



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](#)

2018 년 8 월

박사학위논문

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층  
제조 공정의 개발을 위한 초합금 분말의 전자빔  
예열 및 적층 특성에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

이 호 진

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층  
제조 공정의 개발을 위한 초합금 분말의 전자빔  
예열 및 적층 특성에 관한 연구

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

2018 년 8 월 24 일

조선대학교대학원

기계공학과

이 호 진

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층  
제조 공정의 개발을 위한 초합금 분말의 전자빔  
예열 및 적층 특성에 관한 연구

지도교수 안 동 규

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.






2018 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계공학과

이 호 진

## 이호진의 박사학위 논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	한길영	
위원	조선대학교	교수	박종락	
위원	서울과학기술대학교	교수	박근	
위원	조선대학교	교수	오동욱	
위원	조선대학교	교수	안동규	

2018 년 6 월

조선대학교 대학원

# 목 차

<b>Nomenclature</b> .....	viii
<b>List of Tables</b> .....	xiii
<b>List of Figures</b> .....	xvi
<b>Abstract</b> .....	xxii
<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구 배경 .....	1
1. 적층 제조 공정.....	1
2. 전자빔을 이용한 적층 제조 공정 .....	7
제 2 절 연구 동기 .....	14
제 3 절 선행연구분석 .....	16
제 4 절 연구 목표 및 방법 .....	21
<b>제 2 장 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정</b> .....	<b>25</b>
제 1 절 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정 설계 .....	25

제 2 절 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정 특징 .....	27
제 3 장 기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 예열 특성 분석 .....	29
제 1 절 적층 분말 선택 .....	29
제 2 절 초합금 분말의 비산 및 소결 특성 분석 .....	30
1. 전자빔 적층 공정에서의 분말비산 매커니즘 분석 .....	30
2. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결특성 분석 .....	34
가. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결특성 분석 방법 .....	34
나. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결특성 분석 실험 결과 및 고찰 .....	36
제 3 절 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성 분석 .....	40
1. 기저부 비가열 조건에서의 예열 비드 생성 실험 방법 .....	40
2. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 단일 예열 비드 생성 특성 분석 결과 및 고찰 .....	43
가. 플라즈마 전자빔 시스템의 공정변수에 따른 Stellite21 분말 단일 예열 비드 생성 특성 .....	43
(1) 플라즈마 전자빔 시스템의 공정 거리가 Stellite21 분말 단일 예열 비드 생	

성 특성에 미치는 영향성 .....	43
(가) 공정거리에 따른 예열 비드 폭 및 외부 형상 변화 .....	43
(나) 공정 거리에 따른 예열 비드의 분말간 결합 특성 .....	45
(다) 공정 거리에 따른 예열 비드 두께 및 단면 형상 변화 특성 .....	46
(라) 적정 공정 거리 선정 .....	49
(2) 플라즈마 전자빔 시스템의 검출 전류 및 이송 속도가 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성에 미치는 영향성 분석 .....	50
(가) 검출 전류와 이송 속도에 따른 예열 비드 폭 및 형상 변화 .....	50
(나) 검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열비드의 분말간 결합특성 .....	54
(다) 검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열 비드 두께 및 단면 형상 변화 .....	56
(라) 전자빔 에너지 밀도의 예열 비드 생성 특성 영향 .....	59
(마) 적정 검출 전류 및 이송 속도 선정 .....	60
<b>3. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 평면 예열 비드 생성 및 특성평가 .....</b>	<b>62</b>
<b>제 4 절 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열 비드 생성 메커니즘 분석 .....</b>	<b>63</b>
1. 열전달 해석 모델 개발 .....	63
2. 물성데이터 도출 .....	65
3. 열원 모델 개발 .....	70
4. 예열 공정 변수에 따른 온도 분포 및 가열 형상 변화 분석 .....	74
가. 정상상태 열전달 구간 도출 .....	74



나. 예열 공정 변수에 따른 예열 비드 형상 변화.....	76
다. 분말 비산 메커니즘 분석 .....	80
라. 예열 공정 열전달 해석 모델의 적용 가능성 분석.....	84
<b>제 4 장 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을</b>	
<b>이용한 Stellite21 분말의 적층 특성 분석.....</b>	<b>89</b>
<b>제 1 절 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한</b>	
<b>Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 .....</b>	<b>89</b>
1. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21	
분말 단일 적층 비드 생성 실험 방법 .....	89
2. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21	
분말 단일 적층 비드 생성 특성 분석 결과 및 고찰 .....	90
가. 이송 속도, 전자빔 검출 전류 및 비드 생성 길이에 따른 단일 적	
층 비드 제작 특성 분석.....	90
나. 적층 비드 표면 상태 분석 및 고찰 .....	95
다. 적층 비드 내부 상태 분석 및 고찰 .....	97
라. 적층 비드 결함 모드 분석 및 고찰 .....	99
마. 전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향.....	100
바. 적정 적층 비드 생성 조건 선정 .....	101

3. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 평면 적층 특성.....	102
제 2 절 신개념 금속 적층 제조 공정의 적층 비드 생성 메커니즘 분석.....	103
1. 해석방법 .....	103
2. 물성 데이터 도출.....	104
3. 적층 공정 변수에 따른 용융부 온도 분포 및 가열 형상 분석 .....	107
가. 정상상태 열전달 구간 도출 .....	107
나. 적층 공정 변수에 따른 용융부 형상 변화 예측 결과 및 고찰 ..	108
다. 적층 공정 열전달 해석 모델의 적용 가능성 분석.....	117
제 3 절 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 다층 적층 특성 분석.....	120
제 5 장 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 분말 베드 실험 시스템 개발.....	123
제 1 절 분말 베드 실험 시스템 기본 형상 설계 .....	123
제 2 절 분말 베드 실험 시스템 구동 설계 .....	126
제 3 절 분말 베드 실험 시스템 제작 및 성능 평가 .....	128

제 6 장	기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 초합금 분말 예열 특성 분석 .....	130
제 1 절	기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 초합금 분말 예열 비드 생성 실험 방법 .....	130
제 2 절	기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성 분석 결과 및 고찰 .....	132
1.	이송 속도, 전자빔 검출 전류 및 적층 비드 길이에 따른 단일 예열 비드 제작 특성 .....	132
2.	전자빔 에너지 밀도가 예열 비드 생성에 미치는 영향 .....	134
3.	적정 예열 비드 생성 조건 선정 .....	135
제 7 장	기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 특성 분석 .....	139
제 1 절	기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 방법 ...	139
제 2 절	기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 및 고찰	

.....	141
1. 전자빔 가속 전압, 이송 속도 및 전자빔 검출 전류에 따른 단일 적층 비드 제작 특성.....	141
2. 전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향.....	144
3. 적층 비드 단면 형상 분석 .....	146
4. 적정 적층 비드 생성 조건 선정 .....	149
<b>제 8 장 기저부 가열 조건에서의 다층 적층 제품 제작</b> .....	<b>151</b>
제 1 절 기저부 가열 조건에서의 다층 적층 제품 제작 방법 .....	151
제 2 절 기저부 가열 조건에서의 다층 적층 제품 제작 결과 .....	152
제 3 절 제안된 공정의 적층 특성 분석 .....	159
<b>제 9 장 결론 및 향후 연구</b> .....	<b>162</b>
<b>References</b> .....	<b>167</b>
감사의 글	

## NOMENCLATURE

$P_L$	Penetration depth of laser heat source
$\lambda$	Wavelength of laser
$k$	Extinction coefficient
$S$	Penetration depth of electron beam
$Z_n$	Atomic number
$A_m$	Atomic mass
$U$	Acceleration voltage
$M_e$	Momentum of electron
$F_U$	Lifting force
$F_c$	Coulumb force
$F_L$	Lorenz force
$G$	Powder gravity
$V_e$	Speed of electron

<b>C</b>	<b>Speed of light</b>
<b>E</b>	<b>Electric charge</b>
<b><math>m_0</math></b>	<b>Rest mass of electron</b>
<b><math>I_p</math></b>	<b>Probe current</b>
<b><math>k_e</math></b>	<b>Coulomb's constant</b>
<b>q</b>	<b>Quantity of electric charge</b>
<b><math>D_p</math></b>	<b>Signed magnitudes of the charges</b>
<b><math>\vec{E}</math></b>	<b>External electric field</b>
<b><math>\vec{v}</math></b>	<b>Instantaneous velocity</b>
<b><math>\vec{B}</math></b>	<b>Magnetic field</b>
<b><math>E_D</math></b>	<b>Energy density</b>
<b><math>P_D</math></b>	<b>Power density</b>
<b><math>d_b</math></b>	<b>Diameter of electron beam</b>
<b><math>V_t</math></b>	<b>Travel speed</b>

<b>WD</b>	<b>Working distance</b>
<b><math>k_{effp}</math></b>	<b>Temperature dependent thermal conductivity for the powder layer considering the effects of powder state and porosity for preheating process</b>
<b><math>k_{el}</math></b>	<b>loose powder layer considering the porosity</b>
<b><math>k_{es}</math></b>	<b>Temperature dependent thermal conductivity for the sintered powder layer considering the porosity</b>
<b><math>H_s</math></b>	<b>Ratio of sintered area in the powder layer</b>
<b><math>k_f</math></b>	<b>Thermal conductivity of low vacuumed air</b>
<b><math>k_s</math></b>	<b>Thermal conductivity of Stellite21</b>
<b><math>\emptyset</math></b>	<b>Porosity</b>
<b>B</b>	<b>Constant of Zehner-Schlunder model</b>
<b><math>R_{eff}</math></b>	<b>Temperature dependent material properties for the powder layer considering the effects of powder state and porosity</b>
<b><math>R_s</math></b>	<b>Material properties of stellite21</b>
<b><math>R_f</math></b>	<b>Material properties of low vacuumed air</b>

$\epsilon_{\text{eff}}$	<b>Temperature dependent emissivity for the powder layer</b>
$\epsilon_{\text{H}}$	<b>Emissivity of hole</b>
$\epsilon_{\text{s}}$	<b>Emissivity of stellite21</b>
$A_{\text{H}}$	<b>Fraction of area</b>
$X$	<b>Function of coordinate</b>
$x$	<b>Coordinate x</b>
$y$	<b>Coordinate y</b>
$R$	<b>Radius of electron beam</b>
$\rho$	<b>Density</b>
$C_{\text{p}}$	<b>Specific heat</b>
$k$	<b>Thermal conductivity</b>
$\dot{Q}$	<b>Heat flux</b>
$D_{\text{m}}$	<b>Moving direction</b>
$E_{\text{C}}$	<b>Conversion efficiency</b>
$S_{\text{H}}$	<b>Shape function of electron beam</b>



$S_V$	<b>Penetration function of electron beam</b>
$L_B$	<b>Boundary function of heat source</b>
$z$	<b>Coordinate z</b>
$L_B$	<b>Length of bead</b>
$P$	<b>Power of electron beam</b>
$k_{effm}$	<b>Temperature dependent thermal conductivity for the powder layer considering the effects of powder state and porosity for melting analysis</b>
$k_{em}$	<b>Temperature dependent thermal conductivity for the sintered powder layer considering the porosity</b>
$H_m$	<b>Porosity of preheated bead</b>

## LIST OF TABLES

<b>Table 1 Comparison of characteristics of the fabricated product from SLM process and those of the fabricated product from EBM process</b> .....	13
<b>Table 2 Comparison of mechanical properties of EBM parts and those of forged parts</b> .....	18
<b>Table 3 Comparison results between EBM and proposed process</b> .....	27
<b>Table 4 Chemical composition of major components of Stellite21 powder (wt %)</b> .....	30
<b>Table 5 Thermal, Electrical and physical properties of Stellite21 powder</b> .....	30
<b>Table 6 Conditions to estimate <math>F_U, G, F_c,</math> and <math>F_L</math></b> .....	32
<b>Table 7 Estimated <math>F_U, G, F_c,</math> and <math>F_L</math></b> .....	34
<b>Table 8 Experimental conditions for preheating experiments to estimate a proper working distance (without heating of building plate)</b> .....	42
<b>Table 9 Experimental conditions of preheating experiments to estimate proper probe current and travel speed (without heating of building plate)</b> .....	43
<b>Table 10 Minimum probe current to prevent spreading of Stellite21 powders</b> .....	54
<b>Table 11 Proper condition to fabricate preheating bead without heating of building plate</b> ..	61
<b>Table 12 Number of elements and nodes</b> .....	65
<b>Table 13 Process parameters for heat transfer analysis and their ranges</b> .....	65
<b>Table 14 Conditions to estimate intensity of the heat flux for each coordinate</b> .....	74
<b>Table 15 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the preheated region (<math>I_p = 0.93 - 1.20\text{mA}</math>)</b> .....	85
<b>Table 16 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the preheated region (<math>I_p = 1.50 - 2.00\text{mA}</math>)</b> .....	85
<b>Table 17 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the depth of the preheated region (<math>I_p = 0.93 - 1.20\text{mA}</math>)</b> .....	87
<b>Table 18 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the</b>	

depth of the preheated region ( $I_p = 1.50 - 2.00\text{mA}$ )	87
<b>Table 19</b> Experimental parameters and conditions for deposition experiments using a plasma electron beam and Stellite21 powder (without heating of building plate)	89
<b>Table 20</b> Conditions to allow the creation of the deposition bead and the width of the deposited bead	95
<b>Table 21</b> Process parameters of heat transfer analysis for melting process and their ranges	104
<b>Table 22</b> Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the melted region ( $I_p = 0.5 - 1.0 \text{ mA}$ )	118
<b>Table 23</b> Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the melted region ( $I_p = 1.5 - 2.0 \text{ mA}$ )	118
<b>Table 24</b> Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the melted region (allowable conditions to create the deposited bead)	119
<b>Table 25</b> Heating condition of building plate	131
<b>Table 26</b> Parameters and ranges for preheating experiments (with heating of building plate)	131
<b>Table 27</b> Chemical composition of major components of SUS304 (wt %)	132
<b>Table 28</b> Proper preheating condition (with heating of the building plate)	138
<b>Table 29</b> Parameters and ranges for the deposition experiments (with heating of building plate)	140
<b>Table 30</b> Potential conditions to fabricate deposition bead (with heating of building plate)	148
<b>Table 31</b> Experimental conditions for fabricated parts	151
<b>Table 32</b> Applied powder thickness to deposit multi-layer structure (3 layers)	154
<b>Table 33</b> Applied powder thickness to deposit multi-layer structure (10 layers)	154
<b>Table 34</b> Applied powder thickness to deposit cylindrical specimen (5 layers)	155
<b>Table 35</b> Applied powder thickness to stepped specimen (10 layers)	157

<b>Table 36 Applied powder thickness to square net specimen (11 layers) .....</b>	<b>158</b>
<b>Table 37 Comparison results of proposed process with EBM process in terms of deposited parts .....</b>	<b>159</b>
<b>Table 38 Comparison results of proposed process with EBM process in terms of process times .....</b>	<b>160</b>

## LIST OF FIGURES

<b>Fig. 1 Classification of additive manufacturing process according to principle of deposition</b>	<b>3</b>
<b>Fig. 2 Different technology for additive manufacturing processes</b>	<b>4</b>
<b>Fig. 3 Fundamental design of metal additive manufacturing system</b>	<b>7</b>
<b>Fig. 4 Emission mechanism of laser</b>	<b>9</b>
<b>Fig. 5 Emission mechanism of electron beam</b>	<b>10</b>
<b>Fig. 6 Penetration depth of electron beam for different acceleration voltages</b>	<b>11</b>
<b>Fig. 7 Spreading phenomenon of powders in EBM process</b>	<b>13</b>
<b>Fig. 8 Thermal shielder of EBM process (ARCAM AB)</b>	<b>14</b>
<b>Fig. 9 Suggestion of preheating methods using plasma electron beam</b>	<b>19</b>
<b>Fig. 10 Procedure of investigation</b>	<b>22</b>
<b>Fig. 11 Concept of the proposed novel metal additive manufacturing process using a plasma electron beam</b>	<b>26</b>
<b>Fig. 12 Preheating method and result of EBM process</b>	<b>28</b>
<b>Fig. 13 Preheating method and result of the proposed process</b>	<b>28</b>
<b>Fig. 14 Morphology and size distribution of Stellite21 powder</b>	<b>29</b>
<b>Fig. 15 Free body diagram for negatively charged powders by an electron beam</b>	<b>31</b>
<b>Fig. 16 Procedure of sintering experiments</b>	<b>35</b>
<b>Fig. 17 Experimental set-up for sintering experiments</b>	<b>35</b>
<b>Fig. 18 Specimen of sintering experiments</b>	<b>36</b>
<b>Fig. 19 Variation of surface of the powder layer according to heating temperature</b>	<b>37</b>
<b>Fig. 20 Morphologies of powders for different heating temperatures</b>	<b>38</b>
<b>Fig. 21 Influence of heating temperature on the state of powder</b>	<b>38</b>
<b>Fig. 22 Measured temperature during sintering experiment</b>	<b>39</b>
<b>Fig. 23 Set-up for preheating experiments (without heating of building plate)</b>	<b>41</b>

<b>Fig. 24 Specimen for preheating experiments (without heating of building plate) .....</b>	<b>41</b>
<b>Fig. 25 Definition of process parameters .....</b>	<b>42</b>
<b>Fig. 26 Effects of working distance on the formation of preheating bead (U = 12 keV, I<sub>p</sub> = 0.93 mA, V<sub>t</sub> = 0.2 mm/s, without heating of building plate) .....</b>	<b>44</b>
<b>Fig. 27 Effects of working distance on the width of preheating bead .....</b>	<b>45</b>
<b>Fig. 28 Effects of working distance on morphology of preheated bead (U = 12 keV, I<sub>p</sub> = 0.93 mA, V<sub>t</sub> = 0.2 mm/s, without preheating of building plate) .....</b>	<b>46</b>
<b>Fig. 29 Effects of working distance on the formation of cross section of preheated bead (U = 12 keV, I<sub>p</sub> = 0.93 mA, V<sub>t</sub> = 0.2 mm/s, without heating of build plate) .....</b>	<b>47</b>
<b>Fig. 30 Effects of working distance on the depth of preheating bead .....</b>	<b>48</b>
<b>Fig. 31 Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the preheated beads (U = 12 keV, WD = 115 mm, without heating of building plate) .....</b>	<b>52</b>
<b>Fig. 32 Effects of process conditions on the width of preheating bead .....</b>	<b>53</b>
<b>Fig. 33 Influence of probe current and travel speed on the morphology of the preheated bead (U = 12 keV, WD = 115 mm, without heating of building temperature) .....</b>	<b>56</b>
<b>Fig. 34 Influence of the probe current and the travel speed on the formation of cross section of the preheated bead (U : 12 keV, WD : 115 mm, without heating of building plate) .....</b>	<b>58</b>
<b>Fig. 35 Effects of process conditions on the depth of preheating bead .....</b>	<b>58</b>
<b>Fig. 36 Effects of energy density of electron beam on the formation of the preheated beam (U = 12 keV, without heating of building plate) .....</b>	<b>60</b>
<b>Fig. 37 Preheating window (without heating of building plate) .....</b>	<b>61</b>
<b>Fig. 38 Path of experiments and the fabricated wide specimen using the proposed preheating condition .....</b>	<b>62</b>
<b>Fig. 39 Model of three-dimensional transient heat transfer analysis for preheating process using a plasma electron beam .....</b>	<b>64</b>
<b>Fig. 40 Temperature dependent material properties for the powder layer considering the</b>	

effects of powder state and porosity .....	69
<b>Fig. 41 Measurement method and results of beam profile for preheating step .....</b>	<b>71</b>
<b>Fig. 42 Estimated intensity distribution of the heat flux by the proposed heat flux model (Z coordinate = 0) .....</b>	<b>74</b>
<b>Fig. 43 Results of transient heat transfer analysis for different preheating time (U = 12 keV, I<sub>p</sub> = 0.93mA and V<sub>t</sub> = 0.2mm/s) .....</b>	<b>75</b>
<b>Fig. 44 Variation of maximum temperature of preheating bead according to preheating time (U = 12 keV, I<sub>p</sub> = 0.93mA and V<sub>t</sub> = 0.2mm/s) .....</b>	<b>76</b>
<b>Fig. 45 Temperature distributions of the powder layer for different preheating conditions ·</b>	<b>79</b>
<b>Fig. 46 Effects of the probe current and the travel speed on the width and the depth of the expected sintering region .....</b>	<b>80</b>
<b>Fig. 47 Effects of the probe current and the travel speed on the distance of beam irradiate without sintering .....</b>	<b>81</b>
<b>Fig. 48 Effects of process parameter on the front angle of preheating bead .....</b>	<b>82</b>
<b>Fig. 49 Effects of the probe current and the travel speed on the front angle of preheating bead .....</b>	<b>84</b>
<b>Fig. 50 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the preheated region .....</b>	<b>86</b>
<b>Fig. 51 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the depth of the preheated region .....</b>	<b>88</b>
<b>Fig. 52 Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the deposited bead (L<sub>B</sub> = 5mm) .....</b>	<b>92</b>
<b>Fig. 53 Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the deposited bead (L<sub>B</sub> = 10mm) .....</b>	<b>93</b>
<b>Fig. 54 Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the deposited bead (L<sub>B</sub> = 15mm) .....</b>	<b>94</b>
<b>Fig. 55 Surface morphologies of the deposited bead for different deposition conditions</b>	

(Surface).....	97
<b>Fig. 56 Morphologies of the deposited bead for different deposition conditions (Cross section)</b> .....	<b>98</b>
<b>Fig. 57 Influence of the probe current and the travel speed on defect modes of the deposited bead</b> .....	<b>99</b>
<b>Fig. 58 Effects of the energy density of the plasma electron beam on the formation of the deposited bead</b> .....	<b>101</b>
<b>Fig. 59 Fabricated planar specimen using a proper deposition condition</b> .....	<b>102</b>
<b>Fig. 60 Temperature dependent material properties considering the effects of powder state and porosity for melting analysis</b> .....	<b>106</b>
<b>Fig. 61 Results of transient heat transfer analysis for different melting times (<math>U = 30</math> keV, <math>I_P = 1.5</math>mA, <math>V_t = 10</math>mm/s, without heating of building plate)</b> .....	<b>107</b>
<b>Fig. 62 Variation of maximum temperature of the melted region according to melting time (<math>U = 30</math> keV, <math>I_P = 1.5</math>mA, <math>V_t = 10</math>mm/s, without heating of building plate)</b> .....	<b>108</b>
<b>Fig. 63 Temperature distributions in the vicinity of the melted region for different melting conditions (surface, without heating of building plate)</b> .....	<b>111</b>
<b>Fig. 64 Temperature distributions in the vicinity of the melted region for different melting conditions (cross section, without heating of building plate)</b> .....	<b>113</b>
<b>Fig. 65 Effects of the probe current and the travel speed on the width of the expected melted region</b> .....	<b>113</b>
<b>Fig. 66 Effects of the probe current and the travel speed on the maximum temperature of the melted region</b> .....	<b>114</b>
<b>Fig. 67 Effects of the probe current and the travel speed on eccentricity of melted region</b> ·	<b>115</b>
<b>Fig. 68 Effects of the probe current and the travel speed on the distance between melted pool and heat source</b> .....	<b>117</b>
<b>Fig. 69 Comparison of the formation of the deposited bead by experiment and that of the melted region by analysis (allowable conditions to create the deposited bead)</b> .....	<b>118</b>



<b>Fig. 70 Fabricated parts through multi-layers deposition (without heating of building plate)</b>	121
<b>Fig. 71 Delamination of the fabricated part through multi-layers deposition (without heating of building plate)</b>	122
<b>Fig. 72 Morphology of the fabricated part through multi-layers deposition (cross section, without heating of building plate)</b>	122
<b>Fig. 73 Assembly design of experimental set-up including the developed powder bed system</b>	123
<b>Fig. 74 Design of the developed powder bed system</b>	125
<b>Fig. 75 Driving concept of powder feeder, building plate and hopper</b>	127
<b>Fig. 76 Fabricated powder bed system</b>	128
<b>Fig. 77 Procedure of powder feeding using the developed powder bed system</b>	129
<b>Fig. 78 Result of experiments for multi-layers powder feeding using the developed powder bed system</b>	129
<b>Fig. 79 Procedure of preheating experiments (with heating of building plate)</b>	131
<b>Fig. 80 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of preheated bead (before removal of loose powders, with heating of building plate)</b>	133
<b>Fig. 81 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of preheated bead (after removal of loose powders, with heating of building plate)</b>	134
<b>Fig. 82 Effects of energy density of electron beam on the formation of preheated bead (after removal of loose powders, with heating of building plate)</b>	135
<b>Fig. 83 Effects of preheating conditions on the formation of the deposited bead (with building plate heating)</b>	136
<b>Fig. 84 Morphologies of the deposited bead for different preheating conditions</b>	137
<b>Fig. 85 Procedure of deposition experiments (with heating of building plate)</b>	139
<b>Fig. 86 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of the deposited bead (U = 30 keV, with heating of building plate)</b>	142

<b>Fig. 87 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of the deposited bead (U = 35 keV, with heating of building plate) .....</b>	<b>143</b>
<b>Fig. 88 Deposition window for fabrication of the deposited bead (with heating of building plate) .....</b>	<b>144</b>
<b>Fig. 89 Effects of the energy density of the electron beam on the formation of the deposited bead (with heating of building plate) .....</b>	<b>145</b>
<b>Fig. 90 Morphologies of deposition bead for different deposition conditions (U = 30 keV, with heating of building plate) .....</b>	<b>147</b>
<b>Fig. 91 Morphologies of deposition bead for different deposition conditions (U = 35 keV, with heating of building plate) .....</b>	<b>147</b>
<b>Fig. 92 Results of line analyses in the vicinity of the deposited region (U = 35 keV, with heating of building plate) .....</b>	<b>150</b>
<b>Fig. 93 Results of plane deposition experiments (1 layer) .....</b>	<b>152</b>
<b>Fig. 94 Results of plane deposition experiments (3 layers) .....</b>	<b>153</b>
<b>Fig. 95 Results of plane deposition experiments (10 layers) .....</b>	<b>155</b>
<b>Fig. 96 Results of deposition for cylindrical specimen (5 layers) .....</b>	<b>156</b>
<b>Fig. 97 Results of deposition for stepped specimen (10 layers) .....</b>	<b>157</b>
<b>Fig. 98 Results of deposition for square net specimen (11 layers) .....</b>	<b>158</b>

## ABSTRACT

### **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**

Lee Ho Jin

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

Dept. of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

A powder bed fusion (PBF) process is one of representative metal additive manufacturing (AM) processes. The PBF process can be classified into laser and electron beam types according to the applied heat source. The power of the electron beam is greater than that of the laser. In addition, the electron beam is hardly influenced by the reflectivity of the applied material unlike the laser. The PBF process using electron beam is one of challengeable metal AM processes. However, only one PBF process using an electron beam, so called electron beam melting (EBM) process, has been developed. EBM process adopts a thermal electron beam using a hot cathode. The EBM process has several disadvantageous characteristics including a high level of vacuum environment, a short service life of the cathode, a high temperature of the cathode, a small diameter of beam, a high temperature of the building plate, etc.. The development of a novel PBF type AM process using an electron beam is needed to overcome demerits of the EBM process.

The aim of this thesis is to investigate preheating and deposition characteristics of super-alloy powders for the development of a novel metal additive manufacturing process using a plasma electron

beam. A plasma electron beam has several benefits, including a relatively low level of vacuum environment, a long service life of the cathode, a relatively large diameter of the beam, a low temperature of the cathode, as compared to the thermal electron beam. Due to these merits, a novel PBF type AM process using a plasma electron beam was proposed in this thesis. The proposed process consisted of preheating step to prevent spreading of powders, deposition step to create the deposited bead and re-melting step to improve surface roughness and density.

Various experiments and numerical analyses were carried out to investigate the influence of process parameters on preheating and deposition characteristics of powders. The experiments were performed for two conditions, including no heating condition using the plasma electron beam (without heating of building plate) and heating condition using the plasma electron beam (with heating of building plate), according to heating of the building plate. The building plate was heated to 150 °C before loading of the building plate in the vacuum chamber for the case of the no heating condition. However, the building plate was heated using a plasma electron beam in the vacuum chamber before experiments for the case of the heating condition. The working distance, the probe current of the electron beam, the acceleration voltage of the electron beam, the travel speed of the table, and the length of the bead were chosen as process parameters. Stellite21 powders with 45-150  $\mu\text{m}$  of diameter were selected as the used material. The experiments were carried out using a plasma electron beam finishing system. A commercial software ABAQUS was used to perform numerical analyses. Temperature dependent material properties including state and porosity of powders were used in the numerical analyses. Sintering and melting temperatures of the Stellite21 powders were estimated via sintering and melting experiments using a fiber laser and an infrared camera.

Preheating experiments were performed for the case of no heating condition of the building plate. From the results of the experiments, the effects of the working distance, the probe current and the travel speed on spreading characteristics of powders and the formation of preheated beads were examined. In addition, appropriate working distance, probe current and travel speed were estimated to create the desired preheating bead. In order to investigate heat transfer characteristics during preheating of powders using a plasma electron beam, three-dimensional finite element analyses (FEAs) were performed. The heat source model of the plasma electron beam for preheating step were proposed through the measurement of intensity of the probe current and the regression method using normalized

radius and intensity. Using the results of the FEAs, the effects of the probe current and the travel speed on the temperature distribution in the vicinity of the preheated region were investigated. The influence of the temperature distribution in the vicinity of the preheated region on the spreading phenomenon of powders was discussed.

Deposition experiments were carried out for the case of no heating condition of the building plate. The influence of the probe current, the travel speed and the bead length on defects, morphologies, dimensions of deposited beads was examined. From the results of the examination, a proper deposition condition for the case of no heating condition of the building plate was estimated. In addition, a planner part with repeated deposition beads was fabricated using the proposed condition. FEAs for melting of powders during the deposition step were carried out to investigate the influence of the probe current and the travel speed on the temperature distribution in the vicinity of the melted region. The influence of the probe current and the travel speed on the formation of the melted region was examined using the results of FEAs. Through the comparison of results of experiments and those of FEAs, creation mechanism of the deposited bead for the case of no heating condition of the building plate was discussed. Using results of experiments and numerical analyses of preheating and deposition steps without heating of the building plate, multi-layer deposition experiments were carried out. A three-dimensional part with several defects was fabricated by the experiments. From the results of the experiments, it was noted that automatic successive building system is needed to reduce temperature changes during the deposition and delamination between successive layers. In addition, it was considered that the building plate should be heated in the vacuum chamber before feeding of powders to improve joining characteristics between the building plate and the deposited part.

A PBF type experimental set-up with automatic feeding, deposition and specimen loading devices was developed to perform preheating and deposition experiments in a vacuum chamber. In order to investigate the probe current and focusing of the electron beam, a Faraday cage and a beam focusing tester were assigned in the experimental set-up. Using the experimental set-up, preheating and deposition experiments were carried out for the case of heating of the building plate. In those experiments, the building plate was heated during 10 minutes using the defocused plasma electron beam in a vacuum chamber. After heating of the building plate, powders were fed on the building plate using the automatic feeding device. Preheating conditions for the case of heating of the building plate were

estimated through the examination of the influence of the probe current and the travel speed on the formation of the preheated bead. The effects of the acceleration voltage, the probe current and the travel speed on the formation, the ingredient variation and the surface roughness of the deposited bead were investigated through deposition experiments for the case of heating of the building plate. From the results of the investigation, the deposition window and the proper deposition condition for the case of heating of the building plate were estimated to fabricate the desired deposited bead.

Multi-layers deposition experiments were carried out to investigate feasibility of the fabrication of three-dimensional parts using the proposed AM process. Estimated proposed preheating and deposition conditions for the case of heating of building plate were applied to the multi-layers deposition experiments. In multi-layers deposition experiments, a single layer was created from heating of building plate, feeding of powders, preheating of fed powders, deposition of bead, and surface re-melting of the deposited bead. Through the repetition of the creation method of the single layer, three-dimensional parts were fabricated. Planner part with a single layer, rectangular parts with 3 and 10 layers, cylindrical part with 5 layers, stepped part with 10 layers, and square net part with 11 layers were fabricated. The re-melting step was not applied to the fabrication of the square net part. From the results of multi-layers deposition experiments, it was noted that the proposed AM process can fabricate three-dimensional parts with a high density.

# 제 1 장 서론

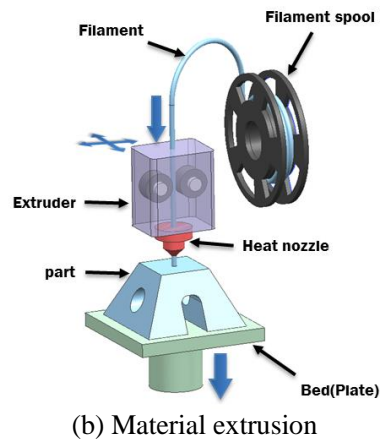
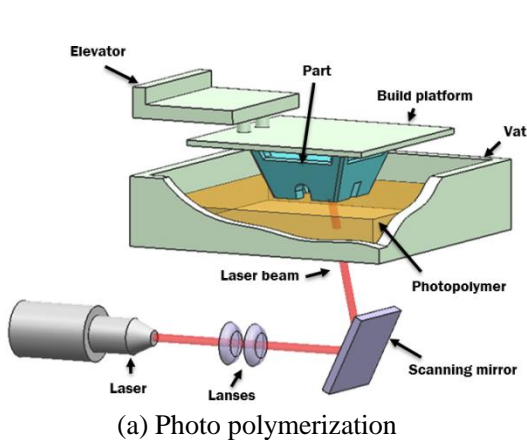
## 제 1 절 연구 배경

### 1. 적층 제조 공정 (Additive manufacturing)

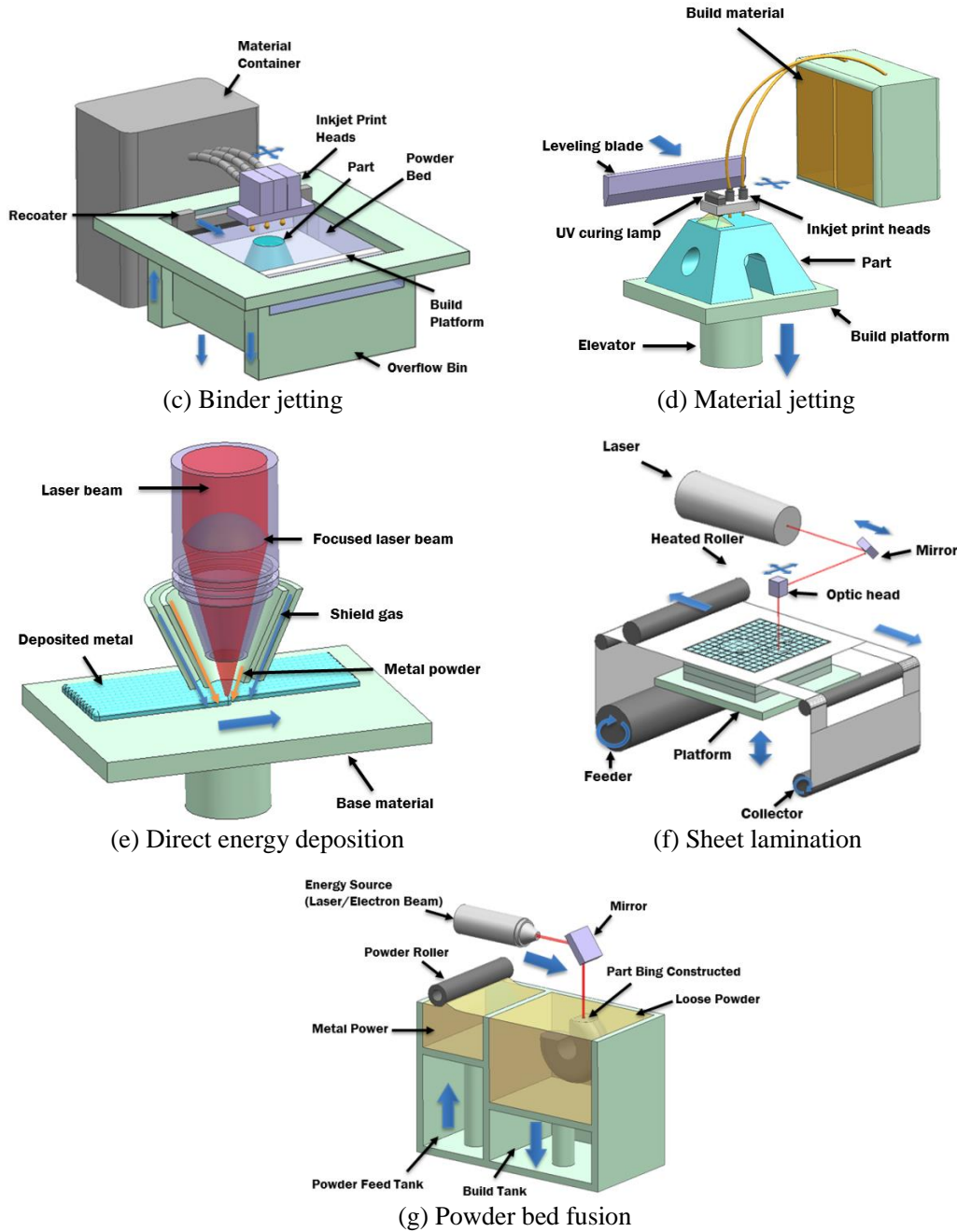
2013 년 2월 버락 오바마 (Barack Obama) 전 미국 대통령 (2009~2017) 의 기조연설에서 3D 프린팅 (3D printing) 이 거론된 이후 전세계적으로 3D 프린팅 공정에 대한 관심이 폭발적으로 증대 되고있다.<sup>1</sup> 3D 프린팅은 2016 년 세계 경제 포럼 (World economic forum, WEF) 에서 주창된 제 4 차 산업 혁명 (The fourth industrial revolution) 에서 6 대 기술 혁신 분야로 선정될 정도로 전세계적으로 기술개발에 대한 관심이 집중되고 있는 분야이다.<sup>2</sup>

3D 프린팅이라는 용어는 현재는 비 관련자에게도 친숙한 용어이지만 학술적인 정식 명칭은 적층 제조 공정 (Additive manufacturing process) 이다.<sup>3</sup> 3D 프린팅은 다양하게 개발된 적층제조 공정 중 하나의 이름이다.<sup>3</sup> 적층 제조 공정의 기본개념은 Computer-Aided Design (CAD) 와 같은 소프트웨어 (Software) 에서 생성된 3 차원 디지털 모델링 데이터 (Three-dimensional digital modeling data) 로 부터 원하는 형상을 가지는 제품을 바로 생산하는 것이다.<sup>3,6</sup> 적층 제조 공정은 전통 가공 공정인 성형 공정 (Forming process) 이나 재료 제거 가공 공정 (Cutting process) 과는 전혀 다르게 재료를 층 단위로 쌓아 올려 (Layer-by-layer deposition) 제품을 생성한다.<sup>3,6</sup> 이와 같은 공정의 기본원리 차이로 인하여 적층 제조 공정은 기존의 성형 공정이나 재료 제거 가공 공정 대비 다양한 장점을 가진다.<sup>3</sup> 적층 제조공정은 설계에 대한 제약이 없어 기존의 성형 공정이나 재료 제거 가공 공정으로 생성할 수 없는 복잡한 형상을 가지는 제품을 생성 할

수 있다.<sup>3-6</sup> 또한, 여러가지 재료를 순차적으로 적층하여 기능 경사 구조를 가지는 제품을 생성할 수 있다. 적층 제조 공정은 다른 제조 공정 대비 낮은 소재 초기 체적대비 낭비되는 비율 (**Buy-to-fly ratio**) 을 가져 재료 소모량 측면에서 매우 경제적이다.<sup>7</sup> 또한 적층 제조 공정은 다른 제조 공정과 융합하여 사용하기 용이하다. 게다가, 공정에 대한 접근성이 매우 우수하여 교육, 가정, 건축, 항공, 기계공학, 예술, 산업현장 및 연구 등 다양한 용도로 사용되고 있으며 누구나 쉽게 사용할 수 있다.<sup>8-12</sup> 이와 같은 다양한 장점들로 인하여 최근 적층 제조 공정에 대한 사용범위와 관심이 날로 증대 되고 있다.<sup>13-21</sup> 적층 제조 공정의 역사는 1984 년 **Charles Hull** 에 의하여 최초의 적층 제조 공정한 광조형 (**Stereolithography : SL**) 공정의 제안과 함께 시작되었다. 이후 오랜 기간에 걸쳐 다양한 연구들이 진행되었으며 현재는 다양한 공정들이 개발 및 상용화되었다.<sup>22,23</sup> 이와 같은 적층제조 공정은 미국재료시험 협회 (**American society for testing and materials : ASTM**) 에 의하여 적층 재료, 적층 메커니즘 및 시스템 구성요소 별로 총 7 가지로 분류되고 있다.<sup>24</sup>

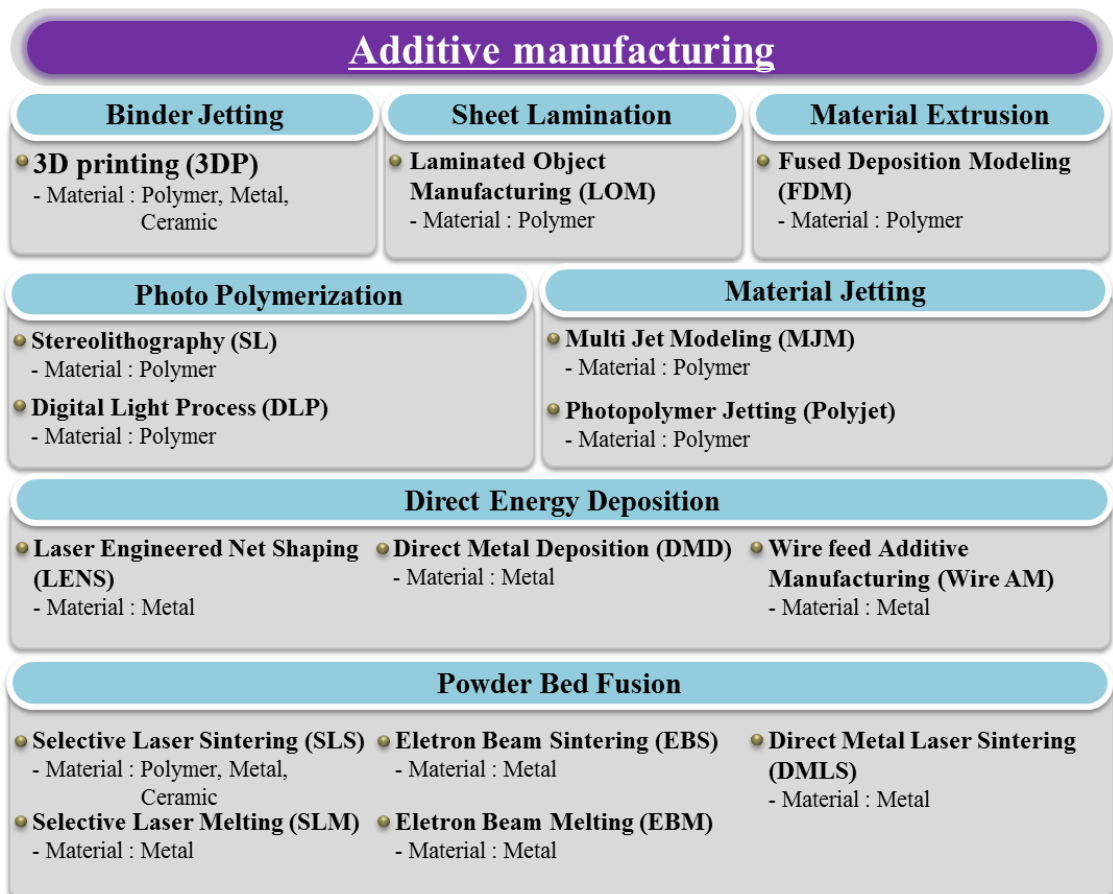






**Fig. 1 Classification of additive manufacturing process according to principle of deposition**

ASTM 에서 규정한 ASTM F2792-12a 규격에 의해 분류된 적층 제조 공정의 원리와 개념도는 Fig. 1 과 같다. Fig. 2 는 ASTM F2792-12a 규격에 의해 분류된 7 가지 적층제조 공정별 세부 적층 타입과 적층 타입에 따른 적층 가능 재료를 분류한 결과이다.<sup>24</sup> 7 가지 적층 제조 공정중 하나인 광경화 (Photo polymerization) 공정의 개념도는 Fig. 1 (a) 와 같다. 광경화 공정은 액상의 광경화 수지 (Photopolymer) 를 큰 용기에 담고 조형판 (Building plate) 에 자외선을 조사하여 국부적으로 경화 시켜 제품을 생성하는 공정이다.<sup>25</sup> SL 공정과 디지털 광조형 (Digital light process : DLP) 공정이 있으며 두 공정 모두 광경화 공정에 속하며 폴리머 재료만 적용 가능하다.<sup>26</sup>



**Fig 2 Different technology for additive manufacturing processes**

재료 압출 (Material extrusion : ME) 공정의 개념도는 Fig. 1 (b) 와 같다. 재료압출 공정은 플라스틱 필라멘트 (Plastic filament) 를 가열한 후 노즐을 통하여 조형판위에 연속적으로 압출하여 제품을 생성하는 공정이다.<sup>27</sup> 다른 적층 제조 공정에 비하여 시스템 설비 구축이 간단하고 저렴하다. 용착 조형 (Fused deposition modeling : FDM) 공정이 재료 압출 공정에 포함된다.<sup>28</sup>

접착재 분사 (Binder jetting : BJ) 공정의 개념도는 Fig. 1 (c) 와 같다. 접착재 분사 공정은 조형판 위에 평평하게 공급된 분말재료에 액상의 경화제를 국부적으로 도포하여 원하는 형상으로 경화 시켜 제품을 생성하는 공정이다.<sup>29</sup> 1993년 미국 MIT 에서 개발된 3 차원 프린팅 (Three-dimensional printing : 3DP) 공정이 접착재 분사 공정에 포함된다.<sup>30</sup>

재료 분사 (Material jetting : MJ) 공정의 개념도는 Fig. 1 (d) 와 같다. 재료 분사공정은 액체 타입의 광경화 수지를 노즐을 통하여 조형판위에 분사하고 자외선램프를 이용하여 경화 시켜 제품을 생성하는 공정이다. 2000 년에 Objet (이스라엘) 사에 의해 발표된 광경화수지 제팅 (Photopolymer jetting) 공정과 3D systems 사에서 개발한 다중젯 모델링 (Multi jet modeling : MJM) 공정이 재료분사 공정에 포함된다.<sup>31,32</sup>

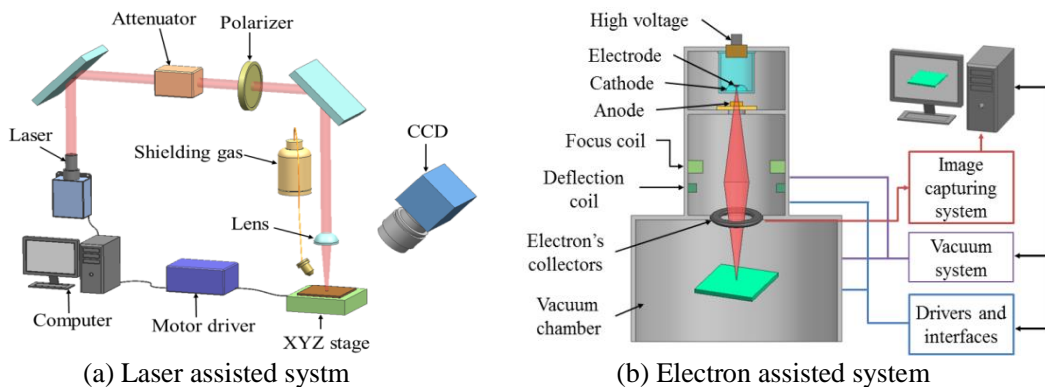
집적식 에너지 적층 (Direct energy deposition : DED) 공정의 개념도는 Fig. 1 (e) 와 같다. 집적식 에너지 적층 공정은 레이저나 전자빔과 같은 고밀도 에너지를 이용하여 재료를 선택적/국부적으로 용해 및 응고시켜 원하는 형상의 제품을 생성하는 공정이다.<sup>33</sup> LENS (Laser-engineered net shaping), DMD (Direct metal deposition) 및 DMT (Laser-aided direct metal tooling) 공정등이 직접식 에너지 적층 공정에 포함된다.<sup>34-36</sup>

박판 적층 (Sheet lamination : SL) 공정의 개념도는 Fig. 1 (f) 와 같다. 박판 적층 공정은 얇은 필름형태의 재료를 열이나 접착제를 이용하여 한층씩 적층하는 공정이다.<sup>37</sup> LOM (Laminated object manufacturing) 공정 등이 박판 적층 공정에 속한다.<sup>38</sup>

분말 베드 용해 (Powder bed fusion : PBF) 의 개념도는 Fig. 1 (g) 와 같다. 분말 베드 용해 공정은 폴리머, 금속 및 세라믹을 재료로 사용하며 레이저빔이나 전자빔과 같은 고출력 에너지원으로 재료를 국부적으로 소결 시키거나 용해 및 응고 시켜 원하는 형상의 제품을 생성 하는 공정이다.<sup>39-42</sup> 특히 분말 베드 용해 공정은 다른 금속 적층 공정 대비 제품 정밀도와 제품의 잔류응력 해소가 용이하여 항공기 부품, 의료, 자동차 및 고 프리미엄 제품 등의 생산에 적용되고 있다.<sup>43,44</sup> 레이저를 에너지원으로 사용하는 분말 베드 용해 공정은 선택적 레이저 용해 공정 (Selective laser melting : SLM) 과 선택적 레이저 소결 공정 (Selective laser sintering : SLS) 및 직접식 금속 레이저 소결 공정 (Direct metal laser sintering : DMLS) 공정 등이 있다.<sup>39-44</sup> 전자빔을 에너지원으로 사용하는 분말 베드 용해 공정은 전자빔 용해 (Electron beam melting : EBM) 공정과 전자빔 소결 (Electron beam sintering : EBS) 공정 단 두 가지만 개발되었다.<sup>45-48</sup> 특히 전자빔을 이용하여 금속을 완전 용해 및 적층하는 상용화된 공정은 EBM (Arcam AB Inc.) 공정이 전세계에서 유일하다.<sup>46-48</sup>

## 2. 전자빔을 이용한 적층 제조 공정

전자빔을 이용한 적층 제조 공정은 집적식 에너지 적층 공정에 속하는 EBAM (Sciaky Inc.), 분말 베드 용해 공정에 속하는 EBM 공정 및 EBS (Technical university of München) 공정 단 3 가지가 존재한다.<sup>42-47</sup> 전자빔을 이용한 적층 제조 공정의 가지 수는 레이저를 이용한 적층 공정의 종류에 비하여 매우 적게 개발되었다. 개발된 전자빔을 이용하는 금속 적층 제조 공정수가 적은 이유는 전자빔 시스템의 친밀도와 구축 용이성이 레이저에 비하여 다소 떨어지기 때문이다. Fig. 3 에서 레이저 및 전자빔 기반 금속 적층 제조 공정의 시스템 구성을 비교한 바와 같이 전자빔 기반 적층 제조 시스템은 레이저 기반 적층 제조 시스템과 달리 다소 큰 크기의 진공 챔버 시스템과 이를 유지하기 위한 장비들이 요구되어 초기 투자비용과 유지보수에 대한 비용이 다소 많이 필요하다.<sup>49-53</sup> 오랜시간 이러한 부정적인 측면에 의하여 전자빔을 이용한 적층 제조 공정 개발에 대한 관심이 감소되었으나, 최근에는 기술 발전으로 인해 진공챔버 비용과 챔버내 진공 생성을 위한 시간이 감소하게 되었다. 또한 진공 시스템을 사용함으로써 금속 적층 제조 공정에 긍정적으로 작용하는 장점들이 연구결과로 보고되고 있다.<sup>54</sup>



**Fig. 3 Fundamental design of metal additive manufacturing system**

첫째, 적층 시스템의 열관리가 용이하다. 금속 적층 제조 공정에서는 금속 재료를 선택적/국부적으로 용융 시킨후 응고시키는 과정을 반복하여 제품을 제작한다. 이때, 고밀도에너지원에 의한 고온의 열이 적층부에 부과된다. 대기환경에서 금속 적층 제조 공정이 수행될 경우 적층부를 포함하는 적층시스템 주위로의 열손실에 의하여 적층부와 적층부 이외의 영역간에 큰 온도구배가 발생한다. 큰 온도 구배는 제품 내부의 열응력과 제품 열변형을 유도하고, 적층 제품에 균열이나 결함을 발생시킨다. 또한 이 온도 구배로 인하여 적층 제품 내부 금속조직이 불균일하게 생성될 수 있다. 그러나 진공 챔버내부에서 적층을 수행 할 경우 극 저진공 환경에서 시스템이 가열 됨으로써 자연대류에 의한 열손실이 매우 적다. 이로인해 적층중 제품의 온도분포가 가열된 상태로 유지 되어 적층 중 온도 구배에 의해 제품에 발생하는 적층부 문제 발생 요인을 최소화 할 수 있다.

둘째, 진공시스템을 사용할 경우 적층 중 불순물 유입 차단이 가능하다. 대기 중에서 적층을 진행할 경우 불활성 가스 분위기를 유지시킨다고 하더라도 외부에서 적층 재료자체가 가지고 있던 수분이나 가스와 같은 불순물을 완벽히 차단할 수 없다. 게다가 시스템 내부에 먼지나 인지할 수 없는 미세한 분말 같은 관리하기 힘든 입자들에 쉽게 노출될 수 있다. 이와 같은 불순물들은 적층 공정의 재현성과 제품의 품질에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 그러나 진공 챔버를 사용할 경우 챔버내 진공 분위기가 생성됨과 동시에 적층 재료 자체에 포함되어 있는 수분이나 가스를 재료 외부로 배출 시킬 수 있다. 또한 적층 중 시스템 내부에 먼지나 미세한 분말등의 적층공정에 영향을 미치는 불순물의 차단이 가능하다.

셋째, 적층 중 제품의 기화 가스 제거가 가능하다. 금속 적층 공정의 특성상 적층 중 가스 (Gas) 가 발생하게 된다. 레이저를 이용한 적층 공정의 경우 이 가스로 인하여 적층 제품 내 기공이 발생하게 된다. 그러나 진공 챔버 내에서 적층 할 경우 진

공 펌프에 의한 가스 배출이 용이하다.

전자빔을 이용한 적층 제조 공정은 진공시스템을 사용함으로써 얻을 수 있는 장점들 외에도 여러가지 추가적인 장점들이 있다. 레이저 (Light amplification by stimulated emission of radiation : Laser) 는 자외선 (Ultraviolet) 에서 적외선 (Infrared) 범위의 파장을 가진 전자기 복사이다. 레이저는 레이저 매질 (Laser medium) 을 광펌핑 (Optical pumping) 하여 낮은 준위의 전자를 높은 준위로 여기 (Excitation) 시키고 준위가 상승된 전자가 밀도 반전 (Population inversion) 으로 저준위로 이동될 때 방출되는 복사를 이용한다. 레이저를 이용한 적층 제조 공정은 이와 같은 레이저 시스템을 이용하여 적층재료를 소결, 용융 및 적층한다. Fig. 4 는 레이저의 빔 방출 메커니즘이다.<sup>55</sup>

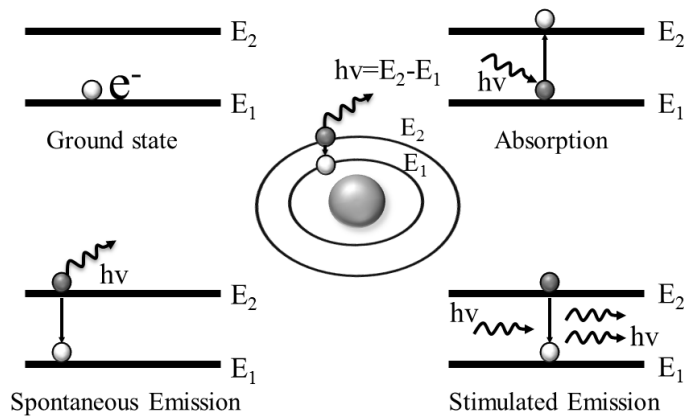
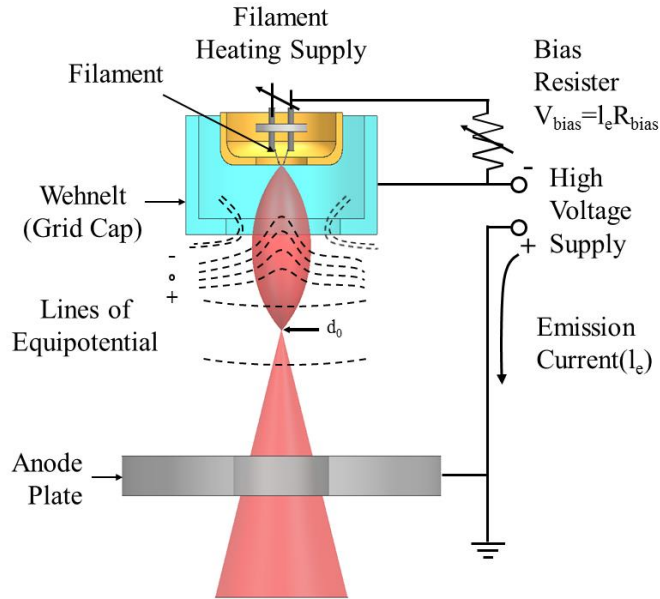


Fig. 4 Emission mechanism of laser

전자빔은 (Electron beam) 매질에서 방출되는 가속된 전자 (Accelerated electron) 들로 구성된다. 전자빔은 저진공 환경에서 음전하 (Negatively charged) 를 띤 캐소드 (Cathode) 와 양전하 (Positively charged) 를 띤 애노드 (Anode) 에 의하여 캐소드의 전자 (Electron) 가 애노드 (Anode) 방향으로 방출된다.<sup>56</sup> 전자빔을 이용한 적층 제조 공정은 전자총



**Fig. 5 Emission mechanism of electron beam**

(Electron beam gun) 에서 방출 된 가속된 전자를 적층 재료에 충돌시켜 발생하는 열로  
서 적층재료를 소결, 용융 및 적층 한다. Fig. 5 는 전자빔의 빔 방출 메커니즘 이다.<sup>55</sup>

전자빔과 레이저는 기본 개념이 상이한 에너지원이다. 그로 인하여 두개의 에너지  
시스템은 에너지 효율이 (Power efficiency) 크게 차이난다. 전자빔의 경우 에너지 효율  
은 70-80 % 정도이고 레이저빔의 에너지 효율은 7-10 % 정도로 전자빔의 에너지 효율  
이 레이저 빔의 에너지 효율에 비하여 매우 크다.<sup>57</sup> 또한, 전자빔의 경우  $9.10938356 \times$   
 $10^{-31}$  kg 의 질량을 가지는 전자가 고전압에 의해 가속되어 재료에 충돌하기 때문에  
열원의 침투 깊이가 레이저에 비하여 매우 깊다.

레이저의 침투 깊이는 식 (1) 을 이용하여 계산할 수 있다.

$$P_L = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (1)$$

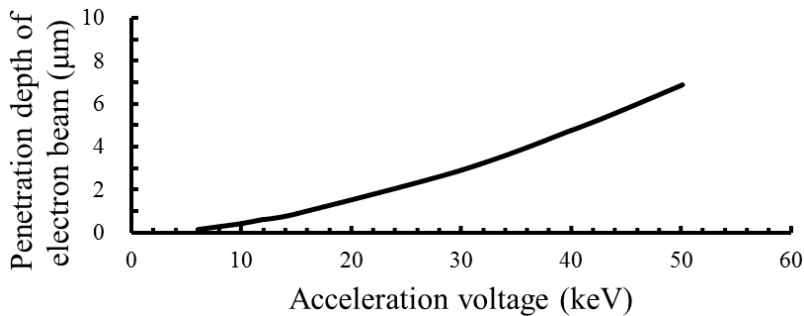


여기서  $P_L$  은 레이저의 열원 침투 깊이,  $\lambda$  는 파장  $k$  는 소광계수이다.<sup>55</sup> 전자빔의 침투 깊이는 식 (2) 와 같은 카나와야-오카야마를 이용하여 계산할 수 있다.<sup>58</sup>

$$S = \frac{0.0276A_m U^{1.67}}{\rho Z_N^{0.89}} \quad (2)$$

여기서  $S$  는 전자빔의 침투 깊이,  $\rho$  는 재료의 밀도,  $Z_N$  는 원자번호,  $A_m$  는 원자의 질량  $U$  는 가속 전압이다.

식 (1) 과 (2) 로부터 각각의 열원의 침투 깊이를 계산할 경우 레이저는 수백-수천 Å 수준의 침투 깊이를 가지는 반면에 전자빔의 경우 가속 전압에 따라 Fig. 6 과 같은 침투 깊이를 가진다.



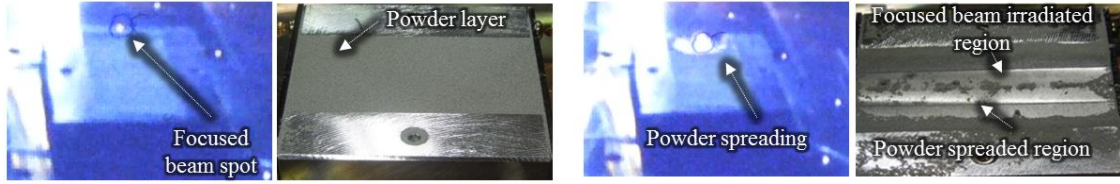
**Fig. 6 Penetration depth of electron beam for different acceleration voltages**

열원의 침투 깊이가 깊을 경우 적층 시 두꺼운 두께를 적층 할 수 있으므로 전자빔을 이용한 적층 공정의 최적화가 이루어질 경우 레이저를 이용한 적층 공정 대비 적층 시간을 매우 감소 시킬 수 있다.<sup>59-61</sup> 또한 전자빔 시스템은 열원의 효율이 레이저 시스템 대비 높아 레이저 시스템으로 용융하기 어려운 초합금 재료나 고용점 재료를 상대적으로 쉽게 용융/적층할 수 있다.<sup>59-61</sup>

전자빔을 이용한 적층 공정 시스템의 빔스캐닝 (Beam scanning) 제어는 레이저 시스템의 갈바노미터 (Galvanometer) 를 사용 하지 않고, 전자기장 렌즈 (Electromagnetic lens) 시스템을 이용하여 제어한다. 레이저 시스템의 갈바노미터는 관성에 의한 제약으로 제어 한계속도가 존재한다. 그러나 전자기장 렌즈 시스템을 이용하는 전자빔의 경우 레이저 시스템 대비 수십-수백배의 수준의 속도로 빔을 제어할 수 있는 장점이 있다.

전자빔을 이용한 적층 제조 공정인 **EBM** 공정은 진공 챔버 내에서 조형판 위에 분말을 평평하게 공급하고, 이를 전자빔으로 용융/적층하여 제품을 제작하는 공정이다. **EBM** 공정의 기본적인 적층 원리는 **SLM** 공정과 매우 유사하나 초기의 예열 단계가 다르다. **EBM** 공정의 순서는 크게 분말 도포, 예열, 적층 및 취출 네가지로 구성된다. **EBM** 공정과 **SLM** 공정은 두 공정 모두 적층 공정 초기에 예열단계를 사용하나 목적이 다르다. **SLM** 공정의 예열 단계의 경우 적층 초기에 시스템 내부 온도 편차를 줄이기 위하여 고안되었다. 그러나 **EBM** 공정의 예열 단계는 전자빔을 사용하는 분말베드 용해공정형의 적층 공정에서 발생하는 분말 비산 현상을 억제하기 위하여 설계되었다.

분말 비산 현상은 전자빔을 사용하는 분말 베드 용해형 적층 공정에서 발생하는 약점 중 하나이다. 분말 비산 현상은 진공 상태에서 기저부 위에 도포된 분말에 고출력의 전자빔이 조사될 경우 분말 주위에 많은 전자들이 모이게 되고 정전하 (Electrostatic charging) 에 의하여 전자간의 척력이 갑자기 증가하게 되어 분말이 순간적으로 폭발하듯 흩어지는 현상이다. Fig. 7 은 전자빔을 이용한 **PBF** 타입의 적층제조 공정에서 발생하는 분말 비산 현상 이다. 적층 공정 중 분말 비산 현상이 발생할 경우 적층 재료가 손실되어 적층 공정을 진행하기 어려우며, 고출력 열원에 적층 판이나 기존에 제작중인 제품이 노출되어 직접 조사된 전자빔에 의해 손상을 입게 된다. 이와 같은 이유로 **EBM** 공정에서 분말 비산 방지를 위한 예열단계가 매우 중요하다.



**Fig. 7 Spreading phenomenon of powders in EBM process**

전자빔기반 적층 제조 시스템과 레이저기반 적층 제조 시스템은 위와 같이 다양한 차이점을 가진다. 두 공정은 유사한 분말 베드 용해 공정임에도 불구하고 SLM 공정과 EBM 공정으로 제작된 제품들의 경우 미세조직, 기공률, 표면 조도 및 잔류응력 특성들이 매우 다르게 나타난다. Table 1 은 SLM 공정과 EBM 공정으로 제작된 제품의 주요 특성 비교 데이터이다.<sup>63-69</sup>

**Table 1 Comparison of characteristics of the fabricated product from SLM process and those of the fabricated product from EBM process.**

Type	Microstructure	Average powder size (μm)	Porosity (%)	Layer thickness (μm)	Roughness (μm)	Residual stresses (MPa)
SLM	Martensitic <sup>63</sup>	45-100 <sup>70</sup> (Co alloy)	0.1 - 20 <sup>64,67</sup>	50 <sup>67</sup>	5 - 40 <sup>63</sup>	100-500 <sup>63</sup>
EBM	Fine lamellar <sup>63</sup>	10-45 <sup>71</sup> (Co alloy)	0.1 - 5 <sup>65,66</sup>	50 <sup>68,69</sup>	25 - 130 <sup>63</sup>	Very low <sup>63</sup>

## 제 2 절 연구 동기

EBM 공정은 유일하게 상용화된 전자빔을 이용하는 분말베드용해공정형 적층 제조 공정이다. EBM 공정은 1 장 1 절 에서 기술한 장점들이 있으나 개선이 요구되는 사항들도 다수 있다. 첫번째 개선이 필요한 사항은 시스템 열 과부하 문제이다. EBM 공정은 분말 비산을 억제하기 위하여 예열 단계가 반드시 수행되어야 한다. EBM 공정은 예열 단계에서 적층플레이트와 분말을 과도 가열한다. 예열 단계가 완료된 후 적층이 시작되는 시점의 시스템 평균 내부 온도는 약 850 °C 내외이다. EBM 공정에서 사용하는 열음극 전자빔 시스템은 방출 효율을 위해서 캐소드를 약 2,300 °C 내외로 가열하여야 한다. EBM 공정은 고온 환경에서 적층을 수행하기 위하여 부가적인 내열 및 열제어 장치들이 필요하다. Fig. 8 은 EBM 공정의 시스템 내부 열차단을 위한 열차폐 시스템이다. 두번째 개선이 요구되는 사항은 장시간이 요구되는 시스템 예열과 냉각 시간의 단축이다. EBM 공정에서 티타늄합금 재료 적층시 권장되는 예열 시간은 약 2 시간 내외이다. 또한, 고온으로 유지되는 적층 공정 이후 제품을 취출하기 앞서 시스템을 상온 수준으로 냉각하여야 하는데, 이때 약 5 시간 정도가 요구된다. 이와 같이 EBM 공정은 적층 공정 시간 이외에도 시스템 예열과 냉각을 위하여 약 7 시간이 부가적으로 요구된다. 세번째 개선 요구사항은 시스템의 진공도 문제이다. EBM 공정은



**Fig. 8 Thermal shielder of EBM process (ARCAM AB)**

고온 캐소드 (Hot cathode) 형의 열음극 전자빔을 사용한다. 열음극 전자빔은 빔 방출 효율을 높이기 위하여  $10^{-5} - 10^{-7}$  Torr 정도의 진공챔버 진공도가 요구된다. 네번째 개선 요구사항은 시스템의 짧은 수명과 고가의 유지보수비이다. EBM 공정에 사용되고 있는 열음극 필라멘트의 일반적인 수명은 약 50 시간 내외이다. 하나의 제품을 적층할 때 필요한 시간이 10 시간일 경우 5 개의 제품을 적층한 후 전자빔 건 시스템을 개폐하고 캐소드를 교체 하여야 한다. 또한 열음극 필라멘트의 가열 온도가 매우 높아서 시스템 주변 장치에 다소 고가인 고내열성 재료를 사용하여야 하며 또한 이를 주기적으로 교체하여야 한다. 게다가 시스템 진공도가 높을수록 고사양의 진공 펌프가 요구되는데 이 진공펌프의 유지 보수를 위한 비용과 시간도 상당히 요구된다. EBM 공정의 개선점들은 대부분 열음극 전자빔 특성에 의한 것들이다. 이러한 개선점들은 다른 타입의 전자빔 소스인 플라즈마 전자빔을 사용할 경우 극복이 가능하다.

기존 EBM 공정이 가지고 있는 한계를 극복하기 위하여 최근 플라즈마 전자빔을 이용한 금속 적층 제조 공정의 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다. 플라즈마 전자빔은 1997 년에 처음 제안된 저온 캐소드 (Cold cathode) 를 사용하는 냉음극 방식의 전자빔 소스이다. EBM 공정에서 사용되고 있는 열음극 방식의 전자빔은 고온 캐소드의 고온 가열 및 바이어스 전압을 부가시켜 전자를 방출 시키지만, 플라즈마 전자빔은 캐소드 앞부분에 플라즈마존을 생성시키고 바이어스 전압을 부가하여 플라즈마로부터 전자를 방출시킨다. 이 같은 빔 방출 메커니즘 차이로 인하여 플라즈마 전자빔의 캐소드는 기존 열음극 전자빔의 캐소드보다 수명이 매우 길고, 전자총 시스템의 분위기 온도가 상대적으로 낮으며, 저가의 전자총 파워 소스를 사용 할 수 있으며, 생성되는 전자빔의 폭 및 형상의 제어가 용이한 장점을 가지고 있다. 플라즈마 전자빔이 가지고 있는 여러 가지 장점에도 불구하고 플라즈마 전자빔의 개발 시기가 상대적으로 최근 이어서, 플라즈마 전자빔을 이용한 분말베드 용해공정기반 적층 제조 공정 개발에 대

한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 상황이다. 그러나 플라즈마 전자빔을 이용한 적층 제조 공정 개발시 열음극 전자빔 대비 생산성 향상, 시스템 원가 및 유지보수비 절감이 가능하다. 또한 기존 EBM 공정의 단점과 열전자 전자빔 및 고진공 시스템을 사용함에 따라 발생하는 문제점들을 개선할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 개발을 위한 초합금 분말의 전자빔 예열 및 적층 특성에 관한 연구를 수행하고자 한다.

### 제 3 절 선행연구분석

전자빔을 이용하는 분말베드용해형 적층 제조 공정은 제품 품질이 공정 변수 및 조건에 매우 의존적이다. 특히 공정조건이 맞지 않을경우 제품내 큰 기공발생, 불균일 조직생성 및 층간박리 등 결함이 발생한다. 이러한 결함들을 억제하기 위하여 적층 제조 공정의 공정 변수에 따른 제품 제작 특성과 관련된 연구들이 꾸준히 진행되고 있다.<sup>46,72-81</sup>

Cordero 등은 분말 베드 용해형 전자빔 적층 제조 공정에서 발생하는 분말 비산 현상에 대한 연구를 수행하였다.<sup>77</sup> 이 연구에서는 분말 베드 시스템에 도포된 분말의 전기적 상태를 정의하였다. 분말 비산 현상은 분말 표면의 산화막에 정전하가 축적 (Charging) 되어 비산 되는 것을 밝혔다. 또한 해석적 접근을 통하여 적층 중 분말의 정전기력의 방향을 예측하였다. 이 예측결과로부터 분말에는 열원의 중심부에서 외부 방향으로 작용하는 힘이 존재하는 것을 알 수 있었다.

Milberg 등은 전자빔 소결 공정 (EBS) 을 이용한 금속 분말 적층에 대한 연구를 수행하였다.<sup>78</sup> 그들의 연구에서는 EBS 공정의 분말 비산 현상을 실험적으로 검증하였다. 또한 이 결과를 이용하여 분말 비산 메커니즘을 고찰하였다. 분말 비산 메커니즘 분석 결과를 이용하여 분말 비산 현상을 억제 하기 위한 5 가지 방법을 제안하였다.<sup>78</sup> 제시된 분말 비산 현상 억제 방법은 시편의 표면을 거칠게 하여 분말과 시편의 접촉 면적을 넓히는 방법, 예열 공정을 통하여 분말과 시편을 국부적으로 소결시켜 전기적으로 연결시키는 방법, 시편의 두께를 증가시켜 전기적 유동을 향상시키는 방법, 시편을 전기적으로 통전시키는 방법 및 분말의 품질을 향상시키는 방법이다. 또한 EBS 공정을 이용하여 30 mm × 30 mm × 25 mm 크기의 원기둥 시편을 제작하고, 시편 내부 조직과 경도를 분석하였다.

Sigl 등은 EBS 공정의 제작 특성에 대한 연구를 수행하였다.<sup>79</sup> 그들은 10 kW 급의 EBS 공정 실험 장치를 개발 하였으며 이 장치를 이용하여 시편을 반복적으로 제작하고 공정 및 공정 변수에 따른 제품 제작 특성을 분석하였다. 실험 결과로부터 제품에서 발생하는 결함을 표면 품질 결함, 홀 벽면 품질 결함, 기공, 박리, 변색 및 흘러내림과 같은 5 가지 모드로 분류하고, 각 항목당 결함 발생률을 분석하였다. 또한 EBS 공정에서 전자빔의 출력과 속도가 제품 결함 발생에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

Kahnert 등은 스캐닝 방법이 EBS 공정의 제품 제작 특성에 미치는 영향성에 대한 연구를 수행하였다.<sup>80</sup> 그들의 연구에서는 X-hatch, XY-hatch (Alternating) 및 XY-hatch 의 세가지 스캐닝 방법에 따른 적층 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 스캐닝 방법에 따라 적층 제품의 품질을 향상 시킬 수 있음을 알 수 있었다. 스캐닝 방법에 따라 제품내의 잔류 응력분포가 변화되며, 적절하지 않은 스캐닝 방법을 적용할 경우 적층부의 층간 박리가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 적층부 박리 없이 40 mm × 40 mm

수준의 넓은 면적을 적층하기 위한 적층 스캐닝 방법을 제안하고, 이 방법의 적용성을 고찰하였다.

Gong 등은 EBM 공정으로 제작된 Ti-6Al-4V 시편과 전통적 제조 공정으로 제작된 시편의 기계적 특성을 실험적으로 비교하였다.<sup>81</sup> EBM 공정으로 제작된 시편과 주조로 제작된 시편의 미세조직 비교 하였으며 EBM 공정으로 제작된 Ti-6Al-4V 시편과 전통적 방법으로 제작된 Ti-6Al-4V 시편의 기계적 특성을 Table 2 와 같이 비교하였다.<sup>81</sup>

**Table 2 Comparison of mechanical properties of EBM parts and those of forged parts.**<sup>81</sup>

Type	Yield strength (GPa)	Ultimate strength (GPa)	Ductility (%)
EBM	0.83-1.15	0.91-1.2	2.3-25
Forged part	0.79-1.22	0.87-1.29	12-14

플라즈마 전자빔을 이용한 적층공정에 대한 연구는 최근에 시작되고 있다. Lee 등은 플라즈마 전자빔을 이용하여 Stellite21 분말의 적층 비드 생성에 대한 연구를 수행하였다.<sup>46</sup> 이 연구에서는 Fig. 9 와 같이 연속적 예열 방법과 위치 고정식 예열 방법의 두 가지 플라즈마 전자빔을 이용한 분말 예열 방법에 대한 고찰을 수행하였다.<sup>46</sup> 또한 연속적 예열 방법을 통하여 크기 30 mm × 60 mm 의 직사각형 형태의 예열층을 결함없이 생성하였으며, 이 예열층을 이용하여 분말의 비산 없이 적층 비드를 생성하는 실험을 수행하였다.



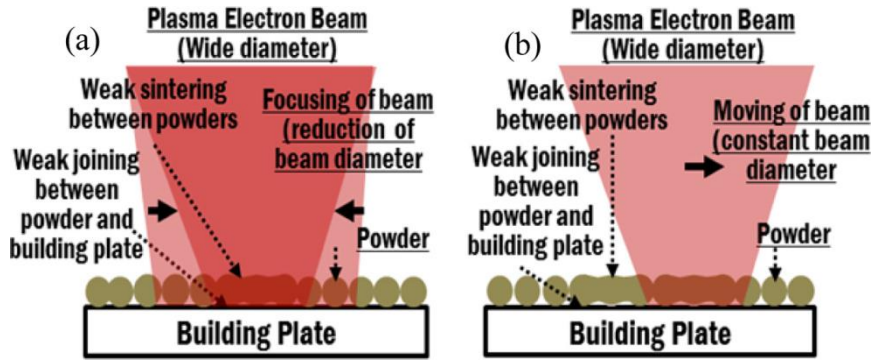


Fig. 9 Suggestion of preheating methods using plasma electron beam<sup>46</sup>

적층 공정 변수의 영향성과 적층 메커니즘 분석을 위한 해석기반 연구도 수행되고 있다.<sup>82-86</sup> Shen 등은 EBM 공정의 열전달 해석 모델을 개발하였다.<sup>85</sup> 이 연구에서는 ABAQUS SW 기반의 EBM 공정의 특성이 고려된 열전달 해석 모델을 제안하였다. 이 해석모델을 이용하여 분말층의 기공률과 전자빔의 직경이 적층 비드 온도분포에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 연구에서는 분말층의 소결 특성이 고려되지 않은 온도 의존 물성데이터를 사용하였다.

Körner 등은 EBM 공정에 대한 메소스코픽 (mesoscopic) 스케일 해석에 대한 연구를 수행하였다.<sup>87</sup> PBF 공정의 경우 적절한 공정 조건을 이용하여 적층 할 경우 분말층이 안정적으로 용융되어 적층 비드가 생성되지만, 적합하지 않은 공정 조건을 사용할 경우 용융풀이 분말층에 스며들지 못하여 분말층 표면에만 비드가 생성되는 현상이 발생한다. 이 연구에서는 EBM 공정의 물리적 상태를 정의하고 공정변수에 따른 적층 비드 생성 특성을 분석하였다. 또한 전자빔 출력과 스캔 속도가 비드 생성 특성에 미치는 영향성을 고찰하였다.

Zäh 등은 EBM 공정의 해석모델 개발하고, 이 모델을 이용한 공정 변수에 따른 적층 비드 생성 특성 변화를 연구하였다.<sup>88</sup> 이 연구에서는 적층 비드의 폭과 길이를 이용한 무차원 변수를 정의하고 전자빔 출력에 따른 무차원 변수의 거동을 고찰하였다.

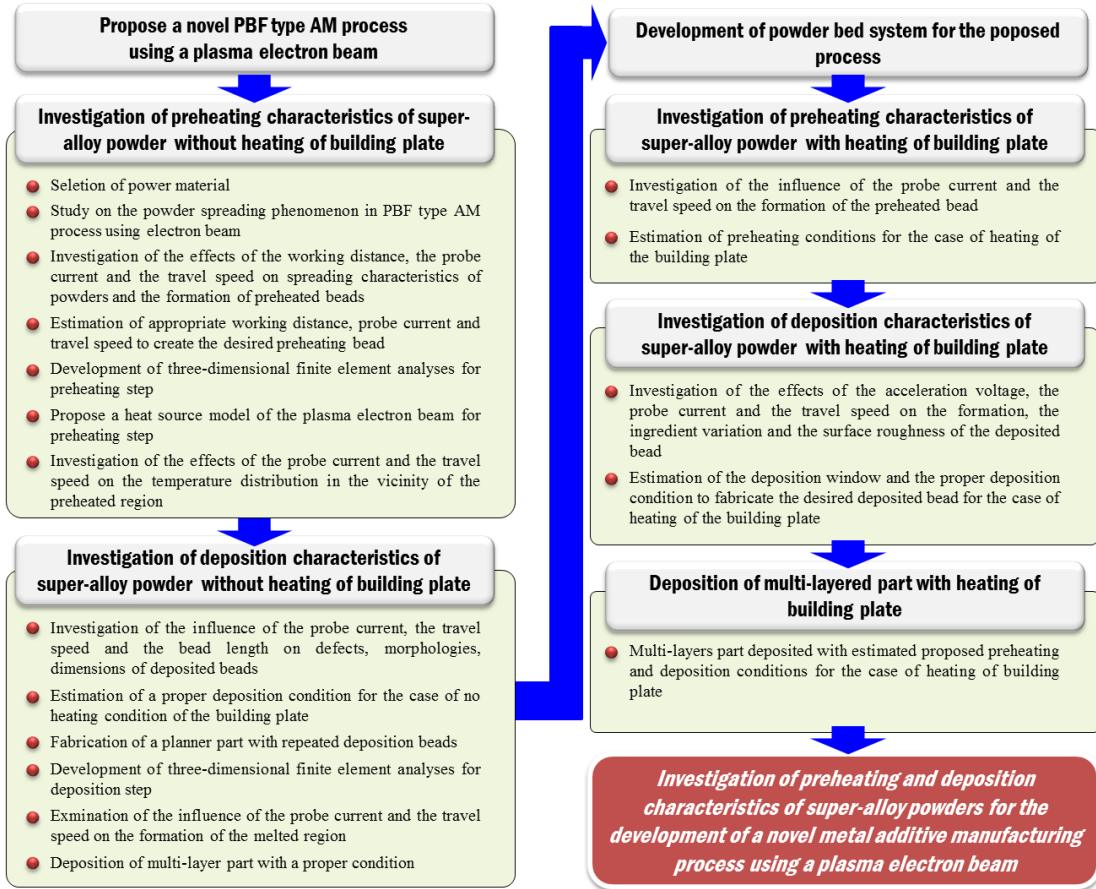
또한 전자빔 출력 및 스캔 속도에 따른 공정 변수 맵을 제안하였다.

Price 등은 EBM 공정에서 전자빔 스캐닝 속도와 전류에 따른 적층 비드 높이 변화를 분석하였다.<sup>89</sup> 또한, 해석적 기법을 이용하여 스캐닝 속도에 따른 적층부 주위의 온도분포, 용융풀 생성특성 및 열전달 특성 변화를 분석/고찰하였다.

## 제 4 절 연구 목표 및 방법

이 연구에서는 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정 개발을 위한 초합금 분말의 전자빔 예열 및 적층 특성을 분석 및 고찰하고자 한다. 이를 통하여 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정을 제안하고자 한다. 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정을 설계하고 기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 예열 및 적층 특성을 분석 및 고찰 하고자 한다. 기저부 비가열 조건은 전자빔으로 기저부를 가열하지 않는 조건을 의미하며 이 조건에서는 시편을 진공챔버 외부에서 150 °C 로 30 분 동안 가열한 후 진공챔버 내부에 장착하였다. 예열 및 용융/적층 공정에 대한 열전달 해석 모델을 개발하고, 이 모델을 이용하여 예열 및 용융/적층 공정에서 열전달 및 온도분포 특성을 분석/고찰하고자 한다. 이 결과들로부터 기저부 비가열 조건에서 예열/용융·적층 공정의 지배적인 공정 변수와 이 공정 변수에 따른 생성 비드 특성을 분석하고, 이를 고려하여 분말 베드 용해형 플라즈마 전자빔 기반 신개념 금속 적층 제조 공정의 실험 시스템을 개발하고자 한다. 또한, 개발된 실험 시스템을 이용하여 기저부 가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 예열 및 적층 특성을 고찰 하고자 한다. 기저부 가열 조건은 전자빔으로 진공챔버내에서 기저부를 고온으로 가열하는 조건을 의미하며 이 조건에서는 시편을 전자빔으로 10 분 동안 가열한 후 실험을 진행하였다. 위 결과들을 종합하여 제안된 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정에 적합한 공정 조건을 도출하고자 한다. 최종적으로 제안된 공정을 이용하여 3 차원 제품 제작 실험을 수행하여, 제안된 공정의 금속 제품 제작성을 고찰하고자 한다. 연구 목표를 달성하기 위한 연구절차는 Fig. 10 과 같다.

제 2 장에서는 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정을 제안하고 기존에 사용되고 있는 전자빔을 이용한 분말 베드 용해형 금속 적층 제조 공정과



**Fig. 10 Procedure of investigation**

특징을 비교 분석하고자 한다.

제 3 장에서는 기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 예열 특성을 분석하고자 한다. 이를 위하여 이론적 접근으로 초합금 분말의 비산 메커니즘을 고찰하고, 기초실험을 통하여 가열온도에 따른 초합금 분말의 소결특성을 분석/고찰 하고자 한다. 이 연구에서는 Co 기반의 Stellite21 분말을 실험을 위한 초합금 재료로 선택하였다. 기저부 비가열 조건에서의 Stellite21 분말의 전자빔 예열 실험을 통하여 단일 예열 비드 생성 및 평면 예열 비드 생성 특성을 분석하고자 한다. 예열공정 해석을 수행하여 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열 비드 생성 메커니즘을 고찰하고자 한다. 이 결

과들을 이용하여 기저부 비가열 조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정에 적합한 예열 조건을 선정하고자 한다.

제 4 장에서는 기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 적층 특성을 분석/고찰한다. 기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 적층 실험을 통하여 단일 적층 비드와 단층 평면 적층 특성을 분석하고자 한다. 또한 적층 공정 해석을 수행하여 적층 비드 생성 메커니즘을 고찰하고자 한다. 이 결과들을 이용한 기저부 비가열 조건에서 플라즈마 전자빔으로 Stellite21 분말을 적층시 적용될 수 있는 적정 적층 조건을 도출하고자 한다. 또한, 도출된 조건을 이용하여 다층 적층 실험을 수행하고 그 특징을 분석 및 고찰하고자 한다.

제 5 장에서는 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정을 구현할 수 있는 진공용 분말 베드 실험 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 공정의 특징들이 구현될 수 있는 시스템 및 부품을 설계/제작한 후, 이 시스템을 이용하여 분말도포 성능을 실험적으로 고찰하였다.

제 6 장에서는 기저부 가열 조건에서의 Stellite21 분말의 전자빔 예열 특성을 분석하고자 한다. 기저부 가열 조건에서의 Stellite21 분말의 플라즈마 전자빔 예열 실험을 통하여 예열 공정 조건에 따른 예열 비드 생성 특성의 변화를 분석하고, 공정변수별 적정 예열 조건을 도출하였다.

제 7 장에서는 기저부 가열 조건에서의 Stellite21 분말의 전자빔 적층 특성을 분석하고자 한다. 기저부 가열 조건에서의 Stellite21 분말의 플라즈마 전자빔 적층 실험을 수행하여, 적층 공정 조건에 따른 적층 비드 생성 특성 변화를 분석/고찰 하였다. 이 결과들로부터 기저부 가열 조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 용융·적층 조건을 도출하고자 한다.

제 8 장에서는 제안된 진공용 분말 베드 실험 시스템과 6 및 7 장에서 도출된 기

저부 가열 조건에서의 **Stellite21** 분말의 예열/적층 조건을 이용하여 3 차원 금속 제품 제작 실험을 수행하였다. 이 실험 결과를 이용하여 제안된 신개념 금속 적층 제조 공정의 제품 제작 가능성과 적용성을 고찰하고자 한다.

## 제 2 장 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정

### 제 1 절 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정 설계

기존의 전자빔을 이용한 분말 베드 용해형 금속 적층 제조 공정의 기술적 개선점들을 보완하기 위하여 Fig. 11 과 같이 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정을 제안하였다.<sup>45</sup> 제안된 공정은 Fig. 11 과 같이 초기 상태, 분말 공급 (Powder feeding), 예열, 평면적층, 다층적층 및 채용용의 총 6 단계로 구성된다. 분말 공급, 예열 및 적층은 3 차원 제품 제작시 반복되고 채용용 공정은 일정 간격의 다층 적층 후 한 번씩 적용되며, 최종 층 적층 후 마지막으로 적용된다. 첫번째 단계인 초기 상태 셋팅에서는 후퍼시스템에 분말을 공급하고 적층판을 적층 간격만큼 하강시켜 적층 공정을 준비한다. 두번째 단계에서는 분말을 일정한 두께로 공급 한다. 분말 공급 단계는 후퍼시스템에 저장된 금속분말을 블레이드 시스템을 이용하여 적층판과 시스템 상판 (Base plate) 에 균일하게 도포하도록 고안되었다. 세번째 예열단계 에서는 전자빔을 이용한 분말베드용해형 금속 적층 제조 공정의 가장 큰 문제점인 분말 비산 현상을 억제하기 위해 고안되었다. 예열 단계는 플라즈마 전자빔의 특징 중 하나인 광폭의 전자빔을 저출력으로 연속적으로 방출하여 적층판위에 균일하게 도포된 분말에 약간의 소결층을 생성한다. 예열 단계를 통하여 분말층을 광범위하게 소결시켜 분말간 소결 및 분말과 적층판 간 연결로 정전하 밀집을 최소화 시키는 개념을 사용한다. 네번째

적층 공정은 먼저 생성된 예열층에 집속된 고출력 전자빔을 이용하여 분말을 국부/선택적으로 용융 및 적층 하는 단계이다. 다섯번째 단계에서는 분말공급, 예열 및 적층의 3 단계를 반복하여 다층 적층으로 3 차원 제품을 제작한다. 여섯번째 단계는 재용융 공정으로 제품의 기공제거를 통한 밀도 향상과 표면 요철 감소를 통한 표면조도 개선을 위해 일정 간격의 다층적층 후와 최종층 적층 후 재용융을 수행한다. 1 에서 6 단계를 반복하여 최종제품을 제작한다.

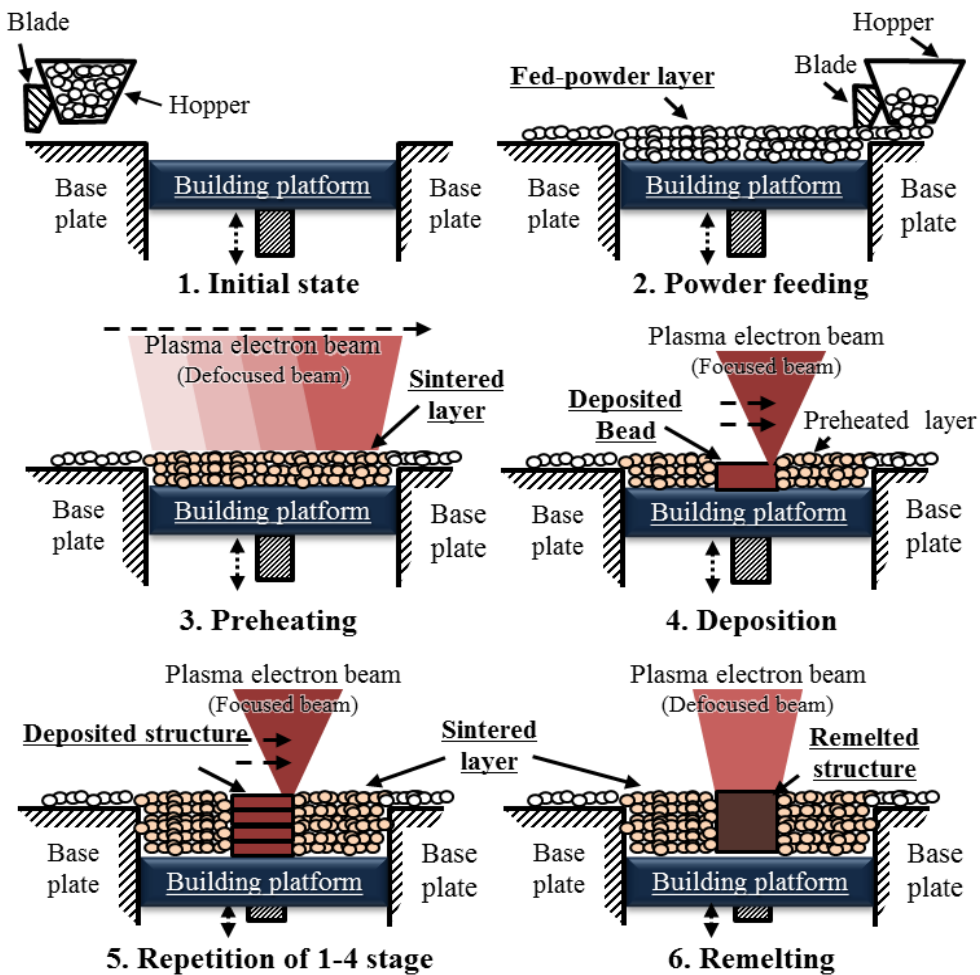


Fig. 11 Concept of the proposed novel metal additive manufacturing process using a plasma electron beam



## 제 2 절 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정 특징

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정과 기존공정의 가장 큰 차이점은 적층에 사용되는 전자빔의 종류와 예열 방법이다. 전자빔 종류의 차이로 인하여 제안된 공정과 EBM 공정은 Table 3 과 같은 차별성을 가진다. 열음극 방식의 열전자빔을 사용하는 EBM 공정의 전자총의 온도는 2,300 °C 내외이나 냉음극 방식의 플라즈마 전자빔 시스템의 전자총의 온도는 거의 상온이다. 공정 운용에 필요한 요구 진공도 수준은 EBM 공정의 경우  $10^{-5} - 10^{-7}$  Torr 이나, 플라즈마 전자빔의 요구 진공도 수준은  $10^{-2} - 10^{-3}$  Torr 정도이다. 또한 EBM 공정은 0.2 - 1.0 mm 의 직경을 가지는 집속된 빔을 빠르게 스캐닝 하여 적층 공정에 사용하지만, 플라즈마 전자빔을 사용하는 제안된 공정은 렌즈시스템을 조절하여 0.2 - 20 mm 수준의 직경/폭을 가지는 빔을 선택적으로 사용할 수 있다. 이와 같이 플라즈마 전자빔을 사용할 경우 저온 및 저진공에서 빔폭의 조절이 용이한 전자빔을 쉽게 방출 할 수 있어, 금속분말 적층 공정에 적용에 매우 유리하다. EBM 공정과 제안된 공정은 분말 예열 기법에도 Fig. 12 및 Fig. 13 과 같은 차이가 있다.

**Table 3 Comparison results between EBM and proposed process**

Type	Energy source	Environment temperature of gun system (°C)	Diameter of beam (mm)	Vacuum level (Torr)
EBM	Thermal electron beam (hot cathode)	≈ 2,300	0.2 - 1.0	$10^{-5} - 10^{-7}$
Proposed process	Plasma electron beam (cold cathode)	≈ 25	0.5 - 20	$10^{-2} - 10^{-3}$

Fig. 12 (a) 및 (b) 는 EBM 공정의 분말 예열 방법과 예열 시편을 나타내었다.<sup>90</sup> EBM 공정은 적층판을 가열 시스템을 가열함과 동시에 고속의 빔스캐닝을 통하여 도포된 분말 전체를 장시간 동안 가열하며 Fig. 12 (b) 의 예열 영역과 같은 상태로 금속 분말을 소결시켜 예열층을 생성한다. 그러나 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열 단계에서는 Fig. 13 과 같이 선택적으로 광폭의 전자빔을 분말 층과 적층판에 조사하여 적층에 필요한 원하는 영역의 분말간 및 분말·적층판간 약하게 소결시켜 예열층을 생성한다. EBM 공정의 초기 예열 시간은 Ti-6Al-4V 재료 기준으로 약 2 시간이 필요하다. 그러나 본 연구에서 제안된 공정을 사용할 경우 예열 단계를 통하여 약 10 mm × 60 mm 의 직사각형의 예열층 생성시 약 120 초 정도가 소요되었다.

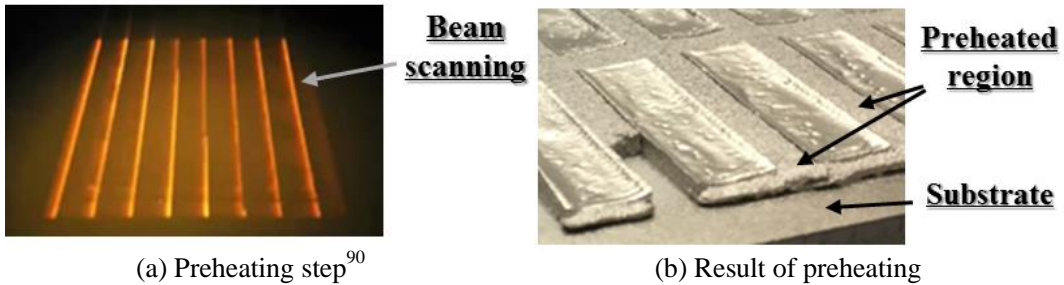


Fig. 12 Preheating method and result of EBM process

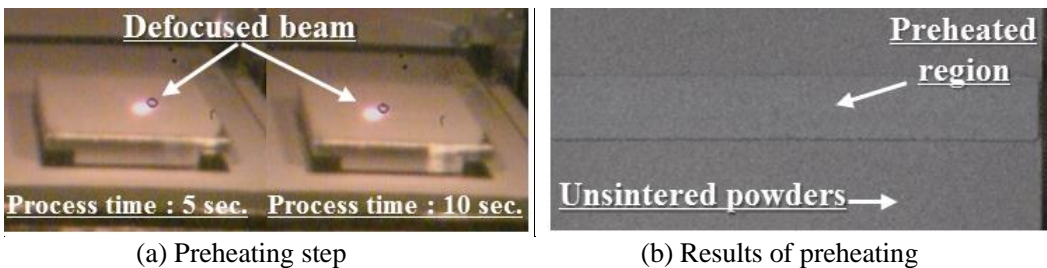


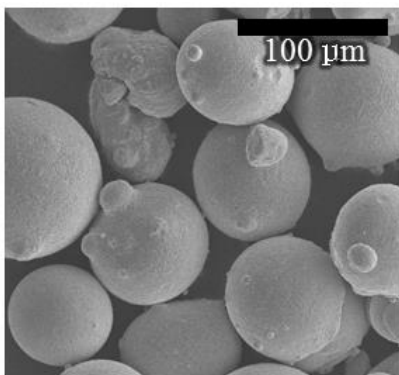
Fig. 13 Preheating method and result of the proposed process

# 제 3 장 기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자 빔 예열 특성 분석

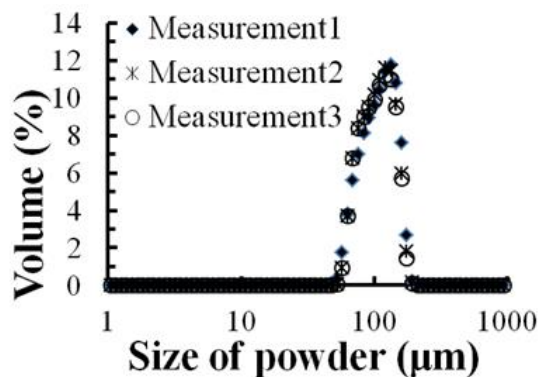
## 제 1 절 적층 분말 선택

이 연구에 사용될 초합금분말은 코발트계 합금인 Stellite21 이다. 코발트계 합금은 원자력 발전소, 자동차 엔진, 우주 항공 및 고프리미엄 제품군에 적용이 되는 재료이다.<sup>91,92</sup>

실험에 사용된 분말은 Deloro 사의 Stellite21 (DS01-22208) 이다.<sup>93</sup> Stellite21 분말의 크기는 45 - 150  $\mu\text{m}$  이다. Fig 14 (a) 와 (b) 는 실험에 사용된 Stellite21 재료의 입도 분석 결과이다. 입도 분석에는 레이저 입자 크기 분석기 (Laser particle size analyser, LS13 320, Beckman Coulter Inc.) 를 사용하였다. Stellite21 재료의 조성비는 Table 4 와 같으며 열, 전기 및 물리적 특성은 Table 5 와 같다.



(a) SEM image of powder



(b) Volume ratio according to size of powder

Fig. 14 Morphology and size distribution of Stellite21 powder

**Table 4 Chemical composition of major components of Stellite21 powder (wt %)<sup>93</sup>**

Co	Cr	Mo	C	Ni
Base	26-29	4.5-6.0	0.20-0.35	2.0-3.0

**Table 5 Thermal, Electrical and physical properties of Stellite21 powder<sup>93</sup>**

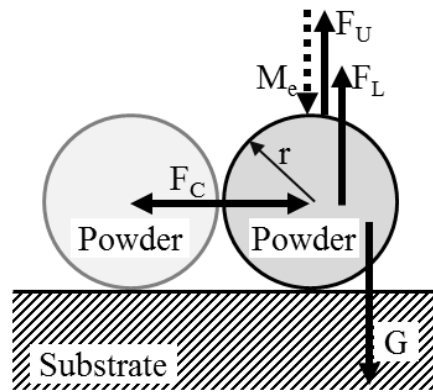
Hardness (HV)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young' modulus (GPa)	Thermal conductivity (W/m·K)	Electrical resistivity (μ-Ω ·cm)
290-430	8.33	1,295-1,435	1,000	650	245	14.5	87.4

## 제 2 절 초합금 분말의 비산 및 소결 특성 분석

### 1. 전자빔 적층 공정에서의 분말비산 메커니즘 분석

분말 비산 현상은 전자빔을 이용한 금속 적층 공정에서 극복해야 할 중요한 기술적 문제점이다. 전자빔을 이용한 금속 적층 공정은 분말 비산 현상을 제어하기 위하여 분말 예열을 수행한다. 예열 공정의 필요성에 대한 정확한 이해와 이를 기반으로 적정 예열 방법과 조건을 도출하기 위해서는 전자빔 적층 공정에서의 분말 비산 메커니즘에 대한 고찰이 필요하다. 전자빔 적층 공정에서 분말 비산 현상은 두가지 주요 메커니즘에 의하여 발생한다. 첫번째로는 진공 환경에서 적층판 (Building plate) 위에 도포된 분말에 전자빔을 조사하면 조사된 분말 표면에 정전하 현상이 발생 하고 이때 집적된 전자간에 발생하는 척력 (Repulsive force) 에 의하여 분말이 갑작스럽게 날아가는

메커니즘이다. 두번째로는 전자빔을 구성하는 가속된 전자의 운동량이 전자가 집적되는 분말에 전달되고, 전자로부터 분말에 전달된 운동량에 의하여 분말이 주위 분말이나 적층판에서 비산되는 메커니즘이다. 금속 분말에 전자빔 조사시 두가지 분말 비산 메커니즘은 혼합되어 나타난다. 전자빔 조사에 의한 금속 분말 비산에는 Fig. 15 와 같이 전자 운동량 (Momentum of electron :  $M_e$ ) 에 의한 전자가 집적된 분말이 적층판을 이탈하려는 힘 (Lifting force :  $F_U$ ), 전자간 척력인 쿨롱 힘 (Coulomb force :  $F_C$ ), 로렌츠 힘 (Lorenz force :  $F_L$ ) 및 분말 중력 (Powder gravity :  $G$ ) 등이 기여한다.



**Fig. 15 Free body diagram for negatively charged powders by an electron beam**

전자빔 내의 전자들의 운동량이 분말에 손실 없이 전달되고 전자빔이 수직 방향으로만 조사된다고 가정할 경우, 전자 운동량에 의한 전자 집적된 분말이 적층판을 이탈하려는 힘 ( $F_U$ ) 은 식 (3), (4) 및 (5) 를 이용하여 예측할 수 있다.<sup>78</sup>

$$V_e = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{eU}{m_\delta c^2}\right)^2}} \quad (3)$$

여기서  $V_e$ ,  $c$ ,  $e$ , 및  $m_\delta$  는 각각 전자의 속도, 빛의 속도, 전하량 (Electric charge), 및 전

자의 정지 상태 질량이다.

$$M_e = \frac{m_\delta V_e}{\sqrt{1 - \frac{V_e^2}{c^2}}} \quad (4)$$

$$F_U = \frac{M_e I_p}{e} \quad (5)$$

여기서  $I_p$  는 전자빔 검출 전류이다.

쿨롱 힘 ( $F_c$ ) 은 분말에 전자빔이 조사되어 분말에 전자들이 대전될 때 분말들 사이에 작용하는 정전기력으로 식 (6) 을 이용하여 산출할 수 있다.

$$F_c = k_e \times \frac{q^2}{D_p^2} \quad (6)$$

여기서  $k_e$ ,  $q$  및  $D_p$  는 각각 쿨롱힘 상수 (Coulomb's constant), 분말에 적용되는 전하량의 크기 (Signed magnitudes of the charges) 및 분말의 직경이다.

**Table 6 Conditions to estimate  $F_U$ ,  $G$ ,  $F_c$ , and  $F_L$**  <sup>62,78</sup>

c (m/s)	e (C)	U (V)	$m_\delta$ (kg)	$I_p$ (mA)	$\epsilon_\delta$ ( $N \cdot m^2 / C^2$ )	$D_p$ (m)	q (C)
$3.00 \times 10^8$	$1.60 \times 10^{-19}$	$1.20 \times 10^4$	$9.11 \times 10^{-31}$	0.93	$9 \times 10^9$	$9.75 \times 10^{-5}$	$9.80 \times 10^{-11}$

로렌츠 힘은 전자기장에 의하여 한 점에 집적되는 전기적 힘과 자기적 힘에 의해 결정된다. 전자빔을 이용한 분말 적층시 분말에 적용되는 로렌츠 힘은 식 (7) 으로 부터 구할 수 있다.<sup>62</sup>

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (7)$$

여기서  $\vec{E}$ ,  $\vec{v}$  및  $\vec{B}$  는 각각 전기장, 전하의 속도 및 자기장이다.

전자 운동량에 의한 전자 집적된 분말이 적층판을 이탈하려는 힘, 쿨롱 힘 및 로렌츠 힘을 예측하기 위한 조건들은 Table 6 과 같다. 각 힘 산출에 사용된 조건들 중 분말 직경은 본 연구에서 사용된 분말인 Stellite21 분말의 평균 직경을 사용하였다. 이 조건들을 식 (3) - (7) 에 대입하여 Table 7 과 같은 결과를 도출하였다. 로렌츠 힘 산출시 정상상태 전기 유량으로 가정하여 전기장에 의한 영향은 무시 하였으며, 전하의 속도 방향과 자기장의 방향은 수직으로 가정하였다. 로렌츠 힘 계산시 자기 유량 밀도는 Kahnert 등이 사용한 방법으로 산출하였다.<sup>62</sup>

Table 7 과 같이 전자 집적된 분말이 적층판을 이탈하려는 힘이 분말의 자중의 약 8.8 배정도로 크게 나타났다. 분말 표면에 집적된 전자들간의 척력인 쿨롱 힘은 자중의  $2.3 \times 10^5$  배 정도로 매우 크게 예측되었다. 그러나 자중이 로렌츠 힘보다 1,440 배 정도 크게 예측되었다. 이 결과들로부터 전자빔을 이용하는 분말베드용해형 금속 적층 제조 공정에서는 발생하는 분말 비산의 지배적인 구동력은 분말 표면에 집적된 전자들간의 척력인 쿨롱 힘이며, 로렌츠 힘은 분말 비산에 기여하지 못함을 알 수 있었다. 또한, 분말 비산을 해결하기 위하여 분말 표면에 집적된 전자들이 이동할 수 있도록 하기 위한 분말-분말 및 분말-적층판 사이의 물리적 연결하는 분말 예열 방법이 필요

함을 알 수 있었다.

**Table 7 Estimated  $F_U$ ,  $G$ ,  $F_c$ , and  $F_L$**

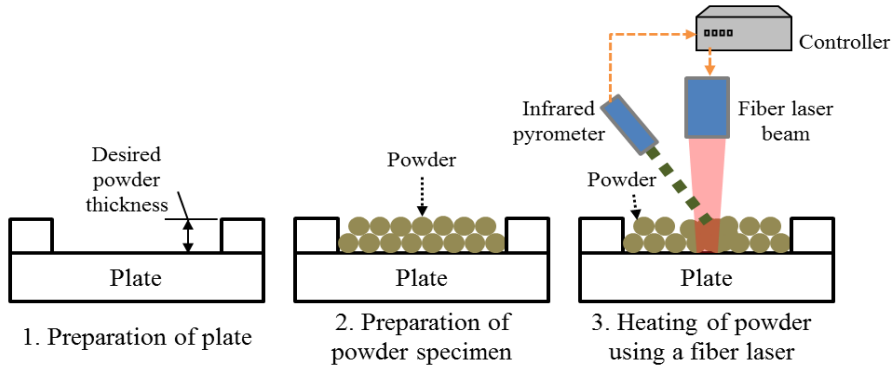
$F_U$ (N)	$G$ (N)	$F_c$ (N)	$F_L$ (N)
$3.46 \times 10^{-7}$	$3.95 \times 10^{-8}$	$9.09 \times 10^{-3}$	$2.74 \times 10^{-11}$

## 2. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결특성 분석

### 가. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결특성 분석 방법

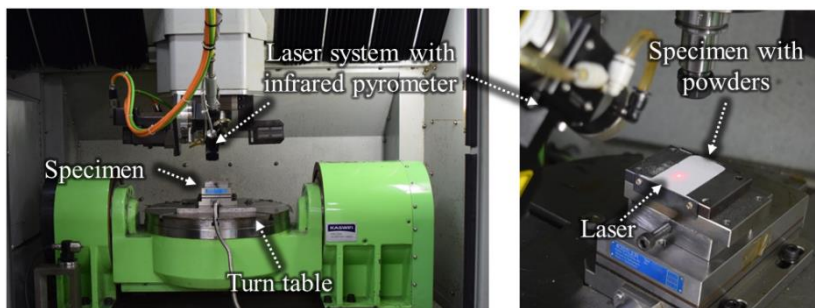
전자빔을 이용하는 분말 베드 용해형 금속 적층 제조 공정은 적층중 금속 분말의 비산을 억제하기 위하여 예열을 통한 분말간의 약한 소결상태를 생성하여야 한다. 선행 연구들에서는 EBM 공정에서의 예열 온도의 범위를  $0.4 - 0.6 T_m$  으로 제시하였다.<sup>94</sup> 그러나 적층 재료의 종류, 성분비 및 분말의 크기에 따라 소결 특성이 현저히 달라지므로 적층에 사용하고자 하는 재료의 주위 온도에 따른 소결 특성 분석이 필요하다. 이 연구에 사용되는 Stellite21 분말에 대한 가열 온도에 따른 분말 소결특성 변화 분석 실험을 하였다. 실험 절차는 Fig. 16 과 같다.





**Fig. 16 Procedure of sintering experiments**

Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결 특성 분석 실험 Set-up 은 Fig. 17 과 같다. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결 특성 분석 실험에서는 온도 측정 및 제어의 용이성을 고려하여 실시간 온도 측정 장치와 측정된 온도를 기준으로 레이저 출력이 제어 가능한 레이저 보조가공 머시닝 시스템을 이용하였다.<sup>95</sup> 레이저 종류는 다이오드 레이저 (Diode laser) 이며 최대 출력, 파장 범위 및 빔 품질은 각각 4 kW, 900 - 1,030 nm 및 20 - 150 mm·mrad 이다. 레이저 시스템과 연동된 온도 측정 장치는 LASCON infrared pyrometer 이다. 온도 측정 범위, 정밀도 및 분해능은 각각 100 - 2,200 °C,  $\pm 2$  °C 및 0.2 ms 이하 이다. 실험에 사용된 시편은 Fig. 18 과 같다. 실험에 적용된 분말층의 두께는 0.5 mm 이다.



**Fig. 17 Experimental set-up for sintering experiments**

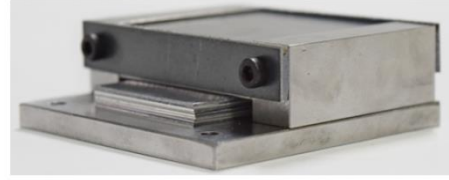
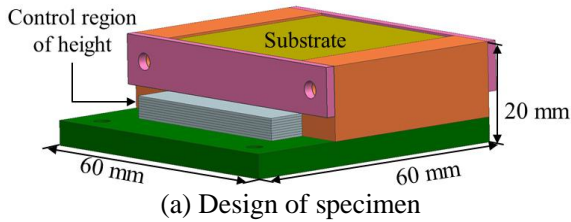
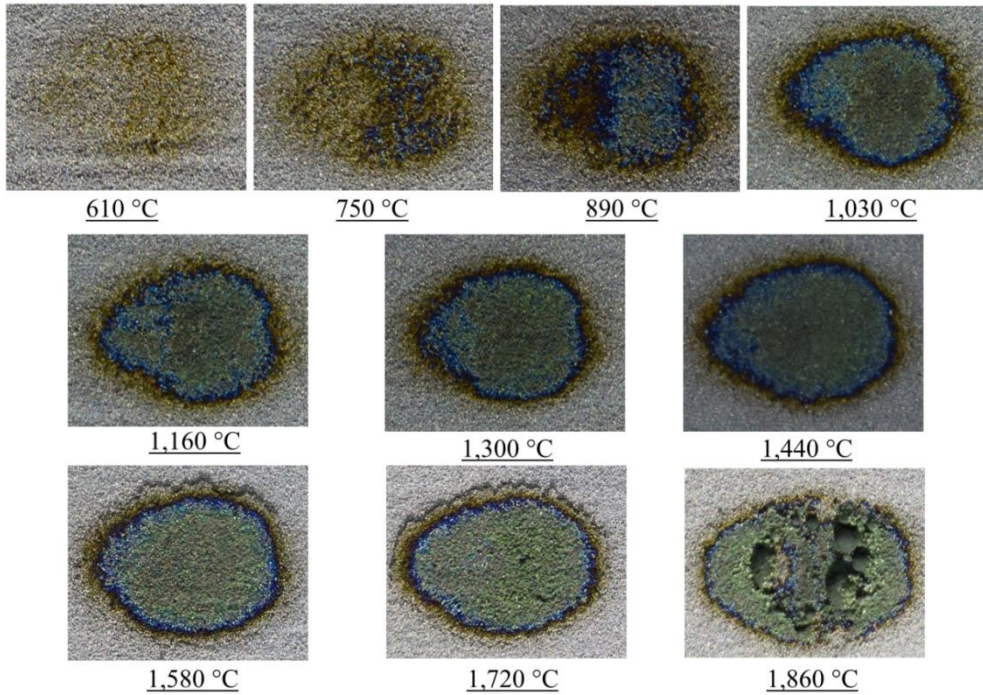


Fig. 18 Specimen of sintering experiments

소결 실험은 시편에 Stellite21 분말을 도포한 후 레이저 시스템을 통하여 30 초 동안 한점을 가열한 후 분말의 소결상태를 분석하였다. 실험에 적용된 온도 범위는 610 - 1,860 °C 이다.

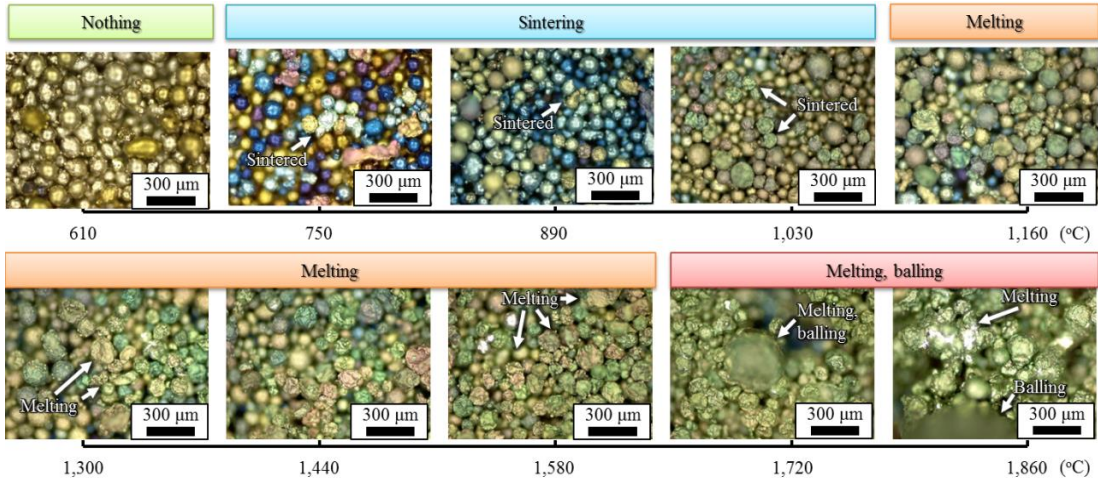
#### 나. Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결 특성 분석 실험 결과 및 고찰

Stellite21 분말의 가열 온도에 따른 소결 특성 분석 실험을 수행하고 표면의 상태 변화를 Fig. 19 와 같이 분석/고찰하였다. 실험 결과 Stellite21 분말은 표면의 평균온도가 750 °C 이상으로 가열 되어야 소결되기 시작함을 알 수 있었다. 또한 표면의 평균 온도가 890 °C 이상으로 가열될 경우 빔이 조사된 영역의 대부분이 소결되는 것을 알 수 있었다. 표면의 평균온도가 1,295 - 1,580 °C 일 때에는 분말 외부가 변색 되는 것 외에도 큰 변화가 없지만, 표면의 평균온도가 1,720 °C 이상에서 분말층의 일부분이 과도하게 용융되어 구형 형태로 뭉치게되는 볼링 (Balling) 결함이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



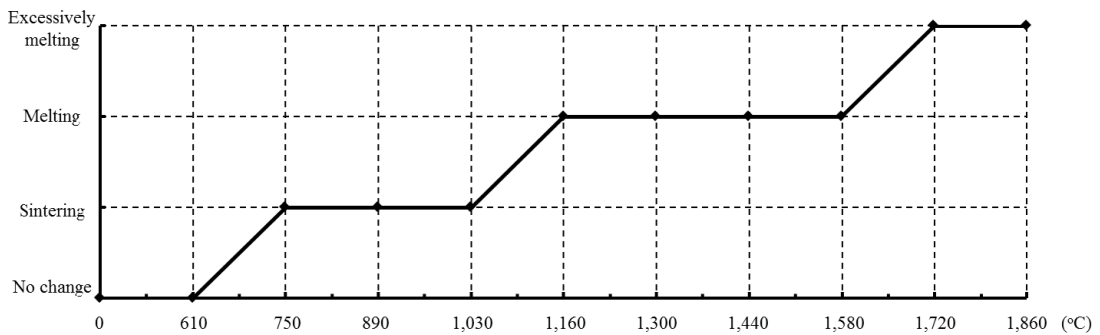
**Fig. 19 Variation of surface of the powder layer according to heating temperature**

광학현미경을 사용하여 Stellite21 분말의 가열온도에 따른 표면부 분말 결합 형태의 변화를 Fig. 20 과 같이 관찰하였다. 이 관찰 결과로부터 Fig. 21 과 같이 Stellite21 분말 가열 온도 영역별로 4 가지의 분말 상태를 도출할 수 있었다. 첫번째 상태는 Stellite21 분말을 가열했으나 분말의 변화가 발생하지 않는다. 표면 평균 온도가 610 °C 이하로 가열하였을 때 분말 표면의 일부가 산화되어 표면이 변색 되었으나, 분말의 소결은 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 두번째 상태는 균일하게 도포된 분말층에서 크기가 작은 분말의 일부가 국부적으로 용융 결합되어 분말에 약한 소결층이 생성 되는 것을 알 수 있었다. 분말 표면의 평균온도가 750 - 1,030 °C 범위로 가열할 경우 분말의 일부가 용융되어 소결층이 생성됨을 알 수 있었다. 세번째 상태에서는 Stellite21 분말이 용융되어 덩어리가 형성된다.



**Fig. 20 Morphologies of powders for different heating temperatures**

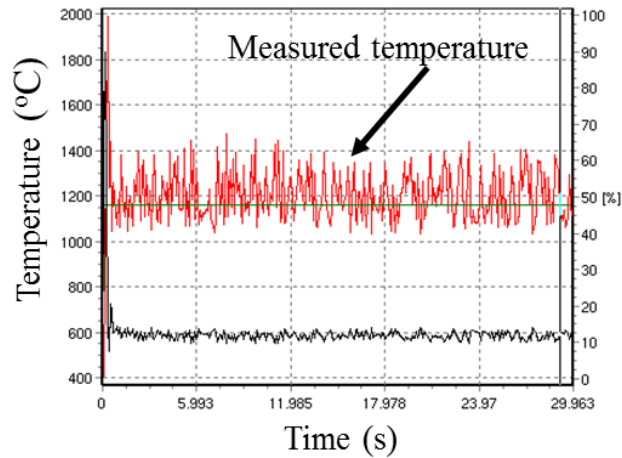
표면의 평균온도가 1,160 - 1,580 °C 범위에서 분말이 가열될 경우 분말층의 일부 분말이 완전히 용융 되는 것을 알 수 있었다. 마지막 상태에서는 Stellite21 분말이 국부적으로 과도 용융되어 큰덩어리로 뭉치는 볼링 결함이 발생한다. 표면의 평균온도를 1,720 °C 이상으로 가열할 경우 분말 층의 일부가 과도 용융된 후 구형으로 결합하여 볼링 결함이 발생하는 것을 알 수 있었다. 재료의 용융온도인 1,295 °C 보다 낮은 온도



**Fig. 21 Influence of heating temperature on the state of powder**

인 1,160 °C 부터 분말이 용융되기 시작하는 이유는 Fig. 22 와 같이 레이저 가열시스템 특성상 일시적으로 목표온도보다 높게 가열되는데 이로인하여 재료가 용융되는것으로 사료된다.

이 결과들로부터 Stellite21 분말에 소결층을 생성하기 위해서는 750 °C 정도로 분말을 가열하여야 함을 알 수 있었다.

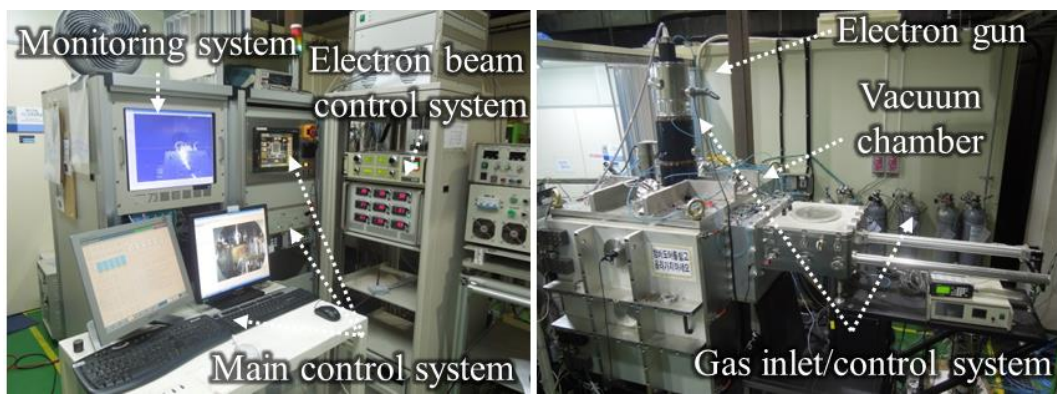


**Fig. 22 Measured temperature during sintering experiment**

### 제 3 절 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성 분석

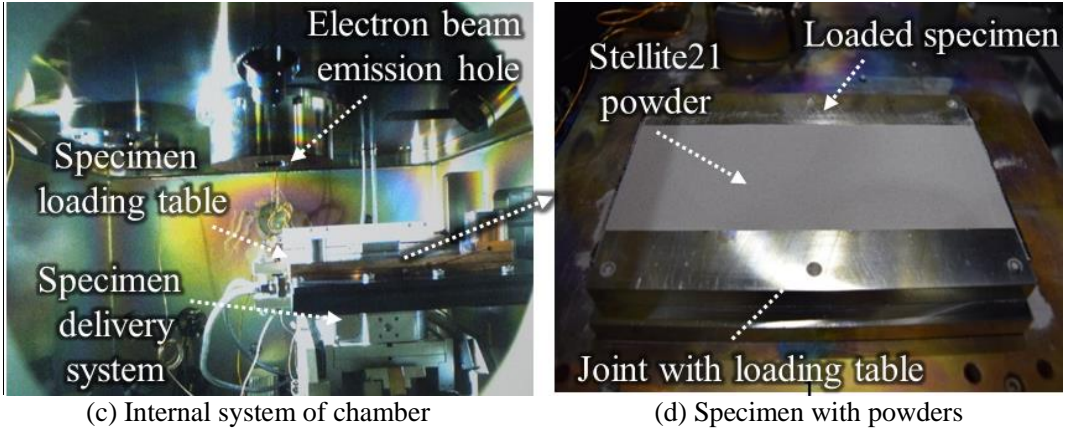
#### 1. 기저부 비가열 조건에서의 예열 비드 생성 실험 방법

기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성을 분석하였다. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 실험 셋업은 Fig. 23 과 같다. 여기서 기저부 비가열 조건이란 기저부를 전자빔시스템을 이용하여 가열하지 않는 조건을 의미한다. 이 조건에서는 시편을 진공챔버 외부에서 150 °C 로 30 분 동안 가열한 후 진공 챔버내부에 시편을 장착하여 실험을 진행하였다. 기저부 비가열 조건에서 시편가열은 히팅 플레이트 (Heating plate) 장치를 사용하였다. 이 실험에서는 한국생산기술연구원 에서 개발한 플라즈마 전자빔 피니싱 시스템을 사용하였다.<sup>96,97</sup> 플라즈마 전자빔 시스템은 전자총, 진공 챔버 및 3 축 이송 시스템으로 구성된다.<sup>96,97</sup> 이 시스템의 최대 방출 전압 및 방출 전류는 각각 40 keV 및 100 mA 이다.<sup>96,97</sup> 실험에 적용된 플라즈마 가스의 종류는 질소이다.

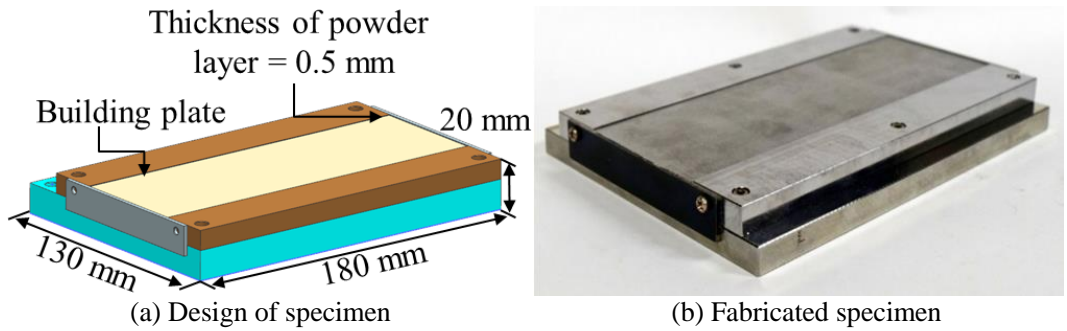


(a) Control and monitoring system

(b) Chamber and electron gun system



**Fig. 23 Set-up for preheating experiments (without heating of building plate)**



**Fig. 24 Specimen for preheating experiments (without heating of building plate)**

실험 중 빔의 위치, 속도 및 방향은 3 축 이송 시스템으로 제어된다.

실험을 위하여 60 mm × 180 mm 의 적층 면적을 가지는 조립형 시편을 Fig. 24 와 같이 설계 및 제작하였다. 시편의 재료는 S45C 이다.

기저부 비가열 조건에서의 예열 비드 생성 실험에 사용된 공정 변수는 공정 거리 (Working distance : WD), 전자빔 검출 전류 (Probe current :  $I_p$ ), 전자빔 가속 전압 (Acceleration voltage : U) 및 테이블 이송 속도 (Travel speed :  $V_t$ ) 이다. 공정 거리는 Fig. 25 와 같이 전자빔 방출구와 시편 최상단 간의 거리이다. 검출 전류는 시편단에서 페러데이 케이지 (Faraday cage) 로 측정된 전자빔 전류 이다. 기저부 비가열 조건에서의

예열 비드 생성 실험은 2 단계로 진행되었다. 첫번째 단계에서는 공정 거리에 따른 예열 비드 생성 실험을 수행하여 전자빔 시스템의 적정 공정 거리를 도출하였다. 두번째 단계에서는 첫번째 단계에서 선정된 적정 공정 거리에서 검출 전류와 이송 속도에 따른 예열 비드 생성 실험을 수행하였다. 기저부 비가열 조건에서의 공정 거리에 따른 예열 비드 생성 실험에 사용된 공정 변수 및 조건은 Table 8 과 같다. 또한, 기저부 비가열 조건에서 검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열비드 생성 실험에 적용된 공정 변수 및 조건은 Table 9 와 같다. 이 실험에 적용된 검출 전류, 가속 전압 및 이송 속도는 Lee 등의 선행연구 결과를 사용하였다.<sup>46</sup>

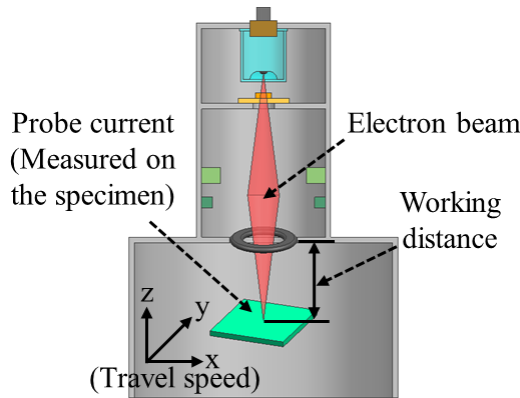


Fig. 25 Definition of process parameters

Table 8 Experimental conditions for preheating experiments to estimate a proper working distance (without heating of building plate)

Process	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)	Initial temperature of specimen ( $^{\circ}\text{C}$ )
Conditions	12	0.93	100 - 135	0.2	150



**Table 9 Experimental conditions of preheating experiments to estimate proper probe current and travel speed (without heating of building plate)**

Process	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)	Initial temperature of specimen ( $^{\circ}\text{C}$ )
Conditions	12	0.93 - 2.0	115	0.2 - 1.0	150

## 2. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 **Stellite21** 분말 단일 예열 비드 생성 특성 분석 결과 및 고찰

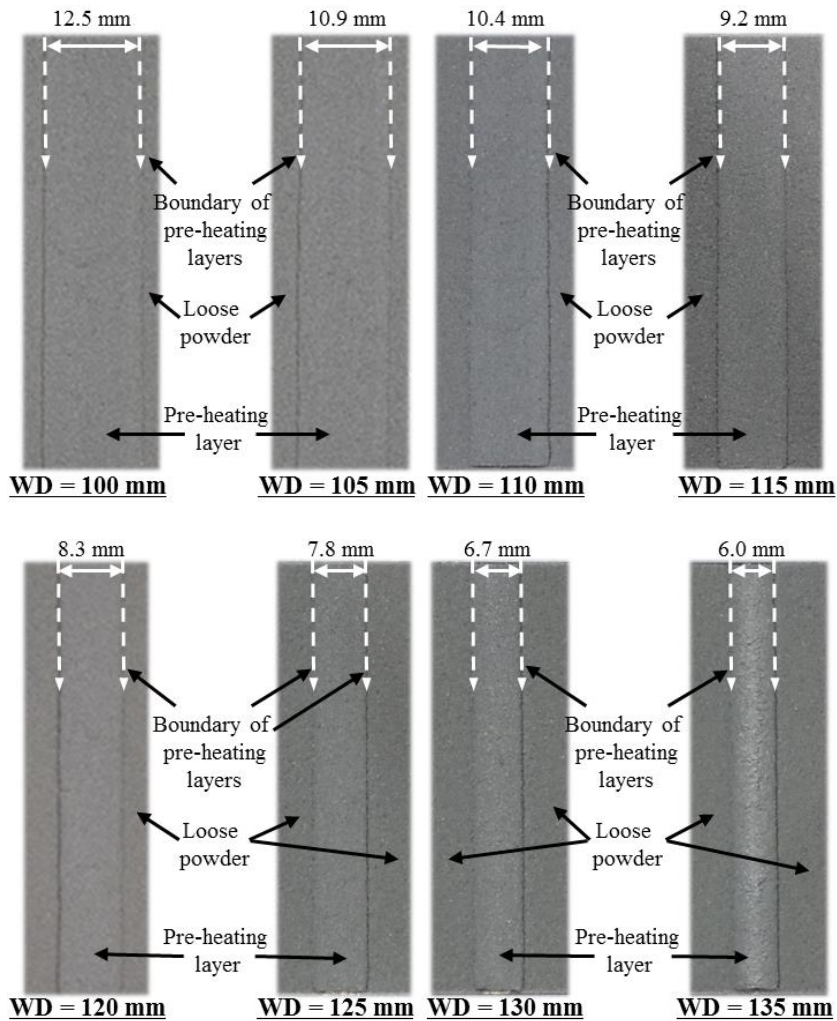
가. 플라즈마 전자빔 시스템의 공정변수에 따른 **Stellite21** 분말 단일 예열 비드 생성 특성

(1) 플라즈마 전자빔 시스템의 공정 거리가 **Stellite21** 분말 단일 예열 비드 생성 특성에 미치는 영향성

(가) 공정 거리에 따른 예열 비드 폭 및 외부 형상 변화

Fig. 26 및 Fig 27 은 공정 거리에 따른 단일 예열층 형상과 폭 변화이다. 실험에 적용된 모든 공정 거리에서 분말의 비산없이 예열층이 생성되었다. 그러나 공정 거리에 따라 예열 비드의 소결정도와 예열 비드의 폭은 다르게 나타났다. 공정 거리가 100 mm 인 경우와 105 mm 인 경우에는 예열 비드의 폭이 각각 12.5 mm 및 10.9 mm 로 측정되었다. 그리고 이 두 가지 조건에서는 예열 비드와 분말층의 경계가 매우 명확하

지 않아 자세히 관찰하지 않을 경우 예열 비드와 분말층의 경계를 구분하기 어려웠다. 공정 거리가 110 mm 이상 인 경우에는 공정 거리가 110 mm 부터 135 mm 까지 5 mm 씩 증가할수록 예열 비드의 폭이 10.4 mm, 9.2 mm, 8.3 mm, 7.8 mm, 6.7 mm 및 6.0 mm 로 점점 감소하였다. 또한 공정 거리가 110 mm 이상인 조건에서는 공정 거리가 증가할수록 예열 비드와 분말층의 경계가 더욱 더 명확하게 나타났다. 공정 거리가 증가할수록 예열 비드와 분말층의 경계가 명확해지는 이유는 공정 거리가 증가할수록 시편단에



**Fig. 26** Effects of working distance on the formation of preheating bead ( $U = 12$  keV,  $I_p = 0.93$  mA,  $V_t = 0.2$  mm/s, without heating of building plate)

적용되는 빔의 직경이 감소하여 전자빔의 출력밀도가 증가하기 때문으로 사료된다. 이와 같은 이유로 공정 거리가 135 mm 일 경우 예열 비드의 중앙부 분말 일부분이 용융되어 밝은 회색으로 변색되는 것을 관찰할 수 있었다.

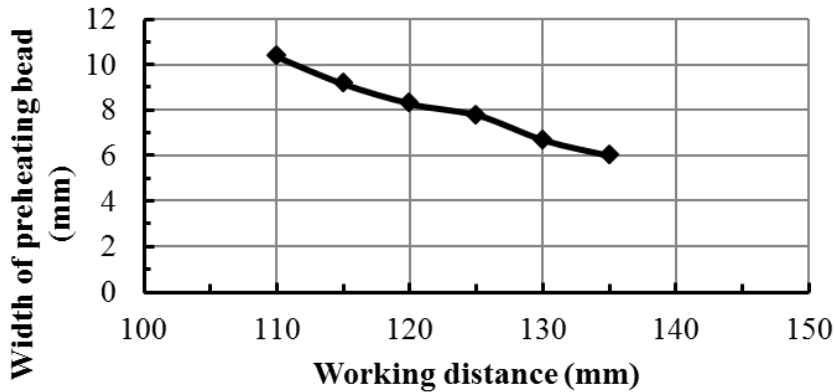
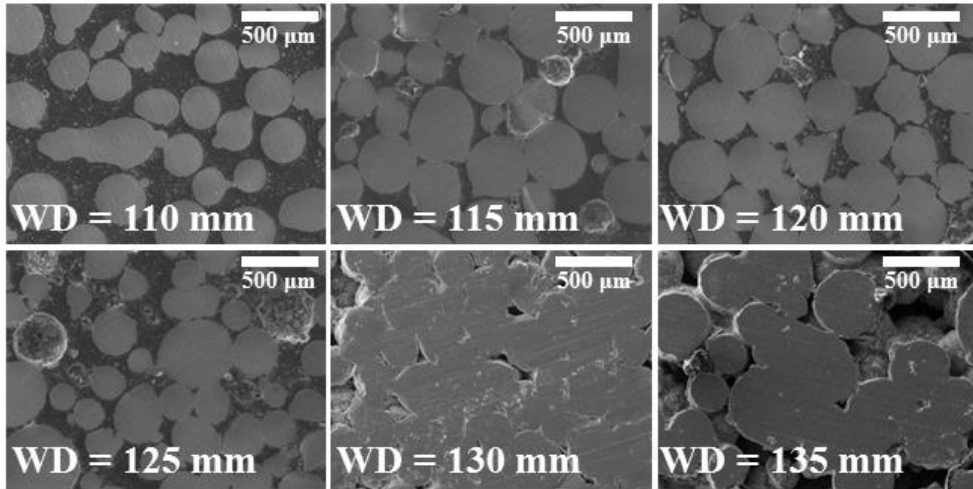


Fig. 27 Effects of working distance on the width of preheating bead

(나) 공정 거리에 따른 예열 비드의 분말간 결합 특성

실험 결과를 이용하여 공정 거리에 따른 예열 비드의 분말간 결합특성변화를 분석/고찰 하였다. Fig. 28 은 예열 비드를 마운팅 한 후 표면으로부터 0.2 mm 를 폴리싱 한 후 예열 비드 상면을 SEM (Scanning Electron Microscope) 으로 촬영한 결과이다. 공정 거리가 100 - 105 mm 일 경우 예열 비드의 결합력이 너무 약하여 예열 비드가 쉽게 부서져서 시편에서 취출하기 매우 어려웠다. 공정 거리 110 mm 의 경우 굵은 분말은 대부분 용융되지 않고 그대로 남아있으며 작은 분말들이 용융되어 굵은 분말들을 약하게 결합시키는 것을 알 수 있었다. 또한 분말간 거리가 다른 공정 거리를 적용하여 제작된 시편에 비해 멀리 떨어져 있어 공정 거리가 115 mm 에서 125 mm 인 경우에는



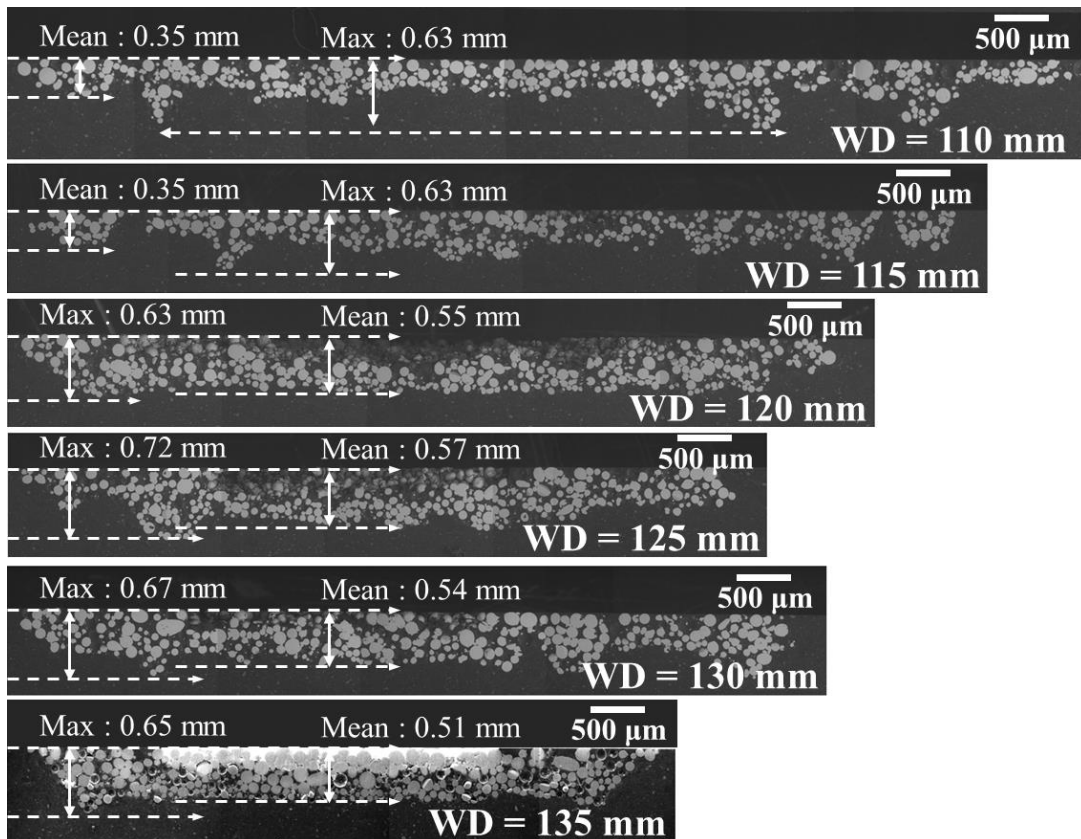
**Fig. 28 Effects of working distance on morphology of preheated bead ( $U = 12 \text{ keV}$ ,  $I_p = 0.93 \text{ mA}$ ,  $V_t = 0.2 \text{ mm/s}$ , without preheating of building plate)**

공정 거리가 110 mm 인 경우에 비해 분말들이 다소 뽁뽁하게 채워져 결합되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이 공정 거리 범위에서는 작은 분말뿐 아니라 큰 분말들도 국부적으로 용융되거나 2 개 이상의 큰 분말이 국부적으로 용융되어 하나로 결합되기 시작하는 것을 알 수 있었다. 공정 거리가 130 mm 이상인 경우에는 거의 모든 분말들이 용융되어 결합되기 시작하는 것을 알 수 있었다. 이 조건에서는 더 이상 작은 분말들이 분말상태로 존재하지 않으며, 분말들이 차지하고 있는 공간 밀도도 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.

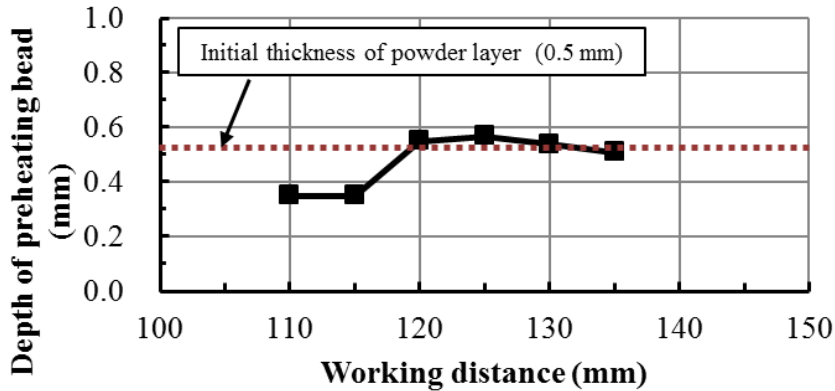
#### (다) 공정 거리에 따른 예열 비드 두께 및 단면 형상 변화 특성

공정 거리에 따른 예열 비드의 두께 및 단면형상을 비교/분석하였다. Fig. 29 는 공정 거리에 따른 예열 비드의 단면 조직 변화를 관찰한 결과이다. 또한 Fig. 30 은 공정 거리에 따른 예열비드의 두께 변화 선도이다. 공정 거리가 100 mm 및 105 mm 인 경우

예열 비드의 결합력이 너무 약하여 쉽게 부서져 시편 취출 및 단면촬영이 불가능 하였다. 공정 거리가 110 mm 및 115 mm 인 경우에는 예열 비드의 평균 및 최대 두께가 각각 0.35 mm 및 0.63 mm 내외로 거의 동일하게 관찰 되었다. 또한, 예열 비드의 가장 자리에서 조금 떨어진 영역에서 최대 예열 두께가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 조건들에서는 예열 비드의 평균 두께가 분말의 초기 도포 두께인 0.5 mm 보다 작게 나타남을 알 수 있었다. 이 결과로부터 공정 거리가 110 mm 와 115 mm 인 경우 분말층의 표면만 소결됨을 알 수 있었다. 공정 거리가 120 mm 및 125 mm 인 경우에는 예열 비드의 최대두께가 각각 0.63 mm 및 0.72 mm 로 측정되었다. 이 두가지 공정



**Fig. 29** Effects of working distance on the formation of cross section of preheated bead ( $U = 12 \text{ keV}$ ,  $I_p = 0.93 \text{ mA}$ ,  $V_t = 0.2 \text{ mm/s}$ , without heating of build plate)



**Fig. 30 Effects of working distance on the depth of preheating bead**

거리 조건에서는 예열 비드의 평균 두께가 각각 0.55 mm 및 0.57 mm 로 측정되었다. 공정 거리가 120 mm 에서 125 mm 로 증가할 경우 예열 비드의 평균두께가 0.02 mm 소폭 증가 하며 최대 두께가 0.09 mm 정도 증가함을 알 수 있었다. 공정 거리가 120 mm 이상일때에는 Fig. 29 와 같이 예열 비드의 평균 및 최대 두께가 분말층의 초기 도포 두께인 0.5 mm 보다 다소 크게 생성되는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 분말층을 가열하여 예열 비드를 생성할 경우 용융된 분말이 비용융된 분말과 결합됨과 동시에 장력이 작용하여 분말층이 재배치되어 분말층의 두께가 증가하게 됨으로 사료된다. 공정 거리가 130 mm 및 135 mm 인 경우에는 예열 비드의 최대 두께가 각각 0.67 mm 및 0.65 mm 로 관찰되었다. 공정 거리가 30 mm 와 135 mm 인 경우에는 예열 비드의 평균 두께가 각각 0.54 mm 및 0.51 mm 로 측정되었다. 공정 거리가 130 mm 에서 135 mm 로 공정 거리가 증가할때 평균 및 최대 두께가 감소하며 공정 거리가 120 mm 및 125 mm 인 경우보다 평균 및 최대 두께가 작아지는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 공정 거리가 증가할수록 전자빔의 직경이 감소하면서 전자빔의 출력 밀도가 증가함에 따라 초기에 도포된 모든 분말이 분말의 크기에 상관없이 동시에 용융되어 더 이상 재배치 되지 않기 때문으로 사료된다.

## (라) 적정 공정 거리 선정

전자빔 방출구와 시편 최상단간의 거리인 공정 거리에 따른 기저부 비가열 조건에서의 예열 비드 폭, 외부형상 및 깊이 변화를 분석결과, 공정 거리 영역에 따라 예열 비드 생성 특성이 조금씩 다르게 나타났다. 이는 전자빔의 특성상 공정 거리가 변함에 따라 시편에 적용되는 전자빔의 직경이 변화하여 예열 비드 생성에 적용되는 전자빔 에너지 밀도 (Energy density :  $E_D$ ) 와 전자빔 출력 밀도 (Power density :  $P_D$ )가 달라지기 때문에 사료된다. 전자빔 에너지 밀도 및 전자빔 출력 밀도는 각각 식 (8) 및 식 (9) 와 같이 정의될 수 있다.<sup>69</sup>

$$E_D = \frac{UI_P}{Sd_bv_t} \quad (8)$$

여기서,  $d_b$  및  $v_t$  는 각각 전자빔 직경 및 이송 속도이다. 전자빔 침투 깊이 ( $S$ ) 는 식 (2) 를 통하여 도출하였다.

$$P_D = \frac{UI_P}{\pi d_b^2} \quad (9)$$

플라즈마 전자빔을 이용한 초합금 금속 적층 제조공정에 적합한 예열 비드 생성 조건은 생산성을 고려하여 한번의 전자빔 스캐닝으로 넓은 비드 생성이 가능하고 예열층과 분말층 및 예열층간의 박리가 발생하지 않아야한다. 또한, 분말간에 충분한 소결이 발생하여 적층공정 중 발생하는 분말 비산 현상을 최대한 억제하여야 한다. 공정 거리가 105 mm 이하 일 경우 예열 비드의 폭은 넓으나 예열 비드를 취출 할 수 없을 정도로 분말간 결합력이 매우 약하여, 예열 공정 수행중 열응력이나 기타 작용력에 의

해 쉽게 손상될 수 있으므로 예열층 생성에 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 공정 거리가 120 mm 이상인 조건에서는 예열 비드가 두께 방향으로 모두 소결됨과 동시에 예열 비드와 분말층 사이의 경계부가 매우 뚜렷하게 생성되는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 공정 거리가 120 mm 이상인 경우 예열 비드와 분말층간의 박리가 발생할 가능성이 높을것으로 사료되었다. 공정 거리가 110 mm 와 115 mm 인 경우에는 충분한 분말간 결합력을 가지며 예열 비드와 분말간의 박리현상이 발생하지 않을 것으로 사료되었다. 이 두가지 공정 거리중 공정 거리가 115 mm 일때 예열층의 밀도가 더 높게 나타났다. 이 결과들로부터 기저부 비가열조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 예열시 적정 공정 거리를 115 mm 로 선택하였다.

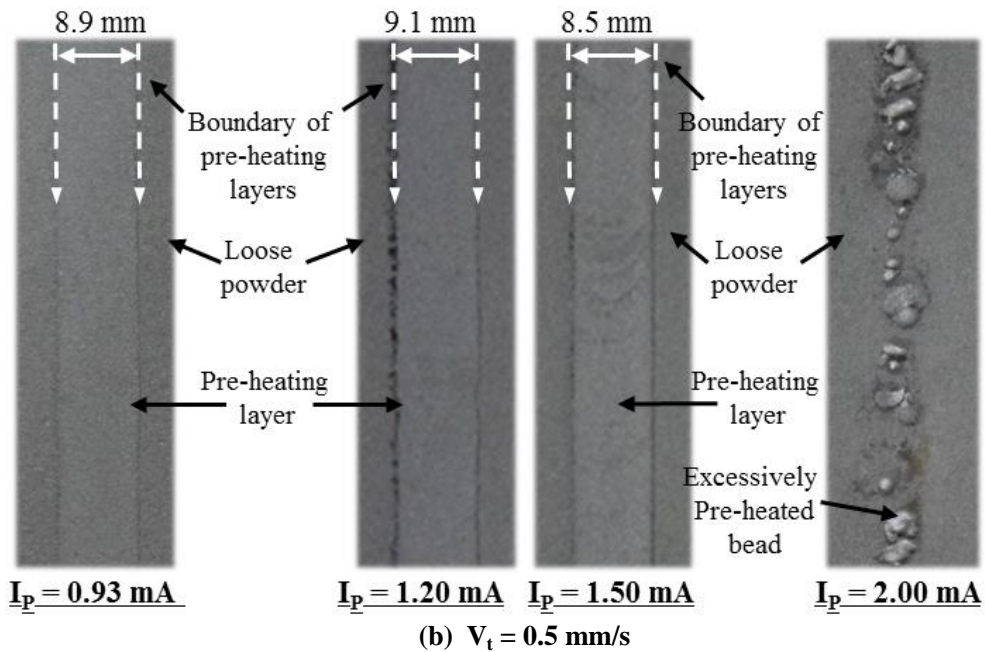
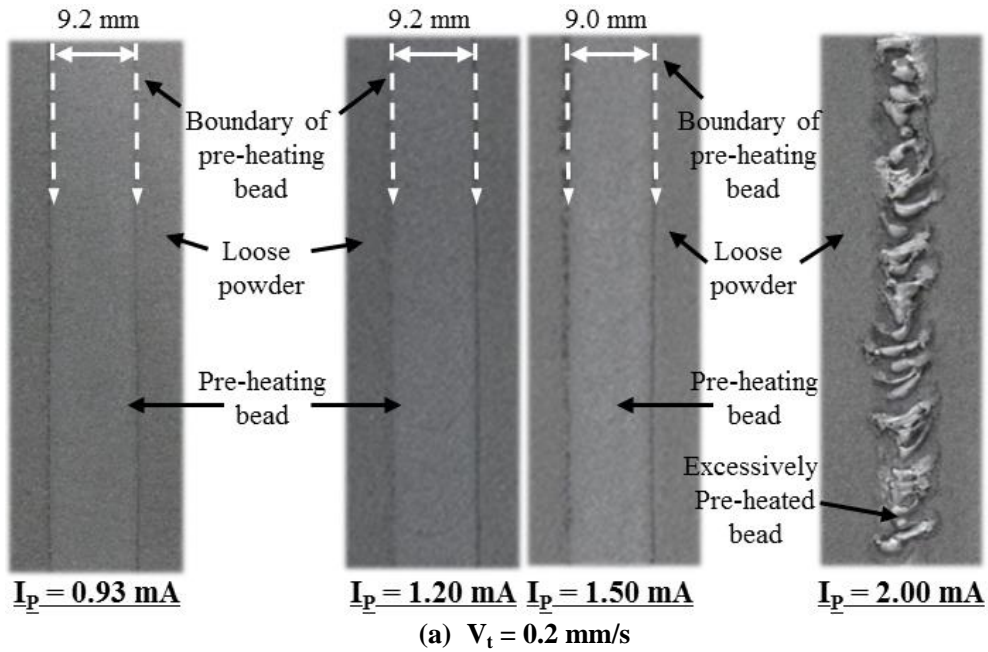
## (2) 플라즈마 전자빔 시스템의 검출 전류 및 이송 속도가 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성에 미치는 영향성 분석

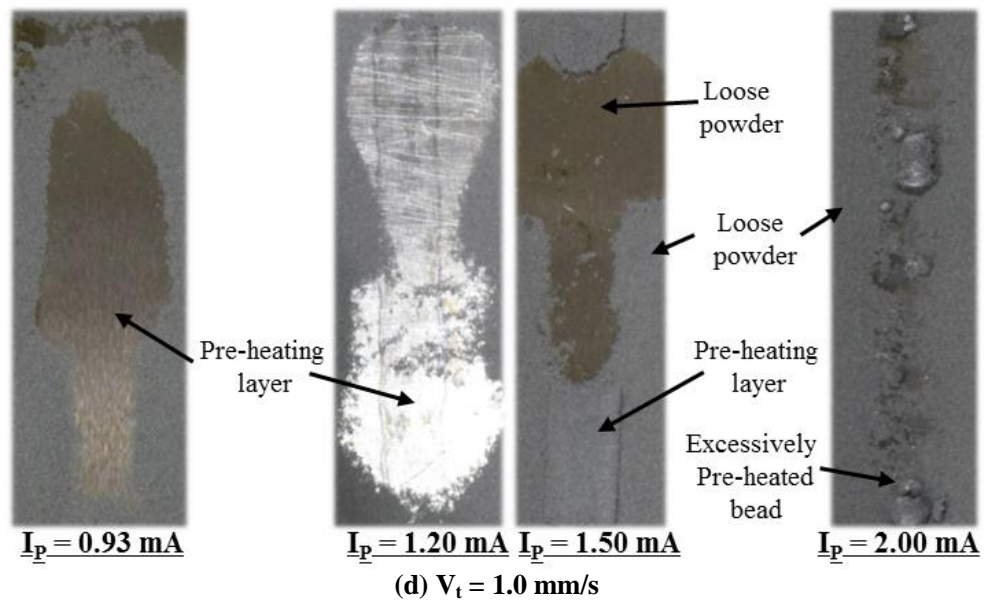
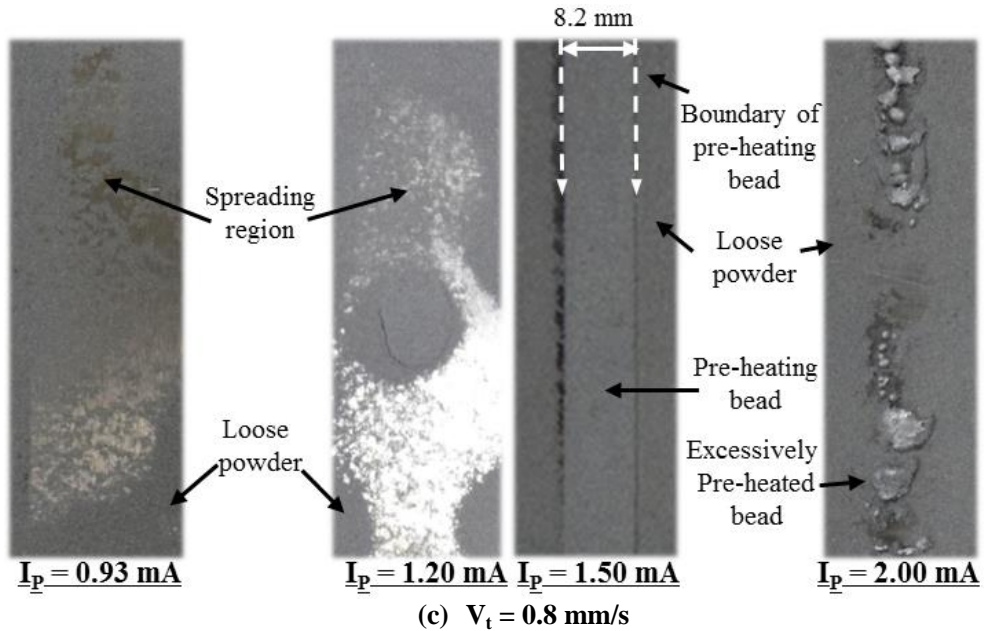
### (가) 검출 전류와 이송 속도에 따른 예열 비드 폭 및 형상 변화

플라즈마 전자빔 검출 전류 및 이송 속도가 Stellite21 분말 예열 비드 생성특성에 미치는 영향성을 분석하였다. 실험에 적용된 공정 거리는 적정 공정 거리로 선정된 115 mm 를 적용하였다.

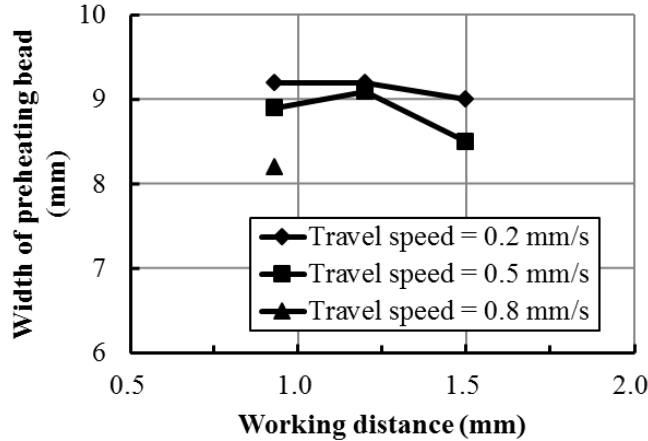
Fig. 31 은 실험결과 얻어진 검출 전류와 이송 속도에 따른 예열 비드 형상 변화를 나타내었다. Fig. 32 는 검출 전류 이송 속도에 따른 예열 비드 폭 변화 선도이다. 이송 속도가 0.2 mm/s 인 경우는 Fig. 31 (a) 와 같이 실험에 사용된 모든 검출 전류 조건에서 예열중 분말 비산 현상이 발생하지 않았다.







**Fig. 31 Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the preheated beads ( $U = 12 \text{ keV}$ ,  $WD = 115 \text{ mm}$ , without heating of building plate)**



**Fig. 32 Effects of process conditions on the width of preheating bead**

검출 전류가 0.93 mA 인 경우와 1.20 mA 인 경우에는 생성되는 예열 비드의 폭이 약 9.2 mm 로 관찰되었다. 검출 전류가 1.50 mA 인 경우에는 생성되는 예열 비드의 폭이 약 9.0 mm 수준으로 나타났다. 그러나 검출 전류가 2.0 mA 인 실험조건에서는 Stellite21 분말이 과도하게 가열되어 국부적으로 용융이 발생하여 매우 불균일하고 거친 표면을 가지는 비드가 생성되었다. 검출 전류가 1.0 mA 에서 1.5 mA 로 증가할 때에는 예열 비드의 폭이 약간 감소하는 것을 알 수 있었다.

이송 속도가 0.5 mm/s 인 경우에서도 Fig. 31 (b) 와 같이 실험에 적용된 모든 검출 전류 조건에서 예열중 분말 비산 현상이 발생하지 않았다. 검출 전류가 0.93 mA, 1.2 mA 및 1.5 mA 인 경우에는 각각 8.9 mm, 9.1 mm 및 8.5 mm 의 폭을 가지는 예열 비드가 생성되었다. 그러나 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 이송 속도 0.2 mm/s 와 유사하게 예열 비드가 과도하게 가열되어 분말의 용융이 발생하여 불균일 용융 비드가 생성되는 것이 관찰되었다. 이송 속도가 0.8 mm/s 인 경우에는 Fig. 31 (c) 와 같이 검출 전류가 1.2 mA 이하인 조건에서 예열중 Stellite21 분말의 비산 현상이 발생하였다. 검출 전류가 1.5 mA 인 실험 조건에서는 폭이 약 8.2 mm 정도인 예열 비드가 생성되었

다. 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 이송 속도 0.2 mm/s 및 0.5 mm/s 와 유사하게 불안정한 용융 비드가 생성되었다. 이송 속도가 1.0 mm/s 인 경우에는 검출 전류가 1.5 mA 이하인 조건에서 예열층 분말 비산 현상이 발생하였다. 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 국부적으로 용융된 불균일 용융 비드가 생성되었다.

Fig. 31 으로부터 이송 속도가 증가할수록 분말 비산이 발생하지 않는 예열 비드 생성 가능 최소 검출 전류가 Table 10 과 같이 증가하는 것을 알 수 있었다.

**Table 10 Minimum probe current to prevent spreading of Stellite21 powders**

$V_t$ (mm/s)	0.2	0.5	0.8	1.0
$I_p$ (mA)	0.93	0.93	1.5	-

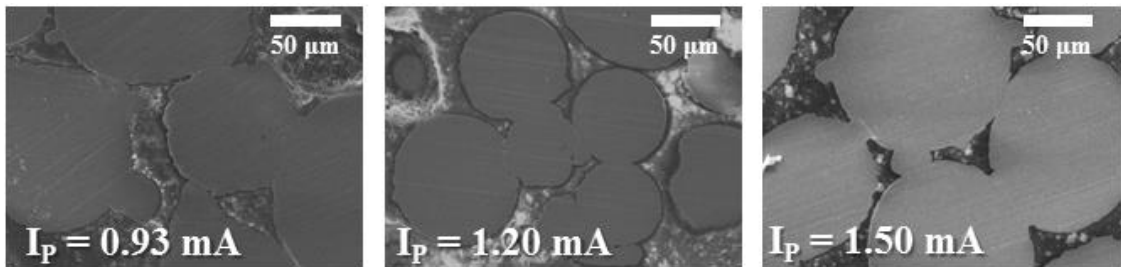
검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 모든 이송 속도에서 예열 비드가 아닌 불안정 용융 비드가 생성되었다. 분말이 비산되지 않는 검출 전류와 이송 속도 범위에서는 이송 속도가 증가할수록 예열 비드 폭이 감소하였다. 이 현상은 이송 속도가 증가 할수록 분말에 적용되는 전자빔 에너지 밀도가 감소하기 때문으로 사료된다.

이송 속도가 0.2 mm/s 와 0.5 mm/s 에서는 검출 전류가 1.2 mA 에서 1.5 mA 로 증가할 경우, 예열 비드 폭이 약간 감소하고 예열층과 분말층의 경계가 좀더 뚜렷해 지는 것을 알 수 있었다.

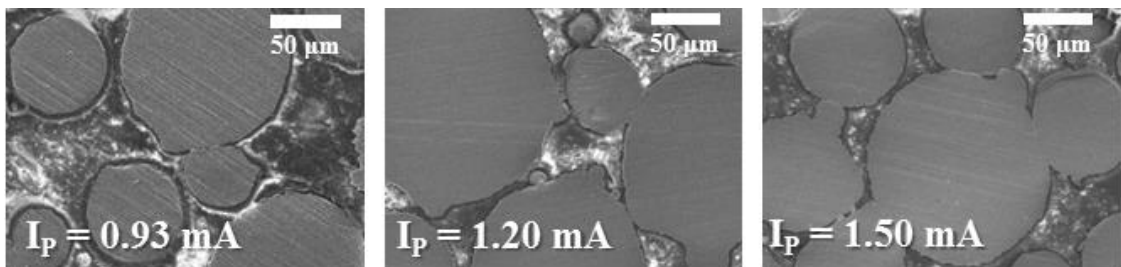
#### (나) 검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열 비드의 분말간 결합특성

검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열 비드의 분말간 결합특성을 분석하였다. 이 분석은 전체 실험 조건들 분말 비산이 발생하지 않는 검출 전류와 이송 속도 영역에

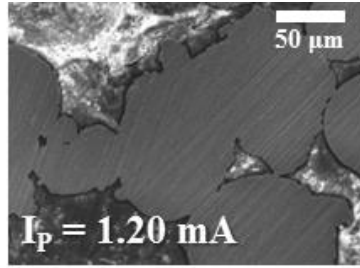
서 수행되었다. Fig 33 은 검출 전류에 따른 예열 비드의 분말간 결합특성을 분석한 결과이다. 이송 속도가 0.2 mm/s 인 경우에는 Fig. 32 (a) 와 같이 실험에 적용된 모든 검출 전류에서 분말의 크기에 상관없이 예열 비드내 모든 분말에서 소결이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 소결면의 길이가 최대 60  $\mu\text{m}$  정도로 다소 길게 측정되었다. 이송 속도가 0.5 mm/s 인 경우는 Fig. 33 (b) 와 같이 검출 전류가 0.93 mA 및 1.2 mA 일때 예열 비드 내부에 작은 크기의 분말들만이 국부적으로 용융되어 소결층이 생성된 것을 알 수 있었다. 이 조건들에서는 소결면의 길이가 10  $\mu\text{m}$  이하로 매우 짧게 나타났다. 검출 전류가 1.5 mA 인 경우에는 분말 크기에 관계없이 예열층내 모든 분말에서 국부적 용융이 발생하여 소결층이 생성된 것을 알 수 있었다. 이송 속도가 0.8 mm/s 인 경우에는 Fig. 33 (c) 와 같이 검출 전류 1.5 mA 에서만 예열층이 형성되었으며, 예열층 소결 상태는 이송 속도 0.5 mm/s 및 검출 전류 1.5 mA 와 거의 유사하나 분말간 소결 면적은 약간 감소하는 것을 알 수 있었다.



(a)  $V_t = 0.2 \text{ mm/s}$



(b)  $V_t = 0.5 \text{ mm/s}$



(c)  $V_t = 0.8 \text{ mm/s}$

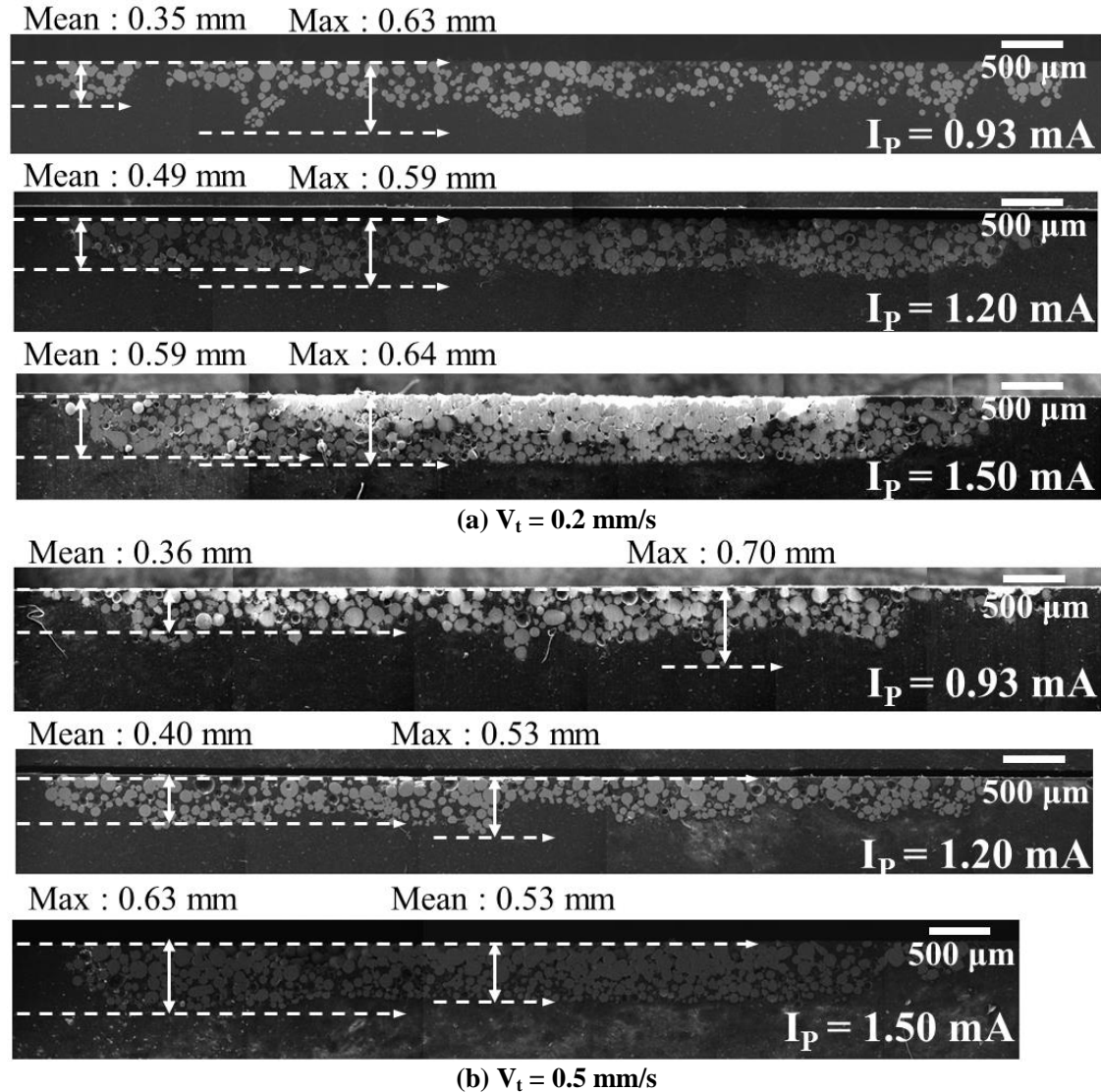
**Fig. 33 Influence of probe current and travel speed on the morphology of the preheated bead ( $U = 12 \text{ keV}$ ,  $WD = 115 \text{ mm}$ , without heating of building temperature)**

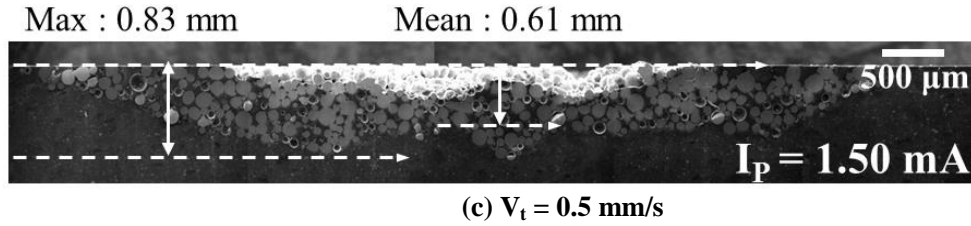
이 결과들로부터 예열 비드내 분말들의 결합 상태를 두가지 모드로 분류할 수 있었다. 첫번째 결합모드는 예열 비드내 모든 분말이 용융되어 소결 면적이 넓은 완전 소결 모드이고, 두번째 결합 모드는 예열 비드내 작은 분말만 용융되고 소결 면적이 상대적으로 적은 국부 소결 모드임을 알 수 있었다.

#### (다) 검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열 비드 두께 및 단면 형상 변화

검출 전류 와 이송 속도에 따른 예열 비드의 두께 및 단면 형상 변화를 고찰하였다. Fig. 34 는 전자빔 검출 전류와 테이블 이송 속도에 따른 예열 비드 단면의 형상 변화를 분석한 결과이다. Fig. 35 는 전자빔 검출 전류 및 테이블 이송 속도에 따른 예열 비드 단면의 두께 변화 선도이다. 이송 속도가  $0.2 \text{ mm/s}$  인경우 검출 전류가  $0.93 \text{ mA}$  인 조건에서는 분말층의 상면만이 소결되어 예열 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 그러나 검출 전류가 증가함에 따라 예열 비드의 두께가 두꺼워져 검출 전류가  $0.93 \text{ mA}$  에서  $1.5 \text{ mA}$  로 증가할 때 예열 비드의 평균두께가  $0.35 \text{ mm}$  에서  $0.59 \text{ mm}$  로 증가하였다. 이송 속도가  $0.5 \text{ mm/s}$  이고 검출 전류가  $0.93 \text{ mA}$  인 조건에서는 이송 속도가  $0.2 \text{ mm/s}$  이고 검출 전류  $0.93 \text{ mA}$  인 조건과 유사하게 분말층의 상면만이 소결되어

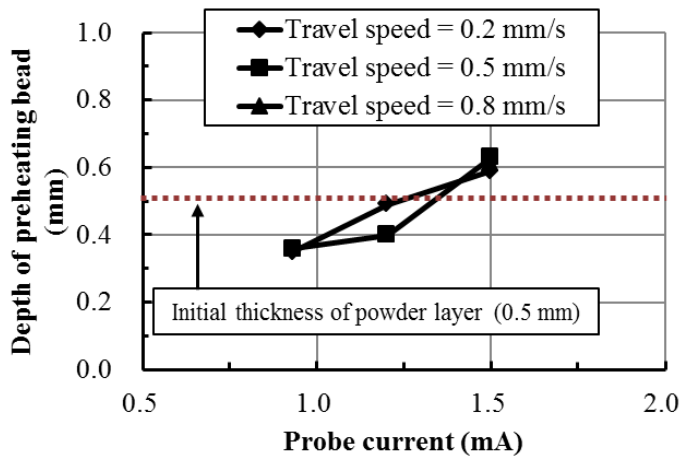
예열 비드가 생성됨을 알 수 있었다. 이송 속도가 0.5 mm/s 인 경우에는 검출 전류가 0.93 mA 에서 1.5 mA 로 증가할 때 예열 비드의 평균 두께가 0.36 mm 에서 0.53 mm 로 증가하였다. 이송 속도가 0.8 mm/s 이며 검출 전류가 1.5 mA 인 경우에는 예열 비드의 평균두께가 약 0.61 mm 정도로 나타났다.





**Fig. 34 Influence of the probe current and the travel speed on the formation of cross section of the preheated bead (U : 12 keV, WD : 115 mm, without heating of building plate)**

Fig. 34 에서 검출 전류가 0.93 mA 이고 이송 속도가 0.2 - 0.5 mm/s 인 경우에는 분말층의 표면 일부만 소결된 예열 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 검출 전류가 1.2 mA 이며 이송 속도가 0.2 - 0.5 mm/s 인 경우에는 예열 비드 두께와 비슷하였다. 검출 전류가 1.5 mA 인 경우는 실험에 적용된 모든 이송 속도 영역에서 과도하게 소결된 예열 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다.

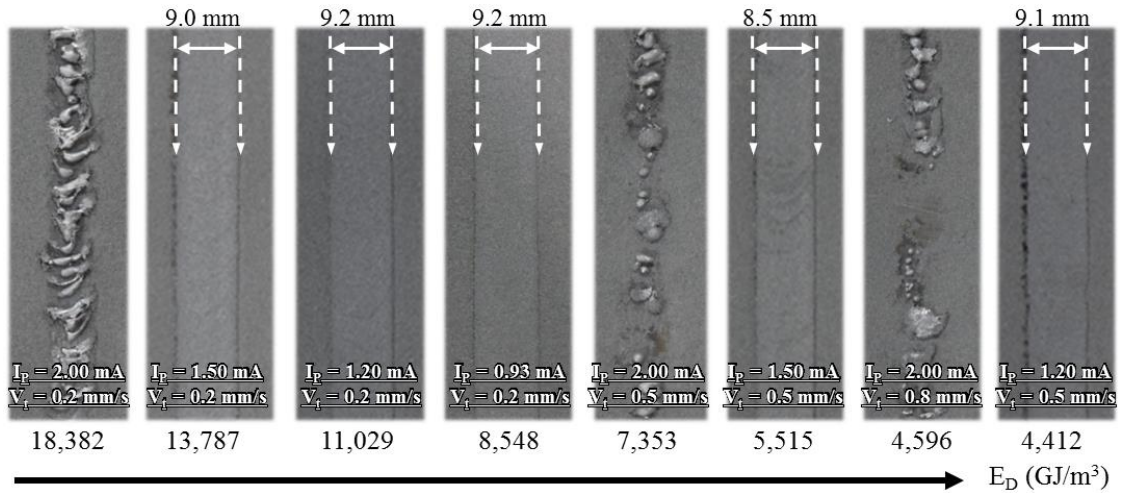


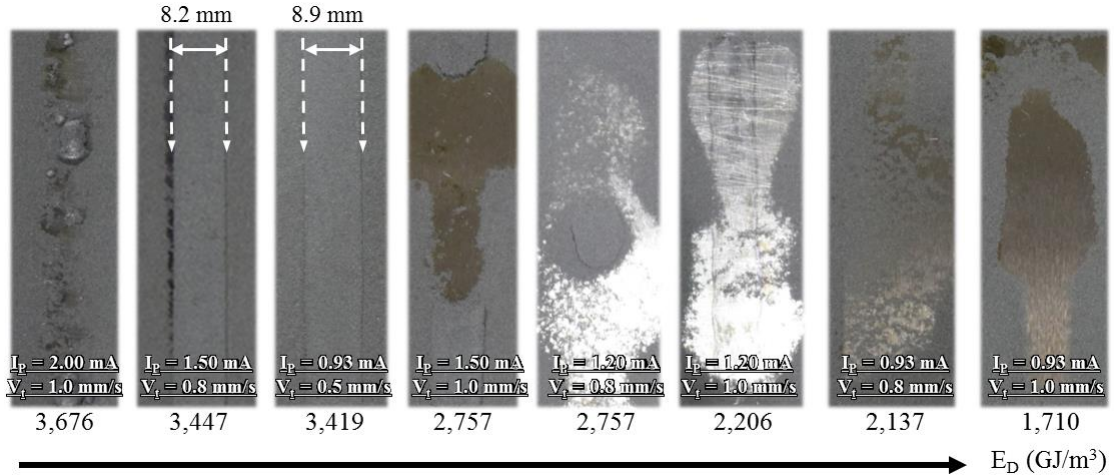
**Fig. 35 Effects of process conditions on the depth of preheating bead**



(라) 전자빔 에너지 밀도의 예열 비드 생성 특성 영향

Fig. 36 에서는 전자빔 에너지 밀도에 따른 예열 비드 형상 변화를 나타내었다. 예열 비드 생성에 적용된 전자빔 가속 전압 12 keV 에서는 전자빔 에너지 밀도가  $2,757 \text{ GJ/m}^3$  이하인 경우에는 검출 전류 및 이송 속도에 상관없이 예열 실험시 분말 비산 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 전자빔 가속 전압이 12 keV 이고 전자빔 에너지 밀도가  $3,419 \text{ GJ/m}^3$  이상인 경우에는 검출 전류 와 이송 속도 조합에 상관없이 분말의 비산이 발생하지 않음을 알 수 있었다. 그러나, 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 전자빔 에너지 밀도에 상관없이 예열 비드가 과도하게 가열되어 용융 비드가 포함된 매우 불균일하고 거친 표면을 가진 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 예열 단계의 분말 비산 현상은 전자빔 에너지 밀도에 크게 의존적임을 알 수 있었다.





**Fig. 36 Effects of energy density of electron beam on the formation of the preheated beam (U = 12 keV, without heating of building plate)**

(마) 적정 검출 전류 및 이송 속도 선정

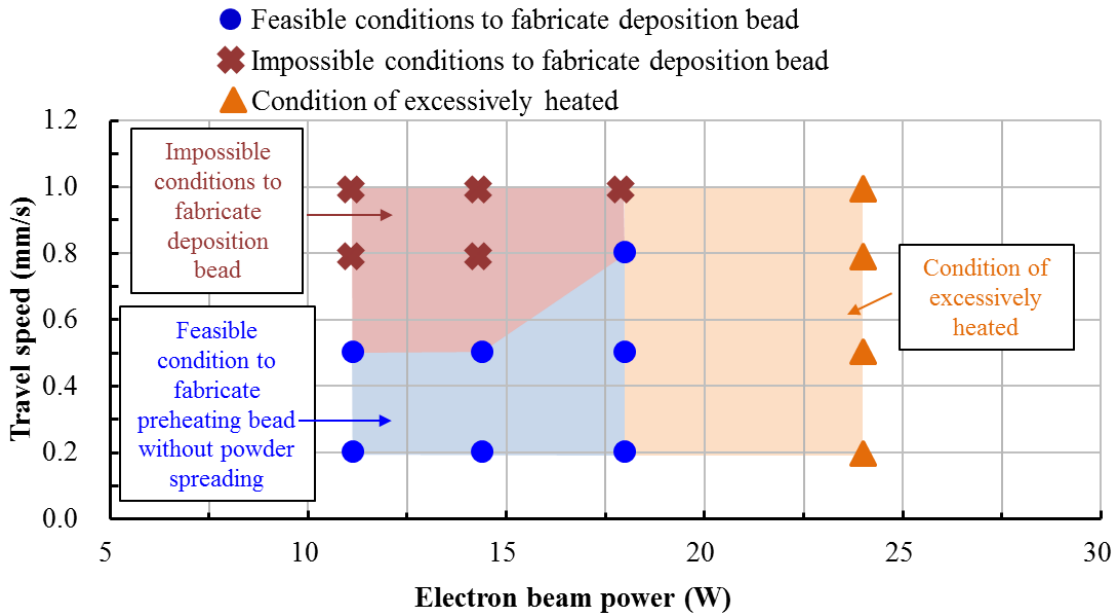
실험 결과들을 종합하여 기저부 비가열 조건에서의 전자빔 출력 및 이송 속도에 따른 예열 비드 생성 가능 범위를 Fig. 37 과 같이 도출하였다. Fig. 37 의 기저부 비가열 조건에서의 예열 윈도우 (Preheating window) 에서는 전자빔 출력 및 이송 속도 조합에 따라 과도용융, 분말 비산 및 예열비드 생성 가능 영역을 분류할 수 있었다.

기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 실험 결과로부터 검출 전류 와 이송 속도에 따른 예열 비드의 생성 특성을 분석/고찰 결과로부터 이송 속도와 검출 전류가 각각 0.2 mm/s 및 0.93 mA 일때 가장 넓은 예열 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 해당조건에서 예열 비드내 모든 분말에서 소결이 발생하여 상대적으로 넓은 면적의 소결층이 생성됨을 알 수 있었다. 또한, 단면 형상 분석 결과에서는 검출 전류가 0.93 mA 이고 이송 속도 범위가 0.2 - 0.5 mm/s 인 실험조건에서는 분말층의 표면 일부만 소결되는 약소결형 예열 비드가 생성됨을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한

Stellite21 분말 적층시 분말 예열을 방지하기 위한 적정 이송 속도와 검출 전류를 0.2 mm/s 와 0.93 mA 로 Table 11 과 같이 선정하였다.

**Table 11 Proper condition to fabricate preheating bead without heating of building plate**

Acceleration voltage (U, keV)	Probe current (I <sub>p</sub> , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed (V <sub>t</sub> , mm/s)
12	0.93	115	0.2

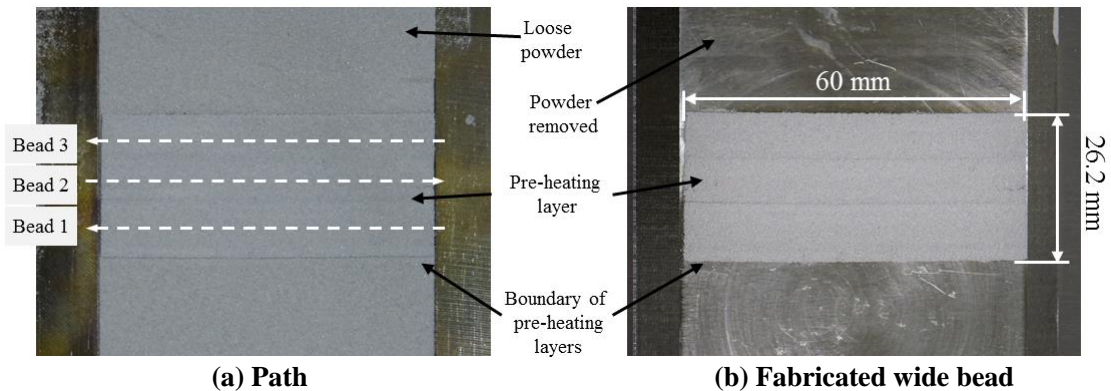


**Fig. 37 Preheating window (without heating of building plate)**

### 3. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 평면 예열 비드 생성 및 특성평가

기저부 비가열 조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성을 위한 적정 조건으로 선정된 가속 전압 12 keV, 검출 전류 0.93 mA, 이송 속도 0.2 mm/s 및 공정 거리 115 mm 인 예열 조건에 대하여 평면 예열 비드 생성 실험을 수행하였다. 제안된 공정조건을 이용하여 교차 이송 (Zig-zag travel) 방식으로 3 회 연속 이송하여 예열 비드를 생성하였다. 실험에 적용된 예열층의 오버랩 간격은 1 mm 이다.

실험결과 Fig. 38 과 같은 단일층의 평면 예열 비드가 생성되었다. 26.2 mm × 60 mm 면적의 직사각형의 평면 예열 비드를 제작할 수 있었다. 제작된 시편을 관찰한 결과 평면 비드 시편 내부에 박리나 과도한 뒤틀림 같은 결함이 발생하지 않은 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 제안된 기저부 비가열 조건에서의 적정 예열 비드 생성 공정조건이 평면 예열 비드 생성에 적용 가능하며 해당 조건을 이용할 경우 결함없는 평면 예열 비드 생성이 가능함을 알 수 있었다.

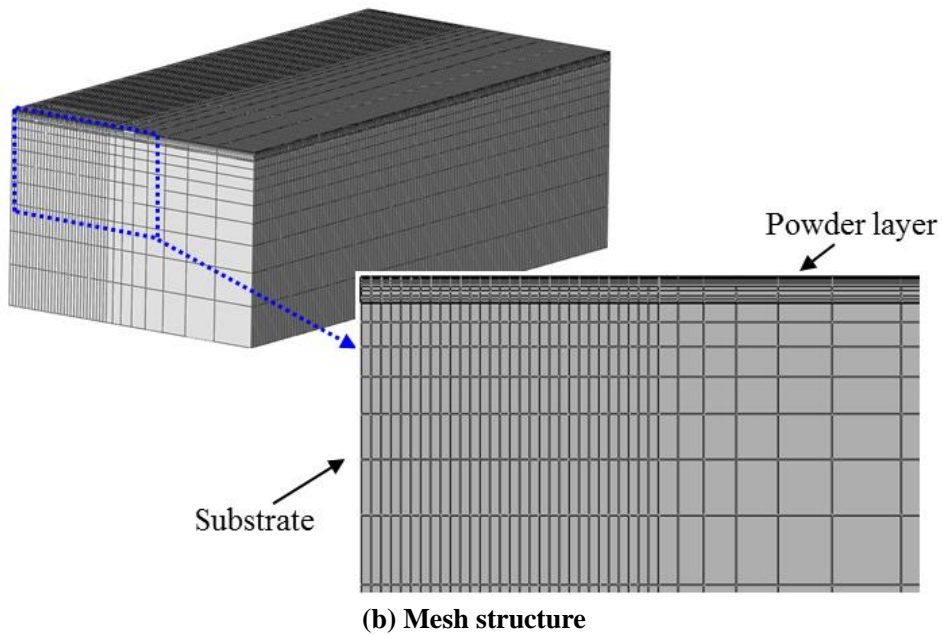
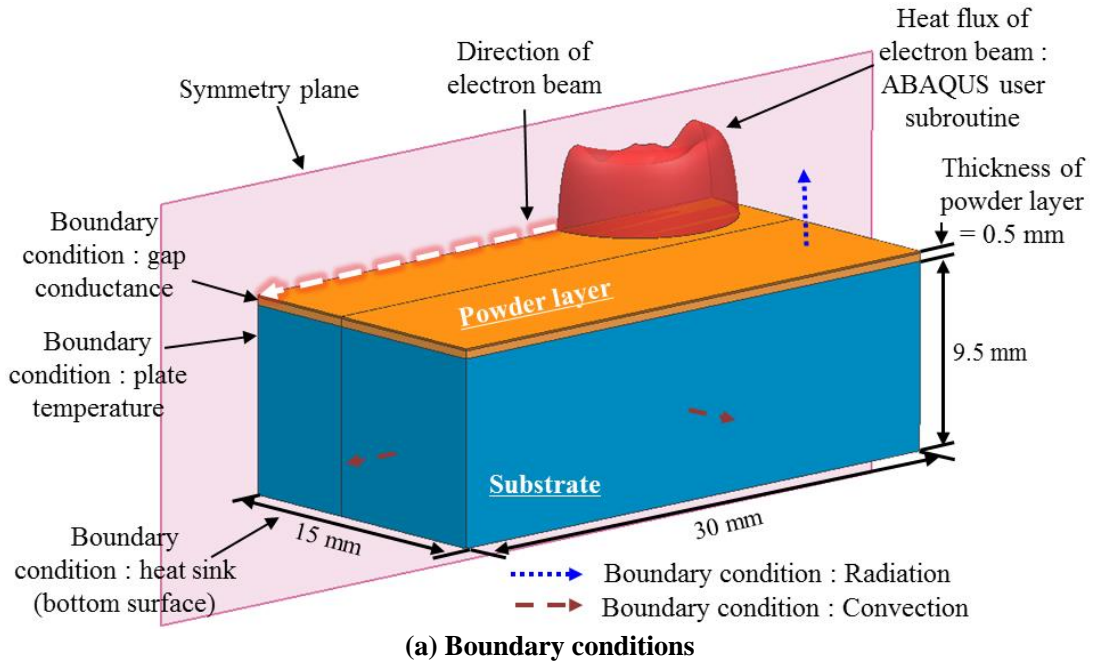


**Fig. 38 Path of experiments and the fabricated wide specimen using the proposed preheating condition**

## 제 4 절 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열 비드 생성 메커니즘 분석

### 1. 열전달 해석 모델 개발

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열 비드 생성 메커니즘 분석을 위하여 열전달 해석모델을 개발하였다. 3 차원 비정상 열전달 해석 모델 개발에 사용된 프로그램은 ABAQUS V12 이다. 해석 모델의 경계조건은 Fig. 39 (a) 와 같다. 열전달 해석 모델의 크기는 15 mm × 30 mm × 10 mm 이다. 유한요소해석 시간의 단축과 컴퓨터 저장 용량 감소를 위하여 대칭조건에 대한 해석 모델 설계하였다. 해석 모델에 적용된 Stellite21 분말층의 두께는 0.5 mm 이다. 해석 모델의 상면에 ABAQUS user subroutine 을 이용하여 전자빔 이동열원을 적용하였다. 분말층의 상면은 고온으로 가열되므로 방사조건을 부여하였으며 모재의 측면에는 저진공 상태의 대류 열전달 조건을 부여하였다. 또한 시편 하면에는 실험에 사용된 전자빔 적층 시스템의 구조를 고려하여 냉각 조건을 부여하였다. 열전달 해석 모델에 적용된 해석 격자는 Fig. 39 (b) 와 같다. 기저부와 분말층은 6 면체 입체요소 격자 (Hexahedral solid element) 로 표현되었다. 해석 모델의 격자수와 절점수는 Table 12 와 같다. 해석에 적용된 공정변수와 공정변수의 범위는 Table 13 과 같다. 해석모델에 적용된 빔직경은 10.2 mm 이며 분말층과 기저부의 재료는 각각 Stellite21 및 S45C 이다.



**Fig. 39 Model of three-dimensional transient heat transfer analysis for preheating process using a plasma electron beam**

**Table 12 Number of elements and nodes**

Parts	No. of elements	No. of nodes	Type of element
Powder layer	45,600	53,001	Hexahedral solid (DC3D8)
Substrate	51,300	58,890	

**Table 13 Process parameters for heat transfer analysis and their ranges**

Parameters	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current (I <sub>p</sub> , mA)	Travel speed (V <sub>t</sub> , mm/s)	Convection coefficient (mW/mm <sup>2</sup> k)	Gap conductance (mW/mm <sup>2</sup> k)	Temperature of heat sink (°C)	Initial temperature (°C)
Ranges	12	0.93 - 2.0	0.2- 1.0	0.001	0.47	25	150

## 2. 물성데이터 도출

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열단계에 대한 열전달 메커니즘을 분석하기 위하여 열전달 해석을 수행하고자 한다. 전자빔을 이용한 적층 공정에서는 두가지 메커니즘에 의한 열손실이 발생한다.<sup>98</sup> 첫번째는 전자빔에 의하여 직접적으로 가열되는 분말층의 복사열전달에 의한 열손실이다.<sup>98</sup> 두번째는 소결된 분말층의 열전도에 의한 열손실이다.<sup>98</sup> 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정은 예열 단계를 통하여 예열 비드를 생성한다. 예열 비드 생성시 초기에 단순 접촉상태로 놓여져 있는 분말은 일부가 소결되어 하나로 연결된다. 이와 같이 예열단계에서 분말의 상태가 변화할 경우 분말층의 열전달 특성이 변화하게 된다. 플라즈마

전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정 열전달 해석모델에서는 이와 같은 분말의 상태변화를 고려하기 위하여 분말의 상태, 기공률 및 온도가 고려된 열전달 해석용 물성데이터를 도출하고 적용하고자 한다.

예열 공정의 열전달 해석에 필요한 물성데이터는 온도 의존 밀도, 온도 의존 비열, 온도 의존 방사율 및 온도 의존 열전도도 이다. 또한, 온도에 따른 분말 상태 변화 정보도 요구된다. 분말의 상태, 기공률 및 온도 의존 열전도도는 식 (10)-(13) 을 통하여 도출하였다. 분말 상태 변화가 고려된 온도 의존 열전도도를 산출하기 위하여 식 (10) 을 사용하였다.

$$k_{effp} = (1 - H_s)k_{el} + H_s k_{es} \quad (10)$$

여기서  $k_{effp}$  는 예열 공정 해석을 위한 분말의 상태, 기공률 및 온도가 고려된 열전도도이며,  $k_{el}$  는 기공률 및 온도가 고려된 분말층의 열전도도,  $k_{es}$  는 기공률 및 온도가 고려된 예열 비드의 열전도도 및  $H_s$  는 분말층내 소결된 영역의 비율이다.

식 (11) 은 분말층이 소결되기전 분말층의 기공률이 고려된 온도 의존 열전도 산출식이다. 식 (12) 는 분말층이 소결되기 전 분말층의 기공률 산출식이다. 분말층이 소결되기전 분말층의 기공률 및 이 기공률과 온도에 의존하는 열전도를 도출하기 위하여 Zehner-Schlunder 모델을 활용하였다.<sup>96</sup>

$$k_{el} = \left[ 1 - \sqrt{1 - \phi} + \frac{2\sqrt{1-\phi}}{\left(1 - \frac{Bk_f}{k_s}\right)} \left[ \frac{\left(1 - \frac{k_f}{k_s}\right)^B}{\left(1 - \frac{Bk_f}{k_s}\right)^2} \ln\left(\frac{k_s}{Bk_f}\right) - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{\left(1 - \frac{Bk_f}{k_s}\right)} \right] \right] k_f \quad (11)$$



여기서  $k_f$ ,  $k_s$ ,  $\emptyset$  및  $B$  는 각각 저진공상태 대기의 열전도도, Stellite21 분말의 열전도도, 기공률 및 Zehner-Schlunder 모델 상수이다.

$$B = 1.25 \left( \frac{1-\emptyset}{\emptyset} \right)^{10/9} \quad (12)$$

기공률 및 온도가 고려된 예열 비드의 열전도는 식 (13) 과 같은 Maxwell 방정식을 이용하여 산출하였다.<sup>99,100</sup>

$$k_{es} = \frac{k_f + 2k_s + 2(\emptyset)(k_f - k_s)}{k_f + 2k_s - (\emptyset)(k_f - k_s)} \cdot k_s \quad (13)$$

기공률 및 온도가 고려된 분말층의 밀도와 비열은 식 (14) 와 같은 혼합 법칙 (Mixing law) 을 이용하여 도출하였다.<sup>101</sup>

$$R_{eff} = R_s + \emptyset(R_f - R_s) \quad (14)$$

여기서  $R_{eff}$ ,  $R_s$  및  $R_f$  는 각각 분말층의 물성, Stellite21 분말의 물성 및 저진공 상태 공기의 물성이다.

분말의 상태, 기공률 및 온도가 고려된 분말의 방사율은 식 (15)–(17) 와 같은 Sih 와 Barlow 의 모델을 이용하여 산출하였다.<sup>102</sup> 식 (15) 은 동일 분말의 상태 변화에 따른 방사율을 산출하기 위한 식이다.

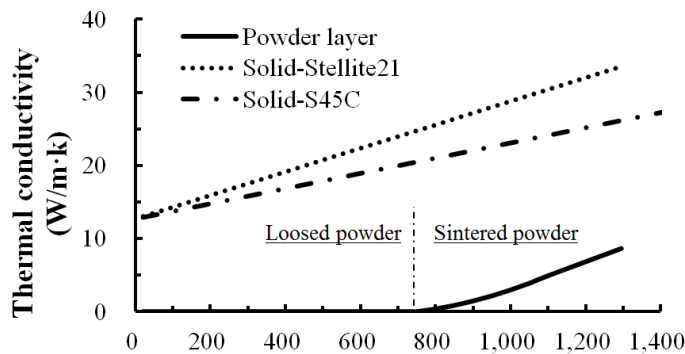
$$\varepsilon_{eff} = A_H \varepsilon_H + (1 - A_H) \varepsilon_S \quad (15)$$

여기서  $\epsilon_{\text{eff}}$ ,  $\epsilon_H$ ,  $\epsilon_s$  및  $A_H$  는 각각 분말층의 방사율, 기공에 의한 방사율, Stellite21 분말의 방사율 및 면적계수이다.

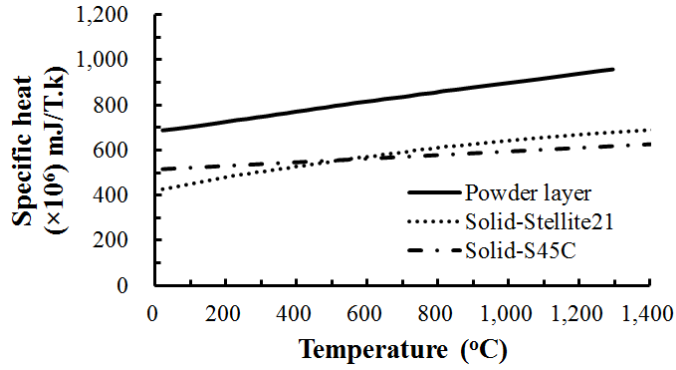
$$\epsilon_H = \frac{\epsilon_s \left[ 2 + 3.082 \left( \frac{1-\phi}{\phi} \right)^2 \right]}{\epsilon_s \left[ 1 + 3.082 \left( \frac{1-\phi}{\phi} \right)^2 \right] + 1} \quad (16)$$

$$A_H = \frac{0.908\phi^2}{1.908\phi^2 - 2\phi + 1} \quad (17)$$

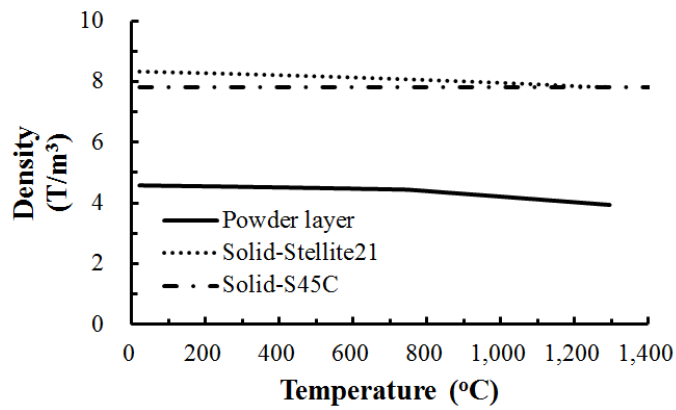
분말의 무게 측정 실험을 통하여 분말층과 예열층의 기공률을 측정하였다. 이 측정결과로부터 분말층과 예열 비드의 기공률은 각각 43.6 % 및 49.5 % 정도임을 알 수 있었다. Stellite21 분말 소결 실험 결과를 이용하여, 분말층이 예열 비드로 천이하기 위한 소결 천이 온도는 750 °C 로 설정하였다. Stellite21 및 S45C 재료의 물성 데이터는 참고문헌들의 데이터를 인용하였다.<sup>103-108</sup> 이 결과들을 이용하여 최종적으로 도출된 파우더 베드 시스템에 도포된 두께 0.5 mm 의 Stellite21 분말층의 상태변화와 기공률이 고려된 온도 의존 물성데이터는 Fig. 40 과 같다.



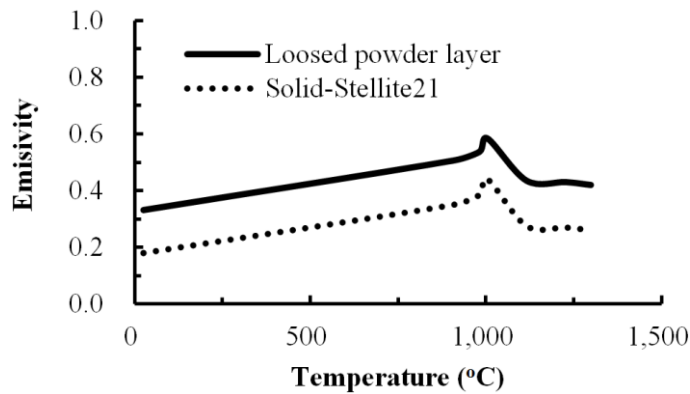
(a) Thermal conductivity



(b) Specific heat



(c) Density



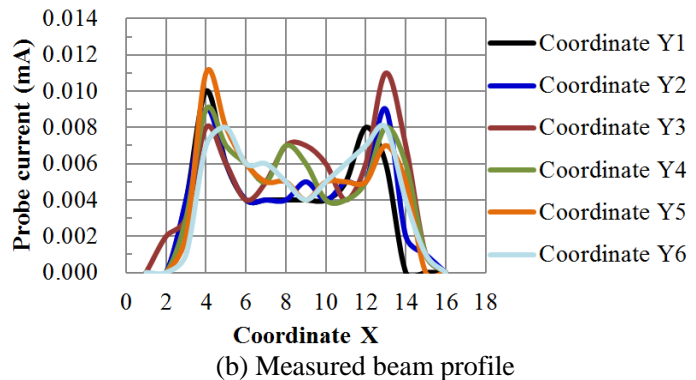
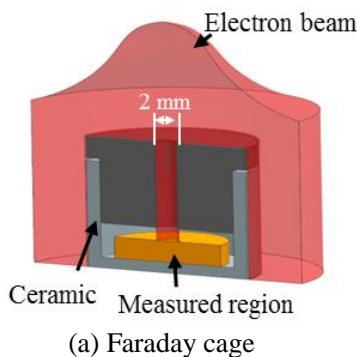
(d) Emissivity

**Fig. 40 Temperature dependent material properties for the powder layer considering the effects of powder state and porosity**

### 3. 열원 모델 개발

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열단계에 대한 열전달 메커니즘을 분석하기 위하여 예열단계에 대한 열원 모델을 개발하였다.

예열 공정 실험에 실험에 적용된 공정 조건인 가속 전압 12 keV 및 검출 전류 0.93 mA 인 조건에 대한 플라즈마 전자빔의 형상 (Beam profile) 을 페러데이 케이지를 이용하여 측정하였다. 전자빔 형상 측정에 사용된 페러데이 케이지 시스템과 빔 형상 측정 결과는 각각 Fig. 41 (a) 및 (b) 와 같다. 전자빔 형상 측정에 사용된 페러데이 케이지 측정부의 지름은 2 mm 이다. Fig. 41 (c) 는 빔 프로파일을 다회 측정한 결과로부터 평균 데이터를 도출한 결과이다. 여기서 전자빔의 축대칭 특성을 고려하고 x 축 좌표계를 무차원화 하였으며 검출 전류를 전류 총량에 대한 비로 표현하였다. Fig. 41 (d) 는 Fig. 41 (c) 로 부터 도출된 예열단계 빔프로파일에 대한 무차원 선도이다. 여기서 전자빔 열원의 특성을 고려하여 전류 프로파일의 끝 (tail) 영역을 제거하였으며 검출 전류 총량에 대한 비율을 무차원화 하였다. Fig. 41 (e) 는 열원 모델의 지수함수에 대한 거동을 고려하여 Fig. 41 (c) 선도의 y 축을 식 (18) 과 같은 지수함수로 나누었으며 이 결과를 이용하여 회귀분석법 (Regression method) 으로 식 (20) 과 같은 다항식을 도출하였다. 도출된 다항식의 신뢰도는 95.8 % 로 계산되었다.



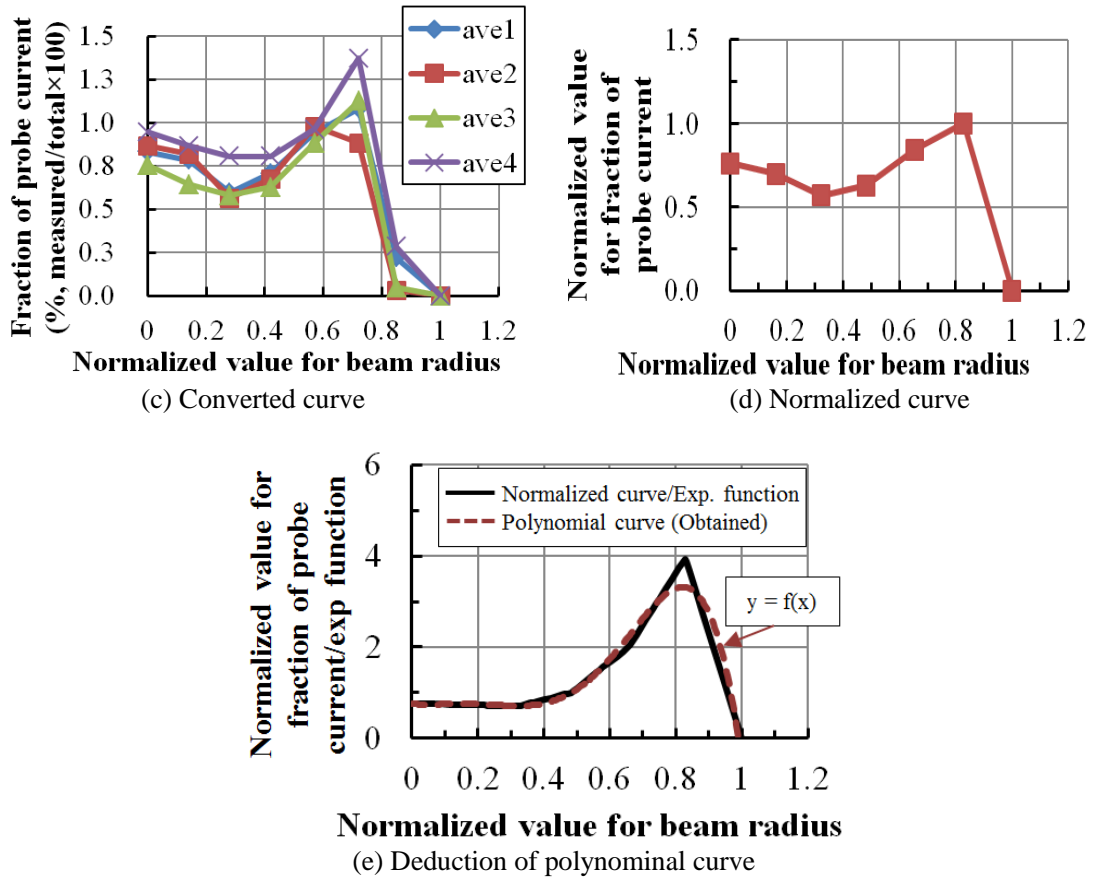


Fig. 41 Measurement method and results of beam profile for preheating step

$$f(\text{exp}) = \exp(-2X) \quad (18)$$

여기서  $X$  는 좌표에 대한 함수로서 식 (19) 와 같이 표현할 수 있다.

$$X = \frac{x^2+y^2}{R^2} \quad (19)$$

여기서  $x, y$  및  $R$  은 각각  $x$  축 좌표,  $y$  축 좌표 및 전자빔의 반지름이다.

$$y = -109.68x^5 + 184.52x^4 - 92.151x^3 + 17.082x^2 - 1.0771x + 0.7608 \quad (20)$$

측정 결과를 통하여 도출된 함수를 이용하여 전자빔 예열 단계의 열원 모델을 도출하였다. 전자빔 예열 단계의 열원 모델은 식 (21) 과 같은 열전달 지배 방정식으로부터 유도된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [k \times \Delta T] + \dot{Q} \quad (21)$$

여기서  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $k$  및  $\dot{Q}$  는 각각 밀도, 비열, 열전도도 및 열유량 이다.

$\rho$ ,  $C_p$  및  $k$  는 재료의 온도가 변할 경우  $\rho(T)$ ,  $C_p(T)$  및  $k(T)$  와 같이 온도의 함수로 나타난다. 그러므로, 식 (21) 을 이 온도 의존 물성으로 다시 표현하면 식 (22) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{k(T)}{\rho(T)C_p(T)} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{Q}(x,y,z,t)}{\rho(T)C_p(T)} = \frac{\partial T}{\partial t} + v_t \frac{\partial T}{\partial D_m} \quad (22)$$

여기서,  $D_m$  은 각각 열원의 이동방향이다.

전자빔 시스템서 열유량  $\dot{Q}$  는 식 (23) 과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Q}(x, y, z, t) = E_c \times P_D \times S_H \times S_V \times L_B \quad (23)$$

여기서  $E_c$ ,  $S_H$ ,  $S_V$  및  $L_B$  는 각각 전자빔 충돌시 재료에서의 에너지 전환 효율, 전자빔의 형상 함수, 전자빔의 침투 깊이 함수 및 열원의 조사 범위 함수이다.

전자빔의 형상함수  $S_H$  는 전자빔 형상 측정 실험 결과로부터 도출하였다. 예열조건의 전자빔 프로파일을 다항식함수로 변환한 결과는 식 (24) 와 같다. 식 (24) 의  $X$  는 식 (19) 과 같이 정의되었다.

$$S_H = \sqrt{\{-109.68(\sqrt{X})^5 + 184.52(\sqrt{X})^4 - 92.15(\sqrt{X})^3 + 17.08(\sqrt{X})^2 - 1.08\sqrt{X} + 0.76\} \times \text{Exp}(-2X)} \quad (24)$$

전자빔의 침투 깊이 함수는 식 (25) 과 같은 Shen 과 Chou 의 모델에서 사용된 선형 모델을 활용하였다.<sup>83</sup> 이 연구에서는 전자빔 침투 깊이를 식 (2) 와 같이 카나야오-오카야마 식을 이용하여 산출하였다.

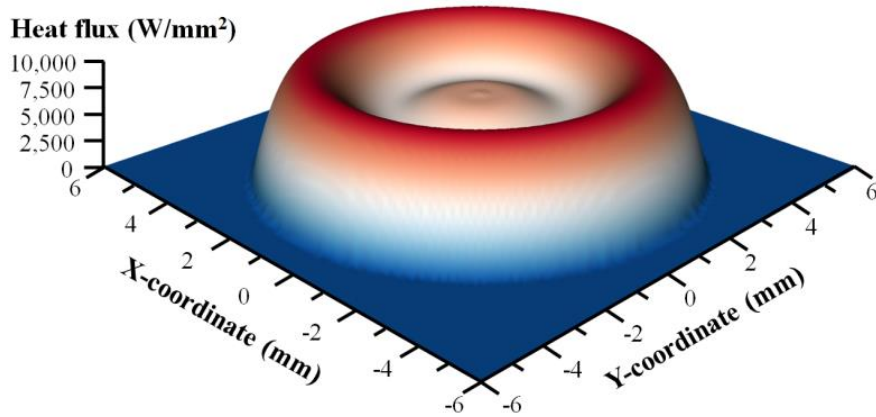
$$S_V = \left(1 - \frac{Z}{S}\right) \times \frac{2}{S} \quad (25)$$

여기서  $Z$  는  $Z$  축 좌표이다.

열원의 조사 범위함수는 식 (26) 와 같다.

$$L_B = \begin{cases} 0, & X \leq 1 \\ 1, & X > 1 \end{cases} \quad (26)$$

위 식들을 이용하여 최종적으로 도출된 예열 단계 열원의 형상 및 열유량 분포는 Fig. 42 와 같다. Fig. 42 의 열원 형상 및 열유량 분포를 생성하기 위하여 적용된 공정 조건은 Table 14 와 같다.



**Fig. 42** Estimated intensity distribution of the heat flux by the proposed heat flux model ( $Z$  coordinate = 0)

**Table 14** Conditions to estimate intensity of the heat flux for each coordinate

Parameters	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Beam radius (mm)
Ranges	12	0.93	5.1

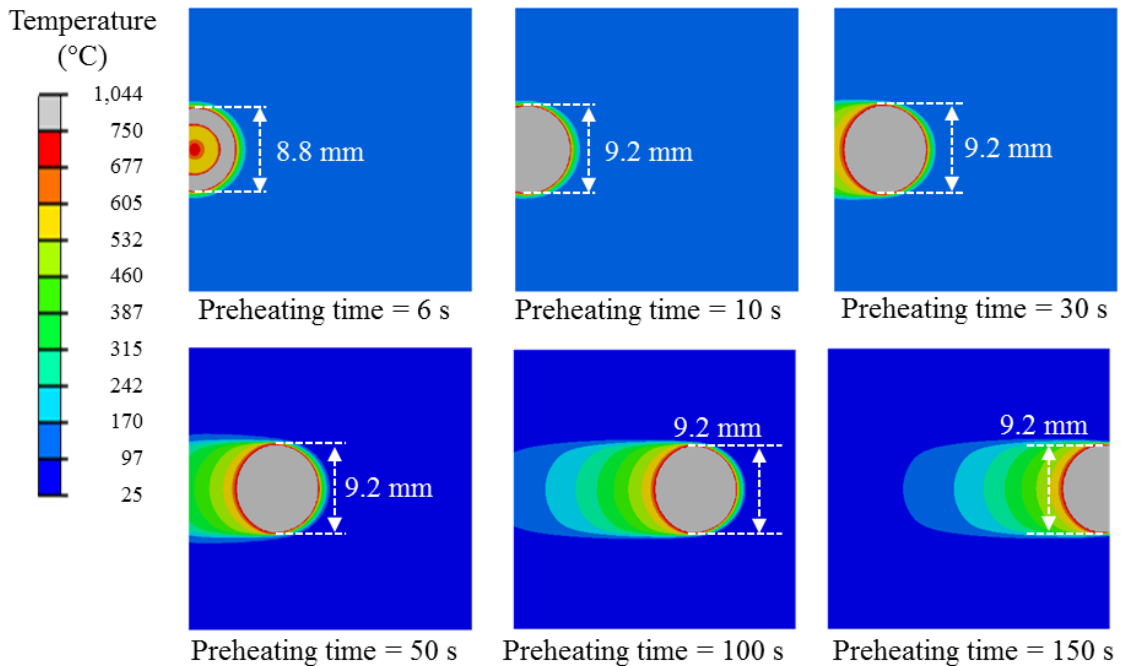
#### 4. 예열 공정 변수에 따른 온도 분포 및 가열 형상 변화 분석

##### 가. 정상상태 열전달 구간 도출

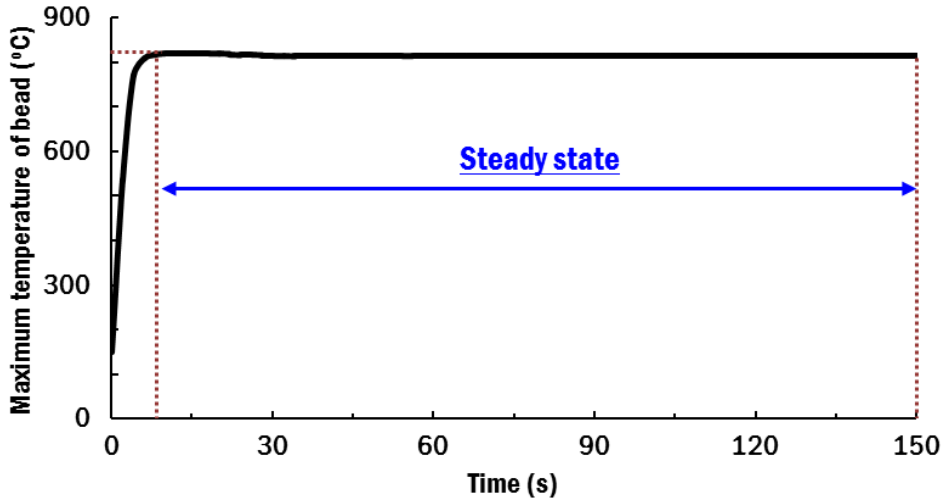
해석결과들의 비교 시점을 도출하기 위하여 정상상태 열전달이 이루어지는 시간 및 구간을 산출하였다. Fig. 43 은 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 12 keV, 0.93 mA 및 0.2 mm/s 인 조건에서 예측된 예열 시간 (Preheating time) 에 따른 전자빔 조사 영역 부근 온도 분포 변화이다. 예열 공정 초기부인 예열 시간 5 초의 경우에는



전자빔 조사부에 직경이 8.4 mm 정도인 도넛 (Doughnut) 형상의 예열부가 생성되는 것을 알 수 있었다. 그러나 예열 시간이 10 초 이상인 경우에는 전자빔 조사부에 직경이 9.2 mm 정도인 원형 형상의 예열부가 유지되는 것을 알 수 있었다. 열전달 해석 결과로부터 Fig. 44 와 같이 예열 시간에 따른 예열 비드 최대온도 변화 곡선을 도출하였다. Fig. 44 와 같이 예열 시간이 10 초 이상일 때 예열 비드의 최대 온도가 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있었다. 또한, 이송 속도가 0.2 mm/s 인 것을 고려하면, 예열 비드 길이가 2 mm 이상일 경우 정상상태의 열전달 현상이 발생함을 알 수 있었다.



**Fig. 43 Results of transient heat transfer analysis for different preheating time ( $U = 12$  keV,  $I_p = 0.93$  mA and  $V_t = 0.2$  mm/s)**



**Fig. 44** Variation of maximum temperature of preheating bead according to preheating time ( $U = 12 \text{ keV}$ ,  $I_p = 0.93 \text{ mA}$  and  $V_t = 0.2 \text{ mm/s}$ )

#### 나. 예열 공정 변수에 따른 예열 비드 형상 변화

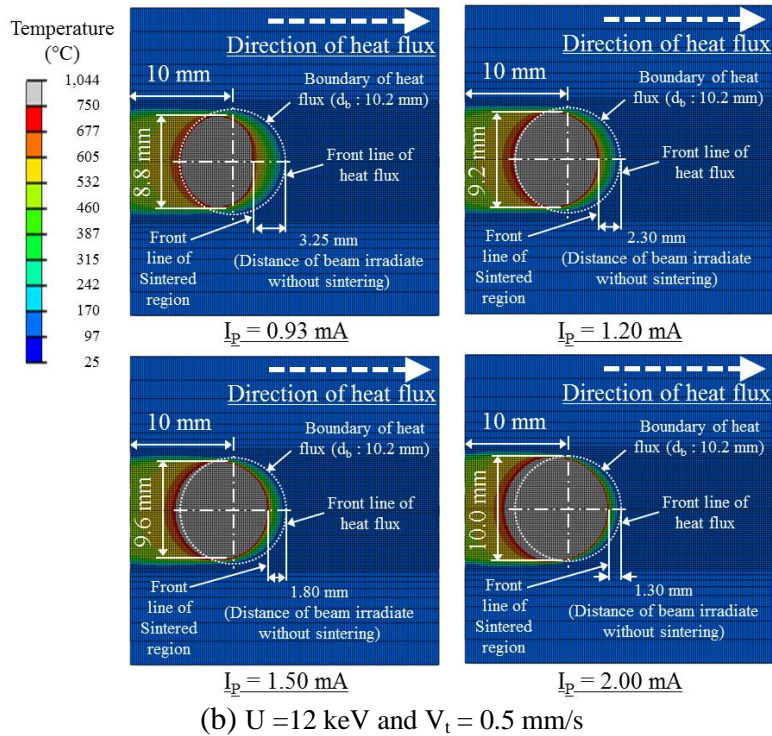
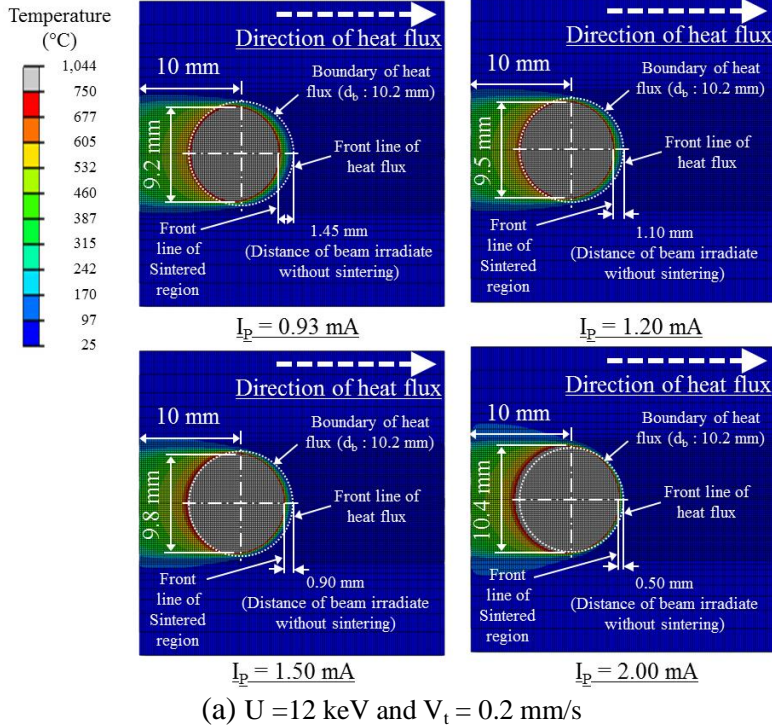
Fig. 45 는 3 차원 비정상 열전달 해석으로부터 도출된 플라즈마 전자빔 검출 전류와 이송 속도에 따른 예열 공정에서의 전자빔 조사부 주위의 온도 분포 변화를 나타내었다.

예열 공정 변수에 따른 소결 예상부 폭 변화 측면에서는 이송 속도가  $0.2 \text{ mm/s}$  이며 검출 전류가  $0.93 \text{ mA}$  인 경우에는 예열 온도가  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  이상인 소결 예상부의 폭이  $9.2 \text{ mm}$  정도 예측 되었으나, 검출 전류를  $2.00 \text{ mA}$  까지 증가시킬 경우 소결 예상부의 폭이  $10.4 \text{ mm}$  까지 넓어지는 것을 알 수 있었다. 이송 속도가  $0.5 \text{ mm/s}$  이며 검출 전류가  $0.93 \text{ mA}$  인 경우에는 소결 예상부의 폭이  $8.8 \text{ mm}$  정도 예측되었다. 이 이송 속도에서 검출 전류를  $2.00 \text{ mA}$  까지 증가시킬 경우 소결 예상부의 폭이  $10.0 \text{ mm}$  까지 넓어지는 것을 알 수 있었다. 이송 속도가  $0.8 \text{ mm/s}$  이며 검출 전류가  $0.93 \text{ mA}$  인 조건

에서는 소결 예상부의 폭이 8.3 mm 로 예측 되었으며 동일한 이송 속도에서 검출 전류를 2.00 mA 까지 증가시킬 경우 소결 예상부의 폭이 9.6 mm 로 증가하는 것으로 예측되었다. 이송 속도가 1.0 mm/s 이며 검출 전류가 0.93 mA 인 경우에는 소결 예상부의 폭이 7.8 mm 정도 예측되었다. 이 이송 속도에서 검출 전류를 2.00 mA 까지 증가시킬 경우 소결 예상부의 폭이 9.5 mm 까지 넓어지는 것을 알 수 있었다.

예열 공정 변수에 따른 소결 예상부 두께 변화 측면에서는 검출 전류가 0.93 mA 인 조건에서는 이송 속도가 0.2 mm/s 일 때 소결 예상부 두께가 0.37 mm 로 예측 되었으며 동일한 검출 전류 조건에서 이송 속도가 1.0 mm/s 일 때 소결 예상부 두께가 0.36 mm 로 큰 변화가 없는 것으로 예측되었다. 그외 검출 전류 조건에서는 이송 속도에 관계 없이 소결 예상부 두께가 0.5 mm 로 예측되었다.

이 결과들을 이용하여 이송 속도 및 검출 전류와 소결 예상부 치수의 상관관계를 Fig. 46 과 같이 도출 하였다. 동일한 이송 속도 조건에서 검출 전류가 증가할 경우 소결 예상부의 폭이 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 동일한 검출 전류 조건에서 이송 속도가 증가할 경우 소결 예상부의 폭이 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 소결 예상부의 두께는 검출 전류에 의존적이며 이송 속도에 대한 영향성은 거의 없는 것으로 예측되었다.



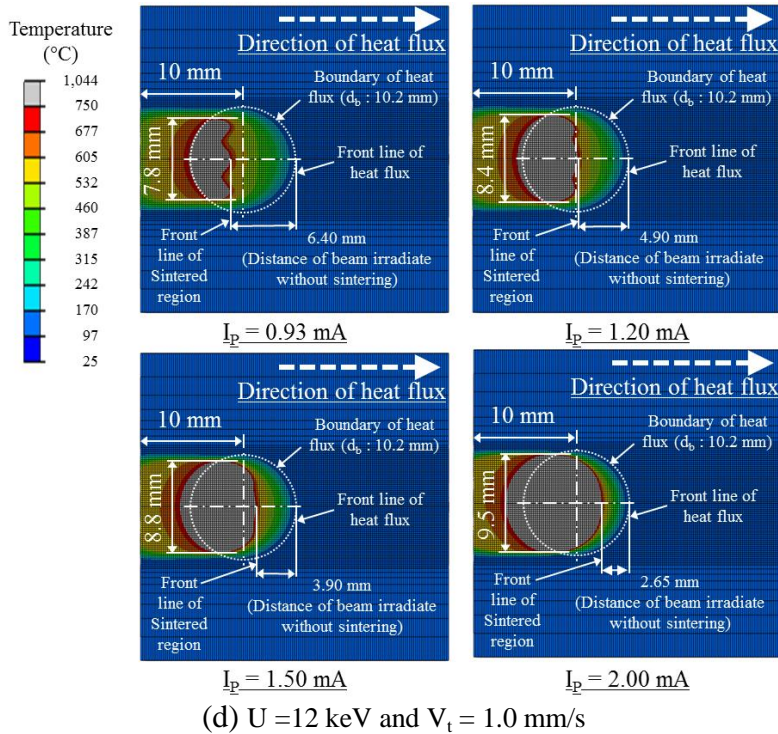
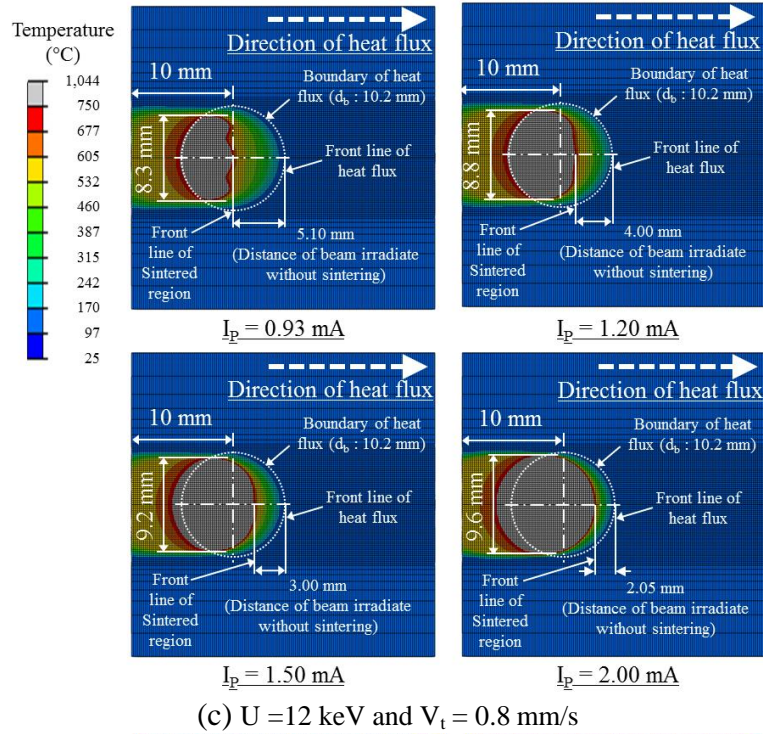
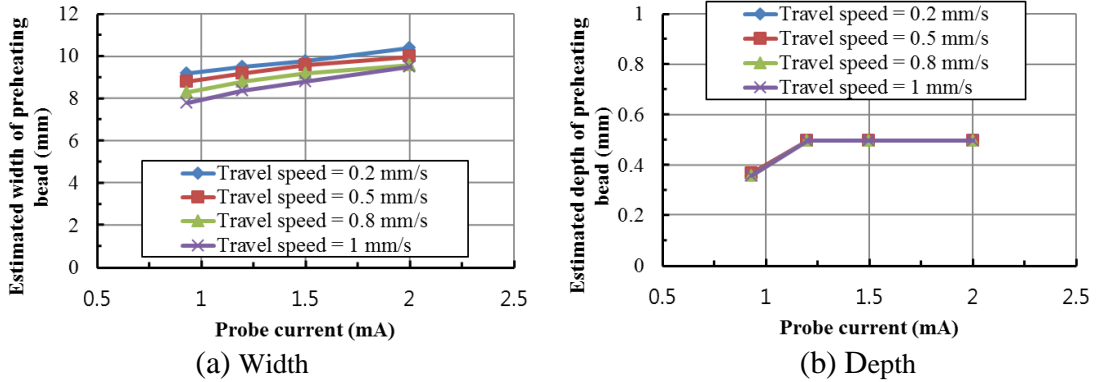


Fig. 45 Temperature distributions of the powder layer for different preheating conditions



**Fig. 46** Effects of the probe current and the travel speed on the width and the depth of the expected sintering region

#### 다. 분말 비산 메커니즘 분석

온도 분포 해석결과로부터 공정조건에 따라 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이가 변화함을 알 수 있었다. 이송 속도가 0.2 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일때 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이는 1.5 mm 로 예측되었다. 그러나 동일한 이송 속도에서 검출 전류가 2.00 mA 인 경우에는 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이가 0.5 mm 로 감소함을 알 수 있었다. 이송 속도가 0.5 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일때 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치 차이는 3.3 mm 로 예측되었다. 그러나 동일한 이송 속도에서 검출 전류가 2.00 mA 인 경우에는 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이가 1.3 mm 로 감소함을 알 수 있었다. 이송 속도가 0.8 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일때 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이는 5.3 mm 로 예측되었다. 그러나 동일한 이송 속도에서 검출 전류가 2.00 mA 인 경우에는 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이가 2.0 mm 로 감소함을 알 수 있었다. 이송 속도가 1.0 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93

mA 일때 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이는 6.4 mm 로 예측되었다. 그러나 동일한 이송 속도에서 검출 전류가 2.00 mA 인 경우에는 예열 열원과 소결 예상부의 최전방 위치차이가 2.7 mm 로 감소함을 알 수 있었다.

예열 열원 최전방의 위치가 소결 예상부의 최전방 위치보다 앞에 위치하게 될 경우 분말이 소결되지 않은 상태에서 전자빔이 조사되는 거리가 증가하게 된다. 이를 고려하여 예열 공정에서 공정변수가 분말이 소결되지 않은 상태에서 전자빔이 조사되는 거리에 미치는 영향성을 Fig. 47 과 같이 도출 하였다. 검출 전류가 증가할 경우 소결되지 않은 상태에서 전자빔이 조사되는 거리가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 이송 속도가 증가할 경우 소결되지 않은 상태에서 전자빔이 조사되는 거리가 증가하게 되는 것을 알 수 있었다. 또한 예열 실험 결과와 해석결과를 같이 고찰한 결과 분말 비산 현상이 발생한 실험 조건들은 모두 소결되지 않은 상태에서 전자빔이 조사되는 거리가 3.3 mm 이상인 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 소결되지 않은 상태에서

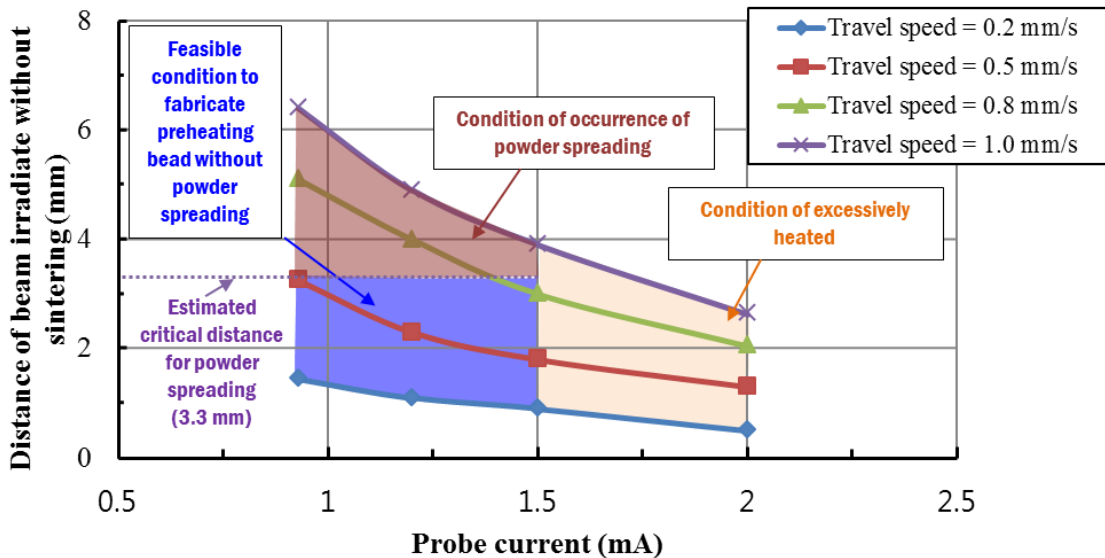
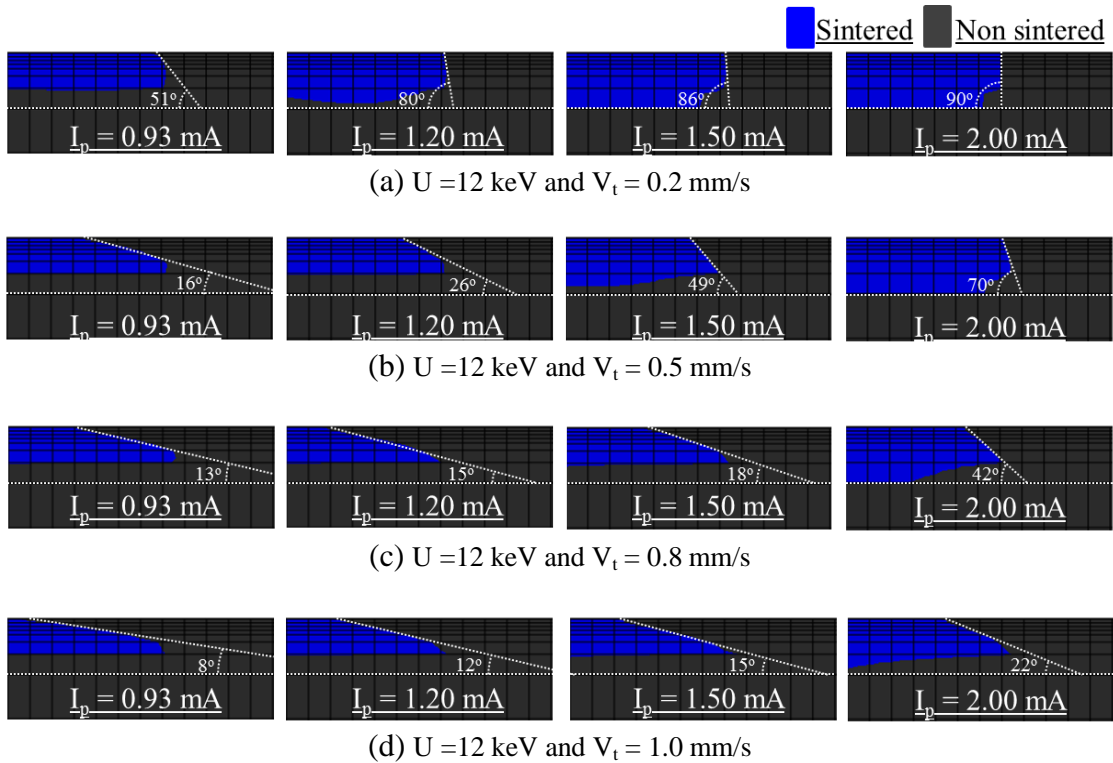


Fig. 47 Effects of the probe current and the travel speed on the distance of beam irradiate without sintering

전자빔이 조사되는 거리는 분말 비산 현상에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 그 이유는 분말 비산을 억제하기 위해서는 예열 공정을 통하여 분말을 소결 및 통전시켜 전하가 충전되지 않게 하여야 하나 소결되지 않은 상태에서 전자빔이 조사되는 거리가 증가하게 될 경우 전하가 충전되는 면적이 증가하게 되기 때문으로 사료된다.

Fig. 48 은 온도분포 해석결과를 통하여 도출된 소결 예상부의 최전방 소결 형상이다. 이송 속도가 0.2 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일 때 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 51° 로 형성되는 것으로 예측되었다. 동일한 이송 속도 조건에서 검출 전류가 2.00 mA 인 조건에서는 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 90° 수준으로 증가하는 것으로 예측되었다. 이송 속도가 0.5 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일 때 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 16° 수준으로 예측되었으



**Fig. 48 Effects of process parameter on the front angle of preheating bead**



며 동일한 이송 속도 조건에서 검출 전류가 2.00 mA 인 조건에서는 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 70° 수준으로 증가하는 것으로 예측되었다. 이송 속도가 0.8 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일 때 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 13° 수준으로 다소 작게 예측 되었으며 동일한 이송 속도 조건에서 검출 전류가 2.00 mA 인 조건에서는 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 42° 수준으로 증가하는 것으로 예측되었다. 이송 속도가 1.0 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.93 mA 일 때 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 8° 수준으로 매우 작게 예측 되었으며 동일한 이송 속도 조건에서 검출 전류가 2.00 mA 인 조건에서는 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 22° 수준으로 증가하는 것으로 예측되었다.

이 결과들을 통하여 예열 공정 변수가 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도에 미치는 영향성을 Fig. 49 와 같이 도출 하였다. 그 결과 이송 속도가 0.8 mm/s 및 1.0 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 증가할 경우 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 소폭 증가함을 알 수 있었다. 그러나 이송 속도가 0.5 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 증가함에 따라 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 상대적으로 크게 증가하며 특히 이송 속도가 0.2 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 증가함에 따라 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 90° 에 근접해 짐을 알 수 있었다. 또한 예열 실험 결과와 함께 고찰 한 결과 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 15° 이하인 조건에서는 공정 조건에 관계없이 모든 조건에서 분말비산 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도는 분말 비산 현상에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 그 이유는 소결 예상부 최전방의 소결 형상 각도가 작을 경우 표면부의 미소결 길이가 길어지게 되는데 이는 소결되지 않은 상태에서 전자빔에 노출되는 분말의 면적이 증가하게 되기 때문이다.

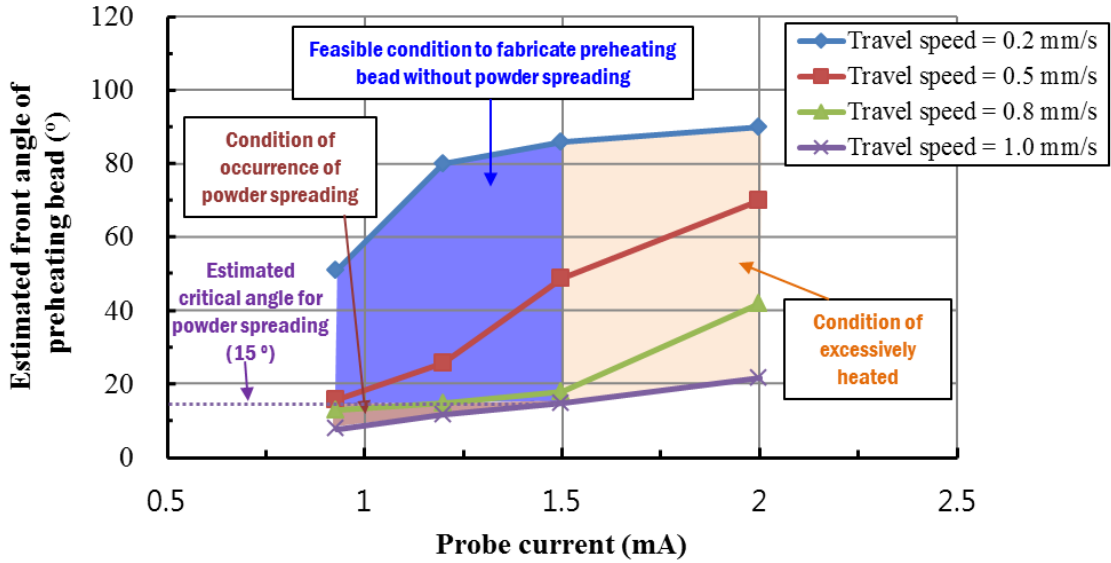


Fig. 49 Effects of the probe current and the travel speed on the front angle of preheating bead

### 라. 예열 공정 열전달 해석 모델의 적용 가능성 분석

본 연구에서 예열 공정에 대한 유한요소해석 모델의 적용 가능성을 고찰하였다. 예열 실험으로 제작된 예열 비드와 해석을 통하여 예측된 소결 예상부의 폭과 두께를 비교/분석 하였다. 하지만, 예열 실험에서 분말 비산이 발생하는 공정 조건 조합에서는 열전달 해석 결과와 비교를 수행하지 않았다.

Table 15 과 16 및 Fig. 50 은 해석 및 실험 결과를 예열 비드 폭 측면에서 비교한 결과이다. 검출 전류가 0.93 mA 인 경우 이송 속도가 0.2 mm/s 일 때에는 Table 15 및 Fig. 50 과 같이 해석모델로부터 예측된 소결 예상부의 폭이 실험 결과 도출된 예열 비드 폭과 동일하게 예측되었다. 그러나 이송 속도가 0.5 mm/s 로 증가한 경우에는 오차율이 1.1 % 정도로 증가하였다. 검출 전류가 1.20 mA 인 경우 이송 속도가 0.2 mm/s 및 0.5 mm/s 일 때에 오차율이 각각 3.3 % 및 1.1 % 정도임을 알 수 있었다. 검출 전류가 1.50 mA 인 경우 Table 16 및 Fig. 50 과 같이 이송 속도가 0.2 mm/s, 0.5 mm/s 및 0.8

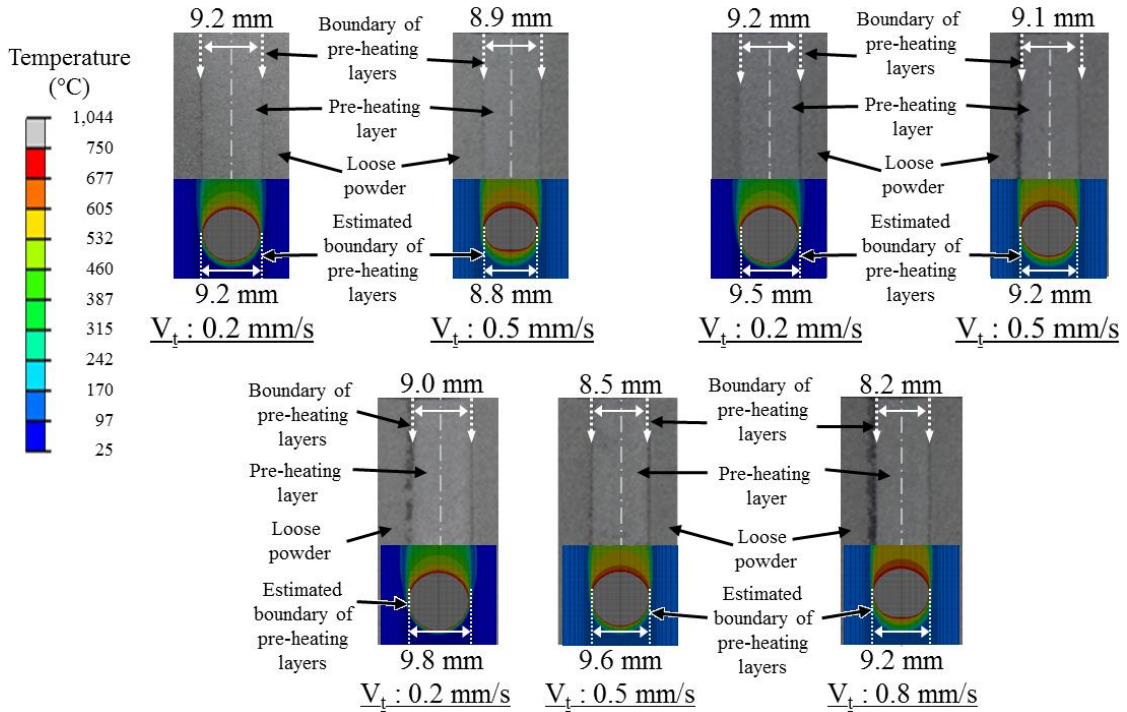
mm/s 일 때에는 오차율이 각각 8.9 %, 12.9 % 및 12.2 % 정도임을 알 수 있었다.

**Table 15 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the preheated region ( $I_p = 0.93 - 1.20$  mA)**

Probe current (mA)	0.93				1.20			
Travel speed (mm/s)	0.2	0.5	0.8	1.0	0.2	0.5	0.8	1.0
Experiment (width, mm)	9.2	8.9	-	-	9.2	9.1	-	-
Analysis (width, mm)	9.2	8.8	8.3	7.8	9.5	9.2	8.8	8.4
Error ratio (%)	0	1.1	-	-	3.3	1.1	-	-

**Table 16 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the preheated region ( $I_p = 1.50 - 2.00$  mA)**

Probe current (mA)	1.5				2.0			
Travel speed (mm/s)	0.2	0.5	0.8	1.0	0.2	0.5	0.8	1.0
Experiment (Width, mm)	9.0	8.5	8.2	-	-	-	-	-
Analysis (Width, mm)	9.8	9.6	9.2	8.8	10.4	10.0	9.6	9.5
Error ratio (%)	8.9	12.9	12.2	-	-	-	-	-



**Fig. 50 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the preheated region**

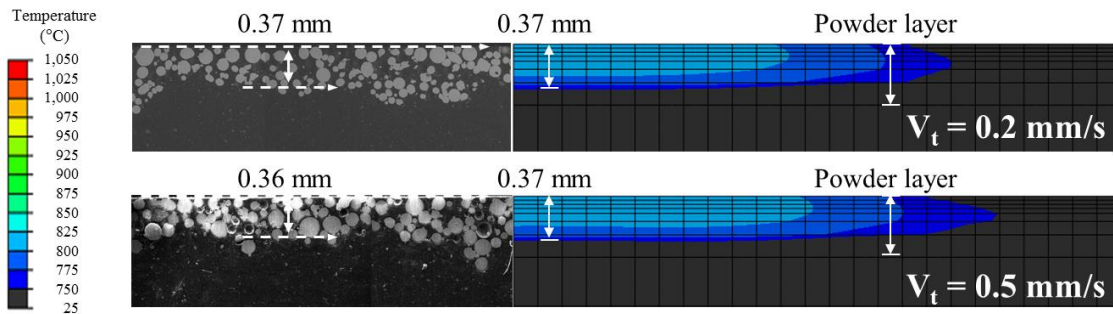
Table 17, 18 및 Fig. 51 은 열전달 해석과 예열 실험 결과를 예열 비드 두께 측면에서 비교한 결과이다. 검출 전류가 0.93 mA 인 경우 Table 17 및 Fig. 51 (a) 와 같이 이송 속도가 0.2 mm/s 일 때 해석 결과 예측된 소결 예상부 두께와 실험 결과 도출된 예열 비드 두께가 약 5.4 % 의 정도 차이 나는 것을 알 수 있었다. 또한, 이송 속도가 0.5 mm/s 인 경우에는 약 1 % 정도 차이 나는 것을 알 수 있었다. 검출 전류가 1.20 mA 인 경우 Table 17 및 Fig. 51 (b) 와 같이 이송 속도가 0.2 mm/s 및 0.5 mm/s 일 때 실험 결과에 대한 해석 결과의 오차율이 각각 2.0 % 및 20.0 % 임을 알 수 있었다. 검출 전류가 1.50 mA 인 경우 Table 18 및 Fig. 51 (c) 와 같이 이송 속도가 0.2 mm/s, 0.5 mm/s 및 0.8 mm/s 일 때 해석에서 예측된 소결 예상부 두께와 예열 실험에서 도출된 예열 비드 두께와 각각 18.0 %, 6.0 % 및 22.0 % 정도 차이 남을 알 수 있었다.

**Table 17 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the depth of the preheated region ( $I_p = 0.93 - 1.20$  mA)**

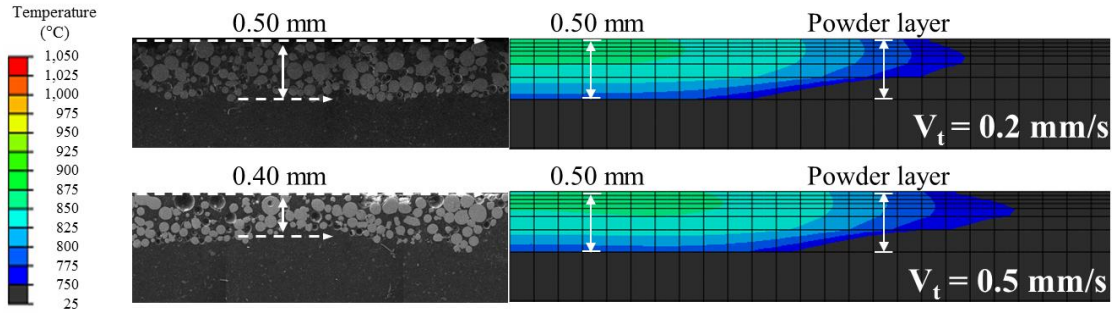
Probe current (mA)	0.93				1.20			
Travel speed (mm/s)	0.2	0.5	0.8	1.0	0.2	0.5	0.8	1.0
Experiment (Depth, mm)	0.35	0.36	-	-	0.49	0.40	-	-
Analysis (Depth, mm)	0.37	0.37	0.36	0.36	0.50	0.50	0.50	0.50
Error ratio (%)	5.4	1.0	-	-	2.0	20.0	-	-

**Table 18 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the depth of the preheated region ( $I_p = 1.50 - 2.00$  mA)**

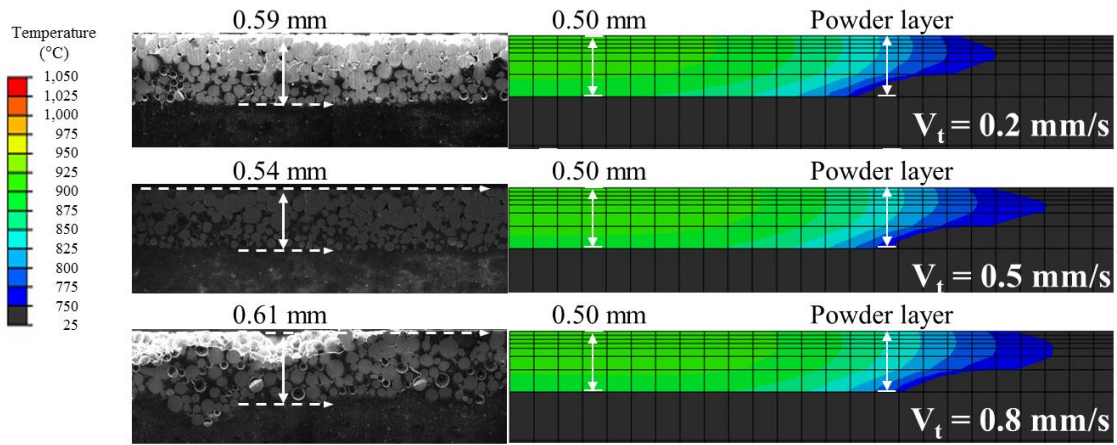
Probe current (mA)	1.5				2.0			
Travel speed (mm/s)	0.2	0.5	0.8	1.0	0.2	0.5	0.8	1.0
Experiment (Depth, mm)	0.59 (0.50)	0.53 (0.50)	0.61 (0.50)	-	-	-	-	-
Analysis (Depth, mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Error ratio (%)	18.0 (0)	6.0 (0)	22.0 (0)	-	-	-	-	-



(a)  $I_p = 0.93$  mA



(b)  $I_p = 1.2 \text{ mA}$



(c)  $I_p = 1.5 \text{ mA}$

**Fig. 51 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the depth of the preheated region**

## 제 4 장 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말의 적층 특성 분석

### 제 1 절 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석

#### 1. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 단일 적층 비드 생성 실험 방법

기저부 비가열 조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 실험을 수행 하였다. 이 실험에서는 3 장 에서 도출된 적층 예열 비드 생성 조건을 이용하여 예열 비드를 생성한 후, 예열 비드 내에 집속된 전자빔을 조사하여 적층 비드를 생성하였다. 기저부 비가열 조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 실험에 적용된 실험 변수 및 범위는 Table 19 와 같다.

**Table 19 Experimental parameters and conditions for deposition experiments using a plasma electron beam and Stellite21 powder (without heating of building plate)**

Parameters	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current (I <sub>p</sub> , mA)	Length of bead (L <sub>B</sub> , mm)	Travel speed (V <sub>t</sub> , mm/s)	Initial temperature of specimen (°C)
Conditions	30	0.5-2.0	5-15	2.5-10	150

## 2. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 단일 적층 비드 생성 특성 분석 결과 및 고찰

### 가. 이송 속도, 전자빔 검출 전류 및 비드 생성 길이에 따른 단일 적층 비드 제작 특성 분석

Fig. 52, 53 및 54 는 비드 생성 길이 (Length of bead :  $L_B$ ) 별 이송 속도 및 전자빔 검출 전류에 따른 적층 비드 제작 결과이다. Fig. 52, 53 및 54 에서 공정 조건 조합을 적층 비드 미생성 조건, 적층 비드 생성 조건 및 용융 비드 생성 조건으로 분류 할 수 있었다. 적층 비드 미 생성 조건에서는 예열 비드가 충분히 가열되지 못하여 예열 비드에 용융이 거의 발생하지 않고, 이로 인하여 적층 비드가 생성되지 않았다. 적층 비드 생성 조건에서는 예열 비드의 용융을 위한 충분한 에너지가 공급되어 예열 비드의 용융과 응고를 통하여 비드 내부가 채워진 적층 비드가 생성되었다. 비드 내부의 충진 정도에 따라 안정적 적층 비드와 불안정 적층 비드로 분류 할 수 있었다. 용융비드 생성 조건에서는 예열 비드가 전자빔에 의하여 과도하게 가열되어 예열 비드의 과용융과 기화가 동시에 발생하는 것을 알 수 있었다. 이로 인하여 온도가 높은 중앙부 인근에서는 예열 비드의 기화가 발생하여 크레이터 (Crater) 가 발생하고, 온도가 상대적으로 낮은 가열부 외곽부는 과도 용융된다. 이 때 과도 용융된 재료가 예열 비드 내 소결부 사이의 공간으로 스며들어 비드의 외곽부에 완전 용융/적층된 비드가 생성된다.

이송 속도 2.5 mm/s 이고 검출 전류 0.5 mA 일 때에는 Fig. 52 (a), 53 (a) 및 54 (a) 와 같이 적층 비드가 생성되었다. 이 경우 비드 폭은 2.4 - 2.6 mm 정도이고, 비드 생성 길이가 증가하면 적층 비드내에 미충진 공간들이 조금씩 증가하는 불안정 적층 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 그러나 이송 속도가 5.0 mm/s 이상이고 검출 전류가



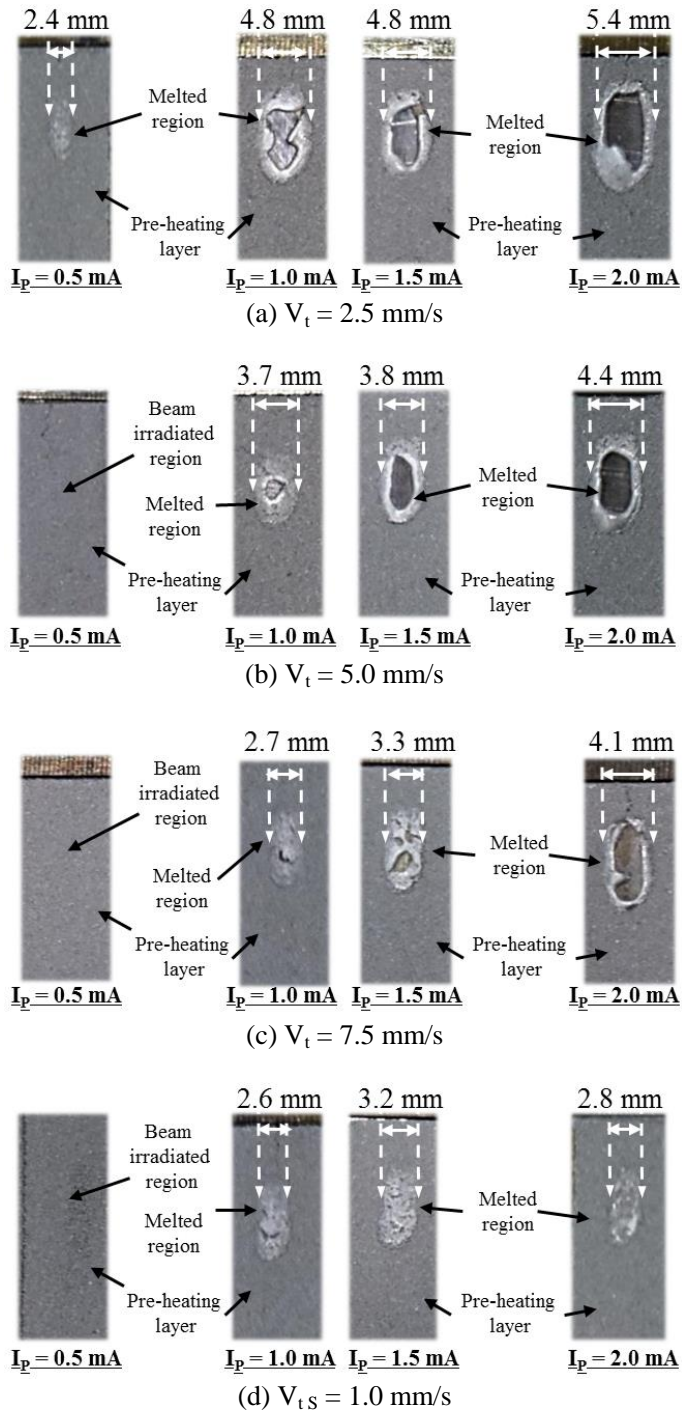
0.5 mA 일 때에는 Fig. 52 (b), 53 (b) 및 54 (b) 와 같이 비드 생성 길이에 관계없이 적층 비드가 생성되지 않음을 알 수 있었다.

이송 속도가 2.5 mm/s 및 5.0 mm/s 이고 검출 전류가 1.0-2.0 mA 인 경우에는 중앙부에 크레이터를 가지는 용융 비드가 생성되었다. 이 조건들에서는 전자빔 조사 영역의 대부분에서 예열 비드의 소결층이 기화 및 주위 소결층으로 스며들어 비드 중앙부는 완전히 비어 있고 비드 가장자리는 용융 띠 (Melting band) 가 생성되는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 비드 생성 길이가 증가하여도 발생하였다. 그러나 비드 생성 길이가 증가할수록 용융 비드 내부에 용융 비드 가장 자리부를 연결하는 연결형 용융 띠의 수가 증가하는 것을 알 수 있었다.

이송 속도가 7.5 mm/s 이고 검출 전류가 1.0 - 1.5 mA 인 경우에는 Fig. 52 (c), 53 (c) 및 54 (c) 와 같이 적층이 가능하지만 비드 내부에 미충진 공간이 존재하는 불안정형 적층 비드가 생성되었다. 에너지 밀도가 높은 검출 전류 1.5 mA 에서 적층 비드내 미충진 영역의 수가 증가하는 경향을 보였다. 이송 속도 7.5 mm/s 이고 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 중앙에 크레이터를 가지는 용융 비드가 생성되었다.

이송 속도가 10 mm/s 이고 검출 전류가 1.0 mA 와 1.5 mA 인 경우에는 거의 대부분의 실험에서 Fig. 52 (d), 53 (d) 및 54 (d) 와 같이 안정적인 적층 비드가 생성되었다. 검출 전류가 1.0 mA 와 1.5 mA 일 때 적층 비드의 폭은 각각 2.5 - 2.7 mm 및 3.0 - 3.2 mm 였다. Fig. 52, 53 및 54 와 같이 검출 전류가 1.5 mA 인 경우가 1.0 mA 인 경우 보다 비드 생성 길이에 영향을 더 적게 받고 더욱 품질이 우수한 적층 비드를 생성할 수 있음을 알 수 있었다. 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 용융 비드가 생성되었다.

위 결과들을 이용하여 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성이 가능한 조건들과 이 조건들에서의 적층 비드 폭을 Table 20 과 같이 도출 할 수 있었다.



**Fig. 52** Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the deposited bead ( $L_B = 5 \text{ mm}$ )

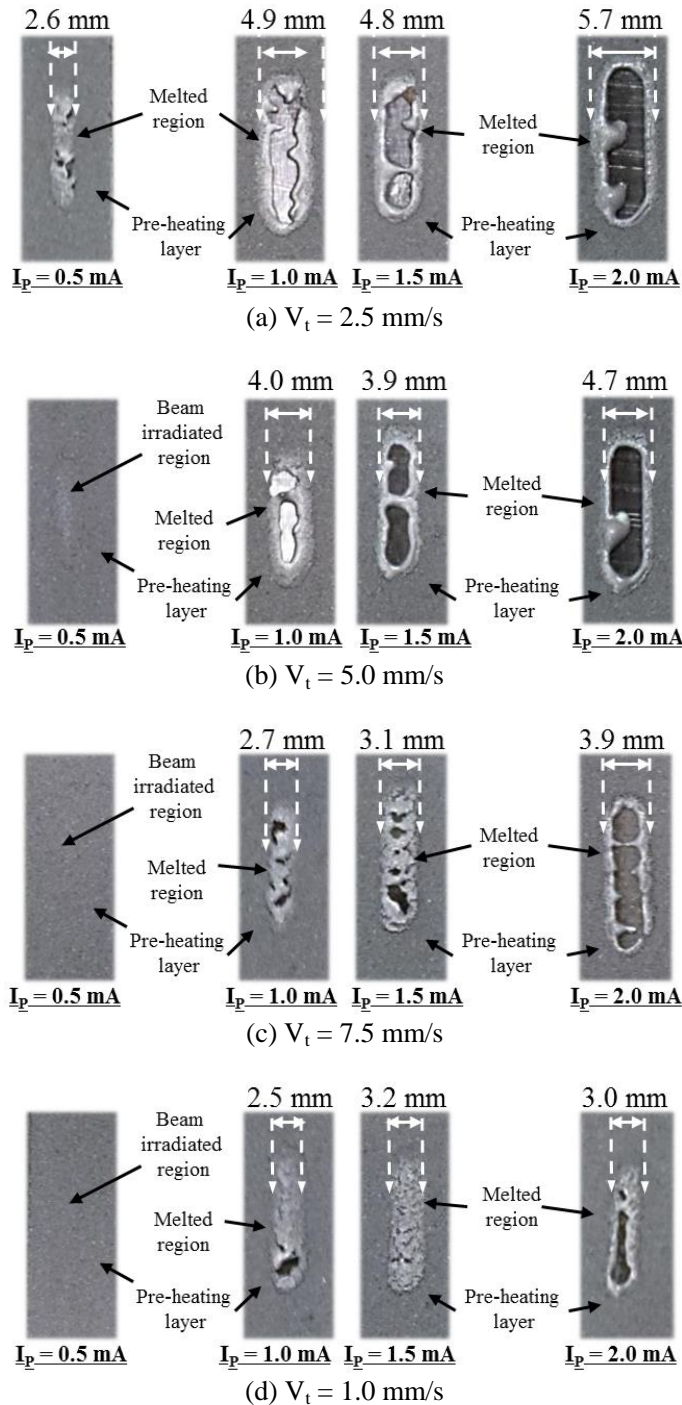
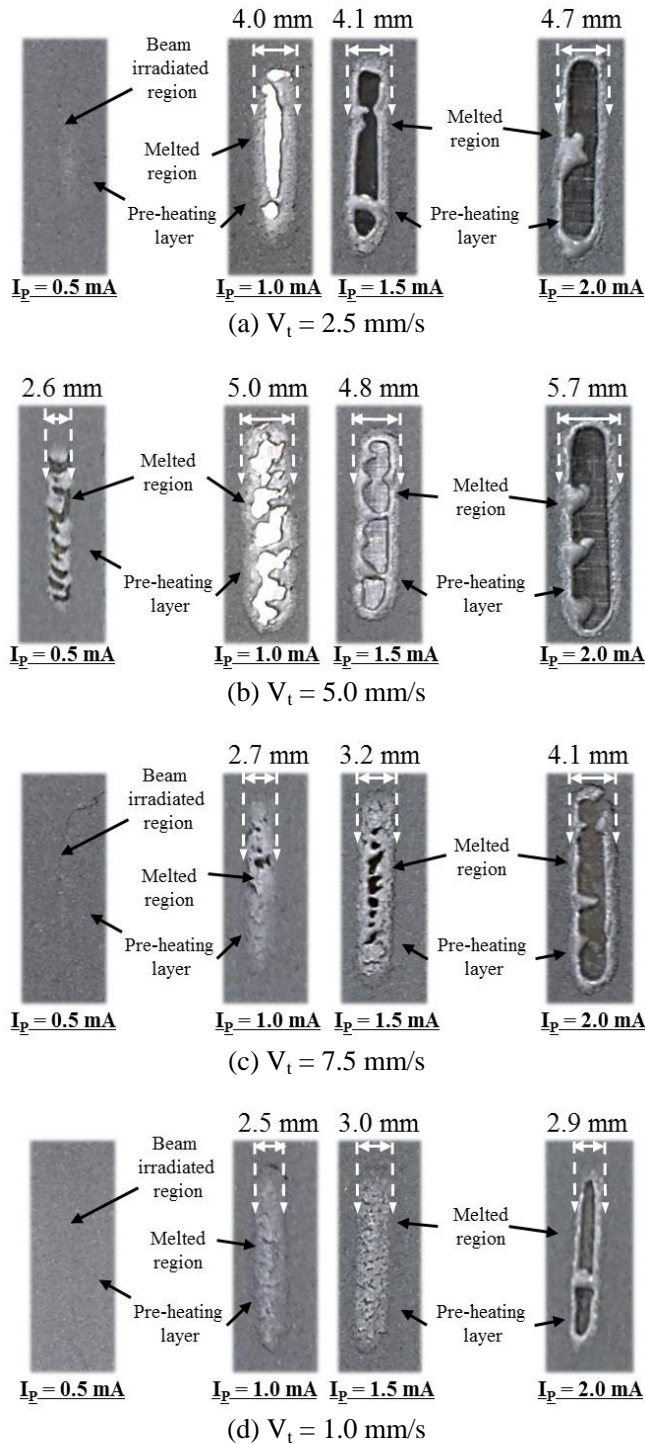


Fig. 53 Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the deposited bead ( $L_B = 10$  mm)



**Fig. 54** Effects of the probe current and the travel speed on the formation of the deposited bead ( $L_B = 15$  mm)

**Table 20 Conditions to allow the creation of the deposition bead and the width of the deposited bead**

No	Length of bead ( $L_B$ , mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Width of bead (mm)
1	5	7.5	1.0	2.7
2	5	7.5	1.5	3.3
3	5	10.0	1.0	2.6
4	5	10.0	1.5	3.2
5	10	2.5	0.5	2.6
6	10	7.5	1.0	2.7
7	10	7.5	1.5	3.1
8	10	10.0	1.0	2.5
9	10	10.0	1.5	3.2
10	15	2.5	0.5	2.6
11	15	7.5	1.0	2.7
12	15	7.5	1.5	3.2
13	15	10.0	1.0	2.5
14	15	10.0	1.5	3.0

#### 나. 적층 비드 표면 상태 분석 및 고찰

이송 속도, 전자빔 검출 전류 및 비드 생성 길이에 따른 단일 적층 비드 제작 특성 분석 결과를 통하여 적층 공정에 적용 가능한 4 가지의 적층 비드 생성 조건을 도출하였다. 가장 양호한 적층 비드 생성 조건을 도출하기 위하여 4 가지 후보 공정 조건 조합에 대하여 적층 비드 표면 특성 분석을 수행하였다. 저진공 주사전자현미경 (LV-SEM) 을 이용하여 적층 비드 표면 특성 분석을 수행하였다.

Fig. 55 (a) 는 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.0 mA 및 7.5 mm/s 인 적층 비드의

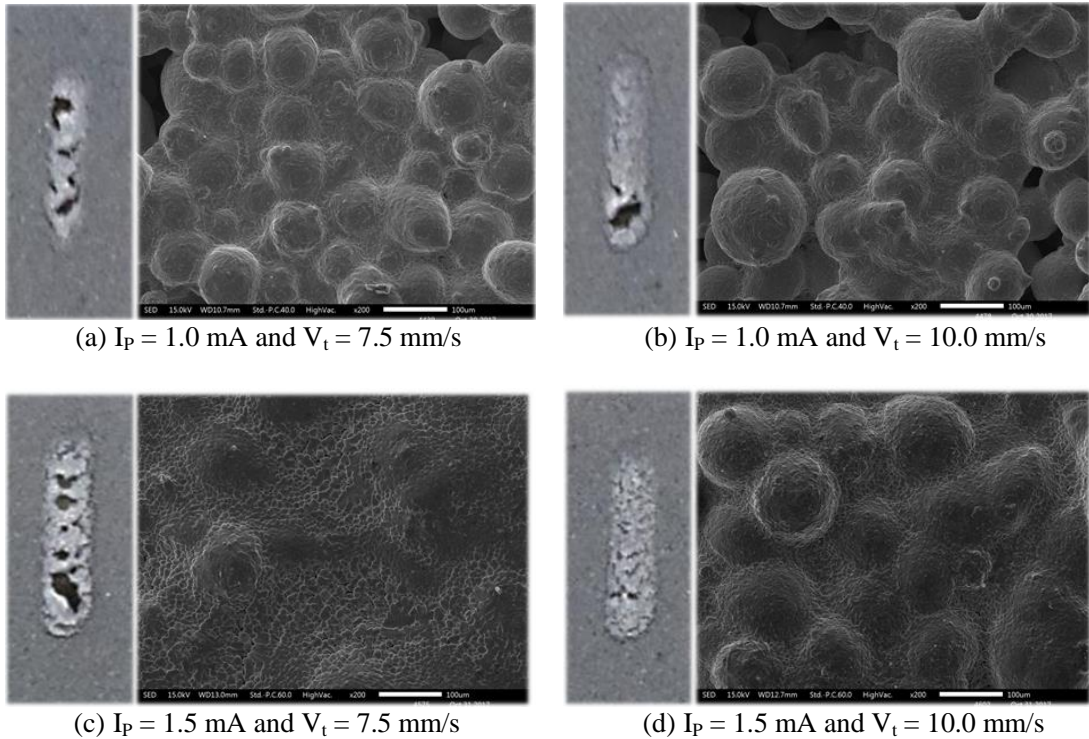
표면부 적층 상태이다. 적층 비드 대부분의 영역에서 분말들이 용융되어 분말들이 양호하게 결합된 것을 알 수 있었다. 그러나 직경이 큰 분말은 완전히 용융되지 않고 일부만 용융이 되고, 직경이 작은 분말들은 완전히 용융된 상태를 나타내었다.

검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.0 mA 및 10.0 mm/s 인 조건에서의 적층 비드에서는 Fig. 55 (b) 와 같이 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.0 mA 및 7.5 mm/s 인 경우와 유사한 표면부 적층 상태가 관찰되었다. 하지만 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.0 mA 및 10.0 mm/s 인 조건에서 생성된 적층 비드에서는 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.0 mA 및 7.5 mm/s 조건에서 생성된 적층 비드 보다 분말들의 용융 정도가 적어서, 완전히 용융되지 않는 분말의 크기가 상대적으로 크고 분말들이 연결된 목 (Neck) 부분의 두께가 약간 얇은 것을 알 수 있었다. 이 현상은 이송 속도가 증가함에 따라 분말에 공급되는 에너지 밀도가 감소하기 때문으로 사료된다.

Fig. 55 (c) 는 검출 전류와 이송 속도가 각각 1.5 mA 및 7.5 mm/s 인 적층 비드의 표면부 적층 상태이다. 이 조건에서는 예열 비드 내의 분말이 완전히 용융되어 분말들의 완전한 결합이 발생한 것을 알 수 있었다. 이로 인하여 적층 비드에 미용융 분말이 거의 발견하기 어려웠다. 하지만 이 조건에서는 적층 비드내에 미충진 공간들이 다소 많이 발생하였다.

검출 전류와 이송 속도가 각각 1.5 mA 및 10 mm/s 인 경우에는 Fig. 55 (d) 와 같이 큰 직경의 분말들에 미세하게 미 용융 영역이 남아 있지만 대부분의 분말들이 완전히 용융되어 분말간에 명확한 결합이 이루어진 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 이 조건에서는 적층 비드 내부에 미충진 공간이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.

이 결과들로부터 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.5 mA 및 10 mm/s 일 때 표면 상태와 분말간 결합이 가장 양호한 적층 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다.



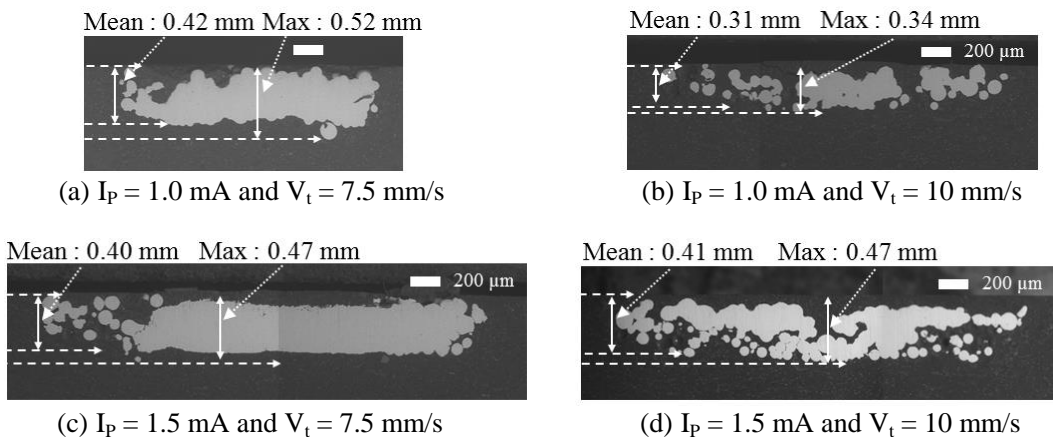
**Fig. 55 Surface morphologies of the deposited bead for different deposition conditions (Surface)**

#### 다. 적층 비드 내부 상태 분석 및 고찰

Fig. 56 과 같이 저진공 주사현미경으로 4 가지의 적층 비드 생성 가능 공정 조건에 대한 적층 비드 내부 상태 분석을 수행하였다.

Fig. 56 (a) 와 같이 검출 전류가 1.0 mA 이고 이송 속도가 7.5 mm/s 인 경우에는 0.42 mm 의 평균 두께를 가지는 적층 비드가 생성되었다. 그러나 이 조건으로 제작된 적층 비드에서는 비드 가장자리 일부 영역이 용융 되지 않아 분말의 형태를 가지고 있었으며, 적층 비드 중앙에 기공이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 검출 전류가 1.0 mA 이고 이송 속도가 10.0 mm/s 인 경우에는 적층 비드의 평균 두께가 0.31 mm 정도 였다. 비드 내부의 결합 상태는 검출 전류가 1.0 mA 이고 이송 속도가 7.5 mm/s 인 경

우와 유사하지만, 완전하게 용융된 면적은 현저하게 감소한 것을 알 수 있었다. 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.5 mA 및 7.5 mm/s 인 경우의 적층 비드 평균 두께는 약 0.40 mm 였다. 이 경우 비드 내부 결합 상태는 가장자리 일부분에 용융되지 않은 분말이 존재하지만 대부분의 영역에서는 분말의 완전 용융이 발생하는 매우 양호한 적층 비드가 생성되었다. 전류가 1.5 mA 이고 이송 속도가 10.0 mm/s 일 때에는 적층 비드의 평균 두께가 약 0.41 mm 였다. 적층 비드 내부에는 국부적으로 완전히 용융되지 않아 분말의 형태를 가지고 있는 영역이 존재하였으나, 전반적으로 분말들의 완전한 용융에 의한 적층 비드가 생성된 것을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.5 mA 및 7.5 mm/s 일 때 내부 상태가 가장 양호한 적층 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 그러나 해당조건의 경우 내부에 미충진 존재하는 불안정 적층 비드가 생성되었다. 이를 고려 할 경우 적층 비드 내부에 국부적으로 완전히 용융되지 않아 분말의 형태를 가지고 있는 영역이 존재하지만, 적층 비드 전체적으로 분말들이 양호하게 결합되어 있는 검출 전류 1.5 mA 와 이송 속도 7.5 mm/s 인 조건이 적합한 적층 조건으로 사료되었다.



**Fig. 56 Morphologies of the deposited bead for different deposition conditions (Cross section)**



## 라. 적층 비드 결함 모드 분석 및 고찰

기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층시 적층 비드에 발생하는 결함 모드를 Fig. 57 과 같이 도출 하였다. 단일 적층 비드에 발생하는 결함모드 (Defect mode) 는 볼링 (Balling) 결함, 비 용융 (Non-melted) 결함 및 삭박 (Denudation) 결함의 총 3 가지였다. 볼링 결함은 분말 베드 용해형 적층 공정에서 흔히 발생하는 결함으로서 용융된 분말이 적층판에 결합되지 않고 구형으로 뭉치게 되는 현상이다. 이 결함이 발생하게 되면 적층물의 높이가 불균일 해져 분말 도포시 분말도포 블레이드 (blade) 와 적층 비드가 충돌할 수 있다. 비 용융 결함은 전자빔을 조사 하였음에도 전자빔의 에너지 밀도 및 출력 밀도가 부족하여 예열 비드가 용융되지 못하는 현상이다. 삭박 현상은 용접공정에서 자주 발생하는 결함으로서 적층 비드가

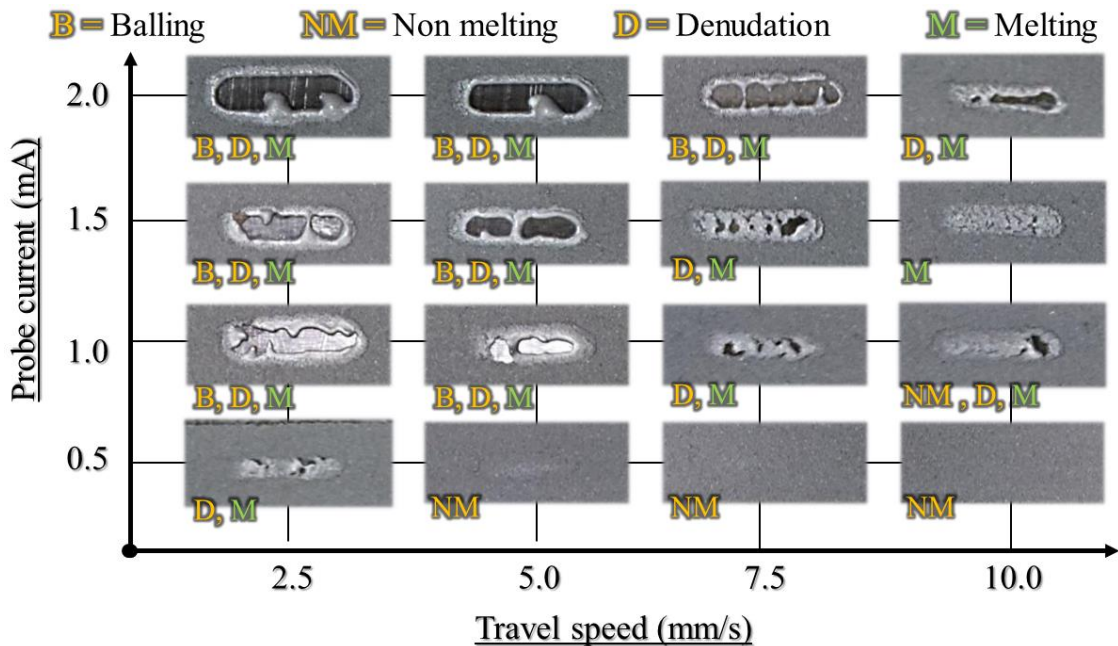


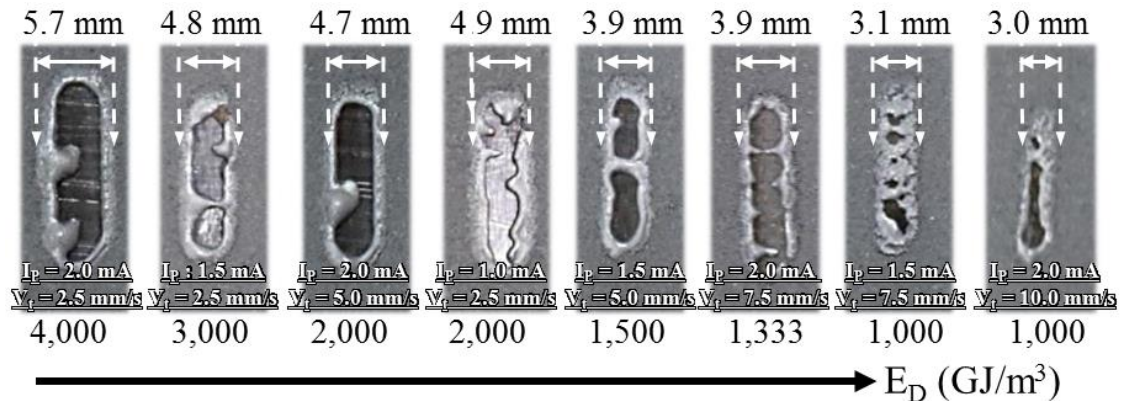
Fig. 57 Influence of the probe current and the travel speed on defect modes of the deposited bead

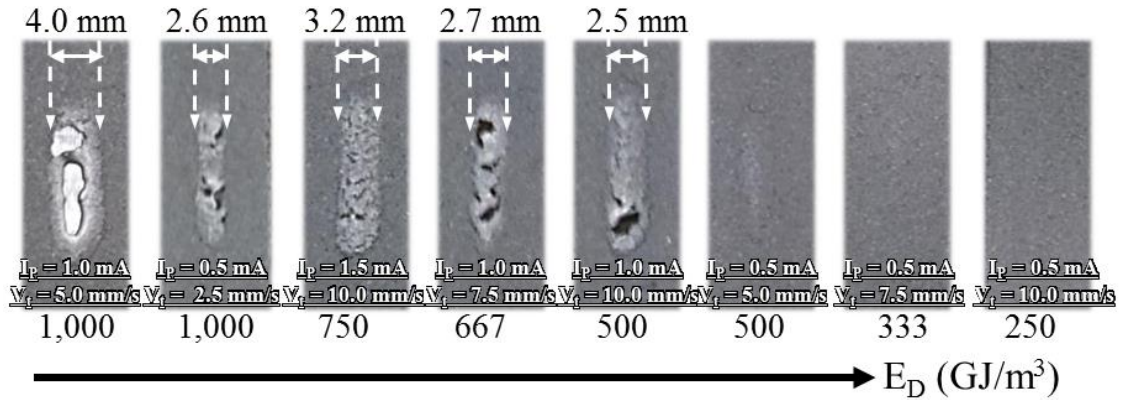
벗겨지는 현상이다. Fig. 57 로 부터 이송 속도가 10.0 mm/s 이고 검출 전류가 1.5 mA 일때 적층 비드에 결함이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.

### 마. 전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향

전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향을 Fig. 58 과 같이 분석/고찰 하였다.

전자빔 에너지 밀도가  $500 \text{ GJ/m}^3$  이하이고 이송 속도가  $5 \text{ mm/s}$  이하인 경우 예열 층에 집속된 전자빔을 조사 하더라도 적층 비드가 생성되지 않아 비용융 결함이 발생 함을 알 수 있었다. 적층 비드 생성에 사용된 전자빔 에너지 밀도 범위가  $500 - 1,000 \text{ GJ/m}^3$  인 조건에서는 검출 전류 및 이송 속도에 따라 적층 비드 생성이 가능하였다. 적층 비드 생성에 사용된 전자빔 에너지 밀도가  $1,333 \text{ GJ/m}^3$  이상일 경우에는 전자빔 의 검출 전류 및 이송 속도에 상관 없이 모든 조건에서 적층 비드에 삭박 및 볼링 결 함이 발생함을 알 수 있었다.





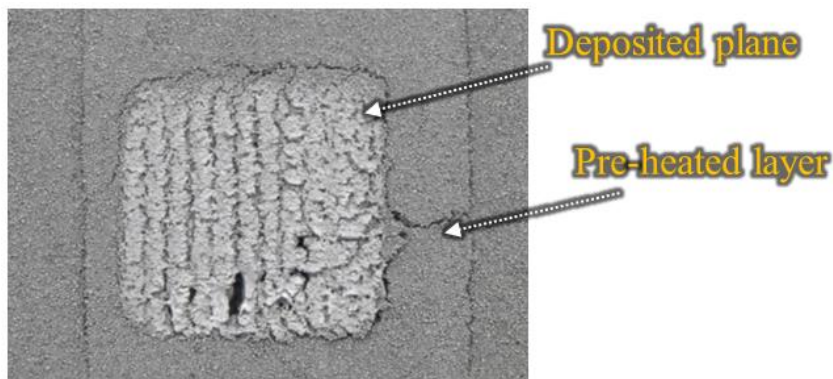
**Fig. 58** Effects of the energy density of the plasma electron beam on the formation of the deposited bead

#### 바. 적층 적층 비드 생성 조건 선정

이송 속도, 전자빔 검출 전류 및 적층 비드 길이에 따른 단일 적층 비드 제작 특성, 적층 비드 결합 특성 및 적층 비드 결합 모드 분석 결과로부터 적층 적층 비드 생성 조건을 선정하였다. 선정된 조건은 가속 전압 30 keV, 검출 전류 1.5 mA, 및 이송 속도 10 mm/s 이다. 이 조건에서는 양호한 품질을 가지는 적층 비드를 연속적이고 안정적으로 생성이 가능하며, 적층 비드 길이에 관계없이 양호한 용융/적층 특성이 나타났다. 또한 적층 상태 분석 결과 적층 비드 내부에 용융되지 않은 분말이 거의 없으며, 분말간 결합 상태가 우수한 것으로 사료되었다.

### 3. 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 평면 적층 특성

4 장 1 절 2 에 의하여 선정된 적정 적층 비드 생성 조건인 가속 전압 30 keV, 검출 전류 1.5 mA, 및 이송 속도 10 mm/s 를 이용하여 평면 적층 실험을 수행하였다. 제안된 적정 비드 생성 조건을 이용하여 플라즈마 전자빔을 교차 이송 (Zig-zag) 방식으로 10 회 연속 이동하여 Fig. 59 와 같은 평면을 적층하였다. 실험에 적용된 적층 비드의 단일선 간격은 1 mm 이다. 실험 결과 제안된 공정조건을 이용하여 12 mm × 12 mm 의 직사각형의 적층 평면을 제작할 수 있음을 알 수 있었다. 제작된 적층 평면을 관찰한 결과 내부 박리나 과도한 뒤틀림 같은 결함이 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 선정된 적정 적층 비드 생성 조건이 평면 예열 비드 생성에 적용 가능하며, 해당 조건을 이용할 경우 양호한 품질을 가지는 평면 적층 비드 생성이 가능함을 알 수 있었다.



**Fig. 59 Fabricated planar specimen using a proper deposition condition**

## 제 2 절 신개념 금속 적층 제조 공정의 적층 비드 생성 메커니즘 분석

### 1. 해석방법

신개념 금속 적층 제조 공정의 적층 비드 생성 메커니즘 분석을 위하여 용융 공정에 대한 3 차원 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 용융 공정 열전달 해석에 사용된 해석 모델과 해석 격자 및 경계 조건 부여 방법은 Fig. 39 의 예열 해석 모델과 동일하다.

용융 공정 열전달 해석의 열원 모델로 Ninggang Shen and Kevin Chou 등이 제안한 침투 깊이가 고려된 전자빔용 가우시안 (Gaussian) 모델을 사용하였다.<sup>85</sup> 전자빔에 대한 열원 모델은 식 (27) 과 같다.<sup>85</sup> 전자빔 침투 깊이는 예열 해석과 동일하게 카나야오-오카야마 식을 이용하여 산출하였다.

$$\dot{Q}(x, y, z) = \frac{8E_c P}{\pi d_b^2} e^{-\frac{8(x^2+y^2)}{d_b^2}} \cdot \left( \frac{2}{s} \left( 1 - \frac{z}{s} \right) \right) \quad (27)$$

여기서 P 는 전자빔 출력이다.

집속된 전자빔은 페러데이 케이지로 직접 측정하기 매우 어려웠다. 그러므로, 적층 실험 결과와 용융 공정의 열전달 해석 결과를 비교하여 집속된 전자빔의 직경을 예측하여 해석에 적용하였다. 해석에 적용된 변수와 범위는 Table 21 과 같다.

**Table 21 Process parameters of heat transfer analysis for melting process and their ranges**

Parameters	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current (I <sub>p</sub> , mA)	Travel speed (V <sub>t</sub> , mm/s)	Convection coefficient (mW/mm <sup>2</sup> k)	Gap conductance (mW/mm <sup>2</sup> k)	Temperature of heat sink (°C)	Initial temperature (°C)
Ranges	30	0.5-2.0	2.5-10.0	0.001	0.47	25	150

## 2. 물성 데이터 도출

용융 공정은 예열 비드에 전자빔을 조사하여 적층 비드를 생성하는 공정이므로 소결 상태에서 용융 상태로 변화하는 분말층의 특성이 고려된 해석물성이 사용되어야 한다. 그래서 용융 열전달 해석을 수행하기 위하여 분말의 결합 상태, 온도 의존 밀도, 온도 의존 비열, 온도 의존 방사율 및 온도 의존 열전도도를 도출하였다.

분말의 결합 상태, 기공률 및 용융 공정 해석용 온도 의존 열전도도는 식 (28) - (29) 를 이용하여 산출하였다. 식 (28) 은 분말의 상태 변화에 따른 열전도도 변화를 고려하기 위한 식이다.

$$k_{effm} = (1 - H_m)k_{es} + H_mk_{em} \quad (28)$$

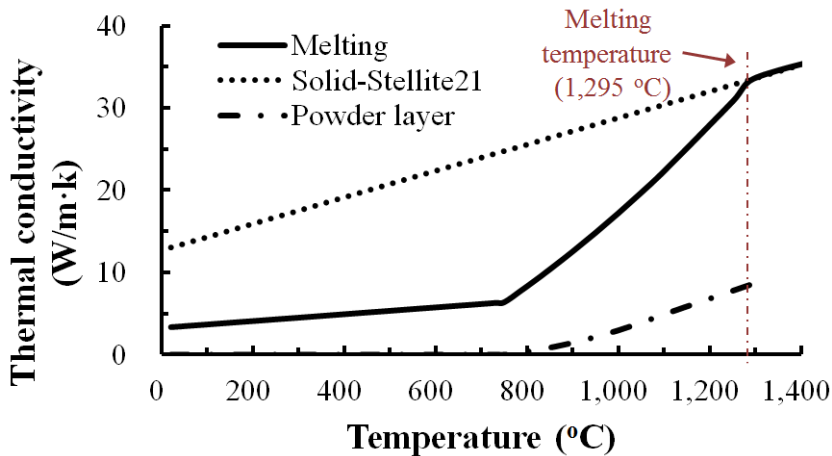
여기서,  $k_{effm}$ , 은 각각 용융 공정 해석을 위한 분말의 상태, 기공률 및 온도가 고려된 열전도도이며  $k_{em}$  은 기공률이 고려된 용융비드의 온도 의존 열전도도,  $H_m$  은 예열 비

드내 용융부 비율이다.

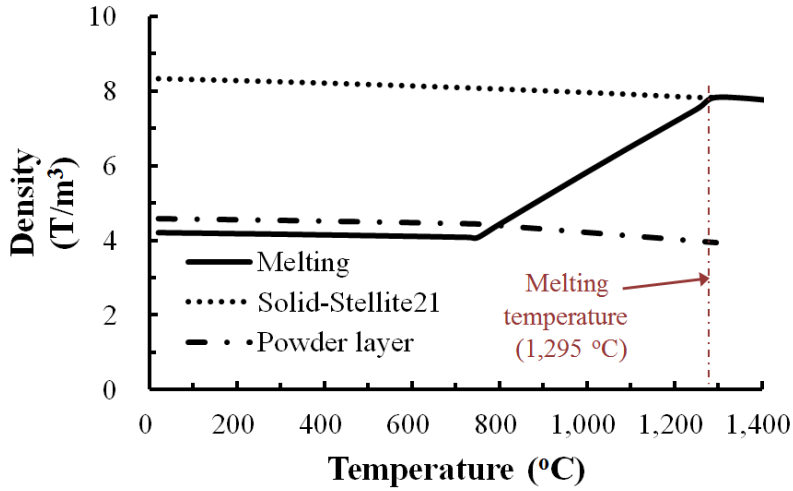
기공률이 고려된 적층 비드의 온도 의존 열전도도는 식 (29) 과 같은 Landauer 와 Bruggeman 모델을 사용하였다.<sup>98</sup>

$$k_{em} = (1 - 1.5\phi) \cdot k_{es} \quad (29)$$

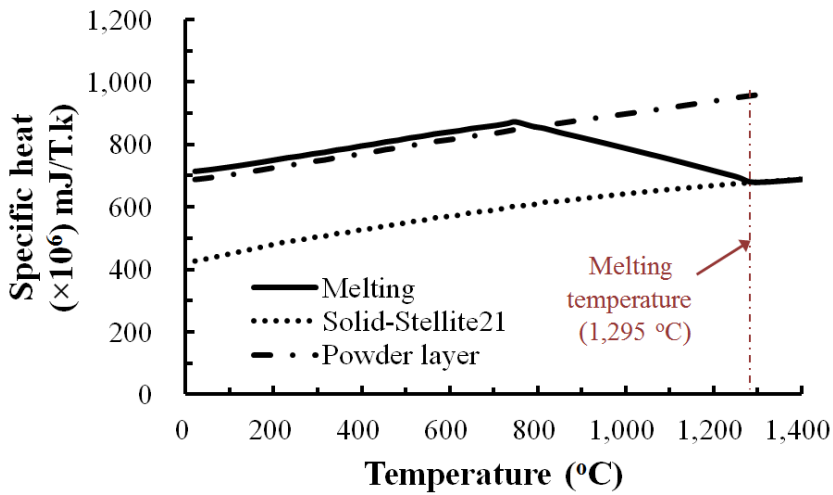
용융 공정 해석용 온도 의존 밀도와 온도 의존 비열은 식 (14) 와 같은 혼합 법칙에 의하여 계산되었다. 예열 비드와 적층 비드의 기공률은 무게 측정 실험으로부터 도출되었다. 이 결과 예열 비드와 용융 비드의 기공률이 각각 49.5 % 및 0 % 로 측정되었다. 분말층이 용융부로 천이되는 온도는 레이저를 이용한 Stellite21 분말 가열 실험 결과로부터 얻어진 용융 시작 온도 1,295 °C 를 사용하였다. 최종적으로 산출된 분말층의 결합 상태 변화 및 기공률이 고려된 용융 공정 해석용 온도 의존 물성데이터는 Fig. 60 과 같다.



(a) Thermal conductivity



(b) Density



(c) Specific heat

**Fig. 60 Temperature dependent material properties considering the effects of powder state and porosity for melting analysis**

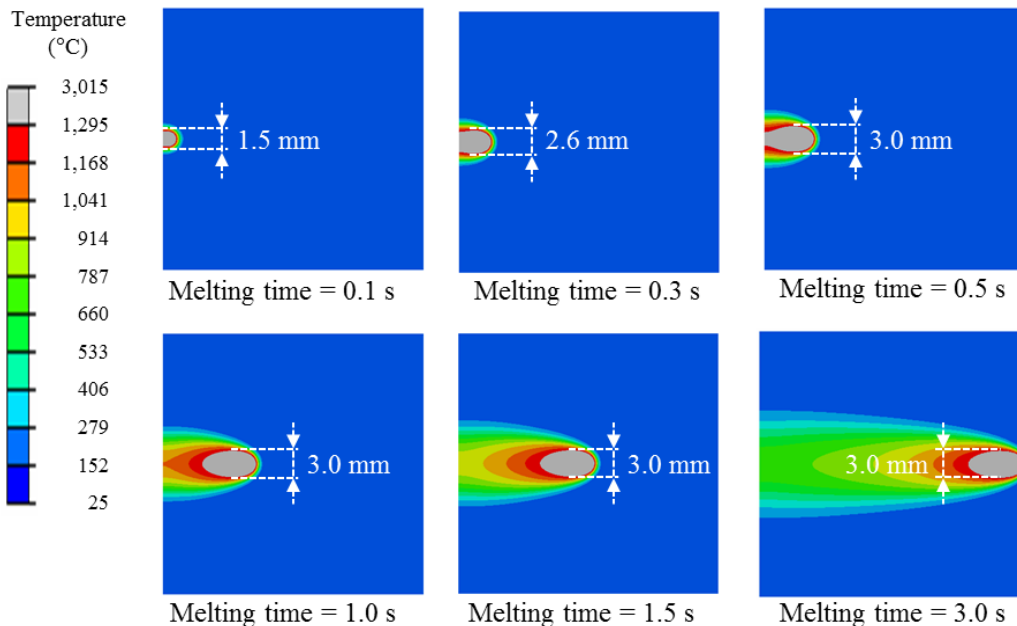


### 3. 적층 공정 변수에 따른 용융부 온도 분포 및 가열 형상 분석

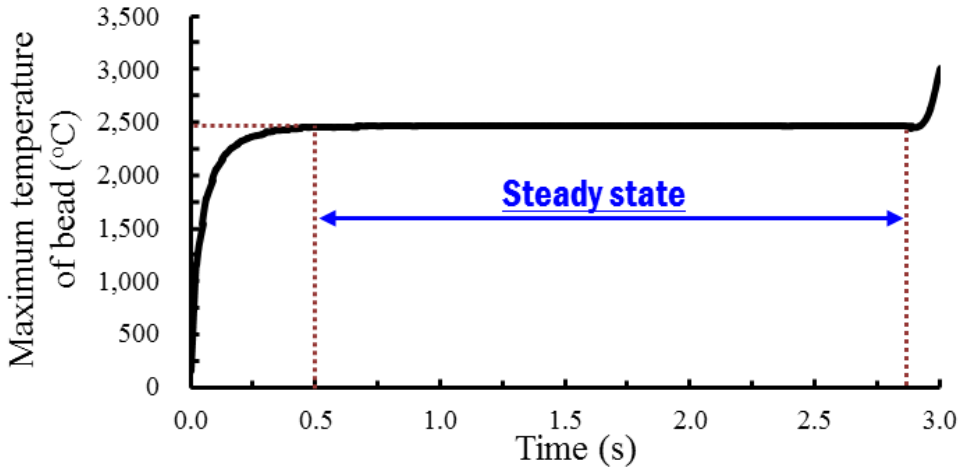
#### 가. 정상상태 열전달 구간 도출

용융 공정에 대한 3 차원 열전달 해석 결과의 비교 시점을 도출하기 위하여 용융 공정의 정상상태 열전달이 이루어지는 시간 및 구간을 도출하였다. Fig. 61 은 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 30 keV, 1.5 mA 및 10.0 mm/s 인 조건에서 예측된 용융 시간에 따른 전자빔 조사 영역 부근의 온도 분포 변화이다.

용융 공정 초기부인 용융 시간 0.1 초의 경우에는 전자빔 조사부에 폭이 약 1.5 mm 인 용융부가 예측되었다. 그러나 용융 시간이 0.5 초 이상인 경우에는 폭이 3.0 mm 정도인 타원의 형상의 용융 영역이 생성되는 것을 알 수 있었다. 용융 공정의



**Fig. 61 Results of transient heat transfer analysis for different melting times ( $U = 30$  keV,  $I_p = 1.5$  mA,  $V_t = 10$  mm/s, without heating of building plate)**



**Fig. 62** Variation of maximum temperature of the melted region according to melting time ( $U = 30$  keV,  $I_p = 1.5$  mA,  $V_t = 10$  mm/s, without heating of building plate)

열전달 해석 결과를 이용하여 Fig. 62 와 같이 용융 시간에 따른 용융부의 최대온도 변화 곡선을 도출하였다. Fig. 61 과 같이 용융 시간이 0.5 초 이상이면 용융부 최대 온도가 거의 일정하게 유지되었다. 또한 이송 속도가 10.0 mm/s 임을 고려하면, 용융부 생성을 위한 전자빔 이송 거리가 5 mm 이상 일 경우 정상상태 열전달 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.

#### 나. 적층 공정 변수에 따른 용융부 형상 변화 예측 결과 및 고찰

Fig. 63 및 64 는 용융 공정에 대한 3 차원 비정상 열전달 해석으로부터 도출된 플라즈마 전자빔 검출 전류와 이송 속도에 따른 전자빔 조사부 주위의 온도 분포 변화를 나타내었다.

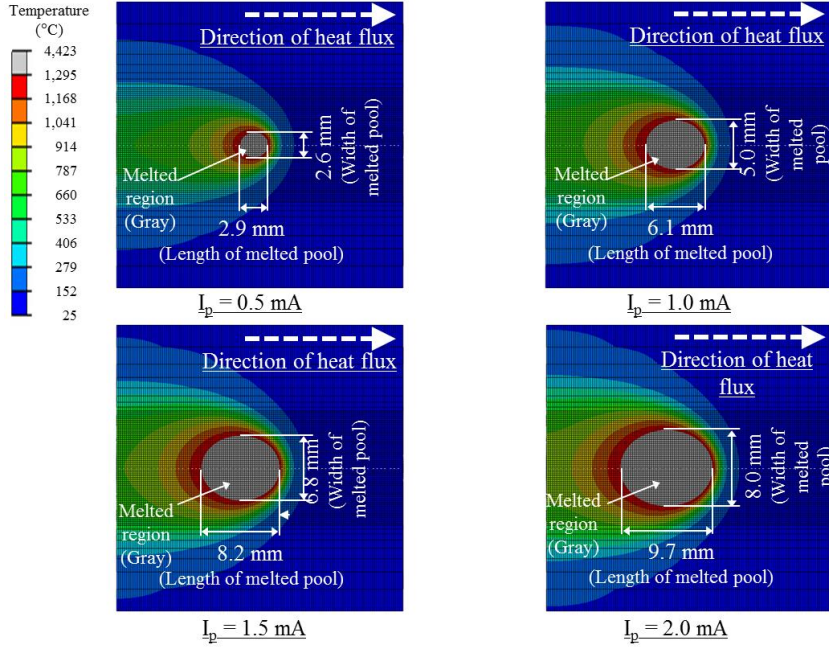
Fig. 63 과 64 에서 동일 이송 속도일 경우 검출 전류가 증가할수록 용융부의 면적이 넓어지고 깊이가 깊어지는 것을 알 수 있었다. 검출 전류가 증가할 경우 전자빔 중심부에서 외부 방향으로 용융부가 전체적으로 팽창하는 경향을 나타내었다. 즉, 전자

빔의 검출 전류가 낮을 때의 용융부 형상이 검출 전류가 증가함에 따라 외부에 용융되지 않은 분말 방향으로 수직하게 용융부가 팽창하여 검출 전류에 따라 용융부 크기만 차이날 뿐이지, 기준 영향은 거의 동일한 특성 나타내었다.

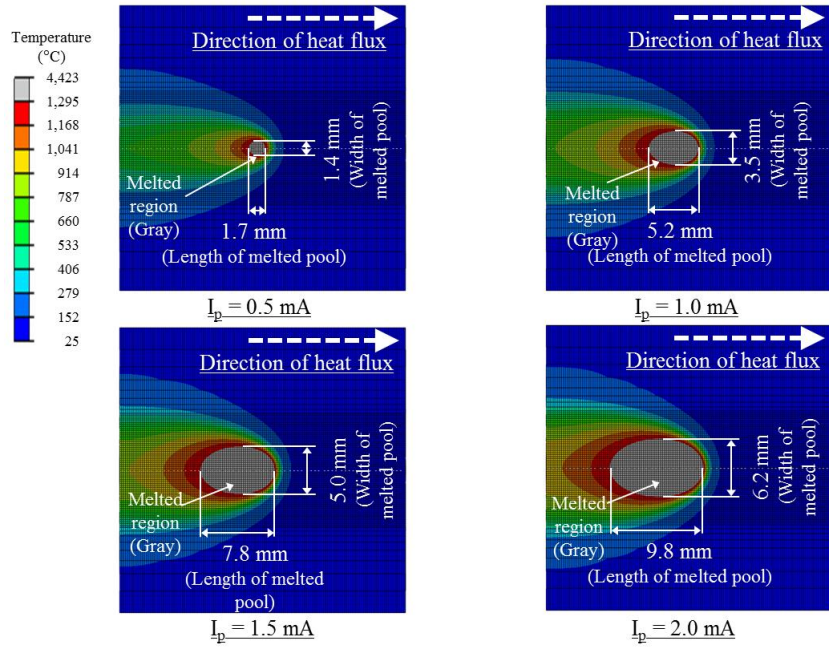
Fig. 63 및 64 를 고찰한 결과 동일 검출 전류에서 이송 속도가 증가할수록 전자빔 이송 방향의 용융부 장축은 증가하고 전자빔 이송 방향에 수직인 방향의 용융부 단축은 감소하여, 용융부 형상이 이심률 (Eccentricity) 이 높은 타원으로 천이하는 것을 알 수 있었다. 용융부 형상의 이심률이 증가하는 이유는 전자빔의 이송 속도 증가시 전자빔에 의해 용융되는 단위 시간당 체적이 증가하여 늘어난 체적 부분에서 열손실이 추가적으로 발생하고, 이로 인해 전자빔 이송 방향에 수직인 방향으로 열이 전달되지 못하기 때문으로 사료된다. 또한 동일 검출 전류에서 이송 속도가 증가할수록 용융부 최대 폭 발생부와 모재 깊이 방향으로 최대 열전달 깊이 발생부가 전자빔 이송 방향의 반대 방향으로 조금씩 이동하는 것을 알 수 있었다.

전자빔 검출 전류 및 이송 속도와 용융부 형상의 이심률과의 상관관계는 Fig. 67 과 같다. 이심률은 식 (28) 을 이용하여 계산되었다. 검출 전류가 0.5 mA 인 조건에서는 이송 속도에 관계없이 이심률이 0.8 - 0.9 수준으로 예측되었다. 용융부 형상의 이심률은 이송 속도 범위가 5.0 mm/s - 10 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다. 그러나 이송 속도가 2.5 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 1.0 mA 이상일 때 검출 전류를 더 증가시키더라도 이심률이 거의 변화하지 않았다. 동일한 검출 전류 조건에서 이송 속도가 증가할 경우 이심률이 감소하는 것을 알 수 있었다.

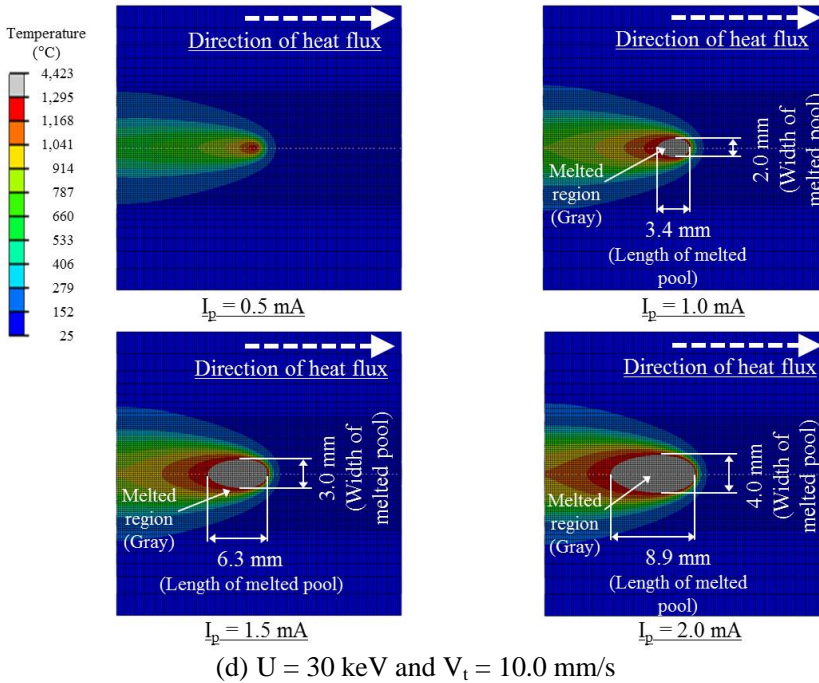
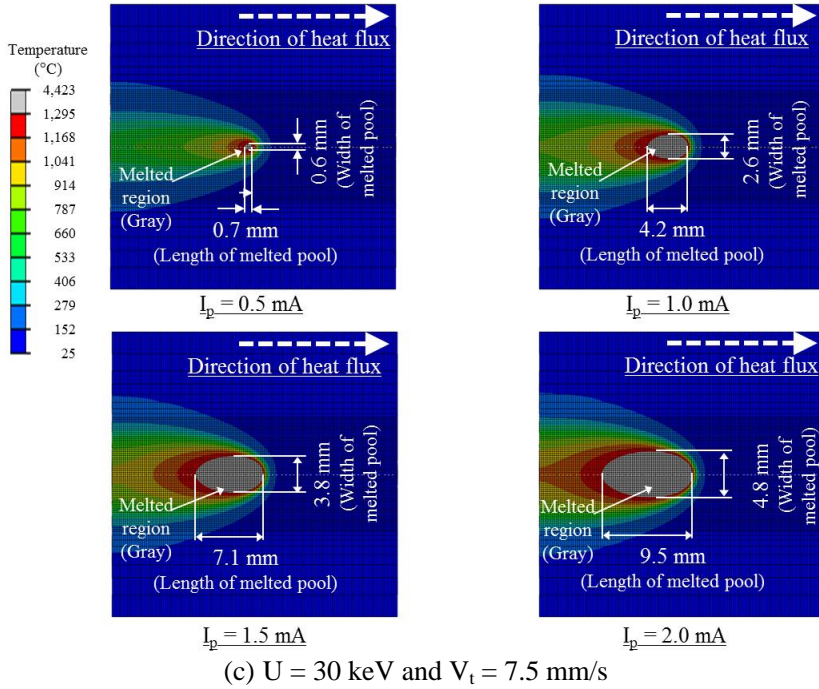
$$Eccentricity = \frac{Width\ of\ melted\ pool}{Length\ of\ melted\ pool} \quad (28)$$



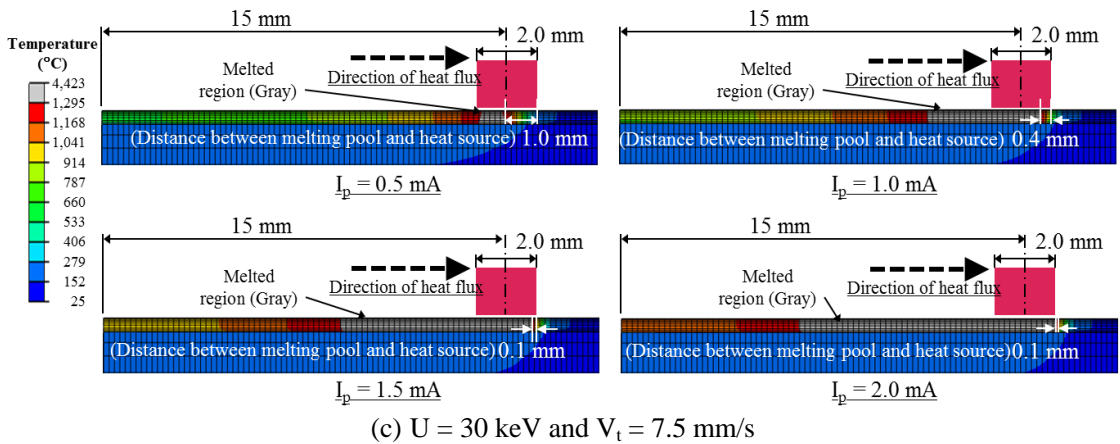
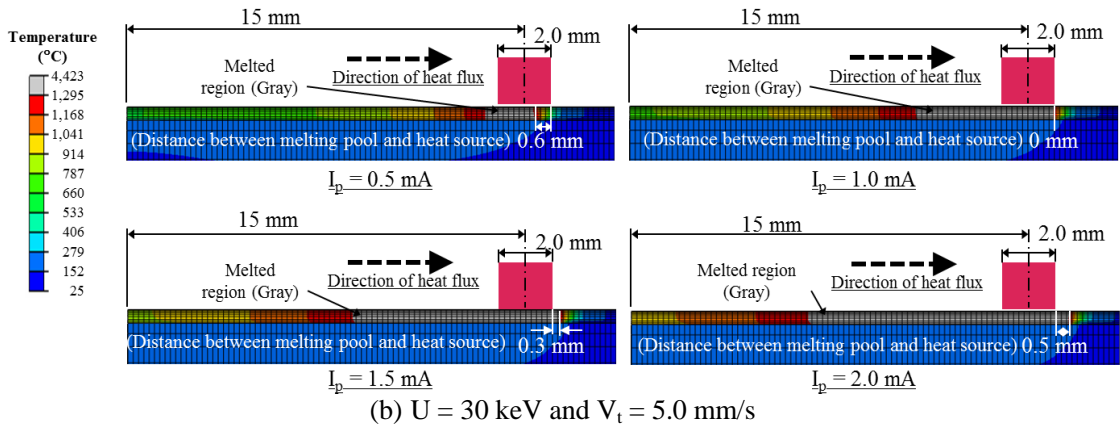
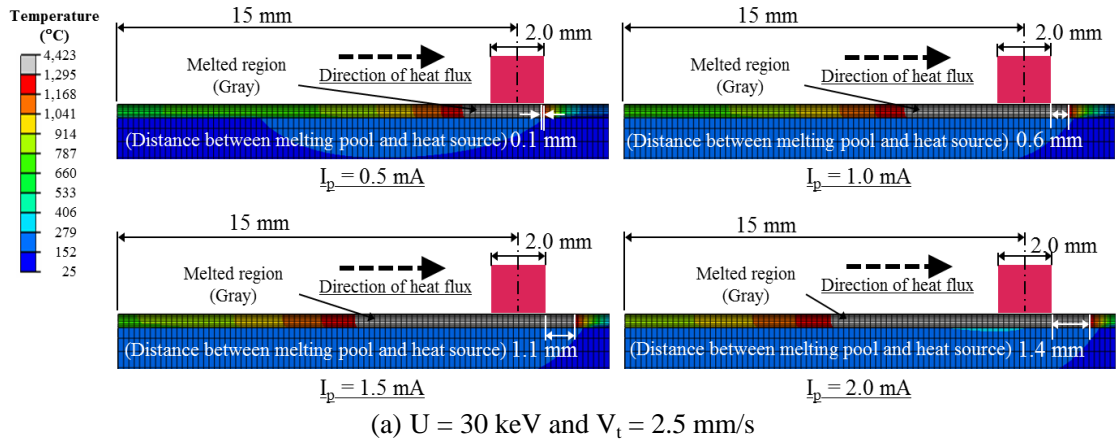
(a)  $U = 30 \text{ keV}$  and  $V_t = 2.5 \text{ mm/s}$

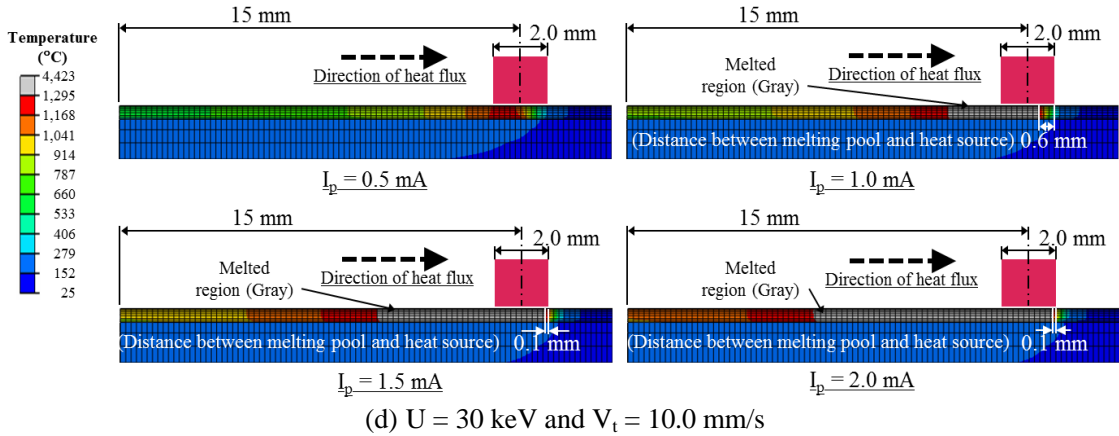


(b)  $U = 30 \text{ keV}$  and  $V_t = 5.0 \text{ mm/s}$



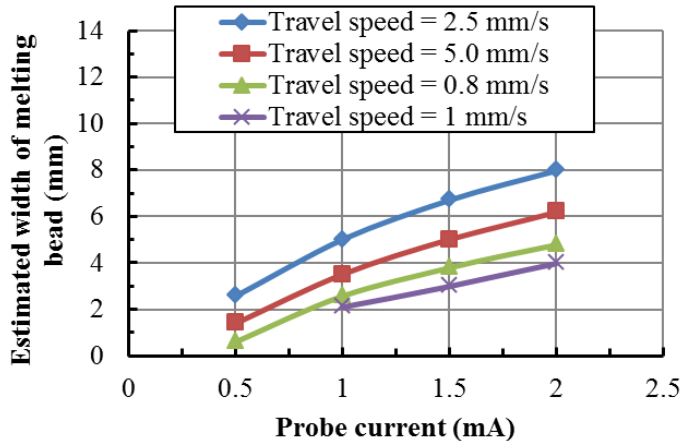
**Fig. 63** Temperature distributions in the vicinity of the melted region for different melting conditions (surface, without heating of building plate)



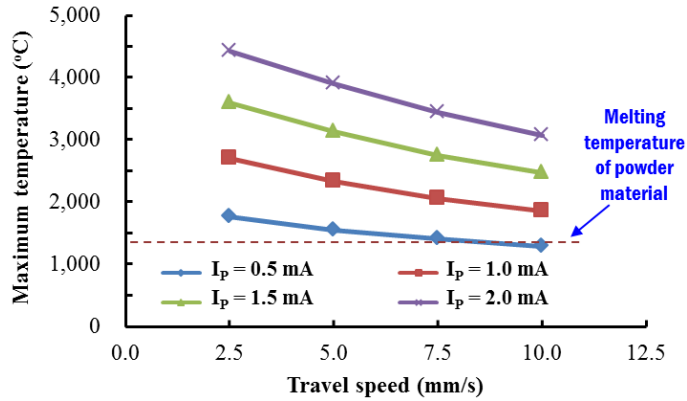


**Fig. 64 Temperature distributions in the vicinity of the melted region for different melting conditions (cross section, without heating of building plate)**

검출 전류가 0.5 mA 인 경우에는 이송 속도가 2.5 mm/s 일때에 표면 용융부의 폭이 2.6 mm 정도로 적층 비드가 생성될 가능성 있는 것으로 예측되었다. 그러나 이송 속도가 5.0 mm/s 이상에서는 표면 용융부 폭이 1.4 mm 이하로 현저히 감소하여 실제 실험에서 적층 비드가 생성되지 않을 것으로 사료되었다. 또한 이송 속도 7.5 mm/s 이상에서는 표면에 용융부가 거의 나타나지 않고 최대 온도가 Stellite21 용융 시작 온도



**Fig. 65 Effects of the probe current and the travel speed on the width of the expected melted region**



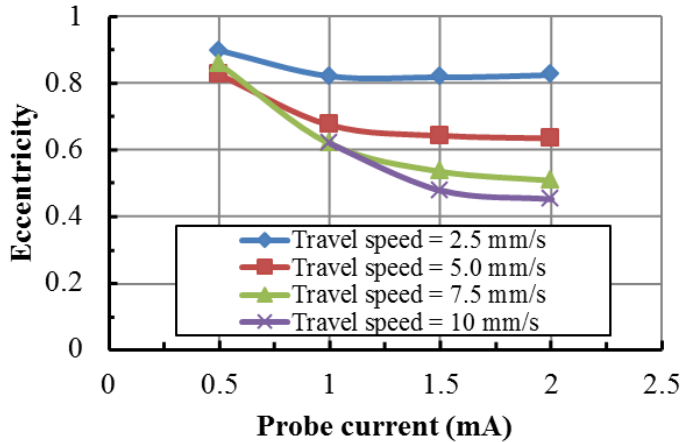
**Fig. 66 Effects of the probe current and the travel speed on the maximum temperature of the melted region**

보다 낮아서, 실제 적층 실험시 적층이 발생하지 않을 것으로 생각되었다.

검출 전류 증가시 용융부의 온도가 증가함에 따라 과용융과 기화가 발생하여 발생하여 Fig. 52, 53 및 54 와 같이 적층 비드 중앙에 크레이터가 발생하는 볼링 결함이 적층 비드에 발생할 가능성이 매우 높을 것으로 예측되었다.

Fig. 65 와 66 은 전자빔 검출 전류와 이송 속도에 따른 용융부 폭과 용융부 최대 온도의 변화를 나타내었다. Fig. 65 에서 검출 전류가 증가할 경우 용융부의 폭은 비선형적으로 증가하며, 이송 속도가 증가할 경우 용융부의 폭이 비선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. Fig. 66 에서 이송 속도와 검출 전류 증가에 따라 용융부 최대 온도는 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 65 와 66 의 비교를 통하여 검출 전류가 0.5 mA 이고 이송 속도가 10.0 mm/s 인 경우 용융부 최고 온도가 Stellite21 분말 용융 시작 온도 이하로 예측되었다. 그래서 이 조건에서는 용융부가 생성되지 못하는 것을 알 수 있었다. 또한 검출 전류 0.5 mA 이고 이송 속도가 7.5 mm/s 인 경우 용융부 최고 온도가 거의 Stellite21 분말 용융 시작 온도와 유사하여 실제 적층시 적층 비드가 생성되지 않을 것으로 사료되었다.





**Fig. 67 Effects of the probe current and the travel speed on eccentricity of melted region**

Fig. 64 의 해석 결과로부터 공정조건에 따라 용융 열원과 용융 예상부의 최전방 위치 차이가 변화함을 알 수 있었다. 이송 속도가 2.5 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.5 mA 인 경우에 용융 열원과 용융 예상부의 최전방 위치차이가 0.1 mm 로 예측되었다. 그러나 검출 전류가 2.0 mA 인 조건에서는 용융 열원과 용융 예상부의 최전방 위치 차이가 1.4 mm 로 증가함을 알 수 있었다. 이송 속도가 2.5 mm/s 인 조건에서는 모든 검출 전류 조건에서 용융 열원의 위치가 용융 예상부의 위치보다 뒤에 위치하는 것을 알 수 있었다. 이송 속도가 5.0 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.5 mA 인 경우에 용융 열원과 용융 예상부의 최전방 위치차이가 0.6 mm 이며 용융 열원의 위치가 용융 예상부의 위치보다 앞에 위치하는 것으로 예측되었다. 그러나 검출 전류가 1.0 mA 인 조건에서는 용융 열원과 용융 예상부의 위치가 일치하는 것으로 예측되었다. 그러나 검출 전류가 1.5 mA 이 상인 조건에서는 용융 열원의 위치가 용융 예상부의 위치보다 뒤에 위치하는 것으로 예측되었다. 이송 속도가 7.5 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 1.5 mA 이하인 조건에서는 용융 열원의 위치가 용융 예상부 위치보다 앞에 위치하는 것으로 예측되었다 그러나 검출 전류가 2.0 mA 인 조건에서는 그 반대로 예측되었다. 이송 속도가 10 mm/s 인 조건에서는 검출 전류가 0.5 mA 일 때 용융 예상부가 예측

되지 않았다. 그외 검출 전류가 1.0 mA - 1.5 mA 인 조건에서는 용융 열원의 위치가 용융 예상부 위치보다 앞에 위치하는 것으로 예측되었다. 그러나 검출 전류가 2.0 mA 인 조건에서는 용융 열원의 위치가 용융 예상부 위치보다 뒤에 위치하는 것으로 예측되었다.

이 결과들을 통하여 Fig 68 과 같이 공정 변수와 용융 열원/용융 예상부의 최전방 위치차이의 상관관계를 도출 하였다. 여기서 음수영역은 용융 열원 최전방부가 용융 예상부 최전방 부보다 앞에 위치하는 것을 의미한다. 이송 속도가 증가할 경우 용융 열원과 용융예상부의 최전방 위치 차이가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 검출 전류가 증가할 경우 용융 열원과 용융예상부의 최전방 위치 차이가 증가 하는 것을 알 수 있었다. 적층 공정 실험 결과를 함께 고찰한 결과 검출 전류 및 이송 속도가 각각 1.0 mA 및 7.5 mm/s 이상이면서 용융 열원 최전방부가 용융 예상부 최전방부 보다 앞에 위치하며 이때의 거리가 1 mm 이상인 조건에서만 결함 적층 결함 없이 적층 비드 생성이 가능함을 알 수 있었다. 특히, 용융 열원 최전방부가 용융 예상부 최전방부 뒤에 위치할 경우 모든 조건에서 과도용융이 발생하는 것을 알 수 있었다. 용융 열원 최전방부가 용융 예상부 최전방부 뒤에 위치할 경우 과도용융이 발생하는 이유는 전자빔은 레이저와 다르게 질량을 가지고 있는데 이미 용융되어 있는 용융 풀에 전자빔 이 조사될 경우 전자의 운동에너지에 의하여 빔이 적용되는 영역의 용융 풀의 유동에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 이 결과들로부터 용융 열원과 용융 예상부 최전방부 위치 차이가 적층 비드 생성 특성에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다.

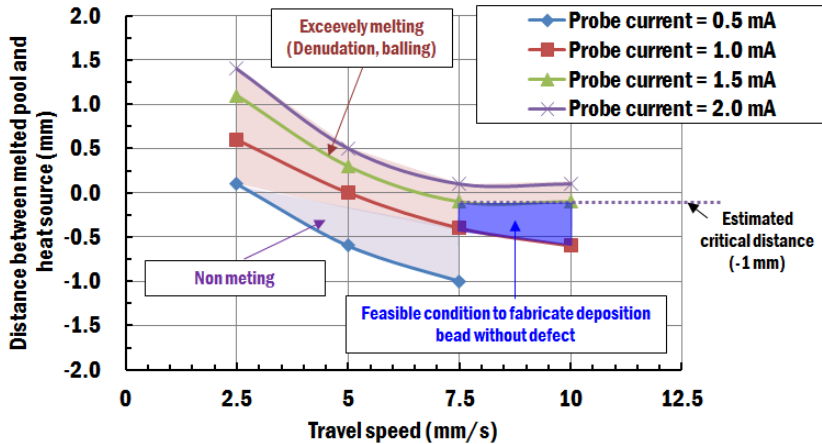


Fig. 68 Effects of the probe current and the travel speed on the distance between melted pool and heat source

#### 다. 적층 공정 열전달 해석 모델의 적용 가능성 분석

제안된 용융공정에 대한 유한요소해석 모델의 적용 가능성을 고찰하였다. 적층 실험으로 제작된 적층 비드와 해석을 통해 예측된 용융 예상부의 폭과 두께를 비교/분석하였다.

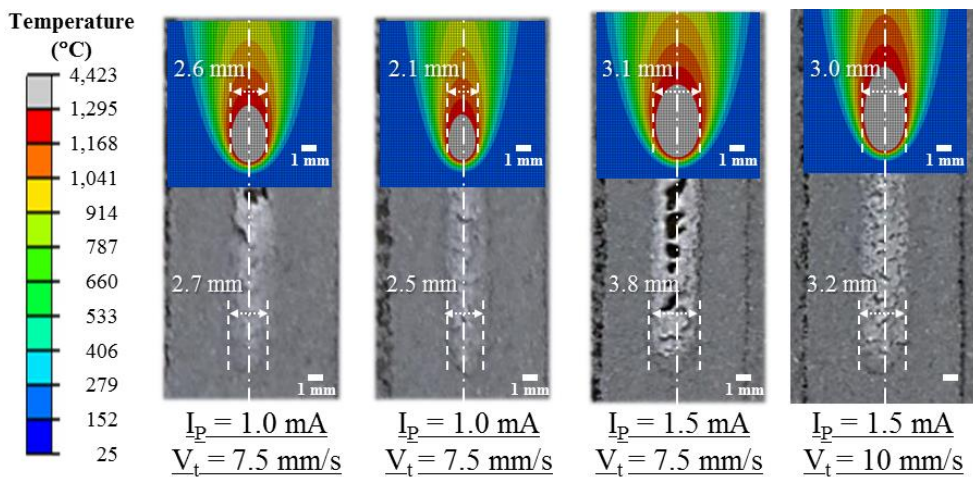
Table 22, 23 및 Fig. 69 는 적층 비드 폭과 해석 결과 도출된 용융 예상부 폭을 비교한 결과이다. 검출 전류가 0.5 mA 인 경우 이송 속도가 2.5 mm/s 일때 해석 모델을 통하여 예측된 용융 예상부의 폭이 적층 비드의 폭과 거의 유사하게 예측되었다. 이송 속도가 5.0 - 7.5 mm/s 인 경우에는 해석에서는 폭 0.6 - 1.4 mm 의 용융부 및 적층 비드가 생성될 것으로 예측 되었으나, 실제 실험 결과에서는 적층 비드가 생성되지 않았다. 그러나 이송 속도가 10.0 mm/s 인 조건에서는 해석 결과가 실험 결과와 동일하게 적층 비드가 생성되지 않을 것으로 예측하였다. 검출 전류가 1.0 mA 인 경우 이송 속도에 따라 2 - 19 % 범위의 해석 결과에 오차 발생하는 것을 알 수 있었다. 검출 전류가 1.5 mA 인 경우에는 이송 속도에 따라 6.7 - 22.4 % 범위의 해석 결과의 오차가 발생하는

**Table 22 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the melted region ( $I_P = 0.5 - 1.0$  mA)**

Probe current (mA)	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
Travel speed (mm/s)	2.5	5.0	7.5	10.0	2.5	5.0	7.5	10.0
Experiment (width, mm)	2.6	-	-	-	4.9	4	2.7	2.5
Analysis (width, mm)	2.6	1.4	0.6	-	5	3.5	2.6	2.1
Error ratio (%)	0	-	-	0	2.0	14.3	3.8	19.0

**Table 23 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the melted region ( $I_P = 1.5 - 2.0$  mA)**

Probe current (mA)	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0
Travel speed (mm/s)	2.5	5.0	7.5	10.0	2.5	5.0	7.5	10.0
Experiment (Width, mm)	4.8	3.9	3.1	3.2	5.7	4.7	3.9	3
Analysis (Width, mm)	6.7	5	3.8	3	8	6.2	4.8	4
Error ratio (%)	22.4	22.0	18.4	6.7	28.8	24.2	18.8	25.0



**Fig. 69 Comparison of the formation of the deposited bead by experiment and that of the melted region by analysis (allowable conditions to create the deposited bead)**

것을 알 수 있었다. 검출 전류가 2.0 mA 인 경우에는 이송 속도에 따라 18.8 - 28.5 % 정도의 해석 결과 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

특정 용융/적층 조건에서 오차율이 급격히 증가하는 이유는 이 연구에서 제안된 해석 모델이 순수 열전달 해석 모델이어서, 실제 용융/적층 공정에서 발생하는 분말이 과도 가열시 용융된 재료가 모세관 현상에 의하여 주변 소결층과 분말층으로 침투하는 현상과 분말이 증발 온도 이상으로 가열될 경우 기화되는 현상을 해석 모델에서 모사하지 못하기 때문으로 사료된다. 이 같은 특성을 고려하여 적층 실험에서 시편 제작 특성이 우수한 실험 조건들에 대하여 해석 결과와 실험 결과를 Table 24 와 같이 비교하였다. 그 결과 제안된 용융/적층 공정에 대한 해석 모델의 용융부 폭 예측 측면의 정확도가 81 % 이상임을 알 수 있었다.

**Table 24 Comparison of results of experiment and those of analysis from the viewpoint of the width of the melted region (allowable conditions to create the deposited bead)**

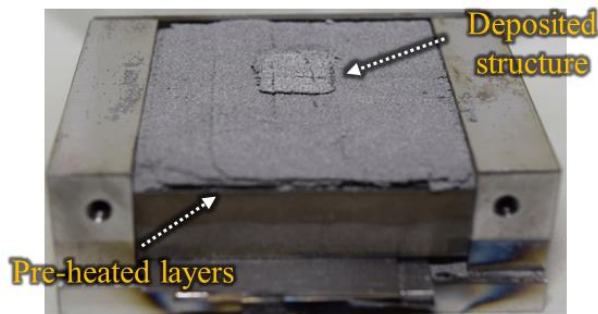
Probe current (mA)	1.0	1.0	1.5	1.5
Travel speed (mm/s)	7.5	10.0	7.5	10.0
Experiment (width, mm)	2.7	2.5	3.1	3.2
Analysis (width, mm)	2.6	2.1	3.8	3
Error ratio (%)	3.8	19.0	18.4	6.7

### 제 3 절 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 다층 적층 특성 분석

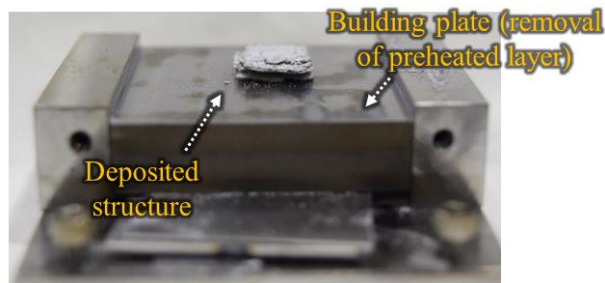
4 장 1 절과 2 절의 적층 실험과 용융 해석 결과로부터 도출된 적정 적층 조건을 이용하여 기저부 비가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 다층 적층 실험을 수행하였다. 다층 적층 실험은 평면 적층 공정을 높이 방향으로 4 회 반복하는 방식으로 진행하였다. Fig. 70 은 기저부 비가열 조건에서 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 다층 적층 실험 결과이다. 제작된 시편을 고찰한 결과 반복적으로 적층을 수행하였을 때 적층 중 적층부에 삭박, 볼링 및 비용융과 같은 결함은 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있었다. 그러나 기저부 비가열 조건에서 다층 적층 수행시 시편에 두 가지 평면 적층과 차별화되는 결함이 발생하는 것을 알 수 있었다. 첫번째는 적층 제품과 기저부와의 분리 결함 (Delamination) 이다. 이 결함의 발생 사유는 기저부와 제품의 온도 편차 및 기저부 표면의 산화막 존재 등으로 사료된다. 적층 공정에서 적층 시편의 바닥부와 기저부를 양호하게 용융/결합하기 위해서는 적층 단계에서 적층 비드와 기저부가 동시에 용융되어야 한다. 그러나 적층되는 비드의 체적과 기저부를 구성하는 적층판의 체적이 크게 차이 나서, 1 회 적층 비드 생성에 해당되는 예열층은 전자빔의 1 회 가열에 의하여 빨리 가열/용융 되지만, 1 회 적층 비드 생성을 위해 부가되는 전자빔의 1 회 가열로는 기저부는 거의 가열되지 않으며 전자빔으로 기저부가열과 용융을 위해서는 시간과 추가적인 열이 필요하다. 이 같은 특성 때문에 기저부 비가열 조건에서 적층 비드를 생성할 경우 적층 비드가 충분히 용융되었음에도 기저부가 용융 되지 않아 제품과 기저부의 결합에 어려움이 있다. 또한 기저부 표면에는 산화막이 존재하는데 이를 제거하지 않은 상태에서 분말을 도포하고 예열 및 적층 공정을 진행할 경우 이 산화막으로 인해 용융된 재료가 기저부에 적층/결합되는 것을 저

해할 수 있다.

두번째 결함은 Fig. 71 과 같이 각 적층 평면간에 완벽한 결합이 이루어지지 않는 층간 분리이다. Fig. 72 와 같이 다층 적층 시편의 단면 형태를 고찰한 결과 기저부 비가열 조건에서 적층 공정을 진행할 경우 적층 시편의 층간 결합이 매우 불안정하게 나타남을 알 수 있었다. 이 시편에서 층간 결합이 불안정한 이유는 진공 챔버에서 한 개의 층을 적층 완료하면 이 셋업을 다시 외부로 이동 시켜 분말을 수동으로 도포하고 다시 진공 챔버에서 적층하는 과정을 반복하여 시편을 제작함에 따라 적층 중 시편이 가열과 냉각을 반복함과 동시에 적층부 표면이 대기에 노출되어 적층부 표면에 산화막이 생겨 층간 결합 활성화를 저해하기 때문으로 사료된다.



(a) Deposited part (before removal of the preheated layers)



(b) Deposited part (after removal of the preheated layers)

**Fig. 70 Fabricated parts through multi-layers deposition (without heating of building plate)**

위 두 가지 다층 적층시 발생하는 결함을 개선하기 위하여 다음과 같은 방법을 제안하고자 한다. 적층 제품과 기저부의 분리 결함은 적층 공정 초기에 기저부를 고온으로 가열하여 기저부 표면의 산화막을 제거함과 동시에 적층 공정중 분말층과 기저부의 온도 편차를 줄여서 해결하고자 한다. 또한, 모재의 재료를 적층에 용이한 재료인 SUS304 로 변경하여 모재와 적층 비드와의 결합 특성을 개선하고자 한다. 각 적층 평면간에 완벽한 결합이 이루어지지 않는 층간 분리 문제는 완벽한 층간 결합 특성을 가진 제품을 제작하기 위하여 진공 환경에서 구동할 수 있는 진공용 분말 도포 장치가 포함된 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 분말 베드 시스템을 개발하고 이를 이용하여 진공환경 내에서 다층 적층을 연속적으로 수행하여 해결하고자 한다.



**Fig. 71 Delamination of the fabricated part through multi-layers deposition (without heating of building plate)**



**Fig. 72 Morphology of the fabricated part through multi-layers deposition (cross section, without heating of building plate)**



## 제 5 장 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 분말 베드 실험 시스템 개발

### 제 1 절 분말 베드 실험 시스템 기본 형상 설계

진공 환경에서 적층 공정을 실험을 연속적으로 수행하기 위하여 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 분말 베드 실험 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 플라즈마 전자빔 시스템의 진공 챔버 (Vacuum chamber) 내부에 모듈 형태로 장착되며 개념도는 Fig. 73 과 같다.

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 분말 베드 실험 시스템의 구성 및 치수는 Fig. 74 와 같다. 플라즈마 전자빔 시스템 내부 크기와 전자빔

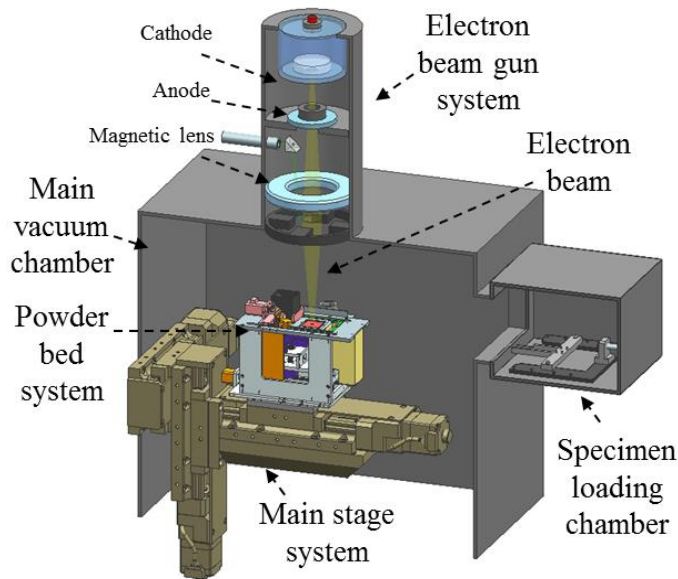
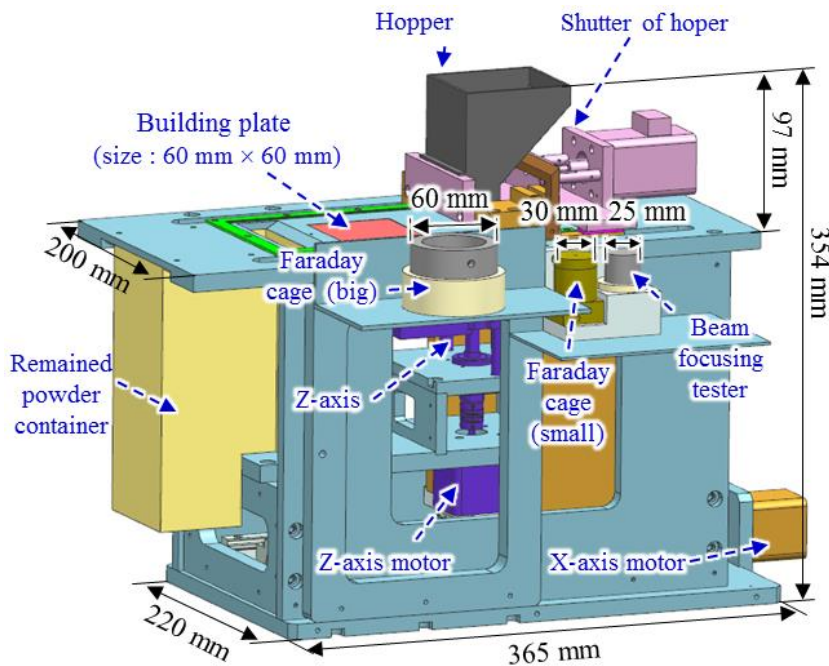
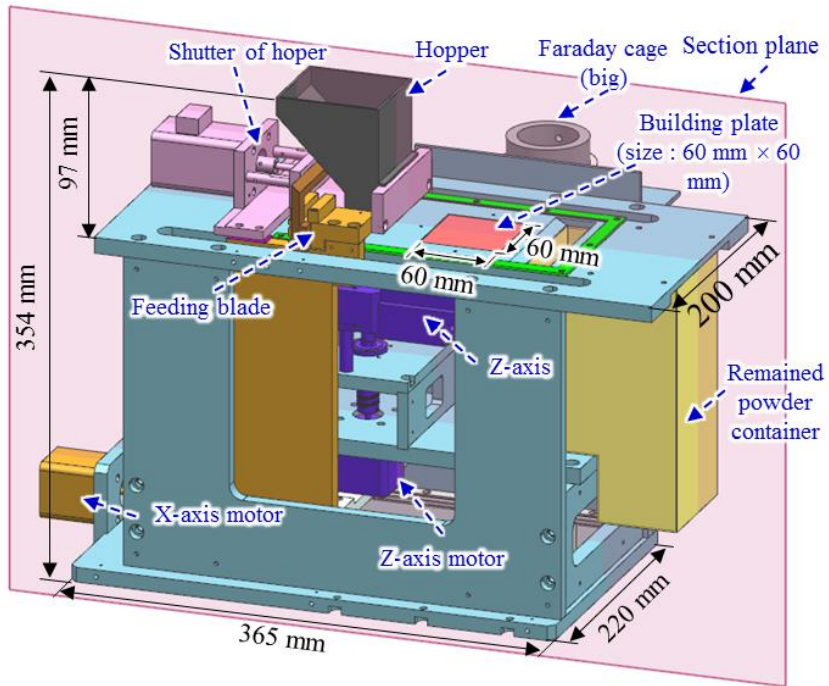


Fig. 73 Assembly design of experimental set-up including the developed powder bed system

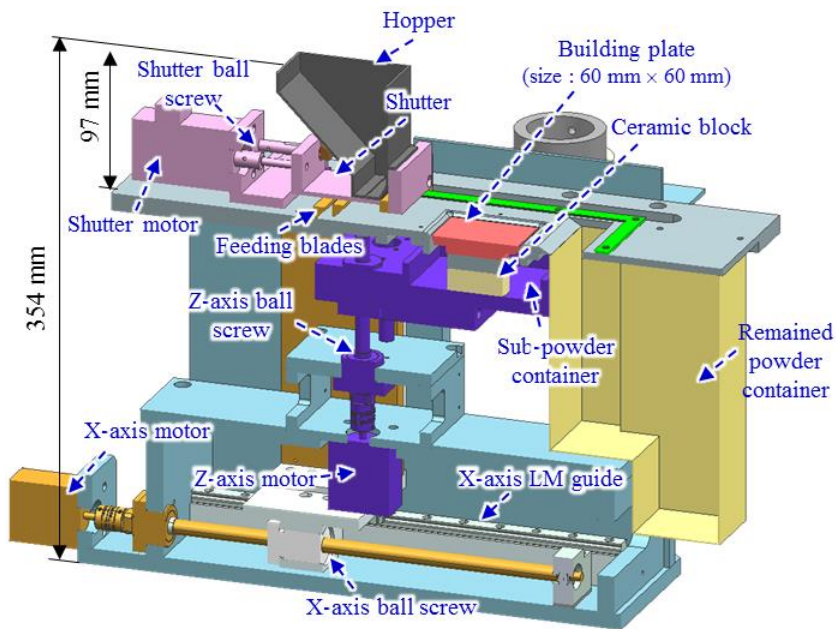
시스템 내부에 분말 베드 실험 시스템의 구동을 고려하여 220 mm × 365 mm × 354 mm 로 설계하였다. 개발된 분말 베드 실험 시스템은 후퍼 (Hopper), 후퍼 셔터(Shutter of hopper), 적층판 (Building plate), 적층판 이송부, 분말 도포 블레이드 (Feeding blade), 분말 도포 블레이드 이송부, 잉여 분말 저장부 (Container of remained powders), 검출 전류 및 빔 집속도 측정 장치 (Faraday cage) 등으로 구성 하였다. 적층판 크기는 60 mm × 60 mm 이다. 분말 베드 실험 시스템 구조물의 재료는 탈부착 용이성 및 가공성을 고려하여 AL6061 을 사용하였다. 전자빔에 직/간접적으로 노출되는 상판의 재료는 부식, 내열성 및 강성을 고려하여 SUS304 를 사용하였다. 개발된 분말 베드 실험 시스템의 내부 단면도는 Fig. 74 (c) 와 같다.



(a) Right side view



(b) Left side view



(c) Sectional view

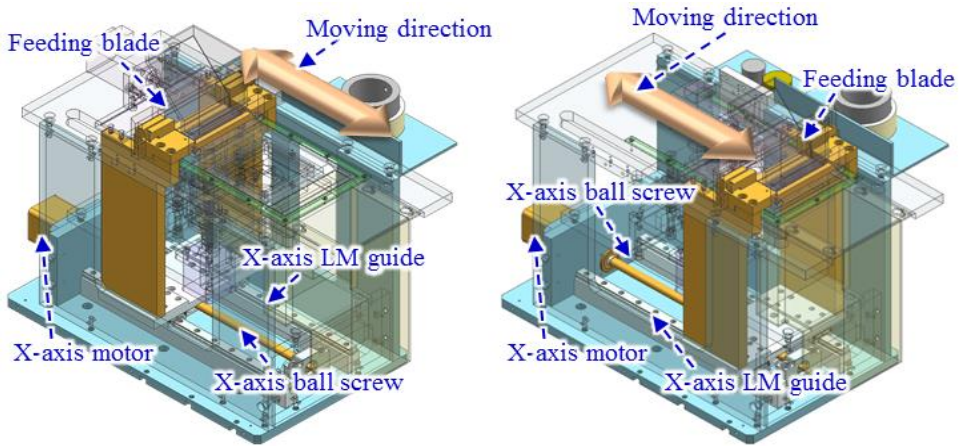
**Fig. 74 Design of the developed powder bed system**

## 제 2 절 분말 베드 실험 시스템 구동 설계

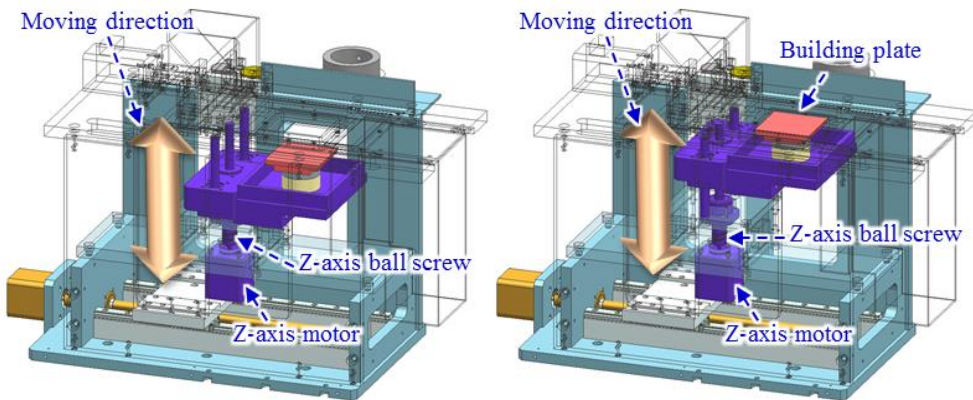
분말 도포 블레이드 시스템의 구동 설계는 Fig. 75 (a) 와 같다. 분말 도포 시스템의 구동은 X 축 이송부와 연결되어 작동되도록 설계하였다. X 축 이송부의 주요 부품인 모터, 볼 스크류 (Ball screw) 및 선형 가이드 (LM guide) 는 분말 베드 실험 시스템의 하단에 위치 시켰다. 그 이유는 적층판과 같은 평면에 X 축 이송부를 배치할 경우 시스템의 크기가 커지기 때문이다. 적층판 이송부의 구동 설계는 Fig. 75 (b) 와 같다. 적층판 이송부의 구동은 Z 축 이송부와 연결되어 작동되도록 설계하였다. Z 축 이송부의 주요 부품인 모터, 볼 스크류 및 볼 가이드 (Ball guide) 는 분말 베드 실험 시스템의 중단에 위치시켰다. 그 이유는 적층판과 같은 축에 배치될 경우 경우 시스템의 높이가 증가하기 때문이다. 또한 X 축과 Z 축 이송부를 적층판과 일정 거리를 유지한 이유는 적층판과 가깝게 설계할 경우 X 축과 Z 축 이송부가 전자빔에 의해 직접 가열되거나 고온으로 가열된 적층판의 열이 X 축과 Z 축 이송부에 직/간접적으로 전달 되어 모터의 수명이나 볼 스크류의 변형이 발생할 수 있기 때문이다. 후퍼의 구동 설계는 Fig. 75 (c) 와 같다. 후퍼의 셔터는 진공 챔버에서 사용할 수 있게 하기 위하여 별도의 후퍼 셔터용 스텝 모터에 연결되어 작동되도록 설계하였다.

검출 전류와 전자빔 집속도를 측정하기 위하여 개발된 분말 베드 실험 시스템의 측면에 2 개의 페러데이 케이지와 빔 집속도 측정기 (Beam focusing tester) 를 설치하였다. 큰 직경을 가지는 페러데이 케이지에서는 넓은 직경을 가지는 빔의 검출 전류를 측정하고, 작은 직경을 가지는 페러데이 케이지에서는 집속된 빔의 검출 전류를 측정한다. 큰 직경과 작은 직경을 가지는 페러데이 케이지들의 직경은 각각 60 mm 와 30 mm 이다. 빔 집속도 측정기는 25 mm 를 가지는 컵으로 구멍으로 전자빔이 통과하는 정도를 측정하여, 빔의 집속도를 검사한다. 페러데이 케이지와 빔 집속도 측정기의 재

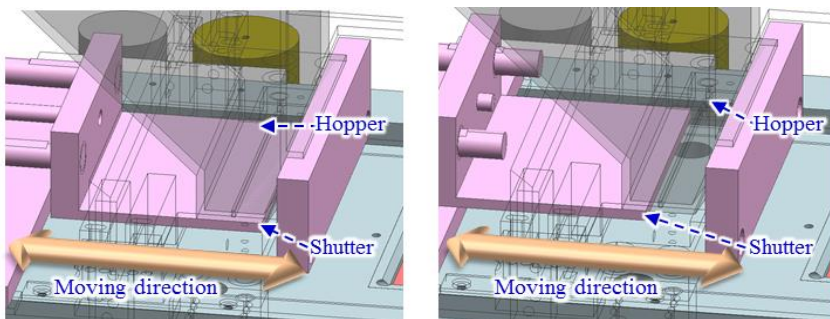
료는 각각 텅스텐 (Tungsten), 구리 (Copper) 및 세라믹 (Ceramic) 을 사용하였다.



(a) Powder feeder



(b) Building plate



(c) Hopper

**Fig. 75 Driving concept of powder feeder, building plate and hopper**

### 제 3 절 분말 베드 실험 시스템 제작 및 성능 평가

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 분말 베드 실험 시스템을 Fig. 76 과 같이 제작하였다. 이 시스템을 이용하여 분말 도포 시험을 수행하였다.

해당 분말 베드 실험 시스템을 이용한 분말 도포 실험 절차는 Fig 77 과 같다. 첫째 단계에서는 분말 베드 실험 시스템의 Z 축 이송부 위에 적층판을 안착 시킨다. 두번째 단계에서는 도포하고자 하는 분말층의 두께를 고려하여 적층판의 높이를 조절하여 적층판의 초기 위치를 설정한다. 세번째 단계에서는 후퍼에서 분말을 토출 시킨다. 네번째 단계에서는 토출된 분말을 분말 공급 블레이드로 적층판 상부로 이송시켜 분말이 일정한 두께로 적층판 위에 도포되도록 한다. Fig 78 은 이 분말 도포 절차를 이용하여 연속 분말 도포 실험을 수행한 결과이다. Fig. 78 과 같이 분말 도포된 시편을 관찰한 결과 연속 10 회 분말 도포를 수행하여 적층판위에 5 mm 두께의 분말 도포층을 안정적으로 생성할 수 있음을 알 수 있었다.

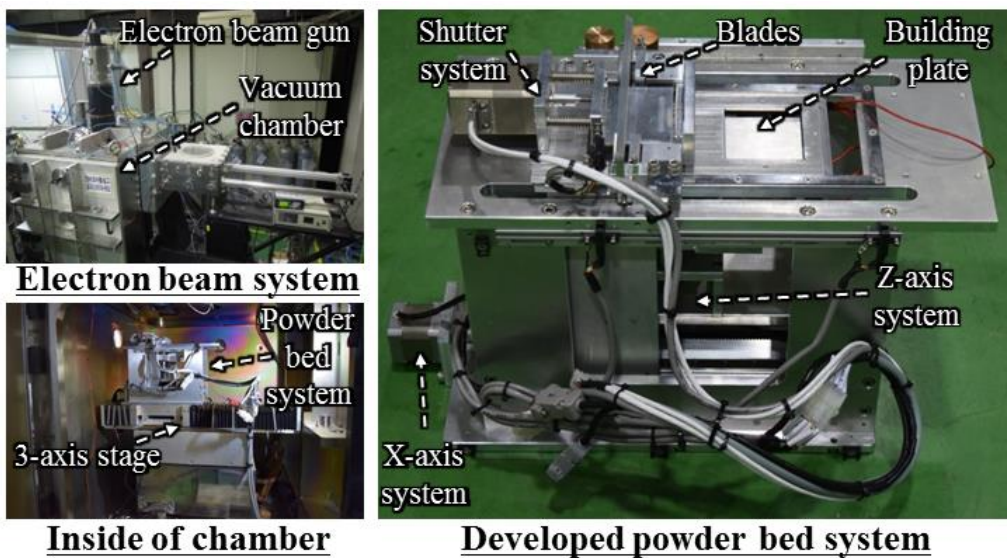


Fig. 76 Fabricated powder bed system

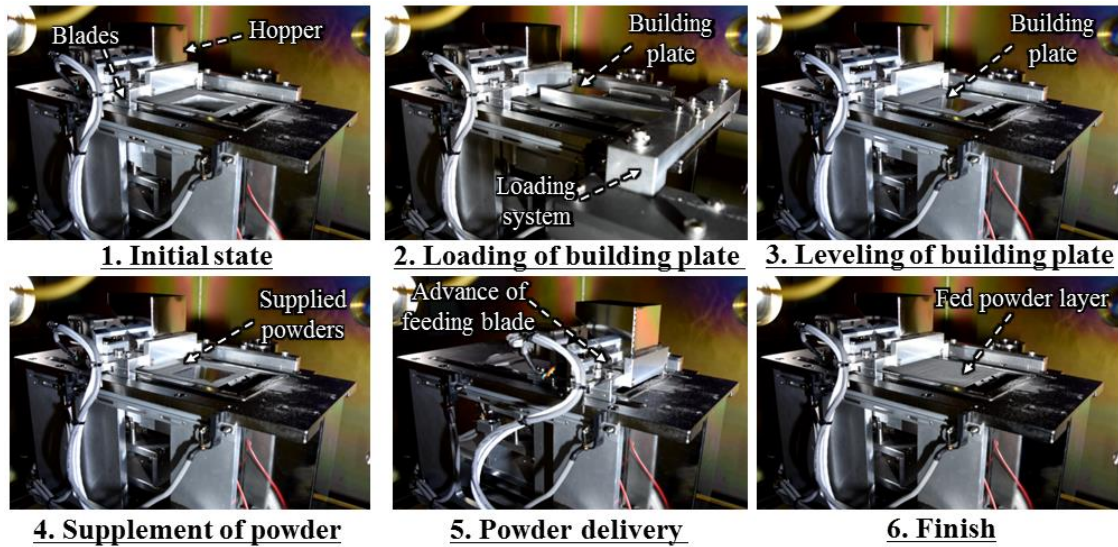


Fig. 77 Procedure of powder feeding using the developed powder bed system

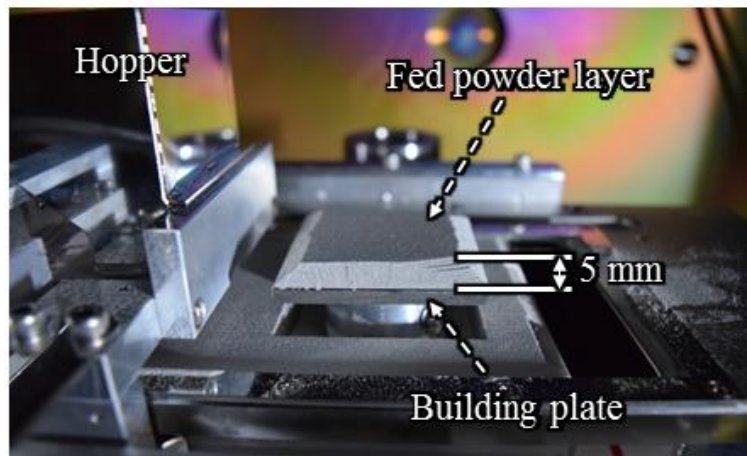


Fig. 78 Result of experiments for multi-layers powder feeding using the developed powder bed system

## 제 6 장 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 초합금 분말 예열 특성 분석

### 제 1 절 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 초합금 분말 예열 비드 생성 실험 방법

4 장의 연구 결과에서 기저부 비가열 조건에서 Stellite21 분말의 예열 비드 생성을 위한 적정 조건으로 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도를 각각 12 keV, 0.93 mA 및 0.2 mm/s 로 선정하였다. 그러나 기저부 가열 조건에서는 적층판의 온도가 기저부 비가열 조건보다 현저히 높으므로 테이블 이송 속도 증가와 전자빔 검출 전류 감소가 가능할 것으로 판단되었다. 기저부 가열 조건에서 Stellite21 분말의 예열 비드 생성 실험을 Fig. 79 와 같이 수행하였다. 여기서 기저부 가열 조건은 전자빔을 이용하여 진공챔버내에서 시편을 직접적으로 가열하는 것을 의미한다. 분말 베드 실험 시스템에 장착된 적층판을 광폭의 플라즈마 전자빔으로 가열하였다. 적층 판 가열 조건은 Table 25 와 같다. 적층판 위에 도포된 분말층의 두께는 0.5 mm 이다. 그 후, Table 26 과 같은 조건으로 예열 비드를 생성하였다. 이 실험에서 기저부의 재료는 SUS304 를 사용하였으며 재료의 조성비는 Table 27 과 같다.

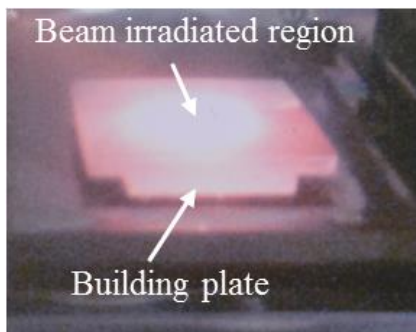
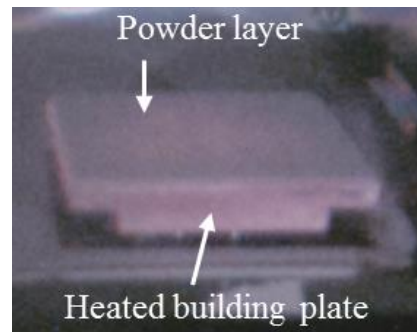
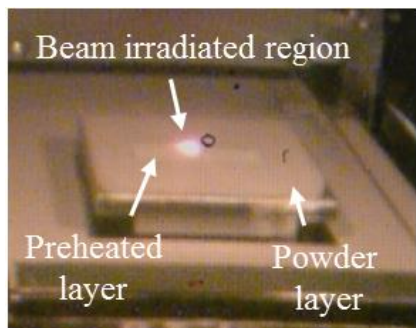
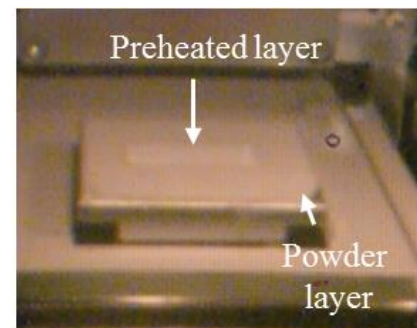


**Table 25 Heating condition of building plate**

Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Duration time (Min.)
35	15	115	10

**Table 26 Parameters and ranges for preheating experiments (with heating of building plate)**

Parameters	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)
Ranges	12	0.50, 0.93	115	0.5 - 2.0


 (a) Heating of building plate (1<sup>st</sup> step)

 (b) Feeding of powders (2<sup>nd</sup> step)

 (c) Preheating of powders (3<sup>rd</sup> step)

 (d) Finally preheated layer (4<sup>th</sup> step)

**Fig. 79 Procedure of preheating experiments (with heating of building plate)**

**Table 27 Chemical composition of major components of SUS304 (wt %)**

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Base	≤ 0.08	≤ 1	≤ 2	≤ 0.045	≤ 0.030	8 - 10.5	18 - 20

## 제 2 절 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 비드 생성 특성 분석 결과 및 고찰

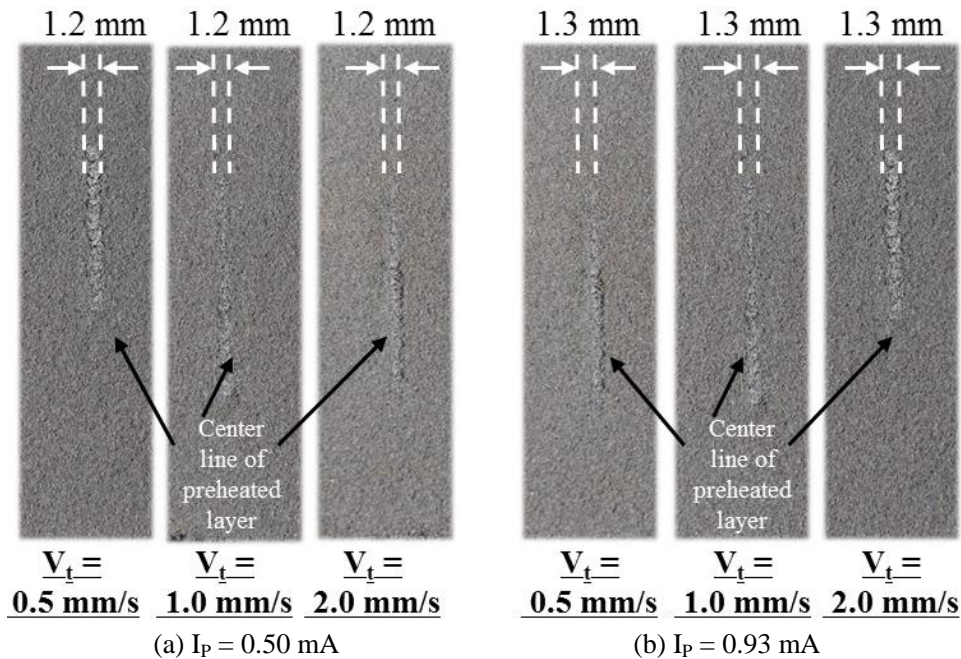
### 1. 이송 속도, 전자빔 검출 전류 및 적층 비드 길이에 따른 단일 예열 비드 제작 특성

Fig. 80 및 81 은 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열 실험 결과이다. Fig. 80 은 예열층이 소결되지 않은 분말들에 포함되어 있을 때 이고, Fig. 81 은 소결되지 않은 분말을 제거한 후의 예열층의 형상이다. 소결되지 않은 분말을 제거하기 전에는 Fig. 80 과 같이 예열층 생성 여부를 인지하기 어려울 정도로 예열층이 명확히 드러나지 않았다. 그러나 소결되지 않은 분말들을 제거한 후에는 Fig. 81 과 같이 예열층이 명확하게 나타났다.

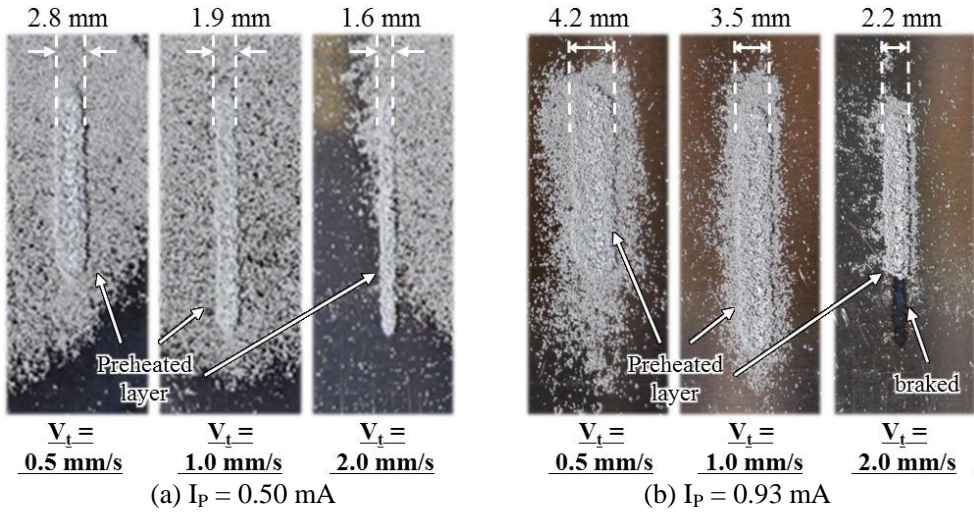
기저부 가열 조건에서 제작된 예열 비드들은 기저부와 예열부의 소결에 의하여, 예열 비드가 기저부에 결합된 상태를 나타내었다. 검출 전류가 0.5 mA 와 0.93 mA 인 경우에는 예열 비드 폭이 각각 1.6 - 2.8 mm 및 2.2 - 4.2 mm 범위로 나타났다. 검출 전

류가 증가하고 이송 속도가 감소할수록 예열 비드 폭은 증가하는 것을 알 수 있었다. 기저부 가열 조건에서 예열 비드를 생성할 경우 3 장의 기저부 비가열 조건에서 예열 비드를 생성할 때 보다 비드 폭이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

기저부 비가열 조건에서는 분말의 비산이 발생하였던 이송 속도 2.0 mm/s 에서도 기저부를 가열한 조건에서는 분말의 비산없이 예열 비드를 생성할 수 있었다. 하지만 검출 전류가 0.93 mA 이고 이송 속가 2.0 mm/s 인 조건에서는 예열 비드 생성중 예열 비드 일부가 단절 (Break) 되는 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.



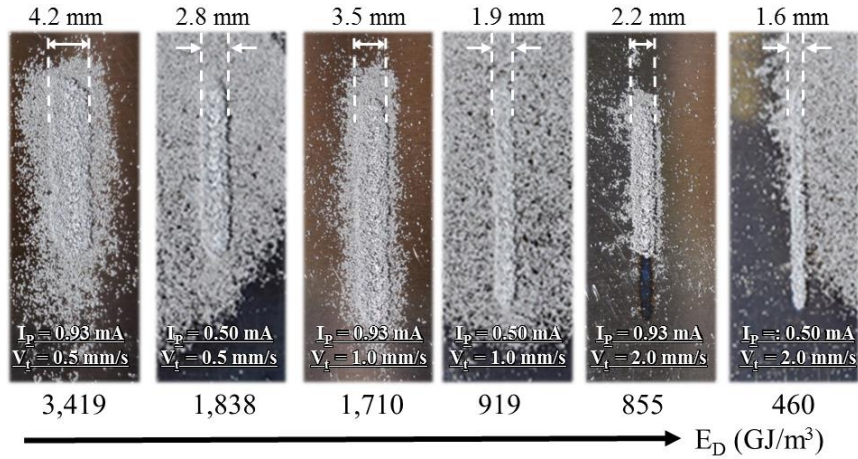
**Fig. 80** Effects of the travel speed and the probe current on the formation of preheated bead (before removal of loose powders, with heating of building plate)



**Fig. 81 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of preheated bead (after removal of loose powders, with heating of building plate)**

## 2. 전자빔 에너지 밀도가 예열 비드 생성에 미치는 영향

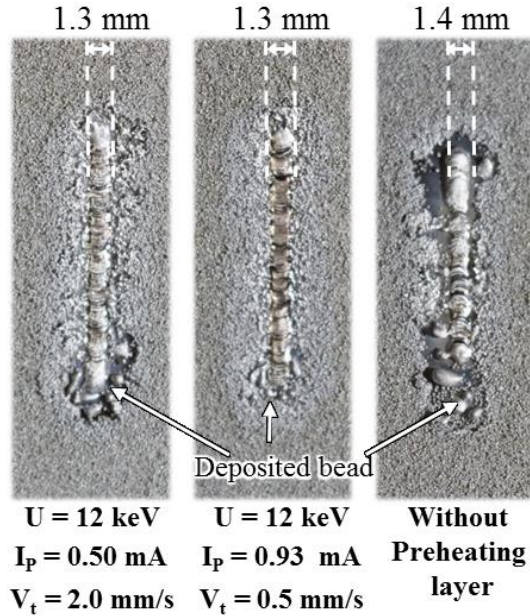
Fig. 82 와 같이 플라즈마 전자빔 에너지 밀도가 기저부 가열 조건에서 예열 비드 생성에 미치는 영향을 분석하였다. 가장 높은 전자빔 에너지 밀도인  $3,419 \text{ GJ/m}^3$  가 적용된 실험군에서 가장 넓은 폭을 가지는 예열 비드가 생성됨을 알 수 있었다. 반대로 가장 낮은 전자빔 에너지 밀도인  $460 \text{ GJ/m}^3$  가 적용된 실험군에서 가장 좁은 폭을 가지는 예열 비드가 생성됨을 알 수 있었다. 그러나 다른 실험군에서는 전자빔 에너지 밀도의 크기와 예열 비드의 폭의 상관관계는 관찰 되지 않았다.



**Fig. 82** Effects of energy density of electron beam on the formation of preheated bead (after removal of loose powders, with heating of building plate)

### 3. 적정 예열 비드 생성 조건 선정

가열 조건에서의 예열 비드 생성 실험을 수행하여, 플라즈마 전자빔 검출 전류 및 이송 속도에 따른 예열 비드 특성을 분석 결과를 이용하여 적정 예열 공정 조건 도출을 위한 두 가지의 추가 예열 실험 조건을 도출 하였다. 첫번째는 예열층의 열영향을 최소화하기 위하여 가장 낮은 에너지 및 출력 밀도를 가지는 검출 전류가 0.5 mA 이고 이송 속도가 2.0 mm/s 인 조건이다. 두번째는 가장 넓은 폭을 가진 예열 비드가 생성된 검출 전류가 0.93 mA 이고 이송 속도가 0.5 mm/s 인 조건이다. 두 가지 조건으로 예열 비드를 생성한 후, 예열 비드 위에 집속된 플라즈마 전자빔으로 적층 비드를 생성하여 예열 비드의 적층 공정 적용 가능성을 고찰하였다. 또한 예열 비드 생성 유무가 적층 비드 생성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 기저부를 가열하지 않고 바로 적층하여 적층 비드를 생성하는 실험을 추가적으로 수행하여, 적층 비드의 특성



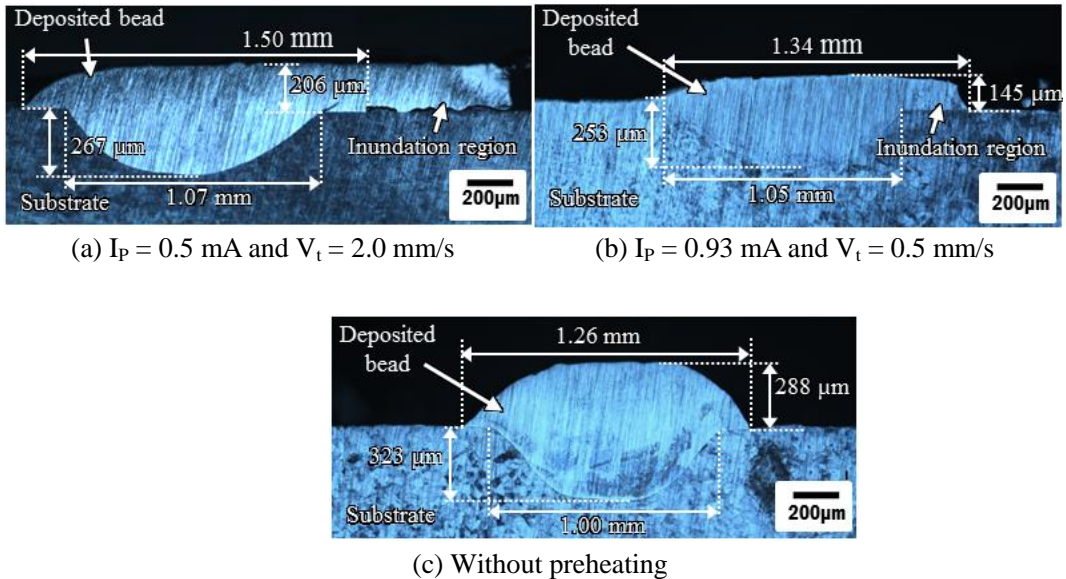
**Fig. 83 Effects of preheating conditions on the formation of the deposited bead (with building plate heating)**

변화를 고찰하였다. 이 적층 비드 생성시 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 35 keV, 3.5 mA 및 5.0 mm 이며 직경 약 2.0 mm 정도로 집속된 전자빔을 예열층과 비 예열 분말에 조사하였다.

Fig. 83 은 두 가지 조건으로 생성된 예열층 위에 적층 비드를 생성한 결과와 예열층이 생성되지 않은 분말층 위에 적층 비드를 생성한 결과의 표면 형상이다. 분말 예열 후 적층 비드를 생성한 경우에는 적층 비드가 안정적으로 생성 되었으나, 예열층이 생성되지 않은 분말층 위에는 볼링 결함과 삭박 결함이 포함된 적층 비드가 생성되는 것을 알 수 있었다. 예열층 위에 적층 비드를 생성한 경우와 예열층이 없는 분말층 위에 적층 비드를 생성하는 경우 평균 적층 비드 폭은 거의 유사하게 나타났다. 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 12 keV, 0.5 mA 및 2.0 mm/s 로 예열층을 생성시킨 경우, Fig. 83 과 같이 적층 비드 끝부분에 과용융된 영역 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러

나 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 12 keV, 0.93 mA 및 0.5 mm/s 로 예열층을 생성한 후, 적층 비드를 생성하면 적층 비드 끝단부 과용융 현상이 현저히 개선되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 84 는 두 가지 조건으로 생성된 예열층 위에 적층 비드를 생성한 결과와 예열층이 생성되지 않은 분말층 위에 적층 비드를 생성한 결과의 단면 형상이다. Fig. 84 와 같이 모든 실험 조건에서 적층 비드와 기저부가 결합된 것을 알 수 있었다. 그러나 예열층을 생성한 후 적층 비드를 생성한 경우 분말층 위에 직접 적층 비드를 생성한 경우와는 적층 비드 형상이 현저히 다르게 나타났다. 예열층 위에 적층 비드가 생성된 경우는 Fig. 84 (a) 및 (b) 와 같이 적층 비드 최상면에 평탄면이 생성되었다. 그러나 예열층을 가지지 않는 Stellite21 분말층에 적층 비드가 생성된 경우는 Fig. 84 (c) 와 같이 상면에 평탄면이 거의 없는 봉우리 형상의 적층 비드가 생성되었다.



**Fig. 84 Morphologies of the deposited bead for different preheating conditions**

가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 12 keV, 0.5 mA 및 2.0 mm/s 로 예열된 층 위에 적층 비드를 생성한 경우에는 적층 비드의 두께가 약 206  $\mu\text{m}$  이었으며, 기저부의 용융 폭과 길이는 각각 1.07 mm 와 267  $\mu\text{m}$  정도였다. 이 실험 조건에서 Fig. 84 (a) 와 같이 적층 비드 생성 과정에서 용융물이 범람한 영역이 다소 크게 나타났다. 또한 적층 비드 가장 자리부에 적층 비드와 기저부가 결합되지 않는 영역이 국부적으로 나타나는 것을 알 수 있었다. 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 12 keV, 0.93 mA 및 0.5 mm/s 로 예열층을 생성한 후 적층 비드를 생성한 경우에는 적층 비드 두께가 약 145  $\mu\text{m}$  이었으며, 기저부의 용융 폭과 길이는 각각 약 1.05 mm 및 258  $\mu\text{m}$  였다. 이 조건에서는 용융물이 범람한 영역은 현저히 감소하였고, 기저부와 적층 비드 사이의 미결합 영역을 거의 찾아보기 어려웠다.

위 결과들로부터 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 제작시 예열층 생성 후 적층 비드를 생성하는 방법이 예열을 수행하지 않고 적층 비드를 바로 생성하는 방법보다 두께가 얇고, 상면에 평탄 영역을 가지는 적층 비드를 생성할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 검출 전류 0.93 mA 이고 이송 속도 0.5 mm/s 인 경우가 검출 전류 0.50 mA 이고 이송 속도 2.0 mm/s 로 예열층을 생성한 경우 보다 더 양호한 적층 비드 생성이 가능할 것으로 사료되었다. 이 결과로부터 Table 28 과 같은 기저부 가열 조건에서의 적정 예열 비드 생성 조건을 도출할 수 있었다.

**Table 28 Proper preheating condition (with heating of the building plate)**

Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)
12	0.93	115	0.5

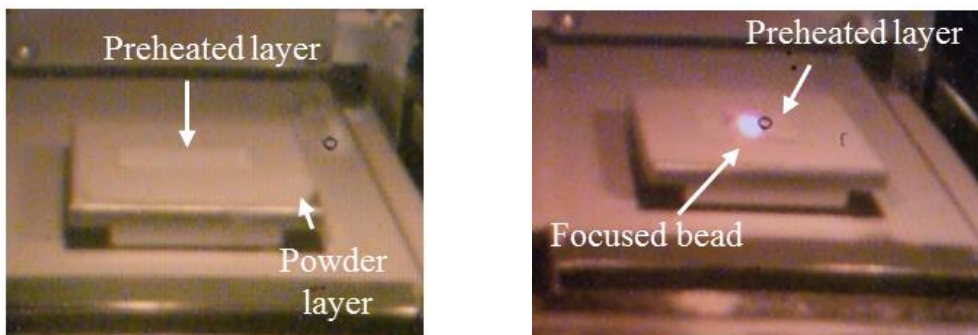


## 제 7 장 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이 용한 Stellite21 분말 적층 특성 분석

### 제 1 절 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 방법

기저부 비가열 조건에서 Stellite21 분말의 적층 비드 생성을 위한 적정 조건으로 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도를 각각 30 keV, 1.50 mA 및 0.5 mm/s 로 선정하였다. 그러나 기저부 가열 조건과 기저부 비가열 조건의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 적층시 기저부의 온도가 현저히 달라져 적층 특성이 변화하게 된다. 그러므로 기저부를 가열시 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층시 적층 조건들에 따른 적층 비드 특성 변화에 대한 분석이 필요하다.

이를 위하여 기저부 가열 조건에서 Stellite21 분말의 적층 비드 생성 실험을 Fig. 85 와 같이 수행하였다. 적층 실험시 첫번째로 기저부 가열 조건에서 예열 비드를



(a) Creation of the preheated layer (1<sup>st</sup> step)      (b) Fabrication of the deposited layer (2<sup>nd</sup> step)

**Fig. 85 Procedure of deposition experiments (with heating of building plate)**

**Table 29 Parameters and ranges for the deposition experiments (with heating of building plate)**

Parameters	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)
Ranges	30, 35	1.5 - 3.5	115	0.5 - 2.0

생성하였다. 이 예열 비드 생성에 적용된 조건은 6 장의 Table 28 과 같다. 이 예열 비드 생성 조건은 6 장에서 도출된 적층판 가열조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열시 적정 예열 비드 생성 조건이다. 생성된 예열 비드 위에 Table 29 와 같은 공정 조건으로 집속된 플라즈마 전자빔을 조사하여 적층 비드 생성 실험을 수행하였다.

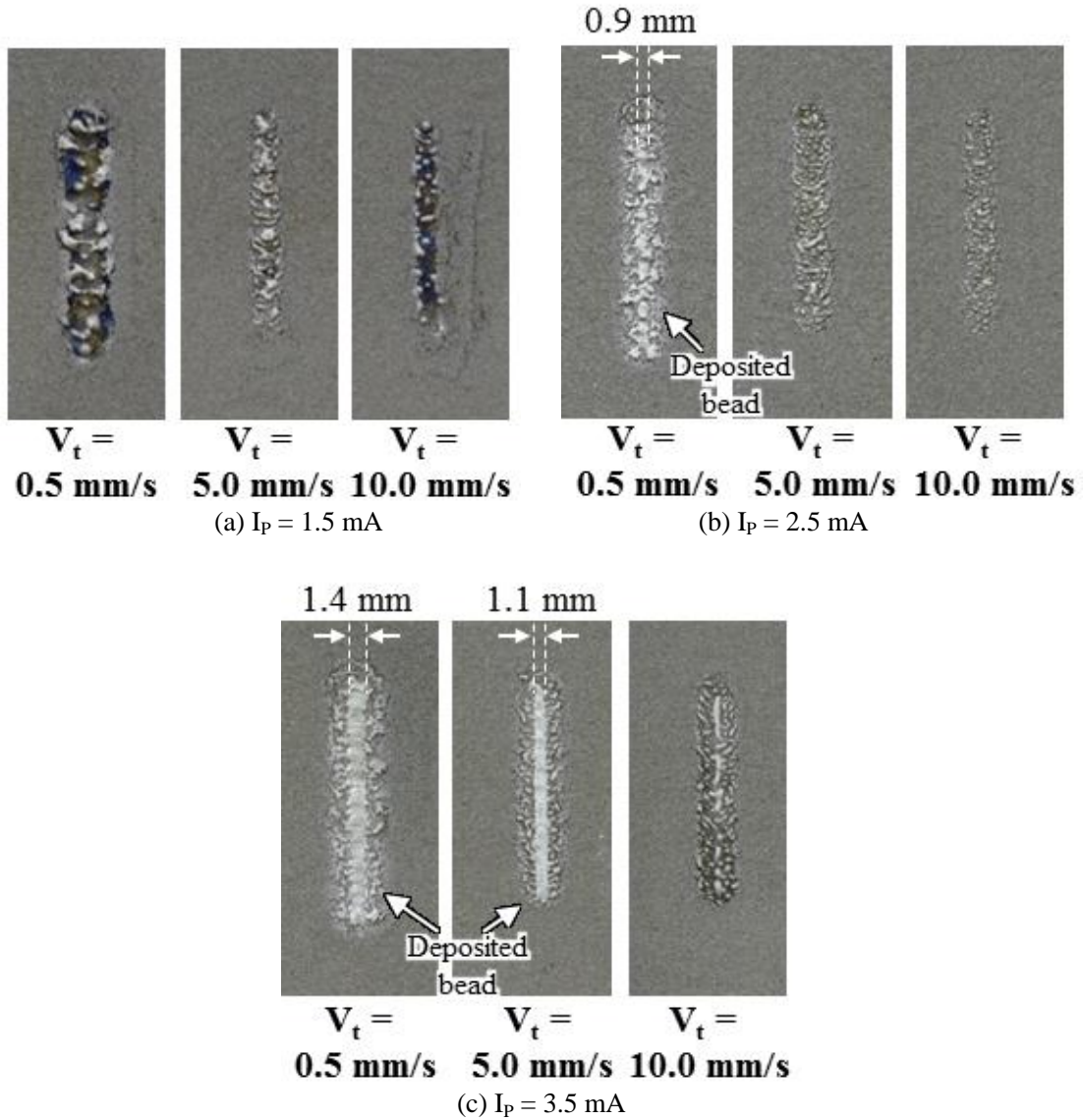
## 제 2 절 기저부 가열 조건에서의 플라즈마 전자빔을 이용한 Stellite21 분말 적층 비드 생성 특성 분석 및 고찰

### 1. 전자빔 가속 전압, 이송 속도 및 전자빔 검출 전류에 따른 단일 적층 비드 제작 특성

Fig. 86 과 87 은 각각 가속 전압 30 keV 와 35 keV 일때 기저부 가열 조건에서의 검출 전류와 이송 속도에 따른 적층 비드 생성 결과이다. Fig. 86 (a) 및 87 (a) 에서와 같이 검출 전류 1.5 mA 인 경우에는 실험에 적용된 가속 전압과 이송 속도 범위에서는 적층 비드가 생성되지 않는 것을 알 수 있었다.

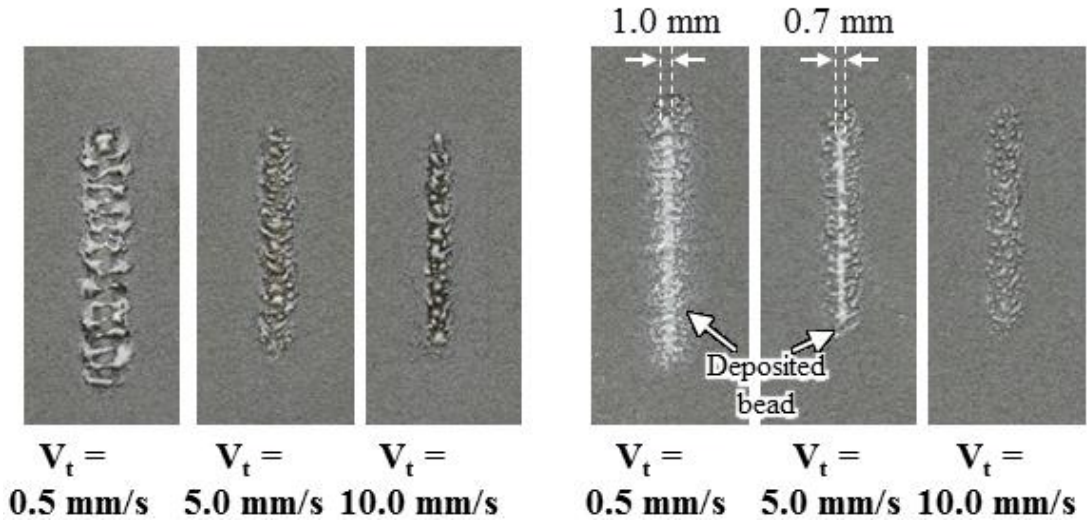
Fig. 86 (b), 86 (c), 87 (b) 및 87 (c) 에서와 같이 검출 전류가 2.5 mA 이상인 경우에는 가속 전압과 이송 속도의 조합에 따라 적층 비드가 생성되는 조건들이 나타났다. 가속 전압과 검출 전류가 각각 30 keV 와 2.5 mA 인 경우에는 Fig. 86 (b) 와 같이 이송 속도가 0.5 mm/s 인 경우에만 0.9 mm 정도의 폭을 가지는 불안정한 형태의 적층 비드가 생성 되었고, 그 밖의 이송 속도에서는 적층 비드가 생성되지 않았다. 가속 전압 및 검출 전류가 각각 30 keV 및 3.5 mA 일 때에는 Fig. 86 (c) 와 같이 이송 속도 범위가 0.5 - 5.0 mm/s 인 경우에는 1.1 - 1.4 mm 의 폭을 가지는 안정적인 적층 비드 생성이 가능하였다. 그러나 이 가속 전압과 검출 전류 조건에서도 이송 속도가 10 mm/s 인 경우에는 적층 비드가 생성되지 않았다. 이 결과들로부터 가속 전압이 30 keV 인 경우에는 검출 전류와 이송 속도 범위가 각각 3.5 mA 이고 0.5 - 5.0 mm/s 일 때에 안정적인 적층 비드가 생성됨을 알 수 있었다.

가속 전압과 검출 전류가 각각 35 keV 와 2.5 mA 인 경우에는 Fig. 87 (b) 와 같이



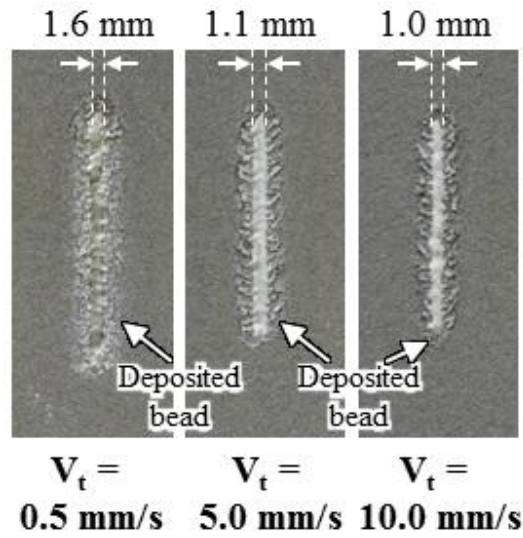
**Fig. 86 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of the deposited bead ( $U = 30 \text{ keV}$ , with heating of building plate)**

이송 속도 0.5 - 5.0 mm/s 일 때에는 안정적인 적층 비드가 생성 되었지만, 이송 속도 5.0 mm/s 를 초과할 경우 적층 비드가 생성 되지 않았다. 이 경우 생성된 비드 폭은 약 0.7 - 1.0 mm 정도였다. 가속 전압과 검출 전류가 각각 35 keV 와 3.5 mA 인 경우



(a)  $I_p = 1.5$  mA

(b)  $I_p = 2.5$  mA



(c)  $I_p = 3.5$  mA

**Fig. 87 Effects of the travel speed and the probe current on the formation of the deposited bead ( $U = 35$  keV, with heating of building plate)**

에는 Fig. 87 (c) 와 같이 실험에 적용된 모든 이송 속도 범위에서 안정적인 적층 비드가 생성되었다. 그러나 이송 속도가 0.5 mm/s 인 경우는 다른 이송 속도와 달리 적층 부의 두께가 매우 얇게 생성되었다. 가속 전압과 검출 전류가 각각 35 keV 와 3.5 mA

인 경우에는 적층 비드의 폭이 1.0 - 1.6 mm 범위를 나타내었다.

위 결과들로부터 기저부 가열 조건에서 적층 비드가 생성되는 조건들을 도출할 수 있었다. 이 결과를 이용하여 출력 밀도와 이송 속도에 적층 비드 생성 가능성 여부 고찰하여 Fig. 88 과 같은 적층 가능 영역 (Deposition window) 를 도출할 수 있었다.

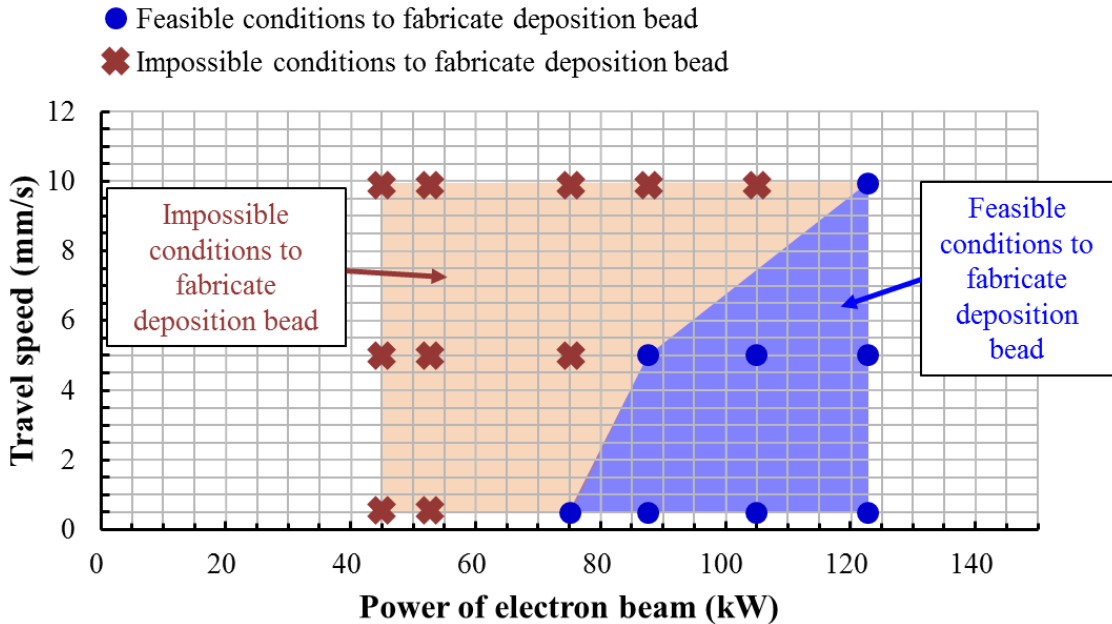


Fig. 88 Deposition window for fabrication of the deposited bead (with heating of building plate)

## 2. 전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향

Fig. 89 는 기저부 가열 조건에서 전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향성을 분석하였다. 7 장 2 절 가의 적층 특성 분석 결과 적층 비드 생성을 위한 최소 검출 전류 (Threshold) 값 이하로 생각되는, 검출 전류 1.5 mA 인 경우의 실험 결과는 전자빔 에너지 밀도가 적층 비드 생성에 미치는 영향성을 분석에서 제외하였다.

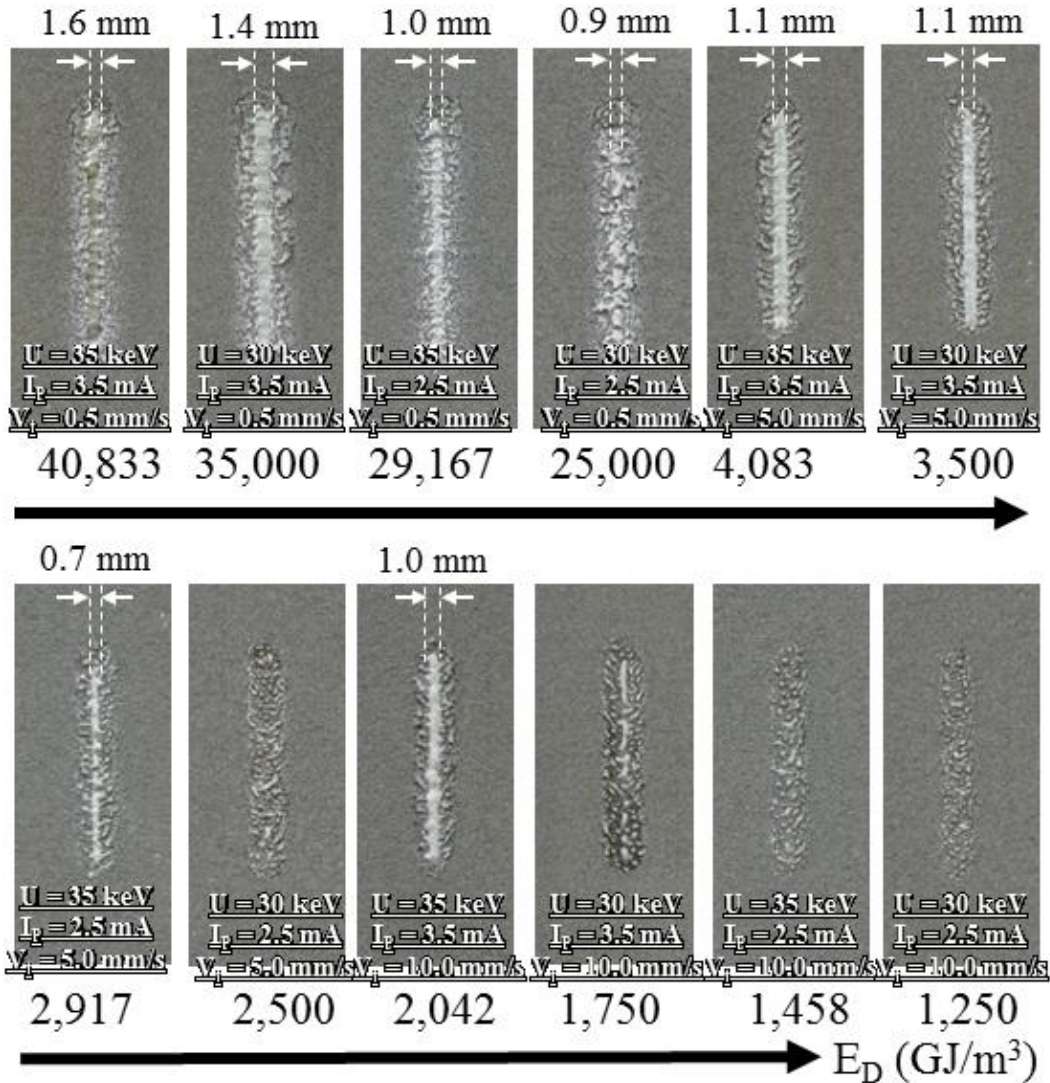


Fig. 89 Effects of the energy density of the electron beam on the formation of the deposited bead (with heating of building plate)

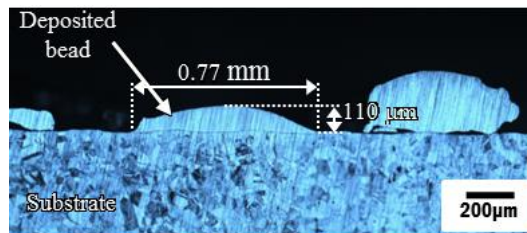
전자빔 에너지 밀도가  $1,750 \text{ GJ/m}^3$  이하인 경우에는 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도에 상관없이 모든 조건에서 적층 비드가 생성되지 않았다. 그러나 전자빔 에너지 밀도가  $2,917 \text{ GJ/m}^3$  이상인 경우에는 검출 전류 및 이송 속도에 관계없이 적층 비드 생성이 가능하였다. 이 영역에서 에너지 밀도가 에너지 밀도가  $40,833 \text{ GJ/m}^3$  이상인 경우에는 적층 비드에 과용융이 발생하는 것을 알 수 있었다. 에너지 밀도 범위가 2,042 -

2,500 GJ/m<sup>3</sup> 인 경우에는 공정 조건의 조합에 따라 적층 비드 생성 유무의 차이가 발생하였다.

### 3. 적층 비드 단면 형상 분석

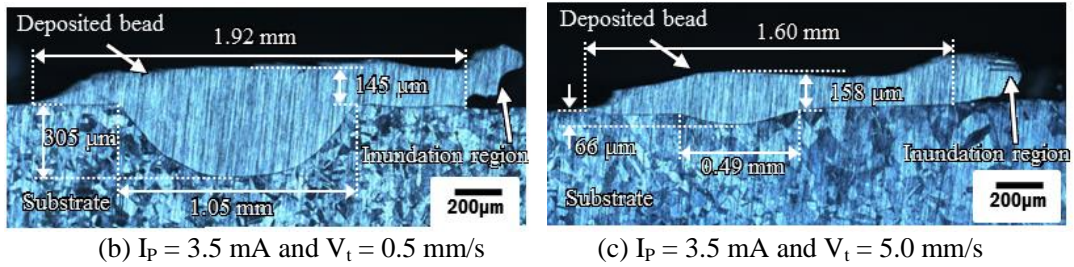
Fig. 90 및 91 은 각각 가속 전압 30 keV 와 35 keV 일 때 기저부 가열 조건에서 적층 비드가 생성된 경우들의 적층 비드와 기저부 결합부의 단면 상태를 고찰한 결과이다.

Fig. 90 (a) 및 (c) 와 같이 가속 전압 30 keV 인 경우 검출 전류와 이송 속도가 2.5 mA 와 0.5 mm/s 인 조건과 검출 전류와 이송 속도가 3.5 mA 와 5.0 mm/s 인 조건에서 적층 비드의 기저부 용입 깊이가 약 66  $\mu\text{m}$  이하로 관찰되었다. 또한 가속 전압 35 keV 이고 검출 전류 2.5 mA 이고 이송 속도가 5.0 mm/s 이하에서는 Fig. 91 (a) 및 (b) 와 같이 적층 비드의 기저부 용입 깊이가 약 82  $\mu\text{m}$  이하로 측정되었다. 이 결과로부터 이들 조건에서는 적층 비드와 기저부 사이의 결합 면적이 작아서 적층 비드와 기저부 사이가 다소 약하게 결합 되었을 것으로 사료되었다.

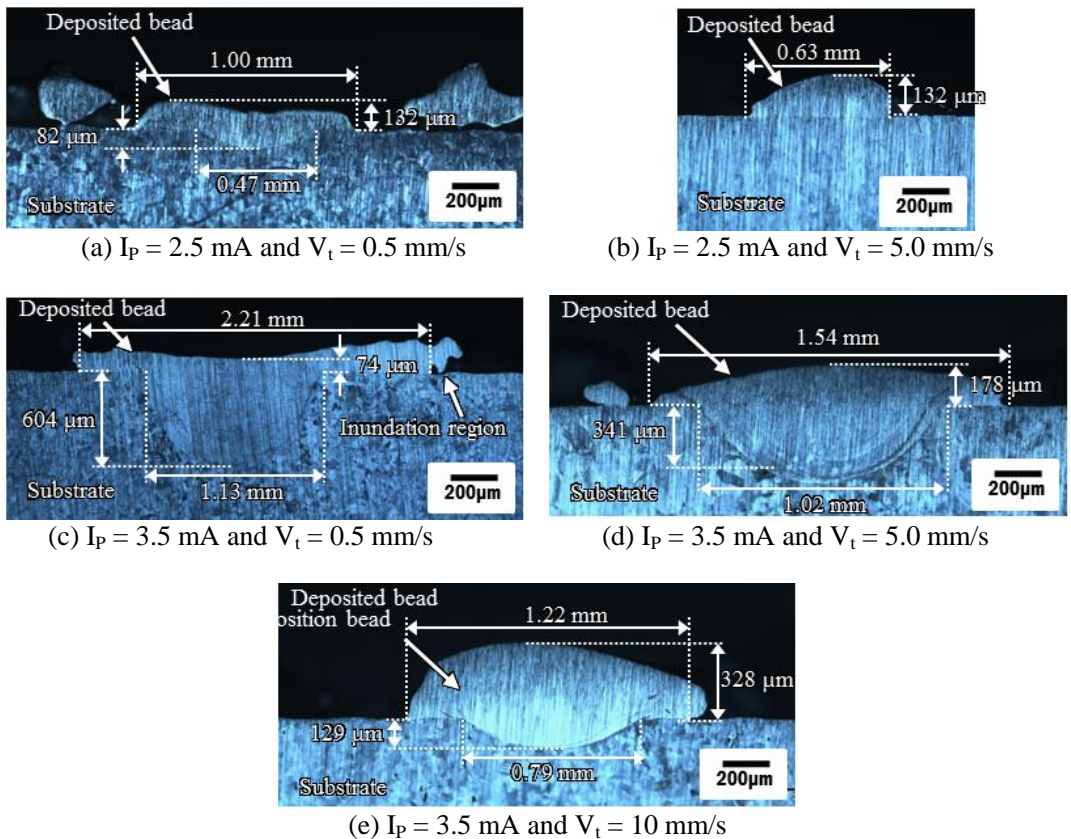


(a) IP = 2.5 mA and  $V_t = 0.5$  mm/s





**Fig. 90 Morphologies of deposition bead for different deposition conditions ( $U = 30 \text{ keV}$ , with heating of building plate)**



**Fig. 91 Morphologies of deposition bead for different deposition conditions ( $U = 35 \text{ keV}$ , with heating of building plate)**

가속 전압이 35 keV 이고 검출 전류가 3.5 mA 인 경우는 실험에 사용된 이송 속도 범위에서 적층 비드의 기저부 용입 깊이가 100  $\mu\text{m}$  이상으로 관찰되었다. 이송 속도가

0.5 mm/s 인 경우는 Fig. 91 (c) 와 같이 적층 비드의 기저부 용입 깊이와 폭이 각각 약 604  $\mu\text{m}$  와 1.13 mm 로 매우 넓은 기저부와와 결합 면적을 가지는 적층 비드가 생성되었다. 또한, 이송 속도가 5.0 mm/s 인 경우에는 적층 비드의 기저부 용입 깊이와 폭이 각각 각각 약 341  $\mu\text{m}$  와 1.02 mm 로 적층 비드와 기저부 결합면이 넓게 형성되었다. 적층 비드의 두께는 약 178  $\mu\text{m}$  이었으며, 적층 비드 상단부가 거의 평탄면으로 생성되었다. 그러나 이송 속도가 10.0 mm/s 인 경우에는 Fig. 91 (c) 와 같이 적층 비드의 기저부 용입 깊이와 폭이 각각 약 129  $\mu\text{m}$  와 0.79 mm 정도로 감소함과 동시에 적층 비드 두께는 약 328  $\mu\text{m}$  정도로 증가하였다. 또한 적층 비드 상면의 평탄도가 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 Table 30 과 같은 기저부 가열 조건에서 플라즈마 전자빔과 Stellite21 분말을 이용한 적층 비드 생성시 적층 비드와 기저부의 넓은 결합 영역이 형성되고 적층 비드 상면에 평탄면이 생성되는 3 가지의 적용 가능한 적층 비드 생성 조건을 도출할 수 있었다.

**Table 30 Potential conditions to fabricate deposition bead (with heating of building plate)**

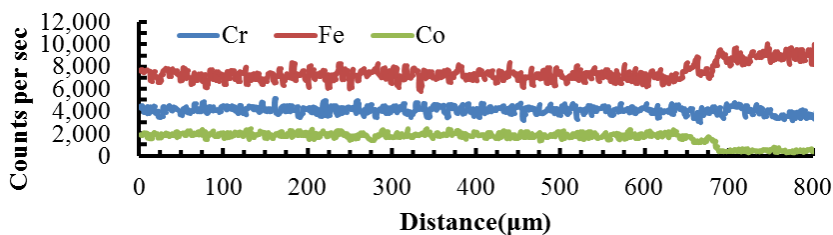
No.	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)
1	30	3.5	0.5
2	35	3.5	0.5
3	35	3.5	5.0

#### 4. 적정 적층 비드 생성 조건 선정

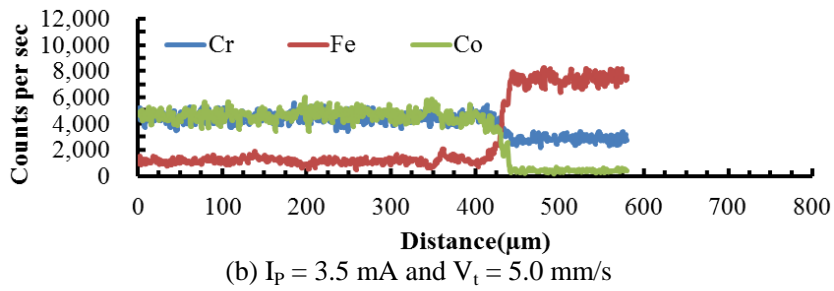
7 장 2 절 다에서 Table 30 과 같은 3 가지의 기저부 가열 조건에서의 적층 비드 생성이 가능한 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도 조합을 도출하였다.

이 공정 변수 조합들 중에서 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 30 keV, 3.5 mA 및 0.5 mm/s 인 조건에서 생성된 적층 비드에서는 Fig. 90 (c) 와 같이 비드 가장 자리에 용융 재료의 범람이 발생하여 적층 비드가 기저부로부터 분리된 영역이 관찰되었다. 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 35 keV, 3.5 mA 및 0.5 mm/s 인 조건에서 생성된 적층 비드 부근의 재료 성분을 Fig. 92 (a) 와 같이 EDS (Energy dispersive spectrometer) 를 사용하여 분석한 결과 분말 재료와 기저부 재료가 과용융에 의하여 완전히 희석되어 적층부 상면에서 Stellite21 재료의 주성분인 코발트 (Co) 와 크롬 (Cr) 의 무게 분율이 매우 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 35 keV, 3.5 mA 및 5.0 mm/s 인 조건에서 적층 비드 가장 자리에 범람 영역이 발생하지 않았으며, 적층 비드는 클레딩 비드와 유사하게 Fig. 92 (b) 와 같이 표면부에 Stellite21 주성분인 코발트와 크롬의 무게 분율이 높게 나타났다.

이 결과들로부터 기저부 가열 조건에서 플라즈마 전자빔과 Stellite21 분말을 이용한 적정 적층 비드 생성 조건을 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 35 keV, 3.5 mA 및 5.0 mm/s 으로 선정할 수 있었다.



(a)  $I_p = 3.5 \text{ mA}$  and  $V_t = 0.5 \text{ mm/s}$



**Fig. 92 Results of line analyses in the vicinity of the deposited region (U = 35 keV, with heating of building plate)**

## 제 8 장 기저부 가열 조건에서의 다층 적층 제품 제작

### 제 1 절 기저부 가열 조건에서의 다층 적층 제품 제작 방법

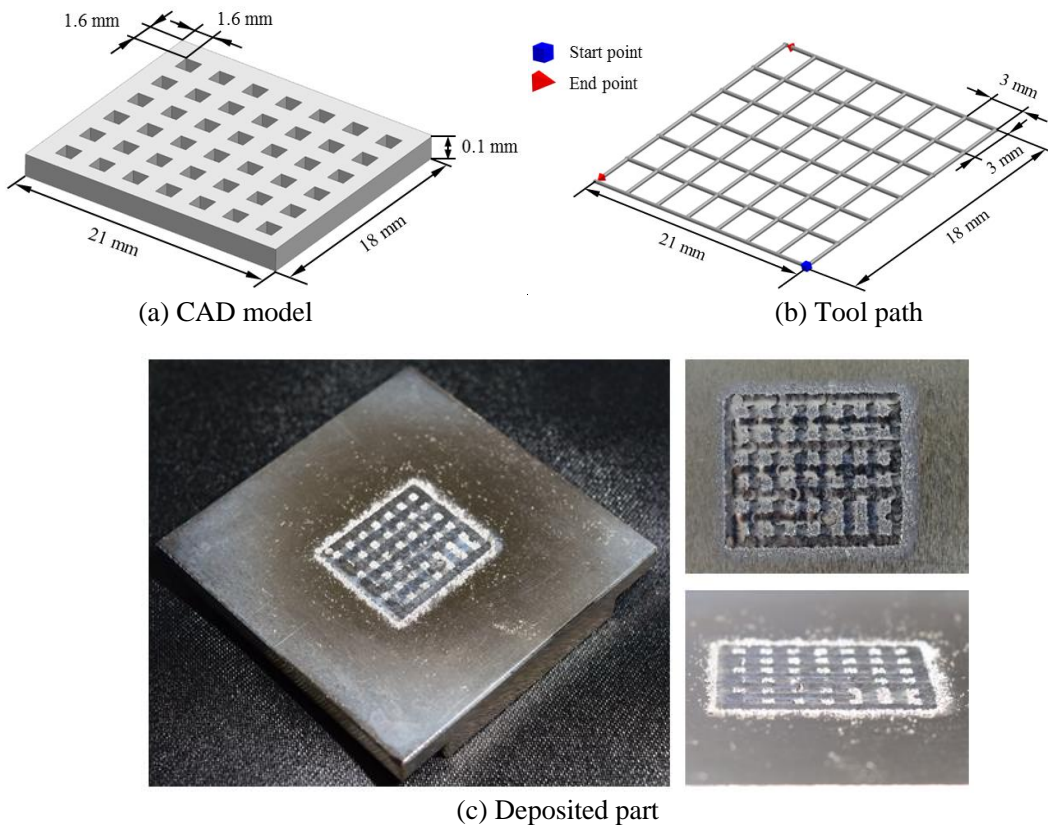
제 6 장에서 제작된 분말 베드 시스템과 제 7 장에서 선정된 예열 비드 생성 조건 및 적층 비드 생성조건을 이용하여 다층 적층 제품을 제작하고 제안된 공정의 가능성과 제품 품질을 평가하였다. 다층 적층 제품 제작에 사용된 공정 조건은 Table 31 과 같다.

**Table 31 Experimental conditions for fabricated parts**

Step	Acceleration voltage (U, keV)	Probe current ( $I_p$ , mA)	Working distance (WD, mm)	Travel speed ( $V_t$ , mm/s)	Duration time (Min.)
Base heating	35	15	115	-	10
Preheating	12	0.93	115	0.5	-
Melting	35	3.5	115	5.0	-

## 제 2 절 기저부 가열 조건에서의 다층 적층 제품 제작 결과

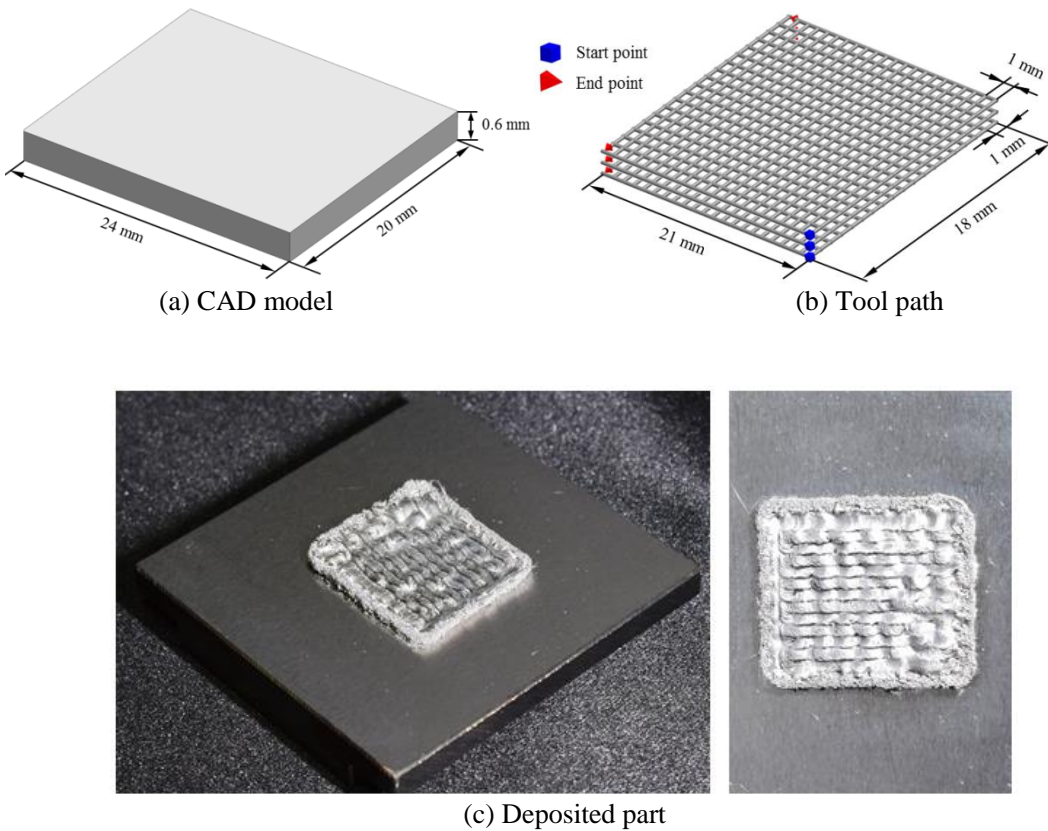
제안된 공정 및 조건을 이용하여 기저부에 한층을 평면 적층하였다. 모델링 형상은 Fig. 93 (a) 와 같으며 적층 경로는 Fig. 93 (b) 와 같다. 이 때 적용한 offset 간격은 3 mm 이다. 적층 결과는 Fig. 93 (c) 와 같다. 초기에 도포된 분말층의 두께는 0.2 mm 이다. 실험 결과 Offset 간격이 비드 간격보다 크게 적용할 경우 그림과 같이 바둑판 형상의 패턴을 생성할 수 있었다. 적층평면의 크기는 약 21 mm × 18 mm 이며 적층 평면의 두께는 약 0.10 mm 로 측정되었다. 이 평면의 표면거칠기 (Rmax) 는 7 μm 로



**Fig. 93 Results of plane deposition experiments (1 layer)**

측정되었다. 이 결과로부터 제안된 공정조건 및 시스템을 이용할 경우 특별한 결함이 없는 적층 평면을 생성할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 적층 경로의 조종을 통하여 원하는 적층 패턴 생성이 가능함을 알 수 있었다.

제안된 공정 및 조건을 이용하여 기저부에 세층의 평면을 연속적으로 적층하였다. 모델링 형상은 Fig. 94 (a) 와 같으며 적층 경로는 Fig. 94 (b) 와 같다. Fig. 94 (c) 는 기저부에 세층의 평면을 연속적으로 적층한 결과이다. 이 때 적용된 분말도포 두께는 Table 32 와 같다. 제작된 적층평면의 크기는 약 30 mm × 30 mm 이며 네층을 쌓은 적층 평면의 두께는 약 0.57 mm 로 측정되었다. 다층 적층된 평면의 표면거칠기 ( $R_{max}$ ) 는 11  $\mu\text{m}$  로 측정되었다.



**Fig. 94 Results of plane deposition experiments (3 layers)**

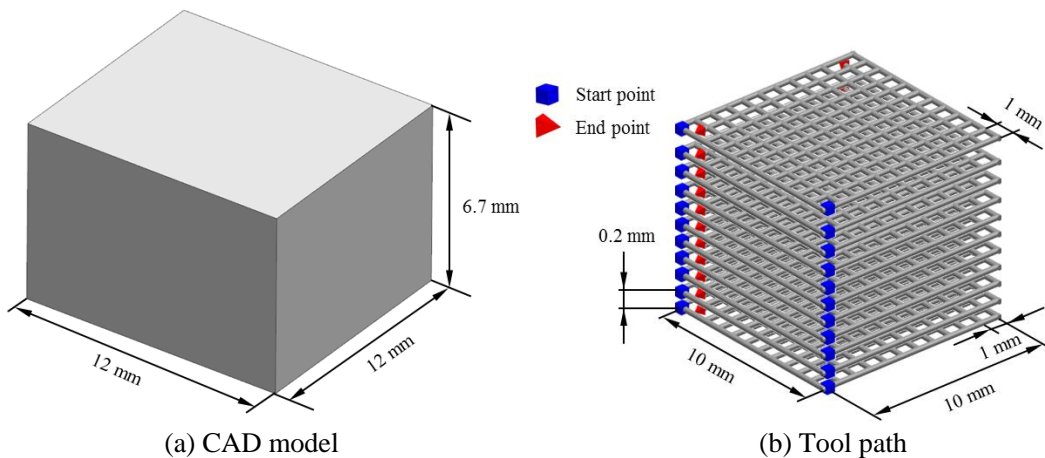
**Table 32 Applied powder thickness to deposit multi-layer structure (3 layers)**

No. of layer	1	2	3
Thickness layer (mm)	0.2	0.2	0.2

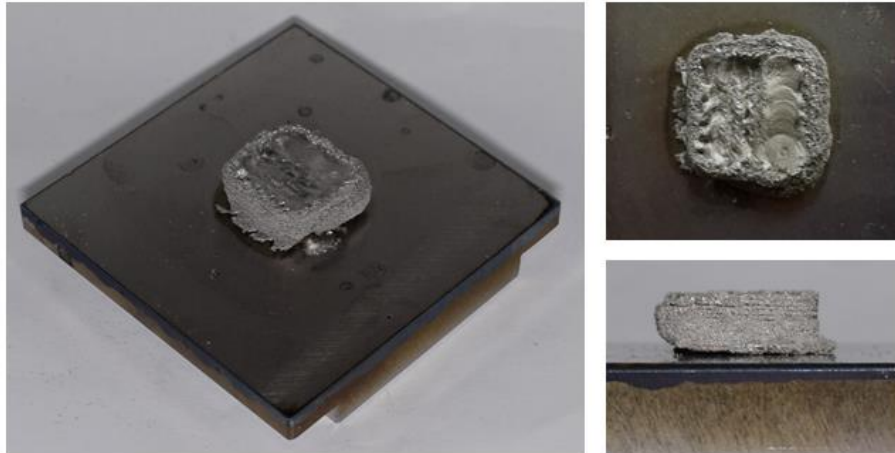
제안된 공정 및 조건을 이용하여 기저부에 10 층의 평면을 연속적으로 적층하였다. 모델링 형상은 Fig. 95 (a) 와 같으며 적층 경로는 Fig. 95 (b) 와 같다. Fig. 95 (c) 는 적층한 결과이다. 이 때 적용된 분말도포 두께는 Table 33 과 같다. 제작된 적층평면의 크기는 약 10 mm × 10 mm 이며 제품의 두께는 약 5.5 mm 이다. 이 결과들로부터 제안된 공정조건 및 시스템을 이용할 경우 특별한 결함이 없는 적층 평면을 다층 적층할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이 시편의 충진율을 측정한 결과 97.8 % 의 충진율을 가짐을 알 수 있었다. 충진율 측정에 사용된 시험규격은 ASTM B 328 이다.

**Table 33 Applied powder thickness to deposit multi-layer structure (10 layers)**

No. of layer	1	2-7	8-9	10
Thickness layer (mm)	0.2	0.5	1.0	1.5







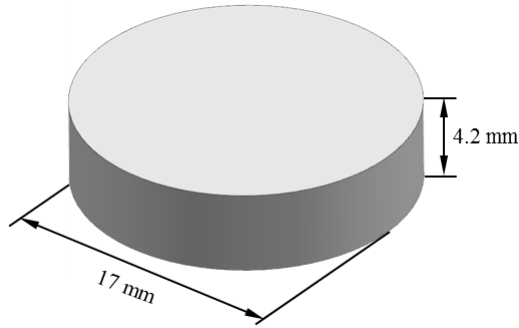
(c) Deposited part

**Fig. 95 Results of plane deposition experiments (10 layers)**

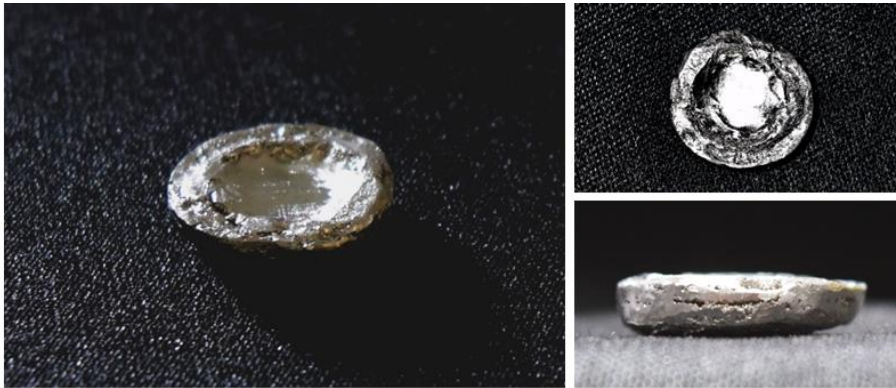
제안된 공정 및 조건을 이용하여 원기둥 시편을 제작 하였다. Fig. 96 (a) 는 원기둥 시편의 모델링 형상이다. 제작된 결과는 Fig. 96 (b) 와 같다. 원기둥 형상의 제품의 경우 직경 17 mm 수준의 광폭의 빔을 1 층당 60 초씩 조사하여 적층 하였다. 원기둥 시편은 총 5 층을 적층하여 제작하였다. 이 때 적용된 분말도포 두께는 Table 34 와 같다. 이를 통하여 직경 및 높이가 각각 17 mm 및 4.2 mm 수준인 원기둥 형상을 제작 할 수 있었다. 이 결과로부터 제안된 공정 및 시스템을 이용할 경우 직경 17 mm 수준의 넓은 면적을 동시에 적층할 수 있음을 확인하였다.

**Table 34 Applied powder thickness to deposit cylindrical specimen (5 layers)**

No. of layer	1	2	3-4	5
Thickness layer (mm)	0.2	0.5	1	1.5



(a) CAD model



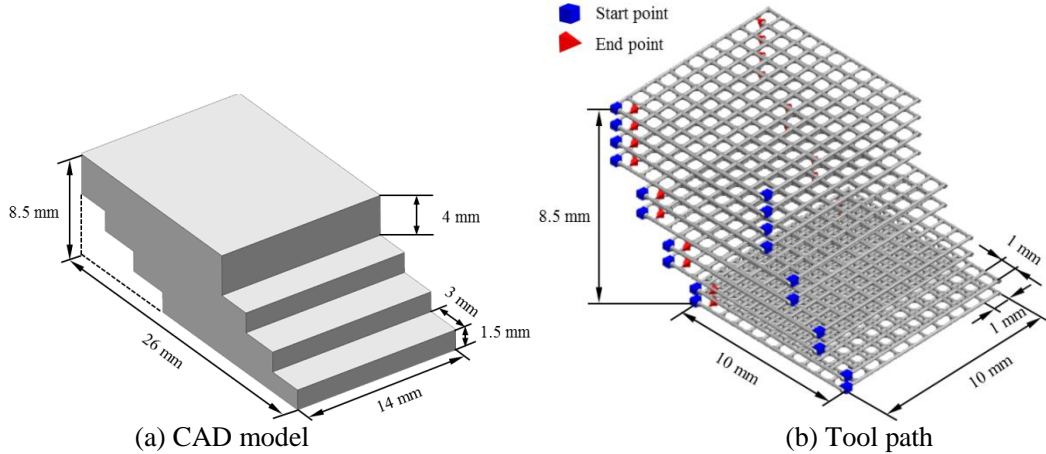
(b) Deposited part

**Fig. 96 Results of deposition for cylindrical specimen (5 layers)**

제안된 공정 및 조건을 이용하여 계단 형상의 시편을 제작 하였다. Fig. 97 (a) 는 모델링 형상이며 Fig. 97 (b) 는 적층 경로이다. 제작된 결과는 Fig. 97 (c) 와 같다. 계단 형상은 총 10 층을 적층하여 제작하였다. 이 때 적용된 분말도포 두께는 Table 35 와 같다. 이를 통하여 크기 14 mm × 26 mm × 8.5 mm 수준의 계단 형상을 제작 할 수 있었다. 이 결과로부터 제안된 공정, 시스템 조건을 이용하여 3 차원 형상의 제품 생성이 가능함을 확인하였다.

**Table 35 Applied powder thickness to stepped specimen (10 layers)**

No. of layer	1-3	4-10
Thickness layer (mm)	0.5	1



(c) Deposited part

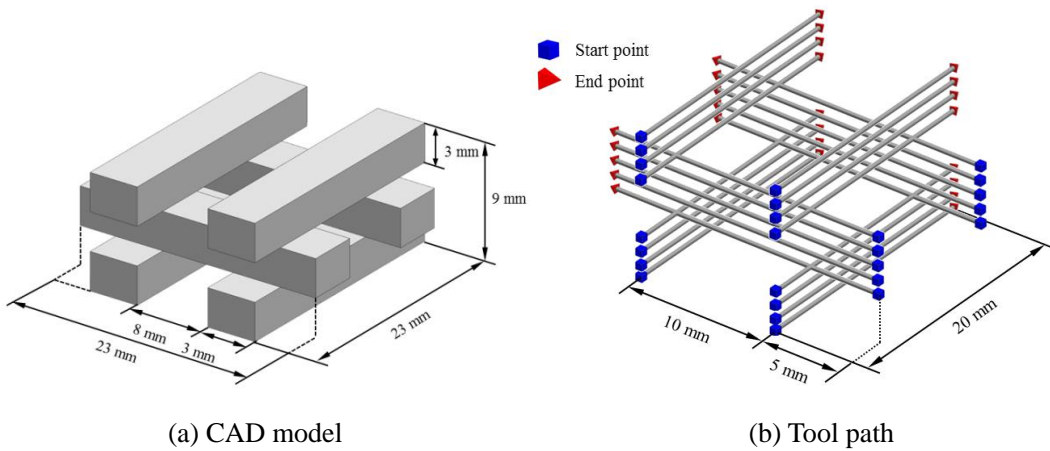
**Fig. 97 Results of deposition for stepped specimen (10 layers)**

제안된 공정 및 조건을 이용하여 사각 격자 형상의 시편을 제작 하였다. Fig. 98 (a) 는 모델링 형상이며 Fig. 98 (b) 는 적층 경로이다. 제작된 결과는 Fig. 98 (c) 와 같다. 사각 격자 형상은 총 11 층을 적층하여 제작하였다. 이 때 적용된 분말도포 두께는 Table 36 과 같다. 이를 통하여 크기 23 mm × 23 mm × 9 mm 의 사각 격자 형상을 제

작 할 수 있었다. 이 결과로부터 제안된 공정, 시스템 조건을 이용하여 다소 복잡한 형상을 가지는 3 차원 형상 제품 생성이 가능함을 확인하였다.

**Table 36 Applied powder thickness to square net specimen (11 layers)**

No. of layer	1-2	3-11
Thickness layer (mm)	0.5	1



(c) Deposited part

**Fig. 98 Results of deposition for square net specimen (11 layers)**

### 제 3 절 제안된 공정의 적층 특성 분석

제안된 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층제조 공정의 특징을 가장 유사한 상용 공정인 EBM 공정과 비교 분석 하였다. Table 37 은 제안된 공정과 EBM 공정의 제품 특성을 비교한 결과이다. 적층 재료 분말의 크기 측면에서 EBM 공정의 경우 45 - 100  $\mu\text{m}$  수준의 분말을 사용하는 반면 제안된 공정의 경우 45 - 150  $\mu\text{m}$  크기의 분말을 사용하여 제안된 공정의 경우 상대적으로 저가인 재료를 적층 할 수 있음을 알 수 있었다. 기공률 측면에서는 EBM 공정의 경우 문헌상에 0.1 - 5 % 로 보고되고있다. 제안된 공정의 경우 충진율 측정 실험을 통하여 2.2 % 의 기공률을 가지는 것으로 평가되었다. 이 결과로부터 제안된 공정을 통하여 제작되는 제품의 기공률은 EBM 공정과 비슷한 수준임을 알 수 있었다. 적층 두께 측면에서는 EBM 공정의 경우 50  $\mu\text{m}$  수준으로 보고 되고 있다. 그러나 제안된 공정의 경우 적층 두께 범위가 100 - 1,500  $\mu\text{m}$  여서 적용범위가 넓음을 알 수 있었다. 또한 두께방향 적층 측면에서 최대 EBM 공정대비 30 배 수준으로 두꺼운 분말층을 한번에 적층 할 수 있으므로 제안된 공정을 이용한 상용 공정개발시 적층 속도를 대폭 향상 시킬 수 있음을 알 수 있었다.

**Table 37 Comparison results of proposed process with EBM process in terms of deposited parts**

Process	Powder size ( $\mu\text{m}$ )	Porosity (%)	Layer thickness ( $\mu\text{m}$ )	Roughness ( $\mu\text{m}$ )
EBM	45-100	0.1-5	50	25-130
Proposed process	45-150	2.2	100-1,500	7-11

적층 제품의 표면 조도 측면에서는 EBM 공정의 경우 25 - 130  $\mu\text{m}$  수준으로 보고되고 있다. 그러나 제안된 공정을 통하여 제작된 제품의 경우 평면 적층 결과에서 적층 제품의 표면조도가 7 - 11  $\mu\text{m}$  로 관찰되었다. 제안된 공정을 통하여 생성되는 제품의 표면 조도가 EBM 공정을 통하여 생성되는 제품보다 다소 우수하게 나타 났지만 이와 같은 표면 조도 차이는 적층 제품 크기 차이에 의하여 발생한 것으로 사료된다.

Table 38 은 제안된 공정과 EBM 공정을 제작 시간 측면에서 비교한 결과이다. 예열 단계 시간에서는 EBM 공정의 경우 200 mm  $\times$  200 mm 크기의 적층 판, 챔버내부 시스템 및 전자총 시스템을 7,200 초 동안 가열한다. 그러나 제안된 공정의 경우 챔버 내부 시스템 및 전자총 시스템 가열 시간이 별도로 필요하지 않으며 필요한 영역에 대해서만 예열 비드를 생성한 후 적층 공정을 수행한다. 제안된 공정의 경우 4.2 mm  $\times$  30 mm 크기의 예열 비드를 생성하는데 기저부 가열 시간을 포함하여 660 초의 시간이 필요하다. 적층 속도에서는 EBM 공정의 경우 EBM S400 기준으로 16.7  $\text{mm}^3/\text{sec}$  의 적층 속도를 가지는 반면 제안된 공정의 경우 11  $\text{mm}^3/\text{sec}$  수준의 적층 속도를 가진다. 제안된 공정의 적층 속도가 상대적으로 느린 이유는 전자빔 스캐닝 방법 차이 때문이다. EBM 공정의 경우 전자기장 렌즈를 이용한 전용 스캐닝 시스템이 장착되어 있어 고속 빔 스캐닝이 가능하다. 그러나 제안된 공정의 경우 전용 스캐닝 시스템이 개

**Table 38 Comparison results of proposed process with EBM process in terms of process times**

Process	Preheating time (sec)	Scanning method	Building rate ( $\text{mm}^3/\text{sec}$ )	Building time for 1,000 $\text{mm}^3$ (sec)	Cooling time (sec)	Total process time (sec)
EBM	7,200 (for 200 mm $\times$ 200 mm)	Electromagnetic lens	16.7 (EBM S400)	60	18,000	50,477
Proposed process	660 (for 4.2 mm $\times$ 30 mm)	Stage system	11	97	1,800	5,022

발되지 않아 스테이지 시스템을 이용하고 있다. 적층 속도를 이용하여  $1,000 \text{ mm}^3$ 의 체적을 적층하기 위한 순수 적층 시간을 도출 한결과 EBM 공정의 경우 60 초 제안된 공정의 경우 97 초가 필요함을 알 수 있었다. 냉각시간에서는 EBM 공정의 경우 약 5 시간이 필요하였다. 그러나 제안된 공정의 경우 30 분 정도의 안정화 시간을 가질 경우 시편을 안정적으로 취출 할수 있었다. 이 결과 들로부터 예열 및 냉각 공정을 포함하여  $1,000 \text{ mm}^3$ 의 체적을 적층 할 경우 제안된 공정이 약 10 배 빠르게 적층 가능할 것으로 예측되었다.

## 제 9 장 결론 및 향후 연구

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 개발을 위한 초합금 분말의 전자빔 개발을 위한 예열 및 적층 특성에 관한 연구를 수행하였다. 이 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 기존의 전자빔을 이용하는 분말 베드형 적층제조 공정인 EBM 공정과 열원, 공정 및 시스템을 비교하여 제안된 공정의 독창성을 고찰하였다.

기저부 비가열 조건에서 초합금 분말의 전자빔 예열특성에 대한 실험을 수행하고 그 특성을 분석 및 고찰 하였다. 초합금 분말은 원자력 발전소, 자동차 엔진, 우주 항공 및 고프리미엄 제품군에 사용되는 코발트계 합금인 Stellite21 로 선정하였다. 선택된 초합금 분말에 대하여 전자빔 적층 공정에서의 분말 비산 메커니즘을 분석하였다. 분말 비산 메커니즘 분석에서는 분말에 전자빔이 조사될 때 분말에 적용되는 힘을 계산하여 전자빔을 이용한 분말베드형 적층공정의 비산 원인과 해결방법을 분석 고찰하였다. 또한, 초합금 분말의 레이저 가열 실험을 수행하여 가열온도에 따른 소결특성을 분석하였다. 기저부 비가열 조건에서 초합금 분말의 전자빔 예열 비드 생성 실험을 수행하였다. 실험 변수로 전자빔 검출 전류, 이송 속도, 공정 거리를 선정하였으며 각각의 변수가 예열 비드 생성 특성에 미치는 영향성을 분석 및 고찰 하였다. 또한 실험결과로부터 전자빔 에너지 밀도 및 출력 밀도와 분말 비산 현상의 상관관계를 분석하고 분말 비산 현상을 억제하기 위한 조건을 제시하였다. 이 결과들로부터 기저부 비가열 조건에서 예열 비드 생성을 위한 조건으로 가속 전압, 공정 거리, 검출 전류 및 이송 속도를 각각 12 keV, 115 mm, 0.93 mA 및 0.2 mm/s 로 선정하였다. 또한 이조건을 이용하여 평면 예열 비드 생성 실험을 수행하고 적용가능성을 분석 및 고찰하였다. 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 예열 비드 생성 메커니즘 분석을



위하여 예열단계 열전달 해석 모델을 개발하였다. 이동열원의 설계는 예열 비드 생성 실험에 사용된 전자빔 검출 전류를 측정하여 이를 수식화 하여 해석에 적용하였다. 또한 예열 비드 생성 중 분말층의 온도, 결합 상태 및 기공률 변화를 고려하여 분말층의 결합상태, 기공률 및 온도가 고려된 열전달 해석 물성을 제안하고 이를 적용하였다. 이 결과들을 이용하여 예열단계 공정변수에 따른 열전달 해석을 수행하고 예열단계 공정변수가 예열 비드 치수에 미치는 영향성에 대하여 분석 및 고찰하였다. 또한 공정변수에 따른 열원적용부 가열형상 변화를 해석을 통하여 도출하고 이와 분말 비산 현상의 상관관계를 분석 및 고찰하였다. 또한, 예열 비드 생성 실험결과와 예열단계 해석 결과를 비교하여 해석모델의 검증 및 정확도를 분석하였다. 분석결과 제안된 예열단계 해석모델은 80% 이상의 정확도를 가짐을 알 수 있었다.

기저부 비가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 적층 특성에 대한 실험을 수행하고 그 특성을 분석 및 고찰하였다. 기저부 비가열 조건에서 적층 비드 생성 실험은 3장에서 도출된 예열 비드 위에 고출력으로 집속된 전자빔 공정변수에 따라 조사하며 적층 비드를 생성하였다. 실험 결과를 통하여 적층공정 변수들이 기저부 비가열 조건에서 적층 비드 생성 특성에 미치는 영향성에 대하여 분석 및 고찰하였다. 이 결과로부터 기저부 비가열 조건에서 비드길이에 상관없이 양호한 적층 비드 생성이 가능한 조건들을 도출하였다. 전자빔 에너지 밀도 및 출력 밀도가 적층 비드 생성 특성에 미치는 영향성에 대하여 분석하고 적층 비드를 생성하기 위한 최소 전자빔 에너지 밀도 수준을 제시하였다. 또한 적층 비드의 용융 정도는 출력 밀도 및 이송 속도와 크게 상관이있음을 고찰하였다. 이 결과들을 종합하여 기저부 비가열 조건에서 적층 비드 생성을 위한 조건으로 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 30 keV, 1.5 mA 및 10 mm/s 인 조건으로 선정하였다. 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 적층 비드 생성 메커니즘 분석을 위하여 적층단계 열전달 해석 모델을 개발하였다. 적층

단계 열전달 해석 모델의 물성은 적층 비드 생성 중 분말층의 온도, 결합 상태 및 기공률 변화를 고려하여 분말층의 결합상태, 기공률 및 온도가 고려된 열전달 해석 물성을 제안하고 이를 적용하였다. 이 결과들을 이용하여 적층단계 공정변수에 따른 열전달 해석을 수행하고 적층단계 공정변수가 적층 비드 치수에 미치는 영향성에 대하여 분석 및 고찰하였다. 또한, 적층 비드 생성 실험결과와 적층단계 해석 결과를 비교하여 해석모델의 검증 및 정확도를 분석하였다. 분석결과 제안된 예열단계 해석모델은 81 % 이상의 정확도를 가짐을 알 수 있었다. 제안된 공정조건을 이용하여 기저부 비가열 조건에서 초합금 분말의 전자빔 다층 적층 실험을 수행하고 특성을 분석하였다. 그 결과 적층 부 층간 박리 및 기저부와 적층부 미결합 두가지 문제점을 고찰하고 해결 방법을 제시하였다.

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 파우더 베드 시스템을 제안 및 제작 하고 시운전을 통하여 성능을 평가하였다. 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 파우더 베드 시스템은 진공상태에서 구동되는 분말 베드 시스템이다. 이 파우더 베드 시스템의 조립을 위한 조립도, 제작을 위한 상세설계 및 구동을 위한 구동시스템 설계를 수행하고 이를 이용하여 파우더 베드 시스템을 제작 하였다. 또한 제작된 파우더 베드 시스템의 시운전을 통하여 파우더 베드 시스템으로서의 성능을 평가 및 고찰하였다.

기저부 가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 예열 실험을 수행하고 그 특성을 분석하였다. 기저부 비가열 조건에서의 예열 비드 생성을 위한 적정조건을 도출하였으나 기저부 가열시 시스템 내부의 온도가 매우 상이하여 이에대한 영향성 분석이 필요 하였다. 기저부 가열후 공정 변수에 따른 예열 비드 생성 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 기저부 비가열 조건에서 공정 변수에 따른 예열 비드 생성 특성을 고찰하고 이 결과로부터 전자빔 에너지 밀도 및 출력 밀도가 기저부 가열조건에서 예열 비드

생성 특성에 미치는 영향성을 고찰하였다. 이 결과들을 이용하여 기저부 가열조건에서 적정 예열 비드 생성 조건을 제안하였다. 제안된 조건은 전자빔 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 12 keV, 0.93 mA 및 0.5 mm/s 이다.

기저부 가열 조건에서의 초합금 분말의 전자빔 적층 실험을 수행하고 그 특성을 분석하였다. 기저부 가열 조건에서 공정변수에 따른 적층 비드 생성특성을 고찰하고 이결과로부터 전자빔 에너지 밀도 및 출력 밀도가 기저부 가열조건에서 적층 비드 생성 특성에 미치는 영향성을 고찰하였다. 이 결과들을 이용하여 기저부 가열조건에서 적정 적층 비드 생성 조건을 제안하였다. 제안된 조건은 전자빔 가속 전압, 검출 전류 및 이송 속도가 각각 35 keV, 3.5 mA 및 5.0 mm/s 이다.

플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정을 이용한 3 차원 제품 제작을 위한 공정 조건을 제안하였다. 제안된 조건을 이용하여 평면 단일층 적층, 평면 다층 적층을 수행하고 제안된 공정 및 조건의 가능성을 평가하였다. 또한, 제안된 공정 및 조건을 이용하여 원통, 계단 및 3 차원 구조체 3 가지 형상을 제작하고 금속 3 차원 적층 제조 공정으로서의 성능 및 가능성을 고찰하였다.

이 결과들로부터 제안된 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조공정으로 금속 3차원 제품을 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안된 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 특성 및 적용성 향상을 위하여 다음과 같은 향후 연구가 필요할 것으로 사료된다. 첫째로 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정용 파우더 베드 시스템의 적층 가능 크기 향상과 시스템 구동최적화, 장시간 적층 공정에 대비하여 내열/내부식성 향상에 대한 연구가 필요하다. 또한 적층 공정 전용 플라즈마 전자빔 시스템을 구축하고 이와 일체화되어 구동되는 파우더 베드 시스템 개발에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

둘째로 이 연구에서 제안된 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조공정의 적정 적층 비드 생성 조건을 이용하여 평면 적층 비드의 오버랩간격 및 톨패스 구성에 따른 제작 특성을 분석하고 형상 정밀도 향상을 및 공정 최적화에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다

셋째로 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조 공정의 열전달 해석 모델을 이용하여 적층 공정변수, 제품 형상 및 적층 톨패스에 따른 적층 제품 내 열누적 문제들을 해석적으로 분석하고 이에대한 데이터 베이스를 구축하여 적층 공정과 연계된 플랫폼 개발에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

넷째로 플라즈마 전자빔을 이용한 신개념 금속 적층 제조공정을 이용하여 다양한 형상의 3 차원 제품들을 출력하고 제품들에 대한 기계 및 금속 특성 분석과 평가를 수행하고 다른 금속 적층 제조 공정과의 특성 비교에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## Reference

- [1] Poprawe, R., Bleck, W., Piller, F. T., Schuh, G., Barg, S., Bohl, A., Bremen, S., Bültmann, J., Hinke, C., Jiang, R., Kleer, R., Merkt, S., Prah, U., Riesener, M., Schrage, J., Weller, C., and Ziegler, S., “Direct, Mold-Less Production Systems,” in: Integrative Production Technology, Brecher, C. and Özdemir, D. (Ed.), Springer International, pp. 23, 2017.
- [2] Li, G., Hou, Y., and Wu, A., “Fourth Industrial Revolution: Technological Drivers, Impacts and Coping Methods,” *Chin. Geogra. Sci.*, Vol. 27, No. 4, pp. 626-637, 2017.
- [3] Wohlers, T. T. and Caffrey, T., “Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report,” Wohlers Associates, 2017.
- [4] Ahn, D. G., “Direct Metal Additive Manufacturing Processes and Their Sustainable Applications for Green Technology: A Review,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 3, pp. 381-395, 2016.
- [5] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., and Emmelmann, C., “Additive Manufacturing of Metals,” *Acta Mater.*, Vol. 117, pp. 371-392, 2016.
- [6] Ahn, D. G., Lee, H. J., Cho, J. R., and Guk, D. S., “Improvement of the Wear Resistance of Hot Forging Dies Using A Locally Selective Deposition Technology with Transition Layers,” *CIRP Annals-Manuf. Tech.*, Vol. 65, pp. 257-260, 2016.
- [7] Babu, S. S., Love, L., DeHof, R., Peter, W., Watkins, T., and Pannala, S., “Opportunities and Challenges of Additive Manufacturing of Materials: Role of Economic Drivers, Automation, Process Control, High Performance Computing and Neutron Characterization,” <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1286848> (Accessed 15 May 2018)
- [8] Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ceylan, A., Martinez, E., Martinez, J. L., Hernandez, D. H., Machado, B. I., Ramirez, D. A., Medina, F., Collins, S., and Wicker, R. B., “Characterization of Titanium Aluminide Alloy Components Fabricated by Additive Manufacturing using Electron Beam Melting,” *Acta Mater.*, Vol. 58, pp. 1887-1894, 2010.

- [9] Helmer, H., Bauereiß, A., Singer, R. F., and Körner, C., “Grain Structure Evolution in Inconel 718 during Selective Electron Beam Melting,” *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 668, pp. 180-187, 2016.
- [10] Lee, H. J., Song, J. G., and Ahn, D. G., “Investigation into the Influence of Feeding Parameters on the Formation of the Fed-Powder Layer in a Powder Bed Fusion (PBF) System,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 18, pp. 613-621, 2017.
- [11] Prashanth, K. G., Scudino, S., and Eckert, J., “Defining the Tensile Properties of Al-12Si Parts Produced by Selective Laser Melting,” *Acta Mater.*, Vol. 126, pp. 25-35, 2017.
- [12] Zhang, Q., Chen, J., Zhao, Z., Tan, H., Lin, X., and Huang, W., “Microstructure and Anisotropic Tensile Behavior of Laser Additive Manufactured TC21 Titanium Alloy,” *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 673, pp. 204-222, 2016.
- [13] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., and Zhang, S., “The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering,” *Comput. Aided. Des.*, Vol. 69, pp. 65-89, 2015.
- [14] Bikas, H., Stavropoulos, P., and Chryssolouris, G., “Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 83, No. 1, pp. 389-405, 2016.
- [15] Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., and Kainuma, Y., “Trends and Research Challenges in Remanufacturing,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Tech.*, Vol. 3, No. 1, pp. 129-142, 2016.
- [16] Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi S. S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, H. B., and Noh, S. D., “Smart Manufacturing : Past Research, Present Findings, and Future Directions,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Tech.*, Vol. 3, No. 1, pp. 111-128, 2016.
- [17] Ho, C. M. B., Ng, S. H., and Yoon, Y. J., “A Review on 3D Printed Bioimplants,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 5, pp. 1035-1046, 2015.
- [18] Cheah, C., Chua, C., Lee, C., Feng, C., and Totong, K., “Rapid Prototyping and Tooling Techniques: A Review of Applications for Rapid Investment Casting,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 25, Nos. 3-4, pp. 308-320, 2005.
- [19] Ko, H., Moon, S. K., and Hwang, J., “Design for Additive Manufacturing in Customized

- Products,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 11, pp. 2369-2375, 2015.
- [20] Rengier, F., Mehndiratta, A., von Tengg-Koblogk, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, H.-U., and Giesel, F. L., “3D Printing Based on Imaging Data: Review of Medical Applications,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 5, No. 4, pp. 335-341, 2010.
- [21] Mueller, B., “Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing,” *Assembly Automation*, Vol. 32, No. 2, 2012.
- [22] Balletti, C., Ballarin, M., and Guerra, F., “3D Printing: State of the Art and Future Perspectives,” *J. Cultural Heritage*, Vol. 26, pp. 17-182, 2017.
- [23] Frketic, J., Dickensa, T., and Ramakrishnan, S., “Automated Manufacturing and Processing of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites: An Additive Review of Contemporary and Modern Techniques for Advanced Materials Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, Vol. 14, pp. 69–86, 2017.
- [24] ASTM F2792-12a, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” 2012.
- [25] Kruth, J. P., Leu, M. C., and Nakagawa, T., “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping,” *CIRP Annals*, Vol. 47, No. 2, pp. 525-540, 1998.
- [26] Cooke, M. N., Fisher, J. P., Dean, D., Rinnac, C., and Mikos, A. G., “Use of Stereolithography to Manufacture Critical-Sized 3D Biodegradable Scaffolds for Bone in Growth,” *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, Vol. 64, No. 2, pp. 65-69, 2003.
- [27] Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., and Roberson, D. A., “Characterizing the Effect of Additives to ABS on the Mechanical Property Anisotropy of Specimens Fabricated by Material Extrusion 3D Printing,” *Addit. Manuf.*, Vol. 6, pp. 16-29, 2015.
- [28] Hutmacher, D. W., Schantz, T., Zein, I., Ng, K. W., Teoh, S. H., and Tan, K. C., “Mechanical Properties and Cell Cultural Response of Polycaprolactone Scaffolds Designed and Fabricated via Fused Deposition Modeling,” *J. Biomed. Mater. Res. A*, Vol. 55, No. 2, pp. 203-216, 2001.
- [29] Xin, X., Meteyer, S., Perry, N., and Zhao, Y. F., “Energy and Material Flow Analysis of Binder-Jetting Additive Manufacturing Processes,” *Procedia CIRP*, Vol. 15, pp. 19-25, 2014.
- [30] Emanuel, M., Sachs, John S., Haggerty, Michael J., Cima, Paul A., and Williams, “Three-Dimensional Printing Techniques,” US Patent, No. 5204055A, 1993.

- [31] Cohen, A., Laviv, A., Berman, P., Nashef, R., and Abu-Tair, J., “Mandibular Reconstruction using Stereolithographic 3-Dimensional Printing Modeling Technology,” Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol., Vol. 108, No. 5, pp. 661-666, 2009.
- [32] Cooper, K. G., “Rapid Prototyping Technology,” Marcel Dekker., 2001.
- [33] Froes, F. H. and Dutta, B. “The Additive Manufacturing (AM) of Titanium Alloys,” Adv. Mat. Res., Vol. 1019, pp. 19-25, 2014.
- [34] Ahn, D. G., Park, S. H., and Kim, H. S., “Manufacture of an Injection Mould with Rapid and Uniform Cooling Characteristics for the Fan Parts using a DMT Process,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 11, No. 6, pp. 915-924, 2010.
- [35] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H., “Wire-Feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 81, Nos. 1-4, pp. 465-481, 2015.
- [36] Balla, V. K., Bose, S., and Bandyopadhyay, A., “Processing of Bulk Alumina Ceramics using Laser Engineered Net Shaping,” Int. J. Appl. Ceram. Technol., Vol. 5, No. 3, pp. 234-242, 2008.
- [37] Tsang, V. L. and Bhatia, S. N., “Three-Dimensional Tissue Fabrication,” Adv. Drug Deliv. Rev., Vol. 56, No. 11, pp. 1635-1647, 2004.
- [38] Feygin, M. and Pak, S. S., "Laminated Object Manufacturing Apparatus and Method," US Patent, No. 5876550, 1999.
- [39] Beaman, J., “Selective Laser Sintering with Assisted Powder Handling,” US Patent, No. 4938816A, 1989.
- [40] Deckard, “Method for Selective Laser Sintering with Layer Wise Cross-scanning,” WO. Patent, No. 1992008567 A1, 1991.
- [41] Christophe, C., “Selective Laser Melting Process,” WO. Patent, No. 2014154901 A1, 2014.
- [42] Yves, K., “Process for Selective Laser Melting and System for Carrying Out Said Process,” US Patent, No. 20140131921 A1, 2011.
- [43] Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A., and King, W. E., “Laser Powder-Bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of



- Pores, Spatter, and Denudation Zones,” *Acta Mater.*, Vol. 108, pp. 36-45, 2016.
- [44] Frazier, W. E. “Metal Additive Manufacturing: A Review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 23, No. 6, pp. 1917-1928, 2014.
- [45] Ahn, D. G. and Lee, H. J., “Rapid Manufacturing Process of Ferrous and Non-Ferrous Parts using Plasma Electron Beam,” US Patent, No. 20170120370 A1, 2017.
- [46] Lee, H. J., Ahn, D. G., Song, J. G., Kim, J. S., and Kang, E. G., “Fabrication of Beads using a Plasma Electron Beam and Stellite21 Powders for Additive Manufacturing,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 4, pp. 453-456, 2017.
- [47] Körner, C., “Additive Manufacturing of Metallic Components by Selective Electron Beam Melting - A Review,” *Int. Mater. Rev.*, Vol. 61, pp. 361-377, 2016.
- [48] Milberg, J. and Sigl, M., “Electron Beam Sintering of Metal Powder,” *Prod. Eng. Res. Devel.*, Vol. 2, pp. 117-122, 2008.
- [49] Pittman, M., Ferré, S., Rousseau, J. P., Notebaert, L., Chambaret, J. P., and Chériaux, G., “Design and Characterization of a Near-Diffraction-Limited FemtoSecond 100-TW 10-Hz High-Intensity Laser System,” *Appl Phys B.*, Vol. 74, No. 6, pp. 529-535, 2002.
- [50] Fukao, M., Ishida, M., Ohtsuka, Y., Matsuo, H., “A Simple Electron Gun by Obstructed Discharge and Its Discharge-Sustaining Mechanism,” *Vacuum*, Vol. 59, pp. 358-372, 2000.
- [51] Sari, A. H., Ghoranneviss, M., Hora, H., Osman, F., Höpfl, R., Hantehzadeh, M. R., and Bolouki, N., “Fabrication of a 50 keV Cold Cathode Electron Gun,” *J. Plasma. Fusion Res.*, Vol. 6, pp. 735-737, 2004.
- [52] Felba, J., Friedel, K., and Przybecki, K., “Application of Glow Discharge Electron Gun to Surface Modification,” *Vacuum*, Vol. 41, Nos. 7-9, pp. 2177-2180, 1990.
- [53] Kang, E. G., Kim, J. S., Lee, S. W., Min, B. K., and Lee, S. J., “Emission Characteristics of High-Voltage Plasma Diode Cathode for Metal Surface Modification,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 1, pp. 13-19, 2015.
- [54] Ahmed, N., Abdo, B. M., Darwish, S., Moiduddin, K., Pervaiz, S., Alahmari, A. M., and Naveed, M., “Electron Beam Melting of Titanium Alloy and Surface Finish Improvement through

Rotary Ultrasonic Machining,” *Int J Adv Manuf Technol.*, Vol. 92, pp. 3349-3361, 2017.

[55] Träger, F., “*Springer Handbook of Lasers and Optics*,” Springer Science & Business Media., 2012.

[56] Yoon, J. D., Yang, C. W., Kim, J. R., and Lee, S. H., “*Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*,” Chung Moon Gak., 2009.

[57] Cambridge Vacuum Engineering, “*Electron Beam Welding Versus Laser Welding*,” [http://www.camvaceng.com/assets/uploads/documents/EBW\\_versus\\_laser.pdf](http://www.camvaceng.com/assets/uploads/documents/EBW_versus_laser.pdf) (Accessed 15 May 2018)

[58] Kanaya, K. and Okayama, S., “Penetration and Energy-Loss Theory of Electrons in Solid Targets,” *J. Phys. D., J. Appl. Phys.*, Vol. 5, pp. 43-58, 1972.

[59] Körner, C., “Additive Manufacturing of Metallic Components by Selective Electron Beam Melting - A Review,” *Int. Mater. Rev.*, Vol. 61, pp. 361-377, 2016.

[60] Eschey, C., Lutzmann, S., and Zaeh, M. F., “Examination of the Powder Spreading Effect in Electron Beam Melting (EBM),” *Solid Freeform Fabr. Symp. Proc.*, pp. 309-319, 2009.

[61] List, F. A., Dehoff, R. R., Lowe, L. E., and Sames, W. J., “Properties of Inconel 625 Mesh Structures Grown by Electron Beam Additive Manufacturing,” *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 615, pp. 191-197, 2014.

[62] Kahnert, M., Lutzmann, S., and Zaeh, M. F., “Layer Formations in Electron Beam Sintering,” *Solid Freeform Fabr. Symp. Proc.*, pp. 88-99, 2007.

[63] Vayssette, B., Saintier, N., Brugger, C., Elmay, M., and Pessard, E., “Surface Roughness of Ti-6Al-4V Parts Obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue life,” *Procedia Eng.*, Vol. 213, pp. 89-97, 2018.

[64] Koutiri, I., Pessard, E., Peyre, P., Amlou, O., and De Terris, T., “Influence of SLM Process Parameters on the Surface Finish, Porosity Rate and Fatigue Behavior of As-Built Inconel 625 Parts,” *J. Mater. Process Technol.*, Vol. 255, pp. 536-546, 2018.

[65] Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., and Nandwana, P., “Effects of the

Microstructure and Porosity on Properties of Ti-6Al-4V ELI Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM),” *Addit Manuf.*, Vol. 10, pp. 47-57, 2016.

[66] Gong, H., Rafi, K., Karthik, N., Starr, T., and Stucker, B., “Defect Morphology in Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting,” *Solid Freeform Fabr. Symp. Proc.*, pp. 12-14, 2013.

[67] Liu, B., Wildman, R., Tuck, C., Ashcroft, I., and Hague, R., “Investigation the Effect of Particle Size Distribution on Processing Parameters Optimisation in Selective Laser Melting Process,” *Solid Freeform Fabr. Symp.*, pp. 227-238. 2011.

[68] Smith, C. J., Derguti, F., Nava, E. H., Thomas, M., Tammas-Williams, S., Gulizia, S., Fraser, D., and Todd, I., “Dimensional Accuracy of Electron Beam Melting (EBM) Additive Manufacture with Regard to Weight Optimized Truss Structures,” *J. Mater. Process Technol.*, Vol. 229, pp. 128-138, 2016.

[69] Murr, L. E., “Metallurgy of Additive Manufacturing: Examples from Electron Beam Melting,” *Addit Manuf.*, Vol. 5, pp. 40-53, 2015.

[70] SLM-Solutions, “3D Metals, discover the variety of metal powders,” <https://slm-solutions.com/download-center> (Accessed 4 Jul 2018)

[71] Arcam, “Arcam ASTM F75 CoCr,” <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arc-024-cocr-mtrl-ds-v2.pdf> (Accessed 4 Jul 2018)

[72] Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Janaki Ram, G.D., Starr, T., and Stucker, B., “Influence of Defects on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Components Produced by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting,” *Mater. Des.*, Vol. 86, pp. 545-554, 2015.

[73] Spears, T. and Gold, S., “In-process Sensing in Selective Laser Melting (SLM) Additive Manufacturing,” *Integrating Material and Manufacturing Innovation.*, Vol. 1, No. 3, pp. 23-31, 1995.

[74] Schueren, B. and Kruth, J. P., “Powder Deposition in Selective Metal Powder Sintering,” *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 1, No. 3, pp. 23-31, 1995.

[75] Kurzynowski, T., Chlebus, E., Kuznika, B., and Reiner, J., “Parameters in Selective Laser

- Melting for Processing Metallic Powders,” High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications, Vol. 8239, pp. 823914, 2012.
- [76] Seifi, M., Christiansen, D., Beuth, J., Harrysson, O., and Lewandowski, J. J., “Process Mapping, Fracture and Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Produced by EBM Additive Manufacturing,” 13th World Conf. on Titanium, 2015.
- [77] Cordero, Z. C., Meyer III, H. M., Nandwana, P., and Dehoff, R. R., “Powder Bed Charging during Electron-Beam Additive Manufacturing,” Acta Mater., Vol. 124, pp. 437-445, 2017.
- [78] Milberg, J. and Sigl, M., “Electron Beam Sintering of Metal Powder,” Prod. Eng. Res. Devel., Vol. 2, pp. 117-122, 2008.
- [79] Sigl, M., Lutzmann, S., and Zaeh, M. F., “Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering,” Solid Freeform Fabr. Symp. Proc., pp. 397-405, 2006.
- [80] Kahnert, M., Lutzmann, S., and Zaeh, M. F., “Layer Formations in Electron Beam Sintering,” Solid Freeform Fabr. Symp. Proc., pp. 88-99, 2007.
- [81] Gong, X., Anderson, T., and Chou, K., “Review on Powder-Based Electron Beam Additive Manufacturing Technology,” Manuf. Rev., Vol. 1, pp. 1-12., 2014.
- [82] Raghavan, N., Dehoff, R., Pannala, S., Simunovic, S., Kirka, M., Turner, J., Carlson, N., and Babu, S. S., “Numerical Modeling of Heat-Transfer and the Influence of Process Parameters on Tailoring the Grain Morphology of IN718 in Electron Beam Additive Manufacturing,” Acta Mater., Vol. 112, pp. 303-314., 2016.
- [83] Yan, W., W, Ge, Smith, J., Lin, S., Kafka, O. L., Lin, F., and Liu, W. K., “Multi-Scale Modeling of Electron Beam Melting of Functionally Graded Materials,” Acta Mater., Vol. 115, pp. 403-412, 2016.
- [84] Zäh, M. F., Lutzmann, S., Kahnert, M., and Walchshäusl, F., “Determination of Process Parameters for Electron Beam Sintering (EBS),” Proc. COMSOL Conf., 2008.
- [85] Shen, N. and Chou, K., “Thermal Modeling of Electron Beam Additive Manufacturing Process-Powder Sintering Effects,” Proc. ASME 2012 Int. Manuf. Sci. Eng. Conf., 2012.
- [86] Frazier, W. E., “Metal Additive Manufacturing: A Review,” J. Mater. Eng. Perform., Vol. 23,

No. 6, pp. 1917-1928, 2014.

- [87] Korner, C., Attar, E., and Heinl, P., “Mesoscopic Simulation of Selective Beam Melting Processes,” *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 211, pp. 978-987, 2011.
- [88] Zäh, M. F. and Lutzmann, S., “Modelling and Simulation of Electron Beam Melting,” *J. Prod. Eng. Res. Devel.*, Vol. 4, pp. 15-23, 2010.
- [89] Price, S., Cheng, B., Lydon, J., Cooper, K., and Chou, K., “On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME.*, Vol. 136, No. 6, 2014.
- [90] Autodesk Netfabb, “Titanium 3D Printing in Action - Electron Beam Melting (EBM),” [https://www.youtube.com/watch?v=E7--ZWPVVdQ&index=5&list=PLD7ckJoR\\_kR6ua0GOMlyJ1mpCKh342iLI](https://www.youtube.com/watch?v=E7--ZWPVVdQ&index=5&list=PLD7ckJoR_kR6ua0GOMlyJ1mpCKh342iLI) (Accessed 4 Jul 2018)
- [91] Gaytan, S. M., Murr, L. E., Martinez, E., Martinez, J. L., Machado, B. I., Ramirez, D. A., Medina, F., Collins, S., and Wicker, R. B., “Comparison of Microstructures and Mechanical Properties for Solid and Mesh Cobalt-Base Alloy Prototypes Fabricated by Electron Beam Melting,” *J. Metall. Mater. Trans. A.*, Vol. 41A, pp. 3216-3227, 2010.
- [92] Sun, S. H., Koizumi, Y., Kurosu, S., Li, Y. P., and Chiba, A., “Phase and Grain Size Inhomogeneity and Their Influences on Creep Behavior of Co–Cr–Mo Alloy Additive Manufactured by Electron Beam Melting,” *Acta Mater.*, Vol. 86, pp. 305-318, 2015.
- [93] Exocor, “Stellite 21 Alloy Technical Data,” <http://exocor.com/downloads/product-datasheets/Stellite-21-Datasheet.pdf> (Accessed 26 May 2018)
- [94] Murr, L. E., Martinez, E., Amato, K. N., Gaytan, S. M., Hernandez, J., Ramirez, D. A., Shindo, P. W., Medina, F., and Wicker, R. B., “Fabrication of Metal and Alloy Components by Additive Manufacturing: Examples of 3D Materials Science,” *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 1, No. 1, pp. 42-54, 2012.
- [95] Lee, C. M., Kim, D. H., Baek, J. T., and Kim, E. J., “Laser Assisted Milling Device: A Review,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 3, No. 2, pp. 199-208, 2016.
- [96] Kang, E. G., Choi, H., Min, B. K., and Lee, S. J., “Austenite Phase Transformation of SKD11

- by Surface Heat Treatment with a Focused Electron Beam,” *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 321, pp. 247-256, 2017.
- [97] Kang, E. G., Choi, H. Z., Min, B. K., and Lee, S. J., “Plasma Diode Electron Beam Heat Treatment of Cast Iron: Effect of Direct Preheating,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 18, No. 10, pp. 1339-1345, 2017.
- [98] Tan, X., Kok, Y., Tan, Y. J., Descoins, M., Mangelinck, D., Tor, S. B., Leong, K. F., and Chua, C. K., “Graded Microstructure and Mechanical Properties of Additive Manufactured Ti-6Al-4V via Electron Beam Melting,” *Acta Materialia*, Vol. 97, 1-16, 2015.
- [99] Abyzov, A.M., Goryunov, A. V., and Shakhov, F. M., “Effective Thermal Conductivity of Disperse Materials. I. Compliance of Common Models with Experimental Data,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 67, pp. 752-767, 2013.
- [100] Živcová, Z., Gregorová, E., Pabst, W., Smith, D. S., Michot, A., and Poulier, C., “Thermal Conductivity of Porous Alumina Ceramics Prepared using Starch as a Pore-Forming Agent,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 29, No. 3, pp 347-353, 2009.
- [101] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S., “Principles of Heat and Mass Transfer,” John Wiley & Sons, 7th Ed., 2013.
- [102] Sih, S. S. and Barlow, J. W., “Emissivity of Powder Beds,” *Solid Freeform Fabr. Symp. Proc.*, pp. 402-408, 1995.
- [103] Farwick, D. G. and Johnson, R. N., “Thermophysical Properties of Selected Wear-Resistant Alloys,” Hanford Engineering Development Laboratory, 1980.
- [104] Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y. and Klemens, P. G., “Thermophysical Properties of Matter Volume 1: Thermal Conductivity-Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum, 1970.
- [105] Touloukian, Y. S., Kirby, R. K., Taylor, R. E., and Desai, P. D., “Thermophysical Properties of Matter Volume 12: Thermal Expansion-Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum, 1970.
- [106] Touloukian, Y. S. and DeWitt, D. P., “Thermophysical Properties of Matter Volume 7: Thermal Radiative Properties-Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum, 1970.
- [107] Touloukian, Y. S. and Buyco, E. H., “Thermophysical Properties of Matter Volume 4:

Specific Heat-Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum, 1970.

[108] Touloukian, Y. S., Powell, R. W., Ho, C. Y., and Nicolaou, M. C., “Thermophysical Properties of Matter Volume 10: Thermal Diffusivity-Metallic Elements and Alloys,” IFI/Plenum, 1973.

## 감사의 글

박사과정 진학을 결심하던 날이 바로 어제 같지만 어느덧 이렇게 박사학위 논문을 작성하게 되었습니다. 학업을 진행하는 동안 많은 분들의 도움이 있었습니다. 박사 과정을 하면서 가장 크게 느낀점은 스승에 대한 존경심과 주위 사람들에 대한 감사함이었습니다. 가장 먼저 지도 교수님이신 안동규 교수님께 감사한 마음을 전하고 싶습니다. 학부생때 인연이 시작되어 교수님 휘하에서 공부를 시작한지 어느덧 9년이란 세월이 흘렀습니다. 함께했던 시간은 평생 기억에 남을 것 같습니다. 교수님의 가르침대로 매사에 열정적으로 열심히 하되 겸손한 마음을 가지고 살도록 하겠습니다.

이 논문이 완성되기까지 바쁘신 일정중에도 시간을 할애하여 많은 지도를 해주신 한길영 교수님, 박종락 교수님, 박근 교수님, 및 오동욱 교수님께 진심으로 고개숙여 감사의 인사를 드리고 싶습니다. 교수님들의 지도가 부끄럽지 않도록 항상 노력하도록 하겠습니다.

이 연구를 진행할 수 있도록 아무런 대가없이 장비 사용을 허락해주시고 많은 관심과 조언을 주신 한국생산기술연구원의 강은구 박사님께 진심으로 감사드립니다. 또한 저를 여러방면으로 도와주신 한국생산기술연구원의 김진석 선배님과 경호에게 진심으로 감사드립니다.

실형실 선후배 분들께도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 이상훈 선배님, 김민수 선배님, 문경제 선배님, 정광운 선배님, 김대원 선배님, 김현우 선배님, 남경흠 선배님, 박승화 선배님, 송동한 선배님, 김세훈 선배님, 박민우 선배님, 조창규 선배님, 선향선 선배님, 안영수 선배님, 우철이, 나라, 대선이, 동인이, 용훈이, 빗리, 광규, 그리고 현식이 모두에게 감사함을 전하고 싶습니다. 제가 무탈하게 박사학위를 하게 되는 것은 선후배님들의 격려와 도움이 매우 컸습니다. 특히 저를 도와준 후배 분들께 다시한번 감



사하다고 말하고 싶습니다.

언제나 학술대회 때마다 모여서 서로 사기를 북돋아주는 우리 창원대, 광주과기원, 서울과기대, 안동대 그리고 그외 식구들에게도 감사함을 표현하고 싶습니다. 대학원 생활이 재밌었던 이유는 우리 식구들 덕분이란 것을 믿어 의심치 않습니다.

항상 저를 걱정하고 응원해주신 아버지, 어머니 그리고 친형에게 진심으로 감사하다는 말을 꼭 전하고 싶습니다. 마지막으로 9 년의 시간동안 언제나 나의 곁을 지켜 주었으며 3 일 후면 평생을 약속할 예비신부 박주혜에게 진심으로 감사합니다. 앞으로 함께하는 동안 이 감사함을 잊지 않도록 하겠습니다.

이 짧은 종이위에 모두 표현하지는 못하였지만 제가 이렇게 박사학위를 받기까지 관심을 가져주시고 도움과 조언을 주신 모든 분들께 진심으로 감사드리고 싶습니다.

2018 년 7월 4일 이 호 진