Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 22, No. 5, pp. 651~658, October, 2010
DOI 10.4334/JKCI.2010.22.5.651

강섬유와 PVA 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 슬럼프 및 역학적 특성

양근혁[1)*]

[1)]경기대학교 건축공학과

Slump and Mechanical Properties of Hybrid Steel-PVA Fiber Reinforced Concrete

Keun-Hyeok Yang[1)*]

[1)]Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

ABSTRACT Sixteen concrete mixes reinforced with hybrid steel-polybinyl alcohol (PVA) fibers and a control concrete mix with no fiber were tested in order to examine the effect of the micro and macro fibers on the slump and different mechanical properties of concrete. Main variables investigated were length and volume fraction of steel and PVA fibers. The measured mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete were analyzed using the fiber reinforcing index and compared with those recorded from monolithic steel or PVA fiber reinforced concrete. The initial slump of hybrid fiber reinforced concrete decreased with the increase of the aspect ratio and the volume fraction of fibers. In addition, splitting tensile strength, modui of rupture and elasticity, and flexural toughness index of concrete increased with the increase of the fiber reinforcement index. Modulus of rupture and flexural toughness index of hybrid fiber reinforced concrete were higher than those of monolithic fiber reinforced concrete, though the total volume fraction of hybrid fibers was lower than that of monolithic fiber. For enhancing the flexural toughness index of hybrid fiber reinforced concrete, using the steel fiber of 60 mm length was more effective than using the steel fibers combined with 60 mm and 30 mm lengths.

Keywords : hybrid fiber reinforced concrete, slump, mechanical properties, fiber reinforcing index, toughness

1. 서 론

콘크리트의 균열제어 및 낮은 인장강도 개선과 함께 취성파괴 특성을 개선하기 위하여 섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 1960년대 이후로 꾸준하게 관심을 받고 있다.[1)] 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 대한 초기 연구는 강섬유[2)] 및 유리섬유[3)]를 이용한 콘크리트에 집중되다가 1980년도 초반부터 아라미드 및 폴리에틸렌과 같은 다양한 합성섬유[4,5)]를 이용한 연구로 확장되었다. 이들 섬유보강 콘크리트는 일반적으로 단일섬유에 국한되어 사용되어 오다가 점차 콘크리트의 균열제어와 함께 고인성 확보를 목표로 하면서 1990년대 후반부터 2종 이상의 섬유를 혼입한 하이브리드 섬유보강 콘크리트로 발전하고 있다.[6,7)] 하지만 하이브리드 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 대부분 혼입된 섬유 체적비가 2% 이상인 고인성 콘크리트[8)]에 집중되어 경제성 및 시공성을 고려하여 산업적으로 광범위하게 사용되고 있는 섬유 체적비가 1% 미만인 일반 섬유보강 콘크리트에 대한 연구는 매우 부족하다.

다른 종류 섬유들의 혼입 또는 길이가 다른 같은 종류의 섬유를 혼입한 하이브리드 섬유의 사용은 균열의 성장을 효과적으로 제어하여 콘크리트 인장강도를 향상시킬 수 있다.[8,9)] Lawler[10)]는 재료특성이 다른 섬유의 하이브리드는 콘크리트 강도와 연성을 증가시키기 위하여 효과적이며, 길이가 다른 섬유의 하이브리드는 미세균열(microcrack)과 거시균열(macrocrack)제어에 효과적임을 보였다. 한편 강섬유는 건설산업에서 가장 일반적으로 사용되는 섬유로서 비록 콘크리트 유동성을 저하시키지만 강도와 연성향상에 매우 효과적이다.[11,12)] 폴리비닐 알코올(polybinyl alcohol, PVA) 섬유는 친수성 재료로서 강섬유에 비해 콘크리트 유동성 저하가 심하지 않으며 강성이 낮아 콘크리트 배합 시 분산성이 좋고 미세균열 제어에 효과적이다.[13)] 강섬유와 PVA섬유의 하이브리드는 콘크리트 유동성 확보 및 강도와 연성증가 측면에서 효과적이지만[14)] 이들 섬유들의 적절한 배합조건을 평가하기 위해서는 다양한 실험자료의 확보가 필요하다.

이 연구에서는 강섬유와 PVA섬유를 하이브리드 혼입한 콘크리트의 초기 슬럼프 및 역학적특성을 평가하기 위하

*Corresponding author E-mail : yangkh@kgu.ac.kr
Received April 1, 2010, Revised May 28, 2010,
Accepted May 28, 2010
ⓒ2010 by Korea Concrete Institute

여 17배합을 실험하였다. 콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도, 파괴계수, 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 휨 하중-변위 관계 등을 측정하였으며, 하중-변위관계로부터 인성지수를 평가하였다. 측정된 역학적 특성들은 섬유보강지수를 사용하여 단일섬유를 사용한 콘크리트와 비교하였다.

2. 실 험

2.1 실험체 상세

PVA섬유와 강섬유(steel fiber, ST)의 길이 및 체적비가 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 섬유보강 콘크리트 16배합과 섬유가 없는 기준 시험체 1배합을 실험하였다. Table 1에 나타낸 각 시험체 상세에서 윗행과 아래행은 각각 PVA섬유와 강섬유의 상세를 의미한다. PVA섬유의 직경은 길이에 관계없이 0.015 mm이며 길이는 이전 연구 결과[15]를 바탕으로 12 mm와 15 mm를 사용하였다. 강섬유의 직경은 길이가 30 mm와 60 mm일 때 각각 0.5 mm와 0.73 mm이다. 따라서 PVA섬유의 형상비는 533과 1,000이며, 강섬유의 형상비는 60과 82이다. PVA섬유의 혼입양은 제조사에서 추천하는 0.9 kg/m^{3}를 기준으로 비교를 위해 2배까지 혼

Table 1 Details of concrete specimens and summary of test results

No.	Details of fiber						S_l (mm)	f_{ck} (MPa)	f_{sp} (MPa)	f_r (MPa)	E_c (MPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$	Toughness index		
	Type	V_f (%)	L_f (mm)	S_f	β_f	η_f ($\times10^{-5}$)									I_5	I_{10}	I_{30}
1	-	-	-	-	-	-	180	23.4	2.32	3.23	22939	0.48	0.67	4742	-	-	-
2	PVA+ST	0.07	12	800	1.249	4.33	155	27.6	2.71	3.51	26205	0.52	0.67	4988	3.87	6.78	-
		0.25	30	60													
3		0.07	15	1000	1.388	4.31	110	25.1	3.08	3.68	25055	0.61	0.73	5001	3.76	6.85	-
		0.25	30	60													
4		0.07	12+15	800+1000	1.319	4.32	130	27.3	3.18	3.85	25747	0.61	0.74	4928	3.68	6.65	-
		0.25	30	60													
5		0.14	12+15	800+1000	1.942	4.40	105	29.1	3.48	4.05	25555	0.65	0.75	4737	4.03	6.79	-
		0.25	30	60													
6		0.07	12	800	1.507	3.18	136	26.6	2.99	4.16	24865	0.58	0.81	4821	4.05	8.01	19.29
		0.25	60	82													
7		0.07	15	1000	1.645	3.17	112	24.8	3.52	4.41	24436	0.71	0.89	4907	4.19	7.31	17.68
		0.25	60	82													
8		0.07	12+15	800+1000	1.576	3.18	120	26.2	3.54	4.54	24987	0.69	0.89	4882	4.12	7.47	19.8
		0.25	60	82													
9		0.14	12+15	800+1000	2.199	3.25	87	28.1	3.85	4.87	26783	0.73	0.92	5052	4.57	8.19	20.83
		0.25	60	82													
10		0.07	12	800	2.459	6.29	115	27.5	3.79	5.26	28282	0.72	1.00	5393	5.64	10.66	35.26
		0.51	60	82													
11		0.07	15	1000	2.598	6.27	95	26.6	4.19	5.41	27239	0.81	1.05	5281	5.75	11.57	34.08
		0.51	60	82													
12		0.07	12+15	800+1000	2.529	6.28	102	26.9	4.13	5.56	27664	0.80	1.07	5334	5.62	11.47	37.80
		0.51	60	82													
13		0.14	12+15	800+1000	3.152	6.35	90	29.1	4.38	5.95	27170	0.81	1.10	5037	5.77	12.39	40.24
		0.51	60	82													
14		0.07	12	800	2.202	7.25	105	29.9	3.94	5.33	27770	0.72	0.97	5078	5.02	10.14	29.84
		0.51	30+60	60+82													
15		0.07	15	1000	2.341	7.24	82	27.5	4.03	5.41	26713	0.77	1.03	5094	5.25	11.59	30.75
		0.51	30+60	60+82													
16		0.07	12+15	800+1000	2.272	7.24	85	28.9	4.19	5.33	27630	0.78	0.99	5140	5.45	10.78	33.16
		0.51	30+60	60+82													
17		0.14	12+15	800+1000	2.895	7.32	83	30.7	4.45	5.50	28462	0.80	0.99	5137	5.61	12.40	36.31
		0.51	30+60	60+82													

Note) β_f = fiber reinforcing index, η_f = fiber spacing, S_f = initial slump of fresh concrete, f_{ck}, f_{sp}, f_r, and E_c = compressive strength, splitting tensile strength, modulus of rupture and modulus of elasticity of concrete, respectively, and I_5, I_{10} and I_{30} = flexural toughness index specified in ASTM C1018 (Fig. 12).

In the details of fiber of each concrete specimen, the upper and lower raws refer to the details of PVA and steel fibers, respectively.

입하였다. PVA섬유 혼입량이 0.9 kg/m^{3}와 1.8 kg/m^{3}일 때 체적비는 0.07%와 0.14%이다. 강섬유의 혼입양은 일반적으로 추천되는 40 kg/m^{3}을 기준으로 비교를 위해 20 kg/m^{3}도 선택하였으며, 이때의 체적비는 각각 0.51%와 0.25%이다. 따라서 이 연구에 실험된 콘크리트는 고인성 시멘트 복합재료가 아닌 섬유체적비가 0.65% 이하인 보통 섬유보강 콘크리트이다.

모든 실험체에서 콘크리트의 목표강도는 21 MPa로서 물시멘트비와 잔골재율은 각각 55%와 45%이다. 결합재로서 혼화재가 없이 보통 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며 단위 시멘트량은 318 kg/m^{3}이다.

2.2 재료 특성

PVA섬유는 수산기를 갖는 친수성 재료로서 시멘트 메트릭스와의 접착성이 우수하고 분산성이 뛰어나며 직경이 15 μm 이하인 미세(micro) 합성 단섬유이다. PVA섬유의 인장강도는 Table 2에 나타낸바와 같이 1,200 MPa이 넘는 고강도이다. 강섬유는 콘크리트와의 혼합 시 분산되도록 다발로 제조된 것으로서 시멘트 메트릭스와의 부착과 정착성능을 향상시키기 위하여 양 단부에 후크를 갖는 형상이다. 강섬유의 인장강도는 1,000 MPa 이상으로서 탄성계수는 206 GPa이다.

사용된 모래의 밀도는 2.54 g/cm^{3}이며 조립률은 2.97이다. 굵은골재로 이용된 최대직경 25 mm 이하 부순자갈의 밀도와 조립률은 각각 2.59 g/cm^{3}과 6.3이다.

2.3 시험체 제작 및 측정 방법

콘크리트는 용량 0.3 m^{3}의 강제식 팬 믹서기를 이용하여 비볐다. 섬유는 콘크리트의 습비빔 후 첨가하였다. 강섬유가 혼입된 콘크리트의 경우 유동성이 현저히 떨어져 섬유분산이 원활하게 되지 않아 폴리카르본산계 고성능 감수제를 시멘트 양 대비 0.33% 투입하였다.

콘크리트 초기슬럼프는 비빔직후 측정하였다. 굳은 콘크리트의 압축강도, 할렬인장강도 및 파괴계수 등은 재령 28일에서 KS 기준[16]의 절차에 따라 측정하였다. 파괴계수 측정 시 ASTM C1080[17]에서 제시하는 인성평가를 위해 Fig. 1(a)에 나타낸바와 같이 경간중앙에서 집중가력 하였으며, 가력점 위치에서 변위를 측정하였다. 지점

Table 2 Details of fibers used

Type	ρ_f (g/cm^3)	L_f (mm)	d_f (mm)	S_f	F_f (MPa)	E_f (MPa)
PVA	1.3	12	0.015	800	1,269	27,640
		15		1,000		
Steel	7.85	30	0.5	60	1,023	206,000
		60	0.73	82	1,220	

*Note) ρ_f, L_f, d_f, S_f, F_f, and E_f = density, nominal length, nominal diameter, aspect ratio, tensile strength and modulus of elasticity of fibers, respectively.

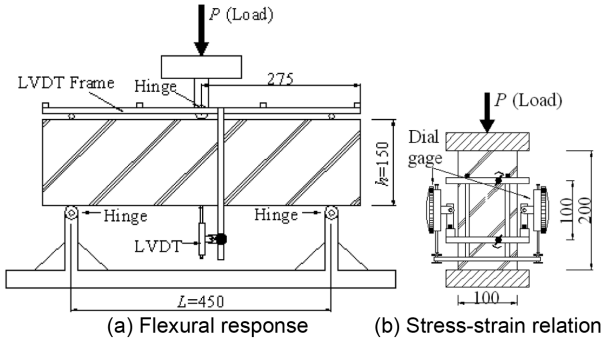


Fig. 1 Test setup

변위를 무시하기 위하여 변위계 고정 틀을 시험체 상부에 설치하였다. 탄성계수는 컴프레서미터가 설치된 ϕ100 × 200 mm 실린더(Fig. 1(b))에서 측정된 응력-변형률 관계에서 최대응력의 45%점에서의 할선계수[15]로부터 산정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

배합된 콘크리트의 초기 슬럼프 및 역학적 특성에 대한 결과를 Table 1에 요약하였다. 일반적으로 콘크리트의 할렬인장강도, 탄성계수 및 파괴계수는 콘크리트 압축강도의 함수로 표현되므로[1,5,18] 이 분석에서도 압축강도 거듭제곱근으로 무차원 한 역학적 특성들을 비교하였다. 또한 하이브리드 섬유콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 이 실험 결과들은 단일 PVA섬유 또는 강섬유 혼입 콘크리트에 대한 이전 연구 결과[15]와 비교하였다.

3.1 초기 슬럼프

섬유 없는 콘크리트의 초기 슬럼프($(S_l)_N$)에 대한 섬유보강 콘크리트의 초기 슬럼프(S_l)의 비를 Fig. 2에 나타내었다. 강섬유보강 콘크리트의 경우 고성능 감수제가 0.33% 첨가되었음에도 불구하고 섬유 없는 콘크리트에 비해 슬럼프가 낮았다. 섬유보강 콘크리트의 상대슬럼프는 섬유길이 및 체적비가 증가할수록 감소하였다. 섬유

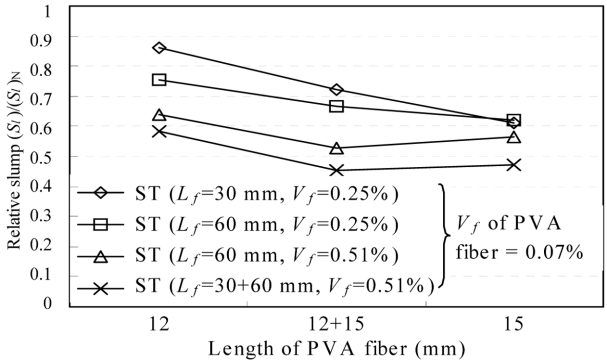


Fig. 2 Effect of volume fraction and length of fibers on the relative slump

길이 증가에 따른 슬럼프 감소기울기는 일반적으로 섬유체적비가 증가할수록 컸다. 이와 같이 섬유보강 콘크리트의 슬럼프는 골재의 크기, 섬유모양 및 섬유투입방법에 의해서도 영향을 받지만 섬유 형상비와 체적비에 의해 중요한 영향을 받는다.[19] 섬유체적비와 형상비의 곱인 등가 섬유비 ($\sum_{i=1}^{n}(V_f)_i(S_f)_i$)[19]와 상대 슬럼프의 관계를 Fig. 3에 나타내었는데, 여기서 n은 종류 및 형상비에 따라 분류되는 섬유 종수이며, i는 임의 형상비의 PVA섬유 또는 강섬유를 의미한다. 섬유보강 콘크리트의 상대 슬럼프는 등가 섬유비가 증가할수록 감소였다. 동일 등가 섬유비의 경우 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 슬럼프는 일반적으로 단일 강섬유 보강콘크리트에 비해 높은 반면 단일 PVA 섬유보강 콘크리트보다는 약간 낮았다.

3.2 28일 압축강도

Fig. 4에는 무보강 콘크리트의 압축강도($(f_{ck})_N$)에 대한 섬유보강 콘크리트의 압축강도 비(f_{ck})인 상대압축강도와 섬유길이 및 체적비의 관계를 나타내었다. 섬유보강 콘크리트의 상대압축강도는 섬유체적비가 증가할수록 그리고 섬유길이가 짧을수록 높았다. 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 섬유 혼입량, 섬유강도, 섬유의 선형성, 섬유의 부착특성, 섬유의 분포성 및 섬유길이에 의해 중요한 영향을 받는다.[20] 섬유체적비 및 부착강도의 증가는 횡인장 변형률에 대한 저항성을 증가시켜 콘크리트 압축강도 증가에 기여한다. 반면 콘크리트 최대 압축응력 시 하중방향을 따라 발생하는 미세균열들은 긴섬유보다는 짧은 섬유에 의해 효과적으로 제어되므로 섬유길이가 짧을수록 압축강도 증가에 유리하다.[8] 한편, 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 무보강 콘크리트에 비해 6~26% 증가하였는데, 짧은 섬유들의 하이브리드가 긴 섬유와 짧은 섬유의 하이브리드에 비해 강도증가에 유리하였다.

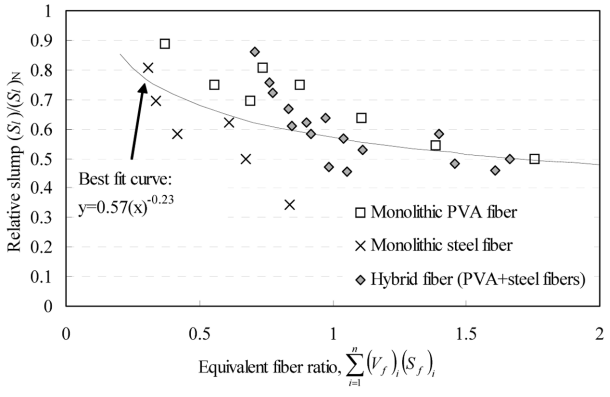


Fig. 3 Equivalent fiber ratio versus relative slump

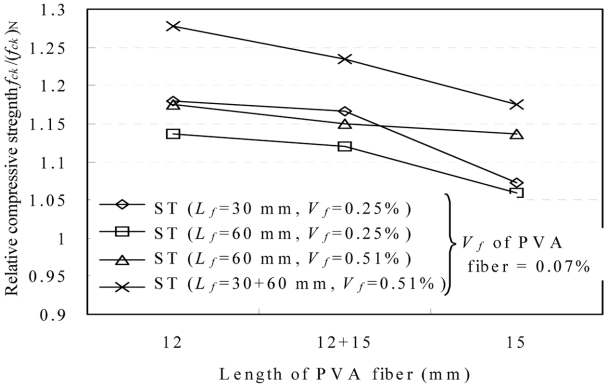


Fig. 4 Effect of volume fraction and length of fibers on the relative compressive strength

Beaudoin[20]은 섬유보강 콘크리트의 상대압축강도는 일반적으로 섬유간격($\sum_{i=1}^{n}(V_f)_i(d_f)_i/(L_f)_i$)의 선형함수로 나타낼 수 있음을 보였다. Fig. 5에는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 상대압축강도와 섬유간격의 관계를 나타내었다. 섬유간격이 증가할수록 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 거의 선형적으로 증가하는데, 그 증가기울기는 PVA섬유보강 콘크리트가 가장 컸다. 이는 친수성인 PVA섬유가 콘크리트 배합수를 흡수하여 수화반응을 위한 물-결합재비가 결과적으로 낮아졌기 때문이다.[13] 이로 인해 PVA 섬유와 강섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트의 압축강도 증가기울기는 강섬유로 단일 보강된 콘크리트에 비해 컸다. 일반적인 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도 증가율인 5~20%[20]에 비해 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도 증가율은 6~31%이었다.

3.3 할렬인장강도

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 무차원 할렬인장강도 ($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)에 대한 섬유길이와 체적비의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 섬유길이와 체적비의 증가와 함께 증가하였다. 하지만 긴 섬유와 짧은 섬유의 하이브리드 보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 긴섬유를 사용한 콘크리트보다 약간 낮았다.

섬유보강 콘크리트의 인장거동 특성은 섬유의 체적비,

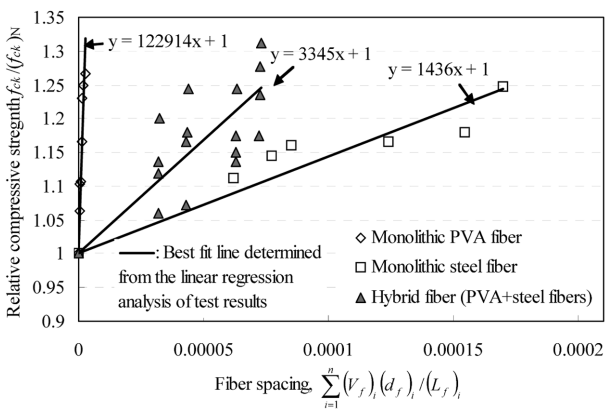


Fig. 5 Fiber spacing versus relative compressive strength

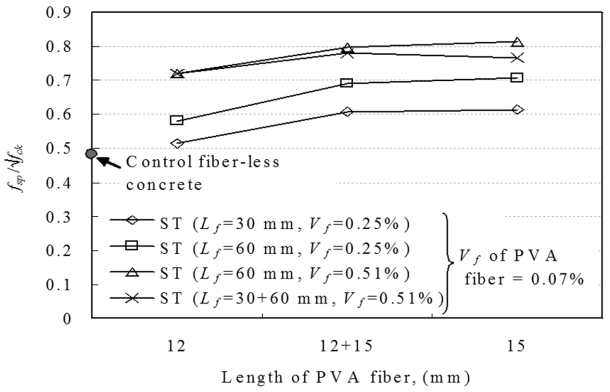


Fig. 6 Effect of volume fraction and length of fiber on $\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$

형상비, 계면접착강도 및 분포도 등에 의해 영향을 받는다.[20] Visalvanich and Naaman[21]는 이들 변수들의 영향을 섬유보강지수로 정의하여 $g\tau V_f L_f / d_f$로 나타내었는데, 여기서 g는 섬유 불연속성에 대한 계수이며 τ는 섬유의 계면접착강도이다. 이 연구에서는 무차원을 고려하여 하이브리드 섬유보강지수를 $\sum_{i=1}^{n} g_i \tau_i (V_f)_i (S_f)_i / \tau_0$로 정의하였는데, 여기서 τ_0(=1 MPa)는 기준 값이다. Fig. 7에는 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$와 섬유보강지수의 관계를 나타내었다. 동일 그림에 섬유없는 콘크리트[22]에서 제시된 할렬인장강도 예측모델을 함께 나타내었다. Visalvanich and Naaman[21]는 실험결과들의 회귀분석으로부터 강섬유 보강콘크리트의 $g\tau$는 4.55 MPa로 있음을 보였다. 한편 PVA 섬유보강 콘크리트에서 $g\tau$에 대한 유용한 연구는 거의 없다. Xu 등[23]은 실험 결과에 근거하여 PVA 섬유의 평균 $g\tau$를 1.19 MPa로 제시하였다. 섬유보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 섬유보강지수의 증가와 함께 증가하였는데, 섬유보강지수가 2.5 이상일 때 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 단일 강섬유 보강콘크리트와 비슷한 수준이었다. 한편 PVA 섬유보강 콘크리트의 할렬인장강도는 보통 콘크리트에 대한 Oluokun[22]의 제안값보다 낮았다. 하지만 하이브리드 섬유보강 및 강섬유 보강콘크리트의 할렬인장강도는 섬유보강지수가 1.6 이상이면 제안값보다 컸다.

3.4 파괴계수

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 파괴계수(f_r)는 할렬인장강도에서와 같이 섬유체적비 및 섬유길이가 증가할수록 증가하였다(Table 1). 섬유보강 콘크리트의 무차원 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)와 섬유보강지수의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 동일 그림에 섬유 없는 콘크리트의 파괴계수에 대한 ACI 318-08의 제안모델을 함께 나타내었다. 섬유보강 콘크리트의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 섬유보강지수가 1.1까지는 증가하지 않았다. 하지만 섬유보강지수가 1.5 이상에서는 섬유보강지수의 증가와 함께 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 증가하였다. 특히 하이브리드 섬유보강 콘크리트는 체적비 1.02%인 단일 강섬유보강 콘크리트에 비해 전체 섬유체적비가 현저히 낮음에도 단일 강섬유보강 콘크리트와 비슷한 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$를 보였다. 이는 길이가 비교적 짧은 PVA섬유는 휨 균열선단에서 균열진전을 효과적으로 제어하고 길이가 긴 강섬유는 균열 폭의 넓어짐에 저항하여 콘크리트의 휨 인장응력을 크게 향상시켰기 때문이다.[7-10]

3.5 탄성계수

하이브리드 섬유보강 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 섬유길이에 거의 영향을 받지 않았다(Table 1). Fig. 9에는 콘크리트의 무차원 탄성계수($E_c/\sqrt{f_{ck}}$)와 섬유보강지수의 관계를 나타내었다. 섬유보강 콘크리트의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 섬유보강지수의 증가와 함께 약간 증가하는데, PVA 섬유보다는 강섬유보강 콘크리트에서 높았다. 이는 강섬유의 높은 탄성계수의 영향 때문이라 판단된다. 한편 이 실험에서 측정된 섬유보강 콘크리트의 탄성계수는 ACI 318-08의 제안모델에 의한 예측값보다 컸다.

3.6 응력-변형률 관계

Fig. 10에는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 응력-변형률 관계를 나타내었다. 비교를 위해 섬유없는 콘크리트 및 단일 PVA 또는 강섬유로 보강된 콘크리트의 응력

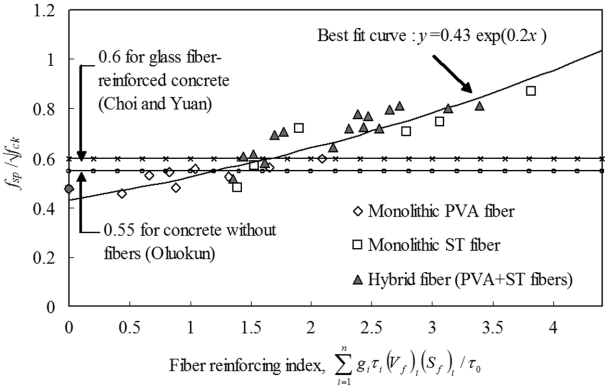


Fig. 7 Fiber reinforcing index versus $\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$

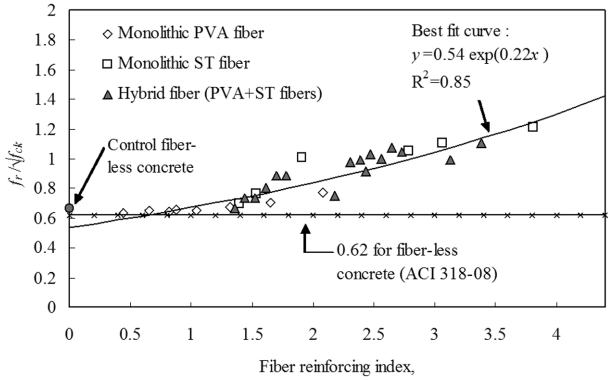


Fig. 8 Fiber reinforcing index versus $\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$

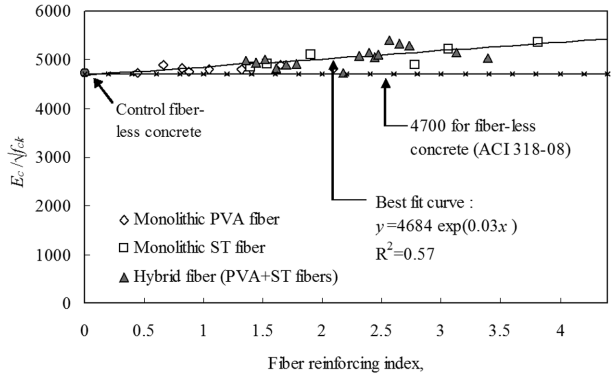
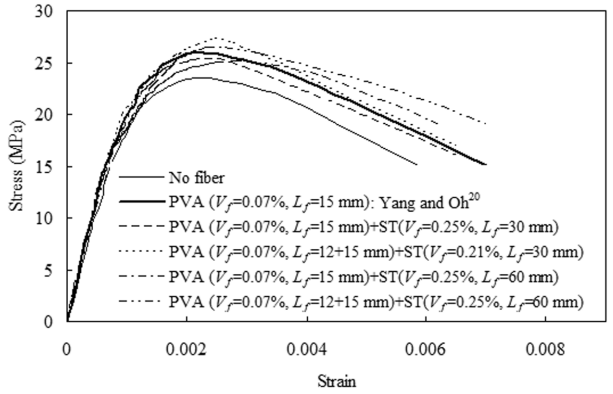
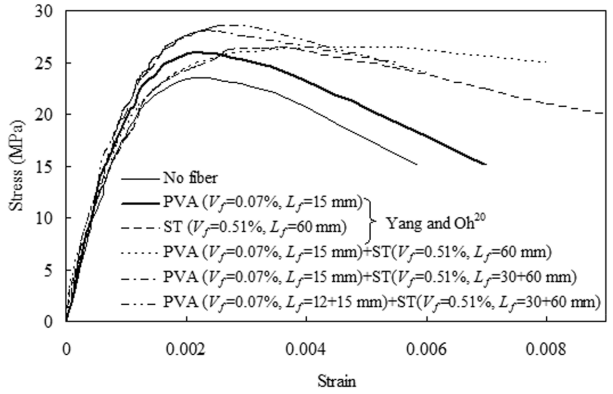


Fig. 9 Fiber reinforcing index versus $\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$



(a) Volume fraction of steel fiber = 0.25%



(b) Volume fraction of steel fiber = 0.51%

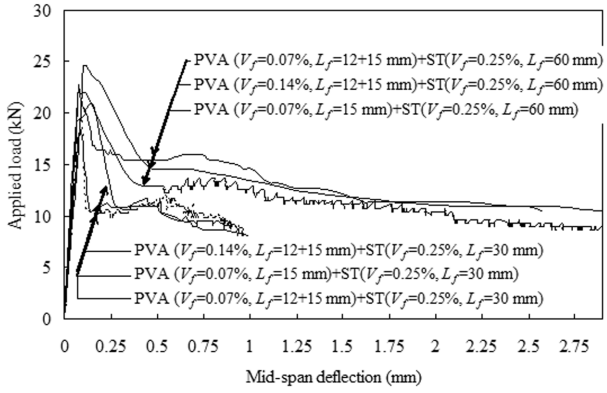
Fig. 10 Typical stress-strain curves of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete

-변형률 관계[20]를 함께 나타내었다. 강섬유 체적비가 0.25%인 경우 PVA 섬유의 혼입 및 길이에 관계없이 최대응력 이후 하강기울기는 섬유없는 콘크리트와 거의 비슷하였다. 하지만 강섬유 길이가 60 mm인 경우에는 콘크리트 최대응력 시 변형률이 섬유없는 콘크리트에 비해 약간 증가하였다. 한편 강섬유 체적비가 0.51%인 콘크리트의 응력-변형률 관계는 섬유없는 콘크리트 또는 PVA섬유만 혼입된 콘크리트에 비해 현저히 연성적으로 변하였다. 특히 PVA섬유와 하이브리드로 혼입된 경우 단일섬유로만 보강된 콘크리트에 비해 최대응력 시 변형률은 증가하며 최대응력 이후 하강기울기도 완만하였다. 하지만 강섬유 길이의 30 mm와 60 mm의 하이브리드는 60 mm만을 사용한 경우에 비해 최대응력 이후 비교적 덜 연성적거동을 보였다.

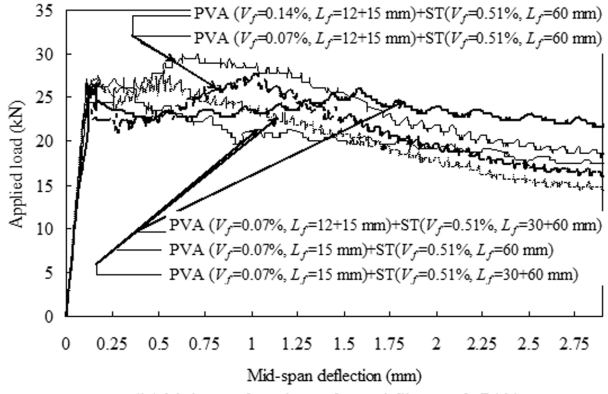
3.7 하중-변위 관계

Fig. 11에는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 하중-변위 관계를 나타내었다. 섬유없는 콘크리트는 휨 균열 발생과 함께 급격한 취성파괴를 보여 최대내력 이후 실험데이터를 얻지 못했다. 강섬유 체적비가 0.25%인 경우 휨 균열발생과 함께 급격한 내력저하가 발생하였으며 최대내력의 50~65% 하중을 유지하며 변위가 증가하였다. 이때 최대내력 이후의 거동은 PVA 섬유 체적비 및 길이에 거의 영향을 받지 않았지만 강섬유 길이가 30 mm보다는 60 mm에서 더 큰 연화거동을 보였다. 한편 강섬유 체적비가 0.51%인 콘크리트는 최대내력 이후 급격한 하중감소 현상이 보이지 않으며 섬유 체적비 0.25%인 경우에 비해 현저히 연성이 증가하였다. 특히, 강섬유 길이가 60 mm이고 PVA섬유길이가 12 mm와 15 mm가 동시에 혼입된 콘크리트에서는 휨 균열 발생 이후 경화현상을 보이면서 내력이 점차 증가하였다. 길이가 비교적 짧은 PVA 섬유는 휨 균열 진전을 제어함으로서 휨 연성 향상에 기여한다고 판단된다.[10]

Figs. 10 및 11로부터 콘크리트의 연성증가를 위해서는



(a) Volume fraction of steel fiber = 0.25%



(b) Volume fraction of steel fiber = 0.51%

Fig. 11 Load-deflection relationship of hybrid steel-PVA fiber reinforced concrete

강섬유가 PVA섬유보다 유리한데, 강섬유 체적비는 0.5% 이상이 요구되며 30 mm보다는 60 mm의 사용이 효율적이다. 더구나 강섬유와 함께 PVA 섬유의 하이브리드는 콘크리트 유동성 감소를 완하하며 미세균열제어를 통한 경화거동 유도에 효과적이다.

3.8 휨 인성지수

섬유보강 콘크리트의 휨 연성을 평가하기 위하여 Fig. 12에 나타낸 ASTM C1018[17]의 인성지수를 이용하였다.

Fig. 12에서 면적 A는 휨 균열 발생에서 소산되는 에너지이며, 면적 B, (B + C) 및 (B + C + D)는 각각 최초 휨균열 발생 시 처짐 (δ_c)의 3배, 5.5배 및 15.5배인 처짐에서 소산되는 에너지이다. Fig. 12로부터 산정된 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 인성지수들을 Table 1 및 Fig. 13에 나타내었다. PVA섬유와 함께 길이가 30 mm이고 체적비가 0.25%인 강섬유가 혼입된 콘크리트 보는 처짐이 15.5δ_c에 도달하기 전에 파괴하여 I_{30}을 측정하지 못하였다. 일반적으로 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 연성지수는 섬유보강지수의 증가와 함께 증가하였다. 이때 증가기울기는 I_{30}에서 가장 크고, I_5에서 가장 작았다. 이는 섬유보강지수가 클수록 5.5δ_c 이후에도 연성거동을 보임을 의미한다. 강섬유의 길이가 휨 연성지수에 미치는 영향도 뚜렷하였다. 강섬유 길이가 길수록 그리고 30 mm와 60 mm 강섬유의 혼용보다는 60 mm 강섬유만 이용하는 것이 I_{10} 및 I_{30} 증가에 유리하였다.

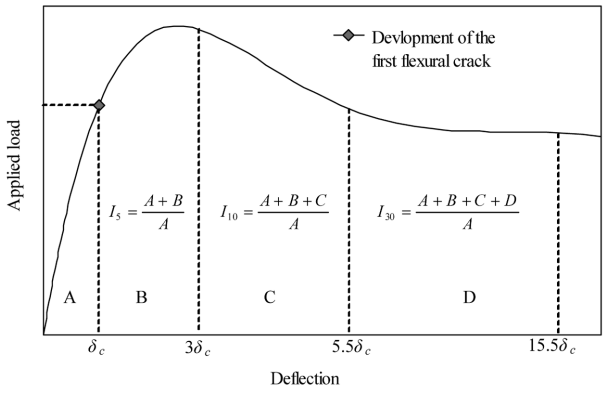


Fig. 12 Flexural toughness index specified in ASTM C1018

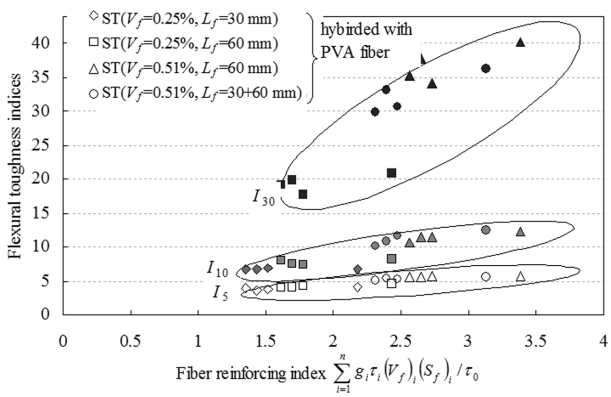


Fig. 13 Fiber reinforcing index versus toughness index

4. 결 론

PVA섬유와 강섬유의 체적비가 0.65% 이하인 보통 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성들에 대한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 상대슬럼프는 섬유체적비와 형상비의 곱인 등가 섬유비가 증가할수록 감소였다. 동일 등가 섬유비의 경우 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 슬럼프는 단일 섬유보강 콘크리트에 비해 높았다.
2) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 상대압축강도는 섬유체적비가 증가할수록 그리고 섬유길이가 짧을수록 높았다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도 증가기울기는 강섬유로 단일 보강된 콘크리트에 비해 컸는데, 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 무보강 콘크리트에 비해 6~31% 증가하였다.
3) 섬유보강 콘크리트의 압축강도 거듭제곱근에 대한 할렬인장강도 비($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 섬유보강지수의 증가와 함께 증가하였는데, 섬유보강지수가 2.5 이상일 때 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 섬유체적비가 낮더라도 단일 강섬유보강 콘크리트와 비슷한 수준이었다.
4) 섬유보강 콘크리트의 압축강도 거듭제곱근에 대한 파괴계수 비($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)는 섬유보강지수가 1.5 이상일 때 섬유보강지수의 증가와 함께 증가하였다. 특히 전체 섬유체적비가 0.65%인 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 체적비 1.02%인 단일 강섬유보강콘크리트와 비슷하였다.
5) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 응력-변형률 관계는 PVA섬유보다는 강섬유 체적비와 길이에 더 큰 영향을 받았는데, 강섬유 체적비와 길이가 클수록 최대응력 시 변형률이 증가하고 최대응력 이후 하강기울기도 완만하였다.
6) 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 연성은 섬유보강지수의 증가와 함께 증가하는데, 강섬유의 길이가 길수록 그리고 30 mm와 60 mm 강섬유의 혼용보다는 60 mm 강섬유만을 이용하는 것이 연성향상에 유리하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년 교육과학기술부(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단) 및 국립문화재연구소 전통건축기술개발연구사업의 지원에 의하여 연구되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 544, “Fiber Reinforced Concrete,” ACI Special Publication SP-81, American Concrete Institute, 1984.
2. Snyder, M. L. and Lankard, D. R., “Factors Affecting the Strength of Steel Fibrous Concrete,” *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 69, No. 2, 1972, pp. 96~100.
3. Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I., and Mobasher, B., “Toughness-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Systems,” *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 5, 1988, pp. 352~360.
4. Balaguru, P. and Shah, S., “Fiber Reinforced Cement Composites,” McGraw Hill, 1992.
5. 철근콘크리트분과위원회, 섬유보강콘크리트, 기술보고서 ATR 97-2, 대한건축학회, 1997.
6. Quan, C. X. and Stroeven, P., “Fracture Properties of Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fibres,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 4, 2000, pp. 343~353.
7. Ahmed, S. F. U. and maalej, M., “Tensile Strain Hardening Behaviour of Hybrid Steel-Polyethylene Fibre Reinforced Cementitious Composites,” *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 1, 2009, pp. 96~106.
8. 원종필, 박찬기, “하이브리드 섬유보강 콘크리트의 특성 및 적용,” 콘크리트학회지, 18권, 1호, 2006, pp. 22~27.
9. Yao, U., Li, J., and Wu, K., “Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Fraction,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 1, 2003, pp. 27~30.
10. Lawler, J. S., “Hybrid Fiber Reinforcement in Mortar and Concrete,” Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Northwestern University, USA, 2001.
11. Johnston, C. D., “Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete-A Review of Mechanical Properties,” Fiber Reinforced Concrete, SP-44, *ACI*, 1974, pp. 127~142.
12. Song, P. S. and Hwang, S., “Mechanical Properties of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete,” *Construction and Building Materials*, Vol. 18, No. 9, 2004, pp. 669~673.
13. Arisoy, B. and Wu, H. C., “Material Characteristics of High Performance Lightweight Concrete Reinforced with PVA,” *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 4, 2008, pp. 635~645.
14. 김무한, 김재환, 김용로, 김영덕, “마이크로 및 매크로 섬유에 의해 보강된 고인성 시멘트 복합재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 17권, 2호, 2005, pp. 263~271.
15. 양근혁, 오승진, “섬유보강 콘크리트의 역학적특성에 대한 섬유체적비와 길이의 영향,” 한국건축시공학회 논문집, 8권, 1호, 2008, pp. 43-48.
16. 한국공업표준협회, KS 규준안: KS F 2405, KS F 2423, KS F 2408, 2006.
17. ASTM C1018, Standard Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (using beam with third-point loading), American Society for Testing and Materials, 2006.
18. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08), American Concrete Institute, 2008.
19. Hannant, D. J., *Fibre Cements and Fibre Concrete*, John Wiley & Sons, UK, 1978.
20. Beaudoin, J. J., *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete*: *Principles, Properties, Developments and Applications*, Noyes Publications, 1990.
21. Visalvanich, K. and Naaman, A. E., “Fracture Model for Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Journal*, Vol. 80, No. 2, 1983, pp. 128~138.
22. Oluokun, F. A., “Prediction of Concrete Tensile Strength from its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 3, 1991, pp. 302~309.
23. Xu, G., Magnani, S., and Hannant, D. J., “Tensile Behavior of Fiber-Cement Hybrid Composites Containing Polyvinyl Alcohol Fiber Yarns,” *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 6, 1998, pp. 667~674.

요 약 콘크리트의 슬럼프와 역학적특성에 대한 마이크로 섬유와 매크로 섬유의 영향을 파악하기 위하여 강섬유와 PVA 섬유로 하이브리드 보강된 콘크리트 16배합과 무보강 콘크리트 1배합을 실험하였다. 주요 변수는 강섬유와 PVA 섬유의 체적비 및 길이이다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적특성들은 섬유보강지수에 따라 분석되었으며, 강섬유 또는 PVA 섬유만으로 보강된 콘크리트와 비교하였다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 슬럼프는 섬유 체적비와 형상비 증가와 함께 감소하였으며, 할렬인장강도, 파괴계수, 탄성계수 및 휨 인성지수는 섬유보강지수의 증가와 함께 증가하였다. 단일 섬유보강 콘크리트의 섬유체적비에 비해 낮은 체적비를 갖는 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 파괴계수와 휨 인성지수는 단일 섬유보강 콘크리트에 비해 높았다. 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 휨 인성 향상을 위해서는 30 mm와 60 mm 길이의 강섬유를 함께 사용하는 것보다는 60 mm 강섬유만을 사용하는 것이 효율적이었다.

핵심용어 : 하이브리드 섬유보강 콘크리트, 슬럼프, 역학적특성, 섬유보강지수, 인성