

폴리머 함침 탄소纖維補強 시멘트 複合體의 力學的 特性에 關한 研究

A Study on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites Impregnated in Polymer

박 승 범* 윤 의 식** Burtrand I.Lee***
Seung Bum, Park Eui Sik, Yoon

요 약

본 연구는 고강도·고내구성이면서 신뢰성이 높은 폴리머 함침 탄소섬유보강 시멘트복합체의 개발·응용을 위한 여러가지 특성을 검토하기 위하여, 복합체는 PAN계 및 Pitch계 탄소섬유, 조강포틀랜드 시멘트, Silica Powder 및 폴리머 함침재를 사용하여 제조하였고, 배합조건별, 재령별, 그리고 양생조건별로 역학적특성, 동결융해저항성 및 장기변형특성에 관한 실험연구를 행하였다. 연구결과, CFRC의 Flow값은 CF혼입율 증가에 따라 거의 직선적으로 저하하였고, 폴리머 함침 CFRC의 압축·인장·휨강도는 CF혼입율 증대에 따라 오토클래브 양생 및 기건양생의 경우에 비하여 현저히 증대하였으며, 또한 월등히 높은 강도를 나타내었다. 그리고, 인장응력-변형관계 및 휨응력-처짐관계는 기건양생 및 오토클래브 양생의 경우 연성적인 비선형을 나타낸 데 비하여 폴리머함침의 경우는 거의 직선적으로 변화하였고, 동결융해저항성, 건조수축변형특성 및 내크리프 특성도 다른 양생 방법의 경우에 비하여 크게 개선됨을 확인하였다.

Abstract

In order to examine the mechanical properties of carbon fiber reinforced cement composites with silica powder. PAN-based carbon fiber and Pitch-based carbon fiber, and polymer impregnators experimental studies on CFRC impregnated in polymer were carried out. The effects of types, length, and contents of carbon fibers and matrices of fresh and hardened CFRC impregnated in polymer were examined. The test results show that compressive, tensile, and flexural strength of CFRC impregnated in polymer were much more increased than those of air cured and autoclaved CFRC. CFRC impregnated in polymer was also considerably effective in improving toughness, freeze-thaw resistance, loss of shrinkage, and creep resistance, compared with air cured and autoclaved CFRC.

*정회원, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

**정회원, 충남대학교 대학원 박사과정

***Professor, Clemson University, U.S.A.

Keywords : mechanical properties, carbon fiber reinforced cement composites, polymer impregnators, compressive strength, tensile strength, flexural strength, toughness freeze-thaw resistance, shrinkage, creep-resistance

I. 서론

1824년 영국의 J.Aspsdin에 의해 포틀랜드 시멘트가 발명된 이래 시멘트·콘크리트는 현재까지 주요 건설재료로서 널리 사용되어 왔으나, 경화가 느리고 수축이 크며, 인장·휨강도가 작고 내약품성이 나쁘다는 등의 본질적인 결함을 가진 취성재료로서, 이런 결점을 개선하고 더욱 우수한 성능을 갖는 새로운 콘크리트를 개발하려는 시도가 오래전부터 행하여져 왔으며, 그 대표적인 예로써, 시멘트 매트릭스에 각종 섬유를 보강하여 제조한 섬유보강 콘크리트¹⁻¹⁶⁾와 시멘트매트릭스 결합체의 일부 또는 전부를 폴리머로 대체시켜 제조한 콘크리트-폴리머 복합체¹⁷⁻²⁹⁾가 이용되고 있다.

섬유상의 복합강화 소재중, 탄소섬유는 특히 다른 섬유에 비하여 역학적 성능, 내열성 및 화학적 안정성등이 월등하고, 다른 섬유에는 없는 밸런스 성능을 갖고 있어 크게 주목되면서, 이를 이용한 CFRC는 경량·고강도이고 내구성, 수밀성 및 신뢰성등이 우수하며, 미관이 좋고 슬렌더한 부재를 제작할 수 있고, 중량의 대폭 경감으로 공기를 단축시킬 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있으므로, 국내외에서 첨단 건설용 신소재로서의 CFRC에 관한 연구개발 및 용도전개가 활발히 이루어지고 있다⁹⁻¹⁶⁾.

또한, 콘크리트-폴리머 복합체의 하나인 폴리머 함침 콘크리트는, 1965년말 미국 BNL과 USBR에 의해 공동연구¹⁷⁾가 행해진 이래, 1975년 이탈리아의 A.Rio에 의해 압축강도 2870 kg/cm²의 초고강도 콘크리트의 개발¹⁸⁾이 성공함에 따라 많은 주목을 끌면서, 미국·일본 및 유럽 선진국에서 그 연구개발이 활발히 이루어지고 있고¹⁹⁻²⁶⁾, 여러차례의 국제회의를 통하여 제조방법, 기초연구 및 실용화에 등이 상세하게 보고되고 있으며²⁷⁻²⁹⁾, 최근에는 폴리머 함침 콘크리트에 강섬유, 유리섬유, 폴리머 섬유 및 탄소섬유 등을 보강한 각종 연구도 이루어지고 있어 주목되고 있다.

한편, 우리나라에서도 제철화학(주)등에서 연간 200톤 규모의 PAN계 탄소섬유가 생산되고 있고, 또 Pitch

계 탄소섬유도 개발이 진행중에 있으므로, 매년 10,000 B.P.S.D.의 석유핏치와 400,000톤의 콜탈핏치가 부산되고 있음을 감안할 때, 이런 저렴한 부산물에 의한 선진국 수준의 폴리머 함침 CFRC의 연구개발 및 응용은 건설산업 뿐만 아니라 관련산업발전에도 크게 기여할 것이다.

따라서 본 연구에서는 고강도·고내구성이면서 신뢰성이 높은 폴리머 함침 CFRC의 개발·응용을 위한 기초적 연구로서 조강시멘트와 PAN계 및 Pitch계 탄소섬유, 그리고 폴리머 함침체에 의한 폴리머 함침 CFRC의 역학적 성능과 내구성 및 장기변형 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

II. 시험개요

2.1 사용 재료

(1) 탄소섬유

탄소섬유는 KOSKA(주) 제품의 PAN계 CF 및 Kureha(주) 제품의 Pitch계 CF 단섬유(3,6,10,20mm)를 사용하였으며, 그 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of Carbon Fiber

Type of fiber	Fiber diameter (10 ⁻³ mm)	Specific gravity	Tensile strength (kgf/cm ²)	Modulus of elasticity (10 ⁴ kgf/cm ²)	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 Early Strength Cement

Specific Gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting Time		Compressive Strength (kg/cm ²)				
		initial (hr:min.)	Final (hr:min.)	1 ds.	3 ds.	7 ds.	28 ds.	
3.14	4,500	3:20	5:20	197	338	373	448	
SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	lg.loss(%)	K ₂ O(%)	Na ₂ O(%)
19.2	5.9	2.8	61.7	3.6	4.2	1.37	1.08	0.15

(2) 시멘트 및 골재

시멘트는 국내 S사 제품의 조강포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 골재는 G사 제품의 Silica Powder를 사용하였으며, 그 물성은 각각 Table 2, 3과 같다.

Table 3. Properties of Aggregates

Name of Aggregate	Chemical Components (%)			Physical Properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Specific Gravity	Particle Size
Silica Powder	95.1	2.15	2.75	2.70	0-80μm

(3) 폴리머 함침제

폴리머 함침용 Monomer System은 Table 4와 같이, 공업용 Styrene Monomer(St)에 가교제로써 TMPTMA, 촉매로써, AIBN, Coupling제로써 SILANE을 St : TMTMA : AIBN : SILANE=88 : 11 : 1 : 1(질량

Table 4. Monomer System

Styrene monomer	Cross linking agent	Catalyst	Coupling agent
(St)	Trimethylolpropane trimethacrylate TMPTMA	α-α'-azobisisobutyronitrile, AIBN	γ-methacryloxypropyltrimethoxysilane(SILANE)
88	11	1	1

비)의 비율로 혼합한 것을 사용하였으며, 이들 함침용 재료의 성질은 Table 5에 나타낸 바와 같다.

2.2 배합 및 시험 방법

(1) 배합 및 믹싱

시멘트 매트릭스의 배합에는 Table 6과 같이 하였고, 믹싱은 용량 30ℓ의 섬유분산용 고성능 Omni-Mixer를 사용하였으며, 비빔시간은 Dry blend : 30초, Primary blend : 3-5분, Secondary blend : 4.5-6분으로 하여 평균 10분간 혼합하였다.

(2) 양생 및 폴리머 함침·중합방법

양생은 공시체 성형후 재령 24시간에서 탈형하여, 기건양생은 23±2℃, 60±5% RH의 조건에서 재령 7일에 시험을 행하였고, 오토클래브 양생은 최고온도 180℃(10기압)에서 3시간으로 하여 양생을 종료한 후 23±2℃, 60±5% RH의 조건에서 재령 7일에 시험을 행하였으며, 또한 전향과 같은 오토클래브 양생을 행한 후 재령 28일에서 폴리머 함침을 하여 재령 12주에서 시험을 행하였다. 이때 폴리머 함침은 가압함침용기를 사용하여 공시체를 넣고 Vaccum장치를 이용하여 5±1mmHg 이하의 조건으로 1시간 탈기후, Table 4와

Table 5. Properties of Chemicals for Impregnant

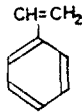
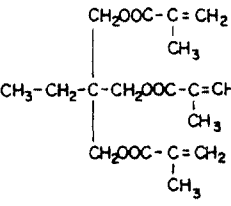
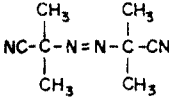
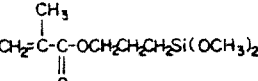
Type of Chemicals	St	TMTMA	AIBN	SILANE
Constitutional Formula				
Molecular Weight	103.15	337.8	165.1	249.2
Boiling Point (°C)	145.0	200°C / 1mm Hg 185°C / 5mm Hg	—	256
Specific Gravity, 20°C	0.910	1.065	1.128 (25°C)	1.043
Flash Point (°C)	30.8	152	—	139
Viscosity (20°C, CP)	0.734	13.1	—	2.1

Table 6. Mix Proportions of Cement Matrices for CFRC

W/C(%)	S/C	Unit Weight (kg/m ³)				
		Water	Cement	Silica Powder	Admixtures	
					S.P.	M.C.
35.0	0.10	477	1363	136	13.6	6.8
45.0	0.25	502	1116	279	11.2	5.6
50.0	0.50	478	955	478	9.6	4.8
55.0	0.50	502	912	456	9.1	4.6
110.0	0.70	653	594	416	5.9	3.0

같은 함침재를 넣고 $8 \pm 1 \text{kgf/cm}^2$ 의 가압하에서 3시간 함침시킨 다음, 다시 $20 \pm 1 \text{kgf/cm}^2$ 의 가압하에서 1시간 가압하여 함침을 종료하였다. 또한 중합은 함침종료 후 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 열수중에서 가열중합을 행하였고, 건조는 100°C 의 건조로 내에서 1일간 건조한 후 상온까지 냉각하였다.

(3) 공시체 제조 및 시험방법

Flow 시험은 KSL 5105에 준하였고, 압축강도 및 인장강도는 KSL 5105, 5104에 준하여 공시체를 제조해 시험조건별로 측정하고, 압축응력-변형을 관계를 파악하기 위하여 $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ 의 원주공시체를 제조해 공시체 중앙부에 Wire Strain Gage(길이 30mm)를 부착하여 100톤 UTM과 변형측정기를 사용해 측정하였다. 직접인장시험은 Fig.1과 같은 직접인장공시체를 제조해 10톤 Instron시험기를 사용하고, 크로스베드 속도 0.5mm/min 의 변위제어방식으로 행하였으며, 인장변형의 측정은 공시체 중앙의 양면에 30mm의 스트레인 게이지를 부착하여 하중-변형곡선을 X-Y recorder로 구하여 이를 토대로 인장응력-변형곡선을 구하였다. 휘강도는 JIS R 5201에 준하여 $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ 공시체를 제조하여 시험조건별로 3점 휨시험방법에 의하여 구하고, CFRC 판재공시체의 휘응력-처짐관계를 조사하기 위하여 $5 \times 1.2 \times 50 \text{cm}$ (b×t×L)의 공시체를 제조해, 스패ن을 40cm로하여 3점 휨시험방법으로 전술한 Instron 시험기를 사용하여 크로스베드 속도 0.5mm/min 로 재하하여 하중-처짐곡선을 구하고 이를 토대로 휘응력-처짐곡선을 구하였다.

한편, CFRC의 내동해성을 파악하기 위하여 배합요인변, 양생조건별로 ASTM C 666-2의 급속동결융해 시험방법에 준하여 $-18^\circ\text{C} \sim +10^\circ\text{C}$ 에서 1일 6~8 cycle로 300 cycle까지 행하였고, 공시체의 질량과 1차 공명주파수의 변화를 조사함과 아울러 표면상태를 관찰하였다. 또한, CFRC의 장기변형특성을 조사하기

위하여, 건조수축시험은 $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ 의 공시체를 제조해 양생조건별로 ASTM C 157의 콤팩테터법에 준하여 길이변화를 측정하였으며, Creep 시험은 ASTM C 39-72에 준하여 양생조건 및 재하하중별(파괴하중의 15%, 30%)로 재령 1년간 Creep 변형량과 그 후 1개월간 Creep 회복량을 측정하였다.

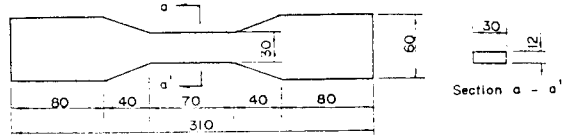


Fig 1. Shapes and Dimensions of Test Specimens for Direct Tensile Strength

III. 시험결과 및 고찰

3.1 Flow값과 탄소섬유 혼입율과의 관계

PAN계 및 Pitch계 CF단섬유 혼입율과 Flow값과의 관계는 Fig.2에 나타낸 바와 같이, CF단섬유의 혼입율

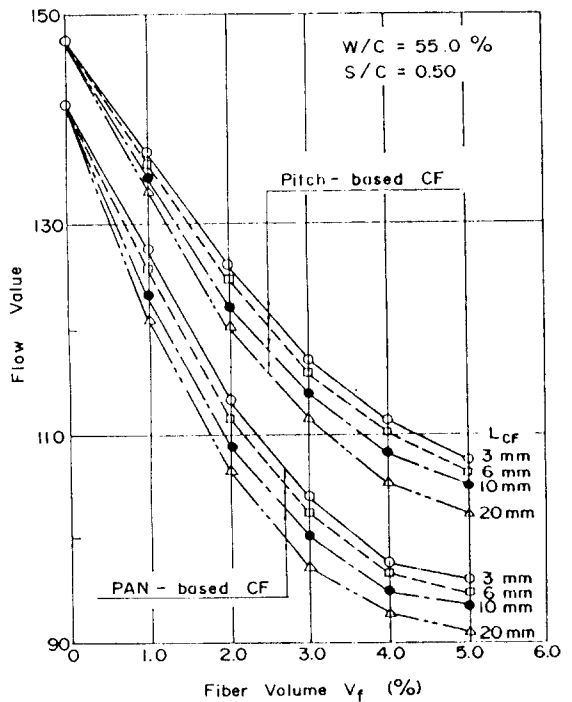


Fig 2. Relation between Flow and Fiber Volume

이 증가함에 따라 CFRC의 Flow값은 거의 직선적으로 저하하는 경향을 나타내었고, 섬유유 종류에 따라서는 섬유유의 직경이 작고 아스펙트비(l/d)가 큰 PAN계 CF의 경우가 Pitch계 CF에 비하여 혼입율의 증가에 수반하여 현저히 저하하는 경향을 나타내었으며, 섬유 길이에 따라서는 CF길이 3.6, 10, 20mm로 증가함에 따라 Flow값은 다소 저하하는 경향을 나타내었다.

3.2 압축강도 및 압축탄성계수

W/C=55.0%, S/C=0.5, PAN계 및 Pitch계 CF 단섬유 $L_{CF}=10\text{mm}$ 인 경우의 CFRC의 압축강도 및 압축탄성계수는 Fig.3,4 및 Table 7에 나타낸 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, CFRC의 압축강도는 양생방법에 관계없이 섬유혼입에 의한 현저한 증가 경향은 나타나지 않았고, 거의 동등수준이거나 오히려 다소 저하하는 경향을 나타내었으며, 양생방법에 따라서는 폴리머 함침의 경우 압축강도는 현저히 증가하여 섬유 혼입율의 증가에 따라 1.8~3.1배의 월등한 고강도를 발휘하였다.

또한, CFRC의 압축탄성계수는 기건양생 및 오토클래브 양생의 경우에 CF혼입율 증가에 따라 감소하고, $V_f=3\%$ 이상의 경우에는 현저히 저하하는데 비하여, 폴리머 함침의 경우에는 CF혼입율에 의한 영향은 거의 받지 않고 $1.90\sim 2.05 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 정도의 일정한 수준을 유지하였으며, 다른 양생방법의 경우에 비하여 약 1.5~3배의 월등히 높은 값을 나타내었다. 이는 폴리머 함침에 의하여 폴리머가 매트릭스 내부의 미세공극까지 침투하여 조적을 밀실화하고 보강시킴에 기인한 것으로 판단된다.

한편, 압축강도시험에서 5.08cm 입방공시체와 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 의 원주공시체를 사용한 경우와 비교하면, 5.08cm 입방공시체의 경우가 약 10~20% 정도 높게 나타나 공시체의 치수가 작을수록 입방체인 공시체가 원주체인 공시체보다 강도가 크게 나타나는 것으로 보이나, 본 연구에서는 두가지의 경우만 고찰한 것으로, 이에 관한 상세한 분석을 위하여는 앞으로 여러형태 및 치수에 관한 검토가 요망된다.

3.3 인장강도 및 인장응력-변형률 관계

W/C=55.0%, S/C=0.5, $L_{CF}=10\text{mm}$ 인 경우의

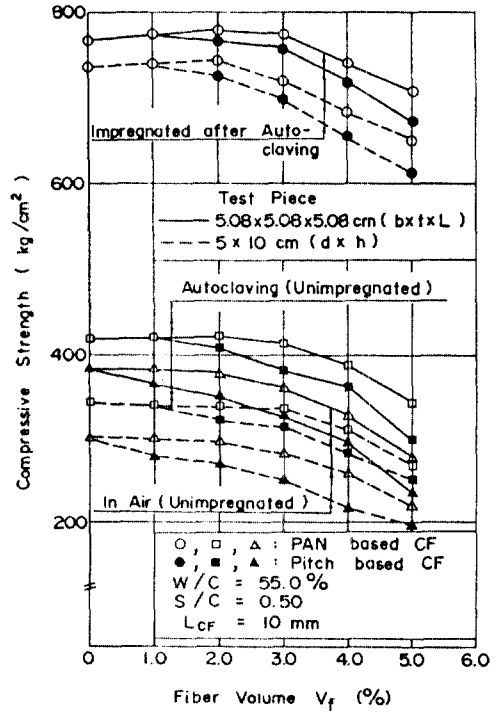


Fig 3. Relation between Compressive Strength and Fiber Volume

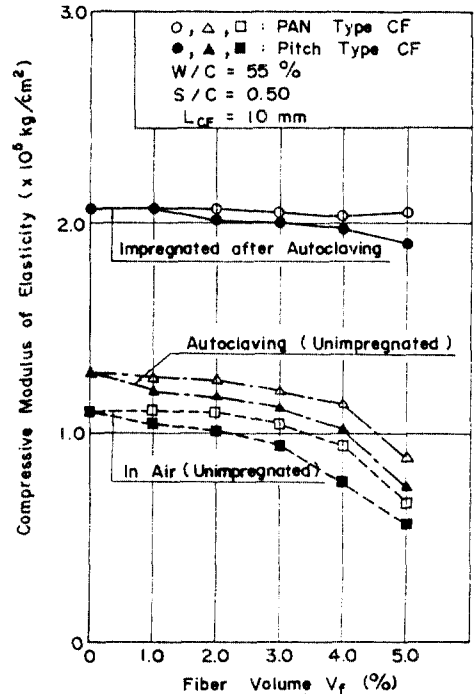


Fig 4. Relation between Compressive Modulus of Elasticity and Fiber Volume

Table 7. Test Results of Strength Tests

Type of Fiber	Fiber Volume (%)	Compressive Strength (kg/cm ²)			Compressive Modulus of Elasticity (×10 ⁶ /cm ²)			Tensile Strength (kg/cm ²)			Flexural Strength (kg/cm ²)		
		Polymer Impregnated	Autoclaving	In Air	Polymer Impregnated	Autoclaving	In Air	Polymer Impregnated	Autoclaving	In Air	Polymer Impregnated	Autoclaving	In Air
PAN based	0	772 (738)	416 (348)	390 (303)	2.07	1.28	1.10	69	42	35	177	108	81
	1	778 (742)	418 (346)	389 (301)	2.07	1.27	1.11	103	66	50	345	212	175
	2	780 (750)	420 (344)	386 (301)	2.07	1.26	1.10	126	78	57	424	263	222
	3	779 (725)	413 (342)	368 (288)	2.05	1.20	1.05	133	87	60	476	271	230
	4	750 (690)	390 (317)	325 (260)	2.03	1.14	0.97	140	89	57	492	265	227
Pitch based	0	772 (738)	416 (348)	390 (303)	2.07	1.28	1.10	69	42	35	177	108	81
	1	777 (741)	417 (345)	370 (282)	2.07	1.19	1.04	98	58	46	322	195	155
	2	773 (731)	406 (328)	352 (273)	2.01	1.17	1.01	113	69	52	405	246	203
	3	769 (705)	387 (324)	325 (252)	2.00	1.12	0.96	123	73	55	443	248	209
	4	727 (663)	367 (290)	293 (223)	1.97	1.02	0.77	129	73	52	451	236	200
5	670 (612)	297 (252)	235 (196)	1.90	0.75	0.56	133	67	41	457	210	174	

(): In case of specimen size $\phi 5 \times 10$ cm

CFRC의 인장강도와 섬유혼입율과의 관계는 Fig.5 및 Table 7에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, 인장강도는 기건양생의 경우에 비해 오토클래브 양생이, 그리고 오토클래브 양생만을 한 경우보다 폴리머 함침을 실시한 경우가 월등히 높은 강도를 발현하여, PAN계 CF를 $V_f=3\%$ 혼입시 폴리머 함침을 한 경우 135kg/cm^2 정도를 나타내어, 오토클래브 양생의 경우에 비해 약 1.5배, 기건양생의 경우에 비해 약 2.2배의 인장강도를 나타내었다. 또한, 섬유혼입을 증가에 따라서는 기건양생 및 오토클래브 양생의 경우 $V_f=3\sim 4\%$ 정도까지는 섬유혼입을 증가에 수반하여 현저한 인장강도 증가경향을 나타내었으나, 그 이상의 CF혼입시에는 섬유의 체적증가로 인한 다공성의 증대 및 Fiberball의 형성으로 인하여 섬유의 균등 분산이 잘 이루어지지 않아 현저한 저하경향을 나타내는데 비하여, 폴리머 함침의 경우에는 $V_f=5\%$ 까지 현저한 인장강도의 증가경향

을 나타내었다.

한편, 인장응력-변형을 관계는 Fig.6,7에 나타난 바와 같이, 오토클래브 양생의 경우 인장응력-변형률관계는 재하초기의 직선적인 단계를 지나 현저한 비선형으로서 연성적인 경향을 나타내었으나, 폴리머 함침의 경우는 최대인장응력의 95%까지 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 매트릭스 자체가 고강도화됨과 함께 섬유와 매트릭스의 부착력이 현저히 증대하여 섬유가 매트릭스로부터 인발이 감소되고 과단섬유가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 섬유 종류에 따라서는 PAN계 및 Pitch계 CF사용의 경우 거의 유사한 경향을 나타내었으나, 고탄성·고강도의 PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 높은 인장응력과 우수한 변형성능을 나타내었다.

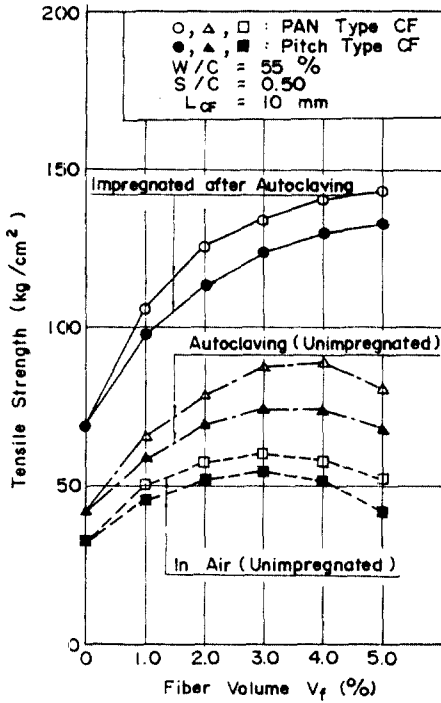


Fig 5. Relation between Tensile Strength and Fiber Volume

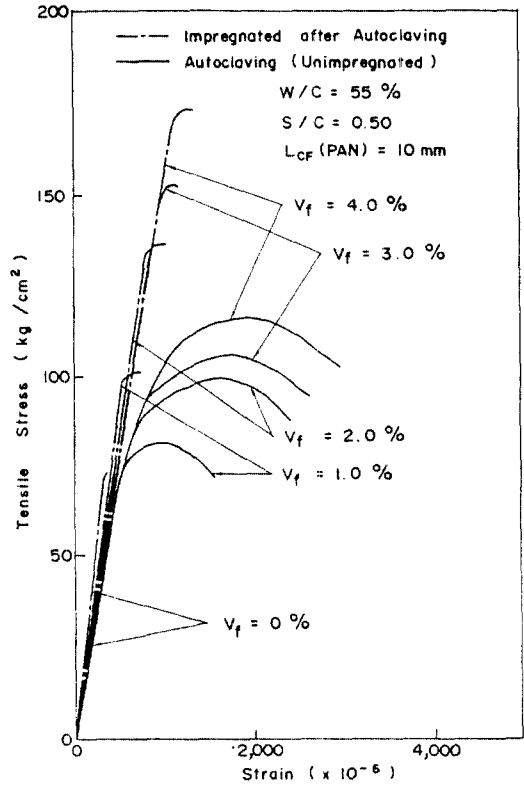


Fig 7. Tensile Stress-Strain Curves

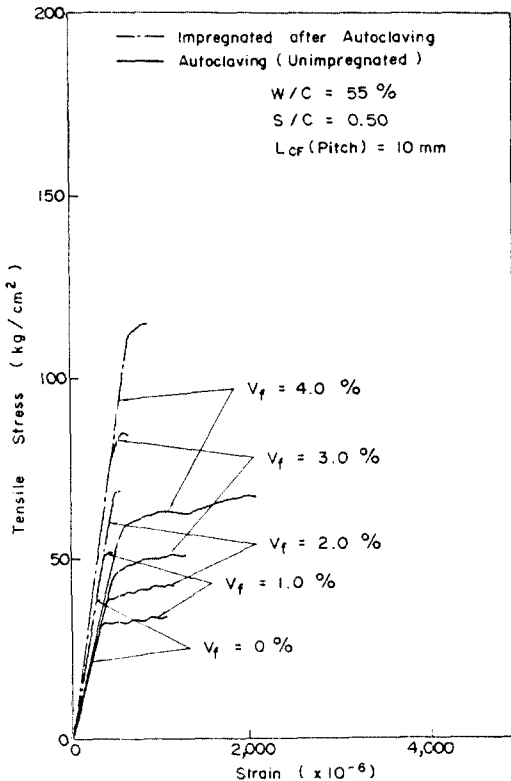


Fig 6. Tensile Stress-Strain Curves

3.4 휨강도 및 휨응력-처짐관계

W/C=55.0%, S/C=0.5, L_{CF} =10mm의 경우의 CFRC의 휨강도는 Fig.8 및 Table 7에 나타난 바와 같다. 이를 고찰하여 보면, CFRC의 휨강도도 인장강도와 마찬가지로 기진양생 및 오토클래브 양생의 경우 PAN계 및 Pitch계 CF 모두 V_f =3%까지는 현저히 증가하는 경향을 나타내었으나 V_f =3%이상에서는 저하하는 경향을 보였으며, 이러한 현상은 섬유혼입율의 증가에 수반하여 섬유의 분산성이 약화되고 부착강도가 저하하기 때문으로 판단된다. 그러나 폴리머 함침 CFRC의 경우에는 섬유혼입율이 증가함에 따라 V_f =5%까지는 휨강도는 증가하는 경향을 나타내었고, 다른 양생방법에 의한 경우에 비하여 약 1.9~3.0배의 월등히 높은 휨강도를 나타내었다. 또한 섬유종류에 따라서는 PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 15~21%정도의 고강도를 나타내었다.

한편, Fig.9는 3점 휨시험방법에 의한 CFRC판재공

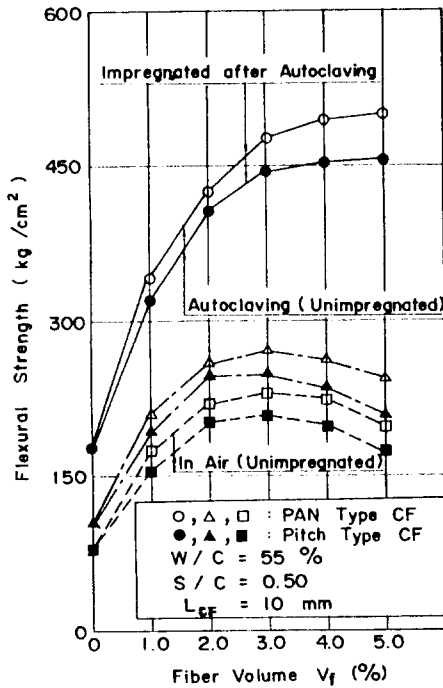


Fig 8. Relation between Flexural Strength and Fiber Volume

시체의 내하력, 최대휨응력-변위능력관계, 휨강도 및 휨인성등을 종합적으로 고찰하기 위하여 휨응력-처짐 곡선을 구한 것으로서, 양생방법에 관계없이 섬유혼입율이 증가함에 따라 휨인성은 현저히 개선됨을 알 수 있으나, 폴리머 함침 CFRC의 처짐량은 현저히 감소하여 오토클래브 양생의 경우에 비하여 크게 저하하였으며, 이는 매트릭스 자체의 고강도화 및 섬유와 매트릭스의 부착력 증대로 파괴시 섬유가 매트릭스로부터의 인발보다는 파단되기 때문으로 판단된다.

3.5 동결 융해 저항성

CFRC의 내동해성 파악을 위한 수중동결융해 시험결과는 Fig.10에 나타낸 바와 같이, 300cycle에서 폴리머 함침 CFRC의 경우 약 1%의 상대동탄성계수의 저하와 약 2%의 질량감소현상을 나타내어, 오토클래브 양생시 각각 약 4% 및 5%, 기건양생시 약 14% 및 8%에 비하여 현저히 작고, Scaling에 의한 열화현상도 거의 나타나지 않아 내동해성의 향상을 위해서는 오토클래브 양생후 폴리머 함침이 매우 유효한 것으로 판단된다.

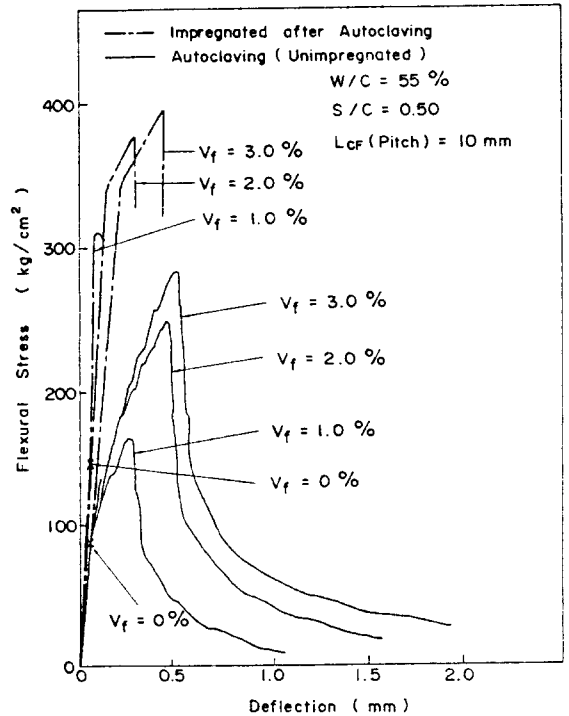


Fig 9. Relation between Flexural Stress and Deflection

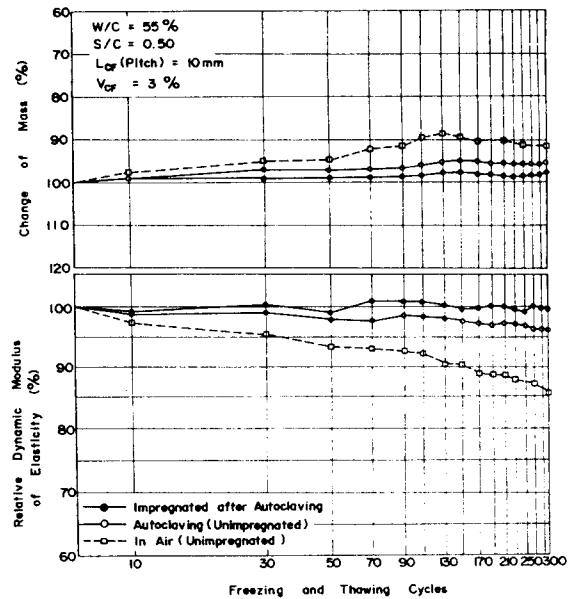


Fig 10. Results of Freezing-Thawing Test of CFRC

3.6 건조 수축 변형 특성

CFRC의 양생조건별 건조수축 변화를 측정된 결과는 Fig.11~14와 같이, 전반적으로 섬유혼입율이 증가함에 따라 건조수축변화량은 크게 감소하고, PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF를 사용한 경우에 비하여 현저한 수축저감효과를 나타내었다. 또한, 양생조건에 따라서는 폴리머 함침 CFRC의 경우, 오토클래브 양생의 경우에 비하여 약 20~30%, 기건양생에 비해서는 약 15~21배의 수축저감효과를 나타내었으며, 재령 6개월까지의 길이변화도 $\pm 0.9 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 정도로 다른 양생방법에 비하여 매우 안정됨을 확인하였다. 이들로부터 건조수축의 최소화를 위해서는 오토클래브 양생후 폴리머함침이 요망되는 것으로 판단된다.

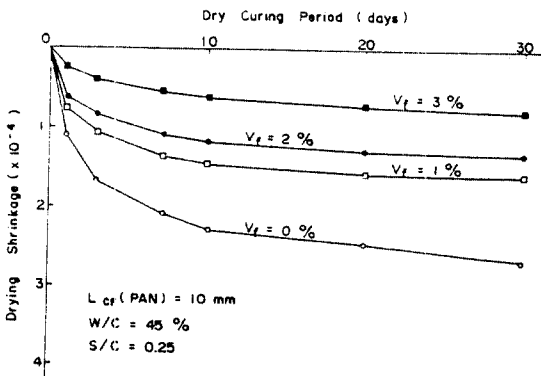


Fig. 11. Relationship between Drying Shrinkage and Dry Curing Period of CFRC Impregnated in Polymer after Autoclaving

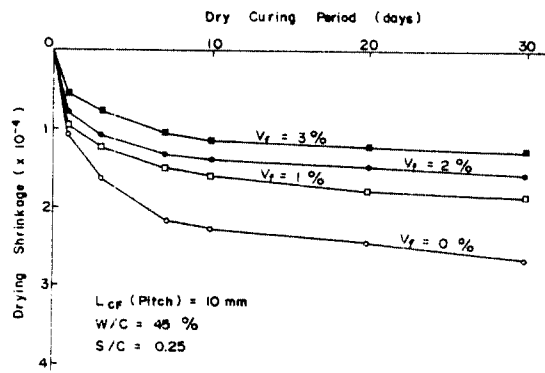


Fig. 12. Relationship between Drying Shrinkage and Dry Curing Period of CFRC impregnated in Polymer after Autoclaving

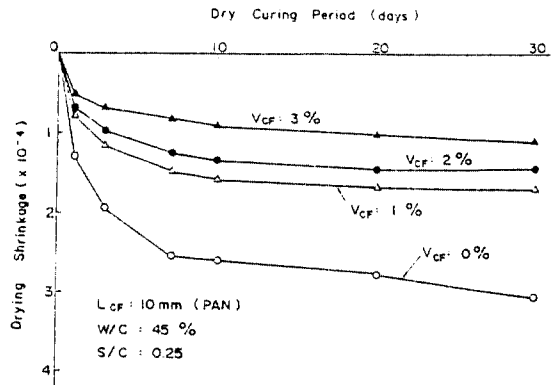


Fig. 13. Relationship between Drying Shrinkage and Dry Curing Period of CFRC after Autoclaving

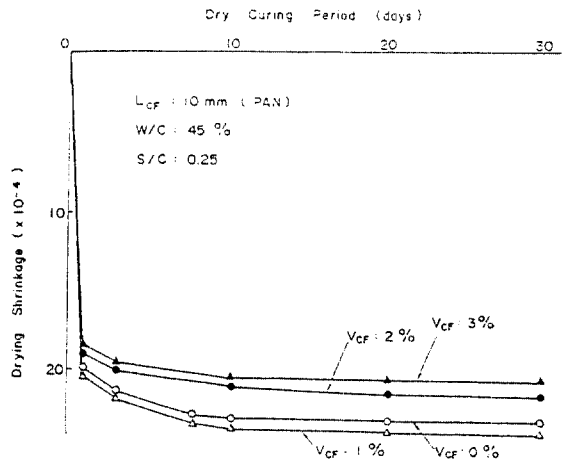


Fig. 14. Relationship between Drying Shrinkage and Dry Curing Period of CFRC after Demolding

3.7 Creep 변형특성

양생조건별, 재하하중별 CFRC의 재령 1년까지의 압축 Creep변형과 1개월간의 Creep 회복량을 측정된 시험 결과는 Fig.15~18과 같다. 이를 고찰하면, 전반적으로 섬유혼입률의 증가에 수반하여 CFRC의 장기 Creep변형량은 크게 감소하였고, Creep회복량도 현저한 증가경향을 나타내었으며, 폴리머 함침을 한 경우 재령 1년에서 PAN계 CF를 $V_f=3\%$ 사용시 $V_f=0\%$ 인 경우에 비하여 내크리프특성은 기건양생시 약 4.0배, 습윤양생의 경우 약 3.4배에 달하였으며, PAN계 CF를 사용한 경우가 Pitch계 CF의 경우에 비하여 우수한 내크리프특성을 나타내었다. 그리고 폴리머 함침 CFRC의 경우 함침

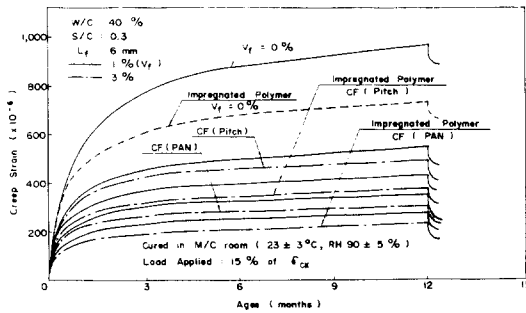


Fig 15. Relationship between Creep Deflection and Ages of CFRC

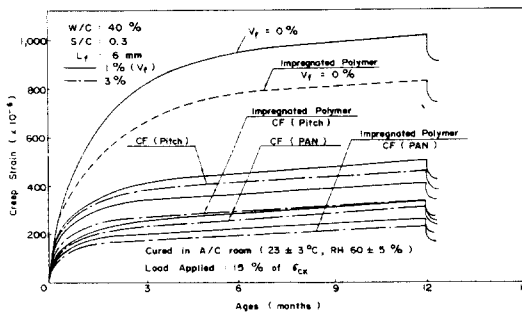


Fig.16. Relationship between Creep Deflection and Ages of CFRC

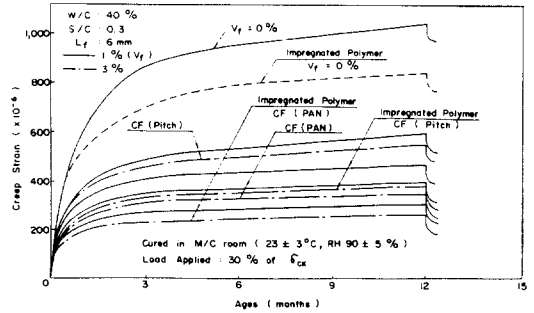


Fig 17. Relationship between Creep Deflection and Ages of CFRC

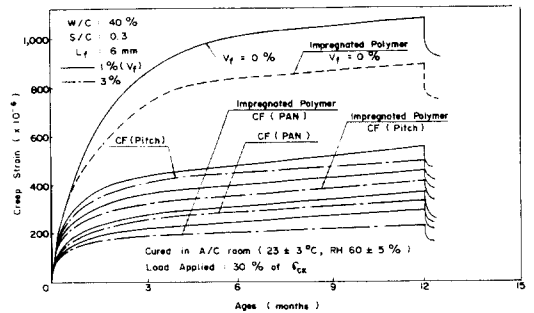


Fig 18. Relationship between Creep Deflection and Ages of CFRC

하지 않은 경우에 비하여 현저한 Creep변형량의 감소 경향을 나타내었으며, 전반적으로 습윤양생(M/C)의 경우 기건양생(A/C)의 경우에 비하여 Creep변형량은 크게 증가하는 양상을 보였다. 또한, CFRC의 Creep속도는 양생방법에 관계없이 모두 재하초기에 현저히 증대하나 그후에는 거의 일정하게 완만히 증가하였으며, 이런 경향은 습윤양생의 경우가 기건양생의 경우보다, 그리고 재하하중 30%(과피하중의)의 경우가 15%인 경우에 비하여 약 10~40% 정도 현저히 증가하는 경향을 나타내어, 이들 Creep변형은 양생조건 및 재하조건에 따라 크게 영향되고, 폴리머 함침에 의하여 장기 Creep변형량을 현저히 저감시킬수 있음을 확인하였다. 따라서 적정량의 CF혼입 및 폴리머함침에 의하여 CFRC의 PC 구조부재료의 응용에 있어 Creep변형의 극소화에 크게 유효한 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구결과 폴리머 함침 CFRC의 물리적·역학적 특성은 섬유 및 매트릭스 관계요인, 양생방법에 의해 크

게 영향됨을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

(1) CFRC의 Flow값은 CF혼입율의 증가에 따라 거의 직선적으로 저하하였고, 이러한 현상은 PAN계 CF의 경우가 Pitch계 CF에 비하여 더욱 현저하였으며, CF의 길이에 따라서는 단섬유길이가 증가함에 따라 다소 저하하는 경향을 나타내었다.

(2) CFRC의 압축강도는 양생방법에 관계없이 CF혼입율에 의한 현저한 증가는 나타나지 않고 거의 동등하거나 저하하였으며, 폴리머 함침의 경우 압축강도는 다른양생의 1.8~3.1배의 월등한 고강도를 나타내었다. 또한 압축탄성계수는 기건양생 및 오토클레브 양생의 경우 CF혼입율 증가에 따라 감소하였으나, 폴리머 함침의 경우는 CF혼입율에 의한 영향은 거의 받지않고 다른 양생의 경우보다 현저히 증가하였다.

(3) CFRC의 인장강도는 기건양생 및 오토클레브 양생의 경우 $V_f=3\sim4\%$ 까지는 섬유혼입율 증가에 따라 현저한 인장강도 증가경향을 나타내었으나 그 이상의 섬유혼입시에는 오히려 인장강도 저하현상을 보였으며, 폴리머 함침에 의한 경우에는 $V_f=5\%$ 까지 현저하게 인

장강도가 증가하고, 또한 기건 및 오토클래브 양생에 비해 약 1.5~2.2배의 높은 강도를 나타내었으며, PAN계 CF의 경우 Pitch계 CF의 경우보다 높은 인장강도를 나타내었다. 또한 폴리머 함침 CFRC의 인장응력-변형률관계는 일반적으로 최대인장응력의 약 95%까지 직선적으로 증가하는 경향을 보였으나, 오토클래브양생의 경우는 현저한 비선형으로 연성적인 경향을 나타내었다.

(4) CFRC의 휨강도는 기건 및 오토클래브 양생의 경우 $V_f=3\%$ 까지는 섬유혼입을 증대에 수반하여 섬유형태에 관계없이 현저히 증대하였으나 그 이상의 혼입시에는 저하하는 경향을 나타내었으며, PAN계 CF의 경우가 Pitch계 CF의 경우보다 약 15~21%의 높은 휨강도를 나타내었다. 또한 폴리머 함침 CFRC의 휨강도는 $V_f=5\%$ 까지 섬유혼입을 증가에 따라 현저히 증가하고 다른 양생방법에 비하여 약 1.9~3.0배의 높은 휨강도를 나타내었다. 또한 섬유혼입을 증대에 따라 휨인성은 현저히 개선됨을 알 수 있고, 폴리머함침의 경우 처짐량은 현저히 감소하여 오토클래브 양생에 비하여 크게 저하하는 경향을 나타내었다.

(5) 폴리머 함침 CFRC의 경우 기건양생 및 오토클래브양생에 비하여 질량감소 및 상대통탄성계수의 저하가 현저히 작고, 열화현상도 거의 나타나지 않았으며, 내동해성의 향상을 위해 오토클래브 양생후 폴리머 함침이 매우 중요한 것으로 판단된다.

(6) CFRC의 건조수축은 전반적으로 섬유혼입을 증가에 수반하여 현저히 저하하고, 폴리머함침의 경우 건조수축에 의한 길이변화율은 오토클래브 양생에 비하여 약 20~30%의 수축저감효과를 나타내었고, 재령 6개월까지의 길이변화도 약 $\pm 0.9 \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 정도로 다른 양생방법에 비하여 매우 안정적이었다.

(7) CFRC의 장기 Creep변형 특성은 섬유혼입 및 오토클래브 양생후 폴리머 함침에 의하여 크게 개선되어 폴리머 함침시 내크리프특성은 재령 1년에서 PAN계 CF를 $V_f=3\%$ 혼입시 $V_f=0\%$ 인 경우에 비하여 기건양생의 경우 약 4.0배, 습윤양생의 경우 약 3.4배에 달하였고, PAN계 CF의 경우가 Pitch계의 경우에 비해 우수한 내크리프특성을 나타내었다. 또한, 재하중중이 파괴하중의 30%인 경우 15%인 경우에 비하여 약 10~40%정도 현저히 증가하는 경향을 나타내어 양생조건 및 재하조건에 따라 크게 영향됨이 판명되었다.

-본 연구는 1989년도 한국과학재단 및 미국 National Science Foundation의 국제공동연구비 지원하에 이루어진 것으로 동재단에 대하여 깊은 감사로 드리는 바입니다. -

참 고 문 헌

1. Aveston, J., Mercer, R.A., and Sillwood, J.M., "The Mechanism of Fiber Reinforcement of Cement Concrete, Part 1.", SI No.90/11/98, Division of Inorganic and Metallic Structure, National Physical Laboratory, Jan. 1975, pp. 1-102.
2. Goldfein, S., "Fibrous Reinforcement for Portland Cement.", Modern Plastics, Vol.42, No. 8, 1965, pp.156-160.
3. Grimer, F.J., Ali, M.A., "The Strengths of Cement Reinforced with Glass Fibers.", Magazine Concrete Research, Vol.21, No.66, 1969, pp. 23-30.
4. Hannant, D.J., "Fibers other than Asbestos, Glass, Polypropylene, and Steel.", Fibre Cements and Fibre Concretes, John Wiley and Sons, Chichester, 1978, pp.146-156.
5. Nielson, L.E., "Young's Modulus of Composite Filled with Randomly Oriented Fibers.", J.of Materials, Vol.3, No.2, 1968, pp.352-358.
6. Naaman, A.E., Shah, S.P., and Thorene, J.L., "Some Developments in Polypropylene Fiber", ACI Pub. SP-81., 1981, pp.373-396.
7. Naraynam, R., Darwish, Y.S., "Use of Steel Fiber as Shear Reinforcement.", ACI Structural J., May~June 1987, pp.216-227.
8. Swamy, R.N., Mangat, P.S., "The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrics", ACI J. SP-44, Detroit, 1974, pp.1-28.
9. Ali, M.A., Majumdar, A.J., and Rayment, D. L., "Carbon Fiber Reinforced Cement.", Cement and Concrete Research, Vol.2, 1972, pp. 201-212.
10. Waller, J.A., "Carbon Fiber Cement Com-

- posites.”, Civil Engineering and Public Works Review, Vol.67, No.789, Apr.1972, pp.357-371.
11. Sarker, S., Baily, M.A., “Structural Properties of Carbon Fibre Reinforced Cement.” Fibre-Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, 1975, London, Vol.1, pp.361-371.
 12. Akihama, S., Suenaga, T. and Nakagawa, H., “Carbon Fiber Reinforced Concrete.”, Concrete International-Design & Construction, Vol.10, No.1, Jan., 1988, pp.40-47.
 13. Briggs, A., “Carbon Fiber-Reinforced Cement.” J.of Material Science, Vol.12, No.2, 1977, pp.384-404.
 14. S.B.Park, E.S.Yoon, “A Study on the Development of CFRC Impregnated in Polymer.” Proc. of KCI Spring Conf.Vol.3, No.1, May 1991, proc. pp.111-116.
 15. S.B.Park, B.S.Rhee, “Experimental Study on the Development and Application CFRC of High Strength.” J.of KSCM Vol.1, No.1, 1988, pp.34-42.
 16. S.B.Park, B.S.Rhee, and H.Y.Kim, “Rheological Behavior Cement-Slurry Suspended with Short Carbon Fibre.”, J. of KSCM, Vol.1, No.1, '88, pp.61-66.
 17. Steinberg, M., Kukacka, L., Colombo, P., Kelsch, J., Monowitz, B., Dikeo, J., and Rubenstein, S., “Concrete-Polymer Materials”, First Topical Report, BNL 50134 (T-509) and USBR Gen., Rep.41, 1986.
 18. Rio, A., Biagini, S., “Recent Progress in the Field of Polymer Impregnated Concretes”, Polymer in Concrete, Proc.of the 1st International Congress on the Polymer Concrete, The Construction Press, Lancaster, 1976, pp. 14-21.
 19. R.F.Feldman and J.J.Beaudoin, “Mechanical Properties of Polymer Impregnated Cement Systems and the Effect of Moisture on their Dimensional Stability”, Cement and Concrete Research, Vol.14, No.6, 1984, pp.785-792.
 20. Mehta, H.C., et al., “Polymer Impregnated Concrete : Field Studies”, Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol.101, No.1, 1975, pp.1-27.
 21. Kuakcka, L.E., P.Colombo, M.Steinberg, and V.Manowitz. “Concrete Polymer Composites”, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.97, No.9, Sept. 1971, pp.2217-2227.
 22. F.Flajsman, D.S.Cahn, and J.C.Phillips, “Polymer-Impregnated Fiber Reinforced Mortars”, J. of American Ceramic Society. Vol.1, No.3, March 1973, pp.129-130.
 23. Gunasekaran, M. “Carbon Fiber Reinforced Polymer Concrete.” Proc. of the 3rd International Congress on Polymers in Concrete, Vol.1, College of Eng., Nihon Univ., Koriyama, Japan, 1982, pp.567-571.
 24. Ohama, Y., Sekino, K., and Shimizu, A., “Effects of Drying Conditions on Polymer Penetration Depth in Rapid Field Impregnation System”, J.of College of Eng. , Nihon Univ., Series A, Vol.26, Mar. 1985, pp.1-5.
 25. Ohama, Y., Demura, K., “Process Technology and Properties of Super-High-Strength Concrete Made by Polymer Impregnation of Silica Fume Concrete”, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Vol.2, ACI Pub. SP-91, Detroit, 1986, pp.1171-1184.
 26. Ohama, Y., Demura, K., and Muranishi, R., “Development of Super-High-Strength Concrete Made with Silica Fume Addition and Polymer Impregnation”, ACI, Detroit, 1985, pp.231-274.
 27. ACI, “Polymers in Concrete”, ACI Pub. SP-40, Detroit, 1973.
 28. ACI, “Application of Polymer Concrete”, ACI Pub. SP-69, Detroit, 1981.
 29. ACI, “Polymer Concrete Uses, Materials, and Properties”, ACI Pub.SP-89, Detroit, 1985.

(접수일자 : 1992. 1. 16)