

마이크로 역학에 의하여 설계된 고인성 섬유복합 모르타르의 1축인장 거동

Uniaxial tension behavior of high ductile fiber reinforced mortar designed based on micromechanics

김 윤 용^{*} 김 정 수^{**} 김 희 신^{***} 김 진 근^{****} 하 기 주^{*****}
Kim, Yun Yong Kim, Jeong Su Kim, Hee Sin Kim, Jin Keun Ha, Gee Joo

ABSTRACT

A high ductile fiber reinforced mortar has been developed by employing micromechanics-based design procedure. Micromechanical analysis was initially performed to properly select water-cement ratio, and then optimal mixture proportion was determined based on workability considerations, including desirable fiber dispersion without segregation. Subsequent direct tensile tests revealed that the fiber reinforced mortar exhibited high ductile uniaxial tension property, represented by 1.8% strain capacity, which is around 100 times the strain capacity of normal concrete.

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 [1]. 이 재료는 모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형을 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합 모르타르로서 미시간대학의 Li 등[2]이 제안한 마이크로 역학(micromechanics)을 이론적인 배경으로 하고 있다.

이 연구는 국내에서 상용 중인 재료를 이용하여 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하고자 함에 목적이 있다. 따라서 선행된 연구[3]에 의하여 결정된 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로 역학적 특성과 모르타르의 역학적 특성을 이용하고, 마이크로 역학(micromechanics)과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 배경으로 하여 1축인장 하에서 인장변형을 경화거동을 하는 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하였다.

* 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. 섬유복합 모르타르의 이론적 배경

이 연구에서는 섬유복합 모르타르를 개발하기 위하여 마이크로 역학(micromechanics)과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)에 근거하여 최적의 배합을 결정하였다. 이 때에 고려되는 기본적인 역학적 구성요소는 섬유(fiber), 모르타르 매트릭스(mortar matrix), 섬유-매트릭스 경계면(interface)으로서 재료의 개발 과정을 개념적으로 표현하면 그림 1에 나타난 바와 같다.

섬유복합 모르타르가 인장변형을 경화거동을 나타내기 위해서는 안정상태 균열발생의 필요조건을 만족함으로써, 인장력 하에서 다수의 미세균열이 발생하여야 한다. 이러한 필요조건이 안정상태 균열이론이며 이를 적용하기 위해서는 우선 섬유복합 모르타르 미세구조의 역학적 특성을 이용하여 균열면 거동을 해석적으로 구하여야 한다. 이 때에 사용되는 이론적인 배경이 마이크로 역학이다.

안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 에너지 조건으로서 섬유복합 모르타르의 균열면 보상에너지 J_b' 가 매트릭스의 균열선단 파괴인성 J_{fb} 보다 항상 커야 한다는 것이다.

$$J_{fb} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta_0) d\delta \equiv J_b' \quad (1)$$

$$J_{fb} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (2)$$

여기서 J_b' 는 그림 1의 Task 2에서 도시한 균열면 응력(σ)과 균열개구변위(δ)의 관계로부터 계산할 수 있다. 그리고 δ_0 는 최대 균열면 응력 σ_0 에 해당되는 균열개구변위이고 K_m 과 E_c 는 각각 매트릭스의 파괴인성과 탄성계수이다. 에너지 조건과 함께 반드시 충족되어야 하는 또 다른 요구조건은 σ_0 가 1축인장 균열강도 σ_k 보다 반드시 큰 값이어야 한다는 인장강도 요구조건이다. 이 조건이 만족되지 않을 경우, 다수의 균열로 변형이 전파되지 못하고, 최초에 발생된 균열로 모든 변형이 집중되는 유사취성재료의 거동을 나타내게 된다.

$$\sigma_k < \sigma_0 \quad (3)$$

여기서 σ_k 는 최대초기결합의 크기와 K_m 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다.

결과적으로 식 (1)과 식 (3)을 만족시킴으로써 기존의 콘크리트(또는 모르타르)가 갖고 있는 유사취성을 높은 연성으로 변화시킬 수 있다. 이러한 방법을 이용하면 최소의 실험적인 접근(trial-error)으로 고인성 섬유복합 모르타르를 설계할 수 있고 보강 섬유의 효율을 극대화할 수 있을 것으로 판단한다.

3. 최적 물-시멘트비의 결정

이 연구에 앞서 선행된 연구[3]에 의하여 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로 역학적 특성과 모르타르의 파괴역학적 특성이 결정되었다(표 1). 최적의 물-시멘트비를 결정하기 위하여 표 1에서 제시된 역

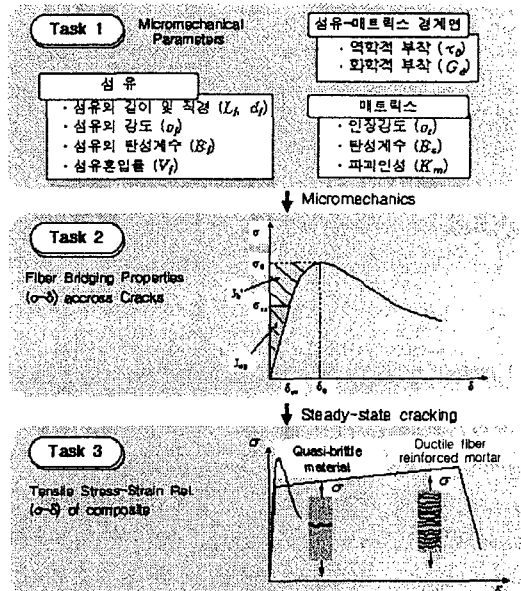


그림 1 마이크로 역학과 안정상태 균열이론에 근거한 섬유복합 모르타르 개발의 흐름도

학적 특성을 이용하여 인성비(toughness ratio= J'_b/J'_{tp})를 계산하였는데, 섬유혼입률 2%와 골재-시멘트 비 80%를 기준으로 하였다.

표 1 실험에 의하여 결정된 역학적 특성 (재령 7일)

특성 물-시멘트비	섬유		매트릭스		섬유-매트릭스 경계면		인성비 (J'_b/J'_{tp})
	길이 (mm)	직경 (μm)	인장강도 (MPa)	파괴인성 ($\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$)	마찰부착 (MPa)	화학적 부착 (J/m^2)	
35%	12	40	1600	0.149	2.070	0.666	3.39
47.5%	12	40	1600	0.106	1.386	0.421	6.71
60%	12	40	1600	0.065	1.237	0.403	11.46

인성비를 계산하기 위하여 각각의 물-시멘트비에 대한 마이크로 역학 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 그림 2와 같은 균열면 응력-균열개구변위 관계를 얻었으며 그 결과를 이용하여 보상에너지와 인성비를 계산하였다(표 1). Kanda 등[4]의 연구에 의하여 3.0이상의 인성비를 갖는 섬유복합재료가 인장변형을 경화저동을 안정적으로 나타낼 수 있는 것으로 밝혀진 바 있다. 따라서 모든 물-시멘트비의 섬유복합 모르타르가 3.0이상의 인성비를 보이므로 인장변형을 경화저동을 나타낼 수 있는 가능성을 갖고 있다. 그러나 실험이 수행된 때의 재령이 7일이기 때문에 재령에 따른 파괴인성의 증진과 그로 인한 인성비의 감소가 예상된다. 따라서 3.0과 유사한 인성비를 갖고 있는 물-시멘트비 35%의 경우는 인장변형을 경화저동을 나타내기에 적합하지 않은 것으로 판단하였다. 한편 물-시멘트비 60%의 경우는 충분한 인성비를 나타내기는 하였으나, 배합 시에 재료분리와 블리딩이 발생하고 섬유의 분산성이 크게 저하되는 단점을 나타내었다. 따라서 인성비가 3.0을 2배 이상 상회하면서 섬유의 분산성이 우수한 물-시멘트비 47.5%를 최적의 배합으로 결정하였다.

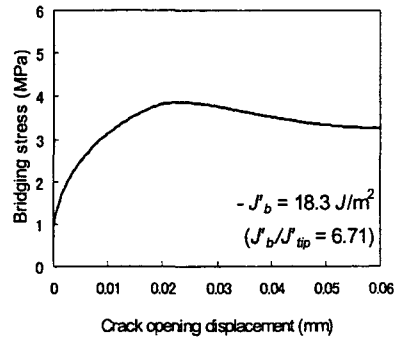


그림 2 균열면 응력과 균열개구변위 관계 (물-시멘트비 47.5%, 재령 7일)

4. 직접인장실험

4.1 사용재료 및 실험체 형상

섬유로는 일본의 Kuraray사가 제작한 12mm 길이의 PVA 단섬유가 사용되었다. S사의 제1종 보통포틀랜드 시멘트와 평균입도 130 μm 의 규사가 사용되었고 섬유의 효과적인 분산을 위하여 셀룰로즈계 분리저감제(MC)와 폴리머계 고성능 감수제(SP)를 첨가하였다.

표 2 섬유복합 모르타르의 배합설계

시멘트	물	잔골재	분리저감제	감수제	섬유(부피비)
1.0	0.475	0.8	0.0005	0.04	0.02

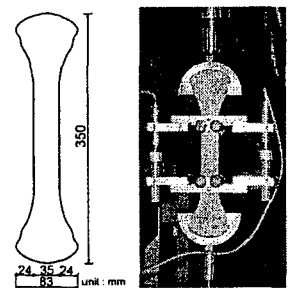


그림 3 실험체 형상과 직접인장실험 상세

4.2 실험방법

직접인장실험은 두께 20mm이고 dog-bone형상의 실험체에 대하여 수행되었다. 그림 3은 실험체 형상과 직접인장실험 상세를 나타낸다. 직접인장실험은 Instron사의 만능재료시험기에서 0.2mm/min.의 변위제어

로 수행되었고 2개의 LVDT가 실험체의 양측에 부착되어 120mm의 계측길이에 대한 변위를 측정 한 후, 변형률로 환산하였다. 재령 7일에 실험이 수행되었고, 응력-변형률 관계와 함께 균열강도, 인장강도, 극한변형률 등이 측정되었다.

4.3 실험결과 및 분석

그림 4는 1축인장 하에서 측정된 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 그림 4에서 보인 바와 같이 최대 균열면 응력의 평균값은 2.98MPa인 것으로 측정되었는데, 이 값은 1축인장 균열강도의 평균값(1.81MPa)에 비하여 약 1.6 배 큰 값이다. 따라서 개발된 섬유복합 모르타르는 안정상태 균열발생을 위한 2가지 조건인 식(1)과 식(3)을 모두 만족하도록 설계된 것으로 나타났다. 그림 4에 도시한 바와 같이 개발된 재료는 1축인장 하에서 뚜렷한 변형률 경화거동을 나타 내었으며, 변형능력은 최대 1.8% 변형률(연신율)이었다.

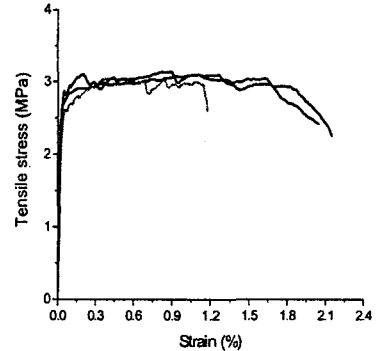


그림 4 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계 (물-시멘트비 47.5%, 재령 7일)

5. 결론

이 연구에서는 마이크로 역학(micromechanics)과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 적용하여 높은 연성의 섬유복합 모르타르를 개발하였다. 또한 개발된 재료의 연성을 검증하기 위하여 직접인장실험을 수행하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 마이크로 역학과 안정상태의 균열이론을 이용하여 섬유복합 모르타르의 기본배합을 결정하였고 그 배합에 따른 균열면 응력과 균열개구변위 관계를 구하였다.
- 2) 개발된 재료는 1축인장 하에서 변형률 경화거동을 나타내었으며, 변형능력은 최대 1.8% 변형률이 었다. 이와 같은 높은 변형능력은 일반 콘크리트(또는 모르타르)의 약 100배에 해당된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부의 2003년도 건설기술연구개발사업(과제번호: 03산학연A06-04)의 연구비 지원 하에 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. 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.
3. 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주, "섬유-모르타르 경계면과 모르타르의 역학적 특성에 미치는 물-시멘트비의 영향", 한국콘크리트학회 봄학술발표회, 2004.
4. Kanda, T., and Li, V.C., "A New Micromechanics Design Theory for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite," ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.125, No.4, 1999, pp.373-381.