

사형 주조에서 바인더 젯 3D 프린터를 이용한 기계적 물성 향상을 위한 공정 연구

황정철* · 김태성*

*금오공과대학교 산업공학과

A Study on the Process for Improving Mechanical Property of Sand Casting by Using the Binder Jetting Method

Jung-Chul Hwang* · Tae-Sung Kim**

*Student, Kumoh National Institute of Technology

**Professor, Kumoh National Institute of Technology

Abstract

Among the Additive Manufacturing (AM) technologies, the Binder-Jetting printing technology is a method of spraying an adhesive on the surface of powder and laminate layer by layer. Recently, this technique has become a major issue in the production of large casting products such as ship-building, custom vehicles and so on. In this study, we performed research to make actual mold castings and increase mechanical property by using special sand and water-based binders. For use as a mold, it has a strength of more than 3MPa and permeability. Various experiments were carried out to obtain suitable them.

The major process parameters were binder jetting volume, binder types, layer thickness and heat treatment condition. As a result of this study, the binder drop quantity was measured to be about 60 pico-liter, layer thickness was 100 μ m and the heat treatment condition was measured about 1,000°C and compressive strength were measured to be more than 5MPa. The optimum condition of this experiment was established through actual casting of aluminum. The equipment used in this study was a Freeforms T400 model (SFS Co., Ltd.), and the printing area of 420 * 300 * 250mm and resolution of 600dpi can be realized.

Keywords : Additive manufacturing, Binder jet, Layer thickness, Binder volume, Sand casting

1. 서론

최근 국내외 대학, 연구소, 기업을 중심으로 Additive Manufacturing 기술을 이용한 항공/우주, 선박, 자동차 등 다양한 산업분야로의 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, Additive Manufacturing 기술은 기존 절삭 가공 공정에 비해 형상자유도가 높아 복잡한 형상 제작이 가능할 뿐만 아니라 설계부터 가공까지 맞춤형 제작이 가능한 장점을 가지고 있어 이러한 연구 트렌드는 점차 확대될 것으로 예측되고 있다[1].

Additive Manufacturing 기술은 적용 소재 및 경화 방식

에 따라 다양하게 분류할 수 있으며, ASTM에 의해 AM은 크게 7가지 방식으로 구분이 되는데 Vat Photo polymerization, Material Jetting, Material Extrusion, Powder Bed Fusion, Binder Jetting, Sheet Lamination, Directed Energy Deposition으로 나누어진다 [2]. 이 중에서도 특히 Binder Jet 기술은 기존 절삭 공정과 비교했을 때, 짧은 가치사슬을 가지고 생산 비용과 제조시간 감소, 디자인에 있어서 자유도가 높고 맞춤 제작이 가능하여 재료 소비를 줄일 수 있는 공정 기술이다[8]. 다시말하면, Biner Jet 기술은 단순 비트맵 이미지를 면 이미지대로 출력할 수 있어서 출력 시간 단축 및 정밀도를 향상시킬 수 있는

장점을 가지고 있을 뿐만 아니라 공정 중 사용하는 소재 자체가 support 역할을 하기 때문에 별도의 지지대가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 또한 플라스틱, 세라믹, 금속 등 다양한 소재를 적용할 수 있어서 다양한 분야에 응용이 가능한 장점을 가지고 있다.

최근 이러한 바인더 젯 기술은 다른 3D 프린팅 기술과 다르게 대량 생산이 가능하고 프린팅 헤드의 개수를 늘림에 따라 대형 프린팅이 가능하기 때문에 사형 주조의 목적을 대체하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Ramakrishnan 등은 바인더 젯을 이용하여 주형을 제작할 때 사용되는 유기 바인더는 주조 과정에서 유독 가스를 발생시키기 때문에 설사 업계에 더 나은 서비스를 제공하더라도 친환경적이지 못하다는 연구를 발표하였다[11]. 특히 대표적으로 사용되는 퓨란계 유기 바인더는 인간에게 발암물질을 제공하기 때문에 작업자에게 건강상 위험을 초래한다는 것이 연구를 통해 밝혀 졌다[12]. 따라서 이러한 문제로 인해 대체 바인더에 대한 연구가 필수적이며, 가스 방출을 낮출 수 있는 추가적인 연구가 필요하며, 동시에 이러한 친환경계 바인더를 이용한 기계적 물성 확보에 대한 연구가 반드시 요구된다[13].

또한 바인더 젯 기술을 이용한 모래 주형의 특성은 프린팅 및 경화 과정을 거치면서 모래의 특성, 바인더 및 활성제의 농도 및 유형, 프린팅 속도[14], 프린팅 방향 및 레이어 두께 등의 프린팅 인자에 대한 영향을 받는다. 예를 들어 층 두께를 줄이고 바인더 도포량을 증가시키면 인장 강도는 향상되지만 표면 품질은 감소하는 경향을 나타낸다[15].

본 연구에서는 기존 사형 주조 공정 중 몰드 및 중자 제작을 위해 바인더 젯 장비를 이용한 연구를 수행하였다. 기존 사형 주조 공정은 큰 틀에서 보면 제품 설계, 주조 방안 설계, 주조/응고 시뮬레이션을 통한 사전 준비 작업을 거치게 된다. 이 후 패턴 및 중자 제작, 주형제작, 주형 예열 및 합형의 5개 과정을 더 거친 후 주형이 최종 완성된다. 이후에는 제작하고자 하는 금속 소재의 용탕을 붓고 탈사를 거친 후 후처리 과정을 통해 최종 제품을 생산하게 된다. 이러한 과정을 정리하면 총 12개의 공정을 거쳐야만 최종 제품을 생산할 수 있다.

이처럼 기존 주조 공정은 제작되는 제품의 크기 및 복잡도에 따라 소요되는 시간이 다르지만 기본적으로 많은 공정 수에 따른 제작 시간의 증가 및 소요 비용의 상승의 단점이 있다. 또한 이때 제작된 목형의 경우 반영구적으로 재사용이 가능하다는 장점을 가지고 있지만 목형을 보관할 수 있는 별도의 대규모 공간이 필요하여 공간에 대한 제약을 가지고 있다.

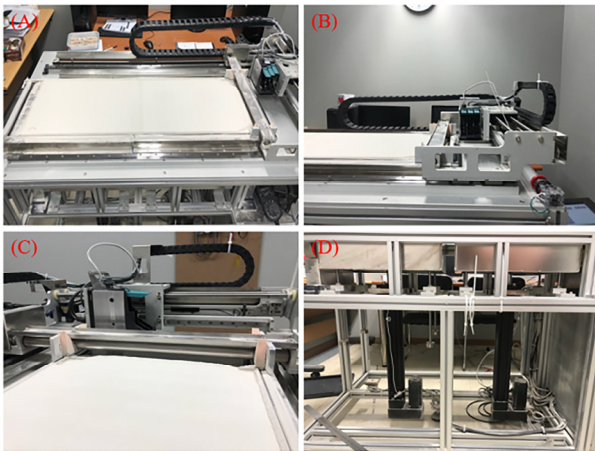
따라서 본 연구에서는 바인더 젯 기술을 이용하여 앞서 설명한 패턴 및 중자 제작, 주형제작, 주형 예열 및 합형

과정의 5개 공정을 1개의 공정으로 단축하기 위한 연구를 수행하였으며, 이에 따른 목형의 제작 시간 및 공간적인 제약 요소를 최소화 하고자 하였다. 이를 위해 일반 주물사에 알루미늄 시멘트를 혼합한 특수 주물사 소재와 소재에 포함된 시멘트를 경화 시킬 수 있으며, 친환경적이기 때문에 발암 물질 발생이 없을 뿐만 아니라 주조 과정 중 가스가 발생하더라도 인체에 해가 없는 수계 바인더를 이용하여 실제 주형 제작에 필요한 바인더 양, 적층 두께 및 후처리 공정 조건 등 다양한 변수를 바탕으로 기초 연구를 진행하였으며, 이를 바탕으로 한 기계적 물성을 평가하여 최종 주형 제작을 위한 연구를 수행하였다.

2. 제작 및 테스트

2.1 바인더 젯 시스템

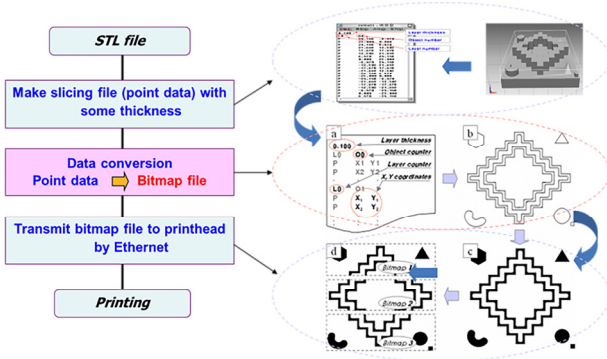
프린팅 헤드를 이용한 Binder jet 장비는 프린터 헤드는 소프트웨어에 의해 생성된 객체 프로파일에 따라 액체를 분말의 얇은 층으로 분사하는 원리이다[9]. 특히, .선가공하는 레이저 장비와는 다르게 형상을 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 특징을 가지고 있다. 대면적의 부품도 프린팅 area와 헤드 개수를 늘리는 것으로 쉽게 해결할 수 있다. 본 연구에서 사용한 Binder jet 장비는 총 5축의 구동축을 가지고 있으며, 파우더 공급, 조형을 하는 영역에 2개의 Z축과 X-Y 단면을 가공하기 위한 프린팅 헤드 및 롤러를 이송하는 2개의 축, 그리고 롤러를 회전시켜 파우더를 평탄화 시키는 회전축 총 5축으로 구성되어 있다. 본 장비는 3개의 Thermal bubble jet head로 이루어져 있으며 헤드 당 총 300개의 노즐이 있다. 본 시스템의 구동 순서는 3D 형상의 STL 파일을 원하는 두께로 슬라이싱하여 단색비트맵 파일(Black and White)로 변환한다. 생성된 비트맵 파일의 Black 부분은 바인더가 분사되는 영역이고, White 부분은 바인더가 분사되지 않는 영역으로 구분되어 있으며, 전체 프린팅 영역을 프린팅 헤드를 이용해서 한번에 바인더를 분사할 수 없기 때문에 생성된 비트맵 파일을 전체 프린팅 영역에 대해 분할하여(Swapping) 프린팅이 되도록 비트맵 파일을 분할하면 최종 프린팅 준비가 마무리된다. 이렇게 생성된 비트맵 파일은 Ethernet 통신을 통해 프린트 헤드에 전달되어 하나의 layer를 프린팅하며, 앞서 설명한 바와 같이 분할된 횟수 만큼 프린팅 헤드가 반복적으로 움직이면서 프린팅을 하게 된다. Figure 1에 전체 바인더 젯 시스템에 대해 나타내었으며, Table 1 및 Figure 2는 바인더 젯 시스템의 사양 및 Slicing을 통해 얻게 되는 비트맵 파일의 획득 과정을 나타내었다.



[Figure 1] Thermal Bubble jet type 3D Printer (A) BJ 3D Printer, (B) Powder roller (Re-coater) and Print head moving system (Y axis), (C) Roller and Print head moving system (X axis), (D) Z-axes of the powder feed and part build areas.

<Table 1> Relationship of Diaphragm & Spring Force

| Items | Specification |
|-----------------|----------------------|
| Build Volume | 300x420x250 mm |
| Layer thickness | 100~150 μm |
| Build speed | 3.6 liter/h |
| Weight | 500 Kg |
| Dimension | 1915 x 942 x 1640 mm |
| Resolution | 600x600 dpi |
| Head type | Thermal Bubble Jet |
| No. of nozzles | 300*3 (900 ea) |



[Figure 2] The flow chart of Bitmap file generation

2.2 공정 변수

Mohammad et al.[10]은 층 두께와 바인더 포화도가 3D 프린팅 공정에 미치는 영향을 연구하여 분말 입자 크기, 바인더 점도, 액적 크기, 바인더 포화도, 인쇄층 두께

등의 주요 파라미터를 도출하였다. 이러한 매개변수는 3D 프린팅 공정의 강도와 표면 품질에 중요한 역할을 한다.

Powder size 같은 경우 작을 때는, spreading 하는 과정에서 유동성이 좋지 않고 리코터에 의해 과하게 압축이 될 수 있으나 파우더 사이즈가 클 경우에는 강도에 안 좋은 영향을 미칠 수 있으며, 크기가 작은 파트는 특히 큰 영향을 받는다. 현재 본 실험에서 사용하는 주물사 파우더의 평균 입도는 50um이다. 타사의 주물사 보다 사이즈가 약 1/5로 작은 편이다. Table 2에 사용된 소재의 물성을 나타내었다.

따라서 기존 공정 조건과는 다른 결과값을 보인다. 본 실험에서는 기본적인 변수들을 최적화하는 데 중점을 두고 연구를 진행하였다. 처음으로 파우더의 평탄화를 위한 연구를 진행하였다. 롤러형 공급 리코터의 회전 속도에 따라 분말 표면 spreading 정도가 달랐다. 속도가 느리면 파우더가 잘 퍼지지 않고 앞서 프린팅 된 면이 밀리는 현상이 발생하며, 속도가 너무 빠르면 많은 파우더가 날린다. 위 현상이 발생하지 않고 매끄러운 파우더 표면을 얻기 위한 실험을 진행하였다. 여러 번의 실험을 걸쳐 도출한 롤러의 회전수는 250 rpm이었다.

<Table 2> Relationship of Diaphragm & Spring Force

| Items | Special casting sand |
|---|----------------------|
| Aggregate refractoriness | 41 SK |
| Thermal expansion coefficient (at 1000oC) | 0.6 % |
| Thermal conductivity | 0.6 W/mK |
| Thermal diffusivity | 900 J/(m2s1/K) |
| Average particle size | 50 μm |

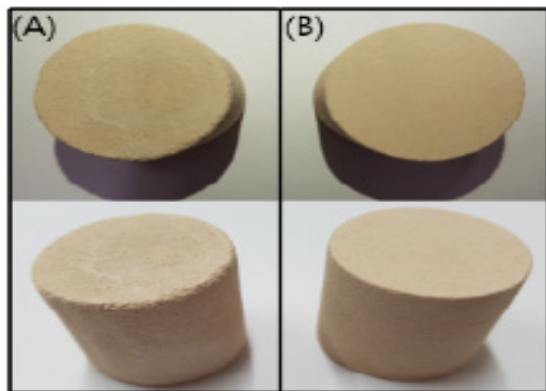
2.3 바인더 분사량

현재 사용하고 있는 잉크젯 헤드는 Thermal bubble jet type으로 Heating element의 온도를 조절 하여 Jetting volume을 조절하며 Heating element의 온도를 조절하는 방법은 Fire pulse width와 Voltage로 제어 할 수 있다. 현재 사용하는 Head는 한 열에 150개의 노즐, 2열로 총 300개의 노즐을 가지고 있으며, 최대 600dpi의 해상도까지 가능하다. 헤드 사양상으로는 Volume density를 100%로 설정하였을 때, 해상도에 따라 평균 Drop volume은 300dpi일때 130pl, 600dpi일때 28pl이며, 600 dpi일때, 같은 영역에 분사되는 잉크량은 112pl이다. 하지만 사용하는 Ink(binder)에 따라 토출량은 달라지게 된다. Density를 100%로 설정 후, Drive voltage와 Fire pulse length를 변수로 제어하여 토출량에 어떠한 변화가 있는 지 실험을 하였다. 테스트 결과 Drive voltage는 바인

더 분사량에 큰 영향을 미치지 못하였고 Fire pulse length 를 증가시킬수록 바인더 분사량이 증가한다는 것을 알 수 있었으며 이와 비례하게 형상정밀도와 강도가 증가하는 것을 발견하였다. 하지만 분사량이 과하면 롤러가 누르는 방향으로 잉크가 퍼져 오히려 정밀도가 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 적당한 바인더양을 분사하는 것이 중요하다. Table 3과 같이 분사량 테스트 결과 치수오차를 줄이기 위해서는 600dpi에 2 μ s으로 설정하는 것이 가장 좋은 것으로 확인 되었다. 또한, 앞서 말한 것처럼 사용하는 파우더의 평균 입도 크기는 50 μ m이다. 평균 입도를 고려하여 적층 두께를 100 μ m, 150 μ m, 200 μ m하여 샘플을 제작하였다. 이때, 분사 조건은 위에서 도출한 값을 사용하였다. 그림과 같이 두께에 따라서 형상정밀도의 차이가 나는 것을 보였다. 특히 200 μ m의 적층 두께를 가지는 샘플은 모서리 부분이 많이 무너지는 것을 육안으로 확인 가능하였으며 전체적으로 샘플의 강도도 약한 것을 확인 할 수 있었다. 이 테스트를 통해 적층 두께는 소재의 평균 크기의 2~2.5배를 사용하는 것이 적당하다고 판단하였다.. Figure 3은 fire pulse length에 따른 외관선의 정확도를 비교한 사진이다.

<Table 3> The binder injection quantity and dimensional error rate according to the fire pulse length

| Resolution | Fire pulse Length (μ s) | Discharging amount (Avg.) | Error rate (XY) |
|------------|------------------------------|---------------------------|-----------------|
| 300 dpi | 1 | 104 pl | No (Weak) |
| | 2 | 105 pl | No (Weak) |
| | 3 | 107 pl | 3.0% (Weak) |
| 600 dpi | 1 | 39 pl | 1.3% (Weak) |
| | 2 | 41 pl | 1.0% |
| | 3 | 44 pl | 1.3% |

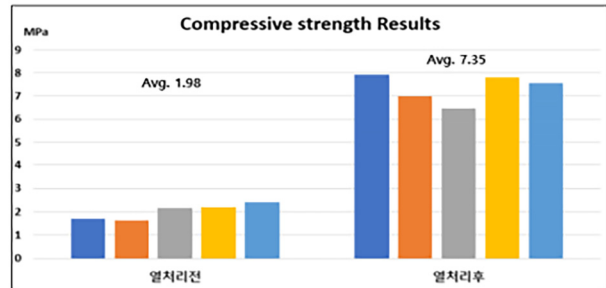


[Figure 3] Contour accuracy according to the fire pulse length, (A) 1.0 μ s, (B) 2.0 μ s

2.4 함침 조건

바인더젯으로 제작한 파트는 다른 장비와 비교하였을 때, 강도가 낮고 다공성이라는 단점이 있다. 본 실험은 주형 제작을 목적으로 하고 있기 때문에 바인더젯이 가지고 있는 단점을 장점으로 극복할 수 있다. 주형은 용융된 금속을 주형에 넣을 때, 발생하는 가스를 잘 배출해야 하며 온도와 압력을 견딜 수 있는 강도를 가져야한다. 하지만 강도가 너무 높으면 탈사에 어려움이 있기 때문에 알루미늄의 경우 5Mpa 이내의 강도를 요구 하고 있다. 따라서 원하는 강도를 갖기 위해 함침 시간과 열처리 온도에 따른 강도를 알아보았다. 본 시편은 지름 10mm에 높이 10mm를 가진 원기둥 형태로 제작되었으며 각 실험마다 10개의 샘플을 분석한 결과값의 평균을 나타냈다.

실험 결과 각 샘플에 용액이 침투된 깊이는 약 3~4mm로 비슷한 결과를 보였으며 함침을 오래 하면 형상이 무너지는 현상을 보여 최적의 후처리 조건은 3분정도 용액에 담궈 1000도에서 열처리 하는 것이다. 관련 실험 결과를 Figure 4 및 Table 4 에 나타내었다.



[Figure 4] Compare with heat treatment before and after

<Table 4> Compressive strength according to impregnation time and heat treatment temperature

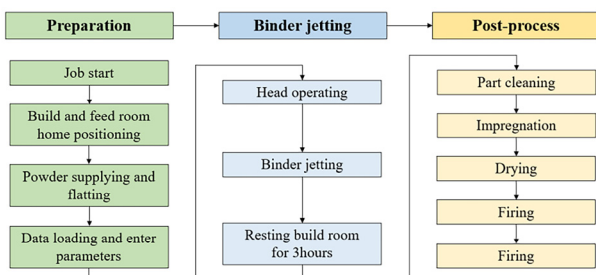
| Impregnation time (min) | Teat treatment temperature ($^{\circ}$ C) | Compressive strength (MPa) |
|-------------------------|--|----------------------------|
| 3 | 600 | 1.76 |
| | 800 | 1.94 |
| | 1000 | 3.41 |
| 4 | 600 | 1.60 |
| | 800 | 2.06 |
| | 1000 | 3.18 |
| 5 | 600 | 1.68 |
| | 800 | 1.84 |
| | 1000 | 3.5 |

3. 연구 결과

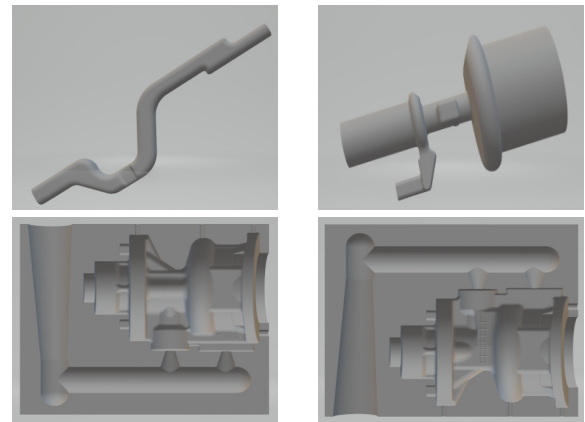
본 연구는 binder jet 방식의 3D Printer를 이용하여 기존 주형제작 과정에서 제작하기 어려운 부분과 같은 어려움을 해소하고 제작 시간 단축 및 소요 비용의 감소를 목적으로 두고 있다. 제작한 장비를 이용하여 다양한 공정 변수를 바탕으로 최적의 공정 변수 및 후처리 조건을 확립하기 위한 연구를 수행하였으며 아래와 같은 공정 플로우로 주형을 제작하여 용융된 금속을 부어 주물을 뽑아 주형으로써 역할을 할 수 있는 지 확인 하였다. 주형을 이용하여 만들어진 알루미늄 주물은 Fig 11과 같이 확인 할 수 있으며 그 외 다양한 제작품을 그림으로 확인 할 수 있다. 사진과 같이 실제 주물을 만들어 봄으로서 제작한 바인더젯 3D PRINTER의 최적화 된 공정 프로세스를 확립하였고 고주형 제작의 가능성을 보여주었다.

Figure 5는 본 연구를 통해 도출된 전체 공정 Flow를 그림으로 표현한 것이다. Binder Jet을 하기 위한 사전 준비 작업에서 프린팅 및 후처리에 관해 본 연구를 통해 도출된 전체 공정에 대해 나타낸 것이다.

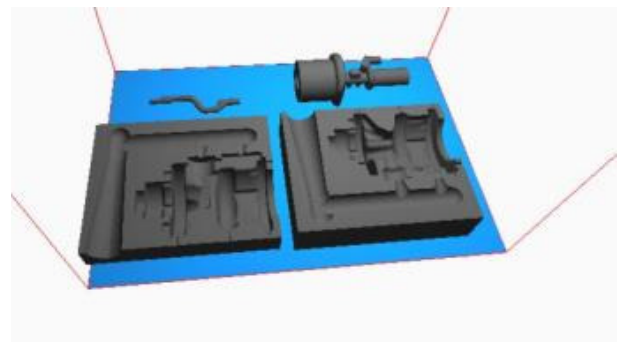
또한 이렇게 도출된 공정 프로세스를 기반으로 실제 주형을 제작하기 위해 Figure 6과 같은 주형을 설계하였으며, 실제 프린팅 사전 준비 작업인 Slicing 단계에서의 배치도 및 이를 통해 도출된 Bitmap 파일의 이미지에 대해 각각 Figure 7 및 Figure 8에 나타내었다. Figure 6부터 Figure 8까지는 Figure 5에서 도출된 전체 공정 중 사전 준비 단계에 해당하며, Figure 9는 실제 프린팅이 되는 장면을 찍은 사진으로 Figure 5에서 도출된 내용 중 Binder Jetting 공정이다. 그리고 최종적으로 Figure 10에 상기 단계를 거친 최종 출력물 사진을 나타내었으며, Figure 11에 이를 통해 제작된 구조물에 대한 결과를 나타내었다. 사진에서 보면 알 수 있듯 본 연구를 통해 도출된 공정 조건이 적용 가능함을 확인할 수 있었다.



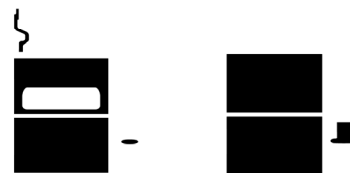
[Figure 5] Process flow of the Binder jet 3D Printing



[Figure 6] 3D modeling of test mold sample



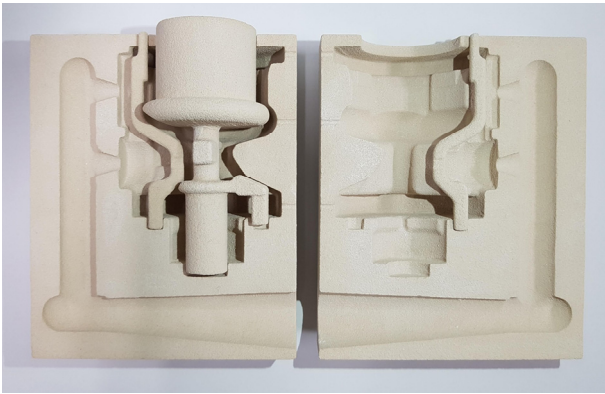
[Figure 7] Slicing process



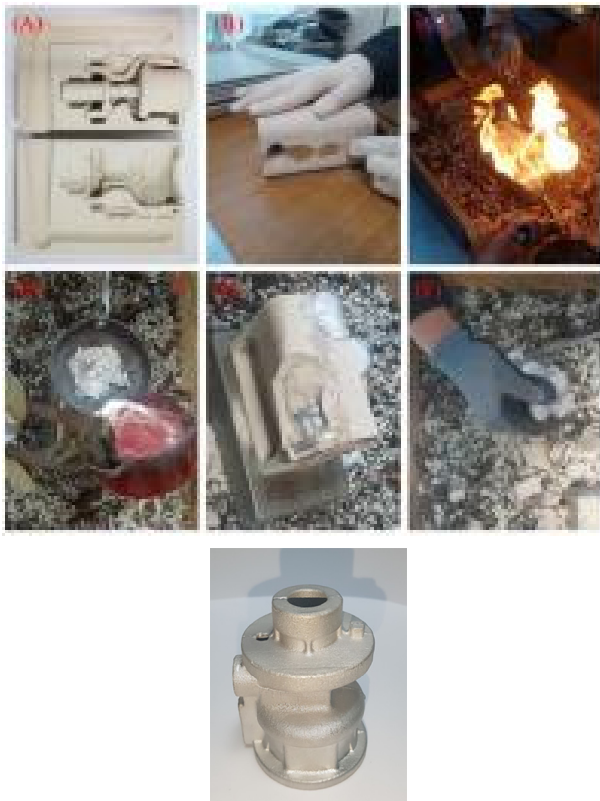
[Figure 8] Bitmap image from slicing S/W



[Figure 9] The photo of printing status



[Figure 10] The photo of printing result



[Figure 11] Aluminum casting process (A) Molds made with the BJ 3D Printer, (B) The process of attaching using the bond so that the molten metal is not visible, (C) The process of heating the mold to reduce the temperature difference with the molten metal, (D) The process of pouring molten metal into a mold, (E) The time for the metal to solidify and the mold to cool down, (F) Smooth the surface of aluminum castings with mold removed by sandblaster

4. 결론

본 연구에서는 특수모래 주조를 위한 바인더 제트기 및

공정을 개발하고 최적의 공정 조건을 위한 공정 파라미터를 제시하였다. 또한, 프린팅된 부품의 강도와 정확도를 향상시킬 수 있는 새로운 공정인 Impregnation 공정을 제시하여 출력물의 강도를 제어할 수 있는 조건을 확립하였다. 또한 층 두께, 바인더 분출 부피, 함침 조건 등의 공정 변수를 평가하여 적용한 장비의 사양 내에서 최적의 공정 조건을 도출하였다. 그리고 제안된 공정의 실현 가능성을 검증하기 위해 압축 강도 실험을 테스트하였으며, 실험 결과 제안된 공정에서 제작된 부품은 알루미늄 주조 금형의 강도가 충분하다는 것을 알 수 있었다. 또한 상기 공정 조건을 바탕으로 다양한 샘플을 제작하였으며, 제작된 결과를 Figure 12에 나타내었다.



[Figure 12] Various productions (A) Korean Heritage “Stone Pagoda”, (B) Korean Heritage “Buddha statue”, (C) Crawfish mold and metal products, (D) and (E) Korean Heritage “Seal of King”

5. References

- [1] A. Mostafaei, E. L. Stevens, E. T. Hughes, S. D. Biery, C. Hilla, M. Chmielus(2016), “Powder bed binder jet printed alloy 625: Densification, microstructure and mechanical properties.” *Materials & Design*, 108:126–135.
- [2] P. K. Gokuldoss, S. Kolla, J. Eckert(2017), “Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting–selection guidelines.” *Materials*, 10(6):672.
- [3] W. E. Frazier(2014), “Metal additive manufacturing: A review.” *J. Mater. Eng. Perform.*, 23:1917–1928.

- [4] Standard Terminology for additive Manufacturing Technologies(2013), American Society for Testing and Materials(ASTM) International: West Conshohocken, PA, USA.
- [5] J. J. Lewandowski, M. Seifi(2016), "Metal additive manufacturing: A review of mechanical properties." Source, 46:151-186.
- [6] D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe(2012), "Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms." Int. Mater. Rev., 57:133-164.
- [7] T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang(2018), "Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties." Prog. Mater. Sci., 92:112-224.
- [8] T. Wohlers(2018), Wohlers report 2018: Additive manufacturing and 3D printing, state of the industry. Wohlers Associates: Fort Collins, CO, USA.
- [9] A. Farzadi, M. Solati-Hashjin, M. Asadi-Eydivand, N. A. Abu Osman(2014), "Effect of later thickness and printing orientation on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous samples for bone tissue engineering." PLoS ONE, 9(9):e108252. doi: 10.1371/journal.pone.0108252
- [10] M. Vaezi, C. K. Chua(2010), "Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53:275-284.
- [11] N. Bakhiya, K. E. Appel(2010), "Toxicity and carcinogenicity of furan in human diet." Arch Toxicol, 84:563-578. doi: 10.1007/s00204-010-0531-y
- [12] ExOne(2017), 3D printing binders. <http://www.exone.com/Resources/Binders> (Accessed on 13 March 2017)
- [13] P. M Hackney, R. Wooldridge(2017), "Characterisation of direct 3D sand printing process for the production of sand cast mould tools." Rapid Prototyp J, 23:7-15. doi: 10.1108/RPJ-08-2014-0101.
- [14] J. Thiel, S. Ravi, N. Bryant(2017), "Advancements in materials for three-dimensional printing of molds and cores." International Journal of Metalcasting, 11:3-13.
- [15] M. Vaezi, C. K. Chua(2011), "Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process." Int J Adv Manuf Technol, 53:275-284. doi: 10.1007/s00170-010-2821-1.3

저자 소개



황정철

- 1992년 2월: 영남대학교 기계공학과 학사
- 1994년 8월: 영남대학교 기계공학과 석사
- 2019년 9월~현재: 금오공과대학교 산업공학과 박사과정
- 현재 스파코(주) 대표이사로 재직 중
- 관심분야: 산업기계, 기계부품, 3D 프린팅
- E-Mail: skjuok9930@naver.com



김태성

- 1991년 2월: 동국대학교 산업공학과 학사
- 1994년 1월: New Jersey Institute of Technology 산업공학과 석사
- 2000년 12월: Louisiana State University 산업공학과 공학박사
- 현재 금오공과대학교 교수로 재직 중
- 관심분야: SCM/APS, MESM Smart Factory, Blockchain
- E-Mail: tkim@kumoh.or.kr