

재생 PET 섬유가 혼입된 섬유 보강 콘크리트의 구조거동

Structural Behavior of Fiber Reinforced Concrete Mixed with Recycled PET Fiber

김성배* · 김현영** · 이나현*** · 김장호****
Kim, Sung Bae · Kim, Hyun Young · Yi, Na Hyun · Kim, Jang-Ho Jay

Abstract

This study was performed to prove the possibility of utilizing short plastic fibers made for recycled polyethylene terephthalate (RPET) as a structural material. In order to verify the capacity of RPET fiber, it was compared with polypropylene (PP) fiber, most widely used short synthetic fiber, for fiber volume fraction of 0%, 0.5%, 0.75%, and 1.0%. To measure material properties such as compressive strength, split tensile strength, appropriate tests were performed. Also, to measure the strength and ductility capacities of reinforced concrete (RC) member casted with RPET fiber added concrete, flexural test was performed on RC beams. The results showed that compressive strength decreased, as fiber volume fraction increased. These trends are similarly observed in the tests of PP fiber added concrete specimens. Split cylinder tensile strength of RPET fiber reinforced concrete increased slightly as fiber volume fraction increased. For structural member performance, ultimate strength, relative ductility and energy absorption of RPET added RC beam are significantly larger than OPC specimen. Also, the results showed that ultimate flexural strength and ductility both increased, as fiber volume fraction increased. These trends are similarly observed in the tests of PP fiber added concrete specimens. The study results indicate that RPET fiber can be used as an effective additional reinforcing material in concrete members.

Keywords : RPET fiber, fiber volume fraction, flexural strength, ductility, energy absorption

요 지

본 연구에서는 재활용된 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate; PET)로 만든 플라스틱 단섬유의 구조재료로서의 사용 가능성을 조사하였다. 성능을 검증하기 위해서 가장 널리 상용되는 합성섬유인 폴리프로필렌(polypropylene; PP) 섬유와 비교하였으며, 섬유의 혼입률을 0%, 0.5%, 0.75%, 1.0%로 변화시켜 혼입률에 따른 영향을 함께 검토하였다. 실험으로는 압축강도, 쪼갠인장강도 등의 재료 특성과 재생 PET(recycled PET fibers; RPET) 섬유가 혼입된 RC 부재에서의 극한성능과 연성을 평가하기 위해 RC보의 휨 실험을 수행하였다. 실험결과, 압축강도는 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 감소하였으나, 기존 PP섬유와 유사하였다. 반면 쪼갠인장강도는 약간 증가하는 경향을 보였다. 구조 부재에 적용하였을 경우에는 RPET을 혼입한 RC 보의 극한강도, 상대 연성비, 에너지 흡수능력이 OPC 시편에 비해 확연히 증가되는 것을 알 수 있었다. 극한 휨강도와 연성비가 증가하는 현상은 PP 섬유를 혼입한 콘크리트에서도 유사하게 나타났다. 따라서 RPET 섬유는 콘크리트 부재의 보강섬유로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 재생 PET 섬유, 섬유 혼입량, 휨강도, 연성, 에너지 흡수능력

1. 서 론

콘크리트는 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 건설재료이다. 그러나, 낮은 인장강도, 저연성 그리고 낮은 에너지 흡수능력을 갖고 있다. 최근 이러한 콘크리트의 취약적인 성질을 개선하기 위하여 보강섬유를 콘크리트에 혼입하여 콘크리트의 연성을 증가시키려는 다양한 연구가 진행되고 있다(Banthia and Sheng, 1996; Bayasi and Zeng, 1997; Dwarakanath and Nagaraj, 1992; Mu *et al.*, 2000). 콘크

리트 보강에 사용되는 합성섬유는 현재 폴리프로필렌(polypropylene; PP), 폴리에틸렌(polyethylene; PE), 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol; PVA), 폴리염화비닐(polyvinylchloride; PVC), 나일론(nylon), 아라미드(aramid), 폴리에스테르(polyester) 등이 사용되고 있다(Mu *et al.*, 2000; Cengiz and Turanli, 2004; Zollo, 1997). 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate; PET)는 공산품에 가장 중요한 플라스틱재료로서 많은 분야에 널리 활용되고 있으며, 주로 음료수병으로 대량 사용되고 있다. 현재 전 세계적으로

*정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : sstk77@yonsei.ac.kr)

**정회원 · 연세대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : wittyman@yonsei.ac.kr)

***정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : wwitch1@yonsei.ac.kr)

****정회원 · 교수이자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 조교수 (E-mail : jhkim@yonsei.ac.kr)

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(한국 PET 용기협회, 2008). 그러나, 다양한 제품으로 활용되고 있는 폐 PET 병은 현재 사용하고 버려지는 양이 많고, 수거되는 대부분도 소각이나 매립 등으로 처리되어 환경오염의 원인이 되고 있다(한국자원리사이클링학회, 2008). 특히 PET 병을 재활용하여 식료품의 용기로 재활용하기에는 많은 비용이 소모되고, 재생된 PET 병의 색깔과 순도는 재활용 가능분야를 제한하고 있다(Rebeiz *et al.*, 1993a). 따라서, 저 비용으로 많은 양의 재생 PET(recycled PET fibers; RPET)을 재활용 할 수 있는 방안이 요구된다. 이와 같은 방법 중 하나인 PET을 콘크리트의 보강섬유로 사용하는 방법은 콘크리트의 단점인 균열발생을 억제하고, 취성적인 성질을 개선하는 동시에 재활용 측면에서 대량의 PET을 소비할 수 있어야 한다. 현재 건설산업에서 폐 PET 병은 폴리머 콘크리트의 수지 또는 경량 콘크리트에 주로 사용되고 있다(Rebeiz *et al.*, 1993a; Rebeiz *et al.*, 1993b; Choi *et al.*, 2005; Jo *et al.*, 2008; Jo *et al.*, 2007; Rebeiz, 1995; Rebeiz and Fowler, 1996). 그러나, 이와 같은 방법은 적용대상이 한정되어 있어 대량으로 재활용하는 데는 한계가 있다. 따라서, RPET 섬유를 건설산업에 대량으로 적용할 수 있는 연구가 점차 증가하고 있다(Marcus, 1997; Kim *et al.*, 2008; Santos and Pezzin, 2003; Ochi *et al.*, 2007). 최근 미국, 일본 등의 선진국에서 수행된 연구에 따르면 친환경 보강 섬유인 폐 PET 병을 재활용한 PET 섬유는 소성수축 및 건조수축 균열제어에 효과가 있는 것으로 보고된바 있다. 국내에서도 홍종석(2007), 원종필 등(2007c)이 얇은 슬래브 공시체 시험에서 RPET 섬유의 형상, 길이 및 혼입률에 따른 시멘트 복합 재료 내에서 소성 수축 균열 제어 특성을 평가하였다. 연구결과, 섬유의 혼입률은 콘크리트 체적의 0.5~1.0%를 혼입할 경우 콘크리트의 소성수축균열을 제어할 수 있으며, 양각형태(embossed type)의 섬유가 가장 우수한 부착성능과 균열제어 성능을 나타내었다. 하지만 대부분의 연구가 재료적인 부분에 국한되어 있으며, 구조 부재에 대한 연구는 거의 전무한 실정이므로, 본 연구에서는

RC 보 실험을 통하여 RPET 섬유가 RC 보의 극한강도, 연성, 에너지 흡수능력, 균열형상 등에 미치는 영향을 비교·분석하고 RPET 섬유가 혼입된 RC 보의 휨성능을 평가하여 성능을 개선하고자 한다.

2. 재생 PET 섬유의 제조공정

RPET 섬유는 폐 PET병을 수집하여 건조/습윤법을 이용 불순물을 제거한 뒤 압쇄 분쇄한 다음 용해하여 RPET 물을 생산한다. 생산된 RPET 물은 슬리팅 장비를 이용하여 가늘게 잘라 직선형태(straight type)의 RPET 섬유를 만든다. 슬리팅 작업이 끝난 RPET 섬유는 그 자체로 직선형태의 콘크리트 보강용 섬유로 사용할 수 있다. 하지만 직선형태의 보강섬유는 콘크리트와의 부착강도가 상당히 떨어져 보강섬유로 사용하기 어려워 표면형상을 주어 부착강도를 증가시키는 작업이 필요하다. 표면형상은 표면형상결정 장비와 표면형상결정 기어를 사용하여 결정하며 표면형상결정 기어에 따라 RPET 섬유에 다양한 표면형상을 줄 수 있다. 일반적으로 콘크리트 보강섬유로 많이 사용되는 섬유의 형태는 굴곡형태(crimped type)와 양각형태(embossed type)가 있다. 마지막으로 표면형상을 결정한 RPET 섬유는 절단장비를 통하여 적당한 길이로 자르는데 일반적으로 25 mm와 50 mm의 길이의 섬유를 많이 사용 한다(원종필 등, 2007c). RPET 섬유를 생산하기 위한 생산시스템의 전 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 또한, 보강 섬유는 화학적 처리 방법에 의해 시멘트 복합재료와 보강 섬유 사이의 부착성능을 향상시킬 수 있다는 기존의 연구결과(원종필 등, 2007a; 원종필 등, 2007b)로부터, 본 연구에서는 RPET 섬유의 분산성 및 부착성능을 향상시키기 위하여 무수말레인산이 그래프트된 폴리프로필렌(maleic anhydride grafted polypropylene, mPP)을 이용하여 섬유의 표면에 친수성 처리 기술을 도입하였다.

3. 재료특성 및 배합설계

3.1 시멘트와 골재

콘크리트의 배합에 사용된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트로 비중 3.15이고 분말도는 3,450 cm²/g이다. 굵은 골재

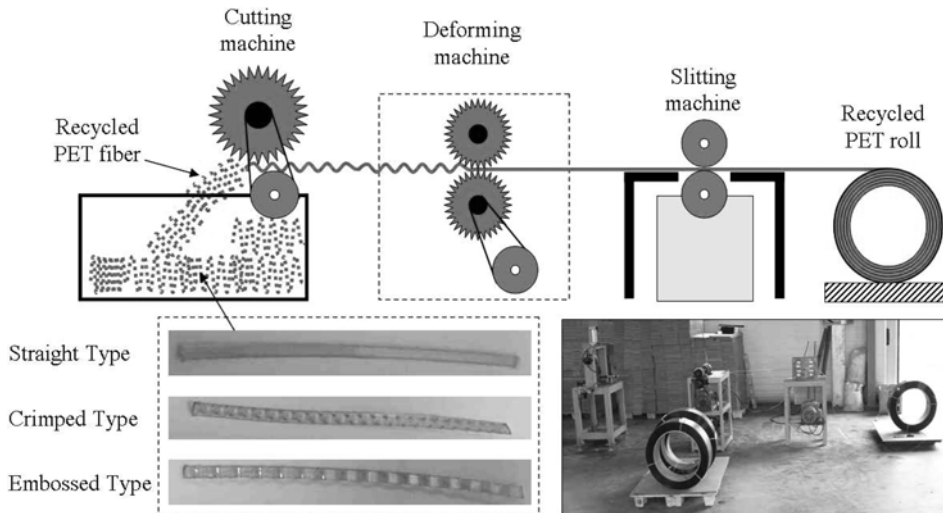


Fig. 1 Manufacturing system of recycled PET fibers

Table 1. Physical and chemical properties of binders

Type	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 (%)
RPET	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

는 최대 입경 25 mm인 부순 골재를 사용하였으며, 잔골재는 청주 인근의 강모래를 사용하였다. 시멘트와 플라이 애쉬의 화학적 조성 및 물리적 특성은 Table 1과 같다.

3.2 보강 섬유

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

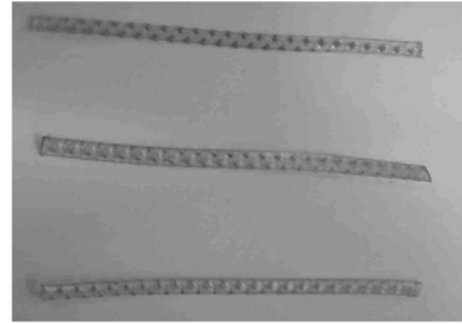
3.3 배합설계

콘크리트의 배합은 w/c=0.41과 공기량 4.5±1.5%, S/a=43.8% 그리고 슬럼프 150±25 mm를 갖고 있으며, 합성섬유가 보강섬유로 사용되었다. 본 연구에서는 콘크리트에 사용되는 단위수량을 줄이기 위해 AE 감수제를 사용하였다. 주요 변수로는 합성섬유의 종류와 혼입량이다. 합성섬유는 스틱크리트에 주로 사용되고 있는 PP 섬유와 본 연구에서 개발한 RPET 섬유가 사용되었으며, 섬유의 혼입량은 콘크리트 체적의 0%, 0.5%, 0.75%, 1.0%로 변화시키며 수행하였다. 시험에 사용된 배합표는 Table 3에 나타내었다.

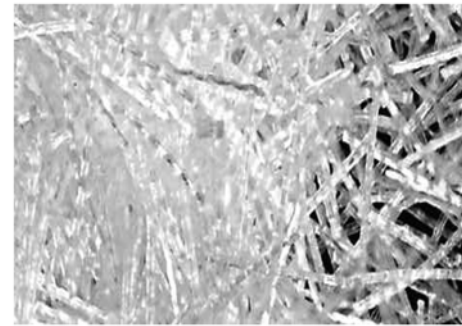
4. 실험방법

4.1 기초물성실험

RPET 섬유의 혼입률에 따른 콘크리트의 물성변화를 확인하기 위하여 압축강도, 쪼갬인장강도를 측정하였으며, 압축강도시험은 KS F 2405, 쪼갬인장강도 시험은 KS F 2423



(a) RPET fiber



(b) PP fiber

Fig. 2 Geometry of the recycled PET fiber and PP fiber

에 따라 각각 수행하였다.

4.2 RC 보의 4점 휨 실험

RC 보 시험체는 모두 7경우로 모든 시편은 타설 후 28일 후에 실험하였다. 시험체는 주철근 D13 철근을 사용하고, 전단보강철근 D10 철근으로 150 mm 간격으로 제작하였다. Fig. 3은 RC 보 시험체의 단면형상 및 배근형태를 나

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	RPET	PP
OPC	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	-	-
RPET 0.5	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	0.5	-
RPET 0.75	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	0.75	-
RPET 1.0	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	1.0	-
PP 0.5	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	-	0.5
PP 0.75	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	-	0.75
PP 1.0	0.41	43.8	355	40	161	775	994	2.37	-	1.0

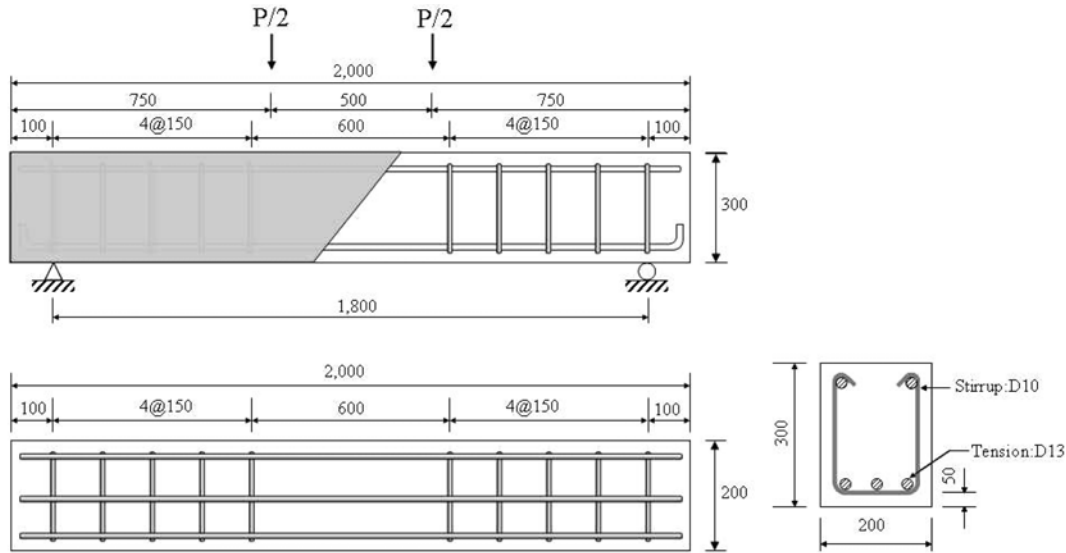


Fig. 3 Dimensions and details of test beam (unit: mm)

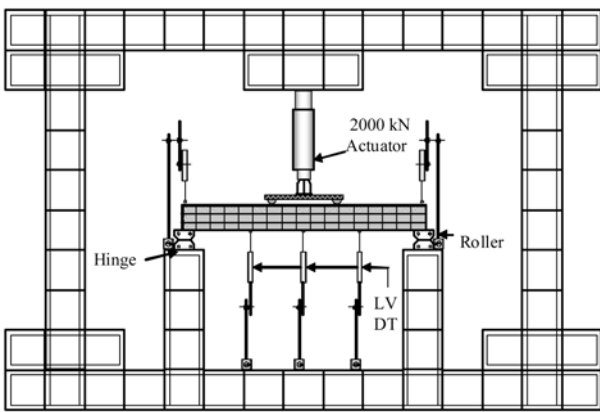


Fig. 4 Set-up of test specimen

타내며, Fig. 4는 시험체의 장치도(set-up)를 보여주고 있다. RC 보의 경계조건은 한쪽은 힌지이고 다른 한쪽은 롤러를 사용하였으며, 최대용량 2000 kN을 갖는 UTM을 사용하여 실험하였다. 하중은 보의 중앙점에서 0.025 mm/sec의 속도로 변위제어를 실시하였다. 주철근의 변형률을 측정하기 위하여 보 중앙 최대 모멘트 지점인 중앙부 하부에 철근용 변형률 게이지를 부착하였고, 콘크리트의 응력을 측정하기 위하여 콘크리트 상부에 콘크리트용 변형률 게이지를 부착하였다. 또한 LVDT를 사용하여 중앙점 및 L/4 지점에서의 처짐을 측정하였다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 기초물성 실험결과

섬유 혼입률에 따른 압축강도와 쪼갬인장강도 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. 압축강도 실험결과로부터 합성섬유를 혼입한 RPET 시편과 PP 시편은 섬유가 혼입되지 않은 OPC 시편에 비해 상대적으로 낮은 압축강도를 나타내었으며, 섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도는 낮아졌다. 이러한 강도의 저하는 RPET 섬유가 콘크리트 내부에서 압축력에 저항하지 못하고 콘크리트 내부 공극으로 존재하여 콘크리트의 유효 단면적을 감소시켜 압축강도가 저하된 것으로 판단된다. 그러나, RPET 섬유와 기존 PP 섬유를 비교했을 때 RPET 섬유의 압축강도 감소 경향은 크지 않음을 알 수 있다. 반면, 쪼갬인장강도에서는 섬유의 혼입량이 증가할수록 인장강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 PP 섬유를 혼입한 콘크리트에서도 유사하게 나타났으며, 섬유의 혼입량이 증가할수록 콘크리트의 단점인 취성적인 성질이 개선되는 것을 알 수 있다. 그러나, 기존 연구자들은 합성 섬유의 혼입률에 따른 콘크리트의 특성 변화가 다양하므로 이를 고려한 섬유 혼입률의 결정이 중요함을 강조하고 있다(Marcus, 1997). 즉, RPET 섬유를 콘크리트 보강제로 사용하기 위해서는 혼입률 등의 여러 가지 영향 인자를 고려하여 사용하면 경제성 및 친환경 측면에서 매우 유용한

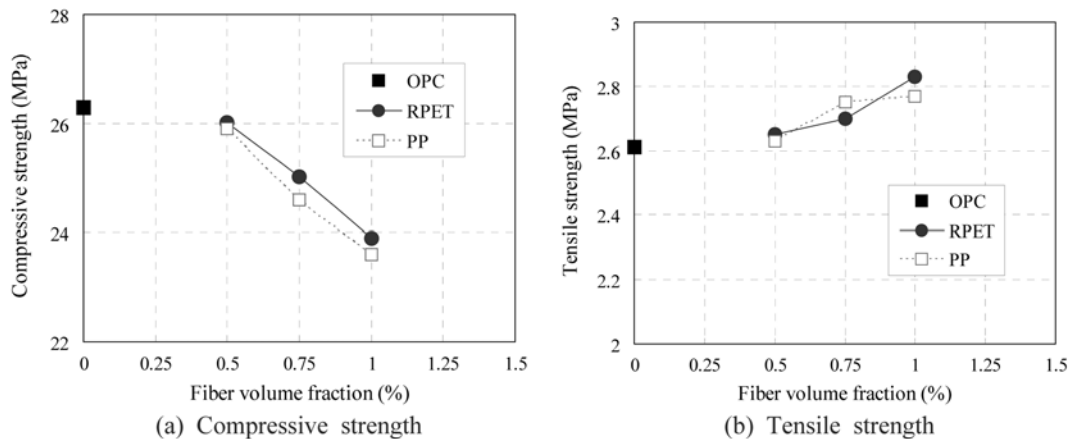


Fig. 5 Effect of fiber volume fraction

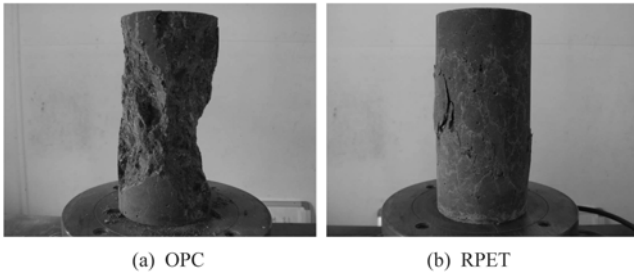


Fig. 6 Fracture shape of concrete specimen under compressive loading

재료일 뿐만 아니라 콘크리트의 인장성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 콘크리트의 파괴거동에 대한 RPET 섬유 영향

Fig. 6은 원형공시체의 압축파괴 형상을 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 일반 콘크리트의 파괴 형상으로 전형적인 압축공시체의 파괴형상인 콘 파괴 거동 보였으나, RPET 섬유가 혼입된 콘크리트는 Fig. 6(b)와 같이 다수의 수직균열과 함께 중앙부가 팽창된 형상을 보였다. 이러한 결과는 RPET 섬유가 콘크리트 내부에서 콘크리트 파편이 박락되는 것을 방지하고 균열의 성장을 억제하였기 때문이다. 또한 콘크리트에 작용하는 응력을 전체적으로 분산시켜 국부적인 파괴를 예방한 것으로 판단된다. RPET 섬유와 비교하기 위해 사용된 PP 섬유를 혼입한 콘크리트에서도 거의 유사한 거동을 보여 RPET 섬유와 같은 합성섬유가 콘크리트의 파괴거동에 효과적으로 작용하는 것을 알 수 있었다.

5.3 하중-변위 결과

Fig. 7은 휨실험 결과에 대한 하중-변위 관계이다. Fig. 7에 보이는 것과 같이, 모든 시편은 균열전 초기 거동에서 섬유의 혼입량과 상관없이 거의 유사하게 나타났다. 초기 균열은 PP 0.5시편을 제외하고 OPC시편에서 가장 늦게 발생하며, 섬유가 혼입되면 균열이 초기에 발생하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 합성섬유가 혼입된 시편에서 자주 나타나는 경향으로 외부가 노출된 콘크리트의 표면에서는 섬유의 구속력이 작용하지 못하여 가교작용을 하지 못하기 때문이다. 또한, 섬유는 앞에서도 언급하였듯이 내부공극으로 작용하기 때문에 인장력에 의한 바닥판에서의 초기균열은 OPC 콘크리트에 비해 초기에 발생하는 것으로 판단된다. 초기균열 이후에는 초기균열 발생지점부터 하부 주철근이 항복한 지점까지 인장철근으로만 하중을 부담하는 OPC 시험체에 비해 합성섬유를 혼입한 RPET 시험체가 높은 강성을 나타내었다.

Table 4는 휨강도 실험 결과를 정리해 놓은 것이다. 실험 결과로부터 RPET 시험체(0.5%, 0.75%, 1.0%)는 OPC 시험체에 비해 혼입량에 따라 각각 25%, 31%, 32%의 극한강도 증가를 나타내었다. 또한, 기존 보강섬유인 PP 섬유와 비교했을 때도 거의 유사하거나 그 이상의 성능을 갖는 것으로 나타났다. Zollo(1997)에 따르면 보강섬유는 콘크리트 내부에서 가교(bridging) 단계를 거쳐 섬유가 인발(pull-out)되어 파괴에 이른다 고 한다. 하지만 RPET 섬유는 섬유와 매트릭스(matrix)의 부착력(bond strength)의 증가로 균열이 발생하였을 때 RPET 섬유가 인발되지 않고 파단되면서 하

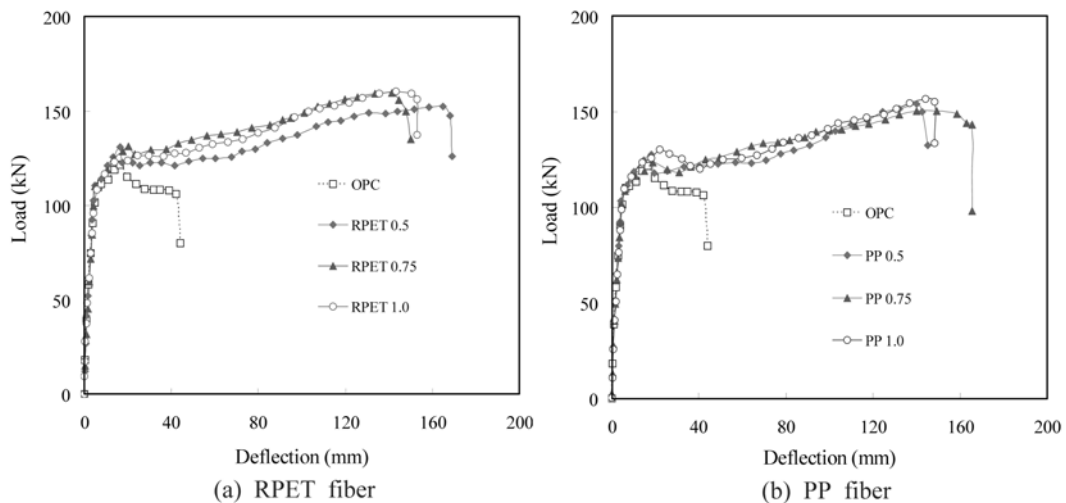


Fig. 7 Comparison of the load-deflection curves for OPC, RPET and PP at the age of 28 days

Table 4. Summarized flexural strength test results

Specimens	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Increased strength (%)	Δ_u (mm)
OPC	32.6	1.01	101.4	4.80	121.6	100	16.94
RPET 0.5	24.8	0.43	109.0	4.52	152.6	125.5	165.0
RPET 0.75	22.0	0.51	108.8	4.67	159.8	131.4	141.36
RPET 1.0	32.4	0.62	107.8	5.31	160.4	131.9	143.36
PP 0.5	32.8	0.75	108.2	4.93	154.0	127.0	140.07
PP 0.75	28.0	0.69	106.3	5.21	150.4	123.7	149.16
PP 1.0	25.6	0.61	106.6	4.71	156.6	128.6	144.22

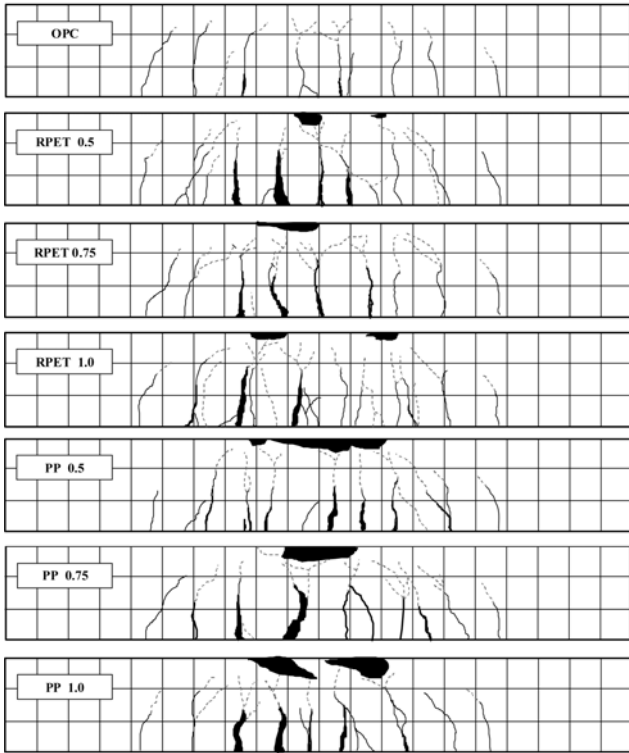


Fig. 8 Crack patterns of each specimen

중에 저항하며, 지속적으로 인장응력을 전달하기 때문에 균열의 성장을 억제하여 우수한 극한성능(ultimate capacity)을 보인 것이다. 따라서, RPET 섬유유기 우수한 부착성능으로 섬유유기 인발 저항성이 증가되어 부재의 급작스런 취성파괴를 방지하고 연성파괴를 유도하는데 효과적이라고 판단된다.

섬유보강 시멘트 복합체는 균열이 발생하기 전에는 섬유와 매트릭스가 일체화된 완전부착 상태이므로, 초기거동에서는 합성섬유유기 보강효과가 나타나지 않는다. 그러나 균열이 발생한 후에는 섬유유기 뿔리는 과정에 영향을 주는 매트릭스-섬유유기 부착력과 섬유유기 인장강도가 균열 후 거동을 지배하게 되는 균열가교관계(crack bridging relation)로 나타난다(Hannant, 1978).

5.4 RC 보의 파괴 모드

Fig. 8에 시험체의 파괴모드를 나타내었다. 파괴형태는 휨-전단(flexural-shear) 파괴 현상을 보였다. 초기균열부터 인장철근의 항복이전까지는 실선으로 표시하였고, 항복이후에 발생한 균열은 점선으로 표시하였다. 모든 시험체는 우선 경간 중앙 하부 콘크리트에서 초기 균열이 발생하고, 철근 항복점까지는 탄성 거동을 하면서 중앙부 휨균열이 진전을 하였다. OPC 시험체는 철근의 항복(yielding)이후 최대하중에 도달한 후 급격히 하중이 감소하면서 파괴되었다. 섬유유기 혼입된 시험체는 철근의 항복이후 하중의 증가와 함께 수직변위가 증가할 때 부분적인 압축파괴가 일어났다. 또한, 하중의 증가에 따라 균열의 수와 균열 폭이 증가함에 따라 섬유유기 파단되면서 최대하중 이후에 파괴되었다.

5.5 연성지수

연성(ductility)은 구조부재 및 구조계에 있어서 하중의 증가와 함께 부재가 탄성범위를 초과하여 소성영역에서 파괴

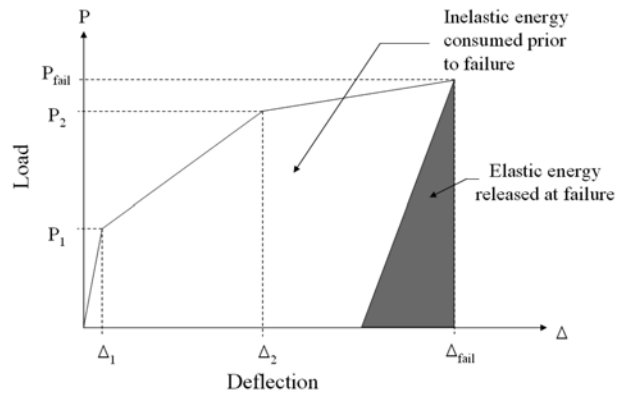


Fig. 9 Ductility of structural member based on energy absorption

에 도달할 때까지 변형을 확보하는 능력을 말한다. 연성은 철근콘크리트 부재의 에너지 흡수능력을 평가하는데 사용되며, 강도와 함께 구조물의 안전도를 평가함에 있어 중요한 요소 중 하나이다. 일반적으로 휨 부재의 연성에 대한 평가 방법은 곡률(ϕ), 회전(θ), 처짐(Δ)의 비 μ 로 식 (1)과 같이 나타내고, 연성지수(ductility index) 또는 연성비(ductility ratio)라 부른다(Park, 1992).

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}, \mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}, \mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

여기서, μ : 부재의 연성지수, ϕ : 부재의 곡률, θ : 부재의 회전계수, Δ : 부재의 처짐

또한, Naaman and Jeong(1995)은 에너지에 근거한 모델을 식 (2)와 같이 나타내고 있다.

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

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

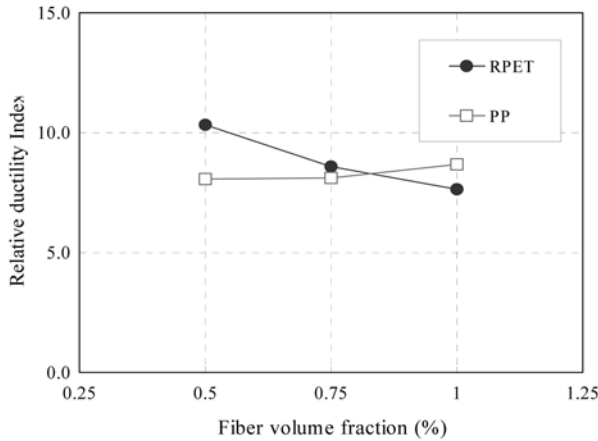
본 연구에서는 단면의 인장철근이 항복할 때의 변위(Δ_y)와 최대하중시의 변위(Δ_u)의 비로 표현되는 처짐에 근거한 모델과 Fig. 9와 같이 에너지(E)에 근거한 모델의 연성지수를 사용하여 부재의 안전성을 평가하였다. 실험결과는 Table 5와 Fig. 10에 나타내었다.

실험결과 처짐에 근거한 상대연성지수는 RPET 섬유유기 혼입한 경우 7.65~10.34로 OPC 시험체에 비해 약 7~10배 정도 연성지수가 높게 나타났다. 즉, RPET 섬유유기 콘크리트의 연성 증가에 매우 효과적인 것을 알 수 있다. 특히, RPET 0.5 시험체는 상대연성지수가 10.34로 OPC 시험체의 약 10배 이상, PP 0.5에 비해서는 약 1.3배 이상 높게 나타나 연성에 대한 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. 이는, RPET 섬유유기 표면에너지가 증가되어 콘크리트에서 섬유유기 인발되기까지 마찰저항력이 증가하였기 때문이다. 그러나, 섬유유기 혼입량이 증가할수록 연성지수는 낮아져, 사용에 맞는 적정 혼입율을 사용하여야 할 것이다. 또한, RPET 섬유유기 비교하기 위해 사용된 PP 섬유유기도 RPET 섬유유기과 거의 유사한 성능을 보여 합성 섬유유기 콘크리트의 연성증가에 효과적인 것을 알 수 있다.

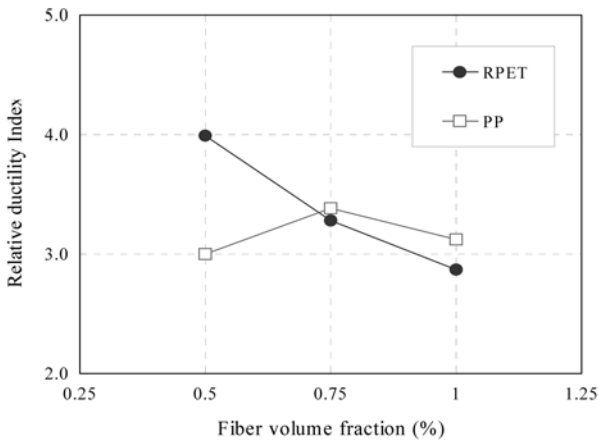
에너지에 근거한 모델의 연성비는 RPET 섬유유기 혼입한

Table 5. Ductility index of test specimens

Specimens	Deflection based model				Energy based model			
	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_u/Δ_y	Relative ductility index	E_{tot} (kN·m)	E_{ela} (kN·m)	$0.5\left(\frac{E_{tot}}{E_{el}}+1\right)$	Relative ductility index
OPC	4.80	16.94	3.53	1	4.64	0.425	5.96	1
RPET 0.5	4.52	165.0	36.50	10.34	22.50	0.483	23.79	3.99
RPET 0.75	4.67	141.36	30.27	8.58	20.87	0.548	19.54	3.28
RPET 1.0	5.31	143.36	27.00	7.65	21.05	0.634	17.10	2.87
PP 0.5	4.93	140.07	28.41	8.05	18.74	0.540	17.85	3.00
PP 0.75	5.21	149.16	28.63	8.11	21.77	0.554	20.15	3.38
PP 1.0	4.71	144.22	30.62	8.67	19.64	0.542	18.62	3.12



(a) Deflection based model



(b) Energy based model

Fig. 10 Comparison of relative ductility index by fiber volume fraction

에 따라 OPC 콘크리트에 비해 2.87~3.99배의 상대연성지수의 증가를 보였다. RPET 섬유가 콘크리트의 에너지 흡수능력을 증가시켜 연성능력을 증가시킨 것으로 판단된다. 상대연성지수는 처짐 모델과 비교했을 때 다소 차이는 있으나 전체적으로 매우 유사한 경향을 보였다. 에너지 개념에 근거한 모델에서도 처짐에 근거한 모델에서와 같이 RPET 0.5 시험체가 가장 뛰어난 연성능력을 보였으며, 에너지 흡수능력(E_{tot})도 가장 뛰어난 성능을 보였다. 그러나 RPET 섬유는 혼입량이 증가 할수록 연성비가 감소하는 경향을 보여, 사용에 맞는 적정 혼입률을 사용하여야 할 것이다.

6. 결 론

1. RPET 섬유를 혼입한 콘크리트의 재료특성 실험에서 압축강도는 섬유의 혼입량 증가에 따라 점차적으로 감소하였다. 이러한 강도의 저하는 RPET 섬유가 콘크리트 내부에서 압축력에 저항하지 못하고 콘크리트 내부 공극으로 존재하여 콘크리트의 유효 단면적을 감소시켜 압축강도가 저하된 것으로 판단된다. 그러나, RPET 섬유와 기존 PP 섬유를 비교했을 때 RPET 섬유의 압축강도 감소 경향은 크지 않았으며, 쪼갬인장강도는 섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.
 2. 모든 시편의 파괴형태는 휨-전단 파괴 현상을 보였다. OPC 시험체는 철근의 항복에 의한 인장부에서 파괴되었으나, 섬유가 혼입된 시험체는 보강 섬유가 콘크리트 시편의 강성과 연성을 증가시켜 철근의 항복이후 하중의 증가와 함께 수직변위가 증가할 때 부분적인 압축파괴와 철근의 항복에 의한 인장파괴가 일어났다.
 3. RPET 섬유는 콘크리트 부재의 연성과 극한강도를 증가시켰다. OPC 시험체와 비교했을 때 최대 10배 이상의 연성증가를 보였으며, 극한하중도 약 30% 이상 증가하였다. 또한, RPET 섬유를 혼입한 콘크리트 시편의 최대 중앙 처짐은 OPC 시편보다 약 4배 이상 크게 나타났다. RPET 섬유는 섬유와 매트릭스의 부착력의 증가로 균열이 발생하였을 때 섬유가 인발되지 않고 균열을 가로지르는 교차작용을 하여 휨성능이 증가된 것으로 판단된다.
 4. 처짐에 근거한 상대연성지수는 RPET 섬유를 혼입한 경우 7.65~10.34로 OPC 시험체에 비해 약 7~10배 정도 연성지수가 높게 나타났으며, 에너지에 근거한 모델의 연성비는 RPET 섬유를 혼입함에 따라 OPC 콘크리트에 비해 2.87~3.99배의 상대연성지수의 증가를 보였다. 특히, RPET 0.5 시험체는 처짐에 근거한 상대연성지수가 10.34로 OPC 시험체의 약 10배 이상, PP 0.5에 비해서는 약 1.3배 이상 높게 나타나 연성에 대한 성능이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 에너지에 근거한 모델에서도 상대연성지수가 3.99로 OPC에 비해 약 4배 정도 높게 나타나 연성능력과 함께 에너지 흡수능력도 가장 뛰어난 성능을 보였다.
- 이상과 같은 결론으로부터 RPET 섬유는 콘크리트 부재의 성능을 개선하여 균열제어 성능이 우수하며, 부재의 급작스

런 취성파괴를 방지하고 연성파괴를 유도하는데 효과적인 것으로 나타났다. 그러나, 섬유 혼입률에 따른 특성 변화가 다양하므로 이를 고려하여 사용하여야 하며, 이러한 인자를 고려하여 사용하면 구조물의 성능개선 및 친환경 측면에서 매우 유용한 재료이다.

감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(바이오하우징연구사업단) 및 한국과학재단이 지원하는 “일반 콘크리트 구조물 및 충격-폭발하중을 받는 구조물의 보수보강을 위한 고인성, 고연성 폴리아우레아의 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

원종필, 박찬기, 김윤정, 박경훈(2007a) 화학적 친수성 처리율에 따른 재생 PET섬유와 시멘트 복합재료와의 계면 인발 특성, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 19, No. 3, pp. 333-339.

원종필, 박찬기, 김형희, 이상우(2007b) 재생 PET 섬유의 친수성표면처리에 따른 시멘트 복합재료의 소성수축균열제어 효과, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3A호, pp. 413-419.

원종필, 박찬기, 김형희, 이상우(2007c) 재생 PET 섬유의 형상 및 길이가 시멘트 복합 재료의 소성 수축 균열에 미치는 영향, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 19, No. 2, pp. 233-239.

한국자원리사이클링학회(2008) **리사이클링백서**, 청문각.

한국PET용기협회(2008). <<http://www.kpcaa.or.kr>>

홍종석(2007) **재활용 PET병에서 추출한 섬유를 이용한 수축균열 제어용 섬유 콘크리트의 재료성능 평가**, 석사학위논문, 세종대학교.

Banthia, N. and Sheng, J. (1996) Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 18, No. 4, pp. 251-269.

Bayasi, M.Z. and Zeng, J. (1997) Composite slab construction utilizing carbon fiber reinforced mortar. *ACI structural Journal*, Vol. 94, No. 4, pp. 442-446.

Cengiz, O. and Turanlı, L. (2004) Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete research*. Vol. 34, No. 8, pp. 1357-1364.

Choi, Y.W., Moon, D.J., Chung, J.S., and Cho, S.K. (2005) Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 35, No. 4, pp. 776-781.

Dwarakanath, H.V. and Nagaraj, T.S. (1992) Deformational behavior of fiber-reinforced concrete beams in bending. *Journal of Structural Engineering*. ASCE, Vol. 118, No. 10, pp. 2691-2698.

Hannant, D.J. (1978) *Fibre Cement and Fibre Concretes*, John

Wiley & Sons Publication, pp. 52-61.

Jo, B.W., Park, S.K., and Park, J.C. (2008) Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. Vol. 22, No. 12, pp. 2281-2291.

Jo, B.W., Tae, G.H., and Kim, C.H. (2007) Uniaxial creep behavior and prediction of recycled-PET polymer concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1552-1559.

JVEC. (2008) Vinyl Environmental Council of Japan. <<http://www.vec.gr.jp/enbi/seisan.htm>>

Kim, J.H.J., Park, C.G., Lee, S.W., and Won, J.P. (2008) Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 39, No. 3, pp. 441-450.

Marcus, G.R. (1997) The effect of recycled polyethylene Terephthalate (PET) strips and scales on the tensile and compressive properties of concrete. ME thesis, The copper union for the advancement of science and art albert nerken school of engineering.

Mu, B., Li, Z., and Peng, J. (2000) Short fiber-reinforced cementitious extruded plates with high percentage of slag and different fibers. *Cement and Concrete research*. Vol. 30, No. 8, pp. 1277-1282.

Naaman, A.E. and Jeong, S.M. (1995) 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, pp. 379-386.

Ochi, T., Okubo, S., and Fukui, K. (2007) Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29, No. 6, pp. 448-455.

Park, R. (1992) Capacity design of ductile RC building structures for earthquake resistance. *Structural Engineer*, Vol. 70, No. 16, pp. 279-289.

Rebeiz, K.S., Fowler, D.W., and Paul, D.R. (1993a) Recycling plastics in polymer concrete for construction applications. *Journal of materials in civil engineering*. ASCE, Vol. 5, No. 2, pp. 237-248.

Rebeiz, K.S. (1995) Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 17, No. 2, pp. 119-124.

Rebeiz, K.S. and Fowler, D.W. (1996) Flexural strength of reinforced polymer concrete made with recycled plastic waste. *ACI Structural Journal*. Vol. 93, No. 5, pp. 524-530.

Rebeiz, K.S., Serhal, S., and Fowler, D.W. (1993b) Shear behavior of steel reinforced polymer concrete using recycled plastic. *ACI Structural Journal*. Vol. 90, No. 6, pp. 675-682.

Santos, P. and Pezzin, S.H. (2003) Mechanical properties of polypropylene reinforced with recycled-pet fibres. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 143-144, pp. 517-520.

Zollo, R.F. (1997) Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 19, No. 2, pp. 107-122.

(집수일: 2009.3.9/심사일: 2009.4.13/심사완료일: 2009.6.28)