

축하중과 반복 횡하중을 받는 콘크리트 충전 각형 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동특성

The Flexural Behavior of a Square Concrete Filled Carbon Tube Columns under the Constant Axial Force with Reversed Cyclic Lateral Load

김희철* 홍원기** 이현주***
Kim, Hee-Cheul Hong, Won-Kee Lee, Hyun-Ju

국문요약

반복 횡하중을 받는 콘크리트 충전 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동을 분석하기 위하여 실험을 수행하였다. 콘크리트 충전 각형 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동에 영향을 미치는 탄소섬유의 와인딩 각도와 두께를 변수로 선택하여 거동을 평가하였다. 콘크리트 충전 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동을 보다 정확하게 분석하기 위하여 설정된 두 변수를 동시에 고려하였다. 실험의 결과에서 얻어진 하중-변형 곡선을 이용하여 콘크리트 충전 각형 탄소섬유 튜브 기둥의 휨강도, 변형능력 및 에너지 소산능력을 조사하였다. 또한 기존 구조물과의 비교를 위하여 철근콘크리트 조적벽과 콘크리트를 충전한 각형 탄소섬유 튜브 기둥과의 연성 능력을 비교 평가하였다.

주요어 : 콘크리트 충전 탄소섬유 튜브, 와인딩 각도, 튜브의 두께, 휨강도, 변형능력, 연성, 에너지 소산능력

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the flexural behavior of square concrete filled carbon tube (CFCT) columns subjected to constant axial load with the cyclic lateral load. Two parameters, winding angle and thickness of tube, were chosen to evaluate the flexural capacity and behavior of rectangular CFCT columns. Selected two parameters were considered simultaneously in order to evaluate the flexural behavior of a rectangular CFCT columns more precisely. Flexural strength, deformation capacity, ductility and energy dissipation capacity of rectangular CFCT columns were evaluated by calculating the area of load-displacement envelope curves and load-displacement hysteresis curves obtained from experiment. Also, the ductile capacity obtained from experiment was compared to that of reinforced masonry wall for the comparison of existing structural element.

Key words : CFCT(concrete filled carbon tube), winding angles, thickness, flexural strength, deformation capacity, ductility, energy dissipation capacity

1. 서 론

건물이 고층화됨에 따라 구조부재가 지지하는 하중은 증가하고 또한 지진하중과 풍하중에 대한 영향도 커지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 신재료의 도입이 필요하게 되었고 합성섬유를 이용한 합성재료의 사용이 하나의 해결책으로 제안되었다. 합성섬유의 종류로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등이 있다. 그 중에서도 탄소섬유는 가장 우수한 역학적 성능과 화학적, 환경친화적 특성을 가지고 있다.

탄소섬유는 고강도, 경량, 내부식성 등의 재료적 성질로 인하여 최근 건설업에 있어 그 사용이 증가하고 있다. 국내의 탄소섬유에 관한 연구사례를 보면 주로 탄소섬유 시트를 이용한 보수·보강의 성능평가로서 휨재인 보에 관한 사례 또는 공시체를 이용한 단순압축실험이 대부분을 차지하고 있으며 실제크기의 시험체에 대한 실험적 연구는 국내에서는 그 사례를 찾아 보기가 힘들다.

구조물의 효율적인 연성거동을 유도하기 위한 설계기준들은 주로 단위 부재의 실험결과를 통하여 검증 수립되고 있다. 따라서 구조물에 사용되는 새로운 재료인 탄소섬유를 이용한 구조물의 거동을 예측하기 위해서는 각 부재 단위의 정밀한 실험 및 분석이 요구된다.

반복 횡하중을 받는 철근 콘크리트 구조물에서 강도와 연성 등의 저하는 구조물이 지니고 있는 연성도 및 에너지 소산 능력과 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 연구의 목적은 일정 축하중과 반복 횡하중을 동시에 받는 콘크리트 충전 각형 탄소섬유 튜브 기둥부재의 실험을 통하여, 탄소섬유 튜브에 의한 횡구속과 횡하중으로 나타나는 기둥의 거동특성을 평가하는 것이다.

기둥의 거동특성을 평가하기 위하여 각 탄소섬유 튜브 기둥의 휨강도와 변형능력을 평가하고 각 시험체의 파괴모드를 분석하였다. 또한 각 시험체의 연성능력과 에너지소산능력에 의한 부재의 감쇠비와 강성저하 등의 거동특성을 기존의 철근 콘크리트 부재와 비교함은 물론 각 시험체의 변수에 따른 영향도 함께 비교, 분석하여 평가하였다.

본 연구에서는 일정 축하중과 반복 횡하중을 동시에 받는 콘크리트 충전 탄소섬유 튜브 기둥부재의 실험을 통하여 매개변수에 따라 변하는 횡하중에 대한 저항성능과 변형량을

* 정희원, 경희대학교 건축공학과 부교수(책임저자: kimhc@khu.ac.kr)

** 성희원, 경희대학교 토목건축공학부 조교수

*** 경희대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2004년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2004. 2. 3 / 심사종료일 : 2004. 7. 6)

분석하고, 탄소섬유 기둥의 연성능력 및 각 사이클의 이력곡선을 통하여 에너지소산능력과 감쇠비 및 강성저하를 검토하였다. 또한 시험체의 파괴형상에 대한 비교 분석을 통하여 기둥의 거동특성을 평가하였다.

시험체의 크기는 가력기의 최대용량을 고려하여 실제 기둥의 크기에 최대한 가깝게 결정하였으며, 섬유 방향을 조합하여 콘크리트의 황구속효과로 인한 강도증가 및 휨성능에 대한 연구를 동시에 수행하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 시험체 제작

본 실험에서는 가로와 세로 250×250(mm), 높이 2700 mm)의 각형 시험체 6개를 제작하였다. 시험체는 필라멘트의 와인딩 각도와 튜브의 두께를 다르게 하여 제작한 각형 탄소섬유 튜브에 콘크리트를 채운 콘크리트 충전 탄소튜브 (Concrete Filled Carbon Tube, 이하 CFCT)를 그 대상으로 하였다. CFCT의 성능을 비교하기 위하여 같은 크기를 가지며 최대철근비를 배근한 각형 철근콘크리트 시험체를 제작하였다. 시험체를 고정시키고 횡하중을 재하하기 위하여 시험체의 상·하부에 콘크리트 stub를 제작하였으며, 이때 사용된 콘크리트의 강도는 26.5MPa이다. 탄소섬유 튜브의 재료적 특성은 표 1에, 각 시험체의 상세는 표 2에 나타내었다.

시험체명에 나타난 30-2T란 30도의 각도로 2mm 두께를 가진 시험체를 의미한다. 그러나 제작 과정에서 예정된 정확한 각도와 두께로 제작되지 않아 시험체의 실측을 통하여 표 2에 나타난 바와 같이 시험체를 다시 분류하였다.

표 1 탄소섬유 물성표

구분	SI unit
인장강도	3844 MPa
인장계수	230456 MPa
Filament의 지름	7.0 μm
극한 신장률	1.7 %
밀도	1.76 g / cm ³

표 2 시험체 종류

단면 형상	시험체명 (LR)	콘크리트 강도 (kg/cm ²)	Carbon Tube 실측두께 (mm)			시험체 실측 각도	시험체 실측두께
			90°	30°	45°		
각 형	30-2T	270	1	1.8		61.5°	2.8mm
	30-4T	270	1	3.6		49.5°	4.6mm
	30-6T	270	1	5.7		53.5°	6.7mm
	45-2T	270	1		1.9	54.5°	2.9mm
	45-4T	270	1		3.6	61°	4.6mm
	45-6T	270	1		5.5	67.5°	6.5mm
	CON	270				N/A	

본 연구의 목적은 철근을 배근하지 않은 CFCT 시험체의 성능평가이나, 하단부에서 기초와 무근 CFCT와의 연결을 위하여 단부에 평형철근비 만큼의 철근을 배근하였다. 이는 탄소튜브가 힘이 아닌 전단에 의하여 파괴되는 현상을 방지하기 위함이다. 기둥의 배근은 기초 상단에서부터 600mm, 기둥상부는 스테브 하단에서부터 400mm 아래까지 철근을 배근하였다.

탄소섬유의 와인딩 각도와 튜브의 두께는 제작상의 정밀도 문제로 인하여 시험체의 실측값을 측정하여 적용하였다. 탄소섬유의 와인딩 각도는 수직이 0° 수평이 90°로 정하였다. 반복적인 횡하중을 받는 구조물이 효과적으로 저항하기 위해서는 충분한 강도와 연성확보가 요구된다. 특히 기둥부재는 축하중과 횡하중을 동시에 받기 때문에 모멘트와 전단에 대해서도 저항하여야 하므로 횡하중과 축하중을 동시에 재하하였다.

2.2 실험장비 세팅 및 실험방법

횡하중 재하는 980 KN 용량의 actuator를 반력벽에 고정시켜 가력하였고, 축하중은 490KN 용량의 actuator 2개를 이용하였다. 실험장비와 시험체의 설치는 그림 1과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 시험체의 단부조건은 하부 고정단, 상부 자유단으로 하였다. 횡력 하중제어 방식은 변위제어를 통한 하중의 재하로 축력(588KN)을 일정하게 가한 상태에서 반복 횡가력을 실시하였다.

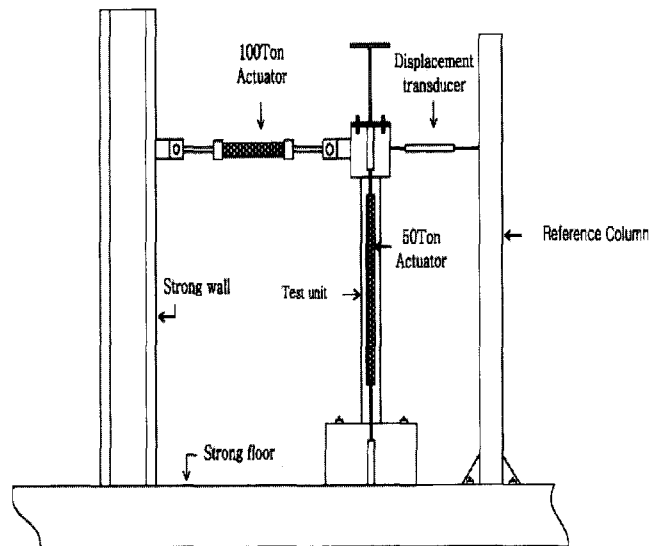


그림 1 실험장비 및 시험체 설치

그림 2는 부착된 strain gage의 설치 위치를 나타내고 있다. 시험체의 가력방향으로는 2축 게이지를, 전단변형이 발생할 수 있는 측면은 3축 게이지를 사용하였으며 그림 3은 시험체의 가력패턴을 보여주고 있는데, 그림에서 나타난 바와 같이 push over 실험을 위하여 시험체의 상부에 인장력과 압축력을 교대로 작용시킴으로서 기둥의 하부에 인장력과 압축력에 의한 휨이 교대로 발생하도록 하였다.

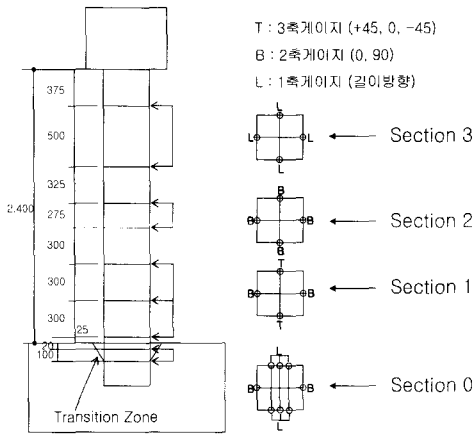


그림 2 게이지 부착위치

3. 실험결과

횡하중과 축하중을 동시에 받는 시험체를 통하여 와인딩 각도와 두께에 따른 영향을 분석하였다. 표 3은 시험체별 최대내력 및 최대변형량을 나타낸 것이며 시험체명은 제작된 탄소튜브의 실측값을 사용하였다.

보다 1.4배 정도 큰 변형량을 나타내었다. 반면에 LR49.5-4.6T 시험체는 최대내력이 32.4kN으로 나타났으나 횡방향 최대변형은 210.3mm로 시험체 중 가장 큰 변형량을 나타내었다.

표 3 시험체별 최대내력 및 최대변형량

시험체명 각형(LR)	최대내력 (kN)		횡방향 최대변형 (mm)		횡방향 최대변형 / 시험체 높이		탄소섬유 시험체변형량 / LR-CON변형량	
	PUSH	PULL	PUSH	PULL	PUSH	PULL	PUSH	PULL
61.5-2.8	22.41	23.03	124.39	128.04	1/19.3	1/18.7	0.6	0.85
49.5-4.6	27.05	32.44	183.11	210.34	1/13.1	1/11.4	0.97	1.4
53.5-6.7	38.32	38.91	186.26	208.85	1/12.9	1/11.5	0.99	1.4
54.5-2.9	25.87	26.36	136.73	134.04	1/17.6	1/17.9	0.73	0.89
61-4.6	26.26	24.21	182.51	195.85	1/13.2	1/12.3	0.97	1.31
67.5-6.5	35.84	35.18	167.47	174.48	1/14.3	1/13.8	0.89	1.2

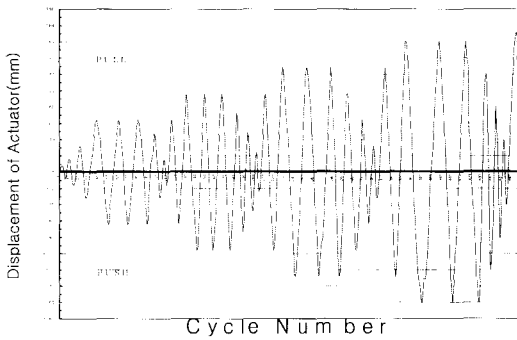


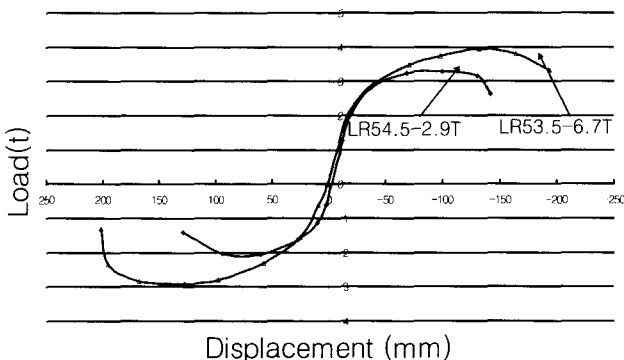
그림 3 가력패턴

표 3에서 보는 바와 같이 LR53.5-6.7T 시험체는 최대내력이 38.91kN으로 탄소섬유 시험체중 가장 큰 내력값을 보였으며 횡방향 최대변형은 208.85mm로 철근콘크리트 기둥

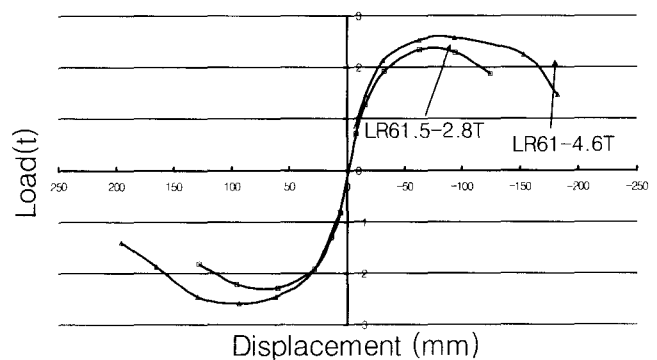
3.1 시험체의 두께에 따른 포락선의 비교

탄소섬유 튜브의 두께가 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 탄소섬유 튜브 두께의 차이를 약 2mm 정도로 두고 일정한 축하중과 횡하중을 동시에 가력하는 실험을 수행하였다. 탄소섬유 튜브 시험체의 두께가 두꺼울수록 최대 내력값이 증가한다는 것을 표 4와 그림 4(a) 및 그림 4(b)를 통하여 알 수 있다. 그림 4(a), 4(b)는 유사한 와인딩 각도를 가진 시험체의 탄소섬유 두께에 따른 차이를 비교한 포락선을 나타내고 있다.

탄소섬유 튜브의 두께가 2.9mm에서 6.7mm로 증가함에 따라 최대내력은 약 47%가 증가하였으며, 2.8mm에서 4.6mm로 증가할 때 최대내력은 약 12% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 표 4에서 보는 바와 같이 탄소의 두께가 2.9mm에서 6.7mm로 증가함에 따라 횡방향 최대변형량은 136.7mm에서 208.9mm로 약 35%의 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) 2.9mm와 6.7mm 두께에 대한 비교



(b) 2.8mm와 4.6mm 두께에 대한 비교

그림 4 탄소섬유 두께에 대한 포락선 비교

표 4 탄소섬유두께에 따른 시험체의 최대내력 및 최대변형량 비교

시험체실측값	최대내력 (kN)	증가량 (%)	최대변형 (mm)	증가량 (%)
54.5°	2.9mm	26.36	-	136.73
53.5°	6.7mm	38.91	47	208.85
61.5°	2.8mm	23.03	-	128.04
61°	4.6mm	26.26	12	195.85

3.2 시험체의 각도에 따른 포락선의 비교

표 5와 그림 5(a), 5(b), 5(c)는 탄소섬유 튜브의 두께가 유사할 때 섬유와 와인딩 각도가 횡하중 저항 성능에 미치는 영향을 비교한 것이다. 탄소섬유 와인딩 각도는 시험체의 실측값으로서 각 시험체간의 각도 차이는 최소 7°에서 최대 14°의 차이가 있으며 최대내력의 증가량은 최소 8.6%에서 최대 19%의 증가량을 보였다. 탄소섬유의 와인딩 각도는 탄소섬유 튜브의 두께가 유사한 시험체인 경우 와인딩 각도가 수직방향에 가까운 시험체일수록 최대내력과 최대변형이 더 큰 것을 알 수 있다.

표 5 탄소섬유각도에 따른 시험체의 최대내력 및 최대변형량 비교

시험체실측값	최대내력 (kN)	증가량 (%)	최대변형 (mm)	증가량 (%)
2.9mm 54.5°	26.36	14	136.73	6.7
2.8mm 61.5°	23.03	-	128.04	-
4.6mm 49.5°	32.44	19	210.34	6.9
4.6mm 61°	26.26	-	195.85	-
6.7mm 53.5°	38.91	8.6	208.85	5.9
6.5mm 67.5°	35.84	-	196.6	-

그림 6은 시험체의 이력거동 및 비선형 거동특성을 13개의 계수들로 나타낸 것이다.

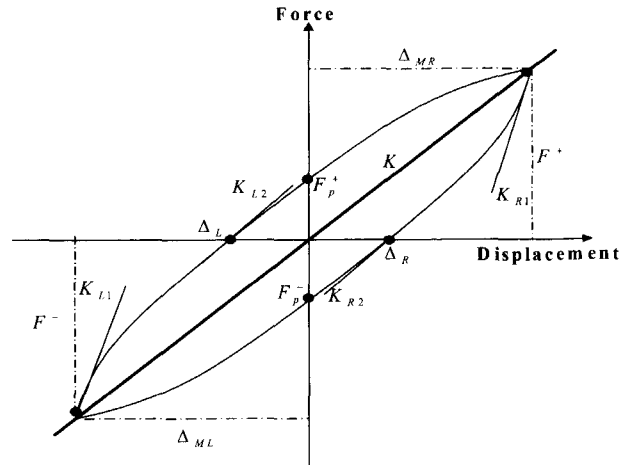


그림 6 Hysteresis loop parameter

- F_p^+ = 하중축의 양의 절점 F_p^- = 하중축의 음의 절점
- Δ_R = 변형축의 양의 절점 Δ_L = 변형축의 음의 절점
- F^+ = 최대하중(Positive) F^- = 최소하중(Negative)
- Δ_{MR} = 최대횡 변형비 Δ_{ML} = 최소횡 변형비
- $K_{R1} = F^+$ 제하방향 기울기 $K_{R2} = \Delta_R$ 제하방향 기울기
- $K_{L1} = F^-$ 제하방향 기울기 $K_{L2} = \Delta_L$ 제하방향 기울기
- K = 유효강성 ($F^- - F^+$ 간의 기울기)

반복 횡하중을 받는 경우, 일정한 변형단계의 하중을 2회~3회 반복해서 재하하면 시험체의 강성저하가 일정수준에 머무르게 된다. 최초의 재하단계를 초기(virgin cycle), 강성저하가 일정수준에 머무르는 단계를 안정기(stabilized cycle)로 정의한다. 각 시험체의 사이클별 계수는 초기와 안정기 사이클에 대하여 고려하였다.

4. 각형 시험체의 횡하중에 대한 해석연구

4.1 하중-변위 이력곡선의 비선형 특성

반복 횡하중을 받는 시험체의 하중-변위 이력곡선은 시험체의 비선형 거동특성을 나타내는 계수들을 가지고 있다. 그

4.2 평균강성 저하에 따른 감쇠비 특성

지진과 같은 수평하중을 받는 구조물의 파괴양상을 이해하기 위해서는 비선형성을 갖는 구조물의 운동방정식을 풀어야 한다. 그러나 실제구조물에서의 운동방정식을 계산하는 과정

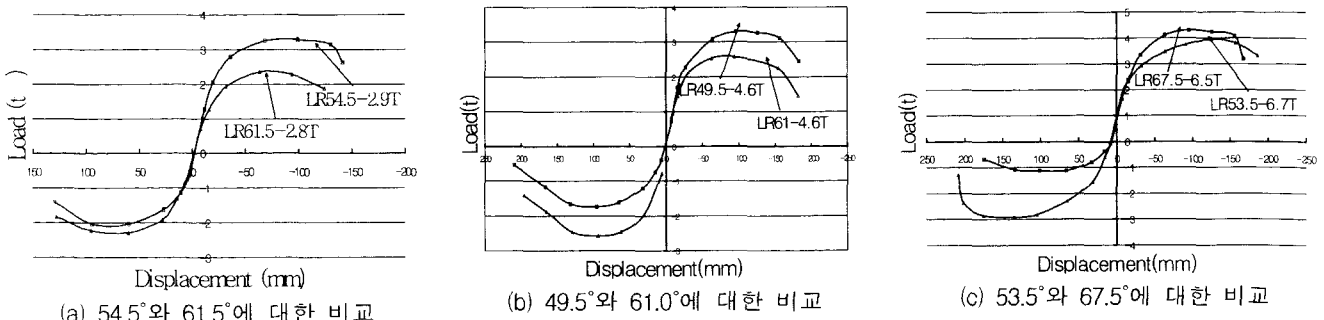


그림 5 탄소섬유 각도에 대한 포락선 비교

은 매우 복잡한 계산단계를 거쳐야 한다. 따라서 횡하중에 의하여 구조물에 발생하는 손상에 따른 강성저하와 감쇠비를 간단하게 평가하기 위하여 시험체의 실제이력곡선에 의한 하중-변형 관계곡선을 이용하였다.

실제 구조물이 강성과 감쇠를 가질 때 반복 횡하중에 의하여 평균강성의 저하가 발생하며, 외력에 의한 에너지를 소비하면서 감쇠비가 증가하게 되는 복합작용이 발생하게 된다. 반복 횡하중을 받는 시험체는 외력에 의하여 구조물의 강성이 작아지게 된다. 따라서 횡하중에 의하여 저하되는 시험체의 강성을 평가하기 위하여 식 (1)과 같이 각 사이클 당 평균 최대변위를 평균최대하중으로 나눈 값으로 정부방향에 대한 강성을 계산하고 그 평균값을 이용하여 시험체의 평균강성을 계산하였다.

$$K_i = \frac{\Delta_i}{P_{i,max}} \quad (1)$$

단자유도계 구조물에서 외력으로 작용하는 반복 횡하중이 $p(t) = p_0 \sin \omega t$ 로 표현될 때, 점성감쇠에 의하여 소비되는 에너지의 양은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_D = \int f_D \cdot dy = \int_0^{2\pi} (c \frac{dy}{dt}) \frac{dy}{dt} dt = \int_0^{2\pi} c (\frac{dy}{dt})^2 dt \quad (2)$$

감쇠에 의한 에너지 흡수량을 평가하기 위해서는 식 (1)을 이용하여 점성감쇠에 의하여 소비된 에너지를 평가해야 한다. 그러나 실제 구조물에서의 감쇠항을 정확하게 계산하기 위해서는 복잡한 계산단계를 거쳐야 하므로 실제 하중-변형 이력곡선이 나타내는 면적으로 감쇠에 의한 에너지를 산출하였다. 또한 구조물의 강성저하로 인한 소성변형에너지는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$E_S = \int f_S \cdot dy = \int_0^{2\pi} (k \cdot y) \frac{dy}{dt} dt \quad (3)$$

식 (3)은 다음과 같은 변형에너지 식으로 근사화시킬 수 있다.

$$E_{So} = \frac{1}{2} k \cdot y_o^2 \quad (4)$$

따라서 탄소섬유 튜브 기둥의 감쇠비는 횡하중을 받는 구조물에서의 감쇠에 의한 에너지 소산과 강성저하에 기인하여 발생하는 에너지 소산의 비로서 식 (5)를 이용하여 구할 수 있으며 이 관계는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_D}{E_{So}} \quad (5)$$

표 6과 표 7은 시험체의 각 사이클의 두께와 각도별로 감쇠비를 나타낸 것이며, 그림 8은 각 시험체의 평균강성이 저하될 때의 감쇠비를 나타낸 그림이다. 시험체의 수평강성이

반복될수록 탄소섬유 기둥은 손상을 입으면서 기둥의 강성이 저하하게 되고 동시에 기둥의 감쇠비는 증가하게 되는데 이것은 횡하중에 의한 외부 에너지가 기둥이 손상되면서 내부의 소산에너지로 전환되기 때문이다. 따라서 탄소섬유 튜브의 두께가 얇을수록 콘크리트를 충전한 탄소섬유 기둥은 상대적으로 작은 강성을 보유하게 되므로 더 많은 변형을 허용하면서 감쇠비는 증가하게 된다.

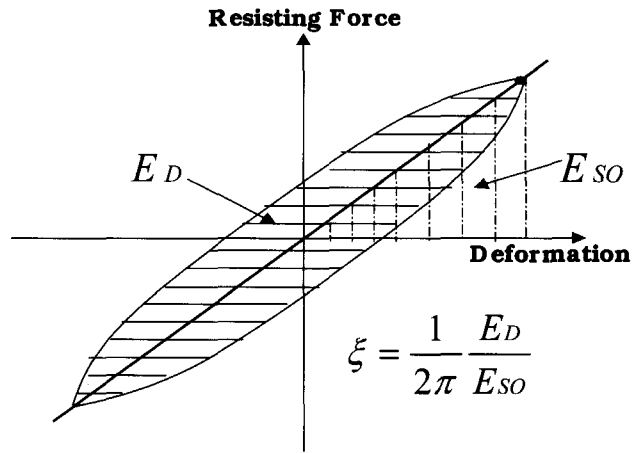


그림 7 감쇠와 강성저하에 의한 감쇠비

표 6 시험체의 각 사이클에 대한 두께별 감쇠비 비교

Cycle	LR	LR	증가율 (%)	LR	LR	증가율 (%)
	61.5-2.8t	61-4.6t		54.5-2.9t	53.5-6.7t	
1	0.301	0.288	4.5	0.392	0.238	64.7
2	0.252	0.201	25.4	0.23	0.217	6
3	0.318	0.307	3.6	0.29	0.229	26.6
4	0.278	0.235	18.3	0.235	0.196	19.9
5	0.479	0.29	65.2	0.355	0.211	68.2
6	0.418	0.283	47.7	0.394	0.209	88.5
7		0.37	-		0.253	-
8		0.439	-		0.251	-

표 7 시험체의 각 사이클에 대한 각도별 감쇠비 비교

Cycle	LR	LR	증가율 (%)	LR	LR	증가율 (%)	LR	LR	증가율 (%)
	61.5-2.8t	54.5-2.9t		49.5-4.6t	61-4.6t		67.5-6.5t	53.5-6.7t	
1	0.301	0.392	-23.21	0.328	0.288	13.9	0.299	0.238	25.6
2	0.252	0.23	9.6	0.231	0.201	14.9	0.249	0.217	14.7
3	0.318	0.29	9.7	0.292	0.307	-4.9	0.283	0.229	23.6
4	0.278	0.235	18.3	0.252	0.235	7.2	0.255	0.196	30.1
5	0.479	0.355	34.9	0.271	0.29	-6.6	0.313	0.211	48.3
6	0.418	0.394	6.1	0.31	0.283	9.5	0.284	0.209	35.9
7				0.394	0.37	6.5	0.371	0.253	46.6
8				0.47	0.439	7.1	0.438	0.251	74.5

탄소섬유 튜브의 두께에 따른 감쇠비를 비교하면 표 6에 나타난 바와 같이 튜브의 두께가 2.8mm인 시험체의 감쇠비가 최대 65% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 2.9mm의 두께를 가진 튜브와 6.7mm의 튜브를 비교하면 2.9mm인 시험체의 감쇠비가 최대 88.5% 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 튜브의 두께가 얇을수록 강성저하에 따른 감쇠비는 큰 증가율을 나타내었다.

반면에 표 7에 나타난 바와 같이 와인딩 각도의 차이에 따른 감쇠비의 영향은 61.5°와 54.5°인 시험체의 비교에서는 54.5°의 시험체가 최대 35% 정도 증가하고, 49.5°와 61°인 시험체의 비교에서는 49.5°를 가진 시험체가 최대 15% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 67.5°와 53.5°의 시험체에 대한 비교에서는 53.5°의 시험체가 최대 75% 정도 증가한 경우도 있으나 전체적으로 각도에 따른 감쇠비의 영향은 두께에 따른 영향에 비하여 작은 것으로 나타났다.

4.2.1 강성에 의한 감쇠비

시험체에 수평가력이 반복될수록 탄소섬유 기둥은 손상을 입으면서 기둥의 강성이 저하하게 되고 동시에 기둥의 감쇠비는 증가하게 되는데 이것은 횡하중에 의한 외부 에너지가 기둥이 손상되면서 내부의 소산에너지로 전환되기 때문이다. 그림 8은 시험체를 강성에 따른 감쇠비로 나타낸 것으로서 튜브의 두께가 얇을수록 강성저하에 따른 감쇠비가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2.2 RC 시험체와 탄소섬유 시험체의 강성에 의한 감쇠비

재료가 다른 탄소섬유 시험체의 내력성능을 평가하기 위하여 강성에 따른 감쇠비를 RC 시험체와 비교하였다. 이와 같은 비교를 통하여 시험체의 손상도를 알 수 있게 된다. 그림 8에서와 같이 탄소섬유 시험체와 RC 시험체를 강성에 따른 감쇠비를 보면 RC 시험체가 탄소섬유 시험체에 비하여 높은 감쇠비를 나타내는 것을 알 수 있다. 탄소섬유 시험체의 강성저하에 따른 감쇠비는 RC 시험체와 비슷한 선의 기울기를 통하여 알 수 있다.

4.3 에너지소산면적에 따른 감쇠비 특성

에너지소산능력은 구조부재가 내력을 유지하면서 흡수된 에너지로서, 하중-변위 이력곡선으로 둘러싸인 면적의 합으로 계산된다. 시험체의 에너지소산능력은 외력인 횡하중에 의하여 부재가 변형을 하면서 외력에 저항하는 능력을 나타낸다. 따라서 시험체의 각 사이클별 최대내력과 최대변형을 나타내는 시험체의 하중-변위 이력곡선을 이용하여 각각의 에너지소산능력과 반복 횡하중에 의하여 시험체에 축적되는 누적에너지소산능력을 계산하였다.

표 8과 표 9는 시험체의 각 사이클별 에너지소산면적을 두께와 각도별로 나타낸 것이며 그림 9는 사이클별 에너지소산면적에 따른 각 시험체의 감쇠비를 나타낸 그림이다. 표 8에 나

타난 바와 같이 탄소섬유 튜브의 두께가 2.8mm인 시험체와 4.6mm인 시험체를 비교하면 4.6mm인 시험체의 에너지소산면적이 최대 20% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 튜브의 두께가 2.9mm인 시험체와 6.7mm인 시험체를 비교하면 6.7mm인 시험체의 에너지소산면적이 최대 21% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 탄소섬유 튜브의 두께가 두꺼운 시험체의 경우에는 반복 횡하중에 의한 감쇠비의 증가량이 작게 나타나면서도 많은 에너지를 흡수하여, 구조물에 손상을 작게 주면서 큰 에너지소산능력을 보유하고 있다는 것을 알 수 있다.

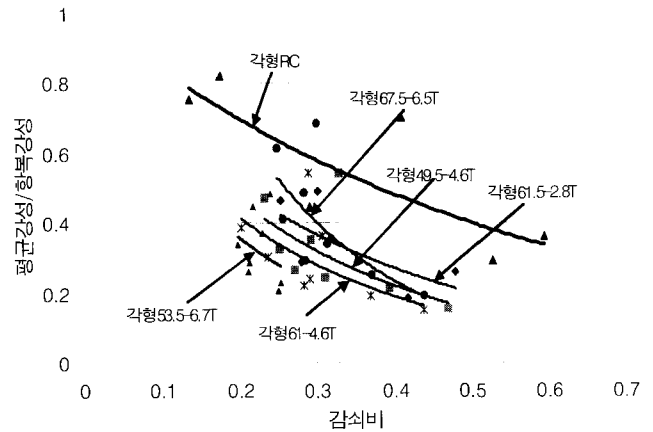


그림 8 평균강성에 따른 감쇠비

반면에 표 9에 나타난 바와 같이 와인딩 각도의 차이에 따른 에너지소산면적의 영향은 61.5°와 54.5°의 비교에서는 54.5°를 가진 시험체가 최대 2.1% 증가하였고, 49.5°와 61° 각도의 비교에서는 49.5°의 시험체가 최대 15% 정도 증가하였다. 67.5°와 53.5°를 가진 시험체의 비교에서는 53.5°의 시험체가 최대 17% 정도 증가하였다. 이와 같이 와인딩 각도에 따른 에너지소산능력의 차이는 비교 대상 시험체들의 각도 차이가 크지 않음으로 인하여 성능에 대한 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

표 8 각 시험체의 두께에 따른 에너지소산면적

Cycle	LR		증가율 (%)	LR		증가율 (%)
	61.5-2.8t	61-4.6t		54.5-2.9t	53.5-6.7t	
1	141.14	133.3	5.9	163.3	137.5	18.8
2	112.79	97.8	15.3	110.5	116.6	-5.3
3	209.18	203.5	2.8	230	192.7	19.4
4	181.07	169.1	7.1	177.6	164.4	8
5	324.97	271.3	19.8	343.6	277	24
6	276.58	247.5	11.7	301	249.7	20.5
7		387.4	-		399	-
8		358.2	-		351.9	-

표 9 각 시험체의 와인딩 각도에 따른 에너지소산면적

Cycle	LR 61.5	LR 54.5	증가율 (%)	LR 49.5	LR 61	증가율 (%)	LR 67.5	LR 53.5	증가율 (%)
	-2.8t	-2.9t		-4.6t	-4.6t		-6.5t	-6.7t	
1	141.1	163.3	-13.6	143.6	133.3	7.7	149.5	137.5	8.7
2	112.8	110.5	2.1	111.2	97.8	13.7	118.5	116.6	1.6
3	209.2	230	-9.1	218.7	203.5	7.5	224.4	192.7	16.5
4	181.1	177.6	2	190.7	169.1	12.8	187.1	164.4	13.8
5	324.9	343.6	-5.4	286.6	271.3	5.6	301	277	8.7
6	276.6	301	-8.1	285	247.5	15.1	272.5	249.7	9.1
7				429.4	387.4	10.8	443.3	399	11.1
8				397.2	358.2	10.9	411.7	351.9	17

재료가 다른 시험체의 내력성능을 평가하기 위하여 에너지소산면적에 따른 감쇠비를 탄소섬유 시험체와 RC 시험체에 대하여 비교하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이 RC 시험체는 가장 높은 감쇠비를 나타내었다. 그러나 동일한 에너지소산면적을 가질 때 탄소섬유 시험체의 감쇠비가 RC보다 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

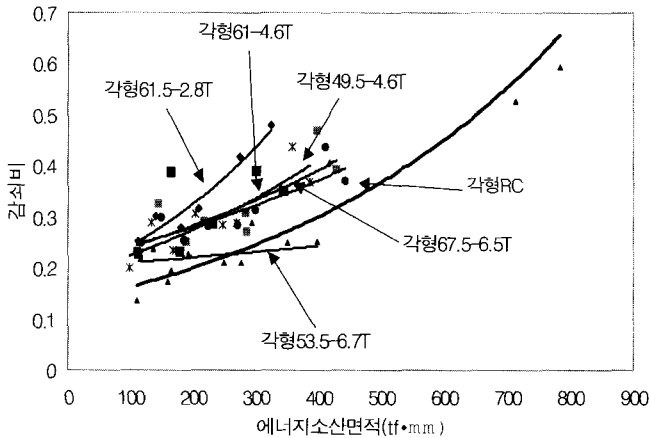


그림 9 에너지소산면적에 따른 감쇠비

4.4 에너지소산면적에 따른 변위연성

에너지소산능력, 누적에너지소산능력과 마찬가지로 시험체의 내력성능을 평가하기 위한 방법으로 연성 또한 중요한 지표로 사용된다. 연성이 큰 재료는 파괴 이전에 상당한 변형을 허용하여 많은 양의 내부 에너지를 흡수할 수 있다. 연성능력이 우수한 탄소섬유 튜브 기둥의 구조성능은 탄소섬유 튜브가 파괴되어 탄소섬유 튜브와 충전된 내부 콘크리트가 모두 구조적인 기능을 상실할 때까지 확보된다고 할 수 있다. 따라서 하중수행능력의 감소없이 비탄성 변형에 저항하는 연성효과를 이용하기 위한 연성계수 μ 는 변위연성(displacement ductility)으로서, 시험체의 이력곡선 응답 중 발생하는 최대 변위를 항복변위로 나눈 값으로서 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (6)$$

연성계수는 단절점계 구조물의 변형 형태를 비교적 정확히 표현할 수 있고 그 표시방법이 간단하므로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서 사용된 탄소섬유 튜브는 소성영역이 거의 존재하지 않는 완전 탄성재료에 가까운 재료이므로 항복점을 명확하게 찾기 힘들다. 따라서 기둥 부재의 항복시의 변형량과 내력을 구하기 위해서는 그림 10과 같이 시험체의 하중-변형 포락선을 bilinear로 가정하여 A와 B의 면적이 동일하게 되는 지점을 항복점으로 가정하여 이때의 변형량과 내력을 구하였다.

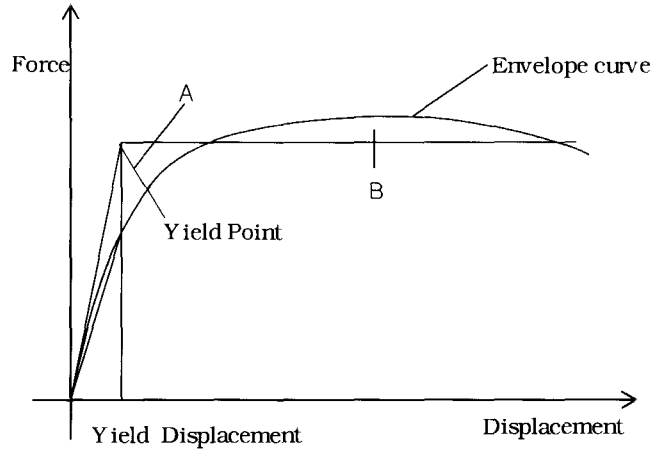


그림 10 가상항복점의 결정

표 10과 표 11은 시험체의 각 사이클별 변위연성을 두께와 각도별로 나타낸 것이다. 그림 11은 사이클별 에너지소산면적에 따른 각 시험체의 연성도(ductility)를 나타낸 그림이다. 표 10에 나타난 바와 같이 탄소섬유 튜브의 두께가 2.8mm인 시험체와 4.6mm인 시험체를 비교하면 4.6mm인 시험체의 변위연성이 최대 16% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 2.9mm의 시험체와 6.7mm의 시험체를 비교하면 6.7mm인 시험체의 변위연성이 최대 21% 정도 증가한다. 따라서 동일한 에너지소산능력을 가질 때 두께가 얇은 시험체가 작은 강성으로 인하여 변형에 의한 연성 또한 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 10 탄소섬유의 두께에 따른 Ductility

Cycle	LR 61.5-2.8t	LR 61-4.6t	증가율 (%)	LR 54.5-2.9t	LR 53.5-6.7t	증가율 (%)
	1	3.749		3.239	15.7	
2	3.679	3.639	1.1	3.097	2.692	15
3	5.178	5.016	3.2	4.232	3.792	8.9
4	5.747	5.462	5.2	4.689	3.887	20.6
5	6.235	7.159	12.9	5.054	5.188	-2.6
6	7.426	7.219	2.9	5.579	5.229	6.7
7		7.932	-		6.416	-
8		8.106	-		6.514	-

그러나 단순히 정량적인 변위연성값만을 비교하여 탄소섬유 튜브의 두께가 얇을수록 시험체의 연성능력이 우수하다고 평가할 수는 없다. 이는 탄소섬유 튜브의 두께가 두꺼울수록 시험체가 큰 강성값을 갖기 때문에 작은 변형을 허용하여, 단순히 최대변위와 항복변위만의 수치인 변위연성값 자체를 비교해서는 합리적인 방법이라 할 수 없다. 따라서 동일한 ductility를 가질 때, 즉 동일한 변위가 발생하였을 때는 두께가 두꺼운 시험체가 작은 손상을 일으키면서 연성값은 크게 나타난다.

반면에 표 11에 나타난 바와 같이 와인딩 각도의 차이에 따른 에너지소산면적의 영향은 61.5°와 54.5°의 비교에서는 54.5°인 시험체가 최대 55% 정도 증가하였고, 49.5°와 61°의 비교에서는 49.5°인 시험체가 최대 9% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 67.5°와 53.5°의 비교에서는 53.5°인 시험체가 최대 13% 정도 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 와인딩 각도에 따른 변위연성의 영향은 두께에 따른 영향보다 작은 것으로 나타났다.

표 11 탄소섬유의 각도에 따른 Ductility

Cycle	LR 61.5 -2.8t		증가율 (%)	LR 61 -4.6t		증가율 (%)	LR 67.5 -6.5t		증가율 (%)
	LR 54.5 -2.9t	LR 49.5 -4.6t		LR 53.5 -6.7t					
1	3.749	2.42	54.9	3.239	3.026	7.1	2.615	2.569	1.8
2	3.679	3.1	18.8	3.639	3.366	8.1	2.779	2.692	3.2
3	5.178	4.23	22.4	5.016	4.91	2.2	4.284	3.792	12.9
4	5.747	4.69	22.6	5.462	5.044	8.3	4.196	3.887	7.9
5	6.235	5.05	23.4	7.159	6.646	7.7	5.357	5.188	3.3
6	7.426	5.58	33.1	7.219	6.444	12	5.614	5.229	7.4
7				7.932	7.254	9.3	6.625	6.416	3.3
8				8.106	7.735	4.8	6.84	6.514	5

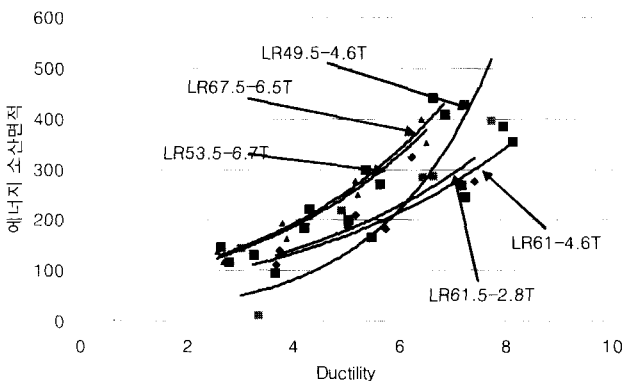


그림 11 에너지소산면적에 따른 Ductility

연성이 큰 재료는 파괴 이전에 상당한 변형을 허용하여 많은 양의 내부에너지를 흡수할 수 있다. 재료가 다른 탄소섬유 시험체와 RC 시험체를 비교하면 두 재료의 차이에 따른 연성능력을 분석할 수 있다. 그림 12는 탄소섬유 시험체와 RC 시험체를 에너지소산면적에 따른 변위연성으로 나타

낸 것으로, RC 시험체는 높은 에너지소산면적을 갖는다. 그러나 탄소섬유 시험체는 RC 시험체에 비하여 연성능력이 매우 우수하게 나타남을 알 수 있다.

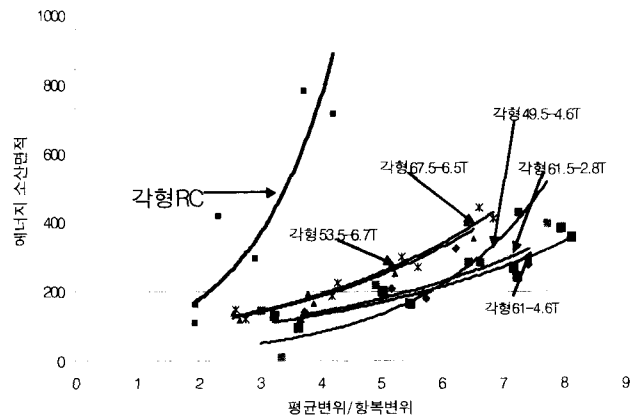


그림 12 에너지소산면적에 따른 변위연성 비교

4.5 변위연성 비교

각형 시험체와 기존의 구조물과의 강성저하에 따른 연성능력을 비교, 평가하기 위하여 탄소섬유 시험체에서 얻은 결과를 철근콘크리트 조적벽(Reinforced Concrete Masonry Wall)과 비교하였다. 단순히 기하학적 강성값이 아닌 하중과 변위의 관계로 나타내고 수치적인 강성값을 이용하여 비교, 평가하였다.

그림 13은 시험체의 사이클별 항복강성으로 무차원화(Normalized)한 평균강성저하에 따른 탄소섬유 시험체와 철근콘크리트 조적벽의 ductility를 나타낸 그림이다. 탄소섬유 시험체와 철근콘크리트 조적벽의 비교를 위하여 각각의 사이클당 계산된 강성은 각 시험체의 항복강성으로 나누어 무차원화한 값으로 세로축에 표시하고 가로축은 항복변위에 대한 변위비인 ductility로 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 탄소섬유 시험체가 철근콘크리트 조적벽에 비하여 평균강성 저하율이 작게 나타났음을 알 수 있다. 일반적으로 벽체의 강성은 기둥에 비하여 큰 것이 사실이다. 그러나 탄소섬유 시험체가 동일한 연성값 즉 동일한 변형을 허용할 때 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 강성을 보유하며 작은 강성저하율을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 탄소섬유 시험체는 동일한 강성에서 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 연성능력을 갖는 것을 알 수 있다.

탄소섬유 튜브 시험체와 RC 시험체의 강성저하에 따른 연성능력을 비교 평가하였다. 단순히 기하학적 강성값이 아닌 하중과 변위의 관계로 나타내고 수치적인 강성값을 이용하여 비교, 평가하였다. 그림 14는 시험체의 사이클별 강성에 따른 탄소섬유 시험체와 RC 시험체의 ductility를 나타낸 그림이다.

그림에서 나타난 바와 같이 탄소섬유 시험체가 원형 RC 시험체에 비하여 강성저하율이 작은 것을 알 수 있다. 그러나 각형 RC 시험체의 강성은 탄소섬유와 비슷하게 나타났다.

변위연성에 대한 실험결과에서는 RC 시험체에 비하여 탄소 섬유 튜브 시험체의 변위연성이 월등히 높게 나타났으며, 기둥의 강성이 저하할수록 탄소섬유 시험체의 변위연성이 RC 시험체보다 높은 것을 알 수 있다.

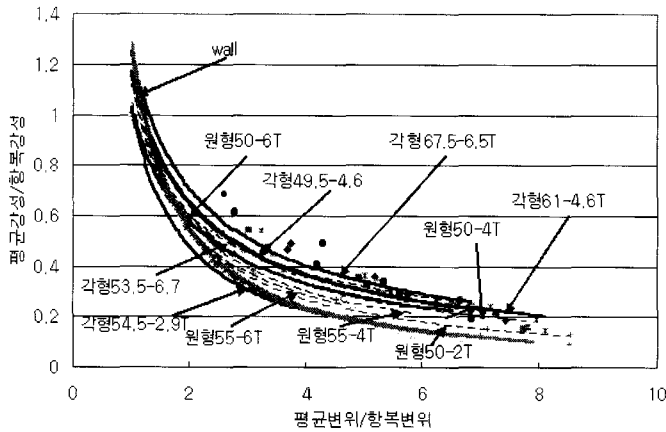


그림 13 변위연성에 대한 비교

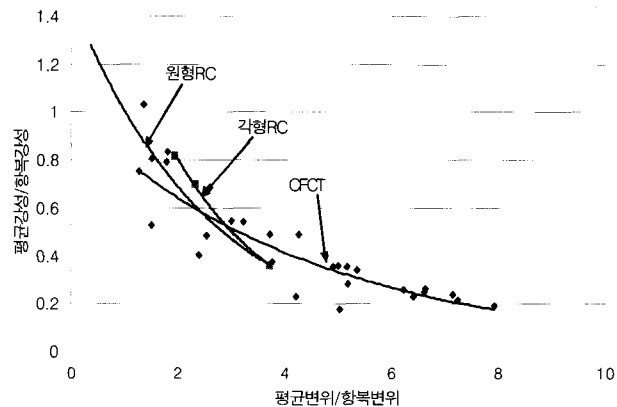


그림 14 재료가 다른 시험체의 변위연성에 대한 비교

5. 결 론

콘크리트를 충전한 각형 탄소섬유 기둥에 대한 실험을 수행하였다. 시험체의 연성능력과 에너지소산능력에 의한 부재의 감쇠비와 강성저하 등의 거동특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 콘크리트를 충전한 각형 탄소섬유 기둥은 탄소섬유 튜브의 두께가 증가할수록 최대내력과 최대변형은 증가하며 와인딩 각도가 수직방향에 가까울수록 최대내력과 최대변형은 증가한다.
- (2) 시험체의 내력성능을 평가하기 위한 방법으로 에너지소산능력, 누적에너지소산능력, 그리고 변위연성을 지표로 사용한 결과 탄소섬유튜브의 두께가 두꺼울수록 작은변형을 허용하여 감쇠비는 감소하였고, 높은강성을 보유했다. 또한 변위연성은 크게 나타났으며, 큰 에너지소산능력이 나타났다. 그러나 와인딩 각도에 대한 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

(3) 하중과 변위와의 관계로 나타난 수치적인 에너지소산면적과 감쇠비와 연성능력을 평가하였으며 탄소섬유 시험체와 철근콘크리트 조적벽의 변위연성을 비교하였다. 동일한 변형과 강성에서 탄소섬유 시험체는 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 강성을 보유했으며, 큰 연성능력을 나타내었다.

(4) 탄소섬유 시험체와 RC 시험체를 비교한 결과 탄소섬유 시험체가 원형 RC 시험체에 비하여 강성 저하율이 작은 것으로 나타났다. 반면에 각형 RC 시험체의 강성은 탄소섬유 시험체와 비슷하게 나타났다. 변위연성에 대한 실험결과에서는 RC 시험체에 비하여 탄소섬유 튜브 시험체의 변위연성이 월등히 높게 나타났으며, 기둥의 강성이 저하할수록 탄소섬유 시험체의 변위연성이 RC 시험체보다 높게 나타났다.

콘크리트를 충전한 탄소섬유 기둥은 철근콘크리트 기둥보다 모든 면에서 우수한 성능을 가지고 있다. 따라서 기존 구조물에 대한 내진보강은 물론 구조물의 신축에도 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 건설교통부 국책과제인 "Carbon shell system을 이용한 무근콘크리트 시스템의 개발" (2001-자유A-05) 연구과제의 일부로서 연구비의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, August, 1988, pp. 1804-1825.
2. 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, 1999, pp. 500-509.
3. A. Mirmiran and M. Shahawy, "A new concrete-filled hollow FRP composite column," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 27, 1996, pp. 263-268.
4. M. Shahawy, A. Mirmiran, and T. Beitelman, "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, Issues 6-7, October, 2000, pp. 471-480.
5. W. Hong, H. Kim, and S. Yoon, "Experiment of compressive strength enhancement of circular concrete column confined by carbon tubes," *KCI Concrete Journal*, Vol.14, No. 4, 2002.

6. H. Kim, W. Hong, & S. Yoon, "Experimental Investigation of Concrete-Filled Carbon Tubes (CFCT) Subjected to Lateral Loads under Constant Axial Load," *Proceedings of The 5th Taiwan-Korea-Japan Joint Seminar On Earthquake Engineering for Building Structures*, Uji, Japan, 2003. 10.
7. W. Hong, "Development of analytical models for reinforced concrete masonry flexural walls," University of California for the degree Doctor of Philosophy in Civil Engineering, 1989.
8. S. A. Sheikh and S. S. Khoury, "Confined concrete columns with stubs," *ACI Structural Journal*, Vol 90, No. 3, 1993, pp. 414-431.
9. Antonio Nanni and Michael S. Norris, "FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression," *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 5, 1995, pp. 273-281.
10. F. Seible, R. Burgueno, M. G. Abdallah, and R. Nuismer, "Advanced composite carbon shell systems for bridge columns under seismic load," National Seismic Conference on Bridge and Highways, San Diego, California, 1995. 12.
11. A. Davol, R. Burgueno, and F. Seible, "Flexural behavior of circular concrete filled FRP shells," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, 2001. 11, pp. 810-817.
12. Y. H. Chai, M. J. N. Priestley, and F. Seible, "Analytical model for steel-jacketed RC circular bridge columns," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 8, 1994. 8, pp. 2358-2376.
13. 홍원기, 김희철, 윤석한, 박순섭, "탄소섬유튜브로 횡구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축강도 성능에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제7권 1호, 2003.
14. 김희철, "Carbon Shell System을 이용한 무근콘크리트 시스템(보, 기둥 및 보-기둥 접합부)의 개발", 2001년 건설교통부 산학연 공동연구 개발사업 1차년도 보고서, 2002년 8월.
15. 천성철, 박형철, 안재현, 박칠림, "일정 축력하의 탄소섬유 시트 보강 기둥의 횡가력 시 거동특성에 관한 실험연구", 콘크리트학회논문집, 제11권 2호, 1999. 4, pp. 147-156.
16. W. Hong and H. Kim, "Behavior of Concrete Columns Confined by Carbon Composite Tube," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, 2004. 8, pp. 178-188.
17. W. Hong, H. Kim and S. Yoon, "Lateral Behavior of full scale Concrete-filled Carbon Composite Columns," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, April, 2004. 8, pp. 189-203.