鋼纖維를 혼입한 鐵筋콘크리트部材의 휨거동에 관한 이론 및 실험연구

A Theoretical and Experimental Investigation on the Flexural Behavior of Reinforced Concrete Members Containing Steel Fibers

吳 炳 煥*
Oh, Byung Hwan

요 약

본 논문에서는 철근콘크리트 부재에 강섬유를 혼입하였을때의 역학적 거동에 관하여 이론및 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 포괄적인 실험연구를 수행하였으며, 단철근 콘크리트 보와 복철근 콘크리트 보에 대하여 강섬유의 혼입효과를 규명하였다. 본 실험으로부터 하중-처짐관계, 균열폭, 균열간격, 균열형상, 철근 및 콘크리트 변형도를 측정하였다. 실험결과 강섬유의 혼입으로 인하여 균열이 크게 억제되고 균열폭이 크게 감소함을 발견하였다. 또한, 부재의 연성과 극한저항모멘트가 크게 증가하였다. 본 논문에서는 이러한 강섬유의 혼입효과를 설명할 수 있는 이론모델을 유도하여 제시하였으며, 앞으로 강섬유콘크리트는 연성을 필요로하는 내진구조물등에 효율적으로 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

The mechanical behavior of reinforced concrete beams with steel fibers is investigated in the present study. An experimental program was set up and several series of reinforced concrete beams have been tested, including two series of singly-reinforced concrete beams and one series of doubly-reinforced concrete beams. It was found from these measurements that the crack widths increase almost linearly with the increase of steel stress and that the crack widths at the same loading stages are greatly reduced as the contents of steel fibers increase. The present study also indicates that the ductility and the ultimate resistance are remarkably enhanced due to the addition of steel fibers. A theoretical model for the flexural analysis of fiber-reinforced concrete beam which takes into account the effects of fibers is also proposed.

1. 서론

토목 및 건축등의 건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 인장이나 동적하중 하에서 급작스런 파괴를 일으키는 취성을 띄고, 균열의 생성 및 성장을 억제하기 힘든 단점이 있다. 이러한 콘크리트의 제반 역학적 성질을 개선하는 방법으로써 철근으로 보강한 철근콘크리트가 지금까지 이용되고 있다. 콘크리트의 인장저항능력의 증대, 국부적인 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등 역학적 성질을 개선 및 보강하기 위하여 불연속적이고 단상인 섬유질 재료를 콘크리트 속에 불규칙적으로 분산시켜 넣은 것을 섬유보강 콘크리트 또는 섬유콘크리트

* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

(Fiber reinforced concrete or Fiber concrete)라 한다. 이때 사용되는 섬유의 종류로는 강(Steel), 유리(Glass), 나일론(Nylon), 폴리프로필렌(Polypropylene), 석면(Asbestos),폴리에틸렌(Polyethylene), 탄소(Carbon) 등이 있다. 취성재료의 역학적 성질을 개선하기 위하여 섬유를 처음 사용한 것은 오래전의 일로써, 흙 벽돌의 보강재료로 잘게 썰은 짚을 사용하거나 석회모르타와 석고에 말총을 사용한 것이 그러한 예가 된다.

1960년대초 미국의 Romualdi & Baston[1, 2]이 파단이론(Fracture theory)을 적용하여 강섬유의 균열억제개념(Crack arrest mechanism)을 설명하였고, 짧은 강섬유 및 연속섬유(Wire)로 보강된 콘크리트의 인장시험을 행하여 콘크리트의 인성(Toughness)과 인장강도가 현저히 개선된다는 사실과 인장특성은 연속섬유간격의 평방근에 반비례 한다는 사실을 밝혔다. Shah와 Rangan [3]에 의해서 강섬유로 보강하면 콘크리트는 인성이 현저히 증대되고, 에너지의 흡수특성 및 피로특성(Fatigue characteristic)이 현저하게 개선된다는 사실이 밝혀졌다.

1980년대에 들어와서는 섬유 콘크리트의 기본적 강도특성 뿐만 아니라 철근 콘크리트 부재에 섬유를 혼입한 효과에 대해서도 실험적, 이론적 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재(보)에 대해 휨시험(Flexural test)을 수행하여 부재의 역학적 거동특성에 관한 강섬유의 보강효과를 규명하여 섬유 콘크리트의 이용 가능성을 제시하고자 한다. 섬유혼입량과 철근량에 따른 섬유보강효과를 알아보기 위하여 섬유혼입량과 철근비를 변화시키면서 실험을 수행하며, 각각의 부재에 대한 초기균열하중, 극한하중, 균열폭, 균열간격 및 전단철근의 응력을 측정, 분석한다.

또한 섬유혼입으로 인한 강도의 증가등을 고려하여 섬유콘크리트 보의 정확한 해석과 설계를 위한 모델을 제시하여 실험결과와 비교분석한다.

2. 섬유 콘크리트보의 역학적거동 실험

2.1 실험개요

2.1.1 실험재료

(1) 콘크리트

콘크리트는 물-시멘트비 W/C=0.40, 슬럼프값을 18 cm로 하여 재령 28일 압축강도(σ_{ck})가 420kg/㎠이 되도록 배합설계 하였다.

시멘트는 제1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔 골재는 조립률(F.M) 2.21, 비중 2.52인 것을 사용하였다. 또한 굵은 골재는 조립률 6.19, 비중 2.60, 최대치수 15㎜인 것을 사용 하였다. 섬유 혼입으로 인한 유동성 악화를 방지하기 위하여 고유동화제인 DAREX Super-20을 1.2% 첨가하였고, 강도의 발현을 돕기 위하여 혼화재 C.S.F.(Condensed silica fume)을 2.0% 첨가하였다. 골재의 성질과 기타의 배합조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Material Properties of Aggregates and Proportion of Mix

(1) 골재의 성질

	비 중	흡 수 율	조 립 률	최대치수
잔 골 재	2.52	1.26%	2.21	
굵은골재	2.60	2.44%	6.19	15 MM

(2) 배합성분 (단위 : kg/㎥)

	시 멘 트	물	굵은골재	잔 골 재	혼 화 재	C.S.F
함 유 량	524	215	987	600	6.29	10.48

(2) 강섬유 및 철근

본 실험에서 콘크리트 보강재로 사용한 강섬유는 국내에서 아직 상업적으로 생산되지 않으므로 단면이 원형인 강선을 일정한 길이로 잘라서 사용하였다. 강섬유는 직경 d_f=0.7㎜, 길이 l_f=40㎜이고 형상비(길이/직경비)가 l_f/d_f=57인 직선섬유(Straight fiber)이다. 강섬유에 대해 재료시험을 실시하였는데 항복점 강도는 1303 MPa이었고, 탄성계수(E_f)는 2.0×10^5MPa이었다. 섬유의 혼입량에 따른 섬유보강효과를 알아보기 위해서 실험변수는 섬유혼입율로 하였으며, 이때 섬유혼입율은 0.0%, 1.0%, 2.0%로 변화시켰다.

인장철근 및 압축철근은 SD 40의 고강도 철근을 사용하였고, 전단철근은 가공상의 이유등으로 저강도의 철근을 사용하는 것이 일반적이므로 SD 24 철근을 사용하였다. 각 철근에 대한 재료시험결과, 각 철근의 항복점강도(σ_y)는 모두 규정 강도를 초과하였다. SD 40 철근의 경우 항복점 강도는 420MPa이고, SD 24철근의 경우에는 항복점 강도가 359MPa이었다.

2.1.2 실험 부재의 설계

실험부재의 단면 및 지간은 콘크리트 표준시방서[20]의 규정에 따라 선정했으며, 실험부재는 단철근 및 복철근보로 하여 모두 9개를 만들었다. 부재의 단면형상은 모두 구형으로서 높이 h=18cm, 폭 b=12cm, 유효깊이(Effective depth) d=14cm인 단철근보와 h=18cm, b=12cm, d=14cm, 압축철근의 위치 d'=4cm인 복철근

보이고 부재의 총길이는 200cm이며 지간길이는 l=180 cm이다.

주철근량의 변화에 따른 섬유의 혼입효과를 알아보기 위해서 실험부재의 변수로는 주철근량을 변화시켰다. 단철근보의 경우에는 철근비(ρ)를 평형철근비(ρ_b)의 0.40, 0.65 두 종류로 하였고, 복철근보의 경우는 $\rho=0.90\rho_b$와 압축철근비(ρ')를 0.0085로 하였다. 철근의 배근은 단철근보에서 $\rho=0.40\rho_b$인 경우 철근량 $A_s=2.534cm^2$(2×D13), $\rho=0.65\rho_b$인 경우에는 철근량 $A_s=3.972cm^2$(2×D16)로 하였고, 복철근보의 경우 인장철근은 $A_s=5.73cm^2$(2×D19), 압축철근은 $A_s'=1.426cm^2$(2×D10)로 하였다.

실험시 부재의 전단파괴를 방지하고 휨 파괴를 유도하기 위해 전단보강은 충분히 하였다. 콘크리트 표준시방서[20]에 따라 전단구간에 걸쳐 수직 스터럽(Vertical stirrup)을 d/2(=7cm) 간격으로 SD24, D10 철근을 배근 하였다.

2.2 실험 부재의 제작 및 양생

실험 부재의 제작시 거푸집은 두께 12mm인 합판으로 만들었으며, 콘크리트 타설후 부재의 성형을 돕기 위해서 거푸집을 각목으로 보강 하였다.

콘크리트는 콘크리트 믹서를 이용하여 시멘트, 굵은 골재, 잔 골재를 혼합한후 강섬유를 골고루 분산시키면서 배합하였고, 타설하기전 섬유의 뭉침을 방지하기 위해 삽비비기를 병행하였다.

또한 봉으로 충분한 다짐을 하면서 콘크리트를 타설하였고, 양생은 부재를 습적으로 덮어 살수를 하면서 습윤 양생을 실시하였다.

철근 콘크리트의 기본적 강도특성을 알아보기 위해서 강도시험용 시편을 만들었는데, 압축강도 및 할열인장강도 시험용으로 지름 10cm, 높이 20cm인 원통형 공시체(Cylinder mould)를 각 부재당 6개씩 만들었고, 휨강도 시험용으로 단면 10cm×10cm, 길이 50cm인 보공시체(Beam mould)를 각 부재당 3개씩 만들었다. 강도 시험용 공시체의 양생은 수중양생과 실험부재의 양생조건과 같은 습윤양생을 실시하였다.

부재제작후 45일 양생을 한 다음 부재 및 공시체에 대한 휨 시험 및 기본강도 시험을 시행하였다.

2.3 실험 방법 및 측정

2.3.1 재하방법

실험 부재의 지지조건은 단순들보로 하였으며, 지점은 양쪽 모두 이동단을 설치 하였다. 실험부재에 대한 재하는 양쪽 지점에서 L/3(=60cm) 떨어진 점에 4-점 재하 방법(4-point bending test)으로 연직 하중을 가하였다.

하중은 60ton 용량의 유압잭을 사용하여 가압하였으며, 하중을 보정하기 위해서 유압 피스톤 아래에 20ton 용량의 Proving ring을 설치하였다. 부재의 재하부 콘크리트의 지압파손을 막고, 편심재하를 방지하기 위하여 재하점의 콘크리트에 폭 14cm의 철판을 두었다.

하중의 재하는 극한 하중에 도달할 때까지 20-30회 정도 단계적으로 실시하였다. 초기균열이 생길 때 까지는 0.25ton씩 증가하면서 재하하였고 균열이 생긴후 사용하중단계에서는 0.5ton씩 하중을 증가시켰다. 또한 극한하중 근처에서는 0.25ton씩 증가시키면서 재하하였다.

2.3.2 측정 및 결과기록

각 하중 단계마다 중앙점, 하중재하점과 지간의 1/4 지점에서 처짐, 균열형상, 균열폭, 철근과 콘크리트의 변형도를 각각 측정 하였다.

(1) 처짐

실험부재 지간의 1/2점, 1/4점 및 하중 재하점에 0.01mm 정도의 다이알게이지를 설치하여 각 하중단계마다 처짐을 측정하였고, 이를 토대로하여 각 부재의 하중-처짐 곡선을 얻었다.

(2) 철근의 변형도

철근의 변형도는 철근표면에 5mm 부착식 전기저항 스트레인게이지(Strain gage)를 인장 및 압축 철근의 경우, 지간의 1/2점, 1/4점에 부착하여 방수처리한 후 각 하중 단계마다 측정하였다. 전단철근의 경우는 지점으로부터 d(=14cm) 및 30cm 떨어진 곳에 위치한 전단철근의 중앙부분에 주철근과 같은 방법으로 스트레인 게이지를 부착한후 각 하중 단계마다 전단철근의 변형도를 측정하였다.

(3) 콘크리트의 변형도

콘크리트의 변형도는 부재 중앙점의 인장 및 압축연단과 인장 및 압축철근의 위치에 68cm 매입용 전기저항 스트레인 게이지를 부착하여 각 하중 단계마다 측정하였다. 또한 사압축대의 변형을 측정하기 위하여 지점에서 30cm 떨어진 점의 중앙부분에 45 경사로 콘크리트 변형 게이지를 설치하였다.

(4) 균열폭

균열폭은 대표적인 몇개의 균열에 대하여 최소읽음값

0.01㎜인 광학균열측정기구(Eye gage)로 각 하중 단계마다 측정하였다. 측정위치는 휨구간 및 전단구간이며, 대표적인 균열에 대해 인장측 연단에서 균열폭을 측정하였다.

(5) 균열형상

각 실험부재에 백색페인트를 칠해서 균열이 발생한 후 각 하중 단계마다 균열의 진행을 부재에 표시하여 균열형상 및 균열간격을 측정하였고, 부재가 파괴에 이르기 전에 균열형상을 트레이싱 페이퍼에 옮겨 그렸다.

각 부재에 대한 변형도 및 처짐의 측정위치는 Fig. 1에 나타냈다. 위에서와 같은 각 변형도의 측정은 1/2 Bridge의 Whitston Bridge의 회로방식에 의하여 자동제어 시스템(Automatic control system)으로 측정하였다.

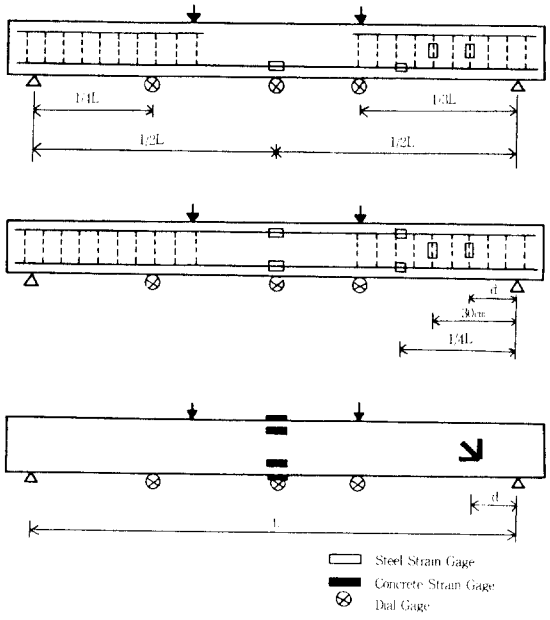


Fig. 1 Locations of Measuring Sensors

3. 실험결과 및 분석

3.1 기본강도 실험

섬유콘크리트의 압축강도, 휨강도, 인장강도 등을 측정하기 위한 기본강도 시험은 시편제작 후 부재시험과 같이 재령이 45일 되었을때 수행하였다. 각각의 시편에 대한 재료시험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Measured Strengths of Concrete

(단위 : MPa)

강도 / 섬유혼입율	양생조건	압축강도		할열인장강도		휨강도	
		수중	습윤	수중	습윤	수중	습윤
0.0 %		41.0	39.7	3.28	2.85	8.24	7.77
1.0 %		44.5	41.4	5.45	5.37	10.18	9.27
2.0 %		47.9	47.7	8.15	8.05	12.84	11.89

(1) 압축강도 특성

섬유콘크리트는 강섬유의 혼입율이 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도가 거의 선형적으로 증가하였으며, 섬유의 혼입율에 따른 압축강도의 증가율은 Fig. 3.과 같다. 이때 압축강도의 증가율은 인장강도의 증가율보다 적었고, 섬유혼입율이 2%일때 압축강도의 증가율은 17% 정도였다. 이와같은 압축강도의 증가는 강섬유의 균열억제작용으로 인해서 일어나며, 이 실험결과는 Shah & Rangan[3] 및 Ramakrishnan & Coyle [10] 등이 행한 실험결과와 유사하다.

(2) 휨강도 특성

무근콘크리트는 최대하중에 도달한 후 급속한 파괴가 일어나는데 반하여 강섬유를 혼입한 콘크리트는 최대하중에 도달한 후에도 지속적으로 하중을 받으며 파괴가 서서히 진행되었다. Fig. 2는 휨파괴시 시편의 모습으로 섬유를 혼입한 경우에 균열이 상당히 생긴 후에도 섬유의 Bridging작용으로 인해서 파괴가 급격히 일어나지 않고 서서히 파괴되는 현상을 보여주고 있다.

섬유콘크리트의 휨강도는 강섬유의 혼입율이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하였다. 섬유 혼입율이 2.0%일때 휨강도의 증가율은 약 56%로서 압축강도의 증가율보다는 크고 할열인장강도의 증가율보다는 작았다(Fig. 3 참조).

(3) 할열인장강도 특성

섬유콘크리트에 대한 할열인장강도시험에서 얻은 인장강도는 Table 2에 나타냈고, 섬유혼입율에 따른 인장강도의 증가율은 Fig. 3.에 나타냈다. 섬유콘크리트의 할열인장강도는 섬유혼입율이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였고, 섬유 혼입율이 2.0%일때 할열인장강도는 약 2.5배 증가하였다.

Fig. 3.으로부터 할열인장강도의 증가율이 휨강도나 압축강도의 증가율보다 훨씬 큼을 알 수 있는데, 이와 같은 결과는 콘크리트에 대한 섬유의 보강은 콘크리트

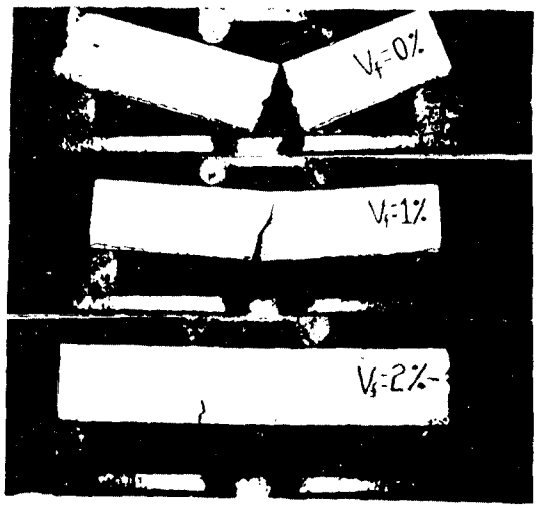


Fig. 2. Modes of Specimens at Failure

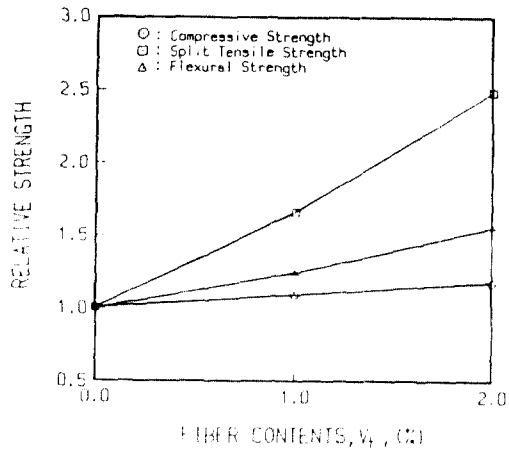


Fig. 3. Variations of Each Strength as a Function of Fiber Contents

의 압축강도보다는 인장강도를 크게 개선함을 나타낸다. 또한, 할열인장강도의 증가율이 휨강도의 증가율보다 큰 것은 할열인장의 경우가 휨인장보다도 인장을 받는 영역이 상대적으로 많기 때문에 섬유효과가 할열인장에서 더 크게 나타나는 것으로 사료된다.

3.2 보의 휨 거동 특성

실험에서 얻어진 부재 중앙점에서의 하중-처짐곡선은 Fig. 4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 철근콘크리트 부재에 섬유를 혼입하면 부재의 극한하중은 증가한다. 극한하중의 증가는 섬유 혼입율의 증가와 비례하는 경향을 나타내는데, 철근비$\rho=0.40\rho_b$인 경우에 섬유혼입율이 1.0%일때는 극한하중이 약 25% 증가하였고 섬유혼입율이 2.0%일때는 48%정도 증가하였다. 또한 철근량이 변함에 따라 극한하중의 증가율이 다르게 나타나는데, 섬유혼입율이 1.0%일때 극한하중은 철근비$\rho=0.40\rho_b$인 경우 25%, $\rho=0.65\rho_b$인 경우 10%, $\rho=0.90\rho_b$와 $\rho'=0.0085$인 경우 6.0% 증가하였다. 이와같은 경향은 섬유혼입율이 2.0%일때도 비슷하게 나타는데, 이처럼 철근량이 많을때 극한하중의 증가폭이 적은 것은 보강철근량이 많을수록 극한하중의 증가에 대한 섬유의 보강효과가 작게 나타나는 것을 의미한다. 또한 섬유혼입율이 0.0%에서 1.0%로 증가할때의 극한하중의 증가폭보다 1.0%에서 2.0%로 증가할때의 극한하중의 증가폭이 보편적으로 더 작게 나타나는데, 이것은 섬유혼입율이 증가할수록 섬유의 보강효과가 상대적으로 작게 나타남을 뜻한다.

이와같은 철근콘크리트 부재의 극한하중에 대한 강섬유의 보강효과는 다른 연구자의 결과와도 유사하다. Swamy & Al-Ta'an[5]의 연구에서 $\rho=0.65\rho_b$, $\rho'=0.007$인 부재에 Crimped 섬유를 1.0% 혼입했을 때 극한모멘트가 8.0% 증가하였다. 또한, 콘크리트에 섬유를 혼입했을때 부재의 초기균열하중(First cracking load)도 증가하였으며, 이것은 매트릭스내에서 섬유의 균열생성억제작용 때문에 일어나며 섬유혼입율이 증가할수록 초기균열하중은 더 많이 증가하였다. 위에서와 같은 부재의 각 하중의 증가는 섬유혼입으로 인한 콘크리트의 압축강도의 증가와 인장강도의 증가때문에 일어나는데, 압축강도의 증가보다는 인장강도의 증가에 의한 영향이 더 크게 작용한다.

부재의 거동은 균열이 발생하기 전까지는 섬유를 혼입한 부재와 혼입하지 않은 부재는 큰 차이 없이 비슷한 거동을 하고, 균열이 발생한 후에는 섬유를 혼입한 부재의 경우에 강성(Stiffness)의 감소가 작게 나타난다. 이와같은 강성의 증가는 콘크리트내에서 섬유의 균열성장억제작용으로 인하여 부재의 유효단면적(Effective cross- section area)이 증가하기 때문에 일어나며, 섬유혼입율이 증가할수록 부재의 강성은 더 많이 증가하였다. 또한 부재의 휨인성(Flexural toughness : 하중-처짐 곡선의 아래부분 면적)은 섬유를 혼입한 경우에 증가하는데 섬유혼입율이 증가할수록 더 많이 증가하였다. Fig. 4 (a), (b), (c)에서 보듯이 휨인성의 증가폭은 주철근량이 적을수록 더 크게 나타나는데, 이것은 섬유에

의한 보강은 철근량이 적을때 더 효과적임을 의미한다.

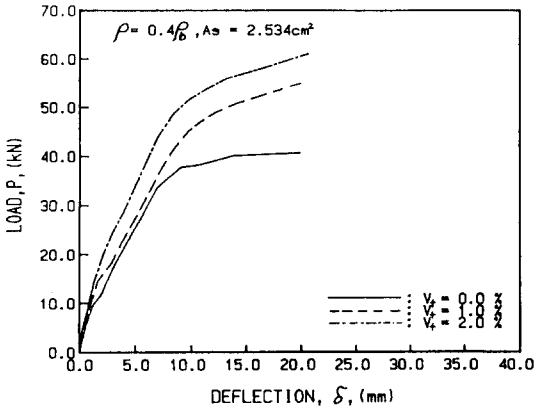


Fig. 4. (a) Load–Deflection Curves for $\rho=0.40\rho_b$

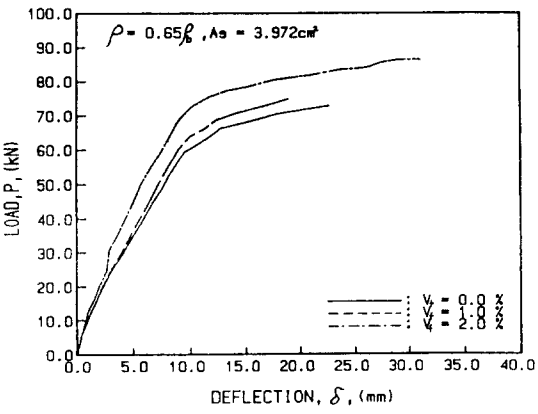


Fig. 4. (b) Load–Deflection Curves for $\rho=0.65\rho_b$

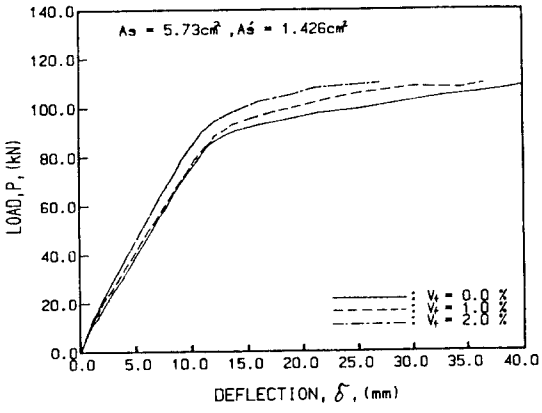


Fig. 4. (c) Load–Deflection Curves for $\rho=0.90\rho_b$, $\rho'=0.0085$

3.3 균열폭 및 균열간격

철근콘크리트 부재의 균열폭은 철근의 응력과 전반적으로 선형의 관계가 있다는 사실은 기존의 여러 연구에서 밝혀져 왔다[11]. 본 실험에서 얻은 균열폭과 철근응력의 변화도 거의 선형의 관계를 보였고, Fig. 5에 이들의 관계를 나타냈다. 여기서 철근의 응력은 측정된 철근의 변형도에 철근의 탄성계수(E_s)를 곱해서 얻었다.

Fig. 5에서 보듯이 섬유를 혼입한 부재는 같은 철근응력에 대해서 균열폭이 더 작게 나타났으며, 이와같은 섬유의 보강효과는 섬유혼입율이 증가할수록 더 크게 나타났다. 또한 인장철근량의 변화에 따라서도 섬유보강효과가 다르게 나타나는데 철근량이 $\rho=0.90\rho_b$, $\rho'=0.0085$인 경우 섬유혼입율이 1.0%일때는 섬유가 혼

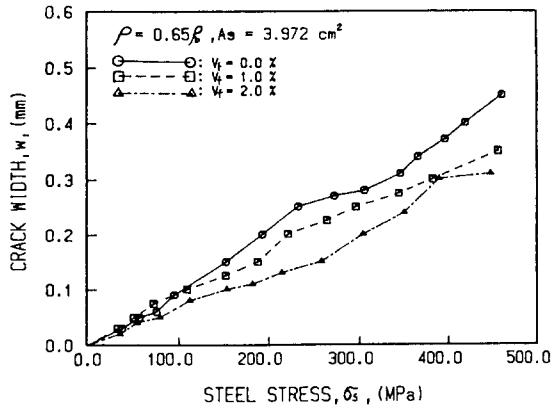


Fig. 5(a) Steel Stress vs. Crack Width Curves for $\rho=0.65\rho_b$

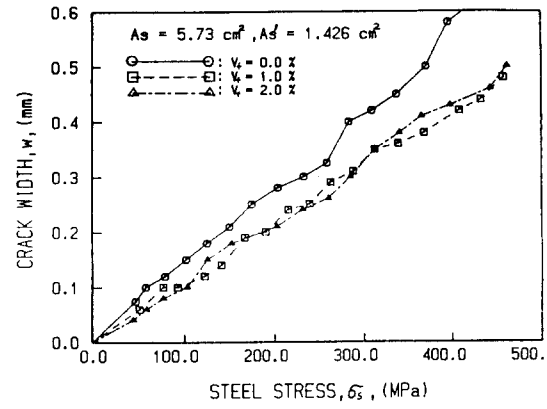


Fig. 5 (b) Steel Stress vs. Crack Width Curves for $\rho=0.90\rho_b$, $\rho'=0.0085$

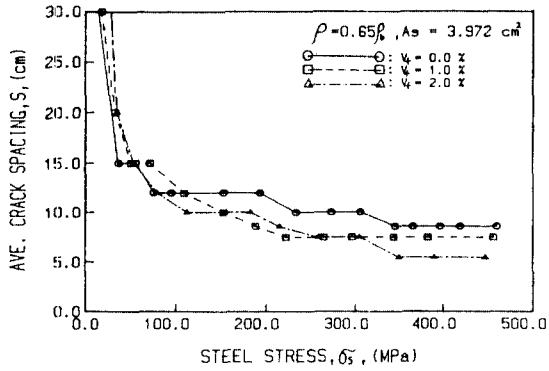


Fig. 6(a) Steel Stress vs. Crack Spacing Curves for ρ=0.65ρ_b

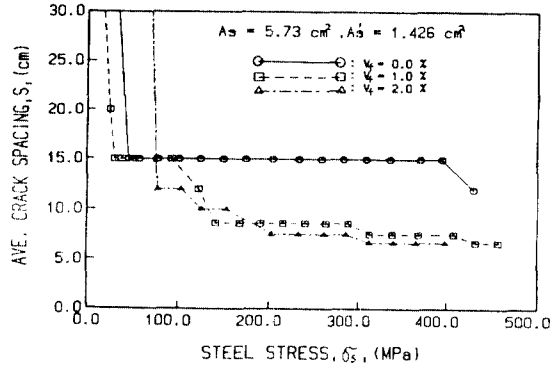


Fig. 6(b) Steel Stress vs. Crack Spacing Curves for ρ=0.90ρ_b, ρ'=0.0085.

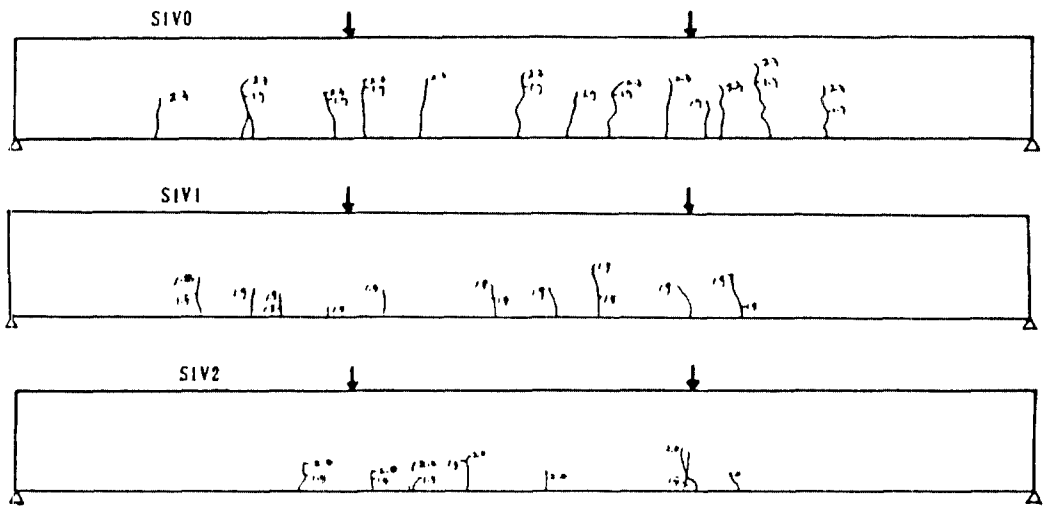


Fig. 7 (a) Crack Patterns for ρ=0.40ρ_b at P=20kN

입되지 않은 경우보다 균열폭이 작게 나타났으며, 2.0% 일때는 1.0%일때와 큰 차이가 없었다. 이와같이 섬유 혼입으로 인해서 균열폭이 감소하는 것은 균열단면에서 균열면에 직각방향으로 섬유의 Bridging작용으로 인해서 균열폭의 확산이 억제되기 때문이다. 이때 섬유는 매트릭스와의 부착에 의해서 지지된다.

철근의 응력과 평균균열간격(Average crack spacing)의 관계는 Fig. 6과 같다. 섬유를 혼입한 부재의 경우가 균열간격이 작게 나타났으며, 섬유혼입율이 증가할수록 균열간격이 더 많이 감소하였다. 균열간격은 하중이 어느정도 증가하면 안정된 균열간격(Stabilized crack spacing)을 유지하는데, 섬유혼입율이 증가할수록 더 높은 철근응력에서 균열간격이 안정되었다.

섬유를 혼입함으로써 균열폭 및 균열간격이 감소하는 것은 섬유의 균열성장억제 작용으로 인해 균열의 확산이 방지되어 새로운 미세균열(Microcrack)이 생성되기 때문이다. 일반적으로 철근콘크리트 구조물에서의 균열은 철근의 부식, 누수등과 관계되기 때문에 균열폭의 제한은 중요하다. 그러므로 섬유의 혼입은 철근콘크리트 구조물의 균열폭을 제한하는데 유효한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 ρ=0.40ρ_b인 부재에 대해서 각 하중 단계에서의 균열의 형상을 그린 것으로 섬유를 혼입한 부재의 경우에 균열의 성장이 느리고, 미세균열이 생김을 알

수 있다.

3.4 전단거동

지점에서 30cm 떨어진 곳에 위치한 스터럽의 응력을 측정하여 철근콘크리트보의 전단거동에 대한 섬유의 혼입효과를 분석해 보았다. 각 부재에 대한 전단력과 스트럽의 응력과의 관계는 전단구간에 균열이 생겨야만 스트럽의 응력이 증가한다는 이론에 따라 본 실험에서도 전단력이 상당히 증가한 후에 전단철근의 응력이 증가하였다.

섬유혼입율이 1.0%일때는 전단철근의 응력이 보통 R.C.콘크리트보의 전단철근의 응력보다 작으나 비슷한 응력의 증가현상을 보였으며, 섬유혼입율이 2.0%일때는 전단력이 상당히 증가한 후부터 전단철근의 응력이 증가하기 시작하였다. 즉, 콘크리트의 전단강도에 대한 섬유의 혼입효과는 섬유혼입율이 증가할수록 상대적으로 많이 나타났다.

4. 섬유콘크리트 보의 해석

섬유콘크리트의 휨강도는 혼합체개념(Composite materials concepts)에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{ct} = \sigma_{mt}\rho_m + \sigma_f\rho_f \quad (1)$$

여기서, σ_{ct} : 혼합체의 휨강도
σ_{mt} : 매트릭스(Matrix)의 휨강도
σ_f : 섬유의 강도
ρ_f : 섬유의 체적비
ρ_m : 매트릭스의 체적비$(1-\rho_f)$

불규칙한 배열로 혼입된 섬유들 중에서 힘의 작용방향과 평행하게 배열된 섬유의 수를 고려한 배향계수(η_o), 섬유의 형상에 따른 부착효율계수(η_b)와 섬유의 길이에 따른 유효길이계수(η_l)를 식(1)에 적용하면, 혼합체의 휨강도는

$$\sigma_{ct} = \sigma_{mt}\rho_m + \eta_o\eta_b\eta_l\sigma_f\rho_f \quad (2)$$

여기서, η_o : 배향계수(Orientation factor)
η_l : 유효길이계수(Length efficiency factor)
η_b : 부착효율계수(Bond efficiency factor)

균열이 생긴 후에는 콘크리트의 강도를 무시하고, 전체 응력을 섬유만이 전담한다고 가정하면 혼합체의 극한강도는 다음과 같이 된다.

$$\sigma_t = \eta_o\eta_l\eta_b\sigma_f\rho_f \quad (3)$$

여기서, σ_t : 혼합체의 극한강도

섬유의 응력(σ_f)은 섬유와 콘크리트 사이가 완전부착(Perfect bond)이라 가정하면, 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_f = 2\ \tau(l_f/d_f)\cdot\rho_f \quad (4)$$

여기서, τ : 섬유의 부착응력
l_f : 섬유의 길이
d_f : 섬유의 직경

섬유의 응력(σ_f)을 혼합체의 극한강도(σ_t)식에 대입하면

$$\sigma_t = 2\eta_o\eta_l\eta_b\tau(l_f/d_f)\cdot\rho_f \quad (5)$$

배향계수(η_o)는 부재의 전 단면에 섬유를 혼입한 경우 0.41이고[11, 14], 부착효율계수(η_b)는 직선섬유인 경우에 1.0이다[12]. 또한 유효길이계수(η_l)는 Cox[15]에 의해서 다음과 같이 표시되었다.

$$\eta_l = 1 - \frac{\tanh(\beta\ l_f/2)}{\beta\ l_f/2} \quad (6)$$

$$= \sqrt{\frac{2\pi G_m}{E_f A_f \ln(S/r_f)}} \quad (7)$$

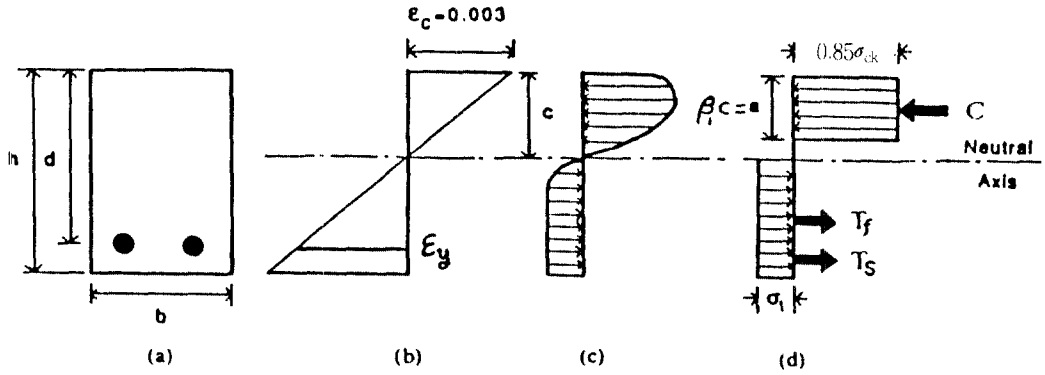
$$= 25\sqrt{\frac{l_f}{V_f\cdot d_f}} \quad (8)$$

여기서, G_m : 매트릭스의 전단계수(Shear modulus)
A_f : 섬유의 단면적
E_f : 섬유의 탄성계수
r_f : 섬유의 반경
S : 섬유의 평균간격, mm, [17]
V_f : 섬유혼입율(체적비)

부착응력(τ)은 Henager & Doherty[12]가 동적 부착응력(Dynamic bond stress) 개념으로 2.3MPa을 제시하였는데, 이값을 본 연구에서 사용한다.

여기서 동적 부착응력이란 섬유의 뽑힘현상(Pull-out)이 진행될 때의 부착응력을 뜻한다.

섬유를 혼입한 철근콘크리트 보의 해석은 보통 철근콘크리트 보에서와 같이 변형도(Strain)의 분포는 선형이고, 압축측 콘크리트의 변형도 및 직사각형응력분포의



(a) Cross Section
(b) Strain Diagram
(c) Actual Stress Distribution
(d) Assumed(Simplified) Stress Distribution

Fig. 8 Design Assumptions for Analysis of Reinforced Concrete Beams Containing Steel Fibers

크기는 0.003, 0.85σ_{ck}로 가정하며, 섬유혼입으로 인한 인장측콘크리트의 인장응력은 식(5)의 크기만큼 전 인장면에 걸쳐 균등하게 분포하는 것으로 가정한다.

섬유콘크리트 보의 변형도 및 응력분포의 형태는 Fig. 8과 같다.

단철근 보의 경우에 중립축의 깊이(c)는 힘의 평형조건에 의해서 계산한다. 즉

압축력, $C = 0.85\ \rho_{ck}\beta_1\ cb$ (9)

섬유에 의한 인장력, $T_f = \sigma_f \cdot b \cdot (h-c)$ (10)

철근에 의한 인장력, $T_s = A_s \cdot \sigma_y$ (11)

총 인장력, $T = T_f + T_s$

$= A_s \cdot \sigma_y + \sigma_f \cdot b \cdot (h-c)$ (12)

평형조건 C=T에 의해서 중립축 깊이 c는 다음과 같이 된다.

$$c = \frac{A_s\sigma_y \cdot b \cdot h}{0.85\sigma_{ck}\beta_1 b + \sigma_f \cdot b} \quad (13)$$

중립축의 깊이를 계산한 후 압축력이 작용하는 점에서 모멘트를 취해 섬유콘크리트보의 공칭모멘트를 식(14)와 같이 계산한다.

$$M_n = A_s\sigma_y(d-a/2) + \sigma_f \cdot b(h-c)(h+c-a)/2 \quad (14)$$

복철근 보의 경우도 단철근 보에서와 같은 방법으로 계산하면 공칭모멘트는 식(15)와 같이 된다.

$$M_n = A_s\sigma_y(d-a/2) + \sigma_f \cdot b(h-c)(h+c-a)/2 + A'_s\sigma'_s(a/2-d') \quad (15)$$

위에서와 같은, 섬유콘크리트보에 대한 해석과정에 의해서 계산된 모멘트는 Table 3에 나타냈다. 표준시방서에 의해 계산된 모멘트는 섬유혼입으로 인한 콘크리트의 압축강도의 증가만을 고려하여 보통 R.C.보와 같이 계산한 값으로서 실측치와 많은 차이를 보이고 있다. Henager와 방법과 본 연구에서 제시된 방법은 섬유혼입으로 인한 부재의 인장측 콘크리트의 인장강도를 고려하여 계산한 모멘트로서, 본 연구에서 제시된 방법에 의해 계산된 모멘트 값이 실측치에 더 접근하였다.

5. 결론

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재에 대한 휨시험을 통해서 부재의 주인장 철근량과 섬유혼입율의 변화에 따른 섬유보강의 효과에 대해서 알아보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 콘크리트에 섬유를 혼입하면 콘크리트의 압축강도, 휨강도, 인장강도및 연성이 증가하며 섬유혼입율이 클수록 섬유의 보강효과가 더 크게 나타난다. 이때 섬유의 혼입은 콘크리트의 인장거동을 크게 개선한다.
2. 철근콘크리트 보에 섬유를 혼입하면 부재의 초기균열하중과 극한하중이 증가하며 이러한 섬유보강의 효과는 주철근량이 적을수록, 섬유혼입율이 클수록 많이

Table 3. Comparisons of Measured Moments and Calculated Moments

	纖維混入率 V_f(%)	Measured Moment (N.m)	Calculated Moment (N.m)			Calculated M. / Measured M.		
			標準示方書 (R.C.보)	Henager's Method	Present Method	標準示方書 (R.C.보)	Henager's Method	Present Method
$\rho=0.40\rho_b$	0.0	12,181	13,508	–	–	1.109	–	–
	1.0	15,229	13,561	14,204	14,952	0.890	0.933	0.982
	2.0	17,963	13,699	15,068	16,594	0.763	0.839	0.924
$\rho=0.65\rho_b$	0.0	20,580	19,929	–	–	0.968	–	–
	1.0	22,638	20,063	20,548	21,200	0.886	0.908	0.936
	2.0	23,373	20,505	21,534	22,905	0.877	0.921	0.980
$\rho=0.90\rho_b$ $\rho'=0.0085$	0.0	26,754	26,021	–	–	0.973	–	–
	1.0	28,371	26,788	27,684	28,280	0.944	0.976	0.997
	2.0	30,908	27,856	28,814	30,085	0.899	0.930	0.971
Mean	Excluding the Beams without Fibers					0.877	0.918	0.965
St. Div.						0.055	0.043	0.026

나타난다.

3. 초기균열이 생기기 전까지는 섬유를 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우에 비슷한 거동을 하며, 균열이 발생한 후에는 섬유를 혼입한 부재의 경우에 부재의 강성의 감소가 작게 나타난다.
4. 섬유를 혼입하면 부재의 균열폭이 감소하며 철근량이 적을수록, 섬유혼입율이 클수록 균열폭의 성장억제에 대한 섬유혼입의 효과가 크게 나타난다.
5. 섬유를 혼입하면 미세균열이 생겨 균열간격이 감소하고 균열간격은 높은 하중에서 안정된다.
6. 섬유를 혼입하면 콘크리트의 전단강도가 증가하며 전단균열도 높은 전단력에서 발생한다. 섬유의 전단보강 효과는 섬유혼입율이 클때 상대적으로 많이 나타난다.
7. 섬유를 혼합한 철근콘크리트 부재의 해석은 섬유혼입으로 인한 부재의 인장측 콘크리트의 인장강도를 고려함으로써 정확하게 할 수 있다.

이상의 결과로 부터 섬유콘크리트는 많은 연성을 요하는 내진 구조물이나 균열폭을 작게 규제해야 할 저장탱크 등의 구조물에 효과적으로 쓰일 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문에 1990년도 한국과학재단의 일반기초연구 및 특정연구에 의하여 수행되었으므로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Romualdi, James P. and Baston, Gorden B., " Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement, "ACI Journal, Vol. 60, June, 1963, pp.775–790.
2. Romualdi, James P. and Baston, Gorden B., " Mechanics of Crack Arrest in Concrete," Processing ASCE, Vol.89, EMS, June, 1963, pp.147–168.
3. Shah, Surendra P. and Rangan, B.Vijaya, "Fiber Reinforced Concrete Properties," ACI Journal, Vol. 68, No.2, Feb., 1971, pp.126–135.
4. Kormering, H.A., Reinhardt, H.W. and Shah, S.P., "Static and Fatigne Properties of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bars and with Fibers," ACI Journal, Vol.68, No.2, Feb., 1971, pp.126–135.
5. Swamy, R.N. and Al–Ta'an, Saád A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete," ACI Journal, Vol.78, No.5, Sep.–Oct., 1981, pp.395–405.
6. Niyogi, Sanat K. and Dwarakanathan, G.I., "Fiber Reinforced Beams Under Moment and Shear," ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.3, March, 1985, pp.516–527.

7. Swamy, R.N. and Bahia, H.M., "The Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcement," Concrete International : Design & Construction, Vol.7, No. 3., March, 1985, pp.35-40.
8. Sood, V. and Gupta, S., "Behavior or Steel Fibrous Concrete Beam-Column Connections, "ACI, SP1 05-25, 1987, pp.437-474.
9. Jindal, R. and Sharma, V., "Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Knee-Type Beam-Column Connections," ACI, SP105-26, 1987, pp. 475-491.
10. Ramakarishnan, V., Coyle, W.V., Kulandaisamy, V. and Schrader, Earnest K., "Performance Characteristics of Fiber Reinforced Concrete with low Fiber Contents," ACI Journal, Vol.78, No.5, Sep.-Oct., 1981, pp.388-394.
11. Park, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures," JOHN WILEY & SONS, 1975, Chapter 7 & Chapter 10.
12. Henager, Chales H. and Doherty, Terrence J., " Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams, "Proceedings, ASCE, Vol.12, ST-1, pp.178-188.
13. ACI Committe 544, "Design Constructions for Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, Vol.35, No.5, Sep.-Oct., 1988, pp.536-580.
14. Romualdi, P. and Mandel, James A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distrbuted and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," ACI, Vol.61, No.6, June, 1964, pp.657-670.
15. Cox, H.L., "The Elasticity and Strength of Paper and Other Fibrous Materials," British Journal of Applied Physics (Bristol), Vol.3, March, 1952, pp. 72-79.
16. Swamy, R.N., Manget, P.S. and Rao, C.V.S.K., "The Machanics of Fiber Reinfocement of Cement Matrices, "Fiber Reinforced Concrete, ACI, SP-4 4, 1974, pp.1-28.
17. Craig, R., "Flexural Behavior and Design of Reinforced Concrete Members," ACI, SP105-28 , 1987, pp.517--563.
18. 오병환, 이형준, 강영진, "섬유콘크리트의 강도및 역학적 특성에 관한 연구," 대한 토목학회 논문집, 제 9 권 제 3 호, 1989년 9월, pp.49-56.
19. 오병환, 이형준, 백신원, 임동환, "강섬유보강콘크리트의 강도및 역학적 특성 연구" 1990년도 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제 2 권 제 2 호, 1990 . 11. 10, pp.175-178.
20. 콘크리트 표준시방서, 건설부, 1988.

(접수일자 : 1991. 8. 10)