



# GFS-CFXB 내진보강법을 이용한 지진피해를 받은 R/C 건물의 내진성능 평가 및 내진보강 효과

이강석<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>전남대학교 건축학부

## Seismic Strengthening and Performance Evaluation of Damaged R/C Buildings Strengthened with Glass Fiber Sheet and Carbon Fiber X-Brace System

Kang-Seok Lee<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**ABSTRACT** Improving the earthquake resistance of buildings through seismic retrofitting using steel braces can result in brittle failure at the connection between the brace and the building, as well as buckling failure of the braces. This paper proposes a new seismic retrofit methodology combined with glass fiber sheet (GFS) and non-compression X-brace system using carbon fiber (CFXB) for reinforced concrete buildings damaged in earthquakes. The GFS is used to improve the ductility of columns damaged in earthquake. The CFXB consists of carbon fiber bracing and anchors, to replace the conventional steel bracing and bolt connection. This paper reports the seismic resistance of a reinforced concrete frame strengthened using the GFS-CFXB system. Cyclic loading tests were carried out, and the hysteresis of the lateral load-drift relations as well as ductility capacities were investigated. Carbon fiber is less rigid than the conventional materials used for seismic retrofitting, resulting in some significant advantages: the strength of the structure increased markedly with the use of CF X-bracing, and no buckling failure of the bracing was observed.

**Keywords** : earthquake damage, reinforced concrete, seismic strengthening, glass fiber sheet, carbon fiber

### 1. 서 론

1995년 일본 고베지진, 1999년 터키 코카에리지진, 2011년 뉴질랜드 크라이스트지진, 2008년 및 2013년 쓰촨성지진 등에서도 드러난 바 지진피해를 받은 건축물이 본진(main shock) 이후 여진(after shock)에 대비한 내진안전성 판정 및 영구복구계획을 실시 할 즈음 지진피해를 받은 구조물에 잔류하고 있는 내진성능(이하, 잔존내진성능, residual seismic capacity)을 적절하게 평가하여 지진피해를 받은 건물을 효과적인 내진보강법에 의해서 보강을 하는 것은 지진피해건물에 대한 내진안전성 확보, 경제적 복구, 재사용 등의 측면에서 매우 중요한 사항이라고 사료된다.

한편, 국내에서 이루어지고 있는 내진관련 연구의 대

부분은 기존 건물에 대한 내진성능 평가법 및 내진보강법 개발에 관한 연구가 주류를 이루고 있으며, 지진피해를 받은 건물에 관한 연구는 극소수에 불과하다.<sup>1)</sup> 국외 연구의 경우, Acheim 및 Black<sup>2)</sup>은 본진 및 여진의 연속지진하중에 의한 누적손상이 비선형거동에 미치는 영향에 대해서 검토하였으며, Lee와 Foutch<sup>3)</sup>는 지진피해를 받은 건축물에 대한 신뢰성기반 성능예측방법을 제안하였다.

Li와 Ellingwood<sup>4)</sup>는 여진에 의해 발생하는 추가적인 손상정도는 본진에 대한 손상, 즉 잔류변형(residual deformation)과 밀접한 관련이 있다는 사실을 연구하였다. Maeda, Nakano 및 Lee<sup>5)</sup>는 지진피해를 받은 철근콘크리트(RC) 건물에 대한 여진발생을 대비한 응급복구 및 영구적인 복구를 위한 잔존내진성능 평가법을 지진피해 손상도(damage class)에 근거한 내진성능저감계수를 바탕으로 평가하는 기법을 제안하였으며, 이 방법은 2004년 일본 니카타지진, 2012년 동일본지진 등에서 활용되었다. 내진성능저감계수는 부재의 정적실험 및 비선형동적해석으로부터 손상도(균열폭)와 잔존에너지 흡수능력과의 상관관계를 바탕으로 정량화하였다.

\*Corresponding author E-mail : kslnist@jnu.ac.kr  
 Received August 5, 2013, Revised October 7, 2013,  
 Accepted October 7, 2013  
 ©2013 by Korea Concrete Institute

상기 지진피해를 받은 건물에 관한 기 수행된 국외 연구의 대다수는 본진 이후 여진이 건축물에 미치는 영향을 검토하는데 중점을 두고 있으며, 지진피해를 받은 건물에 대한 내진보강을 위한 실용적인 잔존내진성능을 평가하는 기법에 관한 연구는 제한적으로 이루어 졌으며, 효과적이며 경제적으로 내진성능이 확보가능한 영구복구를 위한 내진보강법 개발에 관한 연구는 드물다.

기상청 통계자료<sup>6)</sup>에 의하면 국내에서도 지난 31년간 총 816회의 지진이 관측되었으며, 그 중에서 규모 3이상의 지진이 1년에 5~15회, 규모 5이상의 지진도 10~15년 주기로 한반도 전역에 걸쳐서 발생하고 있으며, 또한 역사지진 및 계기지진에 관한 연구 결과<sup>7)</sup>에 의하면 각종 건물에 상당한 피해를 줄 수 있는 정도의 지진이 발생할 가능성이 있는 시점에서 기존 건물뿐만 아니라 가까운 미래에 발생가능한 대규모 지진에 의해서 지진피해를 받을 가능성이 있는 건축물에 대한 지진대책(내진보강)에 관한 연구도 필요하다고 판단된다.

한편, 최근 건축 구조물에 fiber-reinforced polymer(FRP)를 이용한 보수 및 보강법에 관한 연구가 다수 수행되고 있다. FRP를 이용한 다양한 방식의 보수 및 보강법은 기존의 단면을 증설하는 공법의 단점인 중량증가 문제와 공간 확보 및 품질관리의 어려움을 극복할 수 있는 공법으로 알려져 왔다. 그러나 상기 FRP 래핑에 의한 내진보강법은 연성 보강효과에는 우수하지만, 강성 보강효과가 작아 건축물에서 층간변위 제어에 어려움이 있다는 단점이 있다. 이를 보완할 수 있는 보강공법으로서 브레이싱 내진보강에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 그 활용도 및 효용성이 많은 연구자들에 의해서 검증되고 있다.

강재 브레이싱에 대한 연구로서 기본 실험체, 경사 브레이싱, X-브레이싱을 적용한 4, 8, 12, 16층 3D RC 구조 모델을 이용하여 비선형 동적해석을 수행하여, X-브레이싱의 내진보강 효과를 검증하였다.<sup>8)</sup> 또한 브레이싱 시스템의 내진성능개선을 위한 연구로서 모멘트저항 골조 및 철골 브레이싱이 적용된 골조에 대한 실험적 연구를 통하여 브레이싱 보강의 경우가 외부 지진력에 대해서 강도 및 연성측면에서 우수한 지진저항성능을 나타내는 것으로 평가되었다.<sup>9)</sup> 특히 RC 구조물과 브레이싱이 철골 프레임에 의해서 간접적으로 접합된 브레이싱 구조시스템의 결점으로 파악되어 브레이싱을 RC 구조물과 직접적으로 연결될 수 있는 X-브레이싱 구조시스템을 제안하였다.<sup>10,11)</sup>

반면, 강재 브레이싱 내진보강은 연결부 파괴 및 브레이싱 좌굴문제가 내진보강 안전도를 결정하는 척도로 붕괴방지 상태에 대해서는 좌굴안전성에 대한 신뢰지수가 부족한 것으로 분석되었다.<sup>12)</sup> 이러한 정착부의 안정성 문제와 브레이싱의 국부좌굴이 발생할 문제가 있으며, 이를 방지하기 위한 추가보강으로 인해 불필요한 자중증가 등으로 경제적인 내진보강성능 확보에 어려움이 있다.

따라서 이 연구에서는 지진피해를 받은 건물에 지진피

해로 인한 기존 기둥의 연성확보를 위해서 유리섬유시트(glass fiber sheet)로 래핑을 함과 동시에 상기 X-브레이싱 내진보강법의 장점을 충분히 확보하면서 기존 철골 X-브레이싱 내진보강법에 비교해서 경량의 고강도 재료로 보강 후 추가적인 중량증가가 거의 없으며, 브레이싱 압축 좌굴거동에 자유로운 탄소섬유 앵커 X-브레이싱공법(carbon fiber X-brace)을 조합한 경제적이며 효과적인 새로운 내진보강법(이하, GFS-CFXB)을 제안하였다.

이 연구에서 제안한 GFS-CFXB 공법의 유용성을 검증할 목적으로 지진피해를 받은 골조를 대상으로 구조실험을 실시하여 내진성능을 검증함과 동시에 내진보강효과를 검토하였다.

## 2. GFS-CFXB 내진보강법의 특징

전술한 바 X자 형태의 스틸이나 강봉을 이용한 내진보강 효과에 대한 연구<sup>8,9)</sup>를 진행하고 있으나, 탄소섬유 앵커 X-브레이싱공법(CFXB)은 국내에서 최초로 개발된 방법이다. Fig. 1과 같이 탄소섬유앵커를 기둥을 관통하여 X자 형태로 시공하고, 기둥상부를 에폭시로 고정시킨 후 하단부를 긴장한 상태에서 앵커를 방사형으로 펼쳐서 기둥 단면을 감싸면서 에폭시로 고정시키고, 기둥을 감싸서 앵커를 보호하기 위해 두께 1 mm, 탄소섬유시트 1겹을 기둥 상, 하단에서 높이 300 mm까지 보강하였다.

그 뒤 손상을 받은 기존 기둥의 연성확보를 위해서 유리섬유시트(GFS)로 나머지 부분을 래핑하였다. 탄소섬유 앵커가 초기부터 RC 기둥의 하중을 분담할 수 있도록 탄소섬유 앵커에 10 kN의 긴장력을 도입하였다.

GFS-CFXB 내진보강법의 장점은 기존 댄퍼 보강 및 철골 브레이스 보강법과 비교하여 표면처리 등의 사전준

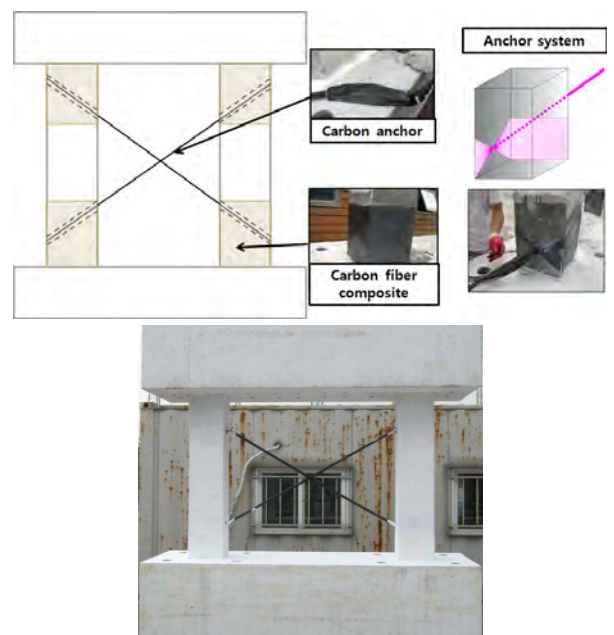


Fig. 1 Schematic diagram of the GFS-CFXB system

**Table 1** Properties of the carbon fibers used in this study

Classification	Yarn number	Tensile strength (MPa)	Mass per unit length tex (g/1km)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Filament diameter (mm)	Sectional area (cm <sup>2</sup> )	Brace diameter (mm)	Tensile force (kN)
Type-1	100 <sup>(1)</sup>	3790	3,273	1.74	1.55	1.881	15.5	712.9 (310.1) <sup>(2)</sup>
Type-2	200 <sup>(1)</sup>	4900	1,761	1.80	1.12	1.957	15.8	958.8 (454.4) <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Yarn number for Type-1 and -2 are based on Fyfe in USA and Toray in Japan, respectively. The CF X-bracing was fabricated in-house.

<sup>(2)</sup> Parentheses indicate the material test results from the institute in Korea.

비가 간단하며 중량증가가 거의 없는 것이 특징이다. 또한 재료 자체가 경량이므로 시공성이 매우 우수하고 중량 및 체적대비 우수한 강도가 발휘될 뿐만 아니라 유리섬유보강에 따른 연성능력이 탁월하다. 특히 탄소섬유의 직경을 변경함으로써 목적(강도 보강량)에 대응하여 내진성능을 쉽게 변화시킬 수 있는 장점이 있다.

### 3. 실험개요

기존 실험 및 해석 연구결과<sup>13-18)</sup>에 의하면 비내진상세를 가지는 국내 RC 골조의 대부분은 기둥 붕괴모드에 의한 전단파괴가 지배적이라고 보고되어 있다는 사실에 근거하여, 이 연구에서는 전단파괴형 골조를 대상으로 지진손상 후의 GFS-CFXB 내진보강법의 내진보강 효과를 검증할 목적으로 전단파괴형 기둥실험체를 계획하였다.

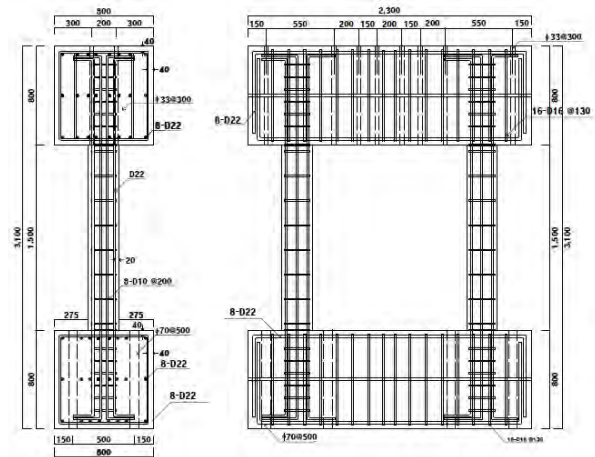
#### 3.1 사용재료 및 특성

구조실험에 사용된 기둥실험체의 콘크리트 압축강도는 30 MPa로, 3개의 공시체 평균값으로 표준공시체 보정값은 측정된 압축강도의 97%로 28일 평균압축강도 31.8 MPa를 확인하였다. 철근의 항복강도는 400 MPa로 전단파괴형 기둥의 주근은 D22, 전단 보강근은 D10@200을 사용하였다. 이음성능 평가 실험체에 사용된 철근의 재료적 특성을 파악하기 위하여 KS B 0801(금속재료 인장시험편)의 ‘라’호의 규정에 따라 철근 인장시험편을 각각 3개씩 제작하여 만능시험기(U.T.M.)을 이용하여 가력속도 5 mm/min로 인장시험을 진행하였다. 시험 결과 철근의 항복강도와 인장 강도는 D10의 경우 평균 518 MPa, 752 MPa로, D22의 경우 평균 538 MPa, 726 MPa로 나타났다. GFS-CFXB 공법에 사용된 유리섬유시트(GFS)는 고강도 CAF-GL1000을 사용하였다.

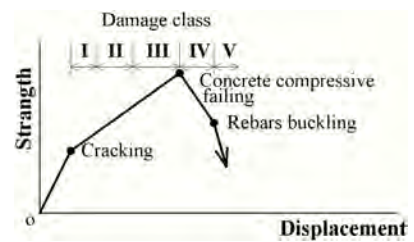
한편 탄소섬유 앵커 X-브레이싱(CFXB)에 사용된 탄소섬유앵커는 총 2가지의 재료를 사용하였으며, Type-1은 미국 F사에서 생산되는 탄소섬유를 이용하여 앵커를 제작하였으며, Type-2는 일본 T사의 탄소섬유 원사를 이용하여 제작한 탄소섬유 앵커를 사용하였다. 인장강도는 공인시험기관에 의뢰하여 Table 1과 같은 성능을 확인하

**Table 2** Epoxy resin used in this study

Classification	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Elastic modulus for tensile (MPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Epoxy resin	89.8	81.6	2857.1	1.16



**Fig. 2** Detail of the control specimen (unit: mm)



**Fig. 3** Relationships between damage degree and load-displacement of shear member<sup>19)</sup>

였다. 한편, Table 2에는 이 연구에서 사용한 에폭시 수지의 재료특성을 나타낸다.

#### 3.2 실험체의 제작 및 변수

GFS-CFXB 내진보강공법의 지진손상 후의 내진성능 효과를 검토할 목적으로 전단파괴형 RC 기둥을 대상으로 우선적으로 Fig. 2에 나타난 무보강 전단파괴형 골조 실험체 2개를 제작하여, Fig. 3에 나타낸 것처럼 지진손

상도-V<sup>19)</sup> 까지 후술하는 Table 5의 하중가력규칙에 의해서 각 실험체에 손상을 주었다. 그 뒤, 손상된 실험체에 GFS-CFXB 탄소섬유 Type-1로 내진보강한 골조(CR-1) 1개 및 GFS-CFXB 탄소섬유 Type-2로 내진보강한 골조(CR-2) 1개, 합계 2개를 각각 제작하였다. 총 실험체변수는 3개이며, Table 3에는 3개 실험체의 일람을 나타낸다.

무보강 실험체는 전술한 바 전단파괴형 실험체로써 기둥 단면은 가로와 세로 250×250 mm인 정방형인 기둥으로 계획을 하였으며 기둥의 주근은 10-D22, 띠근은 D10 @200이며, 기둥의 순길이는 1500 mm, 전단 경간비는 6이다.

Table 4에는 기존 RC 건축물의 내진진단기준<sup>20)</sup>에서 제시한 산정식을 이용하여 상기 무보강 실험체의 휨내력

및 전단내력을 계산하였다. Table 4에 의하면 이 연구에서 계획한 무보강 실험체는 휨내력(193.2 kN)보다는 전단내력(110.8 kN)이 작은 전단파괴형 기둥이다.

기둥 상부에는 스티브를 설치하여 기둥의 구속 효과가 고려될 수 있도록 하였다. 스티브의 형상은 높은 강성에 의해 기둥 거동에 영향을 주지 않는 형태를 선택하였으며 시험 시 집중하중에 의한 균열 및 국부 변형이 생기지 않도록 철근보강을 실시하였다.

### 3.3 실험방법

Fig. 4에는 실험체에 적용된 하중가력 방법을 나타낸다. Fig. 4와 같이 축력의 경우,  $0.1f_{ck}A_g$ 인 187.5 kN을 실

**Table 3** Summary of the specimens

Specimens	H (mm)	C <sub>1</sub> =C <sub>2</sub>	S/D	ρ <sub>s</sub> (%)	ρ <sub>w</sub> (%)	Strengthening types	
						Fibers	Anchorage strengthening
CS-0	1500	250	6	1.27	0.82	-	-
CR-1	1500	250	6	1.27	0.82	Glass fiber (CAF-GL1000)	Carbon fiber (1 layer, 1mm)
						Carbon fiber (Type-1)	
CR-2	1500	250	6	1.27	0.82	Glass fiber (CAF-GL1000)	Carbon fiber (1 layer, 1mm)
						Carbon fiber (Type-2)	
Notation	C		S	0	① Test method (C: Cycling) ② S: Shear Failure, R: Rehabilitation ③ 0: Control specimen without X-bracing 1: GFS and CFX-bracing (Type-1) 2: GFS and CFX-bracing (Type-2)		
	①	②	③				

H : column height, C<sub>1</sub>=C<sub>2</sub> : column dimensions, S/D : span-to-depth ratio, ρ<sub>s</sub> : flexural reinforcement ratio, ρ<sub>w</sub> : shear reinforcement ratio

**Table 4** Load-carrying capacity of the columns calculated according to JBDPA<sup>20)</sup>

Specimens	Axial force N (kN)	Ultimate flexural strength Mu (kN · m)	Shear force at the point of ultimate flexural failure V <sub>mu</sub> (kN)	Ultimate shear strength V <sub>su</sub> (kN)	Ultimate lateral load-carrying capacity V <sub>u</sub> (kN)
CS-0	187.5	144.9	193.2	110.8	110.8 (221.6) <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> The ultimate lateral load-carrying capacities of the two columns are shown in parentheses

**Table 5** Loading cycles for specimens

Load cycles	1~3	4~6	7~9	10~12	13~15	16~18	19~21
R	1/1000	1/500	1/333	1/250	1/200	1/150	1/120
Δ (mm)	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	10	12.5
Load cycles	22~24	25~27	28~30	31~33	34~36	37~39	40~42
R	1/100	1/86	1/75	1/60	1/50	1/43	1/38
Δ (mm)	15	17.5	20	25	30	35	40
Load cycles	43~45	46~48	49~51	52~54	55~57	58~60	61~63
R	1/30	1/25	1/21	1/18	1/14	1/13	1/12
Δ (mm)	50	60	70	85	110	120	130

<sup>(1)</sup> R shows the drift angle. Δ shows the lateral drift (mm)

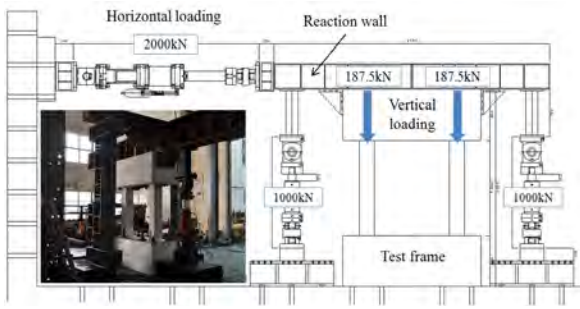


Fig. 4 Experimental configuration for the cyclic loading tests

험체 양쪽에 설치된 1000 kN 오일잭을 이용하여 가력 하였으며, 반력벽에 설치된 2000 kN 액츄에이터를 이용하여 변위제어 방식으로 수평하중을 가력 하였다.

횡 변위는 Table 5에 나타난 것처럼 수평변위 1.5 mm (수평부재각 R=1/1000)에서 130 mm(수평부재각 R=1/12) 까지 각 3 사이클씩 단계별로 점증 가력하였다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 파괴양상 및 하중-변위 곡선

#### 4.1.1 CS-0(무보강 실험체)

무보강 실험체(CS-0)는 전단파괴 모드의 기준이 되는 실험체로서 15 사이클(R=1/200)의 부가력 166 kN에서 우측 기둥하단에서 미세한 휨 균열과 기둥상부에서 전단균열이 관찰되었고, 기둥중앙부에서는 균열이 전혀 발생하지 않았다. 21 사이클(R=1/120)의 부가력 224 kN에서 전단균열이 증가되는 양상을 보였으며, 정가력시 마찬가지로 전단균열이 증가하였다. 부재각이 증가 되면서 전단균열이 점점 커지고, 전단 균열 수가 증가되면서 폭 1 mm 을 넘는 전단 균열이 다수 발생하였고, 27 사이클(R=1/86)에서 양단에서 중앙부로 연결되는 전단 균열이 관찰 되었으며 양단부로 이어지는 균열의 증가와 함께 피복의 박리가 발생하였다. 29 사이클 부가력에서 최대하중 278 kN 으로 더 이상의 하중 증가는 관찰되지 않았으며, 36 사이클 (R=1/50)에서 Fig. 5와 같이 실험체가 최종적으로 전단파괴되는 양상을 보였다.

Fig. 6에서는 CS-0 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내었으며, Table 6에 후술하는 각 실험체를 포함한 CS-0 실험

험체에 대한 정가력 및 부가력에 대한 최대하중 및 변위 등을 각각 비교하여 나타내었다. 상기의 그림 및 표에 의하면 CS-0(무보강) 실험체는 정가력에 최대하중 227 kN (변위 14.7 mm)에 도달하였으며, 부가력인 경우 278 kN (변위 17.5 mm)에서 최대 하중을 나타내었다.

#### 4.1.2 손상된 골조를 GFS-CFXB로 보강한 실험체(CR-1)

Fig. 3에 나타난 지진손상도 V까지 손상을 입힌 실험체를 GFS-CFXB 탄소섬유 Type-1으로 내진보강한 실험체인 CR-1은 기둥에 보강된 유리섬유시트에 의해서 균열 상황은 확인할 수 없었다. 42 사이클(R=1/38) 부가력에서



Fig. 5 Cracks that appeared following different loading steps for the CS-0 specimen

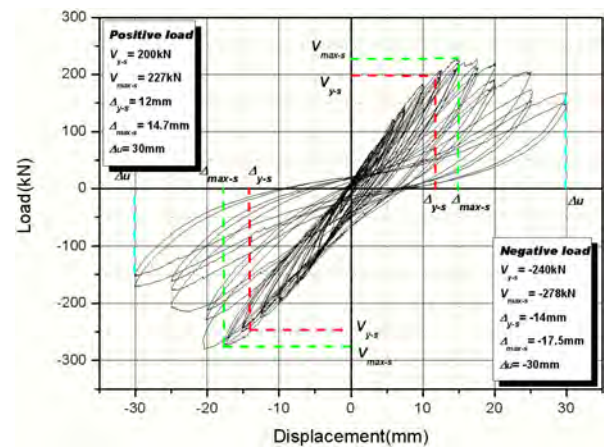


Fig. 6 Lateral load-drift curve for CF-0 specimens

Table 6 Results of the mechanical characterization

Specimen	Positive load					Negative load					Failure modes
	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>max</sub> (kN)	Δ <sub>y</sub> (mm)	Δ <sub>max</sub> (mm)	Δ <sub>u</sub> (mm)	V <sub>y</sub> (kN)	V <sub>max</sub> (kN)	Δ <sub>y</sub> (mm)	Δ <sub>max</sub> (mm)	Δ <sub>u</sub> (mm)	
CS-0	200	227	12	14.7	30	240	278	14	17.5	30	shear
CR-1	410	453	35.2	44.8	114	413	464	32	44	120	flexure
CR-2	459	514	40.9	56.4	112	515	555	46.7	56.3	118	flexure

\* V<sub>y</sub> shows the yield shear strength. V<sub>max</sub> shows the maximum shear strength. Δ<sub>y</sub> is the displacement at the yield point. Δ<sub>max</sub> shows the displacement at the maximum point. Δ<sub>u</sub> shows the displacement at the ultimate point



Fig. 7 Test result for the CR-1 specimen



Fig. 9 Test result for the CR-2 specimen

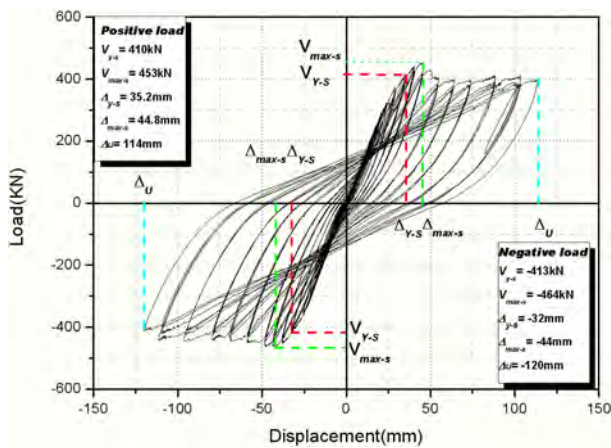


Fig. 8 Lateral load-drift curve for CR-1 specimens

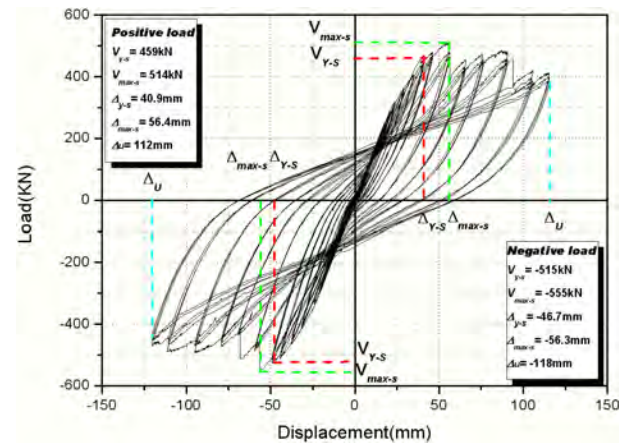


Fig. 10 Lateral load-drift curve for CR-2 specimens

464 kN으로 더 이상 하중의 증가는 관찰되지 않았으며, 43 cycle에서 섬유가 파단하는 소리가 발생하였으며, 58 cycle(R=1/13)에서 극한상태에 도달하였다(Fig. 7).

Fig. 8에는 CR-1 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내었으며, Table 6에 정가력 및 부가력에 대한 각 하중 및 변위값을 나타낸다. Fig. 8 및 Table 6에 의하면 손상된 골조에 GFS-CFXB Type-1을 이용하여 내진보강한 실험체 CR-1은 정가력에서 최대하중 453 kN(변위 44.8 mm)에 도달하였으며, 부가력인 경우 464 kN(변위 44 mm)에서 최대 하중을 나타내었다. Fig. 6에 전단파괴형 CS-0 실험체의 하중-변위 곡선과 상이하게 Fig. 8의 CR-1의 복원력은 방추형에 가까우며, 에너지 소산면적이 매우 크다고 판단되는 전형적인 휨파괴형 부재의 복원력 특성을 나타낸다고 사료된다. 한편, 무보강 실험체 CS-0 대비 CR-1의 최대내력은 약 70%, 항복 시 변위는 약 3배 증가하였다.

#### 4.1.3 손상된 골조를 GFS-CFXB로 보강한 실험체(CR-2)

CR-1과 동일하게 지진손상도 V까지 손상을 입힌 실험체를 GFS-CFXB 탄소섬유 Type-2로 내진보강한 실험체인 CR-2는 CR-1과 같이 기중에 보강된 유리섬유시트에 의해서 균열상황은 확인할 수 없었다.

Fig. 9에 실험 최종상황을 나타낸다. 약 46 cycle(R=1/25) 부가력에서 555 kN으로 더 이상 하중의 증가는 관찰되지

않았으며, 57 cycle(R=1/14)에서 극한상태에 도달하였다.

Fig. 10에는 CR-2 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내었으며, 또한 Table 6에 CS-0 및 CR-1 실험체와 비교하여 정가력과 부가력에 대한 실험 결과를 나타낸다. 상기의 그림 및 표에 의하면 손상된 골조에 GFS-CFXB Type-2를 이용하여 보강한 실험체 CR-2는 정가력에 최대하중 514 kN(변위 56.4 mm)에 도달하였으며, 부가력인 경우 555 kN(변위 56.3 mm)에서 최대 하중을 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 CR-1과 동일하게 에너지 소산면적이 큰 방추형 복원력 특성을 나타내고 있으며, 이 연구에서 제안한 GFS-CFXB 내진보강에 의해서 파괴모드가 전단에서 휨파괴형 골조로 전환된 사실을 알 수가 있다. 무보강 실험체인 CS-0 대비 CR-2 실험체의 최대내력은 약 2배정도 증가하였으며, 항복시 변위도 약 3배 증가하여 내진보강 효과가 탁월한 것으로 판단된다. 한편, 탄소섬유 Type-1으로 내진보강 한 CR-1 대비 CR-2 실험체의 최대하중 및 변형능력이 약 1.2배로 크다. 이것은 Table 1에 나타난 탄소섬유의 인장강도가 Type-1에 비해서 Type-2가 약 1.5배 크기 때문이라고 추론한다.

## 4.2 실험 결과의 상호비교 및 내진보강 효과

Fig. 11에는 4.1절에서 서술한 무보강 실험체(CS-0),

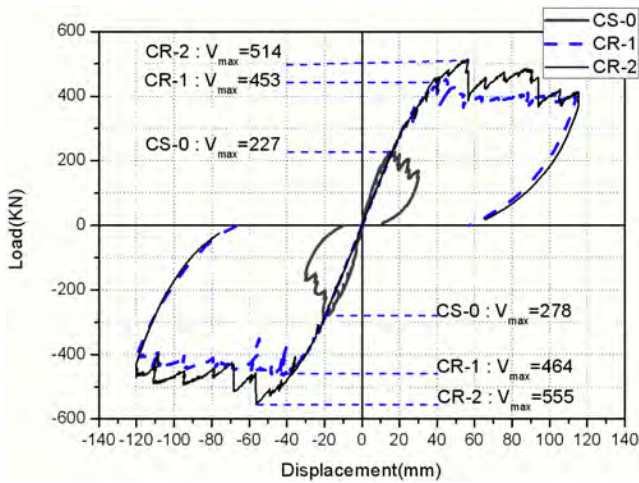


Fig. 11 Load displacement for the envelope curves

Table 7 Strengthening effect and ductility ratio

Specimen	$V_y$	$V_{max}$	SE		$\mu_s$ or $\mu_f$
			Yield	Maximum	
CS-0	240	278	1	1	1.25 ( $\mu_s$ )
CR-1	413	464	1.72	1.67	3.75 ( $\mu_f$ )
CR-2	515	555	2.15	2.0	2.53 ( $\mu_f$ )

(1) SE: strengthening effect in terms of shear strength compared to the control specimens.  $\mu_s$ : ductility ratio for shear failure specimen (CS-0), defined as the maximum displacement divided by yield displacement,  $\delta_{max}/\delta_y$ .  $\mu_f$ : Ductility ratio for flexural failure specimens (CR-1, CR-2), defined as the ultimate displacement divided by yield displacement,  $\delta_u/\delta_y$ .

GFS-CFXB Type-1 실험체(CR-1) 및 GFS-CFXB Type-2 실험체(CR-2)의 하중-변위 곡선에 대한 포락선을 나타내며, 또한 Table 7에는 최대내력을 나타낸 부가력에 대한 CS-0, CR-1, CR-2에 대한 내력비 및 연성능력비를 상호 비교하여 각각 나타내었다. Fig. 6, 8, 10 및 11에 나타난 복원력에 대한 항복점은 Park-Method<sup>21)</sup>에 의해서 결정하였으며, Table 7에 나타난 연성비는 실험 결과 전단파괴형인 CS-0의 경우는 최대하중에서의 변위( $\Delta_{max}$ )에 대한 항복 시의 변위( $\Delta_y$ )의 비로, 휨파괴형인 CR-1 및 CR-2 실험체는 극한상태의 변위( $\Delta_u$ )에 대한 항복 시의 변위( $\Delta_y$ )의 비로 각각 정의하여 산정하였다.

Table 7 및 Fig. 11에 의하면 무보강 실험체 CS-0, 보강 실험체 CR-1 및 CR-2는 모두 부가력일 때 최대내력에 도달하였으며, CS-0는 278 kN( $V_y=240$  kN), CR-1은 464 kN ( $V_y=413$  kN), CR-2는 555 kN( $V_y=515$  kN)을 각각 나타내었다. 무보강실험체 CS-0 대비 GFS-CFXB 내진보강법은 최대내력 및 항복내력을 약 1.5~2배정도 증가시켰다.

한편, CS-0 실험체의 변위 연성비( $\mu_s$ )는 1.25를 나타내었지만, GFS-CFXB 내진보강 실험체 CR-1 및 CR-2는 2.5~3.5를 나타내어 CS-0 대비 약 2~3배 상승하였다. 변위 연성비에 대한 상기 결과는 Fig. 8, 10 및 11에서도 나타

낸바, 전단파괴형 무보강 골조를 연성능력이 풍부한 휨파괴형 골조로 전환시킨 사실과 상관관계를 나타내고 있다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 지진피해를 받은 건물에 지진피해로 인한 기존 기둥의 연성확보를 위해서 유리섬유시트로 래핑을 함과 동시에 브레이싱 압축 좌굴거동에 자유로운 탄소섬유 앵커 X-브레이스 공법을 조합한 새로운 내진보강법(GFS-CFXB)을 제안하였다. 또한, GFS-CFXB 내진보강 공법의 유용성을 검증할 목적으로 지진피해를 받은 골조를 대상으로 반복가력에 의한 구조실험을 실시하여 내진 성능 및 내진보강 효과를 파악하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 무보강 실험체 CS-0, 보강실험체 CR-1 및 CR-2는 모두 부가력일 때 최대 내력에 도달하였으며, CS-0는 278 kN( $V_y=240$  kN), CR-1은 464 kN( $V_y=413$  kN), CR-2는 555 kN( $V_y=515$  kN)을 각각 나타내어, 무보강 실험체 대비 GFS-CFXB 내진보강법은 최대내력 및 항복내력을 약 1.5~2배정도 증가시켰다.
- 2) CS-0 실험체의 변위 연성비( $\mu_s$ )는 1.25를 나타내었지만, GFS-CFXB 내진보강 실험체 CR-1 및 CR-2는 2.5~3.5를 나타내어 CS-0 대비 약 2~3배 상승하였다.
- 3) 무보강 실험체 CS-0는 실험 결과 전형적인 전단파괴형 골조를 나타내었지만, GFS-CFXB공법으로 내진보강 한 CR-1 및 CR-2 실험체는 동일하게 에너지 소산면적이 큰 방추형 복원력 특성을 나타내어 이 연구에서 제안한 GFS-CFXB 내진보강에 의해서 파괴모드가 전단에서 휨파괴형 골조로 전환되었다.
- 4) 이 연구에서 개발한 GFS-CFXB 시스템은 내력 및 연성능력을 동시에 기대할 수 있는 내진보강법으로써 기존 댐퍼 보강 및 철골 브레이스 보강법과 비교하여 표면처리 등의 사전준비가 간단하며 중량증가가 거의 없는 것이 특징이며, 재료 자체가 경량이므로 시공성이 매우 우수하고 중량 및 체적대비 우수한 강도가 발휘될 뿐만 아니라 특히, 탄소섬유의 직경을 변경함으로써 목적(강도보강량)에 대응하여 내진성능을 쉽게 변화시킬 수 있는 장점이 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2013R1A1A2009761) 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

## References

1. Shin, J., Kim, J., and Lee, K., "Fragility Assessment of Damaged Piloti-Type RC Building With/Without BRB

- Under Successive Earthquake,” *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 3, 2013, pp. 133-141.
2. Acheim, M. and Black, E. “Effects of Prior Earthquake Damage on Response of Simple Stiffness-Degrading Structures,” *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 1, 1999, pp. 1-23.
  3. Lee, K. and Foutch, D. A., “Performance Evaluation of Damaged Steel Frame Buildings Subjected to Seismic Loads,” *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 130, No. 5, 2004, pp. 588-599.
  4. Li, Q. and Ellingwood, B. R., “Performance Evaluation and Damage Assessment of Steel Frame Buildings under Main Shock-After Shock Earthquake Sequences,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 36, Issue 3, 2007, pp. 405-427. (doi: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.667>)
  5. Maeda, M., Nakano, Y., and Lee, K. S., “Post-Earthquake Damage Evaluation for R/C Buildings Based on Residual Seismic Capacity,” *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B. C., Canada, Paper No. 1179, 2004, pp. 1179-1194.
  6. Korea Meteorological Administration, “<http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/report.jsp>”.
  7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), “Master Plan for Maintenance and Safety of Facilities,” Notice of MLIT (2002-318), 2002, 350 pp.
  8. Viswanath, K. G., Prakash, K. B., and Desai, A., “Seismic Analysis of Steel Braced Reinforced Concrete Frames,” *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2010, pp. 114-122.
  9. Youssef, M. A., Ghaffarzadeh, H., and Nehdi, M., “Seismic Performance of RC Frames with Concentric Internal Steel Bracing,” *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 7, 2007, pp. 1561-1568. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.08.027>)
  10. Maheri, M. R. and Sahebi, A., “Experimental Investigation on the Use of Steel Bracing in Reinforced Concrete Frames,” *Proceedings of the Second International Conference on Seismic and Earthquake Engineering (Iran)*, 1995, pp. 775-784.
  11. Maheri, M. R. and Sahebi, A., “Use of Steel Bracing in Reinforced Concrete Frames,” *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, 1997, pp. 1018-1024.
  12. Chang, H. Y. and Chiu, C. K., “Performance Assessment of Buckling Restrained Braces,” *Procedia Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2011, pp. 2187-2195.
  13. Lee, K., Wi, J., and Kim, Y., “Seismic Performance Evaluation of RC Buildings using Japanese Standard for Seismic Performance Evaluation,” *Proceedings of EESK Conference 2009*, Vol. 13, 2009, pp. 134-137.
  14. Lee, K. S., Lee, S. H., Kim, Y. I., Wi, J. D., and Song, B. I., “Seismic Safety Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings in Korea,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2010, Vol. 22, No. 2, pp. 363-364.
  15. Ministry of Education and Science Technology (MEST), “Guideline for Seismic Capacity Evaluation and Seismic Strengthening of Existing School Buildings,” MEST, 2011, 60 pp.
  16. Lee, K. S., Choi, H., Han, S. W., and Lee, S. B., “A Practical Rapid Screening Method for Evaluating the Seismic Capacity of Low-rise Reinforced Concrete Buildings,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 9, No. 3, 2010, pp. 301-314. (doi: <http://dx.doi.org/10.3151/jact.9.301>)
  17. Lee, K., et al., “Seismic Performance Evaluation of Korean R/C School Buildings Using Pseudo Dynamic Test Method,” *Proceedings of the Korean Concrete Institute*, Vol. 24, No. 1, 2012, pp. 100-101.
  18. Lee, K., Choi, H., and Yi, W., “Earthquake Damage Ratio Estimation and Seismic Capacity Evaluation of Existing RC Buildings in Korea,” *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 18, No. 1, 2002, pp. 11-21.
  19. Japan Building Disaster Prevention Association., *Standard for Damage Level Classification*, Tokyo, Japan (in Japanese), 2001, 250 pp.
  20. Japan Building Disaster Prevention Association, “Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings,” Tokyo, Japan (in Japanese), 1977 (Revision in 1990 and 2003), 250 pp.
  21. Park, R., “Evaluation of Ductility of Structures and Structural Assemblages from Laboratory Testing,” *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 3, 1989, pp. 155-166.

**요약** 기존 강제 브레이싱 내진보강법은 정착부의 안정성 문제와 브레이싱의 국부좌굴이 발생할 문제가 있으며, 이를 방지하기 위한 추가보강으로 인해 불필요한 자중증가 등으로 경제적인 내진보강성능 확보에 어려움이 있다. 이 연구에서는 지진피해를 받은 건물에 지진피해로 인한 기둥의 연성확보를 위해서 유리섬유시트(glass fiber sheet)로 래핑을 함과 동시에 기존 철골 X-브레이싱 내진보강법에 비교해서 경량의 고강도 재료로 보강 후 추가적인 중량증가가 거의 없으며, 브레이싱 압축 좌굴거동에 자유로운 탄소섬유 앵커 X-브레이싱공법(carbon fiber X-brace)을 조합한 경제적이면서 효과적인 새로운 내진보강법(GFS-CFXB)을 제안하였다. 이 연구에서 제안한 GFS-CFXB공법의 유용성을 검증할 목적으로 지진피해를 받은 골조를 대상으로 반복 하중에 의한 구조실험을 실시하여 내진성능 및 내진보강 효과를 검증하였다.

**핵심용어** : 지진피해, 철근콘크리트, 내진보강, 유리섬유시트, 탄소섬유