

강섬유 계수 및 혼입률을 고려한 SFRC의 강도 및 변형 특성

이현호^{1)*} · 이화진¹⁾

¹⁾ 동양대학교 건축학부

(2004년 3월 5일 원고접수, 2004년 11월 22일 심사완료)

Characteristic Strength and Deformation of SFRC Considering Steel Fiber Factor and Volume Fraction

Hyun-Ho Lee^{1)*} and Hwa-Jin Lee¹⁾

¹⁾ School of Architecture, DongYang University

(Received March 5, 2004, Accepted November 22, 2004)

ABSTRACT

The addition of steel fiber with concrete significantly improves the engineering properties of structural members, notably shear strength. The purpose of this study is to determine the steel fiber shape, aspect ratio and volume fraction ratio in a point of practical usage as structural members. Steel fiber factor and volume fraction are also considered to verify the strengthening effect in member level. From the reviewing of previous researches and analyzing of consecutive material test results, the optimum shape and length of steel fiber, which can have a good strengthening effects, were defined as a hooked end type and larger than 1.5 times of maximum gravel size. Analyzing the test results of strength and deformation capacity, aspect ratio 75 and volume fraction 1.5% can be having a maximum strengthening effect of steel fiber. Also steel fiber factor, tensile splitting strength, and flexural strength are found as key parameter in shear strengthening effect in member level.

Keywords : steel fiber, shear strength, steel fiber factor, volume fraction, tensile splitting strength

1. 서 론

강섬유 보강 콘크리트(steel fiber reinforced concrete, SFRC)는 보강되지 않은 콘크리트에 비하여 강도증진, 취성적인 콘크리트 성질개선 및 균열제어효과가 우수한 것으로 보고¹⁻⁷⁾되고 있다. 이러한 SFRC는 토목구조물에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 SFRC를 건축구조물에 적용하기 위한 연구가 우리 나라에서도 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 경우 80년 후반부터 90년 초반까지 강섬유 재료특성에 대한 연구³⁻⁷⁾가 일부 진행되었으며, 90년대 후반부터 강섬유 재료특성 및 부재특성에 관한 연구^{1,2,8-11)}가 활발히 진행되고 있다. 이렇게 90년 후반부터 강섬유에 대한 연구가 다시 시작된 것은 고급합성재료로서의 강섬유 역할 및 관련규정의 제정 등에 기인한 것으로 판단된다. 구조부재에 강섬유가 미치는 보강효과는 압축강도(f_c), 할렬인장강도(f_{sp}), 휨강도(f_b), 휨인성 계수(f'_b) 등으로 평가

할 수 있으며, 강섬유 형상비(AR)에 따른 강섬유 계수 (steel fiber coefficient, F) 및 강섬유 혼입률 (steel fiber volume fraction %, V_f)이 주요한 평가 요소가 될 수 있다.

본 연구에서는 구조부재에 영향을 미치는 강섬유 보강 효과를 평가하기 위하여 SFRC의 강도 및 변형 특성에 대한 성능 시험을 수행한다. 또한 재료의 강도특성이 부재에 미치는 영향을 평가하기 위하여 강섬유 계수 및 혼입률의 수준에 따른 강도특성을 평가한다.

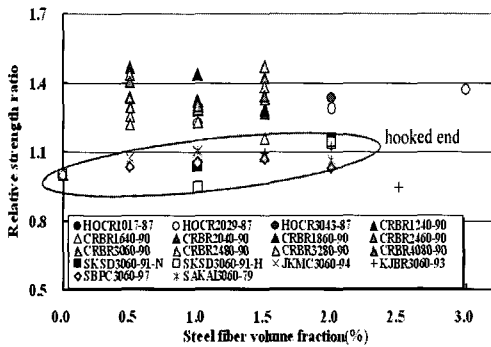
2. 기존 연구결과

강섬유 형상비, 혼입률 및 형상이 강섬유 보강 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향에 대해서 알아보기 위하여, 총 7편의 논문을 비교, 검토하였다. 강섬유 보강 콘크리트의 재료특성에 관한 대표적인 장동일¹⁾, 박승범²⁾, 문제길³⁾, 서상교⁴⁾, 부척량⁵⁾, 오병환⁶⁾ 및 정환옥⁷⁾의 연구내용에서 강섬유의 형상은 직선형에서, 양단고리형 그리고 최근의 원형까지 다양하게 변천되었고, 형상비, 혼입률이 재료특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 기존 결과¹⁻⁷⁾들의

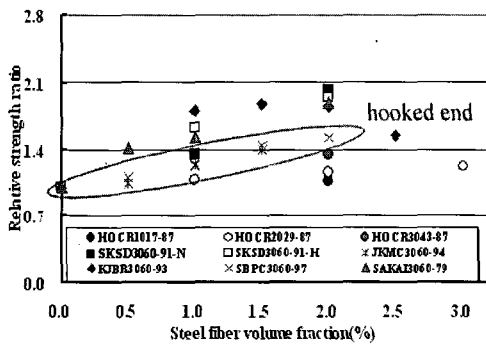
* Corresponding author

Tel : 054-630-1165 Fax : 054-630-1276
E-mail : hhlee@phenix.dyu.ac.kr

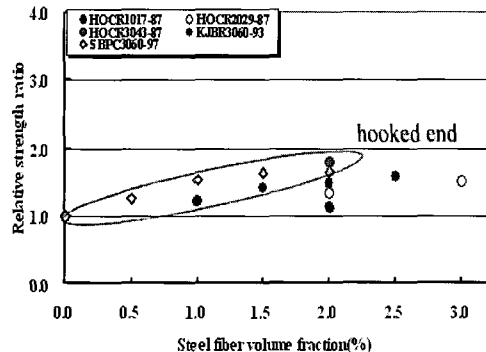
강섬유 혼입률(V_f)에 대한 압축강도(f_{ck}), 할렬인장강도(f_{sp}), 휨강도(f_b)의 강도증진효과를 평가하기 위하여 강섬유 비보강시험체와 보강시험체의 상대비(relative ratio) 상관으로 정리하였으며, 이를 Figs. 1, 2에 강섬유 길이로 구분하여 나타내었다. 여기서 강섬유 길이와 형상(shape)에 대한 영향을 검토하기 위하여 콘크리트표준시방서 해설⁸⁾에 의거 구조용 강섬유 길이가 굵은골재 치수의 1.5배(≈ 40 mm) 이상인 경우와 아닌 부분으로 분류하였으며, 그래프 상에 점선으로 직선형(straight)과 양단고리형(hooked end)을 따로 구분하였다. 압축강도는 직선섬유의 경우 혼입률



(a) Compressive strength(f_{ck})



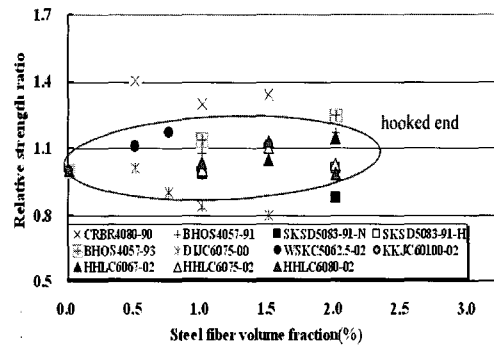
(b) Tensile splitting strength(f_{sp})



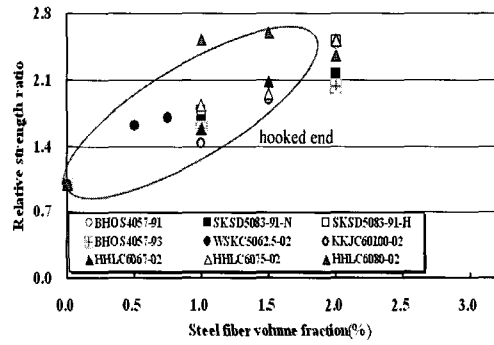
(c) Flexural strength(f_b)

Fig. 1 Characteristic strength of steel fiber length(shorter than 40 mm)

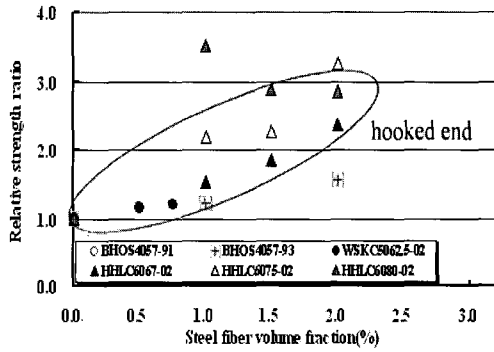
V_f 2.0%까지 강도가 증가하였으며, 양단고리형은 혼입률 V_f 1.5%까지 강도증진 후 V_f 2.0%까지 강도가 떨어지는 것을 볼 수 있었다. 압축강도에 있어 강섬유의 길이가 증가함에 있어 강도증진효과는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 1996년 박승범의 연구결과⁹⁾에서 확인할 수 있었다. 그리고 혼입률이 증가함에도 불구하고 압축강도가 떨어지는 현상이 나타나는데, 이는 강섬유가 콘크리트에 골고루 분산되지 않는 섬유뭉침(fiber-balling)으로 인하여 강도가 감소된 것으로 판단된다. 할렬인장강도는 V_f 2.0%까지 선형적으로 강도증진 양상이 나타났으며, 섬유길이가



(a) Compressive strength(f_{ck})



(b) Tensile splitting strength(f_{sp})



(c) Flexural strength(f_b)

Fig. 2 Characteristic strength of steel fiber length(longer than 40 mm)

40 mm 이상일 때, 직선형 강섬유보다 양단고리형의 강섬유가 강도증진이 우수한 것으로 나타났다. 휨강도는 V_f 2.0%까지 할렬인장강도보다 우수한 강도증진을 보였고, 40 mm 이상의 강섬유, 양단고리형의 강섬유가 직선형 형상보다 강도 증진효과가 크게 나타났다. 이는 강섬유가 콘크리트의 균열면을 잡아주는 브리징효과에 있어 길이가 짧은 강섬유보다 긴 강섬유가 콘크리트와 부착력을 증가시켜 휨 및 인장강도 증진에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 재료성능 평가시험

보통강도 콘크리트에 있어서 형상비에 대한 강섬유 보강효과를 평가하기 위하여 강섬유 형상비 및 강섬유 혼입률을 변수로 압축강도(f_{ck}), 할렬인장강도(f_{sp}), 휨강도(f_b) 및 휨인성계수(f'_b)에 대하여 평가하였다(Table 1 참조). 사용 강섬유는 국내 C사의 양단고리형이며, 강섬유 길이를 지름으로 나눈 형상비 67, 75, 80의 기성품을 사용하였다. 혼입률은 콘크리트 체적의 0.0%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 콘크리트의 설계강도는 24 N/mm^2 로 계획하였다. 여기서 형상비는 섬유길이 60 mm를 기준으로 지름의 크기를 변경한 것으로, 형상비 67, 75, 80에 대한 각각의 지름은 0.9, 0.8, 0.75 mm이다. 본시험에 사용된 배합표는 Table 2와 같으며, 시험결과와 평가에 사용된 압축강도, 할렬인장강도, 휨강도 및 휨인성계수 계산식을 Table 3에 나타내었다.

4. 시험결과 평가

4.1 강도특성 평가

형상비와 혼입률에 따른 시험결과를 Table 4에 나타내었으며, 강도 증진효과를 평가하고자 형상비가 AR 67, AR 75, AR 80의 변수로 강섬유 비보강 시험체에 대한 보강시험체의 상대비로 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)의 형상비 AR 67의 경우 V_f 2.0%까지 할렬인장강도, 휨강도가 증진되는 것으로 나타났으며, 압축강도의 증진은 미미한 것으로 나타났다. Fig. 4(b)의 형상비 AR 75의 경우 V_f 2.0%까지 휨강도 및 할렬인장강도 증진이 우수한 것으로 나타났다. 압축강도의 증진도 다소 있는 것으로 평가되었으나 그 정도는 매우 미미한 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 4(c)의 AR 80 경우 V_f 1.0%일 때 제일 우수한 보강효과가 있는 것으로 나타났으며, 1.5%, 2.0%의 강섬유 보강효과는 1%에 비해 떨어지는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 AR 67, 75 경우 V_f 2.0%까지, AR 80 V_f 1.0%까지 우수한 보강효과가 있는 것으로 판단되며, 할렬인장강도 및 휨강도의 증진이 압축강도 증진보다 우수한 것으로 판단된다. 형상비(AR)가 커질수록, 혼입되는 강섬유 개수가 많을수록 V_f 1.0% 초과시 섬유의 뭉침 등에 의하여 보강효과가 떨어지는 것으로 평가되었다.

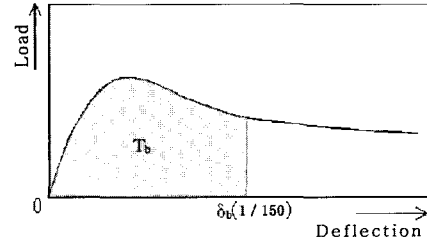


Fig. 3 Definition of area T_b

Table 1 List of specimen

Specimen	V_f (%)	AR
N00-00	0.0	-
N10-67	1.0	67
N15-67	1.5	67
N20-67	2.0	67
N10-75	1.0	75
N15-75	1.5	75
N20-75	2.0	75
N10-80	1.0	80
N15-80	1.5	80
N20-80	2.0	80

Table 2 Mixing table

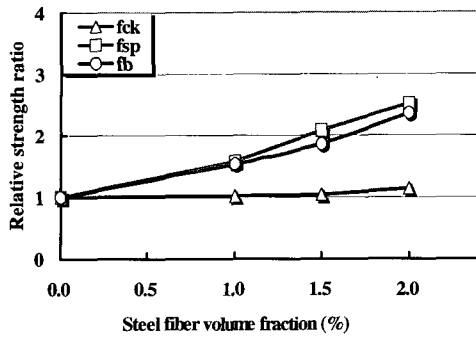
Design strength (N/mm^2)	w/c (%)	s/a (%)	slump (cm)	Unit weight(kgf/m^3)			
				c	w	s	a
24	57.0	44.2	15	323	184	788	993

Table 3 Calculation method

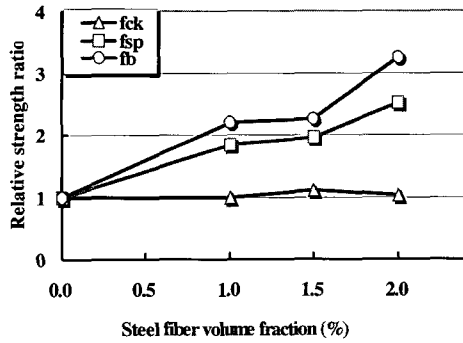
Strength	Equations	Remark
(a) f_{ck}	$f_{ck} = \frac{P}{\pi \times D^2 / 4}$	P : Apply load(N) D : Diameter(cm) l : Length(cm) b : Width of beam(cm) h : Height of beam(cm) T_b : Area in Fig.3 (N · mm) δ_{ib} : l/150
(b) f_{sp}	$f_{sp} = \frac{2P}{\pi \times D \times l}$	
(c) f_b	$f_b = \frac{Pl}{bh^2}$	
(d) f'_b	$f'_b = \frac{T_b}{\delta_{ib}} \times \frac{1}{bh^2}$	

Table 4 Test results (28 days)

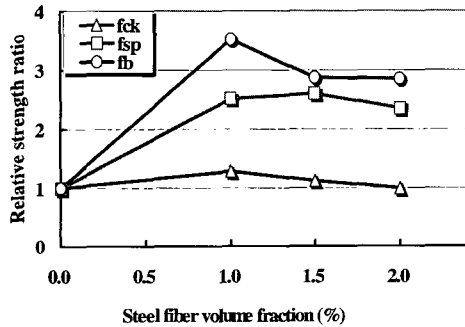
Specimen	f_{ck} (N/mm^2)	f_{sp} (N/mm^2)	f_b (N/mm^2)	f'_b (N/mm^2)
N00-00	32.6	2.99	2.72	0.15
N10-67	33.7	4.73	4.21	3.20
N15-67	34.1	6.23	5.07	4.12
N20-67	37.4	7.56	6.43	7.21
N10-75	32.7	5.50	5.97	3.46
N15-75	36.0	5.86	6.14	4.32
N20-75	33.5	7.53	8.84	5.75
N10-80	33.7	7.56	9.56	7.21
N15-80	36.9	7.78	7.84	5.75
N20-80	32.2	7.05	7.77	5.64



(a) AR 67



(b) AR 75



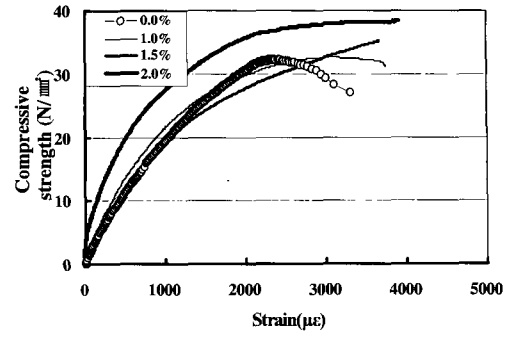
(c) AR 80

Fig. 4 Relative comparison of f_{ck} , f_{sp} , f_b according to aspect ratio

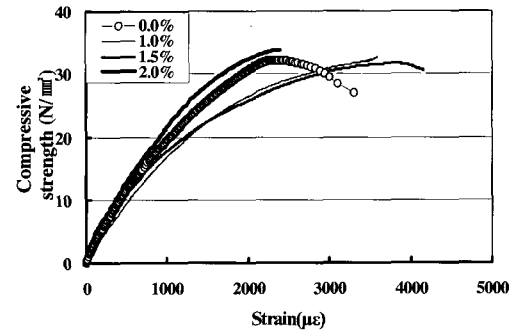
따라서 시공성, 작업여건 등을 고려할 경우 AR 67, 75 및 V_f 1.5% ~ 2.0% 전후의 강섬유를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

4.2 변형특성 및 휨인성계수 평가

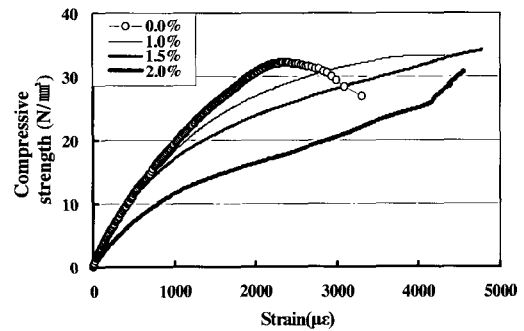
4.1절의 강도특성과 아울러 압축강도 시험시 측정되는 압축응력-수직변형도 곡선, 휨강도 시험시 측정되는 하중-변위 곡선 및 하중-변위 곡선의 면적으로 산정되는 휨인성계수를 포함한 강섬유 보강 콘크리트의 변형특성을 평가하였다. 강섬유 보강 콘크리트 압축강도 시험시 측정되는 압축응력-수직변형도 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 이



(a) AR 67



(b) AR 75

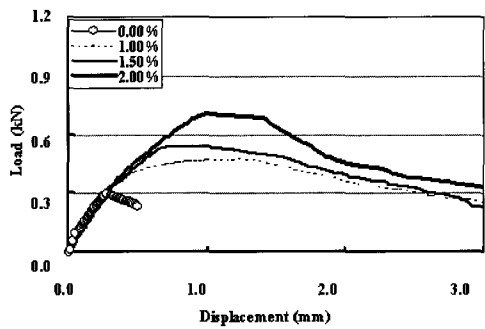


(c) AR 80

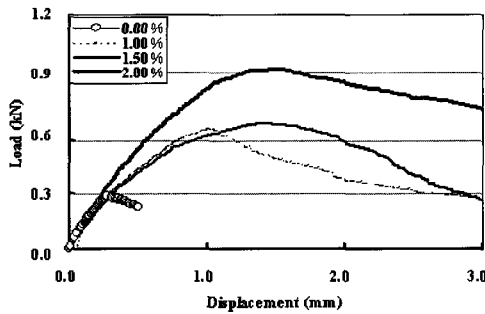
Fig. 5 Compressional stress-vertical strain curve

에 의하면 강섬유 비보강 시험체는 최대하중 이후 명백한 취성파괴를 나타내었으며, 강섬유 보강시험체는 최대하중 이후 취성적인 특성이 개선됨을 확인할 수 있었다. 응력-변형도 곡선은 강섬유 혼입률이 증가됨에 따라 곡선기울기(즉, 탄성계수)가 비례적으로 변하지 않는 것으로 나타났다. 이는 기존연구에서도 확인할 수 있는 현상이었다.¹⁾ 따라서 강섬유 형상비, 혼입률 및 부착계수의 곱으로 표현되는 강섬유 계수에 대한 영향을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다. 강섬유 보강 콘크리트의 휨 시험시 측정되는 하중-변위 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 이에 의하면 강섬유 보강이 휨하중 강도 뿐만 아니라 변형능력도 월등히 증진시키는 것으로 판단된다. 휨인성 계수(f_b)는 강섬유 보강 콘크리트의 에너지 흡수능력을 평가하기 위한 것

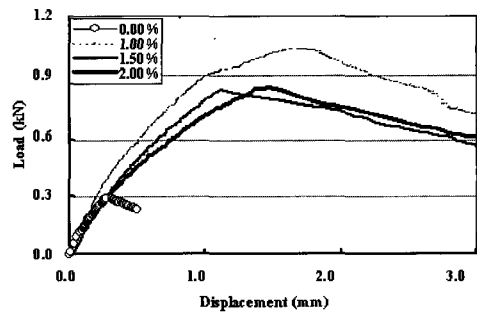
으로 Table 3의 (d)식 및 Fig. 3의 면적으로 산정되며, 이에 의해 구한 휨인성계수를 Fig. 7에 나타내었다. 이에 의하면 AR 67, 75 경우 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 휨인성 계수 증진효과가 있는 것으로 평가되었다. 강섬유 혼입률에 따른 휨인성 계수의 상대비는 휨강도 상대비와 유사한 경향을 보이며, AR 67 및 75의 경우 혼입률 증가에 에너지 흡수 능력이 향상되었다. AR 80의 경우 V_f 1.0%에서 가장 큰 에너지 흡수 능력을 나타내었다. 이는 AR 67, 75보다 AR 80의 경우 동일 혼입률에 있어 섬유 개수가 많아지는데, V_f 1.5% 및 2.0%의 경우 강섬유 뭉침에 의해 보강효과가 적절히 발휘되지 못한 것에 기인한 것으로 판단된다.



(a) AR 67



(b) AR 75



(c) AR 80

Fig. 6 Load-displacement curve

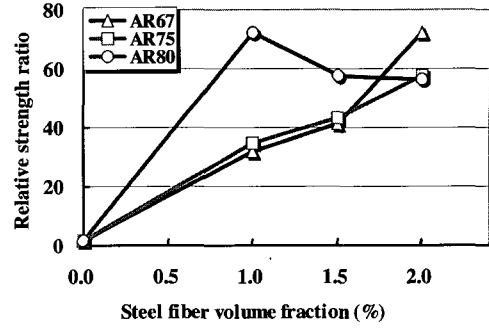
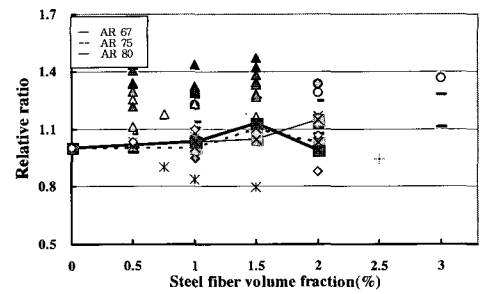
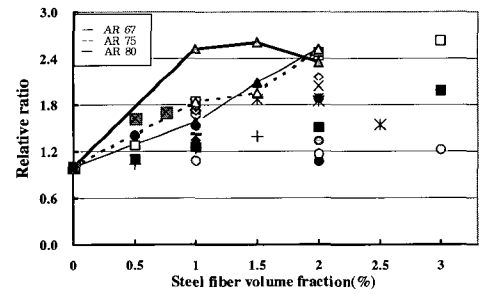


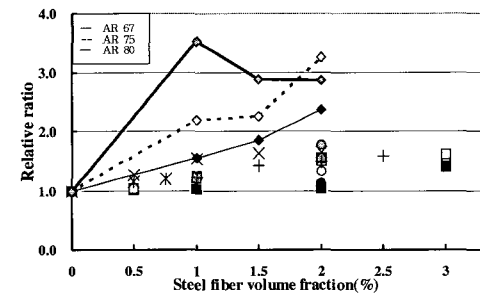
Fig. 7 Flexural toughness according to aspect ratio



(a) Compressional strength(f_{ck})



(b) Tensile splitting strength(f_{sp})



(c) Flexural strength(f_b)

Fig. 8 Relative comparison of f_{ck} , f_{sp} , f_b considering other researches

4.3 기존 연구결과 및 본 시험결과 비교

강섬유 비보강 시험체를 기준으로 한 강도 증진효과를 평가하고자 기존 실험결과와 본 실험의 압축강도, 활렬인장강도, 휨강도 결과를 비보강 시험체에 대한 상대비로 정리하여 이를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 본 연구결과는 실선으로 연결된 것이며, 기존 연구결과는 점으로 나타낸 것이다. 압축강도 경우 기존 논문결과 V_f 1.5%에서 우수한 강도증진이 나타나 앞 절의 연구 결과와도 동일하게 V_f 1.5%까지 보강효과가 명백함을 검증할 수 있었다. 활렬인장강도 및 휨강도 시험 결과는 기존보다 본 시험결과가 우수한 것으로 나타났다. 전체적으로 본 시험결과가 기존 연구 결과보다 큰 값으로 평가되었는데, 본 시험에서는 1차로 비빈 SFRC를 다시 한번 더 비빔에 의해 강섬유가 고루 콘크리트에 분포됨에 기인한 것으로 판단된다. 향후 강섬유 혼합 시간, 혼합 횟수 및 방법(mixing method)의 표준화가 필요한 것으로 판단된다.

5. 강섬유 계수 및 혼입률 평가

5.1 강섬유 계수

강섬유 계수(F)가 압축강도, 활렬인장강도 및 휨강도에 미치는 영향을 평가하고자, 식 (1)과 같은 강섬유 계수식¹²⁾을 사용하였다. 여기서 식 (1)은 강섬유의 형상비, 혼입비, 형상 따른 부착계수로 구성되어 있다. Fig. 9에 본 실험 및 기존 실험에 의한 압축강도, 활렬인장강도, 휨강도 상대비를 강섬유 계수로 정리하여 나타내었다.

$$F = L_f/D_f \times \rho_f \times d_f \quad (1)$$

여기서, L_f/D_f : 강섬유의 형상계수(aspect ratio, AR)

ρ_f : 강섬유 혼입비(ratio)

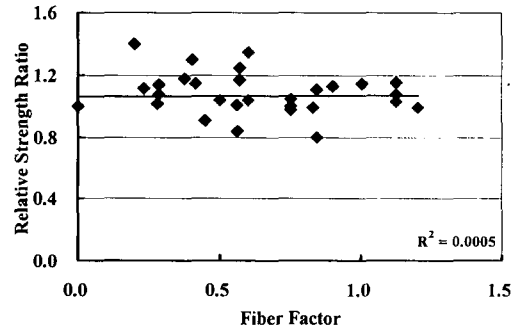
d_f : 강섬유 부착계수

(직선형 0.5, 고리형 0.75, 둥근형 1.0)

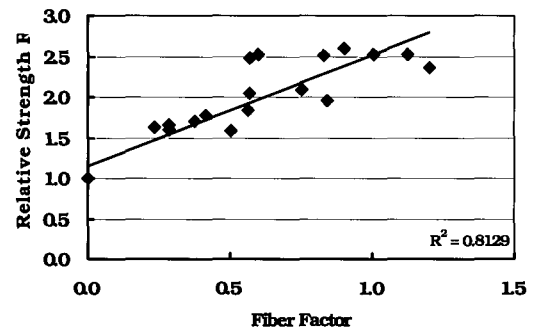
또한 Fig. 9에 개략적인 추세선을 파악하기 위하여 강도특성의 상대비 및 강섬유 계수의 1차 함수로 섬유계수가 증가함에 따른 경향을 나타내었다. 이때 Y축의 상대강도비는 비보강 시험체를 기준으로 한 것이다. 압축강도는 강섬유 계수가 증가하여도 별다른 증진이 없는 것으로 평가되었으며, 활렬인장강도 및 휨강도는 섬유증가에 따른 강도증진효과가 명확히 나타났다.

5.2 강섬유 혼입률

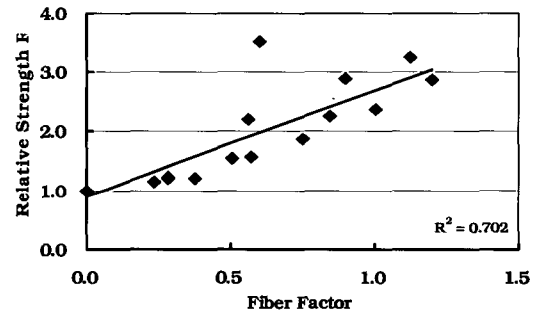
Fig. 9와 마찬가지로 강섬유 혼입률 증가에 따른 재료 특성을 Fig. 10에 나타내었다. 강섬유 혼입률에 따른 강도 증진은 강섬유 계수와 거의 유사한 경향을 나타내었으나, 추세선의 경향으로 보면 결과의 분산 정도가 섬유 계수의 경우보다 큰 것으로 평가되었다. 따라서 SFRC의 강도 특성을 평가하기에는 부적합한 것으로 판단된다.



(a) Compressive strength(f_{ck})

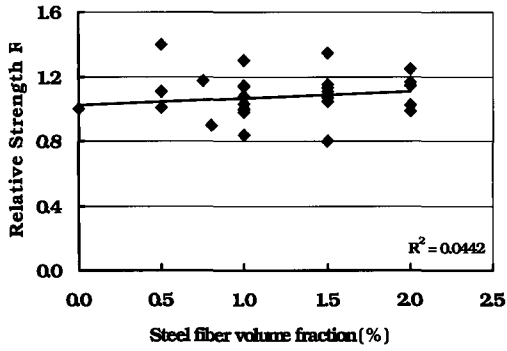


(b) Tensile splitting strength(f_{sp})

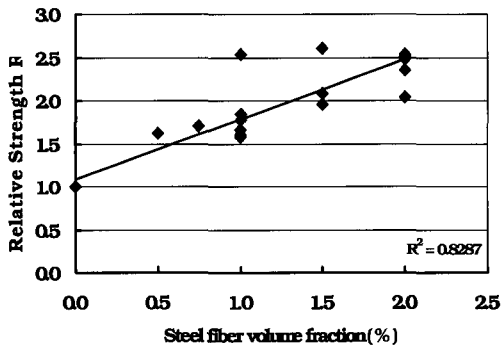


(c) Flexural strength(f_b)

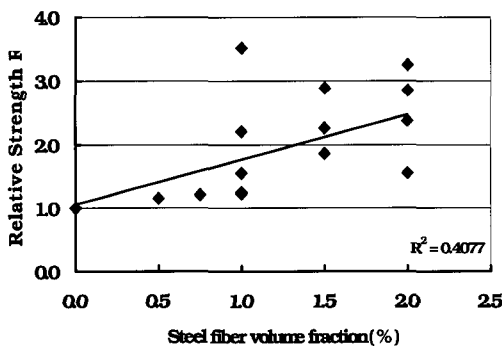
Fig. 9 Comparison of f_{ck} , f_{sp} , f_b according to fiber factor



(a) Compressional strength(f_{ck})



(b) Tensile splitting strength(f_{sp})



(c) Flexural strength(f_b)

Fig. 10 Comparison of f_{ck} , f_{sp} , f_b according to volume fraction

이상 기존 연구와 본 연구를 통계적으로 추정한 결과, 강섬유 보강 콘크리트의 재료를 평가하는 특성인자로 강섬유 혼입률 보다는 강섬유 계수가 적절한 것으로 판단된다. 아울러 강섬유 계수에 따른 할렬인장강도 및 휨강도의 상대비를 통하여 SFRC의 재료 특성을 평가하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 SFRC의 강도 및 변형 특성에 대한 성능 시험을 수행하였으며, 주요한 연구내용은 다음과 같다

- 1) 강섬유 보강에 따른 압축강도의 증진은 다소 있는 것으로 평가할 수 있으나, 이는 할렬인장 강도, 휨강도 증진에 비하면 매우 적은 것으로 판단된다.
- 2) 할렬인장강도 및 휨강도는 양단고리형을 사용할 때, AR 75이하의 V_f 2.0%까지 증가함에 따라 증진되는 것으로 나타났으며, AR 80이상의 V_f 1.0%의 경우의 능력증진이 우수한 것으로 나타났다. 또한 40mm이상의 섬유는 콘크리트내 섬유부착을 돕고 강도 성능 증진에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 3) 응력-변형도 곡선, 하중-변위곡선 및 휨인성 계수로부터, 강섬유 보강은 구조물 변형능력을 충분히 증진시키는 것으로 판단된다.
- 4) 이상의 연구결과로부터 구조용으로 적합한 강섬유의 길이는 40mm이상의 형상비 67, 75로 판단되며, 시공성을 고려한 최대 강섬유 혼입률은 콘크리트 체적의 1.5%가 적절한 것으로 판단된다.
- 5) 기존 연구와 본 연구를 통계적으로 추정한 결과, 강섬유 계수, 할렬인장강도, 휨강도가 주요한 특성인자로 판단된다.

참고문헌

1. 장동일 외 3인, "강섬유 보강 고강도콘크리트의 응력-변형률 곡선 및 탄성계수 추정식 평가", 콘크리트학회 논문집, 12권, 2호, 2000, pp.13~20.
2. 박승범 외 3인, "플라이애쉬를 이용한 강섬유 보강콘크리트의 강도 및 휨인성특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 9권, 2호, 1997, pp.345~350.
3. 문제길, 홍익표, "섬유보강콘크리트 보의 전단거동에 미치는 강섬유의 효과", 콘크리트학회 논문집, 6권, 2호, 1994, pp.118~128.
4. 서상교, "강섬유 보강 콘크리트의 균열 이후의 인장거동에 관한 실험적 연구", 콘크리트 학회 논문집, 3권, 1호, 1991, pp.79~85.
5. 부척량 외 3인, "강섬유 보강 콘크리트의 압축응력-변형률 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 6권, 6호, 1990, pp.295~307.
6. 오병환 외 3인, "강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 역학적 특성연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 2권, 2호, 1990, pp.175~178.
7. 정환옥, 부척량, "강섬유 보강 모르타르 및 콘크리트의 변형성상에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표논문집, 7권, 2호, 1987, pp.579~582.
8. 한국콘크리트학회, "건설교통부 제정 - 콘크리트표준시방서 해설", 한국콘크리트학회, 2000.
9. 박승범 외 4인, "강섬유의 종류에 따른 강섬유 보강 콘

- 크리트의 강도 및 휨변형 특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 8권, 2호, 1996, pp.328~334.
10. 오병환, 임동환, 이형준, “강섬유를 혼입한 철근 콘크리트 부재의 전단거동 및 전단해석에 관한 연구”, 콘크리트학회 논문집, 5권, 2호, 1993, pp.171~180.
11. 김우석 외 3인, “강섬유 보강 콘크리트 휨내력에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집 구조계, 18권, 9호, 2002, pp.3~11.
12. Narayanan R. and Darwish Y.S., “Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement,” *ACI Structural Journal*, 1987, pp.216~227.

요 약

강섬유(steel fiber) 보강은 전단 강도와 같은 콘크리트 구조 부재의 많은 공학적 특성들을 현저히 향상시킨다. 본 연구는 구조 부재로의 실용적 사용을 위해 강섬유의 형상, 형상비, 혼입률, 강섬유 계수를 강도 특성 및 변형 특성의 수준으로 평가하였다. 기존 연구 및 본 연구의 재료 시험 결과들을 평가한 결과, 양단고리형 및 최대골재치수의 1.5배 이상되는 길이의 강섬유의 강도 보강효과가 우수한 것으로 판단된다. 또한 강도 및 변형 능력에 대한 상세 시험결과로부터, 형상비 75, 혼입률 1.5%가 적절한 것으로 판단된다. 결론적으로 재료 성능 시험 결과들을 통계적으로부터 추정한 결과, 강섬유 계수, 할렬인장강도, 휨강도가 SFRC의 주요한 특성인자로 판단된다

핵심용어 : 강섬유, 전단 보강, 강섬유 계수, 혼입률, 할렬인장강도