

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.5.239>
JIIBC 2019-5-33

분말적층용융 기술을 활용한 산업용 중자 제작

Production of Casting Cores using Powder Bed Fusion Techniques

최진용*, 신승중**

Jin-Yong Choi*, Seung-Jung Shin**

요약 기존의 주조 방식은 긴 제작 시간과 많은 비용이 소모되며, 즉각적인 디자인 수정이 불가능하여 다변화하는 현대 사회에 대응하기 어려웠다. 때문에 주조 산업은 새로운 대안이 필요했으며 그 중 하나가 적층 제조 기술과의 접목이다. 적층제조기술에는 7가지가 있으나 본 논문에서는 PBF를 활용한 중자 제작을 살펴보고자 한다. 현재의 적층 제조 기술 장비들은 대부분 외산 장비들로 기능 활용과 서비스의 제약이 따르고 있어서 장비의 국산화가 필요하였고 장비의 개발과 함께 기술 활용의 내용을 담았다. 각 장에서는 PBF의 장비 개발 단계 및 소재 적용과 변수 설정에 대해서 서술하고 있으며, 최종적으로 기술을 활용한 산업용 중자 개발의 성공과 특성에 대한 정보를 보여주고 있다.

Abstract Traditional casting methods require long production lead time and high cost while not accommodating design changes easily. One of the technological alternatives to improve casting method to meet diversifying needs is Additive Manufacturing (AM). Among the 7 AM techniques, Powder Bed Fusion (PBF) is deemed most appropriate for casting applications. Currently, most AM machines are imported; therefore limiting the scope of available services and applications. This paper explores the domestic development of AM machines as well as the applications in casting. Each chapter describes development phases of PBF machines, applicable materials and parameter settings, while the last chapter illustrates a successful case of additive manufacturing industrial casting cores.

Key Words : 3D Printing, Additive Manufacturing, Casting, Powder Bed Fusion, Selective Laser Sintering

1. 서 론

4차 산업으로 접어들면서 시장 변화의 가속화와 모델의 다변화로 인해 제품의 수명주기가 짧아지고 있다. 이러한 시대에 대처하기 위해서는 제품 개발의 시간을 단축하고 개발 공정을 합리화할 필요성이 있다. 특히 주조 산업과 같이 수개월이 소요되는 기존의 전통적인 제조 공법들로는 더 이상 시장 변화 속도를 따라갈 수 없다.

이런 전통적인 사형주조 방식의 복잡한 제작과정의 단순화를 위해 제안되는 기술이 바로 적층 제조 (Additive Manufacturing) 기술이다. 이 기술은 부가적인 전문가의 작업이나 치구 없이 오직 CAD데이터로부터 제작이 가능하다는 점 때문에 개발 시간을 단축시킬 수 있다. 그 중에서도 분말적층용융 기술과 적층제분사 기술의 경우, 사용 소재의 범위가 넓어 산업 활용 접근성이 용이하여 주목을 받고 있다. 다만 해외 기술의존도가 높으며 헤드

*정회원, 한세대학교 대학원 IT 융합학과

**중신회원, 한세대학교 ICT융합학과

접수일자: 2019년 9월 23일, 수정완료: 2019년 10월 3일

게재확정일자: 2019년 10월 4일

Received: 23 September, 2019 / Revised: 3 October, 2019

Accepted: 4 October, 2019

**Corresponding Author: expersin@hansei.ac.kr

Dept. of IT, Hansei University, Korea

시스템과 레이저 시스템이 고가라는 단점이 있다. 적층 제조 기술의 종류에는 제조 공법에 따라 여러 가지가 존재하며 각 방식의 주조산업에 대한 적합성에 대해서는 아직까지 보고된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 기존의 사형주조 방식을 대체 가능한 적층 제조 기술들을 찾아내는 것을 목표로, 각 방식을 적용한 장비와 적용 소재를 개발하고 적합한 공정 파라미터를 찾아 출력한 결과물과 특성을 비교하여 적층 제조 기술의 주조 공정 적합성을 확인하고자 한다.

II. 적층 제조 기술

3D 프린팅 기술은 재료의 종류와 적층하는 방식에 따라 다양한 기술유형이 존재한다. 특히 ASTM에서는 광중합 (Vat Photopolymerization), 재료분사 (Material Jetting), 재료압출 (Material Extrusion), 분말적층용융 (Powder Bed Fusion), 접착제분사 (Binder Jetting), 고에너지직접조사 (Directed Energy Deposition), 판재적층 (Sheet lamination)의 7가지 방식으로 나누고 있으며 각각의 방식에서 에너지 소스에 따라 여러 기술들을 분류하고 있다.^[1] 경제성, 실현 가능성, 효율성 등 다양한 부분을 고려한 결과, 분말적층용융 방식을 활용하여 산업용 중자를 생산하기로 결정하였다. 분말적층용융 방식은 베드에 도포된 분말 (Powder)에 선택적으로 레이저를 조사, 소결하고 분말을 도포하는 공정을 반복하여 적층하는 방식으로 조형 속도가 빠르고 다양한 응용 분야 및 활용 가능 소재가 광범위하기 때문에 파급효과가 클 것으로 판단된다. 하지만 레이저와 같은 고가의 부품이 사용되며 후처리 공정이 필요하고 사용 소재에 따라 가열 온도와 레이저 변수를 조절해야하기 때문에 파라미터 설정 작업이 까다로운 단점이 있다.^[2]

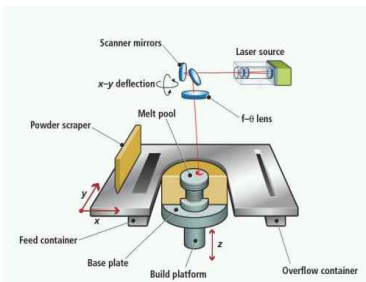


그림 1. 분말적층용융 방식의 모식도.^[3]
Fig. 1. Schematic diagram of Powder Bed Fusion.^[3]

III. 장비 개발 및 적용

1. 적층 제조 장비 개발

현재 세계 시장에서 적층제조 기술은 미국과 독일이 47.2%를 차지하고 있으며, 그 중 Powder Bed Fusion은 EOS사가 대표격으로 뽑히고 있다.^[4] 이들의 기술력은 우수하지만 자국 보유 기술의 유출을 막기위한 용도로 장비의 필수 기능들에 대해 보안을 걸어두고 있어 사용에 제약이 따른다.

또한 장비 자체가 워낙 고가인데다 기술 지원 및 서비스의 한계로 사용이 불편하다. 이러한 단점들로 인해 외산장비를 사용하여 적합한 중자를 생산하기에는 어려움이 있어 실험 장비를 직접 제작하여 모든 기능 사용에 대한 한계를 없애려고 한다. 이를 통해 더욱 품질이 우수한 산업용 중자를 생산할 수 있을 것으로 예상된다. 더 나아가 기존의 외산 장비를 대체할 수 있는 장비 국산화의 초석이 될과 동시에 비용 절감, 수출 경쟁력 상승 등의 경제적인 효과를 볼 수 있다.

분말적층용융 장비에서 가장 핵심적인 부품은 레이저와 스캔 헤드이다. 레이저는 원료 분말을 녹이는 수단으로서, 사용하는 소재에 적합한 파장대인 레이저를 선별해야한다. 또한 스캔 헤드를 설치하여 레이저가 정확한 위치에 도달할 수 있도록 설정하여야 한다. 기구부 쪽은 실제 조형이 진행되는 베드를 움직이기 위한 Z축과 파우더 공급 및 도포를 위한 X축 두 개의 구동부가 필요하다. 본 실험 장비는 CO2 레이저와 2m/s까지 가속이 되는 스캔 헤드를 장착하였고 각 축은 정밀한 이송을 위한 볼 스크류 타입 액츄에이터를 설치하였으며 출력 속도를 향상시키기 위한 목적으로 양방향 도포 시스템을 도입하였다.

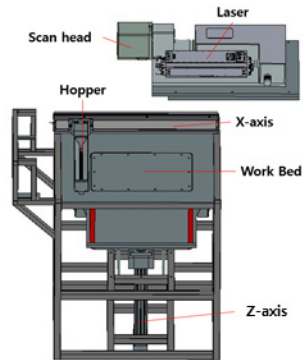


그림 2. 분말적층용융 장비 구조도
Fig. 2. Mechanical structure of PBF machine

공정 프로세스는 그림 2의 Work bed가 내려가면 Hopper가 반대쪽 끝으로 이동하면서 분말을 도포하고 이후 레이저가 Scan head를 통해 조사가 되는 과정을 반복하면서 출력물을 형성한다.

표 1에 개발한 실험 장비와 EOS사의 S750장비를 비교하였다. 출력할 수 있는 크기는 최대한 기준과 동일하도록 유지한 채로 장비의 무게는 대폭 감소시켰다. 적층 제조 기술 장비에서 가장 고가의 부품은 레이저로써 레이저의 개수가 증가할수록 출력 속도는 빨라지지만 가격 부담이 증가한다. 따라서 장비의 비용 절감을 위해 기존의 듀얼 레이저에서 싱글 레이저로 변경하였다. 싱글 레이저의 경우, 큰 영역의 레이저 포커스를 보정해야 하는 문제가 발생하게 된다.

이 부분에 대해서는 Vario scan 시스템을 도입하여 해결하였다. 또한 싱글 레이저를 사용함으로써 듀얼 레이저를 사용할 때 보다 출력 속도가 느려지는 부분은 변수 값 최적화와 양방향 리코팅 시스템 등 여러 개선 방법들을 찾아 적용하였고 만족스러운 결과가 나왔다.

표 1. 개발 장비와 외산장비(S750)의 성능비교
 Table 1. Comparison of key attributes (vs. EOS S750)

	Unit	개발 장비	EOS社. S750
장비 크기	mm	2000*1220*1920	1420*1400*2150
장비 무게	kg	500	1050
출력 크기	mm	600*400*400	720*380*380
출력 속도	cm ³ /h	1000 ~ 2500	2500
적층 두께	μm	0.2 ~ 0.25	0.2
Focus		Vario scan	F-theta lens
Laser		Single Laser	Dual Laser

2. 적층 제조 소재 개발

적층 제조 기술은 기존 주조 공법과는 제작 방식이 완전히 다른 새로운 개념이기 때문에 적층 제조 기술을 활용하여 중자를 제작하기 위해서는 기술 사용에 적합한 소재가 공급되어야 한다. 적합한 소재가 존재하지 않는다면 개발이 우선 진행되어야 한다.

분말적층용 장비에는 순간적인 레이저 열에 의해 분말과 분말을 결합시킬 수 있는 접착제 역할을 하는 재질이 필요하며, 모래는 레이저 열에 의해 변형이나 소실이 발생해서는 안 된다. 또한 사용되는 레진은 수 마이크로 초라는 단시간에 주입되는 에너지로도 녹을 수 있어야 한다. 이러한 원리를 통해 특수 레진을 모래 표면에 균일

한 두께로 코팅하게 되면 분말적층용에 사용이 가능한 소재가 된다. 사용한 소재의 형상은 그림 3에서 확인할 수 있으며 특성은 표 3에 나열하였다.

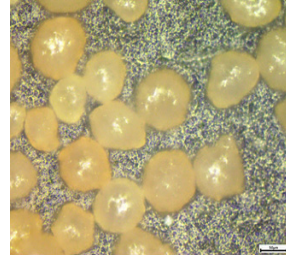


그림 3. Bowder Bed Fusion용 분말
 Fig. 3. PBF powder particles

표 3. 개발 소재의 특성
 Table 3. Key properties of powders used

		RCS
Type	Unit	PBF
Density	g/cm ³	2.7
Melting point	℃	1825
Stick point	℃	84
Shape		Spherical
Average size	μm	85.9

3. 적층 제조 공정 개발

제품의 품질에 영향을 미칠 수 있는 요소는 상당히 많으며, 각각의 변수들은 독립체계가 아닌 상호적 관계로 이뤄져있어 이들의 조합에 따라 제품의 품질이 결정된다. 따라서 적층 제조 기술로 제품을 생산하기 위해서는 최적화된 셋팅 값이 필요하다. 레이저와 소재의 상호관계도 알아야 한다. 소재의 용점은 몇 도인지 레이저 열에 의해 소재가 얼마나 변형이 일어나는지 수축은 어느 정도 일어나는지 그리고 광 흡수율은 어떻게 되는지 등의 광 및 열적 특성을 알아야지 적절한 레이저 파라미터를 결정할 수 있게 된다. 너무 많은 에너지가 주입될 경우 레진이 모두 기화되어 결합이 이뤄지지 않게 된다. 레이저 및 스캔 파라미터만 해도 레이저 빔 스팟 사이즈, 레이저 초점 거리, 레이저 출력, 마킹 속도, 점프 속도, 해칭 간격, 레이어 두께 등 그 수가 10여 가지가 넘으며, 이들의 조합이 어떻게 이뤄지는지에 따라 제품 출력이 제대로 될 수도 혹은 안 될 수도 있다. 모든 변수는 실험을 통해 최적 값을 알아내야만 한다. 아무리 품질이 우수한 제품을 출력한다 할지라도 출력 속도가 느리다면 적층 제조 기술

의 활용가치가 떨어진다. 때문에 프로세스 값을 설정할 때는 제품의 특성과 출력 시간의 적정선을 설정하여야 한다. 본 연구에서 많은 테스트를 진행하였으며, 가장 최적화된 결과 값을 표 4에 나타내었다.

표 4. 주요 파라미터 설정 값
Table 4. Key test parameters

	Unit	Value
Laser power	W	50 ~ 70
Scan speed	mm/s	1000 ~ 2000
Hatching distance	mm	0.3 ~ 1.0
Layer thickness	mm	0.2 ~ 0.25

IV. 실험 및 결과

출력 특성에 영향을 주는 주요 인자는 레이저 세기, 스캔 속도, 해칭 간격이다. 주입되는 에너지가 클수록 소결 범위가 넓어지고 정밀도가 떨어지나 강도는 올라간다. 반대로 주입되는 에너지가 작으면 소결 범위가 좁아 정밀도는 올라가나 강도가 떨어진다.

레이저의 출력이 40W 이하에서는 소결이 제대로 이뤄지지 않았으며, 생산 속도를 고려하여 스캔 스피드 1000mm/s 이하는 실험 대상에서 제외하였다. 파라미터를 조합하여 여러 테스트를 진행한 결과의 일부를 그림 4에 나타내었다. 레이저 세기가 65W, 스캔 스피드가 2000mm/s의 조건에서 해칭 간격만 변경하였을 때 출력물의 품질을 비교하는 실험이다. 해칭 간격이 0.5mm 이하에서는 레이저 소결 범위가 오버랩 (Overlap)되어 에너지가 과하게 주입되었으며, 해칭 간격이 0.7mm 이상에서는 간격이 너무 넓어서 분말 간 접합이 제대로 이뤄지지 않았다. 이 실험에서는 해칭 간격이 0.5 ~ 0.7mm 일 때 우수한 품질의 출력물을 얻을 수 있었다. 분말적층용용 방식은 열을 사용하기 때문에 소재의 변형을 수반한다. 소재의 수축 정도는 레이저 파라미터 설정 값에 따라 다를 수 있으나 최소 에너지원에서도 수축이 발생하는 것을 발견할 수 있었다. 이는 가공 중에 열에 의한 부피 변화로 인해 발생하는 경우와 소결 과정에서 발생하는 수지 (Resin)의 수축 정도가 달라 발생하게 된다.^[5] 수축 및 변형은 합형 과정에서 큰 결함이 될 수 있기 때문에 발생해서는 안 되는 부분이다. 해결책으로 파트에 지지대를 제작하여 물리적인 힘으로 잡아줌으로써 수축 또는 변형이 되는 현상을 방지할 수 있다.

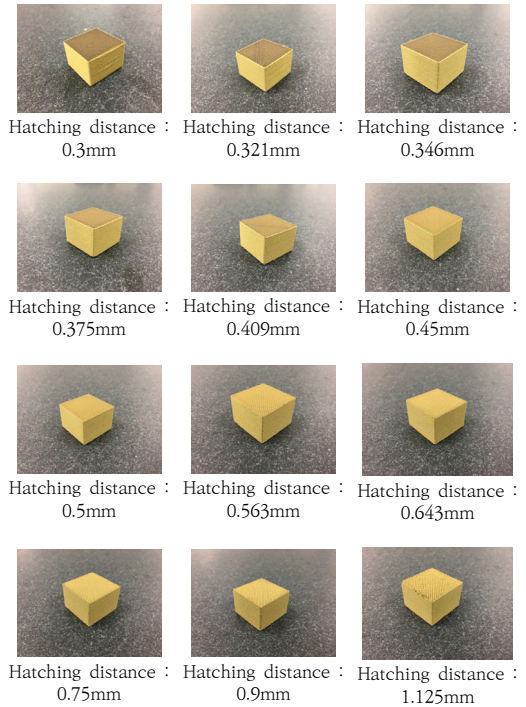


그림 4. 해칭 간격에 따른 출력 결과
Fig. 4. Test results by hatching distances

출력한 파트들이 실제 주조에 쓰일 수 있는지 확인하기 위해서 시편 형상의 샘플을 제작하여 기계적 특성을 알아보았다. 출력 직후 바로 적용할 수 있는지에 대해서는 강도가 너무 약하여 바로 사용은 불가능 하였으며 열처리가 따로 진행되어야 한다는 결론이 나왔다. 또한 열처리 조건에 따라 출력물의 강도가 다를 수 있기 때문에 열처리 조건에 따른 기계적 특성을 알아본 결과, 이상적인 조건에서 평균 항절 강도가 5.44 MPa로 나왔다. 일반적으로 주조에서 요구하는 기계적 특성(5 MPa)에 만족하므로 주조 적용에는 문제가 없다고 판단된다.

표 5. 열처리 조건에 따른 항절 강도 결과
Table 5. Tensile strength by heat treatment parameters

	후처리	측정치
1-1	200°C/3h	5.12
1-2		4.88
1-3		5.04
1-4		4.52
1-5		4.92
2-1	200°C/4h	5.03
2-2		5.22

2-3		5.26
2-4		6.59
2-5		5.53
3-1	180℃/3h	4.92
3-2		5.12
3-3		4.74
3-4		4.47
3-5		4.57
4-1	180℃/4h	5.42
4-2		5.21
4-3		5.57
4-4		6.02
4-5		5.46

위 실험에서 얻은 최적 조건을 통해 중자를 출력하고 열처리를 한 뒤, 주조 테스트를 진행하였다. 그림 5는 분말적층용융 방식을 활용하여 출력한 중자의 모습과 주물이다. 실제 제품 디자인에서부터 생산까지 적층 제조 기술로 제작한 중자의 제작 소요 시간이 기존 공법에 비해 수 주를 앞당기는 결과를 보였다. 다만, 주물의 표면이 좋지 않아 산업에 바로 적용하기에는 어렵다고 판단되며 기계가공을 통한 표면처리가 병행이 되어야 할 것으로 보인다.

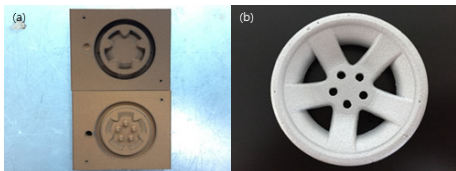


그림 5. 분말적층용융으로 제조한 중자(a) 및 주물(b)
 Fig. 5. Core and casted output using PBF

V. 결 론

적층 제조 기술을 활용할 경우, 기존의 주조 공정 방식의 시간 감소 효과는 물론 모델의 자유화로 시장 경쟁력을 높일 수 있다. 적층제조기술의 경우, 장비, 환경, 소재의 상관관계를 이해하고 모든 변수를 통제해야하며 적절한 파라미터를 설정해야 한다. 본 실험에서 활용한 분말적층용융의 경우 평균 입도 85um의 소재를 기준으로 레이저 세기를 65W, 스캔 속도를 2000mm/s, 해칭 간격은 0.7mm 에서 이상적으로 출력이 진행되었다. 기술 특

성상 열원을 사용하기 때문에 열에 의한 제품의 수축 및 변형이 발생하게 된다. 이 부분에 대해서는 다른 조치가 필요해 보인다. 또한 출력 직후에는 기계적 특성이 부족하여 바로 적용이 불가능하였다. 소재에 맞는 열처리를 병행해야하며, 200도에서 4시간 정도 열처리를 진행했을 때 가장 이상적인 강도를 얻을 수 있었다. 가격적인 측면에서는 레이저 시스템이 상당히 고가이기는 하나 장기적으로 봤을 때 생산속도의 향상으로 기존 공법보다 가격 경쟁력이 좋다고 판단된다.

References

- [1] ASTM International Committee F42 on Additive Manufacturing Technology defines AM as the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methods.
- [2] 3D Printing technology trends, korea creative content agency, pp. 4-8, 2013.
- [3] Global 3D printer industry technology trend analysis, KIMM, pp. 1-7, 2013.
- [4] Implemented 3D printing industry promotion in 2019, KAIT, pp. 2, 2019.
- [5] K.W. Dalgarno, T.H.C.Childs, "Finite Element Analysis of Curl Development in the Selective Laser Sintering Process, Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK
- [6] Senthilkumaran K, Pandey P M, and Rao P V M. "Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering". Materials & Design, pp. 5, 2009
- [7] Qin Dandan, Dang Jingzhi, Bai Peikang, et al. "Experimental study of selective laser sintering on the foundry coated sand. Foundry Technology", 2006
- [8] Gean V S, Priscila K, Rodrigo A P, et al. "Structure and mechanical properties of cellulose based scaffolds fabricated by selective laser sintering". Polymer Testing, pp. 6-10, 2009
- [9] Gibson and Cheung W. "Effects of Energy Density on Bonus Z, Surface Roughness and Warpage of Selective Laser Sintered Polycarbonate", Proceedings of the Eighth International Conference on Rapid Prototyping, held in Tokyo, Japan, 2000
- [10] Wulfhorst, J., Seide, G., Gries, T., Rietzel, D. Drummer, D. "Substitution of powders by ultrashort cut fibers for selective laser sintering (SLS)", 11th World Textile Conference AUTEX, Mulhouse, France, 2011
- [11] Dong-Hwan Gong, Seung-Jung Shin, "Comparative Analysis between Super Loop and FreeRTOS Methods

for Arduino Multitaskin”,

DOI : <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.6.133>

- [12] Seung-Mok Le, “Implementation of 3D Printer Using DLP for Ceramic Resin”, Journal of KIIT. Vol. 15, No. 8, pp. 95-100, Aug. 31, 2017, DOI : <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.8.95>
- [13] Suk-Jae Jung, Tae-Hee Lee, “Study of Trends in The Architecture and The Economic Efficiency of 3D Printing Technology”, Vol. 15, No. 10 pp. 6336-6343, 2014, DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.10.6336>

저 자 소 개

최 진 용(정회원)



- 한세대학교 IT융합학과 박사과정
- 주관심분야 : 3D 프린팅 산업

신 승 중(종신회원, 교신저자)



- 1988년도 세종대학교 대학원 경영학과 졸업(석사)
- 1994년도 건국대학교 대학원 전자계산학과 졸업(석사)
- 1999년도 국민대학교 대학원 정보관리학과 졸업(박사)
- 1988~1995 중경공업전문대 전자과 겸임교수
- 1995년~2003 중부대학교 정보보호학과 부교수
- 2003~현재 한세대학교 ICT융합학과 부교수
- 주관심분야 : 정보보호, 이동통신, 통신공학