

폴리올레핀계 매크로 섬유와 시멘트 경화체의 부착특성에 미치는 천연마섬유의 효과

Effect of Natural Jute Fiber on Bond between Polyolefin Based Macro Fiber and Cement Matrix

이진형* · 박찬기**

Lee, Jin-Hyung · Park, Chan-Gi

Abstract

In this study, the effect of natural jute fiber volume fraction on the bond characteristics of polyolefin based macro fiber in natural jute fiber reinforced cement composites, including bond strength, interface toughness, and microstructure analysis are presented. The experimental results on polyolefin based macro fiber pullout test of different conditions are reported. Natural jute fiber volume fractions ranging from 0.1% to 0.2% are used in the mix proportions. Pullout tests are conducted to measure the bond characteristics of polyolefin based macro fiber from natural jute fiber reinforced cement composites. Test results are found that the incorporation of natural jute fiber can effectively enhance the polyolefin based macro fiber-cement matrix interfacial properties. The bond strength and interface toughness between polyolefin based macro fiber and natural jute fiber reinforced cement composites increases with the volume fraction of natural jute fiber. The microstructural observation confirms the findings on the interface bond mechanism drawn from the fiber pullout test results.

Keywords : bond strength, interface toughness, natural jute fiber, polyolefin based macro fiber, pullout test

요 지

본 연구는 천연마섬유보강 시멘트 경화체와 폴리올레핀계 매크로섬유의 부착강도, 계면인성, 미세구조 분석을 포함한 부착 특성에 미치는 천연마섬유의 효과를 제시하였다. 다양한 조건에서의 폴리올레핀계 매크로섬유 인발시험의 실험적 결과를 보고하였다. 천연마섬유의 혼입률은 0.1%에서 0.2%까지를 배합설계에 적용하였다. 부착시험은 천연마섬유보강 시멘트 경화체에서 폴리올레핀계 매크로섬유의 부착특성을 측정하기 위하여 실시하였다. 시험결과 천연마섬유의 혼입은 폴리올레핀계 매크로섬유와 시멘트 경화체의 계면강화에 효과적이었다. 폴리올레핀계 매크로섬유와 천연마섬유보강 시멘트 경화체의 부착강도 및 계면인성은 섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하였다. 미세구조분석은 섬유의 인발시험결과로부터 획득한 부착 메커니즘을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 부착강도, 계면인성, 천연마섬유, 폴리올레핀계 매크로섬유, 인발시험

1. 서 론

2종 이상의 섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체는 단일섬유보강 시멘트 경화체에서 얻을 수 없는 효과를 발휘할 수 있다(원종필 등, 2005, 2006, 2008; Banthia 등, 2003). 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체는 물리·역학적 특성이 다른 섬유를 사용하였을 때 각 특성에 맞게 시멘트 경화체에서 발생하는 균열을 효과적으로 제어하여 역학적 성능 및 내구성능을 향상시킨다(원종필 등, 2006; Banthia 등, 2003). 시멘트 경화체에서 균열이 확장되어가는 과정은 처음에는 마이크로균열이 발생하고 점차적으로 그 수

가 증가된다. 이 과정에서 응력은 지속적으로 증가한다. 뒤 이어 복합적인 크기의 균열들이 발생하며, 매크로균열이 이러한 균열들을 따라 크게 확산되어간다. 매크로균열이 형성 되면 휨응력은 감소하고 변형이 증가하는 거동을 한다(원종필 등, 2006; Komos 등, 1995). 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체에서는 마이크로균열의 발생 및 성장을 마이크로 섬유가 제어함으로써 응력을 증가시키고, 매크로균열의 발생 및 성장을 매크로섬유가 제어함으로써 시멘트 경화체의 휨능을 증가시킨다(Lawer 등, 2002; Qian 등, 2000a, b). 이와 같은 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체에 대한 연구는 국내·외적으로 다양하게 진행되어 왔으며, 균열제어 및 역

*정회원 · 공주대학교 일반대학원 농공학과 석사과정 (E-mail : ljhxman@kongju.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 공주대학교 지역건설공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : cgpark@kongju.ac.kr)

학적 성능향상에 우수한 효과를 발휘하는 것으로 보고하고 있다(Lawer 등, 2002; Chen 등, 2001; Xu 등, 1998). 한편으로 콘크리트 및 모르타르에서 발생하는 수축균열을 제어하기 위하여 동일한 섬유를 길이 및 직경을 다르게 하여 균열제어 효과를 극대화한 하이브리드섬유 대한 연구도 진행되었다(원종필 등, 2005). 상기의 연구에서는 초기균열 발생시 마이크로균열은 섬유의 길이 및 직경이 짧은 마이크로 섬유가 억제하고 크기 큰 균열의 발생은 길이가 긴 매크로 섬유가 억제하여 균열제어효과를 극대화할 수 있다는 것이다. 그러나 적용된 섬유는 모두 비구조용 섬유로서 휨성능 등 역학적 성능 향상에는 큰 영향을 미치지 못하는 결과를 제시하였다(원종필 등, 2005b). 또한 최근 들어서는 구조용 섬유와 비구조용 섬유를 적용하여 콘크리트의 소성수축 및 건조수축균열을 제어하기 위한 연구가 진행되어 수축균열제어에 우수한 효과를 발휘한 결과도 제시하였다(우상균 등, 2008a,b). 섬유보강 시멘트 경화체의 거동에 있어서 균열제어 성능은 시멘트 경화체와 보강섬유의 부착거동에 영향을 받는다. 보강섬유는 시멘트 경화체에서 섬유의 가교(fiber bridging), 섬유의 분리(debonding), 인발(pullout) 및 파괴(fracture) 등의 과정을 통하여 균열 성장을 억제한다(Chan 등, 2004; Singha 등, 2004). 그러나 상기의 연구에서 마이크로섬유가 매크로섬유의 부착거동에 미치는 영향을 평가한 연구는 많지 않다.

폴리올레핀계 매크로섬유는 강섬유와 비교하여 우수한 충격/정적 강도 비와 부식에 대한 우려가 없는 것으로 알려져 해양구조물, 숏크리트 및 콘크리트 라이닝과 같은 구조물에 적용을 위한 연구가 증가하고 있다. 연구결과 폴리올레핀계 매크로섬유는 부식에 대한 저항성 뿐만 아니라 숏크리트에 적용시 리바운드에 의한 안전성도 강섬유보다 우수하다는 결과를 제시하고 있다(Banthia 등, 1999a, 1999b; 원종필 등, 2007a, 2007b; Khayat 등, 1996). 비구조용 마이크로섬유인 천연마섬유는 친수성재료로서 콘크리트 및 모르타르와 부착력이 우수하여 초기수축균열제어용으로 우수한 성능을 발휘한다. 또한 유효직경이 작아 시멘트 경화체를 밀실화시켜 수밀성을 증가시키는 효과가 있다.

본 연구에서는 길이가 길고, 직경이 크며, 휨성능 향상을 도모할 수 있는 구조용 폴리올레핀계 매크로섬유와 길이가

짧고 직경이 작은 콘크리트 및 모르타르의 초기균열제어용으로 적용되고 있는 비구조용 마이크로 천연마섬유를 적용한 하이브리드 섬유보강 시멘트 경화체의 성능을 향상시키고자 한다. 이를 위하여 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발거동에 미치는 천연마섬유의 효과를 평가함으로써 하이브리드 섬유보강 시멘트 경화체의 균열제어 및 휨성능을 향상시킬 수 있는 천연마섬유의 최적 혼입률 결정을 위한 기초 연구를 실시하였다.

2. 실험계획

2.1 재료

본 연구에서는 국내 S사의 비중 3.14의 보통 포틀랜드 시

Table 2. Properties of polyolefin based macro fiber and jute fibers

Properties	Polyolefin based macro fiber	Jute fiber
Elastic modulus (GPa)	10	61
Density (g/mm ³)	0.91	1.26
Fiber length (mm)	30	3
Fiber diameter (mm)	1	0.015
Tensile strength (MPa)	550	510

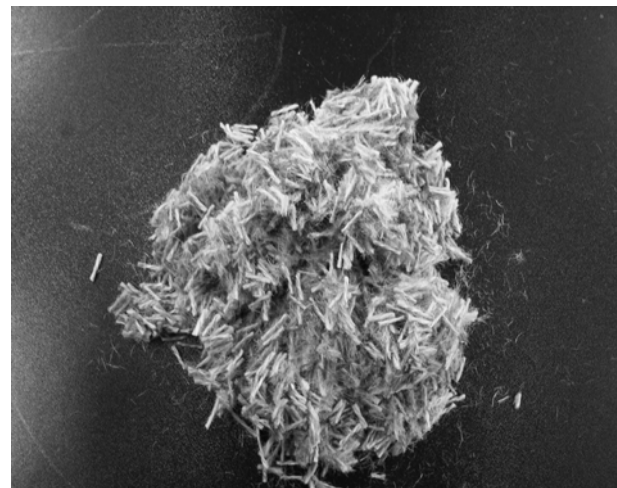


Fig. 1 Photo of jute fiber

Table 1. Properties of fly ash and blast furnace slag

Fly ash							
Density (g/mm ³)		Fineness (cm ² /g)			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
Blast furnace slag							
Density (g/mm ³)		Fineness (cm ² /g)			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

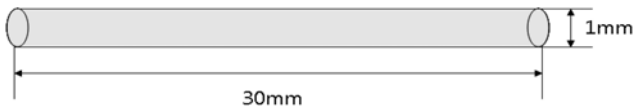


Fig. 2 Geometry of polyolefin based macro fiber

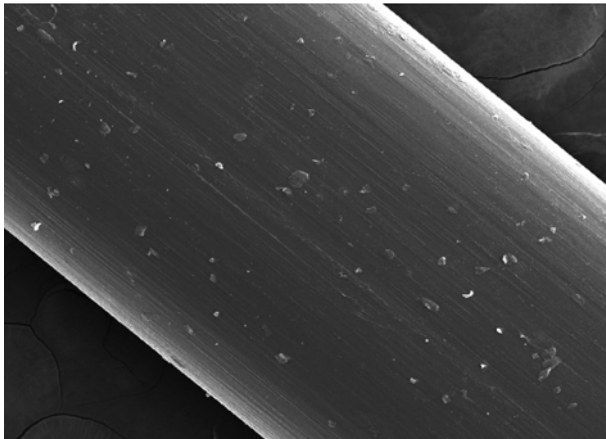


Fig. 3 SEM investigation of polyolefin based macro fiber

멘트, 비중 2.61의 잔골재 및 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다. 천연마섬유는 국내 C사에서 콘크리트 보강섬유로 제조하여 판매하는 제품을 적용하였으며, 그 물리·화학적 특성은 Table 2와 같으며 Fig. 1은 천연마섬유의 형상을 나타낸 것이다. 또한 폴리올레핀계 매크로섬유의 물리·역학적 특성은 Table 2와 같으며 섬유의 형상은 Fig. 2와 같다. Fig. 3은 폴리올레핀계 매크로섬유 표면의 SEM 사진을 보여준다.

2.2 배합설계

본 연구에서 사용된 시멘트 경화체의 배합은 Table 3과 같다. 폴리올레핀계 매크로섬유와 천연마섬유를 혼합한 하이브리드섬유가 성립하기 위하여 천연마섬유의 혼입률 0.00%를 제외하고 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체에서 폴리올레핀계 매크로섬유의 부착특성에 미치는 천연마섬유의 영향을 분석하기 위하여 천연마섬유를 체적비로 0.10, 0.15 및 0.20%를 적용하였다. 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체의 성능에 영향을 미치는 변수 중에 하나는 섬유몽침 현상이다. 따라서 섬유몽침 현상을 최소화할 수 있는 혼입률을 결정하는 것이 필요하다. 폴리올레핀계 매크로섬유 혼입률 변화는 폴리올레핀계 매크로섬유 자체의 몽침 현상 뿐만 아니라 천

연마섬유몽침 현상에도 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 폴리올레핀계 매크로섬유의 첨가로 인한 섬유몽침 현상을 최대한 억제하기 위하여 최소의 양으로 일반적인 폴리올레핀계 매크로섬유의 사용량(약 1.00~2.00%) 보다 적은 0.05%를 적용하였다. 그리고 폴리올레핀계 매크로섬유는 시멘트 경화체의 압축강도 및 휨강도를 평가하기 위한 공시체에만 체적비로 0.05%를 적용하였고, 부착시험공시체의 제작을 위한 배합에는 첨가하지 않고 한 개의 폴리올레핀계 매크로섬유만 공시체에 배열하여 천연마섬유의 혼입률에 따른 영향을 평가하였다. 또한 플라이애시 및 고로슬래그 미분말은 시멘트 중량의 30%를 사용하였다. 초기균열제어용 친수성섬유를 적용한 섬유보강 경화체에 대한 기존 연구결과는 섬유의 혼입률 0.10%까지는 압축강도 및 휨강도에 큰 영향을 미치지 않지만 0.15%에서는 섬유가 배합수를 흡착하는 양이 증가하여 유동성감소 등에 의한 섬유몽침현상 때문에 압축강도 및 휨강도 등이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환하여 적용함으로써 섬유의 첨가로 인한 유동성 감소효과를 개선하고자 하였다. 또한 최근 시멘트 경화체의 경우 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 적용한 배합이 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 광물질 혼화체의 증가하고 있는 시점을 고려하여 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 시멘트 중량에 30%를 치환하여 적용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도

천연마섬유 혼입률에 따른 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체의 압축강도 특성을 평가하기 위하여 KSL 5105에 따른 50 mm×50 mm×50 mm의 입방체 공시체를 제작하여 재령 28일 후 압축강도 시험을 실시하였다.

2.3.2 휨강도

천연마섬유 혼입률에 따른 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체의 휨강도 특성을 평가하기 위하여 KSL ISO 679에 따른 40 mm×40 mm×160 mm의 각주형 공시체를 제작하여 재령 28일 후 휨강도 시험을 실시하였다.

2.3.3 부착성능

천연마섬유 혼입률에 따른 시멘트 경화체에 정착된 폴리올레핀계 매크로섬유의 부착거동을 평가하기 위하여 JCI SF-8

Table 3. Mix proportions of cement matrix

No. of mix	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)						
		Cement	Water	Fine aggregate	FA*	BFS**	Jute fiber	Synthetic macro fiber
No.1	47	424.2	285	1363	181.8	0	1.26	0.45
No.2							1.89	
No.3							2.52	
No.4					0	181.8	1.26	
No.5							1.89	
No.6							2.52	

*Fly ash

**Blast furnace slag

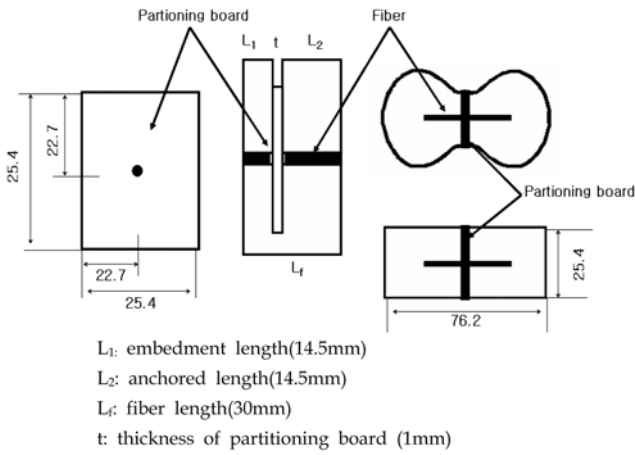


Fig. 4 Arrangement of the partitioning board and fibers, and setting in the mold (unit: mm)

에 따른 dog bone shape 몰드를 이용하였다. Fig. 4와 같은 dog bone shape 공시체를 두 부분으로 분할한 후 중앙에 보강섬유를 정착시켰다. 시멘트 경화체에 묻힌 섬유의 길이(embedment length+anchored length)는 29 mm이다. 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 0.4 mm/min의 하중재하속도로 부착성능을 평가하였다.

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, t_{\max} 는 최대 부착강도이고, P_{\max} 는 최대부착하중, D 는 섬유의 직경이며, L 은 정착길이이다. 폴리올레핀계 매크로섬유의 직경은 1 mm이고 정착길이는 14.5 mm이다.

또한 본 연구에서는 계면인성을 측정하였다. 섬유보강시멘트 경화체에서 보강섬유는 균열이 발생 후 인장응력의 지속적인 전달을 통하여 균열의 성장을 억제하는 동시에 섬유가 시멘트 경화체로부터 인발되면서 인장응력의 전달을 통하여 취성적인 급격한 파괴를 방지하는 역할을 한다. 계면인성은 균열발생 후 거동을 나타내는 중요한 인자로 계면인성이 클수록 시멘트 경화체의 연성 거동 확보에 유리하다. 일반적으로 계면인성은 섬유의 인발과정에서 소비되는 역학적 에너지로 정의될 수 있으며, 인발거동 곡선 아래면적으로 구할 수 있다(Benture 등, 1992; 원종필 등, 2006).

3. 실험결과

3.1 압축강도

천연마섬유 혼입률에 따른 압축강도의 시험결과는 Fig. 5와 같다. 플라이애시를 30% 치환한 배합의 경우 천연마섬유 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 압축강도는 각각 41.5, 37.3 및 35.2 MPa를 보여주어 0.10%의 혼입률보다 감소하는 결과를 보여주었고, 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 배합의 경우 천연마섬유 혼입률이 0.10, 0.15

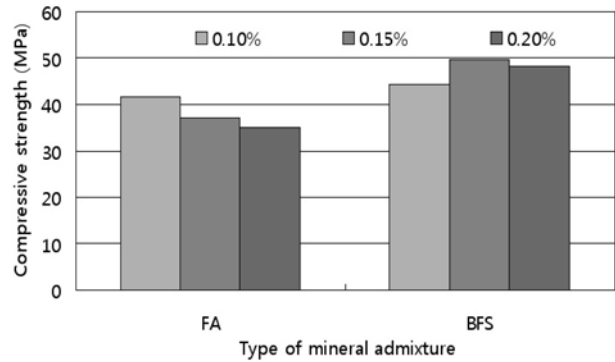


Fig. 5 Compressive strength of cement matrix with jute fiber volume fraction

및 0.20%로 증가함에 따라 압축강도는 각각 44.2, 49.9 및 48.8 MPa를 나타내어 0.15%까지는 압축강도가 증가하나 0.20%에서는 약간 감소하는 결과를 보여주고 있다. 섬유보강 시멘트 경화체에서 압축강도는 섬유의 혼입에 따라 약간 증가하거나 감소할 수 있다. 이와 같은 결과는 섬유의 첨가에 따른 공기량의 증가와 섬유의 뭉침 및 분산효과에 따른 영향이다(원종필 등, 2005a, b; Bentur 등, 1992). 본 연구에서 친수성 섬유인 천연마섬유를 마이크로섬유로 적용하였다. 친수성 섬유는 배합시 배합수를 흡착함으로써 유동성을 감소시킨다. 또한 섬유의 혼입률이 증가할수록 분산성의 감소하고 섬유의 뭉침으로 인하여 공기량이 증가는 등의 현상이 발생한다(원종필 등, 2005a, b). 본 연구에서는 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 첨가함으로써 유동성 감소를 억제하고 섬유의 분산성을 향상시키고자 하였다. 그러나 추가적으로 압축강도 제작시 폴리올레핀계 매크로섬유가 체적비로 0.45% 추가됨으로서 배합의 유동성 감소와 함께 섬유의 분산효과도 감소하였다. 또한 본 연구에서 적용한 플라이애시의 분말도($3,400 \text{ cm}^2/\text{g}$)보다 고로슬래그 미분말($4,000 \sim 6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$)의 분말도가 크다. 따라서 플라이애시를 치환한 배합은 섬유의 혼입률이 증가할수록 상대적으로 고로슬래그 미분말보다 작아 섬유의 분산성이 감소하며, 폴리올레핀계 매크로섬유와의 계면에서의 부착력이 작아 계면에서의 파괴가 발생하여 혼입률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 결과를 초래하였다. 그러나 고로슬래그 미분말은 상대적으로 플라이애시보다 분말도가 커 폴리올레핀계 매크로섬유와의 부착력도 우수하고 섬유의 분산효과도 우수하여 계면강화로 인하여 압축강도가 상대적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 섬유의 혼입률이 0.20%가 되면 섬유의 분산성도 약화되어 강도의 감소가 발생하기 시작하였다. 따라서 하이브리드섬유보강 시멘트 경화체의 성능 향상을 기대할 수 있는 천연마섬유의 혼입률 뿐만 아니라 폴리올레핀계 매크로섬유의 혼입률에 대한 영향도 평가할 필요가 있다. 특히 섬유의 분산성이 역학적 성능 및 부착성능에 영향을 미치므로 유동성을 향상시킬 수 있는 혼화제료를 적용하여 최적의 배합을 선정하는 연구가 필요하다.

3.2 휨강도

천연마섬유 혼입률에 따른 휨강도 시험결과는 Fig. 6과 같다. 플라이애시 30%를 치환한 배합의 경우 천연마섬유의 혼

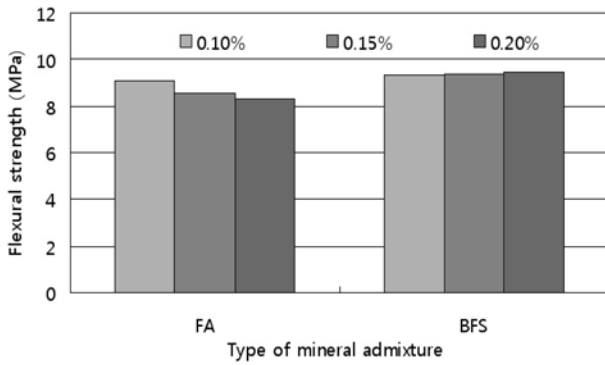


Fig. 6 Flexural strength of cement matrix with jute fiber volume fraction

입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 휨강도는 각각 9.1, 8.6 및 8.3 MPa으로 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 배합의 경우 천연마섬유의 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 휨강도는 각각 9.3, 9.4 및 9.4 MPa의 값을 보여주었다. 휨강도시험결과 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합 모두 약 10%정도 내에서 휨강도의 증가와 감소를 보여주어 휨강도에 큰 영향을 미치지 못하였다. 일반적으로 보강섬유의 첨가는 압축강도 보다는 휨강도에 더 큰 영향을 미친다. 그러나 본 연구에서 사용한 천연마섬유는 섬유길이와 직경이 작고, 소성수축 및 건조수축균열 제어용으로 제조된 제품이며, 섬유 혼입률 역시 균열제어를 위한 2차 보강효과(2% 미만의 체적비)를 특성으로 하는 정도의 양을 적용하기 때문에 휨강도에 큰 영향을 미치지 않았다(원종필 등, 2005a, b; Bentur 등, 1992). 또한 휨성능 향상에 영향을 미치는 구조용 섬유인 폴리올레핀계 매크로섬유의 혼입률이 모두 0.45%로 동일하게 적용하였기 때문에 휨강도의 영향은 크지 않았다. 기존 연구결과를 보면 친수성인 PVA섬유를 적용할 경우 섬유의 혼입률이 0.15%가 되면 휨강도가 크게 감소하는데(원종필 등, 2005a, b; Bentur 등, 1992) 본 연구에서는 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 적용함으로써 섬유 혼입으로 인한 유동성 감소가 광물질혼화제를 치환하지 않은 배합보다 크지 않아 섬유의 분산성을 향상시킬 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 폴리올레핀계 매크로섬유를 0.45% 혼입하고 있어 천연마섬유의 분산성과 유동성 감소에 영향을 미친다. 따라서 휨강도가 플라이애시 배합의 경우 약간 감소하는 결과를 보여주었다. 그러나 고로슬래그 미분말의 경우 분말도가 플라이애시보다 높아 상대적으로 분산성이 우수하고, 휨성능에 영향을 미치는 폴리올레핀계 섬유와 시멘트 경화체와의 부착력도 커 휨강도의 감소가 거의 발생하지 않고 일정한 값을 나타냈다.

3.3 부착성능

3.3.1 인발거동

천연마섬유 혼입률에 따른 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발하중(pullout load)과 미끄러짐(slip) 거동은 Fig. 7과 같다. 시멘트 경화체에서 마이크로균열의 발생 및 성장하는 구간인 첫 번째 매크로균열 발생 전 거동은 거의 유사하나 하중의 크기는 0.20%에서 가장 높은 하중을 보여주었다. 이는

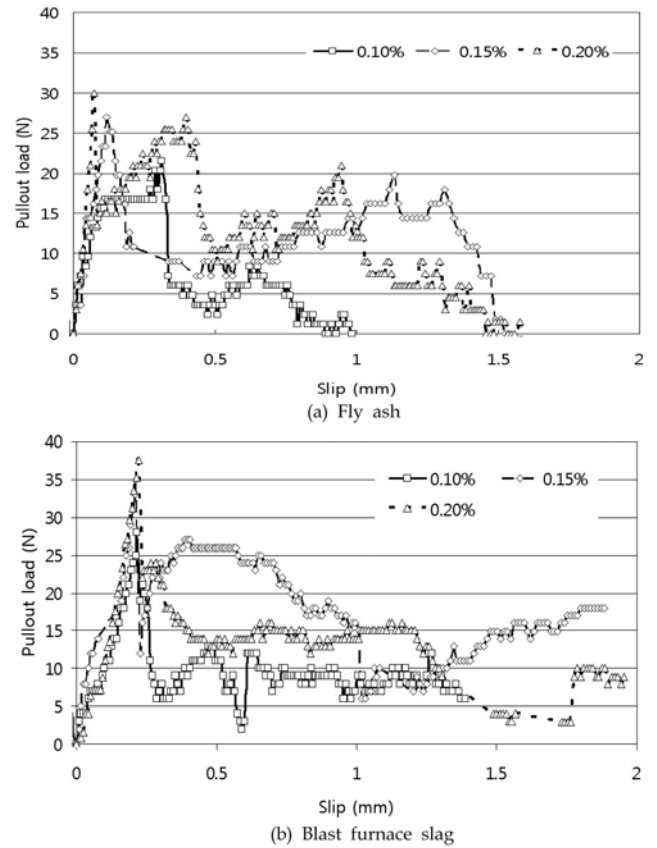


Fig. 7 Pullout behavior of polyolefin based macro fiber in cement matrix with jute fiber volume fraction

혼입률이 증가할수록 마이크로균열의 발생 및 성장을 친수성 천연마섬유가 시멘트 경화체와의 화학적 부착력을 통하여 폴리올레핀계 매크로섬유와 시멘트 경화체의 계면을 구속하는 능력이 증가하고 이를 통하여 마이크로균열의 발생을 제어하는 능력이 증가하기 때문이다. 또한 첫 번째 매크로균열의 발생 후 거동도 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 급격한 감소보다는 서서히 감소하며 인발하중의 증감의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발거동시 천연마섬유가 섬유의 가교, 인발, 분리 및 판단을 통하여 시멘트 경화체와 매크로섬유의 계면을 강하게 구속함으로써 계면에서의 마찰력을 증가시켜 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발을 제어하기 때문이다. 플라이애시를 30% 치환한 배합과 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 배합을 비교해보면 최고 인발하중 및 미끄러짐의 크기는 고로슬래그 미분말을 치환한 배합이 상대적으로 우수하게 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말의 분말도가 플라이애시 보다 커 폴리올레핀계 매크로섬유와 시멘트 경화체와의 계면을 상대적으로 강화시켰기 때문이다.

3.3.2 인발하중 및 부착강도

천연마섬유 혼입률에 따른 인발하중 시험결과는 Fig. 8과 같다. 플라이애시를 30% 치환한 배합의 인발하중은 천연마섬유 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가하면서 인발하중은 각각 20.25, 24.67 및 32.20N을 나타내었고, 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 경우 천연마섬유의 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 각각 28.75, 33.00 및 38.20N을 나타내어 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 치환

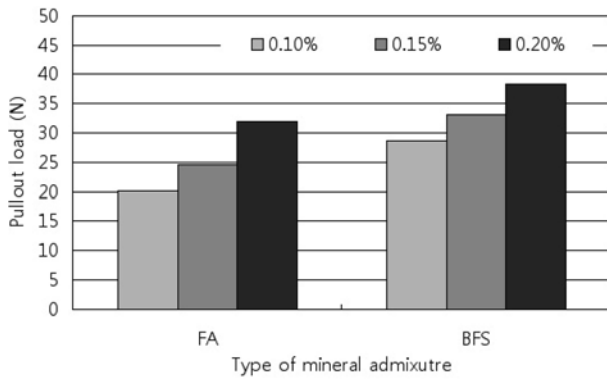


Fig. 8 Pullout load of polyolefin based macro fiber in cement matrix with jute fiber volume fraction

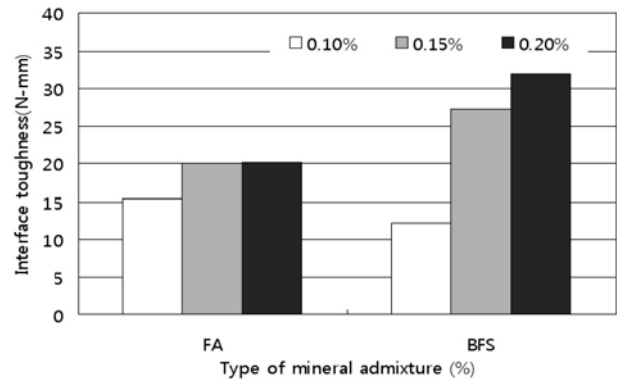


Fig. 10 Interface toughness of polyolefin based macro fiber in cement matrix with jute fiber volume fraction

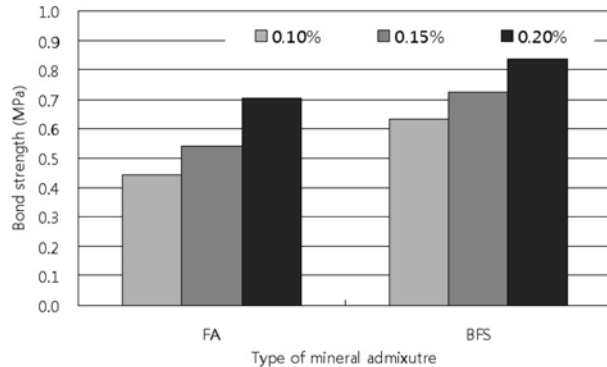


Fig. 9 Bond strength of polyolefin based macro fiber in cement matrix with jute fiber volume fraction

율이 증가할수록 인발하중도 증가하는 경향을 보여주었다.

천연마섬유 혼입률에 따른 부착강도 시험결과는 Fig. 9와 같다. 플라이애시를 30% 치환한 배합의 부착강도 시험결과 천연마섬유 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가하면서 부착강도를 각각 0.44, 0.54 및 0.70 MPa를 나타냈다. 천연마섬유 혼입률 0.10%의 부착강도 시험결과와 비교하여 혼입률이 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 각각 21.81, 및 58.02% 증가를 나타냈다. 고로슬래그 미분말을 치환한 배합의 부착강도는 천연마섬유의 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%로 증가함에 따라 부착강도는 0.63, 0.72 및 0.84 MPa를 나타냈다. 천연마섬유 혼입률 0.10%의 부착강도와 비교하여 부착강도의 증가율은 0.15 및 0.20%에서 각각 14.78 및 32.87를 나타냈다.

상기와 같은 시험결과는 천연마섬유가 친수성섬유로서 하중재하시 시멘트 경화체와의 강한 부착력을 통하여 폴리올레핀계 매크로섬유를 구속하고, 매크로섬유와 시멘트 경화체의 계면에서 발생하는 마이크로 균열을 억제하기 때문이다. 또한 플라이애시를 적용한 배합과 고로슬래그 미분말을 적용한 배합을 비교해보면 인발하중은 고로슬래그 미분말을 치환한 배합이 우수하게 나타났는데 이는 고로슬래그 미분말의 분말도가 플라이애시의 분말도보다 크기 때문에 폴리올레핀계 매크로섬유와의 화학적 부착력이 크고, 이를 통하여 시멘트 경화체와 폴리올레핀계 매크로섬유의 계면을 강화시키는 효과가 플라이애시보다 상대적으로 크기 때문이다. 또한 천연마섬유와도 화학적 부착력이 플라이애시보다 크기 때문에 폴리올레핀계 매크로섬유와 시멘트 경화체의 계면 강화에 효과가 크다.

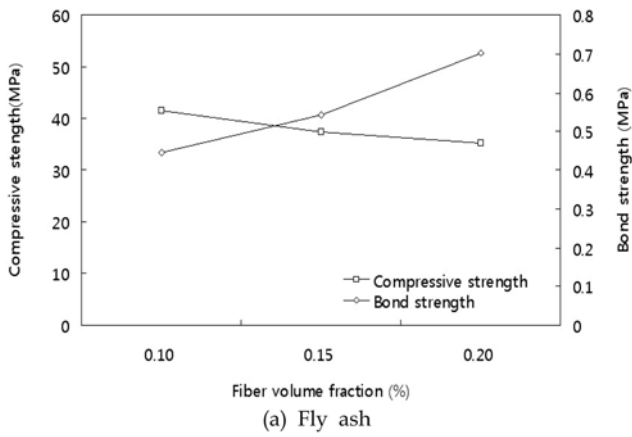
3.3.3 계면인성

천연마섬유 혼입률에 따른 계면인성 시험결과는 Fig. 10과 같다. 플라이애시를 30% 치환한 배합의 계면인성은 섬유의 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%일 때 각각 15.43, 19.98 및 20.19 N-mm를 나타내었다. 고로슬래그 미분말을 30% 치환한 배합에서는 섬유의 혼입률이 0.10, 0.15 및 0.20%일 때 각각 12.20, 27.23 및 31.93 N-mm를 나타냈다. 계면인성은 첫 번째 매크로균열 발생 후 거동에 크게 영향을 받는데, 플라이애시를 치환한 배합 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합 모두 섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발 거동시 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 섬유의 가교, 분리, 뿔힘 및 판단 등의 작용을 통하여 시멘트 경화체와 매크로섬유의 계면을 구속하는 섬유의 수가 증가하기 때문이다. 또한 고로슬래그 미분말은 플라이애시 보다 분말도가 크기 때문에 계면강화에 효과가 있어 마찰력 증대로 인한 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발거동을 억제하는 효과가 우수하여 계면인성이 상대적으로 플라이애시 배합보다 우수하였다.

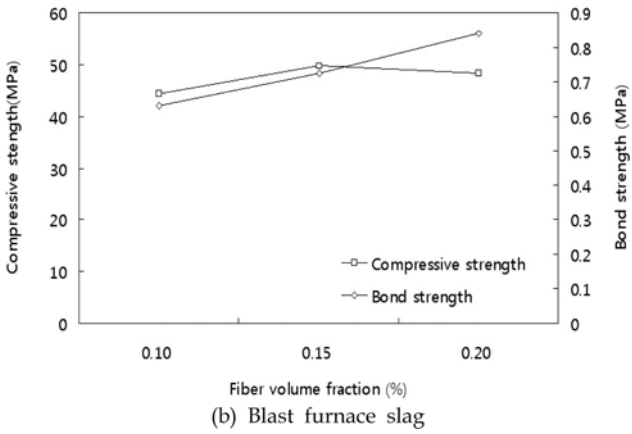
3.3.4 강도와 부착특성과의 관계

천연마섬유 혼입률에 따른 압축강도와 부착강도와의 관계는 Fig. 11과 같으며 휨강도와 부착강도와의 관계는 Fig. 12와 같다. 분석결과 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합 모두 압축강도 및 휨강도는 부착강도와 약간 다른 경향을 나타내고 있다. 압축강도 및 휨강도는 플라이애시를 치환한 배합의 경우 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 약간씩 감소하나 부착강도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 고로슬래그 미분말을 치환한 경우 압축강도 및 휨강도는 0.15%에서는 증가하다가 0.20%에서는 약간 감소하는 경향을 보여주는데 반하여 부착강도는 증가하고 있다.

천연마섬유의 혼입률에 따른 강도특성과 계면인성과의 관계는 Fig. 13 및 14와 같다. 분석결과 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합 모두 압축강도 및 휨강도와 관계없이 섬유의 혼입률이 증가할수록 계면인성이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 압축강도와 휨강도는 플라이애시 배합의 경우 약간씩 감소하였고, 고로슬래그 미분말 배합에서는 0.15%에서는 약간 증가하나 0.20%에서는 약간 감소하거나 거의 동일한 강도가 나타났다. 이와 같은 결과는 폴리올레핀계 합성섬유의 혼입에 따른 하이브리드섬유의 분

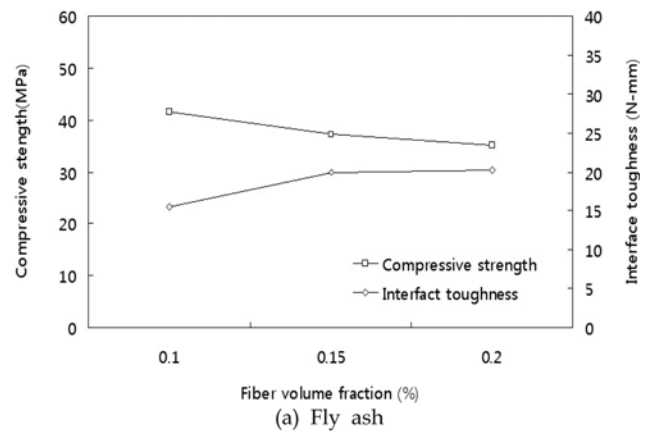


(a) Fly ash

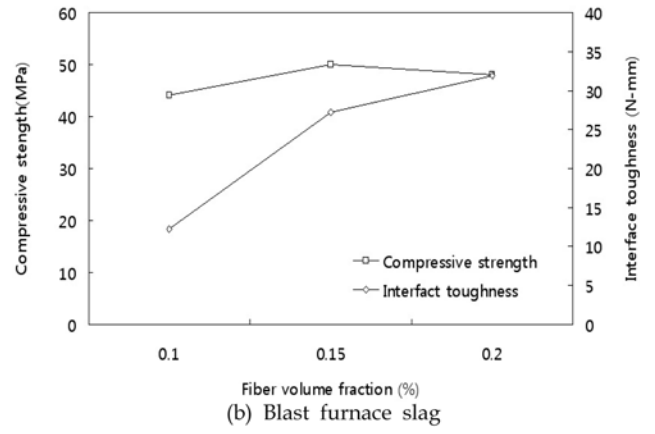


(b) Blast furnace slag

Fig. 11 Relationship between compressive strength and bond strength of polyolefin based macro fiber in cement matrix

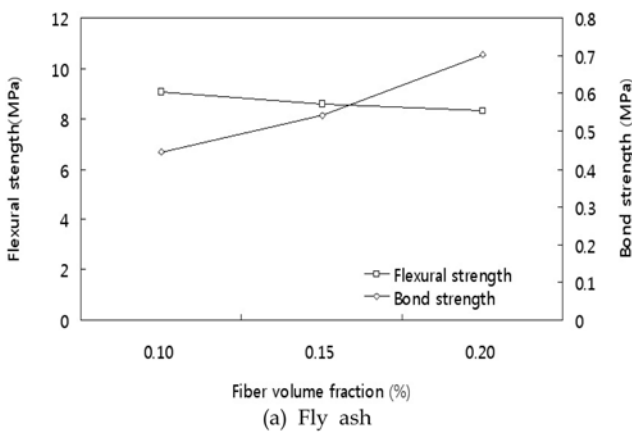


(a) Fly ash

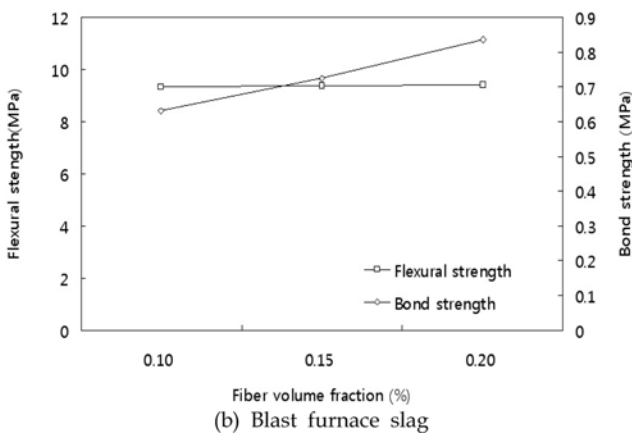


(b) Blast furnace slag

Fig. 13 Relationship between compressive strength and interface toughness of polyolefin based macro fiber in cement matrix

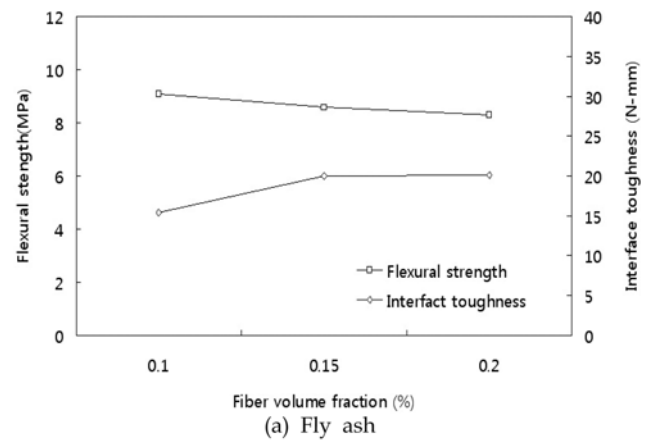


(a) Fly ash

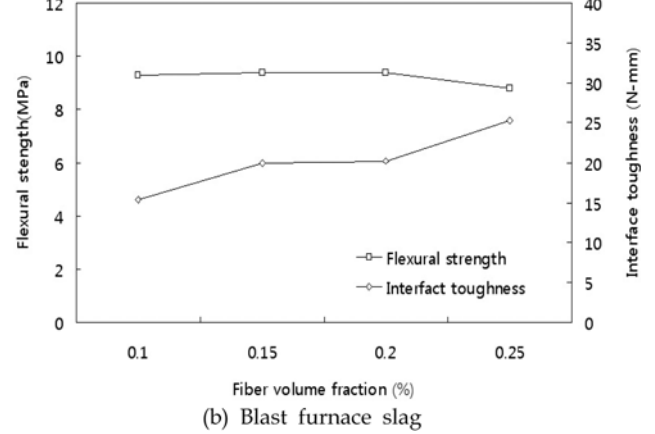


(b) Blast furnace slag

Fig. 12 Relationship between flexural strength and bond strength of polyolefin based macro fiber in cement matrix



(a) Fly ash



(b) Blast furnace slag

Fig. 14 Relationship between flexural strength and interface toughness of polyolefin based macro fiber in cement matrix

산효과 때문에 나타난 결과이다. 압축강도 및 휨강도 공시체의 경우 배합시 하이브리드섬유를 구성하기 위하여 폴리올레핀계 매크로섬유를 0.45%를 혼입시켰다. 따라서 배합시 천연마섬유의 혼입률과 더불어 폴리올레핀계 매크로섬유가 추가적으로 혼입되어 있는 배합이다. 그러나 이에 반해 부착시험 공시체는 폴리올레핀계 매크로섬유를 하나 배열함으로써 배합시 폴리올레핀계 매크로섬유 0.45%는 혼입되어 있지 않다. 따라서 부착시험 공시체에는 폴리올레핀계 매크로섬유의 혼입에 따른 섬유의 분산성의 감소가 발생하지 않는다. 또한 공시체 제작 시에도 폴리올레핀계 매크로섬유가 0.45% 혼입된 압축강도 및 휨강도 공시체에 비하여 유동성 감소가 적어 다짐 작업도 보다 효과적이었다. 따라서 친수성 천연마섬유와 시멘트 경화체와의 부착력 강화를 통하여 폴리올레핀계 매크로섬유와 시멘트 경화체의 계면을 구속함으로써 마이크로균열의 제어를 통하여 부착강도를 증가시킬 수 있었다. 또한 섬유의 혼입률이 증가하면 계면인성에 가장 큰 영향을 미치는 첫 번째 매크로균열 발생 후 거동에 영향을 미치는 섬유의 효과를 증가시키게 된다. 따라서 천연마섬유의 혼입률의 증가는 매크로균열의 발생 후 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발거동 시 섬유의 가교, 분리, 뿔뿔 및 파단 등의 작용을 하는 섬유의 수가 증가되어 시멘트 경화체와 폴리올레핀계 매크로섬유의 계면을 구속력을 증가시켜 인발을 제어함으로써 계면인성이 증가하였다. 상기와 같은 결과로

볼 때 폴리올레핀계 매크로섬유와 천연마섬유를 혼합한 하이브리드섬유의 성능은 폴리올레핀계 매크로섬유의 혼입률에도 영향을 받는다. 폴리올레핀계 매크로섬유의 혼입은 하이브리드섬유의 유동성과 분산성을 감소시켜 시멘트 경화체의 영향을 미칠 수 있으므로 적절한 혼입량을 적용하는 것이 필요하다. 또한 섬유의 분산성이 역학적 성능 및 부착성능에 영향을 미치므로 유동성을 향상시킬 수 있는 혼화제료를 적용하여 최적의 배합을 선정하는 연구가 필요하다.

3.4 미세구조분석

본 연구에서는 부착시험 후 섬유 표면을 관찰하여 섬유와 매트릭스의 마찰력에 따른 굽힘 현상을 관찰하였다. Fig. 15 및 16은 천연마섬유 혼입률에 따른 30% 플라이애시 및 고로슬래그 미분말을 치환한 배합의 부착시험 후 섬유 표면의 SEM 사진을 보여준다. 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 섬유 표면의 굽힘 현상은 증가하고 부분적으로 섬유의 찢개짐 현상도 발생하고 있다. 이와 같은 결과는 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 시멘트 경화체와 폴리올레핀계 매크로섬유의 마찰력이 증가하여 부착성능을 향상시킨다는 것을 보여주는 결과이다. 또한 상대적으로 고로슬래그 미분말을 적용한 배합의 굽힘현상이 큰 것으로 관찰되어 마찰력이 크게 작용했다는 것을 알 수 있으며, 이는 분말도에 의한 화학적 부착력이 증가하였기 때문이라는 것을 알 수 있다.

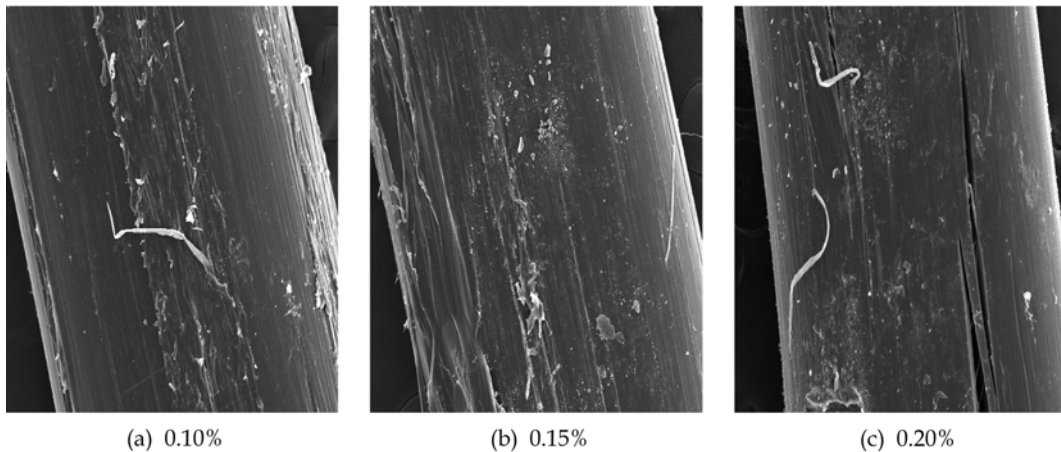


Fig. 15 Microstructure analysis of polyolefin based macro fiber surface in fly ash cement matrix with jute fiber volume fraction ($\times 100$)

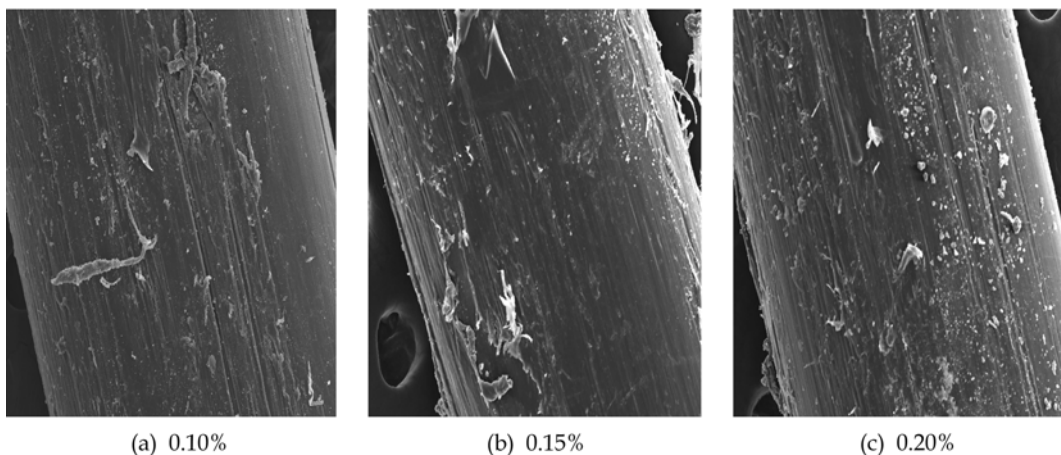


Fig. 16 Microstructure analysis of polyolefin based macro fiber surface in blast furnace slag cement matrix with jute fiber volume fraction ($\times 100$)

4. 요약 및 결론

본 연구는 구조용 폴리올레핀계 매크로섬유와 비구조용 마이크로 천연마섬유를 혼합한 하이브리드섬유보강 경화체의 성능을 향상시키기 위한 기초연구로 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발거동에 미치는 천연마섬유의 효과를 평가하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 부착강도는 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하였다. 이와 같은 결과는 친수성의 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 시멘트 경화체와 강한 부착력을 통하여 폴리올레핀계 매크로섬유와 시멘트 경화체의 계면을 강화시킬 수 있는 섬유의 수가 증가하기 때문이다. 따라서 천연마섬유의 혼입률이 증가되면 시멘트 경화체와 폴리올레핀계 매크로섬유의 계면에서 발생하는 미세균열 제어에 효과적이다. 그 효과는 분말도가 상대적으로 큰 고로슬래그 미분말이 플라이애시보다 크게 나타났다.
2. 계면인성은 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하였다. 이와 같은 결과는 친수성 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 폴리올레핀계 매크로섬유의 인발거동시 섬유의 가교, 분리, 뿔힘 및 파단 작용 등을 하는 천연마섬유의 섬유가 증가하기 때문이다. 따라서 폴리올레핀계 매크로섬유의 구속력이 강화되어 시멘트 경화체의 계면에서 마찰력을 증대시킨다. 그 효과는 분말도가 상대적으로 큰 고로슬래그 미분말이 플라이애시보다 크게 나타났다.
3. 섬유의 혼입률 증가에 따른 강도특성과 부착강도 및 계면인성 특성을 비교해 보면 압축강도 및 휨강도 모두 부착강도 및 계면인성 결과와 약간 다른 결과를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 섬유의 분산성에 대한 문제로 압축강도 및 휨강도 시험공시체에는 천연마섬유와 더불어 폴리올레핀계 매크로섬유가 0.45% 혼입되어 있어 상대적으로 폴리올레핀계 매크로섬유가 포함되어 있지 않은 부착시험 배합보다 분산성 감소 및 공시체 제작시 다짐이 어려워 공극의 발생으로 인한 강도에 영향을 미쳤기 때문이다. 이와 같은 효과는 분말도가 상대적으로 작은 플라이애시 배합에서 고로슬래그 미분말 배합보다 크게 나타났다.
4. 인발시험 후 섬유의 표면관찰결과 천연마섬유의 혼입률이 증가할수록 시멘트 경화체와의 마찰로 인한 굽힘 현상이 증가하는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과로 볼 때 천연마섬유의 혼입은 폴리올레핀계 매크로섬유의 부착성을 향상시킨다는 것을 확인할 수 있다. 또한 그 효과는 분말도가 커 계면강화 효과가 큰 고로슬래그 미분말이 플라이애시 보다 우수하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

원종필, 김명균, 박찬기(2005a) 하이브리드 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 소성수축균열제어 특성, **대한토목학회논문집**, 대

한토목학회, 제25권 제4A호, pp. 621-626.
원종필, 황금식, 박찬기(2005b) 섬유 혼입률 및 길이 변화에 따른 친수성 PVA 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능 및 초기 수축 균열 특성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권 제1A호, pp. 133-141.
원종필, 박찬기, 김윤정, 이시원(2007) 시멘트 경화체 내에서 폴리올레핀계 매크로섬유의 친수성처리에 따른 인발거동, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3A호, pp. 453-460.
원종필, 장창일, 이상우, 김홍열, 김완영(2008) 하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트 기둥부재의 내화성능, **콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, Vol. 20, No. 6, pp. 827-832.
원종필, 박찬기, 김윤정, 박경훈(2007) 고강도 시멘트 경화체에서 단일 강섬유 및 합성섬유의 부착특성 평가, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제4A호, pp. 609-616.
원종필, 박찬기(2006) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성 및 적용, **콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, Vol. 18, No. 1, pp. 22-27.
이상균, 송영철, 원종필(2008a) Blended 섬유를 사용한 양수 댐 표면 치수벽 콘크리트의 균열제어, **구조물진단학회논문집**, 한국구조물진단학회, Vol. 12, No. 6, pp. 10-16.
이상균, 송영철, 원종필(2008b) Blended 섬유를 사용한 양수 댐 표면 치수벽 콘크리트의 내구성 향상, **구조물진단학회논문집**, 한국구조물진단학회, Vol. 12, No. 6, pp. 3-9.
Bentur, A. and Mindess, S. (1992) Fibre reinforced cementitious composites, Elsevier Applied Science, London, pp. 1-132.
Banthia, N., Gupta, P., Yan, C., and Morgan, D.R. (1999) How tough is fiber reinforced shotcrete? PART. 1. Beam tests, *Concrete International*, Vol. 21, No. 6, pp. 59-62.
Banthia, N., Gupta, P., Yan, C., and Morgan, D.R. (1999) How tough is fiber reinforced shotcrete? PART. 2. Plate tests, *Concrete International*, Vol. 21, No. 6, pp. 62-69.
Banthia N. and Nandakumar N. (2003) Crack growth resistance hybrid fiber reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, No. 1, pp. 3-9.
Chan, Y.W. and Chu, S.H. (2004) Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research.*, Vol. 34, No. 7, pp. 1167-1172.
Chen, W.S., Luo, X., and Qian, H. (2001) The effect of hybrid fibers and agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 595-601.
Komlos, K., Babai, B., and Nurnbergerova, T. (1995) Hybrid fibre-reinforced concrete under repeated loading, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 156, No. 1-2, pp. 195-200.
Khayat, K.H., Tagnit-Hamou, A., Tamboue, T., and Petrov, N. (1996) Refection du quai No. 45du port de Montreal, Final report, Sherbrooke, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, pp. 1-100.
Lawer, J.S., Zampini, D. and Shah, S.P. (2002) Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load, *ACI Materials Journal*, Vol. 99, No. 4, pp. 379-385.
Qian, C.X. and Stroeven, P. (2000) Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 5, pp. 343-351.
Qian, C.X. and Stroeven, P. (2000) Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 63-69.
Semsiz Yazici and Gözde Inan, Volkan T. (2007) Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 6, pp. 1250-1253.
Singha, S., Shuklaa, A., and Brown, R. (2004) Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix, *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, No. 10, pp. 1919-1925.
Won, J.P., Lim, D.H., Park, C.G., and Park, H.G. (2006) Bond

behavior and flexural performance of structural synthetic fibre reinforced concrete, Magazine of concrete research, Vol. 28, No. 6, pp. 401-410.

Xu, G., SMagnani, S., and Hannant, D.J. (1998) Tensile behavior of

fiber-cement hybrid composites containing polyvinyl alcohol fiber yarns, ACI Materials Journal. Vol. 95, No. 6, pp. 667-674.

(접수일: 2011.1.18/심사일: 2011.3.16/심사완료일: 2011.4.6)