

강섬유 혼입율이 강섬유보강 고강도 콘크리트의 작업성과 강도특성에 미치는 영향

Influence of Steel Fiber Volume Ratios on Workability and Strength Characteristics of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete

김 윤 일* 이 양 근** 김 명 성***
Kim, Yoon-IL Lee, Yang-Keun Kim, Myung-Sung

Abstract

In this paper, concrete material tests were carried out to investigate influence of steel fiber volumn ratios on variations of workability and strength characteristics of steel fiber reinforced high-strength concrete, 50MPa ~ 90MPa of compressive strength, according to increase of fiber volume. Test specimens were arranged with six levels of concrete compressive strength and fiber volumn ratios, 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%.

The test results showed that steel fiber reinforced high-strength concrete(70MPa ~ 90MPa,1.5% fiber volumn ratio) with good workability of slump 20cm could be used practically and effects of steel fiber reinforcement in improvement of concrete strength and toughness characteristics such as splitting tensile strength, flexural strength, and diagonal tensioned shear strength, were more distinguished in high-strength concrete than general strength concrete.

And the test results indicated that splitting tensile strength of fiber reinforced concrete was proportioned to the product of steel fiber volumn ratios, $V_f(\%)$ and sqare root of compressive strength, $\sqrt{f_{ck}}$, and the increasing rate was in contrast with that of flexural strength, and increase of diagonal tensioned shear strength was remarkable at steel fiber volumn ratio, 0.5%

키워드 : 강섬유 보강 콘크리트, 고강도 콘크리트, 쪼갬인장강도, 휨강도, 휨인성, 사인장 전단강도
Key words : Steel-fiber Reinforced Concrete, High-strength Concrete, Splitting Tensile Strength, Flexural Strength, Flexural Toughness, Diagonal Tensioned Shear Strength

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

콘크리트 기술의 발달로 50MPa~100MPa 정도의 압축강도를 갖는 고강도 콘크리트의 사용이 점점 늘어가고 있다. 그러나 이와 같이 콘크리트 부재가 고강도화 되면서 상대적으로 단면 치수는 작아지지만 콘크리트 재료의 취성적 성질이 더욱 두드러지게 나타나고, 이에 따라 에너지 흡수 능력은 더욱 낮아지는 단점을 보이게 된다. 이러한 단점을 해결하기 위한 방법으로 강섬유를 적절히 혼입한 강섬유보강 고강도 콘크리트를 사용한다.

불연속적이며 단상인 강섬유질 재료를 콘크리트 속에 불규칙적으로 분산시켜서 잘 섞어 넣었을 때, 콘크리트의 인장저항

능력이 크게 향상되고 이로 인하여 국부적인 균열의 생성이나 성장이 억제된다. 이러한 강섬유의 보강효과에 의하여 콘크리트의 전단강도와 연성능력이 증가하게 된다. 또한 보통콘크리트에 비하여 충격강도가 매우 크고 휨파괴와 피로파괴에 대한 저항능력이 증가하는 등 많은 장점이 있다. 그러나 콘크리트 타설시에 작업성이 저하되고, 재료의 분리가 생길 위험성이 있다. 특히 콘크리트 중에 강섬유가 서로 엉켜 섬유뭉침 현상이 생기면 강섬유 혼입의 효과가 현저하게 떨어지게 된다.^{7,8)}

지난 30여년 동안 강섬유보강 콘크리트의 적용과 효과에 대한 많은 연구가 이루어 졌다. 특히 휨보강 효과와 전단보강 효과에 관한 많은 실험과 해석적 연구가 수행되어 해석 모델과 강도예측식들이 제안 되었다.^{1,5,9,11,12,13,15)} 이러한 강도예측식들은 대부분 실험적 결과에 근거하고 있으며, 일부는 압축장 이론 등에 따라 순수 이론해석 모델을 제시하였다.¹⁶⁾

기존의 실험연구에 따르면,⁷⁾ 강섬유콘크리트의 압축강도는 일반적으로 강섬유보강과 특별한 상관관계가 없으며, 쪼갬 인

* 관동대학교 건축학부 교수
** 관동대학교 대학원 박사과정, 강원도개발공사 이사
*** 관동대학교 대학원 석사과정 졸업, (주) 한국구조안전기술원

장강도와 휨강도는 강섬유 혼입율에 비례하는 것으로 알려졌다. 또한 강섬유로 보강하므로써 콘크리트의 초기균열 전단강도와 최대전단강도가 크게 증가하고, 체적비로 대략 1.0%~1.5%의 강섬유 혼입이 적절한 것으로 평가하고 있다.^{5,9)} 그렇지만 체적비 0.5%의 강섬유 혼입만으로도 고강도 콘크리트 보에서 전단 파괴를 방지할 수 있다는 연구가 제시되었다.^{1,9)}

압축강도 50MPa~100MPa의 강섬유보강 고강도 콘크리트를 실용화하기 위해서는 우선적으로 콘크리트 타설 작업이 용이한 슬럼프나 유동성을 갖는 다량의 콘크리트를 제조 할 수 있어야 한다. 또한 강섬유의 혼입량을 증가시킬 때 콘크리트 작업성의 변화, 인장강도, 휨강도, 휨인성, 전단강도와 같은 강도특성의 변화를 잘 알아야 한다.

그러나 강섬유 혼입율(체적비, 0.0%~2.0%)과 압축강도 수준에 따라 강섬유보강 고강도콘크리트의 강도특성이 어떻게 변화되는 지에 대한 상세한 실험 연구가 부족하다. 또한 강섬유 혼입율 1.5%, 압축강도 80MPa~100MPa의 강섬유보강 고강도콘크리트를 현장타설 하기 위한 기초연구가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 강섬유 혼입율의 변화가 강섬유보강 고강도콘크리트의 강도특성에 어떻게 영향을 주는지 보다 상세한 실험적 자료를 제공하고자 한다.

강섬유보강 콘크리트에 대한 지금까지의 연구 성과로 볼 때 이러한 강도특성의 상세한 변화는 아직 이론화 되지 못하는 것으로 사료되며 이는 추후 연구과제로 생각한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 강섬유보강 고강도 콘크리트에 대한 기초 연구로서, 강섬유 혼입량을 체적비로 0.5%~2.0%까지 증가시킬 때 콘크리트의 압축강도 수준에 따라 콘크리트의 작업성과 강도 특성이 어떻게 변화되는 지를 밝히기 위한 실험을 내용으로 한다.

시험체는 배합강도가 대략 30MPa인 일반강도 콘크리트와 배합강도가 대략 50MPa에서 90MPa 사이의 고강도 콘크리트 5 종류로 만들어진 시험체 시리즈로 계획하였다. 이들 각각을 강섬유 혼입량에 따라 5개의 콘크리트로 다시 나누어 총 30 종류의 콘크리트를 제작하였고, 슬럼프 시험과 흐름시험, 압축강도시험, 쪼갬인장강도시험, 휨강도시험을 실시하였다.

또한 전단스팬(a)과 보 춤(d)의 비율이 1.45인 전단력이 지배적인 짧은 보를 제작하여서 가력되는 두 힘의 대각 선상에 나타나는 사인장 전단균열 파괴를 통하여 전단강도 시험을 실시하였다.

2. 강섬유보강 고강도 콘크리트의 제조

2.1 재료 및 배합설계

사용된 시멘트는 국내산 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은골재 최대치수는 13mm이다. 혼화제로는 강섬유보강 콘크리트의 유동성 증진을 위해 국내 J사의 나프탈린계 고성능 감수제와 K사의 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 시험체의 배합강도(fcr)를 30MPa, 50MPa, 60MPa, 70MPa, 80MPa, 90MPa로 하고, 강섬유 양은 체적비율로 각각 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%를 혼입 하였으며, 콘크리트 배합은 표 1과 같다.

강섬유는 국내 C사의 갈고리형(hooked end) 강섬유로서 표 2에서 보는 바와 같은 형상비가 60인 것을 사용하였다.

표 1. 콘크리트 배합

배합 강도 fcr (MPa)	물 시멘트비 (%)	진골재율 (%)	단위중량(N/m³)				고성능 감수제		
			물	시멘트	모래	자갈	혼입율 (%)	혼입량 (N/m³)	종류
30	50	60	2,185	4,371	9,408	6,419	0.8	35.0	나프탈린계
50	35	45	2,215	6,331	6,292	7,830	0.8	50.7	
							1.2	76.4	
60	33	50	2,156	6,537	7,575	9,624	1.0	65.4	폴리카본산계
70	30	63	1,999	6,664	9,006	5,410	1.0	66.6	
80	28	63	2,117	7,556	8,722	5,165	1.5	112.7	
90	27	63	2,038	7,556	8,438	49,59	1.5	112.7	

* 강섬유 혼입량 2%인 시험체의 혼화제 혼입율

표 2. 강섬유의 제원

형상	길이 (mm)	직경 (mm)	형상비	비중	비 고
갈고리형	30	0.5	60	7.85	배합강도 50,80 MPa
	36	0.6			배합강도 30,60,70,90 MPa

2.2 공시체 제작 및 시험방법

콘크리트는 실험실에서 강제식 믹서기를 사용하여 제조하였다. 압축강도와 쪼갬인장강도 시험을 위해 지름 100mm, 높이 200mm의 원통형 공시체를 사용하였고, 휨강도 시험용 보의 치수는 150×150×600mm, 전단강도 시험용의 보의 치수는 120×200×950mm인 시험체를 제작하였으며, 모든 공시체와 보 시험체는 수증양생 또는 습윤양생을 하였다.

휨강도 시험과 전단강도 시험은 3등분점의 2점가력으로 시험하였고, 시험체 중앙의 변위를 측정하기 위해 LVDT를 양쪽에 설치하였다.

쪼갬인장강도 시험은 KS F 2423에 따라 수증양생 후 시험할 때까지 젖은 모포로 덮어 습윤 상태를 유지하였고, 재하속

도는 매분 1.0~1.5 MPa의 일정한 비율로 계속적으로 충격없이 하중을 가하여 시험하였다.

3. 슬럼프 값에 대한 강섬유 혼입율의 영향

그림 1은 강섬유 혼입량의 증가에 따라 슬럼프 값의 감소 추세를 시험체 시리즈 별로 나타낸 것이다. 여기서 보면 슬럼프 값의 감소는 강섬유의 혼입량의 증가에 거의 반비례적으로 나타났다.

f_{cr} 30 시리즈, f_{cr} 50 시리즈, f_{cr} 60 시리즈 시험체들은 나프탈린계 고성능감수제를 사용하였다. 그림 1과 표 3에서 보는 바와 같이 일반강도인 f_{cr} 30 시리즈 시험체는 강섬유 혼입량이 2.0%일 때에도 15cm 이상의 슬럼프 값을 얻을 수 있었다. 그러나 고강도인 f_{cr} 50 시리즈와 f_{cr} 60 시리즈 시험체에서는 강섬유 혼입량이 1.0%일 때 슬럼프 값이 크게 작아져 각각 11cm와 14cm를 나타냈고, 1.5%일 때에는 슬럼프 값이 더욱

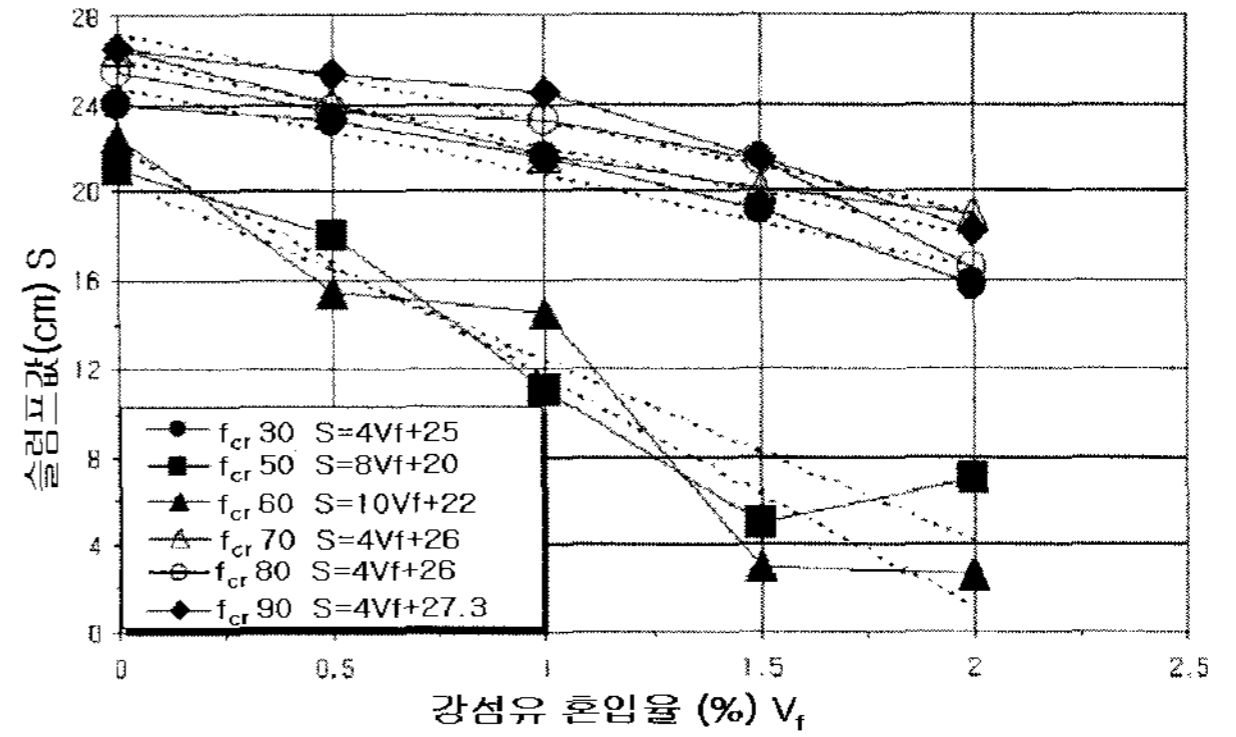


그림 1. 강섬유 혼입량에 따른 콘크리트 슬럼프값의 변화

급격히 감소하여 각각 5cm와 3cm를 보였다.

이를 그림 1에 표기한 회귀분석식($S-V_f$ 상관식)의 감소 추세선의 기울기로 보면, 일반강도 콘크리트인 f_{cr} 30 시리즈 시험체에서는 -4.1 이지만 고강도 콘크리트인 f_{cr} 50 시리즈와 f_{cr} 60 시리즈 시험체에서는 각각 -8.2와 -10.4로 상당히 급

표 3. 슬럼프 시험 및 강도 시험 결과

시험체 시리즈*	시험체명	강섬유 혼입율 (%)	슬럼프 (cm)	압축강도		조깅인장강도		휨강도	
				강도 (MPa)	증가율	강도 (MPa)	증가율	강도 (MPa)	증가율
f_{cr} 30	30-Plain	0	24.0	34.40	1.00	3.23	1.00	3.76	1.00
	30F-0.5	0.5	23.2	25.68	0.75	3.43	1.08	3.78	1.00
	30F-1.0	1.0	21.5	25.28	0.74	4.51	1.41	4.37	1.16
	30F-1.5	1.5	19.2	23.81	0.69	4.51	1.39	5.94	1.57
	30F-2.0	2.0	15.8	28.71	0.84	4.90	1.51	6.74	1.79
f_{cr} 50	50-Plain	0	21.0	43.51	1.00	4.51	1.00	6.08	1.00
	50F-0.5	0.5	18.0	54.00	1.24	6.86	1.52	6.15	1.01
	50F-1.0	1.0	11.0	53.41	1.23	8.04	1.79	8.23	1.35
	50F-1.5	1.5	5.0	64.29	1.48	9.60	2.13	9.72	1.60
	50F-2.0	2.0	7.0	63.60	1.46	9.51	2.12	10.20	1.67
f_{cr} 60	60-Plain	0	22.5	63.25	1.00	5.43	1.00	-	-
	60F-0.5	0.5	15.5	57.76	0.91	7.29	1.34	-	-
	60F-1.0	1.0	14.5	61.45	0.97	9.10	1.68	-	-
	60F-1.5	1.5	3.0	60.61	0.96	10.63	1.96	-	-
	60F-2.0	2.0	2.6	62.32	0.99	10.66	1.96	-	-
f_{cr} 70	70-Plain	0	26.5	65.34	1.00	5.59	1.00	7.34	1.00
	70F-0.5	0.5	24.0	70.48	1.08	7.06	1.26	7.75	1.05
	70F-1.0	1.0	21.6	67.34	1.03	8.13	1.45	8.71	1.18
	70F-1.5	1.5	20.1	67.25	1.03	8.02	1.43	10.77	1.46
	70F-2.0	2.0	19.0	69.56	1.07	10.68	1.91	12.75	1.73
f_{cr} 80	80-Plain	0	25.5	74.00	1.00	6.27	1.00	-	-
	80F-0.5	0.5	23.6	82.32	1.11	8.13	1.29	-	-
	80F-1.0	1.0	23.2	81.05	1.09	9.80	1.57	-	-
	80F-1.5	1.5	21.4	86.14	1.17	11.56	1.84	-	-
	80F-2.0	2.0	16.5	82.03	1.11	12.25	1.96	-	-
f_{cr} 90	90-Plain	0	26.5	85.24	1.00	6.10	1.00	-	-
	90F-0.5	0.5	25.3	86.10	1.01	8.43	1.38	-	-
	90F-1.0	1.0	24.5	89.40	1.05	9.94	1.63	-	-
	90F-1.5	1.5	21.5	82.71	0.97	10.90	1.79	-	-
	90F-2.0	2.0	18.2	82.92	1.06	11.65	1.91	-	-

* 시험체 시리즈는 콘크리트 배합강도 수준에 따라 분류되었음.

격하게 내려간다. 그러나 표 1과 표 3에서 보듯이 폴리카보산계의 고성능감수제를 사용할 때에는 $f_{cr} 70$, $f_{cr} 80$, $f_{cr} 90$ 시리즈 시험체들과 같이 압축강도가 70MPa~90MPa인 고강도 콘크리트에 강섬유 양을 2.0%까지 혼입하여도 슬럼프 값을 16.5cm에서 19cm까지 얻을 수 있었다.

이상의 측정결과로 보면, 압축강도가 70MPa~90MPa이고 강섬유 혼입량이 1.5%~2.0%일 때에도 작업성이 좋은 강섬유보강 고강도 콘크리트를 제조할 수 있음을 확인하였다. 따라서 배합설계에서 시멘트양이나 잔골재율, 굵은골재 최대치수를 적절히 결정하고, 고성능 감수제의 선택과 양의 조절을 보다 정교하고 기술적으로 한다면 작업성이 좋은 양질의 강섬유보강 고강도 콘크리트를 대량으로 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 강도 특성에 대한 강섬유 혼입율의 영향

4.1 압축강도

지금까지의 많은 실험연구 결과로 보면 강섬유 보강은 콘크리트의 압축강도를 증진시키지 않는 것으로 알려졌으며,⁷⁾ 이 연구의 실험에서도 압축강도 시험결과가 일정치 않게 나타났다.

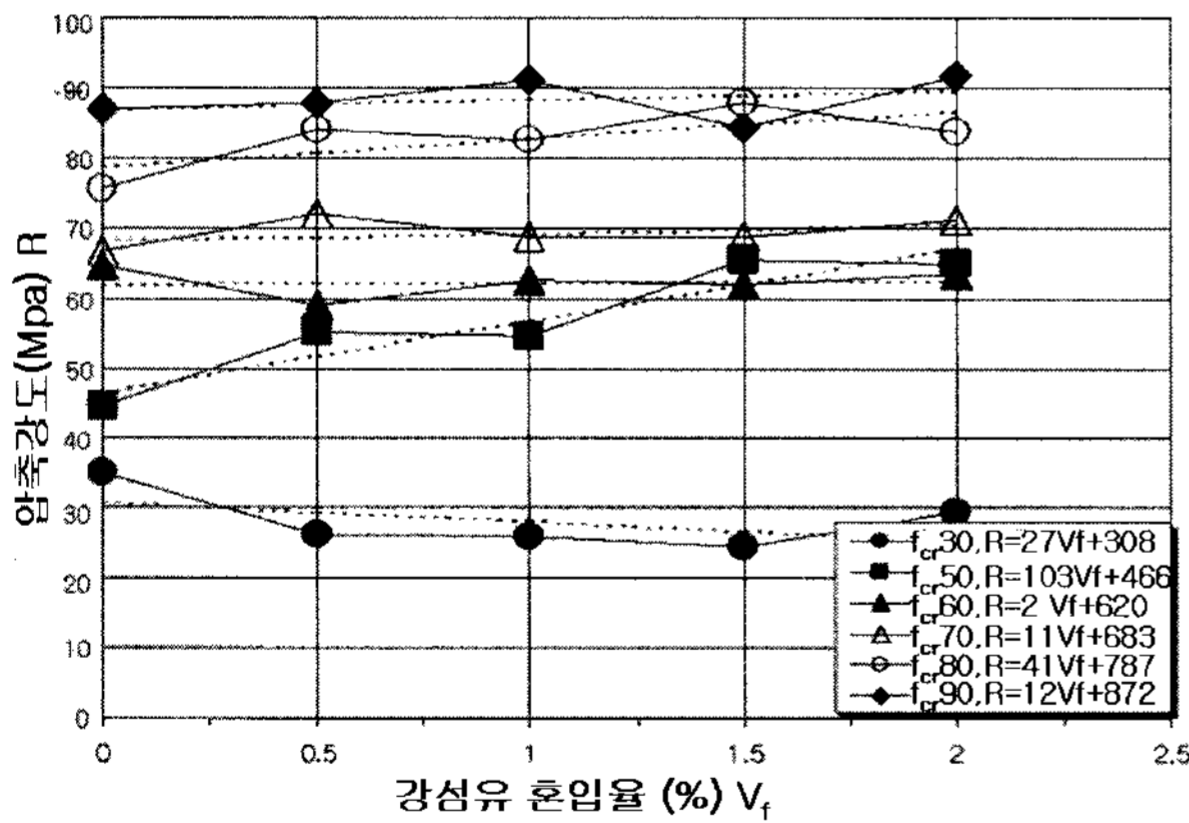


그림 2. 강섬유 혼입량 증가에 따른 압축강도의 변화

표 3과 그림 2에서 보는 바와 같이 $f_{cr} 50$ 시리즈 시험체에서는 강섬유 혼입량이 증가할수록 압축강도가 증가한 것으로 나타났다. 강섬유 혼입량이 1%일 때는 압축강도가 23% 증가되었고, 강섬유 혼입량이 2%일 때에는 압축강도가 46% 증가되었다.

그러나 $f_{cr} 30$ 시리즈 시험체에서는 강섬유보강 콘크리트의 압축강도가 일반콘크리트의 압축강도 보다 오히려 감소한 것으로 나타났다. 이는 강섬유를 전혀 혼입하지 않은 무보강 콘

크리트가 특별히 잘 제작된 것에 기인하는 것으로 사료된다.

$f_{cr} 80$ 시리즈 시험체에서는 강섬유 혼입량이 2%일 때에도 11%의 압축강도 증가를 보일 뿐 이었고, $f_{cr} 60$ 시리즈, $f_{cr} 70$ 시리즈, $f_{cr} 90$ 시리즈 시험체들에서는 강섬유의 혼입량을 증가시켰어도 압축강도는 거의 변화되지 않았다.

이상의 시험결과에서 보면 압축강도는 강섬유 혼입량의 증가와 일정한 상관관계로 변화되지 않으며, 강섬유 보강이 압축강도를 증진 시킨다고 볼 수 없음을 확인 할 수 있었다.

4.2 쪼갬 인장강도

강섬유를 혼입하지 않은 콘크리트는 최대하중에 이른 후에 중앙부에 균열이 커지면서 완전히 반으로 갈라졌다. 그러나 강섬유를 혼입한 콘크리트는 중앙부의 수직균열이 커지고 주변에 미세한 균열들이 발생은 하였으나 반으로 갈라지는 현상은 나타나지 않았다. 쪼갬인장강도는 강섬유 혼입량의 증가에 따라 거의 비례적으로 증가하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 일반강도인 $f_{cr} 30$ 시리즈 시험체에서는 강섬유 혼입량의 증가에 따라 쪼갬인장강도가 증가되는 비율이 비교적 완만하게 나타났다. 그러나 고강도 콘크리트인 $f_{cr} 50$ 시리즈~ $f_{cr} 90$ 시리즈 시험체들에서는 그 증가율이 크게 나타났다.

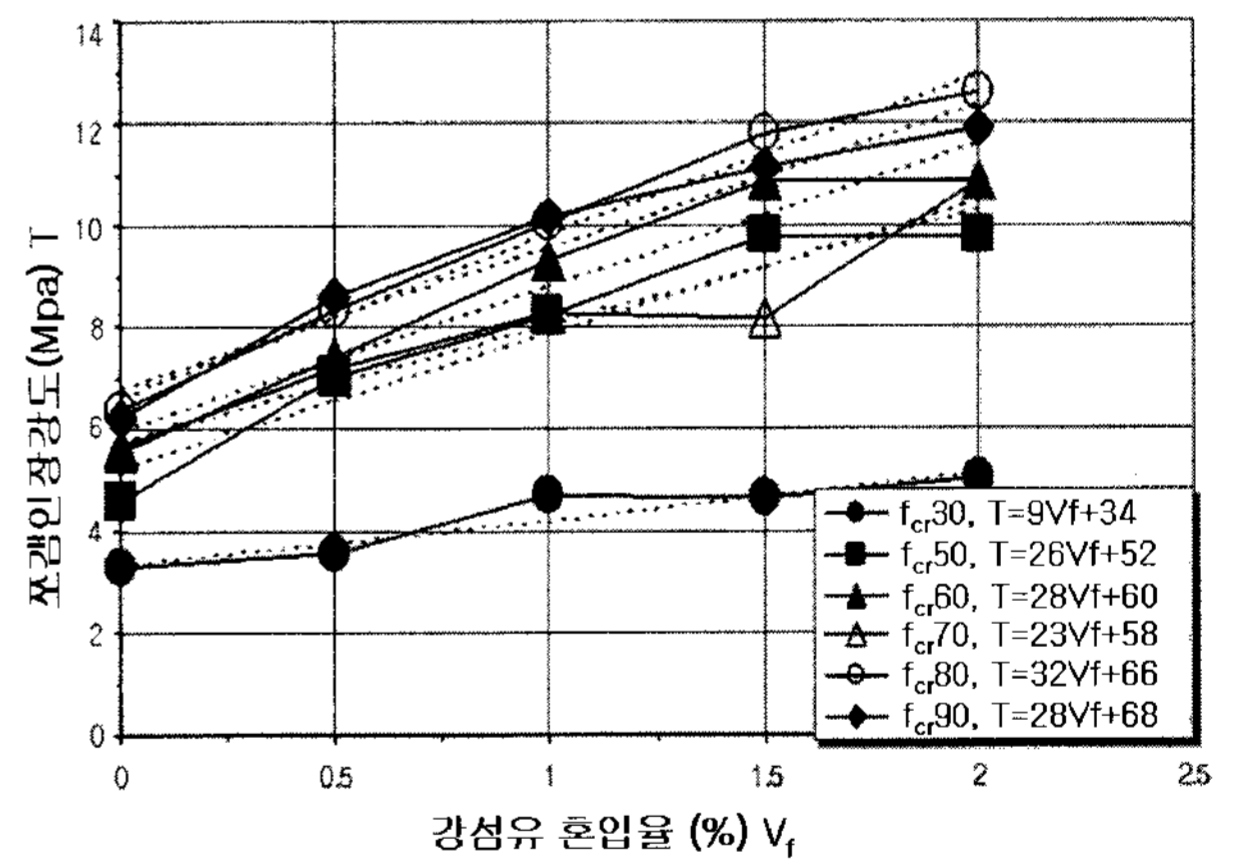


그림 3. 강섬유 혼입량 증가에 따른 쪼갬인장강도의 변화

그림 3에 표기한 회귀분석식($T-V_f$ 상관식)의 강도증가 추세선의 기울기를 보면, $f_{cr} 30$ 시리즈 시험체에서는 9로 나타났지만 $f_{cr} 50$ 시리즈~ $f_{cr} 90$ 시리즈 시험체들은 각각 26, 28, 23, 32, 28,로 비슷하게 나타났다. 이것으로 보면 강섬유 혼입량을 증가시킬 때 쪼갬인장강도가 증가되는 변화는 보통 강도 콘크리트와 고강도 콘크리트가 확연히 다르다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 콘크리트의 인장강도는 압축강도가 커짐에 따라 증가되나 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 압축강도가 높

은 콘크리트 일수록 감소한다. 그래서 콘크리트의 인장강도는 대략 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 값에 비례하는 것으로 알려졌다.¹⁰⁾

그림 4는 동일한 양의 강섬유를 혼입한 콘크리트에서 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 값이 증가할 때 쪼갠인장강도가 증가하는 비율과 경향을 보여준다. 여기서 보면 강섬유 혼입량의 비율이 클수록 강도증가의 비율이 커짐을 알 수 있다. 그림 4의 쪼갠인장강도와 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 관계에서 증가 추세선($T - \sqrt{f_{ck}}$ 상관식)의 기울기를 보면, 강섬유 혼입량이 0.0%일 때 2.8이고, 0.5%일 때 3.5, 1.0%일 때 3.9, 1.5%일 때 4.8, 2.0%일 때 5.6으로 나타나 그림 7에서 보듯이 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이때 상관계수 $R^2=0.98$ 로 나타났다.

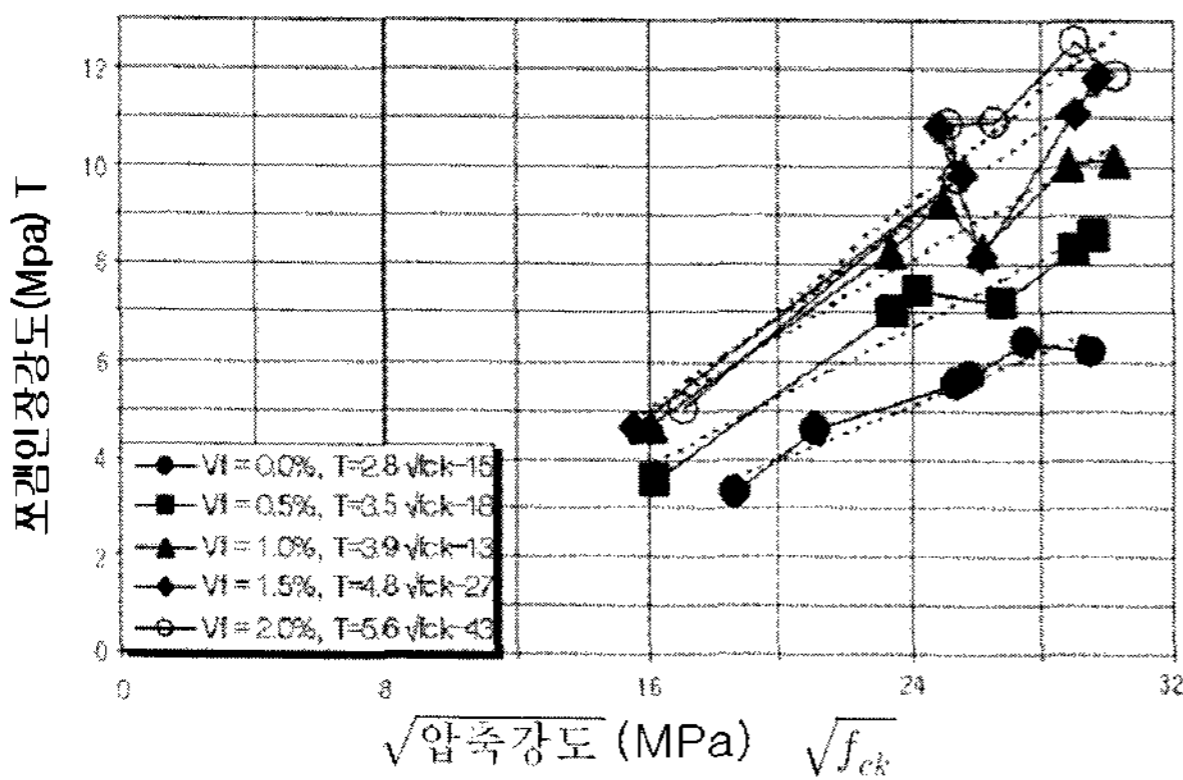


그림 4. $\sqrt{\text{압축강도}}$ 증가에 따른 강섬유보강 콘크리트의 쪼갠인장강도의 변화

이러한 증가 추세선의 기울기 1.4를 이용하여 강섬유 콘크리트의 쪼갠인장강도(f_{st})는 다음 식과 같이 산정될 수 있을 것으로 생각된다.

$$f_{st} = 1.4 V_f \sqrt{f_{ck}} + c \quad (1)$$

여기서 V_f 는 혼입된 강섬유양의 부피비율(%)이고, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도이며, c 는 상수이다.

4.3 휨강도

그림 5는 일반강도인 f_{cr} 30 시리즈 시험체와 고강도인 f_{cr} 50 시리즈 시험체, f_{cr} 70 시리즈 시험체들의 휨강도 시험결과를 강섬유 혼입율의 증가에 따라 나타낸 것이다.

강섬유를 혼입하지 않은 콘크리트는 최대 하중에 도달하면서 중앙점 하단부에 미세균열이 생김과 동시에 반으로 갈라져 취성파괴를 보였으나, 강섬유를 혼입한 콘크리트는 취성파괴는 일어나지 않고 보의 인장측에 많은 미세균열들만 발생하였다. 휨강도 역시 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 거의 비례적

으로 증가하였다.

그림 5에서 보면 일반강도 콘크리트나 고강도 콘크리트 모두에서 강섬유 혼입량이 0.5% 정도에서는 휨강도의 증가가 별로 나타나지 않았다. 일반강도인 f_{cr} 30 시리즈 시험체에서는 강섬유량을 증가시킬 때 증가 추세선의 기울기가 16으로 휨강도가 증가되는 비율이 비교적 완만하게 나타났고, 이는 쪼갠 인장강도의 경우와 비슷하였다.

이에 비하여 고강도인 f_{cr} 50 시리즈 시험체는 그림 5에 표시한 회귀분석식($R - V_f$ 상관식)의 증가 추세선의 기울기가 24이고, f_{cr} 70 시리즈 시험체에서는 28로 나타나 고강도 콘크리트로 갈수록 휨강도 증가율이 커지는 것으로 나타났다.

그림 3과 그림 5를 비교하여 보면 강섬유 혼입량이 0.5%일 때 휨강도는 거의 증가되지 않지만 쪼갠 인장강도가 크게 증가되는 것은 매우 대조적이다.

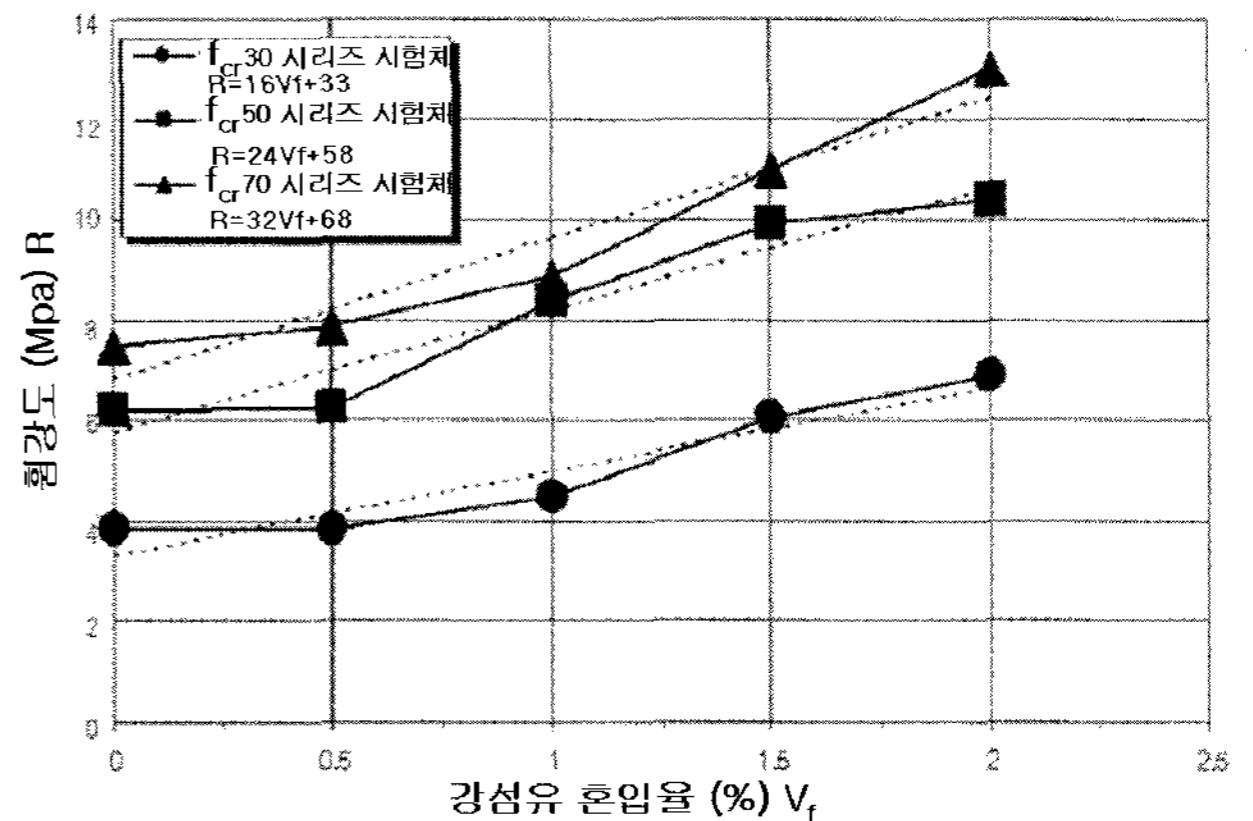


그림 5. 강섬유 혼입량 증가에 따른 휨강도의 변화

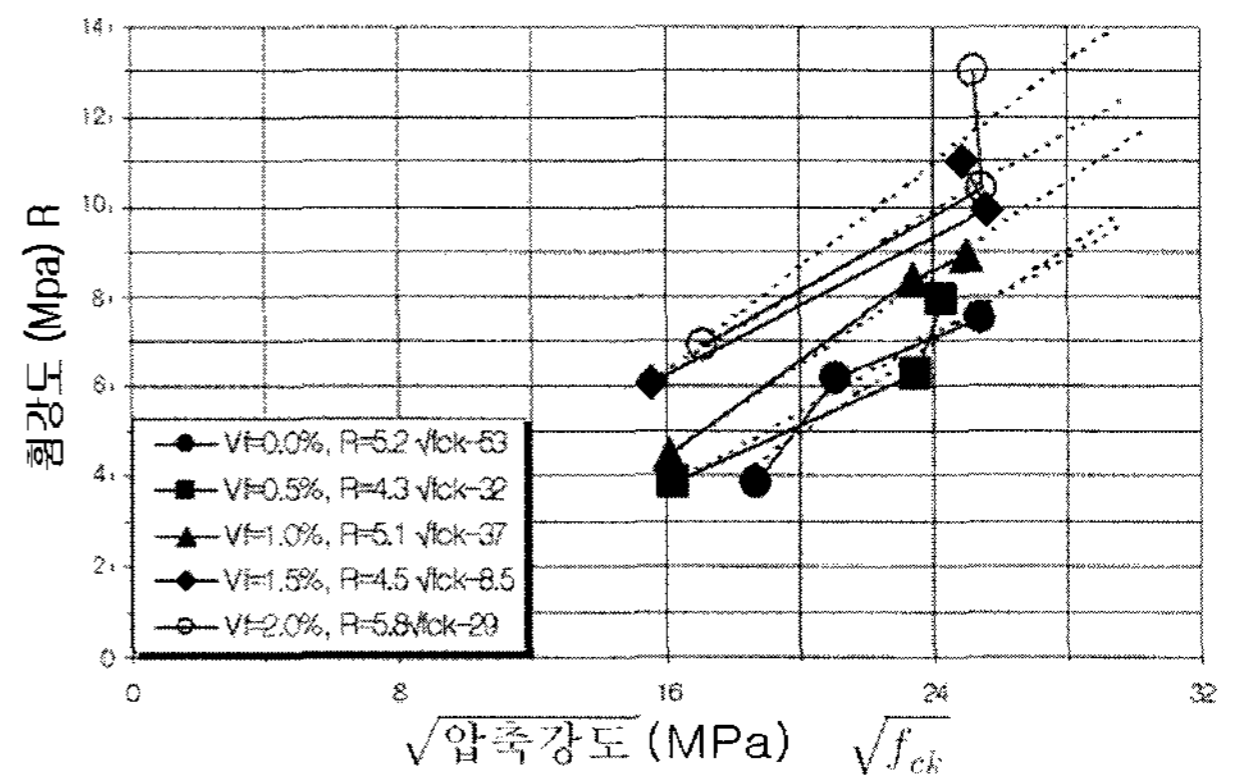


그림 6. $\sqrt{\text{압축강도}}$ 증가에 따른 강섬유보강 콘크리트의 휨강도의 변화

그림 6은 동일한 양의 강섬유를 혼입한 콘크리트에서 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 값이 증가할 때 휨강도가 증가하는 비율과 정도를 보여준다. 이를 그림 4의 쪼갠 인장강도와 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 의 관계

그래프와 비교하고, 이들을 회귀분석식($R-\sqrt{f_{ck}}$ 상관식)으로 나타낸 증가 추세선의 기울기들의 변화를 그림 7과 같이 비교하였다. 여기서 보면 휨강도 증가 추세선의 기울기는 강섬유 혼입량이 0.0%일 때 5.2, 0.5%일 때 4.3, 1.0%일 때 5.1, 1.5%일 때 4.5, 2.0%일 때 5.8로 나타나 별차이 없이 비슷하게 나타났다. 이는 쪼갬 인장강도의 경우와 대조적인 것으로서 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 값에 따라 휨강도가 증가되는 비율은 강섬유 혼입량과는 상관성이 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 쪼갬 인장강도의 증가 추세선의 기울기는 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 가 증가함에 따라 비례적으로 커지는 것을 알 수 있다.

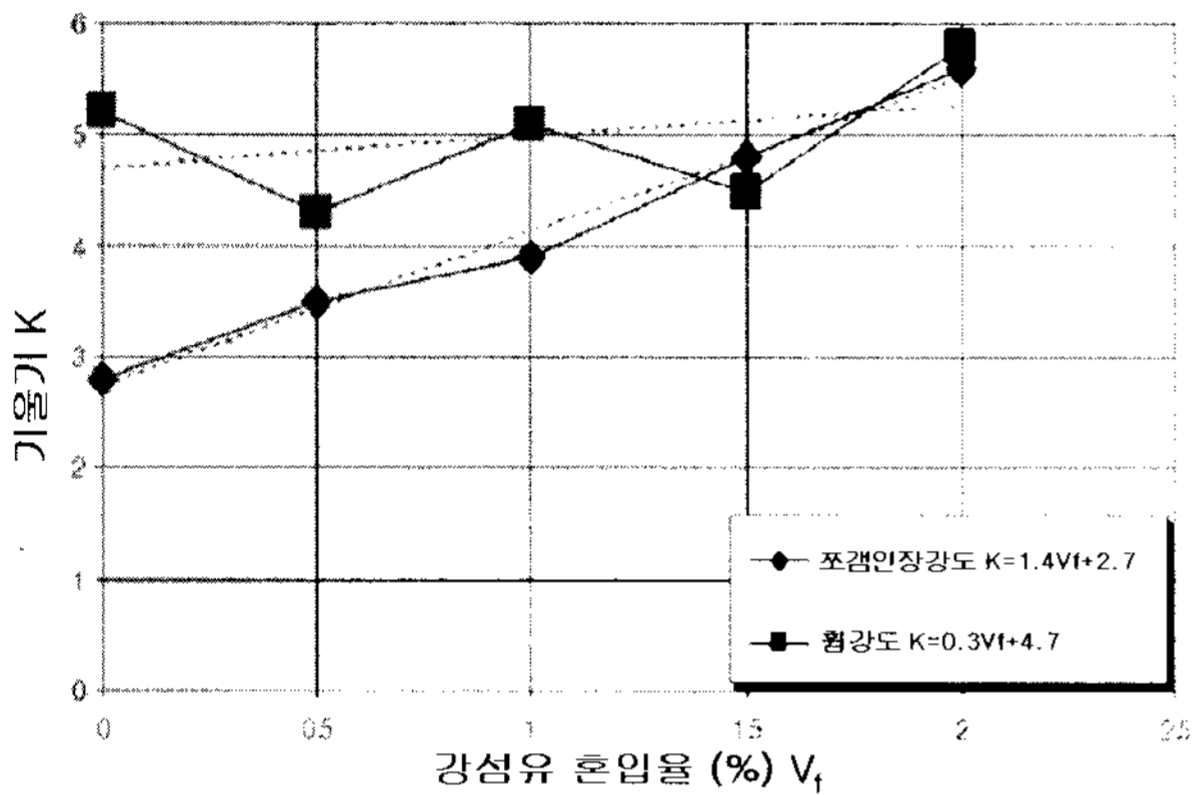


그림 7. $\sqrt{\text{압축강도}}$ 에 대한 쪼갬인장강도와 휨강도의 증가율 변화 비교
(그림 5와 그림 6 추세선의 기울기 변화율 비교)

4.4 휨인성 지수

휨인성이란 에너지 흡수능력으로서 하중-변위 곡선 아랫부분의 면적으로 나타낼 수 있다. 각 시험체의 휨시험에서 보여준 하중-변위 곡선은 그림 8, 그림 9, 그림 10과 같다.

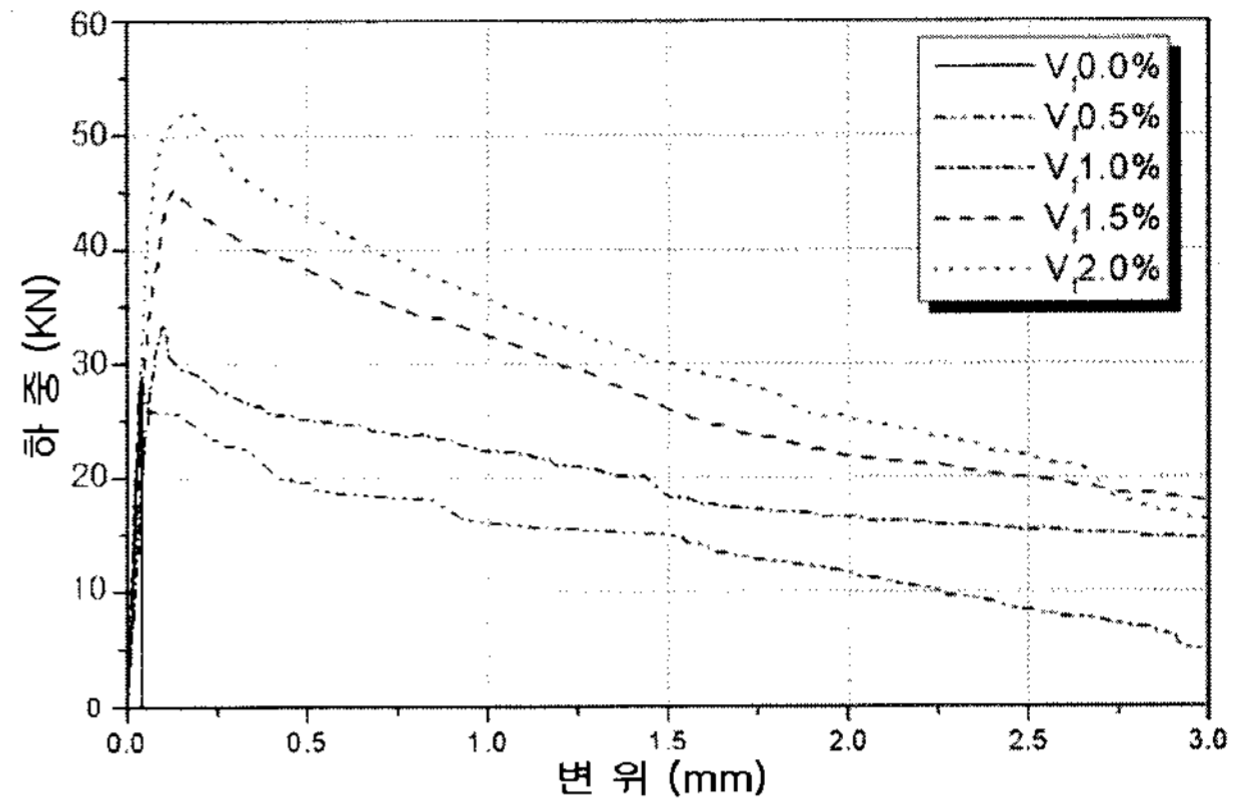


그림 8. fcr 30 시리즈 휨시험체의 하중-변위곡선

표 4는 휨인성 평가방법 중에 ASTM C 1018의 방법과 JSCE - SF4 방법으로 계산된 휨인성 지수이다.^{3,6,14,17)} 이들 하중-변위 곡선과 휨인성 지수를 보면 강섬유의 혼입량이 증가될수록 휨인성이 크게 증가되고 있음을 알 수 있다. 또한 일반강도 콘크리트 보다는 고강도 콘크리트에서 휨인성의 증가율이 더 큰 것으로 나타났다.

표 4. 휨인성 지수

시험체 시리즈	시험체명	ASTM C 1018						JSCE-SF4
		First crack Load (KN)	First crack deflection (mm)	Flexural toughness index				Flexural toughness index
				I_0	I_5	I_{10}	I_{30}	
$f_{cr} 30$	30-Plain	27.44	0.038	0.05	-	-	-	0.0
	30F-0.5	27.83	0.038	0.05	6.08	8.5	22.9	4.3
	30F-1.0	26.26	0.060	0.08	5.57	10.7	27.9	5.9
	30F-1.5	32.14	0.055	0.09	5.87	11.9	33.7	8.3
	30F-2.0	39.30	0.051	0.10	7.03	14.2	38.2	9.3
$f_{cr} 50$	50-Plain	42.73	0.063	0.16	-	-	-	0.2
	50F-0.5	44.88	0.070	0.18	4.48	8.3	19.6	6.5
	50F-1.0	45.57	0.065	0.16	5.15	11.0	34.9	12.2
	50F-1.5	47.43	0.070	0.18	5.76	12.4	37.8	15.2
	50F-2.0	44.39	0.075	0.16	6.58	15.2	49.9	18.5
$f_{cr} 70$	70-Plain	55.76	0.070	0.21	-	-	-	0.2
	70F-0.5	56.55	0.078	0.25	4.56	7.6	16.8	5.9
	70F-1.0	54.19	0.070	0.23	4.45	9.1	22.7	8.5
	70F-1.5	60.96	0.078	0.27	5.09	10.7	31.4	15.5
	70F-2.0	62.43	0.085	0.29	5.52	12.2	39.8	23.2

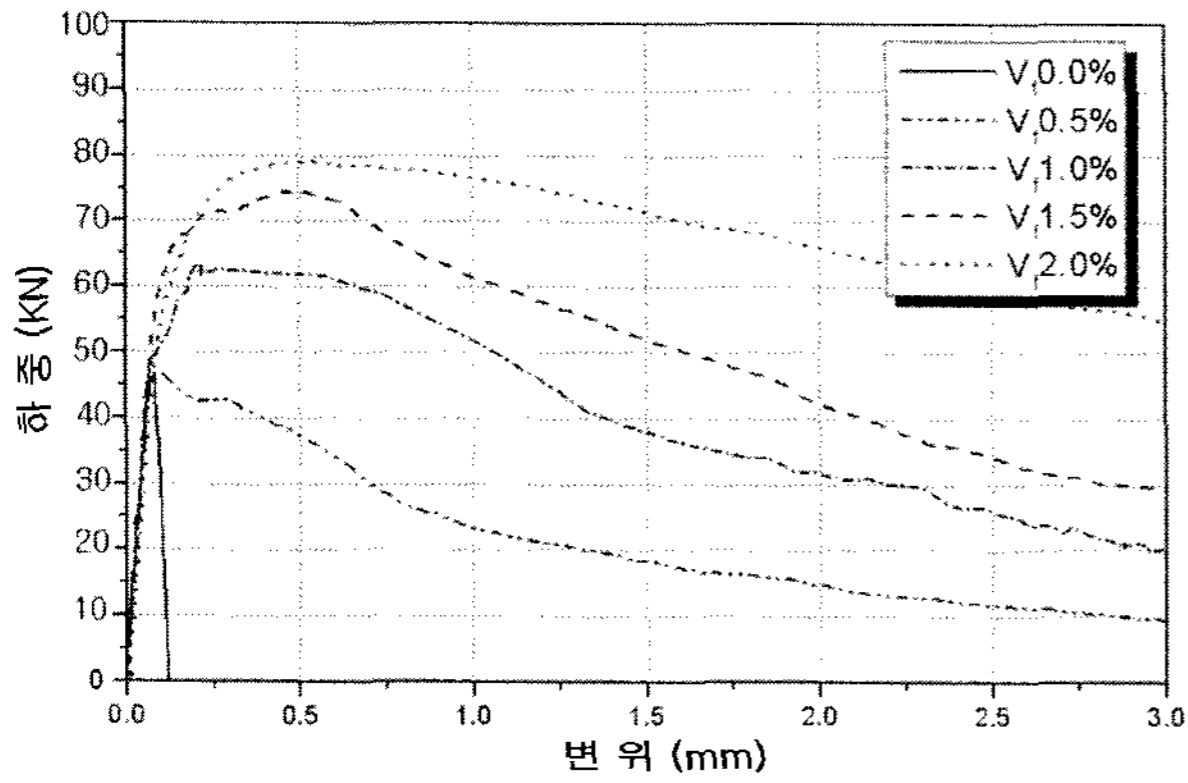


그림 9. fcr 50 시리즈 휨시험체의 하중-변위곡선

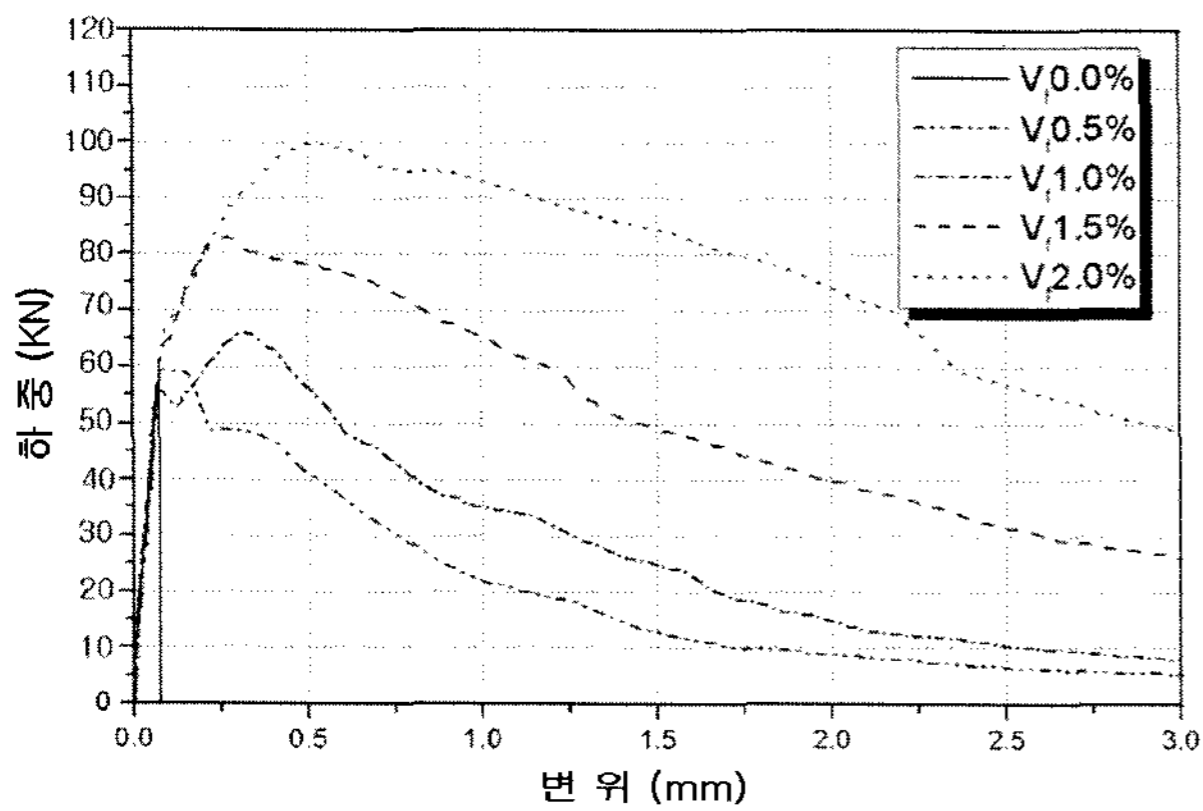


그림 10. fcr 70 시리즈 휨시험체의 하중-변위곡선

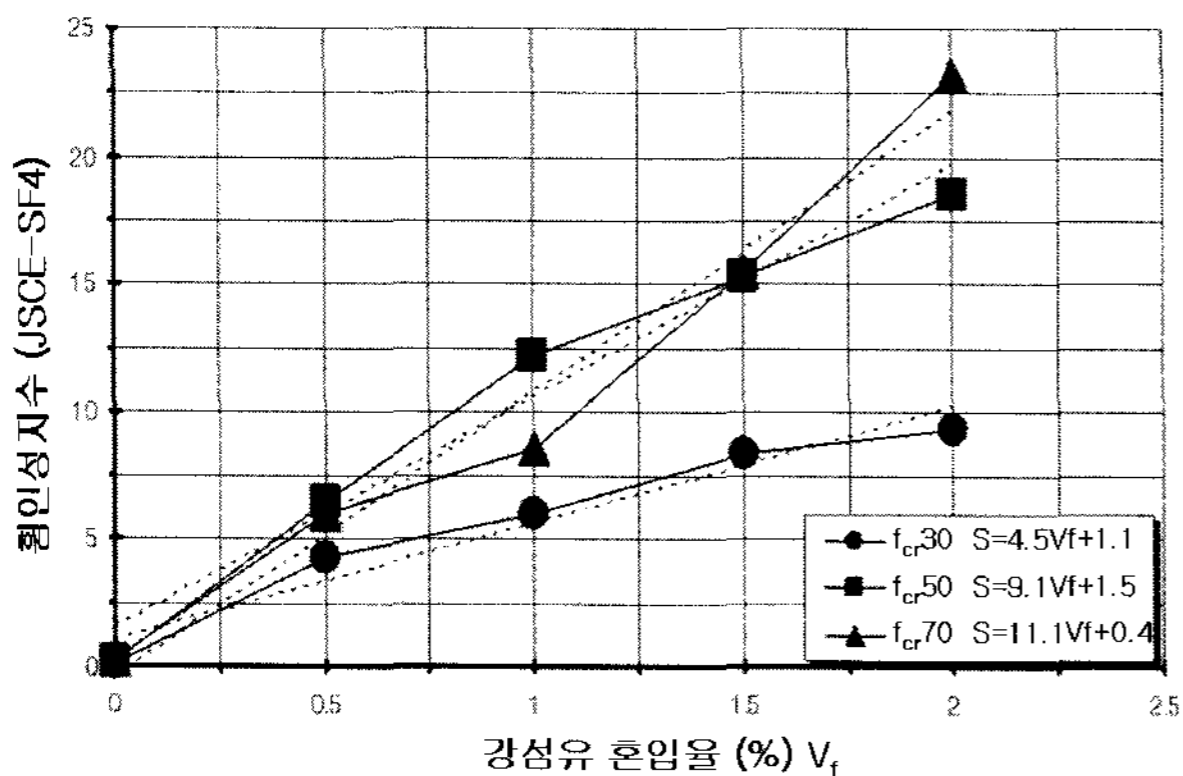


그림 11. JSCE-SF4 방법에 의한 휨인성지수의 변화

그림 11은 JSCE-SF4 방법으로 계산된 휨인성 지수의 값이 강섬유 혼입량의 증가에 따라 어떻게 증가되는가를 보여준다. 보통강도 콘크리트는 그림 11에 표기한 회귀분석식 ($S-V_f$ 상관식)의 증가 추세선의 기울기가 4.5로서 비교적 완만하게 증가되는데 비하여 고강도 콘크리트는 증가 추세선의 기울기가 9.1과 11.1로서 보다 가파르게 커지는 것을 알 수 있다. 그림 12는 ASTM 1018로 계산된 휨인성 지수값이 강섬유 혼입량 증가에 따라 어떻게 증가 되는가를 보여준다.

I_{10} 의 값의 증가비율은 보통강도 콘크리트나 고강도 콘크리트나 차이가 없으나, I_{30} 의 값의 증가비율은 고강도 콘크리트에서 더 크게 나타나고 있다. 여기서 I 는 하중-변위 곡선으로 만들어진 면적으로 계산되며, 최초균열시의 강도와 처짐으로 만들어진 탄성영역 면적에 대한 비율로 표현된다. I_{10} , I_{30} 각각은 처음 균열이 발생할 때에 나타난 처짐량의 5.5배와 15.5배의 처짐까지의 면적으로 계산된 것이다.

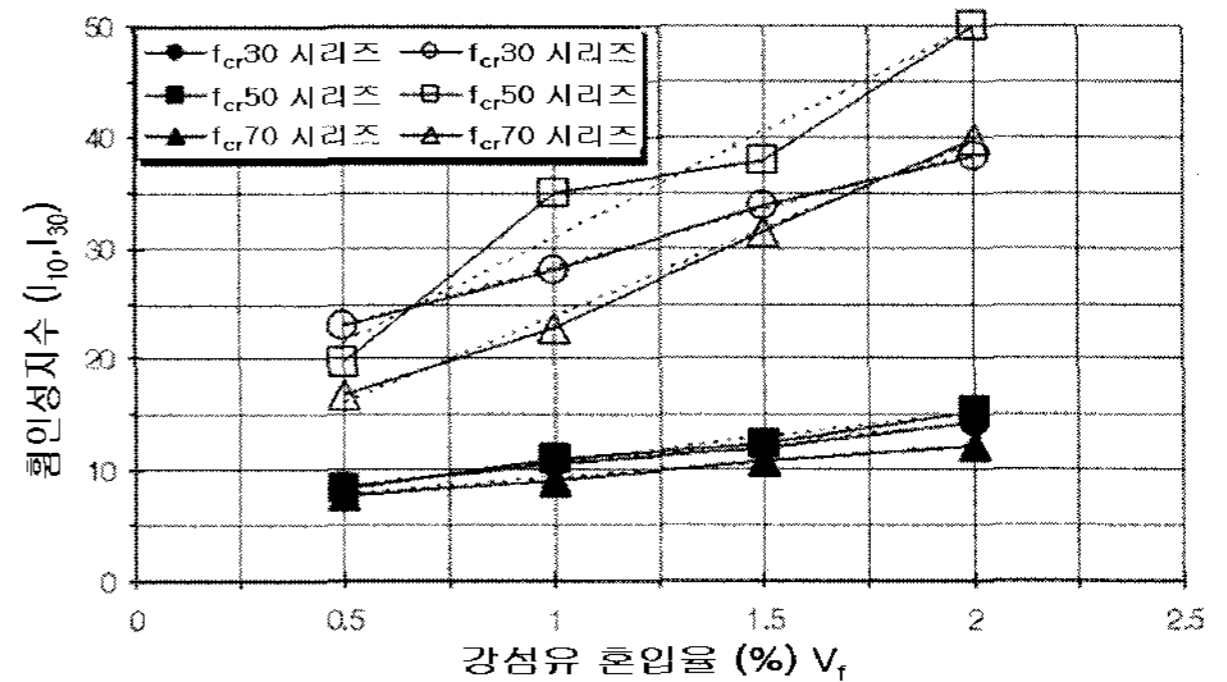


그림 12. ASTM 1018에 의한 휨인성지수 I_{10} , I_{30} 의 변화

4.5 사인장 전단강도

강섬유보강 고강도 콘크리트에서 강섬유 혼입율에 따라 전단강도와 전단보강 효과가 어떻게 변화되는가를 조사하기 위하여 그림 13과 같이 전단 스패인과 보침의 비, a/d 가 1.45로서 길이에 비하여 춤이 높아 전단력이 지배적인 보 시험체를 제작하였다. 시험은 시험체의 3등분점과 양 지지점에서 4점 가력으로 실시하였다.

실험결과는 표 5와 그림 14와 같다. 여기서 보면 압축강도가 70MPa 수준인 $f_{cr} 70$ 시리즈 시험체에서 강섬유 혼입율 0.5%에서는 전단강도가 52%로 크게 향상되었으나, 1.0%, 1.5%에서는 더 이상 향상되지 않고 0.5% 혼입하였을 때와 유사하게 나타났다. 강섬유 혼입율 2.0%에서는 휨파괴로 정확한 값은 알 수 없으나 적어도 전단강도가 68.8% 이상 향상된 것으로 나타났다.

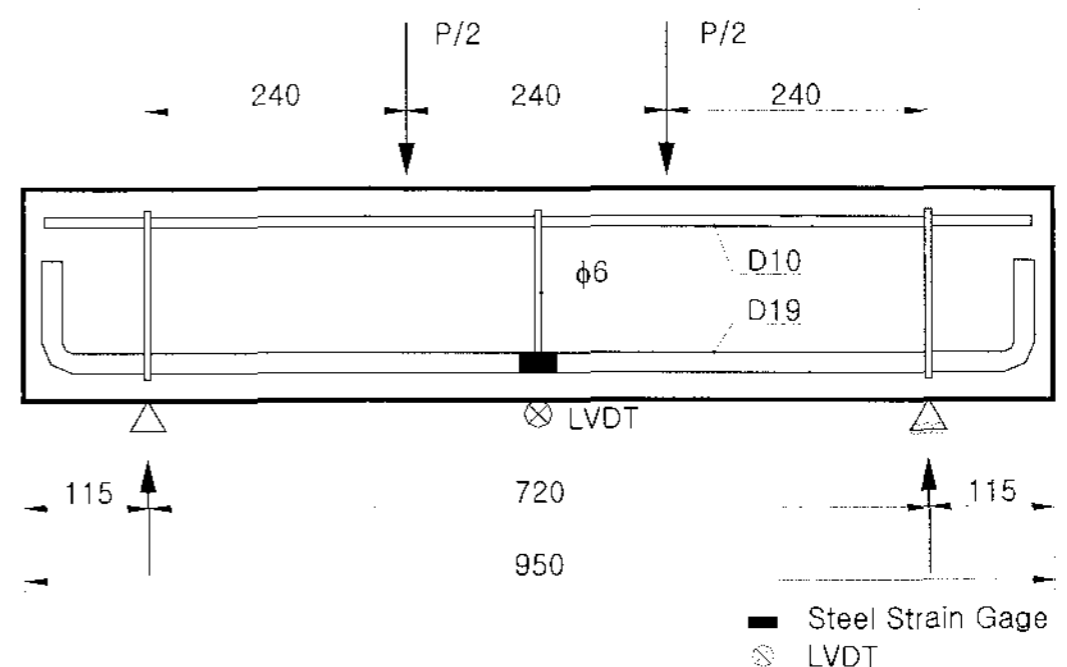
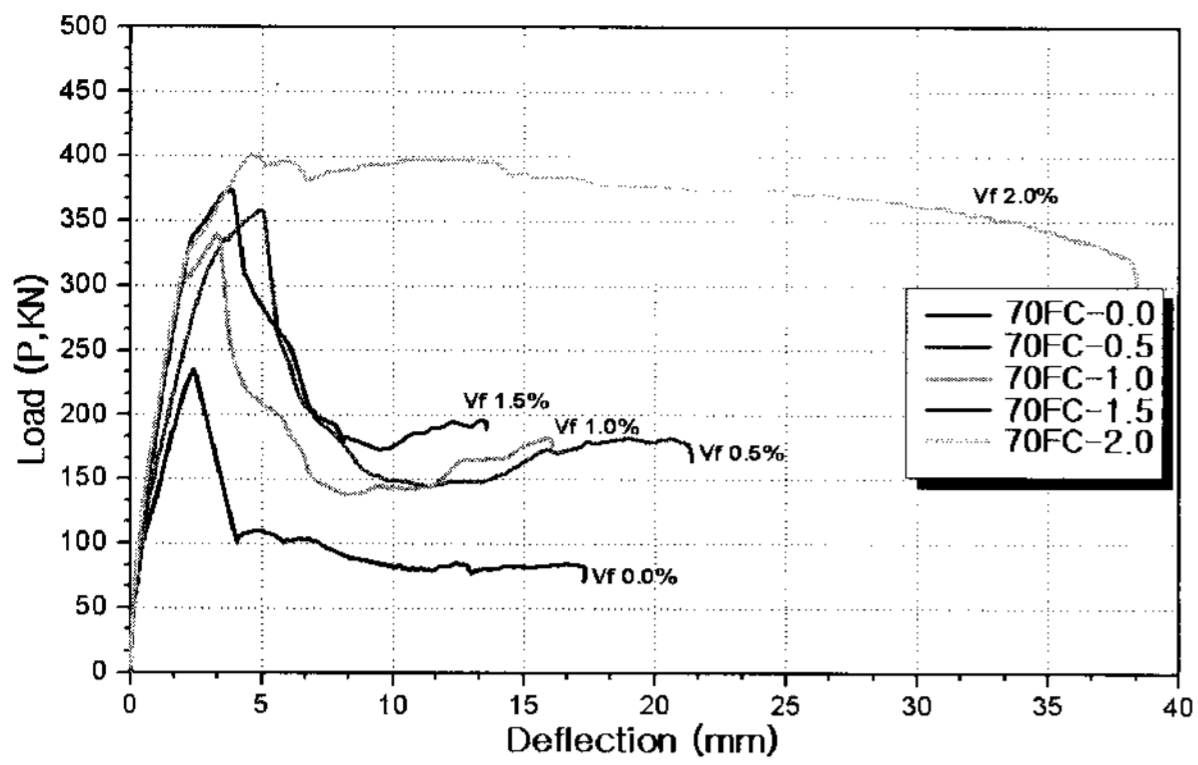
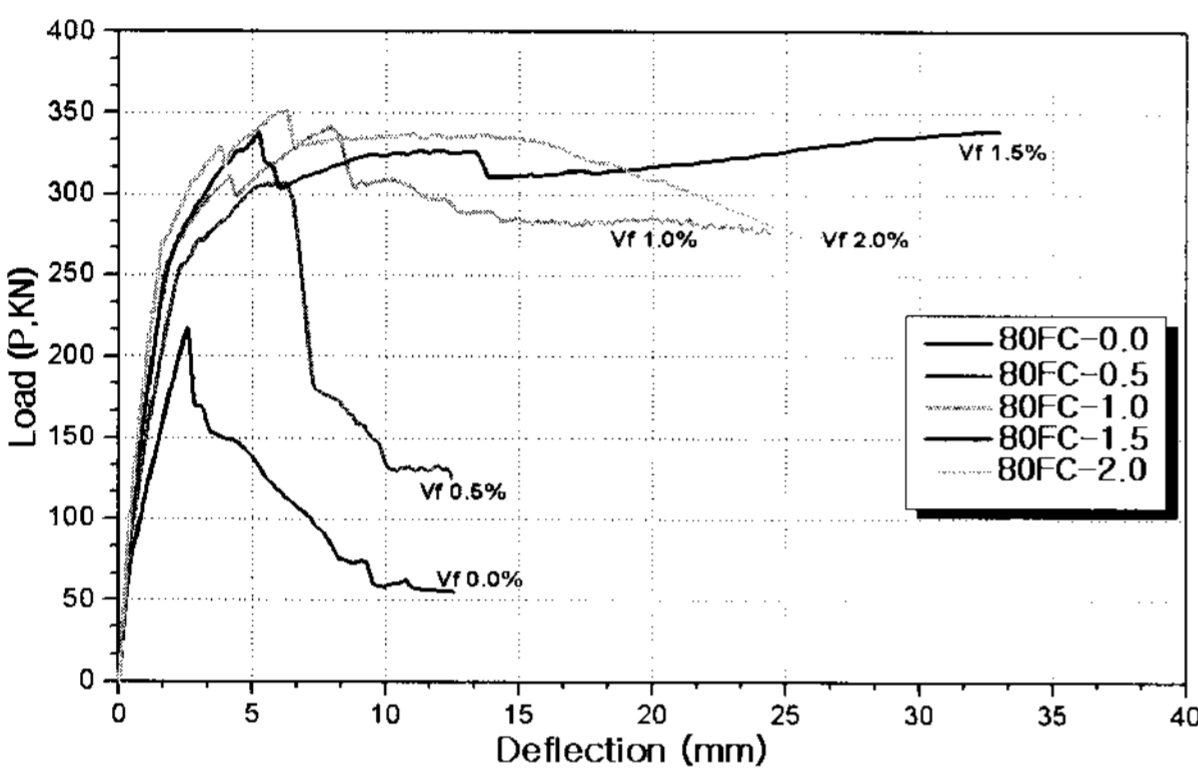


그림 13. 사인장 전단강도 시험체 형상 및 치수



(a) f_{cr} 70 시리즈 시험체



(b) f_{cr} 90 시리즈 시험체

그림 14. 강섬유 혼입율에 따른 전단강도의 변화와 하중-변위 관계곡선

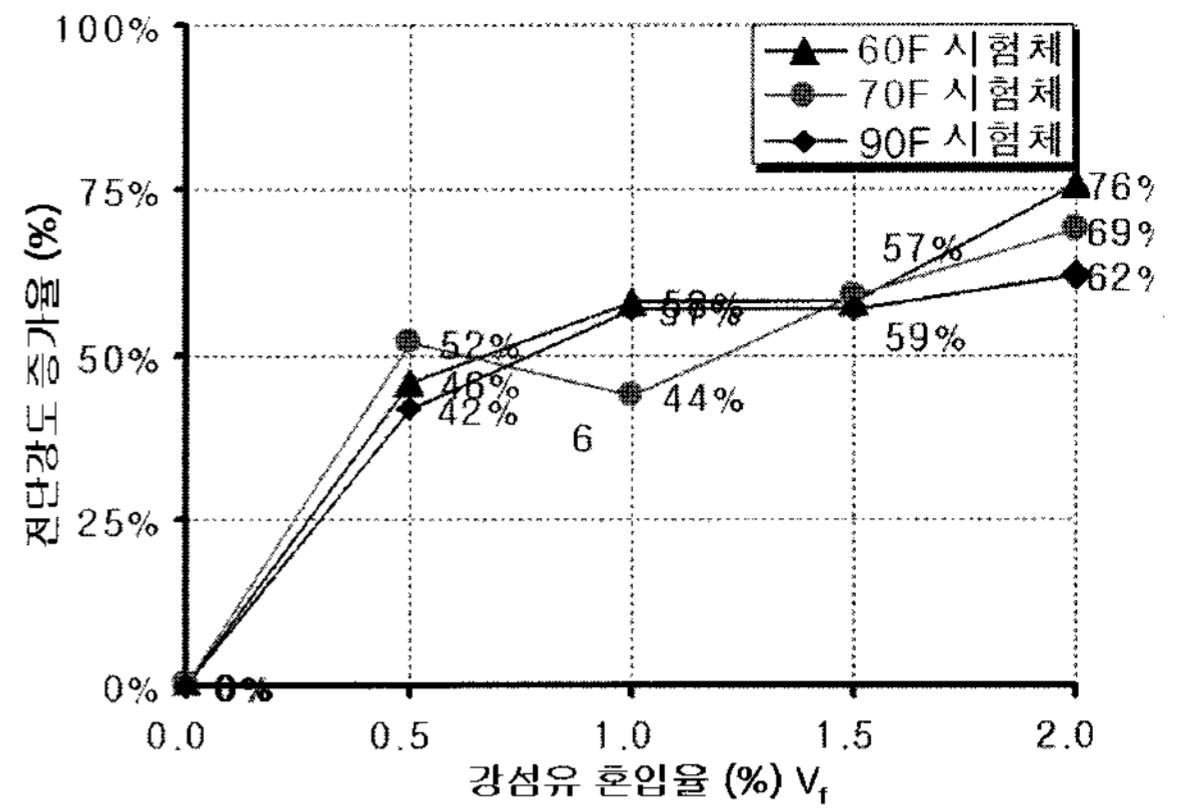


그림 15. 강섬유 혼입율 증가에 따른 전단강도 증가율 변화

또한 압축강도가 90MPa 수준인 f_{cr} 90 시리즈 시험체에서는 강섬유 혼입율 0.5%에서 전단강도가 42% 향상되었고, 1.0%에서는 0.5% 혼입했을 때에 비하여 15%정도 증가된 57.4% 향상된 것으로 나타났다. 여기서 주목할 만한 것은 강섬유를 0.5% 정도로 소량을 혼입하였을 때에 전단강도가 약 50% 정도 크게 향상 되었다는 것이며, 그림 15에서 보는 바와 같이 강섬유를 1.0%, 1.5%, 2.0%로 더 많이 혼입하였을 때에는 전단강도의 향상이 크게 둔화된다는 것을 알 수 있다.

이러한 경향은 Adebar⁹⁾의 실험 결과와 유사하나 본 연구의 실험에서는 강섬유 혼입율이 1.5%~2.0%에서 사인장 전단강도가 증가되는 것으로 추정된다.

표 5. 사인장 전단강도 실험 결과

Beam	slump (cm)	fiber content V_f (%)	compressive strength	splitting tensile strength	reinforcement	Experimental Ultimate Shear Load (P/2, kN)	Shear Load Ratio	Failure Mode
			MPa	MPa				
60F-0.0	22.5	0.0	63.25	5.43	2-D13 (0.25 p_b) without stirrups	65.1	1.00	S
60F-0.5	15.5	0.5	57.76	7.29		95.2	1.46	FS
60F-1.0	14.5	1.0	61.45	9.10		103.0	1.58	FS
60F-1.5	3.0	1.5	60.61	10.63		102.8	1.58	F
60F-2.0	2.6	2.0	62.32	10.66		114.9	1.76	F
70F-0.0	26.5	0.0	65.34	5.59	2-D19 (0.40 p_b) without stirrups	117.6	1.00	S
70F-0.5	24.0	0.5	70.48	7.06		178.8	1.52	S
70F-1.0	21.6	1.0	67.34	8.13		169.5	1.44	S
70F-1.5	20.1	1.5	67.25	8.02		186.7	1.59	S
70F-2.0	19.0	2.0	69.56	10.68		198.5	1.69	F
90F-0.0	26.5	0.0	85.24	6.10	2-D19 (0.48 p_b) without stirrups	108.4	1.0	S
90F-0.5	25.3	0.5	86.10	8.43		153.5	1.42	S
90F-1.0	24.5	1.0	89.40	9.94		170.6	1.57	FS
90F-1.5	21.5	1.5	82.71	10.90		170.2	1.57	F
90F-2.0	18.2	2.0	89.92	11.65		176.0	1.62	F

S*¹ : Shear Failure, FS*² : Flexural-Shear Failure, F*³ : Flexural Failure

5. 결 론

강섬유보강 고강도 콘크리트에서 강섬유 혼입량을 증가 시킬 때 작업성과 강도특성이 어떻게 변화되는지를 재료시험을 통하여 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축강도가 50MPa~90MPa의 고강도 콘크리트에서 1.5% 이상으로 강섬유를 혼입하였을 때에도 적합한 고성능 감수제를 선택하고 사용량을 적절히 조절함으로써 슬럼프 값 20cm 정도의 작업성이 좋은 강섬유보강 고강도 콘크리트를 실용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 50MPa 이상의 고강도 콘크리트에서는 보통강도의 콘크리트에 비하여 강섬유 혼입량을 증가시킬수록 조깅인장강도가 크게 증가하는 것으로 나타났다.
강섬유보강 콘크리트의 조깅인장강도는 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 값이 커질수록 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 이러한 증가율은 강섬유 혼입량의 증가 비율에 따라 비례적으로 더 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 강섬유보강 콘크리트의 조깅인장강도는 강섬유의 혼입량 비율(V_f , %)과 $\sqrt{\text{압축강도}}(\sqrt{f_{ck}})$ 값의 곱에 ($V_f \sqrt{f_{ck}}$) 비례하는 것으로 판단된다.
- 3) 강섬유 혼입량이 0.0%~0.5%일 때 조깅인장강도의 증가율이 가장 크게 나타났다. 그러나 이와는 대조적으로 휨강도에서는 강섬유 혼입량이 0.0%~0.5%일 때 증가가 거의 나타나지 않았다. 또한 콘크리트의 $\sqrt{\text{압축강도}}$ 가 커짐에 따라 휨강도가 증가되는 비율은 강섬유의 혼입율을 증가시키기에 따라 더 증가되지 않고 일정한 것으로 생각된다.
- 4) 60MPa~90MPa의 고강도 콘크리트에서 강섬유 혼입율 V_f 가 0.5% 정도로 소량의 강섬유를 혼입하여도 사인장 전단강도는 매우 크게(약 50% 정도) 향상되며, 강섬유를 1.0% 또는 1.5% 이상 혼입하였을 때에는 전단강도 증가율이 둔화되고 그 효과가 상대적으로 낮다고 판단된다.
- 5) 강섬유보강 고강도 콘크리트의 압축강도는 강섬유 혼입량을 증가하였을 지라도 거의 변화되지 않으며, 강섬유 보강과의 상관관계가 미약하다는 기존의 연구 결과를 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 2007년도 관동대학교 교내연구비의 지원에 의하여 수행된 것으로 실험에 도움을 주신 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 구성모, 이정석, 김우석, 백승민, 박윤근, 전단보강이 없는 강섬유 보강 고강도 콘크리트 보의 전단내력에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 제 17권, 7호 pp.19~26, 2001.7.
2. 김경수, 김재욱, 이용우, 배주성, 강섬유 보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향, 콘크리트 학회지, 제6권, 1호, pp.131~141, 1994.
3. 박성수, 이정훈, 강섬유보강 콘크리트의 휨인성 특성에 관한 연구, 구조물 진단학회지, 제8권 4호, pp.203~210, 2004.
4. 박승범, 윤의식, 강섬유보강 콘크리트의 배합설계 및 물성, 콘크리트 학회지, 제8권, 4호, pp.14~24, 1996.
5. 이현호, 이화린, 강섬유 계수 및 혼입율을 고려한 SFRC의 강도 및 변형 특성, 콘크리트학회 논문집, 16권, 6호, pp.759~766, 2004.
6. 전찬기, 박선규, 강섬유보강 패널구조의 보강효과 분석 및 인성평가 기법, 콘크리트 학회지, 제11권, 2호, pp.209~220, 1999.
7. ACI Committee 544, Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI 544.4R* -88, 1999.
8. ACI Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, *ACI 544.1R*-96, 1999
9. Adebar, P., Mindess, S., St-Pierre, D., and Olund, B., Shear Tests of Fiber Concrete Beams Without Stirrups, *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.1, pp.68~76, 1997.
10. Cho, Soon-Ho and Kim, Yoon-IL, Effect of Steel Fibers on Short Beams Loaded in Shear, *ACI Structural Journal*, Vol.100, No. 6, pp.765~774, 2003, Nov.-Dec.
11. James G. MacGregor, *Reinforced Concrete - Mechanics and Design*, Fourth Edition, Ch.3, p.49, Pearson Education, Inc.
12. K. H. Tan, K. C. Tan, and P. Paramasivam, Instantaneous and Long-Term Deflections of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, pp.384~393, 1994.
13. K. Kohno, J. Suda, and K. Kyazaki, Comparison of Fundamental Properties of Concrete Using New-And-Old-Type Steel Fiber, *RILEM*, pp.51~60, 1992.
14. M. P. Luong, and H. Liu, Tensile Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete, *RILEM, E&FN Spon*, pp.343~354, 1992.
15. P. Balaguru, Ramesh Narahari and Mahendra Patel, Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Material Journal*, Nov.-Dec., pp.541~546, 1992.
16. Song, P.S. and Hwang, S., Mechanical Properties of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials*, No.18, pp.669~673, 2004.
17. Wei-Ling Lin, Toughness Behaviour of Fibre Reinforced Concrete, *RILEM, E&FN Spon*, pp.299~315, 1992.

(접수 2008. 4. 2, 심사 2008. 6. 4, 게재확정 2008. 6. 11)