

# 플라이애쉬와 시멘트 슬러지를 利用한 纖維補強 규산칼슘계 시멘트 複合體의 製造 및 力學的 特性에 關한 實驗的 研究

Experimental Study on the Manufacture and the Mechanical Properties of  
Fiber Reinforced Calcium Silicates - Cement Composites Utilizing Fly Ash  
and Cement Sludge for Construction Materials(II)

朴 承 範\* · 任 昌 應\*\* · 尹 義 植\*\*\* · 金 琮 鎬\*\*\*\*

Park, Seung Bum Im, Chang Duk, Yoon, Eui Sik Kim, Jong Ho

## ABSTRACT

The results of an experimental study on the manufacture and the mechanical properties of fiber reinforced calcium silicates-cement composites utilizing by-Products (fly ash or cement sludge) for construction materials are presented in this paper.

As the test results show, compressive, tensile, and flexural strength, fracture toughness of fiber reinforced calcium silicates-cement composites were improved by increasing the fly ash and fiber contents, but were decreased by increasing cement sludge contents. Somewhat, especially increasing fiber contents the fracture toughness of the composites were remarkably increased. Also, the mechanical properties of the composites reinforcing alkali-resistance GF were higher than those of the composites reinforcing Samoa Pulp.

## 1. 서론

석회(CaO)와 실리카(SiO<sub>2</sub>)를 주원료로 한 170~250℃의 포화수증기압 분위기중에서 화학반응하여 얻어진 재료를 규산칼슘 재료로서, 유럽에서는 珪灰연와, 벽돌의 개발용을 시점으로 약 100년의 역사가 있고 일본, 미국 등에서는 약 20년 전부터 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 1970년대의 오일쇼크 이후 에너지절약화 경향의 건물형태의 변화 및 불연도시건설의 추진, 빌딩 및 아파트건물의 고층화, 주택용 복합건축의 수

요증가 등의 원인에 의하여 해외에서는 ALC 등 규산칼슘계 재료 및 플라이애쉬, 실리카 흙, 시멘트 슬러지 등의 산업부산물을 이용한 건재용 복합체의 개발 및 활용연구가 활발하게 이루어지고 있는 실정이나, 국내에서는 일부 연구진 및 연구기관에 의한 규산칼슘계 경량건재에 관한 연구보고가 있을 뿐으로 이 분야에 관한 기술개발 및 활용연구가 극히 미진한 실정이다.

한편, 현재 국내의 화력발전소에서 부산되는 플라이애쉬 및 레미콘공장 및 콘크리트 2차제품 공장의 시멘트 슬러지 폐기물은 연간 막대한 양이 발생하고 있는 실정으로서, 이러한 산업부산물을 이용한 선진국 수준의 물리적·역학적 성질이 우수한 건재용 경량복합체의 개발 및 활용은 폐자원의 유효 이용과 국내의 건설산업의 발전에 크게 기여할 것으

\* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 시설안전기술공단

\*\*\* 정희원, 충남대학교 토목공학과 강사

\*\*\*\* 정희원, 충남대학교 대학원 석사과정

로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 산업부산물인 플라이애쉬와 시멘트슬러지를 사용한 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체를 제조하여 그 물리적, 역학적 특성에 관한 기초적 연구를 수행하였다.

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료

#### (1) 시멘트 및 플라이애쉬

시멘트는 S사 제품의 조강 포틀랜드 시멘트(비중:3.15)를 사용하였고, 플라이애쉬는 보령 화력발전소의 유연탄 플라이애쉬를 사용하였다.

#### (2) 규사분말

규사는 국내 C사에서 생산되는 평균입경 7.0 $\mu$ m의 규사분말(비중 2.60)을 사용하였다.

#### (3) 시멘트 슬러지

수거한 슬러지는 75 $^{\circ}$ C로 건조기에서 6일 이상 완전건조하여 ball mill로 분쇄한 후 No.200 체로 체가름하여 사용하였다.

#### (4) 석회 및 석고

석회는 국내 J사에서 생산되는 시판의 생석회를 사용하였고, 석고로는 시판의  $\alpha$ 형 반수석고( $\alpha$ -CaSO $_4$ · $\frac{1}{2}$ H $_2$ O)를 사용하였다.

#### (5) 사용 섬유 및 발포제

사용 섬유는 일본 A사 제품의 내알카리성 유리섬유(L<sub>GF</sub>=13mm)와 목질섬유(Woodfiber)로 미국 S사 제품의 Samoa Pulp(L<sub>WF</sub>=1.5, 3.0mm)를 사용하였고, ALC용 발포제로서는 독일 E사 제품의 ALC용 알루미늄 분말을 사용하였다.

## 2.2 배합 및 시험방법

### 2.2.1 배합 및 양생방법

산업부산물인 플라이애쉬와 시멘트 슬러지를 이용한 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 제조를 위한 배합에는 시험배합을 통하여 Table 1과 같이 하였으며, 물·고형분비는 0.65 wt.%로 하고, 배합 종류별로 목질 섬유(Wood Fiber:Samoa Pulp), 유리섬유(Glass Fiber)를 동복합체의 발포가 곤란하

지 않을 정도로 각각 0, 1.0, 2.0 wt.%를 혼합하여 믹싱하였으며 발포용 알루미늄분말은 총고형분에 대해 0.08 wt.%를 사용하였다.

믹싱방법은 섬유를 랜덤 분산시키기 위하여 일본 C사 제품의 용량 30 $\ell$ 의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하였으며, 믹싱시간은 Dry Blend로 3분(시멘트, 플라이애쉬 및 실리카 흙, 생석회, 규사분말), Primary Blend로 2분(25 $^{\circ}$ C의 증류수 첨가), Secondary Blend로 2~3분간 섬유를 투입하여 2분간 믹싱한 다음 기포제를 첨가하여 1분간 믹싱한 후 물드에 슬러리 상태로 타설하였고, 실온에서 5시간 방치하여 발포가 종결된 후 항온 항습기에서 5시간 1차양생(50 $^{\circ}$ C, 80% R.H.)후 오토클래브 양생(최고온도 180 $^{\circ}$ C, 10kg/cm $^2$ 의 기압하에서 5시간 양생)을 실시하였으며, 실온조건의 습도 50~70%의 통풍상태에서 함수율이 10% 이하로 저하할 때까지 방치(약 1주일)한 다음 각종 시험을 행하였다.

Table 1. Mix Proportions of Lightweight Fiber Reinforced Calcium Silicates-Cement Composites

Mix Series	Mix Proportions (wt.%)						Fiber F/M* (wt.%)	Water W/M* (wt.%)
	Silica	FA	Lime	Cement	Sludge	Gypsum		
A	60	-	16	20	-	3	0	65
B	50	10	16	20	-	3	1.0	
C	40	20	16	20	-	3	2.0	
D	60	-	16	15	5	3	2.0	
E	60	-	16	10	10	3	2.0	

Note : \* M = Silica + Fly Ash + Lime + Cement + Gypsum

### 2.2.2 시험방법

압축강도 및 절건비중 시험은 KS F 2459 및 2701에 준하여 10 $\times$ 10 $\times$ 10cm 입방 공시체를 제조하여 70 $^{\circ}$ C에서 함수율이 10 $\pm$ 2%가 되는 표준상태로 건조시켜 용량 25t의 Automatic Computer Controlled UTM을 사용하여 수직으로 매초 1kg/cm $^2$ 의 하중을 가하여 압축강도를 측정하였고, 비중은 공시체를 절건상태로 건조하여 절건중량(g)/체적(cm $^3$ )으로 구하였으며, 인장강도시험은  $\phi$ 10 $\times$ 20cm의 원통형

공시체를 제조하여 KS F 2423에 준하여 행하였다.

휨강도 시험용 공시체의 크기는 7×7×20cm, 순지간 18cm로 하여 JCI SF-4에 준하여 Automatic Computer Controlled UTM(용량 25t)을 사용하여 변위속도 0.05mm/min로 중앙집중 재하방식에 준하여 시험을 행하였고, 이때의 하중-처짐곡선은 X-Y 레코더에 의하여 그려졌으며, 또한 이때의 휨인성값은 JCI 제안방법에 의하여 구하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 절건비중

플라이애쉬와 시멘트슬러지를 사용한 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 절건비중의 측정결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 이들을 고찰하여 보면, 플라이애쉬 및 시멘트슬러지의 혼입율을 증가시킴에 따라 절건비중은 다소 증가경향을 나타내었고, 시멘트슬러지의 혼입율 5, 10 wt.%의 경우 절건비중은 0.50~0.55 정도로 KS 2701 규격 ( $0.45 < \bar{x} < 0.55$ )에 적합한 것으로 나타났다. 또한 보강섬유의 종류에 따른 영향은 목질섬유가 유리섬유에 비하여 전반적으로 절건비중이 근소한 경량화 경향을 보였으며, 보강섬유(GF, WF)의 혼입율이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 압축강도

경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 배합종류별 압축강도 측정결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 이들을 고찰하여 보면, 플라이애쉬와 시멘트 슬러지를 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬 및 시멘트 슬러지 혼입율을 증가시킴에 따라 압축강도는 플라이애쉬 혼입의 경우는 1.39, 3.06% 증가 하였으며, 시멘트 슬러지 혼입의 경우는 약간 감소하는 경향을 나타내었으나, 본 실험결과에서 압축강도 시험결과는 모두 KS F 2701 규격(30kg/cm<sup>2</sup>)보다 크게 상회하였다. 또한 유리섬유혼입의 경우가 목질섬유혼

입의 경우보다, 또한 혼입율 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 2. Test Results of Fiber Reinforced Calcium Silicates · Cement Composites

Mix Series	Mix No.	FA or Sludge (wt.%)	Fibers (wt.%)	Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Comp. Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Bending Strength (kg/cm <sup>2</sup> )
A	1	0	0	0.50	35.9	654	760
	2		GF 1.0	0.54	36.4	7.41	823
	3		* 2.0	0.55	37.2	8.30	918
	4		WF 1.0	0.52	35.7	6.85	710
	5		* 2.0	0.53	36.2	7.17	785
B	6	Fly Ash 10	0	0.52	36.4	6.55	763
	7		GF 1.0	0.54	37.5	7.45	835
	8		* 2.0	0.55	37.8	8.52	9.32
	9		WF 1.0	0.53	36.5	6.88	785
	10		* 2.0	0.54	36.8	7.30	8.36
C	11	Fly Ash 20	0	0.53	37.0	7.15	785
	12		GF 1.0	0.55	37.6	8.20	8.95
	13		* 2.0	0.57	40.8	9.15	9.85
	14		WF 1.0	0.54	37.1	7.20	8.14
	15		* 2.0	0.55	37.9	7.78	8.68
D	16	Sludge 5	0	0.51	35.6	6.53	750
	17		GF 1.0	0.54	35.8	7.38	817
	18		* 2.0	0.55	36.5	8.25	9.15
	19		WF 1.0	0.52	35.5	6.70	7.08
	20		* 2.0	0.53	36.0	7.15	7.78
E	21	Sludge 10	0	0.52	35.3	6.50	7.40
	22		GF 1.0	0.55	35.5	7.29	8.15
	23		* 2.0	0.56	36.0	8.20	9.13
	24		WF 1.0	0.53	35.2	6.65	7.35
	25		* 2.0	0.54	35.8	7.08	7.65

#### 3.3 인장강도

경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 인장강도 시험결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 이들을 고찰하여 보면, 플라이애쉬와 시멘트 슬러지를 혼입하지 않은 경우에 비하여 인장강도는 플라이애쉬와 시멘트 슬러지 혼입율을 증가시킴에 따라 플라이애쉬 혼입의 경우 증가 경향을 나타내었으나, 시멘트 슬러지 혼입의 경우 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 유리섬유 및 목질섬유를 1.0, 2.0 wt.% 혼입함에 의하여 평균 2.3, 28.0% 정도의 현저한 인장강도 증가경향을 나타내었다. 또한 유리섬유보강의 경우가 목질섬유보강의 경우에 비하여 높은 인장강도를 나타내었으며, 이러한 경향은 유리섬유가 목질섬유보다 인장강도가 월등히 우수하고 Aspect비(1/d)가 커 그 비표면적이 크고 섬유의 분산성이 양호하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.4 휨강도

경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 배합종류별 휨강도 측정결과는 Table 2에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 휨강도는 플라이애쉬와 시멘트슬러지를 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 시멘트슬러지 혼입율이 증가함에 따라 플라이애쉬 혼입의 경우 다소 증가 경향을 나타내었고 시멘트 슬러지 혼입의 경우 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유를 1.0, 2.0 wt.% 혼입함에 의하여 유리섬유보강의 경우는 8.3, 25.5%, 목질섬유보강의 경우는 2.6, 10.6%의 휨강도 증가경향을 나타내었으며, 유리섬유보강의 경우가 목질섬유보강의 경우보다 높은 휨강도 증가경향을 나타내었다.

### 3.5 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 파괴인성

섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 하중-처짐량 측정에는 Fig. 1,2에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 최대하중까지는 섬유혼입율에 의한 거의 큰 변화가 없이 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었고, 최대하중이후에는 섬유길이 1.5mm의 목질섬유를 보강한 경우에는 비교적 급격히 저하하였으나, 3mm보강의 경우는 파괴에 이를 때까지 비교적 완만하게 저하하는 경향을 나타내었으며, 혼입량이 2.0 wt.%일때는 최대하중에 달하기 전에 현저한 비선형거동을 나타내었다.

유리섬유보강의 경우의 하중-처짐곡선은 섬유길이 3.0mm의 목질섬유보강의 경우와 유사한 경향을 나타내었으나, 목질섬유 경우보다 다소 작은 변형에서 최대하중을 나타내었다.

한편, 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 파괴인성을 평가하고 그 결과를 Table 3에 나타난 바와 같이 본 실험의 범위내에서는 섬유의 종류에 관계없이 섬유혼입량이 증가함에 따라 인성은 월등하게 증가하는 경향을 나타내었고, 파괴인성평가지 파괴에너지 및 균열진전저항점으로 부터 동일 섬유 혼입량에서 섬유복합효과가 가장 크게 나타난 것

은 섬유길이 3.0mm의 목질섬유보강 ALC에서 나타났다

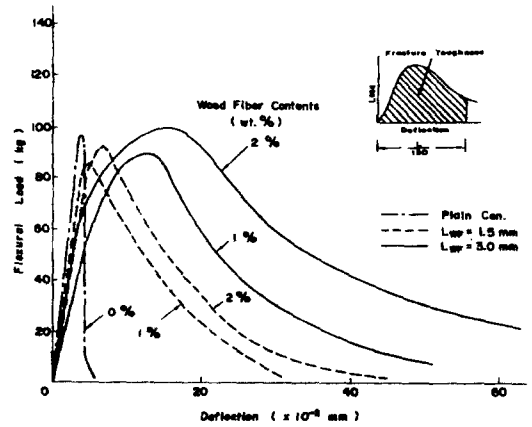


Fig. 1. Relationship between Flexural Load and Deflection for Mix. Series A(1)(2)

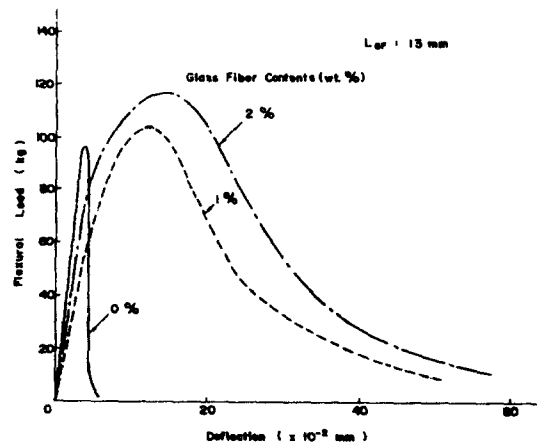


Fig. 2. Relationship between Flexural Load and Deflection for Mix. Series A(3)

Table 3. Evaluation for Fracture Toughness of Fiber Reinforced Calcium Silicate-Cement Composites (Unit:kg·mm)

Kind of Fibers	Fiber Contents (wt.%)		
	0	1.0	2.0
Glass Fiber	2.3	24.1	33.3
Wood Fiber(1.5mm)	2.3	10.8	14.3
Wood Fiber(3.0mm)	2.3	21.3	35.9

#### 4. 결 론

플라이애쉬와 시멘트슬러지를 이용한 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체의 역학적 특성에 관한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 동복합체의 절건비중은 플라이애쉬와 시멘트 슬러지의 혼입을 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었고, 시멘트 슬러지의 혼입율이 5, 10wt.%의 경우 절건비중은 0.50~0.56정도로 KS규격에 적합하였다. 또한 목질섬유를 보강한 경우가 유리섬유를 보강한 경우에 비하여 다소 경량화 경향을 나타내었으며, 섬유혼입율이 증가함에 따라서는 절건비중이 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 동복합체의 압축강도는 플라이애쉬 혼입율이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타낸 반면, 시멘트 슬러지의 혼입율이 증가함에 따라서는 약간 감소하는 경향을 나타내었으나, 이들 모두 KS규격(30kg/cm<sup>2</sup>)보다는 크게 상회하였다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유혼입을 증가에 따라 압축강도는 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

(3) 동복합체의 인장강도는 플라이애쉬의 혼입율이 증가함에 따라 현저히 증가하는 경향을 나타내었으나, 시멘트 슬러지의 혼입율이 증가함에 따라서는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 유리섬유 및 목질섬유의 혼입율을 증가시킴에 따라 현저한 인장강도 증가 경향을 나타내었다.

(4) 동복합체의 휨강도는 플라이애쉬의 혼입율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으나 시멘트 슬러지의 혼입율이 증가함에 따라서는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유혼입율을 1.0, 2.0wt.% 로 증가시킴에 따라 휨강도는 유리섬유 및 목질섬유보강의 경우 모두 증가경향을 나타내었다.

(5) 동복합체의 압축강도, 압축탄성계수, 인장강도 및 휨강도는 모두 유리섬유보강의 경우가 목질섬유보강의 경우에 비하여 우수

한 것으로 나타났다.

(6) 동복합체의 휨하중-처짐 시험결과, 최대하중이후의 거동은 섬유길이 1.5mm의 목질 섬유보강의 경우에는 최대하중이후 비교적 급격하게 저하하였으나, 섬유길이 3.0mm 목질섬유보강의 경우에는 파괴에 이를 때까지 비교적 완만하게 저하하는 경향을 나타내었고, 유리섬유를 보강한 경우의 최대하중이후의 거동은 섬유길이 3.0mm의 목질섬유보강의 경우와 유사한 경향을 나타내었으나,  $L_{wf}=3mm$ 의 목질섬유보강의 경우에 비하여 파괴인성은 다소 저하하였다.

(7) 동복합체의 파괴인성을 평가한 결과 섬유의 종류에 관계없이 혼입량 2.0wt.%까지의 범위내에서는 섬유의 혼입율이 증가함에 따라 인성은 월등히 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 參 考 文 獻

1. H. F. W. Taylor and T. Mitsuda, "Influence of Alumina on the Conversion of Calcium Silicate Hydrate Gels into 11Å Tobermorite at 120°C", *Cement and Concrete*, pp.203-209, 1975
2. T. Mitsuda, S. Kobayakawa and H. Toraya, "Characterization of Hydrothermal Formed C-S-H", 8th International Congress on the Chemistry of Cement, 2-III, pp.173, 1986
3. 光田武, "オートクレーブ處理ケイ酸カルシウム材料", *セラミックス*, Vol.23, No.8, pp.748-752, 1988
4. 澹前鋒, 光田武, "合成Tobermoriteの熱的舉動", *セメント技術年報*, Vol.30, pp.44, 1976