

# 마이크로역학에 의하여 제조된 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성

## Mechanical properties of ductile fiber-reinforced mortar designed based on micromechanics

김 윤 용<sup>\*</sup>      김 정 수<sup>\*\*</sup>      김 회 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

The objective of this study is to examine mechanical properties of ductile fiber-reinforced mortar designed based on micromechanics. This mortar was produced by employing raw materials commercially available in Korea. To verify property level of this material in uniaxial tension, a series of direct tensile tests were performed with varying water cement ratio. In addition to this, flexural tests as well as compressive tests were carried out. Experiments revealed that the fiber reinforced mortar exhibited high ductility represented by strain hardening behavior in uniaxial tension. Significant enhancements of ductility, in terms of strain at peak stress and post-peak behavior, were also observed during the tests in compression and in bending.

### 1. 서 론

최근 들어 높은 연성을 갖는 고인성 섬유복합재료에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 특히 ECC로 알려진 고인성 섬유복합 모르타르가 국내에 소개되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 재료는 모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수십, 수백 배에 달하는 인장 변형률 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합 모르타르로서 미시간대학의 Li 등[1]이 제안한 마이크로역학(micromechanics)을 이론적인 배경으로 하고 있다.

이 연구는 선행된 연구[2]에 의하여 개발된 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 파악하고자 함에 목적이 있다. 따라서 선행된 연구에서 결정된 최적의 물-시멘트비(w/c = 60%)에 대한 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 검증하기 위하여 2가지 물-시멘트비(w/c = 47.5%, 60%)에 대하여 1축 인장과 1축 압축, 그리고 휨에 대한 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 규명하였다.

\* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수

\*\* 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 47.5 %, 60 %에 대하여 직접인장실험을 통하여 인장변형을 경화거동을 검토하였으며 압축실험과 휨실험을 통하여 압축 및 휨 하에서의 섬유복합 모르타르의 역학적 거동을 알아보았다.

실험에서 사용된 섬유는 마이크로역학에 근거하여 일본의 Kuraray사에서 생산된 PVA섬유이며, 사용된 섬유의 물리적인 성질은 표 1에 나타내었다. S사의 제1종 포틀랜드 시멘트가 주 결합재로 사용되었고 잔골재는 평균입도가 130  $\mu\text{m}$ 인 규사를 사용하였으며 섬유의 효과적인 분산을 위하여 카르복실계 감수제(PCSP)와 셀룰로오스계 분리저감제(HPMC)를 혼화제로 첨가하였다. 모든 값은 제조회사에서 제공하는 품질 특성을 그대로 인용하였으며, 배합조건은 표 2와 같다.

표 1 섬유의 물리적 특성

Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Length (mm)	Nominal strength (MPa)	Elongation (%)	Oiling agent content (%)	Young's modulus (GPa)
39	8	1620	6	0.8	38.9

표 2 섬유복합 모르타르의 배합설계

W/C (%)	S/C (%)	PCSP (%)	HPMC (%)
47.5	0.8	2.0	-
60	0.8	1.0	0.1

### 2.2 직접인장실험

1축인장 하에서의 변형률 경화거동은 고인성 섬유복합재료 고유의 특성으로서 제작된 실험체가 변형을 경화거동을 나타내는지를 검증하기 위하여 직접인장실험을 수행하였다. 8.9 kN 용량의 로드셀이 부착된 만능재료시험기에서 0.003 mm/sec의 변위제어로 수행되었고 그림 1(a)에 도시한 바와 같이 2개의 LVDT가 실험체의 양측에 부착되어 150 mm의 계측길이에 대한 변위를 측정한 후, 변형률로 환산하였다. 재령 14일에 실험이 수행되었고, 응력-변형률 관계와 함께 균열강도, 인장강도, 극한변형률 등이 측정되었다.

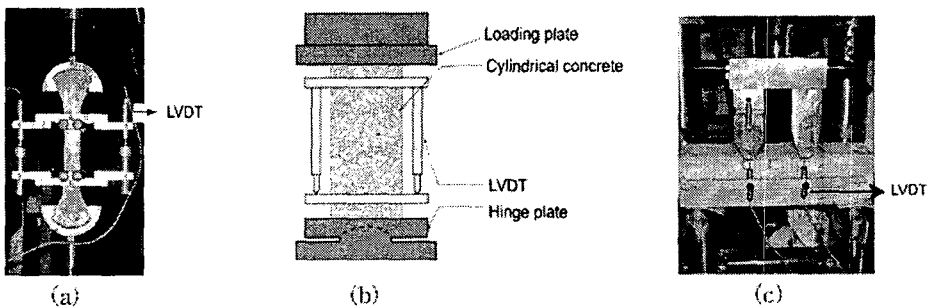


그림 1 게이지 위치 및 실험체 형상

### 2.3 압축실험

압축실험은 재령 14일에  $\phi 100 \times 200$  mm의 원주형 공시체에 대하여 압축강도와 탄성계수 실험이 수

행되었다. 압축실험에 사용된 기기는 Instron 사의 만능재료시험기이며 축방향 변위는 0.001 mm까지 측정할 수 있는 LVDT를 이용하였다.

압축강도 실험 시 만능재료시험기는 0.005 mm/sec의 속도로 변위제어를 하였으며, 하중은 2450 kN 용량의 로드셀을 통하여 측정하였고, 게이지의 위치 및 실험 형상은 그림 1(b)에 나타나 있다.

## 2.4 휨실험

휨실험은 재령 14일에 100×100×400 mm의 정사각형 단면의 실험체에 대하여 실험이 수행되었다. 휨 실험 시 만능재료시험기는 0.01 mm/sec의 속도로 변위제어를 하였으며, 하중은 178 kN 용량의 로드셀을 통하여 측정하였고, 게이지의 위치 및 실험 형상은 그림 1(c)에 나타나 있다.

## 3. 실험결과 및 분석

물-시멘트비 47.5 %, 60 %인 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 평가하기 위하여 재령 14일에 직접 인장실험과 압축실험, 그리고 휨실험을 수행하였다. 그림 2는 1축인장 하에서 측정된 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 그림 2에 도시한 바와 같이 물-시멘트비 60 %의 경우에는 물-시멘트비 47.5 % 보다 1축 인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동을 나타내었으며, 변형능력은 최대 2.5 % 변형률(연신율)이었다. 그리고 파괴형태를 보면 응력이 증가하여 균열강도에 도달하면 첫 균열이 발생하고, 그 이후 다수의 미세균열(multiple micro-cracking)이 형성되면서 인장변형률 경화거동을 나타내었다. 물-시멘트비 47.5 %의 경우 변형률 경화거동을 보이기는 하지만 다수의 미세균열을 형성하지 못하고 파괴에 도달하였다. 이는 안정상태 균열발생을 위한 조건을 만족하기 위한 인성비가 물-시멘트비 60 %의 경우보다 작기 때문이다.

섬유복합 모르타르의 1축 압축 하에서의 응력-변형률 곡선은 그림 3에 도시한 바와 같다. 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 곡선은 일반적인 콘크리트의 응력-변형률 곡선과 다르다. 왜냐하면 압축강도 실험 시 혼입된 섬유에 의하여 균열진전이 늦추어지고 그로 인하여 최고 하중 하에서의 변형률을 증가시키게 되며 압축강도 이후 응력-변형률 곡선이 연성적인 거동을 보이는 것이다[3]. 2가지 물-시멘트비에 대한 섬유복합 모르타르의 압축강도는 재령 14일을 기준으로 하였을 때 보통강도 콘크리트에 해당되며, 향후에는 재료의 활용도를 극대화하기 위한 목적으로 보다 높은 강도의 섬유복합 모르타르가 개발될 필요가 있을 것으로 판단된다.

그림 4는 휨 하중이 작용할 때의 섬유복합 모르타르의 하중-처짐 관계를 나타낸다. 그림 4에 도시한 바와 같이 물-시멘트비 60 %의 경우에는 물-시멘트비 47.5 % 보다 휨강도 이후에 하중-처짐 곡선이 연성적인 거동을 보였다. 이것은 물-시멘트비 60 %의 경우에는 물-시멘트비 47.5 % 보다 다수의 미세균열(multiple micro-cracking)이 형성되는 균열진전을 보이면서 파괴에 도달하기 때문이다. 비선형

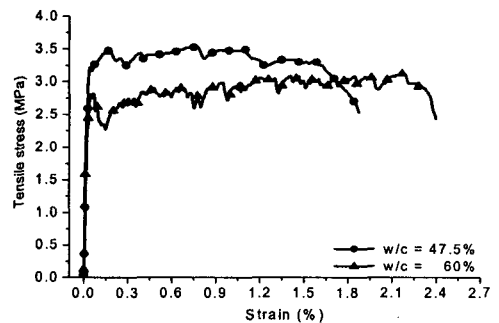


그림 2 1축 인장 하에서 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계 (재령 14일)

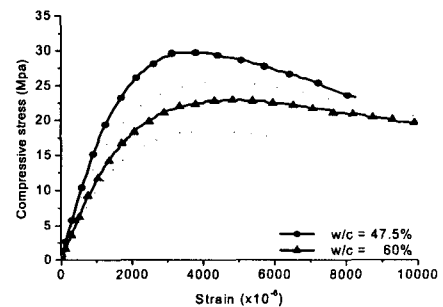


그림 3 1축 압축 하에서 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계 (재령 14일)

구간 이후, 파괴면으로 변형이 집중되어 PVA섬유의 파단과 함께 응력이 감소하면서 파괴에 도달한다. 이 때에 파단면은 최초에 발생된 균열면과 상관없이 수 많은 균열면 중에서 하나의 단면에서 형성되었다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 마이크로 역학(micromechanics)과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)에 근거하여 개발된 높은 연성의 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 파악하고자 함에 목적이 있다. 2가지 물-시멘트비(w/c = 47.5 %, 60 %)에 대하여 1축인장과 1축압축, 그리고 휨에 대한 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 규명하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

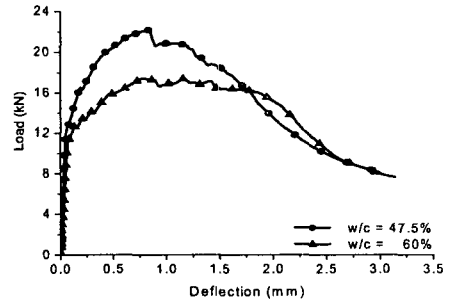


그림 4 휨 하에서의 섬유복합 모르타르의 하중-처짐 관계 (재령 14일)

- 1) 마이크로 역학과 안정상태의 균열이론을 이용하여 개발된 섬유복합 모르타르는 1축인장 하에서 변형을 경화거동을 나타내었다.
- 2) 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 곡선은 일반적인 콘크리트의 응력-변형률 곡선과 다른 거동을 보인다. 다시 말하면 압축강도 실험 시 혼입된 섬유에 의하여 균열진전이 늦추어지고 그로 인하여 최고 하중 하에서의 변형률을 증가시키게 되며 압축강도 이후 응력-변형률 곡선이 연성적인 거동을 보인다.
- 3) 휨 하중이 작용할 때의 섬유복합 모르타르의 하중-처짐 곡선은 휨강도 이후에 연성적인 거동을 보였다. 이는 휨 하중 하에서의 일반적인 콘크리트와는 다르게 다수의 미세균열(multiple micro cracking)이 형성되면서 파괴에 도달하기 때문이다

## 감사의 글

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

## 참 고 문 헌

1. Li, V.C., and Wu, H.C., "Conditions for Pseudo Strain-Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites", Journal Applied Mechanics Review, Vol.45, No.8, 1992, pp.390-398.
2. 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주, "섬유-모르타르 경계면과 모르타르의 역학적 특성에 미치는 물-시멘트비의 영향", 한국콘크리트학회 논문집, 제16권 제1호, 2004년 5월, pp.284-287.
3. Fanella, D.A., Naaman, A.E., "Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression", ACI Journal, Vol.82 No.41, 1985, pp.475-483.