

시멘트 매트릭스 내 강섬유의 매입 인발에 관한 성능

Mechanical Properties on the Pull-Out Response of Steel Fibers Embedded in Cementitious Matrices

전 에스더* 김 선 우* 박 완 신**
Jeon, Esther Kim, Sun Woo Park, Wan Shin
한 병 찬*** 황 선 경*** 윤 현 도****
Han, Byung Chan Hwang, Sun Kyung Yun, Hyun Do

ABSTRACT

The main objective of this study is to provide a parametric evaluation of the pull-out response of steel fibers embedded in cementitious matrices. The various parameters controlling the behavior of the bond stress versus end slip relationship are analyzed; their effects on the entire pull-out load versus end slip response and the corresponding pull-out energy up to total pull-out are investigated. Also discussed are the effects of the fiber length, the water/binder ratio of the mixtures and embedded length.

1. 서 론

많은 건축물의 주요 구조재료로 사용되고 있는 콘크리트는 내구성 및 경제성과 역학 및 재료적으로 우수한 장점을 가지고 있지만, 압축강도에 비해 인장강도, 휨강도가 낮아 취성적인 파괴성향을 보인다. 이러한 결함을 해결하기 위하여 매트릭스에 짧은 섬유를 첨가하는 섬유보강 복합체를 사용하는 방안이 연구되고 있다. 섬유보강 시멘트 복합체(Fiber reinforced cementitious composite, FRCC)에 혼입되는 섬유는 시멘트 복합체의 인장강도 증진보다는 시멘트 복합체 내 발생된 균열을 폭넓게 확산함으로써 연성적인 특성을 갖도록 개선시킬 수 있다.

강섬유의 초기 연구단계에서는 민형의 강섬유를 사용하였지만 연구가 진행됨에 따라 형태가 개선된 강섬유가 개발되었다. 이러한 강섬유는 이전까지 연구되었던 민형 강섬유와는 다른 기계적 부착특성을 보인다. 본 연구에서는 시멘트 매트릭스와 섬유의 부착특성을 직접적으로 평가하기 위한 방법인 매입 인발(Pull-out test) 실험을 수행하여, 시멘트 복합체 내 혼입된 형태가 개선된 강섬유의 부착응력-미끄러짐 거동 및 점착·마찰 특성을 평가하고자 하였다.

* 정회원, 충남대 대학원 석사과정

** 정회원, 충남대 대학원 박사과정

*** 정회원, 충남대 건축공학과 강사, 공학박사

**** 정회원, 우송대학교, 건축공학과 교수, 공학박사

**** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구는 건설교통부 2003년 건설핵심기술연구개발사업 연구비지원(과제번호 03산학연A10-01)에 의한 연구의 일부임

표1. 시험체 일람표

Specimen	W/B	Embedded Length (L_e)(mm)	Inclination (deg.)
SC I 0.4-1/2	0.40	6	0
SC I 0.4-1/4		3	0
SC II 0.4-1/2		6	0
SC II 0.4-1/4		3	0
SCIII 0.4-1/2		6	0
SCIII 0.4-1/4		3	0
SCIV 0.4-1/2		6	0
SCIV 0.4-1/4		3	0
SC I 0.5-1/2	0.50	6	0
SC I 0.5-1/4		3	0
SC II 0.5-1/2		6	0
SC II 0.5-1/4		3	0
SCIII 0.5-1/2		6	0
SCIII 0.5-1/4		3	0
SCIV 0.5-1/2		6	0
SCIV 0.5-1/4		3	0

표2. 사용재료의 물리적 성질

Cement	Type III 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
Superplasticizer	Polycarboxylate

표4. SC섬유의 물리적 성질

Type	Diameter (μ m)	Length (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (Gpa)
SC I	50	32	640	350	206
SC II	70	32	457	342	206
SCIII	200	32	160	350	206
SCIV	150	32	213	340	206

표3. 배합사항

W/B (wt.)	S/M ¹⁾ (Vol.)	FA/B (wt.)	Unit weight (kg/m ³)			
			Cement	Water	Fly-ash	Sand
0.40	0.25	0.20	762	381	191	627
0.50	0.25	0.20	672	420	168	627

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

2. 실험계획 및 방법

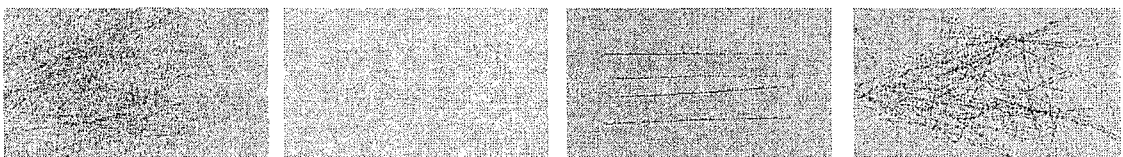
2.1 실험계획

본 연구에서는 강섬유의 매입 인발시 섬유와 매트릭스사이의 부착응력을 평가하기 위하여 복합체의 물결합재비(W/B=0.4, 0.5), 섬유의 종류(SCI, SCII, SCIII, SCIV), 섬유의 매입길이(L_e =섬유 길이의 0.25, 0.5)를 실험변수로 선정하여 실험을 수행 하였다. 실험계획은 표 1과 같으며 각 시험체는 변수별로 5개씩을 제작하여 시험체 제작과정 및 실험 중 발생하는 오차를 최소화하고자 하였다.

2.2 사용재료 및 실험방법

표 2에 나타난 바와 같이, 강섬유의 매입 인발 실험에 사용된 시멘트는 3종 조강포틀랜드시멘트를 사용하였고, 잔골재는 밀도 2.64g/cm³와 입경 0.1~0.3mm의 규사를 사용하였으며, 혼화재료로서는 분말도 3,230cm²/g의 보령산 플라이애시와 폴리카르본산계의 고성능감수제를 사용하였다. 섬유보강 복합체의 배합은 표 3과 같다. 또한 섬유의 물리적 성질과 형상은 표 4와 그림 1에 나타났다.

비빔은 옴니믹서를 사용하여 시멘트, 플라이애시 및 규사를 투입한 후 30초간 건비빔을 실시하고 물과 고성능감수제를 첨가하여 60초간 비빔을 실시하였다. 비빔이 완료된 매트릭스는 타설한 후 온도 20℃, 습도 100%의 대기에 24시간 존치한 후 탈형하여 40±5℃에서 14일간 수증양생 하였다.



(a) SCI

(b) SCII

(c) SCIII

(d) SCIV

그림 1. 강섬유의 형상

3. 실험결과 및 분석

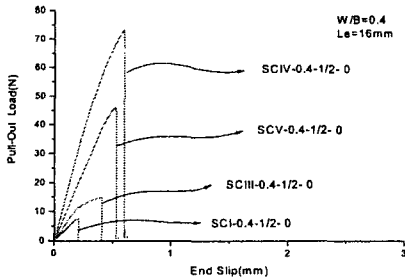
표 5에 강섬유의 매입인발 실험을 통한 초기강성, 최대 인발하중, 최대 인발하중 시 변위, 매입인발-미끄러짐 거동에 대한 에너지 흡수능력을 나타냈으며, 각 변수에 관한 영향은 다음과 같다.

3.1 섬유종류별 영향

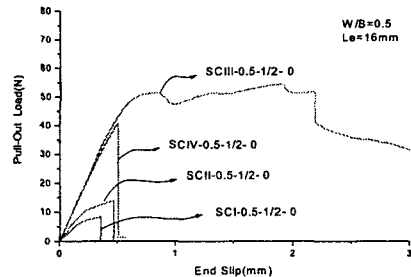
그림 2에 강섬유의 종류에 따른 매입인발-미끄러짐 관계곡선을 비교하여 나타냈다. 물결합재비가 0.4와 0.5일 경우, SCII 시험체가 SCI 시험체에 비해 초기강성 및 최대 인발 하중의 증가를 보이고 있는데, 이는 섬유의 개선된 정도가 섬유와 매트릭스 계면의 기계적 부착에 영향을 주는 것으로 판단되었다. 또한, 꼬인 강섬유의 개수에 따른 매입인발-미끄러짐 거동을 평가하기 위하여 SCII 시험체와 SCIII 시험체를 비교하였다. 동일한 직경을 가진 단일 강섬유, 5연선으로 되어있는 SCIII 시험체는 1연선인 SCII 시험체에 비해 높은 인발 하중을 갖는 것으로 나타났는데, 이는 섬유와 매트릭스 계면의 부착면적이 증가했기 때문으로 판단되었다.

표 5. 실험결과

Specimen	Initial Stiffness	Peak Pull-out Load (N)	Displacement* (mm)	Pullout Work** (N-mm)
SC I 0.4-1/2- 0	39.03	7.885	0.211	0.547
SC I 0.4-1/4- 0	40.11	7.421	0.226	0.549
SC II 0.4-1/2- 0	54.03	14.992	0.404	1.594
SC II 0.4-1/4- 0	64.63	14.611	0.393	2.068
SCIII 0.4-1/2- 0	151.54	73.318	0.597	10.558
SCIII 0.4-1/4- 0	145.06	74.770	0.630	15.168
SCIV 0.4-1/2- 0	95.82	46.044	0.519	3.576
SCIV 0.4-1/4- 0	91.12	46.347	0.578	11.306
SC I 0.5-1/2- 0	36.60	8.398	0.354	0.791
SC I 0.5-1/4- 0	27.58	8.832	0.376	1.186
SC II 0.5-1/2- 0	52.47	14.045	0.463	1.952
SC II 0.5-1/4- 0	33.80	15.111	1.059	4.140
SC II 0.5-1/2- 0	88.58	54.443	1.890	13.255
SCIII 0.5-1/4- 0	108.94	60.945	0.649	14.103
SCIV 0.5-1/2- 0	85.90	40.516	0.500	4.549
SCIV 0.5-1/4- 0	78.86	42.320	0.596	9.552



(a) W/B=0.4, $L_e=16\text{mm}$ 인 경우



(b) W/B=0.5, $L_e=16\text{mm}$ 인 경우

그림 2. 섬유종류의 영향

3.2 물결합재비(W/B)의 영향

강섬유의 매입인발시 섬유와 매트릭스의 계면부착특성에 관한 물결합재비의 영향을 분석하기 위하여 매트릭스 수준을 두 가지 ($f_{cu} = 53.60, 46.29\text{MPa}$)로 선정하여 실험을 실시하였다. 매입길이에 따른 물결합재비의 영향을 그림 3에서 나타내었고, 매입길이가 16mm인 SCIV-0.4-1/2 시험체를 제외한 모든 시험체에서, 물결합재비가 낮을수록 초기강성 및 최대 인발 하중이 다소 증가함을 알 수 있었다. 이는 매트릭스의 강도가 섬유와 시멘트 매트릭스 계면의 부착력을 증가시킨 것으로 판단된다.

3.3 강섬유 매입길이(L_e)의 영향

그림 4는 강섬유의 매입길이에 대한 매입인발-미끄러짐 관계곡선을 나타낸 것이다. 물결합재비가

0.4, 0.5인 경우, 대부분의 시험체에서 매입길이에 관계없이 초기 강성 및 최대 인발 하중이 큰 차이를 보이지 않았고, 섬유가 파단되었다. 이는 과도한 매입길이로 인해 섬유와 시멘트 매트릭스 계면의 기계적 부착력 때문에 매입인발-미끄러짐 관계곡선이 유사 소성변형 거동을 보이지 않고 강섬유가 파단된 것으로 판단된다.

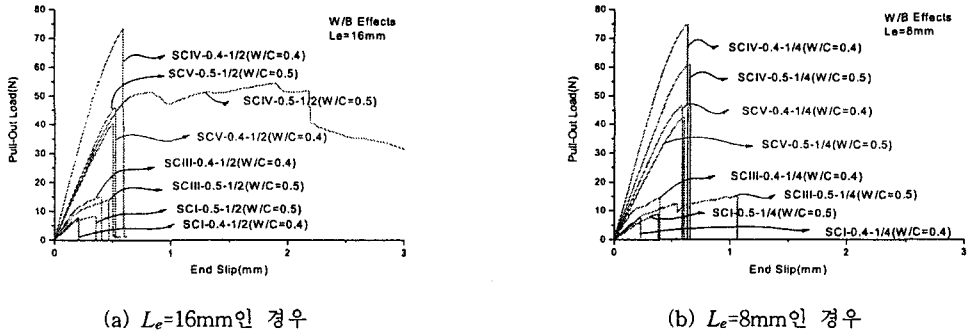


그림 3. 물결합재비(W/B)의 영향

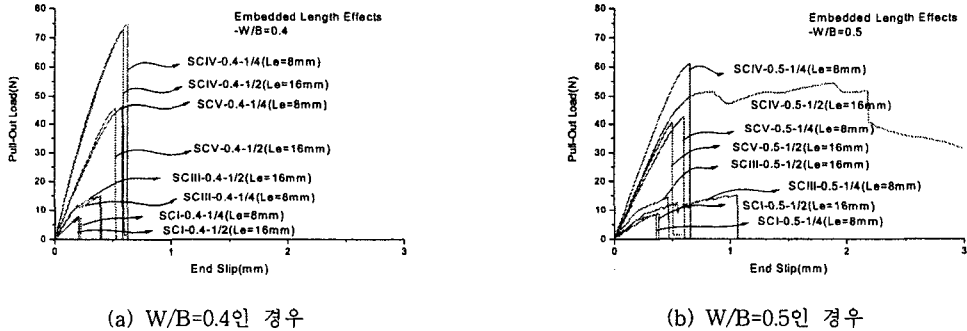


그림 4. 매입길이의 영향

4. 결론

고인성 시멘트 복합체를 제조하기 위하여 적용된 4가지 종류의 강섬유의 매입 인발실험을 실시하여 강섬유와 매트릭스 계면의 부착용력-미끄러짐 거동을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 형태가 개선된 강섬유의 경우, 기계적 부착용력의 증가로 인하여 민형 강섬유에 비해 초기 강성 및 최대 인발 하중이 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 시멘트 복합체의 강도가 증가할수록, 매입길이가 증가할수록 매입 인발 하중은 증가하는 것으로 나타났으나, 시멘트 복합체의 강도나 매입길이가 과도하게 증가한 경우 섬유가 미끄러짐 거동을 보이지 않고 섬유파단이 발생하여 유사 소성변형 거동을 보이지 않았다.

참고문헌

1. J. M. Alwan, A. E. Naaman & W. Hansen, "Pull-Out Work of Steel Fibers From Cementitious Composites : Analytical Investigation", *Cement & Concrete Composites*, 13(1991)247-255.
2. Chuchai Sujivorakul. (2002), "Development of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Using Twisted Polygonal Steel Fibers," Ph. D. Thesis, University of Michigan.
3. I. Markovic, J. C. Walraven and J.G.M. van Mier, "Experimental Evaluation of fibre Pullout From Plain and Fibre Reinforced Concrete", in the Proceedings of the 4th International Workshop on High performance fibre reinforced cement composites, Ann Arbor. pp.419-436