

# 탄소섬유쉬트로 구속된 콘크리트충전 원형강관기둥의 단조압축실험

## Experimental Study on Concrete Steel Circular Tubes Confined by Carbon Fiber Sheet under Axial Compression Loads

박재우<sup>1)</sup> · 홍영균<sup>2)</sup> · 홍기섭<sup>3)</sup> · 최성모<sup>4)</sup>

Park, Jai-Woo · Hong, Young-Kyun · Hong, Gi-Soup · Choi, Sung-Mo

**국문 요약** >> 본 연구에서는 기존 원형 CFT기둥 실험체와 탄소섬유쉬트로 추가구속된 원형 CFT기둥 실험체의 단조압축거동 및 압축 내력평가에 관한 실험을 수행하였다. 실험변수는 탄소섬유쉬트 보강겹수와 직경-두께비이며, 실험변수에 따라 총 10개의 실험체를 제작하여 단조압축실험을 수행하였다. 실험을 통하여 기존 CFT 실험체와 탄소섬유쉬트로 구속된 CFT 실험체의 파괴거동, 하중-축변위 곡선, 최대내력, 변형성능을 비교한다. 끝으로 탄소섬유쉬트의 추가구속을 통해 기둥의 국부좌굴을 지연시켰으며 구속효과로 인해 내력은 상승하는 것으로 나타났다.

**주요어** 콘크리트충전 강관구조, CFT, 합성기둥, 구속효과

**ABSTRACT** >> This paper presents the results of an experiment comparing the current circular CFT columns and circular CFT columns that were additionally confined by carbon fiber sheets (CFS) under axial loading. The main experimental parameters are the numbers of CFS layers and the diameter-to-thickness ratio. 10 specimens were prepared according to the experimental parameter plans, and axial compression tests were conducted. From the tests, the failure procedure, load-axial deformation curve, maximum axial strength, and deformation capacity of the CFT columns and confined CFT columns were compared. The test results showed that the maximum axial strengths of CFT columns additionally confined by CFS are increased higher than those of the current CFT columns, and that local buckling can be delayed due to the confinement effect of CFS.

**Key words** Concrete filled steel tube, CFT, Composite column, Confining effect

## 1. 서론

콘크리트 충전강관구조는 강관과 콘크리트 두 재료의 이질적인 재료특성을 상호 보완하여 기존 단일재료를 사용한 부재보다 내력 및 연성적인 측면에서 구조적 성능을 향상시키게 된다. 원형강관으로 구속된 콘크리트가 중심축력을 받게 되면 내부 충전콘크리트는 압괴에 의해 체적이 팽창하게 된다. 횡방향으로 팽창된 콘크리트의 변형률이 외부 강관의 횡방향 변형률을 따라잡게 되면 강관의 원주방향응력은 인

장상태가 된다. 이로 인해 내부충전콘크리트는 구속을 받게 되며 최종적으로는 3축 응력상태가 되어 내부충전콘크리트의 압축강도는 증가하며 이로 인해 CFT 기둥의 내력은 증가한다.

CFT 기둥에의 기존연구에 대한 고찰내용은 다음과 같다. 박정민<sup>1)</sup>은 중심축하중을 받는 원형강관으로 구속된 콘크리트충전강관 기둥의 역학적 거동에 관한 연구를 수행하였다. 실험변수는 강관의 폭-두께비와 콘크리트 강도이다. 실험결과 원형강관의 구속효과 때문에 구속된 콘크리트의 강도는 비구속된 콘크리트보다 4~7배 증가하는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트의 구속효과는 폭-두께비와 충전 콘크리트의 강도가 낮을수록 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 강관의 항복이후 내부충전콘크리트에 대한 구속효과가 저하하여 최종적으로는 강관의 국부좌굴로 인한 내력저하로 인해 실험체는 파괴되었다.

Schneider<sup>2)</sup>은 14개의 중심축하중을 받는 CFT 기둥에

<sup>1)</sup> 정회원·서울시립대학교 건축공학과, 박사 후 과정 연구원, 공학박사  
(교신저자: anm21c@hanmail.net)

<sup>2)</sup> 홍익대학교 건축학과, 정교수

<sup>3)</sup> 홍익대학교 건축학과, 정교수

<sup>4)</sup> 정회원·서울시립대학교 건축공학과, 부교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

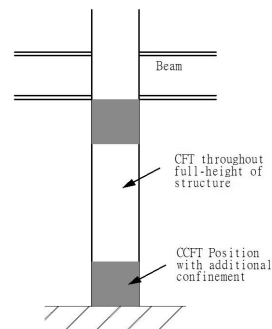
(논문접수일 : 2009. 8. 4 / 수정일 : 2009. 9. 25, / 게재확정일 : 2009. 9. 30)

대한 거동실험을 수행하였다. 실험변수는 형상(원형, 각형), 직경-두께비( $D/t$ ) 또는 폭-두께비( $B/t$ )는 17~50 으로 하였으며, 폭-길이비( $L/D$ )를 4~5로 하여 중심축하중을 받는 CFT 기둥에 대한 실험을 수행하였으며, 실험결과 모든 실험체는 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다.

CFT 기둥은 충전콘크리트를 감싸는 강관으로 인해 구속 효과가 생기며 비충전 강관보다 내력이 상승하며 좌굴에 대해 뛰어난 변형능력을 발휘한다. 그러나 기존 문헌에서 알 수 있듯이 강관이 항복하게 되면 내부충전 콘크리트에 대한 구속효과가 감소하게 되며 이로 인해 강관에 국부좌굴이 발생하며 기둥의 내력은 급격히 저하된다. Ge and Usami<sup>(2)</sup>는 강관 내부에 스티프너가 설치된 강관의 국부좌굴 거동을 분석하여 강관 내부에 설치된 스티프너가 기둥의 강성을 증가시키고 국부좌굴을 지연시킴을 확인하였다. 또한 건설현장에서는 CFT 기둥에 발생하는 국부좌굴의 보강 방법으로 기둥의 단부부위에 스티프너로 보강을 하거나 철판을 덧대는 등의 여러 가지 보수보강 방법을 쓰고 있다. 그러나 기존의 철판보강방법은 용접시 재료의 재료성질이 변형되고 철판 무게로 인해 건물의 자중이 증가되며 단면적의 증가로 인해 건축면적이 감소하는 등의 단점이 있다. 또한 철판의 부식은 보강된 부재의 내력을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 이로 인해 최근 합성재료의 일종인 탄소섬유쉬트로 기존 건물에 보강을 하는 방법이 널리 사용되고 있다. 탄소섬유쉬트는 기존 철판에 비해 자중이 가볍고, 외부 노출로 인한 부식될 염려가 없으며, 시공이 편리하며, 용접의 불필요함으로 기존 부재의 재료성질을 보존할 수가 있어 최근 보수보강재료로서 널리 사용되고 있다. 또한 구조적 성능관점에서 살펴보면 탄소섬유쉬트는 일반 강재보다 인장강도가 3~5배 크기 때문에 기둥구조물에 구속할 경우 강관보강법보다 훨씬 큰 인장력으로 구속효과를 발휘하여 기둥의 내력은 크게 향상시킬 수 있다.

FRP로 구속된 콘크리트공시체의 압축거동에 관한 연구는 수 많은 연구자(Samman, Saffi, Toutanji, Xiao, Lam 등)에 의해 수행되었다. 실험결과 중심축하중으로 인해 FRP는 콘크리트에 구속을 발휘하며 최종적으로 FRP가 찢어지거나 박리현상이 나타나며 파괴되었다. 또한 강재보다 큰 FRP의 인장강도 성능 때문에 훨씬 더 큰 구속효과를 발휘하여 압축내력은 강관구속보다 훨씬 더 크게 나타났으며, 하중-축변위 곡선상에서는 2중선형 거동을 나타내었다.<sup>(14)</sup>

CFT 기둥에 대한 FRP 보강에 대한 연구내용은 다음과 같다. 국부좌굴로 인해 내력이 저하되는 기존 CFT 기둥의 단점을 보완하기 위해 Xiao<sup>(7)</sup>는 기존 원형 CFT 기둥에 탄



〈그림 1〉 단부부위가 보강된 CFT 기둥의 개념도

소섬유쉬트로 추가구속한 CCFT(Confined Concrete Filled Steel Tube)의 압축성능에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험결과 탄소섬유쉬트의 추가구속을 통해 국부좌굴 시점을 지연시켰을 뿐만 아니라 탄소섬유쉬트의 보강접수에 따라 기존 CFT 기둥보다 압축내력이 54 % ~ 136 % 상승하는 것으로 나타났다.

Tao<sup>(9)</sup>은 화재를 입은 기존 원형 및 각형 CFT 기둥에 탄소섬유쉬트로 보수하여 중심축하중 및 편심하중을 가하는 실험을 수행하였다. 실험결과 탄소섬유쉬트의 보강을 통해 기존 화재를 입은 CFT 기둥보다 연성 및 내력을 향상시키는 결론을 도출하여 탄소섬유쉬트의 보강효과를 검증할 수 있었다.

또한 기존 CFT 기둥에 지진하중과 같은 횡하중을 받게 되면 기둥단부부위에 국부좌굴이 발생하며 파괴하게 된다<sup>(7),(8)</sup>. 이를 해결하기 위해 Xiao<sup>(7)</sup>와 박재우<sup>(8)</sup>은 그림 1과 같이 기둥의 단부부위에 탄소섬유쉬트로 보강하여 휨과 압축을 동시에 받는 기둥실험을 수행하였다. 실험결과 탄소섬유쉬트의 추가구속을 통해 국부좌굴의 시점을 지연시켜 기둥의 연성능력과 에너지 소산능력이 증가하게 되어 기둥부재의 내진성능은 향상하였다. 박재우<sup>(10)</sup>는 각형강관 CFT 기둥의 중심축하중거동에 대한 실험을 수행하였으며, 국부좌굴의 지연으로 인해 기둥의 소성변형능력이 기존 CFT기둥보다 크게 향상된 것으로 나타났다.

이와 같이 FRP로 기존 CFT기둥에 보강을 할 경우 원형 강관 CFT 압축내력은 크게 향상되고 원형, 각형강관 CFT 기둥은 지진하중에 대해 연성능력이 크게 개선되어 기둥부재의 내진성능은 크게 향상될 것이다. 또한 화재발생시 내력이 저하된 CFT기둥의 보강방법으로 FRP를 사용한다면 기존의 강관보강방법보다 시공성이 용이하게 손상된 구조부재를 보강하게 될 것이다.

본 연구에서는 기존 CFT 기둥의 보수보강에 대한 내용에 초점을 맞추어 원형 CFT 단주기둥에 탄소섬유쉬트로 추

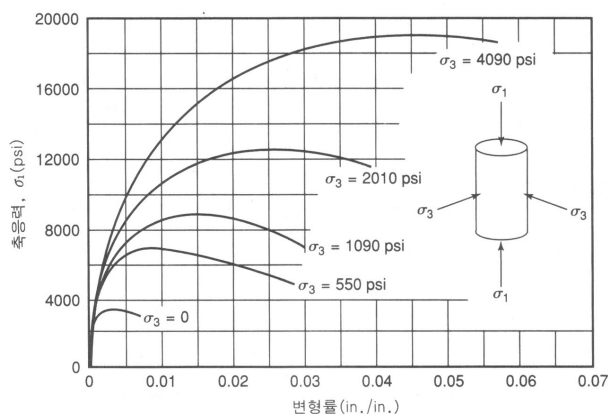
가구속하여 중심축하중을 가하는 실험을 수행하였다. 실험 변수는 직경-두께비( $D/t$ ), 탄소섬유쉬트 보강계수이다. 하중재하 방법은 축하중을 받는 기둥의 거동을 관찰하고자 중심축하중을 받는 재하방법을 선택하였다. 기둥실험을 통해 기존 CFT 기둥과 탄소섬유쉬트로 추가구속된 CFT 기둥의 구조적 거동, 파괴양상, 압축성능 및 변형능력 등을 비교하고 두 종류의 CFT 기둥의 역학적 거동의 차이점을 비교분석하는 데 본 연구의 목적을 두고 있다.

## 2. 단조압축하중에서 원형 CFT 기둥의 역학적 거동

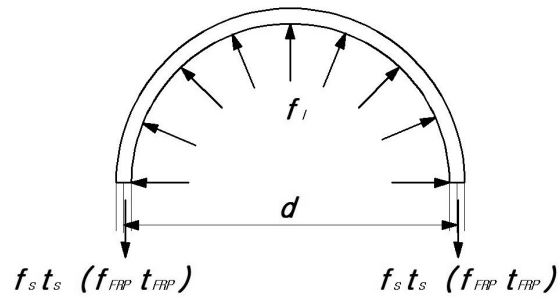
### 2.1 구속효과

강관으로 구속된 CFT 기둥에 축방향 압축을 받을 경우 콘크리트는 횡방향으로 팽창하게 된다. 강관으로 구속된 콘크리트는 압축하중에 의해 횡방향으로 포아송효과에 의해 팽창하게 되어 변형이 발생하게 된다. 하중재하가 계속됨에 따라 콘크리트의 횡방향 변형이 강관의 횡방향 변형에 이르게 되면 강관에서는 인장력이 발생하여 충전 콘크리트의 횡방향 팽창을 억제하는 반지름 방향의 압력(구속압, Confinement Pressure)이 발생하게 되며 코어콘크리트의 팽창을 억제하게 된다. 이때 내부 코어콘크리트는 삼축응력상태가 되며 내부콘크리트의 압축강도 값은 그림 2와 같이 상승하게 된다. 원형강관 CFT 기둥의 경우도 이러한 구속효과 현상으로 인해 압축내력은 강관과 콘크리트 코어의 강도를 각각 누가한 값보다 크게 나타나게 된다.

그림 3은 구속압에 의한 강관의 응력상태를 나타낸 것이다. 강관으로 구속된 CFT 기둥이 압축하중을 받을 경우 극한상태에서 반지름 방향으로 균등하게 팽창하는 변형에 의해 생기는 응력과 강재에 의한 구속응력은 평형상태를 이루게 되며 식 (1)과 같은 관계가 성립하게 된다.



〈그림 2〉 삼축압축응력을 받는 콘크리트 공시체의 응력-변형률 관계 <sup>(13)</sup>



〈그림 3〉 구속압에 의한 강관의 응력상태<sup>(14)</sup>

$$f_l = \frac{2f_s t_s}{d} = \frac{\rho_s f_s}{2} \quad (1)$$

여기서,  $f_l$ 는 횡방향구속압 (confinement pressure),  $f_s$ 는 강관의 인장강도,  $t_s$ 는 강관의 두께,  $\rho_s$ 는 충전콘크리트와 강재의 체적비이다.

### 2.2 구속된 콘크리트의 거동

#### 2.2.1 강관으로 구속된 콘크리트의 압축거동

기존의 논문 중 중심축하중을 받는 원형 CFT기둥의 거동을 살펴보면 최대내력의 경우 구속효과로 인한 내부충전 콘크리트의 향상으로 인해 강재와 콘크리트의 압축강도 단순누가 값 보다 크게 나타났다. 그러나 기존의 문헌<sup>(3),(6)</sup>을 살펴보면 중심축하중을 받는 CFT 기둥은 항복점 이후 내력의 증가율은 둔화되었으며, 최대내력점 이후로 급격한 내력 저하를 보이며 파괴가 되는 양상을 보이고 있다. 실험체는 강관이 횡방향으로 균등하게 팽창하다가 이후 면외좌굴이 발생하며 강관 내벽으로부터 콘크리트의 슬립현상을 수반하며 45° 방향의 사인장 파괴양상을 보이고 있다.

#### 2.2.2 FRP로 구속된 콘크리트의 압축거동

FRP 탄소섬유쉬트의 응력-변형률 곡선을 살펴보면 섬유 종류나 형태에 상관없이 선형적인 응력-변형률 관계를 갖는다.<sup>(14)</sup> 압축하중하에서 FRP로 구속된 콘크리트 공시체의 거동을 살펴보면 콘크리트의 팽창으로 인해 FRP보강재가 구속효과를 발휘하게 되지만 FRP의 인장강도에 이르게 되면 FRP가 찢어지거나 박리파괴를 일으키며 파괴된다. 또한 FRP로 구속된 콘크리트의 축압축 거동은 2중 선형형태를 가지게 된다 (Samaan 1998, Toutanji 1999). 첫 번째 선형구간에서의 하중-축변위 관계는 기존의 강관으로 구속된 콘크리트의 거동과 유사하지만 탄소섬유쉬트에 의한 구속 효과가 발휘되는 시점부터는 FRP의 후프인장력이 FRP의

응력-변형을 관계 때문에 선형적으로 증가하게 되며, 이로 인해 2중 선형형태를 보인다. 이는 강재로 인해 구속된 콘크리트의 축압축거동과 확연히 틀리며, 일반적으로 탄소섬유쉬트의 인장강도는 강재의 인장강도보다 3-5배정도 높으므로 최대압축하중 또한 탄소섬유쉬트로 구속된 콘크리트가 강재로 구속된 콘크리트보다 높게 나타난다.

### 2.2.3 강관과 FRP로 구속된 콘크리트의 압축거동

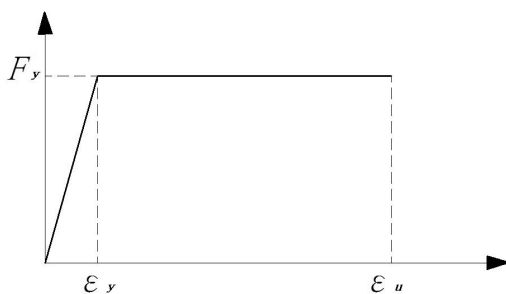
CFT 기둥과는 달리 강관과 탄소섬유쉬트로 동시에 구속하면 강관과 탄소섬유쉬트에 의한 구속압력을 동시에 받게 된다. 강관의 응력-변형을 관계는 그림 3과 같이 항복점 이전에는 응력이 계속적으로 증가하는 탄성적 거동(Elasto-Plastic Model)을 지니고 있지만 강관의 항복이후 응력이 거의 일정한 형태로 나타난다. 결국 식 (1)의 횡방향 구속력은 재하 초기 단계에는 강관의 응력이 증가하기 때문에 증가하게 되나 항복점 이후로는 응력이 일정하여 횡방향 구속력 또한 일정하게 된다. 이러한 강관의 성질 때문에 강관으로 구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계는 초기에는 구속효과가 급격히 증가하지만 강관의 항복이후 구속력은 점차적으로 감소하게 된다.

반면 탄소섬유쉬트의 응력-변형을 관계를 살펴보면 그림 4와 같이 강관과는 달리 변형률이 증가함에 따라 응력이 점차적으로 증가하는 Elastic 거동을 보이고 있다. 응력-변형을 관계에서 탄소섬유쉬트는 강관과 달리 변형률이  $\epsilon_{cu,F}$  에 도달할 때 까지 선형으로 응력이 증가한다.

강관과 탄소섬유쉬트로 동시에 구속된 콘크리트의 횡방향 구속력 ( $f_l$ )은 식 (1)에서 탄소섬유쉬트에 의한 구속효과를 고려하는 항을 중첩하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_l = \frac{2f_s t_s}{d} = \frac{1}{2}(\rho_s f_s + \rho_F f_{Fu}) \quad (2)$$

위 식 (2)에서 탄소섬유쉬트에 대한 항이 없으면 횡방향

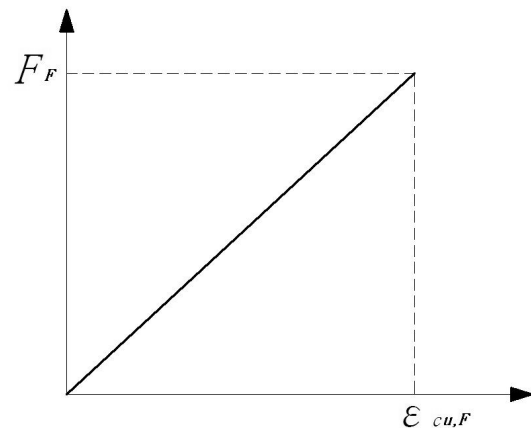


〈그림 4〉 강관의 응력-변형을 관계 (Elasto-Plastic Model)

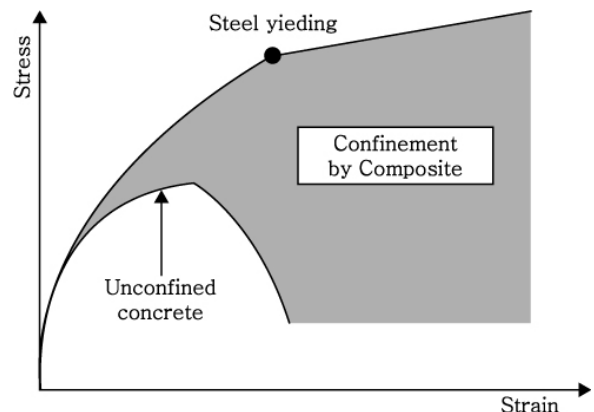
구속력은 강관의 항복점 이전까지는 계속적으로 증가하나 이후로는 횡방향 구속력은 일정하게 된다. 그러나 탄소섬유쉬트에 대한 항이 추가하게 되면 강관이 항복하여도 탄소섬유쉬트로 인한 구속 때문에 구속력은 계속 증가하게 된다.

따라서 강관과 탄소섬유쉬트로 동시에 구속된 CFT 기둥의 콘크리트 응력-변형을 관계는 아래의 그림 6과 같이 강관의 항복점 이후에도 탄소섬유쉬트의 추가구속효과로 인해 구속력은 계속 증가하게 하여 콘크리트의 압축강도는 계속 증가하게 되며 이로 인해 부재의 내력은 계속적으로 상승하게 될 것이다.

실제로 본 연구에서 수행된 실험체의 하중-변위 곡선을 살펴보면 기존 CFT 기둥의 경우 항복점 이후 내력은 증가하였으나 최대내력점 이후로는 점차적으로 내력이 감소되는 거동을 보이고 있다. 그러나 탄소섬유쉬트와 강관으로 동시에 구속된 CFT 기둥의 경우 강관의 항복점 이후에도 탄소섬유쉬트의 추가구속효과로 인해 내력은 탄소섬유쉬트가 파단 되는 시점까지 계속적으로 증가하고 있다.



〈그림 5〉 탄소섬유쉬트의 응력-변형을 관계



〈그림 6〉 강관과 FRP로 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계<sup>(12)</sup>

### 3. 실험계획 및 결과

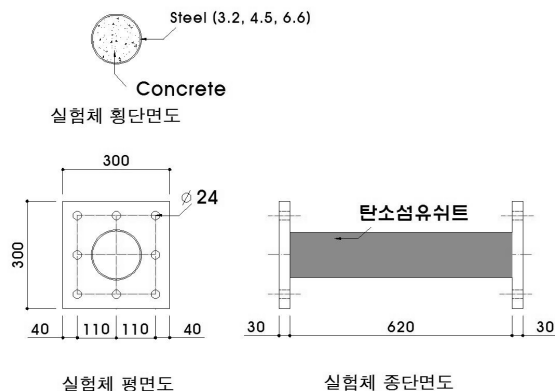
#### 3.1 실험체 제작 및 실험변수 계획

실험체는 그림 7과 같이 직경 139.8mm, 강관두께는 각각 3.2mm, 4.5mm, 6.0mm, 부재길이는 620mm인 원형강관 안에 콘크리트를 타설하여 제작하였으며, 탄소섬유시트 섬유방향은 부재의 구축효과를 가하고자 폭방향으로 배열하였다.

탄소섬유시트 보강법은 한국구조물진단학회에서 제시한 한국구조물진단공학<sup>(15)</sup>중 탄소섬유시트 보강매뉴얼을 참고하였다. 우선 알콜로 강재의 녹이 난 부분을 충분히 제거하였으며 그라인더로 용접잔재물 등을 제거하였다. 이후 프라이어 도포이후 2인 1조로 탄소섬유시트를 강재주변에 충분히 잡아당기며 감쌌다. 또한 시트주격을 사용하여 섬유방향에 따라 2-3회 정도 문질러 수지가 충분히 함침되도록하여 접착면의 기포를 제거하였다. 겹침길이는 매뉴얼에서 제시한대로 10cm 이상되도록 하였으며, 접착후 30분 이상 방치하면서 섬유시트의 들뜸이나 늘어짐 현상이 발생하면 물리나 주격을 이용하여 수정해주며, 수지를 재도포하여 보강해준다. 끝으로 탄소섬유시트는 매뉴얼에서 제시한 대로 7일 동안 양생하였다.

본 연구에서의 실험변수는 기둥의 직경-두께비( $D/t$ )와 탄소섬유시트 보강 겹수이며 표 1의 변수계획에 따라 총 10개의 실험체를 제작하였다. 다만 두께 4.5mm인 C4계열의 실험체는 탄소섬유시트 1겹과 3겹 사이의 거동을 관찰하고 분석하기 위해 탄소섬유시트 2겹으로 보강한 실험체를 제작하였다.

기둥실험을 수행하고자 그림 8과 같이 3000kN급 만능시험기 (U.T.M)에서 강관단면과 콘크리트면이 동시에 압축력을 받도록 하여 중심축하중실험을 수행하였다. 그림 8과 같이 축하중에 대한 축방향 변위를 측정하고자 실험체의 엔드



〈그림 7〉 실험체 제작도 (단위 : mm)

〈표 1〉 실험체 및 실험변수 계획

실험체명	강관두께 (mm)	직경-두께비 ( $D/t$ )	콘크리트 압축강도 (MPa)	CFS 보강겹수
C3N	3.2	44	37.5	-
C3F-1				1
C3F-3				3
C4N	4.5	31	37.5	-
C4F-1				1
C4F-2				2
C4F-3				3
C6N	6.6	21	37.5	-
C6F-1				1
C6F-3				3

주) C 3 F - 1

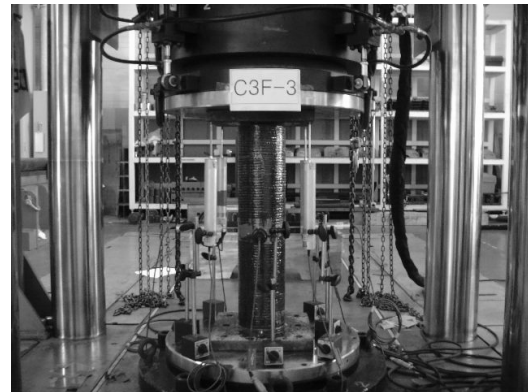
① ② ③ ④

① Circular section

② 강관두께 (3= 3.2 mm, 4= 4.5 mm, 6= 6.6 mm)

③ 섬유보강유무 (N= 보강無, F= 보강有)

④ 보강겹수 (1= 1겹, 2= 2겹, 3= 3겹)



〈그림 8〉 실험체설치 전경

플레이트 모서리에 LVDT 4개를 설치하였으며, 4개의 LVDT의 측정값의 평균값을 축방향 변위량으로 정의한다. 횡방향 변위를 측정하기 위해 실험체 단면 중앙부위에 LVDT 4개를 기둥부재의 횡방향으로 설치하였다.

#### 3.2 재료시험 결과

실험에 사용된 강재의 인장시험은 SK B 0802 금속재료 인장시험편 규정에 따라 수행하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

〈표 2〉 강관의 소재시험 결과

강관두께 (mm)	$F_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_y/F_u$ (%)	연신율 (%)
3.2	357	443	81	29
4.5	327	366	89	31
6.6	295	352	82	36

〈표 3〉 충전콘크리트의 압축강도 시험결과

설계 강도 (MPa)	w/c (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				28일 강도 (MPa)
		시멘트	물	모래	골재	
36	45	444	200	749	861	37.5

〈표 4〉 탄소섬유쉬트의 소재시험 결과

섬유중량 (g/m <sup>2</sup> )	설계두께 (mm/층)	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	인장탄성율 (N/mm <sup>2</sup> )	파단시 신율 (%)
200	0.111	3,500 이상	235,000	1.5

설계강도 36MPa인 콘크리트에 대한 배합표와 KS F 2404 규정에 의한 28일 압축강도시험결과 값은 표 3과 같다.

탄소섬유쉬트의 기계적 성질은 제조사인 S사에서 제공한 결과 값을 인용하였으며 JIS R 7601 시험방법에 의해 수행된 재료물성치 값은 표 4와 같다.

### 3.3 실험결과

#### 3.3.1 실험체 파괴양상

기존 원형강관 CFT 실험체 모두 압축력이 가해짐에 따라 실험체는 강관이 전체적으로 횡방향으로 팽창하였으며 최종적으로는 기둥부재에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다.

탄소섬유쉬트로 추가구속한 CFT 실험체는 압축력이 가해짐에 따라 강관은 횡방향으로 팽창하였으나 탄소섬유쉬트의 추가구속으로 인한 구속효과 때문에 강관의 팽창과 국부좌굴은 지연됨을 관찰할 수 있었다. 이후 하중재하가 증가함에 따라 강관의 팽창으로 인해 탄소섬유쉬트가 전체적으로 파단되었으며, 최종적으로는 강관에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다.

#### 3.3.2 하중-축변위 관계

그림 11, 12, 13은 각 실험체의 하중-축변위 관계를 직경-두께비 계열로 정리하여 나타낸 것이다. 기존 CFT 실험체의 경우 축방향 변위가 증가함에 따라 계속적으로 축하중이 증가하다가 일정시점 이후 내력저하 현상이 완만히 발생하였으며 최종적으로는 내력의 저하 없이 축변위만 계속적으로 증가하는 거동을 보였다.

탄소섬유쉬트로 보강한 실험체는 최대내력은 증가하였으나 탄소섬유쉬트가 파괴되는 시점의 하중-축변위 관계에서는 급격한 내력저하현상을 보였으며 탄소섬유쉬트 파단후 기존 CFT 실험체와 마찬가지로 내력의 저하 없이 축변위만 계속적으로 증가하는 거동을 보였다.



〈그림 9〉 기존 CFT 실험체의 파괴모습 (C6N 실험체)



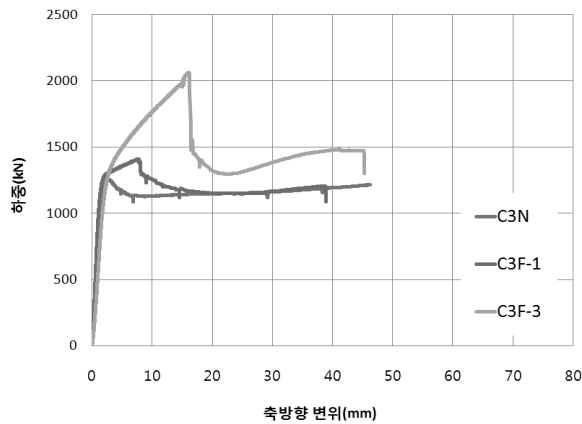
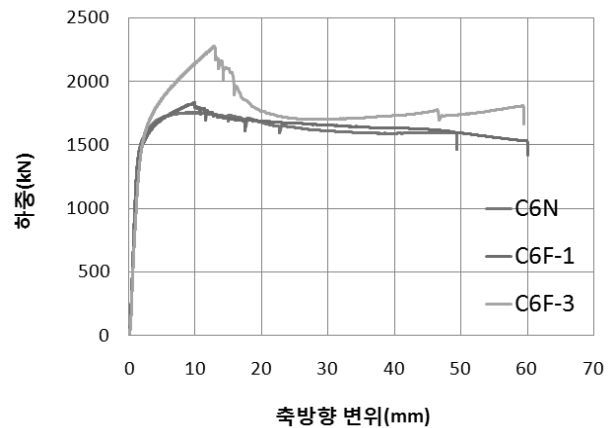
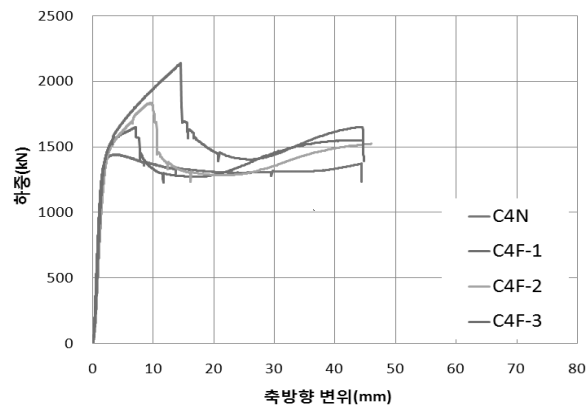
〈그림 10〉 보강된 CFT 실험체의 파괴모습 (C6F-3 실험체)

직경-두께비 44(강관두께 3.2mm)인 C3계열의 실험체를 살펴보면, 기존 CFT 실험체인 C3N 실험체는 하중초기단계에서는 하중재하가 증가함에 따라 내력이 점차적으로 증가되었으며 축변위 2.9mm 단계에서 최대내력 값은 1252.2kN으로 나타났다. 이후 점차적으로 내력은 저하되면서 이후로는 내력저하가 거의 발생하지 않으며 축변위가 증가함에도 불구하고 일정한 내력을 보였다.

탄소섬유쉬트 1겹 보강한 C3F-1 실험체는 기존 CFT 실험체와 마찬가지로 하중초기단계에서 하중재하가 증가함에 따라 내력이 점차적으로 증가하였으나 이후로도 기존 C3N 실험체와는 달리 실험체의 내력 값이 증가하였다. 축변위 5.7mm 단계에서 실험체의 최대내력 값이 1374.4kN으로 나타났으며 이후 탄소섬유쉬트 파단과 함께 급격한 내력저하현상을 보였다. 이후 실험체의 내력은 점차적으로 저하되었으며 끝으로 기존 CFT 실험체와 마찬가지로 축변위가 증가함에도 불구하고 일정한 내력을 보였다.

탄소섬유쉬트 3겹으로 보강한 C3F-3 실험체는 축변위가 증가함에 따라 하중이 계속적으로 증가하였으며 축변위 16.1mm 단계에서 최대내력값은 2062.9kN으로 나타났다. 이후 탄소섬유쉬트의 파단과 함께 급격한 내력저하현상을 보였으며 축변위의 증가에도 일정한 내력을 보였다.



〈그림 11〉 C3 계열 실험체 하중-축변위 관계 ( $D/t=44$ )〈그림 13〉 C6 계열 실험체 하중-축변위 관계 ( $D/t=21$ )〈그림 12〉 C4 계열 실험체 하중-축변위 관계 ( $D/t=31$ )

직경-두께비 31(강관두께 4.5mm)인 C4계열의 실험체를 살펴보면, 기존 CFT 실험체인 C4N 실험체는 C3 실험체와 비슷한 하중-축변위 거동을 보였으며 최대내력 값은 축변위 4.2mm에서 1441.4kN으로 나타났다. 탄소섬유쉬트로 보강한 실험체의 경우 C3계열과 비슷한 거동을 보이며 최대내력 이후 급격한 내력저하현상을 보였다. 탄소섬유쉬트 1겹으로 보강한 C4F-1 실험체는 축변위 7.0mm에 최대내력 값은 1653.5kN으로 나타났으며, C4F-3 실험체는 축변위 14.5mm에서 최대내력 값은 2140.2kN으로 나타났다. 또한 탄소섬유쉬트 2겹으로 보강한 C4F-2 실험체 분석결과 최대내력 값은 C4F-1과 C4F-3 실험체에 중간에 위치하였으며, 축변위 9.6mm에서 최대내력 값은 1839.7kN으로 나타났다.

직경-두께비 21(강관두께 6.6mm)인 C6계열의 실험체를 살펴보면, 기존 CFT 실험체인 C6N은 최대내력 이후 완만한 내력저하를 보이고 있으며 축변위 9.3mm에서 최대내력 값은 1754.1kN으로 나타났다. 또한 탄소섬유쉬트 1겹으로 보강한 실험체인 C6F-1 실험체의 경우 타 계열의 실험체(C3F-1, C4F-1)와는 달리 최대내력점 이후 완만한 내력저하를 보이고 있으며 축변위 9.8mm단계에서 최대내력 값은 1831.9kN으로 나타났다. 탄소섬유쉬트 3겹으로 보강한

C6F-3 실험체의 경우도 최대내력점 이후 타 계열의 실험체(C3F-3, C4F-3)와는 달리 완만한 내력저하현상을 보였다. 실험결과는 축변위 12.9mm에서 최대내력 값은 2262.8kN으로 나타났다.

## 4. 실험결과분석

### 4.1 최대내력분석

#### 4.1.1 실험체 최대내력

각 실험체의 최대내력값은 표 5에 정리하였다. 일반적으로 직경-두께비가 작아질수록, 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가할수록 최대내력은 증가하는 것으로 나타났다.

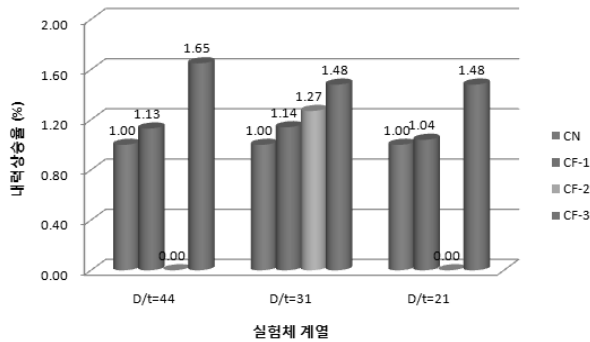
위 실험결과를 살펴보면 탄소섬유쉬트의 보강겹수의 증가로 인해 기존의 원형 CFT 기둥보다 최대내력이 증가하는 것을 알 수 있다. 탄소섬유쉬트의 추가구속으로 인한 구속 효과의 증가로 내부충전콘크리트의 압축강도는 증가하고 이로 인해 기둥부재의 압축내력은 증가한다.

〈표 5〉 실험체의 최대내력 비교

실험체명	$D/t$	보강겹수	최대내력 (kN)	$\frac{P_{MAX}}{P_{CN}}$
C3N	44	-	1252.4	1.00
C3F-1		1	1409.2	1.13
C3F-3		3	2062.9	1.65
C4N	31	-	1444.5	1.00
C4F-1		1	1653.3	1.14
C4F-2		2	1839.6	1.27
C4F-3		3	2139.3	1.48
C6N	21	-	1757.1	1.00
C6F-1		1	1833.6	1.04
C6F-3		3	2274.6	1.48

#### 4.1.2 탄소섬유шит 보강접수에 따른 내력영향평가

그림 14는 기존 CFT의 최대내력대비 탄소섬유шит로 보강한 CFT 기둥의 내력증가율을 각 계열별로 나타낸 것이다. 탄소섬유шит 보강접수에 따른 최대내력분석결과 C3 계열 ( $D/t=44$ ) 실험체는 탄소섬유шит 보강접수가 증가함에 따라 기존 CFT 기둥보다 내력은 13%, 65% 증가한 것으로 나타났다. C4 ( $D/t=31$ ) 계열 실험체는 최대내력이 각각 14%, 27%, 48% 증가하였으며, C6 ( $D/t=21$ ) 계열 실험체는 최대내력이 기존 CFT 기둥보다 4%, 45% 증가하였다. 탄소섬유шит의 보강접수가 증가함에 따라 최대내력은 증가하는 것으로 나타났으며, 구속효과로 인한 내력상승효과가 확연히 증가함을 알 수 있었다.

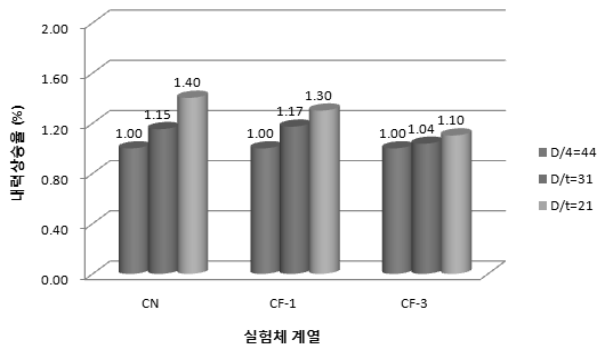


〈그림 14〉 탄소섬유шит 보강접수 영향에 따른 내력영향평가

#### 4.1.3 직경-두께비에 따른 내력영향평가

그림 15는 직경-두께비에 따른 각 실험체 계열별 내력증가율을 나타낸 것이다.

일반적으로 직경-두께비가 작아질수록 최대내력은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강관두께의 증가로 인한 구속효과의 증가로 인해 최대내력이 상승한 것으로 사료된다. 기존 CFT 계열인 CN 계열의 경우 직경-두께비가 작아질수록 최대 40% 정도까지 최대내력이 상승하였다. 탄소섬유шит 1겹으로 보강한 CF-1 계열 실험체는 직경-두께비 감소



〈그림 15〉 직경-두께비 영향에 따른 내력영향평가

에 따라 17%, 30% 최대내력이 상승하였고, 탄소섬유шит 3겹으로 보강한 C3F-3 실험체는 직경-두께비가 감소함에 따라 10% 정도 최대내력이 상승하였다. 직경-두께비가 감소함에 따라 내력이 증가한 이유는 강관의 단면적의 증가로 인해 실험체의 압축내력이 상승하기 때문이며, 이러한 경향은 무보강실험체(CN 계열), 1겹 보강실험체(CF-1 계열), 3겹 보강실험체(CF-3 계열)에서 동일하게 나타났다.

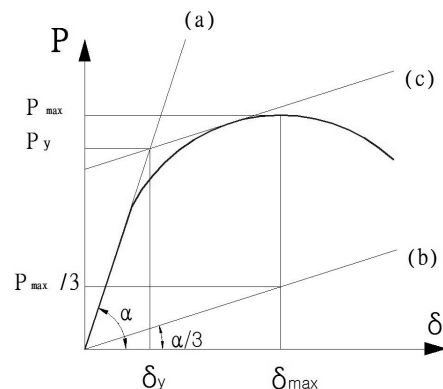
#### 4.2 실험체의 소성변형성능 평가

압축실험체 대한 평가방법은 최대내력평가방법과 더불어 항복이후 파괴점까지의 실험체의 소성변형성능을 파악하는 것 또한 중요하다. 그림 16은 실험체의 변형성능을 파악하기 위한 개념도이다. 항복점은 그림 16과 같이 1/3 점선법<sup>(3)</sup>을 이용하여 산정하며, 파괴점은 실험체의 최대내력시의 축변위량으로 정의한다. 소성변형능력은 부재실험에서 정해지는 최대내력시의 변형도  $\epsilon_{max}$ 을 항복내력시의 변형도  $\epsilon_y$ 로 나눈 값을 소성변형율  $\bar{\epsilon}$ 로 정의한다.<sup>(3)</sup>

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \quad (3)$$

여기서,  $\bar{\epsilon}$ 는 소성변형율,  $\epsilon_y$ 는 항복점에서의 변형도,  $\epsilon_u$ 는 파괴점(최대점)에서의 변형도이다.

실험체의 항복점을 찾기 위한 1/3 점선법<sup>(5)</sup>을 이용하여 산정하였으며 그 개요는 다음과 같다. 항복시 축하중값( $P_y$ ) 값은 그림 16과 같이 하중-축변위 곡선에서 원점과 최대내력의 1/3되는 점을 연결한 선분 그림 16의 (a)을 초기접선강성 값으로 하고, 이 선분과 변위축이 이루는 각의 1/3이 되는 선분을 원점에서 그은 후 그림 16의 (b), 실험값과 외접하도록 평행이동시켜 선분을 만들고 그림 16의 (c), 처음에 그은 초기접선강성 선분과 만나는 점점을 평가한 값이다.



〈그림 16〉 항복점의 정의 개념도



위 개념을 바탕으로 각 실험체의 항복점과 파괴점을 표 6에 정리하였다. 표 6에서 나타난 것과 같이 일반적으로 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가함에 따라 최대내력에서의 축변위량이 지연됨으로써 실험체의 변형성능 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이는 탄소섬유쉬트의 추가구속으로 인해 강관의 국부좌굴시점을 지연시켜 내부충전콘크리트의 구속효과를 계속적으로 유지시킬 수 있었기 때문이라 사료된다. 결국 실험체의 파괴점(최대내력점)에 대한 축변위량의 지연으로 인해 실험체의 변위량은 상승되고 강관의 국부좌굴시점은 지연시켜 탄소섬유쉬트로 구축한 CFT 기둥의 변형성능은 기존의 CFT 기둥보다 크게 향상되었다.

〈표 6〉 실험체의 소성변형성능 평가

실험체명	항복점( $\epsilon_y$ )	파괴점( $\epsilon_u$ )	$\bar{\epsilon}$	상승률
C3N	1.93	3.19	1.65	1.00
C3F-1	2.05	9.26	4.52	2.20
C3F-3	2.58	16.20	6.28	3.81
C4N	1.20	3.94	3.28	1.00
C4F-1	1.45	7.01	4.83	1.47
C4F-2	1.68	9.62	5.73	1.75
C4F-3	1.87	14.43	7.72	2.35
C6N	1.24	7.81	6.17	1.00
C6F-1	1.56	10.62	6.81	1.10
C6F-3	1.72	13.12	7.62	1.23

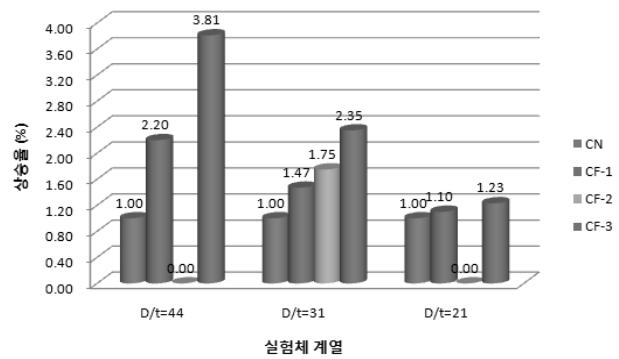
#### 4.2.1 탄소섬유쉬트 보강겹수에 따른 소성변형성능평가

일반적으로 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가함에 따라 실험체의 소성변형성능은 증가하는 것으로 나타났다. C3계열 실험체의 경우 기존 CFT 실험체 보다 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가함에 따라 소성변형성능은 120%, 281% 상승하였으며, C4계열 실험체는 각각 47%, 75%, 135% 상승하였다. 또한 C6계열 실험체는 각각 10%, 23% 소성변형성능이 증가하였다.

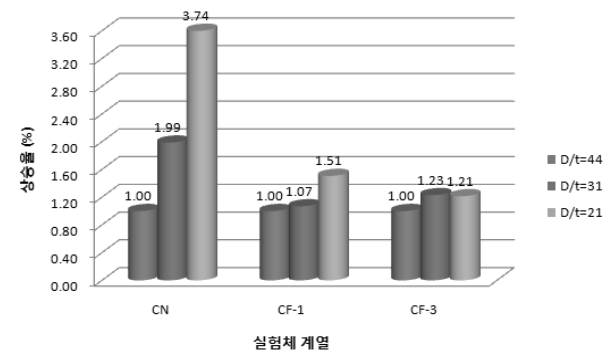
#### 4.2.2 직경-두께비에 따른 소성변형성능평가

그림 18은 직경-두께비에 따른 실험체의 소성변형성능 변형성능영향평가를 나타낸 것이다.

분석결과 일반적으로 실험체의 직경-두께비가 감소할수록 소성변형성능은 상승하는 것으로 나타났다. 먼저 탄소섬유쉬트로 보강을 하지 않은 기존 CFT 실험체는 직경-두께비가 감소할수록 최대 274% 소성변형성능이 증가하는 것으로 나타났으며, 탄소섬유쉬트 1겹으로 보강한 실험체는 직경-두께비가 감소함에 따라 소성변형성능이 51% 상승하



〈그림 17〉 탄소섬유쉬트 보강겹수에 따른 소성변형성능영향평가



〈그림 18〉 직경-두께비에 따른 소성변형성능영향평가

였으며, 탄소섬유쉬트 3겹으로 보강한 실험체는 직경-두께비가 감소함에 따라 소성변형성능은 21% 상승하는 것으로 나타났다.

#### 4.3 FRP로 보강된 CFT 기둥의 장점

탄소섬유쉬트로 추가구속한 원형 CFT 기둥의 축압축실험을 수행하였으며 실험결과 FRP로 보강된 원형CFT 기둥에 대해서 다음과 같은 장점이 있음을 알 수 있었다.

- 1) 우선 기존 CFT기둥은 강관의 항복이후 내부충전콘크리트에 대한 구속효과가 감소하면서 내력은 저하되고 최종적으로 국부좌굴이 발생하며 기둥은 최종적으로 파괴된다. 그러나 탄소섬유쉬트의 추가구속을 통해 국부좌굴의 발생시점을 지연시켰다. 또한 파괴점 (하중-축변위 곡선상에서 최대내력점)을 탄소섬유쉬트의 추가구속으로 국부좌굴을 지연시켜 기둥의 소성변형능력이 향상되는 것으로 나타났다. 본 시스템을 힘을 받는 기둥의 내진설계에 적용시 국부좌굴의 제어 및 연성능력향상시켜 기둥의 내진성능을 크게 개선하게 될 것이다. 따라서 본 연구에서 제안한 기둥시스템은 내진성능 확보를 위한 기존 CFT 건물의 보수보강과 화

재로 인해 손상된 CFT 기둥의 보수보강에 널리 쓰일 것으로 사료된다.

- 탄소섬유쉬트의 인장강도는 강판보다 3-5배 정도 크기 때문에 탄소섬유쉬트로 추가구속시 기존 강판보강 공법보다 구속효과로 인한 압축내력상승율은 훨씬 크게 나타날 것이다. 또한 강판과 FRP로 구속된 콘크리트는 2중선형거동을 보이기 때문에(그림 6 참고) 본 연구에서 제시하는 기둥시스템은 강판보강법 보다 적은 두께의 보강량으로도 압축내력을 크게 향상시킬 수 효과가 있을 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 CFT기둥과 탄소섬유쉬트로 추가구속된 CFT 기둥에 대한 압축거동 및 내력성능평가를 비교하기 위해 총 10개의 실험체를 제작하였으며, 실험변수는 탄소섬유쉬트 보강겹수와 직경-두께비를 선택하였다. 단조압축실험을 통해 두 종류의 파괴거동과 내력성능 및 변형성능을 비교분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 기존 원형강관 CFT 실험체 모두 압축력이 가해짐에 따라 실험체는 강관이 전체적으로 횡방향으로 팽창하였으며 최종적으로는 기둥부재에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다. 탄소섬유쉬트로 동시에 구속된 CFT 실험체는 강관이 횡방향으로 팽창하였으나 탄소섬유쉬트의 추가 구속효과로 인해 강관의 좌굴현상이 지연됨을 관찰하였다. 이후 강관의 횡변형으로 인해 탄소섬유쉬트가 파단되며 최종적으로는 실험체에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다.
- 하중-측변위 관계곡선에서 기존 CFT 실험체의 거동은 최대내력점 이후 내력저하 현상을 보이고 있다. 이후 하중이 계속적으로 증가하여도 내력저하 현상은 거의 발생되지 않고 측변위만 증가하는 거동을 보이고 있다. 그러나 탄소섬유쉬트와 강관으로 동시에 구속된 CFT 실험체의 경우 항복점 이후로도 부재의 내력은 계속적으로 증가하여 기존의 CFT 실험체의 최대내력점을 초과하였으며, 최대내력점 이후 탄소섬유쉬트의 파단과 함께 내력은 급격히 저감하였다.
- 최대내력상승효과를 살펴보면 일반적으로 직경-두께비가 감소할수록, 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가할수록 실험체의 최대내력은 증가하는 것으로 나타났다. 탄소섬유쉬트의 보강겹수가 증가함에 따라 실험체의 최대내력은

C3 계열 실험체는 최대65%, C4 계열 실험체는 48%, C6계열 실험체는 48% 증가하였다. 내력상승원인은 탄소섬유쉬트의 추가 구속에 따라 충전콘크리트의 구속효과 또한 증가하게 되어 이로 인해 내부충전 콘크리트의 강도는 상승하게 되며, 이로 인해 기둥부재의 내력 또한 상승하게 된다.

- 실험체의 변형성능을 평가하면 직경-두께비가 감소할수록, 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가할수록 실험체의 변형성능은 증가하는 것으로 나타났다. 탄소섬유쉬트의 보강겹수가 증가함에 따라 C3 계열 실험체는 최대 281%, C4 계열 실험체는 135%, C6계열 실험체는 23% 증가하여, 직경-두께비가 큰 얇은 강판을 사용한 CFT 기둥에서 탄소섬유쉬트로 인한 실험체의 변형성능이 가장 효율적으로 증가하였다. 탄소섬유쉬트의 추가구속으로 인해 강관의 국부좌굴 시점을 지연시키고 이로 인해 실험체의 변형성능은 기존 CFT 실험체 보다 더욱 향상하였다.
- 기존의 CFT 기둥은 강관의 항복점 이전까지는 강관의 응력은 증가하게 때문에 내부충전 콘크리트에 대한 구속력은 증가하게 되고 이로 인해 부재의 내력은 증가한다. 그러나 강관의 항복이후로는 강관의 응력은 일정하게 되어 충전콘크리트에 대한 구속력은 감소하게 된다. 그러나 탄소섬유쉬트와 강관으로 동시에 구속한 CFT 기둥은 강관의 항복점 이후에도 탄소섬유쉬트의 구속효과 때문에 내부충전 콘크리트에 대한 구속력은 탄소섬유쉬트가 파단되는 시점까지 계속적으로 증가하여 부재의 내력은 기존 CFT 기둥의 내력을 초과하게 된다.

## 감사의 글

본 논문은 과학기술부 국가지정 연구실 사업인 "초고층 구조시스템 선정 평가 기술"(Roa-2007-000-10047-0) 3차년도 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

- 대한건축학회, 건축구조설계기준, 460-463, 2005.
- Ge., H., and Usami., T., "Strength of concrete filled steel tubular columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 11, 3036-3054, 1992.
- 박정민, 김화중, "원형강관으로 구속된 콘크리트의 역학적 거동 특성에 관한 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제 7권 3호, 199-209, 1995.
- Schneider, S.P., "Axially loaded concrete-filled steel

- tubes,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 10, 1125-1138, 1998.
5. 지구현, 최성모, 김동규, “일정축력과 반복 수평력을 받는 콘크리트충전 각형강관 기둥의 변형성능 평가,” 한국강구조학회 논문집, 제 12권 2호, 209-219, 2000.
  6. Fam, A., Qie, F., Q. and Rizkalla, S. “Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads,” *Journal of structural Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 4, 631-640, 2004.
  7. Xiao, Y. He, W., and Choi, K. K., “Confined concrete-filled tubular columns,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 3, 488-497, 2005.
  8. 박재우, 김진호, 홍영균, 홍기섭, “축력과 반복수평력을 받는 TR-CFT기둥에 관한 실험적 연구,” 한국강구조학회 논문집, 제 19권 4호, 403-412, 2007.
  9. Tao, Z., Han, L. H., and Wang, L. L., “Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, No. 8, 1116-1126, 2007.
  10. 박재우, 홍영균, 홍기섭, 이성희, 최성모, “탄소섬유쉬트 로 구속된 콘크리트충전 각형강관기둥의 단조압축실험,” 한국강구조학회 논문집, 제 21권 3호, 311-320, 2009.
  11. 강석빈, “정축력하에서 반복수평력을 받는 콘크리트충전 강관 기둥의 이력거동에 대한 연구,” 서울시립대학교 석사 학위논문, 41-42, 1999.
  12. 정훈식, “탄소섬유쉬트와 나선형 철근으로 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계에 관한 연구,” 성균관 대학교 석사 학위논문, 13-18, 2002.
  13. J. G. Macgregor., *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall, INC., 67-68, 465-468, 1997.
  14. J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith, L. Lam, *FRP Strengthened RC Structures*, John Wiley & Son, INC., 168-176, 2002.
  15. (사)한국구조물진단학회, “한국구조물진단공학”, 구미서관, 387-388, 2006.