

## 강섬유보강콘크리트의 파괴거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fracture Behavior of  
Steel Fiber Reinforced Concrete Structures

張東一\* · 郭鍾現\*\* · 蔡元奎\*\*\*

Chang, Dong-Il · Kawk, Jong-Hyun · Chai, Won-Kyu

## Abstract

In this paper, fracture tests were carried out in order to investigate the fracture behavior of SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) structures. Thirty six SFRC beams were used in this test. The relationships between loadings, strains, and mid-span deflections of the beams were observed under the three point loading system.

From the test results, the effects of percentage of fiber by volume, the fiber aspect ratio and the initial crack depth ratio on the concrete fracture behavior were studied, and the stress intensity factors, the toughness index, and the flexural strength of SFRC beams were calculated. According to the regression technique, some empirical formulae for predicting the flexural strength of SFRC beams were also suggested.

## 요 지

본 논문에서는 강섬유보강콘크리트 구조물의 파괴거동을 규명하기 위하여 파괴실험을 수행하였다. 실험대상 시험체는 모두 36개였으며, 실험시 시험체의 하중의 변화에 대한 휨 변형률과 중앙처짐량의 변화를 관찰하였다.

이들 결과를 토대로, 강섬유 혼입량, 강섬유 형상비와 초기균열비의 변화에 대한 강섬유보강콘크리트의 파괴거동을 고찰하였으며, 강섬유보강콘크리트의 응력확대계수, 인성지수, 휨강도를 계산 비교하였다. 아울러 회귀분석에 의하여 강섬유보강콘크리트의 휨강도를 예측할 수 있는 예측공식을 유도하였다.

\* 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 대전공업대학 공과대학 토목공학과 교수

\*\*\* 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

최근 각종 콘크리트 구조물이 대형화되고 다양화됨에 따라 기존 콘크리트의 결점인 취성 또는 휨이나 인장력에 저항할 수 있는 능력 등을 개선하기 위한 연구가 끊임없이 요구되고 있다. 이러한 기존 콘크리트의 치명적인 단점은 휨강도와 인장강도가 낮고 균열에 대한 저항성이 매우 약해서 결국 균열에 의하여 파괴에 이르는 취성재료라는 점이다. 콘크리트의 이러한 단점을 없애기 위하여 인장부분을 철근으로 보강하고, 균열등의 문제점들은 혼화제를 사용하는 방법을 취해 왔으나, 이것만으로는 콘크리트의 인장강도의 전면보강이나 균열에 대한 저항성을 높이는 획기적인 방법이 될 수는 없었다. 이러한 관점에서 콘크리트의 취성재료인 약점을 보강하여 균열에 대한 저항성을 높이고 인장강도와 휨강도 및 인성등을 개선하며, 충격하중이나 지진하중하에서도 충분한 내구성을 유지할 수 있는 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete; FRC)가 탄생하게 되었다.

이러한 섬유보강콘크리트에 혼입하는 여러 섬유중 유리섬유는 탁월한 인장강도와 비자성(非磁性)의 장점이 있으나 시멘트와 혼합하기가 극히 어렵고, 탄소섬유는 고강도 일 뿐만 아니라 고탄성 재료이나 비교적 가격이 높으며, 플라스틱계 섬유는 시멘트 매트릭스보다 영률이 작으므로 균열강도의 개선에 문제점이 있기 때문에 일반적으로 비구조용 재료로 사용되고 있다. 반면 강섬유보강콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete; SFRC)는 인장, 굽힘, 압축 및 전단등의 각종 하중하에서의 저항능력이 보통 콘크리트의 경우에 비하여 우수하기 때문에 새로운 구조용 재료로서 연구되고 있다.<sup>(1,3)</sup>

강섬유보강콘크리트의 실용화에 대한 연구는 1963년 Romualdi와 Batson<sup>(4,5)</sup>에 의해 최초로 연구되었다. Romualdi와 Batson은 균열구속체로 연속섬유를 치밀한 간격으로 배치한 공시체를 이용한 휨시험에서 Griffith의 선형파괴역학에 기초를 둔 모델을 사용하여 콘크리트 초기균열강도가 섬유간격에 의해서 지배됨을 확인하였다. 또한 Romualdi와 Mandel<sup>(6)</sup>은 1964년 짧은 강섬유를 균등하게 분산한 콘크리트에 대하여 실험을 행하고 강섬유보강콘크리트의 균열강도가 섬유간격에 의해서 지배됨을 보

였다. Shah와 Rangan<sup>(7,8)</sup>은 1971년 강섬유로 보강된 콘크리트는 인성과 에너지 흡수성 및 피로특성이 개선된다고 하였으며, Chen과 Carson<sup>(9)</sup>은 1971년 섬유길이가 섬유보강콘크리트의 인장강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 1972년 Batson, Jenkins, Spatney<sup>(10)</sup>는 강섬유를 철근과 함께 사용하여 비틀림 및 전단 보강재로서의 사용 가능성을 제시하였고, 1985년 Niyogi와 Dwarakanathan<sup>(11)</sup>은 모멘트와 전단력하에서의 강섬유보강콘크리트의 거동에 대하여 연구하였다.

이들 연구에 의하면, 강섬유보강콘크리트의 강도 증대 효과는 강섬유 혼입량, 강섬유 형상비 등에 따라 달라지고 있음을 알 수 있다. 그러나 이들 변수가 강섬유보강콘크리트의 파괴거동에 미치는 영향이 체계적으로 정립되어 있지 않으며, 특히 초기 균열이 있는 강섬유보강콘크리트의 파괴거동에 대한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

이에 본 연구에서는 강섬유보강콘크리트의 강도 증대 요인인 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비, 초기 균열비를 변수로 하여 시험체를 제작하였으며, 이들 변수들에 대한 강섬유보강콘크리트의 하중변화에 따른 휨 변형률과 중앙처짐량의 변화를 측정하였다. 본 논문에서는 이들 결과를 토대로 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트의 응력확대계수, 인성지수, 휨강도 등을 비교 고찰하여 강섬유보강콘크리트의 파괴거동을 규명하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료 및 시험체

본 실험에서는 강섬유보강콘크리트 시험체 제작시, 쌍용시멘트 제품의 포틀랜드 시멘트와 굵은 골재의 최대 치수가 19 mm인 강자갈, 강모래를 사용하였고, 우리나라의 콘크리트 표준시방서<sup>(12)</sup>의 배합 설계 기준에 준하여 표 1과 같이 배합강도 350 kg/cm<sup>2</sup>으로 배합하였다.

배합시 강섬유는 시험체의 전체 체적에 대한 비율로 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%씩 첨가 하였으며, 섬유의 뭉침을 방지하기 위하여 강제식 믹서를 사용하였다. 이때 강섬유는 직경이 0.9 mm이며, 길이가 54 mm, 72 mm, 90 mm인 즉, 강섬유 형상비(L/d)가 60, 80, 100인 단상의 원형 강섬유를 각각 사용하

표 1. 배합설계표.

굵은 골재의 최대 치수 (mm)	슬럼프의 범위 (cm)	공기량의 범위 (%)	물 시멘트 비 W/C (%)	잔골재율 S/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )			
					물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G
19	10	2.0	38.4	45	185	482	752	936

표 2. 강섬유의 재료적 성질.

형상비 (L/d)	길이(L) (cm)	직경(d) (cm)	밀도 (kg/cm <sup>3</sup> )	탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
60, 80, 100	5.4, 7.2, 9.0	0.09	7.85	2,040,000	13,000

였다. 사용 강섬유의 재료적 성질은 표 2와 같다.

보 시험체는 10×10×60 cm로 일정하게 모두 36 개를 제작하였으며, 시험체의 종류는 크게 강섬유 혼입량이 0.0%, 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 5가지, 또 강섬유 형상비가 60, 80, 100인 3가지로 구분하였고, 각 종류마다 초기균열비를 0.0, 0.2, 0.4로 시험체를 세분화하였다.

### 2.2 실험방법

파괴실험시 하중재하방법은 3점 휨하중법으로 하였으며, 100 ton용량의 만능시험기를 사용하여 보 시험체가 파괴 할때까지 하중을 0.1 mm/min 속도로 일정하게 재하하였다.

하중이 10 kg씩 증가할 때마다 보 시험체의 중앙 하단에 설치한 콘크리트 스트레인 게이지와 처짐측 정기에 의해 휨 변형률과 중앙처짐량을 측정하였으며, 아울러 보 시험체의 초기균열발생시의 하중과 파괴시의 극한하중을 측정하였다. 파괴 실험의 개략도는 그림 1과 같다.

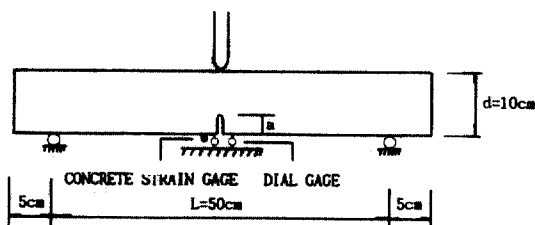


Fig. 1. Three point bending test.

### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 슬럼프 값

강섬유 혼입량과 강섬유 형상비가 콘크리트의 반죽질기에 미치는 영향을 조사하기 위하여 KS F 2402 규정에 준하여 슬럼프 시험을 행하였다. 이 시험 결과, 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 슬럼프 값은 감소하였으며, 같은 강섬유 혼입량 중에서도 강섬유 형상비가 커짐에 따라 슬럼프 값이 더욱 감소함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 배합시 섬유를 뿌려넣으며 혼입할 때 반죽질기가 급격히 저하하는 것을 육안으로도 관찰할 수 있었다는 점에서 강섬유 혼입량의 증가에 기인한 섬유의 표면적에 다량의 수분이 흡착되어 일어나는 것임을 알 수 있다. 또한 동일 혼입량일 경우라도 섬유의 형상비가 증가하면 슬럼프값이 훨씬 더 저하되는 것은 강섬유의 길이로 인한 섬유의 뭉침 현상 때문으로 판단된다.

한편 Kobayashi와 Okamura<sup>(13)</sup>는 강섬유보강콘크리트의 슬럼프 값을 강섬유 혼입량과의 관계로 규정하고 있으나, 본 연구에서는 강섬유 전표면적에 대한 슬럼프 값의 변화를 알아 보았다.

강섬유 한개당 표면적 a는

$$a = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \times 2 + \pi \cdot d \cdot L = \frac{1}{2} \pi \cdot d \cdot (d + 2L)$$

이고, 단위 부피당 섬유갯수 N은

$$N = \frac{p}{100} \div \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \times L \right) = \frac{p}{25 \pi \cdot d^2 \cdot L}$$

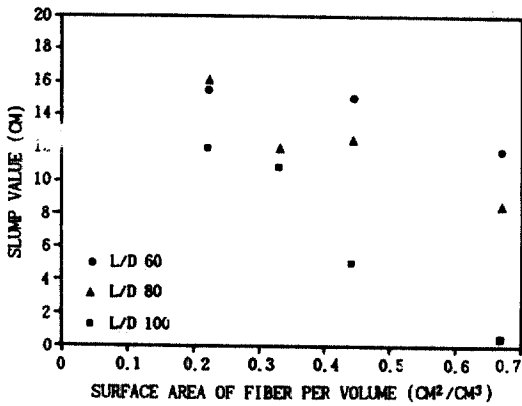


Fig. 2. The relationship between the surface area of fiber per volume and the slump value.

이므로, 단위부피당 강섬유의 전표면적  $A$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = a \times N = \frac{p}{50 \times d} \left( \frac{d}{L} + 2 \right)$$

여기서,  $d$ 는 강섬유의 직경,  $L$ 은 강섬유의 길이,  $p$ 는 강섬유 혼입량이다.

이들 결과는 그림 2에 나타내었으며, 강섬유의 전표면적이 커질수록 슬럼프 값이 저하되어 워커빌리티가 나빠짐을 알 수 있었다. 이러한 현상은 강섬유 형상비가 클 수록 두드러지게 나타났다.

### 3.2 압축강도 및 탄성계수

콘크리트 압축강도 시험용으로  $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 의 원통형 공시체를 시험체 종류에 따라 제작하여 28일 강도를 측정하였으며, 측정결과는 그림 3과 같다.

본 연구에서는 공시체를 이용한 압축강도 시험에서 secant 탄성계수를 측정하였고, 측정값을 ACI Committee 544<sup>(14)</sup>에서 제안한 식과 비교하여 표 3과 그림 4에 나타내었다. ACI Committee 544의 탄성계수 계산식은 다음과 같다.

$$E_c = (1.0 - p) \cdot E_m + p \cdot E_f$$

여기서,  $E_c$ 는 섬유보강콘크리트의 탄성계수,  $p$ 는 섬유 혼입량,  $E_m$ 은 매트릭스(콘크리트)의 탄성계수,  $E_f$ 는 섬유의 탄성계수이다.

이들 결과에서 강섬유 혼입량에 따른 탄성계수의

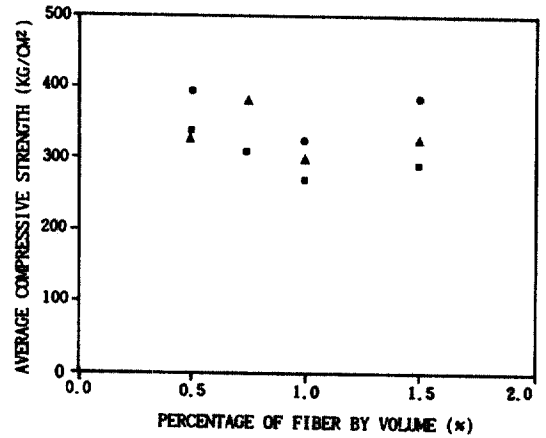


Fig. 3. The relationship between the percentage of fiber by volume and the compressive strength.

표 3. 강섬유혼입량에 따른 탄성계수의 경험치와 실측치. [단위:  $\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ]

함유량(%)	경험치	실측치
0.00	2.23	2.23
0.50	2.32	2.41
0.75	2.37	2.31
1.00	2.41	2.43
1.50	2.50	2.70

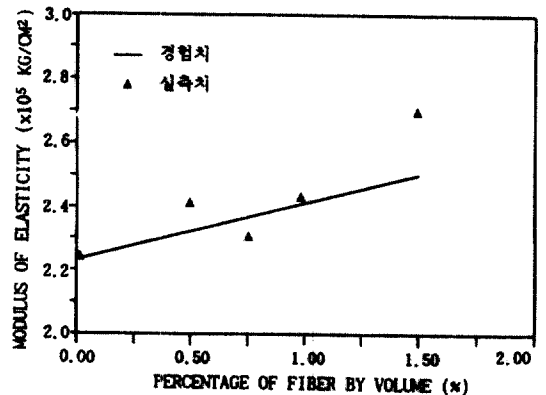


Fig. 4. The relationship between the percentage of fiber by volume and moduli of elasticity.

실측치는 비교적 ACI Committee 544에서 제안한 경험식에 근접하는 것으로 나타났다.

### 3.3 중앙 처짐 및 극한하중

본 실험에서는 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트의 시험체에 3점 휨실험을 행하여 하중의 변화에 따른 휨 변형률과 중앙처짐량의 변화를 조사하였으며, 이들 결과를 표 4에 정리하였다. 파괴실험 결과, 극한상태의 중앙처짐량은 강섬유가 혼입되지 않은 시험체에 비하여 강섬유 혼입량이 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 시험체에서 약 1.03배, 1.59배, 2.91배, 3.31배씩 증가함을 알 수 있었다. 또한 강섬유보강콘크리트의 극한하중은 그림 5에서 도시되어 있듯이 강섬유가 혼입되지 않은 시험체에 비하여 강섬유 혼입량이 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.5%인 시험체에서 평균 1.07배, 1.31배, 1.35배, 1.58배의 각각 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다.

이들 결과는 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 보강된 강섬유와 매트릭스간의 부착강도 증진으로 균열생성 및 성장 억제 능력이 증가되므로 극한하중이 증가되고, 이로인해 중앙처짐 또한 증가되는 것으로 생각된다. 그림 2와 그림 5에서 같은 강섬유 혼입량에서도 강섬유 형상비가 증가 될수록 극한강도가 증가되나, 강섬유 형상비가 큰 경우(L/d=100인 경우)에는 슬럼프값이 극히 적어지므로 이의 실용성에는 문제가 있는 것으로 생각되며, 좋은 워커빌리티를 갖으면서 강도증진효과를 얻기 위해서는 강섬유 형상비가 80(d=72 mm) 일 때가 적당하다고 사료된다.

한편 콘크리트의 단위부피당 강섬유의 수 N은 다음과 같다.

$$N = \frac{p/100}{(\pi \cdot d^2)/4 \cdot L} = \frac{p}{25 \pi \cdot d^2 \cdot L}$$

상기 식에서 단위면적을 가로지르는 강섬유의 수 n은 배향계수(effectiveness factor of random fiber)  $\beta$ 를 고려할 때 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{n}{\beta \cdot L} = \frac{p}{25 \pi \cdot d^2 \cdot L}$$

그러므로 강섬유의 평균간격 S는 다음과 같다.

$$S^2 = 1/n$$

$$S = \frac{5\sqrt{\pi}}{\sqrt{\beta}} \cdot \frac{d}{\sqrt{p}}$$

즉, Romualdi의 섬유간격이론<sup>(5)</sup>에 의하면  $\beta=0.405$ 이므로

$$S = 13.8 \frac{d}{\sqrt{p}}$$

이다.

본 실험결과에 상기 기술한 Romualdi의 이론에 의한 섬유 평균간격을 적용하면 그림 6과 같이 강섬유보강콘크리트의 극한하중을 강섬유의 평균간격에 대해 나타낼 수 있다. 이 결과에서 강섬유의 간격이 1.5 cm미만인 경우 강섬유보강콘크리트의 강도가 급격히 증대됨을 알 수 있었다.

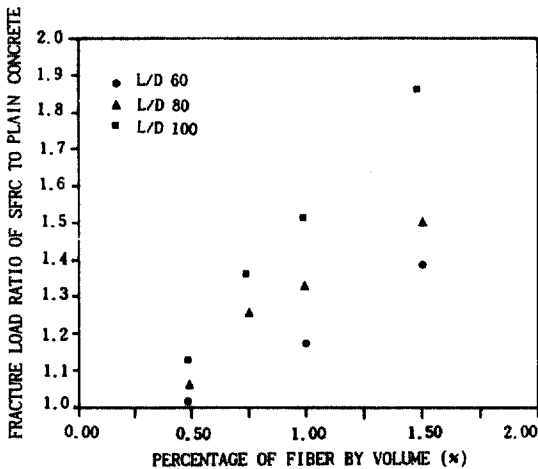


Fig. 5. The relationship between the percentage of fiber by volume and the ultimate load-ratio of SFRC to plain concrete.

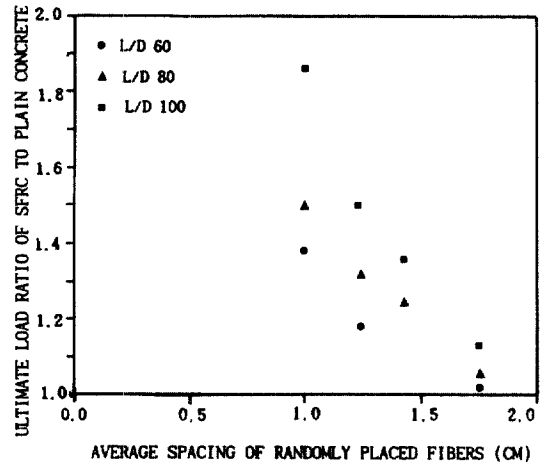


Fig. 6. The relationship between the average spacing of randomly placed fibers and the ultimate load.

표 4. 파괴 실험 결과

Spec. No	$P_{cf}$ (kg)	$P_{cu}$ (kg)	$\epsilon_{cf}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\delta_{cu}$ (mm)	T. I.	$K_{IC}$ ( $kg \cdot cm^{-3/2}$ )	$\sigma_{cf}$ ( $kg \cdot cm^{-2}$ )
P-0	425	531	192	0.30	3.08	—	31.88
P-2	327	385	38	0.19	3.06	70.99	38.32
P-4	211	242	16	0.13	8.16	75.50	43.96
A1-0	430	535	139	0.22	6.86	—	32.25
A1-2	340	390	47	0.14	—	71.91	39.84
A1-4	245	250	27	0.17	—	77.99	51.04
A3-0	442	546	114	0.32	—	—	33.15
A3-2	381	392	38	0.43	—	72.28	44.65
A3-4	286	360	23	0.59	8.51	112.31	59.58
A4-0	460	560	129	0.34	—	—	34.50
A4-2	390	481	32	0.27	15.01	88.69	45.70
A4-4	373	447	21	0.41	12.66	139.45	77.71
B1-0	450	582	142	0.28	7.25	—	33.75
B1-2	351	396	31	0.18	11.57	73.02	41.13
B1-4	254	254	26	0.13	16.58	79.24	52.92
B2-0	468	591	123	0.36	15.31	—	35.10
B2-2	358	460	37	0.32	15.87	84.82	41.95
B2-4	344	350	30	0.24	28.63	109.19	71.67
B3-0	480	622	148	0.28	15.73	—	36.00
B3-2	359	480	33	0.25	—	88.51	42.07
B3-4	347	379	30	0.52	34.00	123.85	72.29
B4-0	532	687	103	0.20	—	—	39.90
B4-2	486	491	42	0.24	15.49	90.54	56.95
B4-4	396	468	10	0.76	6.31	146.01	82.50
C1-0	458	590	155	0.19	8.81	—	34.35
C1-2	365	407	35	0.15	12.46	75.05	42.77
C1-4	294	297	23	0.17	—	92.66	61.25
C2-0	500	599	110	0.30	11.87	—	37.50
C2-2	376	460	31	0.17	35.98	84.82	44.06
C2-4	360	430	19	0.38	23.26	134.15	75.00
C3-0	519	650	165	0.35	12.34	—	38.93
C3-2	400	548	33	0.94	24.65	101.05	46.88
C3-4	382	460	29	0.77	6.59	143.51	79.58
C4-0	650	820	119	0.74	15.50	—	48.75
C4-2	551	625	51	1.21	28.80	115.24	64.57
C4-4	424	585	21	1.03	9.18	182.51	88.33

여기서, P: 무근 콘크리트 시험체  
 A, B, C: 강섬유 형상비가 각각 60, 80, 100인 시험체  
 1, 2, 3, 4: 강섬유 혼입량이 각각 0.5%, 0.75%, 1.0, 1.5%인 시험체  
 -0, -2, -4: 초기균열비가 각각 0.0, 0.2, 0.4인 시험체

$P_{cf}$ : 초기균열발생시의 하중  
 $P_{cu}$ : 극한하중  
 $\epsilon_{cf}$ : 초기균열발생시의 휨 변형률  
 $\delta_{cu}$ : 극한상태시의 중앙처짐량  
 T. I.: 인성지수  
 $K_{IC}$ : 임계 응력확대계수  
 $\sigma_{cf}$ : 초기균열 발생시의 휨강도

### 3.4 응력확대계수와 파괴인성

3점 휨하중을 받는 콘크리트 부재의 응력확대계수는 다음식으로 나타낼 수 있다.<sup>(15)</sup>

$$K_t = \sqrt{\pi} \cdot a \cdot (P \cdot l) / (b \cdot D^2) \cdot f(\alpha)$$

$$f(\alpha) = 1.635 - 2.603 \alpha + 12.30 \alpha^2 - 21.27 \alpha^3 + 21.86 \alpha^4$$

여기서, P는 작용하중, l은 보의 길이, b는 보의 폭, D는 보의 높이, a는 초기균열길이,  $\alpha = a/D$ 이다.

본 실험결과를 상기식에 적용하여 그림 7에 도시하였다. 이 그림에서 강섬유 혼입량이 0.5% 이하 일때는 강섬유에 의한 균열 성장 억제 효과가 적었고, 강섬유 혼입량이 0.75% 이상 일때는 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 강섬유에 의한 균열 성장 억제 효과가 증가함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 강섬유 형상비가 클수록 뚜렷하게 나타났다.

본 연구에서는 ACI Committee 544<sup>(16)</sup>에서 제안한 식을 이용하여 강섬유보강콘크리트의 인성지수를 구하였으며, 이들 결과를 이용하여 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비에 따른 인성증진 효과를 알아보았다. ACI Committee 544에서 제안한 인성지수 계산식은 다음과 같다.

$$T.I. = \frac{1.9 \text{ mm 처짐시까지의 하중-처짐선도 면적}}{\text{초기균열발생시까지의 하중-처짐선도 면적}}$$

이들 결과는 표 4와 그림 8에 정리하였다. 그림 8에서 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비가 증가함에 따라 인성지수는 불규칙하였으나 대체로 증가하는 경향을 나

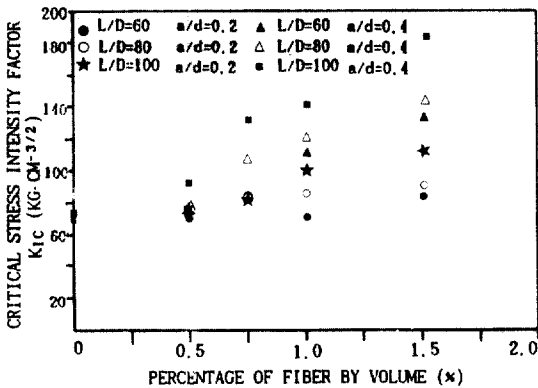


Fig. 7. The relationship between the percentage of fiber by volume and the critical stress intensity factor.

타내고 있었다. 이들 결과에서 강섬유보강콘크리트는 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비의 증가에 따라, 균열이 발생한 이후에도 지속적으로 하중에 저항할 수 있는 능력, 즉 후균열성장 저항성이 높아짐을 알 수 있었다.

### 3.5 휨강도

본 연구에서는 강섬유 혼입량, 강섬유 형상비의 변화에 대한 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 휨강도를 계산하여 표 4에 정리하였으며, 이들 결과를 무근 콘크리트의 휨강도와 비교하여 다음과 같이 회귀분석 하였다.

$$\sigma_{c1} = A \cdot \sigma_m \cdot (1.0 - p) + B \cdot (L/d) \cdot p$$

여기서,  $\sigma_{c1}$ 는 강섬유보강콘크리트의 초기균열발생시

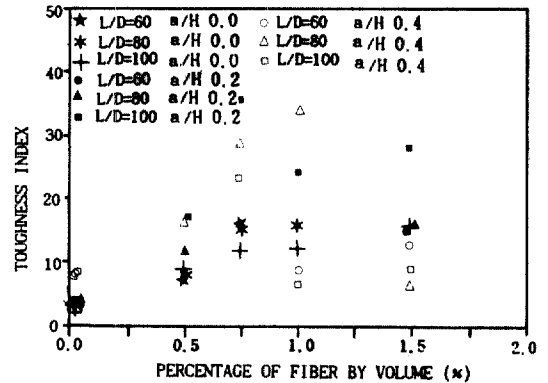


Fig. 8. The relationship between the percentage of fiber by volume and the toughness index.

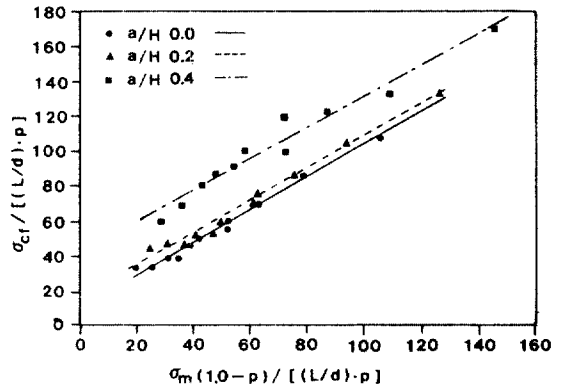


Fig. 9. The flexural strength of SFRC.

의 휨강도,  $\sigma_m$ 은 무근콘크리트의 초기균열발생시의 휨강도,  $(L/d)$ 는 강섬유 형상비,  $p$ 는 강섬유 혼입량,  $A$ 와  $B$ 는 실험상수이다.

상기식을 이용하여 회귀분석한 결과는 그림 9와 같으며, 이들 결과에서 강섬유보강 콘크리트의 휨강도는 다음과 같이 유도될 수 있다.

i) 초기균열비가 0.0인 경우

$A = 0.9263, B = 9.4428$  로서 상관계수는  $\gamma = 0.996$ 이었으며 즉,

$$\sigma_{cr} = 0.9263 \times \sigma_m \cdot (1.0 - p) + 9.4428 \times (L/d) \cdot p$$

ii) 초기균열비가 0.2인 경우

$A = 0.9213, B = 14.2750$  로서 상관계수는  $\gamma = 0.993$ 이었으며 즉,

$$\sigma_{cr} = 0.9213 \times \sigma_m \cdot (1.0 - p) + 14.2750 \times (L/d) \cdot p$$

iii) 초기균열비가 0.4인 경우

$A = 0.9002, B = 40.5621$  로서 상관계수는  $\gamma = 0.979$ 이었으며 즉,

$$\sigma_{cr} = 0.9002 \times \sigma_m \cdot (1.0 - p) + 40.5621 \times (L/d) \cdot p$$

#### 4. 결 론

본 논문에서는 일련의 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트 시험체에 파괴실험을 수행하여 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트의 파괴거동을 규명하고 휨강도를 비교 분석하였다. 본 논문에서 연구한 강섬유보강콘크리트의 파괴거동은 다음과 같다.

단위부피당의 강섬유 전표면적이 커질수록 슬럼프 값이 감소되어 워커빌리티가 나빠졌으며, 이러한 현상은 강섬유 형상비가 클수록 뚜렷하게 나타났다. 또한 본 실험결과에 의한 강섬유보강콘크리트의 탄성계수는 ACI Committee 544 제안식에 근접하는 것을 알 수 있었다.

강섬유의 혼입에 의한 강섬유와 매트릭스간의 부착강도 증진은 휨 인장강도를 증대 시켰으며, 이로 인해 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 하중과 극한하중이 증가되었다. 이러한 현상은 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비가 커짐에 따라 증가하는 양상을 보였으며, 이들 결과에 Romualdi의 섬유

간격설을 적용하면 강섬유 간격이 1.5cm미만인 경우 극한하중이 급격히 증대함을 알 수 있었다. 또한 강섬유보강콘크리트의 응력확대계수와 인성지수의 비교결과에서 강섬유 혼입량이 0.75%이상인 경우 강섬유에 의한 균열 성장 억제 효과와 후균열 성장 저항성이 커짐을 알 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 강섬유보강콘크리트의 초기균열발생시의 휨강도를 강섬유 혼입량과 강섬유 형상비를 변수로 각각 계산 비교하였으며, 이들 결과를 회귀분석하여 초기균열비가 있는 강섬유보강콘크리트의 휨강도를 추정 할 수 있는 예측공식을 유도하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 1990년도 박사과정 학위논문 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. ASM International, "Engineering Materials Handbook-Composites," Ohio, U.S.A., 1987, pp.105-121.
2. 實教出版株式會社, "複合材料", 東京, 日本, 1988, pp.182-200.
3. Kobayashi, K., and Cho, R., "Study on Testing Method for Crack Arrest Ability of Steel Fiber Reinforced Concrete," Proceedings of JSCE, No. 300, 1980, pp.109-119.
4. Romualdi, J.P., and Batson, G.B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," Journal of ACI, Proceedings Vol. 60, No.6, 1963, pp.775-790.
5. Romualdi, J.P., and Batson, G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," ASCE, EM3, 1963, pp.147-168.
6. Romualdi, J.P., and Mandel, J.A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," Journal of ACI, Proceedings Vol. 61, NO. 6, 1964, pp.657-671.
7. Shah, S.P., and Rangan, B.V., "Fiber Reinforced Concrete Properties," Journal of ACI, Proceedings Vol. 68, No. 2, 1971, pp.126-135.



8. Shah, S.P., and Rangan, B.V., "Effects of Reinforcements on Ductility of Concrete," ASCE, ST6, 1970, pp.1167-1184.
9. Chen, W.F. and Carson, J.L., "Stress-strain Properties of Random Wire Reinforced Concrete," Journal of ACI, Proceedings Vol. 68, No. 12, 1971, pp.933-936.
10. Batson, G.B., Jenkins, E., and Spatney, R., "Steel Fiber as Shear Reinforcement in Beams," Journal of ACI, Proceedings Vol. 69, No. 10, 1972, pp.640-644.
11. Niyogi, S.K., and Dwarakanathan, G.I., "Fiber Reinforced Beams under Moment and Shear," ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985, pp.516-527.
12. 건설부, "콘크리트 표준 시방서," 1988, pp.421-436.
13. Kobayashi, K., and Okamura, Y., "Mix Design of Steel Fiber Reinforced Concrete of Desired Consistency," Proceeding of JSCE, No.296, 1980, pp. 111-119.
14. ACI Cmmittee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete," Journal of ACI, Proceeding Vol. 70, No.11, 1973, pp.729-744.
15. Bazant, Z.P. and Cedolin, L., "Approximate Linear Analysis of Concrete Fracture by R-Curves," Journal of Structural Engineering, No.110, 1984, pp. 1336-1355.
16. ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete," Journal of ACI, Proceeding Vol. 75, No. 7, 1978, pp.283-289.

(接受 : 1990. 11. 23.)