Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.33, No.3, pp.191-201, June, 2021

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2021.33.3.191

비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템의 내진보강에 대한 실험연구

박병태[1] · 이선재[2] · 이준호[3*]

[1]연구소장, 메트로티엔씨㈜ 기술연구소, [2]석사과정, 서울과학기술대, SOC유지관리공학과, [3]조교수, 서일대학교, 건축공학과

Experimental Study on Seismic Retrofit of Buckling Restrained Knee Brace Frame System

Park, Byung Tae[1], Lee, Sun Jae[2], Lee, Joon Ho[3*]

[1]CTO, Technical Research Center, Metro T&C Co., Ltd., Seoul, 05836, Korea
[2]Graduate Student (Master's Course), Dept. of SOC Facility Maintenance Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 01811, Korea
[3]Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Seoil University, Seoul, 02192, Korea

Abstract - This study proposes the buckling-restrained knee-braced frames (BRKBF) seismic reinforcement method, which applies buckling restrained knee braces to the seismic reinforcement frame for enhancing the ductility and strength of existing reinforced concrete buildings. For verification of the effectiveness of the proposed BRKBF method, the reinforcement effect was confirmed in the cyclic loading test of BRKB and the two-story reinforced concrete frame specimens with non-seismic details. It was observed that the BRKB satisfied the domestic damping device standards, and the strength, ductility, and energy dissipation capacity were significantly increased in the two-story frame test. From the results, the effectiveness of the BRKBF seismic reinforcement method was verified.

Keywords - BRKBF, Seismic reinforcement, Strength, Ductility, Energy dissipation

1. 서 론

최근 수십 년 동안 국내·외 대형지진이 증가되면서 막대한 인명 및 재산피해가 발생함에 따라 국내·외 연구자들은 지진으로 인한 피해를 감소시키고자 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 2016년 경주지진 및 2017년 포항지진에서 비내진 상세를 갖는 학교시설, 필로티구조, 공동주택 등에서 심각한 지진피해가 발생하였으며, 기둥의 전단파괴가 주요 붕괴의 원인으로 지적됨에 따라 국내 내진대책의 중요한 이슈로 부각되었다[1],[2].

한편, 1988년 내진설계 도입 이전에 설계된 건축물이나 2005년도 3층 이상, 1,000 m^2 이상의 내진설계 의무대상에 포함되지 않는 학교건물, 공공기관 건축물에 대해서는 지진에 의한 피해저감을 위해 보강계획적인 측면에서 국내에서는 강도와 강성을 증대시키는 방법, 연성을 향상시키는 방법, 하중을 저감시키는 방법을 선택하고 있다[3]. 강도 및 강성을 증가시키는 시스템 보강공법으로는 전단벽, 채움벽 또는 가새골조 설치가 있으며, 연성을 증가시키는 공법으로는 섬유보강공법, 강판보강공법, 철근콘크리트 환형고리를 감싸는 공법 등이 있다[4],[5]. 하중 저감 방법으로는 일부 부재를 제거하여 강성을 낮추고 주기를 증가시키거나 감쇠장치를 이용하는 방법 등이 있다[6],[7]. 국내의 비내진 상세를 갖는 저층 콘크리트 건물의 대다수는 조적허리벽 및 채움벽의 영향으로 발생변위가 작기 때문에 강도증진시키는 재래적인 내진보강공법이 경제적인 측면에서 타당하다. 그러나 강도와 강성을 증진시키는 보강공법은 전단벽 신설방법, 기둥 날개벽 신설방법, 부축벽 신설방법, 골조신설 및 끼움골조방법, 철골가새방법 등이 주류를 이루고 있어 보강공사기간 및 철거물량 증가, 기존 골조와의 연결접합부의 시공의 어려움, 주기감소에 따른 응답지진력이 증가하고 건물의 하중 증가에 따른 기존부재의 보강 등의 문제점이 발생할 수 있다[8]. 따라

Note.-Discussion open until December 31, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 24, 2021; revised on May 20, 2021; approved on May 20, 2021.
Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-2-490-7427 Fax. +82-2-490-7808
E-mail. 20190022@seoil.ac.kr

서 이러한 단점을 보완하고자 기존 철근콘크리트 건축물의 구조적 특성에 적합한 강도 및 연성보강을 목적으로 하는 내진보강법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존 강도 및 강성을 증가시키는 내진보강법의 단점을 보완하고자 비좌굴 모서리 가새(buckling restrained knee brace, BRKB)를 적용한 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템(buckling restrained knee brace typed frame system, BRKBF) 내진보강공법을 제안하였다. 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템 공법은 기존 골조 내부 또는 외부에 설치가 가능하며 거주자의 생활 중단 없이 시공이 가능하다. 특히 기존 개구부를 그대로 사용이 가능한 상태로 강성 및 연성을 증가시키는 내진보강공법으로 국내 비내진설계된 철근콘크리트 건축물에 적용이 용이한 내진보강공법이다.

본 연구에서는 제안된 비좌굴 모서리 가새에 대해 건축물 내진설계기준 및 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼에서 제시한 감쇠장치실험을 통해 적합성을 확인하고, 비좌굴 모서리 가새를 적용한 BRKBF를 비내진 상세를 갖는 철근콘크리트 학교건물을 모사한 2층 철근콘크리트 프레임에 설치하여 내진보강 전·후 하중-변위 이력을 통해 내력, 연성, 에너지소산능력 등에 대해 비교하였다.

2. 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템

2.1 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템 공법 개요

비좌굴가새는 일반적으로 코어부재, 좌굴방지부, 비부착부(debonding layer)로 구성되며, 코어부재는 Fig. 1에 표시된 것과 동일한 인장 및 압축변형 하에서 완벽하게 비대칭형상으로 구속항복구간, 구속비항복구간, 비구속비항복구간으로 구성된다. 비좌굴가새는 항복강도보다 큰 인장응력을 받으면 푸아송 효과(Poisson effect)에 의해 두께가 감소되며, 감소된 두께는 코어심재, 코어부재, 좌굴방지부 사이에 발생하는 마찰을 최소화하기 위해 사용되는 비부착재료의 두께(s)와의 영향에 의해 약축휨방향으로 좌굴되도록 한다. 따라서 코어심재는 비탄성범위로 압축된 직후 고차모드 좌굴파형이 형성되며 좌굴방지부에 의해 좌굴파형은 Fig. 2의 sine파와 같은 형태로 변형을 보이게 된다[9]-[11]. 좌굴파형은 비부착재료를 압착하여 좌굴방지부인 콘크리트에 접촉력 N을 생성하며 좌굴파장길이(buckling wavelength) L_b는 코어변형이 약 0.03에 도달할 때 코어심재두께의 약 11배이다[9],[11].

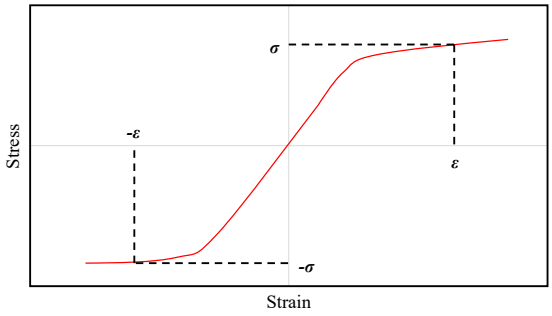


Fig. 1. Brace core of the tension and compression stress-strain relationships

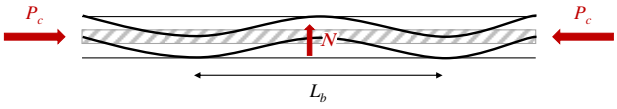
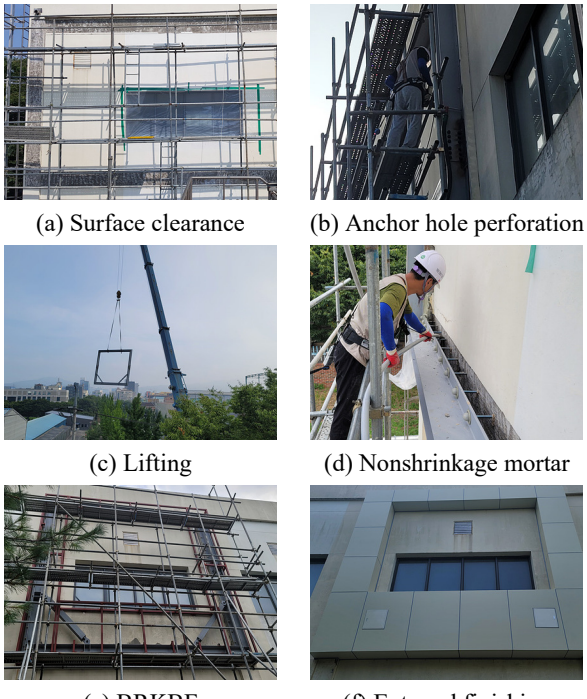


Fig. 2. Schematic of the high-mode buckled brace core

본 연구에서 제안한 BRKBF 시스템 공법은 강도 및 연성보강 공법의 종류로 기존 건물의 수평내력과 연성을 향상시켜 내진성능을 확보하는 공법으로 비좌굴 모서리 가새와 내진보강프레임으로 구성된다. 기존 구조체와 앵커볼트, 강판, 무수축 모르타르 등에 의해 시공되며, 내진보강프레임과 강판은 일체거동을 위해 용접접합으로 시공된다. 내진보강프레임 보강부재의 강재는 SS275 강재이며, BRKBF 시스템에 의한 시공절차는 Fig. 3와 같다.



(a) Surface clearance (b) Anchor hole perforation

(c) Lifting (d) Nonshrinkage mortar

(e) BRKBF (f) External finishing

Fig. 3. Construction procedure of BRKBF method

2.2 비좌굴 모서리 가새의 구성

비좌굴 모서리 가새는 Fig. 4와 같이 외부강관, 코어심재, 수경성 무수축 모르타르로 구성되어 있으며, 코어심재를 통해 기존 가새보다 변형능력 및 지진하중 흡수기능을 향상시켰다. 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템은 Fig. 5와 같이 비좌굴 모서리 가새와 내진보강프레임으로 구성되어 있다. 강력한 지진이 발생하면 예상되는 브레이스의 좌굴 발생을 방지하기 위하여 코어심재 주변을 무수축 모르타르로 보강하여 코어심재의 좌굴을 방지하도록 구성하였다. 코어심재와 심재의 좌굴방지를 위해 타설되는 무수축 모르타르 사이에는 심재의 고차모드(high mode) 영향을 유도하기 위해 비부착물질(unbonding material)을 부착하여 고차모드에 따른 비좌굴가새 내진장치의 변형능력을 향상시켰으며, 사용된 비부착물질은 부틸고무소재를 적용한다.

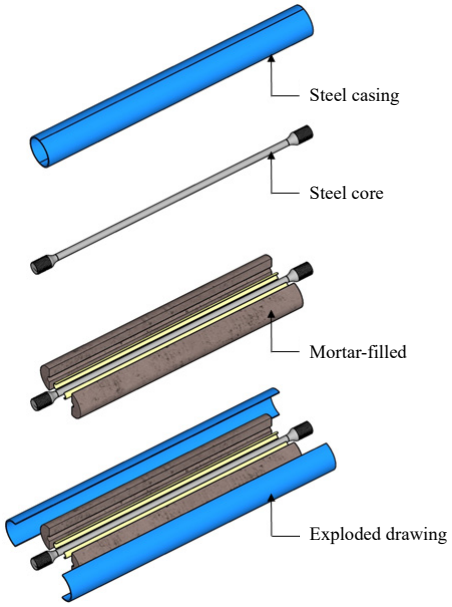


Fig. 4. Buckling restrained knee braces configuration

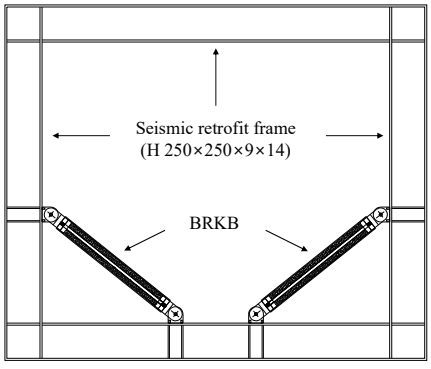


Fig. 5. Details of buckling restrained knee brace frame system

2.3 비좌굴 모서리 가새의 설계

비좌굴 모서리 가새의 코어심재는 압축력하에서 국부좌굴을 방지하기 위해 내부 무수축 모르타르로 채워지며, 모르타르로 채워진 코어심재를 제외한 부분은 변형이 발생하지 않도록 설계된다. 내부 코어는 균일한 응력을 부담하는 것을 기반으로 설계한다. 항복력 P_y, 최대인장력 $T_{\max}$ 및 코어의 최대압축력 $C_{\max}$는 아래 식 (1) - 식 (3)에 의해 계산된다.

$$P_y = F_{yst} A_{st} \tag{1}$$

$$T_{\max} = R_t F_{ust} A_{st} \tag{2}$$

$$C_{\max} = R_y P_y \tag{3}$$

여기서, F_{yst}는 코어심재의 항복응력, A_{st}는 코어심재의 단면적($A_{st} = \pi r^2$), F_{ust}는 코어심재의 인장응력이다. R_y 및 R_t는 강재의 설계기준강도에서 기대강도로 변환하는 계수로 건축물 강구조내진설계 기준(KDS 14 31 60)에 의해 정의된 계수를 따른다[12].

강재코어의 항복변형은 강재의 탄성계수 E를 고려할 때 후크의 법칙을 따른다.

$$\delta_{y,BRB} = \frac{P_y L_B}{E A_{st}} \tag{4}$$

여기서, L_B는 코어심재의 구속되어 있는 순수 심재의 길이이다. 비좌굴 모서리 가새 최대변형은 코어심재의 고차모드 변형에 의해 발생하므로 가새의 최대변위는 코어심재의 최대변형으로 예상할 수 있다. 비좌굴 모서리 가새의 최대변형은 식 (5)에 의해 계산된다.

$$\delta_{\max,BRB} = u \cdot \delta_{y,BRB} \tag{5}$$

여기서, u는 실험에 기초한 강재코어의 연성이며, 강재코어재료에 사용되는 일반 구조용 압연강재 SS275의 설계연신율은 18 - 23, 용접 구조용 압연강재 SM275은 18 - 24, 기계 구조용 탄소강재 SM35C의 연신율은 22 이상이다.

3. 비좌굴 모서리 가새의 성능실험

3.1 비좌굴 모서리 가새의 실험계획

본 연구에선 비탄성영역에서의 비좌굴 모서리형 가새의

거동특성을 분석하기 위해 내부 코어심재의 길이를 700 mm로 하고, 양단부는 액츄에이터 및 반력프레임에 고정하여 반복가력실험을 수행하였다. Fig. 6와 같이 코어심재는 Φ20의 강봉을 사용하였으며, 비부착물질로 2 mm 두께의 부틸고무 소재를 사용하여 고차모드 형성에 유리하도록 하였다.

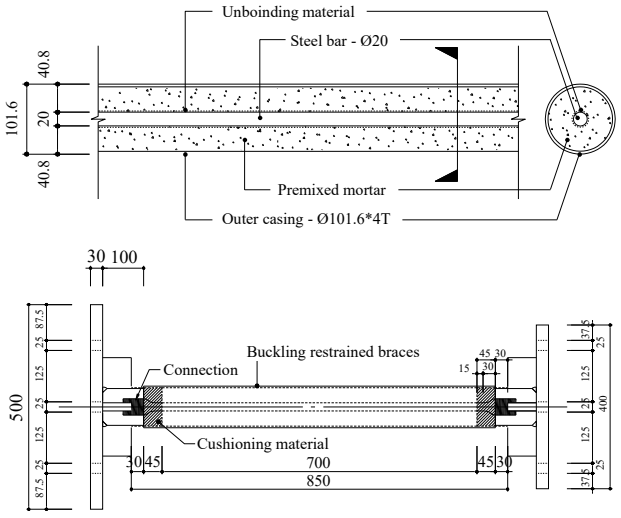


Fig. 6. Specimens of buckling restrained knee braces

3.2 실험체 설치 및 가력계획

본 실험을 위한 실험체의 설치는 Fig. 7과 같이 하였으며, 비탄성 영역에서의 비좌굴 모서리 가새의 성능을 평가하기 위해 변위의존형 감쇠장치에서 권하는 표준재하방법을 사용하였다. 국내 건축물 내진설계 기준(KDS 41 17 00)[3], 학교시설 내진성능평가 및 보강매뉴얼(MOE 2019)[8] 및 국외(ASCE/SEI 41-17)[13]의 표준재하방법은 다음과 같다.

(1) 최대고려지진 시 예상되는 장치변위의 0.33(0.25)배를 10회씩 반복재하
(2) 최대고려지진 시 예상되는 장치변위의 0.67(0.50)배를 5회씩 반복재하
(3) 최대고려지진 시 예상되는 장치변위의 1.0배를 3회씩 반복재하

따라서 비좌굴 모서리 가새에 4.62 mm 10회, 9.38 mm 5회, 14 mm 3회 및 3.5 mm 10회, 7.0 mm 5회, 14 mm 3회 반복가력을 실시하였으며, 최종변위 14 mm는 비좌굴 모서리 가새의 구속항복구간(restrained yielding segment)의 길이 700 mm의 변형률 2 %에 기인한 값이다.

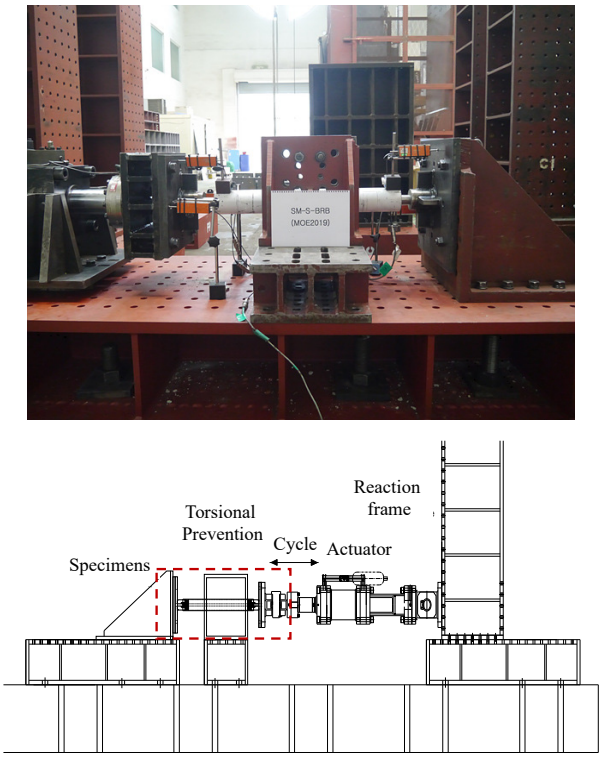


Fig. 7. Specimen test set-up

3.3 실험결과

3.3.1 이력거동

실험결과, Fig. 8과 같이 가력이 진행되는 중 강재코어의 목표변형률인 2 % 변형률 동안 하중의 저감 없이 안정적인 이력거동을 보였으며, KDS 41 17 00(ASCE/SEI 41-17)가력에 의한 실험체의 최대가력하중은 정(+)가력 228.46 kN, 부(-)가력 179.63 kN인 것으로 확인되었다. KDS 41 17 00 가력에 의한 실험체의 원점, 최대·최소 변위에서의 하중비교는 Table 1에 나타내었으며, MOE 2019 가력에 의한 실험체의 최대가력하중은 정가력 230.46 kN, 부가력 168.40 kN인 것으로 확인되었다.

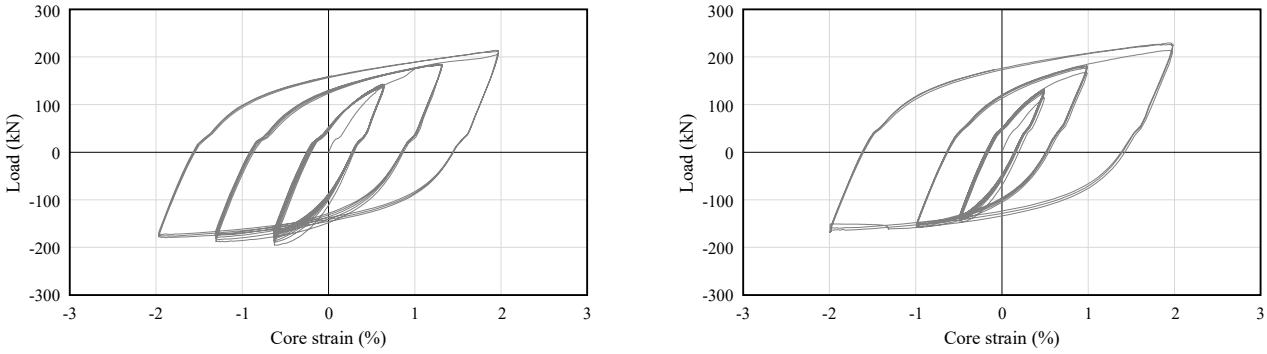
3.3.2 적합성 검토

KDS 41 17 00 및 MOE 2019에서는 변위의존형 감쇠장치에 대해 방향별 최대·최소하중(강성), 원점에서의 최대·최소하중, 이력곡선의 면적 등에 대해 모든 실험에서 평균치의 ±15 % 이내가 되도록 요구하고 있다[3],[8].

비좌굴 모서리형 가새의 최대하중은 평균치의 10.41 %, 최소하중은 9.47 % 이내, 영변위에서의 최대하중은 평균치의 5.3 % 이내, 최소하중은 평균치의 8.7 % 이내, 모든 구간

Table 1. Test result of specimens (KDS 41 17 00)

BRKB	Force at zero displacement (kN)		Force at max. displacement (kN)		Force at min. displacement (kN)		Hysteresis curve area (kN·mm)
	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	
0.33 times	78.5	–98.6	144.0	138.8	–195.5	–168.0	841.0
0.67 times	138.9	–147.2	210.0	184.2	–188.2	–171.5	3,403.0
1.00 times	163.7	–144.4	228.5	213.7	–179.6	–172.7	6,295.3



(a) KDS 41 17 00 (b) MOE 2019

Fig. 8. Load-core strain relationships for test specimens

에서의 이력곡선의 면적은 평균치의 최대 4.7 % 이내로 검토되어 실험체의 적합성(평균치의 15 % 이내)은 확보된 것으로 확인되었다.

4. 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템 성능실험

4.1 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템의 실험계획

기존 건축물이 목표내진성능을 만족하지 못하는 시설물의 경우, 주로 시스템 보강공법 등을 통해 내진성능을 향상시키며 시스템 보강시에는 기존 구조체와의 접합상태를 중요시한다. '학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼'의 가이드라인을 참고하여 시스템보강의 하나인 BRKBF를 배치한 2층 1스팬 철근콘크리트(RC) 구조의 재하실험을 수행하여 보강효과를 검토하였다. 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼에서는 기존 건축물 보강시 성능입증방법으로 구조실험을 수행하도록 되어 있으며, 실험체는 2층 이상의 골조로 제작하도록 하고 있다[8].

2층 실물골조 실험체는 BRKBF 시스템 설치 유·무, 부착형태의 영향을 주요 변수로 보강효과에 대해 검증하였다. 비좌굴 모서리 가새는 3.3.1절을 통해 확인된 비좌굴 모서리 가새를 적용하였으며, 코어심재의 길이는 700 mm로 제작하였다. 코어심재의 강종은 SM35C(F_y = 355 MPa)이며, 내진보강프레임과 접합은 핀접합으로 하였다.

실험체의 기본타입은 Fig. 9과 같이 국내 비내진 상세를 갖는 표준형 학교건물의 2층 장변 방향으로 계획하였으며, 실험체의 종류는 Table 2와 같이 정리하였다. 기준실험체는 무보강 실험체(RCF-N)로 하였으며, 비좌굴 모서리 가새를 내진보강프레임에 설치한 BRKBF 시스템을 내부로 보강한 실험체(RCF-BRKBF-I), 기존 골조에 BRKBF 시스템을 외부 부착형태로 보강한 실험체(RCF-BRKBF-E)로 총 3개의 실험체를 계획하였다. 실험체의 형상은 Fig. 10과 같으며 실험에 사용된 골조 실험체는 기둥, 보로 구성된 2층 RC 모멘트 골조로 층고 2.85 m, 설계용 콘크리트 강도는 21 MPa로 계획하였다. 보강실험체에 적용한 내진 보강프레임은 250×250×9/14의 크기의 H형강을 적용하였다.

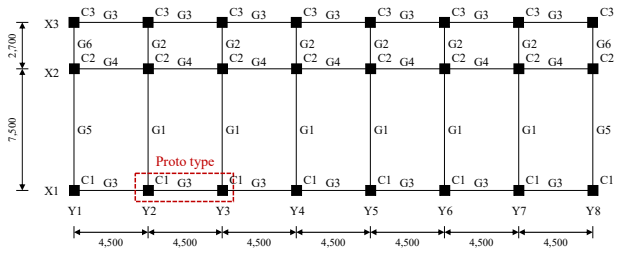
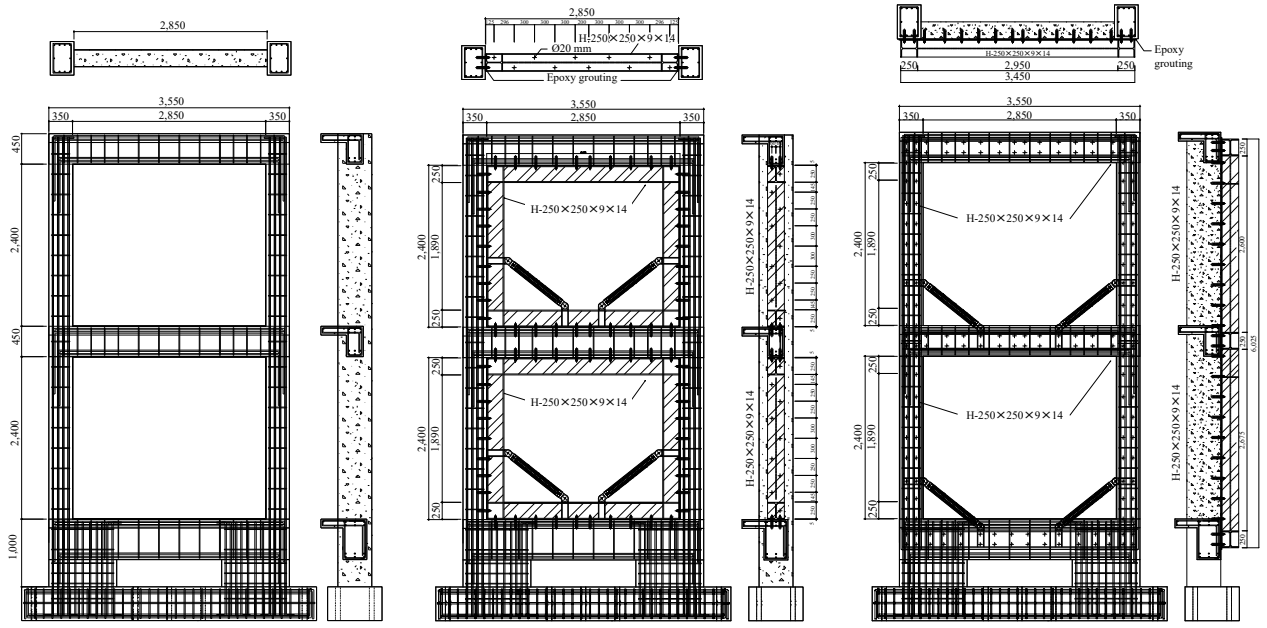


Fig. 9. Planar view of ground floor (1F) of school building

Table 2. Specimens of RC frame

Specimen	Column			Beam (2F, 3F)			Beam (1F)			Failure mode	H-beam	BRKBF
	B×D	Main bar	Hoop	B×D	Main bar	Stirrup	B×D	Rebar	Hoop			
RCF-N	350 × 500	8-D19 2-D16	D10@300	250 × 450	12-D22	D10@200	350 × 600	12-D22	D10@200	Column shear failure mode	-	-
RCF-BRKBF-I											H-250×250×9/14	Internal type
RCF-BRKBF-E												External type



(a) RCF-N (b) RCF-BRKBF-I (c) RCF-BRKBF-E

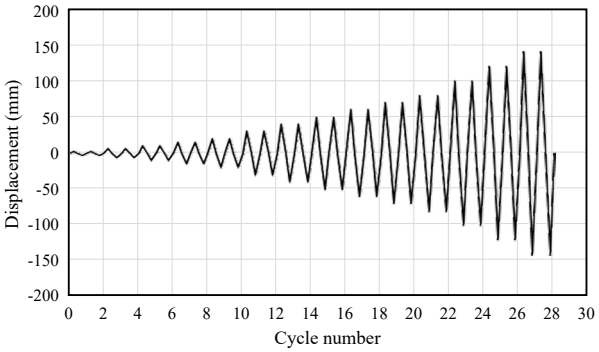
Fig. 10. Specimens for RC frame loading test

4.2 사용재료 시험

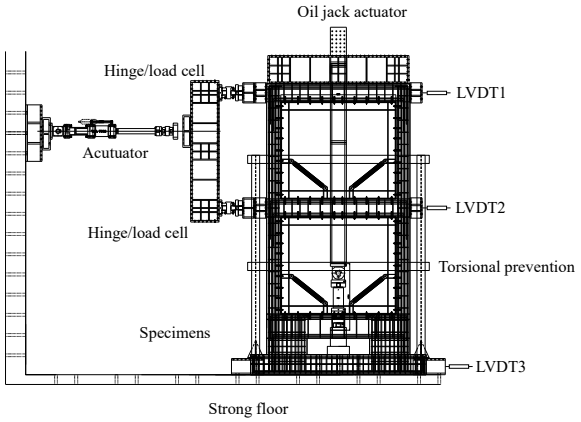
비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템 구조실험에 사용된 철근콘크리트 골조의 콘크리트 압축강도는 시험결과 평균 27.8 MPa, 항복변형률은 0.002385로 확인되었다. 기둥 및 보에 사용한 철근은 SD400이며, 주근은 D22, D19, D16, 전단보강근은 D10 철근을 사용하였다. 철근인장시험편을 3개씩 제작, 만능재료시험기(universal testing machine)를 이용하여 인장시험을 진행하였으며, 시험결과 D22 철근의 경우 항복강도 465.9 MPa, 인장강도 640.3 MPa, D19 철근의 경우 항복강도 485.3 MPa, 인장강도 630.4 MPa, D16 철근의 경우 항복강도 500.2 MPa, 인장강도 600.2 MPa, D10 철근의 경우 항복강도 428.5 MPa, 인장강도 566.9 MPa로 나타났다.

4.3 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템의 실험방법

본 실험에서는 실험실의 여건을 고려하여 Fig. 11(b)와 같이 철근콘크리트 골조실험체를 설치하였으며, 실험체의 양단부는 볼트로 실험체를 고정시켰다. 2,000 kN 용량의 액츄에이터(actuator)를 이용하여 변위제어방식으로 가력하였으며, 1층과 2층의 동시가력을 위해 1개의 액츄에이터를 1:2의 가력변위비가 되도록 실험체를 설치하였다. 이때 액츄에이터가 가력되는 양단부는 횡력만 작용하도록 핀(pin)으로 하였으며, 하중은 Fig. 11(a)에서와 같이 총 14단계로 구성되어 각 단계별로 2사이클(cycle)씩 총 28사이클을 실험체에 가력하였다. 가력이 진행되는 동안 실험체의 외부 변형을 확인하고자 LVDT를 기초판에 1개, 2층 바닥에 1개, 3층 바닥에 1개 설치하였으며, 비좌굴 모서리형 가새의 변형을 확인하고자 비좌굴 모서리 가새 단부에 LVDT를 설치하였다. 실물 모사를 위해 실험이 진행되는 동안 최상층 보에 오일잭(oil jack)을 이용하여 등분포된 하중을 가력하고, 양 기둥에는 약 50톤의 축력(축력비 0.136)을 받도록 하였으며, 비틀림 방지를 위한 가이드를 설치하였다.



(a) Cycle loading history



(b) Specimen test set-up

Fig. 11. Experiment method

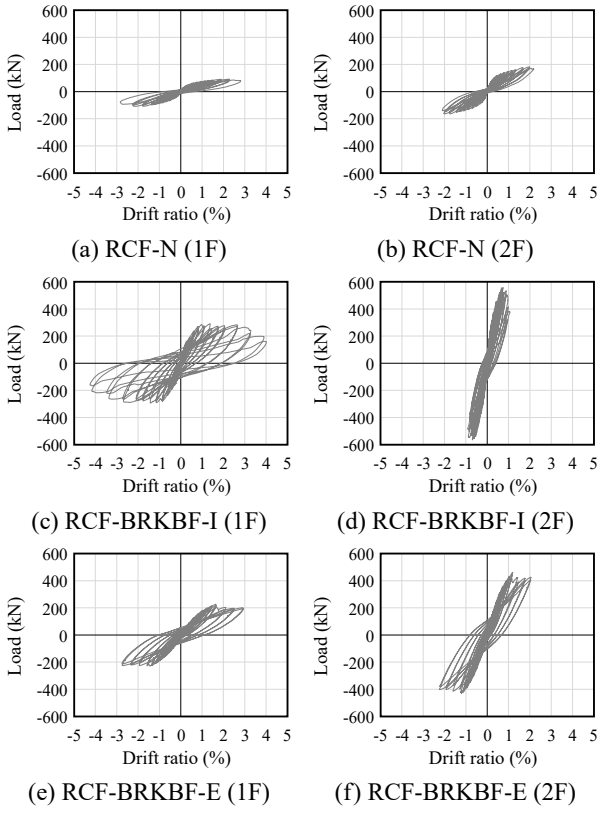
4.4 하중-변위 관계

각 층의 하중-변위비 관계도를 Fig. 12에 나타내었으며, 1층부에 대한 항복강도 및 항복변위는 Table 4에 정리하였다. 하중변위비 곡선은 실험체의 전체적인 거동특성을 나타내며 연성도, 강성저하, 소산에너지의 크기 등 실험체의 특성을 파악할 수 있다.

국내기준에서는 내진설계되지 않은 건물의 허용층간변형각은 Table 3와 같이 내진설계된 건축물의 허용층간변각의 70퍼센트로 제한하고 있으며, 내진보강이 이루어졌다 하더라도 변형능력이 제한적인 부재들이 남아있게 되므로 내진보강 이전과 동일한 값을 적용하도록 되어 있다[8].

RCF-N 실험체 즉, 무보강 비교 실험체의 최대내력은 1층의 경우 정가력 91.85 kN, 부가력 108.54 kN, 2층의 경우 정가력 182.01 kN, 부가력 165.16 kN으로 확인되었으며, 최종적으로 최대내력 이후 1층 기둥 하부단부에서 콘크리트의 다수 탈락으로 대상골조는 붕괴가 되었다.

BRKBF 시스템을 끼움형으로 설치한 RCF-BRKBF-I 내진보강 실험체의 최대내력은 1층의 경우 정가력 291.16 kN,



(a) RCF-N (1F) (b) RCF-N (2F)

(c) RCF-BRKBF-I (1F) (d) RCF-BRKBF-I (2F)

(e) RCF-BRKBF-E (1F) (f) RCF-BRKBF-E (2F)

Fig. 12. Relations of load-drift ratio

Table 3. Drift ratio by performance level (Unit: %)

Structure type	Seismic design			Non-seismic design		
	IO	LS	CP	IO	LS	CP
RC-moment frame	0.70	2.00	3.00	0.49	1.40	2.10

Table 4. Comparison of response strength and displacement

Specimen	Positive (+)		Negative (–)	
	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)
RCF-N	91.85	63.71	–108.54	–61.19
RCF-BRKBF-I	291.16	41.15	–294.08	–42.27
RCF-BRKBF-E	227.93	47.24	–228.57	–45.30

부가력 294.08 kN, 2층의 경우 정가력 559.51 kN, 부가력 564.83 kN으로 확인되었으며, 이때의 층간변위비는 1.45 %인 것으로 확인되었다. 최대내력 이후 실험체의 균열은 전체로 확장되었고 급격한 하중감소는 층간변위비 3.28 %까지는 나타나지 않았다.

BRKBF 시스템을 외부형으로 설치한 RCF-BRKBF-E 내진보강 실험체의 최대내력은 1층의 경우 정가력 227.93 kN,

부가력 228.57 kN, 2층의 경우 정가력 461.71 kN, 부가력 429.64 kN으로 확인되었으며, 이때 층간변위비는 1.66 %인 것으로 확인되었다. 최대내력 이후 실험체의 균열은 RCF-BRKBF-I와 동일하게 실험체 전체로 확장되었고 급격한 하중감소는 층간변위비 2.93 %까지 나타나지 않아 안정된 이력그래프 형태를 보이는 것으로 확인되었다. 또한, 끼움형 실험체에 비해 외부 부착형 실험체에서 정가력 및 부가력이 낮게 나타났으며 이는 끼움형으로 보강시에는 기존 구조체와의 구속효과, 접합부 주응력이 전단으로 작용, 축방향하중의 전달이 기존 구조체로 주로 전달되는 반면 외부형으로 보강시에는 기존 구조체와 구속효과가 낮고, 접합부 주응력이 전단과 인장력이 발생하고 외부보강에 따른 편심영향에서 기인한 것으로 판단되었다.

결과적으로 BRKBF 시스템 내진보강공법으로 내진보강한 실험체는 보강 전 실험체에 비해 내력은 약 2.48배 - 3.17배 증가하였고, 최대내력 이후 붕괴방지수준에서도 안정적인 이력거동을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 최대내력 이후 균열은 증진되었으나, 소규모 피해정도를 나타내어 비좌굴 브레이스 내진보강 프레임 시스템 내진보강공법의 유효성이 검증되었다고 판단한다.

4.5 균열 및 파괴양상

각 실험체의 최종파괴 형태는 Fig. 13에 나타내었으며, 손상정도는 '기존시설물(건축물) 내진성능평가요령'(2019), '학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼'(2019)의 구조요소의 손상정도와 The Japan Building Disaster Prevention Association(JBDPA)의 'Guideline for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings'에서 제시된 Damage class definition of RC columns and walls를 따라 정리하였다[8],[14],[15].

비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템이 설치되지 않은 무보강 실험체인 RCF-N 실험체는 변위비(drift ratio) 0.2 %에서 1층 기둥 하부에서 휨균열 및 전단균열이 발생하였고, 변위비 0.65 %에서 기둥 하부에서 발생된 전단균열은 폭과 길이가 증가되면서 하중 증가폭은 급격히 감소되기 시작하였다. 특히 1층 기둥 하부와 보-기둥 접합부에 집중된 전단균열은 폭과 길이가 진전되면서 양 기둥 하부의 콘크리트 피복이 박리되어 최종파괴에 이르렀으며, 균열 및 손상에 의한 피해정도는 JBDPA[15]에 의하면 붕괴수준의 피해가 발생하였다고 판단된다.

(a) RCF-N (b) RCF-BRKBF-I (c) RCF-BRKBF-E

Fig. 13. Test result of specimen RCF-N, RCF-BRKBF-I and RCF-BRKBF-E

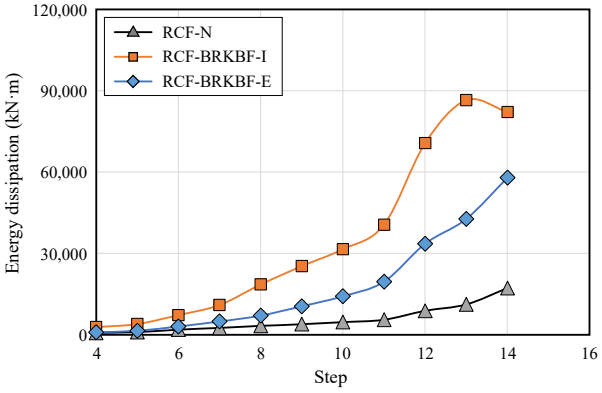
비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템이 내부 끼움형태로 설치된 실험체(RCF-BRKBF-I)는 층간변위비 0.2 %에서 1층 기둥 하단부의 초기 미세한 휨균열이 발생하였으며, 이후 기둥의 중앙부로 휨균열이 확장되었다. 전단균열의 경우 층간변위비 1.44 %에서 1층 및 2층 보에서 발생하기 시작하였으며, 붕괴방지수준(변위비 2.1 %)까지 기둥의 전단균열은 나타나지 않았다. 층간변위비 3.2 % 이후 1층 기둥 하부 콘크리트의 박락이 발생하였으며, 콘크리트 기둥에 나타난 전단균열폭은 무보강 RCF-N실험체에 비해 크지 않았다.

비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템이 외부 부착형태로 설치된 RCF-BRKBF-E는 층간변위비 0.12 %에서 1층 기둥 하단부에 초기 휨균열이 발생하였으며, 층간변위비 0.82 %에서 1층 기둥 하단부에 전단균열이 발생하기 시작하였다. 변위비 증가에 따라 균열의 폭과 길이가 증가하였고 붕괴방지수준(변위비 2.1 %) 이후 휨균열이 증가하였으나, 무보강 RCF-N 실험체와 대조적으로 소규모 이하의 균열이 발생하였다. 실험이 진행된 층간변위비 2.93 %까지 콘크리트 피복의 박락은 나타나지 않았다. 보강실험체의 경우 소규모 피해정도를 나타내어 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템을 이용한 내진보강공법의 유효성이 검증되었다고 판단한다.

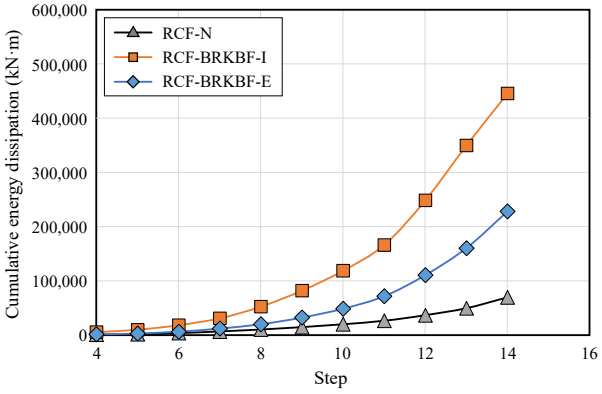
4.6 에너지소산평가

에너지소산능력(energy dissipation capacity)은 지진 발생 시 구조물에 가해지는 지진에너지를 구조체에서 흡수할 수 있는 능력으로 건축물의 내진성능을 평가함에 있어 중요한 지표가 되며, 에너지소산능력은 각 변위비의 첫 번째 사이클의 하중-변위 곡선의 면적으로 계산하였다.

본 실험의 재하단계별 산정된 에너지 소산량을 Fig. 14과 같이 그래프로 나타내었으며, 산정을 위한 그래프는 각 층별 로드셀의 합산인 액츄에이터의 하중과 변위를 적용하였다. RCF-N 실험체는 보-기둥 접합부에 최초 균열이 발생한 횡변위비 0.5 %에서 에너지 소산량이 급격히 증가하기 시작하였으며, 가력이 진행되는 동안 최대 20,005.38 kN·mm의 에너지 소산량을 나타냈었다. 비좌굴 브레이스 내진보강 프레임 시스템으로 내부 끼움형으로 보강한 RCF-BRKBF-I는 붕괴방지 레벨을 초과한 스텝 기준으로 47,342.85 kN·mm의 에너지를 소산하여 보강 전에 비해 3.65배의 에너지 소산량이 증가하였으며, 비좌굴 브레이스 내진보강 프레임 시스템을 외부 부착형태로 보강한 RCF-BRKBF-E 실험체의 경우 39,171.68 kN·mm으로 보강 전 골조에 비해 3.02배 에너지 소산량이 증가되었다. 끼움형 실험체에 비해 외부 부착형 실험체에서 낮은 에너지 소산능력을 보였으며, 이는 기존 구조체와의 구속효과차이, 편심모멘트에 의한 추가 인장력 작용으로 내력이 감소하였으며, 동일 스텝에서 가력변위 감소에 의한 것으로 판단된다.



(a) Energy dissipation



(b) Cumulative energy dissipation

Fig. 14. Comparison of energy dissipation

4.7 연성도

일반적으로 연성도는 변위연성도(displacement ductility ratio)를 의미하며, 항복 후 극한변형까지 구조물이 버틸 수 있는 정도를 나타내는 평가지표로서 Comité Euro-International du Béton에서는 식 (6)과 같이 구조물의 항복변위(Δ_y)에 대한 파괴변위(Δ_f)의 비로 측정한다. 항복변위는 실험체 최대내력의 80 %에 해당하는 내력과 하중-변위 곡선이 만나는 교점이며, 파괴변위는 실험체의 최대내력 도달 후 80 % 감소할 때의 해당하는 지점으로 산정하였다[16].

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_f}{\Delta_y} = \frac{\text{failure displacement}}{\text{yield displacement}} \tag{6}$$

여기서, μ_f: 최대내력 도달 후 80 %의 내력감소할 때의 변위
μ_y: 최대내력의 80 %의 접선과 힘-변위 이력곡선이 교차하는 지점에서의 변위

Fig. 15은 정가력방향에 대한 변위연성도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 무보강 실험체인 RCF-N 실험체는 3.05의 연성도를 보였으며, 비좌굴 브레이스 내진보강 프레임 시스템으로 내부보강한 실험체인 RCF-BRKBF-I는 5.55의 연성도를 보여 무보강 실험체보다 연성도가 증가한 것으로 분석되었다. 비좌굴 브레이스 내진보강 프레임 시스템을 외부형으로 보강한 RCF-BRKBF-E 실험체의 연성도는 2.87로 확인되어 무보강 실험체보다 연성도가 다소 낮게 나타났으나, 이는 실험체의 최종변위가 파괴변위에 도달하지 못한 것으로 확인되어 RCF-BRKBF-E 실험체의 연성도가 다소 과소평가된 것으로 판단되었다.

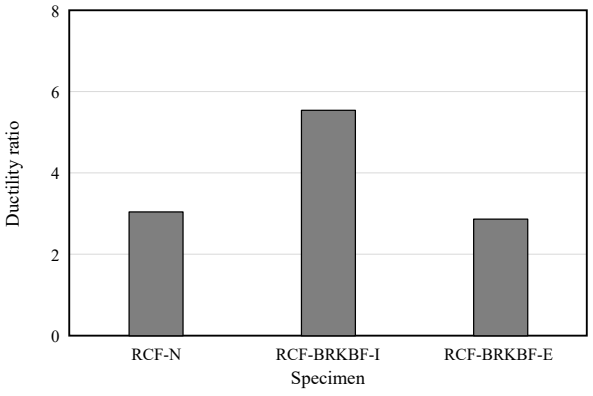


Fig. 15. Comparison of ductility ratio

5. 결 론

본 연구에서는 기존 비내진설계된 철근콘크리트 건축물의 내진보강공법으로 강도 및 연성을 증가시키기 위해 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템 내진보강공법을 제안하였다. 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템 내진보강공법의 유효성 검증을 위해 비좌굴 모서리 가새의 장치원형 실험 및 기존 비내진 상세를 갖는 저층 철근콘크리트 학교건물의 2층 골조를 대상으로 반복가력실험을 수행하였다. 실험결과는 다음과 같다.

(1) 비좌굴 모서리 가새는 코어심재의 변형률 2 %에 대해 반복가력실험결과, 영변위에서의 최대·최소하중, 각 변위비에서의 최대·최소하중, 이력곡선의 면적이 평균치의 ±15 % 이내로 확인되어 국내·외 감쇠장치 적합성기준에 만족한 것으로 확인되었다.

(2) 2층 골조 실대형실험에서 무보강 실험체인 RCF-N의 정가력 최대하중은 91.85 kN, 부가력 최대하중은 108.54 kN으로 확인되었으며, 1층 기둥의 전단균열로 인한 파괴가 발생하였다.

(3) 비좌굴 모서리 가새 프레임을 내부 끼움형으로 보강한 RCF-BRKBF-I 실험체의 경우 정가력 최대하중은 291.16 kN, 부가력 최대하중은 294.08 N으로 확인되었으며, 이는 RCF-N 실험체 대비 정가력시 3.17배, 부가력시 2.71배의 내력이 증가하여 강도증진형 내진보강법임을 확인하였다. 또한 RCF-N 실험체의 연성도는 3.05인 것에 비해 내부 끼움형 실험체는 5.55의 연성도를 보여 1.82배 연성도 증가를 보이는 것으로 확인되었으며, 내력 및 연성 모두 증가하여 지진에너지 흡수능력이 향상되었다.

(4) 비좌굴 모서리 가새 프레임을 외부 부착형으로 보강한 RCF-BRKBF-E 실험체의 경우 정가력 최대하중은 227.93 kN, 부가력 최대하중은 228.57 N으로 확인되어 RCF-N실험체에 비해 최대 2.48배의 내력이 증가한 것으로 확인되었다. 연성도는 RCF-N과 유사하였으나, 이는 가력중단으로 인한 파괴변위(최대내력 이후 80 %)의 과소평가에 따른 것으로 판단된다.

(5) BRKBF 내진보강법은 기존 건축물에 내부의 끼움형 및 외부의 부착형으로 설치하여 기존 거주자의 생활이 가능하면서 개구부를 확보할 수 있다. 특히, 내진성능평가에 따른 보강량을 산정하여 비내진상세를 갖는 국내 저층 철근콘크리트 건물에 강도 및 연성증가에 용이한 내진보강공법이라고 판단되며, 그 유효성은 실험 실험체에 대한 반복가력실험을 통해 검증되었다고 판단된다. 다만, 향후 연구에서는 본 BRKBF를 적용하여 기존건축물의 내진보강평가를 위한 비좌굴 모서리 가새의 수치해석모델에 대한 제안이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 한국연구재단 신진연구자 지원사업 과제(NRF-2020R1C1C1005779)의 연구결과입니다.

참고문헌(References)

[1] Architectural Institute of Korea (2018) *Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by Earthquakes in Gyoungju and Pohang*, AIK, Korea (in Korean).

[2] Ministry of the Interior and Safety (2018) *White Paper on Earthquake in Pohang, 2017*, MOIS, Korea (in Korean).

[3] Architectural Institute of Korea (2019) *Seismic Building Design Code and Commentary*, Kimoondang, Korea (in Korean).

[4] Lee, B.-G., Hwang, D.-S., Choi, Y.-C., Kim, Y.-S., and Lee, K.-S. (2019) Seismic Capacity Evaluation of Full-Size Two-Story R/C Frame Strengthened with HSWF External Connection Method By Pseudo-Dynamic Test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.31, No.1, pp.89-97 (in Korean).

[5] Park, S.-H., Oh, K., Kim, S.-H., and Lee, K. (2021) Seismic Performance Evaluation of RC Frames Reinforced with Steel-Plate Concrete System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.2, pp.119-129 (in Korean).

[6] Park, B.T., Kang, J.W., Kim, Y.S., and Lee, J.H. (2020) Analysis of Reinforcing Effect Through Frame Test of Hybrid Damper Combining Steel Slit and Rotational Friction Damper, *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, AIKRA, Vol.22, No.6, pp.91-98 (in Korean).

[7] Shin, H.-M., Lee, H.-D., Lee, S.-W., and Shin, K.-J. (2020) Shaking Table Test of Reinforced Concrete Frame with Friction Damper Using Short-Cycle Response, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.3, pp.169-178 (in Korean).

[8] Ministry of Education (2019) *Manual for Seismic Performance Evaluation and Reinforcement of School Facilities*, MOE, Korea (in Korean).

[9] Lin, P.-C., Tsai, K.-C., Wang, K.-J., Yu, Y.-J., Wei, C.-Y., Wu, A.-C., Tsai, C.-Y., Lin, C.-H., Chen, J.-C., Schellenberg, A.H., Mahin, S.A., and Roeder, C.W. (2012) Seismic Design and Hybrid Tests of a Full-Scale Three-Story Buckling-Restrained Braced Frame Using Welded End Connections and Thin Profile, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.41, No.5, pp.1001-1020.

[10] Park, K.S., Lee. S.S., Hong, S.Y., and Bae, K.W. (2014) Development of Buckling Restrained Brace Laterally Supported by Semicircular Springs, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 26, No.6, pp.549-558 (in Korean).

[11] Wu, A.-C., Lin, P.-C., and Tsai, K.-C. (2014) High-Mode Buckling Responses of Buckling-Restrained Brace Core Plates, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Vol.43, No.3, pp. 375-393.

[12] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Steel Structure Design Code (Load and Resistant Factored Design)* (KDS 14 31 60: 2017), Korea (in Korean).

[13] American Society of Civil Engineers (2017) *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (ASCE/SEI 41-17), USA.

[14] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, and Korea Infrastructure Safety Corporation (2019) *Seismic Performance Evaluation Method for Existing Facilities (buildings)*, MOLIT and KISC, Korea (in Korean).

[15] Japan Building Disaster Prevention Association (2017) *Guideline for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Building*, JBDPA, Japan (in Japanese).

[16] Comité Euro-International du Béton (1996) *RC Elements Under Cyclic Loading: State of the Art Report* (CEB 1996), Thomas Telford, UK.

요 약 : 본 연구에서는 기존 시스템 보강공법 중 강도 및 강성증진형 내진보강법의 단점을 보완·개선할 수 있는 새로운 내진보강공법인 비좌굴 모서리 가새형 프레임 시스템(buckling restrained knee braces-type frame, BRKBF) 내진보강공법을 제안하였다. BRKBF 내진보강 시스템은 기존 철근콘크리트 건축물의 연성 및 내력확보에 용이하도록 내진보강프레임에 비좌굴 모서리 가새를 적용한 내진보강공법으로 본 연구에서는 BRKBF 공법의 유효성을 검증할 목적으로 BRKB에 대한 장치원형 시험과 비내진 상세를 갖는 기존 철근콘크리트 학교건물을 모사한 2층 골조 실험체를 대상으로 반복가력하였다. 그 결과, BRKB는 국내 감쇠장치 기준에서 제시한 적합성을 만족하였으며, 2층 골조 실험에서는 내력 및 연성, 에너지소산능력이 크게 증가한 것으로 확인되어 본 연구에서 개발한 BRKBF 내진보강공법의 유효성이 검증되었다고 사료된다.

핵심용어 : 비좌굴 모서리 가새형 프레임, 내진보강, 내력, 연성, 에너지 소산