

## 論文

## 高强度 炭素纖維·시멘트複合體(CFRC)의 開發 및 應用에 關한 實驗的研究(I)

朴承範\* · 李輔成\*\* · 李仁遠\*\*\*

### Experimental Study on the Development and Application of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites of high Strength(I)

Seung-Bum Park\*, Bo-Sung Rhee\*\* and In-Won Lee\*\*\*

#### ABSTRACT

In order to develop carbon fiber reinforced cement composites with the short random carbon fibers, experimental studies of fresh and hardened CFRC were carried out. The types of fiber used are pitch-based carbon fiber and high modulus PAN type carbon fiber. To examine the effects of the types, lengths, constants of CF and matrices, the following two types of CFRC were tested; air cured CFRC and autoclaved CFRC.

According to the test results, it can be concluded that the reinforcement of CF were considerably effective in improving tensile strength, flexural strength and toughness of cement matrices compared to conventional cement mortar.

#### 초 록

고강도·고탄성의 PAN계 탄소섬유와 저탄성의 깃치계 탄소섬유를 시멘트 복합체에 혼입한 CFRC의 제조방법, 유동특성, 기건비중, 양생조건별 압축강도, 인장강도 및 휨강도, 그리고 휨응력-처짐에 관한 역학적 성능을 검토하였다. 시험결과, 탄소섬유보강 시멘트 복합체의 제조에 의하여 기건 비중은 1.0~1.3 정도의 경량이면서 인장 및 휨강도 그리고 휨인성 등 역학적 성능이 매우 우수한 건재용 복합체의 제조가 가능함을 확인하였다.

#### I. 序 論

시멘트계 매트릭스(시멘트 페이스트, 모르타, 콘크리트)를 섬유로 보강함에 의하여 이들 매트릭스의 결점인 취성적 성질을 개선하려는 시도가 오래전부터 행해져 왔으며 강섬유, 석면, 내알칼리성, 유리

섬유, 폴리프로필렌 섬유 등으로 보강한 섬유 콘크리트 및 복합재가 사용되고 있고, 이들의 섬유강화 기구 및 역학적 특성에 대한 많은 연구보고[1-10]가 발표되고 있다. 또한, 탄소섬유의 이용도 1970년대 초부터 M.A. Ali[11], J.A. Waller[12], A. J. Majumdar[13], A.E. Naaman[14], S. Sarker

\* 정회원, 충남대학교 토목공학과

\*\* 정회원, 충남대학교 화학공학과

\*\*\* 정회원, 한국과학기술대학

[15] 등에 의해 고탄성의 PAN 계 섬유를 사용한 탄소섬유 보강 시멘트 복합재(이하 CFRC로 칭함)에 대한 연구가 보고된 바 있고, 1980년대 초부터 S. Akihama[16, 17], Nishioka, K. [18], K. Shirakawa[19, 20] 등에 의해 저탄성의 Pitch 계 섬유를 사용한 CFRC의 연구개발이 시작되어 일본 Kajima 건설회사는 Iraq 바그다드시의 Al Shaheed Monument 건설에 CFRC의 적용(경량 외장판넬 장착면적 10,000m<sup>2</sup>)을 시작으로 Tokyo의 ARK 37층 빌딩에 CFRC를 적용함으로써 4,000t의 철골량 절감을 비롯 다방면으로 용도 전개를 서두르고 있다.

CFRC는 그 물리적·역학적 성능이 우수하여 경량고강도, 내화 및 열안정성, 내구성 그리고 신뢰성을 요하는 건설 및 일반 산업용 재료로서의 개발이 기대된다.

그 용도로는 외장판넬, 커튼월, 후레임 및 영구형틀, 상판시스템, 브이·부교등 해양구조물, 수조 및 농업용 사이로, 경량벽 및 전파흡수벽, 면상발열판, 고강도 흙판 및 제진품, 내열·내화성부재, 활주로 및 포장판 보수용 모르타 및 방폭용 부재등 용도 전개가 매우 다양한 것으로 알려져 있다[20].

또한 CFRC의 건설공사에의 응용효과로 내풍성, 수밀성, 내구성이 양호하고 미관이 좋으며 사-프하면서 스펀더한 구조 부재를 제작할 수 있고 중량의 대폭 경감으로 공기를 크게 단축시킬 수 있는 등 많은 잇점을 가지고 있어 일본, 서독, 미국 등지에서는 CFRC의 건설용 첨단 신소재로서의 개발활용을 서두르고 있다.

우리나라의 경우, 제철화학 등에서 년산 200ton 규모의 탄소섬유의 생산이 시작되었고, 매년 정유공장의 부산물로 10,000 B.P.D.S.의 석유 pitch와 400,000ton의 coaltar pitch가 나오고 있음을 감

안할 때 이런 저렴한 부산물을 이용해 얻어지는 탄소섬유를 사용하여 부가가치가 높은 선진국 수준의 CFRC의 개발응용은 관련산업에의 파급효과는 물론 수입대체 및 에너지 절약에 크게 기여할 것이다.

따라서 본 연구에서는 CFRC의 배합, 제조기술 및 물리적·역학적 성질에 관한 단계적 연구를 수행하는 것으로 먼저 이에 관한 1차 연구결과를 보고한다.

## II. 實驗 概要

### 2-1. 使用 材料

(1) 탄소섬유: 제철화학 제품의 PAN 계 및 Kureha 제품의 pitch 계 단섬유(FL; 10mm)를 사용하였으며, 그 물성은 Table 1과 같다.

(2) 시멘트 및 골재: 시멘트는 H 사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트로 Table 2와 같고, 골재는 S 광업 제품의 규사분말(비중 2.70, 입경 0~80 $\mu$ m)를 사용하였다.

(3) 혼화재: 고유동화제 NP-20, 메칠셀룰로즈(점도; 4,000 cps, 용해성; 열수분산), 소포제(Active Deformer; 30%, 비중; 1.0)를 사용하였다.

### 2-2. 配合 및 實驗方法

(1) 시멘트 매트릭스의 배합은 Table 3과 같이 하였고, 믹싱은 용량 30l의 고성능 Omni-Mixer를 사용하여 섬유의 균등 분산을 도모하였다.

(2) 공시체 성형 및 시험방법: 압축 및 인장 그리고 단위 용적중량 시험은 KSL 5105, 5104, KSF 2409에 준하였고, 휨 강도 시험은 JIS R 5201에 준

Table 1. Properties of carbon fiber

Type of fiber	Fiber diameter (10 <sup>-3</sup> mm)	Specific gravity	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Modulus of elasticity (10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Pitch-based carbon fiber	14.5	1.63	7,800	3.8	2.1
Pan-based carbon fiber	6.8	1.78	35,000	23.0	1.6

Table 2. Properties of normal cement

Specific gravity	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	88 residue	Soundness (%)	Time of setting		Compressive strength		
				Initial (hr.:min)	Final (hr.:min)	3 days	7 days	28 days
3.15	3260	1.8	0.17	3:50	6:30	179	246	332
CaO(%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO(%)	So <sub>2</sub> (%)	Insol.(%)	lg.loss(%)	
61.1	21.2	5.5	3.2	3.1	2.3	0.1	2.1	

Table 3. Mix proportions of cement matrices for CFRC

W/C (%)	S/C	Unit weight (kg/cm <sup>3</sup> )				
		Water	Cement	Silica powder	S.P* or Antifoam**	M.C.***
45	0.25	502	1116	279	11.2*	5.6
55	0.50	502	912	456	9.1*	4.6
110	0.70	653	594	416	5.9**	3.0

\* Superplasticizer  
 \*\* Antifoam  
 \*\*\* Methylene Cellulose

하였으며, 100ton UTM 및 10ton Instron 을 사용하였다. 한편, 휨 강도-처짐 측정용 공시체는 5×0.12×50cm(b×t×L)로 제조하여 사용하였다.

(3) 양생방법 : 기건양생 (23±2°C, RH 60±5%) 및 오토클래브 양생 (최고온도 200±10°C, 11±1 기압에서 5시간)을 행하였다.

### III. 實驗結果에 대한 考察

#### 3-1. 굵지 않은 CFRC 의 物性

PAN 계 및 Pitch 계 섬유 혼입율과의 관계는 그림 1과 같고, Flow 값은 모든 매트릭스가 거의 직선적으로 저하하는 경향을 나타내었다.

PAN 계의 경우 Pitch 계의 경우에 비해 보다 급격히 Flow 값이 저하하는 현상을 나타내었다.

섬유 혼입율과 단위용적 질량과의 관계는 그림 2와 같고, 단위용적 질량은 V<sub>f</sub>=3.0%까지 예측값보다 큰 질량 감소율을 나타내고 그 이상의 혼입율에서는 다소 증가하는 경향을 보였고, PAN 계 섬유를 사용한 경우의 단위용적 질량이 약간 높은 경향을 나타냈다.

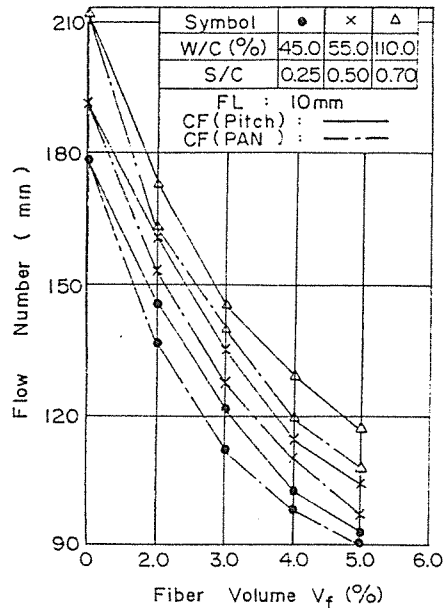


Fig. 1 Relationship between fiber volume and flow

또한 CFRC 의 제조에 있어 탄소섬유는 직경이 매우 미세하여 규사분말 및 규사 2호 이상인 입경의 골재를 사용하면 특히 섬유와의 접착 및 경량화가 어렵고, 기공발생 및 워커빌리티 성능의 저하현상이

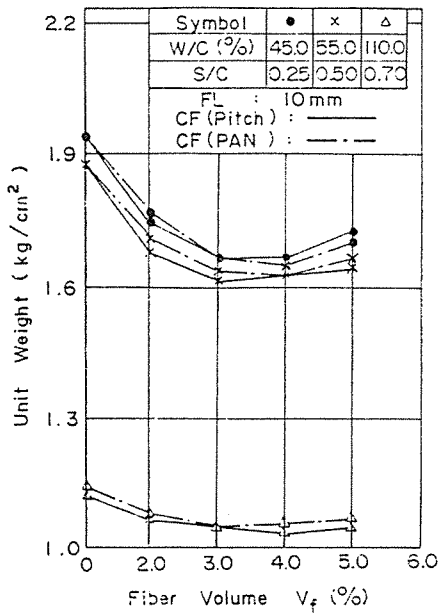


Fig. 2 Relationship between fiber volume and unit weight

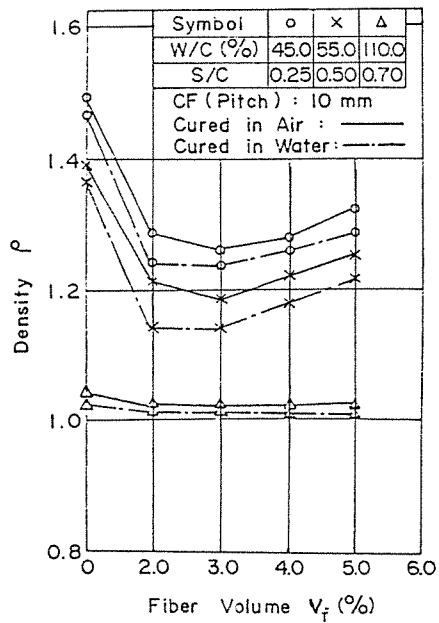


Fig. 3 Relationship between density and fiber volume

매우 현저하여 CFRC의 제조 성형이 매우 곤란함이 확인되었다.

### 3-2. CFRC의 氣乾比重(ρ) 및 壓縮強度

섬유 혼입율에 따른 CFRC의 기건비중은 그림 3과 같고, W/C=45%, S/C=0.25인 경우  $V_f=1.0\sim 5.0\%$ 에서  $\rho=1.23\sim 1.48$ , W/C=55%, S/C=0.50인 경우  $\rho=1.17\sim 1.37$ , W/C=110%, S/C=0.70인 경우  $\rho=1.0$ 으로 되었으며, 오토클래브 양생의 경우 공중양생의 경우보다 다소 높은 경량화 경향을 나타내었다. 섬유 혼입율의 증가에 따른 압축강도는 다소 저하하는 경향을 보여, 이는 기공증대 및 다짐불량에 기인한 것으로, 이를 위하여 폴리머함침 등에 의한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

또한 압축강도는 오토클래브 양생의 경우가 공중양생의 경우보다 평균 9% 정도의 높은 값을 나타내었다.

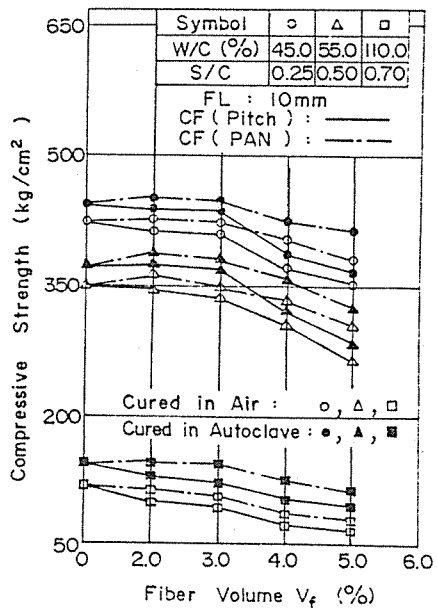


Fig. 4 Relationship between compressive strength and fiber volume

3-3. CFRC의 引張強度 및 變形特性

CF 단섬유 혼입율과 인장강도와의 관계는 그림 5 및 6에 나타낸 바와 같고,  $V_f=3.0\%$ 까지 인장강도는 현저히 증가하여 약 3.0배의 강도 증가율을 보였고, PAN계 섬유 보강의 경우가 Pitch계 섬유 보강의 경우에 비하여, 오토클래브 양생이 공중양생의 경우에 비하여 다소 높은 강도증가 현상을 나타내었으며,  $V_f=2.0\%$ 에서부터는 인장강도의 증가율이 다소 둔화되는 경향을 나타내었다. 또한 각 매트릭스에서 섬유 혼입율의 증가에 따른 인장강도시의 최대 변형율은 급격히 증대하여 Pitch계 CF, FL=10mm,  $V_f=3.0\%$  이상의 경우  $5,000\sim 10,000 \times 10^{-6}$ 의 변형율을 나타내어 매트릭스의 약 14~30배의 변형증가를 나타내었고, 오토클래브 양생의 경우 공중양생에 비하여 다소 낮은 값을 나타내었다.

3-4. CFRC의 휨 強度 및 變形特性

각 매트릭스에 섬유 혼입율  $V_f=2\sim 5\%$ 로 증가하였을 때 휨 강도는  $V_f=4.0\%$ 까지 현저히 증가하여

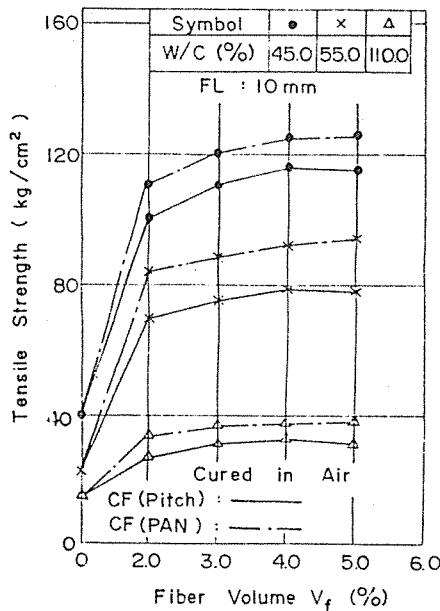


Fig. 5 Relationship between tensile strength and fiber volume

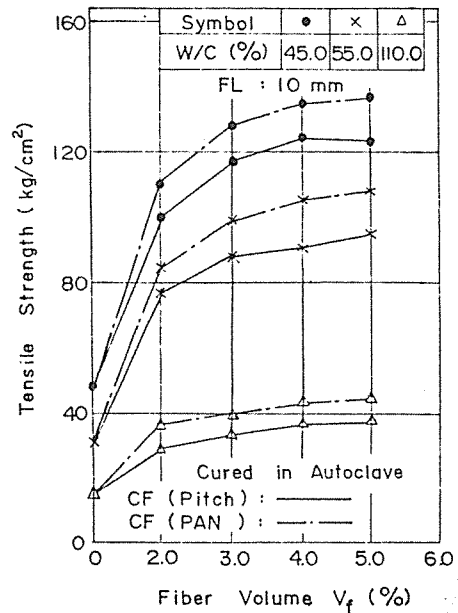


Fig. 6 Relationship between tensile strength and fiber volume

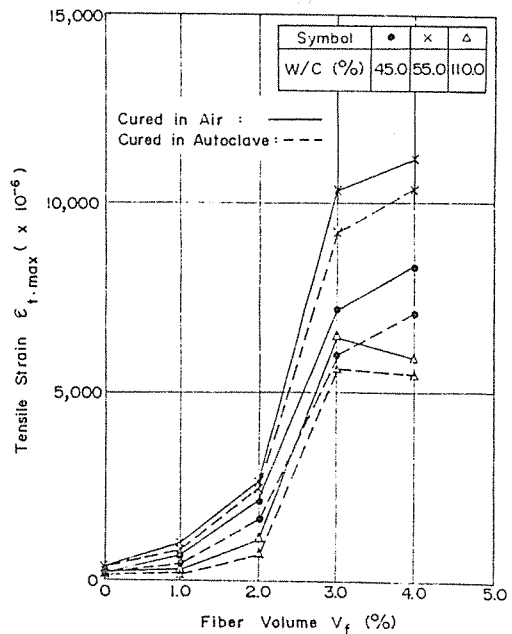


Fig. 7 Relationship between fiber volume and tensile strain when maximum load is applied

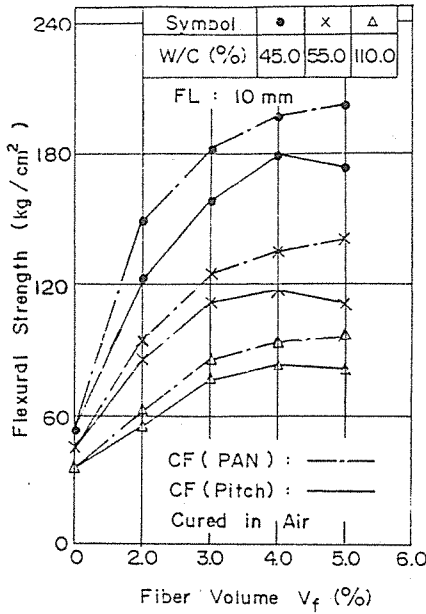


Fig. 8 Relationship between flexural strength and fiber volume

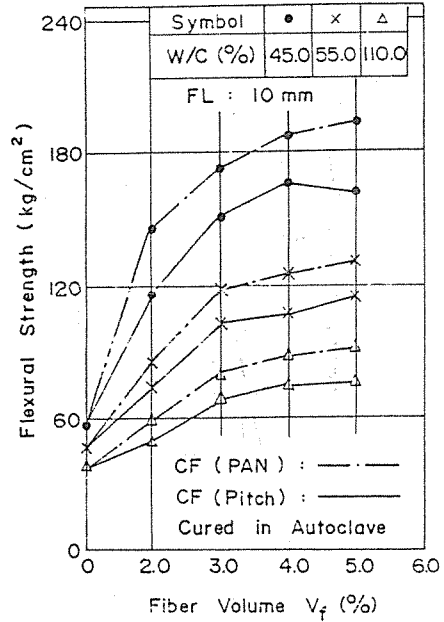


Fig. 9 Relationship between flexural strength and fiber volume

$V_f=3.0\%$ 에서 매트릭스의 대략 2.0~4.3배 증가하였고,  $V_f=5.0\%$ 에서는 강도 증가율이 둔화되는 경향을 나타내었으며, 공중양생의 경우가 오토클래브 양생의 경우보다 다소 높은 경향을 나타내어 인장강도와는 다른 양상을 나타내었다.

한편, 휨 응력-처짐과의 관계는 그림 10과 같고, 섬유 혼입율의 증가에 따라 휨 응력의 증가와 더불어 변형성능은 크게 증대되어 현저한 휨 인성의 증가(곡선하의 면적증대) 경향을 보였고, 오토클래브 양생의 경우가 공중양생의 경우에 비하여 휨 인성이 다소 저하하는 결과를 나타내었다.

### 3-5. 휨 強度에 미치는 골재의 종류, 입경의 영향

Fig. 11은 Pitch계 단섬유 10mm, 혼입율  $V_f=3.0\%$ 인 경우 각종 골재를 사용했을 때 CFRC의 휨 강도 시험결과를 나타낸 것으로 Autoclave 양생후 기건양생의 재령 28일의 조건에서(Flow 값은 150

mm로 일정히 한 경우) 골재의 종류와 입경이 휨 강도에 미치는 영향을 고찰해 보면,

(1) 골재의 종류에 관계없이 물·시멘트비(W/C)가 작아짐에 따라 휨 강도는 증가하고, 물·시멘트비가 일정한 CFRC의 휨 강도는 골재의 입경이 커짐에 따라 저하한다.

(2) 강 모래 및 강 자갈을 사용한 CFRC는 Plain의 경우에 비하여 휨 강도는 다른 골재 사용시 보다 현저히 저하한다.

이것은  $V_f=3.0\%$ 의 섬유가 균등분산의 경우 평균 간격은 약  $80\mu\text{m}$ (McKee의 섬유 간격식)로 되고 이 섬유간에 수 mm 이상의 입경을 갖는 골재가 존재하면 이 골재가 약점으로 되어 저응력에서 파괴됨에 기인하는 것으로 생각한다. 한편, 규사분말 및 8호 규사와 같은 미립의 입경인 골재를 사용한 CFRC의 휨 강도는 시멘트 페스트에 CF를 혼입한 경우보다 현저한 증가 경향을 보여 CFRC의 제조시 CF를 균일하게 분산시키고 강도 증진을 하는 역할을 하는 최적 입경으로 규사분말과 8호규사 정도

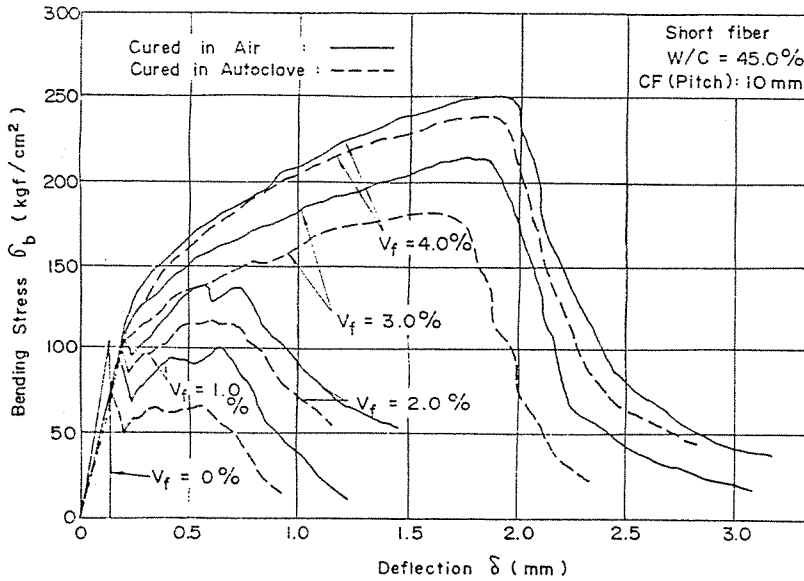


Fig. 10 Bending stress-deflection curves of CFRC

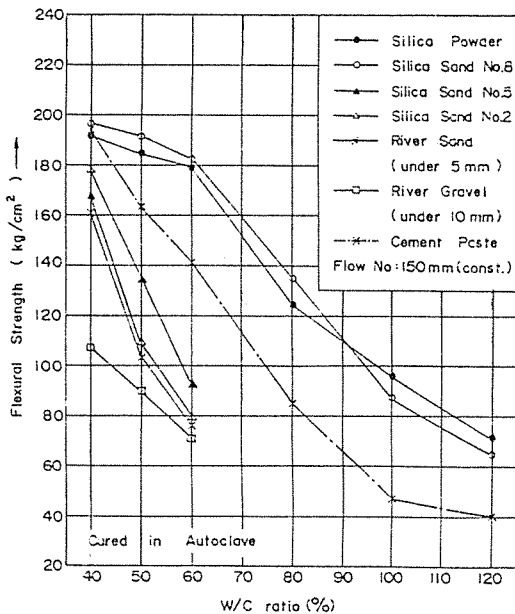


Fig. 11 Relationship between flexural strength and W/C ratio for aggregate of various sizes

의 미세입径의 골재가 요망되는 것으로 판단된다.

#### IV. 結 論

탄소섬유보강 시멘트 복합체 (CFRC)의 제조성형 및 역학적 성능은 섬유 관계요인, 매트릭스 관계요인, 믹싱 관계요인에 따라 크게 영향됨을 확인하였으며, 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. PAN 및 Pitch계 탄소섬유의 혼입율 증가에 따라 시멘트 매트릭스의 유동성 및 섬유의 분산성은 급격히 저하한다. 따라서 섬유분산용 Omni-Mixer의 사용과 함께 적절한 양의 증점제와 고유동화제 그리고 기포 저감을 위한 소포제의 혼용이 요망된다.

2. CFRC의 제조성형용 골재의 입径은 규사분말 또는 8호규사 정도가 적당하고 그 이상의 골재를 사용하는 경우, 섬유와의 부착 및 워커빌리티 성능 그리고 현저한 강도저하 현상을 나타내었다.

3. PAN 및 Pitch계 탄소섬유의 혼입율 증가에 따라 인장 및 휨 강도는 현저히 증가하여 인장강도는 평균 3.0배의 강도 증가율을 나타내었고 휨 강도는 3.2배의 강도 증가율을 보였으나 압축강도는 거의 동등 수준이거나 약간 감소하는 경향을 나타내어

폴리머합침 등에 의한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

4. PAN 계 탄소섬유를 혼입한 CFRC의 경우가 Pitch 계 탄소섬유를 혼입한 경우에 비하여 압축, 인장 및 휨 강도에 있어 다같이 높은 강도 증가율을 나타내었고, 오토클래브 양생의 경우가 기건양생의 경우에 비하여 다소 높은 강도 증가율을 보였다.

5. 탄소섬유의 혼입을 증가에 수반하여 CFRC의 변형성능은 크게 증대하여 Pitch 계 섬유길이 10 mm, 혼입율 3.0%인 경우 매트릭스의 약 14~30배의 변형을 증가를 보였고, 휨 응력-처짐과의 관계에서도 현저한 휨 인성의 증가 경향을 나타내었고, 오토클래브 양생의 경우 기건양생의 경우에 비하여 휨 인성이 다소 저하하는 경향을 나타내었다.

#### 참고문헌

1. Johnston, C.D., "Steel-fibre Reinforced Mortar and Concrete. A Review of Mechanical Properties", Fibre-Reinforced Concrete, ACI Publication SP-44, pp.127~142.
2. Aveston, J., Mercer, R.A., and Sillwood, J. M., "The Mechanism of Fibre-Reinforcement of Cement and Concrete", National Physical Laboratory Report NO SI, No. 90111198, Part I, Jan. 1975; Part II, DMA 228, Feb. 1976.
3. Swamy, R.N., Saad-Ta'an A., "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams made with Steel Fiber Concrete", ACI J., Sept.~Oct., 1981, pp.395~405.
4. Park, Seung Bum, "Studies on the Effect of Fiber Reinforcing upon Mechanical Properties of Concrete and Crack Mode of Reinforced Concrete", J. of KSAE, Vol. 20, No. 2, 1978, pp.17~59.
5. Naaman, A.E., Shah, S.P. and Thorne, J.L., "Some Developments in Polypropylene Fibers for Concrete", Fiber-Reinforced Concrete, ACI Publication SP-81, pp.375~396.
6. Stucke, M.S., and Majumdar, A.J., "Micro-structure of glass Fibre-Reinforced Cement Composites", J. of Materials Science, 11, 1976, pp.1019~1030.
7. Hibbert, A.P., "A Method for Assessing the Quantity and Distribution of Glass Fibre in an Opaque Matrix", J. of Materials Science Letters, 9, 1974, pp.512~514.
8. Klos, H.G., "Properties and Testing of Asbestos Fibre Cement", Fibre-Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Vol. 1, 1975, pp.259~267.
9. Zonsveld, J.J., "Polypropylene Fibre Concrete", Course on Fibre-Cement and Fibre-Concrete for Practising Civil Engineers, Lecture No. 4, Univ. of Surrey, 1976, pp.26.
10. Naraynan, R. and Darwish, Y.S., "Use of Steel Fiber as Shear Reinforcement", ACI Structural J., May~June 1987, pp.216~227.
11. Ali, M.A., Majumdar, A.J. and Rayment, D. L., "Carbon Fibre Reinforcement of Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 2, pp.201~212.
12. Waller, J.A., "Carbon Fiber Cement Composites", Civil Engineering and Public Works Review, April 1972, pp.357~361.
13. Majumdar, A.J., "Properties of Fiber Cement Composites, Fiber-Reinforced Cement and Concrete", RILEM Symposium, 1975, pp.279~313.
14. Naaman, A.E., "High Strength Fiber Reinforced Cement Composites", in Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 42, 1985, pp.219.
15. Sarker, S. and Bailey, M.A., "Structural Properties of Carbon Fibre Reinforced Cement", Fibre-Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, 1975, London, Vol. I, pp.361~371.
16. Akihama, S., Suenaga, T. and Banno, T., "Experimental Study on Mechanical Properties of Carbon Fibre Reinforced Cement Composites", J. of the JCI, Vol. 20, No. 8, 1982, pp.75~83.



17. Akihama, S., Suenaga, T., and Banno, T., "The Behavior of Carbon Fibre Reinforced Cement Composites in Direct Tension", *The International J. of Cement Composites and Lightweight Concrete* Vol. 16, No. 3, Aug. 1984, pp.159~168.
  18. Nishioka, K., Yamakawa, S. and Shirakawa, K., "Properties and Applications of Carbon Fibre Reinforced Cement Composites", Preprint from European Concrete Society Conference, London, England, July 1986.
  19. Shirakawa, K. and Nakagowa, K., "Factors Affecting Flexural Strength of Carbon Fibre Reinforced Cement Composites", *Proceedings of the Japan Concrete Inst. 4th Conf.*, 1982, pp.153.
  20. Akihama, S., et al., "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites", *セメント・コンクリート*, No. 449, July 1984, pp.38~47.
-