

# 합성섬유 보강 콘크리트 보의 후균열 거동 예측에 관한 연구

## Prediction of Post-cracking Behavior of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Beams

오 병 환<sup>\*</sup>   김 지 철<sup>\*\*</sup>   박 대 균<sup>\*\*\*</sup>   한 일 영<sup>\*\*\*\*</sup>   김 방 래<sup>\*\*\*\*</sup>   유 흥 종<sup>\*\*\*\*</sup>  
Oh, Byung Hwan   Kim, Ji Cheol   Park, Dae Gun   Han, Il Young   Kim, Bang Re   Liu, Hong Jong

### ABSTRACT

Fiber reinforced concrete has been used for tunnel lining and rehabilitation of old structures. Recently, structural synthetic fiber was developed to overcome the corrosive properties of steel fibers. Fibers play a role to increase the tensile and cracking resistance of concrete structures. The Post cracking behavior must be clarified to predict cracking resistance of fiber reinforced concrete.

The purpose of the present study is to develop a realistic analysis method for post cracking behavior of synthetic fiber reinforced concrete members.

### 1. 서론

섬유보강 콘크리트는 터널라이닝(tunnel lining), 암반 및 뱀면의 보호, 노후한 구조물의 보수 등에 예전부터 사용되어 오고 있으며, 최근에는 PSC 구조물의 정착부, RC 거더의 전단보강 등 철근 대체 재료로서도 그 역할이 증대되고 있다. 기존의 섬유보강 콘크리트에는 주로 강섬유가 사용되어 왔으나, 부식에 취약하기 때문에, 합성섬유 등 부식에 강한 섬유의 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 최근 들어 북미의 몇몇 나라에서는 다양한 형상을 가지는 구조용 합성섬유의 개발이 활발히 진행되고 있다.

섬유보강 콘크리트는 인장응력에 취약한 콘크리트의 단점을 보완하기 위한 것으로서, 섬유는 콘크리트에 균열이 발생한 후, 균열을 억제하는 역할을 한다. 따라서, 섬유보강 콘크리트에 있어서 균열이후의 거동을 예측하고 모델링하는 것은 매우 중요하다.

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 석사

\*\*\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 정회원, SK건설 기술연구소

본 연구에서는 균열발생이후 섬유유인발거동을 고려하여 최근에 개발되고 있는 합성섬유보강콘크리트보의 균열후 거동(post-cracking behavior)을 예측할 수 있는 기법을 연구하는데 그 목적을 두고 있다. 균열후 거동으로는 보의 하중과 처짐거동, 하중에 따른 균열폭 거동, 모멘트와 곡률관계 등을 포함하고 있다. 본 연구의 이론은 본 연구에서 수행된 실험결과와 비교하여 정확성과 합리성을 보여주고 있다.

## 2. 섬유보강콘크리트의 균열후 거동 해석모델

### 2.1 기본개념

섬유보강콘크리트보의 균열후 거동을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같이 휨하중을 받는 보를 고려한다. 이 보에는 Fig. 2와 같이 변형률과 응력이 작용하고, 특히 균열이 발생하는 인장측에는 균열에 의한 변위(displacement)와 섬유의 인발에 의한 인장저항력이 Fig. 3과 같이 발생한다.

### 2.2 콘크리트의 응력-변형률관계

#### 2.2.1 콘크리트의 압축응력-변형률 곡선

콘크리트의 압축상태에서의 응력-변형률 관계는 일반적으로 Hognestad's 식을 많이 사용하여 본 연구에서도 이를 사용하였다.

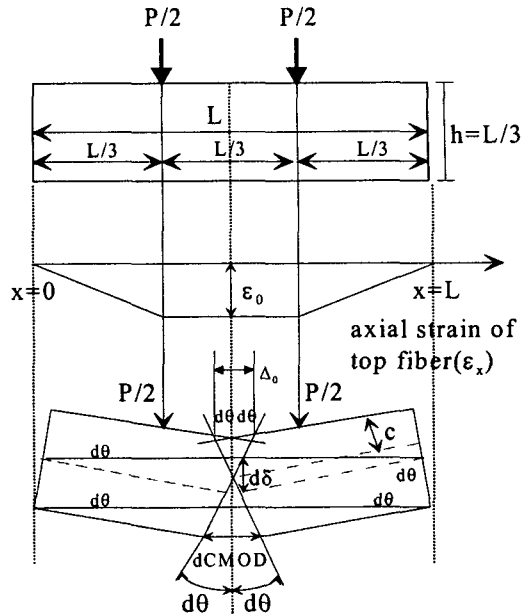


Fig. 1 Failure mode of FRC beam under load

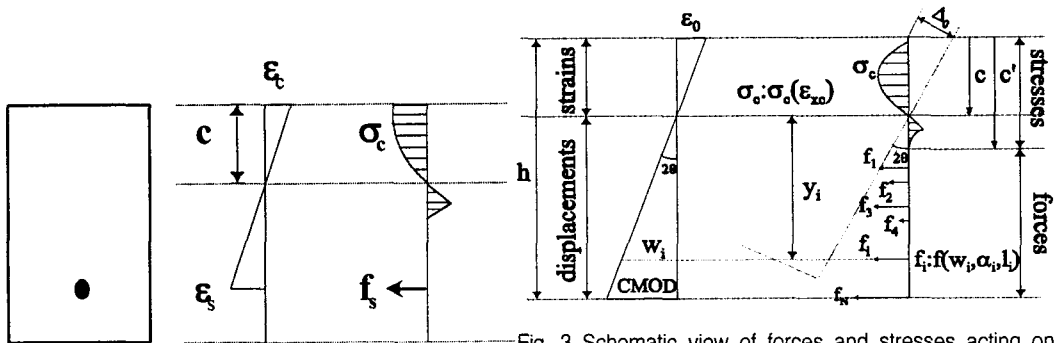


Fig. 3 Schematic view of forces and stresses acting on cracked section of beam

Fig. 2 Stress and Strain relation of RC beam

$$f_c = f_c' \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_o$$

$$f_c = f_c' \left[ 1 - \frac{0.15}{0.004 - \epsilon_o} (\epsilon_c - \epsilon_o) \right] \quad \epsilon_o \leq \epsilon_c \leq 0.003$$

### 2.2.2 콘크리트의 인장응력-변형률 관계

#### (1) 균열발생이전의 거동

균열발생이전에는 탄성거동을 하는 것으로 가정하여, 다음과 같은 식으로 탄성계수를 표시한다.

$$E_{ct} = 5500 \sqrt{f_c'} \quad (MPa)$$

#### (2) 인장강도 이후 (균열이후)의 거동

인장강도 이후의 거동은 Shah's model을 사용하였고, 다음과 같은 식으로 균열이후의 응력  $\sigma_{ct}$ 을 균열폭  $w$ 의 증가에 따라 표현하였다. 여기서,  $f_{cr}$ 은 휨인장강도,  $k=60.787$  그리고  $\lambda=1.01$  이다.

$$\frac{\sigma_{ct}}{f_{cr}} = e^{-k \cdot w^\lambda} \quad w(\text{in mm})$$

### 2.3 부재에 작용하는 하중, 단면력 및 변위 계산

본 논문에서는 힘을 받는 보가 균열 이전에는 탄성거동을 하지만, 균열 이후에는 Fig.1과 같이 주균열을 중심으로 강체변형(rigid body deformation)을 하는 것으로 근사화하였다. 이를 통해 균열폭을 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$w_i = \left[ \frac{CMOD}{h-c} \right] \cdot y_i$$

그러나 실제로 섬유는 인장측에 불규칙하게 배치되어 있으므로 이러한 영향을 고려해야 한다.

Soroushian은 단위면적당 섬유개수  $N_1$ 을 다음 식으로 제시하였다. 여기서,  $\alpha$  = 섬유방향계수 (orientation factor),  $V_f$  = 섬유혼입률,  $A_f$  = 섬유횡단면적이다.

$$N_1 = \alpha \frac{V_f}{A_f}$$

Fig. 3의 인장영역에서 저항하는 섬유의 인장력은 인장영역을 N개의 층으로 나누어 Fig. 4와 같이 각층의 섬유 인장력  $F_i$ 에 각 층별 섬유개수를 곱함으로써 구할 수 있다. 이때 섬유가 뽑히지 않기 위

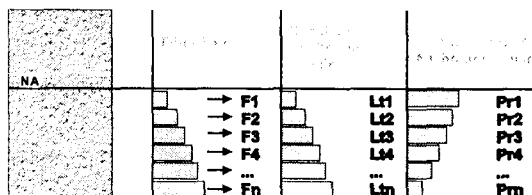


Fig. 4 Fiber force, Required anchorage length and Probability of non-anchorage failure

한 최소한의 소요 정착길이(Required anchorage length)  $L_t$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_t = \frac{F}{\sum_0 \cdot \tau_u}$$

여기서,  $\tau_u$  = 섬유 부착강도로서 인발강도시험에서 얻어지며, F= 휨균열폭에 따른 섬유의 인발력이다. 즉, 섬유에 작용하는 힘 F에 따라 요구되는 소요 정착길이가 달라진다.

또한 Fig. 4는 소요정착길이와 섬유가 뽑히지 않을 확률을 각 층별로 표시하고 있다.

### 3. 실험개요

#### 3.1 배합설계 및 실험방법

사용한 배합설계는 다음과 같다.

Table 1 Mixture proportions

W/C (%)	S/A (%)	Unit Weight(kg/cm <sup>3</sup> )				Fiber Content (%)
		Cement	Water	Sand	Gravel	
45	70	453	204	1115	487	9

JCI-SF4 standard에 의한 four-point-loading에 의해서 휨강도 시험을 실시하였다. 처짐을 구하기 위하여 span의 중앙점에 LVDT를 설치하였다. 이 휨강도 시험을 통해 얻은 하중-처짐 곡선의 면적으로부터 인성을 구할 수 있다.

#### 3.2 실험결과 및 해석

이상에서 얻은 해석·실험을 통해 얻은 결과를 토대로 다음과 같은 graph를 얻을 수 있고, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 섬유의 혼입률이 변할 때 하중-처짐 곡선은 해석결과와 실험결과가 비슷함을 알 수 있다. 즉, 섬유의 혼입률이 증가할 때, 그 인성은 증가하는 것을 알 수 있다.
- 2) load-CMOD curve에서 CMOD가 동일할 경우 섬유의 혼입률이 클수록 저항하는 하중은 크다.
- 3) CMOD-deflection curve에서 동일한 처짐이 발생했을 때 섬유의 혼입률이 클수록 CMOD 값이 커진다.
- 4) 처짐이 증가함에 따라, 중립축 깊이는 균열이전에는 증가하다가 균열이후에는 급격히 감소한 후에 소폭으로 감소하여 콘크리트의 압축부 선단까지 올라가는 것을 알 수 있다.

### 4. 결론

- 1) 균열이후 섬유에 의한 균열연결효과(bridging)에 의한 모체 보강효과를 모체의 균열폭과 섬유의 인발거동을 이용하여 해석할 수 있는 모델을 연구·제시하였다.
- 2) 균열단면에서 섬유의 매입길이와 매입방향성의 무작위성을 고려하여 균열단면을 통과하는 유효섬

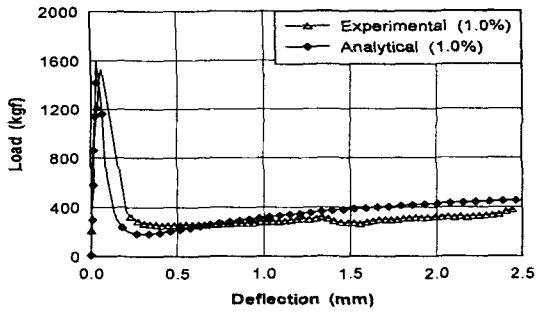


Fig. 5 Crimped type of synthetic fiber of fiber content, 1% of volume

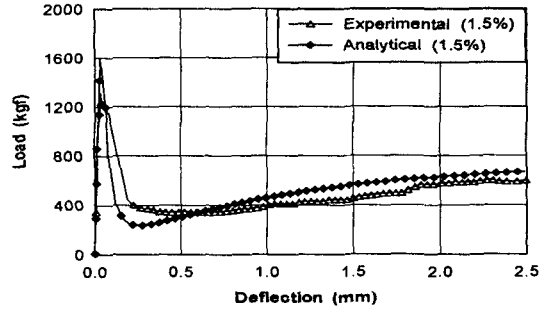


Fig. 6 Crimped type of synthetic fiber of fiber content, 1.5% of volume

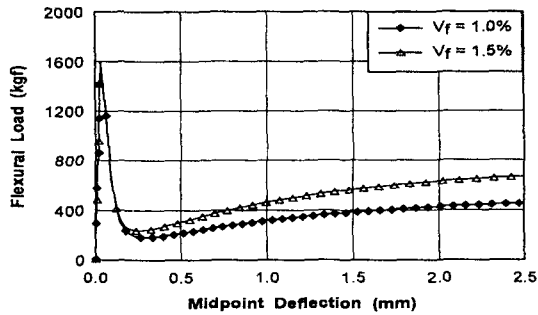


Fig. 7 Analytical result on load and deflection curve

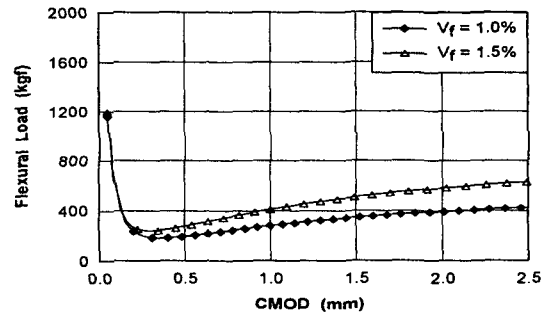


Fig. 8 Analytical result on load and CMOD curve

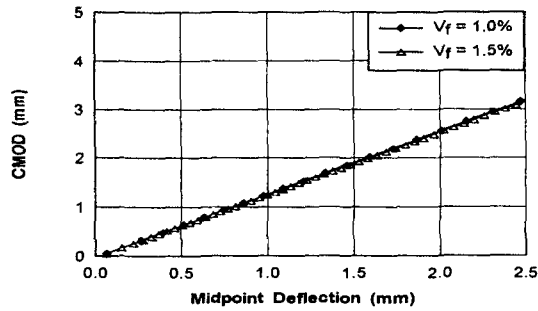


Fig. 9 Analytical result on CMOD and deflection curve

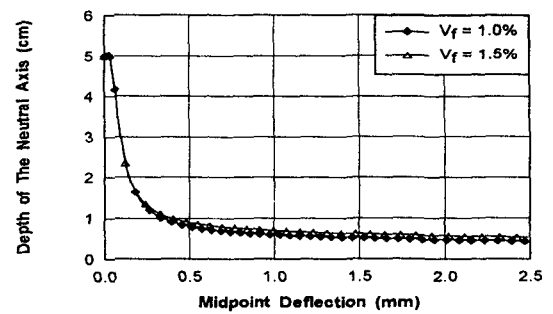


Fig. 10 Analytical result on depth of the neutral axis and deflection curve

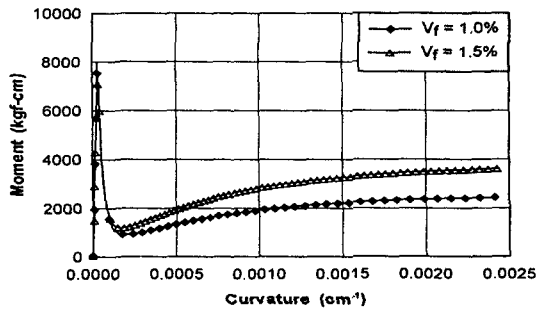


Fig. 11 Analytical result on Moment and curvature relation

유개수 산정방법을 제시하였으며 이를 이용하여 균열이후 섬유인장력의 인장력을 산정하였다.

3) 균열이후 휨특성 해석을 수행하여 단일섬유의 특성으로부터 균열이후 보부재 휨거동의 합리적인 예측이 가능하도록 하였다.

4) 본 이론을 구조용 합성섬유 보강콘크리트 보의 휨거동, 즉, 하중-처짐 거동 등의 실험결과와 비교한 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5) 본 이론은 합성섬유 보강콘크리트보의 후-균열거동예측에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Soroushian, P., and Lee, C., "Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete : Correlation with Some Measures of Fiber Spacing," ACI Material Journal, V. 87, No.5, Sept.-Oct., 1990.
2. Banthia, N., and Armelin, H., "Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from the Pullout of Single Fibers," ACI Material Journal, V. 94, No. 1, Jan.-Feb., 1997, pp 18-31.
3. Banthia, N., and Trottier, J., "Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers, Part I : Bond-Slip Mechanism," ACI Material Journal, V. 91, No. 5, Sept.-Oct., 1994, pp 435-446.
4. Soroushian, P., and Lee, C., "Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Material Journal, V. 87, No. 5, Sep.-Oct., 1990, pp 433-439.
5. Lim, T. Y.; Paramasivam, P.; and Lee, S. L., "Bending Behavior of Steel Fibers Concrete Beams," ACI Material Journal, V. 84, No. 6, Nov.-Dec., 1987, pp. 524-536.
6. Goparatnam, V.S; Surendra, S.P.;Gordon, B.B.; Criswell, M. E.; Ramakrishnan, V.; and Wecharatana, M., "Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete," ACI Materials Journal, V. 88, No. 4, July-Aug. 1991, pp. 339-353.
7. Romualdi, J.P., and Mandel, J. A., "Tensile Strength of Concrete as Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of wire Reinforcement," ACI Journal, Proceedings V.61, No 6, June 1964, pp 650-670.
8. Victor C. Li., Z. Lin., and T. Matsumoto, "Influence of Fiber Bridging on Structural Size-effect," Int. Journal of Solids Structures Vol. 35, 1998, pp 4223-4238.
9. 김규선, 이차돈, 심종성, 최기봉, 박제선, "강섬유보강 콘크리트의 인장파괴메카니즘에 대한 이론연구," 콘크리트 학회지, 1993,06 v.5, n.2, pp. 141-150.
10. 김규선, 이차돈, 심종성, 최기봉, 박제선, "SFRC의 인장 파괴거동에 대한 해석," 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문, 1993, pp. 65-72.