

강섬유 보강 콘크리트의 강도 및 역학적 특성연구

Strength and Mechanical Characteristics of Steel-Fiber Reinforced Concrete

오 병환 * 이 형준 ** 백 신원 ** 임 동환 **
Oh, Byung Hwan Lee, Hyung Joon Paik, Shin Won Lim, Dong Hwan

Abstract

Recently, a growing attention is paid to development of new construction materials. The fiber reinforced Concrete is recognized as one of the most promising new construction materials. A comprehensive experimental study was conducted to explore the mechanical behavior of steel fiber reinforced concrete. The major variables in the experiment were the fiber contents and the lengths of steel fibers. The flexural, tensile, and compressive behavior of steel fiber reinforced concrete were investigated. The present study shows that the strength and ductility are remarkably increased with the increase of fiber content. The rate of strength increase due to steel fibers was found to be the highest in tension, the middle in flexure and the lowest in compression. This indicates that the steel fibers play a major role in increasing the tensile capacity

1. 서론

최근 세계적으로 활발히 진행되고 있는 신소재의 개발과 더불어 건설분야에서도 재료의 강도 및 역학적 특성이 개선되고 진보된 건설재료를 개발하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있으며, 이러한 노력의 일환으로써 연구개발중에 있는 것이 섬유콘크리트이다. 건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 인장이나 동적하중하에서 갑작스런 파괴를 일으키는 취성을 띠고, 균열의 생성 및 성장을 억제하기 힘든 단점이 있다. 이러한 단점을 갖는 콘크리트에 대해 인장저항능력을 증대시키고, 국부적인 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등 콘크리트의 강도와 역학적 거동특성을 개선 및 보강하기 위하여 불연속적이고 단상인 섬유질 재료를 콘크리트속에 분산시켜 넣은 것이 섬유보강콘크리트 또는 섬유콘크리트이다.

본 연구에서는 건설분야에서 가장 적용성이 좋은 것으로 알려진 강섬유 콘크리트에 대하여 섬유의 혼입에 따른 강도특성 및 역학적 거동특성을 규명하는데 있으며, 이로부터 강섬유콘크리트의 이용과 설계를 위한 기초자료를 제시하는데 있다.

2. 섬유콘크리트의 역학적 특성 실험

2.1 실험 개요

취성재료로 분류되는 콘크리트는 공칭압축강도가 증가할수록 취성거동의 경향이 크게 나타나는데, 본 연구에서는 비교적 큰 강도를 갖는 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 재료의 강도특성과 역학적 거동특성을 규명하고자 한다. 재령28일의 압축강도가 400kg/cm² 이상인 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 섬유의 보강효과를 분석한다. 이를 위해 압축거동실험, 활열인장거동실험 및 휨거동실험을 수행하여 각각의 강도와 응력-변형관계, 그리고

하중-변위관계를 얻어 섬유콘크리트의 제반특성에 대한 섬유혼입효과를 규명하고자 하였다.

섬유의 형상비와 혼입량에 따른 보강효과를 알아보기 위하여 사용된 강섬유는 길이가 25mm, 50mm 인 두 종류이고, 섬유혼입률은 각각의 섬유길이에 대해 0%, 0.5%, 1.0%, 2.0%, 3.0%이다.

2.2 실험 재료

콘크리트는 물-시멘트비(W/C)를 0.32, 슬럼프치를 18cm로 하여 재령28일 압축강도가 420kg/cm² 이상이 되도록 표1과 같이 배합설계하였다. 시멘트는 제1종보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재는 잔골재율을 0.4로 하였으며 잔골재의 비중은 2.58, 굵은골재의 비중은 2.70이었다. 또한 낮은 물-시멘트비와 섬유혼입으로 인해서 생기는 유동성 악화를 방지하기 위해서 고유동화제인 Might-150을 시멘트중량비로 1.7% 첨가하였고, 강도의 발현을 돕기 위해서는 혼화재 C.S.F을 2.0%(중량비) 첨가하였다.

강섬유는 국내에서는 생산되고 있지 않기 때문에 미국의 RIBBON Technology사의 제품을 사용하였으며, 섬유형상은 박판으로 된 이형강섬유로써 비중이 7.83이고, 길이는 각각 25mm, 50mm였다.

표1. 콘크리트 배합성분(kg/m³)

시멘트	물	굵은골재	잔골재	M-150	혼화재
530	170	995	663	9.01	10.6

2.3 시편제작 및 양생

콘크리트의 배합은 분당 12회전하는 콘크리트믹서를 이용하여 실시하였다. 굵은골재, 잔골재, 시멘트, 혼화재를 넣어 1분간 혼합한 후, 콘크리트믹서를 돌리면서 강섬유를 손으로 고르게 분산시켰고 M-150을 섞은 물을 첨가하여 콘크리트를 배합하였다.

* 정희원 서울대학교 토목과 부교수

**정희원 서울대학교 토목과 박사과정

표2 섬유 혼입률과 길이에 따른 콘크리트의 강도특성(N/mm²)

섬유 길이	섬유 혼입률	압축 강도	휨 강도	할열인장강도
무근콘크리트($V_f=0\%$)		43.73	5.89	3.62
L=25mm	$V_f=0.5\%$	42.74	5.91	4.01
	1.0%	44.50	6.04	4.54
	2.0%	46.98	6.17	5.49
	3.0%	48.64	8.27	7.20
L=50mm	$V_f=0.5\%$	44.05	6.11	4.62
	1.0%	46.45	7.39	6.69
	2.0%	48.48	8.82	8.82
	3.0%	57.17	12.67	9.53

시편은 압축강도 및 할열인장강도 시험용으로 지름 100mm 높이 200mm인 원주형공시체와 휨강도 시험용으로 단면이 100mm x 100mm이고 길이가 500mm인 보 공시체를 각각의 실험변수에 대해서 3개씩 만들었다. 섬유콘크리트는 보통콘크리트에 비해서 공극이 클 수 있으므로 다짐은 봉다짐과 판진동기를 이용한 진동다짐도 병행하여 실시하였다. 시편의 양생은 시편제작후 24시간 경과한후 물드로부터 탈형하여 수증양생을 실시하였고 이때 수조의 온도는 20±2°C로 유지하였다.

2.4 실험방법 및 측정

섬유콘크리트의 작업성을 고찰하기 위하여 콘크리트를 배합한후 슬럼프시험을 수행하였으며 이결과 섬유혼입률이 증가함에 따라 슬럼프값이 선형적으로 감소하였고 같은 섬유혼입률에서는 섬유길이가 긴 경우에 슬럼프값이 더 감소하였다. 섬유콘크리트의 거동특성을 알아보기 위한 압축강도시험 및 할열인장강도시험은 자동제어 만능시험기를 사용하였다. 재령28일된 섬유콘크리트의 압축거동특성을 알아보기 위해서 시험기의 자기기록계로부터 섬유콘크리트의 응력-변형도 곡선을 얻었다. 또한, 섬유콘크리트에 대한 휨강도시험도 자동제어 만능시험기를 사용하여 수행하였으며 하중의 재하속도는 정적수준인 0.5mm/min로 하여 변위제어실험을 하였다. 이 시험으로부터 섬유콘크리트 보 공시체에 대한 하중-처짐곡선을 얻었다.

3. 실험결과와 역학적 특성분석

3.1 휨거동과 휨강도 특성

보 공시체에 대한 재하시험에서 시험기의 자기기록계로부터 얻어진 재하점에서의 하중-처짐곡선은 그림1과 같다. 이 그림으로부터 섬유가 없는 무근콘크리트는 최대하중에 도달한 후 파괴가 급속히 일어나는데 비하여 섬유가 혼입된 콘크리트는 최대하중에 도달한 후에도 섬유의 Bridging 작용때문에 지속적으로 하중을 지탱하면서 파괴가

서서히 진행됨을 알 수 있다. 초기 균열이 발생하기 전까지는 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트와 섬유콘크리트는 선형적 거동을 하고 균열이 발생한 후에는 섬유콘크리트가 비선형 거동을 함을 알 수 있다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트는 하나의 균열이 확산되어 파괴가 일어나고, 섬유콘크리트는 섬유혼입률이 증가할수록 다수의 미세균열이 발생하면서 파괴가 서서히 일어난다. 섬유혼입률이 아주 작을때($V_f=0.5\%$)에는 극한하중의 증가가 크지 않고 최대하중에 도달한 후에도 하중의 감소가 비교적 빠르게 나타나 섬유의 보강효과가 작게 나타나고 섬유의 혼입효과는 섬유혼입률이 증가함에 따라 크게 나타났다. 섬유의 이러한 보강효과는 콘크리트에 대한 섬유의 혼입이 균열의 생성 및 성장을 억제하여 취성재료로 분류되는 콘크리트의 성질을 크게 개선하는 것으로 볼 수 있다. 섬유콘크리트의 휨인성(하중-처짐곡선하의 면적)은 무근콘크리트에 비해서 상당히 증가하며 섬유혼입률과 섬유길이가 클수록 인성의 증가율은 더 크게 나타난다. 이것은 섬유혼입률이 증가하면 섬유의 간격이 작아져 균열단면에서 저항력이 커지고, 하중의 전달은 섬유와 매트릭스간의 부착력에 의해 일어나는데 섬유길이가 길면 부착력이 증가하여 뿔뿔현상에 대한 저항력이 증대되기 때문인 것으로 분석된다. 실제로 25mm의 강섬유를 혼입한 시편의 파괴면에서 뿔뿔진 섬유의 수가 많이 나타났다. 휨시험에서 얻은 섬유콘크리트의 휨강도는 표2에 나타난 것과 같이 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트에 비해서 많이 증가한다. 이때 섬유혼입률과 섬유길이에 따른 섬유콘크리트의 휨강도의 변화는 그림2와 같다. 섬유혼입률이 증가할수록 휨강도의 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 즉 섬유길이가 50mm인 경우 섬유혼입률이 적을때($V_f=0.5\%$)에는 휨강도의 증가율이 4.0%인데 비해서 섬유혼입률이 클때($V_f=3.0\%$)는 섬유콘크리트의 휨강도가 2.15배 증가하였다. 또한 섬유길이가 길수록 휨강도가 크게 증가하여 섬유혼입률이 3.0%인 경우에 섬유길이가 25mm일때는 40%의 강도증가가

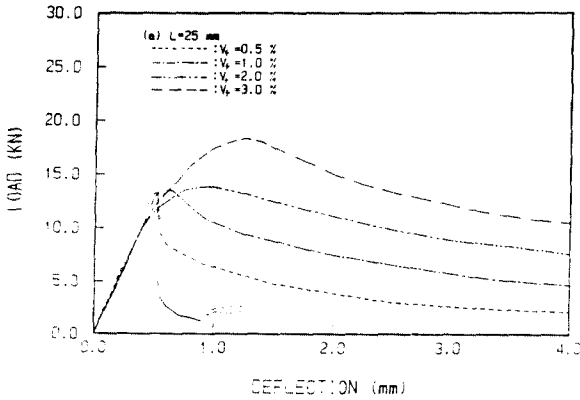


그림1. 섬유 혼입량에 따른 휨하중-처짐곡선

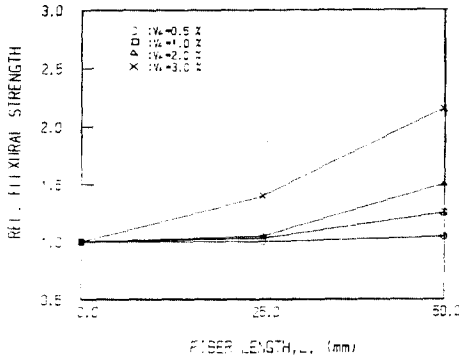


그림2. 섬유 혼입량, 길이에 따른 상대휨강도 변화

있는데 비하여 섬유길이가 50mm일때는 휨강도가 115%증가하였다. 그림6에서 알 수 있듯이 섬유콘크리트의 휨강도의 증가폭은 압축강도의 증가폭보다는 크고 활열인장강도의 증가폭보다는 작는데 이러한 경향은 섬유길이가 길때 더욱 두드러지게 나타난다.

3.2 인장거동과 인장강도의 특성

원주형 공시체에 대한 활열인장시험에서 얻어진 섬유콘크리트의 인장강도는 표2에 나타나 있다. 또한 섬유혼입량과 섬유길이에 따른 섬유콘크리트의 인장강도의 변화는 그림3에 도시되어 있다. 섬유의 길이가 일정할때 인장강도의 변화는 섬유의 혼입률이 증가하면 섬유콘크리트의 인장강도가 증가하는데 섬유길이가 25mm인 경우에는 섬유혼입률이 증가할수록 강도의 증가폭이 증가하는 경향을 보이고, 섬유길이가 50mm인 경우에는 섬유혼입률이 1.0%이상이면 섬유콘크리트의 인장강도의 증가폭이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 또한 섬유길이가 길수록 인장강도가 많이 증가하며, 섬유혼입률이 2.0%이하던 경우에는 섬유길이가 길수록 인장강도의 증가폭이 크게 나타나고, 섬유혼입률이 3.0%인 경우에는 섬유길이가 길면 강도의 증가폭이 둔화되는 경향을 보인다. 이것은 섬유혼

입률과 섬유길이가 과도할 경우 콘크리트의 강도 증진에 대한 기여가 작기때문인 것으로 사료된다. 그림6은 섬유혼입률에 따른 각강도의 증가를 나타낸 것으로 활열인장강도의 증가폭이 휨강도나 압축강도의 증가폭보다 상당히 큼을 알수 있다. 활열인장강도의 증가폭이 휨강도의 증가폭보다 크게

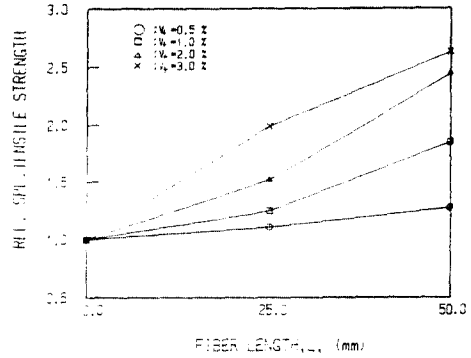


그림3. 섬유 혼입량, 길이에 따른 상대 활열 인장강도 변화

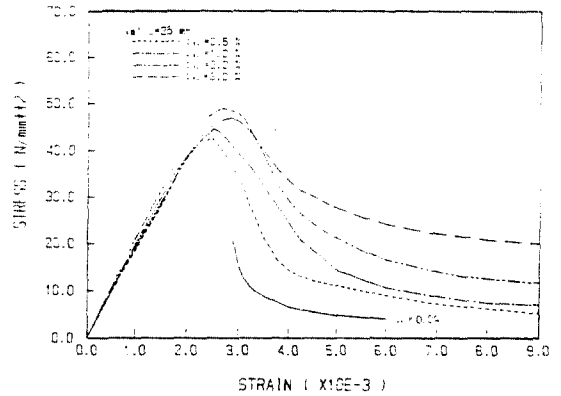


그림4. 섬유혼입량에 따른 압축응력-변형도 곡선

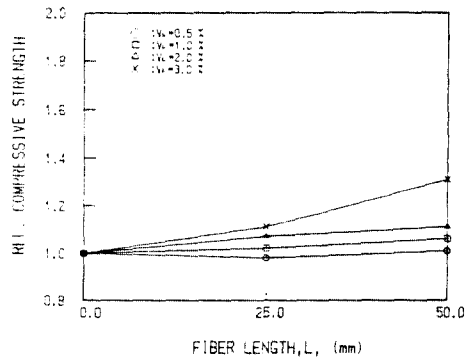


그림5. 섬유 혼입량, 길이에 따른 상대 압축강도 변화

나타나는 것은 합열인장의 경우 휨인장의 경우보다 인장응을 받는 부분이 상대적으로 많으며 섬유효과가 인장영역에서 크게 나타나기때문인 것으로 사료되고 있다. 이와같은 결과는 섬유콘크리트의 인장에 대한 역학적 특성의 개선이 섬유의 혼입률과 형상비에 크게 의존하게 됨을 나타낸다.

3.3 압축거동과 압축강도의 특성

섬유콘크리트의 압축실험으로부터 얻어진 섬유콘크리트의 응력-변형도곡선은 그림4와 같다. 이 그림4에서 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트의 응력-변형도곡선은 높은 강도의 콘크리트에 대한 전형적인 것을 보여주고 있고, 섬유를 혼입한 경우에는 콘크리트의 연성이 증가함을 보여주고 있다. 콘크리트의 연성거동에 대한 강섬유의 혼입효과는 섬유혼입률과 섬유의 형상비가 클수록 많이 나타남을 알수 있다. 섬유콘크리트의 초기거동은 섬유의 혼입에 관계없이 무근콘크리트처럼 선형적으로 거동하나 최고응력 이후에는 섬유의 혼입량에 따라 상당한 연성을 보인다. 그림5에서 알 수 있듯이 섬유의 압축강도의 증가율은 섬유혼입률에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고, 섬유길이 가 길수록 압축강도는 많이 증가함을 보여주고 있다. 이때 압축강도의 증가폭은 섬유길이 50mm, 섬유혼입률 3.0%인 경우에 31%이고, 그외의 다른강도에 비해서 상대적으로 작은 증가폭을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 섬유의 혼입률과 섬유길이에 따라 변화되는 콘크리트의 휨거동, 인장거동 및 압축거동을 실험적으로 규명하고자 하였다. 연구결과, 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 콘크리트의 휨강도에 도달한후이후 응력의 감소가 적어 연성이 크게 증대하는 것으로 나타났으며, 합열인장시험에서도 인장강도가 크게 증가하고 연성도 크게 증가함을 나타냈다.

강도의 증진효과는 합열인장의 경우가 가장 크게 나타났고 그다음이 휨인장이었으며, 압축강도의 증진효과는 상대적으로 적은 편이었다. 이것은 섬유의 혼입이 콘크리트의 인장특성을 특히 대폭 개선함을 보여주고 있다. 또한 섬유의 혼입률과 길이의 효과도 뚜렷하여, 섬유혼입률이 클수록 섬유 길이가 길수록 콘크리트의 강도증진 효과가 커지며 연성도 더욱 증대하는 것으로 나타났다. 이것은 섬유콘크리트의 강도와 역학적 특성이 섬유혼입률과 형상비에 따라 크게 달라지게 됨을 말해주고 있다.

결론적으로 본 연구결과에서 알수 있듯이 섬유 콘크리트는 콘크리트의 강도를 대폭 증가시킬뿐만 아니라 연성을 크게 증대시켜 도로구조물 및 충격하중을 받는 구조물등에 아주 효과적으로 이용될 수 있다.

5. 참고 문헌

1. ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete" ACI Manual of Concrete Practice, ACI Publication, 1988
2. ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on the Fiber Reinforced Concrete" ACI Manual of Concrete Practice, ACI Publication, 1988
3. Naaman, A. E and Shah, S. P, "Pull out Mechanism in Steel Fiber Reinforced Concrete" ASCE, 1976, pp. 1537-1548
4. Shah, S. P and Naaman, A. E, "Mechanical Properties of Glass and Steel Fiber Reinforced Mortar" ACI, 1976, pp. 50-53
5. Shah, S. P and Rangan, B. V, "Effects of Reinforcements on Ductility of Concrete" ASCE, 1970, pp. 1167-1184
6. 이경형, "강섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적연구" 대한토목학회지, 1979, pp. 103-111

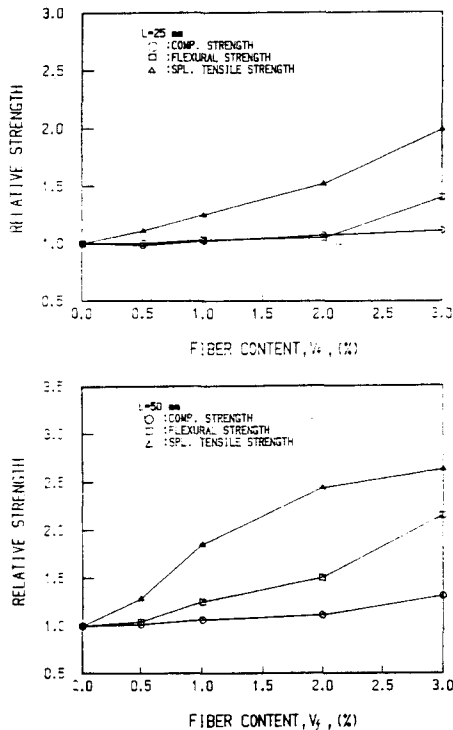


그림6. 섬유혼입량에 따른 각 강도의 변화