초고층 주상복합 프리캐스트 콘크리트 구조물의 경제성 분석에 관한 연구

A study on the economic analysis of high-rise residential-commercial building that is made by precast concrete

김 범 기* 석 성 준* 이 웅 균** 안 성 훈** 강 경 인***
Kim, Bum-Ki Suk, Sung-Joon Lee, Ung-Kyun, An, Sung-Hoon Kang, Kyung-In

Abstract

The increase of high-rise residential-commercial buildings is required to cut down a term of works and the cost of construction. Reinforced concrete structures and steel framed reinforcement concrete that are commonly used have the difficulty in reducing them. Therefore, the purpose of this study is to propose a new precast concrete complex system and to analyze its economical feasibility. The economic analysis is performed through comparing the cost of a high-rise reinforced building that was already constructed with that of the new proposed precast concrete system, which is limited to structural frame work of typical floors. This study shows that the proposed precast concrete complex system is economical. Further research should be directed at including the influence of a term of works.

키워드 : 초고층 빌딩, 프리캐스트 콘크리트, 경제성 분석
Keywords : High-Rise Buildings, Precast Concrete, economic analysis

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

도심 상주인구 감소로 인한 도심공동화 현상을 막기 위해 정부의 주상복합 건축물의 건설 장려정책과 건설업체의 사업 다각화에 대한 노력, 그리고 주택시장의 수요증가에 힘입어, 초고층 주상복합 건물 수는 폭발적으로 증가하고 있다. 90년대 후반기부터 약 450여동의 주상복합건물이 국내에서 시공되었고, 그 건설물량은 약 16조원에 이른다. 이와 같이 주상복합건물은 근래에 이르러 국내 대형 건설 업체에게 가장 중요한 수주공략 대상이 되었다. 주상복합 건물에 대한 급격한 수요 증가와 건설사간의 경쟁으로 다양한 건설기술이 이미 도입·시공되었고, 시공환경의 변화, 건설기술의 발달에 따라서 구조시스템에 대한 선호도도 급격하게 변화되고 있다.

이와 같이 초고층 건축물에 대한 수요는 증가하였지만 이에 따른 인력, 공기 및 기술이 부족한 실정이다. 현장타설 콘크리트 구조물의 경우에 있어서 Hutchinson(1999)은 그의 연구에서 지하 5층, 지상 40층 주거용 건물 기준으로 골조공사를 비교했을 때, 미국의 7개월 공기에 비해 한국의 초고층 건축물은 14개월이 걸린다고 밝히고 있다. 일반적으로 건설공사의 공기를 단축하기 위해 기존에 제시된 방법으로는 인력의 투입, 작업시간의 연장, 새로운 공법의 적용 등을 꼽을 수 있다. 그러나 인력 투입의 경우에 있어 2020년에는 숙련공 12만 명, 비숙련공 29만명이 인력 수급에 있어 문제가 예상된다. 또한 작업시간의 연장에 있어 여유인력의 확보에 어려움이 따른다고 본다. 따라서 고기능을 요하지 않으면서 공기단축에 효과적인 초고층 건축물의 선진 기술 도입이 요구된다.

앞서 제시한 문제점 등을 극복하기 위해 국내의 초고층 건축물은 대부분 철골철근콘크리트 구조형식으로 건축되고 있다. 그렇지만 철골철근콘크리트 구조물로 지어진 초고층 건축물은 공기의 이점에도 불구하고 현장타설 철근콘크리트 구조물에 비해 순공사비가 비싼 단점을 지니고 있다. 그러므로 현장작업을 최소화하고 공사품질을 보장할 수 있으며 공기를 단축시킬 수 있는 가장 경제적이고 합리적인 공법인 PC(Pre cast Concrete)의 활용이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 현장 투입 인력을 줄이고, 콘크리트의 품질확보가 가능한 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete; PC)공법을 모색하여 이에 따른 초고층 주거용 건축물의 타당성에 대한 경제성 측면에서 분석하고자 한다.

* 고려대학교 건축공학과 석사과정
** 고려대학교 건축공학과 박사과정
*** 고려대학교 건축공학과 교수, 공학박사
본 연구는 건설교통부의 건설기술 연구개발 사업에 의한 연구결과의 일부임 (과제번호: C103A1000025-04A0200-02230)

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구는 앞서 제시한 초고층 건축물의 수요에 따른 증가에 대한 기존의 문제점을 극복하기 위해 적용할 PC공법의 타당성에 대한 경제성을 분석하는 것이다. 건설 공사의 신기술 적용에 있어 품질, 원가, 안전, 공정 등의 요소들을 모두 검토하여야 하지만 경제성을 확보하지 못하면 실용화하기에는 어려움이 따를 것이다. 따라서 기존 RC로 지어진 건물과 제안하고자 하는 PC 건물의 경제성을 기준층의 공사비로 제한하여 분석하고자 한다. 여기서 고려할 요소들로는 골조 수량 및 골조 공사비, 공사기간, 연면적, 층고 증감을 반영한 층수이다. 본 연구에서 제시하는 접합부의 구조적 성능 검증은 완료되었으며 이에 대한 경제성의 분석에 초점을 맞추도록 한다.

본 연구는 기존의 PC접합방식을 알아보고 본 연구에서 제시하는 프로토타입 구조 시스템을 소개한다. 이를 실사례에 적용시켜 금액을 비교하여 경제성을 평가하도록 한다.

2. 국내 PC 접합

2.1 국내 PC 접합 방식

종래의 PC 접합방법으로는 콘크리트 혹은 모르타르로 접합하는 습식접합(web-joint), 용접에 의한 접합, 볼트나 인서트에 의해 접합하는 기계적으로 접합하는 방식이 있다. 습식접합(web-joint)은 콘크리트 또는 모르타르로 접합하는 방식으로, 접합하는 부분에 부재 제작 시 미리 매설하여 놓은 철근 또는 철판끼리 용접 또는 그 부분에 콘크리트 또는 모르타르를 충진하여 고정하는 방법이다. 용접에 의한 접합은 접합부에 제작에서 미리 매설하여 놓은 철근 또는 철판을 서로 용접하여 접합하는 방식이다. 용접 후 이 부분에 방청이나 내화를 위하여 모르타르가 충진되는데 이것은 접합부의 강도에는 직접 관계가 없다. 기계적으로 접합하는 방식은 볼트나 인서트에 의해서 접합하는 방법으로서 공법 자체는 극히 간단하지만 시공상의 정밀도를 요하고 구조적인 강성과 경제성이 떨어지는 결점이 있다.

2.2 국내 PC 접합 기술

국내 PC 접합기술은 1970~80년대 사용되던 완전 PC공법을 많이 사용하여 왔다. 이 공법의 콘크리트 충진 방식 조인트는 밀실하지 못하고 결로 및 누수를 발생시켰다. 이후 완전 PC의 결함을 보충한 'RC Wall + PC 슬래브 공법', 'PC WAll + RC 슬래브 공법', 'PC Wall + 하프 슬래브', 'RC Wall + 하프 슬래브 공법' 등과 같은 조인트가 개발되어 현재 사용되고 있지만 기존 완전 PC에서 오는 문제점인 결로, 누수 부분에 중점이 맞추어져 있다.

국내 PC 업체 중 하나인 S사에서는 종전의 PC접합의 문제점을 개선하기 위해 BCS(Bar Connection Sleeve)를 이용한 기둥 접합방법을 제안하였다. BCS란 마찰력을 증대시키기 위하여 내부에 요철을 둔 원통형 슬리브로서 슬리브 내부에 이형철근을 서로 맞대어 삽입하고, 그 철근과 슬리브 사이를 무수축성 고강도 모르터로 충전·경화시켜 이형철근 서로를 일체화시키도록 고안된 joint hardware이다.

2.3 최근 사용되는 PC공법

1) PC 복합화 공법

PC 복합화 공법이란 재래공법과 PC공법의 장점을 조합시킨 합리화 공법의 하나로서, 건물의 각 부위별로 PC와 철근콘크리트나 철골 또는 철골철근콘크리트를 적절히 조합, 시공방법의 효율성을 최대화하여 골조를 구축하는 최적화 공법이다.

따라서 PC복합화 공법은 요소기술의 확보뿐 만아니라 현장의 제반 여건을 고려하여 목적하는 바에 맞게 적절한 공법들을 선택하고 또한 그 공법들을 조합하고 평가하는 소프트 기술의 확보가 뒷받침되어야만 한다.

2) Hi-Beam(Hybrid & Integrated Beam) 공법

Hi-Beam이란 장스판의 보를 양단부는 철근콘크리트로, 중앙부는 철골로 제작한 PC부재를 말하며, 보의 단부와 기둥에는 압축력에 강하며 강성이 높은 철근콘크리트를 적용하고 보의 중앙부에는 가볍고 장스판의 확보가 유리한 강재를 적용하여 합리적으로 복합 구조형식을 실현하는 공법이다. 12 ~ 20 m의 장 스판을 구축할 경우에 가장 경제적인 공법이다.

3) RC 적층공법

철근 콘크리트 라멘(Rahmen)구조의 건물을 PC화 시공하는 첨단 공법으로, 공장 제작된 PC기둥, PC보, Half Slab 등을 현장에서 양중, 조립 한뒤 부재간 접합부와 Half Slab 상부에 콘크리트를 현장타설하여 구조체를 일체화 시키는 복합화 공법이다. 철골공사 등과는 달리 한 개 층씩 층층이 건물의 골조를 완성시켜 나가므로 적층공법이라는 명칭이 붙었다.

PC부재에는 Fc=500kgf/㎠ 정도의 고강도 콘크 리트 사용이 용이하므로 지금까지 철골조 또는 철골철근콘크리트(SRC)조로만 가능했던 20층 이상의 초고층 건물도 철근콘크리트(RC)조로 시공하는 것이 가능해져 공사비가 대폭 절감되는 효과를 볼 수 있다.

초고층 주거용 건물의 경우, 최근 많이 지어지고 있는 철골조 건물이 진동에 취약하고 내화성능이 떨어지는 반면 철근콘크리트로 지어진 건물의 경우 주거성이 훨씬 뛰어나므로, 이웃 일본에서는 철근콘크리트조가 20층 이상 초고층 주택의 주류를 이루고 있다. 바로 RC적층공법이 이런 초고층 철근콘크리트조 건물을 짓기에 가장 적합한 대표적인 공법이다.

4) 벽식 복합화 공법

벽식구조의 초고층 아파트를 PC화하는 첨단 공법으로 벽체와 슬래브를 모두 PC화하던 기존 Large Panel System의 PC 아파트 건축공법과는 달리 수직부재인 벽체만 PC화하고 수평부재인 슬래브는 재래방법대로 거푸집 설치 후 배근하여 콘크리트를 타설, 골조를 완성시키는 공법입니다. 구조적 강성을 보다 강화하기위해서 계단실 등 코어 부분은 PC화하지 않고 현장 타설하기도 한다. 발코니의 경우 파라펫 부분은 Solid PC, 바닥은 Half Slab화하여 수평 콘크리트 타설시 합성바닥을 형성하여 일체화 시킨다.

기존의 All PC 아파트보다 구조적 안정성과 일체성이 크게

강화된 공법으로 PC아파트의 가장 큰 단점으로서 PC아파트 사양화의 원인이었던 방수 및 차음 성능이 일반아파트 수준으로 개선할 수 있다. 현장타설 공법에 비해서는 시공성의 향상이 두드러지고, 공기가 10~20% 단축이 가능하며 공사 환경의 개선과 보다 효과적인 안전관리도 가능한 공법으로PC아파트 건축 공법의 장점은 극대화하고 단점은 극소화시킨 합리화 공법이다.

5) 지하주차장 PC화 공법

최근의 아파트 단지는 지하주차를 확대하고 대신 지상공간을 조경 및 주민 편의시설로 제공하는 추세로 규모가 커지고 다층화 되고 있는 지하주차장과 같은 지하구조물의 공사 방법을 보다 효율적으로 개선할 필요성이 있다.

지하주차장 PC화공법은 이런 요구에 부응하기 위하여 RC 적층공법을 지하구조물에 적합하도록 발전시킨 공법으로 골조 Frame을 형성하는 기둥과 보를 PC화하고 슬래브는 Half Slab와 Topping Concrete로 합성 바닥을 형성하는 것은 RC적층공법과 동일하며, 토압을 받는 외부옹벽 및 Rampway만 현장타설 하여 시공한다.

이부분도 PC화가 가능하지만 PC화시 투입공사비가 상당하여 효과에 비해 경제성이 떨어지기 때문에 현장 타설하고 있다. 전체적으로 볼 때 직접공사비는 다소 비싸지만, 공기가 30% 이상 단축된다는 점을 감안하면 간접공사비에서 절감이 가능하여 경제적인 면에서도 충분한 경쟁력을 갖고 있는 공법이다. 더욱이 지하주차장의 고질적인 하자인 균열 발생을 극소화할 수 있으므로 그 시장이 빠르게 확대되고 있는 우수한 공법이다.

6) 반도체 공장 PC화 공법

반도체공장의 특성상, 진동에 강한 구조가 되어야 하므로 부재들이 매우 크고 중량이 많이 나갈 뿐만 아니라 클린룸 설치를 위해 격자보와 같은 별도의 구조부재가 필요하다. 따라서 반도체공장 구조물을 PC화하기 위해서는 첨단기술의 정화인 반도체만큼이나 첨단의 시공 기술이 뒷받침되어야 한다.

TIMING산업인 반도체산업의 특성상 공기단축에 대한 요구에 부응하기 위하여 신뢰도가 높으면서도 시공이 간편한 접합부 설계 및 대형 부재의 조립 시공성을 높인 각종 요소기술들을 개발하여 현장타설 공법 대비 50 ~ 60%의 공기로 골조를 완성할 수 있는 공법이다.

1983년 시작된 국내 반도체공장 건설은 1990년대 중반 이후 재래식 현장타설 공법이 그 한계에 봉착하면서 PC에서 활로를 모색하게 되었고, 1996년 11월 삼성전자의 천안 LCD-TFT 1,2기 라인 공사에 부분적으로 PC공법을 적용한 이래 현재에는 전체 골조를 100% PC화 시공하고 있다.

7) 더블티 슬래브 시스템

더블티(DOUBLE-TEE) 슬래브란 프리스트레스 (PRESTRESS)가 도입된 2개의 「T」 자를 이어 놓은 형상의 단면을 갖는 PC바닥판을 말하는 것으로 더블티 슬래브 시스템이란 이 더블티 슬래브를 사용하여 10~20m의 긴 스판의 구조물을 용이하게 구축할 수 있는 일방향 조이스트(JOIST) 시스템이다.

따라서 대형매장이나 공장 등 긴 경간이 요구되는 대공간 건물에 적합한 공법으로, 최근 국내에서는 주로 철골조로 지어지던 대형 할인매장 건축을 대체할 수 있는 효과적인 공법으로 각광을 받고 있다.

더블티 슬래브 및 PC기둥, 역 T형보(Inverted-T Beam), L형보(L-Shaped Beam)등이 시스템을 구성하는 기본적인 구조부재들이다. 이러한 구조부재들의 연결은 PIN접합이 주가되며 풍압이나 지진력 등 횡력에 대하여는 계단실 등 코어(core)나 전단벽을 통하여 대응하도록 설계된다.

3. 프로토 타입(Prototype) 고찰

본 연구에서는, 기존에 설계되었던 36F 주상복합건물을 Prototype Building으로 선정하여, 새로운 PC 복합구조 시스템에 대해 다음과 같은 내용으로 설계를 수행하였다.

3.1 하중 조건

중력하중 및 풍하중은 「건축물 하중기준 및 해설(2000, 대한건축학회)」를 적용하였으며, 지진하중은 2004년 현재 새로운 내진기준에 대해 개정작업이 진행되고 있는바, 개정중인 「내진설계기준(안), 2004」를 적용하였다.

표 1. 기존 RC 건물과 제안 PC 건물의 공사 개요

구 분	내 용
고정하중	마감 150 kg/㎡
	슬래브자중(220mm) 528 kg/㎡
	천장 30 kg/㎡
	Partition 150 kg/㎡
	계 858 kg/㎡
적재하중	200 kg/㎡
풍하중	기본풍속 30m/sec
	노풍도 A
	중요도 계수 1.1
	건물높이 108m
지진하중	지진구역 1
	중요도계수 1.25
	단주기 설계스펙트럼 가속도 0.225
	주기 1초의 설계스펙트럼 가속도 0.09
	반응수정계수 0.8

3.2 횡력 & 중력 시스템

PC Frame만으로 횡력에 저항하기 위해서, D.D.C(Dywidaq Ductile Connector 이하 D.D.C) System을 적용하여 횡력에 저항할 수 있도록 하였으며, 횡력에 대한 시스템은 콘크리트 기둥과 보로 저항하는 연성모멘트 골조로 계획하였다. 이 저항골조를 PC로 만들기 위하여 새로운 D.D.C System(미국 샌프란시스코 건물에 적용된 아이템)을 도입하여 PC 기둥과 보가 모멘트 Frame이 되도록 하였다. 횡력에 대해서 모멘트를 많이 받는 저층부와 상대적으로 모멘트가 적게 걸리는 상층부를 나누어 힘을 많이 받는 부분은 연속 Frame을 3개로 상층부는 2개로 하여 DDC부재의 비용을 줄이므로 공사비 절감 방안을 제시하였다. 그림 1에서 가로선으로 표시된 부분이

DDC로 연결된 기둥과 보의 부분을 표현한 것이다. 3Span을 연결한 것은 연속 3 Span에 모두 Dywidaq Ductile Connector를 사용한 것이다.

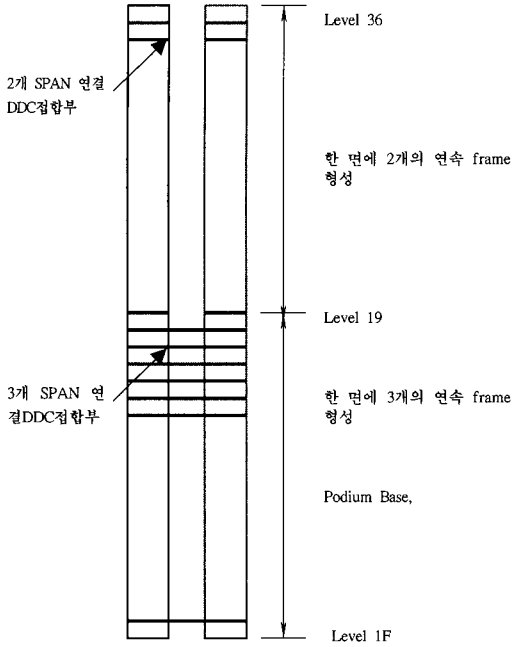


그림 1. 횡력 시스템 제안 모델

중력하중에 대해서는 두께 220mm의 Flat plat slab를 사용하였으며, 바닥진동 Check와 처짐 Check를 수행하여 사용성에 만족하도록 하였다.

각 부재에 걸리는 모멘트에 따라, 1F~17F까지는 그림 2처럼 PC Beam에 D.D.C Rod를 3개 사용하고, 18F~36F까지는 그림 3에서와 같이 D.D.C Rod를 2개 사용하도록 하였다.

3.3 구조개요

그림 2는 제안한 PC의 건물 모델링과 기준층 평면도를 나타낸 것이다. 계단실 및 엘리베이터 부분에 기둥을 넣어 지지하는 형식으로 Core부분 슬래브의 내력이 부족하다면 슬래브를 조금 키우거나 또는 보강근을 삽입함으로써 해결할 수 있다. 제안한 PC공법에서는 그림 3의 (a) 에서 보는 바와 같이 기존의 방식인 습식공법과의 혼용으로써 공사가 복잡해지고 비경제적이 되는 것을 막으면서 건식으로 공사를 진행할 수 있다.(그림 3의 (b)) 이러한 D.D.C 시스템 공법은 Dywidaq사에 의하여 80년대에 개발되어 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 주관하는 PRESSS Program의 실험에서 그 효율성이 검증된 방법이다. DDC 시스템 공법은 Beam Transfer Block을 통하여 보와 기둥을 볼트 접합으로 간편하게 시공할 수 있으며, 기둥 내에 연성 강봉을 삽입하여 기존의 보 단부에서 항복이 일어나는 것과 달리 기둥 안쪽으로 항복을 유도한 것을 특징으로 한다. 볼트 접합으로 시공이 매우 간편하고, 연성능력이 우수하며 콘크리트에 작용하는 피해를 최소화 할 수 있다. DDC 시스템 공법에서 가장 핵심적인 요소는 연성 강봉이다. 연성 강봉은 일반 연성 강재를 재료로 하여 신장력이 매우 뛰어나도록 제작되었으며, 구조물의 모든 변형이 집중되게 된다. Ductile rod는 소성 변형을 일으키더라도 연성능력이 우수하고 압축력이 매우 크게 작용하는 기둥 내부에 삽입되어 있기 때문에 콘크리트에 많은 손상을 일으키지 않는다.

한편 Core내부의 축력은 기둥을 추가하여 해결하고, 엘리베이터나 계단실 등 Opening이 큰 부분들은 슬래브 두께를 증가시키거나 또는 보강근을 추가하는 등의 방법을 사용하여 슬래브 응력을 해결하고자 하였다.

제안 PC에 사용된 재료의 강도는 표 2와 같으며, 표 3은 각 부재의 크기와 종류를 나타낸다.

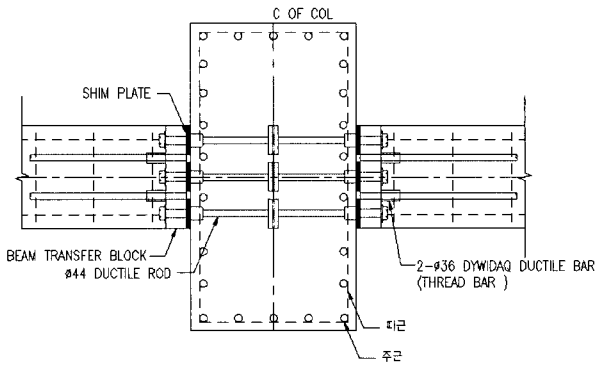


그림 2. PC기둥과 보의 연결 (3개 DDC평면)

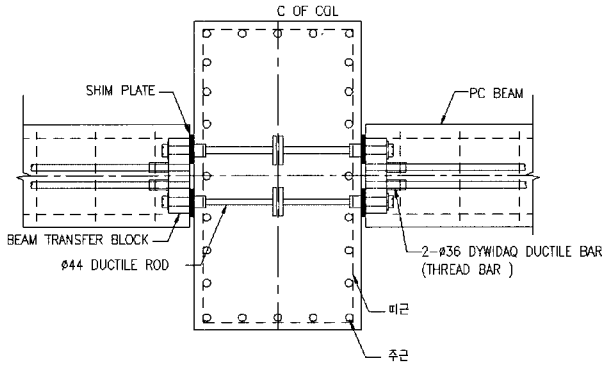
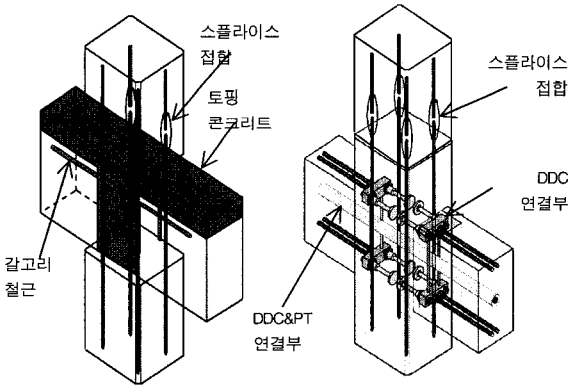


그림 3. PC기둥과 보의 연결 (2개 DDC평면)



(a) 기존 PC 공법 (b) 제안 PC 공법

그림 3. 모델링 및 기준층 평면도

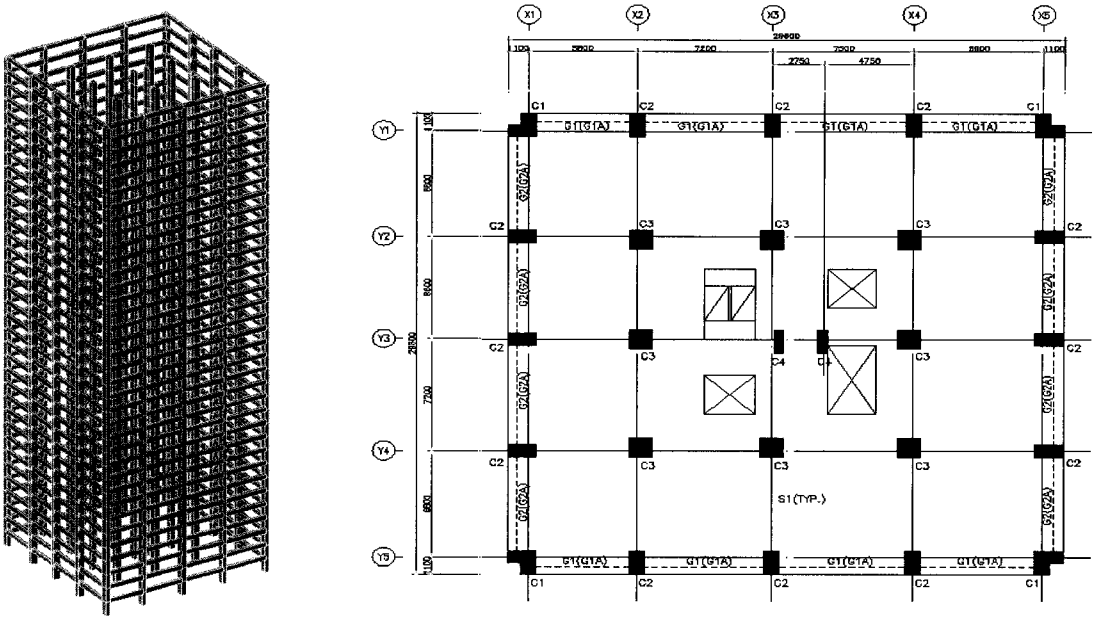


그림 2. 모델링 및 기준층 평면도

표 2. 재료의 강도

재 료		구 분 (강도)
콘크리트	PC 기둥	50MPa
	RC 기둥	50MPa
	PC 보	35MPa
철 근		400MPa
Thread Bar		835MPa, 1030MPa
Dywidaq Ductile Rod		413.7MPa
DDC용 bolt		910MPa

표 3. 부재의 크기 및 종류

구 분		크 기	종 류
기 둥	C1	800X1500+800X700	PC
	C2	800X1500	PC
	C3	1200X1200	RC
	C4	500X1500	RC
보	G1, G2, G1A, G2A	500X1000	PC
슬래브	S1	THK. 220	RC

3.3 층고 계획

층고를 절약하기 위해서 층고절약의 장점을 가진 무량판 슬래브 (Flat Plate slab)와 테두리 보를 활용하여 층고계획을 세웠다. 시공적으로 2.8m는 설비공간의 미확보로 인하여 불가능하다고 판정하여 층고를 3m로 조정하였다. 슬래브 밑 설비공간을 280mm로 확보하도록 하였으며, 층고 3m에 따른 단면계획은 그림 2와 같다.

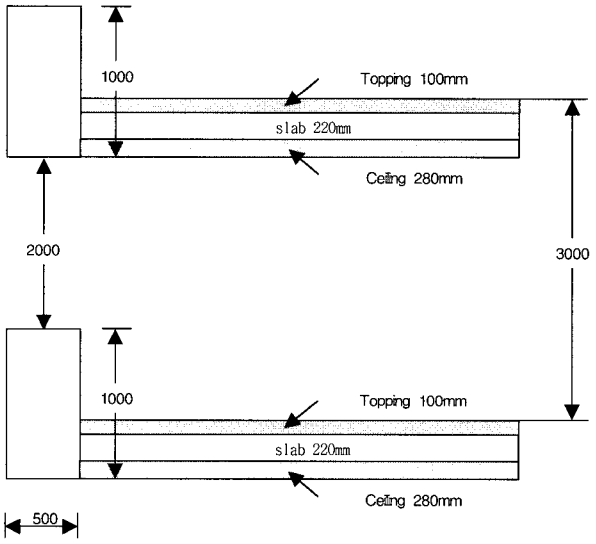


그림 4. 층고 계획

4. 경제성 분석

4.1 분석 대상

본 연구에서는 제안된 PC 공사의 경제성 부분은 기존에 RC로 건설된 A 주상복합건물과의 공사비 비교분석을 통해서 이루어 졌다. 공사비 비교분석의 범위는 기준층이라 할 수 있는 아파트 부분(7층~34층)의 공사비를 대상으로 제한하였고, PC 공법이 적용되는 부분은 바로 지상 기준층인 아파트 부분이기 때문에 지하층과 지상 저층 부분(1층~6층)의 근린생활시설 부분의 공사비는 배제하였다. 본 연구에서 비교분석 대상의 공사 개요는 다음 표 1과 같다.

또한 기존 RC건물과 제안 PC건물의 경제성 분석을 위한 고려 요소는 골조 수량 및 골조 공사비, 공사기간, 연면적, 층고증감을 반영한 층수이다. 이러한 내용을 기본으로 하여 기준층의 수량을 비교해 보고, 기존 RC건물 28개 층의 총 수량과 제안 PC건물 29개 층의 총 수량을 산출하고, 이를 바탕으로 공사비를 비교하였다.

표 1. 기존 RC 건물과 제안 PC 건물의 공사 개요

		기존 RC	제안 PC
규모	연면적	68,143m2	69,568m2
	전체 층수	지하6층, 지상34층	지하6층, 지상35층
	아파트 층수	28개층(7층~34층)	29개층(7층~35층)
구조	지하	철근 콘크리트조	철근 콘크리트조
	지상	철근 콘크리트조	PC조

4.2 경제성 분석

1) 기존 RC건물과 제안 PC건물의 기준층(1개층) 골조 수량 비교

기존 RC 건물과 제안 PC 건물의 경제성 분석을 위해서 우선적으로 기준층의 콘크리트, 거푸집, 철근의 자재별 및 부위별 수량을 비교해 보았으며, 결과는 다음의 표 2과 표 3와 같다.

표 2. 자재별 수량 비교

구 분	규 격	단위	기존 RC건물 수량(A)	제안 PC건물 수량(B)	수량증감 (B)-(A)
콘크리트	Fc=500	m^3	0	189	189
	Fc=350		0	107	107
	Fc=270		649	324	-325
	소계		649	620	-29
거푸집	3회	m^2	1,816	1,488	-328
	데크플레이트		1,664	0	-1,664
	ACS 폼		176	0	-176
	PC		0	1,233	1,233
	소계		3,656	2,721	-935
철근	Fy=4,000	ton	122	73	-49
	Fy=10,300		0	7	7
	소계		122	80	-42

표 3에서 자재별로 살펴보면 콘크리트는 제안 PC 건물에서 기존 RC 건물보다 높은 강도의 콘크리트가 사용되었음을 알 수 있으며 수량은 29㎥가 감소하였다. 거푸집에서는 제안 PC 건물에서 3회 및 ACS Form의 수량이 감소하고 PC 거푸집이 신규로 산출되었으며, 총 수량에 있어서는 935㎡가 감소하였다. 감소의 원인은 옹벽 거푸집의 감소가 주 요인이다. 철근은 제안 PC 건물의 총 수량이 기존 RC 건물 수량보다 42ton의 비교적 많은 수량 감소가 있었으며, 제안 PC 건물에서는 기존 RC 건물에서 쓰이지 않은 Fy 10,300의 고강도 철근 7ton이 사용되었다. 철근 수량의 감소는 PC 보에 Fy 10,300의 D36 철근을 사용하여 수량을 감소시킬 수 있었던 것으로 보인다.

표 4에서는 어느 부위에서 수량 증감이 일어났는지를 보다 상세히 알 수 있다. 가장 눈에 띄는 부위는 바로 벽 부위로써 이는 제안 PC 건물에서 core 벽체를 건식공법으로 적용시킨 결과이다. 그렇게 해서 벽에 사용된 콘크리트, 거푸집, 철근 모든 골조 수량이 모두 0으로 되어 수량 감소의 가장 큰 요인이 되었다. 반면에 PC를 새롭게 적용한 기둥의 경우에는 기존 RC 건물에 비해 늘어난 기둥 개수로 인해서 모든 골조 수량이 증가하였다. 보의 경우도 콘크리트 및 거푸집의 수량은 보의 크기가 커짐으로 인해서 증가하였으나, 철근의 경우는 Fy 10,300의 Thread Bar를 적용하여 수량을 감소시킬 수 있었다.

표 3. 부위별 수량 비교

구 분	규 격	단위	기존 RC건물 수량(A)	제안 PC건물 수량(B)	수량증감 (B)-(A)
콘크리트	Fc=500	m^3	0	189	189
	Fc=350		0	107	107
	Fc=270		649	324	-325
	소계		649	620	-29
거푸집	3회	m^2	1,816	1,488	-328
	데크플레이트		1,664	0	-1,664
	ACS 폼		176	0	-176
	PC		0	1,233	1,233
	소계		3,656	2,721	-935
철근	Fy=4,000	ton	122	73	-49
	Fy=10,300		0	7	7
	소계		122	80	-42

PC를 적용하였을 때 기준층 골조 수량이 전반적으로 감소하는 가장 큰 원인은 코어(core)벽체를 건식벽체로 구조 시스템을 변경하면서 나타난 결과이다.

2) 기존 RC건물의 아파트(7층~34층)부분 수량

(1)에서는 기준층의 수량을 살펴보았고, 기존 RC 건물은 이 기준층 외에 횡력에 대항하기 위한 벨트 트러스(belt truss)층이 존재하였다. 따라서 기존 RC 건물의 아파트 부분의 골조 수량은 크게 2개의 부분으로 나누어 살펴볼 수 있다. 전체 28층 중에 26개 층을 차지하고 있는 기준층과 2개 층의 벨트 트러스(belt truss)층(21층, 33층) 2개의 부분이다.

이 2개의 부분에 대한 각 골조 수량에 대해서 살펴보면, 먼저 콘크리트는 Fc 420, 350, 270의 세 가지 강도로 이루어져 있다. 가장 높은 강도인 Fc 420은 지상 7층부터 12층까지의 기둥과 옹벽에 사용되었고, Fc 350은 13층에서 16층까지의 기둥과 옹벽에 사용되었으며, Fc 270은 17층 이상 기둥, 옹벽 부분과 7층부터 34층까지의 보 및 슬래브에 사용되었다. 두 번째로 거푸집에 대해서 살펴보면, 크게 두 가지 타입으로 구분할 수 있다. 하나는 일반적으로 사용된 3회 거푸집이며, 또 하나는 ACS Form으로 건물 외곽의 외부와 면한 기둥 거푸집과 ELEV PIT의 내부 옹벽 거푸집으로 사용되었다. 마지막으로 철근은 Fy 4,000의 고강도 철근이 사용되었다. 자재별 세부 수량은 표 5에 나타내었다.

표 4. 기존 RC 건물 아파트(총 28개층) 수량

구 분	규 격	단위	기존 RC건물 수량(A)	제안 PC건물 수량(B)	수량증감 (B)-(A)
콘크리트	Fc=500	m^3	0	189	189
	Fc=350		0	107	107
	Fc=270		649	324	-325
	소계		649	620	-29
거푸집	3회	m^2	1,816	1,488	-328
	데크플레이트		1,664	0	-1,664
	ACS 폼		176	0	-176
	PC		0	1,233	1,233
	소계		3,656	2,721	-935
철근	Fy=4,000	ton	122	73	-49
	Fy=10,300		0	7	7
	소계		122	80	-42

3) 제안 PC건물의 아파트(7층~35층)부분 수량

기존 RC 건물에서는 typical층과 belt truss층의 두 가지 종류로 분류하여 수량을 산출한 것과 마찬가지 방법으로 제안 PC 건물에서도 수량을 집계하였다. 여기서 주의 깊게 살펴보아야 하는 것은 기존 RC 건물에 비해서 1개 층이 늘어난 28층이 아닌 29층의 수량이 포함된 것이다. 각 골조 수량에 대해서 살펴보면, 콘크리트는 PC 기둥 부분에는 강도 Fc 500을 사용하고, PC 보 부분에는 강도 Fc 350을 사용하고, 슬래브 부분에는 강도 Fc 270을 사용하였다. 거푸집을 슬래브 및 계단에 사용되는 3회 거푸집과 PC 기둥 및 PC 보에 사용되는 PC 거푸집으로 구분할 수 있다. 철근은 기둥, 보, 바닥, 계단 부분에 모두 강도 Fy 4,000이 사용되었으며, 특히 보에는 Fy 10,300의 고강도 Thread Bar가 사용되었다. 세부 수량은 표 6에 나타내었다.

표 5. 자재별 수량 비교

구 분	규 격	단위	기존 RC건물 수량(A)	제안 PC건물 수량(B)	수량증감 (B)-(A)
콘크리트	Fc=500	m^3	0	189	189
	Fc=350		0	107	107
	Fc=270		649	324	-325
	소계		649	620	-29
거푸집	3회	m^2	1,816	1,488	-328
	데크플레이트		1,664	0	-1,664
	ACS 폼		176	0	-176
	PC		0	1,233	1,233
	소계		3,656	2,721	-935
철근	Fy=4,000	ton	122	73	-49
	Fy=10,300		0	7	7
	소계		122	80	-42

4) 제안PC건물수량과 기존RC건물수량 및 공사비 비교

두 건물의 공사비 비교를 위해서 나와 다에서 구한 제안 PC 건물 수량과 기존 RC 건물 수량을 바탕으로 공기, 골조공사비, 마감공사비, 양중 장비비를 고려한 수량 및 공사비를 비교하여 보면 표7에서와 같이 나타낼 수 있다.

표 6. 제안 PC 건물 수량과 RC 건물 수량 및 공사비 비교

구 분		단위	기존 RC건물 (7~34층: 28개층) (A)	제안 PC건물 (7~35층: 29개층) (B)	증 감 (B)-(A)
전체 연면적		평	20,613	21,044	431
아파트 연면적		평	-	-	-
공 기		월	5.6	5	-0.6
골조공사	콘크리트	m^3	19,989	19,398	-591
	거푸집	m^2	107,107	79,941	-26,886
	철근	ton	3,939	2,316	-1,623
	공사비		7,480,844,210	7,320,868,697	-159,975,513
마감공사	벽체미장	m^2	20,245	0	-20,245
	경량칸막이	m^2	0	20,968	20,968
	석고보드	m^2	0	20,968	20,968
	공사비		202,445,150	702,412,369	499,967,219
양중장비	T/C 14ton	대	2	0	-2
	T/C 20ton	대	0	2	2
	공사비		112,000,000	181,034,483	69,034,483
공사비 계			7,795,289,360	9,204,315,549	409,026,189
아파트 평당 공사비			645,672	656,118	10,446
전체 평당 공사비			378,173	389,865	11,691

기존 RC 건물의 층당 공기는 6일로 7층부터 34층까지 총 28개 층의 공사는 약 5.6개월이 소요되었으며, 제안 PC 건물의 경우 7층부터 35층까지 총 29개 층으로 공기는 층당 5일로 약 5.2개월 정도 소요되므로 기존 RC 건물보다 1개 층이 늘어났는데도 불구하고 실제 기존 공기와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 골조공사의 경우는 구조 시스템의 차이로 인해서 많은 수량차이가 발생했다. 기존 RC 건물은 코어부분이 옹벽시스템으로 되어 있고 제안 PC 건물은 코어부분이 건식벽체로 구성되어 있기 때문에 PC에서 골조 수량이 적게 산출되는 결과가 나왔다. 이러한 구조 시스템의 차이는 마감 공사에도 영향을 미쳐서 제안 PC 건물에서는 코어 부분을 골조공사 대신 경량칸막이 벽체로 구성해야 하므로, 마감공사에서는 추가적인 공사비용이 발생하였다. 한편, PC공사를 위해서는 기존 공사에서 사용한 14톤 타워크레인보다 양중 능력이 큰 20톤 타워크레인을 사용해야 PC로 제작된 기둥 및 보의 양중 및 설치에 무리가 없는 것으로 검토되었으며, 그에 따라 공사비의 증가가 있었다. 이와 같은 결과를 종합해 보면 아파트 부분의 총 공사비가 약 3억5천8백만원 증가하는 것으로 나왔지만, 연면적 대비 공사비를 따져보면 실제 연면적(평)당 공사비는 기존 RC 건물이 378,173(원/평), 제안 PC 건물이 389,865(원/평)로 면적(평)당 11,691원의 소폭의 금액 증가가 있는 것으로 분석되었다. 직접 공사비의 증가는 면적증가에 따른 금액 증가가 대부분이고, PC 공법 적용에 의한 공사비의 상승 요인은 크지 않은 것으로 나타났다.

5. 경제성 분석 요약

본 연구에서 제안 PC공법과 기존에 건설된 RC주상복합 건물과의 공사비분석을 토대로 이루어진 경제성 분석에 대해 요약해 보면 다음과 같다.

우선 기존 주상복합건물의 기준층이라 할 수 있는 아파트 부분은 7층부터 34층까지의 28층이며 이 부분의 높이는 총 91m이다. 이는 층고 3.1m의 높이로 이루어진 25개 층과 층고 4.8m의 소위 belt truss층 혹은 transfer층 2개 층, 그리고 층고 3.9m의 아파트 최상층으로 이루어진 높이이다. 이와 비교해서 제안된 PC공법을 적용하게 되면 기준 층고를 기존 RC 건물에서의 층고 3.1m보다 0.1m 감소된 3.0m로 적용할 수 있어 기존 RC건물의 아파트 부분의 높이 91m의 동일 높이 안에서 기존 28층보다 1개 층이 늘어난 29층의 아파트 공사가 가능하게 되어 1개 층의 면적만큼 분양면적 증가의 효과가 있다.

따라서 기존 RC 주상복합건물 아파트 부분 28개 층의 공사비와 제안된 PC 주상복합건물 아파트 부분 28개 층의 공사비와 추가된 1개 층의 공사비를 합한 총 29층의 공사비를 비교하여 경제성을 분석하였다. 본 연구에서 검토된 바와 같이, 제안 PC 건물의 경우 기존 RC 건물에 비해서 직접 공사비는 총 금액으로는 약 4억1천만원, 연면적(평)당 금액으로는 11,691원이 증가하는 것으로 분석되었다. 이와 같이 PC 공법 적용 시에 공사비 증가요인으로는 PC 부속 자재가 아직 국내에서 생산되지 못하면서 수입에만 의존하여 생기게 되는 가격 상승과 PC의 제작 및 설치 단가 그리고, PC 양중 및 설치를 위한 양중 장비의 비용이 있다. 그러나 기준층 층고를 3.1m에서 3.0m로 낮추면서 동일한 높이 안에서 한 개 층을 추가로 건설할 수 있게 되면서 얻게 되는 431평의 면적을 분양하는 것에 따르는 분양이득을 고려할 때 직접 공사비 증가 금액은 충분히 상쇄하고 남을 것으로 판단되므로 본 제안 PC 복합구조 시스템은 경제성이 있는 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 증가하는 초고층 건축물의 수요에 대응하기 위해 복합구조 시스템을 제안하여 이에 대한 경제성을 기준층 골조공사비에 대해 분석하였다.

본 연구를 통해 RC 구조물에 비해 비싼 것으로 인식되던 PC 시스템이 경제성을 가지는 것으로 파악되었으며, 이를 통해 공기의 단축이 가능할 것으로 사료된다. 공기의 단축은 간접비의 감소를 가져와 전체적으로 공사비의 감소 및 건설 기간의 감소를 가져올 것이다.

본 연구는 골조공사의 공사비만을 파악한 한계를 지니고 있으므로 실 시공을 통해 공기 및 타 요소에 대한 부분도 고려된 공사비 분석이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 조현우 외 3인, 초고층 건물의 골조 공사비와 공기 최적화 방안, 대한건축학회 논문집(구조계), 20권 7호, 2004.
2. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 대한건축학회, 200
3. Hutchinson, N., CM consideration in high rise formwork selection, 초고층 건축 거푸집 시스템 국제 세미나, 대한건축학회, 1999.
4. Hegazy, T., Computer-Based Construction Project Management, Prentice Hall, 2001.