

프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 이력거동 및 내진성능

Hysteretic Behavior and Seismic Resistant Capacity of Precast Concrete Beam-to-Column Connections

최현기¹⁾ · 최윤철²⁾ · 최창식³⁾

Choi, Hyun Ki · Choi, Yun Cheul · Choi, Chang Sik

국문 요약 >> 프리캐스트 콘크리트 골조에서 실물크기의 보-기둥 접합부 실험체 5개를 대상으로 반복가력 실험을 수행하였다. 지진하중을 받는 골조를 대상으로 1개의 일체식 실험체와 4개의 프리캐스트 실험체를 포함하여 5개의 1/2스케일의 내부 보-기둥 접합부를 대상으로 하였다. 주요 변수는 보의 구조적 연속성을 확보하기 위한 접합부의 형태와 접합부의 특별한 보강형태(섬유콘크리트와 횡보강근)로 하였다. 실험체는 강기둥-약보 개념에 따라 설계하였다. 보 철근은 접합부에 큰 비탄성 전단력이 작용할 경우 보에 소성힌지가 발생하도록 계획하였다. 접합부의 성능평가는 접합부의 강도, 강성, 에너지 소산능력과 층간변위비로 평가하였다. 실험결과 실험체의 파괴는 보의 소성힌지부에서 파괴되었다. 보-기둥 접합부의 성능은 대체적으로 우수한 것으로 나타났다. 접합부의 강도는 일체식 RC 구조의 비해 1.15 배 정도 향상되었다. 층간변위 3.5%때의 강도에서 실험체는 ECC의 인장변형능력과 철골연결재의 항복에 의해 연성거동 하였다.

주요어 보-기둥 접합부, 철골연결재, 섬유보강콘크리트, 내진성능, 반복하중 실험

ABSTRACT >> Five half-scale beam-to-column connections in a precast concrete frame were tested with cyclic loading that simulated earthquake-type motions. Five half-scale interior beam-column assemblies representing a portion of a frame subjected to simulated seismic loading were tested, including one monolithic specimen and four precast specimens. Variables included the detailing used at the joint to achieve a structural continuity of the beam reinforcement, and the type of special reinforcement in the connection (whether ECC or transverse reinforcement). The specimen design followed the strong-column-weak-beam concept. The beam reinforcement was purposely designed and detailed to develop plastic hinges at the beam and to impose large inelastic shear force demands into the joint. The joint performance was evaluated on the basis of connection strength, stiffness, energy dissipation, and drift capacity. From the test results, the plastic hinges at the beam controlled the specimen failure. In general, the performance of the beam-to-column connections was satisfactory. The joint strength was 1.15 times of that expected for monolithic reinforced concrete construction. The specimen behavior was ductile due to tensile deformability by ECC and the yielding steel plate, while the strength was nearly constant up to a drift of 3.5 percent.

Key words Beam-to-column, Steel plate connection, Engineered cementitious composite, Seismic performance, Cyclic load test

1. 서론

프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete 이하; PC)는 구조물의 안전성, 내구성, 신뢰성, 고품질, 비용절감 효과를 위한 실용적인 수단으로 널리 채택되어 왔다. 그러나 연결부

위에 대한 시공성 및 경제성확보의 어려움과 설계지침의 미비로 인하여 지진지역에서의 완전한 적용은 다소 제한되어 왔다. PC 구조 사용에 있어 현장타설 RC 구조의 사용을 권장하는 관례적 조항은 지진지역에서의 사용을 주저하게 하고 있으며, 이러한 세부 설계조건은 현장타설 RC 구조와 같은 높은 에너지소산능력과 연성능력을 확보하기 위한 표준 방법론을 제시하게 되었다.(ITC) 이는 강진 이후에도 구조물이 붕괴되는 것을 방지하기 위해 큰 비탄성 변형을 경험한 후 결합부의 높은 에너지 흡수 능력을 요구하고 있으며 일정 수준의 강도 저감을 제한하고 있다. 과거 모멘트 저항골조에서 PC 부재 간 부적절한 접합으로 인해 지진에 취약한 PC구조가 다수 있었으며, 이는 모멘트 저항골조에서

¹⁾ 정회원·한양대학교 건축환경공학과, 박사과정

²⁾ 청운대학교 건축설비소방학과, 조교수

³⁾ 정회원·한양대학교 건축공학과, 교수

(교신저자: ccs5530@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 1. 15 / 수정일 1차 : 2010. 4. 12, 2차 : 2010. 8. 3 /

게재확정일 : 2010. 8. 4)

PC 부재 간 접합부의 설계를 현장타설 RC구조와 동등한 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 취약하며, PC 구조의 경우 부재 간 단절에 의한 응력 불연속 구간이 접합부에 형성되어 일체 타설된 RC 구조와 같은 성능을 발휘하기가 쉽지 않다. 이에 일반적으로 국내에서 사용되고 있는 대부분의 PC 골조 건물들은 PC부재 간 접합부에 부분 PC(이하, half PC)를 적용하여 현장 타설부에 의해 일체화된 성능을 발휘하도록 하고 있다. 이러한 half PC 공법은 RC 공법과의 차별성이 적어 오히려 시공에 불편함을 초래하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

이에 본 연구에서는 PC보-기둥 내부 접합부를 대상으로 새롭게 개발된 접합부의 구조적 특성을 파악하고, 중진지역에서의 접합부 요구성능을 만족하여 현장적용 가능 여부를 실험적으로 평가하고자 한다.

2. 프리캐스트 보-기둥 접합부 실험

2.1 기존 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 연결방법

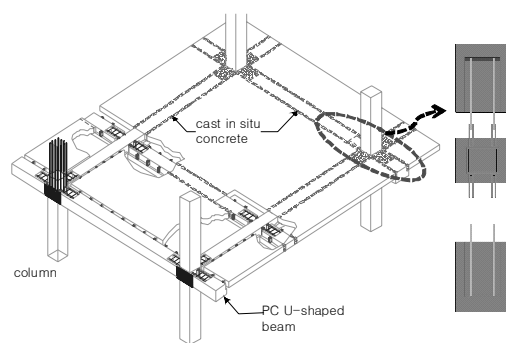
국외 PC 보-기둥 접합부는 내진성능의 취약성으로 일체형 철근콘크리트 보-기둥 접합부에 비하여 매우 제한적으로 사용되어 왔다. 그러나 접합부의 연성도 확보 및 내진성능 증가를 위해 많은 실험적 연구가 진행되었으며, 1990년대부터 PRESSS(Precast Seismic Structural System) 프로그램을 통해 프리스트레스, 하이브리드(Hybrid), DDC(Dywidag Ductile Connection) 공법 등이 개발되었다. 프리스트레스 및 하이브리드공법은 PC 부재 간 접합부의 결합력을 증가시키고 자가조정(Self-centering) 현상에 의해 내진성능을 향상시킨 공법이다. 그러나 보-기둥 접합부를 관통하는 긴 장재의 덕트를 매설하는 등 시공과정이 복잡하며, 포스트텐션 도입을 위한 별도의 장비와 기술이 요구되어 경제성 및 시공성이 떨어진다. DDC 공법은 기둥내에 덕타일 로드(Ductile Load)를 삽입하여 보와 기둥을 볼트로 체결하여 모든 구조적 연결을 완료할 수 있도록 개발된 상세로서 연성능력이 뛰어난 장점을 갖고 있으며 실용화가 이루어진 공법중의 하나이다. 그러나 고가의 덕타일 로드 및 시공시 고도의 정밀도를 요구하는 단점을 갖고 있다.⁽⁵⁾

Soubra⁽⁶⁾는 1993년 PC 보-기둥 접합부에 대하여 PC보와 PC기둥에 돌출된 U형 철근을 설치하고 현장에서 철근을 결속시켜 접합부에 섬유콘크리트를 현장 타설하는 새로운

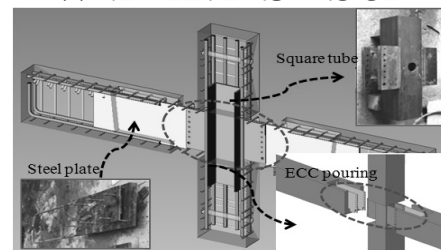
연결방법을 제시하고 외부 접합부에 대한 실험적 연구를 통하여 내진 성능을 평가하였으며 실험결과 섬유혼입량에 따른 내진 성능 향상이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 접합 방법에 있어 돌출된 철근의 연결 및 섬유콘크리트의 타설 방법 등 접합부 조립에 어려움이 있는 것으로 나타났으며, Alcocer⁽⁷⁾는 후프를 사용하여 PC보 하부 철근의 갈고리를 구속하는 새로운 접합부 상세를 개발하여 내진성능 평가를 수행한 결과 접합부 설계시 요구되는 강도와 강성, 변형능력을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 상대적으로 좁은 접합부내에 다수의 철근이 설치되며 설치된 철근의 연결 또한 어려운 것으로 나타났다. 이러한 접합부의 시공성 향상을 위해 Khaloo⁽⁸⁾에 의해 개발된 철근 관통형 접합상세는 하프 PC 보의 하부 철근을 PC 보-기둥 접합부 내에서 정착시키지 않고 이음 연결재를 사용하여 접합면의 보에서 이음 하도록 개발하였다. 접합부의 성능은 축하중에 의해 크게 좌우되며 접합길이 내에 설치된 수평 횡 보강근이 변형성능에 많은 영향을 주는 것으로 나타났으며, 대부분의 연구결과는 내진성능이 우수한 것으로 나타났으나 시공성에 따른 현장 적용성은 크지 않은 것으로 판단된다.

2.2 개발된 접합상세

전술한 PC공법의 문제를 해결하기 위해 그림 1과 같이 접합부의 시공성 및 단절된 PC부재간의 효율적인 응력전달을 위해 철골연결재 및 HPRCCs의 일종인 ECC (Engineered Cementitious Composite)를 적용한 새로운 접합상세를 개



(a) 개발된 접합부를 적용한 시공 방법



(b) 접합상세 및 체결 방법 (outside)

〈그림 1〉 개발된 접합부의 시공 및 접합부 구성개념도

발하였다. 철골연결재는 PC 기둥 및 보에 매립되어 제작되는 철골 각관과 철판을 현장에서 볼트 접합시킨 후 접합부 일부에 ECC를 타설하여 작업을 완료하도록 계획하였다. 개발된 상세의 특징은 각 부재 간 접합을 철물을 통해 간단하게 연결이 가능하여 시공성이 우수하다. 또한 접합부 내에 타설된 ECC의 경우 합성섬유를 시멘트 체적비 1%정도 투입하여 보통 콘크리트나 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete; FRC)보다 1~6%의 인장변형능력(Tensile Deformability)을 확보할 수 있도록 하였다. 이는 지진 등과 같은 수평하중에 의해 발생하는 전단력에 충분한 인성확보가 가능하여 접합부의 내진성능 향상을 기대할 수 있도록 하였다. 또한 본 연구에서 제안하고 있는 ECC는 유동성 확보가 필수적으로 합성섬유의 종류 및 체적비등을 변화시켜 타설용 ECC를 새롭게 개발하여 적용하였다. 이러한 접합부 상세는 접합부에서 교차되는 철근의 상호간섭이 없으며 PC 보의 하부철근이 외부로 돌출되지 않아 공장에서 제작이 용이하다. 시공순서는 1) PC기둥 설치 후 PC 보를 기둥 연결 철물에 조립한 후 볼팅하여 조립을 한 뒤, 2) 슬래브를 동일한 연결철물을 사용하여 설치 한 후 3) 볼트에 초기 긴장력을 가하여 접합부의 강성 및 내진 성능이 향상되도록 한 후, 4) 각 접합부에 ECC를 타설하여 설치를 마감 한다.

2.3 실험체 설계 및 실험방법

본 연구에서 개발된 PC접합부의 내진성능을 분석하기 위해 보와 기둥이 십자형으로 연결된 내부 실험체를 계획하였으며, 구조적 성능에 중요한 영향을 미치는 U자형 보에 타설되는 ECC의 면적과 보와 기둥의 휨 강도비 및 접합부내의 횡보강근 유무, 접합부 상세를 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 기존연구에서⁹⁾ 제안된 소성힌지의 이동위치인 1.0d를 기준으로 0.7d(250mm)와 1.4d(500mm)로 설정하였다.

ACI 318-05⁽¹⁰⁾ 및 KCI⁽¹¹⁾ 구조설계기준에서는 특수모멘트저항골조에서 기둥의 조기파괴를 방지하기 위해 보-기둥 접합부에서 상,하 기둥 휨강도의 합($\sum M_c$)이 양쪽 보의 휨강도의 합($\sum M_b$)보다 1.2배 크도록 규정하고 있으며, ACI-ASCE 352⁽¹²⁾에서는 강진 지역의 경우 1.4배로 제안하고 있다. Bracci와 Dooley⁽¹³⁾는 확률론적 변수연구를 통해 최소의 보-기둥 휨강도비를 2.0배로 제안하였다. 일반적으로 휨 강성비가 1.0보다 조금 큰 경우에는 소성힌지가 보에 형성되지만 대부분의 피해가 접합부 파급되어 접합부에 집

중되며, 1.0보다 훨씬 클 경우 접합부에서 조금 떨어진 보 부분에 발생하는 것으로 보고되고 있다. 접합부의 강도에 있어 1~1.9범위의 휨 강성비를 취할 경우 보-기둥 접합부의 강도가 개선되는 것으로 알려져 있다.^{(14),(15)} 이를 바탕으로 본 연구에서 개발된 접합상세의 휨강도비에 따른 영향을 파악하기 위해 기존 실험체의 경우 기준에서 제안하고 있는 범위 내의 1.6배의 휨 강도비를 산정하였으며 PC 실험체의 경우 기준 실험체 보다 낮은 1.3배의 휨강도비로 계획하였다. 접합부 형태에 있어 기둥면에서 결합부가 형성되는 inside계열 실험체와 기둥면에서 일정위치(0.3d)떨어져 결합부가 형성되는 outside계열 두 가지 형태를 대상으로 하였으며, inside 계열 실험체를 대상으로 접합부 횡보강근 효과에 대한 평가를 수행하였다.

모든 PC 기둥의 크기는 350mm×350mm이며 PC 기둥에 삽입되는 각관은 □-200×200×12의 기성 형강을 사용하였으며 보와의 연결부위는 양면용접을 하였다. 보는 350mm×400mm이며 PC 보에 삽입되는 철판은 PL-334X748(690)×12를 사용하였다. 콘크리트의 공칭압축강도는 27MPa이며, 연결철물 및 철근은 SD40이다. 볼트의 조임력을 통해 접합부의 강성 성능이 개선되도록 하였다.

현행 ACI 318-05⁽¹⁰⁾ 기준에서 지진하중을 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 설계를 비내진 구역(Type 1)과 내진 구역(Type 2)으로 구분하여 설계하고 있다. 지진하중을 받는 철근콘크리트 보-기둥 접합부는 가능하면 탄성범위에서 거동할 수 있도록 설계하며, 대규모의 지진하중을 받을 경우에도 인접한 보에 소성힌지가 발생하도록 하여 접합부에서 파괴가 발생하지 않도록 하고 있다. 이와 같은 파괴를 유도하기 위해 보의 주인장철근 항복시점의 강도보다 접합부의 설계강도를 크게 하여야 한다. 이에 따라 모든 실험체는 보의 항복이후 접합부 파괴되는 실험체로 계획하였으며 접합부의 내력은 식 (1)과 같이 ACI 318-05⁽¹⁰⁾ 기준의 Type 2에 의해 계산하였다.⁽¹⁶⁾

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

여기서 V_j 는 접합부 전단강도, γ 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} 를 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 심간 거리, l_b 는 보의 길이, h_c 는 기둥단면의 높이이다. 보강 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. 표 1과 같이 V_{j2} / V_{by} 의 값이 모두 1 이상임을 알 수 있다. 이는 모든 실험체는 보의 주인장철근이 항복한 이후에 파괴될 수 있음을 의미하며 ACI 352R-91⁽¹²⁾의 Type 2의 기준에 만족하고 있음을 알 수 있다.^{(3),(4),(16)}

실험체 상세는 그림 2와 같으며 실험체 사용된 소재 및 제품의 성능은 KS기준에 의거하여 실험 및 분석하였으며 그 결과는 표 1에 나타내었다.

본 연구에서는 1/2 축소 실험체의 내부 접합부를 대상으로 부분 구조체에 대하여 내진 성능을 평가하기 위한 반복 하중 가력 실험을 계획하였다. 실험체 설치 상세는 그림 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 ($0.1 f_{ck} A_g \approx 400\text{kN}$)이 작용하도록 하였으며 하부에는 회전이 가능하도록 힌지를 설치하였다. 반복가력은 기둥 단부에서 1000kN 용량의 액츄에이터를 사용하였으며, 보의 횡좌굴을 방지하기 위해 양측 보 중간에 힌지가 설치된 철골 지지대를 설치하였다.

가력 프로그램은 ACI T1.1-01⁽¹³⁾의 모멘트 프레임에 대한 내진 성능 실험 방안을 참고하였다. ACI 내진 성능 평가 기준에서는 drift ratio 3.5%까지 가력하도록 제안하였으나 본 연구에서는 실험체의 파괴양상을 파악하기 위해 drift ratio 4.25%까지 변위 제어하였다.

3. 실험결과

3.1 파괴양상

그림 4와 같이 모든 실험체는 수평하중의 증가에 따라 보와 기둥 접합부 순으로 균열이 진행되었다. 보에서 발생한 균열은 대부분 휨에 의한 균열이 부재축에 수직인 방향으로 발생하였다. 모든 실험체의 초기균열 발생위치는 보와 기둥의 접합계면에서 발생하였으며, 좌우로 일정한 간격의 수직 휨 균열이 지지부로 확산되는 양상을 보였다.

기둥에 대한 보의 강도비가 1.6인 기준 실험체(RC)의 경우 기둥보다 보가 먼저 항복함에 따라 보의 모멘트를 기둥으로 원활히 재 분배시켜 보 전단면에 걸쳐 균등한 균열양상을 나타내었으며, 접합부내(Core)에 대각균열이 형성되며 최종 파괴되었다. 이에 반해 4개의 PC 실험체의 경우 주요 변수인 접합형태 및 휨강도비에 따라 상이하게 나타났다.

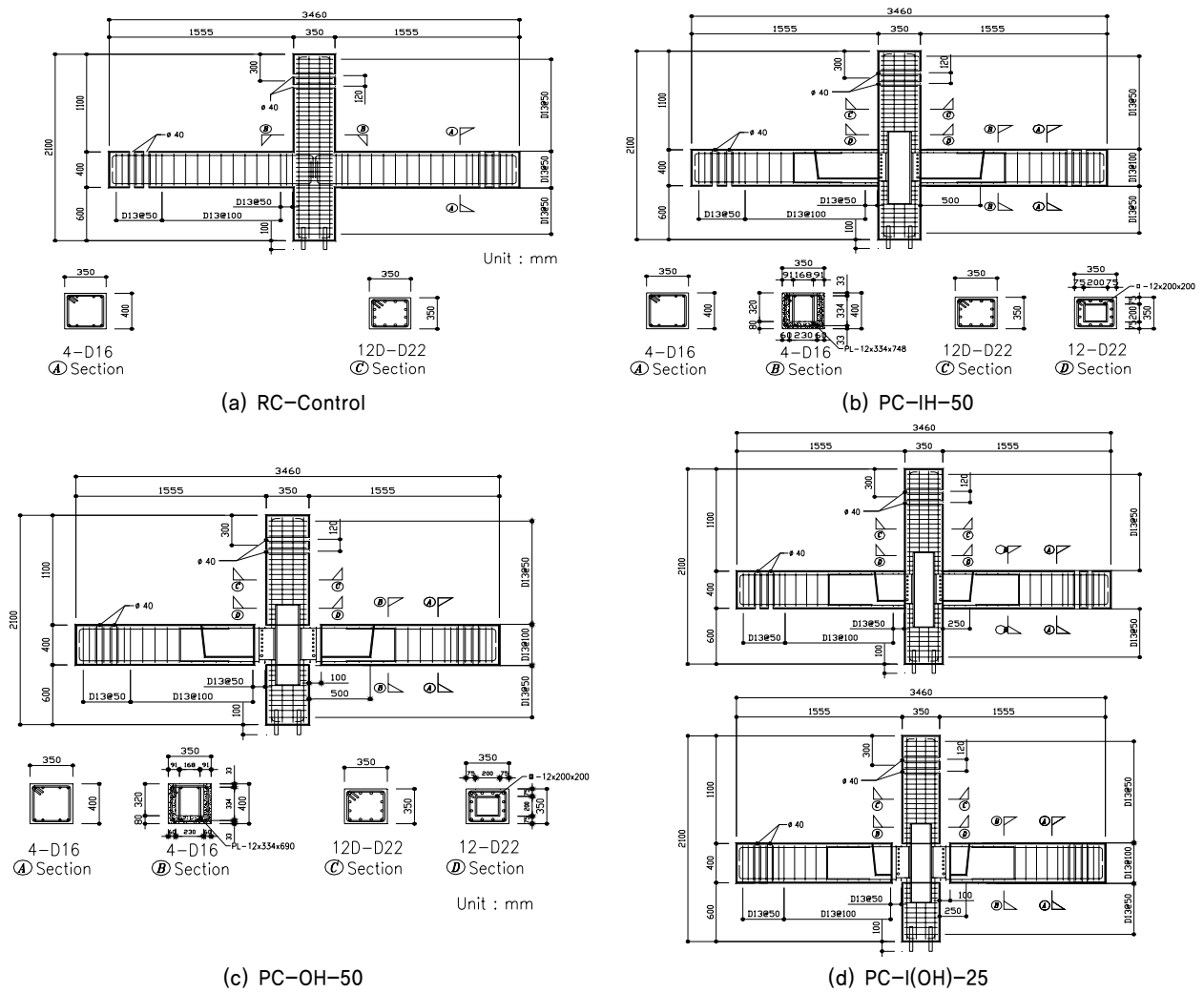
보와 기둥의 접합을 기둥면에서 0.3d 떨어져 결합된 outside 계열 실험체에 있어 ECC 타설면적이 500mm (PC-OH-50)인 경우 결합면에서 소성힌지가 발달하였으며, 항복하중 이후 균열은 소성힌지 내에 집중하여 나타났다. 이는 접합부에 전달되어 마이크로 균열과 더불어 균열의 폭의 증가로 이어졌다. 이에 반해 타설면적이 250mm(PC-OH-25)인 경우 결합면에 소성힌지가 발달된 후 ECC 타설범위를 넘어서까지 (1.4d)소성힌지가 확대되어 보 전단면에 걸쳐 균열의 확산을 보이며 최종 파괴되었다. Inside계열 실험체중 PC-IH-50 실험체의 경우 소성힌지는 1.4d 부근에서 관찰되었으며 지지부로 균열이 확산되었다. 또한 접합부의 파괴는 거의 관찰되지 않았다. 이에 반해 접합부의 횡보강근이 설치되지 않았으며 보강구역이 작은 PC-I-25 실험체의 경우 소성힌지 발달은 1.4d까지 확대되어 나타났으며 접합부에 다수의 대각균열이 발생되었다.

균열 양상을 관찰한 결과 개발된 PC 접합부의 경우 철골 연결재 및 ECC의 타설범위에 따라 일정 길이의 소성 힌지를 유도할 수 있는 것으로 나타났으며, 소성힌지 보강 범위는 변수와 상관없이 0.7d(250mm)가 효율적인 것으로 나타났다.

3.2 하중변위

그림 5에 보-기둥 접합부의 하중-변위 곡선을 나타내었다. 최대 하중은 일체 타설된 실험체에 비해 철근 연결재 및 ECC를 사용하여 부분 습식 접합된 PC 실험체가 높게 나타났다.

일체 타설된 RC 실험체의 경우 부재각 3.5%에서 최대강도를(119kN) 나타내었으며 부재각 4.25%까지 급격한 하중 감소 없이 안정적인 이력거동을 보였다. Outside계열 실험체 중 보에 타설된 ECC 면적이 500mm(1.4d)인 PC-OH-50 실험체의 경우 부재각 3.5%에서 최대강도(155kN)을 나타내었으며 부재각 3.5% 이후 급격한 하중 감소를 보였다. 이는 소성힌지 구간을 폭넓게 보강하여 ECC 타설 부분에서 발생한 소성힌지 구간에 응력이 집중되었기 때문으로 사료된다. 이에 반해 ECC 타설면적이 작은 PC-OH-25 실험체의 경우 부재각 2.2%에서 최대강도(133kN)를 나타낸 후



〈그림 2〉 실험체 상세

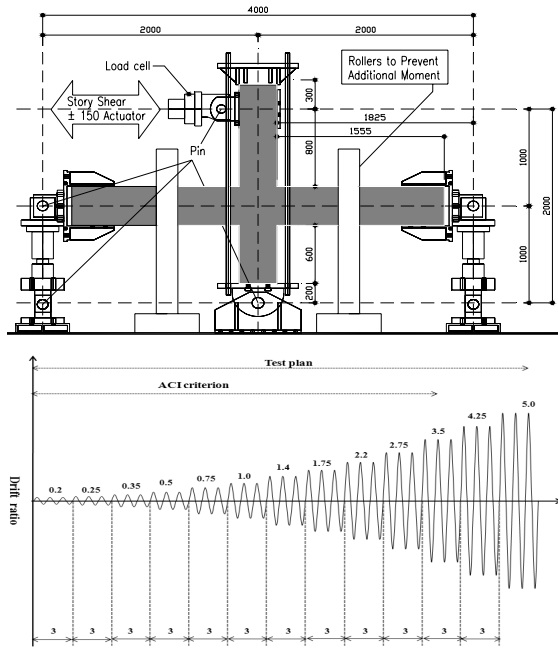
〈표 1〉 실험체 일람 및 재료시험 결과

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]	ρ_c	n_c	f_{hy} [MPa]	ρ_h	s_h [mm]	n_h
RC-Control	Cast-in-place	O	-	350 x 350	350 x 400	508	0.038	12-D22	475	0.011	50	D13
PC-OH-50	Outside connection	O	500(1.4d)									
PC-OH-25	Outside connection	O	250(0.7d)									
PC-IH-50	Inside connection	O	500(1.4d)									
PC-I-25	Inside connection	X	250(0.7d)									

〈표 1〉 실험체 일람 및 재료시험 결과(계속)

Specimens	Beam							f_{ck} [MPa]		$\sum M_c$	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]	ρ_{bu}, ρ_{bl}	n_b	f_{sy} [MPa]	ρ_s	s_b [mm]	n_s								
RC-Control	437	0.012	8-D16	475	0.014	100	D13	27.5	-	1.6	1,056	792	629	1.68	1.26
PC-OH-50	461	0.016	8-D19							1.3	1,286	965	886	1.45	1.09
PC-OH-25	461	0.016								1.3	1,286	965	886	1.45	1.09
PC-IH-50	437	0.012	8-D16							1.6	1,286	965	629	2.05	1.54
PC-I-25	437	0.012								1.6	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



〈그림 3〉 실험체 세팅 및 하중이력

부재각 4.25%까지 이상적인 이력거동을 보였다. 접합영역을 철골 연결재 및 ECC를 사용하여, ECC 타설면적을 증가시켜 보의 소성힌지 구간을 확대 보강한 경우 강도 증진 효과 또한 15%정도 향상되는 것으로 나타났다. 이에 반해 기둥과 동일한 면에서 보와 결합되는 상세를 갖는 inside계열 실험체중 PC-IH-50 실험체의 경우 부재각 4.25%까지 이상적인 거동을 보였다. 보에 타설된 ECC의 범위가 작은 PC-I-25 실험체의 경우 부재각 2.2%에서 최대강도를 나타내었으며(138kN) 이후 부재각 3.5%까지 안정적인 이력 거동을 나타내었다. 접합영역을 철골 연결재 및 ECC를 사용한 두 개의 PC 실험체의 최대내력은 기준실험체에 비해 평균 15% 증가하는 것으로 나타났으며 접합상세에 따른 내력의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 보에 타설면적을 증가시켜 소성힌지 구간을 확대한 경우 내력 상승의 영향은 적으나(약 6%의 내력 향상) 연성능력이 개선되는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 ECC의 소성힌지 확대 구역은 outside 계열의 경우 250mm(0.7d), inside계열의 경우 500mm(1.4d)로 기둥에 작용하는 하중을 접합부 및 보로 효과적으로 전달할 수 있을 것으로 사료되며, 적정 보강 구역은 추가적인 연구가 필요하지만 보 길이에 대해 $l/8 \sim l/4$ 사이의 범위를 갖고 있는 것으로 판단된다.

3.3 철근의 변형률

3.3.1 보 주근의 변형률

현행 미국 기준에서는 특별 모멘트 구조(PC,PSC)의 경

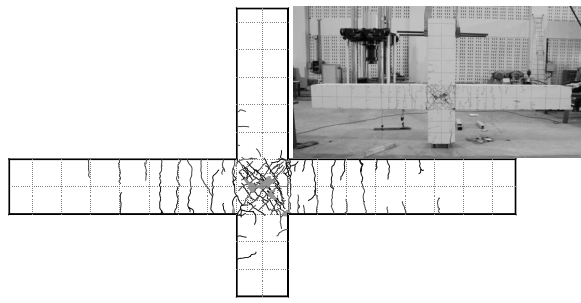
우 소성힌지를 접합부가 아닌 보 내부로 이동시켜 일체식 철근콘크리트 구조와 동일한 성능을 유지하도록 하고 있다. 이에 본 연구에서는 PC U형단면에 철골 연결재 및 ECC를 적용한 보-기둥 접합부에서 부재간 응력 불연속이 나타나지 않고 일체식 구조와 마찬가지로 부재각이 증가함에 따라 소성힌지가 보 내부로 발달 될 수 있는지를 평가하기 위해 기둥면에서 최대 2d까지 설치된 보 주철근의 응력분포를 그림 6에 나타내었다.

그림 6(a)와 같이 전단여유율이 1.26이며(접합부 전단강도/보가 휨 항복 할 때 접합부의 전단 강도; 표 1참조), 휨강도비가 1.6으로 보의 주인장철근이 항복후 접합부가 파괴되도록 계획된 RC 실험체의 경우 부재각 1%내외에서 접합부에 부근에서 첫 항복을 경험하였으며 하중의 증가와 더불어 순차적으로 철근이 항복되는 것으로 나타났다. 전단여유율이 1.09이며, 휨강도비가 1.3으로 계획된 outside계열 실험체 경우 보에 삽입된 철판 연결재의 응력 분포 및 철근의 변형률이 RC 실험체와 유사한 경향을 보였다. 기둥면에서 2.0d 위치에서 철판과 연결된 철근은 부재각 2% 내에서 항복하는 것으로 나타났다. 이에 반해 전단여유율이 1.54이며, 휨강도비가 1.3인 inside계열 실험체의 경우 2.0d위치에서의 철근의 항복은 부재각 2%를 넘어서 항복하는 것으로 나타났으며, 이는 전단여유율이 커 부재의 연성능력이 크기때문으로 판단된다. 또한 ECC 타설면적이 작은 경우 철판 연결재 및 철근의 응력이 커지는 것으로 나타났으며 이는 ECC와 콘크리트와의 부착응력의 크기에 따른 것으로 사료된다.

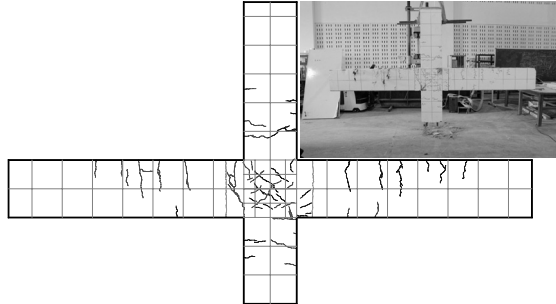
3.3.2 접합부 횡보강근

기존연구결과^{(3),(14)} 접합부에 배근된 횡방향 철근비가 증가함에 따라 접합부의 전단강도는 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 개발된 접합 상세의 횡보강근의 유효성 평가를 위해 inside계열 실험체 중 ECC 타설면적이 작은 PC-I-25 실험체를 제외한 4개의 실험체에 대해 접합부의 전단변형각 및 접합부 횡보강근의 응력변화를 분석하였다.

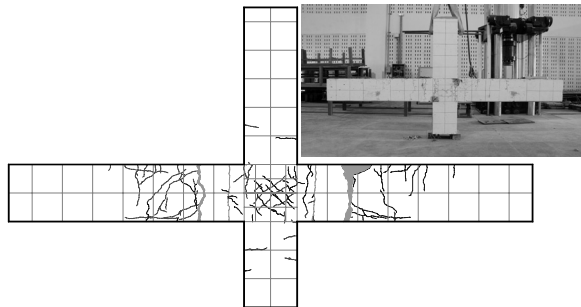
그림 7과 같이 일체 타설된 RC 실험체의 경우 접합부의 위치와 관계없이 거의 유사한 응력분포를 보였으며 이는 접합부의 전단강도에 횡방향 철근이 일정부분 기여하는 것으로 판단된다. 그러나 접합부에 ECC 및 철골 연결재로 연결된 4개의 PC 실험체의 경우 횡보강근의 응력변화율은 미비한 것으로 나타났다. 이는 그림 8과 같이 접합부의 전단변형각이 일체타설된 실험체에 비해 PC 실험체의 전단변형각이 작기 때문으로 판단된다. 이는 기둥에 설치된 철골 연결재



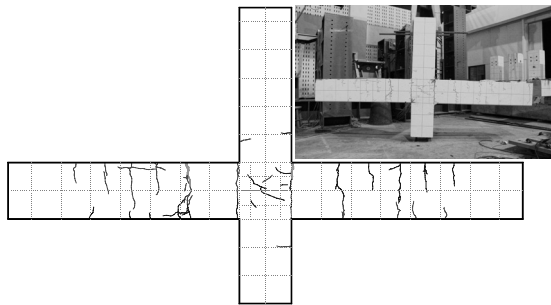
(a) RC-Control



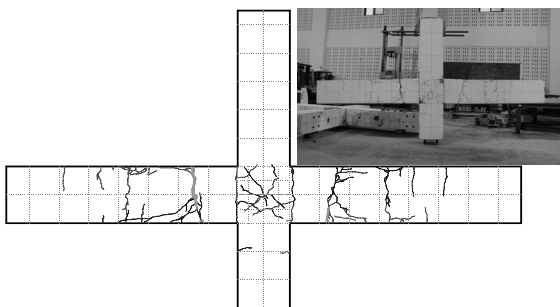
(b) PC-OH-50



(c) PC-OH-25

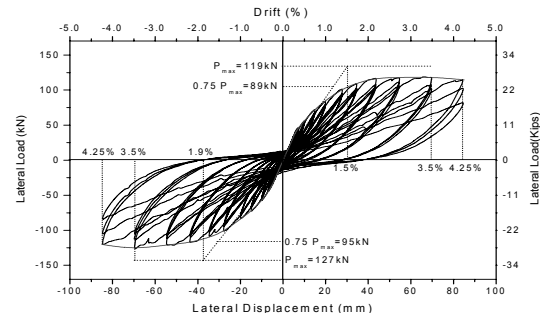


(d) PC-IH-50

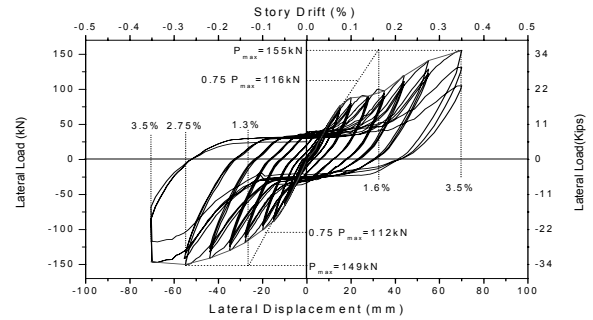


(e) PC-I-25

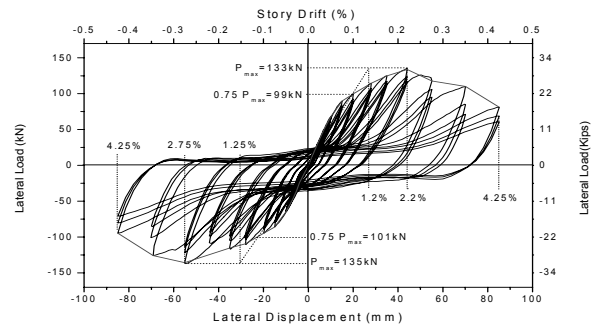
〈그림 4〉 최종파괴 상황



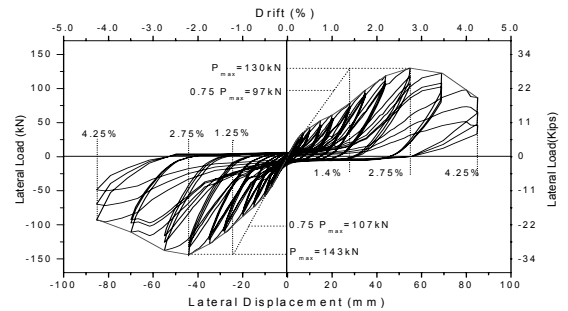
(a) RC-Control



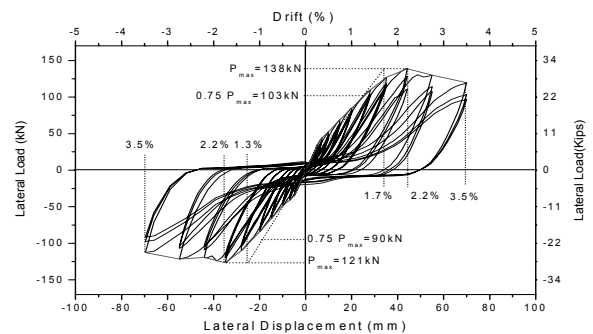
(b) PC-OH-50



(c) PC-OH-25



(d) PC-IH-50



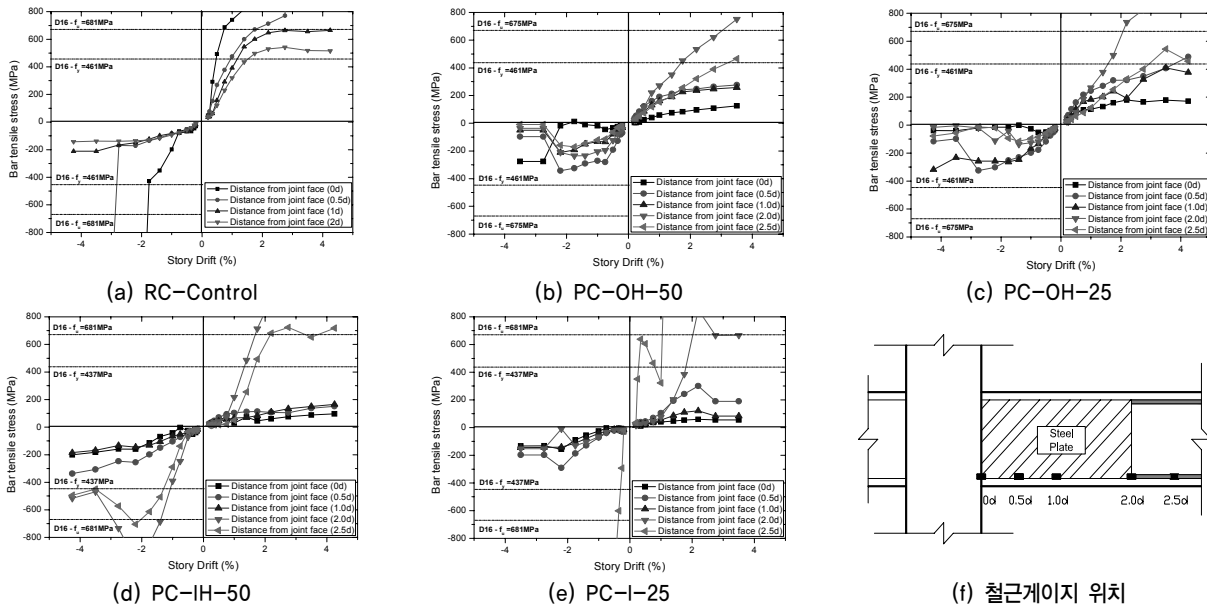
(e) PC-I-25

〈그림 5〉 하중-변위 관계

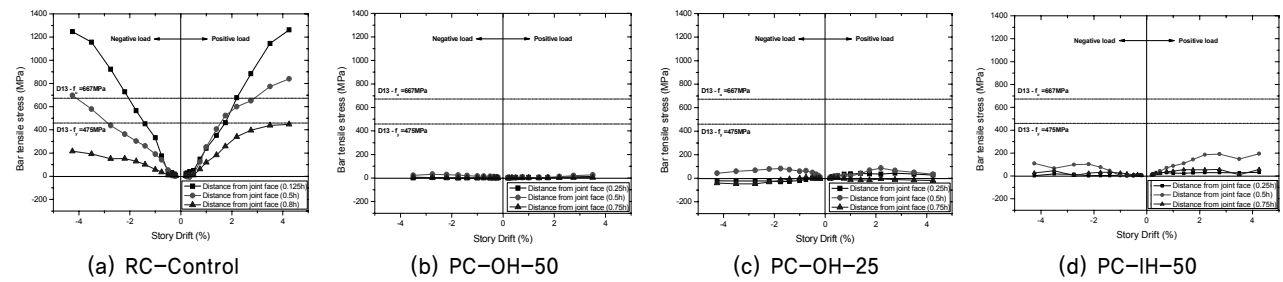
〈표 2〉 실험결과

Specimen		P_y [kN]	P_{max} [kN]	P_f [kN]	δ_y [%]	δ_{max} [%]	δ_f [%]	μ [-]	M_n [kN.m]	$M_{u,j}$ [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	2.3	125	285	206	792	540	572	1.06
	Neg	95	127	120	1.9	3.5	4.25	1.8			219			611	1.13
PC-OH-50	Pos	116	155	100	1.6	3.5	3.5	2.2	192	345	267	965	901	746	0.83
	Neg	112	149	110	1.3	2.75	3.5	2.6			256			717	0.8
PC-OH-25	Pos	99	133	77	1.2	2.20	4.25	1.8	192	345	229	965	901	640	0.71
	Neg	101	135	90	1.25	2.75	4.25	2.2			232			649	0.72
PC-IH-50	Pos	97	130	86	1.4	2.75	4.25	2.1	125	346	225	965	540	625	1.17
	Neg	107	143	92	1.25	2.75	4.25	2.2			125			688	1.27
PC-I-25	Pos	103	138	119	1.7	2.2	3.5	1.3	125	346	238	965	540	664	1.23
	Neg	90	121	112	1.3	2.75	3.5	2.1			125			582	1.08

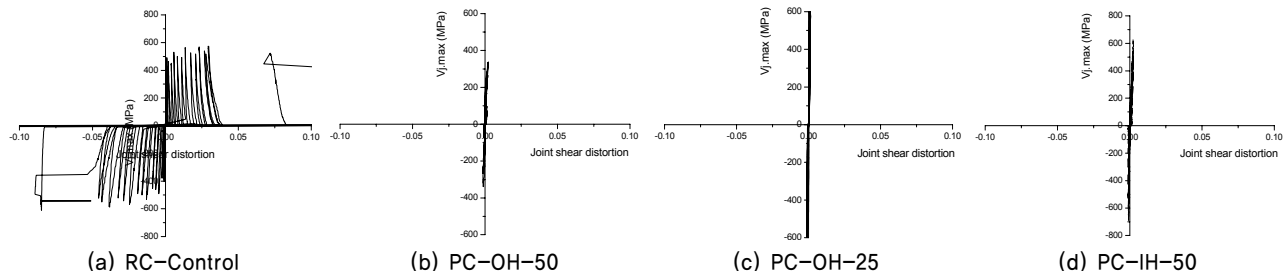
Notes: All estimates associated with moment and shear computed based on actual material properties. P_y : yield load(measured), P_{max} : peak load(measured), P_f : failure load(measured), δ_y : yield displacement (measured), δ_{max} : peak displacement(measured), δ_f : failure displacement(measured), μ : ductility(δ_{max}/δ_y), M_n : nominal moment, $M_{u,j}$: moment corresponding to V_u (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}



〈그림 6〉 보 주근의 응력 변형률관계



〈그림 7〉 접합부의 횡보강간 응력-변형 관계



〈그림 8〉 접합부 전단응력과 전단변형관계

(각형강관) 및 접합부에 타설된 ECC의 저항능력이 증대됨에 따라 접합부의 전단변형이 작아진 것으로 사료되며 이는 본 연구에서 개발된 접합상세의 경우 ECC 및 철골 연결재의 설치로 접합부의 횡보강근 설치에 따른 전단강도의 증가 효과는 미비한 것으로 사료된다.

4. 실험결과 분석

4.1 강도 및 강성

각 실험체의 구조성능은 ACI T1.1-01에 따라 평가하였으며 표 3에 정리하여 나타내었다. 강도는 강진 이후에도 구조물 붕괴를 방지하기 위해 부재각 3.5%이후 강도의 75%이상을 유지하도록 하고 있다. 본 연구에서 개발된 접합부의 경우 부재각 3.5%를 경험한 마지막 사이클의 강도가 75% 이상을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

각 실험체의 강성변화는 그림 9에 정리하였다. 정·부방향 가력시 최대 변위점을 잇는 강성의 변화를 초기 항복강성에 대한 비율로 나타낸 것이다. 모든 실험체에서 비탄성 이력 싸이클이 증가함에 따라 강성이 저하되는 특성을 나타내고 있으나 상대적으로 보의 강도가 높은 outside계열 실험체의 강성이 크게 나타났다. 기둥면에서 일정거리 떨어져 접합된 outside계열의 실험체는 연성능력이 탁월한 ECC 보 강범위에 따라 강성의 감소는 크게 나타났으며 부재각 2% 이후에서는 2배 정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 이에 반해 inside계열 실험체의 경우 일체 타설된 실험체와 유사한 강성크기와 감소 경향을 보였으나 부재각 1.5%이후 기준실험체에 비해 안정된 강성저하 특성을 보였다. 다만, inside

열 실험체의 경우 부재각 1%이후 강성의 감소가 둔화되는 현상을 보였으며, 이는 접합부 및 소성힌지 영역에 ECC를 적용할 경우 콘크리트의 인장변형능력이 향상되어 나타나는 변형경화현상에 따른 것으로 판단된다. 부재각 3.5% 이후 inside계열의 두 PC 실험체의 강성저하율 차이는 접합부의 횡보강을 설치하지 않은 PC-I-25 실험체의 접합부의 균열 확산에 따른 것으로 사료된다.

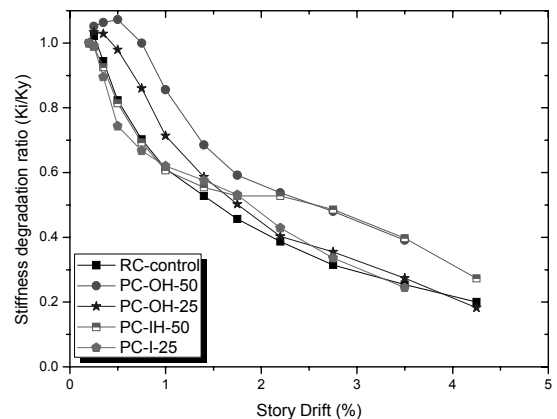
높은 수준의 지진이 발생한 이후 강성이 너무 작아지면 구조물은 작은 하중에도 큰 변형을 일으켜 불안정한 상태가 된다. 이에 ACI에서는 부재각 3.5%에서의 세 번째 사이클의 강성은 초기 강성의 5%를 유지하도록 하고 있으며 표 3과 같이 세 실험체 모두 조건을 만족하는 것으로 나타났다.

4.2 에너지소산능력

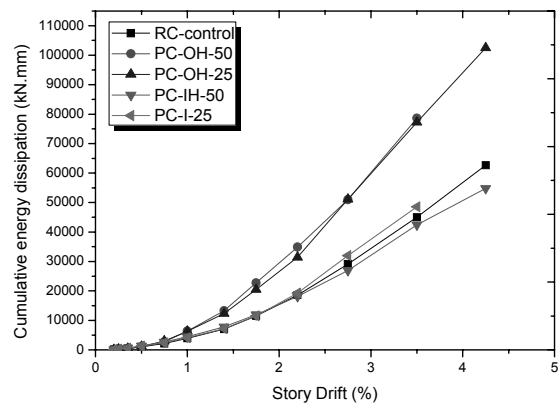
지진 발생시 구조물의 연성거동은 에너지소산 능력과 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, 에너지소산 능력이 클수록 내진 성능이 우수한 것으로 평가받고 있다. 그림 10에 누적에너지 소산면적은 동일 부재각(3.5%)에서 일체 타설된 RC 실험체에 비해 outside계열 PC 실험체가 42%정도 높은 에

〈표 3〉 개발된 접합상세의 구조성능평가 비교 (ACI T1.1-01)

Specimen			During 3.5% & 4.25% drift cycle			
			P_{3rd}/P_{max}	β	K_{rel}/K	K_{un}/K'
Acceptance criteria			≥ 0.75	≥ 0.125	≥ 0.05	≥ 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-OH-50	drift 3.5 %	Pos	0.70	0.30	0.30	0.37
		Neg	0.77			
PC-OH-25	drift 3.5 %	Pos	0.75	0.30	0.32	0.51
		Neg	0.88			
	drift 4.25 %	Pos	0.54	0.30	0.21	0.11
		Neg	0.59			
PC-IH-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-I-25	drift 3.5 %	Pos	0.75	0.24	0.49	0.14
		Neg	0.76			



〈그림 9〉 강성저하곡선



〈그림 10〉 누적에너지소산면적

너지 소산능력을 발휘하는 것으로 나타났다. 이에 반해 inside계열 PC 실험체의 경우 기준실험체와 6%내외의 차이를 보이며 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 다만 타설면적이 크며 접합부에 횡보강근이 설치된 PC-IH-50이 낮은 에너지 소산능력을 보였다. 이는 보의 소성힌지 부의 손상이 상대적으로 크게 나타났으며 이로 인한 펀칭 현상이 에너지 소산능력을 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 표 3과 같이 3.5%와 4.25%에 대하여 분석한 결과 모두 만족하는 결과를 나타냈다.

5. 결론

본 연구에서는 철골연결재 및 고인성섬유복합체를 사용하여 새로운 PC 보-기둥 접합상세를 개발하여 개발된 상세의 구조적 특성을 파악하고자 반복 하중 부분 구조체 실험을 수행하여 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1. 모든 실험체의 파괴는 보의 휨파괴가 선행되는 파괴모드를 보였으며, 철골연결재 및 ECC를 적용하여 일부에 현장타설된 4의 PC 실험체는 최종파괴에 이를 때까지 일체식 거동형태를 보였다.
2. 개발된 접합상세의 거동특성을 분석한 결과 연결철물 및 ECC의 사용을 통해 부재간 응력의 불연속은 나타나지 않았으며 보 및 접합부에 작용하는 하중을 효과적으로 전달하고 있는 것으로 나타났다.
3. 두 계열의(in & outside) 상이한 접합상세에 따른 실험체의 최대강도는 기준 실험체에 비해 15%정도 향상되는 연구결과를 얻었으며 outside계열의 실험체가 inside계열 실험체에 비해 우수한 강도 성능 및 에너지 소산능력을 갖는 것으로 나타났다. 또한 각 계열별 보의 소성힌지 구간을 확대 보강한 경우 강도 증진 효과는 15%정도 향상되는 것으로 나타났으며, 이는 기둥에 작용하는 하중을 접합부 및 보로 효과적으로 전달할 수 있는 확대 구역은 250mm(0.7d)만으로도 가능할 것으로 판단되며 적정 보강 구역은 추가적인 연구가 필요하지만 보 길이에 대해 $1/8 \sim 1/4$ 사이의 범위를 갖고 있는 것으로 사료된다.
4. 접합부의 전단강도에 있어 횡방향 보강근은 접합부의 성능에 비례하여 증가하는 기존연구결과를 입증하였다. 그러나 본 연구에서 제안하고 있는 접합부에서 횡보강근

설치에 따른 강도개선 능력은 ECC 및 철골연결재의 구속효과 증대로 인해 미비한 것으로 나타났으나, 접합부의 균열제어에 있어 필요한 것으로 판단된다.(inside계열 실험결과)

5. 개발된 보-기둥 접합상세는 ACI에서 제안하고 있는 구조성능 지침에서 제안하고 있는 평가기준에 의해 우수한 내진성능을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R01-2008-000-11381-0)

참고 문헌

1. 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, 44-61, 1995.
2. 김승훈, 류갑청, 하상수, 문정호, 이리형, "철근 관통형 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 외부접합부의 구조적 거동에 관한 실험적 연구," 대한건축학회 논문집, 제22권, 3-10, 2006.
3. 이정윤, 채희대, "지진하중을 받는 철근콘크리트 접합부의 강도," 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 25-33, 2006.
4. Lee, J.Y., Kim, J.Y. Oh, G.J., "Strength Deterioration of reinforced Beam-Column Joints Subjected to Cyclic Loading," *Engineering Structures*, Article in press, 2009.
5. 송영수, 유승룡, "반복하중을 받는 프리캐스트 콘크리트 건식 보-기둥 연결부의 거동분석," 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 18, No. 4, 497-506, 2006.
6. Soubra, K.S., Wight, J.K., and Naaman, A.E., "Cyclic Response of Fibrous Cast-in-Place Connections in Precast Beam-Column Subassemblages," *ACI Journal*, Vol. 90, No. 3, 316-32, 1993.
7. Sergio, M.A., Rene, Carranza, S.E., David Perez-Navarrete, M.SC., and Raul Martinenz, S.E., "Seismic Tests of Beam-to-column Connections in a Precast Concrete Frame," *PCI Journal*, May-June, 70-89, 2002.
8. Khaloo, A.R., and Parastesh, H., "Cyclic Loading of Ductile Precast Concrete Beam-Column Connection," *ACI Journal*, Vol. 100, No. 3, 291-296, 2003.
9. Abdel-Fattah, B.A., Wight, J. K., "Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resisting Design of RC Buildings," *ACI Structural Journal*, 31-39, 1987.
10. ACI Committe 318, "Building Code Requirement for Structural Concrete," American Concrete Institute, 2005.
11. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 2007.
12. ACI 352R-91, "Recommendations for Design of Beam

- Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures,”
ACI Manual of Concrete Practice, ACI, 1-9, 2002.
13. Bracci, J.M. Dooley, K.L., “Effect of Column Yielding During Earthquake For Reinforced Concrete Frame,” *ACI Journal*, 2003.
 14. Ehsani, M.R., Wight, J.K., “Exterior Reinforced Concrete Beam-Column Connection Subjected to Earthquake Type Loading,” *ACI Journal Proceeding*, Vol. 82, No. 82-43, 492-499, 1985.
 15. 이광수, 오정근, 문정일, 권영호, 신성우, “반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 보-기둥 접합부의 휨강성비에 관한 연구,” 한국콘크리트학회학술발표대회, 제2권, 63-67, 1990.
 16. 이정윤, 김진영, 오기동, “철근콘크리트 보-기둥 내부 접합부의 전단거동에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회논문집, 제 19권, 441-448, 2007.
 17. ACI T1.1R-01, “Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing,” ACI Manual of Concrete Practice, ACI, 1-7, 2002.
 18. Ehsani, M. R, Alameddin, F., “Design Recommendations for Type2 High-Strength Reinforced Concrete Connections,” *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 3, 277-291, 1991.