

축하중과 반복 횡하중을 받는 콘크리트 충전 원형 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동특성

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

홍 원 기* 김 희 철** 정 진 훈***
Hong, Won-Kee Kim, Hee-Cheul Chung, Jin-Hun

국문요약

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

주요어 : 콘크리트 충전 탄소섬유 튜브, 와인딩 각도, 튜브의 두께, 휨 강도, 변형능력, 연성도, 에너지 소산능력

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the flexural behavior of circular concrete filled carbon tube(CFCT) columns subjected to constant axial load with the cyclic lateral load. Six numbers of composite columns were tested. Two parameters, winding angle and thickness of tube, were chosen to evaluate the flexural capacity and behavior of CFCT columns. Selected two parameters were considered simultaneously in order to evaluate the flexural behavior of CFCT columns more precisely. Flexural strength, deformation capacity, ductility and energy dissipation capacity of CFCT columns were evaluated by calculating the area of load-displacement envelop curves and load-displacement hysteresis curves obtained from experiment. Also, the ductile capacity obtained from experiment were 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

기술의 발달과 함께 새로운 재료에 대한 연구개발은 끊임없이 계속되고 있다. 여러 합성재료 중 탄소섬유는 인장강도가 강재의 10배에 달하는 등 우수한 재료적 성질을 가지고 있다. 탄소섬유에 의한 콘크리트의 구축은 강도, 변형률 및 연성능력을 크게 증가시킴으로서 전체적으로 횡방향 저항능력과 에너지소산능력의 향상을 가져오게 한다. 따라서 탄소섬유 튜브의 구축으로 인한 기둥부재의 반복 횡하중에 대한 변형능력, 연성능력, 에너지소산능력 등의 평가를 통하여 전체적인 탄소섬유 튜브 기둥의 성능을 정확하게 평가할 수 있어야 한다.

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 소산능력과 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 연구의 목적은 일정 축하중과 반복 횡하중을 동시에 받는 콘크리트 충전 원형 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 철근콘크리트 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 매개 변수에 따라 변하는 횡하중에 대한 저항성능과 변형량을 분석하고, 탄소섬유 기둥의 연성능력 및 각 사이클의 이력곡선을 통하여 에너지소산능력과 감쇠비 및 강성저하를 검토하였다. 또한 시험체의 파괴형상에 대한 비교 분석을 통하여 기둥의 거동특성을 평가하였다.

* 정희원, 경희대학교 토목건축공학부 조교수(대표저자: hongwk@khu.ac.kr)

** 정희원, 경희대학교 건축공학과 부교수

*** 경희대학교 대학원 석사

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2004. 2. 3 / 심사종료일 : 2004. 6. 7)

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. 콘크리트 충전 원형 탄소섬유 튜브 기둥의 횡하중 실험

2.1 실험계획 및 시험체의 제작

본 연구에서 고려된 변수는 탄소섬유의 두께와 와인딩 각도이며, 총 6개의 시험체를 제작하였다. 90° 방향으로 1mm 두께의 섬유를 와인딩한 후, 90° ±50°, 90° ±55° 방향으로 와인딩하여 시험체를 제작하였다. 시험체의 크기는 $\phi 300\text{mm} \times 2700\text{mm}$ 크기로 제작하였다. 또한 기준이 되는 철근콘크리트 시험체는 같은 크기를 가지며 최대철근을 배근하여 제작하였다. 시험체를 고정시키고 횡하중을 재하하기 위하여 시험체의 상·하부에 콘크리트 stub를 제작하였으며, 이때 사용된 콘크리트의 강도는 270 kgf/cm²이다. 탄소섬유 튜브의 재료적 특성은 표 1에, 각 시험체의 상세는 표 2에 나타내었다.

섬유의 와인딩 각도와 두께 변화에 따른 시험체의 내력, 변형량, 연성능력, 에너지소산능력, 감쇠비, 평균강성 간의 비교를 위하여 와인딩 각도와 두께의 실측값을 변수에 따라 각각의 시험체 군으로 분류하였다. 따라서 와인딩 각도 49.0°, 49.3°, 51.7° 를 50° 로 분류하고, 56.7°, 55.7° 는 55° 로 분류하였으며, 탄소섬유의 두께는 2.1mm와 2.3mm는 2mm로, 3.9mm는 4mm로, 6.1mm와 6.0mm는 6mm로 분류하여 비교 분석하였다.

표 1 탄소섬유 물성표

구 분	SI unit
인장강도	39,200 kgf/cm ²
인장계수	2.35 × 10 ⁶ kgf/cm ²
Filament의 지름	7.0 μm
극한 신장률	1.7 %
밀도	1.76 g / cm ³

표 2 시험체 개요

Columns	탄소섬유 튜브의 각도와 두께		
	와인딩각도(°)	실측값(mm)	ρ _s (%)
LC48-2T	47.7	2.1	2.83
LC50-2T	49.0	2.3	3.09
LC50-4T	49.3	3.9	5.27
LC50-6T	51.7	6.1	8.29
LC55-4T	56.7	3.9	5.27
LC55-6T	55.7	6.0	8.22

$$*\rho_s = \frac{\text{탄소섬유튜브단면적}}{\text{콘크리트기둥단면적}}$$

시험체에 일정 축하중을 재하하기 위하여, 시험체의 최대

축하중 강도를 계산하였다. 기둥 부재의 단면적에 대한 최대 축하중 강도(P₀)는 탄소섬유 튜브의 영향은 고려하지 않은 콘크리트만의 압축강도, P_c가 190.9 tf로 계산되었다. 따라서 실험에서 재하된 축하중은 탄소섬유 튜브의 연성증대효과를 확실하게 나타낼 수 있도록 일반적인 건축물에서의 축력 범위에 비하여 약간 높은 0.31 P₀(60tf)를 재하하였다.

반복 횡하중은 시험체의 취성적인 재료특성, 현장의 실험장치 설치와 작업자의 안전을 고려하여 변위제어 방식으로 재하하였다. 횡하중 재하는 탄소섬유 시험체가 인장 또는 압축과괴에 이르거나 탄소섬유 튜브가 취성과괴 영역까지 진행하여 탄소섬유 기둥이 구조적인 기능을 상실한 시점까지 가력하였다. 그러나 일부의 파단되지 않은 시험체는 내력이 현저하게 저하된 시점에서 부재가 한계상태에 이른 것으로 가정하였다.

2.2 시험체의 설치

시험체는 하부 콘크리트 stub에 4 개의 강봉으로 각각 20tf의 프리스트레스를 가하여 바닥과 완전히 고정시킴으로서 횡가력 시 stub 부분이 회전하는 현상이 발생하지 않도록 하였으며, 하부 stub의 횡가력 방향으로는 강철 플레이트로 고정하여 횡하중에 의한 시험체의 미끄러짐 현상과 비틀림 현상의 발생을 방지하였다. 따라서 시험체 하부 지지단의 조건을 고정단으로 하는 동시에 시험체가 항상 가력 방향으로만 거동하도록 하였다. 또한 시험체의 상부 stub를 철골 지그와 결합하여 철골보 양쪽에 각각 축하중 30tf가 재하되도록 하였으며, 동시에 횡가력 시 양쪽의 static actuator와 시험체가 일체로 거동하도록 하였다.

2.3 가력방법 및 가력패턴

시험체에 60tf의 일정 축력을 유지하면서 반복적으로 횡력을 가하였다. 항복 후 가력은 기둥의 항복변위를 기준으로 50% 씩 증가시킨 변위제어 방식으로 가력하였으며 가력패턴은 그림 1과 같다.

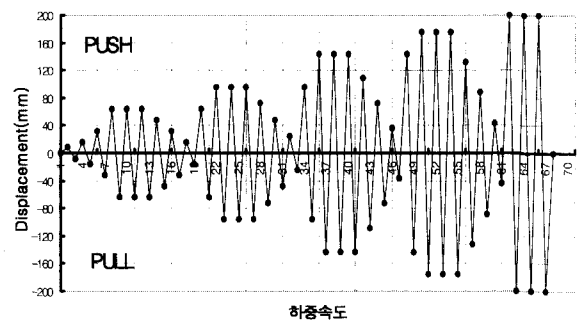


그림 1 가력패턴

시험체에 재하된 횡하중은 100tf 용량의 dynamic actuator를 이용하였고, 축하중은 50tf 용량의 static actuator 2개를 이용하여 그림 2와 같이 재하하였다. 시험체는 하부고정, 상단자유

조건으로 실험하였다. 축력 재하는 시험체 상부 콘크리트 stub 부분에 철판으로 제작된 지그를 결합하여 철판보 양쪽에서 static actuator를 이용하여 재하하였다. 횡하중 또한 자유단인 시험체의 상부 콘크리트 stub부분에 dynamic actuator를 사용하여 횡력을 가하였다.

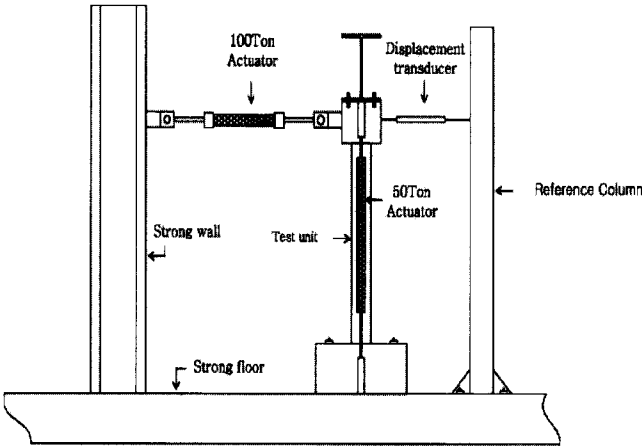


그림 2 실험장비 및 시험체 설치

탄소섬유의 축변형, 횡변형 및 전단변형량은 위치에 따라 1축, 2축 및 3축 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며 그림 3과 같이 각 부분별로 다른 게이지를 설치하였다. 또한 시험체의 횡방향 변위는 Wire LVDT (Potentiometer)를 이용하여 측정하였다.

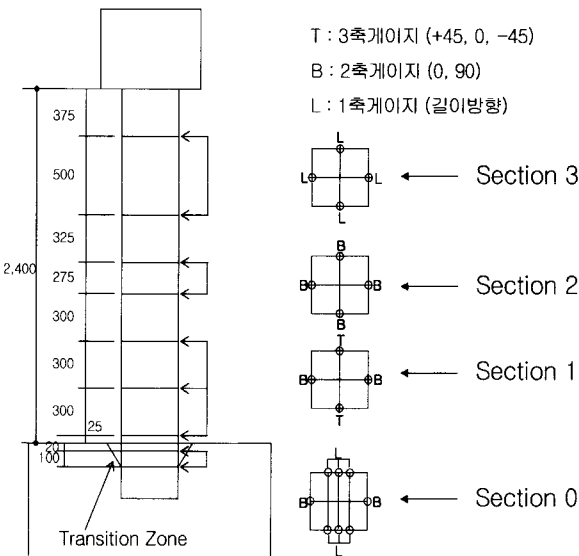


그림 3 게이지 부착위치

3. 실험결과 고찰

그림 4는 각 탄소섬유 튜브 기둥의 시험체별 하중-변형 이력곡선을 나타낸 것으로 각 사이클에서 최대내력을 갖는 사이클인 초기사이클(Virgin Cycle)을 나타낸 것이다. 시험체 모두가 초기사이클의 경우에 최대내력을 나타내었고, 이후의 중

간사이클(Middle Cycle)과 마지막 안정기사이클(Stabilized Cycle)에서는 수평반복가력으로 강성저하가 발생하여 변형량의 증가가 나타났다.

3.1 하중 변위 이력곡선

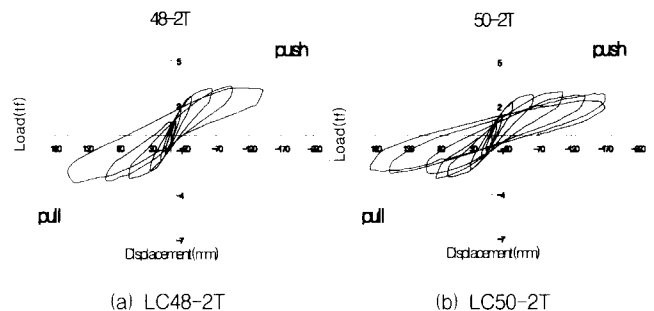
탄소섬유 튜브 기둥의 구조성능은 튜브가 파단되어 탄소섬유와 콘크리트 모두 구조적인 기능을 상실할 때까지 확보되고 할 수 있다. 그러나 성형된 탄소섬유는 파단 직전까지 탄성적 성질을 보이다가 최대강도에 도달하면 갑자기 파단하는 취성적인 재료이고, 최대강도 이후에 탄소섬유 튜브를 구성하는 필라멘트와 에폭시 사이의 부착강도 역시 저하된다. 따라서 하중수행능력의 감소없이 비탄성 변형에 저항하는 탄소섬유 튜브 기둥의 거동특성을 평가하기 위하여, 시험체의 최대내력 이후에 내력저하가 20%까지 발생한 시점까지의 내력과 변형에 대하여 본 연구를 진행하였다.

3.2 포락선(Envelope Curve)의 비교

각 탄소섬유 튜브 기둥의 시험체별 하중-변형 이력곡선에서 최대내력이 발생한 이후 최대내력의 80%까지의 포락선을 이용하여 각 변수에 대한 영향을 평가하였다. 표 3은 각 시험체의 포락선에 나타난 최대내력과 최대변형을로서, 각 탄소섬유 시험체의 변형량은 LC55-6T 시험체의 경우를 제외하고 모두 RC 기둥에 비하여 증가하며 최대 32%까지 증가하였다. 최대내력의 경우는 LC50-6T가 4.99tf로 가장 크게 나타났고, 변형량은 LC50-4T 시험체가 210.2mm로 가장 크게 나타났다.

표 3 시험체별 최대내력 및 변형량

시험체명	내력(tf)		최대내력(tf)	최대횡방향 변형(mm)		최대변형(mm)	변형량/RC변형량
	(+)	(-)		(+)	(-)		
LC 48-2T	3.30	3.05	3.30	160.6	141.4	160.6	1.01
LC 50-2T	2.95	2.93	2.95	187.7	182.8	187.7	1.18
LC 50-4T	3.68	3.60	3.68	203.3	210.2	210.2	1.32
LC 50-6T	4.80	4.99	4.99	197.0	183.8	197.0	1.24
LC 55-4T	3.93	4.10	4.10	192.0	181.3	192.0	1.21
LC 55-6T	3.57	4.55	4.55	148.9	157.8	157.8	0.99



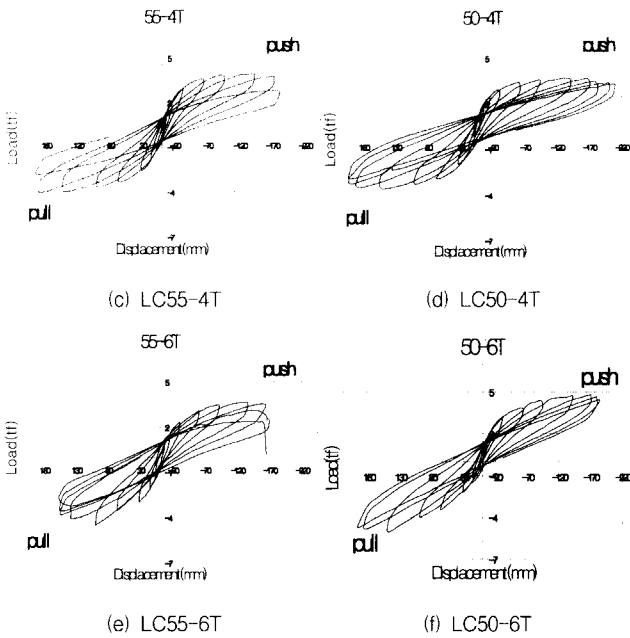


그림 4 하중-변위 이력곡선

3.2.1 포락선을 통한 두께에 따른 비교, 검토

표 4는 탄소섬유 두께에 따른 시험체의 최대내력 및 최대변형량을 나타낸 것이다. 그림 5와 그림 6은 탄소섬유 두께의 변화에 따른 시험체별 최대내력을 나타낸 포락선으로서, 50° 시험체의 경우 탄소섬유 두께가 6mm일 때 2mm 두께를 가진 튜브에 비하여 최대내력은 69% 증가하였다. 55° 시험체의 경우에도 탄소섬유 두께가 6mm에서 4mm 두께를 가진 튜브에 비하여 내력의 크기는 10% 증가한 것으로 나타났다. 따라서 탄소섬유 두께가 증가할수록 최대내력이 증가하는 것을 알 수 있다.

최대변형은 50° 시험체와 55° 시험체 모두 탄소섬유 두께가 4mm의 경우 최대 변형이 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 탄소섬유 두께가 증가하면 기둥의 연성도를 증가시키나, 일정 두께 이상에서는 두꺼워진 튜브의 강성에 영향을 주어 결과적으로 탄소섬유 튜브 기둥의 전체적인 변형능력을 저하시키는 것이 그 원인인 것으로 판단된다.

표 4 두께에 따른 시험체의 최대내력 및 최대변형량

각도	두께	최대내력(tf)	증가량	최대변형(mm)	증가량
50°	2mm	3.30	1	187.7	1
	4mm	3.68	1.25	210.2	1.31
	6mm	4.99	1.69	192.0	1.20
55°	4mm	4.10	1	197.0	1.25
	6mm	4.55	1.10	157.8	1

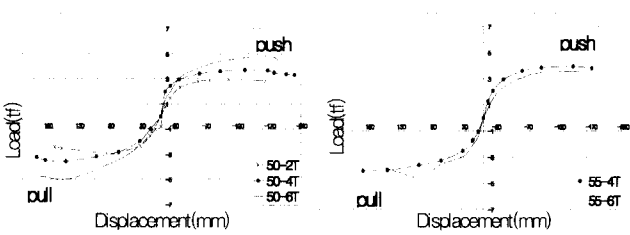


그림 5 튜브 두께별 포락선(LC50) 그림 6 튜브 두께별 포락선(LC55)

3.2.2 포락선을 통한 와인딩 각도에 따른 비교, 검토

표 5는 와인딩 각도에 따른 탄소섬유 시험체의 최대내력 및 최대변형량을 나타낸 것이고, 그림 7 ~ 그림 9는 와인딩 각도의 변화에 따른 시험체별 내력과 변형도를 비교한 포락선이다. 탄소섬유 두께가 6mm의 경우 최대내력과 최대변형 모두 50° 인 시험체가 55° 인 시험체보다 각각 10% 및 25% 증가하여, LC50-6T 시험체의 경우 큰 내력을 가지면서 동시에 변형능력 또한 큰 것으로 나타났다.

표 5 와인딩 각도에 따른 시험체의 최대내력 및 최대변형량

두께	각도	최대내력(tf)	증가량	최대변형(mm)	증가량
2mm	50°	3.30	-	187.7	-
	55°	3.86	1	210.2	1.09
4mm	50°	4.10	1.06	192.0	1
	55°	4.99	1	197.0	1.25
6mm	50°	4.55	1.10	157.8	1
	55°	4.55	1.10	157.8	1

4. 탄소섬유 튜브 기둥의 해석

4.1 하중-변형 이력곡선의 비선형 특성

반복 횡하중을 받는 시험체의 하중-변형 이력곡선은 시험체의 비선형 거동에 대한 특성을 나타낸다. 그림 10은 이러한 시험체의 이력거동 및 비선형 거동특성을 나타내는 13개의 계수들을 나타낸 것이다.

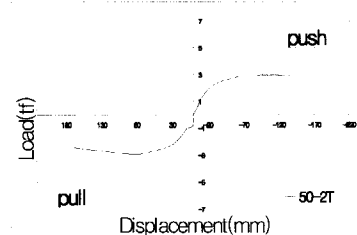


그림 7 와인딩 각도별 포락선 (2T)

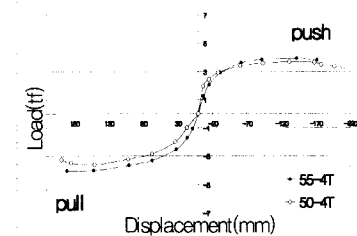


그림 8 와인딩 각도별 포락선 (4T)

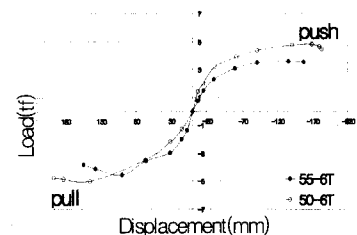


그림 9 와인딩 각도별 포락선 (6T)

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

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 과정은 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 평균최대 변위를 평균최대하중으로 나눈 값으로 정부방향에 대한 강성을 계산하고 그 평균값을 이용하여 시험체의 평균강성을 계산하였다.

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

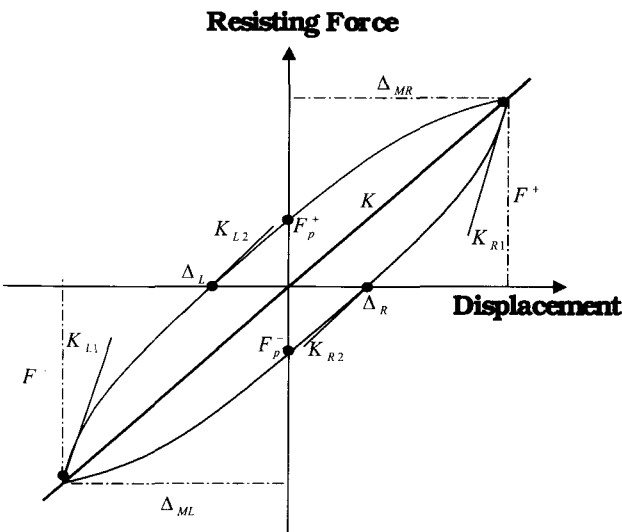


그림 10 비선형 이력곡선과 각각의 변수

- F_p^+ = 하중축의 양의 절점 F_p^- = 하중축의 음의 절점
- Δ_R = 변형축의 양의 절점 Δ_L = 변형축의 음의 절점
- F^+ = 최대 하중(Positive) F^- = 최소 하중(Negative)
- Δ_{MR} = 최대 횡변형비 Δ_{ML} = 최소 횡변형비
- K_{R1} = F^+ 재하 방향 기울기 K_{R2} = Δ_R 재하 방향 기울기

K_{L1} = F^- 재하 방향 기울기 K_{L2} = Δ_L 재하 방향 기울기
 K = 유효강성($F^- - F^+$ 간의 기울기)

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.

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

감쇠에 의한 에너지 흡수량을 평가하기 위해서는 식 1을 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.

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

식 (3)은 다음과 같은 변형에너지 식으로 근사화시킬 수 있다.

$$E_{S_0} = \frac{1}{2} k \cdot y_0^2 \quad (4)$$

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 11과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_D}{E_{S_0}} \quad (5)$$

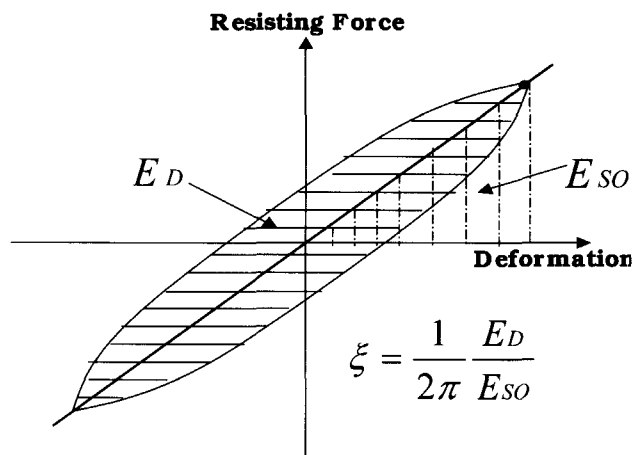


그림 11 감쇠와 강성저하에 의한 감쇠비

그림 12는 각 시험체의 평균강성이 저하될 때의 감쇠비를 나타낸 그림이다. 시험체에 수평가력이 반복될수록 탄소섬유

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

탄소섬유 기둥의 두께에 따른 감쇠비를 비교하면 2mm 시험체는 6mm 시험체에 비하여 최대 2.1 배까지 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 와인딩 각도의 차이에 따른 감쇠비의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 또한 튜브의 두께가 얇을수록 평균강성 저하에 따른 감쇠비는 큰 증가율을 나타내는 것으로 조사되었다.

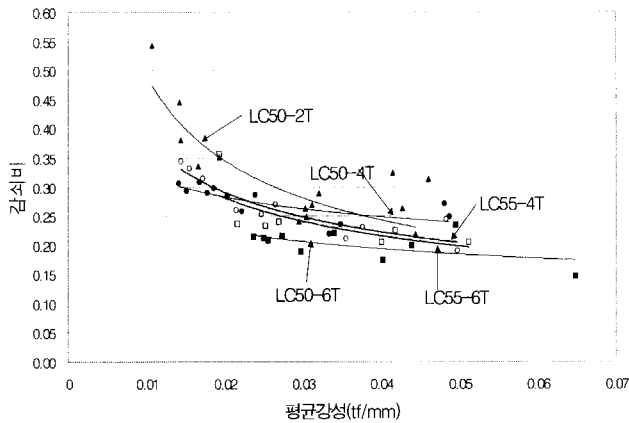


그림 12 평균강성에 의한 감쇠비의 영향

4.3 사이클별 에너지소산면적에 따른 감쇠비 특성

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

그림 13은 사이클별 에너지소산면적에 따른 각 시험체의 감쇠비를 나타낸 그림이다. 식 4에서 보는 바와 같이 감쇠비는 에너지소산면적이 증가할수록 커지게 된다. 이것은 감쇠비가 증가할수록 구조물의 손상이 증가하는 것을 의미하므로 외력에 의한 시험체의 변형이 증가하면 감쇠의 증가로 시험체 내부에서 소산되는 에너지의 양이 증가하는 것을 나타낸다. 전술한 바와 같이 강성이 상대적으로 작은 얇은 두께를 가진 기둥의 감쇠비가 큰 증가율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면에 두꺼운 시험체의 경우에는 반복 횡하중에 의한 감쇠비의 증가량이 작게 나타나면서도 많은 에너지를 흡수하여, 두꺼운 시험체의 경우가 구조물에 손상을 작게 주면서 큰 에너지소산능력을 보유하고 있음을 알 수 있다.

4.4 사이클별 누적에너지소산면적에 따른 감쇠비 특성

그림 14는 사이클별 누적에너지소산면적에 따른 각 시험체의 감쇠비를 나타낸 그림으로, 시험체의 내력성능(performance)을 비교하기 위한 방법으로 파괴되는 동안의 시험체 내에 흡수된 에너지를 계산하는 여러 가지 방법 중, 에너지소산능력과 함께 누적에너지소산능력 또한 중요한 지표로 고려된다. 에너지소산능력의 경우와 마찬가지로 시험체의 감쇠비는 누적에너지소산면적이 증가할수록 커지게 된다. 동일한 누적에너지소산능력을 가질 때 얇은 두께의 시험체가 두꺼운 시험체의 경우보다 구조물의 손상이 1.6배 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

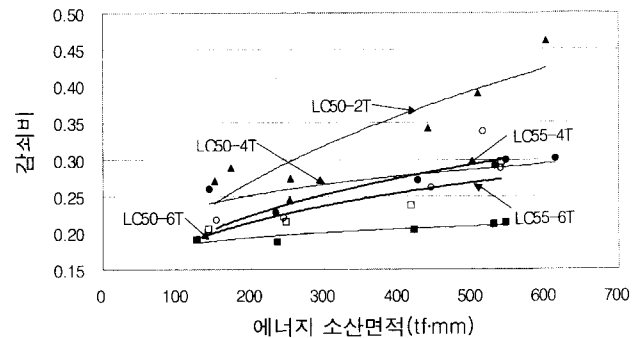


그림 13 사이클별 에너지소산면적에 따른 감쇠비

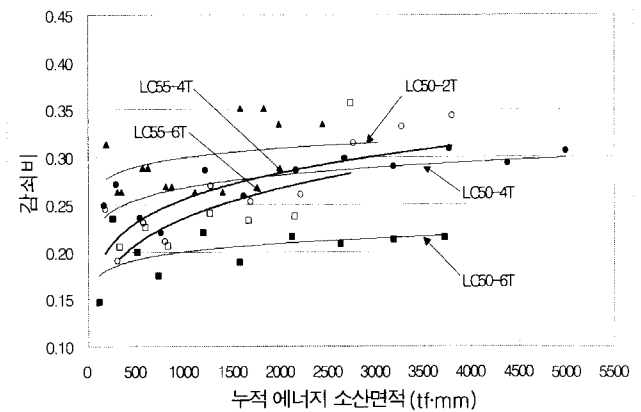


그림 14 누적 에너지소산면적에 따른 감쇠비

4.5 사이클별 에너지소산면적에 따른 평균강성 특성

그림 15는 사이클별 에너지소산면적에 따른 각 시험체의 평균강성 저하를 나타낸 그림이다. 그림 15에서 보는 바와 같이 탄소섬유 튜브는 두께가 증가할수록 탄소섬유 필라멘트와 에폭시 간의 강한 부착강도로 인하여 튜브의 강성이 크게 증가하게 된다. 따라서 횡하중에 의하여 시험체가 변형을 반복하게 되어 강성이 저하될 때 두꺼운 두께를 갖는 시험체가 얇은 두께의 시험체에 비하여 작은 강성 저하율을 갖게 된다. 또한 동일한 강성을 유지할 때 두꺼운 시험체의 에너지소산능력이 2배 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 반복 수평하중에 의하여 시험체의 강성이 현저하게 저하된 이후에도, 튜

브의 두께가 6mm인 시험체는 2mm 시험체에 비하여 최대 2.2 배까지 큰 강성을 유지하는 것으로 나타났다.

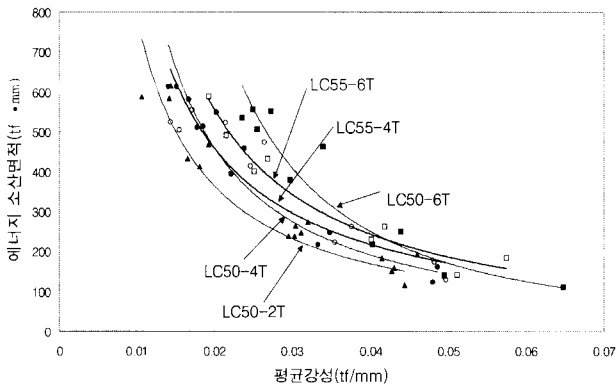


그림 15 평균강성에 따른 에너지소산면적

4.6 사이클별 에너지소산면적에 따른 변위연성 비교

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 최대변위를 항복변위로 나눈 값으로서 식 6과 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 16과 같이 시험체의 하중-변형 포락선을 bilinear로 가정하여 A와 B의 면적이 동일하게 되는 지점을 항복점으로 가정하여 이때의 변형량과 내력을 구하였다.

그림 17은 사이클별 에너지소산면적에 따른 각 시험체의 연성도(ductility)를 나타낸 그림이다. 동일한 에너지소산능력을 가질 때 두께가 얇은 시험체가 작은 강성에 기인하여 변형에 의한 연성도는 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 단순히 정량적인 연성도 수치만을 비교하여 탄소섬유 튜브의 두께가 얇을수록 시험체의 연성능력이 우수하다고 평가할 수는 없다. 이는 탄소섬유 튜브의 두께가 두꺼울수록 시험체가 큰 강성을 갖기 때문에 작은 변형을 허용하여, 단순히 최대변위와

항복변위만의 수치인 변위연성값 자체를 비교해서는 합리적인 방법이라 할 수 없다. 따라서 동일한 연성을 가질 때, 즉 동일한 변위가 발생하였을 때는 두께가 두꺼운 시험체가 작은 손상을 일으키면서 큰 에너지소산능력을 갖게 된다는 사실은 이미 확인한 바와 동일한 결과를 나타내고 있다. 동일한 에너지소산능력을 일으킬 때 2mm 시험체가 6mm 시험체에 비하여 최대 1.3배의 변형이 발생하여 30%의 손상이 더 발생하였음을 나타내고 있다.

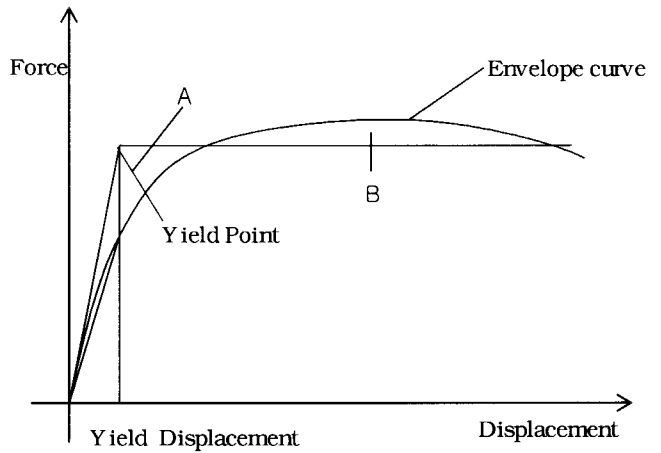


그림 16 가상항복점의 결정

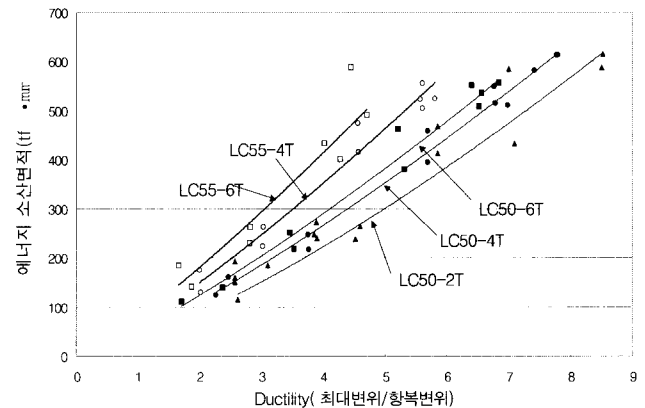


그림 17 에너지소산면적과 Ductility의 관계

4.7 사이클별 평균강성 저하에 따른 시험체의 연성과 Drift Ratio

반복 횡하중에 의하여 발생하는 평균강성 저하에 따른 각 시험체의 연성과 drift ratio의 관계도 앞서 기술한 내용과 동일한 관계를 나타내고 있다. 그림 18은 사이클별 평균강성저하에 따른 각 시험체의 연성을 나타낸 그림으로서 평균강성이 저하함에 따라 튜브의 강성이 작은 얇은 시험체가 큰 강성 저하율을 나타내면서 연성이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 튜브의 두께가 얇은 시험체가 큰 강성저하를 나타내면서 구조물의 손상 정도가 크다는 것을 알 수 있다.

그림 19는 사이클별 평균강성저하에 따른 각 시험체의 drift ratio를 나타낸 그림이다. Drift ratio의 경우에도 연성과 마찬가지로

가지로 평균강성이 저하함에 따라 튜브의 강성이 작은 얇은 시험체가 큰 강성저하를 나타내면서 drift ratio가 증가하는 것을 알 수 있다.

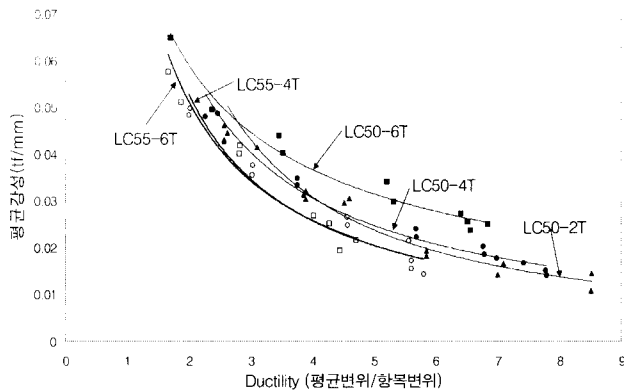


그림 18 평균강성과 Ductility의 관계

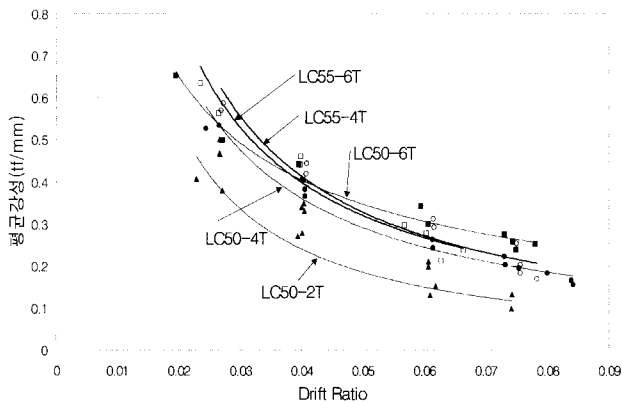


그림 19 평균강성과 Drift Ratio의 관계

4.8 탄소섬유 시험체와 기존 구조물의 연성 비교

본 연구에서 수행한 탄소섬유 부재와 기존의 구조물과의 강성저하에 따른 연성능력을 비교, 평가하기 위하여 철근콘크리트 조적벽에 대한 실험결과를 이용하였다. 단순히 기하학적인 강성만을 가지고 비교하여도 일반적으로 벽체의 강성이 기둥의 강성에 비하여 큰 것은 일반적인 사실이다. 그러나 본 연구에서는 기하학적 강성이 아닌 하중과 변위와의 관계로 나타난 수치적인 강성을 이용하여 비교, 평가하였다.

그림 20은 시험체의 사이클별 항복강성으로 무차원화(Normalized)한 평균강성저하에 따른 각 시험체와 철근콘크리트 조적벽의 ductility를 나타낸 그림이다. 각 시험체와 철근콘크리트 조적벽의 비교를 위하여 각각의 사이클 당 계산된 강성은 각 시험체의 항복강성으로 나누어 무차원화한 값으로 세로축에 표시하고 가로축은 항복변위에 대한 변위비인 연성으로 나타내었다.

그림 20에 나타난 바와 같이 모든 탄소섬유 시험체가 철근콘크리트 조적벽에 비하여 평균강성 저하율이 작은 것을 알 수 있다. 일반적으로 벽체의 강성이 기둥에 비하여 큰 것이 사

실이나 실험결과에서 나타난 바와 같이 탄소섬유 튜브 기둥이 동일한 연성도 즉, 동일한 변형을 허용할 때 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 강성을 보유하며 작은 강성저하율을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 탄소섬유 튜브 기둥이 동일한 강성에서 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 연성능력을 갖는 것을 알 수 있다.

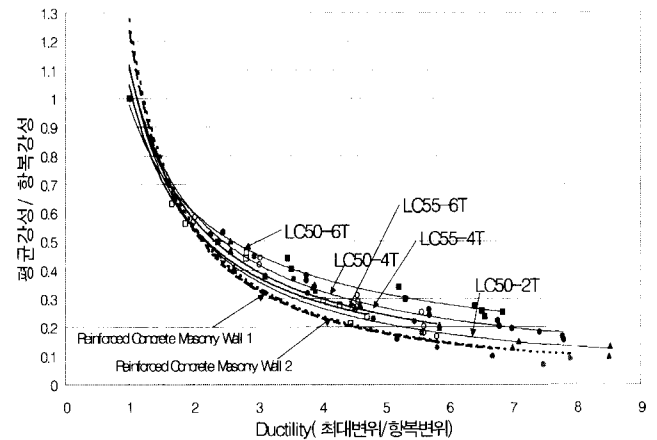


그림 20 철근콘크리트 조적벽과 시험체의 평균강성저하에 따른 Ductility 비교

5. 결 론

본 연구는 탄소섬유라는 새로운 재료를 이용하여 기존의 철근콘크리트 구조물에서 나타나는 경제적, 환경적, 구조적인 문제를 보완하고 대체하기 위하여 시작되었다. 콘크리트를 충전한 탄소섬유 튜브 기둥 부재의 반복 횡하중 실험을 수행하고 이에 따른 결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 탄소섬유 튜브 기둥의 변형능력은 철근콘크리트 기둥에 비하여 평균 19% 이상 증가하였고 최대 32% 까지 증가하여, 콘크리트를 충전한 무근의 원형 탄소섬유 기둥이 같은 크기의 철근콘크리트 기둥에 비하여 큰 변형능력을 갖는 것으로 나타났다.
- (2) 탄소섬유 튜브의 두께가 얇을수록 탄소섬유 기둥은 상대적으로 작은 강성을 보유하게 되므로 더 많은 변형을 허용하면서 감쇠비는 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 와인딩 각도의 차이에 따른 감쇠비의 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 또한 튜브의 두께가 얇을수록 평균강성 저하에 따른 감쇠비는 큰 증가율을 보이는 것으로 나타났다.
- (3) 튜브의 두께가 두꺼운 시험체는 반복 횡하중에 의한 감쇠비의 증가량이 작게 나타나면서도 많은 에너지를 흡수하여 구조물에 손상을 작게 주면서 큰 에너지소산능력을 보유하게 된다. 따라서 감쇠비는 에너지소산능력과 누적에너지 소산면적이 증가할수록 증가하여 동일한 누적에너지소산능력을 가질 때 얇은 두께의 시험체가 두꺼운 시험체보

다 구조물의 손상이 1.6배 정도 증가하였다.

- (4) 탄소섬유 튜브는 두께가 증가할수록 탄소섬유 필라멘트와 에폭시 사이의 강한 부착강도로 인하여 튜브의 강성은 증가하게 된다. 횡하중에 의하여 시험체가 변형을 반복하게 되어 강성이 저하될 때 두꺼운 두께를 갖는 시험체가 얇은 두께의 시험체에 비하여 작은 강성 저하율을 갖게 된다. 또한 동일한 강성을 유지할 때 두께가 두꺼운 시험체의 에너지소산능력은 2배 정도 크게 나타났다.
- (5) 동일한 변위가 발생하였을 때는 두께가 두꺼운 시험체가 작은 손상을 발생시키면서 큰 에너지소산능력을 갖는 것으로 나타났다.
- (6) 하중과 변위와의 관계로 나타난 수치적인 강성을 비교, 평가하였을 때 모든 탄소섬유 시험체가 철근 콘크리트 조적벽에 비하여 평균강성 저하율이 작은 것으로 나타났다. 일반적으로 벽체의 강성이 기둥에 비하여 상대적으로 크지만 탄소섬유 튜브 기둥이 동일한 변형을 허용할 때 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 강성을 보유했으며 작은 강성 저하율을 갖는 것으로 나타났다. 또한 탄소섬유 튜브 기둥이 동일한 강성에서 철근콘크리트 조적벽에 비하여 큰 연성능력을 나타내었다.

실험결과에서 나타난 바와 같이 콘크리트를 충전한 무근 탄소섬유 튜브 기둥은 철근콘크리트 조적벽에 비하여 횡하중에 대한 변형능력이나 에너지소산능력이 우수하면서 상대적으로 큰 강성을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 거동 특성은 본 연구에서 사용된 기둥이 내진구조를 요구하는 지역에서의 기둥으로 매우 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 건설교통부 국책과제인 “Carbon shell system을 이용한 무근콘크리트 시스템의 개발” (2001-자유 A-05) 연구의 일부로서 연구비의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. R. Park and T. Paulay, *Reinforced concrete structures*, John Wiley & Sons, New Zealand, 1975,
2. 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, 1988. 8. pp. 1804-1825.
3. 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. 7-8, pp. 500-509.
4. A. Mirmiran and M. Shahawy, "A new concrete-filled hollow FRP composite column," *Com-*

- posites Part B: Engineering*, Vol. 27, 1996, pp. 263-268.
5. M. Shahawy, A. Mirmiran and T. Beitelman, "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, Issues 6-7, 2000. 10, pp. 471-480.
6. S. A. Sheikh and S. S. Khoury, "Confined concrete columns with stubs," *ACI Structural Journal*, Vol 90, No. 3, 1993. 51~8, pp. 414-431.
7. 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.
8. 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.
9. A. Davol, R. Burgueno, and F. Seible, "Flexural behavior of circular concrete filled FRP shells," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, 2001. 7, pp. 810-817.
10. 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.
11. H. Kim et. el, "Compressive Strength Test of Circular Concrete Filled Carbon Tube(CFCT) Columns with Different Winding Angles and Thickness," *Proceedings of The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'02)*, Busan, Korea, 2002. 8.
12. H. Kim et. el, "An Experimental Study to Evaluate the Influence of Carbon Tube on the Confinement Capacity of Circular Concrete Columns," *Proceedings of The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'02)*, Busan, Korea, 2002. 8.
13. W. Hong et. el, "Strength Increment of a Concrete Filled Carbon Tube Column," *Proceedings of The 4th Taiwan-Japan-Korea Joint Seminar On Earthquake Engineering for Building Structures*, Seoul, Korea, 2002. 10.
14. 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. 12.
15. W. Hong, H. Kim, D. Hwang, and G. Juhn,

- "Hysteretic Behavior of Carbon Tube-Encased Concrete Columns," *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Composite/Nano Engineering*, 2003. 7, pp. 249-250.
16. H. Kim, et. el, "The Behavior of Tube-Encased Concrete Columns," *Proceedings of the 2nd Korea-Japan workshop on New Direction for Enhancement of Structural Performance*, Yokohama, Japan, 2003. 8.
 17. H. Kim, W. Hong, and 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.
 18. W. Hong and H. Kim, "Behavior of Concrete Columns Confined by Carbon Composite Tube," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, 2004. 4, pp. 178-188.
 19. 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, 2004. 4, pp. 189-203.
 20. 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.
 21. 정진훈, 윤석한, 이경훈, 홍원기, 김희철, "일정 축하중과 반복 횡하중을 동시에 받는 원형 탄소섬유 기둥의 변형능력 평가", 한국 구조물 진단학회 가을 학술발표 논문집, 제 6권 2호, 2002. 11.
 22. 홍원기, 김희철, 윤석한, 박순섭, "탄소섬유튜브로 횡구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축강도 성능에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제7권 1호, 2003. 2.
 23. 김희철, "Carbon Shell System을 이용한 무근콘크리트 시스템(보, 기둥 및 보-기둥 접합부)의 개발" 2001년 건설교통부 산학연 공동연구 개발사업 1차년도 보고서, 2002. 8.
 24. 천성철, 박형철, 안재현, 박철립, "일정 축력하의 탄소섬유 시트 보강 기둥의 횡가력 시 거동특성에 관한 실험연구", 콘크리트학회논문집, 제11권 2호, 1999. 4, pp. 147-156.