

전자빔을 이용한 Stellite21 분말 예열공정에 관한 기초 연구

Preliminary Study on Pre-Heating Process of Stellite21 Powder Using Electron Beam

이호진¹, 송재국¹, 김진석², 안동규^{1,✉}
Ho-Jin Lee¹, Jae-Guk Song¹, Jin-Suk Kim², and Dong-Gyu Ahn^{1,✉}

¹ 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun University)

² 한국생산기술연구원 IT 융합공정연구그룹 (IT Convergence Process Group, Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: smart@chosun.ac.kr, Tel: +82-62-230-7043

Manuscript received: 2016.3.30. / Revised: 2016.4.15. / Accepted: 2016.4.18.

A powder spreading phenomenon is one of disadvantageous characteristics of the powder bed fusion process using electron beams. The powder spreading phenomenon can be controlled using a pre-heating process of metallic powders. The aim of this paper was to investigate the pre-heating process of Stellite21 powder using electron beams. Powder spreading experiments were performed to examine the influence of process parameters on the spreading behaviors of Stellite21 powder. Powder heating experiments were carried to investigate the effects of the focusing current of the electron beam on the quality of the heated region. Using the results of the powder spreading and heating experiments, an appropriate combination of process parameters was obtained. The pre-heating experiment of Stellite21 was performed using the estimated combination of process parameters. The results of preheating experiments showed that the pre-heated Stellite21 layer with desired characteristics can be created when the estimated combination of process parameters is applied.

KEYWORDS: Electron beam (전자빔), Stellite21 powder (스텔라이트 21 분말), Pre-Heating process (예열공정), Powder spreading (분말비산)

기호설명

Π = Electron beam power

Φ = Focusing current of electron beam

v = Travel speed of loading table

T = Thickness of powder layer

1. 서론

3차원 프린팅 (3D Printing) 공정은 1984년 광조

형 (Stereo Lithography) 공정이 개발된 이후로 국내/외에서 꾸준히 개발되어 현재는 수십 종류의 공정이 개발되어 있다.¹ 3차원 프린팅 공정은 금형 산업, 건축 산업 및 항공 산업 등 다양한 분야에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 이를 이용한 공학 교육 또한 이루어져 기술에 대한 수요가 날이 증가하고 있다.²⁻⁴ 압출 공정 (Material Extrusion), 재료 제팅 공정 (Material Jetting), 바인더 제팅 공정 (Binder Jetting), 박판 공정 (Sheet Lamination), 컨테

이러한 광경화 공정 (Vat Photopolymerization), 분말 베드 용해 공정 (Powder Bed Fusion), 및 에너지 유도 침적 공정 (Directed Energy Deposition) 은 대표적인 3차원 프린팅 공정이다.⁵ 분말 베드 용해 공정은 미국 텍사스 주립대학 (University of Texas at Austin, USA)에서 SLS (Selective Laser Sintering) 공정으로 최초로 개발되었다.⁵

분말 베드 용해 공정은 하나 또는 다수의 열원을 이용하여 분말들을 융합하는 공정이다. 분말 베드 용해 공정에 다양한 열원이 적용 가능하지만 레이저 빔 (Laser Beam)과 전자빔 (Electron Beam) 열원이 가장 널리 사용되고 있다.^{6,7} 레이저 열원을 이용한 분말 베드 용해 공정은 적용성이 우수하고 설비구축이 편리한 장점을 가지고 있다. 전자빔 열원을 이용한 분말 베드 용해공정은 레이저 열원 대비 높은 출력을 빠르게 낼 수 있어 고용점 재료를 빠르게 용해할 수 있다.⁷ 그러나 전자빔 열원을 사용하기 위해서는 진공환경이 반드시 구축되어야 하며 전자빔을 사용할 때 발생하는 특성들이 고려되어야 한다.

분말 비산 (Powder Spreading) 현상은 전자빔 열원을 이용한 분말 베드 용해 공정에서 발생하는 치명적인 특성 중 하나이다.^{7,9} 분말비산 현상은 도포된 금속 분말 위에 전자빔을 조사하였을 때 도포된 분말이 갑작스럽게 흩어지며 날라가는 것이다. 분말 베드 용해 공정은 적층 판 (Building Platform) 위에 분말재료를 고르게 도포한 후 열원을 이용하여 소결 또는 용융 시킨다. 제작공정 중 도포되어있던 분말이 분말 비산 현상으로 갑작스럽게 날라가게 되면 고출력 열원에 적층 판이나 기존에 제작중인 제품이 노출되어 손상을 입게된다. 이러한 경우 더 이상 제작공정을 진행할 수 없으므로 분말 비산현상은 전자빔 열원을 이용한 분말 베드 용해 공정 설계 시 반드시 고려 되어야 한다. 분말비산 현상의 원인은 분말의 잔류수분, 전자빔 운동에너지 및 정전하 현상으로 구분할 수 있으며 세가지 원인중 정전하 현상의 영향력이 가장 큰것으로 예측되고 있다.^{7,10} 다양한 연구들을 통하여 분말 비산을 억제하기 위하여 많은 방법들이 고안되고 있지만 가장 효율적인 방법은 분말을 예열하는 것이다.⁷ 이와 같은 이유로 많은 연구자들이 분말예열공정에 대한 연구를 수행하고 있다.

Milberg 등은 금속분말의 EBS (Electron Beam Sintering) 공정 특성에 대한 연구를 수행하였다.⁶ 그들의 연구에서는 분말의 잔류수분에 대한 영향,

전자빔 운동에너지에 의한 영향 및 정전하 현상에 의한 영향을 분석하였다.⁶ Kahnert 등은 EBS 공정에서 공정조건에 따른 적층형상 대한 연구를 수행하였다.⁷ 그들의 연구에서는 전자빔 예열조건과 스캐닝 속도 (Scanning Speed)의 상관 관계에 대하여 분석하였으며 실험변수들을 조합하여 에너지 밀도를 규정하고 적층 시 에너지 밀도에 따른 제품의 표면 형상을 분석하였다.⁷ Sigl 등은 전자빔 공정내의 물리적 현상등에 대한 연구를 수행하였다.¹⁰ 그들의 연구에서는 분말 비산현상의 원인과 해결방법에 대하여 물리적 접근을 통하여 분석하였다.¹⁰

이 연구에서는 실험적 접근을 통하여 전자빔을 이용한 Stellite21 분말의 예열공정에 관한 기초연구를 수행하였다. 분말 비산 특성 실험을 통하여 전자빔 조사 조건에 따른 Stellite21 분말의 비산특성을 분석하였다. 가열 특성 실험을 수행하여 전자빔 집속 전류와 가열시간에 따른 Stellite21 분말의 가열부 변화를 고찰하였다. 두가지 실험결과를 이용하여 전자빔을 이용한 Stellite21 분말의 적층 예열공정을 도출하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 시스템 구성 및 시편

분말 비산 특성 및 가열 특성 실험을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험 셋업 (Set-Up) 을 구축하였다. 실험절차는 시편장착, 분말도포, 시편이송, 진공도 조절, 전자빔 조사 및 시편 취출 순서로 진행되었다. 시편장착 및 분말도포 단계는 Fig. 1(d)과 같이 전자빔 시스템의 시편 장착부에 분말도포가 가능한 시편을 장착한 후 Stellite21 분말을 도포하였다. 분말 비산 특성 실험과 분말 가열 특성 실험에 사용된 시편의 재료 및 크기는 각각 SM45C 및 64 mm × 60 mm × 15 mm 이다. 시편은 측면 판재와 적층부가 볼트로 체결되는 형태로 설계 하였다. 시편에 금속분말이 도포될 수 있도록 시편상부에 단차 형상을 설계하였다. 실험에 사용된 분말은 Kennametal 사의 Stellite21 분말이다. 실험에 사용된 분말크기와 형상은 Fig. 2와 같이 45-150 μm 크기의 구형 형상이다. Table 1과 2는 각각 시편 재료인 SM45C와 분말 재료인 Stellite21의 열/전기적 물성과 구성비이다.^{11,12}

분말이 도포된 시편은 자동제어 시스템을 통하여 진공 챔버 내부로 이송한 후, 20분 동안 진공도를 조절하여 안정된 진공 상태를 유도하였다. 실

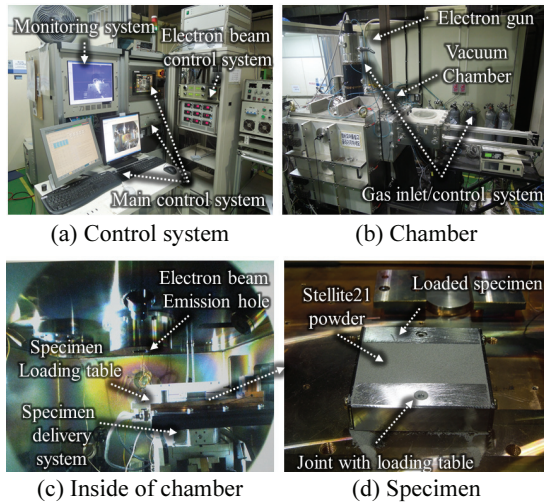


Fig. 1 Set-Up of experiments

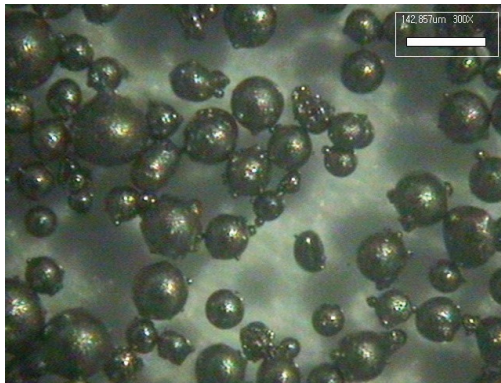


Fig. 2 Morphologies of the stellite21 powder

Table 1 Thermal and electrical properties

Material	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/m·k)	Specific heat (J/g °C)	Electrical resistivity (10 ⁻⁵ ohm·cm)
SM45C	7.85	49.8	0.486	1.62
Stellite21	8.31	14.7	0.423	8.73

험에 사용된 전자빔 설비는 한국생산기술 연구원이 보유한 최대 출력 5.0 kW를 가지는 플라즈마 전자빔 표면처리 시스템을 사용하였다. 시편 장착부에 분말 도포가 가능한 시편을 장착한 후 실험을 수행하였다. 실험중 진공 챔버의 진공도는 10⁻³ torr 수준을 유지 하였다. 진공챔버내 분위기 가스는 질소를 사용하였다. 전자빔은 Fig. 1(a)와 같은 전자빔 제어시스템을 이용하여 제어하였다.

Table 2 Chemical compositions (wt %)

Material	C	Fe	Mn	Co	Cr
SM45C	0.42-0.50	98.5-99.0	0.60-0.90	-	-
Stellite21	0.25	1.5	-	62.2	27.0

Table 3 Conditions of powder spreading experiments

Π (W)	v (mm/s)	Φ (A)	T (mm)
30-450	0-10	0.30-1.10	0.5

Table 4 Conditions of powder heating experiments

Π (W)	v (mm/s)	Φ (A)	T (mm)
180	0	0.50-0.65	0.5

2.2 분말 비산 특성 및 분말 가열 실험 방법

전자빔을 이용하여 Stellite21 분말을 예열하기 위해서는 분말 비산이 발생하지 않는 전자빔 조사 조건 도출이 필요하다. 이 연구에서는 분말 비산이 발생하지 않는 전자빔 조사 조건을 도출하기 위하여 전자빔 조사 조건에 따른 분말 비산 특성 실험을 수행하였다. 분말 비산 특성 실험 변수로는 전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 시편 이송 속도를 선택하였다. 분말 비산 특성 실험에 사용된 실험 변수별 실험 수행 범위는 Table 3과 같다.

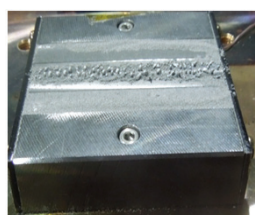
전자빔을 이용한 Stellite21 분말 가열 특성 실험을 수행하였다. 실험 범위는 분말 비산 특성 실험 결과를 이용하여 도출하였다. 분말 가열 특성 실험에서는 전자빔 출력 및 시편 이송 속도를 고정시키고, 전자빔 집속 전류를 변화 시키면서 실험을 수행하였다. 분말 가열 특성 실험에 사용된 실험 변수와 실험 변수별 적용 범위는 Table 4와 같다.

위 두가지 실험들에 사용된 분말도포 두께는 0.5 mm 이다.

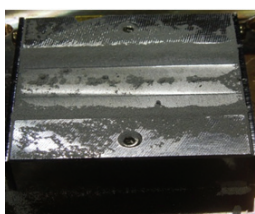
3. 결과 및 고찰

3.1 분말 비산 특성 분석 및 고찰

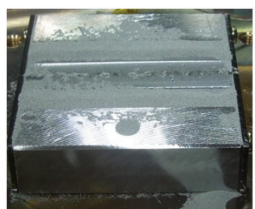
Fig. 3은 분말 비산 특성 실험 결과이다. Fig. 3(a)는 전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 시편 이송 속도가 각각 450 W, 1.10 A 및 10 mm/s인 조건의 실험 결과이다. 이 조건에서는 대부분의 분말이 비산되고, 일부 분말은 용융되어 Fig. 4와 같이 방울 형상으로 시편에 적층 되었다. Fig. 5는 Fig. 3(a) 조건에서 발생하는 분말 비산 현상을 실시간으로 촬영한 결과이다. 분말 비산 현상의 실시간 분석 결과 분말에 전자빔이 조사된 직후, 폭발 현



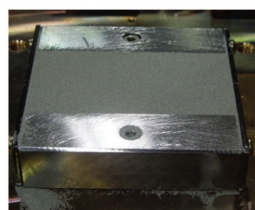
(a) $\Pi = 450 \text{ W}$, $\Phi = 1.10 \text{ A}$ and $v = 10 \text{ mm/s}$



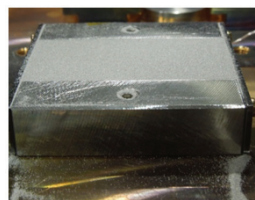
(b) $\Pi = 225 \text{ W}$, $\Phi = 0.80 \text{ A}$ and $v = 10 \text{ mm/s}$



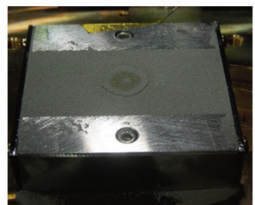
(c) $\Pi = 150 \text{ W}$, $\Phi = 0.30 \text{ A}$ and $v = 10 \text{ mm/s}$



(d) $\Pi = 30 \text{ W}$, $\Phi = 0.30 \text{ A}$ and $v = 0 \text{ mm/s}$



(e) $\Pi = 100 \text{ W}$, $\Phi = 0.30 \text{ A}$ and $v = 0 \text{ mm/s}$



(f) $\Pi = 180 \text{ W}$, $\Phi = 0.50 \text{ A}$ and $v = 0 \text{ mm/s}$

Fig. 3 Results of powder spreading experiments

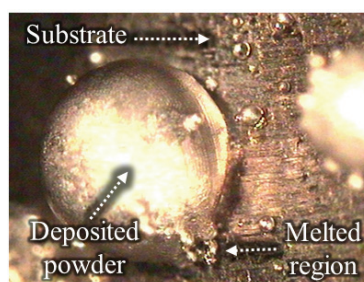
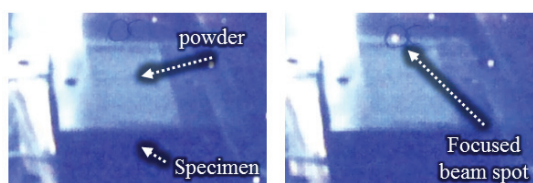
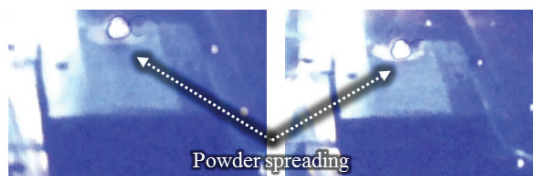


Fig. 4 Morphologies of deposited powder



(a) Before powder spreading



(b) After powder spreading

Fig. 5 Monitored powder spreading phenomenon

상처럼 갑자기 분말이 비산되는 것이 관찰 되었다. 또한 이러한 갑작스런 분말 비산 현상은 시편 이동 중 주기적으로 반복되는 것을 알 수 있었다.

Figs. 3(b)와 3(c)는 시편 이송 속도를 Fig. 3(a)의 조건과 같이 10 mm/s로 고정하고, 전자빔 출력을 각각 225 W와 150 W로 감소 시킨 경우의 분말 비산 특성 실험 결과이다. 빔집속 전류는 전자빔 출력을 고려하여 각각 0.80 A와 0.30 A로 설정하였다. 이 실험 결과 Figs. 3(b)와 3(c)와 같이 분말 비산 특성은 Fig. 3(a)의 조건과 거의 유사하게 나타났다. 그러나 전자빔 출력이 감소 할수록 용융되어 방울 형상으로 시편에 적층되는 분말의 양도 감소 하였다.

이 결과들로부터 전자빔 시편 이송 속도가 10 mm/s 이고 전자빔 출력이 150-450 W이며 빔 집속 전류가 1.10-0.30 A 일 경우 모든 조건에서 분말 비산이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 조건들에서는 비산되는 분말의 양과 용융되어 방울 형상으로 시편에 적층 되는 분말의 양은 전자빔 출력에 매우 의존적인 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 5와 같이 전자빔이 분말에 조사됨과 동시에 비산

현상이 발생하므로, 이송속도가 분말 비산 현상에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 시편 이송속도가 각각 30 W, 0.30 A 및 0 mm/s 일 경우, Fig. 3(d)와 같이 분말 비산이 발생하지 않았다. 또한, Fig. 3(e)와 같이 전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 시편 이송 속도가 각각 100 W, 0.30 A 및 0 mm/s 인 경우에도 실험중 분말 비산 현상이 관찰되지 않았다. 전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 시편 이송 속도가 각각 180 W, 0.50 A 및 0 mm/s 인 경우는 Fig. 3(f)와 같이 분말 비산이 발생하지 않았으며, 전자빔이 조사된 영역에 그을림이 발생하였다. 이 결과들로부터 분말 비산 현상은 전자빔 출력과 전자빔 집속 전류에 의존적임을 알 수 있었다. 또한 동일한 전자빔 출력 조건에서 전자빔 집속 전류를 감소 시킬 경우 단위 면적당 작용하는 전자빔의 에너지 강도가 감소되어 분말 비산 현상이 감소되는 것을 알 수 있었다.

이 분말 비산 특성 실험 결과들로부터의 비산 없이 분말을 가열하기 위한 전자빔 출력과 집속 전류 범위를 도출하였다. 도출된 무 비산 가열 조건은 전자빔 출력과 전자빔 집속 전류가 각각 180 W 및 0.50 A 수준일 경우 이었다.

3.2 가열 특성 분석 및 고찰

분말 비산 특성 실험을 통하여 도출된 분말의 비산이 발생하지 않고 분말을 가열할 수 있는 전자빔 조사 조건을 이용하여 분말 가열 특성 실험을 수행하였다. Fig. 6은 분말 가열 특성 실험 결과이다.

Fig. 6(a)는 전자빔 출력이 180 W 이며 전자빔 집속 전류가 0.50 A 일 때 60 초 동안 가열한 결과이다. 이 조건에서는 전자빔이 조사된 영역에 그을린 듯한 영역이 발생하였다. 또한 이 조건으로 가열된 영역에서는 Fig. 7(a)와 같이 작은 크기의 분말이 일부 소결되는 약한 소결 상태의 가열 영역이 생성되었다. Fig. 6(b)는 전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 가열 시간이 각각 180 W, 0.57 A 및 60 초 일때의 분말 가열 실험 결과이다. 이 조건에서는 그러나 Fig. 6(a)과 비교할 때 전자빔 집속 전류를 증가함에 따라 소결 및 그을린 흔적의 영역이 더 크게 나타났다. 이 현상은 전자빔 집속 전류 증가로 인하여 단위면적당 전자빔 강도가 증가하여 단위 체적당 분말 가열 에너지가 증가하였기 때문으로 사료된다.

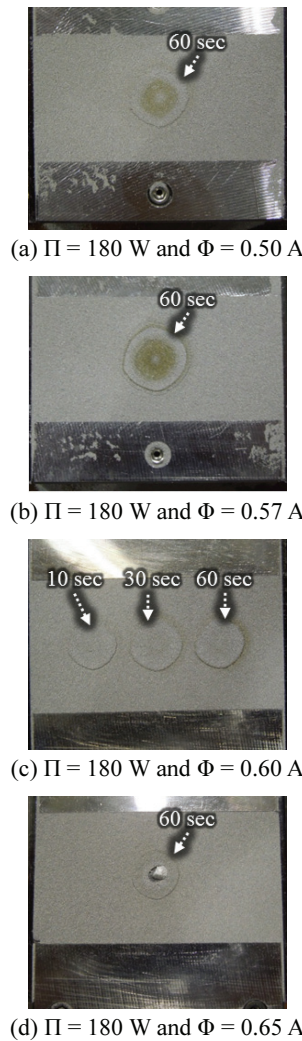


Fig. 6 Results of powder heating experiments

Fig. 6(c)는 전자빔 출력이 180 W 이며, 전자빔 집속 전류가 0.60 A 일 때, 각각 10 초, 30 초 및 60 초 동안 분말을 가열한 결과이다. 그 결과 10 초 이상 가열 하였을 때 가열 영역에 Fig. 7(a)와 같이 약한 소결 상태가 나타나는 것으로 관찰되었다. 분말 가열시간을 60 초로 증가시켜도 가열 영역의 결함은 가열 시간 10 초 일때와 거의 유사한 약한 소결 상태를 유지하였다. 그러나 전자빔 출력이 180 W 이고 전자빔 집속 전류가 0.65 A 이며 가열 시간 60 초 인 경우에는, Fig. 6(d)와 같이 전자빔이 조사되어 가열된 영역의 일부는 용융되고 그 외 영역은 소결되는 것이 관찰되었다. 이 현상은 전자빔의 에너지 분포가 가우시안 (Gaussian)

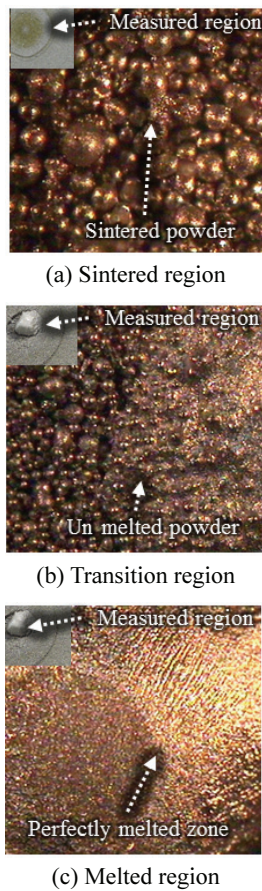


Fig. 7 Morphologies of powder after powder heating test

분포를 가짐에 따라 에너지 밀도가 높은 중앙 영역이 그 외 영역보다 더 많이 가열되어 용융되어 중앙 영역에서는 용융 현상이 발생하고 그 외 영역에서는 소결 현상이 발생하였기 때문에 생각된다. 전자빔 출력이 180 W 이고 전자빔 집속 전류가 0.65 A 이며 가열 시간 60 초로 가열된 시편의 가열부 결합 특성을 분석한 결과, Fig. 7과 같은 소결 영역, 소결/용융 천이 영역 및 완전 용융 영역이 모두 나타났다.

분말 가열 실험 결과들로부터 도포된 분말의 약한 소결을 얻기 위한 적정 전자빔 집속 전류를 0.60 A 선정하였다.

3.3 적정 예열공정 도출 및 예열층 생성

분말 비산 특성 실험과 분말 가열 실험의 결과들을 이용하여 Stellite21 분말 예열을 위한 공정 조건을 Table 5와 같이 도출하였다.

Table 5 Proper conditions for pre-heating of Stellite21 powder using electron beam

Π (W)	v (mm/s)	Φ (A)
180	0.5	0.60

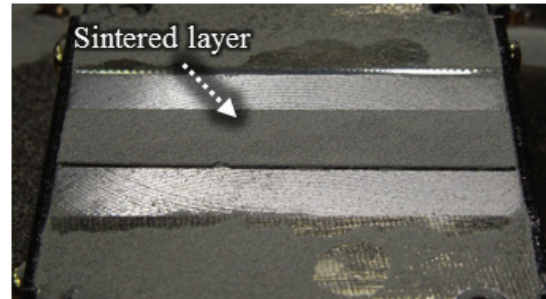


Fig. 8 Results of pre-heating process using a proper condition

이 분말 예열 조건을 이용하여 Stellite21 분말 예열 실험을 수행하였다. 이 실험에서 분말 도포층 두께는 0.5 mm 이며, 실험을 위한 기저부 형상은 분말 비산 특성 및 가열 특성 실험 시편과 동일하다. 분말 예열 실험 결과, Fig. 8과 같이 폭 11 mm의 예열된 소결층을 생성할 수 있었다. 이 예열에 의한 소결층은 기저부와 매우 약한 결합이 되어 있어 손쉬운 제거가 가능 하였다. 또한 Stellite21 분말 사이에는 분말 비산력을 충분히 이겨낼 수 있도록 소결이 이루어진 것을 관찰 할 수 있었다. 이 실험 결과로부터 도출된 적정 예열 조건을 적용할 경우, 분말 비산이 최소화되는 Stellite21 분말 소결층이 생성됨을 알 수 있었다.

4. 결론

이 연구에서는 실험적 접근을 통하여 전자빔을 이용한 Stellite21 분말의 예열공정에 관한 기초 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 전자빔 출력, 전자빔 집속 전류 및 시편 이송 속도가 분말 비산 특성에 미치는 영향을 분석/고찰하였다. 분말 비산 특성은 전자빔 출력과 전자빔 집속 전류에 매우 의존적임을 알 수 있었다. 그러나 시편 이송 속도가 분말 비산에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 이 고찰 결과로부터 분말 비산이 발생하지 않는 전자빔 출력과 전자빔 집속 전류 범위를 도출할 수 있었다.

둘째, Stellite21 분말 가열 특성 실험을 수행하여, 전자빔 집속 전류에 따른 분말 가열 특성 변화를 분석 하였다. 그 결과 적정한 소결 특성이 나타나는 전자빔 집속 전류를 도출할 수 있었다.

셋째, 분말 비산 실험과 분말 가열 실험 결과를 이용하여 적정 Stellite21 분말 예열공정 조건을 도출 하였다. 또한 이 예열 공정 조건을 이용하여 예열층 생성 실험을 수행하였다. 예열층 생성 실험 결과, 도출된 예열공정을 적용할 경우 분말 비산이 발생 하지 않고 기저부와 분말사이 및 분말간 적정 결합력을 가진 예열층이 생성됨을 알 수 있었다.

추후, 추가적인 실험과 해석을 통하여 다양한 예열조건에 따른 특성들을 분석하고 비산이 발생 하지 않으면서 분말을 빠르게 예열할 수 있는 예열공정조건을 도출할 예정이다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부의 지원을 받아 수행되고 있는 산업핵심기술개발사업인 “전자빔을 이용한 고융점 초합금 쾌속생산공정 원천기술개발 (과제번호: 10051336)” 과제의 내용 중 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

REFERENCES

- Ahn, D. G., “Application of 3D Printing Technology in Mold Industry,” *Journal of the Korean Society Mechanical Engineers*, Vol. 54, No. 4, pp. 46-51, 2014.
- Ahn, D. G., Kim, S. H., and Lee, H. J., “A Preliminary Study on the Application of Three-Dimensional (3D) Printing Technologies to Hot Bulk Forming Processes - Example of Preform Design and Investigation of Hot-Working Tool Steel Deposited Surface,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 12, pp. 1093-1100, 2014.
- Choi, S. K., “3D Printing Technologies and Architectural Application,” *Architectural Research*, Vol. 58, No. 2, pp. 17-25, 2014.
- Park, K., “Applications of 3D CAD and 3D Printing in Engineering Design Education,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 12, pp. 1085-1091, 2014.
- Choi, J. W. and Kim, H. C., “3D Printing Technologies - A Review,” *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8, 2015.
- Milberg, J. and Sigl, M., “Electron Beam Sintering of Metal Powder,” *Production Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 117-122, 2008.
- Kahnert, M., Lutzmann S., and Zaeh, M. F., “Layer Formation in Electron Beam Sintering,” *Proc. of 18th Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 88-99, 2007.
- Bailey, A., “Electrostatic Phenomena during Powder Handling,” *Powder Technology*, Vol. 37, No. 1, pp. 71-85, 1984.
- Harrysson, O. L., Cansizoglu, O., Marcellin-Little, D. J., Cormier, D. R., and West, H. A., “Direct Metal Fabrication of Titanium Implants with Tailored Materials and Mechanical Properties Using Electron Beam Melting Technology,” *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 28, No. 3, pp. 366-373, 2008.
- Sigl, M., Lutzmann, S., and Zäh, M., “Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering,” *Proc. of 17th Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 397-405, 2006.
- Matweb, “Kennametal Stellite Stellite® 21,” <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3de3c769afb54af7a8647e117cef0d18> (Accessed 22 April 2016)
- Matweb, “AISI 1045 Steel, Quenched and Tempered to 500 HB,” <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d539dceea38c44ef982a90735e80d348> (Accessed 22 April 2016)