

사례 분석을 통한 프리캐스트 입면 디지털 설계 및 패브리케이션 전략

Case Studies of Precast Facade Digital Design and Fabrication Strategies

김진호¹⁾

Kim, Jin-Ho¹⁾

Received July 10, 2019; Received August 09, 2019 / Accepted August 12, 2019

ABSTRACT: Precast concrete manufacturing has proved economies of scale through the repetitive production by means of standardization, automation, and prefabrication. Advanced digital design and fabrication technologies can empower its benefits by enabling mass customization in the building design and construction. This study analyzed five case studies in terms of 1) design intent and background, 2) module development and facade construction, 3) integrated process among project stakeholder. This article has attempted to establish the following three points in conclusion: 1) Form generating digital design tools such as Rhino, CATIA, Generative Component, and Digital Project were implemented to produce parametric surface pattern and rationalization to maximize existing precast manufacturing benefits. Also, BIM program has been used to promote coordination and communication among engineering consultants and contractors, 2) In addition to traditional precast concrete materials, GFRC, RFP, brick cladding precast and 3D printed mould have been introduced to reduce the weight and cost and to comply the code from the zoning, seismic, and fireproof requirements, 3) Design-assist contract, design-assist financial support, and co-location measures have been introduced to facilitate collaboration between architect, fabricator, and contractor from the beginning of the project.

KEYWORDS: Digital Fabrication, Precast Concrete, Mould, Mass Customization, Parametric Design, Building Information Modeling

키워드: 디지털 패브리케이션, 프리캐스트 콘크리트, 거푸집, 맞춤형 대량생산, 파라메트릭 설계, 건물정보모델링

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

콘크리트 재료는 구조적으로 효과적인 철근콘크리트로서 널리 사용되어 20세기에 철, 유리와 더불어 현대건축을 대표하는 재료로서 자리매김하였다. 또한 콘크리트의 유동적인 특징은 이를 담은 거푸집(mould)에 따라 다양한 형태의 부재를 생산할 수 있는 특징을 지닌다. 특히, 프리캐스트 콘크리트(precast concrete) 생산방식은 규격화(standardization), 자동화(automation)를 바탕으로 사전 제작이 가능한 프리패브(prefabrication) 생산방식을 통해 정밀, 신속가공이 가능하다. 이에 따라 균일한 품질을 추구하고 생산성을 증대시킬 수 있는 대량생산(mass production) 방식이 이루어짐에 따라 규모의 경제(economies of scale)에 따

른 경제성을 추구할 수 있게 되었다(Figure 1. a.). 이러한 프리캐스트 콘크리트의 활용범위는 Precast slabs, beam & girders와 같은 구조용 부재(structural elements)와 더불어 건물의 입면에 적용되는 건축용 프리캐스트(architectural precast)로 그 범위가 확장되었다. 특히, 전후 복구사업에서 사회적인 요구로 지어진 관공서, 대학건물, 도서관, 집합주택 등을 중심으로 규격화되고 반복적인 프리캐스트 콘크리트 입면 디자인을 선보이게 되었다(May, 2013). 하지만, 이는 콘크리트가 가진 유동적인 특징을 살린 개성 있는 형태를 추구할 경우, 거푸집 생산과정에서 복잡하고 난해한 생산과정을 초래하게 되어 기존의 프리캐스트의 장점인 생산성과 경제적인 효과를 살리지 못하는 결과로 풀이된다. (Figure 1. b.) 따라서 프리캐스트 제작방식이 지닌 기존의 장점을 추구하면서 동시에 다양한 수요를 충족할 수 있는 맞춤형 대

¹⁾정회원, 인천대학교 도시건축학부 부교수 (jinhokim2015@inu.ac.kr)

량생산(mass customization)이 가능한 기술개발이 요구되고 있다(Pine, 1993; Kieran and Timberlake, 2004).

디지털 설계(digital design)와 디지털 생산기법(digital fabrication) 그리고 혁신적인 재료(innovative materials)의 통합을 통해 맞춤형 프리캐스트 입면을 구현할 수 있는 기술이 등장하고 있다. 이는 3D 프린터, 건축정보모델링(BIM: Building Information Modeling, 이하 BIM), CNC(Computer Numerically Control, 이하 CNC) 등과 같은 설계 및 제작을 위한 각종 컴퓨터를 활용한 기술의 발달에 힘입은 바가 크다. 그동안 디지털 패브리케이션의 개념을 활용한 이론적인 배경이나 파라메트릭을 적용한 디지털 설계와 이를 실현하는 물성과의 상관관계에 관한 연구(Park, 2010; Lim and Lee, 2015; Lee et al., 2016; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2016b)가 다양한 방면으로 이루어져왔으나 프리캐스트 생산 방식을 활용한 구체적인 건축물 구축 프로세스에 관한 연구는 아직 미진한 상태이다. 따라서 실제 개념, 설계, 제작, 시공에 이르는 일련의 디지털 패브리케이션 과정을 통해 어떻게 프리캐스트 건축물을 효과적으로 실현할 것인가에 대한 연구가 필요한 시점이다. 그러므로 본 연구에서는 사례 건축물의 결과물에 한정되지 않고 이들의 초기 형태생성 단계부터 부재 생산 단계 및 현장에서의 시공까지의 실제적인 내용을 종합적으로 다루어 보기로 한다.

따라서 본 연구의 목적은 디지털 생산기술의 변화에 따른 건축 프로세스의 의미를 살펴보고, 현재까지 개발된 테크놀로지의 현황을 살펴본 다음, 프리캐스트 기법을 활용한 완공작의 사례 분석을 통해 디지털 설계 및 생산기법의 특화된 전략을 도출하는데 있다. 이를 통해 장차 프리캐스트 디지털 패브리케이션 방식을 고려하고자 하는 실무자에게 필요한 기초적인 연구 자료로서의 의미가 있다고 판단된다. 또한 본 연구는 4차 산업혁명의 시대적 흐름에 발맞추어 생산성 및 경제성을 높이고 차별화된 프로세스를 통해 건축 및 건설 분야의 외연을 확대할 수 있는 기초연구로서 의의가 있다.

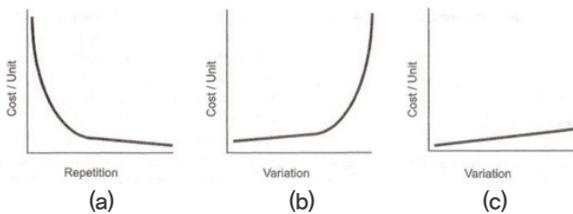


Figure 1. The Mass production and mass customization as to variation level. Source: Smith (2010)

1.2 연구의 범위 및 방법

2장에서는 디지털 패브리케이션의 배경 및 3장의 사례연구의 필요성 및 분석틀이 제시된다. 문헌고찰을 통해 건축분야에서 맞

춤형 대량생산이 가능하게 된 배경을 살펴본다. 이때 디지털 정보가 개념-재현-제작 프로세스에서 유기적이고 연속적으로 전달되는 과정에 주목한다. 또한 문헌 분석을 통해 현재까지 이루어진 프리캐스트를 활용한 디지털 패브리케이션에 관한 문헌 고찰을 통해 현 시점에서 가능한 디지털 설계와 생산기술의 현황을 파악하기로 한다. 다음으로는 건축분야에서 디지털 패브리케이션에 관한 국내 연구를 살펴보고 본 논문의 필요성을 제시한다. 사례분석을 위한 분석틀로서 1) 프로젝트 배경 및 설계방향, 2) 모듈 및 입면 구축 프로세스, 3) 통합프로세스가 제시된다. 3장은 본격적인 분석 단계로서 분석의 대상은 2000년대 이후로 디지털 패브리케이션 기술을 활용하여 완공된 건축물을 선정하여 입면을 중심으로 분석 작업이 이루어진다. 4장에서는 논의의 단계로서 1) 디지털 설계 기술 및 프로그램과의 관계(Design integration), 2) 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스에서 나타난 설계안의 특수한 요구에 따른 프리캐스트 외피 및 거푸집 재료의 선택과 적용(Physical integration), 3) 성공적인 프로젝트를 수행하기 위한 통합프로세스(Integrated process)의 구체적인 방법들을 도출하기로 한다. 마지막으로 내용 요약 및 연구의 의의 및 한계점을 결론으로 도출하였다. 본 연구의 흐름은 아래와 같다 (Figure 2).

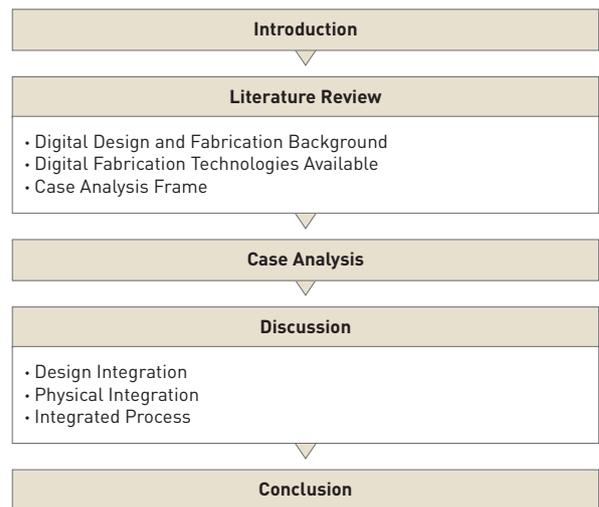


Figure 2. Study Flow

2. 디지털 패브리케이션의 배경 및 사례연구의 필요성

2.1 디지털 패브리케이션 이론 고찰

2.1.1 디지털 패브리케이션과 디지털 건축프로세스 고찰

디지털 제작은 건축과 재료에 관한 기술로서 디지털 디자인과 시공과정을 통해 실현된 건축적으로 혁신적인 작업을 가리킨

다(Iwamoto, 2011; Schodek et al., 2015). 디지털 디자인 도구와 생산기계를 통합함으로써 디지털 데이터는 디자인 정보의 손실 없이 정확한 형태로 가공이 가능하다. Smith(2010)에 따르면 부재의 제작에 있어서 생산성 향상은 1) 라이노(Rhino)와 같은 형태생성 컴퓨터 프로그램, 2) 오토데스크 레빗, 그래피소프트 아키캐드, 벤틀리 건축과 같은 BIM 소프트웨어, 마지막으로 3) CAD/CAM 소프트웨어인 CATIA, Pro/Engineer, Solidworks와 같은 컴퓨터 프로그램을 활용하여 CNC 기계를 통해 디지털 파일을 공유함으로써 연속적이면서도 유기적인 제작프로세스가 가능해지고 있다. Gulling(2014)은 건축분야에서 CNC의 활용 범위가 증대됨에 따라 맞춤형 반복생산(Customized Repetitive Manufacturing)의 가능성에 주목하고, Custom Components, Architecture Prototypes, Architecture Products로 분류하였다. 이러한 개념-재현-제작의 연속적인 흐름 속에서 디지털 파일의 공유를 통해 정밀하고 정확한 오늘날의 생산과정은 제조업 분야에서뿐만 아니라 건축 및 건설 분야에서도 패러다임의 변화를 가져오고 있다(Kieran, 2004; Smith, 2010; Lee et al., 2010; Lim and Lee, 2015).

2.1.2 프리캐스트를 활용한 디지털 패브리케이션 기술현황

본격적으로 사례대상을 선택하고 분석하기에 앞서 프리캐스트 기법을 활용한 디지털 패브리케이션에 관한 선행연구가 해외 문헌고찰을 통해 이루어졌다. Martins and Sousa(2014)은 크게 실무에서 적용되는 거푸집 제작기술과 리서치 연구에서 실험적으로 이루어진 거푸집 제작기술로 나누었으며, 이를 다시 거푸집

을 통해 생산하는 간접적인 방식과 직접적으로 기계를 사용하여 바로 생산되는 방식으로 분류하여 살펴보았다. Schipper(2015)은 기존의 형틀 제작방식보다 경제적이며 효율적인 융통성 있는 (flexible) 형틀 개발에 관한 연구를 수행하였다. 선행연구 분석 결과 프리캐스트 콘크리트 생산에 있어서 거푸집 제작은 절삭 (subtractive), 적층(additive), 변형(flexible)의 형태로 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서는 위에 언급한 각종 프리캐스트 제작기법을 건물 규모와 현재 가용한 기술을 고려하여 건축물을 구성하는 대표적인 요소인 1) 수평적인 요소인 지붕 및 바닥, 2) 수직적인 요소인 건물의 외벽, 그리고 3) 각종 소규모 부재(components)의 관점에서 분류하여 각각의 특징과 사례를 아래의 Table 1과 같이 정리하였다.

2.1.3 국내 디지털 패브리케이션 연구의 고찰

디지털 건축프로세스가 제공하는 가능성에 초점에 맞추어 디지털 패브리케이션에 대한 국내 연구가 다방면으로 이루어져왔다. 디지털 기술 도입에 따른 파일에서부터 제작(file to factory)에 이르는 프로세스의 변화에 대한 배경(Lee et al., 2010)으로부터 시작하여, 파라메트릭(parametric) 디자인 툴 활용에 관한 사례연구(Yi et al., 2016), 비정형 건축물 설계를 위한 디지털설계 소프트웨어 명령어와의 상관관계(Park, 2016), 디지털 제작을 통한 전통적인 재료의 물성의 변화(Park, 2010; Lim and Lee, 2015; Lee et al., 2016; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2016b)에 초점이 맞추어 연구가 진행되었다. 이는 초기에 디지털 개념에서

Table 1. Digital Manufacturing Technology of Precast Concrete

Application Location	Intervention	Digital Fabrication Process	Technology	Examples and Source	No. *
Roof and Floor (Horizontal)	Indirect	Subtractive	CNC Cutting (Section)	Rolex Learning Center by SANAA, Megurino Mori Funeral Hall by Toyo Ito, etc	1
		Flexible Mould	Setting X, Y, Z value	Schipper(2015)	2
Facade (Vertical)	Indirect	Subtractive	CNC Milling	San Francisco Museum of Modern Art Expansion by Snøhetta, etc	1
		Subtractive	CNC Cutting using Hotwire	BladeRunner and Digital Factory Research Project, Brander et al. (2016) & Shutt (2018)	2
		Additive	3D Printing	Domino Sugar Refinery Complex, Roschli et al. (2018)	1
		Additive	3D Printing: Mesh Mould	Hack and Lauer (2014)	2
Components	Indirect	Flexible	Fabric Mould	Fatty Shell by Dave Pigram	2
	Direct	Additive	Slip forming	Smart Dynamic Casting, Lloret et al. (2015)	2
		Additive	Binder Jetting	D-Shape by Dinitech SpA, Lim et al. (2012)	2
		Additive	Layered Extrusion	Contour Crafting, Freeform Construction, Lim et al. (2012)	1

*No.1: Built and realized into a building, No.2: Research project as an experiment work

시작되어 실질적인 제작 구축에 이르는 실현 가능한 방향으로 전개되고 있음을 알 수 있었다. 또한 파라메트릭 기반 비정형 건축물의 현장에서의 애로사항과 이를 극복하기 위한 시공성 향상에 중점(Ryu and Kim, 2012; Ryu, 2013)을 둔 연구로 확대되어가는 중이다.

이와 같이 기존 연구 경향은 크게 디지털 기술의 적용을 통한 물성의 변화, 파라메트릭 설계 및 적용 두 가지로 요약될 수 있다. 공통적으로 전통적으로 사용된 금속, 유리, 목재, 콘크리트 등과 같은 다양한 재료에 대해 언급하고 있지만, 특정 재료 및 공법에 관하여 심도 깊은 연구는 미진하다. 특히 프리캐스트 기법을 활용한 연구는 현재까지 제대로 조명되지 못한 점을 알 수 있다. 따라서 사례연구를 통해 초기설계단계에서부터 생산 및 시공과 정까지의 종합적인 프로세스를 살펴보기 위한 연구가 필요하다.

2.2 사례연구 분석틀 및 대상

구체적인 사례분석을 위해서는 다음과 같은 전제 사항이 존재한다. 우선 설계 배경, 패브리케이션에 대한 자료를 가지고 있는 완공까지 프로세스를 보여주는 자료가 있는 사례가 필요하다. 왜냐하면, 실험적으로 설계 및 설치할 수 있는 파빌리온과 달리 실제 건축물의 경우 외피에 요구되는 재료의 특성, 구조적 안정성, 단열 등 요구사항에 대한 비중이 크기 때문이다(Lim and Lee, 2015). 또한 프로젝트의 기획에서 시공에 이르는 전 과정을 살펴볼 수 있는 사례를 통해 디지털 패브리케이션의 기술적인 효용성을 평가할 수 있는 자료가 될 수 있을 것이다.

이상의 내용을 감안하여, 본 연구에서는 다음과 같은 사례분석틀을 제시한다. 첫째로, 프로젝트의 배경을 설명하고 그에 따른 설계 개념 및 방향을 파악한다. 둘째로는 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스를 고찰함으로써 설계 개발에 따른 디지털 설계 프로그램, 재료의 선택과 적용, 패브리케이션과의 상관관계를 파악한다.

Table 2. List of case studies

No.	Photo	Project name and location	Architect	Year
1		290 Mulberry Condo, New York City, NY, United States	ShoP Architects	2008
2		Perot Museum of Nature and Science, Dallas, TX, United States	Morphosis Architects	2012
3		The Broad, Los Angeles, CA, United States	Scofidio+Renfro	2015
4		San Francisco Museum of Modern Art Expansion, San Francisco, CA, United States	Snohetta	2016
5		Domino Sugar Refinery Complex, New York City, NY, United States	CookFox Architects	2018

마지막으로 통합프로세스(Integrated process)의 관점에서 건축가-제작자-시공자의 협업 프로세스를 조명하기로 한다. 분석의 대상은 디지털 기술로 설계, 제작이 이루어졌으며 최근 각종 매체에 소개된 완공작으로 제시한다(Table 2).

3. 사례 분석

3.1 290 Mulberry Condo, SHoP Architects, 2008

1. 배경: 분석 대상은 역사지구의 특성을 고려한 벽돌 외장재의 사용, 30미터 간격으로 변화 있는 입면 설계라는 지구단위계획의 지침이 우선 고려되어야 했다. 따라서 도로에 면한 북쪽과 서쪽 콘도의 입면에 있어서 시각적 표현이 우수한 입면설계 그리고 경제적인 시공법이 요구되었다. 건축가는 경제적인 시공에 대한 요구사항을 고려하여 프리캐스트 콘크리트 패널을 선택하였고, 표면에 벽돌을 부착함으로써 주어진 지구단위계획 지침을 충족시켰다.

2. 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스: 가로 5피트, 세로 5피트 크기의 6개 정사각형 모듈을 생성한다. 모듈 내 대각선을 통해서 입면에서 높은 지점, 중간 지점, 낮은 지점의 세 부류로 설정하여 높이에서의 변화를 주어 입체적인 입면 형성이 되도록 한다. 6개의 정사각형 모듈을 하나의 총괄 거푸집으로서 이를 부분적으로 재사용하여 총 8개의 패밀리 유형을 고안하여 전체 입면의 모듈을 생성한다. 이러한 모듈개발에 있어서는 형태생성 소프트웨어인 라이노(Rhino) 프로그램이 활용되었다.

본 프로젝트에서는 일반적인 벽돌 벽과는 달리 입체적으로 구현해야하므로 제작에서 주된 관건은 최적의 벽돌 크기 및 쌓기 패턴 파악이라고 할 수 있다. 이를 위해 벤틀리(Bentley System) 회사의 파라메트릭 툴인 Generative Component, 거리 테크놀로지의 Digital Project 프로그램을 활용하여 여러 가지 형태의 쌓기 패턴을 시험하였으며, 최종적으로 벽돌의 굴절(inflexion)이 최대한 허용되는 플래미쉬(flemish) 쌓기 패턴을 선택하게 되었다(Figure 3-①). 이를 바탕으로 높이 차이가 있는 고무 재질의 거푸집을 제작하여 벽돌을 설치하고, 모듈 주변에 박스 형태로 둘러싸고, 그 위에 콘크리트를 부어 최종 모듈이 완성되는 프로세스를 제시하였다(Figure 3-②, ③, ④).

3. 통합 프로세스: 프로젝트 초기부터 건축가는 프리캐스트 콘크리트를 활용하는 방식을 선택하였으며, 따라서 프리캐스트 제작자와 긴밀한 협력이 이루어졌다. 혁신적인 설계와 제작에 대한 부담을 완화하고자 건축가는 건축주에게 초기단계에서 설계보조 시공업자를 통한 컨설팅 서비스를 받기위한 재정적인 지원을 통해 프리캐스트 제작자가 다양한 옵션의 제작방식을 실행할 수 있는 기반을 마련하여 주었다. 또한 건물 스케일에서는 BIM 프로

그램인 레빗(Revit Architecture)을 활용하여 도면 작성 및 물량 산출, 각종 컨설턴트 및 시공자와 코디네이션 및 소통이 원활하게 진행되도록 하였다(Gonchar, 2007; Beorkrem, 2013; Smith, 2010; Nam, et al., 2013).

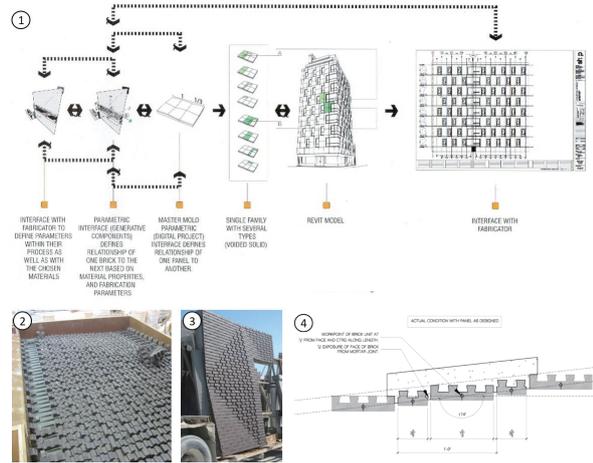


Figure 3. Brick attached Precast module development process (Source: ShoP Architects)

3.2 Perot Museum of Nature and Science, Morphosis Architects, 2012

1. 배경: 설계의 방향은 자연과 과학이라는 주제를 다룬 박물관의 설립 목적을 통해 살펴볼 수 있다. 전체적으로 건축가는 인간이 만든 요소(입방체의 형태)와 자연이 이루어내는 요소(곡선의 유동체적인 무작위적인 입면)의 대비를 하나의 건축물에 담아내고자 하였다. 이는 땅으로부터 솟아오르는 모습을 형상화하기 위해 저층 입면을 중심으로 유기적인 형태의 입체적인 주름이 프리캐스트 콘크리트를 통해 구현되었다.²⁾

2. 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스: 프리캐스트 모듈은 최소 단위의 패밀리로부터 형태, 패턴, 입면단계의 위계를 통해 이루어졌다. 설계개발 단계에서 3축 CNC 라우터(Router)를 통해 입면 패널과 거푸집을 제작하면서 계획안을 발전시켰다. CNC 밀링머신으로 제작된 단위 패밀리는 그 위에 Masonite이라는 합판을 부착하고, 액상 합성고무 재질의 폼라이너(form-liner)를 부어 넣음으로써 완성된다(Figure 4-①, ②, ③, ④). 최소 단위 모듈인 39개의 패밀리와 4개의 패널 형태를 바탕으로 12개의 패턴으로 조합되어 최종적으로 총 656 프리캐스트 패널을 통해 전체 건축물의 입면이 완성되었다(Figure 4-⑤, ⑥). 한번 사용된 최소단위

의 패밀리 모듈은 분리되고 재조합의 단계를 거치며 또 다른 프리캐스트 패널 제작을 위해 재사용된다. 이러한 프로세스를 통해 프리캐스트가 제공하는 경제성을 통해 예산에 맞추는 것에 도움이 되었다.

3. 통합 프로세스: 파라메트릭 모델은 개별 패널 제작을 위한 환경을 제공하였으며, 전체적인 입면 구성에 있어서 배치를 위한 규칙을 수립하는 데 도움이 되었다. 프로젝트 초기 설계단계에서부터 코-로케이션(Co-location) 개념을 도입하여 건축가-제작자-시공업자-컨설턴트 관계자들이 한 자리에서 협업을 촉진하는 시스템을 구축하였다. 또한 BIM모델을 통해 하도급 시공업자와도 공유함으로써 설계뿐 아니라 물량산출, 시공비용 및 시공순서를 조율하는 측면에서도 활용되었다. (AIA TAP Awards, 2014; Stephens, 2013).



Figure 4. Precast Concrete module development process (Source: Gate Precast Company)

3.3 The Broad Museum, Diller Scofidio + Renfro, 2015

1. 배경: 분석 대상은 미술관의 프로젝트로서 내부 전시를 위한 공간 확보와 관람자의 최적의 환경을 조성하는 것이 방향이었다. 외부를 둘러싸는 베일(veil)과 내부 수장고를 나타내는 볼트(vault)로 요약된다. 이는 곧 1) 박스형태의 건물의 외부형태, 2) 내부공간의 활용을 극대화하기 위한 무주(column-free)공간, 3) 외부로부터의 직사광선을 막고 필요한 주광을 최소한으로 도입하기 위한 외부 모듈 설계로 형상화되었다(Figure 5-④).

2. 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스: 모듈은 직사광선의 유입을 차단하되 주광을 도입하기 위해 천공된 형태로 이루어졌다. 또한 지붕 및 벽을 둘러싸기 위해 구조적인 역할을 할 수 있도록 설계되었다. 따라서 위의 요구조건을 충족시키기 위해 기하학적으로 복잡한 형태의 프리캐스트 콘크리트 패널이 설계되었다. 프리캐스트 패널 제작사인 CTC(Creative Teknologies Corporation)는 건축가가 CATIA 프로그램을 사용하여 생산된 설

²⁾건축물의 파사드와 마찬가지로 실내 아트리움의 코어도 프리캐스트 공법을 활용하여 생산되었다. 다만 이때 사용된 거푸집은 합판을 활용하여 입체적인 형태를 만들었으며 CNC와 같은 컴퓨터 파일과 연동이 되지 않았다.

계정보를 모듈 생산을 위해 새로이 확인 및 재조정하는 단계를 거쳤다. 건축가와와의 협업을 통해 단순 반복되는 모듈과 설계상으로 특수한 모듈 설계를 구분하기 위한 작업이 이루어졌으며 총 350여개의 프리캐스트 패널이 제작되었다(Figure 5-①). 구조적인 역할을 충족시키기 위해 프리캐스트 모듈내부로 포스트텐션(post-tensioned)된 케이블이 부착되도록 덕트(duct)가 설계되었다(Figure 5-②, ③). 모듈의 재료로는 구조적인 강도를 추구하되 필요이상의 무게를 줄이기 위해 GFRC(Glass-Fiber Reinforced Concrete)가 사용되었다.

3. 통합 프로세스: 프로젝트의 초기부터 프리캐스트 제작자와 긴밀한 협력이 이루어졌다. 특히, 원래 현장 타설 콘크리트 또는 강구조에 콘크리트를 씌우는 안을 고려하였으나 지역의 지진과 관련된 건축법규에 맞추기 위해서 GFRC 재료로 변경이 되었다. 현장에서의 이해를 돕기 위해 목업(Mock-ups)이 제작되어 설치되었다. 특히, 건축가(Gensler)와 컨설턴트(Arup)를 중심으로 BIM 프로그램인 레빗(Revit Architecture)을 활용하여 협업작업이 이루어졌다.

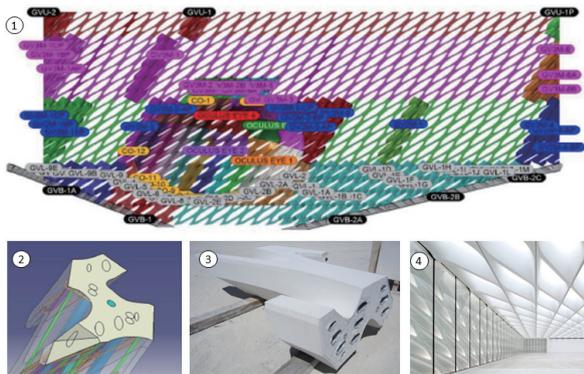


Figure 5. Precast GFRC module development process (Source: Creative Teknologies Corporation)

3.4 San Francisco Museum of Modern Art Expansion, Snøhetta, 2016

1. 배경: 분석 대상은 마리오 보타가 설계한 기존 샌프란시스코 현대미술관 증축 프로젝트이다. 부족한 전시장면적을 확보하고 지역 사회의 새로운 이정표를 구축하기 위한 일환으로 국제초대공모전을 통해 건축가 Snøhetta의 안이 최종적으로 선정되었다. 미술관이 위치한 샌프란시스코의 서부 해안선을 형상화한 입체적인 주름 형태의 동측 외피가 특징적이며 이에 대한 설계 및 제작과정이 분석의 대상이 되었다.

2. 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스: 모듈개발에 있어서는 형태생성 파라메트릭 설계 소프트웨어인 라이노(Rhino)가 활용되었으며, 이후에는 Revit 프로그램이 활용되었다. 총 700여개의 특수한 유리섬유강화폴리머(Fiberglass Reinforced Polymer, 이

하 FRP) 패널이 설계되었다. 1.7미터의 일정한 폭과 1.8미터~9미터 높이의 패널로 이루어져 있으며, 이는 10층 규모의 증축건물의 7,804제곱미터의 외피 면적을 차지한다. 외피 모듈을 이루는 재료로서 초기에는 유리섬유강화콘크리트(GFRC: Glass Fiber Reinforced Concrete)를 고려하였다가, Kreyler & Associates사가 제안한 중량이 가벼운 유리섬유강화폴리머로 수정되었다. FRP재료는 두께가 4.8밀리미터에 불과하여 틀의 형태를 유지하기 위하여 알루미늄 프레임이 사면을 둘러싸고 알루미늄 지지대가 1미터 간격으로 설치되었다.

입면의 구성은 크게 1) Kreyler & Associates사의 FRP 외피와 이에 대한 백업재로서 구조, 방화, 방수의 기능을 담당하는 2) Enclos회사의 Unitized Panel이 조합된 형태로 이루어져있다. 유리섬유강화콘크리트에 사용되기로 한 별도의 구조용 철강재를 줄임으로서 공사기간 및 재료비 상당부분을 줄일 수 있었다.

본 프로젝트에 쓰인 입면 패널의 제작 및 설치는 다음과 같은 과정을 거쳤다. 라이노 3D프로그램을 활용한 입면 및 모듈 설계를 통해 제작자와의 소통 및 기하학적인 형상을 결정짓는데 사용되었다. 거푸집의 기본 재료인 EPS를 CNC 와이어컷(wire-cut)으로 자른 다음, 이를 다시 밀링(milling) 기계로 섬세하게 가다듬었다(Figure 6-①). 가공된 EPS 거푸집위에 알루미늄 호일 막으로 분리제를 적용한 다음 최종 마감 재료이자 방화 재료인 콘크리트 젤 코팅을 바르는 과정을 거쳤다. 이후 세 겹의 FRP를 접착제를 사용하는 라미네이트 작업이 이루어졌다(Figure 6-②, ③). 구조적인 안정을 위해 알루미늄 지지대로 외곽 사각 및 중간중간에 프레임을 설치하고 이를 FRP에 부착하여 일체화하는 작업이 이루어졌다(Figure 6-④). 샌드블라스팅(sandblasting)을 통해 코팅된 표면을 원하는 마감(Matt Finish) 느낌이 나도록 처리하였다. (Figure 6-⑤) Kreyler & Associates사에서 운반된 FRP 패널을 Enclos에서 제작된 Unitized Wall Panel 위로 부착되었다(Figure 6-⑥). Figure 6-②는 CNC 기계를 통한 디지털 제작과정을 보여주며, Figure 6-③~⑤는 KA사에서의 FRP 제작 과정을, Figure 6-⑥은 최종적으로 Enclos사에서 패널 제작 마무리 과정을 보여준다. 이후에는 현장으로 운반되어 입면으로 설치되는 것으로 마무리된다.

3. 통합 프로세스: 본 프로젝트는 설계안과 이를 실현하는데 있어서 시공업자와는 별도로 건축가와 제작자(fabricator) 그리고 서로 다른 공정을 수행하는 제작자 사이에서도 긴밀한 협력이 필요함을 보여준다. 이를 위해 설계개발단계에서 건축가와 제작자와의 설계보조계약(Design-Assist Contract)을 시행하여 시공 현장에서 나올 수 있는 다양한 이슈들을 선제적으로 파악하고 대안을 제시하였다. 이를 통해 외피 재료의 선정, 시공디테일, 보다 경제적이고 합리적인 제작과정을 제시할 수 있었다(Gardiner, 2015).



Figure 6. Precast FRP module development process (Source: Kreysler & Associates, Enclos Company)

3.5 Domino Sugar Refinery Complex, CookFox Architects, 2018

1. 배경: 분석 대상은 뉴욕시의 대표적인 유류시설인 설탕정제 산업시설 재생프로젝트의 일환으로 계획된 42층 규모의 주거 및 상업 복합시설이다. 건축가는 경제적인 시공에 대한 요구사항을 고려하여 반복적인 입면 프리캐스트 모듈을 계획하였다. 기존 산업 시설이 가진 맥락을 고려하여 설탕분자가 가진 결정 형태를 강조한 패턴으로 총 993개의 프리캐스트 콘크리트 패널이 제작되었다.

2. 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스: 초기 목재합판 거푸집이 고려되었으나, 초기비용이 다소 높지만 내구성이 강한 3D 프린팅을 통해 제작된 거푸집이 제작 사용되었다. 부분적으로 면의 조합으로 불가피하게 틈이 생성되는 합판으로 이루어지는 기존의 일반적인 거푸집과는 달리 3D 프린팅으로 생산된 거푸집은 일체화되어 틈을 막기 위한 별도의 작업이 필요로 하지 않는 장점을 지닌다. 또한 본 프로젝트는 일반적인 3D 프린터와는 달리 실제 건물 스케일에 적용하기 위해 BAAM(Big Area Additive Manufacturing) 3D 프린터³⁾가 사용되었다.

프리캐스트 모듈 생산을 위해서 2개의 캐드파일이 필요로 하였다. 하나는 출력용(as-printed model)으로서 3D 프린트를 위해 STL파일 포맷으로 변환되어 8~11시간에 걸쳐 출력되었고(Figure 7-①, ②), 또 다른 캐드파일은 기계작업용(as-machined model)으로서 5축 CNC 라우터 기계에 입력되어 앞서 출력된 거푸집을 다듬는 용도로 활용되었다(Figure 7-③, ④).

각도에 따른 다양한 입면을 제공하기 위해 거푸집을 위아래를 뒤집는 방법으로 거푸집이 재활용되기도 하였다. 또한 층높이가 다른 층이 존재함에 따라 거푸집 제작이 별도로 제작되는 경우

도 생겨났다. 마감으로는 골재(aggregate)를 드러내기 위해 광택(polished)을 내거나 산을 통한 부식(acid-etched) 처리를 통해 다양한 프리캐스트 콘크리트 패널의 표면을 표현하였다(Figure 7-⑤, ⑥).

3. 통합 프로세스: 본 프로젝트는 미국 오크릿지 국립연구소(Oak Ridge National Laboratory)와 프리캐스트 제작사인 게이트(Gate Precast Company)회사 간의 다년간 연구과제의 일환으로 이루어졌다. 또한 프로젝트 초기부터설계보조계약(Design-Assist Contract)을 통해 프리캐스트 제작자가 설계과정에 적극적으로 참여하게 되어 건축가, 시공업자와 더불어 협업이 이루어지게 되었다. 이를 통해 설계 의도는 살리면서 복잡한 부재의 경우 불필요한 거푸집 숫자를 줄이고, 현장에서 조립하는 데 있어서 효율적인 방법을 제시함으로써 공사비를 절감하고 공기를 단축하는 결과를 제시하였다.

건물스케일에서는 대표적인 BIM 프로그램인 레빗(Revit Architecture)을 활용하여 도면 작성 및 물량 산출, 각종 건설턴트 및 시공자와 코디네이션 및 소통이 원활하게 진행되도록 하였다(Stocking, 2017; Roschli et al., 2018; Shutt, 2018).



Figure 7. Precast concrete panel and 3D printed formwork (Source: Gate Precast Company)

4. 논의

4.1 프리캐스트 거푸집 제작에 활용된 디지털 설계

기존의 프리캐스트 콘크리트 건축물은 대부분 정형적인 형태와 입면에 있어서 동일한 패턴의 반복이 특징적이다. 반면에 분석의 대상인 Table 2.는 파라메트릭 설계를 활용한 비정형 건축물로 구성되었다. 이들은 공통적으로 유기적이고 독창적인 입면

³⁾BAAM은 12 X 5.5 X 6 피트 규모의 부재가 출력이 가능하다. 이때 쓰인 3D프린팅 재료는 ABS(Acrylonitrile butadiene styrene)와 탄소섬유와의 중합체로 구성되어있다.

설계를 제시하면서 동시에 프리캐스트 공법의 경제적인 장점을 극대화하기 위해 동일한 패턴의 반복되는 모듈을 파악하기 위한 합리화 작업(Rationalization)이 건축가와 프리캐스트 제작자 사이에서 우선적으로 이루어졌다.

형태 생성을 위한 초기 설계 툴로서 라이노(Rhino) 프로그램이 주로 사용되었으며, 이는 유기적인 곡면 모델링을 구현하는 데 있어서 효과적임을 알 수 있다. 부가적으로 Case 1의 경우에는 경사가 있는 표면에 부착된 벽돌과 이웃 벽돌의 조합⁴⁾을 파악하기 위해 파라메트릭 설계 소프트웨어인 Generative Component가 사용되었으며 여기에서 생성된 정보는 Digital Project 프로그램에 전달되어 보다 큰 스케일의 프리캐스트 커튼월의 제작에 사용되었다. Case 3의 경우에는 직사광의 차단 및 간접광의 유입을 위한 입면설계의 결과 3차원의 보다 입체적인 형태의 설계가 도출되었으며 이를 구현하기 위해서 CATIA 프로그램을 사용되었다.

BIM을 활용한 소프트웨어로는 대표적으로 Revit이 활용되었다. Revit의 역할은 앞서 설계단계에서 개발된 형태생성정보를 종합하여, 각종 설비(MEP: Mechanical Electrical Plumbing) 및 구조 시스템을 조율하기 위한 협업 및 의사소통, 설계도면 작성에 주로 사용되었다.

Table 3. Application of Digital Design Software

Project name	Digital Design Software					
	Form Generating Software					BIM
	Rhino	CAD	CATIA	Generative Component	Digital Project	
290 Mulberry Condo	●			●	●	●
Perot Museum of Nature and Science	●					●
The Broad	●		●			●
San Francisco Museum of Modern Art Expansion	●					●
Domino Sugar Refinery Complex		●				●

4.2 모듈 및 입면 구축 프로세스와 재료의 변화

사례분석 결과, 구조적인 역할을 담당하는 여부에 따라 커튼월

유형의 프리캐스트 패널과 그렇지 않은 프로젝트(Case 3)로 나눌 수 있다. 또한 프로젝트의 요구조건에 다양한 모듈 제작 및 입면 구축을 위한 접근법이 존재함을 발견할 수 있다.

Case 2의 경우에는 입면을 구성하는 최소 단위인 Family와 Shape을 거꾸집을 구성하고 이를 최종적으로 건축물의 입면구성으로 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Family 부재의 경우에는 조합-분리-재조합의 과정을 거치며 다른 형태의 입면생산에 재활용되어 경제적인 방식으로 프리캐스트 입면을 구현하는데 있어서 효과적으로 활용되었다(Figure 8). 반면에 Case 4의 경우에는 기본 모듈이 존재하기보다는 비정형 외피를 가로로 일정한 폭으로 분할하는 방식으로 나누어서 700여개의 독자적인 형태의 패널이 설계 및 제작되었다(Figure 9). CNC를 활용한 디지털 패브리케이션의 기술을 활용하여 맞춤형 거꾸집 생산이 이루어짐을 알 수 있다. Case 1의 경우에는 면을 구성단위로 하여 모듈구성이 이루어지되 콘크리트 표면의 높낮이, 그리고 벽돌이라는 단위모듈의 조합이 고려되었으며, Case 5는 전통적인 프리캐스트 건축물에서 볼 수 있는 창과 일체화된 입면 유닛을 제시하였다.

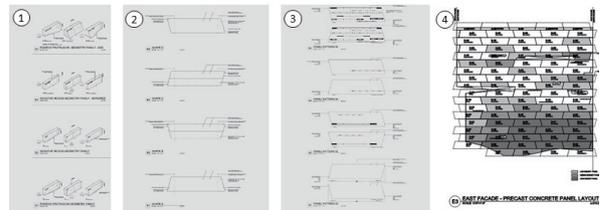


Figure 8. Precast module development from ① family, ② shape, ③ panel and ④ facade (Source: Gate Precast Company)



Figure 9. Facade of San Francisco Museum of Modern Art Expansion (Source: Snøhetta)

⁴⁾1.9센티미터(3/4인치) 이상 표면으로부터 넘어서지 않도록 설계되었다.

사례분석을 통해 프리캐스트 외피 재료의 변화를 파악할 수 있었다. 전통적인 콘크리트 재료(Case 2 & 5)가 사용된 경우도 있었으나, 기존의 콘크리트가 가지고 있는 무게를 줄이기 위한 GFRC(Case 3)와 FRP재료(Case 4)가 시도되었다. Case 4의 경우에는 GFRC를 외장 재료로 고려하였으나 FRP로 변경함으로써 원래 사용되기로 한 구조용 강재의 사용에 대한 예산을 절감할 수 있었다.

Table 4. Materials of mould and precast panel and Fabrication Process

Project name	Materials		Fabrication Process (Intervention)
	Mould	Precast Panel	
290 Mulberry Condo	Rubber	Brick+Concrete	Subtractive (Indirect)
Perot Museum of Nature and Science	EPS, Rubber	Concrete	Subtractive (Indirect)
The Broad	Styrofoam (CNC router)	GFRC	Subtractive (Indirect)
San Francisco Museum of Modern Art Expansion	EPS (CNC wire-cut & Milling)	FRP	Subtractive (Indirect)
Domino Sugar Refinery Complex	ABS+Carbon Fiber	Concrete	Additive (Indirect)

거푸집 재료의 있어서도 변화를 찾아볼 수 있었다. 전통적으로 거푸집은 합판내지는 고무재질의 폼라이너를 사용하였으나, Case 5의 경우에는 3D 프린팅을 통해 제작된 거푸집을 제시하였다. 경제적인 거푸집의 생산에 있어서 주요점은 거푸집 개당 제작비용 및 생산할 수 있는 부재의 수라고 할 수 있다. 그러한 의미에서 3D 프린팅으로 생산된 Case 5의 거푸집은 초기비용은 높으나, 프리캐스트 부재 당 가격은 전통적인 방식보다 대략 75%의 적은 비용이 드는 것으로 나타났다(Table 5). 또한 3D 프린팅을 통해 생산된 거푸집은 면과 면이 만나는 이음새를 막기 위한 별도의 작업이 필요하지 않아 추가적인 작업을 줄일 수 있는 이점이 존재한다.

Table 5. Cost comparison between traditional and BAAM

	Traditional Mould	BAAM
Mould cost	\$1,800	\$9,000
Pours per mould	10	190
Cost per pour	\$180	\$47.37

Source: Roschli, A. et al. (2018)

4.3 통합 프로세스의 도입 및 적용

사례분석들은 공통적으로 비정형 건축물의 형태를 띠고 있으며 이러한 새로운 설계를 구현하기 위해서 특히 제작자 및 시공자는 위험 부담을 가지게 된다. 이를 해결위해서는 건축가-제작자-시공자-엔지니어와의 보다 긴밀한 협업 및 의사소통이 필수적이다. 사례분석 결과, 설계보조계약(Design-Assist Contract)을 비롯한 여러 장치를 통해서 프로젝트 초기부터 제작자와 시공자가 설계에 참여함으로써 위험부담을 줄이고 보다 심화된 협업을 촉진시키기 위한 일련의 장치들을 도입한 것을 알 수 있었다. 또한 실제 스케일의 목업(Mock-ups)을 현장에서 제작함으로써 구성원들의 이해를 돕는데 기여하였다.

Table 6. Integrated process tools applied

Project name	Integrated Process	
	Mock-Ups	Collaboration Tools
290 Mulberry Condo	●	Subcontractor Design-Assist Financial Support
Perot Museum of Nature and Science	●	Co-location of the Design and Construction Teams: Integrated Project Delivery
The Broad	●	Design-Assist Contract
San Francisco Museum of Modern Art Expansion	●	Design-Assist Contract
Domino Sugar Refinery Complex	●	NREL & Precast Company Joint Research Funding Project

5. 결론

사례분석 및 논의의 결과 디지털 설계 기술과 제작기술을 통해서 기존의 프리캐스트 공법의 장점이 보다 강화될 수 있는 가능성을 제시한다. 비정형 건축물 설계와 디지털 패브리케이션을 통한 모듈생산과 더불어 이를 효과적으로 구현하기 위해서는 모듈 제작의 합리화과정을 거치고, 건축물 외피가 가져야하는 기본적인 특성인 구조적 안정성, 내구성, 방화 및 방습기능 등과 같은 기본적인 요구조건을 충족시킬 필요가 있다. 그리고 비정형 설계 및 이전에 시도하지 못한 시공 및 제작에 관련한 리스크 부담을 해결하기 위해서는 프로젝트와 관련된 건축가-제작자-시공자-건축주 사이에서의 의사소통과 협업의 통합프로세스를 촉진시키기 위한 장치들이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구는 최근 몇 년간 완공된 건축물 사례를 중심으로 디지털 설계와 제작에 대한 분석 작업이 이루어졌으므로 분석 결과를 일반화하는 데 있어서는 분명한 한계가 있다고 할 수 있다. 그러나 디지털 설계 및 패브리케이션 기술을 활용한 실제 건축물 사

례분석을 통해 개개의 프로젝트가 가진 고유한 설계 이슈를 진단하고 이를 효과적으로 해결하기 위한 과정을 설계의 배경, 모듈 개발 및 입면 구축 프로세스, 통합 프로세스의 관점에서 살펴보고 시사점을 도출했다는 데 의의를 가진다. 이를 통해 추후 프리캐스트를 활용한 비정형 건축물을 계획함에 있어서 디지털 기술을 활용한 맞춤형 대량생산을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

또한 본 연구자는 후속연구의 일환으로 실무자들이 디지털 설계 및 패브리케이션 프로세스를 진행함에 있어서 촉진 또는 방해요인을 파악하고 이에 대한 효과적인 대처 방안에 대한 인식을 확인하는 연구를 제안하고자한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 인천대학교 교내연구비 지원 (2017-0282)에 의한 결과이며 2019년도 한국BIM학회 춘계 학술발표대회에서 발표한 내용을 발전시켜 제출함.

References

AIA TAP Awards (2014). Perot Museum of Nature and Science, <https://network.aia.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=3b78302a-cf30-4e4f-bd2c-f9eddd49d902&forceDialog=0> (Jul. 1, 2019).

Beorkrem, C. (2013). *Materials Strategies in Digital Fabrication*, New York, Routledge, pp. 130–135.

Brander, D., Bærentzen, A., Clausen, K., Fisker, A., Gravesen, J., Lund, M. N., Nørbjerg, T. B., Steenstrup, K., Søndergaard, A. (2016). Designing for Hot-Blade Cutting: Geometric Approaches for High-Speed Manufacturing of Doubly-Curved Architectural Surfaces, *Advances in Architectural Geometry*, pp. 306–327.

Gardiner, G. (2015). SFMOMA facade: Advancing the art of high-rise FRP, *Composites World*, <https://www.compositesworld.com/articles/sfmoma-faade-advancing-the-art-of-high-rise-frp> (Jul. 1, 2019).

Gonchar, J. (2007). Transformative Tools Start to Take Hold: A Critical Mass of Building Information Modeling Projects Demonstrates the Technology's Benefits and Its Potential for Redefining Practice, *Architectural Record*, April 2007, pp. 155–162.

Gulling, D. K. (2014). Beyond buildings [but] inside architecture, *Proceedings of Architectural Research Centers Consortium*, pp. 23–32.

Hack, N., Lauer, W. V. (2014). Mesh Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Concrete Formwork, *Archit Design*, 84(3), pp. 44–53.

Iwamoto, L. (2011). *Digital Fabrication: Architectural and Material Techniques*, Princeton Architectural Press, pp. 4–7.

Kieran, S., Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*, New York: McGraw Hill.

Kim, S. W., Nam, K. J., Cho, S. Y. (2016a). A Study on the Expression of Materiality of Architectural Skin through Application of Digital technology, *Journal of the Korean Institute of Culture Architecture*, 54, pp. 203–211.

Kim, S. W., Lee, S. J., Jeon, Y. C. (2016b). A Study on Fabric Effects on Contemporary Architectural Surfaces. Based on the Material Characteristics, *Architectural Research*, 18(1), pp. 31–38.

Lee, H. J., Cho, S. Y., Kim, D. H. (2010). A Study on the Tectonic Meaning of Architectural Skin by the Introduction of Digital Technology, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 26(11), pp. 3–10.

Lee, Y. H., Jeon, Y. C., Kim, S. W. (2016). A Study on the Experiential Communication through Material Effect of Architectural Surface, *Journal of the Korean Institute of Culture Architecture*, 53, pp. 258–266.

Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A.G.F., Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing process. *Automation in Construction*, 21(1), pp. 262–268.

Lim, W. C., Lee, J. K. (2015). A Study on Expressive Characteristics of Pavilion Applying Digital Fabrication, *Journal of Korea Institute of Spatial Design*, 10(6), pp. 65–77.

Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R., Gramazio, F., Kohler, M., Langenberg, S. (2015). Complex Concrete Structures: Merging Existing Casting Techniques with Digital Fabrication, *Computer-Aided Design*, 60, pp. 40–49.

Martins, P.F. and Sousa, J. P. (2014). Digital Fabrication Technology in Concrete Architecture, *eCAADe*, 32(1), pp. 475–484.

May, K. (2013). Brutalism, CLOG.

- Nam, K. J., Jeon, Y. C., Kim, S. W. (2013). A Study on the Change of Masonry Construction Method of Contemporary Architecture – Focus on the Comparison of Gantenbein Winery facade and 290 Mulberry Condo facade, Proceedings of Journal of the Architecture Institute of Korea, pp. 127–128.
- Park, J. J. (2010). Modularized Membrane Generation Method by Using Digital Property. Journal of Korea Institute of Interior Design, 78(1), pp. 137–147.
- Park, S. J. (2016). An Analysis on the Correlations between Atypical Form of Contemporary Architecture and Digital Design Tool Commands. Journal of Basic Design and Art, 17(2), pp. 129–143.
- Pine, J. (1993). Mass–Customization: The New Frontier in Business Competition, McGraw–Hill.
- Roschli, A., Post, B. K., Chesser, P. C., Sallas, M., Love, L. J., Gaul, K. T. (2018). Precast Concrete Molds Fabricated with Big Area Additive Manufacturing, Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference, pp. 568–579.
- Ryu, H. G., Kim, S. J. (2012). Case Study of Concrete Surface Design and Construction Method for Freeform Building Based on BIM–Focused on Tri–Bowl, Korea, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 12(3), pp. 347–357.
- Ryu, H. G. (2013). Deduction of Considerations During Design and Construction by Analysing Domestic and Abroad Case Analysis of Freeform Building Envelope. Korea Journal of Construction Engineering and Management, 14(4), pp. 84–96.
- Schipper, H. R. (2015). Double–curved precast concrete elements: Research into technical viability of the flexible mould method, Doctoral Thesis, Technical University of Delft, pp. 11–21.
- Schodek, D., Bechthold, M., Griggs, K., Kao, K. M., Steinberg, M. (2015). Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design, New York: Wiley
- Shutt, C. (2018). 3–D Printed Forms Expand Design Options, Ascent PCI Magazine, Fall 2018 Issue, pp. 10–18.
- Smith, R. (2010). Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction, New York: Wiley.
- Stocking, A. (2017). Realizing Architectural Dreams Through Design–Assist and Precast Concrete, <https://www.autodesk.com/redshift/design-assist/> (Jul. 1. 2019).
- Stephens, S. (2013). Sheared and Shirred: Surfaces and Solids, Architectural Record Magazine, January Issue, pp. 78–85.
- Yi, S. Z., Hong, K. S., Kang, H. W. (2016). A Study on the use of parametric design tools in BIM–based design process. Journal of the Korean Institute of Culture Architecture, 53, pp. 275–284.