



## 반복하중을 받는 하이브리드 프리캐스트 보-기둥 접합부의 성능평가

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

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

### Structural Capacity Evaluation of Hybrid Precast Concrete Beam-Column Connections Subjected to Cyclic Loading

Hyun-Ki Choi,<sup>1)</sup> Chang-Hee Yoo,<sup>1)</sup> Yun-Cheul Choi,<sup>2)</sup> and Chang-Sik 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 350-701, Korea

**ABSTRACT** In this study, new moment-resisting precast concrete beam-column joint made up of hybrid steel concrete was developed and tested. This beam-column joint is proposed for use in moderate seismic regions. It has square hollow tubular section in concrete column and connecting plate in precast U-beam. The steel elements in column and beam members were connected using bolt. Furthermore, in order to prevent the premature failure of concrete in hybrid steel-concrete connection, ECC(engineered cementitious composite) was used. An experimental study was carried out investigating the joint behavior subjected to reversed cyclic loading and constant axial compressive load. Two precast beam-column joint specimens and monolithic reinforced concrete joint specimen were tested. The variables for interior joints were cast-in-situ concrete area and transverse reinforcement within the joint. Tests were carried out under displacement controlled reverse cyclic load with a constant axial load. Joint performance is evaluated on the basis of connection strength, stiffness, energy dissipation, and displacement capacity. The test results showed that significant differences in structural behavior between the two types of connection because of different bonding characteristics between steel and concrete; steel and ECC. The proposed joint detail can induce to move the plastic hinge out of the ECC and steel plate. And proposed precast connection showed better performance than the monolithic connection by providing sufficient moment-resisting behavior suitable for applications in moderate seismic regions.

**Keywords :** hybrid connectin, beam-column joint, engineered cementitious composite, joint shear reinforcement

### 1. 서 론

국내의 건설시장은 노동에 대한 인식이 변화하면서 젊은 기능공의 감소에 따른 노동 인력 수급의 문제, 그로 인한 임금의 상승으로 빚어질 수 있는 건축물의 품질 저하는 시급히 해결해야 할 문제로 인식되고 있다. 이러한 국내 건설시장에 대한 사회적 경향에 대한 문제점을 해결하기 위해서는 기존 구조시스템의 장점을 극대화하고, 경제성 및 구조안전성이 확보된 새로운 구조시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다. 국내 건설업계에서 사용하고 있는 하나의 방안으로 프리캐스트 콘크리트(precast concrete; 이하 PC) 구조가 주목받고 있다.

대표적인 공업화 공법의 하나인 PC 공법은 콘크리트의 품질관리가 가능하고 현장 타설 콘크리트 공법에 비

해 노동력 감소와 공기를 단축시킬 수 있는 특징을 갖고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 일체화된 현장 타설 콘크리트에 비해 지진하중과 같은 심각한 비탄성 변형을 일으키는 반복주기하중을 경험할 경우 보나 기둥의 부재 요소보다는 응력부담이 상대적으로 큰 접합부가 취약하며<sup>2)</sup> PC 공법의 경우 부재간 단절에 의한 응력 불연속 구간이 접합부에 형성되어 일체 타설된 RC구조와 같은 성능을 발휘하기가 쉽지 않다. 이에 PC 부재를 이용한 구조시스템은 시공성이 확보되고, 구조성능 향상 및 일체성 확보를 위한 접합부 상세 개발에 초점을 맞추어 연구들이 진행되어 왔다.

일반적으로 국내에서 사용되고 있는 대부분의 PC 골조 건물들은 PC 부재 간 접합부에 부분 PC(이하; half PC)를 적용하여 현장타설부에 의해 일체화된 성능을 발휘하도록 하고 있다. 이러한 half PC 공법의 시공 방법은 half PC 보를 이미 설치되어 있는 half PC 기둥에 얹어진 상태에서 철근을 배근하고 현장에서 일부 타설(topping concrete)하여 부재간 연속성을 확보하는 공법으로 half PC 보의 상부 철근은 접합부를 관통하여 연속되

\*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr  
 Received September 1, 2009, Revised January 14, 2010,  
 Accepted February 10, 2010  
 ©2010 by Korea Concrete Institute

어 설치되나, half PC 보 하부 철근이 접합부 내에서 단절되기 때문에 일체거동을 확보하기 위해 half PC 보 하부철근을 밖으로 돌출시켜 접합부에 정착시켜야 한다. 그러나 네 방향에 보가 설치될 경우 보 하부철근이 접합부내에 집중되어 철근의 배근이 어렵고, 철근 간섭으로 인해 배근이 안되는 경우도 발생한다. 이러한 half PC 시공은 일반 RC 공법과의 차별성이 적어 오히려 시공상의 불편함을 초래하고 있다.<sup>3,4)</sup> 이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 1과 같이 접합부의 시공성 및 단절된 PC부재간의 효율적인 응력전달을 위해 철골연결재 및 HPHRCs의 일종인 ECC(engineered cementitious composite)를 적용한 새로운 접합상세를 개발하였다.

철골연결재는 PC 기둥과 보에 매립되어 제작되는 철골 각관(square tube)과 철판(steel plate)을 현장에서 볼트 접합시킨 후 접합부 일부에 ECC를 타설하여 작업을 완료하도록 계획하였다. 개발된 상세의 특징은 각 부재간 접합을 철물을 통해 간단하게 연결이 가능하여 시공성이 우수하며, 접합부 내에 타설된 ECC의 경우 합성섬유를 시멘트 체적비 1% 정도 투입하여 보통 콘크리트보다 16%의 인장변형능력(tensile deformability)을 확보할 수 있도록

록 하여 지진 등과 같은 수평하중에 의해 발생하는 전단력에 충분한 인성확보가 가능하여 접합부의 내진성능 향상을 기대할 수 있도록 하였다. 또한 이 연구에서 제안하고 있는 현장타설을 위해서는 유동성 확보가 필수적이므로 합성섬유의 종류 및 체적비 등을 변화시켜 타설용 ECC를 새롭게 개발하여 적용하였다.

이 연구에서는 보-기둥 내부 접합부를 대상으로 접합부의 구조적 특성을 파악하고, 중진지역에서의 접합부 요구 구성능을 만족하여 현장적용 가능 여부를 실험적으로 평가하고자 한다.

## 2. HPHC 시스템의 개요

접합부에서 일체성과 시공성을 확보하는 것이 PC공법의 핵심이다. 이 연구에서 개발한 HPHC(high performance hybrid connection) 시스템은 간단한 철골접합부를 갖고 있으며 접합부 일부에 ECC를 타설함으로써 시공성 및 효율적인 응력전달을 기대할 수 있다.

HPHC 공법은 PC 기둥과 PC 보에 철골연결재(square tube & steel plate) 및 ECC를 사용한 합성 구조 시스템의 일종이다. 특히 보-기둥 접합부를 기둥 및 보에 삽입된 철물을 이용하여 볼트로 연결함으로써 건식공법이 가능하도록 하였다. 철골 연결재와 U형 부분 PC 보, 철골 연결재의 기둥을 사용한 것으로 Fig. 1과 같이 기둥에 매립되어 제작된 각형강관과 U형 단면의 보에 매립된 철판 연결재를 현장에서 조립하여 볼팅하는 것으로 조립이 완성되며, 접합부 일부에 타설되는 ECC와 철골연결재를 통해 일체성을 확보하고 있다. 여기서, U형 보의 철판연결재는 보의 주근과 용접시킴으로써 보의 응력을 접합부로 전달하게 된다. PC 보와 ECC의 일체성을 증가시키기 위해 요철 및 스티드를 둘 수 있으며 ECC가 타설되는 보의 U형 부분에는 보의 전단철근을 설치할 수 있으며 기둥 접합부 부분에 타설되는 ECC의 성능에 따라 접합부 횡보강근을 다양하게 배치 할 수 있도록 하였다. 이러한 접합부 상세는 건식화가 가능한 공법으로 접합부에서 교차되는 철근의 상호간섭이 없으며 PC 보의 하부 철근이 외부로 돌출되지 않아 공장에서 제작이 용이하다. 시공순서는 1) PC기둥 설치 후 PC 보를 기둥에 매립된 각형강관에 조립한 후 볼팅하여 조립한 뒤, 2) 슬래브를 동일한 연결철물을 사용하여 설치 한 후 3) 볼트에 초기 긴장력을 가하여 접합부의 강성 및 내진 성능이 향상되도록 하여, 4) 각 접합부에 ECC를 타설하여 설치를 마감한다.

## 3. 실험 개요

### 3.1 실험 계획

이 연구에서 개발된 HPHC 구조 시스템 접합부의 구조성능을 분석하기 위해 보와 기둥이 “+”연결된 내부 실

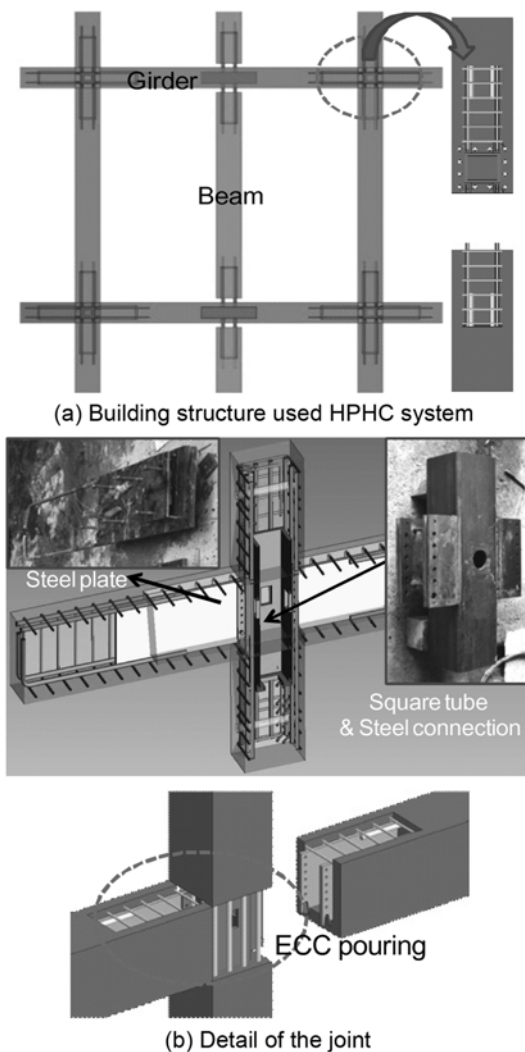


Fig. 1 High performance hybrid connection system (HPHC)

험체를 계획하였으며 구조적 성능에 중요한 영향을 미치는 U자형 보에 타설되는 ECC의 면적 및 접합부의 횡보 강근 유무를 주요 실험 변수로 하였다. 보 및 접합면에 타설될 ECC의 높은 인장변형능력에 따라 보-기둥 접합면에 발생하는 소성힌지를 보의 내측으로 확산시킬 수 있어 보에 타설될 ECC의 범위를 기존연구에서<sup>5)</sup> 제안된 소성힌지의 이동위치인 1.0d를 기준으로 0.7d와 1.4d로 설정하였다.

모든 PC 기둥의 크기는 350 × 350 mm이며 PC 기둥에 삽입되는 강관은 □-200 × 200 × 12의 기성 형강을 사용하였으며 보와의 연결부위는 양면용접을 하였다. 보는 350 × 400 mm이며 PC 보에 삽입되는 철관은 PL-334 × 748 × 12를 사용하였다. 보와 기둥의 현장연결을 쉽게 하기 위해 보철물 하부에 홈을 두어 기둥에 삽입된 각관과의 연결을 쉽도록 하였다. 콘크리트의 공칭압축강도는 27 MPa이며, 연결철물 및 철근은 SD400이다. 접합부 내에 타설될 ECC의 경우 합성섬유를 시멘트 체적비 1%정도 투입하여 보통 콘크리트보다 3%의 인장변형능력 (Tensile deformability)을 확보할 수 있도록 하였다. 섬유 콘크리트는 지진 등과 같은 수평하중에 의해 발생하는 전단력에 충분한 인성확보가 가능하여 접합부의 내진성능 향상을 기대할 수 있다. 그러나 이 시스템에서 제안하고 있는 현장 타설을 위해서는 유동성 확보가 필수적이므로 타설용 ECC를 새롭게 개발하여 적용하였다.

모든 실험체는 보 항복 후 접합부가 파괴되는(BJ) 보-기둥 실험체로서 접합부의 내력은 식 (1)과 같이 ACI 318-05<sup>6)</sup> 기준의 Type 2에 의해 계산하였다.

$$V_{j2} = 0.083\gamma\sqrt{f_{ck}}b_jh_c \quad (1)$$

여기서  $V_j$ 는 접합부 전단강도,  $\gamma$ 는 접합부의 종류 및 내진 구역에 대한 계수(Type 1, 2=20, 15),  $f_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도,  $b_j$ 는 접합부의 폭,  $h_c$ 는 접합부의 높이이다. 보의 주인장철근이 항복할 때의 접합부의 수평 전단력  $V_{jby}$ 는 식 (2)에 의하여 계산하였다.

$$V_{jby} = \left(\frac{l_c}{z_b} - 1\right)V_{by}\frac{l_b}{l_c} - \frac{h_c}{z_b}V_{by} \quad (2)$$

여기서  $l_c$ 는 기둥의 높이,  $z_b$ 는 보의 상하부 주철근의 중심간 거리,  $l_b$ 는 보의 길이,  $h_c$ 는 기둥단면의 높이이다. 보가 항복할 때의 전단력  $V_{by}$ 는 식 (3)에 의하여 계산하였다.

$$V_{by} = A_s f_{by} j d / l_b \quad (3)$$

여기서  $A_s$ 는 보의 주인장철근의 총 단면적,  $f_{by}$ 는 보의 인장철근의 항복강도,  $j d$ 는 접합부에 인접한 보 단면의 응력 중심 간의 거리,  $h$ 는 보 지점에서부터 접합부까지의 거리이다.

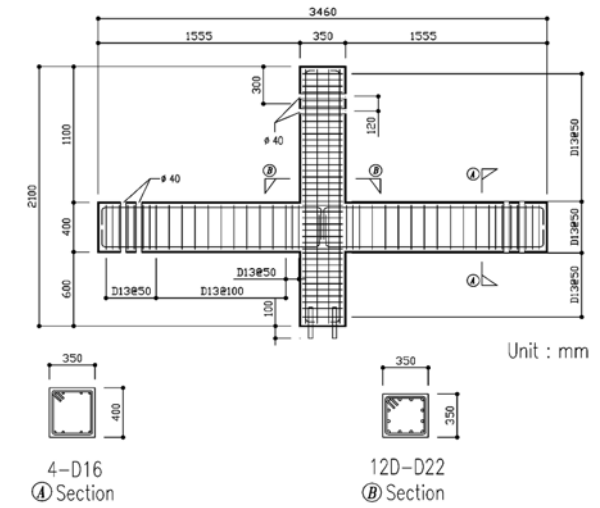
Table 1과 같이  $V_{j2}/V_{jby}$ 의 값이 모두 1 이상임을 알 수 있다. 이는 모든 실험체는 보의 주인장철근이 항복한 이후에 파괴될 수 있음을 의미하며 ACI 352R-91<sup>7)</sup>의 Type 2의 기준에 만족하고 있음을 알 수 있다.<sup>8,9)</sup>

실험체 상세는 Fig. 2와 같으며 실험체 사용된 소재 및 거하여 실험 및 분석하였으며 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

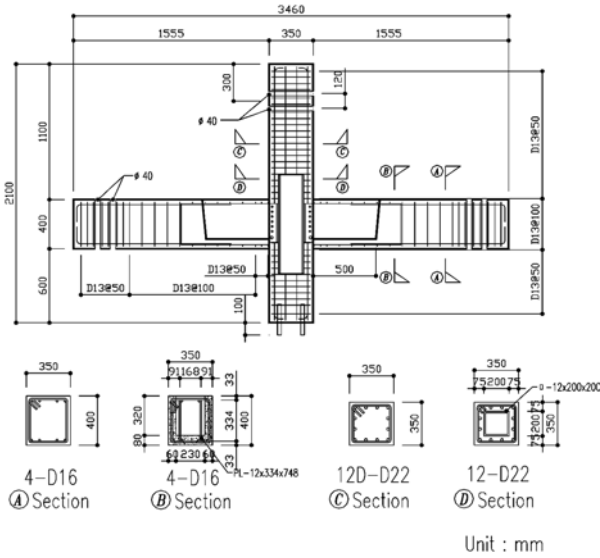
**Table 1** Properties of specimens and material

Specimens	Connection method	Hoop bar of joint area	ECC area (mm)	Column size (mm)	Beam size (mm)	Column								
						Reinforcing bar (Upper and lower each)			Hoop					
						$f_{cy}$ (MPa)	$\rho_c$	$n_c$	$f_{hy}$ (MPa)	$\rho_h$	$s_h$ (mm)	$n_h$		
RC-Control	Cast-in-place	O	-	350 × 350	350 × 400	508	0.038	12-D22	475	0.011	50	D13		
PC-HJFH-50	Inside connection	O	500(1.4d)			508	0.038		475	0.011				
PC-HJF-25	Inside connection	×	250(0.7d)			508	0.038		475	0.011				
Specimens	Beam							$f_{ck}$ (MPa)		$V_{j1}$ (kN)	$V_{j2}$ (kN)	$V_{jby}$ (kN)	$V_{j1}/V_{jby}$	$V_{j2}/V_{jby}$
	Reinforcing bar (upper and lower each)				Stirrup			PC member	ECC member					
	$f_{by}$ (MPa)	$\rho_{bu}$	$\rho_{bl}$	$n_b$	$f_{sy}$ (MPa)	$\rho_s$	$s_b$ (mm)							
RC-Control	461	0.012	8-D16	475	0.014	100	D13	27.5	-	1,056	792	629	1.68	1.26
PC-HJFH-50	461	0.012		475	0.014			27.5	40.5	1,286	965	629	2.05	1.54
PC-HJF-25	461	0.012		475	0.014			27.5	40.5	1,286	965	629	2.05	1.54

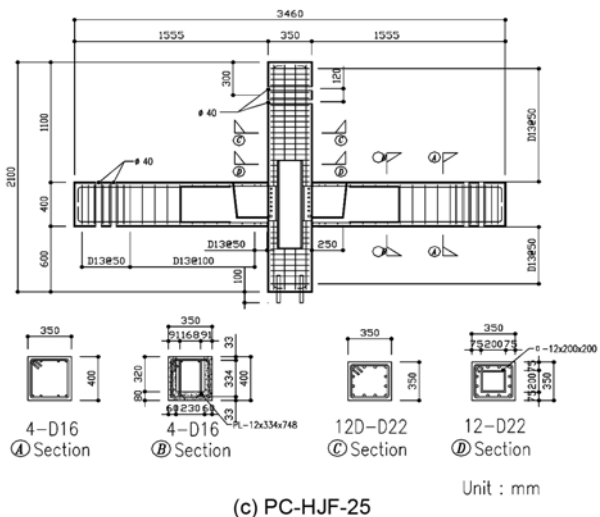
$f_{cy}, f_{hy}, f_{by}, f_{sy}$ : yield strength column bar, hoop, beam bar, beam stirrup respectively,  $\rho_c, \rho_h, \rho_{bu}, \rho_{bl}, \rho_s$ : ratio of column bar, hoop, upper beam bar and lower beam bar, stirrup respectively,  $n_c, n_h, n_b, n_s$ : size of column bar, hoop, beam bar, stirrup respectively,  $f_{ck}$ : compressive strength of concrete and ECC,  $V_{j1}, V_{j2}$ : type 1 and type 2 shear strength of joint predicted by ACI 318-05,  $V_{jby}$ : joint shear strength when beam bar yields



(a) RC-control



(b) PC-HJFH-50



(c) PC-HJF-25

Fig. 2 Detail of specimen

### 3.2 실험 방법

이 연구에서는 1/2 축소 실험체의 내부 접합부를 대상으로 부분 구조체 실험에 대하여 구조 성능을 평가하기

위해 반복하중 가력 실험을 계획하였다. 실험체 설치 상세는 Fig. 3과 같다. 보의 양 단부에는 회전이 가능한 유압힌지를 부착하였으며 로드 셀(loadcell)을 설치하였다. 기둥 양 단부에는 플레이트 판과 축력봉을 이용하여 횡력이 가해지는 동안 일정 축하중( $0.1f_{ck}A_g = \text{약 } 400 \text{ kN}$ )이 작용하도록 하였으며 하부에는 회전이 가능하도록 힌지를 설치하였다. 반복가력은 기둥 단부에서 1,000 kN 용량의 액츄에이터를 사용하였으며, 보의 횡좌굴을 방지하기 위해 양측 보 중간에 힌지가 설치된 철골 지지대를 설치하였다.

가력 프로그램은 ACI T1.1-011<sup>10)</sup>의 모멘트 프레임에 대한 내진 성능 실험 방안을 참고하였다. ACI 내진 성능 평가 기준에서는 drift ratio 3.5%까지 가력 하도록 제안하였으나 이 연구에서는 실험체의 파괴양상을 파악하기 위해 drift ratio 4.25%까지 변위 제어하였다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 균열 및 파괴 상황

모든 실험체가 수평하중의 증가에 따라 보와 기둥 접합부 순으로 균열이 진행되었으며, 보에서 발생한 균열은 대부분 휨에 의한 균열이 부재축에 수직인 방향으로 발생하였으며 기둥 또한 부재축에 수직인 균열이 주 패턴으로 나타났다. Fig. 4와 같이 모든 실험체의 초기균열의 발생위치는 보와 기둥의 접합면에서 발생하였으며, 하중의 증가와 더불어 좌우로 일정한 간격의 수직 휨 균열이 지지부로 확산되는 양상을 보였다. 기준 실험체 (RC-control)를 제외한 두 실험체는 항복하중 이후의 균

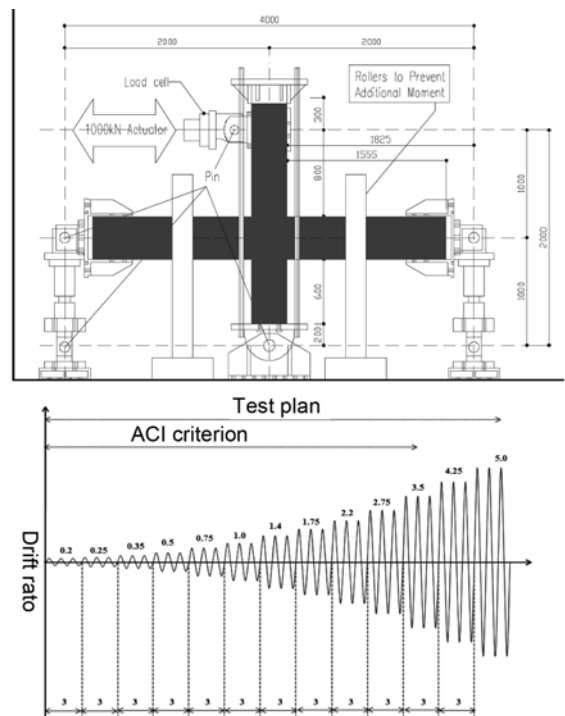


Fig. 3 Test setup & loading history

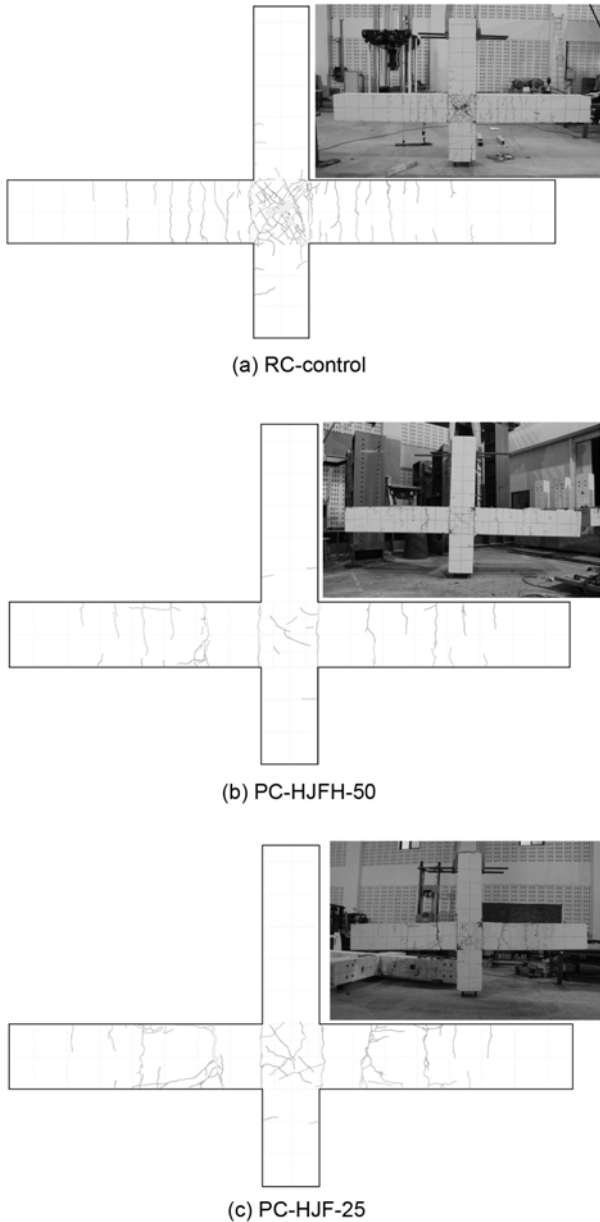


Fig. 4 Observed damage during testing

열은 소성힌지 범위에서 한정되었으며, 기존에 발생된 균열의 폭이 확산되면서 최종 파괴되었다.

1) RC-control; drift 0.2%에서 양단보에 초기 휨균열이 발생하였으며 하중의 증가와 더불어 양단 지지부로 균열이 확산되었으며 drift 0.25%에서 최초 발생된 접합부의 균열이 확산되며 drift 2.2%에서 접합부의 박리가 발생하였으며, drift 3.5%에 이르러 접합부의 압괴와 더불어 파괴가 발생하였다.

2) PC-HJFH-50; drift 0.2%에서 접합면과 ECC타설 계면에서 초기 균열이 발생하였으며 보 상부 타설면에 다수의 미세균열이 하중의 증가와 더불어 확산되었다. drift 0.5%에서 보에 연결된 철판연결재 끝단 부위(접합면에서 700 mm)에서 보의 휨균열이 발생하였으며 이후 보의 양단 지지부로 균열의 폭과 범위가 확산되었다. 접합부에 발생한 미세균열은 확산되었으나 균열의 크기는 작았으

며 drift 3.5%에 이르러 보의 소성힌지 부위에서 콘크리트가 탈락되며 파괴에 이르렀다.

3) PC-HJF-25; 초기 균열의 발생 및 현상은 PC-HJFH-50 실험체와 유사하게 나타났으나 drift 0.25%에서 보에 연결된 철판연결재 끝단 부위(접합면에서 700 mm)에서 보의 휨균열이 발생하였다. 이는 보의 소성힌지 구간에 타설된 ECC 범위가 작고 접합부에 횡보강근이 없기 때문으로 사료된다.

변수에 따라 실험체의 파괴모드는 상이하게 나타났다. 일반 현장타설 실험체인 RC-control의 경우 접합부에 대각선으로 사인장 균열이 발생하여 보에 소성힌지가 발생하기 이전 접합부가 파괴되는 양상을 보였다. 이는 두 PC 실험체에 비해 전단여유율(접합부 전단강도/보가 휨항복 할 때의 접합부의 전단 강도: Table 1)이 작아 보의 소성힌지 발생 전에 접합부 코어 내에 응력이 집중된 것으로 판단된다. 이에 반해 철골연결재 및 접합부와 보 일부에 ECC가 타설된 PC-HJFH-50 실험체의 경우 기존 실험체에 비해 상대적으로 높은 전단여유율을 갖고 있어 보의 소성힌지(약 1d) 발달에 의해 최종 파괴되었다. 접합부에는 미세한 다수의 미세균열이 발생되었으며, ECC 타설면적이 250 mm이며 접합부 횡보강근이 없는 PC-HJF-25 실험체의 경우 보에 소성힌지(약 1d) 발생 후 접합부에 다수의 사인장 균열이 발생하여 최종 파괴되었다. 기존 실험체를 제외한 두 실험체의 경우 ECC 및 철골연결재에 의해 소성힌지를 유도할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4.2 하중-변위 관계

Fig. 5에 보-기둥 접합부의 하중-변위 곡선을 나타내었다. 그림에서 최대 하중은 일체 타설된 실험체에 비해 철근 연결재 및 ECC로 보강된 PC 실험체가 높게 나타났으며 모든 실험체 재료강도를 바탕으로 산정된 공칭강도를 상회하였다.

일체 타설된 RC 실험체의 경우 부재각 3.5%에서 최대강도를(119 kN) 나타내었으며 부재각 4.25%까지 급격한 하중 저하 없이 안정적인 이력거동을 나타내었다. 철골연결재 및 보에 타설된 ECC 면적이 500 mm(1.4d)인 PC-HJFH-50 실험체의 경우 부재각 2.75%에서 최대강도를(130 kN) 나타내었으며 부재각 4.25%까지 이상적인 거동을 보였다. 접합부에 횡보강근이 없으며 보에 타설된 ECC의 범위가 작은 PC-HJF-25 실험체의 경우 부재각 2.2%에서 최대강도를 나타내었으며(138 kN) 이후 부재각 3.5%까지 안정적인 이력 거동을 나타내었다. 접합영역을 철골연결재 및 ECC를 사용한 두 개의 PC 실험체의 최대내력은 기존 실험체에 비해 평균 13%( $V_{peak}$ ) 증가하는 것으로 나타났으며 보에 타설면적을 증가시켜 소성힌지 구간을 확대한 경우 내력 상승의 영향은 적으나(약 6%의 내력향상) 연성능력 즉, 내진 성능이 개선되는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 ECC의 소성힌지 확대 구역은

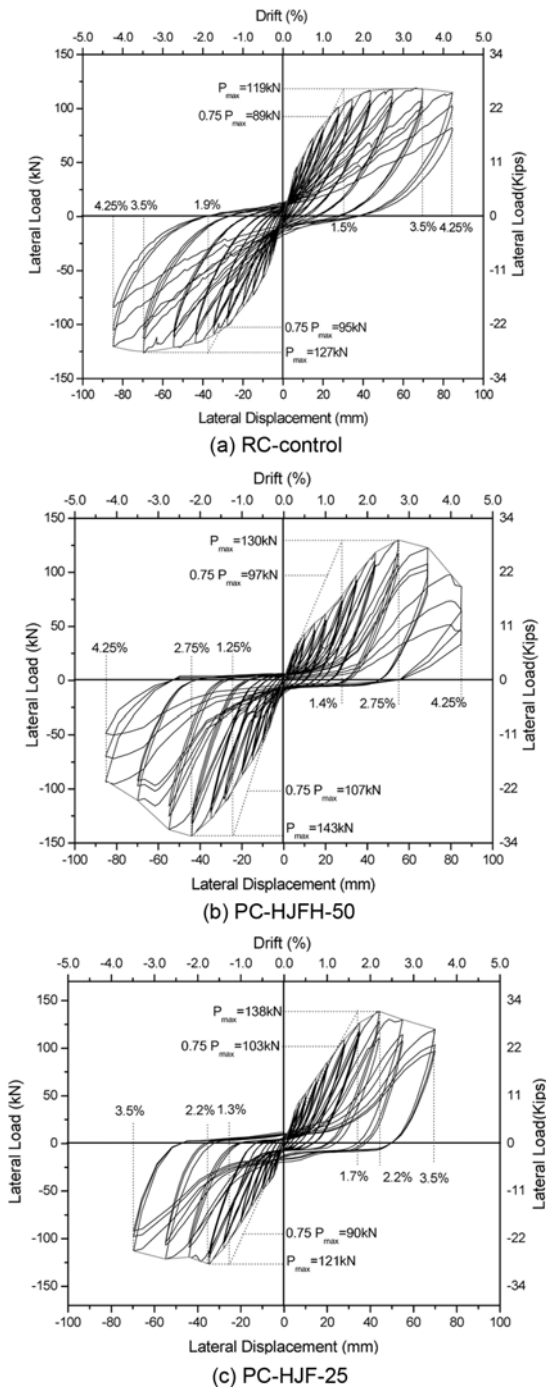


Fig. 5 Cyclic loading response

Table 2 Predicted and measured results for test specimens

Specimen		$P_y$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$P_f$ (kN)	$\delta_y$ (%)	$\delta_{max}$ (%)	$\delta_f$ (%)	$\mu$ (-)	$M_n$ (kN·m)	$M_{uj}$ (kN·m)	$M_{peak}$ (kN·m)	$V_n$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_{peak}$ (kN·m)	$\frac{V_{peak}}{V_u}$
RC-control	Pos	89	119	114	1.5	3.5	4.25	2.8	125	285	206	792	540	572	1.06
	Neg	95	127	120	1.9	3.5	4.25	2.2	125	285	219	792	540	611	1.13
PC-HJFH-50	Pos	97	130	86	1.4	2.75	4.25	3.0	125	346	225	965	540	625	1.17
	Neg	107	143	92	1.25	2.75	4.25	3.4	125	346	247	965	540	688	1.27
PC-HJF-25	Pos	103	138	119	1.7	2.2	3.5	2.0	125	346	238	965	540	664	1.23
	Neg	90	121	112	1.3	2.75	3.5	2.7	125	346	209	965	540	582	1.08

Notes: All estimates associated with moment and shear computed based on actual material properties.  $P_y$ : yield load(measured),  $P_{max}$ : peak load(measured),  $P_f$ : failure load(measured),  $\delta_y$ : yield displacement(measured),  $\delta_{max}$ : peak displacement(measured),  $\delta_f$ : failure displacement(measured),  $\mu$ : ductility( $\delta_f / \delta_y$ ),  $M_n$ : nominal moment,  $M_{uj}$ : moment corresponding to  $V_n$ (computed),  $M_{peak}$ : peak moment(measured),  $V_n$ : nominal joint shear capacity(computed),  $V_u$ : joint shear demand(computed),  $V_{peak}$ : joint shear at  $M_{peak}$

250 mm(0.7d)만으로도 기둥에 작용하는 하중을 접합부 및 보로 효과적으로 전달할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2에는 실험에서 측정된 최대하중 및 이에 상응하는 층간변위, 보의 주인장철근 항복시의 변위와 하중 및 각 실험체의 예상내력과 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 분석 결과 최대 전단강도는 소요 전단강도를 평균 15% 초과하는 것으로 나타났으며 보의 휨 철근이 항복 후 변형 경화에 도달한 이후 접합부 파괴가 나타났다.

### 4.3 철근의 변형률

#### 4.3.1 보 주근의 변형률

현행 미국 규준에서는 특별 모멘트 구조(PC, PSC)의 경우 소성힌지를 접합부가 아닌 보 내부로 이동시켜 일체식 철근콘크리트 구조와 동일한 성능을 보유하도록 하고 있다.<sup>8)</sup> 이에 이 연구에서는 PC U형단면을 사용한 하이브리드 보-기둥으로 접합부에서 부재간 응력의 불연속이 나타나지 않고 일체식 구조와 마찬가지로 부재각이 증가함에 따라 소성힌지가 보 내부로 발달될 수 있는지를 평가하기 위해 기둥면에서 최대 2d 까지 설치된 보 주철근의 응력분포를 Fig. 6에 나타내었다. RC 실험체의 경우 전단여유율(접합부 전단강도/보가 휨 항복 할 때의 접합부의 전단 강도: Table 1)이 1.26으로 보의 주인장철근 항복 후 접합부가 파괴되도록 계획되었으며 Fig. 6(a)와 같이 보 주근의 첫 항복은 부재각 1% 내외에서 발생되었으며 하중이 증가함에 따라 보의 길이방향으로 순차적으로 진행되었다. 이에 반해 전단여유율이 1.54이며 철골연결재 및 철판으로 연결된 접합부를 갖는 PC 실험체의 경우 보에 삽입된 철판 연결재에 용접된 주철근의 변형률이 RC 기준 실험체와 유사한 경향을 보였다. 기둥면에서 2.0d 위치에서 철판과 용접된 철근은 부재각 2% 내외에서 항복하는 것으로 나타났으며, 이는 RC 실험체에 비해 전단여유율이 커 부재의 연성능력이 크기 때문으로 판단된다. 또한 ECC 타설면적이 작은 경우 철판연결재에 용접된 주근의 응력이 커지는 것으로 나타났으며 이는 ECC와 콘크리트와의 부착응력의 크기에 따른 것으로 사료된다.

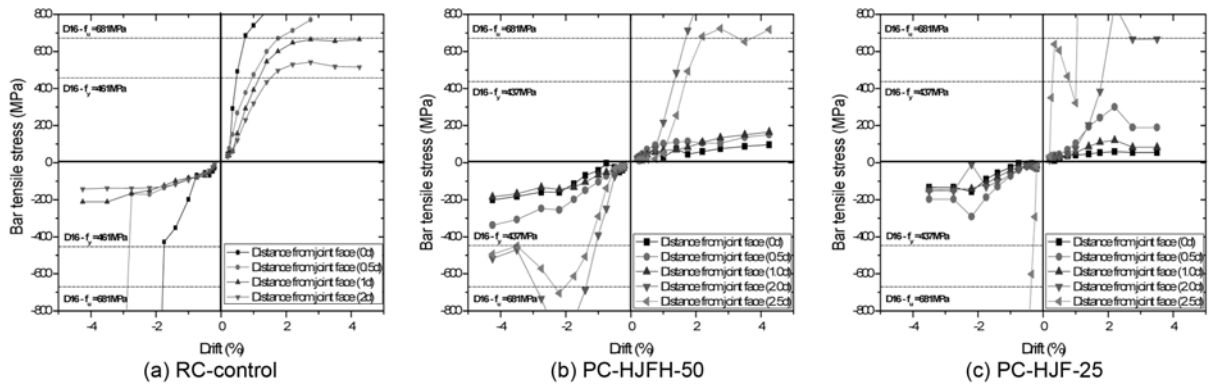


Fig. 6 Bar tensile stress measured at beam bottom

### 4.3.2 접합부의 횡보강근

기존의 연구 결과에 따르면<sup>11)</sup> 접합부에 배근된 횡방향 철근비가 증가함에 따라 접합부의 전단강도는 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이에 이 연구에서는 개발된 접합 상세의 횡보강근의 유효성 평가를 위해 접합부의 전단변형각 및 접합부 횡보강근의 응력변화를 분석하였다.

Fig. 7(a)와 같이 일체 타설된 RC 실험체의 경우 접합부 횡보강근의 위치와 관계없이 거의 유사한 응력분포를 보였으며 이는 접합부의 전단강도에 횡방향 철근이 일정 부분 기여하는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 7(b)와 같이 접합부에 ECC 및 철골 연결재로 연결된 PC-HJFH-25 실험체의 경우 횡보강근의 응력변화율은 미비한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 8과 같이 접합부의 전단변형각이

RC-Control에 비해 PC 실험체의 전단변형각이 작기 때문으로 판단된다. 기둥에 설치된 철골 연결재(각형강관) 및 접합부에 타설된 ECC의 저항능력이 증대됨에 따라 접합부의 전단변형이 작아진 것으로 사료되며 이는 이 연구에서 개발된 접합상세의 경우 ECC 및 철골 연결재의 설치로 접합부의 횡보강근을 설치에 따른 전단강도의 증가효과는 미비할 것으로 사료된다.

## 5. 구조성능평가

### 5.1 강도 및 강성

각 실험체의 강도 변화는 Table 3에 정리하여 나타내

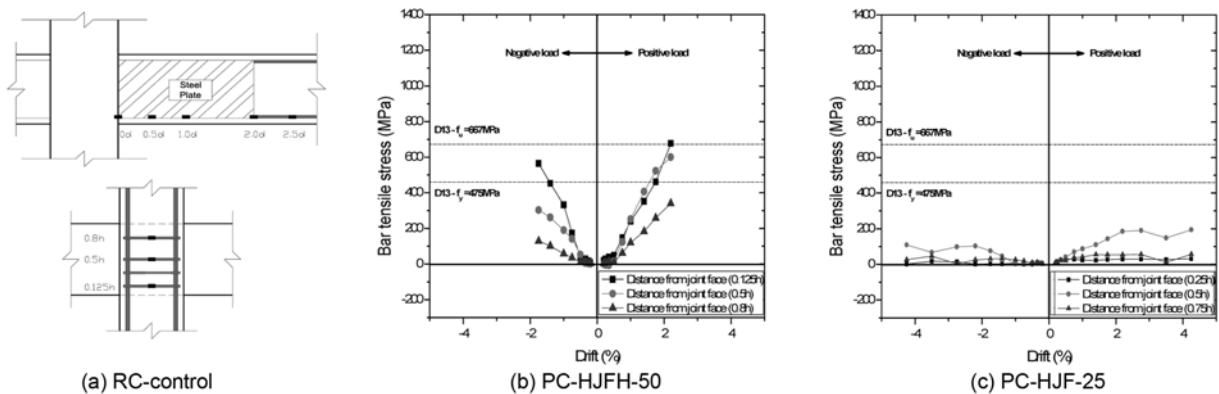


Fig. 7 Bar tensile stress measured at joint hoop

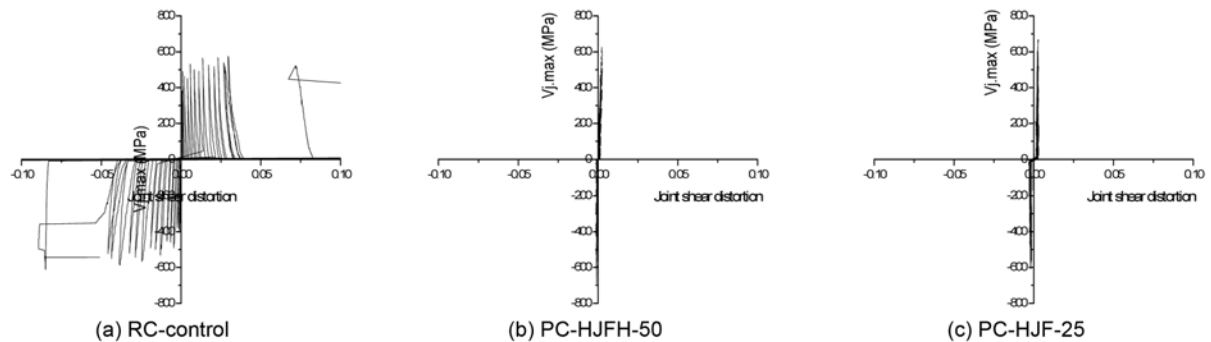


Fig. 8 Joint shear stress versus joint shear distortion relations

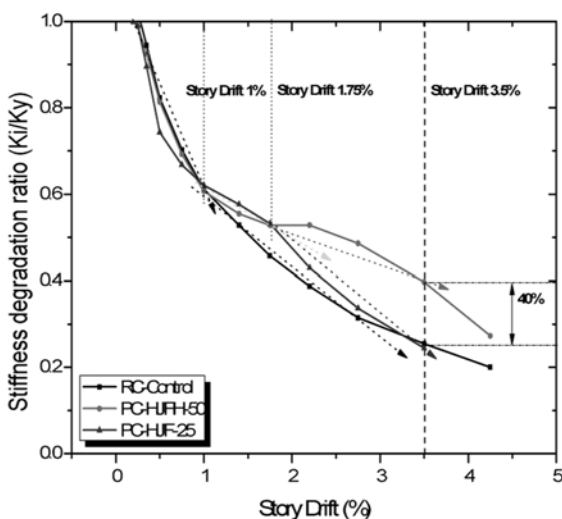
**Table 3** Comparisons between test results and ACI T1.1-01 acceptance criteria

Specimen			During 3.5% & 4.25% drift cycle			
			$P_{3rd}/P_{max}$	$\beta$	$K_{re}/K$	$K_{un}/K'$
Acceptance criteria			$\geq 0.75$	$\geq 0.125$	$\geq 0.05$	$\geq 0.05$
RC-control	drift 3.5%	Pos	0.87	0.19	0.5	0.4
		Neg	0.83			
	drift 4.25%	Pos	0.75	0.18	0.19	0.17
		Neg	0.70			
PC-HJFH-50	drift 3.5%	Pos	0.78	0.20	0.11	0.15
		Neg	0.75			
	drift 4.25%	Pos	0.35	0.19	0.06	0.09
		Neg	0.34			
PC-HJFH-25	drift 3.5%	Pos	0.75	0.24	0.49	0.14
		Neg	0.76			

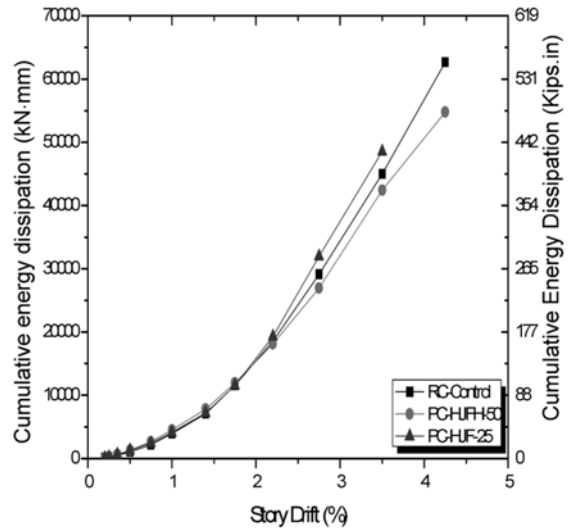
$P_{max}$ : peak load(measured),  $P_{3rd}$ :  $P_{max}$  during third cycle of 3.5 drift(measured),  $\beta$ : relative energy dissipation ratio(ACI T1.1R-01),  $K_{re}$ : secant stiffness form  $-0.35$  to  $+0.35\%$  drift during reloading,  $K_{un}$ : secant stiffness form  $-0.35$  to  $+0.35\%$  drift during unloading,  $K$ : initial stiffness for positive load,  $K'$ : initial stiffness for negative load

었다. ACI T1.1-01<sup>5)</sup>에서는 강진 이후에도 구조물이 붕괴되는 것을 방지하기 위해 부재각 3.5%에서 최대 강도의 75% 이상의 강도 성능을 유지하도록 하고 있다. 이에 대해 분석한 결과 모든 실험체가 부재각 3.5%를 경험한 마지막 사이클의 강도가 75% 이상을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

각 실험체의 강성변화는 Fig. 9에 정리하였다. 정·부방향 가력시 최대 변위점을 잇는 강성의 변화를 초기 항복강성에 대한 비율로 나타낸 것이다. 모든 실험체에서 비탄성 이력 사이클이 증가함에 따라 강성이 저하되는 특성을 나타내고 있으나 실험체의 강도 성능이 클수록



**Fig. 9** Stiffness degradation



**Fig. 10** Energy dissipation

강성 또한 크게 나타났다. 모든 실험체의 강성 저하 현상은 부재각 1%까지는 유사한 경향을 보였으며, 이후 철골연결재로 연결된 PC 실험체의 강성 감소현상이 둔화되는 것으로 나타났다. 또한 두 PC 실험체의 경우 보의 보강면적이 큰 PC-HJFH-50 실험체가 PC-HJFH-25에 비해 40% 둔화된 강성 감소율을 보였으며, 세 실험체 모두 Table 3과 같이 내진성능 평가 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

## 5.2 에너지소산 능력

지진 발생시 구조물의 연성거동은 에너지소산 능력과 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, 에너지소산 능력이 클수록 내진 성능이 우수한 것으로 평가받고 있다. Fig. 10의 누적에너지 소산면적은 동일 부재각(3.5%)에서 6%내외의 차이를 보이며 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 다만 타설면적이 크며 접합부에 횡보강근이 설치된 PC-HJFH-50이 낮은 에너지소산 능력을 보였다. 이는 보의 소성힌지 부의 손상이 상대적으로 크게 나타났으며 이로 인한 펀칭 현상이 에너지 소산 능력을 감소시킨 것으로 판단된다.

ACI에서는 구조물의 안정적인 에너지소산 능력을 확보하기 위해 drift 3.5%의 세 번째 사이클에 대하여 에너지소산율이  $1/8(=0.125)$ 을 넘도록 요구하고 있으며 Table 3과 같이 3.5%와 4.25%에 대하여 분석한 결과 모두 만족하는 결과를 나타냈다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 HPHC 시스템의 접합부에 대한 내진 성능을 평가하고 구조적 특성을 파악하고자 반복하중을 받는 부분구조체 성능 실험을 수행하였다. 이에 대한 연구 결과는 다음과 같다.



- 1) 모든 실험체의 파괴는 보의 휨파괴가 선행되는 파괴모드를 보였으며, 철골 및 ECC를 적용하여 일부에 현장 타설된 2개의 PC 실험체는 최종파괴에 이를 때까지 일체식 거동형태를 보였다.
- 2) 개발된 접합상세의 일체식 거동 형태를 평가한 결과 연결철물 및 ECC의 사용을 통해 부재간 응력의 불연속이 나타나지 않았으며 보 및 접합부에 작용하는 하중을 효과적으로 전달하고 있는 것으로 나타났다.
- 3) 접합부내에 설치된 각형강관 및 ECC의 구속효과에 따라 접합부의 전단변형각은 매우 작았으며 이로 인해 접합부 내의 횡보강근 설치에 따른 내력증가율은 미비하였다. 추가적 연구가 필요하지만 강도에 있어 접합부내의 횡보강근은 필요 없으나 접합부의 균열제어 및 최대 강도 발현 후 변형성능을 향상시킴으로서 이후의 내력저하방지에 기여함에 따라 일정양의 횡보강근이 필요한 것으로 나타났다.
- 4) 개발된 하이브리드 보-기둥 접합상세는 ACI에서 제안하고 있는 부재각 3.5%까지 우수한 내진 성능을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

이 연구는 교육과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었습니다(R11-2005-056-03002-0).

### 참고문헌

1. 김승훈, 류갑청, 하상수, 문정호, 이리형, “철근 관통형 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 외부접합부의 구조적 거동

에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 22권, 11호, 2006, pp. 3~10.

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. 하상수, 김승훈, 문정호, 이리형, “강선 이음형 half PC 보-기둥 내부 접합부의 구조적 거동에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 23권, 9호, 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 Journal*, Vol. 84, No. 1, 1987, pp. 31~39.
6. ACI Committe 318, *Building Code Requirement for Structural Concrete*, American Concrete Institute, 2005.
7. ACI 352R-91, “Recommendations for Design of Beam Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures,” *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 2002, pp. 1~9.
8. Lee, J. Y., Kim, J. Y., and Oh, G. J., “Strength Deterioration of Reinforced Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading,” *Engineering Structures*, Article in Press, 2009.
9. 이정윤, 채희대, “지진하중을 받는 철근콘크리트 접합부의 강도,” 한국지진공학회 논문집, 10권, 5호, 2006, pp. 25~33.
10. 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.
11. Ehsani, M. R. and Alameddin, F., “Design Recommendations for Type2 High-Strength Reinforced Concrete Connections,” *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 3, 1991, pp. 277~291.

**요약** 이 연구에서는 시공성과 경제성이 향상되고 중진 지역에서 사용할 수 있는 새로운 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부 상세를 복합구조로 개발하고 실험을 통하여 이를 검증하였다. 이 상세는 기둥 속에 매립된 각형강관과 보 U형 단부를 갖는 보 단부에 매립된 플레이트를 볼트로 결합시킬 수 있는 구조로 되어있다. 하이브리드 스틸-콘크리트 접합부에 앞서 콘크리트가 조기에 파괴되는 것을 막기 위하여 접합부 부분에 ECC(engineered cementitious composite)를 사용하였다. 개발된 접합부 상세에 대한 성능을 검증하기 위하여 보-기둥 접합부 실험체를 계획하여 이에 대한 내진 성능 실험을 실시하였다. 내부 접합부에 있어서는 접합부 횡보강근 유무와 현장타성 범위를 변수로 3개의 실험체를 제작하였다. 실험은 기둥에 일정 축력을 가한 상태에서 PC기둥 단부에 액추에이터를 설치하여 변위제어로서 반복가력 하여 실시하였다. 실험에서 얻은 자료를 접합부 내력, 강성, 에너지 소산능력 등에 대하여 분석하였으며, 그 결과 이 연구에서 제시한 새로운 보-기둥 접합부 상세는 강재와 콘크리트 그리고 ECC 사이에서의 다른 부착 특성 때문에 구조거동에서 차이점이 관찰되었으며, 기존 실험체를 제외한 두 실험체의 경우 ECC 및 철골연결재에 의해 소성힌지를 유도할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 프리캐스트 접합부는 높은 일체성과 모멘트 저항 능력을 보이며 중진 지역에서 사용가능함을 보였다.

**핵심용어** : 하이브리드 연결부, 보-기둥 접합부, 고인성 시멘트 복합체, 접합부 전단보강