

# 비선형동적해석을 통한 건식 기계적이음을 갖는 프리캐스트 모멘트 골조의 동등성 평가

## Evaluation of Emulative Level for Precast Moment Frame Systems with Dry Mechanical Splices by Using Nonlinear Dynamic Analysis

김선훈<sup>1)</sup> · 이원준<sup>2)</sup> · 이득행<sup>3)\*</sup>

Kim, Seon-Hoon<sup>1)</sup> · Lee, Won Jun<sup>2)</sup> · Lee, Deuckhang<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>충북대학교 건축공학과 공학석사, <sup>2)</sup>충북대학교 건축공학과 박사과정, <sup>3)</sup>충북대학교 건축공학과 교수

<sup>1)</sup>Former Master' Student, Dept. of Architectural Engineering, Chungbuk National University, <sup>2)</sup>Ph. D. Student, Dept. of Architectural Engineering, Chungbuk National University, <sup>3)</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Chungbuk National University

### / A B S T R A C T /

This study presents code-compliant seismic details by addressing dry mechanical splices for precast concrete (PC) beam-column connections in the ACI 318-19 code. To this end, critical observations of previous test results on precast beam-column connection specimens with the proposed seismic detail are briefly reported in this study, along with a typical reinforced concrete (RC) monolithic connection. On this basis, nonlinear dynamic models were developed to verify seismic responses of the PC emulative moment-resisting frame systems. As the current design code allows only the emulative design approach, this study aims at identifying the seismic performances of PC moment frame systems depending on their emulative levels, for which two extreme cases were intentionally chosen as the non-emulative (unbonded self-centering with marginal energy dissipation) and fully-emulative connection details. Their corresponding hysteresis models were set by using commercial finite element analysis software. According to the current seismic design provisions, a typical five-story building was designed as a target PC building. Subsequently, nonlinear dynamic time history analyses were performed with seven ground motions to investigate the impact of emulation level or hysteresis models (i.e., energy dissipation performance) on system responses between the emulative and non-emulative PC moment frames. The analytical results showed that both the base shear and story drift ratio were substantially reduced in the emulative system compared to that of the non-emulative one, and it indicates the importance of the code-compliant (i.e., emulative) connection details on the seismic performance of the precast building.

**Key words:** Precast concrete, Seismic design, Intermediate moment frame, Dry connections, Performance-based design

## 1. 서론

최근 국내 건설산업은 건설 근로자의 노령화 및 부족과 급격한 노임상승, 중대 산업재해 등으로 다양한 어려움에 직면해 있다. 이로 인한 건설현장 중심의 시공방식에서 벗어난 탈현장 공장생산(Off site construction, OSC) 기반 건축시스템이 주목되고 있고 이와 같은 추세는 건축물 폐기물 및 탄소 배출 감소, 품질향상에 적합한 프리캐스트 콘크리트(Precast concrete, PC) 건설 시장이 부각되고 있다[1]. PC 구조물은 기둥-기둥 이음부와 보-

기둥 접합부에 이음이 필수적이며 이음 상세는 건축물에 구조적으로 영향을 미쳐 안전성과 밀접한 관련이 있다[2]. 일반적으로 기둥과 보 부재는 프리캐스트 콘크리트로 제작하고 보-기둥 접합부 패널존에는 현장에서 콘크리트를 타설하는 부분적 습식공법이 적용되고 있으며 기둥-기둥 이음부에는 우수한 내진성능을 발휘할 수 있는 스플라이스 슬리브(splice sleeves)를 적용하고 있다[3, 4]. 다만, 스플라이스 슬리브는 그라우트가 목포 강도를 발휘하기 위해 양생기간이 필수적으로 요구되며 가설재가 설치 및 해체를 위한 현장 작업이 동반되어 PC 공법의 이점인 공기단축 효과가 매우 떨어지는 측면이 지적되고 있다. 최근 연구에서는 철근의 일체성을 확보하는 동시에 공사기간의 단축이 가능하고, 인장력 및 압축력이 모두 전달 가능한 기계적이음 상세에 대한 연구가 지속적으로 진행중에 있다[5].

\*Corresponding author: Lee, Deuckhang

E-mail: dk@cbnu.ac.kr

(Received November 6, 2023; Revised November 27, 2023; Accepted November 28, 2023)

이 연구에서는 건식 기계적이음을 갖는 PC 모멘트골조의 시공성 및 구조성능이 확보된 PC 기둥-기둥 이음부와 보-기둥 접합부와 시스템을 개발한 기존 연구를 기반으로 현장타설(Cast-in-place)방식으로 제작된 철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 모멘트골조와 동등성 평가를 수행하였다. 현행실무에서는 시공 중 횡하중에 의한 전도방지 및 구조적 안전성을 확보하기 위해 부재 각 모서리에 강한 건식 철근이음을 사용하는 것을 권장하고 있으며, 이에 따라서 기둥-기둥 이음부 각 모서리 주철근은 기계적이음을 적용하였으며 그 외의 주철근에는 그라우트 방식의 스플라이스 슬리브를 사용하여 시공성과 경제성을 함께 도모하고자 하였다. 또한, 보-기둥 접합부에서는 PC 기둥을 수평방향으로 관통하는 보의 모든 길이방향 철근은 기계적이음을 사용하여 현장타설 콘크리트 사용을 최소화한 건식 PC공법을 실현하고자 하였다. 이 연구에서는 PC 보-기둥 접합부에서 부재사이를 연결하는 기계적이음의 성능이 PC 구조시스템의 동등성에 영향을 미치는 가장 중요한 영향 인자임을 바탕으로 일체식 철근콘크리트 모멘트골조와 동등성이 확보된 건식 기계적이음을 갖는 PC 모멘트 골조와 비동등성 PC 모멘트 골조의 내진성능을 동적해석을 통해 분석 및 평가하고자 한다.

## 2. PC 접합부의 기계적이음 및 동등성

PC 모멘트골조는 RC 모멘트골조와 달리 기계적이음을 적용하여 PC 구조물을 시공하며 기계적이음 상세는 볼트 체결식(건식 이음)과 그라우트 주입방식(습식 이음), 하이브리드 방식(반건식)으로 구분할 수 있다. 기계적이음의 성능은 PC 구조물이 일체식 RC 구조물과 동등성 확보 및 횡력 거동에 가장 주요한 요소로 여겨지고 있다. 즉, PC 구조물의 적절한 강도 및 연성 확보 그리고 높은 에너지소산 능력을 발휘하기 위해 기계적이음된 철근의 연속성 및 기계적이음 성능 확보가 필수적이다. KDS 14 20 80 4.1.6절 [6]에서는 기계적이음의 항복 및 인장강도에 따라 기계적이음의 유형을 분류하고 있으며 이 연구에서는 유형 2 기계적이음 성능을 파악하기 위해 모재 철근과 제안된 기계적이음에 대하여 일방향 인장 시험을 수행한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. KS D 0249[7]에서는 지진 및 변형의 영향을 받는 기계적이음의 안전성을 평가하는 고응력 반복가력시험을 명시하고 있다. 시

험 방식은 Fig. 2과 같이 상한하중( $0.95\sigma_y$ )과 하한하중( $0.02\sigma_y$ )을 30회 반복 재하 후 판정기준을 아래와 같이 항목을 만족하여야 하며, Fig. 3에는 제안된 건식 기계적이음의 고응력 반복 가력 실험 결과를 예시하였다.

- ① 30회 반복 재하에 의해 발생하는 변형점과 원점을 연결하는 할선강성과 첫 번째 재하에 의해 발생하는 초기강성의 0.85배 이상이어야 한다.
- ② 30회 반복 재하에 의해 발생하는 잔류 변형량이 0.3 mm 이하이어야 한다.

참고로 추후 제정될 건축물 프리캐스트 설계기준(KDS 41 20 10, 신규 제정 예정)에서는 실험 및 해석적 동등성 평가방법이 공식적으로 설계기준에 도입 될 예정이다. 그러나 현행 내진설계기준(KDS 14 20 62[8])에서는 아직 프리캐스트 보-기둥 접합부에 대한 동등성 평가방법이 아직 규정되지 않은 실정이며, 이는 일반적인 철근콘크리트 접합부와 동일한 방법으로 설계하도록 규정하고 있음을 의미한다. 즉, PC 모멘트골조의 내진설계를 위해서는 일체식으로 제작된 철근콘크리트 모멘트골조에서 요구되는 안전성 및 사용성에 관한 성능을 확보여부(즉, 동등성)를 ACI 374.1-05(2005)[9]를 통해 평가해야 될 것으로 판단된다. 다만, 평가 기준은 특수모멘트골조에 대해서만 한정적으로 제시하고 있으며 중간모멘트골조는 해당되지 않는다. ACI 374.1-05에서는 실험적으로 동등성 확보여부를 평가하도록 아래와 같이 허용 기준을 명시하고 있다.

- ① 실험체 공칭강도( $E_m$ ) 도달 시점의 변위비가 IBC(International building

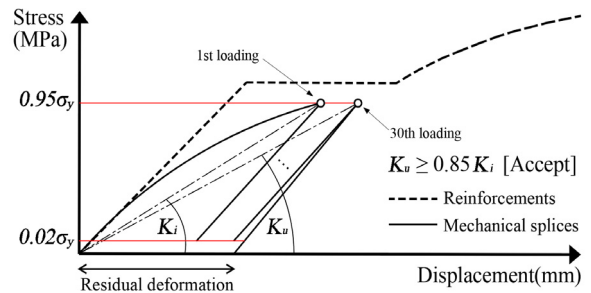


Fig. 2. High strength cyclic test

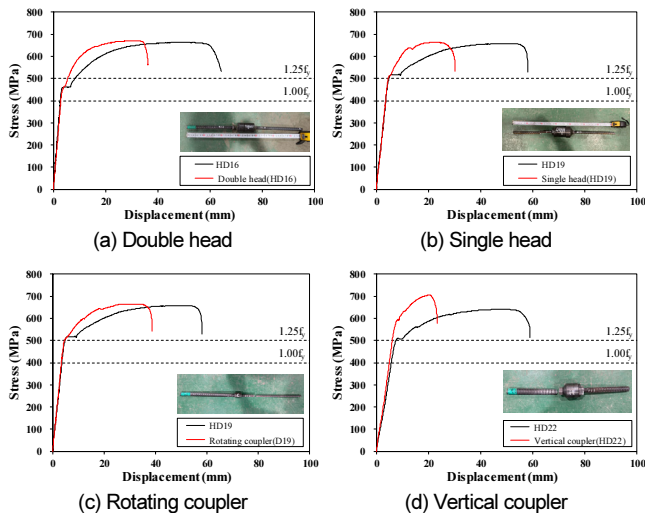


Fig. 1. Monotonic tensile test results of mechanical splices

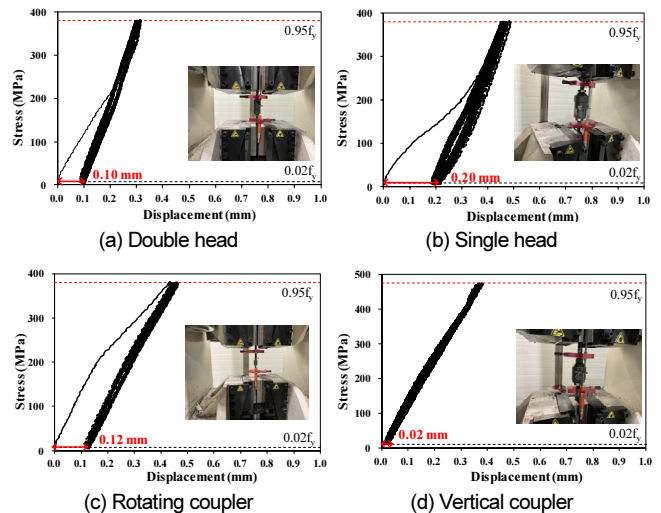


Fig. 3. High strength cyclic test results of mechanical splices

code)에서 제시하는 허용층간변위비 보다 작아야 한다.

- ② 실험체의 최대강도( $E_{max}$ )는 공칭강도에 초과강도계수( $\lambda$ )를 곱한 값 이 하여야 한다.
- ③ 변위비 3.5%에서의 3번째 이력곡선은 아래의 항목을 만족해야 한다.
  - 1) 3번째 이력곡선에서의 최대 하중이 동일 하중방향의 실험체 최대하중( $E_{max}$ )에 0.75배 곱한 하중 이상이어야 한다.
  - 2) 상대 에너지소산비가 1/8 이상이어야 한다.
  - 3) 변위비  $\pm 0.35\%$ 를 얻는 활선강성이 초기 강성의 0.05배 이상이어야 한다.

이 연구에서는 선행 연구의 PC 보-기둥 접합부 실험 결과를 분석하였으며 일체식으로 제작된 실험체와 거동 메커니즘을 파악하고, 동등성 확보 여부를 분석하였다. 선행 연구의 결과를 토대로 대상 PC 모멘트골조를 선정하여 현행설계기준에 따라 내진설계를 수행하였으며 비선형 시간이력해석을 통해 동등성 및 비동등성 PC 모멘트골조 구조물의 내진거동을 평가하였고 이를 바탕으로 현행설계기준에서 규정하고 있는 동등성 설계의 중요성을 검토하였다.

### 3. 보-기둥 접합부 횡방향 반복가력실험

#### 3.1 보-기둥 접합부 실험체 설계

Kim et al.(2023)[10]은 건식 기계적이음이 적용된 PC 보-기둥 접합부

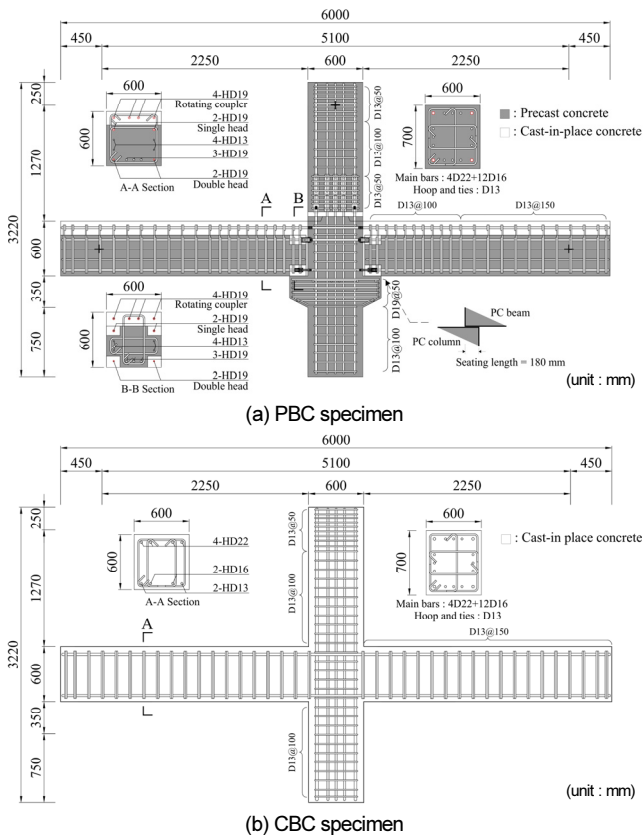


Fig. 4. Details of beam-column connections specimens

실험체와 일체식으로 제작된 철근콘크리트 보-기둥 접합부 실험체에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 PC 보-기둥 접합부의 거동 및 내진성능 확보 여부를 분석하였다. 위 연구의 실험체의 건식 기계적이음 상세는 기둥-기둥 상세와 보-기둥 접합부 상세로 구성되어 있다. 기둥-기둥 이음부 건식 상세는 상부 및 하부 솔리드 기둥을 수직 커플러를 통해 현장 적용 시 시설재 없이도 자립이 가능한 시스템을 구현할 수 있다. 보-기둥 접합부 건식 상세는 기계적이음 장치(더블헤드, 싱글헤드, 회전 커플러)의 나사식 체결을 통해 철근 일체성 확보가 가능하다. 즉, 모든 기계적이음 상세는 압축력과 인장력을 모두 전달할 수 있는 상세이다. Fig. 4는 보-기둥 접합부 실험체의 상세를 보여주고 있다. PBC(Precast concrete Beam-column Connections)는 건식 기계적이음 상세가 적용된 PC 보-기둥 접합부 실험체이며, CBC(Cast-in-place concrete Beam-column Connections)는 철근콘크리트 보-기둥 접합부 실험체이다. 모든 실험체는 중간모멘트골조 상세를 갖도록 설계 및 제작되었다. PBC 실험체의 경우 기둥-기둥 이음부에는 기계적이음을 체결상태에서 자립이 가능하도록 기둥의 네 모서리 주근에 제안된 기계적이음 상세가 적용되었으며 기둥 면에 배근되어 있는 타 철근은 스플라이스 슬리브를 통해 이음되어 있는 상세이다. 또한, 기둥을 수평방향으로 관통하는 보의 모든 길이방향 철근은 기계적이음 상세가 적용되었다. CBC 실험체는 PBC 실험체와 동등한 공칭 휨강도를 갖도록 설계하였으며 전형적인 철근 콘크리트 방식으로 설계되었다.

#### 3.2 횡방향 반복가력 실험

Fig. 5는 보-기둥 접합부 실험 세팅 상세를 보여주고 있으며 ACI 374.2R-13[11]에서 제시하고 있는 변위제어방식에 따라 각 목표 층간변위에서 3회 반복가력을 진행하였다. 실험동 안전상의 이유로 실험체의 최대하중에서 80% 이하의 하중으로 감소하는 시점에서 실험을 종료하였으며 이 때의 층간변위비를 실험체의 파괴점으로 산정하였다.

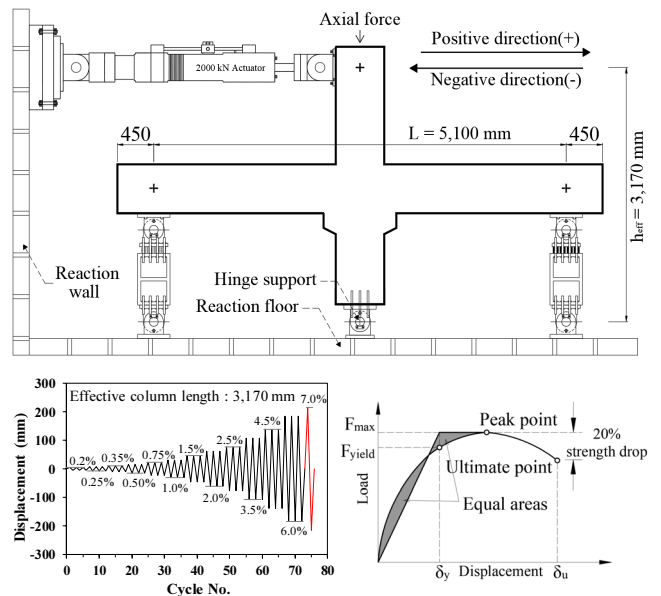


Fig. 5. Lateral cyclic loading test setup

### 3.3 횡방향 반복하력 실험 결과

#### 3.3.1 하중-층간변위비 이력곡선 및 파괴형상

Fig. 6은 실험 결과 하중-층간변위비 이력곡선을 보여주고 있으며 PBC 및 CBC 실험체의 정/부방향 최대 강도는 각각 241.0 kN/-234.2 kN, 219.6 kN/-218.6 kN로 나타났다. 기동-기동 이음부와 보-기동 접합부에 기계적 이음 이 적용된 PBC 실험체의 이력곡선은 CBC 실험체 보다 연성적인 거동을 보여주었으며 기계적이음된 일부 철근이 층간변위비 4.5%에서 파단 되었으나 급격한 강도 저하 없이 우수한 거동을 보여주었다. Table 1은 항복강도 및 최대강도 도달, 파괴 시 층간변위비와 연성비, 초과강도를 나타내었다. 모든 실험체는 공칭강도를 상회하는 강도를 보유했던 것으로 분석되었으며 PBC 실험체의 초과강도계수와 연성비( $\mu$ )는 CBC 실험체와 동등

이상으로 나타났다. 모든 실험체의 파괴형상은 보의 콘크리트 압괴로 인한 휨 파괴로 나타났으며 현행설계기준의 강기동-약보 설계철학에 부합하였다. 따라서 건식 기계적이음을 적용한 PBC 실험체는 일체식으로 제작된 CBC 실험체에 대비하여 동등성을 충분히 확보한 것으로 나타났다.

#### 3.3.2 에너지소산능력

에너지소산능력은 PC 모멘트골조를 RC 모멘트골조에 대하여 동등성 평가를 수행하는데 중요하다. Lee and Byun(2023)[12]에서는 PC 접합부가 RC 중간모멘트골조 접합부와 대등하게 설계되었을 경우 구조성능은 유사하므로 PC 보-기동 접합부의 동등성평가는 층간변위비 2.0%에서의 에너지소산능력을 통해 수행할 수 있다고 제시하였다. 건축물 프리캐스트 설계기준(KDS 41 20 10, 신규 제정 예정)에서는 실험 및 해석적 동등성 평가

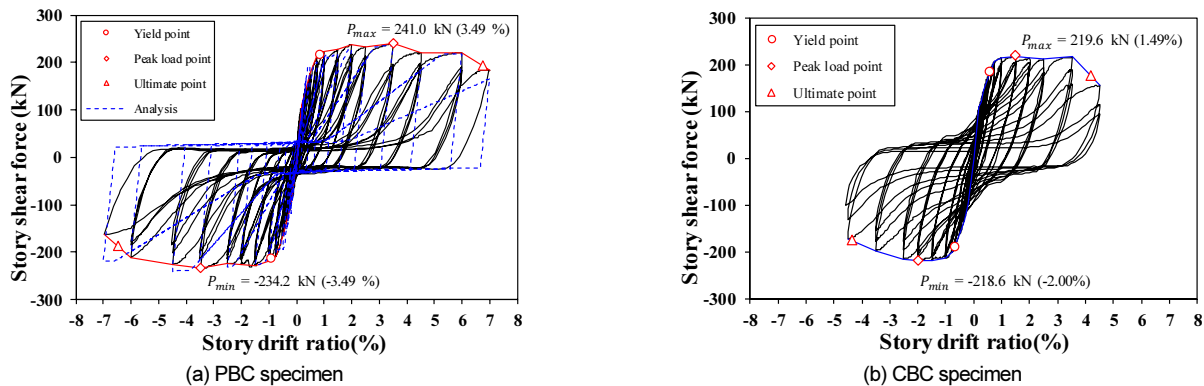


Fig. 6. Story shear force-drift ratio curve

Table 1. Summary of test results

Specimen	Loading direction	$P_n$ (kN)	$P_y$ (kN)	$\theta_y$ (%)	$P_{max}$ (kN)	$\theta_{max}$ (%)	$\theta_u$ (%)	$P_{max}/P_n$	Ductility* ( $\mu$ )
PBC	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
CBC	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:  $\theta_u/\theta_y$ .

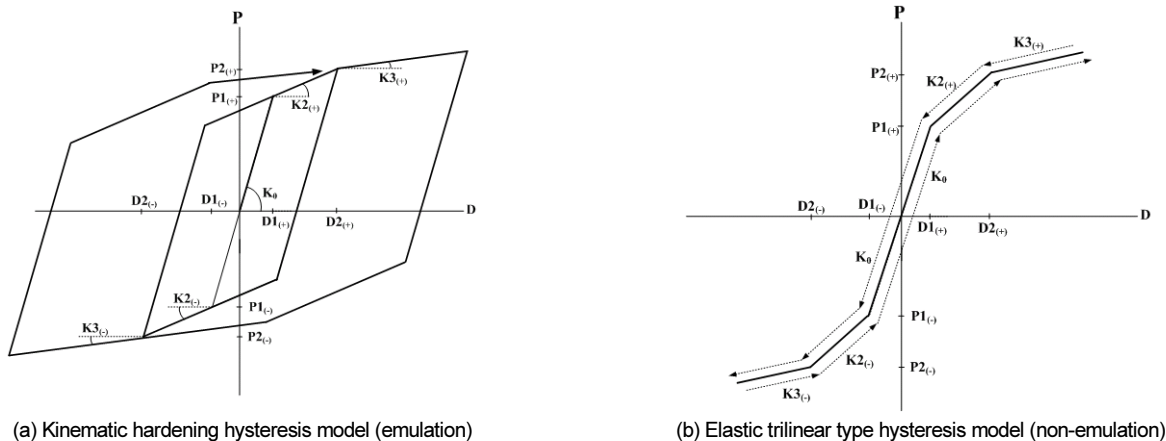


Fig. 7. Analysis Hysteresis model

**Table 2.** Energy dissipation ratio of beam-column connections

Criteria	Energy dissipation		
	PBC specimen	CBC specimen	Analysis of emulative PC specimen
KDS 41 20 10 drift ratio 2.0% 2 <sup>nd</sup> cycle*	12,544 kN·m (16.2%)	16,425 kN·m (25.2%)	13,032 kN·m (18.8%)
ACI 374.1 report drift ratio 3.5% 3 <sup>rd</sup> cycle*	12,931 kN·m (14.8%)	19,620 kN·m (28.1%)	20,702.6 kN·m (20.6%)

\* numbers in parenthesis denote energy dissipation ratio at specific drift ratio.

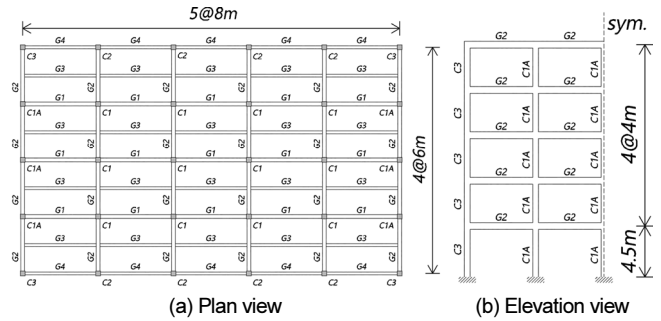
방법이 명시될 예정이며, 층간변위비 2.0% 2<sup>nd</sup> cycle에서의 에너지소산비가 1/10 이상이어야 한다. 또한, 해석적으로 보-기둥 접합부 실험체의 이력 곡선 모사 및 에너지소산능력을 분석하고자 하였다. Fig. 7은 동등성이 확보된 구조물의 거동을 고려할 수 있는 이력 모델을 나타내었다. PBC 실험체의 이력곡선을 모사하기 위해 kinematic hardening 이력모델을 적용하였으며 강성 감소 계수( $\alpha_1, \alpha_2$ )는 각각 0.4, 0.1을 적용하였다. PBC 실험체의 이력곡선을 모사한 해석 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다.

Table 2은 PBC 및 CBC 실험체의 KDS 41 20 10(신규 제정 예정)에 따른 중간모멘트골조 동등성 평가 결과와 ACI 374.1-05에 따른 특수모멘트골조 동등성 평가 결과를 나타내었다. 층간변위비 2.0% 2<sup>nd</sup> cycle에서 PBC 및 CBC 실험체의 에너지소산비는 각각 16.2%, 25.2%로, 1/10 이상으로 중간모멘트골조 동등성 기준을 만족하였다. 두 실험체는 중간모멘트골조 상세를 갖도록 설계되었음에도 불구하고, ACI 374.1-05에서 제시하고 있는 특수모멘트골조의 요구 성능(즉, 층간변위비 3.5% 3<sup>rd</sup> cycle에서의 에너지소산비 1/8 이상)을 만족하였기 때문에 PBC 실험체는 동등성이 확보된 것으로 판단된다.

## 4. PC 모멘트 골조 비선형 시간이력해석

### 4.1 대상 구조물 선정 및 내진설계

이 연구에서는 모멘트골조의 내진성능을 검증하기 위하여 현행설계기준[13]에 따라 내진설계를 수행하고 구조물의 비선형 거동과 내진성능, 밀면전단력, 층간 변위비를 분석하고자 대상 구조물을 선정하였다. 대상 구조물은 5층 규모의 상업시설로 철근콘크리트 중간모멘트골조로 설정하였으며 Fig. 8은 구조물의 평면 및 입면 상세를 나타내었다. 고정하중과 활하중은 각각 4.5 kN/m<sup>2</sup>, 2.5 kN/m<sup>2</sup>로 고려하였으며, 외부 벽체에 의한 클레딩 하중은 1.0 kN/m<sup>2</sup>로 선하중으로 고려하였다. 풍하중은 지표면 조도구분은 B로, 지역별 기본 풍속은 30 m/s으로 고려하였다. 등가정적해석법으로 지진하중을 산정하였으며 이 연구에서 선정한 PC 모멘트골조는 철근콘크리트 중간모멘트골조와 동등성을 확보하였으므로 대상 구조물의 반응수정계수( $R$ ), 시스템 초과강도계수( $\Omega_0$ ), 변위증폭계수( $C_d$ )는 각각 5.0, 3.0, 4.5로 설계하였다. Table 3에는 대상 구조물의 내진설계 수행한 단면의 규격과 철근배근 상세를 나타내었다.



**Fig. 8.** Seismic design result of prototype building

**Table 3.** Summary of seismic results

Element	Floor	Section (mm)		Longitudinal reinforcement		Stirrups
		Beam	Column	Top	Bottom	
Beam	1~5F	G1	450×600	Top	8-D19	D13@250
				Bottom	4-D19	
		G2	450×600	Top	10-D19	
				Bottom	5-D19	
		G3	400×600	Top	4-D19	
				Bottom	4-D19	
		G4	400×600	Top	6-D19	
				Bottom	4-D19	
Column	1F	C1	600×600	16-D22		D13@200
		C1A		14-D22		
		C2		14-D22		
		C3		14-D22		
	2~5F	C1	600×600	16-D22		
		C1A		12-D22		
		C2		12-D22		
		C3		12-D22		

### 4.2 비선형 시간이력해석

이 연구에서는 추후 실무중심의 내진성능평가 및 성능기반내진설계 적용을 위하여 지반운동에 따른 구조물의 변위 및 거동 메커니즘을 상용해석 프로그램인 Midas Gen[14]을 사용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. PC 모멘트골조의 동등성 확보 여부는 지반운동에 따른 구조물이 지반에너지를 충분히 소산하는지에 따라 달라진다. 따라서 이 연구에서는 부재에 발생하는 비선형 거동을 고려하고 해석을 단순화하기 위해 ASCE 41-17[15]에서 제시하는 철근콘크리트 기둥 및 보 비선형 모델링 방법론을 적용하였으며 동등성이 확보된 모멘트골조의 경우 3.3.2장에서 PC 보-기둥 접합부 실험체의 에너지 소산능력을 모사할 수 있는 kinematic hardening 이력모델로 대상 구조물을 검증하였다. 비동등성으로 설계된 구조물의 경우, 보강 철근과 콘크리트 사이의 미끄러짐을 극단적으로 고려하고자 하중 재하 후 원점으로 돌아올 때의 에너지 소산능력을 최소화하도록 탄성 삼선형 이력곡선을 Fig. 5(b)와 같이 적용하여 대상 구조물의 비동등성 모델을 구축하였다. 비동등성 이력곡선은 강성 감소 계수( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ )를 각각 0.4, 0.1, 0.1로 하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 또한, 비선형 동적해석이 사용되는 하중조합은 1.0 DL(고정하중)+0.25 LL(활하중)을 적용하였으며 구조체의 질량은 집중질량으로 고정하중과 동일하게 적용하여 동적해석을 수행하였다.



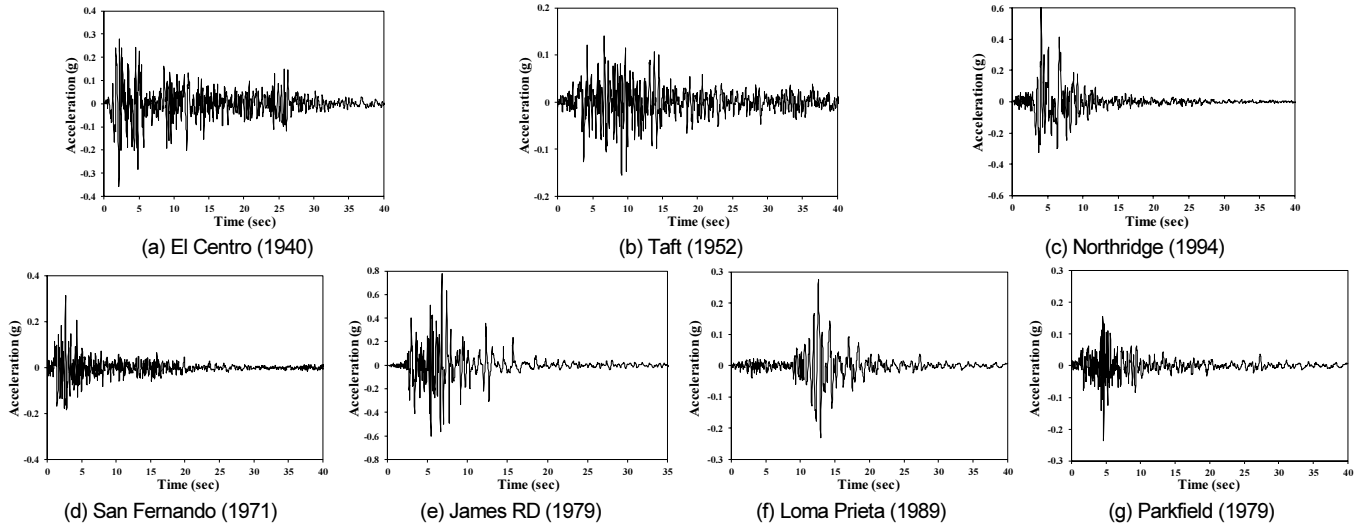


Fig. 9. Ground motion records used for time history analysis

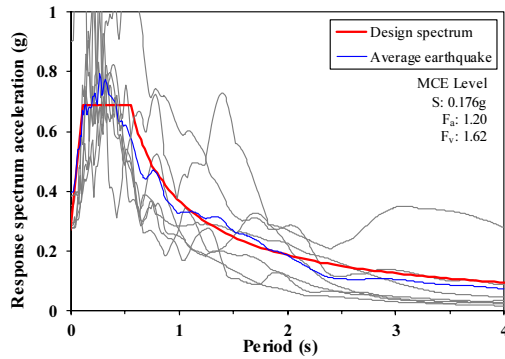


Fig. 10. Calculation of the average spectrum response

### 4.3 입력 지진파

이 연구에서는 모멘트골조의 비선형 시간이력해석을 수행하기 위해 입력 지진파를 선정하고 이를 구조물의 지반특성 및 구조물의 특성에 따라 지반운동의 크기를 조정하였다. ASCE 7-22[16] 13.3.1에서는 구조물의 동적 해석

을 수행하기 위하여 필요한 입력 지반운동의 요구조건을 명시하고 있다. 비선형 시간이력해석에 필요한 최소 지반운동의 수는 3개이며, 해석 지반운동 개수가 7개 미만인 경우 모든 지반운동으로 얻은 응답 중 최댓값으로 설계를 요구하고 있다. 7개 이상의 지반운동을 통해 시간이력해석을 수행할 경우, 모든 지반운동으로 얻은 응답의 평균을 산정하여 결정할 수 있다. Fig. 9에는 7개의 지반운동을 보여주고 있으며 성능기반 내진설계 지침(AIK 2017)을 참고하여 재현주기 2,400년의 유효지반가속도(설계지반가속도의 1.5배)를 기준으로 응답스펙트럼을 작성하였으며 대상 구조물의 고유 특성에 적합하도록 지반운동의 크기를 조정하여 Fig. 10에 나타내었다. 이 연구에서는 7개의 지반운동을 적용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였으며 각 지반운동으로 얻은 응답의 평균을 기준으로 해석 결과를 평가하였다.

### 4.4 비선형 시간이력해석 결과

Fig. 11과 Fig. 12에는 총 7개의 지반운동에 대한 시간이력해석을 수행한 결과로 각각 동등성 및 비동등성 모멘트골조의 밀면전단력을 지반운동

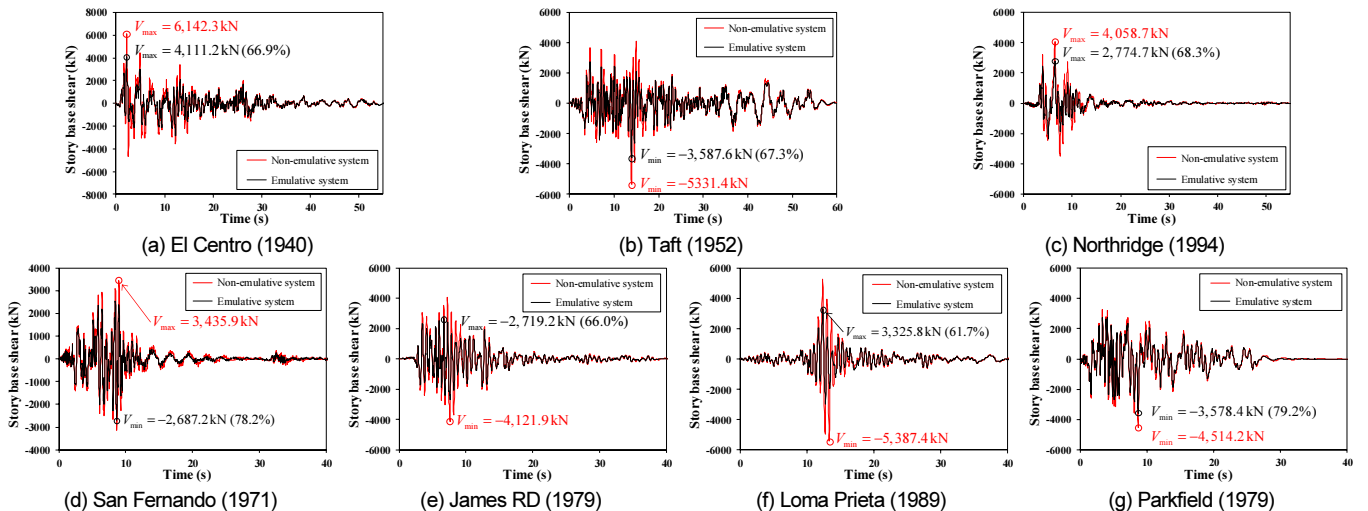


Fig. 11. Response results of nonlinear time history analysis

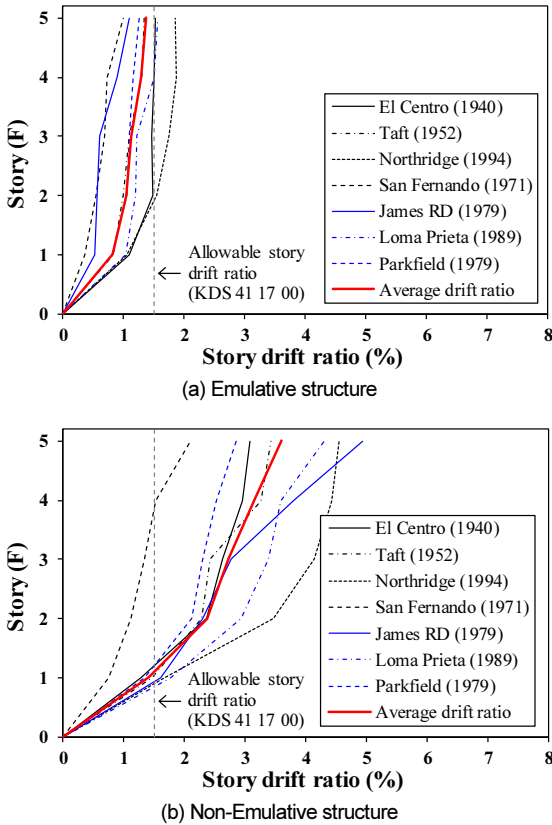


Fig. 12. Story drift ratio of prototype building

시간에 따라 나타내었다. 모든 7개의 지반운동에 따라 동등성 구조물의 밀면 전단력은 비동등성 구조물에 대비하여 61.7~79.2% 정도로 낮게 나타났으며 이는 동등성이 확보된 구조물이 지반 운동 에너지를 충분히 소산하여 낮게 나타난 것으로 판단된다. Fig. 11은 대상 구조물의 층간변위비를 나타내었으며 KDS 41 17 00 8.2에서 제시하고 있는 설계 요구사항인 허용층간변위를 통해 구조물의 변위를 검증하였다. 동등성 및 비동등성 구조물의 최대 층간변위비는 각각 1.37%, 3.60%로 나타났으며 동등성 구조물은 현행 설계기준에서 제시하는 허용층간변위 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 비동등성 시스템의 경우 동등성 시스템에 비해 상대적으로 구조물에 큰 밀면전단력이 가해져 층간변위비가 높게 해석된 것으로 판단된다.

## 5. 결론

이 연구에서는 건식 기계적이음이 적용된 PC 보-기둥 접합부 선형 연구를 분석하여 RC 보-기둥 접합부와 동등성 확보여부를 검토하였으며 결과를 토대로 대상 PC 모멘트골조를 선정하여 비선형 시간이력해석을 통해 동등성 및 비동등성 구조물의 거동을 검토하였다. 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) PBC 실험체의 횡방향 반복가력 실험 결과를 강도, 변형능력, 연성비, 초과강도비에 대해 비교하였을 때 CBC 실험체와 대등한 내진성능을 보여 주었으며, 현행설계기준에서 제시하는 강기둥-약보 시스템에 부합하는 것으로 나타났다.

2) 에너지소산능력은 PC 모멘트골조를 RC 중간모멘트골조에 대하여 안전성 및 사용성에 관한 성능을 평가를 수행하는데 중요한 수치며 보-기둥 접합부 실험 결과, 층간변위비 2.0% 2<sup>nd</sup> cycle에서 PBC 실험체의 에너지소산비는 1/10 이상으로 나타났으며 중간모멘트골조 상세로 설계되었으나, ACI 374.1-05에서 제시하는 특수모멘트골조의 허용 기준을 만족하여 동등성이 확보된 것으로 판단된다.

3) 대상 구조물을 내진설계를 수행하고 동등성 및 비동등성을 갖는 구조물을 7개의 지반운동에 통해 비선형 시간이력해석을 수행한 결과 밀면전단력이 약 61.7~79.2% 낮게 나타났으며 동등성이 확보된 구조물의 층간변위비는 현행설계기준에서 제시하는 허용 층간변위비 이내로 나타났다. 이는 추후 성능기반 내진설계 시 실무에서 합리적으로 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 이 연구에서는 기존 연구를 토대로 동등성 및 비동등성 구조물에 대해 구조물의 이력모델을 고려하여 비선형 시간이력해석을 수행하였으며 추후 내진설계 시 동등성 및 비동등성 모멘트골조에 적합한 점성감쇠비 산정과 비동등성 모멘트골조에 대한 성능기반 내진설계의 적용을 평가할 필요가 있다.

## / 감사의 글 /

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

## / REFERENCES /

- Zhang W, Kim SH, Lee DH, Seismic Performance of Self-Sustaining Precast Wide Beam-Column Connections for Fast-Built Construction, *Computer and Concrete*, 2023 Jul;33(3):339-349.
- Choi HK, Choi YC, Choi CS, Hysteretic Behavior and Seismic Resistant Capacity of Precast Concrete Beam-to-Column Connections, *EESK J Earthquake Eng.* 2010 Aug;14(4):61-71.
- Sung HS, Ahn SR, Park SY, Kang THK, Quasi-Static and Shaking Table Tests of Precast Concrete Structures Utilizing Clamped Mechanical Splice, *EESK J Earthquake Eng.* 2023 Jan;27(1):37-47.
- Zhang W, Lee DH, Kim SH, Ju HJ, Lee CH, Seismic Performance of Precast Wide Beam-Column Connections with Asymmetrical Anchorage Reinforcement Details, *Engineering Structures*, 2023 Jan;275:115237.
- Kim SH, Lee DH, Kim YG, Lee SW, Yeo UY, Park JE, Seismic Performance Evaluation of Dry Precast Concrete Beam-Column Connections with Special Moment Frame Details, *EESK J Earthquake Eng.* 2023 Sep;27(5):203-211.
- MORIT, Seismic Design Standard for Concrete Structures (KDS 14 20 80), Sejong, Korea; Ministry of Land, Infrastructure and Transport; c2021, 24 p.
- KS D 0249, Method of Inspection for Mechanical Splicing Joint of Bars for Concrete Reinforcement, Korean Standard Association; c2019.

8. MORIT, Precast Concrete Structure Design Standard (KDS 14 20 62). Sejong, Korea; Ministry of Land, Infrastructure and Transport; c2021, 14 p.
9. 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.
10. Kim SH, Cho J, Oh HK, Choi SD, Yeo UY, Lee DH, Seismic Performance Evaluation of Dry Precast Concrete Beam-Column Connections with Intermediate Moment Frame Details, EESK J Earthquake Eng. 2023 May;27(3):129-137.
11. ACI Committee 374, ACI 374.2-13 Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads, Farmington Mills, MI: American Concrete Institute; c2013, 18 p.
12. Lee JY, Byun HW, Emulation Evaluation of Precast Concrete Structures, Journal of the Korea Concrete Institute, 2022 Dec; 34(6):633-644.
13. Korea Construction Standard Center, Seismic Building Design Code (KDS 41 17 00); c2019.
14. MIDAS IT, Nonlinear Time History Analysis of Architectural Structures for Performance-Based Design, MIDAS GEN; c2022.
15. American Society of Civil Engineers, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17): Reston; c2017.
16. American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structure (ASCE/SEC 7-22): Reston; c2022.