

炭素纖維補強콘크리트의 一軸壓縮載荷時的의 力學的特性에 關한 實驗的 研究

An Experimental study on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Concrete under Uni-Axial Compression Loading

부 척 량* 김 화 중** 이 상 재***
Boo, Cheong Yang, Kim, Wha Jung, Lee, Sang Jae

요 약

구조재료로서 섬유보강콘크리트의 사용의 증가와 더불어, 그 자체의 역학적 특성에 대한 더 많은 지식이 필요해지고 있다.

본 논문은 단조하중과 반복압축하중을 받을때 탄소섬유보강콘크리트의 거동에 대한 실험 결과를 나타낸다. 그 결과들은 (1) CFRC는 콘크리트 매트릭스에 섬유를 증가시킴으로써 콘크리트 매트릭스의 강도를 개선시키고 있다. (2) 콘크리트 매트릭스에 섬유를 증가시키는 것은 그 자체의 응력도-변형도 응답에 대해서 실질적인 변화를 가져왔었다. 이 변화는 응력도-변형도에서 주목할 정도로 연성이 증가되는 특성이 나타나고 있다. (3) CFRC의 반복하중하에서의 거동은 보통콘크리트에 비해서 더욱 많은 안정성을 가지고 있다. 높은 섬유혼입은 응력도-변형도 곡선에서 곡선하강곡선이 보다 완만하게 나타나고 있다. 이것은 재료의 더 높은 연성의 결과이다.

ABSTRACT

With the increasing use of Fiber Reinforced Concrete as a structural material. More information on its mechanical properties is needed.

This paper reports the results of experiments on the behavior of Carbon Fiber Reinforced Concrete under monotonic and cyclic compressive loading. The results are that (1) CFRC does improve its compressive strength by adding fibers to a concrete matrix. (2) Adding any fiber to a concrete matrix produced a substantial change in its stress-strain response. This change is characterized by a significant increase in ductility as described by the descending portion of the stress-strain curve. (3) As compare with plain concrete, the normalized cyclic behavior of CFRC has a much stability. A higher fiber content produces a lesser steep descending portion, which results in a higher ductility of the material.

* 정회원, 전남대학교 공과대학 건축공학과, 교수, 공학박사
** 정회원, 경북대학교 공과대학 건축공학과, 조교수, 공학박사
*** 정회원, 원광대학교 공과대학 건축공학과, 부교수

● 1990. 6. 9 접수, 본 논문에 대한 토론을 1991. 6.30 까지 본학회에 보내주시면 1991. 9월호에 그 결과를 게재해 드립니다.

1. 서 론

콘크리트는 원래 취성재료로써 오래전부터 콘크리트의 취성적 성질을 개선하려는 시도의 하나로, 강섬유, 유리섬유, 폴리프로필렌계섬유, 탄소섬유 등과 같은 보강재료와의 재료복합화에 의한 섬유보강시멘트 및 콘크리트에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해서 행해져 왔다.⁽¹⁻⁷⁾ 이들 섬유중 역학적특성, 내열성 및 화학적 안정성 등의 신뢰성이 우수한 탄소섬유는 국내외에서 건축용재료로 주목을 받으면서 실용화에 대한 많은 연구 개발이 진척되고 있다.⁽⁸⁻¹³⁾ 탄소섬유보강시멘트 및 콘크리트(이하 CFRC로 부름)에 관한 연구는 PAN系 섬유중 연속섬유를 사용한 실험연구와 Pitch系 단섬유를 사용한 실험연구로 대별되고 있으며, 특히 콘크리트에 관한 실험연구 중에서도 인장 및 휨을 받는 부재의 역학적 거동에 대한 실험 연구가⁽¹⁴⁻¹⁸⁾ 그 주종을 이루고 있는데 비해서, 압축재하시의 역학적 거동에 관한 연구 자료는^(13, 19, 20) 비교적 적다. 또한 압축재하시의 역학적 거동에 대해서 확실한 설명을 하기에는 아직도 불분명한 점이 많은 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 인장 및 휨재하시의 역학적 특성 외에도 一軸방향의 單調增加 압축재하시, 특히 반복압축재하시의 역학적성상에 대한 상세한 파악을 위하여 單調增加 압축재하 및 반복압축재하를 받을때 CFRC가 높은 변형영역에 이르기까지의 역학적성상을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험계획

표 1과 같은 실험요인에서 물시멘트比와 세골재율은 秋^{●●} 등의 실험연구를 참조하여⁽²¹⁻²²⁾ 일정하게 고정하고, 섬유혼입율의 범위는 Fiber Ball 등의 배합상 문제와 경제성을 고려하

여 0.5%~1.5%로 하였다. 또한 시험체의 개수는 각 요인마다 20개씩으로 하여 합계 80개로 하였다.

加力은 圓柱形試驗體(φ10×20cm)에 一軸방향의 單調增加 압축재하와 반복압축재하를 시험체가 완전히 파괴될 때 까지 계속하였다. 변형도의 측정은 圓柱形試驗體의 軸방향 길이의 4등분구간의 중앙 2개 구간에서 변형도를 측정하였다. 그리고 탄소섬유의 체적혼입율에 따른 압축강도와 변형성질을 실험계획법에 따른 분산분석법을 행하였다.

表 1. 실험요인과 수준

요인	수준
섬유종류	Carbon Fiber
섬유형상	Pitch Type 短纖維
섬유길이	10mm
섬유배향	Random 배열
섬유혼입율	0, 0.5, 1, 1.5%
물시멘트비(W/C)	50%
세골재율(S/A)	60%
시멘트	보통 포틀랜드시멘트
골재	강자갈, 강모래
혼화제	AE감수제

2.2 시험체의 제작 및 양생방법

시험체는 보통포틀랜드시멘트(국내 S사제품), 섬진강산 강자갈, 영산강산 강모래 및 탄소섬유(C-110T)를 사용하여 제작하였으며, 각 재료의 성질은 표 2, 표 3, 표 4, 표 5와 같다. 콘크리트의 배합은 다수의 실험연구 예를 참조하여⁽²¹⁻²²⁾ 표 6과 같이 하였으며, AE감수제는 시멘트 중량의 0.15%를 첨가하였다. 또 탄소섬유혼입율의 증가에 따른 시공연도의 저하를 고려하여 세골재量率을 변화시켰다. 공시체의 성형 및 양생방법은 KSF 2404 및 JCI規準案을 따랐다. 특히 콘크리트의 혼합에 있어서 섬유의 분산은 여러 방법이 제안되고 있으나,

(21-22) 본 실험에서는 混練前에 5mm체와 사진1과 같은 섬유분산기를 사용하여 충분히 풀어서 사용하였다. 혼합은 모래 및 자갈의 순서로 약간씩의 골재 속에 섬유를 골고루 분산시키는 방법으로 모래, 자갈, 섬유를 혼합한 후, 용량 54 ℓ의 Rake Drum Type Mixer에 투입하고 1분 내지 1분30초간 혼련하였다. 그리고 시멘트

트, 물의 순으로 투입하고 각각 1분30초와 2분간 혼련하여 공시체를 제작하였다. 다짐방법은 KSF 2404 및 JCI 規準案을 따랐으며, 전동식 판상진동기를 형틀의 외측면에 대고 윗면이 평활할 때 까지 외부진동을 주어 다졌다. 공시체는 24시간 이전에 시멘트페이스트로 캡핑하고, 탈형후 28일간 수조에서 표준 양생하였다.

表 2. Properties of Carbon Fiber

Type of Fiber	Diameter (μm)	Length (mm)	Aspect Ratio(L/D)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity ($\times 10^5\text{kg/cm}^2$)	Elongation (%)
Pitch	18 μ	556	556	약 6,000	3.0	2.0

* Carbon Fiber : 일본 Kureha(주) C-110T

表 3. 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도	안정도	응결시간		압축강도 (kg/cm ²)		
			초결 (분)	종결 (시간)	3일	7일	28일
	cm ³ /g	%					
3.1	3,290	0.13	250	6 : 50	204	295	385

表 4. 시멘트의 화학적 성질

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	F ₂ O ₃ (%)	HgO (%)	So ₃ (%)	강열감량 (%)	C ₃ A (%)	C ₄ O (%)
20.4	6.1	3.3	3.1	2.3	1.1	10.6	53.1

表 5. 골재의 물리적 성질

종류	비중	조립율	흡수율 (%)	최대크기 (mm)	단위용적중량 (kg/m ³)
세골재	2.58	2.9	0.92	5	1604.7
조골재	2.57	6.6	1.85	20	1605.12

* 세골재 : 광주직할시 광산구 영산강지류산

** 조골재 : 전남 곡성군 입면 섬진강지류산

表 6. CFRC의 배합

공시체 종류	물 시멘트 비 W/C (%)	세 골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	섬유 혼입율 (o/vol)	단위 중량(kg/m ³)				
					시멘트	세골재	조골재	탄소섬유	혼화제
A2	50	60	230	0	460	888.4	587.5	0	0.69
C05F	50	60	230	0.5	460	880.6	582.4	8.25	0.69
C10F	50	60	230	1.0	460	872.8	577.2	16.5	0.69
C15F	50	60	230	1.5	460	865.1	572.1	24.75	0.69

* 혼화제 : Conplast AE21(콘크리트 감수 공기 연행제)

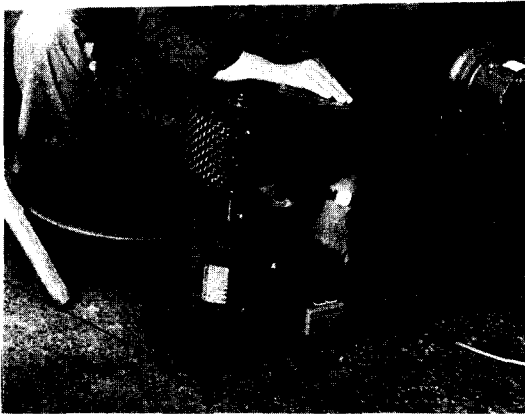


사진 1. 탄소섬유 분산기

2.3 재하 및 측정방법

시험체의 재하는 용량 100ton의 유압식 만능시험기를 사용하였으며, 軸方向변형도의 측정에는 KSF 2405 및 JCI 規準案에⁽²³⁾ 의하여 그림 1과 같은 Compressor Meter에 Displacement Transducer(CDP-10)를 사진 2와 같이 설치하여 실험을 하였다. 전체 실험체계도는 그림 2와 같다. 또한 응력도(σ_c) - 변형도(ϵ_c) 曲線은 최대변형도가 0.8%를 넘을 때까지 추적하였다. 최대압축응력 이하에서의 반복압축재하는 최대압축응력의 2~3등분의 응력위치에서 하중이 깎이 될 때까지 除荷를 행하였으며, 최대압축응력 이후의 복원력특성을 파악하기 위하여 다시한번 반복압축재하를 하는 등, 함께 3~4회 정도의 반복압축재하를 하였다. 응력도(σ_c) - 변형도(ϵ_c)율은 Load Cell과 변형계로 부터 변형측정기를 통하여 컴퓨터와 X-Y Plotter에 기록하였다.

3. 실험결과와 분석 및 검토

3.1 압축강도

3.1.1 압축강도(σ_{max})와 섬유흡입율(V_f)의 관계 섬유흡입율(V_f)이 CFRC의 압축강도에 미치는 영향을 조사하기 위해, 먼저 BARTLETT법에 의한 分散의 均齊性을 검토하고, 分散分析

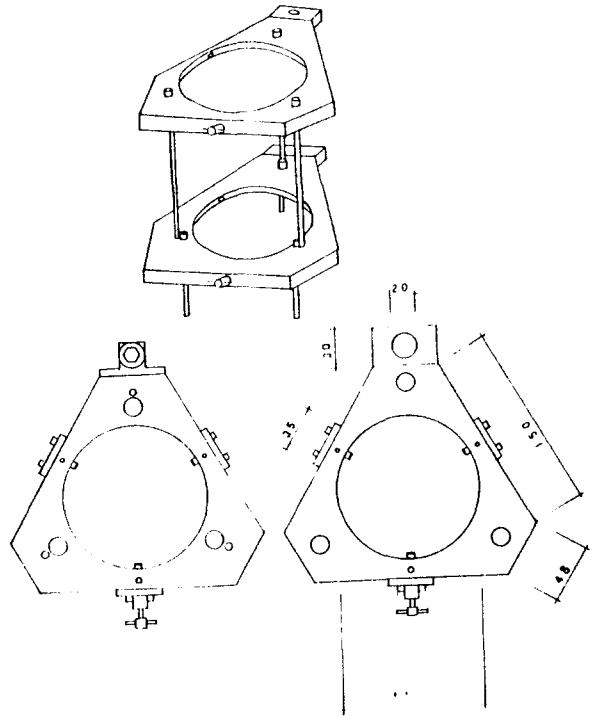


그림 1. COMPRESSOR METER

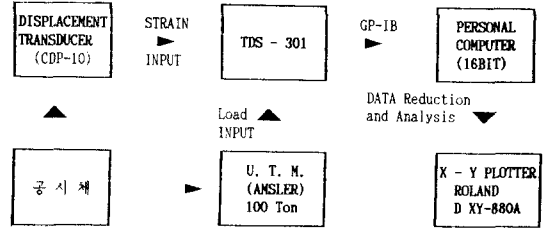


그림 2. Measurement System Flowchart

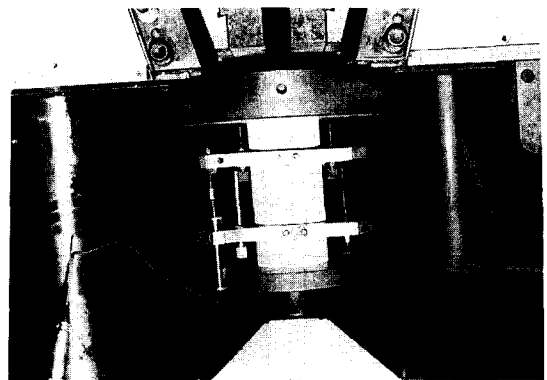


사진 2. 압축 변형 측정장치

法을 행하였다.⁽²⁴⁻²⁵⁾ BARTLETT법에 의한 각

실험수준간의 분산의 균제성은 5% 수준에서 유의성이 없으므로 분산분석을 행한 各處理平均間の 분석결과는 1% 수준에서 고도의 유의성을 발견하였다. 분석결과는 표 7, 표 8과 같으며, 표준오차 및 섬유혼입율(V_f)과 최대압축강도와의 관계는 그림 3과 같았다. 이와같은 결과를 볼 때 섬유혼입율(V_f)이 압축강도에 미치는 영향이 대단히 큼을 알 수 있다. 또한 섬유혼입율(V_f)에 따른 압축파괴형태는 사진 3과 같이 섬유혼입율의 증가에 따라 연성적인 파괴형태를 보여 주고 있었다. 본래 섬유보강의 최대기대효과는 인장강도, 휨강도 및 그 변형성상의 향상을 기대하고 있으나, 압축강도에서는 그림 3과 같이 섬유혼입율이 0.5%일 때는 보통콘크리트에 비해 21% 저하하고 있으며, $V_f=1\%$, 1.5% 에서는 약간의 강도증진을 나타내고 있다. $V_f=0\%$, 1% , 1.5% 일 때는 Akihama 등의 연구결과와⁽²⁰⁾ 비교할 때 강도차이는 약간 있으나 대체로 비슷한 결과를 보이고 있다. 다만 $V_f=0.5\%$ 일 때는 Akihama의 결과와 상당한 차이가 발견되었다. 이것은 $V_f=0.5\%$ 에서는 섬유가 콘크리트 중에서 골재와 유사한 역할을 하지 못하고 오히려 시멘트와 골재의 맞물림 효과에 나쁜 영향을 끼치고 있으나, $V_f=1\%$, 1.5% 에서는 콘크리트와 섬유와의 마찰 및 골재의 맞물림 효과를 증대시킴과 동시에 콘크리트 중에서 골재와 유사한 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 실험범위에서 볼 때 섬유혼입율은 어느정도 이상 혼입해야 하는 것으로 판단된다.

表 7. BARTLETT'S TEST

BARTLETT'S TEST FOR COMPARISON OF VARIANCES			
GROUP NO.	V_f	MEAN	STANDARD DEVIATION
1	1.5%	297,375	26.27757
2	1.0%	280,5	12.28312
3	0.5%	219,725	18.47676
4	0%	279,675	5.855909

THE DIFFERENCE OF VARIANCES IS NOT SIGNIFICANT. $P=1$
SIGNIFICANCE LEVEL : .05 CALCULATED CHI-VALUE : -13.2128

表 8. CFRC의 최대압축강도($\sigma_{c,max}$) 분산분석
ANOVAR AND DUNCAN'S TEST
TABLE OF ANALYSIS OF VARIANCE

FACTOR	SS	(DF)	VARIANCE	F VALUE	P
TOTAL	17566.88	15			
GROUP	13915.75	3	4638.583	15.24544	$\langle =.001$
ERROR	3651.125	12	304.2604		

THE DIFFERENCE IS HIGHLY SIGNIFICANT, $P<0.01$.

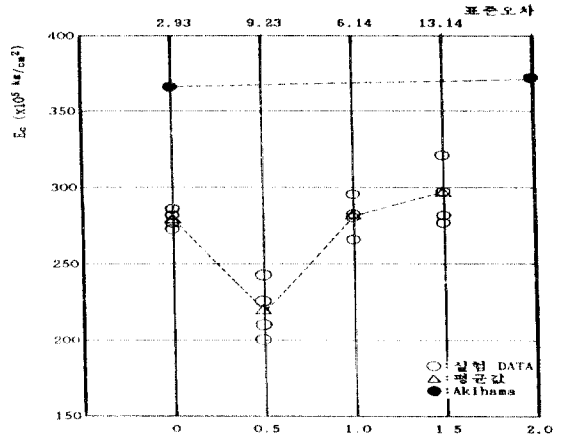


그림 3. 섬유혼입율(V_f)과 최대압축강도($\sigma_{c,max}$)의 관계

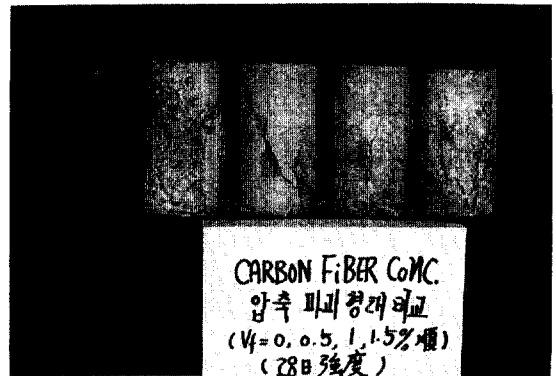


사진 3. CFRC의 압축파괴 형태

3.1.2 탄성계수(E_c)와 섬유혼입율(V_f)의 관계

섬유혼입율(V_f)에 따른 탄성계수(E_c)의 분산 분석결과는 표 9와 같다. 탄성계수(E_c)는 그림 4에 나타난다. 분산분석결과는 5% 수준에서 유의성이 없으나, 그림 4와 같이 CFRC의 탄성계수(E_c)는 보통콘크리트에 비해 전반적으로 저

하하는 현상을 보이고 있다. 이것은 CFRC가 보통콘크리트에 비해 연성적인 성질을 갖기 때문인 것으로 판단되며, CFRC 자체의 탄성계수(E_c)는 본 실험의 $V_f=0.5\% - 1.5\%$ 수준에서는 섬유혼입량(V_f)이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다.

表 9. CFRC의 압축탄성계수(E_c)의 분산분석
 ANOVAR AND DUNCAN'S TEST
 TABLE OF ANALYSIS OF VARIANCE

FACTOR	SS	DF	VARIANCE	F VALUE	P
TOTAL	3.035211E+10				
GROUP	7.490798E+09	15			
ERROR	2.286132E+10	3	2.496933E+09	1.31065	>.05
		12	1.90511E+09		

THE DIFFERENCE IS NOT SIGNIFICANT

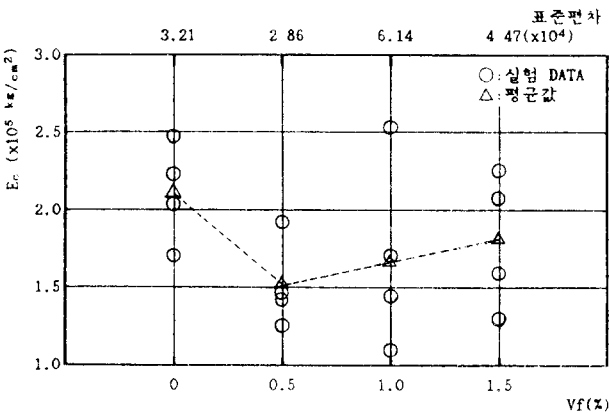


그림 4. 섬유혼입율(V_f)과 탄성계수(E_c)의 관계

3.2 변형성질

3.2.1 單調增加압축재하시의 응력도(σ_c)

- 변형도(ϵ_c)

그림 5는 보통콘크리트와 CFRC의 單調增加 압축재하시의 $\sigma_c - \epsilon_c$ 곡선이다. 본 실험에서 얻은 곡선형상의 특징은 응력하강역에서 최대부구배가 탄소섬유체적혼입율(V_f)의 증가에 따라 완만해지는 경향을 보이고 있으며, 보통콘크리트의 최대부구배보다 적게 나타났다. 이것은

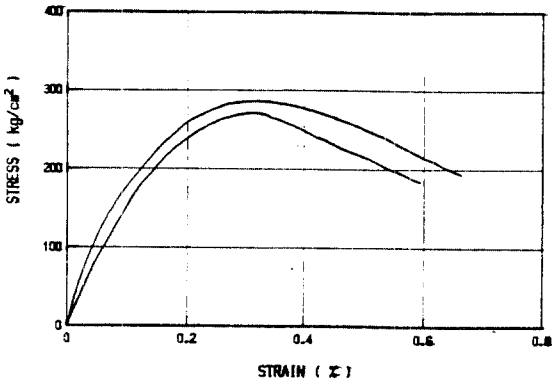
CFRC의 파괴이후의 변형이 보통콘크리트보다 더욱 연성적인 성상을 갖고 있음을 나타내고 있다. 이와같은 요인은 파괴 이후에도 골재 사이에서의 탄소섬유의 부착력에 기인하는 것으로 판단된다. $V_f=0.5\%$ 일 때의 곡선은 보통콘크리트에 비해 약간 저하하는 경향을 보이고 있으나, 응력하강역에서의 최대부구배는 보통콘크리트에 비해 적게 나타나고 있다. 응력상승역에서의 성상은 최대압축응력의 약 30%까지 섬유혼입량에 관계없이 직선적인 관계를 보이고 있으며, 최대압축응력의 30% 이후에서는 $V_f=1\%$ 이상의 CFRC는 비선형적인 변형성상을 보이고 있고, $V_f=1\%$ 이하의 경우는 선형적 관계가 약간 더 진행되는 성상을 나타낸다. 이 현상을 볼 때 섬유혼입량의 증가에 따라 콘크리트 내부에 미세균열이 먼저 발생함을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

섬유체적혼입율(V_f)에 따른 최대압축응력에서의 변형도(이하 최대변형도로 부름)의 분산분석결과는 표 10과 같으며, 0.01%~0.05% 수준에서 상당한 유의성을 나타내고 있다. 그림 6은 표준오차와 V_f 의 증가에 따른 최대변형도의 영향을 나타낸다. 이 결과에서 볼 때 $V_f=1\%$ 에서는 최대변형도가 보통콘크리트에 비해 약 43.05% 정도 증가되고 있으며, $V_f=1.5\%$ 에서는 36.23% 증가되고 있다. 여기서 $V_f=1\%$ 가 1.5%보다 변형도가 약간의 높은 값을 보이고 있는 것은 실험의 오차로 생각된다. 따라서 전체적으로 탄소섬유혼입율에 따른 응력도-변형도성상은 CFRC가 파괴한 후에도 보통콘크리트보다 더욱 연성적인 성상을 보이고 있다.

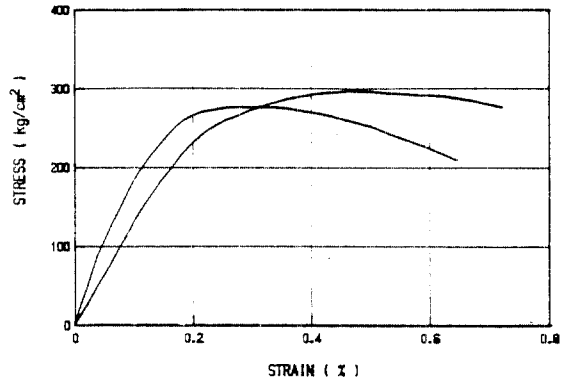
表 10. CFRC의 최대변형도(ϵ_{max})의 분산분석
 ANOVAR AND DUNCAN'S TEST
 TABLE OF ANALYSIS OF VARIANCE

FACTOR	SS	DF	VARIANCE	F VALUE	P
TOTAL	95317	15			
GROUP	53117.75	3	17705.92	5.034947	<=.05
ERROR	42199.25	12	3516.604		

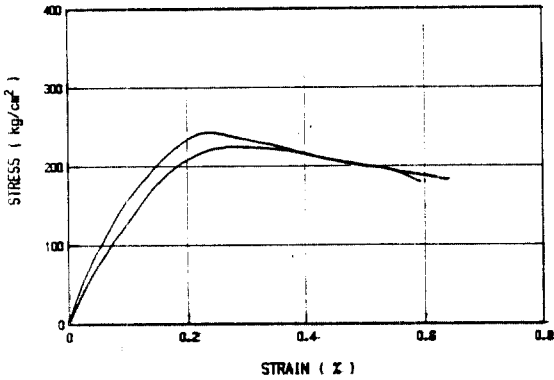
THE DIFFERENCE IS SIGNIFICANT, 0.01 < P < 0.05



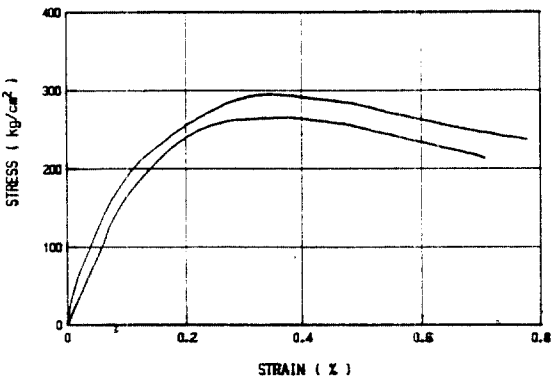
(1) 보통콘크리트($V_f=0\%$)



(4) CFRC($V_f=1.5\%$)



(2) CFRC($V_f=0.5\%$)



(3) CFRC($V_f=1.0\%$)

그림 5. 單調增加압축재하시의 응력도(σ_c)
- 변형도(ϵ_c) 관계

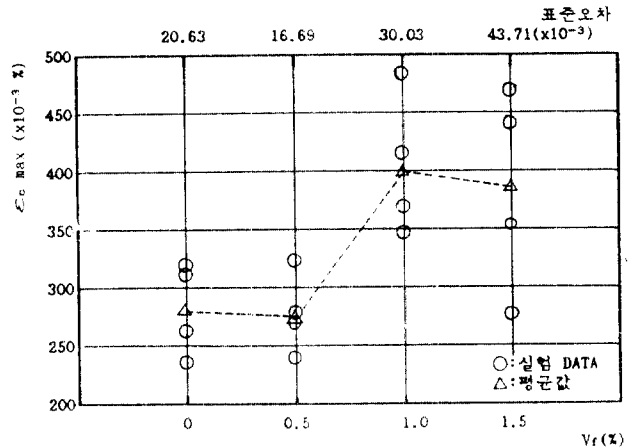
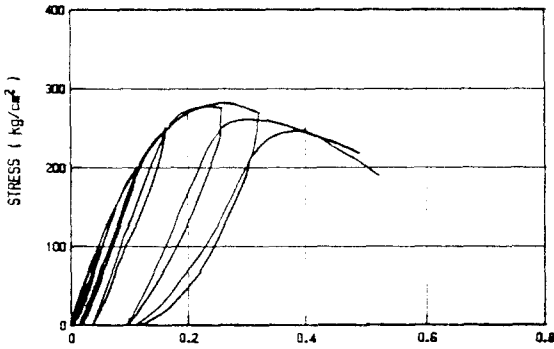


그림 6. 섬유혼입율(V_f)과 최대변형도(ϵ_{\max})의 관계

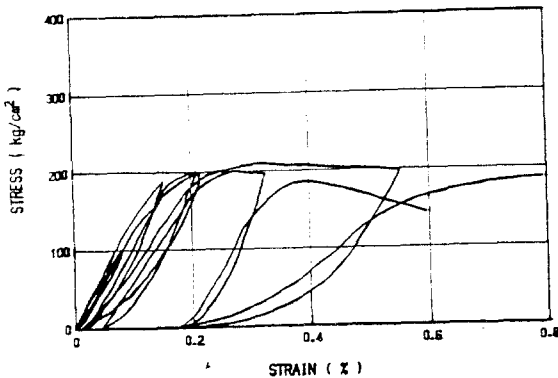
3.2.2 반복압축재하시의 응력도(σ_c) - 변형도(ϵ_c)

섬유보강콘크리트의 내진구조 등으로의 사용에 대한 유용성은 많은 연구자들에 의해 지적되고 있지만^(22, 26, 27), 내진구조등으로의 적용에 관한 합리적 접근을 위해서는 반드시 파악되어야 할 거동중 하나가 반복압축재하시의 변형성상이다. CFRC에 대한 이와같은 변형성상을 파악하기 위해 본 실험에서 얻어진 CFRC의 응력도(σ_c) - 변형도(ϵ_c) 곡선을 그림

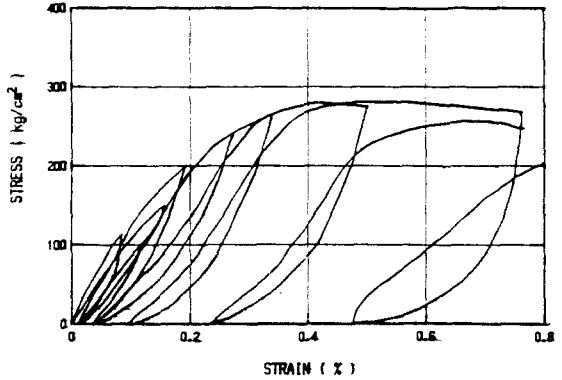
7에 나타낸다. 그림 5-1과 그림 7-1을 비교하면 보통콘크리트의 경우에는 單調增加재하시의 포락선과 반복압축재하시의 포락선이 일치하고 있으나 CFRC경우는 반복압축재하를 받은 곡선이 單調增加재하시의 곡선보다 위로 솟구치는 경향을 나타내고 있다. 또한 除荷곡선은 보통콘크리트의 경우 최대압축응력 이전에는 거의 탄성이력곡선과 평행할 정도로 거의 직선 형태로 除荷되고, 최대압축응력 이후에는 약간 구배가 완만해지는 경향을 보이고 있으나, CFRC경우는 除荷곡선이 더욱 곡선적으로 변하고 있으며, 또한 그 구배도 최대압축응력 이후로 갈수록 크게 적어지는 경향을 나타내고 있다. 최대압축응력 이후의 除荷時的 복원특성은 보통콘크리트와 비교하여 CFRC가 더욱 현저한 복원비율을 보이고 있으며, $V_f=0.5\%$ 보다 1% , 1.5% 에서 더욱 큰 복원비율을 나타내고 있다.



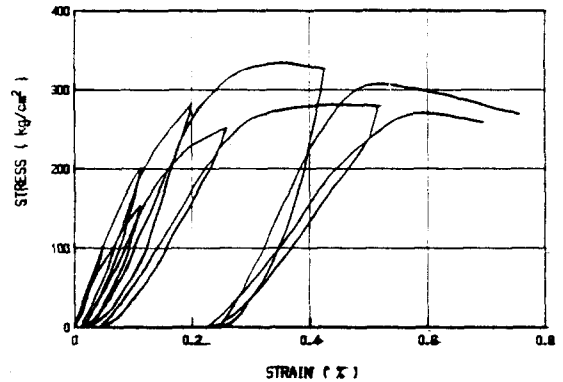
(1) 보통콘크리트($V_f=0\%$)



(2) CFRC($V_f=0.5\%$)



(3) CFRC($V_f=1.0\%$)



(4) CFRC($V_f=1.5\%$)

그림 7. 반복압축재하시의 응력도(σ_c)-변형도(ϵ_c) 관계

4. 결 론

CFRC가 單調增加와 반복압축재하를 받을 때 섬유체적혼입율에 따른 강도 및 변형성상에 대한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) CFRC의 압축강도는 섬유혼입율에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, $V_f=0.5\%$ 일 때는 보통콘크리트보다 저하하고 있으나, $V_f=1\%$, 1.5% 에서는 약간의 강도증진을 나타내고 있다.

2) CFRC의 탄성계수는 보통콘크리트에 비해 전반적으로 낮은 값을 보였고 CFRC 자체는 섬유혼입량의 증가에 따라 증대하고 있다.

3) CFRC의 변형성질은 單調增加 재하시의 곡선과 반복압축재하시의 응력도(σ_c)-변형도(ϵ_c) 곡선은 보통콘크리트에 비해 응력상승역에서 연성적인 변형성상이 나타나고 있고, 응력하강역에서의 최대부구배도 보통콘크리트에 비해 완만하게 나타나는 등 대단히 연성적인 성질이 나타나고 있다.

참고문헌

- 1) Ali, M.A, A.J. Mazumder and D.L. Rayment ; " Carbon Fibre Reinforcement of Cement", Cement and Concrete Research, Vol.2, pp.201-212, 1972.
- 2) S.Sarker & M.B.Bailly ; "Structural Properties of Carbon Fibre Reinforced Cement", RILEM Symposium, Fiber Reinforced Cement and Concrete, pp.361~371, 1975.
- 3) ACI Committee 544 ; "Fiber Reinforced Concrete", ACI J., SP-44, 1974.
- 4) ACI Committee 544 ; State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", ACI J., Vol.70, No.11, pp.729~744, 1973.
- 5) RILEM Technical Committee 19-FRC ; "Fibre Concrete Materials", Mater and Struct., Text Res., Vol.10, No.56, pp.103~120, 1977.
- 6) ACI Committee 544 ; "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI J., Vol.75, No.7, pp.283~289, 1978.
- 7) D. J.Hannant ; "Fiber Cement and Fiber Concrete", John Willy & Sons, New York, 1978.
- 8) 秋兵繁幸, 末永龍夫, 坂野正 ; "纖維補強 콘크리트의 특성과 그 응용", 建築技術, No.363, pp.107~123, 1981.
- 9) 眞谷榮次 ; "纖維補強 세멘트의 특성과 그用途", 建築士 と 실무, Vol.5, No.11,

pp.33~37, 1982.

- 10) 秋兵繁幸, 末永龍夫, 坂野正 ; "炭素纖維補強 콘크리트(CFRC)의 建築構造物への適用(その1)", 塵島建設技術研究所年報, No.31, pp.57~66, 1983.
- 11) 秋兵繁幸 ; "炭素纖維補強 콘크리트(CFRC)-特性と適用事例-", 建築技術, No.412, pp.139~148, 1985.
- 12) 秋兵繁幸 외 5인 ; "CFRC製 輕量カーテンウォールを使用した 超高層ビル", セメントコンクリート, No.472, pp.24~30, 1986.
- 13) 朴承範 ; "炭素纖維補強시멘트複合體의 工學的特性에 關한 實驗的研究", Journal of the Korea Concrete Institute, 제1권, 1호, pp.95~104, 1989.
- 14) J.A. Waller ; "Carbon Fiber Cement Composite", Civil Engineering and Pubric Works Review, pp.357~361, 1972.
- 15) J.A. Waller ; "Carbon Fiber Cement Composite", ACI J., sp-44, pp.143~161, 1974.
- 16) 白川潔 ; 炭素纖維補強 세멘트의 曲げ強度におよぼす 諸因子", 第4回콘크리트工學年次講演會講演論文集, pp.153~156, 1982.
- 17) 秋兵, 末永, 坂野 ; "炭素纖維補強 콘크리트(CFRC)의 實驗的 研究(その3)", 塵島技術研究所年報, 第31號, pp.67~74, 1983.
- 18) 秋兵, 末永, 坂野 ; "炭素纖維補強 콘크리트(CFRC)의 實驗的 研究(その4)", 塵島技術研究所年報, 第32號, pp.71~78, 1984.
- 19) 秋兵, 末永, 坂野 ; "炭素纖維補強 콘크리트(CFRC)의 實驗的 研究(その2)", 塵島技術研究所年報, 第30號, pp.57~68, 1982.
- 20) Shigeyuki Akihama 외 4인 ; "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforcement of Cement Composite and the Application

- to Buildings(Part 2)”, Kajima Institute of construction Technology, pp.1~54.
- 21) 秋兵繁幸；“短纖維強化複合材の練りませ技術”，コンクリート工學，Vol.21, No.5, pp.48~51, 1983.
 - 22) 小林一軸；“纖維補強コンクリート-特性と應用-”，オーム社 日本東京, 1981.
 - 23) 纖維補強コンクリート 研究所委員會；“纖維補強コンクリートに關する試験方法の JCI規準案(4)”，コンクリート工學，Vol.21, No.3, pp.4~7, 1983.
 - 24) 石川馨 外 3人；初等實驗計劃法”，韓國工業標準協會 譯, 서울, 1987.
 - 25) 石居進；“BASIC による統計處理”，培風館, 日本, 1983.
 - 26) R.John Craig 外 3人；“Behavior of Joints using Reinforced Fibrous Concrete”，ACI, sp-81, pp.125~167, 1984.
 - 27) 勝俣英雄 외 2인；“炭素纖維による既存鐵筋コンクリート柱の耐震補強に關する研究(その2)”，大林組技術研究所報, pp. 114~118, 1987.