

강섬유보강콘크리트내 강섬유의 인장보강 효과

Effects of Tensile Reinforcement of Steel Fibers in SFRC

0김 규 선* 이 차 돈** 박 제 선*** 심 종 성**** 최 기 봉*****

Kim, Gyusun Lee, Cha-Don Park, Je Seon Sim, Songsung Choi, Kibong

Abstract

Short, randomly disturbed steel fibers in concrete increase tensile strength and ductility of concrete under direct tension. These improvements are results from crack arrest mechanisms of steel fibers in concrete. These mechanisms are theoretically considered in this study and verification on the adequacy of different spacing for predicting tensile strength of SFRC are assessed. Results indicate that better correlation exists between experimental result and the spacing concept which take into account the effect of boundaries as well as vibration on reorientation of steel fibers inside concrete. Also considered is the modeling of stress-crack opening relationships in post-peak region of SFRC under tension which bases its deviation on micromechanics of fiber pull-out. Satisfactoring results are obsered between tests results and the prediction of the model

1. 서론

일반적으로 콘크리트는 인장력을 받을때 취성파괴를 하게 되는데 이는 콘크리트내의 미세균열의 발생과 함께 이들의 결합과 성장으로 인한 결과라 할 수 있다. 따라서 인장강도에 도달할 때 이러한 콘크리트 단면내의 균열의 확장은 불안정하고, 급작스럽게 진전하게 된다[1]. 이러한 콘크리트 내에 균열확장을 제어할 수 있을때 콘크리트의 인장강도 및 인장거동의 향상을 가져올 수 있다. 콘크리트 내에 짧은 길이를 갖고 임의의 방향을 갖는 강섬유를 혼입하여 얻게되는 강섬유보강콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete : 이하 SFRC)는 콘크리트내에 강섬유에 의하여 단면내의 미세균열확장과 이들의 결합을 branching, bridging역할 등으로 제어함으로써 콘크리트의 인장강도와 함께 강도후 영역에서의 연성을 증가시키게 된다.

SFRC의 인장강도를 예측하는 기본적인 개념에는 spacing 개념과 composite material 개념이 있다[5]. 본 연구에서는 문헌[1]에 발표된 연구의 부분적 연장으로서 기존의 연구된 여러 spacing 개념의 적합성을 조사하였다.

SFRC의 인장거동을 고찰해보면 균열이 발생한 이후의 거동은 하나의 주균열의 확대에 의해 지배된다. 그러므로 균열 이전의 탄성영역에서는 응력-변형률선도를 가지고 인장거동을 설명할 수 있지만 균열이 발생한 이후의 거동을 설명하기 위해서는 응력-변위 선도의 도입이 필요하며 따라서 SFRC의 인장에서 강도후 영역에서의 응력-변위선도를 모델화하기 위해서는 섬유의 pull-out 거동과 콘크리트 모체(matrix)를 가로지르는 균열폭을 고려해야할 필요가 있다.

본 연구의 제 2단계에서는 SFRC의 연화 현상을 micromechanics의 관점에서 살펴봄으로써 SFRC를 사용한 구조체의 해석을 위하여 SFRC의 강도후 영역에서의 응력-변위도 개발을 위한 실용적인 식의 유도를 위한 개념을 제공하고자 하였다.

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

2. 본론

2.1 Spacing 개념

Spacing 개념은 콘크리트 단면내 균열성장 길이가 짧고 임의로 분산된 강섬유에 의하여 저지됨으로써 콘크리트에 인장강도가 향상된다는 데에 그 개념을 두고 있다. Spacing 개념은 Romualdi[2]에 의하여 다음과 같은 식으로 콘크리트내에 임의로 분산된 강섬유간의 평균간격(S)이 산정되었다.

$$S = 13.8 \cdot d_f / \sqrt{100 \cdot V_f} \quad (1)$$

여기서, V_f = 섬유혼입률
 d_f = 섬유의 직경

Romualdi는 식(1)을 유도하는데 있어 임의의 방향성을 갖는 강섬유에 대하여 인장응력 방향으로의 재향성을 고려하는데, 이는 식(1)에서 인장응력 방향에 대하여 유효하게 균열을 제어하는 정도의 척도로 쓰였으며 이를 orientation factor(α)로 나타내었다.

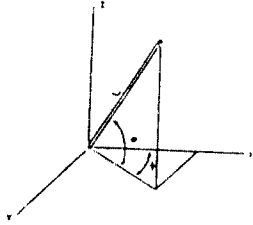


그림 1 orientation factor

$$\alpha = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} L \cos\theta \sin\phi \, d\theta d\phi}{L \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} d\theta d\phi} \quad (2)$$

위의 식(2)에서 나타난 orientation factor는 콘크리트 모체에 비하여 강섬유의 크기가 비교적 작은 것을 감안하여 강섬유가 마치 무한한 공간속에서의 임의의 방향성을 가질 수 있는 확률을 가정하여 산정하였다.

Mckee[4]는 SFRC내에 섬유간격을 또 다른 식으로 나타냈는데 이 식에서는 모든 강섬유가 동일한 체적내에 있는 것으로 가정하여 다음 식(3)으로 섬유간격을 나타내었

다.

$$S = \sqrt[3]{\frac{A_f \cdot l_f}{V_f}} \quad (3)$$

여기서, A_f = 섬유단면적

위의 두 식을 살펴볼 때[식(1), 식(3)] 두 식 모두 SFRC의 섬유수가 증가할수록 섬유간의 간격이 작아지는 것을 살펴볼 수 있으며 문헌[1]과 [2]에 의하면 이들 간격에 반비례하여 강섬유보강콘크리트의 인장강도가 증가하는 것이 보고되었다. 그러나 일반적으로 문헌에 보고된 인장거동을 측정하기 위한 SFRC의 인장시험체는 유한한 단면 크기를 가짐으로써 공시체의 경계부분의 강섬유가 인장응력방향으로의 재향성이 증가하게되며, 또한 공시체는 타설할 때 진동기에 의한 진동이 가해짐으로써 모체내의 강섬유가 이론치와 비교할 때 수평적인 방향성을 갖는다고 볼 수 있다. 이들 영향들은 긍정적으로 강섬유의 인장거동에 영향을 미치게 되는데 단면이 작아질수록, 또한 좀더 많은 진동이 가해질수록 강섬유가 인장응력 방향으로의 재향성이 증가하게 되게 때문이다. 이들 영향이 고려되지 않았을 때 실험실에서의 제한된 단면적을 갖는 공시체의 인장실험결과는 실제 구조해석을 위한 올바른 자료로써 쓰여질 수 없다. 이들 경계조건과 진동에 의한 강섬유의 재향성을 고려하여 Soroushian et. al.[1]은 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$N_l = \alpha \frac{V_f}{A_f} \quad (4)$$

여기서, α = orientation factor

식(4)의 orientation factor는 경계조건을 고려하여 산정되었으며[1] 자세한 내용은 부록 I에 기술하였고, 그 결과는 그림 2로 정리될 수 있다. 한편 참고문헌[1]에 의하면 통계적으로 진동에 의하여 변하는 강섬유의 재향성은 부록 I에 나타난 3-D와 2-D에 평균값으로 나타내어 질 수 있음이 보고되었다.

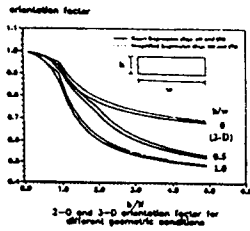


그림.2 각기다른 기하학적 형상조건에 따른 2-D와 3-D 조건의 orientation factor

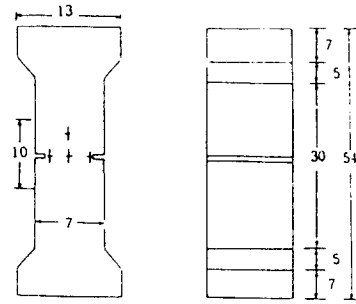


그림 3 시험체의 형상과 치수

2.2 Spacing 개념과 실험결과와의 비교

본 연구는 위의 각각의 spacing개념에 대하여 문헌[1]에서 나타난 49개의 기존 data와 본 연구자들에 의한 실험 data 18개를 근거로 하여 각 개념들과 실험 data 67개와의 상관관계를 조사함으로써 각 개념의 적합성을 조사하였다.

본 연구를 위하여 실행된 실험을 정리하면 다음과 같다.

2.2.1 재료 및 콘크리트의 혼합 과 성형

Type I 포틀랜드 시멘트와 가평에서 채취한 천연골재를 사용하였으며 강섬유는 직경이 0.7mm이고 섬유의 길이는 형상비 60, 80, 100에 따라 각각 42mm, 56mm, 70mm이다. 혼화제는 Daracen 100을 사용하였고 시험체의 성형 및 양생방법은 KS F 2404 및 JCI규준안을 따라서 행하였다. 시험체의 다짐은 소형판상 진동기를 사용하여 다짐을 하였고, 성형이 끝난 공시체는 습윤양생을 하면서 24시간 이내에 시멘트풀을 사용하여 capping을 하였으며, 탈형 후 28일 이상 수중에서 표준양생을 실시하였다. 시험시의 재령은 수중에서 28일 이상 양생한 후 시험 시까지 공기중에서 보관하였다.

2.2.2 실험방법 및 장치

본 연구에서 사용된 시험체는 중앙부 단면이 7cm×10cm를 갖는 dog-bone 형태의 시험체로서 시험체의 중앙면에 폭 3mm이고 깊이 7mm인 notch를 주었다[그림3].

본 연구에서 제작된 직인장 jig는 만능 시험기와 시험체를 연결하는 부분을 힌지로 처리하여 편심이 발생하지 않도록 하였고, 시험체 접촉부분은 slip이 발생하지 않도록 양쪽 면을 bolt를 사용하여 고정하였다. 노치(notch)를 중심으로한 '주균열'에 의한

변위의 정확한 측정을 위해서 JCI와 참고문헌[6]들을 참고로 하여 SFRC의 인장변위를 측정하기 위한 변형측정장치를 인장 jig에 함께 고정할수 있도록 하였으며 여기에 LVDT를 설치하였다. 장착위치는 노치를 중심으로 하여 상, 하로 5cm 되는 곳으로 하였다. 게이지는 1cm크기의 콘크리트 게이지를 사용하였고, 부착위치는 그림 3에 도시되어 있다. 직인장 jig는 그림 4에 도시되어 있고, 그림 5에는 set-up된 시험체의 모습이 제시되어 있다.

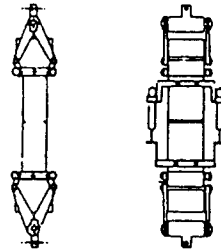


그림 4 직인장 jig

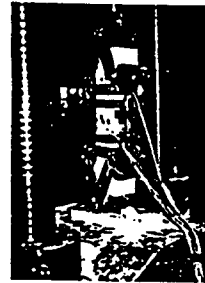


그림 5 UTM에 set-up된 시험체

2.2.3 인장강도와 실험data간의 상관관계

본절에서는 식(1), (2), (4)에 의하여 계산된 섬유간격과 단위면적당 섬유수(N1)와 인장강도사이의 상관관계를 통하여 SFRC의 인장강도와 spacing개념을 토대로 한 섬유

간격간의 관계의 적합성을 검토하였다. 표1과 2에 실험조건 및 결과를 정리하였다. 표 1 실험조건 및 결과(문헌[1])

단면 A	단면 B	종류	유			orientation factor	Fiber spacing		단위면적당 평균섬유수	
			원시 fca	신장 fca	신장 후 fca		식(1)	식(3)		
10.0	0.75	신장	1.0	0.016	0.5-1.5	0.7-1.20	0.092	0.31-0.68	0.34-0.24	17.2-31.7
7.0	7.0	신장	1.0	0.016	0.5-1.5	0.7-1.20	0.092	0.31-0.68	0.34-0.24	17.2-31.7
3.0	0.41	신장	1.0	0.016	0.5-1.5	0.7-1.20	0.092	0.31-0.68	0.34-0.24	17.2-31.7
3.0	0.5	신장	1.0	0.016	0.5-1.5	0.7-1.20	0.092	0.31-0.68	0.34-0.24	17.2-31.7
1.0	1.0	신장	1.0	0.016	0.5-1.5	0.7-1.20	0.092	0.31-0.68	0.34-0.24	17.2-31.7

표 2 실험조건 및 결과

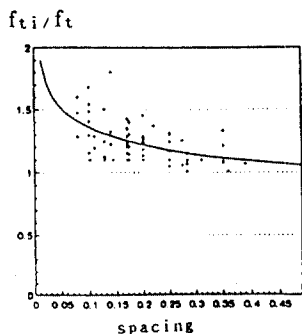
단면 A	단면 B	종류	유			orientation factor	Fiber spacing		단위면적당 평균섬유수	
			원시 fca	신장 fca	신장 후 fca		식(1)	식(3)		
10.0	10.0	신장	1.0	0.016	0.5-1.5	0.7-1.20	0.092	0.31-0.68	0.34-0.24	17.2-31.7

그림 6(a)~(c)에는 식(1), 식(3)에 의해 계산된 섬유간격(S) 및 식(4)에 의해 계산된 단위면적당 평균섬유수(N1)와 SFRC의 인장강도간의 상관관계를 회귀분석한 결과를 보여주고 있다. 회귀분석에 사용된 일 반식은 $y = 1 + ax^b$ 형태의 멱함수로서 결과는 다음과 같다.

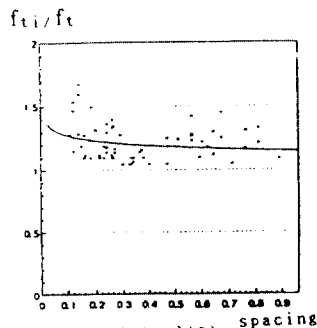
식(1) : $f_{tf}/f_t = 1 + 0.0331 \cdot S^{-0.86}$
상관계수=0.534

식(3) : $f_{tf}/f_t = 1 + 0.1288 \cdot S^{-0.04}$
상관계수=0.226

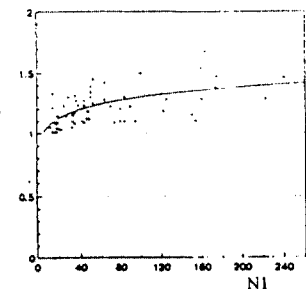
식(4) : $f_{tf}/f_t = 1 + 0.0115 \cdot N1^{0.684}$
상관계수=0.579



(a) 식(1)



(b) 식(3)



(c) 식(4)

그림.6 Spacing 개념에 의한 섬유간격[식(1), (3), (4)]과 인장강도와의 상관관계

그림 6(a), (b), (c)에 제시된 상관계수를 보면, 인장강도비는 식(4)에 의해 계산된 단위면적당 평균섬유수[상관계수:0.579]가 식(1)의 섬유간격[상관계수:0.534]이나 식(3)의 섬유간격[상관계수:0.226]보다 상관성이 있다는 것을 보여준다. 이러한 사실들을 고찰해 볼때 orientation factor를 산정할때는 섬유가 가지는 시험체 단면의 경계조건과 진동효과를 고려해서 산정해야 한다는 것을 알수 있다.

2.3 인장강도 이후의 응력-균열폭 관계

SFRC의 인장거동은 모체 인장강도의 약 80%~85% 정도까지 선형탄성거동을 한다[6] 이 후 영역에서 SFRC는 비선형거동을 하는데 이것은 미세균열이 발생하여 진행되고 있음을 나타낸다. 강도전 영역에서는 SFRC의 거동을 응력-변형도관계로 나타낼 수 있으나 강도후 영역에서는 주균열에 집중되어 변위가 일어남과 동시에 그외의 부분에서는 unloading 현상이 일어남이 본 실험을 통하여 고찰되었다[그림7]. 따라서 기존의 응력-변형도의 개념으로는 gage 길이의 영향

을 배제할 수 없어 gage 길이에 따라 다른 응력-변형도의 결과를 얻게된다. 따라서 본 연구에서는 강도후 영역의 SFRC의 인장 거동을 gage 길이에 무관하게 나타낼 수 있도록 응력-균열크기개념에 근거를 두어 강도후 영역의 SFRC의 연화거동을 나타내고자 하였다.

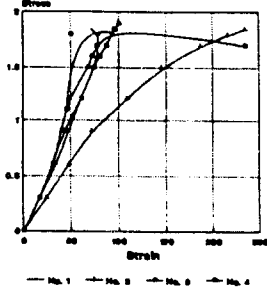
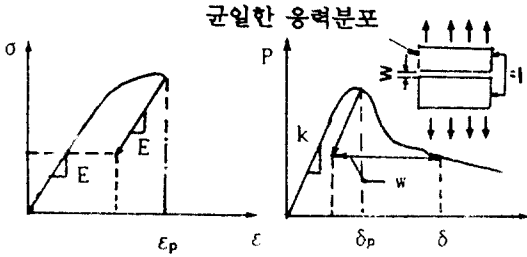


그림 7 게이지 위치에 따른 응력-변형률곡선



(a)unloading (b)균열크기산정

그림 8 강도후 영역에서의 균열크기 산정
 균열크기(w)는 다음과 같이 유도되었다.

$$\begin{aligned} \delta &= w + 2 \int_0^{1/2} \epsilon dx \\ &= w + 2 \int_0^{1/2} \left(\epsilon - \frac{(\sigma_p - \sigma)}{E} \right) dx \\ &= w + (\delta_p - P_p/k + P/k) \end{aligned}$$

그러므로

$$w = \delta - \delta_p + P_p/k - P/k \quad (5)$$

이때 주균열 외부의 구간과 gage 측정범위 구간내의 공시체의 변형도는 동일하중하에서 일정한 unloading 변형도를 갖는 것으로 가정하였다. 그림 9는 본 연구의 실험 자료를 근거로 하여 식(5)을 이용하여 균열폭을 산정한 결과를 나타낸다. 일반 콘크리트의 응력-변형도[3]보다 SFRC의 강도후 영역에서의 응력-변위도가 강섬유의 pull-out에 의하여 에너지를 더 흡수하는 것이 고찰되었다.

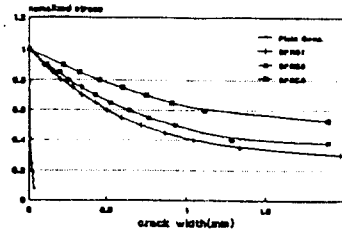


그림 9 응력-균열폭

2.4 강도후 영역에서의 응력-변위도 모델

강도후 영역에서 SFRC는 모체의 연화거동과 강섬유의 pull-out 저항에 의하여 강도가 유지된다. 따라서 강도후 영역에서의 SFRC의 응력-변위도를 적절히 모델화하기 위하여는 모체콘크리트의 연화거동과 강섬유의 pull-out거동에 대한 적절한 모델화가 선행되어야 한다.

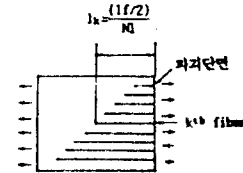


그림 10 파괴단면에서의 강섬유의 분포

SFRC의 응력-변위도에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나[6] 이들 연구는 공시체의 경계조건, 진동효과를 고려하지 않고 있으므로 파괴단면에서의 강섬유수에 대한 부적절한 산정에 기초하고 있으며 또한 강섬유의 묻힌 길이에 대하여 전체적으로 평균 길이를 사용함으로써 강섬유의 묻힌 길이에 따라 비선형으로 변화되는 부착응력을 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 문헌[7]에 보고된 pull-out 모델을 이용하여 기존의 모델들이 갖는 단점을 극복하는 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 다음 가정에 근거하였다.

1. 파괴단면에 N_1 개[식(4)]의 강섬유가 골고루 분산되어있다[그림 10].
2. 각 강섬유는 비선형 pull-out 거동의 지배를 받는다.
3. 강도후 영역에서의 SFRC거동은 모체 콘크리트의 연화거동과 pull-out의 중첩에 의하여 결정되며 균열폭과 강섬유의 slip의 크기는 일치한다.

사용된 pull-out 모델식[7]은 부록II에

