

폴리프로필렌섬유보강 시멘트 복합재료에 정착된 구조용 합성섬유의 부착거동에 미치는 섬유 혼입률의 효과

Effect of Fiber Volume Fraction on Bond Properties of Structural Synthetic Fiber in Polypropylene Fiber Reinforced Cement Composites

이진형¹⁾ 박찬기^{2)*}
Lee, Jin Hyeong Park, Chan Gi

Abstract

The bond properties between polypropylene fiber reinforced cement composites and structural synthetic fiber have been investigated. in this paper. Three levels of polypropylene fibers volume fraction were used, 0.10%, 0.15%, and 0.20% in a series of Dog-bone pull out tests.

The bond strength between structural synthetic fiber and polypropylene fiber reinforced cement composites increases with the volume fraction of polypropylene fiber, but the bond strength decreases above the amount of 0.20% by volume of polypropylene fiber reinforced cement composites. Also, the addition of polypropylene fiber a significant improved the interface toughness and the frictional resistance, The microstructure of structural synthetic fiber surface was investigated after the pullout test. The scratched of structural synthetic fiber increased with the polypropylene fiber volume fraction.

Keywords : Bond strength, Interface toughness, Polypropylene fiber, Structural synthetic fiber

1. 서론

최근 들어 2종 이상의 섬유를 혼입하여 단일섬유보강 시멘트 복합재료가 발휘할 수 없는 효과를 획득하기 위한 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료의 연구가 증가하고 있다. 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료의 성능 향상은 길이 및 직경이 큰 다른 섬유가 시멘트 복합재료에서 발생하는 서로 다른 폭 및 길이의 균열을 효과적으로 제어함으로써 달성할 수 있다(원종필 등, 2008; Lawer et. al, 2002). 이러한 하이브리드 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 연구를 살펴보면 폴리프로필렌섬유(polypropylene fiber: PP 섬유)와 강섬유를 사용한 하이브리드섬유보강 콘크리트의 반복하중 하에서의 영향을 평가하였으며 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트에 비하여 휨강도와 쪼갠장강도는 증가하는 경향을 나타내었다(Komlos et. al, 1995). 또한 길이가 다른 후크형 강섬유와 길이와 지름이 동일한 4가지의 PP섬유를 하이브리드하여 콘크리트

의 압축강도 및 쪼갠 인장강도를 평가한 결과 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 보통 콘크리트와 비교해서 쪼갠장 강도 및 압축강도가 증가하였다(Qian et. al, 2000). 탄소섬유, 강섬유 그리고 PP섬유 3종의 섬유를 섬유 혼입량 0.5%를 기준으로 하여 단일 섬유혼입 또는 하이브리드하여 섬유가 콘크리트에 미치는 영향을 압축강도, 휨강도 및 인성지수를 시험을 통하여 평가 및 분석한 연구에서는 탄소섬유와 강섬유를 하이브리드한 것이 강도 및 휨인성의 향상에 가장 유리한 결과를 나타내었다(Yao et. al, 2003). 강섬유와 PP섬유 및 폴리비닐알코올섬유를 혼합하여 콘크리트에 혼입한 하이브리드섬유보강 콘크리트의 투수성에 대한 평가에서는 동일한 섬유혼입률을 가진 콘크리트에서 상대투수계수는 하이브리드섬유보강 콘크리트가 단일 강섬유보강 콘크리트보다 16~56% 더 낮게 나타났으며 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트보다 42~70%가 더 낮은 결과를 나타냈다(Sun et. al, 2001).

한편 최근 들어 강섬유의 대체재로 구조용 합성섬유에

1) 정회원, 공주대학교 농공학과 석사과정
2) 정회원, 공주대학교 지역건설공학과 조교수

* Corresponding author : cgpark@kongju.ac.kr 041-330-1266

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

대한 연구와 적용이 증가하고 있다. 구조용 합성섬유는 강섬유와 비교하여 우수한 충격/정적 강도 비를 가지는 것으로 알려져 있다(Banthia et. al, 1999a, 1999b). 구조용 합성섬유는 강섬유와 비교하여 콘크리트에 적용되어 부식에 대한 우려가 없다는 장점을 가지고 있어 부식에 취약한 환경에 적용할 경우 충분한 장기 수명을 확보할 수 있다. 최근 들어서는 숏크리트 구조물 및 콘크리트 라이닝과 같은 터널 및 지하공간 구조물에 적용이 증가하고 있다(원종필 등, 2007a, 2007b). 구조용 합성섬유를 숏크리트 및 콘크리트의 적용사례가 증가하고 있는 이유는 구조용 합성섬유가 콘크리트에 적용시 강섬유와 비교하여 동등하거나 그 이상의 휨성능을 발휘하는 연구결과가 나타나고 있기 때문이다(Khayat et. al, 1996). 콘크리트 및 숏크리트의 휨인성은 휨하중-처짐 곡선 아래의 면적으로 정의되며 첫 번째 균열(first crack) 발생까지의 거동은 섬유의 역할보다는 콘크리트의 역학적 특성에 의존하는 것이 대부분이다(Bentur and Mindess, 1990; Won et. al, 2006). 따라서 보강섬유는 첫 번째 균열 발생 후 거동에 영향을 미치게 되며 휨인성은 균열 발생 후 거동에 의하여 결정된다(Bentur and Mindess, 1990; 김성배 등, 2010). 따라서 구조용 합성섬유를 적용할 경우 첫 번째 균열 발생 후 거동 향상에 주요 관점을 두어야 한다. 섬유보강 시멘트 복합재료에서 균열 발생 후 거동은 섬유와 시멘트 매트릭스와 부착거동에 영향을 받는다(원종필 등, 2006a). 시멘트 매트릭스에서 섬유의 분리(debonding), 인발(pullout) 및 파괴(fracture) 등의 과정을 통하여 균열의 성장 억제를 통하여 에너지 흡수능력을 증가시킨다(Chan et. al, 2004; Singha et. al, 2004; Naaman et. al, 1991; Shannag et. al, 1997). 따라서 구조용 합성섬유를 콘크리트 보강섬유로 적용하기 위해서는 부착성능에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 구조용 합성섬유와 PP섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료에서 PP섬유의 혼입률에 따른 구조용 합성섬유의 부착특성을 평가하였다. 해양 구조물 및 수리구조물 등의 경우 물과 접촉해 있어 강섬유의 부식에 대한 문제가 있다. 구조용 합성섬유와 PP섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료는 강섬유와 폴리프로필렌섬유의 하이브리드 효과를 획득할 수 있으며 강섬유의 부식에 대한 문제를 해결할 수 있다. 본 연구에서는 구조용 합성섬유와 PP섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료에서 시멘트 복합재료의

성능에 영향을 미칠 수 있는 PP섬유의 혼입률에 따른 구조용 합성섬유의 부착거동을 평가 및 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 재료

본 연구에서는 국내 S사의 비중 3.14의 보통 포틀랜드 시멘트, 비중 2.61의 잔골재 및 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 그 물리·화학적 특성은 Table 1 및 2와 같다. PP섬유는 국내 C사에서 콘크리트 보강섬유로 제조하여 판매하는 제품을 적용하였으며, 그 물리·역학적 특성은 Table 3과 같다. 구조용 합성섬유는 섬유의 시멘트 복합재료와 부착성능 향상을 위하여 일반적으로 표면형상을 다양하게 변화시켜 적용하지만 본 연구에서는 PP섬유의 특성을 평가하기 위하여 표면형상에 변화를 주지 않은 직선형의 섬유를 적용하였다. 구조용 합성섬유의 물리·역학적 특성은 Table 3과 같으며 섬유의 형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Properties of fly ash

Specific gravity		Fineness		L.O.I* (%)			
2.14		3,400		3.28			
Chemical compositions(%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
58.12	23.56	7.69	2.59	1.12	0.31	1.42	1.05

*: Loss of ignition

Table 2 Properties of blast furnace slag

Specific gravity		Fineness		L.O.I (%)			
2.8		4000-6000		3.0			
Chemical compositions (%)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO	S
33.1	13.9	0.29	42.4	6.1	0.4	0.96	0.66

Table 3 Properties of polypropylene and structural synthetic fiber

Properties	Polypropylene fiber	Structural synthetic fiber
Elastic modulus (GPa)	4	10
Density (g/mm ³)	0.91	0.91
Fiber length (mm)	12	30
Fiber diameter (mm)	0.15	1
Tensile strength (MPa)	600	550

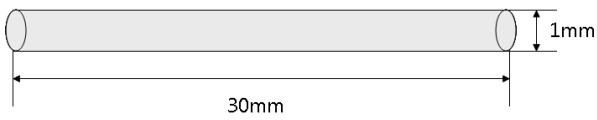


Fig. 1 Geometry of structural synthetic fiber

2.2 배합설계

본 연구에서 사용된 시멘트 복합재료의 배합은 Table 4와 같다. 구조용 합성섬유와 PP섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료에서 구조용합성섬유의 부착특성에 미치는 PP섬유의 영향을 분석하기 위하여 PP섬유를 체적비(fiber volume fraction, V_f)로 0.10, 0.15 및 0.20%를 적용하였다. 이때 PP섬유 혼입률 0.00%는 PP섬유의 혼입에 따른 영향을 평가하기 위하여 필요하나 본 연구에서는 구조용 합성섬유와 PP섬유를 혼합한 하이브리드섬유에서 구조용 합성섬유의 부착거동에 미치는 효과를 평가하기 위한 것으로 PP섬유의 혼입률이 0.00%이면 하이브리드 섬유가 성립하지 않기 때문에 제외하였다. 또한 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 전체 결합재(시멘트+광물질혼화재료) 중량(606kg/m^3)의 30% (181.8kg/m^3)를 적용하였고, 시멘트는 424.2kg/m^3 을 사용하였다.

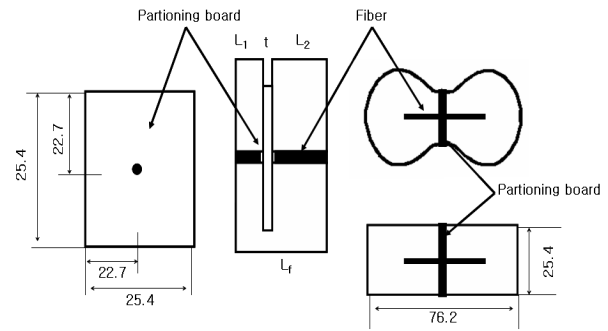
2.3 실험방법

2.3.1 압축강도

PP섬유 혼입률에 따른 압축강도 특성을 평가하기 위하여 KSL 5105에 따른 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 의 입방체 공시체를 제작하여 재령 28일 후 압축강도 시험을 실시하였다.

2.3.2 휨강도

PP섬유 혼입률에 따른 휨강도 특성을 평가하기 위하여



L_1 : embedment length (14.5mm)
 L_2 : anchored length (14.5mm)
 L_f : fiber length (30mm)
 t : thickness of partitioning board (1mm)

Fig. 2 Arrangement of the partitioning board and fibers, and setting in the mold (unit: mm)

KSL ISO 679에 따른 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 의 각주형 공시체를 제작하여 재령 28일 후 휨강도 시험을 실시하였다.

2.3.3 부착강도

PP섬유의 혼입률에 따른 시멘트 복합재료에서 보강섬유의 부착거동을 평가하기 위하여 JCI SF-8에 따른 dog bone shape 몰드를 이용하였다. 일반적으로 부착시험시 변위는 섬유의 신장(elongation)과 미끄러짐(slip)을 포함하고 있다. 섬유보강 시멘트 복합재료에서 섬유의 인발, 분리, 가교작용 및 파단에 영향을 미치는 섬유의 거동은 신장과 미끄러짐을 포함한 변위가 영향을 미친다.³⁾ 따라서 본 연구에서는 JCI SF-8에 따라 섬유의 변위를 측정하였다. Fig. 2와 같은 dog bone shape 공시체를 두 부분으로 분할한 후 중앙에 보강섬유를 정착시켰다. 시멘트 매트릭스에 묻힌 섬유의 길이(embedment length + anchored length)는 29mm이다. 또한 본 연구에서는 부착시험 공시체 제작 시 섬유자체의 신장률을 최소화하고, 섬유의 인발을 유도하기 위하여 섬유를 정착하기 위한 분

Table 4 Mix proportions of pp fiber reinforced cement composites

No. of mix	w/B (%)	Unit weight (kg/m^3)						
		Cement	Water	Fine aggregate	Fly ash	Blast furnace slag	Structural synthetic fiber	Polypropylene fiber
No.1	47	424.2	285	1363	181.8	0	0.45	0.9
No.2								1.35
No.3								1.80
No.4					0	181.8		1.26
No.5								1.89
No.6								2.52

리판을 제외하고는 모두 모르타르에 섬유가 묻히도록 하여 섬유와 모르타르와의 간극을 최소화하였다. 부착실험 공시체는 제작 후 24시간 동안 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 및 상대습도 $50\pm 2\%$ 의 범위에 초기 양생을 실시 한 후 탈형하여 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 물속에서 실험 전까지 습윤양생을 실시하였다. 실험은 재령 28일간의 양생 후에 변위 제어방식의 UTM에 설치 한 후 0.4mm/min의 하중재하속도로 시험을 실시하여 부착성능을 획득하였다.

본 연구에서는 부착시험용 공시체를 6개씩 제작하여 실험한 평균값으로 부착강도를 결정하였으며 부착강도는 다음과 같은 식 (1)로 계산하였다.

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi DL} \quad (1)$$

여기서, τ_{\max} 는 최대 부착강도이고, P_{\max} 는 최대부착하중, D 는 섬유의 직경이며, L 은 정착길이를 나타낸다. 합성섬유의 직경은 1mm이고 정착길이는 14.5mm이다.

또한 본 연구에서는 계면인성을 측정하였다. 섬유보강 시멘트 복합재료에서 보강섬유는 균열이 발생 후 인장응력의 지속적인 전달을 통하여 균열의 성장을 억제하는 동시에 섬유가 시멘트 매트릭스로부터 인발되면서 인장응력의 전달을 통하여 취성적인 급격한 파괴를 방지하는 역할을 한다(Mobasher et. al, 1996; Chan et. al, 2004, 원종필 등, 2007a, b). 계면인성은 균열발생 후 거동을 나타내는 중요한 인자로 계면인성이 클수록 시멘트 복합재료의 연성 거동 확보에 유리하다. 일반적으로 계면인성은 섬유의 인발과정에서 소비되는 역학적 에너지로 정의될 수 있으며, 인발거동 곡선 아래면적으로 구할 수 있다

(Won et. al, 2006).

3. 실험결과

3.1 압축강도

PP섬유의 혼입률에 따른 압축강도의 시험결과는 Fig. 3과 같다. 플라이애시를 30%치환한 배합의 압축강도는 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 각각 38.5, 35.7 및 35.9MPa를 나타내었다. 고로슬래그를 30% 치환한 배합의 압축강도는 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 각각 42.0, 42.1 및 42.6MPa를 나타내었다. 압축강도시험결과 플라이애시를 30% 치환한 배합은 압축강도가 약간 감소하고, 고로슬래그 미분말을 30%치환한 배합은 압축강도가 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다.

3.2 휨강도

PP섬유의 혼입률에 따른 휨강도의 시험결과는 Fig. 4와 같다. 플라이애시를 30%치환한 배합의 휨강도는 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 각각 9.4, 8.4 및 8.1MPa를 나타내었다. 고로슬래그를 30% 치환한 배합의 휨강도는 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 각각 9.9, 9.2 및 8.9MPa를 나타내었다. 휨강도시험결과 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합 모두 휨강도가 감소하는 결과를 보여주었다.

이와 같은 결과는 섬유를 첨가하면 휨강도는 섬유의 분산성이 우수하면 섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하는

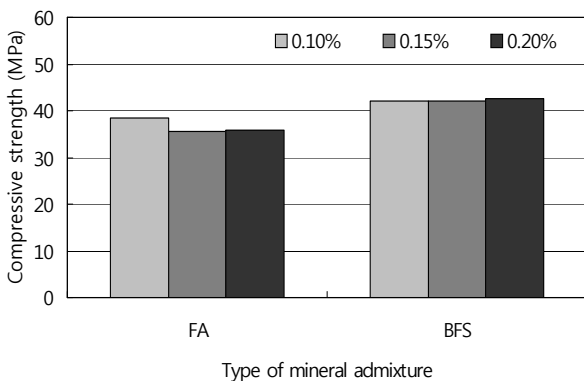


Fig. 3 Compressive strength of PP fiber reinforced cement composites

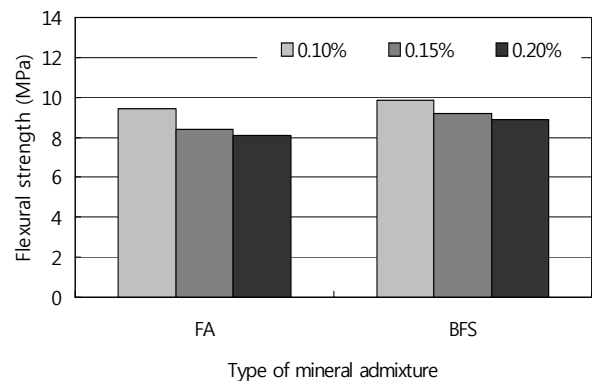


Fig. 4 Flexural strength of PP fiber reinforced cement composites

경향을 보여주는데 본 연구에서는 섬유 혼입률이 증가하면서 섬유덩어리(fiber ball) 현상이 발생하여 휨강도도 약간씩 감소하는 것으로 보인다. PP섬유는 소수성 섬유로 시멘트 복합재료와 부착성이 작은 단점과 배합시 분산성에 대한 문제가 나타나고 있다. 섬유의 분산성은 슬럼프 등 굳지 않은 콘크리트에 영향을 받는데 PP섬유의 혼입률이 증가할수록 유동성이 감소하기 때문에 분산성이 감소한다. 특히 소수성재료이며 비중이 물보다 작은 PP섬유의 경우 혼입률 증가는 분산성에 나쁜 영향을 미친다. 분산성에 대한 문제는 콘크리트 보다는 모르타르에서 분산성에 대한 문제가 더 크게 발생한다(Bentur and Mindess, 1990). 일반적으로 균열제어 등을 향상시키기 위하여 적용되는 PP섬유의 혼입률은 분산성 등으로 고려하여 0.1%(0.9kg/m³)가 널리 적용하고 있다. 그러나 최근 들어서는 화학 혼화제를 이용하여 유동성을 증가시키기 때문에 고성능 섬유보강 복합재료 등에서는 높은 섬유 혼입률에서도 섬유의 분산성 문제를 해결하고 있다. 그러나 본 연구에서는 화학혼화제를 적용하지 않았고, 모르타르 배합이기 때문에 섬유의 혼입률이 증가할수록 유동성의 감소와 섬유의 분산성이 악화되는 결과를 보여주었다.

3.3 부착성능

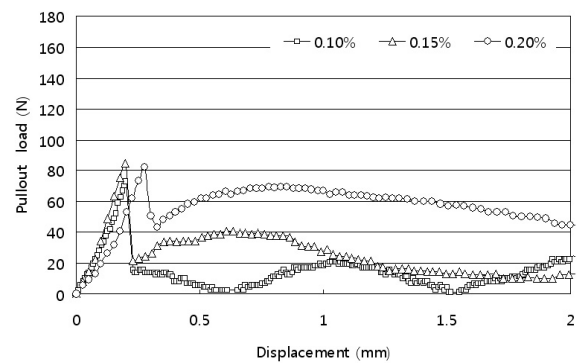
3.3.1 인발거동

PP섬유 혼입률에 따른 인발하중-인발변위와의 관계는 Fig. 5와 같다. 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합 모두 섬유의 혼입률이 증가할수록 최고 인발하중 후 거동이 우수하게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 최고 인발하중 후에 PP섬유가 가교 작용 등을 통하여 구조용 합성섬유가 인발을 억제 및 지연시키는 역할을 하는데 혼입률이 증가하면 이러한 역할을 하는 PP섬유의 수가 많아지기 때문에 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 보인다. 또한 고로슬래그 미분말 보다는 플라이애시를 치환한 배합에서 최고인발하중 후 거동이 우수하게 나타나고 있는데 이는 최고인발 하중 후 하중의 감소가 플라이애시 보다는 고로슬래그 미분말을 치환한 경우가 더 크기 때문이다. 최고인발하중이 크면 섬유의 부착계면에서 균열의 발생 및 성장이 급격하게 발생하고 하중의 감소를 억제하는 PP섬유의 부착강도는 일정하기 때문에 작은 인발하중을 받는 플라이애시배합보다는 큰 인발하중을 받는 고로슬래그 미분말 배합의 하중 감소가 크게 발생한 것으로

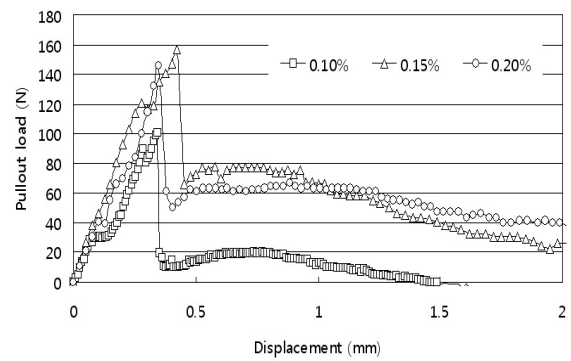
보인다.

3.3.2 일반하중 및 부착강도

PP섬유 혼입률에 따른 인발하중 및 부착강도 시험결과는 Fig. 6 및 7과 같다. 인발하중 및 부착시험결과 플라이애시를 30%치환한 배합 및 고로슬래그 미분말을 30%치환한 배합 모두 0.15%까지는 인발하중과 부착강도가 모두 증가하나 0.20%가 되면 인발 및 부착강도가 감소하는 결과를 가지고 있다. 이와 같은 결과는 섬유의 혼입률이 증가할수록 섬유덩어리 현상이 발생하기 때문인 것으로 PP섬유의 혼입률이 0.20%가 되면 섬유덩어리 현상이 심해져 인발하중 및 부착강도가 감소가 발생한 것으로 보인다. 본 연구에서는 콘크리트가 아닌 모르타르를 적용함으로써 굵은 골재에 의한 마찰력이 없어 PP섬유의 분산이 보다 효율적이지 않았다. 플라이애시를 30% 치환한 배합과 고로슬래그 미분말 30%를 치환 배합과의 비교에서는 고로슬래그 미분말을 치환한 배합이 인발하중 및 부착강도가 약간 크게 나타났는데 이는 플라이애시보다는 고로슬래그 미분말을 치환한 경우가 유동성이 보다 우수하여



(a) Fly ash



(b) Blast furnace slag

Fig. 5 Pullout behavior of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

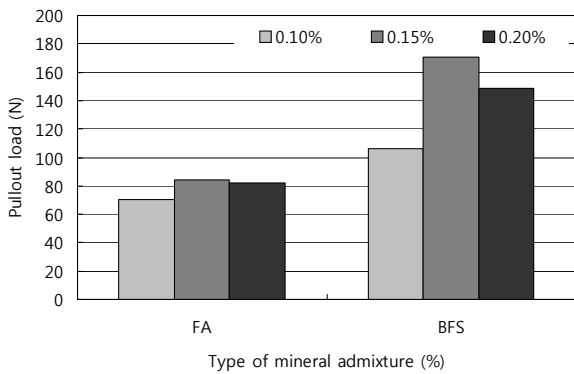


Fig. 6 Pullout load of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

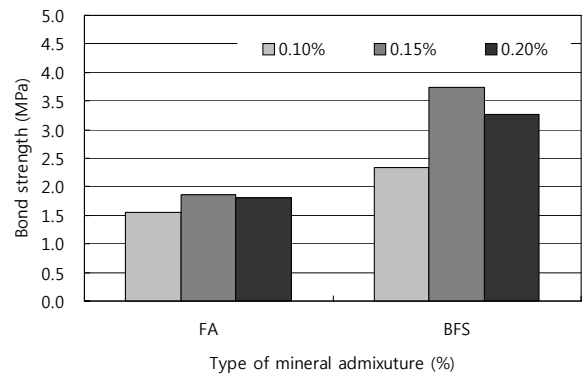


Fig. 7 Bond strength of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

PP섬유의 분산성을 보다 향상 시켰기 때문인 것으로 보인다. PP 섬유의 혼입률에 따른 부착강도 시험결과를 살펴보면 PP섬유의 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 플라이애시를 치환한 배합은 각각 1.55, 1.86 및 1.80MPa를 나타내었으며 고로슬래그 미분말을 치환한 배합은 각각 2.33, 3.74 및 3.26MPa를 보여주었다. 구조용 합성섬유의 인발거동은 섬유의 형상에 따라 영향을 받는다. 기존 연구결과를 살펴보면 섬유의 표면형상 변화가 없는 원형인 모노필라멘트 폴리프로필렌섬유의 경우 0.558MPa의 부착력을 가지고 있으며 표면형상의 변화 등 다양한 처리에 따라 부착강도를 증가시킬 수 있다고 하였다(Naaman et al, 1984).

3.3.3 계면인성

PP섬유 혼입률에 따른 계면인성 시험결과는 Fig. 8과 같다. 플라이애시를 30% 치환한 배합에서는 섬유의 혼입률이 증가할수록 계면인성도 증가하는 경향을 나타내었

고, 고로슬래그 미분말을 치환한 배합에서는 0.15%까지는 크게 증가하나 0.20% 혼입한 배합에서는 0.15% 혼입한 배합과 거의 유사한 결과를 나타내었다. 플라이애시를 30% 치환한 배합의 계면인성은 PP섬유 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 41.70, 44.78, 및 60.11N·mm을 나타내었고, 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 배합에서는 각각 41.77, 59.48 및 58.78N·mm을 나타내었다. PP섬유의 혼입률 0.10%에 비하여 혼입률 증가에 따른 계면인성의 증가율은 플라이애시를 치환한 배합에서 각각 7.37 및 44.11%를 보여주었고, 고로슬래그 미분말을 치환한 배합에서는 42.39 및 40.43%를 보여주었다. 이와 같은 결과는 계면인성은 최고 인발하중보다는 섬유의 인발거동에 영향을 받게 되는데 섬유의 혼입률이 증가할수록 PP섬유가 구조용 합성섬유의 인발 발생시 섬유의 가교 작용 등을 통하여 섬유의 인발을 최대한 억제 및 지연시키기 때문인 것으로 보인다. 그러나 고로슬래그 미분말 치환배합에서는 0.20%에서 약간 감소하는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 최고 인발하중 후에 하중의 감소가 발생하는 구간이 상대적으로 크기 때문이다. 특히 하중의 감소 후 구조용 합성섬유가 인발되는 분리구간(debonded zone)이 발생하는데 분리구간의 하중은 시멘트 매트릭스 특성과 PP섬유의 가교, 분리, 파단 및 인발 등의 부착성능에 의해서 좌우되게 된다. 고로슬래그 미분말을 치환한 배합의 경우 최고 인발하중의 크기가 커 하중의 감소가 상대적으로 크고 급격한 하중의 감소에 의하여 소수성 표면을 가지고 있는 PP섬유도 급격한 하중의 감소에 의하여 파단, 인발 및 분리가 촉진되어 최고 인발하중 후의 거동이 0.15% 보다 약간 감소하는 결과를 초래하였다. 그러나 플라이애시를 치환한 배합

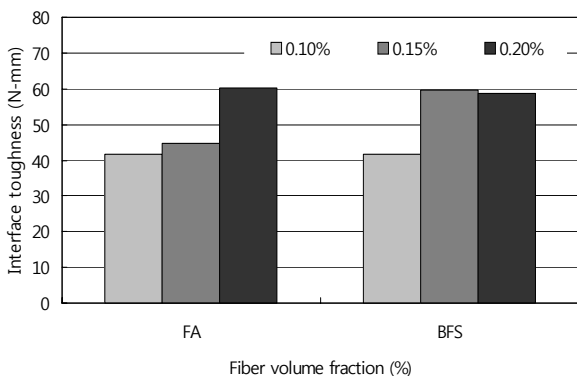


Fig. 8 Interface toughness of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

의 경우에는 상대적으로 최고인발하중이 작기 때문에 급격하게 하중이 감소하는 구간이 크지 않아 PP섬유가 하중 감소에 의한 급격한 부작거동의 변화를 발생시키지 않았기 때문에 0.20% 혼입률에서는 구조용 합성섬유의 인발을 억제하는 섬유의 수가 증가되어 계면인성이 증가하는 효과가 나타난 것으로 보인다.

3.3.4 강도특성과 부작성능과의 관계

PP섬유 혼입률에 따른 압축강도 및 휨강도와 부작강도와의 관계는 Fig. 9 및 10과 같다. 강도시험결과와 비교해 보면 압축강도는 PP섬유 혼입률이 증가함에 따라 약간 증가하거나 감소하는데 이는 모두 10% 이내의 강도의 증가 및 감소로 큰 영향이 없는 것으로 보인다. 부작강도시험결과와 휨강도 시험결과를 살펴보면 0.15%의 혼입률까지는 섬유의 뭉침현상 보다는 PP섬유와 시멘트 복합재료와의 부작계면에서 공극의 증가로 인하여 시멘트 복합재료 전체의 공기량을 증가시킴으로서 강도가 감소하

는 것으로 보인다. 그러나 0.20%가 되면 PP섬유의 뭉침현상이 발생하기 시작하여 부작강도도 감소시키는 것으로 보인다. 구조용 합성섬유와 시멘트 복합재료와의 계면에 PP섬유가 뭉친 부분이 존재하면 이 부분에서 균열의 발생 및 성장으로 부작파괴가 발생하게 된다. 따라서 0.20%에서 부작강도가 감소하는 현상이 발생하는 것으로 보인다. 이와 같은 경향은 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 치환 배합에서 동일하게 나타났다.

PP섬유보강 시멘트 복합재료의 압축강도 및 휨강도와 계면인성을 분석한 결과 섬유의 혼입률이 증가할수록 계면인성은 증가하고 있다(Fig. 11 및 12). 계면인성은 최고 인발 하중 후 거동에 의하여 결정되는데 섬유의 혼입률이 증가할수록 최고 인발하중 후 거동 즉 구조용 합성섬유가 인발되면서 하중에 저항하는 과정에서 PP 섬유가 가고 작용 등을 통하여 구조용 합성섬유의 인발을 억제 및 지연하고, 이 구간에서 인발하중 증가가 발생하는 변형경화 현상을 발생시키게 된다. 이와 같은 효과는 섬유

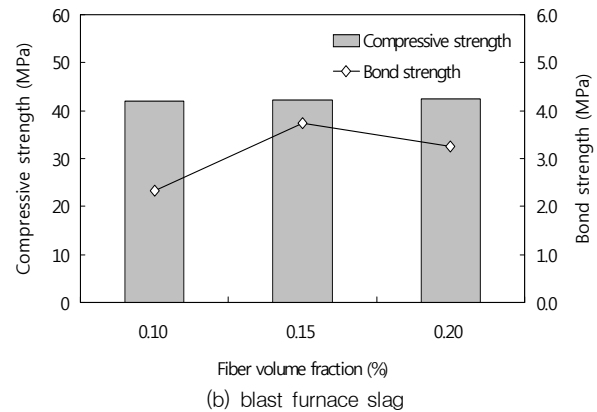
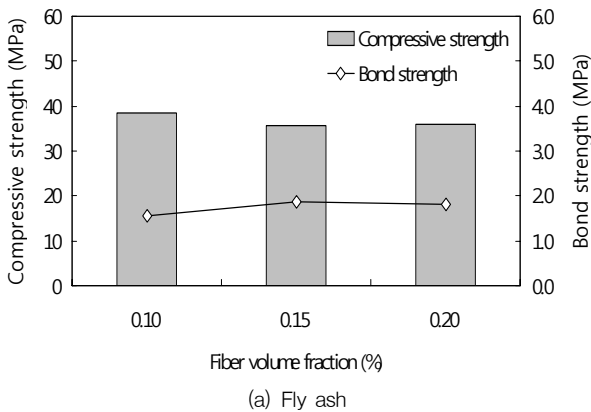


Fig. 9 Relationship compressive strength and bond strength of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

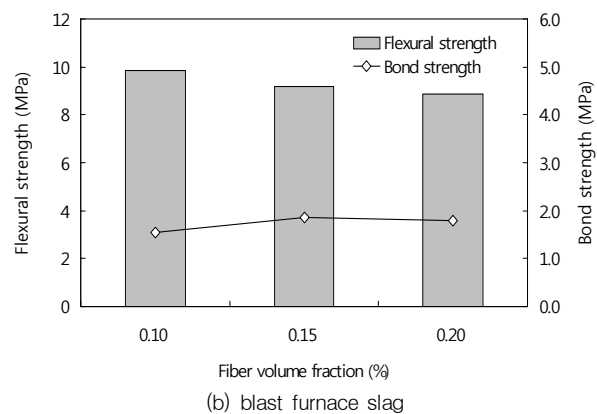
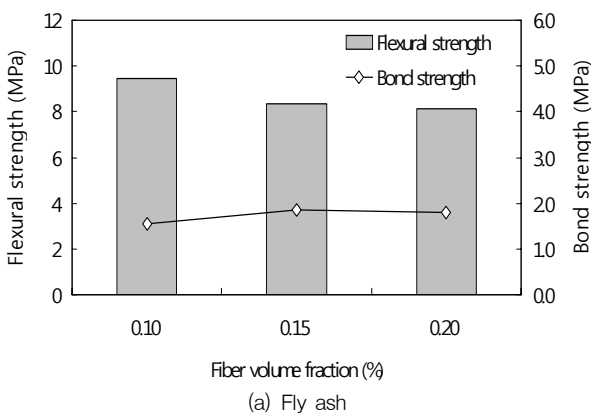


Fig. 10 Relationship flexural strength and bond strength of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

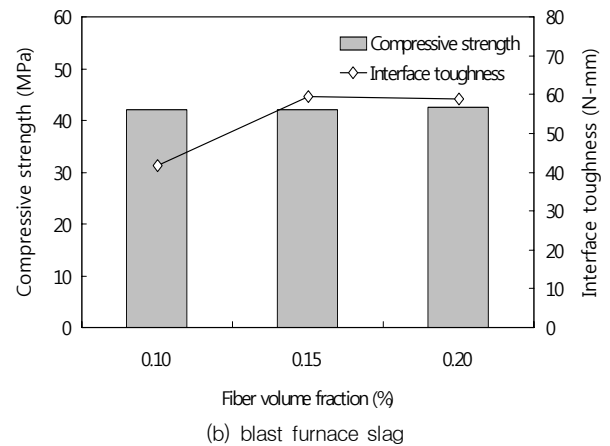
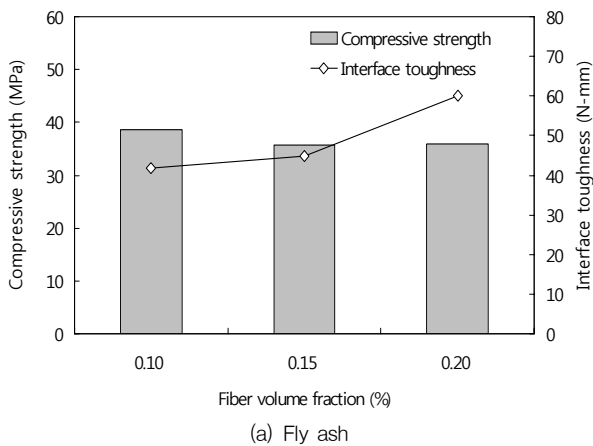


Fig. 11 Relationship compressive strength and interface toughness of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

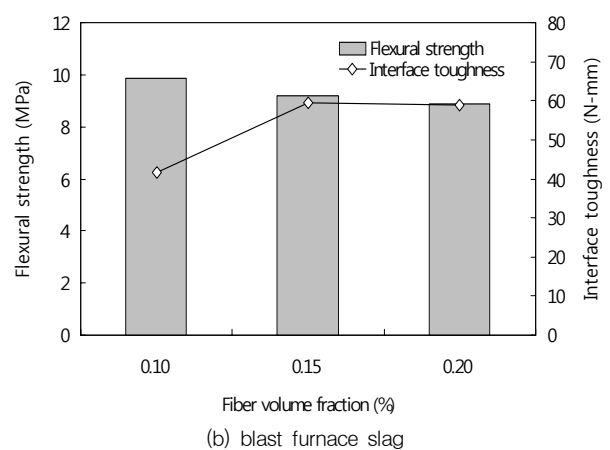
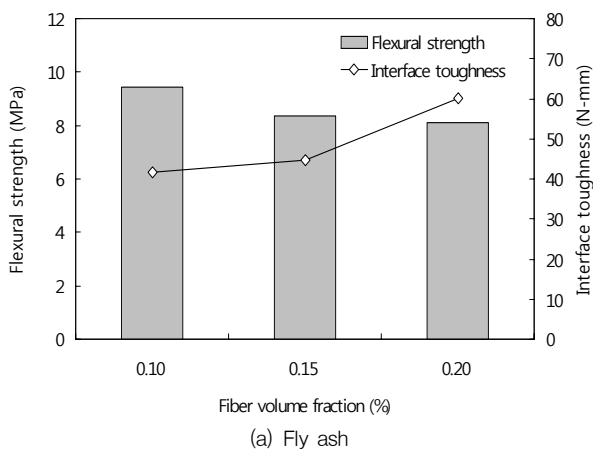


Fig. 12 Relationship flexural strength and interface toughness of synthetic fiber in PP fiber reinforced cement composites

의 혼입률이 증가할수록 가교 작용을 통하여 저항하는 섬유 수가 많아져 보다 효과적인 것으로 보인다.

압축강도와 계면인성을 비교해 보면 압축강도의 변화는 크지 않지만 계면인성은 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 휨강도는 약간씩 감소하는데 계면인성은 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 PP섬유의 혼입률 증가는 압축 및 휨강도 보다는 구조용 합성섬유의 최고 인발하중 후 인발 거동을 억제 및 지연시킴으로써 계면인성 증가에 효과적인 것으로 보인다.

3.4 미소구조분석

본 연구에서는 부착시험 후 섬유 표면을 관찰하여 섬유와 매트릭스의 마찰력에 따른 굽힘 현상을 관찰하였다.

Fig. 13~14는 PP섬유의 혼입률에 따른 부착시험 후 섬유 표면의 SEM 사진을 보여준다. 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 배합 모두에서 섬유의 혼입률이 증가할수록 섬유 표면의 굽힘 현상은 증가하고 있다. 미소구조분석결과 섬유표면의 굽힘 현상은 부착강도 보다는 계면인성과 관련이 더 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 섬유가 인발될 때 지속적으로 시멘트 매트릭스와 마찰력에 의하여 인발저항력을 갖기 때문인 것으로 보인다. 최고인발하중 하중에 도달한 후 다음 섬유의 인발 거동이 섬유표면에 굽힘 현상에 더 큰 영향을 주기 때문이다. 또한 고로슬래그 미분말 30% 치환한 배합의 PP 섬유 혼입률 0.15%와 0.20%의 표면 굽힘 현상이 거의 유사하게 나타난 것으로 보아 계면인성과 섬유의 굽힘 현상은 상호관계가 있는 것으로 나타났다.

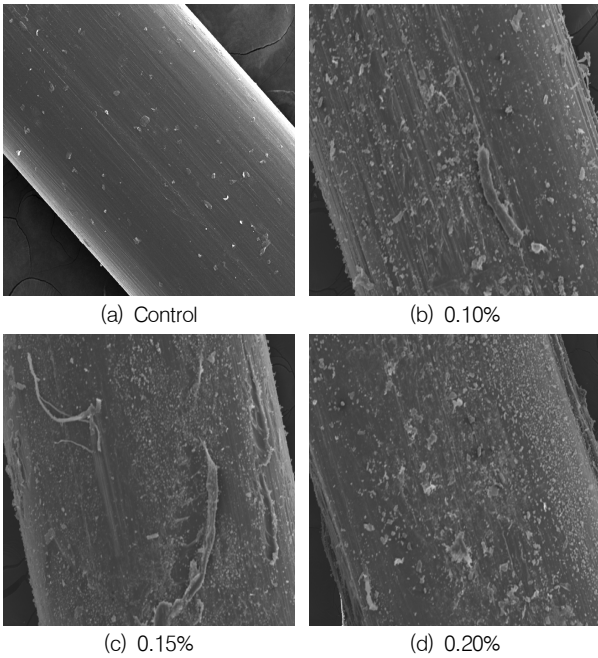


Fig. 13 Microstructure analysis of polyolefin fiber surface in fly ash cement based composites with PP fiber volume fraction($\times 100$)

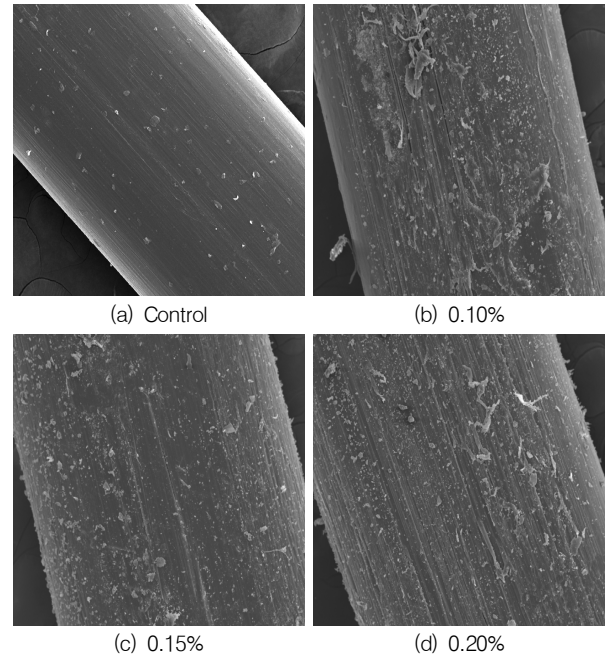


Fig. 14 Microstructure analysis of structural synthetic fiber surface in blast furnace slag cement based composites with PP fiber volume fraction($\times 100$)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 구조용 합성섬유와 PP섬유가 혼합된 하이브리드섬유보강 시멘트 복합재료에서 구조용 합성섬유의 부착거동에 미치는 PP섬유 혼입률의 영향을 부착시험을 통하여 평가하였다. PP섬유 혼입률은 0.10%, 0.15% 및 0.20%를 적용하였다. 인발시험 후 섬유 부착표면의 미세구조관찰을 통하여 구조용 합성섬유의 부착 매카니즘을 평가하였으며, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PP섬유의 혼입률에 따른 부착거동은 섬유의 혼입률이 증가할수록 최고 인발하중 후 거동이 우수하게 나타났다. 섬유의 혼입률이 증가하면서 최고 인발하중 후 하중의 감소가 크지 않고, 오히려 하중 감소 후 다시 하중의 증가한 후 서서히 감소하는 거동을 나타내고 있다. 이는 PP섬유가 구조용 합성섬유의 인발시 섬유의 가교작용 등을 통하여 최대한 인발을 억제 및 지연시키기 때문인 것으로 보인다. 이와 같은 효과는 섬유의 혼입률이 증가할수록 효과가 더 크게 나타난 것으로 보인다.
- (2) 구조용 합성섬유의 부착강도는 PP섬유 혼입률이 0.15%까지는 증가하였으나 0.20%에서는 감소하는

결과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 0.20%에서는 섬유의 뭉침현상이 현저하게 증가하여 구조용 합성섬유와 시멘트 매트릭스의 계면에서 급격하게 균열이 발생하여 부착과괴가 발생하기 때문인 것으로 보인다.

- (3) PP섬유 혼입률에 따른 계면인성 시험결과 섬유 혼입률이 증가할수록 계면인성이 증가하였다. 이와 같은 결과는 계면인성은 최고 인발하중 보다는 섬유의 인발거동에 영향을 받게 되는데 섬유의 혼입률이 증가할수록 PP섬유가 구조용 합성섬유의 인발 발생시 섬유의 가교 작용 등을 통하여 섬유의 인발을 최대한 억제 및 지연시키기 때문인 것으로 보인다. 그러나 고로슬래그 미분말 치환배합에서는 0.20%에서 계면인성의 증가가 거의 나타나지 않았는데 이는 최고 인발하중 후의 거동은 유사한데 최고하중이 0.15%가 높기 때문에 나타난 것으로 보인다.
- (4) PP섬유보강 시멘트 복합재료의 압축강도 및 휨강도와 구조용 합성섬유의 부착강도의 관계를 분석한 결과 PP섬유의 혼입률은 압축강도 및 휨강도에는 큰 영향을 미치지 않았지만 부착강도는 두 배합 모두에서 0.15%까지는 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 0.20%에서는 모두 약간씩 부착강도가 감소하였다.

이와 같은 결과는 PP섬유의 혼입은 압축강도 및 휨 강도를 증가 또는 감소시킬 수 있지만 부착강도는 PP섬유가 구조용 합성섬유와 시멘트 매트릭스의 계면을 섬유의 가교 및 밀실화 효과 등을 통하여 강화시켜 부착강도는 증가하는 것으로 보인다. 그러나 0.2%의 혼입률에서는 섬유뭉침 현상이 현저해져 부착강도도 감소하였다.

- (5) PP섬유보강 시멘트 복합재료의 압축강도 및 휨강도와 계면인성을 분석한 결과 섬유의 혼입률이 증가할수록 계면인성은 증가하고 있다. 이는 구조용 합성섬유가 최고 인발하중 도달 후 거동을 PP섬유가 가교 작용 등을 통하여 최대한 인발을 억제 및 지연시키기 때문인 것으로 보인다. 그러나 고로슬래그 미분말 치환배합에서는 0.20%에서 계면인성의 증가가 거의 나타나지 않았는데 이는 최고 인발하중 후의 거동은 유사한데 최고하중이 0.15%가 높기 때문에 나타난 것으로 보인다.
- (6) 인발시험 후 섬유의 표면관찰결과 구조용 합성섬유의 표면 마찰력은 섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하는 결과를 보여주어 부착강도 보다는 계면인성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 섬유 표면의 굽힘 현상은 최고하중에 도달한 후 섬유의 인발과정에서 이에 저항하는 마찰력에 의하여 발생하게 되는데 최고 인발하중에 도달한 후 거동은 부착강도 보다는 계면인성에 영향을 미치기 때문에 계면인성결과에 영향을 미치는 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(연구과제번호: 2010-0021570)

참고문헌

1. 김성배, 이나현, 김현영, 김장호, “재생 PET 섬유로 보강된 친환경 황토 콘크리트의 역학적 특성과 휨 거동”, 구조물진단학회지, Vol. 14, No. 3, 2010, pp.153-159.
2. 원종필, 박찬기, 김윤정, 이시원, “시멘트 매트릭스 내에서 폴리올레핀계 합성섬유의 친수성처리에 따른 인발거동”, 대한토목학회 논문집, 제27권 3A호, 2007, pp.453-460.
3. 원종필, 박찬기, 김윤정, 박경훈, “고강도 시멘트 복합재료에서 단일 강섬유 및 합성섬유의 부착특성 평가 대한토목학회 논문집”, 제27권 4A호, 2007, pp.609-616.
4. 원종필, 장창일, 이상우, 김홍열, 김완영, “하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트 기동부재의 내화성능”, 콘크리트학회논문집, 제20권 6호, 2008, pp.827-832.
5. Bentur, A. and Mindess, S., “Fibre reinforced cementitious composites”, Elsevier Applied Science, London, 1990, pp.1-377.
6. Banthia, N., Gupta, P., Yan, C. and Morgan, D. R., “How tough is fiber reinforced shotcrete PART. 1. Beam tests”, Concrete International, Vol. 21, No. 6, 1999, pp.59-62.
7. Banthia, N., Gupta, P., Yan, C. and Morgan, D. R., “How tough is fiber reinforced shotcrete PART. 2. Plate tests”, Concrete International, Vol. 21, No. 6, 1999, pp.62-69.
8. Chan, Y. W. and Chu, S. H., “Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 7, 2004, pp.1167-1172.
9. Komlos, K., Babai, B. and Nurnbergerova, T., “Hybrid fibre-reinforced concrete under repeated loading”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 156, No. 1-2, 1995, pp.195-200.
10. Khayat, K.H., Tagnit-Hamou, A., Tamboue, T. and Petrov, N., Refection du quai No. 45du port de Montreal, Final report, Sherbrooke, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 1996, pp.1-100.
11. Lawer, J. S., Zampini, D. and Shah, S. P., “Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load”, ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 4, 2002, pp.379-385.
12. Mobasher, B. and Li, C. Y., “Effect of interfacial properties on the crack propagation in cementitious composites”, Advanced Cement Based Materials, Vol. 4, No. 3/4, 1996, pp.93-105.
13. Naaman, A. E., Shan S. P. and Thorne J. L., “Some development in polypropylene fibers for concrete, In Fier Reinforced Concrete”, ACI SP-81, Amercian Concrete Institute, Detroit, 1984, pp.375-396.
14. Naaman, A. E. and Najm H., “Bond-slip mechanism of steel fibers in concrete”, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 2, 1991, pp.135-145.
15. Qian, C. X. and Stroeven, P., “Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres”, Cement and Concrete Composites, Vol. 22, No. 5, 2000, pp.343-351.
16. Qian, C. X. and Stroeven, P., “Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 1, 2000, pp.63-69.
17. Shannag, M. J., Brinker, R. and Hansen, W., “Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites”, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 6, 1997, pp.925-936.
18. Singha, S., Shuklaa, A. and Brown, R., “Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix”, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 10, 2004, pp.1919-1925.
19. Won, J. P., Lim, D. H., Park, C. G. and Park, H. G., “Bond behavior and flexural performance of structural

synthetic fibre reinforced concrete”, Magazine of concrete research, Vol. 28, No. 6, 2006, pp.401-410.

20. Wei Sun, Huisu Chen, Xin Luo, Hongpin Qian, “The effect of hybrid fibers and agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 4, April 2001, pp.595-601.

21. Xu, G., SMagnani, S. and Hannant, D. J., “Tensile behavior of fiber-cement hybrid composites containing

polyvinyl alcohol fiber yarns”, ACI Materials Journal. Vol. 95, No. 6, 1998, pp.667-674.

(접수일자 : 2011년 1월 14일)
(수정일자 : 2011년 5월 8일)
(심사완료일자 : 2011년 5월 13일)

요 지

폴리프로필렌섬유보강 시멘트 복합재료와 구조용 합성섬유의 부착특성을 평가하였다. 폴리프로필렌섬유는 0.10%, 0.15% 및 0.20%의 체적비로 적용하여 dog-bone 시험을 실시하였다.

구조용 합성섬유와 폴리프로필렌섬유보강 시멘트 복합재료 사이의 부착강도는 폴리프로필렌섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하였으나 0.20% 이상이 되면 감소하였다. 또한 폴리프로필렌섬유의 첨가는 계면인성과 마찰저항을 증가시킨다. 인발시험 후 구조용 합성섬유 표면의 미소구조 분석은 폴리프로필렌섬유의 혼입률이 증가할수록 굽힘 현상이 증가하였다.

핵심 용어 : 부착강도, 계면인성, 폴리프로필렌섬유, 구조용 합성섬유
