



FRP로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 거동 특성

이대형^{1)*} · 김영섭²⁾ · 정영수²⁾

¹⁾경도대학 토목과 ²⁾중앙대학교 토목공학과

Stress-Strain Behavior Characteristics of Concrete Cylinders Confined with FRP Wrap

Dae-Hyoung Lee^{1)*}, Young-Sub Kim²⁾, and Young-Soo Chung²⁾

¹⁾Dept. of Civil, Gyeongdo Provincial College, Yechon 757-807, Koera

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Ansung 456-756, Korea

ABSTRACT Recently, fiber-reinforced plastic(FRP) wraps are known as an effective material for the enhancement and rehabilitation of aged concrete structures. The purpose of this investigation is to experimentally investigate behavior of concrete cylinder wrapped with FRP materials. Experimental parameters include compressive strength of concrete cylinder, FRP material, and confinement ratio. This paper presents the results of experimental studies on the performance of concrete cylinder specimens externally wrapped with aramid, carbon and glass fiber reinforced Polymer sheets. Test specimens were loaded in uniaxial compression. Axial load, axial and lateral strains were investigated to evaluate the stress-strain behavior, ultimate strength, ultimate strain etc. Test results showed that the concrete strength and confinement ratio, defined as the ratio of transverse confinement stress and transverse strain were the most influential factors affecting the stress-strain behavior of confined concrete. More FRP layers showed the better confinement by increasing the compressive strength of test cylinders. In case of test cylinders with higher compressive strength, FRP wraps increased the compressive strength but decreased the compressive strain of concrete test cylinders, that resulted in prominent brittle failure mode. The failure of confined concrete was induced by the rupture of FRP material at the strain, being much smaller than the ultimate strain of FRP material.

Keywords : aramid fiber, carbon fiber, glass fiber, confined pressure, stress-strain model

1. 서 론

기존 콘크리트 구조물에 대한 보수 및 보강은 주로 강관접착공법과 콘크리트 단면증설공법 등을 주로 사용하였다. 하지만, 강관접착공법은 시공이 어렵고, 취급의 용이성 및 부식 및 내화 성능 등의 환경적 요소에 대한 저항성이 떨어지며 지속적인 관리가 필요한 것으로 나타나고 있다¹⁾. 철근콘크리트를 이용한 단면증설공법은 자중과 단면적이 필연적으로 커지고 시공 후 기초부의 하중 부담이 커지는 단점을 지니고 있다. 또한 시공에 많은 시간과 노력이 소요되며, 시공 기간이 길어 작업 효율성이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이에 비해 섬유 재료는 시공성이 좋고 자중이 적어 콘크리트 구조물의 보수·보강에 있어 기초에 하중 부담을 전혀 주지 않으며, 높은 인장강도와 저경량 및 연속성 그리고 내부식성, 내화화성 등의 장점이 있으며 이외에도 다른 재료에 비해 시공이 쉽고 취

급이 간편한 장점이 있다¹⁾. 대표적인 섬유로 탄소(carbon), 아라미드(aramid), 유리(glass)섬유가 이용되고 이를 이용한 콘크리트 구조물의 보수·보강이 점차 늘어나는 추세이다. 그러나 콘크리트 구조물의 보수·보강 설계에 있어서는 콘크리트의 응력-변형률 관계를 정확히 정의하여야 하며, 섬유를 이용한 콘크리트 구속 방법은 비교적 최근의 방법으로 이에 대한 연구가 부족한 실정이다. 이제까지의 연구는 횡구속 철근에 의한 콘크리트의 강도 및 변형률 증가에 관한 연구로 국한되어 온 것이 사실이다²⁾.

Richart et al.(1928)이 처음으로 유압과 나선 철근으로 보강된 콘크리트의 압축강도 및 변형률을 조사하였다³⁾. 이후 Toutanji(1999)는 탄소섬유와 유리섬유로 보강된 콘크리트의 응력-변형률을 조사하였다. 섬유 보강으로 인하여 압축강도, 극한 변형률 및 연성의 증가를 확인하였으며 탄소섬유가 유리섬유에 비해 보강 효과가 우수한 것으로 보고하였다. 이는 탄소섬유에 의한 횡응력이 우수하기 때문으로 평가하였다⁴⁾. 최근 국내에서도 많은 연구자들에 의해 탄소섬유로 보강된 콘크리트의 응력-변형률 거동을 조사하였다⁵⁻⁹⁾. 최근에 황진석(2001)은 탄소섬유쉬트

*Corresponding author E-mail : dhlee@gpc.ac.kr

Received April 28, 2006, Accepted November 27, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형도 특성을 조사하였다. 이를 통하여 횡구속압에 의한 팽창 특성을 구명하고 회귀분석을 통하여 최대 팽창률과 극한 팽창률을 제안하였다⁸⁾.

90년대 들어서 외국에서는 이와 관련된 많은 연구가 진행되어 새로운 설계기준이 마련되기에 이르렀다¹⁰⁻²⁰⁾.

본 연구에서는 FRP로 보강된 콘크리트의 강도 및 변형률에 대한 정확한 예측을 위하여 102개의 원형 콘크리트 공시체를 제작하여 선형 탄성적인 재료인 탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유로 횡구속하여 압축강도의 변화를 측정하였다. 또한 실험을 통해 섬유 구속량, 단면의 크기, 콘크리트 압축강도를 실험 변수로 하여 콘크리트의 축방향 압축강도, 축방향 및 횡방향 변형률, 체적 변형률 등을 조사하여 원형 콘크리트 공시체의 거동을 비교 분석하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 계획

본 실험은 탄소, 아라미드, 유리섬유에 의해 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위해 102개의 콘크리트 공시체를 제작하였다. 주요 실험 변수로서 보강 및 무보강, 단면의 크기, 콘크리트의 강도, 보강 재료의 종류이다. 기준 시험체로서 무보강 시험체를 제작하였으며, 공시체는 100×200 mm, 150×300 mm로 하였다. 실험체의 상세는 Table 1에 나타내었으며 단면의 크기, 강도 및 보강량에 따라 3종류의 그룹으로 구분하였다. 실험체의 배합비는 Table 2와 같다. 원형 공시체는 타설 후 24시간 이내에 탈형한 후 표준 항온실에서 섭씨 18~20°C 온도를 유지하며 재령 28일 표준양생하였다.

2.2 실험체 제작

섬유로 보강하기 전 콘크리트의 표면은 충분히 건조시킨 상태에서 표면을 매끄럽게 처리하여 프라이머와 병행하여 수지로 함침시킨 다음 24시간 이후에 섬유를 원형 콘크리트 공시체에 감아 접착하였으며, 에폭시수지 조건에 맞는 상온(23°C 이상)에서 10일간 양생하였다. 7~10일 동안 상온에서 양생된 에폭시수지 강도는 90% 이상 성능을 발휘하는 것으로 보고되고 있다. 섬유의 역학적

Table 1 Test parameter

Group no.	Strength (f'_{co}) (MPa)	Section type (mm)	FRP type	Layer	No. of specimen			
Group (A)	20	Ø100×200	Aramid	2	3			
			Carbon	2	3			
			Glass	2	3			
			-	-	3			
	34		Aramid	2	3			
			Carbon	2	3			
			Glass	2	3			
			-	-	3			
	43		Aramid	2	3			
			Carbon	2	3			
			Glass	2	3			
			-	-	3			
Group (B)	16	Ø150×300	Aramid	2	3			
			Carbon	2	3			
			Glass	2	3			
			-	-	3			
	28		Aramid	2	3			
			Carbon	2	3			
			Glass	2	3			
			-	-	3			
	42		Aramid	2	3			
			Carbon	2	3			
			Glass	2	3			
			-	-	3			
Group (C)	33	Ø100×200	Aramid	2	3			
			Carbon	3	3			
			Glass	4	3			
			Aramid	2	3			
			Carbon	3	3			
			Glass	4	3			
			Aramid	2	3			
			Carbon	3	3			
			Glass	4	3			
			-	-	3			
			Total					102

f'_{co} = unconfined concrete strength

특성과 에폭시의 물리적 특성은 Tables 3과 4에 각각 나타내었다. 또한, 섬유의 국부 파괴를 피하기 위해 Fig. 1과 같이 실험체의 양쪽 끝단에 5 mm씩 간격을 두고 섬유 보강을 수행하였다. 보강섬유의 접합부는 50 mm의 접

Table 2 Mix proportion

Max. size of coarse agg. (mm)	Slump (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit content (N/m ³)				Compressive strength (MPa)	
				Water (W)	Cement (C)	Fine agg. (G)	Coarse agg. (S)	Diameter (mm)	
								100	150
25	80	58.4	45.0	1,479.8	2,910.6	8,290.8	10,466.4	20	16
	150	44.0	44.0	1,509.2	3,851.4	7,712.6	10,064.6	34	28
	150	37.0	44.0	1,607.2	4,821.6	7,399.0	9,839.2	43	42
	80	56.7	48.8	1,617.0	2,802.8	8,790.6	9,261.0	33	-

Table 3 Mechanical characteristics of FRP sheets

Property	Fiber	Aramid fiber	Carbon fiber	E-glass fiber
Tensile strength f'_{frp} (MPa)		2,173	3,550	560
Modulus of elasticity E_{frp} (MPa)		2.10×10^5	2.35×10^5	2.52×10^4
Rupture strain ϵ_{frp} (%)		1.800	1.500	2.50
Fiber thickness t_{frp} (mm)		0.193	0.167	1.20
Specific gravity		1.450	1.800	2.54

Table 4 Mechanical characteristics of epoxy

Material type	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Density
AFRP laminate	45	69	1.8	1.25
CFRP laminate	34~82.7	105~170	2.4~2.8	1.1~1.4
GFRP laminate	50	88	2.8	1.16

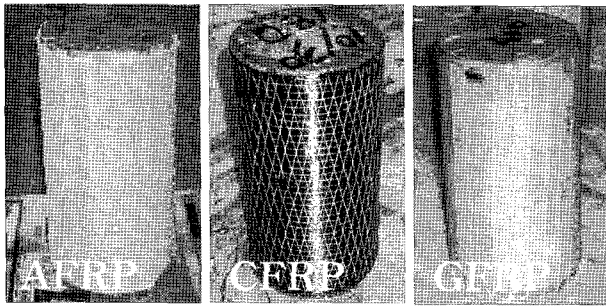


Fig. 1 Test specimens retrofitted with FRP sheets

침 이음 길이를 확보하였다. 축방향 하중재하를 위하여 만능 재료 시험기를 사용하였으며, 하중 재하시 편심이 생기지 않도록 양쪽 단면을 콘크리트 연마기로 평면 작업하였다.

2.3 실험 계측

하중 재하는 콘크리트 압축강도 증가가 매초 0.2~0.4 N/mm²의 속도로 재하하였다. Fig. 2와 같이 실험체 및 계측 장비를 설치하여 횡방향 및 축방향 변형률을 측정하였다. 축방향 변위는 Fig. 2와 같이 컴프레서미터로 양쪽을 고정시킨 뒤 180도 각도로 두 측정점에서 50 mm 변위계를 설치하여 계측하였으며, 횡방향 변위는 컴프레서미터

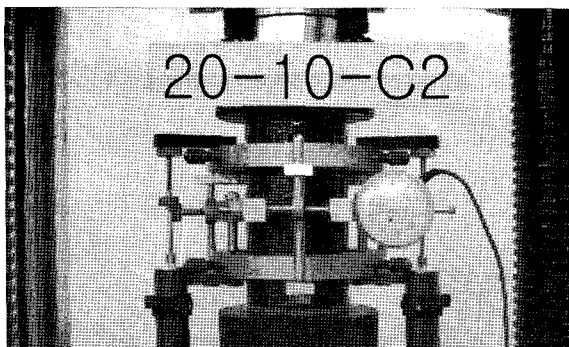


Fig. 2 Test setup

와 동일한 측정점에서 익스텐서미터를 고정시켰으며 20 mm 변위계 1개를 사용하여 계측하였다. 그리고 축방향 하중은 용량 1,500 kN의 load cell을 사용하여 계측하였다. Fig. 3은 계측 장비의 설치에 대한 상세도이다.

3. 실험 결과

3.1 파괴 형태

FRP 구속 콘크리트의 파괴는 Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이 중간 부분에서 나타났다. 공시체 상면과 하면 끝 부분의 파괴는 하중 재하판과 공시체 재하면 사이의 극부파괴이다. 아라미드와 유리섬유로 보강한 실험체의 경우 최대 압축강도의 70~80% 정도에서 내부에서 파단되는 소리를 내며 극한하중 단계에서 취성 파괴의 양상을 보이며 섬유가 파단되었다. 이는 내부 콘크리트가 압축 파괴된 이후 섬유의 보강 효과에 의해 연성을 보이다가 섬유가 파괴에 도달하여 파단되는 것으로 사료된다. 그러나, 탄소 섬유는 아무런 파단의 징후가 없이 극한하중에 도달하여 취성 파괴되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 탄소섬유의 인장강도 및 탄성계수가 유리 및 아라미드에 비해 상대적으로 높으나 파괴 변형률이 작기 때문으로 사료된다.

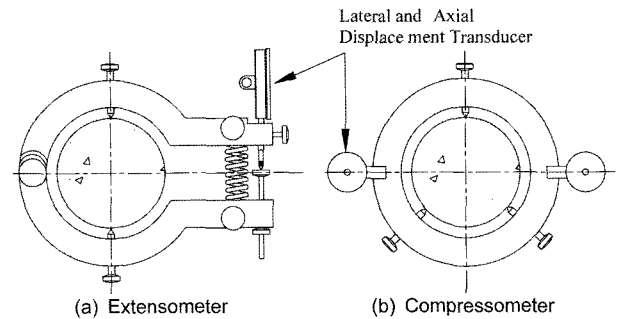
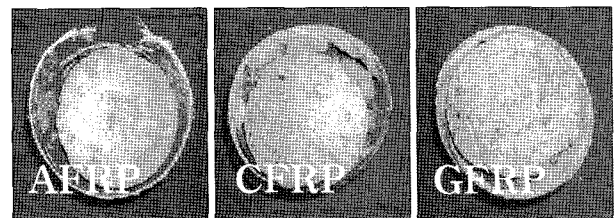
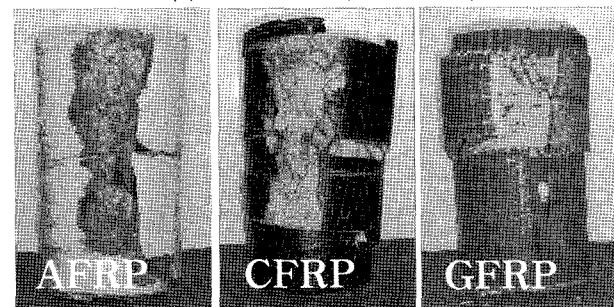


Fig. 3 Extensometer and compressometer



(a) Failure forms (section view)



(b) Failure forms (side view)

Fig. 4 Failure of an FRP confined circular concrete specimen by FRP rupture

보강 실험체의 경우 Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 콘크리트와 섬유유리 시트의 계면 내부에서 파괴가 일어났다. 이는 섬유유리 시트를 콘크리트에 부착 시킬 때 사용된 에폭시 수지로 인해 섬유유리 시트와 콘크리트는 완벽하게 일체화되어 거동하고 있음을 보여주고 있다. 이는 에폭시 수지의 접착강도와 섬유유리 인장강도가 콘크리트의 강도보다 크기 때문이다. 즉 섬유유리 시트와 에폭시 수지 그리고 콘크리트의 단면은 일정한 하중까지 동일한 거동을 보이다 종방향 수직 균열과 함께 급격한 체적 변화를 일으키며 이러한 체적 변화에 의해 종방향 하중이 보강 섬유유리로 전달되어 보강 섬유유리는 인장하중을 받게 된다.

콘크리트의 균열로 인한 체적 변화 이후 섬유유리 시트의 파단에 이르기까지 콘크리트는 연성 거동을 보이며 극한강도에 이르러 파괴된다. 그리고 Fig. 4(b)와 같이 원형 콘크리트 공시체를 섬유유리 보강할 경우 보강 섬유유리 접합부의 접착 이음부의 단면 변화 부분 즉, 접착 이음 시작 및 끝부분에서 초기 파괴가 주로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 에폭시를 이용한 섬유유리 보강에도 적절한

접착 이음 방법 및 길이에 대한 연구가 요구된다.

3.2 콘크리트의 압축강도

무보강 시험체의 압축강도 평균값은 Table 5와 같고 보강된 실험체의 강도 및 변형률은 Table 6에 나타내었다. Fig. 5(a), (b)에서와 같이 보강 실험체의 압축강도의 증가율은 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 작아지는 것

Table 5 Nominal strength of unconfined concrete

Data	Specimen	d (mm)	L (mm)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^{-3})
Set 1	20-10-U0	100	200	20.790	5.35
	34-10-U0	100	200	34.087	3.35
	43-10-U0	100	200	43.702	3.75
Set 2	16-15-U0	150	300	15.500	3.48
	28-15-U0	150	300	28.885	1.15
	42-15-U0	150	300	42.395	1.25
Set 3	33-10-U0	100	200	33.276	2.73

Table 6 Concrete strengthening ratio

Group (A)						Group (B)						Group (C)					
No.	Specimen*	d (mm)	L (mm)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^{-3})	No.	Specimen*	d (mm)	L (mm)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^{-3})	No.	Specimen*	d (mm)	L (mm)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^{-3})
1	20-10-A21	100	200	72.8	49.3	28	16-15-A21	150	300	47.2	25.6	55	33-10-A21	100	200	84.8	18.0
2	20-10-A22	100	200	75.7	23.7	29	16-15-A22	150	300	46.0	25.0	56	33-10-A22	100	200	84.5	22.4
3	20-10-A23	100	200	70.2	23.9	30	16-15-A23	150	300	48.9	31.4	57	33-10-A23	100	200	80.5	17.9
4	34-10-A21	100	200	83.1	49.5	31	28-15-A21	150	300	53.7	27.8	58	33-10-A31	100	200	105.0	20.7
5	34-10-A22	100	200	80.4	45.2	32	28-15-A22	150	300	49.1	21.5	59	33-10-A32	100	200	101.2	21.3
6	34-10-A23	100	200	76.6	39.0	33	28-15-A23	150	300	49.3	21.7	60	33-10-A33	100	200	108.7	26.0
7	43-10-A21	100	200	86.2	30.1	34	42-15-A21	150	300	59.2	15.5	61	33-10-A41	100	200	124.4	23.6
8	43-10-A22	100	200	88.0	31.5	35	42-15-A22	150	300	56.8	10.6	62	33-10-A42	100	200	123.7	23.7
9	43-10-A23	100	200	90.6	34.8	36	42-15-A23	150	300	61.3	18.7	63	33-10-A43	100	200	112.0	13.6
10	20-10-C21	150	300	49.8	3.0	37	16-15-C21	150	300	48.6	20.3	64	33-10-C21	100	200	76.0	9.4
11	20-10-C22	150	300	66.5	13.2	38	16-15-C22	150	300	58.1	30.0	65	33-10-C22	100	200	81.1	11.6
12	20-10-C23	150	300	59.8	13.1	39	16-15-C23	150	300	50.2	19.7	66	33-10-C23	100	200	81.1	11.7
13	34-10-C21	150	300	71.8	13.9	40	28-15-C21	150	300	54.9	17.1	67	33-10-C31	100	200	103.8	10.8
14	34-10-C22	150	300	70.2	15.3	41	28-15-C22	150	300	54.6	17.5	68	33-10-C32	100	200	93.2	11.7
15	34-10-C23	150	300	68.6	10.1	42	28-15-C23	150	300	60.1	22.0	69	33-10-C33	100	200	100.2	10.8
16	43-10-C21	150	300	79.7	5.20	43	42-15-C21	150	300	72.1	16.6	70	33-10-C41	100	200	112.9	14.5
17	43-10-C22	150	300	74.2	0.40	44	42-15-C22	150	300	68.2	13.1	71	33-10-C42	100	200	104.7	13.7
18	43-10-C23	150	300	79.2	6.90	45	42-15-C23	150	300	71.0	13.0	72	33-10-C43	100	200	111.1	16.2
19	20-10-G21	100	200	73.5	48.5	46	16-15-G21	150	300	54.1	30.6	73	33-10-G21	100	200	65.7	8.9
20	20-10-G22	100	200	76.5	49.1	47	16-15-G22	150	300	53.1	29.8	74	33-10-G22	100	200	59.4	4.8
21	20-10-G23	100	200	73.2	46.7	48	16-15-G23	150	300	50.3	25.8	75	33-10-G23	100	200	69.4	11.5
22	34-10-G21	100	200	78.3	37.3	49	28-15-G21	150	300	60.7	32.5	76	33-10-G31	100	200	89.3	18.0
23	34-10-G22	100	200	72.0	29.8	50	28-15-G22	150	300	52.4	20.5	77	33-10-G32	100	200	83.6	16.6
24	34-10-G23	100	200	77.8	38.4	51	28-15-G23	150	300	50.3	17.2	78	33-10-G34	100	200	91.8	18.4
25	43-10-G21	100	200	82.9	22.1	52	42-15-G21	150	300	63.0	14.4	79	33-10-G41	100	200	110.6	19.8
26	43-10-G22	100	200	89.7	27.3	53	42-15-G22	150	300	63.4	14.0	80	33-10-G42	100	200	110.7	21.7
27	43-10-G23	100	200	83.1	24.0	54	42-15-G23	150	300	72.8	24.2	81	33-10-G43	100	200	114.9	23.8

Specimen*

- 20-10-A21 → A : FRP type, 2 : layer, 1 : No. of specimen
- 10 : 100×200 mm
- 20 : Unconfined compressive strength

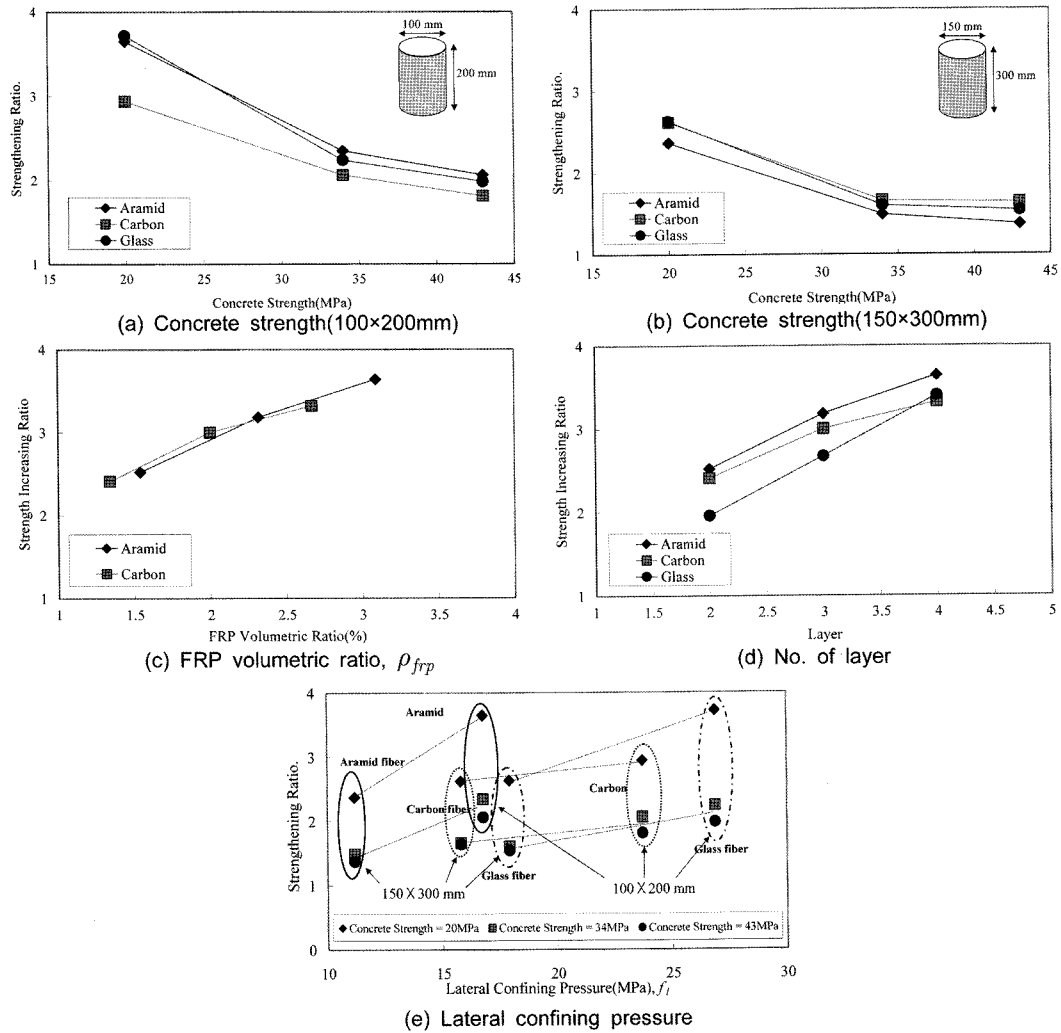


Fig. 5 Strengthening ratio

으로 조사되었다. 20 MPa의 강도에서는 약 3~3.7배 압축강도가 증가하였으며 43 MPa에서는 약 2배 압축강도가 증가하였다. 이러한 압축강도와 압축강도 증가율의 관계는 지수함수(exponential function)의 경향을 보이고 있다.

FRP로 구속된 콘크리트의 횡방향 구속력은 다음 식 (1)과 같고 식 (2)와 같은 FRP의 보강비(ρ_{frp} , volumetric ratio)로 나타내어진다.

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp}f_{frp}}{2} \quad (1)$$

$$\rho_{frp} = \frac{\pi dt_{frp}}{\pi d^2 / 4} = \frac{4t_{frp}}{d} \quad (2)$$

여기서, d = 콘크리트 단면직경, f_{frp} = FRP의 인장강도, t_{frp} = FRP의 두께를 나타낸다.

Fig. 5(a) 및 (b)에서 알 수 있듯이 실험체의 단면이 큰 경우 즉, FRP의 보강비(ρ_{frp} , volumetric ratio)가 작은 경우 압축강도의 증가율이 감소하였다. Fig. 5(c)는 횡구속비에 따른 압축강도 증가율을 Fig. 5(d)는 보강량에 압축강도 증가율을 나타내었다. 보강비의 증가에 따라 압축강도 증가비가 증가함을 알 수 있다. 아라미드와 탄소섬

유의 보강비는 각각 1.03~3.09, 0.89~2.67의 범위에 있으나 유리섬유의 경우에는 6.4~19.2의 범위에 있어 직접적인 비교가 불가능 하였다. 특히, Fig. 5(e)에서 보인 바와 같이 탄소섬유에 의한 보강 효과는 실험체의 크기가 작은 경우(100x200 mm)에는 다른 보강 재료에 비해 작은 것으로 평가되었으나 실험체의 크기가 큰 경우(150x300 mm)에는 오히려 다소 높은 보강 효과를 나타내었다.

일반적으로 모든 보강 재료에서 고강도 콘크리트에 비해 일반 콘크리트의 보강 효과가 뛰어난 것으로 조사되었으며 아라미드와 유리섬유의 경우에는 횡구속력의 증가에 따라 강도 증가를 보이고 탄소섬유의 경우에는 강도 증가가 상대적으로 작은 것으로 조사되었다. 3종류의 보강재료를 비교해보면 단면의 크기와 무관하게 아라미드섬유에 의한 강도 증진 효과가 낮은 구속력에서도 높은 강도 증진 효과를 발휘하는 것으로 조사되었다.

3.3 콘크리트의 응력-변형률

3.3.1 콘크리트 압축강도

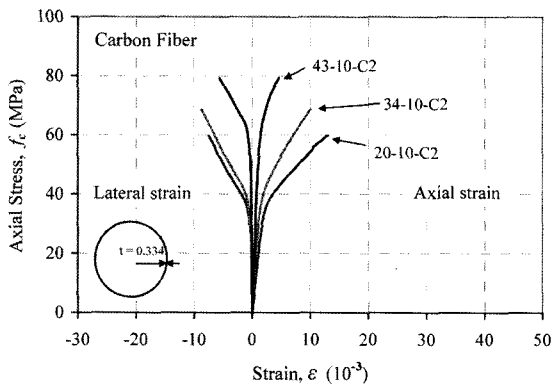
Fig. 6은 Group(A) 계열의 실험체의 응력-변형률을 나타내었다. 탄소, 아라미드, 유리섬유 실험체는 각각 무보

강 콘크리트 압축강도에 따라 2.22, 2.62, 2.59배의 강도가 증가하였고 변형률은 2.28, 9.3, 8.67배로 나타났다. 섬유로 구속된 실험체의 응력-변형률 관계는 구속이 없는 실험체의 강도값 부근에서 기울기가 변화, 즉 연화(softening)되어 2선형(bilinear)으로 나타난다. 초기 선형 구간에서 기울기는 무보강 콘크리트와 유사하다. 이는 무보강 콘크리트의 강도에 이르기까지는 보강 섬유의 효과가 미미함을 나타낸다. 두 번째 구간에서 콘크리트에 균열이 발생되고 보강 섬유의 보강 효과가 유효하게 작용한다. 보강된 콘크리트의 응력은 보강 섬유의 변형률의 증가와 더불어 선형적으로 증가하고 보강 섬유의 파단에서 최대가 된다. 보강 섬유가 극한 변형률에 도달할 때 구속 콘크리트는 극한응력에 도달한다.

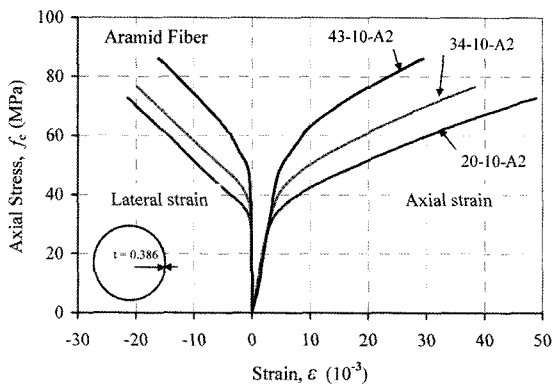
축방향 변형률은 콘크리트의 압축강도에 따라 일정한

경향을 나타낸다. 즉, 압축강도가 작을수록 큰 변형률에 도달하는 것으로 관찰되었다. 횡방향 변형률의 경우는 다른 재료에 비해 탄소섬유로 보강된 실험체의 파괴변형률이 상대적으로 작은 것으로 조사되었다.

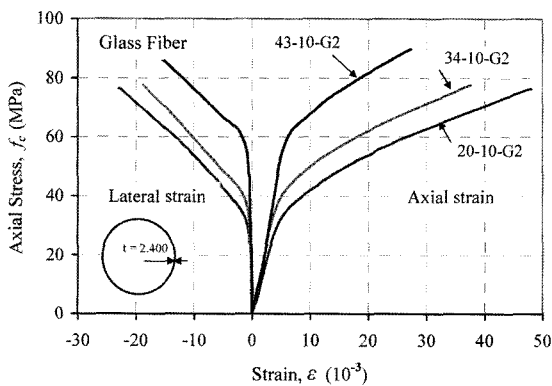
Fig. 7은 Group(B) 계열의 응력-변형률을 나타내었다. Group(B) 계열의 경우, 탄소, 아라미드, 유리섬유로 보강한 콘크리트의 강도는 각각 2.33, 2.07, 2.28배의 증가를 보였고, 변형률 증가는 11.44, 13.46, 14.21배로 나타났다. 그리고 Group(B)의 응력-변형률을 보면 콘크리트의 압축강도가 높은 실험체일수록 변형률이 작아지는 것을 볼 수 있다. 특히, 콘크리트의 압축강도가 28 MPa 및 16 MPa인 실험체는 극한강도가 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 압축강도가 작더라도 보강에 의한 구속 효과로 인하여 축방향 및 횡방향 변형률이 상대적으로



(a) Carbon fiber stress-strain ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$)

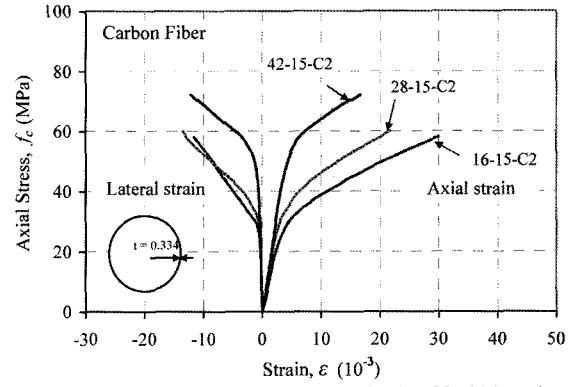


(b) Aramid fiber stress-strain ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$)

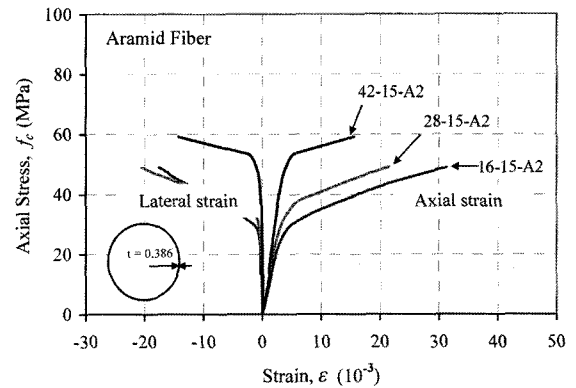


(c) E-glass fiber stress-strain ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$)

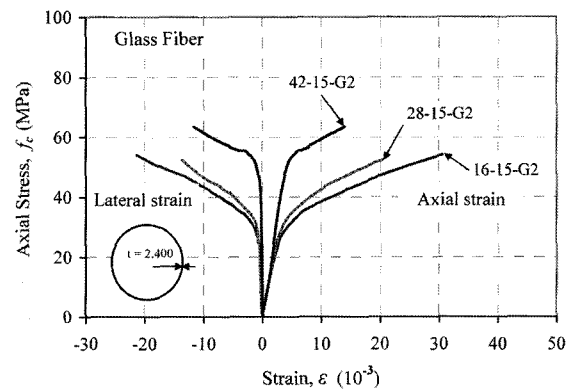
Fig. 6 Typical stress-strain curve of Group(A)



(a) Carbon fiber stress-strain ($\phi 150 \times 300 \text{mm}$)



(b) Aramid fiber stress-strain ($\phi 150 \times 300 \text{mm}$)



(c) E-glass fiber stress-strain ($\phi 150 \times 300 \text{mm}$)

Fig. 7 Typical stress-strain curve of Group(B)

크게 증가하였기 때문이다. 압축강도가 42 MPa인 고강도 콘크리트는 극한하중에서 낮은 변형률을 나타내었으나 콘크리트의 압축강도 이후 변형률 경화(hardening) 구간에서의 2차 기울기가 상대적으로 높게 나타났다.

3.3.2 보강량

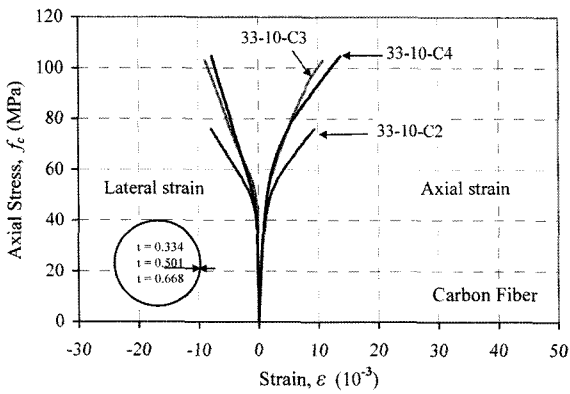
Group(C) 계열의 경우는 동일한 콘크리트 압축강도(33 MPa)에서 FRP의 두께 또는 보강비를 증가 시킨 실험체이며, 보강은 2겹, 3겹, 4겹을 실험 변수로 하였다. Fig. 5 (c), (d)에서 보인 바와 같이 보강량의 증가와 압축강도 증가비는 선형적인 관계를 보였다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 모든 보강 재료에서 탄성 구간에서 유사한 응력-변형률 거동을 보이다가 항복 이후 2차 기울

기의 차이가 나타났다.

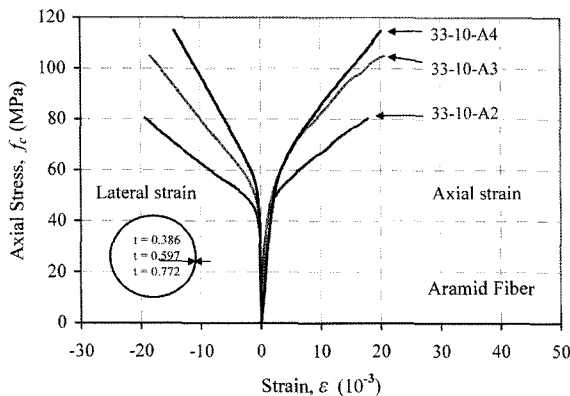
보강량이 증가할수록 보강 섬유 효과로 콘크리트의 파괴 변형률이 다소 증가할 것으로 예상되며 콘크리트가 항복 하는 전이역(transition zone)에서의 강도가 다소 증가하였다.

3.3.3 보강 섬유의 종류

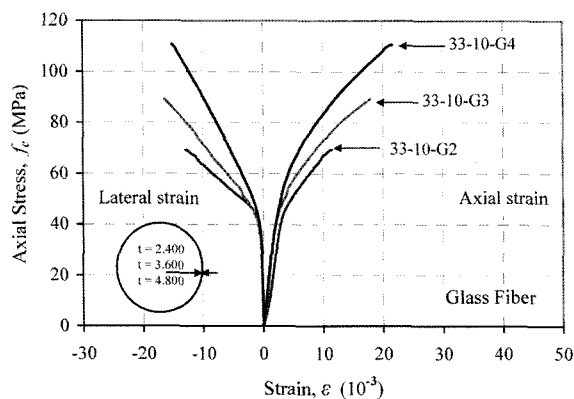
Fig. 9는 아라미드, 탄소 및 유리섬유의 보강 효과를 알아보기 위해 동일한 압축강도를 갖는 보강 실험체를 각 섬유별로 비교하였다. 아라미드와 유리섬유의 경우 거의 유사한 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 또한, 실험체의 파괴 시 극한변형률 및 극한강도가 거의 유사한 결과를 보였다. 하지만, 탄소섬유로 보강된 실험체는 큰



(a) Carbon fiber stress-strain ($\phi 100 \times 200$ mm)

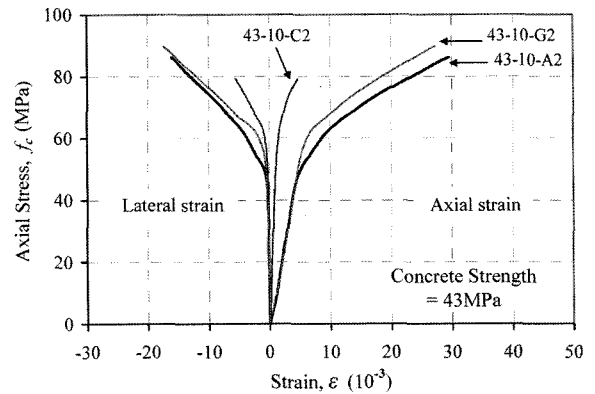


(b) Aramid fiber stress-strain ($\phi 100 \times 200$ mm)

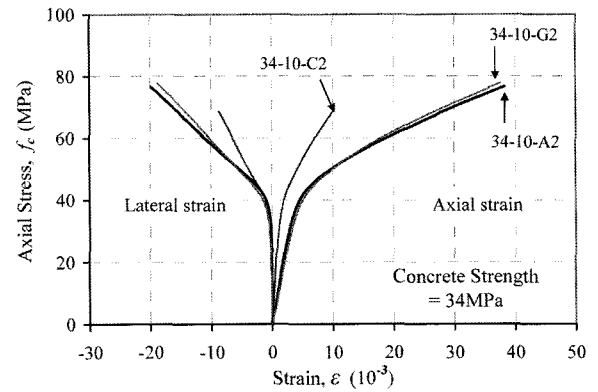


(c) E-glass fiber stress-strain ($\phi 100 \times 200$ mm)

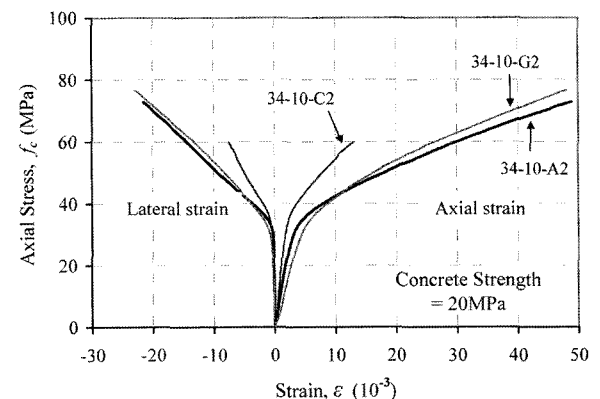
Fig. 8 Typical stress-strain curve of Group(C)



(a) Concrete strength = 43MPa



(b) Concrete strength = 34MPa



(c) Concrete strength = 20MPa

Fig. 9 Comparison of aramid, carbon and glass fiber

탄성계수를 보였다. 또한, 콘크리트의 압축강도 이후의 기울기도 상당히 큰 값을 보였다. 하지만, 극한 변형률은 아라미드와 유리섬유의 약 1/6에 지나지 않았다. 이는 탄소섬유로 보강된 실험체가 취성 파괴 됨을 의미한다.

3.3.4 체적 변형률

보강 섬유로 황구속된 콘크리트의 거동은 응력의 증가에 따름 체적 변형률의 변화를 살펴보면 섬유의 보강 효과를 보다 명확히 확인할 수 있다. 축방향 압축을 받는 구속 콘크리트의 체적 변화는 체적 변화율에 의해 나타낼 수 있으며, 체적 변화는 축방향 및 횡방향 변형률로부터 계산할 수 있다. 체적 변형률은 다음 식(3)에 의해 구해진다.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_c + 2\varepsilon_l \quad (3)$$

여기서, ε_v = 체적 변화율, ε_c = 콘크리트 축방향 변형률, ε_l = 콘크리트 횡방향 변형률이다.

Figs. 10~13은 실험체의 압축강도별 체적 변형률의 변화를 나타내었다. 여기서 (+)는 체적의 감소를 (-)는 체적의 증가 즉, 팽창을 의미한다. 무보강 실험체는 체적 변형률이 압축강도의 80%까지는 거의 선형으로 감소하는 것으로 조사되었다. 이후 응력의 증가에 따라 체적 변형률이 바뀌어 파괴에 도달하기까지 체적이 팽창하여 체적 변형률이 (-)의 값을 보인다. 이는 내부 콘크리트의 파괴로 인하여 균열 발생 및 팽창으로 인하여 파괴 됨을 나타낸다. 또한, Fig. 10에서 보인 바와 같이 무보

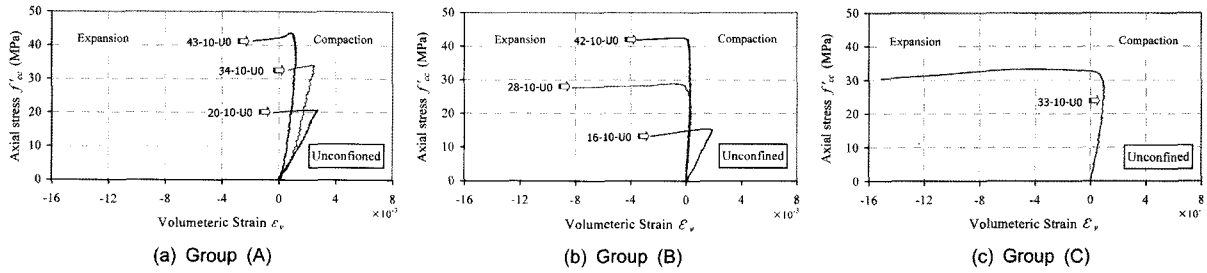


Fig. 10 Typical axial stress-volumetric strain curves of the concrete cylinders

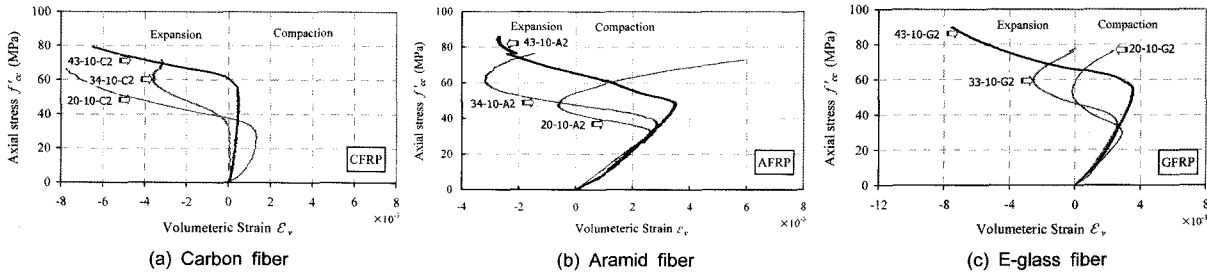


Fig. 11 Typical axial stress-volumetric strain curves of Group (A)

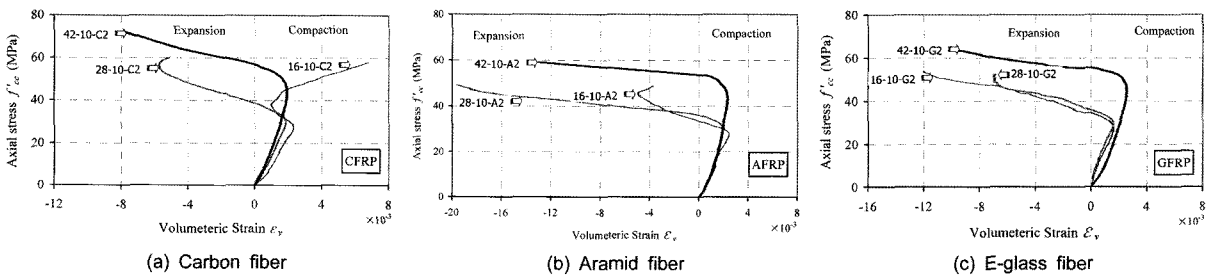


Fig. 12 Typical axial stress-volumetric strain curves of Group (B)

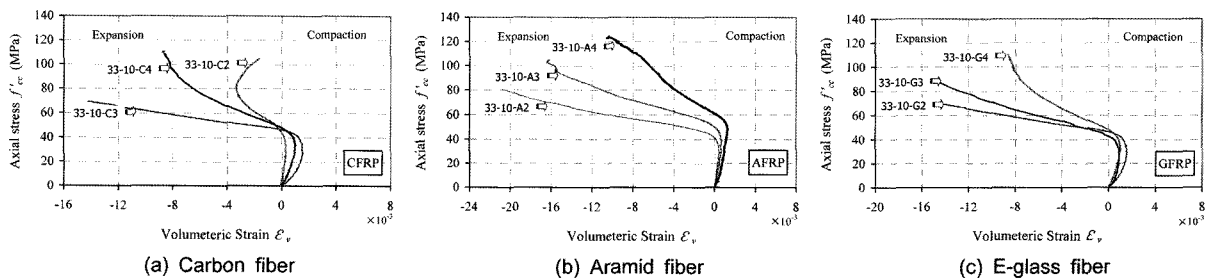


Fig. 13 Typical axial stress-volumetric strain curves of Group (C)

강 실험체는 체적의 팽창과 동시에 축방향 응력의 증가 없이 파괴되는 양상을 보인다.

섬유로 보강된 실험체의 경우에는 축방향 응력이 무보강 실험체의 압축강도의 약 80%에 도달할 때까지 무보강 실험체와 거의 유사한 거동을 보였다. 이후 곡선의 방향이 변하고 보강량이 작은 실험체에서 큰 팽창 변형률을 보이고 파괴되었다. Fig. 13에서와 같이 보강량이 증가할수록 실험체의 팽창을 억제하여 변형률이 작게 나타났다. 특히, 동일한 압축강도 33 MPa에서 섬유를 2겹 보강한 실험체(33-10-A2, 33-10-C2, 33-10-G2)의 변형률은 보강량이 2배인 실험체(33-10-A4, 33-10-C4, 33-10-G4)에 비해 높은 변형률을 보였다. 즉, 보강량이 증가할수록 실험체의 횡방향 변형을 효과적으로 제어함을 보여준다. 실험체의 축방향 응력-팽창률 곡선의 기울기는 보강량에 따라 증가하였다.

4. 결 론

콘크리트 공시체를 아라미드, 탄소, 유리섬유로 보강할 경우 보강 효과를 구명하기 위하여 압축강도의 증가, 변형률의 증가 및 체적 변형 특성을 구명하였다. 이를 위하여 압축강도, 보강 재료, 실험체의 크기 및 보강량에 따른 압축강도의 증가 효과 및 응력-변형률의 관계를 조사하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 보강 실험체의 파괴는 내부 콘크리트의 압축파괴로 인한 횡팽창 이후 보강 섬유의 구속 효과에 의해 파괴가 지연되었으며 파괴단면은 실험체의 내부에서 발생하였으며 계면 파괴는 일어나지 않았다. 또한, 보강섬유의 인장파괴는 섬유의 겹침 이음부 부근에서 발생하여 섬유의 겹침 이음 길이에 대한 연구가 요구된다.
- 2) 탄소, 아라미드, 유리섬유로 보강한 실험체의 압축강도의 증가율은 무보강 실험체의 압축강도와 반비례하였다. 즉, 고강도 콘크리트일수록 보강에 의한 압축강도 증가율은 감소하였다. 그러나, 동일한 압축강도를 갖는 실험체는 모든 보강 섬유에서 섬유의 보강비와 압축강도 증가비는 비례 관계를 보였다.
- 3) 보강 실험체의 응력-변형률 관계는 2선형으로 나타나고 초기 응력-변형률 관계는 무보강 실험체와 유사하였으나 콘크리트의 압축강도 이후 보강 실험체의 2차 응력-변형률은 선형을 보이고 보강비가 클수록 높은 기울기를 보였다.
- 4) 보강 콘크리트의 축방향 응력-횡방향 변형률을 조사한 결과 콘크리트의 압축강도 이후 보강 섬유의 보강 효과가 효과적으로 발휘됨을 알 수 있었다.

보강 재료의 콘크리트 구속 효과 및 내구성 등을 고려한 적절한 재료의 선택을 위하여 재료의 탄성계수 및 내구성에 대한 합리적인 선택을 위하여 추후 관련 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

참고문헌

1. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., *FRP-Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons Ltd., New York, 2002.
2. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp.585-653.
3. Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive stresses", *Bulletin 185, University of Illinois Engineering Experimental Station*, Champion, Ill., 1928.
4. Toutanji, H., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite sheets", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.3, 1999, pp. 397-404.
5. 정신욱, 류천, 김의성, 김화일, 김상섭, "탄소섬유쉬트로 횡구속된 콘크리트의 강도 증진에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표대회, 9권 2호, 1997, pp.462-471.
6. 천성철, 김지영, 박형철, 박철립, "탄소섬유로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형도 모델에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 15권 1호, 1997, pp.27-36.
7. 이명, 이성우, 최석환, 조남훈, "콘크리트충진 복합소재 합성부재의 횡구속 거동분석", 한국콘크리트학회, 가을 학술발표회 논문집, 13권 2호, 2001, pp.585-590.
8. 황진석, "탄소섬유쉬트로 횡구속된 콘크리트 공시체의 응력도-변형도 특성", 대한건축학회 논문집, 17권 9호, 2001, pp.212-220.
9. 이정윤, 정훈식, "섬유에 의하여 구속된 원형콘크리트 기둥의 최대변형률 예측", 콘크리트학회논문집, 15권 5호, 2003, pp.726-736.
10. ACI 440R-96, *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute (ACI) Committee 440, Farmington Hill, Michigan, USA.
11. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.114, No.8, 1988, pp. 1804-1826.
12. Mirmiran, A., Samaan, M., Cabrera, S., and Shahawy, M., "Design, Manufacture Concrete Beam-Columns", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.125, No.10, 1998, pp.1085-1093.
13. Mirmiran, A. Shahawy, M., Samaan, M., and El Echary, H., "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol.2, No.4, 1998, pp.175-185.
14. Mirmiran, A., Samaan, M., Cabrera, S., and Shahawy, M., "Design, Manufacture Concrete Beam-Columns," *Journal*

- of *Structural Engineering, ASCE*, Vol.125, No.10, 1998, pp.1085~1093.
15. Mirmiran, A., Shahawy, M., El Khoury, C., and Naguib, W., "Large Beam - Column Tests on Concrete-Filled Composite Tubes", *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.2, 2000, pp.268~276.
 16. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses", *University of Illinois, Engineering Experimental Station, Illinois, USA.*, 1929.
 17. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression", *University of Illinois, Engineering Experimental Station, Illinois, USA*, 1929.
 18. Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.4, 1999, pp.500~509.
 19. Smaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composite", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.124, No.9, 1998, pp.1205~1031.
 20. Xiao, Y. and Ma, R., "Seismic Retrofit of RC Circular Columns Using Prefabricate Composite Jacketing", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.123, No.3, 1997, pp.1357~1364.

요 약 최근에 노후화된 콘크리트 구조물의 보수·보강 방법으로 FRP를 이용한 보강이 효과적인 것으로 알려지고 있다. 본 연구의 목적은 FRP로 보강된 콘크리트 실린더의 거동을 실험적으로 조사하고자 하는 것이다. 실험 변수로는 콘크리트의 압축강도, FRP재료의 종류 및 구속비이다. 본 연구에서 아라미드, 탄소 및 유리섬유로 보강된 콘크리트의 성능을 압축강도 실험을 통한 연구 결과를 보이고 있다. 이를 위해 축방향 하중, 축방향 및 횡방향 변형률을 측정하였다. 본 연구를 통하여 콘크리트의 강도와 횡방향 변형률과 횡방향 구속응력의 비로 정의되는 구속비가 구속 콘크리트의 응력-변형률을 결정하는 주요 인자인 것으로 나타났다. FRP로 더 많은 보강을 한 실험체는 우수한 구속력으로 인한 강도의 증가를 야기하였다. 고강도 콘크리트의 경우 FRP에 의한 보강으로 구속력의 증가가 증가되더라도 실험체의 압축변형률이 감소하여 취성파괴의 경향을 보였다. 구속된 콘크리트의 파괴는 FRP 재료의 극한 변형률 보다 낮은 변형률에서 FRP의 파단으로 시작되어 콘크리트의 파괴에 도달하였다.

핵심용어 : 아라미드섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 구속력, 응력-변형률 모델