

## 論文

## 콘크리트 충전 FRP 원통관의 압축거동에 관한 실험적 연구

주형중\*, 이승식\*\*, 김영호\*\*\*, 박종화\*\*\*\*, 윤순중\*\*\*\*\*+

## Experimental Investigation on the Compression Behavior of Concrete Filled Circular FRP Tubes

Hyung-Joong Joo\*, Seungsik Lee\*\*, Young-Ho Kim\*\*\*, Jong-Hwa Park\*\*\*\* and Soon-Jong Yoon\*\*\*\*\*+

## ABSTRACT

Durability problems may arise in the concrete, which is one of the major construction materials, used in the construction field. Bridge piers and foundation piles are usually made with concrete and they are exposed to the moisture and hence the durability of the concrete reduced significantly due to oxidization of re-bar and icing of concrete. To mitigate such problems, FRP tube has been developed and the concrete filled FRP tube (CFFT) has been investigated to find the confinement effect which is provided additionally. It was reported that if the concrete is wrapped with FRP, strength and chemical resistance are improved significantly. In order to apply such a member in the construction field, structural behavior and applicable design guideline or design criteria must be thoroughly investigated. In the experimental investigation, the results are compared with the previous research results and the relationship which can predict the ultimate strength and strain is suggested. In addition, some comments found at the compression tests are given briefly.

## 초 록

건설분야에서 사용하고 있는 건설재료인 콘크리트는 대부분 외기에 직접 노출되어 있기 때문에 유해환경으로부터 열화되어 내구성이 저하될 수 있다. 특히, 교량의 교각 및 말뚝과 같은 부재들은 수분의 침투, 동결융해 등의 영향으로 내구성의 감소정도가 심각할 수 있다. 최근 이러한 문제점을 보완하고 효율적인 부재를 제작하기 위해 토목분야에서는 CFFT(Concrete Filled FRP Tube)가 제안되어 연구되고 있다. CFFT는 효율적으로 콘크리트를 구속하여 압축성능을 향상시키고, 화학적 저항성이 우수한 FRP가 외부에 노출되어 반영구적으로 사용될 수 있으며, 연성, 에너지 흡수능력 등을 향상시키는 것으로 평가되고 있다. 그러나 CFFT에 대한 설계기준이 마련되어 있지 않고, FRP-콘크리트 합성부재에 대한 구조거동이 불확실하여 현장에 적용하기 위해서는 다양한 연구가 선행되어야 한다. 이 연구에서는 CFFT에 대한 압축실험을 통해 구조적 거동을 조사하였으며, 실험결과와 기존 연구결과를 비교 분석하여 극한압축강도 및 변형률을 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 또한, CFFT의 압축실험에서 고려되어야 할 사항들에 대해 간략히 설명하였다.

**Key Words :** 콘크리트 충전 FRP 원통관(Concrete Filled Circular FRP Tube (CFFT)), 구속효과(Confining Effect), 일축압축실험(Uniaxial Compression Test), 압축거동(Compression Behavior)

\* 홍익대학교 토목공학과 구조전공 대학원

\*\* 한국해양수산기술진흥원

\*\*\* 세진특허법률사무소

\*\*\*\* 현대건설

\*\*\*\*\*+ 홍익대학교 토목공학과 구조전공, 교신저자(E-mail:sjyoon@hongik.ac.kr)

### 1. 서론

FRP는 재료적 성질이 뛰어난 장점을 갖고 있음에도 불구하고 구조적 거동에 대한 명확한 해석 및 설계기준이 마련되어 있지 않아 건설분야에서의 적용성은 상당히 낮은 단계에 머물고 있다[1]. 이 연구는 FRP를 토목분야의 구조부재에 적용하여 그 본래의 성능을 향상시키고, 반영구적으로 사용할 수 있는 구조부재를 개발하기 위한 연구의 일부이다.

토목분야에서 사용되고 있는 콘크리트 및 철근콘크리트 부재는 외기에 그대로 노출되어 있어 콘크리트가 열화되거나 철근이 부식되어 정기적인 유지관리가 필요하며, 그 손상 정도가 심각할 경우 붕괴의 위험성을 내포하고 있다. 특히, 교각과 같이 하중을 지반에 전달하는 매우 중요한 구조부재이면서 하천이나 해양환경에 설치되어 수분의 침투가 빈번하고 철근의 부식이 우려되는 부재에 대해서는 원천적으로 내구성의 저하요인을 제거해야 할 것이다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 제안된 부재가 CFFT(Concrete Filled FRP Tube)이다.

CFFT는 콘크리트의 외부를 FRP로 감싸는 구조로서 압축하중이 재하될 경우 콘크리트를 구속하여 압축성능을 증가시키고 외부에 화학적 저항성이 큰 FRP가 콘크리트를 보호하므로 수분의 침투 및 콘크리트 열화의 가능성이 감소되며, 충격에너지 흡수능력, 내진성능이 향상되는 것으로 평가되고 있다.

FRP를 사용하여 콘크리트의 외부를 보강하는 방법은 크게 Wrapping, Filament Winding, Prefabricated Sheet Jacketing 공법으로 분류할 수 있다. Wrapping 공법은 주로 현장에서 기존에 건설되어 있는 콘크리트 압축부재를 보강하는 방법으로 일방향 섬유시트나 직조섬유시트를 폴리머레진으로 함침시켜 젖은 상태의 FRP를 기둥의 둘레방향으로 감싸는 공법이고, Filament Winding 공법은 FRP의 제조공법으로서 미리 FRP 원통관을 제작하고 콘크리트를 충전하는 방법이며, Prefabricated Sheet Jacketing 공법은 FRP를 보강대상 콘크리트 부재의 단면형상을 고려하여 미리 반원형이나, ㄷ형 단면으로 제작하여 콘크리트 외부를 감싸는 공법이다.

콘크리트의 외부를 FRP로 감싼 부재에 대해서는 이미 기존 연구자들에 의해 다양하게 연구된 바 있다. 그러나 대부분 FRP Sheet를 콘크리트 부재에 Wrapping한 실험체에 대해 수행되었으며, 이러한 공법은 이미 설명한 바와 같이 보수, 보강을 목적으로 적용하기에 적합한 방법이며, 신설되는 압축부재에 적용하기에는 한계를 나타내고 있다.

이 연구는 보수, 보강 목적이 아닌 신설구조물에 적용하기 위한 연구로서 FRP보강 공법중 Filament Winding공법을 적용한 CFFT 실험체에 대한 구조적 거동을 조사하였다.

### 2. CFFT에 대한 기존 연구

압축재에서 FRP 원통관을 거푸집과 콘크리트를 보호하는

외부 보강재로서 사용하기 위한 연구는 고전적인 콘크리트 체움 강관파일에서부터 수정, 보완, 발전되어 20세기 초 이미 콘크리트에 횡방향 구속력을 가하면 강도와 연성이 증가한다는 사실이 밝혀졌으며, Richart 등(1928)은 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 강도비로서 식 (1)과 같은 선형관계식을 제안하였다[2]. 식 (1)에서  $f_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 압축강도이고,  $f_{co}$ 는 구속되지 않은 콘크리트 압축강도이며,  $k_1$ ,  $f_l$ 은 각각 유효구속계수(Confinement Effective Coefficient)와 구속압(Confining Pressure)을 나타낸다. 구속압  $f_l$ 은 Fig. 1에서 힘의 평형조건으로부터 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f_{co}} \tag{1}$$

$$f_l = \frac{2f_{frp} \cdot t_{frp}}{d} \tag{2}$$

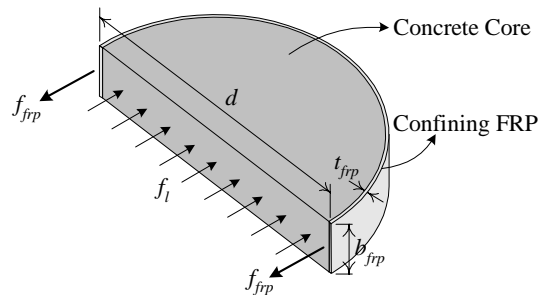


Fig. 1 Confining Action of CFFT.

콘크리트의 횡방향 구속에 의한 압축저항성능의 향상은 이미 많은 연구를 통해 입증된 바 있으나 그 정도에 대해서는 아직도 많은 연구가 수행되고 있고 구속재에 관계없이 구속에 의한 압축강도는 구속압에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 식 (1)의 관계에서 유효구속계수  $k_1$ 을 다양한 형태로 제안하고 있다. 기존 연구자들에 의해 제안된 유효구속계수를 도입하여 강도비(Strength Ratio)와 구속비(Confinement Ratio)의 관계를 나타내면 Fig. 2와 같다[2].

기존 연구자들에 의하면 Richart 등에 의해 제안된 식 (1)의 형태에서 유효구속계수를 상수로 표현하거나 구속비의 함수로 표현하고 있다. 유효구속계수를 구속비의 함수로 나타낼 경우 강도비와 구속비의 관계는 비선형을 나타내고, 유효구속계수를 상수 또는 독립변수로 나타낼 경우 강도비와 구속비는 선형관계를 나타내며, 구속비는 선형곡선의 기울기가 될 것이다. 기존 연구자들에 의해 제안된 강도추정모델은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 강도비와 구속비의 관계는 대부분 선형에 가까운 것을 알 수 있다.

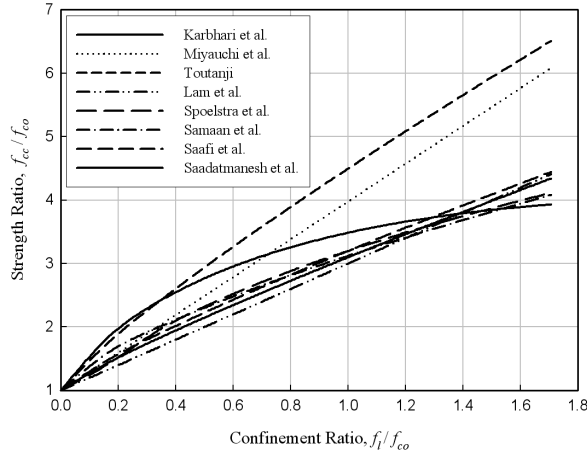


Fig. 2 Strength Model of Confined Concrete.

철근콘크리트 압축부재의 설계에서 콘크리트 극한변형률은 하중저항성능을 검토할 경우 매우 중요한 변수가 되며, 현행 콘크리트 관련 설계기준(2007)에서는 0.003으로 제안하고 있다. 그러나 CFFT는 횡방향 구속에 의해 보장되지 않은 극한 변형률과는 차이를 나타낸다. Richart 등은 구속된 콘크리트 극한압축변형률을 구속압과 연관된 것으로 가정하여 식 (1)의 형태와 유사하게 식 (3)을 제안하였다[2].

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (3)$$

식 (3)에서  $\epsilon_{cc}$ ,  $\epsilon_{co}$ 는 각각 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 축방향 극한변형률이고,  $k_2$ 는 변형률증가계수 (Strain Enhancement Coefficient)이다. Richart 등은 강재에 구속된 콘크리트에 대해서  $k_2$ 는 유효구속계수의 5배( $5k_1$ )라고 제안하였으며, 강재구속의 경우 4.1로 정하였다. 최근 연구결과에 따르면 횡철근으로 구속된 콘크리트는 FRP로 구속된 콘크리트의 변형률과는 차이가 있는 것으로 보고된 바 있다[2, 3].

CFFT 부재의 압축성능은 이미 설명한 바와 같이 구속압에 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 FRP 원통관을 제작한 후 콘크리트를 타설하는 CFFT의 제조특성상 건조수축과 같은 콘크리트의 재료적 특성에 따라 콘크리트와 보강된 FRP 원통관 사이에 간격을 생성하여 구속효과를 감소시킬 수 있어 구속된 콘크리트의 건조수축에 대한 검토가 필요하다. FRP에 의해 구속된 심부콘크리트의 건조수축에 대한 연구는 Naguib 등 (2002)에 의해 수행된 바 있으며, Naguib 등에 의한 연구결과는 Fig. 3에 나타내었다[4].

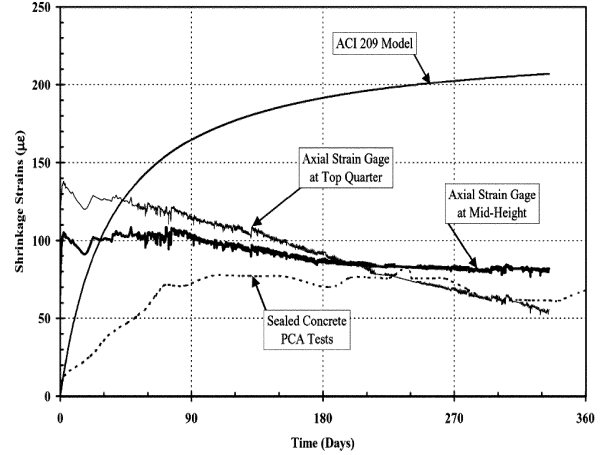


Fig. 3 Shrinkage Strains of CFFT Specimen.

Fig. 3에서 CFFT의 심부콘크리트 변형률은 양생초기 매우 큰 증가를 보이다가 서서히 감소하여 약 0.00005~0.0001의 변형률에서 수렴하는 경향을 보이고 있으며, 이 변형률 변화 곡선은 소성건조수축(Plastic Shrinkage)을 포함한 결과로서 자유수의 증발에 의한 건조수축은 구속되지 않은 콘크리트의 약 10%~20% 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과로 Naguib 등은 CFFT에서 FRP와 콘크리트 사이의 간격은 매우 미소하여 구조거동에 끼치는 영향은 매우 작은 것으로 평가하였다.

### 3. CFFT 일축압축실험

#### 3.1 실험체 제작 및 설치

CFFT 실험체는 모두 FRP 원통관을 필라멘트와인딩 공정에 의해 제작한 후 콘크리트를 타설하여 제작하였다. 각 실험체의 특징은 Table 1에 나타내었으며, 일축압축실험 개요는 Fig. 4에 나타내었다. Table 1에서 FRP 제조에 사용한 보강섬유는 유리섬유이고, 직조형태 및 종류에 따라 A, B, C type으로 구분하였다. A, B type은 유리섬유를 엮은 직조섬유를 사용하였고, C type은 직조하지 않은 연속섬유를 사용하였으며, 배향각은 모두 약 30°이다.

또한, 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도( $f_{co}$ )는 재령 28일에 일축압축실험을 통해 결정된 수치이다. Table 1의 실험체기호 첨자는 직경( $d$ )이 100mm인 실험체의 경우 순서대로 FRP의 종류(type), 보강두께, 콘크리트 강도를 나타내고, 직경이 150mm인 실험체의 경우 순서대로 FRP의 종류(type), 실험체 높이, FRP 보강두께이다. 또한,  $C_{30-1(32)}$  실험체는 심부콘크리트 강도가 32 MPa인 실험체로 첨자 (32)로 구분하였다.

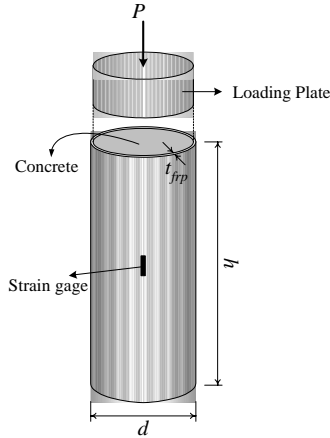


Fig. 4 Test Set-up.

Table 1 Test Parameters

Specimen	Dimension		FRP		$f_{co}$	Number					
	$d$	$h$	Fiber	$t_{frp}$							
C <sub>A2-32</sub>	100	200	A	2	32	5					
C <sub>A4-32</sub>				4		5					
C <sub>A6-32</sub>				6		5					
C <sub>A2-43</sub>				2		43	5				
C <sub>A4-43</sub>				4			5				
C <sub>A6-43</sub>				6			4				
C <sub>B2-43</sub>			B	2	43		5				
C <sub>B4-43</sub>				4			5				
C <sub>B6-43</sub>				6			5				
C <sub>C30-1</sub>				150		300	C	1	54	3	
C <sub>C30-1(32)</sub>									32		
C <sub>C30-3</sub>								54	3	54	3
C <sub>C30-5</sub>	5	3									
C <sub>C45-3</sub>	450	3	54		3						
C <sub>C60-3</sub>		600			3				54		3

$d$  : Diameter (mm)  
 $h$  : Height (mm)  
 $t_{frp}$  : Thickness of FRP Tube (mm)  
 $f_{co}$  : Strength of Unconfined Concrete (MPa)

Table 2 Material Properties of FRP

Class.	$t_{frp}$	$f_{fu}$	$\epsilon_{fu}$	$E_{frp}$
A	2 mm	273	0.0215	14,490
	4 mm	280	0.0208	15,120
	6 mm	273	0.0191	15,730
B	2 mm	267	0.0189	15,600
	4 mm	379	0.0220	17,390
	6 mm	337	0.0203	17,400
C	1 mm	321	0.0103	39,592
	3 mm	530	0.0114	56,123
	5 mm	607	0.0108	56,990

$f_{fu}$  : Ultimate Strength (MPa)  
 $\epsilon_{fu}$  : Ultimate Strain (MPa)  
 $E_{frp}$  : Elastic Modulus (MPa)

갖는 FRP의 역학적 성질과 동일하게 가정할 수 없다. 특히, 필라멘트 와인딩 FRP의 경우 섬유 배향각에 따라서 역학적 성질이 큰 차이를 나타내고 이를 예측할 수 있는 이론적 연구가 다양하게 수행되나 CFRT의 압축성능 예측에서는 원주방향에 대한 극한강도 및 변형률만을 필요로 하고 있기 때문에 이 연구에서는 FRP에 대한 역학적 성질을 실험을 통해 결정하여 Table 2에 결과를 정리하였다.

Table 2에서 A, B type의 역학적 성질은 동일한 두께의 원통관을 1m 직경으로 확장, 제작하고, 절단하여 인장실험을 수행하여 얻은 결과이며, C type의 역학적 성질은 Split-disk 실험을 통해 얻은 결과이다.

### 3.2 실험결과

CFRT 실험체의 최종 파괴형태는 모두 외부 FRP의 파단으로 나타났으며, 각 실험체의 파괴형태를 실험체의 종류에 따라 Fig. 5에 나타내었다. 직조섬유(C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub>)의 경우 실험체의 길이방향으로 FRP가 완전히 분리되는 현상이 뚜렷히 관찰되었으나 연속섬유의 경우 파괴형태는 보강섬유의 배치방향에 따라 파단형태에서 차이를 나타내었다.

Fig. 4의 일축압축실험에서 심부콘크리트에만 하중을 재하하는 방법은 CFRT를 구조물의 압축재로 사용할 경우 외부에 보강된 FRP에 비해 심부 콘크리트의 축방향 강성이 크고, 상부구조와 심부콘크리트가 일체화되기 때문이며, 실제상황과 유사한 조건을 갖도록 하기 위한 것이다.

건설분야에 사용되는 강재나 콘크리트의 경우 등방성이고 균질한 재료로 가정하여 부재치수에 관계없이 동일한 역학적 성질을 갖는 것으로 평가하여 해석에 적용하고 있다. 그러나 FRP의 경우 재료의 역학적 성질은 주로 보강섬유에 의해 결정되기 때문에 단면치수에 따른 역학적 성질을 정확하게 측정하여야 하며, 일정한 단면에서 얻은 역학적 성질을 다른 치수의 단면을

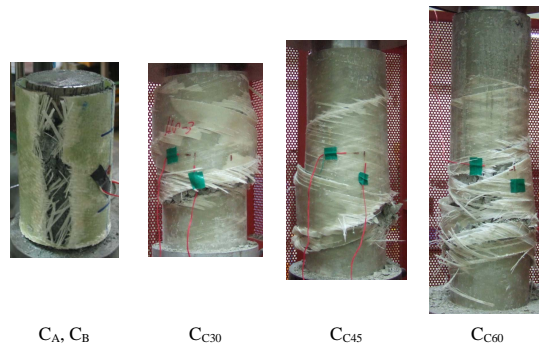


Fig. 5 Failure Mode.

실험체의 축방향으로 설치한 변형률 게이지로부터 측정된 응력-변형률 관계는 모든 실험체에서 Fig. 6에 나타난 바와 유사하게 초기구간과 두 번째 구간으로 분류되는 두 개의 곡선형태로 나타났으나, FRP 보강량에 따라 그 기울기는 차이를 나타내었다. 즉, 보강량이 큰 경우 두 곡선의 기울기는 증가하였으며, 작은 경우 두 곡선의 기울기는 모두 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 6의 응력-변형률 곡선의 기울기는 초기 구간에서는 선형으로 증가하다가 기울기가 변하는 구간이 발생하고 이 후 곡선의 기울기가 초기구간에 비해 감소된 형태로 선형에 가깝게 변화하는 것을 보여주고 있다. 초기구간의 응력-변형률 곡선은 심부콘크리트가 주로 하중에 저항한 것으로 판단되며, 초기구간에 비해 기울기가 감소한 두 번째 곡선은 심부콘크리트에 균열이 발생한 후 압축하중은 FRP에 의한 구속효과에 의해 감소하지 않고 계속 증가하는 것으로 판단된다.

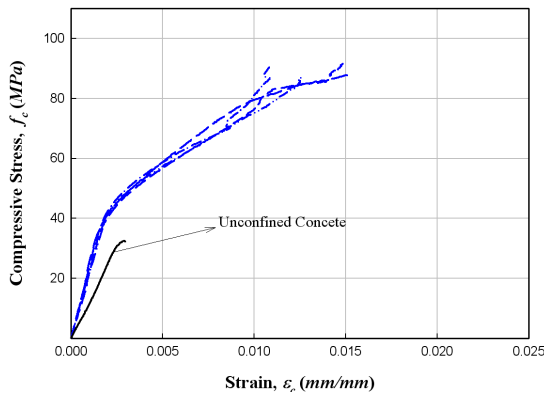


Fig. 6 Stress-Strain Curve of CFFT(CA6-32).

또한, 구속되지 않은 콘크리트의 응력-변형률 곡선과 비교할 때 심부콘크리트가 파괴되기 전에 FRP에 의한 구속효과 또한 축방향 강성 및 강도를 다소 증가시키는 것으로 나타났으며, 각 실험체의 극한강도 및 변형률은 Table 3에 정리하여 나타내었다.

### 4. 결과분석

#### 4.1 직경-높이비 효과

C<sub>C30,45,60-3</sub> 실험체에 대한 압축실험결과 실험체 높이-직경비에 따른 강도비를 Fig. 7에 Mirmiran 등(1998)의 연구결과와 비교하여 나타내었다. Mirmiran 등의 연구에서는 높이-직경비에 따라 강도비가 감소하는 것으로 평가하고 있으나 이 연구의 실험결과 직경과 높이의 비가 1:2 실험체와 1:3, 1:4 실험체의 극한 강도를 비교하면 Mirmiran 등의 연구결과는 직경-높이비에 의한

Table 3 Test Results

Spec.	$f_{cc}$ (MPa)	$\epsilon_{cc}$ (mm/mm)	Spec.	$f_{cc}$ (MPa)	$\epsilon_{cc}$ (mm/mm)
C <sub>A2-32</sub>	49.3	0.0143	C <sub>B4-43</sub>	60.2	0.0107
	45.0	0.0165		69.2	0.0107
	46.8	0.0139		67.5	0.0102
	43.1	0.0123		66.5	0.0089
68.8	0.0139	61.2		0.0077	
C <sub>A4-32</sub>	62.2	0.0122	C <sub>B6-43</sub>	96.2	0.0092
	71.1	0.0206		95.8	0.0103
	69.4	0.0100		105.4	0.0102
	70.9	0.0172		97.4	0.0105
C <sub>A6-32</sub>	91.4	0.0149	C <sub>C30-1</sub>	54.2	0.0150
	88.2	0.0154		55.3	N/A
	87.4	0.0126	C <sub>C30-1(32)</sub>	56.7	0.0170
	91.3	0.0110		105.0	0.0388
C <sub>A2-43</sub>	44.0	N/A		102.3	N/A
	44.6	N/A		107.8	N/A
	41.4	N/A	C <sub>C30-3</sub>	95.5	N/A
	48.3	0.0150		114.7	0.0236
44.6	0.0050	111.7		N/A	
C <sub>A4-43</sub>	57.2	N/A	C <sub>C30-5</sub>	206.4	0.0388
	54.9	N/A		198.9	N/A
	55.3	0.0112		189.1	N/A
	58.1	0.0268	C <sub>C45-3</sub>	115.3	0.0314
58.1	0.0109	113.4		0.0342	
C <sub>A6-43</sub>	71.9	0.0144		108.5	0.0364
	67.4	0.0162		C <sub>C60-3</sub>	120.1
	73.6	0.0320	114.8		N/A
	71.4	0.0105	110.4		N/A
C <sub>B2-43</sub>	41.2	N/A			
	42.6	0.0070			
	46.8	N/A			
	38.9	N/A			
42.6	0.0060				

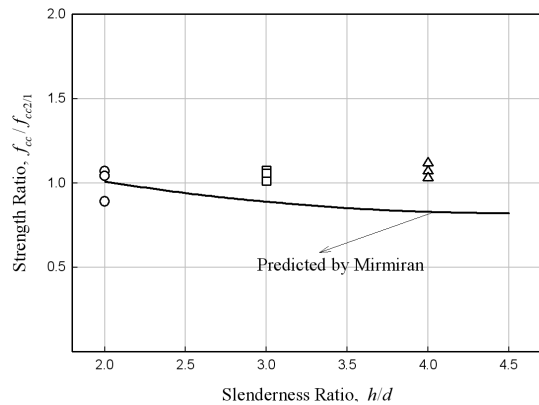


Fig. 7 Strength Ratio vs. Slenderness Ratio.

강도감소를 과대평가하고 있는 것으로 나타났고, 높이-직경비가 2.0 ~ 4.0에서는 직경-높이비에 따른 강도변화는 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

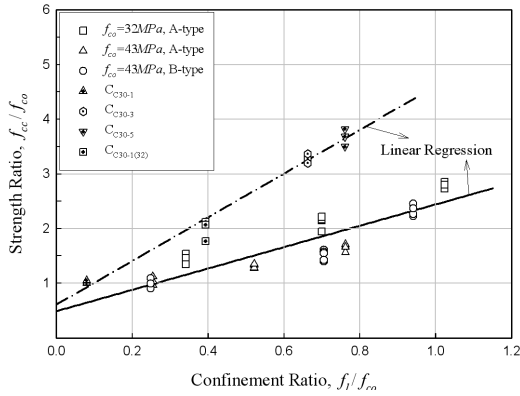


Fig. 8 Strength Confinement Ratios.

4.2 극한강도

CFFT 실험체의 극한강도를 사용하여 결정한 강도비와 구속비의 관계는 Fig. 8에 나타내었다. 실험결과 연속섬유 FRP를 사용한 실험체의 강도비가 직조섬유 FRP를 사용한 실험체에 비해 비교적 큰 것을 알 수 있으며, 두 경우에 대해 구속비와 강도비의 관계는 각각 일정한 경향을 나타내고 있다. 따라서 Fig. 8에 나타낸 실험결과를 선형회귀분석하면 CFFT의 극한강도는 섬유의 종류에 따라 각각 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_{c1}}{f_{co}} = 0.5 + 2.0 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \tag{4}$$

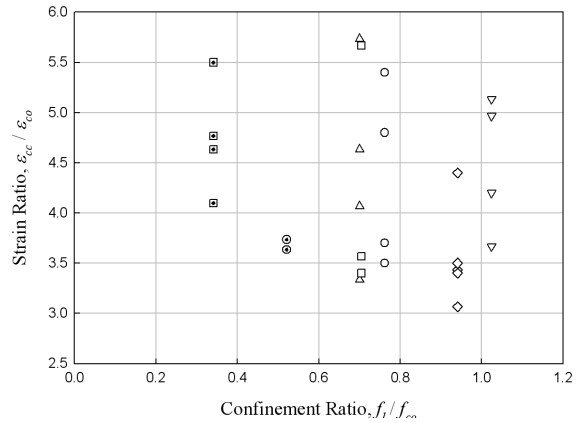
$$\frac{f_{c2}}{f_{co}} = 0.61 + 4.0 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \tag{5}$$

식 (4), (5)에서  $f_{c1}$ ,  $f_{c2}$ 는 각각 직조섬유 CFFT의 극한강도와 연속섬유 CFFT의 극한강도이다.

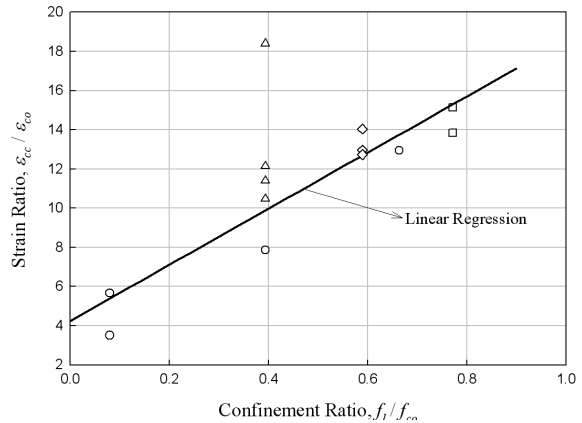
직조섬유를 사용한 CFFT의 극한강도는 기존 연구결과[2]와 비교할 때 유사한 결과를 얻을 수 있으나 FRP에 의한 구속압이 존재하지 않을 경우 콘크리트 강도는 50%가 감소하는 결과를 얻는다. 이와 같은 관계는 FRP로 보강할 경우 최소한의 구속압의 제한이 필요한 것을 의미하며 Fig. 8로부터 최소 구속비는 0.3 이상이 되어야 할 것이다. 또한, 식 (5)의 연속섬유 FRP를 사용한 CFFT의 경우에서도 유사하게 구속비는 최소 0.1 이상이 되어야 한다.

4.3 극한변형률

Fig. 9에 나타낸 변형률비는 구속되지 않은 콘크리트의 극한변형률(0.003)과 CFFT 실험체의 극한강도에서 측정된 축방향 변형률 비이다.



(a) Woven Fabric Fiber



(b) Continuous Fiber

Fig. 9 Strain-Confinement Ratios.

Fig. 9(a)에서 직조섬유 CFFT의 극한변형률은 구속비와 상관관계가 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 측정된 변형률이 FRP 표면에서 측정된 데이터로 실험체 단면에 비해 상대적으로 FRP 보강단면의 치수가 크고, 하중을 심부 콘크리트에만 재하하여 콘크리트와 FRP가 축방향으로 합성거동을 하지 않은 것으로 추정되며, CFFT 전체의 압축거동을 반영한 결과라고 보기 어렵다. 따라서, CFFT 축소모형 실험시 콘크리트의 효과적인 변형률을 측정하기 위해서는 실험방법에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

Fig. 9(b)의 연속섬유 CFFT의 극한변형률은 직조섬유와는 달리 실험체의 단면치수가 크기 때문에 FRP와 콘크리트의 부착면적이 증가하여 극한상태까지 FRP와 콘크리트가 합성거동을 한 것으로 추정되며 구속비에 따라 일정한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 선형회귀분석을 통해 극한변형률을 식 (3)의 형태로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 4.25 + 14.32 \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \quad (6)$$

## 5. 결론

이 연구에서는 CFFT에 대한 기존 연구 자료 조사와 일축 압축실험을 통해 구조적 거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CFFT 심부콘크리트의 건조수축은 FRP로 구속되지 않은 콘크리트와 비교할 때 매우 작기 때문에 FRP 원통관에 콘크리트를 타설한 공법에서 두 재료 사이의 간격에 의한 구속 압의 감소가 구조적 거동에 미치는 영향은 매우 작은 것으로 조사되었다.

(2) CFFT의 파괴모드는 심부콘크리트의 파괴와 보강 FRP의 최종 파괴로 구분할 수 있으며, 응력-변형률 곡선은 심부콘크리트의 파괴를 기준으로 두 개의 곡선으로 나타났다.

(3) FRP에 의한 구속효과로 심부콘크리트의 축방향 강성은 증가하며, CFFT의 심부콘크리트가 파괴된 후 구속되지 않은 콘크리트의 파괴거동과는 달리 외부에 보강된 FRP가 파단될 때 CFFT에 재하되는 하중은 지속적으로 증가한다.

(4) 연속섬유 FRP에 의한 구속효과는 직조섬유 FRP에 의한 구속효과에 비해 크게 나타났으며, 실험결과로부터 극한강도를 예측하기 위한 식을 제안하였다.

(5) CFFT 축소모형실험에서 FRP 표면에서 측정된 극한변형률은 CFFT의 압축거동을 효과적으로 반영한 결과라 보기 힘들며, 심부콘크리트의 변형률을 측정하기 위한 적절한 실험 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 국가과학기술장학사업 2007 이공계 대학원 연구장학금의 일부 지원에 의해 수행된 것이며 연구비 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 한복규, 홍건호, 김기수, “건축토목용 복합재료의 국내의 설계기준 분석,” *한국복합재료학회지*, 19권, 4호, 2006, pp.39-43.
- 2) Lam, J., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L., *FRP-Strengthened RC Structures*, John Willey & Sons, 2002, New York.
- 3) Lam, J., and Teng, L. “Design-oriented Stress-strain model for FRP-confined concrete,” *Construction and*

*Building Materials*, No. 17, 2003, pp. 471-489.

- 4) Naguib, W. and Mirmiran. A. “Time- Dependent Behavior of Fiber-Reinforced Polymer-Confined Concrete Columns Under Axial Loads,” *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 2, 2002, pp. 142-148.
- 5) Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., Echary H. E. Mastrapa, J. C., and Pico, O. “Effect of Column Parameters on FRP- Confined Concrete,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2, No. 2, 1998, pp. 175-185.
- 6) 박준석, 김정우, 남정훈, 김우기, 옥동민, 윤순중, “콘크리트 충전 FRP Tube의 압축강도 추정,” *한국복합재료학회 추계학술발표대회 논문집*, 2006, pp. 106-109.
- 7) 이명, “콘크리트충전 복합소재 합성부재의 거동분석과 세 장비 특성에 관한 연구,” *석사학위논문*, 국민대학교, 2002.
- 8) 이대형, 김영섭, 정영수, “FRP로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 거동 특성,” *한국콘크리트학회 논문집*, 19권 2호, 2007, pp. 135-144.
- 9) 이대형, 김영섭, 정영수, “FRP로 보강된 콘크리트의 강도 및 변형률 예측,” *한국콘크리트학회 논문집*, 19권, 3호, 2007, pp. 253-263.
- 10) 조순호, “FRP로 보강된 원형단면 콘크리트 단주의 강도 및 변형 능력,” *한국콘크리트학회 논문집*, 19권, 1호, 2007, pp. 121-130.