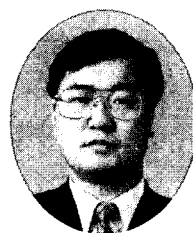


## 프리캐스트 콘크리트의 변천과 장래 전망(건축)

- Changes and Expectations of Precast Concrete (Architecture) -



이광수\*



이한승\*\*

### 1. 서 론

프리캐스트 콘크리트는 철근 콘크리트와 같이 오랜 역사를 가지고 있으며, 원래 철근 콘크리트 시조라고 일컬어지는 프랑스인 조경가 Joseph Monier가 제조 특허를 가진 대형 식재 화분(1867년)이 프리캐스트 콘크리트 제품이었다. 그 후 프리캐스트 콘크리트는 현장 타설 공법과 함께 철근 콘크리트 건축물에 많이 적용되어 왔으며, 현재, 프리캐스트 콘크리트는 각종 블록, 파일, 옥상 슬래브, 슬래브, 커튼 월 등에 사용되고 있으며 주요 구조 부재에 프리캐스트 콘크리트 부재를 사용한 건축물에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 또한, 대부분 프리캐스트 콘크리트는 프리캐스트 콘크리트 제품 혹은 건축물에 주요 구조 부재로 적용할 경우에는 프리스트레스트 콘크리트 공법과 병용되기도 한다. 특히, 애스펙트 비(Aspect ratio)가 큰 부재, 예를 들면 파일, 보, 슬래브(유공 슬래브, ST판, WT판) 등의 경우에는 운

반·가설시의 균열을 피하기 위하여 프리텐션 공법이 사용되는 것이 많고 프리캐스트 콘크리트 부재의 접합에는 포스트텐션 공법에 의한 압착 접합이 사용되는 것이 많다. 본고에서는 프리캐스트 콘크리트를 주요 구조 부재에 사용한 건축 구조에 초점을 맞추어 그 변천과 장래 전망을 논하고자 한다.

### 2. 부재로서의 발전

철근 콘크리트 현장 타설 공법은 조형성의 자유도가 높고 복잡한 형상을 만드는데 매우 적합하며 단품 수주 생산으로 이동 현장 생산이라는 건축 생산 특성상 매우 잘 맞는 공법 특징을 가지고 있어 세계적으로 가장 일반적인 건축물 축조 공법으로서 사용되고 있다. 그러나, 이 특징의 뒷면에는 성형에 필요한 거푸집 재료의 손실이 많은 점, 시공 효율이 낮은 점, 가설 시 사용하는 동바리가 대량으로 필요한 점, 현장 노무 부담이 큰 점, 공기가 길어

지는 등 여러 가지 결점이 있으므로 반드시 생산 효율이 높은 공법이라고 말 할 수 없다. 따라서, 이와 같은 결점을 극복하고 생산 효율을 높임과 동시에 대규모로 복잡한 형상의 구조물을 높은 품질과 높은 정밀도를 유지하면서 실현하는 것을 목적으로 여러 가지 프리캐스트 공법이 고안되어 많은 유명한 건축물이 실현되었다. 안제로 만제룻티의 바랑자데 교회(1957년, <사진 1>), 피에르 네르비의 로마 스포츠 팰리스·소체육관(1959년, <사진 2>), Jorn Utzon의 시드니 오페라 하우스(1963년, <사진 3>) 등이 프리캐스트 부재를 사용한 유명한 건축물로 볼 수 있다. 일본에서도 前川の 뱀의 눈 빌딩(1965년, <사진 4>), 木村가 구조 설계를 담당했던 Pre-grid 시스템에 의한 千葉현립 중앙도서관(1967년, <사진 5>), 토치키현 청사 의회동(1970년, <사진 6>)등 일련의 작품을 비롯하여 최근 대규모 건축물로서는 南長野 운동공원 다목적 경기장 내야 스탠드(나가노 올림픽 개·폐회식 회장, 1996년, <사진 7>), 요코하마 국제 종합경기장(1977년) 등을 들 수 있다. 또한, 부드러운 곡

\* 정회원, 여주대학교 건축공학과 부교수

\*\* 정회원, 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 연구조교수

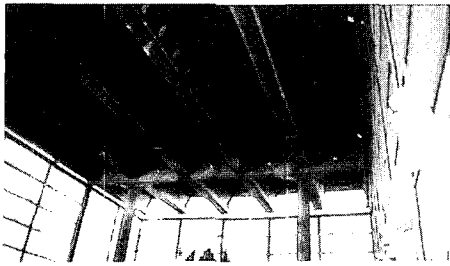


사진 1. 바랑자데 교회

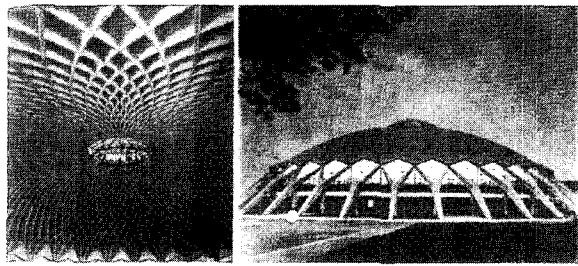


사진 2. 로마 스포츠 팰리스/소체육관

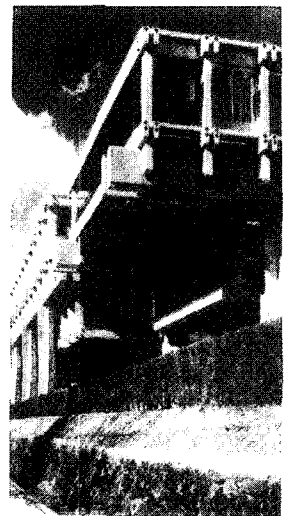


사진 5. 千葉현립중앙도서관



(a) 전경



(b) 프리캐스트 세그먼트

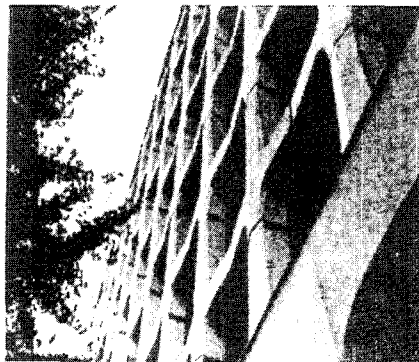


사진 4. 뱀의 눈 빌딩

사진 3. 시드니 오페라 하우스 전경



사진 6. 토지키 현청사의 회동

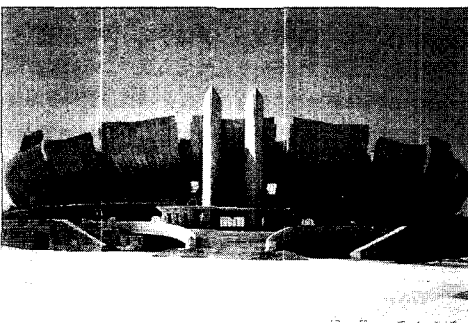


사진 7. 南長野 운동공원 다목적 경기장

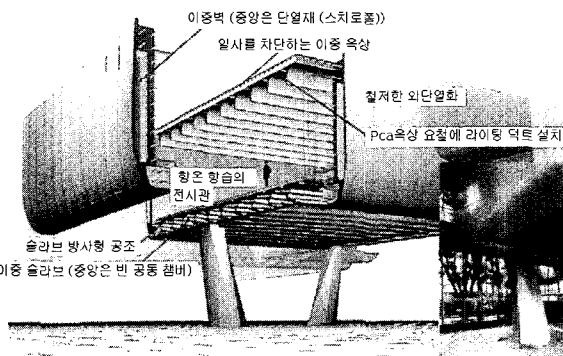


사진 8. 愛媛현립 미술관

### 3. 패널 공법으로서의 발전

1905년 영국의 리버풀에서 T.A. 브로디에 의해 대형 패널 형태의 프리캐스트 부품으로 3층 주택이 건설되었다. 이것이 건축물의 구조체를 대형 프리캐스트 콘크리트 패널 부재로 구성한 최초 건축물로서 일컬어지지만, 프리캐스트 콘크리트 대형 패널 구조가 비약적으로 발전한 단서는 제 2차 세계대전 후 세계 각국이 주택 부족을 해소하기 위하여 실시한 공적인 집합주택 대량 건설(매스 하우스)에 있다. 집합 주택은 동일 스펜으로 동일 구조 패턴을 반복하여 구성되는 것이 큰 특징이고 프리캐스트 콘크리트 대형 패널 공법이 이와 같

과 슬래브를 프리캐스트 부재로 하여 이것들을 프리스트레세에 의해 압착하는 것에 의해 만들어진 愛媛 현립 미술관(1999년, <사진 8>)은 프리캐스트 콘크리트 구조의 조형면에서의 가능성과 공법으로서의 우수한 착상이 유감없이 발휘된 건축물이라 말할 수 있다. 오사카시 중앙체육관(1996년, <사진 9>)는 건물의 주요 부분을 지하에 매설하고 직경 110m의 프리캐스트 콘크리트 부재로 구성된 헬덱의 상부에 1m의 작은 흠 언덕을 만든 독특한 건물이며 프리스트레스트 콘크리트의 Tension Ring을 병용하는 것에 의해 5~6tf/m<sup>2</sup>의 상시 하중에 대하여 균열을 발생시키지 않도록 하고 있다.

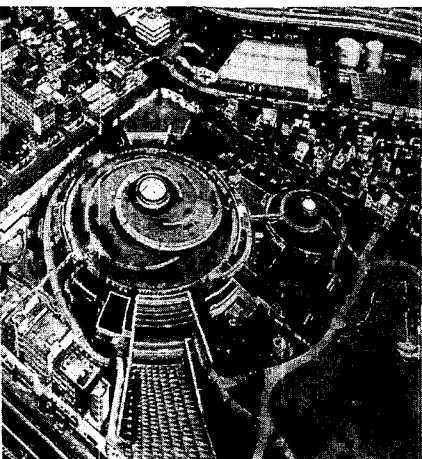


사진 9. 오사카시 중앙 체육관

면을 갖는 육면체 형태의 공간을 1.8m 폭의 타일을 붙여 만들고 원형 형태의 벽

은 다층 집합주택을 대량·신속하게 건설하는 결정적인 수단으로서 소련을 포함한 유럽 각국에서 개발 실용화되었다. 매스 하우스 시대에는 대량·신속한 주택 공급이라는 목적을 달성하는 것이 주안점이었기 때문에 기계화된 공장에서 팔레트 방식 내지는 배터리 방식으로 생산된 벽 및 슬래브를 사용하여 판 형태의 주택 건물로 지어진 주택 단지가 건설되었다. 그러나, 매스 하우스 시대 종결과 함께 집합주택의 건설량이 크게 감소하기 시작한 점, 판 형태의 주택 건물에서 구성되는 단지의 획일적인 경관에 대한 비판, 주거 요구의 다양화에 대한 대응 등의 이유로 탑 형태, 곡면 형태, 혹은 원 형태 등의 평면을 갖는 집합주택이 프리캐스트 콘크리트 구조로 건설되기 시작하였다. 1972년경 프랑스에서는 크레테유, 이부리 등 파리 주변 위성 도시에서 여러 가지 평면 형상을 갖는 프리캐스트 콘크리트 구조 집합주택 단지 건설이 시도되고 있었다. 그러나, 현재에도 동구권 나라를 중심으로 프리캐스트 콘크리트 판 형태 주택 건물이 대규모 단지(7,000만 호 이상)로 존재하고 있으며, 현재, 이와 같은 단지의 재생이 동구권 나라에 있어서는 주택 문제를 해결하는 점에서 큰 과제로 되어 있다.

한편, 스웨덴, 핀란드, 덴마크 등의 북구권 나라에서는 집합주택용의 대형 벽 판넬 혹은 구멍이 뚫려진 슬래브 등에 관하여 단면 크기의 규격화와 조인트 방식의 표준화, 설계 매뉴얼 및 제품 카탈로그의 정비 등이 진행된 결과, 이들 부재가 오픈 부품으로서 시장에 유통되게 되었고 핀란드 등에서는 프리캐스트 콘크리트 대형 판넬 공법에 의한 주택 80% 이상이 오픈화된 부품을 사용하고 있다.

박판(얇은 두께)의 중형 판넬에 의한 대량 생산 공영주택 : 민간에서 개발된 공법을 원형으로 하여 고도 경제 성장기의 공영 주택 건설에 중요한 역할을 한 것이 박판 중형 판넬에 의한 대량 생산 공영 주택이다. 폭 90 cm의 박판 중형 리브를 갖

는 판넬을 내력 벽에 사용하고 그 접합부를 볼트로 체결하는 것을 구조상 특징으로 하고 있다. 1963년 이후 공영 주택으로서 표준 설계가 작성되어 1969년에는 연간 약 1만 3,000호가 건설되었지만 그 후 건설량은 감소하고 그다지 보급되지 않았다. 그 이유는 박판 볼트 체결이기 때문에 고층화에 한계가 있는 점(현재로도 3층 건물까지 축조 가능), 박판이므로 단열성에 문제가 있는 점, 구조상 제약에 의한 평면 계획상의 자유도가 적은 점 등을 들 수 있다.

대형 패널 공법 - PC 공법 : 고도 경제 성장기에 있어서 도심부 집합주택의 고층화 요청에 따라 당초는 민간에서 개발된 공법을 원형으로 하여 시작되었으며 현장에서 적층하여 타설한 대형 판넬을 양측하여 세우고 조인트를 접합하는 이른바 Tilt-up 공법이 주택공단, 건축연구소(BRI) 등을 중심으로 개발되었다.

주택공단에 의한 2층 테라스 하우스의 시공 실적, 건축연구소의 스트롱 룸에 있어서 4층의 2/3모형 3층분의 내진 성능 확인 실험(1960년)등을 거쳐 1962년에는 4층의 시작품 주택이 건설되었다. 그러나, 현장에서 가설물을 이용한 제조에 따른 정밀도 문제, 생산 효율 문제 등에 의해 중간 규모 층의 주택을 대량으로 공급하기 위한 공업화 공법으로서 기본적 특성에 맞지 않는 이유에서 그 후의 대형 판넬 공법의 주류로는 되지 않았다. 이것을 해결한 것이 당시 유럽에서 일반적으로 사용되고 있던 대형 판넬을 공장에서 생산하고 현장에서 조립하는 이른 바 PC공법이다. 1964년 주택공단 대량 생산 시험소에 간이 양생 방식에 의한 테스트 플랜트가 설치되어 1965년에는 千葉현 作草部に 설치된 주택공단의 日産2호 이동식 PC 플랜트를 이용하여 中層 플랫트 496호가 건설되었다.

대형 패널 공법을 일본에 적용하는 데에는 현장 타설 공법에 의한 벽식 구조와 동등의 내진 성능이 요구되기 때문에 내진

성을 고려한 일본 특유의 접합 방법에 관한 연구·개발이 Tilt-up 공법, PC 공법 개발 과정에서 실시되어 수평 조인트로서는 PC판에 매설 정착된 강재를 용접하는 이른바 Dry 조인트를, 연직 접합부에는 PC판의 접합 면에 톱니형의 요철을 둔 Cutter 방식의 Wet 조인트를 사용하는 방식이 일반적인 공법으로서 확립되어 있었다. 1965년에는 일본 건축학회(AIJ)의 4층 건물 PC 공법을 대상으로 한 「벽식 프리캐스트 철근 콘크리트조 설계 기준」, 「JASS10 벽식 프리캐스트 철근 콘크리트공사」 등이 제정되고, 1970년경부터 프리패브 건축협회에서 PC 공법에 의한 공공 중층 대량 생산 주택의 표준설계 - SPH 공법이 검토가 시작되어 이후 SPH 시리즈에 의해 12만 호에 달하는 공공 주택이 건설되었다. 건축연구소에 있어서 PC 공법 5층(1968년) 및 8층(1973년)을 대상으로 한 실대 내진 실험 실시 등을 계기로 민간 회사에서는 고층화 공법에 관한 개발·연구가 활발하게 진행되었고 1974년에는 PC 공법에 의한 8층 주택이 건설되기 시작했다. PC 공법을 고층화하기 위해서는 위에서 말한 Dry 조인트 방식으로는 하층부의 벽판에 생기는 큰 수평 전단력, 축력, 휨 응력을 처리할 수 없기 때문에 벽의 휨 철근을 슬리브 혹은 기계식 이음에 의해 직접 접합하는 이른바 직접 조인트 방식이, 또한 연직 조인트로서도 벽판에서 돌출된 루프근을 매지 철근을 통하여 용접하는 것 등에 의해 균열 후의 강성 저하를 방지하는 각종 디테일이 개발되어 8층 건물을 중심으로 11층 건물까지 건설되었다. 또한, 고층화에 따라 보 방향의 축조 방식은 벽식 라멘 방법으로 변화되어 갔다.

HPC 공법 : PC 공법의 고층화 요청이 높았던 1965년경부터 PC판에 철골을 내장시키는 것에 의해 접합부를 철골 구조로 한 공법이 개발되어 후에 HPC 공법이라고 불리게 되고 주로 고층(11~14층) 주택에 사용하게 되었다.

PS 공법 : 기둥 부재로서 L, T, +자형의 프리캐스트 부재를 세우고 보에는 단형 단면의 프리캐스트 부재를, 창호가 있는 벽에는 PC판을 사용하고 이것들을 연직 방향으로 프리스트레스에 의해 압착 접합하고 슬래브로서 PC판을 올려놓는 공법으로 1966년에는 4층 공영주택이 또한 1971년에는 콘크리트계 프리캐스트 구조로서는 일본 최초의 8층 공영주택이 건설되어 그 후 10층 건물까지 건설되었지만 입체 내력벽을 사용하는 것에 의한 생산 효율 문제 등에 의해 그다지 보급되지 않았다.

#### 4. 프레임 공법으로서의 발전

철근 콘크리트식 프리캐스트 구조 : 당초, 지진시에 큰 응력을 받는 기둥·보 접합부 부근에 있어서 부재 접합을 피하기 위해서 지진시 응력이 작은 기둥, 보의 중앙부에 접합부를 설치하고 부재로서는 +자형을 기본으로 이것을 수직, 수평 연속시킨 이른 바 Tree형의 부재 등을 사용한 방식이 적용되었다. 그러나, 이와 같은 부

재 형상은 공장 생산에 의한 대량 생산 효과를 기대할 수 없는 점, 부재 수송상 문제가 있는 점, 현장에서 대형 중기계가 필요한 점 등 생산 시공상 이유와 건축기법·시공령 중에 기재된 프리캐스트 철근 콘크리트 구조에 관련한 규정이 없기 때문에 프리캐스트로 하면 그때마다 일본 건축센터(BCJ)의 評定·評價를 취득하지 않으면 안되었으므로 그다지 일반적인 공법으로 보급되지 않았다. 1970년경부터 기둥, 보를 단독 부재로서 프리캐스트화하여 기둥·보 접합부를 현장 타설 공법으로 하는 개발 연구가 활발히 진행되기 시작했다. 아울러, 기둥 휨 주근 접합에 사용되는 철근 이음 혹은 보 휨 주근 정착에 관한 연구 등도 활발히 진행되었다. 1974년에 일본 건축센터에서 철근 이음 성능 판정 기준 제1차안이 작성되었으며 그 결과 단독 부재 방식에 의한 가구식 프리캐스트 공법 개발 연구가 활발히 진행되어 저층 건축물에서의 실시 예가 축적됨과 동시에 고층화로의 적용 가능성을 확인하는 실험 연구가 활발히 진행되게 되었다. 1981년

에는 건축기준법 시행령 개정에 맞추어 큰 변형 능력이 요구되는 부재단에 있어서는 철근 이음에 요구되는 이력 성상이나 인성에 관한 성능 판정 기준을 포함 일본 건축센터의 철근 이음 성능 판정 기준이 작성되어 민간 각 회사에서도 고층 건물에 시험적으로 적용하기 시작했다. 1989년에는 보, 슬래브, 벽을 프리캐스트 부재로 한 초고층 건물이(히카리 언덕 B18호동 25층), 1991년에는 초고층 전체 프리캐스트 구조(주택·도시정비공단 히카리 언덕 B14호동 30층, <사진 10>)가 건설되었다. 1987년부터 시작한 건설성 종합 기술 프로젝트 「철근 콘크리트조 건축물의 초경량·초고층화 기술 개발」, 1988년에 제정된 AIJ의 「철근 콘크리트조 건물의 중국강도형 내진설계 지침(안)」 등 동적인 성상을 고려한 철근 콘크리트조 고층 건물 설계에 필요한 실험 연구 자료의 체계화가 시도되었다. 또한, 1989년부터 BRI의 일본과 미국의 공동 연구 일환으로 시작한 「프리캐스트 콘크리트 구조에 관한 연구」(PRESSS)에 의해 현장 타설 철근

콘크리트 구조와 동등한 성능을 갖는 프리캐스트 부재 접합부의 성능을 실현하는 설계 시공법이 체계화되었으며, 그 후 단독 부재 방식에 의한 프리캐스트 콘크리트 고층 건물이 대량 건설되게 되었다. <사진 11>은 현재 고층 건축에 사용되고 있는 매우 일반적인 공법 개요를 나타낸 것으로 기둥에는 단독 부재 형태의 프리캐스트 부재 혹은 전단 철근을 내장하고 원심력 성형에 의해 제작된 외곽 프리캐스트 부재를 사용하고 있다. 또한, 보에는 전단 철근 일부를 현장 타설하는 슬래브와 일체화하기 위하여 노출



사진 10. 단독 부재 방식에 의한 전체 프리캐스트 초고층 주택 (히카리 언덕 B14호동)

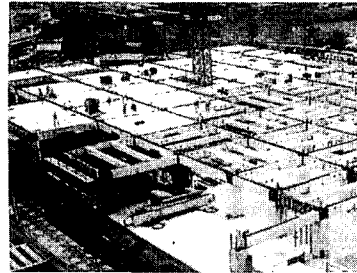


사진 11. 단독 부재 방식에 의한 고층 건물의 구법 개요

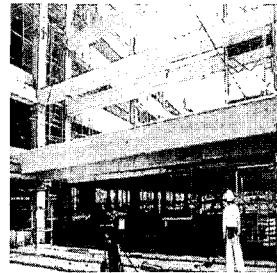


사진 12. 기둥·보를 프리스트레스에 의한 압착 공법 이용(주차장)

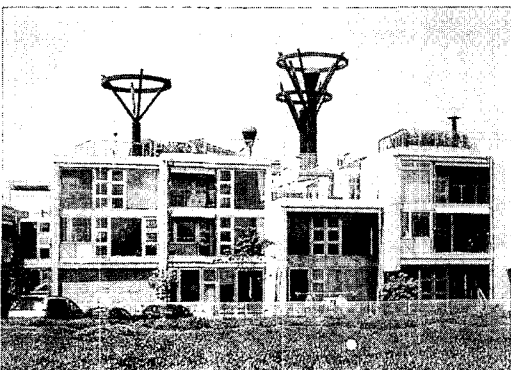


사진 13. FH-HOYA II

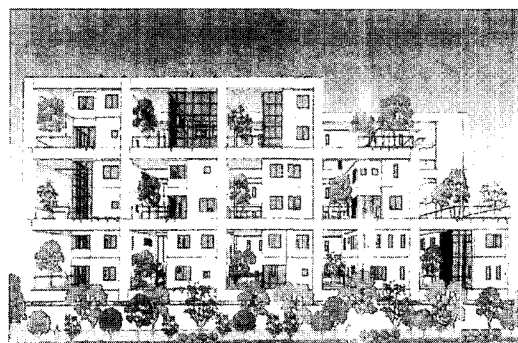


사진 14. 전체 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 부재에 면진장치 조합(지속가능 골조 제안)

시킨 하프 프리캐스트 부재가 사용되는 것이 많다.

프리스트레스에 의한 압착 방식을 사용한 공법 : 프리캐스트 콘크리트 부재를 프리스트레스에 의해 압착 접합하는 것으로 쉽게 剛접합부가 얻어지는 점, 대형 Span 가구로서도 조립 순서를 연구하는 것에 의해 접합부에 생기는 휨 모멘트를 조절 할 수 있는 점, 프리스트레스트 콘크리트 구조 설계에 필요한 기술 기준을 정한 건설성 고시(1960년에 제정, 1973년, 1983년 개정)에 프리캐스트 구조에 적용한 경우의 규정이 포함되어 있는 점, 프리캐스트 구조로서도 일정 높이라면 행정상 통상 확인 신청으로 허가된 점 등의 이유에 의해 현재까지 많은 프리캐스트 콘크리트조 건축물에 사용되어 오고 있다. 초기에는 장 스펀의 보를 세그먼트화한 프리캐스트 부재로 하는 방법 또는 일체형 프리캐스트 부재로 하여 이것을 프리캐스트 철근 콘크리트조 기둥에 압착 접합하는 공법이 많이 사용되어 왔지만 최근에는 기둥에도 압착 접합을 사용한 예가 많이 나타나고 있다(〈사진 12〉).

### 5. 장래 전망

이상 개략적으로 프리캐스트 콘크리트 구조의 변천을 서술하였지만, 금후 건축 설계, 건축 구조, 건축 재료 및 시공 연구자의 긴밀한 연대와 우수한 발상에 의해 개별 건축물로서는 여러 가지 형태의 프리캐스트 콘크리트조 건축물이 건설되어 갈 것이다. 한편, 현장 타설 공법의 합리화,

생산성 향상, 거푸집 자재 절감 등의 환경 문제, 현장 노동력 감소 대응 등의 관점에서 현장 타설 공법의 프리캐스트화 경향은 금후 더욱 더 진전할 것이다. 그러나, 구조체의 프리캐스트화를 생각하는 경우, 표준화·대량 생산화에 의한 생산 효율화와 건축물 획일화와의 모순점 해결은 영원한 과제이다. 특히, 내진에 효율적인 접합부 개발에 여러 가지 연구가 필요한 일본의 경우, 북구권 나라와 같은 구조 부재의 오픈 부품화는 쉽게 실현되지 않을 것으로 판단된다. 소형 PC판과 특별히 연구한 접합 공법에 의해 변화에 다양하게 주공간을 실현한 FH-HOYA II(〈사진 13〉)는 그 가능성을 의도한 작품으로 매우 흥미롭다. 현재까지 프리캐스트 콘크리트 구조의 발전은 현장 타설 철근 콘크리트 구조와 동등한 내진 성능을 확보하는 것이 목표였지만, 금후, 건축물, 부재, 접합부에 요구되는 성능이 각각 정량적으로 명확히 파악되면 요구 성능을 만족하는 여러 가지 접합 공법이 고안되리라고 판단된다. 이전에 뉴질랜드에서 개최된 제12회 세계 지진공학 회의에서 발표된 PC 강재와 보통 철근을 병용한 하이브리드 기둥·보 접합 공법 등<sup>1)</sup>,<sup>2)</sup>은 금후의 방향을 보여주고 있는 매우 흥미 깊은 예이다. 건축물 중에서 장기적으로 기능이 변화하지 않는 부분, 즉 오픈 빌딩의 서포트 부분에 관해서는 사용 재료의 물리적 내구성에 가까운 내구성을 확보하는 것이 지속 가능한 건축물을 달성하기 위한 중요한 요인으로 생각된다. 또한, 프리스트레스의 적절한 이용에 의해 고강도·고품질의 프리캐스트 콘크리트 부재를 얻을 수 있고 이것과 면·제진 공법

을 하이브리드화하여 균열, 잔류 변형, 응답 변형 등의 성능을 제어할 수 있도록 하는 것이 고내구성을 갖는 건축물을 실현하기 위한 매우 유력한 수법의 하나라고 판단된다(〈사진 14〉).

### 6. 결론

프리캐스트 콘크리트 구조라는 말에 가장 먼저 머리에 떠오르는 것은 시드니항의 오페라 하우스이다. 이 건물 설계가 설계 경기에 의해 덴마크인 Jorn Utzon에게 정해진 것이 1957년이고 완성한 것이 1963년 이어서 그 당시 건축저널에 자주 등장하고 있었으며, 같은 시대 네르비의 스포츠 팰리스와 함께 필자에게는 인상깊은 건축물이었다. 필자는 뉴질랜드에서 개최된 제12회 세계 지진공학회의에 참석하여 시드니 오페라 하우스를 참관하면서 이 건물의 실현에 힘쓴 건축 관계자의 정열과 기술적인 우수한 발상에 찬사를 보냄과 동시에 금후 참신한 발상에 의한 프리캐스트 콘크리트조 유명 건축물이 지속적으로 축조되기를 바라는 바이다. □

### 참고문헌

1. Stanton, J.F., et al, "A Five Story Precast Concrete Test Building for Seismic Conditions - Design Details", Paper No. 1297, 12 WCEE, 2000.
2. Sritharan, S., Priestley, M.J.N., et al., "A Five Story Precast Concrete Test Building for Seismic Conditions - An Overview", Paper No. 1299, 12 WCEE, 2000.