

실리카흙 및 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Mechanical Properties of Silica Fume
and Fly Ash · Cement Composites

박승범* 윤의식**

Park, Seung Bum Yoon, Eui Sik

요 약

본 연구는 산업부산물인 플라이애쉬 및 실리카흙을 이용한 고성능 · 고품질의 건재의 제조 및 응용을 위하여 보강재로서 PAN계 및 Pitch계 탄소섬유를 사용하여 건재용 탄소섬유보강 실리카흙 · 시멘트 복합체 및 플라이애쉬 · 시멘트 복합체를 제조하여 배합조건별 동복합체의 물리적 역학적 특성에 관한 연구를 수행하였다.

시험결과, 탄소섬유보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨강도, 휨인성 및 휨변형 특성은 탄소섬유 혼입율증대에 수반하여 현저히 증가하는 경향을 나타내었고, 또 이들 값은 PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 높게 나타났다. 한편, 플라이애쉬 · 시멘트 복합체는 플라이애쉬 대체율의 증가에 따라 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 증가하였으나, 압축 · 휨강도 및 겉보기 비중은 저하하였으며 축진양생한 경우가 습윤양생한 경우에 비하여 우수한 압축강도 및 휨강도를 나타내었다. 또한, 기존 ALC의 대체를 위한 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체를 개발하였고, 그 최적배합조건을 제시하였다.

Abstract

The results of an experimental study on the manufacture and the mechanical properties of carbon fiber reinforced silica fume · cement composites and light weight fly ash · cement composites are presented in this paper.

As the test results show, the flexural strength, fracture toughness and ductility of CF reinforced silica fume · cement composites were remarkably increased by the increase of carbon fiber contents. And the workability of the fly ash · cement composites were improved, but the compressive and flexural strength and bulk specific gravity of them are decreased by increasing the ratio of fly ash to cement. And the compressive and flexural strength of the fly ash · cement composites by cured under the hot water were improved than those by moisture cured. Also, the manufacturing process technology of lightweight fly ash · cement composites in replacement of

* 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 충남대학교 대학원 박사과정 수료

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 1995년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

general autoclaved lightweight concrete was developed and its optimum mix proportions were proposed.

Keywords : silica fume, fly ash, carbon fiber, compressive strength, flexural strength, bulk specific gravity, fracture toughness, ductility

1. 서 론

각종 건설구조물의 대형화 및 다양화와 함께 그 요구성능도 다양화, 고도화 됨에 따라 선진국수준의 경량 고강도의 건설용 재료 및 부재의 수요도 급신장하는 추세에 있으며, 각종 구조물의 경량 고강도화와 품질의 고도화에 수반하여 최근 고성능·고품질의 건설용 섬유보강 시멘트 복합체의 개발 및 실용화가 크게 주목되고 있다. 특히 섬유상의 복합강화소재 중 탄소섬유는 강섬유, 유리섬유 및 각종 합성섬유에 비하여 역학적 특성, 내열성, 화학적 저항성이 월등히 우수하여 시멘트 매트릭스의 보강용 섬유로서 국내·외의 많은 주목을 받으면서 경량·고강도, 고내구성인면서 신뢰성이 높은 탄소섬유보강 시멘트 복합체는 첨단 건설용 신소재로서의 연구개발 및 용도전개가 활발히 이루어지고 있다^(1~7).

또한 우리나라에서는 현재 화력발전소에서 연간 약 250만톤의 석탄회 및 플라이애쉬가 부산되고 있으나 대부분 막대한 경비를 들여 회사장에 폐기되고 있고, 앞으로 이런 산업부산물은 더욱 증대할 것으로 예상되어 국가의 에너지 절약 및 경제·사회적인 측면에서 많은 문제를 야기하고 있는 실정이다. 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 이미 오래전부터 플라이애쉬가 우수한 시멘트 혼화제로써의 실용화 및 활용연구가 수행된 바 있고^(8~13), 우리나라에서도 관련 연구기관^(14, 15) 및 문^(16, 17), 박^(18~19), 김⁽²⁰⁾, 오⁽²¹⁾ 등의 연구진들에 의하여 콘크리트 및 건설용 재료로서의 활용을 위한 기초적 연구가 수행된 바 있으나, 선진국에 비하면 아직 미진한 실정으로서 산업부산물의 선진국 수준으로의 용도개발 및 활용이 시급히 요망되고 있다.

따라서 본 연구에서는 산업부산물인 실리카흄 및 플라이애쉬를 이용한 고성능·고품질의 건재의 제조·개발을 위하여 보강재로서 PAN계 및 Pitch계 탄소섬유(단섬유) 및 실리카흄을 사용한 탄소섬유보강 실리카흄·시멘트 복합체를 제조하여 역학적 특성에 관한 기초적 실험 연구를 행하였으며, 또한 플라이애쉬·시멘트 복합체를 제조하여 물리적·역학적 특성을 검토하였고, 이로 부터 플라이애쉬를 다량 이용하기 위한 최적배합을 도출하여 기포제 및 펄라이트를 첨가한 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체의 제조방법과 물리적·역학적 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

(1) 시멘트

시멘트는 국내 S사 제품의 조강 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 품질은 Table 1과 같다.

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

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	lg.loss (%)	
19.2	5.9	2.8	61.7	3.6	4.2	1.37	
Specific Gravity	Blaine's (cm ² /g)	Setting Time Initial	Final	Comp. Strength(kg/cm ²) 1 ds 3 ds 7 ds 28 ds			
3.14	4,500	3:30	5:20	197	338	373	448

(2) 플라이애쉬

플라이애쉬는 보령 화력발전소에서 부산된 유연탄 플라이애쉬를 사용하였고, 그 화학조성 및 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Chemical compositions and physical properties of fly ash

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Ig.loss (%)
65.30	25.50	4.25	1.20	0.98	0.21	1.03	3.63
Specific Gravity (20℃)		Blaine's (cm ² /g)		Particle size (mm)			
2.14		3.124		<4.2×10 ⁻²			

(3) 실리카흙

실리카흙은 남아프리카 Anglo Alpha Co. 제품의 초미분말의 제품을 사용하였으며, 그 화학조성 및 물리적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical compositions and physical properties of silica fume

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	C (%)
92.0	1.68	2.51	0.56	0.33	0.33	0.31
Specific Gravity (20℃)		Blaine's (m ² /g)		Particle size (μ)		
2.21		26.32		1.36		

(4) 탄소섬유

탄소섬유는 국내 KOSKA 제품의 PAN계 carbon fiber(이하 CF) 및 일본 K사 제품의 Pitch계 CF 단섬유를 사용하였으며, 그 물성은 Table 4와 같다.

(5) 기포제 및 펄라이트

경량 플라이애쉬·시멘트 복합체 제조용으로

Table 4 Physical properties of carbon fiber

Type of Fibers	Average Diameter (μm)	Average Length (mm)	Specific Gravity (20℃)	Young's Modulus (×10 ⁴ kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)
PAN-CF	6.8	10	1.78	23.0	35,000
Pitch-CF	14.5	10	1.63	3.8	7,800

서, 기포제는 일본 N사 제품의 고급 알콜 규산 에스테르계 기포제를 사용하였으며, 펄라이트는 국내 S사 제품의 비중 0.34, 입경 1.2~5.0mm (평균 2.2mm)인 펄라이트를 사용하였다.

2.2 배합 및 시험방법

(1) 배합 및 믹싱

배합은 복합체 제조시 재료가 분리하지 않고 적당한 워커빌리티를 확보하도록 시험배합을 통하여 믹싱방법과 배합조건을 선정하였으며, 탄소섬유 보강 실리카흙·시멘트 복합체의 배합은 Table 5와 같이 하였고, 플라이애쉬·시멘트 복합체의 배합은 Table 6, 7과 같이 하였다.

한편, 믹싱은 섬유를 매트릭스내에 랜덤 균등분산시키기 위하여 용량 30ℓ의 섬유분산용 고성능 Omni-Mixer(일본 C사 제품)을 사용하였으며, 믹싱방법 및 믹싱시간은 ① 탄소섬유보강 실리카흙·시멘트 복합체의 경우 Dry Blend(silica fume, cement)로 2~3분, Primary Blend(Add water, superplasticizer)로 3분, Secondary Blend(Add fiber)로 3~4분으로 하여 평균 10분간 혼합하였고, ② 플라이애쉬·시멘트 복합체의 경우는 플라이애쉬와 시멘트를 2분간 혼합한 후 물을 첨가하

Table 5 Mix proportion of CF reinforced silica fume-cement composites

SF/C (%)	W/C (%)	SP (wt.%)	CF (vol.%)	Mix Proportion(kg/m ³)					Remarks
				C	SF	W	SP	CF	
30	40	5	0	1170	351	468	58.5	-	-
			1	1158	347	463	57.9	16.3	Pitch
				1158	347	463	57.9	17.8	PAN
			2	1146	344	459	57.3	32.6	Pitch
				1146	344	459	57.3	35.6	PAN
			3	1135	340	454	56.7	48.9	Pitch
				1135	340	454	56.7	53.4	PAN
			4	1123	337	449	56.2	65.2	Pitch
				1123	337	449	56.2	71.2	PAN
			5	1111	333	445	55.6	81.5	Pitch
				1111	333	445	55.6	89.0	PAN

Table 6 Mix proportions of fly ash · cement composites

Cement : FA (by wt.%)	W/(FA+C) (%)	Mix Proportion(kg/m ³)			Flow No.
		Cement	Fly Ash	Water	
100 : 0	28.0	1671	0	468	176
90 : 10	28.4	1457	162	460	179
80 : 20	30.0	1233	308	463	180
70 : 30	30.9	1041	446	460	178
60 : 40	31.9	861	574	458	180
50 : 50	33.2	690	690	458	177
40 : 60	34.4	532	797	458	181
30 : 70	36.3	382	891	462	179

여 3분간 믹싱을 실시하였으며, ③ 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 믹싱은 Primary Blend(water, foaming agent)로 1분, Secondary Blend(Add perlite)로 2분, Third Blend(Add fly ash, cement)로 2~3분으로 하였다.

2) 공시체의 제조 및 시험방법

CF보강 실리카흙 · 시멘트 복합체 및 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 플로우 시험은 KSL 5105에 준하여 행하였고, 압축강도 시험은 KSL 5105에 준하여 5.08×5.08×5.08cm의 입방공시체를 제작하여 행하였으며, 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 겔보기 비중시험은 KSF 2459에 준하여 20±3℃의 수중양생 후 재령 28일에 공시체를 절건상태로 건조하여 데시케이터에서 실온이 될 때까지 냉각시킨 중량 \bar{W}_0 (g)을 측정하여 [겔보기 비중 = \bar{W}_0 (g) / 체적(cm³)]으로 구하였다.

한편, CF보강 실리카흙 · 복합체의 휨강도 시험은 JIS R 5201에 준하여 4×4×16cm의 공시체를 제작하고 순지간 10cm로 하여 일본 S사 제품의 용량 25t의 Automatic Computer Controlled Universal Testing Machine을 사용하여 크로스

헤드 속도 0.5mm/min의 변위제어방식으로 중앙 집중재하방법에 의하여 휨강도 및 휨하중-처짐곡선을 구하였으며, 휨인성은 JCI의 제안방법⁽²²⁾에 의하여 조사하였다. 또한 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 휨강도는 JIS R 5201에 준하여 4×4×16cm의 휨공시체를 제작 · 성형한 후 1일 습윤양생(20±3℃, 80% R.H.) 및 60℃의 온수에 의한 촉진양생을 행하여 공시체를 제조해 위의 방법으로 휨강도 시험을 행하였고, 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 경우에도 4×4×16cm 몰드로 성형하고 오토클래브양생(180±10℃, 10±1kg/cm², 4시간 유지) 및 온수양생(70±10)에 의한 콘크리트 촉진시험 방법에 준해 촉진시험을 실시하여 공시체를 제작하고, 위와 동일한 방법으로 휨강도를 측정하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 역학적 특성

(1) CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨강도 및 휨변형 특성

CF혼입을 증가에 따른 CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨강도 시험결과는 Table 8 및 Fig.1 에 나타낸 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨강도는 섬유혼입을 증가에 수반하여 현저히 증가하는 경향을 나타내었고, 또한 체적에 대한 CF혼입을 1, 2, 3, 4, 5%의 어느 경우에도 PAN계 CF를 보강한 경우가 Pitch계 CF를 보강한 경우에 비하여 약 1.4~1.7배의 월등히 높은 휨강도를 나타내었으며, 이러한 경향은 Table 4에서 보는 바와 같이 고

Table 7 Mix proportions of lightweight fly ash-cement composites

FA : C (by wt.%)	PerliteContent (vol.% of FA + C)	Forming Agent (wt.% of FA + C)	W/(FA+C) (%)	Mix Proportion(kg/m ³)					Flow No.
				Cement	Fly Ash	Water	Perlite	Foaming Agent	
40 : 60	50	0	32.0	676.6	451.1	360.8	72.5	-	176
		0.1	33.5	665.2	443.5	371.4	71.2	1.11	178
		0.3	34.4	658.6	439.1	377.6	70.5	3.29	182
		0.5	35.0	654.3	436.2	381.7	70.1	5.45	181

Table 8 Flexural strength and fracture toughness of CF reinforced silica fume · cement composites

CF Contents (vol.%)	Flexural Strength (kg/cm ²)		Fracture Toughness (kg · mm)	
	PAN-CF	Pitch-CF	PAN-CF	Pitch-CF
0	91	91	15.5	15.5
1	212	135	184.8	48.2
2	279	168	311.3	160.5
3	335	200	454.8	283.2
4	351	242	542.1	401.6
5	367	268	680.5	504.7

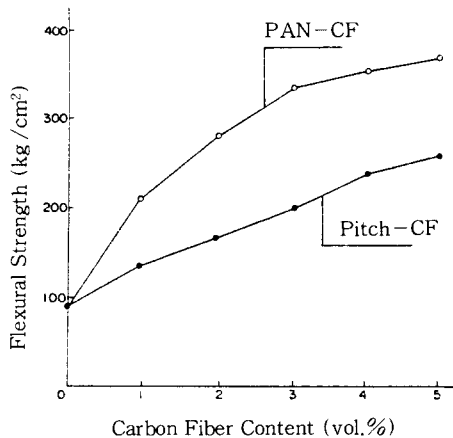


Fig. 1 Relationship between flexural strength and carbon fiber contents of carbon fiber reinforced silica fume · cement composites

탄성 고강도의 PAN계 CF의 평균지름이 6.8 μ m에서 Pitch계 CF의 14.5 μ m에 비하여 작기 때문에 그 비표면적 및 Aspect Ratio(1/d)이 크고 더 많은 수의 섬유혼입에 의한 균열제어 메카니즘으로 휨보강 효과가 증대되기 때문인 것으로 판단된다.

한편, CF보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨강도에 미치는 CF의 종류 및 CF 혼입을 증가에 따른 영향을 통계분석 처리한 결과는 Table 9에 나타낸 바와 같이, 탄소섬유보강 및 CF 혼입을 증가에 따라 모두 유의수준 1%에서도 유의하게 나타나 휨강도 증진에 대단히 효과적인 것으로 판단되며, 휨강도의 증진에는 CF 혼입율과 CF의 종류에 따른 영향이 거의 비슷하게 나타났다.

(2) CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨하중-처짐특성 및 휨응력-인장변형을 관계

Table 9 Analysis of variance for flexural strength of CF reinforced silica fume · cement composites

Source of Variance	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Value	F Probability
CF Contents	5	72043.7500	14408.7500	12.91	0.0070**
Types of CF	1	23496.7500	23496.7500	21.05	0.0059**
Error	5	5581.7500	1116.3500		
Corrected Total	11	101122.2500	101122.2500		

Note : ** : Significance at 1% level,
* : Significance at 5% level

CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨하중-처짐곡선을 측정된 결과는 Fig. 2 및 3과 같다. 이들의 거동을 고찰하여 보면, Pitch계 CF를 혼입한 복합체의 휨하중은 최대값을 나타낸 후에도 급격히 저하하는 경우는 없었으나, PAN계 CF를 혼입한 복합체의 경우에는 최대휨하중을 나타낸 후 거의 직선적으로 저하하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 Table 4에서 보는 바와 같이 PAN계 CF의 영계수가 Pitch계 CF의 영계수에 비하여 약 6배 정도 크고, 섬유직경이 작아 비표면적이 크므로 섬유와 매트릭스 사이의 접촉면적이 증대

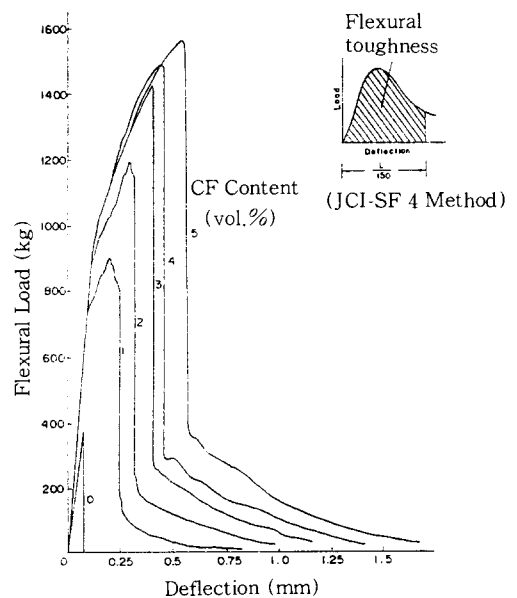


Fig. 2 Relationship between flexural load and deflection of PAN-derived carbon fiber reinforced silica fume · cement composites

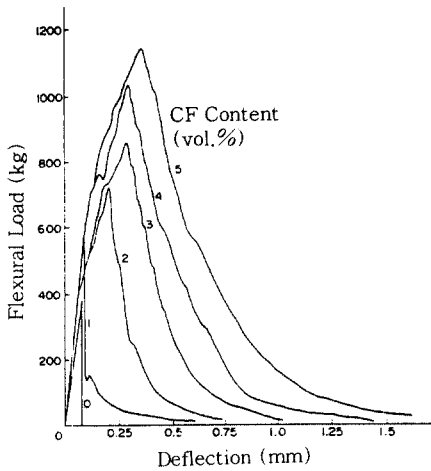


Fig. 3 Relationship between flexural load and deflection of pitch-derived carbon fiber reinforced silica fume · cement composites

되어 부착성이 향상되며, 또한 동일 섬유혼입율에서도 혼입되는 섬유수가 많기 때문에 매트릭스 자체가 고강도화되기 때문인 것으로 판단된다⁽⁷⁾.

또한 CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨변형 특성은 PAN계 CF 및 Pitch계 CF를 혼입한 경우 모두 CF 혼입율의 증가에 수반하여 현저히 개선되었고, CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 CF 혼입율 증가에 따른 휨인성을 평가한 결과는 Table 8에 나타난 바와 같이 CF를 혼입하지 않은 경우에 비하여 체적에 대한 CF 혼입율이 1, 2, 3, 4, 5%로 증가함에 따라 PAN계 및 pitch계 CF를 보강한 경우 11.9, 20.8, 29.2, 34.8, 43.7배 및 3.1, 10.3, 18.2, 25.8, 32.4배의 현저한 휨인성 증가 경향을 나타내었다. 이러한 시험결과는 탄소섬유보강이 시멘트 복합체의 인성 및 변형성능 개선에 크게 유효함을 보고한 박⁽¹⁹⁾의 결과와도 잘 일치하였으며, 이러한 실리카흙의 사용에 의하여 섬유의 분산성이 개선되고, 실리카흙과 시멘트 수화물이 섬유 주위에 치밀한 매트릭스를 형성하여 매트릭스 자체가 보통 시멘트매트릭스에 비하여 월등히 높은 강도를 나타냄으로써 섬유와 매트릭스의 부착력이 현저히 증대하여 섬유가 매트릭스로부터의 인발이 감소하고 파단되기 때문인 것으로 판단된다^(6,7). 섬유의 종류에 따라 휨인성은 전반적으로

로 PAN계 CF를 보강한 경우가 Pitch계 CF를 보강한 경우에 비하여 월등히 높은 경향을 나타내었다.

또한, CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨인성에 미치는 영향을 통계분석 처리한 결과는 Table 10에 나타난 바와 같이, 탄소섬유 보강 및 CF 혼입율 증가에 따라 모두 유의수준 1%에서도 유의하게 나타나 휨인성 증진에 대단히 효과적인 것으로 판단되며, CF 혼입율에 따른 영향이 CF의 종류에 따른 영향보다 더욱 크다는 것을 알 수 있었다.

한편, CF 보강 실리카흙 · 시멘트복합체의 휨응력-인장변형률 곡선은 Fig. 4 및 5에 나타난 바와 같으며, 이를 고찰하여 보면 CF 혼입율의 증가에 수반하여 CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 신장능력은 현저히 증대하는 경향을 나타내었다.

Table 10 Analysis of variance fracture toughness of CF reinforced silica fume · cement composites

Source of Variance	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Value	F Probability
CF Contents	5	477258.3775	95451.6755	44.79	0.0004**
Types of CF	1	50090.8408	50090.8408	23.50	0.0047**
Error	5	10655.4842	2131.0968		
Corrected Total	11	538004.7025			

Note : ** : Significance at 1% level,

* : Significance at 5% level

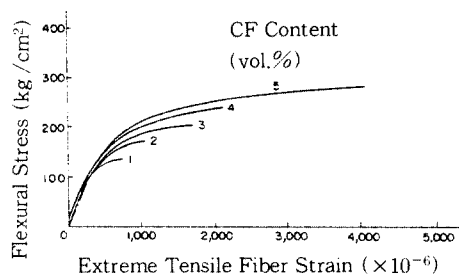


Fig. 4 Relationship between flexural stress and extreme tensile fiber strain of pitch-derived carbon fiber reinforced silica fume · cement composites

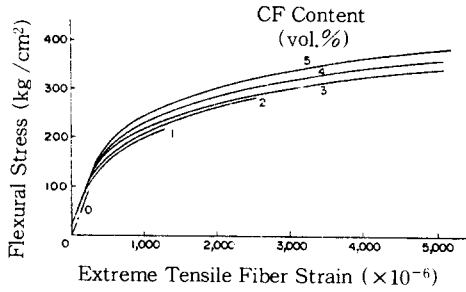


Fig. 5 Relationship between flexural stress and extreme tensile fiber strain of PAN-derived carbon fiber reinforced silica fume · cement composites

3.2 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 물리적 · 역학적 특성

(1) 플라이애쉬 대체율에 따른 위커빌리티 특성
 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 물-(플라이애쉬 + 시멘트)비에 미치는 시멘트에 대한 플라이애쉬 대체율의 영향은 Table 9 및 Fig. 6에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 플로우값을 180 ± 5 로 조정하는 경우 플라이애쉬 대체율의 증가에 수반하여 동복합체의 물-(플라이애쉬 + 시멘트)비는 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 플라이애쉬 대체율에 따른 압축강도 및 휨강도 특성

Table 9 및 Fig. 7, 8은 각각 축진양생(60°C 온

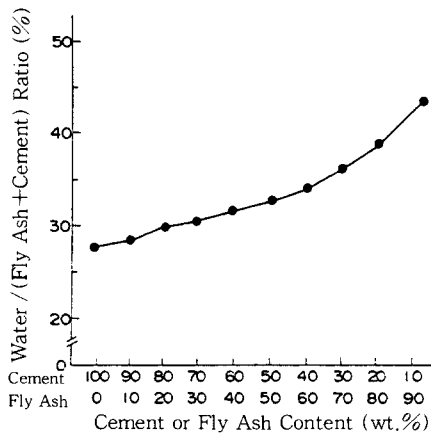


Fig. 6 Relationship between water / (fly ash + cement) ratio and cement (or fly ash) content

수) 및 1일 습윤양생한 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 압축강도 및 휨강도에 미치는 플라이애쉬 대체율의 영향을 나타낸 것이다. 이들을 고찰하여 보면, 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 압축강도 및 휨강도는 양생방법에 관계없이 플라이애쉬 대체율이 증가함에 따라 20~30 wt.%까지는 플라이애쉬를 사용하지 않은 경우에 비하여 거의 비슷한 값을 나타내거나 저하하고, 특히 플라이애쉬 대체율 40 wt.% 이상의 경우에는 현저히 저하하는 경향을 나타내었으며, 이러한 경향은 국내의 여러 연구기관^(14, 15) 및 연구자⁽²¹⁾의 보고와도 잘 일치하

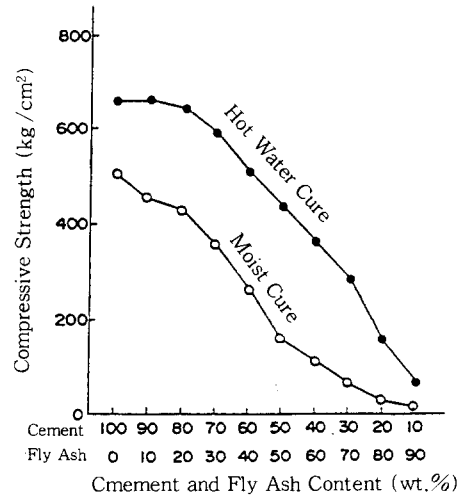


Fig. 7 Relationship between compressive strength and cement (or fly ash) content

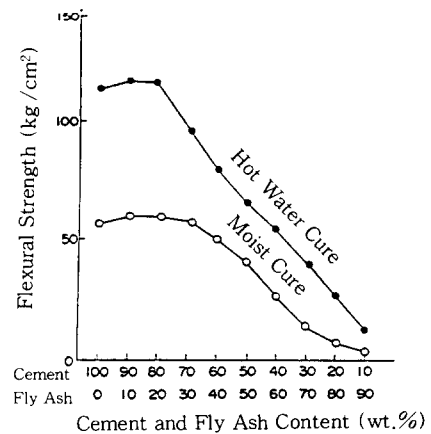


Fig. 8 Relationship between flexural strength and cement (or fly ash) content

고 있다. 또한 1일 습윤양생한 동복합체의 경우에 비하여 축진양생을 한 복합체의 경우가 압축강도는 약 1.3~5.3배, 휨강도는 약 1.6~3.7배의 우수한 강도를 나타내었다.

(3) 플라이애쉬 대체율에 따른 겉보기 비중

플라이애쉬·시멘트 복합체의 축진양생 후의 겉보기비중에 미치는 시멘트에 대한 플라이애쉬 대체율의 영향은 Table 9 및 Fig. 9에 나타난 바와 같으며, 이를 고찰하여 보면 플라이애쉬 대체율의 증가에 수반하여 플라이애쉬·시멘트 복합체의 겉보기비중은 현저히 저하하는 경향을 나타내었다. 따라서 플라이애쉬를 다량으로 사용하기 위한 관점에서 높은 압축강도와 휨강도를 나타내고 경

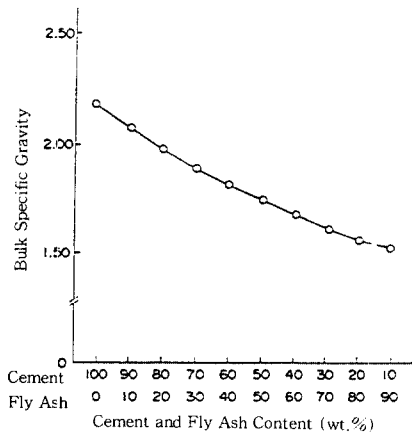


Fig. 9 Relationship between bulk specific gravity and cement (or fly ash) content

Table 11 Physical and mechanical properties of fly ash · cement composites

C : FA (by wt.%)	W/(FA+C) (%)	Bulk Specific Gravity	Comp. Strength (kg/cm ²)		Flexural Strength (kg/cm ²)	
			Hot Water	Moist	Hot Water	Moist
100 : 0	28.0	2.18	660	504	114	57
90 : 10	28.4	2.07	662	457	117	61
80 : 20	30.0	1.98	643	430	116	60
70 : 30	30.9	1.89	589	359	96	58
60 : 40	31.9	1.82	511	263	80	50
50 : 50	33.2	1.75	438	160	66	41
40 : 60	34.4	1.68	363	117	55	26
30 : 70	36.3	1.62	284	64	40	14
20 : 80	38.9	1.57	158	30	26	7
10 : 90	43.8	1.53	63	17	12	4

량화를 목적으로 한 플라이애쉬·시멘트 복합체의 최적 플라이애쉬 대체율은 40~50 wt.% 정도인 것으로 판단된다.

3.3 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체의 제조 및 역학적 특성

(1) 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체의 워커빌리티 특성

시멘트에 대한 플라이애쉬 대체율을 40 wt.%로 한 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체의 펄라이트 혼입을 및 기포제 첨가율과 물-(플라이애쉬+시멘트)비의 관계는 Table 12 및 Fig. 10, 11에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 펄라이트 혼입을

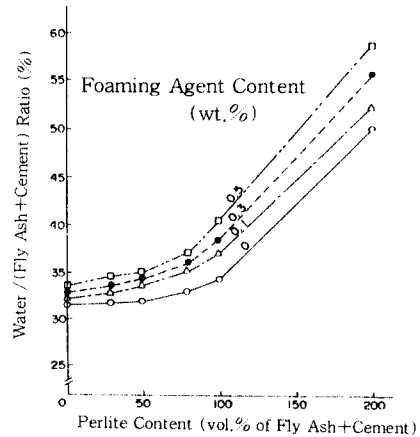


Fig. 10 Relationship between water/ (fly ash+cement) ratio and perlite content

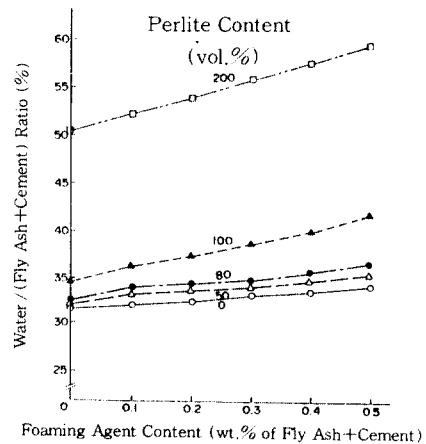


Fig. 11 Relationship between water/ (fly ash+cement) ratio and foaming agent content

Table 12 Physical and mechanical properties of lightweight fly ash · cement composites.

Perlite (vol.% of FA + C)	Foaming Agent (wt.% of FA + C)	W/(FA+C) (%)	Bulk Specific Gravity		Strength (kg/cm ²)			
			Autoclave	Hot Water	Compressive		Flexural	
					Autoclave	Hot Water	Autoclave	Hot Water
0	0	31.9	1.79	1.56	555	516	111	102
	0.1	32.3	1.51	1.47	497	460	94	87
	0.2	32.4	1.37	1.34	432	389	69	64
	0.3	32.6	1.27	0.90	364	338	55	47
	0.4	33.0	1.08	0.83	318	281	43	36
	0.5	33.5	0.92	0.75	277	252	33	29
30	0	32.0	1.57	1.48	438	353	87	80
	0.1	32.9	1.44	1.38	386	293	76	72
	0.2	33.1	1.28	1.21	315	234	51	44
	0.3	33.6	1.01	0.82	268	197	40	33
	0.4	34.1	0.90	0.75	219	142	30	26
	0.5	34.7	0.73	0.64	175	112	23	19
50	0	32.0	1.48	1.41	238	208	75	72
	0.1	33.5	1.37	1.32	207	187	66	60
	0.2	33.9	1.12	1.06	175	150	44	39
	0.3	34.4	0.86	0.77	157	129	33	26
	0.4	34.7	0.76	0.69	115	95	23	20
	0.5	35.0	0.62	0.58	82	59	18	15
80	0	33.0	1.39	1.34	210	190	67	62
	0.1	35.3	1.25	1.20	191	165	56	50
	0.2	35.7	1.01	0.92	153	131	38	32
	0.3	36.1	0.69	0.73	134	112	26	21
	0.4	36.5	0.64	0.61	95	78	17	14
	0.5	37.0	0.55	0.49	60	41	12	9
100	0	34.5	1.35	1.25	185	155	64	56
	0.1	36.3	1.20	1.13	158	128	52	45
	0.2	37.4	0.95	0.85	130	110	36	29
	0.3	38.9	0.63	0.72	110	94	24	19
	0.4	40.1	0.57	0.57	79	60	15	12
	0.5	41.8	0.48	0.45	38	20	9	7
150	0	41.5	1.08	1.03	131	110	51	45
	0.1	44.2	0.92	0.85	112	88	39	33
	0.2	45.6	0.77	0.71	90	76	29	23
	0.3	46.4	0.60	0.54	77	53	18	15
	0.4	47.9	0.48	0.49	50	32	12	9
	0.5	49.4	0.45	0.42	26	17	7	5
200	0	50.4	0.93	0.87	85	76	46	38
	0.1	52.2	0.76	0.72	69	58	33	28
	0.2	53.9	0.67	0.60	53	42	23	19
	0.3	55.8	0.54	0.45	40	27	14	411
	0.4	57.6	0.43	0.43	24	18	10	7
	0.5	59.7	0.40	0.38	17	12	5	4

의 증가에 수반하여 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 현저히 증대하는 경향을 나타내었고, 또한 기포제 첨가율의 증가에 따라라도 동복합체의 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 다소 증대하는 경향을 나타내었다⁽¹⁹⁾.

한편, 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 물(플라이애쉬+시멘트)비에 미치는 펄라이트 및

기포제 혼입율의 영향을 통계분석한 결과, Table 13에 나타낸 바와 같이 펄라이트 혼입 및 기포제 첨가는 모두 유의수준 1%에서 유의하게 나타나 물(플라이애쉬+시멘트)비의 증진에 대단히 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 기포제 첨가율에 의한 영향보다는 펄라이트 혼입율에 의한 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다.

Table 13 Analysis of variance for W/ (FA+C) ratio of lightweight fly ash · cement composites

Source of Variance	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Value	F Probability
Perlite Contents	6	2462.7595	410.4599	311.38	0.0001**
Foaming Agent Cont.	5	115.7905	23.1581	17.57	0.0001**
Error	30	39.5462	1.3182		
Corrected Total	41	2618.0962			

Note** : Significance at 1% level,
 * : Significance at 5% level

(2) 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 겉보기 비중

경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율과 겉보기 비중의 관계는 Table 12 및 Fig. 12에 나타낸 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 양생방법에 관계없이 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 수반하여 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 겉보기 비중은 현저히 저하하는 경향을 나타내었으며, 오토클레브 양생을 한 동복합체의 겉보기비중이 70℃의 온수양생을 한 경우에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다.

한편, 펄라이트 및 기포제의 혼입과 양생방법이 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 겉보기 비중에 미치는 영향을 통계분석 처리한 결과는 Table 14와 같다. 이를 고찰하여 보면, 펄라이트와 기포제의 혼입 및 양생방법에 따라 모두 유의수준 1%에서도 유의하게 나타났으며, 그 중에서도 동복합

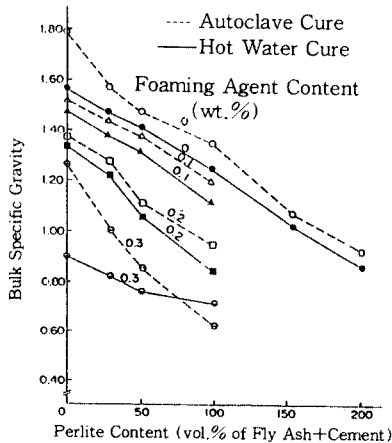


Fig. 12 Relationship between bulk specific gravity and perlite content

Table 14 Analysis of variance for bulk specific gravity of lightweight fly ash · cement composites

Source of Variance	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Value	F Probability
Perlite Contents	6	3.5601	0.5933	112.53	0.0001**
Foaming Agent Cont.	5	6.4346	1.2869	244.06	0.0001**
Curing Method	1	0.1151	0.1151	21.84	0.0001**
Error	71	0.3744	0.0053		
Corrected Total	83	10.4842			

체의 경량화에는 기포제 첨가율이 펄라이트 혼입율과 양생방법의 차이에 의한 영향보다 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 휨강도 특성

플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율과 휨강도의 관계는 Table 12 및 Fig. 13에 나타낸 바와 같으며, 이를 고찰하여 보면 양생방법에 관계없이 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 휨강도는 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 수반하여 저하하는 경향을 나타내었으며, 양생방법에 따라서는 동복합체의 휨강도는 오토클레브 양생을 한 경우가 70℃의 온수양생을 한 경우에 비하여 약 10~30% 정도 우수한 휨강도를 나타내었다.

또한, 각 인자가 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 휨강도에 미치는 영향을 분산분석한 결과는 Table 15와 같고, 이를 고찰하여 보면 펄라이트 혼입 및 기포제 첨가와 양생방법 모두 유의수준

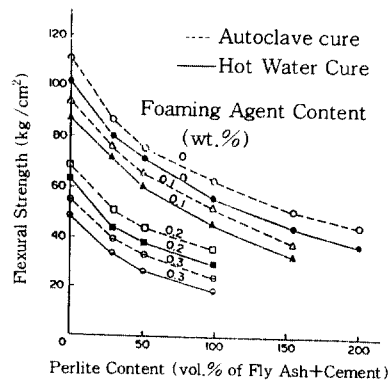


Fig. 13 Relationship between flexural strength and perlite content

Table 15 Analysis of variance for flexural strength of lightweight fly ash · cement composites

Source of Variance	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Value	F Probability
Perlite Contents	6	16611.0714	2768.5119	100.39	0.0001**
Foaming Agent Cont.	5	32437.9524	6487.5905	235.25	0.0001**
Curing Method	1	476.1905	476.1905	17.17	0.0001**
Error	71	1958.0238	27.5778		
Corrected Total	83	51483.2381			

1%에서도 유의하게 나타나 휨강도에 미치는 영향이 대단히 큰 것으로 판단되며, 휨강도 저하는 기포제 첨가율, 펄라이트 혼입율, 양생방법의 차이에 의한 영향순으로 크게 나타났다.

(4) 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 압축강도 특성

경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율과 압축강도와와의 관계는 Table 10 및 Fig. 14에 나타난 바와 같고, 이를 고찰하여 보면 양생방법에 관계없이 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 수반하여 동복합체의 압축강도는 현저히 저하하였으며, 오토클래브 양생을 한 경우가 축진양생을 한 경우에 비하여 높은 강도를 나타내었다. 또한, 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 압축강도에 미치는 각 인자의 영향을 분석한 결과는 Table 16과 같고, 이를 고찰하여 보면 휨강도의 경우와 마찬가지로 각 인자 모두 수준 1%에서도 유의하게 나타났으나, 기포제 첨가율 및 양생방법의 차이에 의한 영향보다는

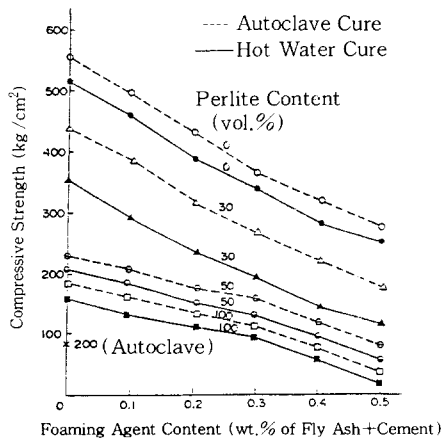


Fig. 14 Relationship between compressive strength and foaming agent content

Table 16 Analysis variance for compressive strength of lightweight fly ash · cement composites

Source of Variance	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F Value	F Probability
Perlite Contents	6	1059782.3333	176630.3889	199.86	0.0001**
Foaming Agent Cont.	5	256938.0595	51387.6119	58.15	0.0001**
Curing Method	1	18571.4405	18571.4405	21.01	0.0001**
Error	71	62748.5833	883.7829		
Corrected Total	83	1398040.4167			

펄라이트 혼입율의 증가에 따른 압축강도의 저하 경향이 큰 것으로 나타났다.

한편, 현재 사용되고 있는 ALC 대체품으로서 본 연구의 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체를 이용하려면 비중 1.5미만, 압축강도 150 kg/cm² 이상이 필요하므로 플라이애쉬를 사용하는 경우 펄라이트 및 기포제의 최적혼입율은 기포제 첨가율을 (플라이애쉬+시멘트)중량의 0, 0.1, 0.2, 0.3%로 하면 각각의 기포제 첨가율에 대하여 펄라이트 혼입율은 (플라이애쉬+시멘트) 체적의 150~200%, 80~100%, 50%, 30% 정도인 것으로 판단된다.

4. 결 론

건재용 CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체 및 경량 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 제조 · 응용을 위하여 동복합체의 물리적 · 역학적 특성에 관한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨강도는 PAN계 및 Pitch계 CF를 혼입한 경우 모두 CF혼입율 증가에 수반하여 현저히 증대하였고, PAN계 CF를 혼입한 경우가 Pitch계 CF를 혼입한 경우에 비하여 약 1.4~1.7배의 높은 휨강도를 나타내었다.

(2) CF 보강 실리카흙 · 시멘트 복합체의 휨변형 특성 및 휨인성은 PAN계 및 Pitch계 CF를 혼입한 경우 모두 CF혼입율 증가에 수반하여 현저히 증대되었으며, 특히 PAN계 CF를 혼입한 경우가 Pitch계 CF를 혼입한 경우에 비하여 휨변형 특성 및 휨인성은 현저히 개선되었다.

(3) 플라이애쉬 · 시멘트 복합체의 제조시 플로우값을 180±5로 조정하는 경우 시멘트에 대한 플

라이애쉬 대체율의 증가에 수반하여 동복합체의 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 현저히 증가하였고, 겔보기비중은 저하하는 경향을 나타내었다.

(4) 플라이애쉬·시멘트 복합체의 압축강도 및 휨강도는 플라이애쉬를 사용하지 않는 경우에 비하여 플라이애쉬 대체율의 증가에 수반하여 다소 저하하였으며, 특히 플라이애쉬 대체율 40wt.% 이상에서는 현저히 저하하는 경향을 나타내었다. 또한 양생방법에 따른 압축강도 및 휨강도는 전반적으로 60℃ 온수에서 촉진양생한 경우가 모두 1일 습윤양생한 경우에 비하여 각각 1.3~5.3배와 1.6~3.7배의 높은 강도를 나타내었다. 따라서 플라이애쉬를 다량 이용하는 관점에서 최적 플라이애쉬 대체율은 약 40~50 wt.% 정도인 것으로 판단된다.

(5) 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체의 물-(플라이애쉬+시멘트)비는 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율의 증대에 수반하여 증대하는 경향을 나타내었고, 겔보기 비중은 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율의 증대에 수반하여 저하하였으며, 오토클레브 양생을 한 경우가 촉진양생한 경우에 비하여 겔보기 비중은 다소 높은 값을 나타내었다.

(6) 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체의 압축강도 및 휨강도는 펄라이트 혼입율 및 기포제 첨가율의 증가에 수반하여 저하하였고, 오토클레브 양생을 한 경우가 촉진양생을 한 경우에 비하여 높은 압축강도와 휨강도를 나타내었으며, 기포제 첨가율 및 양생방법의 차이에 의한 영향보다는 펄라이트 혼입율의 증가에 따라 압축강도 및 휨강도는 더욱 현저하게 저하하였다.

(7) 경량 플라이애쉬·시멘트 복합체를 구조용 ALC 등의 대체품으로 적용하기 위한 펄라이트 및 기포제의 최적 혼입율은 플라이애쉬를 사용하는 경우 기포제 첨가율을 (플라이애쉬+시멘트)중량의 0, 0.1, 0.2, 0.3%로 하면 각각의 기포제 첨가율에 대하여 펄라이트 혼입율은 (플라이애쉬+시멘트) 체적의 150~200%, 80~100%, 50%, 30% 정도가 필요한 것으로 판단된다.

1. Ali, M.A., Majumdar, A.J., and Rayment, D. L., "Carbon Fiber Reinforced Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 2, pp.201~212, 1972
2. Waller, J.A., "Carbon Fiber Cement Composites", Civil Engineering and Public Works Review Vol. 67, No. 789, pp.357~371, 1972
3. Sarker, S. and Baily, M.A., "Structural Properties of Carbon Fibre Reinforced Cement", Fibre-Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Vol. 1, pp.361~371 1975, London
4. Fowler, D.R., "Carbon Fiber Cement", Civil Engineering, No. 817, pp.34~37, 1974
5. Briggs, A., "Carbon Fiber-Reinforced Cement", J. of Materials Science, Vol. 12, No. 2, pp.384~404, 1977
6. 白川潔, 中川憲一, "炭素纖維補強セメントの曲げ強度に及ぼす諸因子", 第4回コンクリート工學年次講演會論文集, pp.153~156, 1982
7. 大浜嘉彦, 天野幹夫, "炭素纖維補強セメントモルタルの基礎性狀", 日本建築學會東北支部研究報告集, No.4, pp.209~212, 1982
8. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete", ACI Committee Report, 1985
9. G.M. Idorn, K.R. Henriksen, "State of the Art for Fly Ash Uses in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.14, NO.4, pp.463~470, 1984
10. E.E.Berry, M.Malhotra, "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review", J.of ACI, 77, NO.1, pp.59~73, 1980
11. 長瀧重義, "石炭灰, 特にフライアッシュの有效利用を中心に, 建設材料に關する研究から新素材へのアプローチ", 情報開發, 東京, pp.37, 1983
12. ASTM Standard Part 14, "Standard Specification for Fly Ash and Raw Calcined Natural-Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete (ASTM C 618-80)", 1980
13. R.E. Davis, R.W. Carlson, J.W.Kelly and Harmer E. Davis, "Properties of Cements and Concrete Containing Fly Ash", J. of ACI, Proc., Vol. 33, No.5, 1993

14. 한국전력공사 기술연구원, "콘크리트 혼화재로서의 석탄회 이용방안 연구", 1989.
15. 산업기지개발공사, "플라이애쉬 콘크리트 연구보고서" 1차 및 2차 보고서, 1984~1985
16. 문한영, 서정우, "플라이애쉬를 혼합한 굳지 않은 콘크리트에 있어서의 유기혼화제의 기능에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, Vol.8, No.2, pp. 117~123, 1988
17. 문한영, 서정우, "콘크리트용 혼화재로서 국산 플라이애쉬의 품질에 관한 실험적 연구", 대한 토목학회 논문집, Vol.7, No.3, pp.213~221, 1987
18. Seung Bum Park, "An Experimental Study on the Development and Application of High Strength Composites Utilizing Waste Products", J. of KSÇM, Vol. 3, No. 1, 1990
19. 박승범, 이보성, 윤익식, "산업폐기물을 이용한 건재용 고성능 복합체의 개발 및 응용", 한국콘크리트학회지, Vol.3, No.3, pp.101~110, 1991
20. 김진근, 박연동, 성근열, "고강도 플라이애쉬 콘크리트의 장기강도 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회지, Vol.3, No.4, pp.5~22, 1991
21. 오병환, 고재균, "플라이애쉬 콘크리트의 강도 및 역학적 특성", 한국콘크리트학회지, Vol.3, No.4, pp.87~96, 1991
22. JCI-SF 4, "纖維補強コンクリートの曲げタフネス試験方法 維補強コンクリートの試験方法に関する規準", 日本コンクリト協會, pp.11~17, 1987
(접수일자 : 1994. 8. 8)