大韓土木學會論文集
第9卷 第3號 · 1989年 9月
pp. 49~56

纖維콘크리트의 強度 및 力學的 特性에 관한 硏究

Strength and Mechanical Characteristics of Fiber-Reinforced Concrete

吳 炳 煥* · 李 亨 俊** · 姜 榮 振***
Oh, Byung Hwan · Lee, Hyung Joon · Kang, Young Jin

Abstract

Recently, a growing attention is paid to the 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 on 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. The present study gives a thorough examination on the mechanical bebavior of steel fiber reinforced concrete and allows more realistic use and design of steel fiber reinforced concrete.

要 旨

本 論文에서는 最近들어 활발히 전개되고 있는 새로운 건설재료의 개발을 위한 노력의 하나로서 鋼纖維콘크리트의 개발과 그 力學的 特性에 관하여 연구하였다. 이를 위하여 포괄적인 실험연구를 수행하였으며 강섬유의 혼입률과 섬유길이를 주요 실험변수로 하였다. 강섬유콘크리트의 역학적특성을 규명하기 위하여 휨거동, 인장거동 및 압축거동을 조사분석하였다. 실험결과 섬유의 혼입률이 증가함에 따라 강도가 증가하며, 특히 연성(延性)이 크게 증가함을 발견하였다. 강도의 증가율은 인장하중상태에서 제일 크게 나타났고, 그 다음이 휨하중 상태였으며, 압축상태에서는 강도증가가 제일 적게 나타났다. 이것은 섬유의 효과가 콘크리트의 인장에서 더욱 크게 나타남을 의미하고 있다. 본 硏究는 鋼纖維콘크리트의 力學的 特性 규명과 함께 강섬유콘크리트의 利用과 設計를 위한 중요한 기초자료를 제시하고 있다.

*正會員 · 서울大學校 工科大學 副敎授 토목공학과
**正會員 · 서울大學校 大學院 博士課程
***正會員 · 서울大學校 工科大學

1. 序 論

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 纖維콘크리트이다. 건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 인장이나 동적하중하에서 갑작스런 파괴를 일으키는 脆性을 띄고, 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 콘크리트 속에 분산시켜 넣은 것이 섬유보강콘크리트 또는 섬유콘크리트이다. 이 때 사용되는 섬유의 종류로는 鋼, 유리, 나일론, 폴리프로필렌, 폴리에틸렌, 석면, 탄소 등이 있다.

취성재료의 역학적 성질을 개선하기 위하여 오래전부터 섬유질 재료를 이용하여 왔으며, 콘크리트에 대해서는 1960년대초 鋼纖維의 균열억제개념(crack arrest mechanism)이 설명되면서 섬유콘크리트에 대한 연구가 시작되어 섬유콘크리트는 인장강도와 인성(toughness)이 증가된다는 사실과 에너지의 흡수특성 및 피로특성이 현저하게 개선된다는 사실이 밝혀졌다[6, 7, 9, 10]. 외국에서는 이와 같은 연구결과를 토대로 도로포장, 바닥슬래브, 공항활주로, 수리항만 구조물, 터널라이닝 등 충격하중과 반복하중을 받는 구조물에 섬유콘크리트가 유효하게 이용되고 있다. 국내에서의 섬유콘크리트에 관한 연구는 이제 시작단계에 있으며[13, 14, 15], 앞으로 섬유콘크리트의 특성에 관한 실험적, 이론적 연구 등 포괄적 연구를 수행하여 주요 토목 및 건축구조물에 이용될 수 있는 섬유콘크리트의 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 건설분야에서 가장 적용성이 좋은 것으로 알려진 鋼纖維콘크리트에 대하여 섬유의 혼입에 따른 강도특성 및 역학적 거동특성을 규명하는데 있으며, 이로부터 鋼纖維콘크리트의 이용과 설계를 위한 기초자료를 제시하는데 있다.

2. 섬유콘크리트의 역학적 특성 실험

2.1 실험개요

취성재료로 분류되는 콘크리트는 공칭압축강도가 증가할수록 취성거동의 경향이 크게 나타나는데, 본 연구에서는 비교적 큰 강도를 갖는 콘크리트에 鋼纖維를 혼입하여 재료의 강도특성과 역학적 거동특성을 규명하고자 한다. 재령 28일의 압축강도가 400 kg/cm² 이상인 콘크리트에 鋼纖維를 혼입하여 섬유의 보강효과를 분석한다. 이를 위해 압축거동실험, 할열인장거동실험 및 휨거동실험을 수행하여 각각의 강도와 응력-변형 관계, 그리고 하중-변위 관계를 얻어 섬유콘크리트의 제반특성에 대한 섬유혼입효과를 규명하고자 하였다.

섬유의 形狀比(aspect ratio)와 혼입량에 따른 보강효과를 알아보기 위해서 사용된 鋼纖維는 길이가 25 mm, 50 mm인 두 종류이고, 섬유혼입률은 각각의 섬유길이에 대해 0 %, 0.5 %, 1.0 %, 2.0 %, 3.0 %이다.

2.2 실험재료

(1) 콘크리트

콘크리트는 물-시멘트비(W/C ratio)를 0.32, 슬럼프치를 18 cm로 하여 재령 28일 압축강도가 420 kg/cm² 이상이 되도록 표 1과 같이 배합설계하였다. 시멘트는 제 1종 보통포틀랜트 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 高流動和劑인 Might-150을 시멘트 중량비로 1.7 % 첨가하였고, 강도의 발현을 돕기 위해서는 혼화재 C. S. F (Condensed Silica Fume)을 2.0 % (중량비) 첨가하였다.

표 1. 콘크리트 배합성분

(단위 : kg/m³)

	시멘트	물	굵은골재	잔골재	혼화제	혼화재
함유량	530	170	994.5	663	9.01	10.6

(2) 鋼纖維

강섬유(steel fiber)는 국내에서는 생산되고 있지 않기 때문에 미국의 RIBBON Technology 사의 제품을 사용하였으며, 섬유 형상은 박판으로 된 이

형강섬유(deformed steel fiber)로써 비중이 7.83이고, 길이는 각각 25mm, 50mm였다.

2.3 시편제작 및 양생

콘크리트의 배합은 분당 12회전하는 콘크리트 믹서를 이용하여 실시하였다. 굵은골재, 잔골재, 시멘트, 혼화재를 넣어 1분간 혼합한 후, 섬유의 혼합은 콘크리트 믹서를 돌리면서 강섬유를 손으로 고르게 분산시켰고 혼화제를 섞은 물을 첨가하여 콘크리트를 배합하였다.

시편은 압축강도 및 할열인장강도 실험용으로 지름 100mm, 높이 200mm인 원주형 공시체(cylindical specimen)와 휨강도 실험용으로 단면이 100mm×100mm이고 길이가 500mm인 보 공시체(beam specimen)를 각각의 실험변수에 대해서 3개씩 만들었다. 섬유콘크리트는 보통콘트리트에 비해서 공극이 클 수 있으므로 다짐은 봉다짐과 판진동기를 이용한 진동다짐도 병행하여 실시하였다.

시편의 양생은 시편제작후 24시간 경과한 후 mould로부터 탈형하여 수중양생을 실시하였고, 이 때 수조의 온도는 20±2°C로 유지하였다.

2.4 실험방법 및 측정

섬유콘크리트의 작업성(workability)을 고찰하기 위하여 콘크리트를 배합한 후 슬럼프시험을 수행하였으며 이 결과 섬유 혼입율이 증가함에 따라 슬럼프값이 선형적으로 감소하였고, 같은 섬유혼입률에서는 섬유길이가 긴 경우에 슬럼프값이 더 감소하였다.

섬유콘크리트의 거동특성을 알아보기 위한 압축강도시험 및 할열인장강도시험은 자동제어 만능시험기를 사용하였다. 재령 28일 된 섬유콘크리트의 압축거동특성을 알아보기 위해서 시험기의 자기기록계로부터 섬유콘크리트의 응력-변형도 곡선(stress-strain curve)을 얻었다.

또한, 섬유콘크리트에 대한 휨강도실험도 자동제어 만능시험기를 사용하여 수행하였으며 그림 1과 같은 4점재하시험을 실시하였다. 하중의 재하속도는 정적수준인 0.5mm/min로 하여 변위제어실험을 하였으며, 이 시험으로부터 섬유콘크리트 보 공시체에 대한 하중-처짐곡선(load-deflection curve)을 얻었다.

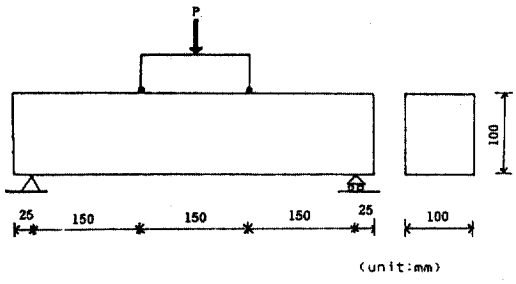

그림 1. 휨인장강도 실험의 개략도

3. 실험결과와 역학적 특성 분석

3.1 휨거동과 휨강도 특성

보 공시체에 대한 재하시험에서 시험기의 자기기록계로부터 얻어진 재하점에서의 하중-처짐 곡선은 그림 2와 같다. 이 그림으로부터 섬유가 없는 무근콘크리트(V_f=0.0 %)는 최대하중에 도달한 후 파괴가 급속히 일어나는데 비하여 섬유가 혼입된 콘크리트는 최대하중에 도달한 후에도 섬유의 bridging 작용 때문에 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, 섬유혼입률이 증가할수록 다수의 미세균열(micro-crack)이 발생하면서 파괴가 서서히 일어난다. 섬유혼입률이 아주 작을 때(V_f=0.5 %)에는 극한하중의 증가가 크지 않고, 최대하중에 도달한 후에도 하중의 감소가 비교적 빠르게 나타나 섬유의 보강효과가 작게 나타나며 섬유의 혼입효과는 섬유혼입률이 증가함에 따라 크게 나타났다. 섬유의 이러한 보강효과는 콘크리트에 대한 섬유의 혼입이 균열의 생성 및 성장을 억제하여 취성재료로 분류되는 콘크리트의 성질을 크게 개선함으로서 나타난다.

섬유콘크리트의 휨인성(toughness, 하중-처짐

표 2. 섬유의 혼입률과 길이에 따른 콘크리트의 강도특성

(단위 N/mm²)

강도 / 섬유혼입률		압축강도	휨강도	할열인장강도
무근콘크리트 (V_f=0%)		43.73	5.89	3.62
섬유길이 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
섬유길이 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

곡선하의 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 매트릭스 간의 부착력에 의해 일어나는데 섬유길이가 길면 부착력이 증가하여 뽑힘현상(pull-out)에 대한 저항력이 증대되기 때문인 것으로 분석된다. 실제로 25 mm의 강섬유를 혼입한 시편의 파괴면에서 뽑혀진 섬유의 수가 많이 나타났다.

휨시험에서 얻은 섬유콘크리트의 휨강도는 표 2에 나타낸 것과 같이 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트에 비해서 많이 증가한다. 이 때 섬유혼입률과 섬유길이에 따른 섬유콘크리트의 휨강도의 변화는 그림 3, 그림 4와 같다. 그림 3은 섬유혼입률에 따른 섬유콘크리트의 휨강도의 변화를 나타낸 것으로 섬유혼입률이 증가할수록 휨강도의 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 즉, 섬유길이가 50 mm인 경우 섬유혼입률이 적을 때(V_f=0.5%)에는 휨강도의 증가율이 4.0%인데 비해서 섬유혼입률이 클 때(V_f=3.0%)는 섬유콘크리트의 휨강도가 2.15배 증가하였다.

그림 4에서는 섬유의 길이에 따른 휨강도의 변화를 나타내는데 섬유길이가 길수록 휨강도가 크게 증가하여 섬유혼입률이 3.0%인 경우에 섬유길이가 25 mm일 때는 40%의 강도증가가 있는데 비하여 섬유길이가 50 mm일 때는 휨강도가 115%증가하였다. 이와 같은 결과는 섬유 길이가 길면 매트릭스와 강섬유간의 부착력이 상당히 증가하여 섬유의 뽑힘현상보다는 강섬유의 파괴에 의해서 시편의 파괴가 일어나기 때문에 섬유길이가 길면 더 큰 하중을 받을 수 있는 것으로 사료되고 있다[8,10,11]. 또한 그림 10에서 알 수 있듯이 섬유콘크리트의 휨강도의 증가폭은 압축강도의 증가폭보다는 크고

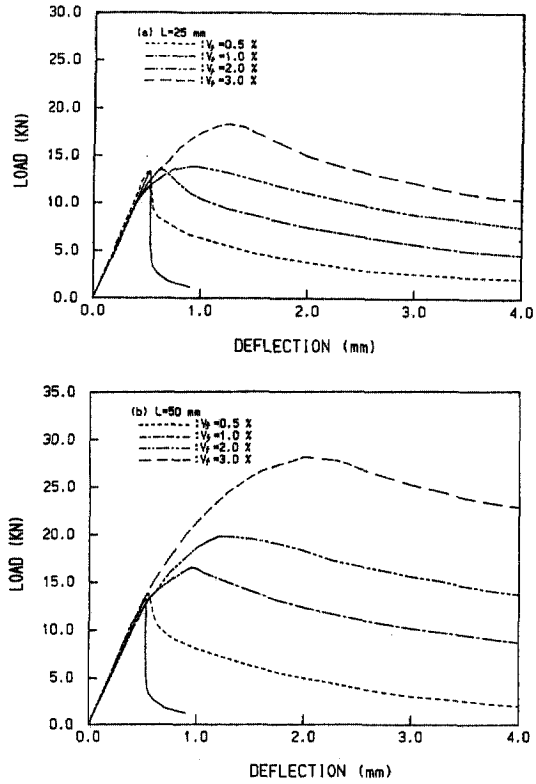

그림 2. 섬유의 혼입량에 따른 휨하중-처짐 곡선

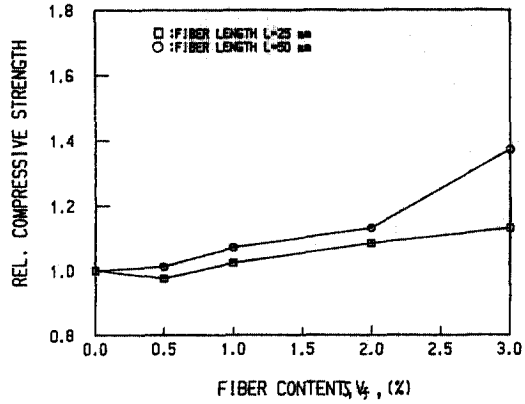

그림 3. 섬유의 혼입량에 따른 상대 휨강도의 증가현상

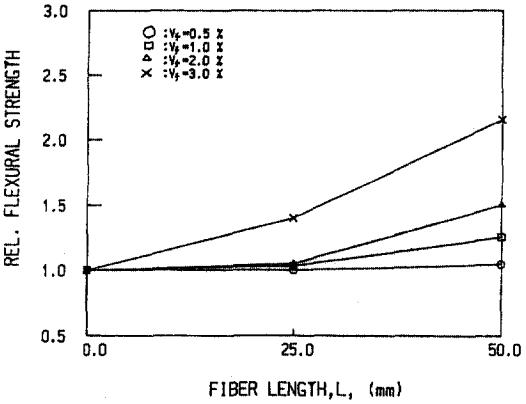

그림 4. 섬유의 길이에 따른 상대 휨강도의 증가현상

할열인장강도의 증가폭보다는 작은데 이러한 경향은 섬유길이가 길 때 더욱 두드러지게 나타난다.

이상에서 살펴본 바와 같이 섬유콘크리트의 휨거동 및 휨강도의 특성은 鋼纖維의 혼입률과 형상비에 크게 의존함을 알 수 있다.

3.2 인장거동과 인장강도의 특성

원주형 공시체에 대한 할열인장실험 (splitting tensile test)에서 얻어진 섬유콘크리트의 인장강도는 표 2에 나타나 있다. 또한 섬유혼입량과 섬유길이에 따른 섬유콘크리트의 인장강도의 변화는 그림 5와 그림 6에 도시되어 있다. 섬유의 길이가 일정할 때 인장강도의 변화는 그림 5에서 알 수 있듯이 섬유의 혼입률이 증가하면 섬유콘크리트의 인장강도가 증가하는데 섬유길이가 25 mm인 경우에는 섬유혼입률이 증가할수록 강도의 증가폭이 증가하는 경향을 보이고, 섬유길이가 50 mm인 경우에는 섬유혼입률이 1.0 % 이상이 되면 섬유콘크리트의 인장강도의 증가폭이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 그림 6은 섬유혼입률이 일정할 때 섬유길이에 따른 섬유콘크리트의 인장강도의 변화를 나타낸 것으로 섬유길이가 길수록 인장강도가 많이 증가하며, 섬유혼입률이 2.0 %이하인 경우에는 섬유길이가 길수록 인장강도의 증가폭이 크게 나타나고, 섬유혼입률이 3.0 %인 경우는 섬유길이가 길면 강도의 증가폭이 둔화되는 경향을 보인다. 이것은 섬유혼입률과 섬유길이가 과도할 경우 콘크리트의 강도증진에 대한 기여가 작기 때문인 것으로 사료된다.

또한 그림 10은 섬유혼입률에 따른 각 강도의 증가를 나타낸 것으로 할열인장강도의 증가폭이 휨강도나 압축강도의 증가폭보다 상당히 큼을 알 수 있다. 할열인장강도의 증가폭이 휨강도의 증가폭보다 크게 나타나는 것은 할열인장의 경우가 휨인장의 경우보다 인장을 받는 부분이 상대적으로 많으며 섬유효과가 인장영역에서 크게 나타나기 때문인 것으로 사료되고 있다.

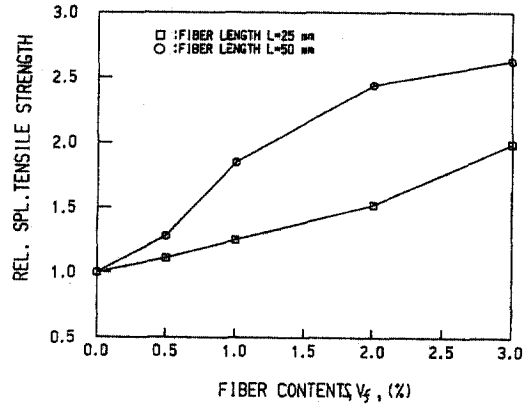

그림 5. 섬유의 혼입량에 따른 상대 할열인장강도의 증가현상

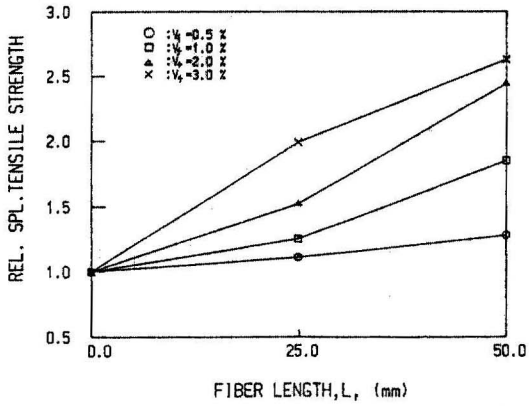

그림 6. 섬유의 길이에 따른 상대 할열인장강도의 증가현상

이와 같은 결과는 섬유콘크리트의 인장에 대한 역학적 특성의 개선이 섬유의 혼입률과 형상비에 크게 의존하게 됨을 나타내며, 여러 연구자의 연구결과를 뒷받침하고 있다[6, 10].

3. 3 압축거동과 압축강도의 특성

섬유콘크리트의 압축실험으로부터 얻어진 섬유콘크리트의 응력-변형도 곡선은 그림 7과 같다. 이 그림 7에서 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트의 응력-변형도 곡선은 높은 강도의 콘크리트에 대한 전형적인 것을 보여주고 있고, 섬유를 혼입한 경우에는 콘크리트의 연성이 증가함을 보여주고 있다. 그림 7(a)는 섬유길이 25 mm인 경우 섬유혼입률에 따른 응력-변형도 곡선으로 콘크리트의 연성거동에 대한 섬유혼입효과가 작고, 그림 7(b)는 섬유길이가 50 mm인 경우에 대한 응력-변형도 곡선으로 섬유혼입률이 0.5 %일 때는 무근콘크리트와 유사한 거동을 하고 섬유혼입률이 1.0 %이상인 경우에 콘크리트의 연성이 많이 증가함을 보여주고 있다. 즉 콘크리트의 연성거동에 대한 鋼纖維의 혼입효과는 섬유혼입률과 섬유의 형상비가 클수록 많이 나타남을 알 수 있다.

섬유콘크리트의 초기거동을 섬유의 혼입에 관계없이 무근콘크리트처럼 선형적으로 거동하나 最高應力이후에는 섬유의 혼입량에 따라 상당한 軟性을 보인다.

纖維콘크리트의 압축시험에서 얻은 壓縮強度가

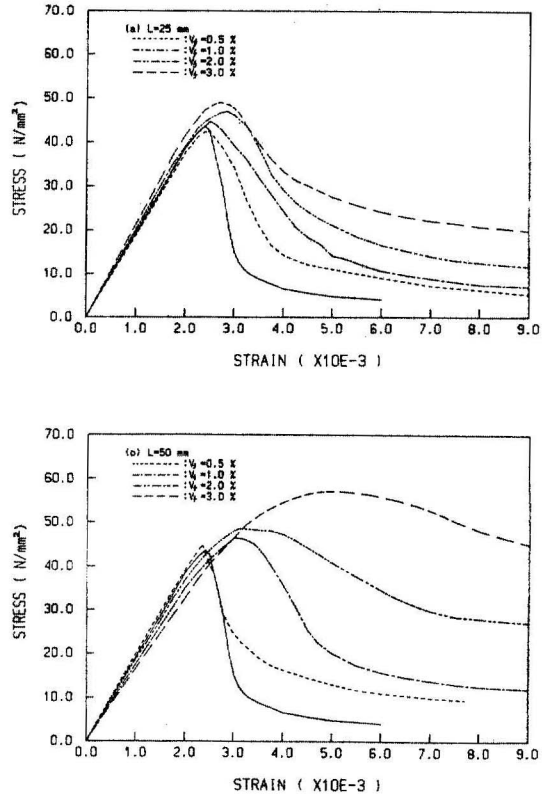

그림 7. 섬유혼입량에 따른 압축응력-변형도 관계곡선

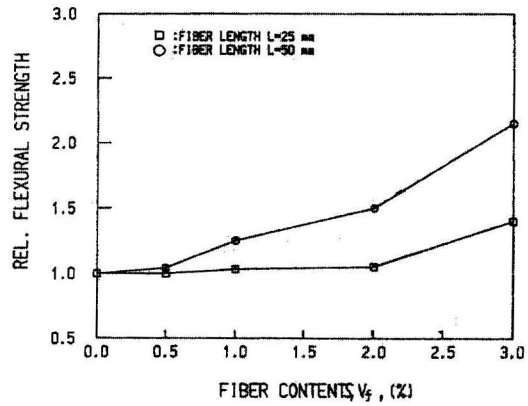

그림 8. 섬유혼입량에 따른 상대 압축강도의 변화

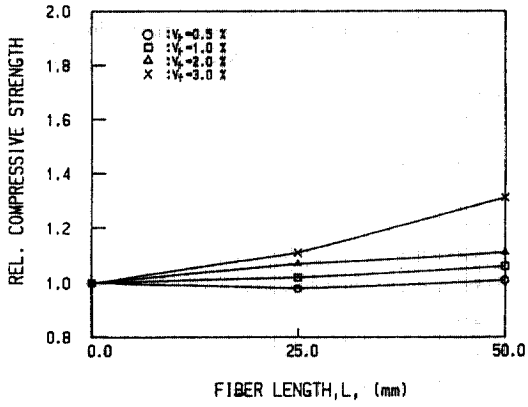

그림 9. 섬유길이에 따른 상대압축강도의 변화

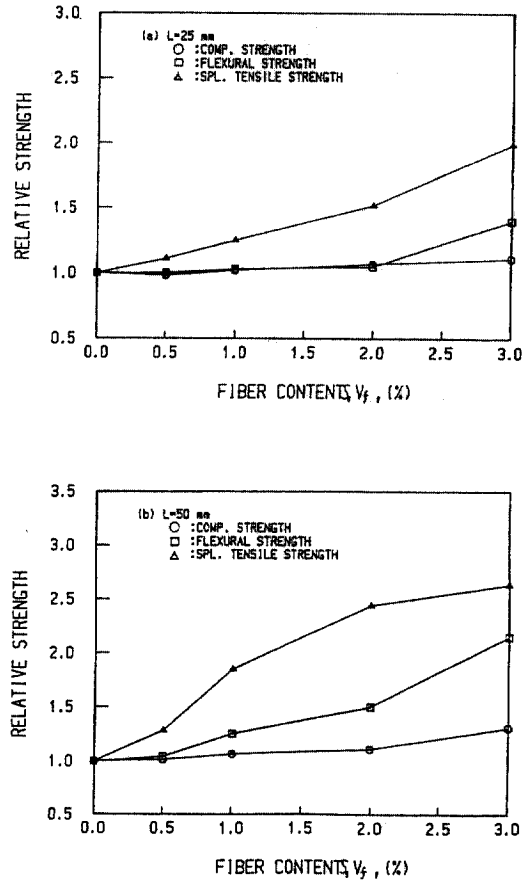

그림 10. 섬유혼입량에 따른 각 강도의 변화

표 2에 요약되어 있다. 섬유의 혼입량과 길이에 따른 섬유콘크리트의 압축강도의 증가율은 그림 8과 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 섬유혼입율에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고, 섬유길이가 길수록 壓縮強度는 많이 증가함을 보여주고 있다. 이때 압축강도의 증가폭은 섬유길이 50 mm, 섬유혼입율 3.0 % 인 경우에 31 % 이고, 그외의 경우에는 압축강도의 증가폭이 10 % 이내로서 다른 강도에 비해서 상대적으로 작은 증가폭을 나타내고 있다.

纖維콘크리트의 압축강도의 증가폭은 그림 10에서도 알 수 있듯이 휨강도나 인장강도의 증가율보다 훨씬 작으며 이와같은 결과는 콘크리트에 대한 鋼纖維의 混入이 콘크리트의 압축보다는 인장거동에 대한 力學的 性質을 개선함을 의미하고 있다. 즉 纖維가 콘크리트의 引張龜裂을 억제하며, 引張時 뽑힘(pull-out)저항을 증대시켜 引張荷重下에서는 그 效果가 크게 나타나나 壓縮荷重下에서는 그 效果가 적게 나타나기 때문인 것으로 사료된다[3, 7].

4. 結 論

本 硏究에서는 새로운 建設材料로서 기존 콘크리트의 力學的 特性을 개선할 수 있는 鋼纖維콘크리트에 대한 제반 強度特性과 擧動特性을 규명하였다. 纖維콘크리트는 콘크리트에 纖維를 混入함으로서 콘크리트의 최대 결점중의 하나인 引張의 취약성과 脆性(brittleness)을 대폭 개선하게 된다.

本 硏究에서는 섬유의 혼입율과 섬유길이에 따라 변화되는 콘크리트의 휨거동, 인장거동 및 압축거동을 실험적으로 규명하고자 하였다. 연구결과, 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 콘크리트의 휨강도는 물론 휨강도에 도달한 후에도 응력의 감소가 적어 연성이 크게 증대하는 것으로 나타났으며, 할열인장시험에서도 인장강도가 크게 증가하고 연성도 크게 증가함을 밝혔다.

강도의 증진효과는 割裂引張의 경우가 가장 크게 나타났고 그 다음이 휨인장 이었으며, 압축강도의 증진효과는 상대적으로 적은 편이었다. 이것은 섬유의 혼입이 콘크리트의 引張特性을 특히 대폭 개선함을 보여주고 있다. 또함 섬유의 혼입률과 길이의 효과도 뚜렷하여, 섬유혼입율이 클수록 섬유길이가 길수록 콘크리트의 강도증진 효과가 커지

며 연성도 더욱 증대하는 것으로 나타났다. 이것은 纖維콘크리트의 強度와 力學的 特性이 纖維混入率과 形狀比에 따라 크게 달라지게 됨을 말해주고 있다.

결론적으로 本 硏究結果에서 알 수 있듯이 纖維콘크리트는 콘크리트의 強度를 대폭 증가시킬 뿐만아니라 軟性을 크게 증대시켜 도로구조물과 내진구조물 및 충격하중을 받는 구조물등에 아주 효과적으로 이용될 수 있다. 앞으로 鋼纖維콘크리트의 국내 활용을 위하여 이 분야의 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

謝 辭

本 論文은 한국과학재단의 1988년도 전반기 기초연구과제에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

參考文獻

1. ACI Committee 544, *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*", ACI Manual of Concrete Pratice, 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", *Journal of St. Div. ASCE*, Vol. 102, ST8, 1976, pp. 1537－1548.
4. Patton, M. E. and Whittaker, W. L., "Effects of Fiber Content of Damaging Load on Steel Fiber Reinforced Concrete Stiffness", *Journal of ACI*, Vol. 80, No. 1, 1983, pp. 13－16.
5. Ramakrishnan, V., Coyle, W. V., Kulandaisamy, V., and Sohrander, E.K., "Performance Characteristics of Fiber Reinforced Concrete with Low Fiber Contents", Journ al of ACI, Vol. 78, No. 5, 1981, pp. 388－394.
6. Romualdi, J. P. and Baston, G. B. "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement", *Journal of ACI*, Vol. 60, No. 6, 1963, pp. 775－790.
7. Romualdi, J. P. and Baston, G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete", *Journal of En. Mechanics, ASCE*, Vol. 89, EM 3, 1963, pp. 147－168.
8. Romualdi, J. P. and Mandel, J.A. "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", *Journal of ACI*, Vol. 61, No. 6, 1964, pp. 657－670.
9. Shan, S. P. and Rangan, B. V. "Effects of Reinforcements on Ductility of Concrete", *Journal of St. Div., ASCE*, Vol. 96, ST6, 1970, pp. 1167－1184.
10. Shah, S. P. and Rangan, B.V., "Fiber Reinforced Concrete Properties", *Journal of ACI*, Vol. 68, No. 2, 1971, pp. 126－135.
11. Shan, S.P. and Naaman, A.E., "Mechanical Propertes of Glass and Steel Fiber Reinfored Mortar," *Journal of ACI*, Vol. 73, No 1, 1976, pp. 50－53.
12. Walkus, P.R., Januskiewicz, A., and Jeradel, J., "Concrete Composites with Cut Steel Fiber Reinforcement Subjected to Uniaxial Tension", *Journal of ACI, proceedings*, Vol. 76, No. 10, oct., 1979, pp. 1079－1092.
13. 문제길, "섬유콘크리트의 특성 및 그 이용에 관한 연구", 건국대 논문집, 1977, pp. 43－61.
14. 박승범, 이보성, 이기준, "탄소섬유보강 시멘트복합체의 실험적 연구" 1988년도 대한토목학회 학술발표회 개요집, 1988. 10.29, pp. 159－162.
15. 이경형, "강섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한토목학회지, 제27권, 제6호, 12月, 1979, pp. 103－111.

(接受 : 1989. 6. 14)