

리사이클링 원료를 사용한 건축용 3D 프린팅 기술 동향

백철승* · 서준형* · 조진상* · 안지환** · §조계홍*

*한국석회석신소재연구소, **한국지질자원연구원

3D Printed Building Technology using Recycling Materials

Chul-Seoung Baek*, Jun-Hyung Seo*, Jin-Sang Cho*, Ji-Whan Ahn** and §Kye-Hong Cho*

*Korea Institute of Limestone and Advanced Materials

**Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약

3D 적층가공(3D Additive manufacturing, AM) 기술은 기존산업의 패러다임을 혁신하는 새로운 비즈니스 모델로 자리매김하고 있다. 2000년대 초 선보인 건축용 3D 프린팅(3D printed building) 기술 또한 미국과 유럽을 중심으로 기계/전자 기술과 연계하여 빠르게 발전하고 있다. 그러나 건축용 3D 프린터 시스템의 경우 기존 전통적인 건설공법에 사용되는 시멘트/콘크리트 원료 제품과는 다른 기계적 특성을 요구한다. 이에 따라 시멘트 산업과 자원리사이클링 산업에서 생산되는 소재원료의 활용도를 높이기 위해서는 건축용 3D 프린팅 기술의 특성을 반영하기 위한 소재가공 및 활용기술 개발, 새로운 물성평가 및 테스트 방법의 확보, 환경적 안정성과 관련된 장기간의 데이터베이스 확보가 필요하다.

주제어 : 적층가공, 3D프린팅, 건축재료, 산업부산물, 리사이클링

Abstract

3D printing, also known as Additive Manufacturing (AM), is being positioned as a new business model of revolutionizing paradigms of existing industries. Launched in early 2000, 3D printing technology for architecture has also advanced rapidly in association with machinery and electronics technologies mostly in the United States and Europe. However, 3D printing systems for architecture require different mechanical characteristics from those of cement/concrete raw materials used in existing construction methods. Accordingly, in order to increase utilization of raw materials produced in the cement and resource recycling industry, it is necessary to develop materials processing and utilization technology, to secure new property evaluation and testing methods, and to secure database related to environmental stability for a long period which aims to reflect characteristics of an architectural 3D printing technology.

Key words : Additive manufacturing, 3D Printing, Construction material, Industrial waste, Recycling

1. 서 론

3D 프린팅 기술은 적층제조기술(Additive Manu-

facturing, AM), 고체자유형상제조기술(Solid Freeform Fabrication, SFF), 쾌속조형(Rapid Prototyping, RP)이라고도 하며 현대 제조업의 패러다임을 바꿀 차세대 기

· Received : September 8, 2017 · Revised : October 17, 2017 · Accepted : November 24, 2017

§ Corresponding Author : Kye-Hong Cho (E-mail : khcho99@kilam.re.kr)

R & D Department, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials, 18-1, Udeok-gil, Maepo-eup, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do, 27003, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

술로 주목받고 있다. 3D 프린터에 사용되는 원료소재의 경우 범용 및 엔지니어링 플라스틱 원료가 주로 사용되고 있으며 최근에는 생체친화형 바이오소재, 나노금속 파우더 및 세라믹 등으로 소재의 활용범위가 확대되고 있다. 이러한 3D 프린팅 기술은 생산-유통-소비자로 전달되는 현재의 공급망 구조를 혁신시킬 수 있는 기술로 제조업은 물론 건설 산업에도 큰 영향을 끼치는 중요한 기술로 인식되고 있다.

건축/건설/토목 분야에 사용되는 대형 3D 프린팅 기술 및 건축용 3D 프린팅 기술(3D printed building)은 2000년대 초반 미국, 유럽을 중심으로 디지털 소프트웨어 기반 모델설계 및 구조해석 기술의 발전이 진행됨에 따라 본격적으로 개발되었다. 그리고 최근에는 건축용 구조재 및 구조 부재의 형상과 물성을 향상시키기 위한 메카트로닉스 기술, 모델링 기술, 원료소재 기술이 연구되고 있으며 중국에서는 일부 상용화 단계에 근접한 기술개발 사례가 언론을 통해 보도되었다. Fig. 1은 언론을 통해 많이 알려진 대표적인 건축용으로 활용 가능한 3D 프린팅 시스템으로, (a)는 건축용 3D 프린팅 시스템의 개념을 정립한 Univ. of Southern California의 Khoshnevis 교수 연구팀이 개발한 ‘컨투어 크래프팅 (Contour Crafting)’이다. 컨투어 크래프팅 시스템은 노즐 말단부의 적층형상 제어와 같은 하드웨어적 메커

트로닉스 기술과 노즐의 이동경로 최적화 기술 등의 소프트웨어적인 처리기술이 복합적으로 연계된 것이 특징이다. (b)는 중국의 Winsun사의 3D 프린팅 시스템으로 컨투어 크래프팅 기술을 모사한 하드웨어 시스템과 산업부산물을 활용한 콘크리트 소재를 활용하여 상용화가 가능한 규모의 건축구조물 제작에 성공한 것으로 유명하다. (c)는 네덜란드의 요리스 라만랩(Joris Laarman Lab)과 CAD 프로그램 제작사인 오토데스크(Autodesk)사가 공동으로 개발한 MX3D printer로 스테인리스 스틸 또는 금속을 용융용접방식으로 구조물 제작이 가능한 시스템이다. 일반적으로 금속재료를 이용한 3D 프린팅 기술은 레이저를 이용하여 금속분말을 용융부착시키는 SLM(Selective Laser Melting) 방식을 주로 사용하나 해당시스템의 경우 DMD(Direct Metal Deposition) 방식의 출력공정을 통해 구조물을 제작한다. (d)는 러시아의 아피스코어(Apis-cor)에서 개발한 타워크레인 타입의 3D 프린터로 겐트리 타입에 비해 건축물의 크기에 대한 제약이 상대적으로 적고 경제성이 높은 장점이 있다. 이외에도 이탈리아 WASP사는 진흙, 모래 등의 전통적인 건축자재를 사용하여 벽면, 천장 등을 제작할 수 있는 높이 12m 규모의 대형 3D 프린터를 개발하였다. 우리나라의 건축용 3D 프린팅 기술개발의 경우 2016년 이전까지는 대학을 중심으로 소규모 연구가 수행되었으



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. News agency reported: (a) Contour Crafting printer, (b) Winsun printer, (c) MX3D Printer, (d) Apis-Cor 3D Printer.

며 2017년부터 정부가 주도하는 대형 3D 프린팅 시스템의 기술개발과 건축용 소재의 3D 프린팅 원료 기술 개발 연구가 시작되었다^{1,2)}.

본 연구에서는 건축용 3D 프린팅 기술에서 사용되는 시멘트/콘크리트 소재의 활용과 관련된 국내외 연구사례를 중심으로 건축용 3D 프린팅 시스템 기술과 함께 직간접적으로 리사이클링 소재를 활용한 기술개발 및 연구사례를 조사하였다. 이와 더불어 기존 건설 소재 및 재활용 소재가 3D 프린팅 원료로 사용될 경우 요구되는 기술적 요구사항 및 특성을 조사하였다.

2. 건축용 3D 프린팅 기술 관련 특허현황

3D 프린팅 기술은 1986년에 적층가공 방식의 기술특허가 등록된 이후 2014년까지 약 850개의 기술 분야 관련 특허 및 약 9000개의 인용특허가 있는 것으로 알려져 있으며, 제작품의 정밀도가 매우 높은 Stereolithography(SLA) 기반 기술이 전체의 76% 가량을 차지하고 있다³⁾.

2015년 말 시점의 미국, EU, 일본, 한국 등의 주요 출원국가 특허를 조사한 결과 2000년을 기점으로 꾸준

히 3D 프린팅 관련 특허출원 건수가 증가하였으나 2010년 이후부터 감소하기 시작하여 전반적인 3D 프린팅 기술의 경우 기술성장단계 중 쇠퇴기에 진입한 것으로 추정된다. 해외의 경우 3D 프린터를 제조하거나 프린팅 재료를 생산하는 기업이 다출원인으로 포함되어 있으나 국내의 경우 LG전자, 삼성전자, 한국전자통신연구원과 같이 특정분야의 대기업 또는 연구기관에 특허출원이 집중되어 3D 프린터 장비 제조기업 및 소재분야 기업의 경쟁력은 상대적으로 취약한 것으로 나타났다⁴⁾. 프린팅 소재분야의 경우 Fig. 2와 같이 세라믹스 계열의 특허출원건수가 가장 많이 증가하였는데 SLA 관련 특허 이외에도 FDM(Fused Deposition Modeling), LOM(Laminated Object Manufacturing), SLS(Selective Laser Sintering) 기술 등에서 출원율이 매우 높게 나타났다⁵⁻⁷⁾. 부가가치가 높은 의료분야 조직공학(Tissue Engineering), 보철물(Prosthesis)과 전자산업용 기계 및 부품류(Mechanical & tooling)의 지적재산권 확보가 활발히 진행되고 있다⁵⁻⁷⁾.

건축 및 건설용 3D 프린터에 사용되는 원료소재와 관련한 국내특허의 경우 거의 전무한 상황이었으나 2014년 이후 FDM 방식용 시멘트 모르타르 원료와 관

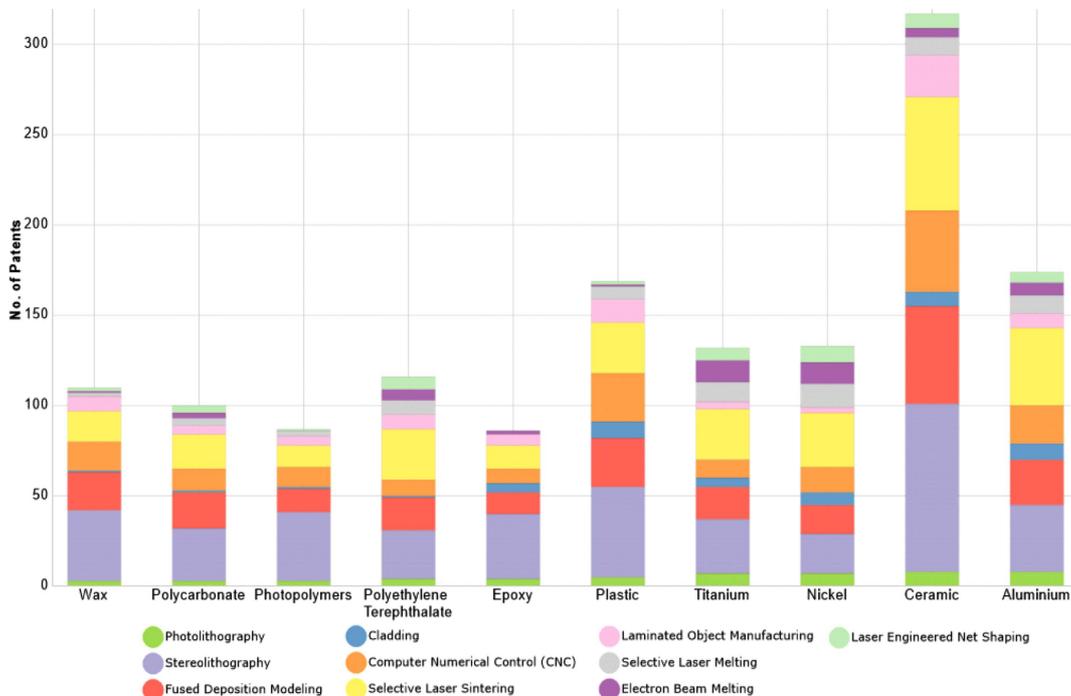


Fig. 2. The chart below 3D printing materials vs technologies.

련한 특허 3건이 등록된 것으로 보아 2010년 이후부터 기술개발이 수행된 것으로 판단된다. Kim(2014)은 일반 포트랜드 시멘트를 이용한 모르타르에 대한 압출 후 경화를 제어하는 방법으로 모르타르와 급결제를 각각의 압출장치를 통해 배출시키는 기술에 대한 특허를 확보하였으며, Jun(2015)은 3D 프린터용 모르타르 및 콘크리트 소재개발과 관련하여 마이크로웨이브 조사방식을 이용한 경화시간을 촉진하는 기술과 수축저감제 및 고유동화제 등을 혼입한 3D 프린팅용 모르타르에 대한 특허를 확보하였다^{8,9)}. 그리고, 2015년 이후 정부가 주도하는 건축용 3D 프린팅 기술개발사업이 시작됨에 따라 대학교, 출연연을 중심으로 건축용 3차원 프린터의 노즐 형상 및 3D 프린터를 이용한 철근콘크리트 구조물의 제조기술에 대한 특허가 등록되어 활발한 기술개발이 진행되는 것으로 조사되었다. 그러나 국내의 경우 리사이클링 재료를 활용한 건축용 3D 프린팅용 원료소재의 제조 및 배합기술에 대한 기술특허는 없는 것으로 나타났다¹⁰⁻¹²⁾.

3. 건축용 3D 프린팅 시스템(3D Printed Building) 기술

시멘트 모르타르, 콘크리트와 같은 수경성 건축 재료를 이용한 3D 프린팅 기술은 건설비용 절감 및 공사기

간 단축, 산업재해 감소 등의 경제적 장점과 함께 약 100년 이상 사용된 전통적인 건설재료를 사용한다는 점에서 다른 건설부재와의 신뢰성 확보가 쉬운 재료적 측면의 장점으로 여러 연구자에 의해 연구됐다. 건축용 3D 프린팅 시스템의 경우 미국 ASTM에서 분류한 7종의 3D 프린터 출력방식(광중합(Photo Polymerization, PP), 재료압출(Material Extrusion, ME), 접착제분사(Binder Jetting, BJ) 재료분사(Material Jetting, MJ), 분말적층용융(Powder Bed Fusion, PBF), 고에너지직접조사(Direct Energy Deposition, DED) 및 필름적층(Sheet Lamination, SL)) 중 재료압출 및 접착제 분사 방식을 기반으로 한 기술을 주로 사용하고 있다.

Table 1은 기존 건축용 및 세라믹계 소재 원료로 사용가능한 3D 프린팅 기술의 특성을 정리한 표이다. SLA 방식의 경우 UV 또는 레이저를 이용하여 폴리머 또는 세라믹스 원료에 포함된 광경화성 물질을 경화시켜 적층시키는 방법으로 적층밀도가 매우 치밀한 장점이 있으나 대형화시 프린팅 시스템의 가격이 급격하게 상승하게 되어 대형 구조물 제작에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다. FDM 방식의 경우 건축용 3D 프린팅 시스템에 가장 광범위하게 활용되고 있으며 프린터의 구조에 따라 겐트리 타입, 델타 타입, 타워크레인 방식으로 구분되며 출력되는 원료의 특성에 따라 페이스트 상태의 원료를 압출하는 방식과 분말이 도포된 출력면

Table 1. Characteristics of 3D printing technologies³⁴⁾

technologies	Components	The printing process	Printing materials
Stereolithography (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> · A perforated platform · A container of a liquid UV-curable polymer · A UV laser 	Using a beam of UV laser to harden the liquid polymer and lower the platform to create multiple layers.	Liquid photosensitive resins
Fused deposition modeling (FDM)	<ul style="list-style-type: none"> · A printer head · Printing material · Support material 	Printing material is fed to the printer head to deposit the material to the layers.	Acrylonitrile butadiene styrene (ABS); Elastomer; Wax; Metal
	<ul style="list-style-type: none"> · A gantry system (or delta & tower) · A nozzle · Printing material · Trowels 	Printing material is extruded from the nozzle and then troweled. The gantry system is computer controlled and moves with the nozzle.	Ceramics materials; concrete
Inkjet powder printing	<ul style="list-style-type: none"> · A printer head · Printing material in the powder form · Binder · An oven 	Printing material in the powder form is deposited. Binder is then sprayed, heated and dried. The product will be cured in an oven when completed.	Polymers; metal
Selective laser sintering and selective heating sintering	<ul style="list-style-type: none"> · Focused laser beam · Printing material in the powder form 	Printing material in the powder form is deposited. It is then consolidated using a focused laser beam. The process is repeated from layer to layer.	Nylon based materials; rapid steel; sand form

에 바인더를 분사하는 방식으로 구분된다. 이외에도 금속원료를 이용하는 SLS 및 SHS 방식의 경우 콘크리트 구조물의 강도를 개선시키는데 필수적인 철근 구조물의 제작에 요구되는 일부 건축용 3D 프린팅 기술에 활용되고 있다. SLA 방식을 이용한 건축용 3D 프린팅 기술은 MIT의 Sachs(1990)가 알루미늄 분말과 콜로이드 실리카를 이용한 사례가 최초로 알려져 있으며, FDM 방식의 경우 전통세라믹스 원료인 시멘트/콘크리트를 이용한 연구는 미국 NIST 소속의 Albus(1993)가 콘크리트 압출장치가 장착된 적층시스템을 6개의 케이블에 연결하여 제어하는 델타방식의 3D 프린터인 ‘로보크레인 (RoboCrain)’ 시스템에 적용하기 위한 시멘트의 적층특성을 연구한 사례가 최초인 것으로 알려져 있다¹³⁻¹⁵⁾. 그리고 이와 유사한 시기에 Pegna(1997)가 800 μm 급으로 분쇄한 모래와 Type I의 포틀랜드 시멘트를 이용한 접착제 분사 방식(binder jet)의 프린팅 기술을 개발하였으며 적층인쇄를 통해 A자 형상의 건축용 블록형 물체를 제조하여 전통적인 거푸집을 이용한 타설 방식을 대체할 수 있음을 확인하였다¹⁶⁾. 그리고 Hinzewski(1997)는 10 μm 크기의 α-alumina 파우더와 광반응제를 원료로 광경화성물질적층조형(Stereolithography, SLA) 방식의 3D 프린터를 이용하여 고강도의 구조물을 제작하는 기술을 개발하였다¹⁷⁾.

Table 2는 대표적인 건축용 3D 프린팅 시스템에서 사용된 원료소재와 특성을 비교한 표이다. Pegna와 D-shape에서 사용된 기술의 경우 분말상태의 모래와 시멘

트층에 물 또는 바인더를 분사하는 방법으로 구조물을 제작하는 기술이며, 컨투어 크래프팅과 콘크리트 프린팅 기술의 경우 콘크리트 및 모르타르와 같이 페이스트 상태의 원료를 압출하여 적층시키는 방법으로 제작하는 기술이다. 이들 기술은 상호간의 장단점이 명확하게 존재하는데 전자의 경우 적층밀도 및 수직정밀도가 높고 기계적 강도확보가 편리한 장점이 있으나 출력에 필요한 시간이 상대적으로 길고 분말 재료를 도포하거나 재배치하는 과정이 추가되어 아직까지는 경제성이 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다. 후자의 경우 적절한 압출성과 압송성이 확보될 경우 전통적인 시멘트 원료를 그대로 사용할 수 있으며 출력속도가 비교적 빠른 장점이 있으나 아치 형태와 같이 수직방향의 비선형 구조물을 제작할 경우 형태가 붕괴될 수 있는 단점이 있다. 최근 개선된 컨투어 크래프팅 기술의 경우 압출장치 측면에 시멘트/콘크리트 등을 벽면에 바를 때 쓰는 자동 제어형 흙손(trowel)을 설치하여 외관을 개선시키는 기술을 확보하였으며, 국내 기업에서 개발된 3D 프린터의 경우 출력 알고리즘의 개선을 통해 둠형태의 수직 비선형 구조물의 제작이 부분적으로 가능하게 되었다^{18,19)}. Fig. 3은 미국의 델타방식의 로보크레인 시스템과 겐트리 방식의 영국의 콘크리트 프린팅 시스템을 비교한 사진이다. (a)는 미국 NIST의 로보크레인 시스템으로 델타방식의 프린터 시스템에 연결된 노즐을 이용하여 콘크리트를 타설하는 기술로 상대적으로 정밀도는 떨어지나 낮은 운영비용 및 대형화가 편리한 장점이 있다.

Table 2. Characteristics of existing research and particle related to AM process in construction³²⁾

AM process in construction	Pegna	Contour Crafting	Concrete Printing	D-Shape
Process	Binder jet	Extrusion	Extrusion	Binder jet
Use of mould	No	Yes (Becomes a part of component)	No	No
Build material	Sand	· Mortar mixture for mould (clay) · Cementitious material for build	In-house Printable Concrete	Granular material (sand I stone powder)
Binder	Portland cement (activated by water)	None (Wet material extrusion and backfilling)	None (Wet material extrusion)	Chorline-based liquid
Nozzle diameter	1 mm	15 mm	9~20 mm	0.15 mm
Nozzle number	-	1	1	6,300
Layer thickness	-	13 mm	6~25 mm	4~6 mm
Compressive strength	28.30 MPa	-	100, 110 MPa	235, 242 MPa
Flexural strength	14.52 MPa	-	12~13 MPa	14~19 MPa

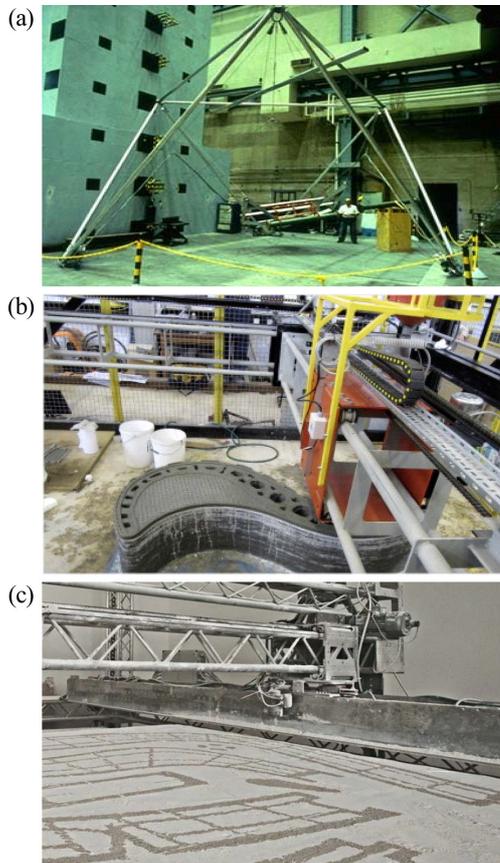


Fig. 3. Automated construction subsystems: (a) Robocrain (b) Concrete printing (c) D-shape¹⁸⁾.

(b)는 영국 Loughborough 대학교의 Buswell(2007)이 개발한 콘크리트 프린팅(Concrete Printing) 시스템으로 건축물을 모듈화된 부재를 제작하기 위해 겐트리형 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식을 따르고 있다. 콘크리트 프린팅 시스템의 경우 컨투어 크래프팅 시스템과 유사한 기계적 특성을 가지고 있으며 시멘트/콘크리트 원료를 기반으로 비정형 구조물의 기계적 강도 향상기술 및 물성 평가기술에 대한 기술개발이 함께 개발되고 있다²⁰⁾. (c)는 이탈리아의 Dini(2006)가 개발한 D-shape 프린터로 앞선 두 프린팅 시스템과 달리 직접 원료를 적층 가공하는 접착제분사 방식과 달리 석분, 활석, 모래 등으로 만들어진 분말과 과립에 바인더 또는 촉매제를 순차적으로 분사하여 적층하는 접착제분사방식(binder jet) 방식의 프린터를 개발하였으며, 시멘트/콘크리트를 원료로 하는 다른 건축용 3D 프린터 시스템과 달리 건설현장에서 발생하는 자갈, 흙, 모래 등의 현

장원료(On-site material)를 비교적 자유롭게 활용할 수 있는 특징이 있다²¹⁾.

4. 건축용 3D 프린팅 원료 소재(Materials of 3D printed building) 기술

시멘트 및 콘크리트와 같이 전통세라믹을 이용한 FDM 방식의 3D 프린터용 원료는 압송성(Pumpability), 압출성(Printability), 시공성(Buildability), 접착시간(Open time)이 중요한 특성으로 작용하는데, 2000년대 초반부터 기존의 상업적으로 활용되고 있는 다양한 압송 기술을 활용하여 영국과 미국의 대학을 중심으로 건축용 3D 프린터용 소재개발 연구가 수행되었다.

건축용 3D 프린팅 기술로 가장 많이 알려진 컨투어 크래프팅 시스템의 경우 초기에는 점토(clay) 및 점성이 높은 포틀랜드 시멘트 원료를 이용하였으나 최근에는 건설현장에서 발생하는 흙과 모래 등을 사용하기 위해 페플라스틱 등이 포함된 접착제 분사방식의 재료도 활용하고 있다. Kwon(2002)은 초기의 컨투어 크래프팅 프린팅 시스템에서 약 2 μm 의 입자크기를 가지는 상용 점토와 산업부산물인 석고를 혼합한 원료를 사용하여 기하학적 곡선 형상 및 수직벽면에 대한 압출방법과 벽면의 마감방법에 대한 연구를 수행하였다²²⁾. Hwang(2004)은 콘크리트 프린팅 시스템 환경에서 Type II의 포틀랜드 시멘트, 모래 및 가스재 등이 포함된 시멘트 모르타르를 원료로 사용하여 6.4 cm 지름의 필라멘트를 시간당 2회 적층하는 수준의 시공성을 확보하였다²³⁾. Lim(2011)은 적층되는 콘크리트의 경화특성과 기계적 특성을 향상하기 위해 CEM I 52.5 시멘트에 플라이애시, 실리카 폼 및 미세하게 절단된 폴리프로필렌 섬유가 혼합된 시멘트 모르타르를 사용하여 기계적 특성을 향상시켰으며, 적층방식 시공의 경우 중력에 의한 퍼짐 현상과 수축현상이 발생하므로 수축률이 낮거나 팽창성을 부여할 수 있는 재료의 사용이 요구된다고 하였다^{24,25)}. Le(2012)는 Lim의 연구에 적용된 시멘트 모르타르의 혼합비를 세분화하여 9 mm 지름의 필라멘트의 적층과정에서 공극발생 및 지지력 부족에 따른 와해특성, 건조과정에서 발생하는 수축특성, 압출과정 중 인장강도의 발현특성 등에 대한 연구를 수행하였으며 적층간격 및 적층시간을 조절할 경우 성능이 일부 개선되는 것을 확인하였다^{26,27)}. Feng(2014)은 컨투어 크래프팅 기술을 참고한 FDM 프린팅 환경에서 팽창성을 가진 시멘트에 모래, 건설폐자재, 유리섬유 등의 재활용 소재와 특수

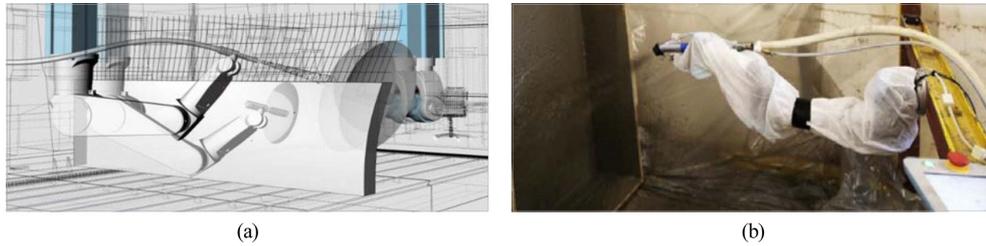


Fig. 4. Combined smoothing process of concrete structures (a) and Experimental setup for concrete spraying robot system (b)²⁹⁾.

경화제를 배합한 3D 프린터용 혼합시멘트를 개발하였으며 기존 일반 콘크리트보다 가볍고 적정시간에 급속 경화하는 특성을 확보하였다²⁸⁾. 이와 더불어 특수시멘트 및 리사이클링 원료를 사용한 3D 프린팅 재료기술의 활용과 관련하여 건축용 3D 프린팅 구조물의 변형을 막을 수 있는 기술적 개선방안도 함께 연구하였다. Neudecker(2016)는 Fig. 4와 같이 최근 3D 프린팅 산업에서 주목받고 있는 연계기술 중 하나인 스프레이 타입 6축 로봇암 기술을 이용하여 콘크리트 벽의 제조시 3D 프린팅에 적합한 습식 콘크리트의 분사특성치(sprayability)에 대한 연구를 수행하였으며 노즐 팁에서의 분사압력과 원료의 혼합비를 최적화하였을 때 수직면인 벽면의 변형을 최소화 할 수 있다고 하였다²⁹⁾. Cesaretti(2014)는 화성 표면의 토양환경에서의 건축물 제작을 위한 연구와 관련하여 소렐 시멘트(sorel cement)를 활용한 3D 프린트 원료연구를 수행하였으며, Kim(2015) 등에 의해 재료의 두께방향으로 성분 및 조성을 연속적으로 변화시키는 경사기능재료(Functionally Graded Materials) 기술 연구가 수행되었다^{30,31)}.

최근에는 건축용 3D 프린팅 기술과 연계하여 구조물이 받는 압축력, 인장력 등에 대응하는 최적의 출력방법과 산업부산물을 이용한 기계적 특성을 개선하는 적용하는 소재연구가 중국, 영국을 중심으로 진행되고 있다. 시멘트/콘크리트를 포함한 세라믹계 3D 프린팅 원료의 경우 결합에 사용된 바인더의 소결, 건조과정에서 발생하는 수축문제와 적층단면간의 부착특성에 의한 기계적 강도저하 문제 등이 발생한다. 일반적으로 사용하는 시멘트 모르타르의 경우 건조과정에서 3~5%의 수축이 발생하고 이에 따른 균열 등이 발생한다. 그리고 적층과정에서 출력되는 압출재료의 형상과 적층시간에 따라 적층단면의 부착강도가 현저히 차이가 발생하게 되며 모래와 같이 입자크기가 큰 재료에 의해 압출형태가 균일하지 못하게 되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 팽창성이 있는 CSA계 시멘트를 혼합하

거나 비산재 등의 산업부산물을 혼합하여 유동성 및 압출성 등을 개선시켜 최종 생산제품의 기계적 물성을 향상시키는 연구가 수행되고 있다. Lim(2012)은 시멘트에 석고 등이 혼합된 원료를 사용하여 약 1m² 넓이의 복잡한 기하학적 형태를 가지는 구조물을 출력하는데 필요한 최적의 인쇄경로와 구조의 강도발현에 관한 연구를 수행하였으며, 새로운 시멘트 모르타르 혼합물질의 활용과 최적인쇄경로 확보를 통해 적층과정에서 나타나는 계단현상(staircase effect)의 최소화 및 레이어 층의 접촉면적을 최대화하여 기계적 강도를 개선할 수 있음을 확인하였다³²⁾. Feng(2015)은 재활용 소재인 석고, 비닐중합체 및 당류(carbohydrate)로 구성된 혼합물에 습윤제(humectant)와 물로 구성된 바인더를 혼합한 원료를 개발하였으며, 출력방향이 서로 다른 모르타르용 강도실험 규격의 공시체를 제작한 후 각각의 몰드를 압축강도, 휨강도, 탄성계수 및 프아송비(Poisson's ratio)에 대한 비교실험을 수행하여 혼합원료의 물성 개선효과를 확인하였다³³⁾. Wu(2016)은 중국 Winsun사의 3D 프린터에 사용된 재활용 소재가 포함된 콘크리트에 유리섬유를 혼입한 경우 강도는 증가하였으나 다른 물리적 특성이 감소하는 문제를 개선하는 연구를 수행하였으며 탄소섬유를 활용할 경우 유리섬유에 비해 물성개선효과가 증가함을 확인하였다³⁴⁾. Gosselin(2016)은 Fig. 5와 같이 산업용 6축 로봇암(robotic arm)의 형태를 가진 3D 프린팅 시스템에 CEM I 52.5N 포틀랜드 시멘트 30~40%, 결정질 실리카 30~40%, 실리카 폼 10% 및 석회석 필터 10%가 포함된 비수축성 모르타르 원료를 개발하였으며, 기존의 일반 모르타르 원료로는 제작이 어려웠던 프렉셀 및 허니컴 구조와 같이 복잡한 구조물의 제작이 가능한 것으로 보고하였다³⁵⁾. 그리고 Craveiro(2017)는 Fig. 6과 같이 경량골재를 사용한 콘크리트, 섬유가 혼입된 폴리머, 코르크 분말이 포함된 점토 등 3개의 재료를 동시에 사용할 수 있는 'Rapid Construction' 시스템을 개발하였으며 새로운 점

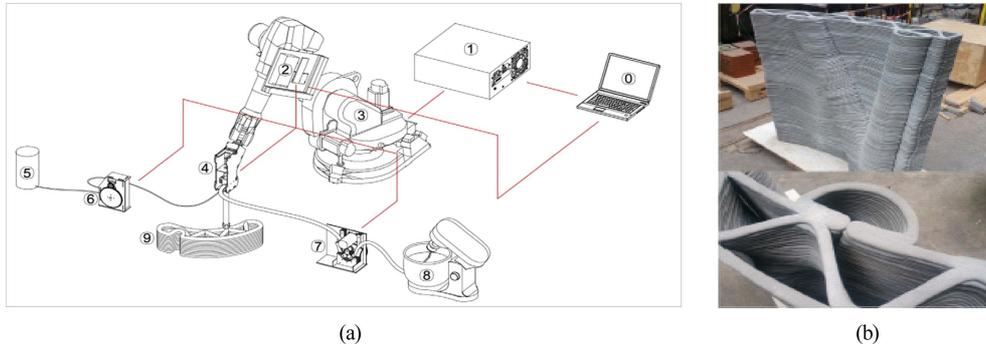


Fig. 5. Schematic of 6-axis robotic arm was used 3D printing system (a) & 3D printed high-performance concrete multifunctional wall (b)³⁵⁾.

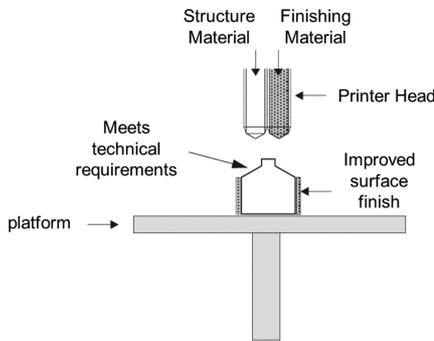


Fig. 6. An illustration of the components and process in FDM type 3D printing system³⁶⁾.

근방법을 통한 재활용 소재의 활용 및 물성개선 방법을 확보하였다³⁶⁾.

5. 향후 건축용 3D 프린팅 원료 소재의 발전방향

건축용 3D 프린팅 기술은 치수정밀도에 영향을 미치

는 원료소재의 밀도 및 기계적 물성의 개선과 제품 표면의 거칠기(Surface roughness)의 최소화를 통해 건축용 구조재 및 내외장재로 활용가능한 제품의 성능을 향상시키고 있다. 그리고 ICT 기술 및 3차원 설계기술과 연계하여 설계단계에서 기계적 강도를 고려한 부품의 분할, 유무기 복합재료는 물론 금속재료와의 혼용, 자원순환 개념의 도입, 압출제어 등의 프린팅 기술과 타 영역간의 통합 등이 시도되고 있다. 또한 건축용 3D 프린팅 시공기술의 안전성과 관련하여 원료소재의 환경적 신뢰성 및 구조적 안정성과 관련된 평가체계 확보를 위한 연구가 진행되고 있다.

Table 3은 건축 및 건설 분야 전문가들에 의해 언급된 건축용 3D 프린팅 기술의 문제점과 기술적 해결방향을 정리한 표이다. Kang(2015)은 3D 프린팅 기반 건축 시공기술의 경우 건축물의 형상 모델링을 위한 BIM 기술, 품질/안전관리 기술과 함께 기계적으로는 건축물에서 요구하는 구조적인 강도를 제공할 수 있는 3D 프린팅 노즐 경로 및 패턴처리 기술이 필요하며 소

Table 3. Technical solution of 3D printed building technology³⁷⁻⁴³⁾

	Problem	Solution
Mechanical Strength	<ul style="list-style-type: none"> · Low Tensile strength · Low Bond strength · Irregular Fracture toughness 	<ul style="list-style-type: none"> · Printing nozzle mode control · Setting rate control of material · High performance premixed cement · Nonshrinkage mortar and concrete
Supporting by law and system	<ul style="list-style-type: none"> · Irregular building using materials · Analysis(or test) of irregular building stability 	<ul style="list-style-type: none"> · Modeling of stacking sequence optimization technic · Government lead project and participating cement companies
Low surface quality & productivity	<ul style="list-style-type: none"> · Low printability and print speed · Technological difficulty of open time control 	<ul style="list-style-type: none"> · Link material technology to printing nozzle technique · Plastering work implementation technology

재측면에서는 거푸집을 이용한 건축방식과 대비하여 동일하거나 우수한 기계적 강도 발현 및 3D 프린터의 운전속도와 연계하여 적절한 경화속도를 제공하는 재료기술의 확보가 요구된다고 하였다³⁷⁾. Seo(2015)는 전통적인 형상의 건축물보다는 기존 건축기술로 구현이 어려운 비정형 출력기능에 대한 장점을 보다 강화할 수 있는 원료소재개발과 함께 제도적 활용방안 마련이 필요하다³⁸⁾. Choi(2015)는 아직 3D 프린팅 제조물의 품질, 생산성, 소재 다양성 측면에서 본질적인 문제점을 가지고 있으며 이를 해결하기 위해서는 기업별로 세분화된 수요를 찾아내서 개발하는 수요지향형 기술개발 모델과 함께 장비, 소재, 공정, SW가 통합된 패키지형 기술개발이 필요하다고 하였다³⁹⁾. Kim(2015)은 3D 프린팅 기술이 실구조물 적용으로 이어지기 위해서는 건축용 3D 프린터의 대형화 및 모듈화, 재료의 압출특성과 Open time에 대응하는 노즐기술 등의 핵심 부품 요소기술 확보, 일반시공속도보다 빠른 신속조형을 위한 재료분사 및 적층성능 개선, 강도 및 강성 확보가 가능한 시멘트 모르타르 재료기술에 대한 연구가 연계되어야 한다고 하였다¹⁾. 그리고, Labonnote(2016)는 3D 건축기술의 패러다임 변화를 위해서는 건축재료 기술 측면의 하드웨어적 요소와 엔지니어링과 건물 설계기술 등의 소프트웨어적 요소가 통합되어야 한다고 하였으며, 향후 건축용 3D 프린팅 소재는 기존 재료의 특성을 향상할 수 있는 새로운 최적화 기술과 비균질형 및 복합형 소재를 활용하여 맞춤형 특성을 제공하는 기술을 확보하는 것이 중요하다고 하였다⁴⁰⁾. 또한 Achilles(2015)는 미래 3D 프린터 소재는 전통적인 건설소재보다 탄소발자국 즉 탄소배출량이 현저히 감소되어야 한다고 하였다⁴¹⁾.

6. 결 론

본 연구를 통해 건축용 3D 프린팅 기술에서 사용된 산업부산물 및 리사이클링 소재의 활용과 향후 확보되어야 할 기술적 특성에 대해 조사하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기존 건축용 3D 프린팅 기술의 경우 공정 및 엔지니어링 기술에 대해 많은 연구가 진행되었지만 3D 프린팅 기술에 특화된 재료의 물성과 요구사항에 대한 조사와 연구는 부족한 상황으로, 향후 다양한 관점에서 건축용 3D 프린팅 기술과 건축용 재료의 특성화와 개선에 대한 노력이 필요하다.

2. 3D 프린팅 원료소재 기술의 경우 인쇄결과물의 형상안정성과 기계적 특성 확보가 필수적이므로 건축용 3D 프린터의 원료소재로 활용하기 위한 산업부산물 및 리사이클링 소재의 가공성 및 출력특성 등 필수적인 요구사항에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3. 국내 건축물용 원료소재의 물리화학적 특성평가 기술은 기본적으로 전통적인 건축기술을 기반으로 한 원료의 특성을 평가하는 방법으로 3D 프린팅 제조물을 평가하는데 한계가 있다. 향후 리사이클링 원료를 사용한 건축용 3D 프린터 원료소재 기술개발과 함께 인쇄물의 특성에 초점을 맞춘 새로운 물성평가 및 테스트 방법의 확보와 환경적 안정성과 관련된 장기간의 데이터 수집이 필요할 것으로 예상된다.

Acknowledgments

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20141010101880).

References

1. Kim, D. H., 2015 : *Status and Direction of Development on the 3D Printing Technology for BRP(Building Rapid Printing)*, Journal of The Korean Association For Spatial Structures, 15(3), pp.61-68.
2. Ministry of Future Creation Science, 2014 : *Strategy Technology Road Map for 3D Printing*, 3D Convergence Technology Center.
3. WiPS, 2014 : *Patent Trend Analysis in 3D Printing*, Polymer Science and Technology, 25(1), pp.51-55.
4. Lee, B. J., 2015 : *Patent Trend Analysis in 3D Printing*, KIC News, 18(1). pp.45-59.
5. Gridlogics, 2014 : *3D Printing Technology Insight Report : An analysis of patenting activity around 3D-Printing from 1990-Current*, Gridlogics Technologies Pvt Ltd, pp.1-44.
6. UK Intellectual Property Office Patent Informatics Team, 2013 : *3D Printing : A patent overview*, Intellectual Property Office. www.ipo.gov.uk.
7. Oh, J., 2014 : *Applicability to the Construction of 3D Printing Technology*, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 62(9), pp.38-44.
8. KR Patent No. 1016200740000, 2015 : *3D Printing Apparatus for Manufacturing Cement Product and Method Thereof*.
9. KR Patent No. 1016200740000, 2015 : *Concrete composition for 3D Printing, Concrete and Manufacturing*

- Method of the Concrete using it.*
10. KR Patent No. 1016487640000, 2016 : *Construction 3D printer nozzle capable of discharging different material.*
 11. KR Patent No. 1016661810000, 2016 : *Construction 3D printer nozzle capable of cutting layer.*
 12. KR Patent No. 1020170008346, 2017 : *Manufacturing method of structure with reinforced concrete construction using 3d printer.*
 13. Sachs, E. et al., 1992 : *Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from CAD representation*, Journal of Engineering for Industry, 114(4), pp.481-488.
 14. Dagalakis, N. G., 1989, *Stiffness study of a parallel link robot crane for shipbuilding applications*, Journal of Offshore Mechanical and Architectural Engineering, 111(3), pp.183-193.
 15. Albus, J. S., 1993 : *The NIST RoboC-rane*, Journal of Robotic Systems, 10(5), pp.709-724.
 16. Pegna, J., 1997 : *Exploratory investigation of solid freeform construction*, Automation in Construction, 5(5), pp.427-437.
 17. Hinzewski, C. Corbel, S. and T. Chartier, 1998 : *Stereolithography for the fabrication of ceramic three-dimensional parts*, Rapid Prototyping Journal, 4(3), pp.104-111.
 18. Khoshnevis, B. and George, B., 2002 : *Automated Construction Using Contour Crafting - Applications on Earth and Beyond*, Nist Special Publication Sp, pp.489-494.
 19. Williams, R. L. et al., 2004 : *Self-contained automated construction deposition system*, Automation in Construction, 13(3), pp.393-407.
 20. Buswell, R. A., 2007 : *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*, Automation in Construction, 16(2), pp.224-231.
 21. US Patent No. US 8337736 B2., 2012 : *Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor.*
 22. Kwon, H. K., 2002 : *Experimental and Analysis of Contour Crafting (CC) Process using Uncured Ceramic Materials*, PhD Thesis, University of Southern California.
 23. Hwang, D. and Behrokh, K., 2004 : *Concrete wall fabrication by contour crafting*, 21st International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC 2004), Jeju, Korea.
 24. Lim, S. W. et al., 2011 : *Development of a viable concrete printing process*, The 28th International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC 2011), Seoul, Korea.
 25. Lim, S. W. et al., 2009 : *Fabricating Construction Components using layered Manufacturing Technology*, Global Innovation in Construction Conference, pp.512-520.
 26. Le, T. T., 2012 : *Hardened properties of high-performance printing concrete*, Cement and Concrete Research, 42(3), pp.558-566.
 27. Le, T. T., 2012 : *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*, Materials and Structures, 45(8), pp.1221-1232.
 28. Feng, L. and Liang, Y., 2014 : *Study on the Status Quo and Problems of 3D Printed Buildings in China*, Global Journals of Human-Social Science Research, 14(5), pp.7-9.
 29. Neudecker, S. et al., 2016 : *A new robotic spray technology for generative manufacturing of complex concrete structures without formwork*, Procedia CIRP, 43, pp.333-338.
 30. Cesaretti, G. et al., 2014 : *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology*, Acta Astronautica, 93, pp.430-450.
 31. Kim, D. H. and Lee, J. H., 2015 : *Status and Direction of Development on the 3D Printing Technology for BRP (Building Rapid Printing)*, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, 15(3), pp.61-68.
 32. Lim, S. W., 2012 : *Developments in construction-scale additive manufacturing processes*, Automation in Construction, 21, pp.262-268.
 33. Feng, P. et al., 2015 : *Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders*, Construction and Building Materials, 93, pp.486-497.
 34. Wu, P. et al., 2016 : *A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry*, Automation in Construction, 68, pp.21-31.
 35. Gosselin, C. et al., 2016 : *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders*, Materials and Design, 100, pp.102-109.
 36. Cravero, F. et al., 2017 : *A design tool for resource-efficient fabrication of 3d-graded structural building components using additive manufacturing*, Automation in Construction, 82, pp.75-83.
 37. Kang, T. W., 2015 : *Technology framework for 3D printing-based architecture*, Building construction, 15(4), pp.24-31.
 38. Seo, M. B., 2015 : *Analysis of 3D Printing Construction Technology and Case Study*, Review of Architecture and Building Science, 60(1), pp.42-46.
 39. Choi, B. S., 2015 : *New Technology and Changes in the industry context ② 3D printing*, Science and Technology Policy, 26(5), pp.24-31.
 40. Labonnote, N. et al., 2016 : *Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities*, Automation in Construction, 72, pp.347-366.
 41. Achillas, C. et al., 2015 : *A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory*, Journal of manufacturing systems, 37, pp.328-339.

42. Zocca, A. et al., 2015 : *Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities*, Journal of the American Ceramic Society, 98(7), pp.1983-2001.

43. Karapatis, N. P. et al., 1998 : *Direct rapid tooling: a review of current research*, Rapid Prototyping Journal, 4(2), pp.77-89.



백철승

- 목원대학교 화학과 이학사
- 광운대학교 화학공학과 석사
- 광운대학교 화학공학과 박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원
- 당 학회지 제24권 5호 참조

서준형

- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원
- 당 학회지 제24권 5호 참조

조진상

- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 선임연구원
- 당 학회지 제19권 3호 참조

안지환

- 현재 한국지질자원연구원 탄소광물화 적정기술사업단 단장
- 당 학회지 제10권 4호 참조

조계홍

- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 책임연구원
- 당 학회지 제19권 3호 참조