



## 하이브리드 프리캐스트 보-기둥 접합부의 해석적 연구

최창식<sup>1)</sup> · 김승현<sup>1)</sup> · 최윤철<sup>2)</sup> · 최현기<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>청운대학교 건축설비소방학과

## Analytical Study on Hybrid Precast Concrete Beam-Column Connections

Chang-Sik Choi,<sup>1)</sup> Seung-Hyun Kim,<sup>1)</sup> Yun-Cheul Choi,<sup>2)</sup> and Hyun-Ki Choi<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Environmental Engineering and Building Service, ChungWoon Univ., Hongseong 350-803, Korea

**ABSTRACT** Non-linear finite element analysis for newly developed precast concrete details for beam-to-column connection which can be used in moderate seismic region was carried out in this study. Developed precast system is based on composite structure and which have steel tube in column and steel plate in beam. Improving cracking strength of joint under reversed cyclic loading, joint area was casted with ECC (Engineering Cementitious Composites). Since this newly developed precast system have complex sectional properties and newly developed material, new analysis method should be developed. Using embedded elements and models of non-linear finite element analysis program ABAQUS previously tested specimens were successfully analyzed. Analysis results show comparatively accurate and conservative prediction. Using finite element model, effect of axial load magnitude and flexural strength ratio were investigated. Developed connection have optimized performance under axial load of 10~20% of compressive strength of column. Plastic hinge was successfully developed with flexural strength ratio greater than 1.2.

**Keywords** : beam-to-column joint, hybrid connection, non-linear finite element analysis, axial load, flexural strength ratio

### 1. 서 론

프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC)는 구조물의 안전성, 내구성, 신뢰성, 고품질, 비용절감 효과를 위한 실용적인 수단으로 널리 채택되어 왔다. 그러나 연결부위에 대한 시공성 및 경제성확보의 어려움과 설계지침의 미비로 인하여 지진지역에서의 완전한 적용은 다소 제한되어왔다. PC구조의 사용에 있어 현장타설 콘크리트 구조의 사용을 권장하는 관례적 조항(일체타설에 준하는 성능요구)은 지진지역에서의 PC구조 사용을 주저하게 하고 있다. 이에 ACI Innovation Task Group에서는 PC구조와 RC구조 간에 높은 에너지소산능력과 연성능력을 확보하기 위한 표준 방법론을 제시하였다(ACI-ITG).<sup>1)</sup> 이는 강진 이후에도 구조물이 붕괴되는 것을 방지하기 위해 결합부의 높은 에너지 흡수능력을 요구하고 있으며 일정 수준의 강도 저감 하한치를 제한하고 있다.

과거 모멘트 저항골조에서 PC 부재간의 부적절한 접

합으로 인해 지진에 취약한 PC구조가 다수 있었으며, 이로 인해 고성능 접합부가 요구되기 시작하였다. 이는 PC 부재간 접합부의 설계를 현장 RC구조와 동일한 내진 성능을 발휘하도록 설계하는 계기가 되었다.

일반적으로 콘크리트 구조물은 지진하중과 같은 심각한 비탄성 변형을 일으키는 반복주기하중을 경험할 경우 보나 기둥의 부재 요소보다는 응력부담이 상대적으로 큰 접합부가 취약하다. PC 공법이 적용된 구조물의 경우 부재의 단절에 의한 불연속적인 응력 전달 메커니즘이 접합부에 발달하게 되어 RC 구조물의 접합부보다 낮은 강도 및 변형능력을 보유하게 되는 것이 일반적이다.

PC 공법의 발전은 부재간 접합 지역에서의 원활한 응력전달 메커니즘을 구현하는 방향으로 진행되었다. 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 PC 공법은 half PC 공법으로, PC 부재간 접합부에 부분 PC 부재를 접합하는 방법을 주로 사용한다. Half PC 공법은 부재의 접합에 별도의 공정이 필요하여 비용 및 공기가 크게 소요되기 때문에<sup>2,3)</sup> 최근 해외에서는 완전 PC 공법에 대한 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다.<sup>4,5)</sup>

이에 연구진은 접합부의 시공성 및 단절된 PC 부재간의 효율적인 응력전달이 가능할 수 있도록 Fig. 1에 나타난 바와 같은 철골연결재 및 섬유보강콘크리트를 사용한

\*Corresponding author E-mail : chk7796@naver.com

Received June 26, 2013, Revised August 3, 2013,

Accepted August 13, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

## 2. 기존 접합상세의 해석 방법

일반적으로 PC 접합부는 RC 접합부에 비해 독특한 거동 특성과 다양한 접합상세를 갖고 있으며 큰 비선형 거동에 지배되므로 다양한 종류의 해석 모델이 제시되고 있는 상황이다.

Rami 등<sup>8)</sup>은 PRESS<sup>9)</sup>에서 제시된 하이브리드 접합부의 반복하중에 대한 해석을 수행하였다. 해당 접합부는 기둥 및 보가 완전한 PC로 제작된 형태이며 건식접합 상세만으로 접합부가 구성되어 있다. 기둥과 보가 닿는 면에는 contact element를 사용하여 마찰력에 의해 접합부의 절점이 응력을 전달할 수 있도록 하였으며, 프리스트레싱 텐션과 상·하부에 위치한 주근에 발생하는 마찰 또한 모델링 하였다. 이 때 사용한 마찰 계수는 접합부의 경우 0.5, 철근 및 텐션과 콘크리트 사이에서는 0.05를 사용하였다.<sup>9)</sup>

Rami 등의 연구에서는 3차원 모델을 사용했으나 현재 제안되고 있는 접합부들은 이 연구가 대상으로 하고 있는 접합부와 같이 철골연결재 및 기타 접합 상세에 대한 필요 사항들을 다양하게 보유하고 있다. 최적화된 설계 변수 및 방법론을 도출하기 위해서는 수많은 변수에 대해 검토할 필요가 있으며 이를 위해서는 빠른 속도의 해석 방법이 필요하다. 이에 따라 2차원 모델들이 제시되고 있다.

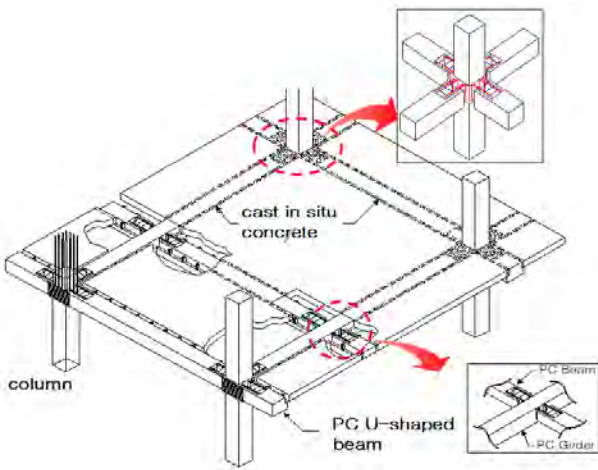
Daniel<sup>10)</sup>은 Rami의 연구에서는 PRESS 접합상세를 대상으로 유한요소해석을 위해 기둥을 관통하는 주철근은 트러스 요소로 모델링한 2차원 모델을 제안하였다. 재료 모델로는 CEB-fip에서 제안하고 있는 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 관계를 사용하였으며, 부착-미끄럼 관계를 콘크리트와 철근 사이에 적용하였다. 해당 모델을 사용하여 해당접합부의 설계 변수를 검토하고 설계식을 제시하였다.

이 연구에서는 일반적으로 사용되는 콘크리트와 철근 및 강재 외에도 섬유보강콘크리트가 사용되었다. 섬유보강콘크리트는 인장응력하에서 큰 강도와 변형능력을 유지하므로 이에 대한 별도의 고려가 필요하다. Tong-Seok Han 등<sup>11)</sup>은 고인성섬유복합체에 대한 반복하중하에서의 모델을 개발하여 유한요소해석에 적용한 결과 높은 정확도를 확보할 수 있음을 확인하였다.

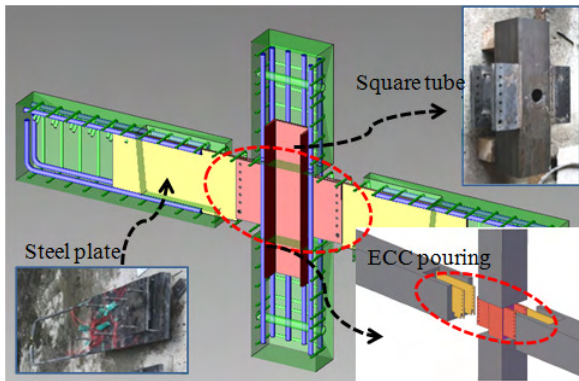
이상의 유한요소 해석과 관련된 연구들을 바탕으로 HPHC 시스템의 접합부에 대한 해석적 연구를 수행하였다.

## 3. 유한요소해석 모델

HPHC 시스템의 접합부에 대한 유한요소해석 위해 이 연구에서는 상용 프로그램인 ABAQUS<sup>12)</sup>를 사용하였다. ABAQUS에서는 콘크리트 및 강재에 대한 반복하중하에서의 구성법칙들을 제시해주고 있으며 접촉요소의 적용을 통해 요소간 마찰에 의한 응력전달이 가능하다.



(a) HPHC system with slabs



(b) HPHC detail

Fig. 1 HPHC (high performance hybrid connection) system

high performance hybrid connection system(HPHC)를 개발하였다.<sup>6)</sup> 개발된 접합부의 특징은 PC 기둥과 보를 현장에서 볼트 조립하여 시공성 및 안정성을 확보하였으며, 접합부에서 발생하는 응력 집중 현상을 방지하기 위해 섬유보강콘크리트 중 타설이 용이한 편에 속하는 ECC (engineered cementitious composite)를 사용하여 접합부의 변형능력을 향상, 적합한 내진성능을 확보할 수 있도록 하였다.

HPHC 시스템은 기존의 실험 연구<sup>6,7)</sup>를 통해 지진지역 내에서 사용이 가능함을 확인할 수 있었으며, 구조적 성능이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 실험 연구를 통해서 다양한 설계 변수에 대해 고려하기 어려우며 접합부 및 주변 부재들 사이의 응력 흐름을 정확하게 파악하기 어렵다. 또한 다양한 하중 상태에 대한 응력 변화 메커니즘을 특정하기 어려워 최적화된 설계 변수로 활용하기에는 부족한 점이 있다. 이 연구에서는 기존 HPHC 실험체를 대상으로 한 유한요소 해석 모델을 제안하고, 해석 모델의 적합성을 평가할 것이다. 제안된 해석 모델을 사용하여, 이 연구에서 수행되기 어려웠던 추가 변수에 대한 변수분석을 실시하여 향후 HPHC 및 유사 접합 형태를 가진 접합부들의 설계에 대한 주요 방법론을 제시하고자 한다.

### 3.1 콘크리트 모델링

해석에서 사용된 콘크리트의 인장 및 압축거동은 Fig. 2에서 나타난 바와 같은 콘크리트의 소성모델을 사용하여 나타낼 수 있다. 1축 인장하에서 응력-변형을 관계는 파괴응력  $\sigma_{tu}$ 에 도달할 때까지 선형 탄성이며, 균열 발생 이후 철근의 영향을 반영한 인장 강화 효과가 나타나도록 지수함수의 형태로 모델링 되었다. 1축 압축하에서의 콘크리트의 응력-변형을 관계는 일반적으로 사용되는 수정된 2차 곡선이 적용되었다. 이 연구에서 사용된 콘크리트의 구성법칙은 concrete damaged plasticity 모델<sup>13)</sup>으로써 1축 인장 및 압축 응력 하에서의 콘크리트의 거동을 묘사함과 동시에 반복 하중 하에서의 강성 감소를 반영할 수 있는 모델이다. 반복하중 하에서의 강성 감소효과는 손상계수인  $d_c$ 와  $d_t$ 에 의해 나타낼 수 있으며 각 값은 스칼라량으로 0에서 1 사이의 값을 가진다. 콘크리트 요소가 다축 응력상태에 놓일 경우 콘크리트의 응답은 파괴 기준면에 의해 결정되며, 이 파괴 기준면은 팽창각, 1축 압축강도에 대한 2축 압축강도의 비, 편심비, 점도에 대한 계수를 실험을 통해 산정하여 사용하도록 하고 있다.

### 3.2 철근 및 강재

철근은 콘크리트 내에 분포되어 콘크리트의 균열 이후 부재에 작용하는 인장응력을 부담할 수 있도록 하였다. 철근의 응력-변형률 관계는 보수적 평가가 가능할 수 있도록 bi-linear 탄소성 모델을 적용하였다. 철근의 항복강도는 실험을 통해 얻어진 결과를 사용하였다. 철골연결

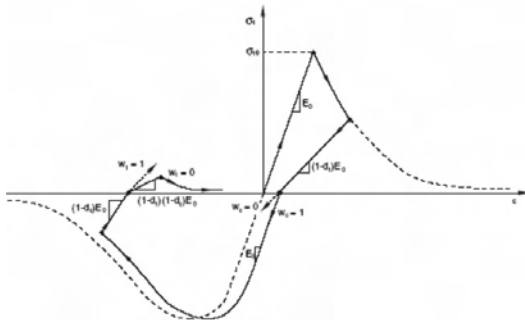


Fig. 2 Uniaxial behavior of concrete

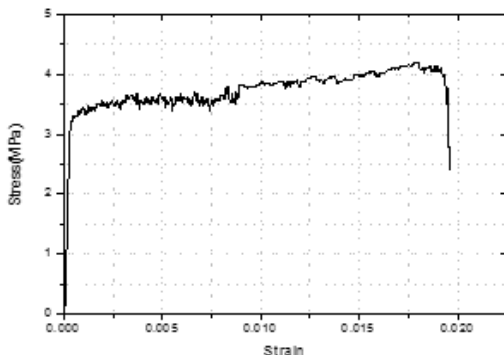


Fig. 3 Uniaxial tensile behavior of ECC

재 또한 철근과 같이 완전 탄소성 bi-linear 모델을 사용하였으며, 항복강도는 인장강도시험 결과를 적용하였다.

### 3.3 ECC

ECC역시 콘크리트와 같은 concrete damaged plasticity 모델을 사용하여 구현되었다. 섬유보강 콘크리트의 경우 압축응력 하에서의 거동은 일반 콘크리트와 크게 다르지 않은 형태를 보이므로 콘크리트의 모델링 방법과 같은 방법을 사용하였다. 그러나 인장 상태의 경우 ECC는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 변형경화현상을 보이므로 응력-변형률 관계로 tri-linear 모델을 사용하였다.

## 4. HPHC 시스템 접합부의 해석

HPHC 시스템의 접합부에 대한 유한요소해석 방법론의 도출과 변수분석에 대한 기초 자료들을 구성하기 위해 기 수행된 실험 결과를 적용하였다.

대상 실험체는 개발된 접합부의 거동을 다양하게 반영할 수 있도록 볼트 접합부의 위치(I-기동면과 일치되게 결합된 상세, O-기동면에서 일정거리 떨어져 결합된 상세), 띠철근의 유무 및 휨강도비의 차이를 변수로 하는

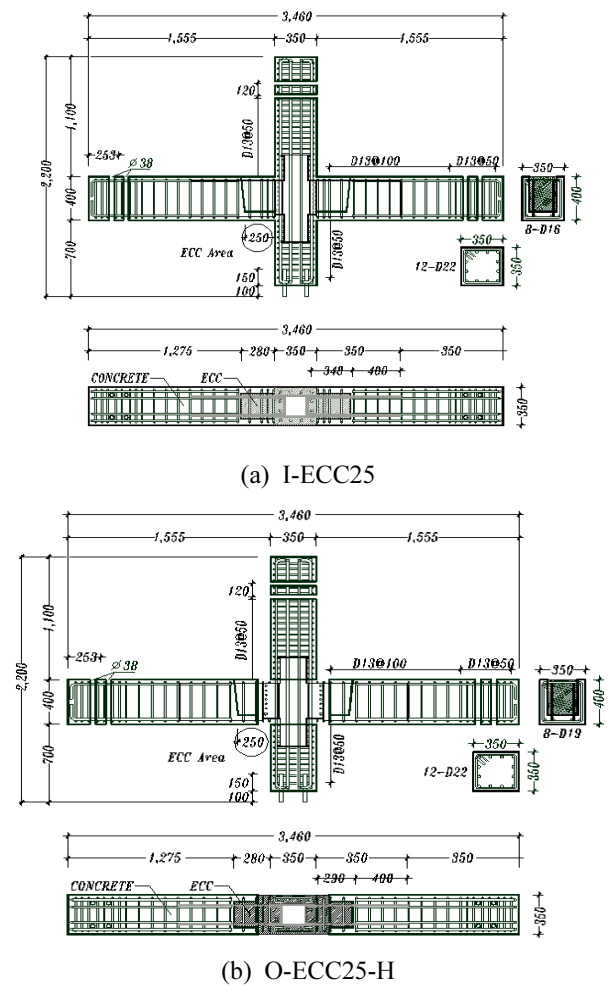
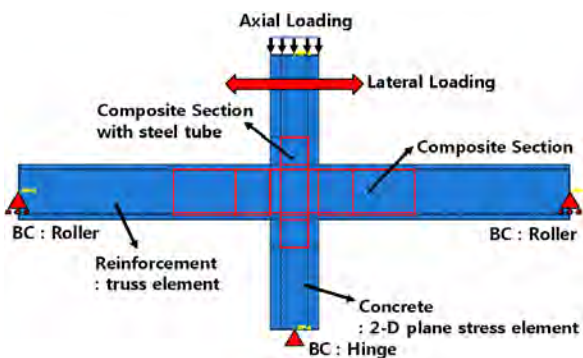


Fig. 4 Details of tested specimen (unit: mm)

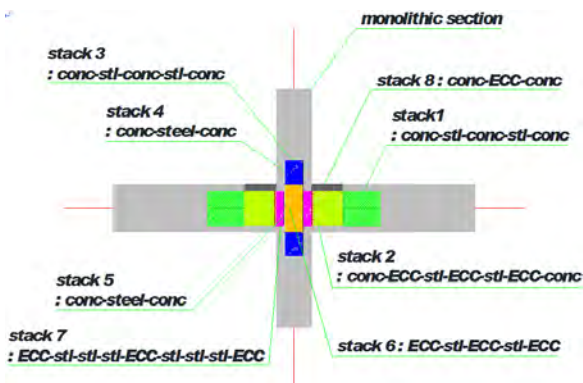
**Table 1** Details of test specimen & material properties

Specimen	Specimen type	Connection method	Hoop bar of Joint area	ECC area (mm)	Column size (mm)	Bram size (mm)	$f'_c$		Axial load (kN)	$\frac{\sum M_c}{\sum M_b}$	$v_{j1}$	$v_{j2}$	$v_{jby}$	$\frac{V_{j2}}{V_{jby}}$
							PC element	ECC element						
1	I-ECC25	Inner connection	×	250 (0.7d)	350 × 350	350 × 400	27.5	40.5	0.1	1.6	1286	964	628	1.53
2	O-ECC25-H		○	250 (0.7d)										

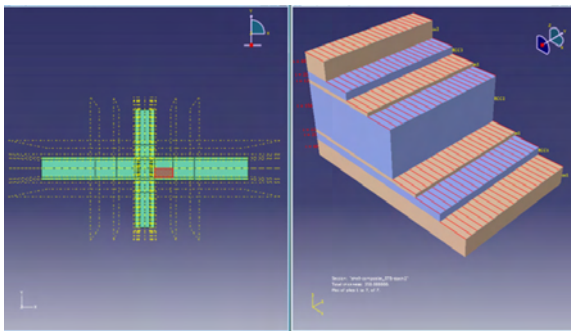
$f'_c$ : compressive strength of concrete and ECC by material test; axial load:  $0.1f'_c A_g$ ;  $\frac{\sum M_c}{\sum M_b}$ : strength ratio predicted by ACI 352R-02;  $V_{j1}, V_{j2}$ : type 1 and type 2 shear strength of joint predicted by ACI 318-11<sup>14)</sup>,  $v_{jby}$ : joint shear strength when beam bar yields,  $\frac{V_{j2}}{V_{jby}}$ : potential shear capacity ( $\frac{V_{j2}}{V_{jby}} > 1$ : failure mode BJ)



**Fig. 5** Finite element model for specimen with element details and boundary conditions



(a) Composite section plan



(b) Ply-stack view

**Fig. 6** Composite section and ply-section

실험체로 설정하였다. 해석모델의 평가에 사용된 실험체 상세는 Fig. 4에 각각 나타내었으며 실험체의 일람은 Table 1에 나타내었다.

#### 4.1 실험체 모델링

유한요소해석 모델의 적합성을 확인하기 위해 유한 요소 해석 결과는 선정된 실험체의 실험 결과와 직접적으로 비교하였다.

Fig. 5에 실험체에 대한 유한요소 해석 모델을 나타내었다. 실험체의 보를 구성하는 철근은 트러스 요소를 통해 모델링 되었으며 기둥으로부터 돌출된 강판은 2차원 쉘 요소를 통해 모델링 되었다. 강판의 좌우에 타설되는 콘크리트 및 ECC 레이어는 ABAQUS에서 제공하는 ply-stack 요소를 사용하여 모델링을 수행하였다. 기둥은 콘크리트의 경우 2차원 쉘 요소, 철근은 트러스 요소로 구성되었으며 접합지역은 ply-stack 요소(Fig. 6 참조)를 통해 구성되었다. 여기서, ABAQUS에서는 쉘 요소에 하나 이상의 재료특성을 입력할 수 있도록 복합적층단면을 제공한다. 복합적층단면을 사용할 경우 재료특성과 두께 및 방향성을 정의하여 쉘요소의 강성을 산정한다. 이는 ply-stack이라는 이름으로 ABAQUS 내에서 시각화가 가능하며, 이 연구에서 사용된 모델의 예시를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 또한 PC의 특성으로 나타나는 gap 및 강판과 콘크리트 사이에서 발생하는 슬라이딩을 고려하기 위해 보와 기둥을 별도의 요소로 구성하였다. 이 때 사용된 마찰 계수는 기존 연구 결과<sup>14)</sup>를 반영하여 0.25를 사용하였다. 실험조건과 동일한 구성을 위해 가력조건 및 경계조건을 설정하였다. 기둥의 하부는 힌지를 통해 경계조건을 구성하였으며, 보의 양단은 구속한 롤러가 사용되었다. 압축력은 하중의 작용지점에서 응력집중에 따른 해석과정의 조기 실패를 방지하기 위해 분포하중의 형태로, 횡방향 하중은 기둥 상부의 구속과 함께 집중하중의 형태로 변위를 제어하였다.

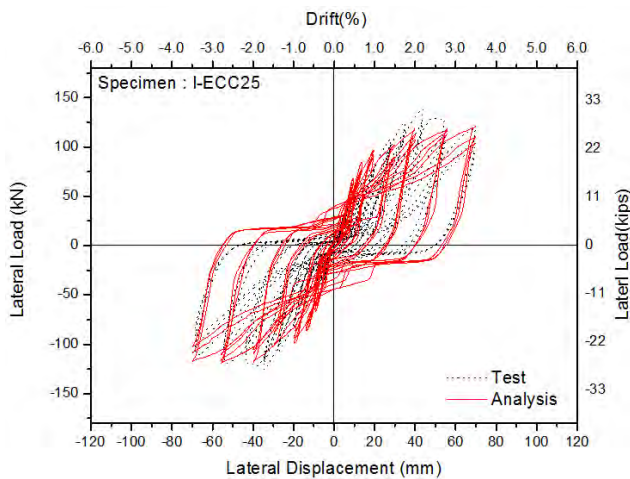
## 4.2 하중-변위 관계 및 파괴패턴

유한요소해석에 의해 추정된 하중-변위관계와 실험 결과로 취득한 하중-변위 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, 실험체 I-ECC25에 대한 유한요소 해석 결과는 실험 결과와 유사한 형태를 잘 나타내는 것으로 판단된다. 해석 초기에서는 실험 결과에 비해 큰 강성을 보이는 것으로 나타났으나, 해석이 진행될수록 유사한 강성을 보유하는 것이 나타났다. 그러나 최대하중 발현에 있어서는 해석 결과가 실험 결과에 비해 정가력에 있어서는 14% 낮은 결과가 도출되었으며, 부가력에서는 7% 낮은 결과가 도출되었다. 이는 실험 후반에서 나타난 보의 소성힌지 발생에서 드러나는 철근의 변형 경화 현상이 철근의 응력-변형률 관계에 묘사되어 있지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

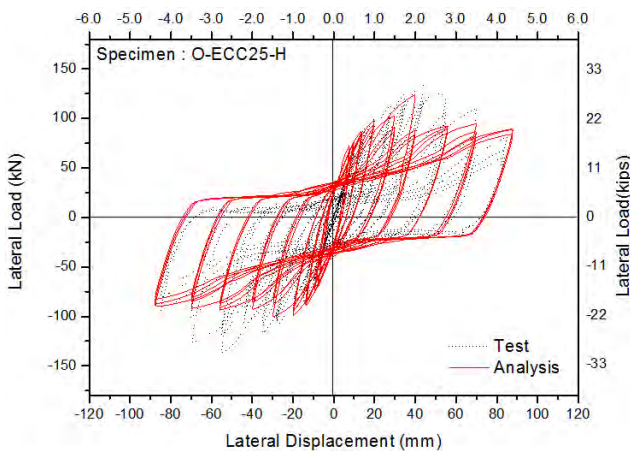
볼트접합위치가 다르며, 접합부 내에 띠철근이 배치되어 있는 실험체인 O-ECC25-H의 경우 역시 초기 강성이 크게 나타났다. 정가력에서의 최대 하중은 해석 결과가 실험 결과에 비해 9% 작게 나타났으나 부가력에서는

30%로 큰 차이를 보였다. 이는 O-ECC25-H의 경우, 최대하중 발현 이후 소성힌지 발생시 철근과 강관의 변형 경화 현상이 반영되지 않았기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

하중-변위 관계를 비교해 본 결과, 최대 하중 발현 시

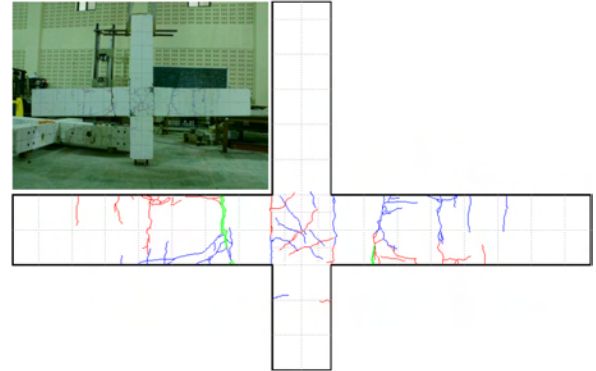


(a) I-ECC25

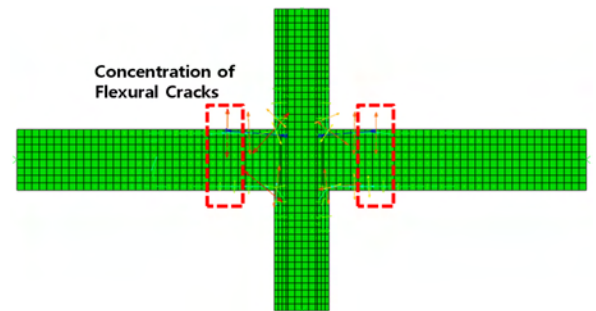


(b) O-ECC25-H

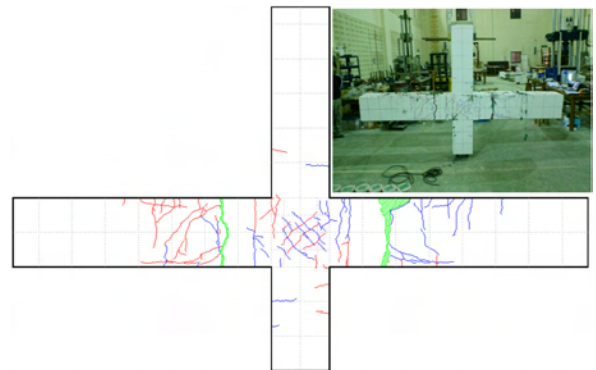
Fig. 7 Comparison of FE analysis results with experiment results (load-displacement)



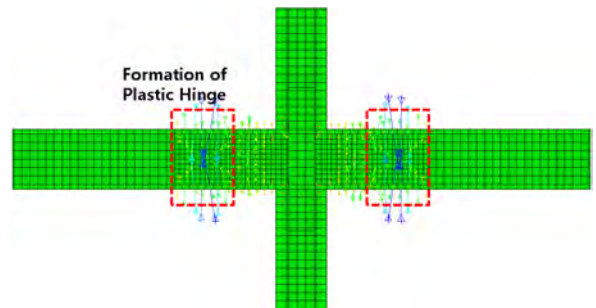
(a) I-ECC25 (test results)



(b) I-ECC25 (analysis results)



(c) O-ECC25-H (test results)



(d) O-ECC25-H (analysis results)

Fig. 8 Comparison of FE analysis results with experiment results (failure pattern)

파괴 패턴이 실험 결과와 유사하게 나타나야 함을 확인할 수 있었다.

Fig. 8에 실험의 파괴패턴과 해석 결과 나타낼 수 있는 파괴 패턴을 나타내었다. 실험 변수와 상관없이 ECC 및 강판이 적용된 실험체의 경우 ECC 타설 면적에 따라 소성힌지부가 발달되었으며, 접합부의 파괴분포는 나타나지 않았다. 이러한 실험 결과와 비교했을 경우 해석에서 나타난 소성힌지부의 위치는 실험 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

### 5. HPHC 시스템 접합부의 변수해석

이 장에서는 HPHC 시스템에 대해 기둥에 작용하는 압축력의 크기와 휨강도비를 대상으로 변수해석을 수행하였다.

#### 5.1 축하중의 영향

철근콘크리트 구조물의 보-기둥 접합부는 큰 응력이 작용하게 되어 구조물 전체의 파괴 패턴에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 철근콘크리트 구조물에서 축하중은 전단파괴에 있어서 중요한 인자다. 그러나 현행 접합부 설계기준은 축하중에 대한 영향을 고려하도록 하는 기준<sup>15)</sup>과 고려하지 않는 기준<sup>15)</sup> 등 다소 모호한 기준으로 설정되어 있다. 축하중에 대한 기존 연구 결과 축하중은 기둥 단면의 압축연단으로부터 중립축까지의 깊이를 크게 하여 주변 보 부재와 연결되는 철근과 콘크리트 사이의 부착력을 향상시켜 접합부의 성능을 향상시키는 역할을 하는 것으로 Paulay<sup>2)</sup>는 보고하였다.

기존 연구자들의 경우 일정수준까지 기둥에 작용하는 축하중은 접합부의 구속력을 개선시키고 전단강도를 증가시키는 연구 결과를 발표하고 있다. 그러나 항복하중 이후 접합부 균열 진전이 다소 급작스럽게 진행되고 있으며, 최대 하중 이후의 강성저하는 매우 크게 나타나는 것으로 보고하고 있다. 이에 Lin<sup>17)</sup>은 압축력이 기둥이 보유한 압축강도의 30%를 초과할 경우 접합부의 강도 발현에 불리하다는 결과를 보고하였으며, Fu<sup>18)</sup>는 접합부에 작용하는 전단응력과 압축응력의 관계를 통해 압축력이 접합부의 전단강도에 미치는 영향을 보고하였다.

이 연구에서는 HPHC 시스템 접합부에 대한 압축력의 영향을 파악하기 위해 압축력을 변수로 유한요소 해석을 수행하였다. 이 연구에서 수행된 유한요소 해석은 압축력을 가하는 스텝과 휨하중을 가하는 스텝으로 구성된다. 이 때 압축력을 가하는 스텝은 독립적으로 구성될 수 있으며 최종적으로 가해진 압축력이 지속적으로 유지될 수 있다. 압축력은 0으로부터 기둥 단면이 보유한 압축강도 50%까지 값의 범위에서 검토하였으며 I-ECC25를 대상으로 검토하였다.

해석 결과는 back-bone 커브 형식으로 Fig. 9에 모든

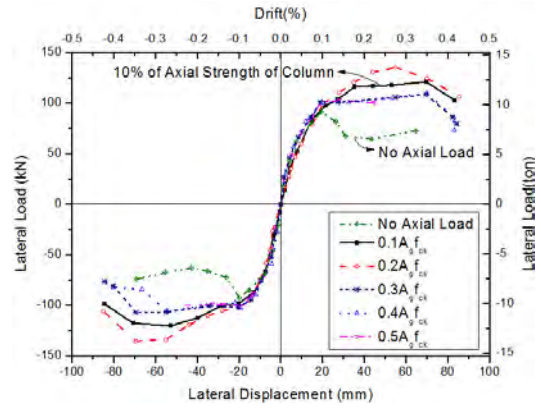
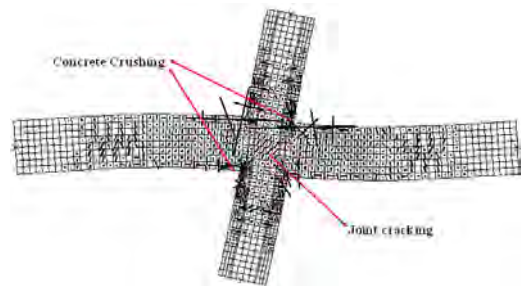
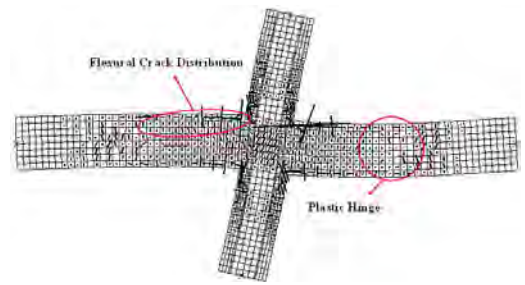


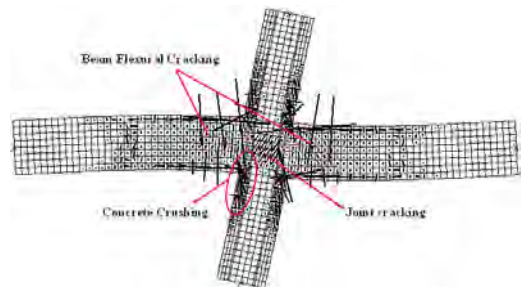
Fig. 9 Comparison of FE analysis according to the variation of axial load



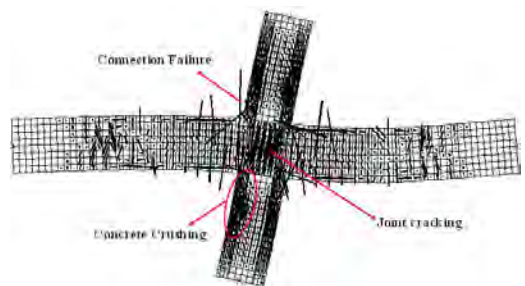
(a) Axial load ratio 0.1



(b) Axial load ratio 0.2



(c) Axial load ratio 0.3



(d) Axial load ratio 0.5

Fig. 10 Crack pattern by axial load I-ECC25-0.2

축력비에 대하여 나타내었다. 또한, Fig. 10에는 큰 영향을 주는 축력비에 대하여 실험체의 균열 및 변형 발생 정도를 나타내었다.

해당 상세를 가진 HPHC 접합부에 대해 강도 측면에서 가장 좋은 성능은 20%의 축력비를 받는 경우였으며 20%를 초과할 경우 강도의 감소 및 조기 파괴가 나타나는 현상을 확인할 수 있었다. 30~40%의 축력을 받을 경우에는 유사한 거동을 하였으나 축력비가 높아질수록 변형능

력이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 50%의 축력비를 가진 실험체는 기둥면에서의 콘크리트 압괴로 인해 조기파괴되는 현상을 관찰할 수 있었다. 또한 축력이 작용하지 않을 경우, 접합부에서 균열이 빠르게 확장되어 강도의 감소가 빠르게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 해당 접합부를 설계할 경우 10~30% 사이의 축력비가 기둥에 작용하도록 해야 할 것으로 판단된다.

## 5.2 휨강도비의 영향

철근콘크리트로 모멘트 골조를 구성할 경우 기둥과 보의 모멘트 강도 비율과 소성 힌지의 발생 위치가 중요한 설계요소가 된다. HPHC는 강판에 의해 모멘트 강도비가 보 내에서도 달라질 수 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다.

ACI-ASCE 352<sup>16)</sup>에서는 특수모멘트저항골조에서 기둥의 조기파괴를 방지하기 위해 보-기둥 접합부에서 상,하 기둥 휨강도의 합( $\sum M_c$ )이 양쪽 보의 휨 강도의 합( $\sum M_b$ )보다 1.2배 크도록 규정하고 있다.

일반적으로 휨 강성비가 1.0보다 조금 큰 경우에는 소성힌지가 보에 형성되지만 대부분의 피해가 접합부 파급되어 접합부에 집중되며, 1.0보다 훨씬 클 경우 접합부에서 조금 떨어진 보 부분에 발생하는 것으로 보고되고 있다. 접합부의 강도에 있어 1~1.9범위의 휨 강성도를 취할 경우 보-기둥 접합부의 강도가 개선되는 것으로 알려져 있다.

HPHC의 성능평가에 사용된 실험체는 휨강도비가 1.6인 상태로 계획되어 있다. 그러나 실험 결과 제안된 상세의 경우 접합부에 설치된 연결재(철골)의 강성이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 기준에서 제시하고 있는 휨강도비의 영향력이 거의 없는 것으로 나타났다. 이 절에서는 개발된 접합상세의 휨강도비 영향력을 판단하기 위해 1~1.6사이에 분포한 휨강도비를 대상으로 변수해석을 수행하였다.

휨강도비는 최대 하중 발현 시 소성 힌지의 위치에 영향을 주게 되므로 유한요소 해석 결과로 도출된 파괴 형태를 먼저 검토하였다. 대부분의 경우 보의 파괴가 주요 파괴 형태가 되었으나, 휨강도 비가 1일 경우접합부 파괴가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 휨강도 비의 증가는 소성힌지의 위치를 기둥면으로부터 멀어지게 해주었으며, 소성힌지 위치에서 더 큰 곡률을 경험하게 하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 균열의 집중 현상도 휨강도비의 증가에 따라 보의 특정 위치에 집중되었다.

파괴 패턴과 함께 철근의 변형률 분포 경향 또한 휨강도비의 영향을 도출하는 데 중요한 역할을 한다. 보 주근에 발생하는 변형률의 증가 경향으로 소성힌지의 위치를 확인할 수 있다. 해석 결과 도출된 변형률의 분포 상태를 Fig. 12에 나타내었다.

철근의 응력은 철근의 변형률에 탄성계수를 곱하여 나

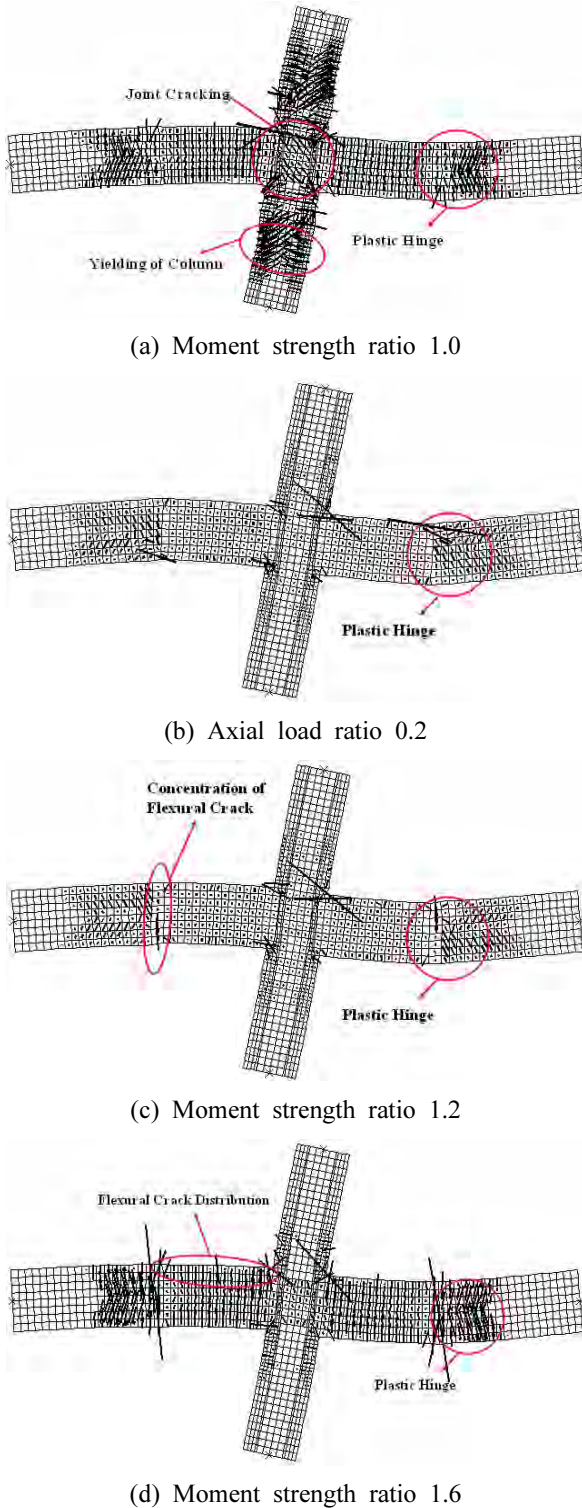
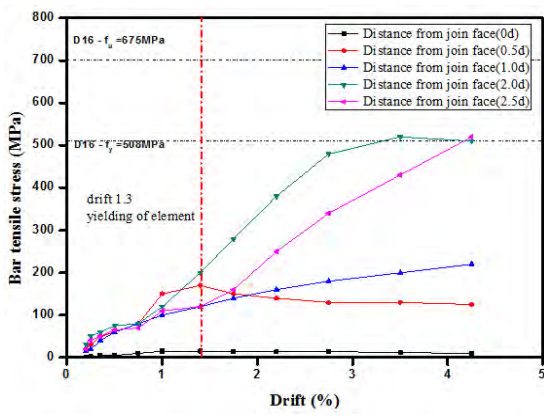
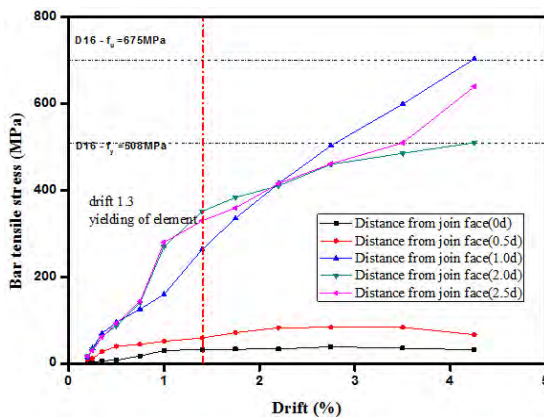


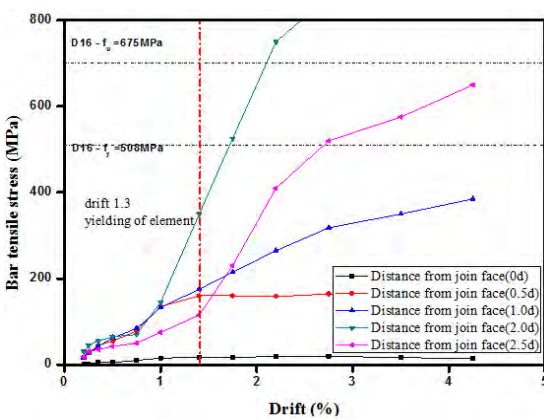
Fig. 11 Crack pattern according to moment strength ratio



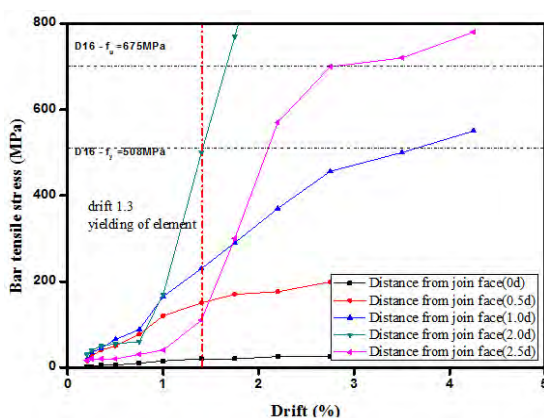
(a) Moment strength ratio 0.1



(b) Moment strength ratio 0.2



(c) Moment strength ratio 0.3



(d) Moment strength ratio 0.5

Fig. 12 Stress distribution according to moment strength ratio

타낸 것이다. 해석 결과 모든 실험체가 철근의 항복을 경험하였으나 휨강도비가 작은 실험체의 경우 철근의 응력 발생 정도가 더 늦게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 휨강도비가 1일 경우 최대 강도 발생 시 보의 주근이 항복을 시작하는 것을 확인할 수 있었으며 휨강도비가 1.6에서 Park<sup>19)</sup>의 항복점 판단 방법을 이용했을 때의 항복변위에서 주근의 항복을 경험할 수 있음을 확인할 수 있었다. 주근의 항복이 최초로 발생하는 위치는 기둥면으로부터 기둥 깊이의 2배인 지점에서 발생하는 것으로 철골연결재가 끝나는 지점으로 나타나는 바, HPHC의 주요 개발 목적 중 하나였던 소성힌지 위치의 특징이 가능함을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 시공안전성 및 접합부의 안정적 강도 발현을 위해 개발된 HPHC의 비선형 유한요소해석 방법을 제시하였다. 비선형 유한요소해석에 의한 변수분석을 통해 기존 실험연구 과정에서 검토하기 어려웠던 변수에 대한 검토를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

HPHC의 유한요소해석에 있어서 철골연결재와 콘크리트 사이의 마찰계수로는 기존 연구에서 제안하고 있었던 0.25가 적합한 것으로 나타났으며 ECC의 모델링은 압축에서는 일반콘크리트의 응력-변형률 관계를, 인장에서는 bi-linear 관계를 쓸 경우 안전성이 보장된, 적합한 해석 결과를 도출할 수 있는 것으로 나타났다. 반복하중에 의한 해석 결과 실험 결과에 비해 최대 하중 및 이에 관계된 변위는 안전하게 예측하는 것으로 나타났으나, 핀칭 현상이 실험 결과가 더 크게 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기둥과 보 사이에서의 들뜸 현상에 대한 묘사가 2차원 모델링으로는 완벽하게 수행되지 않아 발생한 현상으로 판단되며, 더 정확한 해석이 필요할 경우 3차원 모델링을 통해 들뜸 현상이 나타날 수 있도록 해야 할 것으로 판단된다.

변수분석에 있어 기둥에 작용하는 축력이 기둥 축강도의 10~20% 내외에서 작용할 경우 해당 상세 및 재료가 보유한 최대의 성능을 발휘할 수 있음을 확인할 수 있었다. 30%를 초과할 경우에는 접합부가 과도한 압축응력 및 전단응력의 조합에 의해 조기파괴 될 수 있으므로 설계시에 이를 반영해야 할 것으로 판단된다. 또한, 현행 설계기준이 제한하고 있는 휨강도비 1.2로 설계되어 있는 경우 설계자가 의도하는 위치에서 소성힌지의 발생을 유도할 수 있는 것으로 나타났다. 반면 소성힌지의 발생 시점이 항복강도에 근접하게 하기 위해서는 휨강도비가 1.6에 이르러야 하는 것으로 나타나, 성능설계를 수행할 경우 이를 반영하여 휨강도비를 정해야 할 것으로 판단된다.



## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2013R1A1A2010717)지원과 기술 표준화(11기술표준화07-01)사업의 지원으로 수행되었다.

## References

1. ACI T1.1R-01, "Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing," *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 2002, pp. 1-7.
2. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, A Wiley Interscience Publication, 1992, pp. 250-263.
3. Ha, S. S., Kim, S. H., Moon, J. H., and Lee, L. H., "An Experimental Study on the Structural Behavior of the half PC Beam-Column Interior Joint with Strand," *Journal of Architectural Institute of Korea (AIK)*, Vol. 23, No. 9, 2007, pp. 3-11.
4. Restrepo, J. I., Park, R., and Buchanan, A. H., "Test on Connections of Earthquake Resisting Precast Reinforced Concrete Perimeter Frames of Buildings," *PCI Journal*, Vol. 40, No. 4, 1995, pp. 44-61.
5. Abdel-Fattah, B. A. and Wight, J. K., "Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resisting Design of RC Buildings," *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 1, 1987, pp. 31-39.
6. Choi, H. K., Yoo, C. H., Choi, Y. C., and Choi, C. S., "Structural Capacity Evaluation of Hybrid Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Loading," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 3, 2010, pp. 325-333. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.3.325>)
7. Choi, H. K., Choi, Y. C., and Choi, C. S., "Hysteretic Behavior and Seismic Resistant Capacity of Precast Concrete Beam-to-Column Connections," *Earthquake Engineering Society of Korea (EESK)*, Vol. 14, No. 4, 2010, pp. 61-71.
8. Hawileh, R., Rahman A., and Tabatabai, H., "Nonlinear Finite Element Analysis and Modeling of a Precast Hybrid Beam-Column Connection Subjected to Cyclic Loads," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 9, 2010, pp. 2562-2583.
9. Priestley, M. J. N., "Overview of PRESSS Research Program," *PCI Journal*, Vol. 36, No. 4, 1991, pp. 50-57.
10. Camarena, D., "Finite Element Analysis of Precast Prestressed Beam-Column Concrete Connection in Seismic Construction," Chalmers University of Technology, Master's Thesis, 2006.
11. Han, T. S., Feenstra, P. H., and Illington, S. L., "Simulation of Highly Ductile Fiber-Reinforced Cement-Based Composite Components Under Cyclic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, 2003, pp. 749-757.
12. ABAQUS Theory Manual: Karlsson & Sorensen, Inc.
13. Lee, J. and Fenves, G. L., "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 8, 1998, pp. 892-900. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:8\(892\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)))
14. Mittelstädt, J., *Numerical Studies on Composite Action with Concrete Filled Hollow Section Columns*, Studienarbeit of TUHH Matr. Nr. 30978, 2008, pp. 7-12.
15. NZS 3101: Part 1, *Concrete Structures Standard (NZS 3101:1995)*, Standard Association of New Zealand, Wellington, New Zealand, 1995, pp. 133-136.
16. ACI-ASCE Committee 352, *Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R-02)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2002, pp. 1-37.
17. Lin, C. M. and Restrepo, J. I., "Seismic Behaviour and Design of Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joints," *Bulletin of the New Zealand for Society Earthquake Engineering*, Vol. 35, No. 2, 2002, pp. 108-128.
18. Fu, J. P., Chen, T., Wang, Z., and Bai, S., "Effect of Axial Load Ratio on Seismic Behaviour of Interior Beam-Column Joints," *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand (12WCEE), 2000, pp. 1-5.
19. Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, 1975. pp. 11-47.

**요약** 이 연구에서는 기존에 수행된 시공성과 경제성이 향상되고 중진 지역에서 사용 가능한 새로운 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합상세의 비선형 유한요소해석이 수행되었다. 해당 상세는 복합구조를 기반으로 함으로써 기둥 내에는 각관을 보유하고 있으며 보에는 강관이 매입되어 있는 복잡한 단면을 보유하고 있다. 또한 콘크리트와 강재뿐만 아니라 ECC라는 새로운 재료를 사용함에 따라 요소의 선택 및 재료모델의 결정에 대한 방법론을 제시하였다. 비선형 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 수행되었으며 요소 및 재료 모델은 ABAQUS에서 제공하는 모델들을 사용하였다. 비선형 유한요소해석 결과 기 수행되었던 실험 결과에 유사하거나 보수적으로 평가함으로써 변수분석에 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. 구축된 유한요소해석 모델을 통해 해당 상세의 성능에 대한 압축력의 영향, 휨강도비의 영향에 대해 분석하였다. 압축력의 경우 기둥 압축강도의 10~20%에서 가장 좋은 성능을 발휘할 수 있었으며, 휨강도비 1.2 이상에서 기둥의 항복 없이 보의 소성힌지를 유도할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 보-기둥 접합부, 하이브리드 연결부, 비선형 유한요소해석, 압축력, 휨강도비