

# LOM 방식 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스 및 Mock-up test

## The Production Process and Mock-up Test of Freeform Concrete Segments using LOM type 3D Printer

이 동 윤

이 동 민

조 훈 희\*

강 경 인

Lee, Dong-Youn

Lee, Dong-Min

Cho, Hun-Hee\*

Kang, Kyung-In

*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seongbuk-Gu, Seoul, 02841, Korea*

### Abstract

Recently, the importance of the construction technology of the free-formed buildings is becoming more significant, as the interest and demand for the free-formed buildings are increasing. However, it takes much time and cost during the construction of free-formed buildings because the current construction technique of freeform concrete segments is manufactured by a formwork. Therefore, in this study, we suggested a new manufacturing process based on the LOM-type 3D printer for freeform concrete segments that can shorten construction time and reduce cost when constructing freeform concrete segments, and we also verified the feasibility of production process through mock-up test. The result shows that the suggested process shortened 47.8% of production time and saved 56.2% of cost compared to the existing steel formwork method. In conclusion, it is expected that the production method of freeform concrete segments using 3D printer will contribute to the improvement of productivity of freeform concrete segments construction and the activation of new construction method for free-formed building construction.

Keywords : freeform concrete segments, 3D Printer, mock-up test, production process

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 비정형 건축물은 건축물의 심미성과 상징성이 중요시 되는 추세로 그 수요가 증가하고 있으며, 건축기술의 발전에 따라 다양한 형태의 콘크리트 곡면을 제작할 수 있게 되었다[1,2]. 그러나 비정형 건축물을 시공하고 생산하기 위한 기술과 관리적 측면에서의 한계가 있어 공기 및 원가 측면에서 문제점이 드러나고 있다[3]. 비정형 건축물을 시공하는

데 있어서 문제점 중 하나는 정형화된 거푸집으로 철근 콘크리트를 사용하여 건설하는 것이 어려운 점이다. 이에 관한 대안으로 최근 각광받고 있는 4차 산업혁명의 대표적인 기술 중 하나인 3D 프린팅 기술을 적용하여 비정형 부재를 프린팅하는 기술이 주목 받고 있다[4]. 3D 프린팅 기술을 이용하여 건축물을 시공하는 대표적인 기술로는 USC (University of Southern California)에서 개발한 Contour Crafting과 Lough Borouch 대학과 Foster & Paterners 건축사무소에서 개발한 Concrete Printing 기술이 있다[5,6]. 또한 중국의 윈선건설사(WINSUN 3D Construction Technology)에서 3D 프린터를 직접 개발하여 상하이 공업단지에 사무실용 건축물을 시공한 사례도 있다. 이 기술들은 로봇기술로 콘크리트를 분사하여 비정형 건축에서의 곡면과 다양한 크기의 비정형 부재를 프린팅하는 것이다. 두 기술 모두 비정형 건축물을 시공하는 것에 새로운 방식의 기술로써 주목 받고 있지

Received : November 14, 2017

Revision received : November 21, 2017

Accepted : November 23, 2017

\* Corresponding author : Cho, Hun-Hee

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

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

만 초기 연구 단계이며, 출력되는 콘크리트 부재의 품질성 검증 및 소재와 기술의 안전성 검증이 부족한 상황이다.

현재 국내의 경우, 3D 프린팅을 이용한 비정형 건축물 생산 연구는 FDM(Fused Deposition Modeling)방식을 전제로 진행되고 있는데 이 방식은 상대적으로 고가의 장비와 재료비, 마감면의 품질, 슬라브 생산방식 등의 한계를 가지고 있어 실용화 단계에 이르기까지는 다소 시간이 소요될 것으로 예상된다.

따라서 비정형 건축물 부재를 FDM 방식 등으로 직접 3D 프린터로 출력하기 보다는 비정형 거푸집을 3D 프린팅 기술로 생산하여 기존의 재료와 장비들을 활용하는 방식이 효과적인 대안이 될 수 있다. 기존에 비정형 건축물과 콘크리트 부재 생산에 사용되는 비정형 거푸집의 판넬 혹은 폼 라이너는 목재, 강재, EPS(Expanded Poly Styrene) 등이 활용되고 있다[7,8]. 이 중 목재와 강재의 경우 자체가 구조재이며 비정형 형상을 구현해야하기 때문에 재료비와 가공비가 상당한 수준이다. 반면 EPS를 CNC(Computerized Numeric Control)로 가공하여 기존의 거푸집 판넬 안쪽에 이를 설치하는 방식은 목재나 강재를 이용하는 방식에 비하여 매우 경제적이거나, 상대적으로 측압에 의한 왜곡이 발생할 수 있다. 또한 여전히 고가의 CNC 장비와 제작기간 등의 개선여지가 있는 상황이다.

이에 본 연구에서는 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산기술 개발을 위하여 LOM 방식 3D 프린터를 이용하여 비정형 거푸집의 라이너를 출력하여 콘크리트를 타설하여 비정형 콘크리트 부재를 생산하는 방식을 제시하고자 한다. 또한 본 연구에서 제시한 생산 프로세스를 적용한 Mock-up test를 통해 기존 강재 거푸집을 이용한 비정형 생산기술과 비교하여 기술적인 장점과 현장 적용의 가능성을 확인하고자 한다.

## 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 소형 비정형 건축물에 사용되는 비정형 콘크리트 부재를 대상으로 한다. 본 연구에서 사용되는 3D 프린터는 기존 로봇기술에서 콘크리트가 출력하는 FDM방식이 아닌 거푸집을 쾌속조형하기 위해 재료를 절삭하고 적층하는 LOM(Laminated Object Manufacturing) 방식을 활용한다. 거푸집의 재료는 형상을 빠르고 용이하게 가공할 수 있는 EPS를 사용하였다. 또한 본 연구에서 비정형 콘크리트 부재 생산에 활용되는 비정형 거푸집은 비정형으로 가공된

EPS 폼 라이너를 기존 유로폼에 부착한 비정형 거푸집 시스템이라고 정의한다.

본 연구의 진행방법은 다음과 같다.

- 1) 기존 건축 분야에 활용되고 있는 3D 프린팅 기술과 비정형 콘크리트 부재 생산의 연구동향을 고찰하고 문제점을 제시한다.
- 2) 기존의 비정형 콘크리트 부재 생산 분석을 비정형 거푸집 재료인 목재, 강재, EPS를 대상으로 시공기간에 관해 분석하고 대표적인 사례를 통해 한계점을 제시한다.
- 3) 기존의 문제점을 해결할 수 있는 대안을 통해 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스를 제시한다.
- 4) Mock-up test를 통해 현장 적용성을 살펴보고, 생산 시간 및 비용을 기존 강재 거푸집을 활용한 비정형 콘크리트 부재 생산과 비교분석한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 건축 분야 3D 프린팅 기술 연구동향

최근 3D 프린팅 기술이 발달하면서 건축분야에도 해당 기술을 적용하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 국외의 연구동향을 살펴보면 초대형 건설 제작물을 신속하게 제작하기 위한 3D 프린팅 기술의 필요성 제시를 시작으로 콘크리트 인쇄 프로세스에 관한 연구, 3D 프린팅 장비에 건설재료를 사용할 수 있는 재료개발 연구 등이 수행되고 있다[1,9]. 또한 건축공사에 사용되는 주재료인 콘크리트의 품질을 보전하고, 쾌속 출력이 가능할 수 있는 펌프, 노즐 등 장비에 관한 연구도 함께 진행되고 있다. 국내의 경우, 국외와 달리 관련 분야의 연구는 초기 단계라 볼 수 있으며, 주로 3D 프린팅 기술의 건축분야 활용 동향 및 경제성, 가능성에 관한 연구, 3D 프린팅 기술을 이용한 건축 공법 매커니즘 개발 등과 같은 기초적인 연구가 진행되었다[10,11].

이들의 연구는 3D 프린팅 기술 중 대표적 방식인 FDM 방식을 대상으로 전체 건축물을 시공하는 연구의 초점이 맞춰져 있다. 중국의 원선건설사에서 FDM 방식 3D 프린터를 이용한 사무실용 건축물을 시공한 사례 등과 같이 3D 프린터를 활용하여 실제로 건축물을 시공한 사례도 있으나, 최근까지의 사례를 살펴보면 건축물에서 비정형 콘크리트 부재의 정밀도는 재래식 공법에 의해 시공된 부재보다 미흡한 것으로 나타난다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 LOM방식

3D 프린팅 기술을 적용하고자 한다.

LOM방식 3D 프린팅 기술은 디자인한 모델을 횡으로 분할하여 종이, 플라스틱, 금속판 등을 접착하여 조형하는 방식이다. 이 기술은 타 3D 프린팅 기술에 비해 제조하는 비용이 저렴하다. 이는 FDM 방식 3D 프린팅 기술에 사용되는 광경화성 레진과 같은 특수재료보다는 저렴한 재료를 사용하기 때문이다. 또한 다양한 형태를 정밀하게 대응이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 비정형 콘크리트 부재를 시공할 때에는 기존 재래식 공법인 거푸집공사를 적용하는 것이 바람직하다고 판단하였다. 이를 위해 3D 프린팅 방식을 기존 FDM 방식이 아닌 LOM 방식을 활용하여 비정형 형태의 EPS 폼 라이너를 제작하고, 이를 활용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스를 제시하였다.

## 2.2 비정형 콘크리트 부재 생산 연구동향

최근 국내·외로 비정형 건축물의 요구도 및 수요가 높아짐에 따라 해당 분야의 연구도 활발하게 이뤄지고 있다. 비정형 콘크리트 부재에 관련된 국외 연구를 살펴보면 설계, 비정형 콘크리트 생산 및 시공 등의 다양한 측면에서 연구가 진행되고 있다. 특히 BIM(Building Information Modeling)의 정보를 기반으로 비정형 곡면 가공기술이 향상되었다. 그러나 여전히 비정형 부재를 생산하기 위한 거푸집, 마감 패널의 몰드는 긴 생산기간과 높은 원가 측면에서 생산성이 떨어지고 있다[12,13,14]. 이와 같은 한계점을 극복하기 위해 다양한 기술이 적용되고 있지만, 현재까지 비정형 콘크리트 부재를 경제적으로 시공하는 것은 미흡한 실정이다[13].

국내 연구는 비정형 건축물의 설계 프로세스, 형태적 특성 분석, 설계기술 개념 분석 및 제안 수준으로 진행되었다[15]. 또한 BIM 기반 비정형 콘크리트 부재의 설계와 시공 사례를 분석한 연구가 있으나, 실용화 중심의 기술을 개발한 연구는 부족하다.

이와 같이 비정형 콘크리트 부재 생산에 관한 연구는 설계에 관한 많은 연구들이 진행은 되고 있으나, 공사 전반의 생산성을 높일 수 있는 실질적인 대안을 제시를 하고 있지 못하고 있다. 또한 비정형 콘크리트 부재 생산은 비정형 거푸집 및 몰드의 재료로 목재, 섬유, 철재, CNC 장비로 가공된 EPS 등을 이용하여 실용화에 노력하고 있으나, 값비싼 비용과 긴 제작시간, 재활용의 어려움 등의 한계점과 거푸집 탈형 후 불가피한 후속공정이 발생하는 문제점을 극복하지 못하고 있다. 이와 같은 한계점을 극복할 수 있도록 본 연구

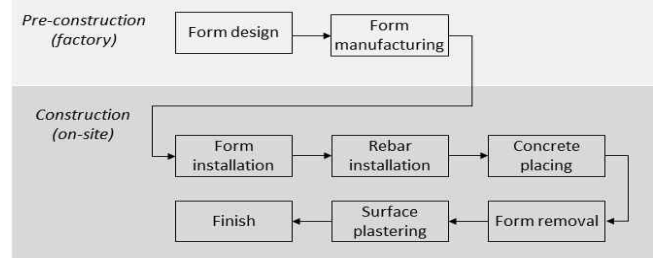


Figure 1. The production process of freeform concrete segments

에서는 비정형 부재의 거푸집의 제작 방식을 LOM 방식의 3D 프린팅 기술에 경제적인 EPS 재료를 활용한 생산 프로세스를 제시하였다. 또한 본 연구에서는 EPS 거푸집 표면 정밀 처리기술을 적용하여 비정형 콘크리트 부재 생산성을 향상하는 동시에 부재의 품질 향상에도 기여가 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 기존 비정형 콘크리트 부재 생산

비정형 콘크리트 부재 생산 분석은 부재 생산의 생산성을 향상시킬 수 있는 생산 프로세스를 제시하기 위해 국내에 적용되고 있는 기존 생산의 사례기반으로 분석하였으며, 이를 통해 기존의 한계점을 도출하였다. 기존 비정형 콘크리트 건축물에 적용된 생산 분석은 사용된 거푸집의 재료별로 목재, 강재, EPS로 나누었으며 생산 프로세스는 거푸집 설계, 제작, 설치, 철근배근, 콘크리트 타설, 거푸집 탈형, 후속작업 순으로 나타냈다(Figure 1).

각 공정별 소요시간은 1,000m<sup>2</sup>의 면적 기준으로 변환하여 일단위로 계산하였다(Table 1). 이는 비정형 거푸집의 자재선택에 있어 시공자 및 수요자 목적에 맞게 선택할 수 있는 기초자료로 제공하기 위함이다.

Table 1. Construction time comparison by materials

Work	Time (days)		
	Timber	Steel	EPS
Form design	15	15	15
Form manufacturing	30	70	40
Form installation	0.5	0.5	0.5
Rebar installation	0.5	0.5	0.5
Concrete placing	1	1	1
Form removal	0.5	0.5	0.5
Surface plastering	1	0.5	1
Total	48.5	88	58.5



Figure 2. Timber forms(DDP, Lib Form)

그 결과, 거푸집의 제작에 있어 재료별로 제작기간의 차이가 많이 발생하는 것으로 알 수 있으며, 그 중 강재 거푸집의 제작기간이 가장 긴 것으로 나타났다. 이는 강재의 가공이 어려운 점이 있는 것과 가공 후 면처리 등과 같은 후처리의 시간이 오래 걸리기 때문이다. 이와 같은 특징을 상세하게 살펴보기 위해 다음과 같이 목재, 강재, EPS 거푸집을 사용한 사례를 통해 살펴보았다.

### 3.1 목재를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산

목재를 이용한 비정형 거푸집은 콘크리트 부재의 형상을 정확하게 구현, 시공이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 목재를 부재의 형태에 맞게 가공하는 것은 어려우며, 정밀 가공을 위해서는 리브 거푸집제작 등과 같은 추가적인 작업이 요구된다. 또한 현장에서 거푸집간의 조립과 콘크리트 타설 시 발생하는 측압을 견디기 위한 장선 등의 부속품이 추가적으로 많이 발생하는 단점이 있다.

목재를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산의 대표적인 사례는 S 건설에서 시공한 DDP(Dongdaemoon Design Plaza)의 안쪽에 다양한 비정형 노출콘크리트 부분이다. 현장담당자에 따르면, 기존 CNC로 가공된 EPS를 현장에 적용하려 했지만 EPS 표면에 콘크리트가 묻어 나오는 품질적인 하자가 지속적으로 발생하여, 거푸집을 목재로 대체하였다. 해당 시공기술은 현장에서 300mm 간격으로 리브널을 제작 및 설치하여 그 널에 따라 합판을 취부 해 나가는 공법이며, 이를 리브 거푸집(Lib Form) 공법으로 명명하였다(Figure 2).

### 3.2 강재를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산

강재를 이용한 거푸집은 작은 모듈을 결합하여 거푸집을 제작하고 설치하는 목재 거푸집과 EPS 거푸집과는 달리 부재의 원사이에 맞춰 제작이 가능하다. 또한 제작과정에서

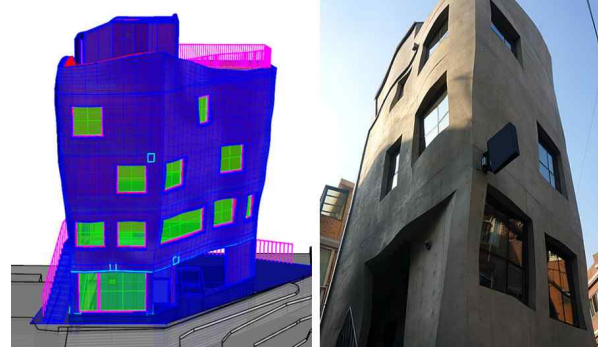


Figure 3. O Architects office building



Figure 4. Steel forms

거푸집의 면처리 작업이 포함되어 있어, 타설 이후 콘크리트 면의 품질이 우수하게 나오는 장점이 있다. 그러나 강재 거푸집의 가공은 레이저 가공 장비 또는 3D 프레스 금형가공을 활용하기 때문에 상당한 시간이 소요되며, 제작비용도 매우 높다. 그리고 부재에 대응하여 제작되는 거푸집의 크기가 큰 점과 무거운 거푸집에 의해 현장에서 거푸집 조립작업의 많은 어려움이 따르는 단점이 있다. 또한 거푸집의 표면의 정밀도 향상을 위해 퍼트작업 등의 추가 후속공정이 요구된다. 따라서 강재를 이용한 비정형 콘크리트 부재 시공은 부재의 품질은 확보 가능할 수 있으나, 거푸집의 긴 제작기간과 많은 비용, 시공의 어려움으로 인해 공사의 생산성을 저하시킬 수 있다.

강재를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산의 사례는 용산구 이태원동에 위치한 건축사사무소 사옥이며, 건물의 외관은 다양한 곡면이 교차하고 있는 형태이다(Figure 3).

O 건축사사무소 사옥은 건물전체가 노출콘크리트로 시공되었으며, 층당 하나의 강재 거푸집이 제작되어 설치되었다(Figure 4).

### 3.3 EPS를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산

EPS 거푸집은 앞서 제시한 목재와 강재에 비해 단가가 낮으며, 가벼운 무게로 인해 현장에서의 작업이 용이하다는



Figure 5. Paul smith flagship store

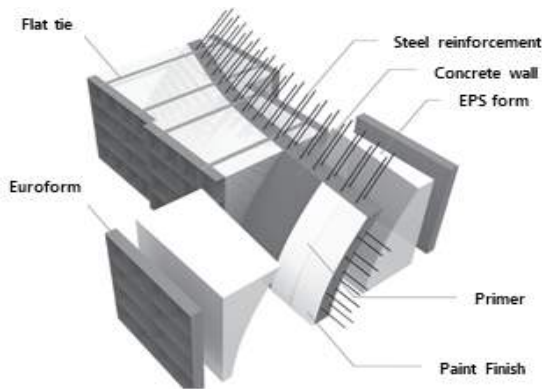


Figure 6. EPS Form

장점이 있다. 또한 EPS 거푸집은 CNC 장비를 이용하여 가공되어 형태의 정밀도가 우수하다. 그러나 가공장비가 고가인 것과 제작기간이 1,000m<sup>2</sup> 당 약 2개월로 비교적 길며, 거푸집 탈형 후 EPS 거푸집 표면에 콘크리트가 묻어나와 품질이 저하되는 단점이 존재한다. 또한 콘크리트 타설 시 발생하는 측압을 EPS 단독으로 견딜 수 없기 때문에 재래식 거푸집을 EPS 외부 설치하여 거푸집간 긴결을 해야 하는 후속 작업도 요구된다.

EPS를 이용한 비정형 콘크리트 건축물 생산의 사례는 2011년, 신사동에 시공한 폴스미스 플래그십 스토어이다 (Figure 5).

건물 외관에 나타나는 비정형 형태를 EPS 거푸집으로 제작하여 대응하였으며, EPS와 함께 유로폼을 함께 설치하였다. 거푸집간의 단차를 극복하기 위해 Flat tie를 이용, 콘크리트와 부착하는 EPS 표면을 일반 테이프 코팅하였으며, 거푸집 탈형 후 콘크리트 표면에 프라이머를 도포하고 페인트로 미장작업을 실시하였다(Figure 6).

본 연구는 LOM 방식 3D 프린터를 활용하여 폼 라이너를 제작하는 방안을 모색하였으며, 본 장비에 적합한 자재는 폼 라이너의 제작기간이 짧고, 자재비가 저렴하며, 비정형

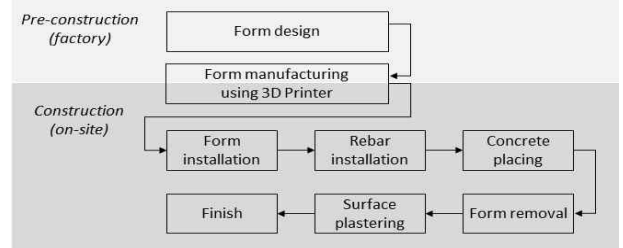


Figure 7. The production process of freeform concrete segments using 3D printer



(a) None (b) Polyurea

Figure 8. Experiments on removal of EPS form liner

형태에 잘 대응이 가능한 것이 요구된다. 위와 같이 자재별 비정형 부재 거푸집 생산기술을 살펴 본 결과, 본 연구에서 요구도에 적합한 폼 라이너 자재로 EPS가 가장 적합한 것으로 판단하였으며, EPS를 폼 라이너로 사용하여 진행하였다.

#### 4. 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스


본 연구에서 개발한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스는 다음과 같다(Figure 7). 본 연구에서 사용한 거푸집 재료는 가공이 용이하고, 단가가 저렴한 EPS로 선정하였다. 그리고 EPS 거푸집을 기존 CNC 장비가 아닌 LOM 방식의 3D 프린터를 활용하여 제작하였으며, 이 장비는 장비의 크기에 따라 공장 또는 현장 내에서도 거푸집 제작이 가능한 장점이 있다. 또한 EPS 거푸집의 표면 정밀처리기술이 적용되어 거푸집 탈형 후 콘크리트 표면을 견출하는 후속작업이 감소하는 특징이 있다. 이에 따라 시공기간이 단축될 것으로 판단되며, 전체 공사비도 절감이 될 것으로 기대된다.

##### 4.1 3D 프린터를 이용한 EPS 폼 라이너 제작

EPS 폼 라이너를 제작하는 3D 프린터는 LOM 방식을 변형시킨 것이며, 재료를 설계 요구 형태에 맞춰 절삭 및 적층한다(Figure 8). 장비의 상세한 내용은 다음과 같다 (Table 2).



Table 2. Specifications of the LOD type 3D printer

Item	Content
Frame Size (W*D*H)	1,000mm * 1,000mm * 1,000mm
Workspace	600mm * 600mm
Cutting velocity	223.4mm <sup>2</sup> /s
Concept image	

본 장비는 서로 평행한 위, 아래의 X-Y평면에 독립적으로 제어할 수 있는 2개의 End-effector와 이것에 연결된 Hot-wire로 커팅부가 구성되어 있다. 해당 장비의 단위표면적 인쇄속도는 223.4mm<sup>2</sup>/s이며, 이는 EPS 20T, 600mm×600mm의 판넬 한판을 원하는 모양으로 컷팅하는 데 약 3분이 소요되는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구진에서는 해당 3D 프린터를 지속적으로 개발하고 있으며, 향후 EPS 판넬 이송, 절삭, 적층이 자동으로 가능한 자동형 3D 프린터를 개발할 계획이다.

#### 4.2 EPS 폼 라이너 표면마감 처리

앞서 제시한 3D 프린터로 출력된 EPS 폼 라이너는 장비의 절삭에 있어 약 2~3mm의 오차가 발생하고, 인력을 통한 EPS 판넬간 부착으로 인해 EPS 판넬간의 최대 5mm 정도의 단차가 발생한다. 또한 콘크리트 타설 시 표면처리되지 않은 EPS 폼 라이너를 바로 사용할 시 콘크리트에 EPS의 잔재가 묻어나오는 등의 품질 하자가 발생할 가능성이 높다. 이와 같은 한계점을 극복하기 위해서는 가공된 EPS의 표면 마감 처리기술이 필요하다.

EPS의 표면마감 처리기술은 EPS 판넬간 단차 제거단계, 표면 코팅단계 등 총 2단계로 나눌 수 있다. 첫 번째로 EPS 판넬간 단차를 제거하는 단계는 열에 약한 EPS의 특징을 이용해 톨러형 열처리기술을 적용하는 단계와 사포를 이용하여 표면을 깎아내는 단계이다. 다음 단계는 표면 코팅단계는 최종 EPS 표면의 정밀성을 향상시키고, 콘크리트와 탈착이 잘 될 수 있게 하는 작업단계이다. 이 단계에서는 EPS 판넬간의 경계선 제거를 위해 프라이머를 1mm 이하로 얇게 도포하고, 이후 거푸집 탈형 시 콘크리트의 품질을 확보할 수 있도록 하는 폴리우레아를 도포한다. 이와 같은 EPS 표

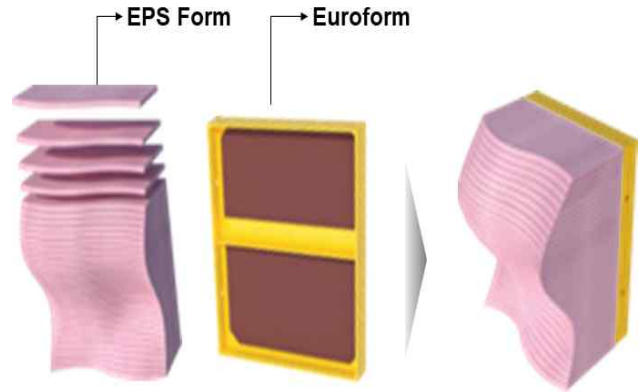


Figure 9. Combined EPS and euroform

면처리 물질의 적정성을 판단하기 위해서 간단한 실험을 진행하였다. 실험은 표면처리하지 EPS와 폴리우레아를 도포한 EPS에 시멘트 모르타르를 캐스팅하고, 2일 이후 탈형을 진행하였으며, 실험 결과는 육안검사로 판단하였다. 그 결과 폴리우레아를 도포한 EPS의 콘크리트 표면 정밀도가 매우 우수하게 나온 것과 탈형 시 용이한 것을 확인할 수 있었다 (figure 8).

EPS 판넬간 단차 제거단계는 0.36m<sup>2</sup> 면적의 EPS 거푸집을 표면 처리하는 것의 최종 소요시간은 약 36시간이 소요된다.

#### 4.3 거푸집 설치 및 철근 설치, 콘크리트 타설

3D 프린터로 가공된 EPS 거푸집 하나의 모듈의 최대 크기는 600mm×600mm×600mm이다. EPS 거푸집의 설치는 우선, 비정형 콘크리트 부재의 형태와 크기에 맞춰 제작된 EPS 거푸집 모듈을 실리콘 접착제를 이용하여 모듈간의 결합을 진행한다. 이후 EPS거푸집 반대편 면에 유로폼을 설치하는데, 이는 콘크리트 타설 시 발생하는 측압을 견디기 위함이다(Figure 9). 이후 철근 설치 및 콘크리트 타설 작업은 일반적인 철근 공사 및 콘크리트 공사와 유사하다.

#### 4.4 거푸집 탈형 및 후속작업

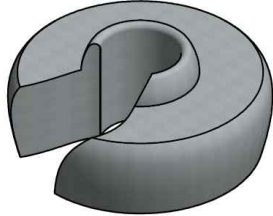
거푸집 탈형은 콘크리트 타설 이후 콘크리트 압축강도가 5Mpa 이상으로 발현된 것을 확인 후 실시한다.<sup>1)</sup> 거푸집 탈형의 순서는 일반 유로폼 탈형의 순차와 유사하다. 유로폼을 탈형 후 EPS 거푸집을 탈형하는데 주의사항은 부재의 가장자리가 예각으로 꺾여 있는 부분의 EPS는 아세톤을 이

1) 건축공사표준시방서 2015에 따른다.

Table 3. Mock-up test overview

Item	Content
Size (W×D×H)	1,296mm×1,296mm×562mm
Period	2017. 10. 01~2017. 11. 03 (34 days)
EPS Form liner manufacturing Location	Anam-dong 5ga Seongbuk-gu Seoul
Concrete placing Location	Daehwa-dong Ilsanseo-gu Goyang-si Gyeonggi-do

Air view



용하여 EPS를 녹이면서 탈형하는 것이다. 해당 부위의 콘크리트는 두께가 얇기 때문에 일반적인 탈형 방법을 적용할 경우, 콘크리트의 균열, 탈락 등의 품질하자가 발생할 수 있기 때문이다.

거푸집 탈형 후 견출작업 또는 미장작업을 실시한다. 본 연구에서 제시하는 후속작업은 언급한 EPS 거푸집 표면마감 처리 공정으로 인해 견출작업에서 면갈이 작업이 기존에

비해 단축될 것으로 판단된다. 이로 인해 기존 대비 후속작업에서의 생산성도 확보할 수 있을 것이다.

## 5. Mock-up test를 통한 프로세스의 효과 및 현장 적용성 분석

### 5.1 Mock-up test 개요

본 연구에서는 LOM 방식의 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 시공기술의 현장 적용성 및 기술의 타당성을 검증하기 위해 비정형 벤치 Mock-up을 제작하였다. 벤치의 형상은 가운데가 원형으로 비어있는 C자 비정형 원기둥 형상이며, 높이 420mm의 의자부분과 162mm의 높이의 등받이부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서 제작한 비정형 벤치 Mock-up의 개요는 다음과 같다(Table 2).

### 5.2 Mock-up 제작

Mock-up 제작은 크게 7단계의 과정으로 이루어진다 (Table 4). 1단계는 설계단계이다. 벤치의 개념설계를 기반으로 상세설계를 거치며, 부재 제작을 위한 거푸집 상세설계도 수행된다. 또한 3D 프린터로 출력하기 위해 CAD 모델의

Table 4. Mock-up production process

work	Image	work	Image	work	Image
1. Form design		4. Form installation		7. Surface plastering	
2. EPS form liner manufacturing		5. Concrete placing		8. Finish	
3. EPS form liner surface finishing work		6. Form removal			

세그먼트화가 수행되고, CAD 파일을 3D 프린터에 적용하기 위한 G-code 변환을 진행한다. 2단계는 EPS 폼 라이너를 제작하였다. EPS 폼 라이너의 모듈은 총 12개로, 의자부분 9개, 등받이 부분 4개로 구성되었다. 3단계는 출력된 EPS 폼 라이너의 표면처리기술을 적용하여 거푸집의 표면정밀도를 확보하였다. EPS 폼 라이너 표면의 단차를 사포를 사용하여 제거한 후 프라이머 도포, 폴리우레아 도포 순으로 진행하였다. 4단계는 EPS 폼 라이너 및 유로폼을 결합하였다. 12개의 EPS 폼 라이너 모듈을 전체 거푸집 형상에 맞게 결합하고, 결합된 EPS 폼 라이너 외부와 바닥에 유로폼이 설치하였다. 유로폼은 총 15개가 설치되었고, 사이즈 600mm×1,200mm 유로폼 10개와 사이즈 300mm×1,200mm 5개로 설치되었다. 의자부분과 등받이 부분의 EPS 폼 라이너 높이 차는 목재 합판 6개를 설치하여 해결하였다. 이후 강관파이프 12개를 유로폼 외부에 설치하여 전체 거푸집을 고정하였다. 5단계는 설치된 거푸집에 콘크리트를 타설하였다. 콘크리트는 일반콘크리트 24MPa의 강도 발현이 가능하도록 배합하였으며, 호퍼 및 지게차를 이용하여 타설하였다. 6단계는 콘크리트 양생 후 거푸집을 탈형하였다. 거푸집 탈형은 부재의 윗면과 측면 부분을 실시하고, 바닥면은 크레인을 이용해 부재를 들어 올려 탈형하였다. 마지막 7단계는 견출작업을 하였다. 거푸집 탈형 후 모듈 간에 발생한 미세한 단차를 제거하기 위해 먼처리 작업을 수행하였다. 이는 EPS 모듈간의 결합 시 사용된 접착제의 두께로 인해 발생한 단차인 것으로 판단된다.

본 Mock-up test에 철근 설치작업이 생략된 이유는 Mock-up의 크기가 비교적 작으며, 철근 설치 없이 구조적 문제가 없는 것으로 확인되었기 때문이다.

### 5.3 기존 생산과의 생산기간 및 비용 비교분석

3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 생산프로세스의 타당성을 검증하기 위해 본 연구의 Mock-up을 대상으로 강재 거푸집으로 시공할 시 시공기간과 비용을 산정하여 비교 분석하였다.<sup>2)</sup> 시공기간은 Mock-up 제작 단계(7단계)를 따르며, 시간단위로 산정하였다. 비용은 크게 자재비, 장비비로 구분하였다. 자재비는 2017년 종합물가정보를 적용하여 산정하였고, 장비비의 경우 실무자 면담을 통해 최근 3년간 강재거푸집 제작에 사용되는 레이저 커팅 장비와 같은 강재

가공장비의 임대 및 가공비용을 기준으로 하였다.

시공기간을 비교분석한 결과는 다음과 같다(Table 5). 기존 시공기술과 유사하게 소요되는 작업단계는 설계, 거푸집 설치, 콘크리트 타설 단계이며, 거푸집 제작기간에서 많은 차이가 나는 것으로 나타났다. 분석결과, 본 연구에서 제시하는 시공기술이 기존 강재 거푸집을 사용한 시공기술에 비해 약 253시간, 약 10일이 단축되는 것으로 분석되었다. 기존 강재 거푸집 제작기간은 전체기간의 약 67.7%를 차지한 것으로 나타났다. 이에 반해 3D 프린터를 이용한 EPS 폼 라이너 제작기간은 전체기간의 약 34.6%를 차지함으로써 거푸집 제작기간에서 절반의 기간을 단축할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 차이는 크지 않지만 거푸집 탈형 및 후속 작업에서의 작업기간의 차이가 나는 것으로 분석되었다.

Table 5. Production period comparison by methods

work	Period (hour)					
	Steel Frame form (A)		Frame from using 3D printer (B)		Variation (B-A)	
	(hour)	(%)	(hour)	(%)	(hour)	(%)
1. Form design	140	26.3	140	50.5	-	0.0
2. Form(Form liner) manufacturing	360	67.7	96	34.6	-264	73.3
3. Form surface finishing work	24	4.5	36	13.0	12	-50.0
4. Form installation	3	0.6	2	0.7	-1	33.3
5. Concrete placing	1	0.2	1	0.4	-	0.0
6. Form removal	4	0.8	2.5	0.9	1.5	37.5
7. Surface plastering	3	0.6	1	0.4	-2	66.7
Total	532	100	277.5	100	-251.5	47.8

자재비와 장비비를 산정하여 비용을 비교분석한 결과는 다음과 같다(Table 6). 비용 산정은 기존과 동일하게 소요되는 콘크리트 및 타설에 필요한 부속자재 등의 자재비와 타설 장비 및 거푸집 운반장비의 장비비는 제외하여 산정하였다. 본 연구에서 개발한 시공기술의 비용은 기존 대비 총 비용이 약 47.8%가 감소한 것으로 나타났다. 이는 장비비에서 약 56.2%가 감소하였으며, 자재비는 3D 프린터를 이용 시공기술에서 사용하는 자재가 기존보다 많으나, 철재 거푸집의 자재비가 EPS에서 보다 월등히 높아 그 차액만큼 비용이 절감되었다.

2) 강재거푸집 제작 전문기업의 자체 생산성 자료와 전문가 그룹 자문을 결과로 분석된 자료임



Table 6. Production cost comparison by methods

Item	Cost (thousand won)						
	Steel Frame form (A)		Frame from using 3D printer (B)		Variation (B-A)		
	(thous and won)	(%)	(thous and won)	(%)	(thous and won)	(%)	
Equipment	Laser cutting	1,500	37.0	0	0.0	-1,500	0.0
	3D printer	0	0.0	500	28.2	500	0.0
Sub total		1,500	37.0	500	28.2	-1,500	0.0
Material	Steel Form	1,939	47.8	0	0.0	-1,939	0.0
	EPS Form	0	0	550	31.0	550	0.0
	Euroform	0	0	442	24.9	442	0.0
	Plywood	0	0	100	5.6	100	0.0
	Steel pipe	100	2.5	60	3.4	-40	40.0
	Clamp	19	0.5	10	0.6	9	47.1
	Adhesive	0	0	50	2.8	50	0.0
	Finishing material	500	12.3	164	9.2	-336	67.2
Sub total		3,558	87.7	1,262	68.2	-2,328	65.9
Total		4,058	100	1,776	100	-2,163	56.2

생산기간과 비용을 분석한 결과, 본 연구에서 제시하는 시공기술은 작업시간 단축 및 비용절감의 효과가 있는 것으로 검증되었다. 이 시공기술을 Mock-up보다 크기가 큰 비정형 건축물 및 콘크리트 부재에 적용한다면 시공기간 단축 및 비용절감의 효과는 상당할 것으로 예상할 수 있다.

## 6. 결 론

비정형 콘크리트 부재 생산은 비정형 건축공사의 생산성과 품질에 직접적인 영향을 끼치는 핵심적인 기술이지만 기존의 생산은 비정형 부재의 형태에 대응하는 거푸집의 긴 제작기간과 값비싼 장비비 및 재료비 등으로 인해 많은 문제점이 나타나고 있다. 이와 같은 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 3D 프린터를 활용한 이용하여 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스를 제시하였다. 또한 본 기술의 장점과 현장 적용성을 확인하기 위해 Mock-up test를 실시하였으며, 기존 강재를 이용한 생산 프로세스와 생산기간 및 비용을 비교분석을 수행하였다. 그 결과, 기존 대비 거푸집의 제작기간이 크게 감소하고 거푸집 탈형 후 후속작업이 감소하여 작업시간의 단축과 자재비 절감의 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과는 Mock-up에 의한 값으로 비정형 콘크리트 건축물 또는 부재에 적용할 경우 전반적인 공사기간의 단축과 공사비 절감의 효과는 볼 수 있을 것으로 기대된다. 또한 곡면이 심한 다양한 형태의 비정형 부재도 품질하지 없이 생산될 것으로 사료된다.

본 연구는 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산의 초기단계로, 추후 EPS 거푸집의 이송, 절삭, 적층이 완전자동화 가능한 장비개발 및 검증을 진행할 예정이다. 그리고 본 연구에서 개발 생산 프로세스를 비정형 건축물 시공 또는 콘크리트 부재 생산에 적용하였을 시 작업의 분류를 보다 세분화한 생산프로세스 분석이 필요하며, 비용 분석은 노무비를 포함하여 생산성에 관한 연구도 추가적으로 필요하다. 또한 최종적으로 비정형 콘크리트 생산의 최적화된 프로세스를 개발하고, 다양한 비정형 콘크리트 부재제작에 현장적용을 실시하여 시공기간과 비용 등의 실제 데이터를 근거한 분석이 추가적으로 요구된다.

## 요 약

최근 비정형 건축물의 관심과 수요가 증가하면서 비정형 건축물 시공기술에 관한 중요도가 높아지고 있다. 그러나 국내의 비정형 콘크리트 부재 시공기술은 거푸집으로 제작하는 것에 많은 시공기간과 공사비용이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 비정형 콘크리트 부재 생산 시 생산기간을 단축하고 비용을 절감할 수 있는 LOM 방식의 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스를 제시하고, Mock-up test를 통해 생산프로세스의 타당성을 검증하였다. 연구결과, 본 생산 프로세스는 기존 강재 거푸집을 이용한 시공기술 대비 약 47.8% 제작기간 단축 효과와 56.2%의 비용절감 효과가 나타났다. 본 연구의 결과인 3D 프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스는 비정형 콘크리트 부재 생산의 생산성 향상을 비롯한 비정형 건축물 시공의 새로운 공법활성화에 기여할 것으로 기대된다.

**키워드** : 비정형 콘크리트 부재, 3D 프린터, Mock-up test, 생산 프로세스

## Acknowledgement

This research was supported by a grant(17AUDP-

B121595-02) from Urban Architecture Research Program funded by Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs of Korean government.

## References

1. Buswell RA, Soar R, Gibb AG, Thorpe A. Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*. 2007 Mar;16(2):224-31.
2. Bae KJ, Lee SH, Jun HJ. A study on digital design process of the materialization of free form design architecture. *Architectural Institute of Korea*. 2009 Jun;29(1):221-4.
3. Lee G. Construction issues of irregular-shaped buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2008 Apr;52(4):63-5.
4. Zhang J, Khoshnevis B. Optimal machine operation planning for construction by contour crafting. *Automation in Construction*. 2013 Jan;29:50-67.
5. Bosscher P, Williams RL, Bryson LS, Castro Lacouture D. Cable-suspended robotic contour crafting system. *Automation in Construction*. 2007 Nov;17(1):45-55.
6. Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Law R. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012 Mar;42(3):558-66.
7. Verhaegh RWA. Free forms in concrete fabric. Eindhoven University of Technology. MS thesis. 2001.
8. Ryu HS, Kim SJ. Case study of concrete surface design and construction method for freeform building based on BIM-Focused on Tri-Bowl. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2012 Jun;12(3):347-.57.
9. Lim S, Buswell RA, Le TT, Austin SA, Gibb AG, Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012 Jan;21:262-8.
10. Jung SJ, Lee TH. Study of trends in the architecture and the economic efficiency of 3D printing technology. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 2014 Oct;15(10):6336-43.
11. Seo J, Hong D. 3D Cutting machine of EPS foam for manufacturing free-formed concrete mold. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 2017 Jan;34(1):35-9.
12. Beatriz P. The return on investment of the guggenheim museum bilbao. *International Journal of Urban and Regional Research*. 2006 Jun;30(2):452-67.
13. Park JW, Kim S, Lee S, Song H. Suggesting solutions when applying building information modeling (BIM) to the korean construction industry through Case studies. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2009 Aug;9(4):93-102.
14. Kang DE, Gam SD, Kim JH. Member design technologies of free-form irregular structures. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2010 Jun;22(3):381-8.
15. Lyu HC. Characteristics of digital tectonics of free-form structures designed through digital process. *Design Forum*. 2009 Nov;25:225-36.