



수정된 섬유 가교 특성을 고려한 ECC의 인장변형특성

김정수¹⁾ · 이방연¹⁾ · 김진근¹⁾ · 김윤용^{2)*}

¹⁾한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ²⁾충남대학교 토목공학과

Tensile Deformation Characteristics of ECC Predicted with a Modified Fiber Bridging Curve

Jeong-Su Kim,¹⁾ Bang-Yeon Lee,¹⁾ Jin-Keun Kim,¹⁾ and Yun-Yong Kim^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT A theoretical prediction model of fiber bridging curve was established based on the assumption that fibers are uniformly distributed on the crack surface. However, the distance between fibers and their orientation with respect to crack surface can greatly affect the prediction of fiber bridging curve. Since, the shape of fiber bridging curve is a critical factor for predicting the tensile stress-strain relationship of ECC, it is expected that the assumption of uniform distribution of fiber may cause a significant error when predicting the tensile behavior of ECC. To overcome this shortcoming, a new prediction method of stress-strain relation of ECC is proposed based on the modified fiber bridging curve. Only effective fibers are taken into account considering the effects of their orientation and distance between them. Moreover, the approach for formulating the tensile stress-strain relation is discussed, where a procedure is presented for obtaining important parameters, such as the first crack strength, the peak stress, the displacement at peak stress, tensile strain capacity, and the crack spacing. Subsequent uniaxial tensile tests were performed to validate the proposed method. It was found that the predicted stress-strain relations obtained based on the proposed modified fiber bridging curve exhibited a good agreement with experimental results.

Keywords : ECC, tensile stress-strain, fiber bridging curve, fiber orientation, distance between fibers

1. 서 론

모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형을 경화거동을 보이는 ECC(engineered cementitious composite)는 미시간 대학의 Li 등¹⁾이 제안한 마이크로역학(micromechanics)을 기반으로 개발되었으며, ECC를 구조부재(예: 내진부재)에 사용할 경우 구조물의 내진성능이 크게 개선될 것으로 판단된다.²⁾ 비록 ECC를 사용한 구조물을 설계할 때 중요한 요인인 ECC의 인장거동 예측에 대한 연구는 많이 이루어지긴 하였지만,³⁾ 실제 섬유 가교 곡선을 고려한 ECC의 인장거동 예측에 대한 연구는 미비한 실정이다. 현재까지 ECC의 인장거동 예측에 대한 연구는 이론적으로 균열면에서 섬유가 균일하게 분포하고 있다고 가정하고 섬유 가교 곡선을 유도하여 인장강도와 인장변형률을 예측하는 방법으로 수행되었다.⁴⁾ 그러나 이론적으로 유도된 방법은 균열면에서 섬유의 비균일적인 분포를 고

려하지 못하는 단점이 있어서, Fig. 1과 같은 섬유 가교 곡선의 변동을 고려하지 못한다. 기존의 연구에 의하면 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격이 일정하지 않아 발생하는 섬유 가교 곡선의 차이를 고려하지 못하므로, 실제 섬유 가교 곡선과 차이를 보이며, 이로 인하여 ECC의 인장거동을 예측할 때 오차를 발생시킨다.

이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 균열면에서 섬유 가교 작용에 기여하는 유효 섬유의 개수를 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따라 측정된 후, 수정된 섬유 가교 곡선을 구하고, 이를 이용하여 보다 합리적인 ECC 인장거동 예측기법을 제시하였다. 그리고 예측된 결과와 ECC의 인장실험 결과를 비교함으로써 예측 방법의 타당성을 평가하였다.

2. 섬유 가교 곡선과 1축 인장거동의 관계

2.1 1축 인장거동 특성

ECC의 인장거동 특성은 Fig. 2와 같이 초기 균열 상태와 극한상태로 나뉘지며, 2개의 직선으로 묘사될 수 있다. 여기서 초기균열 상태(first crack state)는 Fig. 2에

*Corresponding author E-mail: yunkim@cnu.ac.kr
 Received August 26, 2008, Revised April 28, 2009
 Accepted July 10, 2009
 ©2009 by Korea Concrete Institute

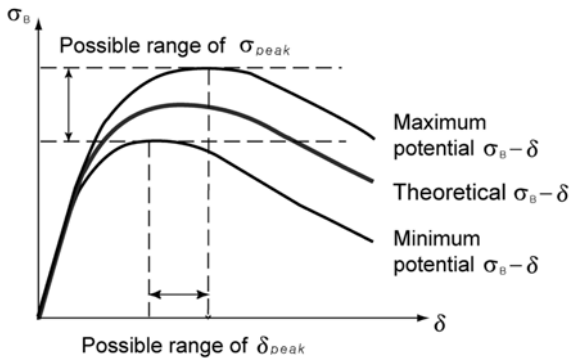


Fig. 1 Conceptual fiber bridging curves plotted for the Influence of fiber distribution variation

정상태균열 조건이 만족되지 못하게 됨으로써 국부적인 파괴가 발생하게 되는 응력상태이다. 그러므로 ECC의 인장거동을 예측하려면 식 (1)과 같이 초기균열강도(σ_{fc}), 인장강도(섬유 가교 곡선의 최대응력, σ_{peak}), 인장변형률(ϵ_{cu}), 그리고 탄성계수(E_c)가 필요하다.

$$\sigma(\epsilon) = \begin{cases} E_c \epsilon & \epsilon \leq \frac{\sigma_{fc}}{E_c} \\ \sigma_{fc} + \left(\frac{\sigma_{peak} - \sigma_{fc}}{\epsilon_{cu}} \right) \epsilon_{cu} & \epsilon_{cu} \geq \epsilon > \frac{\sigma_{fc}}{E_c} \end{cases} \quad (1)$$

즉, 식 (1)에서 탄성계수를 알고 있다고 가정하면, 초기 균열강도, 인장강도, 그리고 인장변형률을 알면 ECC의 인장거동을 이론적으로 예측할 수 있다. 여기서 초기균열강도는 예측 모델식을 사용하여 구할 수 있고, 인장강도는 섬유 가교 곡선, 인장변형률은 섬유 가교 곡선과 균열간격으로부터 얻을 수 있다. Fig. 3은 3가지 미지수에 대한 예측절차를 나타내며, 이에 대한 상세한 내용은 3장에서 언급하고자 한다.

2.2 섬유 가교 곡선의 역할 및 영향 인자

2.2.1 섬유 가교 곡선의 역할

ECC의 1축 인장거동은 2.1절에서 언급하였듯이, 초기 균열강도, 섬유 가교 곡선, 인장변형률에 의하여 이론적으로 예측될 수 있다. 특히 섬유 가교 곡선은 인장강도와 인장변형률에 영향을 미치기 때문에 정확히 모델링하여야 한다. 이론적인 섬유 가교 곡선은 섬유의 분산성에 따라서 Fig. 1과 같은 변동을 보이기 때문에, 보다 정확한 ECC의 1축 인장거동을 예측하려면 섬유 분산 특성을 고려한 섬유 가교 곡선을 재해석할 필요가 있다. 다시 말하면, 실제로 균열면에서 섬유 가교 작용에 기여하는 섬유의 개수는 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따라 달라지기 때문에, 섬유 가교 작용에 기여하는 유효 섬유의 개수를 파악하는 것이 중요하다.

2.2.2 섬유의 기울어진 각도가 섬유 가교 곡선에 미치는 영향

기존 연구에 의하면 섬유의 기울어진 각도와 섬유 가교 곡선의 관계는 섬유의 기울어진 각도에 따라 섬유 인

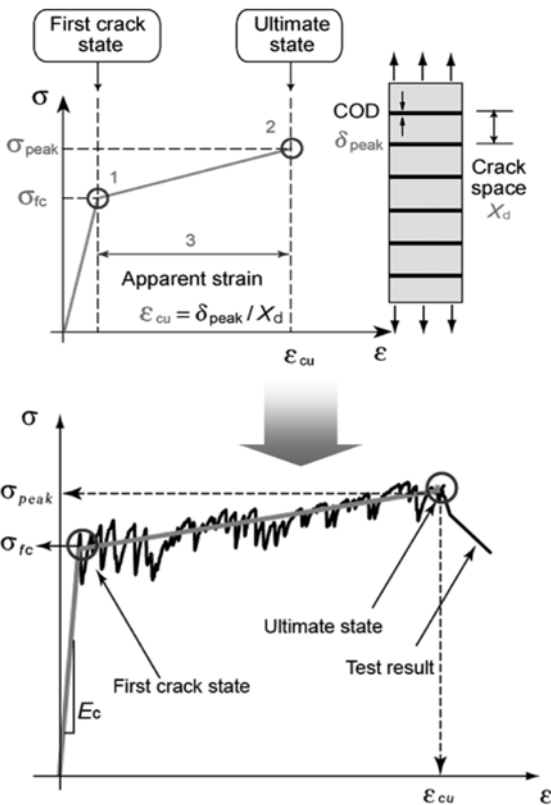


Fig. 2 Outline of prediction of tensile stress-strain relation

서 첫 번째로 구부러지는 점이고 초기균열 강도인 σ_{fc} 로 표현된다. 또한 다수의 균열이 시작되는 점이다. 극한상태(ultimate state)는 균열면에 유발된 응력이 증가하여 안

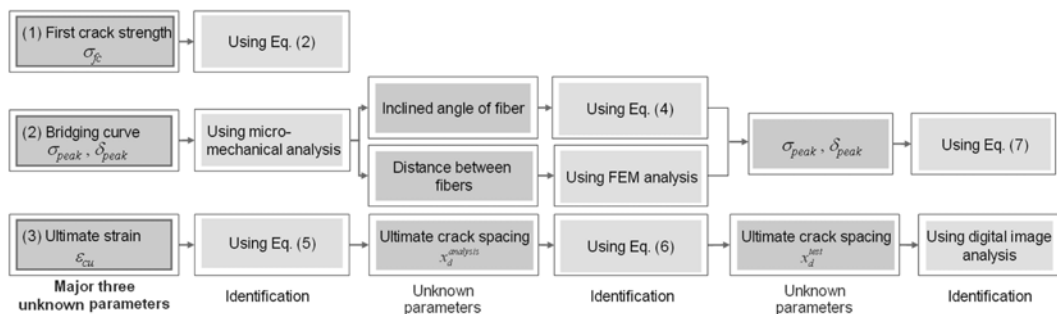


Fig. 3 Procedure for identifying three major unknown parameters

발 실험을 수행함으로써 파악할 수 있다.⁴⁾ Fig. 4에 나타난 것과 같이 섬유들의 기울어진 각도가 75°이상이면 섬유가 파단됨을 알 수 있다.⁴⁾ 이 연구에서는 섬유의 기울어진 각도가 75°이상이면 섬유가 파단되고, 파단된 섬유들은 더 이상 섬유 가교 작용을 못한다고 가정하고, 섬유 가교 곡선을 구할 때 기울어진 각도가 75°이상인 섬유는 제외시켰다.

2.2.3 섬유 간격이 섬유 가교 곡선에 미치는 영향

섬유 사이의 거리가 너무 가까우면 섬유가 개별적으로 인발되지 않고 Fig. 5와 같은 플러그 뽑힘 현상(plug pullout phenomenon; 가까이 모여있는 여러개의 섬유가 균열면에서 매트릭스 덩어리와 함께 뽑혀 나오는 현상)이 발생하는데, 이는 섬유 뭉침 현상에 의하여 섬유 간격이 특정 거리보다 짧을 경우에 발생한다.³⁾ 이러한 경우에는 섬유 뽑힘으로 유발되는 매트릭스 응력이 매트릭스의 인장 강도보다 크기 때문이며, 이 경우도 섬유가 더 이상 가교 작용에 기여하지 못하므로 섬유 가교 곡선을 구할 때 이러한 섬유는 제외시켜야 한다.

위에서 언급한 것과 같이, 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따라서 섬유 가교 작용에 기여하는 섬유의 개수가 달라지기 때문에 섬유 가교 곡선을 재해석하여야 하며, 이에 관한 내용은 3.2절에서 자세히 설명하였다.

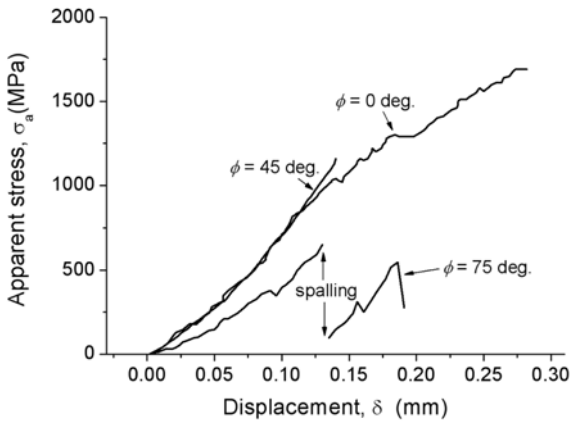


Fig. 4 Results of embedded strength tests⁵⁾

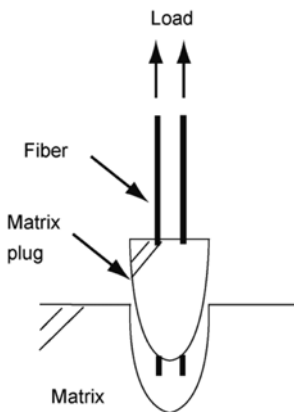


Fig. 5 Schematic of plug pullout phenomenon

3. 1축 인장거동 예측을 위한 3개 변수의 결정

3.1 초기균열강도의 결정 방법

초기균열강도에 대한 예측은 일반적으로 파괴역학에 기반을 두고 많은 연구⁶⁻⁸⁾가 수행되었으며, 이 연구에서는 균열강도 평가에 대한 결함모델(flaw model)을 제시한 Kanda⁸⁾의 초기균열강도 예측식을 사용하였고, 그 식은 다음과 같다.

$$\sigma_{fc}^{analysis} = 0.8 \left\{ \frac{\sqrt{\pi} \left[\frac{K_{tip}}{\delta_{peak}} \right] + \int_0^{R_u} \sigma_{c2}(\delta) \frac{RdR}{\sqrt{1-R^2}}}{+ \int_{R_u}^1 \sigma_{c1}(\delta) \frac{RdR}{\sqrt{1-R^2}}} \right\} \quad (2)$$

여기서 K_{tip} 은 매트릭스의 파괴인성, c_m 은 초기결함의 크기, R_u 는 균열의 지름, σ_{c1} , σ_{c2} 는 섬유의 가교응력, R 은 균열의 장반경대 단반경의 비이다.

3.2 섬유 가교 곡선의 결정 방법

3.2.1 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격을 구하기 위한 영상 처리기법

섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격은 다이아몬드 절단기를 이용하여 시편을 제작하고, 형광 현미경을 통하여 시편을 촬영한 후, 칼라 화상(RGB image)을 이진 화상(binary image)으로 변환하여(Fig. 6), 섬유 이미지를 검출하였다.⁹⁾

먼저, 섬유의 기울어진 각도는 섬유 이미지에서 각 개별 섬유의 형상을 파악함으로써 구할 수 있다. 물체의 형상을 나타내는 기술자(descriptor)는 여러 가지가 있는데 이 연구에서는 packing density(F_c)를 사용하였다. F_c 는 물체의 면적(A_{ob})을 물체 외접원의 면적(A_{cc})으로 나눈 값이며, 이를 수식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$F_c = \frac{A_{ob}}{A_{cc}} \quad (3)$$

F_c 는 이미지의 회전(rotation), 이동(translation), 크기 변화(scale), 그리고 밝기 변화(illumination change) 등의 변환

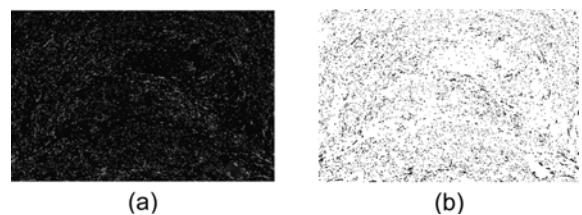


Fig. 6 Processed images for (a) cross-sectional fluo-rescence image, and (b) binary image

에 대하여 불변 특성을 가지고 있으며, 폭에 비하여 길이가 긴 물체의 경우 0에 가까운 값을 나타내고, 원에 가까운 물체의 경우 1에 가까운 값을 나타낸다. 또한 F_c 와 θ (섬유가 단면의 법선과 이루는 각도)의 관계는 식(4)와 같으므로 이를 이용하여 섬유의 기울어진 정도를 표현할 수 있다.

$$F_c = \frac{\pi dl/4}{\pi^2/4} = \frac{d}{l} = \frac{d}{d/\cos \theta} = \cos \theta \quad (4)$$

여기서 d 는 섬유의 지름이고, l 은 단면에서 섬유가 나타내는 타원의 장변 길이이다. 한편, 촬영된 단면에서 섬유 간 거리는 개별적으로 검출된 섬유 이미지의 무게 중심 좌표를 구한 후, 각 좌표 간의 거리를 계산하여 구할 수 있다.

3.2.2 섬유 간격의 영향을 결정하는 방법

정확한 섬유 가교 곡선을 구하기 위해서는 먼저 2장에서 언급한 바와 같이 인접한 섬유들에 의해 발생할 수 있는 플러그 뽑힘 현상을 정량적으로 평가하여 섬유 가교 작용에 기여하는 유효 섬유를 구별하여야 한다. 섬유 간격에 따른 영향을 실험적으로 구한다는 것은 매우 어려운 일이므로, 이 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 DIANA 9.2를 이용하여 3차원 해석을 수행한 후 그 결과를 활용하였다. 3차원 해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 단일 섬유 인발에 대한 기존의 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. 검증된 해석 절차를 바탕으로 다중섬유의 인발해석을 수행하여 플러그 뽑힘 현상이 발생하게 되는 임계 섬유 간격을 결정하였다. 결정된 임계 섬유 간격을 바탕으로 3.2.1절의 영상처리기법을 통하여 임계 섬유 간격 이하의 섬유들은 유효 섬유에서 제외하였다.

3.2.3 섬유 가교 곡선의 결정법

이론적인 섬유 가교 곡선은 이상적으로 균일하게 섬유가 분산되었다는 가정 하에 섬유혼입률(V_f)만큼의 모든 섬유가 유효한 것으로 보고 결정된다.⁴⁾ 그러나 2.2절에서 언급한 바와 같이 섬유 가교 곡선은 가교 작용에 실제로 기여하는 유효 섬유의 개수에 따라 달라지게 된다. 따라서 이 연구에서는 전체 섬유의 개수에서 임계 섬유 간격 이하의 섬유와 기울어진 각도가 75° 이상인 섬유의 개수를 제외한 유효 섬유의 개수를 계산하였다. 그리고 전체 섬유 개수에 대한 유효 섬유 개수의 비율만큼 섬유혼입률(V_f)이 유효하다는 가정 하에 섬유 가교 곡선을 수정하였다.

3.3 인장변형률

인장변형률은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{cu} = \frac{\delta_{peak}}{x_d} \quad (5)$$

여기서 δ_{peak} 는 섬유 가교 곡선에서 최대 응력일 때의 변위를 나타내고, x_d 는 평균 균열 간격을 나타낸다.

3.2.3절의 섬유 가교 곡선에 기초하여 δ_{peak} 를 구할 수 있기 때문에, 인장변형률은 x_d 만 알면 예측 가능하다. 이 연구에서는 x_d 를 예측하기 위하여 Wu 등¹⁰⁾이 제안한 식(6)을 사용하였다.

$$x_d = \frac{L_f - \sqrt{L_f^2 - 2\pi\phi L_f x'}}{2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } \phi &= \frac{4}{\pi g}, x' = \frac{V_m \sigma_{mu} d_f}{4 V_f \tau}, g = \text{스너빙 계수(scrubbing factor)}, \\ &= 2 \frac{e^{\pi f/2} + 1}{4 + f^2}, L_f \text{는 섬유의 길이, } V_m \text{은 매트릭스의 부피비,} \end{aligned}$$

σ_{mu} 는 매트릭스의 인장강도, d_f 는 섬유의 직경, V_f 는 섬유의 부피비, τ 는 마찰부착, f 는 스너빙 마찰 계수를 나타낸다.

4. 검증 및 분석

4.1 검증을 위한 1축 인장실험

이 절에서는 ECC의 1축 인장거동을 예측하기 위해 필요한 3개 변수를 결정하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 물-시멘트비 60%, 48%인 경우($W/C = 60\%, 48\%$)와 물-시멘트비 60%, 48%인 배합에 고로슬래그미분말을 25% 첨가함으로써 각각 물-결합재비 38%, 48%($W/B = 48\%, 38\%$)인 배합에 대하여 1축 인장실험을 수행하였다. 9.8 kN 용량의 로드셀이 부착된 만능재료시험기에서 0.3 mm/min의 변위제어로 수행하였고, 2개의 LVDT가 실험체의 양측에 부착되어 150 mm의 계측길이에 대한 변위를 측정 한 후, 변형률로 환산하였다.¹¹⁾ 재령 28일에 각 변수당 3개의 실험체에 대하여 실험을 수행하였고, 응력-변형률 관계와 함께 초기균열강도(σ_{fc}^{test}), 인장강도(σ_{peak}^{test}), 인장변형률(ϵ_{cu}^{test}) 등을 측정하였다. Table 1은 대표적인 값들을 나타낸다.

4.2 초기균열강도

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 4가지 배합에 대하여 예측된 초기균열강도와 인장실험 결과(Table 1)를 비교해 본 결과, 상관관계수 $R = 0.97$ 로 나타나 초기균열강도 예측식인 식(2)는 실험 결과를 매우 정확하게 모사함을 알 수 있다.

4.3 섬유 가교 곡선

4.3.1 섬유 각도 영향

Table 2는 4.1절의 4가지 배합에 대하여 섬유의 기울어진 각도에 따른 섬유의 개수를 구한 것이다. Table 2에서 알 수 있듯이 기울어진 각도가 75° 이상인 섬유는 평균적으로 2.3%이며, 섬유의 분포 특성에 크게 좌우되지 않는 경향이 있다.

Table 1 Outline of typical tensile test results

	W/C = 60%, w/o slag	W/C = 60%, w/ slag (W/B = 48%)	W/C = 48%, w/o slag	W/C = 48%, w/ slag (W/B = 38%)
σ_{fc}^{test} (MPa)	2.7 ± 0.5	3.4 ± 0.3	4.5 ± 0.4	5.0 ± 0.35
σ_{peak}^{test} (MPa)	3.5 ± 0.4	4.8 ± 0.15	4.8 ± 0.35	5.7 ± 0.3
σ_{cu}^{test} (MPa)	2.4 ± 0.3	3.6 ± 0.2	0.73 ± 0.2	0.98 ± 0.3

Table 2 Number of fibers for each mix according to inclined angle of fiber

Inclined angle	Mix	W/C = 60%, w/o slag	W/C = 60%, w/ slag (W/B = 48%)	W/C = 48%, w/o slag	W/C = 48%, w/ slag (W/B = 38%)
< 15°		1,023	1,210	1,163	1,156
15°~30°		1,186	1,354	1,237	1,245
30°~45°		994	1063	1042	1,136
45°~60°		326	425	223	214
60°~75°		365	239	296	382
75° >		114	45	127	79

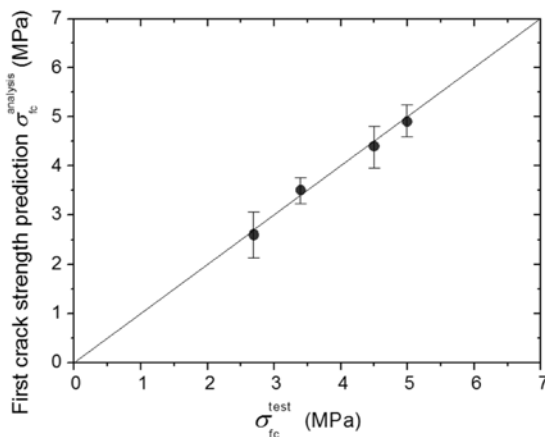


Fig. 7 Comparison between test and analysis for first crack strength

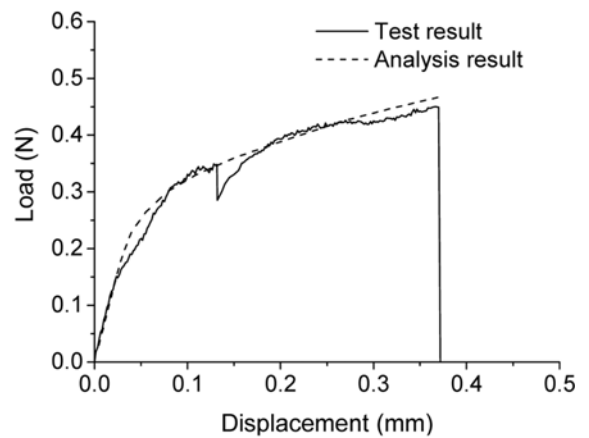


Fig. 9 Comparison between fiber pullout test result and analysis result

4.3.2 섬유 간격의 영향

DIANA 9.2를 이용한 3차원 섬유 인발 해석의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 실험 연구¹²⁾에서 사용한 실험체의 형상(Fig. 8)을 모델링 하였다. 또한, 섬유와 매트릭스의 계면 특성을 나타내는 화학적 부착과 마찰부착값은 기존의 연구¹²⁾에 의하여 결정된 실험값을 적용하였다. 단일 섬유에 대한 인발해석결과는 Fig. 9와 같고 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 단일섬유로 검증한 모델링을 바탕으로 Fig. 10(a)와 같이 다중섬유에 대한 모델링을 하였다. 모델링을 할 때 섬유의 문힘길이(≈3 mm)는 Li 등¹³⁾이 제안한 확률밀도 함수를 이용하여 구하였다.

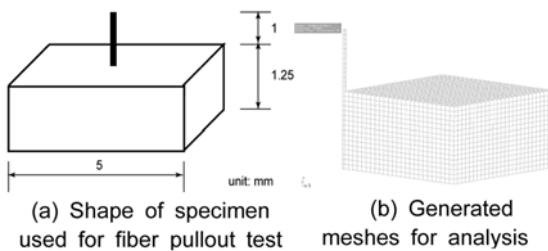


Fig. 8 Shapes of fiber pullout specimen

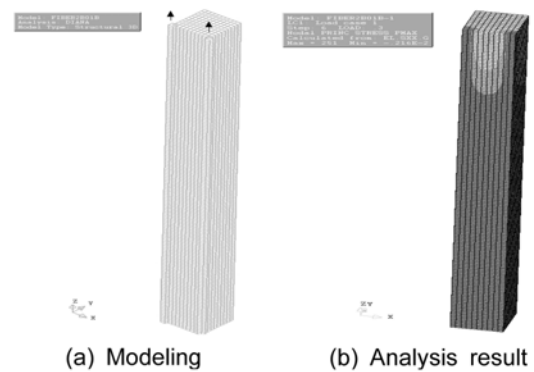


Fig. 10 The specimen with two embedded fibers

Fig. 10(b)는 W/C=60% w/o slag에 대한 해석 결과를 나타내며, 섬유사이의 거리가 0.063 mm이하가 되면 플러그 뽑힘 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 4가지 배합에 대하여 플러그 뽑힘 현상이 일어날 수 있는 섬유사이의 거리를 Table 3과 같이 구하였다.

4.3.3 섬유 가교 곡선

4.3.1절과 4.3.2절에서는 섬유 가교 작용에 참여하지 못

Table 3 Relation between fiber distance and number of fibers

	Distance between fibers	Number of fibers
W/C = 60%, w/o slag	< 0.063	517
W/C = 60%, w/ slag (W/B = 48%)	< 0.041	164
W/C = 48%, w/o slag	< 0.028	289
W/C = 48%, w/ slag (W/B = 38%)	< 0.019	156

하는 섬유 수의 개수를 구하여 보았으며, 이를 제외하고 섬유 가교 작용에 기여하는 유효 섬유의 개수와 기존 연구에서 구한 섬유 분산성¹²⁾을 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 알 수 있듯이 섬유 가교 작용에 참여하는 유효 섬유의 비율이 배합에 따라서 다르기 때문에 섬유 분포 특성을 고려한 섬유 가교 곡선을 구하기 위해서는 섬유 분산성(섬유의 기울어진 각도, 섬유 간격)이 고려되어야 한다. 또한, 기존연구¹²⁾에서 구한 섬유와 매트릭스의 특성을 Lin 등⁴⁾이 제안한 식 (7)에 대입하여 구한 이론적인 섬유 가교 곡선(theoretical bridging curve)과 섬유의 각도(Table 2) 및 간격(Table 3)의 영향을 고려하여 수정한 섬유 가교 곡선(modified bridging curve)은 Fig. 11에 비교한 바와 같다.

$$\sigma_B(\delta) = \frac{4V_f}{\pi d_f^2} \int_{\phi=0}^{\pi/2} \left[\int_{z=0}^{L_f/2 \cos \phi} \frac{2P(\delta) \sin \phi}{L_f} dz \right] d\phi \quad (7)$$

여기서 V_f 는 섬유복합 모르타르에 섬유의 부피 혼입량이

며 L_f 는 혼입된 섬유의 길이이다. 또한 $P(\delta)$ 는 단일 섬유가 균열면에서 작용하는 힘이다.

인장변형률의 크기, 즉 인장변형성능을 나타내는 척도 중의 하나인 보상에너지(complementary energy; J_b')¹¹⁾는 섬유가교곡선에서 다음 식 (8)의 계산에 의하여 구할 수 있다.

$$J_b' = \sigma_{peak} \delta_{peak} - \int_0^{\delta_{peak}} \sigma_B d\delta \quad (8)$$

여기서 σ_B 는 섬유가교곡선에서 가교응력을 의미한다.

Table 5는 균일한 섬유분포를 가정한 이론적인 섬유가교 곡선에서 구한 보상에너지와 수정된 섬유가교 곡선에서 구한 보상에너지를 비교하여 나타내고 있다. Table 5에서 계산된 보상에너지의 감소율을 보면 슬래그를 첨가한 배합(W/C = 60% mix with slag, W/C = 48% mix with slag)과 비교하여 슬래그를 첨가하지 않은 배합(W/C = 60% mix without slag, W/C = 48%, without slag)의 보상에너지 감소율이 훨씬 큼을 알 수 있다. 이는 섬유의 각도와 간격을 고려하여 수정된 보상에너지를 구할 경우, 섬유 분산 특성이 우수하여 유효 섬유의 개수가 많은 배합이 상대적으로 낮은 보상에너지 감소율을 나타내기 때문이다.

4.4 인장변형률

1축 인장실험에 의하여 나타난 평균 균열 간격은 3.3

Table 4 Number of fibers actually involved in the bridging capacity

	Number of fibers involved in bridging capacity (1)	Actual number of fibers (2)	(1) / (2)	Fiber dispersion
W/C = 60%, w/o slag	3377	4008	0.84	0.313
W/C = 60%, w/ slag (W/B = 48%)	4127	4336	0.95	0.362
W/C = 48%, w/o slag	3662	4088	0.89	0.302
W/C = 48%, w/ slag (W/B = 38%)	3987	4212	0.94	0.353

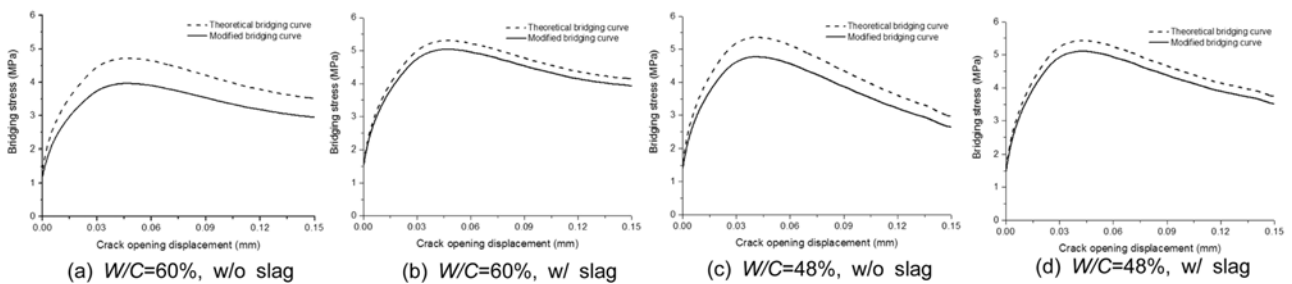


Fig. 11 Comparison between theoretical bridging curve and modified bridging curve

Table 5 Theoretical and modified complementary energies accounting for fiber dispersion

	W/C = 60% w/o slag	W/C = 60% w/ slag	W/C = 48% w/o slag	W/C = 48% w/ slag
Theoretical complementary energy (a)	189	208	182	184
Modified complementary energy accounting for fiber dispersion (b)	159	197	162	173
Decrease of complementary energy (%)	15.8	5.2	10.9	6.0
Tensile strain (%)	2.4	3.6	0.73	0.98

*Decrease of complementary energy (%) = $\frac{a-b}{a} \times 100$

Table 6 Predicted tensile properties of ECC

	W/C=60%, w/o slag	W/C=60%, w/ slag (W/B=48%)	W/C=48%, w/o slag	W/C=48%, w/ slag (W/B=38%)
$\sigma_{fc}^{predicted}$ (MPa)	2.6 (2.7)	3.5 (3.4)	4.4 (4.5)	4.9 (5.0)
$\sigma_{peak}^{predicted}$ (MPa)	4.0 (3.5)	5.0 (4.8)	4.7 (4.8)	5.2 (5.7)
$x_d^{predicted}$ (mm)	1.65	1.91	2.12	2.38
$\varepsilon_{Cu}^{predicted}$ (%)	2.7 (2.4)	2.5 (3.6)	1.8 (0.73)	1.7 (0.98)

The values in parentheses present experimental results in terms of average values

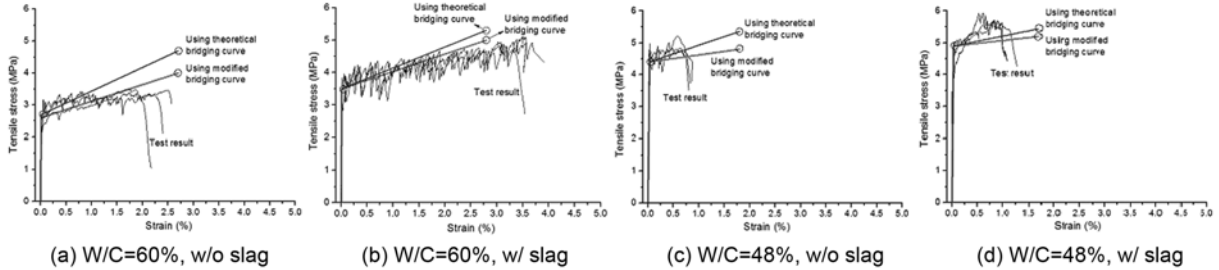


Fig. 12 Comparison of tensile stress-strain curves between predicted and experimental for ECCs

질의 식 (6)에 의하여 예측하였고 그 결과는 Table 6에 나타내었다.

4.5 1축 인장거동

수정된 섬유 가교 곡선을 고려한 ECC 인장거동 예측 기법의 실효성 및 정확성을 평가하기 위하여 ECC의 인장거동을 예측한 결과를 4.1절에서 언급한 1축 인장실험 결과와 비교하였다. Table 6은 3장에서 제안한 방법으로 예측된 결과를 나타내며, 이 결과를 이용하여 Fig. 12와 같이 1축 인장실험 결과와 비교하였다. Table 6에 나타난 예측 결과와 실험 결과들이 대체로 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 11(a)~(d)에서 이상적인 섬유 가교 곡선을 사용하여 인장거동을 예측할 경우에는 섬유의 분포 특성, 즉, 섬유의 기울어진 각도와 섬유사이의 간격을 고려하지 않고 모든 섬유들이 이상적으로 분포되어 있다고 가정하였기 때문에 인장강도와 인장변형률이 과대평가(Fig. 12(c), (d))되는 경향이 있다. 그러나 Fig. 12(a)~(d)에는 섬유의 분포 특성을 고려한 수정된 섬유 가교 곡선을 사용하여 인장거동을 예측하였기 때문에 실험 결과와 예측 결과가 유사함을 알 수 있지만, 보다 정확한 인장거동 예측을 위해서는 유효섬유의 수를 고려하는 것과 더불어 섬유의 각도의 영향을 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 12(c), (d)에는 실험 결과와 예측 결과가 다소 차이를 보이는데 이는 다수의 균열이 발생될 수 있는 조건을 만족하지 못하여 균열이 충분히 발생되지 않기 때문이라고 판단된다. 이상에서 알 수 있듯이 수정된 섬유 가교 곡선을 이용하면 보다 합리적인 ECC의 인장거동을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

이 연구를 통하여 ECC의 인장거동을 예측하기 위하여

수정된 섬유 가교 곡선을 이용한 ECC의 인장거동 예측 기법을 개발하였다. 또한, 이 기법의 타당성을 검증하기 위하여 검증 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 섬유의 분포 특성을 고려한 섬유 가교 곡선을 구하여 ECC의 인장거동 예측에 활용하고자, 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따라서 섬유 가교 작용에 기여하는 유효 섬유의 개수를 구한 후, 수정된 섬유 가교 곡선을 구하였다.
- 2) 수정된 섬유 가교 곡선을 구할 때 균열면에서 섬유의 분포 특성에 따른 영향을 평가하기 위하여, 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따른 영향을 알아보았다. 섬유의 기울어진 각도를 구하기 위해서 형광 현미경에 의하여 검출된 섬유 이미지의 형상으로부터 기울어진 각도의 유형을 분류하였고, 기울어진 각도가 75° 이상인 섬유는 파단이 일어나 섬유 가교 작용을 하지 못하기 때문에 섬유 가교 곡선을 구할 때는 이를 제외시키고 구하였다. 또한, 섬유 간격에 따른 영향은 단일섬유에 대하여 인발해석을 수행한 후 다중섬유로 인발해석을 확장시켜, 섬유사이의 거리에 따른 영향을 조사하였다.
- 3) 수정된 섬유 가교 곡선과 이상적인 섬유 가교 곡선으로 ECC의 인장거동을 예측한 결과와 인장실험 결과를 비교하여 예측방법의 타당성을 평가하였다. 이론적인 섬유 가교 곡선을 이용하여 인장거동을 예측할 경우, 섬유의 분포 특성(섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격)을 고려하지 않고 모든 섬유들이 이상적으로 분포되어 있다고 가정하였기 때문에 인장강도와 인장변형률이 과대평가되는 경향이 있으나, 수정된 섬유 가교 곡선을 사용할 경우, 이론적인 섬유 가교 곡선을 사용할 경우에 비하여 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타나 ECC의 인장거동을 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 교육과학기술부 기초과학연구사업에서 콘크리트 균열제어연구단에 지원된 연구비에 의해 수행된 연구이며, 지원에 감사드립니다. 또한 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-314-D00421).

참고문헌

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. Fischer, G. and Li, V. C., "Effect of Matrix Ductility on Deformation Behavior of Steel Reinforced ECC Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 6, 2002, pp. 781~790.
3. Kanda, T. and Li, V. C., "Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4, No. 1, 2006, pp. 59~72.
4. Z. Lin, 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.
5. Kanda, T. and Li, V. C., "Interface Property and Apparent Strength of a High Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix," *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 10, No. 1, 1998, pp. 5~13.
6. Li, V. C. and Leung, C. K. Y., "Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 188, No. 11, 1992, pp. 2246~2264.
7. Marshall, D. B. and Cox, B. N., "A J-integral Method for Calculating Steady-state Matrix Cracking Stresses in Composites," *Mechanics of Materials*, Vol. 7, No. 2, 1988, pp. 127~133.
8. Kanda, T. and Li, V. C., "Multiple Cracking Sequence and Saturation in Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Concrete Research and Technology JCI*, Vol. 9, No. 2, 1998, pp. 19~33.
9. 김윤용, 이방연, 김진근, "PVA-ECC 단면 이미지의 섬유 분류 및 검출 기법," 콘크리트학회 논문집, 20권, 4호, 2008, pp. 601~608.
10. Wu, H. C. and Li, V. C., "Snubbing and Bundling Effects on Multiple Crack Spacing of Discontinuous Random Fiber-Reinforced Brittle Matrix Composites," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 75, No. 12, 1992, pp. 3487~3479.
11. 김윤용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근, "마이크로역학에 의하여 설계된 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성," 콘크리트학회 논문집, 17권, 5호, 2005, pp. 709~716.
12. Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., and Kim, Y. Y., "Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC Produced with Slag Particles," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 7, 2007, pp. 1096~1105.
13. Li, V. C. and Obla, K., "Effect of Fiber Diameter Variation on Properties of Cement Based Matrix Fiber Reinforced Composites," *Composites Engineering International Journal Part B 27B*, 1996, pp. 275~284.

요약 지금까지 ECC의 인장거동 예측에 대한 이론적인 연구는 균열면에서 섬유가 균일하게 분산되어 있다고 가정하고 섬유 가교 곡선을 유도하는 방법으로 수행되었으며, 섬유의 기울어진 각도와 섬유사이의 간격은 섬유 가교 곡선을 예측하는데 큰 영향을 준다. 그러나 이론적으로 유도된 방법은 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따라서 섬유 가교 곡선의 형태가 달라지는 것을 모사하지 못하여 실제 섬유 가교 곡선과 차이를 보이며, ECC 인장거동을 예측할 때 큰 오차가 발생할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 균열면에서 섬유 가교 작용에 기여하는 유효 섬유의 개수를 섬유의 기울어진 각도와 섬유 간격에 따라 고려한 후, 수정된 섬유 가교 곡선을 구하고, 이를 이용하여 보다 합리적인 ECC의 인장거동 예측기법을 제시하였다. 또한, 인장거동 예측에 중요한 변수인 초기 균열 강도, 섬유 가교 곡선에서의 최고 응력과 변위, 인장변형률, 균열간격을 구하기 위한 방법과 절차를 제시하였다. 그리고 예측 방법의 타당성을 평가하기 위하여 수정된 섬유 가교 곡선과 이론적인 섬유 가교 곡선으로 구한 ECC의 인장거동을 실험 결과와 비교하였다. 수정된 섬유 가교 곡선을 사용할 경우, 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었으며, ECC의 인장거동을 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : ECC, 인장응력 변형률 관계, 섬유 가교 곡선, 섬유의 기울어진 각도, 섬유사이의 간격