

고인성 섬유보강 복합체 내에서 폴리프로필렌 섬유의 계면 부착성능

Interfacial Properties of Polypropylene Fiber in High Performance Fiber Reinforced Cement Composites

한 병 찬* 전 에스더** 박 완 신***
Han, Byung-Chan Jeon, Esther Park, Wan-Shin
이 영 석**** 福山洋***** 윤 현 도*****
Lee, Young-Seak Hiroshi, Fukuyama Yun, Hyun-Do

ABSTRACT

The polypropylene(PP) fiber is poised as a low cost alternative for reinforcement in structural applications in comparison with other high performance fibers, such as the polyvinyl-alcohol(PVA), polyethylene, carbon and aramid fiber. The mechanical properties of the composite are strongly determined by the interfacial behavior of fiber and cementitious matrix. The crack bridging mechanism contribute to composite toughness from activation of the fiber-matrix interface where energy is dissipated through debonding of the interface and fiber pullout. In this study, therefore, the pullout behavior of PP fibers is investigated. Experimental work includes the investigation of the interfacial properties, and the composite property. The quantification of interfacial properties, the frictional bond is achieved through single fiber pullout test. A study on the effect of inclination angle on fiber pullout behavior is also conducted.

1. 서론

폴리프로필렌섬유(polypropylene fiber, 이하 PP섬유)는 시멘트복합체의 소성 및 건조수축균열을 억제하고 안정화하여 인성, 내충격성 및 인장강도를 증진시킴으로써 역학적 성질을 개선하여 내구성을 증대시키는 것으로 알려져 있어 그 사용이 증가하고 있다. 또한, 최근에는 섬유를 시멘트 체적비의 2~3%를 투입하여 변형경화 특성 및 큰 인장 변형능력을 갖는 새로운 고성능 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 HPFRCCs)에 관한 연구가 진행되고 있다. 시멘트 복합체 내에서 인장응력은 섬유와 섬유를 둘러싸고 있는 매트릭스 사이의 계면에 전단응력으로 정의할 수 있는 계면 부착력을 통해서 전달된다. 그러므로 섬유-매트릭스사이의 부착력은 HPFRCCs 내에서 합성작용의 매우 중요한 요소가 되며 시멘트 복합체내 단일섬유의 매입인발(Pull-Out)시험을 통하여 이를 정량화 할 수 있다. 그러므로 본 논문은 고인성 시멘트 복합체를 제조하기 위하여 PP섬유의 활용 가능성을 평가하고자 하는 연구의 일환으로 단일 PP섬유 매입 인발시험을 수행하여, PP섬유와 매트릭스 사이의 부착응력-미끄러짐 거동 및 점착/마찰 특성을 평가 하였다.

2. 폴리프로필렌섬유의 물리 화학적 특성

PP섬유는 프로필렌 중합으로 만들어지는 열가소성 수지로서 기계적강도, 내열성, 내약품성, 내수성, 전기절연성 등 각종 물성 및 성형가공성이 우수하다. 또한 낮은 비중으로 인하여 동일 수준에서 상대적으로 많은 양의 섬유가 시멘트 복합체에 혼입되어 사용될 수 있다. 인장강도 또한 상당히 양호하며 강섬유의 단점인 부식에 대해 상대적으로 우수하다. 그러나 PP섬유의 표면특성이 소수성을 나타내기 때문에 경화초기에 수경성인 시멘트 매트릭스와의 부착력이 낮고, 탄성계수값이 작은 단점을 가지고

* 정희원, 충남대 건축공학과 강사, 공학박사
** 정희원, 충남대 대학원 석사과정
*** 정희원, 충남대 대학원 박사과정
**** 정희원, 순천대학교 화학공학과 교수, 공학박사
***** 정희원, 일본건축연구소 건축생산그룹 특별연구원, 공학박사
***** 정희원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사
본 연구는 건설교통부 2003년 건설핵심기술연구개발사업 연구비 지원(과제번호 03산학연A10-01)에 의한 연구의 일부임

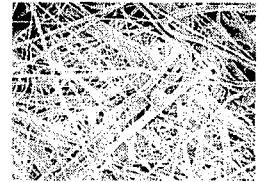
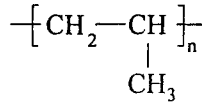
있다¹⁾. 그러나 이러한 소수성 때문에 물을 흡수하지 않으며, 시멘트 매트릭스 내의 화학적 반응 역시 PP 섬유가 산과 염기에 우수한 저항성을 가지고 있어 안정적이라 할 수 있다.

3. 폴리프로필렌섬유의 매입인발(Pull-Out)시험 계획 및 방법

PP섬유의 부착 메커니즘에 관한 매입인발실험을 표 2 및 그림 2와 같이 각 변수별로 계획하였다. 실험 변수는 시멘트 복합체의 수준(결합체 수준, W/B=0.3, 0.4, 0.5), 섬유의 매입길이(L_e =섬유 길이의 0.25, 0.5), 그리고 배향각(0, 30, 60°)로 하였으며 각 변수별로 5 개씩을 제작하여 시험체 제작과정 및 실험 중 발생하는 오차를 제거하였다. 실험에 사용된 재료는 표 3에 나타난 바와 같이 시멘트는 3종 조강포틀랜드시멘트, 잔골재는 밀도 2.64g/cm³와 입경 0.1~0.3mm의 규사를 사용하였으며, 혼화재료로서는 분말도 3,230cm²/g의 보령산 플라이애시와 폴리카르본산계의 고성능 감수제를 사용하였다. 또한 배합수준별 검토를 위하여 잔골재 용적비 및 혼화제의 종류(플라이 애쉬, 고로슬래그)를 변수로 설정하였다. PP섬유(그림 4)의 기계적 성능은 재료시험을 통하여 획득하였으며 각각 표 5 및 그림 3과 같다. 비빔은 옴니믹서를 사용하여 시멘트, 플라이애시 및 규사를 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하고 물과 고성능감수제를 첨가하여 60초간 비빔을 실시하였다. 그림 5는 시험체 타설을 위한 거푸집 및 양생 설비를 보여주고 있다. 비빔이 완료된 매트릭스는 거푸집에 타설하여 40±5°C에서 14일간 수중양생 하였다. 또한 매트릭스는 50×50×50mm의 큐빅 몰드에 타설하여 기계적 성능을 평가하였다. 큐빅 몰드에 의한 압축강도는 W/B(0.3, 0.4, 0.5)에 대하여 각각 87, 84, 44MPa로 나타났다.

표 1. PP 섬유의 물리 화학적 성질

PP 섬유 물리 화학적 성질	비 중	밀도 (g/cm ³)	초기탄성률 (10 ³ kg/m ²)	인장강도 (kg/cm ²)	과괴변형률 (%)
	0.90~0.92	0.90	3.3~18	2600~7100	5~21
	발화점	용융점	흡수율	전도성	분산성
	538°C	163°C	0(소수성)	낮음	양호
				양호	양호



(a) PP섬유의 화학적 결합 (b) PP섬유의 형태
그림 1. PP섬유의 화학적 결합 및 형태

표 2. 실험변수

PP 섬유	시멘트 복합체 수준	매입길이 (L_e)(mm)	배향각 (deg.)	수준별 시험체 수
길이=15mm 직경=40µm 제조사=SS산업	결합체=3수준 W/B=0.3,0.4,0.5	7.5mm 15mm	0, 30, 60°	5ea

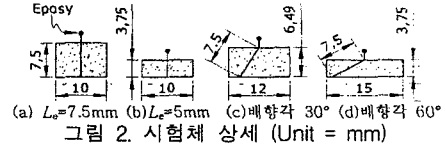


표 3. 사용재료의 물리적 성질

Cement	조강 시멘트, Density : 3.17g/cm ³ , Fineness : 3,230cm ² /g
Sand	Silica sand, Density : 2.64g/cm ³ , Grade : 0.1~0.3mm
Fly-ash	Density : 2.13g/cm ³ , Fineness : 2,976cm ² /g
SP	Polycarboxylate

Note 1) S/M : Sand volume fraction to mortar

표 4. 시멘트 복합체의 배합수준

Mix. No.	W/B (wt.)	S/M ¹⁾ (Vol.)	FA/B (wt.)	BFS/B (wt.)	Air	Unit weight (kg/m ³)					
						Bin.	C	W	FA	BFS	S
#1	0.3	0.20	0.20	0	50	1100	880	330	220	0	627
#2	0.3	0.25	0.20	0	50	1173	938	352	235	0	502
#3	0.3	0.30	0.20	0	50	935	935	280	187	0	752
#4	0.3	0.20	0.00	0.45	50	1208	664	362	0	544	502
#5	0.4	0.25	0.20	0.00	50	953	762	381	191	0	627
#6	0.5	0.25	0.20	0.00	50	840	672	420	168	0	627

표 5. PP섬유의 재료시험 결과

	Specimen TYPE-I	Specimen TYPE-II
Diameter(µm)	40	40
Specimen Length	7.5mm	7.5mm
Elastic Modulus(MPa)	3.65e3	3.74e3
Tensile Strength(MPa)	292	265
Density(g/cm ³)	0.90	0.90

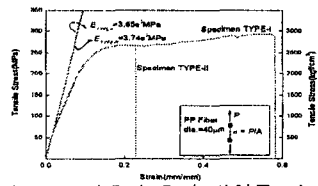


그림 3. PP섬유의 응력-변형률 관계

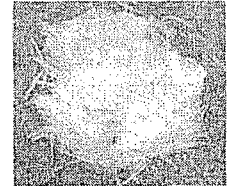
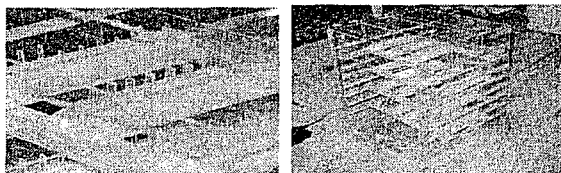


그림 4. PP섬유 형상



(a) 시험체 제작용 거푸집 (b) 양생기구
그림 5. 매입 인발 시험용 거푸집 및 양생기구



(a) Instron Extensometer (b) 그림(grip)상세
그림 6. 가력 장치 및 그림(grip) 상세

표 6. 실험결과 및 분석

No.	Mix.No	Embedded Length, L_e , mm	Incline Angle($^\circ$)	Initial Stiffness	P_0 (N)	Peak Pull-out Load (N)	$\delta - \delta_0$ (mm)	τ_0^1	β^2	Pullout Work ³⁾ (N-mm)
1	#1	7.5	0	2.398	0.297	0.424	0.531	0.315	0.040	0.050
2		5.0	0	1.552	0.248	0.354	1.412	0.394	0.028	0.165
3	#2	7.5	0	1.875	0.289	0.413	0.303	0.307	0.065	0.045
4		5.0	0	0.293	0.251	0.358	0.763	0.399	0.036	0.086
5	#3	7.5	0	2.443	0.300	0.429	0.421	0.318	0.049	0.050
6		5.0	0	1.496	0.239	0.341	1.594	0.380	0.028	0.060
7	#4	7.5	0	2.159	0.303	0.433	3.292	0.321	0.019	0.575
8		5.0	0	1.332	0.244	0.348	0.625	0.388	0.040	0.066
9	#5	7.5	0	2.252	0.284	0.405	1.308	0.301	0.022	0.091
10		7.5	30	2.859	0.289	0.412	2.957	0.306	0.18	0.081
11	#6	7.5	60	2.582	0.254	0.362	0.419	0.269	0.049	0.070
12		5.0	0	0.777	0.214	0.306	0.608	0.341	0.041	0.055
13	#6	3.75	0	0.870	0.160	0.228	0.458	0.339	0.055	0.041
14		7.5	0	2.146	0.262	0.374	1.440	0.278	0.021	0.144
15	#6	7.5	30	2.382	0.282	0.403	3.509	0.299	0.019	0.115
16		7.5	60	1.825	0.250	0.357	4.448	0.265	0.023	0.199
17	#6	5.0	0	0.711	0.208	0.298	0.902	0.312	0.033	0.071
18		3.75	0	1.096	0.139	0.199	0.424	0.296	0.058	0.038

1) Eq. (1), 2) Eq. (2), 3) 최대 인발하중 P_{max} 이후 $0.8P_{max}$ 까지의 미끄러짐에 대한 일량

매입 인발실험을 위한 실험장치를 그림 6에 나타냈다. 시험체에 매입된 PP섬유의 위 끝부분은 가력장치의 로드셀에 부착된 그립(grip)에 의해 매달리도록 하였으며 매트릭스는 ASTM의 실험규준을 만족하는 그립에 의해 잡아당겨지도록 하였다. 매입인발 하중과 이에 상응하는 미끄러짐은 자료획득장치를 통해 측정되도록 하였다. 하중가력장치는 30N용량의 로드셀을 갖춘 30kN 용량의 INSTRON EXTENSO METER를 이용하였으며, 가력속도는 1.0mm/min의 비율로 변위제어(displacement control)하였다.

4. 매입인발 실험결과 및 분석

4.1 매입 인발-미끄러짐 거동특성

PP섬유의 매입인발 실험결과를 초기강성, 최대 인발하중, 최대인발하중시의 변위, 인발-미끄러짐 거동에 대한 에너지 흡수능력, 부착강도로 분석하여 표 6에 나타냈다. 단일 섬유와 복합체 내 매입인발시 거동은 그림 7과 같이 섬유와 계면의 화학적 부착, 추가적인 미끄러짐-경화 특성을 포함하는 3가지 단계로 구분하여 살펴볼 수 있다. 초기 마찰에 의한 부착력 τ_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Li, 1992).

$$\tau_0 = P_0 / \pi d_f L_e \quad (1)$$

그림 7과 같이 계면의 전단응력이 미끄러짐에 의존하는 경우(Stage 2~Stage 4)에는 초기 마찰 부착력 τ_0 로써 특성을 정의하기는 불충분하다(Lin et al, 1999). 이러한 경우에 τ_0 는 S의 함수로 표현할 수 있다. 여기서는 단순한 선형 관계로써 식 3과 같이 나타내었다. 식으로부터 섬유 및 매트릭스 특성에 관한 미끄러짐 경화 또는 연화 구간은 계수 β 의 정부호 나타낼 수 있다.

$$\tau = \tau_0 (1 + \beta S / d_f) \quad (2)$$

미끄러짐-경화 변수 β 는 식 (3)과 같이 최대 인발하중에 대한 매입인발 하중의 증가에 의해 표현될 수 있다. 미끄러짐 정도 S는 $(\delta - \delta_0)$ 로 대체하면,

$$P = \pi \tau_0 d_f (L_e - (\delta - \delta_0)) (1 + \beta (\delta - \delta_0) / d_f) \quad (3)$$

가 된다. 이후의 거동(Stage 4 이후) 거동은 섬유와 시멘트 매트릭스사이의 부착력을 상실하면서 연화구간으로 나타나게 된다. 시험체의 전반적인 거동 특성을 살펴보면 초기 매입 인발하중의 증가는 거의 선형으로 상승하였으며, 이러한 부착거동 특성은 마찰-점착 부착(frictional - adhesive bond) 거동으로 판단되었다. 이후 PP섬유와 매트릭스 계면의 점착력을 상실하면서 비선형 거동 특성을 나타냈다. 하중저하 이후의 거동은 크게 두 가지 경우로 나타났는데, 지속적인 내력저하 이후 대 변형까지 안정적인 인발 거동을 보이는 경우와, 충분한 기계적 부착거동 후 섬유가 파단되는 거동 특성을 보였다.

4.2 각 변수별 효과

시멘트 매트릭스 수준별 단일 PP섬유의 매입인발시 부착특성을 그림 8(a) 및 (b)에 나타냈다. 그림으로부터 S/M에 따른 매입 인발거동을 살펴보면 S/M=2.0, $L_e=7.5$ mm인 시험체(NO.1)의 경우 최대인발하중 이후 안정된 거동을 보이고 있는 것에 비하여 동일조건에서 S/M=0.25, 0.3인 시험체(No.3, 5)의 경우는 최대인발 하중이후 변형 연화(softening)특성을 보였다. 그러나 초기 강성(1.875~2.443) 및 부착강도(0.307~0.318N/mm²)에서는 유의한 경향을 보이지 않았다. 이러한 특성은 동일변수에서 매입길이가 5mm인 시험체(No. 2, 4, 6)에서도 나타났다. 물결합재비(W/B)에 따른 거동특성을 비교해 보면

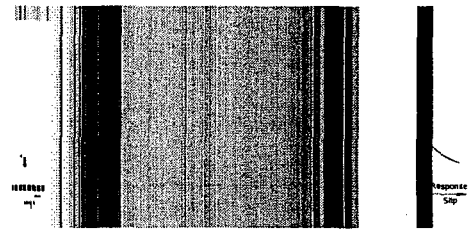


그림 7. PP 섬유 매입인발 거동 특성

$L_e=7.5\text{mm}$, 배향각 0° 이고 W/B가 각각 0.3, 0.4, 0.5인 시험체(No. 1, 9, 14)의 경우는 몰시멘트비가 작아 질수록 최대 매입인발하중 및 부착강도가 커짐을 알 수 있었으며 이는 시멘트 매트릭스의 조직이 치밀해 지면서 시멘트 계면과 섬유와의 계면 점착-마찰이 커졌기 때문으로 판단되었다. 이러한 경향은 $L_e=5\text{mm}$ 인 시험체(No.2, 12, 17)에서도 유사한 경향을 나타냈다.

매입길이(L_e)에 따른 PP섬유의 매입인발특성을 그림 8(c), (d)에 나타냈다. 그림으로부터 W/B에 관계 없이 $L_e=7.5\text{mm}$ 인 시험체는(No.9, 14)는 최대 인발하중이후에도 안정적인 거동을 보이고 있으며 이는 충분한 매입길이에 따른 기계적 부착강도의 유지 및 섬유의 소성 인장변형에 기인한 것으로 판단되었다. 그러나 $L_e=5\text{mm}$ 인 시험체(No.12, 17) 및 3.75mm 인 시험체(No.13, 18)는 $L_e=7.5\text{mm}$ 인 시험체에 비하여 매입길이가 짧아질수록 최대 매입인발 강도가 낮게 나타났으며, 최대강도 이후에 변형 연화현상을 보이며 섬유가 인발되는 특성을 보였다. 부착강도는 W/B=0.4인 경우 $0.301\sim 0.341\text{N/mm}^2$, W/B=0.5인 경우 $0.278\sim 0.312\text{N/mm}^2$ 로써 매입길이의 영향은 없는 것으로 나타났다.

그림 8(e), (f)은 단일 PP섬유의 매입 배향각에 따른 매입인발 거동 특성을 비교해 나타낸 것이다. W/B=0.4수준인 경우 배향각에 따른 시험체(No. 9, 10, 11)를 비교해 보면 배향각이 0° 에서 30° 로 증가함에 따라 (No. 9, 10) 초기강성은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 최대 인발 하중은 각각 0.405, 0.412N으로 큰 차이를 보이고 있지 않았으며 이는 충분한 매입길이에 의해 매입 인발하중이 부착강도 상실에 따른 섬유의 뿔힘에 의해 결정되기 보다는 섬유의 인장 변형 후 파단에 의해 결정되었기 때문이다. 반면 배향각이 60° 인 경우(No 11)에는 최대 인발하중이 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 반면 W/B= 0.5인 경우(No. 14, 15, 16)에는 배향각이 30° 인 경우가 0° 인 경우보다 초기강성 및 최대 매입인발강도가 크게 나타났으며 60° 인 경우에는 W/B=0.4인 경우와 유사한 특성을 보였다.

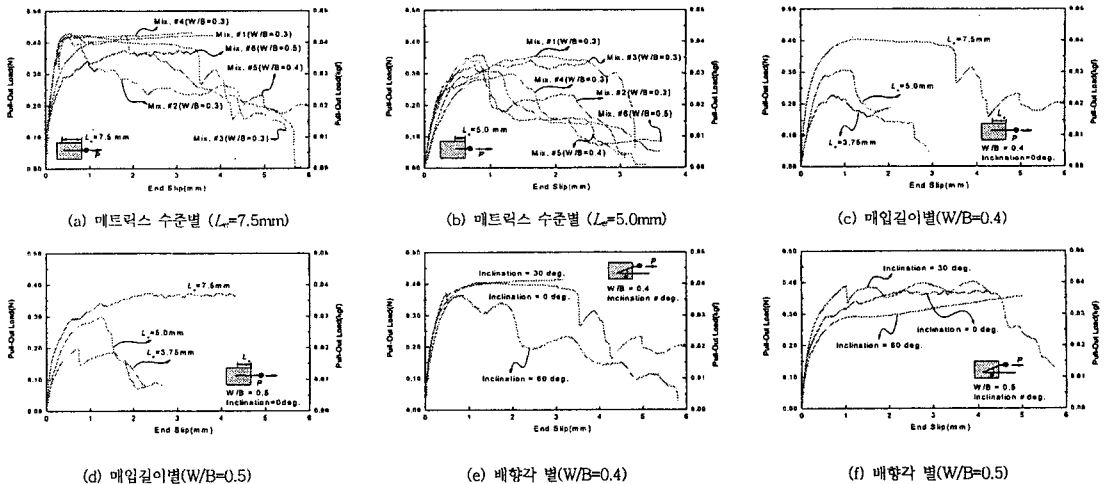


그림 8. 단일 PP 섬유 매입인발 거동

4. 결론

고인성 시멘트 복합체를 제조하기 위하여 단일 PP섬유의 매입 인발시험을 수행하여, PP 섬유와 매트릭스 사이의 부착응력-미끄러짐 거동 및 점착/마찰 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 단일 PP섬유 매입인발하중-미끄러짐 거동은 PP섬유와 매트릭스의 부착특성 및 미끄러짐에 의해 점착력 상실에 의한 하중 감소를 보이거나 이후 인성이 큰 유사 소성변형 거동을 보였다.
- (2) 시멘트 복합체의 강도가 증가할수록, 단일섬유 매입길이가 증가할수록 매입인발 하중은 증가하는 것으로 나타났으며 인발하중의 최대값은 단일섬유의 인장파단 강도와 같음을 알 수 있었다.
- (3) 부착강도는 몰시멘트비가 작아질수록 커지며 시멘트 매트릭스의 S/M 및 매입길이에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Guirguis, B. E. and Potter. R. J., "Polypropylene Fibers in Concrete", Technical Report TR/F90. Cement and Concrete Association of Australia, 1985.
2. Chan, Y.W., Li, V.C.(1997), "Effects of Transition Zone Densification on Fiber/Cement Bond strength Improvement", J. Advanced Cement Based Materials, 5(1), pp. 8-17.