

카본시트튜브로 구속된 압축재의 성능평가

Capacity Evaluation of Compressive Member Confined by Carbon Sheet Tube

이 경 훈*

Lee, Kyoung-Hun

김 희 철**

Kim, Hee-Cheul

홍 원 기***

Hong, Won-Kee

Abstract

An experimental research has been performed to investigate capacity of CFCST(Concrete Filled Carbon Sheet Tube) columns because column member is one of the most important structural members. Generally, two shapes of column sections, rectangular and circular shapes, are designed but the circular shape which has constant curvature was chosen for this study. Total 17 column specimens confined by carbon sheet tube were tested using 10,000kN universal test machine(UTM).

요 지

본 연구에서는 카본시트튜브로 구속된 원형기둥의 성능을 평가하는 실험을 수행하였다. 일반적으로 기둥은 각형과 원형의 두 가지 형상으로 설계가 이루어지지만 단면의 전체가 일정한 곡률을 유지하여 구속효과가 큰 원형단면의 경우를 본 연구에서 채택하였다. 전체 17개의 시험체를 10,000kN 용량의 UTM을 이용하여 실험을 수행하여 극한강도를 예측하는 실험식을 제안하였다.

Keywords : Carbon Sheet Tube, Confinement Effect, Circular Column

핵심 용어 : 카본시트튜브, 구속효과, 원형기둥

* 정회원, 경희대학교 공학박사

** 정회원, 경희대학교 토목건축공학부 교수

*** 정회원, 경희대학교 토목건축공학부 조교수

E-mail : leekh@khu.ac.kr 031-201-2864

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

기둥은 일반적으로 각형과 원형의 형상으로 설계가 이루어진다. 각형기둥은 더 보편적으로 사용되는 형상이지만 카본튜브로 구속할 경우 모서리부분에 응력이 집중되어 구속효과가 저하된다. 반면 단면전체가 일정한 곡률을 갖는 원형기둥은 구속효과가 우수하여 본 연구에서는 카본시트튜브로 구속된 원형기둥에 대한 실험을 수행하였다.

Mander 등⁽⁴⁾은 원형기둥의 나선철근이나 띠철근의 구속압에 의한 강도식을 제안하였으며, Saafi 등⁽⁵⁾은 탄소섬유와 유리섬유로 구속된 실험결과를 회귀분석하여 축방향 극한강도와 구속압 사이의 관계를 밝히는 식을 발표하였다. 국내에서는 탄소섬유튜브로 구속된 원형기둥의 실험식이 홍원기 등⁽⁶⁾에 의하여 제안되었다. 이 연구는 섬유원사를 몰드에 직접 감아 튜브를 제작하는 와인딩 공법을 적용하여 카본시트로 튜브를 제작한 본 연구의 결과와 좋은 비교가 될 것이다. 또한 한 상훈 등⁽¹⁾은 탄소섬유시트로 구속된 RC 기둥의 강도식을 제안하였는데, 이 연구에서는 주 철근이 배근되고 띠철근 비율을 하나의 변수로 채택하여 실험을 수행한 반면 본 연구에서는 철근이 배근되어있지 않고 순수하게 카본시트튜브로만 구속된 원형기둥의 실험을 수행하여 연구의 차별성을 두었다. 이와 같이 국내외의 활발한 연구결과를 활용하여 본 연구에서는 섬유원사의 각도와 시트의 장수에 따른 원형콘크리트 기둥의 극한강도를 예측하는 실험식을 제안하고자 한다.

2. 카본시트튜브로 구속된 원형기둥의 강도 실험

카본시트를 이용한 튜브의 제작과정은, 우선 철판으로 원하는 형상의 몰드를 제작한 후 탈형을 위한 골판지를 씌운다. 골판지위에 투명필름을 씌움으로써 다음에 적층될 시트와 골판지가 서로 붙는 것을 방지한다. 시트를 적층하기 전에 얇은 FRP 시트를 한 장 적층하고 미리 원하는 각도로 제단된 카본시트를 적층하여 튜브를 제작한다. 이때 적층각도는 기둥의 길이방향으로 0°로 설정하였다. 완성된 튜브는 몰드에서 탈형

시킨 후 상온에서 약 2~3일정도 양생시킨다.

제작된 튜브 내부에는 콘크리트의 변형을 측정할 수 있도록 게이지를 매립하였으며 타설한 후에는 튜브표면을 매끄럽게 가공한 후 게이지를 부착하였다. 시험체의 제원은 길이 600mm, 튜브내경 300mm이다. 시트의 장수 및 각도에 따라 제작한 시험체는 40개였으며 여기에는 모든 각도에 대하여 시트의 장수가 3T, 5T, 7T인 튜브가 다 포함되었다. 그러나 튜브를 제작하는 과정은 모든 공정이 기술자의 수작업에 의해서 이루어져 시공결함의 여러 시험체에서 발견되어 17개의 시험체에 대하여 분석을 수행하였으며 그 개요는 Table 1과 같다.

3. 실험결과

일반적으로 구속된 기둥의 거동은 Fig. 1과 같이 크게 세 가지 경우로 구분될 수 있다.

Fig. 1(a)는 강도가 탄성구간을 지난 후에도 일정한 기울기로 계속 증가하는 경우로, 기둥의 극한강도와 극한변형률은 모두 시험체가 붕괴되는 시점에서 발생하여 구속효과가 매우 우수하며 본 실험의 결과는 모두 이 경우에 속한다.

Table 1 축 하중성능 시험체 개요

시험체	시험체 수	실제두께 (mm)	90°	0°	30°	45°	60°	75°
0-3T	2	1.2	1	2				
0-5T	2	2.0	1	4				
30-3T	1	1.2	1		2			
30-7T	1	2.8	1		6			
45-3T	1	1.2	1			2		
45-5T	1	2.0	1			4		
45-7T	1	2.8	1			6		
60-3T	1	1.2	1				2	
60-5T	1	2.0	1				4	
75-3T	1	1.2	1					2
75-5T	2	2.0	1					4
75-7T	1	2.8	1					6
90-3T	1	1.2	3					
90-5T	1	2.0	5					
전체개수	17							

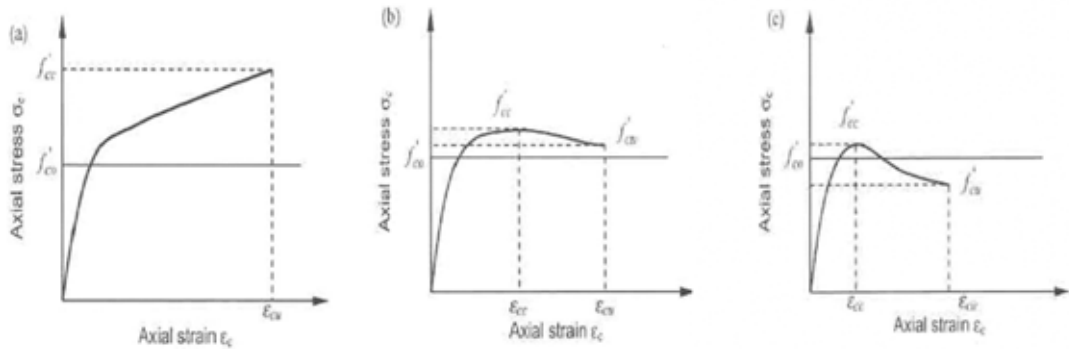


Fig. 1 구속된 기둥의 축 하중에 대한 거동 패턴

Fig. 1(b)는 강도가 탄성구간을 지난 후 일정구간 증가되다가 감소하지만 파괴되는 시점의 강도가 여전히 f'_{co} 값보다 높아 여전히 구속이 효과적이다. Fig. 1(c)는 파괴 시의 응력이 f'_{co} 보다 낮아 구속효과가 부적절한 경우이다.

본 연구에서는 콘크리트의 공칭강도를 f'_{co} (=27 MPa)로, 압축강도를 변형률이 0.002에 도달했을 때의 강도인 $f_{0.002}$ 로, 그리고 극한강도를 시험체가 붕괴되는 시점의 강도인 f_{cc} 로 표기하였다. Table 2를 살펴보면, 시험체의 압축강도는 최고 1.47배 증가하였으며, 극한강도는 최고 2.7배 증가되었다. 그러나 강도

및 변형률의 증가양상은 두께와 각도의 변동에 따라 일관성 있게 나타난 것은 아니다. 예를 들어 3T 시험체의 경우 0°, 30°, 45°로 각도가 증가할수록 강도가 향상되다가 60°와 75°의 경우 각각 35.71MPa과 40.82MPa로 감소하였으며 다시 90°의 경우 강도가 향상되었다. 이러한 현상은 튜브제작과정에서 발생한 시공의 결함에 따른 것으로 판단되어 시트를 이용하여 튜브를 제작하는 경우 재료의 고유성능과 상관없이 시공성에 따라 성능의 향상정도가 달라지므로 실제로 구조물을 구축하는 경우 그 기술이 입증된 기술자만이 시공할 수 있는 제안사항을 마련하여야 할 것으로 판단된다.

Table 2 구속압에 의한 압축강도 및 변형률의 증가

시험체	실제두께(mm)	f'_{co} (MPa)	f_{cc} (MPa)	$f_{0.002}$ (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc}/f'_{co}	$f_{0.002}/f'_{co}$	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{0.002}$
0-3T	1.2	27.0	31.19	28.57	0.0048	1.16	1.06	2.44
0-5T	2.0		38.55	36.33	0.0138	1.43	1.35	6.90
30-3T	1.2		39.37	32.47	0.0091	1.46	1.20	4.55
30-7T	2.8		48.50	34.06	0.0201	1.80	1.26	10.06
45-3T	1.2		43.24	36.21	0.0127	1.60	1.34	6.35
45-5T	2.0		41.58	33.78	0.0116	1.54	1.25	5.81
45-7T	2.8		47.56	37.53	0.0165	1.76	1.39	8.28
60-3T	1.2		35.71	37.42	0.0158	1.32	1.39	7.91
60-5T	2.0		54.17	33.56	0.0246	2.01	1.24	12.3
75-3T	1.2		40.82	30.18	0.0149	1.51	1.12	7.47
75-5T	2.0		62.67	36.54	0.0247	2.32	1.35	12.37
75-7T	2.8		62.54	42.41	0.0195	2.32	1.57	9.76
90-3T	1.2		56.05	36.54	0.0204	2.08	1.35	10.20
90-5T	2.0		72.93	39.76	0.0184	2.70	1.47	9.24

여기서, f'_{co} : 콘크리트의 공칭강도(MPa)

f_{cc} : 구속된 기둥의 극한강도(MPa)

$f_{0.002}$: 변형률 0.002에 해당되는 구속된 기둥의 압축강도(MPa)

ϵ_{cc} : 구속된 기둥의 축 방향 극한변형률

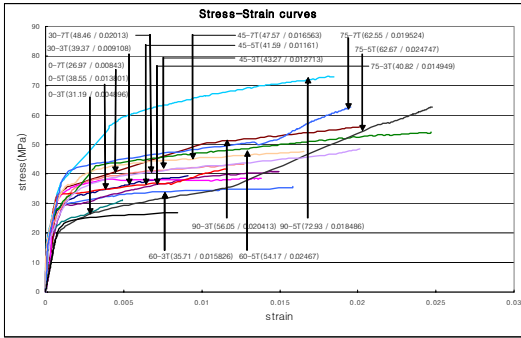


Fig. 2 응력-변형률 곡선

Fig. 2는 시험체의 응력과 변형률의 관계를 나타낸 그래프이다. 시험체 중에서 연성의 증가율이 가장 높은 시험체는 75-5T 시험체로 수직변형률이 약 0.025로 측정되어 콘크리트보다 약 12.4배정도 연성이 증가되어 큰 에너지 흡수 능력을 보유하고 있음을 알 수 있었다.

4. 카본시트튜브로 구속된 콘크리트의 강도 계산식

4.1 기존 제안식

Saafi와 Toutanji⁽⁵⁾는 탄소섬유 등으로 제작된 튜브로 구속된 기둥의 강도 식을 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co}(1 + 2.2(\frac{f_l}{f_{co}})^{0.84}) \quad (1)$$

$$= f_{co}(1 + 2.2(\frac{2t_{com}f_{com}}{df_{co}})^{0.84})$$

여기서, f_{com} 과 t_{com} 은 각각 튜브의 인장강도와 두께, d 는 튜브의 내경을 나타낸다.

$$f_l = \frac{2t_{com}E_{com}\epsilon_l}{d} \quad (2)$$

여기서, f_l 은 유효횡구속압, E_{com} 은 튜브의 탄성 계수, ϵ_l 은 횡방향 변형률이다.

또한 횡구속된 기둥의 변형률은 다음과 같으며 여기서 ϵ_{com} 은 튜브의 극한변형률이다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}(1 + (537\epsilon_{com} + 2.6)(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)) \quad (3)$$

4.2 카본시트튜브로 구속된 콘크리트 기둥의 강도 계산식

본 연구에서는 카본시트튜브로 구속된 기둥의 압축 강도를 예측하는 식의 일반적인 형태를 Mander와 Saafi가 제안한 기본식의 형태인 다음 식으로 가정하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_l \quad (4)$$

식 (4)의 양 변을 콘크리트의 순수 압축강도로 나누어서 횡구속효과와 횡구속 비에 대한 식 (5)를 실험식의 기본 형태로 가정하였다. 여기서 횡구속효과에 대한 비선형거동을 표현하기 위하여 지수함수 계수인 p 를 도입하였다.

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

가정된 위 식의 변수인 k_1 과 p 의 값을 카본시트의 배치각도에 따른 실험결과와 회귀분석을 수행하여 구속된 콘크리트의 압축강도 식을 유도하였다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.15(\frac{f_l}{f_{co}})^{0.30} \quad (6)$$

위 식에서 카본시트의 배치각도를 변수로 갖는 실험식을 제안하기 위하여 지수의 계수인 0.30을 상수로 다음과 같이 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_2 (\frac{f_l}{f_{co}})^{0.30} \quad (7)$$

식 (7)에 의해서 얻은 결과를 재차 회귀분석하면 각도에 따른 회귀식들을 얻을 수 있으며 최종실험식에 각도의 변수를 지정해주기 위하여 식 (8)과 같이 k_2 를 독립변수로 지정하고 radian으로 환산된 시트의 각도인 θ 를 종속변수로 회귀분석을 수행한다.

$$k_2 = a_1 \theta^b \quad (8)$$

위 식의 변수인 a_1 과 b 를 회귀분석을 수행하여 구하면 다음과 같은 카본시트의 각도와 시트의 장수(튜브의 두께)에 따라 구축된 콘크리트의 압축응력을 계산하는 실험식을 얻을 수 있다.

$$0^\circ \quad f_{cc} = f_{co} [1 + 0.66 (\frac{f_{lt}}{f_{co}})^{0.30}] \quad (9)$$

$$30^\circ \sim 90^\circ \quad f_{cc} = f_{co} [1 + 1.26 \theta^{0.49} (\frac{f_{lt}}{f_{co}})^{0.30}] \quad (10)$$

4.3 카본시트튜브로 구축된 콘크리트 기둥의 변형률 계산식

카본시트튜브로 구축된 기둥의 변형률을 예측하는 식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + k_3 (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)] \quad (11)$$

식 (11)의 양 변을 콘크리트의 순수 변형률로 나누어서 식 (12)와 같은 기본식의 형태를 마련하였다. 여기서 횡구속효과에 대한 비선형거동을 표현하기 위하여 지수함수 계수인 p 를 도입하였다.

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + k_3 (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)^p \quad (12)$$

가정된 위 식의 변수인 k_3 와 p 를 카본시트의 배치 각도에 따른 실험결과의 회귀분석을 수행하여 구축된 콘크리트의 변형률 식을 유도하였다.

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + 1.73 (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)^{5.27} \quad (13)$$

식 (13)에 의해서 얻은 결과를 재차 회귀분석하면 각도에 따른 회귀식들을 얻을 수 있으며 최종실험식에 각도의 변수를 지정해주기 위하여 식 (14)와 같이 k_3 를 독립변수로 지정하고 시트의 각도인 θ 를 종속변수로 회귀분석을 수행한다.

$$k_3 = a \theta^p \quad (14)$$

위 식의 변수인 a 와 p 를 회귀분석을 수행하여 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_3 = 1.03 \theta^{0.57} \quad (15)$$

따라서 카본시트의 각도와 시트의 장수(튜브의 두께)에 따라 구축된 콘크리트의 압축강도와 변형률을 계산하는 실험식은 다음과 같다.

$$0^\circ \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + 32.01 (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)^{5.27}] \quad (16)$$

$$30^\circ \sim 90^\circ \quad \epsilon_{cc} = \epsilon_{co} [1 + 1.03 \theta^{0.57} (\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1)^{5.27}] \quad (17)$$

단, 0°시험체의 경우 이론적으로는 구속에 대한 효과가 전혀 발생하지 않지만 본 연구에서는 모든 튜브에 대하여 제작을 용이하게 하고 구속효과를 높이기 위하여 최소 1장의 90° 방향 시트를 적층시켜 제작하였으므로 실제로는 어느 정도 구속효과를 기대할 수 있다. 이러한 이유로 0°시험체는 별도로 실험식을 제안하였다.

제안된 실험식의 결과 중 3T, 5T, 7T 모두를 포함하고 있는 45°와 75°의 경우를 다른 제안식들과 비교하여 Fig. 3~Fig. 8에 그래프로 나타내었다. 그래프를 살펴보면 제안식 그래프는 변형률이 0.002에 도달할 때까지의 거동을 구속되지 않은 콘크리트의 거동과 일치한다고 가정하였다. 그러나 실험결과를 살펴보면 변형률 0.002이하의 구간에서도 구속효과로 인하여 강도가 증가됨을 알 수 있었다.

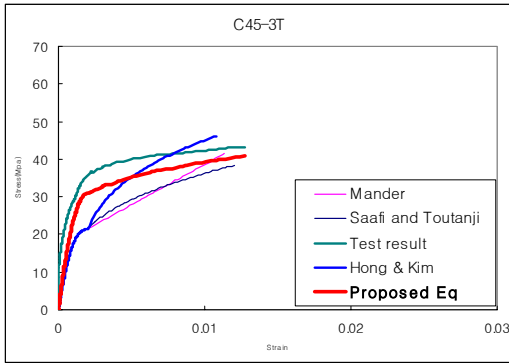


Fig. 3 45-3T 시험체

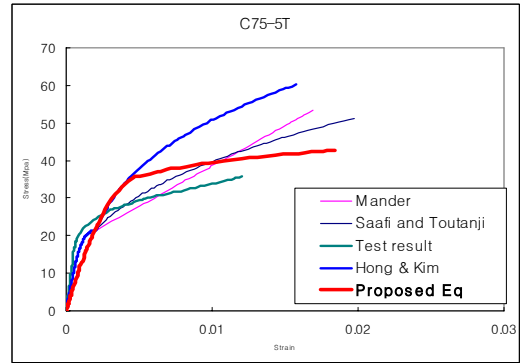


Fig. 6 75-5T 시험체

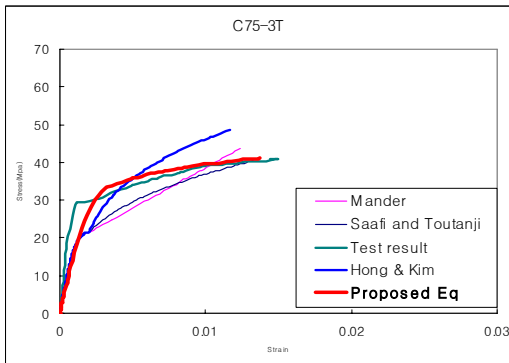


Fig. 4 75-3T 시험체

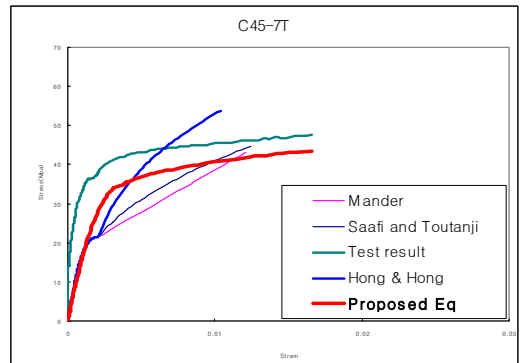


Fig. 7 45-7T 시험체

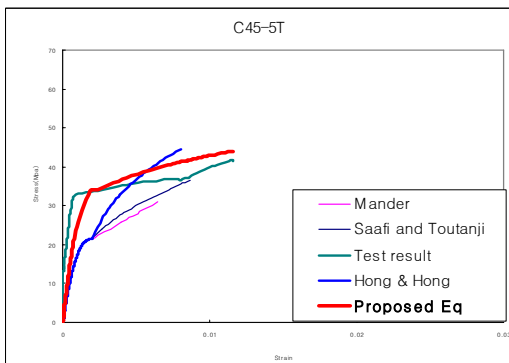


Fig. 5 45-5T 시험체

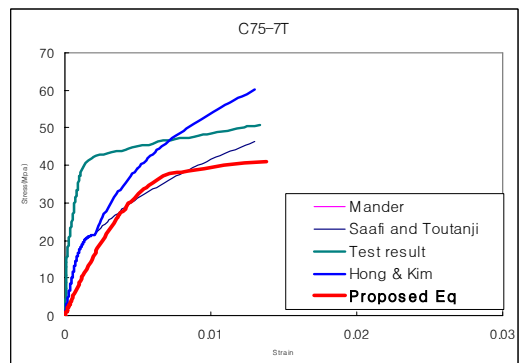


Fig. 8 75-7T 시험체

5. 결론

- 1) 카본시트의 배치각도에 따른 거동은 시트를 구성하는 섬유들이 횡 방향에 가까울수록, 즉 각도가 커질수록 극한강도가 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 구속된 시험체의 극한강도는 최대 72.93MPa로써 약 2.7배가량 향상되었으며, 극한변형률은 0.0247로써 약 12.4배가량 증가되어 에너지흡수 능력이 효과적임을 알 수 있었다.
- 3) 카본시트튜브로 구속된 원형기둥의 극한강도 및 극

한변형률을 계산하는 실험식을 다음 식 (18)~식 (21)과 같이 제안하였다.

$$0^\circ \quad f_{cc} = f_{co} \left[1 + 0.66 \left(\frac{f_L}{f_{co}} \right)^{0.30} \right] \quad (18)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 32.01 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right)^{5.27} \right]$$

30°~90°

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 1.26 \theta^{0.49} \left(\frac{f_L}{f_{co}} \right)^{0.30} \right] \quad (19)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 1.03 \theta^{0.57} \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right)^{5.27} \right]$$

참고문헌

1. 한상훈, 홍기남, “탄소섬유쉬트로 구속된 RC 기둥의 일축압축 거동”, 구조물진단학회논문집, 제 9권 제 2호, 2005년 4월, pp. 207-216.
2. 신영수, 홍기섭, 홍영균, 최완철, “탄소섬유쉬트로 확보강된 콘크리트의 강도 특성”, 대한건축학회논문집, 제

11권 10호(통권 84호), 1995년 10월, pp. 323-328.

3. 신영수, 홍기섭, 홍영균, 최완철, “Compressive Strength on Concrete Cube Confined with Carbon Fiber Sheets”, 대한건축학회논문집, 제 12권 12호(통권 98호), 1996년 12월, pp. 197-203.
4. J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, August, 1988, pp. 1804-1825.
5. Mohamed Saafi, Houssam A. Toutanji, and Zongjin Li, “Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes”, ACI Materials Journal, Vol. 97, No. 4, July-August 1999, pp. 500-509.
6. Won-Kee Hong, and Hee-Cheul Kim, “Behavior of concrete columns confined by carbon composite tube”, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 31(2), 178-188, 2004.

(접수일자 : 2005년 8월 8일)