

## PPF 섬유 첨가가 콘크리트의 공극구조에 미치는 영향

## The Effects of PPF Fiber on Pore Structure of Concrete

한 만 엽\*

Han, Man Yop

## Abstract

Polypropylene Fibers have been used to increase the toughness of concrete and to increase the resistance to crack formation. However, there are many contradictory argument about the effectiveness of the fiber due to the lack of knowledge about the mechanism of fiber in concrete. One of the mechanism which changes the concrete properties on the addition of fiber is the change of the micropore structures. In this study, the change of pore structure due to the addition of fiber has been analyzed by a permeability and a pore size distribution test. The added fiber is found to provide a path for moisture movement, which increases drying shrinkage and pore size. It is found that the size of pores formed around the fiber ranges from 0.05  $\mu\text{m}$  to 5.0  $\mu\text{m}$ .

## 요 지

최근에 폴리프로필렌 섬유를 첨가하여 콘크리트의 인성을 증가시키고, 균열에 대한 저항성을 향상시키고자 하는 노력이 경주되어 왔다. 그러나 첨가된 섬유의 작동 구조에 대한 이해 부족으로 인하여 연구자들 간에 실험 결과에 대한 해석이 상이한 경우가 많았다. 섬유의 첨가에 따른 콘크리트 물성의 변화는 콘크리트의 미세 공극구조의 변화가 외부적으로 관측된 것이기 때문에 본 연구에서는 주로 투수성 실험과 공극분포 측정 등을 통한 공극구조의 변화를 분석하여 섬유의 첨가로 인한 콘크리트의 물성 변화가 발생하는 메카니즘에 대하여 분석하였다. 분석결과, 섬유의 첨가는 수분의 이동을 촉진하는 통로를 제공하며, 이에 따라 건조수축을 증가시키고 공극의 크기를 증가시키는 효과를 나타내고 있으며, 섬유의 주변에 형성된 공극의 크기는 0.05  $\mu\text{m}$ 에서 5.0  $\mu\text{m}$  사이에 분포되어 있음이 관측되었다.

## 1. 서 론

지난 10여년 동안 강섬유나 유리섬유, 플라스틱 계의 고분자 섬유 등을 비롯한 가늘고 긴 형상의 재료를 첨가하여 콘크리트의 성능을 개선하기 위한

수많은 노력이 있어 왔다. 이러한 섬유의 사용으로 콘크리트의 최대 약점 중의 하나인 취약한 인성이 보강될 수 있는 가능성을 보여준 것은 사실이지만 아직은 유동성 저하, 가격 상승 등의 문제로 인하여 널리 사용되지는 못하고 있는 실정이다.

최근에는 polypropylene fiber(이하 PPF 섬유)를 사용하여 양생 초기 콘크리트의 건조수축이나 온도

\* 정회원, 아주대학교 토목공학과 조교수

강하에 따른 내부 응력을 조절할 수 있는가에 대한 많은 논란이 있어 왔다.<sup>(1)</sup> 이와 관련된 여러 연구 결과는 PPF 섬유가 콘크리트의 투수성과 건조수축 뿐 아니라 균열 발생에도 어떤 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 PPF 섬유가 콘크리트에 미치는 효과는 주로 양생 초기 콘크리트의 투수성의 증가와, 균열 발생후 PPF 섬유가 균열의 확대를 억제하는 기능을 갖는데서 기인하는 것으로 설명되어진다. 본 논문에서는 PPF 섬유가 콘크리트의 투수성, 체적 변화, 공극 크기 분포 등에 얼마만한 영향을 미치는가를 분석하고, 영향을 미친다면 이들에 어떤 작동 구조를 갖는가를 규명하는 것을 목적으로 하고 있다.

## 2. 콘크리트의 투수성

공극 크기 분포나 모세관의 비중은 콘크리트의 투수성에 영향을 미치는 중요한 인자이나 서로 상반되는 결론이 도출되는 경우가 많은 것은 공극의 형상이나 연결 정도 등이 동시에 고려되지 않았기 때문이다. 비록 투수성과 관련된 개별적인 인자들의 측정은 가능하다고 하더라도 이들 인자들의 기여 정도 및 인자들간의 상호관계를 규명한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 가능하다면 직접적인 투수성의 측정만이 PPF 섬유가 콘크리트의 투수성에 미치는 영향을 판별하는데 가장 적합한 방법이 될 것이다. 다만 PPF 섬유의 첨가에 따른 투수성의 변화는 콘크리트의 양생 초기에 발생하기 때문에 기존의 재래적인 투수 측정방법으로는 시간이 오래 걸려 그 측정이 불가능하다. 따라서 양생 초기 콘크리트의 투수계수는 수리에너지의 측정을 통한 측정 방법을 적용하였다.<sup>(4)</sup> 수리에너지의 측정을 통한 투수성 측정방법은 모델식 이용법과 수리에너지 분포법, 직접측정법 등 3가지가 있으며 기본 이론은 참고문헌 (4)에 나와 있다.

콘크리트의 타설 후 수분 손실로 인하여 발생하는 건조 수축은 주로 표층에 집중되어 있다. 이러한 표층의 수축 변형이 수축이 적은 내부층에 의하여 자유로운 변형을 제한받게 될 때, 응력이 유발되어 균열이 발생하게 된다. 따라서 섬유에 의하여 내부의 수분 이동이 좀더 자유로워지면 내, 외부간의 수분 분포가 좀더 균질하여 저서 균열을 방지할 수 있

다는 것이다.<sup>(3)</sup> 그러나 이 가설은 섬유에 의하여 수분의 분포가 좀더 균질하여 진다하더라도 수분 이동 통로의 형성에 따른 전체적인 수분 손실량의 증가는 오히려 건조수축 균열을 증가시킬 수도 있다는 점을 간과하고 있다.

### 2.1 Polypropylene Fiber와 공극구조

PPF 섬유는 일반적으로 비흡습성의 물질로 알려져 있다. 그러나 PPF 섬유의 흡습성을 측정된 실험 결과<sup>(5)</sup>는 PPF 섬유도 수분을 흡착하고 있으며, PPF 섬유에 흡착된 수분은 서서히 대기중으로 방출되며, 그 속도는 상대습도에 좌우됨을 보여주었다. 이 결과는 PPF 섬유가 수분을 흡수하지는 않아도 표면에는 흡착된 수분이 존재할 수 있는 것을 증명하는 것이다. 따라서 섬유의 표면과 물분자 사이에 존재하는 흡착력에 의하여 PPF 섬유의 주변은 물분자의 층으로 둘러싸여 있으며, 장기간에 걸쳐 PPF 섬유의 흡착력보다 강력한 증발력을 갖는 외부 조건에 노출이 되면 서서히 수분을 잃게 되는 것이다.

PPF 섬유가 콘크리트의 투수성에 미치는 영향에 대한 가설은 Fig. 1으로 요약할 수 있다. 배합시 PPF 섬유에 수분이 흡착됨으로써 섬유 주변에 형성됐던 길다란 선형의 모세관을 통하여 양생 초기의 잉여 수분이 신속히 이동, 증발함으로써 실질적인 물-시멘트 비가 감소하고 좀더 수밀한 콘크리트가 만들어질 수 있는 것이다. 그러나 섬유 주변은 양생 후

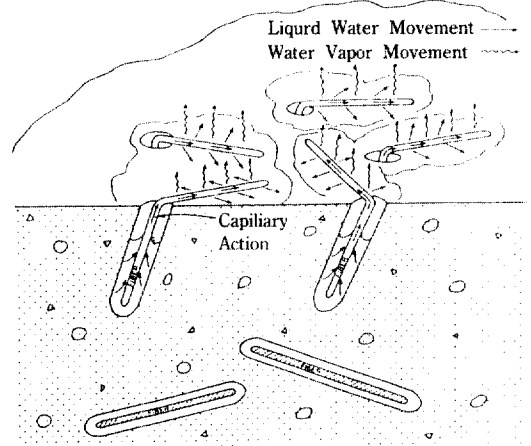


Fig. 1. The role of fiber on moisture migration in concrete

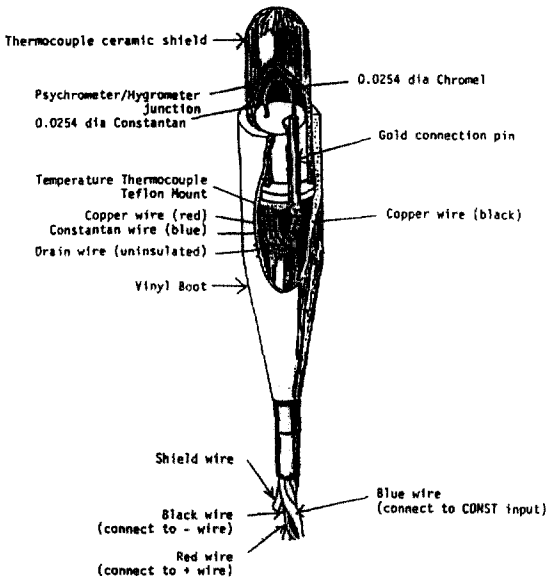


Fig. 2. Structure of Psychrometer

에도 시멘트 수화물의 부착이 원활하지 못하기 때문에 빈 공간으로 남아 수분 이동에 계속적인 통로를 제공함으로써 오히려 투수성이 큰 콘크리트가 될 수도 있다.

### 3. 실험 개요

#### 3.1 수리에너지 측정

토질 실험이나 양생된 콘크리트의 투수 실험에 사용되는 재래적인 측정법은 시간이 오래 걸리기 때문에, 양생 초기 공극율의 변화가 심한 콘크리트의 경우에는 적용하기가 어려운 문제점이 있다. 따라서 양생 초기 콘크리트의 투수성을 측정할 수 있는 방법으로서, 특히 섬유와 첨가에 따른 콘크리트의 투수성의 변화 여부를 구별할 수 있는 정도의 정밀도를 갖는 측정방법으로써, 수리에너지의 변화를 측정하여 투수성을 측정하는 방법을 이용하였다.

수리 에너지를 측정할 수 있는 사이크로미터 센서를 슬라브내에 4개를 분산 배치하였으며, 표면에는 건조수축 변위량을 측정할 수 있도록 DeMec 게이지를 설치하였다. Fig. 2은 실험에 사용된 사이크로미터의 개념도를 보여주는데 다공성의 세라믹 컵으로 둘러싸인 크로멜과 콘스탄탄의 정점에서 측정이 이루어진다. 사이크로미터는 이 열전쌍의 정점에

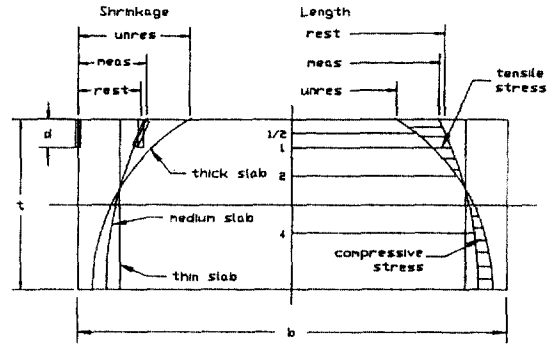


Fig. 3. Distribution of Drying Shrinkage upon the change of thickness and restraint

역전류를 흘려 온도를 낮춤으로써 수리 에너지를 측정하는 센서이다.

#### 3.2 건조수축의 측정

콘크리트의 건조수축량을 측정하기 위한 방법은 여러 가지가 있으나 본 실험의 경우 적용된 것은 DeMec 게이지를 이용하는 방법이다. 다만 슬라브 시편의 경우 표면에서 측정된 건조수축량은 슬라브의 두께와 폭, 측정점의 깊이 등에 영향을 받는데 Fig. 3는 형상에 따른 건조수축 응력과 변형율의 분포를 개념적으로 보여준다. 두꺼운 슬라브의 경우 밀폐된 슬라브 저면의 변형율은 상당히 작고 표층에 가까울수록 커지는 분포를 갖는다. 반면에 두께가 얇아질수록 상하층간에 변형율의 차이가 없어지게 되며, 대신 건조수축 에너지는 슬라브에 뒤틀(warping)을 발생시킨다. Fig. 3에는 이렇게 자유 건조수축이 제한을 받아 변형되지 못하는 만큼의 인장, 압축 응력이 슬라브의 표층과 저층에 각각 발생함을 보여준다. 본 실험에 사용된 슬라브는 이 두가지 중 두꺼운 슬라브에 가까운 성질을 갖는 것으로 판단된다.

#### 3.3 공극크기 분포 측정

공극크기 분포 측정방법은 수은침투법과 가스흡착법이 있는데 콘크리트의 투수성에 영향을 미치는 모세관 크기의 공극 측정에는 일반적으로 수은침투법이 더 널리 사용되고 있다. 수은 침투법은 비흡착성 액체가 압력을 받으면 고체의 공극내로 침투해 들어가는데 그 침투 가능 공극의 크기는 압력에 반비례한다는 원리를 이용한 것이다. 공극의 크기와 압력과의 관계는 접촉각, 액체의 표면장력, 그리고

Table 1. Mix Design and Properties of Fresh Concrete (kg/m<sup>3</sup>)

	W/C	Cem.	Water	Sand	Agg.	Fiber	Slump	Air
F0	0.53	279	148	745	1388	0.0	8.8	2.5
F1	0.56	279	155	745	1388	0.89	10.0	3.3
F5*	0.60	279	167	745	1388	3.0	8.8	3.8

Air Ent. Agent=2.5 g/kg, Retarder=9.4 g/kg

\*이 실험은 공극 크기 분포만 측정하였음.

공극의 크기, 형상 등에 영향을 받는데, 다음과 같은 Washburn의 식에 수은의 표면장력과 접촉각등을 대입하여 측정된 압력으로 부터 공극의 크기를 계산할 수 있다.

$$P = -4\gamma\cos\theta/d$$

여기서 P는 압력이고, d는 공극의 직경이며,  $\gamma$ 는 액체의 표면장력이고  $\theta$ 는 접촉각이다. 본 실험은 Micrometric Instrument Co.의 "AutoPore II 9220"으로 수행되었다.

### 3.4 실험계획

본 연구에서는 보통 콘크리트와 PPF 섬유를 혼입한 콘크리트 슬라브 시편을 제작하여 비교 분석함으로써 PPF 섬유를 첨가한 효과를 분석하고자 하였다. 슬라브 시편은 PPF 섬유의 권장 사용량인 0.89 kg/m<sup>3</sup>의 PPF 섬유를 혼입한 콘크리트와, 이와 같은 유동성을 갖는 보통 콘크리트로 제작하였다. 슬라브 시편은 수리에너지의 측정을 위하여 4개의 센서를 깊이에 따라 설치하였고, 표면에는 표면 변위를 측정하기 위하여 DeMec 게이지를 매설하였으며, 공극 크기 분포를 측정하기 위하여 별도의 시편을 준비하였다. 별도의 시편으로부터 공기량, 단위중량, 공극분포 등을 측정하여 PPF 섬유가 콘크리트내의 수분의 이동에 미치는 효과를 분석하고자 하였다. 이 실험에서는 PPF 섬유의 사용량을 늘린 3.0 kg/m<sup>3</sup>를 사용한 콘크리트 시편도 제작, 실험하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 배합설계표와 균기전 콘크리트의 물성 측정 결과가 Table 1에 요약되어 있다.

측정은 온도 25°C 에 상대습도 50%의 항온항습실에서 실시되었고, 시편 제작후 탈형전에는 밀폐 상태에서 보관되었다가 상부 표면을 제외한 모든 면을



1. Plain Concrete Slab
2. 1.5lb/cy Fiber Concrete Slab
3. DeMec Point
4. Microvoltmeter
5. 3-ply plastic
6. Paraffin Seal

Fig. 4. Slab under test

2층의 비닐로 밀폐하였다. 실험은 2주간의 건조기와 2주간의 습윤기를 거쳐, 다시 3주간의 건조기 동안 진행되었다. Fig. 4는 실험이 진행중인 슬라브 시편의 그림을 보여준다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 수리에너지 측정 결과

Fig. 5와 Fig. 6은 제1건조기 동안의 보통 슬라브와 PPF 섬유 첨가 슬라브의 측정 결과를 보여준다. 얇은 곳의 수리에너지는 거의 직선적으로 변화하고 깊은 곳의 수리에너지는 약간의 비선형적인 변화를 보여준다. 얇은 곳에서 수리에너지가 증가하다가 급격히 감소하기 시작하는 것은 센서의 측정범위를 벗어났음을 의미한다. 또한 10 cm 깊이의 수리에너지의 변화는 수분의 손실에 의한 변화라기 보다는 수화 반응에 의한 수리에너지의 감소가 반영된 것으로 사려된다.

습윤 실험은 2주간 계속되었으나 2일 이후에는

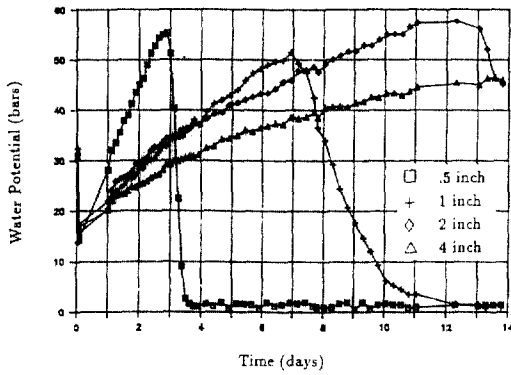


Fig. 5. Water potential changes of plain concrete during the first drying period

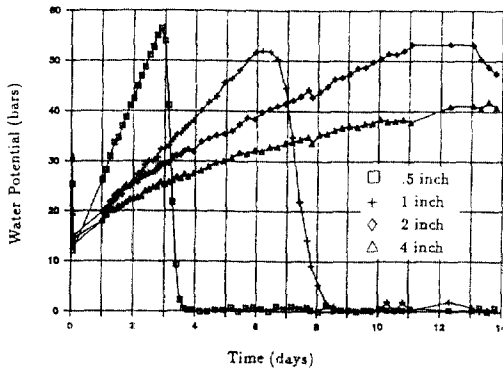


Fig. 6. Water potential changes of fiber concrete during the first drying period

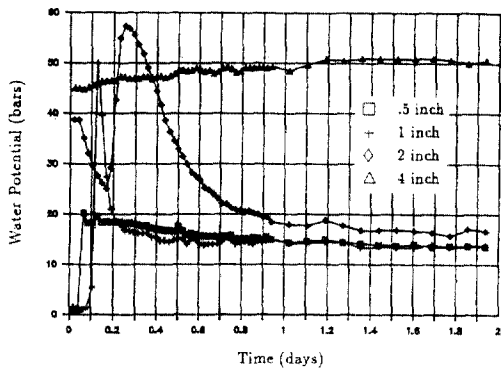


Fig. 7. Water potential changes of plain concrete during the wetting period

측정값의 변화가 거의 없기 때문에 Fig. 7과 Fig. 8에서는 변화가 많은 초기 2일 동안의 변화만을 보여주고 있다. 이 결과로부터 깊이에 따라 수리엔

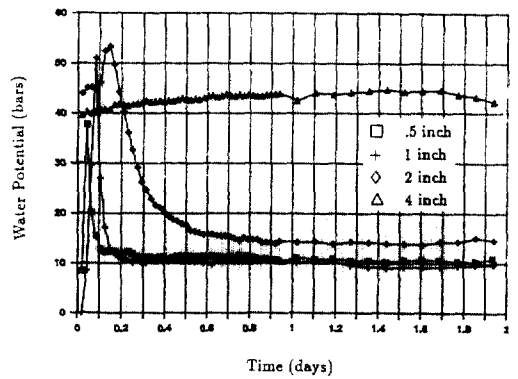


Fig. 8. Water potential changes of fiber concrete during the wetting period

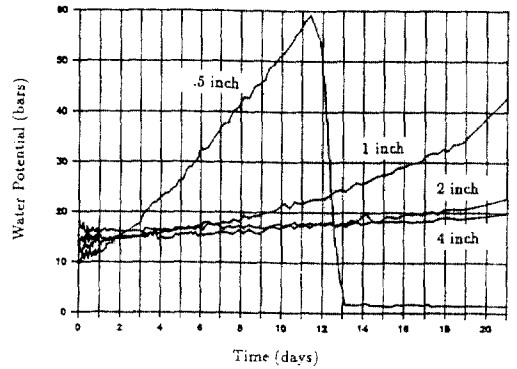


Fig. 9. Water potential changes of plain concrete during the second drying period

지가 측정되는 시점 및 속도에 차이가 있음을 알 수 있다. 보통 콘크리트의 경우 각각의 센서마다 측정이 가능하게 된 시점이 1.5시간, 3시간, 6시간이었으며, 반면에 섬유 첨가 콘크리트의 경우는 1시간, 2시간, 3.5시간으로 보통 콘크리트의 경우보다 빠르게 수분이 침투해 들어갔음을 알 수 있다. 이는 섬유 첨가 콘크리트가 더 높은 투수성을 갖고 있기 때문에 관측된 현상으로 믿어진다. 아울러 이들 수리엔너지는 안정된 상태에서도 '0'으로 떨어지지 않고 10에서 14 bar 정도의 값을 유지하는데 이는 시멘트의 화학 성분 및 불포화 상태의 미세 공극의 존재로 인한 것이다. 또한 이러한 수리엔너지의 차이는 이에 비례하는 정도의 공극의 크기에 차이가 있음을 의미한다.

Fig. 9과 Fig. 10은 제 2건조기 동안의 수리엔너지의 변화를 보여준다. 제 1건조기 동안의 측정결과에

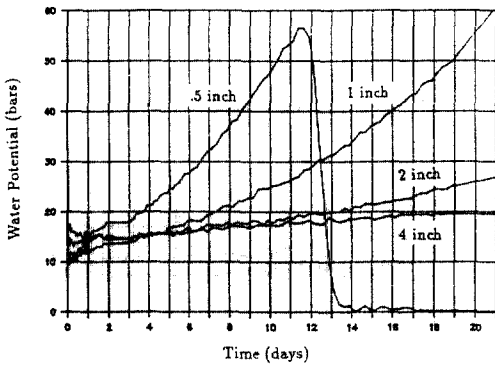


Fig. 10. Water potential changes of fiber concrete during the second drying period

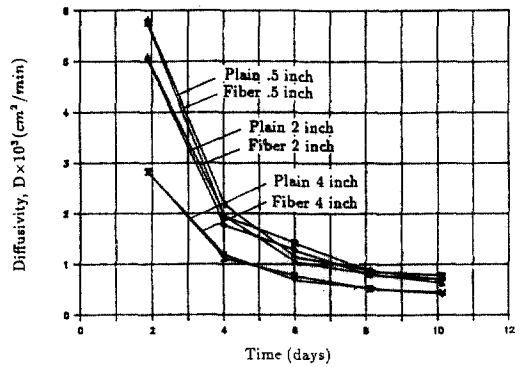


Fig. 13. Calculated diffusivity during the second drying period

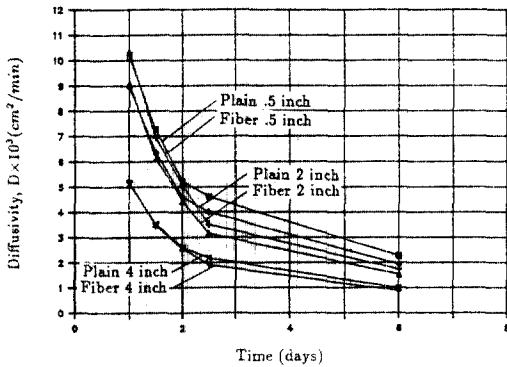


Fig. 11. Calculated diffusivity during the first drying period

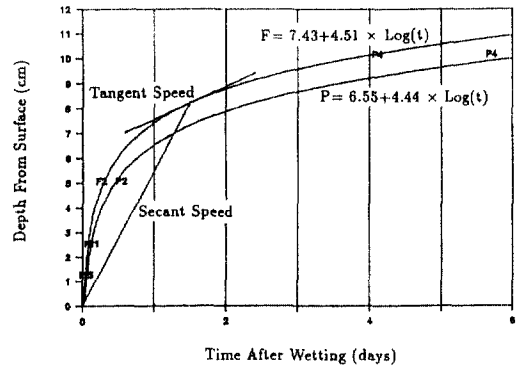


Fig. 14. Wetting front movement during wetting period

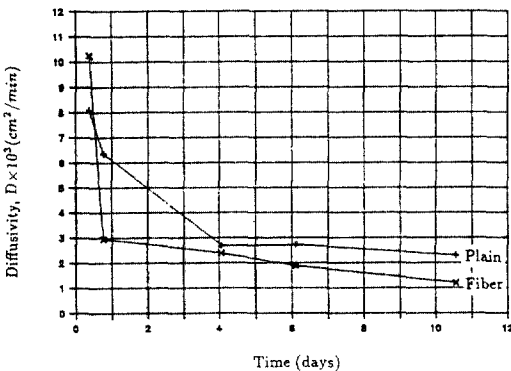


Fig. 12. Calculated diffusivity during the wetting period

비하여 변화속도가 대단히 느려졌음을 알 수 있다. 또한 섬유 첨가 콘크리트의 경우가 일반 콘크리트보다 빠른 측정값의 변화를 보여줌으로 해서 수분의

손실 속도가 빠른 것을 관찰할 수 있다. 이는 섬유 첨가 콘크리트가 충분히 양생이 진행된 뒤에도 일반 콘크리트보다 더 투수성이 큰 콘크리트로 남아있음을 의미한다.

#### 4.2 확산계수 측정 결과

Fig. 11과 Fig. 12, Fig. 13은 제 1건조기와 습윤기, 제 2건조기 동안의 확산계수를 계산한 값인데, 각각의 경우 노출조건의 변화가 발생하면 초기에는 큰 확산계수를 갖다가 시간이 감에 따라 지수함수적으로 값이 저하되는 현상을 관찰할 수 있다. 섬유 첨가 콘크리트의 경우, 초기에는 일반 콘크리트보다 큰 확산계수를 갖고 있다가 나중에는 상대적으로 더 적은 확산계수를 갖게 되는 것을 두개의 실험 결과 모두에서 공통적으로 관찰할 수 있는데 이는 섬유 첨가 콘크리트의 높은 투수계수로 인하여 초기에는

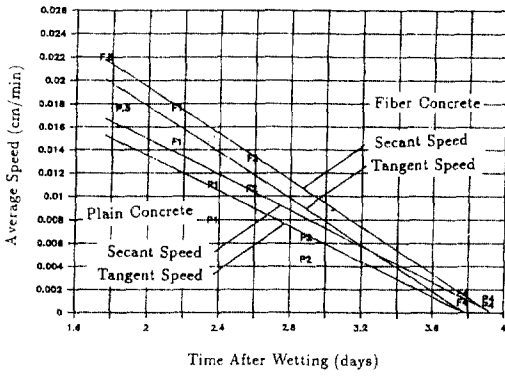


Fig. 15. The speed of wetting front movement through concrete

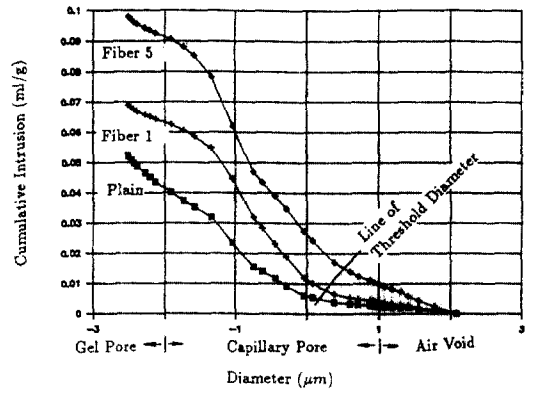


Fig. 17. Cumulative pore volumes of concrete by mercury intrusion test

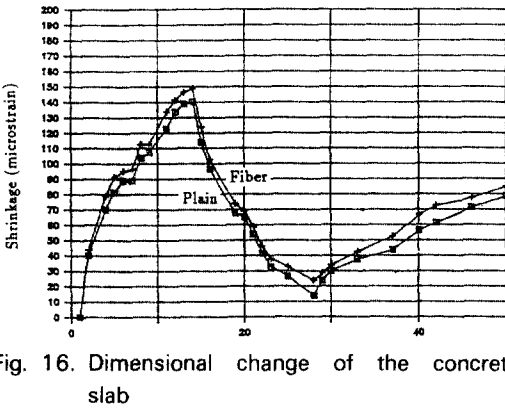


Fig. 16. Dimensional change of the concrete slab

활발한 수분의 이동이 발생했다가 이후 수분 이동이 안정되는 진행이 빠르게 일어남을 의미한다. Fig. 14는 시간에 따른 습윤 침투면의 위치를 보여주는데 이 측정 결과 역시 일반 콘크리트보다 섬유 첨가 콘크리트에서 수분이 빠른 속도로 침투해 들어감을 알 수 있다. 습윤 침투면의 이동속도는 그림에 표시된대로 2가지의 속도로 계산할 수 있는데 그 결과가 Fig. 15에 나와 있다. 섬유첨가 콘크리트의 경우 일반 콘크리트보다 항상 높은 침투 속도를 나타내고 있다.

#### 4.3 건조수축 측정 결과

Fig. 16은 슬라브의 표면 건조수축량을 측정한 결과인데 섬유 첨가 콘크리트가 일반 콘크리트보다 약간 더 큰 값을 시험 초기부터 유지하고 있으며, 그 차이에는 그리 큰 변화는 없음을 알 수 있다. 이는 두 콘크리트의 건조수축의 발생량의 차이가 양생

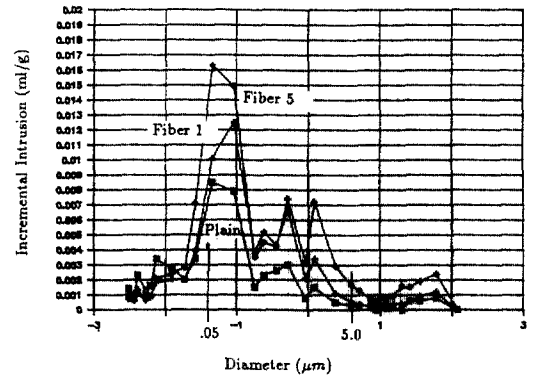


Fig. 18. Incremental pore volumes of concrete by mercury intrusion test

초기에 주로 발생하며 그 이후에는 건조수축의 발생량의 차이가 거의 없음을 보여주는 것이다. 또한 제 2건조기 동안에는 수축량이 절반 정도로 감소함을 알 수 있다. 앞절의 확산계수 측정결과와 비교해보면 섬유 첨가 콘크리트의 경우 양생 초기의 수분 손실이 많았기 때문에 더 큰 건조수축이 발생한 것임을 알 수 있다.

#### 4.4 공극크기 측정 결과

Fig. 17은 측정된 누적 공극량을 나타낸다. 섬유 함유량이 증가할수록 누적 공극량이 증가하며, 임계 공극의 크기 또한 섬유량의 증가에 따라 1.2, 1.7, 3.3  $\mu\text{m}$ 로 증가함을 알 수 있다. Fig. 18은 공극반경별 공극량을 나타내는데 모세관으로 분류되는 0.01  $\mu\text{m}$ 에서 10  $\mu\text{m}$  사이의 공극이 공극량의 대부분을 차

Table 2. Summary of pore volume test results

Calculated Volume	Plain	Fiber (0.9 kg/m <sup>3</sup> )	Fiber (3.0 kg/m <sup>3</sup> )
Concrete Unit Weight (g/ml)	2.561	2.532	2.514
Mortar Unit Weight (g/ml)	1.172	1.144	1.126
Mortar Volume (ml/ml)=V <sub>mor</sub>	0.546	0.549	0.555
(ml/g)	0.466	0.479	0.493
Cement (g/g)	0.238	0.244	0.248
Gel pore (ml/g)	0.043	0.044	0.045
Capillary pore (ml/g)	0.041	0.029	0.034
Air Void	0.021	0.029	0.034
Capillary+Air Void Vol (ml/g)	0.062	0.077	0.093
Total Pore Volume (ml/g)=VT <sub>cal</sub>	0.105	0.121	0.138
V <sub>cal</sub> /V <sub>mor</sub>	23%	25%	28%
Fiber Volume (ml/g)=V <sub>fiber</sub>	0.0	.00086	.0029
V <sub>fiber</sub> /VT <sub>cal</sub>	0.0%	1.12%	3.14%
Measured Volume	Plain	Fiber (0.89 kg/m <sup>3</sup> )	Fiber (3.0 kg/m <sup>3</sup> )
Total Pore Volume(ml/g)=VT <sub>meas</sub>	0.052	0.069	0.098
(30 Å ≤ φ ≤ 10 μm)			
VT <sub>meas</sub> /VT <sub>cal</sub>	50%	58%	71%
VT <sub>meas</sub> /V <sub>cal</sub>	84%	91%	105%
Air Void (ml/g)	.0025	.0042	.0098
(φ ≥ 10 μm)			
Capillary Pore (ml/g)	.0377	.0584	.0807
(0.1 μm ≤ φ ≤ 10 μm)			
Gel Pore (ml/g)	.0120	.0063	.0074
(30 Å ≤ φ ≤ .01 μm)			
Threshold Dia. (μm)	1.2	1.7	3.3

지함을 알 수 있고, 비교 대상 콘크리트 간의 공극량의 차이도 이 직경의 공극에 집중되어 있음을 알 수 있다. 이는 섬유 첨가 콘크리트의 경우 섬유 주변에 이러한 미세한 크기의 공극이 상당히 형성되어 있음을 의미한다.

수는 침투법에 의한 공극크기 분포실험 결과를 요약한 것이 Table 2에 정리되어 있다. 이 계산 결과를 보면 섬유의 첨가량이 늘어날수록 총공극의 크기가 0.105에서 0.138까지 늘어난 것을 알 수 있는데, 이는 공극율로 보면 약 23%에서 28%까지로 늘어난 것이다. 또한 이 결과로부터 형성된 공극의 형상과 크기가 얇은 판상의 섬유 주변에 0.05 μm

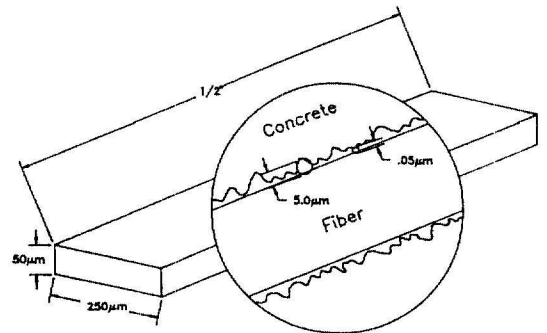


Fig. 19. The conceptual shape of pores formed around fiber



에서 5.0  $\mu\text{m}$  사이의 크기로 길다란 공극이 형성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 19는 섬유 주변에 형성된 공극의 개념적인 형상을 보여준다.

## 5. 결 론

콘크리트의 균열을 조절하기 노력의 일환으로 섬유첨가 콘크리트의 연구가 많은 발전을 이룩해왔으나 그 작동 메카니즘에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않는 상태이다. 본 연구에서는 섬유의 첨가에 따른 공극구조의 변화와 건조수축 특성에 영향을 미치는 원인에 대한 가설을 제시하고, 확인하는 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 콘크리트에 플라스틱계의 섬유를 첨가하게 되면 섬유의 주변에 공극이 형성됨으로 해서 수분의 통로를 제공하게 된다. 따라서 섬유 첨가 콘크리트는 섬유 주변에 형성된 공극으로 인하여 일반 콘크리트보다 투수성이 증가한다.

2) 섬유 첨가 콘크리트는 투수성이 크기 때문에 양생 초기 수분 손실량이 증가하여 일반 콘크리트보다 초기 건조수축이 증가하고 따라서 총 건조수축량도 증가한다.

3) 섬유의 첨가량이 증가하면 임계공극의 크기가 증가하며, 콘크리트내의 섬유 주변에 형성된 공극의 크기는 0.05  $\mu\text{m}$ 에서 5.0  $\mu\text{m}$  사이에 분포하며, 이는 투수계수에 큰 영향을 미치는 모세공극의 범위에 해당된다.

4) 따라서 섬유 첨가 콘크리트에서의 균열 조절 기능은 건조수축량을 감소시키는데서 비롯된 것이라기 보다는 양생초기 균열 발생시에 콘크리트의

강도가 상대적으로 작기 때문에 섬유의 보강 효과가 기능을 발휘할 수 있는 것이라 할 수 있다.

## 참고문헌

1. Zellers, R.C. and Biddle, D.T., "Forta Corporation's Response to the Wire Reinforcement Institute's Position on CFP Fibers", Research Report, Forta Fiber Co., Grove City, PA, Jan, 1986.
2. Beresford, F.D., "Polypropylene Fiber Reinforcement in Concrete Slab-on-Ground", Asia-Pacific Concrete Technology Conference, Jakarta, Indonesia, Oct. 1986.
3. Aitcin, P., Laplante, P. and Lapalme, Y., "The Use of Fiber Reinforced Concrete for Highway Rehabilitation", Research Report, Etude No. 231, Quebec, Canada, 1985.
4. 한만엽, "양생초기 콘크리트의 투수계수 측정에 관한 연구", **한국콘크리트학회지**, 제 5권 3호, 1993. 9, pp. 152-160.
5. 한만엽, "PPF 섬유가 콘크리트의 물성에 미치는 영향", **한국콘크리트학술발표회 논문집**, 1993. 11, pp. 150-155.
6. Lytton, R.L., Olsen, M.P.J., Han, M.Y., and Advani, A., "The Effect of Polypropylene Fibers in Concrete", Research Report, Wire Reinforcement Institute, Texas A&M University, College Station, Texas, Jul. 1988.
7. Sellevold, E.J., "Mercury Porosimetry of Hardened Cement Paste Cured or Stored at 97F", **Cement and Concrete Research**, Vol. 4, 1974, pp. 399-404.

(接受 : 1994. 5. 23)