

## 카본시트튜브로 구속된 원형 콘크리트 기둥의 강도감소계수 제안에 관한 연구

이경훈<sup>1\*</sup>

# A Study of Strength Reduction Factor Preparation for Circular Concrete Columns confined by Carbon Sheet Tube

Kyoung-Hun Lee<sup>1\*</sup>

**Abstract:** In this study, circular concrete column specimens confined by carbon sheet tube with different winding angles and different number of carbon sheet plies(3T, 5T and 7T) were tested to propose design equations and a strength reduction factor. Specimens were designed by 300 mm diameter and 600 mm height with  $90^\circ \pm 0^\circ$ ,  $90^\circ \pm 30^\circ$ ,  $90^\circ \pm 45^\circ$ ,  $90^\circ \pm 60^\circ$ ,  $90^\circ \pm 75^\circ$  and  $90^\circ \pm 90^\circ$  carbon fiber angles. A 10,000 kN UTM was used for compressive strength test of specimens by displacement control method with 0.01 mm/sec velocity. Estimation equations of compressive strength and ultimate strain of circular concrete column specimens confined by carbon sheet tube using a regression analysis and a strength reduction factor to apply ultimate strength design method of concrete were proposed. The strength reduction factor( $\phi$ ) of circular concrete columns confined by carbon sheet tube was estimated as 0.64 by the Monte Carlo Analysis Method. Manufacture and construction process have to be perfectly managed by construction managers because the structural capacities of carbon tubes were depends on construction abilities of manufacturing operators.

**Keywords:** Circular concrete columns confined by carbon sheet tube, Strength reduction factor, Monte carlo analysis, Design equations

## 1. 서 론

건축물의 주된 구조형식으로 이미 널리 적용되고 있는 철근콘크리트 구조는 1910년대 국내에 최초로 적용된 이래로 경제 및 산업의 발전에 발맞추어 그 성능도 개선되어 왔다. 이러한 성능개선 방안의 일환으로 콘크리트 자체의 강도를 높이는 고강도 콘크리트의 개발이 활발히 진행되고 있으나, 본 연구에서는 콘크리트 자체의 강도를 높이지 않고 인장강도가 큰 FRP(Fiber Reinforced Polymer)를 이용하여 기둥의 강도를 향상시키는 연구를 소개하고자 한다.

카본시트는 인장강도가 매우 큰 FRP 재료로써 기존에 널리 사용되고 있는 철근의 인장강도보다 약 10배 정도 우수한 인장성능을 지니고 있다. 카본시트로 제작된 구조부재를 건물의 신축공사에 적용한 경우는 드물지만 노후 구조물이나 자연재해 등의 피해로 인하여 성능이 저하된 구조물의 보수 및 보강에는 널리 적용되고 있다. 그러나 카본시트의 성능은

그 어느 구조재료의 성능과 비교하여 뒤지지 않을 만큼 우수한 성능을 보유하고 있기 때문에 보수 및 보강을 위한 재료로만 국한시켜서 사용하기보다는 그 성능을 충분히 발휘할 수 있도록 적용범위를 더 넓혀야 한다.

신축건물의 공사에 카본시트 튜브를 사용하는 경우, 카본시트 튜브를 거푸집으로 활용이 가능하고 해체공정이 불필요하여 친환경적이며 공기를 단축시킬 수 있다. 또한 철근 소요량이 감소됨에 따라 철근배근 공정이 축소되어 시공기간을 추가로 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라, 철근배근 과정에서 발생할 수 있는 시공결함을 감소시킬 수 있는 효과가 있다.

횡 구속에 의한 콘크리트 기둥의 압축강도 실험식은 원형 및 각형 기둥에 대하여 많은 연구자들이 제안하였는데, “Mander and Priestley(1988)”는 나선철근과 띠철근으로 구속된 콘크리트의 압축강도 식을 제안하였으며, “Mohamed Saafi et al.(1999)”은 탄소섬유와 유리섬유로 구속된 콘크리트 기둥의 강도와 구속압사이의 관계를 규명하는 식을 제안하였다. “Mohamed Saafi et al.(1999)”은 FRP 튜브가 거푸집을 대신하고 철근 소요량을 감소시킬 수 있는 구조부재임을 강조하였으며, 콘크리트로 충전된 FRP 기둥의 응력-변형률 곡선과 압축강도, 그리고 최대 변형률을 예측하는 실험식을 제안하였다.

Mirmiran et al.(1998)은 FRP의 구속효과는 콘크리트 강도, 섬유와 레진의 타입, 튜브를 구성하는 섬유의 양과 와인딩 각

<sup>1</sup>정회원, 국민안전처 중앙119구조본부 정보분석관(사무관, 공학박사), 교신저자  
\*Corresponding author: leekhun@korea.kr

National 119 Rescue Headquarters in Ministry of Public Safety and Security (MPSS), Gujiseoro 1 Dalsung Daegu, 43011, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

도, 튜브의 두께, 단면의 형태 등이 영향을 주는 요소라고 언급하였다. Nanni and Bradford(1995)는 FRP로 횡구속된 150 mm x 300 mm 공시체의 일축압축강도 실험을 수행하였다. 전체 51개의 공시체에 대하여 실험을 수행하였으며, FRP재료는 Aramid와 Glass Fiber 두 가지를 사용하였다. 실험결과 실험체의 파괴모드를 Mohr-Coulomb Shear 파괴, FRP 튜브의 인장파괴 및 FRP 튜브의 중첩으로 형성되는 Joint 파괴의 세 가지 파괴형상에 대하여 분석하였다.

Shahawy et al.(2000)은 카본튜브로 구축된 45개의 콘크리트 실험체의 압축실험을 수행하여 강도와 연성이 향상되었음을 주장하였다. 특히, Drucker-Prager의 Non-associative 비선형 유한요소모델을 적용하여 좋은 실험결과를 도출하였음을 표명하였다.

국내에서는 Hong and Kim(2004)에 의하여 탄소섬유 와인딩 공법으로 제작된 카본튜브로 구축된 콘크리트 기둥의 압축강도 식이 제안되었으며, Lee et al.(2006)은 카본시트로 구축된 콘크리트 기둥의 압축강도 실험식을 제안하였다. 또한, Han and Hong(2005)은 탄소섬유 시트와 띠철근 비율을 주된 변수로 실험을 수행한 강도 식을 제안하였으며, Lee(2005)는 카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 압축강도 및 휨성능 평가실험 결과를 이용하여 회귀분석과 Monte Carlo Analysis 기법을 수행하는 분석기법을 소개하였다. 본 연구에서는 기존 연구자들이 제안한 실험방법과 실험식을 근거로 카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 압축강도 실험을 실시하고, 구속효과로 향상된 압축강도 및 극한변형을 실험식을 실제 설계에 적용하기 위한 강도감소계수를 제안하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 압축강도 실험

#### 2.1.1 실험체 제작

카본시트는 얇은 탄소섬유를 한 방향으로 배치하여 종이와 같이 공장에서 완제품으로 제작된다. 이런 카본시트를 이용하여 원형 카본튜브를 제작하는 경우 탄소섬유와 기둥의 재축이 이루는 각도는 기둥의 압축강도를 향상시키는 변수가 되며, 카본튜브의 두께(시트의 수) 또한 구속효과를 향상시키는 요인이므로 주요변수로 채택하였다.

카본시트를 이용하여 튜브를 제작하는 과정은 비교적 간단하다. Fig. 1은 일 방향 카본시트를 이용하여 원형튜브를 제작하는 공정으로써 우선 제작하고자 하는 형상의 몰드를 철판을 이용하여 제작한 후 얇은 골판지를 몰드위에 씌운다. 몰드

에 바로 시트를 적층하지 않고 골판지를 씌우는 이유는 튜브의 탈형을 원활하게 하기 위함이다. 골판지 위에 얇은 필름지를 씌움으로써 corrugation(주름)과 골판지가 달라붙는 것을 방지하고 필름지위에 일정한 간격을 유지하며 미리 제작한 corrugation을 배치할 수 있다. Corrugation의 간격이나 접착을 고르게 하기 위하여 얇은 FRP 시트를 한 장 적층한 후 각도에 맞게 절단된 카본시트를 에폭시수지로 접합해가며 원하는 각도와 장수로 튜브를 제작하고 탈형 후 약 2~3일 정도 양생하면 구조용 튜브를 완성할 수 있다.

일반적인 콘크리트 압축강도 공시체의 크기는 150 mm x 300 mm이지만 본 연구에서는 공시체가 아닌 실물 기둥의 구속에 의한 영향을 평가하기 위하여 300 mm x 600 mm 규격의 실제 기둥크기로 실험체를 제작하였으며, 가력은 10,000 kN 용량의 UTM을 이용하여 0.01 mm/sec의 변위제어 방식으로 하중을 가력 하였다. 압축강도 실험체의 제작을 위한 원형 카본시트 튜브는 탄소섬유의 배치각도와 장수에 따라 600 mm

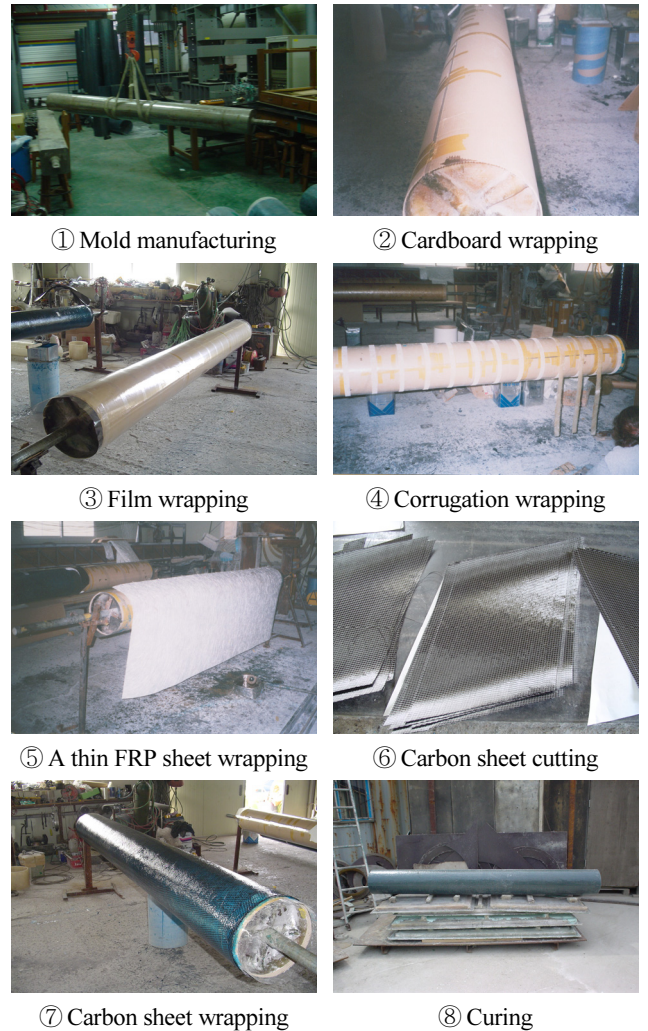


Fig. 1 Manufacturing Process of Circular Carbon Sheet Tube

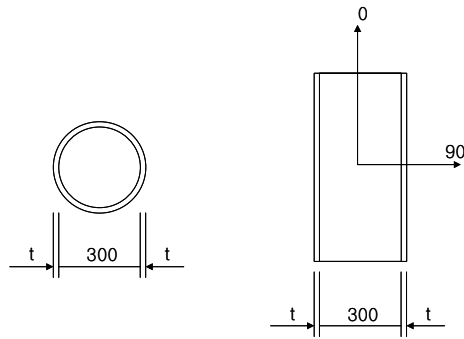


Fig. 2 Carbon Sheet Tube

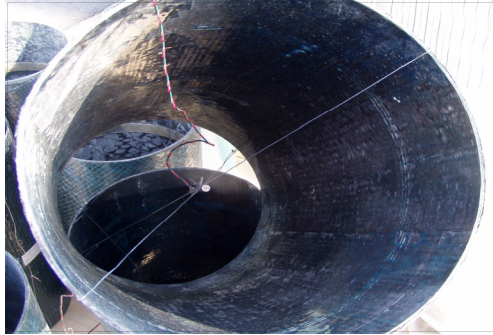


Fig. 3 Embedded Strain Gauge



Fig. 4 Curing of Specimens

길이를 절단한다. 이와 같이 제작된 원형튜브 내부에는 콘크리트의 변형을 측정할 수 있는 매립형 게이지를 설치한다. 튜브내부에 매립형 게이지를 설치할 때에는 콘크리트 타설 시 게이지가 수직을 벗어나거나 이탈되지 않도록 단단히 정착하여야 한다. 콘크리트를 타설한 후에는 카본시트 튜브 표면의 게이지 부착부분을 매끄럽게 가공한 후 2축 게이지를 부착한다.

Fig. 2는 압축강도 실험체를 구성하는 카본시트 튜브의 단면과 길이에 대한 각도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 콘크리트를 타설하기 전에 내부에 단단하게 고정된 매립형 게이지를 설치한 사진이다. 또한 Fig. 4는 콘크리트 타설 후 양생중인 실험체를 나타내는 사진이다. 탄소섬유의 각도와 카본시트의 수

Table 1 Compressive Strength Test Specimens

Specimen	Thk. of Tube [mm]	Number of Carbon Sheets					
		0°	30°	45°	60°	75°	90°
C0-3T	1.2	2					1
C0-5T	2.0	4					1
C0-7T	2.8	6					1
C30-3T	1.2		2				1
C30-7T	2.8		6				1
C45-3T	1.2			2			1
C45-5T	2.0			4			1
C45-7T	2.8			6			1
C60-3T	1.2				2		1
C60-5T	2.0				4		1
C75-3T	1.2					2	1
C75-5T	2.0					4	1
C75-7T	2.8					6	1
C90-3T	1.2						3
C90-5T	2.0						5

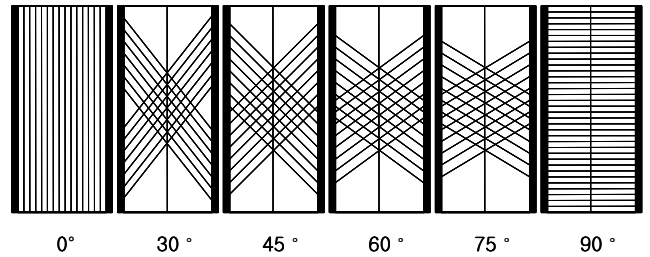


Fig. 5 Winding Angles of Carbon Fiber

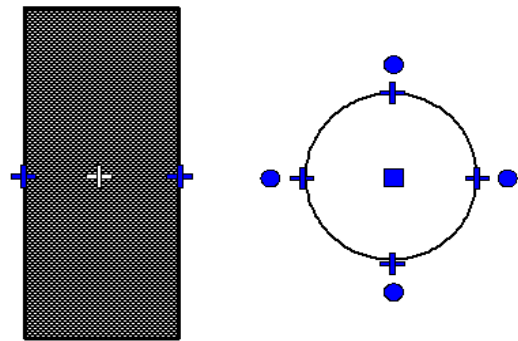


Fig. 6 Strain Gauges

를 변수로 제작된 압축강도 실험체는 Table 1과 같으며, 모든 실험체는 구속효과를 위하여 기둥의 길이방향과 90°로 첫 번째 카본시트를 배치한 후에 각도변수에 따라 카본튜브를 제작하였으며(Fig. 5), 변형을 측정을 위한 게이지 부착은 Fig. 6과 같다.

### 2.1.2 탄소섬유의 배치각도에 따른 실험 결과

카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥 실험체의 압축강도 실험결과는 Table 2와 같다. 콘크리트는 취성거동을 나타내는 재료로써 최대변형률( $\epsilon_c$ )은 0.003으로 알려져 있으나 취성재료인 콘크리트 기둥을 카본시트 튜브로 구축하면 내부 콘크리트 기둥의 변형률이 0.003을 초과한 후에도 변형률은 지속적으로 증가한다. 극한상태에 이르면 카본시트 튜브가 수평팽창 한계에 도달하여 균열이 발생되며 파괴에 도달하는 순간의 변형률을 카본시트 튜브로 구축된 콘크리트 기둥의 최대 변형률( $\epsilon_{cc}$ )로 측정하였다.

카본시트의 장수가 3장인 실험체의 거동을 살펴보면, 구속 효과에 의한 압축강도는 1.32~2.07배, 최대변형률은 1.67~6.67배까지 증가하는 것을 알 수 있었다. 탄소섬유의 배치각도에 따른 성능은 구속효과가 큰 90° 실험체의 경우 압축강도와 변형률이 가장 크게 증가하였으며, 기둥의 길이방향과 평행한 0°로 배치한 실험체의 성능향상이 가장 낮게 나타났다. 0°~90° 사이의 실험체는 기둥의 재축방향과 직각이 될수록 구속 효과가 커지지만, 카본시트를 작업자가 수작업으로 시공을 수행함에 따라 시공능력에 따른 카본시트의 접착성능이 강도와 변형률에 직접적인 영향을 미치는 요소임을 또한 알 수 있었다. 카본시트의 수가 5T, 7T인 실험체의 경우에도 90°로 구축된 경우 강도와 변형률이 가장 효과적으로 증가됨을 알 수 있었다.

### 2.2 카본시트 튜브로 구축된 원형기둥의 압축강도 실험식

Table 3은 기존 연구자들이 제안한 실험식들로, 특히 Lee et al.(2006)은 카본시트 튜브로 구축된 콘크리트 기둥의 압축강도 및 변형률 예측을 위한 실험식을 식(1)~식(4)와 같이 제안하였다.

$$0^\circ f'_{cc} = f'_c \left[ 1 + 0.66 \left( \frac{f'_l}{f'_c} \right)^{0.30} \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 32.01 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right)^{5.27} \right] \quad (2)$$

$$30^\circ \sim 90^\circ f'_{cc} = f'_c \left[ 1 + 1.26 \theta^{0.49} \left( \frac{f'_l}{f'_c} \right)^{0.30} \right] \quad (3)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 1.03 \theta^{0.57} \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right)^{5.27} \right] \quad (4)$$

여기서,  $f'_{cc}$ 는 구축된 콘크리트 기둥의 압축강도(MPa),  $f'_c$ 는 콘크리트 기둥의 압축강도(MPa),  $f'_l$ 은 유효 횡 구속압(MPa),  $\epsilon_{cc}$ 는 구축된 콘크리트 기둥의 최대 변형률(mm/mm),  $\epsilon_{co}$ 는 콘

크리트 기둥의 최대 변형률(=0.003),  $\theta$ 는 기둥의 재축과 탄소 섬유가 이루는 각도(deg)이다.

Table 2 Test Results

Specimen	$f'_{ck}$ [MPa]	$f'_{cc}$ [MPa]	$f'_{cc}/f'_{ck}$	$\epsilon_c$	$\epsilon_{cc}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_c$
C0-3T		31.19	1.15		0.005	1.67
C30-3T		39.37	1.45		0.009	3.00
C45-3T	27	43.24	1.60	0.003	0.012	4.00
C60-3T		35.71	1.32		0.015	5.00
C75-3T		40.82	1.51		0.015	5.00
C90-3T		56.05	2.07		0.020	6.67
C0-5T		29.00	1.07		0.013	4.33
C45-5T		41.58	1.54		0.011	3.67
C60-5T	27	54.17	2.00	0.003	0.024	8.00
C75-5T		46.70	1.72		0.024	8.00
C90-5T		72.93	2.70		0.018	6.00
C0-7T		26.97	0.99		0.008	6.00
C30-7T	27	48.50	1.79	0.003	0.020	6.67
C45-7T		47.56	1.76		0.016	5.33
C75-7T		62.54	2.31		0.019	6.33

여기서,  $f'_{ck}$ 는 콘크리트의 28일 압축강도(MPa)이다.

Table 3 Proposed Equations by Others

	Proposed Equations
Saffi et al.	$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + 2.2 \left( \frac{2t f_{com}}{d f'_c} \right)^{0.84} \right)$ $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left( 1 + (537 \epsilon_{com} + 2.6) \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right)$
Mander and Priestley	$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.25 + 2.25 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}} - \frac{2 f'_l}{f'_{co}}} \right)$ $\epsilon_{cc} = 0.002 \left( 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right)$
Karbhari et al.	$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + 2.1 \left( \frac{2t f_{com}}{d f'_c} \right)^{0.87} \right)$ $\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.01 \left( \frac{2t f_{com}}{d f'_c} \right)$
Fardis et al.	$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + 4.1 \left( \frac{t f_{com}}{d f'_c} \right) \right)$ $\epsilon_{cc} = 0.002 + 0.01 \left( \frac{E_{com} f_{com}}{d f'_c} \right)$
Miyauchi et al.	$f'_{cc} = f'_c \left( 1 + 3.5 \left( \frac{2t f_{com}}{d f'_c} \right) \right)$ $\epsilon_{cc} = 0.002 \left( 1 + 10.6 \left( \frac{2t f_{com}}{d f'_c} \right)^{0.373} \right)$

여기서,  $f_{com}$  은 콘크리트 압축강도(MPa),  $t$ 는 FRP튜브의 두께(mm),  $d$ 는 원형기둥의 직경(mm),  $\epsilon_{com}$  은 콘크리트 최대 변형률(mm/mm),  $E_{com}$  은 콘크리트 탄성계수(MPa)이다.

실험결과와 회귀분석을 통하여 제안한 실험식은 통계를 바탕으로 제안된 식으로, 현재 국내에서 콘크리트 구조물의 설계에 적용하고 있는 극한강도 설계를 적용하기 위해서는 강도감소계수를 적용한 설계식을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 보다 안전한 설계를 위하여 Monte Carlo Analysis를 이용한 해석을 수행하여 강도감소계수( $\phi$ )를 제안하였다.

### 2.3 강도감소계수

한계상태식을  $G = R - Q$  와 같이 저항성분  $R$  과 하중성분  $Q$  에 의해 정의되는 경우에 대해 생각해 보면, 각 확률변수가 모두 통계적으로 독립인 대수정규분포 확률변수라면 신뢰도지수는 식 (5)와 같이 정의되며, 다시 표현하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{\ln R_m - \ln Q_m}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (5)$$

$$\ln(R_m/Q_m) = \beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \quad (6)$$

식 (6)에 루트의 근사식을 식 (7)을 적용한 후 우변에 자연 로그를 취하면 식 (8)~ 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며, 강도감소계수  $\phi$ 는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{V_R^2 + V_Q^2} \approx 0.75(V_R + V_Q) \quad (7)$$

$$\ln(R_m/Q_m) = \ln e^{0.75\beta(V_R + V_Q)} \quad (8)$$

$$R_m = Q_m (e^{0.75\beta V_R} \times e^{0.75\beta V_Q}) \quad (9)$$

$$e^{-0.75\beta V_R} R_m = e^{0.75\beta V_Q} Q_m \quad (10)$$

$$\phi = e^{-0.75\beta V_R} \quad (11)$$

강도감소계수를 구하기 위한 식 (11)에서  $V_R$  은 변동계수 (표준편차/평균)를 나타내며,  $\beta$  는 신뢰도지수를 나타내는 것으로 연성거동을 나타내는 부재의 경우 3으로 일정한 상수 값을 갖는다. 다음의 7가지 확률변수 값을 미리 작성된 visual Basic을 이용한 프로그램에 입력한다.

- ① 콘크리트 강도( $f'_c$ )
- ② 카본튜브의 두께( $t_{cf}$ )
- ③ 카본튜브로 구속된 기둥의 압축축 변형률( $\epsilon_c$ )
- ④ 카본튜브의 인장축 변형률( $\epsilon_t$ )
- ⑤ 카본튜브의 둘레방향 탄성계수( $E_h$ )
- ⑥ 카본튜브의 길이방향 탄성계수( $E_v$ )
- ⑦ 카본시트의 각도( $deg$ )

위에서 제시된 7 가지의 확률변수들은 카본시트튜브로 구속된 기둥을 제작하거나 시공할 때 발생할 수 있는 변수들을 설정한 것이다. 콘크리트 강도를 결정짓는 요소들은 타설 시의 온도, 양생기간, 배합비율, 타설 방법, 골재의 품질 등이 있으며 이 요소들에 의하여 강도의 차이가 발생하기도 한다. 또한 구속에 의하여 향상된 콘크리트의 강도를 결정짓는 추가적인 요소들은 튜브의 두께, 탄소섬유의 배치각도, 그리고 기둥 주근의 단면적 등과 카본튜브를 제작하는 기술자의 기술 보유 정도 및 제작여건 등이 있다.

본 연구에서 제안된 카본시트 튜브로 구속된 콘크리트의 압축강도 및 변형률을 측정할 수 있는 실험식에 대한 신뢰성은 위에서 언급한 7가지 확률변수의 신뢰도지수를 검증함으로써 식의 신뢰도를 만족시킬 수 있다. 위의 확률변수 중 ③~⑥의 4가지 확률변수 또한 여러 가지 실험을 통하여 얻어진 통계적인 실험 자료이므로 정확한 값이라 할 수는 없지만 재료의 특성을 나타내는 탄성계수나 변형률 등의 값은 카본시트로 제작된 튜브의 direct tensile test 및 split disk test 등의 재료실험을 통하여 얻은 실측값을 사용하였다. 따라서 재료실험을 통하여 얻을 수 있었던 자료들을 제외한 나머지 확률변수의 값들은 10,000개의 난수를 발생시켜서 해석을 수행하였다.

변동계수에 따라서 발생된 10,000개의 확률변수들의 난수를 분석하여 해석에 적합한 값의 난수가 발생되었는지 확인

Fig. 7 Analysis Work Sheet

**Table 4** Variable Coefficient and Strength Reduction Factor

	Variable Coefficient ( $V_R$ )	Credibility Index( $\beta$ )	Strength Reduction Factor ( $\phi$ )	Strength Reduction Factor ( $\phi_\theta$ )
C0-3T	0.1734		0.6770	
C0-5T	0.1782	3	0.6697	0.639
C0-7T	0.2494		0.5706	
C45-3T	0.1711		0.6805	
C45-5T	0.1756	3	0.6736	0.642
C45-7T	0.2475		0.5731	

하고 발생된 난수의 정확도가 96% 이상 확보되었을 때 해석을 계속 수행하였다. Fig. 7은 각각의 확률변수에 대한 난수발생 워크시트를 나타낸 것이며, 본 실험에서는 0°~90°까지 다양한 탄소섬유 각도에 대한 실험을 수행하였다. Lee et al.(2015)은 카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 반복수평하중 가력실험을 수행하여 탄소섬유의 휨 성능을 평가하는 실험을 수행하였는데, 이 실험은 본 연구에서 수행된 압축강도 실험과 연계된 실험으로 탄소섬유의 각도가 0°에 가까울수록 기둥의 휨 성능은 향상되었다. 따라서 본 연구에서 수행한 압축강도 실험결과와 Lee et al.(2015)의 휨 성능 실험결과를 같이 분석한 결과 압축과 휨을 동시에 만족하는 각도배열로 0°와 45° 실험체에 대한 강도감소계수 분석을 실시하였다. 해석결과 0° 실험체의 강도감소계수 평균값은 0.639, 45° 실험체의 강도감소계수 평균값은 0.642로 나타났으며 각 실험체의 강도감소계수 값은 Table 4와 같다.

### 3. 결론

본 연구에서는 카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 압축강도 실험을 수행한 후 구속으로 인하여 증가된 압축강도와 극한변형률을 예측하는 실험식을 제안하였으며, 국내 콘크리트 설계방법인 극한강도설계에 적용할 수 있는 강도감소계수를 Monte Carlo Analysis를 통하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = 0^\circ \quad f'_{\alpha} = \phi_\theta \cdot f'_c \left[ 1 + 0.66 \left( \frac{f'_l}{f'_c} \right)^{0.30} \right]$$

$$\theta = 45^\circ \quad f'_{\alpha} = \phi_\theta \cdot f'_c \left[ 1 + 1.26 \theta^{0.49} \left( \frac{f'_l}{f'_c} \right)^{0.30} \right]$$

강도감소계수  $\phi_\theta = 0.64$

카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 압축강도 실험 및 해석을 통하여 실험식과 설계식, 그리고 강도감소계수를 상기와 같이 제안하였다. 카본튜브는 탄소섬유를 와인딩 몰드에 직접 감아 만드는 와인딩 공법과 탄소섬유 시트를 몰드에 부착하여 양생시키는 카본시트 공법이 있는데, 본 연구에서는 후자인 탄소섬유 시트를 이용한 연구를 수행하였다. 탄소섬유시트를 몰드에 부착하는 공정은 모두 수작업으로 이루어지므로 탄소섬유 시트의 구조성능 외에 부재의 성능을 결정하는 중요한 요인은 작업자의 시공성이다. 구속에 의하여 압축강도를 효과적으로 향상시키기 위해서는 탄소섬유의 시공성이 무엇보다 중요하며, 이는 시공결함의 요인의 존재하는 것을 의미한다. 이런 이유로 강도감소계수 0.64는 안전한 구조물의 시공을 위해서 적절한 예측이라 판단된다.

### References

- Amir Mirmiran, Mohsen Shahawy, Michel Samaan, Hazem El Echary, Juan Carlos Mastrapa and Odell Pico (1998), Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete, *Journal of Composite for Construction*, 2(4), 175-185.
- Antonio Nanni and Nick M. Bradford (1995), FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression, *Construction and Building Materials*, 9(2), 115-124.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1998), Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 114(8), 1804-1825.
- Lee, K.-H., Kim, H.-C., Kim, J.-H., and Lee, Y.-H. (2015), Response of Concrete Filled Carbon Sheet Tube Column under Axial and Lateral Loads, *Mechanics and Materials*, 764-765, 1109-1113.
- Lee, K.-H., Kim, H.-C., and Hong, W.-K. (2006), Capacity Evaluation of Compressive Member Confined by Carbon Sheet Tube, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 10(3), 152-158.
- Mohamed Saafi, Houssam A. Toutanji, and Zongjin Li (1999). Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes, *ACI Materials Journal*, 97(4), 500-509.
- M Shahawy, A. Mirmiran and T. Beiteman (2000), Tests and Modeling of Carbon-Wrapped Concrete Columns, *Composite Part B: Engineering*, 31(6-7), 471-480.
- Han, S.-H., and Hong, K.-N. (2005), Uniaxial Compression Behavior of RC Columns Confined by Carbon Fiber Sheet Wraps, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 9(2), 207-216.
- Hong, W.-K., and Kim, H.-C. (2004), Behavior of concrete columns confined by carbon composite tube, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 178-188.
- Lee, K.-H., (2005), An Experimental Study of Circular Columns Confined by Carbon Sheet Tube, Ph.D Thesis, 150-159.

Received : 10/04/2016

Revised : 10/11/2016

Accepted : 10/17/2016

---

**요 지** : 본 연구에서는 각기 다른 각도와 시트장수(3T, 5T 및 7T)로 제작된 카본시트 튜브로 구축된 원형 콘크리트 기둥의 압축강도 실험을 수행한 후 압축강도 실험결과 강도감소계수를 제안하였다. 실험체는 300 mm x 600 mm 크기로 제작하였으며, 탄소섬유의 각도는  $90^\circ \pm 0^\circ$ ,  $90^\circ \pm 30^\circ$ ,  $90^\circ \pm 45^\circ$ ,  $90^\circ \pm 60^\circ$ ,  $90^\circ \pm 75^\circ$  및  $90^\circ \pm 90^\circ$ 이다. 압축강도 실험은 10,000 kN UTM을 이용하여 0.01 mm/sec 가력속도의 변위 제어법으로 실험을 수행하였다. 실험결과와 회귀분석을 통하여 각도별 압축강도 및 극한변형률을 예측하는 실험식을 제안하였으며, 국내 콘크리트 부재의 설계법인 극한강도 설계법 적용을 위한 강도감소계수를 제안하였다. 강도감소계수는 Monte Carlo Analysis를 이용하여 해석을 수행하였으며 그 값은 0.64로 제안하였다. 탄소섬유시트를 이용하여 카본튜브를 제작하는 것은 시공자의 기술력에 따라 구조성능이 좌우될 수 있으므로 카본튜브 제작 및 시공 시 각별한 현장관리가 요구된다.

**핵심용어** : 카본시트 튜브로 구축된 콘크리트 기둥, 강도감소계수, 몬테카를로 해석, 설계식

---