

# 강섬유 혼입량에 의한 강섬유보강콘크리트의 파괴에너지에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Fracture Energy of Steel Fiber Reinforced Concrete Structures by the Effects of Fiber Contents

張 東 一\* 蔡 元 奎\*\* 鄭 原 宇\*\*\* 孫 永 現\*\*\*

Chang, Dong Il Chai, Won Kyu Cheong, Won Woo Son, Young Hyun

### 요 약

본 논문에서는 강섬유 혼입에 따른 강섬유보강콘크리트의 강도 증대 현상을 규명하고 파괴에너지를 결정하기 위하여, 일련의 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트 시험체에 대하여 파괴실험을 수행하였다.

파괴실험은 3점 휨 실험법으로 실시하였으며, 실험시 각 시험체의 하중변화에 따른 휨 변형률, 중앙처짐, 균열끝 개구변위와 초기균열 발생시의 하중, 극한하중 등을 조사하였다. 이들 실험 결과를 토대로 강섬유 혼입량과 초기균열 비에 따른 강섬유보강콘크리트의 파괴인성, 임계 에너지해방률 등을 비교 분석하였으며, 아울러 하중-처짐 선도를 이용한 파괴에너지를 결정하였다.

연구결과, 측정된 강섬유보강콘크리트의 하중-처짐선도는 강섬유 혼입량이 클수록 파괴후 완만하게 나타났으며, 하중-처짐선도 면적에 의하여 계산된 강섬유보강콘크리트의 파괴에너지는 강섬유 혼입량이 0.5%~1.0%인 경우에는 무관콘크리트의 파괴에너지의 약 7~10배, 강섬유 혼입량이 1.5%인 경우에는 약 15배 각각 크게 나타났다.

### Abstract

In this study, fracture tests were carried out in order to investigate the fracture behavior of SFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete) with initial cracks. The relationships between loading, strain, mid-span deflections and CMOD(Crack Mouth Opening Displacement) of the beams were observed under the three point loading system. The effect of the fiber content and the initial crack ratio on the concrete fracture behavior were studied and the fracture toughness, the critical energy release ratio and the fracture energy were also calculated from the test results. From the test results, it was known that when the fiber contents are between 0.5%, and 1.0%, and 1.5%, the average fracture energy of SFRC specimens is about 7~10 times, and about 15 times better than that of the plain concrete specimens respectively.

\* 성희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 성희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

\*\*\* 한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

# 1. 서론

## 1.1 연구배경

섬유보강콘크리트의 역학적 성질에 대한 연구는 1950년대 말부터 1960년대 초에 Romualdi와 Batson<sup>(1)(2)</sup>에 의해 최초로 연구되었다. Romualdi와 Batson은 강섬유를 모르타르에 사용한 결과 응력확대계수가 감소하는 것에 의해 인장강도가 증가한다고 발표하였으며, 이들의 이론적인 결과는 강섬유를 모르타르의 부피에 대한 비율로 변화시켜가면서 강섬유의 간격과 초기균열 발생시의 응력을 비교하였다. 뒤이어 Romualdi와 Mandel<sup>(3)</sup>은 짧은 강섬유를 균등하게 분산한 모르타르에 대한 실험을 통하여 부단 모르타르와 강섬유보강모르타르의 초기균열 발생시의 강도비를 비교함으로써 강섬유보강모르타르의 균열강도가 섬유간격에 의해서 지배됨을 보였다.

Shah와 Rangan<sup>(4)(5)</sup>은 1971년 강섬유로 보강된 콘크리트는 인성과 에너지흡수성 및 피로특성이 개선된다고 하였으며, Chen과 Carson<sup>(6)</sup>은 1971년 섬유간격이 섬유보강콘크리트의 인장강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 1972년 Batson, Jenkins, Spatney<sup>(7)</sup>는 강섬유를 철근과 함께 사용하여 비틀림 및 전단 보강재로서의 사용 가능성을 제시하였고, 1985년 Niyogi와 Dwarakanathan<sup>(8)</sup>은 모멘트와 전단력하에서의 강섬유보강콘크리트의 거동에 대하여 연구하였다.

## 1.2 연구목적

본 논문에서는 이러한 강섬유 혼입에 따른 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트의 강도 증대 현상을 규명하고, 강섬유보강콘크리트의 파괴에너지를 결정하기 위하여 일련의 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트 시험체에 대하여 파괴실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험체는 강섬유를 전체 콘크리트의 체적에 의한 비율로 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%씩 혼입한 4가지 종류로 분류하였으며, 각 시험체 종류마다 초기균열비를 0.0, 0.2, 0.4로 시험체를 세분화하였다.

파괴실험은 3점 휘험법으로 실시하였으며, 실험시 각 시험체의 하중변화에 따른 휘 변형률, 중앙처짐, 균열률 개구변위와 초기균열 발생시의 하중, 극한하중 등을 조사하였다. 이를 실험 결과를 토대로 강섬유 혼입량과

초기균열비에 따른 강섬유보강콘크리트의 파괴인성, 임계 에너지해방률 등을 비교 분석하였으며, 아울러 하중-처짐선도를 이용하여 파괴에너지를 결정하였다.

# 2. 실험

## 2.1 사용재료

### 2.1.1 강섬유

본 실험에서 사용한 강섬유는 직경이 0.6mm인 원형강선을 chopping machine에 의해 48mm로 일정하게 잘라서 사용하였으며, 재료적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties of steel fiber.

직경(d) (cm)	길이(L) (cm)	형상비 (L/d)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
0.06	4.8	80	7.85	2,020,000	13,000

### 2.1.2 콘크리트

콘크리트 배합시 시멘트는 현재 현장에서 주로 사용되고 있는 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 화학적 성분 및 물리적 성질은 Table 2와 같다. 골재는 비중이 각각 2.65, 2.60인 강자갈, 강모래를 사용하였으며, 최대치수를 19mm로 하였다. 콘크리트의 배합설계표는 Table 3과 같다.

## 2.2 시험체

모 시험체는 10×10×60cm로 일정하게 제작하였으며, 강섬유 혼입량이 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 초기균열비가 0.0, 0.2, 0.4인 12개의 시험체를 실험에 사용하였다. 또한 강섬유보강콘크리트의 압축강도 시험용으로  $\phi$ 10cm×20cm 원통형 공시체 36개를 제작하였다. 시험체 제작시 중력식 믹서를 사용하였고, 섬유봉침(fiber balling) 현상이 생기지 않도록 강섬유를 조금씩 뿌려 넣어가면서 믹서하였다.

Table 2. The chemical components and the physical properties of cement.

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	감열감량 (%)	비중	비표면적 (m <sup>2</sup> /g)
20.8	6.3	3.2	62.1	3.3	2.3	0.12	0.8	1.0	3.12	3200

Table 3. Mix proportion of concrete.

굵은 골재의 최대치수 (mm)	슬럼프의 범위 (cm)	공기량의 범위 (%)	물 시멘트비 W/C (%)	산물재율 (%)	단위량 (kgf/cm <sup>3</sup> )			
					물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G
19	10	2.0	38.4	45	185	482	752	936

### 2.3 실험방법 및 측정

파괴실험시 하중재하방법은 3점 휨하중법으로 하였으며, 25ton 용량의 만능시험기를 사용하여 보 시험체가 파괴될 때까지 하중을 1kgf/sec 속도로 일정하게 재하하였다. 하중이 50kgf씩 증가할 때마다 보 시험체의 중앙상단 및 균열끝에 부착한 콘크리트 스트레인 게이지와 중앙하단에 설치한 처짐측정기에 의해 휨 변형률과 중앙처짐량을 측정하였으며, 초기균열이 있는 시험체의 경우에는 균열끝에 설치한 크립 게이지(crip gage)에 의해 균열끝 개구변위를 조사하였다. 아울러 보 시험체의 초기균열 발생시의 하중과 극한하중을 측정하였다. 파괴실험의 개략도는 Fig.1과 같다.

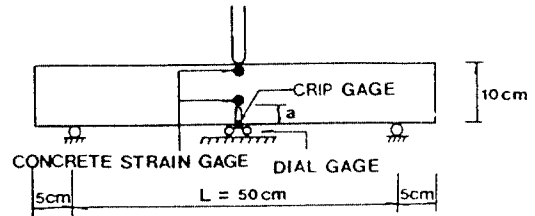


Fig. 1. The general view of the fracture test.

### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 파괴실험 결과

파괴실험시 하중의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트 각 시험체의 중앙처짐, 휨변형률, 균열끝 개구변위를 측정하였으며, 아울러 초기균열 발생시의 하중과 극한하중을 조사하였다. 이들 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Fracture test results.

강섬유 혼입량 (%)	초기 균열비 (a/d)	F <sub>1</sub> (kgf)	F <sub>u</sub> (kgf)	δ <sub>1</sub> (mm)	δ <sub>u</sub> (mm)	ε <sub>cl</sub> (·10 <sup>-6</sup> )	ε <sub>cu</sub> (·10 <sup>-6</sup> )	CMOD <sub>1</sub> (mm)	CMOD <sub>u</sub> (mm)
0.0	0.0	700	700	0.20	0.20	-97	-97	-	-
0.0	0.2	510	510	0.24	0.24	-116	-116	0.05	0.05
0.0	0.4	325	325	0.12	0.12	-99	-99	0.05	0.05
0.5	0.0	850	885	0.35	0.40	-109	-168	-	-
0.5	0.2	650	700	0.34	0.41	-194	-256	0.05	0.14
0.5	0.4	545	565	0.34	0.44	-231	-279	0.21	0.28
1.0	0.0	950	1000	0.54	0.79	-297	-336	-	-
1.0	0.2	755	900	0.43	0.67	-287	-408	0.16	0.35
1.0	0.4	600	615	0.33	0.40	-276	-293	0.19	0.25
1.5	0.0	1350	1400	0.70	0.78	-407	-505	-	-
1.5	0.2	1200	1230	1.28	2.61	-479	-564	0.91	2.03
1.5	0.4	1000	1050	0.78	1.28	-581	-733	0.40	0.82

여기서,  $F_1$ 는 초기균열 발생시의 하중,  $F_{20}$ 는 극한하중,  $\delta_1$ 는 초기균열 발생시의 처짐,  $\delta_{20}$ 는 극한상태의 처짐,  $\epsilon_{1s}$ 는 초기균열 발생시의 압축 횡변형률,  $\epsilon_{cu}$ 는 극한상태의 압축 횡변형률,  $CMOD_1$ 는 초기균열 발생시의 균열끝 개구변위,  $CMOD_{20}$ 는 극한상태의 균열끝 개구변위를 나타낸다.

시험체의 초기균열 발생시의 하중은 균열끝에 부착한 스트레인 게이지의 파손에 의해 측정하였으며, 이들 결과는 Fig. 2와 같다. 이 그림에서 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 하중은 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 크게 증가하였으며, 초기균열비가 큰 시험체의 경우 그 경향이 더욱 뚜렷하였다. 무근콘크리트에 대한 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 하중은 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5%일 때 초기균열이 없는 시험체의 경우, 약 1.14배, 1.36배, 1.93배, 초기균열비가 0.2인 시험체의 경우 약 1.27배, 1.48배, 2.35배, 초기균열비가 0.4인 시험체의 경우 약 1.68배, 1.85배, 3.08배씩 각각 증가함을 알 수 있었다. 이들 결과로부터 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 콘크리트의 균열발생을 억제하는 능력이 커짐을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 초기균열이 없는 시험체보다는 초기균열이 있는 시험체에서 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

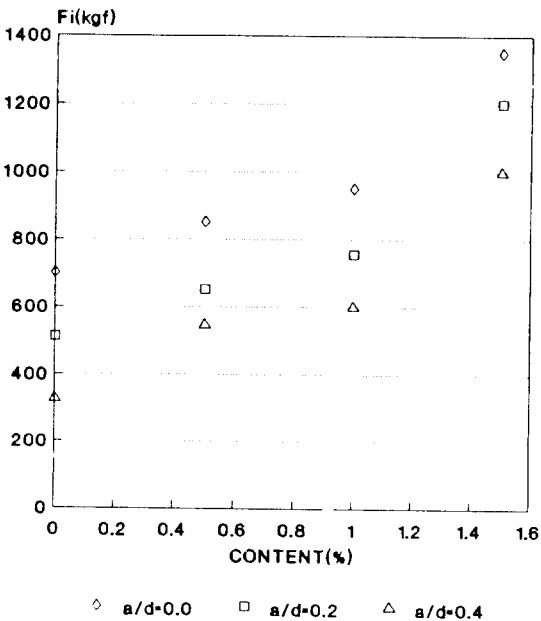


Fig. 2. The relationships between the fiber content and the initial crack load.

Fig. 3은 강섬유보강콘크리트의 파괴실험시 측정된 극한 하중을 나타내고 있다. 이 그림에서 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 강섬유보강콘크리트의 극한하중은 증가하였으며, 초기균열 발생시 하중의 경우와 마찬가지로 무근콘크리트에 대한 강섬유보강콘크리트의 극한하중은 초기균열이 있는 시험체의 경우 더욱 크게 나타났다. 초기균열비가 0.4인 시험체의 경우 강섬유보강콘크리트의 극한하중은 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5%일 때 무근콘크리트의 극한하중에 비하여 약 1.75배, 1.90배, 3.25배의 큰값을 나타내고 있었다. 이들 결과로부터 강섬유보강콘크리트는 후균열 정상 억제능력이 뛰어난 것을 알 수 있었으며, 초기균열이 있는 구조물의 경우에 더욱 효과적이라고 생각된다.

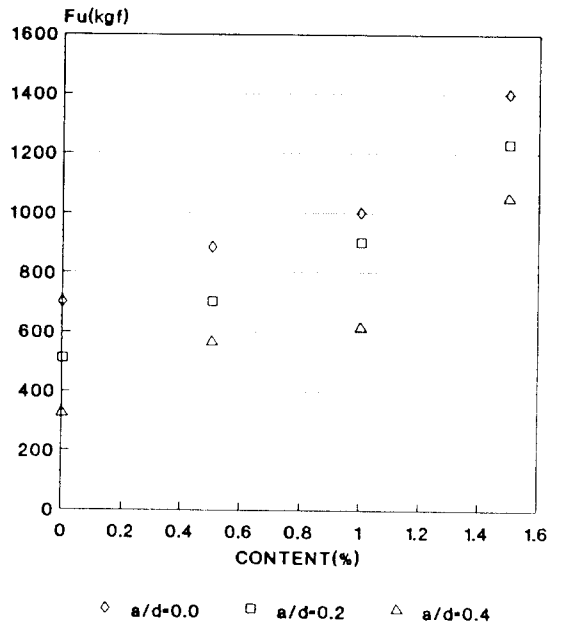


Fig. 3. The relationships between the fiber content and the ultimate load.

Fig. 4와 Fig. 5에 강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 처짐과 극한상태의 처짐을 나타내었다. 무근콘크리트에 비하여 강섬유보강콘크리트의 처짐은 강섬유 혼입량이 클수록 증가하였으며, 강섬유 혼입량이 1.5% 이상인 시험체의 경우에는 뚜렷하게 처짐이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 보강된 강섬유와 매트릭스간의 부착강도 증진으로 균열의 생성 및 정상 억제능력이 증가되므로 극한하중이 증가되고, 이로 인하여 중앙처짐 또한 증가되는 것으로 판단

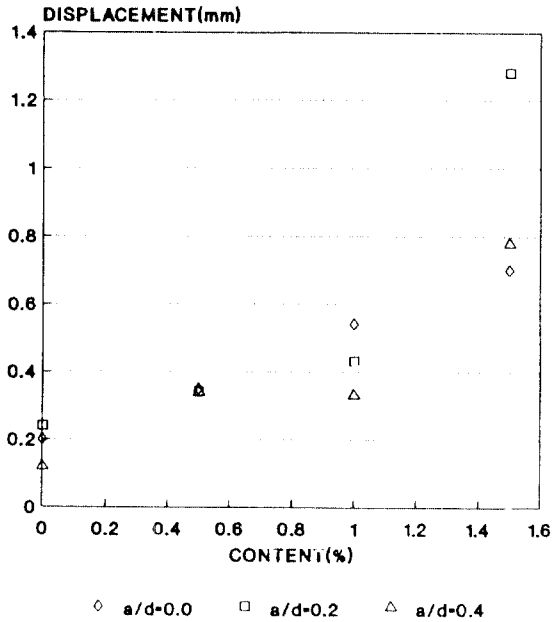


Fig. 4. The relationships between the fiber content and the mid-span deflection at which initial crack occurs.

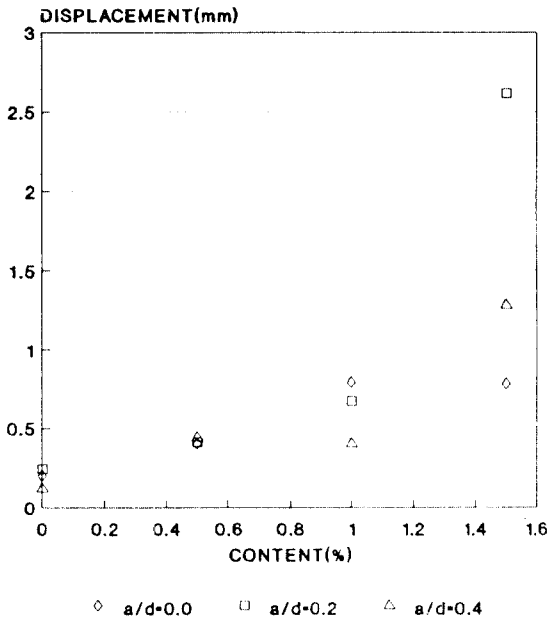


Fig. 5. The relationships between the fiber content and the mid-span deflection at the ultimate load.

된다.

### 3.2 파괴인성(Fracture Toughness; $K_{IC}$ )과 임계 에너지 해방률(Critical Energy Release Rate; $G_c$ )

본 연구에서는 강섬유혼입량의 변화에 따른 강섬유보강 콘크리트의 균열 확대시 균열에 주어지는 에너지의 변화를 알아보기 위하여, 선형탄성파괴역학 이론하의 파괴인성과 임계에너지해방률을 비교하여 보았다.

3점 휘하중을 받는 콘크리트 부재의 파괴인성은 다음식으로 나타낼 수 있다.<sup>19)</sup>

$$K_{IC} = \sigma_N \cdot \sqrt{a} \cdot V_{II}(\alpha)$$

$$\sigma_N = \frac{1.5 \cdot l \cdot (F_u + mg/2)}{d^2 \cdot t}$$

$$V_{II}(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{1.5}}$$

여기서,  $a$ 는 초기균열길이,  $l$ 은 시험체의 길이,  $F_u$ 는 탄한하중,  $m$ 은 시험체의 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $\alpha$ 는 초기 균열비( $\alpha = a/d$ ,  $d$ 는 시험체의 높이)이다.

본 실험결과를 상기식에 적용한 결과는 Fig. 6과 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 부근콘크리트 시험체의 파괴인성에 비하여 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5%인 시험체의 파괴인성은, 초기균열비가 0.2인 시험체의 경우 약 1.40배, 1.79배, 2.44배씩 각각 증가하였으며, 초기균열비가 0.4인 시험체의 경우 약 1.72배, 1.88배, 3.19배씩 각각 증가하였다. 이들 결과에서 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 강섬유가 콘크리트 매트릭스의 변형을 구속하는 효과가 증가함을 알 수 있었으며, 이러한 강섬유의 균열성장 억제능력은 초기균열비가 큰 시험체에서 더욱 크게 나타났다.

한편, 상기식에 의해 임계 에너지해방률은 다음과 같이 계산할 수 있다.<sup>19)</sup>

$$G_c = \frac{K_{IC}^2}{E}$$

여기서,  $E$ 는 탄성계수이며 다음과 같다.

$$E = \frac{6 l \cdot (a + H_0) \cdot V_I(\alpha)}{d^2 \cdot t \cdot C}$$

$$V_I(\alpha) = 0.76 - 2.28\alpha + 3.87\alpha^2 - 2.04\alpha^3 + \frac{0.66}{(1-\alpha)^2}$$

여기서,  $H_0$ 는 크립 게이지의 높이,  $t$ 는 시험체의 폭,  $C = CMOD_{ul}/F_u$ ,  $CMOD_{ul}$ 은 탄성한계시의 균열폭 개구면

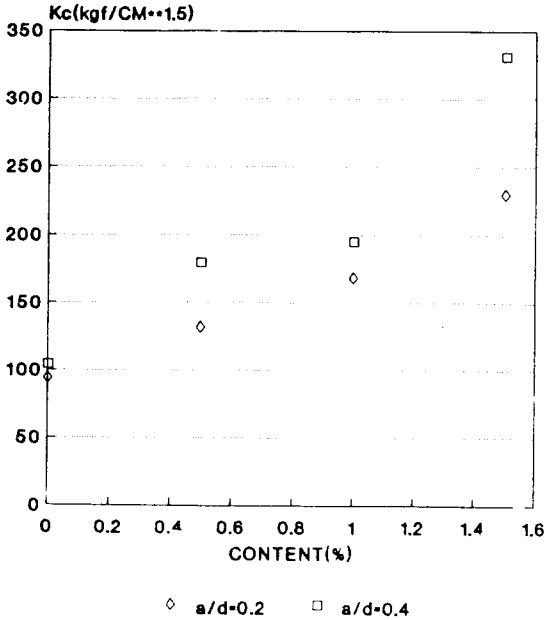


Fig. 6. The relationships between the fiber content and the fracture toughness.

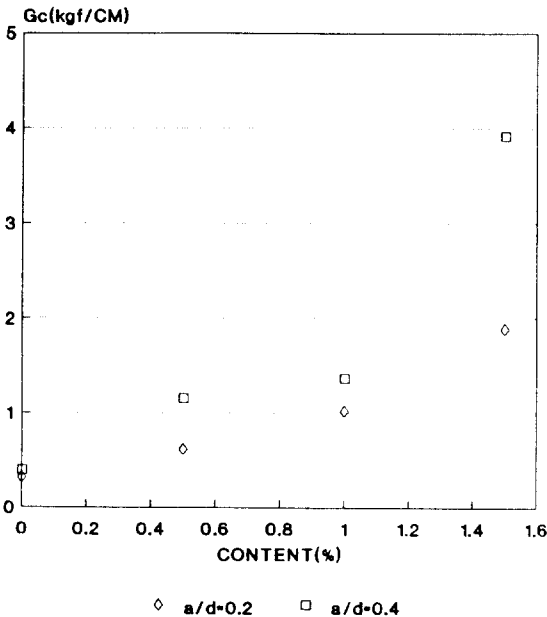


Fig. 7. The relationships between the fiber content and the critical energy release rate.

위이다.

본 연구에서는 상기식에 의해 강섬유보강콘크리트의 임계 에너지해방률을 계산하여 Fig. 7에 나타내었으며,

그 결과 강섬유 혼입량이 1.0% 이하인 시험체에서는 강섬유 혼입량의 증가에 따라 강섬유보강콘크리트의 균열 확대시 균열에 전파되는 에너지가 선형에 가깝게 증가하였으며, 강섬유 혼입량이 1.5%인 시험체에서 크게 증가함을 알 수 있었다.

### 3.3 파괴에너지(Fracture Energy ; $G_F$ )

콘크리트의 파괴에너지는 파괴실험에서 얻은 하중-처짐선도의 면적으로부터 구할 수 있다. 이 하중-처짐선도의 면적은 콘크리트의 균열이 전파함으로써 소모된 에너지를 표시한다. 또한, 작용된 하중 이외에 콘크리트보의 자중에 의한 영향을 고려해야 하므로 콘크리트의 파괴에너지는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.<sup>(11)</sup>

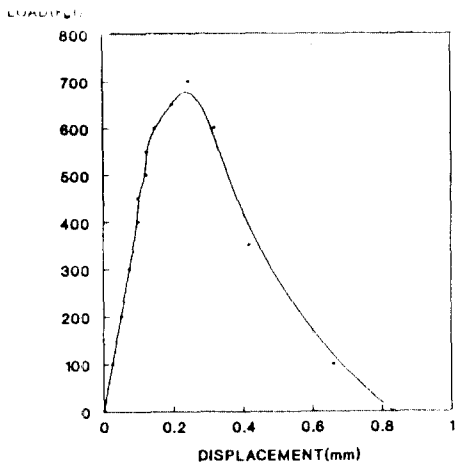
$$G_F = \frac{W_0 + W_1}{(d - a_0)t}$$

여기서,  $W_0$ 는 하중-처짐선도의 전체면적을 나타내며,  $W_1$ 은  $mg\delta_0$ ,  $\delta_0$ 는 시험체가 파괴후 하중이 0인 상태의 처짐을 나타낸다.

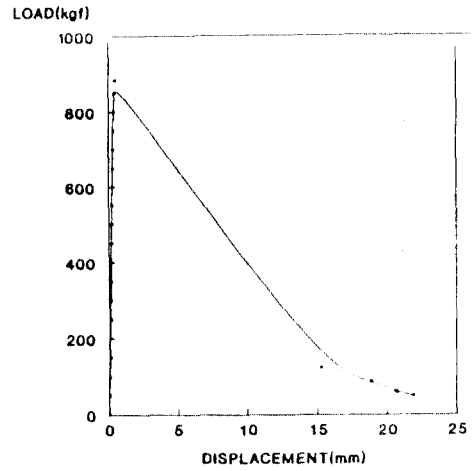
Fig. 8~Fig. 11에 파괴실험시 측정된 하중-처짐선도를 나타내었다. 이들 그림에서 무근콘크리트 시험체는 극한상태 이후에 급격히 파괴되는데 반하여, 강섬유가 혼입된 시험체는 극한상태 이후에 대체로 완만한 곡선을 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 강섬유보강콘크리트의 파괴에너지는 무근콘크리트의 파괴에너지 보다 매우 크게 나타나게 됨을 알 수 있다.

상기식에 의해 파괴에너지( $G_F$ )를 계산한 결과를 초기균열비에 따라 Fig. 12에 도시하였다.  $G_F$ 는 임계에너지해방률( $G_c$ )보다 큰 값을 나타내고 있었는데, 이는  $G_c$  계산시 느린 균열 성장을 무시하고, 균열길이를 초기균열로 계산한 결과 즉, 선형탄성파괴역학의 영역내에서 계산되었기 때문으로 사료된다.

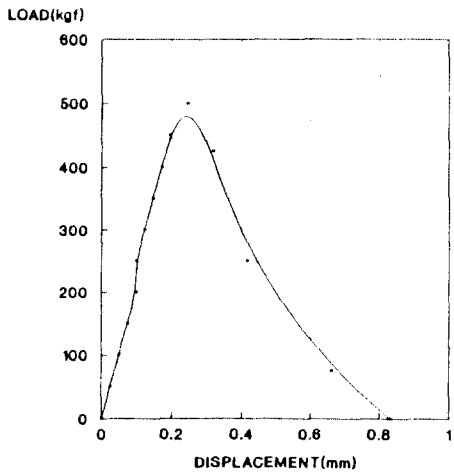
이 그림에서 보는 바와 같이 초기균열이 커짐에 따라 파괴에너지가 감소하였으며, 또한 초기균열 길이가 어느 정도 이상에서는 파괴에너지의 감소폭이 줄어들어 완만해지는 경향을 보이고 있었다. 초기균열이 아주 작은 경우에 파괴에너지가 크게 계산되는 것은 파괴진행대(fracture process zone) 외곽의 콘크리트가 응력을 많이 받아 추가적인 에너지가 소모되기 때문인 것으로 생각되며 이러한 현상은 강섬유 혼입량이 클수록 커지는 경향이 있었다. 반면, 초기균열이 과다하게 클 경우에는 균열이 전파할



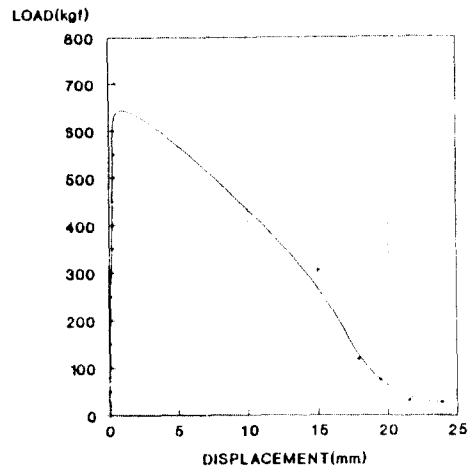
(a)  $a/d=0.0$



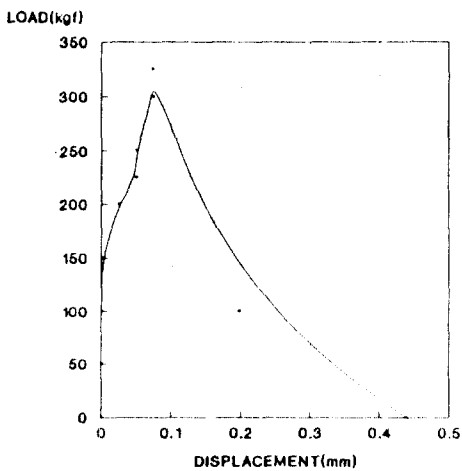
(a)  $a/d=0.0$



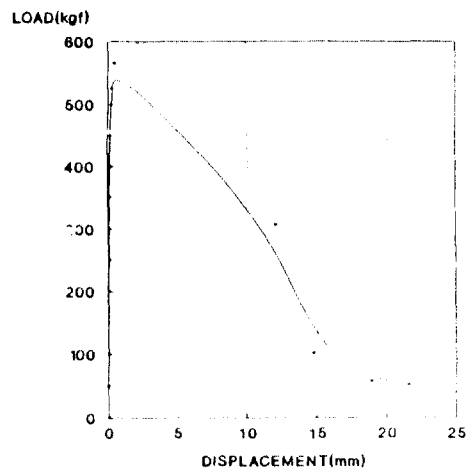
(b)  $a/d=0.2$



(b)  $a/d=0.2$



(c)  $a/d=0.4$



(c)  $a/d=0.4$

Fig. 8. The load-deflection curves of plain concrete.

Fig. 9. The load-deflection curves of SFRC when the fiber content is 0.5%.

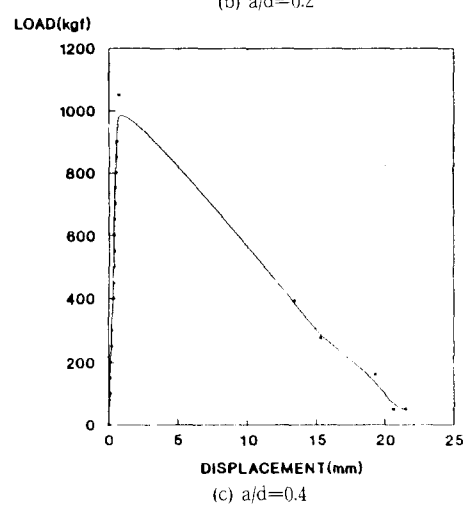
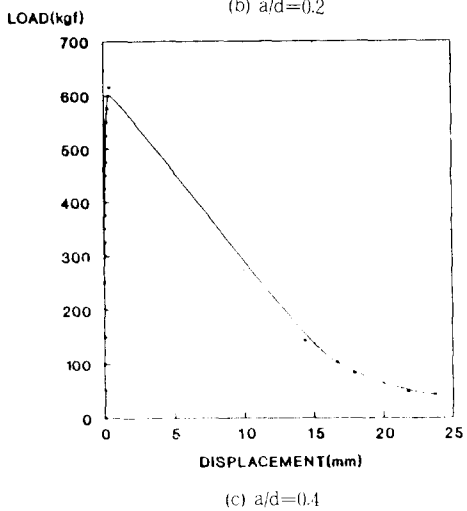
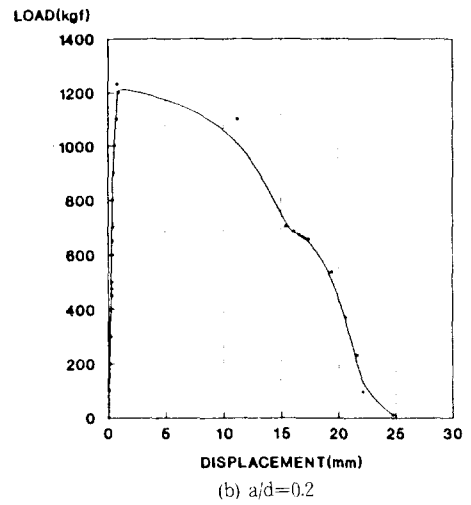
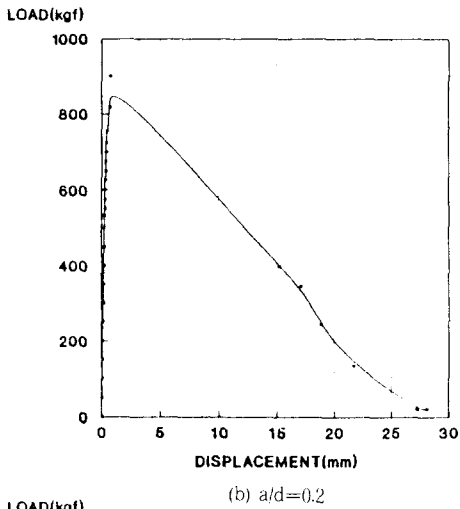
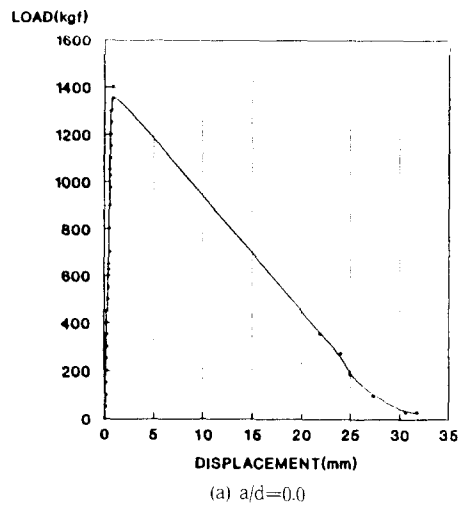
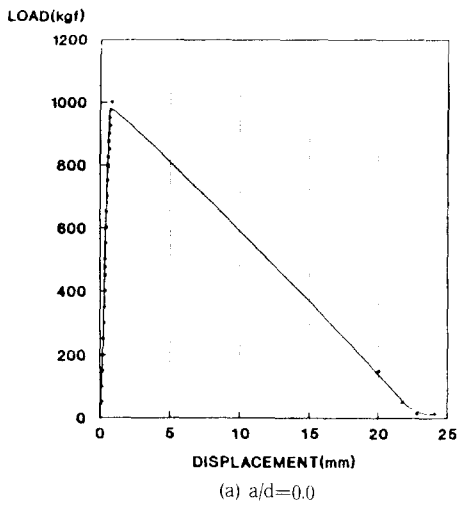


Fig. 10. The load-deflection curves of SFRC when the fiber content is 1.0%.

Fig. 11. The load-deflection curves of SFRC when the fiber content is 1.5%.



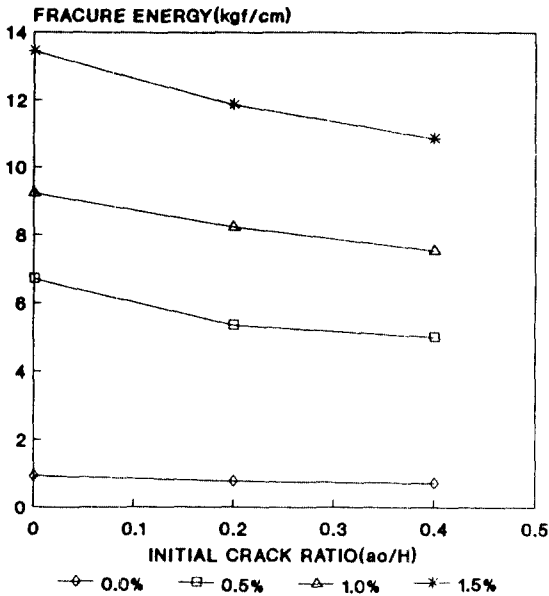


Fig. 12. The relationships between the initial crack ratio and the fracture energy.

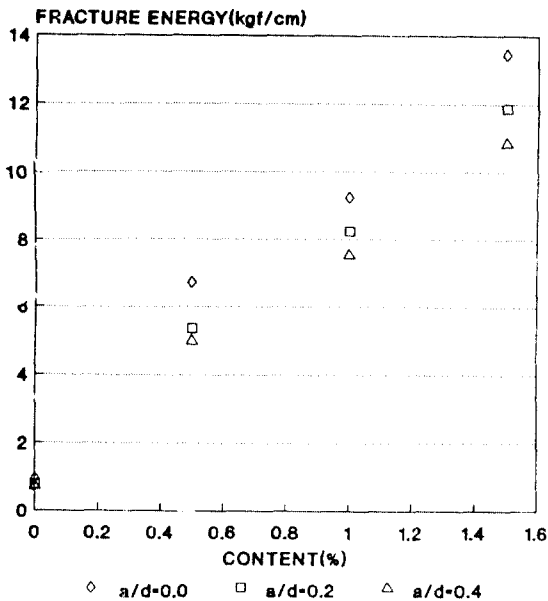


Fig. 13. The relationships between the fiber content and the fracture energy.

Table 5. Average fracture energy of SFRC.

시험체 종류(강섬유 혼입량)	평균 파괴에너지(kgf/cm)
F1 - Series(0.5%)	6.129
F2 - Series(1.0%)	7.862
F3 - Series(1.5%)	11.511

부분이 작아 파괴진행대가 충분히 발달할 수 없으므로 파괴에너지가 약간 작게 계산된다. 그러므로 본 실험에 의한 강섬유보강콘크리트의 평균 파괴에너지 계산에 적합한 초기균열비는 파괴에너지 곡선이 완만한 0.3으로 고려될 수 있으며, 이에 따라 계산된 강섬유 혼입량의 변화에 따른 강섬유보강콘크리트의 평균 파괴에너지 값은 Table 5와 Fig. 13에 나타내었다.

이들 결과에서 무근콘크리트에 대한 강섬유보강콘크리트의 파괴에너지는 강섬유 혼입량이 0.5%, 1.0%, 1.5% 일 때 약 7.0배, 10.5배, 15.2배씩 각각 증가함을 알 수 있었다. 한편, 본 연구 결과 강섬유보강콘크리트 시험체의 자중이 파괴에너지에 미치는 영향은 크지 않았으며, 전체 에너지값의 약 3~8% 정도로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 일련의 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트 시험체에 파괴실험을 수행하여 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트의 파괴거동을 규명하고, 파괴에너지를 결정하였다. 본 논문에서 연구한 초기균열이 있는 강섬유보강콘크리트의 파괴거동은 다음과 같다.

강섬유보강콘크리트의 초기균열 발생시의 하중과 극한상태의 하중은 강섬유 혼입량이 1.5%일 때 무근콘크리트에 비해 약 2~3배 크게 나타났으며 초기균열비가 클수록 그 증가폭이 컸다. 한편 무근콘크리트에 대한 강섬유보강콘크리트의 파괴인성은 강섬유 혼입량이 0.5%~1.0%일 때 약 1.5~2.0배 증가하였으며 이러한 강섬유보강콘크리트의 균열 성장 억제능력은 초기균열비가 큰 시험체에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

본 실험에서 측정된 강섬유보강콘크리트의 하중-처짐 선도는 강섬유 혼입량이 클수록 파괴후 완만하게 나타났으며, 하중-처짐선도 면적에 의하여 계산된 강섬유보강콘크리트의 파괴에너지는 강섬유 혼입량이 클수록 증가하였고, 초기균열비가 클수록 감소하였다. 강섬유보강콘크리트의 평균 파괴에너지는 강섬유 혼입량이 0.5%~1.0%인 경우에는 무근콘크리트의 파괴에너지의 약 7~10배, 강섬유 혼입량이 1.5%일 때는 약 15배정도로 강섬유 혼입량이 1.5%이상시 강섬유에 의해 콘크리트의 균열이 전파함으로써 소모되는 에너지가 크게 증가됨을 알 수 있었다. 한편 강섬유보강콘크리트 시험체의 자중이 파괴에너지에 미치는 영향은 약 3~8% 정도로 나타났다.

## 감사의 글

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

## 참 고 문 헌

1. Romualdi, J.P. and Batson, G.B. "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," Journal of ACI, Proceedings Vol. 60, No.6, pp.775~790, 1963.
2. Romualdi, J.P. and Batson, G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," ASCE, EM3, pp.147~168, 1963.
3. 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, pp.657~671, 1964.
4. Shah, S.P. and Rangan, B.V., "Fiber Reinforced Concrete Properties," Journal of ACI, Proceedings Vol.68, No.2, pp.126~135, 1971.
5. Shah, S.P. and Rangan, B.V., "Effects of Reinforcements on Ductility of Concrete," ASCE, ST 6, pp.1167~1184, 1970.
6. Chen, W.F. and Carson, J.L., "Stress-strain Properties of Random Wire Reinforced Concrete," Journal of ACI, Proceedings Vol.68, No.12, pp.933~936, 1971.
7. Batson, G.B., Jenkins, E., and Spatney, R., "Steel Fiber as Shear Reinforcement in Beams," Journal of ACI, Proceedings, Vol.69, No.10, pp.640~644, 1972.
8. Niyogi, S.K. and Dwarakanathan, G.I., "Fiber Reinforced Beams under Moment and Shear," ASCE, Vol.111, No.3, pp.516~527, 1985.
9. Srawley, J.E., "Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E 399 Standard Fracture Toughness Specimens," Int. Journal of Fracture, Vol.12, pp.375~476, 1976.
10. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture, Concrete, Rock, Metal," ASCE, Vol.110, pp.518~535, 1984.
11. Proposed RILEM Recommendation, "Determinations of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams," Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, January 1982, Revised Version, p.6, October 1984.

(접수일자: 1991. 9. 30)