

공동주택 RC 및 PC공법 적용 공사비 비교 및 OSC의 포괄적 경제성 분석 프레임워크 구축

윤원건^{1*} · 배병운² · 강태경³

¹한국건설기술연구원 건설정책연구소 수석연구원 · ²한국건설기술연구원 건설정책연구소 연구원 · ³한국건설기술연구원 건설정책연구소 선임연구원

Comparison of Construction Cost Applied by RC and PC Construction Method for Apartment House and Establishment of OSC Economic Analysis Framework

Yun, Won-Gun^{1*}, Bae, Byung-Yun², Kang, Tai-Kyung³

¹Senior Researcher, Division of Construction Policy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Researcher Division of Construction Policy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Senior Research Fellow, Division of Construction Policy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Abstract : OSC is a type of supply chain and value chain that spans the entire process of construction production (planning, design, construction, maintenance, etc.). It is a method of producing the final object by manufacturing it in a factory, transporting it to the site, installing and construction. This research as is the construction cost was compared for each case A, which applied the PC method, and case B, which applied the RC method. In the case of applying the PC method (excluding the PC design cost), compared to the case where only the RC method was applied, the frame construction cost per unit quantity (㎡) increased by about 70% (50% based on the total RC construction type). Of the total frame construction cost of PC method application, PC accounted for 90.2%, 'PC manufacturing cost' 54.8%, 'PC assembly cost' 28.5%, and 'transportation cost' accounted for 6.89%. Also a decision-making framework that can consider both costs and benefits was established. In the case of benefits, the construction period, defect repair, disaster occurrence, energy efficiency, noise/dust/waste, and greenhouse gas emission indicators reflecting OSC technical advantages were presented. It can contribute to providing a basis for helping decision-making on the introduction of PC apartment houses using OSC.

Keywords : Off-Site Construction, Precast Concrete, Construction Cost, Apartment House, Economic Analysis

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

OSC (Off-site Construction)는 기획, 설계, 시공, 유지보수 등의 건설생산 전 과정에 걸친 공급망과 가치사슬의 한 유형으로 건설현장이 아닌 공장 등 제3의 장소에서 계획, 생산, 조립된 부재, 부품, 선 조립 모듈, 유닛 등을 현장으로 운반하여 설치 및 시공하므로써 최종 목적물을 생산하는 방식

이다(Bae et al., 2020). 이러한 OSC는 최근 노동인력 고령화, 생산성 저하, ESG (Environmental·Social·Governance) 패러다임으로의 전환에 따른 현장 안전 및 환경 문제 등 산업 이슈와 코로나19로 인한 디지털화 및 공급망 재구축 변화와 관련하여 새로운 건설 생산방식으로 주목받고 있다.

글로벌 컨설팅사인 McKinsey에서 향후 건설 프로젝트의 생산방식을 근본적으로 변화시키고, 자재 공급자, 개발자, 발주자, 기계 및 소프트웨어 제공 업체 등 건설산업의 생태계 전반에 영향을 미칠 9가지 변화 동인을 ① 제품 기반의 접근방식, ② 전문화, ③ 가치사슬 관리와 산업 차원의 공급망 통합, ④ 통합, ⑤ 고객 중심 및 브랜딩, ⑥ 기술 및 시설에 대한 투자, ⑦ 인적 자원에 대한 투자, ⑧ 국제화, ⑨ 지속가능성 등과 같이 제시하였다. 또한, 이러한 변화 동인들로 인한 건설산업의 넥스트 노멀(The next normal in construction)을 ① 건설산업의 생산방식이 현장중심(site-

* **Corresponding author:** Yun, Won Gun, Division of Construction Policy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

E-mail: wongun78@kict.re.kr

Received September 22, 2022; **revised** -

accepted October 12, 2022

built)에서 공장제작 방식으로 전환되는 탈 현장화(OSC), ② 디지털기술의 건설산업 적용, ③ 건설분야 스타트업 (Startup) 확산, ④ 건설기업의 비즈니스 모델 확대 등으로 제시하였다(Mckinsey, 2020).

국내에서도 PC와 모듈러를 중심으로 OSC에 대한 관심이 높아지고 있으며, 건축분야 PC는 물류센터, 공장, 공동주택 지하주차장 등을 중심으로 시장이 확대되고 있다. 최근 국토교통부에서 발표한 '스마트 건설 활성화 방안('22.7.20)'에 제조업 기반의 탈현장 건설 활성화 내용을 포함하였으며, OSC 방식중 하나인 사전제작 콘크리트(Precast Concrete; PC) 공법을 활용한 공동주택 건축 실증사업이 LH공사와 SH공사 등을 중심으로 확산되고 있다.

여기서 PC라함은 공사의 견식화와 공기단축을 도모하여 PC부재를 공장이나 건설현장 내에서 제작하고, 접합부는 콘크리트에 의한 충전 또는 기타 접합방식으로 현장 조립하여 사용할 수 있도록 한 콘크리트 부재를 말한다(Hansung PCC, 2016). 현장타설 기반의 RC공법(재래식 거푸집 공법)에 비해 PC의 높은 원가 구조가 PC확산에 장애가 되는 요인이긴 하지만(Hwang, 2019), 구조물을 부재단위의 사전공장 제작으로 인해 현장 작업이 최소화되어 공기를 단축시키고, 현장 노무자의 안전사고 저감 및 폐기물 배출량 감소 등의 효과가 장점으로 제시되고 있다(Hwang, 2014; Kim, 2004).

최근 이러한 공동주택 건설시장 변화에 맞춰 OSC기반 PC 공법 관련 기술개발과 생산시스템¹⁾이 진행되고 있다. 그러나 아직 국내 적용 사례가 적고 새로운 공법 도입 의사결정을 지원하기 위한 경제성 분석 연구가 미흡하여 기존 공법들과 비교하여 적용 효과 판단이 어려운 상황이다.

이에 본 연구에서는 최근 수행된 공동주택 건설 사례를 기반으로 RC공법과 PC공법의 공사비를 PC가 적용되는 영역인 골조공사를 중심으로 차이를 비교하고자 한다. 이를 통해 RC공법에 비해 높게 나타나고 있는 PC공법의 공사비 구조를 분석하고, 이러한 높은 공사비로 인한 PC공법 적용 의사결정을 지원할 수 있는 OSC의 경제성 요인들을 도출하여 포괄적 경제성 분석 프레임워크를 제안하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 절차

본 연구에서는 공동주택 건설공사시 기존 재래식 거푸집/현장타설 공법(RC공법)과 PC공법의 공사비 구조를 비교하고 차이를 도출하기 위해 수집된 사례들의 내역서를 기반으로 공종별 투입내역 특성을 분석하였다. 현재 기술 수준에서 RC구조와 PC구조 적용에 따른 차이는 건축 골조에만 해당

하므로 핵심 비교대상은 골조공사의 직접공사비를 중심으로 비교하였다. 또한, 공동주택 건설공사시 기존 RC공법과 PC공법의 공사비를 포함한 포괄적 경제성을 비교하는데 활용할 수 있는 분석 프레임워크를 구축하기 위해 국내·외 선행연구 등 문헌고찰을 통하여 OSC기반 PC공법의 경제성과 연관된 요인들을 도출하고, 적정 분석 방법론을 제시하였다. 이 연구에서 다루는 공동주택 경제성 범위는 PC부재를 공장에서 설계·제작하고 현장에서 현장까지 운송하고 현장에서 설치·시공하는 공사단계 외에도 시설운영 및 해체폐기 단계까지의 생애주기 관점을 고려하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 공동주택 공법 및 공사비 구조

2.1.1 RC 공법현황 및 공사비 내역의 구조

RC공법은 공동주택 및 일반 건축물에서 대중화된 방식으로 현장에서 기초공사 후 골조공사의 거푸집을 설치하고, 콘크리트(레미콘)타설과 양생하여 상부골조를 완성하는 인력 투입 중심의 공법이다. 철근과 콘크리트를 일체식 구조화하여 형상 설계가 자유로운 장점이 있으나, 현장 타설시 동바리 시공이 필요하고 외부 환경에 따라 품질관리에 주의가 필요한 특성을 가진다. 이러한 RC공법에 대한 공사비 내역 분류는 세부공정(단, 골조공사 내역만 포함)으로 가설공사, 철근콘크리트공사를 살펴보면 철근콘크리트공사 I (합판거푸집설치, 유로폼, 콘크리트타설 등의 공종이 진행), 철근콘크리트공사 II (철근공), 철근콘크리트공사 III (깁폼), 철근콘크리트공사 IV (알루미늄폼)로 분류가 가능하다(Table 1). 이 밖에 조적, 미장, 타일 등 골조공사와 내·외부 마감공사 및 기초공사의 내역체계로 구성된다.

최근 건설현장은 RC공사에서 인력수급문제와 숙련공수 급부족으로 어려움을 겪고 있고, 직접공사비 중 거푸집작업 공사비 비중이 20년 전에 30% 내외였지만 현재 50% 수준까지 증가(Kim, 2005)하였으며, 비계 설치 해체 등 가설공사 현장 공정이 복잡하여 사고위험 및 안전관리에 주의가 필요한 한계점을 가진다. 또한, 공기 및 비용 관점에서는 거푸집, 철근 및 레미콘 등 재료 및 자재 조달의 영향이 크며, 현장 공정에서 다량의 폐기물이 발생하고 도심지 공사의 경우 미세먼지, 소음 관리도 중요한 특징을 가진다.

RC공법의 건축공사비 상세내역 항목들을 자세히 살펴보면 거푸집 공종 및 콘크리트 타설 항목과 타워크레인(T/C)의 사용이 주요공정이다. 특히, 현장내 건축자재의 이동, 양중이 일반적으로 '공통가설공사' 항목에 포함된다(Table 1). 이러한 RC공법에서 PC공법으로 대체되는 공사비 항목은 공장에서 제작이 가능한 구조물의 기둥, 보, 바닥판, 벽체 등과

1) 언론기사 "車공장처럼 가공·조립 공정... 철근 생산성 10배 늘었죠" [르포] PC 스마트 팩토리 (e대한경제, 2021.04.05.)<https://www.dnews.co.kr/uhtml/view.jsp?idxno=202104031445188600983>

Table 1. Construction cost details of apartment house (Ground floor Construction) by 'RC method'

	Field	Standard	Quantity	
Temporary Work	Assembled floor post (steel pipe)	Less than 3 months 1st stage, 2m	unite	
	Steel post pipe (0.6m)	3.5m or less, 3 months or less	m ²	
	Prefabricated Steel Pipe floor post (floor post System)	(H:4.2~10M) 1 month	m ²	
	Laying of plywood for internal work of EL shaft	(Including installation of fixed support)	m ²	
	Steel pipe frame	For work over 4m of fatigue	m ²	
	Marking	(For housing, frame)	m ²	
	Scaffolding bracket installation	(For wall, bracket not included)	place	
	System Scaffolding	3 months	m ²	
	System Scaffolding	Bracket_3 months	m ²	
Reinforced Concrete Construction I	Euroform	Normal, 0-7m or less	m ²	
		Complex, 0-7m or less	m ²	
	Crushing CON'C (VIBRATOR)		m ²	
	Plywood formwork	3 times, complex	m ²	
		(6 times)	m ²	
	Veneer coated plywood formwork	(10 times)	m ²	
	Ready-mixed concrete	25-24-15	m ³	
	Ready-mixed concrete pouring and pouring (pump truck boom)(32M)	(reinforced structure less than 100~300m ² , S=15)	m ³	
		(Unrooted structure less than 50m ² , S=15)	m ³	
		(Unfounded structure less than 100-300m ² , S=15)	m ³	
	Ready-mixed concrete pouring and pouring (pump truck boom) (52M)	(reinforced structure less than 100-300m ² , S=15)	m ³	
	T/C foundation installation and dismantling cost (remicon, pile (material, construction cost) separate)	12T, mixed parking lot, pile	place	
	T/C anchor installation and dismantling cost	12T, foundation buried	place	
	Tower crane transport cost (for analysis)	12T	unit	
Tower crane rental (for analysis)	12T	month		
Tower crane installation and dismantling cost (wall fixed) (for analysis)	1 stage, wall fixed	unit		
Reinforced Concrete Construction II	Rebar mill processing and assembly	complication	ton	
	Production of rebar construction drawings	-	t	
	Deformed bar steel (SD500, ex-works drawing)		H-10	t
			H-13	t
			H-16	t
			H-19	t
			H-22	t
		H-25	t	
Rebar unloading and sorting	(rebar factory processing)	t		
Material transportation cost	Processing plant → field, 40KM	t		
Reinforced Concrete Construction III	Ladder	H=1.8, 3	place	
	Gang form installation and dismantling fee	setting layer	m ²	
		general floor	m ²	
		finishing layer	m ²	
GANG FORM	H=3m, including work platform (5 steps), handrail (11 steps)	m		
Reinforced Concrete Construction IV	AL FORM 10-14F (low noise method)	Setting floor, assembly and disassembly, including	식	
		General floor, assembly and disassembly included	m ²	
		Including finishing layer, assembly and disassembly	m ²	

같이 거푸집, 철근 및 철근배근, 레미콘 및 레미콘 타설과 현장 작업에 필요한 비계와 동바리 등이다.

2.1.2 PC 공법현황 및 공사비내역의 구조

공업화 주택은 사전에 공장에서 구조물의 구성요소를 조립·제작한 다음 완성된 조립품 또는 하위 조립품을 최종 제품이 위치할 건설현장으로 운송하여 조립하는 것으로(Tim

V. and Roger C, 2004), 현재 국내의 PC부재생산 시스템은 아래 <Table 2>에서 보이는 것과 같이 부재단위를 공장에서 제작하여 현장에 운송 후 설치 및 시공하고 있다.

특히, RC공법에서 현장 거푸집 조립 및 해체를 반복하며 부재를 형성하지만, PC공법은 공장에서 반복사용 가능한 몰드(Mold)를 이용하여 부재를 생산하므로 이를 통해 생산된

PC부재는 우기, 동절기 등 현장 기후와 상관없이 우수한 품질 확보가 가능하며, 표면이 균질하여 마감공사를 최소화 할 수 있다(Hwang, 2014). OSC 활성화에 앞장서고 있는 영국의 경우 1990년대 영국의 주택제고 부족현상에 정부가 300만 가구를 건설할 계획을 발표한 이후 OSC에 대한 운송 및 관리, 공급망 물류를 포함한 기술적 문제 해결이 필요했음에도 불구하고 경제성 및 사회적 정책변화에 따라 이러한 PC부재의 제작의 장점들이 재차 부각되었다.

Table 2. Prefabricated systems for housing (Thomas, 2005)

Type	Description
Volumetric Systems	Fully assembled three-dimensional modular units produced in a factory and installed on site.
Partial Modularization	Standardised units or components.
Prefabrication of Elements	Various individual systems including 'frames' and 'structural insulated panels (SIP)'.

PC공법을 사용한 공동주택 건설방식의 기초공사는 RC공법과 유사하지만 구조부재를 공장에서 생산하여 현장에 시공(조립)되는 것이 차이점이고, 현장에서 기초공사가 진행되는 동시에 제작공장에서 부재를 생산하므로 공기단축에 효과적이다. PC공법의 공사비 내역 분류는 일반적으로 가설공사, 철근콘크리트공사(합판거푸집, 콘크리트 타설 등), 조적, 미장, 타일 등 내외부 마감공사와 기초공사로 구성된다. 하지만 현재 PC공사 공정으로 골조공정이 완료되지 않고, RC공사의 공종들과 혼합 시공되고 있기 때문에 PC공사와 관련된 공종이 아래 <Table 3>과 같이 가설공사와 철근콘크리트공사 공정으로 구분되어 있다(단, 골조공사 내역만 포함). 자세히 살펴보면 가설공사에 포함된 PC설계비, 운반비, 제작비, 조립비는 모두 PC제작/설치사에서 골조부재의 단위 물량(m³)당 견적비용에 근거해 산정되고, 제작 상세내역은 공사비 내역서에 포함되지 않는다. PC제작/운반의 경우 부재 특성상 기둥, 빔, 거더, 하프슬래브 등 각각 산정되며, PC조립의 경우 작업 비용과 양중에 필요한 크레인비용이 별도로 산정된다.

몰드제작은 PC제작 절차의 시작이자 마무리가 되며, 부재 1개 제작 후 리빌드를 통해 반복 사용되는데 공장에서는 부재제작에 투입되는 레미콘, 철근, 강연선 등의 자재 외에 몰드(몰드/리빌드) 비용이 포함된다. 이러한 몰드 작업의 생산성이 비용 및 제작 공기에 중요 영향요인으로 작용한다. 특이한 점은 PC설계비와 PC운반비가 공사비 내역구조에서 가설공사에 포함되어 있고, PC제작, PC조립은 철근콘크리트공사로 나뉘어 계상된다.

PC설계비는 RC공법의 내역에 없는 항목으로 최근 진행되는 PC 공동주택 건설공사들이 RC구조에서 PC구조로 전

환 설계된 제작도면(SHOP DWG.)을 사용하여 시공하고 있기 때문에 사료되고, 이러한 설계비 비중이 PC공사 부분의 대략 15~16% 정도로 RC공법에 비해 공사비가 증가하는 원인으로 분석되었다. 이러한 설계비는 향후 공동주택 PC원설계가 가능할 때 전환설계내역에서 제외될 수 있을 것이다.

공사비 관점에서 PC부재의 제작비용 중 철재몰드(Mold)가 차지하는 비율은 약 7~20%이고, 부재의 형태가 다양한 경우 몰드 개조에 시간과 비용이 다수 발생할 수 있다. 이러한 방식은 현장공법에 비해 원재료비가 크게 차지되는 반면에 공장의 자동화 수준에 따라서 제작과정 중 노무량의 투입을 줄일 수 있으므로 노동생산성이 향상되는 특징이 있다(Cho, 2014).

2.2 PC 공동주택 경제성 및 선행연구 고찰

RC공법 공사에서는 구조물의 기둥, 보, 바닥판, 벽체 등과 같은 구조부재를 현장에서 직접 거푸집을 설치하고 철근을 배근한 후 콘크리트를 타설하여 시공이 이루어진다. 공장에서 대량 생산으로 품질확보 및 원가절감이 가능한 규격화된 건설자재와는 달리 현장여건의 변화, 기후나 계절의 영향 등에 의한 품질저하 및 원가상승이 발생할 수 있다(Hwang, 2014). 이러한 단점을 극복하고자 개발된 것이 PC공법으로 구조부재 공장생산을 통하여 품질확보, 원가절감 및 공기단축을 목적으로 한다. 하지만 기존 연구들에서 제시된 바와 같이 아직 전통 방식(RC공법)과의 단위 비용이 약 18~108% 정도 증가하는 것으로 나타나(Mao et al., 2016; Pan & Sidwell, 2011; Hong et al., 2018), 시공단계 원가절감 측면에서 PC공법의 경제성 확보 필요성이 제기되었다.

여기서 건설사업 초기투자비 경제성만을 고려한다면 시공단계 투입공사비 측면에서 PC공법에 따른 부재제작, 현장 시공에 따른 노무비, 자재비, 경비를 절감할 수 있는 최적의 효율적인 설계 및 생산 프로세스 및 방식을 구현하는 것이 비용 관점 경제성의 핵심이 된다. 한편 영국의 대표적인 건설분야 전문연구기관인 CIRIA (2020)의 'Methodology for Quantifying the benefits of offsite construction' 보고서에서 OSC의 혜택을 건설 품질의 개선, 결과의 안정성, 현장 시간의 단축, 지속가능성 및 건강과 안전 증진 등을 제시한 것과 같이, 공동주택 PC 구조 적용에 따른 장점 또한 시공단계 직접공사비 외에도 연관된 사업부대비용 및 다양한 관점을 고려할 필요가 있다. Blismas et al. (2006) 및 Alazzaz and Whyte (2014)은 OSC 기술에 대한 심층 문헌고찰을 통해 공기절감, 품질개선, 숙련기술자 부족 해소, 생산성 향상 등 OSC의 장점을 분석하였으며, Wuni and Shen (2019)은 OSC의 장점과 관련하여 4개국 32개의 연구문헌을 분석하여 공기(Time), 비용(Cost), 품질(Quality), 생산성(Productivity)

Table 3. Construction cost details of apartment House (Ground floor Construction) by 'PC method'

Field		Standard	Quantity
Temporary Work	Assembled horse scaffolding (steel pipe)	Less than 3 months 1st stage, 2m	unite
	Steel supporting post (exceeding 0.6m)	3.5m or less, 3 months or less	m
	On-site cleanup	RC group	m
	Prefabricated Steel Pipe floor post (floor post System)	(H:4.2~10M) 1 month	m
	Laying plywood for internal work of EL shaft	(Including installation of fixed support)	m
	Marking	(For housing, frame)	m
	PC design cost	PC Structure and Shop drawing	m
		Create original structure drawing	unite
	PC transportation fee	wall, curtain wall	m
		general material	m
	Water installation cost for each building	7th floor	place
Indoor Electric Appliance (Standing)	7th floor	unite	
System scaffolding	3 months	m	
Reinforced Concrete Construction	Plywood formwork	3 times, complex	m
	Ready-mixed concrete pouring and pouring (pump truck boom) (32M)	(Unrooted structure less than 50m, S=15)	m
		(Unfounded structure less than 100-300m, S=15)	m
	PC production	Pillar	m
		Beam/Girder	m
		half slab	m
		wall	m
		curtain wall	m
		Stairs	m
	PC assembly	Excluding equipment cost	m
		200 ton crawler crane	m
PC Construction (TOPPING CONC)	Including paid material cost (subcontract details not included)	unite	

등 8개 그룹으로 분류해 86개의 요인을 도출하였다. Cho and Kim (2015)은 공동주택 지하주차장에 PC구조 시스템을 다양하게 조합하여 각 대안별 경제성을 분석하였으며, PC시스템은 RC 라멘구조 대비 약 12~28% 정도 골조공사비가 상승됨을 제시하였다. Yun et al. (2021)은 공동주택 공법 의사결정에 있어 핵심이 되는 경제성 평가에 있어 공사비 산정에 영향을 미치는 다양한 요인들을 도출하고, 관련업계 전문가 그룹 대상 의견조사를 통해 설계/제작, PC운반, PC조립/시공의 3개 단계별 높은 몰드 제작 및 조립 단가, 지역외 운반(운반거리 증가 등)으로 인한 운송 추가비, 별도 전용 크레인(이동식 크레인) 사용 등 총 10개 공사비 영향요인과 구조 설계 합리화로 투입재료(철근, 콘크리트) 물량 감소, 부재설계 표준화로 몰드전용 횡수 증가 및 현장시공 생산성 증가, 공장설비자동화로 생산성 증가 등 13개 공사비 절감방안들의 중요도와 효과를 분석하였다.

McKinsey (2019)에 따르면, OSC 방식 적용을 통해 프로젝트 일정은 20~50% 단축이 가능함을 제시한 바 있으며, 여기서 OSC는 공사의 60~90%가 공장에서 제작되기 때문에 기후로 인한 공사기간 지연의 위험(risk)을 줄일 수 있어, 기존 RC공사와 비교하였을 때 공사기간을 단축할 수 있다고 설명하고 있다. 따라서, 이러한 PC공법의 가장 큰 장점이자 경제성에도 영향을 주는 요인이 공사기간 즉, 공기단축 특성

이라 할 수 있다.

앞선 이러한 연구들은 주로 OSC 및 PC 활성화를 위한 주요 장점을 도출하고, 공동주택 공사비 절감 중심의 경제성 향상에 대해 논의되었다는 한계를 가지고 있어 PC 공동주택 생애주기 관점을 고려한 포괄적 경제성 분석 프레임워크 구축을 위한 연구는 미진한 것을 알 수 있다.

3. RC 및 PC 공법의 사례중심 공사비 비교

3.1 분석 기준 및 절차

3.1.1 분석대상 사례의 개요

본 절에서는 RC공법과 PC공법의 최근 건설공사 실제 사례를 기반으로 공사비 내역구조를 분석하여 공사비의 비율 및 공사규모에 대하여 비교하였다. 즉, 공공기관에서 진행된 PC공법을 사용한 공동주택 [A사례](Case A-1, 7층)를 사용하였고, RC공법의 공사비 사례로 [A사례]와 대지면적, 연면적, 세대수가 유사한 공동주택의 공사비내역 [B사례]를 사용하였다(Fig. 1). 단, [A사례]의 경우 주동 1개와 지하주차장 일부분에 PC공법이 적용된 한계가 있다. 또한, PC공법 적용이 상부동과 지하주차장별로 상이하고 공사비 내역도 분리되고 있기 때문에 A와 B사례의 상부동과 지하주차장으로 분리하여 각각 비교분석하였다. 상부동을 분석하기 위해

Table 4. Frame by construction cost using PC method building (Analysis Method II)

Frame construction cost		(1) 'PC' construction part	(2) 'RC' construction part	whole frame (1)+(2)
(Case A-1) 1 PC building (7th floor)	① Frame quantity(m ³)	1518.4	497.9	2,016.3
	② Relative cost/(m ³) ratio(%) based on Table 5.(*)	179.5%	59.4%	149.8%
	Construction cost ratio(%)	90.2%	9.8%	100.0%
	※ note	PC Excluding design cost	TOPPING Conc. etc.	-

Table 5. Frame by construction cost using RC method building (Analysis Method II)

Frame construction cost		(1) 'PC' construction part	(2) 'RC' construction part	whole frame (1)+(2)
(Case A-2) 1 RC building (7th floor)	① Frame quantity(m ³)	-	2,016.3	2,016.3
	② Relative cost/(m ³) ratio(%) based on Table 5.(*)	-	100.0% (*)	100.0%
	Construction cost ratio(%)	-	100.0%	100.0%
	※ note	-	RC method applied	RC method applied

서 [A사례]의 2개동(PC공법이 적용된 1개동과 유사 규모의 RC공법이 적용된 1개동) 과 [B사례]의 1개동을 비교하고, 지하주차장을 비교하기 위해서 2개 사례 외에 RC공법이 적용된 1개 사례도 추가로 분석하였다.

	Case A (PC, RC): LH project	Case B (RC): LH project
Land area	52,422 M ³	50,361 M ³
Total ground area	103,643.48 M ³	107,416.88 M ³
Construction scale	26m ² Type, 37m ² Type, 46m ² Type - 1,442 Unit	26m ² Type, 37m ² Type, 46m ² Type- 1,486 Unit
Construction period	2019.12 ~ 2022.07 (Proceeding)	2017.12 ~ 2020.06 (Completed)
Parking lot	Underground 647 Unit, Ground 276	Underground 796 Unit, Ground 690 Unit
PC application	1 residential building (compared to 1 similar flat building)Underground parking lot PC+RC complex	RC only

Fig. 1. Overview of the case to be analyzed

3.1.2 공사비 분석방법

본 연구에서는 공사비 분류 범위별로 RC 및 PC 공법 비교 분석을 수행하였다. 첫째, 현행 PC공사의 내역에서 'PC설계비'를 그대로 포함한 '전체 건축공사비' 대상의 직접비로 '상부공사'내 가설공사, 철근콘크리트공사, 조적/미장/타일 등 마감공사와 '기초공사'내 토공사, 지정공사, 철근콘크리트공사가 포함된 원내역서에 기준한 방법(분석방법 I)을 사용하였다.

둘째, 앞서 분석된 건축공사비중에서 PC공법 적용에 따라 기존 RC공법을 대체하는 변화가 있는 '골조공사비' 대상 분석을 위해 '상부공사'내 가설공사, 철근콘크리트공사가 포함된 '골조공사비'를 비교분석(분석방법 II)하였으며, 가설공사내(떡매김(마감), 준공청소비), 조적공사, 미장공사 등 타 공종공사와 기초공사는 제외한 순 골조공사비만을 사용하였다. 단, 이러한 비교에서는 두 공법의 실제 공중에 투입되는 작업기준만의 비교와 향후 공동주택 원설계부터 PC로 진행되는 경우를 검토하여 원내역서상 가설공사에 포함된 'PC설계비'는 제외하였다.

3.2 RC, PC 기존 공사비 비교 사례분석

3.2.1 건축공사비 기준 공동주택 상부동

분석방법 I 을 사용한 [A사례] 공동주택 1개동(PC제작수량: 1,518m³, PC공사 적용 단가: 1,570,756원/m³(PC설계비 포함 기준))의 상부층 건축공사비를 분석해본 결과 '22년 현재 기술 수준을 고려할 때 RC공법 대비 PC공법 공사비가 전체 건축공사비 합계 기준 약 50% 내외 수준에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 업계 전문가들은 3,000m²미만의 PC가 투입되는 소규모 공사에서 약 절반가량이 몰드 제작에 투입되기 때문에 제작 단가에 한계가 있음을 제시한 바 있다²⁾.

자세히 살펴보면 PC공법 적용 건축공사비는 '상부공사'내 가설공사(17.8%), 철근콘크리트공사(43.2%) 합계인 골조비 비중이 61.0%로 RC의 44.1%³⁾에 비해 증가하였으며, 공사비는 97% 수준이 증가해 약 2배정도를 나타내고 있다. 전체 건축공사비 기준 PC부분 공사비 합계 비중은 56.7%이며, PC 제작이 26.4%, PC조립이 13.7%, PC설계가 12.7%, PC운반이 3.3%로 구성된다. 반면에 RC공법 사례에서는 전체 건축공사비 기준 가설공사가 3.4%, 철근콘크리트공사가 40.7%이며, 철근콘크리트공사내 포함된 거푸집공사(알폼, 갱폼, 유로폼 및 합판거푸집)는 약 15~18%를 나타내고 있다.

3.2.2 골조공사비 기준 공동주택 상부동

분석방법 II 를 사용한 공사비 산정 기준을 원내역 사례 착공 전 시점기준으로 [A사례]의 공동주택 상부동 골조공사비 분석결과 RC공법을 PC공법보다 공사비가 작다는 전제 하에 비교 기준으로 설정하여 다음과 같이 상대 비율(%)로 제시하였다. PC공법 적용 상부동(Case A-1, 7층)의 유사 규모 비교 대상인 RC공법 적용동(Case A-2)의 단위 골조물량

2) 언론기사 "공공현장 파고드는 PC공법... LH, 본격 도입" (e대한경제, 2021.02.26.) <https://www.dnews.co.kr/uhtml/view.jsp?idxno=202102081850422490046>

3) Cho and Choi (2011)의 연구에서 공동주택 10개 현장 자료 분석결과 골조 공사비가 건축공사 직접비에서 약 41%를 차지하고 있는 것으로 나타난 결과와 유사한 수준임

(m³)당 공사비 기준(〈Table 5〉에서 100%, (*) 표시) PC공법 적용시 골조공사비(PC공사 적용 단가: 1,216,168원/m³(PC설계비 제외 기준))는 179.5%로 79.5% 정도 높게 나타났다. 또한, 현장 RC공사 부분은 59.4%로 낮게 나타났으며, 이는 PC적용 시 혼합 시공되는 RC부분 공종 구성이 다르기 때문인 것으로 판단된다. PC공사부분 공사비 비중은 90.2%, 현장 RC공사부분 공사비는 9.8%이다(〈Table 4〉).

또한, 동일 규모 상부동 RC 대비 PC 골조공사비 증가율 및 공종별 비율을 살펴보면 PC공법 적용시 전체 골조공사비(RC 공종 합계 기준)가 약 50% 증가하였으며, PC공법 적용 사례의 경우 PC공사비 비중 90.2%중 'PC제작비'가 54.8%, 'PC조립' 28.5%, '운반'이 6.89%를 차지하였다. RC공법 적용 사례의 경우에는 골조공사비중 '거푸집' 33.4%, '철근' 24.52%, '레미콘' 공이 16.8%를 차지하였다.

3.2.3 건축공사비 기준 공동주택 지하주차장

분석방법 I 를 사용한 [A사례] 및 [B사례] 공동주택 지하주차장 전체 건축공사비 사례분석 결과 현재 기술 수준을 고려할 때 RC공법 대비 PC공법 공사비가 전체 건축공사비 합계 기준 약 10~20% 내외 수준에서 증가하고 있음을 알 수 있다. [A사례]에서 PC공법이 적용(PC제작수량: 1,897 m³, PC공사 적용 단가: 909,838원/m³(PC설계비 포함 기준))된 건축공사비는 '상부공사'내 가설공사(7.3%), 철근콘크리트공사(47.7%)의 합계로 골조비 비중이 55.0%이다. RC공법이 적용된 [B사례]의 56.6%와 유사한 수준이며, 공사비는 약 17% 수준에서 증가를 나타내고 있다. 이는 앞서 분석했

던 상부동에 비해 작은 수치로, [A사례]의 경우 PC와 RC가 지하주차장 전체에 함께 적용되었기 때문인 것으로 판단된다. 이와 관련한 현장 전문가 면담 결과 현재 지하주차장은 현장여건에 따라 비정형 구간은 PC공법 적용이 어려워 기존 RC공법으로 수행되고 있는 것으로 조사되었다.

본 사례에서도 전체 건축공사비 기준 PC부분 공사비 합계 비중은 16.9%로 PC제작이 11.8%, PC조립이 3.6%, PC설계가 0.6%, PC운반이 0.9%로 구성되어 상부동에 비해 PC공법 공사비 비중은 작게 나타났다. RC공법 [B사례]에서는 전체 건축공사비 기준 가설공사가 5.3%, 철근콘크리트공사가 51.3%이며, 철근콘크리트공사내 포함된 거푸집공사(합판, 탈형데크, 유로폼)는 19.3%를 나타내고 있다. 반면에, PC공법 [A사례]에서는 거푸집공사가 9.3%로 나타났으며 이는 PC제작으로 대체된 부분이 반영되었기 때문이다.

또한, RC공법 대비 PC공법 적용시 공사비 규모를 직접 비교한 결과, 전체 공사비 내역 유형 분류(재료비, 노무비, 경비)내 노무비 비중이 감소하고 재료비 비중이 증가하였다. 즉, 골조 부분(가설 및 철근콘크리트공사)은 31.3% 증가하였고, 조적, 미장, 방수 등 마감공은 7.4% 정도 감소한 것으로 나타났으나, 이러한 감소가 PC공법 적용 효과인지는 향후 PC제작단계의 상세 내역 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.4 골조공사비 기준 공동주택 지하주차장

앞서 제시한 분석기준 중에서 공사비 산정기준을 원내역서를 사용한 사례의 착공전 시점기준으로 분석방법 II 를 사용한 [A사례], [B사례] 공동주택 지하주차장 골조공사비

Table 6. Construction cost using RC method underground parking lot (Analysis Method II)

Construction cost		(1) 'PC' construction part	(2) 'RC' construction part	whole frame (1)+(2)
(Case A) Underground parking lot	① Frame quantity(m ³)	-	-	-
	② Relative cost(/m ³) ratio(%) based on Table 7.(*)	-	-	-
	Construction cost ratio(%)	-	-	-
(Case B) Similar size underground parking lot	① Frame quantity(m ³)	-	10,338.0	10,338.0
	② Relative cost(/m ³) ratio(%) based on Table 7.(*)	-	100.0%*	100.0%
	Construction cost ratio(%)	-	100.0%	100.0%
(Case C) Different size underground parking lot	① Frame quantity(m ³)	-	13,922.0	13,922.0
	② Relative cost(/m ³) ratio(%) based on Table 7.(*)	-	109.9%	109.9%
	Construction cost ratio(%)	-	100.0%	100.0%

Table 7. Construction cost using PC method underground parking lot (Analysis Method II)

Construction cost		(1) 'PC' construction part	(2) 'RC' construction part	whole frame (1)+(2)
(Case A) Underground parking lot	① Frame quantity(m ³)	1,897.0	8,436.0	10,333.0
	② Relative cost(/m ³) ratio(%) based on Table 7.(*)	176.9%	94.7%	109.8%
	Construction cost ratio(%)	29.6%	70.4%	100.0%
(Case B) Similar size underground parking lot	① Frame quantity(m ³)	-	-	-
	② Relative cost(/m ³) ratio(%) based on Table 7.(*)	-	-	-
	Construction cost ratio(%)	-	-	-
(Case C) Different size underground parking lot	① Frame quantity(m ³)	-	-	-
	② Relative cost(/m ³) ratio(%) based on Table 7.(*)	-	-	-
	Construction cost ratio(%)	-	-	-

사례분석 결과는 [A사례]를 기준으로 PC공법을 적용한 지하주차장(Case A, 골조수량 10,333m³)의 비교 대상인 RC공법 적용 지하주차장인 [B사례](Case B, 골조수량 10,338m³)의 단위 골조물량(m³)당 공사비 수준을 비교 기준(Table 7)에서 100%, (*) 표시)으로 설정하였을 때, PC공법 적용 시 골조공사비(PC공사 적용 단가: 877,638원/m³(PC설계비 제외 기준))는 176.9%로 76.9% 높게 나타났다. 이는 상부동의 179.5% 차이와 유사고, 현장 RC공사 부분은 94.7%로 RC공법만 적용하는 경우와 거의 유사한 수치를 나타냈다. 전체 공사비중 PC공사부분 공사비 비중은 29.6%, 현장 RC공사부분 공사비는 70.4%이다. 따라서 현재 국내 기술 수준 및 산업 환경에서 RC공법을 PC공법으로 전환 시 대략 70%이상 골조공사비 증가가 있다고 설명 가능하다(Table 6).

또한, 다른 규모 RC공법 적용 지하주차장 사례(Case C, 골조수량: 13,920m³)의 경우에는 109.9%로 다소 높게 나타났으나 RC공법 적용 지하주차장 골조공사비 수준은 유사한 수준으로 판단하였다.

동일 규모 지하주차장 RC 대비 PC 골조공사비 증가율 및 공종별 비율을 자세히 살펴보면, PC공법 적용시[Case A] 골조공사비가 약 10% 증가하였으며(단, 지하주차장은 PC+RC 병용으로 골조공사중 PC적용 비중은 30% 내외로 낮음), PC의 경우 골조공사비 중 'PC제작비'가 21.3%, 'PC조립' 6.6%, '운반'이 1.7%를 차지하였다. RC의 경우[B사례]에는 골조공사비중 '거푸집' 32.8%, '철근' 33.6%, '레미콘' 공이 22.3%를 차지하였다.

4. PC 공동주택 경제성 분석 프레임워크 구축

4.1 PC 공동주택 경제성 분석 항목 고찰

앞서 RC 및 PC 공법 공사비를 비교한 결과에서와 같이 PC구조의 현장시공 단계에서는 RC공법에서 부재의 현장 생산분이 공장제작으로 대체되므로 거푸집 및 동바리 등 가설 관련 재료비, 노무비가 크게 감소되며, 현장작업의 감소로 한정된 작업공간에서의 복잡성 문제도 개선되어 공정, 안전 등 관리의 용이성도 향상되는 효과를 기대할 수 있다. 하지만, 아직 높은 공장제작 단가 및 운송비 등으로 인해 RC공법과의 공사비 경쟁력 확보가 어려운 한계가 존재하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 공사비외에 정량화 가능한 PC공법의 경제성 향상 요인들을 검토하였으며, 이를 기반으로 포괄적인 경제성 분석 프레임워크를 제안하였다.

영국의 OSC 산업 관련 전문기관인 Buildoffsite에서는 OSC 확산에 대한 기술개발 및 지속가능성(Sustainability)에 대한 관심을 가지고 이에 대한 지표를 연구하고 산업 전반에 걸쳐 목표 및 전략을 제시함으로써 협력사들과 함께

성과를 주기적으로 측정해오고 있다. Buildoffsite (2013)에서 발간한 "OFFSITE CONSTRUCTION: Sustainability Characteristics" 보고서에서는 지속가능성을 Social(사회적 책임성), Environmental(환경적 건전성), Economic(경제적 수익성) 범주로 구분하여, 세부 속성을 제시하고 있다. 여기서, Economic 범주는 앞서 제시한 비용과 공사기간과 관련되며, Social 범주는 건강 및 안전, 작업환경개선, Environmental 범주는 현장 에너지 사용 절감 및 폐기물 절감과 건물 운영단계에서의 에너지 사용 절감으로 구성되며, 이는 최근 전세계적인 환경 이슈인 탄소절감과 직접 연관된 분야라 할 수 있다.

Wuni and Shen (2019)은 OSC확산에 영향을 미치는 공기(Time), 비용(Cost), 품질(Quality), 생산성(Productivity), 지속가능성(Sustainability) 등 세부 성과 요인을 제시하였으며, Cost 성과에서는 공사비외에 인력 수요 및 비용, 생애주기비용, 해체 및 폐기 비용의 절감을 제시하였다. 또한, Sustainability 성과에서는 현장의 먼지/소음, 폐기물 절감 외에도 작업자의 건강과 안전 개선, 에너지 성능 및 효율 개선, 환경영향 개선, 현장 혼잡도 개선, 탄소 절감, 기업의 사회적 책임 등 다양한 요인을 제시하였다.

CIRIA (2020)의 연구에서는 OSC 적용 증가를 통하여 얻을 수 있는 혜택(Benefit)을 정량적으로 측정하여 프로젝트 성과를 개선하는 기준을 제시하기 위해 다양한 지표(metrics)를 제안하였다. 이는 크게 'Direct project metrics'의 Cost, Time Quality, Labour requirements, Health&safety, 'Broader project metrics'의 Environmental considerations, Life-cycle consideration, Local disruptions, 'Wider societal impacts'의 Workforce quality of life, Industry benefits, Community benefits의 3가지 그룹으로 구분된다. 'Direct project metrics' 그룹에서 Cost, Time 부문은 앞선 Wuni and Shen (2019)의 연구와 유사한 특성을 가지나, Quality 부문에서는 재작업 비용, 하자보수 등을 제시하고, Health & Safety 부문에서는 재해빈도율 등 정량적 측정이 가능한 지표를 제시한 특징이 있다. 또한, 'Broader project metrics' 그룹에서는 Environmental considerations 부문에서는 폐기물 발생, 탄소발생, 물 사용, 수질 오염 등 지표를 제시하였으며, Life-cycle considerations 부문에서는 내구성, 재활용성을, Local disruption 부문에서는 소음, 장비통행, 공기질 지표를 제시하였다.

일본 국토교통성(2019)에서는 공동주택 12층 규모 1동을 기준으로 RC구조 대비 PC구조 적용에 따른 공사비, 공사기간, 현장 투입인력, 분진 및 소음 발생량을 비교한 자료를 제시한 바 있다. 여기서 공사비는 PC구조에서 증가함에도 공

사기산 감소 28%, 현장 투입인력 70% 감소, 분진 및 소음 역시 획기적으로 감소됨을 제시하고 있다.

또한, Mao et al. (2013)은 주거 건축물을 대상으로 OSC와 전통적 공법으로 건설된 2개 사례 데이터를 수집하여 온실가스(Greenhouse gas; GHG)배출량을 정량적으로 산정하여 비교하였다. OSC 적용시 건설현장에서 발생하는 온실가스 산정 범위에서는 원자재 생산 및 운송과 부재 공장제작 단계에 소요되는 자원 및 에너지를 고려하였고, 제작이 완성된 부재의 현장으로의 운송 및 현장작업 단계에 소요되는 자원 및 에너지와 발생 폐기물 처리 등을 고려하였다. 이러한 기준에 따라 OSC와 전통적 공법의 현장 적용에 따른 단위면적(m²)당 온실가스 배출량을 비교한 결과 OSC 적용시 약 3.2%가 절감됨을 제시하였다. 국내에서도 향후 이러한 PC 적용 효과들을 사례기반으로 측정이 가능할 때 포괄적 관점의 경제성 분석이 가능할 것으로 판단된다.

4.2 경제성 분석 프레임워크 구축

4.2.1 경제성 분석 방법론 및 프레임워크 방향

경제성 분석은 비용과 편익을 화폐가치로 환산하여 비교·분석함으로써 타당성을 추정하는 것으로 분석과정에서 평가자 주관의 개입여지가 적고 균일한 척도로 비교 가능한 비용·편익 분석 등을 포함하며, 평가지표는 편익/비용비율, 순현재가치(NPV)가 보편적으로 이용되고 있다(Lee & Kim, 2013). 또한, 비용·편익 분석은 투자에 대한 성과로 얻어지는 이익을 평가하기 위해 사용되는 가장 일반적인 분석 틀이라 할 수 있다(Kim, 2012).

Kim et al. (2016)은 PC공법에서 부재의 중량화로 인한 운반비 상승, 고용량 양중장비 사용에 따른 공사비 증가 문제 보완을 위해 중공 PC기둥 복합공법을 제안하였으며, 기존 공법과 비교하여 공사관리 측면에서 계층분석적 의사결정 방법(Analytic Hierarchy Process; AHP)기반의 편익-비용 분석을 통해 현장적용 가능성을 검토하였다. 이 연구에서 제시한 평가항목은 구조성능, 시공용이성, 공사기간, 공사비를 제시하였다. 또한, Kim et al. (2019) 연구에서는 공공 건축물의 제로에너지빌딩 개발에 따른 비용·편익 분석을 진행하였으며, 여기서 기존 공사안을 기초로 제로에너지빌딩 대안을 새롭게 작성하고 두 대안간 $\Delta B/\Delta C$ 값을 도출하였으며, 기준공사비 대비 추가공사비 증분을 ΔC 로 산정하고, 편익(ΔB)는 제로에너지 빌딩 계획에 따른 운영비 절감(원/kWh*y) 측면과 에너지사용량 감소(kWh/y)에 따른 사회적 편익 측면으로 나누어 산정하였다.

본 연구에서는 PC 공동주택 경제성 분석 모델을 일반적인 건설사업 추진의 타당성 관점보다는 앞서 기술한 2개 연구 사례와 같은 타공법과의 적용 효과를 정량적으로 비교하는

것에 초점을 맞춘 분석을 목적으로 설정하였기 때문에, 비용과 편익을 함께 고려할 수 있는 의사결정 프레임워크 초안을 구축하고자 하였다. 본 연구에서 비용 관점 모델은 PC 생산 및 공사단계의 비용을 고려하였으며, 운영시 발생하는 유지관리비는 대안별 차이가 발생할 경우 추가적으로 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 편익 관점 모델은 앞서 연구 동향 고찰에서의 OSC 지표를 고려하였으며 특히, CIRIA (2020)의 연구에서 Time 관점 공사기간 단축, Quality 관점에서 제시된 하자보수 지표를 고려한 품질향상에 따른 하자보수비용 절감 및 재해발생을 완공단계에서 편익으로 포함하고, 운영단계에서는 발생하는 에너지량을 고려하여 에너지 절감 비용은 편익으로 포함할 수 있도록 제안하였다.

4.2.2 비용(Cost) 모델

비용은 산업 이해관계자들에게 가장 관련성 높은 관심사라고 얘기할 수 있을 것이다(Blismas et al., 2006). 이상적으로는 기록된 프로젝트 비용이 시작부터 완공까지 모든 내·외부 과정, 조달, 컨설턴트 및 건설업자 비용을 포함해 프로젝트 이행을 위해 발주처 또는 고객에게 청구되는 총비용이 되어야 한다(CIRIA, 2020). 하지만, 앞서 모델 개요에서 제시한 바와 같이 본 연구에서의 경제성 분석은 대안의 비교에 목적을 두고 있어, 앞서 기술한 Mao et al. (2016)의 연구 사례에서와 같이 현실적으로 산정이 용이하고 대안간 직접적인 차이가 발생하는 비용으로 범위를 한정하고자 하였다. 이러한 비용은 공사비로 대표되며, PC 공동주택은 크게 공장제작(RC 공동주택의 경우는 공장제작 제외), 현장조립 단계의 각 공종별 직접공사비(재료비, 노무비, 경비)와 간접공사비를 포함하였다. 단, 여기서 OSC기반 PC공법 적용에 있어 골조외 마감이나 기계/소방/전기/통신 공종도 향후 공장 제작과 연계될 수 있는 점을 고려하여 이를 공사비 범위에 포함하였다.

4.2.3 편익(Benefit) 모델

(1) 공사기간

모듈러 공법의 가장 큰 특징은 공기 절감이 가능하다는 점이며, 이 효과는 현장관리비 등 제경비의 절감 효과와 불확실성에 따른 리스크를 줄일 수 있다는 점이다. 이와 별개로 임대를 위한 건축물의 경우 공기단축에 따라 추가적인 임대수익을 기대할 수 있으며, 개발사업자의 금융비용 절감도 가능하다(Cho, 2014). 공기 관점에서 최근 PC공법 적용에 따른 효과 기대가 큰 시설물은 지식산업센터 및 물류센터로, 이는 시공사가 직접공사비를 조달하는 시스템이라서 공기가 빨라지면 금융비용을 줄일 수 있기 때문에 공기가 중요한 검토요인으로 작용하고 있다. 실제 재래식 공법(21개월)에서 PC공법 적용으로 5개월의 공기단축 효과를 얻은 아파트형 공장 건설 사례도 있다(Kim & Yun, 2020). 공동

주택의 경우에도 공기단축을 통한 빠른 완공은 현장 간접비용 및 금융비용 감소 효과를 기대할 수 있으며, 무엇보다 다수의 주택을 빠른 시기에 국민에게 공급할 수 있는 장점이 크다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제시한 경제성 분석 모델에서는 PC 공동주택 적용시 공기 단축에 따른 간접공사비, 금융비용을 편익으로 포함하였다. 단, 향후 연구에서 공동주택 공사에서 1일 공기단축시 금전적 효과를 산정할 수 있는 기준에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

(2) 하자보수

우리나라의 공동주택 주거비율은 1978년에 5.2%에 불과하였으나 2018년에는 61%로 증가할 만큼 공동주택의 주거비율이 높아졌다. 이에 따라 공동주택 입주자의 품질에 대한 눈높이 또한 높아졌으며, 하자보수에 대한 요구도 증가하였다. 하지만 이러한 높아진 입주자의 안목과 기대치에 부응하지 못하는 공사품질로 인하여 시공사와 입주자 간에 하자보수로 인한 분쟁이 증가하였으며, 이는 하자소송까지 이어지고 있는 실정이다(Pyeon et al., 2021).

Oakley (2018)는 OSC 프로젝트에서 완료 전 확인해야 하는 ‘예상 밖의 소소한 문제(snagging)’를 다루는 비용이 50% 감소함을 보고한 바 있다. 또한, 앞선 연구 동향 고찰에서의 CIRIA (2020)의 연구에서 OSC Quality 관점에서 제시한 하자보수 지표를 일반적으로 준공후 12개월 기준으로 건설비 10만 파운드당 하자책임기간(defects liability period)에 기록된 완료 후 결함의 수로 제시한 바 있어, 본 연구에서는 공동주택 사용자 관점에서 프로젝트 품질을 비교하는 주요한 인자로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 하자보수를 공동주택 사례를 기반으로 사례당 평균 하자보수비 및 하자분쟁 발생시 판결금액 절감액을 사회적 편익에 포함하였다. 단, 향후 연구에서 상세한 산정기준 및 적용 가능성에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

(3) 재해발생

건강 및 안전을 잠재적으로 개선할 수 있다는 점이 OSC 건설의 주요 측면이며, 환경 및 작업 조건을 통제할 수 있는 능력 때문에 공장내 작업은 건설현장에서의 작업보다 사고와 부상의 위험을 낮출 수 있다(Buildoffsite, 2013). 영국산업안전보건청(Health and Safety Executive; HSE)는 2013년부터 2018년까지 5년간의 통계자료에서 제조업의 2.1%, 전체 산업의 1.7%에 비해 건설산업 근로자 중 2.4%가 부상을 겪었고, 제조업의 0.92명, 전체 산업의 0.45명이 비해, 건설산업 사망률이 근로자 10만명당 1.31명이었으며, 이중 49%가 추락이 원인임을 제시하였다(HSE, 2019).

이러한 배경에서 앞선 연구 동향 고찰에서의 CIRIA

(2020)의 연구에서는 OSC Quality 관점에서 제시한 Health & Safety 부문의 재해빈도를 지표에서는 부상, 질병, 위험한 사고발생 보고에 관한 규칙 2013 (RIDDOR)에 따른 프로젝트에서 발생한 부상 및 사망자를 기준으로 10만 인·시(Hours)당 재해수를 측정하도록 제시하였다. 이는 건설프로젝트에 해당하는 것으로, 현장 외 공급업체부터 정보 획득을 전제로 하고 있다. 또한, 이러한 사망 및 부상의 사회적 비용은 HSE에서 발표한 단위비용을 통해 계산할 수 있도록 제시하였으며(Table 8), 이 비용은 인간적 비용(개인의 삶의 질, 삶의 상실에 미치는 영향)과 금전적 비용(생산성 손실 및 생산비)을 포함하여 사회와 개인, 고용주나 정부에 대한 비용으로 확인될 수 있다. 따라서, 본 연구에서도 이러한 유사 지표를 활용하여 OSC의 현장작업 최소화로 안전사고 발생 감소에 따른 편익을 포함하였으며, 향후 국내 공동주택 사례를 기준으로 이러한 현장 발생 재해수와 사회적 비용을 측정할 수 있는 체계 검증이 필요하다고 판단된다.

Table 8 . Cost to society per case (HSE, 2016)

Field	Human Costs	Financial Costs	Total Costs
Fatal injuries	£ 1,203,000	£ 414,200	£ 1,617,200
Non-Fatal injuries- 7 or more days	£ 19,700	£ 10,400	£ 30,100
Non-Fatal injuries- up to 6 days	£ 300	£ 550	£ 850
Ill-health - 7 or more days	£ 20,000	£ 17,700	£ 37,700
Ill-health - up to 6 days	£ 360	£ 620	£ 980

(4) 에너지효율

OSC는 더 나은 통기성, 낮은 단열 격차, 사전 조립 및 사전 위탁된 유닛을 활용하여 현장 시스템보다 예측치에 더 가깝게 기능하는 좀 더 효율적인 기계 및 전기 시스템을 갖춤으로써 건물의 품질을 개선할 수 있고, 이를 통해 건물의 에너지 효율을 개선할 수 있는 잠재력이 있다(Buildoffsite, 2013). 또한, McKinsey (2019) 보고서에서 인용된 사례에서는 모듈러 건축으로 전환한 후 건물의 에너지 비용이 25% 절감되었다고 제시하였다.

즉, 이러한 관점에서 PC 공동주택에서도 기존 방식과 비교해 제작·조립 정밀도 향상을 통한 운영중 에너지사용량 감소를 통한 비용 절감 효과를 획득할 가능성을 제시하고 있는 것으로 판단된다. 이를 위해서는 향후 PC 공동주택에서 건물에서 발생하는 연간 에너지 사용량 추산치를 주기적으로 측정할 수 있어야 하며, PC 공동주택 세대의 기밀효과 및 건물자체의 통기성과 외단열 효과에 대한 지속적인 기술 개발과 검증도 필요할 것이다.

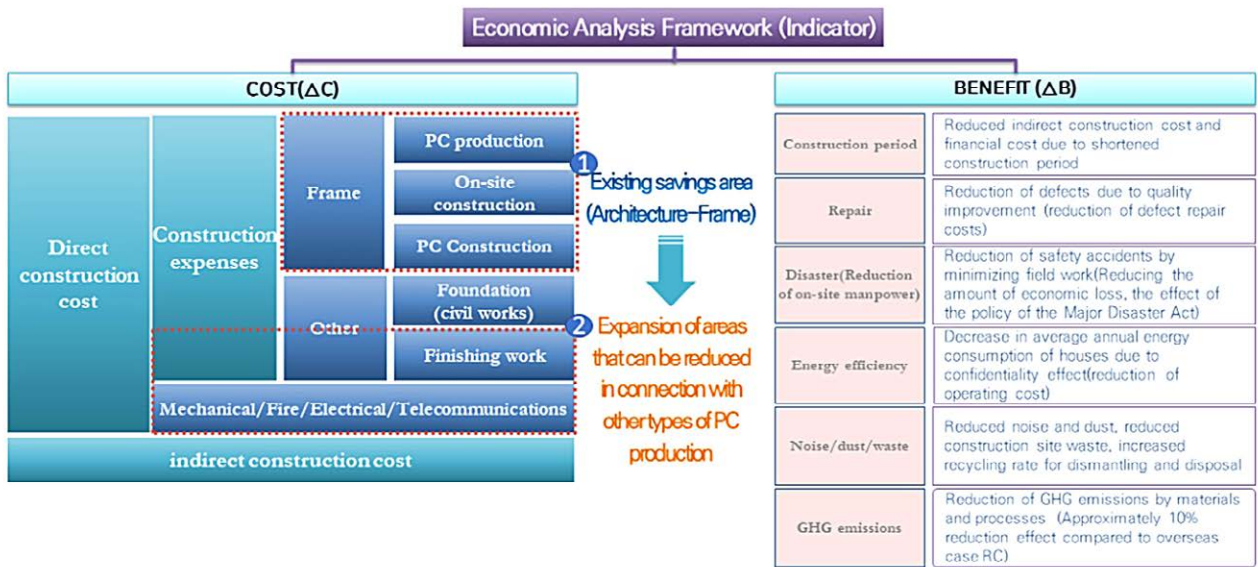


Fig. 2. PC apartment house comprehensive economic analysis framework

(5) 소음, 분진, 폐기물

앞선 연구 동향 고찰에서의 국토교통성(2019)에서는 공동주택 12층 규모 1동을 기준으로 RC구조 대비 PC구조 적용에 따른 분진 및 소음 발생량을 비교하여 PC 공동주택 현장에서 분진 및 소음 발생량이 절감됨을 제시하였다. 이는 OSC기반 PC공법에서 현장 인력이 50%이상 감소되고, 거푸집 설치·해체 및 콘크리트 현장 타설 작업이 사라지고 부재 양중과 설치가 주가 되기 때문에 작업자의 작업 시간이 상대적으로 짧아지는 영향 때문이다. Kim(2004)은 PC 공법 적용시 내·외부 비계작업 최소화(RC대비 70~80% 절감), 공업화 생산에 의한 현장조립으로 폐기물 발생감소(RC대비 70% 정도 감소) 등 폐기물 발생 최소화로 환경친화적 공사관리가 가능함을 설명하였다. 또한, Wuni and Shen (2019)의 연구에서도 OSC의 Sustainability 성과에서 현장의 먼지/소음, 폐기물 절감을 제시하였고, CIRIA (2020)의 연구에서도 Environmental considerations 부문의 폐기물 발생을 고려하였다. 따라서 현장작업 최소화는 현장에서 발생하는 작업 부산물 또는 폐기물이 감소하는 효과도 기대할 수 있으므로 이러한 환경영향 및 처리 비용 절감 편익을 포함하였다.

(6) GHG 배출

지구온난화와 기후변화는 지속가능한 개발을 위한 중요한 키워드가 되었다. 세계적으로 건설은 국가 온실가스 배출에 있어서 상당한 비중을 차지하며 기후변화 이슈에 중요한 역할을 하고 있다. 건설업은 각국에서 중요한 에너지 소비 분야이고 환경부하에 영향을 주는 분야이기 때문이다. 국가 통계포털(KOSIS)에 따르면 최근 10년간 건설업은 국내총생산(GDP)의 4.8 ~ 6.0%를 차지하며 한국경제에 있어

역사적으로도 중요한 역할을 하여 왔다(Jung et al., 2021). 해외 주요국은 온실가스 감축을 위해 탄소발자국(Carbon Footprint)⁴⁾ 관련 정책을 운영하는 등 최근 이에 대한 세계적인 관심이 증가하고 있으며, 국내에서도 2050 탄소중립 달성을 위한 전 산업분야에서 탄소 감축 목표를 수립하고 있다. 앞선 Mao et al. (2013)의 연구 동향 고찰에서도 OSC와 전통적 공법의 현장 적용에 따른 온실가스 배출량을 비교한 결과 약 3.2%가 절감됨을 제시한 바 있으며, 최근 OSC를 정책적으로 추진하는 대표적인 국가인 영국의 Buildoffsite에서도 탄소 감축에 대한 관심이 높아지고 있다.

따라서 본 연구에서도 PC 공동주택의 탄소배출절감에 따른 사회적 편익을 포함하였으며, 향후 연구에서 특히 국내 여건을 고려한 PC 공장제작 및 현장조립 단계별 탄소배출량 산정 기준에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

다음 (Fig. 2)는 앞서 기술한 비용과 편익을 기반으로 타 공법과의 적용 효과를 정량적으로 비교할 수 있는 PC 공동주택 경제성 분석 모델 프레임워크(안)를 공사비(Cost)와 편익(Benefit) 관점에서 구조화하여 제시하였다. 여기서 공사비는 현재 PC대상인 골조(Frame) 부분을 ①차적으로 고려하였으나, 향후 마감, 기계/소방 등 타공종 PC제작 연계 고려한 ②차 범위도 함께 정의하였다. 이는 공동주택 사업시 기존 RC 공법과 비교하여 공사비 증가분과 다양한 편익 향

4) 개인 또는 조직활동에 의해 직·간접적으로 발생되거나 어떤 생산물의 생애 전 단계에 걸쳐 누적 배출된 이산화탄소의 총량을 측정하는 것으로, 교토의정서에 정의된 6가지 주요 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 과불화탄소, 수소불화탄소, 육불화황)의 직·간접적 배출량을 이산화탄소 등가물(CO₂e)로 변환 측정하는 것임(KEA 에너지 이슈 브리핑 제159호 2021.4.12.)

상 효과를 함께 비교하여 포괄적인 관점에서의 경제성을 분석할 수 있는 기준으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 건설공사 노동 및 현장여건 변화에 따른 OSC 공법 적용 확산 배경속에서, 공동주택을 대상으로 OSC 및 PC공법과 관련한 기술 현황과 공사비 관련 문헌을 조사·고찰하고, 기존 RC 및 PC공법이 적용된 최근 공사비 사례를 수집하여 비용 구조를 파악하였다. 최근 LH에서 수행된 공동주택 PC공법 적용 사업 공사비 내역 사례와 이와 유사한 규모(대지면적, 연면적, 세대수 등)를 가진 RC공법 적용 공사비 내역 사례를 기반으로 공사비 구성 내역 비율 및 규모에 대한 차이를 비교·분석하였으며, 그 결과 PC공법 적용(PC설계비 제외)의 경우 RC공법만 적용하는 경우에 비해 골조 단위물량(m)당 공사비가 약 70% 내외로 증가(RC 공종 합계 기준 50%)함을 도출하였다. 특히, PC공법 적용 사례 전체 골조공사비중 PC비중이 90.2%로 'PC제작비'가 54.8%, 'PC조립' 28.5%, '운반'이 6.89%를 차지하여, PC제작 및 조립에서 비용 절감이 필요할 것으로 판단하였다.

또한, PC공법 현장 적용에 따른 공사비의 다양한 관점에서의 경제성을 분석하기 위한 프레임워크 제시하고자, 국내·외 선행연구 등 문헌고찰을 통하여 OSC기반 PC 공동주택의 경제성과 연관된 요인들을 도출하고, 분석 방법론을 제시하였다. 분석 방법론은 일반적인 경제성 분석의 하나인 비용·편익 분석에 기반하되 타공법과의 적용 효과를 정량적으로 비교하는 것에 초점을 맞추어 비용과 편익을 함께 고려할 수 있는 의사결정 프레임워크 초안을 구축하였다. 경제성 분석을 위한 프로젝트 데이터 취득 및 비용·편익 산정 범위는 PC부재를 공장에서 설계·제작하고 공장에서 현장까지 운송하고 현장에서 설치·시공하는 공사단계 및 시설운영 단계까지의 생애주기 관점을 고려하였다. 특히, 편익의 경우 OSC 기술적 장점이 반영된 공사기간, 하자보수, 재해발생, 에너지효율, 소음/분진/폐기물, 온실가스 배출 지표를 제시하였다.

본 연구에서 제시한 PC 공동주택 경제성 분석 프레임워크는 지표별 정량적인 산정방식에 대한 검토가 미흡한 한계를 가지므로, 향후 세부 지표별 측정 기준 적용성과 산정방식에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단한다. 이를 통해 최종적으로 OSC 기반 PC 공동주택 산업 활성화를 위한 발주처의 정책 검토 및 사업추진시 설계단계 의사결정을 지원하기 위한 근거를 마련하는 기준으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22ORPS-B158109-03).

References

- Alazzaz, F., and Whyte, A. (2014). "Uptake of Off-site Construction: benefits and Future Application." *World Academy of Science Engineering and Technology International Journal of Civil Architectural Structural and Construction Engineering*, 8(12), pp. 1148-1152.
- Bae, B.Y., Kang, T.K., Shin, E.Y., and Kim, K.H. (2020). "A Study on the Policy Agenda for Activating PC Apartment using Focus Group Interview (FGI)." *Journal of Korea Academy Industrial Cooperation Society*, 21(12), pp. 888-895.
- Blismas, N., Pasquire, C., and Gibb, A. (2006). "Benefit evaluation for off-site production in construction." *Construction Management and Economics*, 24(2), pp. 121-130.
- Buildoffsite (2013). OFFSITE CONSTRUCTION: Sustainability Characteristics.
- CIRIA (2020). Methodology for Quantifying the benefits of offsite construction.
- Cho, B.H. (2014). "Eight Factors Affecting the Economics of Modular Construction", ARCHITECTURE(ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA), 58(05), pp. 42-46.
- Cho, M.J., and Kim, J.S. (2015). "Economic Evaluation of Underground Parking Lot PC Structural System that is Suitable for Long-Life Housing." *Journal of the Korean housing association*, 26(2), pp. 103-110.
- Cho, T.J., and Choi, J.S. (2015). "Case Studies: Schedule Delay Factors and Delay Prevention Program for Concrete Frame Works in Apartment Construction Project." *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 11(1), pp. 9-18.
- Hansung PCC (2016). Precast Concrete (Special Specifications).
- Hong, J., Shen, G.Q., Li, Z., Zhang, B., and Zhang, W. (2018). "Barriers to promoting prefabricated construction in China: a cost-benefit analysis." *J. Clean. Prod.*, 172, pp. 649-660.
- HSE (2016). Construction Statistics in Great Britain, 2019, Health and Safety Executive, London, UK.
- Hwang, J.H. (2014). "Development of Integrated Management Process for Precast Concrete construction method based on BIM." MS thesis, University of Seoul.
- Hwang, Y.H. (2019). "Development of hybrid PC method

- for apartment underground parking lot.” DAELIM TECHNICAL REVIEW 2004_SUMMER, pp. 94-105.
- Jeong, Y.S., Mun, S.H., and Cho, S.H. (2021). “Analysis of Greenhouse Gas Emissions in the Construction Sector.” *Journal of Climate Change Research*, 12(4), pp 53-62.
- Kim, H.S. (2012). “A Study on the Economic Feasibility of Green Home Project.” Ph.D thesis, Kangnam university.
- Kim, J.M., Noh, H.E., and Lee, N.H. (2019). “Cost Benefit Analysis of Public Zero Energy Building -focusing on Impact of ZEB Obligation Policy-” *Korea Environmental Policy and Administration Society Conference*, pp. 63-64.
- Kim, J.S. (2005), “Why is P.C. System good for parking lot building?” *SK Building Technology Information*, 3, pp. 10-13.
- Kim, S.H. (2004). “Apartment basement parking lot PC conversion.” *SSANGYONG CONSTRUCTION TECHNOLOGY REVIEW 2004_SUMMER*, pp. 32-39.
- Kim, Y.N., and Yun, H.D. (2020). “Precast Concrete Method of Knowledge Industrial Building & Flatted Factory.” *ARCHITECTURE(ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA)*, 64(7), pp. 21-26.
- Lee, J.K., and Kim, S.Y. (2013). A study on general guidelines for conducting a preliminary feasibility study for public corporations and quasi-governmental institutions. KDI.
- Mao, C., Xie, F., Hou, L., Wu, P., Wang, J., and Wang, X. (2016). “Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China.” *Habitat Int.*, 57 (2016), pp. 215-222.
- Mckinsey & Company (2019). *Modular construction : From projects to products*, Capital Projects&Infrastructure.
- Mckinsey & Company (2020). *The next normal in construction*.
- The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2019).
- Oakley, M. (2018). *The value of offsite construction to UK productivity and growth: A WPI economics report for Heathrow*, WPI Economics, Middlesex, UK.
- Pan, W., and Sidwell, R. (2011). “Demystifying the cost barriers to offsite construction in the UK.” *Construction Management and Economics*, 29(11), pp. 1081-1099.
- Pyeon, S.J., Kim, J.H., Kim, G.Y., Choi, G.C., Son, M.J., and Nam, J.S. (2021). “A Study of the Prevent Measure by Case Analysis of Apartment Building Defect Lawsuit.” *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 21(04), pp. 257-268.
- Tim V., and Roger C. (2004). “Modern methods of construction in Germany playing the off-site rule.” CIRIA, p. 3.
- Thomas F. (2005). “Final Report Offsite Manufacture in Australia.” CRC, p. 9.
- Wuni, I.Y., and Shen, G.Q.P. (2019). “Holistic Review and Conceptual Framework for the Drivers of Offsite Construction: A Total Interpretive Structural Modelling Approach.” *Buildings*, 9(5), p. 117.
- Yun, W.G., Shin E.Y., and Kang, T.K. (2021). “Analysis of Factors for Improvement of Economic Feasibility of Construction Cost to Spread Application of OSC Construction Method for Apartment Housing.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 22(6), pp. 55-63.

요약 : OSC는 기획, 설계, 시공, 유지보수 등의 건설생산 전 과정에 걸친 공급망과 가치사슬의 한 유형으로 건설현장이 아닌 공장 등 제 3의 장소에서 제작한 후 현장으로 운반하여 설치 및 시공하므로써 최종 목적물을 생산하는 방식이다. 본 연구에서는 PC공법 및 RC 공법을 적용한 공동주택 사례를 각각 1개에 대하여 공사비를 비교하였다. PC공법 적용(PC설계비 제외)의 경우 RC공법만 적용하는 경우에 비해 골조 단위물량(m²)당 골조공사비가 약 70% 내외로 증가(RC 공중 합계 기준 50%)함을 도출하였다. PC공법 적용 사례 전체 골조 공사비 중 PC비중이 90.2%로 'PC제작비'가 54.8%, 'PC조립' 28.5%, '운반'이 6.89%를 차지하여, PC제작 및 조립 부문에서 비용 절감 노력이 필요할 것으로 판단하였다. 또한, 비용과 편익을 함께 고려할 수 있는 의사결정 프레임워크 초안을 구축하였다. 편익의 경우 OSC 기술적 장점이 반영된 공사기간, 하자보수, 재해발생, 에너지효율, 소음/분진/폐기물, 온실가스 배출 지표를 제시하였다. OSC기반 PC 공동주택 도입 의사결정을 지원하기 위한 적용 효과 근거를 마련하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 탈 현장 공장생산 기반 건설(OSC), PC공법, 공사비, 공동주택, 경제성분석
