

연성도 및 에너지 소산능력 비교에 따른 콘크리트충전 탄소섬유튜브 기둥의 성능

Capacity of Concrete Filled Carbon Tube Columns Based on the Comparison of Ductility and Energy Dissipation Capacity

이경훈¹⁾ · 김희철²⁾ · 홍원기³⁾ · 이영학⁴⁾

Lee, Kyoung-Hun · Kim, Hee-Cheul · Hong, Won-Kee · Lee, Young-Hak

국문 요약 >> 본 연구에서는 반복 횡하중을 받는 콘크리트충전 탄소섬유튜브기둥의 휨성능 평가실험을 수행하였다. 시험체의 단면형상은 각형과 원형이며 탄소섬유튜브의 두께 및 와인딩각도(winding angle)를 실험변수로 채택하였다. 모든 시험체는 건물의 한 층 높이와 유사한 높이를 갖는 full scale 크기로 제작되었으며 3대의 가력기(actuator)를 동시에 가동시켜 축하중과 횡하중을 가력하였다. 실험결과를 분석하여 기둥의 휨강도, 변형능력 및 에너지소산능력을 평가하였으며, 횡하중에 대한 기둥의 연성거동 또한 평가되었다.

주요어 탄소섬유튜브기둥, 반복 횡하중, 연성거동

ABSTRACT >> Flexural capacity estimation test of concrete filled carbon tube (CFCT) column under the cyclic lateral load was carried out in this study. Thickness of carbon tube and winding angles of carbon fiber were chosen as test parameters and two types of column with square and circular sections were manufactured. To act axial and lateral load, three dynamic actuators were used and all specimens were made with actual size. Flexural stiffness, ability of deformation, energy dissipation capacity and ductility behavior of CFCT column were analyzed with test data.

Key words CFCT (Concrete Filled Carbon Tube), cyclic lateral load, ductility behavior

1. 서론

구조물의 효율적인 연성거동을 유도하기 위한 설계기준들은 주로 단위부재의 실험결과를 통하여 검증되고 있다. 새로운 재료인 탄소섬유를 구조물에 적용하기 위해서는 구조물의 거동을 예측할 수 있는 각 부재단위의 정밀한 실험 및 분석이 요구된다. 반복 횡하중을 받는 RC 구조물의 강도와 연성 등의 저하는 구조물이 지니고 있는 연성도 및 에너지 소산능력과 밀접한 관련이 있다. 따라서, 본 연구에서는 일정한 크기의 축하중과 반복 횡하중을 동시에 받는 콘크리트

충전 탄소섬유튜브 기둥의 실험을 통하여 탄소섬유튜브로 구속된 기둥의 거동특성을 규명하고자 한다.

기둥의 횡구속에 관한 연구는 오랜 세월동안 많은 학자들에 의해서 지속적으로 연구가 진행되고 있는 주제이다. 1988년에 Mander 등¹⁾은 콘크리트를 구속하고 있는 원형 및 각형 띠철근의 횡구속압에 대한 해석적 접근법을 제안하였으며, Saafi 등²⁾은 FRP 재료로 구속된 기둥의 압축강도 향상에 대한 연구를 수행하였다. 홍원기 등³⁾은 CFRP로 구속된 원형 및 각형 기둥의 일축 압축강도 실험을 수행하였다. 이 밖에도 저자 등⁴⁾은 카본시트로 횡구속된 원형콘크리트 기둥의 성능실험을 수행한 후 향상된 압축강도를 예측할 수 있는 실험식을 제안하였다.

본 연구의 목적은 기둥의 주근이 배근되어있지 않은 무근 CFCT 기둥의 반복 횡하중에 대한 연성능력을 평가하는 것으로서, 이를 위하여 각 시험체의 강성저하에 따른 감쇠비와 에너지 소산면적의 변화양상을 분석하였으며 또한 기둥의 휨강도와 변형능력 및 파괴양상 등을 분석하였다.

¹⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 연구박사

²⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 교수

(대표저자: kimhc@khu.ac.kr)

³⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 부교수

⁴⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2004. 8. 7 / 심사종료일 : 2006. 12. 13)

2. 실험계획 및 방법

본 연구에서 고려된 변수는 탄소섬유의 두께와 와인딩각도(winding angle)이며, 각각 6개의 원형 및 각형시험체를 제작하였다. 탄소섬유튜브는 90°방향(기둥 길이의 수직방향)으로 1mm 두께의 섬유를 와인딩(winding)한 후, 90°±30°, 90°±45° 각도를 설계각도로 제작하였으나 탄소섬유가 몰드(mold)에 감기면서 옆으로 미끄러져 튜브(tube)가 양생된 후 측정된 각도는 설계각도와 차이를 나타내고 있었다. 이러한 이유로 시험체의 이름에 탄소섬유의 실측각도를 포함하여 제작된 각도대로 성능을 분석하였다. 원형시험체는 Φ300mm×2700mm 크기로 6개를, 각형시험체는 가로와 세로 250×250(mm), 높이 2700(mm)인 6개를 제작하였다. 또한 기준이 되는 RC기둥은 최대철근비인 8%의 철근을 배근하여 제작하였다. 시험체를 고정시키고 횡하중을 재하하기 위하여 시험체의 상·하부에 콘크리트 스텐드(stub)를 제작하였으며, 시험체 제작에 사용된 콘크리트의 강도는 26.5MPa 이고 접합부에 배근된 철근의 인장강도는 400MPa 이다. 탄소섬유의 재료적 특성은 표 1, 원형 및 각형시험체의 개요는 각각 표 2와 표 3과 같다.

〈표 1〉 탄소섬유의 물성치

인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	탄소섬유 직경	극한신장률 (%)	밀도 (g/cm ³)
3,844	230	7.0μm	1.7	1.76

〈표 2〉 원형시험체의 개요

시험체	와인딩각도	실측두께(mm)	ρ _o (%)
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

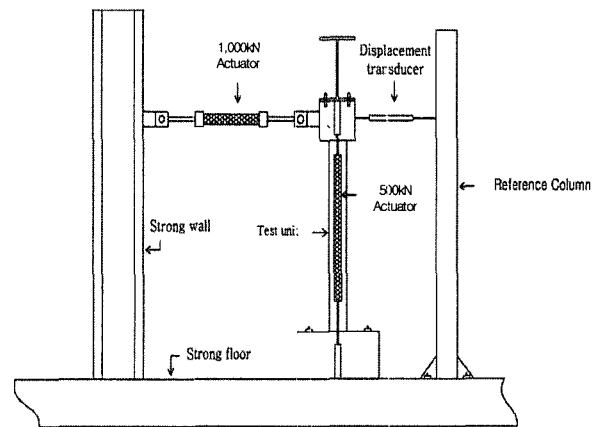
〈표 3〉 각형시험체의 개요

시험체	와인딩각도	실측두께(mm)	ρ _o (%)
LR61.5-2.8T	61.5°	2.8	4.48
LR49.5-4.6T	49.5°	4.6	7.36
LR53.5-6.7T	53.5°	6.7	10.72
LR54.5-2.9T	54.5°	2.9	4.64
LR61.0-4.6T	61.0°	4.6	7.37
LR67.5-6.5T	67.5°	6.5	10.40

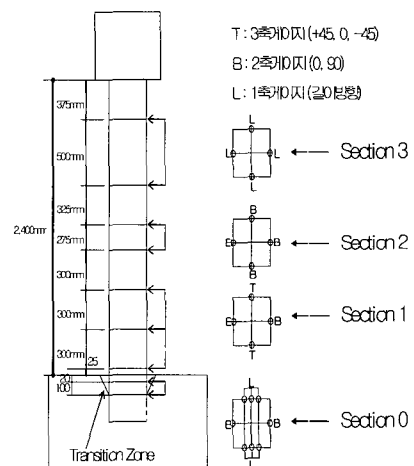
*ρ_o = $\frac{\text{탄소섬유튜브단면적}}{\text{콘크리트기둥단면적}} \times 100(\%)$

탄소섬유의 와인딩각도(winding angle)는 기둥의 길이방향을 0°, 수평방향을 90°로 설정하였다. 반복적인 횡하중을 받는 구조물이 효과적으로 저항하기 위해서는 충분한 강도와 연성확보가 요구된다. 특히 기둥부재는 기본적으로 일정크기의 축하중을 받고 있으므로 횡하중을 받는 기둥의 내력은 전단력과 모멘트 외에 축력도 포함된다. 이러한 이유로 본 실험에서는 시험체에 횡하중과 축하중을 동시에 재하하였다.

횡하중은 1,000kN 동적가력기(dynamic actuator)를 반력벽에 고정시켜 가력하였고, 축하중의 가력은 500kN의 가력기(actuator) 2대가 사용되었으며 시험체의 설치는 그림 1과 같다. 이때 축하중은 기둥단면의 최대허용하중의 약 30%인 600kN을 일정하게 재하하였으며, 횡하중은 변위제어방식으로 하중계획을 수립하여 재하하였다. 그림 2는 자료 수집을 위한 스트레인게이지(strain gauge)의 배치계획을 나타내는 그림이다. 횡하중으로 인한 모멘트가 가장 크게 발생하는 시험체 하부의 가력방향으로는 2축 게이지를, 전단변형이 발생할 수 있는 측면은 3축 게이지를 설치하였다.



〈그림 1〉 실험장비 및 시험체 설치

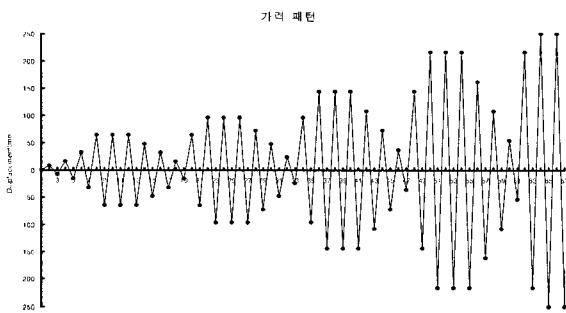


〈그림 2〉 게이지 부착위치

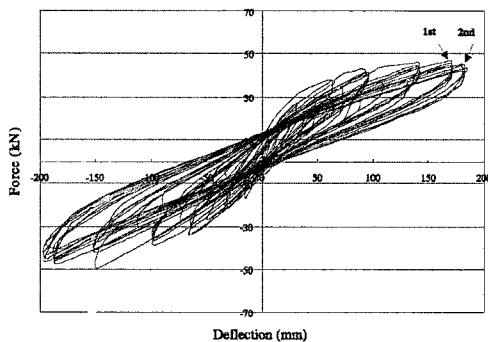
그림 3은 시험체의 가력패턴으로써, 사전해석을 통하여 시험체가 탄성구간에 머물 것이라고 예측되는 구간에서는 매 사이클마다 가력변위를 두 배로 증가시켰으며 그 이후에는 각 사이클에서 동일한 변위로 세 차례 횡하중을 반복가력하고 다음 사이클은 50%의 변위를 더하여 가력패턴(loading pattern)을 작성하였다. 이처럼 동일변위에서 세 차례 반복적으로 하중을 가력한 이유는 기둥의 강성저하양상을 분석하기 위함이다.

3. 실험결과

횡하중은 시험체가 비선형거동을 나타내는 구간에서도 지속적으로 변위를 증가시키며 가해지다가 극한강도의 80%에 해당되는 강도로 저하되었을 때 실험을 종료하였다. 그림 4



〈그림 3〉 가력패턴

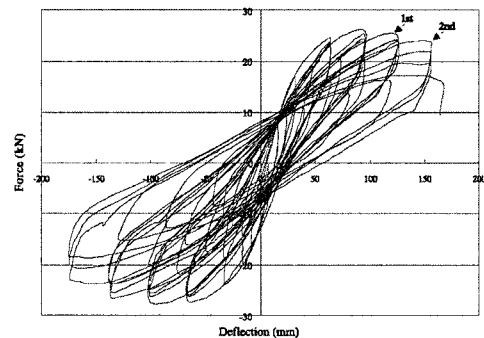


〈그림 4〉 LC50-6T 시험체의 하중-변위 그래프

는 LC 50-6T 시험체의 거동을 나타내는 그래프로써, 수평변위가 약 200mm에 도달할 정도로 충분한 연성거동 및 에너지흡수 능력이 있음을 잘 나타내고 있다. 이 시험체의 경우 갑작스런 강도의 저하양상이나 급격한 균열발생에 의한 파괴형태 등은 나타나지 않았다. 시험체의 최대변위는 197mm이었으며 최대내력은 48.9kN이었다. 첫 번째 균열은 카본튜브의 인장측에서 발생하였으며 이때의 내력은 42kN, 수평변위는 170mm 이었다. 균열의 크기가 커지면서 시험체의 강성이 다소 저하되었으며 수평변위가 186mm에 도달하는 순간 두 번째 균열이 발생하였고 이때의 횡하중에 대한 연성능력을 평가하는 연성도(μ)는 7.6 이었다.

그림 5는 각형시험체 중 LR67.5-6.5T 시험체의 거동을 나타내는 그래프이다. 이 시험체의 첫 번째 균열은 수평변위가 125mm에 도달하는 순간에 발생하였으며 그때의 하중은 25kN, 연성도 μ 는 약 5.4로 나타났다. 발생된 균열은 하중을 가할수록 점점 커지며 기둥 강성저하의 주된 요인으로 작용하였으며 시험체의 연성도가 약 6.7에 도달 할 즈음에 현저한 강성저하 현상이 발생하여 실험을 종료하였다.

표 4는 원형시험체의 거동에 대한 최대내력과 최대변형을 나타내는 표로써, 각 탄소섬유 시험체의 변형량은 LC55-6T 시험체의 경우를 제외하고 모두 RC 기둥에 비하여 증가하며 최대 31%까지 증가하는 것으로 나타났다. 최대내력의 경우는 LC50-6T가 48.9kN으로 가장 크게 나타났으며, 변위는 LC50-4T 시험체가 210.2mm로 가장 크게 나타났다.



〈그림 5〉 LR67.5-6.5T 시험체의 하중-변위 그래프

〈표 4〉 원형시험체의 최대내력 및 변위

시험체	내력(kN)	최대내력(kN)	최대수평변위(mm)	최대변위(mm)	시험체변위/RC변위	
LC48-2T	32.4	-30.0	32.4	160.6	160.6	1.00
LC50-2T	28.9	-28.7	28.9	187.7	187.7	1.17
LC50-4T	35.1	-35.3	35.3	203.3	210.2	1.31
LC50-6T	47.1	-48.9	48.9	197.0	183.8	1.23
LC55-4T	38.5	-40.2	40.2	192.0	181.3	1.20
LC55-6T	35.0	-44.6	44.6	148.9	157.8	0.99
RC	53.0	-59.8	59.8	160.0	160.0	-

표 5를 살펴보면, LR53.5-6.7T 시험체의 최대내력이 38.9kN으로 시험체 중 가장 큰 내력이 나타났으며 횡방향 최대변위는 208.9mm로 이는 철근 콘크리트기둥보다 약 1.07배 큰 값이었다. 반면에 LR49.5-4.6T 시험체는 최대내력은 32.4kN으로 나타났으나 횡방향 최대변형은 210.3mm로 시험체 중 가장 큰 변형량을 나타내었다. 그러나 전체적인 거동양상을 분석한 결과, 구속에 의한 강성의 향상 및 변위 등 연성도능력의 개선도는 각형기둥에 비하여 원형기둥의 경우에 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

4. 실험결과 및 고찰

반복 횡하중을 받는 시험체의 하중-변형 이력곡선은 시험체의 비선형 거동에 대한 특성을 나타낸다. 그림 6은 이러한 시험체의 이력거동 및 비선형 거동특성을 나타내는 13개의 계수들을 나타낸 것이다. 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 사이클(cycle)별 계수는 초기와 안정기 사이클(cycle)에 대하여 고려하였다.

4.1 평균 강성저하에 따른 감쇠비 특성⁽⁷⁾

지진과 같은 횡하중을 받는 구조물의 파괴양상을 이해하

기 위해서는 비선형성을 갖는 구조물의 운동방정식을 풀어야 한다. 그러나 실제구조물에서의 운동방정식을 계산하는 과정은 매우 복잡하므로 구조물의 강성저하와 감쇠비를 간단하게 평가하기 위하여 시험체의 하중-변형곡선을 이용하였다. 실제 구조물은 반복 횡하중에 의하여 평균강성의 저하가 발생하며 외력에 의한 에너지를 소비하면서 감쇠비가 증가하게 되는 복합작용이 발생하게 된다. 따라서 횡하중에 의하여 저하되는 시험체의 강성을 평가하기 위하여 식 (1)과 같이 각 사이클 당 평균최대하중을 평균최대변위로 나눈 값으로 정부방향에 대한 강성을 계산하고 그 평균값을 이용하여 시험체의 평균강성을 계산하였다.

$$K_i = \frac{P_{i,max}}{\Delta_i} \tag{1}$$

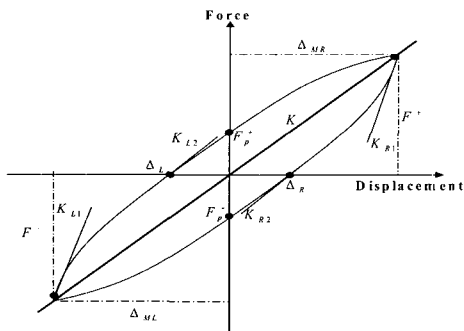
단자유도계 구조물에서 외력으로 작용하는 반복 횡하중이 $p(t) = p_0 \sin \omega t$ 로 표현될 때 점성감쇠에 의하여 소비되는 에너지의 양은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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 하중-변형 이력곡선이 나타내는 면적으로 감쇠에 의한 에너지를 산출

〈표 5〉 각형시험체의 최대내력 및 변위

시험체	내력(kN)		최대내력(kN)	최대수평변위(mm)		최대변위(mm)	시험체변위/RC변위
LR61.5-2.8T	22.4	-23.0	23.0	124.4	-128.0	128.0	0.66
LR49.5-4.6T	27.1	-32.4	32.4	183.1	-210.3	210.3	1.08
LR53.5-6.7T	38.3	-38.9	38.9	186.3	-208.9	208.9	1.07
LR54.5-2.9T	25.9	-26.4	26.4	136.7	-134.0	136.7	0.70
LR61.0-4.6T	26.3	-24.2	26.3	182.5	-195.9	195.9	1.01
LR67.5-6.5T	35.8	-35.2	35.8	167.5	-174.5	174.5	0.90
RC	46.8	-44.6	46.8	194.5	144.6	194.5	-



〈그림 6〉 비선형 이력곡선

- F_p^+ 하중축의 양의 절점, F^+ 최대하중,
- F_p^- 하중축의 음의 절점, F^- 최소하중,
- Δ_R 변형축의 양의 절점, Δ_{MR} 최대 횡 변형비
- Δ_L 변형축의 음의 절점, Δ_{ML} 최소 횡 변형비
- K_{L1} F^+ 에서 재하(unloading) 방향 기울기
- K_{R1} Δ_R 에서 재하(unloading) 방향 기울기
- K_{L2} F^- 에서 재하(reloading) 방향 기울기
- K_{R2} Δ_L 에서 재하(reloading) 방향 기울기
- K 유효강성($F^- - F^+$ 간의 기울기)

하였다. 또한 구조물의 강성저하로 인한 소성변형에너지는 식 (3)으로 나타낼 수 있으며 식 (4)와 같은 변형에너지 식으로 근사화 시킬 수 있다.

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

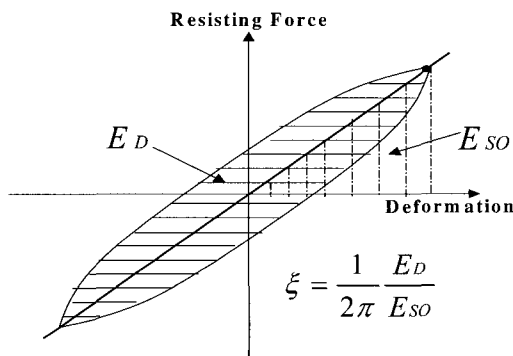
$$E_{s_0} = \frac{1}{2} k \cdot y_0^2 \quad (4)$$

또한 탄소섬유기둥의 감쇠비(damping ratio)는 횡하중을 받는 구조물에서의 감쇠에 의한 에너지 소산과 강성저하에 기인하여 발생하는 에너지 소산의 비인 식 (5)를 이용하여 구할 수 있으며 이 관계는 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_D}{E_{s_0}} \quad (5)$$

시험체에 횡하중이 지속적으로 반복될수록 탄소섬유기둥은 손상을 입으면서 기둥의 평균강성이 저하되고 동시에 기둥의 감쇠비(damping ratio)는 증가하게 되는데 이것은 횡하중에 의한 외부 에너지가 내부 소산에너지로 전환되기 때문이다. 따라서 탄소섬유튜브의 두께가 얇을수록 탄소섬유기둥은 상대적으로 작은 강성을 보유하게 되므로 더 많은 변형을 허용하면서 감쇠비(damping ratio)는 증가하게 된다.

그림 8은 원형과 각형기둥의 강성에 따른 감쇠비(damping ratio)를 나타낸 그래프로써, 원형과 각형기둥 모두 카본튜브(carbon tube)의 두께가 얇을수록 강성저하에 따른 감쇠비가 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 카본튜브(carbon tube)의 두께가 4mm인 시험체의 강성저하에 따른 감쇠비(damping ratio)의 경우에는 각형기둥의 감쇠비(damping ratio)가 원형기둥보다 월등히 높게 나타났다. 또한 탄소섬유기둥의 내력성능을 평가하기 위하여 강성에 따른 감쇠비(damping ratio)를 RC기둥과 비교하였다. 원형RC기둥은 높



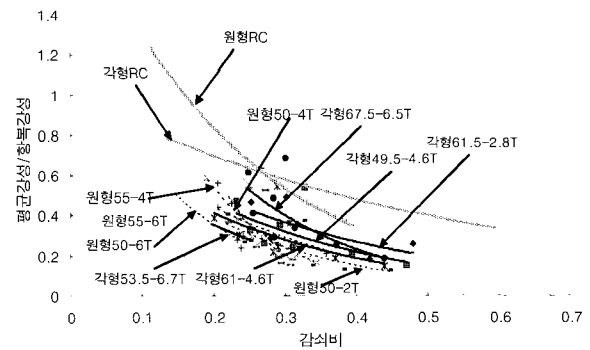
〈그림 7〉 감쇠와 강성저하에 의한 감쇠비

은 강성을 가지고 있으나 감쇠비(damping ratio)는 가장 낮게 나타났으며 각형RC기둥은 탄소섬유기둥에 비하여 높은 감쇠비(damping ratio)를 나타내었다. 탄소섬유기둥의 강성저하에 따른 감쇠비(damping ratio)는 각형RC기둥과 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

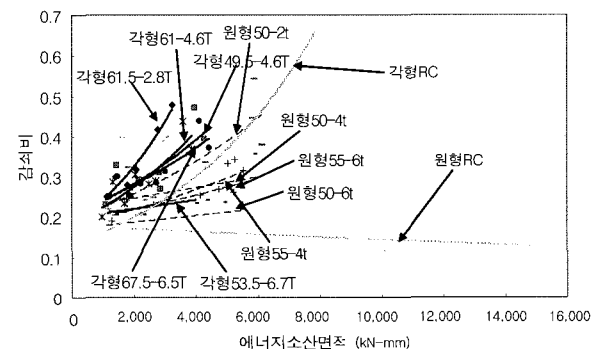
4.2 에너지소산면적에 따른 감쇠비(damping ratio) 특성

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

단면의 형태가 다른 시험체의 내력성능을 평가하기 위하여 에너지소산면적에 따른 감쇠비(damping ratio)를 각형과 원형기둥에 대하여 비교하였으며 그 결과는 그림 9와 같다. 동일한 에너지소산능력을 갖는 각형과 원형기둥 모두 두께가 두꺼운 시험체의 감쇠력이 높은 것으로 나타났다. 그러



〈그림 8〉 강성에 따른 감쇠비



〈그림 9〉 에너지소산면적에 따른 감쇠비

나 일반적인 감쇠력 비교에서는 원형기둥이 각형기둥보다 높게 나타났다. 반면에 튜브(tube)의 두께가 일정한 두께에 도달했을 때의 감쇠력 비교에서는 원형기둥보다 각형기둥이 높게 나타났다. 즉, 원형기둥과 각형기둥의 2mm두께와 6mm두께의 시험체에 대한 감쇠비(damping ratio)를 비교한 결과 각형기둥의 감쇠력이 원형기둥의 감쇠력보다 2% 정도 높게 나타났다. 또한 그림 9에는 탄소섬유기둥과의 비교를 위한 RC기둥의 감쇠비(damping ratio)를 비교하였다. 이를 살펴보면, 각형RC기둥은 가장 높은 감쇠비를 나타내었고 원형RC기둥은 가장 낮은 감쇠비(damping ratio)를 나타내었다. 각형RC기둥은 각형탄소섬유기둥과 원형탄소섬유기둥 사이의 값으로 나타났다. 따라서 동일한 에너지소산면적을 가질 때 각형탄소섬유기둥의 감쇠비(damping ratio)가 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.

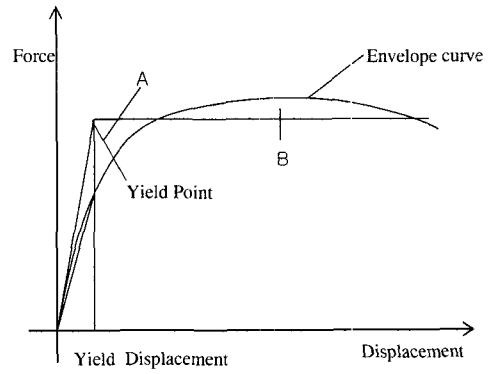
4.3 에너지소산면적에 따른 변위연성

에너지소산능력, 누적에너지소산능력과 마찬가지로 시험체의 내력성능을 평가하기 위한 방법으로 연성 또한 중요한 지표로 사용된다. 연성이 큰 재료는 파괴 이전에 상당한 변형을 허용하여 많은 양의 내부에너지를 흡수할 수 있다. 연성능력이 우수한 탄소섬유튜브기둥의 구조성능은 탄소섬유튜브가 파괴되어 튜브(tube)와 충전된 내부콘크리트가 모두 구조적인 기능을 상실할 때까지 확보된다고 할 수 있다. 따라서 하중수행능력의 감소 없이 비탄성 변형에 저항하는 연성효과를 이용하기 위한 연성계수 μ 는 변위연성(displacement ductility)으로써, 시험체의 이력곡선 응답 중 발생하는 최대변위를 항복변위로 나눈 값인 식 (6)과 같이 표현된다.

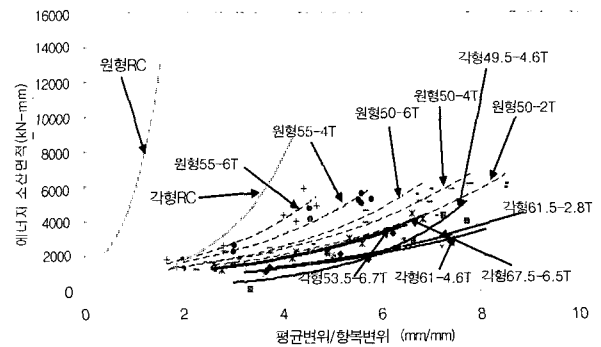
$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (6)$$

연성계수는 단절점계 구조물의 변형 형태를 비교적 정확히 표현할 수 있고 그 표현방법이 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 편적이 동일하게 되는 지점을 항복점으로 가정하여 이때의 변형량과 내력을 구하였다.

그림 11은 원형과 각형기둥을 에너지소산면적에 따른 변위연성(displacement ductility)으로 나타낸 것이다. 동일한 에너지소산능력을 가질 때 원형기둥은 두께가 얇을수록 연



〈그림 10〉 가상항복점의 결정



〈그림 11〉 에너지소산면적에 따른 변위연성

성능력이 우수하게 나타남을 알 수 있었다. 각형기둥 또한 두께가 얇은 기둥의 연성능력이 높게 나타났으나 원형기둥과 같이 두께별 변화가 정확히 나타나지는 않았다. 그러나 비슷한 두께를 가지고 동일한 에너지소산능력을 가질 때 각형기둥의 연성능력이 원형기둥 보다 높게 나타났음을 알 수 있었다. 재료가 다른 탄소섬유기둥과 RC기둥을 비교하면 두 재료의 차이에 따른 연성능력을 분석할 수 있다. 그림 11에서 탄소섬유기둥의 에너지소산면적은 RC기둥에 비하여 작지만 연성능력은 매우 우수하게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트를 충전한 원형 및 각형탄소섬유기둥의 성능에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 하중과 변위와의 관계로 나타난 수치적인 에너지소산면적과 감쇠비(damping ratio)와 연성능력을 각형과 원형의 CFCT시험체로 비교, 평가하였으며 탄소섬유기둥의 변위연성(displacement ductility)을 비교하였다. 동일한 변형과 강성에서 탄소섬유기둥은 RC기둥에 비하여 큰 연성능력을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 원형탄소섬

유기둥은 각형에 비하여 두께에 따른 연성능력이 정확하게 나타났지만 각형기둥은 정확한 변화를 나타내지 않았다. 그러나 동일한 에너지소산능력과 비슷한 두께를 가진 시험체에서는 각형기둥이 원형기둥보다 연성능력이 높게 나타났다.

- (2) 에너지소산면적에 따른 감쇠비의 비교에 있어, 각형기둥이 원형기둥보다 약 1.2배 정도 큰 것으로 나타났다. 각형탄소섬유기둥은 원형에 비하여 작은 횡 구속효과를 갖지만 각형기둥의 튜브두께가 일정 두께 이상이 되면 원형기둥보다 감쇠비와 연성능력이 높으므로 지진지역에서의 기둥으로는 더욱 유효할 것으로 판단된다.
- (3) 탄소섬유기둥과 RC기둥의 성능을 비교한 결과 탄소섬유기둥은 원형RC기둥에 비하여 강성 저하율이 작은 반면, 각형RC기둥의 강성은 탄소섬유기둥과 유사하게 나타났다. 변위연성(displacement ductility)에 대한 실험 결과에서는 RC기둥에 비하여 탄소섬유튜브기둥의 변위연성이 월등히 높게 나타났으며, 기둥의 강성이 저하할수록 탄소섬유기둥의 변위연성이 RC기둥보다 높은 것으로 나타났다.

실험결과에서 나타난 바와 같이 콘크리트를 충전한 무근 탄소섬유튜브기둥은 횡하중에 대한 변형능력이나 에너지소산능력이 우수하면서 상대적으로 큰 강성을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 거동특성은 본 연구에서 사용된 기둥이 내진구조를 요구하는 지역에서의 기둥으로 매우 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 내진성능이 부족한 기둥의 보강에도 매우 간편하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 Brain Korea 21(BK21) 2단계 사업과 2001년도 건설교통부 국책과제인 “Carbon Shell System을 이용한 무근콘크리트 시스템의 개발(2001-자유A-05)” 연구과제의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., “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, July-August, 1999, pp. 500-509.
3. Hong, W., Kim, H. and Yoon, S., “Lateral Behavior of full scale Concrete-filled Carbon Composite Columns,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, April, 2004, pp. 189-203.
4. 이경훈, 김희철, 홍원기, “카본시트튜브로 구속된 압축재의 성능 평가”, 한국구조물진단학회지 제10권 제3호(통권 제37호), 2006년 5월, pp. 152-158.
5. 홍원기, 김희철, 정진훈, “축하중과 반복 횡하중을 받는 콘크리트 충전 각형 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동특성”, 한국지진공학 회논문집, 제8권 3호(통권 제37호), 2004년 6월, pp. 13-22.
6. 김희철, 홍원기, 이현주, “축하중과 반복 횡하중을 받는 콘크리트 충전 각형 탄소섬유 튜브 기둥의 휨거동특성”, 한국지진공학 회논문집, 제8권 4호(통권 제38호), 2004년 8월, pp. 1-10.
7. Akiyama Hiroshi, 에너지 평행법에 의한 건축물의 내진설계, 구미서관, pp. 27-36.