

비정형 건축물 공사의 생산성 분석 및 향상방안

- 노출콘크리트 공사를 중심으로 -

이은영¹ · 김예상*

¹성균관대학교 대학원 초고층장대교량학과

An Analysis and Improvement of Free Form Building's Construction Productivity

- Focused on Exposed Concrete Work -

Lee, Eun-Young¹, Kim, Yea-Sang*

¹Department of Mega Buildings and Bridges, Sungkyunkwan University

Abstract : The Global's top five Design Firms selected from BauNetz a German architectural magazine in 2007 designed free form building design which was 25% of the overall design by 2006-2010. Free form building is a landmark of the city and the country so its social and economic impacts are very large. In case of Korea, free form buildings such as Tribowl in Incheon, KINTEX Exhibition hall 2 and Dongdaemun Design Plaza have increased. However, those the increase in design trends and, the needs due to the lack of free form building design and construction management experience, free form building projects can't be expected to profitability and have a number of problems after completion. Especially, there are many excessive quality problems and the rising cost due to design changes frequently and lack of experience and data. Thus an initial plan regardless of considering of free form building's characteristics can be a huge risk because of the difference with the plan and actual projects, yet there aren't free form building project's performance data and case studies related to productivity. In this study, through selection of low-construction productivity works and an analysis of the work process and productivity data, hope to propose an actual field productivity of free form building and the ways to improve productivity.

Keyword : Free Form Building, Construction Productivity, Productivity Hindrance Factor, Exposed Concrete

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

비정형 건축물은 도시, 국가의 랜드마크로서 건축물이 가지고 오는 사회적, 경제적 파급효과가 매우 크다. 실제로 스페인의 쇠퇴해가던 지방공업도시 빌바오 시(市)는 대표적인 비정형 건축물인 '구겐하임 미술관'으로 인해 매년 100만 명에 달하는 관광객이 방문하는 세계적인 도시가 되었다. 또한 개관 후 10년 동안 약 2조 7천 7백억 원의 경제 이익과 4만 5천명의 고용창출 효과를 가져왔으며, 지역 경제 활성화에 주역으로 자리 매김하였다. 이러한 비정형 건축물은 현재도 세계 곳곳에 지역을 대표하는 랜드마크로 성장하고 있으며, 제 2, 3의 빌바오 효과를 기대받고 있다. 비정형 건축물의 증가추이를 정량적으로 분석하고자 Fig. 1 과 같이 2007년 바우넷에서 선정한 세계 5대 설계사(들

의 1991 ~ 2010년 작품 중 비정형 건축물의 증가 추이를 분석하였다(이강 2011).

Fig. 1에서 나타나듯이 5대 설계사의 2006 ~ 2010년 정형 대비 비정형 건축물 설계 비중은 전체 설계 중 25%로 비록 5대 설계사가 모두 대표한다고는 할 수 없지만 시장을 주도하는 설계사들의 설계 흐름을 나타내고 있다고 할 수 있

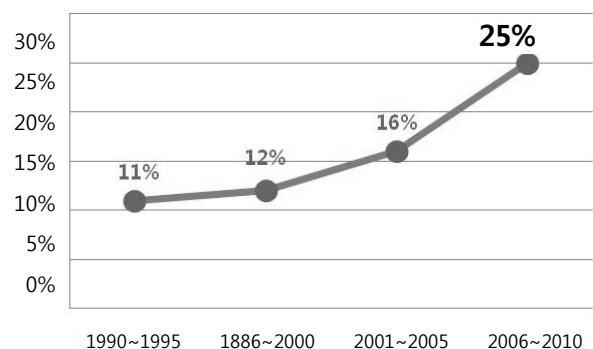


Fig. 1. Design Trend of World Big 5 Design Firms(이강 2011)

* Corresponding author: Kim, Yea Sang, School of Civil and Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-330, Korea
E-mail: yeakim@skku.edu

Received December 19, 2013; revised March 11, 2014

accepted March 17, 2014

1) 헤르조그앤 드 뤼퐁(Herzog and de Meuron), 렘 쿨하스(Rem Koolhaas,

OMA), 자하 하디드(Zaha Hadid), 렌조 피아노(Renzo Piano), 노만 포스터(Norman Foster and Partners)

다. 또한 비정형 설계 비율이 지속적으로 증가하는 추세를 보면 다른 건물들과 차별된 독창적인 디자인을 선호하는 발주자들의 '비정형 형태'에 대한 수요 역시 증가하고 있음을 알 수 있다.

하지만 비정형 건축물은 수요는 점차 증가하고 있는데 반해 설계 및 시공 관리 경험 부족으로 인해 비정형 프로젝트는 수익성을 기대하기 어렵고, 완공 후에도 많은 문제들이 부각되고 있는 실정이다.

일반적으로 비정형 건축물의 공사 관리에서 발생하는 문제점으로는 크게 공기지연, 공사비 증가, 품질저하로 요약할 수 있다. 실제로 프랭크개리가 설계한 미국 LA의 월트 디즈니 콘서트홀은 세계적인 비정형 건축물 중 하나로서 LA 폭동과 지진으로 인한 공사 중단도 있었지만 총 공사 기간이 5년에서 16년으로 늘어났고, 당초 1억 달러로 추산됐던 공사비는 2억7천400만 달러로 약 2.5배의 증가가 나타났다. 또한 MIT는 프랭크개리가 설계한 Stata 센터의 불충분한 설계 도면을 제공하여 누수 문제로 재시공비용이 \$1.5백만이 들었다며 소송을 제기하기도 했다.

국내 대표적인 비정형 건축물 사례 중 2011년 완공된 국내 최대 전시장인 KINTEX 제2전시장의 경우, 외장 패널 제작에 대한 예정가격 산정 시 일반금속공사 기준으로 전체 면적에 대한 총공사비만을 산정하여 시공 난이도에 따른 비정형적 특성이 반영되지 못하였다고 한다(안지연 2011).

이처럼 국내 인력의 비정형 프로젝트 수행 경험부족으로 인한 불확실한 공사비 예측, 설계 과다변경, 공기지연은 물론 완공 후에도 품질 문제를 비롯한 공사비 상승 관련 문제들이 계속 발생하고 있다. 또한 비정형 건축물의 특성을 고려하지 못한 초기 계획은 프로젝트 수행 시 리스크로 작용되지만 아직 비정형 건축물 프로젝트 관련 실적자료나 사례분석 자료 구축은 미비로 인해 초기단계에서 어려움을 겪고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비정형 건축물 공사 중 생산성이 낮은 공종의 작업 프로세스 분석 및 사례분석을 통한 비정형 건축물의 시공 생산성 지수(공중에 따른 표준품셈 생산성 대비 비정형 건축물 사례현장 생산성)를 통해 생산성 향상 방안을 도출하여 비정형 건축물 프로젝트의 리스크 저감을 목표로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 비정형 건축물 공사 수행 시 일반 정형 건물 시공과 달리 공기 증가 및 공사비 증가 리스크가 가장 큰 건축 공종(이하 비정형 공종)을 선정하여 그 차이가 얼마나 발생하는지 사례분석을 통해 실증 자료 제시 및 개선 방안을 살피고, 시행착오 최소화 및 비정형 건축물 시공 생산성 향상을 목표로 한다.

본 연구의 수행 절차는 다음과 같다. 우선 비정형 건축물 관련 국내의 연구동향을 살펴본 후 건설공사관리 생산성 저해요인관련 연구를 분석하여 비정형 건축물에서의 생산성 저해요인의 기초자료로 활용한다. 그리고 전문가와 면담을 통해 비정형이란 형태적 특성에 의해 생산성이 계획 대비 실제 투입 자원의 차이가 많이 발생하는 공종을 선정하여 실제 현장 사례를 검토하여 작업 프로세스 분석과 일반적으로 생산성의 기준으로 삼는 품셈과의 비교를 통해 선정된 공종의 현장 생산성 분석 및 저해요인을 파악하고 결론에서는 이에 대한 생산성 향상방안을 제시하고자 한다.

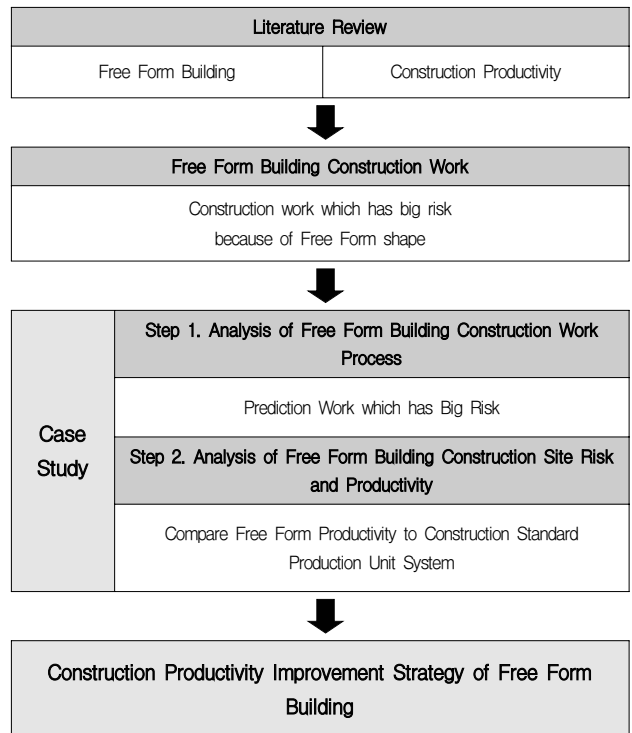


Fig. 2. The Flow of the Research

2. 국내외 관련 연구동향

본 장에서는 현재까지의 비정형 건축물 관련 연구 동향 분석 및 건설 생산성 관련 연구 분석을 통해 시사점을 도출하고 비정형 건축물 프로젝트에서의 노무 생산성 향상방안 제시를 위한 기초 연구를 수행한다.

2.1 비정형 건축물 관련 선행연구

본 연구에 앞서 비정형 건축물관련 연구들에서 비정형 건축물을 어떻게 정의하고 있는지 살펴보았다. 비정형 건축물 외장 패널에 대해 연구한 김선우의 연구에서는 비정형 건축물을 건축물의 전체 또는 일부가 기울거나 (tilted), 좁아지거나(taperd), 뒤틀린(twisted) 형태이거나, 자유로운 곡선 형태를 가지고 있는 건축물로 정의하고 있으며(Kim 2008), 비정형 건축의 설계변경 특성에 대해 연구한 하지희의 논

문에서는 정형 건축물이란 platonic solid로 구성된 매스형태를 갖는 건축물을 말하고, 비정형 건축물이란 platonic solid를 벗어나 불규칙적인 외피를 갖는 형태로 구성된 건축물이라고 정의하였다(Ha 2011). 이외에도 비정형에 대한 공통적인 정의는 존재하지 않지만 대부분의 선행연구에서 불규칙적이고 틀에 박히지 않는 형태를 지닌 건축물을 비정형 건축물로 정의하고 있다.

하지만 이는 대부분 형태 및 디자인측면에서 정의한 개념으로 시공자 관점에서 비정형 건축물 공사 수행 리스크 절감을 위한 본 연구와는 그 성격이 부합하지 않는다. 따라서 본 연구에 맞는 정의가 필요할 것으로 보이며, 이에 대해서는 3장에서 정의하겠다.

한편 비정형 관련 국내 연구 동향 분석결과 2002년 이후로 꾸준히 증가 추이를 보이고 있으며, 대부분의 연구 주제가 비정형 형태 설계기술, BIM 및 구조, 특정 공중에 집중되어 있으며 프로젝트 관리 및 실제 시공관련 연구는 미미하였다. 국외 연구의 경우 내진, 내풍 등 횡력 저항과 관련된 구조논문이 대부분이었으며, BIM관련 논문들 역시 대부분 통합설계나 견적 및 자동공기 산출에 대한 연구들이었다.

따라서 기존의 설계와 특정 공중에 초점을 맞춘 연구에서 나아가 비정형 건축물 프로젝트 관리의 균형적인 성장 및 발전에 기초자료로 활용될 수 있도록 시공관리 및 사례 자료 축적을 위한 대한 연구가 필요한 시점이다.

2.2 건설 생산성 관련 선행 연구

건설 생산성과 관련된 많은 정의가 존재하나, 본 연구에서 생산성이 갖는 의미는 공종별 단위 작업량(Functional Unit; Outputs) 대비 그 작업을 완성시키기 위해 투입된 노동량(Labor man-hours; Inputs)(김예상 1994)으로 이는 공사 진행의 효율성, 전체 공정에 미치는 영향도 및 저해요인 파악을 용이하게 하는 역할로 실적 데이터의 축적이 매우 중요하다. 국외의 건설 생산성 관련 연구는 Work Sampling을 통해 생산성 저해요인 분석뿐 아니라 실제 생산성 데이터 축적관련 연구도 지속적으로 진행되고 있다. 반면 국내 건설 생산성 관련 연구들은 Table 1에서 정리한 바와 같이 생산성 저해요인에 대한 다양한 요인 도출 및 향상방안 제시에 대한 다수의 연구들이 진행되고 있다. 하지만 설문을 통해 중요도를 분석하여 중요한 요인을 중점 관리해야 한다는 식의 정성적 접근에서 그쳐 실증적인 검증이 뒷받침되고 있지 않다. 특히 비정형 건축물의 경우 아직 국내에 비정형 건축물 시공사례 및 시공경험이 적어 축적된 생산성 데이터 부족으로 인해 계획 대비 실제 투입 인원이 배로 늘거나, 공기 지연의 문제로 공사 초기단계에서 계획 수립에 어려움은 물론 생산성 관리 리스크 또한 매우 크다는 문제를 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 비정형 건축물의 작업 프로세스 분석을 통해 일반 건축물 대비 생산성 저해 요인 분석과 이에 대한 실제 사례 현장의 생산성 자료를 검증 자료로 뒷받침하여 생산성 연구의 정량적 접근에 의의가 있으며, 연구를 통해 도출한 생산성 자료를 바탕으로 향후 비정형 건축물 초기 공사 계획 및 리스크 관리에 기여하고자 한다.

Table 1. Productivity Hindrance Factor From the Literature Review

	Hindrance Factors	Kim.Y '94	JungH '02	Park.J '03	Shahriyar '05
Labor	1 Shortage of skilled labor	○	○	○	○
	2 Lack of Worker's responsibility			○	
	3 Lack of skills and experience of workforce		○	○	○
	4 Lack of Worker's motivation	○	○	○	○
	5 Frequent breaks	○	○		○
	6 Worker's physical exhaustion due to overwork	○	○		
	7 Poor use of multiple shifts or overtime				○
	8 Ignoring or not soliciting employee input				○
	9 Absenteeism and turnover	○			○
Design & Engineering	1 Difficulty of Design	○			
	2 Poor drawings of specification	○		○	○
	3 Design in disregard of Constructability	○	○	○	
	4 Design change frequently	○	○		
Construction Management	1 lack of quality control	○			○
	2 Poor management system				○
	3 Poor construction methods		○	○	○
	4 Lack of pre-task planning	○	○	○	○
	5 Impractical Schedule	○		○	
	6 Waiting for instructions	○	○	○	○
	7 Poor communication between office and field			○	○
	8 Poor logistic plan	○	○		
	9 Work interference	○	○		
	10 Supervision delay	○	○		○
	11 Safety	○	○		○
	12 Change order and rework		○		
	13 Inspection delays		○		○
	14 Congested work areas		○		○
Material & Equipment	1 Late equipment and material fabrication & delivery	○	○	○	○
	2 Lack of material		○		○
	3 Equipment breakdowns	○			○
	4 Sub-quality material	○			
	5 Lack of proper tools & equipment	○			○
Others	1 Locality of Site	○		○	
	2 Lack of Workforce training				○
	3 Poor work environment	○		○	
	4 Local union and politics			○	○
	5 Project uniqueness	○			○
	6 Strike	○			
	7 Weather condition	○	○		○
	8 Underground Structure	○			
	9 Lack of cost control accounting				○

3. 비정형 공종

3.1 비정형 공종 정의

앞서 선행연구 고찰에서 밝힌 바와 같이 비정형이란 일반적으로 형태 및 설계적 측면에서 불규칙적이고 틀에 박히지 않는 형태를 지닌 건축물로 정의하고 있다. 그러나 이러한 정의는 시공 측면에서의 비정형 건축물 공사 생산성 분석에 대한 본 연구의 성격에 부합하지 않아 이에 맞는 새로운 정의가 필요하다고 사료되었다.

따라서 비정형 공종이란 비정형 건축물의 자유로운 외피를 표현하기 위해 건물 전체 또는 일부가 불규칙하여 이로 인해 자재 제작단계부터 시공단계에 이르기까지 작업의 반복성이 적고, 리스크(예측하지 못한 사건 발생으로 계획 대비 실제 투입 자원 증가)가 큰 공종으로 정의하고자 한다.

3.2 사례분석을 위한 비정형 공종 공사의 선정

비정형 건축물과 일반 건축물의 가장 큰 차이는 자유로운 외피를 지녔다는 형태적 요인에서 기인한다. 이러한 비정형 외피를 표현하기 위해 일반 건축물과 다른 비정형 건축물 시공 프로세스 상의 특징은 1) 자재 제작 단계에서 3D모델링을 바탕으로 2D 제작도면 추출이 필요하며, 2) 시공하기 전 Mock-Up 테스트를 통해 품질 및 기술 검토가 선결되어야 하며, 3) 자재의 공장 제작을 위한 자원 투입이 많이 소요되거나, 4) 현장작업 반복성이 낮아 학습률 및 생산성이 낮고 마지막으로 5) 비정형성에 의해 공종별 기존 공사 수행 프로세스와 비교해 새로운 작업 발생한다는 점을 들 수 있다. 그러나 이러한 비정형 특성은 비정형 건축물이라 하여 모든 건축 공종에 해당되는 것은 아니며, 부위마다 그 성격 또한 다르다. 따라서 본 연구에서는 다루고자 하는 공종의 선정은 비정형 건축물에서 중점 관리해야 할 공종들을 대상으로 하여 관련 공사의 실무경험이 있는 전문가와 면담을 통해 비정형 건축물 공사 수행 시 생산성 관리 리스크(본 연구에서는 계획 대비 실제투입 자원으로 정의함)가 가장 큰 공종으로, 비정형 노출콘크리트 공사, 비정형 외부판재공사, 비정형 수장공사를 선정하였다.

$$\begin{aligned} \text{생산성관리리스크} &= \frac{\text{실제 소요 공기}}{\text{계획 공기}} \\ &= \frac{\text{실제 투입인력}}{\text{계획 투입인력}} \end{aligned} \quad (1)$$

Table 2는 선정한 세 공종별 비정형 시공 프로세스 특징 분류이다. 도면 추출, Mock-up 테스트, 새로운 작업 생성은 세 공종 모두 같지만 비정형 외부판재공사와 비정형 수장공사는 자재의 공장 제작 및 운송에 소요되는 시간 및 비용 투입은 증가하지만 가조립된 상태로 현장에 반입되고, 현장 내 설치 역시 반복 작업으로 인해 학습률이 높은 반면 비정형 노출콘크리트 공사의 경우 이러한 공사 관리 외

부 요인에 의한 생산성 저하는 미미하지만 현장 작업 반복성이 낮아 생산성이 저하된다는 특징을 갖는다.

Table 2. Characteristic of Free Form Building Construction

Stage	Characteristic of Free Form Building Construction	Exposed Concrete	Exterior Panel Work	Interior Finishingwork
PRD	Extracting of 2D Drawings from BIM Model	●	●	●
	Increase of Resource to Produce Material and Delivery		●	●
PRE	Mock-up Test for Quality and Forming Technology	●	●	●
CON	Arising New Work Process	●	●	●
	Lack of Work Repetitive	●		

* PRD: Production Stage, PRE: Pre Construction Stage, CON: Construction Stage

따라서 본 연구에서는 공사 수행 리스크가 큰 이 세 공종 중에서도 공장 제작 및 물류관리 리스크와 같이 외부요인이 아닌 내부요인을 중점으로 연구 범위를 한정하였다. 또한 시공자가 현장에서 생산성 관리 가능한 비정형 노출콘크리트 공사의 생산성 향상을 목표로 4장에서는 비정형 노출콘크리트 공사의 작업 프로세스 분석 및 실제 현장 사례 분석을 통해 일반 건축물 대비 비정형 건축물에서의 노출콘크리트 공사와의 생산성 차이를 분석하고자 한다.

4. 사례분석-비정형 노출 콘크리트 공사

4.1 비정형 노출콘크리트 공사

본 절에서는 앞서 선정한 비정형 공종 중 현장작업 반복성이 낮아 학습률 및 작업생산성이 낮은 비정형 노출콘크리트의 공사의 생산성 분석을 위해 사례현장을 선정하여 B-1, B-2, B-3, B-4동의 비정형 노출콘크리트 시공사례를 분석하였다. B현장에 시공된 비정형 노출콘크리트는 3차원 곡면의 비정형 노출 콘크리트 공사로서 국내 시공사례가 거의 없으며 해외에서는 이러한 비정형 노출 콘크리트 공사를 위해 리브(rib)와 합판을 이용한 거푸집공법이 사용되고 있다(최소연 2012).

4.1.1 비정형 노출콘크리트 공사 작업 수행 과정

노출콘크리트 공사는 철근콘크리트 공사 시 거푸집 표면을 그대로 건축물의 외관으로 적용하는 것으로서 콘크리트 양생 후 거푸집을 탈형하고 난 콘크리트 자체가 외부 마감으로 사용될 수 있는 공법을 말한다(오정우 2006).

또한 노출콘크리트 공사는 일반적인 철근콘크리트 공사와 비교하여 내구성 및 품질에 있어 많은 기술력을 요구하기 때문에 철저한 계획 및 시공관리가 필요하다. 특히 마감이 없어 대기 중에 표면이 직접 드러나기 때문에 오염이 쉽고, 재시공이 어려우며 콘크리트 탄산화에 따른 철근 부식 등의 이유로 내구성 및 품질확보가 어렵기 때문에 설계 시 시공 고려요소는 물론 품질관리를 위한 체계적인 노력이 필요하다.

일반 노출콘크리트 공사의 순서는 사전 준비 후 거푸집

제작 및 설치, 철근 배근, 콘크리트 타설 및 양생, 콘구멍 마감, 보양 및 발수제 도포 순으로 진행되는 반면 비정형 노출 콘크리트 공사 순서는 우선 BIM 모델링을 통해 비정형 형상을 도면화하고, 거푸집 제작을 위해 도면의 곡률에 따라 리브(Rib)를 제작 후 이에 합판을 취부하는 작업을 거치며, 측압을 견딜 수 있도록 거푸집 내외부에 보강재를 시공이 선결되어야 한다. 또한 철근 배근 시에도 곡률을 따라 절곡하는 작업이 필요하며, 콘크리트 타설 후 콘구멍 마감, 발수제 도포 및 보양이 필요하다.

Fig. 3에서 보듯이 비정형 노출콘크리트 공사 작업 프로세스를 살펴보면 일반적인 노출 콘크리트 공사에 비해 거푸집 제작부터 시작하여 곡면 리브(Rib) 합판널 먹매김, 재단, 조립, 설치에 거푸집 보강까지 모두 형틀공의 손을 거쳐 작업이 이뤄지며, 숙련된 기능공의 기술 및 정확한 제작도가 요구되는 등 생산성 관리 리스크가 가장 큰 작업이라 예상된다.

특히 B현장에 시공된 비정형 노출콘크리트의 경우 부분마다 곡률이 다르기 때문에 곡률부분의 거푸집 전용 없이 모두 직접 제작하였으며, 철근공사의 경우 수직 철근 배근 후 내부 거푸집의 곡률에 맞춰 수동 원곡기를 이용하여 절곡하고, 수평철근은 수직철근의 곡률에 맞게 현장에서 곡가공 후 시공하는 등의 작업들이 이루어 졌다.

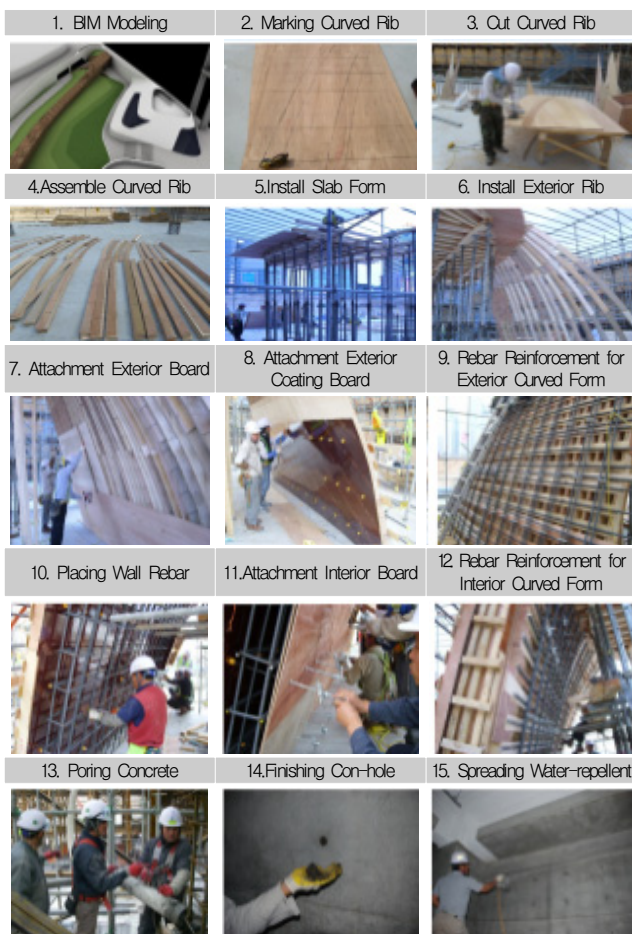


Fig. 3. Free Form Exposed-Concrete Construction Process

4.2.2 건물 별 비정형 노출콘크리트 공사 생산성 분석

비정형 노출콘크리트 공사 작업 프로세스 분석을 통해 생산성 관리 리스크가 가장 큰 작업은 거푸집 시공이라 예상하였다. 이를 검증하기 위해 1단계로 B현장의 B-1, B-2, B-3, B-4의 각 동별 계획대비 실제 공기 및 투입인력 자료를 거푸집 시공, 철근배근, 콘크리트 타설 및 먹매김 작업별로 분석하여 계획 대비 실제 투입 자원의 차이가 가장 큰 작업을 생산성 관리 리스크가 큰 작업으로 분석하였다.

2단계에서는 생산성 관리 리스크가 가장 큰 작업의 생산성이 일반적으로 생산성 기준으로 사용되는 품셈 대비 발생하는 차이를 분석하기 위해 물량과 투입 인원 자료를 바탕으로 품셈과 비교하여 비정형 건축물에서의 작업의 생산성을 분석을 실시하였다.

비정형 노출콘크리트 공사 생산성관리리스크 (2)

$$= \frac{\text{실제 소요 공기}}{\text{계획 공기}} \text{ or } \frac{\text{실제 투입인력}}{\text{계획투입인력}}$$

1) 비정형 노출콘크리트 작업별 생산성관리리스크 도출

1단계는 비정형 노출콘크리트 세부 작업별 생산성관리 리스크가 가장 큰 작업을 도출하는 단계로 2단계에서 생산성 분석의 대상이 된다. Fig. 3~6은 사례현장의 각 동별 예정 공정 계획 및 실시공정표를 바탕으로 작업일은 실제 현장 작업일은 반영하여 주 1일 휴무, 6일 업무로 가정하였으며, 노무량은 각 작업별 1층 벽체, 기둥, 슬래브, 파라펫 시공에 투입된 인원이며, 공정표는 노출콘크리트 구간의 완료 시까지의 공사 기간 및 투입인원의 합으로 분석하였다.

Fig. 4은 B-1동의 작업별 계획 대비 실시공정표 및 계획 투입 인원 및 실제 투입 인원으로 실제 B-1동의 규모는 지하 3층부터 지상 1층까지지만 본 연구에서는 노출콘크리트인 지상1층만의 공정 및 인원을 분석하였으며 건축면적은 679m²로 계획대비 실제 공사시작일은 약 2주 지연되었다.

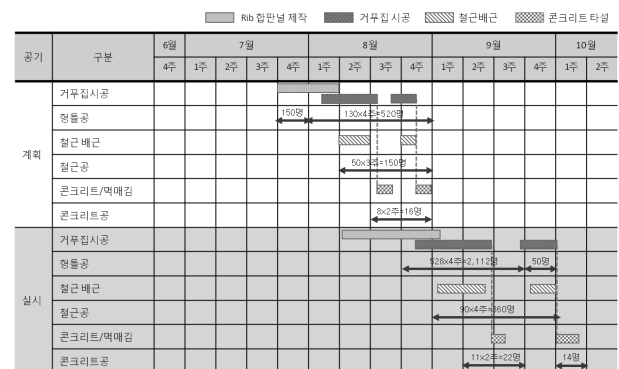


Fig. 4. Planned Schedule and Manpower vs. Actual Schedule and Manpower of B-1

세부 작업 일정을 살펴보면 거푸집 시공의 리브(Rib)제작 소요일은 계획대비 실제 1.7배 증가하였고, 거푸집 설치 작업은 1.5배 증가하였으며 인원은 약 3.2배가량 증가하였다. 철근배근과 콘크리트 타설 작업의 경우 계획한 작업일 보다 1.3배씩 더 소요되었으며, 인원은 각각 24배, 23배 증가하였다.

Fig. 5은 B-2동의 작업별 계획 대비 실시공정표 및 계획 투입 인원 및 실제 투입 인원으로 B-2동은 단층 공간으로 건축면적 213m²의 건물로서 주간공정표에서 보듯이 계획 공기 대비 약 1주 늦게 시작하였으며 거푸집 시공의 리브(Rib)제작은 계획대비 1.5배 증가하였고, 거푸집 설치 작업은 1.3배 증가하였으며 인원은 약 3배가량 증가하였다. 철근배근과 콘크리트 타설 작업의 경우 계획한 작업일 보다 1.3배씩 더 소요되었으며, 인원은 각각 1.3배, 2.3배 증가하였다.

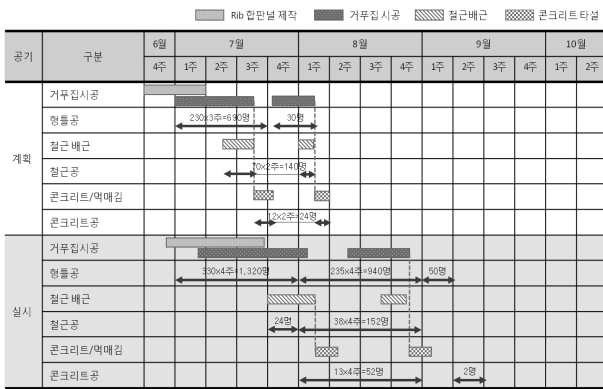


Fig. 5. Planned Schedule and Manpower vs. Actual Schedule and Manpower of B-2

Fig. 6은 B-3동의 작업별 계획 대비 실시공정표 및 계획 투입 인원 및 실제 투입 인원으로 B-2동과 마찬가지로 계획한 공사 시작일과 실제 착수일은 같지만 거푸집 시공의 리브(Rib)제작이 계획대비 2.3배 증가하였고, 거푸집 설치

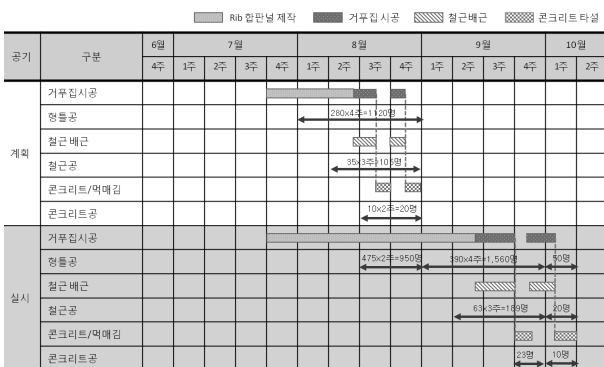


Fig. 6. Planned Schedule and Manpower vs. Actual Schedule and Manpower of B-3

작업은 1.6배 증가하였으며 인원은 2.3배가량 증가하였다. 철근배근과 콘크리트 타설 작업의 경우 계획한 작업일 보다 1.2배, 1.6배씩 더 소요되었으며, 인원은 각각 2배, 1.7배 증가하였다.

Fig. 7은 B-4동의 작업별 계획 대비 실시공정표 및 계획 투입 인원 및 실제 투입 인원으로 디자인 기확전이 열리는 갤러리로서 계획한 공사 시작일과 실제 착수일은 같지만 거푸집 시공의 리브(Rib)제작이 계획대비 1.6배 증가하였고, 거푸집 설치 작업 역시 1.6배 증가하였으며 인원은 약 3배가량 증가하였다. 철근배근과 콘크리트 타설 작업의 경우 계획한 작업일 보다 1.5배, 1.7배씩 더 소요되었으며, 인원은 각각 1.2배, 3.3배 증가하였다.

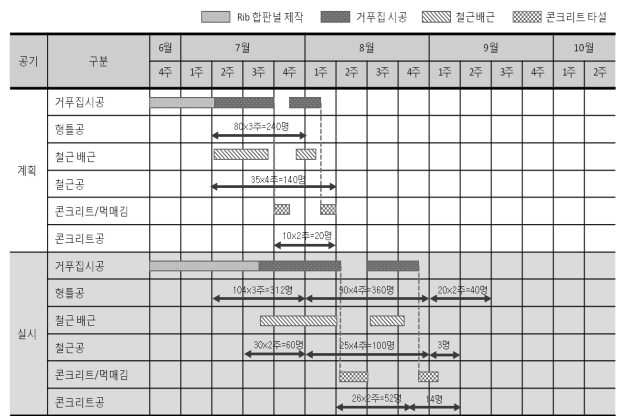


Fig. 7. Planned Schedule and Manpower vs. Actual Schedule and Manpower of B-4

거푸집 시공의 경우 리브(Rib)제작이 1.5배에서 2.3배로 평균 1.8배 차이가 났으며, 거푸집 설치는 1.3배에서 1.6배로 평균 1.5배 차이가 났다. 철근배근 작업의 경우 1.2배에서 1.5배로 평균 1.3배로 거푸집 공사에 비해서는 미미한 수준이다. 콘크리트타설 작업은 1.3배에서 1.7배로 평균 1.5배 정도 계획 대비 실제 공사기간이 더 증가하였다. 하지만 공정표 상의 표기와 실제 작업과의 차이를 감안한다면 앞서 작업 프로세스 분석에서 예측한 바와 같이 거푸집 시공에서 리스크가 크다는 결론을 내릴 수 있다. 투입인원을 살펴보면 거푸집 시공은 2배에서 3.2배까지 투입 인원이 증가했으며, 철근배근은 1.2배에서 2.4배까지 투입인원 변동이 있었으며, 콘크리트 공사의 경우 1.7배에서 3.3배까지 변동이 있었는데 이는 재시공으로 인한 타설 횟수가 증가했기 때문으로 사료된다. 전반적으로 콘크리트 공사 투입인원은 공기가 증가되면서 연쇄적으로 증가하기 때문에 계획대비 실제 투입인원의 오차를 수밖에 없었다.

Table 3. Analysis of Exposed Concrete Productivity Management Risk

Activity			Planned		Actual			
			Schedule	Manpower	Schedule	Manpower		
B-1	Form work	Rib making	12	670	20	2162		
		Install	15		22			
	Reinforcement		9	150	12	360		
	Ready mixed concrete		7	16	9	36		
B-2	Form work	Rib making	12	720	18	2310		
		Install	26		35			
	Reinforcement		12	140	15	176		
	Ready mixed concrete		4	24	5	54		
B-3	Form work	Rib making	18	1120	42	2560		
		Install	10		11			
	Reinforcement		7	105	11	209		
	Ready mixed concrete		5	20	6	33		
B-4	Form work	Rib making	14	240	22	712		
		Install	17		28			
	Reinforcement		18	140	22	163		
	Ready mixed concrete		6	20	9	66		
Result								
Activity			Schedule			Manpower		
			min.	max.	avg.	min.	max.	avg.
Formwork	Rib making	1.5	2.3	1.8	2.3	3.2	2.9	
	Install	1.3	1.6	1.5				
Reinforcement		1.2	1.5	1.3	1.2	2.4	1.8	
Ready mixed concrete		1.3	1.7	1.5	1.7	3.3	2.4	

2) 노출콘크리트 거푸집 시공 작업 생산성 분석

앞서 거푸집 시공, 철근배근, 콘크리트 타설 작업의 계획 대비 실제 공기 및 인원 자료의 분석을 통해 생산성 관리 리스크가 가장 큰 거푸집 시공이 계획 대비 실제 생산성이 가장 떨어짐을 알 수 있었다. 2단계에서는 표준품셈과 비교를 통해 면적 대비 비정형 노출 콘크리트 거푸집 공사의 생산성이 얼마나 차이 나는지 분석해 보았다.

비정형 노출콘크리트 거푸집 공사생산성 지수 (3)

$$= \frac{\text{비정형노출콘크리트 거푸집 공사 생산성}}{\text{표준품셈 노출콘크리트 거푸집 공사 생산성}}$$

건물 별 비정형 노출콘크리트 거푸집 공사의 생산성 지수는 Table 4와 같다. 비정형 노출콘크리트 공사의 거푸집 공사 생산성 차이는 표준품셈과 비교해서 작게는 0.85배에서 4.32배까지 차이가 남을 볼 수 있다. 그러나 B4동의 경우 실제와 표준품셈의 생산성 차이가 미미한 이유는 B4동의 3D 모델링 사진에서 볼 수 있듯이 다른 건물에 비해 비정형 곡률 부위가 두드러지지 않기 때문임을 알 수 있다.

Table 4. Exposed Concrete Formwork's Productivity Analysis of Each Building

Building	3D Modeling	Actual	C.S.P.U.S.
B-1		Quantity	2,381.6m ²
		Manpower	2162 1120
		Productivity	0.91manpower/m ² 0.47manpower/m ²
		Free Form Productivity Index	1.94
B-2		Quantity	1,136.3m ²
		Manpower	2310 534
		Productivity	2.03manpower/m ² 0.47manpower/m ²
		Free Form Productivity Index	4.32
B-3		Quantity	1,814.6m ²
		Manpower	2560 852
		Productivity	1.41manpower/m ² 0.47manpower/m ²
		Free Form Productivity Index	3
B-4		Quantity	1,799.8m ²
		Manpower	712 846
		Productivity	0.40manpower/m ² 0.47manpower/m ²
		Free Form Productivity Index	0.85

*Exposed Concrete Formwork's Productivity of Construction Standard Production Unit System (short for C.S.P.U.S.) = 0.47(Formwork Carpenter 0.23+Helper 0.24)manpower/m²

4.3 비정형 노출콘크리트 공사 생산성 저해요인 분석

B현장의 비정형 노출콘크리트 공사 작업 생산성 분석과 전문가 면담을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 비정형 노출콘크리트 생산성 관리 리스크는 작업프로세스 분석에서 예측한 것과 같이 거푸집 공사, 콘크리트 타설, 철근배근 순으로 크며 거푸집공사에서 계획 대비 공사기간, 투입인원차이가 가장 많이 발생했음을 알 수 있다.

2) 비정형 노출콘크리트 공사 작업 중 리스크가 가장 큰 거푸집 공사의 실 작업생산성을 표준 품셈과 비교해 보니 곡률에 따라 건물 별 2배에서 4배까지 차이가 발생했으며 초기 계획 수립 시 이러한 비정형적 특성을 고려하여야 한다. 주요 생산성 저해요인으로는 곡면 리브(Rib) 제작을 위한 숙련공 부족과 Mock-up 및 3차원 모델링 좌표데이터를 통한 도면 추출 기술 및 정확한 시공도작성이다. 사례 현장에서는 비정형 벽의 2차원 단면도를 추출하기 위해 단면도를 300mm간격으로 상세하게 단면도를 제작하여 시공 품질을 확보 할 수 있었다.

3) 비정형 노출콘크리트 콘크리트 타설 작업은 1-2일이 소요되는 단기 작업으로 가장 큰 생산성 저해요인은 콘크리트 면 불량으로 인한 재시공이다. 타설면이 마감 없이 외부로 드러나기 때문에 감압 타설을 유도하고 타설 높이를 준수, 코너 및 개구부 주변 다짐을 철저히 할 수 있도록 타설 품질 교육 및 타설 시 철저한 시공관리가 요구된다.

4) 비정형 노출콘크리트 철근 배근 작업은 다른 작업에 비해 생산성 관리 리스크는 가장 작다. 하지만 도면검토를 통해 가공 물량을 신청하고 철근 가공도와 일치하는지 확인 후 내부 거푸집 곡물에 따라 곡가공하여 검측 후 최종 시공을 수행한다. 또한 노출면의 품질확보를 위해 피복두께 확보를 철저히 해야 하는 점과 같이 품질 관리 사항이 많다는 점이 일반 철근 공사에 비해 생산성이 낮은 주요인으로 분석되었으며, 이를 고려하여 계획을 수립해야 한다.

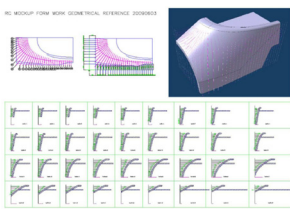


Fig. 8. Rib Shop Drawing



Fig. 9. Education for Casting

5. 결론

비정형 건축물은 도시, 국가의 랜드마크로서 사회적, 경제적 파급효과가 매우 크며, 국외 뿐 아니라 인천세계도시축전 기념관, 한강 예술섬, 여우 엑스포 주제관 등 국내 비정형 건축물 사례가 점차 증가하고 있다. 하지만 국내 인력의 비정형 프로젝트 수행 경험 부족으로 인한 공사 관리 미숙과 계획의 신뢰도 및 정확도도 매우 떨어져, 실제 투입자원이 배로 소요되거나 공기지연과 같은 프로젝트 관리의 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제들은 자연스럽게 프로젝트 수익성 저하 및 완공 후에도 품질 문제, 공사비 관련 클레임들이 빈번하게 발생하고 있다.

이에 본 연구에서는 비정형 건축물 프로젝트 시공관리자들과의 면담을 통해 비정형 건축물 생산성 관리 리스크가 큰 작업으로 비정형 노출콘크리트 공사, 비정형 외부 판재 공사, 비정형 수장공사를 선정하여 그 중 자재제작 및 현장 운송 등과 같은 현장관리 외부요인이 아닌 현장 내 작업 생산성의 영향이 큰 비정형 노출콘크리트 공사를 대상으로 사례 현장 비정형 노출콘크리트 시공된 4개 건물의 실제 생산성 자료를 분석하였다.

세부 작업별로는 거푸집공사, 콘크리트 공사, 철근 공사 순으로 계획 대비 실제 투입 자원의 차이가 큰 것으로 분

석되었으며, 거푸집 공사의 경우 리브(Rib) 제작과 거푸집 설치까지 계획대비 평균 1.6배의 기간이 더 걸렸으며 이를 바탕으로 표준폼셈과 생산성을 비교해 본 결과 곡물에 따라 2배에서 4.3배까지 차이가 났다. 이러한 거푸집 공사의 생산성 저해 주요인은 곡면 리브(Rib) 제작을 위한 숙련공 부족과 정확한 도면의 추출로 기능공 확보 및 정확한 3D 모델링 및 도면 추출 기술 확보로 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 콘크리트 타설 작업의 경우 계획대비 평균 1.5배의 기간이 더 걸렸으며, 생산성 저해 주요인은 콘크리트 품질 불량으로 인한 재시공으로 타설 품질 교육 및 철저한 시공관리를 통해 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 철근 배근작업의 경우 품질 관리 사항이 많은 것이 주요인으로 노출콘크리트 품질에 있어 철근 피복두께 확보가 중요하기 때문에 이를 고려한 시공계획이 필요하다고 판단된다.

따라서 향후 비정형 건축물 공사 관리를 수행하는 시공자는 초기계획 수립 시 이러한 비정형 건축물과 일반 건축물의 생산성 차이에 대한 인식을 바탕으로 비정형 형태에 대한 이해와 면밀한 검토 후 계획을 수립하여야 하며, 지속적인 비정형 건축물의 생산성 자료축적 및 생산성 향상 계획에 많은 사례 현장을 통한 생산성 피드백이 요구된다.

또한 비정형 공종으로 도출한 외부판재공사와 수장공사의 경우 본 연구 범위에서는 제한하였지만 추후 이 두 공종에 대한 생산성 향상에 관한 연구 또한 이뤄져야 할 것이다.

References

- An, Ji Yean (2011). "A Study on the Lessons Learned for Improving Efficiency of Free-Form Facade Construction", MS thesis, Seoul National Univ. of Science&Technology.
- Cha, Hee Sung and Kim, ki Hyun (2013). "Development of Construction Project Performance Management System(PPMS) Considering Project Characteristics", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 14(1) pp. 82-90.
- Choi, So Yeon (2012). "A Case Study on the Construction Process of Irregular-shaped Building in Dongdaemun Design Plaza", MS thesis, YonSei Univ.
- Chung, Hee Suk (2002). "A Strategy for Improvement and Analysis on Factors that Influence the Productivity on Construction Site - Comparison of General Contractor and Subcontractor -", MS thesis, Hanyang Univ.
- Kim, Cheol Kyoo and Kim, Jung Jae (2003). "A Study on Expressive Characteristics of Informal Form in the Contemporary Architecture", *Journal of Architectural Institute of Korea*, 19(4), pp. 101-108.

- Kim, Seon Woo (2009). "Classification and Optimization of Irregular-Shaped Building Panels by Fabrication Methods-Focused on Dongdaemun Design Plaza Park", MS thesis, YonSei Univ.
- Kim, Yea Sang (1994). "Analysis of the Factors influencing Construction Productivity." *Journal of Architectural Institute of Korea*, 10(10), pp. 267-273.
- Kwon, Soon Ho, Shim, Hyoun Woo and Ock, Jong Ho (2011). "A Study on the Problem Analysis and Quality Improvement in Fabricating Free-Form Buildings Facade Panels through Mock-up Panels Production", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(3), pp. 11-21.
- Lee, Chang (2011). *BIM Reading by 43 Questions*, Pixelhouse, Korea, pp. 130-131.
- Oh, Jung Woo, Ahn, Byung Joo, Lee, Yun Sun and Kim, Jae Jun (2006). "A Study for Improvement for Exposed Concrete Finished Building Works", *Journal of Architectural Institute of Korea*, 26(1), pp. 463-466.
- Shahriyar Mohahed (2005). "A Project Improvement System for Effective Management of Construction Projects", Doctorate thesis, Louisiana State Univ., U.S.A.

요약: 2007년 독일의 건축 잡지 바우넷에서 선정한 세계 5대 설계사들의 2006 ~ 2010년 설계한 전체 설계 중 25%가 비정형 건축물로, 비정형 건축물은 도시, 국가의 랜드마크로서 그 사회적, 경제적 파급효과가 매우 크다. 국내 또한 인천세계도시축전 기념관, 킨텍스 제2전시장, 동대문디자인 플라자 등 비정형 건축물이 증가하고 있다. 그러나 이러한 설계 트렌드 및 증가하고 있는 비정형 건축물의 수요에 반해 이를 충족할 만한 비정형 건축 프로젝트의 설계 및 시공 관리 경험 부족으로 인해 비정형 프로젝트는 수익성을 기대하기 어렵고, 완공 후에도 많은 문제들이 부각되고 있다. 특히 국내 인력의 비정형 프로젝트 수행 경험부족으로 인해 불확실한 공사비 예측, 설계 파다변경 등으로 인해 완공 후에도 품질 문제를 비롯한 공사비 상승 관련 문제들이 계속 발생하고 있으며, 이와 같은 비정형 건축물의 특성을 고려하지 못한 초기 계획은 프로젝트 수행 시 실제와 그 차이가 커 프로젝트 관리 리스크로 작용하지만 아직 비정형 건축물 프로젝트 관련 실적자료나 사례분석 자료 구축은 미비로 인해 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비정형 건축물 공사 중 생산성이 낮은 공종을 선정하여 작업 프로세스 분석 및 실제 현장 생산성 자료 분석을 통해 실질적인 생산성 자료 구축 및 비정형 건축물 공사 생산성 향상 방안을 제시하고자 한다.

키워드 : 비정형 건축물, 건설 생산성, 생산성 저해요인, 비정형 노출콘크리트
