

# 산업부산물 및 규산칼슘계 재료를 이용한 경량·고강도 복합체의 개발·평가에 관한 실험적 연구 (其 1)

## Experimental Study on the Development and Evaluation of Lt. Wt. & High Strength Composites Utilizing By-Products and Calcium Silicates for Construction Materials(1)

박 승 범\*

Park, Seung Bum

### 요 약

산업부산물인 플라이애쉬와 실리카흄 및 국내 부존자원이 풍부한 규사분말, 생석회 및 발포용 알루미늄 분말과 취성개선을 위한 보강용 섬유를 사용한 경량 고강도의 시멘트복합체의 개발을 위하여 오토클래브 양생에 의한 열수 알카리분위기에서의 섬유 자체의 열화현상을 조사함과 아울러 배합요인별로 경량용 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체를 제조하여 그 역학적 특성에 관한 연구를 수행하였다.

시험결과, 탄소섬유 및 내알카리성 유리섬유는 보강용 섬유로서 적합함이 확인되었으며, 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 압축, 인장, 휨강도는 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율 및 섬유혼입율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었고 또한 섬유혼입율 증가에 따라 현저히 휨인성이 증가하였으며, 탄소섬유보강의 경우가 유리섬유보강의 경우에 비하여 압축, 인장, 휨강도 및 휨인성은 다소 높은 경향을 나타내었다.

### Abstract

The results of an experimental study on the development and the evaluation of lightweight and high strength composites utilizing by-Products and calcium silicates for construction materials are presented in this paper. The composites using early strength portland cement, by-Products(fly ash, silica fume), silica powder, quick lime, gypsum, Al powder and fibers(PAN-derived CF, alkali-resistance GF) were prepared using various mixing conditions.

As the test results show, PAN-derived CF and alkali-resistance GF were suitable for reinforcing fiber of the composites. And the mechanical properties, such as compressive tensile flexural strength, and toughness of Lt. Wt. fiber reinforced calcium silicates cement composites were improved by increasing the fly ash and silica fume contents, and fiber contents, especially by increasing fiber contents the toughness of the composites were remarkably increased. Also, compressive tensile flexural strength, and toughness of the composites reinforcing PAN-derived CF were higher than those of the composites reinforcing alkali-resistance GF.

**Keyword :** by-products, calcium silicates, fly ash, silica fume, carbon fiber, glass fiber, mechanical properties, flexural toughness.

\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 1994년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서 론

석회(CaO)와 시리카(SiO<sub>2</sub>)를 주원료로 한 170~250℃의 포화수증기압 분위기중에서 화학반응하여 얻어진 재료를 규산칼슘 재료라 한다. 규산칼슘은 공극률이 높은 수화물이고, 화학적 안정성 및 내열성능이 우수한 소재이다. 그 성형체는 경량성, 단열성 및 내화성이 우수하며 커텐월, 칸막이벽, 내화블록, 보온재 등의 건재용으로 이용되고 있다.<sup>(1)</sup>

이들 규산칼슘계 재료에 관한 연구는, 유럽에서는 珪灰연와, 벽돌의 개발응용을 시점으로 약 100년의 역사가 있고 일본, 미국 등에서는 약 20년 전부터 실용화 및 응용연구가 Taylor<sup>(2,3)</sup>, Toraya<sup>(4)</sup>, 光田<sup>(5-8)</sup>, 近藤<sup>(9-10)</sup>, 鈴木<sup>(11-12)</sup>, Laod<sup>(13)</sup>, Fujiki<sup>(14)</sup>, Bettermann<sup>(15)</sup> 등에 의하여 보고된 바 있다. 특히 1970년대의 오일쇼크 이후 에너지절약화 경향의 건물형태의 변화 및 불연도시건설의 추진, 빌딩 및 아파트건물의 고층화, 주택용 복합건재의 수요 증가 등의 원인에 의하여 해외에서는 ALC등 규산칼슘계 재료 및 플라이애쉬, 실리카흄, 시멘트슬러지 등의 산업부산물을 이용한 건재용 복합체의 개발 및 활용연구가 활발하게 이루어지고 있는 실정이나 국내에서는 노<sup>(16)</sup>, 박<sup>(17-18)</sup>, 서<sup>(19)</sup> 등에 의한 규산칼슘계 경량건재에 관한 연구결과가 발표된 바 있고, 건설기술연구원<sup>(20)</sup>, 대한건축학회<sup>(21,22)</sup> 등 등에 의한 ALC평가조사 등의 연구보고가 있을 뿐으로 이 분야에 관한 기술개발 및 활용연구가 극히 미진한 실정이다. 한편, 현재 국내의 화력발전소에서 부산되는 플라이애쉬는 연간 약 200만톤으로 2001년에는 약 500만톤에 이를 것으로 예상되고 있고<sup>(17)</sup>, 레미콘공장 및 콘크리트 2차제품 공장의 시멘트슬러지 폐기물은 연간 약 37만톤 정도 발생하고 있는 실정으로<sup>(18)</sup> 이러한 막대한 산업부산물을 이용한 선진국 수준의 물리적·역학적 성질이 우수한 건재용 경량복합체의 개발 및 활용은 폐자원의 유효 이용과 국내의 건설산업의 발전에 크게 기여할 것으로 기대된다. 따라서, 본 연구에서는 그 1차 연구로 산업부산물인 플라이애쉬와 실리카흄 그리고 국내의 부존자원이 풍부한 ALC

용 규사 및 생석회와 발포용 알루미늄분말과 취성 개선을 위한 보강용 섬유를 사용한 건재용 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트 복합체를 제조하여 오토클래브 양생에 의한 알카리열수 분위기에서의 섬유자체의 열화현상을 조사함과 아울러 그 역학적 특성에 관한 기초적 연구를 수행하였다.

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료

#### (1) 시멘트 및 플라이애쉬

시멘트는 S사 제품의 조강 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애쉬는 보령화학발전소의 유연탄 플라이애쉬를 사용하였으며 각각의 화학 조성 및 물리적 성질은 Table 1 및 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions and physical properties of early strength portland cement

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Ig.loss (%)	Specific Gravity(20℃)	Blaine's Specific Surface Area(cm <sup>2</sup> /g)
19.2	5.9	2.8	61.7	3.6	4.2	1.37	3.14	4,500

Table 2 Chemical compositions and physical properties of Fly Ash

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Ig.loss (%)	Specific Gravity(20℃)	Blaine's Specific Surface Area(cm <sup>2</sup> /g)
65.40	25.50	4.25	1.21	0.98	0.21	1.03	3.63	2.16	4,453

#### (2) 규사분말 및 실리카흄

규사는 국내 C사에서 생산되는 평균입경 7.0 $\mu$ m

Table 3 Chemical compositions and physical properties of silica powder

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Ig.loss (%)	Micell. (%)	Specific Gravity(20℃)	Blaine's Specific Surface Area(cm <sup>2</sup> /g)
92.90	3.81	0.51	0.27	0.75	0.95	0.81	2.60	4,480

Table 4 Chemical compositions and physical properties of silica fume

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	C (%)	Specific Gravity(20°C)	Blaine's Specific Surface Area(cm <sup>2</sup> /g)
92.0	1.68	2.51	0.56	0.58	0.33	0.31	2.30	26.32

의 규사분말을 사용하였고, 실리카흄은 평균입경 0.15 $\mu$ m의 남아프리카 A사 제품을 사용하였으며, 그 화학적조성 및 물리적성질은 Table 3 및 4와 같다.

(3) 석회

석회는 국내 J사에서 생산되는 시판의 생석회를 사용하였고, 그 화학적 성질은 Table 5와 같다.

Table 5 Chemical compositions of quick lime

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	F-CaO (%)	T-CaO (%)	MgO (%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (%)	S (%)	P (%)
3.01	0.36	0.35	92.20	84.41	0.46	-	-	2.5

(4) 석고

석고로는 시판의  $\alpha$ 형 반수석고( $\alpha$ -CaSO<sub>4</sub> 1/2 H<sub>2</sub>O)를 사용하였으며 그 물리적 성질은 Table 6과 같다

Table 6 Physical properties of gypsum

Setting Time(min-sec)			Wet Strength(kg/cm <sup>2</sup> )		Specific Gravity (20°C)
Initial set	Apparent F.nal set	Final Set	Compressive Strength	Tensile Strength	
15-16	16-18	30-00	130	18.5	2.75

(5) 알루미늄분말 및 사용 섬유

① 알루미늄분말은 독일 E사 제품의 ALC용 알루미늄분말을 사용하였고, ② 사용 섬유는 국내 KOSKA 제품의 PAN계 탄소섬유 및 일본 A사제품의 내알카리성 유리섬유(L<sub>GF</sub>=13mm)와 미국 F사 제품의 폴리프로피렌섬유(L<sub>PF</sub>=13mm) 그리고 일본 K사 제품의 비니론 섬유(L<sub>VF</sub>=12mm)를 사용하였으며 또한, 이들 섬유의 오토클래브 양생시

의 열수알카리 조건하에서의 열화시험결과에 따라 성능변화가 거의없는 PAN계 탄소섬유 및 내알카리성 유리섬유를 시험용 공시체 제작에 사용하였다. 이들 사용섬유의 물리적 성질은 Table 7과 같다.

Table 7 Physical properties of fibers

Type of Fibers	Average Diameter ( $\mu$ m)	Average Length (mm)	Specific Gravity (20°C)	Young's Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )
CF	6.8	6	1.78	23,000	350
GF	14.1	10	2.60	5,900	250
PF	88.0	13	0.91	357	70
VF	14.0	12	1.30	3,700	150

2.2 배합 및 실험방법

2.2.1 배합 및 양생방법

경량 섬유보강 플라이애쉬 규산칼슘계 시멘트 복합체의 제조를 위한 배합에는 시험배합을 통하여 Table 8과 같이 하였으며, 물 고형분비는 0.66 Wt.%로 하고, 배합 종류별로 탄소섬유, 유리섬유를 동 복합체의 발포가 곤란하지 않을 정도로 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 Wt.%를 혼입하여 믹싱하였으며 발포용 알루미늄분말은 총고형분에 대해 0.07 Wt.%를 사용하였다. 또한, 플라이애쉬(FA)와 실리카흄(SF)은 1:1의 비율로 혼합하여 사용하였다.

Table 8 Mix proportions of lightweight fiber reinforced calcium silicates - cement composites

Mix Series	Mix Proportions (Wt.%)					Fiber(CF, GF) F/M* (Wt.%)	Water W/M* (Wt.%)
	Silica (FA+SF)	Lime	Cement	Gypsum			
A	62	-	17	18	3	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	66
B	57	5	17	18	3		
C	52	10	17	18	3		
D	42	20	17	18	3		

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

믹싱방법은 섬유를 매트릭스내에서 랜덤분산시키기 위하여 용량 30l의 섬유분산용 일본 C 사 제

폼의 Omni-Mixer를 사용하였으며, 믹싱시간은 Dry Blend로 3분(시멘트, 플라이애쉬 및 실리카 흙, 생석회, 규사분말), Primary Blend로 2분(25℃의 증류수 첨가), Secondary Blend로 2~3분간 섬유를 투입하여 2분간 믹싱한 다음 기포제를 첨가하여 1분간 믹싱한 후 몰드에 슬러리 상태로 타설하였고, 실온에서 5시간 방치하여 발포가 종결된 후 항온 항습기에서 5시간 1차양생(50℃, 80% R.H.) 후 오토클래브 양생(최고온도 180℃, 10kg/cm<sup>2</sup>의 기압하에서 5시간 양생)을 실시하였으며, 실온조건의 습도 50~70%의 통풍상태에서 함수율이 10% 이하로 저하할때 까지 방치(약 1주일)한 다음 각종 시험을 행하였다.

### 2.2.2 시험방법

먼저 보강용 섬유의 열수알카리 분위기에서의 열화현상을 조사하기 위하여 사용섬유 종류별로 수산화칼슘 포화용액(20℃, 용해도는 약 0.138/100g) 600ml를 넣은 일본 M 사의 오토클래브 용기내에 섬유를 10g 투입하여 교반한 다음 180℃ 10기압에서 5시간 방치한 후 냉수(약 5℃의 증류수)에 충분히 씻어 수산화칼슘을 제거하고 반응 후의 잔분중량 및 형상변화를 관찰하였다.

압축강도 및 절건비중 시험은 KS F 2459 및 2701에 준하여 10cm×10cm×10cm 육면체 공시체를 제조하여 70℃에서 함수율이 10±2%가 되는 표준상태로 건조시켜 용량 25t의 Automatic Computer Controlled UTM을 사용하여 수직으로 매 초 1kg/cm<sup>2</sup>의 하중을 가하여 압축강도를 측정하였고, 압축탄성계수 측정은 KS F 2438에 준하여 배합종류별로 Φ10cm×20cm 원통형 공시체를 제조하여 공시체측면에 길이 68mm의 와이어 스트레인게이지를 부착하여 UCAM에 연결 중변형율을 측정하였고, 탄성계수는 최대응력의 40% 응력과 변형율의 할선 탄성계수로 구하였다. 또한, 비중은 공시체를 절건상태로 건조하여 절건중량(g)/체적(cm<sup>3</sup>)으로 구하였으며, 인장강도시험은 Φ10cm×20cm의 원통형 공시체를 제조하여 KS F 2423에 준하여 행하였다.

휨강도 시험용 공시체의 크기는 7×7×20cm, 순지간 18cm로 하여 JCI SF-4(섬유보강 콘크리

트의 휨강도 및 휨인성 시험방법)에 준하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 지점은 공시체길이 방향으로 회전 가능한 상·하 롤러가 있는 것을 사용하고, 처짐측정장치는 공시체 중앙부에 알루미늄봉과 pin, 그리고 변형측정용 선형변위변환기를 고정하고, 앵글상 절편은 고강력 집착제로 공시체에 부착하여 사용하였다. 재하는 일본 S사 제품의 Automatic Computer Controlled Universal Testing Machine(용량 25t)을 사용하여 변위속도 0.05mm/min로 중앙집중 재하방식으로 시험을 행하였고, 이때의 하중-처짐곡선은 X-Y 레코더에 의하여 그렸으며, 또한 이때의 휨인성값은 JCI 재하방법<sup>(23)</sup>에 의하여 구하였다.

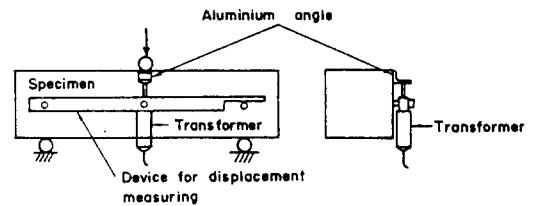


Fig. 1 Apparatus set-up for measuring displacement

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 섬유의 열수 알카리에 의한 열화

열수 알카리에 대한 오토클래브양생 후의 섬유의 잔분중량 측정결과 및 형상변화는 Table 9 및 Photo. 1에 나타낸바와 같다.

Table 9. Residue weight of fiber after autoclave

Type of Fibers	Residue Weight(%)	Fiber Shape after Autoclave
CF	102.6	CF keeps its original form
GF	109.8	GF keeps its original form
PF	104.0	PF masses into a lump
VF	39.0	VF changes into yellow powder and smells bad

Table 9를 고찰하여 보면, PAN계 탄소섬유는 형상 및 중량이 오토클래브 후에도 변함이 없음을

나타내고 내알카리성 유리섬유는 수산화칼슘과 수화반응에 의해 규산칼슘 화합물을 생성함에 따라 잔분중량이 약 10% 증대하고 오토클래브 후의 형상은 거의 원형 그대로 유지되는 경향을 나타내어 탄소섬유와 내알카리성 유리섬유는 보강섬유로서 충분히 사용할 수 있는 것으로 판단되었다. 한편, 폴리프로피렌섬유의 경우는 잔분중량이 104%로 알카리용액에 대한 용해는 거의 없는 상태이나 용해에 의하여 섬유의 형상이 모두 괴상으로 되었고, 비니론 섬유는 잔분중량이 39.0%로 현저히 감소되고 섬유는 악취를 내며 황색분말로 변하여 부적합한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 보강섬유로서 PAN계 탄소섬유 및 내알카리성 유리섬유를 보강재로 사용하였다.

### 3.2 절건비중

경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 절건비중의 측정결과는 Table 10에 나타낸바와 같다. 이들을 고찰하여 보면, 플라이애쉬와 실리카흙의 혼입율을 5, 10, 20 Wt.% 증가시킴에 따라 절건비중은 평균 3.8%, 8.4%, 23.4%의 증가경향을 나타내었고, 플라이애쉬와 실리카흙의 혼입율 5, 10 Wt.%의 경우 절건비중은 0.51~0.55 정도로 KS 2701 규격( $0.45 < \bar{x} < 0.55$ )에 적합함을 알수있고 혼입율이 20 Wt.%의 경우 절건비중은 0.60~0.65 정도의 다소 높은 경향을 나타내었다. 한편, 오토클래브의 양생온도를 140℃, 160℃, 180℃, 200℃로 변화시키고 기타조건은 동일하게 한 경우 섬유를 보강하지 않은 경량 규산칼슘계 시멘트복합체의 절건비중은 각각 0.53, 0.52, 0.50, 0.50으로 180℃ 이상 200℃에서는 절건비중의 변화가 거의 나타나지 않았다. 또한 보강섬유의 종류에 따른 영향은 탄소섬유가 유리섬유에 비하여 전반적으로 절건비중이 근소한 경량화 경향을 보였으며, 보강섬유(CF, GF)의 혼입율이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 탄소섬유 및 내알카리성 유리섬유를 보강할 경우 KS 규격에 적합한 경량성을 확보하기 위해서는 플라이애쉬와 실리카흙의 혼입율을 10 Wt.% 까지 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

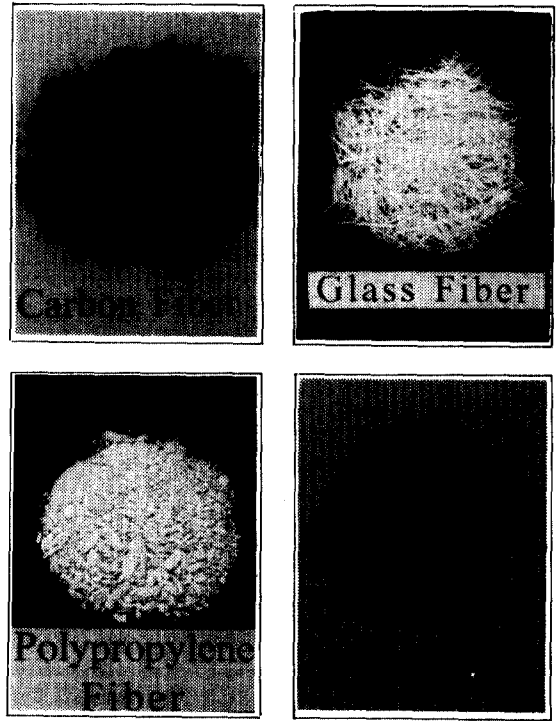


Photo. 1 Fiber shape after autoclave curing of alkali-heating Water Condition

### 3.3 압축강도 및 압축탄성계수

본 시험에 사용된 규산칼슘계 시멘트복합체의 오토클래브 양생시간에 따른 압축강도의 측정에는 Fig. 2에 나타낸 바와 같고, 이를 고찰하여 보면, 오토클래브 양생시간의 증대에 따라 양생시간 4시간까지는 비교적 급격한 압축강도의 증가현상을 나타내었고 양생시간이 5시간 및 6시간으로 증대함에 따라 압축강도의 증가는 둔화되는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 경량규산칼슘계 시멘트복합체의 오토클래브 양생중의 수열반응에 의하여 강도발현에 중요한 역할을 하고 Tobermorite의 생성과 단열성능이 우수한 중공구조 형태의 Xonolite등의 생성 등 조직구조가 치밀하게 변화하면서 강도발현이 이루어지기 때문으로 판단된다.<sup>(4,5)</sup>

경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 배합종류별 압축강도 및 압축탄성계수의 측정결과

Table 10 Test results of fiber reinforced calcium silicates · cement composites

Mix series	Mix No.	FA+SF (Wt.%)	Fibers (Wt.%)	Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Compressive Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Bending Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Compressive Modulus of Elasticity (×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	
A	1	0	0	0.50	36.2	6.68	7.70	1.87	
	2		0	0.51	36.5	6.81	7.85	2.01	
B	3		CF 0.5	0.51	37.0	7.24	7.95	1.93	
	4		· 1.0	0.52	37.8	7.75	8.42	1.90	
	5		· 1.5	0.51	39.0	8.09	9.01	1.89	
	6	5	· 2.0	0.52	39.0	8.46	9.64	1.88	
	7		GF 0.5	0.52	36.7	7.16	7.89	1.98	
	8		· 1.0	0.53	37.5	7.65	8.05	1.96	
	9		· 1.5	0.52	38.6	8.02	8.16	1.90	
	10		· 2.0	0.53	38.5	8.30	8.70	1.88	
	C	11		0	0.54	37.0	7.09	7.97	2.20
		12		CF 0.5	0.53	37.2	7.50	8.35	2.17
13			· 1.0	0.54	38.3	8.29	8.96	2.08	
14			· 1.5	0.54	40.2	8.84	9.80	2.06	
15		10	· 2.0	0.55	40.6	9.26	10.28	2.03	
16			GF 0.5	0.54	37.4	7.35	8.01	2.18	
17			· 1.0	0.55	38.0	7.96	8.52	2.15	
18			· 1.5	0.54	39.5	8.24	9.13	2.08	
19			· 2.0	0.55	40.1	8.59	9.76	2.04	
D	20		0	0.60	37.9	7.85	8.36	2.39	
	21		CF 0.5	0.60	38.4	8.06	8.60	2.36	
	22		· 1.0	0.62	40.6	8.57	9.02	2.20	
	23		· 1.5	0.61	41.3	9.20	10.30	2.15	
	24	20	· 2.0	0.62	41.7	9.78	10.48	2.12	
	25		GF 0.5	0.62	38.2	7.93	8.40	2.37	
	26		· 1.0	0.62	39.7	8.27	8.67	2.35	
	27		· 1.5	0.63	40.8	8.75	9.35	2.19	
	28		· 2.0	0.65	41.0	9.34	9.92	2.13	

는 Table 10과 Fig. 3 및 4에 나타낸 바와 같고, 이들을 고찰하여 보면, 압축강도는 플라이애쉬와 실리카흙을 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 실리카흙 혼입율을 5, 10, 20 Wt.% 증가시킴에 따라 압축강도는 평균 4.5, 6.9, 10.4%의 증가경향을 나타내었으며, 본 실험결과에서 압축강도 시험결과는 모두 KS F 2701 규격(30kg/cm<sup>2</sup>)을 상회하는 것으로 나타났다. 한편, 오토클래브 양생온도에 따른 압축강도는 섬유를 혼입하지 않은 경량 규산칼슘계 시멘트복합체의 압축강도는 양생온도가 140℃, 180℃, 200℃의 경우 각각 29.7, 33.4, 36.2, 36.1kg/cm<sup>2</sup>를 나타내어 양생온

도 180℃까지는 온도의 증가에 따른 강도증가현상이 뚜렷하였으나, 180℃ 이상 200℃의 경우 거의 증가현상이 나타나지 않고, 드물게 미세균열현상이 나타나 오토클래브 양생온도는 180℃ 정도가 적합한 것으로 판단된다.

또한, 보강섬유의 종류 및 혼입율에 따른 압축강도에 미치는 영향은 탄소섬유혼입의 경우가 유리섬유혼입의 경우보다 또한, 혼입율 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었고, 반면에 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 압축탄성계수는 전반적으로 보강섬유(CF,GF)의 혼입율이 증가함에 따라 다소 저하하였고, 탄소섬유보강의 경우

경량 시멘트복합체의 탄성계수 저하를 보고한 박(25)의 결과와 일치하는 경향을 나타내었다.

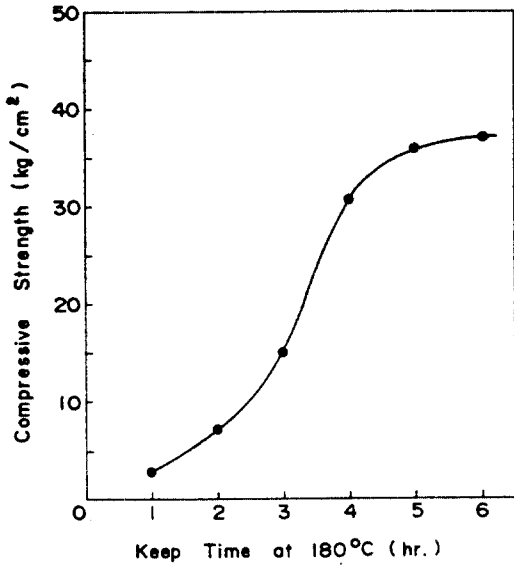


Fig. 2 Relationship between the autoclave curing time and compressive strength for Mix No.1

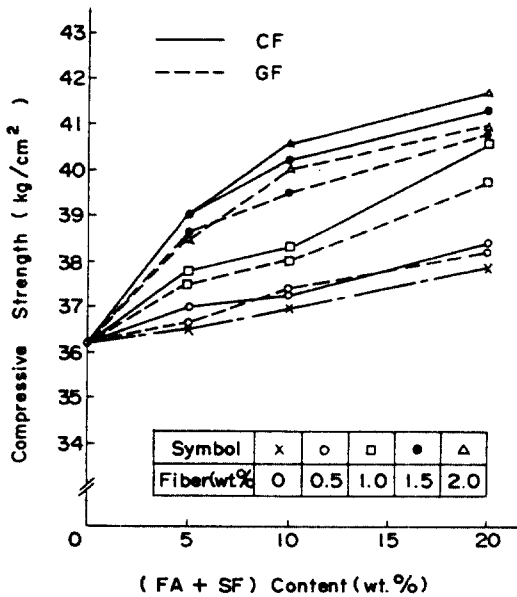


Fig. 3 Relationship between the FA & SF content and compressive strength

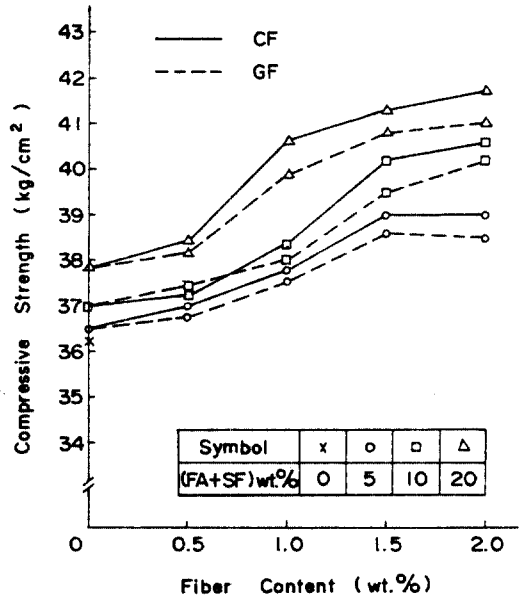


Fig. 4 Relationship between the fiber content and compressive strength

### 3.4 인장강도

경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 인장강도 시험결과는 Table 9와 Fig. 5 및 6에 나타난 바와 같다. 이들을 고찰하여 보면, 인장강도는 플라이애쉬와 실리카흄을 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율을 5, 10, 20 Wt.%로 증가시키에 따라 평균 2.0, 7.2, 14.5%가 증가되었으며, 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 탄소섬유 및 유리섬유보강의 경우 섬유혼입율을 1.0~2.0 Wt.% 혼입함에 의하여 10~26.5% 정도의 현저한 인장강도 증가경향을 나타내었다 또한, 탄소섬유보강의 경우가 유리섬유보강의 경우에 비하여 높은 인장강도를 나타내었으며, 이러한 경향은 탄소섬유의 경우 평균입경 및 길이는 6.8 $\mu$ m 및 6.0mm로 내알칼리성 유리섬유의 14.1 $\mu$ m 및 10.0mm에 비하여 작아 그 비표면적이 크고 섬유의 분산성이 양호함에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 탄소섬유와 유리섬유의 보강 및 플라이애쉬와 실리카흄 혼입이 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 인장강도에 미치는 영향을 통

계분석 처리한 결과는 Table 11에 나타낸 바와 같이, 탄소섬유 및 내알카리성 유리섬유의 보강은 유의수준 1%에서도 유의하게 나타내어 인장강도 증진에 대단히 효과적임을 알 수 있고, 플라이애쉬와 실리카흄 혼입의 경우도 유의수준 5%에서 유의하게 나타나 효과적인 것으로 판단된다.

### 3.5 휨강도특성

섬유보강이 시멘트콘크리트의 휨강도, 인성 및 변형성능의 개선에 크게 유효함은 많은 연구자들에 의하여 확인된바 있다.<sup>(24)</sup> 본 연구에서, 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 배합종류별 휨강도 측정결과는 Table 9와 Fig. 7 및 8에 나타낸 바와 같고, 이를 고찰하여 보면 휨강도는 플라이애쉬와 실리카흄을 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율이 5, 10, 20 Wt. % 로 증가함에 따라 평균 1.9, 8.2, 11.6%가 증가되었으며, 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유를 1.0~2.0 Wt.% 혼입함에 의하여 탄소섬유보강의 경우는 9.2~25.7%, 유리섬유보강의 경우는 4.4~17.3%의 휨강도 증가경향을 나

Table 11 Statistically analysis results for tensile strength of CF and GF reinforced calcium silicate cement composites

(a) Analysis of Variance of Tensile Strength by CF and GF Contents

Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio	F Probability
CF & GF Contents	8	11.8717	1.4840	6.3823	0.0004**
Error	19	4.4177	0.2325		
Total	27	16.2894			

Note : \* F Prob. < 0.05, \*\* F Prob. < 0.01

(b) Analysis of Variance of Tensile Strength by FA and SF Contents

Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio	F Probability
FA & SF Contents	3	5.9331	1.9777	4.5832	0.0113*
Error	24	10.3563	0.4315		
Total	27	16.2894			

Note : \* F Prob. < 0.05

Table 12 Statistically analysis results for flexural strength of CF and GF reinforced calcium silicate cement composites

(a) Analysis of Variance of Flexural Strength by CF and GF Contents

Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio	F Probability
FA & SF Contents	8	14.5057	1.8132	8.7519	0.0001**
Error	19	3.9364	0.2072		
Total	27	18.4421			

Note : \* F Prob. < 0.05, \*\* F Prob. < 0.01

(b) Analysis of Variance of Flexural Strength by FA and SF Contents

Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Ratio	F Probability
FA & SF Contents	3	4.5361	1.5120	2.6096	0.0748
Error	24	13.9060	0.5794		
Total	27	18.4421			

Note : F Prob. > 0.05

타내었고, 탄소섬유보강의 경우가 유리섬유보강의 경우보다 높은 휨강도 증가경향을 나타내었다. 한편, 탄소섬유와 유리섬유의 보강 및 플라이애쉬와 실리카흄 혼입이 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 휨강도에 미치는 영향을 통계분석 처리한 결과는 Table 12에 나타낸 바와 같고, 이를 고찰하여 보면, 섬유의 보강은 유의수준 1%에서도 유의하게 나타나 복합체의 휨강도 증진에 매우 효과적인 것으로 판단되나, 유의수준 5%에서 볼때 플라이애쉬와 실리카흄 혼입은 섬유혼입률 증가의 경우에 비하여 복합체의 휨강도 증진에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



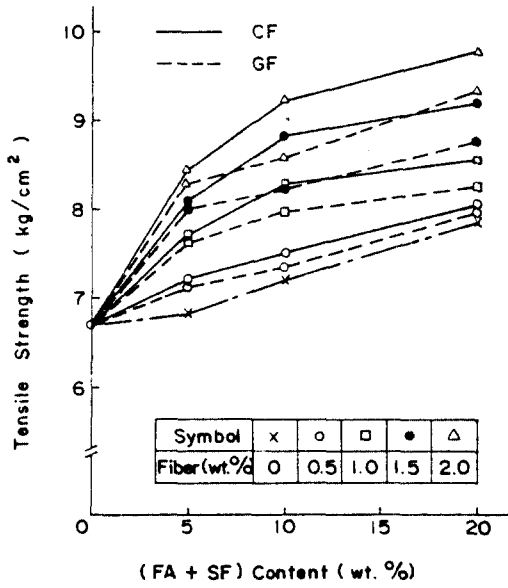


Fig. 5 Relationship between the FA & SF content and tensile strength

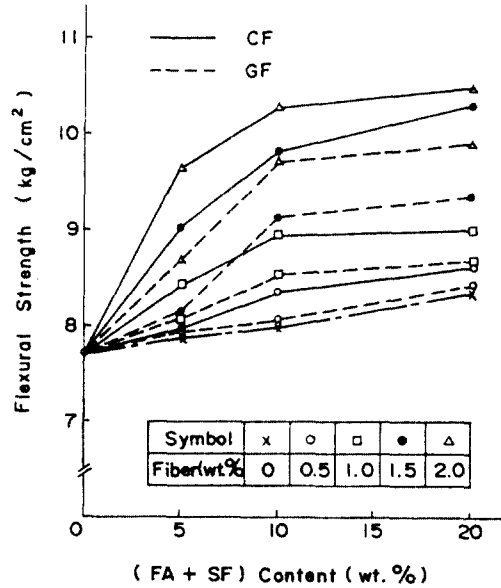


Fig. 7 Relationship between the FA & SF content and flexural strength

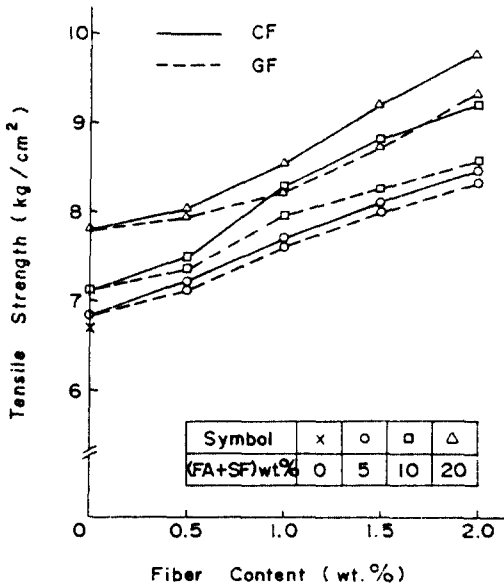


Fig. 6 Relationship between the fiber content and tensile strength

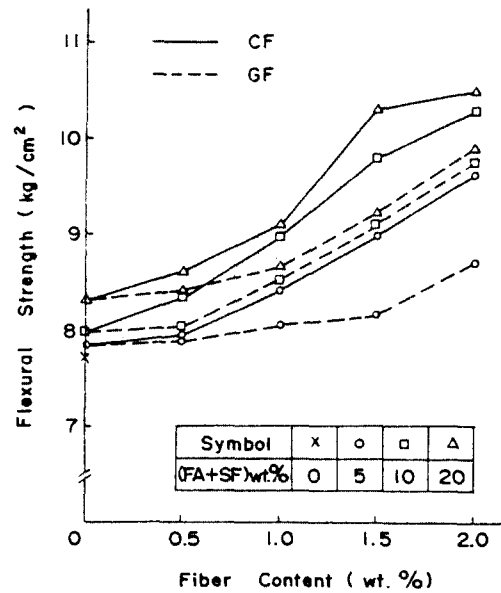


Fig. 8 Relationship between the content and flexural strength

### 3.6 하중-처짐변형능

섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 배합종류별 하중-처짐량 측정결과는 Fig. 9, 10 및 11에 나타난 바와 같다. 이들을 고찰하여 보면, 전반적으로 최대하중까지의 거동은 섬유(CF, GF)혼입에 관계없이 유사하게 거의 직선적으로 급격히 증가하는 경향을 나타내었으나, 최대하중 이후의 거동은 섬유혼입율이 증대함에 따라 현저한 비선형을 나타내고 처짐변형능 및 휨인성은 현저히 증대하는 경향을 나타내었다. 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 휨인성을 평가한 결과는 Table 13에 나타난 바와 같이, 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유혼입율이 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 Wt.%로 증대함에 따라 유리섬유의 경우 평균 3.5, 5.3, 8.1, 9.5배로 휨인성이 증대하고 탄소섬유의 경우 평균 5.4, 7.2, 9.4, 10.8배의 현저한 휨인성 증가 경향을 나타내었다. 이러한 시험결과는 탄소섬유보강이 시멘트복합체의 인성 및 변형성능 개선에 크

Table 13 Evaluation for fracture toughness of fiber reinforced calcium silicate · cement composites  
(Unit : kg · mm)

Fibers(Wt.%) FA+SF(Wt.%)	0	0.5		1.0		1.5		2.0	
		CF	GF	CF	GF	CF	GF	CF	GF
0	3.78	-	-	-	-	-	-	-	-
5	3.81	21.11	12.06	26.65	18.64	34.40	27.93	42.67	32.01
10	3.83	21.66	14.22	29.86	20.65	37.43	33.26	44.37	39.17
20	4.32	21.78	15.49	30.71	24.31	40.32	36.29	47.22	42.31

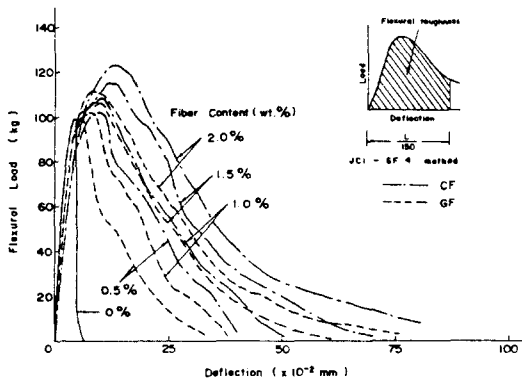


Fig. 9 Flexural load-deflection curves for mix Series B

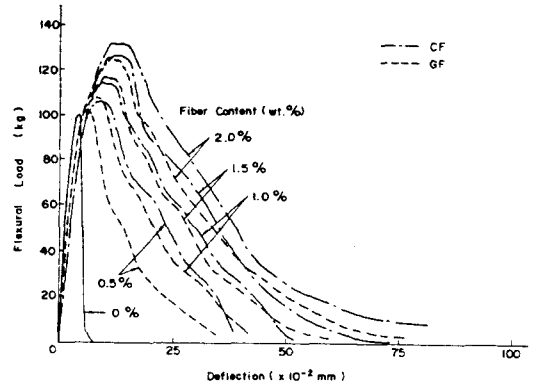


Fig. 10 Flexural load-deflection curves for mix Series C

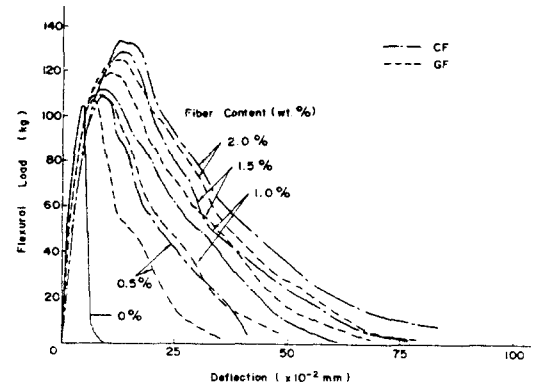


Fig. 11 Flexural load-deflection curves for mix Series D

게 유효함을 보고한 박<sup>(18,26)</sup>의 결과와도 잘 일치하였으며, 이러한 현상은 오토클레브양생의 경우 매트릭스 자체가 고강도화됨과 함께 섬유와 매트릭스의 부착력이 현저히 증대하여 섬유의 매트릭스로부터의 인발이 감소하기 때문으로 판단된다<sup>(27)</sup>. 또한 섬유의 종류에 따른 휨인성은 전반적으로 탄소섬유보강의 경우가 유리섬유보강의 경우에 비하여 다소 높은 경향을 나타내었다.

### 4. 결 론

경량 섬유보강 플라이애쉬와 실리카흙 혼입 규산칼슘계 시멘트복합체의 제조 응용을 위한 물리적·역학적특성에 관한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 열수 알칼리에 대한 오토클래브 양생후의 섬유질의 잔분중량 측정 및 형상변화를 관찰한 결과, 폴리프로피렌 섬유는 알칼리용액에 대한 용해는 거의 없으나 용해되어 괴상으로 되었고 비니론 섬유는 잔분중량이 39.0%로 현저히 감소하고 약취를 내는 황색분말로 변화했으나 PAN계 탄소섬유는 형상 및 중량이 변화를 일으키지 않았고 내알칼리성 유리섬유는 잔분중량이 다소 증대하였으나 거의 원형을 유지하는 경향을 나타내어 탄소섬유 및 내알칼리성 유리섬유는 보강용 섬유로 충분히 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

2) 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 절건비중은 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율이 증가함에 따라 다소 증가하였고, 플라이애쉬와 실리카 혼입율이 5, 10 Wt.%의 경우 0.51~0.55 정도로 KS 규격에 적합하였으나, 20 Wt.%의 경우에는 0.60~0.65 정도의 다소 높은 값을 나타내었다. 또한, 탄소섬유를 보강한 경우가 유리섬유를 보강한 경우에 비하여 다소 경량화 경향을 나타내었고, 섬유혼입율이 증가함에 따라서는 절건비중이 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

3) 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 압축강도 및 압축탄성계수는 플라이애쉬와 실리카흄을 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율이 증가함에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었고 압축강도 시험결과는 모두 KS 규격(30kg/cm<sup>2</sup>) 이상이었다. 또한, 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유혼입율의 증가에 따라 동복합체의 압축강도는 약간 증가하였으나, 압축탄성계수는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다.

4) 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 인장강도는 플라이애쉬와 실리카흄을 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율이 증가함에 따라 현저히 증가하고, 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 섬유혼입율이 증가함에 따라 탄소섬유 및 유리섬유 혼입의 경우 현저한 인장강도 증가경향을 나타내었고, 탄소섬유보강의 경우가 유리섬유보강의 경우에 비하여 다소 높게 나타났다.

5) 경량 섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의

휨강도는 플라이애쉬와 실리카흄을 혼입하지 않은 경우에 비하여 플라이애쉬와 실리카흄 혼입율이 증가함에 따라 현저히 증가하였고, 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 탄소섬유 및 유리섬유보강의 경우 섬유혼입율이 증가함에 따라 현저한 휨강도 증가경향을 나타내었으며, 유의수준 1%에서도 유의하게 나타나 휨강도 증진에 대단히 효과적인 것으로 판단된다.

6) 탄소섬유 및 유리섬유보강 규산칼슘계 시멘트복합체의 하중-처짐량 시험결과, 전반적으로 최대하중까지의 거동은 섬유혼입에 관계없이 유사하게 거의 직선적으로 급격히 증가하는 경향을 나타내었으나, 최대하중 이후의 거동은 섬유혼입율이 증대함에 따라 현저한 비선형을 나타내었다. 휨인성은 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 탄소섬유 및 유리섬유보강의 경우 섬유혼입율이 1.5, 2.0 Wt.% 혼입한 경우 약 8.1~10.8배의 현저한 휨인성 증가경향을 나타내었으며, 이들 섬유보강이 동복합체의 휨인성향상에 매우 유효한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본연구는 한국학술진흥재단의 1993년도 자유공모과제 연구비지원에 의하여 수행된 연구의 일부로 동재단과 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 左右田孝男, "氣泡コンクリト製品", 오토클레브處理建設材料, 窯業協會, pp.159, 1974
2. H.F.W.Taylor and T.Mitsude, "Influence of Alumium on the Conversion of Calcium Silcate Hydrate Gels into 11Å Tobermorite at 120 °C", Cement and Concrete, pp.203-209, 1975
3. H.F.W.Taylor, "The Chemistry of Cements", Academic Press, London and New York, pp. 169, 1964
4. 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

5. 光田武, “オートクレ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
6. 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
7. 光田武, “建材システムへの利用, 硅酸カルシウム水化物の利用”, 大河出版, pp.208, 1986
8. 崎山正人, 光田武, “Tobermoriteの生成におよぼすせっこう添加の影響”, セメント技術年報, 31, pp.46, 1977
9. 近藤連一, “オートクレブ處理材料における原料の反應性”, オートクレブ處理建設材料, 窯業協會, pp.1, 1974
10. 近藤連一, 淺賀喜與志, 大門正機, “エ-ライト 石英水熱反應における石英の粒徑が微構造組織と強度に與える影響”, セメント技術年報, Vol.34, pp.67, 1980
11. 鈴木一孝, 淺川邦治, 土田幸宏, 伊藤祐敏, 福尾券一, “成因の異なる石英の石灰との水熱反應性”, 窯業協會誌, 85. 9, pp.21, 1977
12. 鈴木一孝, 淺川邦治, 加藤雄三, 池上哲夫, “けい酸カルシウムの水熱合成におけるケイ石の影響”, セメント技術年報, 28, pp.352, 1974
13. P.S.Laod, “Calcium Silicate as High Temperature Insulation Material”, Chemical Engineering World, Vol.7, No.1, pp.65-66, 1972
14. Y.Fujiki, T.Mitsubishi and Y.Suzuki, “Hydrothermal Growth and Etching of ZrO<sub>2</sub> Crystals”, J. Am. Ceram. Soc., Vol.55, No.4, pp.223-224, 1972
15. P.Bettermann and F.Liebase, “The Transformation of Amorphous Silicates Crystalline Silica under Hydrothermal Conditions”, Contrib. Mineral. Petrol., Vol.53, pp.25-36, 1975
16. 노재성, 홍성수, 조현영, “일반산업폐기물의 지역연계에 의한 재활용방안”, 지역개발논총, 충남대학교 지역개발연구소, Vol.3, pp.1-16, 1992
17. Seung Bum Park, “Engineering Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites”, Cement and Concrete Research, Vol.21, No.4, pp.589-600, 1991
18. Seung Bum Park, “Mechanical Properties of CFRC Polymer Impregnated Cement Composites”, Cement and Concrete Composites, Vol. 15, No.2, pp.153-163, 1993
19. 서치호, “경량콘크리트의 성상에 관한 연구”, 한양대학교 박사학위 논문, 1986
20. 한국건설기술연구원, “ALC성능평가 및 활용연구”, 1993. 6
21. 대한건축학회, “동부아파트 ALC벽체 평가 조사연구 보고서”, 1993. 10
22. 대한건축학회, “일산 라이프아파트 ALC벽체 평가 조사연구 보고서”, 1993. 10
23. JCI-SF4, 纖維補強콘크리트의 curve 강도及び曲げタフネス試驗方法, 纖維補強콘크리트의試驗方法に關する規準, 日本콘크리트工學協會, pp.11-17, 1984
24. ACI Committe 544, “State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete”, J. of the ACI, pp.729-744, 1973
25. 朴承範 외, 산업폐기물을 이용한 고성능복합체의 개발 및 응용, 한국콘크리트학회지, Vol.3, No.3, pp.101-109, 1991
26. 박승범, 건재용 경량 CF보강 시리카분말, 플라이애쉬, 시리카흙 시멘트복합체의 제조방법, 발명특허 058695호, 특허청장, 1993. 1
27. 朴承範, 炭素纖維補強 시멘트複合體의 工學的特性에 關한 實驗的研究, 한국콘크리트학회지, Vol.1, No.1, pp.95-104, 1989

(접수일자 : 1994. 6. 22)