섬유 분포에 따른 ECC 1축 인장 거동

Uniaxial Tension Behavior According to the Distribution of Fiber Orientation

이 방 연* 김 윤 용** 김 진 근*** 남 관 우****

Lee, Bang Yeon Kim, Yun Yong Kim, Jin-Keun Nam, Kwan-Woo

ABSTRACT

This paper presents crack spacing which quantitatively considers the fiber distribution and prediction of uniaxial tensile behavior of ECC on the basis of crack spacing and fiber distribution. The predictions exhibit similar tensile stess-strain curves to the test results within 10% error.

요 약

이 논문에서는 섬유 분포 특성을 반영하여 균열 간격을 계산할 수 있는 수식을 유도하고, 이를 바탕으로 ECC의 1축 인장 거동을 예측하였다. 예측 결과와 실험 결과는 약 10% 오차가 발생하였다.

1. 서 론

ECC는 일반적으로 1축 인장 거동에서 다중 균열에 의한 2% 이상의 극한 변형 성능을 나타내는데, 이를 예측하기 위해서는 섬유 가교 곡선과 균열 간격을 정확히 평가하여야 한다. 이제까지는 주로 섬유 각도에 대한 확률밀도함수를 2차원이나 3차원으로 가정하였는데 실험체를 제조하는 방법에 따라 섬유 분포 특성이 달라지기 때문에 이를 고려하여 섬유 분포 특성에 따른 섬유 가교 곡선과 균열 간격을 평가하여야 한다. 이 논문에서는 섬유 분포 특성을 반영하여 균열 간격을 계산할 수 있는 수식을 유도하고, 이를 바탕으로 ECC의 1축 인장 거동을 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 균열 간격 및 ECC 1축 인장 거동 예측

섬유 보강 복합재료에서 균열 간격은 균열면에서 하중에 저항하는 섬유의 응력이 매트릭스에 계면을 통해 전달되면서 또 다른 균열이 발생하는 원리에 의해 계산될 수 있다. 즉, 균열 간격이란 섬유가 가교 작용을 충분히 할 수 있는 요소 크기로 생각할 수 있다. 섬유가 연속적이고 1차원 배열이라고 가정하면 균열 간격은 $x_1 = (V_m \sigma_{mu} d_f)/(4 V_f \tau_0)$과 같다[1]. 여기서 V_m, σ_{mu}, d_f, V_f, τ_0는 각각 매트릭스의 부피, 매트릭스 강도, 섬유의 직경, 섬유 부피, 매트릭스와 섬유의 마찰계수이다. 식 (1)은 섬유

* 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사후 연구원
** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
*** 정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수
**** 정회원, (주)태영건설 상무

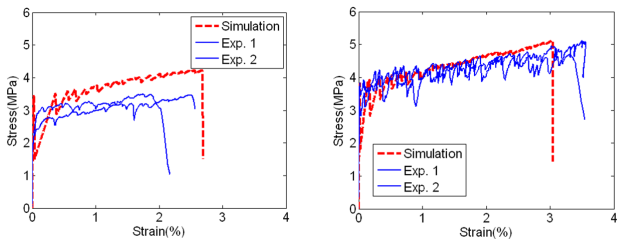
가 연속적이고 1차원 배열일 때 균열 간격을 바탕으로 단섬유이며 섬유 각도에 대한 확률밀도함수를 고려하여 유도한 균열 간격이다.

$$x_{\mathrm{m}} = \frac{L_f - \sqrt{L_f^2 - 4L_f\left(\frac{\varphi_{ori}\alpha_{nf} - \varphi_{Fpul}}{\varphi_{ori}\varphi_{Ffri}\alpha_{nf}^2}\right)\alpha_s x_1}}{2} \tag{1}$$

여기서 α_{nf}, α_s, φ_{ori}, φ_{Ffri}, φ_{Fpul}, $p(\theta)$, 는 각각 섬유 개수 보정 계수, 스너빙 효과 보정계수, $\int_0^{\pi/2}\cos(\theta)\,p(\theta)d\theta$, $\int_0^{\pi/2}\cos(\theta)^2\,p(\theta)d\theta$, $\int_0^{\pi/2}(1-\cos(\theta))\cos(\theta)\,p(\theta)d\theta$를 나타낸다. 섬유 방향성 및 섬유 개수는 이미지 프로세싱 기법을 적용하였으며, 해석 방법은 Fischer[2]에 의해 제시된 방법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 2%의 PVA 섬유와 물/결합재비/슬래그 유무에 따라 제조된 ECC 2가지 실험체[3]에 대하여 2절에서 유도한 균열 간격과 섬유 분포 특성을 고려하여 구한 섬유 가교 곡선으로 1축 인장 거동을 시뮬레이션한 결과와 실험결과를 비교한 것이다. wc60wos 실험체의 경우 실험결과에 비하여 응력과 극한 변형률 모두 약 10% 과도하게 산정된 반면, wc60ws 실험체는 실험결과에 비하여 응력은 거의 비슷하게 산정되었고 극한 변형률은 약 10% 작게 산정되었다. 다만, 이 연구에서는 슬래그 첨가에 따른 영향을 고려하지 않았으므로 이를 고려하면 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.



(a) wc60wos (b) wc60ws

그림 1. 실험결과와 시뮬레이션 결과

4. 결 론

이 논문에서는 섬유 분포 특성을 반영하여 균열 간격을 계산할 수 있는 수식을 유도하고, 이를 바탕으로 ECC의 1축 인장 거동을 예측한 결과, 실험결과를 약 10% 오차 이내로 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-314-D00421).

참고문헌

1. Aveston J, Cooper GA, and Kelly A. Single and multiple fracture. In the Properties of Fiber Composites, Guildford, UK: IPC Science and Technology Press. 1971. P. 15-26.
2. Fischer, G. and Li, V.C., Influence of matrix ductility o tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC), ACI Structural Journal, Vol.99, No.1, 2002, pp.104-111.
3. 김윤용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근, 마이크로역학에 의하여 설계된 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성, Vol.17, No.5, 2005, pp.709-716.