

3D 프린팅 기술을 활용한 비정형 프리캐스트 바닥판 제작

Fabrication of irregular precast deck using 3D printing technology



김기열 Kiyool Kim
단국대학교
토목환경공학과 박사과정
E-mail : kiyool520@naver.com



이용세 Yongsei Lee
대우건설 기술연구원
책임연구원
E-mail : yongsei.lee@daewoenc.com



마향욱 Hyangwook Ma
대우건설 기술연구원
책임연구원
E-mail : ma.hyangwook@gmail.com



배성운 Sungwoon Bae
프로팜
대표이사
E-mail : profab@profab.pro



최명성 Myongsung Choi
단국대학교
토목환경공학과 교수
E-mail : choims@dankook.ac.kr

1. 서론

최근 국내외에서 3D 프린팅 기술 발전과 더불어 건설 분야로의 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 건설 3D 프린팅 기술은 초기 단계에 있지만 빠른 출력 시간, 다양한 소재의 활용, 인건비 절감 등의 장점으로 건설시장에서 급성장할 수 있을 것으로 전망된다.¹⁾ 건설용 3D 프린팅은 중국 Winsun의 3D 프린팅 격리실, 네덜란드의 TU Eindhoven의 자전거 통행용 교량, 미국의 ICON사와 러시아의 Apis Cor사의 단층 주택 사례를 들 수 있다^{2), 3)} <그림 1>. 이러한 건설용 3D 프린팅 기술은 대부분 FDM(Fused Deposition Modeling)으로 대표되는 적층공법(AM: Additive Manufacturing)으로 콘크리트를 펄프와 노즐을 통해 직접 압출하는 재료압출(ME: Material Extrusion)방식을 선택하고 있다. 이러한 프린팅 방식은 고성능의 모르타르를 사용하여 출력 및 적층을 하고 있으며 3D 프린팅에 특화된 재료를 개발하는 연구들이 많이 진행되고 있다.⁴⁾ 하지만 제조업 분야에서의 3D 프린팅은 다양한 3D 프린팅 형식(재료 압출, 바인더 분사, UV 경화 등)과 사용 재료(플라스틱, 구사, 철, 세라믹 등)에 따라서 3D 프린팅의 종류가 매우 다양한 것을 확인할 수 있다.^{5), 6)} 특히 BJ(Binder Jetting) 방식의 경우 제품의 양산 공정에서의 생산능력 증대, 생산원가 절감, 품질 향상 및 손실 비용 저감 등의 효과가 매우 커서 제조업 분야에서 각광받는 기술이다.^{7), 8)}

본 기술기사에서는 높은 정밀도가 요구되는 건설구조물에 3D 프린팅을 적용하기 위해 기존에 건설 분야에서 사용되는 콘크리트 3D 프린팅 방식 이외에 다른 재료 혹은 형식의 3D 프린팅 방식을 검토하여 건설구조물에 대한 적용성을 분석하고 목표로하는 비정형 프리캐스트 바닥판 제작에 적합한 사례를 소개하고자 한다.

2. 3D 프린팅 방식별 비교

2.1 FDM(Fused Deposition Modeling) 3D 프린팅

FDM 방식의 3D 프린팅은 노즐을 X, Y, Z축으로 움직이며 제품을 출력하는 방식으로 제조업 분야에서 가장 범용적으로 사용되는 방법이다. 가장 범용적인 플라스틱을 재료로 하는 3D 프린터는 가정에 공급되는 개인용 3D 프린터부터 제품생산을 위한 산업용 3D 프린터까지 그 종류와 크기도 다양하다. 산업용 3D 프린터의 경우 챔버를 가지고 있어 온도와 습도를 정량

적으로 관리할 수 있으며 이는 플라스틱의 열수축 현상을 제어할 수 있는 환경을 조성한다. 다만 현재 상용화된 산업용 3D 프린터 중 가장 큰 규모의 3D 프린터는 <그림 2>의 Stratsys사의 F770이라는 모델로 이 모델의 출력 챔버 크기는 1,000×610×610 mm으로 일반적인 건설구조물을 출력하기에는 작은 크기이기 때문에 건설 분야로의 적용이 어려운 실정이다.

건설용 3D 프린팅에 다방면으로 많이 적용되는 3D 프린팅은 콘크리트를 주재료로 한 FDM 방식 3D 프린팅이다. 이 방식은 사용되는 재료가 저렴하기 때문에 출력 자체는 경제적이다. 하지만 갠트리 방식과 로봇 암 방식의 구분 없이 초기 설비에 대한 투자가 필연적이고 건설구조물의 특성상 규모가 크기 때문에 초기 투자 비용이 많이 증가한다는 단점이 있다. 또한 건설용 3D 프린팅의 경우 <그림 3>와 같이 적용 정밀도를 높이기 어렵다. 단순한 예로 노즐의 직경을 2배로 줄이게 된다면 동일한 면적을 출력하는데 4배 이상의 시간이 걸리게 될 것이다. 이는 3D 프린팅의 출력 시간의 증가로 이루어지며 목적물의 제작 시간이 길어지는 것을 의미한다. 사용재료가 시간에 따라 경화되는 콘크리트이므로 제작시간이 길어지는 것은 각 레이어별 부착강도가 발현이 어려운 상황을 야기할 수 있다. 따라서 콘크리트를 사용하는 3D 프린팅의 경우 적용 정밀도를 높이는 데 한계가 있는 실정이다.



그림 1. 국외 3D 프린팅 건축물



그림 2. Stratsys F770 3D 프린터



(a) 일반 3D 프린팅 (b) 노즐 축소 3D 프린팅

그림 3. 건설용 3D 프린팅에서의 노즐 차이



(a) 철 (b) 콘크리트

그림 4. 재료에 따른 규사 몰드로 제작한 제품

2.2 BJ(Binder Jetting) 3D 프린팅

BJ 방식의 3D 프린팅은 세라믹, 철, 규사 등을 주재료로 하여 주재료 사이에 결합재를 녹여 넣어 3D 프린팅 목적물을 만드는 방식이다. 이러한 BJ 방식의 3D 프린팅은 정밀도가 높은 제품을 제조하거나 제품의 몰드를 제작하는데 활발하게 사용되고 있다. 이 중에서 규사를 활용한 BJ 방식의 3D 프린팅은 가장 경제적이면서 기술의 숙련도가 높아 빠른 양산시간과 균일한 품질을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 <그림 4>의 제작물처럼 몰드를 제작하여 철, 콘크리트, 우레탄 등 모든 재질에 적용가능하는 장점이 있다. 또한 기존의 3D 프린팅에서 사용되는 결합제 이외에 강화제를 도포하여 모래로 만든 출력물의 제작이 가능하다. 따라서 규사를 활용한 BJ 방식의 3D 프린팅의 경우 경제적이면서 출력물에 대한 설계 자유도가 매우 높고 제작이 간단하여 높은 정밀도를 가지는 건설구조물에 적용하는데 가장 적합하다고 판단된다.

2.3 기타 3D 프린팅

그 외 다른 3D 프린팅 방식으로 광경화성 수지 조형 방식(SLA: Stereolithography, DLP: Digital Light Processing), 선택적 레이저 소결 조형 방식(SLS: Selective Laser Sintering) 등이 있다. 이러한 3D 프린팅 방식은 재료의 단가가 매우 높고 제작 가능 크기가 작아 건설분야에 적용하기에는 적합하지 않다고 판단된다.

3. BJ 프린팅 블록의 재료 특성 분석

본 기사에서는 높은 정밀도를 확보할 수 있으면서 경제적인 규사를 활용한 BJ 방식의 3D 프린팅으로 제작된 출력물을 비정형 프리캐스트 바닥판 제작을 위한 몰드로서 사용하고, 규사 출력물의 내구성 분석하기 위해 규사 블록의 압축강도와 휨강도를 측정하였다. 또한 몰드로서의 반복적인 사용성을 분석하기 위해 수분 흡수율과 부착강도를 측정하였다.

3.1 압축강도 시험

'KSL 5105 : 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법'에서 제안하는 50×50×50 mm의 정육면체로 시편을 제작하여 각 블록의 압축강도를 측정하였다. 규사를 사용한 프린팅 이후 특별한 처리를 하지 않은 일반 BJ 블록의 경우 8.58 MPa를 보였으며 프린팅 이후 표면강화처리를 실시한 표면 강화 BJ 블록의 경우 9.91 MPa를 보여 표면 강화처리로 인한 강화율은 15.5%인 것으로 나타났다. 이는 표면강화제가 전체적으로 블록에 도포되는 것이 아닌 블록의 표면에만 도포되어 외력이 작용할 때 내부의 규사간의 결합이 끊어지면서 외부의 표면강화제가 역할을 충분히 하지 못하는 것으로 판단된다. 압축강도 측정 결과는 <그림 5>에 나타내었으며 실험 결과 값은 [표 1]에 나타내었다.

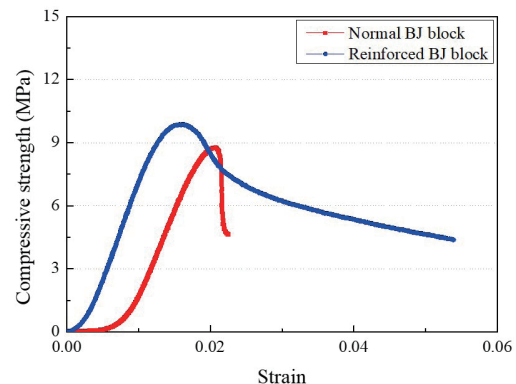


그림 5. 압축강도 실험 결과

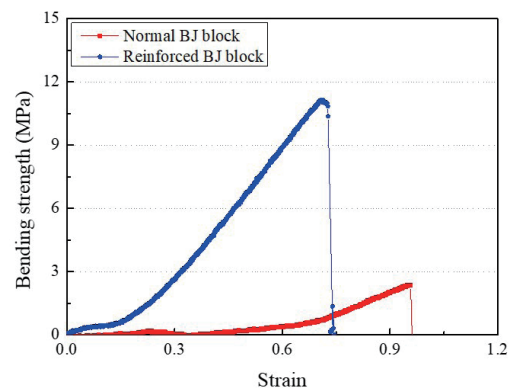


그림 6. 휨강도 실험 결과

[표 1] 기본 재료 특성 시험 결과

시험 종류	일반 BJ 블록	표면강화 BJ 블록	이형처리 BJ 블록	강화율 (%)
압축강도 (MPa)	8.6	9.9	-	15.5
휨강도 (MPa)	2.4	11.1	-	360.6
수분흡수율 (%)	7.6	9.7	1.6	-

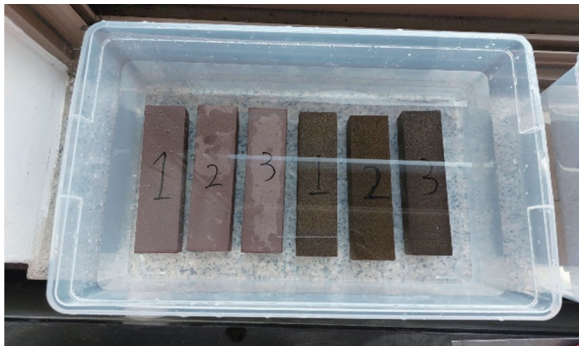


그림 7. 흡수율 시험 흡수 시

3.2 휨강도 시험

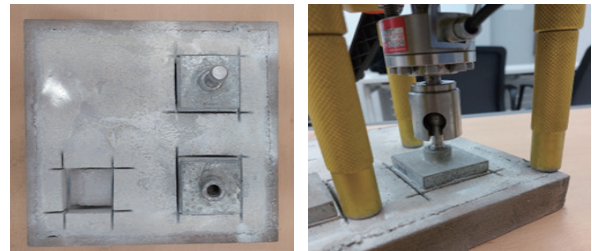
‘KS F 2476 : 폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법’에서 제안하는 40×40×160 mm의 막대 시편을 제작하여 각 블록의 휨강도를 측정하였다. 일반 BJ 블록의 경우 2.41 MPa의 낮은 휨강도를 보였지만, 표면강화 BJ 블록의 경우 11.10 MPa로 약 360.6%의 높은 강화율을 보여주었다. 이는 압축강도와는 달리 표면강화제가 도포되고 경화된 부분이 인장에는 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 휨강도 측정 결과는 <그림 6>에 나타내었으며 실험 결과값은 [표 1]에 나타내었다.

3.3 흡수율 시험

앞선 3.2의 휨강도 시험과 마찬가지로 ‘KS F 2476’에서 제안하는 40×40×160 mm의 막대 시편을 제작하여 80℃에서 48시간 동안 건조 시킨 후 20℃에서 48시간 동안 물에 담가두어 흡수율을 측정하였다 <그림 7>. 그 결과 일반 BJ 블록과 표면강화 BJ 블록은 각각 7.6%, 9.7%로 큰 차이가 없었지만, 이형처리까지 한 블록의 경우 1.6%로 그 효과가 매우 뛰

[표 2] 부착강도 시험 결과

몰드 종류	1차 결과 (kN/MPa)	2차 결과 (kN/MPa)	평균 결과 (kN/MPa)
일반 BJ 몰드	0.22/0.08	0.18/0.07	0.20/0.08
표면강화 BJ 몰드	0.46/0.18	0.28/0.11	0.37/0.15
이형처리 BJ 몰드	0.03/0.01	0.03/0.01	0.03/0.01



(a) 부착시험 시편

(b) 부착강도 측정

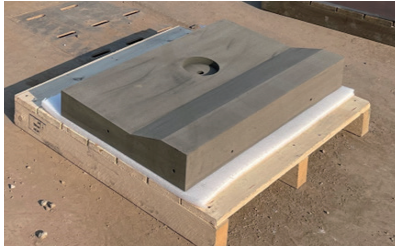
그림 8. 부착시험 시편 및 부착강도 측정

난 것을 확인할 수 있었다. 이는 규사로 제작된 몰드를 사용시에 원활한 탈형을 위해 이형처리가 필연적임을 보여준다.

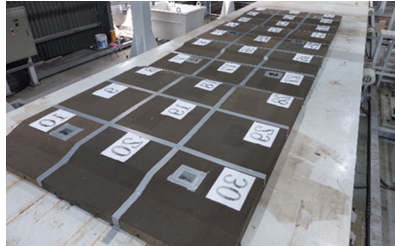
3.4 부착강도 특성 분석

규사로 제작된 출력물은 콘크리트 부재 제작을 위한 몰드로서 사용하기 위해서는 콘크리트와의 부착 특성이 매우 중요하다. 기존 강제 거푸집 사용시에도 이형 박리제를 전체 거푸집에 도포한 후 철근 적치 및 콘크리트 타설을 진행한다. 따라서 규사로 제작된 출력물에도 이를 측정하기 위해 부착강도를 시험하였다. 부착강도는 ‘KS F 2476’에서 제안하는 방법을 따라서 진행하였다 <그림 8>. 일반 BJ 몰드, 표면 강화 BJ 몰드, 이형처리 BJ 몰드에 대하여 실험을 진행한 결과 앞선 3.3의 흡수율 결과와 비슷하게 일반 BJ 블록의 경우 0.08 MPa의 부착강도를 나타낸 반면 표면 강화 BJ 몰드의 경우 0.15 MPa로 약 87.5% 증가한 결과를 보여주었으나 이형처리 BJ 블록의 경우 부착강도가 0.01 MPa로 매우 작았다.

이러한 실험결과를 통해 규사를 활용한 BJ 방식 3D 프린팅의 경우 이형처리를 하는 것이 콘크리트와의 부착강도를 감소시켜 쉽게 탈형 할 수 있음을 예상할 수 있다. 부착강도 시험 결과는 [표 2]에 나타내었다.



(a) 비정형 바닥판 몰드 소블록

(b) 비정형 프리캐스트 바닥판 몰드 결합 전경
(6.37×1.97×0.25 m)

(c) 제작된 프리캐스트 바닥판

그림 9. BJ 프린팅활용 프리캐스트 바닥판 제작과정

4. 프리캐스트 바닥판 시험체 제작

BJ 방식의 3D 프린팅으로 출력한 규사 몰드를 비정형 프리캐스트 바닥판 제작에 적용하였다. 실제 프리캐스트 바닥판 사이즈인 가로 6.37 m, 세로 1.97 m으로 제작하였고, 높이는 바닥판 아래 헌치부 형상에 따라 가변시켜 최대 높이 250 mm로 제작하였다. 하지만 BJ 프린팅 장비 크기의 한계로 인하여 이를 한 번에 출력할 수 없었으며 이를 30개로 분할하여 각각의 소블록을 제작하고 <그림 9(a)> 이들을 결합하여 하나의 바닥판 거푸집 몰드로 완성시켰다 <그림 9(b)>. 이렇게 완성된 비정형 바닥판 몰드를 사용하여 프리캐스트 바닥판을 제작하였다 <그림 9(c)>. 이때 30개로 분할 출력임에도 불구하고 각 블록간의 접합시 정밀도가 높아 결합도 매우 손쉽게 이어졌다.

5. 맺음말

3D 프린팅은 제조업 분야에서 혁신적인 기술로 형식, 사용 재료에 따라서 다양한 종류의 기술들이 개발되었다. 본 고에서는 3D 프린팅을 높은 정밀도가 요구되는 비정형 프리캐스트 바닥판 제작에 적용한 사례를 소개하였다.

건설용으로 연구개발이 많이 진행되고 있는 콘크리트를 사용한 FDM 3D 프린팅 방식은 출력물의 정밀도를 높이기에는 한계가 존재한다. 사용 재료를 플라스틱으로 바꿀 경우 정밀도는 올라가지만 비용이 증가하여 비경제적이다. 또한 주재료를 레진, 금속, 세라믹을 사용하는 기타 3D 프린팅의 경우에도 정밀도는 매우 높으나 경제적이지 못한 단점이 있다.

본 고에서는 규사를 사용한 BJ 방식의 3D 프린팅을 사용하여 경제적이며 높은 정밀도를 가지고 있음을 확인하였으며 비정형 프리캐스트 바닥판 제작을 위한 몰드를 출력하였고 이를 활용하여 비정형 프리캐스트 바닥판을 실규모로 제작하였다. 추후에는 본 3D 프린팅 방식을 적용 발전시켜 정밀하고 비정형성이 극대화된 건설구조물에 더욱 효과적으로 사용할 예정이다.

감사의 글

이 성과는 대우건설의 미래성장과제 재원으로 지원받아 수행한 연구임. 또한, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2023R1A2C2007402).

참고문헌

- 최명기(2021) 스마트 건설과 3D 프린팅, 국토일보.
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533.
- Theo A.M, Salet, Zeeshan Y, Ahmed, Frek P. Bos & Hans L.M. Laagland, "Design of a 3D printed concrete bridge by testing," *Virtual and Physical Prototyping* 13, no. 3, 2018, pp.222~236.
- Lee, H.J., Kim, J.H., Moon, J.H., Kim, W.W., & Seo, E.A. (2019). Evaluation of the mechanical properties of a 3D-printed mortar. *Materials*, 12(24), 4104.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). Could 3D printing change the world. *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC, 3, 1-16.
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296.
- 한국현, 백진욱, 박성윤, 임태완, 박주민(2021) 샌드 3D 프린팅 기술 융합을 통한 생산성 혁신 사례 연구, 한국정밀공학회지, 제38권, 제9호, pp. 651-657.
- Shakor, P., Chu, S. H., Puzatova, A., & Dini, E. (2022). Review of binder jetting 3D printing in the construction industry. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(4), 643-669.