

3D 콘크리트 프린터 분류체계 비교연구

정지훈¹ · 이강^{2*} · 김정훈³ · 최재진⁴

¹연세대학교 건축공학과 석사과정 · ²연세대학교 건축공학과 교수 · ³연세대학교 건설환경공학과 교수 · ⁴연세대학교 건축공학과 학사과정

A Comparative Analysis of the Classification System for Three-Dimensional Concrete Printers

Chung, Jihoon¹, Lee, Ghang^{2*}, Kim, Jung-Hoon³, Choi, Jaejin⁴

¹Graduate Student, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University

²Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University

³Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

⁴Undergraduate Student, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University

Abstract : This study reviews and comparatively analyzes existing classification systems for 3D concrete printers to propose a classification system for 3D concrete printers. Several classifications for existing 3D printers have been proposed and used in the market. Nevertheless, quite a few of the printer types such as fused deposition modeling (FDM) and selective laser melting (SLM) are not suitable for characterizing 3D concrete printers. To derive the properties that distinguish one 3D concrete printer type from the others, this study reviews existing 3D concrete printers and comparatively analyzes the properties of 3D concrete printers identified in previous studies. The results show that existing classifications do not reflect the states-of-the-art of 3D concrete printers, the classification terms are ambiguous, and the entire printing processes are not considered. A new classification system was proposed based on the essential properties of the 3D concrete printers identified through the analysis of related work. The result of this study can be used as a basis for classifying commercial 3D concrete printers as well as studies related to 3D concrete printers.

Keywords : Concrete, 3D Printing, Additive Manufacturing, Classification System, Digital Construction

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

낮은 시공비용, 적은 건설 폐기물, 건설현장 안전성과 같은 장점과 함께 건설 숙련공 감소에 대한 대안으로서 건설 자동화는 주목을 받아왔으며(Jin et al., 2009; Kwon, 2004; Lim and Kim, 2016), 특히 그중 건축용 3D 프린팅 기술은 2012년을 기점으로 급속히 발전해왔다(Delgado Camacho et al., 2018; Labonnote et al., 2016). 초기 3D 콘크리트 프린터는 플라스틱을 사용하는 상용 3D 프린터를 모방하여 개발되었는데, FDM (Fused Deposition Modeling)방식을 모방한 Contour Crafting과 SLS (Selective Laser Sintering)방

식을 모방한 D-Shape이 대표적인 예이다(Enrico Dini et al., 2006; Khoshnevis, 2004).

그러나 3D 콘크리트 프린터는 대상 구조물 설계 시, 콘크리트 물성에 대하여 고려해야 할 뿐만 아니라, 시공과정 또한 고려해야 하므로 기존의 상용 3D 프린터와 상당히 다른 모습으로 발전해왔다. 가장 보편적인 3D 콘크리트 프린터인 갠트리(gantry)방식은 단순한 상용 3D 프린터의 크기를 크게 만든 것으로 노즐의 위치를 X, Y, Z축에 따라 단순히 정의가 가능하지만(Labonnote et al., 2016), 규모가 큰 건축물을 출력하기 위해서는 거대한 3D 프린터가 필요하다는 단점이 있다. 그러나 규모가 큰 건축물을 출력하기 위해서는 출력하고자 하는 건축물보다 크게 3D 프린터를 설계해야 하는 치명적인 단점이 있다(Delgado Camacho et al., 2018). 이에 대한 대안으로 스페인 IAAC (Institute for Advanced Architecture of Catalonia)에서 Minibuilder라는 작지만, 협업이 가능한 세 개의 3D 콘크리트 프린터를 개발하였으며(IAAC, 2014) 러시아 Apis Cor에서는 크레인을 활용한 3D

* **Corresponding author:** Lee, Ghang, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

E-mail: glee@yonsei.ac.kr

Received November 29, 2019; **revised** -

accepted February 24, 2020

콘크리트 프린터를 개발하여 프린터보다 큰 주거형 건축물을 출력하기도 하였다(Apis Cor, 2017).

Statista (2018)의 보고에 따르면, 2018년 기준 상용 3D 프린터 중 가장 보편적으로 사용되는 기술은 FDM (46%), SLS (38%), SLA (stereolithography, 33%)이다. 그러나 사용되고 있는 3D 콘크리트 프린터 중 그 어느 것도 FDM 방식처럼 재료를 녹여 적층하거나 SLS 혹은 SLA 방식처럼 레이저를 활용하여 재료를 녹이거나 굳히지 않기에, 위 기술 체계로는 분류할 수 없다.

ISO 17296-2 (2015)에서는 상용 3D 프린터뿐만 아니라 건축과 의학, 고고학, 지도 제작 등 다양한 산업에서 활용되는 제각각 다른 3D 프린터의 출력과정에 대하여 일반적인 작동원리를 중심으로, vat photopolymerization, material jetting, binder jetting, powder bed fusion, material extrusion, directed energy deposition, 그리고 sheet lamination, 총 7가지 범주의 분류체계를 제안하고 있다. 그러나 현존하는 3D 콘크리트 프린터는 콘크리트를 배합하여 원하는 위치에 압출하거나 입자층(particle-bed)에 굳히고자 하는 부분에만 선택적으로 바인더나 활성화제, 혹은 두 재료의 혼합물을 압출하는 방법을 활용하고 있다 (Lowke et al., 2018). 감광성 수지에 빛을 쏘아 굳히는 vat photopolymerization, 금속 가루에 고출력 레이저, 그리고 얇은 판재를 레이저 혹은 초음파를 통해 잘라가며 적층하는 sheet lamination은 3D 콘크리트 프린터와 무관할 뿐만 아니라, 큰 규모의 출력에는 비효율적이기 때문에 건축용으로는 아직 개발되지 않았다(Delgado Camacho et al., 2018; Wu et al., 2016). 이는 ISO는 많은 분야의 3D 프린터를 넓은 범위로 분류는 가능하나, 각 산업에 최적화된 분류체계가 아님을 의미한다. 또한, 3D 프린팅은 재료 출력방법 자체만 바라볼 것이 아니라, 시공과 같은 다양한 시스템과 함께 고려되어야 한다(Lee et al., 2017).

본 연구는 기존의 3D 콘크리트 프린터를 분류한 논문들을 비교분석하여 3D 콘크리트 프린터에 최적화된 분류체계를 제안하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 분석범위는 2004년부터 2019년까지 출판된 논문 중 건축용 3D 프린터 비교분석 혹은 분류한 리뷰논문을 선정하여 분석하였다. 적절한 문헌을 적절한 문헌을 조사하기 위하여 Scopus 웹사이트에서 [(‘Concrete’ AND ‘3D Printing’) OR (‘Additive’ AND ‘manufacturing’)]이라는 문자열을 입력하여 논문 제목, 초록, 키워드 중심으로 검색하여 934개의 문헌을 검색하였고, 언어는 영어로, 자료 유형은 논문으로 걸러내어 390편의 논문을 추려내었다. 각 논문의

제목들을 분석하여 적절하다고 판단되는 논문 52편을 선정하였으며, 더 나아가 각 초록과 본문을 검토하여 건축용 3D 프린터 비교분석 및 분류한 논문 10편을 선정하였다. 선정된 논문들의 참고문헌을 검토하여 의미 있는 논문 2편을 더 추가함으로써 총 12편의 논문을 선정하였다. 각 논문은 건축용 3D 프린터의 가능성과 한계를 분석한 리뷰논문으로, 각 출판연도는 2012년도 1편, 2016년도 3편, 2017년도 1편, 2018년도 4편, 2019년도 3편으로 구성되어 있다.

본 논문의 2절에서는 각 기존의 문헌에서 제시한 3D 콘크리트 분류방법에 대하여 고찰하였고, 각 연구에서 제시한 분류체계에 대한 문제점을 종합하여 분석하였다. 3절에서는 2절에서 고찰한 내용을 토대로 3D 콘크리트 프린터 비교 및 분류 시 중점적으로 다뤄지고 있는 기준을 도출하였다. 4절에서는 3절의 분석결과를 토대로 기존 연구 및 프로젝트 사례를 분석하여 각 분류에 대한 세부항목을 도출하였다. 5절에서는 이 연구의 결론과 기여점, 향후 연구 방향을 언급하였다.

2. 기존 연구 고찰

2.1 기존 3D 콘크리트 프린터 분류체계

Lim et al. (2012)에 따르면, 초기의 3D 콘크리트 프린터는 선택적으로 바인더를 압출하여 굳히는 파우더 기반 적층방식(powder deposition process)과 시멘트 기반 반죽을 압출하는 적층방식(deposition head mounting)으로 나뉘어 발전하였으며, 해당 연구에서는 당시 개발된 Pegna, Contour Crafting, Concrete Printing, D-Shape의 기계 및 재료의 특성과 장단점을 비교하였다. 본 논문은 각 3D 콘크리트 프린터를 출력과정(process), 주형 사용 여부(use of mould), 재료(build material), 바인더(binder), 보강 여부(reinforcement)로 구분하였다.

Bos et al. (2016)에서는 3D 콘크리트 프린터의 가능성은 자명하나 실무에서 적용방안에 대한 모호함을 언급하며, 상황에 따라 3D 콘크리트 프린터의 4가지 선택 전략을 제시하였다. 저렴하고 빠른 시공을 목적으로 하거나 최적화된 형태에 고성능 품질을 목적으로 하는지(optimise production versus optimise performance), 그리고 현장 혹은 공장에서 출력하는지(on-site versus off-site)에 따라 전략적으로 선택할 수 있도록 제시하였다.

Labonnote et al. (2016)은 현존하는 적층제조 기술들을 노즐을 이동하는 메커니즘 혹은 기계를 작동하는 원리를 중심으로 분류하며, 각각의 기계적 한계점들을 분석하였다. 기계 작동원리에는 구동기를 X, Y, Z축으로 이동시키며 작동하는 갠트리 방식(gantry solution), 노즐을 케이블에 매

달아 이동시키는 방식(cable-suspended solution), 거대한 단일 로봇이 아닌 작고 여러 로봇을 협업하며 출력하는 군집 접근법(swarm approach), 다목적 로봇팔을 활용하여 재료를 출력하거나 벽돌을 쌓아 올리는 방법(multi-purpose robotics and automated assembly), 그리고 2차원의 판재를 종이접기식으로 스스로 접어 올리거나 조립하여 3차원 구조물로 만드는 방법(folding and self-assembly)가 있다. 또한, 적층제조하는 재료의 특성에 따라, 조적 혹은 탄소 섬유와 같은 고체 물질(solid-like materials), 시멘트와 같은 점성 물질(viscous-like materials), 석재가루와 같은 가루 물질(powder-like materials), 그리고 아직 건축분야에는 적용되지 않았지만 감광성 수지와 같은 액체 물질(liquid-like materials)로 나누어 구분하였다.

Timothy et al. (2016)은 건축 분야의 디지털 제조를 크게 형상 채우기(form filling)와 적층 제조(AM (additive manufacturing))로 구분하였으며, 적층제조를 다시 바인더 분사(binder jetting) 방식, 레이어 적층(layered extrusion), 그리고 처음으로 건설분야의 슬립폼 공법과 3D 프린팅을 결합한 슬립폼(slipforming) 방식까지 고려하며 분류하였으며, 각각의 장단점과 한계점을 분석하였다.

Duballet et al. (2017)은 3D 콘크리트 프린팅 중 압출 방식에 대하여, 보다 체계적인 건설 시스템을 구조화하고자 하였으며, 처음으로 표기법 체계를 도입하였다. 본 표기법은 출력하고자 하는 출력물의 크기(object scale), 출력하고자 하는 레이어의 두께(extrusion scale), 출력 환경(environment), 출력물의 조립 여부(assembly), 출력물 임시 지지대의 특성(support), 그리고 기계의 자유도(robot complexity)의 특성에 따라 구분되어 표기된다. 해당 저자는 현존하는 3D 콘크리트 프린팅 기술들을 본 표기법에 따라 표기하여 정리하였다.

Delgado Camacho et al. (2018)에서는 건설분야에서의 적층제조 방식을 시멘트, 폴리머 금속과 같은 재료와 ISO/ASTM에서 제시한 적층 과정에 따라 범주화하였다. 저자는 더 나아가 재료 전달 방식에 따라 갠트리(gantry), 로봇팔(robotic), 그리고 기타(other)로 구분하였으며, 각 범주의 특성에 대하여 분석하였다.

Lowke et al. (2018)은 입자층 3D 프린팅(particle-bed 3D printing)에 초점을 맞추어 연구논문들을 분석하였으며, 출력과정에 사용되는 재료를 중점적으로 분류하였다. 시멘트가 바인더로 사용되며 물 혹은 물 첨가된 용액을 뿌리며 굳히는 선택적인 바인더 활성화(selective binder activation) 방법, 입자층은 바인더 없이 골재로 이루어져 있고 시멘트와 물, 첨가물로 이루어져 있는 바인더 반죽을 압출하며 굳히는 선택적인 반죽 압출(selective paste intrusion), 그리고

레진과 같은 바인더를 입자층에 압출하며 굳히는 바인더 분사 방법(binder jetting)로 구분하였으며, 각각의 원리 및 실험에 관하여 분석하였다.

Asprone et al. (2018b)에서는 처음으로 3D 콘크리트 프린터에서 보강 전략에 대하여 구조적 원리(structural principle)와 제조 단계(manufacturing stage)라는 2차원의 축 분류로 제시하였다. 여기서 구조적 원리라는 축을 따르는 보강용 철근이 필요하지 않고 섬유로만 인장 강도와 연성을 보완할 수 있는 연성 출력 재료(ductile printing material), 보강용 철근이 필요하며 자동화 기술로 설치가 가능한 콘크리트 디지털 제조 혼합기술(DFC composite), 추가적인 인장 보강이 필요하지 않은 경우의 압축 하중 구조물(compression loaded structures), 그리고 혼합 해결책(hybrid solutions)으로 분류가 된다. 제조 단계라는 축을 따르는 콘크리트를 적층하기 이전에 보강하는 제조 이전 단계(before manufacturing), 콘크리트 적층 중에 보강하거나 재료에 적용하는 제조 도중 단계(during manufacturing), 그리고 제조 후에 보강물을 설치하는 제조 후 단계(after manufacturing)로 구분을 하였다.

Wangler et al. (2019)에서는 거푸집 없이 시공하는 콘크리트 디지털 제조 방식을 출력과정을 중심으로 분류하였다. 출력방법으로서 가장 보편적인 노즐을 통한 콘크리트 압출 방법(extrusion), 거푸집을 출력한 후 콘크리트를 부어 양생하는 거푸집 출력방법(formwork printing), 일시적인 지지대를 출력하고 콘크리트를 부어 양생하는 방법(temporary supports), 슬립폼 공법을 활용한 출력방법(slipforming), 그리고 입자층에 바인더를 출력하는 방법(particle bed fusion)을 분류하였다. 본 분류체계는 거푸집이 없는 적층제조뿐만 아니라, 거푸집을 활용한 출력방법까지 고려하여 구분하였다.

Paolini et al. (2019)에서는 적층제조 과정은 출력하고자 하는 재료와 긴밀하게 연관이 있음을 강조하였다. 본 연구는 건축용 3D 프린팅 기술을 크게 재료를 중심으로, 골재 재료(aggregate-based materials), 금속(metals), 그리고 폴리머(polymers)로 구분하였다. 그리고 각각의 재료에 따른 적층제조 과정을 분류하였으며, 골재 재료 중 재료 압출 방법(material extrusion), 입자층 과정(particle-bed process), 보강물 통합(integration of reinforcement) 방법의 경우에는 저자가 참고한 논문에 따라 세부적으로 구분하였다.

2.2 기존 분류체계의 문제점 도출

본 절에서는 각 논문의 저자들이 제시한 3D 콘크리트 프린터 분류체계에 대한 문제점에 대하여 고찰하여 다음과 같은 3가지의 문제점을 도출하였다.

2.2.1 최근 기술 및 프로젝트 미반영

건축용 3D 프린팅 기술이 본격적으로 개발되기 시작한 2016년까지 많은 연구자와 사기업들이 급증하였지만, 아직 유아기에 해당하며 다양한 기술들이 개발되지 않았다(Bos et al., 2016). 이에 따라 이 시기에 연구자들이 제안한 분류 기준 또한 제한적일 수밖에 없으며, 다양한 기술들이 개발된 현재에 본 분류체계를 그대로 활용하기에 적절하다고 보기 어렵다.

Lim et al. (2012)의 연구가 진행될 당시 3D 콘크리트 프린팅 기술은 압출 방식과 입자층 융합방식이 유일하였으나, 현재 출력기술은 거푸집 출력방식, 일시적 지지대 방식, 슬립폼 방식이 추가되었다(Wangler et al., 2019). 또한, Bos et al. (2016) 경우, 건축용 3D 프린터의 선택 전략을 네 가지로 나누어 고려하였으나, 구조적 안정성에 따라, 출력물 해상도에 따라, 그리고 출력물 규모에 따라 선택 전략이 달라질 수 있다(Asprone et al., 2018b; Labonnote et al., 2016; Lowke et al., 2018).

3D 콘크리트 프린팅 기술은 해마다 급속히 발전하고 있으며, 새로운 기술들은 끊임없이 등장하고 있다. 이에 따라, 3D 콘크리트 프린터 분류체계 또한 이를 반영하여 새로이 구성해야 할 필요성이 있다.

2.2.2 분류기준 용어의 모호성

현재까지 3D 콘크리트 프린터에 다양한 분류기준 및 비교분석이 이루어지고 있지만, 그에 대한 용어는 제각각 다르게 사용되고 있으며 몇몇 기준들은 그 개념들을 명료하게 구분하지 못하고 있다. 가장 모호하게 활용되고 있는 용어는 ‘technology’와 ‘process’란 단어이다.

Labonnote et al. (2016)은 적층제조 기술을 건설 규모로 키웠을 때 직면하는 다양한 어려움에 대하여 다양한 기술적 해결책들(technical solutions)을 제시하였다. 그러나 ‘기술적 해결책’이란 단어는 굉장히 광범위한 용어로, 다르게 해석될 여지가 다분하다. 또한, 저자가 기술적 해결책으로 구분한 기준도 일관적이지 못하다. 갠트리 방식, 케이블 방식, 로봇팔 방식은 개념들은 노즐의 이동방식으로 구분이 되지만, 균중 접근법은 로봇의 크기와 협업 가능 개수, 스스로 조립되는 방식은 스스로 조립되는 여부에 따라 구분이 되므로 분류기준이 모호해진다.

Wangler et al. (2019)에서는 각 구조물을 형성하는 방법을 ‘과정(process)’이라는 용어를 통하여 압출 방법, 슬립폼 방법, 입자층 융합방법뿐만 아니라 거푸집 출력, 일시적 구조물 방법까지 분류하였다. 이는 단순히 출력원리 혹은 적층제조 원리에 따라 분류한 것이 아니라, 시공과정까지 고려하여 분류한 것으로 ‘과정’이라는 용어를 다른 연구에서보다 넓은 의미로 활용한 것으로 보인다(Delgado Camacho et al.,

2018; Labonnote et al., 2016; Lim et al., 2012; Timothy et al., 2016).

3D 콘크리트 프린팅 기술이 발전에 따라 다양해지면서 관련 개념들을 보다 복잡해지고 있다. 이에 따라, 각 개념을 명료하게 설명할 수 있는 용어를 선정하여 표준화할 필요가 있다.

2.2.3 전체 출력과정에 대한 미고려

일반 적층제조 기술과 건설용 적층제조 기술의 가장 큰 차이점은 출력물의 크기에 있다. 건설용 출력기술은 단순히 프린터의 크기를 키우는 것을 넘어 보다 효율적으로 건축물을 출력하기 위하여, 출력방식뿐만 아니라, Minibuiler처럼 협업이 가능한 로봇을 제안하거나 구조물 보강에 대한 전략을 제안하는 것처럼 전체 출력과정까지 고려하여 개발되고 있다(Asprone et al., 2018b; Labonnote et al., 2016).

그러나 기존 3D 콘크리트 프린터 분류 및 비교분석 중에는 대부분 전체 출력과정까지 고려하지 않은 것으로 보인다. Delgado Camacho et al. (2018)의 경우에는 단순히 적층제조 과정과 재료, 재료 전달 시스템만 고려하여 분류하였으며, Timothy et al. (2016)에서는 디지털 콘크리트 기술을 단순히 개별 물체에 대한 출력과정을 기준으로만 분류하였다.

3D 콘크리트 프린터 연구자 혹은 잠재 고객이 프린터를 선택하는데 고려요소는 단순히 출력방법에 따른 장단점이 아닌, 시공에서의 장단점일 것이다. 전체 출력과정을 반영한 분류체계가 도입된다면, 그들이 프린터를 선택하는데 더욱 효율적이며 유용한 정보로 활용될 것으로 보인다.

3. 3D 콘크리트 프린터 분류기준 도출

기존 연구에서 3D 콘크리트 프린터를 비교분석 및 분류하기 위하여 다양한 분류기준이 활용되었으며, 그 중 필수적인 내용을 정리하면 아래 <Table 1>과 같다.

3.1 출력 재료(Printed Material)

출력 재료란 노즐을 통해 압출되어 적층되는 재료를 의미한다. 출력 재료의 특성은 적층제조 과정과 긴밀하게 연결되어, 어떠한 재료를 선택하느냐에 따라 적층제조 과정의 성격이 상당히 결정된다(Paolini et al., 2019). 입자층 융합방식의 경우, 출력 재료를 바인더를 사용하는지, 활성화제를 사용하는지에 따라 직접 부품 생산 혹은 거푸집 생산이 결정된다(Lowke et al., 2018). 재료 압출 방식의 경우, 콘크리트의 혼합 비율 혹은 첨가물에 따라 출력 노즐의 속도와 경로가 결정된다(Paolini et al., 2019). 그러므로 출력 재료는 전체 출력과정에 영향을 미치며, 3D 콘크리트 프린터를 분류하는 중요 기준이라 볼 수 있다.

Table 1. Identification of Classification Criteria for 3D Concrete Printer

Author, Year	Classification Criteria	Essential Properties
Lim et al., 2012	Process	Printed Material,
	Use of Mould	
	Binder	
	Build Material	
	Reinforcement	
Bos et al., 2016	Optimise Production versus Optimise Performance	Type of Printing Mechanism,
	On-site versus Off-site	
Labonnote et al., 2016	Material	On-site or Off-site Printing,
	Production Process	
	Technological Solution	
Wangler et al., 2016	Form Filling versus Additive Manufacturing	Type of Nozzle-Traveling System,
	Printing Process	
Duballet et al., 2017	Object Scale	Mobility of the Build Platform,
	Extrusion Scale	
	Environment	
	Assembly	
	Support	
Delgado et al., 2018	Material	The Number of Collaborative Robots,
	AM Process	
	Material Delivery Method	
Lowke et al., 2018	Printing Strategy of Particle-Bed 3D Printing	Reinforcement Strategy
Ghaffar et al., 2018	AM Technology used	Reinforcement Strategy
	Printed Material and Products	
Asprone et al., 2018b	Structural Principle	Reinforcement Strategy
	Manufacturing stage	
Wangler et al., 2019	Printing Process	Reinforcement Strategy
Zhang et al., 2019	Raw Materials	
Paolini et al., 2019	Material	Reinforcement Strategy
	AM Process	

3.2 출력기술 종류(Type of Printing Mechanism)

출력기술 종류란 3D 프린터가 원하는 형상을 출력하는 방식의 종류를 의미한다. 앞서 언급하였듯이 출력 재료가 출력과정의 성격을 결정하는 것처럼, 출력기술 종류는 선택할 수 있는 출력 재료의 범위를 규정한다. 예를 들어 재료 압출의 방식의 경우, 선택할 수 있는 재료는 점성재료에 국한되게 되며, 그 중 압송성능(pumpability), 적층성(buildability), 가사 시간(open time)의 조건을 만족하는 재료만 사용할 수 있다. 입자층 융합방식의 경우, 화학적 반응을 통하여 입자층의 재료를 굳힐 수 있는 성질의 물질만 출력 재료로 사용할 수 있다. 그러므로 출력기술 종류 또한 출력과정의 성격에 큰 영향을 미치는 요소라고 볼 수 있다(Labonnote et al., 2016).

3.3 현장출력 및 공장출력(On-Site or Off-Site Printing)

건축물을 출력하는 장소가 현장인지 공장인지 결정하는 것은 시공 전 과정에 큰 영향을 미친다. 공장출력은 콘크리트 혼합물이나 창과 문과 같은 가구의 운반뿐만 아니라, 3D 프린터 현장 설치 과정까지 대체할 수 있기 때문이다(Bos et al., 2016). 또한, 콘크리트 혼합물을 레미콘으로 운반하는 경우, 콘크리트가 굳어지기 전에 출력해야 하므로, 이는 시공 시간에 결정적인 영향을 미치며 시공 계획에도 중요한 변수가 된다. 그러므로 현장출력 및 공장출력은 시공과정을 함께 고려했을 때 중요하게 여겨져야 할 3D 콘크리트 프린터의 요소라 볼 수 있다.

3.4 노즐 이동 시스템 종류

(Type of Nozzle-Traveling System)

노즐 이동 시스템 종류란 갠트리(gantry), 크레인(crane), 로봇팔(robotic-arm), 케이블 방식(cable-suspended platform)과 같이 3D 콘크리트 프린터의 노즐 이동 방법을 의미한다. 본 시스템에 대하여 Labonnote et al. (2016)에서는 기술적 해결책(technical solution)라는 용어를 사용하였고, 그리고 Delgado Camacho et al. (2018)에서는 공간적 운반 시스템(spatial delivery system)라는 용어를 사용하였으며, 두 시스템에 공통적으로 포함된 요소에는 갠트리, 로봇팔이 있다. 두 요소의 중요한 차이점은 노즐의 위치를 정의하는 방식이다. 갠트리는 노즐의 위치를 X, Y, Z 축으로 정의하는 반면(Labonnote et al., 2016), 6축 로봇팔의 경우는 노즐의 위치를 6가지의 매개변수로 정의한다는 것이다(Shakor et al., 2017). Delgado Camacho et al. (2018)에서 다룬 케이블 방식은 4개의 매개변수로 표현하며(Bosscher et al., 2007), Labonnote et al. (2016)에서 살펴본 WASP(World's Advanced Saving Project)의 델타(delta) 방식은 3개의 매개변수로 정의한다(WASP, 2015). 즉, 각각의 분류기준은 용어만 보면 모호하지만, 각 분류내용을 살펴보면 노즐 이동 시스템의 종류를 공통으로 분류하고자 했음을 알 수 있다.

3.5 본체 이동 시스템(Mobility of the Build Platform)

본체 이동 시스템이란 3D 콘크리트 프린터가 원하는 장소로 이동을 가능하게 하는 이동 시스템을 의미한다. 건축용 3D 프린터의 가장 큰 한계 중 하나는 출력하고자 건물 규모가 커짐에 따라 프린터의 크기를 키우기 어렵다는 점이다. 그러한 점에서 프린터의 본체가 이동할 수 있다는 것은 큰 장점으로 꼽힐 수 있다. 최근 많은 연구자가 건설을 위한 이동 플랫폼을 개발하기 시작하였으며, 현장에서 더욱 큰 구조물을 출력하기 위해 이동 시스템은 필수적인 요소가 되고

있다(Keating et al., 2017). Furet et al. (2019)의 경우, 자율 주행 차량을 탑재하여 사람의 개입 없이 자유롭게 이동할 수 있도록 하였으며, 크레인 방식처럼 건설현장에 설치하거나 해체할 필요가 없도록 하였다. 이렇게 이동 시스템은 시공과정에서 다양한 장점을 주목받고 있으며, 앞으로 3D 콘크리트 프린터를 분류하는 중요한 기준으로 바라볼 수 있다.

3.6 협업 가능 로봇의 개수 (The Number of Collaborative Robots)

협업 가능 로봇의 개수란 계획된 건축물을 시공하는데 필요한 로봇의 개수를 의미한다. 3D 콘크리트 프린터의 크기를 키우지 않으면서도 출력하는 건물의 규모를 키울 수 있는 다른 방법 중 하나는 출력하는 협업 가능한 여러 개의 로봇을 활용하는 것이다. IAAC (2014)에서는 출력하고자 하는 출력물의 크기와 로봇의 크기를 독립적으로 만들기 위하여 작은 크기의 건설로봇 무리를 처음으로 개발하였다. 가로, 세로, 높이가 50cm 채 넘지 않는 이 로봇들은 그보다 거대한 구조물을 출력하는 성과를 보였다. 이를 기점으로 다양한 리뷰논문에서 새로운 접근법으로 주목받고 있으며, 앞으로 시공과정에서 중요한 요소로 꼽힐 것으로 보인다(Bos et al., 2016; Labonnote et al., 2016; Zhang et al., 2018).

3.7 보강 전략(Reinforcement Strategy)

3D 콘크리트 프린팅 기술이 실제 건설로 이어지는데 어려

움 중 하나는 콘크리트의 부서지기 쉽고 인장력이 약한 성질이다. 이러한 기계적 성질은 3D 콘크리트 프린팅 기술이 보강재 없이 발전하는데 명백한 걸림돌로 여겨지기도 한다(Asprone et al., 2018b). Asprone et al.(2018b)에서 살펴본 바와 같이 최근 연구 동향뿐만 아니라, 2010년 이전에 진행되었던 초기 몇몇 콘크리트 프린팅 실험을 살펴봐도 Contour Crafting에서는 실제 구조물에 형태를 유지하도록 돕는 보강재(form rebar)를 사용하였으며(Khoshnevis et al., 2006), D-Shape에서는 보강재와 조립 전략에 대한 실험이 이루어졌음을 알 수 있다(Gardiner, 2011). 이러한 점으로 미루어 보아, 3D 프린팅 기술의 상용화를 위해 보강전략에 대한 고려는 필연적인 것으로 보이며, 시공 전 3D 프린터의 종류와 함께 고려하여 선택해야 할 것이다.

4. 3D 콘크리트 프린터 분류 내 세부항목 도출 및 제안

기존 연구 및 프로젝트 사례를 분석하여 각 분류에 대한 세부항목을 도출하였으며, 그에 관한 사례와 출처를 정리하면 아래 <Fig.그림 1>과 같다.

4.1 출력 재료(Printed Material)

시멘트질 재료들(cementitious materials) 중 가장 대표적인 것은 콘크리트로, 상대적으로 다루기 쉽고, 높은 강도, 그

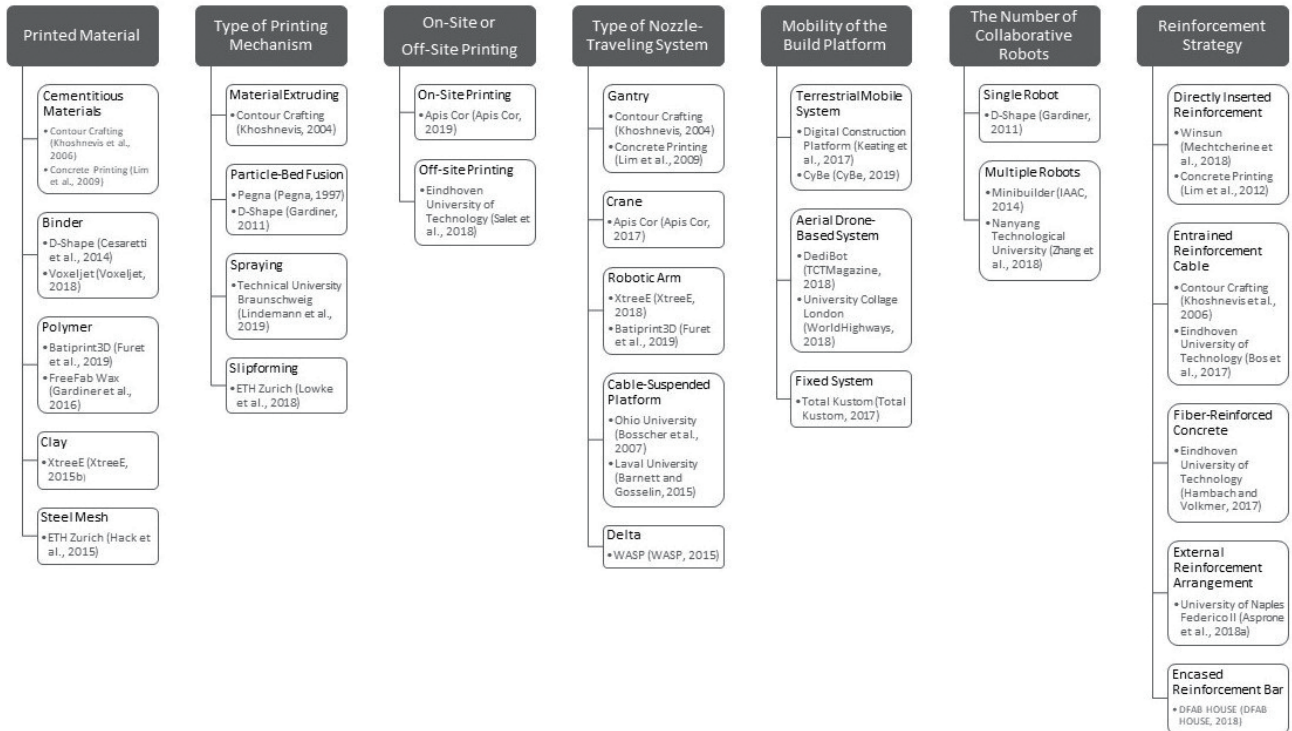


Fig. 1. Classification Criteria for 3D Concrete Printer

리고 저렴한 가격으로 건설 재료 중 가장 많이 사용되고 있으며, 이는 Contour Crafting과 Concrete Printing 등 초창기부터 3D 콘크리트 프린터의 출력 재료로서 가장 보편적으로 활용되고 있는 재료이다(Khoshnevis et al., 2006; Lim et al., 2009). 그러나 단순히 타설 재료가 아닌 3D 프린터의 출력 재료로 활용되는 것은 결코 단순해 보이지 않는다. 이전에 콘크리트 타설을 위한 적절한 유동성을 측정하는 척도로는 워커빌리티(workability)만 존재하였으나, 3D 콘크리트 프린팅 기술이 발달함으로써 출력을 위한 적절한 콘크리트 유동 요구조건으로 압송성능(pumpability), 압출성(extrudability), 출력성(printability), 적층성(buildability), 그리고 구조화율(structuration rate)와 같은 개념이 나타났으며, 적절한 유동성을 찾기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다(Wangler et al., 2019).

출력 재료를 바인더(binder)로 사용하는 사례로는 대표적으로 입자층 융합방법을 사용하는 D-Shape이 있으며, 골재로 이루어져 있는 입자층에 물이나 경화제와 같은 바인더를 선택적으로 압출하여 형상을 만들어간다(Cesaretti et al., 2014). 또 다른 예로는 PMMA 가루에 바인더인 polypor를 압출하여 비정형 거푸집을 생산하는 Voxeljet이 있다(Lowke et al., 2018; Voxeljet, 2018).

폴리머(polymer)는 물리적 특성상 콘크리트에 비해 낮은 경도와 강도로 인해 구조물의 역할에 적합하지 않다(Paolini et al., 2019). 이러한 특성으로 인해 구조물 대신 거푸집으로 출력되는 시도들이 나타나고 있다. 폴리우레탄 폼의 경우, 출력 후 45초 만에 충분한 경도와 강도를 나타내고 높은 단열성능으로 인해 거푸집인 동시에 단열재의 기능으로 사용되며(Furet et al., 2019), 폴리우레탄 왁스의 경우, 출력하여 비정형 콘크리트 구조물의 거푸집으로 사용한 후 온전히 재사용하여 폐기물을 줄임으로써 큰 비용 절감이 가능하게 한다(Gardiner et al., 2016; Laing O'Rourke, 2017).

진흙(clay)은 낮은 경도와 강도를 나타내지만, 물에 잘 녹는 물리적 특성이 있다. 이로 인해 XtreeE의 경우, 트리스나 비정형 구조물처럼 재료압출 방식으로 출력하기 어려운 구조물을 위한 몰드나 지지대를 출력하는데 활용하였다(XtreeE, 2015a; XtreeE, 2015b).

강철은 다른 재료에 비해 상대적으로 높은 경도와 강도로 인해 적은 양으로도 높은 하중을 견뎌낼 수 있다. Gramazio and Kohler Research에서는 강선을 구부리고 용접하여 강선 메시(steel mesh)를 직조하는 자동화 로봇을 개발하여 거푸집인 동시에 보강재가 될 수 있는 구조물을 제작하였다. 여기에 콘크리트를 부어 양생하면 구조적으로 안정한 콘크리트 벽이 완성되므로 출력과 보강이 통합된 방법이라 할 수 있다(Hack et al., 2015; Timothy et al., 2016).

4.2 출력기술 종류(Type of Printing Mechanism)

일반적으로 3D 콘크리트 프린팅을 생각하면 가장 먼저 떠오르는 것은 콘크리트를 이용한 재료 압출(material extruding) 방식이다. 재료 압출이란 노즐을 특정 위치에 이동시킨 후, 압력을 가하여 재료를 압출하는 것을 의미한다. 이는 2004년에 처음으로 3D 콘크리트 프린팅을 구현한 Contour Crafting의 Behrokh Khoshnevis의 업적으로 인해, 많은 연구자가 이를 기점으로 콘크리트 프린터 연구를 시작했기 때문으로 해석된다(Khoshnevis, 2004; Wangler et al., 2019).

다음으로 가장 인지도가 높은 기술은 Pegna가 처음 아이디어를 제안하고, D-Shape의 Enrico Dini가 구현한 입자층 융합(particle-bed fusion)방식이다(Gardiner, 2011; Pegna, 1997). 기본 원리는 골재로 이루어져 있는 입자층에 선택적으로 바인더를 압출하여 재료를 굳히는 방식이다. 보다 구체적으로 이는 다시 세 방식으로 나뉘는데, 바인더와 활성화제를 섞어 노즐을 통해 압출하는 방법(selective paste intrusion), 골재에 활성화제를 섞고 바인더를 압출하는 방법(binder jetting), 또는 골재에 바인더를 섞고 활성화제를 압출하는 방법(selective binder activation)이 있다. 재료 압출보다 형태의 제한 없이 출력할 수 있으며, 비교적 고해상도로 출력할 수 있다는 장점이 있다(Lowke et al., 2018).

분사(spraying) 방법은 슛크리트(shotcrete)와 3D 프린팅을 혼합한 방법으로, 기압을 가하여 호스를 통해 콘크리트나 몰탈을 운반하며 프린터 노즐을 통해 목표물에 빠른 속도로 분사하는 방법을 말한다. 재료 압출 방식과 비교하면, 쉘터 레버 출력과 박판(laminar) 출력, 그리고 다양한 각도의 출력이 가능하며, 출력 중 보강재 삽입이 용이하다는 장점이 있다(Lindemann et al., 2019).

슬립폼(slipforming) 방식이란 건설현장의 슬립폼 공법을 디지털 제조에 적용한 기술로, 기기에 부착된 콘크리트 경도 측정기와 피드백 시스템을 통해 거푸집을 수직으로 이동시키는 시점을 자동으로 파악하여 원하는 형상을 안정적으로 출력하도록 만든 시스템이다(Lloret et al., 2017). 주요 장점은 보강재를 활용하기 용이하다는 점과 재료 압출에서 발생하는 cold joint 문제가 발생하지 않는 점, 그리고 표면 품질이 우수하다는 점이다(Wangler et al., 2019).

4.3 현장출력 및 공장출력(on-Site or Off-Site Printing)

일반적으로 3D 콘크리트 프린팅은 실험실 혹은 공장에서 이루어진다. 이는 콘크리트 물성 특성상, 콘크리트 출력되고 강도가 발현되는데 비바람뿐만 아니라 온도와 습도의 영향을 받기 때문이다(Huang et al., 2019; Wolfs et al., 2019). 이에 관한 대표적인 사례는 네덜란드 아인트호벤 공과대학교

(Eindhoven University of Technology)에서 진행된 3D 콘크리트 프린팅된 교량을 시공하는 것이었다. 본 연구에서는 세계적으로 현장시공에서 제조 및 조립으로 변하고 있다고 전망하였으며, 통제된 출력환경은 로봇 사용과 같은 자동화 기술을 단순화한다고 보았다(Salet et al., 2018).

현장출력의 대표적인 사례로는 러시아의 Apis Cor사가 있다. 본 기업은 온도와 습도가 일정치 않은 자연환경에서 환경조건을 일정하게 유지하기 위한 임시 가설물 없이도 안정적인 출력이 가능하도록 연구하였으며, 그 결과로 최근에 두바이에서 640제곱미터라는 2019년 11월 기준 세계에서 가장 큰 3D 프린팅 건물을 성공적으로 출력하였다(Apis Cor, 2019).

4.4 노즐 이동 시스템 종류 (Type of Nozzle-Traveling System)

갠트리(gantry) 방식은 기본적으로 X, Y, 그리고 Z축으로 노즐의 위치를 정의하고 이동하는 시스템으로서, 가장 단순한 형태로 초기 3D 콘크리트 프린터들은 물론 현재에도 가장 많이 사용되는 방식이다(Labonnote et al., 2016; Lim et al., 2012).

크레인(crane) 방식은 XY좌표 평면에서의 노즐의 위치를 X, Y축으로 정의하는 것이 아니라, 각도 θ 와 크레인 팔의 길이로 정의한다. 대표적인 사례로는 러시아의 Apis Cor가 있으며(Apis Cor, 2017), 갠트리 방식과는 달리 로봇이 차지하는 공간보다 더 넓은 공간을 출력할 수 있으며, 로봇팔 방식에 비해 상대적으로 출력 가능 범위가 넓다는 장점이 있다.

로봇팔(robotic arm) 방식은 노즐의 위치를 갠트리처럼 3개의 축으로 정의하는 것이 아닌, 6개의 축으로 정의하는 방식이다(Shakor et al., 2017). XtreeE의 경우 6개의 축으로 이루어져 있으며, Batiprint3D의 경우 4개의 축으로 이루어진 로봇을 활용하고 있다. 본 방식은 크레인 방식처럼 로봇이 차지하는 공간보다 더 넓은 공간을 출력할 수 있으며(Labonnote et al., 2016), 크레인 방식보다 노즐의 각도 조절이 자유롭다는 장점이 있다.

케이블 방식은 로봇을 케이블에 매달아 이동시키는 방식으로 케이블에 연결된 구동기의 개수와 동일한 매개변수의 개수로 노즐의 위치를 정의한다. 본 방식은 더 넓은 출력 가능 영역을 확보할 수 있다는 점에서 주목을 받았으며, 이에 더해 로봇을 이동시키는데 비교적 적은 에너지가 소요되고 설치 및 해체도 간단하다. 대표적인 사례로는 미국의 오하이오 대학교와 캐나다의 라발 대학교가 있다(Barnett and Gosselin, 2015; Bosscher et al., 2007).

델타(delta) 방식은 저가형 상용 3D 프린터에서 주로 사용되는 방식으로, 3개의 수직축을 통해 노즐이 이동하며 상대

적으로 안정적이라는 장점이 있다. 대표적인 사례로는 이탈리아의 WASP가 있다(WASP, 2015).

4.5 본체 이동 시스템(Mobility of the Build Platform)

같은 크기의 3D 콘크리트 프린터를 통해서 보다 큰 규모의 건축물을 시공하기 위해 3D 프린터는 이동 플랫폼을 개발하는 연구가 최근에 증가하고 있으며, 이동 플랫폼의 이동 방식에는 지상 이동 시스템(terrestrial mobile system)과 항공 드론 시스템(aerial drone-based system)이 있다(Keating et al., 2017).

지상 이동 시스템은 트럭이나 캐터필러(caterpillar)와 같은 플랫폼을 통해 대지 위에서 이동하는 시스템을 의미한다. 미국 MIT Media Lab의 DCP (Digital Construction Platform)의 경우에는 트랙기반 이동 플랫폼(track-based mobile platform)을 탑재하여, 3D 프린터가 무인으로 목표한 장소에 이동하여 출력을 진행하는 실험을 진행하기도 하였다(Keating et al., 2017). 네덜란드의 CyBe의 경우에는 무한궤도 시스템(crawler system)을 활용하였으며, 목표한 장소에서 네 개의 지지대를 이용해 본체를 들어 올려 바퀴로 인해 흔들리는 것을 방지하였다(CyBe, 2019).

항공 드론 시스템은 드론을 통해 공중을 자유롭게 이동하는 시스템을 의미한다. 2014년도에 폴리우레탄 폼을 출력하는 드론기반 3D 프린팅이 개발되었고(Hunt et al., 2014), 2015년도에는 시멘트질 재료를 출력하는 실험이 진행되었다(Jared Shier, 2015). 2018년도에는 DediBot에서 출력 시연이 진행하였으며(DediBot, 2018; TCTMagazine, 2018), 동일 연도 유니버시티 칼리지 런던(University College London)에서 드론 기반 3D Printer를 통하여 콘크리트와 아스팔트 도로의 하자를 보수하는 논문이 출판되기도 하였다(Jackson et al., 2018; World Highways, 2018). 항공 드론 시스템은 시스템 특성상, 비행 중 안정적인 출력은 여전히 어려워 보인다. 하지만 최근 많은 개발이 이루어지는 것으로 보아, 본 한계점도 머지않아 상당 부분 해결될 것으로 기대한다.

4.6 협업 가능 로봇의 개수 (The Number of Collaborative Robots)

현재까지 대부분의 건축용 3D 프린터는 단일 로봇(Single Robot)으로서 출력이 이루어졌으나, 2014년도에 세 개의 작은 로봇을 통해 구조물을 출력하는 스페인 IAAC의 Minibuilder의 등장으로 협업 로봇의 가능성을 주목받았다. 본 로봇 시스템은 세 개의 각기 다른 기능을 가진 로봇으로 구성되어 있으며, 각각의 모델은 기초, 벽 및 천장, 그리고 마감을 출력하는 역할을 담당한다(IAAC, 2014). 세 개의 로봇은 각각의 역할을 나누어 출력과정에 따라 하나씩 진행

할 뿐, 진정한 의미의 협업이라 보기 어렵다. 그러나 최근에 진행된 싱가포르 난양공과대학교(Nanyang Technological University)에서 진행된 연구는 동일한 모델의 두 로봇이 각자 담당한 부분을 동시에 출력하여 하나의 구조물을 만드는 실험이 이루어졌다(Zhang et al., 2018). 본 연구에서는 위치 계획, 로봇 위치 확인, 충돌 방지, 조직화한 출력기술을 통해 협업 로봇을 개발하는데 여러 어려움들을 극복함으로써, 3D 프린팅 협업 로봇에 대한 현실적인 실현 가능성을 제시하였다.

4.7 보강 전략(Reinforcement Strategy)

Asprone et al. (2018b)에서 현재까지 연구된 3D 콘크리트 프린팅에서의 보강 전략들을 구조적 원리에 따라, 그리고 제조과정 단계에 따라 정리하였다. Paolini et al. (2019)에서는 본 내용을 토대로 보강재가 내부 혹은 외부인지에 따라, 그리고 출력 전, 중, 후에 설치되는지에 따라 재구성하였다.

3D 콘크리트 프린팅의 보강 전략을 떠올리면 가장 직관적으로 떠올리는 것은 콘크리트 거푸집 출력 도중 철근을 직접 삽입한 후에 콘크리트를 붓는 방법(directly inserted reinforcement)이다. 중국의 Winsun은 출력 후 콘크리트 붓기 전에 수직 보강재를 삽입하는 기술을 사용하였고(Mechtcherine et al., 2018), 영국의 Concrete Printing에서는 벤치를 설계하는 과정에서 23개의 빈 공간을 내어 출력 후 이곳에 보강재를 삽입하였다(Lim et al., 2012). 본 전략은 굉장히 쉽고 경제적인 장점이 있는 반면에, 출력된 콘크리트와 양생된 콘크리트 간의 접합력이 좋지 않다는 것과 구조적으로 비효율적인 단점이 있다.

최근 개발된 자동 보강방법으로는 콘크리트를 금속 케이블과 함께 출력하는 방법(entrained reinforcement cable)이다. 본 보강전략은 2006년도에 Khoshnevis가 제안한 아이디어(Khoshnevis et al., 2006), 최근에 아인트호벤 공과대학교에서 많은 연구가 이루어졌다(Bos et al., 2017). 본 연구 내용에 따르면, 본 보강 전략은 기존의 철근콘크리트 부재만큼 출력물의 연성을 상당히 향상시키며, 모멘트 저항력에 대한 추정도 가능하다.

출력과 동시에 보강을 하는 또 다른 방법으로는 매입형 철근(encased reinforcement bar)을 활용하는 것이다. 일반적으로 슬립폼 출력방식에 활용되는 보강전략으로, 콘크리트 출력 전에 표준화되고 저렴한 변형된 출근을 복잡한 형상에 맞게 구부리는 자동화 시스템을 적용하여 제작한다. 그리고 철근을 매입한 상태로 콘크리트 출력 및 양생을 진행하는 방법이다. 대표적인 사례로는 스위스의 DFAB HOUSE로, 제각각 다른 형상의 멀리언(mullion)들을 수평 하중 조건에 맞게 최적화하여 제작한 후 슬립폼 방식의 3D 프린팅

을 진행하였고, 그 결과 충분한 전단 강도와 연성을 확보하였다.

가장 간단하게 보강을 하는 방법의 하나는 콘크리트 자체의 휨강도를 높이는 것이다. 섬유 보강된 콘크리트(fiber-reinforced concrete)는 콘크리트 배합 시, 유리 및 탄소 섬유를 함께 배합한 콘크리트를 의미한다. Hambach and Volkmer (2017)에 따르면, 이러한 방법은 혼합물의 휨강도를 상당히 증가시킨다. 그러나 비록 휨강도가 30MPa까지 높은 강도를 나타낸다고 하더라도, 여전히 철근 보강은 필요하다는 한계점은 존재한다.

외부 보강재 배열(external reinforcement arrangement)은 보강재와 제작과 콘크리트를 출력을 별도로 진행한 후, 철근 콘크리트(RC) 부재를 제작하는 방법이다. 이는 이상적으로는 RC 부재를 디지털 제조를 통해 여러 개의 부분으로 나누어 콘크리트 출력 후, 보강재를 통하여 조립하는 것이다(Asprone et al., 2018b). Asprone et al. (2018a)에서는 비정형의 RC 부재를 제작하기 위해 10개의 부분으로 나누어 출력 후, 레바 보강재를 활용하여 연결하였다. 본 구조물은 사전에 FEM (Finite Element Model)을 통하여 구조 최적화된 것으로 불필요한 부피를 최소화하여 가벼우면서도 높은 휨강도를 나타낸다. 또한, 시공방법에 있어서 복잡한 형상의 거푸집 시스템이 필요 없으며, 운반과 설치 및 해체가 용이하다는 장점이 있다.

5. 결론

본 연구는 3D 콘크리트 프린터의 분류체계 제안하기 위하여 기존 건축용 3D 프린터 비교분석 및 분류한 리뷰논문들을 선정하여 분석하고 종합하였다. 기존 3D 콘크리트 프린터 분류 시 중점적으로 다루지는 7가지 기준인 출력 재료, 출력기술 종류, 현장출력 및 공장출력, 노즐 이동 시스템 종류, 본체 이동 시스템, 협업 가능 로봇의 개수, 보강 전략을 분류기준으로 도출하였다. 더 나아가 기존 연구 및 프로젝트 사례 분석을 통해 각 분류에 대한 세부항목 26개를 도출하여 구체화된 분류체계를 구축하였다.

본 분류체계는 기존 비교 및 분류기준에서 발견되었던 최신 기술과 프로젝트가 반영되지 못한 점, 분류기준 용어가 모호한 점, 그리고 전체 출력과정에 대해 고려하지 못한 점을 해결하는 방향으로 개발되었다. 이러한 분류 및 특징 조합은 현존하는 각 3D 콘크리트 프린터의 성격을 보다 명료하게 규정하고 각 기술에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 보인다. 더 나아가, 이는 3D 콘크리트 프린터 연구자 혹은 잠재 고객이 각 프린터에 대한 특징을 비교하고 선택하는데 용이하게 할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 3D 콘크리트 프린터의 논문을 분석하고 핵심 기준을 도출하여 3D 프린터의 기술 및 시공 측면에서의 분류체계를 제시하였다. 향후 연구에서는 3D 콘크리트 프린터의 성능평가지표를 파악하는 연구를 통해 상세한 기술 사양까지 다루고, 이를 통해 각 프린터의 특징을 비교하고 선택하는 데 지침을 줄 수 있는 콘크리트 프린터의 표준 기술 사양을 개발하여 제안하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 연구비지원 (19AUDP-B121595-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Apis Cor. (2017). 3D printing a home for under \$10,000. Retrieved from <https://www.apis-cor.com/gallery>.
- Apis Cor. (2019). Collaborative Project with Dubai Municipality. Retrieved from <https://www.apis-cor.com/dubai-project>
- Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C., and Mercuri, V. (2018a). "3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach." *Construction and Building Materials*, 165, pp. 218-231.
- Asprone, D., Menna, C., Bos, F.P., Salet, T.A.M., Mata-Falcón, J., and Kaufmann, W. (2018b). "Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete." *Cement and Concrete Research*, 112, pp. 111-121.
- Barnett, E., and Gosselin, C. (2015). "Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot." *Additive Manufacturing*, 7, pp. 27-44.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., and Salet, T. (2016). "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing." *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), pp. 209-225.
- Bos, F.P., Ahmed, Z.Y., Jutinov, E.R., and Salet, T.A.M. (2017). "Experimental Exploration of Metal Cable as Reinforcement in 3D Printed Concrete." *Materials (Basel)*, 10(11).
- Bosscher, P., Williams, R.L., Bryson, L.S., and Castro-Lacouture, D. (2007). "Cable-suspended robotic contour crafting system." *Automation in Construction*, 17(1), pp. 45-55.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., and Pambaguian, L. (2014). "Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology." *Acta Astronautica*, 93, pp. 430-450.
- CyBe. (2019). Technology - 3D Printers. Retrieved from <https://cybe.eu/technology/3d-printers/>
- DediBot. (2018). Open-ended Additive Manufacturing (OAM). Retrieved from <http://www.dedibot.com/en/product/detail/19>
- Delgado Camacho, D., Clayton, P., O'Brien, W.J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., and Salamone, S. (2018). "Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review." *Automation in Construction*, 89, pp. 110-119.
- DFAB HOUSE. (2018). DFAB HOUSE. Retrieved from <https://dfabhouse.ch/dfab-house/>
- Duballet, R., Baverel, O., and Dirrenberger, J. (2017). "Classification of building systems for concrete 3D printing." *Automation in Construction*, 83, pp. 247-258.
- Enrico Dini, Moreno Chiarugi, and Nannini, R. (2006). United States Patent No. US20080148683A1.
- Furet, B., Poullain, P., and Garnier, S. (2019). "3D printing for construction based on a complex wall of polymer-foam and concrete." *Additive Manufacturing*, 28, pp. 58-64.
- Gardiner, J. (2011). "Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing - Project Led Architectural Research." (Doctor of philosophy). *RMIT*.
- Gardiner, J., Janssen, S., and Kirchner, N. (2016). "A realisation of a construction scale robotic system for 3D printing of complex formwork." *Proceedings of the ISARC 2016-33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- Hack, N., Lauer, W.V., Gramazio, F., and Kohler, M. (2015). "Mesh Mould: Robotically fabricated metal meshes as concrete formwork and reinforcement." *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferroement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*, Aachen, Germany.
- Hambach, M., and Volkmer, D. (2017). "Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste." *Cement and Concrete Composites*, 79, pp. 62-70.
- Huang, H., Huang, T., Yuan, Q., Zhou, D., Deng, D., and Zhang, L. (2019). "Temperature dependence of structural build-up and its relation with hydration kinetics of cement paste." *Construction and Building Materials*, 201, pp. 553-562.
- Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, P.A., and Kovac, M. (2014). "3D printing with flying robots." *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- IAAC. (2014). Small Robots Printing Large-Scale Structures. Retrieved from <https://iaac.net/project/minibuilders/>
- ISO. (2015). Additive manufacturing - General principles. In Part 2: Overview of process categories and feedstock

- (ISO 17296-2:2015): Dansk Standard.
- Jackson, R.J., Wojcik, A., and Miodownik, M. (2018). "3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties." *Materials and Design*, 160, pp. 468-474.
- Jared Shier, T.T. (2015). 3D Printing at SxSW Robot Petting Zoo. Retrieved from <http://www.gensleron.com/work/2015/3/13/3d-printing-at-sxsw-robot-petting-zoo.html>
- Jin, I.G., Shin, Y.S, Cho H.H., and Kang, K.I. (2009). "Development of Component Design Process for Automated Construction System." *Korean Journal of Construction Engineering and Management* *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 4(1), pp. 76-86.
- Keating, S.J., Leland, J.C., Cai, L., and Oxman, N. (2017). "Toward site specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales." *Science Robotics*, 2(5), eaam8986.
- Khoshnevis, B. (2004). "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies." *Automation in Construction*, 13(1), pp. 5-19.
- Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K.-T., and Yeh, Z. (2006). "Mega-scale fabrication by Contour Crafting." *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 1.
- Kwon, S.W. (2004). "Human Assisted Fitting and Matching Primitive Objects to Sparse Point Clouds for Rapid Workspace Modeling in Construction Automation." *Korean Journal of Construction Engineering and Management* *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 5(5), pp. 151-162.
- Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., and Rüter, P. (2016). "Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities." *Automation in Construction*, 72, pp. 347-366.
- Laing O'Rourke. (2017). FreeFAB. Retrieved from <https://www.freefab.com/>
- Lee, J.-Y., An, J., and Chua, C.K. (2017). "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials." *Applied Materials Today*, 7, pp. 120-133.
- Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G. F., and Thorpe, T. (2012). "Developments in construction-scale additive manufacturing processes." *Automation in Construction*, 21, pp. 262-268.
- Lim, S., Le, T., Webster, J., Buswell, R., Austin, S., Gibb, A., and Thorpe, T. (2009). "Fabricating construction components using layer manufacturing technology." *Proceedings of the Global Innovation in Construction Conference 2009 (GICC'09)*, Loughborough University. <http://oro.open.ac.uk/37889/>
- Lim, S.Y., and Kim, S. (2016). "A Text Mining Analysis for Research Trend about Information and Communication Technology in Construction Automation." *Korean Journal of Construction Engineering and Management* *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 17(6), pp. 13-23.
- Lindemann, H., Gerbers, R., Ibrahim, S., Dietrich, F., Herrmann, E., Dröder, K., Raatz, A., Kloft, H. (2019). "Development of a Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) Technology for Additive Manufacturing of Reinforced Freeform Concrete Structures." *Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*.
- Lloret, E., Reiter, L., Wangler, T., Gramazio, F., Kohler, M., and Flatt, R.J. (2017). "Smart dynamic casting: slipforming with flexible formwork—inline measurement and control." *HPC/CIC Tromsø 2017*, p. 27.
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., and Dillenburger, B. (2018). "Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges." *Cement and Concrete Research*, 112, pp. 50-65.
- Mechtcherine, V., Grafe, J., Nerella, V.N., Spaniol, E., Hertel, M., and Füssel, U. (2018). "3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour." *Construction and Building Materials*, 179, pp. 125-137.
- Paolini, A., Kollmannsberger, S., and Rank, E. (2019). "Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods." *Additive Manufacturing*, 30, 100894.
- Pegna, J. (1997). "Exploratory investigation of solid freeform construction." *Automation in Construction*, 5(5), pp. 427-437.
- Salet, T.A.M., Ahmed, Z.Y., Bos, F.P., and Laagland, H.L.M. (2018). "Design of a 3D printed concrete bridge by testing." *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), pp. 222-236.
- Shakor, P., Renneberg, J., Nejadi, S., and Paul, G. (2017). "Optimisation of different concrete mix designs for 3D Printing by utilising 6DOF industrial robot." *Proceedings of the ISARC 2017-Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*.
- Statista. (2018). Most used 3D printing technologies in 2017 and 2018. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>

- TCTMagazine. (2018). DediBot showcase flying 3D printer at TCT Asia 2018. Retrieved from <https://www.tctmagazine.com/tct-events/tct-asia/dedibot-showcase-flying-3d-printer-at-tct-asia-2018/>
- Timothy, W., Ena, L., Lex, R., Norman, H., Fabio, G., Matthias, K., Robert, F. (2016). "Digital Concrete: Opportunities and Challenges." *RILEM Technical Letters*, 1(0).
- Total Kustom. (2017). 3D Concrete House Printer. Retrieved from <http://www.totalkustom.com/>
- Voxeljet. (2018). Complex Concrete Formwork - With 3D Printing. Retrieved from <https://www.voxeljet.com/applications/concrete-formwork/>
- Wangler, T., Roussel, N., Bos, F.P., Salet, T.A.M., and Flatt, R.J. (2019). "Digital Concrete: A Review." *Cement and Concrete Research*, 123, 105780.
- WASP. (2015). BigDelta WASP 12m. Retrieved from <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/#bigdelta>
- Wolfs, R.J.M., Bos, F.P., and Salet, T.A.M. (2019). "Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion." *Cement and Concrete Research*, 119, pp. 132-140.
- World Highways. (2018). Researchers trial 3D printing for both concrete and asphalt roads. Retrieved from <https://www.worldhighways.com/categories/materials-production-supply/features/researchers-trial-3d-printing-for-both-concrete-and-asphalt-roads/>
- Wu, P., Wang, J., and Wang, X. (2016). "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry." *Automation in Construction*, 68, pp. 21-31.
- XtreeE. (2015a). Space Truss Prototype. Retrieved from <http://www.xtreee.eu/projects-space-truss-prototype/>
- XtreeE. (2015b). Clay Mold for Concrete Surface. Retrieved from <http://www.xtreee.eu/projects-clay-mold-for-concrete-surface-prototype/>
- XtreeE. (2018). Woven Concrete Benches. Retrieved from <http://www.xtreee.eu/project-woven-concrete-benches/>
- Zhang, X., Li, M., Lim, J.H., Weng, Y., Tay, Y.W.D., Pham, H., and Pham, Q.-C. (2018). "Large-scale 3D printing by a team of mobile robots." *Automation in Construction*, 95, pp. 98-106.

요약 : 본 연구의 목적은 기존의 3D 콘크리트 프린터의 분류체계를 검토하고 비교분석하여 3D 콘크리트 프린터의 분류체계를 제안하는 것이다. 기존의 3D 프린터에 대하여 여러 분류체계가 제안되어 왔고, 관련 시장에서는 이를 사용하기도 한다. 그럼에도 불구하고, 상당히 많은 종류의 프린터가 FDM(Fused Deposition Modeling)이나 SLM(Selective Laser Melting)처럼 3D 콘크리트 프린터를 특징짓는데 적절하지 않다. 3D 콘크리트 프린터 간에 구분 짓는 특징을 밝히기 위해서, 본 연구는 기존의 3D 콘크리트 프린터를 검토하고 기존 연구에서 확인된 3D 콘크리트 프린터의 특징을 비교분석을 하였다. 그 결과, 기존의 분류체계는 최신 3D 콘크리트 프린터를 반영하지 못하였고, 분류 용어들은 모호하며, 전체 출력과정은 고려되지 않았음을 알 수 있었다. 기존 연구 분석을 통하여 3D 콘크리트 프린터의 필수적인 특징들을 도출함으로써, 새 분류체계를 제안하였다. 본 연구결과는 3D 콘크리트 프린터 관련 연구들뿐만 아니라, 상업용 3D 콘크리트 프린터들을 분류하는데 기초가 될 수 있을 것이다.

키워드 : 콘크리트, 3D 프린팅, 적층제조, 분류체계, 디지털 건설
