

産業副産物을 活用한 纖維補強 시멘트 複合體의 力學的 特性에 關한 實驗的 研究(I)

An Experimental Study on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Utilizing by-Products (I)

박 승 범* · 윤 의 식** · 조 청 휘***
 Seung Bum, Park Eui Sik, Yoon Chung Hui, Jo

ABSTRACT

In order to discuss the mechanical properties of fiber reinforced composites with fly ash, lime, gypsum and polymer emulsion-Styrene Butadiene Rubber Latex (SBR), experimental studies on FRC were carried out. The kinds of fiber used in FRC are PAN-derived and Pitch-derived carbon fiber, alkali-resistance glass fiber.

As a test results, the flexural strength and toughness of fiber reinforced fly ash · lime · gypsum cement composites are remarkably increased by fiber contents, but compressive strength of the composites are influenced by kinds of fiber more than by fiber contents. Also, addition of a polymer emulsion (SBR) to the composites decreased the bulk specific gravity, but compressive and flexural strengths, toughness of the composites are not influenced by it, are considerably improved by increasing fiber contents.

1. 서 론

최근 각종 건설구조물의 대형화 및 다양화와 함께 그 요구성능도 다양화·고도화됨에 따라 선진국 수준의 경량·고강도의 고성능 건설용 재료 및 부재의 수요도 급신장하는 추세에 있고, 이에 수반하여 특히 고성능·고품질의 건재용 섬유보강 시멘트 복합체의 개발 및 실용화가 크게 주목되고 있다. 또한, 최근 경제적·사회적으로 많은 문제를 야기하고 있는 국내 화력발전소의 석탄회 및 플라이애쉬와 같은 산업부산물은 대부분이 막대한 경비를 들여 회사장에 폐기되고 있는 실정으로서, 이러한 산업부산물을 고성능 경량 고강도 건재의 제조에 다량 이용함은 국가산업발전은 물론 에너지 절약에도 크게 기여할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 산업폐기물인 다량의 플라이애쉬 및 국내 부존 자원이 풍부한 석회, 석고 등을 이용한 고성능·고품질의 건재 제조 및 개발을 위하여 보강재

로서 PAN계 및 Pitch계 탄소섬유와 내알칼리성 유리섬유를 사용하여 경량·고강도이고 내구성, 안정성 등이 우수한 건재용 섬유보강 석탄회·석회·석고 복합체의 제조방법과 그 물리적·역학적 특성을 검토하였다.

2. 시험개요

2.1 사용재료

(1) 시멘트

국내 S사 제품의 조강포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 그 물성은 Table. 1 과 같다

Table. 1 Compositions and Physical Properties of Early Strength Portland Cement

Chemical Composites (%)							Specific Gravity(20°C)	Blaine's Specific Surface Area(cm ² /g)
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	H ₂ O	SO ₃	Ig. loss		
19.2	5.9	2.8	61.7	3.6	4.2	1.37	314	4,500

(2) 플라이애쉬

국내 보령 화력발전소에서 부산된 Fly Ash를 사용하였고, 그 화학성분 및 물리적 성질은 Table. 2와 같다.

* 정회원, 忠南大學校 工科大學 土木科 教授
 ** 정회원, 忠南大學校 大學院 博士課程
 *** 정회원, 忠南大學校 大學院 碩士課程

Table. 2 Chemical Composites and Physical Properties of Fly Ash

Chemical Compositions (%)								
Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Total
2.14	63.50	28.50	4.21	1.20	0.21	1.03	0.20	98.85
Size (mm)	Specific Gravity (20°C)		Water Content (%)	Organic Impurities				
< 4.2×10 ⁻²	2.12		< 0.1	None				

(3) 석회 및 석고

석회는 시판의 소석회(Lime)을 사용하였고, 석고(Gypsum)는 시판의 α형 반수석고(α-CaSO₄ · ½ H₂O)를 사용하였으며, 그 물성은 Table. 3과 같다.

Table. 3 Physical Properties of Gypsum

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

(4) 섬유

탄소섬유는 국내 KOSKA 제품의 PAN계 CF 및 일본 K사 제품의 Pitch계 CF단섬유(L_{CF}=6mm)를 사용하였고, 유리섬유로는 일본 Asahi사 제품의 내알칼리성 유리섬유(L_{CF}=13mm)를 사용하였으며, 그 물성은 Table. 4와 같다.

Table. 4 Physical Properties of Fiber

Type of Fibers	Average Diameter (μm)	Average Length (mm)	Specific Gravity (20°C)	Young's Modulus (×10 ⁻⁵ 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
GF	14.1	13	2.78	7.0	26,000

(5) 폴리머 분산제(Polymer Dispersion)

폴리머 분산제로는 일본 H사 제품의 SBR (Styrene-Butadiene Rubber Latex) 에멀젼(emulsion)을 사용하였으며, 그 품질은 Table. 5와 같다.

Table. 5 Properties of Polymer Dispersions

Type of Polymer Dispersions	Appearance	Specific Gravity (20°C)	PH (20°C)	Viscosity mPa · s (20°C)	Total Solids (%)
SBR	Milky-white, Without Coarse Particles, Coagula and the others	1,020	7.82	147	44.6

2.2 배합 및 시험방법

(1) 배합 및 믹싱

배합은 복합체 제조시 재료가 분리되지 않고 적당한 워커빌리티를 확보하도록 시험배합을 통하여 믹싱방법과 배합조건을 선정하였고, 섬유 보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 배합을 Table. 6과 같이 하였으며, 섬유보강 폴리머혼입 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 배합은 Table. 7과 같이 하였다. 또한, 믹싱은 용량 10l의 고성능 Omni-Mixer를 사용하였고, 비빔시간은 (a)Dry blend(Fly Ash, 석회, 석고):2~3분, (b)Primary blend(Add Water):3분, (c)Secondary blend(Add Fibers):3~4분으로 하여 평균 10분간 혼합하였다.

Table. 6 Mix Proportions of Fiber Reinforced Fly Ash · Lime · Gypsum Composites

Mix Proportion (by wt.)				Fiber Content (vol. %)
Fly Ash	Lime	Gypsum	Water	PAN-CF, Pitch-CF, GF
60	20	13	46	0, 0.5, 1.0, 1.5

Table. 7 Mix Proportions of Fiber Reinforced Polymer · Fly Ash · Lime · Gypsum Composites

Mix Proportion (by wt.)					Fiber Content (vol. %)
Fly Ash	Lime	Gypsum	Water	Polymer (%)	PAN-CF
60	20	13	46	0.5, 10, 15	0, 0.5, 1.0, 1.5
60	20	10	46	0.5, 10, 15	0, 0.5, 1.0, 1.5

(2) 공시체의 제조 및 시험방법

Flow 시험은 KSL 5105에 준하여 행하였고, 압축강도 시험은 KSL 5105에 준하여 5.08×5.08×5.08cm의 입방 공시체를 제작하여 시험조건별로 측정하였다. 또한, 휨시험은 JIS R 5201에 준하여 4×4×16cm의 공시체를 제작하여 일본 S사 제품의 용량 25t의 Computer Controlled Universal Testing Machine을 사용하여 3점 휨하중시험방법에 의해 크로스헤드 속도 0.5mm/min의 변위제어 방식으로 휨강도 및 휨하중-처짐곡선을 측정하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 최적배합 시험결과

Fig. 1은 석고 혼입율을 13%로 일정하게 한 경우의 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 석회 혼입율과 압축 및 휨강도의 관계를 나타낸 것이다. 이를 고찰하면, 석회 혼입율의 증가에도 불구하고 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 휨강도는 다소 증가하였으나 거의 일정하며, Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 압축강도는 증대하고 석회 혼입율의 증가에 따라 석회 혼입율 20 wt.%에서 최대값을 나타내었다. 이러한 현상은 Fly Ash 중의 Al_2O_3 에 대한 석회 혼입율이 적게 되면 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ 가 주성분으로 되기 때문에 강도 발현이 작게 되고, 반대로 Al_2O_3 에 대한 석회 혼입율이 많게 되면 에트링가이트(Ettringite, $3C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$)의 생성에 기여하지 않는 석회가 존재하여 압축강도가 저하하기 때문으로 생각된다. 본 연구결과에서 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 최적배합은 Fly Ash : Lime : Gypsum : Water = 60~70 : 15~25 : 10~15 : 40~48 (wt.%) 정도인 것으로 판단된다.

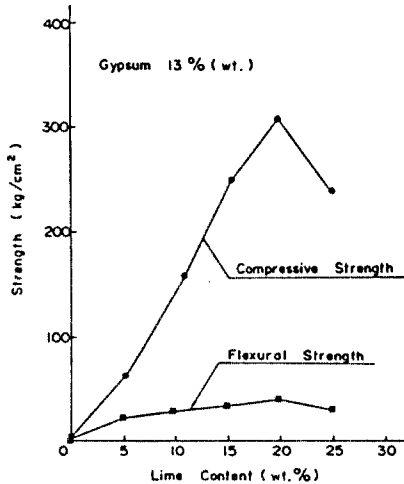


Fig. 1. Relationship between Strength and Lime Content

3.2 섬유보강 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 역학적 특성

(1) 섬유(PAN derived CF, Pitch derived CF 및 GF)보강 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 압축강도 특성

Fig. 2는 PAN계 CF, Pitch계 CF 및 내알칼리성 GF를 보강제로 사용한 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 압축강도와 섬유혼입율과의 관계를 나타낸 것이다. 이를 고찰해 보면, PAN계 CF 및 Pitch계 CF를 보강제로 사용한 Fly Ash · 석회 · 석고 복합체의 압축강도는 일반적으로 섬유종류에 관계없이 섬유혼입율 증대에 따라 저하하였

으며, 섬유혼입율 1.0 vol.%까지는 비교적 완만하게 저하하였으나 1.5 vol.%에서는 급속하게 저하하였다. 또한, 섬유종류에 따라서는 PAN계 CF, Pitch계 CF, 내알칼리성 GF를 사용한 순으로 높은 압축강도를 나타내었다. 이것은 섬유의 비 표면적의 차이에 따른 영향과 함께 섬유혼입율 및 섬유길이의 증가에 따른 언행공기의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.

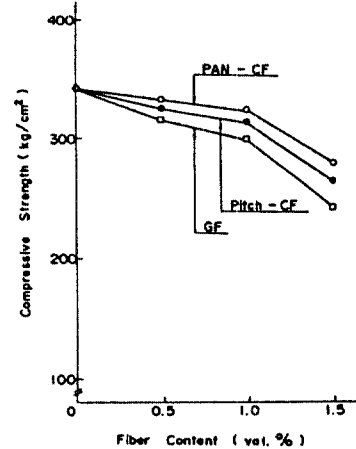


Fig. 2. Relationship between Compressive Strength and Fiber Content

(2) 섬유(PAN derived CF, Pitch derived CF 및 GF)보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨강도 및 하중-처짐특성

Fig. 3 및 Fig. 4, 5, 6은 보강섬유로 PAN계 CF, Pitch계 CF 및 GF를 사용한 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨강도와 섬유혼입율과의 관계 및 휨하중과 처짐과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 일반적으로 섬유혼입율의 증가에 수반하여 섬유보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨강도는 증대하였고, 섬유혼입율 1.5 vol.%에서의 휨강도는 섬유혼입율 0 vol.%의 경우(휨강도 52 kg/cm²)와 비교하여 보면, PAN계 CF의 경우 1.7배(86 kg/cm²), Pitch계 CF 1.3배(69 kg/cm²), GF 1.5배(77 kg/cm²)를 나타내었다. 섬유의 종류에 따라서는 섬유혼입율 1.0 vol.%까지는 내알칼리성 GF를 사용한 경우가 PAN계 CF, Pitch계 CF를 사용한 경우보다 높은 휨강도를 나타내었으며, 1.5 vol.%에서는 PAN계 CF, GF, Pitch계 CF의 순으로 높은 휨강도를 나타내었다. 한편, Fig. 4, 5, 6에서 휨하중-처짐특성을 고찰하여 보면, 전반적으로 섬유혼입율의 증가에 수반하여 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨변형 특성은 현저히 개선되고, 사용섬유의 종류에 관계없이 균열 발생 직후에 있어 섬유보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨하중의 저하는 비교적 경사가 완만하게 나타내었으며, 이러한 경향은 섬유혼입율의 증가에 수반하여 보다

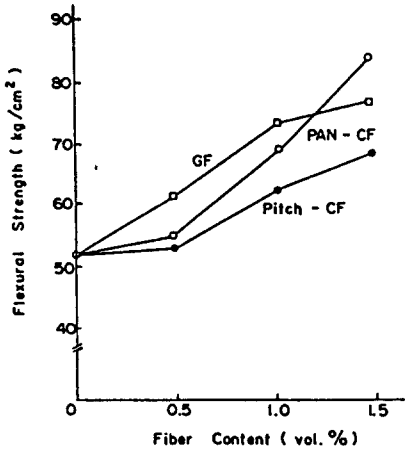


Fig. 3. Relationship between Flexural Strength and Fiber Content

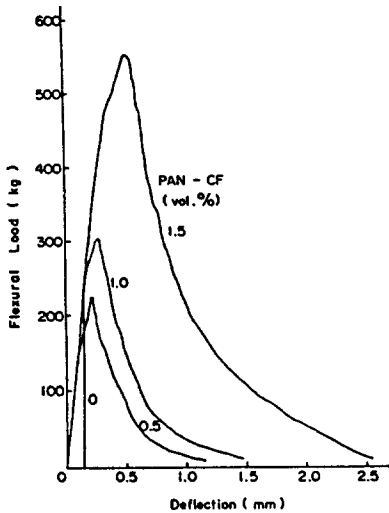


Fig. 4. Relationship between Flexural Load and Deflection for PAN derived CF Reinforced Fly Ash-Lime-Gypsum Composites

현저하였다. 또한, 섬유혼입율의 증가에 수반하여 섬유보강 Fly Ash·Lime·Gypsum 복합체의 휨인성은 일반적으로 증대하였고, 섬유의 종류에 따른 휨강도 및 인성의 차이를 확인할 수 있으며, 이러한 섬유의 종류에 따른 차이는 섬유 자체의 물리적·화학적성질, 매트릭스 내에서의 섬유의 분산정도 및 섬유와 매트릭스간의 부착강도의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

한편, 압축강도와 휨강도간의 섬유혼입율과 강도관계의 차이는 두가지 시험에 있어 공시체의 파괴기구의 차이에 의한 것으로 생각되고, 공시체의 파단면에 대한 고찰로부터 섬유길이의 증가는 공시체중의 연행공기의 증가를 수반하는 경향이 없는 것으로 판단되었으며, 이는 섬유길이가 타섬유보다 긴 GF를 사용한 Fly Ash·Lime·Gypsum 복합체의 최저 압축강도를 나타내게 한 원인으로 판단된다.

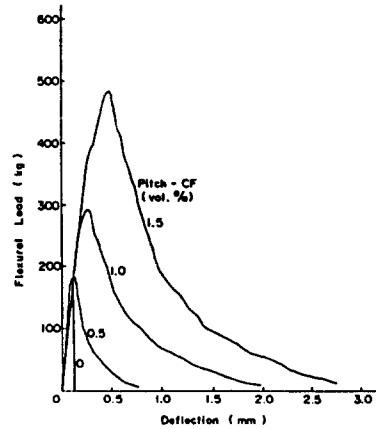


Fig. 5. Relationship between Flexural Load Deflection for Pitch derived CF Reinforced Fly Ash-Lime-Gypsum Composites

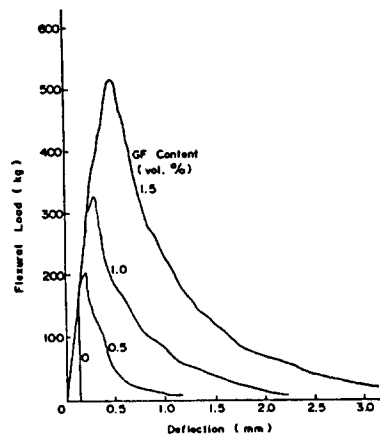


Fig. 6. Relationship between Flexural Load Deflection for Glass Fiber Reinforced Fly Ash-Lime-Gypsum Composites

3.3 탄소섬유보강 폴리머혼입 Fly Ash·Lime·Gypsum 복합체의 역학적 특성

(1) PAN계 CF와 폴리머 분산제로 SBR를 혼입한 탄소섬유보강 Polymer·Fly Ash·Lime·Gypsum 복합체의 Flow값 및 Bulk Specific Gravity를 확인하기 위해 시험배합을 통하여 비교적 배합이 양호한 것으로 판단된 Fly Ash:Lime:Gypsum:Water = 60:20:13:46 및 65:20:10:46의 경우에 대하여 Polymer - (Fly Ash+Lime+Gypsum) 비율을 각각 0%, 5%, 10%, 15%로 하고, 또한 CF 혼입율을 각각 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% (vol.%)로 한 경우에 대한 Flow값 및 Bulk Specific Gravity의 측정결과는 Fig. 7 및 Table. 8에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 섬유혼입율의 증가에 수반하여 복합체의 Flow값은 현저히 저하하는 경향을 나타내었고, 배합에 따라서는 Polymer분산제를 혼입하지 않은 경우에는 Fly Ash:Lim:Gypsum:Water = 65:20:10:46 인 배합이 60:20:13:46의 배합에 비해 섬유혼입

울에 관계없이 Flow값은 높은 값을 나타내었으나, Polymer를 혼입한 경우에는 오히려 60 : 20 : 13 : 46의 배합이 65 : 20 : 10 : 46의 배합에 비해 전반적으로 높은 Flow값을 나타내었으며, 배합에 따라 Polymer 혼입율에 의한 영향은 다소 차이를 나타내었다. 또한, 동 복합체의 Bulk Specific Gravity는 섬유혼입율 증대에 따라 다소 차이가 있으나 큰 영향을 주지 못하며 Polymer 혼입율 증가에 따라 현저히 저하하는 경향을 나타내었다.

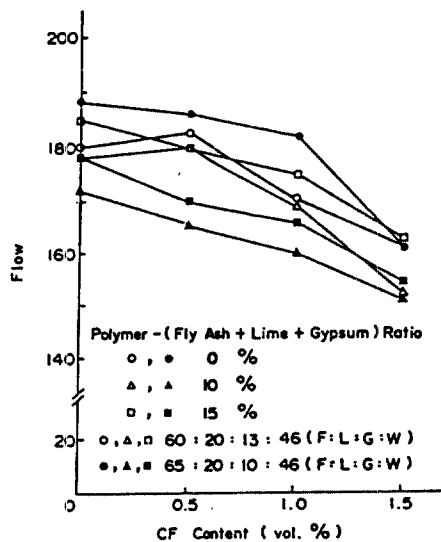


Fig. 7. Relationship between Flow and CF Content

Table. 8 Flow and Bulk Specific Gravity of Fiber Reinforced Polymer · Fly Ash · Lime · Gypsum Composites

Mix No.	Mix Proportion (by wt.) Fly Ash:Lime:Gypsum:Water	Polymer-(Fly Ash + Lime + Gypsum) Ratio (%)	Fiber Content (PAN-CF) (vol.%)	Flow	Bulk Specific Gravity
1	60 : 20 : 13 : 46	0	0	180	1.48
2			0.5	183	1.47
3			1.0	170	1.51
4			1.5	161	1.50
5		5	0	181	1.45
6			0.5	180	1.40
7			1.0	168	1.38
8			1.5	152	1.40
9		10	0	178	1.41
10			0.5	180	1.40
11			1.0	168	1.42
12			1.5	152	1.44
13		15	0	185	1.39
14			0.5	180	1.40
15			1.0	175	1.41
16			1.5	162	1.38
17	65 : 20 : 10 : 46	0	0	188	1.50
18			0.5	186	1.53
19			1.0	182	1.50
20			1.5	161	1.54
21		5	0	170	1.49
22			0.5	167	1.51
23			1.0	162	1.52
24			1.5	150	1.52
25		10	0	172	1.50
26			0.5	165	1.48
27			1.0	160	1.49
28			1.5	151	1.51
29		15	0	178	1.40
30			0.5	170	1.43
31			1.0	166	1.42
32			1.5	154	1.40

(2) PAN계 CF 보강 Polymer 혼입 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 압축강도와 폴리머혼입율과의 관계는 Fig. 8에 나타난 바와 같고, 이를 고찰하여 보면 전반적으로 섬유혼입에도 불구하고 Polymer 혼입율의 증가와 함께 Polymer · Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 압축강도는 저하하는 경향을 나타내었으며, Fly Ash:Lime:Gypsum:Water = 60:20:13:46의 경우의 압축강도가 Fly Ash:Lime:Gypsum:Water = 65:20:10:46의 경우에 비하여 약간 높은 경향을 나타내었다.

한편, CF 보강 Polymer 혼입 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨강도와 CF 혼입율과의 관계는 Fig. 9에 나타난 바와 같고, 하중-처짐관계는 Fig. 10에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, CF 혼입율의 증가에 수반하여 CF 보강 Polymer 혼입 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨강도 및 휨인성은 현저히 증대하나 Polymer 혼입에 의한 휨강도 및 휨인성에 미치는 혼입효과와는 현저하지 못한 것으로 나타났다.

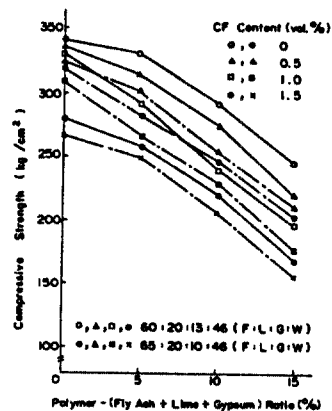


Fig. 8. Relationship between Compressive Strength and Polymer-(Fly Ash + Lime + Gypsum) Ratio

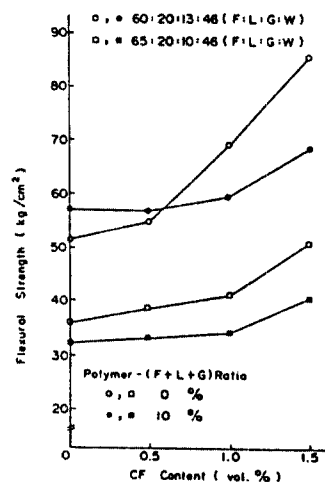


Fig. 9. Relationship between Flexural Strength and CF Content

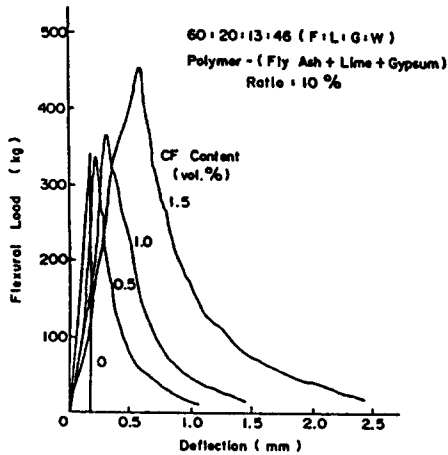


Fig. 10. Relationship between Flexural Load and Deflection

4. 결 론

산업부산물인 Fly Ash 및 국내 부존자원이 풍부한 Lime, Gypsum과 보강섬유로서 PAN계 CF, Pitch계 CF 및 내알칼리성 GF와 폴리머 분산제 등을 이용한 고성능 건재의 개발을 위한 기초적 연구로서 본 실험연구의 중간 결과를 요약하여 보면 다음과 같다.

(1) Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 최적배합 조건은 Fly Ash:Lime:Gypsum:Water = 60~70:15~20:45~48 wt. % 정도로 판단된다.

(2) 섬유보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 변형성능도 섬유혼입율의 증가에 수반하여 크게 개선되고, 일반적으로 섬유혼입율의 증가에 따라 섬유보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 휨강도 및 휨인성은 증대한다.

(3) 섬유보강 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 압축강도는 PAN계 CF 및 Pitch계 CF, 내알칼리성 GF를 사용한 순서로 높은 압축강도를 나타내었다.

(4) PAN계 탄소섬유보강 Polymer 혼입 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체의 Flow값은 섬유혼입율의 증가에 수반하여 감소하는 경향을 나타내었고, 섬유혼입율은 Bulk Specific Gravity에 별 영향을 주지않으나, Polymer 혼입율의 증가에 수반하여 Bulk Specific Gravity는 현저히 저하하는 경향을 나타내었다.

(5) PAN계 탄소섬유보강 Polymer 혼입 Fly Ash · Lime · Gypsum 복합체는 CF 혼입율의 증가에 수반하여 휨강도 및 휨인성은 크게 증대하나, Polymer 혼입에 의한 영향은 별로 크지않은 것으로 판단되며, 이에 관련한 등복합체의 Polymer 함침 등에 의한 성능개선 등에 관한 지속적인 연구 · 고찰이 요망되는 것으로 판단된다.

1. Seung-Bum Park, "Engineering Properties of CFRC with Fly Ash", International J., Cement and Concrete Research, Vol.21, No.1, 1991
2. Seung-Bum Park, Burt I. L., "Mechanical & Physical Properties of CFRC of Lt.Wt.", High Pressure and High Temperatures, London, pp.67-79, 1990
3. Seung-Bum Park, Bo-Sung Rhee, "An Experimental Study on the Development and Application of High Strength Composites Utilizing Industrial Waste Products", J. of KSCM, Vol.3, No.1, pp.23-50, 1990
4. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete", Committee Report, 1985
5. E. E. Berry, M. Malhotra, "Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review", J. of ACI, Vol.77, No.1, pp.59-73, 1980
6. 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, 建設材料に関する研究から新材料へのアプローチ", 情報開発, 東京, pp.37, 1983
7. 石炭技術研究所, "石炭灰の 有效利用技術", 1981
8. Han-Young Moon, Joung-Woo Seo, "A Study on the Mix Proportioning and Strength Properties of Concrete Mixtures Containing Fly Ash", Proc. of KSCE, Vol.8, No.3, pp.43-52, 1988
9. 한국동력자원연구소, "석탄회 의 활용방안연구", 1983. 12
10. 한국전력공사 기술연구원, "콘크리트 혼화제로서의 석탄회 이용방안", 1989. 4
11. Seung-Bum Park, "An Experimental Study on the CF Reinforced Fly Ash-Cement Composites Modified with EVA", Proc. of KCI, Ann. Conf., pp.30-38, May 1990