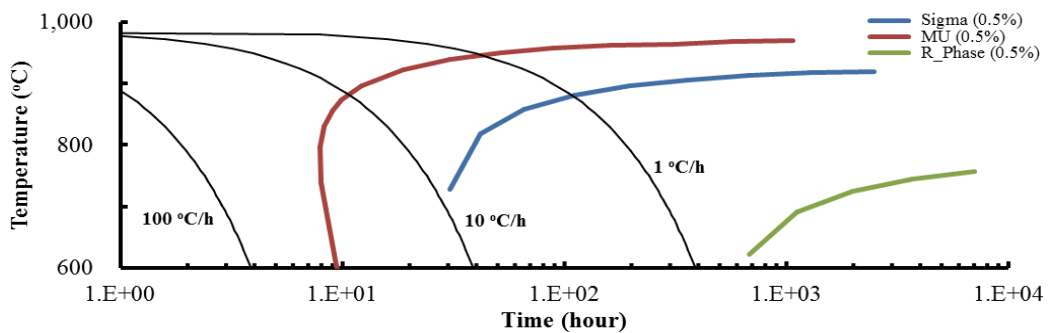


(b) TTT curves

Fig. 30 CCT and TTT curves of Inconel 625



(b) TTT curves



(d) CCT curves

Fig. 31 CCT and TTT curves of Stellite 21

Inconel 625 는 1,222 °C 에서 용융이 발생하여 1,331 °C 에서 완전한 액체 상태가 된다. Stellite 21 는 1,264 °C 에서 용융이 발생하여 1,353 °C 에서 완전한 액체 상태가 된다. 상온부터 용융점 까지 Inconel 625 및 Stellite 21 은 98.9 % 및 96.3 % Gamma 상으로 나타나고 Fig. 30 및 Fig. 31 에 나타낸 CCT 및 TTT 그래프와 같이 온도와 시간에 따라 상이 변화하지만 공정에서는 재료가 용융된 후 급속 냉각이 되기 때문에 단일 상으로 가정하였다. 프로그램을 이용하여 도출된 Inconel 625 및 Stellite 21 분말의 열 및 기계 물성 데이터는 Fig. 32 와 같다.

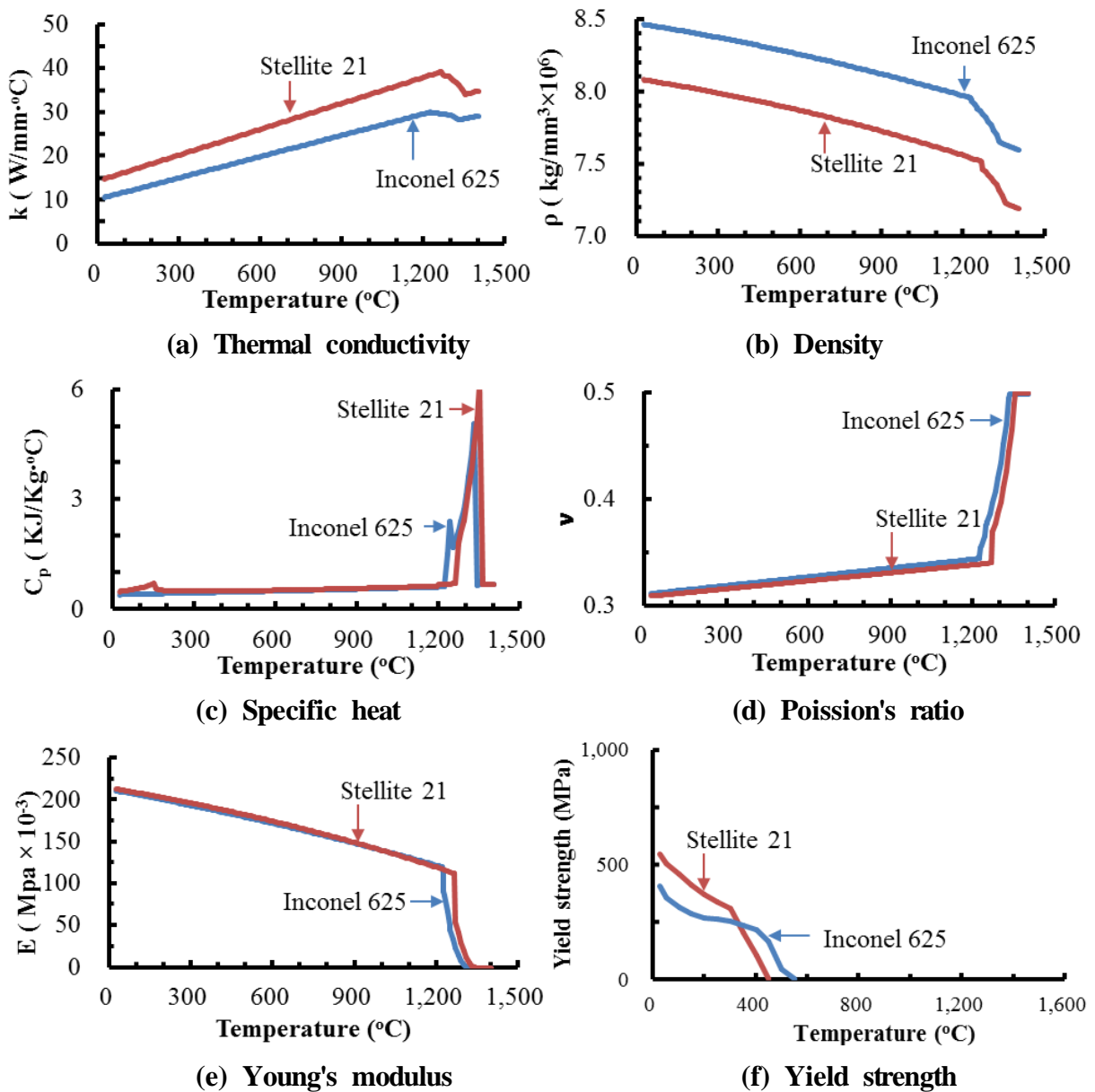
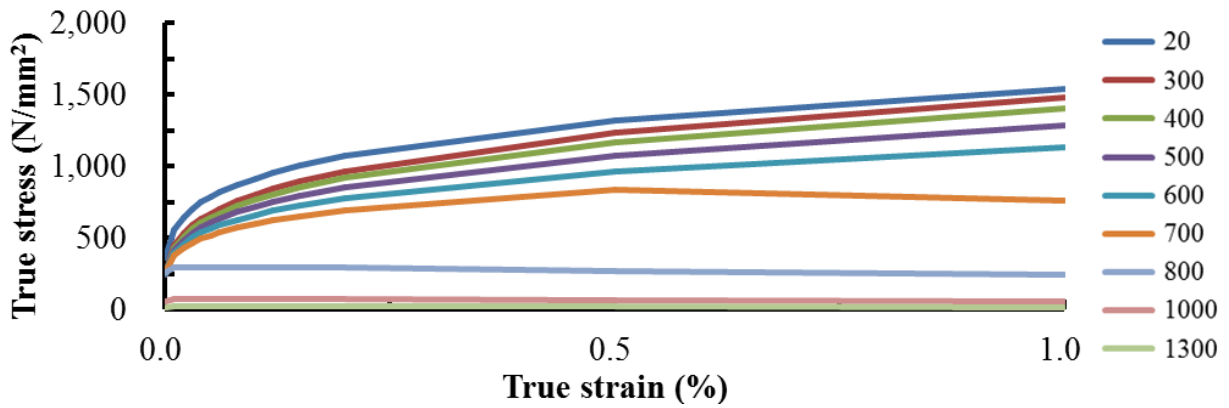
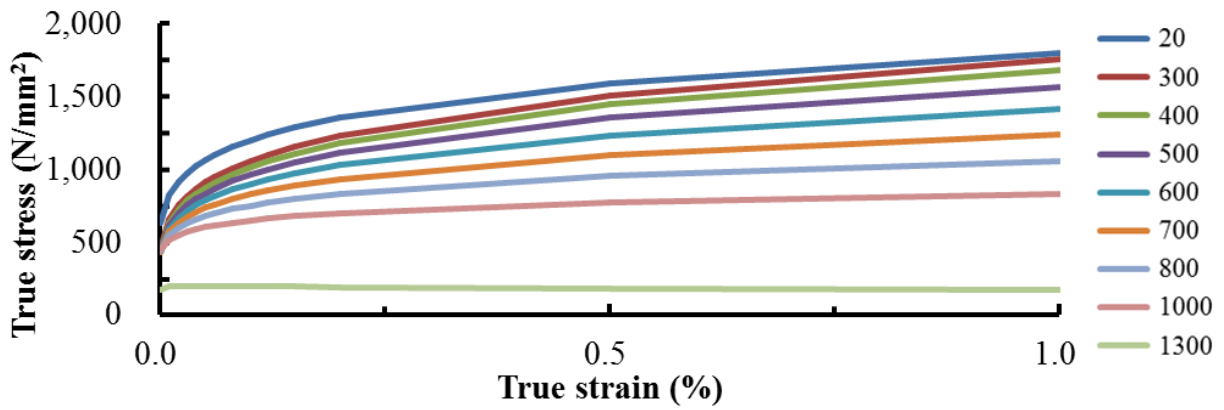


Fig. 32 Temperature dependent thermal and mechanical properties of Inconel 625 and Stellite 21



(a) Inconel 625



(b) Stellite 21

Fig. 33 True stress-strain curves of inconel 625 and stellite 21

제 2 절 경계조건 데이터 도출 및 고찰

DMT 공정의 대류 및 복사 등의 표면에서 일어나는 열전달 현상을 유한요소 해석에 적용하기 위해 자연대류계수, 강제대류계수, 방사율 및 등가 강제대류계수를 도출하고 적용하였다. 공정 진행은 적층공정, 적층 시간 간격 및 냉각으로 구분되며 이에 따른 경계조건은 Fig. 34 와 같다.

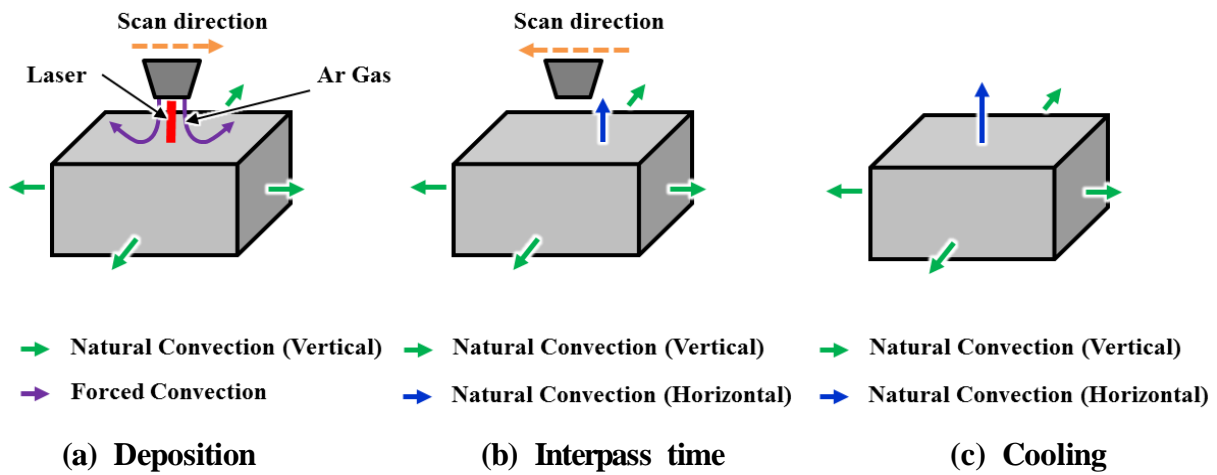


Fig. 34 Classification into boundary conditions in deposition and cooling stages

적층 공정의 수행 중에는 레이저 조사 및 분말 분사와 함께 불활성 가스가 분사되며 기저부 상면에 강제 대류를 일으킨다. 기저부 옆면에는 자연대류가 일어나며 적층 시간 간격 및 냉각 시에는 시편 상면과 옆면 모두 자연대류가 일어난다. 이러한 공정의 경계조건을 고려하여 경계조건 데이터를 도출하였다. 노즐 크기, 노즐과 시편 사이 거리 및 노즐에서 분사되는 가스를 고려하여 강제 대류 계수를 계산하였다. 수평에서의 자연 대류와 수직에서의 자연 대류의 차이를 고려하여 자연대류계수를 도출하고 적용하였다. 복사 열전달의 경우 낮은 온도 범위에서는 그 효과가 미미하여 자연대류계수 계산 시 고려하지 않았다. 공정을 진행할 때 레이저를 조사하여 용융풀이 생성되는 국소 부위에 온도는 높기 때문에 강제대류 계수 계산 시 복사 열전달을 함께 고려하였다. 대류와 복사에 의한 열 손실을 함께 고려하여 등가 강제 대류 계수를 도출하였다.

1. 강제 대류 경계조건 데이터 도출

DMT 공정은 적층 공정 중 보호가스 분위기 형성을 위해 노즐로 아르곤 가스를 분사하여 적층부 상면에 강제대류를 발생시킨다. 적층 공정 수행 중 기저부 상면에 발생하는 강제대류효과를 고려하기 위해 Fig. 35 과 같이 단일 원형 노즐에서 분사되는 가스의 표면충돌 모델 및 아르곤 가스의 온도 의존 물성 데이터를 이용하여 강제대류계수를 도출하였다.³⁷⁾

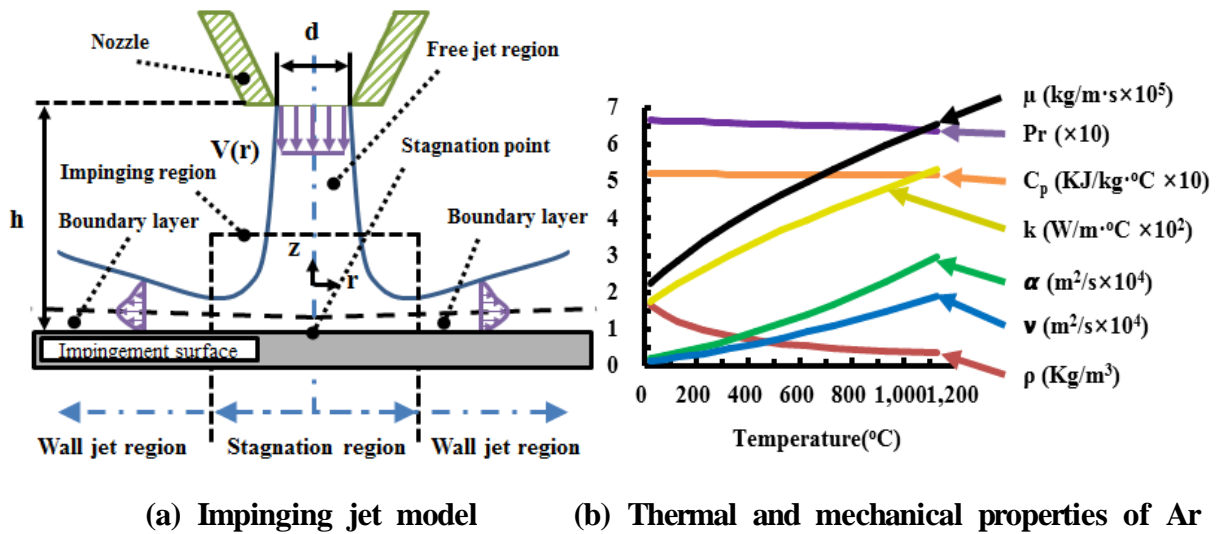


Fig. 35 Impinging jet model and properties of the argon gas to estimate the forced convection coefficient³⁷⁾

Fig. 25 (a) 의 표면충돌 모델은 자유 분사구간 (Free jet region), 정체점 (Stagnation point), 충돌 영역 (Impinging region), 경계층 (Boundary layer) 로 설명된다. 노즐에 분사되는 아르곤 가스는 난류로 노즐 출구로부터 충돌 면까지 높이가 증가함에 따라 충돌 영역을 넓히게 된다. 가스가 표면에 충돌한 이후 사방으로 퍼져나가 경계층을 형성시키고 기저부 상면에 강제 대류를 일으킨다. 단일 노즐 표면충돌 모델의 강제대류 계수 계산은 식 (1) - (4) 을 이용해 도출하였다.³⁷⁾

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

여기서 \bar{h}_f , \bar{Nu} , k 및 D_h 는 평균 강제대류 계수, 평균 너셀수, 유체의 열전도도 및 노즐의 직경이다. 평균 너셀수는 Martin 이 제안한 식 (2)를 이용하여 도출하였다.³⁷⁾

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

$$\left(\begin{array}{l} 2000 < Re < 400,000 \\ 2 < H/D < 12 \\ 0.004 < Ar < 0.04 \end{array} \right) \quad (2)$$

여기서 Re , Ar , Pr 및 H 는 레이놀즈수, 적용 면적, 프란텔 수 및 노즐 입구와 표면 사이 거리 이다. 레이놀즈수 및 적용 면적은 식 (3) 및 (4) 와 같다.³⁷⁾

$$Re = \frac{V_e \times D}{\nu} \quad (3)$$

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

식 (3) 및 (4) 에서 V_e , D_h , ν 및 R 은 유동의 평균 속도, 노즐의 직경, 유체의 동점성 계수 및 적용 반경이다. 도출된 평균 강제대류계수는 Fig. 36 과 같다.

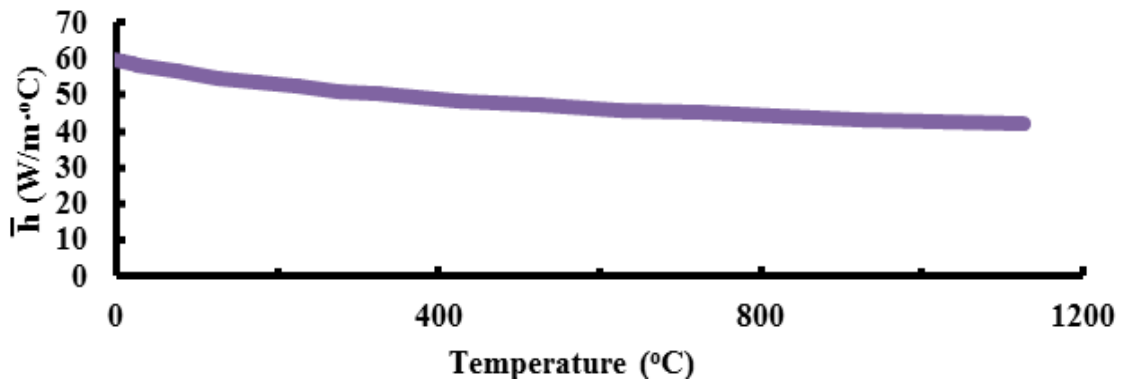


Fig. 36 Estimated forced convection coefficients for different temperature

2. 자연 대류 경계조건 데이터 도출

적층 공정 수행하는 중 시편의 적층부와 수직인 벽면은 항상 자연대류가 일어난다. 레이저를 조사하지 않는 패스간 시간 및 냉각의 경우 자연대류에 의한 냉각이 적용된다. 자연 대류 계수는 수직 벽인 경우와 수평면인 경우를 각각 고려하였다. 수직인 경우 식 (5) 를, 수평인 경우 식 (6) 을 이용하여 도출하였다.³⁸⁾

$$\overline{Nu} = 0.68 + \frac{0.67Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (10^{-1} < Ra < 10^9) \quad (5)$$

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

여기서 Ra 는 레일리 수로 식 (7) 과 같다.³⁷⁾

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\alpha\nu} \quad (7)$$

여기서 g , β , T_s , T_∞ , L_c 및 α 는 중력가속도, 열팽창계수, 표면 온도, 표면에서 충분히 떨어진 외부 온도, 특성 길이 및 열확산계수 이다.

유체의 체적 열팽창계수 β 는 식 (8) 과 같다.³⁷⁾

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{2}{T_\infty - T_s} \quad (8)$$

여기서 T_f 는 필름 온도로 대류 경계층의 유체 온도에 대한 근사치이다. 자연대류계수를 도출하기 위해 Fig. 37 과 같이 공기의 온도의존 물성데이터를 이용하였다.

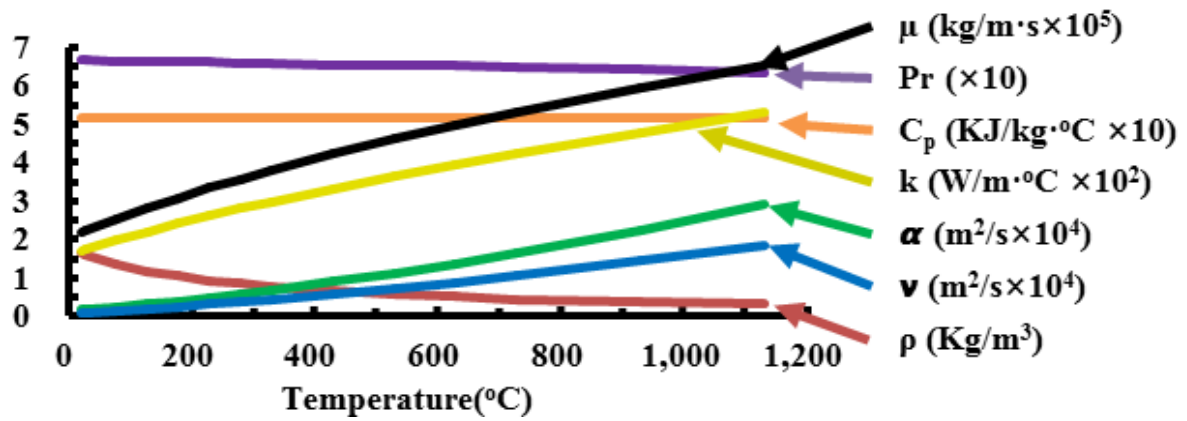


Fig. 37 Temperature dependent thermal and mechanical properties of air

공기의 온도 의존 물성데이터를 이용해 도출된 자연대류 계수는 Fig. 38 과 같다.

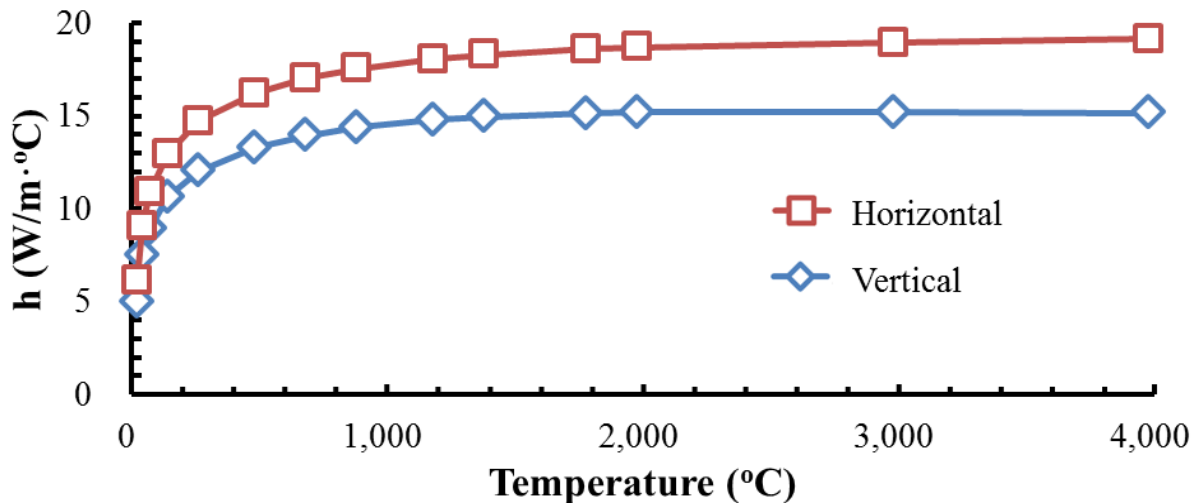


Fig. 38 Estimated natural convection coefficients for different temperatures and directions

3. 등가 강제대류계수 도출

낮은 온도 범위에서의 복사 열손실은 미미하기 때문에 고려하지 않는다. 하지만 적층 공정을 수행하는 중 레이저를 조사하는 부위의 온도는 높기 때문에 복사 열전달에 의한 효과를 고려할 필요가 있다. 이에 따라 대류 및 복사를 함께 고려한 등가 강제대류계수를 도출하였다. 공정 중 발생하는 총 열손실은 식 (9) 와 같다.³⁷⁾

$$\dot{Q}_{loss,total} = \dot{Q}_{loss,forced} + \dot{Q}_{loss,rad} \quad (9)$$

여기서 $\dot{Q}_{loss,forced}$ 및 $\dot{Q}_{loss,rad}$ 는 강제대류에 의한 열손실 및 복사에 의한 열손실이다. 강제 대류 및 복사에 의한 열손실은 식 (10) 및 (11) 과 같다.³⁷⁾

$$\dot{Q}_{loss,forced} = \bar{h}_f(T_s - T_\infty) \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{loss,rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (11)$$

여기서 ϵ 및 σ 는 방사율 및 스테판-볼츠만 상수 [$\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ (W/m²K²)] 이다. 두 식을 이용하여 도출된 등가 강제대류계수는 식 (12) 와 같다.³⁷⁾

$$\bar{h}_{eq,f} = \bar{h}_{forced} + \epsilon\sigma(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \quad (12)$$

따라서 총 열손실은 식 (13) 과 같다.

$$\dot{Q}_{loss,total} = \bar{h}_{eq,f}(T_s - T_\infty) \quad (13)$$

등가 강제대류계수를 도출하기 위해 참고문헌 조사를 통해 Inconel 625 재료의 온도 의존 방사율을 Fig. 39 와 같이 도출하였다.⁴⁰⁾ 기저부 S45C 및 Stellite 21 재료의 방사율은 온도 의존 데이터가 없어 단일 방사율인 0.28 및 0.18 로 적용하였다.

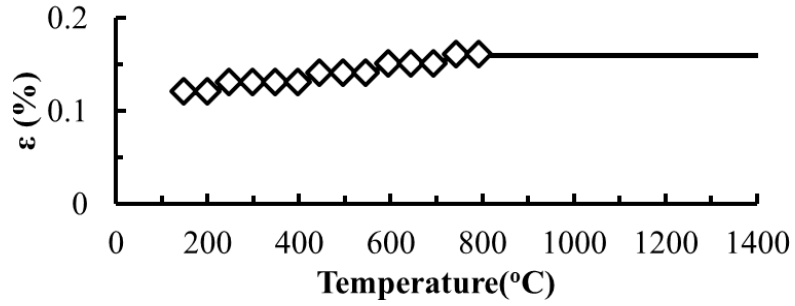


Fig. 39 Emissivity of Inconel 625

도출된 강제대류 계수 및 방사율을 이용하여 온도 의존 등가 강제대류계수를 Fig. 40 과 같이 도출하였다.

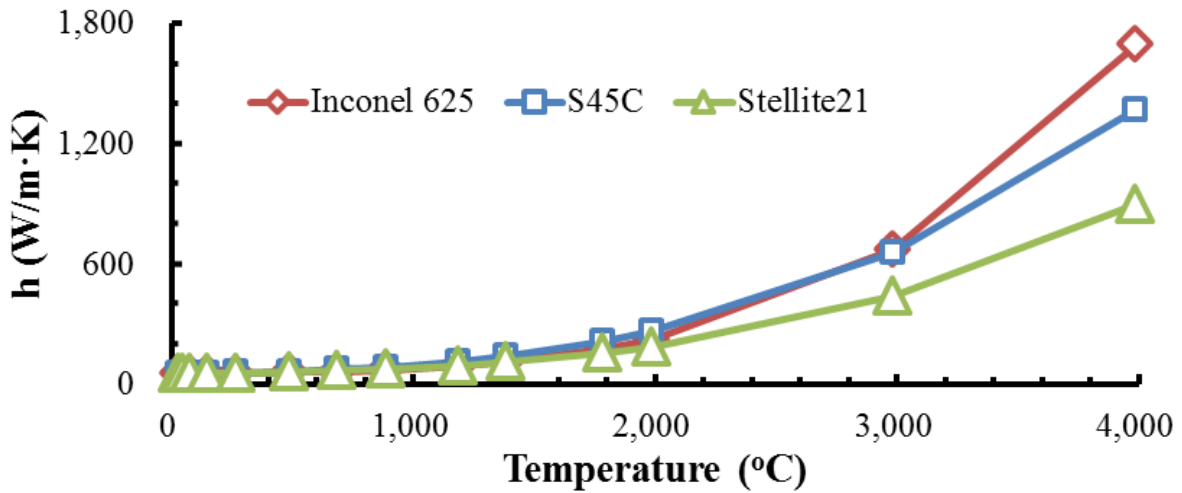


Fig. 40 Estimated equivalence forced convection coefficients for different materials

기저부 상면의 온도 분포에 따라 온도 의존 등가 강제대류계수는 Fig. 41 과 같이 적용된다.

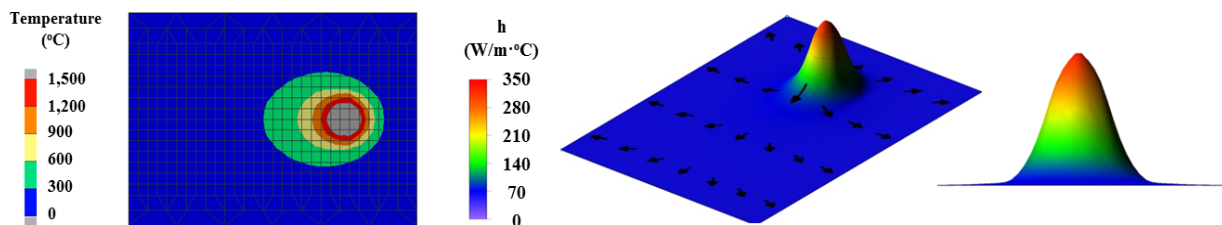


Fig. 41 Visualization of the application of equivalent forced convection coefficients in the vicinity of irradiates region of laser

제 3 절 열원 모델 도출 및 고찰

1. 체적 열원 모델 도출 및 고찰

가. 레이저 열원

본 연구에서 사용된 DMT 장비인 MX-3 는 적층 공정을 수행하기 위한 열원으로 Fiber Laser 를 이용한다. 레이저는 전기장 및 자기장의 패턴과 형태에 따라 여러 가지 모드가 존재하며 그 중 TEM_{00} 모드에서 최소 초점 크기와 최고 에너지 밀도를 가지게 된다. TEM_{00} 모드는 초점 및 초점거리 밖에서도 그 형상을 그대로 유지할 수 있는 유일한 레이저 빔의 양상이다. 조사된 레이저 단면부의 에너지 분포를 보았을 때 가우시안 형태를 보이며 초점거리에서 그 형태가 뚜렷하게 나타난다. SYSWELD 프로그램에서 레이저의 가우시안 분포를 고려하여 제안한 레이저 열원은 Fig. 42 과 같다.

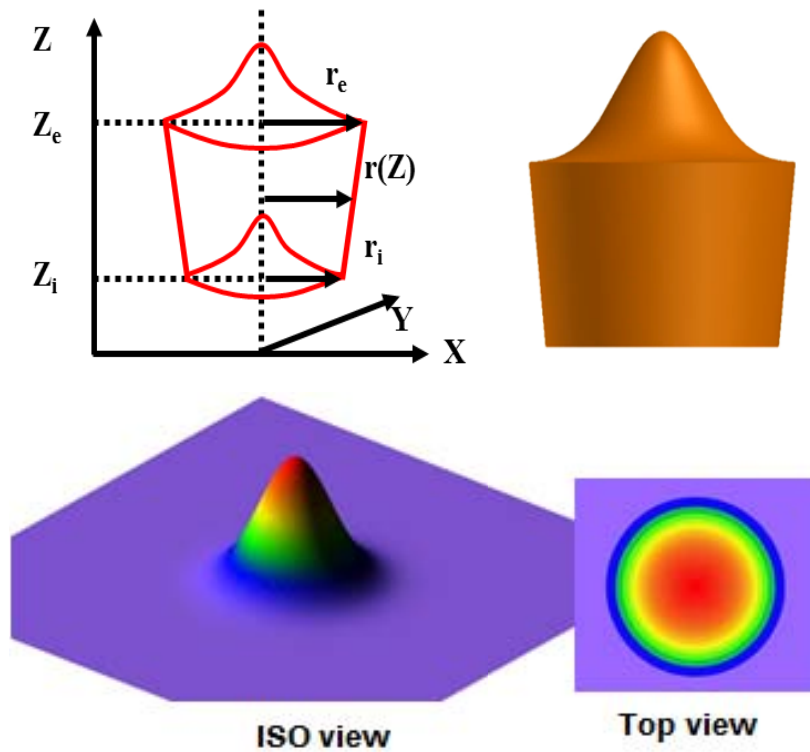


Fig. 42 Heat flux model of laser⁴¹⁾

여기서 r_e , r_i , z_e 및 z_i 는 각각 열원의 상부 반경, 하부 반경, 상부 위치 및 침투 깊이가 하며 체적 열원은 설정된 경로를 따라 이동하며 적용된다. 열원의 반경은 실험에서 사용된 초점 크기를 적용하였으며 열원의 상부 위치는 비드 상부에, 열원의 침투 깊이는 생성된 비드 높이만큼 설정하였다. 본 연구에 적용된 체적 열원은 식 (14) 와 같다.

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

여기서 η , Q_0 , x , y , v , t , C 및 $r^2(Z)$ 는 열원의 효율, 최대 파워 밀도, x 위치, y 위치, 속도, 시간, 형상계수 및 침투깊이에 따른 적용범위 이다. 열원의 최대 파워 밀도 및 침투깊이에 따른 적용범위는 식 (15) 및 (16) 과 같다.

$$Q_0 = \frac{3P}{\pi\delta(r_i^2 + r_i r_e + r_e^2)} \quad (15)$$

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

여기서 P , δ 및 z 는 레이저 파워, 침투 깊이 및 z 위치이다. 식 (16) 에서 열원의 상부 반경과 하부 반경이 동일할 경우 체적 열원의 적용이 불가능해 진다. 본 연구에서는 이를 고려하여 열원의 하부 반경을 상부반경에 최대한 근접하게 설정하여 해당 열원을 적용하였다.

나. 열원모델 도출을 위한 해석모델 생성

유한요소 해석의 열원 적용 시 유한요소 격자와 열원의 관계는 Fig. 43 과 같다.

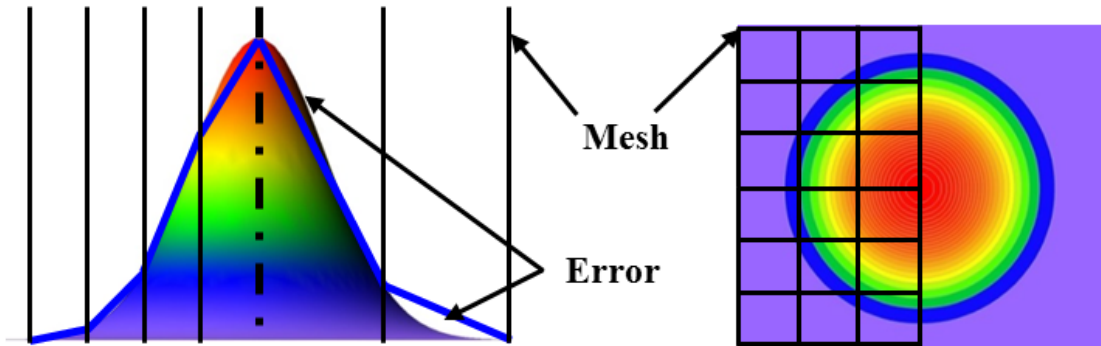


Fig. 43 Method of mesh generation to configure the heat flux model

유한요소 격자가 조밀할수록 해석 결과는 정확해지지만 해석 시간이 증가하기 때문에 해석의 정확도와 해석 시간과의 조율이 필요하다. 이러한 요소들을 고려하여 단일 비드 적층 시 두 가지 해석 모델을 Fig. 44 와 같이 생성하고 두 모델의 해석 결과를 비교하여 적정 유한요소 격자 및 열원 모델을 도출하였다.

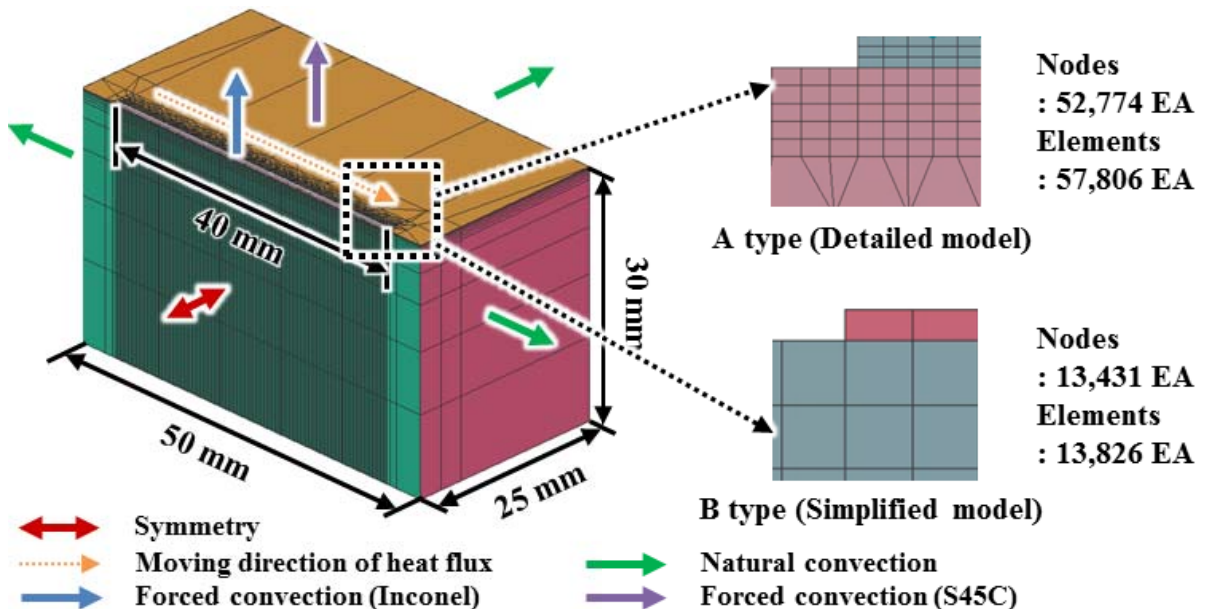


Fig. 44 Two types of FE model to simulate thermo-mechanical phenomenon during deposition and cooling

조밀한 모델은 조대한 모델에 비해 유한요소 격자의 수가 약 4 배 정도 많게 구성 하였으며 열원이 적용되는 비드부의 격자를 더욱 조밀하게 배치하였다. 해석에 사용된 변수는 Table. 5 와 같다.

Table. 5 Process parameters of finite element analyses

Parameters	Laser Power (W)	Scan speed (mm/s)	Spot size of laser (mm)	Initial temperature (°C)	Efficiency
Ranges	400	14.17	0.8	18	0.3 - 0.5

단일 비드 해석 모델에서 열원 모델 도출을 위해 해석 시간에 따른 최대 온도를 Fig. 45 와 같이 도출하였다.

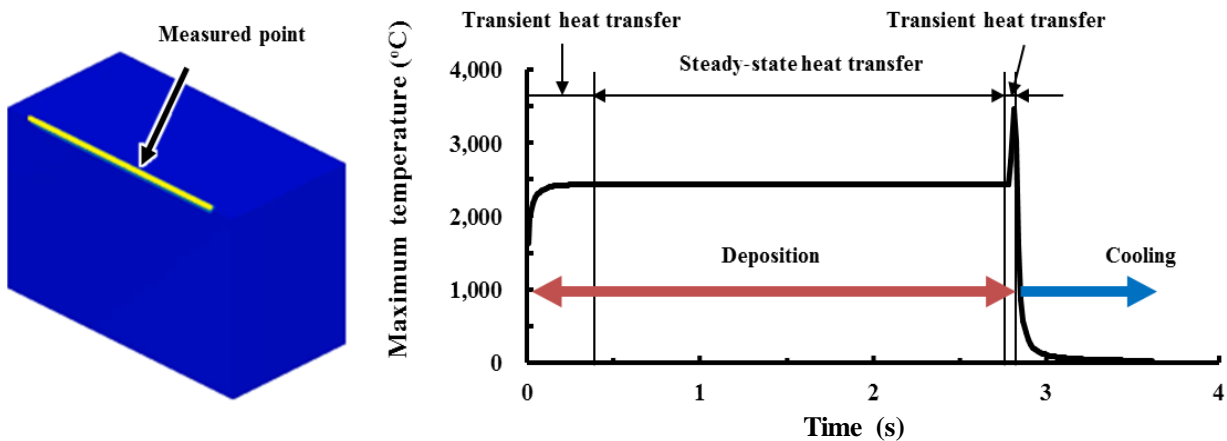
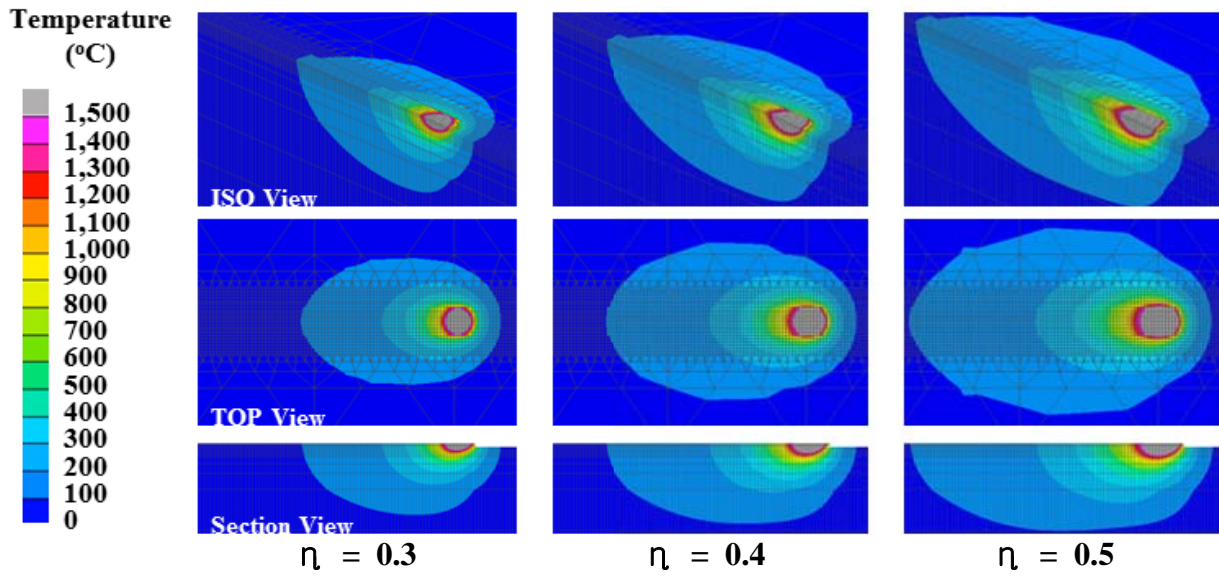
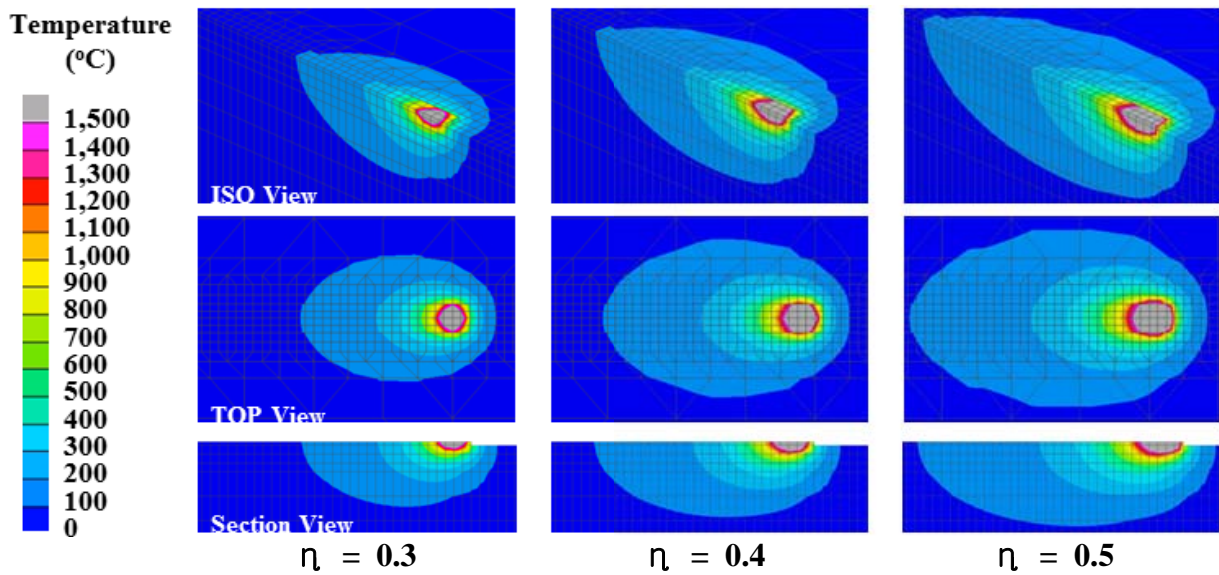


Fig. 45 Estimated steady-state heat transfer region

도출된 해석 결과에서 최대온도 변화가 1 °C 이하로 변화하는 경우 해석이 정상 상태에 들어갔다 가정 한 후 과도 구간과 정상 상태 구간을 구분하였다. 해석 결과 0.4 sec 이하의 구간에서는 레이저를 조사함에 따라 온도가 증가하는 과도 해석이 진행되었다. 해석이 진행됨에 따라 해석이 종료되기 전까지 정상상태가 유지되었다. 모든 해석의 비교는 정상상태 구간에서 비교하기위해 모델의 중앙부인 20 mm 위치에서 측정을 진행하였다. 열원의 효율을 결정하기 위해 0.3, 0.4 및 0.5 효율을 적용하여 해석을 진행하였으며 해석 결과는 Fig. 46 과 같다.



(a) A type (Detailed model)



(b) B type (Simplified model)

Fig. 46 Influence of type of FEA model on temperature distribution in the vicinity of the deposited region

열원의 효율에 따른 해석 결과 열원의 효율이 증가함에 따라 열원의 온도 분포는 증가하였다. 유한요소 격자가 다른 두 모델을 비교 하였을 때 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 두 해석모델의 비교를 통해 해석 모델의 유한요소 격자는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않으며 유사한 해석을 진행할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 조직 및 상이 변화하는 재결정 온도를 기준으로 영향성을 분석하기 위해 Fig. 47 과 같이 데이터를 도출하였다.

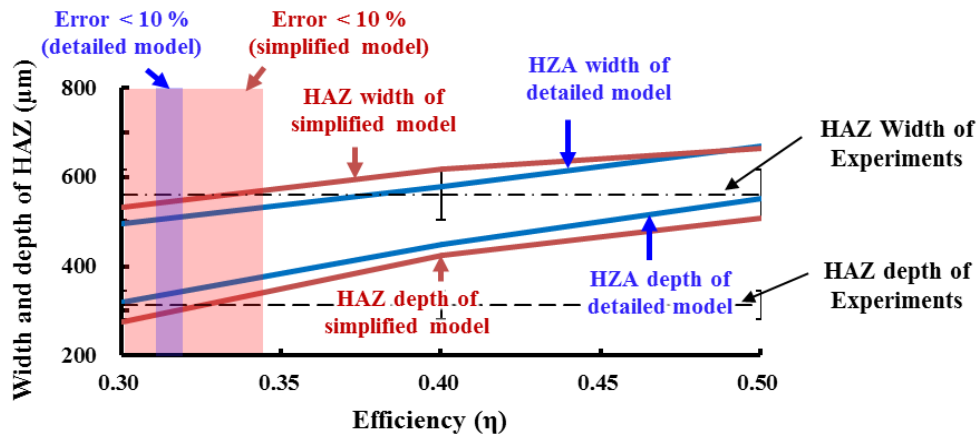


Fig. 47 Estimation of efficiency of heat flux

두 해석 모델 비교 결과 효율에 따른 열 분포는 큰 차이가 없이 거의 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 열영향부인 738 °C 기준으로 폭과 깊이를 비교 하였을 때 두 모델의 차이는 폭 기준으로 최대 38 μm 깊이 기준으로 44 μm 로 도출되었다. 또한 실험 결과를 기준으로 두 해석모델의 오차율 10 % 이내인 구간을 도출하였을 때 두 결과 모두 효율 0.30 - 0.35 사이에서 도출되었다. 적용된 열원 모델의 효율은 두 해석모델 모두 만족시킬 수 있는 효율인 0.32 로 선정하여 적용하였다. 또한 해석시간을 고려하여 유한요소 격자가 조대한 모델을 선정하였다.

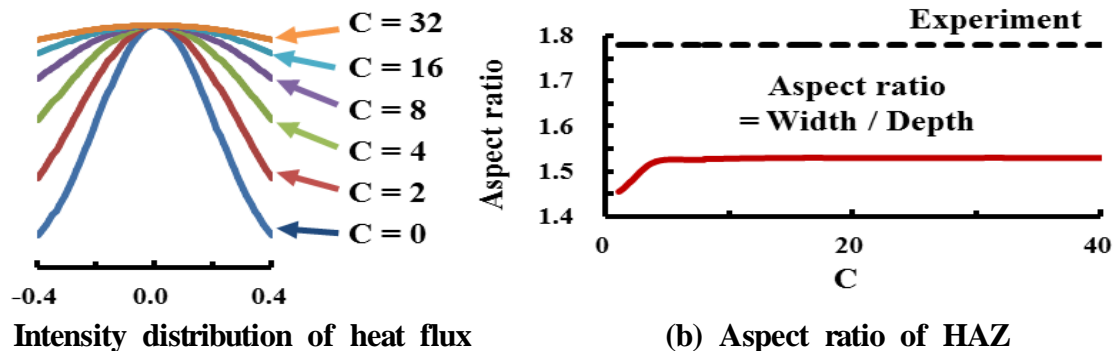


Fig. 48 Influence of shape coefficient on the intensity distribution of the heat flux and aspect ratio of HAZ

Fig. 48 은 C 값 증가에 따른 열원의 형상 변화를 적용하여 해석한 결과이다. 열원의 형상이 원통형에 근접할수록 열영향부의 종횡비는 실험값에 근접하였으나 C 값이 16 이상인 경우 종횡비가 일정하게 도출되었다. 열원의 효율 및 열원의 형상에 따른 해석 결과 본 연구의 열원의 적정 효율은 0.32 이며 열원의 형상은 원통형 열원을 적용하였다.

제 4 절 유한요소 해석 모델 도출

1. 해석 모델 도출

실험을 통해 얻은 적층 비드 형상 및 해치 거리를 고려하여 단일, 이열, 다열 및 다층 비드 유한요소 해석 모델을 Fig. 49 및 Fig. 50 과 같이 생성하였으며 각 모델의 노드 및 유한요소 격자수는 Table. 6 과 같다. 해석 모델은 상용 유한요소 해석 프로그램인 SYSWELD 14.0 을 사용하여 생성하였다.

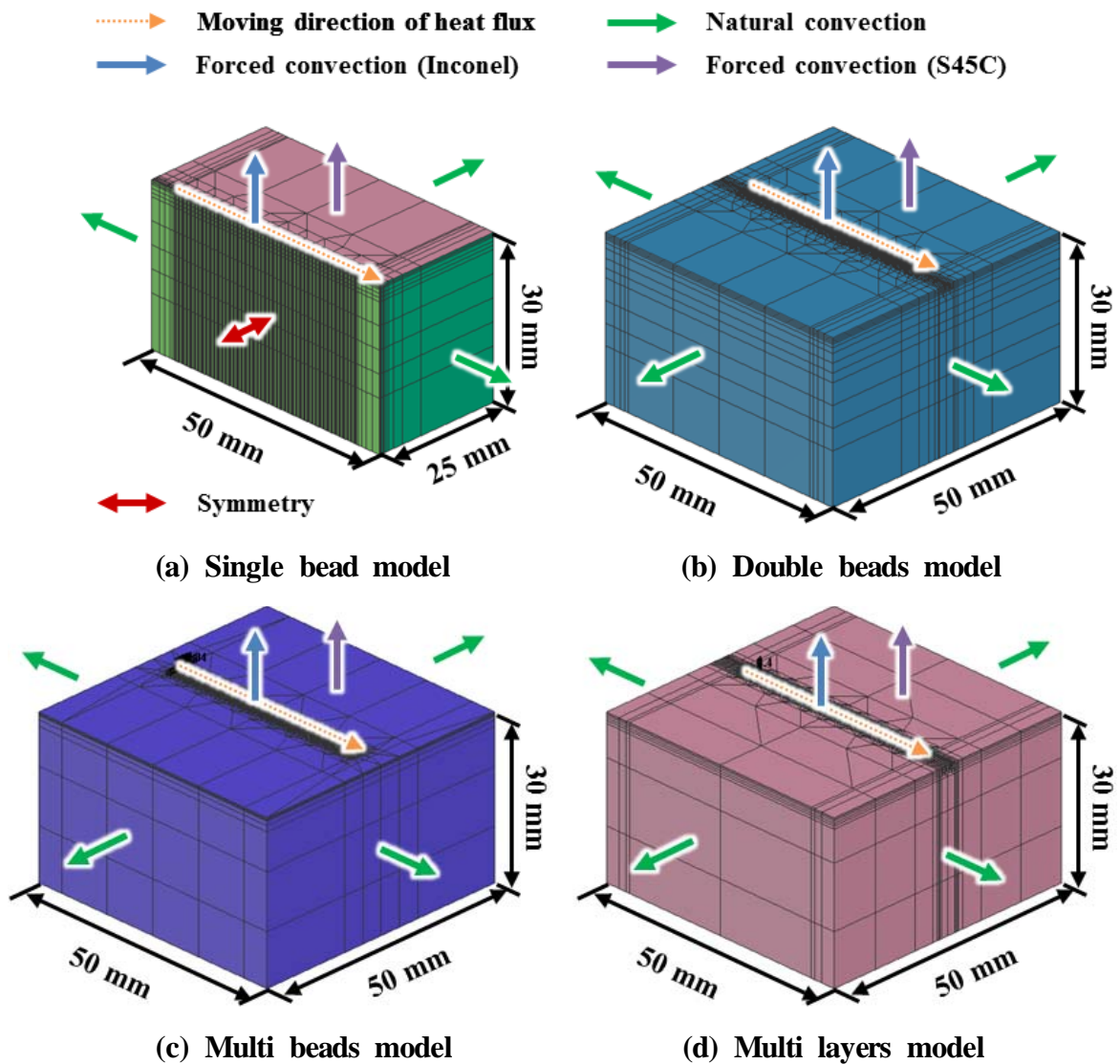


Fig. 49 Models of FEAs for different deposited beads (Inconel 625)

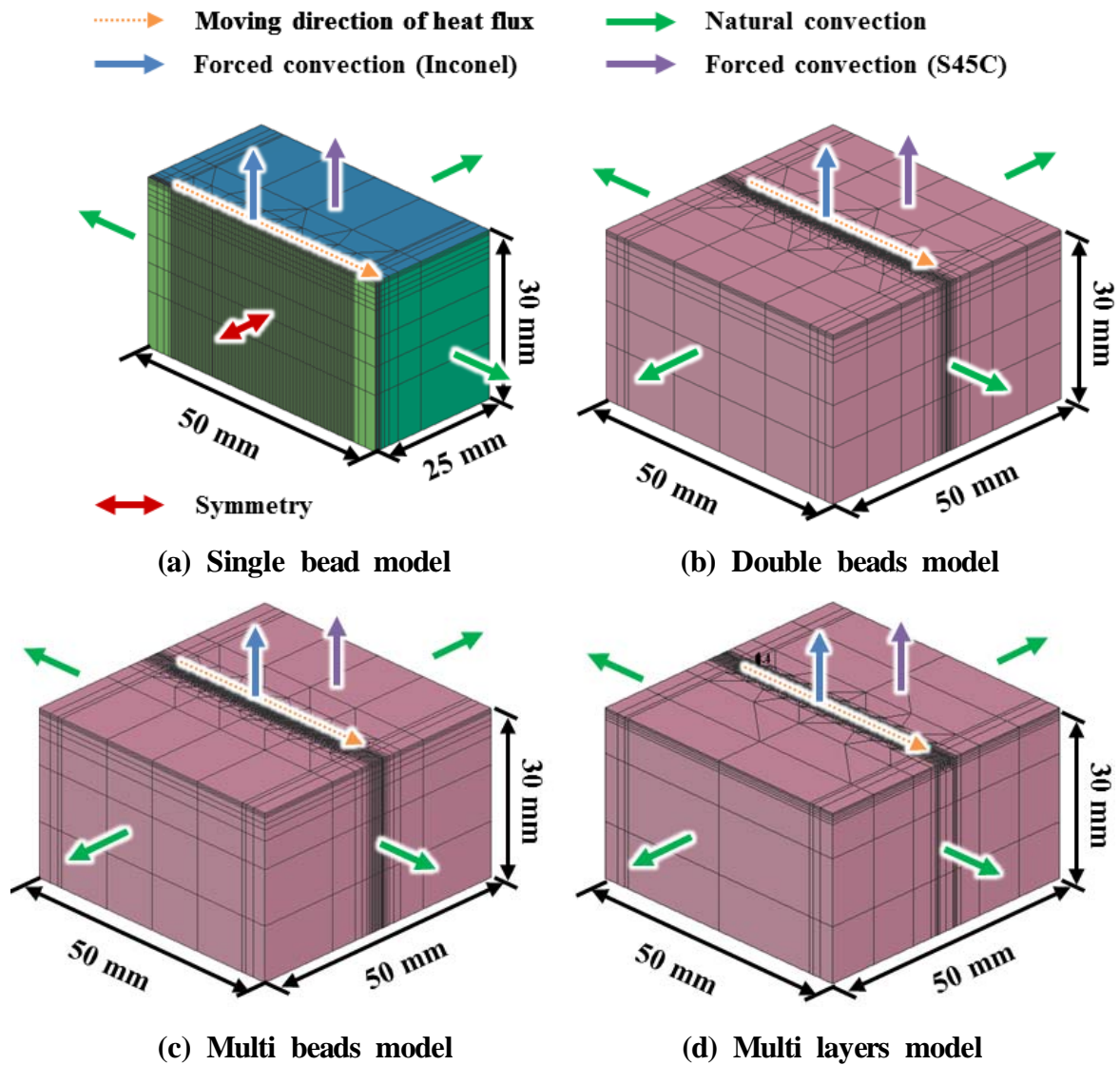


Fig. 50 Models of FEAs for different deposited beads (Stellite 21)

Table. 6 Nodes and elements of FE model for different deposited beads

Type of material	Type of model	Nodes (EA)	Elements (EA)
Inconel 625	Single bead	13,431	13,826
	Double beads	21,935	28,236
	Multi beads	28,940	39,764
	Multi layers	27,583	37,808
Stellite 21	Single bead	15,195	15,602
	Double beads	23,717	27,632
	Multi beads	32,943	35,592
	Multi layers	27,583	37,808

각 모델에 해당되는 비드와 적용되는 열원 위치는 Fig. 51 과 같다.

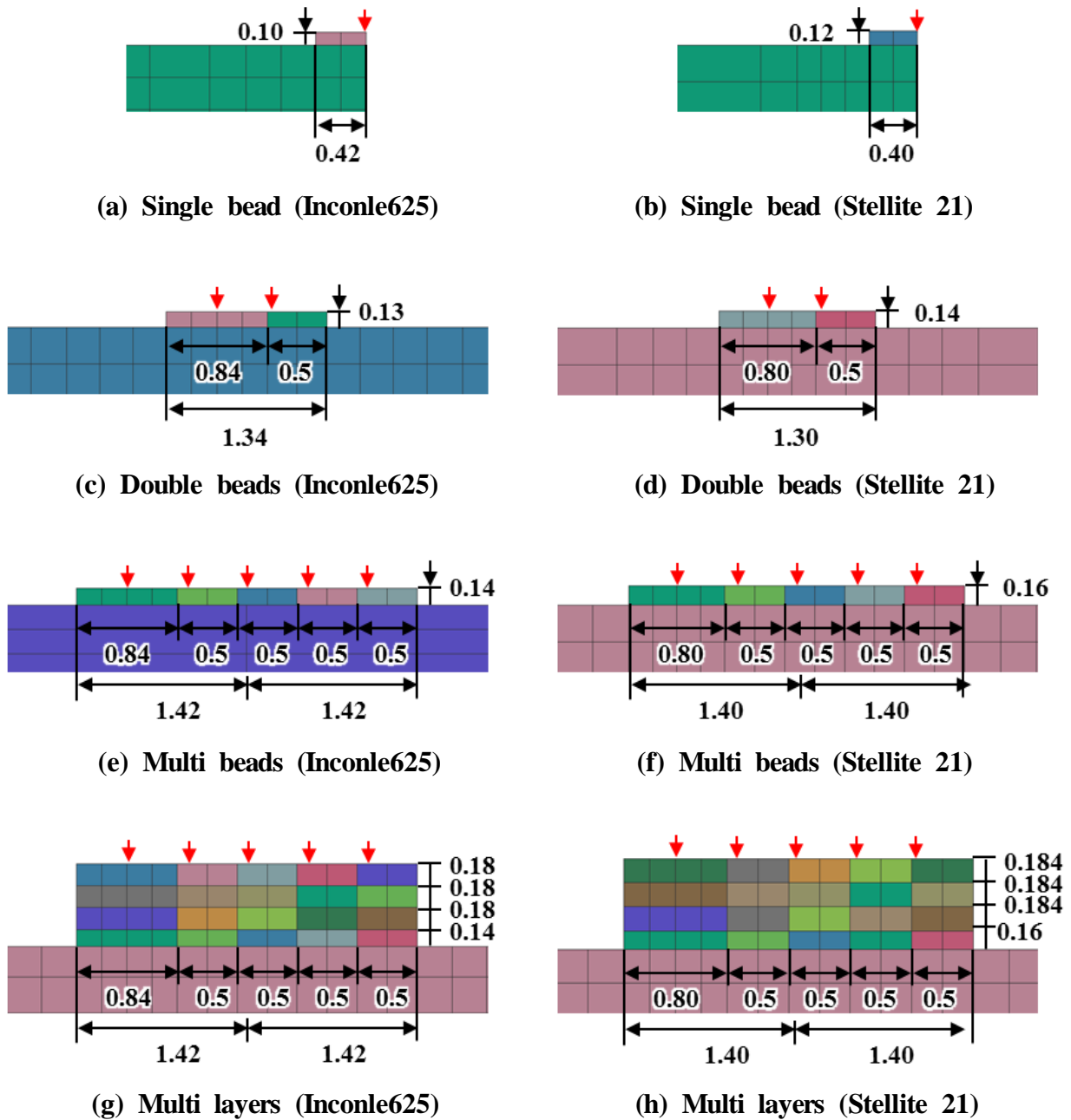


Fig. 51 Bead shapes for different FE models

실험을 통해 도출된 비드의 폭 및 높이를 기준으로 각 유한요소 해석모델의 비드 크기를 결정하였다. 이열 및 다열 비드 해석모델에서는 단일 비드의 폭 과 해치 거리를 기준으로 비드를 생성하였고, 높이는 평균 높이를 이용하였다. 다층 적층 해석 모델에서는 평균 폭과 높이를 기준으로 전체 크기를 설정하였다.

제 4 장 유한요소 해석을 이용한 이종재료 적층 특성 고찰

제 1 절 열전달 해석 결과 및 특성 분석

1. 단일 비드 열전달 해석 결과 및 비교 분석

단일 비드 열전달 해석에서는 재료에 따른 온도 분포, 정상 상태에서의 열 이력과 CCT curve 의 비교, 기저부의 상변화 분석 및 기저부 경도에 따른 온도 분포 비교를 진행하였다.

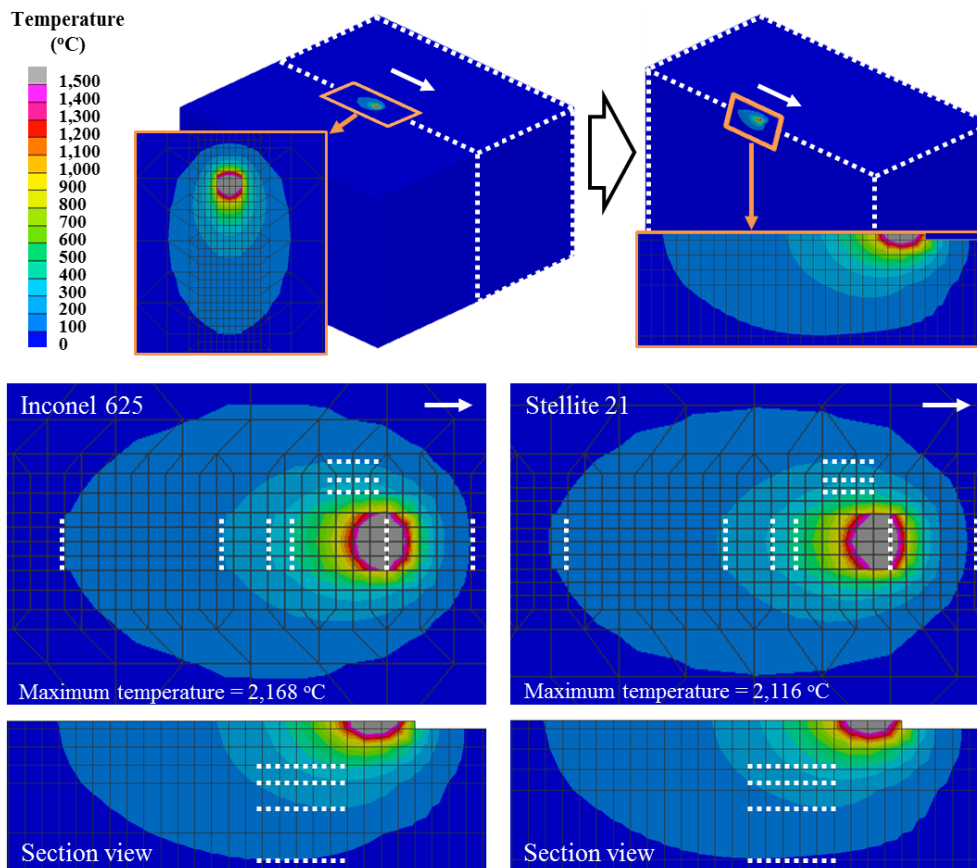
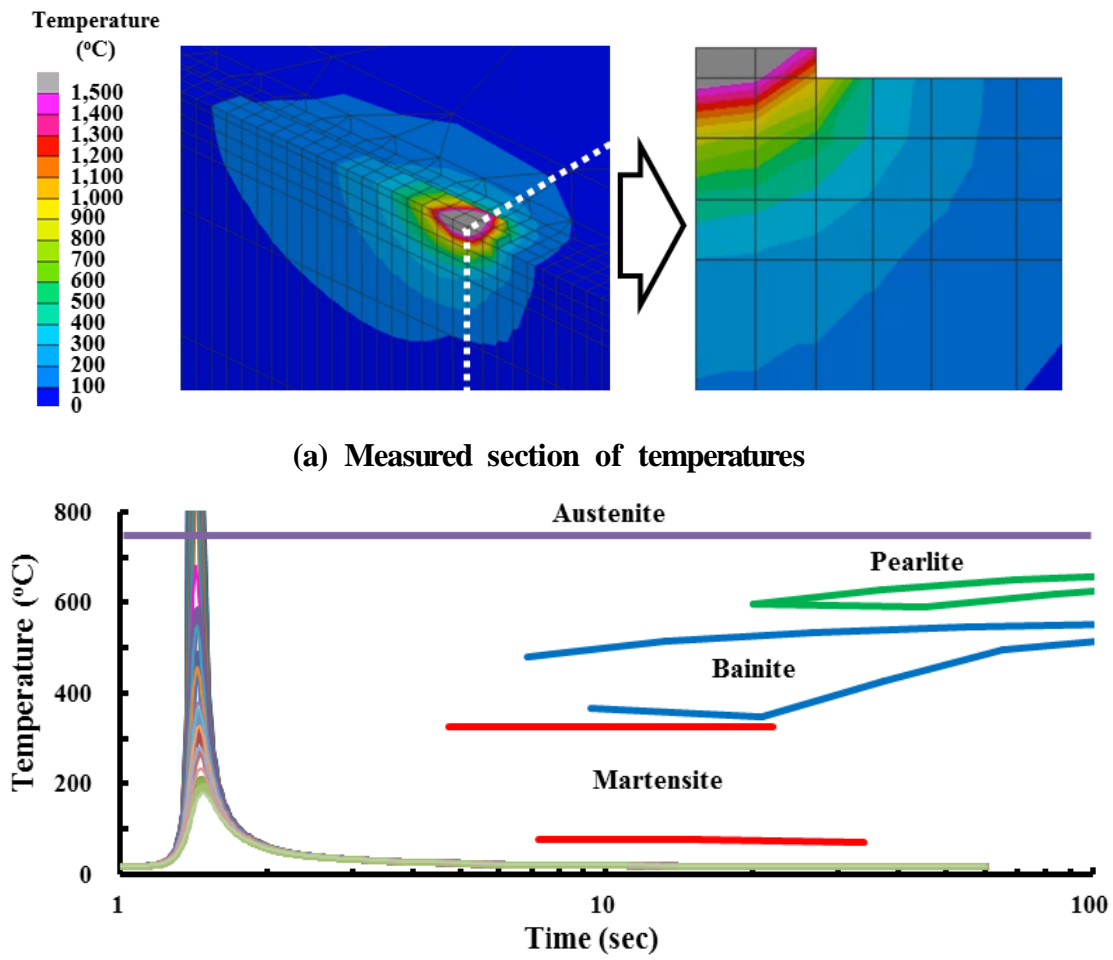


Fig. 52 Comparison of temperature distributions for Inconel 625 powders and those for Stellite 21 Powders

Fig. 52 는 재료에 따른 적층부 상면 및 측면의 온도 분포 비교 결과이다. 소재에 관계없이 레이저 빔 조사 위치에 급격한 온도 분포를 나타내었다. Inconel 625 해석 결과를 Stelle 21 해석 결과에 대비해 보았을 때 적층 방향인 길이방향에서 Stelle 21 의 온도 분포가 100 °C 기준으로 170 μm 길게 나타난 것을 확인하였다. Inconel 625 소재 적층 시 최대온도가 Stelle 21 소재 적층 시 최대온도보다 50 °C 높게 측정되었다. 도출된 결과를 통해 Inconel 625 소재 적층 시 열이 더 응집되며 재료에 따른 온도 분포는 폭 과 깊이보다 길이방향으로 영향이 있음을 알 수 있었다. 두 결과의 차이가 미미한 이유는 기저부 체적보다 적층된 소재의 체적이 현저하게 작기 때문으로 사료된다. 급격한 열전달에 의한 상변화를 분석하기 위하여 Inconel 625 단일 비드 적층 해석의 정상상태에서 단면부의 열 이력과 CCT 선도를 Fig. 53 과 같이 비교하였다.



(b) Thermal histories of the measured section and CCT curves of S45C

Fig. 53 Influence of thermal histories on the phase of the substrate

단면부의 각 노드의 열 이력과 CCT 선도를 비교한 결과 급격한 열전달에 의해 재결정 온도를 지나 오스테나이트화된 부분은 모두 마르텐사이트 조직으로 형성될 것으로 예상되었다. 급격한 열 이력에 의한 마르텐사이트 조직 형성은 금속에 강도를 증가시키지만 동시에 취성이 생기기 때문에 적층 시 균열 발생의 원인이 된다. 균열 발생의 원인이 되는 마르텐사이트 조직 형성을 관찰하기 위하여 단일 비드 적층 시 각 상에 대한 해석 결과를 Fig. 54 및 Fig. 55 와 같이 도출하였다.

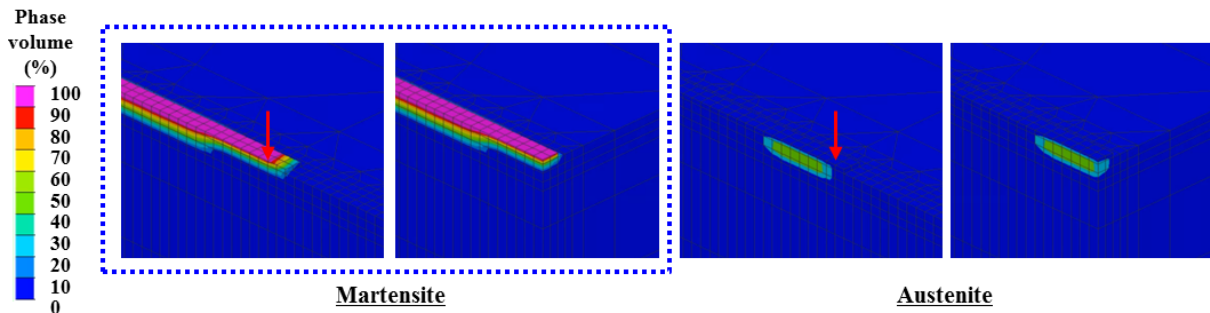


Fig. 54 Phase distributions during the deposition (Inconel 625)

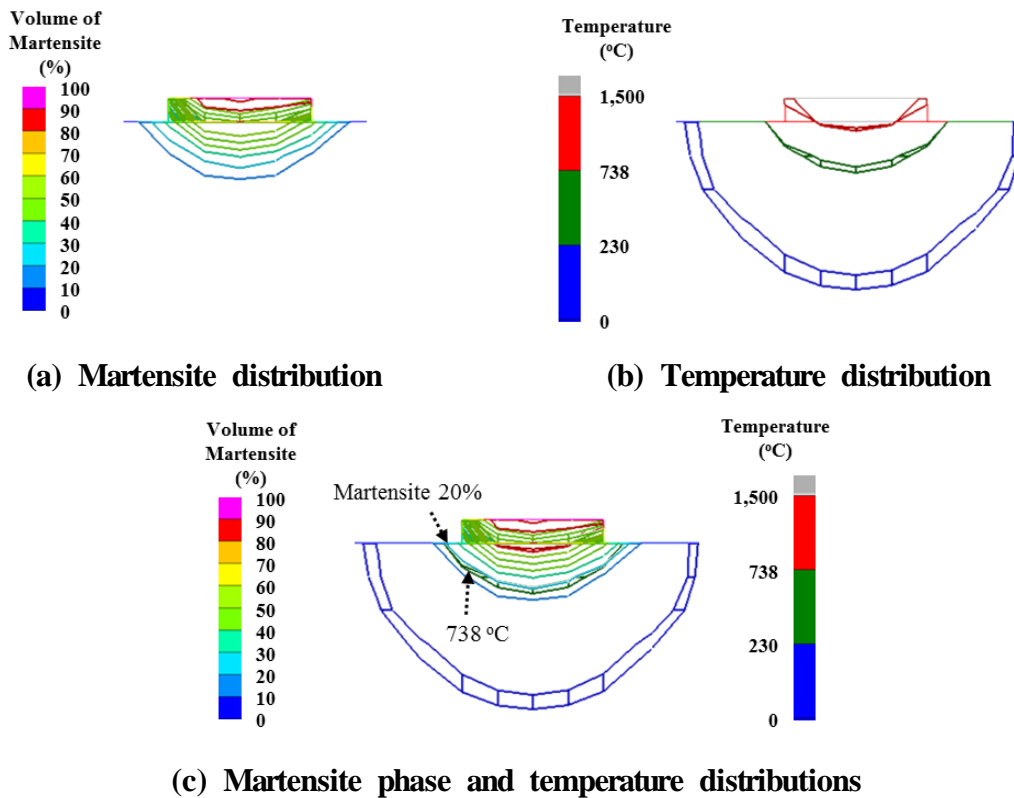
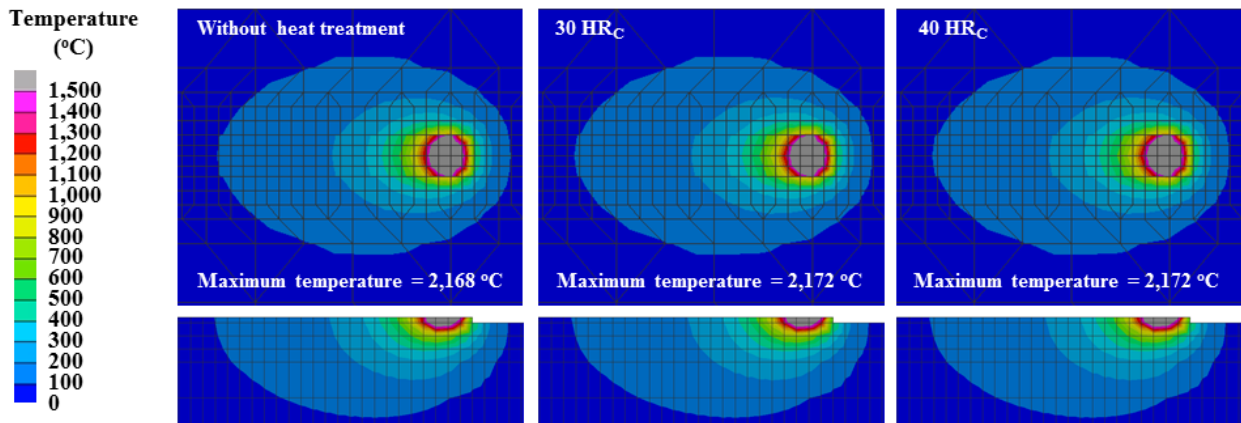
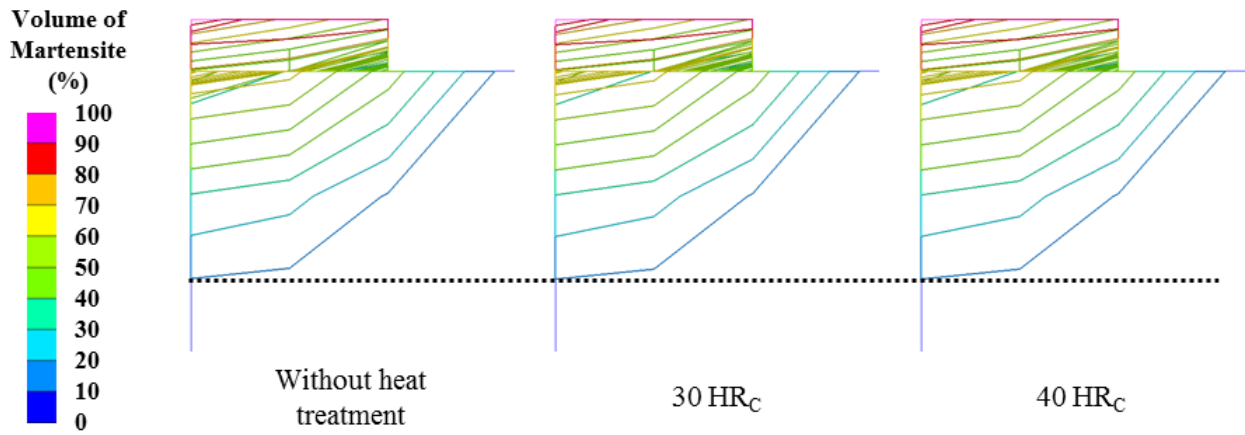


Fig. 55 Influence on the temperature distribution on the phase volume of martensite in the substrate (Inconel 625)

각 상에 대한 해석 결과 단일비드 적층이 진행될 때 Fig. 54 와 같이 열원이 적용되는 부위에서 일정 온도 범위까지 오스테나이트 상이 관찰되었고 이후 마르텐사이트화 하는 것을 알 수 있었다. 급격한 열 이력에 의해 베이나이트는 형성되지 않았으며 S45C 의 기본상인 페라이트 및 페라이트와 시멘타이트의 조합인 펄라이트가 관찰되었다. 해석 결과를 기반으로 재결정 온도 이상에서 오스테나이트화한 탄소강이 마르텐사이트 조직으로 변태함을 볼 수 있었으며 마르텐사이트 조직이 유지되는 것을 알 수 있었다. Fig. 55 (a) 와 같이 마르텐사이트 분포는 재결정 온도 이상 가열되어도 100 % 마르텐사이트 조직으로 형성되지 않고 적층부와 기저부 사이인 완전 용융된 지점에서 높은 비율을 가지는 것으로 도출되었다. 또한 변화된 마르텐사이트 상과 Fig. 55 (b) 온도 분포를 Fig. 55 (c) 와 같이 비교해 보았을 때 S45C 의 오스테나이트화 온도인 738 °C 온도 분포선과 마르텐사이트 20 % 선이 거의 일치하였으며 온도 분포선이 마르텐사이트 분포 선 보다 깊게 도출되었다. 이 결과를 통해 유한요소 해석에 적용한 상별 온도 분포 및 온도 변화에 따른 상변화가 잘 적용되었음을 알 수 있었다. 또한 온도 분포선과 마르텐사이트화 된 영역 비교를 통해 기저부가 오스테나이트화 하는 A_{c1} 점 (738 °C) 이상의 열 이력을 가진 부분을 열 영향부 (Heat Affected Zone : HAZ) 로 설정할 수 있음을 알 수 있다.⁴²⁾

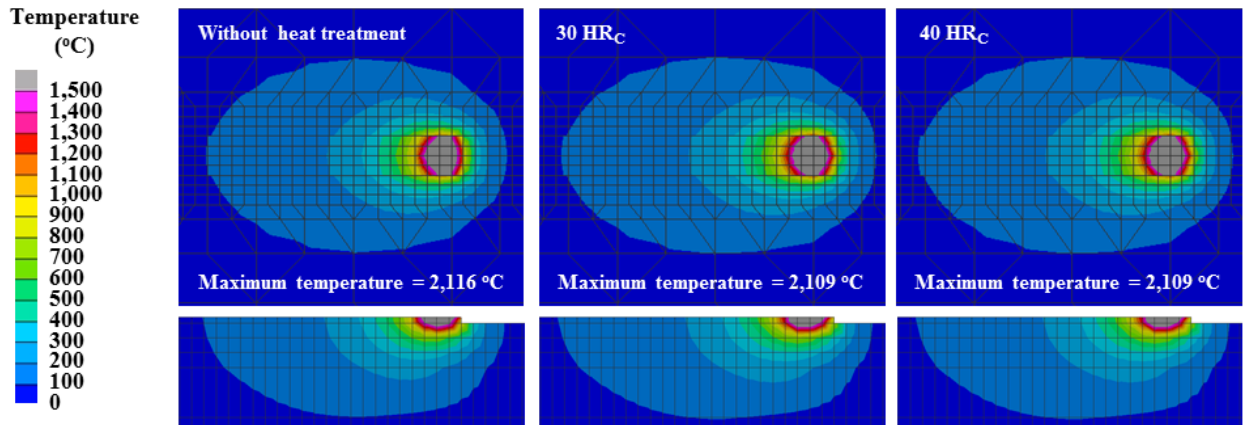


(a) Temperature distribution

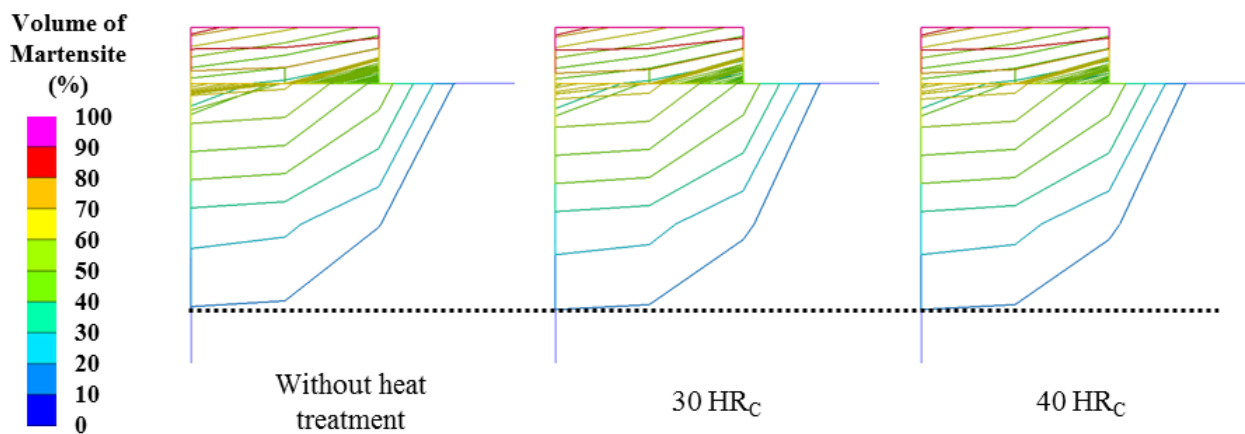


(b) Martensite distribution

Fig. 56 Influence of the hardness of the substrate on temperature distributions and phase volume of martensite in the vicinity of the deposited region (Inconel 625)



(a) Temperature distribution



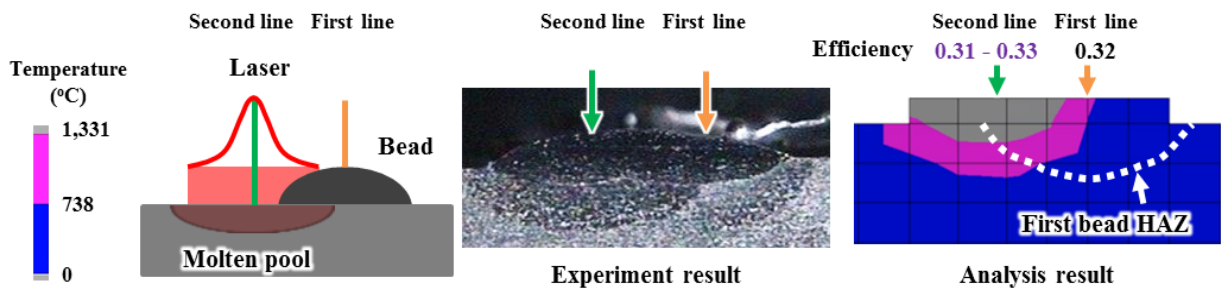
(b) Martensite distribution

Fig. 57 Influence of the hardness of the substrate on temperature distributions and phase volume of martensite in the vicinity of the deposited region (Stellite 21)

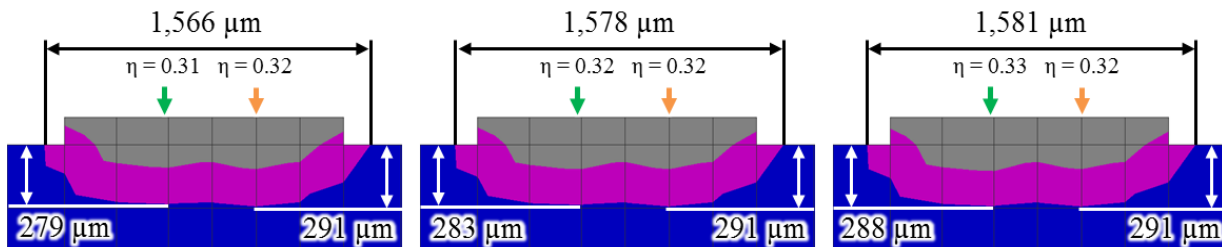
Fig. 56 (a) 및 Fig. 57 (a) 는 기저부의 열처리 물성을 적용한 단일 비드 온도 분포를 나타낸 결과이다. 열처리의 유무에 따라 최대온도 차이는 Inconel 625 의 경우 4 °C, Stellite 21 의 경우 8 °C 로 아주 미세하게 나타났으며 열처리 정도에 따른 변화는 나타나지 않았다. 또한 재결정온도 기준으로 열영향부의 폭과 깊이를 측정하였을 때 Inconel 625 의 경우 폭 및 깊이가 5 μm 차이가 났으며 Stellite 21 의 경우 폭은 24 μm 깊이는 13 μm 차이가 발생하였다. 이러한 미세한 변화는 열처리에 따라 페라이트와 시멘타이트에서 펄라이트와 베이나이트 조직으로 상이 변화 하였지만 상변화에 따른 온도 의존 열 물성 값의 차이가 미미하기 때문에 사료된다. 또한 Fig. 56 (b) 및 Fig. 57 (b) 와 같이 기저부 경도에 따른 마르텐사이트 조직을 보았을 때 Inconel 625 소재 적층 시 보다 Stellite 21 소재 적층 시 마르텐사이트 분포는 좁고 깊게 도출되었다. 경도에 따른 마르텐사이트 분포 차이는 열전달 결과와 마찬가지로 약간의 차이가 존재 하였지만 거의 동일한 분포를 보이는 것으로 도출되어 기저부의 경도에 따른 마르텐사이트 분포는 차이가 거의 없을 것으로 사료된다.

2. 이열 비드 열전달 해석 결과 및 비교 분석

이열 비드 열전달 해석에서는 열원의 효율 변화 비교 분석, 재료 및 패스간 시간에 따른 온도 분포, 기저부의 상변화 분석을 진행하였다. 단일 비드 적층 후 연속적으로 적층을 진행할 경우 기존에 생성된 비드가 열원의 효율에 미치는 영향성을 분석하기 위해 Fig. 58 과 같이 Inconel 625 이열 비드 해석 모델을 이용하여 열원의 효율에 따른 해석을 진행하였다.



(a) Estimation method



(b) Effects of efficiency of the formation of HAZ

Fig. 58 Variation of efficiency of the heat flux according to a successive deposition (Inconel 625)

이열 비드 적층 시 열영향부를 비교한 결과 두 번째 비드 적층 시 모든 효율 조건에서 감소되었다. 이는 기존에 적층된 비드로의 열전달에 의해 열영향부의 깊이가 감소된 것으로 사료된다. 또한 적정 효율인 0.32 를 기준으로 해석 결과를 비교 하였을 때 효율이 감소할 경우 열영향부의 폭과 깊이는 폭 방향으로 $12\ \mu\text{m}$ 깊이 방향으로 $4\ \mu\text{m}$ 차이가 나타났으며 효율이 증가할 경우 폭 방향으로 $3\ \mu\text{m}$ 깊이 방향으로 $5\ \mu\text{m}$ 차이가 나타났다. 적층 시 열원의 효율 변화에 따른 열 영향부의 폭 및 깊이의 차이가 미미하여 다중 적층 시 동일한 효율을 적용하였다. 동일한 열원을 적용한 해석 결과는 Fig. 59 와 같다.

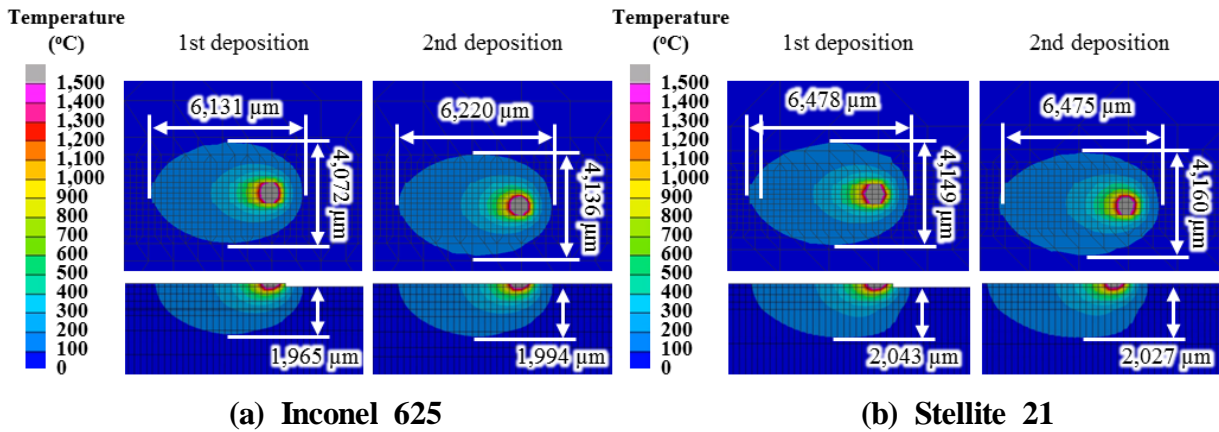


Fig. 59 Variation of temperature distributions in the vicinity of the molten pool according to a successive deposition

Inconel 625 및 Stellite 21 소재의 이열 비드 해석을 통해 첫 번째와 두 번째 비드 적층 시 온도 분포의 폭, 길이 및 깊이를 비교하였다. Inconel 625 의 경우 두 번째 비드 적층 시 온도 분포의 폭, 길이 및 깊이 모두 증가하였다. 반면에 Stellite 21 의 경우 온도 분포의 폭은 증가 하였지만 길이 및 깊이는 감소하였다. 이열 비드 적층 시 온도 변화를 관찰하기 위해 적층 경계부에서 시간에 따른 온도 변화 그래프를 Fig. 60 과 같이 도출하였다.

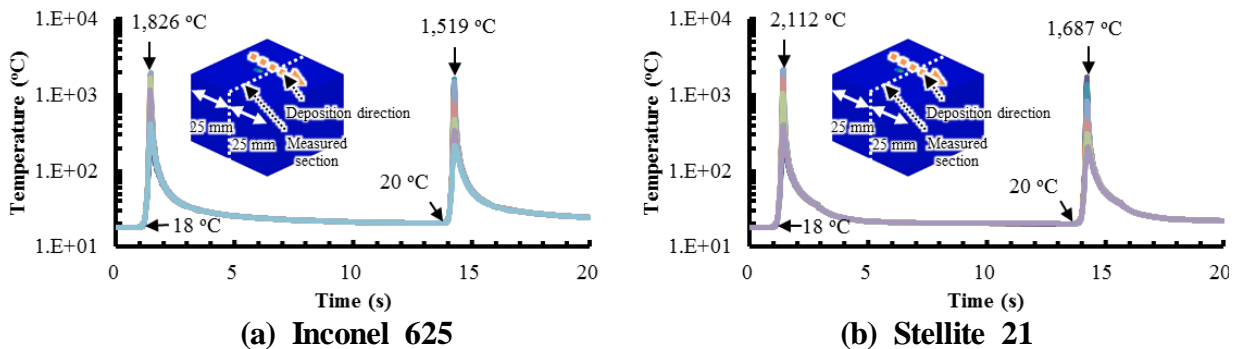


Fig. 60 Temperature-time curves for the double bead deposition

두 소재 모두 적층이 진행됨에 따라 최소온도는 증가하였고 최대온도는 감소하였다. 최대온도는 Inconel 625 가 더 높고 적층이 진행됨에 따라 온도 감소 폭이 더 크게 나타났다. 이열 비드 해석 결과를 통해 적층 소재에 따라 적층 시 열전달 현상이 다르게 나타남을 알 수 있으며 첫 번째 적층 시 생성된 비드가 연속적인 적층에 따라 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

이열 비드 적층 시 방향 및 패스간 시간에 따른 영향성을 분석하기 위해 적층 방향 및 적층 경로에 따른 이열 비드 적층 열전달 해석을 진행하였다. 단일 방향 적층의 경우 두 번째 비드 적층을 위해 레이저의 위치를 이동할 시간이 필요하기 때문에 최소 패스간 시간을 1 초로 설정하였다. 소재, 방향 및 패스간 시간에 따른 해석 결과는 Fig. 61 과 같다. 온도 분포 측정은 시편의 중앙부인 20 mm 지점에서 수행하였다.

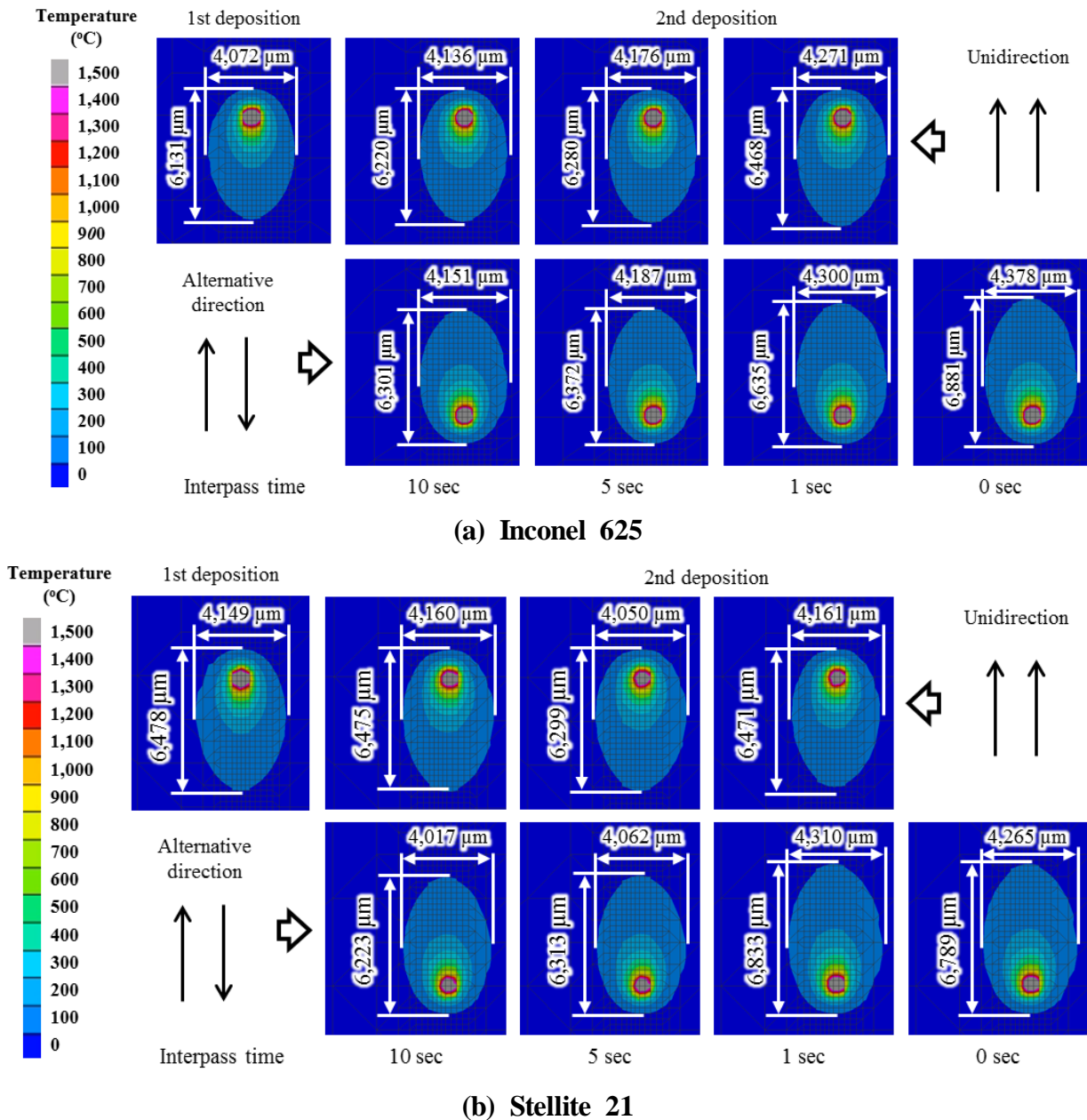
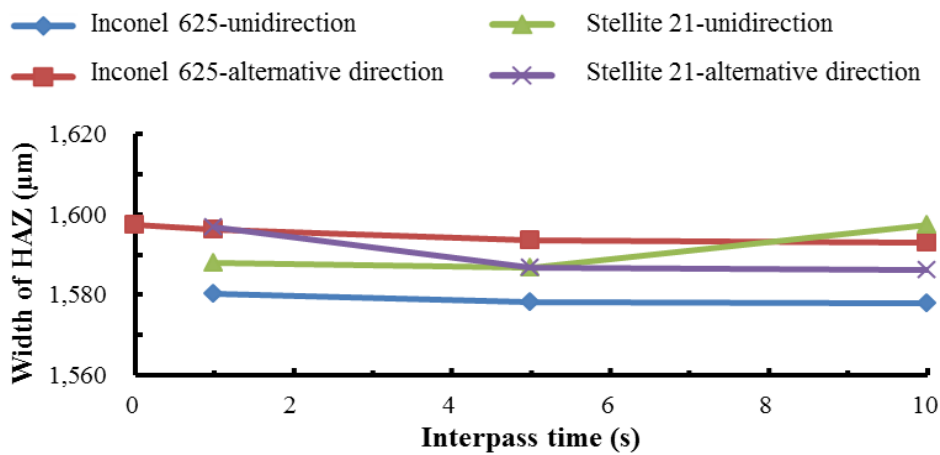


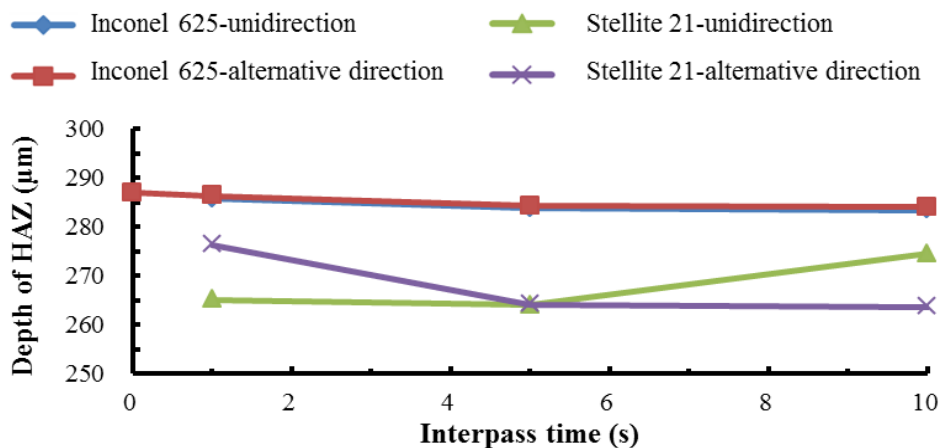
Fig. 61 Influence of the deposition path and the interpass time on temperature distribution in the vicinity of the irradiated region by the heat flux

Inconel 625 소재 적층 시 Fig. 61 의 (a) 와 같이 100 °C 부분의 온도 분포 크기를 비교하였을 때 첫 번째 비드 적층에 비해 연속적인 적층 시 온도 분포의 크기가 증가하였으며 패스간 시간이 감소할수록 크기가 증가하였다. 또한 단일 방향 적층 시 보다 교차로 적층을 진행할 때 크기가 증가함을 알 수 있었다.

Stellite 21 소재 적층 시 Fig. 61 의 (b) 와 같이 단일 방향 적층의 경우 Inconel 625 적층과 동일하게 첫 번째 비드 적층에 비해 연속적인 비드 적층 시 온도 분포 크기가 증가하였다. 단일 방향 적층 시 패스간 시간이 감소함에 따라 온도 분포는 감소하였다가 증가하였다. 교차로 적층을 진행할 때에는 첫 번째 비드 적층 시 보다 온도 분포 크기는 감소하였고 패스간 시간이 감소할수록 증가하였다가 다시 감소하였다.



(a) Width of HAZ



(b) Depth of HAZ

Fig. 62 Effects of the interpass time, the deposition path and the deposition material on the width and the depth of HAZ

Fig. 62 와 같이 두 소재의 열 영향부의 폭과 깊이를 측정하였을 때 100 °C 부분의 온도 분포 크기 측정 시와 동일한 경향이 나타났다. 패스간 시간 및 적층 경로에 따라 열 영향부 폭은 최대 1597 μm , 최소 1578 μm 으로 19 μm 차이가 났으며 깊이는 최대 287 μm , 최소 283 μm 으로 4 μm 차이가 났다. Stellite 21 소재의 경우 폭은 최대 1597 μm , 최소 1586 μm 으로 11 μm 차이가 났으며 깊이는 최대 276 μm , 최소 263 μm 로 13 μm 차이가 났다. 이러한 경향을 보았을 때 Inconel 625 소재의 열영향부 폭은 패스간 시간 보다는 경로에 영향을 더 받으며 깊이 방향으로는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. Stellite 21 소재의 경우 열영향부의 폭과 깊이가 비슷한 차이를 보이고 적층 경로와 패스간 시간에 영향을 크게 받는 것으로 사료된다. 경로와 패스간 시간에 따른 영향을 관찰하기 위해 저온 영역에서의 해석 결과를 Fig. 63 과 같이 도출하였다.

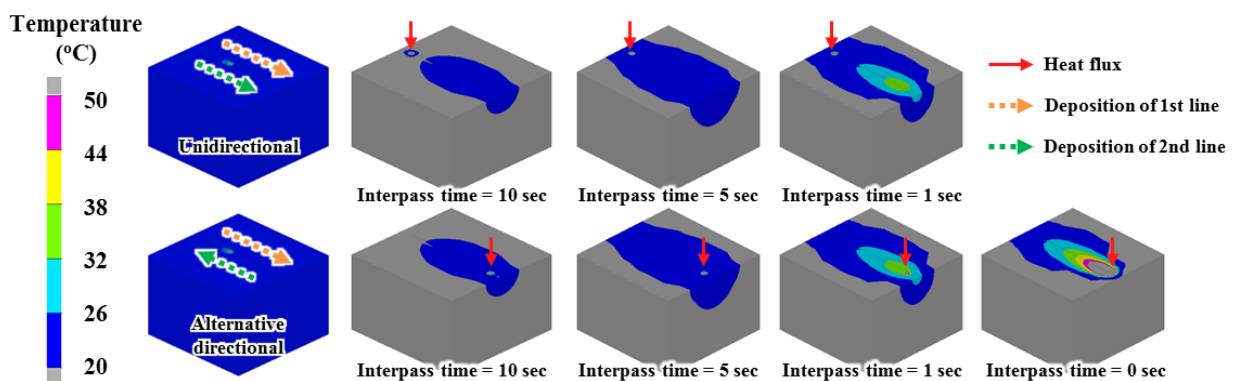
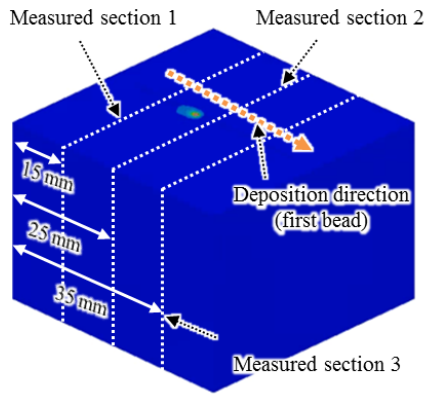
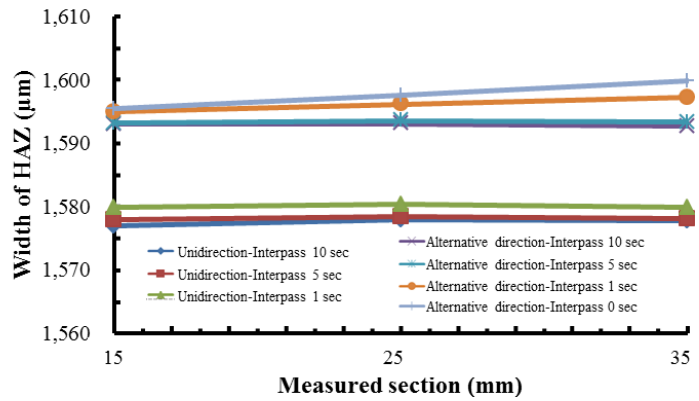


Fig. 63 Effects of the deposition path and the interpass time on the formation of a low temperature region (Inconel 625)

저온 영역에서 두 번째 비드 적층시의 적층 시작 온도를 관찰하였을 때 단일 방향 적층은 패스간 시간에 따라 비슷한 온도인 20 - 26 °C 영역에서 적층이 시작되었다. 교차 방향으로 적층을 진행할 경우 패스간 시간에 따라 20 - 26 °C 부터 50 °C 이상의 온도까지 적층 시작 온도에 차이를 보였다. 또한 적층 경로에 따른 영향을 관찰하기 위해 Fig. 64 와 같이 적층 시작 경로에서부터 10, 20 및 30 mm 에서 데이터를 도출하였다.



(a) Measured region



(b) Width of HAZ

Fig. 64 Influence of the deposition path and the interpass time on the width of HAZ and the deposition direction

적층 경로 및 패스간 시간에 따른 차이를 관찰하기 위하여 비교적 차이가 크게 나타나는 열영향부의 폭을 기준으로 각 위치별 데이터를 도출하였다. 교차로 적층을 진행할 경우 패스간 시간에 영향을 많이 받았으며 패스간 시간 0 초에서 열영향부 폭 차이는 최대 $8\mu\text{m}$ 로 도출되었다. 이열 비드 적층 시 상변화를 관찰하기 위하여 Fig. 65 와 같이 적층이 진행됨에 따른 마르텐사이트 조직 변화를 관찰하였다.

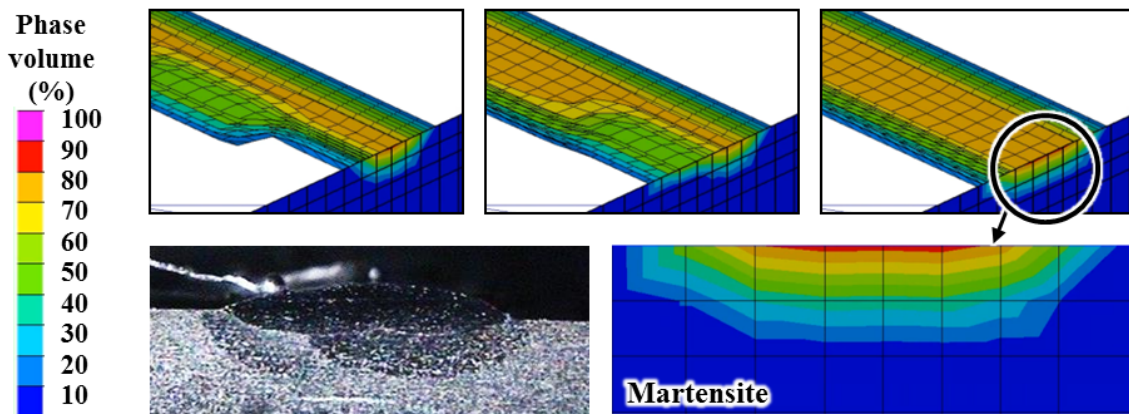


Fig. 65 Evolution of martensite phase during the deposition of double lines (Inconel 625)

두 번째 비드 적층 시 열전달에 의한 상변화는 단일 비드 적층 시 형성된 마르텐사이트 조직에 영향을 주었으며 적층 공정 수행 후에는 단일 비드 적층 시와 동일하게 마르텐사이트 조직이 형성 된 것을 알 수 있었다. 연속적인 적층과는 무관하게 적층 경계부에서 마르텐사이트 조직은 80 % 이상 형성 된 것으로 나타났다.

3. 다열 비드 열전달 해석 결과 및 비교 분석

다열 비드 열전달 해석에서는 평면 적층 시 재료에 따른 온도 분포, 적층 경로에 따른 온도 분포 및 기저부의 상변화에 따른 온도 분포 비교를 진행하고자 한다. Inconel 625 및 Stellite 21 적층에 대한 다열 비드 열전달 해석 결과는 Fig. 66 및 Fig. 67 과 같다.

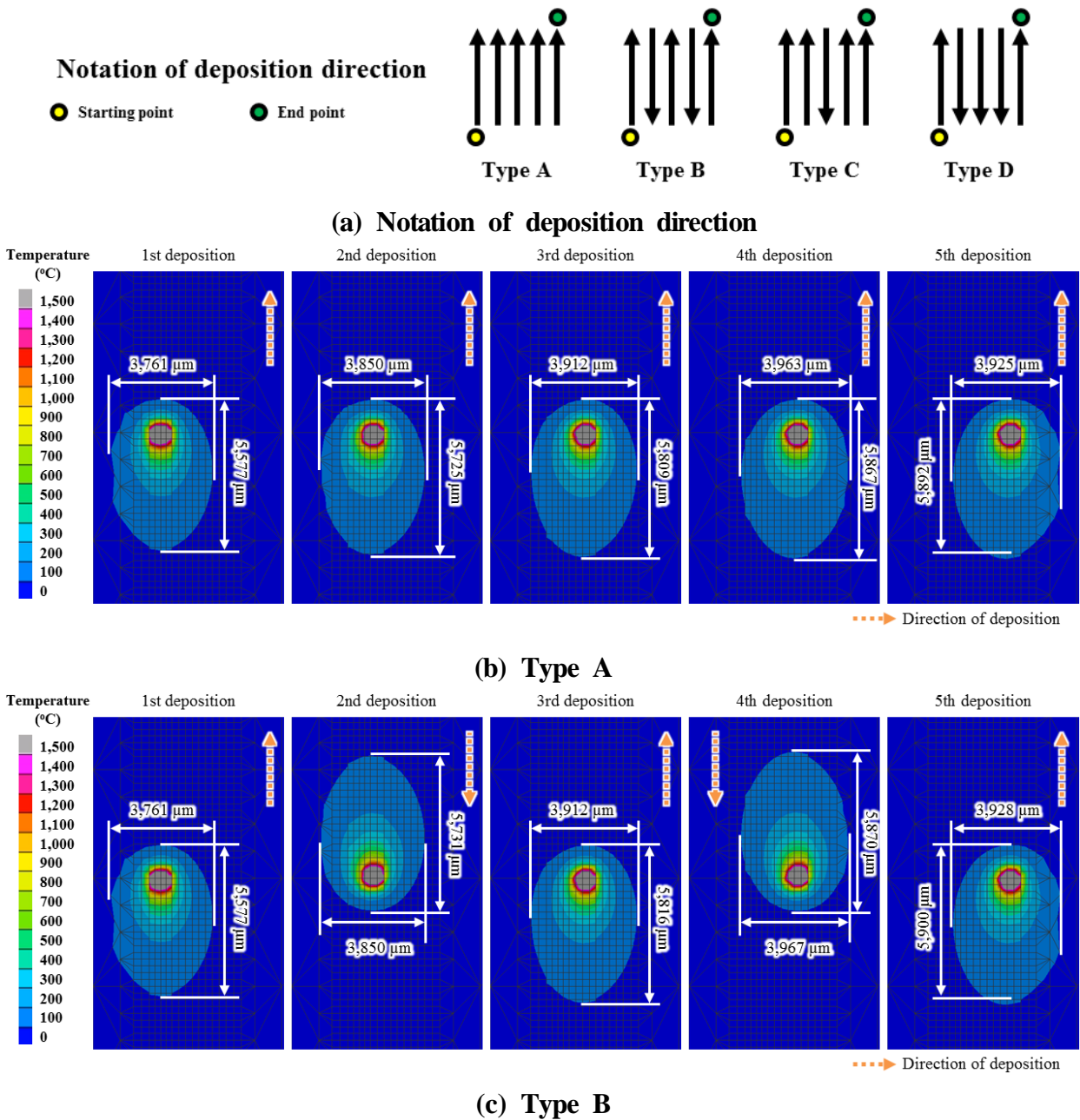
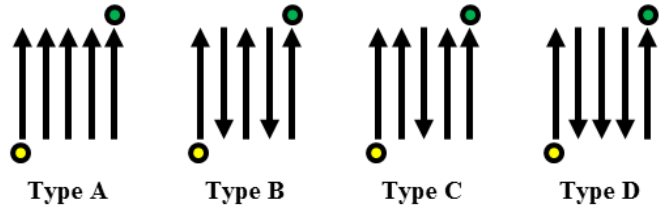


Fig. 66 Variation of temperature distribution in the vicinity of the deposited region (Deposition of multi lines, Inconel 625)

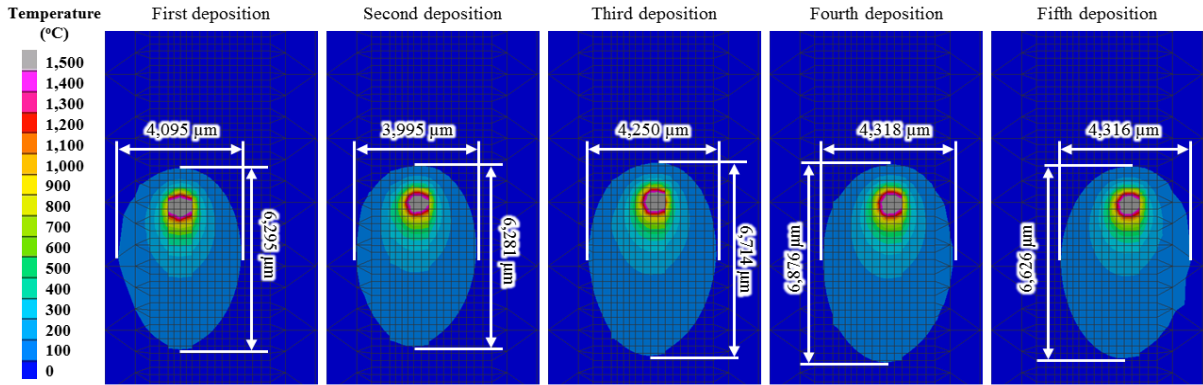
Notation of deposition direction

● Starting point

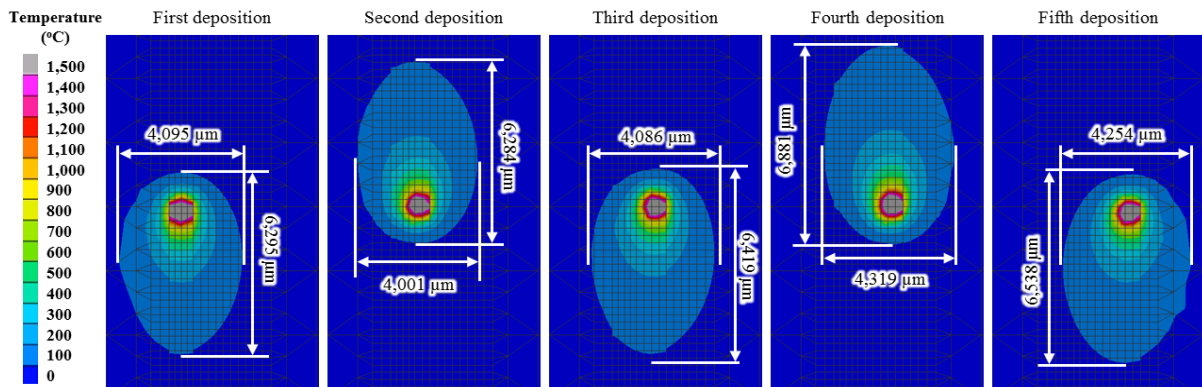
● End point



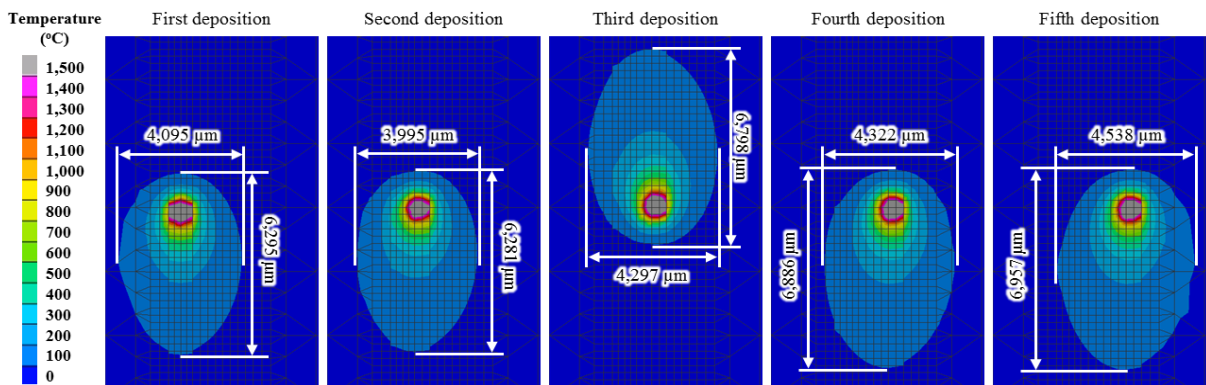
(a) Notation of deposition direction



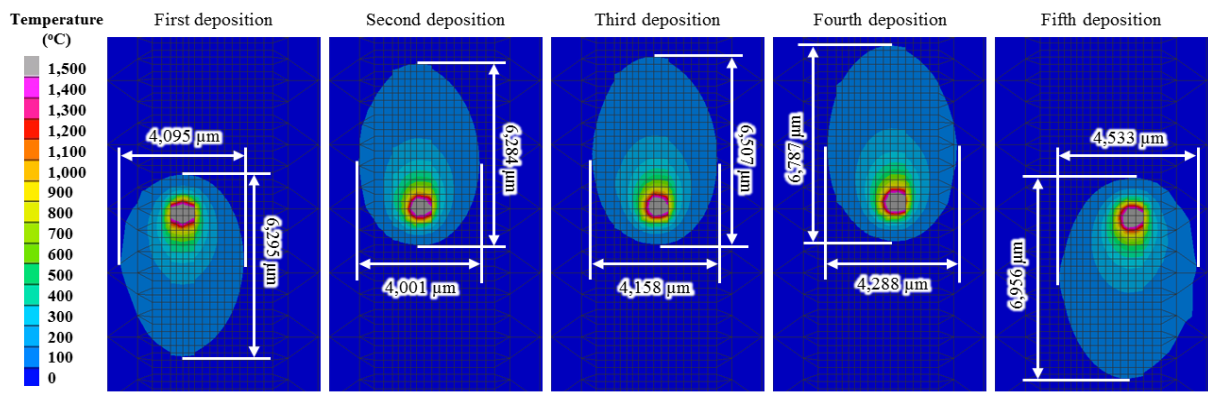
(b) Type A



(c) Type B



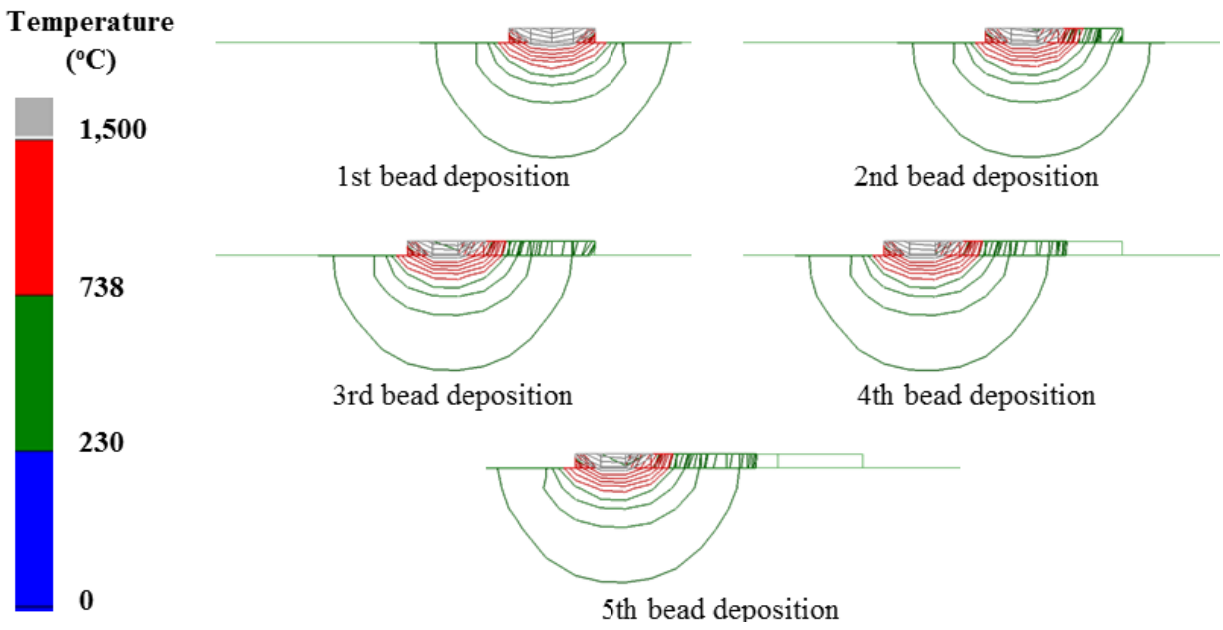
(d) Type C



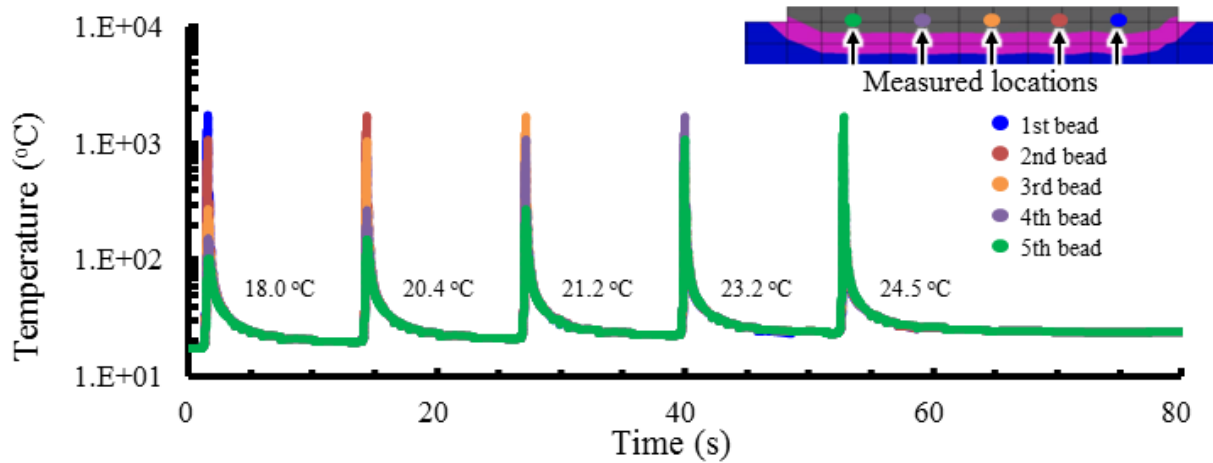
(e) Type D

Fig. 67 Variation of temperature distribution in the vicinity of the deposited region (Deposition of multi lines, Stellite 21)

다열비드 해석에 적용한 적층 경로는 Inconel 625 의 경우 단일 방향인 Type A 와 교차방향인 Type B 패턴으로 설정하였고, Stellite 21 의 경우 적층 경로에 영향을 많이 받기 때문에 Inconel 625 에서 적용한 패턴 외 Type C 및 Type D 패턴을 추가로 적용하여 해석을 진행하였다. 각 패턴에 따른 해석결과는 Fig. 66 및 Fig. 67 과 같으며 모든 해석 조건에서 적층 열이 증가할수록 온도 분포의 폭과 길이가 증가하는 경향을 보였다. Inconel 625 소재의 경우 일정한 경향을 보이며 증가하였지만 Stellite 21 소재의 경우 세 번째 및 다섯 번째 적층 시 경로에 의한 차이를 보였다.



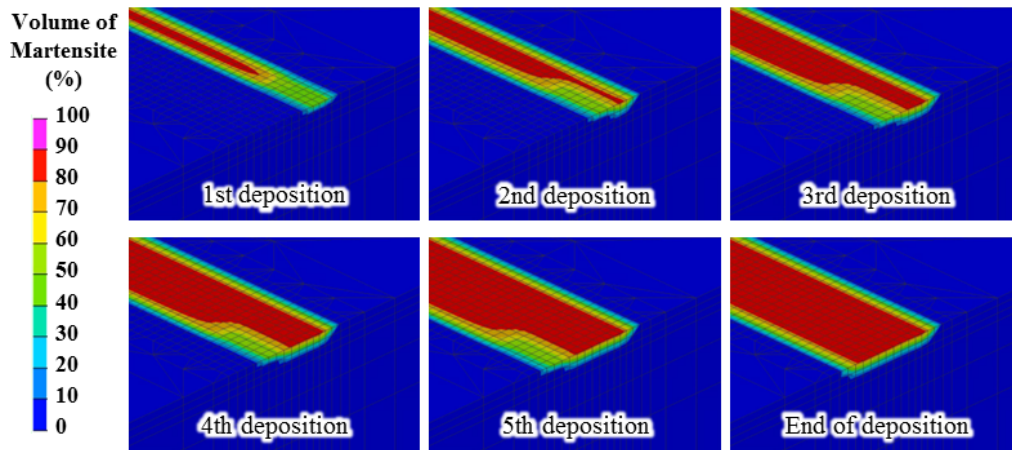
(a) Temperature distributions



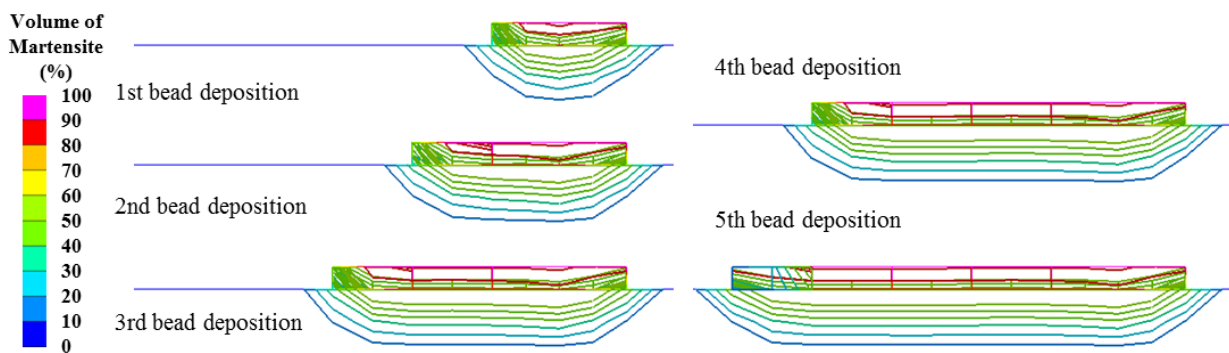
(b) Temperature-time curves for different measured locations

Fig. 68 Temperature distributions and temperature-time curves for different measured regions during the deposition

Fig. 68 (a) 의 온도 분포는 S45C 의 용융점 ($1,500\text{ }^{\circ}\text{C}$), 재결정 온도 ($738\text{ }^{\circ}\text{C}$) 및 시멘타이트의 자기변태점 A0 ($230\text{ }^{\circ}\text{C}$) 를 기준으로 도출하였다. 재결정 온도를 기준으로 세 번째 비드 적층 시 첫 번째 비드에 영향을 주지 않으며 시멘타이트의 자기 변태점을 기준으로 다섯 번째 비드 적층 시부터 첫 번째 비드에 영향을 주지 않는 것으로 도출되었다. 이러한 결과를 토대로 다층 비드 적층 시 다섯 번째 적층부터 추가적인 적층 진행에 따라 정상 상태를 보일 것으로 사료된다. Fig. 68 (b) 는 적층 경계부의 열 이력을 도출한 것이다. 온도 측정 결과 적층이 연속적으로 진행될 때 최소온도는 상승하였다. 최소 온도 상승으로 인해 단일 방향 적층 시 증가하는 온도 분포 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 선에 변화를 주는 것으로 사료된다. 다열 비드 적층 시 상변화를 관찰하기 위하여 Fig. 69 와 같이 적층이 진행에 따른 마르텐사이트 조직 변화, 각 비드 적층 시 마르텐사이트 분포 및 재료와 경로에 따른 조직 변화를 관찰하였다.



(a) ISO view



(b) Section view

Fig. 69 Variation of volume of martensite in the vicinity of the deposited region according to a successive deposition (deposition of multiple beads, Inconel 625)

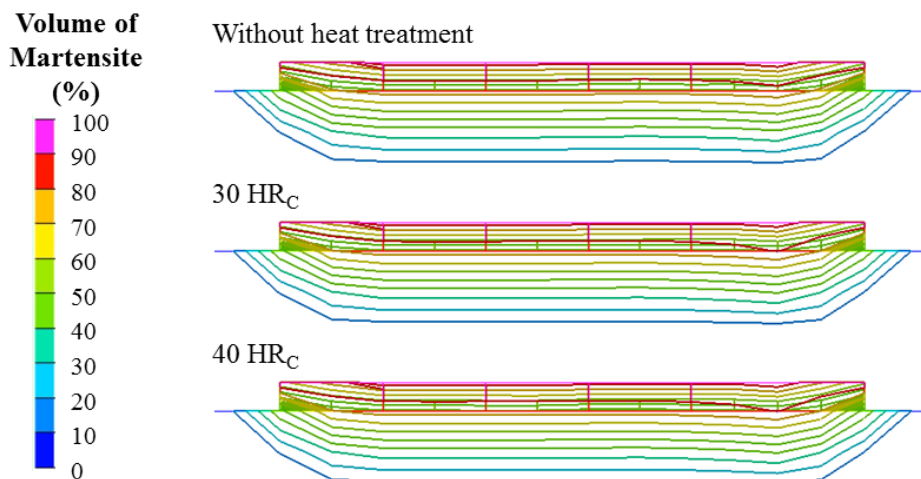


Fig. 70 Influence of the hardness of the substrate on the volume of martensite (deposition of multiple beads, Inconel 625)

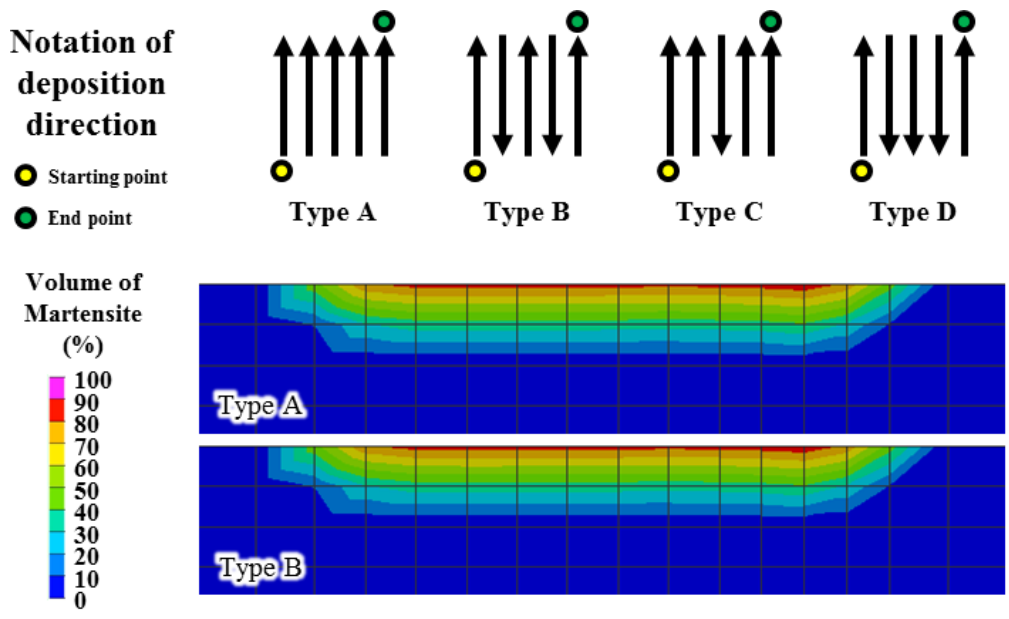


Fig. 71 Effects of the deposition path on the volume of martensite in the deposition of multiple beads (Inconel 625)

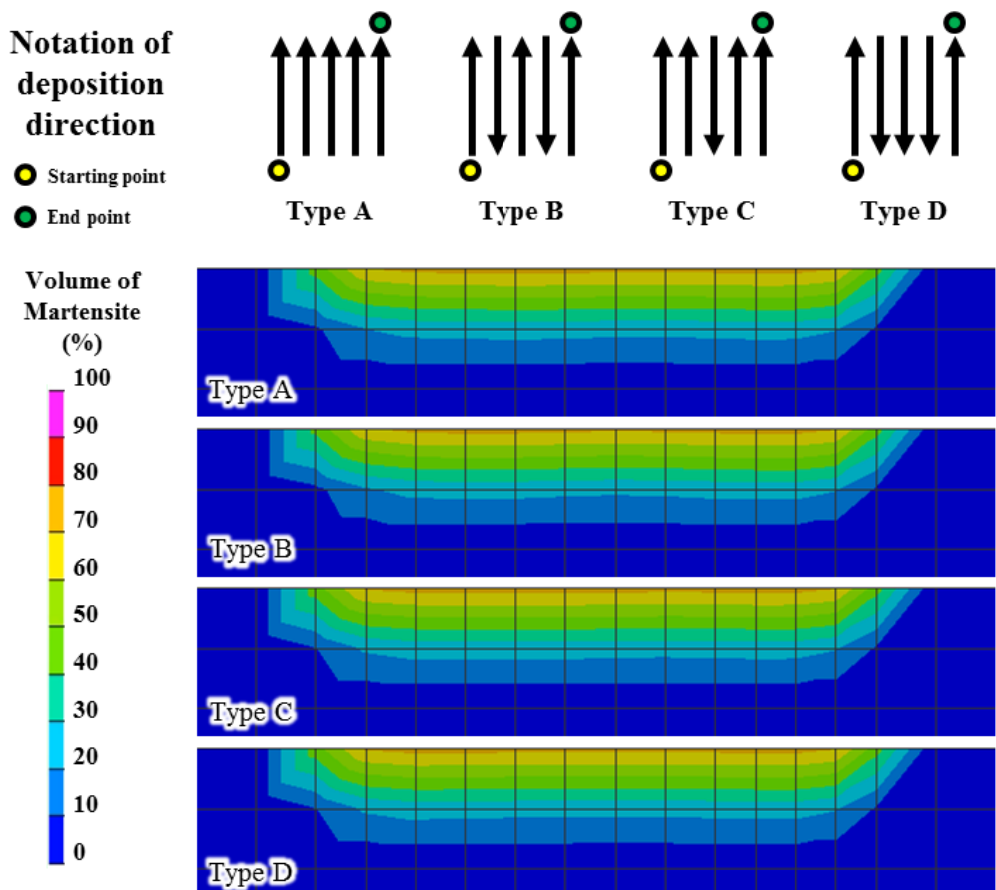


Fig. 72 Effects of the deposition path on the volume of martensite in the deposition of multiple beads (Stellite 21)

Inconel 625 소재 다열 적층 시 이열 비드와 동일하게 기존에 형성된 마르텐사이트 조직에 영향을 주었지만 냉각 과정을 거치면서 마르텐사이트 조직이 형성되어 마르텐사이트 분포는 증가하였다. Fig. 69 (a) 를 보았을 때 세 번째 비드 적층 시 까지 기존에 형성된 마르텐사이트 조직에 영향을 줄 것으로 사료되었다. Fig. 69 (b) 와 같이 적층부 단면에서 마르텐사이트 상분포를 보았을 때 연속적으로 적층이 진행됨에 따라 마르텐사이트 조직이 일정하게 나타나는 것으로 사료되었다. Fig. 70 은 Inconel 625 소재 단일방향 적층 시 기저부 경도에 따른 마르텐사이트 상 분포를 나타낸 결과이다. 기저부 경도 증가와는 무관하게 동일한 마르텐사이트 조직이 형성되는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 S45C 소재는 열처리에 관계없이 마르텐사이트 조직이 형성되는 것으로 사료된다. Fig. 71 및 Fig. 72 는 Inconel 625 및 Stellite 21 소재의 적층 경로에 따른 마르텐사이트 분포를 나타낸 결과이다. Inconel 625 소재의 마르텐사이트 분율이 Stellite 21 소재보다 적층 경계부에서 더 높게 도출되었으며 적층 경로에 관계없이 거의 동일하게 나타났다. 적층 경로 및 패스간 시간에 영향을 많이 받는 Stellite 21 소재에서 마르텐사이트 분포는 약간의 차이가 나타났으며 Type D 패턴에서 가장 균일한 마르텐사이트 분포를 보였다. 이를 통해 단층 적층 시 마르텐사이트 조직의 형성은 적층 경로에 따른 영향이 거의 없을 것으로 사료되었다.

4. 다층 비드 열전달 해석 결과 및 비교 분석

다층 비드 열전달 해석에서는 다층 적층 시 층별 온도 분포, 기저부의 상변화 및 다층 적층 시 정상상태 분석을 진행하고자 한다. Inconel 625 적층에 대한 다열 비드 열전달 해석 결과는 Fig. 64 와 같다.

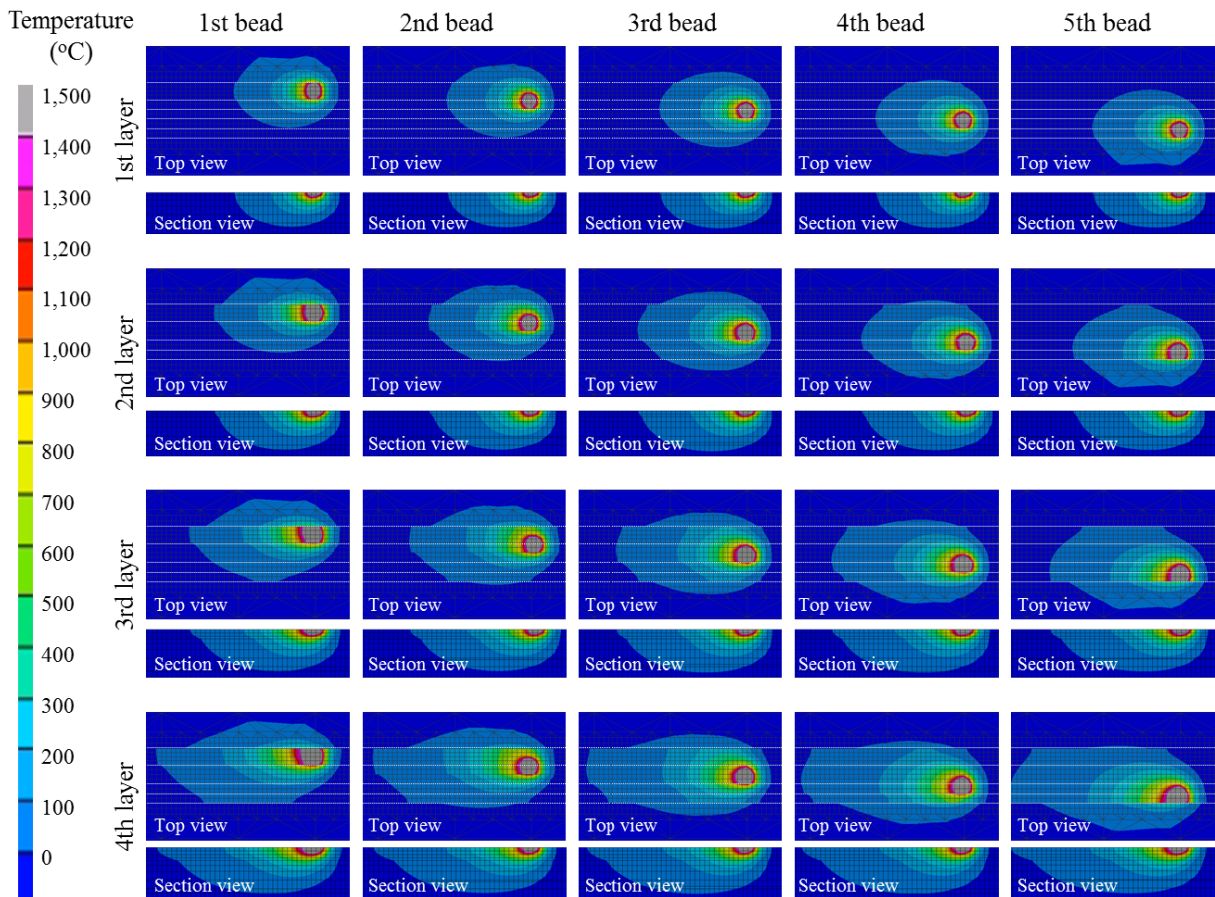


Fig. 73 Variation of temperature distribution in the vicinity of the deposited region (Deposition of multi layers, Inconel 625)

Fig. 73 은 Inconel 625 소재 다층 비드 적층 시 각 적층에 대한 온도 분포이다. 적층 층이 동일할 경우 온도분포의 크기는 거의 차이가 나지 않았으며 적층 층이 증가할수록 온도분포의 길이 및 깊이가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 적층 층이 증가할수록 대류에 의한 열손실에 비해 전도에 의한 열전달이 많이 일어나기 때문으로 사료된다. 또한 다층 비드 적층 시 열 영향을 분석하기 위하여 Fig. 74 와 같이 재결정 온도를 기준으로 결과를 도출하였다.

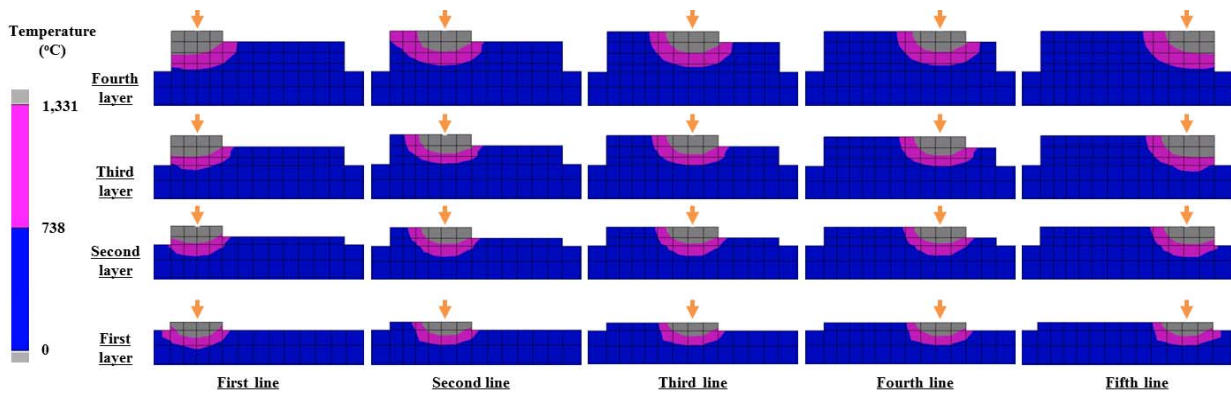


Fig. 74 Variation of the formation of HAZ according to a successive deposition (Inconel 625)

재결정 온도를 기준으로 단면부 온도분포를 보았을 때 단층 적층 시 적층 경계부에 재결정 온도를 넘는 온도 분포가 도출되었다. 적층 비드 수 증가에 따라 세 번째 비드 적층 시부터 각 층에서 정상상태를 보였다. 하지만 적층 층이 증가하면서 적층 끝단부에서 더 깊은 열 영향부가 도출되었으며 세 번째 층 적층 까지 적층 경계부에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다. 이는 Fig. 75 와 같이 적층 경계부에서 도출한 열 이력을 통해 알 수 있다.

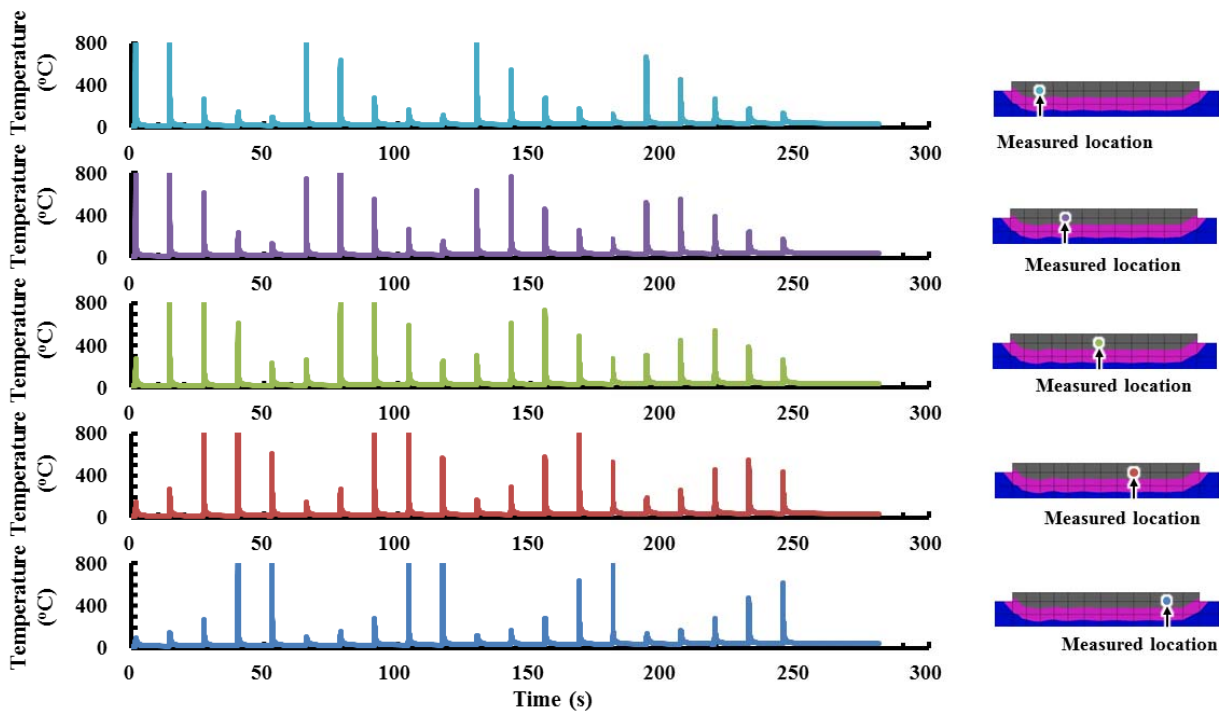
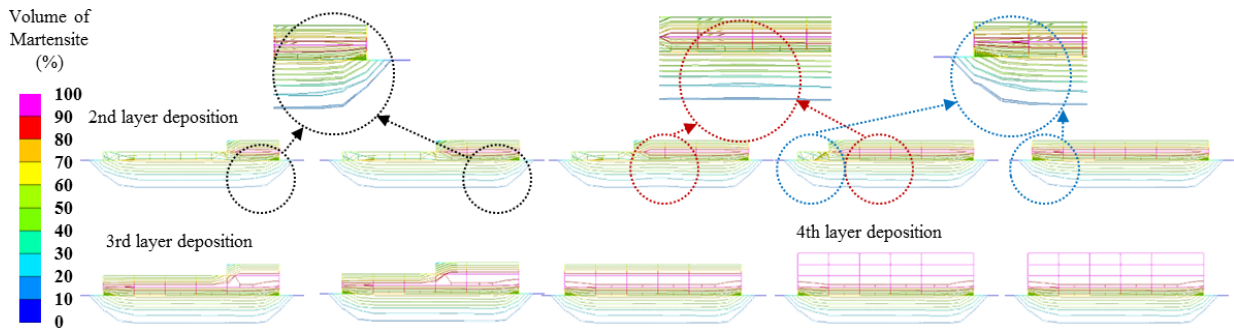
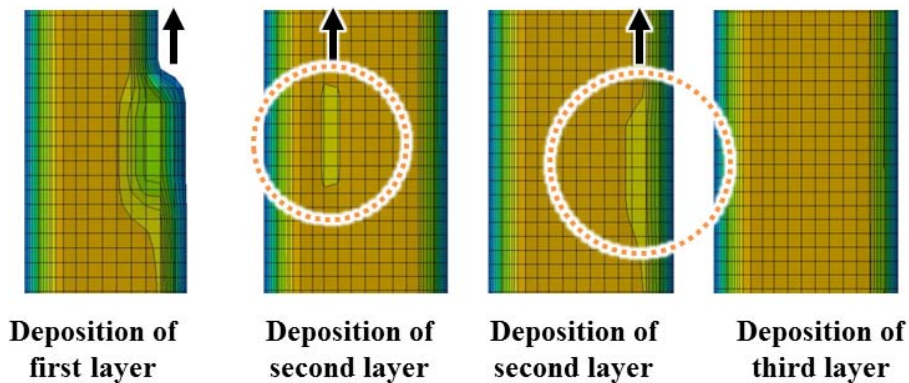


Fig. 75 Temperature-time curves for different measured locations

Fig. 75 는 각 비드에서의 열 이력을 도출한 결과이다. 적층 시 인접한 부분의 비드에 영향을 주며 세 번째 층 적층까지 재결정 온도 이상의 열 이력을 받는 것으로 나타났다. 다층 비드 적층 시 상변화를 관찰하기 위하여 Fig. 76 과 같이 적층이 진행됨에 따른 마르텐사이트 조직 변화를 관찰하였다.



(a) Section view



(b) Top view

Fig. 76 Volume of martensite during a successive deposition of multiple lined and layers

Fig. 76 (a) 와 같이 단면에서 마르텐사이트 분포를 관찰하였을 때 두 번째 층 적층 시 기존에 단층 적층 시 형성되어있던 마르텐사이트 조직에 영향을 주었다. 마르텐사이트 분포는 연속적인 적층에 따라 기존 분포와 동일하게 형성되었으며 끝단부에서는 마르텐사이트 분포가 증가하였다. 마르텐사이트 분율이 20 % 일 때 차이가 가장 크게 나타났으나 기존에 형성된 조직과 큰 차이를 나타내지 않았다. Fig. 76 (b) 와 같이 기저부 상면에서 적층 시 마르텐사이트 분포를 비교한 경우 두 번째 층 적층 시 기저부 조직 형성에 영향을 주었으며 세 번째 층 적층부터 영향은 나타나지 않았다.

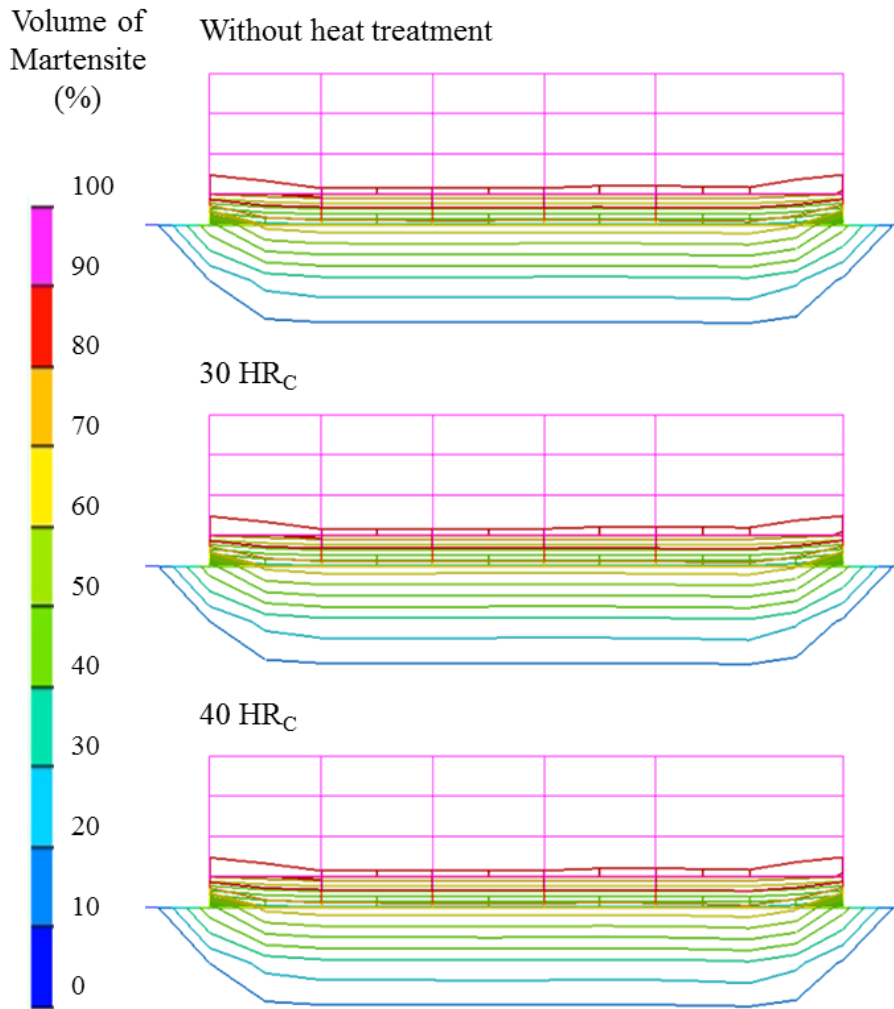
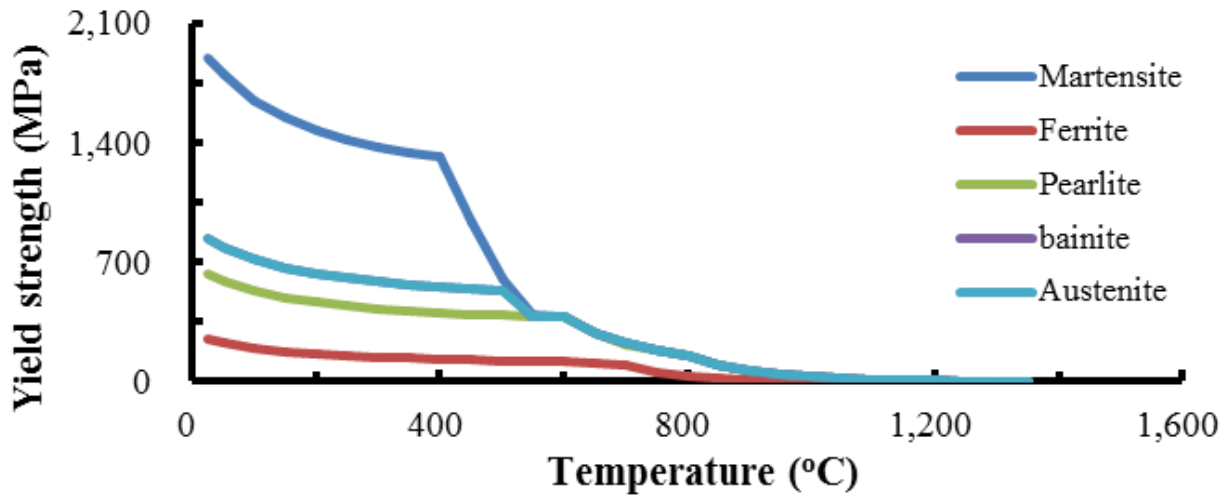


Fig. 77 Effects of the heat treatment of the volume of martensite after the depositions of multiple lines and layers (Inconel 625)

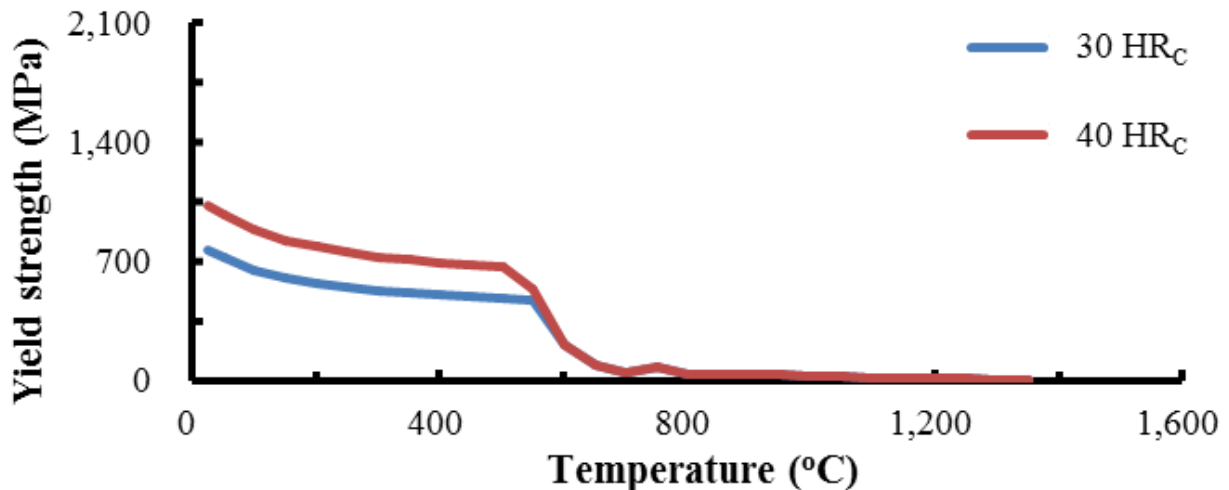
Fig. 77 과 같이 경도에 따른 해석 결과를 비교한 경우 열처리에 따른 마르텐사이트 체적 분율 분포 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 이로부터 마르텐 사이트 형성은 첫 번째 층 적층 시 온도 분포 및 이력에 영향을 크게 받으며, 다층 적층 시 발생하는 온도분포와 이력에는 영향을 적게 받음을 알 수 있었다.

제 2 절 열응력 해석 결과 및 특성 분석

단일, 이열, 다열 및 다층 비드 적층에 대한 열응력 해석을 진행하고 Von-Mises 응력, 주응력 및 변형을 관찰하였다. Von-Mises 응력은 물체의 각 지점에서 응력 성분들에 의한 비틀림 에너지의 크기를 나타내며 물체의 파괴를 예측하는 보편적인 기준이 된다. 따라서 본 열응력 해석에서의 파단 조건은 Von-Mises 응력으로 도출하였다. 주응력은 각 지점에서의 인장과 압축을 판단하고 각 값을 비교하기 위해 도출하였으며 응력이 가해지는 부분의 변형을 토대로 응력 해석 결과를 도출하였다.



(a) Effects of phase



(b) Effects of hardness

Fig. 78 Yield strength-temperature curve

Fig. 78 (a) 는 각 상에 따른 항복 강도이다. 이는 각 상의 강도와 관련이 있으며 가장 강도와 경도가 높게 측정되는 마르텐사이트 조직에서 높은 항복 강도 값이 관찰되었다. Fig. 78 (b) 는 열처리에 따른 항복 강도이다. 열처리를 수행할 경우 기저부의 상은 트루사이트 및 소르바이트 상으로 변화하게 되고 이에 따라 S45C 의 기본 상인 페라이트와 펄라이트 상의 항복 강도보다 높은 항복 강도가 도출되는 원인이 된다.

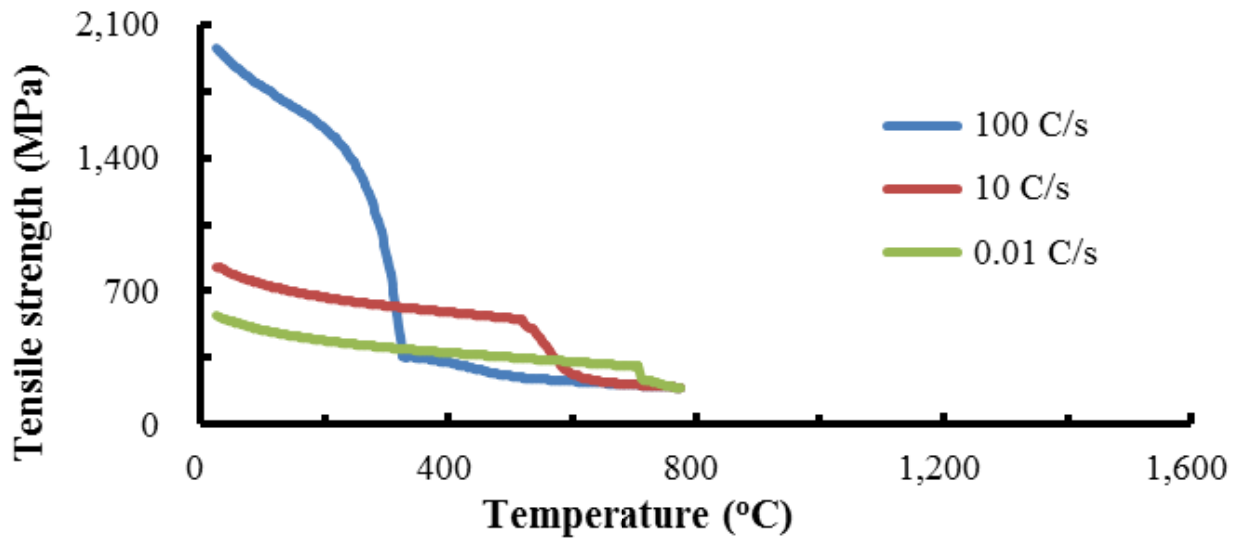
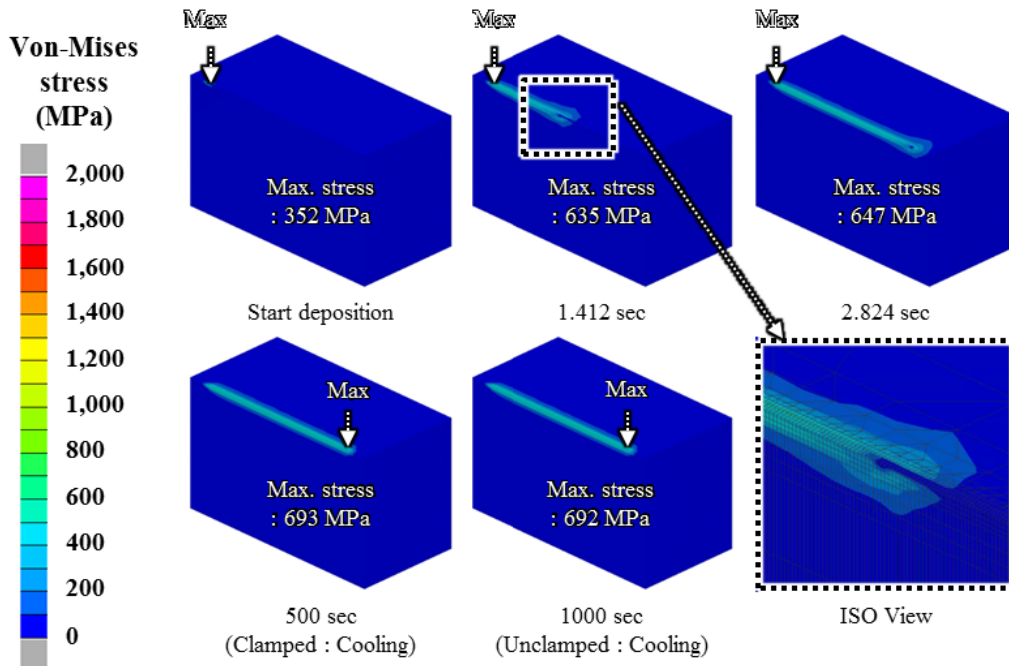


Fig. 79 Tensile strength-temperature curves for different cooling rates

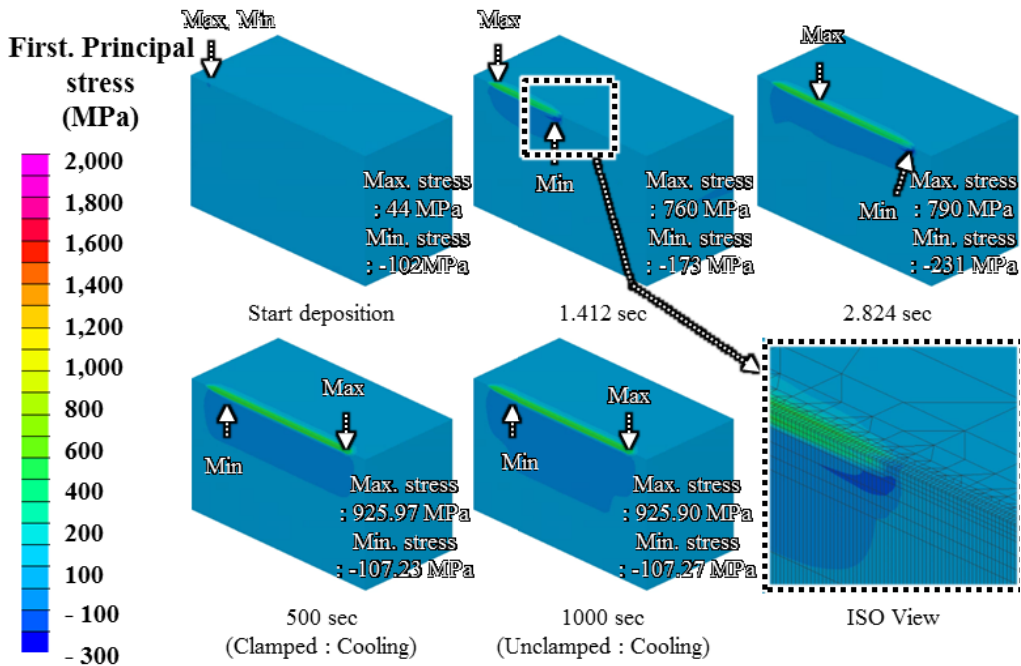
Fig. 79 는 기저부의 냉각 속도에 따른 인장 강도 (Tensile strength) 그래프이다. 냉각속도 0.01 °C/s 일 경우 가장 낮은 인장 강도를 나타내었으며 냉각속도 0.01 °C/s 일 경우 가장 높은 인장 강도를 나타내었다. 냉각속도가 느릴 경우 Fig. 78 (a) 상별 항복강도 그래프와 비교해 보았을 때 페라이트와 펄라이트 사이의 인장 강도 값이 도출 되었으며 냉각속도가 급격할 경우 마르텐사이트 조직의 항복강도와 유사한 인장 강도 값이 도출되었다. 이는 S45C 와 같은 탄소강의 냉각 속도에 따라 변화하는 상에 의한 것으로 냉각 속도가 급격해질수록 나타나는 마르텐사이트 조직으로 인해 높은 항복 강도가 도출되었다. 이를 통해 국소부위에 급격한 가열 및 냉각이 이루어지는 DMT 공정에서 급격한 열 이력에 의해 나타나는 마르텐사이트 상의 인장 강도를 기준으로 단일, 이열, 다열 및 다층 적층에 대한 열응력 특성분석을 진행하였다.

1. 단일 비드 열응력 해석 결과 및 비교 분석

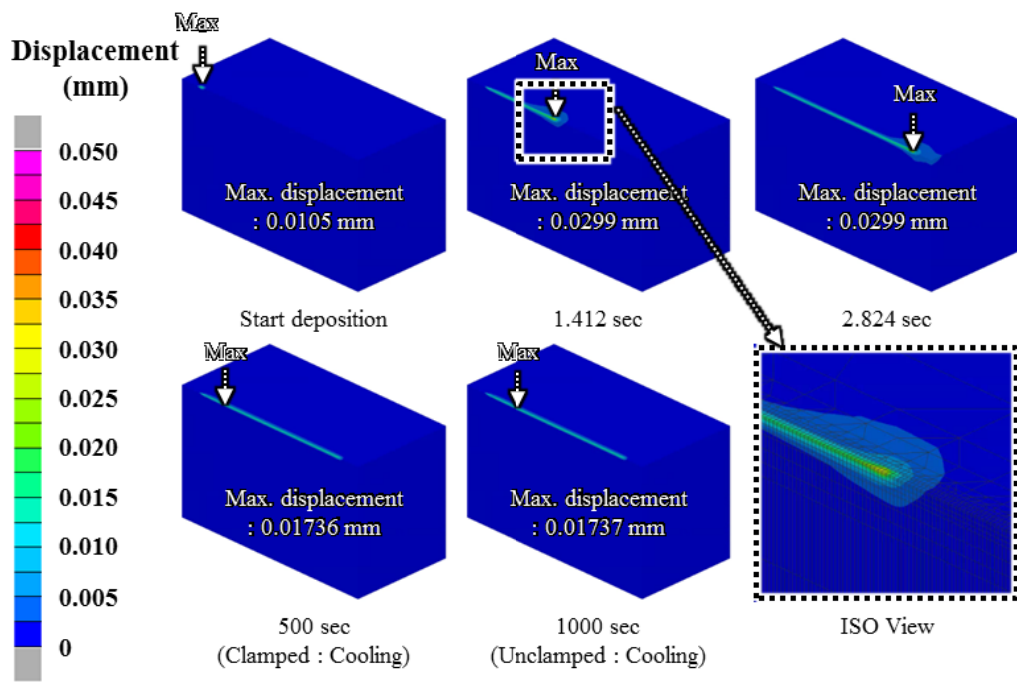
단일 비드 열응력 해석에서는 재료 및 경도 변화에 따른 응력 분포 및 변형 분포를 비교 분석 하고자 한다.



(a) Von-Mises stress



(b) 1st principal stress

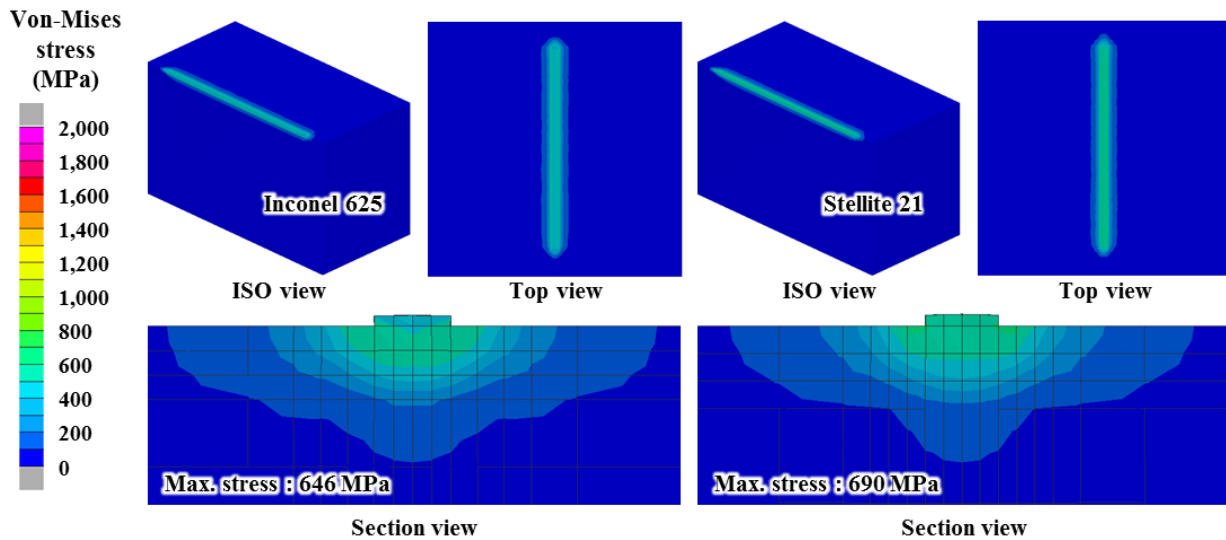


(c) Displacement

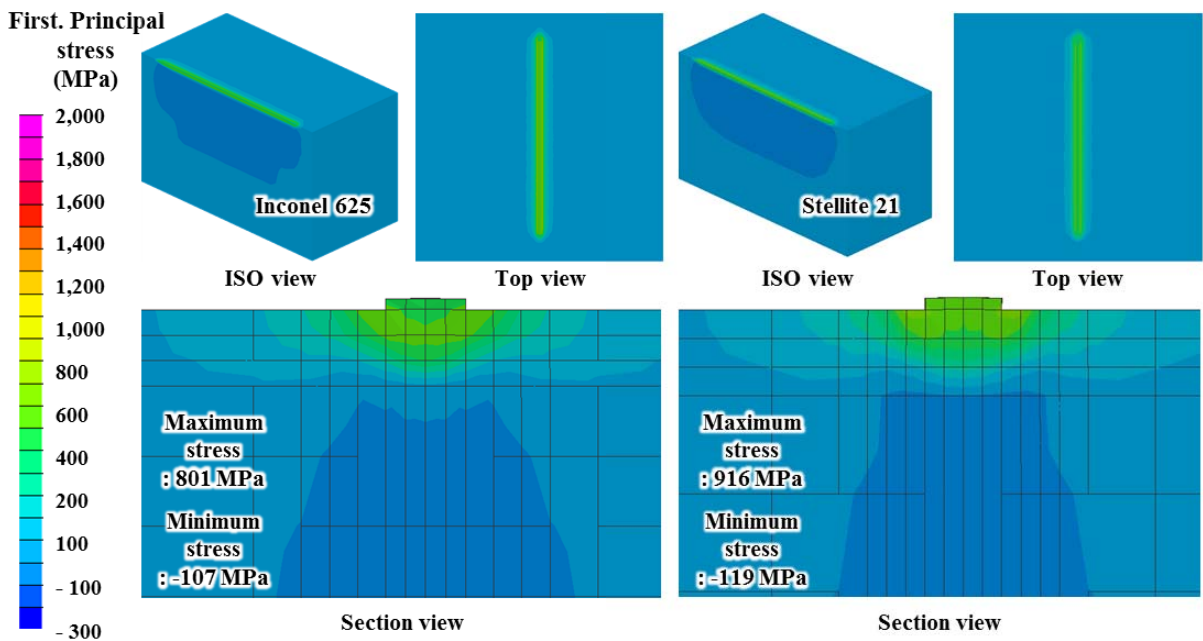
Fig. 80 Residual stress and displacement distributions for different deposition times (Deposition of single bead, Inconel 625)

Fig. 80 (a) 는 단일 비드 적층 시 Von-Mises 응력 분포이다. 단일 비드 적층에 따라 응력은 점점 증가하였고 적층 시작 부분에 최대응력이 나타나는 것은 과도 구간에서 입열량이 많기 때문으로 사료된다. 공정이 끝난 후 500 초 동안 냉각 공정을 수행하였을 때 응력의 변화 없이 일정하게 나타났으며 고정 조건을 해제 하였을 때 응력이 약간 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 80 (b) 는 단일 비드 적층 시 주응력 분포이다. 주응력은 적층 공정 수행에 따라 열원이 적용되는 영역 근처에 인장응력이 나타나며 기저부에는 압축응력이 나타났다. 주응력은 Von-Mises 응력과 동일하게 적층이 진행될수록 인장 응력과 압축 응력 모두 증가하였으며 냉각 공정을 수행함에 따라 인장응력은 증가하고 압축응력은 감소하였다. Fig. 80 (c) 는 단일 비드 적층 시 변형 분포이다. 변형은 열원이 적용되는 부분에서 가장 크게 나타났으며 과도 구간 후 정상상태부터 적층 공정이 끝날 때 까지 일정한 변형을 보였다. 냉각 공정을 수행함에 따라 변형은 감소하였고 고정조건을 해제 하였을 때 증가하는 것으로 나타났다. 적층에 따라 변형이 발생 하였지만 적층부 주위에만 변형이 발생한 것으로 보아 시편의 변형을 고려한 시편설계가 알맞게 되었음을 알 수 있다.

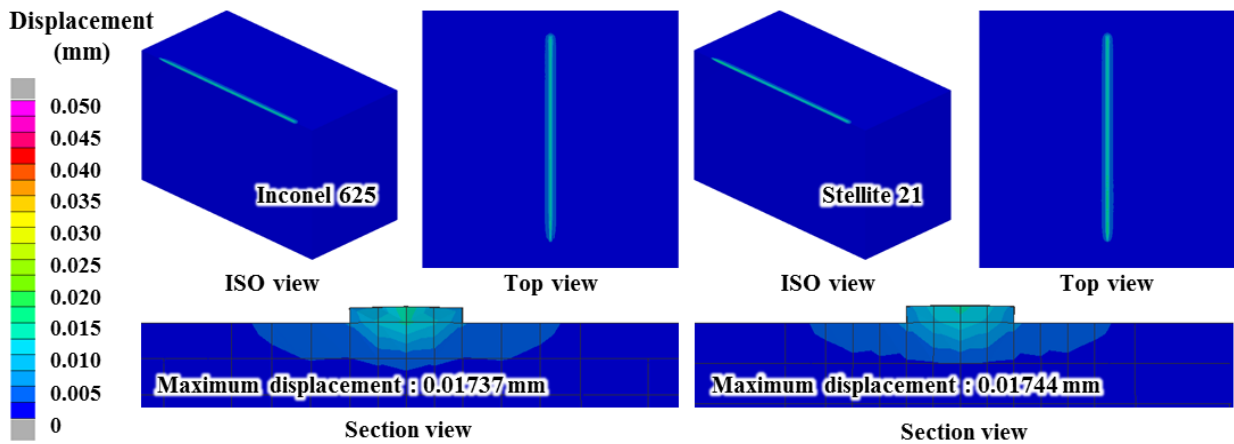
세 가지 결과를 종합해서 보았을 때 적층 공정이 수행됨에 따라 변형 및 응력은 증가하며 냉각 공정을 수행할 경우 감소한다. Von-Mises 응력의 경우 과도 구간에서 응력이 크게 걸리기 때문에 정상상태에서 비교 분석이 필요하다. 시편의 고정 조건을 해제하였을 때 응력 및 변형의 변화는 고정 조건이 응력에 영향을 미치며 탄성회복에 의한 것으로 사료된다. 단일비드 적층 시 적층 재료에 따른 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 81 과 같이 각 재료에 대한 열응력 해석을 수행하였다.



(a) Von-Mises stress



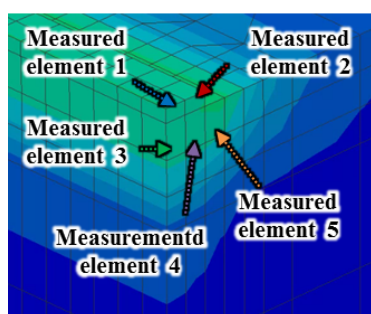
(b) First principal stress



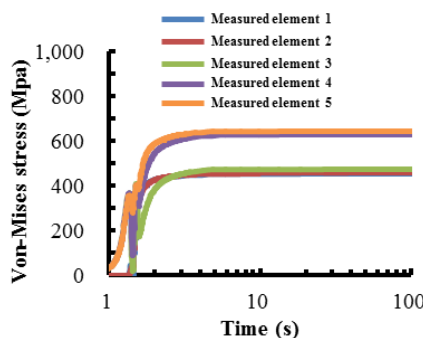
(c) Displacement

Fig. 81 Comparison of residual stress and displacement distributions of the Inconel 625 deposited region and those of the Stellite 21 deposited region (Deposition of single bead)

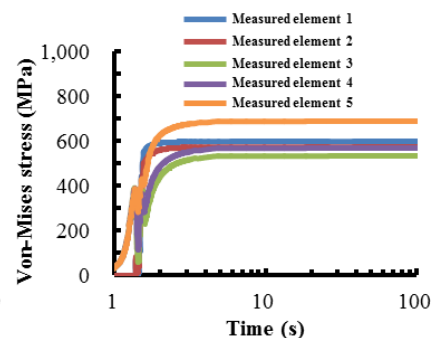
Fig. 81 (a) 와 같이 공정 후 고정조건을 풀었을 때 나타나는 잔류응력과 변형을 정상상태 구간에서 비교해 보았을 때 Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재의 Von-Mises 응력 및 변형은 크게 나타났다. Fig. 81 (b) 와 같이 재료에 따른 주응력을 비교해 보았을 때 Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재의 인장응력은 115 MPa, 압축응력은 12 MPa 크게 나타났다. 고경도 소재 적층 시 압축 보다는 인장응력이 더 크게 걸리는 것을 알 수 있다. Fig. 81 (c) 와 같이 재료에 따른 변형을 비교해 보았을 때 Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재의 변형이 크게 도출되었으며 두 소재 모두 적층된 비드 중앙부 상면에서 가장 크게 도출되었다.



(a) Measured location



(b) Inconel 625



(c) Stellite 21

Fig. 82 Von-Mises stress-time curves for different measured locations (Dposition of single bead)

Fig. 82 와 같이 정상 상태에서 각 소재별로 Von-Mises 응력을 도출한 결과 Von-Mises 응력은 측정 요소 5 에서 가장 크게 나타나 적층 경계부에서 가장 균열에 취약할 것으로 사료된다. 또한 Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재의 강도가 높기 때문에 응력 분포가 전체적으로 높게 측정된 것으로 사료된다. 기저부 열처리에 따른 변화를 관찰하기 위해 각 소재 및 열처리에 따른 열응력 해석을 수행하고 냉각 공정 후 나타나는 잔류응력을 Fig. 83 과 같이 비교하였다.

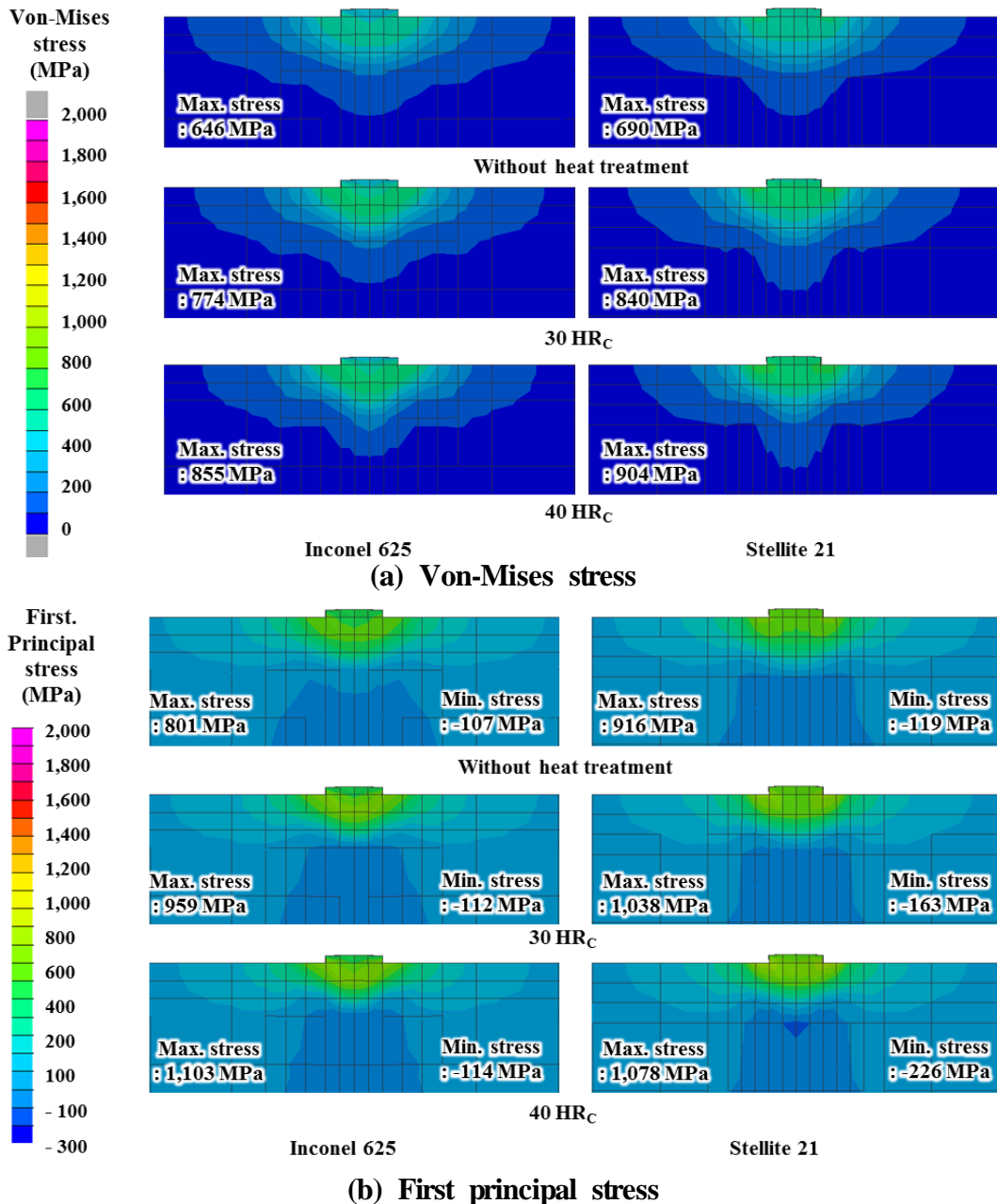
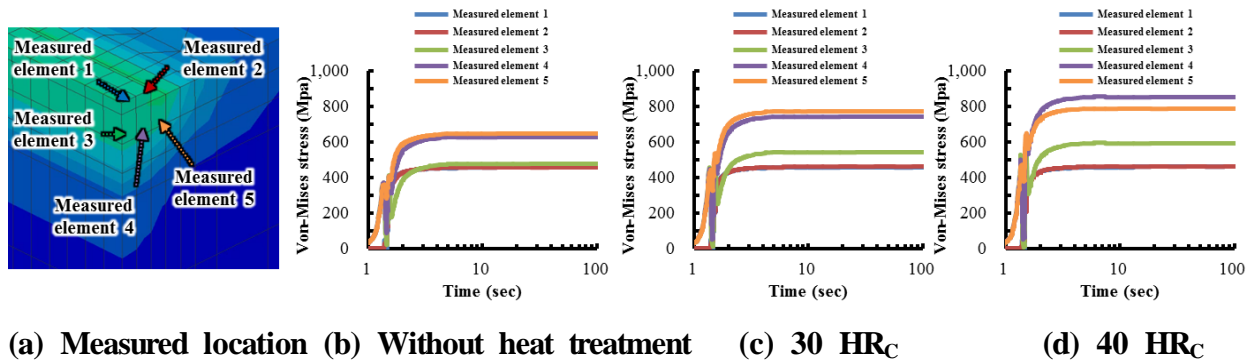
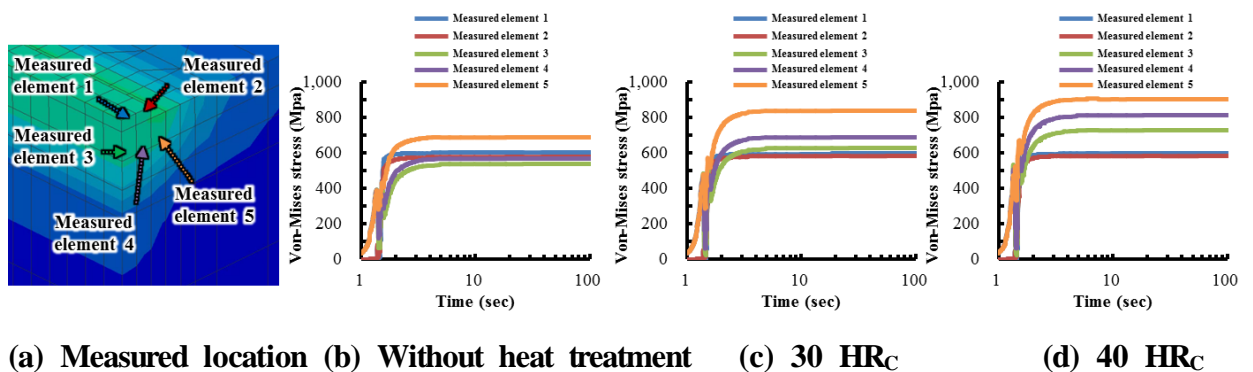


Fig. 83 Influence of the heat treatment of the substrate on residual stress distributions in the vicinity of the deposition region

Fig. 83 (a) 는 재료 및 경도에 따른 Von-Mises 응력 분포이다. 경도가 증가할수록 최대 응력은 증가하며 기저부 및 적층소재가 모두 고 경도일 경우 가장 크게 도출되었다. 온도 분포로 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않았으나 경도가 증가함에 따라 응력이 집중되는 것을 볼 수 있다. Fig. 83 (b) 는 재료 및 경도에 따른 주응력 분포이다. Von-Mises 응력과 동일하게 기저부와 적층 소재 모두 고 경도일 경우 인장 응력 및 압축 응력 모두 가장 크게 도출되었다.



(a) Measured location (b) Without heat treatment (c) 30 HR_C (d) 40 HR_C
Fig. 84 Effects of the heat treatment of the substrate on the Von-Mises stress-time curves (Inconel 625)

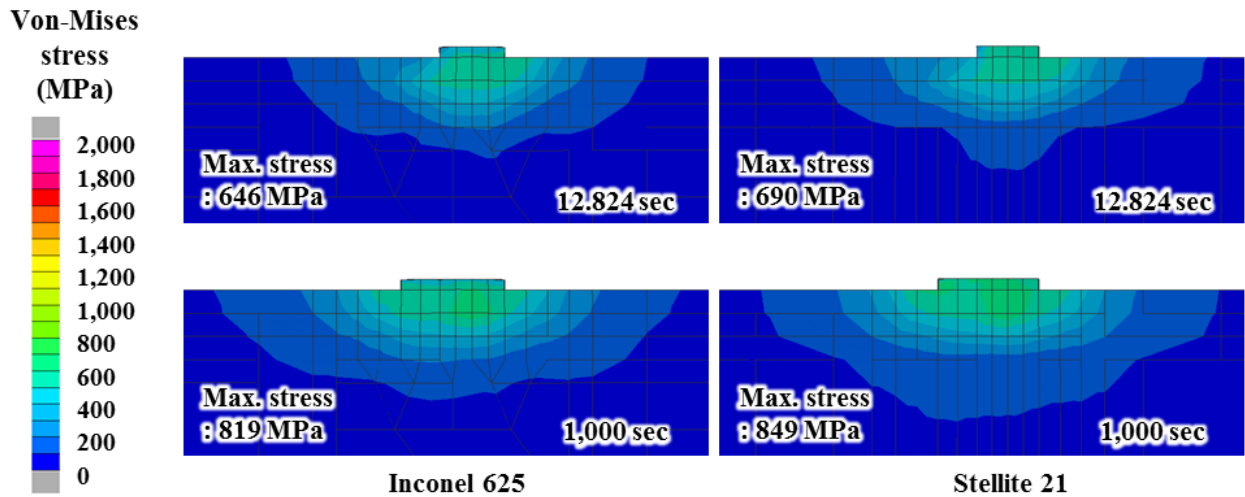


(a) Measured location (b) Without heat treatment (c) 30 HR_C (d) 40 HR_C
Fig. 85 Effects of the heat treatment of the substrate on the Von-Mises stress-time curves (Stellite 21)

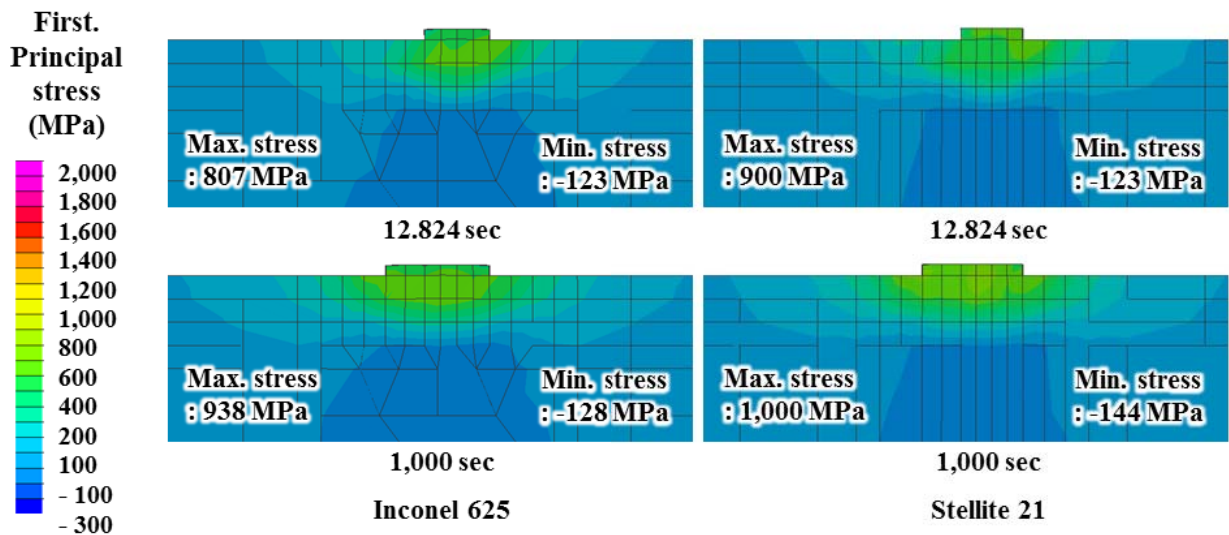
Fig. 84 및 Fig. 85 는 각 적층 소재의 경도에 따른 Von-Mises 응력 그래프이다. Inconel 625 소재에서 경도가 증가함에 따라 최대응력의 도출 지점이 달라졌으며 고경도 기저부에 적층할 경우 적층 경계부에서 가장 큰 응력 값이 도출되었다. Stellite 21 소재에서 기저부 경도가 증가함에 따라 적층 경계부의 응력이 증가하는 경향을 보였으며 측정 요소 5 와 4 의 응력 차이가 줄어드는 경향을 보였다.

2. 이열 비드 열응력 해석 결과 및 비교 분석

이열 비드 열응력 해석에서는 재료, 패스간 시간, 적층 경로 및 경도 변화에 따른 Von-Mises 응력 분포를 비교 분석 하고자 한다. Inconel 625 및 Stellite 21 재료에 따른 이열 비드 열응력 해석 결과는 Fig. 86 과 같다.



(a) Von-Mises stress



(b) 1st principal stress

Fig. 86 Comparison of residual stress distributions of the deposited region by Inconel 625 and those by Stellite 21

Fig. 86 (a) 는 각 소재의 Von-Mises 응력 분포이다. 연속적인 적층이 진행될 때 최대응력은 증가하였으며 Stellite 21 적층 시 응력 최대값은 Inconel 625 소재 적층 시 보다 30 MPa 높게 측정되었다. 하지만 최대 응력 증가는 Inconel 625 소재 적층 시 173 MPa, Stellite 21 소재 적층 시 159 MPa 로 Stellite 21 소재 적층 시 보다 최대 응력 증가가 크게 나타났다. 단일 적층 시 측정 요소 8 번에 위치하던 최대 응력은 추가적인 적층이 진행됨에 따라 Inconel 625 의 경우 측정 요소 6 번에 위치하였고, Stellite 21 의 경우 측정 요소 5 번에 위치하였다. 이를 통해 연속적인 적층이 진행됨에 따라 최대응력의 위치가 변화하는 것을 알 수 있었다. Fig. 86 (b) 는 각 소재의 주응력 분포이다. 연속적이 진행될 때 두 소재 모두 인장응력과 압축응력이 증가하였다. Inconel 625 의 경우 Stellite 21 소재 적층 시 보다 인장응력 증가 폭이 크게 나타났으며 Stellite 21 소재는 압축응력 증가 폭이 크게 나타났다. 적층 비드가 증가할 때 단일 비드 적층시와 동일하게 인장응력은 적층 경계부 주위에서 나타나며 압축응력은 기저부에서 나타났다. 적층 소재, 패스간 시간 및 방향에 따른 최대응력 변화를 관찰하기 위해 Table. 7 및 Fig. 87 과 같이 소재 및 패스간 시간에 따른 최대 Von-Mises 응력을 도출하였다.

Table. 7 Analysis conditions for deposition of double bead

Material	Direction	Inter pass time (sec)
Inconel 625 & Stellite 21	Unidirectional	10, 5, 1
	Alternative directional	10, 5, 1, 0

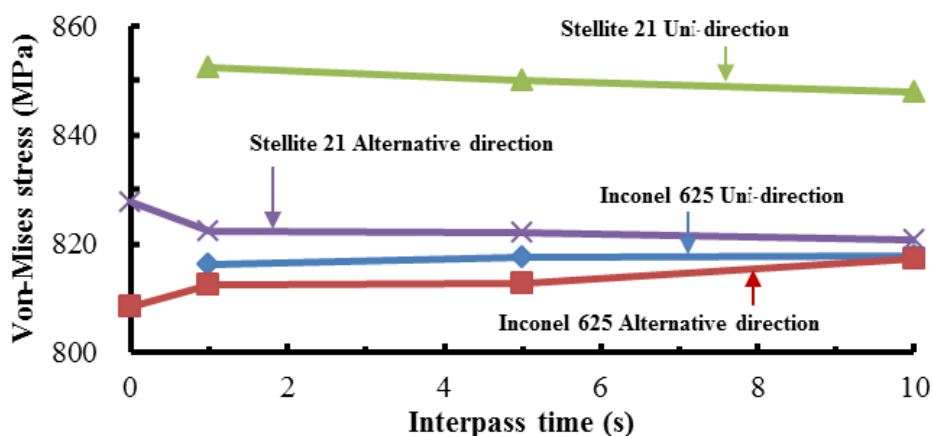


Fig. 87 Influence of the interpass time, the deposition path and the deposition material on the residual stress in the vicinity of the deposited region (Deposition of double beads)

적층 소재별 패스간 시간에 따른 본 메세스 응력을 도출한 결과 Inconel 625 소재의 경우 패스간 시간이 감소할수록 최대 응력이 감소하는 경향을 보였으며 교차 적층 시 최대응력은 감소하였다. 하지만 Stellite 21 소재의 경우 패스간 시간이 감소할수록 최대응력은 오히려 증가하는 경향을 보였다. Inconel 625 의 경우 단일 방향 적층과 교차 적층에 대한 효과가 미미하였지만 Stellite 21 소재의 경우 교차 적층을 진행할 시 단일방향 적층 보다 낮게 도출되었다. 이 결과를 통해 잔류 응력 감소를 위해서는 교차 적층을 진행해야 함을 알 수 있으며 패스간 시간에 따른 응력변화는 미미하기 때문에 적층 시간 단축을 위해 0 초로 설정 하는 것이 합리적인 적층 방법일 것으로 사료된다. 기저부 경도에 따른 최대 응력 변화를 관찰 하기 위해 Inconel 625 소재 이열 비드 적층 시 경도별 최대 Von-Mises 응력을 Fig. 88 과 같이 도출하였다.

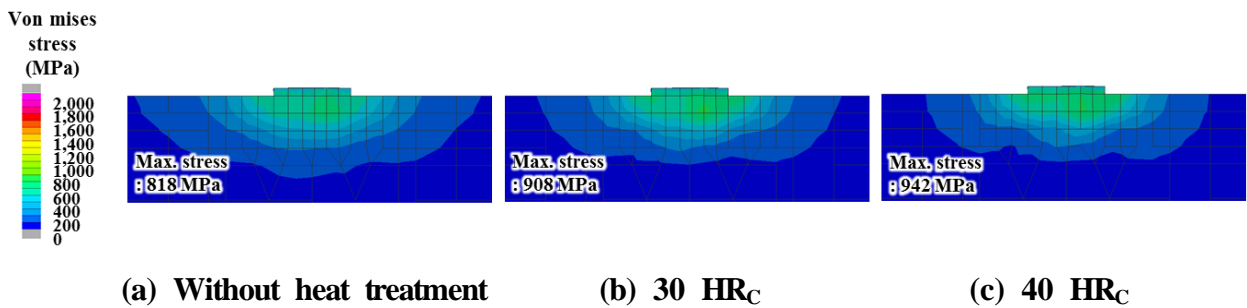


Fig. 88 Effects of the heat treatment of the substrate on residual stress distributions for the deposition of double bead

경도에 따른 최대 응력 변화를 관찰한 결과 열처리를 하지 않은 모델과 30 HR_C 모델에서 연속적인 적층에 따라 기존에 잔류했던 응력이 풀려 낮아지는 반면 40 HR_C 모델에서는 응력이 풀리지 않고 증가하는 것으로 나타났다. 최대 응력의 증가폭은 열처리를 하지 않은 모델에서 168 MPa 로 가장 크게 나타났으며 30 HR_C 모델에서 114 MPa, 40 HR_C 모델에서 56 MPa 로 기저부 경도 증가에 따라 최대응력 증가폭은 감소하였다.

3. 다열 비드 열응력 해석 결과 및 비교 분석

다열 비드 열응력 해석에서는 적층 소재, 적층 경로 및 경도 변화에 따른 응력 분포를 비교 분석 하고자 한다. 단일 방향 다열 비드 적층 시 시간에 따른 해석 결과는 다음과 같다.

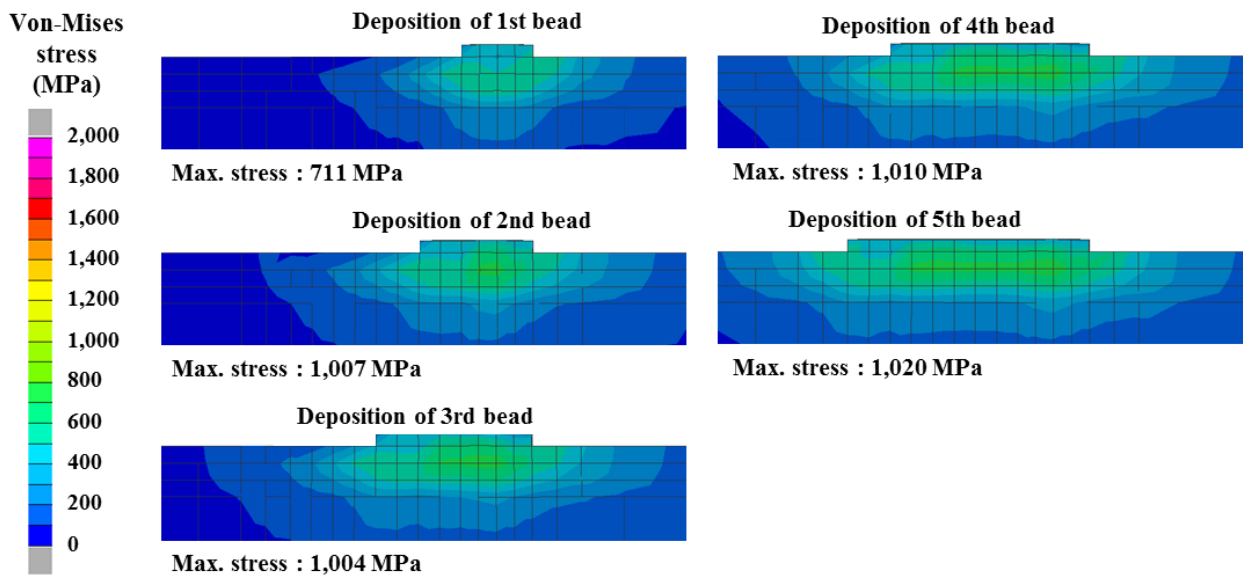


Fig. 89 Residual stress distributions in the vicinity of the deposited region for the case of the deposition of multiple lines (Inconel 625)

Fig. 89 는 Inconel 625 다열 비드 적층에 따른 Von-Mises 응력 분포 및 그래프이다. 적층이 진행될 때 Von-Mises 응력은 적층 경계부에서 발생하였으며 최대 응력이 증가하면서 일정한 정상상태를 보일 것으로 사료된다. 이열 비드 적층 시 최대응력은 적층부 외곽에서 첫 번째 비드 하단부로 이동하였지만 연속적인 적층에 따라 최대응력 발생 지점은 변화하지 않았다. 이러한 결과를 토대로 연속적인 적층이 진행되어도 최대응력은 첫 번째 비드와 기저부의 경계에서 발생할 것으로 사료된다. 또한 연속적인 적층이 진행되어도 마르텐사이트 조직의 인장응력 이하의 최대응력이 나타나 단층 적층시에 균열은 발생하지 않을 것으로 사료된다.

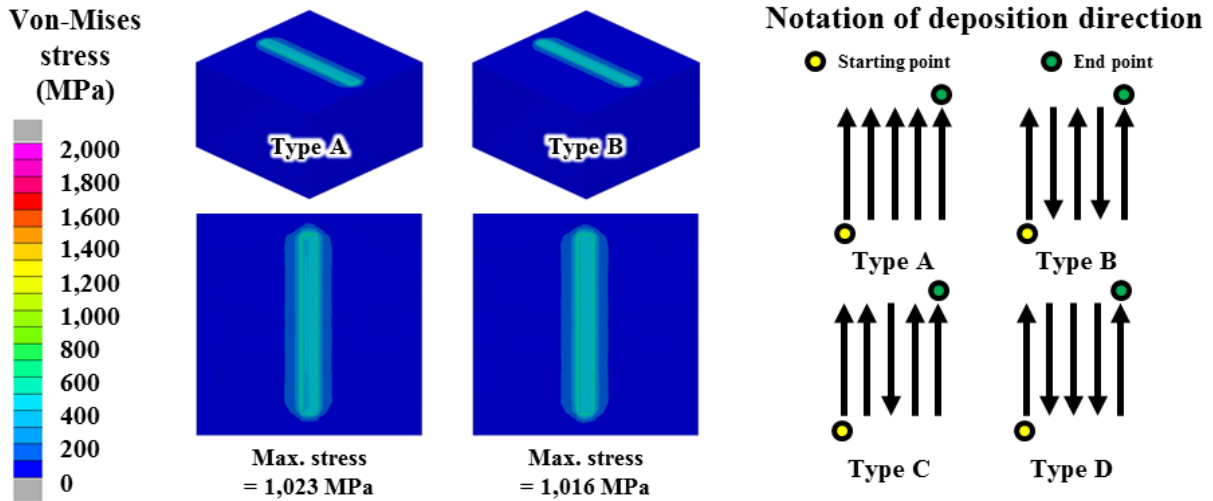


Fig. 90 Influence of the deposition path on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines (Inconel 625)

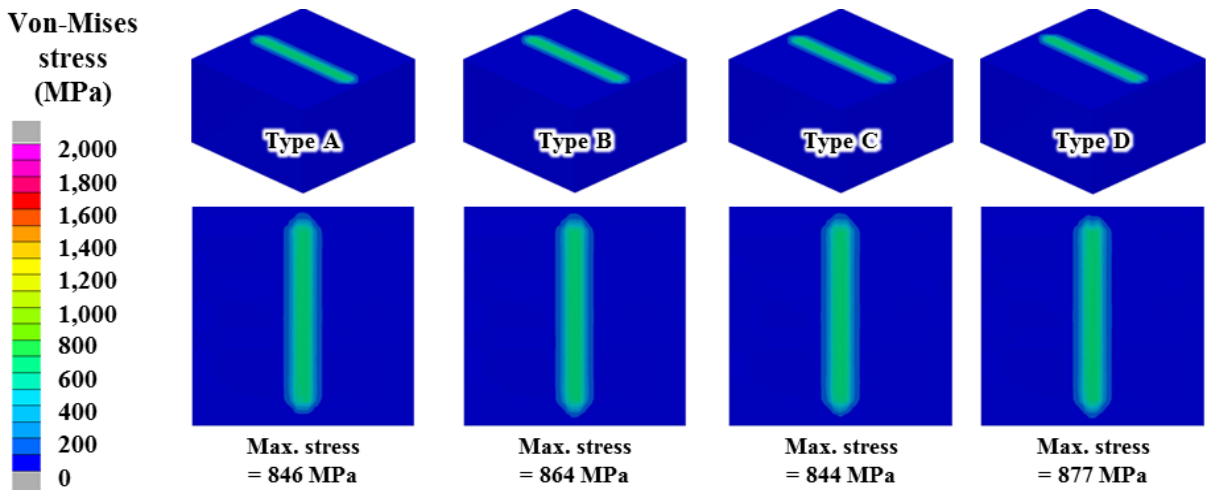


Fig. 91 Influence of the deposition path on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines (Stellite 21)

Fig. 90 및 Fig. 91 은 적층 경로에 따른 각 적층 재료의 Von-Mises 응력 분포 및 최대응력 도출 결과이다. 이열 비드 해석에서는 Inconel 소재에 비해 Stellite 21 소재의 최대응력이 높게 도출되었지만 적층 비드 수가 증가함에 따라 Stellite 21의 최대 응력은 Inconel 625 소재보다 낮게 도출되었다. 두 소재 모두 단일 방향으로 적층을 실시하는 A type 경로에 비해 교차로 적층을 실시할 때 낮은 최대 응력 값이 도출 되었으며 Stellite 21의 경우 적층 경로 C type에서 가장 낮은 최대 응력 값이 도출되었다.

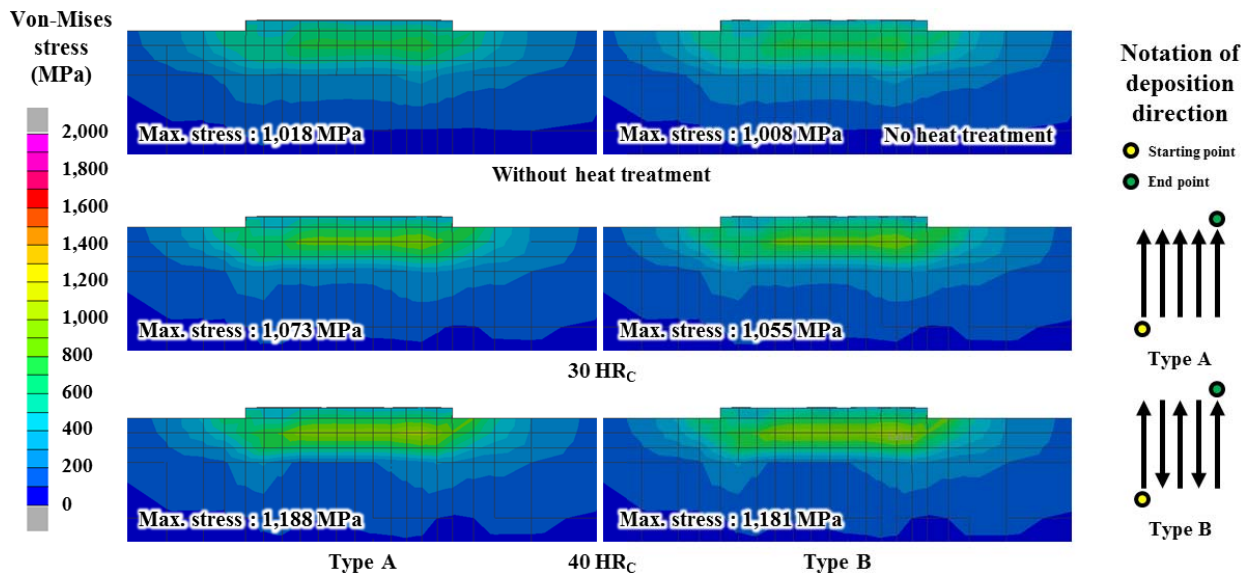


Fig. 92 Residual stress distributions for different deposition parts and hardness of the substrate for the case of the deposition of multiple lines (Inconel 625)

Fig. 92 는 Inconel 625 적층 시 경도 및 경로에 따른 Von-Mises 응력 분포이다. 기저부 경도 증가에 따라 이전 해석과 동일하게 최대 응력은 증가하였으며 기저부 경도 30 HR_C 에서 적층 경로에 따른 최대응력 변화가 가장 많이 나타났다. 적층 경로에 따라서 비교한 결과 단일방향 적층 시 보다 교차로 적층을 진행할 경우 최대 응력 값이 작게 도출되었다. 기저부의 경도 적용과는 무관하게 최대 응력은 첫 번째 비드 아래서 도출되었다.

4. 다층 비드 열응력 해석 결과 및 비교 분석

다층 비드 열응력 해석에서는 다층 적층 진행 시 적층 소재, 적층 경로 및 경도에 따른 응력 분포 비교 분석 하고자 한다. Inconel 625 소재에 대한 다층 비드 열응력 해석 결과는 Fig. 93 과 같다.

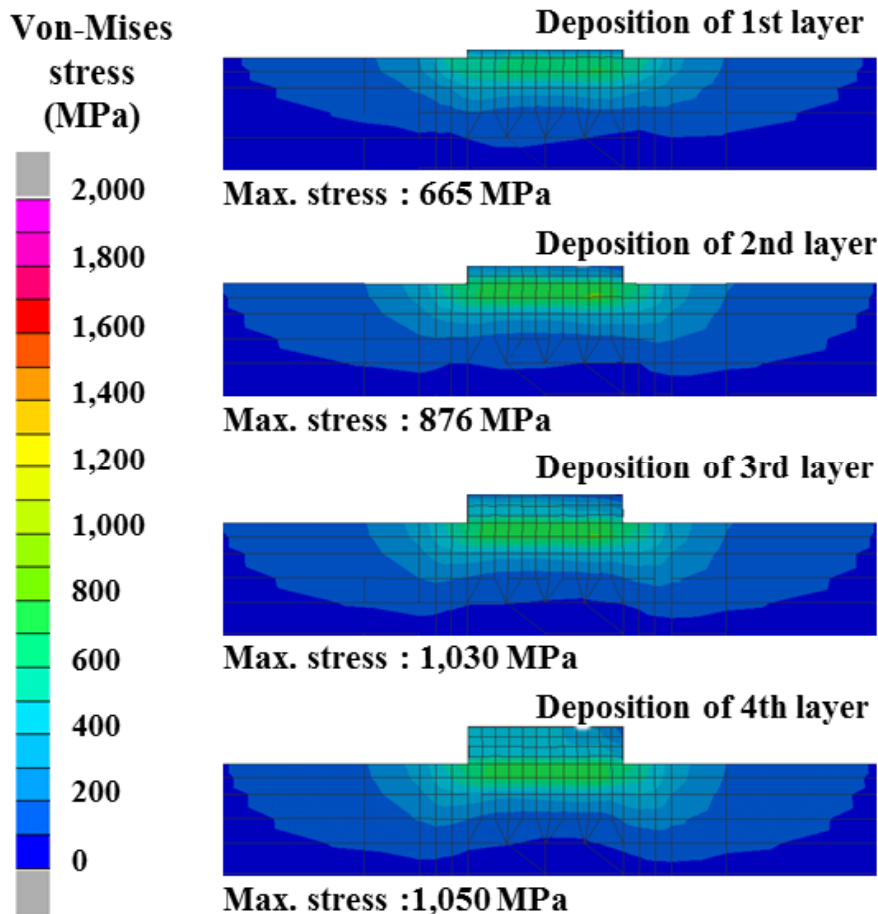


Fig. 93 Residual stress distributions in the vicinity of the deposited region for the case of the deposition of multiple layers (Inconel 625)

다층 비드 적층 시 적층 층에 관계없이 최대응력은 모두 동일하게 적층 경계부에서 도출되었다. 이는 적층부에서 변형이 많이 일어나기 때문으로 사료된다. 적층 층이 증가할수록 최대 응력이 증가하였지만 증가폭은 감소하여 일정 층 이상 적층 시 정상상태를 보일 것으로 사료된다. 세 번째 적층 시 까지 적층 경계부의 최대응력을 변화시켰으며 네 번째 적층 시부터 기저부의 최대응력에

미치는 영향은 미미할 것으로 사료된다. 이는 열전달 해석에서 재결정 온도를 기준으로 보았을 때의 결과와 유사하였다. 이를 통해 적층 층이 증가할수록 열 영향에 의해 잔류응력이 해소되는 것이 아닌 증가하는 것을 알 수 있었다. 적층 소재에 따른 비교를 하기 위하여 Fig. 77 과 같이 Inconel 625 및 Stellite 21 소재의 다층 적층에 대한 Von-Mises 최대 응력을 도출하였다.

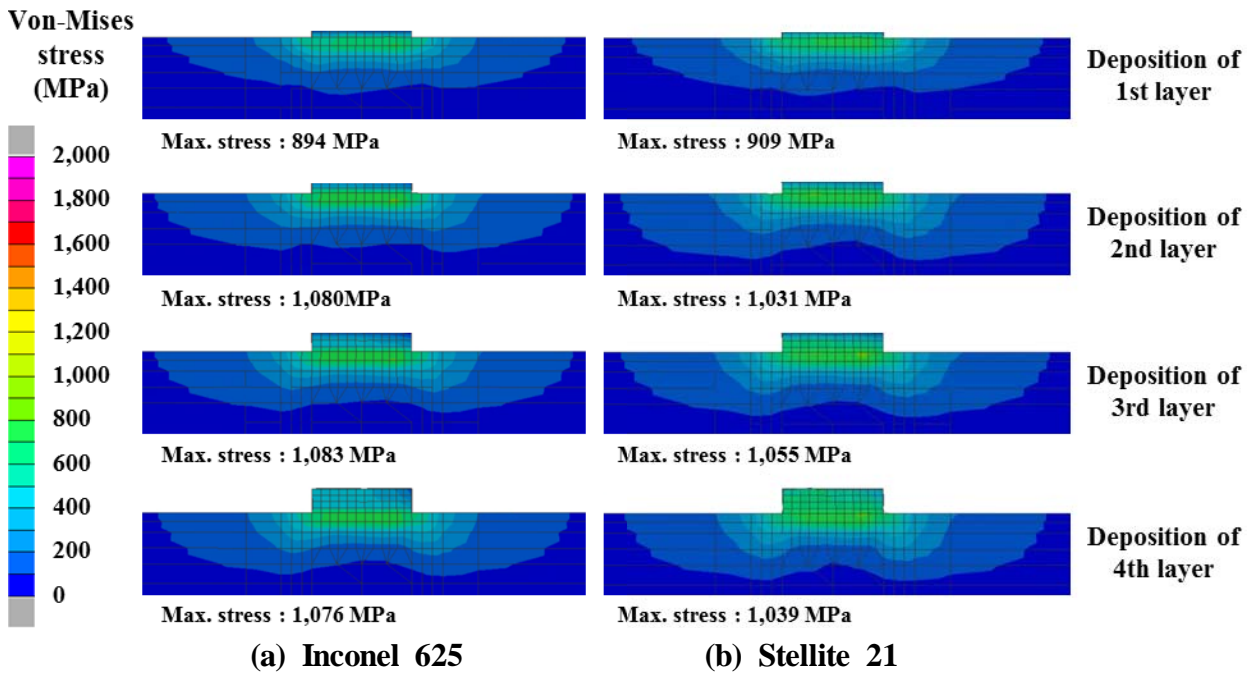


Fig. 94 Effects of the deposited material on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines and layers

Fig. 94 는 다층 적층 시 소재에 따른 Von-Mises 응력 해석 결과이다. 두 소재 모두 적층 층이 증가할수록 최대응력이 증가하였다. Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재가 단층 적층 시에는 15 MPa 만큼 높은 최대응력을 나타내었으나 적층 층이 증가함에 따라 마지막 층 적층 시 37 MPa 만큼 낮은 최대응력이 나타났다. 또한 Stellite 21 소재는 적층부에서 응력이 높게 도출되었다. Stellite 21 소재의 적층부에 잔류응력이 많이 발생하는 것으로 보았을 때 Inconel 625 소재가 적층 소재로 더 사용이 용이할 것으로 사료된다. Fig. 95 는 Inconel 625 소재의 기저부 경도에 따른 Von-Mises 최대응력 도출 결과이다. 단일, 이열 및 다열 적층 시와 동일하게 기저부 경도가 증가할수록 최대응력은 높게 도출되었으며 적층부에 잔류응력은 동일한 분포를 나타내었다.

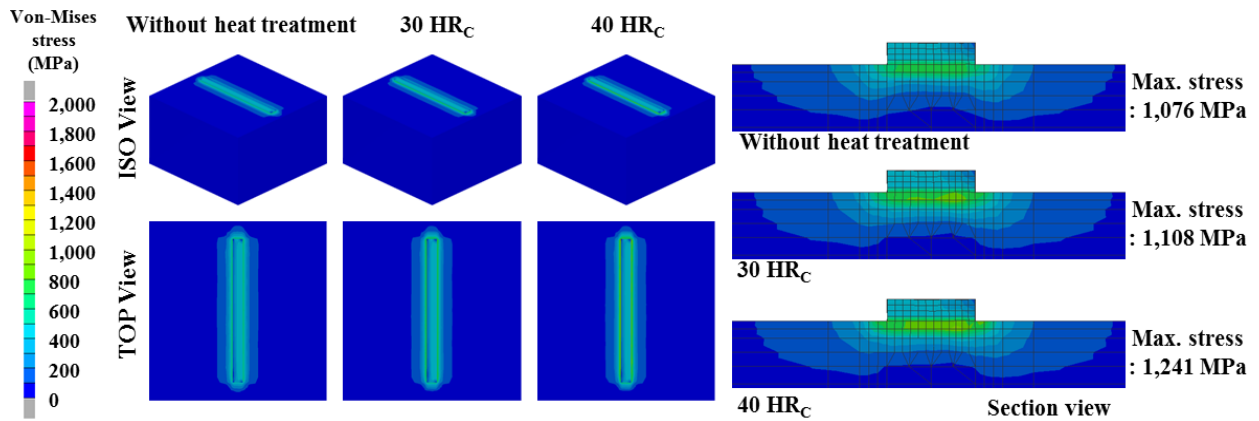


Fig. 95 Effects of the heat treatment of the substrate on residual stress distributions for the case of the deposition of multiple lines and layers (Inconel 625)

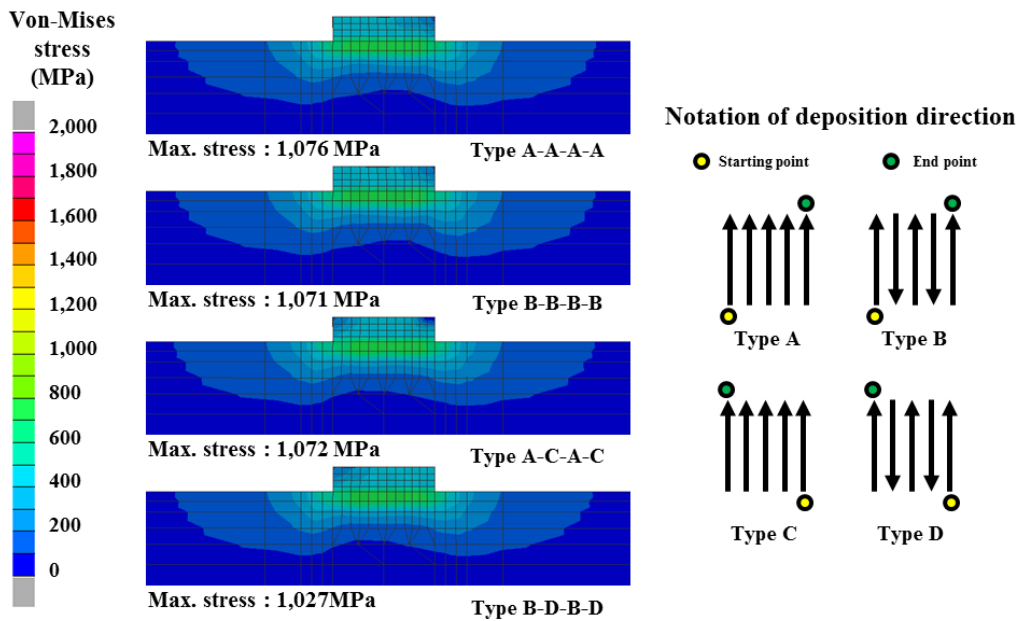


Fig. 96 Influence of the deposition path on residual stress distribution for the case of the deposition of multiple lines and layers

Fig. 96 는 Inconel 625 소재의 적층 경로에 따른 Von-Mises 최대응력 도출 결과이다. 적층 경로는 총 4 가지로 각 적층 경로의 조합이다. 적층 경로에 따른 해석 결과 Type A-A-A-A 에서 가장 높은 1,076 MPa 로 도출되었으며 Type B-D-B-D 1,027 MPa 로 가장 낮은 잔류응력이 도출되었다. 이를 통해 다층 적층 시 적층 경로가 적층 응력에 영향을 줄 수 있으며 교차로 적층을 진행할 경우 최대응력이 감소함을 알 수 있었다.

제 5 장 결론 및 향후과제

DMT 공정을 이용하여 S45C 기저부 위 Inconel 625 및 Stellite 소재 단일, 이열, 다열, 다층 및 대면적 적층을 수행하고 열전달 및 열응력 유한요소 해석을 통해 이종재료 적층 시 적층 특성에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 실험, 데이터 도출 및 유한요소 해석 관점에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

단일, 이열, 다열 및 다층 적층 실험을 통해 비드의 형상 및 열영향부 크기에 대한 데이터를 도출할 수 있었으며 다열 비드 적층 시 일정한 깊이의 열영향부가 형성됨을 알 수 있었다. 물성 계산 프로그램인 JmatPro 를 이용하여 도출된 S45C 의 상별 온도 의존 물성 데이터와 철-탄소 평형상태도, CCT 선도 및 TTT 선도 비교를 통해 도출된 결과가 이론과 유사하게 계산되었음을 알 수 있었다.

단일 비드 열전달 해석을 통해 도출된 열 이력, CCT 선도 및 해석을 통해 도출된 상변화를 비교한 결과 적층 시 재결정 온도를 넘을 경우 기저부는 오스테나이트 상으로 변화하며 냉각 시 마르텐사이트 조직으로 형성되었다. 재결정 온도 선과 마르텐사이트 분율을 비교해 보았을 때 기저부의 재결정온도를 기준으로 열 영향부를 도출 할 수 있음을 알 수 있었다. 기저부의 열처리에 따른 해석 결과에서는 온도 분포 및 마르텐사이트 분포 모두 큰 차이를 보이지 않았으며 이는 기저부 열처리에 따라 적용된 펄라이트와 베이나이트 물성의 차이가 미미하기 때문으로 사료되었다.

이열 비드 열전달 해석을 통해 열원의 효율을 동일하게 적용할 수 있음을 알 수 있었으며 기존에 적층된 비드가 연속적인 적층에 따라 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다. 또한 적층 경로와 패스간 시간에 따른 해석 결과 Inconel 625 소재의 경우 패스간 시간 보다는 적층 경로에 영향을 더 받았으며 Stellite 21 소재의 경우 패스간 시간 및 경로 모두 영향을 받는 것으로 나타났다. 패스간 시간과 경로의 차이는 저온영역에서 해석결과 비교를 통해 적층 시작 지점 온도의 영향에 의한 것으로 도출되었다. 또한 교차로 적층을 진행할 경우 패스간 시간 0 초 및 1 초 에서 위치별 열영향부 폭이 다르게 나타났지만 미미한 차이를 보였다.

다열 비드 열전달 해석을 통해 Inconel 625 소재보다 Stellite 21 소재가 경로에 의한 영향을 더 많이 받으며 다열 적층 시 다섯 번째 비드 적층 시부터 추가적인 적층 진행에 따라 정상 상태를 보일 것으로 사료되었다. 또한 기저부의 마르텐사이트

분포는 추가적인 적층 진행에 따라 성장하였다. 적층 경로에 영향을 많이 받는 Stellite 21 소재에서 SBBBS 패턴 적용시 가장 균일한 마르텐사이트 분포를 보였지만 차이가 미미하여 적층 패턴은 상변화에 큰 영향성이 없을 것으로 사료된다.

다층 비드 열전달 해석 결과 적층 층이 증가할수록 전도에 의한 열전달 보다는 대류에 의한 열전달이 더 많이 일어나기 때문에 온도 분포의 길이가 증가하였으며 이러한 효과로 인해 적층 비드 끝단부에 더 깊은 열 영향부가 도출되었다. 다층 비드 적층 시 기저부의 마르텐사이트 조직 변화는 미미하게 나타났으며 3 층 이상 적층을 수행할 경우 상변화에 영향성은 없을 것으로 사료되었다.

단일 비드 열응력 해석 결과 단일 비드 적층에 따라 최대 응력은 증가하였으며 적층 경계부에 인장응력이 발생하고 기저부에 압축응력이 발생하였다. 공정 수행에 따라 발생한 응력은 냉각공정이 진행되면서 감소하였으나 일정 시간 이후에는 감소하지 않고 잔류응력 형태로 남는 것으로 사료되었다. Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재의 Von-Mises 응력, 주응력 및 변형 모두 크게 발생하였다. 기저부의 열처리에 따라 일정한 열 이력을 가졌음에도 기저부 경도가 증가할수록 높은 최대 응력 값이 도출되었다. 이러한 결과를 토대로 경도가 높은 기저부 위 고경도 소재를 적층할 경우 응력은 크게 발생하며 이는 적층 후 잔류응력에 의한 균열 발생의 원인이 될 수 있을 것으로 사료된다.

이열 비드 열응력 해석 결과 연속적인 적층 진행에 따라 최대응력은 증가하였으며 패스간 시간 및 방향에 영향을 받는 것으로 나타났다. Inconel 625 소재에서는 교차 적층 시 패스간 시간 0 초에서 가장 낮은 최대응력이 도출되었으며 Stellite 소재에서는 교차 적층 시 패스간 시간 10 초에서 가장 낮은 최대응력이 도출되었지만 패스간 시간에 대한 차이는 미미하였다.

다열 비드 열응력 해석 결과 최대 응력은 첫 번째 비드 아래 적층 경계부에서 발생하였으며 연속적인 적층과는 무관하게 동일한 위치에서 발생하였다. 또한 연속적인 적층이 진행될 때 최대응력은 지속적으로 증가하는 것이 아닌 일정한 정상상태를 보일 것으로 사료되었다. 이러한 결과를 토대로 면적 적층 시 적층부 외곽에서 균열이 쉽게 발생할 것으로 사료되었다.

다층 비드 열응력 해석 결과 적층 층이 증가할수록 최대 응력이 증가하였으며 세 번째 적층 이후 정상상태를 보일 것으로 사료되었다. 또한 Inconel 625 소재에 비해 Stellite 21 소재의 최대응력이 낮게 도출되었으나 적층부의 응력은 높게 도출되어 Inconel 625 소재가 적층 소재로 좋은 소재임으로 사료되었다.

본 연구에서 진행한 이종 재료 적층 특성 분석 결과를 토대로 금속 적층 제조 공정을 적용한 이종 재료에 대한 추가적인 연구가 진행 되어야 한다.

첫째, 본 연구에서 적용된 물성데이터는 이론을 기반으로 물성계산프로그램인 JmatPro 를 이용하여 계산된 물성을 적용하였다. 상 별 온도의존 물성 데이터가 적용되었지만 열전달에 의한 조직의 크기 변화가 고려되지 않았기 때문에 상 및 조직이 함께 고려된 데이터 도출이 필요하다. 또한 상변화 해석 결과 형성된 마르텐사이트 분율과 실험의 열 영향부의 비교 분석을 하기 위해 조직검사가 수행 되어야 한다.

둘째, 대면적 적층에 대한 유한요소 열전달 및 열응력 해석을 진행해야한다. 본 연구에서 수행한 해석은 단일, 이열, 다열 및 다층 적층에 대한내용으로 다열 적층에 대한 해석에서 단층 적층 시 최대응력은 일정한 정상상태를 보일 것으로 사료되었다. 이를 고찰하기 위해 대면적 적층에 대한 열전달 및 열응력 해석이 수행 되어야 한다.

셋째, 응력 해석에서 고찰한 내용의 신뢰성 향상을 위해서는 실험을 통해 균열이 발생된 시편과의 비교 및 잔류응력 측정을 통해 유한요소 해석과 비교 분석할 필요가 있다. 또한 최대 응력이 발생하는 기저부의 잔류응력 해소 방안에 대한 논의와 고찰이 필요하다.

넷째, 적층 패턴에 대한 연구가 수행 되어야 한다. 본 연구에서 적용한 패턴은 단일 방향 적층과 교차방향 적층에 대해 주로 논의하였다. 단일 방향 적층과 교차 방향 적층에서의 차이점을 보았을 때 추가적인 적층 패턴에 대한 연구를 할 필요성이 있다.

이 외에도 적층 후 가공 및 열처리, 경사 적층에 대한 고찰, 최소 적층으로 최대 효율을 내기 위한 적층 방법에 대한 고찰, 굴곡진 형상에서의 적층, 작은 체적에서의 적층등 금속 적층 제조 공정의 이종재료 적층의 문제점을 해결하도록 향후에 많은 연구가 진행 되어야 할 것이다.

Reference

1. Schwab, K. “The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond”. 《World Economic Forum》, 14 Jan, 2016.
2. Schwab, K. “The Fourth Industrial Revolution”, Kyung-jin Song, new_present, pp. 26, 2016.
3. Balletti, C., Ballarin, M., Guerra, F., "3D printing: State of the art and future perspectives", Journal of Cultral Heritage, Vol.26, pp.172-182, 2017.
4. Dong-Gyu Ahn, "Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing -Green Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 381-395, 2016.
5. Stratasys, <https://www.stratasys.co.kr/explore/what-is-3d-printing>.
6. Dong-Gyu Ahn, "Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding & forming tools – state of the art", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Volume 12, Issue 5, pp 925-938, 2011.
7. Dong-Gyu Ahn et al. "Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers", CIRP Annals, Volume 65, Issue 1, Pages 257-260, 2016.
8. U. S. Department of Energy, “Quadrennial Technology Review 2015, Additive Manufacturing,” <http://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/QTR2015-6A-Additive%20Manufacturing.pdf> (Accessed 20 November 2019)
9. 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, Nos. 1-4, pp. 465-481, 2015.

10. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., et al., "Energy and Emissions Saving Potential of Additive Manufacturing: The Case of Lightweight Aircraft Components," Journal of Cleaner Production, DOI No. 10.1016/j.jclepro.2015.04.109, 2015.
11. ASTM INTERNATIONAL, "Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies", <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm> (Accessed 1 November 2019)
12. 3D GURU, "Vat Photopolymerization", <http://www.3dguru.co.kr/bbs/newsroom/9988> (Accessed 8 October 2019)
13. Angel R. Torrado, Corey M. Shemelya, Joel D. English, Yirong Lin, Ryan B. Wicker, David A. Roberson, "Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing", Additive Manufacturing, Vol. 6, PP. 16-29, 2015.
14. Dietmar W. et. al., "Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling", Journal of Biomedical Materials Research, Vol.55, Issue2, PP. 203-216, 2001.
15. Leo Gregurić, "What Is Material Jetting? - 3D Printing Simply Explained", <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>, Mar 21 2019, (Accessed 12 October 2019)
16. About Additive Manufacturing-Sheet Lamination, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>, (Accessed 5 November 2019)
17. Ho-Jin Lee, "A Study on Preheating and Deposition Characteristics of Super-alloy Powders for the Development of a Novel Metal Additive Manufacturing Process Using a plasma Electron Beam", Doctoral dissertation, Chosun university, Gwang-Ju 2018.
18. Xu Xin, Simon Meteyer, Nicolas Perry and Yaoyao Fiona Zhao., "Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes.", Procedia CIRP, ELSEVIER, 15, pp.19-25. 2014.

19. Alkaios Bournias Varotsis, "Introduction to Binder Jetting 3D printing", <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#what>, (Accessed 5 November 2019)
20. Myoung-Pyo Hong et al. "High-performance eco-friendly trimming die manufacturing using heterogeneous material additive manufacturing technologies", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Volume 5, Issue 1, pp 133-142, 2018.
21. P Ogin1, D Levashkin and F Vasilyev, "Laser-aided direct metal tooling of manufacturing aviation details on CNC machine", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 450, 2018.
22. K.K. Lee, H.S. Kim, Y.S. Kim and D.G. Ahn, " A Preliminary Transient Heat Transfer Analysis for a Single Bead Deposition of a HastelloyX Material Using a DED Process", *Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 2019, No. 5, PP. 393-393, 2019.
23. Dinda G.P., Dasgupta A.K., Mazumber J., "Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 509, Issues 1-2, P.P. 98-104, 25 May 2009.
24. Heigel, J. C., Michaleris, P., & Reutzler, E. W., " Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V". *Additive Manufacturing*, Vol. 5, P.P. 9-19, 2015.
25. Caoa Jun, Michael A. Gharghoury & Philip Nash, "Finite-element analysis and experimental validation of thermal residual stress and distortion in electron beam additive manufactured Ti-6Al-4V build plates", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 237, P.P. 409-419, 2016.
26. Do-Sik Shim et. al., "Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process", *Optics & Laser Technology*, Vol. 86, P.P. 69-78, 2016.
27. Lia F. et. al., "Thermal and microstructural analysis of laser-based directed energy deposition for Ti-6Al-4V and Inconel 625 deposits", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 717, P.P. 1-10, 2018.

28. Engineering.com, "7 Issues to Look Out for in Metal 3D Printing", <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles>, (Accessed 13 October 2019)
29. Lee K., Kang G., "Calculation of Material Properties with JMatPro for the Process Simulation", The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. P.P. 142-145
30. Diekmann Uwe, "CALCULATION OF STEEL DATA USING JMATPRO", COMAT, P.P. 21-22, 2012.
31. Special Materials, "Inconel alloy 625", <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>, (Accessed 13 November 2019)
32. S. Kapoor, "High-Temperature Hardness and Wear Resistance of Stellite Alloys", Carleton University, Ottawa, Ontario, 2012
33. Exocor technical data, "STELLITE 21 ALLOY", "<http://exocor.com/downloads/product-datasheets/Stellite-21-Datasheet.pdf>", (Accessed 13 November 2019)
34. Jung G.H. et. al., "INTRODUCTION TO METAL·WELDING METALLURGY", Kuminsa, pp. 80-81, 2016.
35. Hardness Testing ASM International, Metal Park OH 1897 ASTM Designation E -.140-.12b, 1897.
36. Computational Thermodynamics, "Metastable Iron-Carbon (Fe-C) Phase Diagram" <http://www.calphad.com/iron-carbon.html>, (Accessed 20 November 2019)
37. 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.
38. R&B, "TTT-CCT curve" <http://www.randb.co.kr/wp-content/uploads/2014/12/TTT-CCT-Curve.pdf> , (Accessed 22 November 2019)
39. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. DeWitt, WILEY, "Incropera's Principles of Heat and Mass Transfer", Global Edition, pp. 443-559, 2017.
40. Kieruj, P., Przystacki, D., and Chwalczuk, T., "Determination of Emissivity Coefficient of Heat-Resistant Super Alloys and Cemented Carbide," Arch. Mech. Technol. Mater., Vol. 36, Issue 1, pp. 30-34. 2016.

41. SYSWELD Visual-Weld (Version 14.0) [Computer software], Appendix: Process type and heat source.
42. Yong Y., Fuc w., Denga q., Chena d.,“A comparative study of vision detection and numerical simulation for laser cladding of nickel-based alloy”,Journal of Manufacturing Processes, Vol. 28, Part 2, p.p. 364-372, 2017.

감사의 글

이 논문을 작성하기까지 도움을 주신 분들에게 감사의 글을 올리려고 합니다. 실험실 생활이 힘들어 포기하고 싶을 때도 많았지만 석사과정을 마칠 때 까지 이끌어 주시고 지도해 주신 안동규 교수님께 감사드립니다. 바쁜신 와중에도 졸업 논문을 지도해주신 한길영 교수님과 오동욱 교수님에게도 감사의 인사를 드립니다. 다루는 주제에 비해 많이 부족한 결과이지만 이 연구를 발판삼아 더욱 더 좋은 결과를 낼 수 있도록 열심히 노력하겠습니다.

연구실 생활을 함께 하며 많은 것을 알려주시고 도움을 주셨던 이호진 박사님, 영어와 유한요소 해석에 많은 도움을 주셨던 Bihiil Chua 박사님, 후배들을 항상 먼저 아끼고 챙겨주신 용훈이형 정말 감사했습니다. 형들 덕분에 많은 것을 알아가고 이렇게 성장할 수 있었습니다. 실험실 생활을 가장 오래 함께했던 현식이와 옆에서 많은 도움을 준 호, 선호, 안재가 있어서 무사히 졸업 논문을 작성할 수 있었습니다. 옆에서 도와주신 선,후배님 들에게 다시 한번 감사 인사를 올립니다.

이 연구를 진행할 수 있도록 도움을 주신 모든 분들께 감사의 인사를 드리고 싶습니다. 대구에서 장비 운용에 많은 도움을 주신 이민규 연구원님, 시편 가공에 도움을 주신 한독정공 김용복 대표님, 시편 열처리에 도움을 주신 하남열처리 민수홍 이사님, 물성데이터 도출에 도움을 주신 솔루션랩 강경필 책임연구원님, SYSWELD 프로그램 사용에 도움을 주신 ESI 민경옥 대리님, 이지선 부장님, X-ray CT 촬영에 도움을 주신 원광대학교 조용균 수석님과 LG 오건영 박사님 에게도 감사 드립니다. 도움을 주신 덕분에 무사히 연구를 진행하고 졸업논문을 작성할 수 있었습니다.

이상훈 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, 국대선 선배님, 김동인 선배님 모든 실험실 선배님 들에게 감사의 인사를 올립니다.

서로 다른 연구 분야지만 연구 주제에 대해 함께 논의하고 공부하며 학업 스트레스로 인해 힘든 상황에서도 아껴주고 챙겨주었던 회원이에게 감사의 인사를 올립니다. 그리고 공부한다고 바쁘다는 핑계로 많이 만나지 못했지만 언제나 먼저 연락해 주고 신경 써주는 오승렬 팀장님과 재호에게 감사합니다.

마지막으로 이렇게 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 항상 응원해주신 아버지, 어머니 감사합니다. 사랑합니다. 늦게 공부를 시작해서 공부한다면서 남들만큼 부모님을 많이 뵈지도, 챙겨드리지도 못해 죄송한 마음뿐입니다. 앞으로 더 성장해서 남부럽지 않은 자랑스러운 아들이 되도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2019 년 12 월 4 일 이 광 규