

마이크로역학에 의하여 설계된 ECC (Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성

김윤용¹⁾·김정수¹⁾·김희신²⁾·하기주³⁾·김진근^{1)*}

¹⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ²⁾ 청석엔지니어링 ³⁾ 경일대학교 건축학부

(2005년 1월 31일 원고접수, 2005년 7월 25일 심사완료)

Mechanical Properties of an ECC(Engineered Cementitious Composite) Designed Based on Micromechanical Principle

Yun-Yong Kim¹⁾, Jeong-Su Kim¹⁾, Hee-Sin Kim²⁾, Gee-Joo Ha³⁾, and Jin-Keun Kim^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-338, Korea

²⁾ Chungduk Engineering, Co., LTD., Karak-dong, Songpa-gu, Seoul 138-702, Korea

³⁾ School of Architecture, Kyungil University, Gyeongsan 712-904, Korea

(Received January 31, 2005, Accepted July 25, 2005)

ABSTRACT

The objective of this study is to develop a high ductile fiber reinforced mortar, ECC(Engineered Cementitious Composite) with using raw material commercially available in Korea. 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, which are used for designing mix proportion suitable for achieving strain-hardening behavior at a composite level. Test results showed that the properties tended to increase with decreasing water-cement ratio. 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 basic mixture proportion range was determined based on workability considerations, including desirable fiber dispersion without segregation. Subsequent direct tensile tests were performed on the composites with W/C's of 47.5% and 60% at 28 days that the fiber reinforced mortar exhibited high ductile uniaxial tension property, represented by a maximum strain capacity of 2.2%, which is around 100 times the strain capacity of normal concrete. Also, compressive tests were performed to examine high ductile fiber reinforced mortar under the compression. The test results showed that the measured value of compressive strength was from 26 MPa to 34 MPa which comes under the strength of normal concrete at 28 days.

Keywords : ECC, strain-hardening behavior, fiber pullout, fracture toughness, micromechanics

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 있다¹⁾. 이 재료는 모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형률 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합 모르타르로서 미시간 대학의 Li 등²⁾이 제안한 마이크로역학(micromechanics)을 이론적인 배경으로 하고 있다. 특히 2종류의 취성적인 재료(모르타르, 합성섬유)로 구

성된 섬유복합 모르타르(또는 콘크리트)에 높은 연성을 효과적으로 부여하기 위하여 역학적 구성 요인인 섬유(fiber), 모르타르 매트릭스(mortar matrix), 그리고 섬유와 매트릭스 사이의 경계면(interface) 특성을 파악하고 이를 이용하는 방법을 적용하였다.

이 연구는 국내에서 상용 중인 재료를 이용하여 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하고자 함에 목적이 있으며, 고인성 섬유복합 모르타르 개발에 선행하여 모르타르 매트릭스의 파괴역학(fracture mechanics)적 특성과 섬유-모르타르 경계면의 마이크로역학(micromechanics)적 특성을 파악하였다. 특히 시멘트계 재료의 역학적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 물-시멘트비에 대한 연구에 초점을 맞추어 3가지의 물-시멘트비에 대하여 섬유의 인발실험(fiber pullout test)과 모르타르의 췌기조깅실험(wedge splitting

* Corresponding author

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

test)을 수행하였다. 그리고 그 결과를 이용하여 섬유-매트릭스 경계면(interface)의 특성과 매트릭스의 파괴인성을 구하였다.

이러한 연구에 의하여 결정된 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로 역학적 특성과 모르타르의 역학적 특성을 근거로 하여 마이크로역학(micromechanics)에 의거한 균열면 섬유 가교(fiber bridging) 거동을 해석하였다. 균열면 거동 해석과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 통하여 물-시멘트비의 범위와 함께 재료의 기본 배합을 제시하였다. 또한, 개발된 재료에 대하여 1축인장 하에서 다수의 미세균열 분포에 의한 인장변형을 경화거동과 1축 압축 하에서 역학적인 특성을 구하였다.

2. 섬유복합 모르타르 개발의 이론적 배경

2.1 섬유인발실험

섬유인발실험을 통하여 얻을 수 있는 일반적인 섬유인발하중-뿔힘량과의 관계는 Fig. 1에 나타내었다. 섬유인발 실험 할 때에 인발하중이 증가하다 섬유와 매트릭스의 임계 부착하중에 도달하면 섬유와 매트릭스의 부착이 떨어져 하중이 급격히 떨어지며 그 이후 매트릭스로부터 섬유의 인발이 일어나게 된다.

인발하중-뿔힘량의 관계를 이용하여 섬유와 매트릭스 사이의 화학적 부착(G_a)과 마찰부착(τ_0)을 구할 수 있다. 이 연구에서 사용한 Poly Vinyl Alcohol(PVA) 섬유는 친수성 합성섬유로서 매트릭스에 존재하는 수분과 반응하여 화학적 부착을 형성하게 된다. 이러한 화학적 부착은 섬유인발 곡선에서 임계 부착 하중 P_a 와 부착이 파손되고 하중 강하가 일어난 직후의 하중 P_b 의 차이를 갖고 결정한다(식 (1))³⁾. 또한 마찰 부착은 식 (2)와 같이 화학적 부착이 파괴된 이후의 최대값인 P_b 에 의하여 결정할 수 있다.

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

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

여기서, E_f , d_f , l_e 는 각각 섬유의 탄성계수, 직경, 문힘 길이이다.

2.2 썬기썬실험(파괴인성실험)

썬기썬실험으로부터 얻을 수 있는 하중-균열개구변위 곡선의 형상은 Fig. 2와 같다. 하중-균열개구변위 곡선으로부터 얻은 CMOD, P , P_c (최대 수직하중) 등을 식 (3)과 식 (4)에 대입하여 K_{lc} 를 구한다⁴⁾.

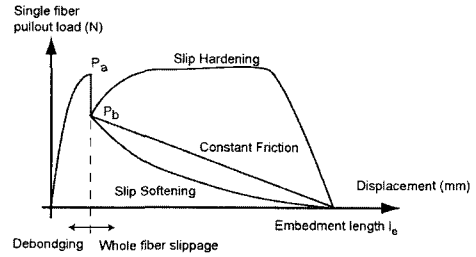


Fig. 1 General profile of single fiber pullout test³⁾

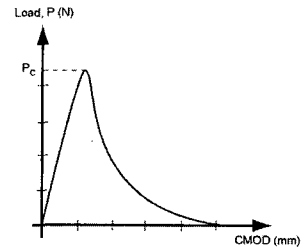


Fig. 2 General profile of wedge splitting test

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

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

여기서, B 와 D 는 썬기썬실험 실험체의 두께와 실험체 하단에서 로울러 축까지의 거리를 각각 의미한다. 또한 α 는 a/D , E 는 탄성계수, $F(\alpha)$ 는 Zhao 등에 의하여 제안된 기하학적 함수이다⁵⁾.

2.3 마이크로역학이론

콘크리트, 모르타르, 섬유보강 콘크리트(또는 섬유보강 모르타르, FRC) 등의 유사취성적인 시멘트계 재료와는 달리 고인성 섬유복합 모르타르의 경우 1축인장 하에서 금속과 같은 인장변형경화거동을 나타낸다. 이러한 인장변형 경화와 더불어 일반적으로 100 μ m 이하로 제어되는 균열 폭이 고인성 섬유복합 모르타르 고유의 재료 특성으로서 이러한 성능은 마이크로역학에 근거하여 모르타르 매트릭스, 섬유, 경계면 등의 3가지 역학적 요소에 해당되는 각종 요인들을 조절함으로써 구현된다. 특히 인장변형을 경화거동의 특성을 갖도록 하기 위해서는 안정상태 균열 발생(steady-state cracking)의 기본 요구 조건을 만족하여야 한다. 이를 통하여 인장 하에서 다수의 미세 균열(multiple micro-cracking)이 발생하게 되는데, 이러한 필요 조건에 대한 이론적 배경을 제공하는 것이 마이크로역학이론이다.

안정상태 균열 이론에 의하여 고인성 섬유복합 모르타르의 인장변형 경화거동을 설계하기 위해서는 섬유인발실험과 썬기썬실험 등을 통하여 얻은 섬유와 매트릭스 경계면의 역학적 특성과 매트릭스의 파괴 역학적 특성을 이

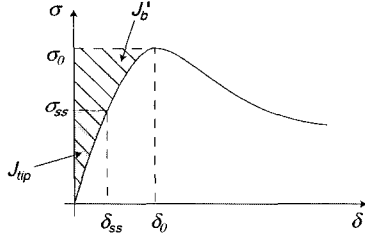


Fig. 3 A typical $\sigma(\delta)$ curve for ECC²⁾

용하여 섬유복합 모르타르의 균열면 응력(bridging stress, σ)-균열 개구변위 관계(crack opening, δ)를 구한다. 균열면 응력-균열 개구변위 관계를 구하기 위해서는 식 (5)를 이용하여 균열면에 작용하는 개개의 섬유 가교 역할을 적분하여야 한다.

$$\sigma_B(\delta) = \frac{4V_f}{\pi d_f^2} \int_{\phi=0}^{\pi/2} \left[\int_{z=0}^{(L_f/2)\cos\phi} P(\delta)p(\phi)p(z)dz \right] d\phi \quad (5)$$

여기서, V_f 는 섬유복합 모르타르에 섬유의 부피 혼입량이며 L_f 는 혼입된 섬유의 길이이다. 또한 $P(\delta)$ 는 단일 섬유가 균열면에서 작용하는 힘이고, $p(\phi)$ 는 섬유와 매트릭스가 이루는 각의 확률밀도함수이며 $p(z)$ 는 섬유의 도심과 균열면까지의 거리에 대한 확률밀도함수이다. 균열면에 섬유가 균일하게 무작위로 분포되어 있다면 $P(\phi) = \sin\phi$ 이고 $P(z) = 2/L_f$ 이다⁶⁾. 식 (5)를 이용하여 구한 균열면 응력-균열면 개구 변위는 Fig. 3과 같은 형태를 보인다.

안정상태의 균열을 발생시키기 위한 첫 번째 조건은 Fig. 3의 균열면 응력-균열면 개구변위 관계에 나타난 바와 같이 ECC의 균열면 응력과 균열개구변위 관계에서 계산되는 보상에너지(complementary energy, J'_b)가 모르타르 매트릭스의 균열선단 파괴인성(crack tip toughness, J_{tip})보다 항상 커야 한다는 것이다.

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J'_b \quad (6)$$

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_c} \quad (7)$$

여기서, σ_0 는 δ_0 에 해당되는 최대 균열면 응력이고 K_m (= K_c)과 E_c 는 각각 모르타르 매트릭스의 파괴인성과 탄성계수이다. 즉, 식(6)은 안정상태의 균열을 발생시키기 위한 에너지 조건이다. 인장변형 경화거동을 유도하기 위한 또 다른 요구 조건은 항상 σ_0 가 1축인장 균열장도(tensile first crack strength, σ_{fc})보다 큰 값이어야 한다는 것이다.

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \quad (8)$$

여기서, σ_{fc} 는 최대 초기 결함의 크기와 K_m 에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다. 마이크로역학의 이론에 관한

Table 1 Properties of PVA fiber

Diameter	Length	Nominal tensile strength	Elongation	Oiling agent content	Young's modulus
39 μm	12 mm	1620 MPa	6 %	0.8 %	38.9 GPa

Table 2 Properties of cement and sand

Material property	Type I cement	Sand
Grain size (μm)	11.7±14.8	130±38
Specific gravity	3.15	2.60

Table 3 Properties of chemical admixtures

Material property	HPMC	PCSP
Water content	0 % (powder)	60 % (liquid)
Specific gravity	1.3	1.2

자세한 내용은 Li 등에 의한 연구 결과에 나타난 바와 같다. 결과적으로 마이크로역학 이론은 식(6)과 (8)을 만족시킴으로써 기존의 콘크리트와 같은 시멘트계 재료가 갖고 있는 취성적인 특성을 고유한 섬유복합 재료의 고인성 특성으로 변화시키는 이론적 수단이 된다.

이러한 마이크로역학 이론을 이용함으로써 최소의 실험적인 접근으로도 고인성 섬유복합 재료를 개발할 수 있고, 보강 재료 사용되는 섬유의 효율을 극대화할 수 있으며, 섬유혼입량을 최소화하는 방법을 찾을 수 있다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험 개요

이 연구에서는 물-시멘트비 35%, 47.5%, 60%에 대하여 섬유인발실험과 모르타르의 썬크래크실험을 수행하여 섬유-매트릭스 경계면과 모르타르 매트릭스의 역학적 특성을 구하였으며, 그 값을 마이크로역학과 안정상태 균열이론에 적용시켜 기본 배합의 물-시멘트 범위를 선정하였다. 선정된 배합에 대하여 직접인장실험과 압축실험을 통하여 인장변형을 경화거동 및 압축하에서의 역학적 거동을 검증하였다. 각 실험 변수에 따라 실험된 실험체의 개수는 5개이다.

실험에서 사용된 섬유는 K사에서 생산한 PVA섬유이며, 사용된 섬유의 물리적인 성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. 또한, PVA섬유의 친수성에 의하여 모르타르 매트릭스와 섬유의 경계면에 과다한 화학적 부착과 마찰 부착이 발생하는 것을 방지하기 위하여 섬유를 제작할 때에 중량비 0.8%의 오일링(oiling)을 시행하여 최적의 부착 특성을 부여하였다. S사의 제1종 포틀랜드시멘트가 주 결합재로 사용되었고 잔골재는 평균 입도가 130 μm 인 규사를 사용

Table 4 Mix proportions

W/C (%)	S/C (%)	PCSP (%)	HPMC (%)
35	80	3.0	-
47.5	80	2.0	-
60	80	1.0	0.1

* W: water, C: cement, S: sand,
All numbers are mass ratios

하였으며, 섬유는 효과적인 분산을 위하여 카복실계 감수제(PCSP)와 셀룰로즈계 분리지감제(HPMC)를 혼합제로 첨가하였다. 각 재료의 품질 특성은 Tables 2와 3에 제시한 바와 같고, 모든 값은 제조회사에서 제공하는 품질 특성을 그대로 인용하였으며, 배합 조건은 Table 4와 같다.

3.2 실험체 제작

3.2.1 섬유인발실험

실험체 형상은 Fig. 4(a)에 나타내었다. 섬유 필라멘트를 아크릴 몰드에 통과시킨 후 모르타르를 몰드에 부어서 실험체를 제작하였다. 실험체는 재령 2일에 탈형하였고 인발 실험 하루 전에 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다. 섬유 인발실험을 할 때에는 섬유가 완전한 뽑힘거동을 보이도록 실험체를 1.0mm미만의 두께(=문힘 길이)로 연마하는 방법으로 제작하였다⁷⁾.

3.2.2 모르타르의 썩기쪼갠실험

썩기쪼갠실험은 콘크리트 또는 모르타르의 파괴인성 (K_{Ic})을 구하는 파괴역학실험 방법의 일종으로써 자중의 영향을 배제하면서, 균열면을 직접 열기 때문에 매우 안정적인 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 이 연구에서 선정된 실험체의 기하학적 형상은 Fig. 4(b)와 같다. 실험체에서 초기균열은 타설 전에 두께 1mm의 강판을 삽입한 후, 탈형 이후에 이를 제거하는 방법으로 만들었다. 또한 로울러 하중장치를 고정시키고, 클립게이지(clip gage)를 설치하기 위하여 실험체의 윗부분에 홈을 만들었다.

3.2.3 직접인장실험

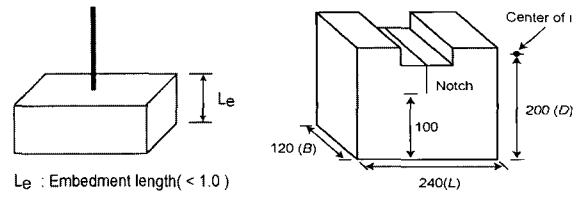
직접인장실험은 두께 20mm이고 단부 파괴를 방지하면서 효율적인 1축 인장실험이 수행될 수 있는 dog-bone형상을 채택하였다. 실험체의 형상은 Fig. 4(c)에 나타내었다.

3.2.4 압축실험

압축실험은 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체에 대하여 수행되었다(Fig. 4(d)).

3.3 실험 방법

3.3.1 섬유인발실험

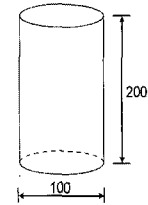


(a) Single fiber pullout test

(b) Matrix fracture toughness test

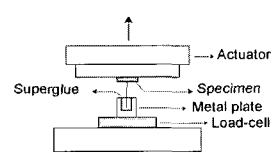


(c) Direct tensile test

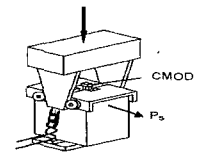


(d) Compressive test

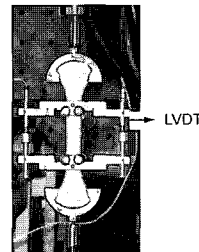
Fig. 4 Specimen geometries (unit : mm)



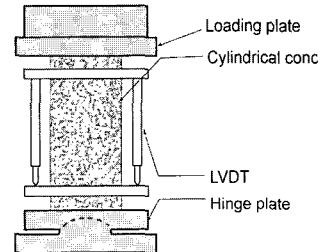
(a) Single fiber pullout test



(b) Matrix fracture toughness test



(c) Direct tensile test



(d) Uniaxial compression test

Fig. 5 Experimental test setup

실험체의 밑면과 노출된 섬유의 일부를 Instron 실험 장치의 Actuator와 로드셀에 각각 부착하였다. 0.2mm/min의 변위제어 방식으로 인발실험을 수행하였으며 섬유 인발실험에 작용되는 하중은 10N 용량의 로드셀로 측정하였다. 실험 장치의 상세는 Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같다.

3.3.2 모르타르의 썩기쪼갠실험

썩기쪼갠실험을 이용하여 이 연구에서 수행한 실험 방법은 Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같다. 수직하중(P)과 함께 로울러와 썩기가 접하는 위치(썩개는 힘(P_s))이 작용하는 위치에서 균열개구변위(CMOD)가 측정된다. 균열개구변위를 0.06mm/min의 속도로 제어하는 방법으로 실험을 수행하였으며, 이 제어 속도에 의하면 실험 시작 후 약 20~40초 사이에 최대 하중에 도달하게 된다.

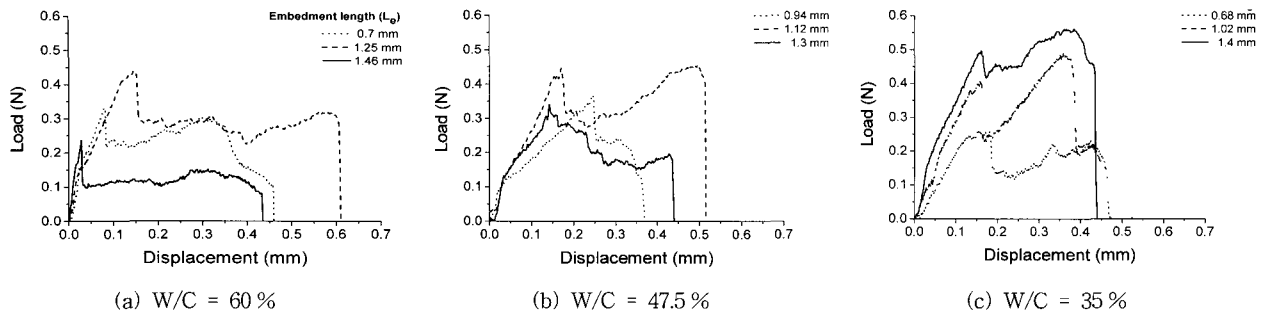


Fig. 6 Fiber pullout displacement vs. applied load curves obtained from single fiber pullout tests at 28 days

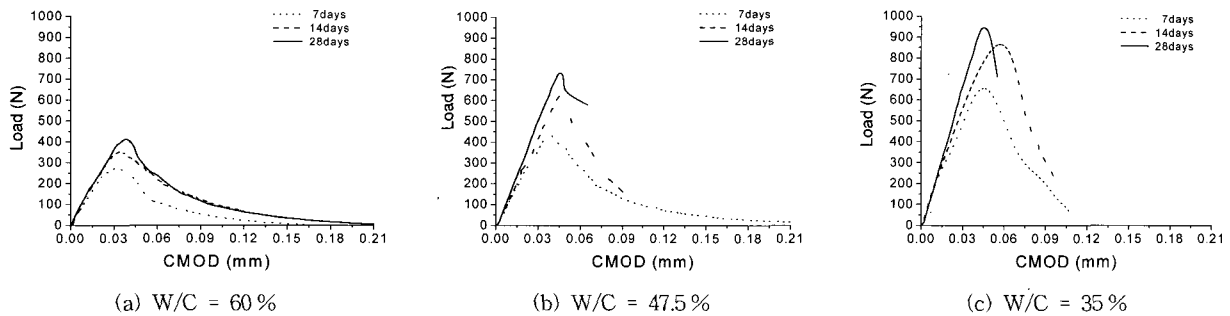


Fig. 7 Typical CMOD vs. applied load curves obtained from wedge-splitting tests

3.3.3 직접인장실험

1축인장하에서의 변형률 경화거동은 고인성 섬유복합재료 고유의 특성으로써 제작된 실험체가 변형률 경화거동을 나타내는지를 검증하기 위하여 선정된 물-시멘트비에 대하여 직접인장실험을 수행하였다. 9.8 kN 용량의 로드셀이 부착된 만능재료시험기에서 0.18 mm/min의 변위 제어로 수행되었고 Fig. 5(c)에 도시한 바와 같이 2개의 LVDT가 실험체의 양측에 부착되어 150 mm의 계측 길이에 대한 변위를 측정 후, 변형률로 환산하였다. 재령 28일에 실험이 수행되었고, 응력-변형률 관계와 함께 균열장도, 인장장도, 극한변형률 등이 측정되었다.

3.3.4 압축실험

압축하에서의 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 파악하기 위하여 선정된 물-시멘트비에 대해서 압축실험이 실시되었다. 압축실험은 재령 28일에 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체에 대하여 압축강도와 탄성계수실험이 수행되었다. 압축실험에 사용된 기기는 만능재료시험기이며 축방향 변위는 0.001 mm까지 측정할 수 있는 LVDT를 이용하였다. 압축강도실험을 할 때 만능재료시험기는 0.3 mm/min의 속도로 변위제어를 하였으며, 하중은 2200 kN 용량의 로드셀을 통하여 측정하였고, 게이지의 위치 및 실험 형상은 Fig. 5(d)에 나타나 있다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 섬유 인발 특성

실험을 통하여 얻은 인발하중-뺨힘량의 관계는 Fig. 6에 나타내었다. 섬유인발실험을 할 때에 인발하중이 점차 증가하다가 최고하중 P_0 에 도달하게 되면 섬유와 매트릭스 사이의 부착이 떨어지게 되고 급격하게 인발하중이 감소한다. 이는 경계면을 따라 섬유와 매트릭스 사이의 화학적 부착이 더 이상 존재하지 않음을 의미하며 특히 이 연구에서 채택한 PVA섬유는 매우 강한 화학적 부착을 갖고 있기 때문에 인발 과정에서 화학적 부착이 파괴되면서 매우 급격한 하중의 강하를 보인다. 화학적 부착이 파괴된 후의 인발거동은 매트릭스의 재령, 강도, 탄성계수, 실험에 사용한 섬유의 종류나 인장 강도 등에 따라 슬립경화거동 또는 슬립연화거동을 나타내는데 섬유와 매트릭스 사이의 마찰력이 커져 매트릭스가 섬유의 인발에 저항할수록 슬립경화 거동을 나타내게 된다⁹⁾. 식 (1)과 (2)를 통하여 계산한 화학적부착(G_d)과 마찰부착(τ_0)은 Table 5에 나타낸 바와 같다.

4.2 매트릭스의 파괴인성

썩기조깅실험으로부터 얻은 하중-균열개구변위 곡선은 Fig. 7과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 실험체의 재령이 증가할수록 P-CMOD 곡선에서 강성(기울기)이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 매트릭스의 강도가 재령에 따라 증가하기 때문이다.

Table 5 Matrix fracture toughness and fiber-matrix interface properties

Age	W/C = 60 %			W/C = 47.5 %			W/C = 35 %		
	t_0 (MPa)	G_d (J/m ²)	K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})	t_0 (MPa)	G_d (J/m ²)	K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})	t_0 (MPa)	G_d (J/m ²)	K_{Ic} (MPa·m ^{1/2})
7days	1.297	1.795	0.069	1.397	1.923	0.106	1.488	1.796	0.149
14days	1.361	1.809	0.086	1.494	1.844	0.134	1.526	1.840	0.188
28days	1.617	1.819	0.100	1.822	1.853	0.146	1.903	1.702	0.227

Table 6 Toughness ratios calculated based on micromechanical analysis

Age (days)	W/C = 60 %			W/C = 47.5 %			W/C = 35 %		
	J'_{up} (J/m ²)	J'_b (J/m ²)	$J'_{v'}$ (J/m ²)	J'_{up} (J/m ²)	J'_b (J/m ²)	$J'_{v'}$ (J/m ²)	J'_{up} (J/m ²)	J'_b (J/m ²)	$J'_{v'}$ (J/m ²)
7	1.631	17.605	10.790	2.783	18.196	6.539	4.762	18.799	3.948
14	2.149	18.099	8.423	4.137	18.309	4.425	6.368	17.388	2.730
28	2.675	17.150	6.411	4.413	16.895	3.828	8.588	18.227	2.122

하중-균열개구변위 곡선으로부터 얻은 CMOD, P , P_c (최대 수직하중) 등을 식 (3)과 식 (4)에 대입하여 파괴인성 $K_{Ic}(=K_m)$ 를 계산하였으며 그 값은 Table 5에 나타낸 바와 같다.

4.3 최적의 물-시멘트비 범위의 결정

섬유 인발실험과 모르타르의 썬기쪼갬실험에 의하여 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로역학적 특성과 모르타르의 파괴역학적 특성이 결정되었다(Table 5). 고인성 섬유복합 모르타르의 물-시멘트비 범위를 결정하기 위하여 Table 5에 나타난 역학적 특성값을 이용하여 인성비(toughness ratio= J'_b/J'_{up})를 계산하였으며, 섬유의 혼입률은 2% (체적비)를 기준으로 하였다.

인성비를 계산하기 위하여 각각의 물-시멘트비에 대한 마이크로역학 해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 6에 나타내었다. 해석을 통하여 Fig. 8과 같은 균열면 응력-균열개구변위 관계를 얻었다(Table 6). 이에 사용된 마이크로역학적 해석 과정 및 수식 전개는 식 (5)에 나타나 있으며 Lin 등¹⁰⁾에 의하여 상세하게 제시된 바 있다.

한편, 인성비가 1.0이상이면 식 (6)에 제시된 안정상태의 균열을 발생시키기 위한 에너지 조건을 만족하지만, Kanda 등¹¹⁾의 연구에 의하면 3.0이상의 인성비를 갖는 섬유복합재료가 인장변형을 경화거동을 안정적으로 나타낼 수 있는 것으로 밝혀진 바 있다. 이를 근거로 하였을 때 물-시멘트비 35%를 제외한 2가지 경우에는 3.0이상의 인성비를 나타내므로 섬유복합 모르타르가 인장변형을 경화거동을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다(Table 6). 또한 28일 이후에는 일반적으로 인성비의 변화가 거의 없기 때문에 28일에 3.0 이상의 인성비를 나타내고 있는 물-시멘트비 47.5%와 60%의 경우가 인장변형을 경화거동을 나

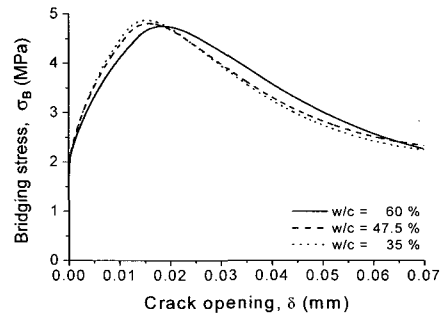


Fig. 8 Bridging stress vs. crack opening displacement relations calculated from micromechanical analysis on the composites at 28 days

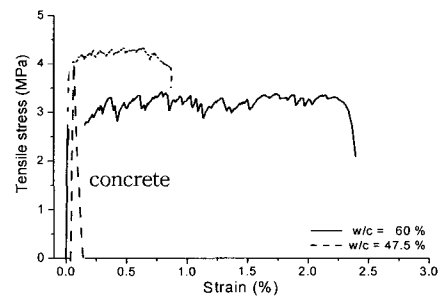


Fig. 9 Typical uniaxial tensile stress-strain curves of fiber-reinforced mortar

타내기에 적합한 배합인 것으로 판단된다. 또한, 이 연구에서 물-시멘트의 범위를 35%~60% 사이로 제한하였으므로, 제한된 물-시멘트비 안에서 인성비 3.0이상을 만족하는 물-시멘트비 범위는 47.5%~60%인 것으로 결정하였으며, 이 범위 안에서는 고인성 섬유복합 모르타르가 인장변형을 경화거동을 나타낼 것으로 판단하였다.

4.4 섬유복합 모르타르의 1축인장 및 압축 거동

물-시멘트비 47.5%, 60%인 고인성 섬유복합 모르타르의 역학적 특성을 평가하기 위하여 재령 28에 직접인장실험과 압축실험을 수행하였다. Fig. 9는 1축인장 하에서 측정된 섬유복합 모르타르의 응력-변형률 관계를 나타낸다. Fig. 9에서 보인 바와 같이 물-시멘트비 47.5%, 60%에 해당하는 실험체의 평균 인장강도는 각각 4.1 MPa, 3.2 MPa인 것으로 측정되었는데, 이 값은 각각의 1축인장 균열강도의 평균값인 2.8 MPa(W/C = 47.5%), 2.1 MPa(W/C = 60%)에 비하여 약 1.5배 큰 값이다. 결과적으로 물-시멘트비 47.5%, 60%의 섬유복합 모르타르는 안정상태 균열발생을 위한 2번째 식(3)을 만족하도록 설계된 것으로 나타났다.

Fig. 9에 나타낸 바와 같이, 인성비 조건을 만족하는 섬유복합 모르타르는 1축인장 하에서 뚜렷한 변형을 경화거동을 나타내었으며, 이 때의 변형 능력은 최대 2.2% 변형

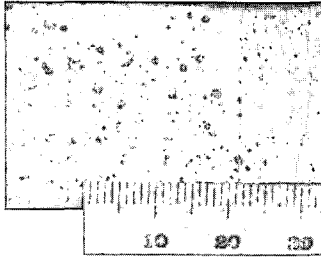


Fig. 10 Crack pattern (w/c = 60 %)

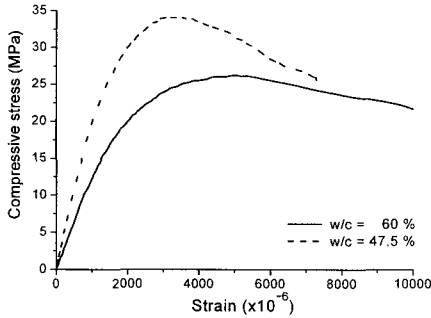


Fig. 11 Typical compressive stress-strain curves

를(연신율)이었다. 이러한 변형 능력의 수준은 일반 콘크리트(또는 모르타르)의 약 100배에 해당된다. 그리고 파괴 형태를 보면 응력이 증가하여 균열강도에 도달하면 첫 균열이 발생한 후 다수의 미세 균열(multiple micro-cracking)이 형성되면서 인장변형을 경화거동을 나타내었다. Fig. 10은 균열패턴(crack pattern)을 보여 주고 있는데, 응력이 상승하는 변형경화구간에서는 평균 $60\mu\text{m}$ 폭의 미세 균열이 매우 좁은 간격으로 다수 발생하였다. 변형 경화 구간 이후, 인장강도에 도달하면 파괴면으로 변형이 집중되어 PVA섬유의 파단과 함께 응력이 감소하면서 파괴에 도달한다. 이때 파단면은 최초에 발생한 균열면과 상관없이 수많은 균열면 중에서 하나의 단면에서 형성되었다.

섬유복합 모르타르의 압축하에서의 응력-변형을 곡선은 Fig. 11에 도시한 바와 같고, 물-시멘트비에 따른 압축강도와 인장강도 및 변형률은 Table 7에 나타내었다. 섬유복합 모르타르의 응력-변형을 곡선은 일반적인 콘크리트의 응력-변형을 곡선과 다르다. 왜냐하면 압축하중이 가해지고 있는 동안에 혼입된 섬유가 균열면에서 가교역할을 하면서 균열의 진전을 늦추고 그로 인하여 최고 하중 하에서의 변형률이 증가된다. 또한 압축강도 이후의 하강 부분에서도 일반 콘크리트에 비하여 매우 연성적인 거동을 보인다. 물-시멘트비 47.5%, 60%에 해당하는 섬유복합 모르타르의 압축강도는 각각 34MPa, 26MPa이며, 이는 보통강도 콘크리트에 해당되는 값이다. 향후에는 재료의 활용도를 극대화하기 위하여 보다 높은 강도의 섬유복합 모르타르가 개발될 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 7 Mechanical properties of fiber-reinforced mortar

W/C (%)	Strain capacity (%)	Tensile strength (MPa)		Compressive strength (MPa)
		First crack	Ultimate	
60	2.2	2.1	3.2	26
47.5	0.9	2.8	4.1	34

5. 결 론

이 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로 역학적 특성과 모르타르의 역학적 특성을 근거로 하여 마이크로역학에 따라 균열면 섬유 가교(fiber bridging) 거동을 해석하였다. 균열면 거동 해석과 함께 안정상태 균열 이론을 적용하여 최적의 물-시멘트비의 범위(47.5%~60%)를 결정하였고 이를 근거로 한 재료의 기본 배합을 제시하였다.
- 2) 섬유-매트릭스 경계면의 마찰부착(τ_0), 화학적부착(G_d), 매트릭스의 파괴인성은 모두 물-시멘트비의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 섬유-모르타르 경계면 특성과 모르타르의 파괴인성을 이용하여 섬유복합 모르타르가 인장변형을 경화거동을 나타내는 판단조건인 인성비를 계산하였다.
- 3) 섬유복합 모르타르가 안정상태 균열이론에 따른 인성비 조건을 만족할 경우 1축인장 하에서 변형을 경화거동을 나타내었다. 이 때에 변형 능력은 최대 2.2% 변형률(연신율)이었고 이러한 변형 능력은 일반 콘크리트(또는 모르타르)의 약 100배에 해당된다.
- 4) 압축 하에서의 섬유복합 재료의 거동은 혼입된 섬유에 의하여 압축강도 이후 응력-변형을 곡선이 완만하게 감소하는 연성파괴의 형태를 나타낸다. 재령 28일에서 섬유복합 모르타르의 압축강도(26MPa, 34MPa)는 보통강도 콘크리트의 값에 해당되며 재료의 활용도를 높이기 위하여 보다 고강도의 섬유복합 모르타르를 개발할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술연구개발사업(과제번호: 03산학연A06-04)에 의한 것임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김윤용, "습식스프레이공법으로 타설된 고인성 섬유보강 모르타르(ECC)의 역학적 특성과 보수 성능", 콘크리트학회 논문집, 15권 3호, 2003. 6, 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. 김운용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주, "섬유-모르타르 경계면과 모르타르의 역학적 특성에 미치는 물-시멘트비의 영향", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 16권 1호, 2004. 5, pp.336~339.
4. Murakami, Y., et al., *Stress intensity factors handbook*, Pergamon Press, New York, 1987, pp.274~276.
5. 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*, Vol.98, 1999, pp.179~193.
6. Fella, D. A. and Naaman, A. E, "Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression", *ACI Journal*, Vol.82, No.4, 1985, pp.475~483.
7. Katz, A. and Li, V. C., "A special technique for determining the bond strength of microfibers in cement matrix by pull-out test", *Journal of Material Science Letter*, Vol.15, 1996, pp.1821~1823.
8. Kim, J. K., and Kim, Y. Y., "Fatigue crack growth of high strength concrete in wedge splitting test", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.5 1999, pp.705~712.
9. Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T., "Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC", *ACI Materials Journal*, Vol.99, No.5, 2002, pp.463~472.
10. Lin, Z., Kanda, T., and Li, V.C., "On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites", *Journal of Concrete Science and Engineering*, RILEM, Vol.1, 1999, pp.173~184.
11. 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.

요 약

이 연구는 국내에서 상용 중인 재료를 이용하여 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하고자 함에 목적이 있으며, 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하기 위해서는 모르타르 매트릭스의 파괴역학(fracture mechanics)적 특성과 섬유-모르타르 경계면의 마이크로역학(micromechanics)적 특성을 파악하여야 한다. 특히 시멘트계 재료(cementitious materials)의 역학적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 물-시멘트비(water cement ratio)에 대한 연구에 초점을 맞추었으며, 3가지의 물-시멘트비에 대하여 섬유의 인발실험(fiber pullout test)과 모르타르의 썩기조갯실험(wedge splitting test)을 수행하였고 이를 통하여 모르타르 매트릭스와 섬유-매트릭스 경계면(interface)의 역학적인 특성을 파악하였다. 이러한 연구에 의하여 결정된 섬유-매트릭스 경계면의 마이크로역학적 특성과 모르타르의 역학적 특성을 이용하여 물-시멘트비 범위 및 재료의 기본 배합을 제시하였고 또한 마이크로역학과 안정상태 균열이론(steady-state cracking theory)을 배경으로 하여 1축인장 하에서 인장변형을 경화거동을 나타내는 고인성 섬유복합 모르타르를 개발하였다. 개발된 재료는 1축인장 하에서 변형을 경화거동을 나타내었으며, 변형능력은 최대 2.2% 이었다. 이와 같은 높은 변형 능력은 일반 콘크리트(또는 모르타르)의 약 100배에 해당된다. 또한 압축하에서는 압축강도 이후 응력-변형을 곡선이 완만하게 감소하는 연성파괴의 형태를 나타내었으며 28일의 압축강도는 보통강도 콘크리트의 강도에 해당되는 26MPa, 34 MPa인 것으로 측정되었다.

핵심용어 : 섬유복합 모르타르, 변형을 경화거동, 섬유인발실험, 썩기조갯시험, 마이크로역학