

# 흑트강섬유보강철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Flexural Behavior of Reinforced Hooked Steel Fibrous Concrete Beam

심종성<sup>1)</sup> 이차돈<sup>2)</sup> 김규선<sup>3)</sup> 오홍섭<sup>4)</sup>

Sim, Jongsung Lee, Cha-Don Kim, Gyu Seon Oh, Hong Seob

### ABSTRACT

Increases in strength and ductilities of steel fiber reinforced concrete(SFRC) under direct tension and compression result in improvements of flexural behavior of reinforced steel fibrous concrete beam(RSFCB). Use of hooked steel fibers in stead of round steel fibers enhances futher the structural properties of a beam due to their greater mechanical bond resistance compared to that of round steel fibers. Flexural strength, initial stiffness, ductility and failure mechanisms of RSFCB are dependent upon material and structural parameters and among which are the volume fraction of fibers, reinforcement ratio, and casting depth of SFRC in a beam section. The flexural behavior of RSFCB's are examined experimentally in this study and some conclusions are made regarding those effects of main material and structural parameters on the overall behavior of RSFCB.

### 1. 서론

콘크리트에 짧고 임의의 방향성을 가진 강섬유를 혼입하여 만든 강섬유보강콘크리트(SFRC)는 인장 및 압축하중하에서 강도와 특히 연성에 큰 증가를 가져오므로 SFRC를 기존의 철근콘크리트 보에 사용할 경우 강섬유보강철근콘크리트보는 휨, 전단, 비틀림에 대하여 강도 및 연성이 증가하게 된다[1,3,4]. 일반적으로 직선강섬유보강콘크리트는 직선강섬유와 모체콘크리트와의 낮은 기계적 부착강도로 말미암아 흑트강섬유보강콘크리트와 비교할 때 재료적 물성 및 구조적 거동에서 비효율적이라 할 수 있다. 흑트강섬유보강콘크리트는 강섬유 끝단에 흑크를 둠으로써 모체와의 기계적 부착을 증진시킨 강섬유로서 실제 건설 현장에서 구조재로서 널리 이용되고 있다.

강섬유보강철근콘크리트보는 일반 철근콘크리트보의 거동과 비교해 볼 때, (1) 단면 저항 모멘트의 증가, (2) 연성의 증가, (3) 균열제어능력의 향상, (4) 강성의 증가, (5) 안정된 파괴 양상과 같은 구조적 우수성을 나타낸다[3, 5].

본 연구에서는 흑트강섬유보강콘크리트의 휨거동 특성을 연구하기 위한 첫번째 단계로서 섬유혼입률( $V_f$ ), 주철근비( $P$ ), 그리고 SFRC의 보강부위를 주요변수로 하여 이들 주요 변수들이 흑트강섬유보강철근콘크리트보(Reinforced Hoked Steel Fibrous Concrete Beam ; 이하 RSFCB)의 휨거동에 미치는 메카니즘(RSFCB의 휨강성, 초기 휨강성, 연성, 보의 파괴양상)에 대하여 고찰하였다.

### 2. 실험 계획

#### 2.1 실험 재료

##### a) 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 S사에

1) 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 부교수  
2) 정희원, 중앙대학교 건축공학과 부교수  
3) 한양대학교 토목공학과 박사과정  
4) 한양대학교 토목공학과 석사과정

서 생산되는 보통 포틀랜드 시멘트로서 비중은 3.15이다.

b) 골재

본 실험에서 사용된 잔 골재는 안산에서 채취한 잔골재로써 품질 시험을 한 결과는 표1과 같다.

표 1 잔골재의 물리적 성질

특성	F.M	비 중	함수율	비 고
산지				
경기도 안산	2.98	2.65	1.2	-

굵은 골재는 최대치수가 15mm로서 안산에서 채취한 강자갈로써 물성은 다음 표2와 같다.

표 2 굵은 골재의 물리적 성질

특성	F.M	비 중	함수율	비 고
산지				
경기도 안산	6.50	2.60	1.13	-

C) 혼화제

SFRC의 워커빌리티를 개선하기 위해 고 유동화제 (Superplasticizer)를 사용하였는데 그 배합비는 문헌을 참조하여 최적 배합비에 따라 결정하였다. 사용된 혼화제는 한국 그레이스사의 Daracen-100을 사용하였으며 비중은 1.21이다.

d) 강섬유

본 연구에 사용된 강섬유는 국내에서 유통되는 Dramix사의 상업용 흑트 강섬유로써, 형상비가 60인 강섬유를 사용하였으며 비중은 7.86이다.

2.2 배합

SFRC의 배합은 요구되는 강도와 시공성을 고려하여 설계되었으며 재료의 배합은 100% 강제식 믹서를 이용하여 수행하였다. 배합을 위한 순서는 다음과 같다.

1. 자갈+모래 전량

- 2.(물+혼화제)×1/3과 (콘크리트+플라이 애쉬)×1/2을 넣고 4분간 배합
- 3.강섬유전량과 (물+혼화제)×1/3을 투입하고 3분간 배합
- 4.나머지를 투입하고 3분간 배합
- 5.휴식 3분
- 6.재배합 2분

본 연구에서 채택한 SFRC의 배합비는 표3과 같다.

표 3 SFRC의 배합비

	W/(C+F)	S/G	(S+A)/(C+F)	Sp/(C+F)
배합비	0.5	1	4.5	0.015

2.3 시험체

본 연구에서 사용된 보 시험체의 배근도와 단면은 그림 1과 같으며 검토된 실험체의 변수는 표4와 같다. 변수당 시험체는 각각 2 개씩이다.

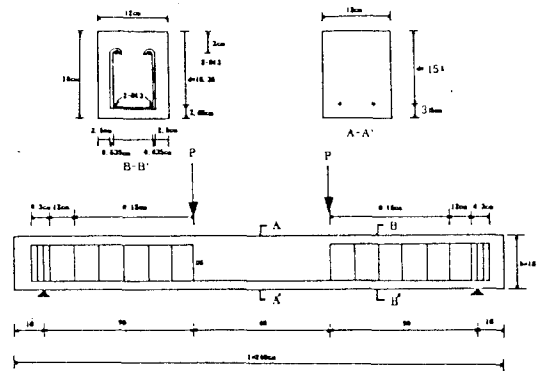


그림 1 시험체 단면과 배근도

표 4 SFRC보시험체의 실험 변수

실험변수 보명칭	SFRC의 보강 부위	섬유혼입율 (Vf)	주철근비 (Pb)
FN0005	없음	0	0.5
FF0505	전단면	0.5	0.5
FF1505	전단면	1.5	0.5
FB1505	하단면	1.5	0.5
FN0010	없음	0	1.0
FF1510	전단면	1.5	1.0

철근의 변형도는 철근 게이지를 시험체 중앙부 2곳에 시험체마다 모두 설치하여 측정하였고 콘크리트 게이지의 경우 각 변수 중 1개 시험체에만 시험체 중앙부 8곳에 설치하였다. 게이지 부착 위치는 그림 2과 같다. 시험체는 4점재하를 하였으며 진단 스펠비(a/d)는 6.0이다.

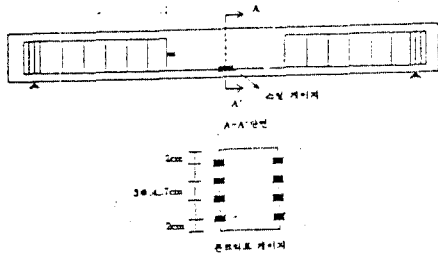


그림 2 시험체 게이지 부착위치

### 3 실험 결과

#### 3.1 시험체의 일반 파괴 양상

일반적인 시험체의 파괴 양상은 전형적인 휨 파괴로서 거의 모든 휨 시험체가 가력점의 양쪽 하부에서 초기균열이 발생하였으며 하중이 증가하면서 균열이 진전되어 가력점을 향하여 발전되어 파괴되는 양상을 보였다(부록 그림1). 주철근비가 평형철근비( $P_b$ )이고 강섬유가 보강이 되지 않은 FN0010-1, FN0010-2 보시험체의 경우 철근의 항복과 거의 동시에 콘크리트 압축단이 파괴되면서 취성파괴를 하였으며 강섬유를 전단면에 1.5% 보강한 FF1510-1, FF1510-2 보의 경우 강도 후 영역에서 어느정도 연성을 확보하여 일반 철근콘크리트보(FN0010)처럼 강도 후 영역에서 급작스럽게 저항력을 상실하지는 않았다.

주철근비가 일정할 경우( $P=0.5P_b$ ) 섬유혼입율을 각각 0.5%, 1.5%인 시험체(FF0505, FF1505, FB1505)들은 파괴하중에 이를때의 균열양상이 일반 콘크리트보에 비하여 균열의 발생 개소가 비교적 많이 줄어들었으며

균열의 폭도 작은 것이 관찰되었다(부록 그림1). 이것은 강섬유의 균열억제 메커니즘에 기인한다고 볼 수 있다.

주철근비가 0.5 $P_b$ 일 때 일반콘크리트를 사용한 경우(FN0005)와 SFRC를 전단면에 걸쳐 타설한 경우(FF1505) 그리고 보의 축의 반에 해당하는 인장 측부분(보의 하단부분)에 SFRC를 타설한 철근콘크리트(FB1505)보의 파괴양상을 비교해 보면 일반 콘크리트를 사용한 철근콘크리트보의 경우 초기균열 발생 이후 많은 미세균열이 발생되어 하중이 증가함에 따라 이들 균열들이 결합하여 생긴 주 균열들이 급격히 증가하면서 파괴에 이른 반면 전단면을 SFRC로 보강한 경우에는 콘크리트 내에 혼입된 강섬유의 균열 억제 효과로 인하여 두드러지게 균열이 줄어드는 것을 관찰할 수 있었으며, 인장측에만 SFRC를 타설한 경우에는 균열 발생 개소가 일반 철근 콘크리트 보에 비해서는 줄어들지만 전반적인 균열 양상은 일반콘크리트 보와 유사함이 고찰되었다. 그러나 인장측만 보강했을 경우와 전단면을 보강했을 경우 모두 일반 철근 콘크리트보의 경우에 비하여 높은 연성을 나타내었다.

#### 3.2 하중-처짐 곡선

그림 3과 4에는 주철근비가 각각 평형철근비의 50%(0.5 $P_b$ ), 그리고 평형철근비( $P_b$ )일 경우 강섬유 혼입량에 따른 하중-처짐곡선을 나타내고 있다.

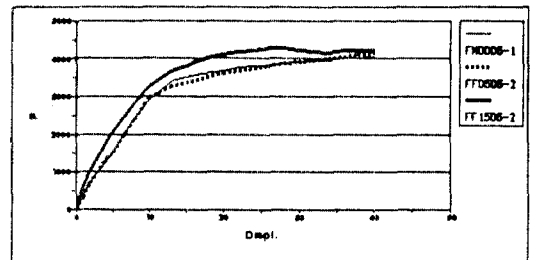


그림 3 하중-처짐선도 ( 0.5  $P_b$ 일 경우)

주철근비가 0.5P<sub>b</sub>일 경우 하중-처짐 선도를 비교해 보면 섬유혼입율이 1.5%인 경우 (FF1505) 휨강도나 연성, 그리고 휨강성 등 휨강성 등 휨거동이 향상되어있음을 알수있다(그림3).

그러나 주철근비가 평형철근비(P<sub>b</sub>)일 경우를 비교해 보면 휨강도나 휨강성은 일반 철근콘크리트보에 비하여 별다른 차이점을 찾아 볼 수 없지만 강섬유를 1.5% 혼입한 RSFCB(FF1510)는 강도후 영역에서 연성이 향상됨을 알 수 있다(그림 4).

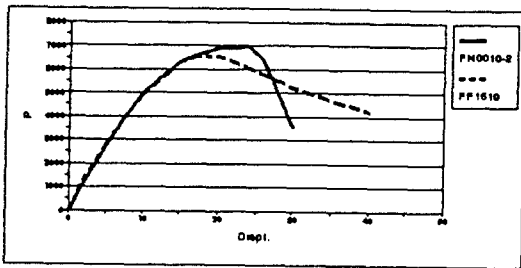


그림 4 하중-처짐선도 ( P<sub>b</sub>일 경우 )

그림 5에는 RSFCB(P=0.5P<sub>b</sub>)의 보강 범위를 각각 무보강, 인장면, 전단면으로 나누었을 경우 하중-처짐선도를 나타내었다.

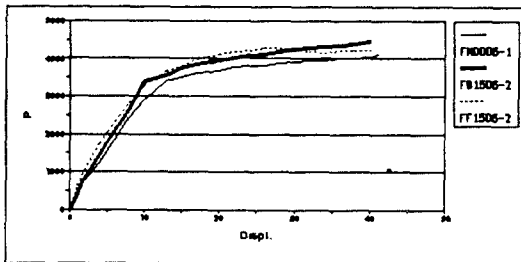


그림 5 하중-처짐선도 (보강부위 별로)

각 보강 부위별로 하중-처짐 선도를 비교해보면 섬유혼입율이 1.5%인 SFRC로 보의 인장측만 보강한 시험체(FB1505)의 경우 휨강성은 무보강일 경우(FN0005)와 전단면 보강일 경우(FF1505)의 평균치 정도이며 휨

강도와 강도후 영역의 연성은 하단면만 보강했을 경우와 전단면을 보강했을 경우와 거의 비슷하였다.

### 3.3 강섬유보강철근콘크리트보의 휨거동에 대한 주요 변수들의 영향

- 1) 보의 항복강도(P<sub>y</sub>)에 대한 변수영향
  - a) 섬유혼입율(V<sub>f</sub>)의 영향

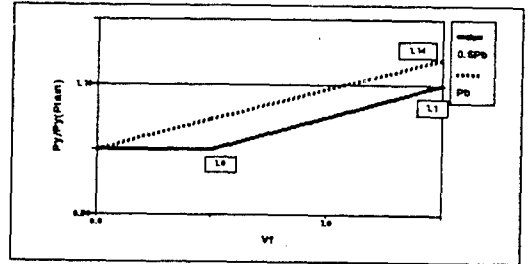


그림 6 섬유혼입율이 항복강도에 미치는 영향

주철근비가 평형철근비(P<sub>b</sub>)인 경우와 0.5P<sub>b</sub>인 철근콘크리트보에 대하여 형상비가 60인 강섬유의 용적율이 보의 휨강도에 미치는 영향을 고찰하였다. 주철근비가 0.5P<sub>b</sub>일 경우 섬유혼입율이 0.5%인 RSFCB(FF0505)의 항복강도는 일반철근콘크리트 보의 항복강도와 동일하였으나, 섬유혼입율이 1.5%인 RSFCB(FF1505)의 경우는 약 10% 정도의 휨강도향상을 나타내고 있다(그림 6). 그림 6의 점선은 주철근비가 평형철근비인 시험체에 대한 항복강도의 비교 결과이다. 이 경우 섬유혼입율이 1.5%인 RSFCB(FF1510)의 경우 항복강도가 14% 정도 증가하였다.

- b) 보강위치의 영향

SFRC의 보강위치가 RSFCB의 항복강도에 미치는 영향을 그림 7에 나타내었다. 하단면만을 강섬유로 보강한 경우의 RSFCB(FB1505)는 일반철근콘크리트보에 비하여 약 9% 정도 항복강도가 향상되었으며, 전단면 보강의 경우(FF1505)는 14%정도 항복강도가 증가하였다(그림7).

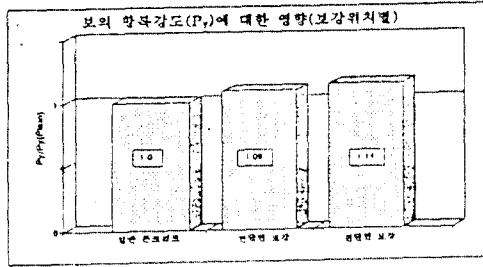


그림 7 보강위치가 항복강도에 미치는 영향

2) 강섬유보강콘크리트 보의 초기강성에 대한 변수영향

a) 섬유혼입율의 영향

강섬유의 혼입율이 RSFCB의 초기강성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 주철근비가  $P_b$ 와  $0.5P_b$ 일 경우에 대해서 섬유혼입율을 변화시켰을 때 그 영향을 살펴보았다. 본 연구에서의 초기강성은 보의 인장측에 초기균열이 발생하기 이전의 보 강성으로 정의되었다. 주철근비가  $0.5P_b$ 인 경우에는 섬유혼입율이 0.5%인 시험체(FF0505)의 강성이 일반철근콘크리트 보의 강성과 비교하여 거의 같은 값을 나타내었으나, 섬유혼입율이 15%인 경우(FF1505)는 약 21%의 초기강성의 향상을 나타내고 있다. 또한 그림 9는 주철근비가  $1.0 P_b$ 인 경우와 비교하였으며, 이 경우 초기강성이 약 4% 증가함이 고찰되었다(그림 8).

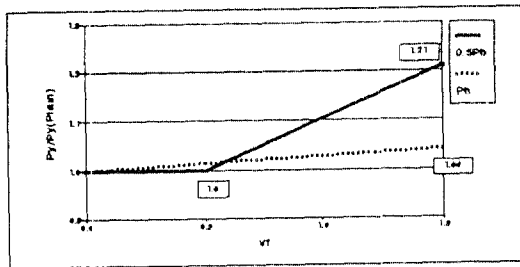


그림 8 섬유혼입율이 초기강성에 미치는 영향

b) 보강위치의 영향

보강위치에 따른 초기 휨강성의 변화 정도를 알아보기 위해서 일반 철근콘크리트보(FN0005)와 전단면 RSFCB(FF1505)와 인장측 하단면만 SFRC로 보강한 철근콘크리트보(FB1505)에 대하여 각각 초기강성을 비교하였다(그림 9). FB1505 보의 경우 FN0005 보의 초기 강성보다 17%, FF1505 보의 경우에는 21% 정도 증가하였다. 따라서 초기강성의 경우 하단면만 보강하였을 경우와 전단면을 보강하였을 경우 휨강성이 조금 증가한 것이 고찰되었다.

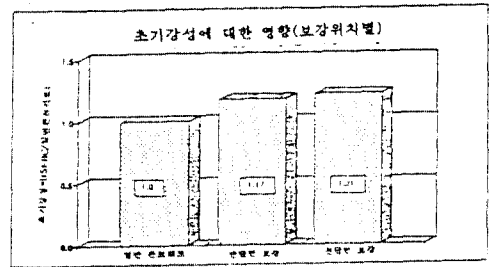


그림 9 보강위치가 초기강성에 미치는 영향

3) 강섬유보강콘크리트 보의 휨강성( $E_{fc}$ )에 대한 변수영향

a) 섬유혼입율의 영향

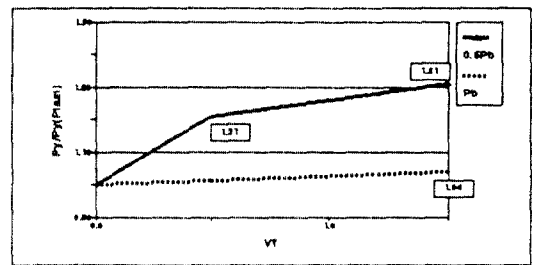


그림 10 섬유혼입율이 휨강성에 미치는 영향

섬유 혼입율이 RSFCB의 초기 휨강성과 휨강성에 미치는 영향을 비교하여 보면 섬유

혼입율이 RSFCB에 미치는 영향은 초기강성보다 휨강성에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 휨강성의 경우 주철근비가 0.5P<sub>b</sub>에서 섬유혼입율이 0.5%일 때 강성이 21% 정도 증가하였으나, 섬유혼입율이 1.5%일 때는 증가 정도가 둔화되어 약 31% 정도의 증가를 나타내고 있다(그림 10).

주철근비가 1.0P<sub>b</sub>인 경우는 일반 철근콘크리트 보와 비교하여 휨강성의 증가가 거의 나타나지 않았다(그림 10). 따라서 RSFCB의 경우 주철근이 0.5P<sub>b</sub>일때 초기 휨강성보다 휨강성이 섬유혼입율의 영향을 더 많이 받는 것을 알 수 있으며, 주철근을 평형철근비 수준으로 과보강했을 경우 강섬유혼입율을 증가시켜도 전체 휨강성에는 영향을 거의 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

b) 보강위치의 영향

그림 11은 보강 위치에 따른 강섬유보강 철근콘크리트보의 휨강성의 증가 정도를 상대적으로 나타낸다. 하단면만을 보강한 RSFCB(FB1505)의 경우 24%의 휨강성의 증가를 나타내고 있으며 전단면을 보강한 콘크리트보의 경우에는 31%의 증가를 보이고 있다. 따라서 초기강성과 마찬가지로 전단면을 SFRC로 보강한 경우가 하단면만을 보강한 경우에 비하여 휨강성의 증가를 나타냄이 고찰되었다.

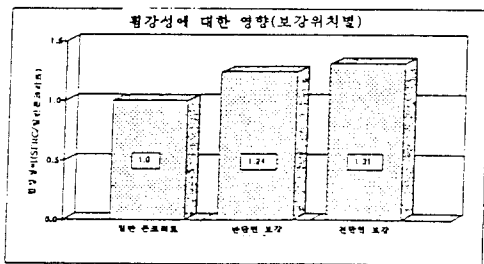


그림 11 보강위치가 휨강성에 미치는 영향

4) 강도 후 휨거동

a) 강도 후 하중-처짐 곡선

RSFCB의 강도 후 휨거동은 주철근비에 따라 크게 두가지 형태로 나눌 수 있다. 주철근비가 0.5P<sub>b</sub>일 경우 강섬유로 보강하지 않더라도 보가 충분한 연성을 확보하여 강섬유혼입율에 상관없이 항복강도 이후 처짐이 증가함에 따라 하중이 계속 증가하는 경향을 나타낸다(그림 3). 그러나 주철근비가 평형 철근비인 경우에는 최대강도 이후 일반철근 콘크리트 보와 RSFCB 모두가 연화거동을 나타내었다(그림 4). 그러나 섬유혼입율이 증가할 수록 하중-처짐곡선의 기울기는 완만해진다.

섬유혼입율이 1.5%인 경우 일반 철근콘크리트 보와 비교하여 강도 후 곡선의 기울기는 약 9.5배 정도 증가한 것을 보이고 있는데, 이는 주철근비가 평형철근비(P<sub>b</sub>)일 경우 항복강도나 휨강성에는 그렇게 큰영향을 미치지 않는지만 강도 후 영역에서의 연성에는 큰영향을 미치는 것을 알 수 있다.

b) 연성거동고찰

주철근비가 각각 1.0P<sub>b</sub>인 일반철근콘크리트 보(FN0010)와 RSFCB(FF1510)의 강도 후 영역의 연성을 비교해 보기 위해서 강섬유보강콘크리트의 항복강도시 처짐( $\Delta_y$ )에 대해서 강도 후 영역에서 항복강도에 대한 50, 60, 70%의 상대강도시의 처짐의 값( $\Delta_a$ )을 비교하여 연성을 표현하였으며 이들 값은 아래 표5와 같다.

표 5. 상대강도시의 상대연성비

시험 제명	P <sub>y</sub>	$\Delta_y$	a값에 따른 $\Delta_{a1}$			a값에 따른 $(\Delta_a^*/\Delta_y^*)$			a값에 따른 $(\Delta_a^*/\Delta_y^*)$					
			0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7			
FN0010	5700	12.3	31	30	28.7	2.46	2.44	2.33	4.02	3.67	3.36	1.63	1.5	1.44
FF1510	6000	12.8	51.5	47	43									

\* 위첨자 p, f는 일반콘크리트, 강섬유보강콘크리트를 나타낸다.

그림 12는 상대 강도에 따른 철근콘크리

트 보에 대한 RSFCB의 연성비를 나타낸 것이다. 최대강도 후 상대강도가 낮을수록 연성은 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

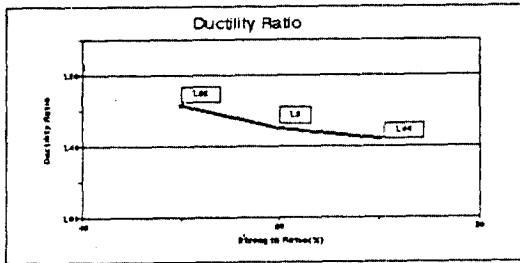


그림 12 상대강도에 따른 연성비의 변화

#### 4. 결론

1. 강섬유보강철근콘크리트보는 파괴시 일반 철근콘크리트보에 비하여 균열의 개소 및 균열의 폭이 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 강섬유의 균열 억제 메카니즘에 기인한다.
2. 주철근비가 0.5Pb인 철근콘크리트보의 경우 섬유혼입률이 0.5%, 1.5%로 증가함에 따라 초기 휨강성, 휨강성, 항복강도, 연성이 증가하지만 주철근비가 평형철근비인 철근콘크리트보의 경우에는 SFRC가 보의 강도 전 휨거동에 거의 영향을 미치지 못하였다. 그러나 강섬유가 철근의 항복과 동시에 급작스러운 보압축단 콘크리트의 파괴를 방지해 줌으로써 강도 후 영역에서 연성파괴를 유도함을 알 수 있다.
3. 주철근비가 0.5Pb인 철근콘크리트보의 경우 SFRC를 인장축에만 보강했을 때에도 전단면을 보강했을 경우와 같이 보의 항복강도, 초기강성, 강도 후 영역의 연성의 증가에서 거의 동일한 보강효과를 나타낸 반면, 휨강성의 경우 보강효과가 전단면을 보강했을 경우에 비하여 보강효과가 약간 떨어지는 것이 관찰되었다. 그러나 전체적으로 충분한 보강효과를 나타내므로 이와 같은 보강방법을 이용할 경우 역

학적 보강효과 뿐만 아니라 경제성도 확보할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 1994년도 학술진흥재단의 공모 과제(01 E 1044)연구비에 의하여 연구되었음을 알려드립니다.

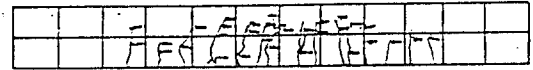
#### 참고문헌

1. ACI Committe. 544, "State of Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Report : 544, IR-82, ACI, Detroit, May, 1982, pp16
2. Hannant, D.J., "Fiber Reinforced Cement and Concrete : Part 1; Theoretical Principles", Concrete Society Current Practice Sheet, No.92
3. Teck-Yong Lim, P.Paramasivam, and Seng-Lip Lee, Fellow ASCE, "Behavior of Reinforced Steel-Fiber-Concrete Beams In Flexure"
4. R.Craig, "Flexural Behavior and Design of Reinforced Steel Fibrous Concrete Beams"
5. Soroushian, P. and Bayasi, Z. "Concept of Fiber Reinforced Concrete", Fiber Reinforced Concrete : Design and Applications, Seminar Proceedings, Composite Materials and Structures Center, Michigan State University, U.S.A.

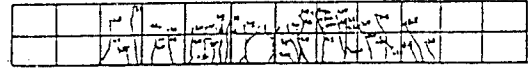
## 부 록

표 1. 휨거동에 대한 변수들의 영향

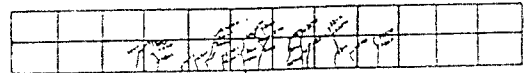
시험체명	$P_u$ (kg)	$E_d$ (kg/mm)	$E_k$ (kg/mm)	
FN0005	1	3500	349	242
	2	3000	308	206
FN0010	1	5000	512	413
	2	5500	555	477
FF0505	1	3500	341	263
	2	3000	300	282
FF1505	1	3500	355	270
	2	3700	451	309
FF1510	1	6000	505	432
	2	6000	530	483
FB1505	1	3500	400	306
	2	3600	375	273



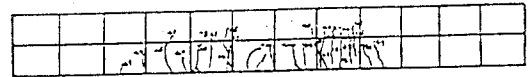
FF0505-1



FF0505-2



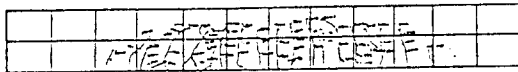
FF1505-1



FF1505-2



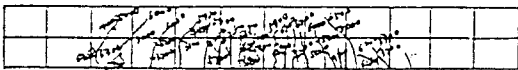
FN0005-1



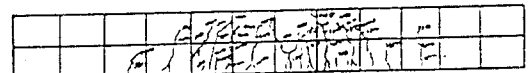
FN0005-2



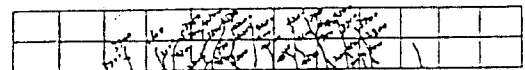
FN0010-1



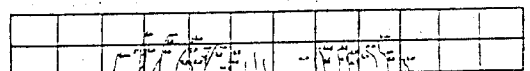
FN0010-2



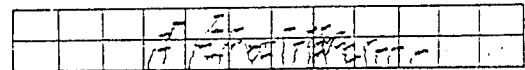
FB1505-1



FB1505-2



FF1510-1



FF1510-2

그림 1. 시험체별 균열도