

탄소섬유튜브로 횡구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축강도 성능에 관한 연구

Strength Characteristics of Square Concrete Column Confined by Carbon Composite Tube

홍원기* 김희철** 윤석한*** 박순섭****
Hong, Won Kee Kim, Hee Cheul Yoon, Suk Han Park, Soon Sup

국문요약

탄소섬유튜브는 기존의 콘크리트 기둥에 강도와 연성을 제공하여 길이방향 및 횡방향 철근을 대신할 수 있다. 본 연구에서는 탄소섬유튜브에 의해 구속된 각형 콘크리트의 축하중에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 탄소섬유튜브는 길이방향에 대하여 $90^\circ \pm 30^\circ$, $90^\circ \pm 45^\circ$ 로 섬유 방향을 조합하여 필라멘트 와인딩 방법으로 제작하였다. 10,000kN UTM을 이용하여 단조축하중을 재하였다. 섬유의 방향, 튜브의 두께에 따른 횡구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 관계를 고찰하였다. 탄소섬유튜브에 의해 횡구속된 콘크리트의 압축강도와 연성을 예측하기 위하여 제안된 실험식은 실험결과를 적절히 예측하는 것으로 나타났다.

주요어 : 탄소섬유튜브, 횡구속 효과, 와인딩 각도, 압축강도, 연성

ABSTRACT

The carbon composite tube can play an important role in replacing or complementing longitudinal and transverse reinforcing steels by providing ductility and strength for conventional columns. In this study, both the experimental and analytical investigations of axial behavior of large-scale square concrete columns confined by carbon composite tube are presented. The specimens are filament-wound carbon composite with $90^\circ \pm 30^\circ$, $90^\circ \pm 45^\circ$ winding angle respect to longitudinal axis of tube. The instrumented large-scale concrete-filled composite tubes(CFCT) are subjected to monotonic axial loads exerted by 10,000kN UTM. The influence of winding angle, thickness of tube on stress-strain relationships of the confined columns is identified and discussed. Proposed equations to predict both the strength and ductility of confined columns by carbon composite tube demonstrate good correlation with test data obtained from large-scale specimens.

Key words : carbon composite tube, confinement effect, winding angle, strength, ductility

1. 서 론

기술의 발달과 함께 재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속되고 있으며, 새로운 재료가 계속 발명되고 있다. 이들 중에서도 합성재료(composite material)라 불리는 재료 분야가 급속히 진보하고 있으며, 또한 주목을 받고 있다. 이 합성재료 가운데서도 탄소섬유는 우수한 재료적 성질을 가지고 있다.

일반적으로 횡구속에 의한 3축 응력 상태에 놓인 콘크리트의 강도는 1축 압축 상태의 콘크리트보다 상당히 증가하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 콘크리트 기둥에 횡보강된 철근 콘크리트 기둥에 관한 연구에서 시작되어, 강관으로 구속된 기둥이 제안되었고, 합성 재료를 이용하여 구속된 합성 기둥이 제안되고 있다.

강관으로 구속된 기둥(CFT : concrete filled steel tube)의 특징을 살펴보면, 콘크리트는 철보다 포아송비가 작아 압축 변형 시 두 재료의 분리가 일어난다. 또한 콘크리트의 건조 수축(shrinkage)은 하중 재하전에 두 재료 사이의 간격을 발

생시켜, 합성거동의 효과는 철의 국부 좌굴을 막는데 한정되고 콘크리트의 연성 증가 또한 한정된다. 철은 포아송비가 콘크리트보다 크기 때문에 이러한 다른 팽창 차이의 결과로 구속 메카니즘의 활동을 지연시킬 뿐이다.⁽²⁾

합성섬유(FRP : fiber reinforced polymer)에 의한 구속은 CFT와 비교되는 장점들을 가지고 있다. 철은 부식에 약하고 무거운 중량을 가지고 있으나, FRP는 부식에 강하고, 가벼운 중량을 가지고 있다. 최대 변형률에서의 응력은 철의 항복 응력보다 훨씬 높고 응력-변형률관계는 파괴점까지 선형을 유지한다. 철은 탄성이면서 소성 재료이지만, FRP는 선형적인 탄성 재료이다. FRP는 원하는 방향으로 강성과 강도를 조절할 수 있다. 기존의 재료는 등방성 재료이기 때문에 모든 방향으로 강성과 강도가 같으나, 복합재료는 필요한 방향으로만 강성과 강도를 높여서 재료의 낭비를 막을 수 있다는 장점이 있다. FRP는 기존의 재료보다 강도와 강성이 훨씬 크다. FRP는 열팽창계수가 거의 0에 가까우므로 온도의 변화에 의하여 크기가 거의 변화하지 않는 구조물을 제조할 수 있다.

탄소섬유를 와인딩하여 튜브 형태로 제작하여, 콘크리트를 채운 기존의 RC 기둥의 확장된 모델이 제시된다. 탄소섬유에 의한 외부 구속은 큰 에너지 소산 능력의 결과로 강도와 연성을 크게 증가시킨다.

횡구속효과에 대한 연구는 Richart(1928)⁽¹⁾가 낮은 압력

* 정회원 · 경희대 토목건축공학부, 조교수(대표저자 : hongwk@khu.ac.kr)

** 정회원 · 경희대 토목건축공학부, 부교수

*** 학생회원 · 경희대 건축공학과, 박사과정

**** 학생회원 · 경희대 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 10. 29 / 심사종료일 : 2003. 1. 3)

범위에서 유압에 의해 황구속된 원주형 콘크리트 압축 강도 시험을 통하여, 축방향 압축강도와 황구속압 사이에, 계수비가 4.1인 선형 관계가 있음을 처음으로 밝혔다. 이후 주로 철근에 대한 황구속효과에 대한 연구가 수행되었다. Iyengar (1970)⁽³⁾는 나선 철근에 의해 황구속된 원주형 콘크리트는 유압에 의해 황구속된 콘크리트와 유사하다고 했다. Mander (1988)⁽⁴⁾는 나선철근, 띠철근 등에 의해 황구속 모델링을 제안하였으며 이것은 황구속 철근의 항복에 의해 황구속압이 일정해진 것을 기초로 하고 있다. 구속된 콘크리트의 응력-변형률의 모형을 이론적으로 제시했다. 또한 Razvi(1992)⁽⁵⁾는 기존의 3축 압축 실험 결과를 바탕으로 회귀 분석하여 황보강 응력의 크기에 따른 강도 계수값을 제안하여 황보강된 콘크리트 강도 예측식을 제안했다.

이 후 최근들어 FRP에 의한 황구속효과에 대한 연구들이 이루어졌으나 이러한 연구들은 섬유와 와인딩 각도를 고려하지 않고 한방향으로 와인딩하여 제작된 튜브의 구속효과를 고려하였으며, 시험체의 크기가 작아 실제 기둥에서의 황구속효과를 과대평가하는 경향이 있다. 또한 탄소섬유튜브 기둥은 철근콘크리트와 달리 압축축의 응력-변형률의 관계가 작용하는 축하중에 따라 변하게 되므로 탄소섬유튜브 기둥의 압축강도 성능에 대한 연구가 휨성능을 예측하기 위하여 필수적으로 요구된다.

따라서 본 연구에서는 탄소섬유튜브로 황구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축강도 성능평가를 위한 실험을 수행하였다. 시험체는 기둥 부재의 휨성능을 고려하여 탄소섬유와 와인딩 각도를 두께별로 조합하였고 시험체의 크기를 실제 기둥의 크기에 가깝도록 제작하여, 탄소섬유튜브의 구속으로 인한 성능향상을 평가하였다. 또한, 탄소섬유튜브 기둥의 응력-변형률 관계를 예측하는 식을 제안하였으며, 제안된 식은 향후 탄소섬유튜브 기둥의 휨성능해석시 압축축의 응력-변형률 관계에 적용할 수 있다.

2. 실험의 개요

2.1 시험체의 제작

탄소섬유튜브의 제작을 위한 탄소섬유와 레진의 물성치는 표 1과 같다.

탄소섬유튜브의 제작은 탄소섬유를 레진에 함침시키면서 사전에 제작된 맨드릴에 감는다. 이때 탄소섬유의 각도는 원하는 성능에 따라 컴퓨터를 이용하여 설계 시 사전에 결정된 각도로 섬유를 감는다. 그림 1은 탄소섬유튜브의 제작과정을

표 1 탄소섬유와 레진의 재료특성

	탄소섬유	레진	탄소섬유+레진(60:40)
비중	1.76	1.2	1.54
인장강도(MPa)	3,920	64~74	2,058
탄성계수(GPa)	235	-	137
극한변형률	0.017	0.02~0.03	0.015

* 제조사의 데이터

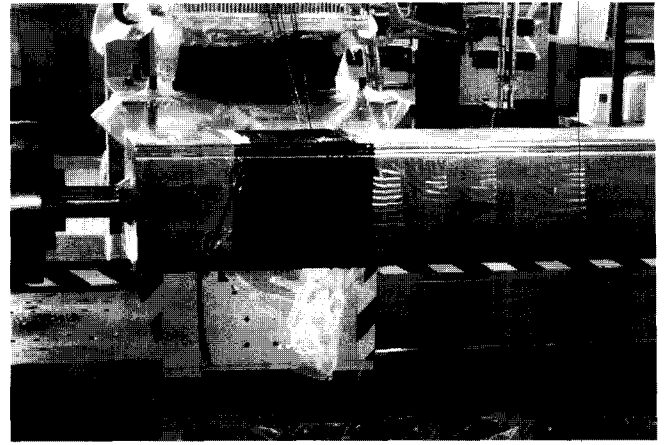


그림 1 필라멘트 와인딩 과정

나타낸 그림이다.

탄소섬유의 와인딩 각도와 두께의 변화에 따른 콘크리트 압축부재의 거동을 파악하기 위하여 총 4개의 25×25×60cm 시험체를 제작하였고, 시험체의 크기와 동일한 무근 콘크리트 공시체를 제작하였다. 표 2는 시험체의 콘크리트 강도 및 탄소섬유튜브의 와인딩 각도 및 두께를 나타낸 것이다.

콘크리트는 최대골재 치수 25mm, 배합강도는 26.5MPa이다. 4주 양생후, 공시체 시험결과 압축강도는 18.8MPa로 목표한 강도와는 많은 차이를 나타냈다. 튜브에 의하여 통기가 잘 되지 않은 관계로 인하여 목표강도에 이르지 못한 것으로 판단된다.

각 시험체의 와인딩 각도와 두께에 대하여 고전 적층판 이론⁽⁶⁾에 의하면 탄성계수의 값은 표 3과 같다.

표 2 시험체 리스트

시험체명	콘크리트강도 (MPa)	와인딩 각도별 두께(mm)			전체두께 (중앙부 실험평균두께) (mm)
		90°	45°	30°	
S30-2T	18.8	1	-	1	2(2.328)
S30-3T	18.8	1	-	2	3(2.748)
S45-2T	18.8	1	1	-	2(2.015)
S45-3T	18.8	1	2	-	3(2.943)

표 3 시험체의 탄성계수

시험체명	탄성계수(MPa)	시험체명	탄성계수(MPa)
S30-2T	71,172.6	S45-2T	80,387.0
S30-3T	59,266.1	S45-3T	57,458.9

2.2 실험장치

그림 2는 시험체의 축하중을 재하기 위한 10,000kN용량의 UTM과 측정기기를 설치한 사진이다. 시험체의 수직 변형율을 측정하기 위하여 탄소섬유튜브 내부의 콘크리트 코어 중심에 70mm 스트레인 게이지를 설치하였으며 탄소섬유튜브 표면에 수직과 수평변형률을 측정할 수 있는 2축 게이지를 90° 간격으로 상부, 중앙부, 하부에 3개씩 모두 12

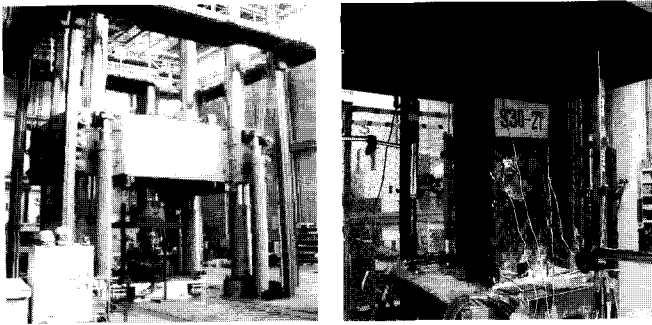


그림 2 U.T.M.(10,000kN)과 시험체 설치

개를 설치하였다. 또한 외부에 LVDT를 90° 간격으로 설치하여 시험체의 변형을 측정하였다(그림 2). 측정데이터는 UCAM-500A를 이용하여 수집하였다. 하중은 0.01 mm/sec의 속도로 변위를 제어하면서 재하하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 응력도-변형도 관계

표 4는 실험결과를 각 시험체의 횡구속효과에 의한 압축강도와 변형률, 그리고 일반콘크리트의 압축강도와 변형률의 증가비를 표시한 것이다.

표 4 실험 결과

시험체	f'_{cu} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	$\frac{f'_{cc}}{f'_{cu}}$	$\frac{\epsilon_{cc}}{0.002}$
S30-2T	18.8	25.6	0.0337	1.36	16.9
S30-3T	18.8	30.8	0.0469	1.64	23.5
S45-2T	18.8	22.5	0.0351	1.20	17.6
S45-3T	18.8	23.9	0.0340	1.27	17.0
Con-S	18.8	N/A	N/A	N/A	N/A

그림 3은 각 시험체의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 축의 왼쪽은 수평방향의 변형률을 나타낸 것이며, 오른쪽은 수직변형률을 나타낸 것이다. 그림 4는 무근 콘크리트 공시체의 압축강도를 기준으로 응력과 변형률을 일반화한 것이

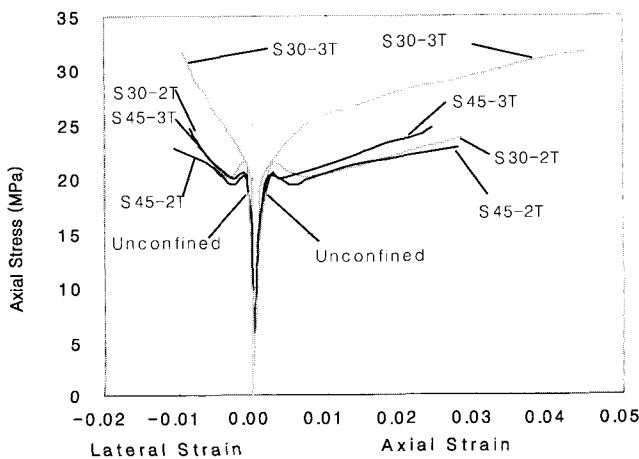


그림 3 응력도-변형도 곡선

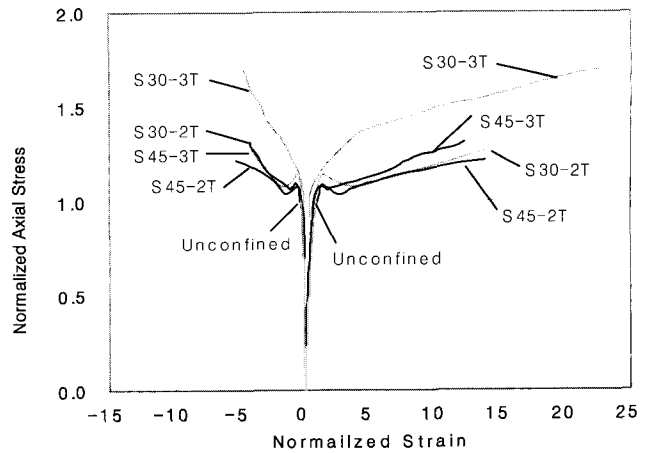


그림 4 정규화한 응력도-변형도 곡선

다. 시험체의 평균 강도는 1.36배, 평균 변형률은 18.7배까지 증가하였다. S30-3T 시험체의 경우, 다른 시험체들보다 높은 강도와 연성을 가졌다. 이는 제작상의 요인이 작용한 것으로 판단되어 실험결과와 분석 및 비교에서 제외하였다. 섬유 방향에 따른 구속효과의 차이는 매우 적게 나타났으며, 이는 기존의 다른 연구결과⁽⁷⁾와 유사하다.

응력-변형률 곡선은 세부적으로 구분된다. 초기 선형부분은 구속되지 않은 콘크리트에 의해 축하중을 지지하여 일반 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 축하중에 대한 지지 역할이 콘크리트에서 탄소섬유로 전환되는 구간을 지나, 그 이후의 영역은 탄소섬유에 의해 응력-변형률곡선은 단조증가하는 경향을 나타낸다.

3.2 파괴모드

시험체가 축하중을 받음에 따라 탄소 튜브는 수평 방향으로 균열이 생긴다. 탄소 튜브에 의해 횡구속압이 작용하여 압축강도가 약 20%~36% 증가하였다(S30-3T제외). 파괴에 이르는 변형은 압축강도의 증가에 비하여 현저히 증가하여 최대 17.6배까지 증가하였다. 그림 5(a)와 그림 5(b)와 같이 하중이 가해짐에 따라 시험체의 축에 수평 방향으로 균열이 일어났고, 그 층의 어느 한 부분에서 탄소 섬유에서 파단이 발생하면서 작은 팽음이 나며 파괴에 도달했으며, 탄소섬유의 와인딩 각도에 대한 영향은 나타나지 않았다.

그림 5(c)와 그림 5(d)에 나타난 것과 같이 콘크리트의 파괴 모드는 시험체 전면에 걸쳐 시험체의 축에 수직 방향으로 균열이 발생하는 압축 파괴의 현상을 볼 수 있었고, 콘크리트의 균열이 여러 곳에서 관측되었다. 파괴 시점시 콘크리트 전단면에 걸쳐 압축력을 받아 전단면에 크랙이 발생한 것으로 판단된다. 탄소 튜브의 횡구속압이 큰 시험체 단면의 중앙부에서 시험체의 수평 방향으로 다른 부분보다 큰 균열이 일어났다. S30-3T 시험체는 다른 각형 시험체보다 콘크리트의 손상된 부분이 많았다. 시험체의 모서리 부분보다는 시험체의 면에서 크랙이 많이 발생했다. 이는 각형의 모서리보다는 면에서 탄소섬유튜브에 의한 횡구속력이 미약하기 때문인 것으로 판단된다. 표 5는 각 시험체의 탄소 튜브의 파괴



(a) S30-2T

(b) S45-2T



(c) S30-3T

(d) S45-3T

그림 5 시험체의 파괴 모드

표 5 시험체의 파괴 형상

S30-2T	S30-3T	S45-2T	S45-3T

형태를 스케치한 것이다.

그림 6은 파손된 탄소섬유튜브를 전자 현미경으로 1000배 확대하여 촬영한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 튜브의 황구속력에 의한 인장력에 의해 탄소섬유가 파손된 형상을 볼 수 있다.



그림 6 S30-3T, S45-2T 시험체 탄소튜브의 SEM 사진

3.3 황구속 메카니즘

황구속 콘크리트의 압축강도와 변형도의 증가는 콘크리트의 황방향 팽창에 대한 탄소 튜브의 저항 성능에 달려 있다. 탄소 튜브에 의해 콘크리트에 황압력이 작용하면 구속

콘크리트의 축방향 응력도와 황압이 평형을 이루는 최대 하중까지 계속된다. 최대 하중까지 이르면 탄소 튜브가 파단되어 내부의 콘크리트는 파단에 이르게 된다. 탄소 튜브의 변형이 튜브 호의 전체 길이를 따라 균일하다고 가정하면, 탄소 튜브는 전 길이에 걸쳐 균일한 후프 응력(hoop stress)을 받게 되어, 후프 응력이 항복 응력도에 도달할 때, 콘크리트에 최대 황압이 작용하게 된다. 일반적으로 원형의 탄소 튜브의 황압력은 그림 7의 황구속메카니즘에 의하여 식 (1)에 의하여 구할 수 있다.

$$f_l = k_s \frac{2f_j t_j}{D} \quad (1)$$

각형의 경우 단면 형상 계수는 원형의 경우 1이 되고, 각형은 다양한 값이 제안되고 있다. Mander⁽⁴⁾가 제안한 방법으로 각면 중앙에서 0.25D 깊이 지점을 꼭지점으로 하는 2차 포물선을 그리고 이 영역을 제외한 가운데 부분만이 유효하게 구속된다. 본 연구의 시험체는 모서리가 곡선으로 처리되어 있으며 그림 8과 같은 황구속메카니즘에 의하여 단면형상계수는 식 (2)와 같이 구할 수 있으며, r 은 모서리의 반경이다.

$$k_e = \frac{1}{3} + \frac{8r}{3D} \left(1 - \frac{r}{D}\right) \quad (2)$$

일반적으로 황구속된 콘크리트의 압축 강도는 황압과 무보강 콘크리트의 일축 압축강도의 관계로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (3)$$

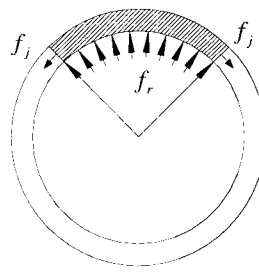


그림 7 황구속압

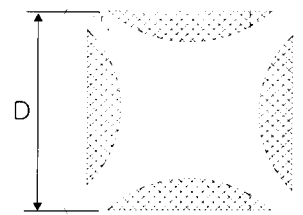


그림 8 사각단면

3.3.1 탄소섬유시트에 의한 황구속 모델 고찰

Miyauchi(1997)⁽⁸⁾는 축방향 압축강도와 황구속압 사이에 계수비가 3.5의 선형 관계가 있음을 제안했다.

3.3.2 탄소, 유리튜브에 의한 황구속 모델 고찰

Fadis(1981)⁽⁹⁾는 유리 FRP 튜브에 콘크리트를 타설한 새로운 합성체의 식을 처음으로 제안했으며, Mirmiran(1996)^{(9),(10)}은 유리섬유에 대한 많은 연구들을 진행하였으며, Samaan(1998)⁽¹¹⁾은 유리섬유에 대한 실험결과를 가지고 회귀 분석한 황구속 제안식을 발표했으며, Saafi(1999)⁽¹²⁾는 탄소섬유와 유리섬유의 기존의 실험 데이터를 가지고 회귀 분석하여 축방향

압축 강도와 횡구속압 사이에 새로운 제안식을 발표했다. Shahawy(2000)⁽¹³⁾는 콘크리트의 강도와 탄소섬유의 외피(wrap)의 수에 따른 구속효과의 차이를 연구했으며, Hsein-Kuang Liu(2000)⁽¹⁴⁾는 섬유 재료와 와인딩 각도에 따른 구속효과의 차이를 연구했으며, Pessiki(2001)⁽¹⁵⁾는 탄소시트와 유리시트로 구속된 원형과 각형 시험체의 구속 효과의 차이를 연구했다.

Mirmiran⁽⁷⁾은 전단 연결 리브를 가진 시험체의 부착(bond) 효과로 인한 횡구속 효과의 차이를 발표했다. 그림 9(a)는 각형시험체에서 부착효과가 고려되지 않을 때, 횡구속 효과에 의한 강도 증진이 거의 없음을 보여 준다. 그림 9(b)와 같은 리브가 있을 때는 부착효과로 인한 횡구속 효과에 의한 강도 증진이 있음을 보여준다. 반면에 원형시험체는 기계적 부착(mechanical bond)이 없음에도 횡구속 효과에 의한 강도증진이 상당히 커짐을 알 수 있다. 이는 사각단면에서 리브에 의한 부착효과의 증가가 아닌 리브의 단면 증가로 인하여 휨강성이 증가하여 구속효과가 증가되는 것으로 판단된다. 표 6은 기존의 횡구속효과에 대한 이론식을 정리한 것이다.

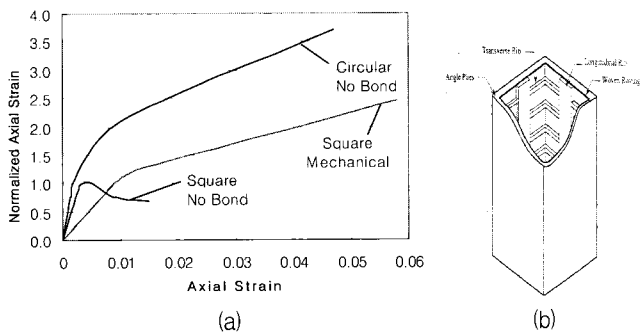


그림 9 기계적 부착효과

3.4 제안식 산정

3.4.1 횡구속된 압축 강도 제안식 (f'_{cc})

횡구속 효과의 일반적인 형태는 식 (3)과 같다.

4개의 각형 시험체에 대한 구속 응력 효과계수 k_1 의 값을 식 (4)에 의하여 그림 10과 같이 나타내어 회귀분석하여 k_1 값을 구하게 되면, 식 (5)를 구할 수 있다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (4)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} + 1.15f_l \quad (5)$$

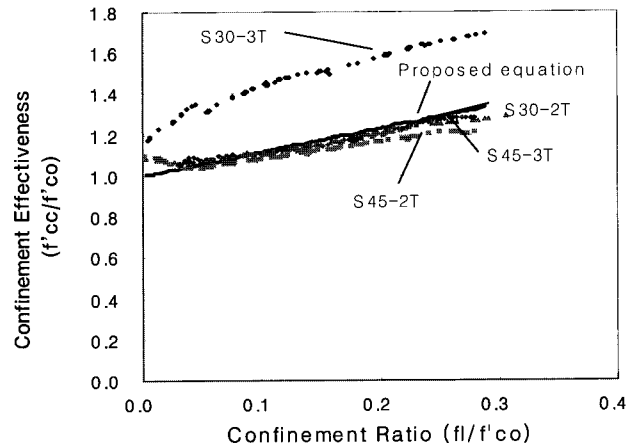


그림 10 구속효과와 구속비

3.4.2 횡구속된 압축 변형을 제안식 (ϵ_{cc})

압축변형률의 일반적인 형태는 Mander⁽⁴⁾가 제안한 식 (6)의 형태와 같다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

계수 5의 값을 변수 k_2 로 놓으면,

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + k_2 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \quad (7)$$

이 되며, k_2 에 대하여 정리하면,

표 6 응력-변형도 모델링 제안식

종류	제안자	제안식	종류	제안자	제안식
철근	Iyengar ⁽³⁾ (1970)	$f'_{cc} = f'_{co} + 4.6f_l$	튜브	Karbhari ⁽¹⁶⁾ (1993)	$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 2.1 \left(\frac{2t_{cf}f_j}{Df'_{co}} \right)^{0.87} \right)$
		$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + 46f_l/f'_{co})$			$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0.01 \frac{2t_{cf}f_j}{Df'_{co}}$
	Mander ⁽⁴⁾ (1988)	$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_l}{f'_{co}} - \frac{2f_l}{f'_{co}}} \right)$		Samaan ⁽¹¹⁾ (1998)	$f'_{cc} = f'_{co} + 6.0f_l^{0.7} [MPa]$
		$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + 5(f'_{cc}/f'_{co} - 1))$			$\epsilon_{cc} = \frac{f_{co} - f_o}{E_2}$
Razvi ⁽⁵⁾ (1992)	$f'_{cc} = f'_{co} + 6.7(f_l^{0.17})f_l$	$f_o = 0.872f'_{co} + 0.371f_l + 6.258$	$E_2 = 245.61f'_{co}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_j t_{cf}}{D} [MPa]$		
	$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + 5(f'_{cc}/f'_{co} - 1))$	Saafi ⁽¹²⁾ (1999)	$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.84} \right)$		
Fardis ⁽⁹⁾ (1981)	$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 4.1 \left(\frac{t_{cf}f_j}{Df'_{co}} \right) \right)$		$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left(1 + (537\epsilon_{cf} + 2.6) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right)$		
		$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0.001 \left(\frac{E_j t_{cf}}{Df'_{co}} \right)$			

$$k_2 = \frac{\epsilon_{cc}/\epsilon_{co} - 1}{f'_{cc}/f'_{co} - 1} \quad (8)$$

이 된다. 4개의 각형 시험체에 대하여 식 (8)에 대하여 데이터 값을 회귀분석하면, 식 (9)를 구할 수 있다.

$$k_2 = 1907\epsilon_{cf} + 13.4 \quad (9)$$

식 (9)를 식 (7)에 대입하여 정리하면, 탄소섬유튜브에 의해 횡구속된 최대 응력에서의 변형률 식 (10)을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}(1 + (1907\epsilon_{cf} + 13.4)(f'_{cc}/f'_{co} - 1)) \quad (10)$$

3.5 기존 연구와의 비교

표 7은 본 실험결과와 기존의 제안식, 본 연구에서 제시된 제안식을 비교하여 나타냈다. 기존의 이론식은 각형 탄소 튜브에 의한 압축 강도의 증가를 과대 평가하였고, 횡구속된 최대 압축 변형률을 과소 평가하였음을 알 수 있다.

그림 11과 그림 12는 시험체 S30-2T, S45-2T의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로 Fardis의 식을 제외하고는 실험결과와 많은 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 탄소섬유튜브의 횡구속효과가 섬유방향의 조합방법, 방향별 두께의 조합에 따라 다르기 때문에⁽¹⁷⁾ 기존의 횡구속효과에 대한 제

안식이 본 연구에서 사용된 탄소섬유튜브의 횡구속효과를 예측을 위한 적용이 적절하지 않다. 본 연구에서의 제안식은 실험결과와 응력-변형률과 비교할 때, 본 연구의 시험체에 대한 횡구속효과를 비교적 정확히 평가하는 것으로 나타났으며, 제안된 횡구속효과 실험식은 추후 탄소섬유튜브 기둥의 휨해석에서 압축축의 응력-변형률에 사용된다.

4. 결 론

탄소섬유튜브로 횡구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축 강도를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 탄소 튜브에 의한 구속은 각형 단면에서는 무근 콘크리트의 연성을 상당히 증가시켰다. 연성은 무근 콘크리트보다 10배 이상 증가하였다.
- 2) 각형 시험체는 탄소섬유튜브의 섬유의 방향에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정한 구속효과를 나타내었다.
- 3) 각형 시험체의 횡구속 효과는 기존의 실험식과 일치하지 않았으며, 본 실험 결과에 의하여 탄소 튜브에 적용되는 최대 압축강도와 최대 변형률의 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 1.15f_t$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}(1 + (1907\epsilon_{cf} + 13.4)(f'_{cc}/f'_{co} - 1))$$

표 7 탄소튜브로 구속된 콘크리트의 최대압축강도와 제안식의 비교

Specimens	Experimental strength(MPa)	Proposed equation		Saafi		Mander		Samaan	
		f'_{cc} (MPa)	Error(%)	f'_{cc} (MPa)	Error(%)	f'_{cc} (MPa)	Error(%)	f'_{cc} (MPa)	Error(%)
S30-2T	25.6	24.8	2.9	33.0	-28.8	42.0	-63.9	38.0	-48.3
S30-3T	30.8	25.0	18.7	33.4	-8.3	42.4	-37.8	38.4	-24.7
S45-2T	22.5	24.9	-10.5	33.0	-46.7	42.0	-86.6	38.0	-68.9
S45-3T	23.9	25.4	-6.5	34.1	-42.9	43.5	-81.8	39.3	-64.3
	Experimental strain	ϵ_{cc}	Error(%)	ϵ_{cc}	Error(%)	ϵ_{cc}	Error(%)	ϵ_{cc}	Error(%)
S30-2T	0.0337	0.0290	14.0	0.0181	46.4	0.0143	57.6	0.0109	67.7
S30-3T	0.0469	0.0298	36.4	0.0185	60.6	0.0146	68.9	0.0110	76.6
S45-2T	0.0351	0.0291	17.2	0.0181	48.5	0.0143	59.2	0.0109	69.0
S45-3T	0.0340	0.0316	6.9	0.0194	43.0	0.0151	55.6	0.0111	67.4

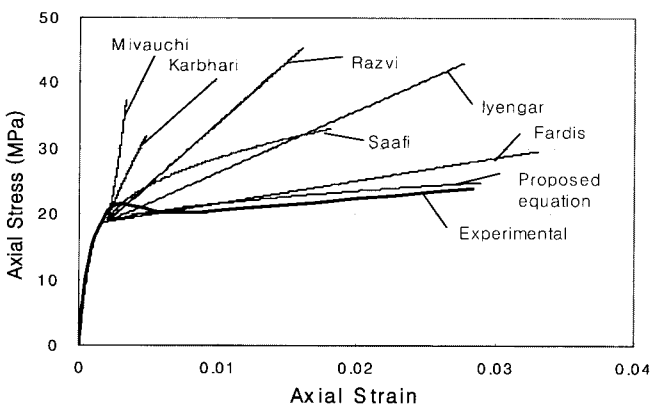


그림 11 기존 제안식과 비교(S30-2T)

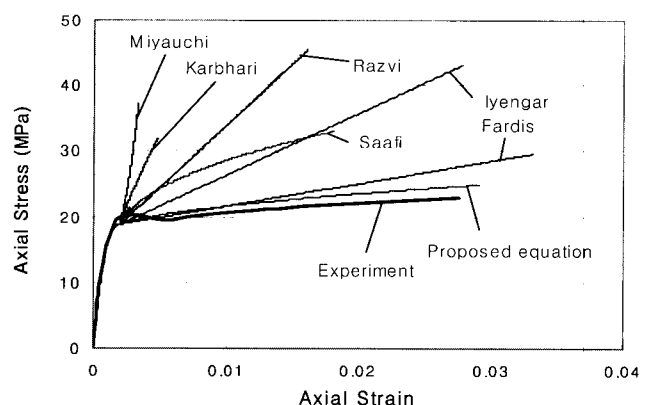


그림 12 기존 제안식과 비교(S45-2T)

감사의 글

본 연구는 2001년 건설교통부에서 지원하는 산학연 공동 연구개발사업으로, 본 연구의 수행을 지원해주신 건설교통부에 감사 드립니다.

기 호

- D : 탄소섬유에 의한 구속된 콘크리트 직경
 f_{cc} : 구속된 콘크리트의 압축강도
 f_{co} : 구속되지 않은 콘크리트 압축강도
 f_l : 횡구속압
 f_j : 탄소섬유튜브의 항복강도
 E_j : 탄소섬유튜브의 탄성계수
 ϵ_c : 축변형률
 ϵ_r, ϵ_l : 횡변형률
 ϵ_{co} : 일반 콘크리트의 최대응력에 대한 변형률
 ϵ_{cc} : 구속된 콘크리트의 최대응력에 대한 변형률
 ϵ_{cf} : 탄소섬유튜브의 파단 변형률
 k_1 : 구속 응력 효과 계수
 k_2 : 구속 변형률 효과 계수
 k_s : 단면형상계수
 t_j, t_{cf} : 탄소섬유튜브의 두께

참 고 문 헌

- Park, R. and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New Zealand, 1975, pp. 17-30.
- Furlong and Richard, W., "Strength of steel-encased concrete beam columns," *Proceedings, ASCE*, Vol. 93, ST. 5, 1967, pp. 113-124.
- Iyengar, K. T. R. J., Desayi, P., and Reddy, K. N., "Stress-strain characteristics of concrete confined in steel blinders," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 22, No. 72, 1977, pp. 173-184.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1825.
- Saatcioglu, M. and Razvi, S. R., "Strength and ductility of confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607.
- 이대길, 정광섭, 최진호, 복합재료 역학 및 제조기술, 시그마프레스, 1998.
- Mirmiran, A., Shawawy, 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, 1998, pp. 175-185.
- Miyauchi, K., Nishibayashi, S., and Inoue, S., "Estimation of strengthening effects with carbon fiber sheet for concrete column," *Proceeding of Nonmetallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, Vol. 1, 1997, pp. 217-223.
- Fardis, M. N. and Khalili, H., "Concrete encased in fiber glass-reinforced plastic," *ACI Journal*, 1981. 11-12, pp. 440-446.
- Mirmiran, A. and Shahawy, M., "A new concrete-filled hollow FRP composite column," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 27, Issues 3-4, 1996, pp. 263-268.
- Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of concrete confined by fiber composites," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 9, 1998, pp. 1025-1031.
- Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 4, 1999. 7-8, pp. 500-509.
- Shahawy, M., Mirmiran, A., and Beitelman, T., "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, Issues 6-7, 2000. 10, pp. 471-480.
- Liu, H. K., Tai, N. H., and Chen, C. C., "Compression strength of concrete columns reinforced by non-adhesive filament wound hybrid composites," *Composites : Part A*, Vol. 31, 2000, pp. 221-233.
- Pessiki, S., Harries, K. A., Kestner, J. T., Sause, R., and Ricles, J. M., "Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets," *Journal of Composites for Construction*, 2001. 11, pp. 237-245.
- Karbhari, V. M. and Eckel, D., "Strengthening of concrete column stubs through resin-infused composite wraps," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, No. 6, 1993. 4, pp. 92-107.
- 김장호, 김석호, 양종석, 김진근, "단면형상과 적층각도의 변화에 따른 CFS보강 콘크리트 압축부재의 역학적 거동 특성", 대한토목학회논문집, 제22권, 제2-A호, 2002.