

섬유보강 복합체의 균열면 해석을 위한 수정 미세역학 모델

Modified Micro-Mechanical Fiber Bridging Model for Crack Plane of Fiber Reinforced Cementitious Composite

신경준* 박종범*

Shin Kyung-Joon Park Jong-Bum

ABSTRACT

In this paper, the post cracking stress-crack width relationship of the composite is studied from a micromechanics points of view. Cook-Gordon debonding effect is studied by more refined method with considering of chemical friction of fiber interface.

As a result, fiber with pre-debonding length retards stress development and shows more wide crack width for the same force level. longer pre-debonding length and lower pre-debonding bond strength results in lower full-debonding force, but same crack width.

1. 연구배경 및 목적

섬유보강 모르타르의 균열면 거동에 대한 해석을 위해서 섬유의 가교응력(Bridging Stress)을 이용한 미세역학이론이 사용된다. 다중 균열 분산효과를 목표로 하는 ECC의 경우 미세역학이론에 기본하여 배합조건이 결정되게 된다. 그러나 기존의 미세역학 모델은 균열발생에 의한 섬유 부착면의 변화에 대한 고려 없이, 섬유 뿔힘 실험의 결과만을 이용하기 때문에 실제의 거동을 과대평가하는 경향이 있다. 따라서, 본 연구에서는 균열발생시의 Cook-Gordon Effect를 합리적인 방법으로 고려하는 수정된 미세역학 이론에 대한 연구를 수행하였다.

2. 기존연구의 섬유뿔힘 모델

섬유의 뿔힘단계는 섬유와 매트릭스간의 부착이 파괴되는 debonding 단계와 섬유가 전체적으로 뿔히는 pull-out 단계로 구분할 수 있으며, 부착 파괴의 기준에 따라, 응력에 기초한 방법과 에너지평형에 기초한 방법으로 분류된다. 응력에 기초한 파괴 기준은 Leung and Li(1991)와 Kanda and Li(1999)에 자세히 설명되어있다.

응력해석과 에너지 평형에 기초한 부착파괴 기준은 Lin and Li(1999)에 몇가지의 가정과 함께 다음과 같이 유도되었으며, 자세한 식과 변수설명은 Lin and Li(1999)에 나타나있다.

(1) 부착파괴 단계의 섬유

$$P = \sqrt{\frac{\pi^2 \tau_0 E_f d_f^3 (1 + \eta)}{2} \delta + \frac{\pi^2 G_d E_f d_f^3}{2}}, \quad 0 \leq \delta \leq \delta_0 \quad (1)$$

*정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부

(2) 섬유 뽑힘 단계의 섬유

$$P = \pi d_f \tau_0 (1 + \beta(\delta - \delta_d) / d_f)(L_e - \delta + \delta_d), \quad \delta_0 \leq \delta \leq L_e \quad (2)$$

여기서, L_e : embedded fiber length, δ_d :부착파괴시의 균열폭.

3. Cook-Gordon Effect

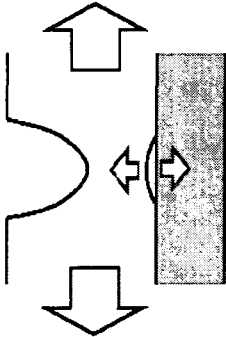


그림.1 The Cook-Gordon effect in front of crack tip

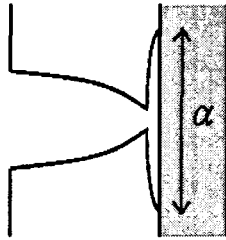


그림.2 An isolated composite cylinder model

그림 1에 보여진 바와 같이 콘크리트 매질내에 균열이 진전 할 때, 균열선단의 앞쪽에서 하중재하방향의 직각방향으로 인장응력이 발생하게 된다. 따라서, 균열선단이 섬유에 도달하기 전에 섬유와 매질의 분리되는 현상이 발생하며, 이를 Cook-Gordon 효과라 알려져 있다. 이러한 효과에 의하여 균열발생과 동시에 섬유-매질간의 부착이 저하되는 Pre-Debonding이 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 Pre-debonding이 발생하는 구간을 섬유 부착응력이 감소하는 것으로 모사하였으며 그림 2에서 보인바와 같이 길이 a_p , 부착응력 τ_p 의 구간을 Pre-debonding region으로 모델링 하였다.

3. 균열면의 섬유에 대한 수정 미세역학모델

Lin and Li(1999)에 의해 제안된 에너지평형에 의한 부착파괴 기준에 의한 섬유모델링에 기초하여 수정된 미세역학모델을 유도하였으며, 상수 β 값으로 섬유의 뽑힘에 의한 경화현상을 모사하였다.

(1) Frictional slide-out stage of fiber in pre-debonded region

$$P = \sqrt{\frac{\pi^2 \tau_p E_f d_f^3 (1 + \eta)}{2}} \delta \quad \text{for } \delta < \delta_p \quad (3)$$

$$\delta_p = \frac{2\tau_p a_p^2 (1 + \eta)}{E_f d_f}$$

여기서, δ_p 는 pre-debonding 구간의 섬유뽑힘이 완료되었을때의 균열폭이다.

(2) Elastic stretching of fiber in pre-debonded region

$$P = \frac{\pi d_f^2 E_f}{4a} \delta + \frac{\pi \tau_p d_f a (1 + \eta)}{2} \quad \text{for } \delta_p < \delta < \delta_{PG}$$

여기서, $\delta_{pG} = \frac{2\tau_p a_p^2 (1+\eta)}{E_f d_f} + \sqrt{\frac{8G_d a_p^2 (1+\eta)}{E_f d_f}}$ 는 부착 구간의 파괴가 시작되는 시점의 균열폭이다.

(3) Progressive debonding in bonded region

$$P = \sqrt{\frac{\pi^2 \tau_d E_f d_f^3 (1+\eta)}{2} \delta + \pi^2 \tau_d (\tau_d - \tau_p) a_p^2 d_f^2 + \frac{\pi^2 G_d E_f d_f^3}{2} - \pi d_f a (\tau_d - \tau_p)} \quad \text{for } \delta_{pG} < \delta < \delta_{fd}$$

여기서, $\delta_p = \frac{2(1+\eta)}{E_f d_f} [\tau_b l_e^2 + (\tau_p - \tau_d) a_p^2] + \sqrt{\frac{8G_d l_e^2 (1+\eta)}{E_f d_f}}$ 는 debonding이 완료된 시점의 균열폭이다.

(4) Pull-out period

전체구간의 부착이 파괴된(full-debonding) 후에 마찰에 의한 섬유 뺨힘현상이 발생하며, 다음과 같은 식으로 나타내어 진다.

$$P = \pi d_f (1 + \beta(\delta - \delta_{fd})/d_f) (\tau_b (l_e - a - \delta + \delta_{fd}) + \tau_a a) \quad \text{for } \delta < l_e - a + \delta_{fd}$$

$$P = \pi d_f (1 + \beta(\delta - \delta_{fd})/d_f) (\tau_a (l_e - \delta + \delta_{fd})) \quad \text{for } \delta > l_e - a + \delta_{fd}$$

4. PVA단일섬유에 대한 해석 예

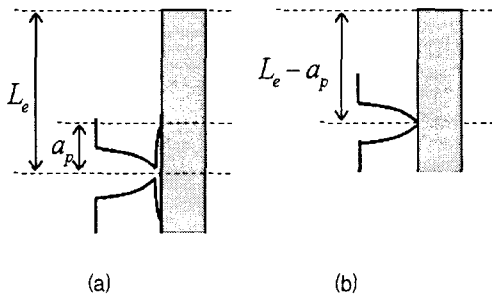


그림.3 Fiber with Same Pull-out Strength (a) with Pre-debonding region (b) without Pre-debonding region

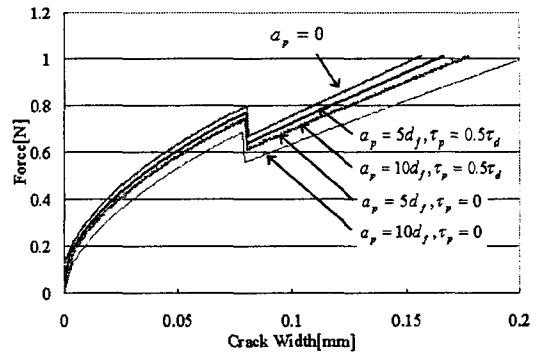


그림.4 Force-Crack Width Relations for 12mm PVA fiber with different pre-debonding parameters

제안된 모델을 이용하여 pre-debonding의 고려에 따른 섬유 뺨힘 특성에 대한 해석을 수행하였다. 동일한 강도특성을 보이는 섬유에 대한 해석을 위하여, 그림 3에 보인 바와 같이 (a) 묻힘길이 $L_e - a_p$, Pre-debonding=0인 섬유와 (b) 묻힘길이 L_e , Pre-debonding 길이 a_p , 부착응력 $\tau_p=0$ 인 두섬유에 대한 해석을 수행하여 그림5, 6에 나타내었다. 해석결과 전체의 부착파괴(full debonding)시의 뺨힘 강도와 파단시의 강도는 변화가 없는 것으로 나타났고, 균열폭 증가에 따른 응력발현의 지연효과가 있는 것으로 나타났으며, 결과적으로 부착파괴시점을 늦추어 지는 효과가 발생하였다.

또한, Pre-debonding 길이와 부착응력에 대한 값을 변수로 해석을 수행하여 그림 4에 나타내었다. pre-debonding 구간의 길이가 길수록, 부착강도가 낮을 수록 부착파괴(full-debonding) 시점의 응력이 작아지는 경향을 보였다.

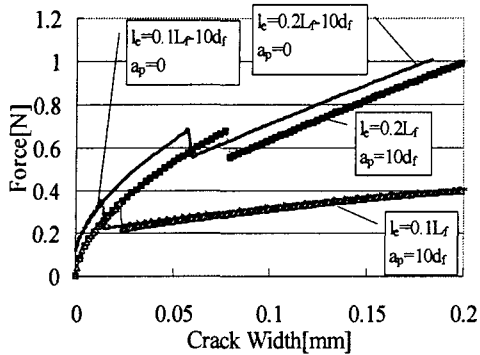


그림.5 Force-Crack Width Relations for 12mm PVA fibers with or without pre-debonding region

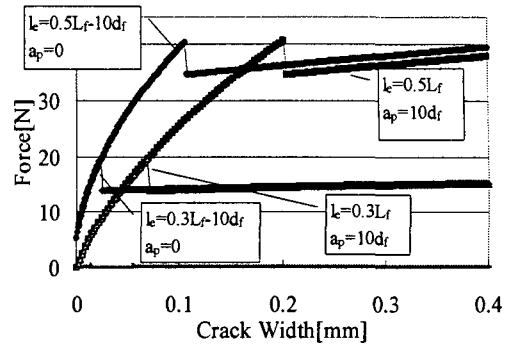


그림.6 Force-Crack Width Relations for 30mm PVA fibers with or without pre-debonding region

5. 결론

본 연구에서는 균열발생시의 Cook-Gordon Effect를 합리적인 방법으로 고려하는 수정된 미세역학 이론에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 균열발생과 동시에 Cook-Gordon Effect 효과에 의해 Pre-debonding 구간이 발생였다. 본 연구에서는 해당구간의 부착강도를 저하시키는 방법으로 모사하였으며, 구간의 길이를 a_p , 부착강도를 τ_p 로 나타내었다.
- (2) 동일매입길이에 대한 해석을 통하여 Pre-debonding 효과에 대한 분석을 수행하였으며, Pre-debonding 구간을 고려하는 경우 전체의 부착파괴(full debonding)시의 뿔힘강도와 파단시의 강도는 변화가 없는 것으로 나타났고, 균열폭 증가에 따른 응력발현의 지연효과가 있는 것으로 나타났으며, 결과적으로 부착파괴시점을 늦추어 지는 효과가 발생하였다.
- (3) 동일매입길이에 대한 해석을 통하여 pre-debonding 구간의 길이가 길수록, 부착강도가 낮을수록 부착파괴(full-debonding) 시점의 응력이 작아지는 경향을 보였다.
- (4) 섬유직경이 큰 경우 Pre-debonding에 의한 응력지연효과가 크게 나타났다.

참고문헌

1. Leung, C.K.Y., and Li, V.C., "New Strength Based Model for the Debonding of Discontinuous Fibers in an Elastic Matrix", Journal of Materials Science, 26, pp. 5996-6010, 1991
2. Lin, Z., T. Kanda and V.C. Li, "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites," J. Concrete Science and Engineering, RILEM, Vol. 1, pp. 173-184, 1999.
3. Kanda, T. and V.C. Li, "Effect of Apparent Fiber Strength and Fiber-Matrix Interface on Crack Bridging in Cement Composites," ASCE J. of Engineering Mechanics, Vol. 125, No. 3, pp. 290-299, 1999
4. Li, V. C., S. Wang, and C. Wu, "Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC," ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 6, Nov.-Dec., 2001, pp 483-492