

중간모멘트골조 상세를 갖는 건식 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Dry Precast Concrete Beam-Column Connections With Intermediate Moment Frame Details

김선훈¹⁾ · 조종²⁾ · 오효근³⁾ · 최석동⁴⁾ · 여윤용⁵⁾ · 이득행^{6)*}

Kim, Seon Hoon¹⁾ · Cho, Jong²⁾ · Oh, Hyo Keun³⁾ · Choi, Seok Dong⁴⁾ · Yeo, Un Yong⁵⁾ · Lee, Deuck Hang^{6)*}

¹⁾충북대학교 건축공학과 석사과정, ²⁾포스코건설 R&D센터 건축연구그룹 부장, ³⁾신세계건설 미래성장연구소 파트너, ⁴⁾(주)연우건축구조기술사무소 대표이사, ⁵⁾(주)원원개발 전무, ⁶⁾충북대학교 건축공학과 교수

¹⁾Master Student, Department of Architectural, Chungbuk National University, ²⁾Senior Manager, Architecture Research Group, Posco E&C Co, Ltd.,

³⁾Partner, Health Safety Environment Division, Shinsegae E&C Co, Ltd., ⁴⁾COO, Yunwoo Structural Engineers Co, Ltd., ⁵⁾Executive Director, Winwin Coupler, ⁶⁾Professor, Department of Architecture, Chungbuk National University

/ ABSTRACT /

This study presents a dry precast concrete (PC) beam-column connection, and its target seismic performance level is set to be emulative to the reinforced concrete (RC) intermediate moment resisting frame system specified in ACI 318 and ASCE 7. The key features include self-sustaining ability during construction with the dry mechanical splicing method, enabling emulative connection performances and better constructability. Test specimens with code-compliant seismic details were fabricated and tested under reversed cyclic loading, which included a PC beam-column connection specimen with dry connections and an RC control specimen. The test results showed that all the specimens failed in a similar failure mode due to plastic deformations in beam members, while the hysteretic response curve of the PC specimen showed comparable and emulative performances compared to the RC specimen. Seismic performance evaluation was quantitatively addressed, and on this basis, it confirmed that the presented system can fully satisfy all the required performance for the intermediate RC moment resisting frame.

Key words: Precast concrete, Beam-column connection, Dry joint, Seismic performance, Mechanical splice

1. 서 론

최근 국내 건설환경은 현장중심의 생산공법에서 급격히 탈피하여 소위 탈현장 건설(Off-Site Construction, OSC) 공법의 적용을 요구하고 있다. 프리캐스트 콘크리트(Precast concrete, PC) 공법은 고품질의 단위부재들을 공장에서 선제작하기 때문에 공기단축을 통한 금융비용 및 투입 노무비를 절감할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 즉시 실현 가능한 대표적인 탈현장 공법이다[1]. 기존의 PC 공사에서는 상부와 하부 기둥을 연결하기 위하여 주로 스플라이스슬리브(splice sleeve)를 이용하였으며, 이는 그라우트를 주입하여 일체화하는 습식 기계적이음을 공법이다. 이 같은 습식 공법은 그라우트의

충분한 강도가 발현될 때까지 양생기간이 필요하고 이에 따라서 다수의 가설재가 필수적으로 요구되어 상부층 공사가 지연되는 단점이 지속적으로 지적되고 있다. 이를 개선하기 위하여 이 연구에서는 압축력과 인장력을 모두 전달할 수 있는 건식 기계적이음을 개발하였고, 이를 활용한 PC 모멘트골조의 요구성능 및 내진성능 확보 여부를 평가하고자 한다. 이를 통해 가설재 없이도 자립이 가능한 시스템(Self-sustaining system, SSS)을 구현하고, 시공안정성과 급속시공성능을 동시에 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험적 연구

2.1 공법개요

이 연구에서는 건식 기계적이음을 통해 연결된 PC 보-기둥 접합부 실험체를 제작하여 접합부의 거동 및 내진성능을 실험적으로 분석 및 평가하였

*Corresponding author: Lee, Deuck Hang
E-mail: dk@cbnu.ac.kr

(Received February 2, 2023; Revised February 27, 2023; Accepted February 28, 2023)

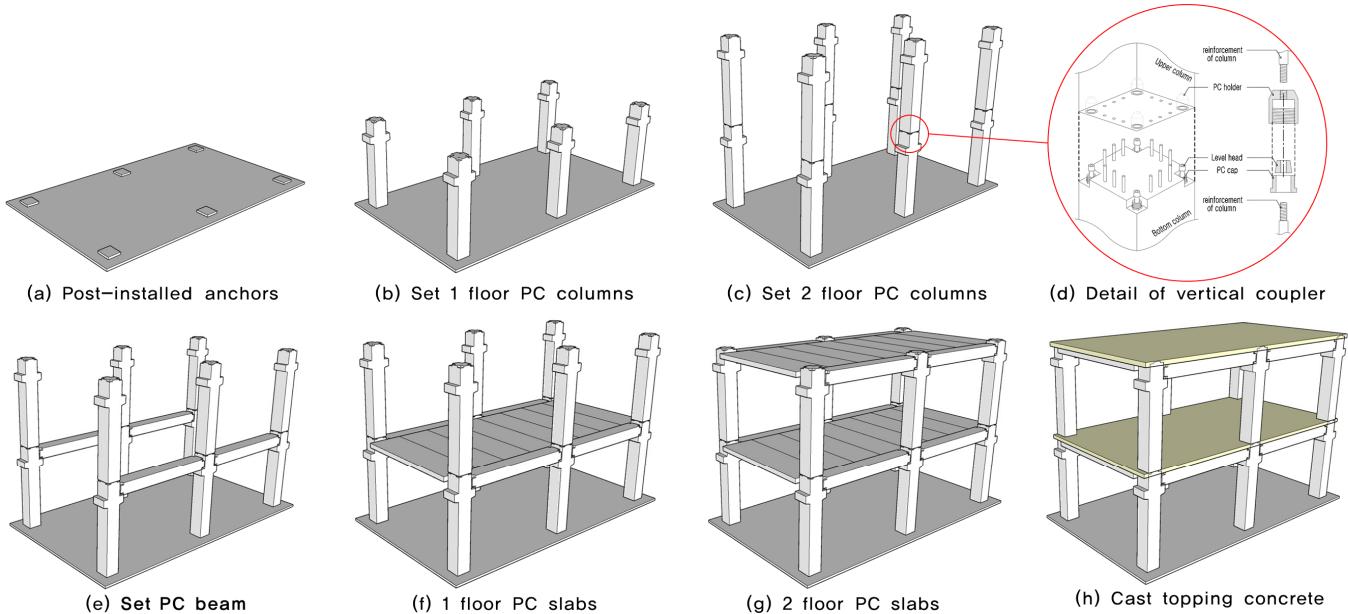


Fig. 1. Construction process of PC moment frame system with dry mechanical connection

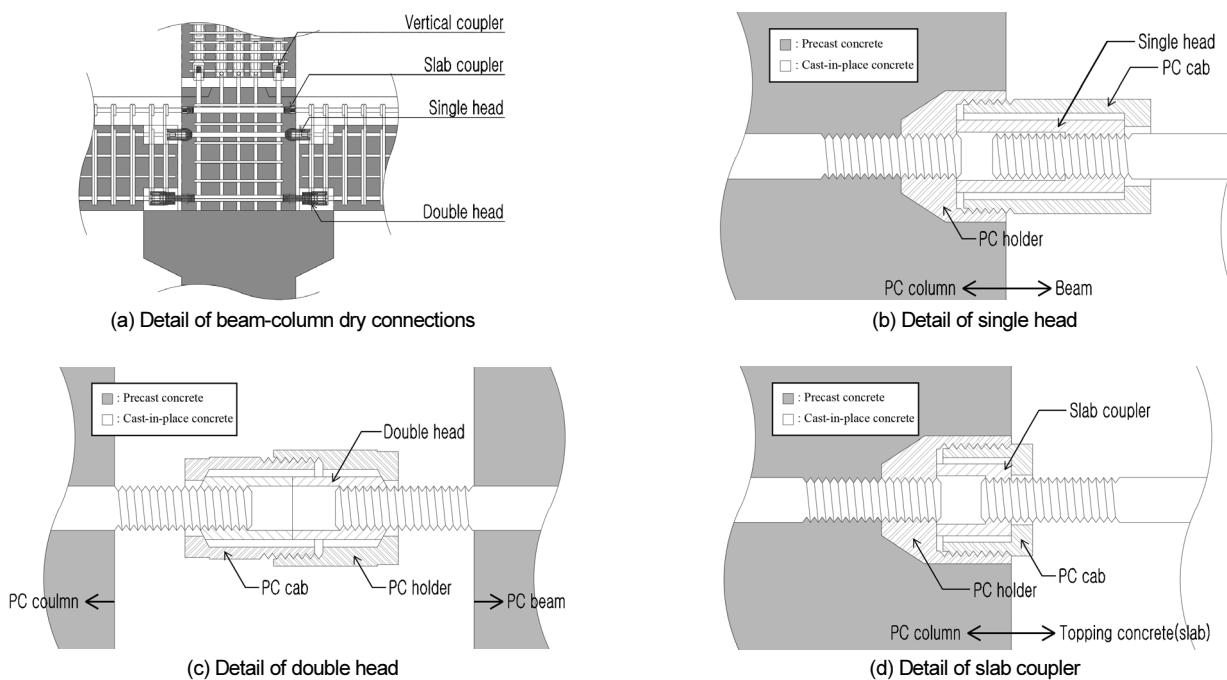


Fig. 2. Description of dry mechanical splicing method

다. Fig. 1에는 건식 접합부를 갖는 PC 공법의 시공순서를 보여주고 있으며, Fig. 2는 이 연구에서 적용된 기계적이음 공법의 상세를 제시하였다. 이 연구에서 적용된 건식 기계적이음은 외부홀더와 이에 연결되는 고정캡 및 내부헤드로 구성되어 있다. 외부홀더와 고정캡의 체결을 통해 인장력을 기계적이음으로 전달하고, 내부헤드를 통해 압축력을 전달하는 방식이다. PC 기둥-기둥 이음부(수직 커플러)와 PC 보-기둥 접합부(더블헤드, 싱글헤드, 장철근)를 일체화할 수 있도록 설계하였다. 여기서 더블헤드(double head)는 기둥과 보에서 연장된 양쪽철근에 헤드를 맞닿게 설치하며, 싱글헤드(single head)는 기둥내부에 홀더만 설치되고, 보에서만 헤드를 조절하여 맞닿게 하는 방법이다. 헤드는 철근과 나사를 조립되어 있으며, 나사를 풀

어서 상대측 철근과 맞닿도록 구성되어 있다. 장철근 접합(slab coupler)은 현장타설콘크리트 부분(즉, 슬래브)에 배치되는 길이방향철근을 직접회전하여 홀더에 나사조립하는 방식으로 기본적인 상세는 싱글헤드와 비슷하다. 요약하면, 홀더는 PC 부재 내에 미리 매설되며, 현장에서는 내부헤드(싱글 또는 더블 헤드)의 나사를 풀어 상호 밀착시키고, 외부 고정캡을 홀더에 체결하여 시공을 마무리한다. 외부홀더와 고정캡은 PC 부재의 조립시 오차를 수용할 수 있도록 고안되었다.

실험체에 적용된 기계적이음의 성능을 평가하기 위하여 KS D 0249 「철근 콘크리트용 봉강의 기계식 이음의 검사방법」에 따라 시편을 제작하여 일방향 인장시험 및 고응력 반복 시험을 수행하였고, 모두 요구성능을

충분히 만족하는 것을 확인하였다. 또한, 현행설계기준에서 규정하고 있는 유형 2 기계적이음에 준하는 성능 또한 만족하였다. 기계적이음 시험 방법 및 성능평가 결과는 2.4절에서 설명하였다.

이 연구에서는 기계적이음을 적용한 건식 PC 보-기둥 접합부가 중간모멘트골조의 요구성능을 만족하기 위하여 정적반복가력 실험을 수행하였다. 실험 결과를 토대로 접합부의 균열 및 파괴양상, 거동을 검토하고 건식 PC 기계적이음 공법이 적용된 중간모멘트골조 보-기둥 접합부 실험체를 정량적 해석을 통해 기존의 일체로 타설된 철근콘크리트(Reinforced concrete, RC) 공법이 적용된 실험체와 동등성 확보를 평가하였다.

2.2 실험체 설계

이 연구에서는 기계적이음을 적용한 건식 PC 골조 시스템의 현장 적용성을 검토하고자 ACI 318-19(ACI committee 318. 2019)[2]와 ACI 352[3]에 근거하여 실험체를 설계하였다. ACI 318-19 18.4에서 요구하는 중간모멘트골조의 보, 기둥 및 접합부 상세를 토대로 PC 접합부 실험체(PC-S)를 제작하였고, 이와 동등성을 평가하기 위해 접합부가 일체로 타설된 실험체(RC)를 제작하였다. 실험체의 주요 특징을 Fig. 3에 나타내었다. PC-S 실험체는 PC 보는 속이찬 중실단면이며, 이에 따라서 보의 주철근은 기계적 이음 장치(더블헤드, 싱글헤드, 장철근)를 통해서만 기둥을 관통하

여 연결된다. 앞서 설명한 것과 같이, 덧침콘크리트(즉, 슬래브)에 배치되는 길이방향 철근은 장철근, 기둥을 관통하는 상부와 하부 보 길이방향 철근은 각각 싱글헤드와 더블헤드 상세를 갖도록 연결하였다. PC-S 실험체의 기둥-기둥 이음은 기둥의 4개 모서리에 배치된 SHD22 철근을 싱글헤드를 갖는 기계적이음 장치로 체결하였으며, 이외의 기둥의 나머지 주철근은 스플라이스 슬리브를 통하여 연결하였다. 즉, 코너의 4개 철근은 건식 기계적이음을 적용하여 시공하중에 대해 자립성능을 확보하였고, 나머지 기둥의 주철근은 습식 공법인 스플라이스 슬리브를 통하여 기둥-기둥 이음부의 일체성을 도모하였다. RC 실험체는 PC 실험체와 동등한 휨강도를 확보하기 위해 보 상·하부에 각각 4-HD22, 2-HD16 + 2-HD13 철근을 배근하였으나, 모든 실험체는 실험실의 현실적인 제약사항인 양중무게 및 가력장비의 용량을 고려하여 높이는 3,220 mm, 경간길이는 6,000 mm로 계획되었으며, 모든 실험체의 보와 기둥의 크기는 각각 600 mm×600 mm 및 600 mm×700 mm이다.

2.3 실험체 제작 과정

Fig. 4에는 PC 실험체의 제작과정을 나타내었다. PC 실험체는 PC 보와 PC 기둥을 별도로 콘크리트 타설하였으며 각 부재의 양생기간은 약 2주 소요되었다. 이후 상·하부 PC 기둥의 각 모서리에 위치한 수직 커플러를 체결

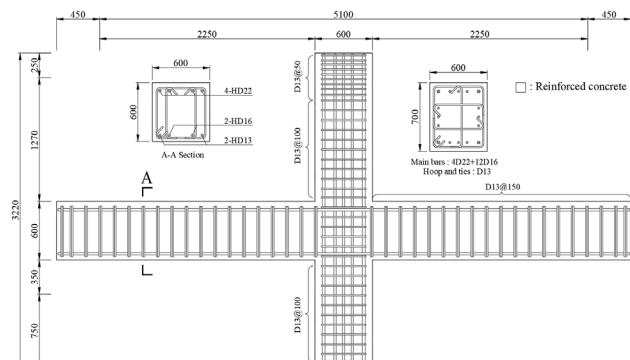
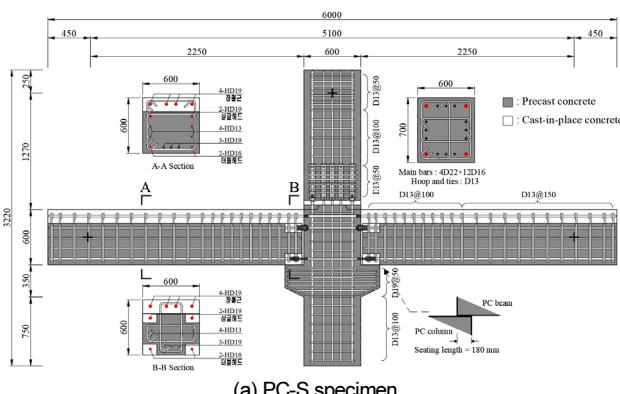


Fig. 3. Configuration of beam-column joint specimens



(a) Manufacture PC components



(c) Application of mechanical splices on PC beam-column joint



(b) Assemble of PC components



(d) Cast in place concrete

Fig. 4. Construction of PC beam-column joint specimen

하여 시공하중에 의한 전도를 방지하였으며 하부 기둥 브라켓에 걸침길이 180 mm를 두어 PC 보 부재를 안착시킨 뒤에 수평방향 기계적이음 장치를 체결하였다. 덧침콘크리트를 타설하기 이전에 기둥의 스플라이스 슬리브 와 PC 보의 포켓부에 무수축 그라우트를 충전하였다. 이후 PC 개별부재 양 생기간 이후 덧침콘크리트를 PC 보 상부에 타설하여 실험체를 일체화하였다. 충분한 덧침콘크리트의 강도를 발현하기 위해 타설 후 약 4주 후에 횡방향 정직반복시험을 수행하였다.

2.4 재료 및 기계적이음 성능시험

실험체에 사용된 콘크리트 압축강도는 35 MPa로 설계하였으며, 철근의 항복강도는 400 MPa(HD철근), 500 MPa(SHD철근) 이형 철근을 사용하였다. Table 1과 Table 2는 각각 콘크리트 압축시험과 철근 인장시험 결과를 요약하였으며 콘크리트의 재료 강도는 정직 반복 실험일에 원형 공시체 5개를 압축 재료시험을 수행하여 평균 재료강도로 산정하였다. 기계적이음은 KS D 0249에서 규정하는 성능 시험을 Fig. 5에 따라 수행하였으

Table 1. Concrete material properties

Specimen	Compressive strength f_{ck} (MPa)		
	Column	Beam(PC)	Beam(RC*)
PC-S	37.3	45.5	36.8
RC	35.9	-	35.9

* RC: Topping concrete in PC specimen

Table 2. Reinforcement material properties

Size*	Yield strength $f_{y,test}$ (MPa)	Tensile strength $f_{u,test}$ (MPa)	$f_{u,test}/f_y$ **	Residual slip [†] Δ_r (mm)
HD13	472.7	610.1	1.52	0.024
HD16	461.7	663.6	1.65	0.107
HD19	515.1	658.6	1.64	0.009
SHD22	594.1	705.1	1.28	0.053

* HD: Grade 400 MPa; SHD: Grade 500 MPa.

** Ratio based on the specified yield strength.

† Residual slips were measured based on KS D 0249.

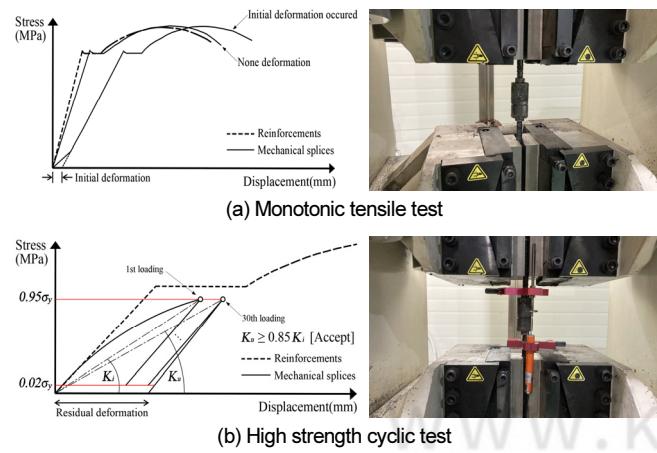


Fig. 5. Mechanical splice test method

며 일방향 인장 시험과 고응력 반복 내력 시험 결과를 각각 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. 기계적이음 성능시험 결과 모든 기계적이음은 유형 2 기계적이음 성능과 0.3 mm 보다 작은 미끄러짐 및 강성 기준을 만족하는 것으로 판정되었다. Table 3에는 기계적이음의 성능시험 결과를 나타내었다.

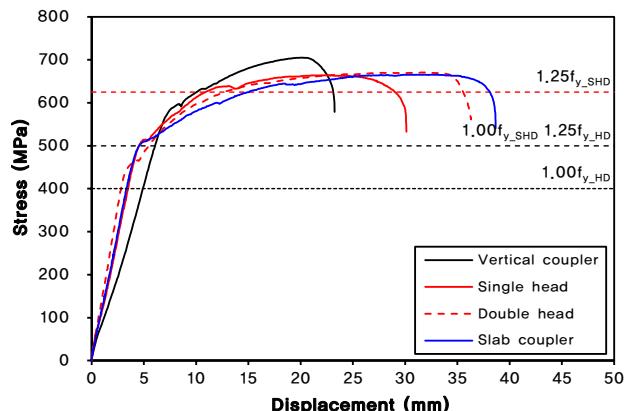


Fig. 6. Monotonic tensile test result

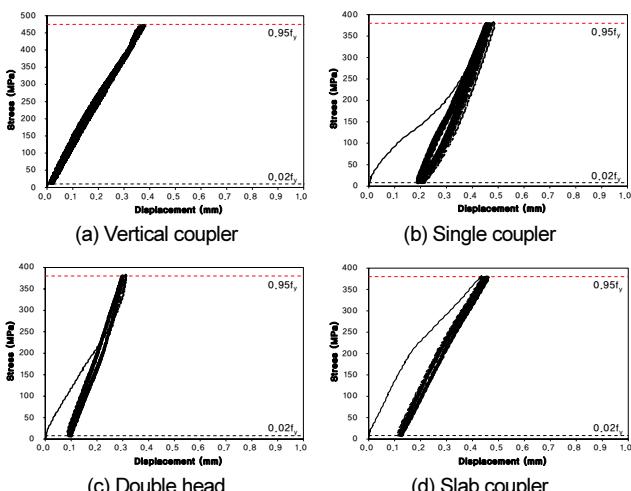


Fig. 7. High strength cyclic test result

Table 3. Mechanical splice test results

Mechanical splice (Size*)	Monotonic tensile test		High strength cyclic test	
	Tensile strength $f_{u,test}$ (MPa)	$f_{u,test}/f_y$ **	Residual slip [†] Δ_r (mm)	K_i/K_u ‡‡ (%)
Vertical coupler (SHD22)	704.9	1.40	0.025	93.17
Single head (HD19)	663.5	1.65	0.191	106.94
Double head (HD16)	671.7	1.67	0.102	103.78
Slab coupler (HD13)	607.7	1.51	0.105	96.01

* HD: Grade 400 MPa; SHD: Grade 500 MPa.

** Ratio based on the specified yield strength.

† Residual slips were measured based on KS D 0249.

‡‡ K_i : Initial stiffness; K_u : Ultimate stiffness.

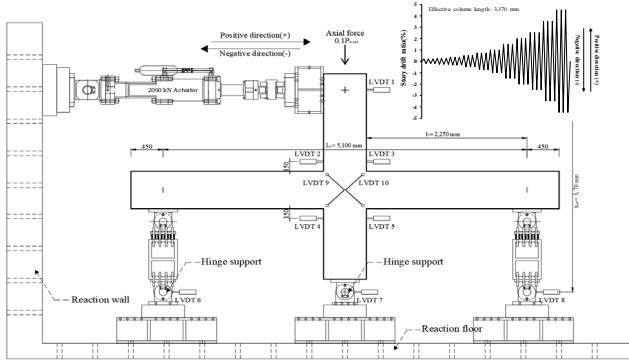


Fig. 8. Test setup of beam-column joint specimens

2.5 실험 방법

Fig. 8에는 실험세팅과 계측장비의 위치를 나타내었다. 기둥의 하부에 배치된 지점철물을 이용하여 편지점으로 구현하였으며, 보의 양단부에 둘러 지점을 구현하고자 450 mm 떨어진 구간에 힌지 2개를 배치하였다. 횡방향 가력점은 기둥 하부면에서 2,850 mm 떨어져 있으며 가력점에서부터 기둥 하부에 위치한 힌지점 중심까지의 거리는 3,170 mm이다. 실제 구조물에서 발생하는 중력하중을 모사하기 위해 기둥 단면의 공칭 압축강도 대비 약 10%를 축력으로 재하하였다. 가력상세는 ACI 374.1-05[4]에서 제시된 이력을 사용하였다. 2,000 kN 용량의 액추에이터를 상부 기둥에 체결하였으며, 변위제어방식으로 충간변위비 0.2%부터 6.0% 까지 각 하중단계에 대하여 정·부방향으로 3회 반복가력하였으며, 가력한 이후에도 여력이 남아있는 실험체의 경우 충간변위비 7.0% 정·부방향 1회 가력하였다. 실험체의 변위측정은 횡방향 가력점에 위치한 수평 LVDT의 계측값을 활용해 하중 단계의 목표 변위를 산정하였으며 접합부에 수평 및 대각방향으로 위치한 LVDT(LVDT 2~5, 9~10)는 보와 접합부의 회전각을 측정하고자 하였다. 또한, 실험체 지점에 위치한 철물을 LVDT(LVDT 6~8)는 힌지 철물의 수평변위를 측정하여 실험 중 발생할 수 있는 상대적인 미끄러짐을 실시간으로 보정하였다. 최대하중의 80% 이하로 하중이 계측되면 실험실 안전규정에 준하여 가력을 종료하였다.

3. 실험 결과

3.1 이력거동

실험체의 공칭강도(P_n)는 보 단면의 정·부방향 공칭 휨강도를 기둥 상

부의 가력점에 작용하는 항력으로 치환하여 산정하였다.

$$P_n = \frac{M_{b+} + M_{b-}}{h_{eff}} \quad (1)$$

여기서, M_{b+} 와 M_{b-} 는 각각 보 단면의 정방향 및 부방향 공칭 휨강도, h_{eff} 는 실험체의 유효 높이로서 3,170 mm이다. Table 4는 실험에서 계측된 보-기둥 접합부 실험체의 정·부방향 항복점, 파괴점, 최대하중과 최대하중 도달 시 충간변위비와 초과강도비, 연성도를 정리하여 나타내었다. 실험체의 항복점은 Fig. 9에 따라 산정하였으며 파괴점은 하중이 실험 최대하중의 80% 이하로 감소하는 시점으로 산정하였다. 모든 실험체는 기둥에 비해 보부재에 다수의 휨 균열이 나타났으며 이력 곡선에서 최대 하중은 보의 공칭 강도와 유사하게 나타났다. 또한, 실험체의 파괴모드는 보 부재의 내단부 소성힌지 구간에서 상·하부 콘크리트의 압괴 및 주철근 파단으로 인한 휨파괴로 나타난 것으로 판단되며 따라서 현행설계기준에 부합하는 강기동·약보의 거동을 보였다.

Fig. 10(a)는 중실단면을 갖는 PC-S 실험체의 이력곡선과 균열상세를 나타내었다. 초기 하중단계에서 보의 휨 균열이 나타났으며 정·부방향 각각 216.3 kN(0.84%) 및 -213.9 kN(-0.89%)에서 항복점에 도달하였다. 접합부의 전단균열은 정·부방향 충간변위비 $\pm 1.5\%$ 에서 발생하였으며, 이후 접합부의 전단균열은 크게 진전되지 않았다. 실험체의 정·부방향 최대 하중은 각각 241.0 kN(3.49%), -234.2 kN(-3.49%)이다. 정·부방향 충간변위비 $\pm 3.5\%$ 에서 기계적이음이 매설되어있는 포켓부의 콘크리트가 탈락하였으며, 정·부방향 충간변위비 $\pm 4.5\%$ 에서 기계적이음된 보의 일부 주철근이 기계적이음 외부에서 파단되었다. 이후 정방향 및 부방향에 대하여 충간변위비 6.75%과 -6.46%에서 보 상·하부 콘크리트 압괴로 실험체가 파괴점

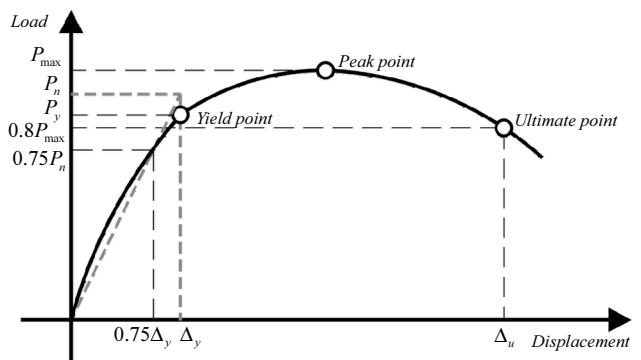
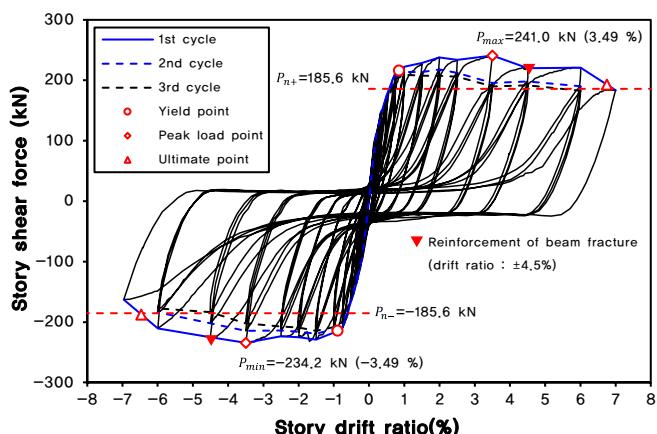


Fig. 9. Characteristic points on load-displacement curve

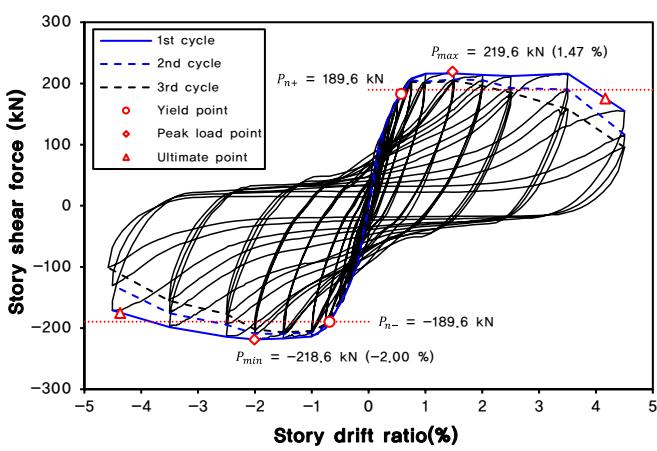
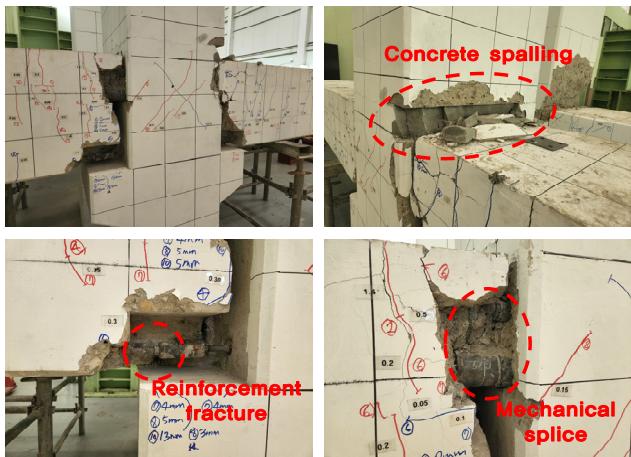
Table 4. Summary of test results

Specimen	Loading direction	P_n (kN)	P_y (kN)	θ_y (%)	P_{max} (kN)	θ_{max} (%)	θ_u (%)	P_{max}/P_n	Ductility* (μ)
PC-S	Positive (+)	185.6	216.3	0.84	241.0	3.49	6.75	1.29	8.03
	Negative (-)	-185.6	-213.9	-0.89	-234.2	-3.49	-6.46	1.26	7.25
RC	Positive (+)	189.6	183.0	0.57	219.6	1.47	4.16	1.15	7.29
	Negative (-)	-189.6	-189.5	-0.68	-218.6	-2.00	-4.37	1.15	6.42

* Ductility: θ_u/θ_y .



(a) PC-S specimen



(b) RC specimen

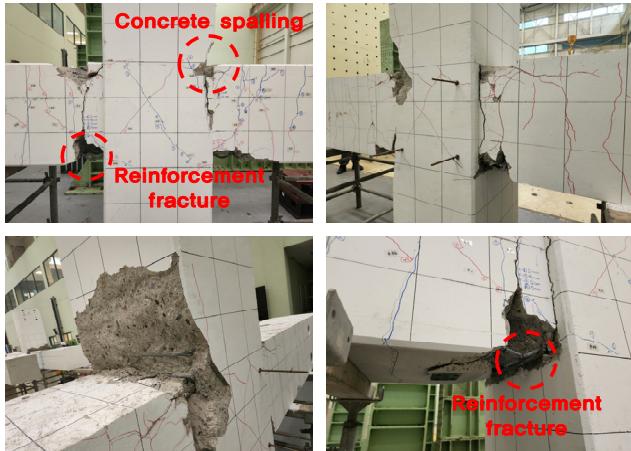


Fig. 10. Story shear force-drift ratio curve and crack patterns

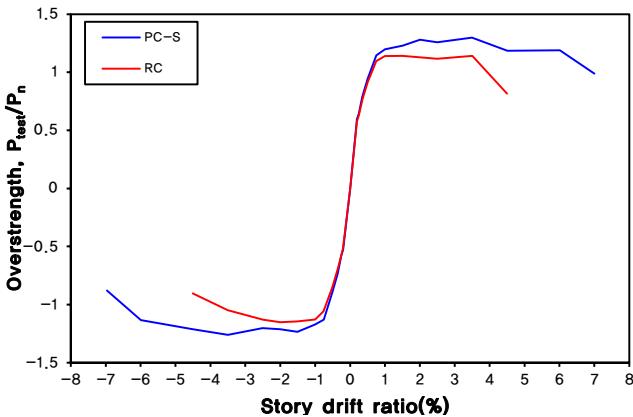


Fig. 11. Envelopes of overstrength-story drift ratio

에 도달하였다.

Fig. 10(b)는 보와 기둥이 일체로 탄설된 RC 실험체의 이력거동을 나타내었다. 초기 하중단계에서 보 내단부에 휨균열이 발생하였으며 접합부의 대각 전단균열은 PC-S 실험체보다 이른 시점인 정·부방향 충간변위비 $\pm 1.0\%$ 에서 발생하였다. RC 실험체는 정·부방향 각각 183.0 kN(0.57%) 및 -189.5 kN(-0.68%)에서 항복점에 도달하였다. 실험체의 최대하중은 정방향과 부방향에 대하여 각각 219.6 kN(1.47%) 및 -218.6 kN(-2.00%)로 나

타났다. 이후 하중단계가 증가할수록 RC 공법의 전형적인 거동을 보여주었으며, 보의 주철근 파단 및 기둥의 콘크리트 압괴로 인한 손상이 크게 나타나 정·부방향에 대하여 충간변위비가 각각 4.16% 및 -4.37%에서 PC-S 실험체보다 이른 시점에 파괴점에 도달하였다. PC-S 실험체를 RC 실험체와 충간변위비-하중 곡선을 비교하였을 때, PC-S 실험체는 항복점 및 최대 하중 도달 시점이 RC 실험체보다 높은 충간변위비에서 도달하였다.

Fig. 11은 PC-S 실험체와 RC 실험체의 포락곡선을 분석하기 위해 각 실험체의 이력거동을 충간변위비에 따른 초과강도로 정규화하여 나타내었다. 두 실험체의 초기 강성 및 공칭강도 도달시점은 유사하였으며, 초과강도는 PC-S 실험체가 RC 실험체보다 높게 나타났다. 이는, PC-S 실험체의 높은 강성을 보유한 기계적이음이 접합부 부근에서 압축력 및 인장력을 모두 부담하는 거동을 보여주어 초과강도 및 연성능력이 높게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 기계적이음 적용한 건식 PC 중간모멘트골조는 RC 실험체에 대비하여 동등성능을 충분히 보유한 것으로 판단된다.

3.2 철근의 변형률

Fig. 12는 PC-S 실험체와 RC 실험체의 보 길이방향 철근에 부착한 철근 변형률 계이지를 통해 주요 충간변위비에서의 변형률을 나타내었다.

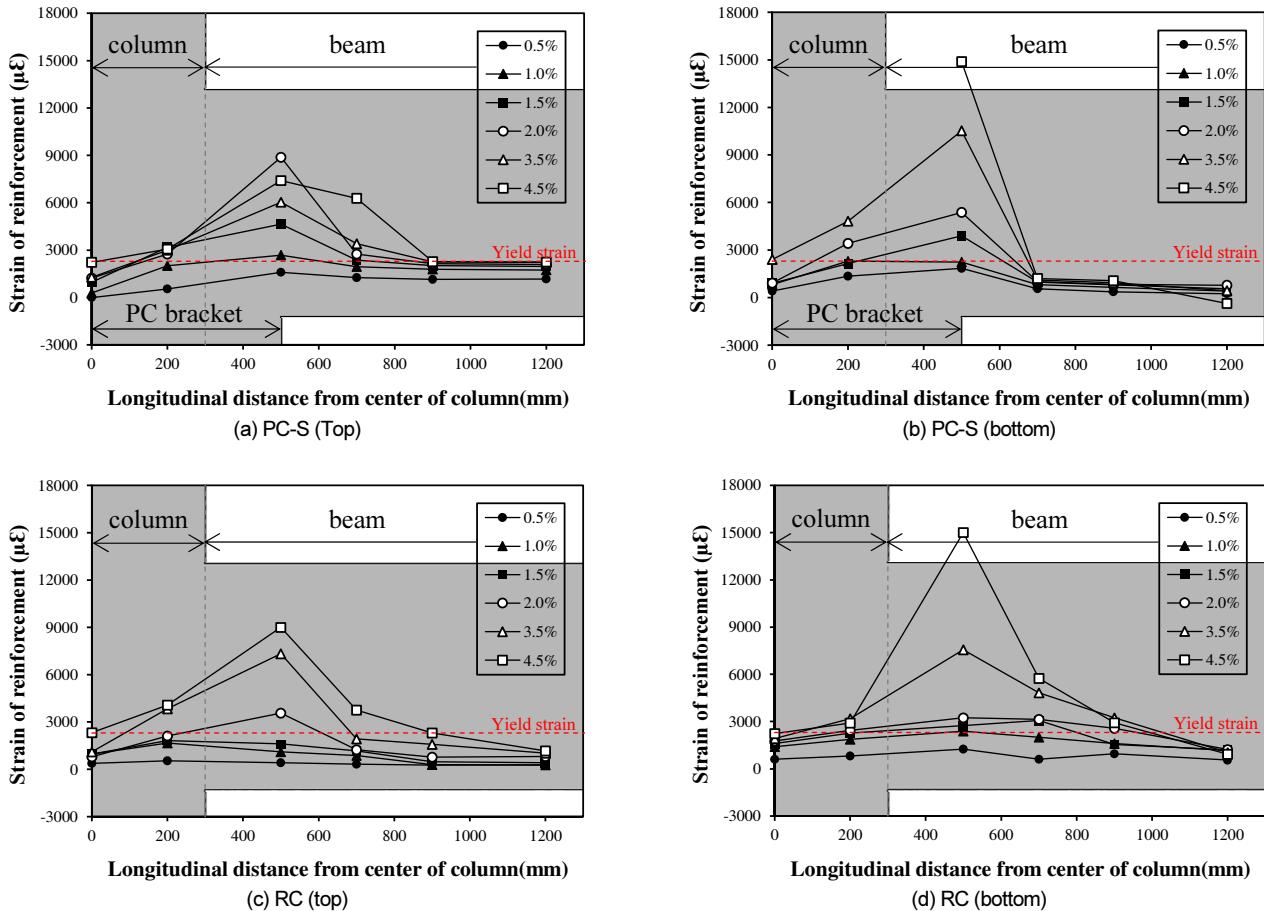


Fig. 12. Strain distribution of connecting reinforcements

Fig. 12(a) 및 Fig. 12(b)은 각각 PC-S 실험체의 기계적이음된 상부철근(장철근)과 하부철근(더블헤드)의 변형률을 보여주고 있다. 보상-하부주철근의 변형률은 초기 하중단계에서는 모두 유사한 변형률 분포를 보여주었다. 충간변위비 1.5% 이후 기둥면에서 150 mm 떨어진 위치에 배치된 기계적이음장치 부근에서 변형률이 증가하는 양상을 보여주었으며 하부철근은 충간변위비 4.5%에서 높은 변형률을 보여주면서 기둥 주변에서도 다소 크게 나타났다. 이는 기계적이음이 강성이 높아 다소 변형률이 집중되는 경향을 보인 것으로 판단되며, 그럼에도 불구하고 견식이음장치는 충분한 변형능력을 확보하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12(c) 및 Fig. 12(d)는 각각 RC 실험체의 보 길이방향 상-하부 철근의 변형률을 보여주고 있으며 전형적인 RC 보-기둥 접합부 변형률 추이를 보여주었다. 이 실험체의 상부철근의 변형률과 하부철근의 변형률은 유사하게 나타났으며, 충간변위비 1.5%에서 기둥 주변에서 상-하부 철근이 항복하여 소성거동을 하였다.

3.3 할선강성

할선강성 비교를 위하여 각 실험체의 정·부방향 충간변위비에 따른 첫 번째 하중 사이클에서의 할선강성을 산정하였으며 Fig. 13에 나타내었다. KS D 0249에서 규정하는 기준을 만족하는 기계적이음을 적용한 PC-S 실험체는 모든 하중단계에서는 PC-S 실험체의 강성은 RC 실험체와 유사하게 나타났다. 일반적으로 기계적이음을 적용한 PC-S 실험체는 기계적이음

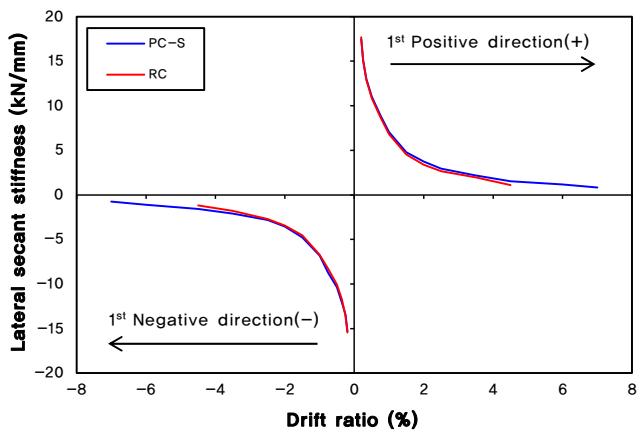


Fig. 13. Lateral secant stiffness

상세가 체결식으로 되어 있어 커플러 내부의 나사산에서 초기 슬립이 발생하여 RC 공법 실험체보다 비교적 강성이 작게 나타날 수 있다. 이 연구에서 제안하는 건식 접합부를 갖는 PC 중간모멘트골조의 경우에는 RC 공법과 대비하여 동등성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

3.4 에너지소산능력

에너지소산능력은 보-기둥 접합부에서 보가 기둥보다 먼저 항복하여 보

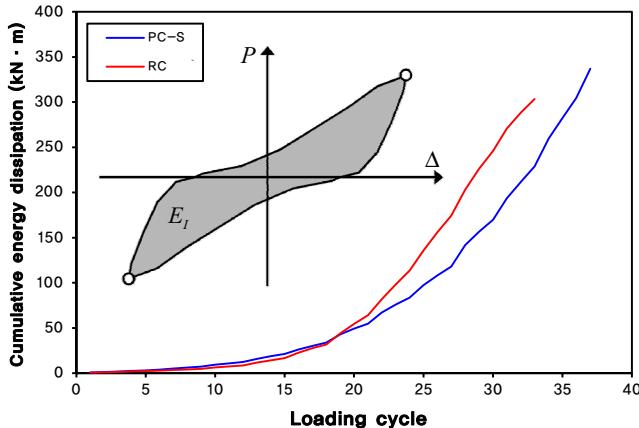


Fig. 14. Cumulative energy dissipation

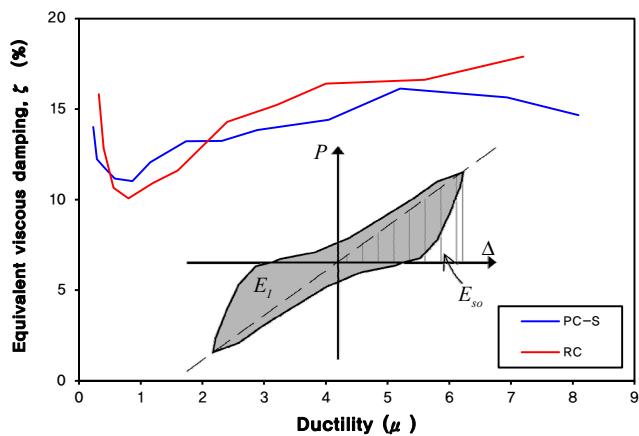


Fig. 15. Equivalent viscous damping ratio

의 소성한지 영역에서 에너지소산이 이루어져야 하며, 이는 건물의 시스템 레벨에서 내진성능을 판단할 수 있는 지표가 된다[5, 6]. Fig. 14는 각 실험체의 이력곡선을 이용하여 산정된 누적 에너지소산량을 각 하중 단계에 대하여 나타내었으며, 에너지소산량은 각 목표 충간변위비에서 이력곡선으로 둘러싸인 면적으로 산정하였다. 실험체의 각 항복점 도달 시점까지 모든 실험체의 에너지소산능력은 유사하게 나타났다. 충간변위비 1.5% 이후 RC 실험체는 PC-S 실험체에 대비하여 높은 에너지소산량을 보였으며 이는 RC 실험체가 다소 이른 시점에 최대 실험 하중에 도달한 것으로 판단된다. 최종적으로 PC-S 실험체와 RC 실험체의 에너지소산능력을 비교하였을 때, 1.11배 이상으로 에너지를 소산하였으며 따라서 기계적이음을 적용한 PC-S 실험체는 RC 실험체보다 우수한 에너지 소산능력을 보유한 것으로 판단된다.

두 실험체의 등가점성감쇠에 의한 에너지소산능력을 실험체의 각 목표 충간변위비에서 첫 번째 이력곡선에서 계산하였다. 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비(ζ_q)는 구조물의 응답을 통해 소멸되는 에너지를 의미하며, 선형 탄성 거동으로 계산된 정적 변형에너지(E_{so})를 사용하여

$$\zeta_q = \frac{1}{4\pi} \frac{E_I}{E_{so}} \quad (2)$$

으로 산정될 수 있다. 여기서, E_I 와 E_{so} 는 각각 한 가력 사이클에서 소산된

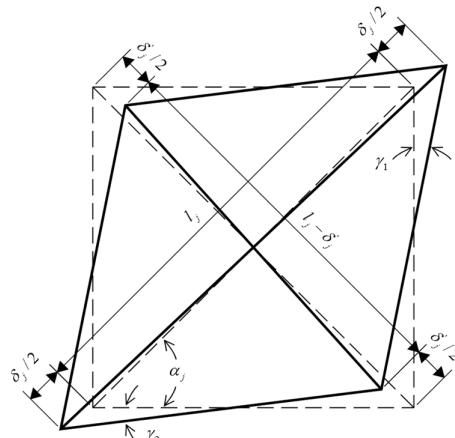


Fig. 16. Evaluation of shear deformation in joints

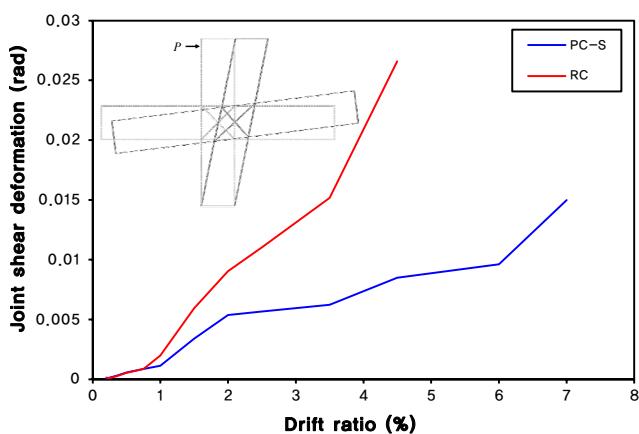


Fig. 17. Shear deformation in panel zone

에너지 및 정적 변형에너지를 의미한다. Fig. 15에는 두 실험체의 충간변위비에 따른 등가감쇠비를 나타내었으며 충간변위비가 높아질수록 등가감쇠비는 증가하였다. 현행 실무기준에서 제시하는 중간모멘트꼴조의 허용충간변위비(내진등급II: 2.0%)[7]에서 PC-S 실험체와 RC 실험체의 등가감쇠비는 각각 13.2%, 15.2%로 나타났다.

3.5 접합부 전단 변형

보-기둥 접합부의 평균 전단 변형량을 측정하기 위해 두 변형 계측기 (LVDT 9, 10)를 패널존에 대각방향으로 배치하였다. 접합부 평균 전단 변형(γ_j)은 라디안(radian) 단위로 치환하였으며, Fig. 16를 바탕으로 식 (3)으로 산정될 수 있다.

$$\gamma_j = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\delta_j - \delta'_j}{2l_j} (\tan \alpha_j + \cot \alpha_j) \quad (3)$$

여기서, δ_j 와 δ'_j 는 패널존에서 대각방향의 변형량을 의미하며, l_j 는 접합부 패널존의 변형 전 대각길이, α_j 는 접합부 패널존에 위치한 LVDT의 수평에 대한 초기 각도이다.

Fig. 17는 각 실험체의 충간변위비에 따른 접합부 전단변형을 나타내었

다. 초기 충간변위비에서는 두 실험체의 접합부 변형은 유사하게 나타났으며, RC 실험체는 PC-S 실험체와 비교하였을 때 충간변위비 1.0%에서 소성거동을 하면서 접합부에 전단균열이 발생되어 전단변형이 크게 증가되었다. 충간변위비 1.5% 이후 PC-S 실험체 접합부의 전단변형은 다소 증가하였으나 RC 실험체의 전단변형은 급격하게 증가되었다.

4. 결 론

이 연구에서는 건식 기계적이음 공법이 적용된 중간모멘트골조 상세를 갖는 PC 보-기둥 접합부의 요구성능 및 내진성능을 실험적으로 평가하였고, 이를 바탕으로 건식 PC 골조 시스템의 현장 적용성을 검토하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. PC-S 실험체의 이력거동은 RC 실험체와 대등한 내진성능을 보여주었으며, KS D 0249에 따라 요구성능을 만족한 기계적이음 장치의 체결상태는 대부분 양호한 상태로 나타났다. 또한 접합부 패널존 영역의 전단손상은 경미하였다. 건식 PC 보-기둥 접합부의 파괴모드는 보의 콘크리트 압괴로 인한 휨파괴로 나타났으며, 이는 현행설계기준의 설계 철학인 강기동-약보 시스템에 부합하는 것으로 판단된다.
2. PC 보와 기둥을 연속적으로 연결하는 보의 주철근 변형률을 계측하였으며, PC-S 실험체는 기계적이음 장치에서 보의 외측지점에서 변형률이 집중되는 것으로 나타났으며, RC 실험체와 비교하였을 때 강도 및 변위 측면에서 연성적인 거동을 보여주었다. 건식 PC 기계적이음 공법은 RC 공법에서 사용되는 연속철근과 동등 이상의 일체성능을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.
3. 실험체의 강성, 에너지소산능력, 등가감쇠비, 접합부의 전단변형 등을 통해 정량적으로 분석한 결과, 보-기둥 접합부를 관통하는 기계적이음 장치(장철근, 싱글헤드, 더블헤드, 수직커플러)로 설계된 PC-S 실험체는 RC 실험체와 동등한 정착성능을 보유한 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 유형 2 성능을 만족하는 건식 기계적이음이 적용된 PC 모멘트골조 공법이 현행설계기준에서 제시하는 중간모멘트골조의 요구성능을 충분히 만족할 수 있는 상세로 판단된다.
4. 이번 연구에서는 주로 실험적 평가를 중심으로 보고하였으며, 추후 해석적 연구가 수반되어야 할 것으로 판단된다. 해석적 연구에서는 비선형유

한요소해석을 통한 실험체의 거동에 대한 상세한 분석과 함께 동등성이 확보된 PC 모멘트 골조에 대한 성능기반 내진설계의 적용성을 시스템 레벨에서 평가할 필요가 있다.

/ 감사의 글 /

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00209647).

/ REFERENCES /

1. Lee DJ, Lee JD, Oh TS, Kang THK, Seismic Experiment of Precast Concrete Exterior Beam–Column Joint using Bolt Type Connection and Prestressing Method. J Korea Concr Inst. 2014 APR;26(2): 125–133.
2. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–19) and Commentary (ACI 318R–19). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; c2019. 624 p.
3. Joint ACI–ASCE Committee 352, Recommendations for Design of Beam–Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R–02). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; c2002. 38 p.
4. ACI Committee 374. Acceptance Criteria for Moment Frames based on structural testing and commentary (ACI 374.1–05). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; c2005. 9 p.
5. Jang BS, Kim JH, Choi SH, Kim KS, Hwang JH, Choi SD. Structural Behavior of Precast Wide Girder–Column Joints under Lateral Cyclic Loading. J Korea Concr Inst. 2021 DEC;33(3):289–297
6. Zhang W, Lee DH, Kim SH, Ju HJ, Lee CJ. Seismic Performance of Precast Wide Beam–Column Connections with Asymmetrical Anchorage Reinforcement Details. Engineering Structures. 2022 OCT; 275, 115237.
7. American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEC 7–22); Reston: c2022.