



고연성 PET 섬유로 보강된 철근콘크리트 원형 기둥의 내진성능

소라삭 바치라판야쿰¹⁾ · 임명관^{2)*} · 최동욱³⁾

¹⁾한경대학교 대학원 건축학과 ²⁾송원대학교 건축공학과 ³⁾한경대학교 건축학부

Seismic Performance of Circular RC Columns Retrofitted Using Ductile PET Fibers

Sorrasak Vachirapanyakun,¹⁾ Myung-Kwan Lim,^{2)*} and Dong-Uk Choi³⁾

¹⁾Graduate School of Architecture, Hankyong National University, Anseong 17579, Rep. of Korea

²⁾Department of Architectural Engineering, Songwon University, Gwangju 61756, Rep. of Korea

³⁾Department of Architectural Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Rep. of Korea

ABSTRACT An experimental research was performed using fibers for the purpose of retrofitting existing reinforced concrete circular columns. Glass fiber (GF) and polyethylene terephthalate (PET) were used as well as combined GF+PET (HF). PET has high tensile strength (over 600 MPa) and high ductility (about 15%), but has very low elastic modulus (about 1/6 of GF). A total of four columns was tested against laterally applied reverse cyclic load: control column, GF-, PET-, and HF-strengthened columns. All columns retrofitted using fibers demonstrated improved moment capacity and ductility. Moment capacity of GF-, PET-, and HF-strengthened columns was 120%, 107%, and 120% of the control column, respectively. Drift ratio of all retrofitted columns also increased by 63 ~ 83% over the control column. The final failure mode of the control column was main bar buckling. The final failure mode of the GF- and HF-strengthened columns was GF rupture while that of the PET-strengthened column was main bar rupture in tension. No damage was observed for PET at the ultimate stage due to excellent strain capacity intrinsic to PET. Current test results indicate that PET can be effectively used for seismic retrofit of RC columns. It is noted that the durability characteristics of PET needs to be investigated in the future.

Keywords : glass fiber, PET, seismic strengthening, moment capacity, ductility

1. 서 론

탄소섬유(CF) 및 유리섬유(GF)는 경량이면서 강도 및 강성이 우수한 구조 재료로서 1990년대 이후 우리나라에서도 철근콘크리트 부재 및 구조물의 보강에 많이 사용되어 왔다. 그러나 CF의 최대 변형률은 약 1%, GF의 최대 변형률은 2% 이하이므로 큰 변형을 수반하는 구조물의 내진보강에 적용하기에는 연성 측면에서 한계가 있는 것으로 사료된다. 또한 GF는 알칼리 및 습윤 환경에 노출되면 섬유의 열화에 따른 내구성 문제가 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾

PET(polyethylene terephthalate)는 최대 변형률이 15%에 달하는 고연성 섬유이며, 인장강도가 600 MPa를 상회하

지만 탄성계수는 유리섬유의 1/6 수준으로 매우 낮다. 이 연구에서는 GF 및 PET를 이용한 철근콘크리트 원형 단면 기둥의 내진보강에 대한 실험적 연구를 수행하고, 무보강 기둥과 내진성능을 비교하였다. 또한 기둥 단면에 대해 수행한 모멘트-곡률 해석과 실험결과를 비교하였다. 한편 이 연구와 병행하여 PET의 내구성에 대해서는 별도의 연구가 진행 중이다.

우리나라에서 PET는 일반적으로 타이어 보강용 섬유, 건설 산업에서는 geotextile fabric 등 지반 보강용으로 사용되고 있다. PET를 이용한 철근콘크리트 기둥 보강에 대한 연구는 세계적으로도 아직 초기 단계이며, 일본에서 우에다 등에 의해 기둥 보강 시 우수한 전단 성능 및 연성 증진 효과를 보이는 것으로 보고된 바 있다.²⁾

우리나라에서는 섬유를 사용한 기둥의 내진보강에 대해 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유 등을 사용하여 활발한 연구가 진행되었다. 천성철 등은 탄소섬유 시트 2겹 및 3겹을 사용하여 직사각형 단면의 기둥 내진보강을 실

*Corresponding author E-mail : limmk79@naver.com

Received August 6, 2015, Revised January 13, 2016,

Accepted January 14, 2016

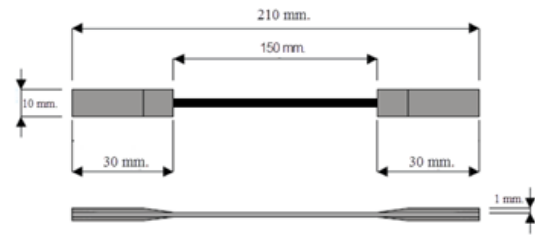
©2016 by Korea Concrete Institute

시하였고, 휨강도는 46~59%, 연성은 3~4배로 증가한 것으로 보고하였다.³⁾ Chung 등은 원형 단면의 교각 내진성능에 대해 유리섬유 1~4겹으로 횡 방향으로 보강한 결과 무보강 기둥의 변위연성도 5에 비해 변위연성도가 7~8 이상으로 증가한다고 보고하였다. 단, 축 방향으로 설치한 섬유 보강 효과는 미미하였다.⁴⁾ Lee 등은 아라미드 섬유를 사용하여 직사각형 단면 기둥의 횡 방향 및 축 방향 보강을 실시하였고, 보강한 기둥의 휨강도는 1.2배 이상으로 증가하였고 동시에 연성이 증가한다고 주장하였다.⁵⁾

2. 재료적 성질 및 실험준비

2.1 보강 섬유 및 접착제의 재료적 성질

연구에 사용된 두 가지 섬유(PET, GF)의 비중, 인장강도, 파괴 시 변형률, 탄성계수 등 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 보강 섬유의 인장시험은 ISO 10406-2를 따라 실시하였고, 500 N 용량의 LLOYD LR5K UTM을 사용하였다(Fig. 1 참고).⁶⁾ Table 1 및 Fig. 1에서 인장강도와 최대 변형률은 PET가 GF의 각각 110%, 1,170%로 PET가 우수하지만, PET의 탄성계수는 GF의 약 16%로 매우 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 PET의 응력-변형률 곡선은 비선형이고, Table 1에서는 변형률 1%에 해당하는 할선탄성계수를 나타내었다. 이 연구에서는 또한 고연성 섬유의 적용에 따라서 접착제도 연성이 우수한 제품을 사용하고자 하였으며, Table 2에



(a) Fiber tensile test specimen



(b) GF roving



(c) PET sheet

Fig. 1 Fiber tensile test

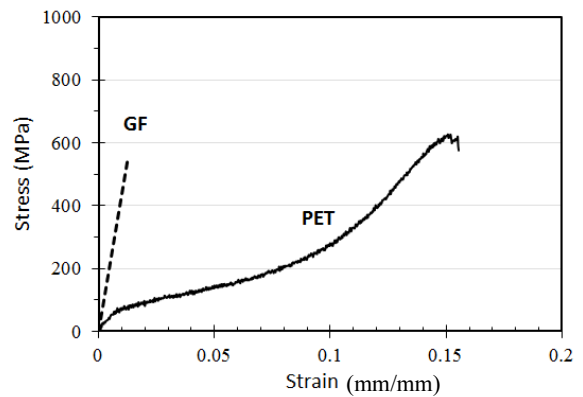


Fig. 2 Fiber tensile test results

이 연구에서 사용한 연성 에폭시 접착제(K2)의 기계적 성질을 나타내었다.

2.2 기둥 실험 준비

2.2.1 기둥 실험체 제작

기둥 실험체는 철근콘크리트 내진설계가 도입되기 이전인 1980년대에 시공된 교량 교각을 모사하였으며, ACI-318-83에 따라서 기둥 단면을 설계하였다.⁷⁾ Fig. 3에 나타낸 기둥 실험체에서 스티브와 기둥은 분리하여 타설하였다. 원형 단면 띠철근 기둥의 외부 지름은 400 mm이고, 12개 D16을 배치(주철근비, $\rho_s = 1.93\%$)하고, D10 띠철근을 250 mm 간격으로 설치(횡 방향 띠철근비, $\rho_{tie} = 0.37\%$)하였다. 콘크리트 56일 압축강도는 30.8 MPa이었고, 100×200 실린더를 사용하고, 1,200 kN 용량의 Instron 4495 UTM으로 측정하여 응력-변형률 곡선을 기록하였

Table 1 Mechanical properties of fibers

Fiber type		Specific gravity	f_{fu} (MPa)	ϵ_f (%)	E_f (GPa)
GF	Ave.	2.54	557	1.28	44.8
	STD	-	21.84	0.0017	6.33
	COV	-	0.039	0.18	0.14
PET	Ave.	1.40	613	14.95	7.1
	STD	-	37.87	0.004	-
	COV	-	0.062	0.029	-

Note: 1. Cross-sectional area of a GF roving = 0.97 mm²; 2. Cross-sectional area of PET sheet = 5.25 mm² (area of fibers in the axial direction only is considered); 3. Secant modulus corresponding to 1% strain is given for PET; 4. No. of test specimens: 5 ea. per fiber type.

Table 2 Tensile properties of adhesive

Type	After 3 days			After 7 days		
	Stress (MPa)	Strain (%)	$E_{adhesive}$ (GPa)	Stress (MPa)	Strain (%)	$E_{adhesive}$ (GPa)
K2	43.7	2.01	2.17	40.9	2.58	1.59

다. 이형철근은 SD400 등급을 사용하였고 철근의 인장시험 역시 같은 UTM을 사용하고 응력-변형률 곡선을 기록하였다. 한편, 기둥 보강에 사용한 GF 섬유는 Table 1에 나타난 섬유 로빙과 유사한 기계적 성질을 갖는 1방향 시트, PET는 Table 1에 나타난 것과 동일한 2방향 시트를 사용하였다.

2.2.2 기둥 섬유보강

무보강(컨트롤) 기둥을 제외한 3개 기둥의 보강 시 2개 기둥은 각각 GF 시트 1겹과 PET 시트 10겹을 사용하여 보강하였다(Table 5 참고). 이때 GF 시트 1겹과 PET 시트

10겹의 축 방향 강성비($E_{GF}A_{GF}/E_{PET}A_{PET}$)는 약 5:1이었다. 이는 PET의 탄성계수가 매우 낮아서 GF와 동일한 수준의 축 방향 강성을 제공하려면 너무 많은 양의 PET를 사용하여야 하기 때문에 PET량을 임의로 제한한 것이다. 나머지 1개 기둥은 PET 시트 10겹을 사용하여 보강한 후에 GF 1겹을 스트립 형태로 부분적으로 사용하여 추가 보강하였다(Fig. 4(d) 및 Table 5 참고). 보강 섬유는 기둥 콘크리트 면을 가볍게 그라인딩한 후에 에폭시 접착제를 사용 기둥 스티브 면으로부터 $2d$ (유효깊이, $d = 352$ mm) 높이로 설치하여 소성흔지 영역을 충분히 보강하였다. 보강 시 사용된 접착제의 양은 시트 체적의 200%이었다.

Table 3 Summary of column concrete strengths

Member	Compressive strength at day, MPa		
	7	28	56
Column	18.1	26.6	30.8
Column stub	--	44.0	48.0

Table 4 Material properties of column rebars

Use	Size	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
Main bars	D16	403	480	175
Ties	D10	465	670	181

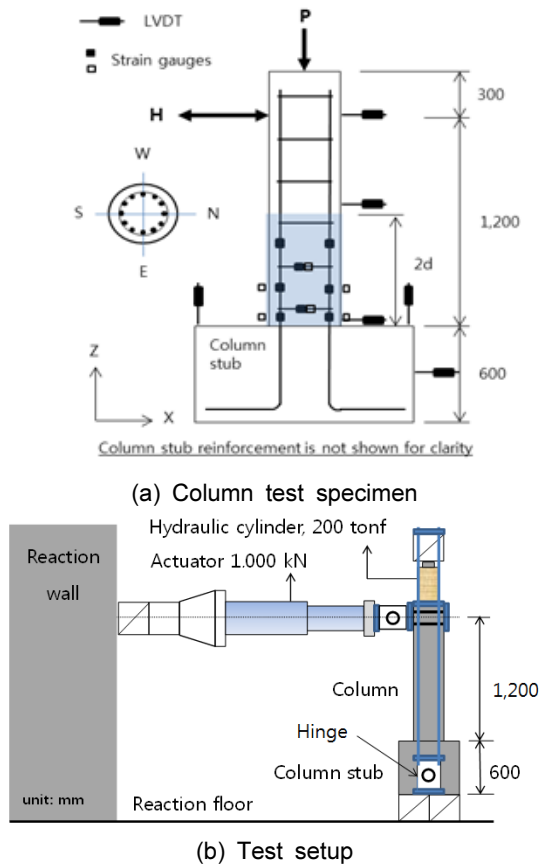


Fig. 3 Column test specimen and test setup

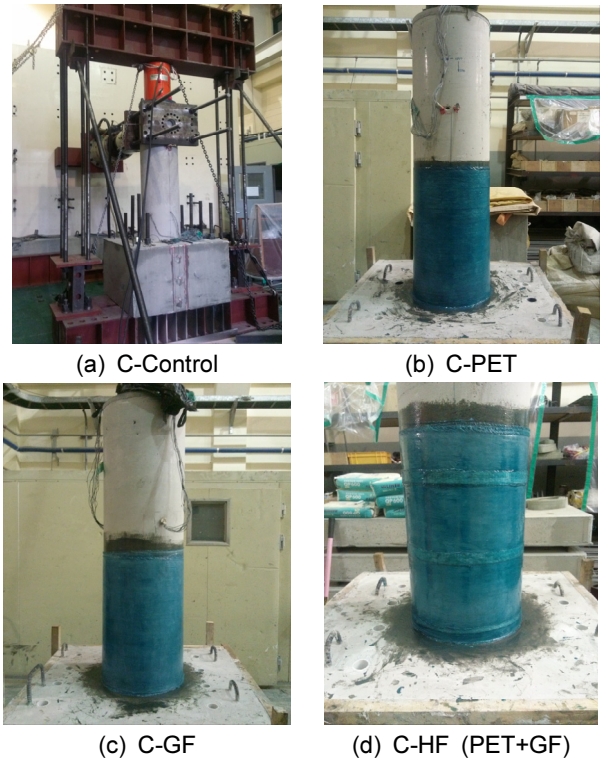


Fig. 4 Control and fiber wrapped columns

Table 5 Fibers used for column strengthening

Index	a/d ¹	ρ_{st} ² (%)	ρ_{tie} ³ (%)	ρ_f ⁴ (%)	Remarks ⁵
C-Control				--	
C-CF				0.108	GF 1 layer
C-PET	3.4	1.93	0.37	1.05	PET 10 layers
C-HF				1.08	PET 10 layers + GF strips

Note: 1. $a = 1,200$ mm, $d = 352$ mm; 2. $\rho_{st} = A_{st}/A_g$; 3. $\rho_{tie} = Vol_{tie}/Vol_{core conc}$; 4. $\rho_f = Vol_f/Vol_{conc}$; 5. GF 1 layer = 106 mm²/pitch, 6. PET 10 layers = 132 mm²/pitch, 7. HF = PET+GF, i.e. PET 132 mm²/pitch + GF 26.1 mm²/pitch (1 pitch = 250 mm), 8. Thickness of GF sheet = 0.424 mm/layer, thickness of PET sheet = 0.106 mm/layer.

Table 5에 기둥의 경간, 주철근비, 횡 방향 철근비 및 섬유 보강비를 요약하여 나타내었다.

2.2.3 측정기기

Fig. 3(a)에 나타난 기둥 실험체에서 주근이 최대 모멘트를 받는 N/S 위치 주근에 수직 방향으로 스트레인게이지 3세트, 기둥 스티브로부터 첫 번째 및 두 번째 띠철근의 E/W 위치에 스트레인게이지 1세트를 수평 방향으로 각각 설치하였다. 주근에 설치한 스트레인게이지는 휨모멘트, 띠철근은 전단력에 대한 철근의 저항을 각각 측정하였다. 기둥이 섬유로 보강된 경우, 모든 실험에서 첫 번째 및 두 번째 띠철근에 해당하는 높이 N/S/E/W 위치에 스트레인게이지를 각각 수평 방향으로 설치하여 섬유의 후프 방향 인장변형을 측정하였다. PET가 사용된 기둥에서는 후프 방향 스트레인게이지에 추가하여 주근이 최대 모멘트를 받는 N/S 위치에 수직 방향으로 각각 스트레인게이지를 설치하였다. 이는 PET 시트가 2방향으로 제작되어 있으므로, 시트의 수직 방향(기둥 축 방향)과 수평 방향(후프 방향) 인장변형률을 모두 측정한 것이다. 3개의 LVDT를 기둥의 변위를 측정하기 위하여 Fig. 3(a)와 같이 기둥의 상부(가력점), 중간, 하부에 각각 설치하였다. 또한 기둥 스티브의 강체 회전을 측정하기 위해 스티브 상부 N/S 단부에 각 1개, 기둥 스티브의 강체 이동 및 수평 방향 강체 회전을 측정하기 위하여 스티브 중앙부 E/W 양측에 각 1개의 LVDT를 설치하였다.

2.2.4 실험방법

Fig. 3과 같이 기둥 실험체의 높이는 1.5 m이고, 횡력은 스티브로부터 상부 1.2 m 지점(실제 기둥의 약 2/3로 제작된 기둥의 중간 위치)에서 가력하였다. 기둥 실험체는 축 방향으로 200 톤 용량의 유압실린더를 사용하여 축하중 강도의 약 7.5%에 해당하는 350 kN을 가력(고정하중을 모사)한 상태에서 1,000 kN 용량의 액추에이터(Instron PL 1.0 N)를 사용하여 변위제어 방식으로 N/S 방향의 횡력을 반복하여 가력하였다. 전반적인 가력 프로그램은 참고문헌 8)을 따랐다. 실험 시작 후 S, N 주철근이 항복 변형률에 다다르기까지 N/S 방향으로 각각 순차적으로 가력하여 각 방향 항복변위를 측정 후 양 방향 항복 변위의 평균값을 취하여 Δ_y 로 정하였다. 이후 Fig. 5의 가력 프로그램에 따라 반복 횡 가력을 실시하였다. 실험 중 일정한 축력이 유지되도록, 힌지를 사용하여 기둥의 변위에 따라서 유압실린더의 압축력과 기둥 중심축이 일치하도록 고려하였다(Fig. 3(b) 참고). N/S 방향의 반복가력은 1, 2, 3, 4.5, 6, $8\Delta_y$ 의 순으로 가력하였고, 각 변위별로 2사이클씩 실시하였다. 각 사이클에서 결정된 최대강도가 실험 중 기록된 최대강도의 80% 이하인 경우 파괴로 간주하고 실험을 중지하였다. 모든 데이터는 TDS 530 데이터로거를 이용하여 실시간으로 기록하고 저장하였다.

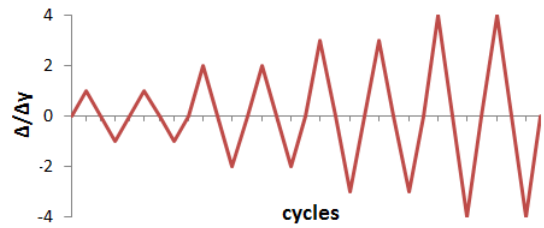


Fig. 5 Program for lateral force application

3. 실험결과

3.1 하중-변위 이력 거동(Hysteretic behaviour)

3.1.1 컨트롤 기둥

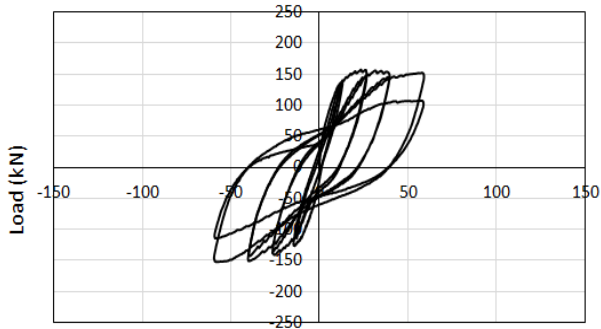
Fig. 6(a)에 나타난 것과 같이 N/S 방향 평균 항복하중은 130 kN, 평균 항복변위(Δ_y)는 13 mm이었다. 4.5 Δ_y 에 해당하는 첫 번째 사이클에서 기둥 하부에서 N/S 방향 모두 콘크리트 박리 현상이 발생하였고, 두 번째 사이클에서 N/S 주철근이 모두 좌굴되었다(Fig. 11 참고). 좌굴은 첫 번째와 두 번째 띠철근 사이에서 발생하여 실험을 종료하였다. 최대 하중은 N/S 방향에서 각각 157/152 kN 이었고, drift ratio는 N/S 방향 모두 4.9%이었다.

3.1.2 PET 보강 기둥

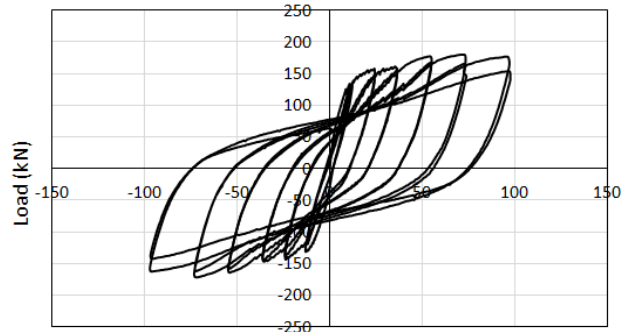
Fig. 6(b)에 나타난 것과 같이 PET로 보강한 기둥의 평균 항복강도는 129 kN, 평균 항복변위는 10.5 mm이었다. 변위의 증가에 따라 기둥의 횡력에 대한 저항 성능은 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 최대 하중은 변위 6 Δ_y 에서 N/S방향 각각 180/172 kN이었다. PET 보강 기둥은 102 mm 변위에서 S 방향 주근의 좌굴에 이은 인장파괴(주근이 이전 사이클에서 국부적으로 좌굴한 후 다음 사이클의 인장하중에 의해 파단)로 최종 파괴되었고, 철근 인장파괴의 위치는 스티브 상부에서 첫 번째 띠철근 사이 중간의 최대 모멘트 지점이었다. 최대 Drift ratio는 8.0%로 무보강 기둥에 비하여 1.6배 수준으로 크게 증가하였다. 기둥 주근의 좌굴 시 콘크리트의 부풀림(bulging) 현상이 두드러지게 나타났으나, 최종 단계에서도 고연성 PET의 파단은 나타나지 않았다(Fig. 12 참고).

3.1.3 GF 보강 기둥

Fig. 6(c)에서 GF로 보강한 기둥의 평균 항복강도는 127 kN, 평균 항복변위는 13 mm이었다. 변위의 증가에 따라 기둥의 횡력에 대한 저항 성능은 지속적으로 증가하였다. 최대 하중은 변위 7.5 Δ_y 에서 N/S 방향 각각 174/219 kN이었다. 액추에이터의 스트로크가 소진되어 일단 실험을 중지하고, 스트로크를 다시 조정 후 N 방향으로 단조가력을 실시하였다. 단조가력 중 하중 222 kN, 변위 148 mm에서 N측면의 GF 인장 파단으로 최종 파괴되었다(Fig. 13 참고). 반복가력에 대한 drift ratio는 8.1%로 무



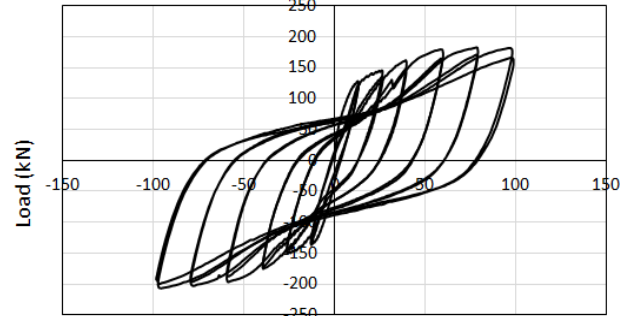
(a) C-Control



(b) C-PET



(c) C-GF



C-HF(PET+CF)

Fig. 6 Load vs. Displacement: Hysteretic behavior

보강 기둥의 1.7배이었으며, 단조가력 시 최대 drift ratio는 12.3%이었다.

3.1.4 HF(PET+GF) 보강 기둥

전술한 것과 같이 HF 보강 기둥은 PET 10겹으로 보강한 후에 추가적으로 GF를 사용하여 부분적으로 추가 보강을 실시하였다. 두 가지 섬유를 혼합(Hybridized fiber, HF)한 이유는 GF의 우수한 강도 및 강성과 PET의 고연성을 동시에 활용하고자 하였기 때문이었다. Fig. 6(d)에서 HF 보강 기둥의 평균 항복강도는 132 kN, 평균 항복 변위는 13 mm이었다. 최대 하중은 변위 7.5Δ_y에서 N/S 방향 각각 182/207 kN이었다. 이후 액추에이터의 스트로크가 소진되어 스트로크를 다시 조정하여 N 방향으로 단조가력을 실시하였다. 하중 177 kN, 변위 161 mm에서 기둥 최하단의 GF 보강 띠가 부분적으로 인장파단하면서 최종 파괴되었다(Fig. 14 참고). 반복가력에 대한 drift ratio는 8.1%이었고, 단조가력 시 최대 drift ratio는 13.4%이었다.

3.2 하중-변위 곡선 포락도

총 4개 기둥 실험으로부터 결정된 하중-변위 거동의 포락도를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 3개의 보강된 기둥(C-PET, C-GF, C-HF)은 모두 무보강 기둥(C-Control)에 비해 향상된 강성, 내력 및 변위를 보이고 있다. N 방

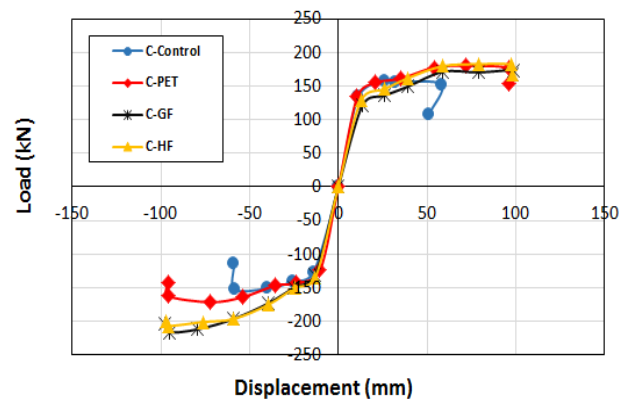


Fig. 7 Load-displacement envelope curves

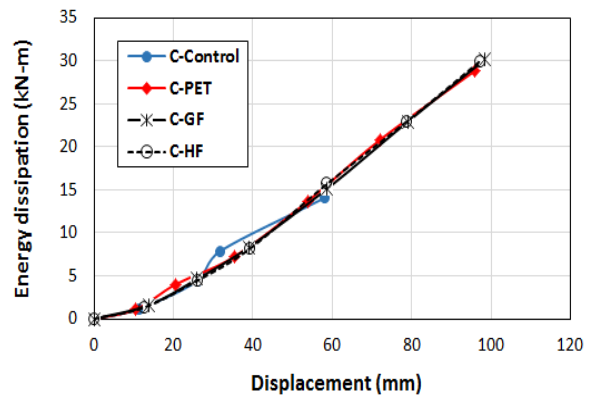


Fig. 8 Energy absorption capacities

향 가력(1/4 분면)에서는 보강된 3개 기둥의 거동이 유사하며, S 방향 가력(3/4 분면)에서는 GF 및 HF 보강 기둥이 PET 보강 기둥보다 더 높은 강도를 보이고 있다.

3.3 에너지 소산 능력

하중-변위 곡선 각 싸이클의 면적은 에너지 소산 능력을 나타낸다. Fig. 8에 총 4개 기둥의 에너지 소산 능력을 나타내었다. 무보강 기둥과 보강 기둥에서 각 싸이클의 에너지 소산 능력은 유사하지만, 섬유로 보강된 기둥의 연성 및 휨강도 향상으로 인하여 3개 섬유보강 기둥의 에너지 소산 능력은 무보강 기둥의 약 200% 수준으로 크게 증가함을 알 수 있다.

3.4 띠철근에 의한 횡구속 효과

Fig. 9에 반복가력 시 측정된 띠철근의 인장변형을 나타내었다. 기둥 스테브로부터 첫 번째 띠철근과 두 번째 띠철근의 변형률은 유사하고, 띠철근의 항복변형률에는 미치지 못함을 알 수 있다(Table 4 참고).

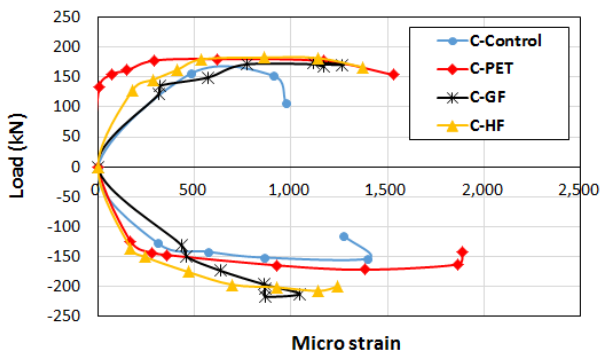
3.5 보강 섬유에 의한 횡구속 효과

Fig. 10에 보강 섬유의 인장변형을 나타내었다. 보강 섬유의 인장변형은 띠철근과 같은 위치 섬유에 부착된

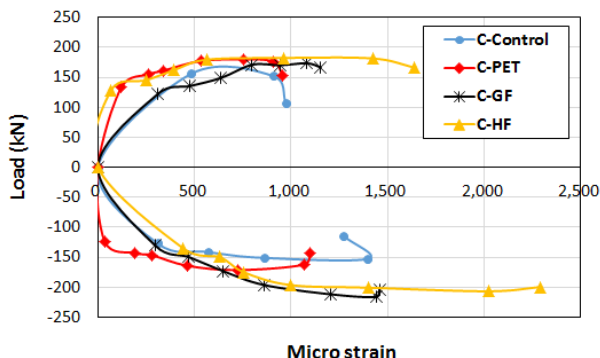
스트레인게이지로부터 측정하였다. 첫 번째 띠철근 위치의 보강섬유 변형률은 HF > PET > GF 순이고, 두 번째 띠철근 위치에서는 HF 변형률이 가장 크고 PET, GF 변형률이 유사하며, 최대 변형률은 HF(스트레인게이지는 PET에 설치하였음)의 경우 0.004를 초과하고 있다. 전술한 것과 같이 보강섬유에 설치한 스트레인게이지의 위치는 띠철근 위치와 동일하였다. 그러나 실험결과 GF의 파단은 최하단 최대 모멘트 지점, PET의 부풀림 현상은 기둥 최하단과 첫 띠철근 사이에서 주로 발생하였으므로, 보강섬유의 실제 인장변형률은 Fig. 10에 나타난 인장변형률을 훨씬 상회한 것으로 사료된다(예를 들어서 C-GF의 경우 GF 파단 시 변형률은 1.3% 이상이고 실험 시 인장 파단되었으나 띠철근 위치 FRP에서 측정된 후프 방향 변형률은 Fig. 10에서 0.25~0.4% 수준임). 한편 PET 시트는 2방향으로 제조되었으므로 C-HF 실험 중 PET의 후프 방향 변형률과 더불어, 기둥 축 방향 변형률도 측정하였고, Fig. 15에 그 결과를 나타내었다. Fig. 15에서 하중의 증가에 따라서 축 방향 PET 변형률이 증가함을 알 수 있다.

3.6 파괴모드

무보강 기둥(C-Control, Fig. 11 참고)의 파괴모드는 첫 번째와 두 번째 띠철근 간 주근 좌굴이었고, PET 보강 기둥(C-PET, Fig. 12 참고)에서는 기둥 하부와 첫 번째 띠철근 간 주철근의 좌굴에 이은 후속 싸이클에서 주근의

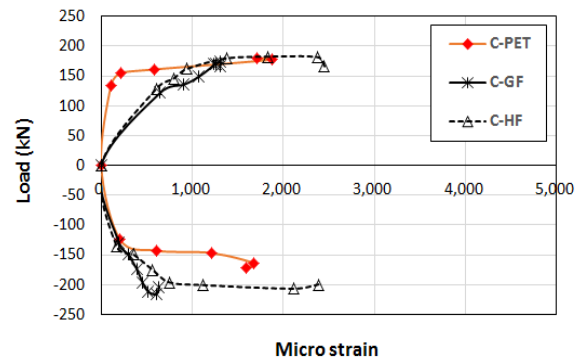


(a) column ties - level 1

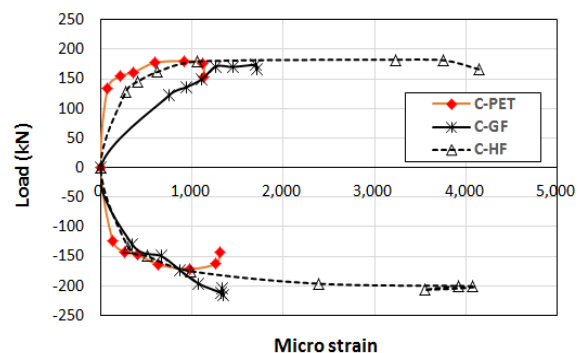


(b) column ties - level 2

Fig. 9 Load vs. column tie strains (Average value of E/W strains)



(a) FRP - level 1



(b) FRP - level 2

Fig. 10 Load vs. FRP strains (Average value of N/S/E/W strains)

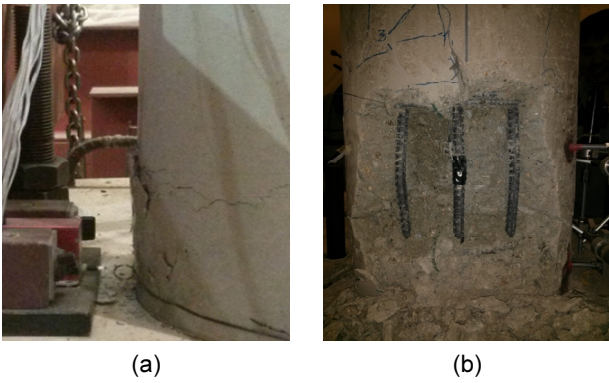


Fig. 11 C-Control: (a) concrete spalling, $4.5\Delta_y$ (b) column main bar buckling

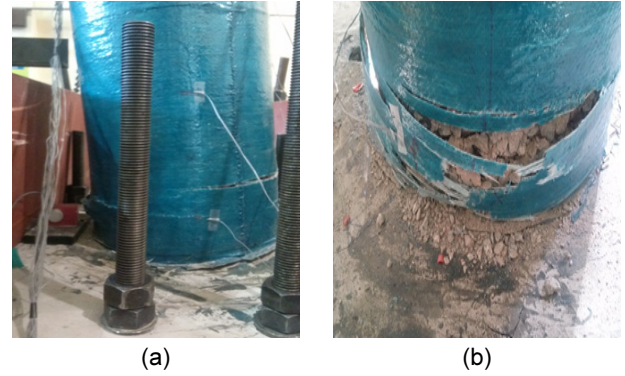


Fig. 13 C-GF: (a) Concrete crack visible through GF sheet, $6\Delta_y$ (b) GF rupture, monotonic loading

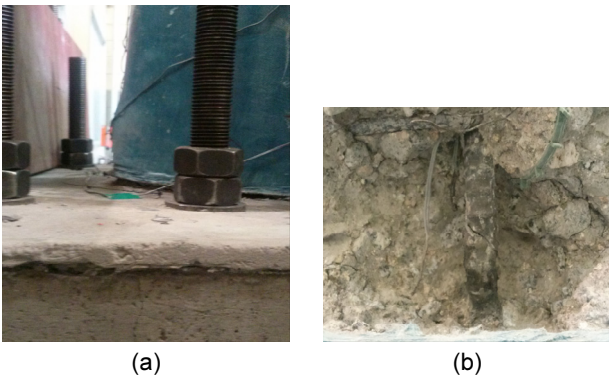


Fig. 12 C-PET: (a) concrete bulging, $8\Delta_y$ (b) column main bar tensile fracture

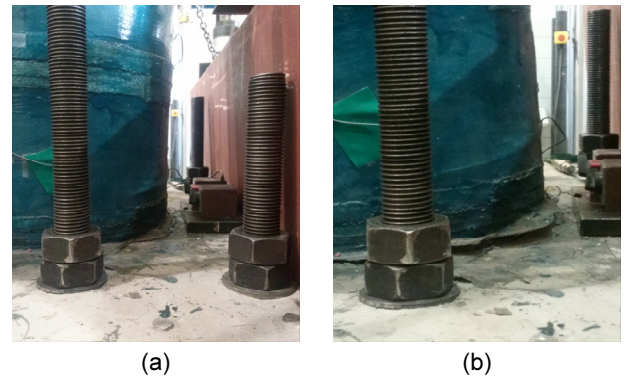


Fig. 14 C-HF: (a) concrete bulging, $6\Delta_y$ (b) GF rupture, monotonic loading

인장 파단이였다. 최종 파괴 시까지 고연성 PET의 파단은 나타나지 않았다. GF 보강 기둥(C-GF, Fig. 13 참고)의 파괴모드는 최대 모멘트 위치 GF 파단에 이은 주철근의 좌굴이였다. 한편, HF 보강 기둥(C-HF, Fig. 14 참고)의 파괴모드는 최대 모멘트 지점에서 GF 파단이였다. 횡가력에 대한 최대 강도 측면에서는 GF와 HF(PET+부분 GF)로 보강된 기둥이 가장 우수하였다(C-GF, C-HF). 그러나 GF의 제한적인 변형 성능으로 인하여 파괴모드는 모두 GF 파단이였으므로, 큰 변형이 수반되는 지진하중에 대해 취성파괴의 우려가 있다고 사료된다.

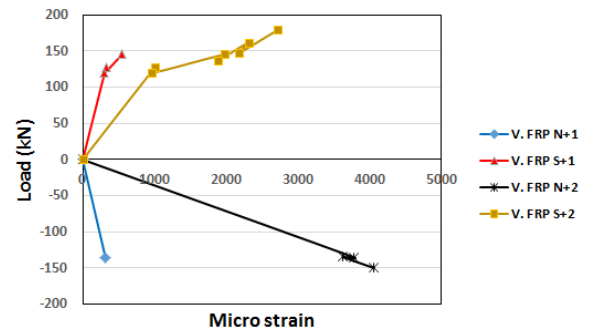


Fig. 15 Load vs. PET strain (axial direction)

Table 6 Summary of test results: strength, displacement, displacement ductility, and drift ratio

Loading to	N direction						S direction						
	Column index	P_{y-test} (kN·m)	$P_{max-test}$ (kN·m)	Δ_{y-test} (mm)	$\Delta_{max-test}$ (mm)	Displ. ductility	Drift ratio (%)	P_{y-test} (kN·m)	$P_{max-test}$ (kN·m)	Δ_{y-test} (mm)	$\Delta_{max-test}$ (mm)	Displ. ductility	Drift ratio (%)
C-Control		134	157	11.3	58.5	5.2	4.9	127	152	14.0	58.5	4.2	4.9
C-PET		134	180	10.6	96.0	9.1	8.0	124	172	10.3	96.0	9.3	8.0
C-GF ¹⁾		122	174(222)	13.7	98.0(148)	7.4(10.8)	8.2(12.3)	131	219	13.1	98.0	7.5	8.2
C-HF ²⁾		128	182(177)	12.7	98.0(161)	7.7(12.7)	8.2(13.4)	135	207	13.0	98.0	7.5	8.2

Note: 1) C-GF: End of actuator stroke was reached during reverse cyclic loading and test continued in monotonic loading after adjustment of actuator stroke. Numbers given in parenthesis represents load or displacement values recorded during monotonic loading phase; 2) C-HF: Same as 1)

4. 기둥 단면의 해석

4.1 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선

횡구속된 콘크리트의 거동에 대한 여러 연구 중에서 이 연구에서는 비교적 잘 알려진 Mander 등의 연구결과와 참고문헌 10)에 따라서 횡구속된 기둥에서 구속효과에 의해 증진된 압축강도와 변형률을 식 (1), (2)와 같이 구하였다.⁹⁾

$$f_{cc}' = f_{co}' + k_1 f_i \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}(1 + k_2 * f_i/f_{co}') \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 f_{cc}' 은 횡구속된 콘크리트의 압축강도, ε_{cc} 는 횡구속된 콘크리트의 최대강도 시 변형률, f_{co}' 는 횡구속되지 않은 콘크리트의 압축강도, ε_{co} 는 횡구속되지 않은 콘크리트의 최대강도 시 변형률이며, 상수 k_1 , k_2 는 각각 4.1, $5k_1$ 으로 취할 수 있다. 또한 f_i 는 횡보강에 의한 최대 구속압력이고, 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$f_i = 2E_f n f_{fe} / D \quad (3)$$

식 (3)에서 E_f 는 보강 섬유의 탄성계수, n = 보강 겹수,

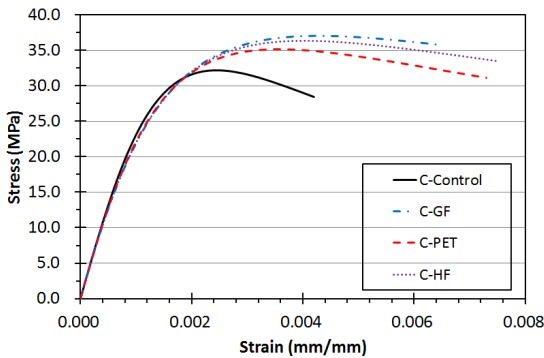


Fig. 16 Stress-strain relationship of confined concrete

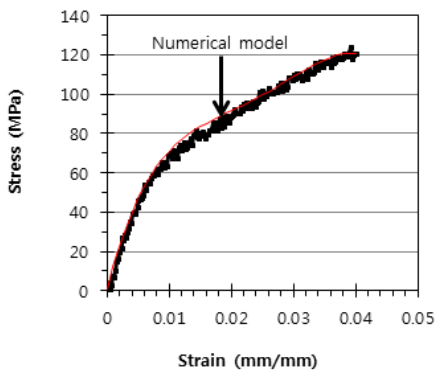


Fig. 17 Curve fitting: PET stress-strain relationship

t_f 는 보강 섬유 1점의 두께, ε_{fe} 는 섬유 파괴 시의 유효 변형률, D 는 원형 기둥 단면의 지름이다.¹⁰⁾

식 (3)에서 GF 유효변형률(ε_{fe})의 값은 인장시험 결과인 1.28%를 사용하고(Table 1 참고), 식 (1), (2)의 f_{cc}' 및 ε_{cc} 을 구한 후 GF 보강 기둥 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 구할 수 있다.⁹⁾ 고연성 PET의 경우에는 기둥 실험 중 섬유의 파단에 이르지 않으므로, 실험결과를 참고로 하여 PET의 유효 변형률을 3%로 가정한 후 PET 보강 기둥 및 HF(PET+GF) 보강 기둥 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 구하였다. Fig. 16에 이렇게 구한 무보강 기둥과 3개 보강 기둥 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. Fig. 16에서 횡구속된 콘크리트의 최대 강도는 GF 보강 기둥이 가장 높고, 최대 변형률은 PET 및 HF(PET+GF) 보강 기둥이 더 큰 것을 알 수 있다.

4.2 기둥 단면의 모멘트-곡률 곡선

원형 단면 기둥의 모멘트-곡률 곡선을 구축하기 위하여 횡구속된 Fig. 16에 나타낸 콘크리트의 응력-변형률 곡선, Table 4에 나타낸 철근의 응력-변형률 곡선, Table 1 및 Fig. 2에 나타낸 섬유의 응력-변형률 관계를 각각 이용하였다. 또한 PET의 응력-변형률 곡선이 비선형이므로 Fig. 17과 같이 PET 변형률 최대 4%까지의 응력-변형률 관계를 Method of least square를 이용한 다항식 형태의 수치 해석적 모델로 구하였다.

위와 같은 과정을 거쳐서 구한 모멘트-곡률의 해석결과를 항복단계 및 극한단계에서 실험결과와 각각 비교하여 Table 7에 요약하여 나타내었다. Table 7에 나타낸 것과 같이 실험결과와 해석결과는 항복단계 및 극한단계에서 모두 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 항복모멘트는 해석값 대비 실험값 86~97%의 범위에 있으며, 극한모멘트는 해석값 대비 실험값이 91.5~105% 범위이다.

Table 7에서 실험결과 극한모멘트는 GF 보강 기둥, PET 보강 기둥, HF 보강 기둥의 경우, 무보강 기둥에 비해 각각 19.9%, 6.6%, 19.9% 증가하였다. 여기서 PET 기둥의 보강효과가 상대적으로 낮은 것은 전술한 것과 같이 PET 사용량이 작았기 때문이다(즉, GF 보강 기둥 대비 PET 보강 기둥의 축 방향 강성비 $E_{GF}A_{GF}/E_{PET}A_{PET} =$ 약 5:1). 한편 Table 7에서 연성비는 GF 보강 기둥, PET 보강 기둥, HF 보강 기둥이 각각 4.8, 5.3, 5.5로서 무보강 기둥의 연성비 3.0에 비해 모두 크게 증가하였다. 이와 같은 실험 및 해석결과는 연성 보강 재료인 PET를 철근 콘크리트 기둥의 내진보강에 사용하면 휨강도의 증가와 연성 증가에 모두 효과적이라는 것을 나타내고 있다.

또한 전술한 것과 같이 PET 시트는 2방향으로 제조되었으므로, 후프 방향 섬유와 축 방향 섬유를 모두 고려하여 해석을 수행한 결과도 Table 7에 포함되어 있다. Table 7에서 PET 보강 기둥의 경우, 후프 방향 섬유만 고려하

Table 7 Comparison between experimentally and analytically determined values

Column index	Test values, kNm (N/S average)		Analytically determined values, moment in kNm, curvature in 10^{-5} radian/mm				M_{y-calc} / M_{y-test} (%)	M_{u-calc} / M_{u-test} (%)	Curvature ductility Φ_u / Φ_y
	M_{y-test}	M_{u-test}	Yield stage		Ultimate stage				
			M_{y-calc}	Φ_{y-calc}	M_{u-calc}	Φ_{u-calc}			
C-Control	142	166	137	1.13	174	3.34	96.6	105	3.0
C-GF	152	199	137	1.14	182	5.44	89.7	91.5	4.8
C-PET ¹⁾ (Hoop fiber only)	160	177	137	1.13	181	6.01	86.0	102	5.3
C-PET ²⁾ (Hoop + vertical fibers)			138	1.13	185	5.89	86.7	104	5.2
C-HF ¹⁾ (Hoop fiber only)	158	199	137	1.14	182	6.23	86.4	91.5	5.5
C-HF ²⁾ (Hoop + vertical fibers)			138	1.14	185	6.15	87.1	93.4	5.4

Note: 1) Only hoop fibers of bi-axial PET sheet are considered, 2) Both hoop fibers and axial fibers were included in the analyses.

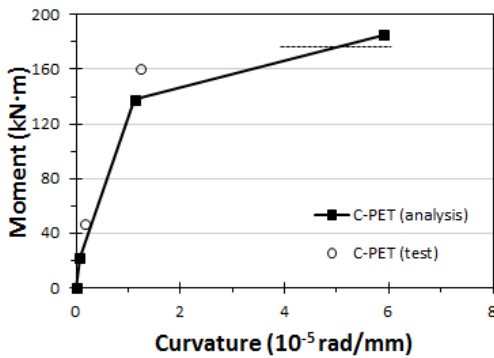


Fig. 18 Test vs. analysis: Moment-curvature relationship for C-PET

면 휨강도는 181 kNm, 후프 방향과 축 방향 섬유를 동시에 고려하면 185 kNm이고, 그 차이는 약 2% 수준이므로 2방향 PET 시트를 사용한 보강에서 후프 방향 섬유만 고려하여도 비교적 휨강도를 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있으며, 이는 참고문헌 4, 5)에서 제시한 연구의 결과와 일치한다. Fig. 18에 Table 7의 C-PET에 대하여 실험 및 해석에 의한 모멘트-곡률 관계를 비교하여 나타내었다. 단, Fig. 18에서 실험 시 극한단계 곡률은 스트레인게이지 탈락으로 인해 결정할 수 없으므로 개략의 범위만을 표시(점선 참고)하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 강도 및 연성이 우수하지만, 탄성계수가 낮은 PET 섬유를 사용하여 유리섬유(GF)를 사용한 기둥의 내진보강 효과를 휨강도 및 연성 증진 측면에서 실험적으로 비교한 후 실험결과에 대한 기둥 단면의 모멘트-곡률 해석을 수행하였다. 총 4개의 기둥의 유사동적 실험 및 해석결과는 다음과 같다.

- 1) GF 및 PET를 사용하여 보강한 3개 기둥에서 모두 휨강도의 증진효과를 얻었다. GF 보강 기둥, PET 보강 기둥, HF(PET+GF) 보강 기둥의 경우, 휨강도는 무보강 기둥에 비해 각각 19.9%, 6.6%, 19.9% 증가하였다. 특히 PET로 보강한 기둥에서는 극한단계에서도 고연성 섬유층의 파단이 발생하지 않았고, 연성적인 거동을 보였다.
- 2) 연성비는 GF 보강 기둥, PET 보강 기둥, HF 보강 기둥이 각각 4.8, 5.3, 5.5로서 무보강 기둥의 연성비 3.0에 비해 1.63~1.83배 수준으로 증가하였다.
- 3) 2방향으로 제조된 PET 시트를 사용한 기둥에서, 후프 방향 섬유만 고려한 경우의 휨강도와 후프 방향과 축 방향 섬유를 동시에 고려한 경우 간 휨강도의 차이는 2% 이하이므로 후프 방향 섬유만 고려하여도 비교적 휨강도를 정확히 예측할 수 있었다.
- 4) PET+GF를 혼합 사용한 HF 기둥의 경우, 가장 높은 강도와 연성을 나타내었다. 그러나 GF의 제한적인 변형 성능으로 인하여 최종 파괴모드는 GF 파단이었으므로, 큰 변형이 수반되는 지진하중에 대해 취성파괴의 우려가 있으며, 섬유를 혼합하여 사용한 경우의 보강 효과에 대해 좀 더 심도있는 연구가 필요한 것으로 사료된다.
- 5) 이 연구에서는 PET의 낮은 탄성계수로 인하여, 보강용으로 많은 양을 사용해야 하므로, 섬유 축 방향 인장 강성비($E_f A_f$) 기준으로 PET를 GF의 약 20% 수준으로 사용하였다. 결과적으로 PET 보강 기둥이 GF 보강 기둥보다 휨강도 증진효과는 다소 작으나, 연성은 오히려 더욱 우수한 결과를 나타냈다. 이는 Fig. 16에 나타낸 것과 같이 PET로 횡구속된 콘크리트의 변형 특성과 PET 자체가 갖는 우수한 연성에 기인한 것으로 사료된다.

References

1. ACI 440.1R-06, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2006.
2. Anggawidjaja, D., Ueda, T., Dai, J., and Nakai, H., "Deformation capacity of RC piers wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain", *Cement and Concrete Composites*, Vol.28, 2006, pp.914-927.
3. Chun, S.C., Park, H.C., Ahn, J.H., and Park, C.L., "Behavior of Concrete Columns Confined by Carbon Fiber Sheets under a Constant Axial Force with Reversed Cyclic Lateral Loading", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.11, No.2, 1999, pp.147-156.
4. Chung, Y.S., Lee, K.K., Han, G.H., and Lee, D.Hy., "Quasi-Static Test for Seismic Performance of Circular R.C. Bridge Piers Before and After Retrofitting", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.11, No.5, 1999, pp.107-118.
5. Lee, H.H., Kim, J.H., Rho, K.G., "Strengthening Effects of RC Column using Fiber Reinforced Polymer", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.4, 2012, pp.473-480.
6. ISO 10406-2, Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part. 2: FRP sheets, Geneva, Switzerland, 2015.
7. ACI 318-83, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1986.
8. ACI 374.2R-13, Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads, ACI Committee 374, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2013.
9. Mander, J.B., Priestley, M.J., and Park. R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *ASCE Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol.114, 1988, pp.1804-1826.
10. ACI 440.2R-08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2008.

요 약 휨강도 및 연성이 부족한 철근콘크리트 원형 기둥의 섬유를 사용한 내진보강에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 일정한 축력을 받는 4개 기둥의 횡 방향 유사동적 실험에서 변수는 GF, PET 및 PET+GF 혼합 보강(HF) 등 섬유의 종류이었다. 이 연구에 적용한 PET는 인장강도(600 MPa 이상)가 우수하고 고연성(약 15%)이나, 탄성계수가 GF의 1/6 수준으로 매우 낮다. 기둥 실험 결과, 모든 보강 기둥은 컨트롤 기둥보다 7~20% 증가한 휨강도를 보였고, 연성은 1.6~1.8배로 증가하였다. 무보강 기둥은 주근 좌굴, GF 및 HF 보강 기둥의 최종 파괴모드는 GF 파단이었으나, 고연성 PET는 극한단계에서도 파단이 발생하지 않았다. PET는 휨강도 및 연성 증진 측면에서 RC 부재의 보강용으로 적합하다고 사료되나, 탄성계수가 낮으므로 많은 양을 사용하여야 하는 단점이 있으므로 이 연구에서 PET는 GF에 비해 인장 강성비 20% 수준으로 사용하였다. 한편 PET의 내구성에 대하여는 현재 연구가 진행 중에 있다.

핵심용어 : 유리섬유, PET, 내진보강, 휨강도, 연성