

축하중을 받는 콘크리트 충전 탄소섬유튜브 기둥의 소성 이론을 적용한 비선형 유한요소해석

Nonlinear finite element analysis of Concrete Filled Carbon Tube Columns Using Plasticity Theory

김희철* 서상훈** 이영학***
Kim, Heecheul Seo, Sang Hoon Lee, Young Hak

Abstract

In the field of composite structures, the use of carbon tube for the confinement of concrete has been arisen since 1990's. However, experimental and analytical studies were limited to those of reinforced concrete and concrete filled steel tube. The carbon tube provides excellent confinement capabilities for concrete cores, enhancing compressive strength and ductility of concrete significantly. The carbon tube has high tensile strength, light weight, corrosion immunity and high fatigue strength properties. Since carbon fiber is an anisotropic material, carbon tube could be optimized by adjusting the fiber orientation, thickness and the number of different layers. In this study, both experimental and analytical studies of axial and lateral behavior of full-scale CFCT (Concrete Filled Carbon Tube) columns subjected to monotonic axial load were carried out using Drucker-Prager theory. And, based on comparison results between experiment results and analytical results, k factor estimation was proposed for effective analysis.

키워드: 카본시트, 기둥, 콘크리트
Keywords: Carbon sheet, Column, Concrete

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 대도시의 건물은 지가상승 및 용지난으로 인한 한정된 부지의 효율적인 이용을 위하여 고층화되고 있는 추세이다. 또한, 종래의 구조적 제약 조건을 극복하고 장스팬 및 공간의 효과적인 활용을 위한 구조형식의 개발이 필요하다. 이와 같은 현실에서 여러 가지의 합성구조형식이 대두되고 있다.

합성구조에 대한 지속적인 연구결과로 섬유보강플라스틱(FRP)을 이용한 합성구조가 근래에는 토목·건축분야에서 사용이 증대되고 있다. Fiber Wrapping 기둥은 일본에서 처음으로 콘크리트 굴뚝에 사용되었다. 이러한 기술이 발전하여 콘크리트 기둥의 보수·보강에 사용되고 있다. Fiber Wrapping의 대안으로 사전 제작된 FRP Sheet에 접착제를 이용하여 현장에서 구조물과 부착시켜 사용할 수 있게 되었다. 이러한 방법들은 탄소섬유튜브가 콘크리트의 횡 방향 팽창을 억제함으로써 구속효과를 제공하여 구조물의 강도와 연성을 크게 향상시키는 장점이

있다. 이와 같은 개념은 새로운 합성구조인 콘크리트 충전 탄소섬유튜브(Concrete Filled Carbon Tube, 이하 CFCT)에서도 사용될 수 있다.

탄소섬유튜브로 구축된 콘크리트에 관한 실험연구는 지난 몇 년 동안 수행되어져 왔으나, 해석연구는 비교적 새로운 것이다. 본 연구에서는 탄소섬유튜브로 구축된 콘크리트에 대한 실험연구를 통하여 CFCT의 거동의 특성을 파악하고, Drucker-Prager 소성이론을 사용한 비선형 유한요소해석¹⁾을 수행하여 CFCT의 거동 및 특성을 예측하기 위한 신뢰할 수 있는 모델링 기법을 제안하는 데 그 목적이 있다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구에서는 탄소섬유튜브의 구속효과를 평가하기 위하여 축력 실험을 수행하였다. 시험체의 크기는 높이 60cm, 지름 30cm로 하였고, 섬유방향을 변수로 하여 섬유의 방향을 $90^\circ \pm 30^\circ$, $90^\circ \pm 45^\circ$, $90^\circ \pm 60^\circ$ 로 변화시켜 실험을 수행하였다. 섬유의 방향을 변화시킨 CFCT의 성능에 대한 실험을 통하여 섬유의 방향 변화에 따른 실험결과를 기존의 구속효과에 대한 예측식과 비교하고, 본 실험결과를 바탕으로 새로운 구속효과에 대한 실험식을 제안하였다.

또한, 실험연구에서 제안된 식의 유효구속계수 k 를 적용하여 유한요소해석을 실시하여 제안된 실험식에서의 k factor를 검토

* 주저자, 경희대학교 건축공학과 교수, 공학박사
** 교신저자, 경희대학교 대학원 석사과정 (seosanghoon@khu.ac.kr)
*** 경희대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사, 건축구조기술사

하였다. 유한요소해석은 섬유 방향을 변화시킨 CFCT에 대하여 Druker-Prager 소성이론을 사용하여 비선형해석을 수행하였다. 해석에 사용된 매개변수의 영향을 파악하여, CFCT의 거동 및 특성을 예측하기 위한 신뢰할 수 있는 모델링 기법 및 k factor를 제안하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존 연구에 관한 고찰

횡구속에 의하여 3축 압축 응력상태에 놓인 콘크리트의 강도는 1축 압축응력상태의 콘크리트 강도보다 증가한다. 기존에 발표된 3축 압축 상태에 관한 연구들을 고찰하여 보았다.

Fardis와 Khalili²⁾는 탄소섬유튜브로 구속된 콘크리트의 hyperbolic 응력변형도 모델에 대하여 연구하였다. Nanni와 Bradford³⁾는 강도는 적절하게 예측하나 연성을 과소평가하는 모델을 발표하였다. Ahamad와Shah⁴⁾는 콘크리트 기둥에 대한 유리섬유의 나선형 보강에 대한 구속효과를 예측하기 위한 모델에 대하여 연구하였으며, 횡구속압과 콘크리트의 강도비에 따라 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + 4.2556 \frac{f_l}{f_{co}} \quad \left(\frac{f_l}{f_{co}} < 0.68 \right) \quad (1)$$

$$f_{cc} = 1.7757f_{co} + 3.1171 \frac{f_l}{f_{co}} \quad \left(\frac{f_l}{f_{co}} > 0.68 \right) \quad (2)$$

Saatcioglu와 Razvi⁵⁾는 실험을 통하여 유효구속계수로 $6.7f_l^{0.17}$ 을 제시하였다. Mirmiran⁶⁾은 유리섬유를 이용한 콘크리트의 횡구속실험에서 다음의 식을 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + 4.269f_l^{0.587} \quad (3)$$

Samaan⁷⁾은 콘크리트의 변형률을 계산하기 위하여 이선형 응력-변형률 곡선과 강도를 사용한 모델을 제안하였다. Shahawy⁸⁾는 콘크리트 강도와 탄소섬유 외피 수에 따른 구속효과에 대하여 연구하였으며, Hsien-Kuang Liu⁹⁾는 섬유의 재료와 섬유방향에 따른 구속효과의 차이를 연구하였다. Pessiki¹⁰⁾는 탄소시트와 유리시트로 구속된 원형과 각형 시험체의 구속효과의 차이를 연구하였으며, 박순섭¹¹⁾은 탄소섬유로 구속된 원형과 각형시험체의 구속효과의 차이를 연구하였다.

Rocjetta와 Labossiere¹²⁾는 탄소섬유와 아라미드섬유로 감겨진 콘크리트 기둥의 거동을 연구하기 위하여 증분 유한요소기법을 사용하였으며, 콘크리트를 탄소성 재료로 고려하여 Associative Druger-Prager이론을 도입하였다. 그러나, 섬유의 방향, 단면형상에 대한 고려가 미흡하였고, 매개변수가 24개로 실제로 적용하기에는 사용성이 떨어진다. Mirmiran¹³⁾등은 플라이의 두께를 변화시켜 Non-associative Druger-Prager이론을 이용한 해석적 접근을 하였다.

본 연구에서는 섬유의 방향을 변화시킨 탄소섬유튜브를 Non-associative Druger-Prager소성이론을 적용하여 해석연구를 수행하였다.

표 1. 탄소섬유와 레진의 물성치

	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

표 2. 각 시험체의 탄성계수

시험체명	탄성계수(GPa)
C30-3T	46,134
C45-3T	47,413
C60-3T	70,666

3. CFCT의 거동 실험연구

3.1 실험개요 및 목적

기존에 발표된 탄소섬유튜브의 구속효과에 관한 연구들은 시험체의 크기를 실제 기둥보다 작게 제작하여 size effect가 발생하였다. 또한, 섬유의 방향이 일반적으로 70°~90° 범위 내에서 구속효과만을 고려한 단일 방향을 사용하여 실험을 실시하였다. 따라서, 응력-변형률 거동이 과대평가되는 경향을 나타내어 그 거동을 정확하게 예측할 수 없었다.

이에, 본 실험에서는 실제 기둥의 거동과 유사한 실험결과를 얻기 위하여 시험체의 크기를 실제크기와 근접하게 제작하였다. 또한, 섬유방향에 따른 구속효과의 영향에 관한 정보를 얻기 위하여 섬유방향을 변화시켜 실험을 수행하였다.

탄소섬유튜브를 제작하기 위한 탄소섬유 원사는 일본 Toho Tenax, Co. 의 HTA-12K를 사용하였으며, 그 외에 SNS 케미칼의 SS-2018W(에폭시레진), SS-2010H(경화제), SA-101(축진제)를 사용하였다. 탄소섬유 및 레진의 물성치는 표 1과 같다. 탄소섬유와 레진의 함량은 60:40으로 유지하였다. 시험체의 탄성계수값은 고전적층판이론을 토대로 표 2와 같이 산정하였다.

3.2 시험체 개요

시험체는 탄소섬유튜브의 섬유방향에 따른 영향을 파악하기 위하여 3개의 시험체를 제작하였다. 탄소섬유튜브의 형태는 원형, 두께는 3mm, 그리고 섬유의 방향은 각각 90° ± 30°, 90° ± 45°, 90° ± 60°로 조합하였다. 90° 방향의 섬유는 기본적인 튜브의 구속효과를 고려하기 위하여 모든 시험체에 공통적으로 포함되었다. 그 외의 섬유방향은 튜브의 휨 및 전단을 고려하기 위하여 조합되었다. 시험체의 자세한 사항은 표 3에 나타내었다. 또한 콘크리트의 강도를 측정하기 위하여 동일한 크기의 공시체를 제작하였다. 탄소섬유튜브 내에 충전된 콘크리트와 동일한 조건의 양생을 위하여 거푸집은 실험을 수행하는 시점에서 제거하였다.

시험체의 크기는 국내 최대 용량을 가지고 있는 포항산업과학연구원(RIST)에 설치된 UTM의 용량을 고려하여 최대한 실제 크기에 가깝도록 제작하였다.

표 3. 축력 시험체 개요

단면형상	시험체명	콘크리트 배합강도 (MPa)	Carbon Tube 두께 (mm)				비고
			90°	60°	45°	30°	
원형 (Φ 300×600mm)	C30-3T	26.4	1			2	축력
	C45-3T	26.4	1		2		축력
	C60-3T	26.4	1	2			축력
	CON-C	26.4	N/A.				



그림 1. 10000 kN UTM

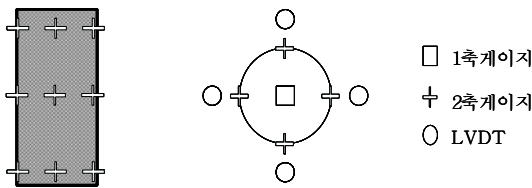


그림 2. 측정기기 배치

UTM은 그림 1에 보이는 10000kN 용량을 사용하였으며, 가력 방법은 변위제어를 통하여 0.01mm/s의 속도로 재하 하였다. 실험데이터의 수집은 UCAM-500A를 이용하였다. 튜브의 변형률을 측정하기 위하여 튜브 면에 둘레방향으로 90° 간격으로 상부, 중앙부, 하부에 모두 12개의 2축 계이저를 부착하여 축방향과 횡방향의 변형률을 측정하였다. 내부 콘크리트의 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 코어 중심부에 계이저를 삽입 하였다. 전체 길이에 대한 평균 축소량을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 시험체의 주변에 4개의 LVDT를 배치하였다.

콘크리트는 배합강도 26.4MPa의 압축강도를 사용하였다. CFCT의 경우, 카본 튜브에 의하여 콘크리트가 외기와 차단되어 콘크리트 28일 강도가 배합강도에 비하여 낮게 나타난다. 따라서, 콘크리트의 압축강도 측정을 위한 공시체는 밀봉하여 실험이 시작될 때까지 양생하여 CFCT와 동일한 양생조건을 제공 하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

콘크리트의 압축강도 실험을 위하여 CFCT와 동일한 크기 및 양생조건으로 제작된 공시체의 압축강도는 배합강도보다 낮은 17.5MPa의 압축강도를 나타내었다. 또한 탄소섬유튜브의

표 4. 튜브의 실측두께와 실험결과 요약

시험체	실측두께 (mm)	f'_{co} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f'_{cc}/f'_{co}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{0.002}$
C30-3T	3.45	17.5	46.6	0.0282	2.66	14.1
C45-3T	3.64	17.5	59.1	0.0359	3.38	18.0
C60-3T	3.25	17.5	87.4	0.0317	4.80	15.9
CON-C	N/A.	N/A.	N/A.	N/A.	N/A.	N/A.

* f'_{co} = 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도
 f'_{cc} = 구속된 콘크리트의 압축강도
 ϵ_{cc} = 구속된 콘크리트의 최대 응력에서의 압축변형률
 $\epsilon_{0.002}$ = 구속되지 않은 콘크리트의 압축변형률 0.002

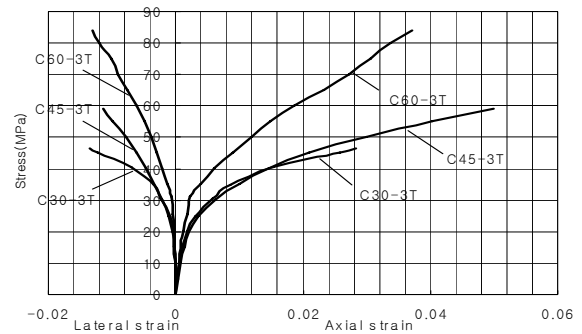


그림 3. 응력-변형률곡선

두께는 제작과정에서 계획된 두께와 차이를 나타내었다. 표 4와 그림 3은 각 시험체의 응력-변형률 곡선과 실측두께 및 실험결과를 나타낸 것이다.

C30-3T 시험체는 약 3293kN의 압축하중에서 파괴되었다. 압축강도는 약 46.6MPa이었으며, 파괴시 축방향의 변형률은 약 0.0282가 발생되었다. 이는 콘크리트 강도의 약 2.66배, 연성은 콘크리트의 최대응력시 변형률 0.002의 약 14.1배로 향상되었다. C45-3T 시험체는 약 4177MPa의 압축하중에서 파괴되었다. 압축강도는 약 59.1MPa이었으며, 파괴시 축방향의 변형률은 약 0.0359가 발생되었다. 이는 콘크리트 강도의 약 3.38배, 연성은 콘크리트의 최대응력시 변형률 0.002의 약 18.0배로 향상되었다. C60-3T 시험체는 약 5937MPa의 압축하중에서 파괴되었다. 압축강도는 약 84.0MPa이었으며, 파괴시 축방향의 변형률은 약 0.0317이 발생되었다. 이는 콘크리트 강도의 약 4.08배, 연성은 콘크리트의 최대응력시 변형률 0.002의 약 15.9배로 향상되었다.

실험결과, 섬유 방향이 부재의 둘레방향에 가까워질수록 내력은 증가하여 섬유 방향이 60° 일 때 최대 84%까지 증가하였다. 반면, 변형은 섬유의 방향이 45° 인 경우가 60° 인 경우보다 변형이 크게 나타났다. 표 5와 그림 4에서는 탄소섬유튜브의 실측두께와 섬유방향에 따른 내력과 변형률을 비교하였다.

표 5. 섬유의 방향에 따른 내력과 변형 비교

시험체	실측두께 (mm)	두께증감	f'_{cc}/f'_{co}	강도증감	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{0.002}$	변형률증감
C30-3T	3.45	1	2.66	1	14.1	1
C45-3T	3.64	1.06	3.38	1.27	18.0	1.28
C60-3T	3.25	0.99	4.80	1.80	15.9	1.13

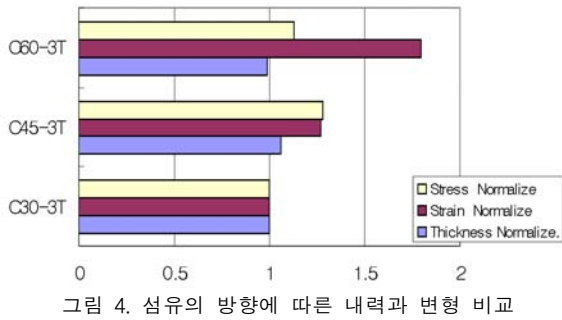


그림 4. 섬유 방향에 따른 내력과 변형 비교

3.4 기존의 이론식 비교 및 실험식 산정

탄소섬유튜브에 의한 횡구속효과에 대한 기존의 이론식을 구속된 콘크리트의 강도 f_{cc} , 압축변형률 ϵ_{cc} 에 관하여 표 6에 정리하였다. 각 시험체의 실험결과와 각 이론식의 비교결과는 그림 5~그림 7과 같다.

기존의 이론식들 중에서 Saafi¹⁴⁾가 제안한 실험식이 $90^\circ \pm 30^\circ$ 의 실험결과와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나, 튜브 외부섬유의 방향이 부재 둘레방향에 가까워질수록 탄소섬유튜브의 구속효과를 낮게 평가하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 박순섭¹¹⁾의 이론식은 $90^\circ \pm 30^\circ, 90^\circ \pm 45^\circ$ 에서는 실험결과와 유사하게 나타났으나, $90^\circ \pm 60^\circ$ 에서는 실험결과와의 차이를 나타내었다.

표 6. 횡구속 이론식

종류	제안자	제안식
탄소섬유 튜브	Fardis ²⁾	$f_{cc} = f'_{co} (1 + 4.1 (\frac{t_{cf} f_j}{L f_{co}}))$
		$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} + 0.001 (\frac{E f_{cf}}{L f_{co}})$
	Samaan ⁷⁾	$f_{cc} = f'_{co} + 6.0 f'_i{}^{0.7} [MPa]$
		$\epsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - f_o}{E_2}$
		$f_o = 0.872 f'_{co} + 0.371 f'_i + 6.258 [MPa]$ $E_2 = 245.61 f'_{co}{}^{0.2} + 1.3456 \frac{E f_{cf}}{D} [MPa]$
	Saafi and Toutanji ¹⁴⁾	$f_{cc} = f'_{co} (1 + 2.2 (\frac{f_l}{f_{co}})^{0.84})$
		$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + (537 \epsilon_{cf} + 2.6) (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1))$
	박순섭 ¹¹⁾	$f_{cc} = f'_{co} (1 + 2.176 (\frac{f_l}{f_{co}}))^{0.520}$
$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} (1 + (434.4 \epsilon_{cf} + 1.24) (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1))$		

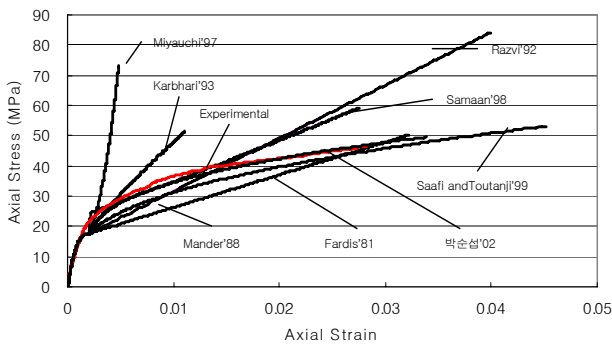


그림 5. C30-3T 시험체의 실험결과와 이론식의 비교

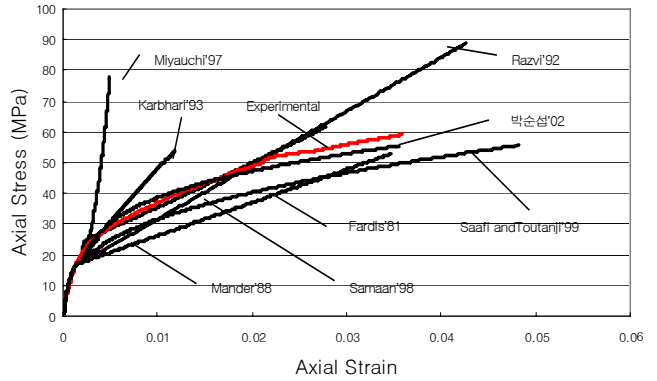


그림 6. C45-3T 시험체의 실험결과와 이론식의 비교

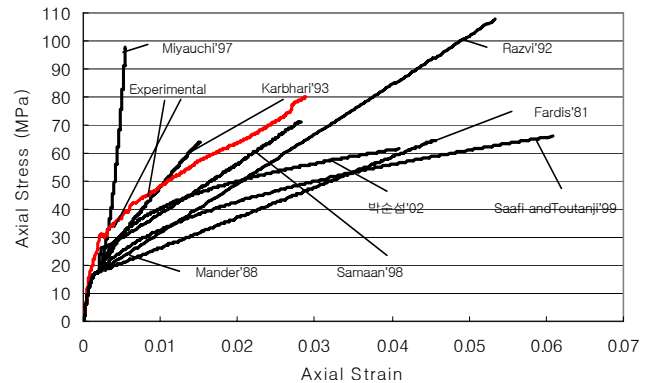


그림 7. C60-3T 시험체의 실험결과와 이론식의 비교

앞에서 살펴 본 바와 같이 기존의 k 의 횡구속효과에 대한 이론식은 CFCT의 압축강도와 변형률을 예측하기 위하여 적용할 수 없다. 이는 탄소섬유로 제작된 튜브의 경우에서 섬유의 방향 및 섬유방향의 조합 등에 따라 달라지기 때문이다. 따라서 CFCT와 같이 탄소섬유튜브의 내부층에 부재 둘레방향으로 1 mm 두께를 갖고, 외부에 섬유의 방향을 변화시킨 CFCT의 횡구속효과를 예측할 수 있는 실험식을 개발하였다.

횡구속효과에 의한 압축강도의 일반적인 형태는 식(4)와 같다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \tag{4}$$

그림 8과 같은 형태로 구속효과와 구속비에 대한 식을 유도하면, 지수형태의 식 (5)와 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^p \tag{5}$$

식(5)의 k_1 과 p 의 값을 섬유방향에 따른 변수로 놓고, 각 시험체의 실험결과값의 회귀분석을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다. 단, θ 는 radians이며 $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ 이다.

$$k_1 = 2.628\theta^{0.502} \tag{6}$$

$$p = 1.191\theta^{0.066} \tag{7}$$

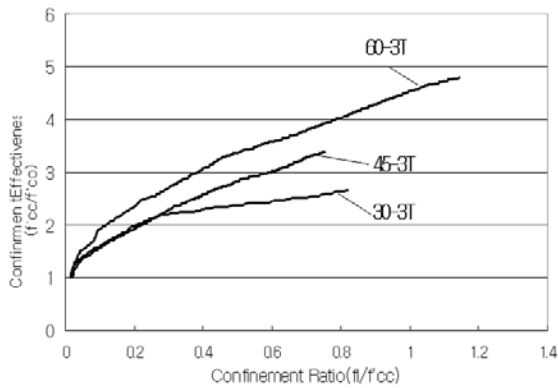


그림 8. 구속효과와 구속비

따라서, 시험체의 구속효과에 의한 실험식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{cc}} = 1 + 2.628\theta^{0.502} \left(\frac{f_l}{f_{cc}}\right)^{1.191\theta^{0.066}} \quad (8)$$

$$f_{cc} = f_{cc} \left[1 + 2.628\theta^{0.502} \left(\frac{f_l}{f_{cc}}\right)^{1.191\theta^{0.066}} \right] \quad (9)$$

압축변형률의 일반적인 형태는 Mander의 제안식과 형태가 같다.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cc} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{cc}} - 1\right) \right] \quad (10)$$

식 (10)에서 계수 5를 변수 k_2 로 놓고 정리하면,

$$k_2 = \frac{\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{cc} - 1}{f_{cc}/f_{cc} - 1} \quad (11)$$

그림 9와 같은 형태로 구속효과와 횡방향 변형률에 대한 식을 유도하면 다음과 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$k_2 = A\varepsilon_{cf} + B \quad (\varepsilon_{cf} = \text{카본튜브의 과단변형률}) \quad (12)$$

식 (12)의 A와 B의 값을 각도에 따른 변수로 놓고 섬유 방향에 대하여 식을 산정하면,

$$A = 779.445 \sin(3.142\theta - 0.704) \quad (13)$$

$$B = 0.835\theta^{-0.537} \quad (14)$$

단, θ 는 radians이며 $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ 이다. 따라서,

$$k_2 = 779.445 \sin(3.142\theta - 0.704)\varepsilon_{cf} - 0.835\theta^{-0.537} \quad (15)$$

탄소섬유튜브에 의하여 횡구속된 압축변형률을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cc} \left[1 + (779.445 \sin(3.142\theta - 0.704)\varepsilon_{cf} - 0.835\theta^{-0.537}) \left(\frac{f_{cc}}{f_{cc}} - 1\right) \right] \quad (16)$$

제안된 실험식의 타당성 검증을 위하여 실험식과 실험결과를 비교하였다. 그림 10~그림 12에 나타낸 것과 같이 시험체에 대하여 제안된 실험식은 실험결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

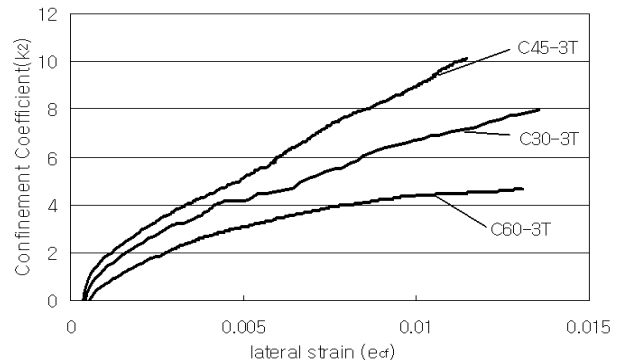


그림 9. 섬유방향에 따른 k_2

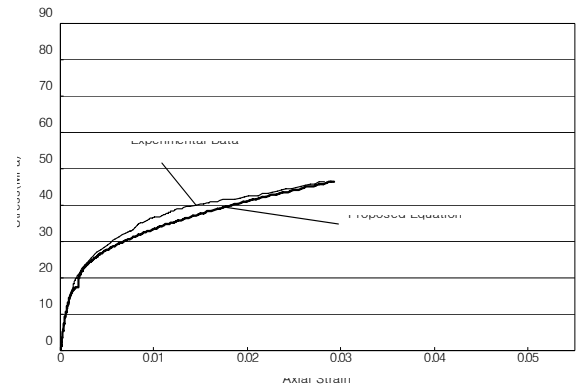


그림 10. C30-3T 실험식과 실험결과 비교

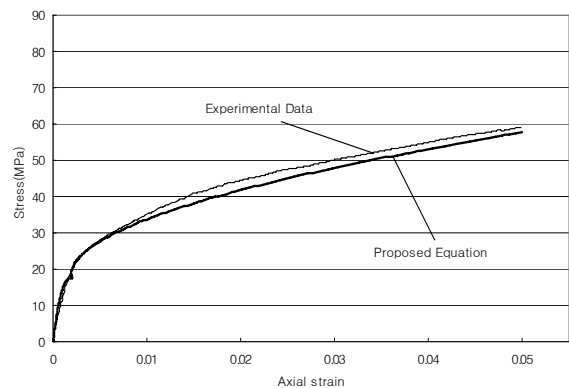


그림 11. C45-3T 실험식과 실험결과 비교

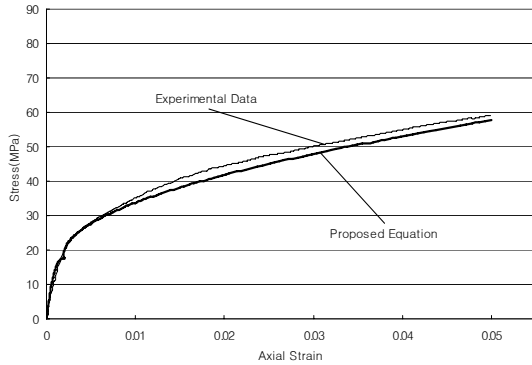


그림 12. C60-3T 실험식과 실험결과 비교

4. 유한요소법에 의한 CFCT의 거동

4.1 개요

탄소섬유를 이용한 실험연구는 지난 몇 년 동안 수행되었지만, CFCT의 구축에 의한 콘크리트의 해석연구는 수행된 것이 거의 없다. 콘크리트와 강관과는 다르게 선형탄성재료인 탄소섬유튜브는 매우 다른 거동을 나타낸다. CFCT를 기존의 콘크리트나 강관에 관한 해석 모델에 적용하면 강도가 과대평가되는 경향이 있다. 본 절에서는 CFCT의 압축거동을 범용유한요소 프로그램인 ANSYS Version 6.0을 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석에 필요한 재료의 물성치는 고전적층 판이론을 토대로 산정하였으며, CFCT의 소성특성을 적용하기 위하여 Druker-Prager이론을 도입하여 해석을 수행하였다. 실험결과와 제안된 실험식과의 비교를 통하여 해석결과의 타당성을 검토하였으며, CFCT의 구조적 성능을 예측할 수 있는 유한요소 모델을 제시하였다.

4.2 Druker-Prager 이론의 항복조건

Druker-Prager이론은 토질역학에서 유도된 이론이다. Mohr-Coulomb의 조건을 일반화한 식으로 Mohr-Coulomb이론에 대한 하나의 근사식으로 볼 수 있다. Mohr의 조건과는 달리 중간주응력을 고려하였고, Von Mises 이론과 유사한 이론이다. 흙, 암석, 콘크리트와 같이 소성변형을 고려할 수 있으며, Coulomb의 내부 마찰설에서 전단응력을 불변량으로 표시한다.

$$f = aI_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (17)$$

$$\sqrt{\frac{3 + \sin^2\Phi}{3}} J_2 = p \sin\Phi + c \cos\Phi \quad (18)$$

식에서 p 는 평균응력, I_1 은 응력의 1차 불변량, J_2 는 편차응력의 2차 불변량이다. 여기서,

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (19)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (20)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (21)$$

f 는 항복함수로서, $f=0$ 이면 항복상태, $f < 0$ 은 탄성상태를 나타내며, $f > 0$ 인 경우는 나타날 수 없다. a , k_c 는 물질정수 또는 유동변수 또는 재료정수로서 점착력 c 와 내부마찰각 Φ , 재료팽창각 Φ_f 의 매개변수로 나타난다.

4.3 유한요소 해석결과 및 k factor 제안식

시험체의 모델링은 본 시험체의 형상과 하중조건의 대칭성을 고려하여 그림 13과 같이 전 단면의 1/4부분과 높이의 1/2부분, 실제 시험체의 1/8을 모델링하였다. 대칭방향은 Symmetric 처리를 하여 실제의 시험체와 같은 거동을 할 수 있게 표현하였다. CFCT의 거동을 정확하게 파악하기 위하여 위의 해석결과를 토대로 재료팽창각을 0(Non-associative)으로 두고 매개변수인 점착력과 내부마찰각, k factor에 대한 민감도 해석을 수행하였다.

해석 결과 응력-변형률 곡선은 축방향과 횡방향에서 이선형의 형태를 나타내었다. 응력-변형률 곡선의 첫 번째 기울기는 비구속된 콘크리트의 탄성계수와 일치하였으며, 전환점은 비구속된 콘크리트의 최대강도와 일치하였다. 그림 14는 C60-3T의 시험체의 경우에서 k factor의 변화에 따른 응력-변형률 곡선을 나타낸 그림이다. k factor가 커지면서 변곡점과 곡선의 2차 기울기가 커졌다. 변곡점이 나타나는 것은 CFCT가 유사소성거동을 하는 것을 의미한다. 유한요소해석 결과로 나타난 곡선은 실험결과와 같이 완전한 곡선형태를 나타내지 않았다. 그 이유는 Druker-Prager이론은 재료가 탄소성이라는 가정을 기본으로 작성되었기 때문이다.

그림 15는 CFCT의 응력-변형률 곡선에서 점착력과 내부마찰각의 영향을 알아보기 위한 민감도 해석의 수행결과이다.

응력-변형률 곡선의 2차 기울기에 영향을 주는 매개변수는 내부마찰각으로 나타났으며, 내부마찰각이 커지면 곡선의 2차 기울기는 증가하였다. 변곡점은 점착력과 내부마찰각에 영향을 받는데, 점착력과 내부마찰각이 증가하면 변곡점의 위치, 변형률 및 강도가 증가하였다.

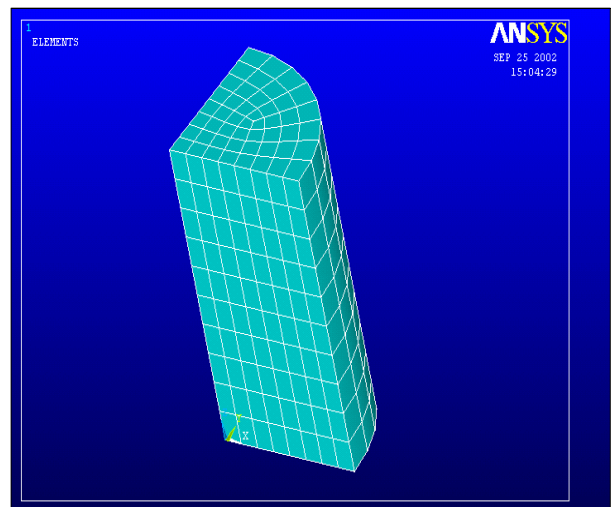


그림 13. Model Shape

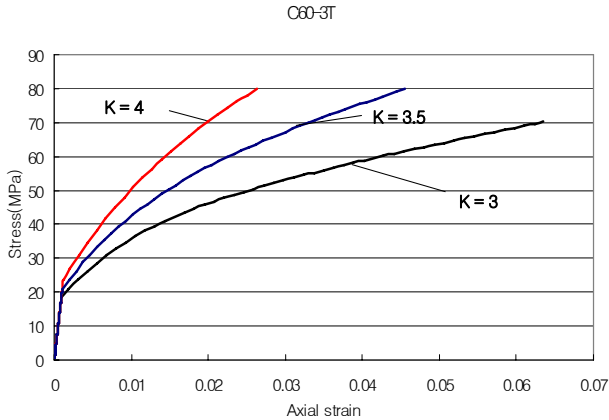


그림 14. k factor의 영향

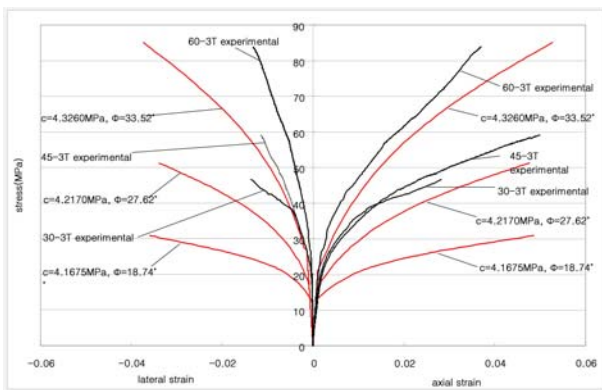


그림 15. 매개변수의 영향

4.4 k factor 제안식

실험연구에서 제안된 식의 k factor를 사용한 해석결과와 실험결과에서 차이가 났다. Druker-Prager이론은 기본적으로 토질역학을 토대로 한 이론이므로 콘크리트에서는 정확성이 떨어졌다. 그러므로, 이를 CFCT의 유한요소모델에 적절히 적용하기 위해서는 매개변수들에 대한 보정이 필요하였다.

특히, 본 연구는 섬유방향에 따른 CFCT의 거동에 관한 연구로서, 섬유방향에 관한 영향을 반영하는 유효구속계수 k factor의 보정이 가장 효과적이었다. 시험체의 섬유방향에 따른 적절한 k factor를 구하기 위하여 실험반복의 해석연구를 실시하였다. 각 시험체에서 해석연구로 나타는 k factor를 변수로 회귀분석을 실시하여 섬유방향에 따른 k factor를 다음과 같이 제안하고 실험결과와 비교하여 제안된 식을 검증하였다. 그림 16은 섬유방향에 따른 k factor와의 관계를 나타낸 것으로, 섬유방향에 따라 k factor의 편차가 크음을 알 수 있다. k factor를 섬유방향에 따른 변수로 놓고 회귀분석을 실시하여 섬유의 방향에 대하여 다음과 같은 식을 구할 수 있다. 단, θ 는 radians이며 $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ 이다.

$$k = 0.42 \sin(8.83\theta + 11.63) + 3.32 \quad (22)$$

제안된 식의 타당성 검증을 위하여 제안식과 실험결과를 비교하였다. 그림 17~19에 나타난 것과 같이 시험체에 대하여 제안된 식은 실험결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

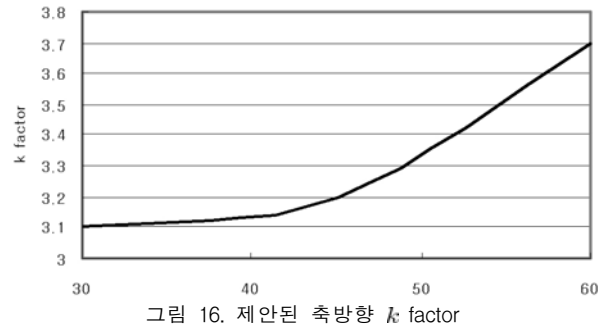


그림 16. 제안된 축방향 k factor

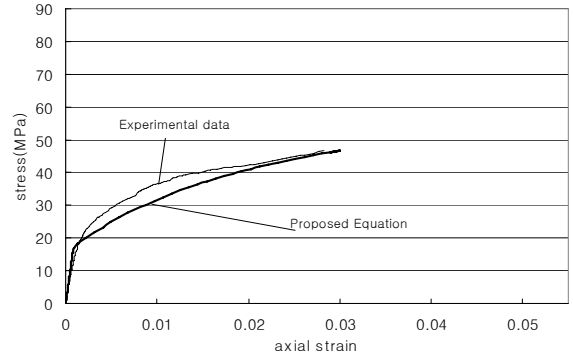


그림 17. C30-3T 축방향 제안식과 실험결과 비교

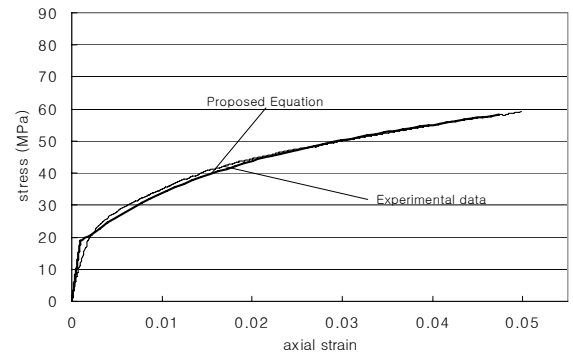


그림 18. C45-3T 축방향 제안식과 실험결과 비교

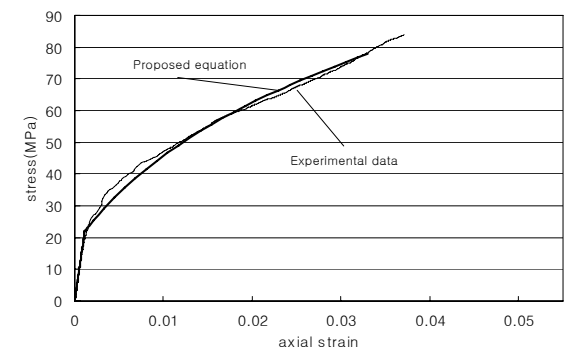


그림 19. C60-3T 축방향 제안식과 실험결과 비교

5. 결론

탄소섬유튜브로 구속된 3개의 시험체에 대하여 실험연구를 통하여 CFCT 거동의 특성을 파악하였다. 실험결과와 기존의 이론식을 비교한 결과에서 큰 오차가 나타났다. 따라서, CFCT

기둥의 거동을 예측할 수 있는 섬유 방향을 고려하여 실험식을 실험결과를 바탕으로 제안하였다. Druker-Prager 소성이론을 사용하여 비선형 유한요소해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 원형의 탄소섬유튜브에 의하여 구축된 콘크리트는 압축강도와 연성이 현저히 증가하였다. 또, 섬유의 방향에 따른 구속 효과의 영향은 섬유의 방향이 부재의 둘레방향에 가까워질수록 내력이 향상되었으나, 변형은 섬유의 방향이 45° 인 시험체가 최대인 것으로 나타났다.

2. 실험결과를 근거로 CFCT기둥의 축하중에 대한 성능을 예측할 수 있는 실험식을 제안하였으며, 실험결과와 비교하여 본 결과 CFCT기둥의 축하중에 대한 거동을 적절하게 예측하는 것으로 나타났다. 본 실험 결과에 의하여 탄소섬유튜브에 적용되는 최대 압축강도와 최대 변형률의 식을 다음과 같이 제안하였

다. 단, θ 는 radians이며 $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ 이다.

구축된 콘크리트의 압축강도

$$f_{cc} = f_{co} [1 + 2.628\theta^{0.502} (\frac{f_l}{f_{co}})^{1.191\theta^{0.066}}]$$

최대변형률

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + (779.445 \sin(3.142\theta - 0.704) \epsilon_{cf} - 0.835\theta^{-0.537}) (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)]$$

3. 유한요소해석에서는 k factor와 매개변수의 영향을 파악하기 위하여 민감도 해석을 실시하였다. 해석결과를 근거로 CFCT기둥의 축하중에 대한 성능을 예측할 수 있는 k factor에 관한 이론식을 제안하였으며, CFCT 기둥의 축하중에 대한 거동을 적절하게 예측하는 것으로 나타났다. 본 실험결과에 의하여 탄소섬유튜브에 적용하는 축방향의 k factor는 다음과 같다.

단, θ 는 radians이며 $\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ 이다.

$$k = 0.42 \sin(8.83\theta + 11.63) + 3.32$$

4. 본 논문은 제한된 시험체만을 사용하여 실험을 수행하고 제안식을 제시하였으며, 이는 정확성이나 객관성 측면에서 한계를 가질 수 있다고 판단된다. 향후 더 많은 실험과 연구를 통한 제안식의 검증 및 새로운 식의 제안이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 허윤정, "Druker-Prager 이론에 의한 축하중을 받는 콘크리트 충전 탄소섬유튜브 기둥의 비선형 유한요소해석", 경희대학교 석사학위논문, 2003
2. Michael N. Fardis and Homayoua Khalili, "FRP-Encased Concrete as a Structure Material", Magazine of Concrete Research, Vol. 34, 1982, pp.191-202
3. Antonio Nanni and Nick M. Bradford, "FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression", Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 2, 1995, pp.115-124

4. Shualb H. Ahmad and Surendra P. Shah, "Complete Triaxial Stress-Strain Curves for Concrete", Journal of Structural engineering, Vol. 108, No. 4, 1982, pp.728-742
5. Murat Saatcioglu and Salim R. Razvi, "Strength and ductility of confined concrete." Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 6, 1992, pp.1590-1667
6. Amir Mirmiran and Mohsen Shahawy, "A New Concrete-Filled Hollow FRP Composite Column", Composites Part B: Engineering, Vol. 27, Issues 3-4, 1996, pp.263-268
7. Amir Mirmiran, Michel Samaan, Suramy Cabrera and Mohsen Shahawy, "Design, manufacture and testing of a new hybrid column", Construction and building Materials, Vol. 12, No. 1, 1998, pp.39-49
8. Mohsen Shahawy, Amir Mirmiran and T. Beitelman, "Tests and Modeling of Carbon-Wrapped Concrete Columns", Composites Part B: Engineering, Vol. 31, Issues 6-7, 2000, pp.471-480
9. Hsien-Kuang Liu, Nyan-Hwa Tai and Chih-Chen Chen, "Compression Strength of Concrete Columns Reinforced by Non-Adhesive Filament Wound Hybrid Composites", Composites : Part A, Vol. 31, 2000, pp.221-233
10. Stephen Pessiki, Kent A. Harries, Justin T. Kestner, Richard Sause, and James M. Ricles, "Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets", Journal of composites for construction, Vol. 5, No. 4, 2001, pp.237-245
11. 박순섭, "탄소섬유튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 응력-변형도 모델에 관한 연구", 경희대학교 석사학위논문, 2002
12. P. Rochette, P. Labossiere, "A plasticity approach for concrete columns confined with composite material", Proceedings Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 1996, pp.356-366
13. Amir Mirmiran, Kenneth Zagers, Wenqing Yuan, "Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites", Finite elements in analysis and design, vol. 35, 2000
14. 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