

# 내진보강용 폴리우레아로 보강된 철근콘크리트 기둥의 내진성능 평가에 대한 유사동적실험 연구

조철민\* · 이두성\*\* · 김태균\*\*\* · 김장호\*\*\*\*

Cho, Chul Min\*, Lee, Doo Sung\*\*, Kim, Tae Kyun\*\*\*, Kim, Jang-Ho Jay\*\*\*\*

## Pseudo Dynamic Test Study on Seismic Performance Evaluation of RC Columns Retrofitted by PolyUrea

### ABSTRACT

As earthquakes have frequently happened all over the world, huge losses of human life and property have occurred. Therefore, retrofitting and strengthen technologies of non-seismically designed structures in Korea are urgent. Also, there has been a growing interest about seismic retrofitting, where researches on the topic have been actively pursued in Korea. The study results showed that ductility inducing retrofitting method is more superior stiffness inducing method. In Japan, Super Reinforcement with Flexibility (SRF) was introduced. Therefore, in this study, seismic performance evaluation was performed through pseudo dynamic test and uniaxial compression test for RC column retrofitted by PolyUrea for ductility inducing retrofitting material. Uniaxial compression test results showed that strength of all specimens retrofitted by PolyUrea was higher than that of RC specimens. Also, all specimens retrofitted by PolyUrea also showed ductile fracture behavior. In pseudo dynamic test, by applying real earthquake record, the seismic behavior of RC column reinforced by PolyUrea was evaluated through relative displacement, reinforcement strain, displacement ductility, and dissipation energy. The results showed that PolyUrea helped to enhance seismic performance of RC columns.

**Key words** : Seismic, Strength, Retrofitting, PolyUrea, Uniaxial Compression Test, Pseudo Dynamic Test

### 초 록

국내외적으로 지진의 발생이 빈번함에 따라 인명 및 재산 피해가 발생하고 추가적인 경제적 손실을 초래한다. 국내의 비내진으로 설계된 구조물의 보수·보강이 시급할 뿐만 아니라 지진에 대한 관심이 고조됨에 따라 내진보강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 고연성 보강재를 사용한 내진보강기법이 소개되면서 강성보강보다는 연성보강에 대한 신뢰도가 높아지고 있다. 따라서 본 연구에서는 연성보강 재료로써 최근 각광받고 있는 폴리우레아를 이용한 내진보강공법을 소개하기 위해서, 폴리우레아로 보강한 RC 시편에 대하여 일축압축시험과 유사동적실험을 수행하였다. 일축압축시험에서 폴리우레아 보강시 강도가 증진되었을 뿐 아니라 연성거동을 확인할 수 있었으며, 실제 지진파를 적용한 유사동적실험에서는 상대변위, 주철근의 변형률, 변위연성도, 소산에너지 모두 향상된 보강성능을 확인할 수 있었다. 연성보강의 목적으로 개발한 폴리우레아 보강방법은 기둥부재의 내진보강에 유용하게 사용될 것이라고 판단된다.

**검색어** : 내진, 보수, 보강, 폴리우레아, 일축압축실험, 유사동적실험

\* 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (Yonsei University · mngt0313@nate.com)

\*\* 정회원 · (주)홍지 공학박사 (Hong-gi DCS · Lds1970@hgdc.com)

\*\*\* 정회원 · (주)홍지 대표이사 (Hong-gi DCS · ceo@hgdc.com)

\*\*\*\* 중신회원 · 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (Corresponding Author · Yonsei University · jjhkim@yonsei.ac.kr)

Received September 23, 2016/ revised October 25, 2016/ accepted February 23, 2017

## 1. 서론

전 세계적으로 지진발생이 빈번하고 해를 거듭할수록 그 발생 횟수는 증가하고 있다. 2016년 한 해 동안 리히터 규모 6.0 이상의 강진이 일본 해역에 11건, 대만 해역에 4건, 중국 내륙에 2건, 러시아 1건으로 조사되었으며, 네 나라와 근접한 우리나라 울산 동구 동쪽 52 km 해역에서 리히터 규모 5.0의 지진이 발생한 바 있다(KMA, 2016). 1992년 도로교설계기준에 내진설계 항목을 개편하여 현재까지 사용하고 있지만 그전에 건설 및 사용된 내진설계 대상 시설물 31종 123,201개소 중 45,905개소(37%)는 내진성능이 확보 되었고 나머지 77,296개소(63%)는 내진보강이 되어있지 않아 위험에 방치되어 있는 상황이다. 최근 일본 대지진을 계기로 국내 내진설계 및 성능보강에 대한 요구가 높아짐에 따라 국내외적으로 지진에 대한 관심이 고조되고 있으며, 내진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim et al., 1997; Lee et al., 2012; Jin, 2016). 기존 구조물의 보수, 보강공법으로는 단면증가 보강방법, 철판보강 방법, FRP 보강방법이 주로사용 되어왔다. 특히 FRP 보강기술에 대한 국내외적 다양한 기술 개발이 진행되고 있으며 복합섬유를 이용한 다양한 형태의 보강기술이 연구되어왔다(Bonacci and Maalej, 2001; Youm et al., 2006; Lee et al., 2008). 그러나 기존의 FRP 보강방법은 강성보강의 목적으로 부재의 최대변형을 일정하게 억제함으로써 지진 하중에 대처하는 방법이기에 때문에 실제 지진에 의한 진동의 규모와 반복 회수가 예상을 초과하는 경우 붕괴에 대한 위험성이 있고 결국 대처할 수가 없다.

최근 일본에서는 고연성 보강재를 사용한 내진보강기법(SRF, Super Reinforcement with Flexibility)에 관한 연구를 시작하였고, 2008년부터 실용화 되면서 현재 가장 각광받고 있는 기술로 평가되고 있다. SRF 공법은 폴리에스테르 섬유를 벨트나 시트로 직조한 고연성재를 우레탄계 고인성 접착제로 콘크리트 표면에 부착하는 보강공법이다. 기존 FRP 보강공법과 유사하지만 보강 재료로 쓰이는 고연성재는 변형률과단 없이 탄성을 유지하기 때문에 보강효과가 다르게 나타난다. 즉, 강성보강이 아닌 연성보강개념으로 설계가 적용된다. 2011년 일본 3.11 대지진에서도 강성보강으로 설계된 구조물은 붕괴되거나 큰 균열이 발생하여 막대한 경제적 손실이 있었지만 연성보강으로 설계된 구조물은 미세한 균열만 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 폴리머계의 경질형 폴리우레아를 연성보강 재료로 적용하여 기둥부재의 내진보강 방법을 개발하기 위해서 실지진과의 이력을 적용할 수 있는 유사동적실험을 통해 내진보강용 폴리우레아의 내진성능 효과를 판단하였다. 유사동적실험은 Hakuno et al. (1969)에 의해서 기본적인 개념이 제안되었고 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 동적거동을 연구하기 위해 컴퓨터를 이용한 유사동적실험 기법이 제안되었다

(Takanashi et al., 1975). 현재 기존의 단점들을 보완하여 내진성능을 평가하는데 유사동적실험을 통한 연구가 많이 진행되어져 왔다(Shing and vannan, 1991; Ang et al., 1994; Chung et al., 2002; Chen et al., 2003; Li et al., 2003; Yang et al., 2004; Jung and Benson Shing, 2006; Marriott et al., 2009).

본 연구에서는 구조물의 연성능력을 판단하기 위하여 폴리우레아를 도포한 철근콘크리트 축소모형의 일축압축시험을 계획 및 수행하였으며, 비내진으로 설계된 철근콘크리트 교각의 1/2크기의 축소모형에 대하여 폴리우레아를 도포방법에 따른 유사동적실험을 통하여 내진성능을 검증하려고 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 압축강도 실험

내진보강 성능을 검증하기 위하여 폴리우레아로 보강된 시편의 일축압축강도 실험을 실시하였다. Fig. 1과 같이 원형단면 시편의 단면치수는  $\phi$  200 mm, 각형단면 시편의 단면치수는 200×200 mm이며 시편 높이는 각각 700 mm이다. 모든 시편에 종방향 철근 D16 4개와 띠철근 D10을 양 끝에 2개, 끝단으로부터 200 mm 떨어진 곳에 2개, 총 4개를 배근하였으며 원형 및 각형단면 시편을 각각 9개씩 총 18개의 철근콘크리트 축소모형 기둥을 계획하였다.

보강 형태로는 내진보강용 폴리우레아를 도포한 보강과 GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) 시트를 에폭시로 1차 함침 후 그 위에 폴리우레아를 도포한 보강, GioGrid 시트를 에폭시로 1차 함침 후 그 위에 폴리우레아를 도포한 보강으로 총 세 가지이며,

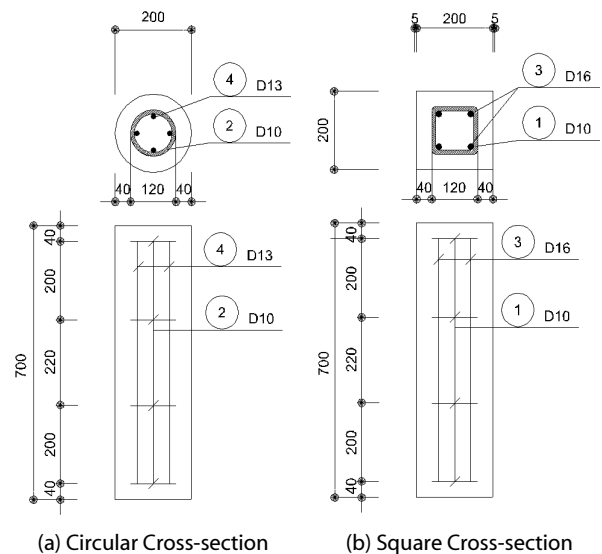
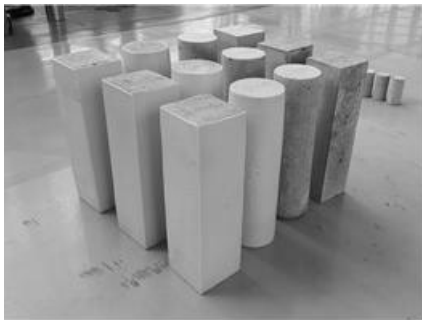


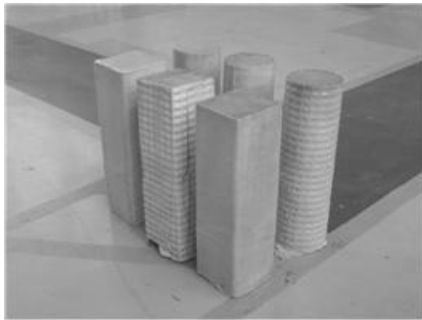
Fig. 1. Details of Specimens of Uniaxial Compression Test

Table 1. Outline of Specimens of Uniaxial Compression Test

Specimen	Type	Reinforcing material	Specimens (EA)
C-RC	Circular cross-section	Non PolyUrea	3
C-PU		PolyUrea (PU) 5 mm	3
C-GFPU		GFPU (GFRP + PU) 5 mm	2
C-GPU		GPU (GioGrid + PU) 5 mm	1
S-RC	Square cross-section	Non PolyUrea	3
S-PU		PolyUrea (PU) 5 mm	3
S-GFPU		GFPU (GFRP + PU) 5 mm	2
S-GPU		GPU (GioGrid + PU) 5 mm	1
Total			18



(a) RC and PU



(b) GFPU and GPU

Photo 1. Foreground of Specimens of Uniaxial Compression Test

도포 범위는 5 mm 두께로 측면 도포하였다.

Table 1은 시편의 개요를 나타내고 있으며 Photo 1은 시편 전경을 나타내고 있다. 일축압축 실험에 사용한 장비는 용량 3,000 kN UTM을 사용하였으며 5 mm/min의 속도로 재하 하였다.

## 2.2 유사동적실험

### 2.2.1 실험 시편 설계 및 제작

내진보강 성능을 검증하기 위하여 폴리우레아로 보강된 기둥의 유사동적실험을 실시하였다. 대상 교각은 경기도 가평군의 국도상 비내진으로 설계된 창촌교의 철근콘크리트 교각을 선정하였으며,

Table 2. Similarity of Pseudo-dynamic Test

Quality	Dimension	Scale factor
Length	M	S
Mass	M	S <sup>3</sup>
Force	MLT <sup>-2</sup>	S <sup>2</sup>
Stress	ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>	1
Velocity	LT <sup>-1</sup>	1
Acceleration	LT <sup>-2</sup>	S <sup>-1</sup>
Time	T	S

이 교각은 H/D가 5.83으로 장주에 해당하는 원형단면 교각이다. 1 : 2의 상사비를 이용하여 원형 및 각형단면축소모형 기둥을 설계 하였다. 대상 교각은 원형단면이기 때문에 각형단면 축소모형 기둥 설계시 원형단면 축소모형 기둥과 동일한 압축하중을 받는 기둥으로 설계하였다. Table 2는 설계에 적용한 물리량별 상사비를 나타낸 것이며, Table 3은 상사비에 따른 원형 및 각형단면 축소모형 실험체의 제원을 나타낸 것이다. Fig. 2는 1 : 2의 상사비를 적용한 원형 및 각형단면 기둥의 축소모형 도면이다. 원형단면 시편은 단면치수  $\phi$  600 mm, 높이 2,900 mm, 종방향 철근 D13을 36개 배근하였으며 띠철근 D10을 150 mm 간격으로 배근하였다. 각형 단면 시편은 단면치수 가로 540 mm, 세로 680 mm, 높이 2,900 mm, 종방향 철근 D13을 46개 배근하였으며 띠철근 D10을 150 mm 간격으로 배근하였다. 시편에 사용한 콘크리트는 설계강도 30 MPa의 콘크리트 배합을 사용하였고 수직방향 축하중은 강연선을 이용하여 38.75 ton을 긴장하였으며, 이 때 사용한 강연선은  $\phi$  15.2 mm, 항복강도 1,600 MPa, 극한강도 1,730 MPa, 단위중량 1.101 kg/m의 SWPC 7연선 B중 강연선(1,860 MPa) 두 가닥을 이용하여 긴장하였다.

보강 형태로는 내진보강용 폴리우레아를 도포한 보강과 GFRP 시트를 에폭시로 1차 함침 후 그 위에 폴리우레아를 도포한 보강으

로 총 두 가지이며, 도포 범위는 기초 상부 즉, 기둥 바닥면에서부터 1.0 m 높이까지 5 mm 두께로 보강하였다. 압축강도 실험에서 사용한 GioGrid의 경우 GFPU 겹침 보강에서 보다 낮은 성능을 나타냈으므로 유사동적실험에서는 배제하였다. 따라서 원형단면

시편의 준정적실험 시편 1개와 원형 및 각형단면 시편의 유사동적실험 시편 각 3개씩으로 총 7개의 시편을 계획하였다. Table 4는 시편의 개요를 나타내고 있으며 Photo 2는 보강재료에 따른 시편을 나타내고 있다.

Table 3. Specification of Circular and Rectangular Cross-sectional Column Specimens

Quality	Target column	Circular cross-sectional column specimen	Similarity	Rectangular cross-sectional column specimen
Section (mm)	Diameter	Diameter	2	Length×Breadth
	1,200	600		540×680
Height (mm)	6,100	2,900	2.10	2,900
Geometry ratio	5.08	5.08	1	5.08
Axial load (ton)	155	38.75	2	38.75
Longitudinal reinforcing bar (mm)	D25=25.4	D13=12.7	2	D13=12.7
Ratio of reinforcement	0.016129	0.016132	0.99, 1.01	0.015872
Hoop reinforcing bar (mm)	D13=12.7	D10=9.53	1.33	D10=9.53
Spacing of hoop (mm)	S=300	S=150	2	S=150

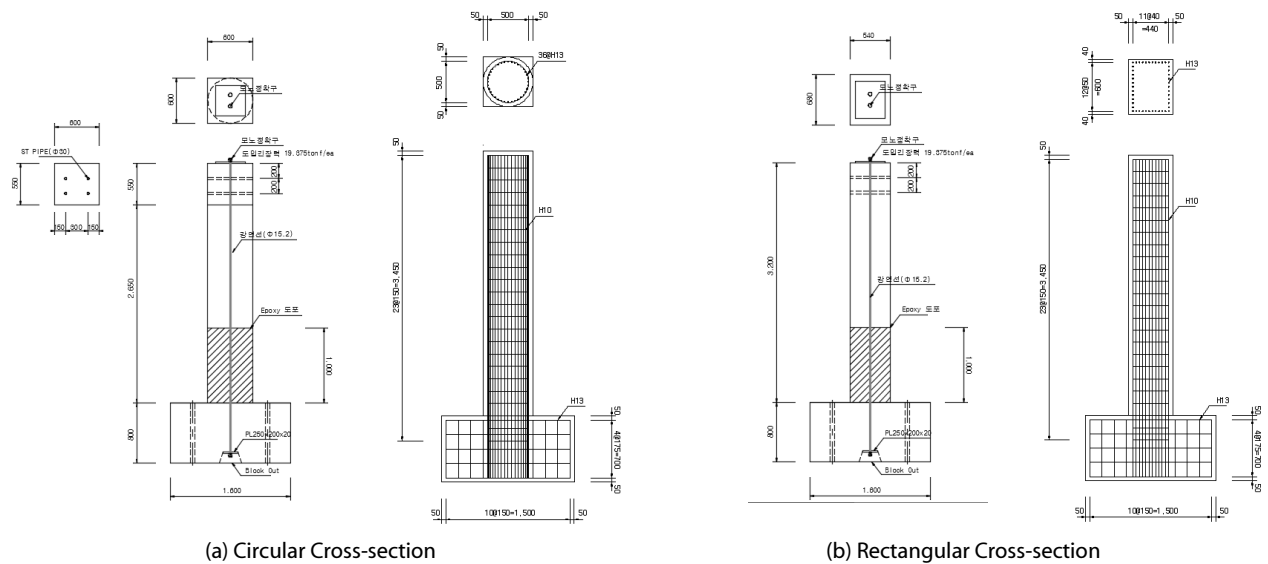


Fig. 2. Details of Circular and Rectangular Cross-sectional Column Specimens

Table 4. Outline of Specimens for Pseudo-dynamic Test

Specimen	Cross-section type	Reinforcing material	Coating depth (mm)	Test method
C-RC	Circular	Non PolyUrea	-	Quasi-static
C-RC	Circular			
R-RC	Rectangular			
C-PU	Circular	PolyUrea	5	Pseudo-dynamic
R-PU	Rectangular			
C-GFPU	Circular	GFPU (GFRP + PU)	5	
R-GFPU	Rectangular			



Photo 2. Types of Retrofitting Materials

### 2.2.2 실험방법

실험체의 탄소성 이력특성을 알아보기 위해 준정적실험을 수행하였으며 수평하중 재하방식은 실험체의 높이에 대한 수평방향의 변위인 드리프트 레벨(Drift level)을 증가시키는 변위제어방식으로 하중을 재하하였다. 드리프트 레벨을 0.25%씩 증가시켜 2 사이클 반복 후 다음 단계를 진행하였으며, 변위제어에 대한 변위-시간 이력은 Fig. 3과 같다. 이 때 사용한 장비로는 최대스트로크 ± 250 mm, 최대하중 1,000 kN 용량의 유압가력장치를 사용하였으며 수직방향 축하중은 강연선을 이용하여 시편에 38.75 ton의

축력을 유지하도록 하였다. 유사동적실험의 입력가속도는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 1940, El Centro EQ 지진파를 사용하였다. 최대가속도(PAG)는 0.35g, 총 가진 시간은 31.2초이며, 유사동적 실험에서 El Centro PGA의 두 배에 해당하는 0.7g의 가속도를 적용하였다. 단위 적분 시간은 0.02초이며, 감쇠비 5%, 입력데이터인 초기강성 및 주기는 준정적실험의 결과 데이터를 사용하였다. 유사동적실험에서 사용한 해석프로그램으로는 미국의 캘리포니아 Berkeley 대학 지진연구소 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research)센터에서 개발된 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)를 이용하였으며 시간적분방법으로는 Newmark-β를 사용하여 실험을 수행하였다.

유사동적실험에 사용된 계측 센서로는 LVDT, 강연선 게이지, 철근 게이지를 사용하였으며 동적 데이터로거를 통하여 데이터 계측을 수행하였다. LVDT의 경우, 하중이 적용되는 선상에 wire 형태의 1,000 mm LVDT 1개를 설치하여 변위 이력을 계측하였으며, 기둥 중앙부 200 mm LVDT 1개, 폴리우레아 도포 1.0 m부분 1/2 지점 및 1/4 지점에 100 mm LVDT를 각각 1개씩, 기초 중앙 및 기초 상부 끝단 10 mm 안쪽 지점에 50 mm LVDT를 각각 1개씩을 설치하여 변위이력을 계측하였다. 강연선 게이지의 경우, 원형 및 각형단면 시편에 대해서 시편 1개당 총 3개의 강연선 게이지를 부착하였으며, 부착 위치는 강연선의 중앙부, 파단부, 끝단부로 하였다. 철근 게이지의 부착 위치는 Fig 5와 같이 원형단면 시편의 경우, 기둥 중앙부에 대해서 띠철근에 부착한 게이지는 띠철근 한 개에 4방향으로 각 1개씩 총 4개, 주철근에 부착한 게이지는 하중방향과 수직하도록 2개를 부착하였으며, 파단예상(기초와 기둥이 시작되는 아래)부분에 대해서 띠철근에 부착한 게이지 12개, 주철근에 부착한 게이지 12개로 총 30개의 철근게이지를 부착하였다. 각형단면 시편의 경우, 기둥 중앙부에 대해서 띠철근에 부착한 게이지는 하중방향과 평행하도록 2개, 주철근에

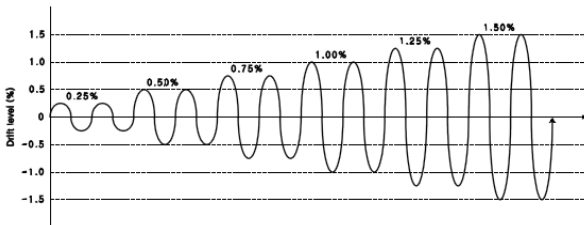


Fig. 3. Drift Level of Quasi-static Test

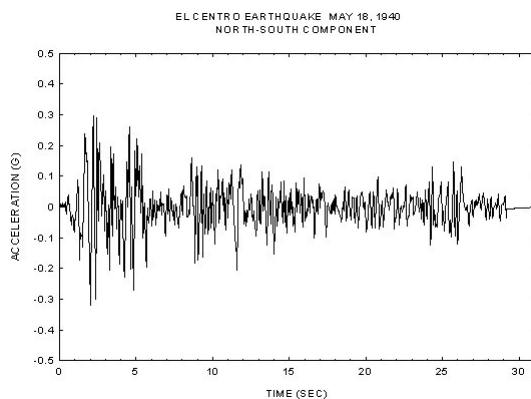


Fig. 4. El Centro Earthquake

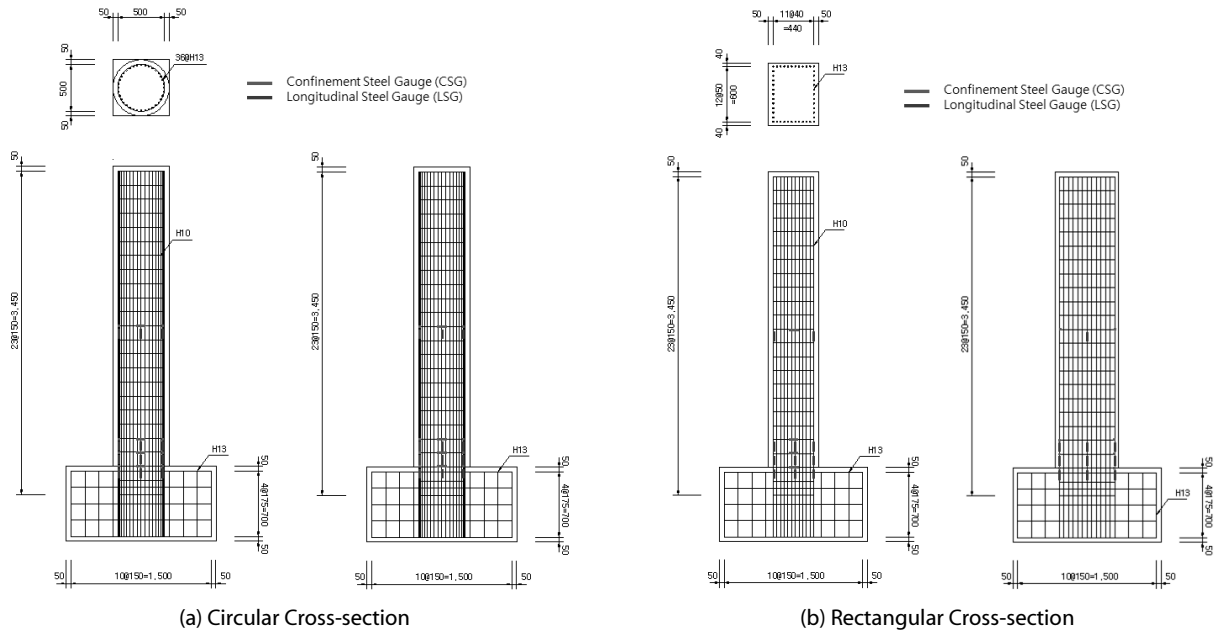


Fig. 5. Location of Steel Gauge in Circular and Rectangular Cross-sectional Column Specimens

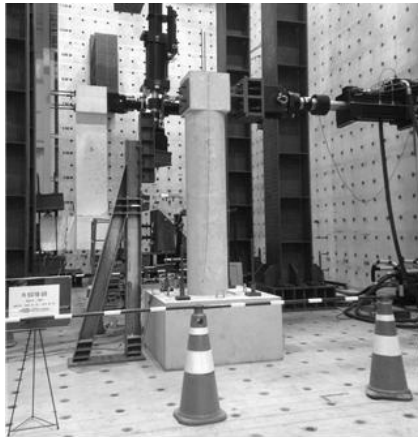


Photo 3. Pseudo-dynamic Test Setup

부착한 게이지는 하중방향과 수직하도록 2개를 부착하였으며, 파단 예상부분에 대해서 띠철근에 부착한 게이지는 하중방향과 평행하도록 6개 및 주철근에 부착한 게이지는 하중방향과 수직하도록 12개를 부착하여 총 22개의 철근 게이지를 부착하였다. Photo 3은 유사동적실험 전경을 나타내고 있다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 압축강도 실험 결과

내진보강용 폴리우레아로 보강된 시편의 일축압축강도 실험 결과는 Table 5에 정리되어 있다. 원형단면 시편의 경우 최대

압축력의 크기가 GPU > GGPU > PU > RC 순으로 측정되었으며, 각형단면 시편의 경우 최대 압축력의 크기가 GPU > PU > GPU > RC 순으로 측정되었다. 원형단면 시편의 최대하중을 고려해 볼 때 무보강 시편에 비하여 PU 1.14배, GGPU 1.40배, GPU 1.23배의 강도 증진이 나타났다. 각형단면 시편의 최대하중을 고려해 보면 무보강 시편 PU 1.20배, GGPU 1.48배, GPU 1.08배의 강도 증진이 나타났다. GGPU의 경우 시편의 편차가 컸으며 FRP 시트 부착이나 PU 도포 작업의 정밀도에 따른 강도 증진효과에 큰 차이가 있음을 확인하였다. GPU의 경우 GGPU에 비해 낮은 압축강도를 보였다. 특히 GPU는 재하하중이 증가함에 따라서 폴리우레아면이 GioGrid에서 분리되는 거동을 확인하였다. 이는 양생된 에폭시의 강성에 비해 폴리우레아의 강성이 상대적으로 약해 먼저 파괴에 도달하는 것으로 판단된다. 각형단면 시편은 모서리가 존재하고(원형단면 시편은 불연속면 형성이 유리함) 콘크리트 표면과 GioGrid의 합침 시 모서리부분에 들뜨는 현상으로 접착성에 문제가 존재하기 때문에 보강효과가 감소하는 것으로 판단된다. FRP나 GioGrid는 콘크리트면에 부착하는 과정이 시공성을 크게 좌우할 수 있다는 것을 시험을 통해서 확인 하였으며, 각형단면 시편보다는 원형단면 시편에서 보강효과가 우수한 것을 확인하였다. Fig. 6은 원형 및 각형단면 시편의 하중-변위 곡선을 나타내고 있으며 PU, GGPU, GPU 시편 모두 균열 이후의 거동에서 일정 강도를 유지하면서 변위가 증가하는 연성거동을 확인하였다. Photo 4는 원형 및 각형단면 시편의 파괴 형상을 보여주고 있다.

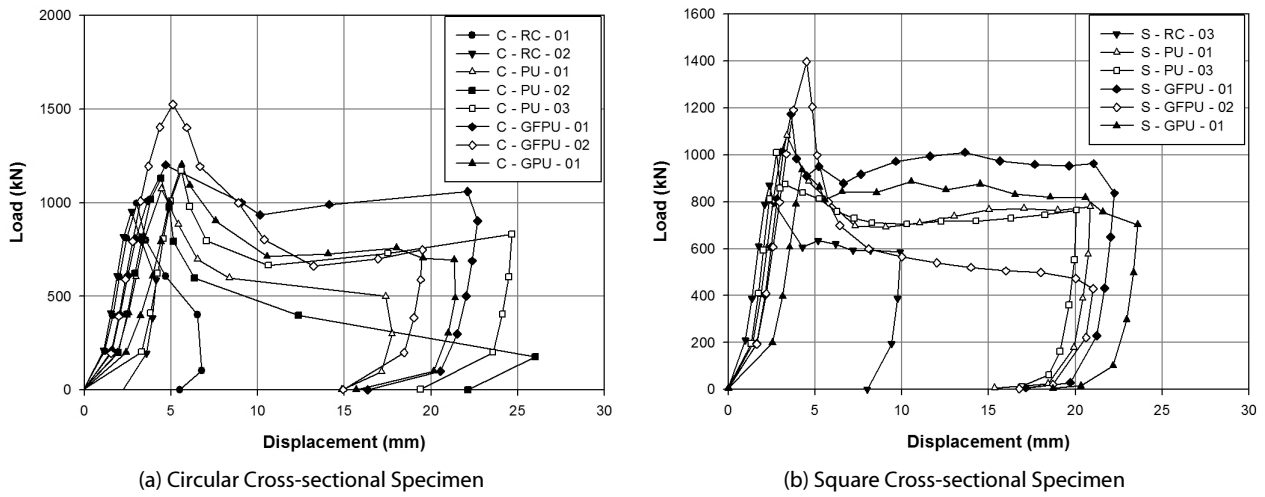


Fig. 6. Load versus Displacement Curve of Uniaxial Compression Test

Table 5. Uniaxial Compression Test Results

Specimen	$P_{Max}$ (kN)	Compressive strain ( $\epsilon$ )	Avg. $P_{Max}$ (kN)	Ratio
C-RC-01	996.3	0.0045	973.70	1.00
C-RC-03	951.1	0.0039		
C-PU-01	1,062.3	0.0066	1,112.30	1.14
C-PU-02	1,117.8	0.0064		
C-PU-03	1,156.8	0.0081		
C-GFPU-01	1,200.3	0.0068	1,360.45	1.40
C-GFPU-02	1,520.6	0.0074		
C-GPU-01	1,200.8	0.0081	1,200.80	1.23
S-RC-03	867.8	0.0035	867.80	1.00
S-PU-01	1,074.1	0.0050	1,038.75	1.20
S-PU-03	1,003.4	0.0040		
S-GFPU-01	1,169.8	0.0052	1,281.70	1.48
S-GFPU-02	1,393.6	0.0065		
S-GPU-01	933.4	0.0061	933.40	1.08

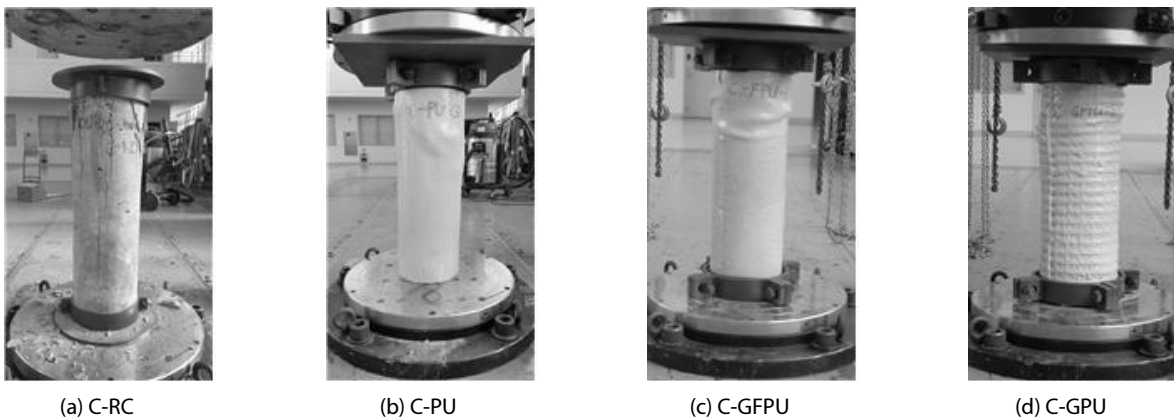


Photo 4. Failure Behavior of Circular and Square Specimens of Uniaxial Compression Test

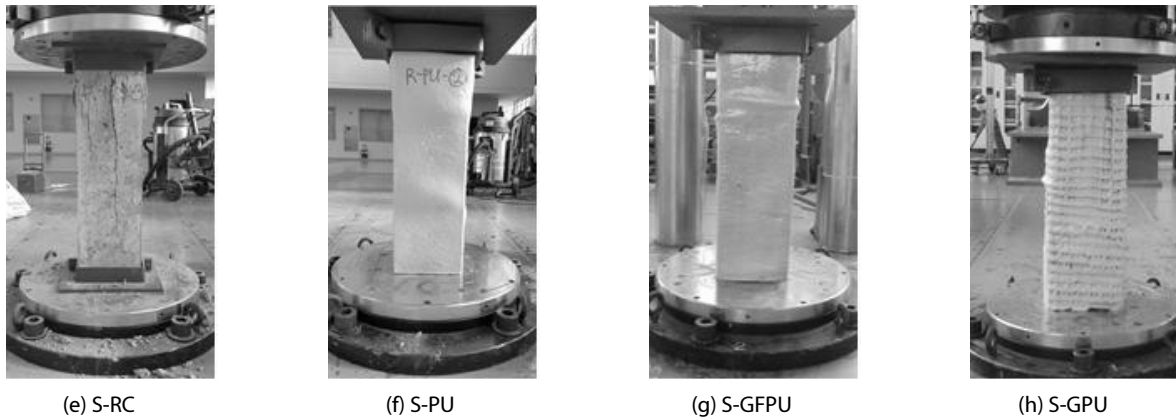


Photo 4. Failure Behavior of Circular and Square Specimens of Uniaxial Compression Test (Continue)

### 3.2 유사동적실험 결과

#### 3.2.1 하중-변위 이력곡선

내진보강용 폴리우레아로 보강된 시편의 유사동적실험에서 하중-변위 이력곡선 결과는 다음과 같다. Table 6은 시편별 최대하중에 따른 변위를 나타내고 있으며, Fig. 7은 각 시편에 대한 하중-변위 이력곡선을 나타내고 있다. Table 6에서 볼 수 있듯이 원형단면 시편의 경우 C-RC의 최대하중 208.63 kN(pull)일 때 변위 69.48 mm, 최대하중 174.51 kN(push)일 때 변위 54.52 mm로 측정되었다. C-PU의 최대하중 173.59 kN(pull)일 때 변위 72.15 mm, 최대하중 188.79 kN(push)일 때 변위 46.36 mm로 측정되었으며, C-GFPU의 최대하중 188.37 kN(pull)일 때 변위 69.48 mm, 최대하중 180.49 kN(push)일 때 변위 45.51 mm로 측정되었다. 각형단면 시편의 경우, R-RC의 최대하중 224.62 kN(pull)일 때

변위 67.60 mm, 최대하중 224.07 kN(push)일 때 변위 38.29 mm로 측정되었다. R-PU의 최대하중 218.09 kN(pull)일 때 변위 63.53 mm, 최대하중 210.10 kN(push)일 때 변위 36.53 mm로 측정되었으며, G-GFPU의 경우는 최대하중 253.13 kN(pull)일 때 변위 60.56 mm, 최대하중 207.29 kN(push)일 때 변위 35.62 mm로 측정되었다. push방향 최대하중에서 pull방향 최대하중까지의 상대변위를 계산한 결과 C-RC 124.00 mm, C-PU 118.51 mm, C-GFPU 114.99 mm로 측정되었으며 R-RC 105.89 mm, R-PU 100.06 mm, R-GFPU 96.18 mm로 측정되었다. 무보강 시편에 비해 PU 보강시 원형단면 시편 4%, 각형단면 시편 6% 이상 변위가 줄어들었고 GFPU 보강시 원형단면 시편 7%, 각형단면 시편 9% 이상 변위가 줄어들었다. 원형 및 각형단면 시편 모두 PU 및 GFPU 보강에 따라 변위 값이 줄어드는 경향으로 보아 같은 지진하중에 대해서 강성이 증진되었다고 판단된다.

Table 6. Similarity of Pseudo-dynamic Test

Specimen	P <sub>Max</sub> [kN]	Displacement [mm]	Relative displacement [mm]	Ratio
C-RC	-208.63	-69.48	124.00	1.00
	174.51	54.52		
C-PU	-173.59	-72.15	118.51	0.96
	188.79	46.36		
C-GFPU	-188.37	-69.48	114.99	0.93
	180.49	45.51		
R-RC	-224.62	-67.60	105.89	1.00
	224.07	38.29		
R-PU	-218.09	-63.53	100.06	0.94
	210.10	36.53		
R-GFPU	-253.13	-60.56	96.18	0.91
	207.29	35.62		

Fig. 8은 유사동적실험에서 원형단면 및 각형단면 시편에 대한 변위-시간 곡선을 나타내고 있다. 시편 모두 지진파를 경험한 이후 pull방향 쪽으로 치우친 경향을 보이며, 이는 El Centro EQ의 특성상 초기에 최대가속도가 적용되므로 초기에 최대하중이 발생하고 이후 반복하중에 따라 잔류변형이 발생된 것으로 판단된다. 잔류변형은 C-RC 2.91 mm, C-PU 10.31 mm, C-GFPU 6.79 mm로 측정되었으며 R-RC는 20.69 mm, R-PU는 9.58 mm, R-GFPU는 8.25 mm로 측정되었다. 각형단면 시편의 경우 잔류변형량은 PU 및 GFPU 보강시 약 두 배 이상 줄어든 것을 확인하였다. PU와 GFPU 보강의 차이는 1.33 mm로 큰 차이는 보이지 않았다. 반면 원형단면 시편의 경우 PU 보강보다 GFPU 보강에서 약 34% 정도 잔류변형이 줄어든 것을 확인하였다. GFPU 보강보다 GFPU 보강에서 우수한 성능을 확인하였으며 원형단면 시편에서 GFPU 보강은 원형단면 특성상 모서리가 없기 때문에 각형단면 시편보다 우수한 것으로 판단하였다.



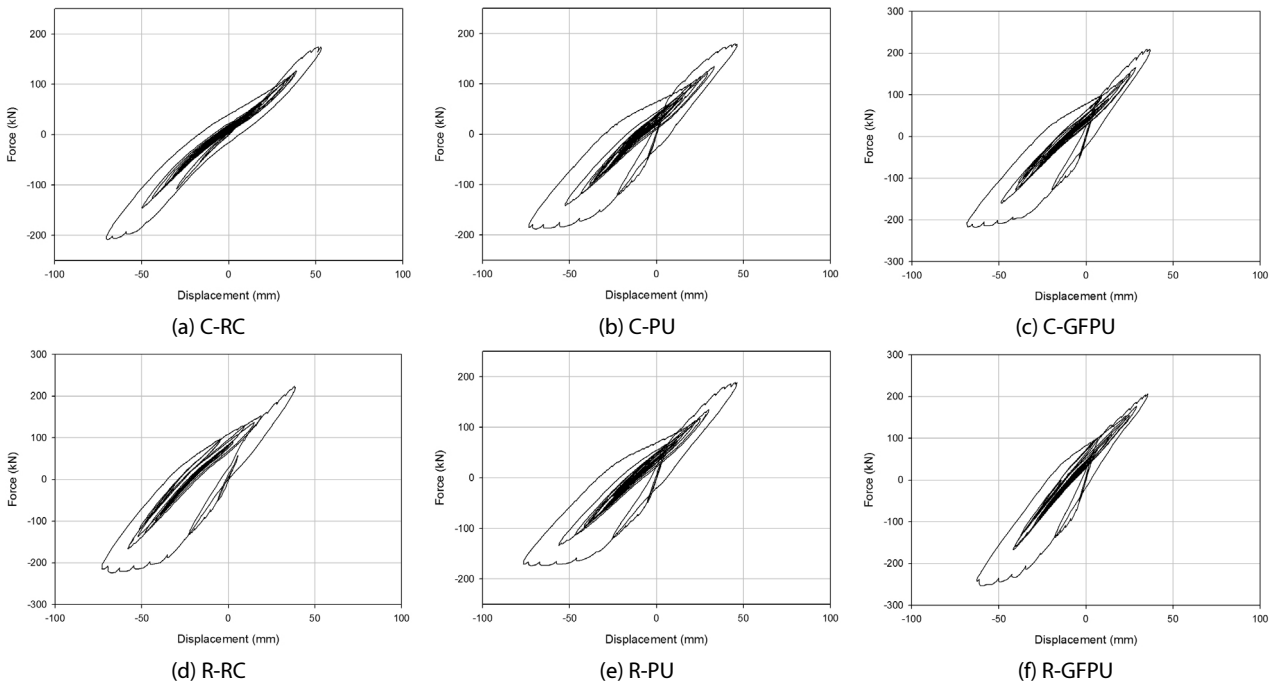


Fig. 7. Force versus Displacement Curve of Pseudo-dynamic Test

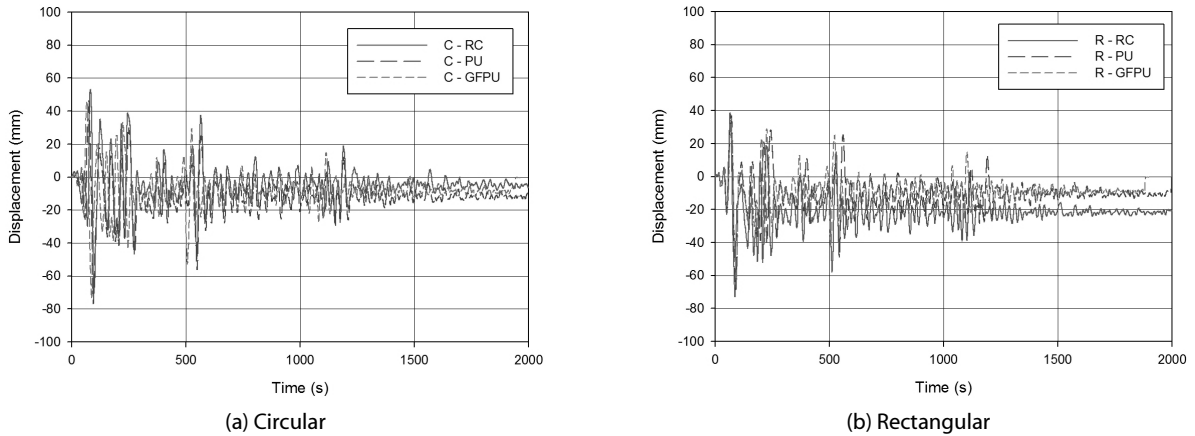


Fig. 8. Displacement versus Time Curve of Pseudo-dynamic Test

### 3.2.2 철근변형률

내진보강용 폴리우레아로 보강된 시편의 유사동적실험에서 철근변형률 결과는 다음과 같다. Figs. 9 and 10은 주철근의 철근변형률에 관한 하중-변형률 곡선을 나타내고 있다. 최대하중 및 최대하중 시의 변형률은 C-RC의 최대하중 208.63 kN(pull)일 때 변형률 0.0158, 최대하중 174.51 kN(push)일 때 변형률 0.0023로 측정되었다. C-PU의 최대하중 173.59 kN(pull)일 때 변형률 0.0090, 최대하중 188.79 kN(push)일 때 변형률 0.0019로 측정되었으며, C-GFPU의 최대하중 188.37 kN(pull)일 때 변형률 0.0159, 최대하중 180.49 kN(push)일 때 변형률 0.0016로 측정되었다. R-RC의

최대하중 224.62 kN(pull)일 때 변형률 0.0035, 최대하중 224.07 kN(push)일 때 변형률 0.0011로 측정되었다. R-PU의 최대하중 218.09 kN(pull)일 때 변형률 0.0030, 최대하중 210.10 kN(push)일 때 변형률 0.0008로 측정되었으며, G-GFPU의 최대하중 253.13 kN(pull)일 때 변형률 0.0033, 최대하중 207.29 kN(push)일 때 변형률 0.0008로 측정되었다. 무보강 시편에 비해 PU 보강시 원형단면 시편의 경우는 16~43%, 각형단면 시편의 경우는 15~26% 이상 변형률이 감소하였고 GFPU 보강시 원형단면 시편의 경우는 0~28%, 각형단면 시편의 경우는 5~23% 이상 변형률이 감소하였다. 측정된 변형률을 통해 응력으로 환산하였을 때 원형단면 시편의

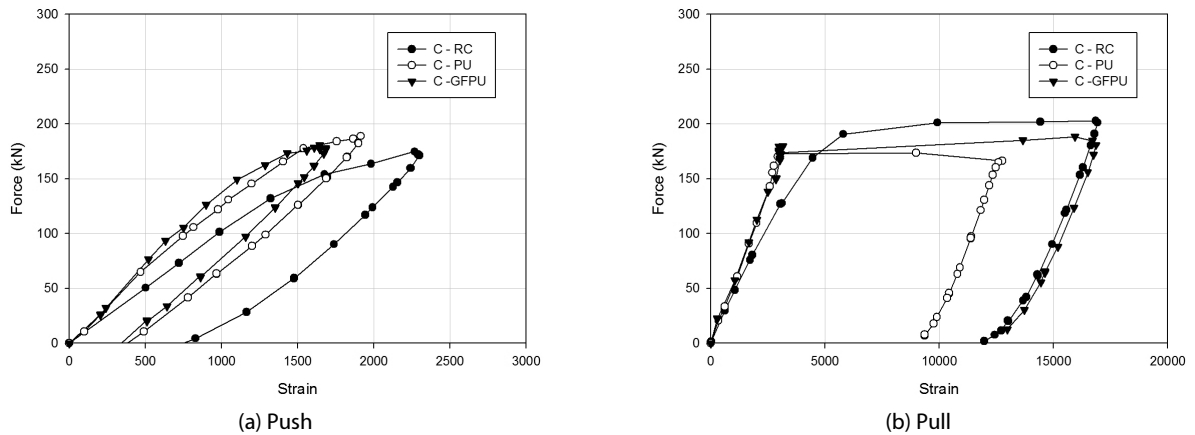


Fig. 9. Force versus Displacement Curve of Main Reinforcement in The Circular Cross-sectional Specimens

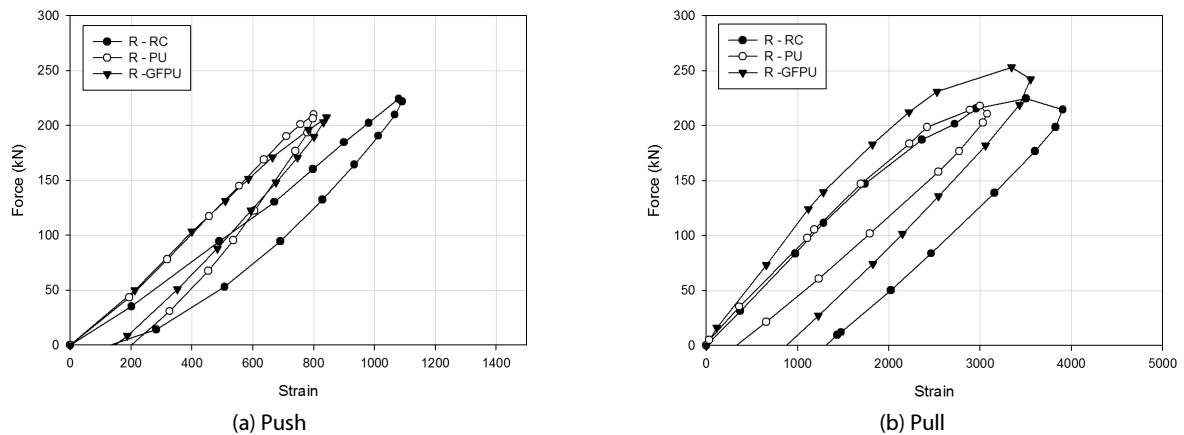


Fig. 10. Force versus Displacement Curve of Main Reinforcement in The Rectangular Cross-sectional Specimens

경우 push(인장)에서 보강된 시편들은 약 적용하중 90 kN까지 강재의 허용응력인 140 MPa를 넘지 않은 탄성거동을 하였지만 C-RC는 같은 하중에서 항복응력인 240 MPa의 근접한 응력으로 항복하기 시작하였다. pull(압축)에서 30 kN까지는 모두 탄성거동을 하다가 60 kN 전에서 C-RC의 주철근은 항복하기 시작하였으며, 보강된 시편은 70 kN에서 주철근이 항복하기 시작하였다. 각형단면 시편의 경우 push(인장)에서 보강된 시편들은 적용하중 약 180 kN까지 탄성거동을 하였지만, R-RC는 같은 하중에서 주철근의 응력이 약 40 MPa 더 측정되었다. pull(압축)에서 R-RC와 R-PU는 110 kN 정도까지는 탄성거동을 하다가 그 이후 항복한 반면 R-GFPU는 130 kN에서 주철근은 항복하기 시작하였다. 인장영역에서 원형 및 각형단면 시편 모두 확연한 보강효과를 나타냈으며, 압축영역에서는 GFPU보강이 PU보강보다 성능이 우수한 것을 확인하였다. 원형단면 시편의 주철근은 하중이 작용할 때 집중응력을 많이 받기 때문에 각형단면 시편의 주철근보다는 변형을 및 응력이 많이 발생하였다고 판단하였다. 원형 및 각형단면 시편

모두 PU 및 GFPU 보강에 따라 변형률이 감소하는 경향으로 보아 같은 지진하중에 대하여 보강효과가 증진된 것으로 판단된다.

### 3.2.3 변위연성도

내진보강용 폴리우레아로 보강된 시편의 유사동적실험에서 변위연성도 결과는 다음과 같다. Figs. 11 and 12는 원형 및 각형단면 시편에 대한 최대하중까지 하중-변위 포락곡선이다. 변위 연성도 극한변위를 항복변위로 나눈 값으로 계산하여야 하지만 본 연구에서는 최대변위를 항복변위를 나눈 값으로 하였다. 변위연성도는 C-RC의 최대하중 208.63 kN(pull)일 때 변위연성도 1.14, 최대하중 174.51 kN(push)일 때 변위연성도 1.15로 측정되었다. C-PU의 최대하중 173.59 kN(pull)일 때 변위연성도 1.68, 최대하중 188.79 kN(push)일 때 변위연성도 1.34로 측정되었으며 C-GFPU의 경우는 최대하중 188.37 kN(pull)일 때 변위연성도 1.56, 최대하중 180.49 kN(push)일 때 변위연성도 1.41로 측정되었다. R-RC의 최대하중 224.62 kN(pull)일 때 변위연성도 1.68, 최대하중 224.07

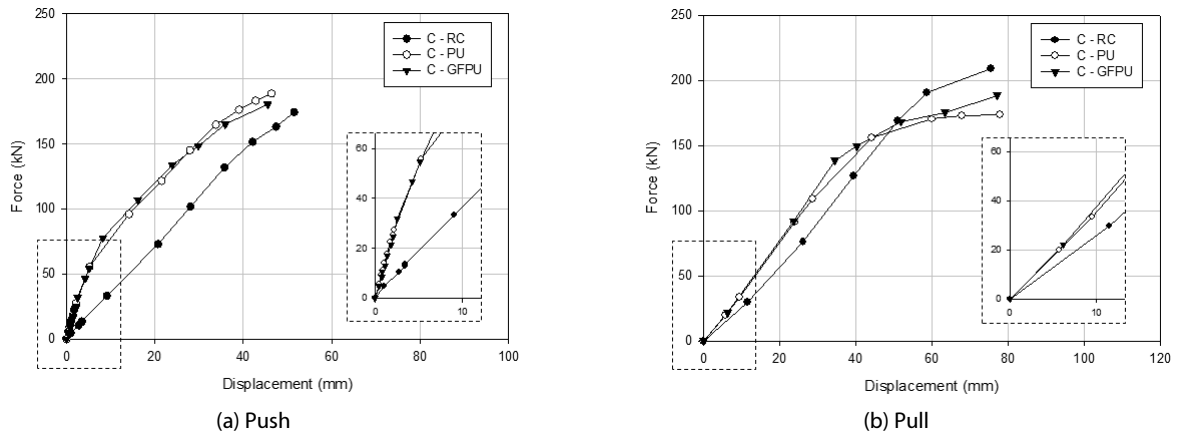


Fig. 11. Force versus Displacement Envelope Curve until Maximum Force of Circular Cross-sectional Column Specimens

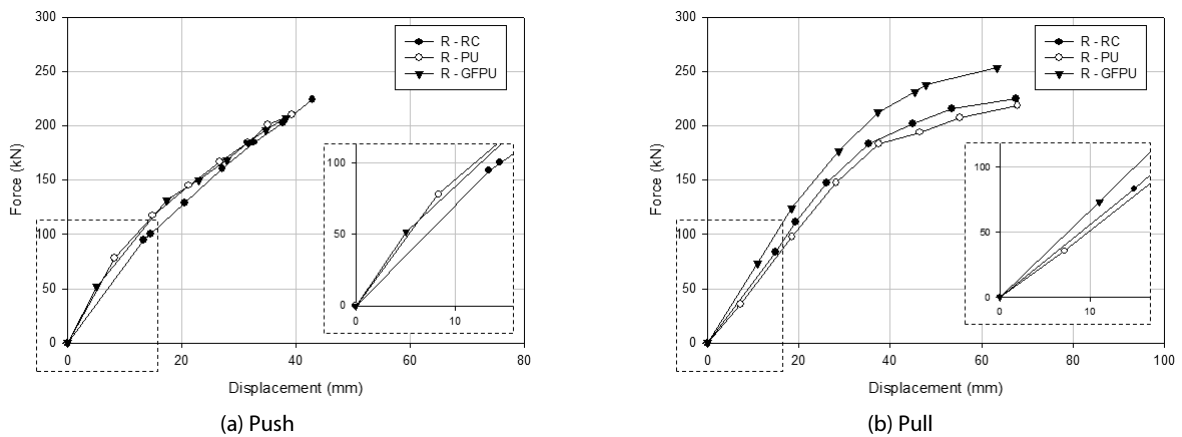


Fig. 12. Force versus Displacement Envelope Curve until Maximum Force of Rectangular Cross-sectional Column Specimens

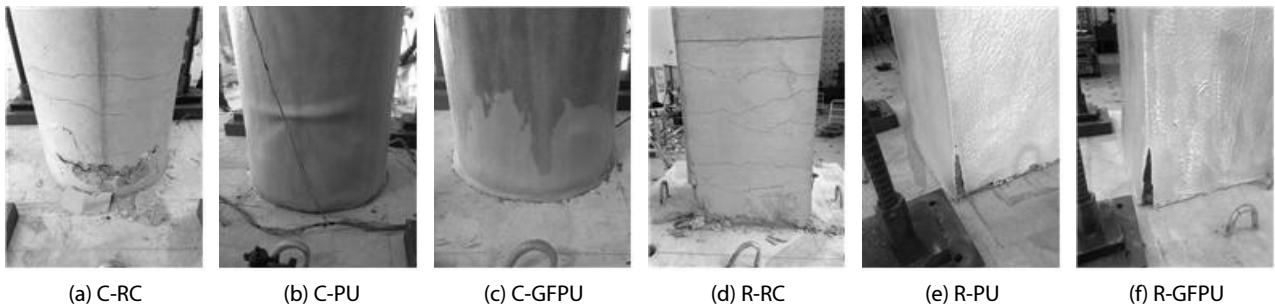


Photo 5. Failure Behavior of Specimens of Pseudo-dynamic Test

kN(push)일 때 변위연성도 1.20로 측정되었다. R-PU의 최대하중 218.09 kN(pull)일 때 변위연성도 1.56, 최대하중 210.10 kN(push)일 때 변위연성도 1.32로 측정되었으며 G-GFPU의 최대하중 253.13 kN(pull)일 때 변위연성도 1.49, 최대하중 207.29 kN(push)일 때 변위연성도 1.25로 측정되었다. 원형단면의 경우 무보강 시편에 비해 PU 보강시 1.16~1.48배, GFPU 보강시 1.22~1.37배 변위

연성능력 향상을 나타내고 있으며, GFPU 보강의 경우 GFRP 시트와 결합된 에폭시와 폴리우레아 계면사이의 부착이 완전히 이루어지지 않아 PU 보강 시편과 비교했을 때 보강효과가 감소하는 것으로 판단된다. 각형단면 시편의 경우 무보강 시편에 비해 PU 보강시 0.93배, GFPU 보강시 0.88배로 오히려 변위 연성능력 저하를 나타내고 있다. 이는 Photo 5(e) and 5(f)에서 보는 바와

같이 PU 및 GFPU 보강 모두 각형단면의 모서리 부분에서 폴리우레아가 찢겨나가는 현상이 발생 되었으며, 특히 PU와 GFRP 시트의 단일 거동을 하지 못하고 모서리 부분에서 박리되면서 반복하중에 따른 응력집중으로 인한 손상이 발생되었다고 판단된다. 모서리가 없는 원형단면 시편의 경우 폴리우레아의 합성에서 불연속면 형성으로 인하여 원형단면 시편이 각형단면 시편보다 변위 연성능력이 우월한 것으로 판단된다.

### 3.2.4 소산에너지

구조물의 에너지 흡수 혹은 소산능력은 내진성능을 평가하는데 중요한 요소이다. 소산에너지는 하중-변위 이력곡선의 내부면적의 합으로 정의하며 Fig. 7의 하중-변위 이력에 대한 소산에너지를 Table 7에 정리하였다. C-RC의 소산에너지는 6,828.68 kN·mm이며 C-PU와 C-GFPU의 소산에너지는 각각 10,425.61 kN·mm, 10,379.11 kN·mm로 계산되었다. R-RC의 소산에너지는 12,292.94 kN·mm이며 R-PU와 G-GFPU의 소산에너지는 각각 10,201.87 kN·mm, 9,153.05 kN·mm로 계산되었다. 원형단면 시편의 경우 무보강 시편에 비해 PU 보강시 1.53배, GFPU 보강시 1.52배 소산능력이 향상되었으며, 각형단면 시편의 경우 무보강 시편에 비해 PU 보강시 0.83배, GFPU 보강시 0.74배 소산능력이 저하되었다. 앞서 언급한바와 같이 각형단면의 모서리 부분에서 폴리우레아가 파단되는 현상을 고려하였을 때 폴리우레아와 GFRP 시트의 단일 거동을 하지 못하고 모서리 부분에서 박리되면서 반복하중에 따른 응력집중으로 손상이 발생되었다고 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 지진하중에 영향을 받는 기중부재의 내진성능 극대화를 위한 내진보강용 폴리우레아로 보강된 시편의 일축압축 강도 실험 및 유사동적실험을 수행하였으며 다음과 같은 연구 결과를 도출하였다.

(1) 일축압축강도 실험의 경우, 내진보강용 폴리우레아 보강 시편

들은 시편보다 강도가 증진된 경향을 보였으며, PU 보강시 1.14~1.20배 증가, GFPU 보강시 1.40~1.48배 증가, GPU 보강시 1.08~1.23배 증가하였다. 보강된 시편 모두는 균열 이후 일정 강도를 유지하면서 변위가 증가하는 연성거동을 확인할 수 있었다. GFPU와 GPU는 콘크리트면과의 부착에 따라 단일 거동이 크게 좌우될 수 있으며, 특히 GPU는 재하하중이 증가함에 따라 폴리우레아가 GioGrid에서 분리되는 거동을 확인하였다.

- (2) 유사동적실험의 경우 모든 시편에 대해서 지진파를 경험하면서 실험 초기에 최대하중이 발생한 이후 시험 종료까지 반복하중으로 인한 잔류변형이 발생하였으며 pull방향으로 치우쳤다. RC 시편에 비해 PU 보강시 4~6% 이상, GFPU 보강시 7~9% 이상 변위가 줄어들었다. 원형 및 각형단면 시편 모두 PU 및 GFPU 보강에 따라 변위 값이 줄어드는 경향으로 보아 같은 지진하중에 대해서 강성이 증진되었다고 판단된다. 각형단면 시편의 경우 잔류변형량은 PU 및 GFPU 보강시 약 두 배 이상 줄어든 것을 확인하였다. PU와 GFPU 보강의 차이는 1.33 mm로 큰 차이는 보이지 않았지만 원형단면 시편의 경우 PU 보강보다 GFPU 보강에서 약 34% 정도 잔류변형이 줄어든 것을 확인하였다. PU 보강보다 GFPU 보강에서 우수한 성능을 확인하였다.
- (3) 주철근 변형률의 경우, PU 보강시 원형 및 각형단면 시편은 각각 16~43%, 15~26% 이상 변형률이 감소하였고 GFPU 보강시 원형 및 각형단면 시편은 각각 0~28%, 5~23% 이상 변형률이 감소하였다. 동일한 지진하중에 대하여 원형 및 각형단면 시편 모두 PU 및 GFPU 보강에 따라 변형률이 감소하는 경향으로 보아 보강효과가 증진된 것으로 판단된다.
- (4) 변위연성도 결과로 원형단면 시편의 경우, PU 보강시 1.48배, GFPU 보강시 1.37배 변위 연성능력 향상을 나타내고 있으며, 각형단면 시편의 경우, PU 보강시 0.93배, GFPU 보강시 0.88 배로 오히려 변위 연성능력 저하를 나타내고 있다. GFPU 보강의 경우 GFRP 시트와 결합된 에폭시와 폴리우레아 계면사이의 부착이 완전히 이루어지지 않아 PU 보강 시편과 비교했을 때 보강효과가 감소한 것으로 판단된다. 각형단면 시편의 경우 모서리 부분에서 폴리우레아가 찢겨나가는 현상이 발생 되는 것을 고려하였을 때 PU와 GFRP 시트의 단일 거동을 하지 못하고 모서리 부분에서 박리되면서 반복하중에 따른 응력집중으로 인한 손상이 발생되었다고 판단된다.
- (5) 소산에너지 결과로 원형단면 시편의 경우, PU 보강시 1.53배, GFPU 보강시 1.52배 소산능력이 향상되었으며, 각형단면 시편의 경우, PU 보강시 0.83배, GFPU보강시 0.74배로 오히려 소산능력이 저하되었다.

Table 7. Results of Dissipation Energy

Specimen	Dissipation energy (kN·mm)	Ratio
C-RC	6,828.68	1.00
C-PU	10,425.61	1.53
C-GFPU	10,379.11	1.52
R-RC	12,292.94	1.00
R-PU	10,201.87	0.83
R-GFPU	9,153.05	0.74

(6) 본 연구에서 내진보강용 폴리우레아로 보강된 부재의 압축강도에 있어 축방향 하중으로는 강도증진과 연성거동능력이 우월한 것으로 판단되고, 지진하중을 고려한 유사동적실험에 있어 횡방향 하중으로는 상대변위, 잔류변형, 주철근 변형률, 변위연성도, 소산에너지 모두 원형단면 시편의 경우 성능향상을 입증하였으며, 모서리가 있는 각형단면 시편은 폴리우레아 도포 시 불연속면 형성이 불리하기 때문에 원형단면 시편보다 구속효과가 낮은 것으로 판단된다. 폴리우레아와 GFRP 시트의 단일 거동을 위하여 각형단면의 모서리부분의 추가적인 연구가 뒷받침되어야 하겠지만 본 연구에서 제안된 내진보강용 폴리우레아 보강방법은 기둥부재의 내진보강에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2015년 국토교통기술사업화지원사업 ‘기둥부재의 내진 성능 및 내구성 극대화를 위한 PU Spray 보수 보강 공법의 실용화(15TBIP-CO74206-02)’ 연구단을 통해 수행되었으며, 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구개발사업의 연구결과입니다(No. 1403010). 연구지원에 감사드립니다.

### References

Ang, B. G., Priestley, M. J. N. and Paulay, T. (1994). "Seismic shear strength of circular reinforced concrete columns." *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 1, pp. 45-59.

Bonacci, J. F. and Maalej, M. (2001). "Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP." *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, No. 2, pp. 102-113.

Chen, C. H., Lai, W. C., Cordova, P., Deierlein, G. G. and Tsai, K. C. (2003). "Pseudo-dynamic test of full-scale RCS frame: Part 1-Design, construction and testing." *In Proceedings of International Workshop on Steel and Concrete Composite Constructions*, pp. 107-118.

Chung, Y. S., Park, J. H., Park, H. S. and Cho, C. B. (2002). "Pseudo dynamic test for the seismic performance enhancement of circular RC bridge piers retrofitted with fibers." *Journal of the Korea concrete institute*, Vol. 14, No. 2, pp. 180-189 (in Korea).

Hakuno, M., Shidawara, M. and Hara, T. (1969). "Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by and analog-computer."

*Transactions of The Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 171, pp. 1-9.

Jin, D. H. (2016). *Seismic Performance Evaluation of Concrete Structure using Hybrid Test System*, Master degree thesis, Myungji University, Korea (in Korea).

Jung, R. Y. and Benson Shing, P. (2006). "Performance evaluation of a real-time pseudo-dynamic test system." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 7, pp. 789-810.

Kim, D. K., Kim, D. Y., Ahn, J. H. and Park, C. L. (1997). "Assessment of the seismic capacity of structure using pseudo-dynamic test", *Journal of the earthquake engineering society of Korea*, Vol. 1, No. 2, pp. 49-57 (in Korea).

KMA, Korea Meteorological Administration, Earthquake (2016). Available at: <http://www.kma.go.kr/mini/earthquake/main.jsp> (in Korea).

Lee, S. K., Chen, Z. F., Ng, M., Tang, J. M., Wan, L. L., Liu, M. and Lee, L. (2008). "Evaluation of CFRP, GFRP and BFRP material systems for the strengthening of RC slabs." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pp. 1-12

Lee, D. H., Oh, J. K., Yu, W. D. and Choi, E. S. (2012). "Seismic performance of RC columns confined by outside lateral reinforcement", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3, pp. 189-196 (in Korea).

Li, Y. F., Chang, S. Y., Tzeng, W. C. and Huang, K. (2003). "The pseudo dynamic test of RC bridge columns analyzed through the Hilbert-Huang transform." *Journal of Mechanics*, Vol. 19, No. 3, pp. 373-387.

Marriott, D., Pampanin, S. and Palermo, A. (2009). "Quasi-static and pseudo-dynamic testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 38, No.3, pp. 331-354.

Shing, P. S. B. and Vannan, M. T. (1991). "Implicit time integration for pseudodynamic tests: Convergence and energy dissipation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 20, No. 9, pp. 809-819.

Takanashi, K., Udagawa, K., Seki, M., Okada, T. and Tanaka, H. (1975). "Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system." *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, Vol. 8, pp. 1-17.

Yang, Y. S., Wang, K. J., Wang, S. J., Hsu, C. W., Tsai, K. C. and Hsieh, S. H. (2004). "Networked pseudo-dynamic testing part I: Database approach." *In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1910-1919.

Youm, K. S., Kwon, T. G., Lee, Y. H. and Hwang, Y. K. (2006). "Seismic retrofit of GFRP wrapping on the lap-spliced bridge piers." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 2, pp. 311-318 (in Korea).