

재생 PET 섬유가 보강된 RC 슬래브의 구조성능 평가

Structural Performance Evaluation of Recycled PET Fiber Reinforced RC Slab

김 성 배¹⁾ 김 장 호^{2)*}
Kim, Sung Bae Kim, Jang Ho Jay

Abstract

This study was performed to verify the structural reinforcing effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber. In order to verify the structural reinforcing capacity of RPET fiber, recycled PET fiber added RC slab specimens were prepared to examine the flexural capacity while those of plain concrete and those of added with PP fiber, and the behavior of the specimens were also evaluated. The result shows that the compressive strength reduces as the fiber volume fraction increases, and the rate of reduction varies from 2% to 7%. The result of the flexural capacity shows that the ultimate capacity of plain specimens is the highest compare to those fiber reinforced specimens, but it has shown that specimens reinforced by 5% PET fiber has the highest energy absorption and the ductility index. In the application of PET fiber in slab specimens has shown that ductility capacity have increased where the ultimate capacity decreasing. That is the different tendency of beam specimens, which the ultimate capacity and the ductility of those have both shown the improvement compare to plain concrete specimens, which means the reinforcing effect of PET fiber in slab is less strong than in beam. Therefore, the application of PET fiber in slab structures as reinforcement needs the proper mix proportion of concrete and volume fraction of PET fiber with deep consideration of the structures.

Keywords : PET fiber, Flexural capacity, Energy absorption, Ductility index

1. 서 론

음료수 용기로 사용되는 Polyethylene Terephthalate (PET) 병은 사용 후 버려지는 양이 매우 많아 환경적 측면에서 문제로 제기되고 있다. 현재 전 세계적으로 PET의 생산량은 연간 6백 7십만 톤을 초과했으며, 아시아 지역에서 빠르게 증가하고 있다(JVEC, 2008). 특히 한국에서는 매년 PET 병의 사용량이 증가하여 2007년에 13만 톤을 생산하는 급격한 성장세를 보이고 있다(KPCA, 2008). 그러나, 다양한 제품으로 활용되고 있는 PET 병은 현재 사용하고 버려지는 양이 많고, 수거되는 대부분도 조각이나 매립 등으로 처리되어 환경오염의 원인이 되고 있다(KIRR, 2008). 이러한 환경문제를 해결하기 위해 버려지는 PET병을 재활용하여 사용하는 방법이 대안으

로 제시되고 있으며 이는 건설분야에서도 활발히 진행되고 있는 실정이다.

최근 콘크리트의 취성적인 성질을 개선하기 위하여 연성이 큰 보강섬유를 콘크리트에 혼입하여 콘크리트의 연성을 증가시키려는 연구가 진행되고 있다. 보강섬유는 결합재 사이의 인장강도를 증가시켜 콘크리트 부재의 미세 균열의 진전을 제어하는 효과가 큰 것으로 알려져 있다. 이에 버려지는 PET 병을 재활용하여 만든 PET보강섬유를 콘크리트 부재의 균열제어용 섬유로 사용하는 방법은 콘크리트의 균열 발생을 억제하여 구조물의 성능 향상이 가능하도록 하는 동시에 폐 PET병의 재활용 측면에서도 효과적인 방법이라 할 수 있다.

지금까지 재생 PET 섬유에 대한 연구는 콘크리트의 소성수축 및 건조수축 균열제어에 관한 내용이 주로 연구되

1) 정회원, ㈜바이텍코리아 기술연구소 차장

2) 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수, 교신저자

* Corresponding author : jjhkim@yonsei.ac.kr 02-2123-5802

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Physical and chemical properties of binders

Type \ Item	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig. loss (%)	Specific gravity	Blain (cm ² /g)
Cement	20.68	5.16	3.02	62.42	4.71	2.42	1.36	3.15	3,450
Fly ash	57.09	24.66	10.50	2.58	1.37	0.94	3.02	2.10	4,350

Table 2 Properties of synthetic fibers

Fibers	Type	Dimension (mm)	Length (mm)	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation (%)
PET	Embossed	0.2×1.3	50	1.38	10,175.4	420.7	11.2
PP	Crimped	0.38×0.9	50	0.91	6,000.0	550.0	15.0

였으며(Kim et al., 2010b; Won et al., 2007a; Won et al., 2007b), 일각에서 구조부재에 대한 구조용 보강섬유로써 연구되었다(Kim et al., 2009; Kim et al., 2010a; Lee and Lee, 2010; Ha and Lee, 2010). 그러나, 이러한 구조용 보강섬유에 대한 연구도 대부분이 RC 보를 대상으로 연구가 수행되었으며, 슬래브 구조체에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 재생 PET 섬유를 콘크리트 RC 슬래브 구조체에 적용하여 재생 PET 섬유가 RC 슬래브 구조체에 미치는 영향을 비교·분석하고자 한다.

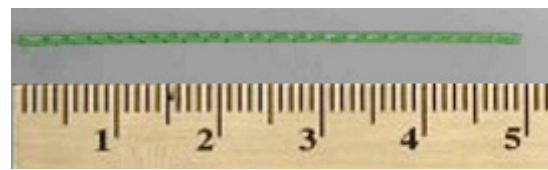
2. 실험개요

2.1 시멘트와 골재

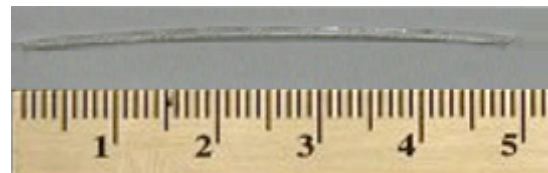
콘크리트의 배합에 사용된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트로 비중 3.15이고 분말도는 3,450cm²/g이다. 굵은 골재는 최대 입경 25mm인 부순 골재를 사용하였으며, 잔골재는 청주 인근의 강모래를 사용하였다. 시멘트와 플라이 애쉬의 화학적 조성 및 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.2 보강 섬유

본 연구에서 검증하고자 하는 재생 PET 섬유는 버려지는 폐 PET병을 수집하여 건조/습윤법을 이용 불순물을 제거한 뒤 압쇄 분쇄한 다음 용해하여 재생 PET 물을 생산한다. 생산된 재생 PET 물은 슬리팅 장비를 이용하여 가늘게 잘라 직선형태(straight type)의 섬유로 만든다. 슬리팅 작업이 끝난 섬유는 그 자체로 직선형태의 콘크리트 보강용 섬유로 사용할 수 있다. 하지만 직선형태의 보강



(a) Recycled PET fiber



(b) PP fiber

Fig. 1 Photos of synthetic fiber

섬유는 콘크리트와의 부착강도가 상당히 떨어져 구조체의 보강섬유로 사용하기 어려워 섬유표면에 형상을 주어 부착강도를 증가시키는 작업이 필요하다. 표면형상은 표면형상결정 장비와 표면형상결정 기어를 사용하여 결정하며 표면형상결정 기어에 따라 재생 PET 섬유에 다양한 표면형상을 줄 수 있다. 일반적으로 콘크리트 보강섬유로 많이 사용되는 섬유의 형태는 굴곡형태(crimped type)와 양각형태(embossed type)가 있다. 표면형상을 결정한 재생 PET 섬유는 절단장비를 통하여 적당한 길이로 자른다. 마지막으로 재생 PET 섬유는 분산성 및 부착성을 향상시키기 위하여 무수말레인산이 그래프트된 폴리프로필렌(maleic anhydride grafted polypropylene, mPP)을 이용하여 섬유의 표면에 친수성 처리 기술을 도입하여 제조하였다.

본 연구에서는 재생 PET 섬유의 특성을 확인하기 위해 기존 구조용 섬유로 사용되는 PP 섬유와 비교하였다. 실험에 사용된 합성섬유의 기본물성은 Table 2에 나타내었으며, Fig. 1에는 보강섬유로 사용된 재생 PET 섬유와

Table 3 Mix proportion of concrete

Specimens	W/B	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						Fiber volume fraction (%)	
			C	FA	W	S	G	AE	PET	PP
Plain	0.43	43.8	350	40	161	775	994	2.37	-	-
PET 0.5	0.43	43.8	350	40	161	775	994	2.37	0.5	-
PET 1.0	0.43	43.8	350	40	161	775	994	2.37	1.0	-
PP 0.5	0.43	43.8	350	40	161	775	994	2.37	-	0.5
PP 1.0	0.43	43.8	350	40	161	775	994	2.37	-	1.0

PP 섬유 함유의 형상을 나타내었다.

2.3 배합설계

콘크리트의 배합은 w/c=0.43과 공기량 4.5±1.5%, S/a=43.8% 그리고 슬럼프 150±25mm를 갖고 있으며, 합성섬유가 보강섬유로 사용되었다. 본 연구에서는 콘크리트에 사용되는 단위수량을 줄이기 위해 AE 감수제를 사용하였다. 주요 변수로는 합성섬유의 종류와 혼입량이다. 합성섬유는 일반적으로 가장 널리 사용되고 있는 PP 섬유와 본 연구에서 검토하고자 하는 재생 PET 섬유가 사용되었으며, 섬유의 혼입량은 콘크리트 체적의 0%, 0.5%, 1.0%로 변화시키며 수행하였다. 시험에 사용된 배합표는 Table 3에 나타내었다.

3. 실험방법

3.1 압축강도실험

재생 PET 섬유 함유의 혼입률에 따른 콘크리트의 물성변화를 확인하기 위하여 압축강도와 콘크리트의 응력-변형률 관계를 측정하였으며, 압축강도시험은 KS F 2405에 따라 수행되었으며, 식 (1)에 의해 계산되었다.

$$f_c = \frac{P}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (1)$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa)이고, P는 파괴시의 최대하중(N), d는 공시체의 지름(mm)이다.

3.2 철근 콘크리트 슬래브 시험체 제작

철근 콘크리트 슬래브 시험체는 시험기의 용량, 시험체

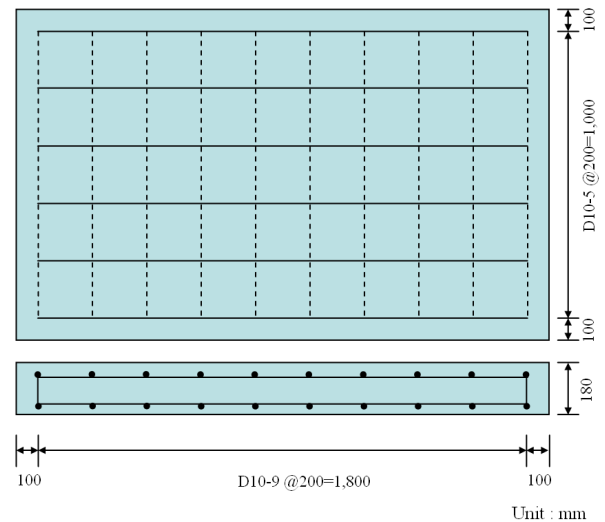


Fig. 2 Dimension and details of test beam

의 관리 및 제어를 고려하여 시험체의 제원을 결정하였다. 콘크리트의 설계기준강도 f_{ck} 는 24MPa, 철근의 항복강도 f_y 는 400MPa로 상·하부에 양단 배근하였으며, 단면형상은 직사각형 단면으로 폭 b 는 1200mm, 길이 l 은 2000mm, 높이 h 는 180mm로 제작하였다. 철근 콘크리트 슬래브 구조 시험체의 단면형상 및 배근형태는 Fig. 2와 같다.

3.3 RC 슬래브의 구조 휨 성능 시험방법

철근 콘크리트 슬래브 시험체는 양생포로 덮어 양생 후 재령 28일에 거푸집을 탈형하였으며, 균열의 진전 및 파괴양상을 자세히 관찰 할 수 있도록 흰색 페인트로 도색 후 눈금을 표시하였다. 휨 실험을 위한 시험체는 충청대학 구조 실험동 소재 최대용량 2,000 kN의 만능시험기 (UTM)를 사용하여 휨 실험을 하였다. 시험체의 가력은 중앙에 선하중을 재하하였으며 초기 균열 발생 전까지는 하중제어법을 사용하여 20 kN/min의 속력으로 가력하였

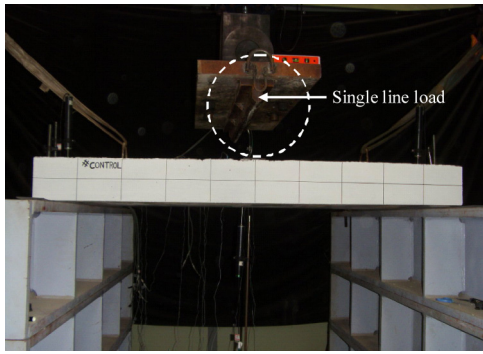


Fig. 3 Photograph of test set up

으며, 초기 균열 발생 후에는 변위제어법을 사용하여 0.05 mm/min의 속력으로 가력하였다.

RC 슬래브 시험체의 변형률을 측정하기 위하여 보 중앙 최대 모멘트 지점인 중앙부 상부 표면과 하부 인장철근에 변형률 게이지를 부착하였고, 슬래브 중앙 하부면에는 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 설치하였으며 변형률 게이지와 LVDT로부터 측정되는 모든 실험 데이터는 자동변형 측정기(data logger : TDS-303)를 통해 전자식으로 획득하였다. 또한 균열의 발생 및 진전 상황은 육안으로 확인 기록하였다. 실험전경은 Fig. 3과 같다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 압축강도와 응력-변형률 관계

섬유 혼입률에 따른 압축강도 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 압축강도 실험결과로부터 보강섬유를 혼입한 재생 PET 시편과 PP 시편은 섬유가 혼입되지 않은 Plain 시편에 비해 약 2~7%가량의 압축강도 감소율을 보여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타내었으며, 보강섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도는 낮아졌다. 이러한 강도의 저하는 보강섬유가 콘크리트 내부에서 공극으로 작용하여 압축하중에 저항하는 콘크리트의 유효 단면적을 감소시켜 압축강도가 저하된 것으로 판단된다. 그러나, 재생 PET 섬유와 기존 PP 섬유를 비교했을 때 재생 PET 섬유의 압축강도 감소 경향은 크지 않음을 알 수 있어 시공 시 적정량을 고려하여 혼입하고 혼입량이 많아질 경우에는 강도저하를 고려하여 배합강도를 상향조정하여 설계하는 방법을 통해 해결할 수 있어 콘크리트의 압축강도는 큰

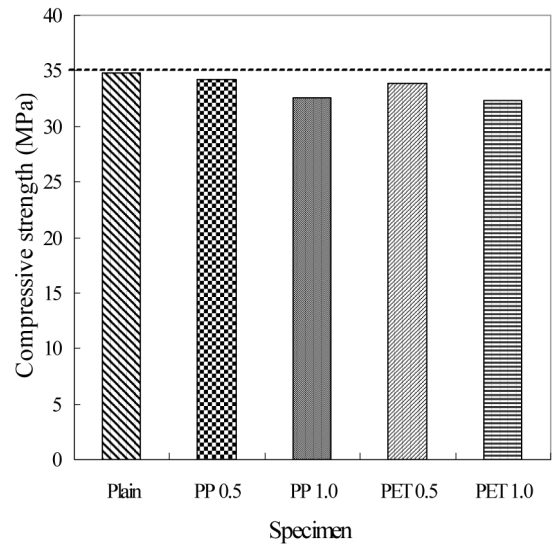


Fig. 4 Results of compressive strength test

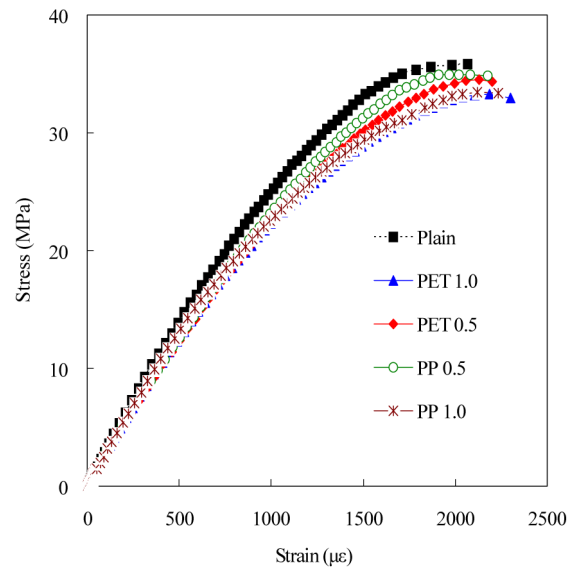


Fig. 5 Axial stress-axial strain for fiber volume fraction

문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 실험결과로부터, Plain 시편의 곡선기울기가 가장 급한 것으로 나타나 강성이 가장 큰 것을 알 수 있다. 보강 섬유가 혼입된 시편은 섬유의 혼입량이 증가할수록 변형률 곡선의 기울기가 완만하게 감소하였다. 이러한 결과는 재생 PET 섬유가 콘크리트에 혼입되면 콘크리트의 마이크로 크랙의 생성과 연성거동을 유도하는데 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

4.2 RC 슬래브의 구조 휨 성능 시험

4.2.1 하중-변위 결과

휨 실험에 대한 하중-변위 관계를 Fig. 6에 보강섬유 별로 나타내었으며, Table 4에 결과를 정리하였다. 실험 전 계산된 슬래브 시편의 균열하중은 약 45 kN으로 계산되었으며, 강도감소계수가 반영된 설계하중은 약 86 kN (공칭하중 101 kN)으로 계산되었다. 실험결과와 비교하였을 때 실험에 의한 P_{cr} 시편의 균열하중은 62.6 kN으로 측정되어 계산값 보다 실험값이 크게 나타났으며, 섬유보강 시편의 경우 섬유의 혼입에 따라 Plain 시편보다

는 낮은 균열하중을 나타내었지만 모두 계산된 균열하중 보다는 높은 균열하중을 보이는 것으로 나타나 균열에 대한 설계는 문제가 없는 것으로 나타났다. 또한 설계하중은 86 kN으로 모든 시편은 86 kN이후에 하부 인장철근이 항복하는 것으로 나타나 휨 설계가 제대로 이루어진 것으로 판단된다.

실험결과는 Fig. 6에 보이는 것과 같이, 모든 시편은 균열 전 초기 거동에서 섬유의 혼입량과 상관없이 거의 유사하게 나타났으며 항복하중인 약 120 kN까지도 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 그러나, 항복하중 이후에는 뚜렷한 거동의 변화를 보여주고 있다.

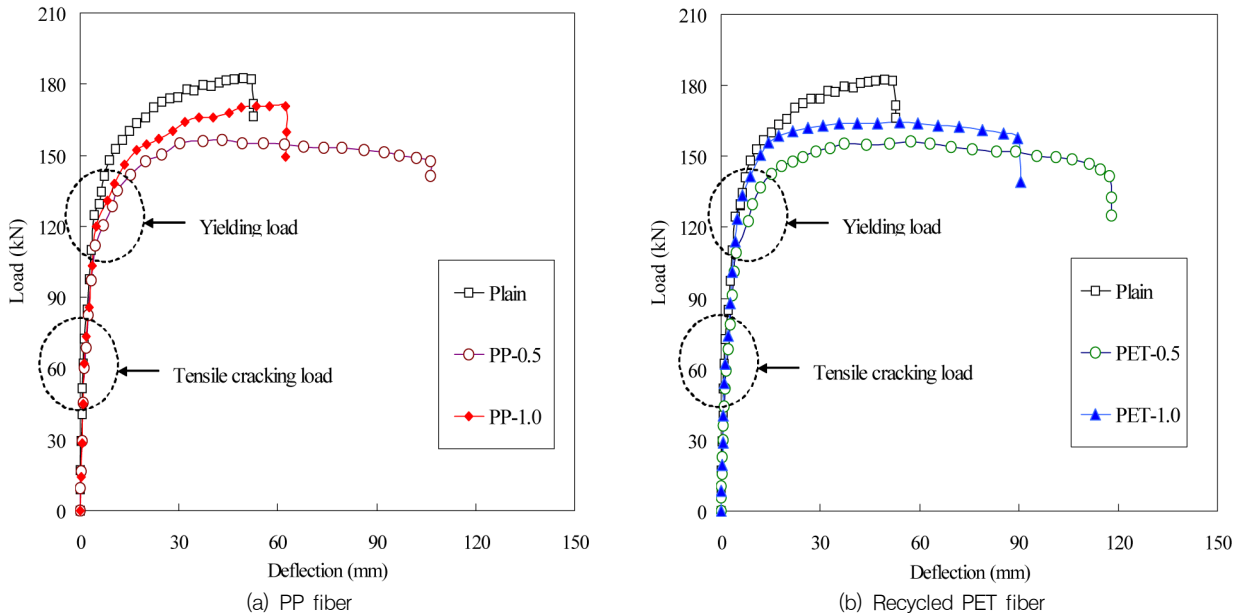


Fig. 6 Comparison of the load-deflection curves

Table 4 Summary of test results

Specimen	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	ϵ_y ($\mu\epsilon$)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Ductility index (Δ_u / Δ_y)	Relative ductility	
Slab	Plain	62.6	0.92	124.6	4.35	2073	182.0	51.9	11.93	1
	PET 0.5	59.4	1.41	109.4	4.72	1904	142.0	117.5	24.89	2.09
	PET 1.0	62.2	1.32	123.4	4.86	2101	157.8	89.6	18.44	1.55
	PP 0.5	60.2	1.37	111.8	4.64	1971	147.2	106.2	22.89	1.92
	PP 1.0	59.0	1.28	119.8	4.82	2010	170.8	62.4	12.95	1.09
Beam ⁴⁾	Plain	32.6	1.01	101.4	4.80	-	121.6	16.94	3.53	1
	PET 0.5	24.8	0.43	109.0	4.52	-	152.6	165.0	36.50	10.34
	PET 1.0	32.4	0.62	107.8	5.31	-	160.4	143.36	27.00	7.65
	PP 0.5	32.8	0.75	108.2	4.93	-	154.0	140.07	28.41	8.05
	PP 1.0	25.6	0.61	106.6	4.71	-	156.6	144.22	30.63	8.67

Note : 4) indicates a reference number

섬유를 혼입하지 않은 Plain 시편의 균열하중은 약 62.6 kN로 섬유를 혼입한 시편과 유사하게 나타났으나 균열하중 시의 변위는 0.92 mm로 섬유를 혼입한 시편의 균열하중 시 변위인 1.28~1.41 mm에 비해 적게 측정된 것으로 나타났다. 또한 Plain 시편은 항복하중도 약 124.6 kN으로 측정되어 가장 높은 값을 보이는 것으로 나타났으며, 이때의 변위도 4.35 mm로 섬유를 혼입한 시편에 비해 상대적으로 적은 변형을 보였다. 이러한 결과는 섬유의 혼입에 따라 콘크리트의 유효단면적이 줄어들어 강성이 적어진 것으로 판단된다.

파괴하중의 경우에는 Plain 시편이 182 kN에서 파괴되어 가장 높은 하중저항력을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 변위는 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 시편의 최대 변위가 117.5 mm로 가장 크게 나타났으며, PP 섬유를 0.5% 혼입한 시편이 106.2 mm의 변위를 보여 두 번째로 큰 변위를 보였다. Plain 시편은 파괴하중 시 51.9 mm의 변위를 보여 가장 작은 변형을 보였으며, 이는 최대변형을 일으킨 PET 0.5 시편에 비해 약 2배가량 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 재생 섬유를 혼입하면 항복하중 이후 구조물의 강성은 저하되나 연성이 증가되어 안전성이 증대되는 것을 확인할 수 있어 구조물의 안전성 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 보 시편에 적용할 경우에는 Plain 시편에 비해 연성능력 뿐 아니라 극한성능도 증가되는 것으로 나타났

으나 슬래브 시편의 경우 연성능력은 증가되나 극한성능이 감소하는 것을 확인할 수 있어 보 시편에 비해 상대적으로 보강효과가 적게 나타나고 있어 슬래브에 적용할 경우에는 배합과 혼입량을 적절히 사용해야 할 것으로 사료된다.

4.2.2 하중-변형률 결과

변형률 계이지는 단순하중하에 있는 슬래브의 초기균열과 균열진전을 나타내는데 이전부터 사용되어 왔다(Falkner and Teutsch, 1993; Roesler and Barenberg, 1999). 본 연구에서 측정된 변형률은 주로 콘크리트 슬래브의 인장과 휨 균열 하중을 측정하는데 사용되었으며, 더 나아가 무보강된 콘크리트 슬래브(Plain 시편)와 섬유 보강된 콘크리트 슬래브 사이의 파괴 거동 차이를 설명하는데 사용되었다.

Fig. 7은 Plain 시편과 섬유 보강된 콘크리트 슬래브 시편에서 측정된 콘크리트의 초기인장균열 시의 변형률을 보여주고 있다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 Plain 시편은 재하하중 62.6 kN (Plain_bottom)에서 초기균열이 발생하여 철근에서 비선형적인 거동을 나타내기 시작하였다. 이 하중단계는 Table 4에 보이는 것과 같이 철근 콘크리트 슬래브에서 콘크리트의 인장강도로 정의되며 철근 콘크리트 구조물의 초기에 발생하는 균열발생 단계이다. Plain 시편은 섬유를 보강한 시편보다 근소하게 균

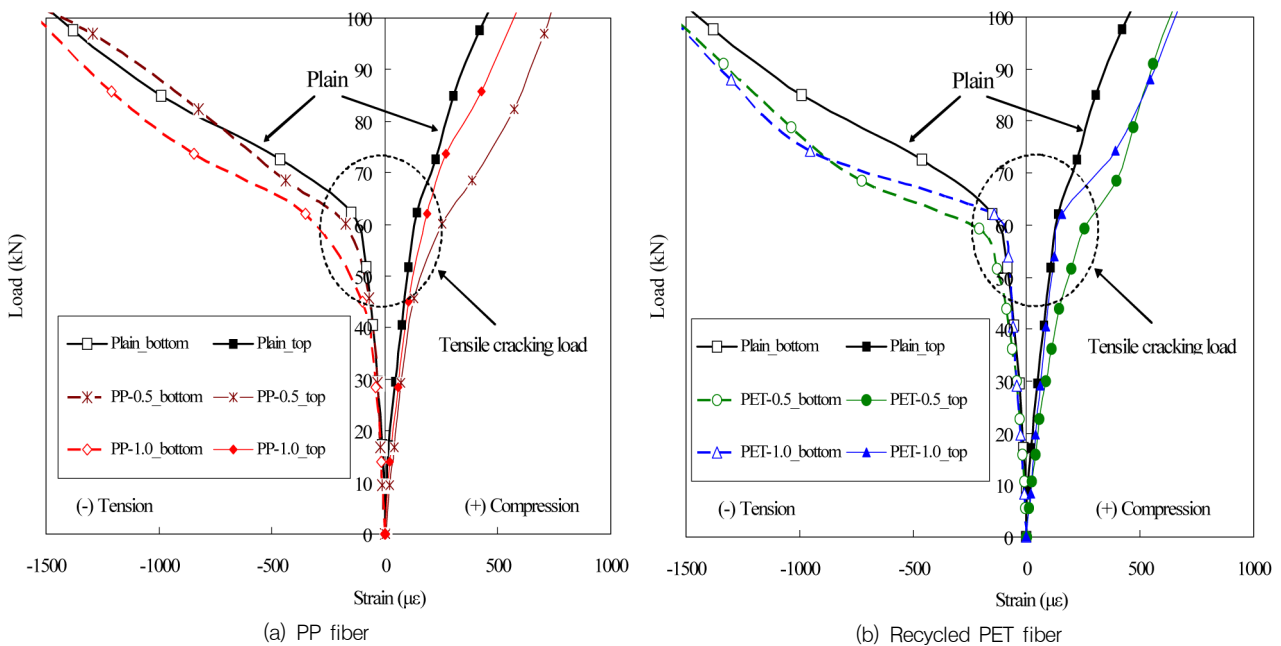
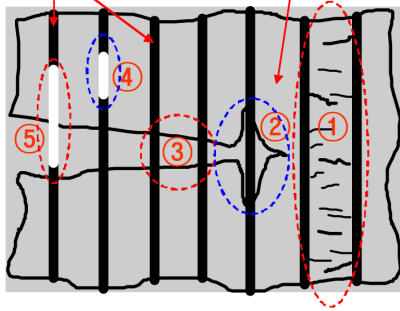


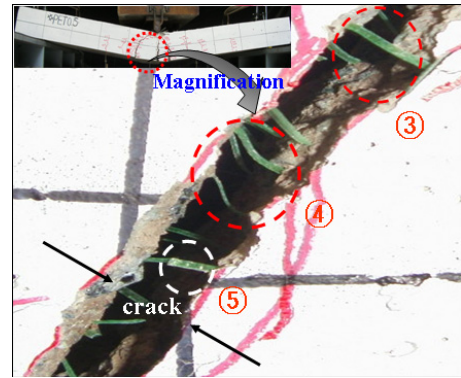
Fig. 7 Comparison of the load-strain curves under tensile cracking load

Recycled PET fiber Concrete matrix



(a) Fracture mechanism of synthetic fiber in concrete

- ① Damage of the matrix
- ② Fiber/matrix debonding
- ③ Fiber bridging
- ④ Fiber failure
- ⑤ Fiber pull-out



(b) Bridging effect of RPET fiber-matrix in slab

Fig. 8 Fracture mechanism of Recycled PET fiber in concrete

열발생 하중이 높은 것으로 나타났다. 또한 Plain 시편의 강성이 가장 큰 것으로 나타나 균열발생이전에는 섬유보강에 의한 효과가 거의 없으며 오히려 휨 균열발생을 가속화 시키는 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 섬유의 가교작용(bridging effect)이 충분한 역할을 하지 못하기 때문이다. 일반적으로 섬유는 콘크리트에 보강될 경우 Fig. 8과 같은 메커니즘에 의해 콘크리트의 균열을 억제하는 기능을 갖고 있으나 초기균열에서는 섬유가 충분한 가교기능을 확보하지 못하기 때문에 이러한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 즉 섬유가 콘크리트의 표면에 위치하면 오히려 콘크리트의 인장저항력을 감소시켜 초기균열이 초기에 발생하는 현상을 가져오게 되며 이러한 연구결과는 기존의 연구에서도 확인할 수 있다(Kim et al., 2009). 그러나 전체적으로 모든 시편은 약 60 kN 근처에서 초기균열이 발생하였으며 항복하중은 약 120 kN으로 철근의 항복강도인 400 MPa ($\epsilon_y=2,000$)에서 슬래브가 항복하며 비선형 거동을 보이는 것으로 나타났다.

4.2.3 파괴형상

본 연구에서는 재생 PET 섬유의 혼입에 따른 철근콘크리트 슬래브의 파괴거동 평가를 수행한 결과 슬래브 시험체는 모두 휨파괴 현상을 보였으며, Fig. 9에 파괴형상을 나타내었다. 모든 시험체는 슬래브 하부에서 초기균열이 발생하였고, 철근 항복점까지는 하중증가에 따라 탄성 거동을 하면서 균열이 성장하는 것을 확인할 수 있었다. 섬유를 보강하지 않은 Plain 시편은 철근의 항복이후에도 파괴하중까지 약 46%의 강도증가를 보인 이후 급격한 강도감소를 보이면서 파괴되었다. 반면에 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 시편은 철근의 항복이후 강도의 증가 없이

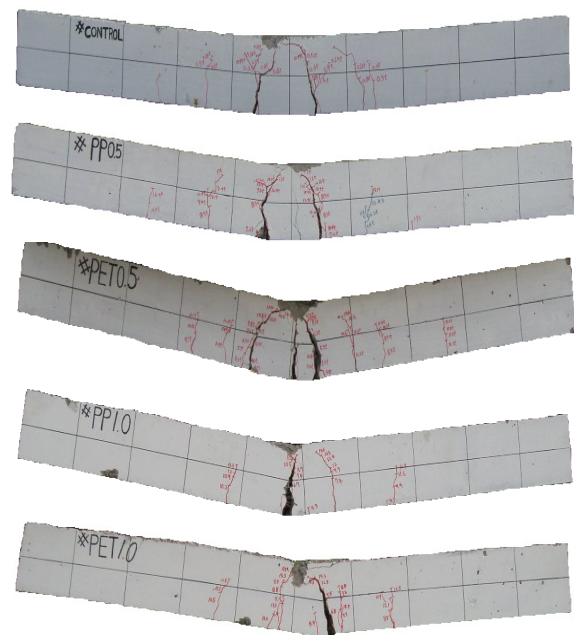


Fig. 9 Fracture modes for the slabs

변위의 증가와 균열이 지속적으로 확산되며 성장하는 것을 확인 할 수 있다. 균열의 진전은 섬유를 0.5% 혼입한 PET 0.5와 PP 0.5 시편에서 가장 뚜렷하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 균열의 발생이후 섬유 균열을 가로지르는 가교역할에 의해 지속적으로 인장응력을 전달하기 때문에 부재의 급작스런 취성파괴를 방지하고 변위의 증가를 보이는 연성파괴를 유도하기 때문이다.

Zollo(1997)에 따르면 보강섬유는 콘크리트 내부에서 bridging 단계를 거쳐 섬유가 pull-out되어 파괴에 이른다 고 보고하고 있으며 재생 PET 섬유도 Fig. 8과 같은 파괴 메커니즘을 갖는 것으로 나타났다. 하지만 기존 연구에서 보 시편을 대상으로 실험한 결과와는 다르게 슬래

Table 5 Results of energy absorbing capacity test

Specimens	E_{tot} (kN·m)	E_{ela} (kN·m)	$0.5\left(\frac{E_{tot}}{E_{ela}}+1\right)$	Relative ductility index
Plain	8.32	0.27	15.91	1
PET 0.5	17.17	0.25	34.84	2.19
PET 1.0	13.87	0.21	33.52	2.11
PP 0.5	15.47	0.27	29.15	1.83
PP 1.0	9.50	0.26	18.77	1.18

브 시편을 대상으로 실험한 결과 연성과괴 유도에는 효과적이지만 구조내력을 향상시키기에는 다소 무리가 있다고 판단된다.

4.2.4 에너지 흡수능력

연성(ductility)은 철근콘크리트 부재의 에너지 흡수능력을 평가하는데 사용되며, 강도와 함께 구조물의 안전도를 평가함에 있어 중요한 요소 중 하나이다. 본 연구에서는 식 (2)와 같이 Naaman and Jeong(1995)의 에너지에 근거한 연성모델을 이용하여 에너지 흡수능력과 연성비를 평가하였으며, 결과는 Table 5에 나타내었다.

$$\mu = 0.5\left(\frac{E_{tot}}{E_{el}}+1\right) \quad (2)$$

여기서, E_{tot} :하중-변위 곡선의 총 에너지, E_{el} :하중-변위 곡선의 탄성에너지

보강섬유와 혼입율에 따른 에너지 흡수능력을 평가한 결과는 Table 5에 나타내었으며, Fig. 10에는 상대에너지 흡수 능력과 연성비를 비교하여 놓았다. 실험 결과로부터 탄성에너지 흡수능력은 Plain과 PP 0.5% 시편이 0.27 kN·m로 가장 높게 나타났으며, 다른 시편은 이보다 다소 낮은 탄성에너지 흡수능력을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 전체 에너지 흡수능력은 Plain 시편이 8.32 kN·m로 가장 낮은 것으로 나타났으며, 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 시편이 17.17 kN·m로 가장 우수한 에너지 흡수능력을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존 연구결과(Kim et al., 2009)에서도 언급하였듯이 합성섬유가 혼입되어 콘크리트 표면에서 섬유의 구속력이 작용하지 못하고 오히려 섬유가 내부공극으로 작용하여 인장력에 의한 바닥판에서의 초기균열이 조기에 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

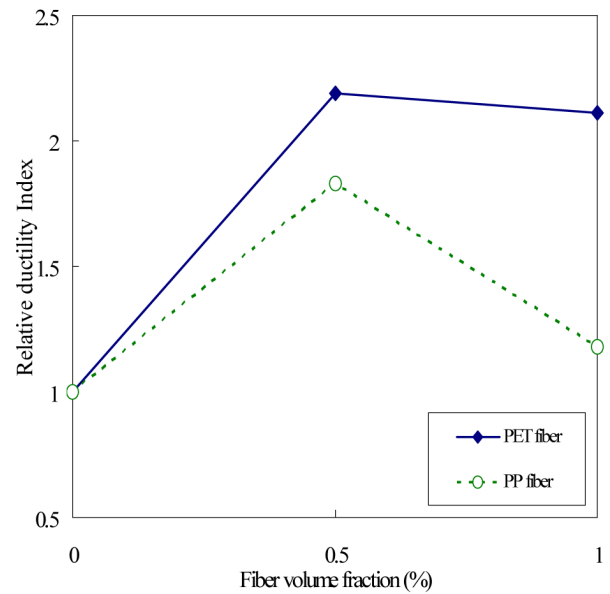


Fig. 10 Comparison of relative energy absorbing capacity

에너지 흡수능력을 바탕으로 계산된 상대연성지수는 Plain 시편과 비교하여 재생 PET 섬유를 0.5%, 1.0% 혼입한 시편이 각각 2.19, 2.11로 높은 상대연성비를 보이는 것으로 나타났으며, PP섬유를 0.5%, 1.0% 혼입한 시편은 각각 1.83, 1.18로 Plain 시편에 비해 연성비가 증가하는 것으로 나타났다. 에너지 흡수 능력과 연성지수가 가장 우수한 시편은 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 것으로 나타났다. 또한 섬유 혼입률에 따른 영향은 Fig. 10에서 보이는 것과 같이 재생 PET 섬유나 PP섬유 모두 0.5%를 혼입하였을 때 에너지 흡수 능력 및 연성지수가 가장 우수한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 재생 PET 섬유를 구조재료로 사용하기 위한 성능 검증 연구로써 철근 콘크리트 슬래브에 재생 PET 섬유를 혼입하여 휨 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 압축강도 실험결과로부터 보강섬유를 혼입한 재생 PET 시편과 PP 시편은 섬유가 혼입되지 않은 Plain 시편에 약 2~7% 가량의 압축강도 감소율을 보여 상대적으로 낮은 압축강도를 나타내었으며, 보강 섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도는 낮아졌다. 그러나, 재생 PET 섬유와 기존 PP 섬유를 비

교했을 때 재생 PET 섬유는 압축강도 감소 경향은 크지 않음을 알 수 있어 시공 시 적정량을 고려하여 혼입하고 혼입량이 많아질 경우에는 강도저하를 고려하여 배합강도를 상향조정하여 설계하는 방법을 통해 해결할 수 있어 콘크리트의 압축강도는 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

- (2) 콘크리트의 응력-변형률 곡선으로 부터, Plain 시편의 곡선기울기가 가장 급한 것으로 나타나 강성이 가장 큰 것을 알 수 있다. 반면 재생 PET 섬유가 혼입된 시편은 섬유의 혼입량이 증가할수록 변형률 곡선의 기울기가 완만하게 감소하였다. 이러한 결과는 재생 PET 섬유가 콘크리트에 혼입되면 콘크리트의 마이크로 크랙의 생성과 연성거동을 유도하는데 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.
- (3) 휨 결과로부터 Plain 시편의 극한하중은 182 kN으로 가장 높은 하중저항력을 갖는 것으로 나타났으며 변위는 51.9 mm로 가장 적은 변형을 보였다. 반면에 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 시편의 극한하중은 142 kN으로 가장 낮은 하중저항력을 보였으며 변위는 117.5 mm로 가장 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 재생 섬유를 혼입하면 항복 하중이후 구조물의 강성은 저하되나 연성이 증가되어 안전성이 증대되는 것을 확인할 수 있어 구조물의 안전성 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 보 시편에 적용한 경우에는 Plain 시편에 비해 연성능력 뿐 아니라 극한성능도 증가되는 것으로 나타났으나 슬래브 시편의 경우 연성능력은 증가되나 극한성능이 감소하는 것을 확인할 수 있어 보 시편에 비해 상대적으로 보강 효과가 적게 나타나고 있어 슬래브에 적용할 경우에는 배합과 혼입량을 적절히 사용해야 할 것으로 사료된다.
- (4) 에너지 흡수능력을 평가한 결과 탄성에너지 흡수능력은 Plain과 PP 0.5% 시편이 0.27 kN·m로 가장 높게 나타났다. 반면 전체 에너지 흡수능력은 Plain 시편이 8.32 kN·m로 가장 낮은 것으로 나타났으며, 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 시편이 17.17 kN·m로 가장 우수한 에너지 흡수능력을 보이는 것으로 나타났다.
- (5) 에너지 흡수 능력을 바탕으로 계산된 상대연성지수는 Plain 시편과 비교하여 재생 PET 섬유를 0.5%,

1.0% 혼입한 시편이 각각 2.19, 2.11로 높은 에너지 흡수능력을 보이는 것으로 나타났으며, 에너지 흡수 능력과 연성지수가 가장 우수한 시편은 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 재생 PET 섬유를 혼입한 슬래브 시편은 에너지 흡수능력과 연성능력이 뛰어나 급작스런 취성과파괴를 방지하고 연성과파괴를 유도하는데 효과적일 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Falkner, H. and Teutsch, M., "Comparative Investigations of Plain and Steel Fiber Reinforced Industrial Ground Slabs", 102 Institute fur Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1993, p.70.
2. Ha, G. J. and Lee, D. R., "Improvement and Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beam using High Ductile Fiber-Reinforced Mortar with Ground Granulated Blast Furnace Slag", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 14, No. 6, 2010, pp.142-152. (in Korean)
3. JVEC, Vinyl Environmental Council of Japan, <<http://www.vec.gr.jp/enbi/seisan.htm>>, 2008.
4. Kim, S. B., Kim, H. Y., Yi, N. H. and Kim, J. H. J., "Strength and Crack Resistance Properties of Fiber Reinforced Concrete Mixed with Recycled PET Fiber", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 14, No. 1, 2010b, pp.102-108. (in Korean)
5. Kim, S. B., Kim, H. Y., Yi, N. H. and Kim, J. H. J., "Structural Behavior of Fiber Reinforced Concrete Mixed with Recycled PET Fiber", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, KSCE, vol. 29, No. 5A, 2009, pp.543-550. (in Korean)
6. Kim, S. B., Yi, N. H., Kim, H. Y. and Kim, J. H. J., "Mechanical Properties and Flexural Behavior of Recycled PET Fiber Reinforced Eco-Friendly Hwang-toh Concrete", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 14, No. 3, 2010a, pp.152-159. (in Korean)
7. Korea PET Container Association, <<http://www.kpcaa.or.kr>>, 2008. (in Korean)
8. Korean Institute of Resources Recycling (KIRR), Recycling White Paper, Cheong Moon Gak, 2008, pp.19-22.
9. Lee, S. T. and Lee, C. Y., "Flexural Behavior of Hybrid Fiber Reinforcement Strengthened RC Beams", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 14, No. 5, 2010, pp.79-86. (in Korean)
10. Naaman, A. E. and Jeong, S. M., "Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons", Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concretes Structures, Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), E&FN Spon, London, 1995, pp.379-386.
11. Roesler, J. R. and Barenberg, E. J., "Effect of Static and Fatigue Cracking on Concrete Strain Measurements", Transportation Research Record 1684, Washington, D.

C, 1999, pp.51-60.

12. Won, J. P., Park, C. G., Kim, H. H. and Lee, S. W., "Effect of Recycled PET Fiber Geometry and Length on the Plastic Shrinkage Cracking of Cement Based Composites", Journal of the Korea Concrete Institute, KCI, vol. 19, No. 2, 2007a, pp.233-239. (in Korean)

13. Won, J. P., Park, C. G., Kim, H. H. and Lee, S. W., "Effect of Hydrophilic Treatments of Recycled PET Fiber on the Control of Plastic Shrinkage Cracking of Cement Based Composites", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, KSCE, vol. 27, No. 3A, 2007b, pp.413-419.

(in Korean)

14. Zollo, R. F., "Fiber-Reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development", Cement and Concrete Composites, vol. 19, No. 2, 1997, pp.107-122.

Received : 06/20/2012
 Revised : 11/21/2012
 Accepted : 12/11/2012

요 지

본 연구는 재생 PET 섬유 구조보강성능을 규명하기 위한 연구의 일환으로 수행되었다. 재생 PET 섬유의 구조보강성능을 규명하기 위하여 철근 콘크리트 슬래브 부재를 제작하여 휨 성능을 수행하고 기존 합성섬유인 PP 섬유와 합성섬유를 혼입하지 않은 Plain 시편과 비교하였으며, 또한 섬유의 혼입율에 따른 거동을 평가하였다. 실험결과 압축강도는 섬유의 혼입율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며 감소 비율은 약 2~7% 정도로 나타났다. 휨 실험결과로부터 Plain 시편의 극한성능이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 에너지 흡수 능력과 연성지수는 재생 PET 섬유를 0.5% 혼입한 시편이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 보 시편에 적용한 경우에는 Plain 시편에 비해 연성능력 뿐 아니라 극한성능도 증가되는 것으로 나타났으나 슬래브 시편의 경우 연성능력은 증가되나 극한성능이 감소하는 것을 확인 할 수 있어 보 시편에 비해 상대적으로 보강효과가 적게 나타나고 있다. 따라서 슬래브 구조물에 적용할 경우에는 배합과 혼입량을 적절히 사용해야 할 것으로 사료된다.

핵심 용어 : PET 섬유, 휨 성능, 에너지 흡수, 연성지수