메타카올린 및 실리카폼 첨가율에 따른 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착특성

Bond Properties of Structural Poly Vinyl Alcohol Fiber in Cement Based Composites with Metakaolin and Silica Fume Contents

이정우* · 박찬기**,*

Lee, Jung Woo · Park, Chan Gi

ABSTRACT

In this study, the effect of metakaoline and silica fume on the bond performances of structural polyvinyl alcohol (PVA) fiber in cement mortar, including bond strength, interface toughness, and microstructure analysis are presented. Metakaoline and silica fume contents ranging from 0 % to 15 % are used in the mix proportions. Pullout tests are conducted to measure the bond performance of PVA fiber from cement mortar. Test results showed the incorporation of metakaoline and silica fume can effectively enhance the PVA fiber-cement mortar interfacial properties. Bond strength and interface toughness increased with metakaoline and silica fume content up to 10 % in cement mortar and decreased when the metakaoline and silica fume content reached 15 %. The microstructural observation confirms the findings on the interface bond mechanism drawn from the fiber pullout test results.

Keywords: Bond strength; Interface toughness; Silica fume; Metakaoline; Pullout test

1. 서 론

최근 들어 광물질 혼화재를 적용한 고강도 시멘트 복합재료의 대한 연구가 진행되고 있다 (Chan et al., 2004; Lee et al., 2011a, b). 특히, 실리카폼은 고강도시멘트 복합재료에 사용이 증가하고 있다 (Chan et al., 2004). 그러나 국내에서는 실리카폼이 생산되지 않아 경제성이 악화되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 최근 들어 실리카폼의 대체재료로 메타카올린에 대한 연구와 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 연구 등 다양한 연구가 진행되었다 (Park et al., 2008; Lee and Park, 2011b). 그러나 한편으로는 실리카폼 및 메타카올린 등을 적용한 시멘트 복합재료의 고강도화는 취성적 성질을 증가시키는 문제점이 있다. 이와 같은 시멘트 복합재료의 취성적 문제를 해결하기 위한 방법으로 보강섬유를 적용하는 방법이 있다. 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능은 보강섬유와 시멘트 복합재료의 부착성능에 큰 영

향을 받는다 (Lee, et al., 2011a,b; Mobasher, et al., 1996). 일반적으로 섬유보강 시멘트 복합재료는 균열이 발생하였을 때 섬유의 가교 작용 즉, 섬유분리 (fiber debonding), 섬유인발 (fiber pullout), 섬유파괴 (fiber fracture) 등을 통하여 연성파괴를 유도한다 (Kim, et al., 2008; Won, et al., 2006). 가교작용은 균열선단에서 응력집중계수 (stress intensity factor) 감소와 균열 닫힘 (crack closure)을 발생시킨다 (Shannag, et al., 1997; Sehaj, et al., 2004; Won et al., 2007). 또한, 시멘트 복합재료의 계면 (interface)에서 섬유분리와 인발은 균열의 성장 기간에 총 에너지 흡수능력에 영향을 미쳐 연성을 향상시킨다 (Li, et al., 1997; Naamman, et al., 1991; Wu, et al., 1999). 따라서 보강섬유와 시멘트 복합재료의 부착성능 향상은 시멘트 복합재료의 연성을 증가시켜 취성의 문제를 해결할 수 있다. 수리구조물의 경우 취성적 문제 뿐만아니라 균열의 발생시 수밀성이 저하되어 내구수명이 감소하는 문제점이 발생할 수 있다. 보강섬유의 적용은 취성적 문제 뿐만아니라 균열의 발생 및 성장을 제어하는 효과가 있다. 시멘트 복합재료와 보강섬유의 부착성능 향상은 이와 같은 균열제어 효과를 극대화할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 메타카올린 및 실리카폼을 적용한 시멘트 복합재료에서 보강섬유의 효과를 최적화할 수 있는 기초연구로 보강섬유와 시멘트 복합재료의 부착성능을 평가하였다. 보강섬유로는 친수성

* 공주대학교 대학원 농공학과

** 공주대학교 지역건설공학과

† Corresponding author Tel.: +82-41-330-1266

Fax: +82-41-330-1269

E-mail: cgpark@kongju.ac.kr

2012년 2월 23일 투고

2012년 5월 22일 심사완료

2012년 5월 25일 게재확정

재료이며 비부식성 재료로 최근 들어 슛크리트, 콘크리트 포장, 보수 재료 등 다양한 콘크리트 구조물에 강섬유를 대체하여 적용이 증가하고 있는 구조용 PVA 섬유를 사용하였다 (Lee and Park, 2011a, Kuraray PVA Fiber Division). 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착특성 평가는 Dog-bone 공시체를 제작하여 실시하였으며, 부착시험 후 섬유 표면의 미세구조 분석을 통하여 메타카올린 및 실리카폼의 치환율에 따른 부착 특성을 분석하였다. 이와 같은 결과의 분석을 통하여 섬유보강 시멘트 복합재료의 취성적 성질 개선과 균열억제 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부착성능을 최적화할 수 있는 메타카올린 및 실리카폼의 사용량 효과를 제시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재료

본 연구에서는 국내 S사의 비중 3.14의 보통 포틀랜드 시멘트, 비중 2.61의 잔골재 및 메타카올린과 실리카폼을 사용하였으며, 물리·화학적 특성은 Table 1 및 2와 같다. 구조용 PVA 섬유는 친수성 섬유로서 강한 수소결합을 통하여 시멘트 복합재료와 부착특성이 우수하다. 구조용 PVA 섬유의 물리·역학적 특성은 Table 3과 같다.

Table 1 Physical and chemical composition of metakaolin

Density (g/mm ³)		Fineness (cm ² /g)		*L.O.I (%)		
2.5		150,000		0.6		
Chemical compositions (%)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
49.40	46.23	0.54	0.05	0.16	0.17	1.79

*: Loss on ignition

Table 2 Physical and chemical composition of silica fume

Density (g/mm ³)	Fineness (cm ² /g)		L.O.I (%)					
2.02	180,000~200,000		2.08					
Chemical compositions (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
94.0	0.3	0.8	0.05	–	0.3	0.4	0.8	0.2

Table 3 Properties of structural PVA fiber

Properties	Structural PVA fiber
Elastic modulus (GPa)	23
Density (g/mm ³)	1.3
Fiber length (mm)	30
Fiber diameter (mm)	0.66
Tensile strength (MPa)	900

Table 4 Mix proportions of cement mortar

Type of mix	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)				
		Cement	Water	Fine aggregate	MK*	SF**
Plain	47	606	285	1363	0	0
MK5		575.7			30.3	0
MK10		545.4			60.6	0
MK15		515.1			90.9	0
SF5		575.7			0	30.3
SF10		545.4			0	60.6
SF15		515.1			0	90.9

*: Metakaolin

**: Silica fume

2. 배합설계

본 연구는 Table 4와 같은 시멘트 복합재료 배합을 이용하여 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착특성을 평가하였다. 메타카올린과 실리카폼은 시멘트 중량에 0, 5, 10 및 15 %를 치환하여 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착특성에 미치는 영향을 평가하였다.

3. 실험방법

가. 휨강도

메타카올린 및 실리카폼의 치환율에 따른 시멘트 복합재료의 휨강도 특성을 평가하기 위하여 KSL ISO R 679에 따른 40 mm×40 mm×160 mm의 각주형 공시체를 제작하여 재령 28일 후 휨강도 시험을 실시하였다.

나. 부착성능

메타카올린과 실리카폼의 치환율에 따른 시멘트 복합재료와 친

L₁: embedment length (14.5 mm)

L₂: anchored length (14.5 mm)

L_f: fiber length (30 mm)

t: thickness of partitioning board (1 mm)

Fig. 1 Arrangement of the partitioning board and fibers, and setting in the mold (unit: mm)

수성 구조용 PVA 섬유를 부착거동을 평가하기 위하여 JCI SF-8에 시험규정을 이용하였다. Fig. 1과 같은 Dog-bone 모양의 공시체를 두 부분으로 분할한 후 중앙에 구조용 PVA 섬유를 정착시켰다. 부착실험 공시체는 제작 후 24시간 동안 23 ± 2 °C 및 상대습도 50 ± 2 %의 범위에 초기 양생을 실시한 후 탈형하여 23 ± 2 °C의 물속에서 실험 전까지 습윤양생을 실시하였다. 실험은 재령 28일간의 양생 후에 변위 제어방식의 UTM에 설치한 후 0.5 mm/min의 하중재하속도로 부착성능을 평가하였다.

본 연구에서는 식(1)을 부착강도를 계산하였으며, 배합마다 공시체 6개씩의 공시체를 제작하여 시험을 실시하였다.

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

여기에서 $\tau_{\max}$: 최대 부착강도

$P_{\max}$: 최대부착하중

D: 섬유의 직경

L: 정착길이

섬유보강시멘트 복합재료에서 보강섬유는 균열이 발생 후 인장응력의 지속적인 전달을 통하여 균열의 성장을 억제하는 동시에 섬유가 시멘트 복합재료로부터 인발되면서 인장응력의 전달을 통하여 취성적인 급격한 파괴를 방지하는 역할을 한다. 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). 본 연구에서는 JCI SF-8에 따라 인발하중-변위곡선에서 변위 2.5 mm까지의 면적으로 적용하여 계면인성을 계산하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 휨강도

메타카올린 및 실리카폼 치환율에 따른 시멘트 복합재료의 휨강도 시험결과는 Fig. 2와 같다. 메타카올린 및 실리카폼의 치환율이 증가할수록 휨강도가 증가하고 치환율 15 %에서 휨강도의 감소가 나타나기 시작하였다. 메타카올린 치환율이 0, 5, 10 및 15 %로 증가함에 따라 휨강도는 5.9, 6.7, 8.0 및 7.1 MPa를 나타내었으며, 실리카폼의 치환율이 0, 5, 10 및 15 %로 증가함에 따라 휨강도는 5.9, 7.9, 8.5, 및 8.2 MPa를 나타내었다. 또한, 메타카올린 치환율 10 %에서 실리카폼 치환율 5 %와 거의

Fig. 2 Compressive strength of cement mortar

유사한 휨강도를 나타냈다. 따라서 메타카올린의 10 % 치환했을 때 실리카폼 5 %와 유사한 휨강도 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

2. 부착성능

가. 인발거동

메타카올린 및 실리카폼 치환율에 따른 구조용 PVA 섬유의 인발하중과 변위 거동은 Fig. 3과 같다. 섬유보강 시멘트 복합재료에서 섬유의 부착거동은 첫 번째 매크로 균열이 발생하기 전 거동인 균열발생 전 거동 (prcracked zone behavior)과 균열발생 후 거동 (debond zone behavior)으로 구분할 수 있다. 균열발생 전 거동은 섬유와 매트릭스의 계면 부착력에 의하여 균열의 발생을 억제하는 구간이며, 균열발생 후 거동은 균열이 발생 후 섬유의 인발거동을 섬유와 매트릭스의 계면에서 마찰력에 의하여 억제하는 구간이다. 메타카올린 및 실리카폼의 치환율 10 %까지는 구조용 PVA 섬유와 시멘트 모르타르의 균열 전 거동이 향상되는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 메타카올린 및 실리카폼은 미분말로 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 계면에 발생하는 공극을 채워 밀실하게 하기 때문이다. 또한, 시멘트 복합재료의 강도를 증가시켜 균열발생 강도를 향상시키기 때문이다. 그러나 치환율 15 %가 되면 점성이 크게 증가하고 유동성이 감소하기 때문에 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 계면에 시멘트 복합재료가 잘 채워지지 않아 공극 발생으로 인한 계면약화가 발생하여 균열 발생 전 거동이 감소하는 결과를 보여주었다. 최고 인발하중 후에 구조용 섬유의 인발 거동이 발생하는데 하중의 급격한 감소 후에 일정한 하중을 유지하다가 최종적으로 인발되는 거동은 모든 메타카올린 및 실리카폼 치환율에서 나타났다. 균열발생 후 섬유와 시멘트 복합재료가 분리되는 구간의 거동은 거의 유사하나 메타카올린 및 실리카폼의 치환율

(a) Metakaolin

(b) Silica fume

Fig. 3 Pullout behavior of structural PVA fiber in cement mortar

15 %까지는 마찰 저항력이 증가하여 거동이 증가하나 15 %에서는 약간 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 치환율 15 % 이상에서는 점성과 유동성이 감소하여 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 계면에 공극 발생하기 때문이다. 따라서 실리카폼 및 메타카올린 치환율 15 % 이상에서는 유동화제 등을 적용하여 시멘트 복합재료의 유동성을 향상시킬 필요가 있다.

나. 부착강도

구조용 PVA 섬유의 메타카올린 및 실리카폼의 치환율에 따른 부착강도는 Fig. 4와 같다. 메타카올린 치환율이 0, 5, 10 및 15 %로 증가하면서 부착강도는 각각 1.93, 2.42, 3.34 및 3.04 MPa를 나타냈다. 실리카폼 치환율에 따른 부착강도는 치환율이 0, 5, 10 및 15 %로 증가함에 따라 각각 1.93, 3.28, 4.26 및 3.68 MPa를 보여주었다. 메타카올린 및 실리카폼의 치환율에 따른 부착강도의 경향은 치환율 10 %까지는 증가하고 15 %에서는 감소하는 결과를 나타냈다. 부착강도는 첫 번째 매크로 균열이 발생하는 강도로 시멘트 복합재료의 휨강도와 관계가 있다.

Fig. 4 Bond strength of structural PVA fiber in cement matrix

따라서 치환율 10 %까지는 균열 발생강도 및 휨강도를 향상시킬 수 있다고 판단된다. 또한, 메타카올린을 치환한 배합보다는 실리카폼을 치환한 배합이 부착강도가 우수하게 나타났다. 또한, 메타카올린 치환율 10 %에서 실리카폼 치환율 5 %와 유사한 부착강도를 나타냈다. 이와 같은 결과는 휨강도와 유사한 결과로 메타카올린 및 실리카폼의 치환은 시멘트 복합재료와 구조용 PVA 섬유의 계면을 강화하여 부착강도를 증가시킨다. 그러나 치환율 15 %에서는 실리카폼 및 메타카올린의 분말도가 크기 때문에 점성이 증가하여 유동성의 감소한다. 따라서 공시체 제작 시 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착계면이 잘 채워지지 않고 다짐이 어려워 부착계면에 공극이 증가한다. 따라서 부착강도가 감소한다. 따라서 실리카폼 및 메타카올린 치환율 15 % 이상에서는 유동화제 등을 적용하여 시멘트 복합재료의 유동성을 향상시킬 필요가 있다. 또한 메타카올린 10 %를 치환하였을 때 부착강도는 실리카폼 5 %를 치환하였을 때와 부착강도가 유사한 결과를 보여주었다.

다. 계면인성

메타카올린 및 실리카폼 치환율에 따른 구조용 PVA 섬유의 계면인성 시험결과는 Fig. 5와 같다. 메타카올린 치환율이 0, 5, 10 및 15 %로 증가함에 따라 계면인성 값은 각각 18.19, 23.08, 27.80 및 25.31 N-mm를 나타내었으며, 실리카폼 치환율이 0, 5, 10 및 15 %로 증가함에 따라 계면인성은 각각 18.19, 31.18, 35.12 및 33.34 N-mm를 나타냈다. 계면인성은 분리존에서의 거동을 나타내는 특성으로 첫 번째 매크로균열 발생 후 거동에 크게 영향을 받는다. 메타카올린 및 실리카폼의 치환율 10 %까지는 증가하다가 15 %에서는 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과는 실리카폼 및 메타카올린 치환은 미분말로 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착계면을 강화시켜 섬유의 인발거동 시 마찰력의 증가로 인하여 계면인성을 증가시킨다. 그러나 치환율 15 %에서는 점성의 증가로 유동성이 감소하

여 섬유와 시멘트 복합재료의 계면에 시멘트 복합재료가 충분히 채워지지 않아 공극의 발생으로 인하여 계면이 약화되어 계면인성이 감소하였다. 따라서 실리카폼 및 메타카올린 치환율 15 % 이상에서는 유동화제 등을 적용하여 시멘트 복합재료의 유동성을 향상시킬 필요가 있다. 또한, 메타카올린을 치환한 경우보다 실리카폼의 치환한 경우 계면인성이 상대적으로 증가하였는데 이와 같은 결과는 메타카올린보다 실리카폼이 미분말로 계면의 공극을 채우는 효과와 강도발현을 증가시켜 상대적으로 계면강화효과가 우수하여 계면인성이 증가하였다. 계면인성의 증가는 시멘트 복합재료의 연성을 증가시키는 효과가 있다. 따라서 실리카폼 및 메타카올린의 10 % 치환은 시멘트 복합재료의 취성적 성질을 개선하고 연성을 향상시키는 가장 큰 효과가 있을 것으

Fig. 5 Interface toughness of structural PVA fiber in cement matrix

(a) Control

(b) 5 %

(c) 10 %

(d) 15 %

Fig. 6 Microstructure analysis of structural PVA fiber surface in meta kaolin cement matrix ($\times 100$)

로 판단된다. 또한, 계면인성시험결과 휨강도와 부착강도는 메타카올린 치환율 10 %일 때 실리카폼 5 %와 유사한 값을 보여주었으나 계면인성에는 실리카폼을 치환하였을 때가 메타카올린을 치환하였을 때와 비교하여 매우 우수한 값을 나타내어 모든 치환율에서 메타카올린의 최대 계면인성보다 큰 값을 보여주었다.

라. 미세구조분석

본 연구에서는 부착시험 후 섬유 표면을 관찰하여 섬유와 시멘트 복합재료의 마찰력에 따른 굽힘 현상을 관찰하였다. Fig. 6 및 7은 메타카올린 및 실리카폼의 치환율에 따른 부착시험 후 섬유표면의 SEM 사진을 보여준다. 메타카올린 및 실리카폼의 치환율이 증가할수록 섬유표면의 굽힘현상과 섬유의 찢겨짐, 섬유

표면의 시멘트 복합재료 분말이 남아있는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같은 현상은 메타카올린 및 실리카폼의 치환율 10 %까지 증가하다가 15 %에서는 약간 감소하는 경향을 나타냈다. 섬유의 표면에 굽힘현상 및 섬유의 찢겨짐 등의 현상은 시멘트 복합재료에 정착된 구조용 PVA 섬유가 뽑힘 거동 시 마찰력에 의한 저항력을 나타내는 결과이다. 시멘트 복합재료와 구조용 PVA 섬유의 부착계면에서 균열이 발생하지 않게 저항하고, 균열이 발생하여 뽑힘 거동이 발생하기 시작하면 뽑힘거동에 저항하게 된다. 마찰력저항력이 증가할수록 섬유의 표면에 굽힘현상과 섬유 찢겨짐, 섬유표면에 남아있는 시멘트 복합재료 분말이 많이 남아 있게 된다. 구조용 PVA 섬유의 표면분석결과와 메타카올린 및 실리카폼의 첨가는 부착거동 향상에 효과가 있으며, 메타카올린 및

Fig. 7 Microstructure analysis of structural PVA fiber surface in silica fume cement matrix (×100)

실리카폼 치환율 10 %까지 그 효과는 증대되며, 15 %에서는 감소하기 시작하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 메타카올린 및 실리카폼은 미분말로서 섬유와 시멘트 복합재료의 계면의 강화를 통하여 부착저동을 향상시키는 것으로 판단된다.

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

IV. 결 론

본 연구에서는 메타카올린 및 실리카폼을 적용한 시멘트 복합재료의 취성적 성질과 균열발생가능성에 대한 문제점을 해결할 수 있는 구조용 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 기초연구를 실시하였다. 특히 구조용 PVA 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착성능을 평가하였다. 시험결과를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 메타카올린 및 실리카폼 치환율 10 %까지는 휨강도 및 부착강도가 증가하였다. 그러나 15 % 치환율에서는 시멘트 복합재료의 점성 증가와 유동성 감소로 휨강도 및 부착강도가 감소하는 결과를 나타냈다. 또한, 메타카올린 10 % 치환율의 휨강도와 부착강도는 실리카폼 치환율 5 %와 유사한 결과를 나타냈다. 따라서 부착강도 및 휨강도 측면에서는 메타카올린 10 % 치환은 실리카폼 5 % 치환하였을 때의 성능을 확보 가능성이 있을 것으로 판단된다.

2. 계면인성시험결과 메타카올린 및 실리카폼 치환율 10 %까지는 증가하다가 15 %에서 감소하는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 치환율 10 %까지는 섬유와 시멘트 복합재료의 계면 강화로 인발 시 마찰력에 의하여 계면인성이 증가하지만 15 % 치환율에서는 점성의 증가와 유동성의 감소로 계면을 충분히 채우지 못해 마찰력 저하가 발생하였기 때문이다.

3. 부착시험 후 섬유 표면의 관찰결과 부착강도 및 계면인성 시험결과와 유사한 결과를 나타냈다. 따라서 구조용 PVA 섬유의 표면관찰결과 메타카올린 및 실리카폼 치환은 시멘트 복합재료와 구조용 PVA 섬유의 부착저동에 영향을 미치고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 구조용 PVA 섬유와 시멘트 복합재료의 부착성능 시험결과 섬유보강 시멘트 복합재료의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부착특성은 실리카폼 및 메타카올린 치환율 10 %에서 가장 효과적이었다. 따라서 본 연구의 부착시험결과 치환율 10 %에서 시멘트 복합재료와 구조용 PVA 섬유의 부착특성을 가장 크게 향

상시켜, 시멘트 복합재료의 취성적 성질의 개선 및 균열저항성 등의 향상이 가장 클 것으로 판단된다. 또한, 수리구조물의 적용 시 연성을 증가시키고 균열의 억제통하여 수밀성을 향상시킬 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Chan, Y. W., and S. H. Chu, 2004. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research* 34(7): 1167-1172.
2. Kim, J. H., C. G. Park, S. W. Lee, S. W. Lee, and J. P. Won, 2008. Effects of the geometry recycled PET fiber reinforcement on shrinkage of cement-based composites, *Composites Part B: Engineering* 39(3): 442-450.
3. Kuraray PVA Fiber Division, Kuraray structural fibers for concrete reinforcement, <http://www.kuraray-am.com>. Accessed 29 April. 2012.
4. Lee, J. H., and C. G. Park, 2011a. Effect of Polyvinyl Alcohol Fiber Volume Fraction on Pullout Behavior of Structural Synthetic Fiber in Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites, *Journal of Korea Concrete Institute* 23(4): 461-469 (In Korean).
5. Lee, J. H., and C. G. Park, 2011b. Effect of Mineral Admixture on Bond Properties between Polyolefin Based Synthetic Fiber and Cement Mortar, *Journal of Korea Concrete Institute* 23(3): 339-346 (In Korean).
6. Li, V. C., and H. Stang, 1997. Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites, *Advanced Cement Based Materials* 6(1): 1-20.
7. Mobasher, B. and C. Y. Li, 1996. Effect of interfacial properties on the crack propagation in cementitious composites, *Advanced Cement Based Materials* 4(3/4): 93-105.
8. Naaman A. E., and H., Najm, 1991. Bond-slip mechanism of steel fibres in concrete, *ACI Materials Journal* 88(2): 135-145.
9. Park, S. B., J. S. Kim, and Y. Y. Kim, 2008. Rheology Control of Cement Paste for Applying ECC Produced with Slag Particles to Self-Consolidating and Shotcreting Process, *Journal of the Korea Concrete Institute* 20(1):

- 67~75 (In korean).
10. Park, C. B., H. S. Kim, J. Y. Jeon, E. K. Kim, and D. H. Ryu, 2008. Properties of Ternary or Quaternary High Strength Concrete Using Silica Fume & Meta Kaolin, *Journal of the Korea Concrete Institute* 20(3): 307~315 (In korean)
11. Shannag, M. J., R. Brinker, and W. Hansen, 1997, Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites, *Cement and Concrete Research* 27(6): 925-936.
12. Sehaj Singha, Arun Shuklaa, and Richard Brown, 2004. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix, *Cement and Concrete Research* 34(10): 1919-1925.
13. Won, J. P., D. H. Lim, C. G. Park, and H. G. Park, 2006. Bond behavior and flexural performance of structural synthetic fibre reinforced concrete, *Magazine of concrete research* 28(6): 401-410.
14. Won, J. P., C. G. Park, Y. J. Kim, and K. H. Park, 2007. Interfacial Pullout Characteristics of Recycled PET Fiber With Hydrophilic Chemical Treatments in Cement Based Composites, *Journal of the Korea Concrete Institute* 19(3): 333-339 (In korean).
15. Wu, H. C., and V. C. Li, 1999. Fiber cement interface tailoring with plasma treatment, *Cement and Concrete Composites* 21(3): 205-212.