

# 폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 강도 특성 및 건조수축균열제어 특성에 관한 연구

## A Study on the Strength and Drying Shrinkage Crack Control Properties of Polypropyl

오 병 환\* ,                      오 백 상 현\*\*  
Byung-Hwan Oh,                Sang-Hyun Baik

Polypropylene fiber reinforced mortar and concrete as civil material or architectural material have been used in America and British etc, and have been researched. Polypropylene fibers have many advantages in many points ; in economical costs, chemical stability and durability. It has been reported that polypropylene fiber can control restrained tensile stresses and cracks and increase toughness, resistance to impact, corrosion, fatigue and durability.

This study has been performed to obtain the properties of polypropylene fiber reinforced concrete such as compressive strength, flexural strength, toughness, slump, drying shrinkage crack and drying shrinkage characteristics. The test variables are fiber contents, fiber length, fiber types, and so on. From the results of this study, we can expect the effects of the admixtures of polypropylene fiber about strength and drying shrinkage properties in concrete and mortar.

### 1. 서론

콘크리트에의 폴리프로필렌 섬유 사용은 모르타르나 콘크리트가 건조,냉각에 의해 수축될때, 구속에 의한 인장응력 및 균열을 제어하고, 인성증가와 충격, 마모, 피로에 대한 저항성을 증대시키고 내구성을 증대시키는 등 여러 장점을 가진다. 본 연구는 폴리프로필렌섬유보강콘크리트의 압축강도, 인장강도, 인성, 탄성계수, 유동성과 균열 및 건조수축 제어특성을 실험적으로 규명하고자 하였다.

\* 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 쌍용중앙연구소 건설기술연구실

### 2. 폴리프로필렌섬유의 기본 특성

폴리프로필렌 섬유는 다른 섬유재료에 비해 낮은 비중을 가지고 있으며, 이는 많은 양의 섬유가 콘크리트나 모르타르에 혼입되어 사용될수 있음을 의미한다. 인장강도 또한 상당히 양호하고 강섬유의 단점인 가격과 부식에 대해 상대적으로 우수하다.

그러나, 단점으로는 낮은 탄성계수와 시멘트 경화체와의 부착특성, 강섬유에 비해 상대적으로 낮은 강도등이 있을 수 있다.

또한, 폴리프로필렌 섬유는 물을 흡수하지도 않고, 반응하지도 않으며 산과 염기에 우수한 저항성을 가지고 있다. 불에 대한 흡수

성이 없음을 다른 섬유재료인 sisal, cotton에 비해 우수한 점으로 콘크리트나 모르타르의 물-시멘트비를 변화시키지 않고 심각한 작업성의 저하가 섬유혼입량의 조절로 방지될수 있음을 의미하고, 물과의 화학적 반응이 없음을 콘크리트, 모르타르 매트릭스 내에서 안정적으로 거동함을 의미한다. 그리고 산과 알칼리에 대한 저항성은 polyester나 강섬유에 비해 우수한 점으로 구조물의 사용기간 동안 건전성이 유지될수 있으므로 콘크리트의 내구성 측면에서 장점을 갖는다.

### 3. 폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 역학적 특성실험

#### 3.1 실험계획 및 실험변수

표 1. 콘크리트 실험 시편의 종류 및 실험변수

시편 번호	섬유 종류	섬유 혼입량(%)	양생 (일)	섬유 길이 (mm)	섬유 굵기 (denier)
CF 0-1	단섬유형	0	7	19	30
CF 0-2			28	19	30
CF 1-1		0.078	7	19	30
CF 1-2			28	19	30
CF 2-1		0.1	7	19	30
CF 2-2			28	19	30
CF 3-1		0.16	7	19	30
CF 3-2			28	19	30
CF 4-1		0.2	7	19	30
CF 4-2			28	19	30
CF 5-1		0.5	7	19	30
CF 5-2			28	19	30
CF 6-2		1.0	28	19	30
CF 7-2		2.0	28	19	30
CFL 6-2		1.0	28	30	30
CFM 5-2	매쉬형	0.5	28	19	30

#### 3.2 실험시편의 제작 및 양생

각 변수에 따른 배합은 240 kg/cm<sup>2</sup>의 설계강도를 기준강도로 하여 약 300 kg/cm<sup>2</sup>의 배합강도가 나오도록 배합비가 결정되었다. 혼화제로는 고유동화제가 시멘트량의 0.2%가 첨가되었다. 또한 각 변수에 대하여 휨 측정을 위한 10cm x 10cm x 50cm 의 각주형 시편과 압축강도시험을 위한  $\Phi$ 10cm x 20cm의 실린더 시편을 3개씩 제작하였다.

배합은 시멘트와 골재의 전비율을 수행한 후 배합수를 첨가하여 1분 배합한후 섬유를 고르게 뿌려 다시 2-3분 정도 믹서에 의한 배합을 수행하였다. 배합이 끝난 후, 타설하고 24시간 이후 탈형하여 25 ±1℃의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

#### 3.3 실험결과 및 분석

##### 3.3.1 유동 특성

섬유의 혼입량에 따라 슬럼프가 감소하나 0.2%까지는 초기값을 조절하여 작업이 가능한 것으로 사료된다. 그러나 0.5%이상의 섬유혼입은 유동성에 특별한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

##### 3.3.2 압축 및 휨강도 특성

압축강도에 대하여는 7일 강도는 28일강도의 약 70%정도가 발현되었다. 아래의 그림은 압축강도의 변화를 나타낸 그림으로 0.2%정도의 혼입까지는 압축강도가 약12%까지 점차적으로 증가하나 0.2%를 넘어서는 감소하여 1.0% 이상에서는 폴리프로필렌 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트의 압축강도 이하로 급격히 내려가는 것을 알 수 있었다.

휨강도는 아래 그림에서 보는 바와 같이 체적비로 0.2%까지는 휨인장강도가 약 22%정도 증가하다가 감소하여 1.0%이상에서는 섬유가 혼입되지 않은 경우보다 더 작게 나오는 것으로 관찰되었다.

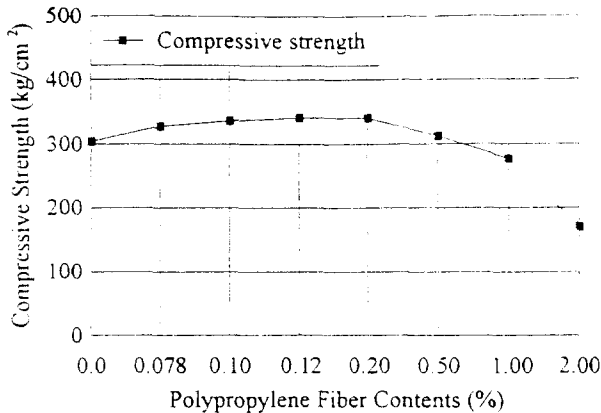


그림 1. 섬유혼입에 따른 압축강도(19mm)

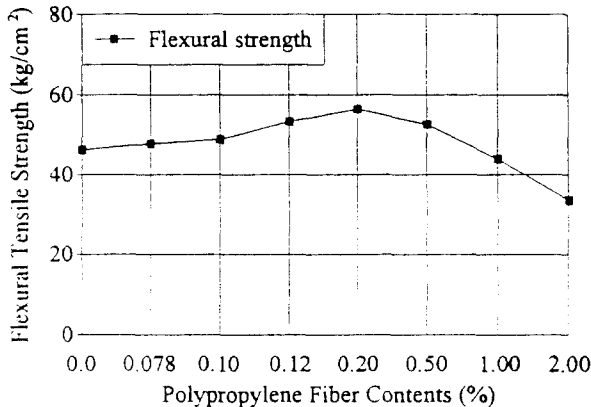


그림 2. 섬유혼입에 따른 휨인장강도(19mm)

### 3.3.3 하중-변위 (응력-변형도) 관계

압축시험의 경우 섬유의 혼입량이 증가할수록 특히 0.1%이상의 혼입량에서 최대하중도달 이후의 하중이 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 섬유가 혼입됨으로써 최대하중도달이후 시편의 일부가 분리되어 떨어지는 현상이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다.

휨시험에 의한 하중-변위 곡선에서는 앞서 언급한 특징들을 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있다. 특히 섬유의 혼입량이 1.0%, 2.0%에서는 전혀 다른 모양의 하중-변위 관계 곡선이 얻어짐을 알 수 있었다. 최대하중의 50-70%정도에서 다시 하중을 상당 변위동안

지속함을 볼 수 있었다.

## 3.3 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 휨인성 지수 분석

### 3.3.1 휨인성 지수의 정의 및 계산

( 휨인성지수 (Toughness Index:  $I_t$ )

$$= \frac{L-D\text{곡선의 } i \times D_{cr}\text{변형까지의면적}}{L-D\text{곡선의 초기균열까지의 면적}}$$

### 3.3.2 섬유의 혼입량, 길이 및 종류별 휨인성지수의 계산

섬유가 혼입되지 않는 경우 최대하중 도달 이후 시편이 분리 즉 파쇄되어 버리는 것으로 섬유의 혼입과 동시에 파쇄가 방지되고 휨인성 지수가 증가한다. 즉 부착면적이 증가할수록 휨인성지수 측면에서 그 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 따라서 섬유의 길이가 길수록 섬유의 종류가 매쉬형인 경우 거의 1.5-2배에 가까운 휨인성지수의 증대를 보였다.

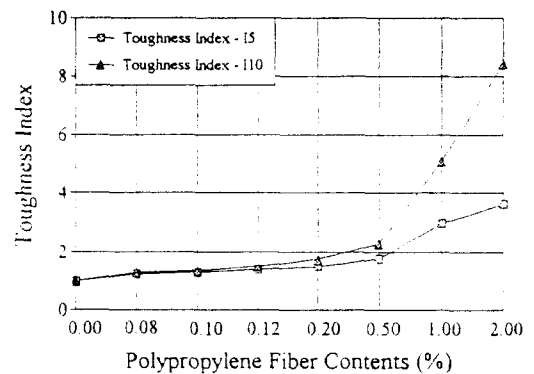


그림 3. 섬유혼입에 따른 휨인성지수의 변화

## 4. 폴리프로필렌 섬유보강 모르타르의 수축균열 저항 특성 실험

### 4.1 실험계획 및 실험변수

표 2. 폴리프로필렌 섬유 모르타르의 소성수축균열특성 실험 변수

시편번호	섬유종류	섬유혼입 (%)	양생조건
MF 0-0		0	항온항습자연건조
MF 0-1		0	항온항습강제건조
MF 1-1	단상 19mm	0.1	항온항습강제건조
MF 1-2	단상 19mm	0.15	항온항습강제건조
MF 1-3	단상 19mm	0.2	항온항습강제건조
MF 2-1	단상 30mm	0.1	항온항습강제건조

#### 4.2 실험방법 및 수행

실험모ULD는 90 x 60 x 2 cm의 얇은 판 모양으로 바닥은 모르타르의 수축이 원활하도록 비닐막을 설치하였고, 구속효과가 나타나 인장응력을 집중시키도록 90 x 60 cm의 둘레에 10cm간격으로 구속섬유를 설치하였다. 그리고 모ULD의 측면은 부피변화가 측벽에 의해 구속되지 않도록 아크릴로 제작하였다. 시험체 모르타르의 배합비는 물 : 시멘트 : 모래가 1 : 2 : 3 이고, 0.2% 중량비의 고유동화제를 첨가하였다. 전비빔이후 배합수를 첨가하고 비빔을 2-3 분 더 수행한 후 섬유가 혼입되는 경우에는 섬유를 고르게 분산, 살포하여 2-3분 더 비빔을 수행한 후 타설한다.

타설된 시편은 양생초기 1시간 경과후 부터 25℃의 50%상대습도에서 건조시키고 시편의 표면에 20-30 m/sec의 바람을 표면에 작용시킨다. 단, 자연건조조건인 경우는 이를 생략한다. 이후 6시간-24시간의 균열진전상황을 관찰한다.

#### 4.3 실험결과 및 분석

항온항습조건에서 건조되는 시편은 3-6시간에서 소성수축균열을 발생시킨다. 균열의 진전상황을 관찰하고 최종적으로 12시간 이후 안정된 균열형태의 형상과 균열폭, 균열

길이등을 측정한다. 여기서 균열면적은 균열 길이에 균열폭을 곱하여 구한다.

섬유가 혼입되지 않은 시편의 균열면적을 100%로하여 혼입량에 따라 상대비교하였는데 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 섬유가 0.1%가 함유된 경우 50%로, 0.2% 첨가시는 15%정도로 감소함을 볼 수 있었다. 또한 섬유의 혼입량이 증가할수록 균열의 폭과 균열갯수가 감소하였다. 30mm길이의 섬유가 19mm에 비해 효과가 큰것으로 나타났는데, 0.1%의 사용에도 19mm의 0.2%첨가보다 균열제어효과가 큰것으로 나타났다.

시험조건시 가해지는 바람의 영향을 고려하기 위해 항온항습조건만의 건조상태 시편으로 비교하였는데 약 5배의 균열면적 감소효과가 증대되는 것으로 나타났다. 따라서 이런 관계로 추론하면 섬유의 첨가시 실제 상태에서는 상당한 균열제어효과가 있는 것으로 판단된다.

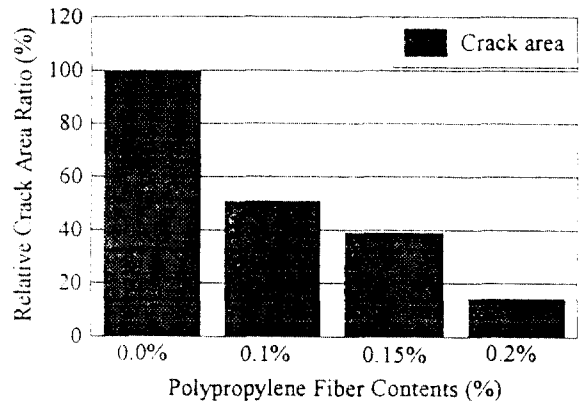


그림 4. 섬유혼입에 따른 소성수축균열면적

### 5. 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 구속건조수축특성 실험 분석

#### 5.1 실험계획 및 실험변수

표 3. 구속건조수축특성실험의 변수

시편번호	섬유혼입량(%)	비고
F0	0	단상19mm 섬유
F1	0.1	
F2	0.2	
F3	0.3	
F5	0.5	

## 5.2 실험방법 및 수행

아래의 그림은 구속건조수축실험을 위한 실험시편의 모습이다.

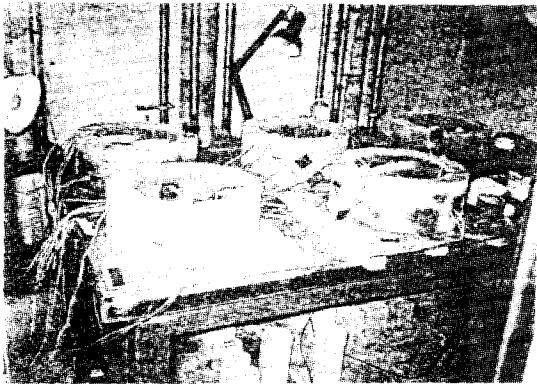


그림 5. 구속건조수축실험시편

자유건조수축실험을 위한 시편은 5 x 5 x 25 cm와 9 x 9 x 40 cm의 빗형태의 시편을 제작한후 표면에 건조수축량의 측정을 위한 스티드를 각기 20cm, 25cm간격으로 모듈드의 내부에 설치하여 탈형후 스티드가 콘크리트에 묻힐수 있도록 한다.

타설후 1일 경과후 탈형하여 온도 25±1℃, 상대습도 100%의 항온항습조건에서 4일간의 양생을 실시한후 온도 25±1℃, 상대습도 40% 항온항습조건에서 건조를 지속시키게 된다.

양생이 끝난후 건조수축변형도를 측정하는데, 구속건조시편의 경우 시편의 외면에 길이 30mm의 concrete strain gage를 원주방향등간격으로 3개씩 부착하여 그 평균값을 읽는다. 또한 자유건조수축실험시편의 경우, 서로 다른 단면크거의 시편을 각 2개씩 제작하여 휘트모아 스트레인 게이지를 사용하여

그 평균치를 읽게 된다.

## 5.3 실험결과

구속건조시편은 양생후 6시간 간격으로 데이터로거를 통하여 게이지의 strain값을 측정하며, 자유건조시편은 휘트모아스트레인게이지에 의해 1일 간격으로 측정한다.

아래의 그림은 28일 경과후 섬유혼입량에 따른 구속건조실험의 결과이다.

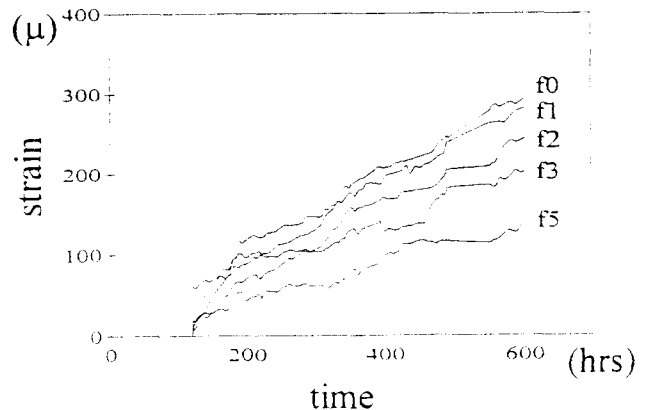


그림 6. 구속건조수축실험의 결과

## 6. 폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 구속건조수축실험 분석

### 6.1 콘크리트의 구속조건

콘크리트는 타설후 콘크리트의 재료적 특성에 의해 수분의 증발로 인하여 건조수축이 발생하게 된다. 그런데 실제의 콘크리트구조물에서는 건조수축에 대하여 내·외부적 구속조건이 주어지게 된다. 일반콘크리트부재의 경우 내부구속 조건으로써 콘크리트의 표면과 내부에서의 수분분포의 경사로 인해 발생하는 건조수축에의 골재의 구속과 RC구조물과 같이 보강된 철근으로 인한 자유로운 수분의 이동에의 내부조건 등이 있으며, 외부구속조건으로써, 외부에서의 구속을 주게 되는 구조물에서의 구속조건으로 인하여 실제 구조물에서는 단부구속(end restraint)이 있게 된다. 이와같은 콘크리트의 건조수축에 대한 일반적 구속조건과 함께 섬유가 보강된

콘크리트의 경우, 콘크리트에 보강된 섬유는 수분경사로 생기는 수분이동예의 구속효과를 가지며 건조수축으로 인하여 발생하게 되는 콘크리트의 수축응력에 저항하여 균열의 발생을 억제할수 있게 된다.

## 6.2 섬유의 내부구속 기여도 분석

섬유콘크리트에서의 섬유는 콘크리트에 존재하는 자유수의 이동경로를 차단하는 내부 구속의 역할과 함께 구속시 건조수축으로 인하여 유발되는 수축응력을 감소시키는 기능을 갖는것으로 판단된다. 이는 콘크리트부재가 구속되었을 경우 섬유콘크리트가 온도, 양생방법, 습도조건에 의해 더욱 크게 유발될수 있는 건조수축에 의한 인장응력에 대해 저항효과를 증대시켜 균열제어에도 큰 역할을 할수 있을것으로 예견된다.

### 6.3.1 자유건조수축량을 고려한 콘크리트의 구속시 건조수축특성

실험결과에서 알수 있듯이 콘크리트시편의 자유건조수축량과 구속건조수축량과는 오차량을 갖게 되는데, 이는 실제 콘크리트부재가 외부구속상태에서 건조수축변형을 일으키게 된다면, 자유건조수축량이 초기에 나타나지는 않으며, 구속상태에서도 콘크리트가 자유건조수축량의 일부를 콘크리트가 저항할수 있는 인장강도의 범위내에서 미세균열등에 의해 저항하면서 수축변형을 일으키지 않는것으로 판단된다. 따라서 콘크리트가 구속되었을 경우 자유건조수축량의 초기구속효과만큼은 응력치로 작용하며, 또한 자유건조수축량과 구속건조수축량의 결과를 비교하여 보면 혼입량의 증가에 따른 자유건조수축량에의 제어효과에 비하여 구속시의 건조수축량의 감소효과가 큰것을 볼수 있는데, 이는 콘크리트가 자유로운 건조수축에 놓여 섬유가 기여하는 수분이동예의 구속효과보다는 콘크리트가 구속상태에서 건조수축변형을 일으킬 경우의 건조수축제어효과가 뛰어나다는 것을 의미한다. 이는 곧 구속으로 인하여 유발되는 인장응력에 섬유가 저항하여 결국은 구속시의 건조수축변형을 보다 효과적으로

억제할수있음을 의미하는것이다.

이러한 섬유혼입의 효과를 나타내면 다음과 같다.

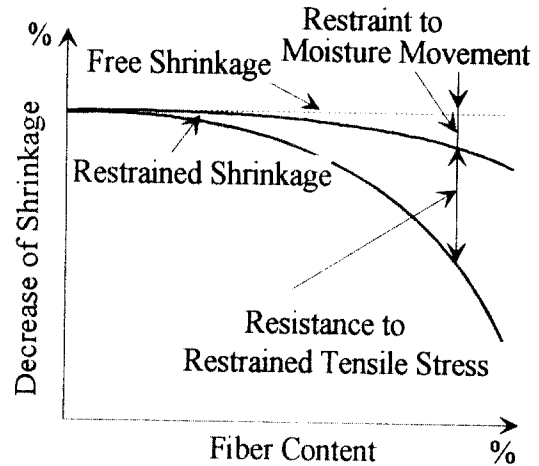


그림 7. 섬유혼입에 따른 건조수축의 양상

끝, 섬유의 효과는 자유건조수축량에서 수분의 이동을 구속하며, 자유건조수축량과 구속건조수축량의 차이는 구속시의 섬유의 인장응력저항효과를 의미하게 된다.

본 연구에서 실험적으로 규명된 섬유콘크리트의 건조수축제어효과나 구속시 발생하는 인장응력에의 저항효과를 토대로 자유건조수축량의 제어에 대한 기여도 및 구속시 유발되는 인장응력에의 섬유혼입의 효과를 분석하여 보면 다음표와 같다.

표 5. 섬유혼입의 효과(28일 경과후)

시편 번호	자유 건조 수축량	구속 건조 수축량	수분이동 구속효과 (%)	섬유혼입 총기여도 (%)	인장응력 부담효과 (%)
F0	440	431.5	0	0	0
F1	430.98	416.5	2.05	5.79	3.74
F2	423.02	376	3.86	12.75	8.89
F3	413.38	329	6.05	23.75	17.7
F5	396.62	251.5	9.86	41.71	31.85

위의 결과들은 섬유가 콘크리트에 존재하는 자유수의 이동경로를 차단하는 내부구속의 역할과 함께 건조수축으로 인하여 유발되는 응력에의 저항효과를 증대시키는 기능을

갖는것으로 판단된다. 이는 콘크리트부재가 구속되었을 경우 섬유콘크리트가 온도, 양생 방법, 습도조건에 의해 더욱 크게 유발될수 있는 건조수축에 의한 인장응력에 대해 저항 효과를 증대시켜 균열제어에도 큰 역할을 할 수 있을것으로 판단되며, 이러한 섬유콘크리트의 효과는 소성수축균열시험에서의 결과로부터 어느정도 예견될수 있다.

이와같이 섬유콘크리트에서의 이러한 섬유의 구속효과는 일반콘크리트의 건조수축과는 그 메카니즘에서의 차이를 나타내며, 이러한 섬유혼입에 의한 구속시의 건조수축개념을 섬유콘크리트부재의 설계시 적용할 필요가 있다. 그 개념을 수식화하여 표현하면,

$$\ast \quad \epsilon_{sh} = \epsilon_{c0} - \Delta\epsilon_i - \Delta\epsilon_{ten}$$

과 같다.

## 7. 결론

- (1) 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 슬럼프값으로부터 0.12%혼입이하의 혼입량에서는 별다른 주의 없이 실제 현장에서 사용할 수 있으나 그 이상의 혼입에서는 주의를 요하는 것으로 나타났다.
- (2) 폴리프로필렌 섬유 콘크리트의 강도는 섬유의 혼입량이 0.2%까지 압축강도는 최대 12%, 휨강도는 최대 22% 증가하는 것으로 나타났고, 그 이상의 혼입에서는 압축, 휨 강도 모두 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 휨인성지수 분석에서는 0.5%이상의 사용에서  $I_{10}$ 이 4이상, 2.0% 이상에서는 최대 8.4 정도까지 나타났고, 0.2% 이하의 사용에서는 1.2 - 2.0 의 값을 보였다.
- (4) 소성수축균열제어 특성은 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 섬유혼입으로 인한 균열제어효과가 큰것으로 나타났다.
- (5) 섬유콘크리트의 건조수축특성은 일반콘크리트와 달리 섬유의 내부구속효과를 보이며, 구속시에는 섬유가 내부수분이동의 구속 효과와 함께 그러한 효과의 1.5~3배의 효과를 발휘하는 인장응력에의 저항효과가 작용하여 구속시의 콘크리트의 수축변형을 억제

하게 된다. 이러한 개념을 수식화하면, 다음과 같다.

$$\ast \quad \epsilon_{sh} = \epsilon_{c0} - \Delta\epsilon_i - \Delta\epsilon_{ten}$$

## 참 고 문 헌

1. ACI, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, 1986.
2. ASTM, Annual book of ASTM standards - Concrete and Aggregate, 1990, Vol. 04.02.
3. Guirguis, B. E. and Potter, R. J., "Polypropylene Fibres in Concrete", Technical Report TR/F90, Cement and Concrete Association of Australia, 1985.
4. Zollo, R. F. et al, "Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibers," to be published in 1986.
5. "Static Load Test of Fibermesh vs. Welded Wire Fabric," F.E.D. Report No.5, Fibermesh Inc.(Tests performed by Wiss, Janney, Elstrier Associates Inc.), 1985.
6. Wei Ling Lin, "Toughness Behavior of Fibre Reinforced Concrete," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Edited by R. N. Swamy, RILEM, 1992.
7. Khajuria, A. and Balaguru P., "Plastic Shrinkage Characteristics of Fibre Reinforced Cement Composites," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Edited by R. N. Swamy, RILEM, 1992.
8. Kraai, P. P., "A Proposed Test to Determine the Cracking Potential due to Drying Shrinkage of Concrete," Concrete Construction, pp.775-778, 1985.
9. Kolver, K., Sikuler, J., and Bentur, A., "Free and Restrained Shrinkage of Fibre Reinforced Concrete with Low Polypropylene Fibre Content at Early Age," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Edited by R. N. Swamy, RILEM, 1992.