

# 섬유-모르타르 경계면과 모르타르의 역학적 특성에 미치는 물-시멘트비의 영향

## Effects of water-cement ratio on fiber-matrix interface characteristics and matrix fracture toughness

김 윤 용<sup>\*</sup>    김 정 수<sup>\*\*</sup>    김 희 신<sup>\*\*\*</sup>    김 진 근<sup>\*\*\*\*</sup>    하 기 주<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Kim, Yun Yong    Kim, Jeong Su    Kim, Hee Sin    Kim, Jin Keun    Ha, Gee Joo

### ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation examining water-cement ratio effects on fiber-matrix interface properties and on matrix fracture properties, which are used for designing mix proportion suitable for achieving strain-hardening behavior at a composite level. A single fiber pullout test and a wedge splitting test were employed to measure the bond properties in a matrix and the fracture toughness of mortar matrix, respectively. Test results showed that the properties tended to increase with decreasing water-cement ratio. Composite design using these test results will be discussed in the follow-up paper.

### 1. 서 론

모르타르와 같은 유사취성적인 시멘트계 재료에 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 변형능력과 파괴인성을 얻을 수 있음은 기존의 연구에 의하여 밝혀진 바 있다[1]. 특히 2종류의 취성적인 재료(모르타르, 합성섬유)로 구성된 섬유복합 모르타르(또는 콘크리트)에 높은 연성을 부여하기 위해서는 역학적 구성요인인 섬유(fiber), 모르타르 매트릭스(mortar matrix), 그리고 섬유와 매트릭스 사이의 경계면(interface) 특성을 파악하고 이를 이용하는 방법이 효과적이다[2].

이 연구는 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하기 위하여 모르타르 매트릭스의 파괴역학(fracture mechanics)적 특성과 섬유-모르타르 경계면의 마이크로 역학(micromechanics)적 특성을 파악하고자 함에 목적이 있다. 특히 시멘트계 재료의 역학적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 물-시멘트비에 대한 연구에 초점을 맞추었다. 따라서 3가지의 물-시멘트비에 대하여 섬유의 인발실험(fiber pullout test)과 모르타르의 썬기쪼갠실험(wedge splitting test)을 수행하였고 이를 통하여 모르타르 매트릭스와 섬유-매트릭스 경계면(interface)의 역학적인 특성을 파악하였다.

\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구조교수

\*\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정

\*\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

\*\*\*\*\* 정회원, 경일대학교 건축학부 교수

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험개요

이 연구에서는 물-시멘트비 35%, 47.5%, 60%에 대하여 섬유 인발실험과 모르타르의 썩기조깅실험을 수행하여 섬유-매트릭스 경계면과 모르타르 매트릭스의 역학적 특성을 구하고자 한다. 이 실험에서 사용된 섬유는 일본의 Kuraray사에서 생산하는 PVA섬유로서 커팅하지 않은 필라멘트를 사용하였다. 사용된 섬유의 물리적인 성질은 표 1에 나타내었다. 매트릭스의 잔골재는 평균입도가 130 $\mu$ m인 규사를 사용하였고 시멘트는 S사의 1종 보통시멘트를 사용하였으며 배합조건은 표 2와 같다.

표 1 PVA섬유의 물성치

직경 (mm)	인장강도 (MPa)	파단신도 (%)	탄성계수 (GPa)
0.04	1600	6	37

표 2 모르타르 배합설계

물-시멘트비 (%)	골재-시멘트비 (%)	감수제 (%)	분리저감제 (%)
35	0.8	3.0	-
47.5	0.8	2.0	-
60	0.8	0	0.1

### 2.2 실험체 제작

#### 2.2.1 섬유 인발실험

실험체 형상은 그림 1에 나타내었다. 섬유 필라멘트를 아크릴 몰드에 통과시킨 후 모르타르를 몰드에 부어서 실험체를 제작하였다. 실험체는 재령 2일에 탈형하였고 인발실험 하루 전에 다이아몬드 커터를 이용하여 절단한 후에 1.0mm미만의 두께(=문힘길이)로 연마하는 방법으로 실험체를 제작하였다.

#### 2.2.2 모르타르의 썩기조깅실험

썩기조깅실험은 콘크리트 또는 모르타르의 파괴인성( $K_{Ic}$ )을 구하는 파괴역학 실험의 일종으로서 이 연구에서 선정한 실험체의 기하학적 형상은 그림 2와 같다. 실험체에서 초기 균열은 타설 전에 강판을 삽입한 후, 탈형 이후에 이를 제거하는 방법으로 만들었다. 또한 로올러 하중장치를 고정시키고, 클립 게이지(clip gage)를 설치하기 위하여 실험체의 윗부분에 홈을 만들었다.

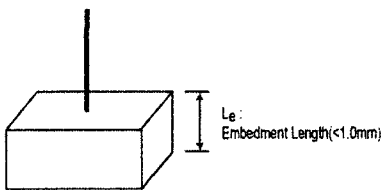


그림 1 섬유 인발실험체 형상

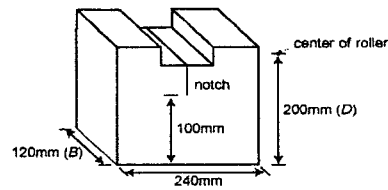


그림 2 썩기조깅실험체 형상

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 섬유 인발실험

실험체의 밑면과 노출된 섬유의 일부를 Instron 실험장치의 actuator와 로드셀에 각각 부착하였다. 분당 0.2mm의 변위제어 방식으로 인발실험을 수행하였으며 섬유 인발실험에 작용되는 하중은 10N용량의 로드셀로 측정하였다. 실험 장치의 상세는 그림 3에 나타낸 바와 같다.

### 2.3.2 썩기쪼갠실험

썩기쪼갠실험을 이용하여 이 연구에서 수행한 실험방법은 그림 4에 나타낸 바와 같다. 수직하중( $P$ )과 함께 로울러와 썩기가 접하는 위치(쪼개는 힘( $P_s$ ))이 작용하는 위치에서 균열개구변위(CMOD)가 측정된다. 균열개구변위를 0.001mm/sec의 속도로 제어하는 방법으로 실험을 수행하였으며, 이 제어 속도에 의하면 실험 시작 후 약 20~40초 사이에 최대하중에 도달하게 된다.

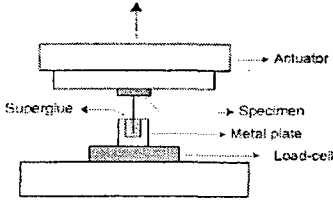


그림 3 섬유 인발실험 상세

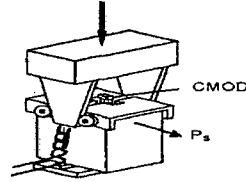


그림 4 썩기를 이용한 쪼갠 하중 재하 방법

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 섬유 인발실험

실험을 통하여 얻은 인발하중-뿔힘량의 관계는 그림 5에 나타내었다. 그림과 같은 실험결과를 이용하여 섬유와 매트릭스의 화학적인 부착강도( $G_d$ )와 마찰부착강도( $\tau_0$ )를 구하는 식은 Li 등[2]에 의하여 다음과 같이 제안되었다.

$$G_d = \frac{2(P_a - P_b)^2}{\pi^2 E_f d_f^3} \quad (1)$$

$$\tau_0 = \frac{P_b}{\pi d_f l_e} \quad (2)$$

여기서  $E_f$ ,  $d_f$ ,  $l_e$ 는 각각 섬유의 탄성계수, 직경, 묻힘 길이이다. 하중  $P_a$ 는 섬유와 매트릭스의 부착이 떨어지기 전 최고 강도이며  $P_b$ 는 둘 사이의 부착이 떨어진 직후의 하중 값이다. 실험결과로부터 얻은  $P_a$ 와  $P_b$ , 그리고 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산한 섬유-매트릭스의 화학적, 마찰부착 특성은 표 3에 나타낸 바와 같다.

### 3.2 썩기쪼갠실험

썩기쪼갠실험으로부터 얻은 하중-균열개구변위 곡선은 그림 6과 같다. 그림과 같은 실험결과로부터 얻은 CMOD,  $P$ ,  $P_c$ (최대 수직하중) 등을 식 (3)과 식 (4)에 대입하여  $K_{Ic}$ 를 구한다[3]. 이러한 과정을 통하여 계산한 모르타르의 파괴인성을 표 4에 나타내었다.

$$CMOD = \frac{P}{BE} [11.56(1 - \frac{a}{D})^{-2} - 9.397] \quad (3)$$

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{B\sqrt{D}} F(a) \quad (4)$$

여기서  $B$ 와  $D$ 는 그림 2에서 표시된 실험체의 두께와 실험체 하단에서 로울러 측까지의 거리를 각각 의미한다. 또한  $a$ 는  $a/D$ ,  $E$ 는 탄성계수,  $F(a)$ 는 Zhao 등에 의하여 제안된 기하학적 함수이다[3].

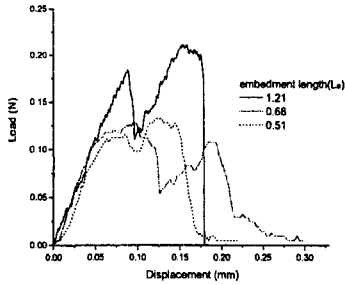


그림 5 섬유 인발실험결과 (w/c = 47.5%)

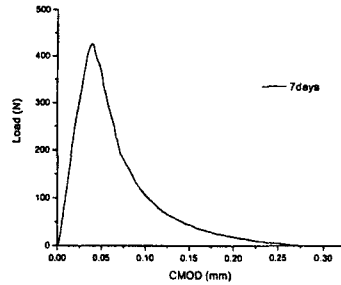


그림 6 하중-균열개구변위 곡선

표 3 섬유와 매트릭스의 마찰 및 화학적 부착 특성

물-시멘트비 (%)	마찰부착 (MPa)	화학적 부착 ( $J/m^2$ )
35	2.070	0.666
47.5	1.386	0.421
60	1.237	0.403

표 4 모르타르 매트릭스의 파괴인성

물-시멘트비 (%)	파괴인성 ( $MPa \cdot \sqrt{m}$ )
35	0.149
47.5	0.106
60	0.065

#### 4. 결론

이 연구에서는 섬유 인발실험과 모르타르의 썩기조깅실험을 통하여 섬유-매트릭스 경계면의 부착특성과 모르타르의 파괴인성에 미치는 물-시멘트비의 영향을 파악하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 섬유-모르타르 경계면의 마찰부착( $\tau_0$ ), 화학적 부착( $G_d$ ), 모르타르의 파괴인성은 모두 물-시멘트비의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) 재령 7일에 해당되는 초기재령 모르타르에서 물-시멘트비에 따른 섬유부착과 파괴인성 특성을 파악하였다. 이 결과는 인장변형을 경화거동을 하는 고인성 섬유복합 모르타르를 설계하기 위한 기초 자료로서 활용될 것이며, 이와 관련한 내용은 이어지는 논문에서 다룰 계획이다.

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부의 2003년도 건설기술연구개발사업(과제번호: 03산학연A06-04)의 연구비 지원하에 이루어졌음을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김윤용, "습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능", 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 제3호, 2003년 6월, pp.462-469.
2. Redon, C., Li, V.C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., and Ogawa, A., "Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.13, No.6, 2001, pp.399-406.
3. Xu, S., and Reinhardt, H.W., "Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part III: Compact tension specimens and wedge splitting specimens", International Journal of Fracture, No.98, 1999, pp.179-193.