

Sloped-LOM 방식 3D 프린터를 이용한 비정형 EPS 거푸집 제작 공법 개발

Development of Method for Manufacturing Freeform EPS Forms Using Sloped-LOM Type 3D Printer

안희재¹ 이동윤² 지우종³ 이우재³ 조훈희^{4*}
Ahn, Heejae¹ Lee, Dongyoun² Ji, Woojong³ Lee, Woojae³ Cho, Hunhee^{4*}

*Doctor's Course, Graduate School, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 02841, Korea*¹
*Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang, 10223, Korea*²
*Ph. D. Candidate, Graduate School, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 02841, Korea*³
*Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 02841, Korea*⁴

Abstract

Recently, free-formed construction technology is becoming a new measure of representing technological superiority and sociocultural ingenuity. However, the CNC processing technology utilizing the existing wood and iron form has limitations in terms of the manufacturing time and material cost. Therefore, in this study, the method and process of manufacturing free-formed EPS form using S-LOM-based 3D printing technology were suggested. Furthermore, through the mock-up test, a comparative analysis of the manufacturing time and precision with CNC milling technology was conducted. The results show that S-LOM-based 3D printing technology has reduced manufacturing time about 57.4% compared to CNC milling technology during the free-formed EPS form manufacturing process. In addition, compared to the design drawings, the maximum error value was 20.5mm, proving the applicability of S-LOM-based 3D printing technology. The results of this study are expected to contribute to the improvement of S-LOM method and the activation of S-LOM method by verifying the applicability of S-LOM-based 3D printing technology.

Keywords : freeform concrete forms, 3dimensional printing, sloped-laminated object manufacturing, mock-up test

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

과거에는 높고 큰 건축물의 건설기술이 한 나라의 과학, 산업, 기술, 문화, 경제를 가늠하는 척도로 여겨졌다[1]. 하지만

최근에는 향상된 설계 및 시공 기술을 바탕으로, 비정형 건축물에 대한 건설기술이 기술적 우월성과 사회문화적 의미를 갖는 새로운 척도가 되고 있다[1,2]. 기존 비정형 건축물의 거푸집은 형상에 맞게 목재, 철재, 발포 스티렌 수지(Expanded polystyrene; 이하 EPS) 등을 활용하여 제작되었다. 목재 거푸집은 재료비가 싸고 제작시간이 짧은 반면, 다양한 형상을 구현하는데 한계가 있다. 철재 거푸집은 컴퓨터 수치 제어(Computerized numeric control; 이하 CNC)기술을 이용하기 때문에 자유로운 형상을 정확하고 정밀하게 가공할 수 있으나, 거푸집 제작시간이 길고 재료단가 및 제작비용이 매우 높다. CNC 밀링 기술을 활용한 EPS 거푸집은 철재 거푸집보다는 저렴하

Received : December 5, 2019

Revision received : February 16, 2020

Accepted : April 8, 2020

* Corresponding author : Cho, Hunhee

[Tel: 82-2-3290-3328, E-mail: hhcho@korea.ac.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

나, 제작시간과 가공시간이 길어 비정형 건축물 시공에 적용된 사례가 많지 않다.

한편, 3D 프린팅 기술의 절삭 방식 중 경사대응형 박막적층(Sloped-laminated object manufacturing; 이하 S-LOM) 방식은 재료를 절삭한 후 적층하여 원하는 형상을 구현하는 방식으로, 쾌속조형이 가능하며 자유로운 입면형상의 구현이 가능하다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 비정형 거푸집 제작의 한계점을 극복하기 위해 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용한 비정형 거푸집 제작 공법을 개발하였다. 또한 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용한 비정형 거푸집의 제작 프로세스(Process) 및 각 작업 단계에 활용되는 요소 기술의 특징을 구체적으로 제시하였다. 최종적으로는 제작 프로세스에 따른 실물 모형 시험을 통해 기존 거푸집 제작공법과 제작시간 및 정밀도를 측정하여 두 기술을 비교분석하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 수행 절차

본 연구는 비정형 건축물을 대상으로, S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용하여 비정형 EPS 거푸집을 제작하는 것을 연구의 범위로 하였다.

본 연구는 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- 1) 기존 비정형 거푸집 제작 및 관련 연구 동향과 건축 분야에 활용되는 3D 프린팅 기술 연구 동향을 고찰하고 문제점을 제시한다.
- 2) S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용한 비정형 거푸집 제작 프로세스와 각 작업 단계에서 활용되는 요소 기술의 특징을 구체적으로 제시한다.
- 3) 기존 CNC 밀링 방식과 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용하여 비정형 EPS 거푸집 제작 실물 모형 시험을 수행한다.
- 4) 기존 CNC 밀링 방식과의 비정형 거푸집 제작시간 및 기술의 정밀도를 정량적으로 비교 분석한다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존 비정형 거푸집 제작 및 관련 연구 동향

기존의 비정형 콘크리트 건축물은 정형 건축물의 시공에 활용되었던 철재 거푸집이나 목재 거푸집이 주로 활용되었다. 여기에 곡률이 심하거나 곡면 등 기하학적인 형상이 복잡하게 구현되어야 하는 부위에는 부분적으로 EPS 거푸집이 적용되었



Figure 1. EPS form & mock-up for Hanabank remodeling work

다[3]. 하지만 기존의 목재 및 강재, EPS 등의 재료는 주로 CNC 공법으로 가공되며, CNC 공법을 활용할 경우 가공의 정밀도는 비교적 정확하지만 가공속도가 느리다는 단점이 존재한다[3].

이러한 기존의 문제점을 해결하기 위해 비정형 거푸집의 제작에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. Lee and Kim[4]은 CNC 장치의 로드(Rod)를 이용하여 파라핀(Paraffin)을 원하는 형상으로 응고시켜 비정형 거푸집을 제작하는 프로세스를 제시하였다. 하지만 해당 연구는 아직 프로세스만을 제시하는 수준에 머물러 있으며 시공 사례가 없다.

Park et al.[5]은 CNC 가공된 T형 경량철골들로 틀을 구축한 후 그 지오메트리(Geometry)를 따라 철근을 배근하고 와이어 메시(Wire mesh) 등을 활용한 철망거푸집 제작 기술을 제안하였다. 이 경우, 철근을 CNC 밀링으로 가공하기 때문에 재료비용 감소와 제작시간 단축에 관한 추가적인 연구가 수행될 필요가 있다.

EPS를 CNC 밀링 기술로 가공하고, 이를 기반으로 다시 섬유 강화 플라스틱(Fiber reinforced plastics) 거푸집을 제작하여 Figure 1과 같이 초고성능 콘크리트 외장 패널(Panel)을 제작한 시공사례(삼성동 하나은행 리모델링 공사)에 대한 연구도 수행되었다[6]. EPS를 활용하여 재료비용은 감소될 수 있지만, 결국 EPS를 사용하여 다시 다른 소재의 거푸집을 제작하므로, 제작시간과 비용 측면에서 한계점이 있을 것으로 예상된다.




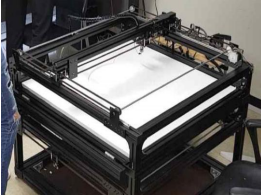
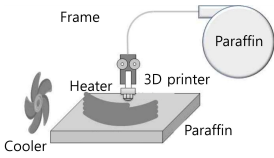
Sawides[7]는 CNC 장치의 로드를 활용하여 비정형 거푸집의 모형을 원하는 대로 변형시켜 콘크리트 패널을 생산하는 방식인 Free form formwork system technology(3FST)를 개발하였다. 하지만, 제작된 콘크리트의 표면이 매끄럽지 못하여 후속 작업이 필요하다[8]. 또한, 지오메트리에 따라 정확히 형상이 구현되지 않는데, 그 원인을 아직 파악하지 못하고 있는 실정이므로 3FST관련 연구는 개념도 제시 단계에 머물러있다[8].

이와 같이 비정형 거푸집 제작에 관한 연구는 대부분 CNC 밀링 기술을 기반으로 수행되었다. 하지만 이는 거푸집의 제작 시간이 과도하게 오래 걸린다는 단점을 갖고 있다. 따라서 다양한 형상을 빠르고 정확하게 제작할 수 있는 3D 프린팅 기술을 적용하는 것이 효과적인 대안이 될 수 있다.

2.2 건축 분야에 활용되는 3D 프린팅 기술 연구 동향

건축 분야에 활용되는 3D 프린팅 기술관련 연구 동향은 3D 프린팅 기술의 방식 측면으로 나누어 조사하였다. 본 연구에서는 여러 방식 중 건축물 및 부재를 직접 출력하는 용융 적층 조형(Fused deposition modeling; 이하 FDM) 방식, 선택적 레이저 소결(Selective laser sintering; 이하 SLS) 방식과 거푸집을 출력하는 박막적층(Laminated object manufacturing; 이하 LOM) 및 그 외 방식에 대하여 Table 1과 같이 조사하였다.

Table 1. Types of 3D printing technologies in construction fields

Type	Method	Related figure
FDM	CC (University of southern california)	
	Concrete printing (Loughborough university)	
SLS	Using D-shape printer (Dini technology)	
LOM	Using F3D (Lee et al. 2018)	
Other	Using PCM (Kim et al. 2018)	

3D 프린팅 건설 사례에는 대부분 고체의 재료를 녹여서 쌓는 FDM 방식이 활용되었다[9]. 대표적인 기술로는 미국의 서던 캘리포니아 대학교(University of southern california)에서 개발한 컨투어 크래프팅(Contour crafting; 이하 CC) 기술과 영국의 러프버러 대학(Loughborough university)에서 개발한 콘크리트 프린팅(Concrete printing) 기술이 있다.

CC 기술은 크레인(Crane) 방식 장비를 활용한 현장 생산 기술로, 폴리머나 시멘트 등의 재료를 적층하여 형상을 구현하는 기술이다[10,11]. 관련 연구로 Khoshnevis et al.[12]은 화성에 CC 기술로 건축물을 시공하기 위하여 유황콘크리트 실험에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Zareyan and Khoshnevis[13]는 CC 기술을 활용했을 때 층간 결합 강도 및 구조물의 강도 증진에 관한 연구를 수행하여, 골재의 크기 및 골재-시멘트 비율에 따른 구조물 강도의 변화를 확인하였다.

콘크리트 프린팅 기술은 갠트리(Gantry) 방식 장비를 활용한 오프사이트(Off-site) 생산 기술로 3차원 상의 자유로운 구동이 가능하며, 출력부가 작아 정밀한 작업에 용이한 기술이다[11]. 관련하여 Le et al.[14]은 콘크리트 최적 배합 및 고성능 콘크리트 제작에 관한 연구를 진행하였으며, 해당 연구에 기반하여 고성능 콘크리트의 강도, 수축 등 실험에 관한 연구도 추가적으로 수행되었다[15].

SLS 방식은 모래, 해수, 마그네슘(Magnesium) 등을 기반으로 레이저를 이용해 금속분말을 가열한 후 응고시키는 기술로, 시설물 전체를 한 번에 출력하는 기술이다[9]. 대표적인 기술로는 이탈리아의 디니사(Dini technology)에서 개발한 D-shape 장비를 활용한 기술이 있다. 이와 관련하여 Cesaretti et al.[16]은 D-shape 장비를 활용하여 달에 건축물 제작 시 현장에서 구할 수 있는 재료의 적용 가능성 및 진공시험에 관한 연구를 수행하였다.

LOM 방식은 재료를 절삭한 후 적층하여 원하는 형상을 구현하는 기술이다. 관련 연구로 Lee et al.[17]은 Free-form formwork 3D printer(F3D) 장비를 활용한 비정형 EPS 거푸집의 생산 프로세스를 제시하였다. 또한 실물 모형 시험을 통하여 기존 강재 거푸집을 사용한 시공기술과 제작 비용 및 작업 시간을 비교분석하였다[17]. 하지만 EPS 재료를 사용한 시공기술과 비교가 이루어지지 않았으며, 절삭 속도가 느린 열선 기반의 3D 프린팅 장비를 활용하여 연구를 수행하였다.

그 외의 방식으로, Kim et al.[18]은 위상 변화 재료(Phase change material; 이하 PCM) 중 파라핀을 활용하여 3D 프린팅 기술 기반 비정형 패널 거푸집 생산 기술을 제안하였다.

하지만 해당 연구는 개념도를 제시하는 수준으로 시공사례가 없다.

이와 같이 건축물 및 부재를 직접 출력하는 방식은 달, 화성에 건축물을 축조하기 위한 연구까지 진행되는 등 활발히 연구되고 있는 반면, 거푸집을 출력하는 방식에 관한 연구는 아직 미미한 수준이다. 하지만 3D 프린팅 기술을 활용하여 비정형 건축물 및 부재를 직접 출력하는 방식은 정밀도가 낮아 접합부 시공문제가 발생하며, 입면적인 자유곡면을 구현하기 어렵다는 한계점이 존재한다[19]. 이러한 한계점을 극복하기 위해서는 쾌속조형이 가능하고 입면형상을 자유롭게 구현할 수 있는 S-LOM 방식으로 비정형 거푸집을 제작하는 방안이 효과적일 것으로 판단된다.

3. S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용한 비정형 거푸집 제작 프로세스

3.1 비정형 EPS 거푸집 제작 개요

기존의 CNC 밀링 기술을 활용하여 비정형 거푸집을 제작하는 방식은 제작시간이 과도하게 오래 걸린다는 단점이 존재한다. 또한, 이를 극복하기 위하여 3D 프린팅 기술을 활용하여 비정형 건축물 및 부재를 직접 출력하는 방식은 정밀도가 낮고 자유곡면을 입면적으로 구현하기가 어렵다는 한계점이 존재한다. 이에 본 연구에서는 3D 프린팅 기술 중 쾌속조형 및 자유로운 입면 형상 구현이 가능한 S-LOM 방식의 비정형 거푸집 제작 프로세스를 제시하였다. 본 연구에서 비정형 거푸집의 재료로는 원하는 형상을 빠르고 용이하게 가공할 수 있는 EPS로 선정하였으며, 거푸집 제작 프로세스는 Figure 2와 같이 설계단계, 제작단계로 구분하였다.

설계단계는 ① 3D 캐드(3D CAD)를 활용한 도면 설계 ② 스테레오 리소그래피(Stereo lithography; 이하 STL) 파일(File)로 변환 ③ 균등 분할 ④ G-code 생성의 순서로 진행된다. 제작단계는 ① EPS 패널 투입 ② EPS 패널 절삭 ③ EPS 패널 반출 ④ EPS 패널 적층 ⑤ 표면 단차 제거 ⑥ 표면 코팅의 순서로 진행된다.

3.2 비정형 EPS 거푸집의 3D 설계단계

비정형 EPS 거푸집의 설계단계에서는 우선 원하는 형상의 비정형 거푸집을 3D 캐드 도면으로 제작한 후 오토데스크사(Autodesk)의 인벤터(Invntor) 프로그램(Program)을 활용하

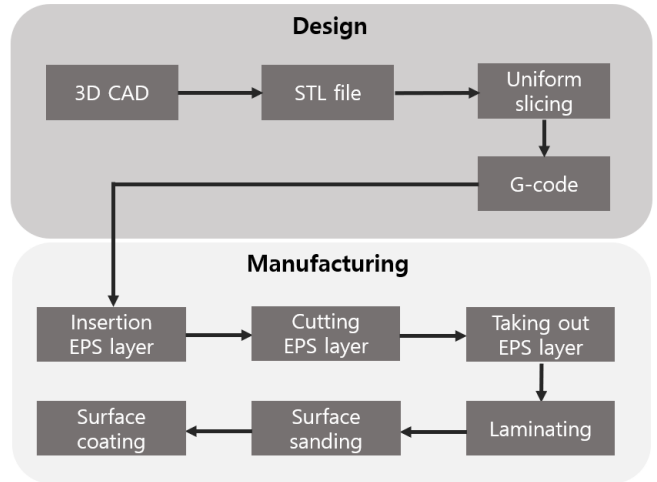


Figure 2. The procedure of manufacturing EPS concrete forms

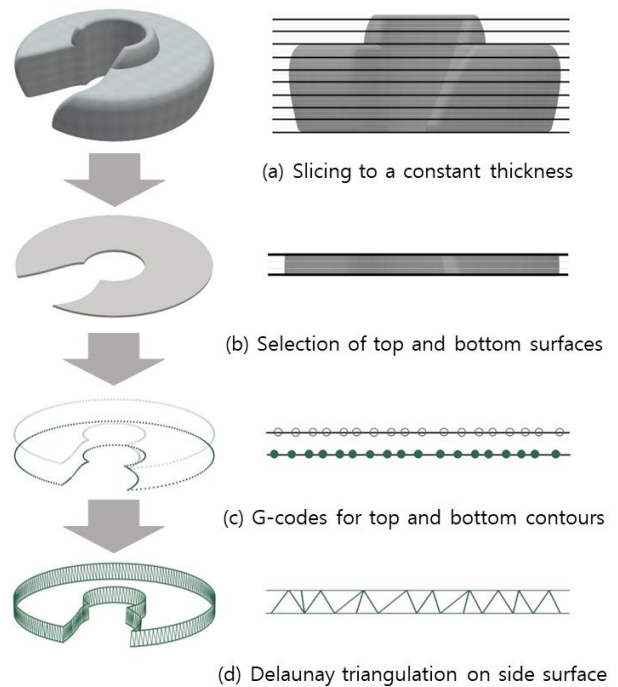


Figure 3. Process of generating G-code and side surface

여 STL 파일로 변환되어야 한다. 이는 S-LOM 방식의 특성상 구현하고자 하는 형상이 일정한 두께로 분할되어야 하기 때문이다. 균등 분할 작업에는 주로 큐라(Cura) 프로그램이 사용된다. 균등 분할 작업이 수행되면서 거푸집 각 층의 둘레부분의 G-code가 추출된다. G-code는 3D 프린터의 절삭 경로라고 할 수 있으며 G-code 자체는 위치 정보를 담고 있는 여러 개의 좌표, 즉 '점'의 형태로 구성되어 있다.

따라서 한 개의 EPS 패널의 윗면 둘레의 좌표와 아랫면 둘레

의 좌표를 삼각형 형태로 이어서 '면'의 형태로 변환하는 과정이 필요하다. 변환된 측면 삼각형이 최종 절단 경로라고 할 수 있으며, 삼각 분할은 들로네 삼각분할(Delaunay triangulation)법이 활용된다[20].

이러한 일련의 과정을 통해서 비정형 형상의 벤치 제작을 위한 거푸집을 제작한다면, 3D 캐드 도면으로부터 G-code와 최종 절단 경로를 도출하는 과정은 Figure 3와 같이 나타낼 수 있다[20].

3.3 S-LOM 방식을 활용한 EPS 패널 절삭가공 단계

S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용하여 비정형 EPS 거푸집을 제작하는 단계에서는 CO₂ 레이저 빔(Laser beam)으로 EPS 패널을 절단하는 방식의 장비가 사용되었다. CO₂ 레이저 빔을 이용하는 방식의 절단각도 범위는 최대 60도까지이며, 이는 기존 Lee et al.[17]의 연구 등에서 활용된 열선을 이용하여 절삭하는 방식의 최대 절단각도인 45도에 비해 절단 범위가 넓다. 따라서 비정형 형상의 구현 범위 또한 열선을 이용하는 방식에 비해 넓다는 장점을 갖고 있다. 절단 속도 또한 약 26.7~41.7mm/sec 정도로, 열선 절삭 방식의 절단 속도인 약 10mm/sec 보다 훨씬 빠르기 때문에 작업 시간의 단축이 가능하다. 뿐만 아니라, 열선 등 공구의 교체나 EPS 패널의 정밀 고정 필요 없으며, 장비의 제어가 쉽다는 장점을 갖고 있다[21]. 장비의 세부 사양은 Table 2와 같다.

Table 2. The specifications of the S-LOM type 3D printer

Item	Content
Laser type	CO ₂ laser tube
Laser power	Max 75W
Frame size (W×D×H)	1,580mm×1,400mm×1,530mm
Workspace (W×D×H)	1,500mm×1,320mm×100mm
Cutting velocity	26.7~41.7mm/sec
Cutting range of angle	-60° ≤ θ ≤ 60°

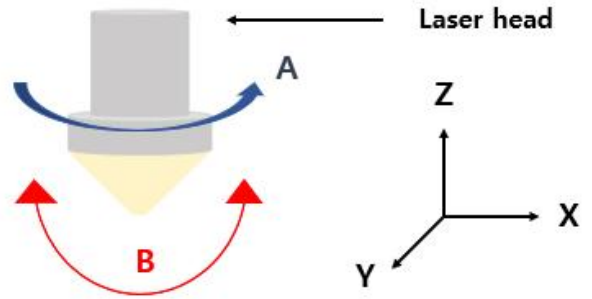


Figure 4. 5-axis of laser cutting machine

CO₂ 레이저 절단 방식에서 사용되는 레이저 빔은 차수가 작을수록 집속되는 레이저 빔의 직경이 작아 정밀한 가공이 가능하고 큰 출력 밀도를 가질 수 있다[21]. 따라서 본 연구에서는 차수가 작은 Transverse electromagnetic(TEM)₀₀ 모드의 CO₂ 레이저 빔이 사용되었다. CO₂ 레이저 빔은 볼록렌즈를 통과한 후 굴절되어 저장된 G-code를 따라 EPS 패널을 절삭하게 된다. 레이저 헤드(Laser head)는 Figure 4와 같이 3차원 좌표인 X, Y, Z축과 레이저 헤드의 회전 방향인 A, B축으로 구동하게 되며 구동 프로그램으로는 마하3(Mach3)가 활용된다.

EPS 패널 절삭 시 레이저 헤드의 B축에 대한 회전 각도는 좌우로 최대 약 60도까지 가능하며, 보통 출력의 크기는 약 75W, 절단 속도는 약 26.7~41.7mm/sec 범위로 20~30mm 정도 두께의 EPS 패널을 절삭한다. 출력의 크기와 절단 속도는 구현하고자하는 비정형 형상 및 사용하는 EPS 패널의 두께, EPS 비드(Bead)의 크기 등에 따라서 다르게 설정할 수 있다.

EPS 패널 절삭가공 단계는 3D 프린터로 EPS 패널을 투입하는 작업, EPS 패널을 절삭하는 작업, 절삭된 EPS 패널을 다시 3D 프린터에서 반출하는 작업으로 구성된다. EPS 패널 절삭가공 단계의 소요 시간은 절삭하는 EPS 패널의 형상에 따라 다르나 1개의 EPS 패널 당 약 2분~5분 정도가 소요된다.

3.4 EPS 패널 적층 및 표면 처리 단계

절삭된 여러 개의 EPS 패널들은 층간 결합 작업이 필요하다. 이 때, Kim et al.[22]이 개발한 EPS 층간 결합 장치 등 건식공법의 결합방식 또한 활용이 가능하다. 하지만 EPS 거푸집 내에 천공을 따로 해야 하고 제작하고자하는 부재에 따라 필요한 장치의 규격이 달라진다는 한계점이 존재하여 주로 습식공법이 이용된다.

Lee et al.[17]의 연구를 비롯하여 기존에는 주로 EPS 패널



Figure 5. Silicon adhesive & glue adhesive & spray adhesive

간 결합에 Figure 5와 같이 실리콘(Silicon) 접착제, EPS 접착용 본드(Bond), EPS 접착용 스프레이(Spray)가 활용되었다. 하지만 실리콘 접착제 및 EPS 접착용 본드의 경우 접착제 자체의 두께 때문에 적층된 EPS 패널 사이에 공간이 생기는 경우가 빈번하게 발생한다. EPS 패널 사이에 공간이 생기게 되면, 타설 시 그 틈으로 콘크리트가 누출되어 새어나오기 때문에 원하는 비정형 형상의 정밀한 구현이 어렵게 된다. 따라서 현재까지는 EPS 접착용 스프레이를 활용한 결합 방식이 EPS 패널 간 결합에 가장 적합하다고 판단된다.

적층된 EPS 패널들은 현장 이송의 용이성, 콘크리트 타설 후 탈형성 등을 고려하여 보통 20~30개의 EPS 패널로 하나의 EPS 모듈(Module)을 구성하게 된다. 적층 직후 EPS 모듈은 모듈을 구성하는 EPS 패널 사이에 최대 5mm 정도의 단차가 발생하게 되어 표면이 매끄럽지 못한 상태가 된다. 이는 3D 프린터 장비 자체의 오차나 적층 시 생기는 단차에 의해서 발생하게 된다. 따라서 적층작업 후에는 사포나 수세미 등을 활용하여 이러한 단차를 제거하는 작업이 필요하다.

Figure 6과 같이 적층 작업에 이어 단차 제거 작업까지 완료된 EPS 모듈은 콘크리트 타설 후 원활한 탈형을 위하여 표면이 매끄럽게 코팅되어야 한다. Lee et al.[17]의 연구 등 기존 표면



Figure 7. Spreading polyurea & taping & spreading form oil

코팅작업에는 폴리우레아(Polyurea)를 도포하는 방식이 가장 많이 활용되었다. 폴리우레아를 도포하는 방법은 곡률이 심한 비정형 곡면에 대응하기 용이하지만 탈형성이 좋지 않다. 반면, 유리테이프를 부착하는 방법은 곡률이 심한 비정형 곡면에 대응하기에는 어렵지만 경제적이며 탈형성이 매우 좋다. 경우에 따라서는 탈형성 확보를 위하여 폴리우레아를 도포한 후 박리제까지 추가로 도포하기도 하나, 본 연구에서는 Figure 7과 같은 여러 표면코팅 방식 중 유리테이프를 부착하는 방법이 활용되었다.

또한, 본 연구에서는 유리테이프를 대체할 수 있는 표면 코팅 방법을 개발하기 위하여 50mm×50mm×200mm(가로×세로×높이) 콘크리트 공시체 제작 후 탈형 테스트를 진행하였다. Figure 8과 같이 차량용시트지, 유리테이프, 스트레치드필름, 청테이프를 활용하여 테스트를 진행한 결과, 차량용시트지와 유리테이프가 탈형성과 콘크리트 품질이 가장 우수하였다. 하지만 차량용시트지의 경우 스티로폼과의 밀착 부착이 어려우며, 재단 시 많은 시간이 소요된다. 따라서 현재까지는 유리테이프를 활용하는 것이 가장 효율적인 방법인 것으로 판단된다.

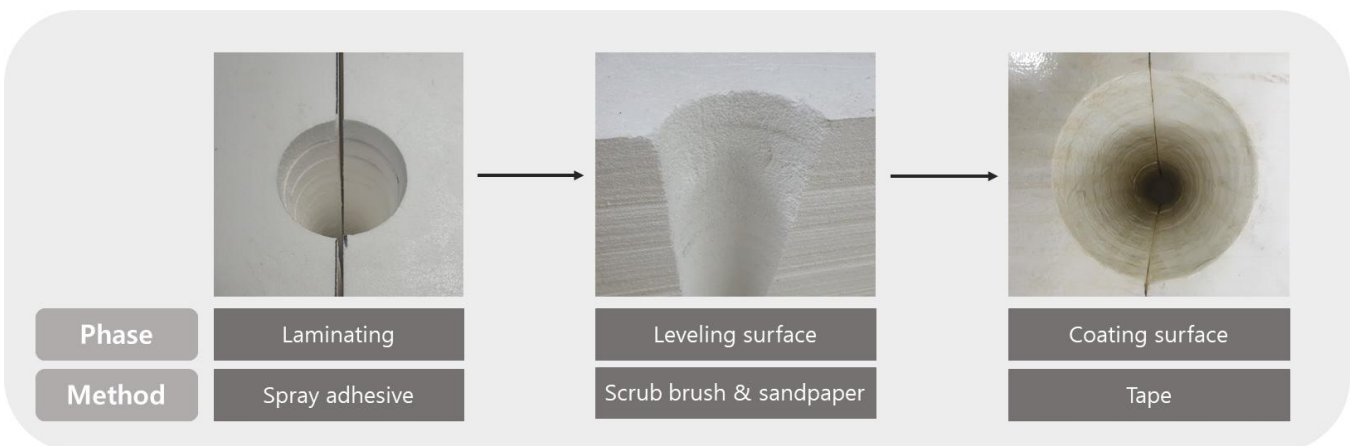


Figure 6. Detailed phases and methods for post processing of EPS forms

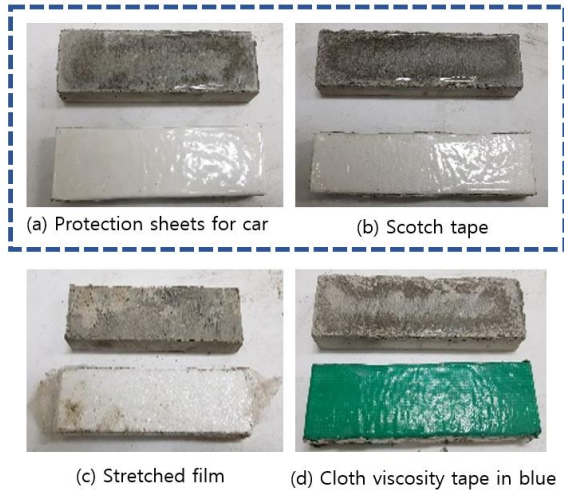


Figure 8. Test for coating surfaces of concrete forms

4. 실물 모형 시험을 통한 기존 비정형 거푸집 제작공법과 제작시간 및 정밀도 비교분석

4.1 실물 모형 시험 개요

기존의 CNC 밀링 기술은 모든 가공이 프로그램에 의해 가공되는 방식으로, 재료 및 공구를 1회 부착하면 공작 기계 등이 EPS를 조각하여 원하는 형상을 구현하는 방식이다. 본 연구에서는 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용하여 비정형 벤치 생산을 위한 거푸집을 제작할 때와 기존의 CNC 밀링 기술을 활용하여 동일한 형상의 거푸집을 제작할 때의 정밀도, 작업 시간을 비교하였다.

재료는 두 방식 모두 EPS로 선정하였으며, 표면 코팅 작업은 두 방식 모두 동일한 면적에 대해 수행되므로 실물 모형 시험의 범위는 설계단계부터 단차 제거 작업까지로 설정하였다. 실물 모형 시험에 활용된 비정형 벤치 거푸집 모형은 Table 3과 같이 캐나다 토론토에 위치한 워터파크 시티(Waterpark city)의 비정형 벤치 모형 모듈 중 일부로 선정하였다. 거푸집의 크기는 600mm×660mm(폭×높이)이며, 절단 각도의 범위는 5도에서 120도 사이로 설정되었다.

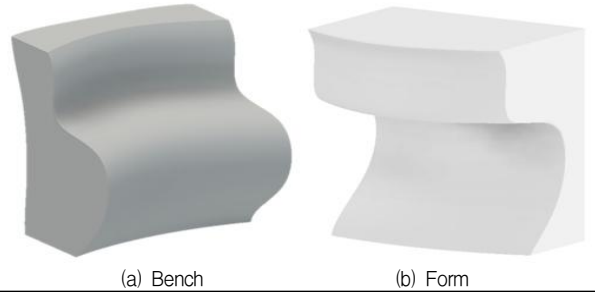
4.2 실물 모형 제작 프로세스

4.2.1 CNC 밀링 방식을 활용한 실물 모형 제작

본 연구에 활용된 CNC 밀링 기계는 4축 장비로써 깊이 250mm 까지 작업이 가능하며, 절단 속도는 약 25mm/sec 정도이다. CNC 밀링 방식은 S-LOM 방식과 유사하게 컴퓨터

Table 3. The specification of mock-up test

Item	Content
Name	The bench of Waterpark city in Toronto, Canada
Material	EPS
Size	600mm×660mm (W×L)
Range of angle	$5^{\circ} \leq \theta \leq 120^{\circ}$



지원 제조(Computer aided manufacturing;이하 CAM) 프로그램으로 G-code를 생성하게 되며, 마하3 프로그램으로 구동된다. 또한 CNC 밀링 범위의 한계로 본 실물 모형 시험은 비정형 거푸집을 2개로 나누어 제작한 후 이를 접착 결합하는 방식으로 진행되었다. CNC 밀링 방식의 작업 순서는 ① 설계 단계 ② G-code 생성 단계 ③ 데이터(Data) 입력 단계 ④ CNC 밀링 작업 단계 ⑤ 단차 제거 단계로 진행되었다.

4.2.2 S-LOM 방식을 활용한 실물 모형 제작

비정형 벤치의 높이는 660mm이므로 EPS 패널은 총 22장이 투입되었다. S-LOM 방식을 활용한 비정형 EPS 거푸집 제작 순서는 Figure 9와 같이 ① 설계 단계 ② 분할 단계 ③ G-code 생성 단계 ④ 데이터 입력 단계 ⑤ 절삭 단계 ⑥ 적층 결합 단계 ⑦ 단차 제거 단계로 진행되었다. 전체적으로 CNC 밀링 방식과 유사하게 진행되었으며, CNC 밀링 방식과의 차이점으로는 분할 단계 및 적층 결합 단계가 추가되었다는 점, 절삭방식이 다르다는 점이 있다. 또한 본 실물 모형 시험은 앞서 제시한 S-LOM 방식의 프로세스와는 다르게 기존의 분할 작업용 프로그램을 활용하지 않고, 3D 캐드 프로그램에서 바로 분할 작업을 진행하였다.

4.3 비정형 거푸집 제작시간 및 정밀도 비교분석

4.3.1 제작시간 비교분석

CNC 밀링 방식과 S-LOM 방식을 활용한 실물 모형 시험 결과, 비정형 거푸집을 제작 시 각 작업 별 소요 시간은 Table 4와 같았다.

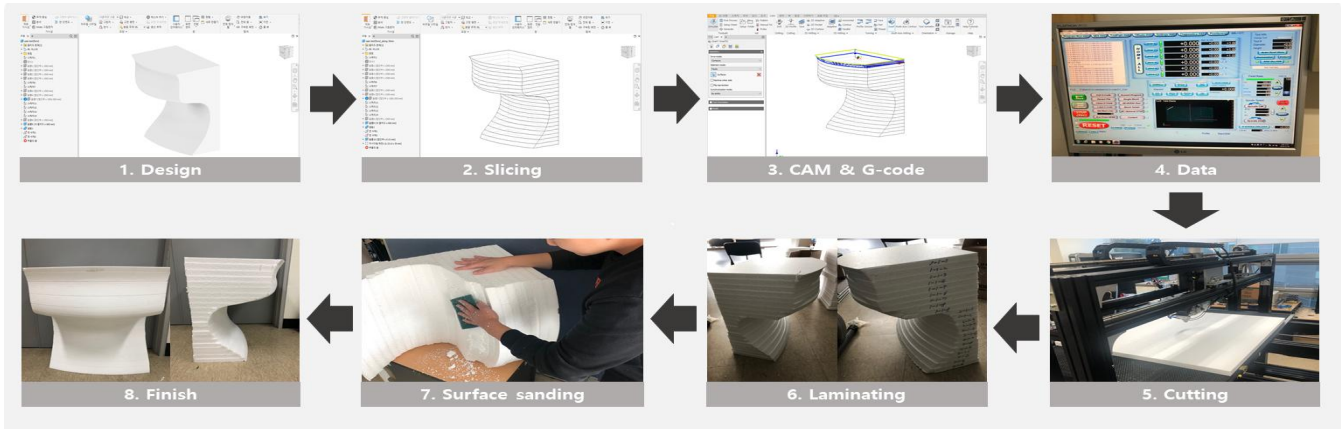


Figure 9. Process of freeform concrete form manufacture using S-LOM method

Table 4. Comparative analysis based on manufacturing time by manufacturing method

Item	Manufacturing time				
	CNC milling (A)		S-LOM (B)		Variation (B-A)
	(Minutes)	(%)	(Minutes)	(%)	
Milling or cutting	348.8	77.2	34.4	17.9	-314.4
Setting	2.0	0.4	5.5	2.9	3.5
Attaching or laminating	1.1	0.2	17.4	9.0	16.3
Bond hardening	90.0	19.9	90.0	46.8	0.0
Surface sanding	10.0	2.2	45.0	23.4	35.0
Total (Minute)	451.9		192.3		-259.6

작업 별 소요 시간 비교 분석 결과, CNC 밀링 방식보다 S-LOM 방식에서 EPS 밀링 및 절삭 작업 시간이 314.4분이나 적게 소요되었다. S-LOM 방식의 특성 상 다수의 패널이 적층 되기 때문에 적층 결합 작업과 표면 단차 제거 작업에서 작업 시간이 각각 16.3분, 35분씩 더 소요되었지만, 전체 작업 시간은 S-LOM 방식이 259.6분 적게 소요되었다. 따라서 작업 시간 측면에서는 CNC 밀링 방식보다 S-LOM 방식이 훨씬 우수하다고 할 수 있다.

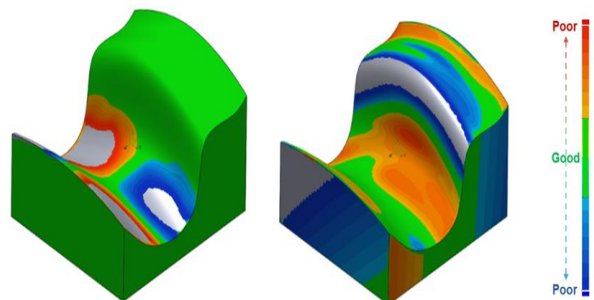
4.3.2 정밀도 비교분석

실물 모형 시험의 정밀도 비교에는 3D 형상의 정밀한 비교 분석을 위하여 레이저를 활용한 3D 스캐닝(3D scanning) 기술이 사용되었다. 3D 스캐닝 장비로는 형상의 오차에 따라

출력되는 색상과 밝기 조절이 가능한 스테레오스캔 네오(Stereoscan neo)가 활용되었다. 측정된 형상에 대한 정보는 역설계 되어 3D 캐드 파일로 변환된 후, 기존 3D 캐드 설계 도면과 자동으로 비교되어 형상의 오차값이 계산된다. 정밀도 비교 분석 결과는 Table 5와 같으며, 측정된 형상의 부위별 오차 발생 정도는 Figure 10과 같다.

Table 5. Precision analysis result

Item	Manufacturing method	
	CNC milling	S-LOM
Mean value(mm)	-0.3	-3.5
Standard deviation	2.0	6.0
Index regarding error value	Absolute value of maximum(mm)	21.6
	Absolute value of minimum(mm)	0.0



(a) CNC milling method (b) S-LOM method

Figure 10. Precision analysis results through 3D geometry

오차의 최대·최소 절댓값에는 두 방식 간에 큰 차이가 없었으나, 오차값의 표준편차에서 S-LOM 방식이 3배 크게 측정되었다. 이는 형상의 전체적인 정밀도 측면에서는 CNC 밀링 방식으로 가공하는 것이 더 우수하다는 것을 의미한다.

한편, S-LOM 방식에서 오차의 표준 편차값이 비교적 큰 이유는 인력이 직접 적층 결합 작업을 수행하므로 일직선으로 적층하기 어렵고, 단차 제거 단계에서 제거해야 할 단차가 상대적으로 많기 때문이라고 예상된다. 특히 곡면이 60도 이상으로 경사가 급한 부분을 작업자가 표면 처리하는 작업 과정에서 오차가 발생하였다고 사료된다. CNC 밀링 방식의 경우, 2개로 나누어서 제작된 모듈을 작업자가 접합하는 과정에서 국소적인 부분의 오차가 발생했다고 예상된다.

정형 거푸집의 경우 거푸집 및 동바리 설계기준 「KDS 21 50 00 : 2018」[23]에 따르면 Table 6과 같이 콘크리트 마감 상태에 따라 최대 3~13mm 이내의 허용 오차를 갖는다. 반면, 현재 비정형 거푸집에 대한 설계기준은 따로 존재하지 않으며, 현재 기술로는 위 기준을 충분히 만족시킬 수 있는 방법이 없다. 한편, 콘크리트 타설 후 보통 견출작업이 수행되는데, 견출작업을 통해 거푸집 제작 시 발생한 오차를 일정 수준 극복할 수 있다. 본 연구의 S-LOM 방식은 개발 초기 단계로, 현장 인터뷰를 참고하여 Table 6의 C급 절대 변형값 기준인 13mm에 50% 할증을 한 19.5mm를 목표로 정밀도 분석을 수행하였다.

Table 6. Strain standard of form board

Surface grade of form board	Relative strain	Absolute strain
A	$l_n/360$	3mm
B	$l_n/270$	6mm
C	$l_n/180$	13mm

1) A: The exposed concrete surfaces that are important to the aesthetic
 B: The concrete surface with a finish
 C: The exposed concrete surface that is not aesthetic important
 2) l_n : Stands for support supporting form or long distance of form base

분석 결과, S-LOM 방식의 경우 오차의 최대 절댓값이 20.5mm 발생하였는데 1mm의 오차는 3D 프린터의 절단 속도 조절을 통해 충분히 극복 가능한 수준이다. 또한 Lee et al.[17]의 연구에 따르면 1,296mm×1,296mm×562mm 크기의 비정형 벤치 견출작업에는 약 1시간이 소요되므로 본 연구에서 제작한 거푸집의 경우 견출작업이 약 30분이 채 걸리지 않을

것으로 예상된다. 따라서 비정형 거푸집 제작시간과 정밀도를 종합적으로 고려할 때 S-LOM 방식을 활용하는 것이 CNC 밀링 방식을 활용하는 것보다 현장 적용성이 우수할 것으로 예상된다.

5. 결 론

목재, 철재, EPS 거푸집 등을 활용한 비정형 거푸집 제작 방식은 제작시간이 길고 제작비용이 높아 거푸집 공사의 생산성을 저하시키는 한계점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 3D 프린팅 기술 중 S-LOM 방식을 활용한 비정형 EPS 거푸집 제작 공법을 개발하고 프로세스를 제시하였다. 또한 본 공법의 현장 적용성 검증을 수행하기 위하여 실물 모형 시험을 통한 기존 CNC 밀링 기술과의 제작시간 및 정밀도에 대한 비교 분석을 실시하였다.

분석 결과, S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술은 기존의 CNC 밀링 기술 대비 제작시간 측면에서 약 57.4%의 제작시간 단축 효과가 있었다. 한편, 정밀도 측면에서 CNC 밀링 기술과 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술은 각 설계도면 대비 21.6mm, 20.5mm의 오차의 최대 절댓값이 발생하였다. 또한, 오차의 표준편차값은 S-LOM 방식이 CNC 밀링 기술보다 3배 크게 측정되었다. 따라서 제작시간 측면에서는 S-LOM 방식이 더 우수하다고 할 수 있지만 정밀도 측면에서는 CNC 밀링 기술이 더 정밀하다고 할 수 있다.

본 연구의 실물 모형 시험은 소형 부재를 대상으로 수행되어 대형 부재를 생산하거나 다량의 부재를 생산할 경우, 기존의 CNC 밀링 기술에 비해 제작시간을 크게 단축시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 S-LOM 방식은 3D 프린터의 절단 속도 조절을 통해 본 연구에서 제안한 비정형 거푸집 설계기준을 충족시킬 수 있다. 따라서 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용하는 것이 CNC 밀링 기술보다 현장 적용성이 우수할 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서는 S-LOM 방식 3D 프린팅 기술과 기존 CNC 밀링 기술의 정밀도, 제작시간에 대한 비교분석만 수행되었다. 또한 실물 모형의 경우 최대 절단각도를 초과한 패널을 포함하여 22개의 다양한 형상의 패널로 구성되었지만, 거푸집 모듈 단위로는 실물 모형 시험이 1회 수행되었다. 이는 거푸집 모듈 단위의 제작시간과 정밀도의 통계적 유의미성 판단은 어렵다고 볼 수 있다. 따라서 추후 연구에서는 비정형 거푸집 설계기준에 부합할 수 있도록 3D 프린터의 절단 속도를 조정

한 후, 기존의 CNC 밀링 기술과의 경제성에 대한 비교와 함께 다수의 실물 모형 시험을 수행하여 제작시간과 정밀도에 대한 추가적인 검증이 예정된다. 또한 자동 적층 결합 장치 등 패널을 일직선으로 수직 적층할 수 있는 기술의 개발과 3D 프린터의 절단 속도를 개선시킬 수 있는 기술이 추가적으로 필요하다고 사료된다.

요 약

최근 비정형 건축물이 한 나라의 기술적 우월성을 나타내는 새로운 척도로 부상하기 시작하면서 비정형 건축물을 효율적으로 제작하는 기술이 중요해지고 있다. 하지만 기존의 목재, 철재 거푸집 등을 CNC 기술로 가공하여 비정형 거푸집을 제작하는 방식은 제작시간과 재료 비용 측면에서 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 통한 비정형 EPS 거푸집 제작 공법을 개발하고 제작 프로세스를 제시하였다. 또한 실물 모형 시험을 통해 기존 CNC 밀링 기술과의 제작시간 및 정밀도에 대한 비교 분석을 실시하였다. 연구결과, S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용할 경우 CNC 밀링 기술 대비 약 57.4%의 제작시간 단축 효과가 있었다. 또한 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술의 경우 설계도면 대비 약 20.5mm의 오차의 최대 절댓값이 발생하였다. 본 연구의 결과는 거푸집 제작시간과 정밀도 측면에서 S-LOM 방식 기술의 현장 적용 가능성을 확인하여, S-LOM 방식 기술의 개선 및 공법 활성화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

키워드 : 비정형 콘크리트 거푸집, 3차원 인쇄, 경사대응형 박막적층, 실물 모형 시험

Funding

This research was supported by a grant(20AUDP-B1 21595-05) from Urban Architecture Research Program funded by Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs of Korean government.

ORCID

Heejae Ahn, <https://orcid/0000-0001-9501-8390>
Dongyoun Lee, <https://orcid/0000-0003-1929-3563>

Woojong Ji, <https://orcid/0000-0002-1499-1955>
Woojae Lee, <https://orcid/0000-0001-8567-3666>
Hunhee Cho, <https://orcid/0000-0002-2010-6641>

References

1. Lee G. Construction issues of irregular-shaped buildings. *Review of Architecture and Building Science*. 2008 Apr;52(4):63-5.
2. Kim JH, Kim YK, Kim JD, Kim TJ. Structural design of complex-shaped super tall Lotte world tower. *Review of Architecture and Building Science*. 2016 Apr;60(5):11-5.
3. Lee JH. Deformation compensation method of expanded polystyrene form-liner manufactured by 3D printer [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Korea University; 2019. 85 p.
4. Lee DH, Kim SK. Development of PCM-enabled atypical concrete segment production process. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*. 2015 Feb;17(1):219-24.
5. Park YM, Jo SJ, Kim SJ. Development of the free-formed concrete structure construction technologies using 3D digital design. *Proceeding of the Korea Institute of Building Construction 2012*; 2012 May 18; Jeonbuk University, Jeonju, Korea. Seoul(Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2017. p. 205-8.
6. Park YM, Kim HW, Park KH, Kim SJ. Study on construction example of free formed curved facade using external UHPC panels-Focused on the remodeling construction of Samsung-dong KEB Hana bank. *Proceeding of the Korea Institute of Building Construction 2017*; 2017 May 17-19; The-K hotel, Gyeongju, Korea. Seoul(Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2017. p. 62-3.
7. Savvides A. Free form formwork system technology for concrete structures [master's thesis]. [Budapest (Hungary)]: Budapest University of Technology and Economics; 2012. 74 p.
8. Lim JY, Kim DY, Kim SK. An experimental study for quality assurance of free-form concrete panels produced by CNC machine. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018 April 26;24(2):145-54. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.461>
9. Seo MB. Analysis of 3D printing construction technology and case study. *Review of Architecture and Building Science*. 2015 Dec;60(1):42-6.
10. Tay YWD, Panda B, Paul SC, Noor Mohamed NA, Tan MJ, Leong KF. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017 May;12(3):261-76. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
11. Lim S, Buswell RA, Le TT, Austin SA, Gibb AGF, Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012 Jan;21:262-8.

-
- <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
12. Khoshnevis B, Yuan X, Zahiri B, Zhang J, Xia B. Construction by Contour Crafting using sulfur concrete with planetary applications. *Rapid Prototyping Journal*. 2016 Aug;22(5):848-56. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2015-0165>
 13. Zareiyan B, Khoshnevis B. Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting-Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thick. *Automation in Construction*. 2017 Sep; 81:112-21. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.013>
 14. Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Gibb AGF, Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*. 2012 Jan;45(8):1221-32. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
 15. Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Law R, Gibb AGF, Thorpe T. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012 Mar;42(3):558-66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
 16. Cesaretti G, Dino E, Kestelie X, Colla V, Pambaguian L. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Automation in Construction*. 2014 Jan;93:430-50. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>
 17. Lee DY, Lee DM, Cho HH, Kang KI. The production process and mock-up test of freeform concrete segments using LOM type 3D printer. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2018 Feb;18(1):89-98. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.1.089>
 18. Kim KH, Pyeon SJ, Lee DH. A study for development of FCP production technology using 3D printing method. *General Assembly & Spring Annual Conference of Architectural Institute of Korea 2018*; 2018 Apr 26-27; The-K hotel, Seoul, Korea. Seoul(Korea): Architectural Institute of Korea; 2018. p. 640-1.
 19. Kim KT, Jun YH. Technical limit analysis of the construction method of free-curved architectural structure using 3D printer. *Proceeding of the Korea Institute of Building Construction 2017*; 2017 May 17-19; The-K hotel, Gyeongju, Korea. Seoul(Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2017. p. 201-2.
 20. Jeong SY. Cutting path generation for S-LOM of free-form form-work [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Korea University; 2019. 72 p.
 21. Kim HM, Sim JH, Jeong SY, Hong DH. A study on optimal cutting condition of EPS foam cutting based on collimated CO₂ laser beam. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 2019 Sep;36(9):859-65. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.9.859>
 22. Kim HR, Ahn HJ, Lee DY, Cho HH, Kang KI. Development of the interlayer coupling equipment for EPS form manufacturing based on LOM-type 3D printing technology. *Assembly & Spring Annual Conference of Architectural Institute of Korea 2019*; 2019 Apr 26-27; Korea University, Seoul, Korea. Seoul(Korea): Architectural Institute of Korea; 2019. p. 410-1.
 23. Korea Construction Standard. KDS 21 50 00 : 2018. Ministry, Infrastructure and Transport. 2018 Apr. 28 p.