

건설 3D 프린팅 기술: Construction 3D Printing Technology

이호재 인프라안전연구본부 선임연구원

건설용 3D 프린팅 기술의 발전

3D 프린팅 기술이 건설분야에 최초로 적용된 것은 2000년대 초반 University of Southern California의 Behrokh Khoshnevis 교수가 개발한 Contour crafting 기술이다. Contour crafting이란 외곽선을 적층하는 기술로 현재 건설용 3D 프린팅 기술의 기반이 되고 있다. 건설용 3D 프린팅 기술은 이후 발전하여 2010년대부터 영국의 Loughborough University, 네덜란드의 TU Eindhoven(이하 TU/e)를 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

또한 러시아의 Apis Cor는 2018년 단층 주택의 출력 성공 이후 2019년 높이 9.5m, 연면적 640m² 규모의 2층 Office를 현장에서 직접 출력하는 방식으로 건설하였다. 이를 통해 세계 최고 높이, 최대 면적의 건축물을 출력하는데 성공하였으며, 이를 통해 기네스북에 등재되는 기록을 달성하였다.

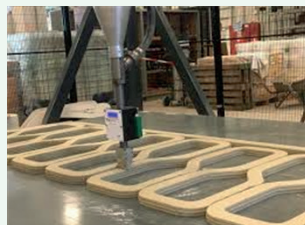


그림 1 TU/e 출력과정¹⁾



그림 2 TU/e 자전거 교량 출력물²⁾



그림 3 APIS COR의 출력과정(UAE)³⁾



그림 4 APIS COR의 2층 Office 출력물(UAE)⁴⁾

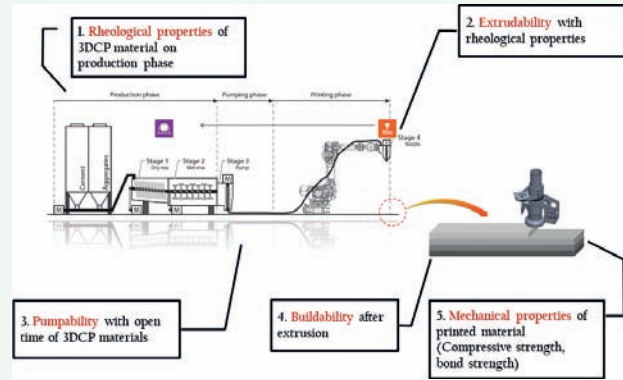


그림 5 건설용 3D 프린팅 기술 공정 [1, 2]

건설용 3D 프린팅 공정

건설용 3D 프린터의 공정은 3P phase(Production phase, Pumping phase, Printing phase)로 구성된다. 재료의 배합, 이송, 출력 과정으로 이루어지는데 재료준비부터 출력에 이르기까지 물질이동과정에 따라 주재료인 콘크리트가 가져야하는 주요 기능을 그림 5와 같이 표현하였다.

3D 프린팅 기술을 건설분야에 적용하기 위해서는 설계, 재료, 장비 기술의 확보가 필수적이며, 각 기술의 유기적인 연계를 고려해야 한다. 건설용 3D 프린팅 기술에 적용되는 3요소 중 설계기술은 출력물을 디자인하고 상품화하는 부분, 출력물의 구조적 안전성을 확보하고 검증하는 부분, 출력물을 장비의 특성에 맞춰 기계의 준비기능을 나타내는 G코드로의 변환이 가능하도록 슬라이싱하는 기술을 포함하고 있다. 특히, 적층공법은 구조물에 다수의 계면이 발생하는 특징이 있는데, 이에 대한 충분한 성능과 안전성을 확보하며, 장비의 특성에 맞는 출력물을 설계하는 것은 상당히 어렵고 복잡한 과정을 내포하고 있다.

건설용 3D 프린팅용 장비 동향

건설용 3D 프린터는 갠트리(Gantry) 로봇 형식의 장비가 주로 개발됐는데, 이는 장비의 정확하고 정밀한 제어가 쉬우며, 특히 기존 소형 3D 프린터 장비가 갠트리 로봇 형식으로 제작됐기 때문에 기술의 응용이 수월했기 때문이다. 그러나 최근 크레인(Crane) 형식, 로봇 팔(Robot arm) 형식의 프린터 개발이 활발히 이루어지고 있다. 건설용 3D 프린터 장비의 형식으로 가장 선호됐던 갠트리 로봇은 현장 기초면에 레일을 설치하여 레일위에서만 이동이 가능한 단점이 있으며, 출력물의 면적이 장비의 규모보다 커질 수 없으므로, 출력되는 구조물의 크기를 제한한다는 큰 단점이 있다. 반면, 크레인 형식, 로봇 팔 형식의 프린터는 장비는 갠트리 로봇과 비교하여 경량화가 가능하고 현장이동이 쉬워 최근 건설용 3D 프린터로 선호되는 형식이다.



그림 6 갠트리형식⁵⁾



그림 7 크레인형식⁶⁾



그림 8 로봇팔형식⁷⁾

건설 3D 프린팅용 재료 동향

건설 3D 프린팅용 재료로는 널리 알려진 콘크리트 외에 다양한 재료가 적용되고 있다. 이탈리아의 D-shape의 경우 Binder jetting 방식을 이용해서 콘크리트와 메탈의 혼합재료로 출력을 한다. 또한 프랑스 BatiPrint3D의 경우, 우레탄폼을 이용해서 거푸집을 출력하는 방식으로 적용하였으며, 이탈리아의 WASP는 친환경 재료인 진흙을 이용하여 3D 프린팅을 시도하였다. 이 외에도 다양한 소재의 개발과 연구가 진행되고 있으나, 생산단가 등의 문제로 인해 콘크리트가 전체 건설용 3D 프린팅 시장의 50% 이상을 차지 할 것으로 미국의 시장전문 조사기업인 Transparency market research는 전망하고 있다[3].

3D 프린팅 기술의 실용화를 위한 선결과제

3D 프린팅 기술을 건설분야에 적용하기 위해서는 설계, 재료, 장비 기술의 확보가 필수적이며, 각 기술의 유기적인 연계를 고려해야 한다. 건설용 3D 프린팅 기술에 적용되는 3요소 중 설계기술은 출력물을 디자인하고 상품화하는 부분, 출력물의 구조적 안전성을 확보하고 검증하는 부분, 출력물을 장비의 특성에 맞춰 기계의 준비기능을 나타내는 G코드로의 변환이 가능하도록 슬라이싱하는 기술을 포함하고 있다. 특히, 적층공법은 구조물에 다수의 계면이 발생하는 특징이 있는데, 이에 대한 충분한 성능과 안전성을 확보하며, 장비의



그림 9 콘크리트와 금속 재료 (D-shape)⁸⁾



그림 10 폴리우레탄폼 (BatiPrint3DTM)⁹⁾

특성에 맞는 출력물을 설계하는 것은 상당히 어렵고 복잡한 과정을 내포하고 있다.

또한, 기존의 시공기술보다도 더욱 정확하고 정밀하게 이동해야 하는 특징을 갖고 있는데, 허용공차가 수 mm 수준으로 매우 고정밀도를 요구한다. 만약 설계된 이동 경로에서 벗어나면 출력물에는 예상치 못한 결함이 발생할 수 있고, 최악의 상황에서는 이미 출력된 부재와 장비의 충돌로 인해 안전사고를 포함한 시공의 실패로 이어질 수 있기 때문에 높은 정확도와 정밀도를 필요로 한다.

향후 발전 방향

3D 프린팅 기술은 시공자동화의 한 축을 담당하는 기술로 성장하고 있다. 그러나 아직 완전한 성능을 갖는 구조물의 출력 자동화를 달성하기에는 다양한 문제들이 존재하며, 이를 해결하기 위해 건설, 기계, 설비, IT 등 다학제적인 융/복합 연구를 바탕으로 유기적인 협력을 통한 연구가 필요할 것으로 예상된다. 향후 건설용 3D 프린팅 기술의 지속적인 발전은 시공현장인력 투입규모 축소를 통한 안전성 확보, 시간적 제약에서 벗어난 연속시공으로 공기단축, 비정형 구조물의 출력 용이성을 바탕으로 한 거푸집 제작비용 절감 등 사회적, 경제적인 긍정적 효과 증대를 통해 건설 산업에 혁신적인 바람을 불러일으킬 것으로 예상된다.

1) 사진 : TU/e, <https://ko.tu.nl/blog/netherlands-3d-printed-bridge-eindhoven-university/>

2) 사진 : TU/e, <https://www.designindaba.com/articles/creative-work/eindhoven-university-technology-unveils-world%E2%80%99s-first-3d-printed-bridge>

3) 사진 : APIS COR, <https://inhabitat.com/worlds-largest-3d-printed-building-opens-in-dubai-2-weeks-of-construction/>

4) 사진 : APIS COR, <https://www.esquireme.com/content/40309-dubai-creates-worlds-largest-3d-printed-building>

5) 사진 : COBOD, <https://cobod.com/videos/>

6) 사진 : APIS COR, <https://www.apis-cor.com/gallery>

7) 사진 : CyBe, <https://cybe.eu/technology/3d-printers/>

8) 사진 : D-shape, <https://3dprint.com/27229/d-shape-3d-printed-military/>

9) 사진 : BatiPrint3D, <https://www.bouygues-construction.com/en/innovation/all-innovations/3d-printing>

참고자료

- Buswell, R. A., W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger. "3d Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research." *Cement and Concrete Research* 112 (2018): 37-49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- H. Lee, 2020, PhD Thesis, Experimental Evaluations of Extrudability, Pumpability, Buildability and Strengths of Cement-based Composite Materials for Construction Applications of 3D Printing
- 3D Printing in Construction Market, Rep Id : TMRGL74895 (2020): 197, Transparency Market Research, <https://www.transparencymarketresearch.com/3d-printing-construction-market.html>