

KIGEM

## 주거용 PC 조립식 건축구조 시스템 개발

**박흥근** 서울대학교 건축학과 교수  
**박순규** 울산대학교 건축학과 교수  
**홍건호** 호서대학교 건축공학과 교수  
**김승희** 서울대학교 건축학과 교수



### 1. 서론

본 연구는 국토해양부에서 지원하고 있는 “공기단축형 복합 구조시스템 건설기술개발” 연구단의 연구개발과제중 하나로서 프리캐스트 콘크리트 공법(이하 PC 공법)의 실용화와 보급을 위하여 수행되었다. 현재 지하층 구조 등 일부 구조에만 사용되고 있는 PC 공법을 20~30층 내외의 중·고층의 지상구조에 활용하기 위하여 국내에서 가장 많은 수요를 가지고 있는 주거용 건축에 적용하였다. PC 공법의 실용화를 위해서 기존의 현장타설 콘크리트공법과 차별화된 PC 공법의 장점을 최대한 발현하도록 구조시스템을 개발하였다. 즉, 프리캐스트 콘크리트 조립식 공법의 고유의 장점인 공기단축 및 인력절감 뿐만 아니라 마감일체형 PC 부재, 구체축열 온돌 등의 기술을 사용함으로써 마감공정을 줄이고,

고급질감의 다양한 입면을 사용하여 고급건축으로서 건축물의 가치 상승을 통하여 PC 공법의 경쟁력을 확보하는 것을 목표로 하였다. 이에 본고에서는 타워형/판상형 주거용 PC 구조시스템 및 PC 공법의 요소기술에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

### 2. 개발기술 개요

#### 2.1 타워형 주거용 PC 구조시스템 개발

현존하는 타워형 주거 건축물을 모델로 하여 평면크기는 30m×30m 이고 30층의 트윈 타워형 주거용 PC 건물을 계획하였다.(그림 1(a)) 지하층에는 주차장으로 활용하였으며, 1층에는 근린생활시설과 입주자들을 위한 각 동의 로비가



(a) 타워형 주거용 PC 구조시스템 계획안



(b) 기준층 평면도

그림 1. 타워형 주거용 PC 조립식 건축구조 시스템 계획안

계획되어 만남의 장소로서의 기능적 역할을 부가하였다. 저층부의 업무 및 근린생활시설이 이루는 상업 영역과 주거 영역이 만나게 되는 중층부에는 주민편의시설을 계획하여 완충공간의 역할을 하도록 하였다. 시공, 구조, 경제성, 지하층 공간의 활용과 기둥 및 보의 크기와 형상등을 고려하여 평면은 내부코아와 외부골조로 구성하였다. 외부골조는 공간 가변성, 시야 확보와 지하공간을 주차장으로 적용하기 위해 장스팬으로 설계하는 것이 유리하여 3×3스팬의 평면을 계획하였다. 주택수요의 다원화시대를 맞이하여 소득계층별, 가족형태별로 다양하고 변화 가능한 평면을 제공할 수 있도록 평면을 계획하였다.(그림 1(b))

본 건물의 구조시스템은 구조성능을 만족하고 경제적인 구조시스템을 구성하기 위해 내부코어는 RC 전단벽을 사용하였고 외부 바닥시스템 및 프레임은 중공슬래브(Hollow Core Slab ;이하 HCS)와 PC 보-기둥 접합부로 계획하였다. 현재의 국내 PC 공법의 기술수준과 경제성을 고려하여 조립식 공법을 사용하기 어려운 코아벽에는 현장타설콘크리트 벽을 사용하였으며, 외곽 골조는 시공성 및 경제성을 고

려하여 보-기둥접합을 사용하는 PC 골조를 사용하였다. PC 공법의 공기단축효과를 유지하기 위하여 코아벽의 현장 타설콘크리트 시공은 PC 공정과 분리하여 ACS (Auto climbing system) 거푸집시스템을 이용한 코어 선형 공법으로 계획하였다. 기준층 바닥의 슬래브는 내부코아벽에서부터 외부골조까지 10m 경간의 장스팬을 연결하기 위하여 250mm 두께의 중공슬래브(Hollow Core Slab, HCS)가 사용되었다. 횡하중에 대한 격막작용(Diaphragm)을 위한 일체성확보를 위하여 HCS 상부에는 50mm의 토핑콘크리트를 계획하였다.

## 2.2 판상형 주거용 PC 구조시스템 개발

중·저층의 기존 아파트들은 대부분 벽식 구조로 되어 있어 평면 계획의 변경이 불가능 하다. 그러나 본 연구의 구조시스템은 PC 모멘트 프레임과 코어 전단벽에 의한 횡력저항 시스템을 적용하여 내부 공간의 칸막이 계획이 자유로운 특징을 가지고 있다. RC 구조와 명확한 비고를 위하여 한강로에 소재한 e-편한세상을 비교대상으로 선정하여 이와 동일

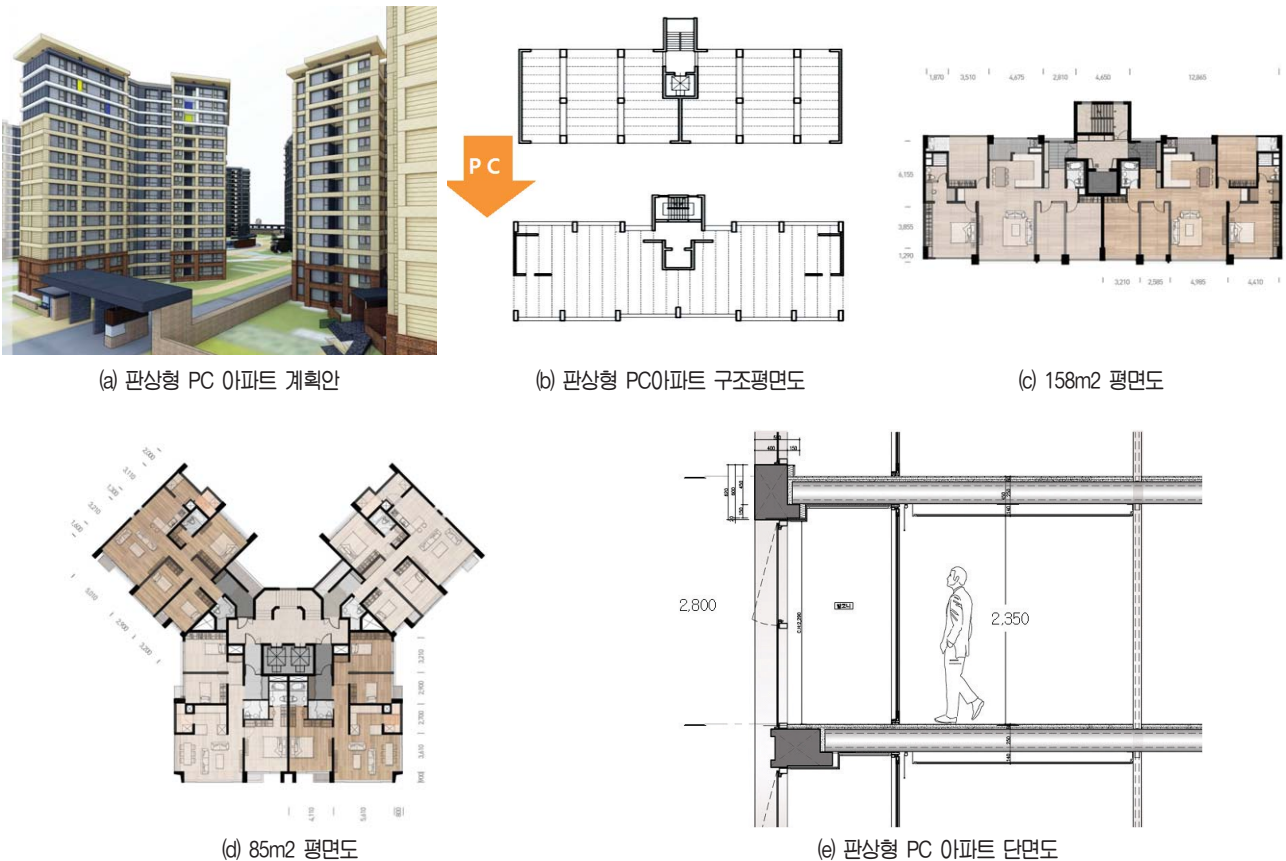


그림 2. 판상형 주거용 PC 조립식 건축구조 시스템 계획안

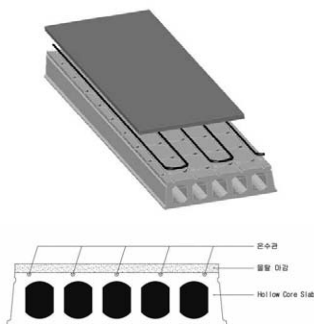
한 조건하의 158m<sup>2</sup> 아파트와 다양하고 변화 가능한 평면을 제공할 수 있도록 85m<sup>2</sup>의 PC아파트를 계획하였다.(그림 2.(a,c,d)) 기존의 벽식아파트들이 구조적인 문제로 인하여 측면 구조벽과 아파트 내부에 기둥이 있었던 것과 달리, PC 구조는 프리스트레스 중공슬래브시스템으로 인하여 장경간을 사용하므로 내부의 기둥을 없앨 수 있고 외곽부의 PC 모멘트 프레임과 코어벽에 의한 횡력저항시스템으로 구조벽에서 자유로울 수 있다.(그림 2.(b)) 이로 인해 아파트의 평면과 입면에 다양한 변화가 있을 수 있다. 건물의장 측면에서 일반 아파트는 대체로 단조로운 아파트 입면을 가지고 있지만 PC의 장점인 다양한 형상의 가능성과 양질의 마감 면, 다양한 콘크리트 표면 처리, 색 콘크리트 등을 이용하여 기존 RC구조에서는 불가능한 것들을 장점으로 잘 부각될 수 있도록 입면 설계에 적극 반영하였다.(그림 2.(a)) 또한, 구조체의 형태를 그대로 입면의 요소에 적용시켜 별도의 마감 없이도 다양한 입면의 요소를 만들어 낼 수 있다.

본 건물의 구조설계 계획은 지상 20층 규모의 주거 건물로 서울의 평균적인 지반조건 및 풍하중 조건을 가지는 것으로 가정하였다. 횡력저항 구조시스템으로는 판상형 아파트의 특성을 고려하여 장변방향은 철근콘크리트 전단벽 이중골조 시스템, 단변방향은 철근콘크리트 전단벽의 내력벽 시스템을 적용했다. 기존층 바닥의 슬래브는 250mm두께의 HCS가 사용되었고, PC슬래브를 사용할 경우, 프리스트레스에 의한 치올림이 가능하고 중공으로 인한 단면적감소로 슬래브의 자중을 줄일 수 있기 때문에 바닥이 약 10m 경간인 일방향 슬래브로 계획하였다. 또한 층의 격막작용(Diaphragm) 역할과 일체성 확보를 위해 슬래브 위에

50mm두께의 토핑콘크리트를 현장타설하고, 와이어메쉬(Wire Mesh)를 사용하였다.(그림 2.(e)) 테두리보는 건물의 장변방향의 횡력저항을 위해 이중골조 시스템을 적용하였기 때문에 모멘트 접합을 통해 횡력에 저항할 수 있도록 설계하였고 건축 입면을 위해 3층 단위로 PC부재활용을 위해 단면 형태를 다르게 계획하였다.

### 2.3 온돌 일체형 중공코어 슬래브

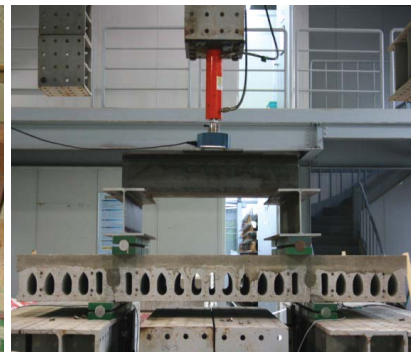
주거용 건물에서 바닥구조의 온돌시스템은 층고, 건물의 중량, 공사기간에 영향을 주는 매우 중요한 요소이다. 특히 기존의 온돌과 같이 별도의 공정과 습식공사가 필요한 경우 전체 PC공법의 공사기간에 결정적인 영향을 줄 수 있어서 매우 중요하게 고려되어야 한다. 해외에서 개발된 구체축열에 의한 복사냉·난방시스템은 국내의 온돌시스템과 유사하게 축열체에 의한 복사공조를 실현함으로써 쾌적한 실내 환경을 조성할 수 있으며, 구조체와 공조시스템을 일체화함으로써 슬래브위에 별도의 온돌을 설치해야하는 기존 온돌시스템의 단점을 제거할 수 있다. 본 연구에서 개발된 온돌병합 HCS는, 부재생산시 슬래브 상부에 온수배관을 위한 배관홈을 제작하고, 현장에서는 상기 온수배관 홈에 파이프를 설치한 후 기존 HCS 설치공정과 동일하게 토핑콘크리트를 타설함으로써, 온돌층과 구체 슬래브를 일체화시킬 수 있다.(그림 3.(a)) 이 방법은 추가 마감공정인 온돌층의 설치 공정을 생략할 수 있어서 전체 공정의 단순화 및 상당한 공기 단축의 실현이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 온돌층의 구체 내 삽입은 전체 층고의 절감에 상당히 유리하고, 자중을 감소시킴으로서 기타 구조부재의 설계에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.



(a) 온돌 일체형 중공코어 슬래브 상세



(b) 바닥 충격역 평가



(c) HC슬래브간 접합부 성능 평가

그림 3. 온돌 일체형 중공코어 슬래브



주거용 PC 구조시스템에 적용된 중공형 슬래브시스템은 구조형식상 일방향 슬래브시스템으로 구성된다. 이러한 구조적인 특성은 바닥의 충격력에 대한 슬래브의 가속도응답을 일반 RC 건축물에서 사용되는 이방향슬래브보다 크게 저감시키며 진동모드의 형상을 변화시키게 된다. 이에 따라 본 연구에 사용된 HCS는 소음으로 전달될 가능성이 큰 50Hz 이상의 진동수 영역에서 소음과파가 확연하게 감소됨으로써, 중량충격을 저항성능을 향상시켜 건축물의 거주성능 향상에 도 크게 도움이 될 수 있다.(그림 3.(b)) 이외 슬래브의 격막작용에 의한 구조성능을 검증하기 위해 HC 슬래브간 면내, 면외 방향의 접합부 성능실험을 수행하였다. 실험결과 토핑 콘크리트의 두께가 증가할 수록 전단내력은 비례적으로 증가하였고, 와이어메쉬(Wire Mesh)를 배근할 경우 내력, 강성, 연성도등이 증가하는 것으로 나타났다. (그림 3.(c))

### 2.4 모멘트 보-기둥 접합부

국내에서 PC 구조는 지하주차장, 창고형 건물 등 주로 수직하중을 받는 구조체로 사용되어 왔으나, 지진하중과 같은 횡력에 저항하는 구조시스템으로 사용 범위가 확장되고 있다. PC 구조의 내진성능을 확보하기 위해 다양한 PC 보-기

둥 접합부 상세가 개발되었고 시공법에 따라 완전건식 및 반건식 공법으로 구분할 수 있다. PC 보-기둥의 접합을 볼트 접합, 용접접합, 프리스트레싱 등을 이용하는 완전건식 접합부는 설치가 용이하지만, 보강 철물 및 기계적 이음장치는 가격상승과 함께 추가적인 작업공정이 필요하게 되어 인건비가 상승하는 단점이 있다. 대표적 반건식공법인 U형 단면의 PC 셸을 이용한 PC 보-기둥 접합부는 PC셸을 기둥에 거치한 후 셸 내부에 힘 철근을 관통하여 배근한 후 콘크리트를 타설하여 접합부를 시공하므로, 일체화된 접합부의 시공이 가능하고 공사가 간편하여 공기단축이 가능하다.(그림 4.(a)) 그러나, 주기 재하 실험에서 보-기둥 이음부에 심한 대각 균열과 미끄러짐 및 핀칭거동이 발생되며, 그로 인해 PC 보-기둥 접합부의 에너지 소산능력과 강성등의 내진성능이 ACT의 '모멘트 프레임에 대한 허용 기준안'에서 제시하고 있는 기준을 만족하지 못하는 것으로 보고되고 있다.

이러한 문제를 개선하고자 본 연구에서는 PC 접합부는 접합부에서 떨어진 곳에서 휨항복이 발생하도록 유도하는 강접합(strong connection) 방법을 이용한 상세를 개발하였다. 즉, 이음부 및 기둥과 보가 맞닿은 접합면에서의 휨강도를 크게 설계하여 탄성상태에 있도록 하고, 접합면에서 떨어진 곳

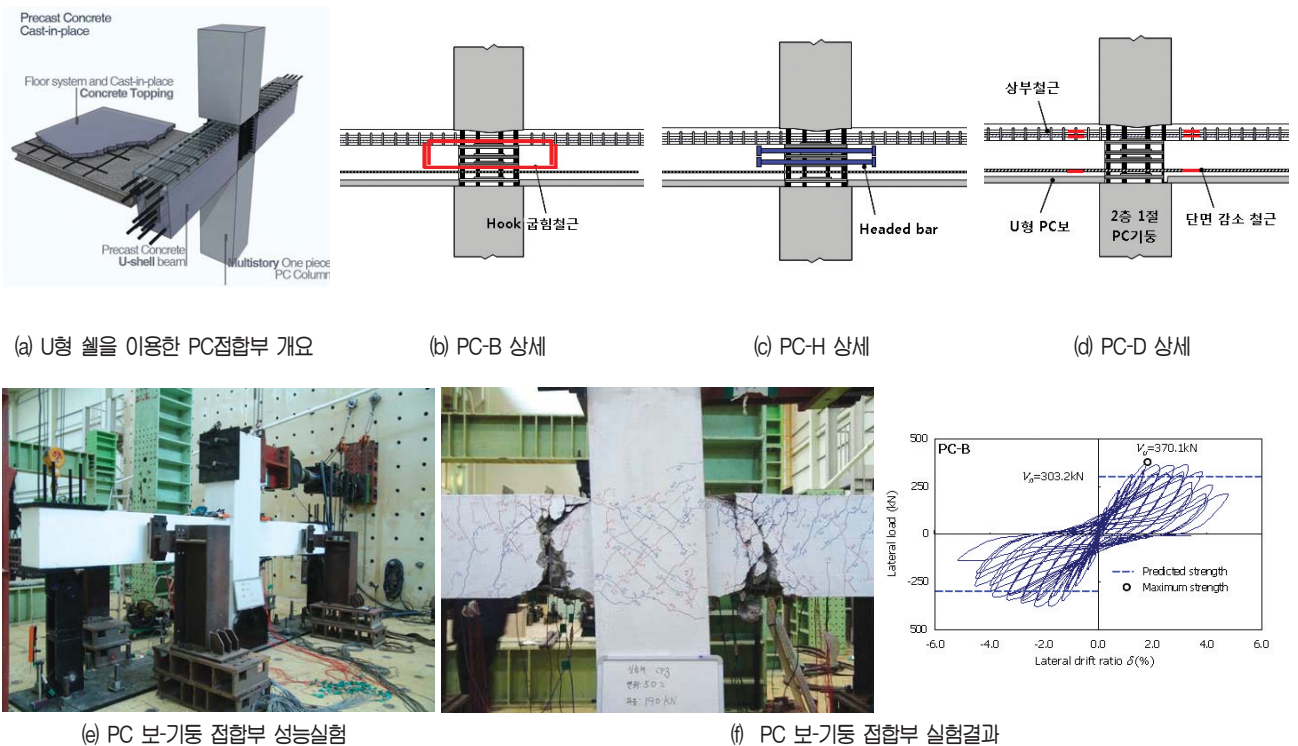


그림 4. PC 보-기둥 접합부

의 휨강도를 약하게 설계하여 소성변형이 발생하도록 개발하였다. 강접합 방법을 이용하여 설계할 경우 보의 비탄성변형이 접합부에서 떨어진 곳에서 발생하므로 보 휨철근의 부차 파괴와 이음부의 전단 대각균열을 감소시켜 접합부의 강성과 에너지 소산능력의 내진성능이 우수해 질 수 있다. 강접합 방법으로는 보-기둥 이음부에 Hook철근(PC-B), Headedbar (PC-H) 등을 추가로 배근하여 이음부의 휨강도를 증가시키는 상세와, 보에서 휨항복이 발생하도록 보의 철근의 단면을 감소시킨 철근을 배근하여 보의 휨강도를 감소시키는 상세(PC-D)를 개발하여, 보에서 소성힌지가 발생하도록 하였다.(그림 4.(b~d)) 개발된 PC 접합부는 강기둥 약보 설계 전략에 따라 보에서 소성변형이 크게 나타나는 소성힌지가 발생하였고, 이로 인해 접합부의 대각 균열과 보 휨철근의 미끄러짐 변형을 방지할 수 있어 접합부의 손상을 최소화 할 수 있다. 뿐만 아니라 접합부의 핀칭 현상이 줄어들어 에너지 소산능력이 증가하였다. (그림 4. (e~f))개발된 보-기둥 접합부는 기존의 PC 접합부의 내진성능을 개선하여 RC 접합부와 동등한 내진성능을 발휘하는 것으로 나타나 중간모멘트 골조, 특수모멘트 골조와 같은 내진구조로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.5 고성능 PC 벽체

횡하중에 저항하는 구조벽체는 벽체하부에서 가장 큰 모멘트와 전단력을 받게 된다. 또한 지진에 효과적으로 저항하기 위해서는 벽체의 변형능력이 중요한데, 벽체 하부의 소성힌지 영역에서의 변형능력이 벽체의 변형성능을 좌우한다. 따라서 구조벽체가 횡하중, 특히 지진에 대해서 안정적인 저

항성능을 발휘하려면 벽체하부 소성힌지 영역이 충분한 강도와 변형성능을 발휘할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 PC 구조벽체를 주요 횡력저항시스템으로 사용할 수 있도록 하기 위하여 RC 구조벽체와 동등이상의 내진성능을 확보할 수 있는 PC 구조벽체를 개발하였다. 개발된 PC 구조벽체는 PC 벽체 하부의 연결철근의 일부를 단면감소시키고 비부착 상세를 적용한 PC 구조벽체이다. (그림 5(b))

제안된 PC 구조벽체에 대한 횡하중 반복가력실험 수행 결과 PC 패널 접합부에 취성파괴가 집중되는 기존 PC 구조벽체와는 달리 제안된 PC 구조벽체는 벽체 판넬 내부의 단면이 감소된 연결철근에서 안정적인 반복 이력거동이 계측되었다. 또한, 최대하중 이후 거의 하중의 저하가 나타나지 않았고 RC 벽체와 비교하여 우수한 변위연성비를 나타냈다. 누적에너지 소산에서도 RC 구조벽체 보다 매우 우수한 것으로 나타났다.(그림 5(c))

위와 같은 실험 결과를 종합하면 개발된 PC 구조벽체는 기존의 PC 구조벽체의 내진성능을 크게 개선하였고 RC 구조벽체와 동등 이상의 내진성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 PC 구조벽체는 구조물의 주요 횡력저항요소로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 연구를 통하여 개발된 타워형/판상형 주거용 건축을 위한 PC 시스템은 기존의 현장타설콘크리트 구조에 비하여

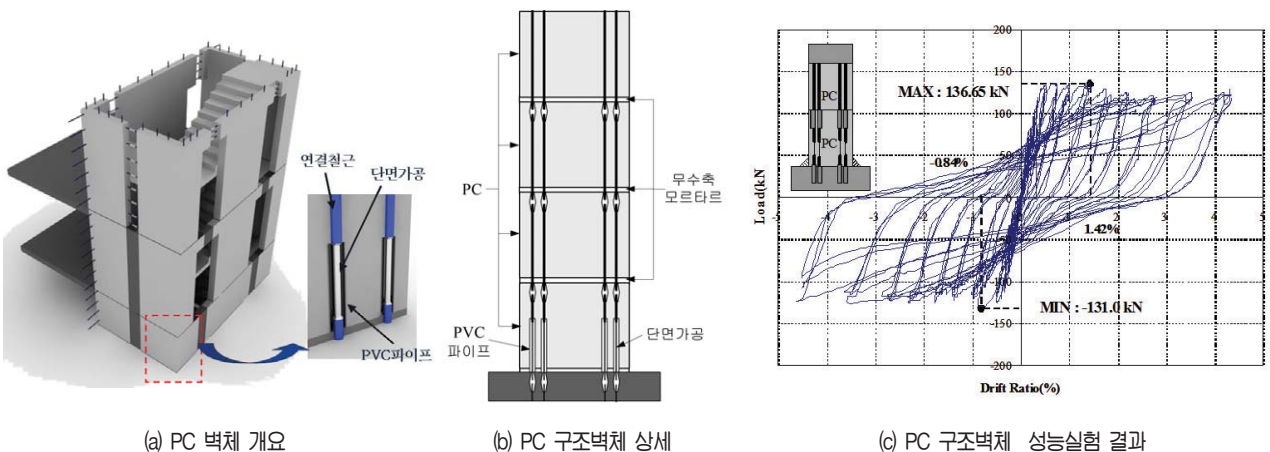


그림 5. PC 구조벽체

다음과 같은 장점을 확보하여, 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

- 1) 공기단축 및 인력감축으로 인한 공사비 및 금융비용감소
- 2) 다양한 입면상세, 마감재의 우수한 질감 확보를 통한 건축물의 가치상승
- 3) 건물의 경량화로 인한 구조재 및 기초 크기의 감소
- 4) 장스팬의 기둥식구조로서 지하층의 사용성 확대
- 5) 외벽 및 바닥온돌시스템의 구조재와 마감공정의 복합화로 인한 마감공정 최소화
- 6) 우수한 지진저항 구조

프리캐스트 콘크리트 공법을 고층 주거용 건물에 적용할 경우 경제적이면서 건물의 가치를 높일 수 있는 공법으로 판단된다. 다만, 프리캐스트 콘크리트 공법의 성공여부는 설계, 공정에 대한 치밀한 사전준비, 인력의 교육훈련에 달려 있으며, 특히 엔지니어와 건설사의 새로운 공법에 대한 열린 자세가 매우 중요하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설기술교통평가원에서 위탁 시행한 05건설핵심기술연구개발사업(과제번호 D02-01)과 대림산업, 동서PCC, 우림건설, 창민우구조, 다우와 키움건설, GSC 엔지니어링, 강남건영, 희림건축, 신안건설의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

- 박홍근 e-mail : parkhg@snu.ac.kr
- 박순규 e-mail : pask@mail.ulsan.ac.kr
- 홍건호 e-mail : honggh@hoseo.edu
- 김승희 e-mail : arksh@snu.ac.kr