섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 대한 섬유 체적비와 길이의 영향

Effect of Volume Fraction and Length of Fiber on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete

양 근 혁* 오 승 진**
Yang, Keun-Hyeok O, Seung-Jin

Abstract

Fifteen concrete specimens were mixed and tested to explore the significance and limitation of appling the polyvinyl alcohol (PVA) fiber and steel fiber with end hook to concrete. Main parameters investigated were volume fraction and length of the fibers. The measured mechanical properties of fiber reinforced concrete are analyzed according to the equivalent fiber amount index explaining the adding amount and length of fibers. Test results showed that compressive strength of fiber reinforced concrete was higher than that of concrete with no fiber by 10~20%. The normalized splitting tensile strength and flexural strength of PVA fiber reinforced concrete were similar to those of concrete with no fiber, whereas those of steel fiber reinforced concrete increased with the increase of the equivalent fiber amount index. In particular, much higher ductile behavior was observed in steel fiber reinforced concrete than in PVA reinforced concrete, indicating that the slope of descending branch of load-displacement relationship of steel fiber reinforced concrete decreased with the increase of the volume fraction and length of the fiber.

키 워 드 : 섬유보강 콘크리트, 강섬유, PVA 섬유, 섬유길이, 섬유체적비, 등가 섬유양 지수
Keywords : Fiber reinforced concrete, steel fiber, PVA fiber, fiber length, volume fraction of fiber, equivalent fiber amount index.

1. 서 론

각종 섬유와 시멘트 페이스트 및 골재가 혼합된 섬유보강 콘크리트(Fiber reinforced concrete, FRC)는 콘크리트의 낮은 인장강도 및 취성파괴 특성의 개선과 건조수축 제어를 위해 1960년대 이후부터 국내, 외적으로 많은 연구들이 진행되었다[1]. 이로 인해 다양한 강섬유, 유리섬유 및 합성 섬유기술들이 발전하였으며, 섬유보강 복합체의 사용 목적에 맞추어 적절한 섬유를 선택할 수 있게 되었다. 특히 최근 20년 동안 섬유보강 콘크리트와는 전혀 다른 배합비를 갖는 고인성 섬유보강 콘크리트는 철근콘크리트 구조물의 보강을 위해 적용가능성이 높은 신재료로 인식되고 있다[2]. 하지만 고인성 섬유보강 콘크리트는 실험실 수준에서 우수한 성능을 검증받았지만 경제성 및 시공성에 문제가 발생하는 것이 현실이므로 아직까지 현장적용 실적은 거의 없는 실정이다[1].

콘크리트의 인장강도를 증진시켜 균열저감 효과를 얻는 섬유보강 콘크리트의 적절한 배합을 위해서는 작업성과 경제성에 영향에 대한 섬유의 종류와 적절한 혼입율이 고려되어져야 한다. 콘크리트에 이용되는 보강섬유는 일반적으로 인장강도와 탄성계수가 큰 것이 효과적이다. 게다가 섬유계면과 시멘트 매트릭스의 부착성능은 섬유보강 콘크리트의 균열제어 및 인장강도 향상에 영향을 미치므로 섬유의 재질 및 형상도 중요하다. 특히 섬유의 크기와 길이는 시멘트 매트릭스 보강효과에 매우 중요하다. 하지만 시멘트 매트릭스와의 부착력을 향상시키기 위한 각종 형상과 다양한 길이를 갖는 섬유들이 상업적으로 유통됨에도 불구하고 이들의 변화에 따른 콘크리트 역학적 특성에 대한 연구는 매우 부족한 편이다.

본 연구에서는 현재 건설현장의 슬래브 또는 벽체의 균열제어를 위해 많이 이용되는 폴리비닐알콜(Polyvinyl alcohol, PVA) 합성섬유와 양단부 훅크를 갖는 강섬유의 길이 및 첨가 양에 따른 콘크리트의 유동성과 역학적 특성들을 평가하였다. 이를 위해 섬유보강 콘크리트 14배합과 동일조건의 무보강 콘크리트가 배합되었다. 섬유보강 콘크리트의 할렬인장강도, 휨강도 및 탄성계수는 압축강도의 루트승으로 무차원되어 섬유 체적비와 형상비가 조합된 등가 섬유양 지수에 따라 비교되었다.

2. 실험계획

2.1 배합계획

섬유보강 콘크리트에서 주요 변수는 섬유의 종류, 길이 및 첨가 양이다. 섬유보강 콘크리트를 위해 최근 현장적용성이 높은 PVA 합성섬유와 단부 훅크를 갖는 강섬유가 선택되었다. PVA 합성섬유의 공칭 길이는 8, 12, 15 및 19 mm 이며, 강섬유의 공칭길이는 30, 35 및 60 mm이다. PVA 합성섬유의 첨가양은 제조회사에서 제시하는 최적의 양 0.9 kg/㎥과 이의 두 배

* 목포대학교 건축공학전공, 조교수
** 목포대학교 대학원 석사과정

인 1.8 kg/㎥이며, 강섬유 첨가양도 제시된 최적 양 40 kg/㎥과 이의 두 배인 80 kg/㎥으로 하였다. 결과적으로 콘크리트 단위용적 (1㎥)에 대한 PVA 합성섬유 체적비(V_f)는 0.07%와 0.14%이며, 강섬유의 체적비는 0.5%와 1.0%이다. 콘크리트의 목표강도는 21 MPa이다. 모든 콘크리트 배합에서 단위수량, 물/시멘트 비(W/C) 및 잔골재율(S/A)은 표 1에 나타낸 바와 같이 각각 175 kg/㎥, 55% 및 45%로 일정하다.

2.2 재료특성

사용된 모래의 밀도는 2.54 g/c㎥이며 조립률은 2.97이다. 또한 최대 직경 25 mm 이하의 쇄석이 굵은 골재로 이용되었는데 이의 밀도와 조립률은 각각 2.59 g/c㎥과 6.3이다.

표 2에는 사용된 섬유들의 물리적, 역학적 특성을 나타내었으며 그림 1에는 이들 섬유들의 형상을 나타내었다. PVA 합성섬유는 섬유자체에 수산기를 갖는 친수성 섬유이며 시멘트 매트릭스와의 부착성이 우수하고 분산성이 뛰어나다. 뿐만 아니라 직경이 15 μm 이하로서 미세(Micro) 단섬유이다. 반면 강섬유는 다발로 제조되어 콘크리트와의 혼합에서 분산되도록 제조되었으며, 콘크리트와의 부착과 정착성능을 향상시키기 위하여 양 단부에 훅크가 설치되었다.

2.3 시편제작 및 측정

콘크리트 비빔을 위해 강제식 팬 믹서기가 이용되었다. 콘크리트의 비빔 직 후 섬유를 첨가하였으며, 첨가된 섬유가 콘크리트 속에서 잘 분산되도록 추가 1분을 더 비볐다. 비빔 직후 콘크리트의 슬럼프가 측정되었다. 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 Φ100×200 mm 실린더를 이용하여 재령 1, 3, 7, 28 및 91일에서 측정되었다. 또한 재령 28일에서 섬유보강 콘크리트의 할렬인장강도, 휨 강도 및 탄성계수가 측정되었다. 탄성계수의 측정은 전기저항게이지 (Wire strain gage)와 컴프레서미터가 설치된 Φ100×200 mm 실린더로부터 측정된 응력-변형률 관계에서 최대응력의 45%점의 기울기로 얻었다[3]. 모든 실험 및 시험체 크기는 한국산업규격[4]에서 제시된 절차를 따랐다.

제작된 시험체들은 양생온도 21±1℃, 상대습도 75±5%의 양생실에서 대기양생되었다. 몰드는 재령 1일에서 제거되었다.

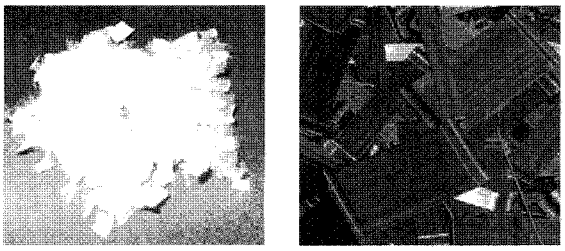
표 1. 콘크리트의 배합표

W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/㎥)			
		Cement	Water	Sand	Gravel
55	45	318	175	774	962

표 2. 섬유의 물리적, 역학적 특성

Type	Specific gravity	L_f (mm)	d_f (mm)	S_f	F_f (MPa)	E_f (MPa)
PVA	1.3	8	0.015	533	1269	27640
		12		800		
		15		1000		
		19		1267		
Steel	7.85	30	0.5	60	1023	20600
		35	0.53	66	1029	
		60	0.73	82	1220	

*Note: L_f, d_f, S_f, F_f, and E_f indicate the nominal length, nominal diameter, aspect ratio, tensile strength and elastic modulus of fiber, respectively.



(a) PVA 합성섬유 (b) 강섬유

그림 1. 섬유의 형상

3. 실험결과 및 분석

표 3에는 초기 슬럼프 및 측정된 역학적 성질들의 실험결과를 나타내었다. 압축강도(f_{ck}), 할렬인장강도(f_{sp}), 휨강도(f_r) 및 탄성계수(E_c)는 실린더 3개의 평균 값이다. 섬유보강 콘크리트의 역학적 성질에 대한 섬유 첨가양과 길이의 영향을 고려하기 위해 섬유 체적비와 형상비의 곱인 등가 섬유양 지수($V_f \times S_f$)의 개념을 이용하였다.

표 1에 나타낸 시험체 명은 섬유가 첨가되지 않은 무보강 콘크리트(N)를 제외하고 3부분으로 구성된다. 첫 번째 문자는 섬유종류를 의미하는데 P는 PVA 합성섬유를 S는 강섬유를 의미한다. 두 번째 수는 섬유길이를 나타낸다. 섬유 첨가 양을 의미하는 세 번째 문자에서 S는 섬유제조회사에서 제시하는 최적양을 그리고 D는 그 최적양의 두 배를 첨가한 것을 의미한다. 예를 들어 시험체 P8S는 길이 8 mm인 PVA 합성섬유가 제조회사에서 제시하는 최적 양인 0.9 kg/㎥가 첨가된 콘크리트를 의미한다.

3.1 초기 슬럼프

그림 2에는 섬유길이에 따른 섬유보강 콘크리트의 초기 슬럼프 변화를 나타내었다. 일반적으로 섬유길이와 체적비가 증가할수록 초기 슬럼프는 감소하였다. 이들 감소기울기는 PVA 합성섬유보다는 강섬유 보강콘크리트에서 현저하였다. 섬유보강 콘크리트의 유동성은 한천구 등[5]이 지적한바와 같이 섬유 혼입량이 증가할수록 단위체적당 차지하는 섬유수가 증가하여 시멘트 매트릭스와 접하는 표면적이 증가하고, 섬유의 길이가 증가할수록 섬유의 가교작용으로 인한 시멘트 매트릭스간의 네트워크 형성이 치밀해지기 때문에 섬유의 첨가양과 길이에 중요한 영향을 받는다. 이로 인해 비록 PVA 합성섬유가 친수성으로서 흡수성이 높지만 섬유 체적비가 크고 길이가 긴 강섬유 보강 콘크리트가 PVA 보강 콘크리트에 비해 유동성이 낮았다.

3.2 압축강도

그림 3에는 섬유보강 콘크리트의 28일 압축강도에 대한 섬유 길이의 영향을 나타내었다. 세로축은 무보강 콘크리트의 압축강도($(f_{ck})_N$)로 무차원한 섬유보강 콘크리트의 상대 압축강도를 나타낸다. PVA 합성섬유 보강 콘크리트의 경우 섬유 체적비가 0.07%일 때 섬유길이가 압축강도에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았지만 섬유 체적비가 0.14%일 때에는 섬유길이가 12 mm 이상일 때 20% 이상의 압축강도 증진 효과를 보였

표 3. 실험결과

Specimen	Fiber			Slump (mm)	f_{ck} (MPa)					f_{sp} (MPa)	f_r (MPa)	E_c (GPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$
	Type	L_f (mm)	V_f (%)		1 day	3 days	7 days	28 days	91 days						
5N	No fiber			180	8.9	16.1	20.1	23.4	29.9	2.32	3.23	22.9	0.48	0.67	4742
P8S	PVA	8	0.07	160	8.8	16.1	20.8	25.9	33.3	2.40	3.33	22.7	0.47	0.65	4470
P12S		12		135	8.2	17.0	23.8	27.3	36.1	2.70	3.30	24.9	0.52	0.63	4775
P15S		15		125	8.2	15.5	21.2	24.9	31.5	2.65	3.26	23.6	0.53	0.65	4737
P19S		19		135	7.5	15.0	20.6	25.9	32.2	2.78	3.26	23.9	0.55	0.64	4702
P8D		8	0.14	145	6.8	16.3	20.0	26.0	32.5	2.42	3.26	23.6	0.48	0.64	4634
P12D		12		115	7.8	16.9	23.4	28.8	34.7	2.73	3.33	22.7	0.51	0.62	4237
P15D		15		98	10.3	18.1	24.7	29.2	33.6	2.83	3.43	23.1	0.52	0.63	4266
P19D		19		90	10.9	19.5	25.8	29.6	38.3	3.10	3.98	23.4	0.57	0.73	4292
S30S	Steel	30	0.5	145	8.3	15.7	21.8	27.1	32.3	2.50	3.62	25.3	0.48	0.69	4852
S35S		35		125	8.5	16.5	21.7	25.9	33.1	2.96	3.95	25.5	0.58	0.78	5000
S60S		60		105	8.8	17.5	22.5	26.8	34.7	3.67	5.12	27.0	0.71	0.99	5218
S30D		30	1.0	112	8.2	17.4	22.6	27.6	35.0	3.81	5.68	26.5	0.73	1.08	5042
S35D		35		90	8.0	18.4	23.8	27.3	32.9	3.93	5.81	27.4	0.75	1.11	5239
S60D		60		72	9.1	18.3	24.3	29.2	32.5	4.55	6.33	29.0	0.84	1.17	5367

다. 반면 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 섬유 체적비와 길이에 관계없이 무보강 콘크리트보다 평균 15% 증가하였다.

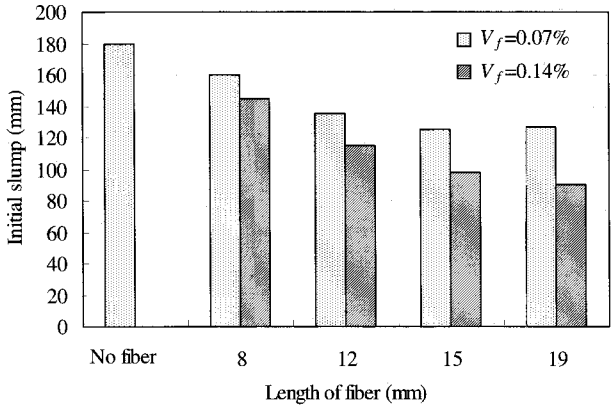
그림 4에는 등가 섬유양 지수와 상대 압축강도의 관계를 나타내었다. 섬유보강 콘크리트의 상대 압축강도는 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 증가하였다. 이들 증가기울기는 강섬유에서 현저하였으며 PVA 합성섬유는 등가 섬유양 지수가 약 1.25 이상에서 상대 압축강도가 급격히 증가하였다. 비록 섬유 첨가양이 콘크리트 압축강도에 미치는 영향에 대해서는 아직도 논란의 여지[6]가 있지만 섬유가 콘크리트 내에 분산이 잘 될 경우 약 10~20% 정도의 압축강도 증가효과를 기대할 수 있다고 판단된다.

3.3 압축강도 발현

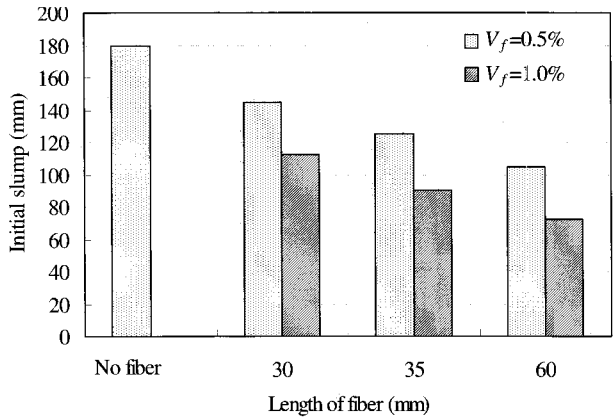
그림 5에는 섬유보강 콘크리트의 압축강도 발현율에 대한 등가 섬유양 지수의 영향을 나타내었다. 압축강도 발현율은 각 콘크리트의 재령에 따른 압축강도를 28일 압축강도로 무차원한 것이다. 초기 재령 1일, 3일 및 7일에서 섬유보강 콘크리트의 강도발현율은 등가 섬유양 지수에 관계없이 무보강 콘크리트에 비해 낮았다. 반면 장기재령 91일에서 섬유보강 콘크리트의 압축강도 발현율은 유효 섬유양이 0.5 이하에서는 무보강 콘크리트와 동등한 수준이지만 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 무보강 콘크리트에 비해 낮았다. 특히 장기재령 91일에서 강섬유 보강 콘크리트의 강도발현은 PVA 합성섬유 콘크리트에 비해 낮았다.

3.4 할렬인장강도

그림 6에는 섬유보강 콘크리트의 전형적인 할렬인장 파괴모드 및 파괴면에서 섬유의 거동을 나타내었다. 무보강 또는 PVA 섬유가 혼입된 콘크리트는 최대 인장강도에 도달함과 동시에 중앙부에 균열이 커지면서 완전히 반으로 쪼개지지만 강섬유가 1.0% 이상 혼입된 콘크리트는 중앙부의 수직균열이 커지고 주변에 미세한 균열들이 발생하였으나 완전히 반으로 쪼개지는 현상은 나타나지 않았다. PVA 섬유보강 콘크리트의 인장 파괴면에서 섬유들은 완전이 콘크리트와 분리되지만 강섬유는 그림 6 (b)에 나타낸 바와 같이 분리된 콘크리트들과 서로 연결되어 완전 뽑힘파괴는 발생하지 않았다.



(a) PVA 합성섬유

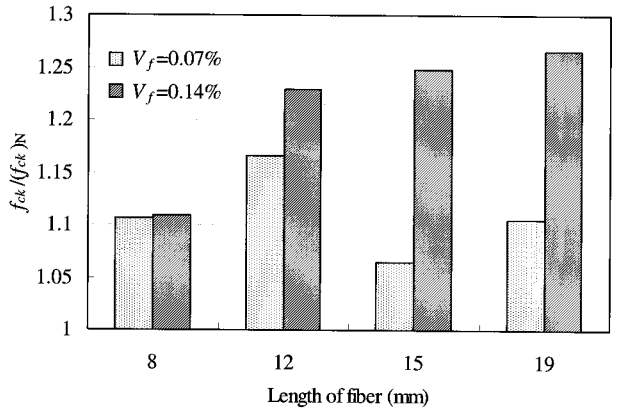


(b) 강섬유

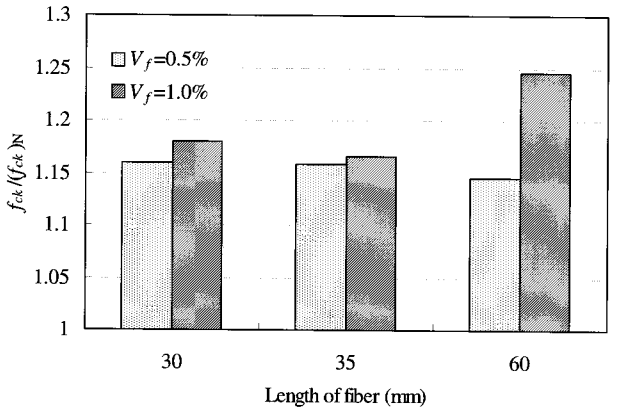
그림 2. 섬유길이와 초기 슬럼프의 관계

그림 7에는 무보강 콘크리트에 대한 섬유보강 콘크리트의 상대 할렬인장에 대한 섬유길이의 영향을 나타내었다. PVA 섬유보강 콘크리트의 인장강도는 섬유길이가 8 mm일 때에는 무보강 시험체와 비슷한 수준이지만 섬유길이가 12 mm 이상일 때에는무보강 콘크리트에 비해 약 20% 정도 상승하였다. 반면

강섬유 보강 콘크리트의 상대인장강도는 섬유길이와 체적비가 증가할수록 증가하였다. 그림 8에는 등가 섬유양 지수와 콘크리트 압축강도 루트승에 대한 할렬인장강도의 비($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)의 관계를 나타내었다. PVA 섬유보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수에 관계없이 평균 0.52로서 무보강 콘크리트와 비슷한 수준이다. 반면 강섬유 보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수가 0.4 이상일 때 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 급격히 증가하였다. 따라서 콘크리트의 인장강도 향상을 위해서는 PVA 섬유보다는 강섬유가 효과적이며 동일체적비에서는 길이가 긴 섬유가 유리하다.



(a) PVA 합성섬유



(b) 강섬유

그림 3. 섬유길이와 28일 상대 압축강도의 관계

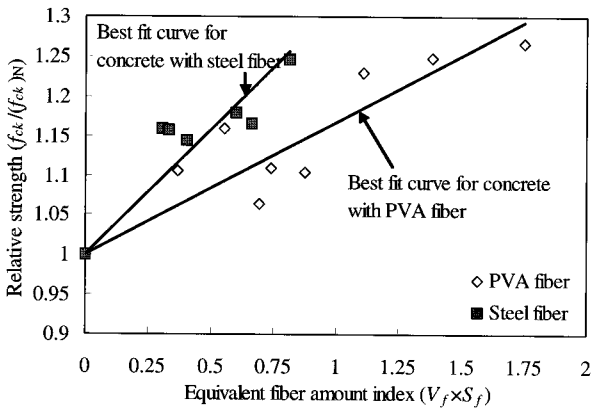


그림 4. 등가 섬유양 지수와 상대 압축강도의 관계

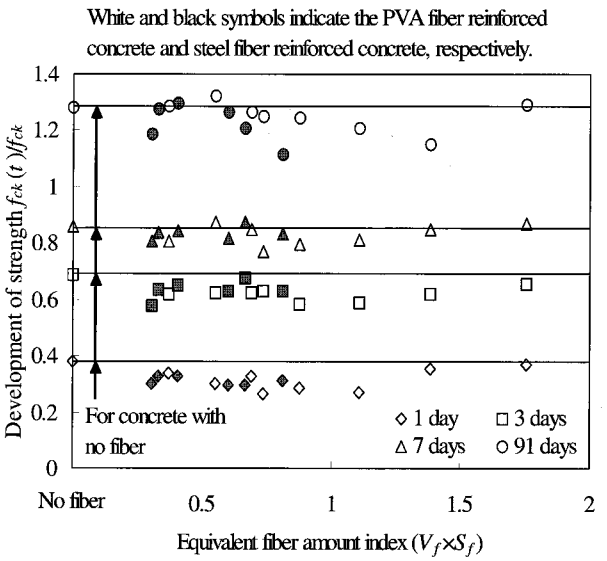
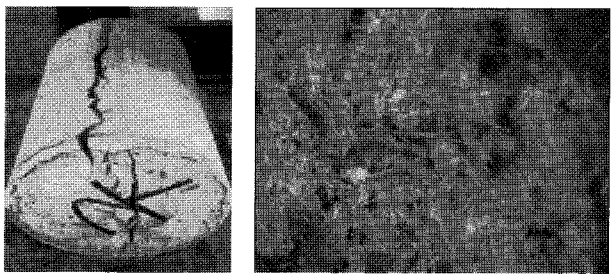
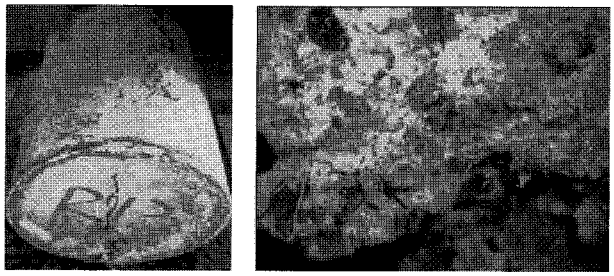


그림 5. 강도발현율에 대한 등가 섬유양 지수의 영향



(a) PVA 섬유보강 콘크리트



(b) 강섬유 보강 콘크리트

그림 6. 섬유보강 콘크리트의 할렬인장 파괴모드 및 파괴면의 특성

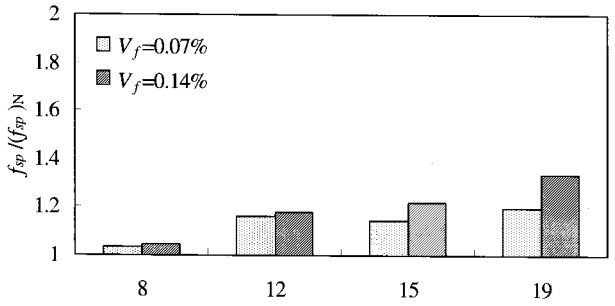
3.5 탄성계수

그림 9에는 등가 섬유양 지수와 섬유보강 콘크리트의 압축강도 루트승에 대한 탄성계수 비($E_c/\sqrt{f_{ck}}$)의 관계를 나타내었다. PVA 섬유보강 콘크리트의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 감소하였으며 무보강 콘크리트에 비해 낮았다. 반면 강섬유 보강콘크리트의 탄성계수는 무보강 콘크리트에 비해 약 10~20% 증가하며 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 증가하지만 그 증가 기울기는 작았다.

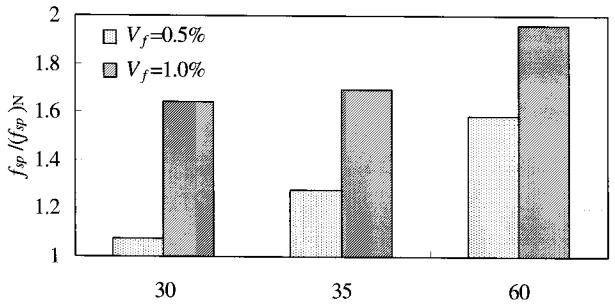
3.6 휨 강도

PVA 합성섬유 보강 콘크리트의 휨 강도는 표 3에 나타낸 바와 같이 섬유길이 및 첨가양에 관계없이 무보강 콘크리트와

비슷한 수준이다. 하지만 강섬유 보강콘크리트의 휨 강도는 섬유길이가 증가할수록 증가하며 특히 섬유 체적비가 1.0%의 경우 무보강 콘크리트에 비해 1.8 배나 높았다. 그림 10에는 등가 섬유양 지수와 섬유보강 콘크리트의 압축강도 루트승에 대한 휨 강도 비($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)의 관계를 나타내었다. PVA 섬유보강 콘크리트의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수에 관계없이 평균 0.65로서 무보강 콘크리트와 비슷한 수준이다. 하지만 강섬유 보강콘크리트의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수가 약 0.5 이상일 때 급격히 증가하며 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 증가하였다. PVA 합성섬유는 콘크리트 휨 강도 상승에 거의 영향이 없는 반면 강섬유는 매우 효과적이었다.



(a) PVA 합성섬유



(b) 강섬유

그림 7. 섬유길이와 상대 할렬인장강도의 관계

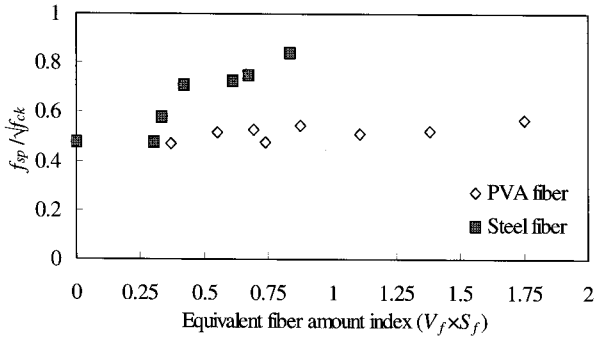


그림 8. $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$에 대한 등가 섬유양 지수의 영향

그림 11에는 강섬유 보강 콘크리트의 휨 실험에서 얻은 하중-변위 관계를 나타내었다. 비교를 위해 무보강 콘크리트의 하중-변위 관계를 그림 11에 함께 나타내었다. PVA 보강섬유 콘크리트의 경우 무보강 콘크리트에서와 같이 최대 휨 내력에 도달 후 곧바로 취성파괴를 보이기 때문에 최대 휨 내력 이후의 데이터는 얻지 못했다. 강섬유 보강 콘크리트의 초기 강성 및 최대내력은 무보강 콘크리트에 비해 높았다. 최대 내력 이후의 기울기도 강섬유 길이와 체적비가 증가할수록 완만한 연성특성을 보였다. 특히 섬유 길이가 60 mm인 강섬유 보강콘크리트는 최대내력 이후 대 변형에서도 최대내력의 60% 이상의 하중을 전달하였다.

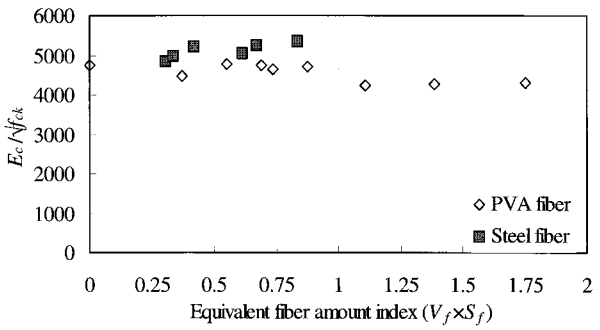


그림 9. $E_c/\sqrt{f_{ck}}$에 대한 등가 섬유양 지수의 영향

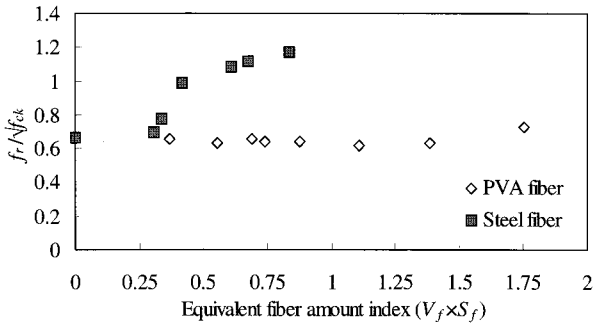
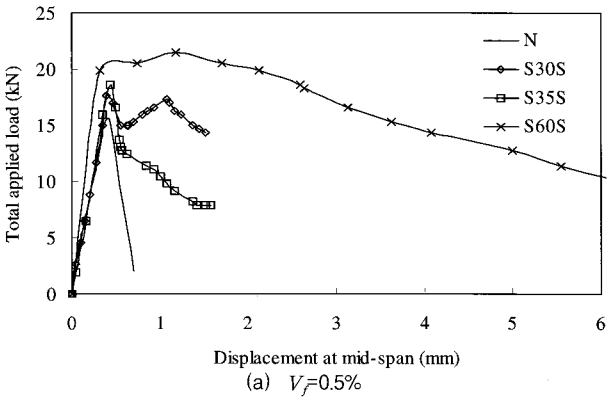
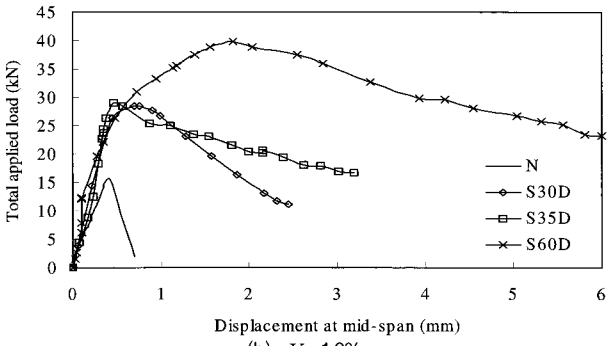


그림 10. $f_r/\sqrt{f_{ck}}$에 대한 등가 섬유양 지수의 영향



(a) V_f=0.5%



(b) V_f=1.0%

그림 11. 강섬유 보강콘크리트의 하중-변위 관계

4. 결 론

PVA 섬유 또는 강섬유로 보강된 콘크리트 14배합과 동일조건의 무보강 콘크리트가 실험되었다. 콘크리트의 역학적 특성들은 섬유길이와 첨가양을 고려하는 등가 섬유양 지수에 따라 비교되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 섬유길이와 체적비가 증가할수록 콘크리트의 초기 슬럼프는 감소하였으며, 감소기울기는 PVA 합성섬유보다는 강섬유 보강콘크리트에서 현저하였다.
2) PVA 합성섬유 보강 콘크리트의 경우 섬유 체적비가 0.07%일 때 섬유길이가 콘크리트 압축강도에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았지만 섬유 체적비가 0.14%일 때에는 섬유길이가 12 mm 이상에서 20% 이상의 압축강도 증진 효과를 보였다. 반면 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 섬유 체적비와 길이에 관계없이 무보강 콘크리트에 비해 평균 15% 증가하였다.
3) PVA 섬유보강 콘크리트의 압축강도 루트승에 대한 할렬인장강도비($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 등가 섬유양 지수에 관계없이 평균 0.52로서 무보강 콘크리트와 비슷한 수준이다. 반면 강섬유 보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수가 0.4 이상일 때 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 급격히 증가하였다.
4) PVA 섬유보강 콘크리트의 압축강도 루트승에 대한 탄성계수비($E_c/\sqrt{f_{ck}}$)는 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 감소하였으며 무보강 콘크리트에 비해 낮았다. 반면 강섬유 보강콘크리트의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수의 증가와 함께 증가하지만 그 증가 기울기는 작았다.
5) PVA 섬유보강 콘크리트의 압축강도 루트승에 대한 휨 강도비($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)는 등가 섬유양 지수에 관계없이 평균 0.65로서 무보강 콘크리트와 비슷한 수준이지만 강섬유 보강콘크리트의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 등가 섬유양 지수가 약 0.5 이상일 때 급격히 증가하였다.
6) 강섬유 보강 콘크리트의 하중-변위 관계에서 최대내력 이후 하강기울기는 강섬유 길이와 체적비가 증가할수록 완만한 연성특성을 보였다.

감사의 글

이 논문은 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업 (바이오하우징연구사업단) 및 국립문화재연구소 전통건축기술개발연구사업의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 김규용, 김영덕, 조봉석, 윤현도, 김무한, "국내에서의 섬유보강 시멘트 복합재료의 적용현황과 수요전망" , 콘크리트학회지, 18권 1호, pp. 44-51. 2006.
2. 김윤일, 박동순, 서치호, "강섬유 혼입량 증가에 따른 고강도 콘크리트 재료특성의 변화" , 대한건축학회논문집 구조계, 21권 2호, pp. 95-101, 2005.
3. 한국공업표준협회, 한국산업규격(KS) 규준, 2006.
4. 한천구, 윤기원, 한민철, 신현섭, "나일론 섬유보강 콘크리트의 특성에 관한 기초적 연구" , 대한건축학회논문집 구조계, 23권 4호, pp. 95-102, 2007.
5. ACI Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05). American Concrete Institute, 2005.
6. Li, V. C., "High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering", Journal of Applied Polymer Science, V.83, pp. 660-686, 2002.