



철골 가새 및 끼움골조로 보강한 기존 철근콘크리트골조의 내진성능평가

오근영¹⁾ · 이강민^{2)*} · 이경구³⁾

¹⁾충남대학교 건축공학과 박사후연구원 ²⁾충남대학교 건축공학과 교수 ³⁾단국대학교 건축공학과 교수

Seismic Performance Evaluation of Existing Reinforced Concrete Frame Retrofitted with Steel Chevron Bracing and Infilled Frame

Keunyeong Oh,¹⁾ Kangmin Lee,^{2)*} and Kyungkoo Lee³⁾

¹⁾Post-doctoral Researcher, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

²⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

³⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin 16890, Rep. of Korea

ABSTRACT The purpose of this study was to evaluate the seismic performance of existing RC frames retrofitted with steel chevron bracing and infilled frame by conducting an experiment study. Although the steel chevron bracing and infilled frame require high constructability, these approaches known to be more effective than other seismic retrofitting methods to provide lateral strength and stiffness. However, specific design procedures and methods for retrofitting steel chevron bracing and infilled frames are not included in the current guidelines. In this study, an experimental study was conducted to produce fundamental data for developing seismic retrofitting design methods for existing RC frames with steel chevron bracing and infilled frame. In order to evaluate the seismic performance of the existing RC frames retrofitted with steel members, a total of four specimens were manufactured, and the flexural stiffness of all specimens was calculated using the direct stiffness method. Two of the specimens were reinforced with a steel chevron bracing system, and designed to be two to three times the flexural stiffness of the existing RC frames, respectively. In addition, one specimen was retrofitted with an steel infilled frame and was designed to be four times the flexural stiffness of the existing RC frame, and one specimen was not reinforced. Test results revealed that the specimens retrofitted with the steel member almost similar target flexural stiffness to that calculated by the direct stiffness method. It was confirmed that retrofitted specimens showed a notable increase in strength and stiffness compared to the existing RC frame.

Keywords : chevron bracing, infilled frame, reinforced concrete frame, seismic performance evaluation

1. 서 론

최근 국내에서 발생한 2016년 경주지진과 2017년 포항지진을 통해 국내 건축물에 대한 내진설계 및 내진보강에 관한 사회적 관심 및 요구가 증가하고 있다. 2016년 경주지진 당시에는 비구조재로 인한 일부 피해만 발생하였지만, 2017년 포항지진 때에는 비내진상세를 갖는 학교 건축물과 필로티 및 공동주택의 구조재(벽체, 기둥 및 보 등)에서 심각한 파괴가 발생되었다(AIK 2018). 이에 따라 국내에서는 지진의 강도와 빈도가 증가함을 고려하여 비내진상세를 갖는 중저층 철근콘크리트(RC) 구조물의 내진성능을 향상시키기 위한 다양한 내진보강공법 등이 개발되고 있다.

국내에서 개발된 기존 철근콘크리트(RC) 구조물의 내진 보강공법으로는 크게 연성보강방법과 강도/강성보강방법으로 나눌 수 있다. 연성보강방법에는 댐퍼(damper)를 사용하는 것과 기둥과 보에 강판이나 섬유보강폴리머(FRP)를 사용하는 방법 등이 있다. 댐퍼를 사용하여 기존 철근콘크리트의 연성을 보강하는 공법에는 점성댐퍼와 벽식댐퍼 등을 이용하는 방법 등이 있다. 댐퍼 적용 시 구조물의 가시권을 최대한 확보할 수 있는 장점이 있지만, 외부 입면 변경이 불가피하고 시공난이도 또한 복잡하고 고가인 경우가 다수이다(Lee et al. 2018). 기둥과 보에 강판이나 섬유보강폴리머(FRP)를 사용하는 방법은 부재의 균열을 억제할 수 있고 보-기둥 접합부나 골조의 약간의 강도와 연성능력을 향상시킬 수 있지만, 댐퍼나 강도/강성보강방법과 비교하였을 때 눈에 띄는 내진성능 향상은 기대하기 어렵다(Truong et al. 2017).

Jung and Lee(2018)의 연구 결과에서는 국내 비내진상세를 갖는 중저층 철근콘크리트 건축물은 전단파괴가 발생할

*Corresponding author E-mail : leekm@cnu.ac.kr

Received June 23, 2020, Revised July 16, 2020,

Accepted July 21, 2020

©2020 by Korea Concrete Institute

가능성이 크고 연성능력을 개선하는 단독공법을 이용한 내진보강공법은 비효율적이라고 지적하고 있다. 국내 비내진상세를 가지는 중저층 철근콘크리트 구조물의 내진성능 향상을 위해서는 강도/강성보강공법이 더 효율적인 내진보강 방법이라고 보고하고 있다(Kim et al. 2020).

내진성능 향상을 위하여 기존 중저층 철근콘크리트(RC) 구조물의 강도/강성을 보강하는 방법에는 철골 가새, 철골 끼움골조, 끼움전단벽체, 강판, 패널, 그리고 날개벽 등을 기존 골조 내에 신설하는 방법 등이 있다. 이 중 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 공법은 철골 가새와 철골 끼움골조를 기존 철근콘크리트(RC) 골조 내에 신설하는 것으로 기존 골조와의 일체성 확보를 위하여 높은 시공성이 요구되지만, 확실한 내진성능 향상을 기대할 수 있다.

현재 국내 기존 중저층 철근콘크리트(RC) 건축물(학교시설)의 내진성능평가 및 보강방법에 관한 가이드라인은 교육부에서 발간한 ‘학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼’이 있다(MOE 2019). 이 매뉴얼에서는 학교시설을 대상으로 다양한 내진보강공법에 대하여 다루고 있으며 철골가새와 철골 끼움골조 내진보강 방법에 관해서도 소개하고 있지만, 구체적인 보강량 산출은 어려운 실정이다. 또한, 다양한 연구자들에 의해서 철골 가새 또는 철골 끼움골조를 활용한 내진성능평가가 수행되었지만, 구체적인 설계절차에 관해서는 언급되지 않은 실정이다(Ozcelik 2011; Kim et al. 2013; Hu et al. 2019). 구체적인 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 내진성능 향상 목표가 설정되지 않고 내진보강이 수행될 경우에는 과도한 내진보강으로 인하여 건물의 중량을 증가시키고, 특히 기초가 약한 건축물에서는 기초보강이 필요할 가능성이 크다.

따라서 본 연구에서는 철골가새 또는 철골 끼움골조를 활용한 내진보강방법에 관한 구체적인 설계 절차를 마련하기 위하여 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 철골 가새 또는 철골 끼움골조를 내진보강하여 내진성능평가를 수행하였다. 기존 골조 대비 구체적인 강성 증가를 목표로 철골가새 또는 철골 끼움골조를 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 보강하였다. 직접강성법을 활용하여 기존 철근콘크리트(RC)의 강성을 도출하고, 철골 가새가 적용된 골조는 기존 골조의 강성에 대비하여 2배 또는 3배 증가시키는 것을 목표로 설정하였다. 철골 끼움골조가 적용된 골조에 대해서는 기존 골조 강성의 4배 증가를 목표로 구체적인 내진성능 향상 목표를 설정하였다.

내진보강 설계단계에서 직접강성법을 활용한 강성 예측이 실험결과와 유사성을 판단하였다. 또한, 철골 가새 또는 철골 끼움골조로 내진보강한 골조의 이력거동, 강성, 에너지소산능력 등을 평가하여 내진보강 효과를 검증하였다.

2. 철골 가새 및 끼움골조 내진보강 설계

2.1 내진보강 철골 부재 설계

내진보강되는 철골 가새 및 끼움골조의 구체적인 보강량을 산출하기 전, 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 휨강성을 직

접강성법을 활용하여 산출하였다. 1층 1경간을 갖는 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 콘크리트 설계압축강도(f_{ck})는 24 MPa, 철근은 SD300을 사용하였다. 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 휨강성은 Fig. 1과 같이 횡하중이 작용하였을 때, 골조의 휨강성을 적합조건인 직접강성법에 따라 식 (1)과 (2)로 산출하였다(McGuire et al. 1999).

$$\{F\} = [k] \{\Delta\} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} F_{xb} \\ M_b \\ F_{xc} \\ M_c \end{pmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ & & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ Sym. & & & 4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_b \\ \theta_b \\ u_c \\ \theta_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 통해 산출된 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 휨강성은 약 17.2 kN/mm로 계산되었다.

철골 가새로 보강되는 골조의 휨강성은 기존 철근콘크리트(RC) 골조 휨강성의 각각 2배와 3배가 되도록 실험체 계획을 수립하였다. 보강되는 가새의 형태는 역V형으로 선정하였으며, Fig. 2와 같이 축력을 받는 요소의 자유물체도를 활

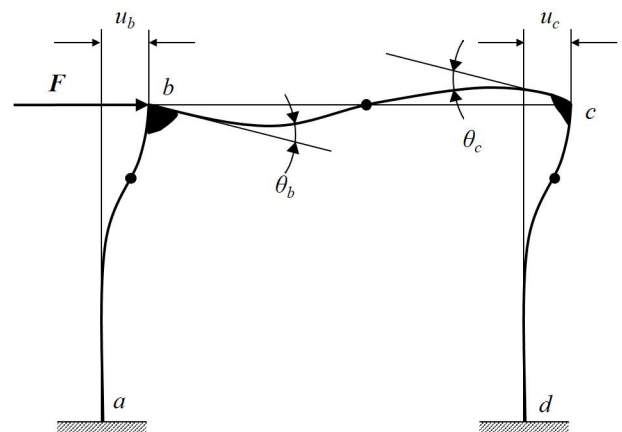


Fig. 1 Deformation of frame subjected to lateral force

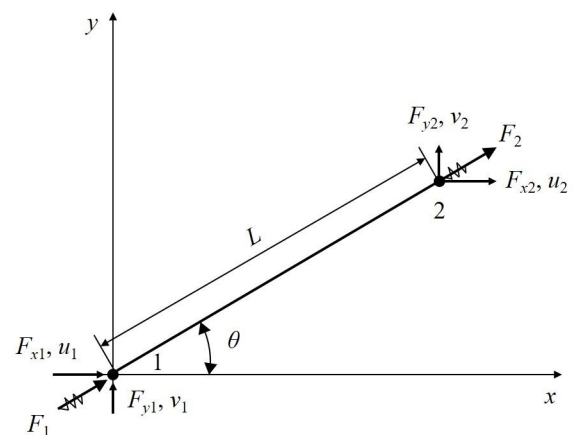


Fig. 2 DOF of element subjected to axial force

용하여 역V형 가새 골조에 횡하중이 작용하였을 때의 휨강성을 식 (3)으로 산출하였다.

$$[k] = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta & -\cos^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ & \sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta & -\sin^2\theta \\ Sym. & & \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ & & & \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)을 활용하여 기존 골조에 역V형 가새를 보강한 골조의 휨강성이 보강하지 않은 골조 휨강성의 약 2배를 만족하는 부재의 크기는 □-50×50×2.3으로 SRT275(공칭항복강도 275 MPa) 각형강관 강종을 사용하면 될 것으로 산출되었다. 이때 기존 철근콘크리트(RC) 골조와 역V형 가새의 합 강성은 약 33.5 kN/mm로 계산되었다. 동일한 방법으로 역V형 가새를 보강하였을 때, 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 휨강성의 3배에 도달하기 위해서는 각형강관 □-100×100×2.3 부재를 사용하면 될 것으로 산출되었고, 이때 기존 골조와 역V형 가새의 합 강성은 약 51.9 kN/mm로 계산되었다. 직접강성법에 의해 도출된 가새 부재는 국부좌굴 및 휨좌굴에 의해 조기에 강도저하가 발생하지 않고, 충분한 에너지소산능력을 발휘할 수 있도록 건축구조기준(KDS 41 17 00) 내 특수중심가새골조의 가새 부재에 요구하는 세장비 및 폭두께비를 만족하는 것으로 나타났다.

철골 끼움골조로 내진보장을 한 실험체의 경우에는 기존 철근콘크리트(RC) 골조 휨강성의 4배 증가를 목표로 설계가 수행되었다. 이때 철골 끼움골조와 기존 철근콘크리트(RC) 골조 사이의 접합은 완전합성단면으로 가정하였고, 식 (2)를 활용하여 철골 끼움골조의 부재를 산출하였다. 직접강성법을 통하여 철골 끼움골조의 보강량을 산출한 결과, H-200×200×8×12의 부재로 SS275 강재를 사용하면 될 것으로 나타났으며, 이때 기존 골조와 철골 끼움골조의 합 강성은 약 68.8 kN/mm로 계산되었다.

2.2 접합부 설계

기존 골조에 가새를 보강할 시에는 가새의 압축력과 인장력의 차이로 인하여 구조물에 불균형력이 부가하게 된다. 따라서 가새와 보 하부 접합부 설계응력을 산정함에 있어 압축가새 부재가 압축강도를 발현한 경우와 압축가새부재가 후좌굴강도를 발현한 경우 접합부에 가해지는 인발력과 전단력을 Fig. 3과 같이 고려하여야 한다.

가새와 보 하부 접합부에 가해지는 불균형력에 의한 인발력과 전단력을 고려하여 거셋플레이트(gusset plate)와 베이스플레이트(base plate) 간의 용접부와 철근콘크리트(RC) 골조에 요구되는 앵커를 설계하였다. 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 가새 설치를 위한 거셋플레이트(gusset plate) 설계 시에는 거셋플레이트의 항복, 전단력과 수직인발력의 조합응력으로 인한 항복, 거셋플레이트의 좌굴, 블록전단파단과 단면 파단 등을 고려하여 설계를 수행하였다. 거셋플레이트와 가새의 간의 접합부는 용접접합을 수행하였으며, 용접접

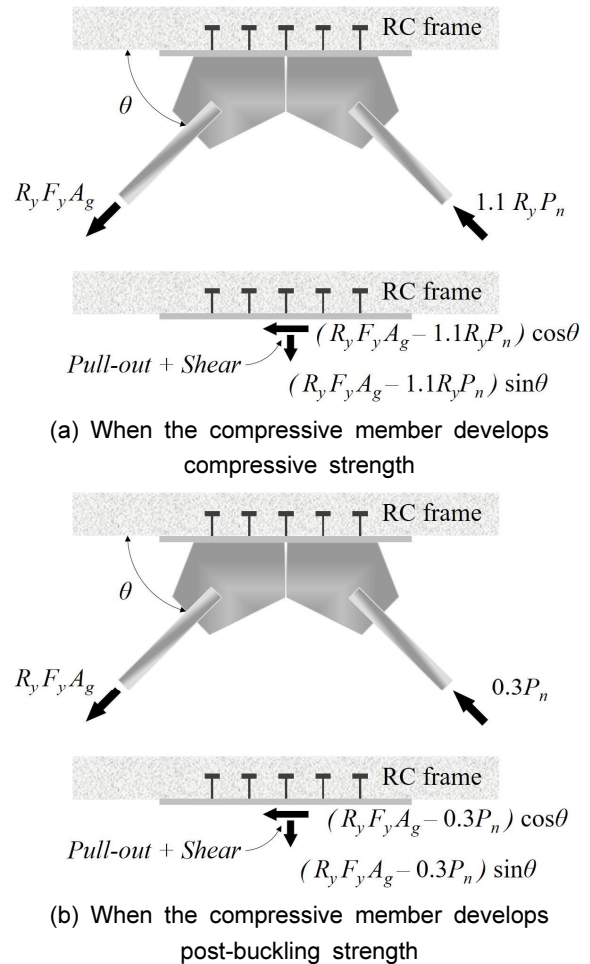


Fig. 3 Calculating of design strength at the connection between bracing and beam

합에 관한 설계는 건축구조기준(KDS 41 31 00)에 준하여 설계하였다.

기존 철근콘크리트(RC) 골조에 철골 끼움골조로 보강한 실험체의 경우에는 H 형강과 RC 단면을 완전합성단면으로 설계하였으며, 강재 단면과 철근콘크리트 단면 사이의 계면 전단력은 강재 앵커에 의해서만 전달되는 것으로 가정하여 설계하였다.

2.1절과 2.2절을 바탕으로 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 철골 가새 및 철골 끼움골조를 각각 보강한 실험체의 상세와 일람표를 Fig. 4와 Table 1에 정리하였다.

3. 실험연구 계획 및 방법

3.1 실험 개요

본 연구에서는 직접강성법을 통해 도출된 철골 부재를 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 보강하여 내진보강 효과에 대하여 검증하고자 한다. 철골 가새로 보강된 실험체들(C2, C3)은 기존 골조의 휨강성에 약 2배 및 3배가 되도록 설계되었으며, 철골 끼움골조로 보강된 실험체(F4)는 기존 골조 휨강성의 4배가 되도록 설계되었다.

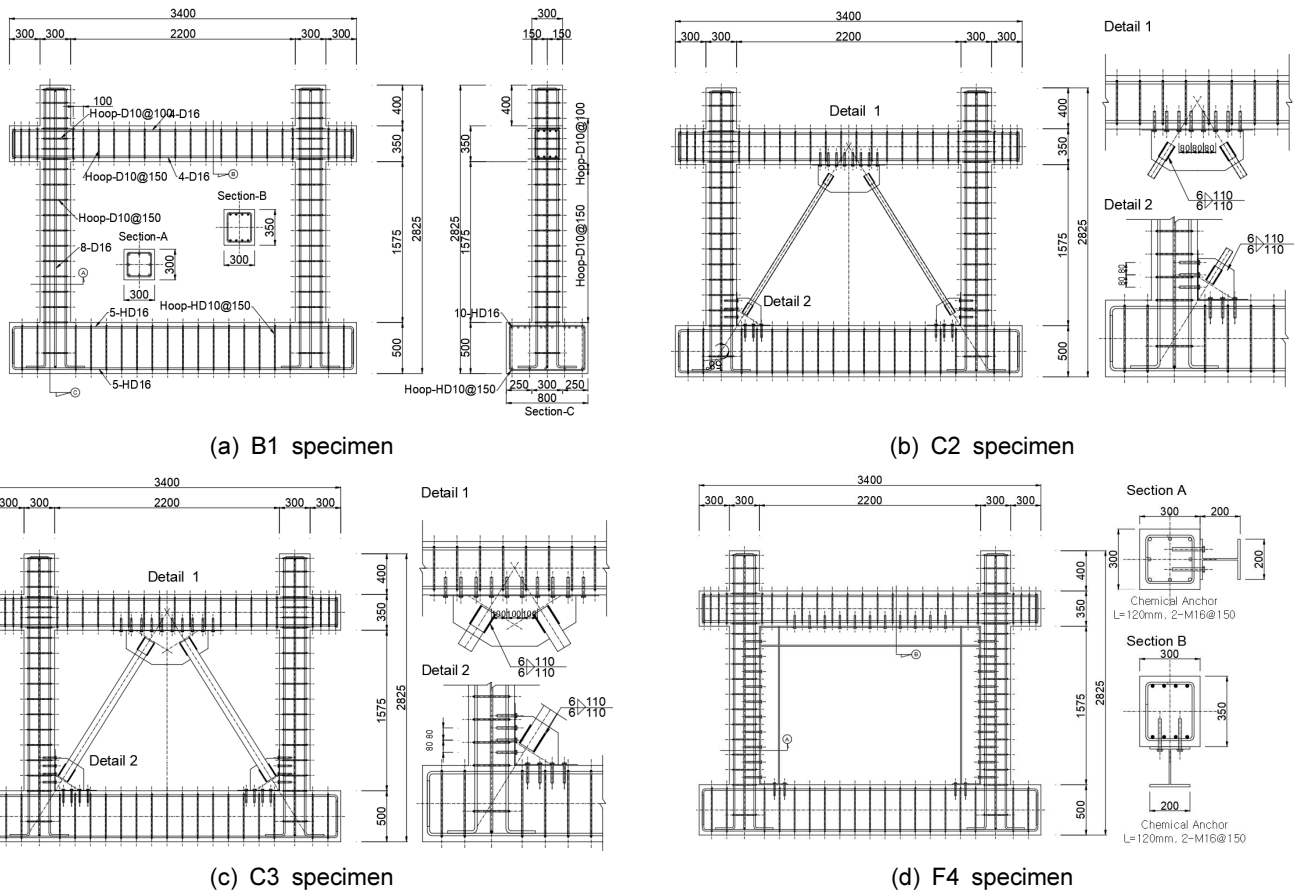


Fig. 4 Details of specimens (unit: mm)

Table 1 Summary of test specimens

Specimen	Reinforced method	RC frame	Reinforced member	Target initial stiffness (kN/mm)	Used materials
B1	-	$f_{ck}=24$ MPa re-bar=SD300	-	17.2 (1.00)	Gusset plate (SS275)
C2	Chevron bracing		\square -50 \times 50 \times 2.3 (SRT275)	33.5 (1.95)	
C3	Chevron bracing		\square -100 \times 100 \times 2.3 (SRT275)	51.9 (3.02)	Chemical anchor (M16)
F4	Infilled steel frame		H-200 \times 200 \times 8 \times 12 (SS275)	68.8 (4.00)	

B: bare frame, C: chevron bracing system, F: infilled steel frame, Number: stiffness ratio

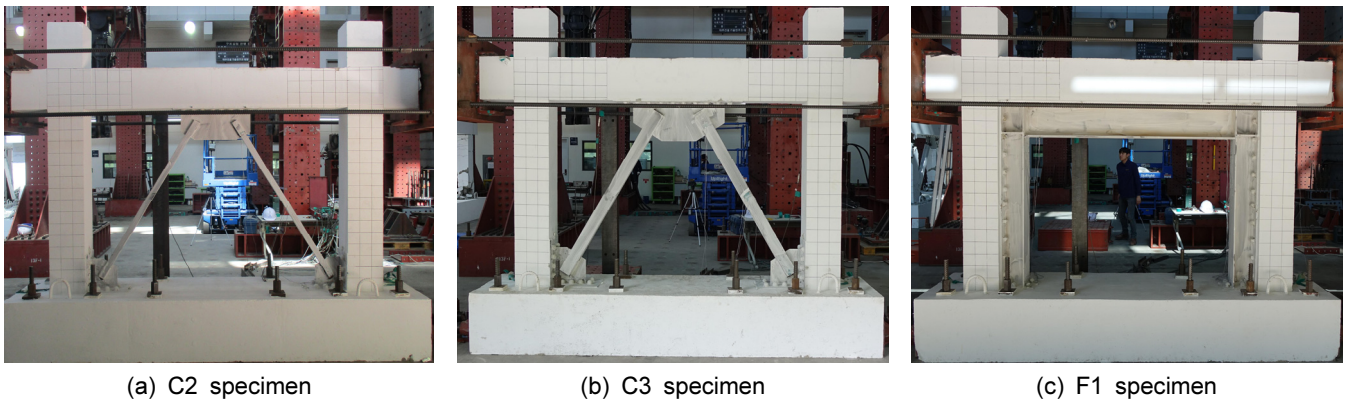


Fig. 5 Actual views of specimens reinforced with steel member

기존 철근콘크리트(RC) 골조는 실제 크기의 1/2 스케일(scale)로 제작되었다. 모든 실험체의 기존 골조의 크기는 Fig. 4에서와 같이 보와 기둥의 단면은 각각 350×300 mm, 300×300 mm이고, 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 24 MPa, 철근은 SD300을 사용하였다. 보강되는 철골 부재 및 거싯플레이트는 항복강도 275 MPa급 강재를 사용하였다. 철골 부재 보강은 기존 골조에 앵커 삽입을 위한 천공작업을 실시한 후, 케미컬앵커와 에폭시를 통해 보강판을 부착한 후, 철골골조를 기존 RC 골조에 신설하여 보강판과 철골 골조를 용접하여 부착하였다(Fig. 5 참조).

3.2 재료시험 및 가력 계획

철근콘크리트 골조에 사용된 콘크리트의 압축강도 시험은 콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법에 따라 원주형 100×200 mm 공시체를 제작하여 콘크리트 압축강도 시험방법에 준하여 평가하였다(KATS 2017a; 2019). 콘크리트 압축강도 시험 결과 총 5개의 공시체의 평균 압축강도는 26.5 MPa로 설계압축강도에 비하여 약 10 % 높게 측정되었다. 철골 부재 및 거싯플레이트는 금속 재료 인장 시험편에 준하여 평가하였고, 평균 항복강도(310 MPa)는 공칭항복강도(275 MPa)를 상회하였다(KATS 2017b).

기존 골조 및 철골 부재로 보강한 골조의 내진성능평가를 위하여 용량 2,000 kN 용량의 액추에이터를 사용하여 변위제

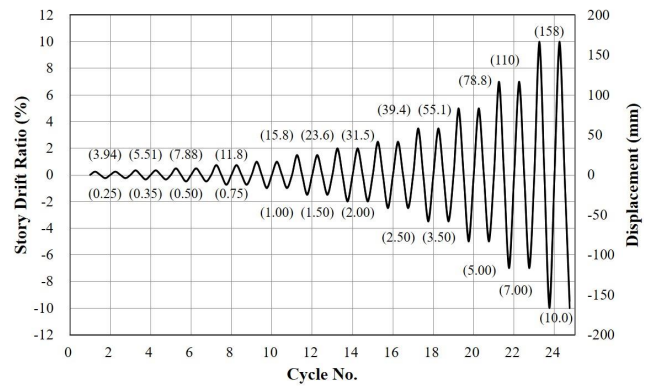


Fig. 6 Loading protocol

어 방식으로 가력하였다. 가력 패턴은 Fig. 6과 같이 0.5 mm/sec의 가력 속도로 증간변위 0.25~10%까지 2 사이클씩 반복 가력하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴양상

보강하지 않은 기존 철근콘크리트(RC) 골조 실험체(B1)의 경우, 증간변위 0.5 %에서부터 기둥 상하부에서 초기 미세 휨균열이 발생하였다. 그 이후 휨균열은 점차 증가하여



(a) B1 specimen



(b) C2 specimen



(c) C3 specimen



(d) F1 specimen

Fig. 7 Final failure mode

보-기둥 접합부 부분까지 균열이 확대되었다. 이 균열은 기둥 상하부와 보-기둥 접합부 부분에서 집중적으로 발생되었다. 층간변위 5.0 %에서부터는 균열의 폭이 증가하면서 기둥 상·하단부에서 콘크리트의 박리가 시작되었다. 층간변위 7.0 %에서는 기둥 단부의 콘크리트 박리가 심화되면서 하중이 급격히 감소되어 1 사이클 가력 후 실험을 종료하였다. 보강하지 않은 기존 철근콘크리트(RC) 골조 실험체(B1)는 Fig. 7(a)에서와 같이 기둥 하단부에서 콘크리트의 파괴가 발생되었다.

철골 가새를 보강하고 기존 골조 휨강성의 2배를 목표로 설정한 C2 실험체의 경우에는 층간변위 1.0 %에서 기둥 상단부에서 초기 미세 균열이 발생하였고, 1.5 %에서는 가새 중앙부에서 좌굴이 발생하였다. 이후 층간변위 2.5 %에서 가새 중앙부가 파단되었다. 가새 중앙부가 파단된 이후에는 철근콘크리트(RC) 골조가 하중은 부담하면서 균열의 폭이 증가하였고, 콘크리트의 박리가 심화되면서 B1 실험체와 마찬가지로 층간변위 7.0 % 1 사이클까지 가력 후 실험을 종료하였다. B1 실험체와는 달리 C2 실험체의 경우에는 Fig. 7(b)에서와 같이 기둥 하단부에 거셋플레이트 설치를 위한 보강판으로 인하여 기둥 상단부에 균열이 집중된 것을 확인할 수 있었다.

기존 골조 휨강성의 3배를 목표로 설정하고 철골 가새로 보강한 C3 실험체는 C2 실험체와 유사한 파괴패턴을 보여

주었다. 층간변위 1.0 %에서 기둥 상단부 초기 미세 휨균열이 발생하였고, 철골 가새의 좌굴은 층간변위 1.5 %에서 가새 단부에서 발생하여 층간변위 2.5 %에서는 가새 단부가 파단되었다. 가새가 파단된 이후부터는 C2 실험체와 유사한 파괴양상을 보여주었고 층간변위 7.0 %까지 가력되었다.

기존 철근콘크리트(RC) 골조 휨강성의 4배 증진을 목표로 철골 끼움골조로 보강한 F4 실험체의 경우에는 층간변위 0.75 %일 때, 콘크리트 기둥 하단부에서 초기 미세 휨균열이 발생하였고, 동 층간변위 2번째 사이클에서 좌측 철골 하부 베이스플레이트가 콘크리트와 들뜸 현상이 발생되었다. 그 이후 철근콘크리트(RC) 기둥에서 휨균열이 기둥 전구간에 대해서 발생하다가 층간변위 1.5 %에서는 철골 끼움골조 패널존에서 항복하였다. 이후 기둥의 균열은 점차 확대되었고, 철골 끼움골조에서는 패널존은 완전 소성화되었으며, 보에서도 항복이 관찰되었다. F4 실험체는 층간변위 5.0 %까지 가력하였을 때 우측 기둥에서 콘크리트의 박리가 심화되었으며, 균열 폭이 증가하면서 하중이 급격히 감소되어 실험을 종료하였다.

4.2 하중-변위 관계 곡선

모든 실험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 8에 나타내었으며, Table 2에는 각 실험체의 항복하중(P_y), 항복변위(δ_y), 최대

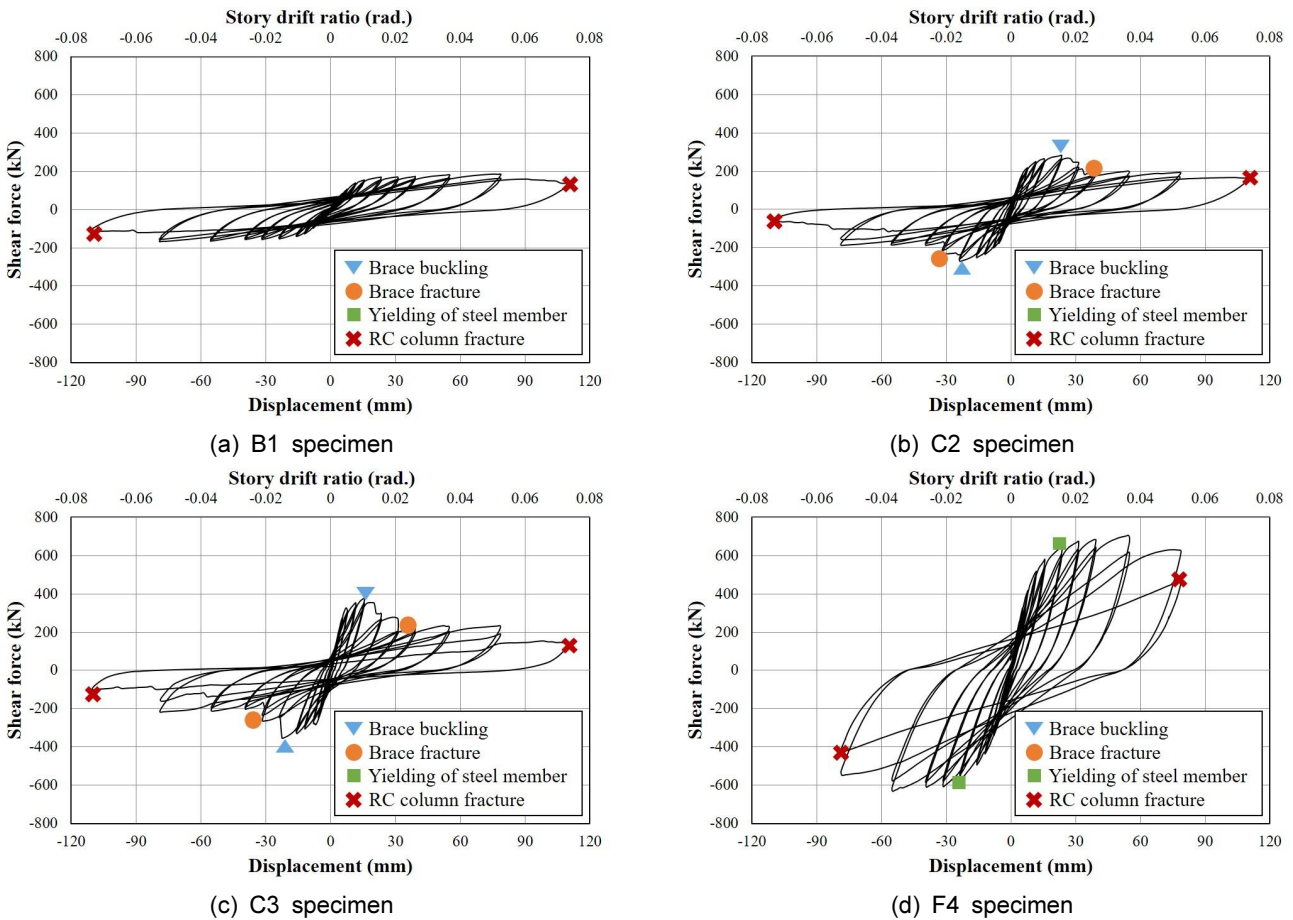


Fig. 8 Hysteresis curves of specimens

Table 2 Summary of test results

Specimen	Positive (+)					Negative (-)					Failure mode
	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	k_y (kN/mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	k_y (kN/mm)	
B1	175	10.1	185	75.9	17.3	-157	-10.0	-168	-79.1	15.7	Lower columns fracture
C2	259	7.3	281	23.7	35.5	-243	-6.9	-272	-23.5	35.2	Upper columns fracture after middle bracing fracture
C3	352	6.8	376	15.4	51.8	-311	-6.6	-352	-22.4	47.1	Upper columns fracture after end bracing fracture
F4	656	9.7	703	54.7	67.6	-585	-12.1	-633	-54.9	48.3	Lower columns fracture

하중(P_u), 최대변위(δ_u), 항복강성(k_y) 그리고 최종 파괴모드를 정리하였다. 이때 항복하중과 항복변위는 등가에너지법을 이용하여 도출하였고 항복강성은 항복하중과 항복변위의 비로 산출하였다. 또한, 최대변위(δ_u)는 최대하중에 도달하였을 때의 변위를 의미한다.

철골 부재로 보강하지 않은 B1 실험체는 층간변위 5.0% 까지 완만하게 하중이 증가하다가 최대강도 185 kN에 도달하였고 층간변위 7.0%에서 기둥 콘크리트가 파괴되면서 하중이 급격하게 감소하였다. 정·부가력 시 항복강성(k_y)은 16.5 kN/mm로 측정되어 직접강성법으로 도출한 예상 항복강성 17.2 kN/mm과 거의 유사하게 나타났다.

철골 가새로 보강한 C2와 C3 실험체들은 층간변위 1.5%에서 최대강도에 각각 도달하였으며, 철골 가새가 파단이 되는 층간변위 2.5%까지 하중을 분담하였다. 철골 가새가 파단된 이후에는 철골 가새의 기여가 있지 않아 보강되지 않은 실험체와 유사한 거동을 보여주었다. C2와 C3 실험체들의 강성은 각각 35.4 kN/mm와 49.5 kN/mm 측정되어 설계 시 산출되었던 예상강성과 오차가 약 5% 내외인 것으로 나타났다.

철골 끼움골조로 보강한 F4 실험체는 층간변위 3.5%까지 완전합성된 상태로 거동을 하였다. 층간변위 3.5%에서 최대강도를 보여주었으나, 정가력(+)과 부가력(-) 시 최대강도와 항복강도 각각 상이하게 나타났다. 이는 초기에 좌측 철골 기둥에서 베이스플레이트와 콘크리트 사이에서 들뜸 현상이 나타나 정·부가력 이력거동이 대칭적이지 못한 것으로 판단된다. F4 실험체의 강성은 58.0 kN/mm로 측정되어

설계단계에서 예상한 강성에 비하여 다소 낮게 측정되었다. 모든 실험체의 포락곡선을 Fig. 9에 나타내었다.

4.3 유효강성 평가

각 실험체의 유효강성을 층간변위 별로 정리하여 Fig. 10에 나타내었고, 모든 실험체의 설계강성 값과 실험강성 값을 Table 3에 정리하였다. 유효강성은 각 층간변위에서 최대하중과 최대변위의 비로 정의하였다. 모든 실험체의 휨강성은 정방향(+)으로 가력하였을 때가 부방향(-)으로 가력하였을 때보다 높게 측정되었다. 철골 부재가 보강하지 않은 B1 실험체의 초기 휨강성은 16.5 kN/mm로 측정되었고, 이는 초기 설계단계에서 예측한 휨강성 17.2 kN/mm와 매우 유사하였다. 철골 가새로 보강한 실험체 C2와 C3 실험체의 초기 휨강성은 각각 35.4 kN/mm와 49.5 kN/mm이며, 이는 B1 실험체 휨강성에 비하여 약 2.15배와 3.00배 상승하였다. 또한, 철골 끼움골조로 보강한 F4 실험체의 초기 휨강성은 58.0 kN/mm

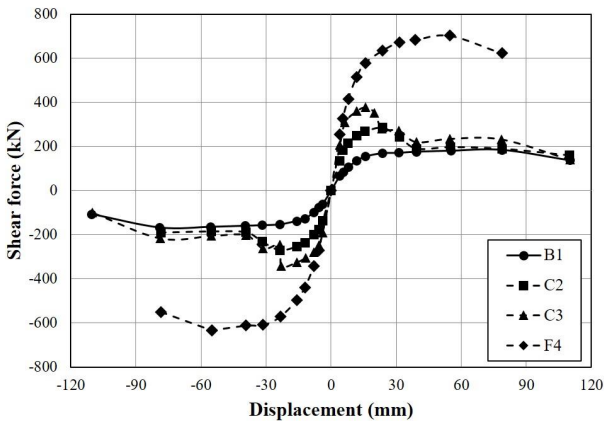


Fig. 9 Comparison of envelop curves

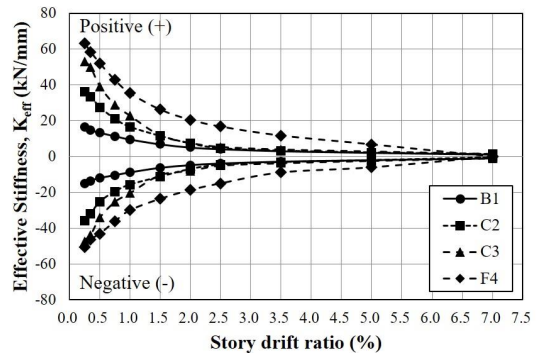


Fig. 10 Comparison of effective stiffness

Table 3 Comparison of design and experiment stiffness

Spec.	Design stiffness (kN/mm)	Experimental stiffness (kN/mm)		
		Average (Error, %)	Positive	Negative
B1	17.2	16.5 (4.1)	17.3	15.7
C2	33.5	35.4 (5.7)	35.5	35.2
C3	51.9	49.5 (4.6)	51.8	47.1
F4	68.8	58.0 (15.7)	67.6	48.3

로 B1 실험 횡강성에 약 3.52배 상승하였다. 철골 부재로 보강한 실험체의 횡강성은 초기 설계단계에서 목표한 수준에 상당히 근접한 것으로 나타났다.

또한, 철골 가새로 보강한 C2와 C3 실험체는 좌굴이 발생하는 층간변위 1.5 % 전까지는 철골 부재로 보강하지 않은 B1 실험체보다 높은 강성을 유지하였다. 철골 가새 파단이 발생하는 층간변위 2.5 % 이후부터는 B1 실험체의 유효강성과 거의 유사하였다.

철골 끼움골조로 보강한 F4 실험체는 B1 실험체에 비하여 높은 강성을 유지하다가 철근콘크리트(RC) 기둥 부재가 파괴가 발생하는 층간변위 5.0 % 이후부터는 B1 실험체의 강성과 거의 유사함을 보여주었다. 이를 통해 철골 가새와 철골 끼움골조로 보강한 골조는 층간변위 약 2.0 % 이내에서 기존 철근콘크리트(RC) 골조를 내진보강함을 확인할 수 있었으며, 중·저층 구조물에 내진보강 시 확실한 내진보강 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 에너지소산능력

반복가력을 수행한 모든 실험체의 누적된 에너지소산능력을 Fig. 11에 나타내었으며, 에너지소산능력은 하중-변위 관계 곡선의 면적으로 산출하였다. 철골 부재로 보강하지 않은 B1 실험체와 철골 가새로 보강한 C2 및 C3 실험체는 층간변위 7.0 %까지, 철골 끼움골조로 보강한 F4 실험체는 층간변위 5.0 %까지 나타내었다. 철골 가새로 보강한 C2 및 C3 실험체는 철골 가새가 파단하는 층간변위 2.5 %까지 보강하지 않은 B1 실험체보다 더 많은 에너지를 소산하였으나, 철골 가새가 파단 이후부터는 철골 가새의 기여도가 상실되었기 때문에 B1 실험체와 거의 유사하게 나타났다. 철골 끼움골조를 보강한 F4 실험체의 경우에는 철골 끼움골조 항복 이후부터 많은 양의 에너지를 소산하였지만, 철근콘크리트(RC) 골조의 파단으로 층간변위 5.0 %까지 가력되지 못하였다.

층간변위 5.0 % 기준으로, B1 실험체의 경우 약 87.3 kN·m 만큼 에너지를 소산하였고, C2 및 C3 실험체는 각각 110.6 kN·m, 126.0 kN·m 정도 에너지를 소산하여 B1 실험체와 비교해 1.3배와 1.4배 정도 에너지를 더 소산하였다. 철골 끼움

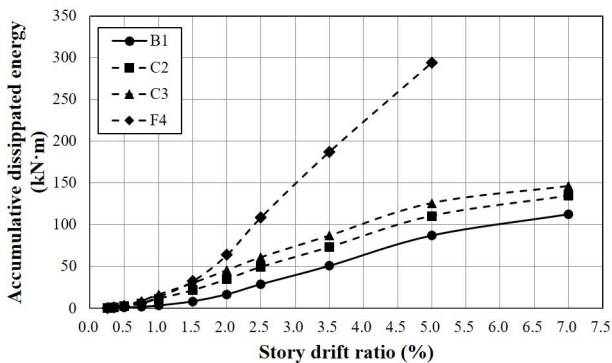


Fig. 11 Comparison of accumulative dissipation energy capacity

골조로 보강한 F4 실험체는 294.2 kN·m 정도 소산하여 B1 실험체와 비교해 약 3.4배 더 에너지를 소산하였다. 이를 통해 철골 가새 및 철골 끼움골조로 보강하였을 때 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 횡강성을 보강할 수 있지만, 높은 연성능력을 향상시키지 못한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 철골가새 또는 철골 끼움골조를 활용한 내진보강방법에 관한 구체적인 설계 절차를 마련하기 위하여 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 철골 가새 또는 철골 끼움골조를 보강하여 내진성능평가를 수행하였다. 구체적인 강성증진을 목표로 직접강성법으로 보강되는 부재의 크기를 산정하였고, 건축구조기준(KDS 41)에 따라 접합부 설계를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 대비하여 구체적인 강성증진을 목표로 직접강성법을 활용하여 도출한 부재를 사용하였을 때, 설계단계에서 목표로 한 강성증진의 효과를 이루었다. 철골 가새로 보강하였을 때는 기존 철근콘크리트(RC) 골조 대비 약 2.15와 3.00배 상승하였으며, 철골 끼움골조로 보강하였을 경우에는 약 3.52배 강성증진 효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 철골 가새로 보강한 실험체의 파괴 메커니즘을 분석하였을 때, 먼저 가새 부재가 좌굴이 발생하였고, 다음으로 가새 부재가 파단되었다. 가새 파단이 발생하기 전까지 기존 골조 대비 높은 강성을 유지하다가 파단 이후에는 철근콘크리트(RC) 골조가 하중을 부담하였다. 철골 가새 부재로 내진보강을 수행할 경우에는 건축물의 내진설계 시 역량설계법 개념을 도입하는 것과 유사하였다.
- 3) 철골 끼움골조를 활용하여 내진보강을 수행하였을 때에는 기존 골조 실험체 대비 높은 강성을 보여주었으나, 기존 철골콘크리트(RC) 골조 기둥의 파단이 철골 가새보다 이른 시점에 발생하였고, 철골 끼움골조와 기초판 사이의 들뜸 현상 또한 발생하였다. 이를 통하여 높은 강성을 보유한 부재로 보강하였을 경우에는 주변 골조의 피해를 야기시킬 수 있으며, 기초보강 또한 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 대표적인 강성보강방법인 철골 가새와 철골 끼움골조를 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 내진보강하였을 경우에는 강성/강도 증진의 효과를 기대할 수 있으나 확실한 연성능력 향상은 기대하기 어려움을 확인하였다. 따라서 중·저층 건축물에 내진보강을 수행할 때에는 시공성과 경제성 등을 고려하여 강성/강도보강방법이 더 효율적인 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서는 구체적인 강성증진의 목표로 직접강성법을 활용하여 내진 보강되는 철골 부재를 설계하였다. 기존 철근콘크리트(RC) 골조의 내진성능 향상을 위한 내진보강 설계법 및 설계절차 수립을 위한 기초

자료를 구축하였고, 추가적인 실험 및 해석연구를 통하여 설계법 및 절차에 관한 추가적인 유효성 검증 작업이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 충남대학교 학술연구비 지원사업의 연구비 지원(2017-1880-01)에 의하여 수행되었습니다.

References

- AIK (2018) *Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by Earthquakes in Gyeongju and Pohang*. Seoul, Korea; Architectural Institute of Korea (AIK). 1-347. (In Korean).
- Hu, B., Lv, H. L., and Kundu, T. (2019) Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Frame in Primary and Middle Schools with Different Strengthening Methods. *Construction and Building Materials* 217, 473-486.
- Jung, J. S., and Lee, K. S. (2018) A Seismic Capacity of R/C Building Damaged by the 2016 Gyeongju Earthquake Based on the Non-linear Dynamic Analysis. *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection* 22(1), 137-146. (In Korean)
- Kim, K. I., Jung, J. S., Lee, B. K., and Lee, K. S. (2020) Seismic Performance Evaluation of Full-size Two-story R/C Frame Strengthened with Concrete Wingwall with Embedded Kagome Truss by Pseudo-dynamic Test. *Journal of the Korea Concrete Institute* 32(2), 173-183. (In Korean)
- Kim, M. S., Choi, H. S., Song, S. E., and Lee Y. H. (2013) Seismic Capacity of Reinforced Concrete Frames Retrofitted with H-beam Frame. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* 17(3), 127-132. (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2017a) *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete (KS F 2405)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2017b) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials (KS B 0801)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2019) *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens (KS F 2403)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Lee, C. H., Ryu, J. H., and Ju, Y. K. (2018) Improving Seismic Performance of Non-ductile Reinforced Concrete Frames through the Combined Behavior of Friction and Metallic Dampers. *Engineering Structures* 172, 304-320.
- McGuire W., Gallagher R. H., and Ziemian, R. D. (1999) *Matrix Structural Analysis*. 2nd edition. USA, New York; John Wiley & Sons, Inc.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2019a) *Seismic Design Standard for Buildings (KDS 41 17 00)*. Sejong, Korea; MOLIT. (In Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2019b) *Steel Structures Design Standard (KDS 41 31 00)*. Sejong, Korea; MOLIT. (In Korean)
- MOE (2019) *Guideline for Seismic Evaluation and Rehabilitation of Existing School Buildings in Korea*. Sejong, Korea; Ministry of Education (MOE). (In Korean)
- Ozcelik, R. (2011) *Seismic Upgrading of Reinforced Concrete Frames with Structural Steel Elements*. Ph.D Thesis. Middle East Technical University.
- Truong, G. T., Dinh, N. H., Kim, J. C., and Choi, K. K. (2017) Seismic Performance of Exterior RC Beam-Column Joints Retrofitted using Various Retrofit Solutions. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 11(3), 415-433.

요약 본 연구에서는 기존 철근콘크리트(RC) 골조에 철골 가새 및 철골 끼움골조로 보강하여 내진성능평가를 수행하여 내진 보강 효과에 대하여 검증하였다. 철골 가새 및 철골 끼움골조는 앵커 정착 등으로 인한 높은 시공성능이 요구되지만, 다른 내진 보강방법과 비교하여 확실한 내진보강 효과를 얻을 수 있다. 그러나 현재 기준에서는 철골 가새 및 철골 끼움골조를 활용한 내진보강방법에 관한 구체적인 설계절차에 대해서는 포함하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 철골 가새 및 철골 끼움골조를 활용한 내진보강방법에 관한 구체적인 설계절차 마련을 위하여 내진성능평가가 수행되었다. 이를 위하여 철골 가새로 보강하였을 때에는 기존 골조 대비 휨강성 2배 및 3배 강성 증진을 목표로 하였고, 철골 끼움골조를 보강하였을 때에는 4배 강성 증진을 목표로 하였으며, 직접강성법을 통해 부재를 선정하였다. 내진성능평가 결과, 철골 부재로 보강된 실험체는 설계단계에서 목표로 한 휨강성과 거의 유사하였고, 기존 골조 대비하여 눈에 띄는 강도/강성 증진 효과를 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 철골 역V형 가새, 철골 끼움골조, 철근콘크리트 골조, 내진성능평가