

SFRC의 인장 파괴거동에 대한 해석

Analysis on the Tensile Fracture Behavior of SFRC

○ 김 규 선* 이 차 돈** 심 중 성*** 최 기 봉**** 박 제 선*****
 Kim, Gyuseon Lee, Cha-Don Sim, Jongsung Choi, Kibong Park, Je Seon

Abstract

Steel fiber reinforced concrete(SFRC) which is made by short, randomly distributed steel fibers in concrete is superior in its tensile mechanical properties to plain concrete in enhancement of tensile strength and tensile ductility. These improvements are attributed to crack arresting mechanisms and formation of longer crack paths due to fibers, which as a consequence lead to increase in energy absorption capacity of SFRC. In the post-peak region under tensile stresses, major macrocrack forms at critical section. The opening of this macrocrack is mainly resisted by both of the fiber pull-out bridging the cracked surfaces and the resistance by matrix softening.

In this study, micromechanical approach has been made in order to simulate tensile behavior of SFRC and based on which the theoretical model is presented. This model reflects the features of both the composite material concept and the spacing concept in predicting tensile strength of SFRC. The model also takes into account for the effects of matrix tensile softening and fiber bridging by pull-out on the resistance for the post-peak behavior of SFRC. It has been shown that the developed model satisfactory predicts the experimental results.

1. 서론

콘크리트 내에 짧은 길이를 갖고 임의의 방향을 갖는 강섬유를 혼입하여 얻어지는 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete : 이하 SFRC)는 콘크리트가 인장응력을 받을 때 콘크리트내의 강섬유에 의하여 단면내의 균열성장 경로가 길어지거나 또는 억제됨으로써 콘크리트의 인장강도와 함께 강도후 영역에서 연성을 향상시키게 된다. 따라서 인장강도 및 특히 파괴시에너지 흡수능력이 일반콘크리트에 비하여 향상되어 인장응력에 대하여 취성적인 파괴양상을 갖는 콘크리트 구조물의 거동에 대한 향상을 가져올 수 있다.

SFRC가 강도에 이른 직후 위험단면에는 큰 균열(macrocrack)이 형성된다. 강도후 이후의 SFRC의 인장거동은 이 균열의 열림 (crack

opening)에 대하여 모체의 연화현상과 강섬유의 pull-out고랑역할에 의한 저항으로 인하여 연성이 크게 증가하게 된다[3].

SFRC의 인장강도를 예측하는 기본적인 개념에는 spacing 개념과 composite material 개념이 있다[1]. 본 연구에서는 기존의 composite material 개념과 spacing 개념의 이론적 단점을 보완하여 인장강도를 산정할 수 있는 식을 micromechanics에 근거하여 제안하였다.

2. SFRC의 인장모델 개발

2.1 모델 가정

인장하중을 받는 SFRC의 거동을 모델화하기 위하여 문헌연구를 통하여 다음과 같은 가정을 토대로 하였다.

(a) 콘크리트 단면내 균열성장 길이가 짧고 임의로 분산된 강섬유에 의하여 저지됨으로써 콘크리트모체가 주변 강섬유의 영향을 받아 보강되므로 콘크리트의 인장강도가 향상된다.

(b) SFRC가 인장강도에 도달시 slip이 많이 일어나지 않는다고 가정하였다[12].

*	한양대학교	토목공학과	석사과정
**	중앙대학교	건축공학과	조교수
***	한양대학교	토목공학과	조교수
****	경원대학교	토목공학과	조교수
*****	강원대학교	토목공학과	교수

(c) SFRC의 위험단면을 가로지르는 강섬유의 매입길이는 실제 전부 다르므로 본 연구에서는 위험단면에서 강섬유의 분포를 평균적으로 일정하게 변하여 분포한다고 가정하였다. 이는 강도전 영역에서의 위험단면에 대해 각 섬유의 변형 및 응력이 다른 것을 나타내며 또한 강도후 영역에서는 pull-out이 일어날 경우 강섬유의 매입길이의 차이에 따른 섬유와 모체콘크리트간의 비선형응력분포를 나타내는 것이 된다.

(d) 기존에 연구된 spacing개념에서 시편크기에 대한 경계조건과 진동효과를 고려한 N_1 개념[1]을 본 모델에 적용하였다.

(e) Local bond-slip관계는 그림 1과 같이 가정하였다.

(f) SFRC의 인장거동은 강도전 영역은 응력-변형도로 표현될 수 있지만 강도후 영역은 응력-변위도로 표현된다.

(g) 강도후 영역에서의 SFRC의 인장거동은 모체콘크리트의 연화거동과 N_1 개념에 근거한 pull-out의 중첩에 의하여 결정되며 균열폭과 강섬유의 slip의 크기는 일치한다.

(h) 위험단면을 가로지르는 각 강섬유는 인장응력하에서 위험단면을 중심으로 균열폭이 주어질 경우 각기 다른 강섬유의 매입길이에 대한 적합방정식(compatibility)을 만족한다.

2.2 강도전 SFRC 인장응력-변형도모델

Shah[3]의 실험을 고찰해 볼 때 SFRC의 인장거동은 모체콘크리트의 인장강도의 약 80~90%까지 선형탄성거동을 한다. 따라서 본 연구에서는 문헌[3,6]을 고찰하여 강도전 영역의 SFRC의 응력-변형도를 bilinear 형태로 모델화하였다. 본 연구에서 제안한 bilinear 형태의 응력-변형도 모델은 그림 2와 같다.

SFRC의 임의단면에 N 개의 강섬유가 가로지르고 이들 각 섬유의 응력을 σ_{fi} ($i=1, 2, \dots, N$)라고 하면 SFRC의 인장하중은 다음과 같이 모체콘크리트와 이들 강섬유의 응력들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_c = \sigma_m(A_g - N \cdot a_f) + \sum_{i=1}^N \sigma_{fi} \cdot a_f \quad (1)$$

여기서, P_c = 인장력;

σ_m = 콘크리트모체의 강도;

A_g = SFRC의 전체 단면적;

a_f = 강섬유 한개의 단면적;

N = $N_1 \cdot A_g$;

$N_1 = \alpha \cdot \frac{V_f}{A_f}$; 그리고

α = orientation factor(Lee[2])
= w, h, l_f 의 함수

식(1)을 A_g 로 나누면 위의 식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = \sigma_m(1 - N_1 \cdot a_f) + \frac{a_f}{A_g} \sum_{i=1}^N \sigma_{fi} \quad (2)$$

콘크리트모체내 각 강섬유가 탄성영역내에서 응력값이 골고루 변화하므로 임의단면내의 임의의 강섬유에 대한 응력, σ_{fi} 는 다음과 같다.

$$\sigma_{fi} = \frac{\sigma_{fc}}{(N/2)} \cdot i, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

식(3)에서 σ_{fc} 의 값을 $\gamma \cdot \sigma_{fy}$ (σ_{fy} =강섬유의 항복강도, $0 < \gamma < 1$)이라하고 이를 식(2)에 대입하면,

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \sigma_m(1 - N_1 \cdot a_f) + \frac{a_f}{A_g} \left[\frac{N/2}{2} \sum_{i=1}^N \frac{\gamma \cdot \sigma_{fy}}{(N/2)} \cdot i \right] \\ &= \sigma_m(1 - N_1 \cdot a_f) + \frac{\gamma}{2} \cdot a_f \cdot \sigma_{fy} (N_1 + 2/A_g) \quad (4) \end{aligned}$$

위의 식에서 모체콘크리트의 기여도는 SFRC의 최대강도시 SFRC의 변형도가 모체콘크리트 최대강도시의 변형도보다 크게되므로 SFRC 최대강도시의 모체콘크리트의 기여도는 줄게된다. 한편 spacing 개념에 의하면 SFRC의 인장강도에 대한 모체콘크리트의 기여도는 SFRC내의 강섬유의 braching, bridging 등의 균열제어 작용으로 인하여 단면내 강섬유수가 증가할수록 증가하게된다. 따라서 이러한 강섬유의 모체보강효과를 고려하기위하여 위의식 (4)를 다음과 같이 모체보강계수(β)를 써서 보완한다[그림 3 참조].

$$\sigma_c = \beta \cdot \sigma_m(1 - N_1 \cdot a_f) + \frac{\gamma}{2} \cdot a_f \cdot \sigma_{fy} (N_1 + 2/A_g) \quad (5)$$

대개의 SFRC 인장시험체의 경우 $2/A_g \approx 0$ 이고 모체콘크리트 보강계수(β)는 $\beta = (1 + \beta^* \cdot N_1^{2/3})$, $\gamma^* = \gamma/2$ 로 두면 식(5)는 다음과 같다

$$\sigma_c = (1 + \beta^* \cdot N_1^{2/3}) \sigma_m(1 - N_1 \cdot a_f) + \gamma^* \cdot a_f \cdot \sigma_{fy} \cdot N_1 \quad (6)$$

식(6)의 β^* , γ^* 는 기존의 인장실험에 대한 회귀분석을 통하여 결정되었으며 회귀분석에 사용된 data는 표 1과 같다.

$$\sigma_c = (1 - 0.027 \cdot N_1^{2/3}) \cdot (1 - N_1 \cdot a_f) \sigma_m + 0.41 \cdot a_f \cdot \sigma_{fy} \cdot N_1 \quad (7)$$

SFRC의 인장강도에 해당하는 변형을 ϵ_p 는 문헌[10]의 제안된 실험식을 사용하였다.

$$\epsilon_p = \epsilon_m(1 + 0.35 \cdot N_1 \cdot d_f \cdot l_f) \quad (8)$$

여기서, N_1 =단위면적당 강섬유수(강섬유수/cm²)

d_f, l_f = 강섬유의 직경과 섬유의 길이

ϵ_m = 무근콘크리트의 강도시 변형을

SFRC의 탄성계수는 (6)에 Hooke의 법칙을 적용하여 다음과 같이 산정되었다.

$$E_c = (1 + \eta \cdot N^{2/3}) \cdot E_m \cdot (1 - N_1 \cdot a_f) + a_f \cdot E_f \cdot N_1 \quad (9)$$

$$E_c = (1 + 0.0061 \cdot N^{2/3}) \cdot E_m \cdot (1 - N_1 \cdot a_f) + a_f \cdot E_f \cdot N_1 \quad (10)$$

여기서, η = SFRC의 탄성거동시 모체보강계수

강도전 영역의 bilinear 모델에서 기울기가 변하는 위치는 문헌[3]의 실험결과에 따라 SFRC의 인장강도의 80%가 되는 곳으로 산정하였다.

표 1 회귀분석 data

문헌	재료특성	N_1	σ_{cp}
문헌[3]	$\sigma_m=28.4\text{kg/cm}^2$ $a_f=0.00126\text{cm}^2$	3.104	30.5
		6.201	33.8
		9.312	36.8
문헌[11]	$\sigma_m=28.4\text{kg/cm}^2$ $a_f=0.00126\text{cm}^2$	0.947	35.7
		1.895	38.4
		1.895	39.3
		2.841	35.7
		2.841	37.5
		3.788	41.1
		1.042	32.1
		3.126	41.1
		4.168	42.0
		4.168	43.8
		1.108	34.8
		1.108	33.0
		2.216	41.1
2.216	42.0		
2.216	44.6		
3.324	42.9		

2.3 SFRC 강도후 영역의 거동

실제 강도후 영역에서의 SFRC의 인장력에 대한 저항은 모체의 연화거동과 강섬유의 pull-out에 의한 강섬유 교량효과, 그리고 강섬유 pull-out시의 강섬유의 plastic bending, 전단변형, 강섬유의 주변 콘크리트의 crushing 등의 저항에 기인한다[4,7]. Brandt[4]는 SFRC가 인장응력을 받을때 강섬유의 debonding, pull-out, plastic deformation, 모체콘크리트의 crushing 등을 고려하여 이들 각각이 흡수되는 파괴에너지의 양을 계산함으로써 최대 파괴에너지의 양을 산정하여 최적의 강섬유 방향을 제시하였다. Naaman[5]의 pull-out 실험보고에 의하면 인장응력에 대하여 경사각을 갖는 강섬유가 pull-out될 때 pull-out 강도는 각도에 거의 무관함이 고찰되었다. 그러나 이들 복합적인 영향에 대하여는

아직 충분한 실험 및 이론이 부족한 실정이다.

2.3.1 단위강섬유의 pull-out 힘과 slip관계

1) 기본식

강도후 영역에서 위험단면을 가로지르는 강섬유의 pull-out에 대한 메카니즘이 중요하므로 이에 대한 이론 고찰이 선행되어야 한다. 본 연구에서 사용된 local bond-slip의 관계는 그림 1에 나타나 있다.

그림 4와 같이 인장응력과 동일한 방향을 갖는 강섬유의 pull-out 힘과 slip관계는 다음과 같은 단계로 산정할 수 있다.

모체내 강섬유 미소자유도에 대한 평형조건식:

$$dF - \tau_p dx = 0 \quad (11-a)$$

또는,

$$\frac{dF}{dx} = \tau \cdot \rho \quad (11-b)$$

여기서, F=강섬유의 국부하중;

τ =콘크리트모체와 섬유의 접촉면에서 국부전단응력;

ρ = 강섬유의 주변장;

전체 평형방정식:

$$P = F + M \quad (12-a)$$

$$= A_f E_f \epsilon_f + A_m E_m \epsilon_m \quad (12-b)$$

여기서, M= 콘크리트모체의 국부하중;

A_f, E_f = 강섬유의 면적과 탄성계수;

A_m, E_m = 콘크리트모체의 면적과 탄성;

ϵ_f, ϵ_m = 강섬유와 모체의 변형율;

강섬유 부착응력-slip 관계(탄성영역):

$$\tau = k \cdot S_x \quad (13)$$

$$S_x = \int_0^x [\epsilon_f(x) - \epsilon_m(x)] dx \quad (14)$$

여기서, S_x = slip값

위의 식[식(11-b), (12-b), (13), (14)]들을 이용하여 다음과 같은 지배방정식과 이에 대한 해인 강섬유 내 위치에 따른 인장내력을 산정한다.

$$\frac{d^2 F}{dx^2} - \lambda^2 F = -A P \quad (15)$$

$$F(0) = 0, F(1) = P$$

식(10)의 해 F(x)는 다음과 같이,

$$F(x) = P(C_1 e^{\lambda x} + C_2 e^{-\lambda x} + 1/B) \quad (16)$$

$$\text{여기서, } A = 1 + \frac{\rho k}{A_m E_m} :$$

$$B = 1 + \frac{A_m E_m}{A_f E_f} :$$

$$\lambda = \sqrt{A \cdot B} :$$

$$C_1 = 1/(1 - e^{-2\lambda l}) [(1-1/B)e^{-\lambda l} + 1/Be^{-2\lambda l}] ;$$

$$C_2 = 1/(1 - e^{-2\lambda l}) [-(1-1/B)e^{-\lambda l} - 1/B]$$

2) 임계하중(critical force)과 임계 slip값

$x=1$ 에서 극부착응력이 τ_{max} 에 이르게 될때의 하중(P_c : 이하 임계하중)은 식 (7-b)와 식 (11)을 이용하여 다음과 같은 식으로 산정된다:

$$P_c = \frac{\tau_{max} \rho}{\lambda} \left[\frac{1 - e^{-2\lambda l}}{(1-1/B) \cdot (1 + e^{-2\lambda l}) + (2/B)e^{-\lambda l}} \right] \quad (17)$$

식 (12-b)와 (14)를 이용하여 적분하면 P_c 에 해당하는 slip값(δ_c)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_c &= \int_0^x S_x dx \\ &= \frac{P_c (B-2)}{\lambda A_m E_m} \left[\frac{1 - e^{-2\lambda l}}{1 + e^{-2\lambda l}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Pull-out 하중 P 가 P_c 보다 작을 경우 콘크리트모체와 강섬유사이의 접촉면에서는 탄성부착조건이 우세하므로 debonding이 발생하지 않는다.

3) Debonding 영역에서의 pull-out하중과 slip값

Pull-out하중 P 가 임계하중을 넘어서게 되면 강섬유와 모체콘크리트 부착면에서 극부적으로 debonding 영역이 발생하게 되고 하중이 증가할수록 이 영역은 늘어난다[3]. 따라서 콘크리트모체와 강섬유 사이의 접촉면에서는 부착영역과 debonding영역이 공존하게된다.

$$P = P_b + P_d \quad (19)$$

여기서, P_b = 부착영역의 힘:

P_d = debonding 영역의 힘:

Debonding 영역의 길이를 z 라고 정의하면 부착영역의 길이는 $(1-z)$ 로 표현할 수 있다. 그러므로 접촉면의 부착응력을 고려하면 P_b 는 식(17)로부터 경계조건을 적절히 변화시킴으로써 산정할 수 있다.

$$P_b = \frac{\tau_{max} \rho}{\lambda} \quad (20)$$

$$\left[\frac{1 - e^{-2\lambda(1-z)}}{(1-1/B) \cdot (1 + e^{-2\lambda(1-z)}) + (2/B)e^{-\lambda(1-z)}} \right]$$

$$P_d = \tau_f \cdot \rho \cdot z \quad (21)$$

이때의 slip은 식(18)과 마찬가지로 식(14)를 이용하여 두구간으로 나누어 적분하면,

$$\delta = \left\{ P(B-1)z - \tau_f \rho z^2 (B-2)/2 + (P - \tau_f \rho z) \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\lambda(1-z)})}{(1 - e^{-\lambda(1-z)})} \right] \frac{(B-2)}{\lambda} - \tau_f z l \right\} / (A_m E_m) \quad (22)$$

여기서, z 의 범위는 $0 \leq z \leq 1$ 이다. 그러므로 $z=1$ 일때 섬유와 콘크리트모체의 접촉면 전체에 걸쳐 완전한 debonding이 발생하게되며 이때의 pull-out 하중은 다음과 같다.

$$P_{fd} = \tau_f \cdot \rho \cdot l \quad (23)$$

이때의 slip값은 식(22)로 부터 다음과 같이 산정된다.

$$\delta_{fd} = \frac{(B-2) \tau_f \rho l}{2 A_m E_m} \quad (24)$$

4) 최대 pull-out 하중(P_{max})에 대한 근사식 산정
최대 pull-out하중은 일반적으로 극부 debonding상태에서 발생한다. 그러나 콘크리트모체내에 강섬유의 매입길이가 아주 짧은 경우에는 그림 5와 같이 비선형부착응력이 형성되어 P_{max} 는 임계하중값이 된다.

Debonding이 진행되어 debonding영역의 길이가 z_p 에 이를때에 pull-out하중이 최대가 된다면 이때 z 는 다음식을 만족한다.

$$\frac{dP}{dz} \Big|_{z=z_p} = 0 \quad (25)$$

식(20)의 분모항을 Q 라고 하면 일반적인 강섬유보강콘크리트의 경우 $1-B \approx 1.0$ ($1/B=1/1500 \approx 0$)이므로,

$$Q \approx 2/B e^{-\lambda(1-z)} + 1 + e^{-2\lambda(1-z)} \quad (26-a)$$

$$= e^{-2\lambda(1-z)} (1 + 2/B e^{\lambda(1-z)}) + 1 \quad (26-b)$$

여기서, $2/B \approx 2/1500$ 이므로 $1.001 < 1 + 2/B e^{\lambda(1-z)} < 1.06$ 범위에 들므로 $1 + 2/B e^{\lambda(1-z)}$ 항은 근사치로 1로 볼수있다. 따라서 식(19)에 대한 근사식은 다음과 같다.

$$P = \tau_f \cdot \rho \cdot z + \frac{\tau_{max} \rho}{\lambda} \left[\frac{1 - e^{-2\lambda(1-z)}}{1 + e^{-2\lambda(1-z)}} \right] \quad (27)$$

식(27)의 미분식으로 부터 최대하중시의 debonding길이, z_p 를 구하면 다음과 같다.

$$z_p = 1 - \ln X / (2\lambda) \quad (28)$$

강섬유(매입길이=1~4cm, $\tau_{max}/\tau_f=1.1\sim 1.5$)에 대하여 근사치와 수치해법에 의한 해는 직선이므로 매우 근사한 값을 갖는다.

실제 pull-out 실험에서 얻은 pull-out 하중과 slip 관계는 그림 6에서와 같이 P_c 와 P_{max} 사이의 기울기는 초기부착계수와 거의 동일하므로 P_c 는 무시하고 P_{max} 까지 선형으로 고려하여 pull-out 하중과 slip 관계를 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 P_{max} 까지 pull-out 하중과 slip 관계를 선형으로 고려하였다.

2.3.2 SFRC 강도후 영역에 대한 해석

SFRC의 강도후 영역에서의 인장응력에 대한 저항은 강섬유의 pull-out과 모체콘크리트의 연화현상에 의한다.

실제 SFRC의 위험단면내에서의 pull-out을 모델화하기 위해서는 N_i 개념을 근거로하여 단면의 경계조건과 진동효과를 고려한 파괴단면에서의 평균섬유수($N=N_i \cdot A_g$, A_g =총단면적)를 산정하고 이 강섬유들이 각기 다른 매입길이를 가진다고 가정하면 그림 7과 같이 i 번째 임의의 섬유가 파괴단면의 양쪽에 서로 다른 길이를 갖고 묻혀있다고 고려할 수 있다. 따라서 그림 7(a)에서 알수있듯이 인장시 SFRC의 강도후 영역의 i 번째 강섬유의 전체 slip(δ_i)은 짧게 묻혀진 강섬유의 slip($\delta_{s,i}$)과 길게 묻혀진 강섬유의 slip($\delta_{l,i}$)의 합으로 이루어진다. 파괴단면에서 각기 매입길이 가 다른 강섬유의 적합조건을 고려하면 식(24)와 같다.

$$\delta_i = \delta_{s,i}(P) + \delta_{l,i}(P) \quad (29)$$

여기서 주어진 전체변위가 짧게 묻혀진 강섬유의 최대 slip($\delta_{s,max}^i$) 보다 작을 경우에는 매입길이가 각기 다른 SFRC의 적합방정식을 적용하여 식(27)와 같이 산정할 수 있다[그림 7(b)].

$$\delta_i = \frac{P_i \delta_{s,max}^i}{P_{s,max}^i} + \frac{P_i \delta_{l,max}^i}{P_{l,max}^i} \quad (30)$$

$\delta_{s,i}$ 가 $\delta_{s,max}^i$ 보다 클 경우 짧게 묻혀진 강섬유는 동적 pull-out(dynamic pull-out)을 하게되므로 이때 다른면에 매입된 길게 묻힌 강섬유의 slip은 일어나지 않는다고 가정한다. 따라서 식(30)의 P_i 는 $\delta_{s,i}$ 의 크기에 종속된 함수로서 다음과 같다:

$$(i) \delta_{s,i} < \delta_{s,max}^i \text{인 경우} \quad (31-a)$$

$$P_i = \frac{\delta_i}{\frac{\delta_{s,max}^i}{P_{s,max}^i} + \frac{\delta_{l,max}^i}{P_{l,max}^i}}$$

$$(ii) \delta_{s,max}^i < \delta_{s,i} \leq \delta_{s,d}^i \text{인 경우} \quad (31-b)$$

$$P_i = \frac{P_{s,d}^i - P_{s,max}^i}{\delta_{s,d}^i - \delta_{s,max}^i} (\delta_{s,i} - \delta_{s,max}^i) + P_{s,max}^i$$

$$(iii) \delta_{s,d}^i < \delta_{s,i} \leq l_{s,i} \text{인 경우} \quad (31-c)$$

$$P_i = \frac{P_{s,d}^i}{\delta_{s,d}^i - l_{s,i}} (\delta_{s,i} - \delta_{s,d}^i) + P_{s,d}^i$$

$$(iv) \delta_{s,i} < l_{s,i} \text{인 경우} \quad (31-d)$$

$$P_i = 0$$

그러므로 slip (δ)이 주어진 경우 전체 pull-out 하중은 위험단면을 가로지르고 위의 조건들을 만족하고 각 섬유의 pull-out 하중의 합으로 나타내어 진다.

$$P(\delta) = \sum_{i=1}^N P_i(\delta) \quad (32)$$

여기서, $N = N_i \cdot A_g$

앞에서 언급한 강섬유의 pull-out 거동과 콘크리트 모체의 연화거동을 중첩하면 실제 SFRC의 연화거동을 표현할 수 있다. 여기서 모체콘크리트의 연화거동은 Shah[3]가 제시한 실험식을 사용하였다.

$$\sigma(\omega) = \sigma_p \cdot \exp(\gamma\omega\varphi) \quad (33)$$

여기서 γ, φ 는 시험상수이고 ω 는 균열크기이다. 본 연구에서는 $\gamma=691$ 이고, $\varphi=1.01$ 을 사용하였다. 따라서 SFRC의 연화거동은 다음과 같이 나타내어진다.

$$P(\delta) = \sum_{i=1}^N P_i(\delta) + \sigma(\delta) \cdot A_g \quad (34)$$

2.4 SFRC 인장모델과 실험치의 비교

본 연구에서 제안한 강도전 영역의 응력-변형도 모델과 강도후 응력-변위도 모델을 문헌들 [3,8]의 실험결과에 따른 응력-변위도와 비교하여 그림 8, 9에 나타내었다. 이 그림들을 고찰해 볼때 실험치와 모델식이 잘 일치함을 알수있다.

3. 결론

1. 강도전 영역에서의 SFRC 거동을 예측하는 모

델을 제안하였다. 이 모델은 전체적으로 bilinear형태이고, micromechanics에 근거하여 SFRC의 인장강도를 예측하는 기존의 composite material 개념과 spacing개념, 두 이론의 취약점을 보완하여 SFRC 인장강도를 예측하는 모델을 제시하였다.

2. 강도후 영역에서의 SFRC 거동을 이론적으로 고찰하였으며 본 이론은 기존 이론과 비교하여 경계조건, 진동효과, 모체콘크리트와 강섬유 표면사이의 비선형부착응력의 분배를 고려하였으며 특히 위험단면을 중심으로 서로 다른 매입길이를 갖는 강섬유에 적합조건을 적용하였다. 본 이론 식은 시험치와 비교해볼 때 만족스런 결과를 얻을 수 있었다.

3. SFRC의 인장거동에 대한 연구에서 강섬유의 plastic bending, 전단변형, 강섬유주변의 콘크리트모체의 crushing 등이 앞으로 고려되어야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(1993)의 연구비 지원하에서 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on FRC ACI 544.1R-82," ACI, 1982, PP.16
2. 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.
3. Gopalaratnam, V.S., and Shah, S.P., "Micromechanical Model for the Tensile Fracture of Steel Fibre Reinforced Concrete", RELEM Symposium, 1986
4. Brandt, A.M., "On the Optimization of the Fiber Orientation in Cement Based Composites Materials", RILEM-Polish Academy of Sciences, Cracow Tech. University, Sept. 1983, PP.13-22
5. Naaman, A.E., and Shah, S.P., "Pull-out Mechanism in Steel Fiber Reinforced Concrete," Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 102, No. ST8, Aug. 1976, PP.1537-1548
6. T.T.Lim, P.Paramasivam, S.L. Lee, "Analytical Model for Tensile Behavior of Steel Fiber Concrete", ACI Material Journal, July-August, 1987
7. A.E. Naaman, J.M. Alwan, H.S. Najin, "Fiber Pullout and Bond Slip. 1: Analytical Study", ASCE, Journal of Structural, Vol.117, No.9,

1991

8. A.K. Maji, J.L., Wang Noninvasive Dignosis of Toughening Mechanisms in Fiber Reinforced Concrete, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.211, 1991
9. Naaman, Antoine E.; Moavenzadeh, Fred; and McGarry, Frederick J., "Probabilistics Analysis of Fiber Reinforced Concrete," Proceedinga, ASCE, V.100, EM2, Apr., 1974, P P.397-413
10. Cha-Don Lee, "Constitutive Modeling and Flexural Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete for Structural Applications," Thesis of Ph.D, Dept of Civil Eng., 1990
11. 박제선, 심중성, 이차돈, 최기봉, "섬유보강콘크리트의 구조적 응용과 개발", 한국과학재단, 1993, pp 101-109
12. P. Soroushian, Z. Bayasi, "Prediction of the Tensile Strength of Fiber Reinforced Concrete : A Critique of the Composite Material Concept," Fiber Reinforced Concrete, SP-105, ACI, Detroit, 1987, pp. 71-84

부록 I

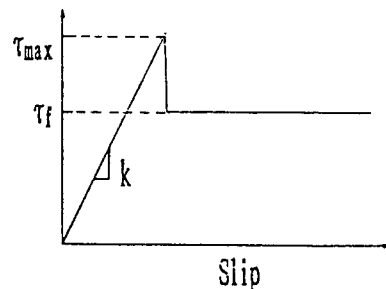


그림 1 Local bond-slip 관계

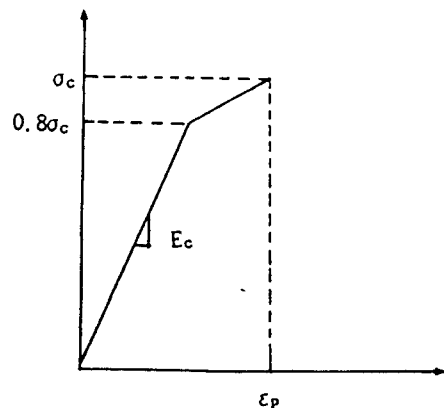


그림 2 강도전 SFRC의 응력-변형도 모델

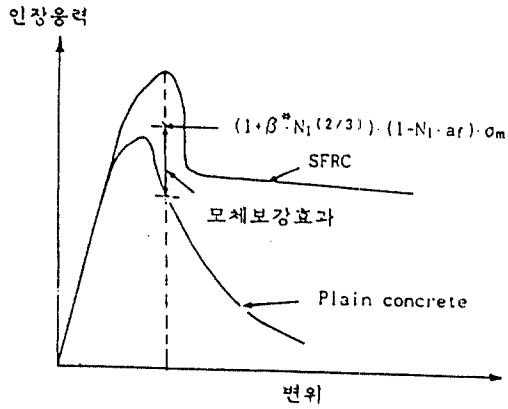


그림 3 강섬유의 모체보강효과

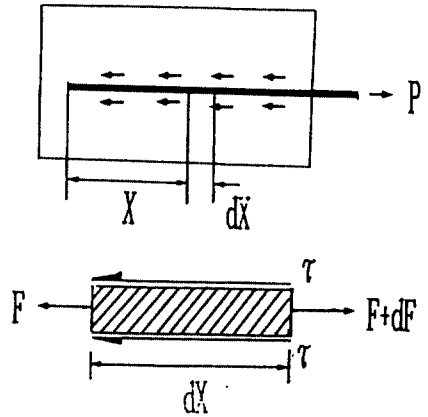


그림 4 강섬유의 pull-out시 미소자유도

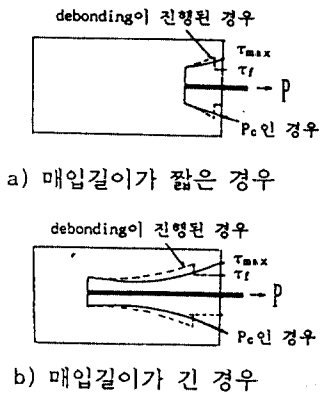


그림 5 매입길이에 따른 비선형 부착응력 분포

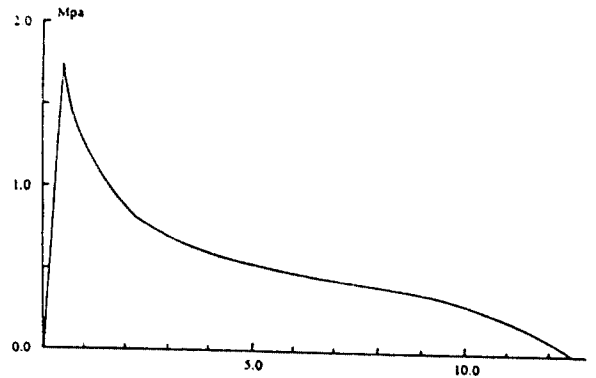


그림 6 Pull-out 실험에 의한 pull-out 하중과 slip 관계

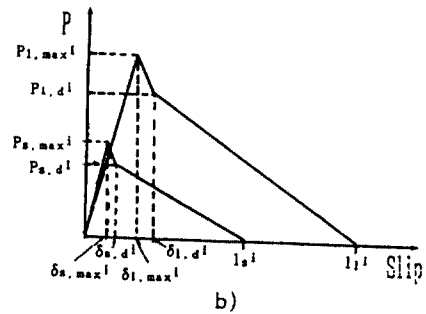
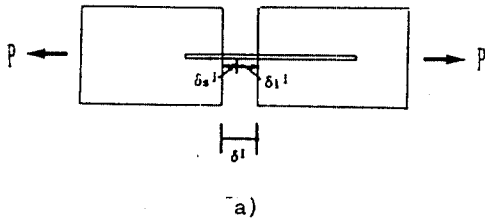
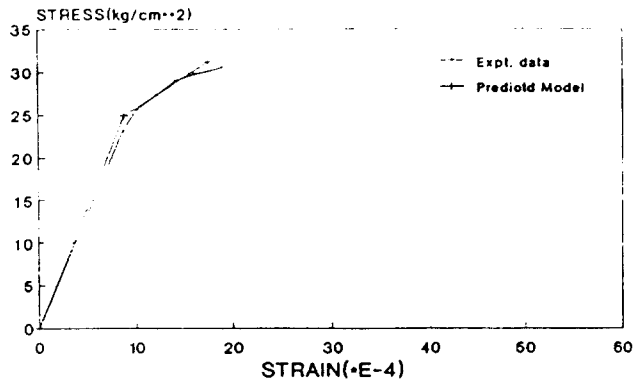
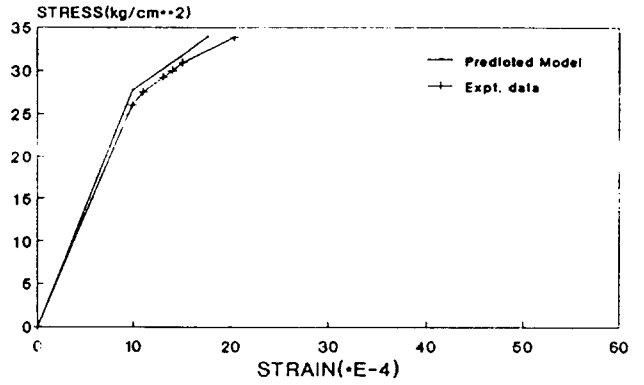


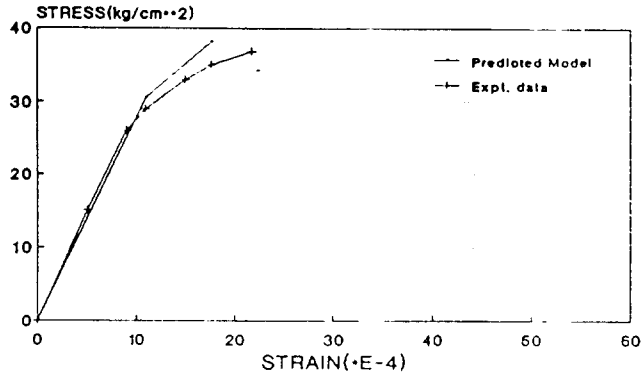
그림 7 SFRC 내의 임의의 강섬유의 Pull-out



a) $V_f = 0.5\%$, $L/D=63$

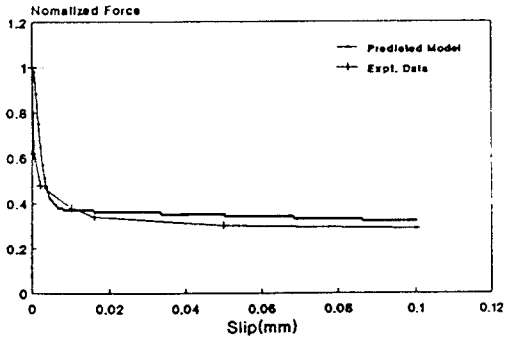


b) $V_f = 0.5\%$, $L/D=63$

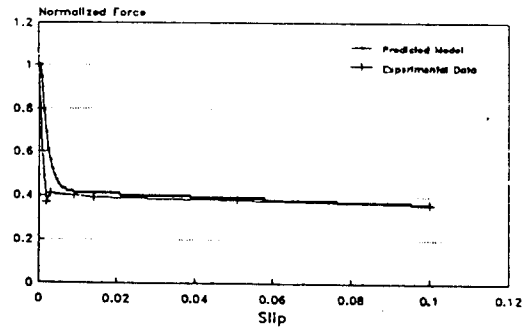


c) $V_f = 0.5\%$, $L/D=63$

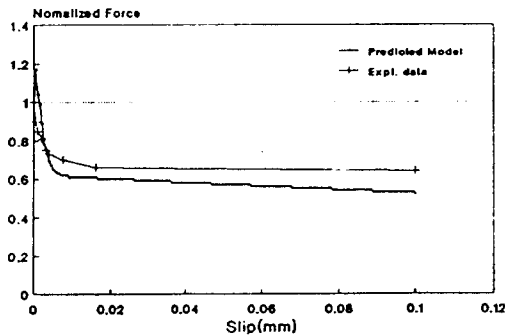
그림 8 강도전 영역의 SFRC의 인장모델과 실험치 비교



a) 문헌[9] : $V_f = 0.5\%$



b) 문헌[6] : $V_f = 0.5\%$



c) 문헌[3] : $V_f = 0.5\%$

그림 9 강도후 영역의 SFRC의 인장모델과 실험치 비교