



## 섬유 혼입률에 따른 섬유보강 경량골재 콘크리트의 역학적 특성

이행기<sup>1)\*</sup> · 송수용<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한국과학기술원 건설 및 환경공학과

## Effect of Volume Fraction of Fibers on the Mechanical Properties of a Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers

Haeng-Ki Lee<sup>1)\*</sup> and Su-Yong Song<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

**ABSTRACT** This paper presents results of an experimental study conducted to investigate the effect of volume fraction of fibers on the mechanical properties of a fiber-reinforced, lightweight aggregate concrete(FRLAC) that was produced without an autoclave process. The FRLAC enhanced the strength of lightweight, cellular concrete by adding polypropylene fibers and lightweight aggregates. To investigate the effect of volume fraction of fibers on the mechanical behavior of FRLAC and to determine the optimal volume fraction of fibers, a series of compression and flexural strength tests on FRLAC specimens with various fiber volume fractions(0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%) were conducted. It was observed from the tests that a 0.25% volume fraction of fibers maximized the increase in the strength of FRLAC and the fibers controlled cracking in FRLAC.

**Keywords** lightweight aggregate concrete, foam agent, optimal volume fraction of fibers, compressive strength and flexural strength tests, fiber reinforcing effect

### 1. 서 론

구조물의 자중을 줄이기 위해 사용되는 경량골재 콘크리트<sup>1)</sup>는 골재의 전부나 일부에 경량골재를 사용한 콘크리트로 주로 팽창혈암이 경량골재로 사용된다. 이러한 경량골재 콘크리트에 다량의 기포를 포함시킨 경량골재 기포콘크리트는 시멘트 매트릭스 내에 형성된 기포 때문에 단열성과 흡음성이 우수한 장점을 가지고 있다<sup>2)</sup>. 기포콘크리트의 강도발현을 위해 사용되는 대표적인 공법인 오토클레이브 양생과정은 제작크기에 한계가 있을 뿐만 아니라 제작비용이 많이 드는 단점이 있어 실용화에 방해가 되어왔다.

본 연구진은 강도와 기능성을 향상시키기 위해 섬유를 혼입한, 오토클레이브 양생과정 없이 제작되는 섬유보강 경량골재 콘크리트(fiber-reinforced, lightweight aggregate concrete, FRLAC) 개발 연구를 선행한 바 있으며<sup>3)</sup>, 본 연구에서는 FRLAC의 최적 섬유 혼입량을 결정하기 위해 섬유의 혼입률에 따른 FRLAC의 역학적 특성에 대해 알아보고자 한다.

시멘트 매트릭스 내에 기포를 안정적으로 생성시키기 위하여 협력업체인 T사가 개발한 기포제를 사용하였으

며, FRLAC의 강도를 높이기 위해 팽창혈암으로 만들어진 경량골재와 굵은골재를 사용하였다. 배합은 원주형 공시체를 이용한 예비 압축강도시험<sup>3)</sup>에 의해 결정된 배합을 사용하였으며, 섬유의 혼입률이 FRLAC의 역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 섬유를 여러 가지 비율로 혼입한 공시체들을 제작하였다. 마지막으로 FRLAC의 역학적 특성을 알아보기 위해 압축강도시험 및 휨강도시험을 수행하였다.

### 2. 공시체 제작 및 시험 개요

#### 2.1 공시체 제작

시험에 사용된 콘크리트의 구성은 제1종 보통포틀랜드 시멘트, 경량골재와 굵은골재, 혼합된 혼화제, 폴리프로필렌 섬유이다. 시멘트는 국내 S사에서 생산하는 비중 3.15의 제1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 골재는 중국에서 팽창혈암을 이용하여 생산한 비중 0.324~0.600의 경량골재를 사용하였다. 본 연구에서는 폴리카본산계 고유동화제와 협력업체인 T사가 독자적으로 개발한 기포제를 혼합한 혼화제를 사용하였으며, 섬유는 국내 S사에서 생산하는 비중 0.91, 탄성계수 3.53~17.65 GPa, 인장강도 254.97~696.27 GPa, 길이 19 mm의 단사형 폴리프로필렌 섬유를 사용하였다. 본 시험에서는 예비 압축강도시

\*Corresponding author E-mail : leesh@kaist.ac.kr  
Received April 5, 2006, Accepted September 27, 2006  
©2006 by Korea Concrete Institute

험<sup>3)</sup>에 의해 결정된 배합비를 사용하였으며, 사용된 배합비는 Table 1과 같다. 섬유 혼입률이 FRLAC의 역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 섬유 혼입률이 각각 0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%의 부피비를 가지는 공시체들을 제작하였다.

압축강도시험을 위하여  $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 의 크기를 가진 원주형 공시체들을 제작하였으며, 휨강도시험을 위해서는  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 의 보형 공시체들을 제작하였다. 재료의 배합방법 등의 자세한 사항은 Lee와 Song<sup>3)</sup>에 소개되었다.

## 2.2 시험 개요

본 시험의 시험방법 및 관련 장비는 ASTM 및 KS 규격에 근거하였다. 시험은 만능시험기(UTM)를 이용하였으며 0.005 mm/sec의 속도로 변위제어 방식을 이용하여 수행하였다. 시험자료는 UCAM-20PC 데이터 로거가 연결된 노트북 컴퓨터를 이용하여 공시체가 파괴될 때까지 매 3초마다 자동으로 기록되었다. 압축강도시험을 통하여 FRLAC의 섬유 혼입률에 따른 압축강도, 탄성계수, 푸아송비, 단위중량을 측정하였고, 휨강도시험을 통하여 휨강도 및 에너지흡수량을 측정하였다.

## 3. 특성 시험

폴리프로필렌 섬유의 혼입률이 FRLAC의 역학적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 서로 다른 섬유 혼입률을 가지는 공시체들에 대해 일련의 압축강도시험과 휨강도시험이 진행되었다. 비교를 위해 섬유를 보강하지 않은 기준공시체의 시험도 진행되었다.

### 3.1 압축강도 시험

FRLAC의 압축강도, 탄성계수 및 푸아송비, 단위중량은  $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 의 크기를 가진 원주형 공시체를 사용한 압축강도 시험<sup>4)</sup>에서 결정되었다. 압축강도 시험의 시험 방법 및 관련 장비는 ASTM C 39 규격<sup>4)</sup> 및 KS F 2405 규격<sup>5)</sup>에 근거하여 사용되었으며, 공시체들은 수조에서 28일간 양생한 후 시험하였다. Fig. 1은 UTM에 설치된 압축강도 시험용 공시체를 나타내고 있으며, 시험 방법 및 계산 방법 등 자세한 사항은 Lee와 Song<sup>3)</sup>에 의해 소개되었다.

Table 1 Mix proportion (Unit: kg/m<sup>3</sup>)

Mix no.	Water	Cement	Fine agg.	Coarse agg.	Fibers (volume fraction)	Admixture
F1	144.8	420	275	220	-	0.880
F2	144.8	420	275	220	0.910(0.10 %)	0.880
F3	144.8	420	275	220	2.275(0.25 %)	0.880
F4	144.8	420	275	220	4.550 (0.50 %)	0.880

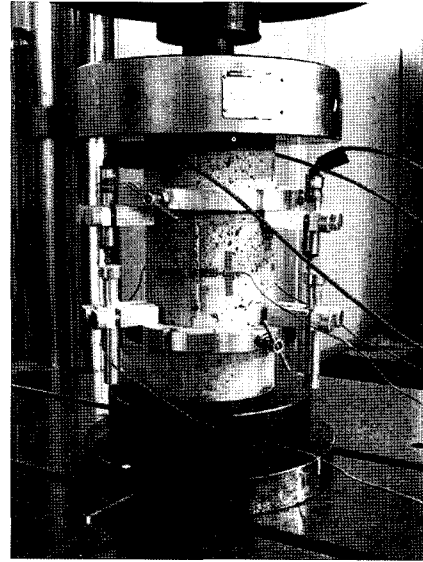


Fig. 1 A cylindrical specimen for a compression test

압축강도 시험에서 측정된 FRLAC 공시체들의 단위중량, 압축강도, 탄성계수, 푸아송비를 Table 2에 요약하였다. 표에서 보듯이 기준 공시체와 비교하여 폴리프로필렌 섬유가 0.25% 혼입된 공시체의 압축강도는 평균 105%, 탄성계수는 6% 향상된 것을 알 수 있다. 즉, 0.25%의 섬유 혼입률을 가지는 공시체가 0.10%나 0.50%

Table 2 The measured density, compressive strength, modulus of elasticity, and Poisson's ratio of the FRLAC specimens

Mix no.	Specimen no.	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio
F1	1	1,050	5.01	5,456	0.19
	2	1,110	4.08	5,754	0.20
	3	1,090	6.01	6,017	0.21
	4	1,110	5.74	5,799	0.20
	5	1,070	5.52	5,915	0.20
	Average	1,086	5.27	5,788	0.20
F2	1	-	-	-	-
	2	1,100	6.26	4,946	0.18
	3	1,070	5.90	4,528	0.21
	4	1,100	5.98	6,579	0.23
	5	1,110	6.40	5,012	0.19
	Average	1,095	6.14	5,266	0.20
F3	1	1,110	11.47	6,475	0.21
	2	1,090	9.79	5,843	0.18
	3	1,120	11.68	6,345	0.20
	4	1,080	11.18	6,001	0.18
	5	1,050	9.98	5,963	0.19
	Average	1,090	10.82	6,125	0.19
F4	1	1,060	6.05	4,735	0.17
	2	1,060	6.08	4,466	0.17
	3	1,060	5.96	4,492	0.17
	4	1,070	5.50	5,816	0.24
	5	1,070	6.51	4,730	0.13
	Average	1,064	6.02	4,848	0.18

의 혼입물을 가지는 공시체에 비해 월등히 향상된 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 휨강도시험

휨강도 시험의 시험 방법, 체계 및 관련 장비는 ASTM C 78 규격<sup>8)</sup> 및 KS F 2408 규격<sup>9)</sup>에 근거하였고, 하중-처짐 거동은 150 mm × 150 mm × 450 mm의 크기를 가진 보형 공시체에 삼등분점 재하 시험을 수행하여 결정하였다. Fig. 2는 UTM에 휨강도 시험용 공시체가 설치된 모습을 나타내고 있으며, 시험 방법 및 계산 방법 등 자세한 사항은 Lee와 Song<sup>3)</sup>에 소개 되었다. 공시체들이 파괴에 도달하기 전에 흡수한 총에너지 흡수량은 하중-처짐 곡선의 아래 면적을 계산하여 얻을 수 있었다.

FRLAC 공시체 및 기준공시체의 휨강도시험에서 얻은



Fig. 2 Prism specimen for a flexural strength test

하중-처짐 곡선은 Fig. 3과 같고, 측정된 최대하중, 에너지 흡수량, 파괴계수는 Table 3에 요약되었다.

Table 3 The measured peak load, energy absorbed and modulus of rupture of the FRLAC specimens

Mix no.	Specimen no.	Peak load (N)	Energy absorbed(J)	Modulus of rupture(MPa)
F1	1	10,855	3.251	1.38
	2	10,913	3.142	1.39
	3	10,806	3.035	1.38
	4	14,000	4.419	1.82
	5	12,938	3.192	1.66
	Average	11,092	3.408	1.53
F2	1	10,885	3.291	1.41
	2	9,738	3.314	1.26
	3	9,777	2.956	1.26
	4	10,228	3.268	1.31
	5	8,777	2.618	1.14
	Average	9,881	3.089	1.28
F3	1	7,620	2.200	1.04
	2	8,581	2.831	1.13
	3	8,630	2.595	1.15
	4	8,689	2.692	1.12
	5	8,718	2.977	1.19
	Average	8,448	2.659	1.13
F4	1	8,904	2.565	1.23
	2	7,247	1.986	1.02
	3	8,228	1.831	1.13
	4	8,826	2.843	1.26
	5	8,748	2.676	1.24
	Average	8,391	2.380	1.18

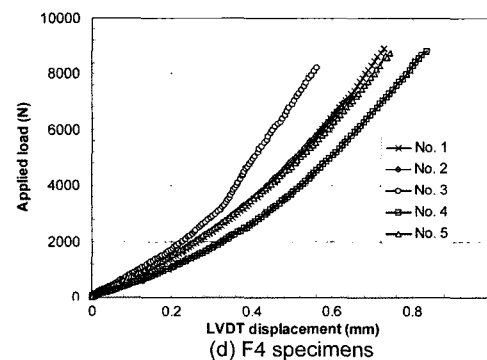
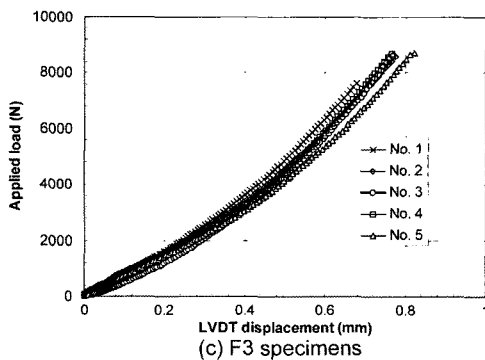
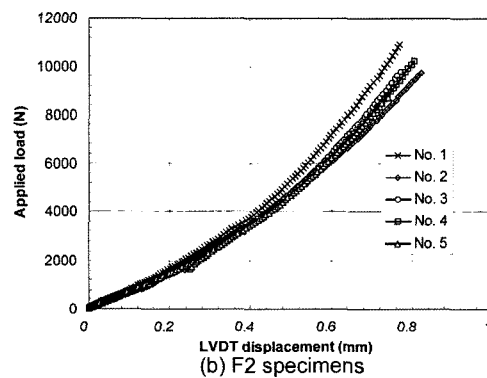
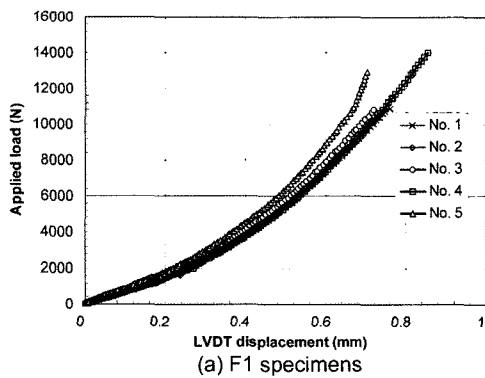


Fig. 3 Load-deflection curves of the FRLAC specimens during the flexural strength test

### 3.3 공시체의 파괴거동

섬유 혼입률이 0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%인 4종류의 배합에 대해 각각 4개에서 5개 공시체들이 시험에 사용되었고 시험 결과는 Tables 2, 3에 요약되었다.

Fig. 4에서와 같이 압축강도 시험용 공시체들은 상부에서 균열이 생기기 시작해 수직으로 진전되었으며, 이는 0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%의 섬유 혼입률을 가지는

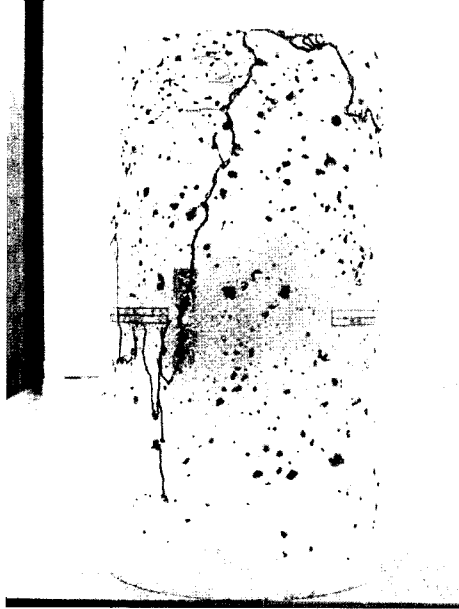


Fig. 4 Failed specimen after the compression test

공시체들이 거의 비슷한 양상을 보였다.

휨강도 시험 동안에 파괴된 기준 공시체와 FRLAC 공시체들의 전형적인 파괴양상은 Fig. 5에 나타나있다. 대부분의 공시체들이 공시체의 중앙에서 파괴되는 이상적인 파괴양상을 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 섬유를 혼입하지 않은 0%의 기준 공시체들과 가장 적은 양의 섬유를 혼입한 0.10%의 섬유 혼입률을 갖는 공시체들은 최대하중에 도달함과 동시에 공시체 중앙의 균열에 의해 두 개의 부분으로 나뉘는 반면, 0.25%와 0.50%의 섬유 혼입률을 가지는 공시체들은 섬유가 파괴면을 구속하는 효과를 내어 파괴 후에도 균열만 생겼을 뿐 처음의 형상을 유지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6는 FRLAC 공시체의 파괴면을 주사전자현미경으

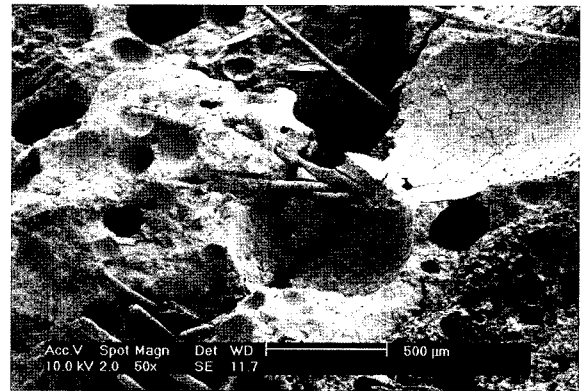


Fig. 6 SEM images of cracked surface of FRLAC(0.25% of volume fraction of fibers, see also lee and song<sup>3)</sup>)

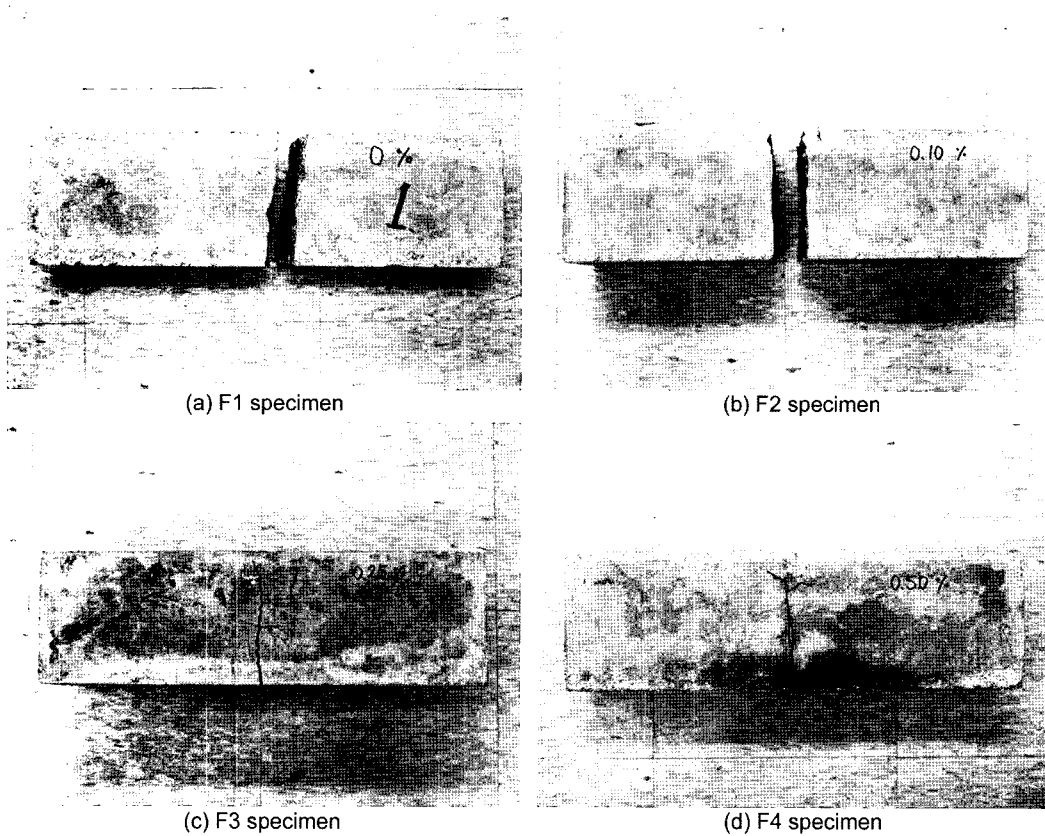


Fig. 5 Failed specimens after the flexural strength test

로 촬영한 사진(SEM)으로 섬유가 두 개로 분리된 부분을 연결하고 있는 섬유의 보강효과를 볼 수 있다. 이로부터 섬유가 FRLAC의 균열의 진전을 제어하고 있음을 알 수 있었다.

### 3.4 섬유 혼입률의 영향

섬유 혼입률의 변화에 대한 압축강도의 변화 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 압축강도의 경우 섬유 혼입률이 0%인 기준공시체의 경우 5.27 MPa, 0.10%인 경우 6.14 MPa, 0.25%인 경우 10.82 MPa, 0.50%인 경우 6.02 MPa로 측정되었다. 즉 섬유의 혼입률이 0.25%까지는 섬유의 양이 늘어남에 따라서 압축강도가 증가하지만, 혼입률을 0.50%로 지나치게 늘리면 오히려 압축강도가 감소함을 알 수 있다. Fig. 8은 섬유 혼입률에 따른 탄성계수의 변화 그래프로 탄성계수는 섬유 혼입률의 영향을 받지 않는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

섬유 혼입률이 푸아송비에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 9에 섬유 혼입률에 대한 푸아송비의 변화 그래프를 나타내었다. 그래프를 보면 섬유 혼입률이 0%인 기준공시체의 푸아송비는 0.20, 0.10%인 경우 역시 0.20, 0.25%인 경우 0.19, 0.50%인 경우 0.18로 측정되었다. 섬

유의 혼입률이 많아질수록 섬유가 횡방향 변위를 어느 정도 구속하게 되어 푸아송비의 값이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 10은 섬유 혼입률에 따른 휨강도의 변화를 나타낸 그래프로, 그래프를 통해 알 수 있듯이 시험 측정치들이 일정한 변화를 보이지 않고 탄성계수와 마찬가지로 섬유 혼입률의 영향을 받지 않는 양상의 결과를 보여 섬유의 혼입률과 휨강도의 상관관계를 알아볼 수 없었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 오토클레이브 양생과정 없이 제작할 수 있는 새로운 FRLAC의 최적 섬유 혼입률을 결정하기 위해 폴리프로필렌 섬유의 혼입률에 따른 FRLAC의 역학적 특성 변화에 대한 시험 결과를 소개하였다. 섬유 혼입률이 FRLAC의 역학적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 섬유의 혼입률이 0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%인 공시체들에 대해 일련의 압축강도시험과 휨강도시험을 진행하였다. 본 실험적 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 0.25%의 섬유 혼입률을 가진 공시체에서 최대 압축 강도를 보였다. 0.50%의 섬유 혼입률을 가진 공시

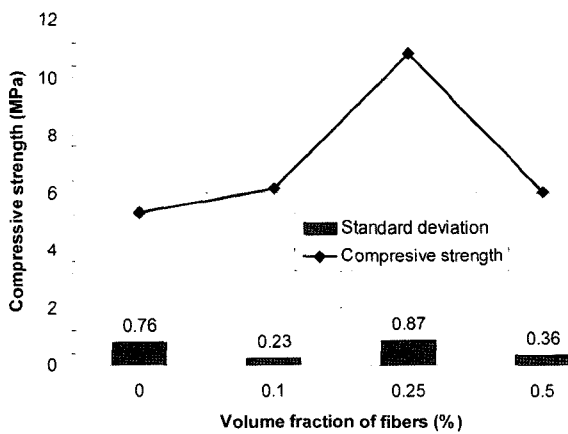


Fig. 7 Compressive strength vs. volume fraction of fibers

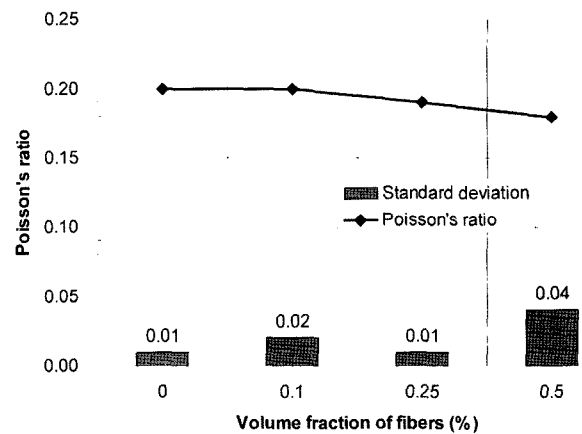


Fig. 9 Poisson's ratio vs. volume fraction of fibers

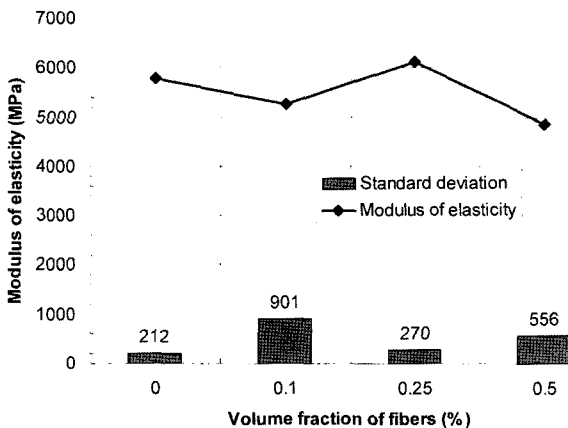


Fig. 8 Modulus of elasticity vs. volume fraction of fibers

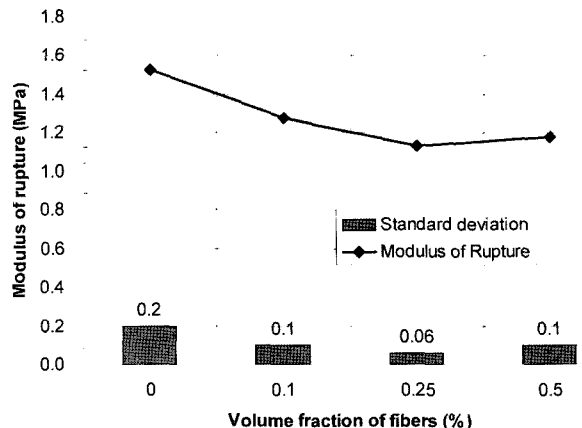


Fig. 10 Modulus of rupture vs. volume fraction of fibers

체의 경우, 많은 양의 섬유로 인해 믹싱과정에서 섬유의 분산이 불량해져 볼링(balling) 현상 등이 발생하여 강도가 오히려 저하된 것으로 판단된다.

- 2) 섬유의 혼입률이 많아질수록 FRLAC의 푸아송비는 감소하였다. 이는 섬유의 혼입률이 많아질수록 섬유가 횡방향 변위를 어느 정도 구속하게 되어 푸아송비가 작아지는 것으로 판단된다.
- 3) 주사전자현미경 사진에서 보았듯이 섬유는 FRLAC의 균열의 진전을 제어함을 알 수 있다.
- 4) 섬유의 혼입률이 FRLAC의 압축강도에 미치는 영향은 매우 크나 휨강도에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 FRLAC의 최적 섬유 혼입률과 섬유 혼입률에 따른 FRLAC의 역학적 특성 변화를 알 수 있었다. 앞으로 FRLAC의 성능 향상과 보다 정확한 역학적 특성 파악을 위해 섬유의 종류, 실리카폼, 플라이애쉬, 양생조건 등이 FRLAC의 역학적 특성에 미치는 영향에 대해 추가적인 연구가 요구된다.

### 감사의 글

본 연구를 위해 기술적 지원 및 기포제를 제공한 미국 Thermoflex Inc.와 실험에 많은 도움을 준 김봉래 연구원과 하성국 연구원의 협력에 깊은 고마움을 전합니다. 이 연구는 한국과학기술원으로부터 지원된 신입교원 정착연구비에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

1. Yasar, E., Atis, C. D., Kilic, A., and Gulsen, H., "Strength Properties of Lightweight Concrete Made with Basaltic Pumice and Fly Ash", *Materials Letters*, Vol.57, No.15, 2003, pp.2267~2270.
2. Al-Khaiat, H. and Haque, M. N., "Effect of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of a Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.6, 1998, pp.859~866.
3. Lee, H. K. and Song, S. Y., "Properties of a Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers", *Cement and Concrete Research*, to Be Submitted.
4. ASTM C 39/C 39M-04a, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, American Society for Testing and Materials, 2004, pp.1~7.
5. KS F 2405, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법, 한국표준협회, 2005, pp.1~6.
6. ASTM C 469-02, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, American Society for Testing and Materials, 2002, pp.1~4.
7. KS F 2438, 콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 푸아송비 시험 방법, 한국표준협회, 2002, pp.1~4.
8. ASTM C 78-02, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete(Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, American Society for Testing and Materials, 2002, pp.1~3.
9. KS F 2408, 콘크리트의 휨 강도 시험 방법, 한국표준협회, 2000, pp.1~9.

**요 약** 본 논문은 오토클레이브 양생과정 없이 제작되는 섬유보강 경량골재 콘크리트(FRLAC)의 섬유 혼입률에 따른 역학적 특성의 변화를 알아보기 위해 수행된 실험적 연구의 결과에 대해 서술하고 있다. FRLAC는 폴리프로필렌 섬유와 경량골재를 혼입함으로써 기포 콘크리트의 강도를 증진시켰다. 섬유의 혼입률이 FRLAC의 역학적 특성에 미치는 영향을 알아보고 최적 섬유 혼입률을 결정하기 위해 폴리프로필렌 섬유의 혼입률이 0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%인 공시체들을 제작하여 일련의 압축강도시험과 휨강도시험을 수행하였다. 시험 결과 0.25%의 섬유 혼입률에서 압축강도가 가장 많이 증대되었고, 섬유가 FRLAC의 균열진전을 제어함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 경량골재 콘크리트, 기포제, 최적 섬유 혼입률, 압축강도 및 휨강도 시험, 섬유보강 효과