

# 좌굴방지링으로 횡지지된 건식형 좌굴방지가새 내진보강에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on Seismic Reinforcement of Dry Type Buckling Restrained Braces Laterally Using Buckling Restrained Rings

이선재<sup>1)</sup> · 문희숙<sup>2)</sup> · 박병태<sup>3)\*</sup>

Lee, Seon Jae<sup>1)</sup> · Moon, Hee Suk<sup>2)</sup> · Park, Byung Tae<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>단국대학교 건축공학과 박사과정, <sup>2)</sup>메트로티엔씨(주) 내진기술연구소 선임연구원, <sup>3)</sup>메트로티엔씨(주) 내진기술연구소 연구소장 공학박사

<sup>1)</sup>Ph.D. Student, Department of Architectural Engineering, Dankook University, <sup>2)</sup>Researcher, Technical Research Center, Metro T&C Co., <sup>3)</sup>Ph.D., CTO, Technical Research Center, Metro T&C Co.

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

This study is conducted to verify the seismic reinforcement effects of internally inserted buckling-restrained braces supported laterally by buckling-restrained rings for the seismic reinforcement of existing reinforced concrete buildings with non-seismic details. First, to evaluate the performance of KDS, the hysteretic characteristics of buckling-restrained braces are verified, and it is discovered that they satisfy the conformance criteria of the displacement-dependent damping device. Three full-scale, two-story reinforced concrete framework specimens are prepared to verify the seismic reinforcement effects, and the proposed buckling-restrained braces are bolstered with single diagonal and V-shaped braces to be compared with non-reinforced specimens. By performing a comparison with non-reinforced specimens that present intensive shear cracks at the bottom of first-floor columns, it is revealed that the maximum load and energy dissipation of specimens reinforced with the proposed buckling restrained braces, in which the structural damage extends evenly throughout the system, are approximately 4 and 6.2 times higher, respectively, which proves the effectiveness of the proposed seismic reinforcement method.

**Key words:** Buckling-restrained braces, Buckling-restrained rings, Non-seismic details, Seismic reinforcement, Full-scale

## 1. 서론

최근들어 전 세계적으로 대규모 지진 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이에 따른 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 특히, 국내는 2016년 규모 5.8의 경주지진과 2017년 규모 5.5의 포항지진이 발생하여 주로 학교시설, 공동주택, 필로티 구조물에서 지진으로 인한 피해가 발생하였으며, 특히, 필로티 구조물은 약층(Soft Story)에서 기둥의 전단파괴가 나타나, 여전히 국내 내진보강사업에 대한 필요성을 증대시키는 계기가 되었다[1-3].

한편, 국내에서는 1988년 내진설계법이 도입되어 지상 6층 이상, 100,000 m<sup>2</sup> 이상의 건축물을 대상으로 내진설계를 실시하였으며, 지속적인 개정을 통해 2005년부터는 지상 3층 이상으로 확대, 2017년에는 지상 2층 이상, 200 m<sup>2</sup> 이상 건축물에 대해서 의무적으로 내진설계를 실시하도록 규정하

고 있다[3]. 하지만, 2020년말 기준으로 국내 공공건축물의 내진확보율은 44.9%, 학교시설물은 55.8%에 불과해 여전히 지진발생시 막대한 피해가 예상된다[4]. 이러한 부족한 내진성능을 향상시키기 위한 방법 중 가새골조 시스템은 구조물에 작용하는 수평하중을 가새의 축방향 강성으로 저항함으로써 기둥의 수평 전단력을 분담시킨다[5]. 그러나 가새의 압축력이 좌굴하중 이상이 되면, 가새에 좌굴이 발생하여 내력이 크게 저하되면서 구조물은 불안정한 거동을 보이기 때문에 이를 보완하기 위한 좌굴방지가새(Buckling restrained brace)가 개발되었다. 연구의 시작은 Yoshino에 의해 가장 먼저 수행되었으며, 철근콘크리트 패널로 감싸고 있는 평면 강관과 그 사이에 비부착 재료(Unbonding material)를 삽입하여 실험하였다[6]. 그 이후 현재 보편적으로 사용하는 좌굴방지가새인 콘크리트 충전 강관 내부에 강재코어를 이용한 형태가 Watanabe에 의해 제안되었다[7]. 좌굴방지가새는 충전재가 주입된 강관튜브에 연성능력이 뛰어난 철골 심재를 삽입한 형태로 철골 심재와 콘크리트 충전재 사이에 축력이 전달되지 않도록 비부착 물질을 사용하여 철골 심재의 축력이 보강재에 전달하는 것을 최소화할 수 있게 해준다[8]. Fig. 1과 같이 내부 충전은 일반적으로 모르타르 및

\*Corresponding author: Park, Byung Tae

E-mail: seismic119@gmail.com

(Received March 22, 2022; Revised April 25, 2022; Accepted April 26, 2022)

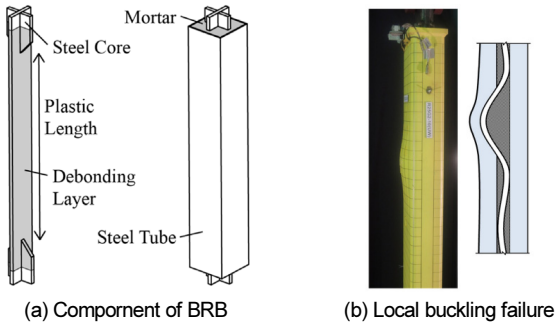


Fig. 1. Typical buckling restrained brace[9]

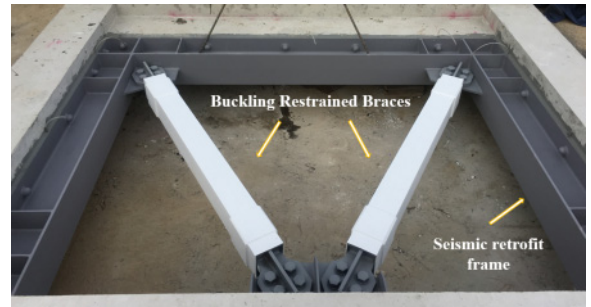


Fig. 2. Buckling restrained braced frames

콘크리트를 사용하는 습식형으로 콘크리트의 타설불량, 제품의 중량증가, 제작효율의 저하로 인해 공사비가 증가하기 때문에 시공성이 저하된다는 단점이 있다[9]. 따라서 이러한 습식형 좌굴방지가새의 단점을 보완하고자 좌굴방지링을 코어심재의 구속요소로 한 좌굴방지가새 내진프레임 시스템 (Buckling restrained brace frame system, BRBFS) 공법을 제안하였다. 제안된 공법은 건식형 좌굴방지가새이기 때문에 콘크리트 타설에 따른 문제점이 없고 공기단축에 효과적이며, 강재의 강성을 이용하여 국내 저층콘크리트 건축물 보강에 효과적이다.

본 연구에서는 좌굴방지링으로 지지된 건식형 좌굴방지가새에 대한 이력특성을 확인하고, 국내 학교건축물을 모사한 2층 1스팬의 골조실험체에 좌굴방지가새 내진프레임을 대각형 및 V형으로 설치하여 보강되지 않은 무보강 골조와의 파괴형상, 강성 및 에너지소산능력 등에 대해 비교·분석하고자 하였다.

## 2. 좌굴방지가새 내진프레임 시스템

### 2.1 좌굴방지가새 내진프레임의 구성

Fig. 2와 같이 좌굴방지가새 내진프레임은 내진보강프레임과 좌굴방지링으로 횡지된 좌굴방지가새의 결합으로 구성된다. 내진보강프레임은 기존구조체와 앵커로 접합되어 횡력발생시 기존 구조체와 일체화 거동하면서 좌굴방지가새에 축방향으로 변형을 전달하게 된다. 일반 가새의 압축력 거동시 발생하는 좌굴현상이 좌굴방지가새에서는 코어심재의 고차모드 좌굴로 인해 인장강도 수준으로 향상됨에 따라 기존구조체는 강성이 증대되고, 압축 및 인장영역 거동에 의한 소성변형이 에너지를 소산시켜 지진에 의한 구조물의 피해를 최소화할 수 있다.

좌굴방지가새는 Fig. 3과 같이 코어 심재와 외부 케이싱, 좌굴방지 고정링으로 구성되어 있다. 외부케이싱은 ㄱ형강에 좌굴방지 고정링을 용접한 뒤 코어 심재를 배치 후 상·하 케이싱을 용접 접합하여 축방향하중에 대해 인장뿐만 아니라 압축에 대해서도 성능을 발휘하도록 구성하였다. 이때 코어 심재와 좌굴방지 고정링 사이에는 서로 부착되지 않도록 이격간격을 두어 코어심재의 수축(Contraction)과 신장(Elongation) 시 외부 케이싱에 전단력으로 전달되는 것을 방지하도록 하였으며, 코어심재로부터 좌굴방지링으로 전달되는 접촉력(N)을 고려하여 설계되었다. 본 실험에 적용한 좌굴방지가새의 코어심재와 좌굴방지링 사이의 간격은 두께 2 mm의 부틸고무를 적용하여 고차모드형 좌굴이 되도록 하였다[10-11].

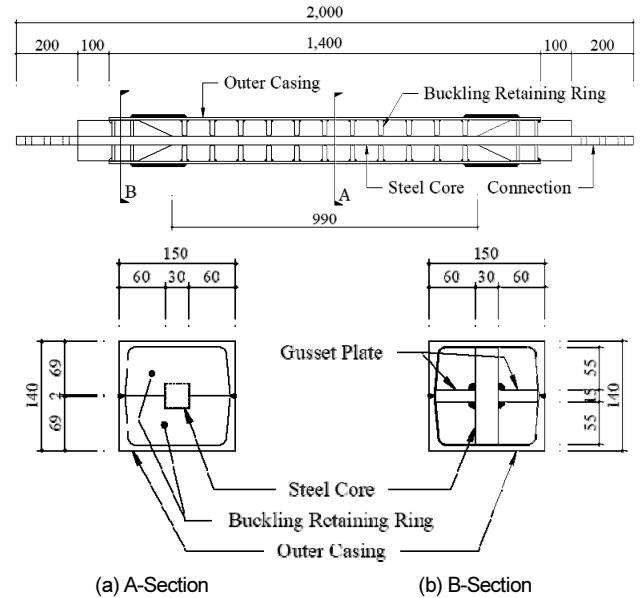


Fig 3. Configuration of BRB

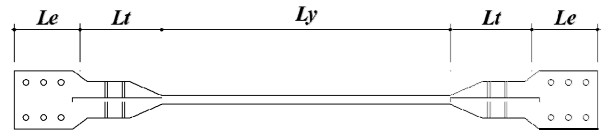


Fig. 4. Details of steel core

Fig. 4의 코어심재는 축하중에 항복되도록 설계되는 구속 항복구간(Ly), 면적이 연속적으로 증가되면서 구속된 항복구간의 탄성 영역을 확장시키는 구속 비항복구간(Lt), 골조의 접합을 위한 비구속 비항복구간(Lc)으로 총 세구간으로 구분된다.

### 2.2 좌굴방지가새의 설계

건식형 좌굴방지가새의 코어심재는 압축력하에서 국부좌굴을 방지하기 위해 좌굴방지링으로 횡지되며, 코어심재의 구속 항복구간을 제외한 비항복구간, 케이싱부분은 변형이 발생하지 않도록 설계된다. 코어심재는 균일한 응력을 부담하는 것을 기반으로 설계하며 항복력 Py, 인장력 Tmax 및 코어의 최대압축력 Cmax는 아래 식 (1)~(3)에 의해 계산된다.

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

$$T_{max} = R_t F_{ust} A_{st} \quad (2)$$

$$C_{max} = R_y P_y \quad (3)$$

여기서,  $F_{yst}$ 는 코어심재의 항복응력,  $A_{st}$ 는 코어심재의 단면적,  $F_{ust}$ 는 코어심재의 인장응력이다.  $R_y$  및  $R_t$ 는 강재의 설계기준강도에서 기대강도로 변환하는 계수로 건축물 강구조 내진설계기준(KDS 14 31) 의해 정의된 계수를 따른다[12].

강재코어의 항복변형은 강재의 탄성계수  $E$ 를 고려할 때 후크의 법칙을 따른다.

$$\delta_{y, BRB} = \frac{P_y L_B}{EA_{st}} \quad (4)$$

여기서,  $L_B$ 는 코어심재의 구속되어 있는 순수 심재의 길이이다. 순수 심재의 길이는 좌굴방지가새의 허용변위를 결정하는 요소로 성능기반해석에 적용하는 평가기준지진에 의한 가새의 최대변위 응답에 해당하는 변위에 저항할 수 있도록 설계해야 하며, 좌굴방지가새의 최대변형은 식 (5)에 의해 계산된다.

$$\delta_{max, BRB} = u \cdot \delta_{y, BRB} \quad (5)$$

여기서,  $u$ 는 실험에 기초한 강재코어의 연성이며, 강재코어재료에 사용되는 일반 구조용 압연강재 SS275의 최소연신율은 18~23, 용접 구조용 압연강재 SM275의 최소연신율은 18~24, 기계 구조용 탄소강재 SM35C의 최소연신율은 22이다[12].

### 2.3 좌굴방지가새의 실험계획

본 연구에서는 비탄성영역에서 좌굴방지가새의 이력특성을 확인하기 위해 KDS 41 17 00 및 MOE 2021의 감쇠장치 기준으로 Fig. 5와 같이 반복가력실험을 수행하였다[3, 5]. 실험체의 크기는 Fig. 3과 같으며, 좌굴방지링과 코어심재사이는 마찰력 감소 및 고차모드 형성에 유리하도록 부틸 고무소재를 부착하였다. 실험체의 최대변형은 코어심재의 한계변형률을 2%로 가정하여 20 mm로 하였으며, KDS 41 17 00 및 MOE 2021에서 변위의존형 감쇠장치에서 권하는 표준재하 방식을 적용하였다. 따라서 6.6 mm 10회, 13.4 mm 5회, 20 mm 3회 및 5.0 mm 10회, 10 mm 5회, 20 mm 3회에 대해 반복가력을 실시하였다.

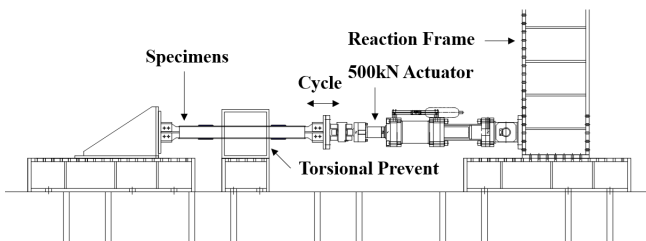


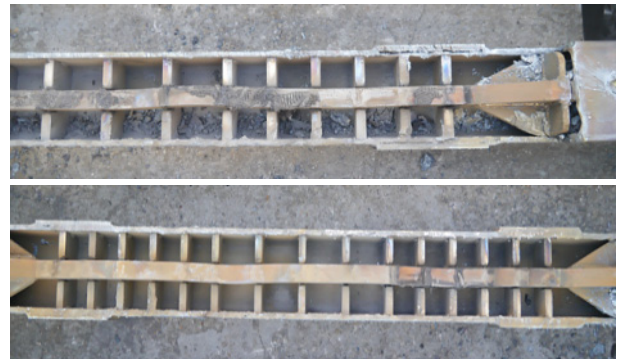
Fig. 5. Specimens test set up

### 2.4 좌굴방지가새의 실험결과

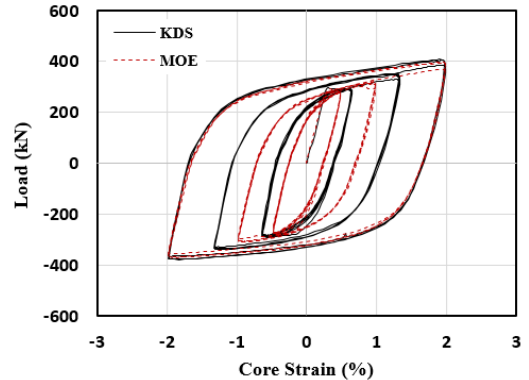
실험결과, Fig. 6(a)와 같이 코어심재의 고차모드형 좌굴형상이 확인되었으며, Fig. 6(b)와 같이 가력이 진행되는 동안 강재코어의 목표변형률인 2% 변형률 동안 하중의 저감없이 안정적인 이력거동을 보이는 것으로 확인되었다. KDS 41 17 00 가력에 의한 실험체의 최대 가력하중은 정(+)가력 407.7 kN, 부(-)가력 379.85 kN였으며, 가력에 따른 실험체의 원점, 최대·최소 변위에서의 하중비교결과에 대해 Table 1에 나타내었다. MOE 2021 가력에 의한 실험체의 최대 가력하중은 정(+)가력 396.12 kN, 부(-)가력 370.93 kN인 것으로 확인되었다.

KDS 41 17 00 및 MOE 2021에서는 변위의존형 감쇠장치에 대해 방향별 최대·최소하중(강성), 원점에서의 최대·최소하중, 이력곡선의 면적등에 대해 모든 실험에서 평균치의 ±15%이내가 되도록 요구하고 있다.

좌굴방지가새의 최대하중은 평균치의 4.66%, 최소하중은 2.22%이내,



(a) Deformation behavior in higher mode



(b) Load-core strain relationships for BRB

Fig. 6. Test result of specimens

Table 1. Test results

KDS 41 17	Force at zero disp.	Force at max disp.	Force at min disp.	Hysteresis curve area (kN·mm)
	Max.(min)	Max.(min)	Max.(min)	
0.33 times	220.94 kN (-246.01 kN)	295.54 kN (288.75 kN)	-291.89 kN (-285.97 kN)	4,012.74 (3,718.22)
0.67 times	285.56 kN (-289.63 kN)	351.19 kN (329.05 kN)	-340.77 kN (-329.72 kN)	12,085.27 (11,443.57)
1.00 times	331.48 kN (-330.37 kN)	407.7 kN (386.05 kN)	-379.85 kN (-366.69 kN)	22,067.8 (20,982.11)

영변위에서의 최대하중은 평균치의 2.28%, 최소하중은 평균치의 4.26%, 이내, 모든 구간에서의 이력곡선의 면적은 평균치의 최대 4.66% 이내로 검토되어 실험체의 적합성(평균치의 15%이내)은 확보된 것으로 확인되었다.

### 3. 2층 실물 골조실험

#### 3.1 좌굴방지가새 내진프레임 시스템의 실험계획

본 실험에서는 좌굴방지가새 내진프레임 시스템의 내진성능을 평가하기 위해 실물과 유사한 크기의 2층 철근콘크리트 골조에 내진보강을 실시하여 정적주기하중실험을 실시하였다. 보강효과를 확인하기 위해 무보강 실험체와 보강된 실험체에 대해 균열 및 파괴양상, 하중-변위 이력곡선, 강성, 에너지소산면적을 산정하여 비교·분석하였다.

실험에 사용한 골조는 내진설계기준이 도입되기 이전에 준공된 비내진 상세를 가진 학교 건축물을 대상으로 하였다. Fig. 7은 1980년대 학교 건축물의 표준도면이며, 실험에 사용한 골조 실험체는 기둥, 보로 구성된 2층 골조로 층고는 실험장소의 여건을 고려하여 2.85 m, 설계용 콘크리트 강도는 21 MPa로 계획하였다.

2층 철근콘크리트 골조실험체의 단면정보는 Table 2에 정리하였으며, Fig. 8(a)와 같이 무보강 실험체(RCF-N)를 기준으로 제안된 좌굴방지가새의 적용수량 및 형태에 따라 구분하였다. 보강실험체는 무보강 실험체에

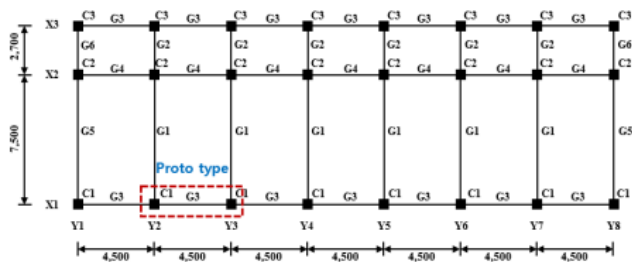
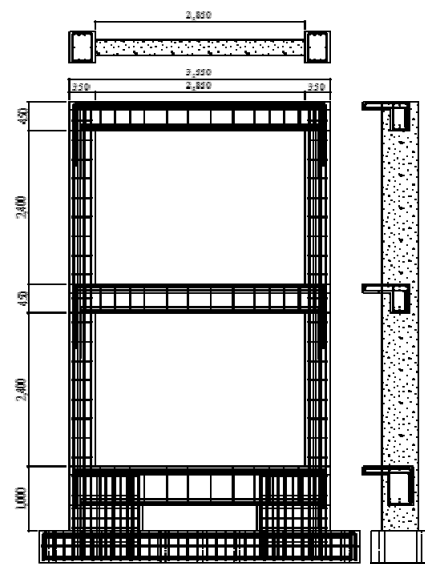


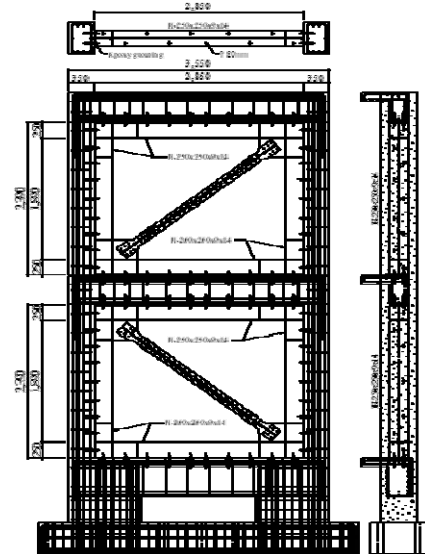
Fig. 7. Planar view of ground floor (1F) of school building

Table 2. Specimens of RC frame

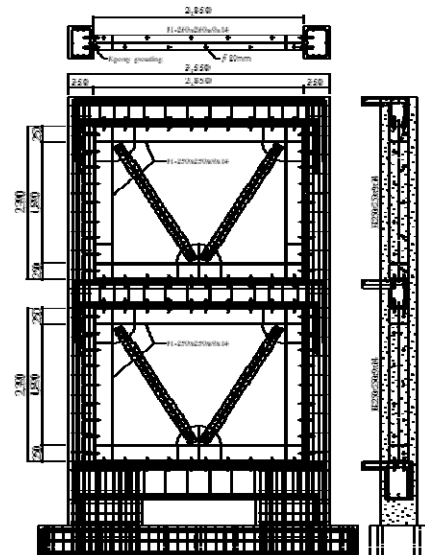
Specimens	RCF-N	RCF-RBDI	RCF-RBV	
Column	B×D	350×500 mm	350×500 mm	350×500 mm
	Main bar	8-D19 2-D16	8-D19 2-D16	8-D19 2-D16
	Hoop	D10@300	D10@300	D10@300
Beam (2F,3F)	B×D	250×450 mm	250×450 mm	250×450 mm
	Main bar	12-D22	12-D22	12-D22
Beam (1F)	Stirrup	D10@200	D10@200	D10@200
	B×D	350×600 mm	350×600 mm	350×600 mm
	Rebar	12-D22	12-D22	12-D22
Hoop	D10@200	D10@200	D10@200	
Failure mode	Column shear failure mode			
H-Beam	-	H-250×250×9/14		
BRBF	-	Diagonal Type	V Type	



(a) RCF-N Specimen



(b) RCF-RBDI Specimen



(c) RCF-RBV Specimen

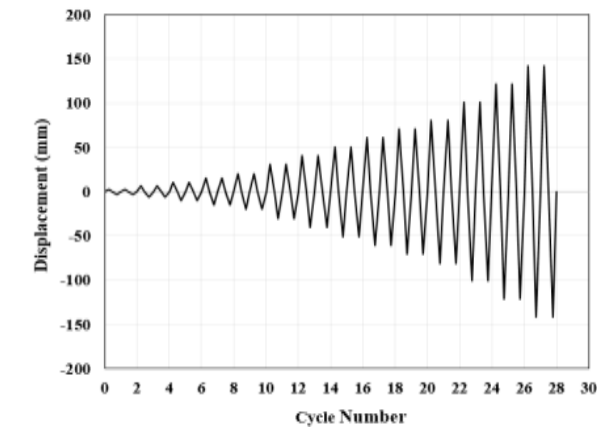
Fig. 8. Specimens for RC frame loading test

제안된 좌굴방지개새를 각 층마다 대각선으로 1개씩 총 2개가 설치된 실험체(RCF-RBDI)와 V형 개새로 배치한 실험체(RCF-RBV)이다. 내진보강 실험체는 좌굴방지개새가 내부 끼움형으로 계획하였으며, 무보강 실험체에 직접 접합방식으로 일체화 하였다.

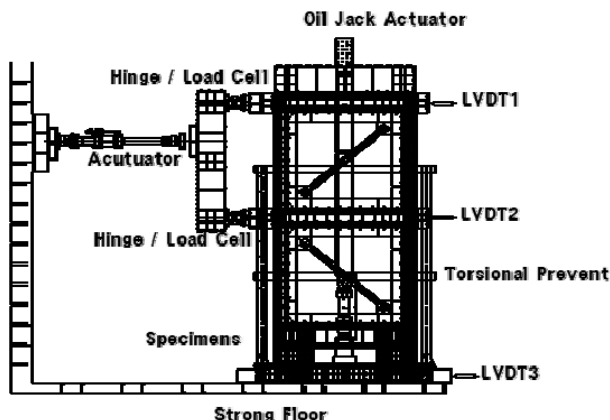
### 3.2 좌굴방지개새 내진프레임 시스템 실험방법

본 실험은 무보강 골조와 내진 보강된 골조의 실험을 진행하고 결과값을 비교·분석하였다. 실험체는 Fig. 9(a)와 같이 최소 횡변형량( $\Delta_0$ )을 3.04 mm로 가정하여 각 단계별 2사이클씩 총 14단계로 증분가력 하였으며, 실험체의 내력이 충분히 감소될 때까지 실험을 진행하였다.

실험체를 가력하기 위하여 Fig. 9(b)와 같이 실험체를 설치하였다. 가력은 2,000 kN 용량의 유압 서브 액츄에이터 1개를 사용하였으며, 1층과 2층의 변위가 각각 1:2가 되도록 핀으로 구성된 보의 상단부 기준으로 1/3 지점을 가력하였다. 실험체의 비틀림 방지를 위하여 H형강 프레임으로 구성된 가이드를 설치하였으며, 기둥 1개의 지배면적에 따른 전체 축력을 산정한 1,000 kN을 양쪽 기둥에 분배하여 각각 500 kN(축력비 0.136)을 받도록 하였다. 또한, 실험체의 변형을 확인하기 위하여 기준관, 2층 바닥, 3층 바닥위치에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 각각 1개씩 설치하였으며, 좌굴방지개새에도 LVDT를 부착하여 좌굴방지개새의 변위를 확인할 수 있게 하였다.



(a) Cycle loading history



(b) Specimen test set-up

Fig. 9. Test setup and loading history

### 3.3 하중-변위 관계

2층 실물골조 실험에 대한 하중-변위 이력곡선은 Fig. 10와 같으며, Table 3에 정·부방향에 대한 항복내력 및 변위에 대해 정리하였다.

무보강 실험체(RCF-N)의 최대내력은 1층의 경우 정가력 91.85 kN, 부가력 108.54 kN, 2층의 경우 정가력 182.01 kN, 부가력 165.16 kN으로 확인되었으며, 최대내력 이후 1층 기둥 하부단부에서 콘크리트가 다수 탈락되면서 대상골조는 붕괴가 되었다.

좌굴방지개새를 대각선으로 1개씩 배치되어있는 실험체(RCF-RBDI)의 최대내력은 1층의 경우 정가력 395.16 kN, 부가력 440.34 kN, 2층의 경우 정가력 726.98 kN, 부가력 814.33 kN으로 확인되었으며, 이때 1층의 최대 층간변위비는 1.9%인 것으로 확인되었다. 최대내력 이후 실험체의 균열은 전체로 확장되었고, 1층의 층간변위비 2.49% 이후에 하중이 급격

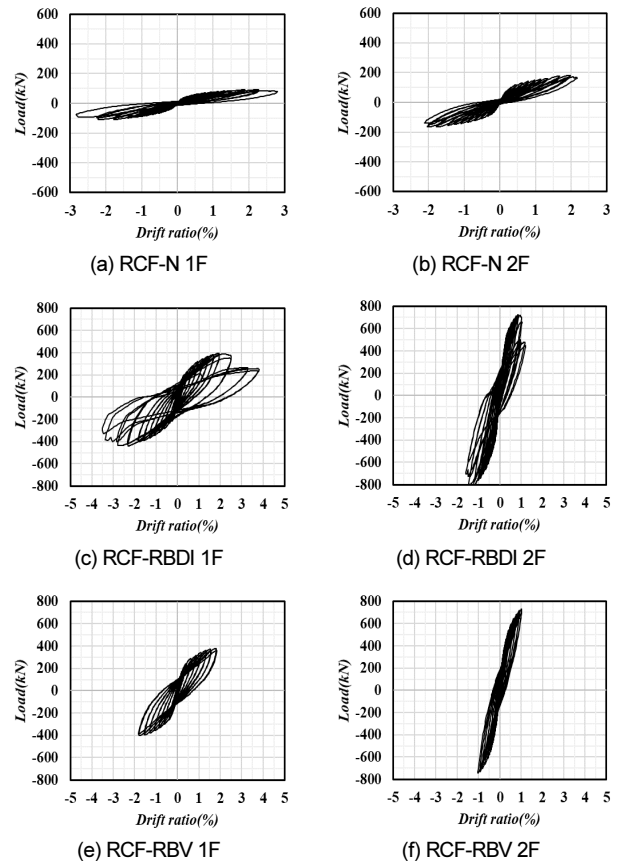


Fig. 10. Relations of load-drift ratio

Table 3. Comparison of response strength and displacement

Specimens		Positive (+)		Negative (-)	
		Py (kN)	$\delta_y$ (mm)	Py (kN)	$\delta_y$ (mm)
RCF-N	1F	91.85	80.10	108.54	80.76
	2F	182.01	62.00	165.16	60.29
RCF-RBDI	1F	395.16	108.38	440.34	100.08
	2F	726.98	34.69	814.33	45.57
RCF-RBV	1F	379.32	52.35	402.94	51.90
	2F	730.26	29.05	741.29	29.39



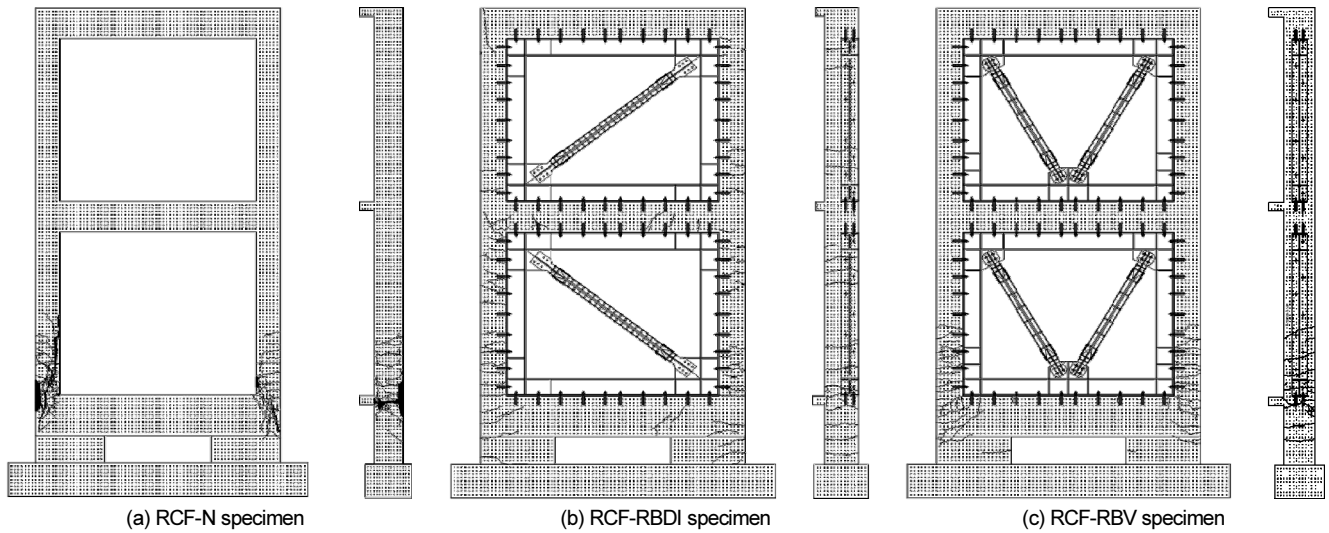


Fig. 11. Failure shape of specimens

히 감소되는 것을 확인하였다. 좌굴방지가새를 V형 가새로 배치한 실험체 (RCF-RBV)의 최대내력은 1층의 경우 정가력 379.32 kN, 부가력 402.94 kN, 2층의 경우 정가력 730.26 kN, 부가력 741.29 kN으로 확인되었으며, 이때 1층의 최대 층간변위비는 1.84%인 것으로 확인되었다. 최대내력 이후 RCF-RBDI와 동일하게 균열이 전제로 확장되었고, 1층의 최대 층간변위비 1.84%까지 하중감소가 나타나지 않아 안정적인 이력 그래프 형태를 보이는 것을 확인하였다. RCF-RBDI 실험체와 RCF-RBV 실험체의 최대 내력은 유사하였으며, 이는 가력 액츄에이터의 허용용량(2,000 kN) 중 부가력의 허용용량이 약 1,100 kN임에 따라 RCF-RBV 실험체의 변위를 최대내력 도달 후 증가시키지 못하였기 때문이며, 실험체의 하중-변위 관계 및 좌굴방지가새의 축방향 최대변위가 13.93 mm임을 통해 내력의 여유도는 있는 것으로 판단되었다. 결과적으로 RCF-RBDI의 경우 무보강 실험체에 비해 내력이 약 4.05~4.30배 증가하였으며, RCF-RBV의 경우 무보강 실험체에 비해 내력이 3.71~4.13배 증가함을 보임에 따라 충분한 내력향상 효과를 보이는 것으로 분석되었다.

### 3.4 균열 및 파괴양상

각 실험체의 최종파괴 형태는 Fig. 11에 나타내었으며, 손상정도는 기존 시설물(건축물) 내진성능평가요령(2021), 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼(2021)의 구성요소 손상정도와 육안에 근거한 손상도 평가법을 제시하고 있는 일본건축방재협회의 지진피해 건축물의 피해도 구분 판정기

준 및 복구기술지침을 따라 정리하였다[13-15].

좌굴방지가새 내진프레임이 설치되지 않은 무보강 실험체인 RCF-N 실험체는 변위비(Drift ratio) 0.2%에서 1층 기둥 하부에 휨균열 및 전단균열이 발생하였고, 변위비 0.65%에서 기둥 하부에 발생한 전단 균열의 폭과 길이가 증가되면서 하중 증가폭이 급격히 감소되기 시작하였다. 특히 1층 기둥 하부와 보-기둥 접합부에 집중된 전단균열의 폭 및 길이가 증가되면서 양 기둥 하부 콘크리트 피복이 탈락되었으며, 접합부 기둥 철근의 좌굴 및 후프근의 파단이 육안으로 확인되어 붕괴수준의 피해가 발생하였다고 판단된다.

좌굴방지가새 한 개가 대각선으로 배치되어있는 RCF-RBDI 실험체는 층간변위비 0.25%에서 1층 기둥 하부에 미세한 휨균열이 발생하였으며, 변위비 0.75%에서 1층 기둥 하부의 전단균열이 발생하기 시작하면서 1층 기둥의 하단부 및 상단부의 휨균열 및 전단균열이 발생하였다. 변위비 증가에 따른 실험체의 균열은 전체 골조로 확산되었으며, 1층 기둥하부 콘크리트의 탈락이 발생한 무보강 실험체와 달리 콘크리트의 탈락은 나타나지 않았다.

좌굴방지가새를 V형 가새로 배치한 RCF-RBV 실험체는 층간변위비 0.25%에서 1층 기둥 하단부에 초기 휨균열이 발생하였다. 변위증가에 따른 균열증가는 1층 기둥에서 주로 휨균열의 형태로 나타났으며, 콘크리트의 박락은 나타나지 않았다. 무보강 실험체와 대조적으로 보강실험체는 보수 한계 레벨수준이하의 손상도를 보임에 따라 좌굴방지가새 내진프레임 시스템을 이용한 내진보강공법의 유효성이 검증되었다고 판단된다.

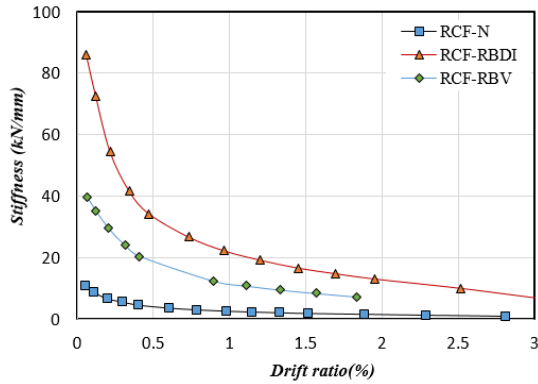


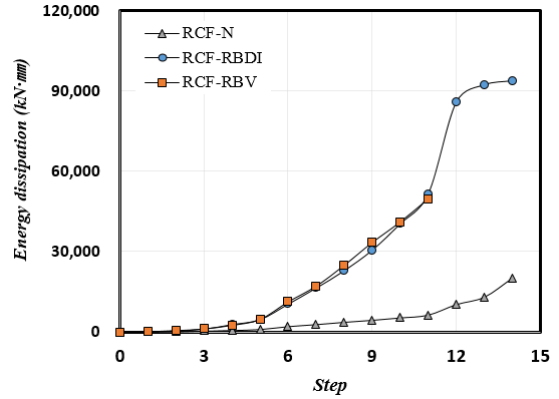
Fig. 12. Stiffness reduction comparison

### 3.5 강성변화 및 강성저하 비교

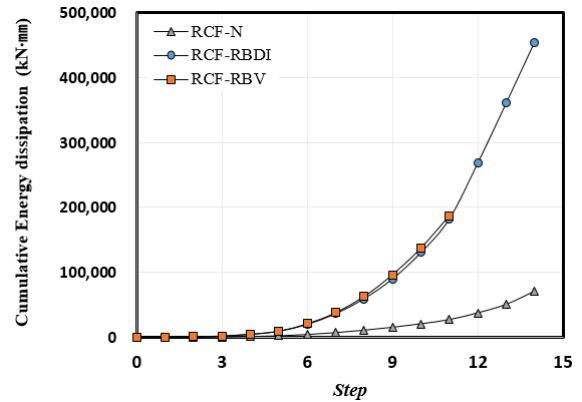
각 실험체별 강성변화를 Fig. 12에 나타냈으며, 무보강 실험체인 RCF-N의 1층골조부의 정가력 초기강성은 11.07 kN/mm, 기둥의 휨균열이 증가되기 시작하는 변위비 0.4%에서의 강성은 4.67 kN/mm, 변위비 1.88%에서의 강성은 1.7 kN/mm으로 나타났다. 좌굴방지가새를 1개 설치한 RCF-RBDI 실험체의 1층 골조부의 초기강성은 86.02 kN/mm, 변위비 0.47%에서의 강성은 34.31 kN/mm, 변위비 1.96%에서의 강성은 13.05 kN/mm으로 나타나, 무보강 실험체 대비 초기강성은 약 7.77배, 변위비 1.84%에서의 강성은 약 7.68배로 높은 것으로 분석되었다. 좌굴방지가새를 V형으로 2개 설치한 RCF-RBV 실험체의 1층골조부의 정가력 초기강성은 39.56 kN/mm, 변위비 0.41%에서의 강성은 20.47 kN/mm, 변위비 1.84%에서의 강성은 7.25 kN/mm으로 나타나 무보강 실험체 대비 초기강성은 3.57배, 변위비 1.84%에서의 강성은 약 4.27배 향상되는 것으로 분석되었으며, RCF-RBDI 실험체가 RCF-RBV 실험체와 비교하여 가새의 축방향력 전달에 유리함에 따라 더 높은 강성을 유지한 것으로 판단된다.

### 3.6 에너지소산평가

에너지 소산능력(Energy dissipation capacity)은 지진 발생 시 가해지는 지진에너지를 구조체에서 흡수할 수 있는 능력으로 일반적으로 건축물의 내진성능을 평가함에 있어 중요한 지표가 되며, 에너지 소산 능력은 각 층별 로드셀의 합산인 액츄에이터의 하중-변위 곡선의 면적으로 적용하였다. 각 실험체의 에너지소산 및 누적에너지소산은 Fig. 13에 정리하였다. RCF-N 실험체는 보-기둥 접합부에 최초 균열이 발생한 횡변위비 0.5%에서 에너지 소산량이 급격히 증가하기 시작하였으며, 8 Step 기준으로 2,558.22 kN·mm의 에너지소산량을 나타냈으며, 가력이 진행되는 동안 최대 20,005.38 kN·mm의 에너지 소산량을 나타내었다. 보강실험체인 RCF-RBDI와 RCF-RBV 실험체는 각각 8스텝을 기준으로 각각 22,965.23 kN·mm, 24,932.73 kN·mm의 에너지를 소산하여 보강 전에 비해 각각 6.22배, 6.75배의 에너지 소산량이 증가한 것으로 확인되었으며, 가력 액츄에이터의 부가력 용량부족으로 RCF-RBV 실험체의 실험이 중단된 11 Step 기준으로 보강실험체의 에너지소산면적은 각각 51,690.01 kN·mm, 49,755.57 kN·mm으로 나타나 두 실험체가 유사한 것으로 분석되었다.



(a) Energy dissipation



(b) Cumulative energy dissipation

Fig. 13. Energy dissipation comparison

## 4. 결론

본 연구에서는 기존 비내진 설계된 철근콘크리트 건축물의 내진보강공법으로 강도 및 연성을 증가시키기 위해 좌굴방지링으로 횡지진된 건식형 좌굴방지가새 내진보강프레임 공법을 제안하였으며, 제안된 공법을 2층 철근콘크리트 골조에 내부끼움형으로 적용하여 반복가력실험에 의한 내진성능을 평가하였다. 좌굴방지가새 내진보강시스템을 적용한 2층 철근콘크리트 골조 실험체의 내력, 파괴모드, 강성 및 에너지소산면적을 분석하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 좌굴방지링으로 횡지진된 건식형 좌굴방지가새는 원점에서의 최대·최소하중, 각 방향별 최대 장치변위에서의 하중, 이력곡선 면적이 모든 반복재하로부터 산정된 평균치의 15% 이내임을 확인하여, 국내 에너지소산장치로서의 적합성을 만족하는 것으로 확인되었다.
- 2) 1층 기둥 하부에 전단균열이 집중적으로 발생한 무보강 실험체와 비교하여 좌굴방지가새 내진보강시스템을 내부끼움형으로 보강시에는 전체적으로 균열을 분산시켜 일부에 집중되는 심각한 손상이 억제되었으며, 내력은 약 4.05배~4.1배 증가되는 것으로 확인되었다.
- 3) 좌굴방지가새 내진보강시스템을 내부끼움형으로 보강시 초기강성은 약 3.57배~7.77배, 붕괴방지수준에 근접한 변위비 1.84%에서는 약 4.27배~7.68배 증가하는 것으로 확인되어, 좌굴방지가새 내진보강시스템을 내부끼움형으로 보강시 내력 및 강성증대효과가 큰 것으로 확인되었다.

- 4) 좌굴방지가새 내진보강시스템을 내부끼움형으로 보강시 에너지소산면 적은 붕괴방지수준의 변위비에서 약 6.22배~6.75배 증가하여 본 연구에서 제안한 좌굴방지링형 좌굴방지가새 내진보강시스템의 유효성을 확인되었다고 판단된다.
- 5) 향후 좌굴방지가새 내진보강시스템의 실용화를 위하여 좌굴방지가새의 해석모델 및 비선형해석 절차방법의 체계화가 필요하며, 해석을 통해 내진보강 전·후의 내진성능을 정밀하게 검토할 필요성이 있을 것으로 사료된다.

**/ 감사의 글 /**

이 논문은 2020년도 중소기업 네트워크형 기술개발사업 네트워크기획 (번호:S2878786)의 연구결과입니다.

**/ REFERENCES /**

1. Korea Meteorological Administration, Weather Information.
2. Architectural Institute of Korea, Site inspection and damage investigation of buildings by earthquakes in Gyeongju and Pohang. c2018.
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Seismic design code for buildings (KDS 41 17 00). c2019.
4. Ministry of the Interior and Safety, Status of securing seismic performance of existing public facilities in 2020, Available from : <https://www.mois.go.kr/>
5. MOE, Seismic performance evaluation and retrofit manual for school facilities, Ministry of Education (MOE), Korea, c2021.
6. Yoshino T, Karino Y. Experimental study on shear wall with braces :

Part 2, In Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, 1971;11:403-404.

7. Watanabe A, Wada A, Saeki E, Takechi T, Development of Unbonded Brace, Nippon Steel Corporation Building Construction and Urban Development Division, Tokyo, Japan, c1998.
8. Park BT, Lee SJ, Lee JH, Experimental Study on Seismic Retrofit of Buckling Restrained Knee Brace Frame System, Journal of Korean Society of Steel Construction, 2021;33(3):191-201.
9. Toru T, Akira W, Review of Buckling-Restrained Brace Design and Application to Tall Buildings, International Journal of High-Rise Buildings, 2018;7(3):187-198.
10. Tsai KC, Wu AC, Wei CY, Lin PC, Chuang MC, Yu YJ, Welded end-slot connection and debonding layers for buckling-restrained braces, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014;43: 1785-1807.
11. Wu AC, Lin PC, Tsai KC, High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014;43:375-393.
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Steel structure design code (KDS 14 31 60). c2017.
13. The Japan Building Disaster Prevention Association, Guidelines for seismic retrofit of existing reinforced concrete buildings, Japan, c2001.
14. Japan Building Disaster Prevention Association, Guideline for seismic retrofit of existing reinforced concrete building, Japan, c2017.
15. Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Guidelines for seismic performance evaluation of existing facilities (Buildings), Korea, c2021.