

# 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 강도 및 건조수축균열 제어특성 연구

A Study on the Strength and Drying Shrinkage Crack Control Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete



오병환\*



이명규\*\*



유성원\*\*



백상현\*\*\*

Oh, Byung-Hwan Lee, Myung-Gyu Yoo, Sung-Won Baik, Sang-Hyun

## 요 약

토목 및 건축재료로서 폴리프로필렌 섬유보강 모르터 및 콘크리트의 사용은 미국, 영국 등지에서 개발되기 시작하여 많은 연구가 진행되어 왔는데, 경제적 이점, 화학적인 안정성과 우수한 내구성으로 인해 국내에서도 그 사용이 점차 증대되고 있는 실정이다. 이러한 폴리프로필렌 섬유의 사용은 모르터 및 콘크리트가 건조나 온도에 의해 수축될 때, 구속에 의해 발생하는 인장응력 및 균열을 제어하고, 인성의 증가와 충격, 마모, 피로에 대한 저항성을 증대시키며, 콘크리트의 내구성을 증대시키는 등의 장점을 가지는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 이러한 폴리프로필렌 섬유보강 모르터 및 콘크리트의 재료적 특성인 유동성, 압축강도, 인장강도, 휨인성뿐만 아니라 균열제어특성, 건조수축특성을 실험을 통하여 규명하고자 하였다.

본 연구 결과, 폴리프로필렌섬유의 혼입으로 인성이 증가되고 건조수축균열 및 건조수축량이 제어되고 있는 것으로 나타났다. 본 연구는 앞으로 건조수축균열제어와 인성증가를 위한 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 활용 및 설계에 기초자료를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 대학원

\*\*\* 정회원, 쌍용중앙연구소 건설기술연구실

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 2월 27일까지 학회로 보내  
주시면 1997년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## Abstract

Recently, polypropylene fiber reinforced mortar and concrete as civil and architectural materials have been used in major countries in the world.

Polypropylene fiber reinforced concrete has many advantages in terms of economical aspect, 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.

The purpose of the present study is, therefore, to investigate the strength as well as many mechanical characteristics including toughness and shrinkage control properties. A specially devised shrinkage test has been applied to measure the crack control characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete. The present study indicates that the polypropylene fiber reinforced concrete curbs greatly the crack occurrence due to shrinkage and enhances toughness resistance. The present study provides a firm base for the efficient use of polypropylene fiber reinforced concrete in actual construction such as pavements and slab structures.

**Keywords :** polypropylene fiber, concrete, mortar, strength, toughness, cracking, drying shrinkage, crack control

## 1. 서 론

콘크리트와 모르타에 사용되는 각종 섬유는 콘크리트의 역학적 단점인 취성을 보완하여 연성을 확보하고 에너지 흡수능력을 증대키 위하여 개발되어, 여러 구조 형태에서 그 사용이 증대되고 있는 실정이다.

폴리프로필렌섬유는 가격이 저렴하고, 화학적인 안정성과 내구성이 우수하여 그 사용이 점차 증대되고 있다.<sup>1,2)</sup> 폴리프로필렌섬유의 사용은 모르타 및 콘크리트가 건조나 온도에 의해 수축될 때, 구속에 의해 발생하는 인장응력 및 균열을 제어하고, 인성의 증가와 충격(impact), 마모(abrasion), 피로(fatigue)에 대한 저항성을 증대시키며, 내구성을 증대시키는 등의 여러가지 장점을 지니는 것으로 보고되고 있다.<sup>6,7,8,11)</sup>

본 연구에서는 이러한 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 역학적 거동 특성인 압축강도, 인장강도 등 강도 특성 뿐만 아니라 인성, 탄성계수, 유동성과 균열 및 건조수축 제어특성을 실험적으로 규명하고자 하였다. 특히 섬유의 건조수축 제어특성을

규명하기 위하여 구속된 원형시험체 (ring specimen)를 제작하여 섬유의 건조수축 제어특성에 대하여 연구하였다.

## 2. 폴리프로필렌섬유의 기본 특성

### 2.1 폴리프로필렌섬유의 물리적 특성

폴리프로필렌섬유의 물리적 특성으로는 비중 (specific gravity), 열전도율(thermal conductivity), 내구성, 밀도, 색상, 흡수율(absorption), 인장강도, 발화점(ignition point), 용융점(melt point), 전기 전도성(electrical conductivity), 분산성, 알칼리-산 저항성 등이 있다.

폴리프로필렌섬유는 다른 섬유재료에 비해 낮은 비중을 가지고 있으며, 이는 많은 양의 섬유가 콘크리트나 모르타에 혼합되어 사용될 수 있음을 의미한다. 인장강도 또한 상당히 양호하고 강섬유의 단점인 가격과 부식에 대해 상대적으로 우수하다. 그러나, 단점으로는 낮은 탄성계수와 시멘트 경화제와의 부착특성, 강섬유에 비해 상대적으로 낮은 강

도 등이 있을 수 있다.<sup>8)</sup>

표 1에서는 이러한 폴리프로필렌섬유의 개략적인 물리적 특성을 나타내었다.

Table 1 Physical properties of polypropylene fiber

항 목	폴리프로필렌섬유의 물리적 특성
비 중	0.90~0.92
밀 도	0.89t/m <sup>3</sup>
흡 수 율	0
발 화 점	538℃
용 융 점	163℃
탄성계수	3.5~3.8×104kg/cm <sup>2</sup>
긴기 전도성	낮음
분 산 성	양호
알칼리 및 산 저항도	양호

## 2.2 폴리프로필렌섬유의 화학적 특성

시멘트의 수화반응에서 시멘트량의 약1/3정도가 생성되는 수산화칼슘은 pH12-13정도의 강알칼리성을 나타낸다. 그리고 철근이나 강섬유 등의 철재료는 산화에 의해 부식을 일으키고 부피가 팽창하여 콘크리트나 시멘트 모르타에 손상을 입힌다. 따라서 콘크리트나 시멘트 모르타에 혼입되어 사용되는 섬유재료는 물, 알칼리 및 산에 대하여 충분한 저항성을 확보하여야 한다. 이런 측면에서 폴리프로필렌섬유는 물을 흡수하지도 않고, 반응하지도 않으며 산과 염기에 우수한 저항성을 가지고 있다. 물에 대한 흡수성이 없음은 콘크리트나 모르타의 물-시멘트비를 변화시키지 않고 심각한 작업성의 저하가 섬유혼입량의 조절로 방지될 수 있음을 의미하고, 물과의 화학적 반응이 없음은 콘크리트, 모르타 매트릭스 내에서 안정적으로 거동함을 의미한다. 그리고 산과 알칼리에 대한 저항성은 polyester나 강섬유에 비해 우수한 점으로 구조물의 사용기간 동안 건진성이 유지될 수 있으므로 콘크리트의 내구성 측면에서 장점을 갖는다. 또한 고도의 결정성과 탄소 고리의 입체적인 규칙적 배열성을 갖고 있으므로 인장강도가 다른 합성섬유에 비해 크고, 비교적 높은 융점을 가지고 있다.

## 3. 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성 실험

### 3.1 실험계획 및 실험변수

폴리프로필렌섬유를 혼입한 콘크리트의 인성과 강도 특성을 규명하기 위한 실험을 수행하였는데, 섬유의 혼입량과 섬유의 종류(단상형, 메쉬형), 섬유의 길이 등에 의한 영향을 평가하고자 하였다.

Table 2 Test variables and specimen numbering

시험번호	섬유종류	섬유혼입량 (%)	양생일수 (일)	섬유길이 (mm)
CF 0-1		0	7	19
CF 0-2			28	19
CF 1-1		0.078	7	19
CF 1-2			28	19
CF 2-1		0.1	7	19
CF 2-2			28	19
CF 3-1		0.16	7	19
CF 3-2			28	19
CF 4-1	단섬유형	0.2	7	19
CF 4-2			28	19
CF 5-1		0.5	7	19
CF 5-2			28	19
CF 6-2		1.0	28	19
CF 7-2		2.0	28	19
CFL 6-2		1.0	28	30
CFM 5-2	메쉬형	0.5	28	19

### 3.2 실험시편의 제작 및 양생

각 변수에 따른 구성 재료의 배합비는 표 3과 같고<sup>9)</sup>, 혼화제로는 고흡동화제(superplasticizer)는 시멘트량의 0.2%가 첨가되었다.

또한 각 변수에 대하여 힘 측정을 위한 10cm×10cm×50cm의 각주형 시편과 압축강도 시험을 위한 10cm×20cm의 실린더 시편을 3개씩 제작하였다.

콘크리트의 배합은 시멘트와 골재의 전비율을 수행한 후 배합수를 첨가하여 1분 배합한 후 섬유를 고르게 뿌려 다시 2~3분 정도 믹서에 의한 배합을 수행하였다. 배합이 끝난 후, 타설하고 24시간 이후 탈형하여 23±1℃의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

Table 3 Mix design of test specimen

설계강도	배합기준	물시멘트비	시멘트량	배합수량	잔골재비	잔골재	굵은골재
240 (kg/cm <sup>2</sup> )	중량	0.51	385	185	0.45	823	1005

비 중 : 잔골재 = 2.6 , 굵은 골재 = 2.59  
 흡수율 : 잔골재 = 1.0% , 굵은 골재 = 1.3%  
 함수량 : 잔골재 = 0.8% , 굵은 골재 = 0.7%

### 3.3 실험결과 및 분석

#### 3.3.1 유동 특성

다음의 그림 1은 섬유 혼입량에 따른 slump의 변화로서, 섬유의 혼입량에 따라 슬럼프가 감소하나 0.2%까지는 시험배합에 의해 슬럼프를 조절하여 작업이 가능한 것으로 사료된다. 그러나 0.5% 이상의 섬유혼입은 유동성에 특별한 주의가 필요한 것으로 판단되고, 특히 현장에서 펌핑을 하여 작업하는 경우는 0.2% 이하라도 반드시 시험배합에 의해 유동성의 확보 여부를 검토하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

30mm 길이의 섬유가 19mm의 섬유에 비해 약간 작은 슬럼프를 보였으며, 메쉬 형상의 섬유도 약간 감소하는 비슷한 경향을 보였다.

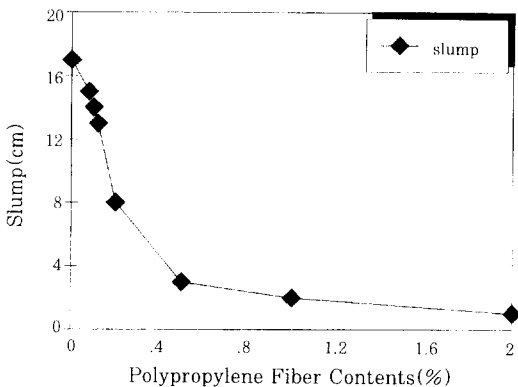


Fig. 1 The change of slump values

#### 3.3.2 압축강도 특성

본 연구에서는 섬유혼입량에 따른 압축강도의 변화를 비교·분석하였고, 섬유길이 변화에 의한 영향, 그리고 섬유의 종류에 따른 영향을 실험적으로 검증하였다.

7일 강도 특성은 일반 콘크리트의 7일 강도 특성과 큰 차이점이 발견되지 않고, 28일 강도의 약 70%정도가 발현되었다.

그림 2는 19mm 폴리프로필렌섬유의 혼입량에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 그림으로 0.2% (1800g/m<sup>3</sup>) 정도의 혼입까지는 압축강도가 약 12%까지 점차적으로 증가하나, 0.2%를 넘어서는 감소하여 1.0% 이상에서는 폴리프로필렌섬유가 혼입되지 않은 콘크리트의 압축강도 이하로 감소함을 알 수 있었다.

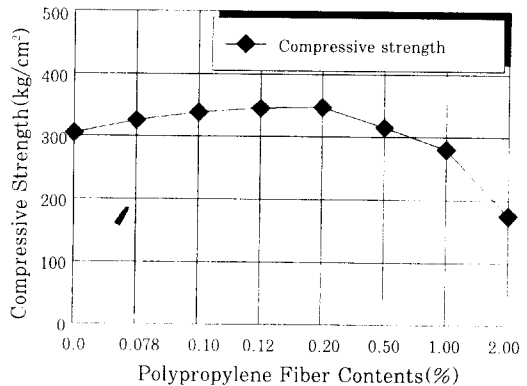


Fig. 2 The change of compressive strength (mono type : 19mm)

또한 섬유의 길이가 길수록 강도의 감소가 발생함을 알 수 있었으나, 단섬유형과 메쉬형의 압축강도 특성에 대한 차이점은 매우 작았고 메쉬형이 약간 큰 것으로 결과가 도출되었다.

#### 3.3.3 휨 인장강도 특성

섬유혼입량에 대한 휨인장강도의 변화를 그림 3에 나타내었는데, 체적비로 0.2% 섬유혼입까지는 휨인장강도가 약 22% 정도 증가하다가 감소하여 1.0% 이상에서는 섬유가 혼입되지 않은 경우보다 더 작은 강도를 갖는 것으로 나타났다. 이것은 1% 이상의 과다한 혼입에서는 배합시 섬유의 뭉침현상으로 분산성을 저하시키거나, 콘크리트의 강성저하와 같은 물리적 특성을 악화시키기 때문인 것으로 판단된다.

섬유의 종류에 따른 영향은 단섬유보다 메쉬형의 섬유가 약간 작은 휨인장강도 값을 보였다. 섬유의

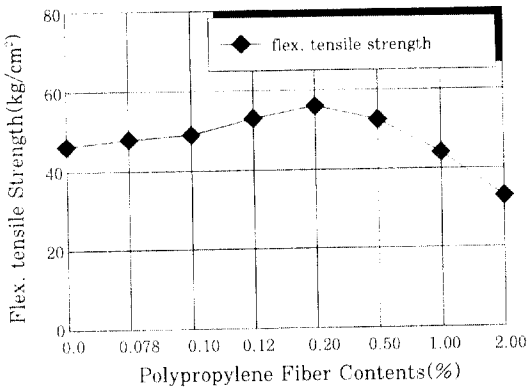


Fig. 3 The change of flexural tensile strength (mono type : 19mm)

혼입량이 0.5%인 경우에 단섬유형은 52.6kg/cm<sup>2</sup>의 인장강도를 보였고 배쉬형은 45.8kg/cm<sup>2</sup>의 인장강도를 보였다.

### 3.3.4 하중-변위 관계

압축시험의 경우 섬유 혼입량이 증가할 수록 최대하중도달 이후의 하중이 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 섬유혼입량의 증가에 따라 최대하중도달 이후 시편의 일부가 분리되어 떨어지는 현상이 현저히 감소하였다. 19mm, 30mm의 섬유길이의 비교는 하중-변위 관계에서는 별다른 차이점을 발견할 수 없고, 섬유종류의 비교도 단섬유형과 배쉬형에 있어서도 큰 차이점은 보이지 않는다.

휨시험에 의한 하중-변위 곡선에서는 앞서 언급한 특징들을 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있다. 특히 섬유 혼입량이 1.0%, 2.0%에서는 전혀 다른 모양의 하중-변위 관계 곡선이 얻어져, 최대하중의 50~70% 정도에서 다시 하중을 상당 변위동안 지속하였다. 이러한 하중-변위곡선 형태의 대표적인 예로써, 그림 4와 그림 5에 각각 섬유가 보강되지 않은 콘크리트와 섬유의 혼입량이 1.0%인 콘크리트의 휨하중-변위곡선을 나타내었다. 또한, 30mm 섬유가 19mm 섬유에 비해 최대하중이후 약간 더 완만한 하중-변위 곡선의 형태를 보였으며, 배쉬형의 경우 단섬유형에 비해 최대하중 도달 이후의 취성적 거동이 상당히 개선됨을 볼 수 있었다.

이러한 하중-변위 곡선으로부터 콘크리트의 취성적 거동이 섬유보강으로 인해 개선될 수 있으며, 특

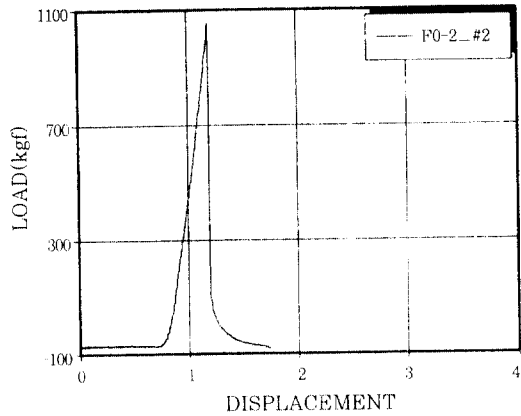


Fig. 4 Flexural L-D curve of fiber-free specimen

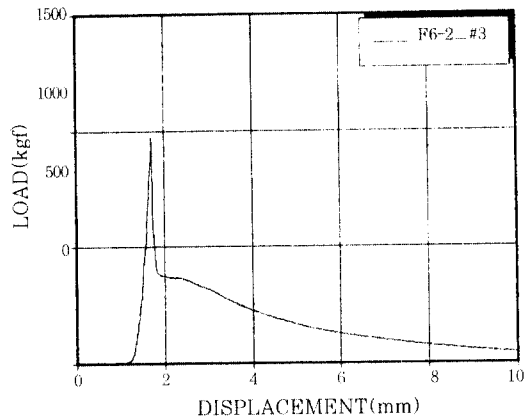


Fig. 5 Flexural L-D curve of 1.0% fiber reinforced sp.

히 섬유의 혼입량이 증가하고, 길이가 길며 배쉬형일 경우 보다 완만한 휨하중-변위 곡선을 나타냄은 콘크리트에의 섬유의 부착면적이 증가할 수록 재료의 취성적 거동의 개선에 큰 효과를 갖게 됨을 알 수 있다.

## 3.4 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 휨인성 지수 분석

### 3.4.1 휨인성 지수의 정의 및 계산

섬유 콘크리트를 쓰는 주된 이유 중의 하나는 콘크리트의 인장 저항성을 개선하고 균열 저항성을 증가시키는 것이다. 연성 즉 인성을 확보한다는 것은 변형에너지를 크게 확보한다는 의미로 구조물의 취성적 파괴를 방지할 수 있음을 의미한다. 이때 인

성이라는 것은 하중-변위 곡선(응력-변형도 곡선)의 면적으로 표현될 수 있고, 이 면적으로 인성이 정량화 될 수 있다.<sup>3)</sup> 즉,

$$\begin{aligned} & \text{휨인성 지수(Toughness "Index" : } I_t) \\ &= \frac{\text{하중-처짐 곡선의 } (i \times u_{cr}) \text{ 변형까지의 면적}}{\text{하중-처짐 곡선의 초기균열}(u_{cr}) \text{까지의 면적}} \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)로 정의될 수 있는 휨인성지수를 하중-처짐선에 대하여 그림 6에 도시하였다.

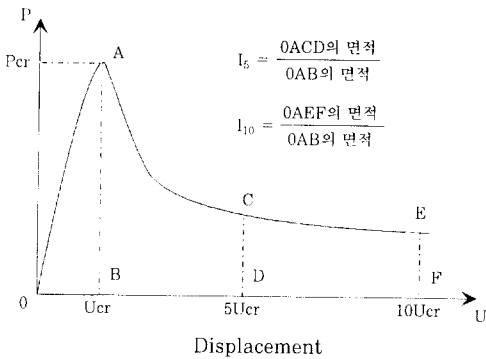


Fig. 6 The calculation of toughness indices from L-D curve

이러한 휨인성의 확보는 에너지 흡수능력의 증대로서 피로 및 충격 저항성이 증가하는 것을 의미하고 최대하중도달 이후 파쇄저항성의 기능도 증대된다.<sup>9)</sup>

3.4.2 섬유 혼입량, 길이 및 종류별 휨인성 지수의 계산

휨강도-변위 곡선으로부터 계산된 휨인성 지수는 섬유의 혼입량별로 다음의 그림 7과 같은 휨인성 지수  $rm(I_5, I_{10})$ 를 갖는다.

섬유가 혼입되지 않는 경우의 1.0의 지수값은 최대하중 도달 이후 시편이 파쇄되는 것을 의미하며, 섬유의 혼입과 동시에 파쇄가 방지되고 휨인성 지수가 증가한다. 섬유의 혼입량이 증가할수록, 섬유의 길이가 길수록, 또한 섬유의 종류가 배쉬형인 경우, 휨인성 지수가 증대되었는데 이는 섬유의 부착면적이 증가함에 따라 휨인성 측면에서 그 성능이 향상됨을 알 수 있다.

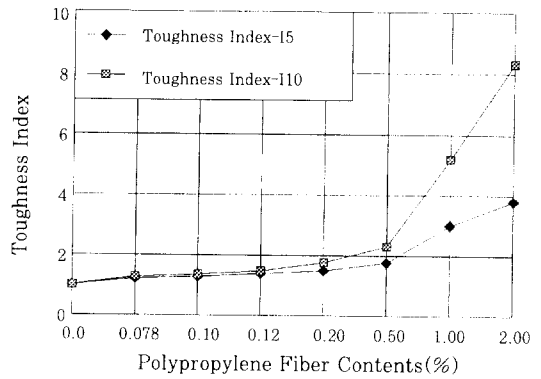


Fig. 7 The change of flexural toughness indices

#### 4. 폴리프로필렌 섬유보강 모르타르의 소성수축균열 저항 특성 실험

##### 4.1 실험계획 및 실험변수

Table 4 Test variables and specimen numbering

시험번호	섬유종류	섬유혼입량(%)	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

본 연구에서 제작된 몰드는 90×60×2cm의 얇은 판 모양으로 바닥은 모르타르의 수축이 원할하도록 비닐막을 설치하였고, 구속효과가 나타나 인장응력을 집중시키도록 몰드의 둘레에 10cm간격으로 구속섬유를 설치하였다. 그리고 몰드의 측면은 부피변화가 측벽에 의해 구속되지 않도록 아크릴로 제작하였다. 그림 8은 소성수축균열 저항성을 보기 위한 시험체의 개형이며, 그림 9는 타설된 시험체의 모습이다.<sup>10)</sup>

시험체의 배합비는 물 : 시멘트 : 모래가 1 : 2 : 3 이고, 0.2% 중량비의 고유동화제를 첨가하였다.

전비빔이후 배합수를 첨가하고 비빔을 2~3분간 수행하고 섬유가 혼입되는 경우에는 섬유를 고르게 분산, 살포하여 2~3분간 비빔을 수행한 후 타설한다.

타설된 시편은 양생 초기 1시간 경과후 부터 23℃

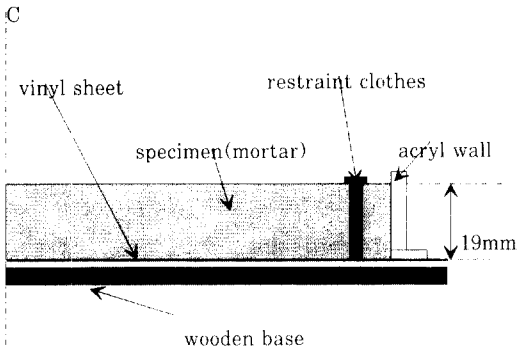


Fig. 8 The diagram of test specimen

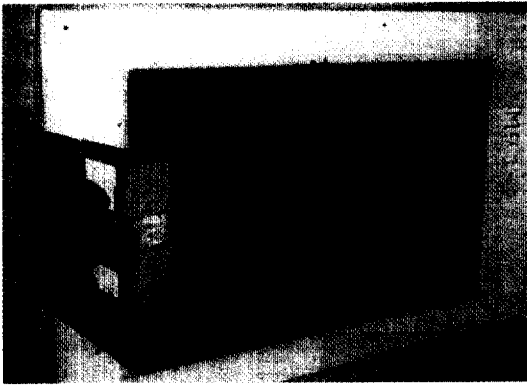


Fig. 9 The picture of test specimen

의 50%상대습도에서 건조시키고 시편의 표면에 20~30m/sec의 바람을 작용시킨다. 단, 자연건조 조건인 경우는 이를 생략한다. 이후 6~24시간의 균열진전상황을 관찰한다.

#### 4.3 실험결과 및 분석

항온항습조건에서 건조되는 시편은 3~6시간에서 소성수축균열이 발생된다. 균열의 진전상황을 관찰하고 최종적으로 12시간 이후 안정된 균열의 형상과 균열폭, 균열길이 등을 측정한다.

각 시편의 균열면적을 상대비교함으로써 균열저항성을 고찰하였는데 균열면적은 균열길이에 균열폭을 곱하여 구한다. 섬유가 혼입되지 않은 시편의 균열면적을 100%로하여 혼입량에 따라 상대비교하였는데 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 균열면적이 급격히 감소하였다. 각 시편에 대한 균열면적을

그림 10에 나타내었는데, 섬유가 0.1% 첨가된 경우 50%로, 0.2% 첨가시는 15%정도로 감소하였다. 또한 섬유의 혼입량이 증가할 수록 균열의 폭과 균열갯수가 감소하였다.

30mm 길이의 섬유가 19mm에 비해 균열제어효과가 큰 것으로 나타났는데, 30mm의 0.1% 혼입에도 19mm의 0.2% 혼입보다 균열제어효과가 큰 것으로 나타났다.

시험조건시 가해지는 바람의 영향을 고려하기 위해 항온항습, 자연건조 조건의 시편과 비교하였는데, 이 경우 강제건조조건에 비해 균열면적이 약 5배 감소되었다. 따라서 자연건조상태에서 섬유의 보강은 상당한 균열제어효과가 있는 것으로 판단된다.

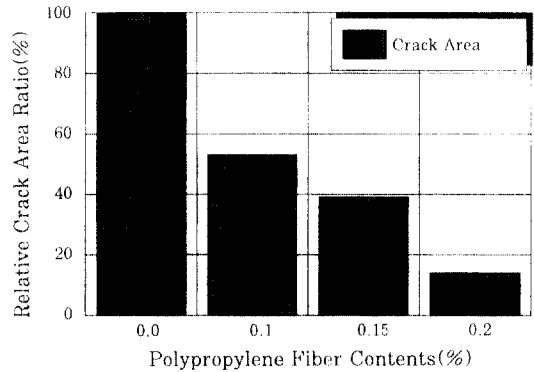


Fig. 10 Relatively compared shrinkage crack area ratio

### 5. 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 건조 수축 특성 실험

#### 5.1 실험계획 및 실험변수

Table 5 Test variable and specimen numbering

시편번호	섬유혼입량(%)	비 고
F0	0	단상 19mm 섬유
F1	0.1	
F2	0.2	
F3	0.3	
F5	0.5	

## 5.2 실험방법 및 수행

먼저 구속건조수축실험을 위해 내부강관을 나무 판 위에 고정시킨 후 그 외부에 모울드를 고정하고 두 링사이에 콘크리트를 타설하여 시편을 만들었다. 내부 강관은 외경 302mm, 두께 15mm이며, 모울드는 내경 382mm의 강관이다. 그림 11은 구

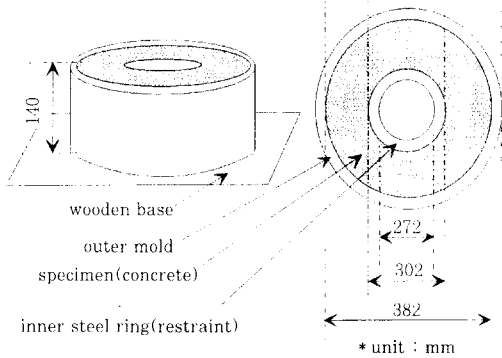


Fig. 11 The diagram of test specimen

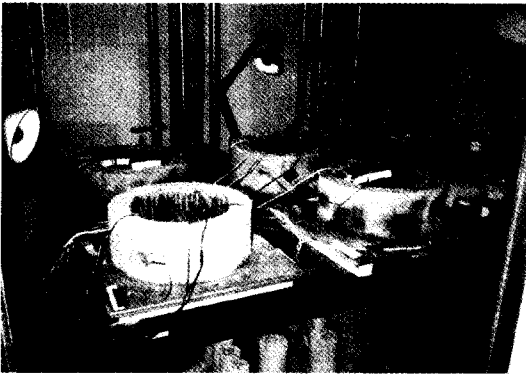


Fig. 12 The picture of test specimens

속 건조수축특성을 보기 위한 시험체의 개형이며, 그림 12는 타설된 시험체의 모습이다.

자유건조수축(free shrinkage) 실험을 위한 시편은 5×5×25cm와 9×9×40cm 크기의 범시편으로 제작되는데, 표면에 건조수축량의 측정을 위한 스트러드를 타설한 각기 20cm, 25cm간격으로 모울드의 내부에 설치하여 탈형후 스트러드가 콘크리트에 묻힐 수 있도록 한다.

타설후 1일 경과후 탈형하여 온도 23±1℃, 상대습도 100%의 항온항습조건에서 4일간의 양생을

실시한 후 온도 23±1℃, 상대습도 40% 항온항습 조건에서 건조를 지속시키게 된다.

양생이 끝난 후 건조수축변형도를 측정하는데, 구속건조시편의 경우 시편의 외면에 길이 30mm의 콘크리트 변형게이지를 원주방향등간격으로 3개씩 부착하여 데이터 로거에 의해 측정하며, 이후 각 시간별로 3개 게이지의 평균값을 계산한다. 또한 자유건조수축 실험시편의 경우, 크기효과(size effect)를 고려하기 위해 서로 다른 단면크기(5×5×25cm, 8×8×40cm)의 시편을 각 단면에 대하여 2개씩 제작하여 휘트모아 스트레인게이지를 사용하여 측정후, 각 단면에 대한 평균치를 계산한다.

## 5.3 실험결과

구속건조시편은 양생후 6시간 간격으로 데이터로거를 통하여 게이지의 strain값을 측정하며, 자유건조시편은 휘트모아 스트레인게이지에 의해 1일 간격으로 측정한다. 그림 13은 각 시편의 시간에 따른 구속건조수축변형률을 보여주고 있다.

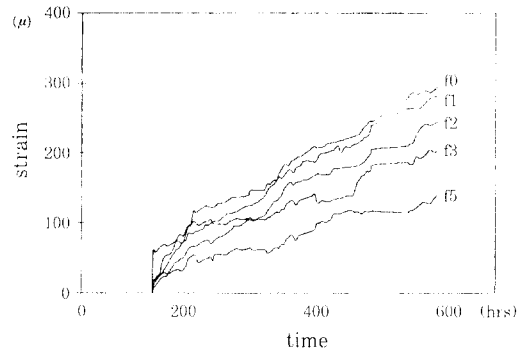


Fig. 13 The development of restrained shrinkage strains

28일 경과후 혼입량에 따른 각 실험의 결과를 간단히 정리하면 다음 표 6과 같다.

Table 6 Shrinkage strains after 28 days

시편번호	건조수축량(με)	자유건조수축량 (5×5×25cm)	자유건조수축량 (8×8×40cm)	구속건조수축량
F0		473	407	294.5
F1		460	403	281.5
F2		454	393	245
F3		441	386	203
F5		423	370	140.5



## 5.4 결과 분석

### 5.4.1 콘크리트의 건조수축

건조수축은 콘크리트의 건조로 인해 콘크리트 내부의 수분이 방출되면서 진행되는 콘크리트의 재료적 특성이다. 이러한 콘크리트의 건조수축에는 콘크리트의 물-시멘트비, 단위골재량, 외부습도, 양생 조건, 골재의 크기, 시편의 형상 및 크기 등이 영향을 미치게 된다. 이러한 인자들의 영향으로 콘크리트 내부에 존재하는 수분의 감소로 인한 콘크리트의 체적감소가 나타나며 이는 콘크리트의 내부와 표면의 수분분포의 경사로 발생하는 수분이동 문제로 설명된다.

### 5.4.2 콘크리트의 구속조건

콘크리트는 타설후 수분의 증발로 인하여 건조수축이 발생하게 된다. 실제의 콘크리트 구조물에서는 건조수축에 대하여 내·외부적 구속조건이 주어지게 된다. 일반적으로 콘크리트 부재의 경우, 건조수축에 대한 구속의 조건을 살펴보면, 먼저 내부구속 조건으로써 골재와 보강철근 등에 의해 콘크리트내부와 표면의 수분경사로 인한 수분의 이동을 구속하게 된다. 또한 외부구속조건으로써 콘크리트 부재의 타설시간차로 인한 부재 상호간의 구속과 구조물의 단부에서 구조적 지점구속 등과 같은 외부적 구속조건이 있다.<sup>12)</sup> 이와 같은 콘크리트의 건조수축에 대한 일반적 구속조건과 함께 섬유가 보강된 콘크리트의 경우, 콘크리트에 보강된 섬유는 수분이동에 대한 구속효과를 가지며, 구속시 건조수축으로 인하여 발생하게 되는 콘크리트의 인장응력에 저항하여 균열의 발생을 억제할 수 있게 된다.

### 5.4.3 섬유의 내부구속 기여도 분석

실험결과로부터 측정된 건조수축변형량에 대한 섬유혼입의 효과를 그림 14에 도시하였다.

그림 12에서  $\Delta\epsilon_m$ 는 섬유가 보강되지 않은 콘크리트의 자유건조수축 변형량에서 섬유가 보강된 각 시편에 대한 자유건조수축량을 뺀 값으로, 섬유의 수분이동에 대한 구속효과를 의미하게 된다. 또한  $\Delta\epsilon_{len}$ 는 각 시편의 자유건조수축량에서 구속건조수축량을 뺀 값으로, 콘크리트의 구속상태에서 섬유

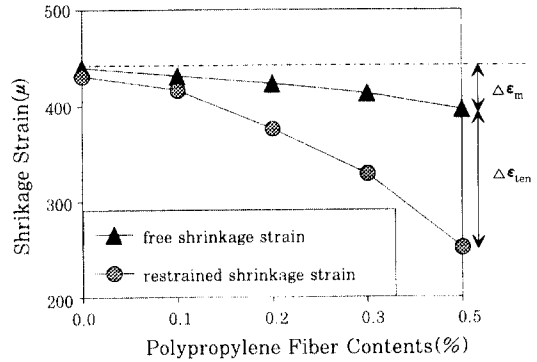


Fig. 14 The trend of drying shrinkage strains

Table 7 The effects of fiber reinforcement after 28 days

시편번호	자유건조 수축량 (μE)	구속건조 수축량 (μE)	수분이동 구속효과 ( $\Delta\epsilon_m$ ) (%)	섬유혼입 총기여도 (%)	인장응력 부담효과 ( $\Delta\epsilon_{len}$ ) (%)
F0	440	431.5	0	0	0
F1	431.5	416.5	1.9	3.4	1.5
F2	423.5	376	3.8	12.9	9.1
F3	413.5	329	6.0	23.8	17.8
F5	396.5	251.5	9.9	41.7	31.8

의 인장응력 저항효과를 의미하게 된다.

표 7에서는 섬유혼입의 효과를 정량적으로 분석하여 나타내었다.

표 7에서 자유건조수축량은  $5 \times 5 \times 25\text{cm}$ 와  $8 \times 8 \times 40\text{cm}$ 의 두 시편에 대한 건조수축변형량의 평균값이다. 링시편에 의한 구속건조수축 실험결과에서 콘크리트의 구속효과에 의해 각 시편들은 양생후 초기 약 5일간은 수축변형이 측정되지 않는다. 표 7에서 계산된 구속건조수축량은 이러한 초기의 구속효과를 고려하기 위하여, 측정된 링시편의 건조수축량에 초기 5일간의 자유건조수축량을 더한 값이다. 이는 콘크리트의 구속효과에 의해 측정되지 않는 초기의 변형량도 콘크리트 매트릭스에 응력치로 작용하고 있음을 의미한다. 수분이동 구속효과라 함은 F0의 자유건조수축량에 대한 각 시편의 자유건조수축량의 감소량의 비로써 계산되며, 섬유혼입의 총기여도는 F0의 구속건조수축량에 대한 각 시편의 구속건조수축량의 감소량의 비로써 계산된다. 따라서, 구속시 건조수축변형으로 인해 유발되는 인장응력에 대한 섬유의 부담효과는 섬유의 총기여

도에서 수분이동의 구속효과를 빼 값이 된다.

그림 14와 표 7에서 섬유혼입량의 증가에 따른 자유건조수축량의 제어효과에 비하여 구속시 건조수축량의 제어효과가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 섬유가 기여하는 수분이동에의 구속효과에 비해 외부적 구속상태에서 건조수축변형을 일으킬 경우에 섬유의 건조수축 제어효과가 보다 큰 것을 의미한다. 이는 곧 구속으로 인하여 유발되는 인장응력에 섬유가 효과적으로 저항하며 결국은 구속시의 건조수축변형량을 효과적으로 억제할 수 있음을 의미하는 것이다.

이러한 결과로부터 보강된 섬유가 콘크리트에 존재하는 자유수의 이동경로를 차단하는 내부구속의 역할과 함께 건조수축으로 인하여 유발되는 응력에의 저항효과를 증대시키는 기능을 지님을 알 수 있다. 이는 콘크리트 부재가 구속되었을 경우 섬유콘크리트가 온도, 양생방법, 습도조건에 의해 더욱 크게 유발될 수 있는 건조수축에 의한 인장응력에 대해 저항효과를 증대시켜 균열제어에도 큰 역할을 할 수 있을 것이며, 이러한 보강섬유의 건조수축균열에 대한 제어효과는 4장에서 진술된 소성수축균열 시험에서의 결과로부터도 알 수 있다.

섬유콘크리트에서의 이러한 섬유의 구속효과는 일반콘크리트의 건조수축과는 그 메카니즘에서 차이를 나타내며, 이러한 섬유혼입에 의한 구속시의 건조수축개념을 섬유콘크리트 부재의 설계시 적용할 필요가 있다. 즉, 일반콘크리트 부재의 건조수축과 달리 섬유보강 콘크리트에서는 섬유의 수분이동 구속효과와 인장응력 저항효과로 인하여 제어되는 건조수축량을 고려하여야 한다. 따라서, 섬유콘크리트 부재에 대하여 건조수축의 개념을 수식화하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{trc} = \epsilon_c - \Delta\epsilon_m - \Delta\epsilon_{ten} \quad (2)$$

이 식에서,

$\epsilon_{trc}$  : 섬유콘크리트의 건조수축량

$\epsilon_c$  : 일반콘크리트의 건조수축량

$\Delta\epsilon_m$  : 섬유의 수분이동 구속효과로 인해 제어되는 건조수축량

$\Delta\epsilon_{ten}$  : 섬유의 인장응력 저항효과로 인해 제어되는 건조수축량

상기식에서처럼 섬유보강 콘크리트 부재의 해석이나 설계시 섬유혼입에 의한 건조수축변형의 감소효과를 고려하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구는 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 강도, 인성, 균열제어, 건조수축 제어특성을 실험적으로 규명하고 분석하는데 그 목적이 있다. 따라서 섬유보강 콘크리트의 역학적 거동특성을 분석하고 섬유의 혼입량 및 섬유길이, 섬유종류에 따른 콘크리트의 압축, 휨강도, 휘인성, 소성수축균열 제어특성 실험 및 건조수축 제어특성 실험을 수행, 분석하였다.

본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 슬럼프에 의한 유동특성은 0.12% 혼입까지는 최대 4cm가 감소하여, 이 이하의 혼입량에서는 별다른 주의없이 실제 현장에서 적용이 가능하다. 그 이상의 혼입에서는 주의가 필요한 것으로 판단된다.

(2) 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 강도특성은 섬유가 0.2% 혼입될 때까지 압축강도는 최대 12%, 휨강도는 최대 22% 증가하는 것으로 나타났고, 그 이상의 혼입에서는 압축, 휨강도 모두 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 휘인성지수는 0.5% 이상 섬유의 사용에서  $I_{10}$ 이 4이상, 2.0% 이상에서는 최대 8.4 정도까지 나타났고, 0.2% 이하의 사용에서는 1.2~2.0의 값을 보였다. 또한 섬유의 길이가 19mm보다 30mm의 경우가, 단섬유형보다 메쉬형이, 보다 큰 인성지수 값을 보였다.

(4) 폴리프로필렌 섬유보강 모르타르의 소성수축 균열면적은 섬유가 보강되지 않은 시편에 비해 섬유의 혼입량이 0.1%(900g/m<sup>3</sup>)의 경우 50%가 감소하여, 섬유혼입으로 인한 균열제어효과가 큰 것으로 나타났다.

(5) 섬유콘크리트의 건조수축특성은 일반콘크리트와 달리 섬유의 내부구속효과를 지니며, 섬유의 내부구속효과는 콘크리트 내부의 수분이동 구속효

과와 함께 그러한 효과의 1.5~3배의 효과를 발현하는 인장응력에의 저항효과가 있다. 이러한 개념이 앞으로 섬유콘크리트 부재의 설계시 이 개념이 효율적으로 적용되어야 할 것으로 사료된다.

(6) 본 연구는 앞으로 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 활용시 건조수축 제어효과와 균열제어 효과 등을 정량적으로 분석하여 설계, 시공하는데 중요한 토대를 제공할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 오병환외, 최신콘크리트 공학, 기문당, 1992.
2. 백상현, 폴리프로필렌 합성섬유보강 콘크리트의 강도특성 및 건조수축균열제어 특성 연구, 서울대학교 공학석사학위 논문, pp.48, 1996.2.
3. ACI, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, 1986.
4. ASTM, Annual book of ASTM standards - Concrete and Aggregate, 1990, Vol. 04.02.
5. Guirguis, B. E. and Potter, R. J., "Polypropylene Fibres in Concrete", Technical Report TR/F90, Cement and Concrete Association of Australia, 1985.
6. Ramakrishnan, V., Gollapudi, S., and Zeller, R., "Performance Characteristics and Fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete," Fiber Reinforced Concrete Properties and Application, ACI SP-105, pp.159-178, 1987.
7. Mindess, S., Banthia, N., and Benturt, A., "The Response of Reinforced Concrete Beams with a Fibre Concrete Matrix to Impact Loading."
8. "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.
9. Wei Ling Lin, "Toughness Behavior of Fibre Reinforced Concrete," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Edited by R. N. Swamy, RILEM, 1992.
10. 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.
11. Zollo, R. F. et al. "Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibers," to be published in 1986.
12. Kraai, P. P., "A Proposed Test to Determine the Cracking Potential due to Drying Shrinkage of Concrete," Concrete Construction, pp.775-778, 1985.

(접수일자 : 1996. 7. 15)