

섬유보강 폴리머 콘크리트의 강도 및 역학적 특성

Strength and Mechanical Characteristics of Fiber-Reinforced Polymer Concrete

오 병 환*

Oh, Byung Hwan

요 약

최근들어 성능이 우수하고 품질이 높은 새로운 건설소재를 개발하려는 노력이 계속되고 있다. 본 논문에서는 고강도화 및 연성확보를 위하여 폴리머 콘크리트에 섬유를 혼입한 섬유보강 폴리머 콘크리트를 제조하여 강도 및 역학적 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위하여 포괄적인 실험연구를 수행하였으며 주요 실험변수로는 강섬유의 혼입량과 채움재(filler)의 혼입량, 그리고 양생온도를 주요변수로 선정하였다. 강섬유의 혼입량은 체적비로 0%, 1%, 2%로 변화시켰으며, 채움재와 수지의 비는 1.0과 1.5로 하였다. 본 연구결과 섬유의 혼입으로 인하여 압축강도, 휨강도, 인장강도 모두 증가하였으며, 특히 인장강도의 증가가 더 크게 나타났다. 양생온도가 증가한 경우 폴리머의 중합반응이 좋아져 강도가 증가하였다. 또한 본 논문에서는 섬유보강 폴리머 콘크리트의 응력-변형도 관계곡선을 도출하였으며, 이것은 구조설계시 중요한 기초가 될 것으로 사료된다.

Abstract

Considerable efforts are still being made to develop new construction materials. Presented is a study on the strength and mechanical characteristics of fiber-reinforced polymer concrete to enhance the strength and ductility. To this end, a comprehensive experimental program was set up and the fiber contents, filler amounts and curing temperatures were chosen as major test variables. The fiber contents were varied from 0% to 2% by volume and the filler-to-polymer ratios were 1.0 and 1.5. The present study indicates that the fiber addition increases all the strengths including compressive strength and the rate of strength increase is greatest in tension. The high curing temperature also increases the strength of polymer concrete. Finally, this study presents the stress-strain curves of fiber-reinforced polymer concrete which are very important properties in the design of concrete structures.

keywords : Fiber-reinforced polymer concrete, steel fibers, polymer, fiber content, filler, curing temperature, strength increase, ductility, stress-strain curves, mechanical behavior.

* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

1. 서론

성능이 우수하고 품질이 높은 새로운 건설소재를 개발하려는 노력은 꾸준히 계속되고 있다. 콘크리트는 그것이 갖는 여러가지 장점으로 인하여 주된 건설재료로 광범위하게 활용되어 오고 있다. 그러나, 콘크리트는 인장에 취약하여 균열을 유발할 수 있고 열악한 환경하에서 내구성이 저하되는 등 단점도 지니고 있다. 따라서, 재료의 고강도화와 더불어 내구성 및 내화학성 증진을 위한 폴리머 콘크리트의 개발과 이용이 대두되고 있다.

그러나 폴리머 콘크리트도 인장균열이 유발될 수 있으며 연성이 미약한 면을 가지고 있어, 이를 개선하기 위한 방안으로 섬유보강을 고려할 수 있다. 그동안, 폴리머 콘크리트의 연구는 주로 폴리머수지만을 이용한 폴리머 콘크리트(polymer concrete : PC)에 국한되어 연구되어 왔으며, 섬유보강 폴리머 콘크리트(fiber-reinforced polymer concrete : FRPC)의 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구는 폴리머 콘크리트에 섬유를 혼입한 섬유보강 폴리머 콘크리트에 대한 강도특성과 응력-변형관계등 역학적 특성을 규명하는데 주목적을 두고 있다.

이를 위하여 포괄적인 실험연구를 수행하였으며 섬유 혼입량은 0%, 1%, 2%로 변화시켰고, 폴리머 수지와 채움재의 비를 두가지로 변화시킨 경우의 제반특성을 규명하였으며 양생온도가 폴리머 콘크리트의 강도에 미치는 영향도 분석하였다.

2. 섬유보강 폴리머콘크리트의 실험

2.1 실험개요

본 연구에서는 건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트의 제반 성질을 개선하기 위하여 결합재로서 시멘트대신 불포화 폴리에스터수지를 사용하고, 균열저항성 및 연성(ductility)를 증가시키기 위하여 강섬유를 혼입한 시편에 대하여 압축 및 휨실험을 수행하므로써 섬유보강 폴리머 콘크

리트의 역학적 기동특성을 규명하고자 하였다.

폴리머의 함량은 기존의 연구에서 가장 적절한 것으로 나타난 15%(중량비)로 하고, 섬유혼입률, 양생온도, 그리고 채움재(filler)의 혼입량을 변화시킨 경우 폴리머 콘크리트의 강도 및 역학적 특성을 규명하고자 하였다. 먼저 섬유의 혼입량에 따른 섬유보강 효과를 알아보기 위하여 섬유혼입률 V_f ($\text{섬유체적} / \text{콘크리트체적} \times 100$)를 0%, 1%, 2%로 변화시켰다. 다음으로 동일한 체적의 폴리머 콘크리트 배합에서 채움재의 양이 강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 폴리머 : 채움재(P : F)비를 1 : 1, 1 : 1.5로 설정하였다. 또한 폴리머 콘크리트의 특징인 조기강도 증진효과를 고찰하기 위하여 압축강도 실험에서는 재령변수를 1일, 3일, 7일, 28일로 설정하였으며, 휨강도 실험에서는 28일로 설정하였다. 그리고, 본 섬유보강 폴리머 콘크리트의 압축강도 실험에는 50×100mm실린더를, 휨강도 실험에서는 50×50×250mm 보강시체를 사용하였다. 실험 시편의 분류기호와 배합설계 내용은 Table1과 같다.

Table 1. Test variables and mix proportions for various test series

Polymer/Filler	Temperature (°C)	V_f (%)	Specimen Number	UP (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	CA (kg/m ³)	SF (kg/m ³)
1:1	20	0.0	AV ₀	398.3	398.3	747.4	1115.9	0
		1.0	AV ₁	405.6	405.6	722.1	1081.7	93.4
		2.0	AV ₂	413.4	413.4	696.0	1047.2	187.0
	80	0.0	AHV ₀	398.3	398.3	747.4	1115.9	0
		1.0	AHV ₁	405.6	405.6	722.1	1081.7	93.4
		2.0	AHV ₂	413.4	413.4	696.0	1047.2	187.0
1:1.5	20	0.0	BV ₀	399.2	399.0	665.7	998.5	0
		1.0	BV ₁	406.6	609.9	642.3	962.1	93.4
		2.0	BV ₂	414.4	621.6	617.8	925.4	187.0
	80	0.0	BHV ₀	399.2	399.0	665.7	998.5	0
		1.0	BHV ₁	406.6	609.9	642.3	962.1	93.4
		2.0	BHV ₂	414.4	621.6	617.8	925.4	187.0

(Note : UP=Unsaturated Polyester, FA=Fine Aggregate, CA=Coarse Aggregate, SF=Steel Fiber)

2.2 실험재료

(1) 채움재(filler)

채움재료는 실용적인 면과 여러 특성면에서 바람직하며 쇄석을 만들때에 부산물로 얻어지는 비중 2.75인 석분을 사용하였으며, 석분의 체가름 시험결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Sieve analysis results for stone powder

Sieve No.	Percentage passing(by Weight)
No. 30	100
No. 50	98
No.100	85

(2) 골재

잔골재는 비중 2.64, 조립률 2.18인 강모래를, 굵은골재는 2.66, 조립률 7.12, 최대 골재치수 9.5mm인 강자갈을 사용하였다.

(3) 강섬유

본 실험에서 콘크리트 보강재로 사용한 강섬유는 단면이 원형인 강섬유로서 직경 $d_f=0.7\text{mm}$, 길이 $L_f/30\text{mm}$ 이고 형상비(길이/직경비)가 $L_f/d_f=43$ 인 직선섬유(straight fiber)이다. 강섬유에 대한 역학적성질을 시험한 결과 항복점 강도는 1303 MPa이었고, 탄성계수(E_f)는 2.0×10^5 MPa 이었다.

(4) 폴리머 및 경화제

폴리머 콘크리트에 사용되는 폴리머에는 여러 가지가 있으나 본 실험에서는 M회사에서 생산된 비중 1.13인 일반 성형용 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였으며 그 화학적인 구조는 Fig.1과 같고 물리적인 성질은 Table 3와 같다.

경화제는 MEKPO(Methyl-Ethyl Kethone Peroxide)를 수지체적의 1%를 첨가하여 사용하였다.

Table 3. Physical properties of unsaturated polyester

Viscosity (25°C) (PS)	mg KOH/g	Hardening condition	Gel time(25°C) (min)	Styrene monomer(%)
2-4	20	M1.0	8-15	38

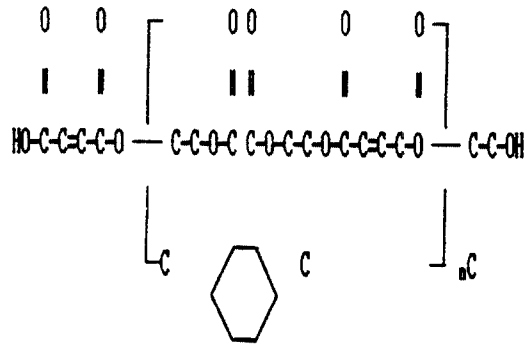
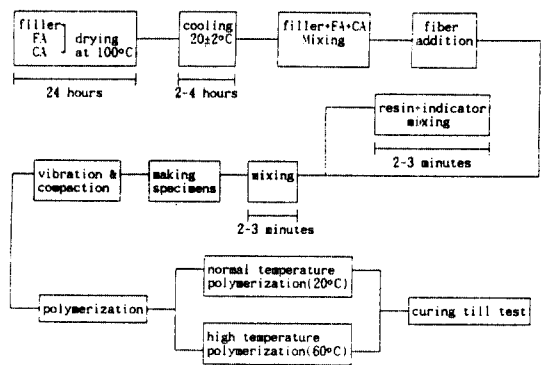


Fig. 1 Chemical structure of unsaturated polyester(ortho type)

2.3 실험시편의 제작 및 양생

모든 시편들은 각 시리즈(series)마다 한 배치에서 만들어졌으며, 압축강도 실험용으로 원주형 공시체와 휨강도 실험용으로 보공시체를 제작하였다. 양생온도가 폴리머 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 두가지 양생온도로 구분하여 실험하였다. 첫번째 경우는 제작후 20°C에서 실험일까지 양생한 경우이고, 두번째 경우는 시편 제작후 바로 60°C의 온도로 유지시킨 건조기에 넣어 18시간 양생후 탈형해서 실험일까지 20°C에서 양생한 경우이다. 배합 및 양생공정을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Mixing and curing procedures for fiber-reinforced polymer concrete



2.4 실험 수행 및 측정

실험은 압축강도 실험 및 휨강도 실험으로 나누어 수행하였다. 압축강도 측정은 재령 1,3,7,28일에 실시하였으며, 휨강도 측정은 재령 28일에서 측정하였다. 폴리머 콘크리트는 고강도이기 때문에 약간의 편심이 작용하여도 강도에 많은 영향을 주므로 압축강도 측정에 앞서 모든 실린더 시편들을 깎핑하였다. 그리고 강도 측정에는 성능 200ton인 자동제어 재료시험기를 사용하였으며, 모든 실험결과가 X-Y recorder에 의해 자동기록되었다.

3. 실험결과 및 분석

강도실험은 압축 및 휨실험으로 나누어 수행하였으며 각 시리즈에 대한 강도실험 결과는 Table 5에 요약되어 있다.

Table 5. Test results of compressive and flexural strengths for various series of fiber-reinforced polymer concrete

Test Series	Compressive Strength (MPa)				Flexural Strength (MPa)
	1day	3days	7days	28days	28days
AV ₀	44.97	53.28	60.22	71.09	17.61
AV ₁	46.21	55.02	61.82	72.94	20.57
AV ₂	48.36	57.11	63.86	74.91	25.80
AHV ₀	52.66	59.15	64.15	72.33	18.10
AHV ₁	53.81	60.07	66.07	76.27	24.46
AHV ₂	56.14	62.83	67.99	81.67	26.80
BV ₀	62.62	66.14	68.85	73.29	20.54
BV ₁	63.95	68.84	72.60	76.90	21.98
BV ₂	66.30	70.28	73.35	84.37	27.47
BHV ₀	67.06	69.42	71.24	74.21	20.87
BHV ₁	68.73	72.42	74.49	77.88	21.98
BHV ₂	72.41	75.72	78.27	86.53	28.47

3.1 압축강도 특성 및 압축 거동

(1) 섬유혼입률의 변화에 따른 강도증진 특성
섬유보강 폴리머 콘크리트(FRPC)에서 강섬유

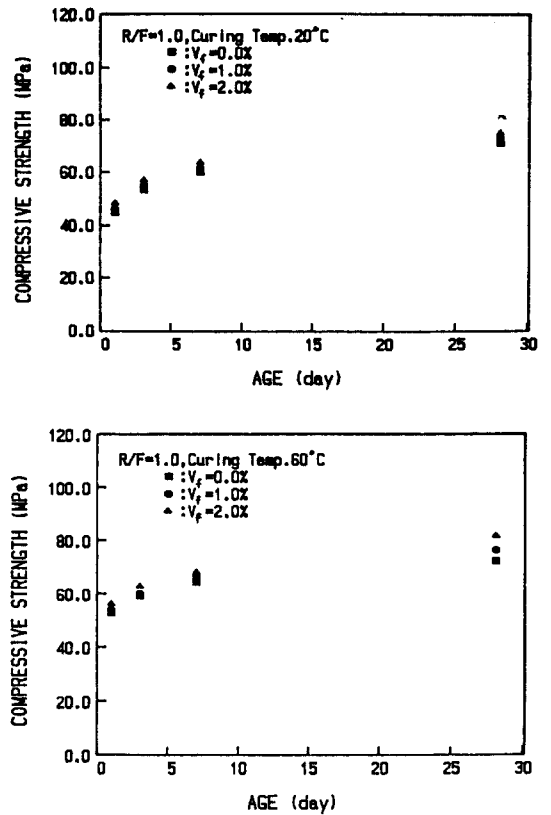


Fig. 2 Variation of compressive strengths due to fiber addition (R/ F=1.0)

의 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 증가했으며, 이 결과를 Fig.2 및 Fig.3에 나타냈다. 이때 압축강도의 증가율은 휨강도의 증가율보다 작았으며, R/F=1.5이고 섬유혼입률이 2%일때 재령 28일에서 60°C로 양생한 시편의 압축강도는 같은 조건에서 섬유를 혼입하지 않은 시편의 압축강도보다 17%정도 증가하였다. 이와같은 강도의 증가는 강섬유의 균열 억제작용에 기인하는 것으로 사료된다.

(2) 양생온도 변화에 따른 강도변화 특성

양생온도 변화에 따른 재령별 압축강도를 Fig.4 및 Fig.5에 도시하였다. 이 결과로부터 20°C로 양생한 시편보다 60°C로 18시간 양생한 후 상온에서 양생시킨 시편의 압축강도가 더 크음을 알 수 있다. 이는 시편제작 직후 중합(polymerization)되는 과

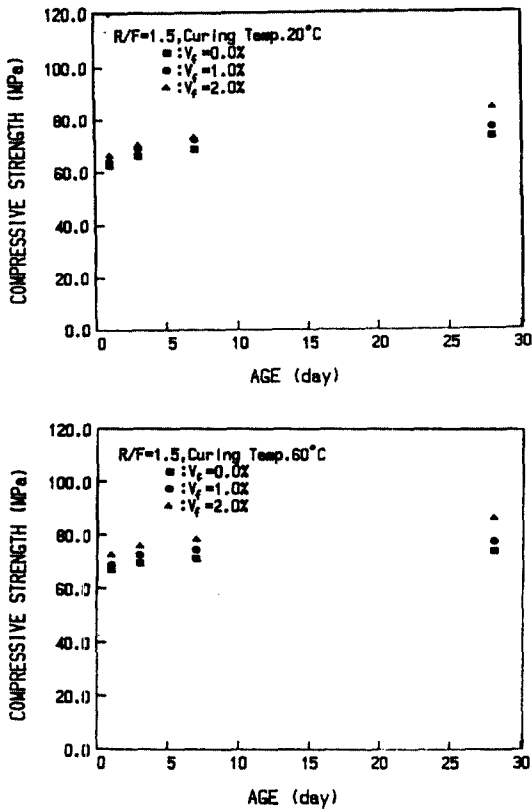


Fig. 3 Variation of compressive strengths due to fiber addition ($R/F = 1.5$)

정에서 고온의 열이 중합을 촉진해서 일어난 결과라고 볼 수 있다.

(3) 채움재 함량변화에 따른 압축강도 특성

채움재 : 세골재 : 조골재(F:FA:CA)의 비에 따른 강도의 변화를 Fig.6 및 Fig.7에 나타내었다. Fig.7에서 채움재 : 세골재 : 조골재의 비가 1 : 1.7 : 2.5인 경우보다 1 : 1.0 : 1.5인 경우에 강도가 더 크음을 알 수 있다. 이것은 일정한 수지량에서 채움재가 충분히 들어가는 경우 채움재가 골재사이의 공극을 보다 치밀하게 하여주기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 휨강도 특성 및 휨거동

섬유보강 폴리머 콘크리트(FRPC)의 휨강도는

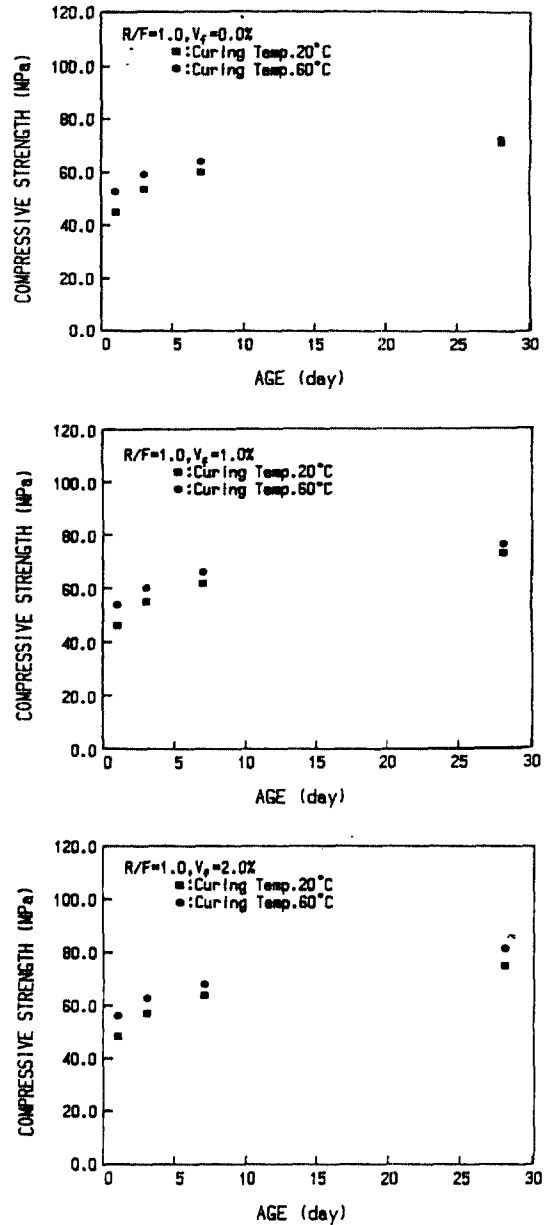


Fig. 4 Effect of curing temperature on the compressive strengths of FRPC ($R/F = 1.0$)

섬유혼입률이 증가함에 따라 상당히 증가했으며, 이를 Fig.8에 도시하였다. 압축강도에서의 특성과 마찬가지로 20°C로 양생한 시편보다 60°C로 18시간 양생한 후 상온에서 양생시킨 시편에 있어 휨강도가 더 컸으며, 채움재의 양을 증가시켰을 때에도 휨강도가 더 크게 나타났다. 또한, 수지 : 채

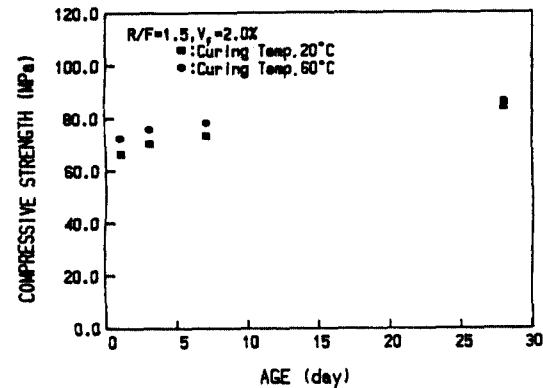
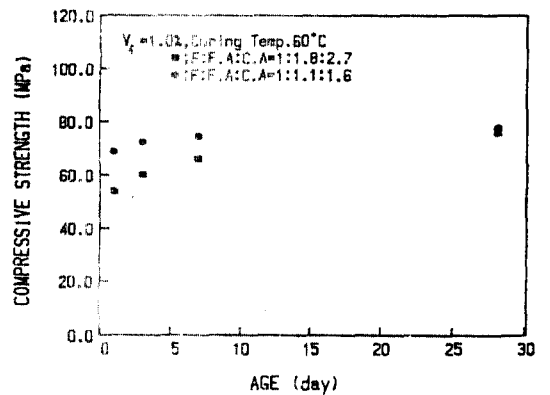
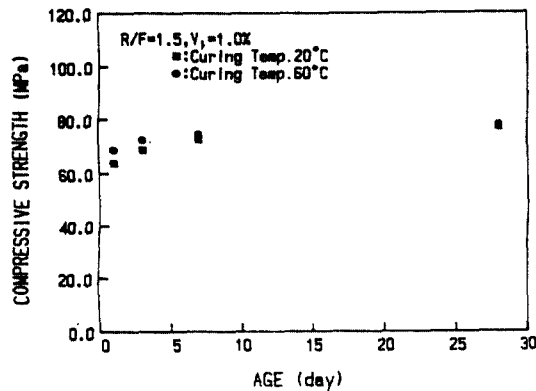
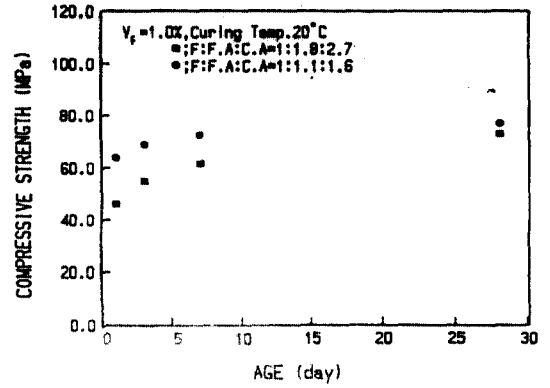
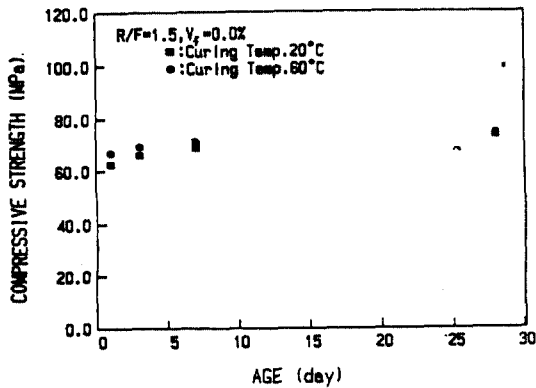


Fig. 5 Effect of curing temperature on the compressive strengths of FRPC (R/F=1.5)

Fig. 6 Effect of fiber amount on the compressive strength of FRPC at fiber volume $V_f=1\%$

움재비가 1 : 1, 양생온도 60°C에서 섬유보강 폴리머 콘크리트의 휨강도는 강섬유의 혼입률이 증가할수록 거의 선형적으로 증가했으며, 섬유혼입률이 2%일때 섬유를 혼입하지 않은 시편에 대한 휨

강도의 증가율을 약 50%로서 압축강도의 증가율 보다 컸다. 이와 같은 결과는 섬유보강 폴리머 콘크리트가 폴리머 콘크리트의 압축보다는 휨거동에 대한 역학적 성질을 크게 개선함을 나타낸다.

3.3 활열 인장강도 특성

본 연구에서는 휨거동 시험에 부가하여 R/F=1.5인 경우의 활열 인장강도 시험도 수행하였다. 섬유보강 폴리머 콘크리트(FRPC)의 활열 인장강도는 섬유혼입률이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였고 R/F=1.5, 섬유혼입률이 2%일 때 활열 인장강도는 섬유혼입률이 0%인 경우의 활열 인장강도보다 약 2.2배 증가하였다. Fig.9는 압축강도, 휨강도, 활열 인장강도 결과를 상호비교한 것으로서 활열 인장강도의 증가율이 휨강도

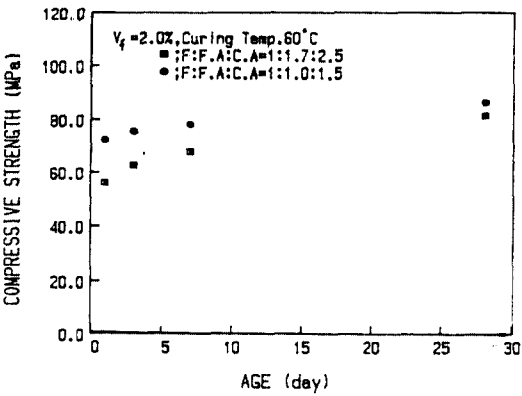
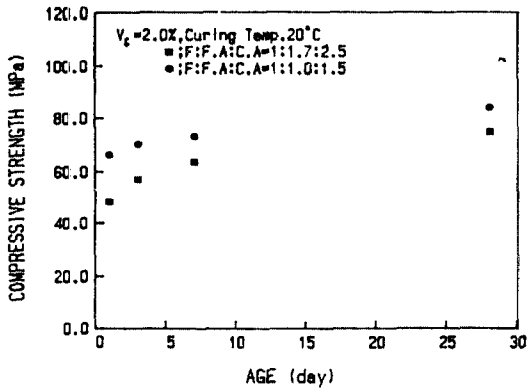


Fig. 7 Effect of filler amount on the compressive strength of FRPC at fiber volume $V_f = 2\%$

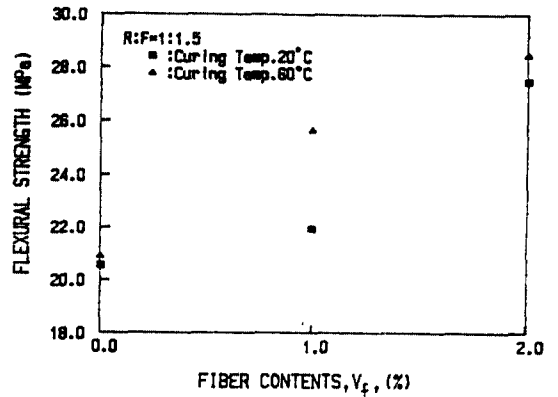
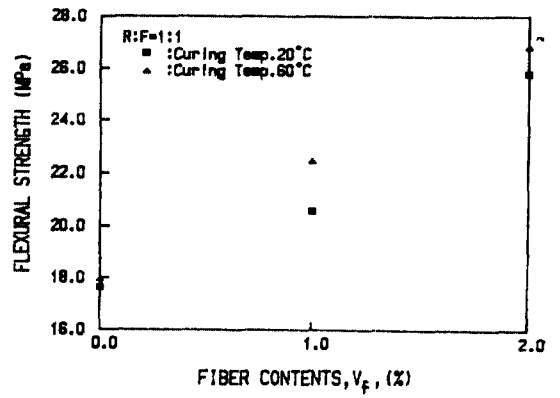


Fig. 8 Variation of flexural strengths of FRPC at different fiber amounts and curing temperatures

나 압축강도의 증가율보다 훨씬 큼을 알 수 있으며, 이와같은 결과는 콘크리트에 대한 섬유보강은 콘크리트의 압축강도보다는 인장강도를 크게 개선함을 나타낸다. 또한 활열 인장강도의 증가율이 휨 인장강도의 증가율보다 큰 것은 활열 인장의 경우가 휨인장보다도 인장을 받는 영역이 상대적으로 많기 때문에 섬유보강효과가 활열인장에서 더 크게 나타나는 것이라고 사료된다.

4. 섬유보강 폴리머 콘크리트의 역학적 거동

4.1 응력-변형도 관계곡선 도출

섬유보강 폴리머 콘크리트의 설계를 위하여 필요한 압축하중하에서의 응력-변형도 관계곡선

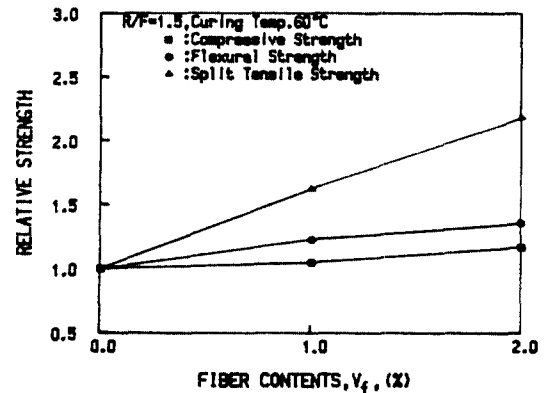


Fig. 9 Comparison of various strengths of FRPC at various fiber contents

(stress-strain curve)을 본 실험으로부터 도출하였다.

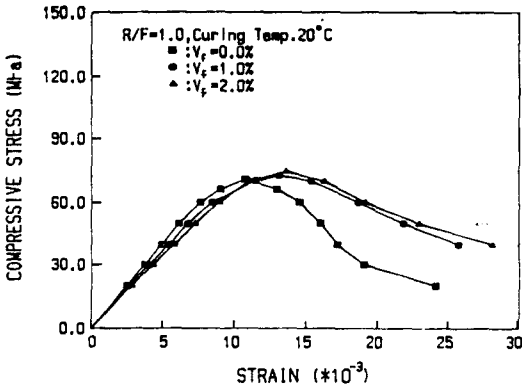


Fig. 10 Stress-strain curves of FRPC(curing temperature 20°C)

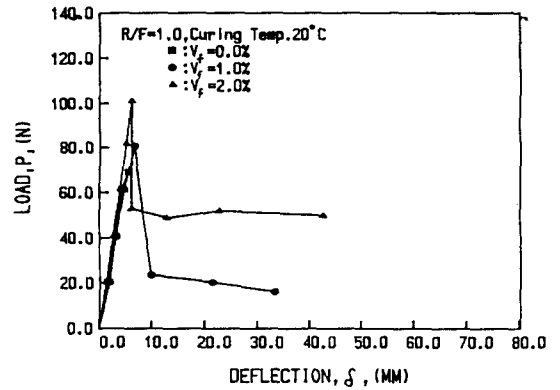


Fig. 12 Load-deflection curves of FRPC at various fiber contents (curing temperature 20°C)

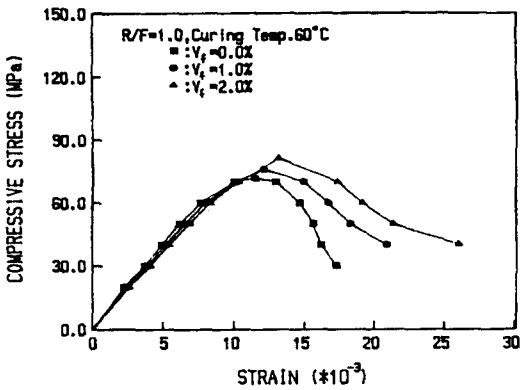


Fig. 11. Stress-strain curves of FRPC(curing temperature 60°C)

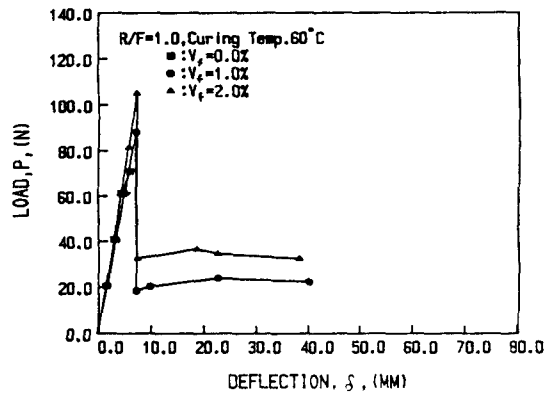


Fig. 13 Load-deflection curves of FRPC at various fiber contents (curing temperature 60°C)

Fig.10은 수지 : 채움재비가 1 : 1이고 양생온도가 20°C인 경우에 섬유혼입량별 응력-변형 관계곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서 보듯이 섬유혼입량이 많아질수록 연성(ductility)이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.11은 수지 : 채움재비가 1 : 1이고 양생온도가 60°C인 경우의 섬유혼입량별 응력-변형도 관계를 보여주고 있다. 이 그림에서도 연성의 증가가 뚜렷이 나타나고 있다.

4.2 휨하중-처짐 곡선

섬유보강 폴리머 콘크리트의 휨거동을 구체적으로 알아보기 위하여 하중-처짐곡선을 실험적으로 도출하였다.

Fig.12는 양생온도 20°C인 경우의 정적하중하

에서 하중-처짐곡선을 보여주고 있으며, 이 그림에서도 섬유혼입량 2%에서 연성이 매우 커지는 것을 알 수 있다.

Fig.13은 양생온도 60°C인 경우의 하중-처짐곡선을 나타내고 있다. 여기에서도 섬유혼입으로 인하여 연성의 증가가 뚜렷함을 알 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 성능을 개선하고, 특히 인장 저항성능과 연성을 증가시키기 위하여 섬유보강 폴리머 콘크리트의 제반 강도특성 및 역학적 거동을 규명하고자 하였다. 특히 폴리머 콘크리트의 강도특성에 미치는 제반 영향을 분석하기 위하여 섬유의 혼입률, 채움재의 혼입률 및 양생 온도등을 주요변수로 하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 폴리머 콘크리트에 섬유를 혼입하면 압축강도, 휨강도 및 할열 인장강도가 증가하며, 이때 인장강도가 가장 많이 증가하므로 섬유의 혼입은 폴리머 콘크리트의 인장거동을 크게 개선한다.

(2) 고온에서 양생한 경우 압축강도 및 휨강도가 크게 개선되었으며 이것은 고온의 열이 중합을 촉진시키기 때문인 것으로 사료된다.

(3) 수지의 양을 고정시킨 상태에서 채움재의 함량을 어느정도 증가시켰을 때 압축강도 및 휨강도가 증가한다.

(4) 폴리머 콘크리트에 섬유를 혼입하면 연성 및 휨인성이 크게 증가한다.

(5) 수지는 채움재와 골재입자 사이의 부착력을 향상시키므로 일반적으로 시멘트 콘크리트에서는 골재와 matrix 공유면의 파괴를 보이는 반면, 폴리머 콘크리트에서는 작은골재입자의 파괴를 보인다. 따라서 폴리머 콘크리트에서 양질의 골재를 사용하면 강도증진이 더 클 것으로 사료된다.

(6) 섬유보강 폴리머 콘크리트의 응력-변형도 관계곡선과 하중-처짐 관계곡선을 도출하였으며 이것은 섬유보강 폴리머 콘크리트의 구조설계시 중요한 기초자료로 이용될 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 1989년도 목적기초 연구 지원으로 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Koyanagi, W., Rokugo, K., Murai, N. and Hayashi, F., "Evaluation of toughness of resin concrete and its improvement by steel fibers," *Polymers in Concrete, ICPIC '84, Darmstadt*, pp.93-98.
2. Huges, B. P. and Guest, J. E., "Polymer modified fibre-reinforced cement composites," *Proceedings of the First International Congress on Polymer Concretes, U.K., May 5-7, 1975*, pp.85-92.
3. Kobayashi, K. and Ito, T., "Several physical

- properties of resin concrete," *Proceedings of the First International Congress on Polymer Concretes, U.K., May 5-7, 1975*, pp.236-240.
4. Aguado, A., Martinez, A. and Salla, J.M., "Effects of different factors in mixing and placing of polymer concrete," *Polymers in Concrete, ICPIC '84, Darmstadt*, pp.299-303.
5. Mangat, P.S., Swamy, R.N., "Properties of polymer modified plain and fibre-reinforced concrete," *Proceedings of the First International Congress on Polymer Concretes, U. K., May 5-7, 1975*, 296-299.
6. McClain, R.R., : *Epoxy Modified Cement Admixtures*, "Proceedings of second international congress on polymers in concrete, Austin, October 25-27, 1978", pp.483-501.
7. Demura, K., Ohama, Y. and Shinizu, A., "Proposed mix proportioning of polyester resin concrete," *Polymers in Concrete, ICPIC '84, Darmstadt*, pp.265-269.
8. "Polymers in concrete", Reported by ACI Committee 548(1977).
9. Bazant, Z.P. and Oh, B.H., "Strian-rate effect in rapid triaxial loading of concrete," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.108, No.EM5, Oct. 1982*, 764-782.
10. Shah, S. P. and Rangan, B. V., "Fiber reinforced concrete properties," *ACI Journal, Vol.68, No.2, Feb., 1971*, pp.126-135.
11. Swamy, R.N., Manget, P.S. and Rao, C.V.S. K., "The Mechanics of fiber reinforcement of cement matrices," *Fiber Reinforced Concrete, ACI, SP-44, 1974*, pp.1-28.
12. 신수봉, "변형속도 효과를 고려한 콘크리트의 구성모델 연구," 서울대학교 대학원, 석사학위논문, 1986.
13. 이형준, "강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재의 휨 거동에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1988.
14. 나정우, "Polymer 함침 콘크리트의 기초적 성질에 관한 연구," 서울대학교 대학원 석사학위논문, 1981.
15. 오병환, 김영선, "섬유보강 폴리머 콘크리트의 강도특성에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 1989가을 학술발표회 논문집, 1989.11, pp.5-8.

(접수일자 : 1992. 7. 20)