

# 조기강도 섬유보강 콘크리트의 수축특성

## Shrinkage Properties of High Early Strength Fiber Reinforced Concrete

원        종        필\* · 김        현        호\*\*  
Won, Jong      Pil · Kim,      Hyun      Ho

### Abstract

The shrinkage properties of high early strength concrete were investigated. One of the method to control microcrack and crack development due to restrained shrinkage is to reinforce concrete with randomly distributed fibers. Regulated-set cement and two different types of fiber were adopted. The experiments for heat of hydration, drying and autogenous shrinkage were conducted.

The desirable resistance of high early strength fiber reinforced concrete to restrained shrinkage microcracking was achieved. These results indicate that use of fiber in high early strength concrete plays an important role in control of crack development due to restrained shrinkage.

### I. 서    론

오늘날 산업구조의 복잡화로 인한 토목구조물의 대형화, 특수화로 인해 시멘트 콘크리트 분야에서도 시멘트 품질의 다양화, 목적화 및 고성능화의 연구가 지속되어지고 있다.<sup>(5,10)</sup> 산업의 고속화로 인해 콘크리트 분야에서도 급속시공 및 긴급보수에 따른 콘크리트의 조기강도화를 요구함으로써, 1970년대에 미국 포틀랜드 시멘트 협회에서 포틀랜드 시멘트의 클링커를 수정하여 "Regulated-set cement" 라는 초속경 시멘트 개발에 성공하였으며 비슷한 시기에 일본에서도 "Jet-cement" 라는 초속경 시멘트를 개발하여 상품화 하였다.<sup>(11)</sup> 한편 국내에서는 1980년대 중반 이후 연구가 시작되어

1988년부터 제품을 생산하기 시작하였다.<sup>(1)</sup>

초속경 시멘트는 물과 혼합한 후 2~4시간 만에 일반 시멘트의 28일 강도를 발휘할 수 있어, 조강성이 시급히 요구되는 긴급공사, 한중공사 등의 긴급보수용으로 사용되고 있다.<sup>(4)</sup> 그러나 초속경 시멘트는 수화반응이 빠르게 진행되어 이로 인한 콘크리트내에서 열과 수분의 이동을 증가시킨다.<sup>(13,16)</sup> 실제현장 조건하에서 열과 수분의 이동은 콘크리트의 수축으로 인한 콘크리트 내부에 인장응력을 발생시키고, 이로 인한 미세균열이 발생한다.<sup>(13,15)</sup> 콘크리트에 발생하는 균열을 감소시키는 방법 중 하나로 콘크리트 보강재료로서 섬유를 사용할 수 있는데, 콘크리트 보강섬유는 콘크리트의 타설 후 발생할 수 있는 균열의 발생을 억제 할

\* 건국대학교 농축산생명과학대학  
\*\* 건국대학교 대학원

키워드 : 미세균열, 섬유, 수축, 조기강도 콘크리트

뿐만아니라 균열의 폭을 감소시키고 안정화하여 콘크리트의 성능을 증대시킨다.<sup>(2,3,12)</sup> 보통콘크리트에 섬유를 혼입하여 수축균열 제어에 대한 연구는 많이 이루어져 있으나 초속경 시멘트를 사용한 조기강도 콘크리트의 수축에 대한 특성을 규명하고 제어하기 위한 실험 및 해석적 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 초속경 시멘트를 사용한 보통 조기강도 콘크리트와 섬유를 보강재료로 사용한 조기강도 섬유보강 콘크리트의 수축특성을 비교·분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 초속경 시멘트

본 실험에 사용된 초속경 시멘트는 국내 S사 제품으로 화학성분은 Table 1과 같다.

#### 나. 보강섬유

본 연구에서 사용한 콘크리트 보강섬유는 폴리프로필렌 섬유와 특수 가공된 셀룰로오스 섬유이다. 폴리프로필렌 섬유는 비중이 낮은 단점을 가지고 있으나, 콘크리트의 초기균열 제어에 효과가 있다고 알려져 널리 사용되고 있다.<sup>(3)</sup> 본 연구에서 사용된 폴리프로필렌 섬유는 국내 S사에서 생산된 제품을 사용하였다.

셀룰로오스 섬유는 그 성분이 셀룰로오스로 이루어져 있으며, 배합시 분산성이 우수하고 콘크리트 성능향상에 기여할 수 있도록 특수 가공된 섬유이다. 특히 표면이 친수성인 수산기로 되어 있어 콘크리트 내에서 우수한 부착성과 분산성을 보이며, 시멘트 입자에 비해 상대적으로 작은 유효

직경을 가지고 있어 콘크리트를 밀실하게 만들어 준다.<sup>(2,3)</sup> 본 연구에서 사용된 폴리프로필렌 섬유와 특수가공된 셀룰로오스 섬유의 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of cellulose and polypropylene fiber<sup>(2,3)</sup>

Property	Fiber type	
	Cellulose fiber	Polypropylene fiber
Elastic modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	61 × 10 <sup>4</sup>	3.5 × 10 <sup>4</sup>
Bond strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	15.3	4.1
Specific gravity	1.5	0.9
Fiber length(mm)	3.0	19
Effective diameter(mm)	0.015	0.1
Length-to-diameter ratio	200	190
Tensile strength(kgf/cm <sup>2</sup> )	5,100	6,120
No. of fibers per gram	1,200,000	12,000
Fiber count(1/cm <sup>2</sup> )	1,480*	0.6**

\* 1.3kg/m<sup>3</sup>

\*\* 0.9kg/m<sup>3</sup>

#### 다. 골재

굵은골재는 최대치수 25 mm의 부순골재물, 잔골재는 비중 2.61의 강모래를 사용하였다. 본 연구에 사용된 골재의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of fine and coarse aggregate

Aggregate	Specific gravity			Absorption (%)	F.M
	Bulk	Bulk (SSD)	Apparent		
Fine aggregate	2.59	2.61	2.63	0.67	2.99
Coarse aggregate	2.80	2.62	2.83	0.35	6.92

Table 1 Chemical components of regulated-set cement

Type of cement	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	L.O.I
Regulated-set	12.305	14.362	1.407	0.029	46.020	1.657	0.458	0.166	0.127	0.149	3.927
OPC*	21.807	4.935	2.600	0.055	63.029	2.989	0.905	0.156	0.060	0.321	0.774

\* Type I Ordinary Portland Cement

## 2. 배합설계

굳지않은 콘크리트의 슬럼프는 5~7 cm, 공기량은 4~6 %로 고정하였다. 일반적으로 초속경 시멘트의 사용이 가장 많은 콘크리트 도로구조물 긴급공사의 설계휨강도 35 kgf/cm<sup>2</sup>(3시간)를 기준으로 최적배합비를 도출하였다.<sup>(6)</sup> 폴리프로필렌 섬유와 셀룰로오스 섬유의 혼입량은 적정혼입량이라 알려진 0.9 kg/m<sup>3</sup>과 1.3 kg/m<sup>3</sup>을 각각 사용하였으며<sup>(2,3)</sup> 배합설계는 Table 4와 같다.

Table 4. Mixture proportions (kg/m<sup>3</sup>)

W/C	s/a (%)	C	W	S	G	RA*	AE**	SP***	Cellulose fiber	Polypropylene fiber
0.37	45	400	148	789	968	1.2	0.012	8.8	-	-
							-	12	1.3	-
							-	-	-	0.9

\* Retarder admixture  
 \*\* Air entraining admixture  
 \*\*\* Superplasticizer

## 3. 실험방법

### 가. 굳지않은 콘크리트 특성

보통 조기강도 콘크리트와 조기강도 섬유보강 콘크리트의 작업성을 알아보기 위해서 KS F 2402

에 따라 슬럼프 시험을 실시하였고, 공기량의 변화를 알아보기 위해 KS F 2401에 준하여 공기량 시험을 실시하였다. 시험은 각각 3회 반복하였다.

### 나. 수화열실험

믹싱 후 경과시간에 따른 초속경 시멘트의 수화열에 대해 알아보기 위하여 스티로폼 용기로 단열장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 300×300×250 mm의 몰드에 콘크리트를 타설하여 중심부에 온도센서(Thermocouples) 2개를 묻고 콘크리트 내부의 온도상승을 측정하였다.

### 다. 수축실험

#### 1) 건조수축실험

건조수축 균열 실험은 아직 규정된 방법이 없어 봉 테스트(Bar test), 판 테스트(Plate test), 링 테스트(Ring test) 등 여러 가지 방법이 제안되고 있으나 그 중 가장 높은 구속력을 지속적으로 고르게 분포시키는 링 테스트가 보편화 되어있다.<sup>(9,12,16)</sup> 실제 많은 연구자들이 치수는 다르지만 링 테스트를 사용하여 건조수축 실험을 실시하였다.<sup>(7,8,14,16)</sup> 본 연구에서도 조기강도 섬유보강 콘크리트의 건조수축균열 제어특성을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같은 링테스트로 실험을 실시하였다. 실험은 두

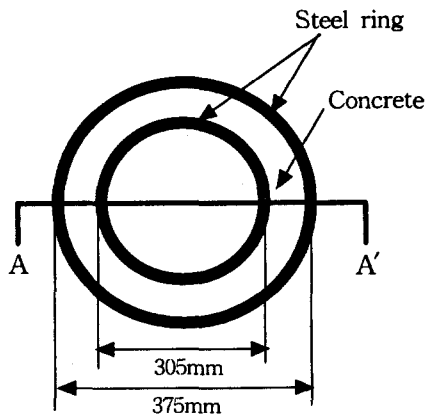


Fig. 2(a). Plan viewed

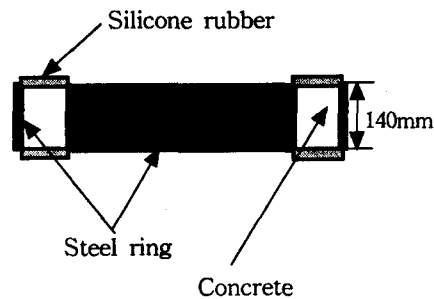


Fig. 2(b). Cross-sectional(A-A') viewed

Fig. 2 Drying shrinkage test set-up

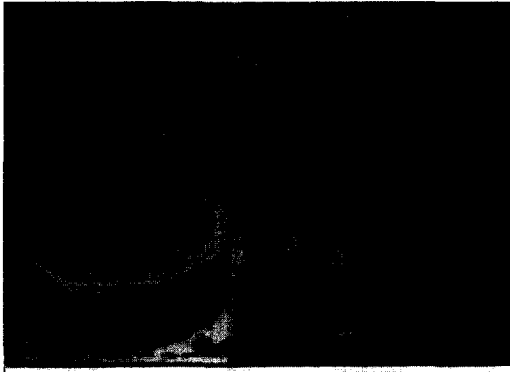


Fig. 3(a). Before demolding

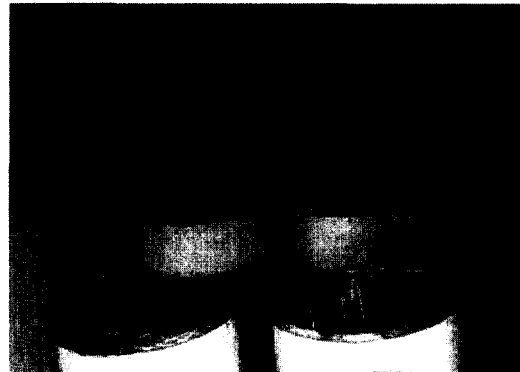


Fig. 3(b). After demolding

Fig. 3 Ring test specimens of before and after demolding

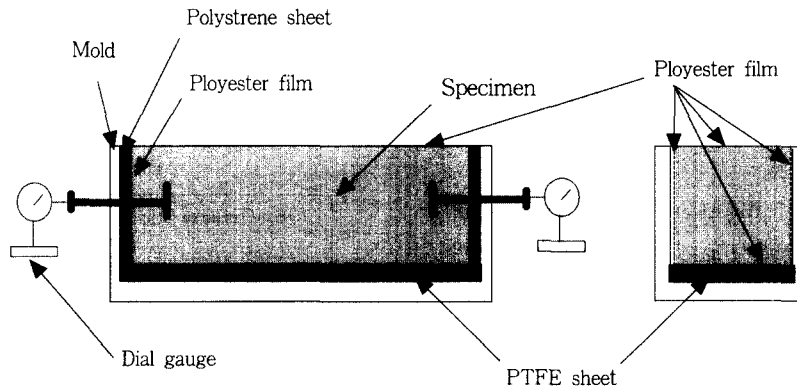


Fig. 4 Autogenous shrinkage test set-up<sup>(17)</sup>

링 사이의 공간에 콘크리트를 타설하여 3시간 후 외부 몰드를 제거하였고, 수분의 증발을 외부 원형표면으로 유도하기 위해서 콘크리트 몰드 상·하면을 실리콘으로 실링하였다. 이후에 상대습도 45%, 온도 23°C의 항온항습실에서 82일간 균열을 관찰하였다. 실험결과는 마이크로 스코프를 이용하여 링공시체에 발생한 균열의 상·하부, 중간지점의 균열폭을 측정하여 평균하였다. Fig. 3은 건조수축균열 측정을 위해 본 연구에서 사용한 링공시체의 탈형 전과 탈형 후의 사진이다.

## 2) 자기수축실험

시멘트계 재료에 있어서, 시멘트의 수화반응에

따라 응결하기 시작한 이후에 수화수축으로 인해 체적이 감소하는 현상을 자기수축이라 한다.<sup>(17)</sup> 본 연구에서 사용한 초속경 시멘트 콘크리트는 고강도 콘크리트로서 일반 배합과 비교하였을 때 물-시멘트비가 낮아 자기수축량이 클 것으로 사료되어 자기수축실험을 실시하였다. 자기수축 측정은 일본 콘크리트공학협회(JCI)의 실험방법에 준하여 실시하였다.<sup>(17)</sup> 공시체는 3시간의 초기양생 후 탈형하여 공시체 전면을 알루미늄 접착테이프로 밀봉한 후 상대습도 60%, 온도 23°C의 항온항습실에서 28일간 실험을 실시하였다. 수축량 측정은 정도 0.001 mm의 다이얼게이지를 사용하였다. Fig. 4는 자기수축실험 장치를 나타낸 것이다.

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 굳지않은 콘크리트 특성

슬럼프시험 결과는 Table 5 및 Fig. 5와 같다. 목표 슬럼프치를 맞추기 위해서 많은 양의 고유동화제를 첨가하였으며, 조기강도 섬유보강 콘크리트는 보통 조기강도 콘크리트와 비교하여 섬유 혼입에 의해 슬럼프가 감소하였다. 따라서 조기강도 섬유보강 콘크리트에서는 보통 조기강도 콘크리트보다 초속경시멘트량의 0.8%의 고유동화제를 증가시켰다. 조기강도 섬유보강 콘크리트는 섬유 혼입에 따른 공기량의 증가로 공기연행제를 첨가할 필요 없이 목표 공기량을 얻을 수 있었다. Table 6 및 Fig. 6은 공기량시험 결과를 나타낸 것이다.

#### 2. 수화열

초속경 시멘트를 사용한 보통 조기강도 콘크리트의 수화발열 현상은 Fig. 7과 같다. 타설 20분이 지나서 수화반응이 서서히 진행되어 약 60분에서 46°C로 최대점을 나타내었고 그 이후에는 완만하게 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과는 초속경시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트보다 상대적

으로 높은 알루미늄( $Al_2O_3$ )성분을 가지고 있기 때문에 빠른 응결로 인한 영향으로 판단된다. 초속경 시멘트의 이러한 특성은 조기에 상대적으로 높은 수화열을 발생시켜 온도응력으로 인한 수축이 발생하여 콘크리트 내부에 미세균열이 발생할 가능성을 내포하고 있다.

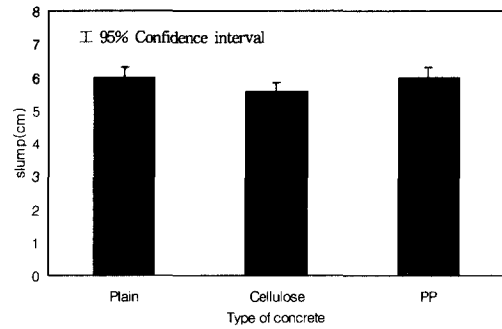


Fig. 5 Slump

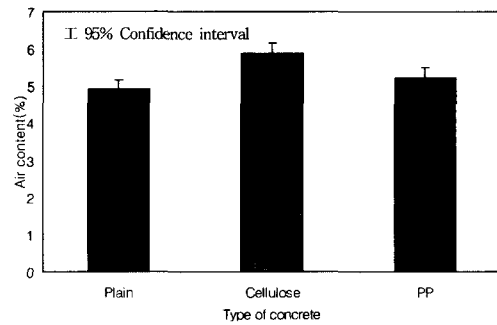


Fig. 6 Air content

Table 5 Results of slump test (Unit : cm)

Type of concrete	No. of batch			Mean (St. Dev.)
	1	2	3	
Plain	6	6.2	5.8	6.00(0.20)
Cellulose	5.5	5.7	5.5	5.57(0.12)
Polypropylene	5.8	6	6.2	6.00(0.20)

Table 6 Results of air content test (Unit : %)

Type of concrete	No. of batch			Mean (St. Dev.)
	1	2	3	
Plain	4.8	5	5	4.93(0.12)
Cellulose	5.8	6	5.8	5.87(0.12)
Polypropylene	5.4	5.2	5.1	5.23(0.15)

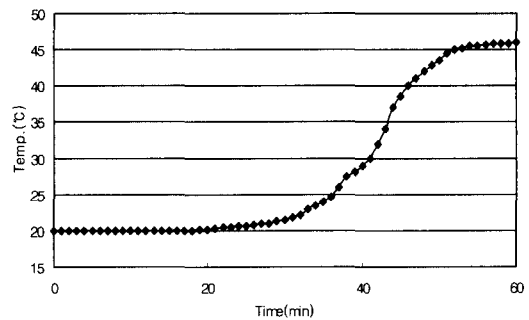


Fig. 7 Heat of hydration of regulated-set cement

### 3. 수축특성

#### 가. 건조수축

초속경 시멘트를 사용한 보통 조기강도 콘크리트와 조기강도 섬유보강 콘크리트의 건조수축균열 제어특성은 Fig. 8과 같다. 실험결과는 조기강도 섬유보강 콘크리트가 보통 조기강도 콘크리트보다 건조수축 균열 제어에 우수한 효과를 보여주었다. 조기강도 섬유보강 콘크리트는 보통 조기강도 콘크리트와 비교하여 볼 때 재령 82일에서의 균열폭이 조기강도 셀룰로오스 섬유보강 콘크리트가 2.5배, 조기강도 폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트가 1.7배 감소되었다. 이와 같은 결과는 섬유가 콘크리트 내부에서 가교작용(bridging)으로 인한 미세 균열의 발생과 성장을 억제하였기 때문이라 판단된다. 또한 조기강도 셀룰로오스섬유보강 콘크리트는 조기강도 폴리프로필렌섬유보강 콘크리트보다 건조수축균열 제어에 우수한 효과를 보여주었다. 이와 같은 결과는 셀룰로오스섬유의 표면이 친수성 재료인 수산기로 되어 있어 비친수성 재료인 폴리프로필렌섬유에 비하여 콘크리트 매트릭스 내에서 우수한 분산성과 부착성능을 가지고 있기 때문이라 판단된다.

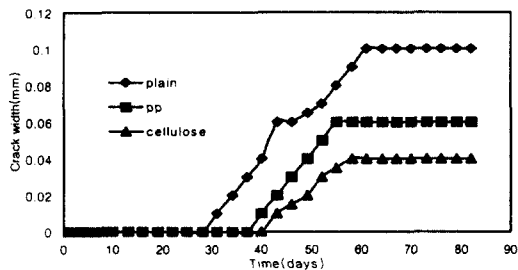


Fig. 8 Drying shrinkage of regulated-set cement concretes

#### 나. 자기수축

초속경 시멘트를 사용한 보통 조기강도 콘크리트와 조기강도 섬유보강 콘크리트의 자기수축량은 Tabel 7 및 Fig. 9와 같다. 조기강도 콘크리트의 응결시간 측정 결과 초결이 타설 22분경에 나타나서 이 시점을 기준으로 자기수축실험을 시작하였으며 재령 28일까지 실험을 실시하였다. 자기수축 실험결과 조기강도 섬유보강 콘크리트가 보통 조기강도 콘크리트보다 수축량이 작게 나타났다. 재령 28일에서의 수축량으로 볼 때 보통 조기강도 콘크리트와 비교하여 폴리프로필렌 및 셀룰로오스 섬유보강 조기강도 콘크리트가 각각 약 10%, 14% 정도 자기수축량이 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 셀룰로오스섬유가 친수성재료로서 콘크리트 매트릭스 내에서 우수한 분산성과 부착성으로 인해 자기수축에 우수한 저항성을 보인 것으로 판단된다.

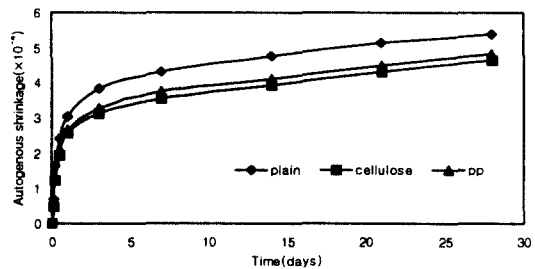


Fig. 9 Autogenous shrinkage of regulated-set cement concretes

### IV. 요약 및 결론

본 연구에서 보통 조기강도 콘크리트의 수화특성과 초속경 시멘트를 사용한 보통 조기강도 콘크리트와 조기강도 섬유보강 콘크리트의 굳지않은

Table 7 Autogenous shrinkage of regulated-set cement concretes

(Unit :  $\times 10^{-4}$ )

	22분	3시간	6시간	12시간	1일	3일	7일	14일	21일	28일
plain	0	-0.672	-1.630	-2.410	-3.025	-3.820	-4.305	-4.755	-5.125	-5.385
cellulose	0	-0.480	-1.210	-1.925	-2.565	-3.125	-3.525	-3.925	-4.320	-4.625
pp	0	-0.525	-1.325	-2.105	-2.630	-3.260	-3.730	-4.105	-4.500	-4.820

콘크리트 특성 및 수축실험을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 조기강도 섬유보강 콘크리트는 보통 조기강도 콘크리트와 비교하여 섬유의 혼입으로 인한 상대적인 단위수량 감소로 슬럼프 값이 다소 떨어졌다. 따라서 고유동화제량을 증가시켜 목표 슬럼프치를 맞추었다. 반면에 섬유의 혼입으로 공기량이 증가되어 공기연행제는 첨가하지 않았다.

2. 수화열 실험결과 보통 조기강도 콘크리트는 타설 후 20분을 경과하여 수화반응이 서서히 시작하여 60분경에서 최대온도 46°C를 나타냈다. 이와 같이 빠른 수화반응은 높은 수화열로 인한 온도응력으로 콘크리트 내에 미세균열을 발생시킬 가능성을 내포하고 있을 것이라 판단된다.

3. 건조수축 실험결과 조기강도 섬유보강 콘크리트가 보통 조기강도 콘크리트보다 건조수축 균열 제어에 우수한 효과를 보여주었다. 특히 조기강도 셀룰로오스섬유보강 콘크리트가 조기강도 폴리프로필렌섬유보강 콘크리트보다 건조수축에 대한 균열을 제어하는데 더 우수한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 셀룰로오스섬유가 수산기로 되어 있어 콘크리트 내에서 뛰어난 분산성과 부착성을 가지고 있으며, 또한 섬유의 유효면적이 커서 균열의 발생과 성장의 제어에 효과적이기 때문이라 판단된다.

4. 자기수축 실험결과 보통 조기강도 콘크리트보다 조기강도 섬유보강 콘크리트가 수축량이 작게 나타났고 그 중에서도 조기강도 셀룰로오스섬유보강 콘크리트가 조기강도 폴리프로필렌섬유보강 콘크리트보다 자기수축량이 작은 경향을 나타냈다. 이는 셀룰로오스섬유가 시멘트 매트릭스와 섬유사이의 부착력이 폴리프로필렌섬유보다 뛰어나 콘크리트의 자기수축에 대한 저항성이 우수하기 때문이라 판단된다.

5. 이와 같은 실험결과로부터 초속경 시멘트를 사용한 조기강도 콘크리트에 섬유를 혼입하면 수축에 대한 저항성이 향상됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 권극현, 1990, 초속경 시멘트 콘크리트의 배합 및 강도 특성에 관한 기초적 연구, 한국과학기술원 석사학위 논문, pp. 1-2.
2. 원종필외, 1999, 특수 가공된 셀룰로오스섬유보강 콘크리트의 초기특성, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, pp. 349-354.
3. 원종필외, 2000, 콘크리트 초기 균열 제어를 위한 특수 가공된 셀룰로오스섬유의 적용에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제20권, 제2-A호, pp.311-319.
4. 이병철외, 1996, 조기교통개방 콘크리트 포장 공법에 대한 시험적 연구, 한국도로공사 연구보고서, pp. 50-55.
5. 장복기외, 1998, 시멘트 材料化學, 전남대학교 출판부, pp. 22-23.
6. 한국도로공사, 시멘트 콘크리트 포장 유지보수 및 시공, pp.33-37.
7. Grzybowski, M. and Shah, S. P., 1989, Model to predict cracking in fibre reinforced concrete due to restrained shrinkage, Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No. 148, pp.125-135.
8. Grzybowski, M. and Shah, S. P., 1990, Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 2, pp. 138-148.
9. Lange, D. A. and Altoubat, S. A., 1997, Early age shrinkage and creep of fiber reinforced concrete, International Conference on Engineering Materials, June 8-11, Ottawa, Canada.
10. Malier, Y., 1992, High Performance Concrete, pp. 8-14.
11. Mehta, P. K., Monteiro P. J. M., 1993, Concrete, Prentice Hall Inc., pp. 216-217.
12. Sarigaphuti, M., Shah, S. P. and Vinson, K. D., 1993, Shrinkage Cracking and Durability Characteristics of Cellulose Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 90, No. 4,

- pp.309-318.
13. Soroushian, P. and Ravanbakhsh, S., 1999, High-Early-Strength Concrete: Mixture Proportioning with Processed Cellulose Fibers for Durability, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 5, pp. 593-599.
  14. Swamy, R. N. and Stavrides, H., 1979, Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking, ACI Journal, No. 76-21, pp. 443-460.
  15. Weiss, W. J., Yang, W and Shah, S. P., 1999, Factors Influencing Durability and Early-Age Cracking in High-Strength Concrete Structure, ACI International, SP189-22, pp. 387-409.
  16. Wiegink, K., Marikunte, S. and Shah, S. P., 1999, Shrinkage Cracking of High Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 3, pp. 409-415.
  17. 日本コンクリート工學協會, 1996, 自己收縮研究委員會報告書.