

고연성 PET 섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 부착 및 휨 거동

박혜선¹, 김소영^{2*}, 임명관³, 최동욱⁴

Bond and Flexural Behavior of RC Beams Strengthened Using Ductile PET

Hye-Sun Park¹, So-Young Kim^{2*}, Myung-Kwan Lim³, Donguk Choi⁴

Abstract: An experimental study was performed to investigate flexural performance and bond characteristics of RC beams strengthened using ductile polyethylene terephthalate(PET) with low elastic modulus. Bond tests were planned and completed following CSA S806. Test variables were fiber type and fiber amount. Also, total of 8 RC beams was tested. Major test variables of the beam tests included section ductility($\mu = 3.4, 7.0$), fiber type(CF, GF, PET) and amount of fiber strengthening. Moment-curvature analyses of the beam sections were also performed. In bond tests, the bond stress distribution as well as the maximum bond stress increased with increasing amount of PET. In case of 10 layers of PET, the effective bond length was 60 mm with the maximum and the average bond stress of 2.33 and 2.10 MPa, respectively. RC beam test results revealed that the moment capacity of the RC beams strengthened using PET 10 and 20 layers increased over the control beam with little reduction in ductility by fiber strengthening. All beams strengthened using PET resulted in ductile flexural failure without any sign of fiber debonding or fiber rupture. It was important to include the mechanical properties of adhesive in the moment-curvature analysis of PET-strengthened beam sections.

Keywords: RC beam, Fiber strengthening, Bond characteristic, Flexural performance, Ductility, PET

1. 서론

우리나라에서 철근콘크리트 보 및 슬래브 등 휨부재의 보강에 많이 사용하는 탄소섬유와 유리섬유는 강도, 강성, 경량성 등 우수한 기계적 성질을 갖고 있으나, 연신율은 1~3% 수준이다. 따라서 이러한 낮은 변형률의 섬유로 보강된 휨부재는 취성파괴의 위험이 있을 수 있다고 사료된다. Kim et al.(2007)은 RC 보 인장면에 탄소섬유를 단순 부착하여 휨실험을 실시하였고, 휨강도가 섬유 보강량에 따라 10~80% 증가하였으나 보강량이 증가할수록 연성 및 보강효과가 감소한다고 보고하였다. You et al.(2007)은 유리섬유로 단순 보강한 RC 보와 부착파괴의 방지를 위하여 보강섬유 단부를 U형 섬유로 정착한 보의 휨실험 결과, 각각 무보강 보에 비하여 극한 단계에서 휨강도가 52%, 44% 증가하지만 단순 부착한 실험체는 부착길이의 변화에 따른 파괴모드 및 내력의 변화가 거

의 없으므로 유리섬유의 충분한 부착길이를 확보하여도 콘크리트와 섬유 간 박리파괴를 방지할 수 없고 조기 부착파괴가 발생한 단부 U형 보강 실험체 역시 유효 변형률이 재료 변형률의 60~70% 수준에서 부착파괴 되므로 박리를 근본적으로 억제할 수 없다고 주장하였다. 기존에 선행된 연구에서 보여 지듯이 탄소섬유 및 유리섬유로 보강된 휨부재는 취성파괴의 위험을 비롯하여 콘크리트 계면과 섬유 사이의 부착거동 역시 불리하게 작용하는 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에서는 새로운 고연성 섬유 재료인 polyethylene terephthalate(PET)로 보강된 철근콘크리트 보의 부착실험과 휨실험을 통해 부착 특성 및 휨 거동을 고찰하였으며, 보의 단면해석을 병행하였다.

PET는 변형율이 15%에 달하는 고연성 섬유이며, 인장강도도 비교적 우수하지만 탄성계수가 매우 낮다. PET로 보강된 철근콘크리트 기둥의 내진 거동에 대한 연구는 2000년대 이후 우리나라와 일본에서 수행되어 왔다(Anggawidjaja et al., 2006; Vachirapanyakun et al., 2016). 그러나 PET를 이용한 철근콘크리트 보의 휨 보강에 대한 연구는 국내외적으로 거의 찾을 수 없으며, 그 이유는 PET의 낮은 탄성계수로 인하여 휨 보강에 대한 기대효과가 낮기 때문으로 사료된다. 이 연구의 주목적은 다음과 같다.

¹정회원, 한경대학교 대학원 건축공학전공

²정회원, 한경대학교 대학원 건축공학전공, 교신저자

³정회원, 송원대학교 건축공학과 교수

⁴정회원, 한경대학교 건축학부 건축공학전공 교수

*Corresponding author: sykim1982@hknu.ac.kr

M.eng. student of Graduate School of Architecture of Hankyong National University, Anseong, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

- (1) 콘크리트와 PET의 부착 특성 연구.
- (2) 고연성/저탄성계수 PET로 보강한 RC 보의 휨 거동 연구.
- (3) 고연성/저탄성계수를 갖는 섬유로 보강된 보의 실험과 단면해석의 결과 비교 및 휨 거동에 영향을 미치는 주요 변수 고찰.

2. 보강 섬유 및 접착제의 기계적 성질

2.1 보강 섬유

탄소섬유(CF), 유리섬유(GF) 및 PET의 인장시험을 Fig. 1(a)와 같이 ISO 10406-2에 따라서 섬유 종류별로 각 10회 수행하고, 시험결과를 Table 1 및 Fig. 1(b)에 나타내었다(ISO10406-2, 2015). CF, GF는 섬유 roving 및 1방향 시트(CF/GF roving은 보 휨실험, CF/GF 시트는 부착실험에 각각 사용함), PET는 2방향(90°교차)으로 직조한 섬유 시트를 사용하였다. Table 1에서 PET의 인장강도는 600 MPa를 상회하지만 CF의 1/3 이하이고, GF와 유사하다. PET의 탄성계수는 각각 CF 및 GF의 1/20, 1/6 이하 수준으로 매우 낮고 연성은 PET가 가장 우수하다. 또한 Fig. 1(b)에서 CF 및 GF의 응력-변형률 곡선이 선형

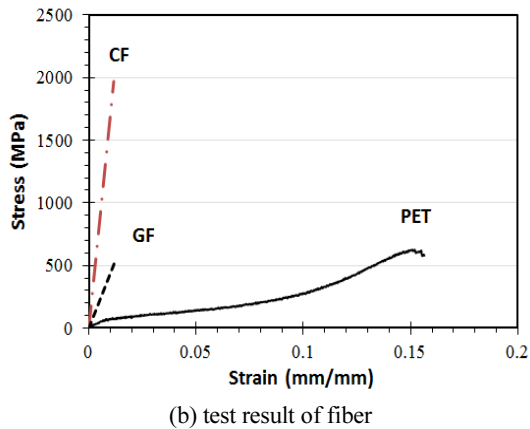
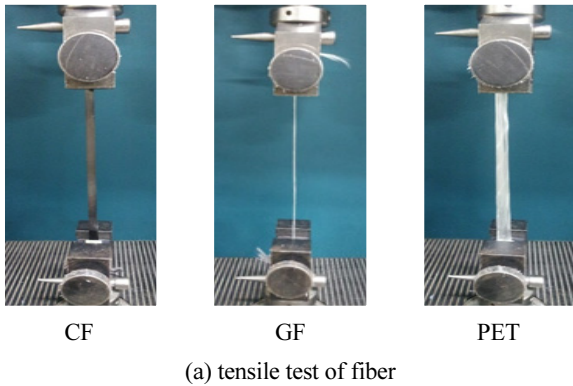


Fig. 1 Tensile test results of fibers

인테 비해, PET의 응력-변형률 곡선은 비선형이므로 같은 종류의 섬유를 이용하여 선행된 연구에서 Vachirapanyakun et al.(2016)은 Fig. 2와 같이 PET 변형률 4%까지의 응력-변형률 관계를 회귀분석을 이용하여 식 (1)과 같은 다항식 모델로 나타내었다.

2.2 접착제

이 연구에서는 고연성 PET 섬유를 다루므로, 접착제 역시 가능한 한 연성이 큰 접착제를 사용하고자 하였다. 국내외 총 4종의 상용 접착제에 대해 ASTM D638에 따라 인장시험을

Table 1 Mechanical properties of fibers

Fiber type	f_{tu} MPa	ϵ_f %	E_f GPa	Area mm ²	Thk. mm	Density g/mm ³
CF roving	1,970	1.16	169	0.446	0.109	0.00180
GF roving	557	1.28	44.8	0.970	0.424	0.00254
CF sheet	1,820	0.94	194	17.42 ²	0.174	0.00180
GF sheet	798	1.68	47.6	40.48 ²	0.405	0.00254
PET sheet	613	14.95	7.1 ¹	5.25 ²	0.106	0.00140

Note: ¹Secant modulus corresponding to 1% strain is given for PET due to non-linear stress-strain relationship; ²Cross-sectional area is given per 100 mm width for all sheets (for bi-axially woven PET sheet, axial fibers only is included).

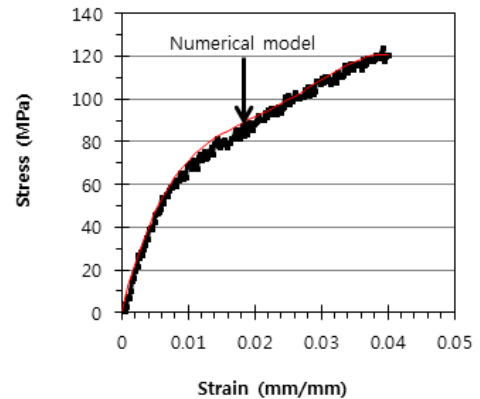


Fig. 2 Curve fitting: PET stress-strain relationship

Table 2 Tensile properties of adhesives

Type	After 3 days			After 7 days		
	Stress MPa	Strain %	$E_{adhesive}$ GPa	Stress MPa	Strain %	$E_{adhesive}$ GPa
K1	32.8	1.11	2.98	36.0	1.34	2.69
K2	43.7	2.01	2.17	40.9	2.58	1.59
J	6.3	7.09	0.89	36.7	1.95	1.88
RE500	--	--	--	43.7	0.68	6.43

각 5회 수행하였고 그 결과를 Table 2에 나타내었다(ASTM D638-08, 2008). 각 접착제의 성능은 초기 재령에 따라 변화하였으나, 상온에서 7일 이후에는 모두 안정적이었다. Table 2에서 시간경과에 따른 물성변화가 작고, 강도 및 연성이 우수한 에폭시 계통의 접착제(이하 K2로 칭함)를 사용하였다.

$$\sigma = 0.8187 + 1.2282 \times 10^4 \epsilon - 7.0550 \times 10^5 \epsilon^2 + 1.9990 \times 10^7 \epsilon^3 - 2.0390 \times 10^8 \epsilon^4 \quad (1)$$

여기서, σ 는 PET 인장응력(N/mm²), ϵ 는 변형률(mm/mm)이다.

3. 부착실험 및 휨실험

3.1 부착 실험계획 및 실험

PET는 탄성계수가 낮으므로 효과적인 보강을 위해서 많은 양의 섬유를 사용하여야 하는 반면에 보강섬유의 두께가 두꺼워지면 단부 박리 등의 문제가 발생할 수 있으므로 부착실험을 통하여 PET의 부착 특성을 고찰하였다. 부착실험은 CSA S806 Annex C에 따라서 Fig. 3과 같이 제작하고 실험을 수행하였다.

부착 실험체(double shear test 혹은 pull bond test)는 140 x 150 x 275 mm 크기의 축방향으로 연속된 2개의 직사각형 콘크리트 블록으로 구성되고, 각 콘크리트 블록 내부에 \varnothing 16 mm

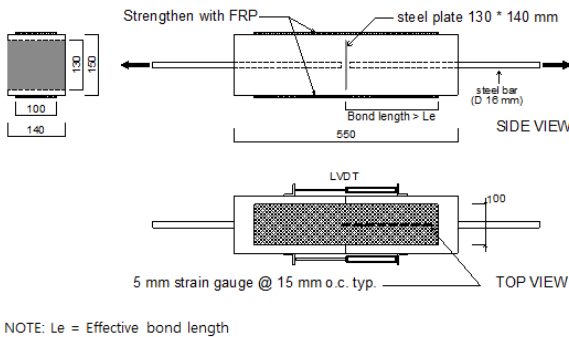


Fig. 3 Pull bond test by CSA S806.(2012)

Table 3 Test variables of pull bond test

Fiber sheet	No. layers	No. test	Area (mm ²)	Bond length (mm)	Strain gauges
CF	1		17.4		
GF	1	1	40.5	260	30 mm o.c. for all specimens
PET	10		52.5		

Note: $f_{ck} = 40.8$ MPa

steel bar를 설치하여 축방향 가력이 가능하도록 하였다. 2개 블록의 연결부(중앙부)에는 얇은 강판을 부분 설치하여, 가력시 연결된 2개 블록이 중앙부에서 먼저 파괴되도록 하였다. 또한 부착 실험체의 중앙부(Fig. 3의 steel plate 위치)로부터 보강섬유 단부까지 5 mm 스트레인게이지를 30 mm 간격으로 실험체 양면에 대칭으로 설치하여 하중의 증가에 따른 보강섬유 각 부위의 변형을 변화를 측정하였다. 보강 면을 제외한 나머지 2개 면에 1세트의 LVDT를 콘크리트 면에 설치하여 가력에 따른 변위를 계측하였다.

실험변수는 Table 3과 같이 섬유 종류와 보강량(CF 시트 1겹, GF 시트 1겹, PET 시트 10겹)이었다. 1,200 kN 용량의 Instron 4495 UTM을 사용하고 변위제어 방식으로 실험체 양 단부에 축방향 인장력을 가하여 섬유의 인장파괴 혹은 계면의 부착파괴가 발생할 때까지 가력하여 콘크리트와 섬유간의 부착거동을 고찰하고 그 결과를 보 휨실험에 참고하였다.

3.2 보 실험계획

RC 보의 휨실험을 2차에 걸쳐 총 8회 수행하였다. 주요 실험변수는 보 단면의 연성비, 보강섬유 종류 및 보강량이었다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 휨파괴를 유도하기 위해 전단경간비를 2.5 이상으로 계획하여 모든 보의 길이는 2 m(경간 1.8 m), 보 단면은 200 x 250 mm으로 하였으며 충분한 양의 스테럽을 배근하였다. 또한 선행된 부착실험 연구를 참고하여 보강량에 따른 부착 및 휨 거동을 비교·고찰하기 위하여 PET 를 10겹, 20겹, 30겹으로 보강하였다. Table 4에 철근 및 콘크리트

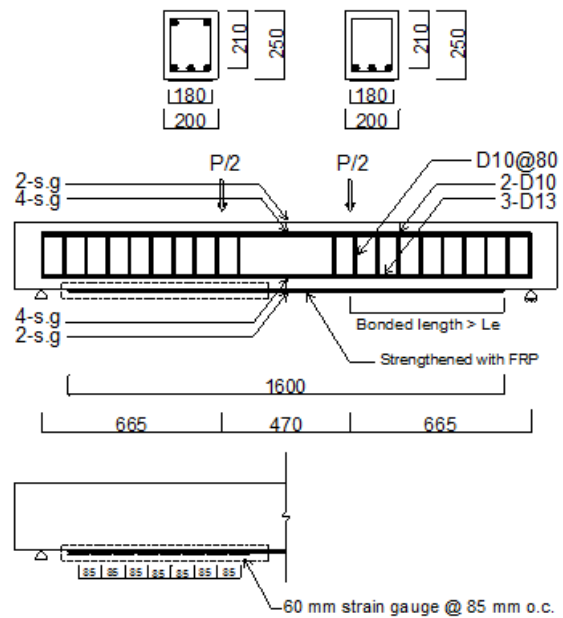


Fig. 4 Cross-sections, test setup and strain gauge installation for RC beams

Table 4 Summary of RC beam test variables

Series	Beam index	Beam cross-section		Concrete f_{ck} MPa	Reinforcement (f_y, f_{us}, E_s)			Fiber	
		b, h mm	Ductility, μ		Tension MPa	Comp. MPa	Type	Area mm ²	Remarks
1	B-1-Control	200, 250	7.0	47.6	3D13	--	--	--	
	B-1-CF				(373)		CF roving	21.0	
	B-1-GF				(556)		GF roving	79.5	
	B-1-PET22				(156,000)		PET sheet	208	22 layers
2	B-2-Control		3.4	23.5	3D13	2D10	--	--	
	B-2-PET10				(458)	(483)		94.5	10 layers
	B-2-PET20				(590)	(617)	PET sheet	189	20 layers
	B-2-PET30				(187,000)	(189,000)		284	30 layers

Note: D10 Stirrup, $f_y = 507$ MPa, $E_s = 180$ GPa, for all beams.

강도를 포함한 실험변수를 나타내었다.

3.2.1 제 1차 휨실험 보

콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 47.6$ MPa(28days)이고 타설 후 7일 간 습윤양생 한 뒤에 탈형하여 기건양생을 실시하였다. 실험 1주일 전에 보의 인장면을 그라인더로 약간 거칠게 처리한 후, K2 에폭시를 사용하여(섬유 체적의 200%) 섬유보강 하였다.

제 1차 실험은 연성이 큰 보 단면(μ , 연성비 = 극한단계 곡률/항복단계 곡률 = 7.0)을 사용하였다. 무보강 보 1개, CF 보강 보, GF 보강 보, PET 22겹 보강 보 각 1개를 제작하였다. 모든 보는 과소보강보이었다. 전술한 바와 같이 CF, GF는 섬유로빙, PET는 2방향으로 직조한 시트를 사용하였고(2방향 PET 시트의 각 방향 물성은 동일하나, 축 방향 섬유만 보강에 기여함) 보강 길이는 1.6 m로서 경간의 대부분을 보강하였다. PET의 탄성계수가 낮으므로 많은 양의 PET를 사용하였음에도 불구하고, 축방향 강성($E_s A_s$)는 PET 22겹 보강 보가 CF 및 GF 보강 보의 약 42% 수준이었다. 또한 PET 22겹의 경우 섬유와 접착제를 합한 보강층 두께는 약 6 mm이었다.

3.2.2 제 2차 휨실험 보

제 1차 실험 보와 유사한 방법으로 RC 보 실험체 4개(무보강 보 1개 및 PET 보강 보 3개)를 제작하였다. 콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 23.5$ MPa이었고, 보 단면의 연성비는 제 1차 휨실험 보보다 낮았다($\mu = 3.4$). PET 보강량을 세 가지(PET 시트 10, 20, 30겹)로 변화시켜서 PET 보강량의 변화에 따른 보강 효과를 고찰하고 무보강 보와 비교하였다. 또한 제 2차 휨실험에서는 보 단부에서 PET와 콘크리트 간 부착거동을 고찰하였다.

3.2.3 보 실험 시 계측기기 설치 및 실험방법

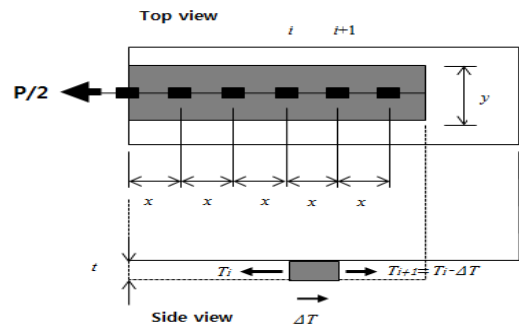


Fig. 5 Determination of bond stress

Fig. 4에 나타난 보 실험체에서 인장철근, 압축철근의 중앙부에 각각 5 mm 스트레인이지를 2세트 설치, 실험 시 콘크리트 압축단 및 보강섬유의 중앙부에 60 mm 스트레인이지 각 2개를 설치하였다. 제 2차 실험 RC 보 중에서 PET 보강 보 3개는 보 한 쪽 중앙부와 단부에 걸쳐 60 mm 스트레인이지를 85 mm 간격으로 보강섬유에 연속으로 설치, 하중의 변화에 따른 보강섬유 축방향 변형률의 변화로부터 부착 특성을 고찰하고자 하였다. RC 보는 1,000 kN 용량의 Instron PL 1.0N 액츄에이터를 사용하여 변위제어 방식으로 4점 가력을 실시하였다. 중앙부 및 4등분점 위치에서 3개의 LVDT(1/4, 1/2 및 3/4 지점)를 사용, 보의 처짐을 계측하였다. 모든 데이터를 TDS 530 데이터로거를 사용하여 실시간으로 저장하였다.

4. 부착실험 결과

Fig. 5에서 부착 실험체 중앙에서 1면의 보강섬유에 작용하는 힘 P/2에 의해 보강섬유와 콘크리트 간 발생하는 부착응력

은 식 (2)~(5)와 같이 구할 수 있다.

$$T^i = \sigma_x^i (ty) \quad (2)$$

$$T^{i+1} = \sigma_x^{i+1} (ty) \quad (3)$$

$$\Delta T = T^i - T^{i+1} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\Delta T}{xy} = \mu \quad (5)$$

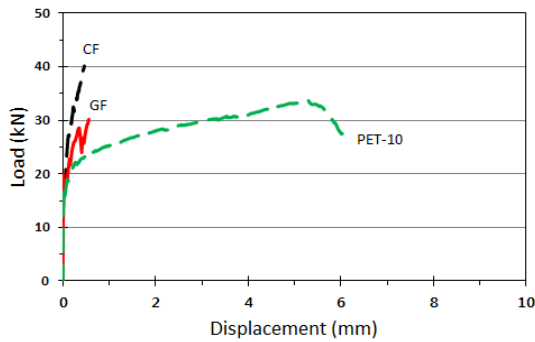


Fig. 6 Load vs. displacement: Bond test

여기서, T^i , α_x^i 는 각각 i 번째 스트레인이메이지 위치에 작용하는 축 방향 힘 및 응력, t, y 는 각각 보강섬유 두께 및 폭, u 는 i 번째와 $i+1$ 번째 스트레인이메이지 사이에 작용하고 있는 보강섬유와 콘크리트 간 평균 부착응력이다.

부착실험 결과 하중-변위 곡선을 Fig. 6, 축 방향 변형률 및 응력과 식 (2)~(5)를 사용하여 결정한 부착응력을 Fig. 7-9에 각각 나타내었다. Fig. 6에서 CF, GF 부착실험체의 경우, 작은 변위(변위는 Fig. 3의 LVDT 평균값이므로 중앙부 균열 폭을 포함함)에서 박리가 발생하며, PET 10겹의 경우 CF, GF에 비해 더 큰 변위를 나타내고 최대하중은 33.7 kN 이다. Table 5 및 Fig. 7, 8에서 CF, GF 보강 부착 실험체는 각각 0.36%, 0.49% 섬유 변형율에서 박리되었다. CF의 경우, 최대 변형율에서 부착응력은 약 120 mm 구간에 걸쳐 분포하고, 평균 부착응력(각 스트레인이메이지 간 평균 전단응력)은 최대 3.25 MPa, 평균 1.41 MPa 수준이다. GF의 경우, 최대 변형율에서 부착응력은 약 60 mm 구간에 걸쳐 분포하고, 부착응력은 최대 2.99 MPa, 평균 2.51 MPa 수준으로 CF에 비해 부착응력의 분포범위가 작고 부착응력의 크기는 높은 경향을 나타내고 있다. Teng et al.(2002) 연구의 결과, CF, GF의 유효부착길이가 100 mm 이내로 알려져 있으나 이 연구에서 CF의 유효부착길이는 이를 다소 초과한 것으로 나타났으며 CF, GF 실험체 모두 섬유와 계면사이의 박리로 최종 파괴하였다.

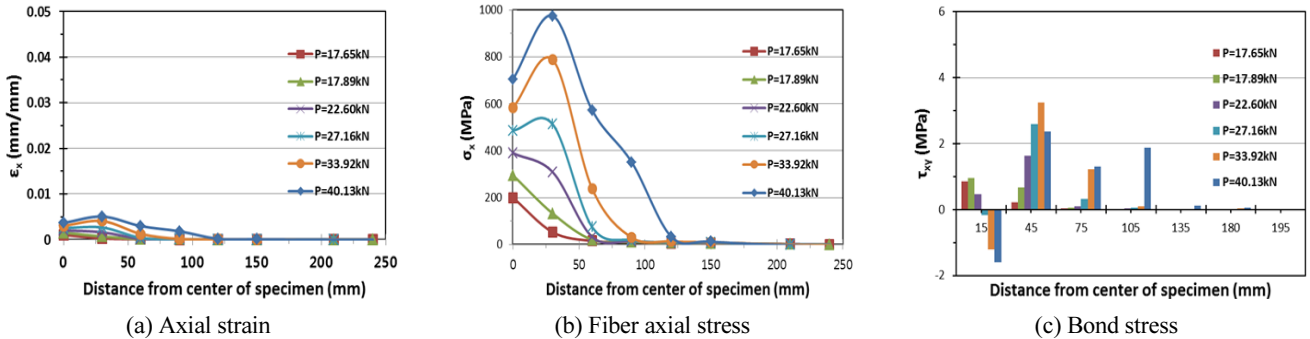


Fig. 7 CF-1: Distribution of fiber axial strain, fiber axial stress and bond stress ($\epsilon_{x-CF} = 0.0036$ at $P = 40.1$ kN)

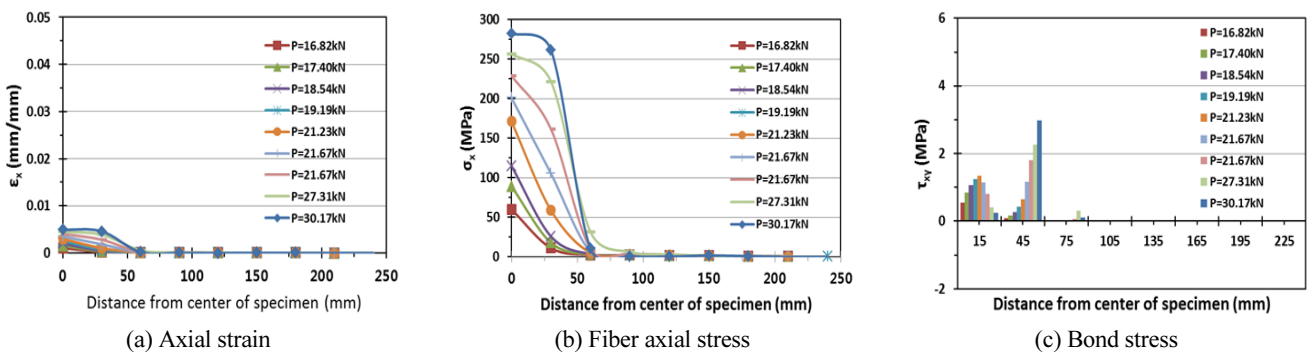


Fig. 8 GF-1: Distribution of fiber axial strain, fiber axial stress and bond stress ($\epsilon_{x-GF} = 0.0049$ at $P = 30.1$ kN)

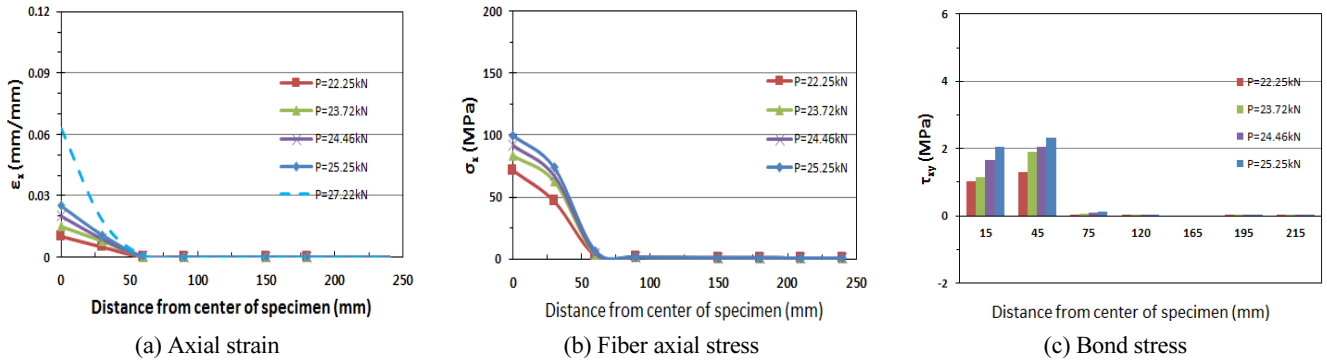


Fig. 9 PET-10: Distribution of fiber axial strain, fiber axial stress and bond stress ($\varepsilon_{X-PET} = 0.025$ at $P = 25.3$ kN)

Table 5 Pull bond test results at max. fiber strain of $\varepsilon_X = 0.0036$ for CF, 0.0049 for GF, and 0.025 for PET

Index	$\varepsilon_{X-fiber}$	$\sigma_{X-fiber}$ (MPa)	σ_{X-K2} (MPa)	A_{fiber} (mm ²)	A_{K2} (mm ²)	P_{fiber} (kN)	P_{K2} (kN)	$P_{fiber+K2}$ (kN)	X^1 (mm)	τ_{aver} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{max} / τ_{aver}	Failure mode
CF-1	0.0036	705	5.81	17.4	34.8	24.6	0.40	25.0	120	1.41	3.25	2.30	debonding
GF-1	0.0049	236	7.88	40.5	67.5	19.1	1.06	20.2	60	2.51	2.99	1.19	debonding
PET-10	0.0250	99.7	39.8	52.5	210	10.5	16.7	27.2	60	2.10	2.33	1.11	PET rupture

Note ¹⁾ X = distance over which bond stresses distribute

Table 6 Summary of RC beam test results

Series	Beam index	ρ_f (A_f/b_h) %	Yield stage				Ultimate stage				Failure mode
			P_y kN	Δ_y mm	Stiffness kN/mm	P_y/P_y^*	P_{max} kN	Δ_{max} mm	P_{max} / P_{max}^*		
1	B-1-Control *	--	85.0	7.06	12,04	--	103	41.7	--	flexure	
	B-1-CF	0.042	98.4	6.98	14,07	1.16	138	23.1	1.34	CF rupture	
	B-1-GF	0.159	116	8.90	13,03	1.36	160	24.4	1.55	rip-off	
	B-1-PET22	0.416	102	8.06	12,66	1.20	137	38.4	1.33	flexure	
2	B-2-Control *	--	88.4	8.28	10,68	--	101	46.5	--	flexure	
	B-2-PET10	0.189	96.8	8.18	11,83	1.10	111	57.6	1.10	flexure	
	B-2-PET20	0.378	108	8.08	13,37	1.22	125	48.5	1.24	flexure	
	B-2-PET30	0.568	117	9.48	12,34	1.32	142	35.9	1.41	flexure	

Fig. 9는 PET 10겹 보강 시, 축 방향 변형률, 섬유 응력 및 부착응력 분포를 접착제 파괴 직전인 변형률 2.5%까지 나타낸 것이다(Fig. 9(a)의 점선은 실험 시 측정된 최대 변형률을 나타냄). 또한, 부착응력의 분포구간은 60 mm이고 최대 부착응력 및 평균 부착응력은 각각 2.33 MPa, 2.10 MPa이다. 따라서 부착응력의 분포구간은 CF보다 작고 GF와 비슷하며 최대부착응력은 CF, GF 보다 작다. 이러한 결과는 PET 섬유 두께가 두꺼움에도 불구하고 CF, GF 보다 작은 부착응력을 발생시키므로 효과적인 부착거동을 나타내는 것으로 사료된다. 최대하중에서 섬유파단으로 최종 파괴하였으며 박리현상은 나타나지 않았다.

5. 보 휨실험 결과

5.1 제 1차 휨실험 결과

Table 6에 항복단계 및 극한단계에서 최대하중과 최대변위, Fig. 10에 하중-변위 및 하중-변형률 곡선을 나타내었다. 고강도 콘크리트($f_{ck} = 47.6$ MPa)와 연성이 큰 보 단면($\mu = 7.0$)을 사용한 제 1차 휨실험에서 모든 보강 보의 휨강도 및 휨강성은 무보강 보에 비해 증가하였다. Table 6 및 Fig. 10(a)에서 휨강도는 B-1-CF, B-1-GF, B-1-PET22가 각각 B-1-Control에 비하여 34%, 56%, 33% 증가하였다. 휨강성은 하중-변위 곡선에서 원점과 항복점을 연결한 할선의 기울기로 구하였고,

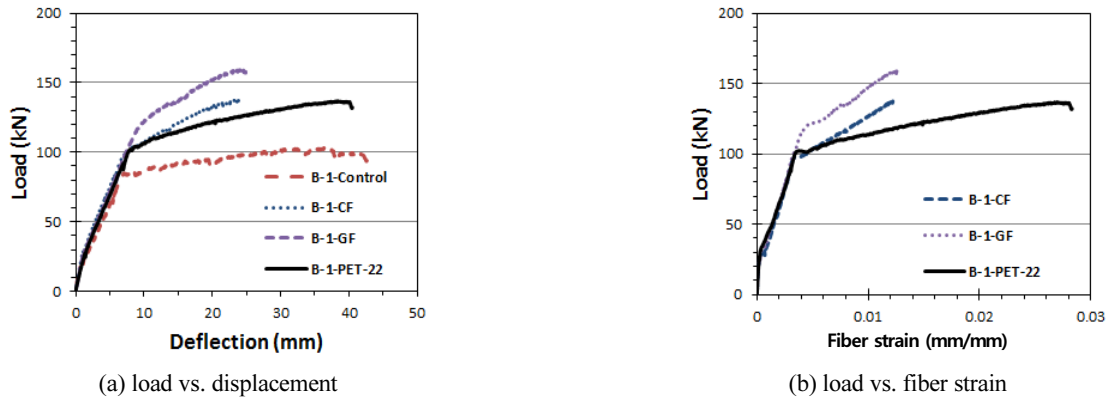


Fig. 10 Test results of Series 1 RC beams: B-1-Control, B-1-CF, B-1-GF, B-1-PET22

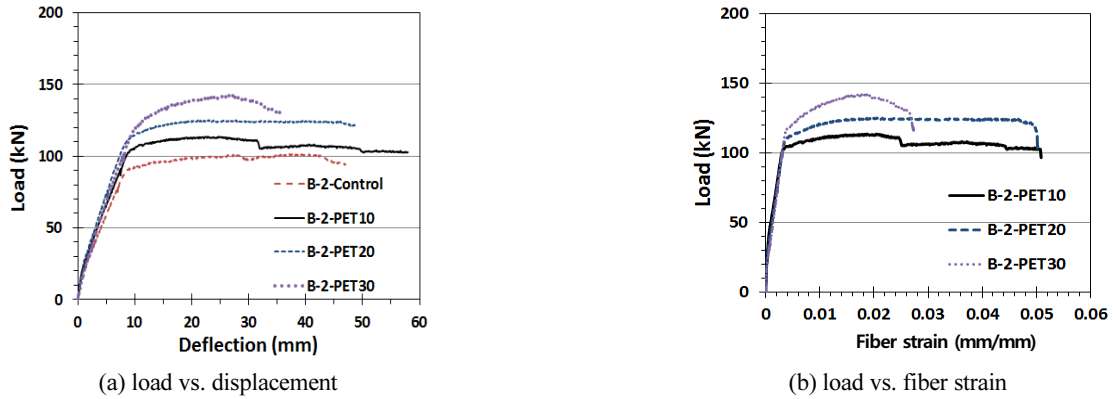


Fig. 11 Test results of PET-strengthened Series 2 RC beams: B-2-Control, B-2-PET10, B-2-PET20, B-2-PET30

Table 6에 나타낸 것과 같이 B-1-CF, B-1-GF, B-1-PET22의 휨강성은 B-1-Control에 비하여 각각 17%, 8%, 5% 증가하였다. PET 보강 실험체의 휨강성 증가폭이 낮은 이유는 CF, GF 보다 탄성계수가 상대적으로 매우 낮기 때문인 것으로 사료된다.

또한 고연성 PET로 보강된 보는 CF, GF 보강 보에 비해 우수한 하중-처짐 거동을 보였다. Table 6 및 Fig. 10(a)에서 B-1-Control의 최대처짐은 41.7 mm, B-1-CF, B-1-GF, B-1-PET22의 최대처짐은 각각 23.1, 24.4, 38.4 mm이다. CF, GF 보강 보의 최대처짐은 B-1-Control에 비해 대폭 감소하였으나 고연성 PET 보강 보는 무보강 보와 유사한 연성적인 하중-처짐 거동을 나타내고 있다.

또한 Fig. 10(a)에서 처짐 23.1 mm(CF 보강 보 최대처짐)에서 B-1-PET22의 휨저항은 B-1-CF보다 작지만, 이후 PET의 연성이 발휘되며 발생하는 추가적인 처짐을 통해 휨강도가 증가하고 있다(Fig. 10(b)에서 극한단계에서 B-1-PET22의 PET 변형율은 약 2.8% 수준이다).

Fig. 10(b), 12에서 각각 B-1-CF 실험체의 최종 파괴 시 보강섬유 변형율 1.2%에서 CF 파단으로 취성파괴 하였고,

B-1-GF는 콘크리트 rip-off에 의한 취성적 파괴모드를 나타내었으며 파괴 시 유리섬유 변형율은 1.25%이었다. 반면에 PET 보강 보는 휨파괴 양상을 보였고 극한단계에서도 PET 파단 혹은 박리현상이 나타나지 않았다.

5.2 제 2차 휨실험 결과

보통강도 콘크리트($f_{ck} = 23.5 \text{ MPa}$)와 연성이 낮은 보 단면($\mu = 3.4$)을 사용한 제 2차 휨실험에서는 PET 보강량에 따른 보강 효과를 검증할 목적으로 PET 10, 20, 30점으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험결과는 Table 6 및 Fig. 11에 요약하여 나타내었다. Table 6 및 Fig. 11에서 PET 보강 보의 휨강도는 섬유 보강량의 증가에 따라 증가하고, 최대처짐의 크기는 섬유 보강량에 따라 감소한다. 즉 B-2-PET10($\rho_f = 0.19\%$), B-2-PET20($\rho_f = 0.38\%$), B-2-PET30($\rho_f = 0.57\%$)의 휨강도는 B-2-Control보다 각각 10%, 24%, 41% 증가하는 반면에 최대 처짐은 B-2-Control의 46.5 mm에 비하여, B-2-PET10, B-2-PET20, B-2-PET30에서 각각 57.6, 48.5, 35.9 mm를 나타내어 보강량의 증가에 따라서 보 단면의 연성이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 휨강성은 B-2-PET10, B-2-PET20, B-2-PET30에서

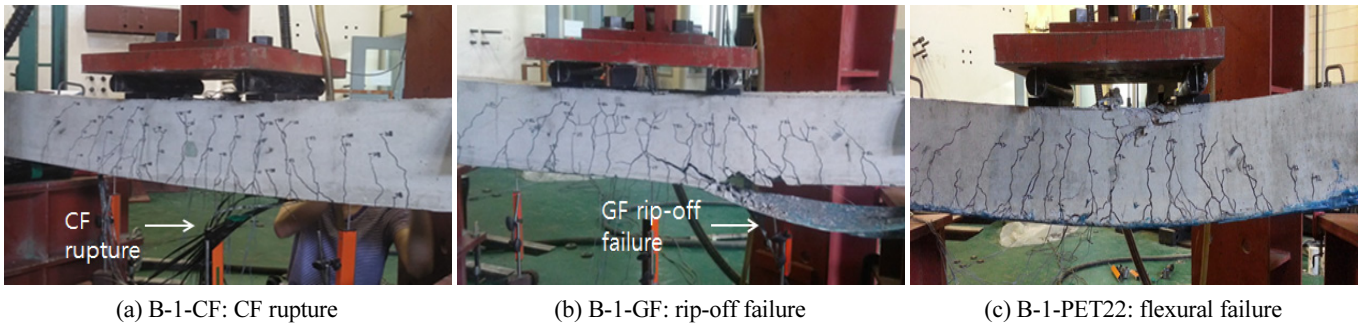


Fig. 12 Failure mode of Batch 1 RC beams

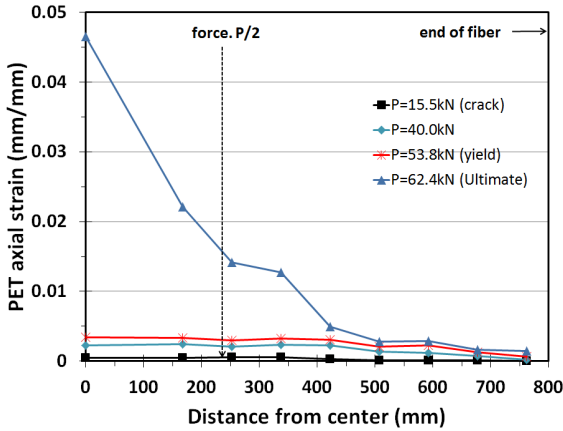


Fig. 13 PET axial strain distribution: B-2-PET20

B-1-Control에 비해 각각 11%, 25%, 15% 증가하였다. 최종 파괴모드는 모든 PET 보강 보에서 보강량에 관계없이 휨파괴를 나타내었고 섬유유 의 파단 또는 박리현상은 나타나지 않았다. 다만, Fig. 11(b)에서 B-2-PET10 및 B-2-PET20의 극한단

계 섬유 변형률이 약 5% 수준인 것에 비해 B-2-PET30의 변형률이 2.7%이므로, PET 30겹 보강한 단면의 연성이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 13에 B-2-PET20으로부터 측정된 하중 증가에 따른 PET 축방향 변형률의 변화를 나타내었다. PET 변형률은 가력점으로부터 섬유 단부까지 점차 감소하고, 극한단계에서 섬유의 최대 변형률은 0.046이다. 결과적으로 섬유두께를 고려하면 Fig. 9(a)에서 PET-10 시험체의 부착 파괴시 섬유 변형률 0.063에 거의 근접한 것을 알 수 있다.

6. 보 단면해석 결과

보 단면의 모멘트-곡률 곡선을 구축하기 위하여 실험결과 철근과 콘크리트의 응력-변형률 곡선, Table 1 및 Fig. 1(b)에 나타난 섬유의 응력-변형률 관계, Table 2의 접착제 물성을 이용하였다. 또한 Fig. 2에서 언급하였듯이 PET의 응력-변형

Table 7 Experiment vs. theory: experimental results vs. moment-curvature analysis results

Beam index	M_{rest} , k·Nm		M_{theory} , k·Nm				Theory / test, %				Yield / Ultimate	Yield / Ultimate	Ductility ratio Φ_u / Φ_y	
	M_y	M_u	w/o adhesive		w/ adhesive		w/o adhesive		w/ adhesive		Φ_y 10-5 (rad./mm)	Φ_u 10-5 (rad./mm)	w/o adhesive	w/ adhesive
			M_y	M_u	M_y	M_u	M_y	M_u	M_y	M_u	w/o adhesive	w/ adhesive		
B-1-Control	28.3	34.2	27.1	31.7	--	--	95.8	92.7	--	--	1.57 / 10.9	--	6.96	--
B-1-CF	32.7	45.9	29.4	38.8	29.5	39.0	89.9	84.5	90.2	85.0	1.59 / 5.57	1.59 / 5.57	3.50	3.51
B-1-GF	38.6	53.2	29.4	40.0	29.6	40.8	76.2	75.2	76.7	76.7	1.59 / 6.14	1.59 / 6.16	3.87	3.87
B-1-PET22	33.9	45.6	28.6	35.9	29.5	41.1	84.4	78.7	87.0	90.1	1.58 / 9.83	1.59 / 8.73	6.22	5.50
B-2-Control	29.4	33.6	31.9	34.1	--	--	109	101	--	--	1.81 / 6.12	--	3.38	--
B-2-PET10	32.2	36.9	32.6	35.6	33.0	36.9	101	96.5	102	100	1.82 / 5.95	1.82 / 5.79	3.27	3.17
B-2-PET20	35.8	41.5	33.3	37.0	34.1	39.6	93.0	89.2	95.3	95.4	1.83 / 5.78	1.84 / 5.50	3.16	2.99
B-2-PET30	38.8	47.3	34.0	38.4	35.3	42.0	87.6	81.2	91.0	88.8	1.84 / 5.62	1.86 / 5.25	3.06	2.83

Note: Analytical results are shown based on fiber strain of 2.58% for all PET-strengthened beams.

를 곡선이 비선형이므로, 전술한바와 같이 PET 변형률 최대 4%까지의 응력-변형률 관계를 최소자승법을 이용한 다항식 형태의 수치 해석적 모델을 해석에 사용하였다.

ACI 440.1R-06.(2006)에 의거하여 보 단면의 모멘트-곡율을 해석하였고 그 결과를 항복단계 및 극한단계에서 실험결과와 각각 비교하여 Table 7에 요약하여 나타내었다. Table 7에 나타난 것과 같이 실험결과와 해석결과는 CF, GF, PET 보강 시 모두 항복단계 및 극한단계에서 비교적 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 다만, 탄성계수가 매우 낮으므로 많은 섬유를 사용하고, 따라서 접착제의 사용량이 증가하는 PET 보강의 경우 접착제의 영향을 고려하면 더욱 정확한 해석결과를 보였다. Table 7에서 접착제의 영향을 무시하면 PET 보강 보의 항복모멘트는 해석값 대비 실험값 84.4~101%의 범위에 있으며, 극한모멘트는 해석값 대비 실험값이 78.7~96.5% 범위이다. 반면 접착제의 영향을 고려하면(즉, K2 에폭시의 물성을 해석에 포함하면) PET 보강 보의 항복모멘트는 해석값 대비 실험값이 87.0~102%의 범위에 있으며, 극한모멘트는 해석값 대비 실험값이 88.8~100% 범위로 오차범위 10% 내외의 정확성을 보이고 있다. 이와 같은 해석결과는 탄성계수가 매우 낮은 PET 보강 보의 해석에서 K2 접착제의 탄성계수가 PET와 비교할 수 있는 수준이며 또한 접착제의 양이 섬유량의 2배이므로 접착제의 영향을 무시할 수 없는 결과를 나타낸 것으로 판단되며(단, Table 7에서 PET 보강 보의 경우 해석에 의한 극한단계 휨강도의 산정은 Table 2의 접착제(K2) 최대 변형율인 2.58%를 기준으로 하였음) 해석 시 PET의 응력-변형률 관계를 나타낸 수치 해석적 모델의 적용은 적합한 것으로 사료된다.

7. 결 론

- 1) 부착실험의 결과, CF 및 GF 시트 1겹의 유효부착길이는 각각 120, 60 mm이었다. CF의 최대 및 평균 부착응력은 각각 3.25, 1.41 MPa이었다. GF의 부착응력은 최대 2.99 MPa, 평균 2.51 MPa이었다.
- 2) PET 시트 10겹 보강 시험체 부착실험의 결과, 부착응력 분포길이는 60 mm였으며 최대 부착응력 및 평균응력은 각각 2.30 MPa, 2.10 MPa이었다. 또한, CF 및 GF 시트 보강 실험체는 작은 변위에서 시트가 박리하였지만 PET 부착 실험체는 CF, GF 에 비해 큰 변위를 나타내었고 최대하중은 33.7 kN이었다.
- 3) 부착실험에서 최대 강도 시 CF, GF, PET의 변형율은 각각 0.36%, 0.49%, 6.29%였으며 CF, GF 부착실험체는 계면에서 시트가 최종적으로 탈락하였다. 반면에 PET 부착 실험

체에서 박리현상은 나타나지 않았다.

- 4) 모든 보강 보의 휨강도 및 휨강성은 무보강 보에 비해 증가하였다. CF, GF 보강 보의 최대처짐은 무보강 보에 비해 감소하였고 취성적인 파괴양상을 나타내었으나, PET 보강 보는 무보강 보와 유사한 연성적인 휨 거동을 보였다.
- 5) 고연성과 낮은 탄성계수를 갖는 PET를 적절한 양으로 사용하면, CF 혹은 GF 보강과 유사한 휨강도 증진 효과를 얻을 수 있었다. 이 연구에서 PET를 CF 및 GF의 축방향 강성($E_f A_f$)비 약 42%로 사용한 PET 22겹 보강의 경우, 휨강도는 각각 CF, GF 보강 보의 99%, 86%이었다. CF, GF 보강과 달리 PET 보강보는 모두 연성적인 휨 파괴 양상을 보였고, 모든 PET 보강 보에서 PET의 파단, 박리 또는 rip-off 파괴는 나타나지 않았다.
- 6) 휨실험에서 극한단계 PET의 변형률은 2.5~5%를 나타내었다. PET 보강 보의 휨강도는 PET의 고연성으로 인한 추가적인 처짐을 통해 발휘된다. 다만, 보강량에 따라 연성이 감소하므로 PET 보강비 약 0.4% 수준의 보강이 적절하다. 또한 이 연구에서 보 단면의 연성 차이에 따른 PET 보강 효과의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았다.
- 7) 고연성 PET를 사용한 보강 시 극한단계에서도 콘크리트와 섬유 간 부착이 유지되어 보강효과가 나타날 수 있도록 연성이 우수한 접착제를 사용하여야 한다.
- 8) CF, GF, PET 보강 보 단면해석의 결과는 휨실험 결과와 비교적 일치하였다. 단 PET의 낮은 탄성계수로 인하여 접착제 물성을 해석에 포함시키면 정확도가 더욱 향상되는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 환경대학교 2015년도 학술연구조성비의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- ACI 440.1R-06 (2006), Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- ACI 440.2R-08 (2008), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- Anggawidjaja, D., Ueda, T., Dai, J., and Nakai, H. (2006), Deformation Capacity of RC Piers Wrapped by New Fiber-reinforced Polymer with Large Fracture Strain, *Cement and Concrete Composites*, 28,

914-927.

ASTM D638-08 (2008), Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

CSA S806 (2012), Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers, Canadian Standard Association.

ISO 10406-2 (2015), Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part. 2: FRP sheets, Geneva, Switzerland.

Kim, J. Y., Kim, K. S., Park, S. K., and Lee, Y. J. (2007), Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP, *Journal of Korea Concrete Institute*, 19(2), 225-231.

Ko, H. B. (2006), Bond Characteristics between Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheet and Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea-Structural Division*, 22(8), 69-76.

Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H. (2001), Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete,

ACI Structural Journal, 98(3), 1-9.

Sorrasak Vachirapanyakun, Lim, M. K., and Choi, D. U. (2016), Seismic Performance of Circular RC Columns Retrofitted Using Ductile PET Fibers, *Journal of Korea Concrete Institute*, 28(3), 279-288.

Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002), FRP STRENGTHENED RC STRUCTURES, Wiley.

You, Y. C., Choi, K. S., and Kim, K. H. (2007), An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of RC Beams Strengthened with GFRP Sheets, *Journal of Korea Concrete Institute*, 19(6), 677-684.

Received : 07/18/2016

Revised : 07/28/2016

Accepted : 08/10/2016

요 지 : 이 연구에서는 고연성과 낮은 탄성계수를 갖는 PET 섬유로 보강한 철근콘크리트 보의 부착특성과 휨거동을 각각 부착실험 및 휨실험을 통하여 규명하고자 하였다. 부착실험은 CSA S806에 따라 수행하였고, 실험변수는 섬유 종류와 보강량(CF 및 GF 시트 각 1겹, PET 시트 10겹)이었다. 총 8개의 보 실험에서 주요 실험변수는 단면의 연성비($\mu = 3.4, 7.0$), 보강섬유 종류(CF, GF, PET) 및 보강량이었다. 보 단면의 모멘트-곡률 해석을 병행하였다. 부착실험의 결과, CF, GF 시트 1겹 보강에서 유효 부착길이는 각각 120, 60 mm 이었고 최대부착응력은 각각 3.25, 2.99 MPa 이었다. PET 10겹 보강에서 유효 부착길이는 60 mm, 최대 및 평균 부착응력은 각각 2.30, 2.10 MPa 이었다. 또한 최대 강도 시 CF, GF, PET의 변형율은 각각 0.36%, 0.49%, 6.29% 였으며 CF, GF 부착실험체는 계면에서 시트가 최종적으로 탈락하였지만 PET 부착 실험 체에서 박리현상은 나타나지 않았다. 휨실험의 결과, PET 10, 20, 30겹으로 보강한 RC 보의 휨강도, 휨강성이 모두 무보강 보에 비해 증가하였고, 연성적인 휨과괴 양상을 보였으나 PET 30겹의 경우 20겹에 비하여 연성이 감소하였다. 모멘트-곡률 해석의 결과, PET 보강 보에서 접착제의 물성을 해석에 포함시키면 해석의 정확도가 향상하였다. 한편 PET 의 내구성에 대해서는 보고된 문헌이 없어서 현재 연구 진행 중이다.

핵심용어 : 철근콘크리트 보, 섬유 보강, 부착 특성, 휨 거동, 연성, PET
