

실제 균열면응력-변위 곡선을 고려한 ECC의 1축 인장거동 관계

Tensile Stress-Strain Relation of ECC (Engineered Cementitious Composite) Accounting for Bridging Curve

김정수* 이방연** 권승희*** 김진근**** 김윤용*****
Kim, Jeong-Su Lee, Bang Yeon Kwon, Seong-Hee Kim, Jin-Keun Kim, Yun Yong

ABSTRACT

An engineered cementitious composite (Engineered Cementitious Composite) had been developed in previous study. Theoretical prediction of the tensile stress-strain relation of ECC is important in providing the material constitutive relation necessary for designing structural members. But, few studies have been reported with regard to predicting the tensile stress-strain relation of ECC. Prediction of the tensile stress-strain relation of ECC accounting for actual bridging curve, such as fiber dispersion is needed. The present study extends the work as developed by Kanda et al., by modeling the bridging curve, accounting for fiber dispersion, the degree of matrix spalling, and fiber rupture to predict the tensile stress-strain relation of ECC. The role of material variation in the bridging curve, such as number of effective fiber actually involved in the bridging capacity and how it affects the multiple cracking process is discussed. The approach for formulating the tensile stress-strain relation is discussed next, where the procedure for obtaining the necessary parameters, such as the crack spacing, is presented. Finally, the predicted stress-strain relation will be validated with experimental tests results.

요약

모르타르에 2 %이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형률 경화거동을 보이는 ECC가 기존 연구에 의해 개발되었으며, ECC를 구조부재에 사용할 경우, 구조물의 성능개선이 매우 커질 것으로 판단된다. 그러나 ECC를 사용한 구조물을 설계할 때 중요한 요인인 ECC의 인장거동 관계 예측에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 특히 보다 실제적인 인장거동 관계를 예측하기 위해서는 섬유분산성 등 실제의 균열면응력-변위 곡선을 고려한 연구가 필요하다. 따라서, 이 연구에서는 ECC의 인장거동 관계를 예측할 수 있는 기법을 제시하였다. ECC의 인장거동 예측방법은 초기균열강도, 인장강도, 인장변형률을 구하는 과정으로 구성되는데, 보다 합리적이고 실제적인 ECC의 인장거동 예측을 위하여 균열면응력에서 가교작용에 기여하는 유효섬유의 개수를 섬유의 기울어진 각도와 섬유사이의 간격에 따라 예측하였다. 또한 극한인장변형률 예측을 위하여 화상처리기법을 사용하였다. ECC의 인장실험결과와의 비교를 통하여 예측방법의 타당성을 평가하였다.

* 정회원, KAIST 건설및환경공학과 박사후연구원

** 정회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정

*** 정회원, 명지대학교 토목공학과 교수

**** 정회원, KAIST 건설및환경공학과 교수

***** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

1. 서론

모르타르에 2%이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형을 경화거동을 보이는 ECC가 기존 연구에 의해 개발되었으며, ECC를 이용하여 구조부재를 설계하는데 필요한 재료의 구성방정식을 제시하기 위하여 ECC의 인장거동 관계를 예측하는 것이 필요하다. 또한, ECC의 인장거동 관계 예측에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 특히 실제 균열면응력-변위 곡선을 고려한 ECC의 인장거동 관계에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 실제적인 ECC의 인장거동 예측을 위하여 균열면에서 가교작용에 기여하는 유효섬유의 개수를 섬유 기울어진 각도와 섬유사이의 간격에 따라 고려하였으며, ECC의 인장실험결과와의 비교를 통하여 예측방법의 타당성을 평가하였다.

2. ECC의 인장거동 관계

2.1 개요

ECC의 인장거동 관계의 변수는 그림 1에서와 같이 다음의 3가지이며, 초기균열강도(1), 인장강도(2), 인장변형률(3)을 알면 인장거동관계를 예측할 수 있다. 또한, 인장강도(2)와 인장변형률(3)은 균열면응력-변위 곡선에서 구하는 균열면에서의 응력과 변위와 밀접한 관련이 있다.

2.2 섬유분산성을 고려한 균열면응력-변위 곡선

기존에 이론적으로 유도된 균열면응력-변위 곡선¹⁾은 섬유의 무작위적인 분포를 고려하지 않았기 때문에, 균열면응력과 변위를 해석할 때 섬유가 균일하게 분포되어 있다고 가정을 하였다. 그러나 실제적으로는 섬유의 분산성에 의하여 그림 2와 같이 균열면응력-변위 곡선이 다양한 변동폭을 가지며, 결과적으로 섬유의 분산성이 ECC의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 그래서 이 연구에서는 섬유의 기울어진 각도와 섬유사이의 간격에 따른 유효 섬유의 개수를 고려하여 수정된 균열면응력-변위 곡선을 구하였다.

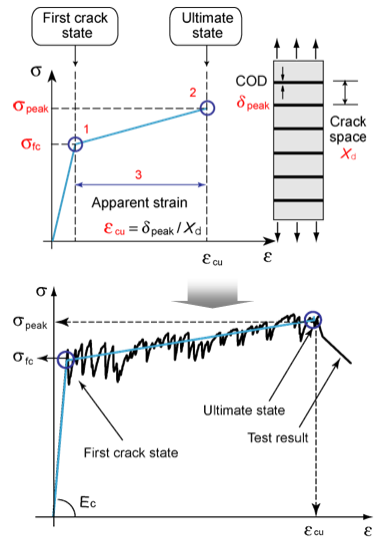


그림 1 인장거동 관계의 변수

2.2.1 섬유의 기울어진 각도의 영향

그림 3(a)와 같이 균열면에서 섬유의 기울어진 각도가 75° 이상이면 섬유가 가교작용을 하지 못하고 파단된다는 기존의 연구²⁾에 의하여 섬유의 기울어진 각도가 75° 이상인 섬유는 균열면에서의 가교작용에 기여를 하지 못할 것으로 판단하여, 수정된 균열면응력-변위 곡선을 구할 때는 이를 제외하였다. 그리고 섬유의 기울어진 각도는 기존의 연구자가 제안한 방법을 사용하였으며,³⁾ 이 연구에서 제시된 배합과 섬유의 기울어진 각도는 표 1과 같다.

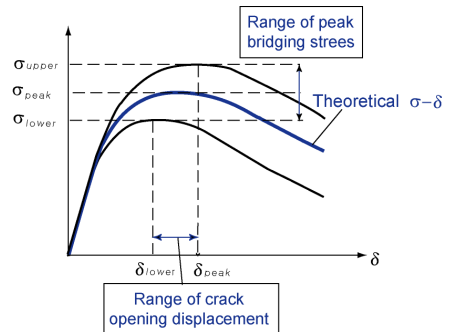


그림 2 균열면응력-변위 곡선의 변동

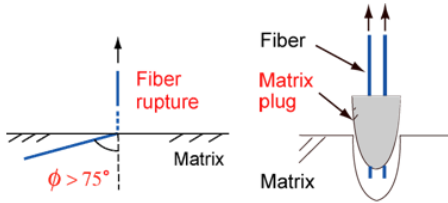
2.2.2 섬유사이의 간격에 따른 영향

그림 3(b)와 같이 섬유사이의 간격이 너무 가까운 경우, 섬유와 매트릭스가 같이 뽑히는 현상이 일어난다고 보고되었으며,⁴⁾ 뽑힘현상이 발생한 섬유는 더 이상 균열면에서의 가교작용에 기여하지 못한다고 판단하였다. 이 연구에서도 섬유와 매트릭스의 뽑힘현상이 발생하는 섬유사이의 간

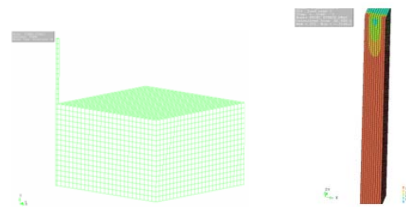
격을 알아보기 위하여 그림 4와 같이 상용프로그램인 DIANA를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석을 통하여 구한 가교작용에 기여하는 유효섬유의 개수는 표 2와 같다.

표 1 섬유의 기울어진 각도에 따른 섬유의 개수

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%)
Inclined angle				
<15°				
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



(a) 섬유 각도의 영향 (b) 섬유 간격의 영향
그림 3 균열면응력-변위 곡선의 영향인자



(a) 단일섬유 (b) 다중섬유
그림 4 섬유간격에 따른 뽑힘 해석

표 2 섬유의 뽑힘현상이 일어날 수 있는 섬유의 개수

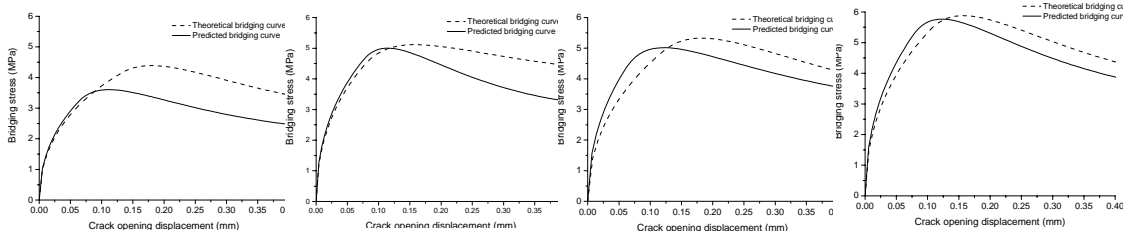
Mix	Distance between fibers which plug pullout phenomenon may occur (mm)	Number of fibers
W/C=60%, w/o slag	< 0.063	517
W/C=60%, w/ slag (W/B=48%)	< 0.041	164
W/C=48%, w/o slag	< 0.028	289
W/C=48%, w/ slag (W/B=38%)	< 0.019	156

2.2.3 섬유의 분산성을 고려한 유효섬유의 개수와 수정된 균열면응력-변위 곡선

위 절에서 구한, 섬유의 각도와 섬유의 간격에 따라서 가교작용에 기여하는 유효섬유의 개수는 표 3과 같다. 표 3에서 알 수 있듯이 섬유의 분산성이 커짐에 따라서 가교작용에 기여하는 섬유의 개수가 증가하며, 이는 슬래그의 첨가에 의하여 섬유분산성이 개선되었기 때문이라고 기존 연구에서 밝혀진 바 있다⁵⁾. 그리고 가교작용에 기여하는 유효섬유의 개수를 이용하여 수정된 균열면응력-변위 곡선을 구하면 그림 5와 같다.

표 3 가교작용에 기여하는 유효섬유의 개수

Mix	Number of fibers involved in bridging capacity (1)	Actual number of fiber (2)	(1)/(2)	Fiber dispe rsion
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



(a) W/C=60%, w/o slag (b) W/C=60%, w/ slag (c) W/C=48%, w/o slag (d) W/C=48%, w/ slag
그림 5 수정된 균열면응력- 변위곡선

2.4 초기균열강도(1)와 인장변형률(3)

초기균열강도는 Kanda et. al⁴⁾의 식을 사용하여 예측하였고, 실험결과와도 잘 일치하였다. 인장변형률($\epsilon_{cu} = \delta_{peak} / X_d$)은 수정된 균열면응력-변위곡선에서 변위(δ_{peak})를 구할 수 있으므로, 균열간격(X_d)를 구하면 된다. 이 연구에서는 Wu et. al⁶⁾의 식과 이미지 프로세싱 기법에 의하여 균열을 촬영하여 균열간격을 구하였으며, 그 값은 실험결과와 잘 일치하였다.

3. 실험결과와의 비교

그림 6은 예측된 초기균열강도(1), 인장강도(2), 인장변형률(3)으로 구한 ECC의 인장변형 관계와 실험결과와의 비교를 나타내고 있다. 그림 6(a)~6(d)는 실험결과와 예측된 결과가 대체로 잘 일치함을 알 수 있다.

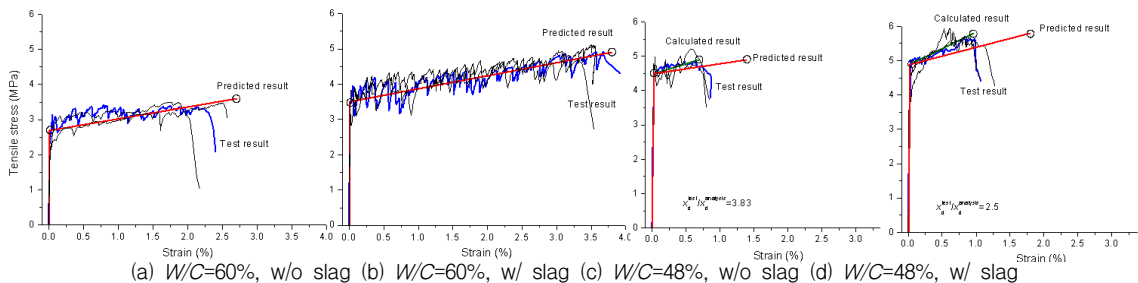


그림 6 예측된 인장거동 관계와 실험결과와의 비교

4. 결론

이 연구에서는 보다 실제적인 균열면응력-변위 곡선을 구하여 인장변형률 예측에 활용하고자, 섬유 기울어진 각도와 섬유사이의 간격에 따라서 가교작용에 기여하는 유효 섬유의 개수를 구한 후, 수정된 균열면 응력-변위 곡선을 구하였다. 또한 예측된 인장거동관계와 인장실험결과와의 비교를 통하여 예측방법의 타당성을 평가하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00470).

참 고 문 헌

1. Z. Lin, T. Kanda and V. C. Li, "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites", Journal of Concrete Science and Engineering, RILEM, Vol. 1, 1999, pp. 173-184.
2. T. Kanda and V. C. Li, "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.
3. J. S. Kim, "Development and Application of ECC Produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag for Processibility Enhancement", PhD Thesis, KAIST, 2008.
4. T. Kanda and V. C. Li, "Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 4, No. 1, 2006, pp. 59-72.
5. J. K. Kim, J. S. Kim, G. J. Ha, and Y. Y. Kim, "Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC Produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag", Cement and Concrete Research, Vol. 37, No. 7, 2007, pp. 1096-1105.
6. H. C. Wu and V. C. Li, "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.