

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.5.245>  
JIIBC 2019-5-34

## 접착제 분사 기술을 활용한 산업용 증자 제작

# Production of Casting Cores using Powder Binder Jetting Techniques

최진용\*, 신승중\*\*

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

**요약** 현대 주조산업에서는 적층제조기술과 같은 신기술을 도입하면서 과거에는 불가능했던 일들의 실현가능성을 보여 주고 있다. 이미 해외에서는 적층제조기술을 활용한 증자 생산 및 적용 사례가 심심치 않게 보도되고 있으며, 정부지원 하에 고유 기술들을 개발하고 시장을 확장해 나가고 있다. 반면 국내에서는 고유장비 기술은커녕 적층제조기술의 활용조차 전무한 실정이다. 이러한 상황에서 적층제조기술의 도입과 국산화는 반드시 필요하다. 본 논문의 각 장에서는 여러 가지 적층제조기술 중 접착제 분사 기술에 관련된 적층제조장비의 개발 과정에서부터 개발 장비를 활용한 산업용 증자 생산의 내용을 다루고 있으며, 실제 주조 산업의 적용 가능성에 대해서 언급하고 있다.

**Abstract** In recent years, new technologies such as additive manufacturing have been applied to casting industry, paving new ways to achieve what have traditionally been impossible. In the global market, numerous successful cases of producing cores using additive manufacturing technology have been reported, and new techniques and markets are being developed under governments' support. In Korea, however, cases of applying additive manufacturing to casting are hard to come by, not to mention domestic AM machines and related technologies. Under these circumstances, introduction of additive manufacturing technologies and customized application to domestic casting industry are required. Each chapter of this paper explores topics ranging from the development of AM machine using binder jetting technology among various AM techniques through producing industrial cores to the on-site applications in the foundries.

**Key Words** : 3D Printing, Additive Manufacturing, Binder Jetting, Casting

## 1. 서 론

현대 사회에서 전통적인 주조방식을 대체할만한 기술로 적층제조기술(Additive Manufacturing, AM)이 떠오르고 있다. 이 기술은 절삭 가공과는 반대되는 개념으

로 원 재료를 깎아서 제작하는 것이 아닌 층층이 쌓아올려 형상을 만들어내기 때문에 재료비용 절감과 제품화 단계에서 중간과정을 대체할 수 있어 개발 주기를 대폭 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그 중, 접착제 분사 방식은 시간 및 경제적인 부분에서 상당히 효율적이라고 인

\*정회원, 한세대학교 대학원 IT 융합학과

\*\*종신회원, 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](mailto:expersin@hansei.ac.kr)

Dept. of IT, Hansei University, Korea

정받고 있다. 이미 해외에서는 접착제 분사 기술을 활용하여 주조 산업에 적용한 사례들이 여러 차례 발표되고 있고 고유 기술들을 보유하고 있다. 하지만 국내에서는 접착제 분사 기술을 활용하여 주조산업에 적용한 사례에 대해 보고된 바가 드물며, 특히 접착제 분사 장비의 국산화에 대한 내용은 전무하다.

본 연구에서는 접착제 분사 장비의 국산화를 이뤄내는 것을 목표로 고유 기술을 획득하고 활용하여 산업용 중자의 생산가능성을 알아보고자 한다.

## II. 접착제 분사 장비의 국산화

### 1. 접착제 분사 원리

노즐에서 액체 상태의 경화물질을 베드 표면에 도포된 분말에 분사하여 적층하는 방식으로 컬러 잉크를 사용할 수 있어서 조형물에 다양한 색감을 입힐 수 있다는 특징이 있다. 제조 시간은 비교적 짧은 편이나 출력 후 별도의 분말 제거와 표면처리가 필요하여 후 공정 작업 시간이 소요된다.<sup>[1]</sup>

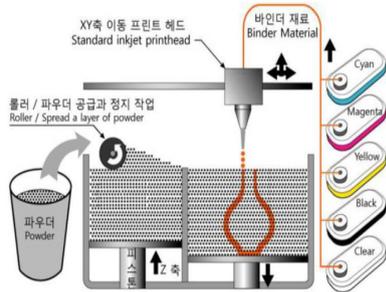


그림 1. 접착제 분사 방식의 모식도.<sup>[1]</sup>  
Fig. 1. Schematic diagram of Binder Jetting.<sup>[1]</sup>

### 2. 적층 제조 장비 개발

Binder Jetting 장비의 경우 일반적으로 사용되는 잉크젯 헤드의 적용이 가능하며 헤드의 크기 및 개수에 따라 출력 속도가 달라진다. 헤드가 크고 개수가 많을수록 한 번에 출력할 수 있는 면적이 넓어지기 때문에 그만큼 조형물의 제작 속도가 빨라진다. 헤드는 잉크 분사 방식에 따라 압전 타입을 이용한 piezo head와 열을 이용한 thermal head로 나뉘며, 각 타입은 가격과 사용 바인더의 범용성 등의 다양한 장단점을 갖는다. 프린터는 원료 분말 공급 작업을 하는 롤러와 잉크젯 헤드를 움직이는 x축 및 y축, powder의 평탄작업을 위한 롤러의 회전축,

프린트 작업이 이루어지는 build room과 build room에 원료 분말을 공급하는 feed room을 움직이는 두 z축으로 이루어져 있다.(그림 2) 잉크젯 헤드가 build room 위로 이미지를 그리면 build room이 원하는 두께만큼 내려가고, feed room은 상승하여 roller가 feed room에서부터 원료 분말을 깔고 와 build room을 채우게 된다. 이러한 과정을 수회 반복하여 이미지를 적층 하면 3D 형상의 조형물이 제작된다.

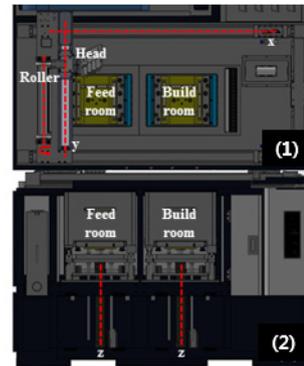


그림 2. 접착제 분사 장비 구조도.  
Fig. 2. Mechanical structure of Binder Jetting.

개발된 실험 장비는 독일의 voxeljet사의 장비와 비교해 볼 수 있다. Voxeljet사는 주조용 3D프린트 개발을 주 사업으로 하며, 대학 연구실 용의 작은 사이즈부터 세계에서 가장 큰 3D프린터를 보유한 회사이기도 하다. 이 회사의 프린터 중 본 연구에서 개발된 장비와 유사한 사이즈를 갖는 장비로는 VX200과 VX500이 있는데 표 2에 나타난 것과 같이 이 프린터들과 개발 장비는 속도와 가격면에서 그 차이를 느낄 수 있다. 각 장비가 layer thickness가 다르다는 점을 고려해 보아도, VX200장비의 경우 개발 장비대비 느린 출력 속도를 확인할 수 있다. 만 일 동일 조건이라면, 개발 장비보다 7배 느린 출력 속도를 갖는다. VX500의 경우 개발 장비와 유사한 출력 속도와 프린팅 해상도를 갖는 것을 알 수 있으나, 가격면에서 큰 차이가 난다. 두 장비 모두 piezo type의 head를 사용하는데 이로 인해 개발 장비와는 확연한 가격 차이를 갖는다. Piezo head는 고가의 프린터 head로 head자체 뿐만 아니라 thermal jet head와 달리 head내부 잉크를 순환하기 위한 별도의 부가장치 들로 인해 높은 가격을 갖는다. 또한 head에 이상이 생길 경우 교체가 힘들고, 가격적인 부담으로 인해 유의가 필요하다. 반면 개발된 장비의 thermal jet head의 경우에

는 head가 탈착 형식으로 교체가 쉽고, 가격이 저렴하여 head를 교체하기에 있어 사용자의 부담을 덜어준다.

표 1. 개발 장비와 외산장비의 성능비교  
 Table 1. Comparison of key attributes (vs. VoxelJet)

	Unit	개발 장비	VX200	VX500
장비 크기	mm	1650*1000*1700	1700*900*1500	1750*1850*2100
장비 무게	kg	500	450	1200
출력 크기	mm	300 * 420 * 250	300 * 200 * 150	500 * 400 * 300
출력 속도	l/h	1.8	0.7	3
해상도	dpi	600	300	600
적층 두께	μm	100	300	150
Head		Thermal	Piezo	Piezo

개발된 장비는 길이 12.7 mm, 노즐 300개의 thermal head를 사용하며, head 4개를 이어 50.8 mm의 인쇄영역을 갖는다. 인쇄 속도에 영향을 주는 x축의 움직임은 사용된 모터의 성능상 250~500 mm/s의 속도로 움직일 수 있으나, 500 mm/s의 속도로 움직일 경우, head 통신 속도와 출력 속도 간의 차로 잦은 출력 오류가 일어나 적정 속도는 450 mm/s로 확인된다. 출력 영역의 크기가 300 mm \* 400 mm인 점을 감안하였을 때, 전 영역을 출력하기 위해선 head는 y축으로 6회 움직여야하기 때문에 1layer 인쇄 시 6초의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 이때 이 인쇄 시간은 head의 개수를 늘려 한 번에 인쇄되는 영역의 크기를 증가시킨다면 더 단축될 수 있다.

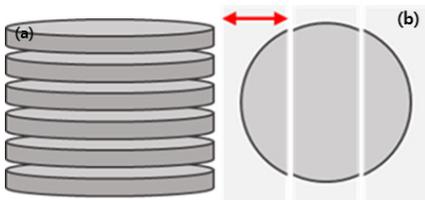


그림 3. 접착제 분사 공정 조건. 측면(a) 윗면(b)  
 Fig. 3. Printing conditions for Binder Jetting. side view(a)

### 3. 적층 제조 소재 개발

일반적으로 사형제작에는 유기 바인더를 이용하여 이루어지는데, 유기 바인더를 이용하여 제작된 주형에 쇳물을 붓게 되면 포름알데히드, 유리 페놀, 벤젠 등과 같은 유해가스가 발생하게 된다. 이러한 유해 가스는 작업자의 인체에 유해할 뿐만 아니라 쇳물이 응고될 때 기포를 발생시켜 강도 저하 및 크랙을 유발하게 된다.

이에 반해 무기 바인더는 유기 바인더와 달리 유해가스를 거의 발생시키지 않아 제품의 품질 향상 및 작업환경 개선이 가능하다. 또한 유기 바인더는 대부분 점도가 높아 잉크젯 헤드 사용이 불가능하거나 thermal head의 사용이 힘든 것에 반해 무기 바인더의 경우 저점도 바인더가 많아 head 선택의 폭이 넓다. 이러한 무기 바인더는 수분을 이용하는 만큼 유기 바인더 대비 퍼짐 현상이 두드러지기 때문에 이를 제어하는 것이 중요하다. 때문에 바인더의 점도, 표면장력, pH 등을 고려하여 적합한 바인더를 찾는 것이 중요하며, thermal head를 사용하는 만큼 바인더가 열적 안정성을 갖는 것이 중요하다.

주형을 이루는 모래의 경우 무기 바인더를 사용하는 만큼 일반 규사의 사용은 힘들기 때문에 수분과 반응할 수 있는 알루미늄 시멘트 계열의 분말을 사용하며, 분말은 흐름성을 위하여 입자가 구상 형상을 갖추어야 한다. 또한 입도가 너무 크면 정밀도에 영향을 주고 반대로 너무 작으면 흐름성에 영향을 주기 때문에 적절한 사이즈와 그 공정 조건을 찾는 과정이 필요하다.

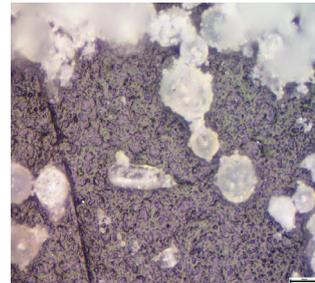


그림 4. 접착제 분사용 분말  
 Fig. 4. Binder Jetting powder particles

### III. 실험 및 결과

Binder Jetting의 경우, 치수정밀도, 표면 균일도, 강도 등의 파라미터는 바인더 포화도 (saturation)와 적층 두께의 영향을 받는다. 실험에 사용된 head는 300개의 노즐을 갖고 있고, 150개의 노즐이 4mm간격을 갖고 2열로 배열되어 있다. 이 두 행이 1/600 인치로 엇갈려 배열되어 300 혹은 600 DPI의 해상도를 갖으며, 33pl의 drop volume을 갖는다. 물론 사용되는 바인더의 특성에 따라 분사되는 양은 달라짐으로 성질에 따라 그 양을 가감해야 한다. 일반적으로 바인더 saturation level이 높으면 퍼짐 현상에 의해 치수정밀도와 표면 균일도는 감소하나 강도는 증가하고, 낮으면 반대 효과가 있

나 적정량 이하로 내려갈 경우 조형이 안정적이지 못하고 edge가 무너지거나, powder 평탄화 과정에서 이미지가 유지되지 못하고 롤러에 의해 쓸려 나가게 된다.(그림 5)

본 실험에서 300 DPI로 인쇄 시 조형이 안정적이지 못하고 표면에 무너짐이 확인되어 적정 DPI는 600으로 판단된다.(그림 6) 적층 두께는 사용 소재 (powder)에 큰 영향을 받으며, 보통 최소 두께는 powder 평균 사이즈의 150~200 %이다. 이때 적층 두께가 이보다 더 낮으면 도포 시 표면이 균일하지 못하고, 높으면 binder 흡수율에 영향을 주어 layer 간 결합이 원활하지 못하게 된다. 이 실험에 사용된 소재의 평균 입자 사이즈는 50  $\mu\text{m}$ 로, 80, 100, 150  $\mu\text{m}$ 의 적층 두께를 갖을 수 있음을 예상할 수 있다. 하지만 형상물의 출력 속도 및 정밀도를 고려하였을 때 powder 사이즈의 200 %인 100  $\mu\text{m}$ 의 적층 두께를 갖을 때 적합한 것으로 판단된다.

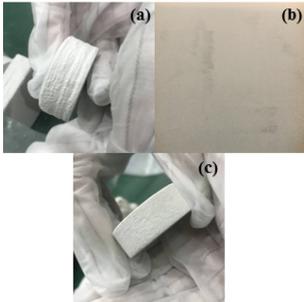


그림 5. 바인더 분사량에 따른 출력 결과 (a) 과량 (b) 미량 (c) 정량

Fig. 5. Printed objects by binder volume (a) excessive (b) insufficient (c) adequate

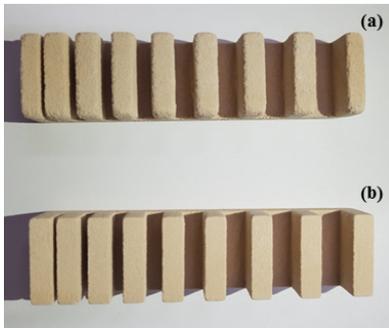


그림 6. DPI에 따른 출력 결과 (a) 300DPI (b) 600DPI

Fig. 6. Printed objects by DPI (a) 300DPI (b) 600DPI

Binder Jetting으로 출력한 제품이 주조에 사용할 수 있는지를 확인하기 위해 항절강도 테스트를 진행하였고 결과는 표 5에 나타내었다. X, Y, Z축의 길이가 각각 70 mm, 20 mm, 10 mm인 직사각형 시편을 제작하여 열처리 조건에 따라 항절강도가 어떻게 나타나는지 알아보았다. 열처리를 하지 않은 경우 2.9MPa로 나왔으며 1500도에서 19MPa로 가장 높은 강도를 보여주고 있다. 주조에 사용할 수 있는 적정 강도인 5MPa를 만족하기 위해서는 1300도 이상에서 열처리를 진행해야 한다. Powder Bed Fusion과 마찬가지로 Binder Jetting 역시, 출력된 제품을 열처리 없이 주조에 바로 사용하는 것은 불가능 하다.

표 2. 열처리 조건에 따른 항절 강도 비교

Table 2. Bending strength by heat treatment parameters

No.	Heat treatment (Temperature/Time)	Unit	Strength
1	X	MPa	2.9
2	1000/2h	MPa	1.3
3	1100/2h	MPa	1.8
4	1200/2h	MPa	3.2
5	1300/2h	MPa	7
6	1400/2h	MPa	11.2
7	1500/2h	MPa	19

출력 속도에 영향을 주는 요인은 축의 이동시간과 조형에 소요되는 시간이다. Binder Jetting의 경우는 면대면 출력의 특성을 지니고 있어 적층제조기술 안에서도 상당히 빠른 출력 속도를 자랑한다. 실제 조형 출력 속도를 알아보기 위해 100mm \* 100mm \* 100mm의 정육면체 형상의 디자인을 개수별로 출력하였을 때, 분말적층용용 방식과의 총 출력시간을 비교해 보았다. 표 3에 나타난 바와 같이 하나의 샘플을 출력할 경우에는 분말적층용용 방식이 3650초로 접착제 분사 방식보다 빠르지만, 수량이 늘어날수록 분말적층용용 방식의 소요되는 시간이 늘어가는 반면, 접착제 분사 방식은 그대로 이다. 결과적으로 5개 이상 출력하게 되면 접착제 분사 방식의 생산속도가 더 빠름을 확인할 수 있다. 따라서 대량의 중자를 생산할 경우에는 허용되는 최대 용적 안에서 접착제 분사 방식의 출력 속도가 분말적층용용 방식의 출력 속도 보다 훨씬 빠르기 때문에 효율성이 좋아진다.

표 3. 생산 수량에 따른 출력 시간 비교  
 Table 3. Printing time by printing volum per build

	Powder Bed Fusion	Binder Jetting
1 ea	3650 s	16000 s
2 ea	7300 s	16000 s
3 ea	10950 s	16000 s
4 ea	14600 s	16000 s
5 ea	18250 s	16000 s
6 ea	21900 s	16000 s

위 실험에서 얻은 최적 조건을 통해 중자를 출력하고 열처리를 한 뒤, 구조 테스트를 진행한 결과를 그림 7에 나타내었다. 1500℃가 넘는 온도를 충분히 견뎌왔으며 이후 탈사작업 또한 수월하게 진행되었다. 구조품의 특성상 표면이 우수하지는 않지만 표면 기공 및 크랙 등의 결함이 발견되지는 않았다. 표면 상태는 기계가공을 통한 후 처리를 통해 보완이 가능한 수준이다. 이를 통해 적층제조 기술을 활용한 중자가 실제 구조산업에 적용하기에 충분한 가능성을 보여주고 있다.

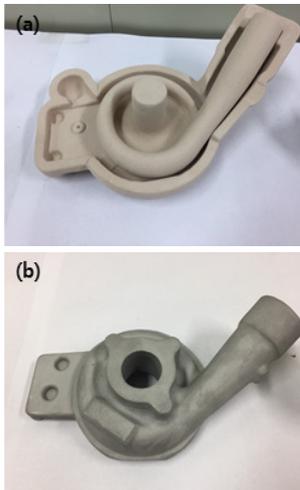


그림 7. 접착제 분사 방식으로 제조한 중자(a) 및 주물(b)  
 Fig. 7. Cores(a) and casted output(b) using Binder Jetting

#### IV. 결 론

적층제조장비의 국산화를 이루고자 많은 노력을 하였으며 결과적으로 접착제 분사 방식의 장비를 개발하고 직접 구동하여 중자의 생산 가능성을 확인하였다. 특히

기존의 외산장비와 비교해 보아도 그 성능이 나쁘지 않았으며, 해상도나 출력 속도는 오히려 더 우수하였다. 접착제 분사 방식은 바인더의 토출량을 제어하는 소프트웨어와 헤드 기술이 핵심이며 장비의 파라미터 설정을 어떻게 하느냐에 따라 최종 출력물의 품질을 결정지었다. 본 개발 장비에서는 적층 두께 100 $\mu$ m, 600DPI의 해상도, 450mm/s의 속도로 출력하였을 때 가장 안정적인 것으로 나타났다. 제작된 출력물은 출력 직후의 강도는 산업에 바로 사용하기 부족하였고 최소 1300℃ 이상에서 2시간 가량 열처리를 진행하였을 때 적절한 강성을 가지게 되었다. 또한 출력 생산 속도 비교를 통해 접착제 분사 방식이 대량생산에 적합하다는 사실을 확인할 수 있었다.

#### References

- [1] Global 3D printer industry technology trend analysis, KIMM, pp. 1-7, 2013,
- [2] J.F. Bredt, Binder Stability and Powder\Binder Interaction in Three Dimensional Printing, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1995
- [3] H. Miyajima, S. Zhang, L. Yang, A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process, International Journal of Machine Tools and Manufacture 124(Supplement C) 2018
- [4] R.C. Daniel, J.C. Berg, Spreading on and penetration into thin, permeable print media: Application to ink-jet printing, Advances in Colloid and Interface Science, pp. 123-126, 2006
- [5] K. Range, F. Feuillebois, "Influence of Surface Roughness on Liquid Drop Impact", Journal of Colloid and Interface Science, pp. 203(1), 1998
- [6] S. Shrestha, G. Manogharan, "Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method", JOM 69(3) , 2017
- [7] M.A. Caradonna, M.J. Cima, J. Grau, J. Moon, E.M. Sachs, P.C. Saxton, J.G. Serdy, S.A. Uhlund, "Jetting layers of powder and the formation of fine powder beds thereby", Google Patents, 2000
- [8] A.L. Yarin, DROP IMPACT DYNAMICS: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing..., Annual Review of Fluid Mechanics 38(1), 2006
- [9] D.G.K. Aboud, A.-M. Kietzig, Splashing Threshold of Oblique Droplet Impacts on Surfaces of Various Wettability, Langmuir 31(36), 2015
- [10] Š. Šikalo, M. Marengo, C. Tropea, E.N. Ganić, "Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces",

Experimental Thermal and Fluid Science 25(7), 2002

- [11] Dong-Hwan Gong, Seung-Jung Shin, "Analysis of Arduino Timer Callback for IoT Devices",  
DOI : <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.6.139>
- [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