

# 구속 효과를 고려한 원형 CFT 기둥의 비선형 해석

## Nonlinear Analysis of a Circular CFT Column Considering Confining Effects

한택희\* · 원덕희\*\* · 이규세\*\*\* · 강영종\*\*\*\*

Han, Taek Hee · Won, Deok Hee · Yi, Gyu Sei · Kang, Young Jong

### Abstract

An analysis program to predict the behavior of a concrete filled steel tube column (CFT) was developed. It considered confining effect, material nonlinearity, strain hardening of steel, and initial axial load. With the developed program, axial load-bending moment interaction analyses, moment-lateral displacement relation analyses, and lateral load-lateral displacement relation analyses were performed. For the verification of the developed program, analysis results were compared with the test results from the other researches. The verified results showed that the developed program predicted the behavior of the CFT column with agreeable accuracy. And they showed that it is necessary to consider the confining effect for the reasonable analysis of the CFT column. A simple parametric study was performed and it chose the strength of unconfined concrete and the thickness of a steel tube as the major parameters affecting the behavior of the CFT column. The parametric analysis results showed that the CFT column had higher strength and smaller ductility by increasing the strength of concrete. But the CFT column showed higher strength and larger ductility by increasing the thickness of the steel tube.

**Key words** : CFT, confining effect, nonlinear, composite, column

### 요 지

콘크리트의 구속효과 및 재료 비선형성, 강재의 변형 경화, 초기작용 축력을 고려하여 원형 콘크리트 충전 강관(Concrete Filled Steel Tube : CFT) 기둥의 해석을 위한 프로그램을 작성하고 검증 및 해석을 수행하였다. 축력-모멘트 상관관계 해석, 모멘트-곡률 해석, 모멘트-횡변위에 대한 해석을 수행하고, 선행연구자의 실험결과와 비교하여 검증하였다. 검증결과, 작성된 프로그램은 실제 CFT 기둥의 거동에 근접하였으며, 콘크리트의 구속효과를 고려한 경우 그렇지 않은 경우보다 더 큰 강도와 연성능력을 나타내었다. 콘크리트의 강도와 강관의 두께 변화에 따른 간단한 매개변수 해석을 수행하였으며, 콘크리트의 강도 증가 시 CFT 기둥의 강도는 증가하나 연성은 저하되는 결과를 보여주었다. 반면에 강관 두께를 증가시키는 경우에는, CFT 기둥의 강도와 연성 모두 증가하는 결과를 보여주었다.

**핵심용어** : CFT, 구속효과, 비선형, 합성, 기둥

### 1. 서 론

구조물에서 기둥은 연직하중과 지진력에 저항하는 주부재이다. 따라서 기둥의 거동은 전체 구조물계에 영향을 미치게 된다. 이러한 기둥의 정확한 해석을 위해서는 실제 구조물의 거동을 반영할 수 있는 해석 모델이 필요하다. 일반적으로 가장 널리 사용되는 기둥은 철근 콘크리트 (Reinforced Concrete, RC) 기둥이며, 최근 콘크리트 충전 강관(Concrete Filled Steel Tube, CFT) 기둥이 활발히 연구되어 사용되고 있다. 이러한 CFT 기둥은 콘크리트와 강관의 상호작용과 콘크리트의 구속효과로 인하여 일반적으로 압축 및 연성 능력

이 증가하는 것으로 알려져 있으며, 변형성능과 에너지 흡수 능력이 우수하다고 알려져 있다. 따라서 많은 연구자들에 의해 CFT 기둥의 성능 평가 방법 및 해석 방법이 다양하게 연구되어 왔다.

하지만 현재, CFT 기둥은 선형 해석을 사용하여 설계가 이루어지고 있으며, 콘크리트의 구속 효과도 반영되지 않고 있다. 이러한 설계 방법은 CFT 기둥의 큰 장점이라 할 수 있는 콘크리트의 구속효과를 충분히 반영하지 못한다고 할 수 있다. 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트는 그 거동이 큰 차이를 보이므로, CFT 기둥의 경제적인 설계를 위해서는 콘크리트의 구속효과를 고려한 해석이 필요하다고

\*정회원 · 서울메트로 기술연구소 전문위원(E-mail: taekie@seoulmetro.co.kr)  
\*\*고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정  
\*\*\*정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수  
\*\*\*\*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(교신저자)

판단된다. 따라서 본 연구에서는 Mander 등(1988)의 콘크리트 모델을 이용하여 콘크리트의 구속효과와 비선형성 및 초기 축력을 고려하여 CFT 기둥의 축력-모멘트 상관관계, 모멘트-곡률관계 및 횡하중-횡변위 관계를 분석하고 기존 연구자에 의한 실험 결과와 비교하여 검증하였다.

## 2. 기존 연구

CFT 기둥의 강도 특성에 대해서는 주로 세장비, 단면형상 및 강관의 폭-두께비 등에 따른 압축 강도에 대한 연구가 수행되어 왔으며, Knowles와 Park (1996) 및 Sugano 등 (1996)은 원형단면 및 구형단면의 CFT 단주의 강도에 대해 연구를 하였다. Hajjar 등(1997)과 Hu 등(2005)은 유한요소법을 이용하여 CFT 기둥의 해석 모델을 개발하고, 실험을 수행하여 검증하였다. O'Shea 등(2000)은 실험을 통하여 원형 CFT 기둥내의 구속된 콘크리트의 강도를 비교하고 설계방법을 제안하였으며, Xiao 등(2005)은 실험을 통하여 구속된 CFT 기둥의 거동을 분석하였다. Elremaily와 Azizinamiai(2002)는 실험을 통하여 CFT 기둥의 강도와 거동을 분석하고 해석 모델을 제안하였으며, Fujimoto(2004) 등은 편심축력을 받는 CFT기둥의 거동 실험을 수행하고 해석 모델을 제안하였다.

국내에서는 강현식 등(2000)에 의해 각형 CFT 기둥의 축하중-변형의 관계 모델이 제시되었으며, 황원섭 등(2002)에 의해 유한요소 해석을 이용하여 콘크리트 구속효과를 고려한 정사각형 CFT 단주의 강도를 연구가 수행되었다. 이 후, 윤복희 등(2004)에 의해 구속효과를 고려한 CFT 기둥의 비틀림 거동이 분석되었고, 그 외에도 많은 연구자들에 의해 CFT기둥에 대한 연구가 수행되고 있다. 한편, 미국(AISC, 1988), 캐나다(CAN/CSA, 1994) 및 일본(AIJ, 1985)의 설계 기준에서도 CFT 기둥의 강도에 대한 식을 규정하고 있으며, 우리나라(한국강구조학회, 2003)에서도 Kato(1996)의 연구와 일본의 연구(AIJ, 1985)를 참고하여 CFT 기둥의 강도에 대한 가이드를 제시하고 있다. AISC-LRFD(1998)의 경우에는 다음의 식 (1)과 같이 CFT 기둥의 강도를 제시하고 있다.

$$f_{ym} = f_y + 0.85f_{co} \left( \frac{A_c}{A_s} \right) \quad (1)$$

하지만, 여러 연구자들에 의해 CFT 기둥에서의 콘크리트의 구속효과와 중요성에 대한 많은 연구가 이루어졌음에도, 현재의 설계 기준에서 제시하고 있는 CFT 기둥의 강도는 비구속 콘크리트 강도의 85% 강도를 갖는 등가 응력 사각형을 이용하여 계산되고 있으며, 강재의 강도 또한 단순히 항복강도에 의해 계산되고 있다(AISC-LRFD, 1998). Fam 등(2004)의 연구나 국내에서 제시하고 있는 설계 및 시공지침(강구조학회, 2003)에 나타난 CFT 기둥의 강도 산정식에 의한 강도와 실험 결과에 따른 강도를 비교한다면, 이러한 설계 기준에서 제시하고 있는 CFT 기둥의 강도는 모두 콘크리트의 구속효과를 충분히 고려하고 있지 못하는 것으로 판단되며, 실제 CFT 기둥이 발휘하는 강도보다 작은 강도를 산정하고 있음을 알 수 있다.

## 3. 해석 모델

### 3.1 재료 모델

Mander 등(1988)은 일축 압축 응력을 받는 구속된 콘크리트에 대하여 항복 전후의 거동을 예측할 수 있는 통합된 응력-변형률 해석법을 제안하였으며, 본 연구에서는 이 재료 모델을 이용하여 CFT 기둥의 거동을 분석하였다. 본 해석법 중 단조 증가하는 압축 하중에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Popovics(1973)에 의해 제안된 관계식을 따른다. 이 제안식을 사용할 경우, 응력-변형률 곡선에서 상승 구간과 하강 구간의 식을 따로 분리하여 정의할 필요 없이 식 (2)와 같이 통합된 하나의 식으로 정의할 수 있어, Mander 등 (1988)은 콘크리트 모델에 이 식을 차용하였으며, 이 모델은 일정한 구속 응력을 받는다는 가정에 기초하고 있다.

$$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r-1+x^r} \quad (2)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \quad (3)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad (4)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (5)$$

구속된 콘크리트의 최대 강도( $f_{cc}$ )는 식 (6)에 의해서 구할 수 있다. 구속된 콘크리트의 최대 강도에서의 변형률( $\epsilon_{cc}$ )은 식 (7)과 같이 비구속된 콘크리트의 최대 강도에 해당하는 변형률( $\epsilon_{co}$ )의 함수로서 정의된다. 나선철근이나 띠철근의 경우에는 전체 콘크리트를 완전히 구속할 수 없으므로, 최초 발생된 구속응력( $f_l$ )은 식 (8)과 같이 감소계수( $k_e$ )를 적용하여 사용된다. CFT 기둥 내의 콘크리트와 RC 기둥 내의 콘크리트의 차이는 연속적인 구속력과 불연속적인 구속력에 있다. CFT 기둥의 경우에는 강관에 의해 콘크리트가 연속적으로 구속되며, 이로 인해 구속응력을 산정할 때 감소계수를 적용하지 않는다.

$$f_{cc} = f_{co} \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_l'}{f_{co}} - \frac{2f_l'}{f_{co}}} - 1.254 \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

$$f_l' = k_e \cdot f_l \quad (8)$$

그림 1은 CFT 부재 단면의 자유물체도를 보여주며, 이로 부터 식 (9)와 식 (10)이 유도된다. 그림 2는 한택희 등 (2007)에 의해 수행된, 유도된 식에 의한 재료모델의 검증결과를 보여준다.

$$f_l \cdot D = 2f_y t_s \quad (9)$$

$$f_l = \frac{2f_y t_s}{D} \quad (10)$$

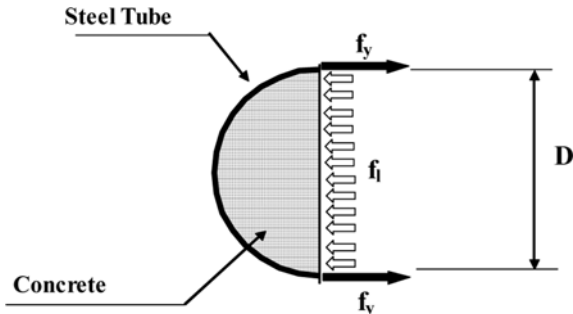


그림 1. CFT 기둥의 자유물체도

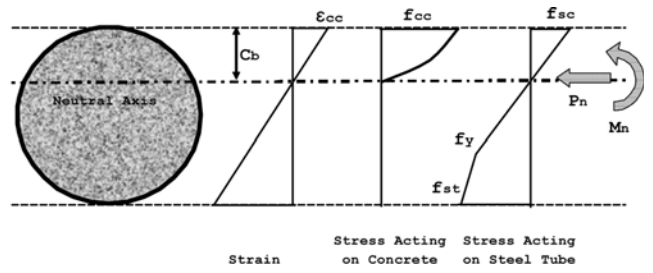


그림 3. CFT 기둥 단면내의 응력 분포

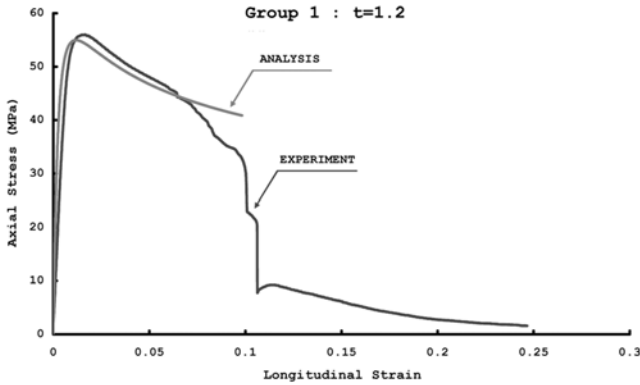


그림 2. 재료모델의 검증 (한택희 등, 2007)

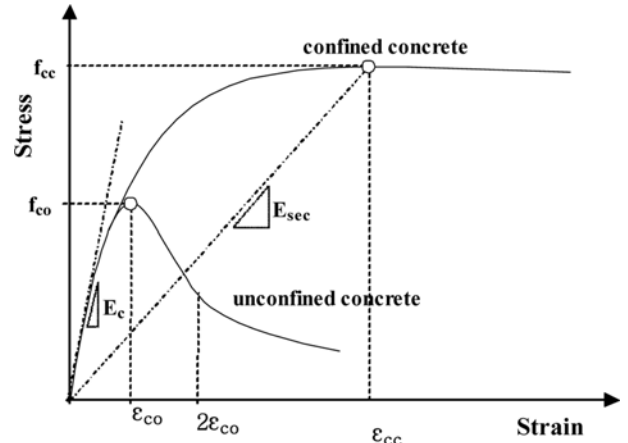


그림 4. 콘크리트의 응력-변형률 관계

### 3.2 기둥 모델

CFT 기둥의 거동을 예측하기 위하여, 3.1절에서 기술된 콘크리트 모델(Mander 등, 1988)을 이용하여 기둥 해석 모델을 개발하였다. 개발된 해석 모델은 축력-모멘트 상관관계 해석 및 횡하중-횡변위 해석을 수행하도록 작성되었다. 본 해석 모델에서는 강관과 콘크리트가 완전 합성되었다고 가정되었으며, 기둥의 단면을 층별로 해석하여 적분하는 방법인 단면 해석(section-analysis)이 이용되었다 (Kilpatrick 등, 1997). 해석 모델은 구속효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 두 가지 경우와 강관의 비선형(nonlinear) 거동과 탄소성(elastoplastic) 거동을 모두 고려할 수 있도록 개발되었다. 그림 3에 이상화된 단면해석 개요를 나타내었으며, 그림 4와 그림 5는 적용된 콘크리트와 강재의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 강재의 응력-변형률 관계는 식 (11)과 같이 표현하였다. 해석은 그림 6과 같이 변형률 분포 단계에 따라 이루어진다. 각각의 변형률 분포 단계에서 콘크리트와 강관에 작용하는 각각의 응력이 계산되며, 계산된 결과를 합산하여 식 (12)~(14)와 같이 해당하는 변형률 분포에서 기둥에 작용하는 축력( $P_j$ ), 모멘트( $M_j$ ) 및 곡률( $\phi_j$ )을 산출한다.

$$f_s = f_y + \frac{f_u - f_y}{\sqrt{\epsilon_u - 1.5\epsilon_y}} \sqrt{\epsilon_s - 1.5\epsilon_y} \quad (11)$$

$$P_j = P_j^{cc} + P_j^t \quad (12)$$

$$M_j = M_j^{cc} + M_j^t \quad (13)$$

$$\phi_j = \frac{\epsilon_{cc}}{C_{b,j}} \quad (14)$$

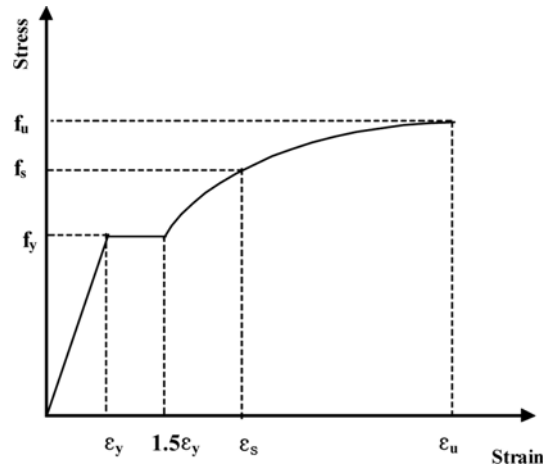


그림 5. 강재의 응력-변형률 관계

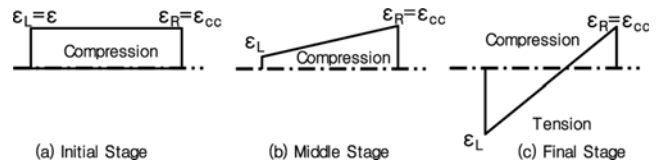


그림 6. 변형률 분포 단계

횡력과 횡변위는 각각의 변형률 분포 단계에서 계산된 모멘트와 곡률로부터 산출될 수 있다. 횡력의 경우에는 식 (15)와 같이 산출된다. 기둥의 높이에 따른 곡률의 분포는 그림 7(c)에서와 같이, 소성힌지 부분은 각 변형률 분포 단계에서 계산된 기둥 최하단의 곡률( $\phi_j$ )을 유지하고 그 이후에는 선형으로 감소하여 기둥 최상단의 곡률은 0이 된다고 가정하였다. 기둥의 높이에 따른 곡률함수( $\phi(z)$ )는 식 (16)과 같이

표현된다. 소성힌지의 길이( $L_p$ )는 그림 7(b)와 같은 모멘트 분포를 가정하여, 항복모멘트( $M_y$ ) 이상의 모멘트가 작용하는 구간으로 설정하였다.

$$F_{L,j} = \frac{M_j}{L} \quad (15)$$

$$\phi(z) = \phi_j : \text{when } 0 \leq z \leq L_p \quad (16a)$$

$$\phi(z) = \phi_j + \frac{\phi_j}{L-L_p}(z-L_p) : \text{when } z > L_p \quad (16b)$$

곡률과 변위의 관계는 그림 8과 같이 가정하여 계산하였다. 그림 8에서와 같이 기둥을 높이에 따라  $n$ 개의 요소로 분할하고, 각각의 요소의 길이를  $S_{j,i}$ 라 하고,  $i$ 번째 요소의 곡률에 의한 순수 회전각을  $\theta_{j,i}$ 라 정의하였다. 따라서  $i$ 번째 요소의 실제 회전각은 전단계의 회전각 값이 누적되어  $i$ 번째 요소까지의 누적 회전각이 되며, 이로부터 각각의 요소에 대한 변위  $\Delta_{j,i}$ 를 구할 수 있으며,  $j$ 번째 변형률 단계에서의 기둥 최상단의 변위( $\Delta_j$ )는 각 요소 변위의 합으로 나타낼 수 있다. 이를 식으로 나타내면, 식 (17)과 식 (18)로 나타낼 수 있다.

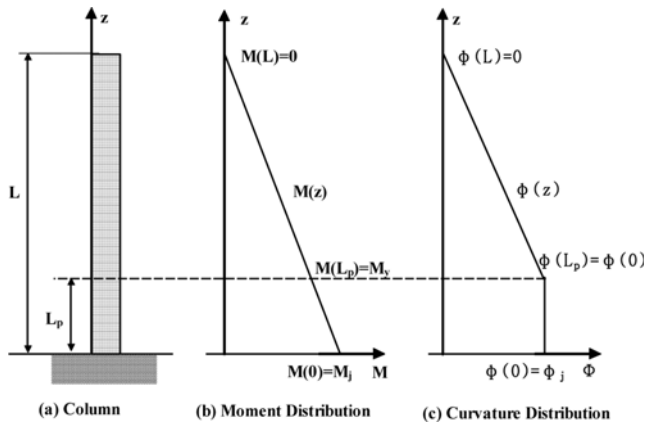


그림 7. 곡률 분포 가정

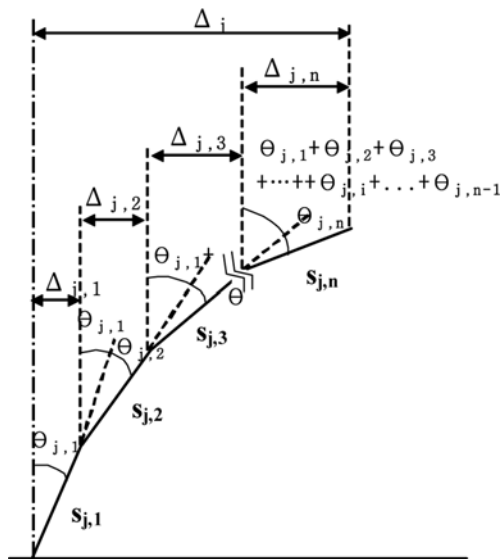


그림 8. 횡변위 계산법

$$\theta_{j,i} = \phi(z) \cdot S_{j,i} \quad (17)$$

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^n \Delta_{j,i} = \sum_{i=1}^n \left( S_{j,i} \sum_{k=1}^i \theta_{j,k} \right) \quad (18)$$

초기 축력을 응력으로 변환한 후, 이에 상응하는 초기 변형률을 갖도록 하는 방법으로 초기 축력의 영향을 고려하였으며, 초기축력에 의한 2차 모멘트 효과는 고려되지 않았다. 해석 시, 1) 강관이 좌굴과괴 되는 경우, 2) 강관의 축방향 변형률이 극한 변형률에 도달하는 경우, 3) 콘크리트의 축방향 변형률이 극한 변형률에 도달하는 경우 중 한 가지에 해당하면 기둥의 파괴로 판단하고, 해석을 종료하도록 하였다. 여기서, 강관의 좌굴 파괴 여부는 초기에 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2004)에서 제시된 식 (19)에 의해 판단된다. 콘크리트의 극한 변형률은 구속응력에 따라 다르게 계산되며, 재료모델로부터 산출된다. 재료모델에서 콘크리트의 극한변형률은 구속응력에 의해 강관의 횡방향 변형률이 극한 변형률에 도달할 때의 콘크리트 축방향 변형률로 정의하였다. 유도된 식을 이용하여 CFT 기둥 해석 프로그램을 작성하였다. 프로그램은 FORTRAN을 이용하여 작성되었으며, 그림 9는 작성된 프로그램의 순서도이다.

$$t_s > (D+t_s) \sqrt{\frac{f_y}{8E_s}} \quad (19)$$

## 4. 검증 및 해석 연구

### 4.1 해석 모델 검증

기존 연구자의 실험결과를 이용하여, 개발된 해석프로그램의 검증을 수행하였다. Hu 등(2005)의 연구결과와 비교하여,

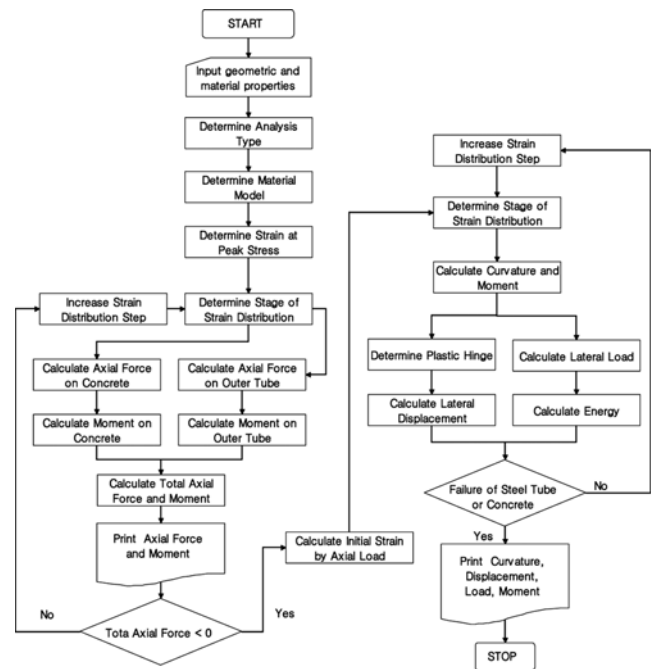


그림 9. 기둥 해석 프로그램 순서도

표 1. 시험체 제원, 재료특성 및 모멘트 비교

항목	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
$D$ (mm)	272.0				
$t_s$ (mm)	4.0				
$f_{co}$ (MPa)	24.2				29.1
$f_y$ (MPa)	285.0				288.0
$P_A$ (kN)	0	542	812	1354	1200
$M_u$ (kN-m) Experiment (Hu et al., 2005)	131.8	154.6	164.3	171.8	182.3
$M_u$ (kN-m) Analysis (Present)	112.5	150.2	163.1	177.6	182.9
error (%)	14.64	2.85	0.73	3.38	0.33

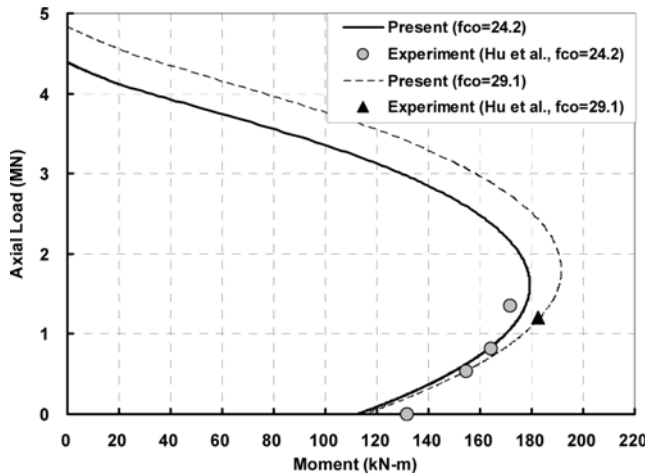


그림 10. 축력-모멘트 상관관계 해석 검증

해석프로그램의 축력-모멘트 상관관계 해석을 검증하였다. Hu 등(2005)의 연구에서의 시험체 제원 및 재료특성은 표 1에 정리되어 있으며, 강관의 극한강도와 탄성계수는 제시되어 있지 않아, 극한강도는 항복강도와 같은 값을 적용하였으며, 탄성계수는 200 GPa을 적용하였다. 시험체 S1~S4에는 강도 24.2 MPa의 콘크리트가 사용되었으며, 시험체 SP5에는 강도 29.1 MPa의 콘크리트가 사용되었다. 표 1에 실험과 해석에 의해 구해진 각 시험체의 극한모멘트 값을 정리하여 비교하였으며, 그림 10에 시험체에 대한 축력-모멘트 상관관계 해석 결과와 실험결과를 비교하였다. 극한모멘트의 해석결과는 실험결과와 비교하여, 초기 축력이 작용한 경우에는 0.33~3.38%의 오차를 보여주어, 해석결과를 신뢰할 수 있음을 보여주었다. 초기축력이 작용하지 않은 SP1의 경우에는 14.64%의 오차로, 비교적 큰 차이를 보여주었다.

그림 11은 시험체 SP3의 모멘트-곡률 해석에 대한 실험결과 (Hu end, 2005)와 해석결과의 비교를 보여준다. 그림에서 나타난 바와 같이, 개발된 해석프로그램은 극한모멘트 값 이외에, 극한 곡률 및 모멘트 증가에 따른 곡률의 변화 경향도 충분히 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 강관과 콘크리트에 작용하는 모멘트를 분리하여 나타낸 결과를 보면, 강관의 항복이후에, 강관에 작용하는 모멘트는 증가하지 않으나, 콘

구속 효과를 고려한 원형 CFT 기둥의 비선형 해석

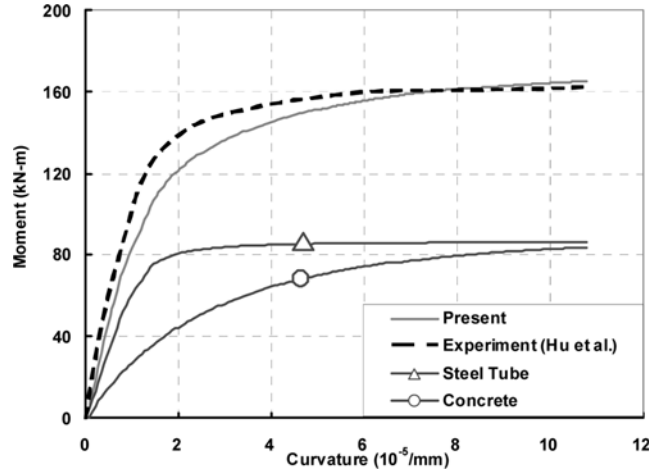


그림 11. 모멘트-곡률 해석 검증 (SP3)

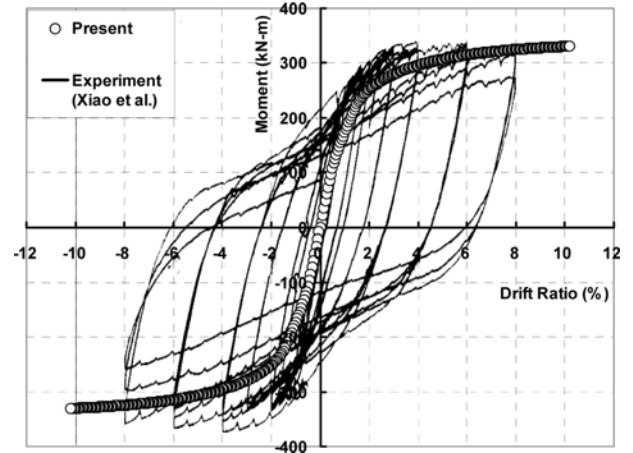


그림 12. 실험결과(Xiao 등, 2005)와 해석결과의 비교

표 2. 기둥 시험체의 제원 및 재료특성 (Xiao 등, 2005)

$D$ (mm)	$t_s$ (mm)	$f_{co}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)
313.0	6.0	28.0	312.0

크리트에 작용하는 모멘트는 꾸준히 증가함을 알 수 있다.

Xiao 등(2005)의 실험결과를 이용하여 횡하중-횡변위 관계 해석을 검증하였다. 그림 12는 실험결과와 개발프로그램에 의한 해석결과의 비교이다. 시험체의 높이는 1500 mm이며, 2000 kN의 초기축력을 작용하였다. 각각의 시험체에 대한 제원과 물성치는 표 2에 나타내었다. Xiao 등(2005)의 실험에서 시험체의 최대 모멘트는 약 329 kN-m로 측정되었으며 (그림 11에서 1사분면 기준임.), 개발프로그램에 의한 해석 결과는 330.49 kN-m의 최대 모멘트 값을 보여주어, 0.45% 오차를 보여주었으며, 실제 거동에 매우 근접한 해석결과를 보여줄 수 있다. 하지만, 중국 변위는 실험결과의 drift ratio는 8%이나, 해석결과의 drift ratio는 10%로서, 해석결과가 더 큰 값을 보여주었다.

#### 4.2 해석 연구

그림 13은 콘크리트의 구속효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 CFT 기둥의 축력-모멘트 상관도를 나타내

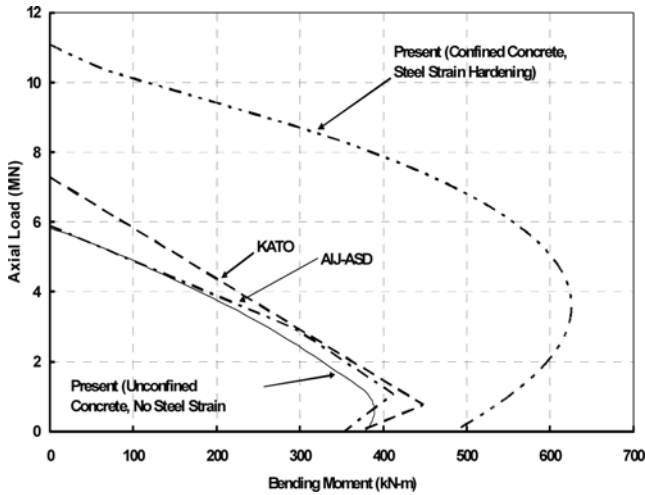


그림 13. 설계 기준별 축력-모멘트 상관도 비교

표 3. 해석 대상 기둥의 제원 및 물성치

$D$ (mm)	338.48	$f_u$ (MPa)	480.69
$t_s$ (mm)	9.00	$E_s$ (MPa)	206,010
$f_{co}$ (MPa)	29.43	$\epsilon_u$	0.20
$f_y$ (MPa)	323.73		

표 4. 해석 대상 기둥의 제원 및 물성치

$D$ (mm)	600	$f_u$ (MPa)	392
$t_s$ (mm)	4, 6, 8	$E_s$ (MPa)	206010
$f_{co}$ (MPa)	20, 25, 30	$\epsilon_u$	0.16
$f_y$ (MPa)	250	$L$ (mm)	2,500

며, 일본의 설계기준(AIJ, 1985) 및 Kato(1996)의 연구 결과에 따른 해석결과를 같이 비교하였다. 해석에 적용된 기둥의 제원과 물성치는 표 3에 요약되어 있다. 그림 13에서 나타낸 바와 같이, 콘크리트의 구속효과를 고려한 경우, 그렇지 않은 경우보다 상당히 큰 강도를 가짐을 알 수 있으며, Kato(1996)의 연구나 일본의 설계기준(AIJ, 1985)은 콘크리트의 구속효과를 고려하지 않고 CFT 기둥의 축력과 모멘트를 계산함을 알 수 있다.

콘크리트 강도와 강관의 두께가 CFT 기둥의 거동에 미치는 영향에 대해 간단한 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 기둥의 제원과 재료특성은 표 4에 나타내었다. 콘크리트의 강도는 20~25 MPa의 범위에서 변화시켰으며, 강관의 두께는 4~6 mm의 범위에서 변화시켜 해석하였다. 콘크리트 강도 변화에 따른 해석 시에는 강관의 두께를 8 mm로 고정하여 해석하였고, 강관 두께 변화에 따른 해석 시에는 콘크리트의 강도를 25 MPa 로 고정하여 해석하였다.

그림 14와 그림 15는 각각 강관의 두께가 8 mm 일 때, 콘크리트의 강도와 콘크리트 구속효과 고려의 차이에 따른 축력-모멘트 상관도와 횡하중-변위 관계를 나타낸다. 그림 14와 그림 15에 나타난 결과와 같이 콘크리트의 구속효과를 고려한 경우, 그렇지 않은 경우보다 더 큰 강도를 나타내며, 연성도 크게 증가하였음을 알 수 있다. 또한, CFT 기둥에서

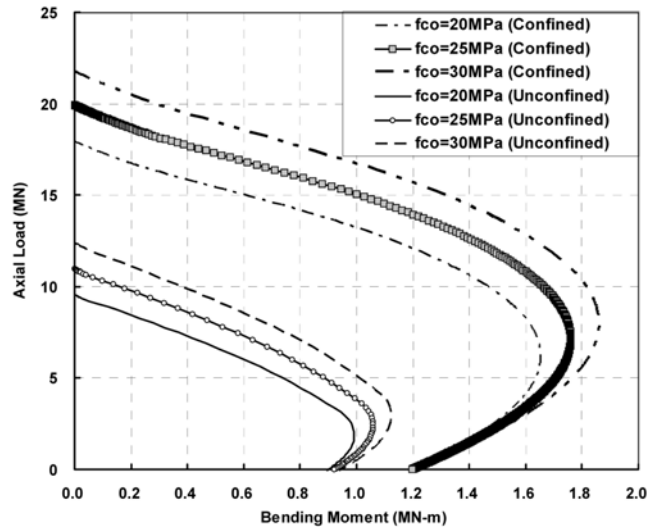


그림 14. 콘크리트 강도에 따른 축력-모멘트 상관관계 비교 ( $t_s = 8$  mm)

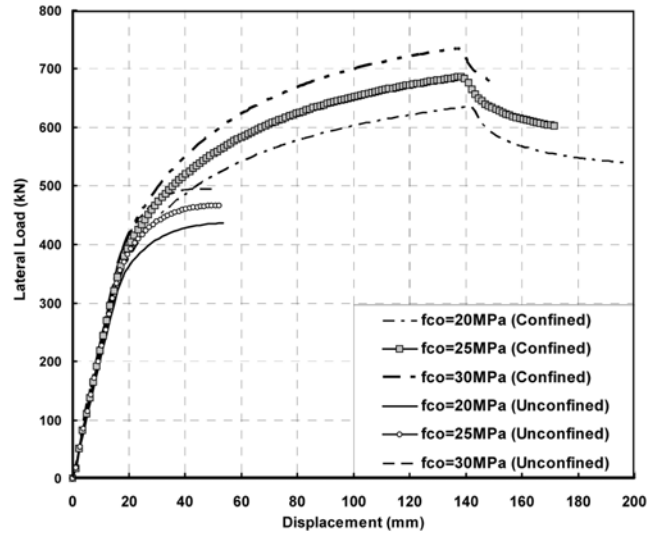


그림 15. 콘크리트 강도에 따른 횡하중-변위 비교 ( $t_s = 8$  mm)

고강도의 콘크리트를 사용할수록 강도는 증가하나, 연성은 감소함을 보여준다.

표 5에 극한에너지와 항복에너지, 그리고 에너지 연성도를 나타내었다. 콘크리트의 강도를 20 MPa에서 30 MPa로 증가시켰을 때, 강도는 기둥의 강도는 15.5%, 항복에너지는 18.95% 증가하였다. 하지만, 극한변위, 항복에너지, 에너지 연성도는 각각 약 11%, 14%, 28% 감소하였다. 콘크리트의 강도가 증가함으로써, 기둥의 강성이 증가하게 되어, 항복에너지는 증가하였다. 하지만, 극한변위가 감소하게 되어 극한 에너지는 점차 감소하는 경향을 보이며, 이에 따라 에너지 연성도가 감소하는 경향을 보여주었다. 여기서, 극한변위와 항복변위의 결정시에는 Park (1988)의 방법에 따라 계산하였다.

그림 16과 그림 17은 콘크리트의 강도가 25 MPa 일 때, 강관의 두께와 콘크리트 구속효과 고려의 차이에 따른 축력-모멘트 상관도와 횡하중-변위 관계를 나타낸다. 해석 결과, 콘크리트의 구속효과를 고려한 경우, 강관두께 차이에 따른 기둥의 강도 차이가 크며, 이는 강관 두께가 증가할수록 구

표 5. 콘크리트 강도변화에 따른 기둥의 거동

	$f_{co}=20$ MPa	$f_{co}=25$ MPa	$f_{co}=30$ MPa
극한강도 (kN)	635.82	686.46	734.40
	100.00%	107.96%	115.50%
극한변위 (kN)	198.18	171.54	151.28
	100.00%	86.56%	76.33%
극한에너지 (kN-m)	103.94	96.16	89.28
	100.00%	92.51%	85.90%
항복 에너지 (kN-m)	18.47	20.49	21.97
	100.00%	110.94%	118.95%
에너지 연성도	5.63	4.69	4.06
	100.00%	83.30%	72.11%

표 6. 강관 두께 변화에 따른 기둥의 거동

	$f_{co}=4$ mm	$f_{co}=6$ mm	$f_{co}=8$ mm
극한강도 (kN)	366.79	454.15	686.46
	100.00%	123.82%	187.15%
극한변위 (kN)	109.86	141.67	171.54
	100.00%	128.96%	156.14%
극한에너지 (kN-m)	30.49	50.83	96.16
	100.00%	166.71%	315.38%
항복 에너지 (kN-m)	10.35	15.76	20.49
	100.00%	152.27%	197.97%
에너지 연성도	2.95	3.23	4.69
	100.00%	109.49%	158.98%

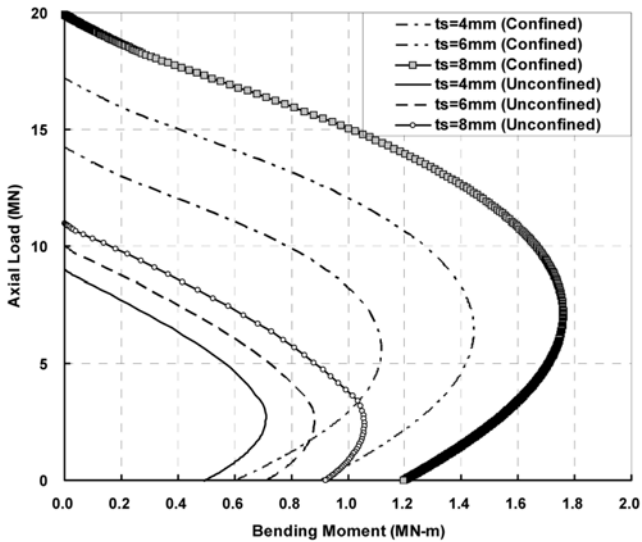


그림 16. 강관 두께에 따른 축력-모멘트 상관관계 비교 ( $f_{co} = 25$  MPa)

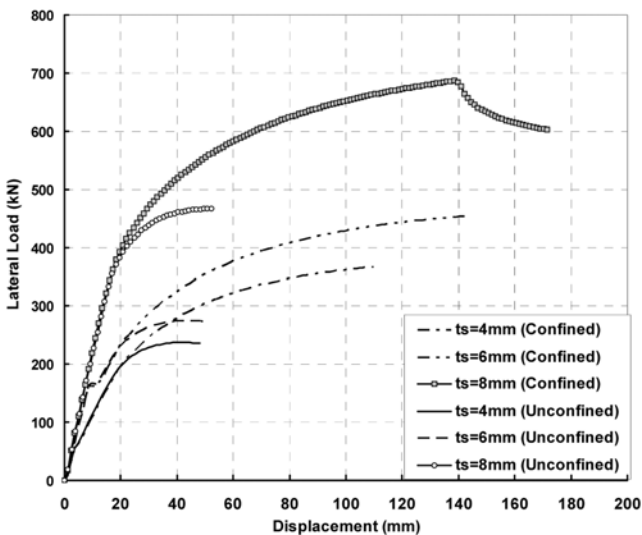


그림 17. 강관 두께에 따른 횡하중-변위 비교 ( $f_{co} = 25$  MPa)

속효과가 크기 때문이다. 또한, CFT 기둥에서 강관의 두께가 증가할수록 강도와 연성이 증가함을 보여준다.

표 6에 강관의 두께 변화에 따른 CFT 기둥의 극한에너지

구속 효과를 고려한 원형 CFT 기둥의 비선형 해석

와 항복에너지, 그리고 에너지 연성도를 나타내었다. 강관의 두께가 4 mm에서 8 mm로 증가하였을 때, 기둥의 강도, 극한변위, 극한에너지, 항복에너지, 에너지 연성도는 각각 87.15%, 56.14%, 215.38%, 97.97%, 58.98% 증가하였다. 강관의 두께가 증가함에 따라, 극한에너지와 항복에너지 모두 증가하지만, 극한에너지의 증가율이 더 크게 나타났다. 이에 따라 강관의 두께가 증가할수록 에너지 연성도도 함께 증가하는 경향을 보여주었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 구속효과 및 기둥의 강성 변화를 고려하여 원형 CFT 기둥의 축력-모멘트 상관관계 해석, 모멘트-곡률 관계 해석 및 하중-변위 관계 해석 기법을 제안하였다. 제안된 해석 기법을 통하여 CFT 기둥의 비선형 거동을 분석하였으며, 기존의 실험결과와 비교하여 검증 수행하였다. 검증 결과 축력-모멘트 상관관계 해석은 축력이 0인 경우를 제외하면, 3.38% 이내의 오차를 보여주어 높은 신뢰성을 보여주었다. 모멘트-횡변위 관계 검증에서는 최대 강도에 대해 0.45%의 오차로서 실제 강도에 근접하는 해석 값을 보여주었다.

작성된 프로그램을 이용하여, CFT 기둥의 축력-모멘트 상관관계에 대한 각국 설계기준에서 제시하고 있는 해석 방법과 제안된 방법에 의한 해석 결과를 비교하였다. 해석결과, 현재 각국의 설계기준에서 제시하는 방법은 콘크리트의 구속효과를 고려하고 있지 않아, 실제 CFT 기둥의 강도보다 낮게 평가하고 있으며, 콘크리트의 구속효과를 고려할 경우에는 CFT 기둥의 강도는 크게 증대되며, 실제 거동에 근접하는 강도를 산출할 수 있었다. CFT 기둥에서 콘크리트의 강도를 증가시키는 경우에는 강도는 증대되나, 연성이 감소하는 경향을 보였다. 콘크리트의 강도를 20 MPa에서 30MPa로 증가시켰을 때, 강도는 기둥의 강도는 15.5%, 항복에너지는 18.95% 증가하였다. 하지만, 극한변위, 극한에너지, 에너지 연성도는 각각 약 11%, 14%, 28% 감소하였다. 강관의 두께를 증가시키는 경우에는 기둥의 강도와 연성 모두 증가하는 경향을 보여주었다. 강관의 두께가 4 mm에서 8 mm로 증가

하였을 때, 기둥의 강도, 극한변위, 극한에너지, 항복에너지, 에너지 연성도는 각각 87.15%, 56.14%, 215.38%, 97.97%, 58.98% 증가하였다. 현재의 연구 결과에 따라, 추후 콘크리트의 구속효과를 고려하여 CFT 기둥을 설계한다면, 경제적인 설계에 도움이 될 것으로 판단된다.

### 기호 색인

- $A_c$  : 콘크리트 단면적
- $A_s$  : 강재 단면적
- $C_b$  : 중립축에서 인접 최외단까지의 거리
- $C_{b,j}$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 중립축에서 인접 최외단까지의 거리
- $E_c$  : 비구속 콘크리트의 접선탄성계수
- $E_{sec}$  : 비구속 콘크리트의 활선탄성계수
- $E_s$  : 강재의 탄성계수
- $F_{L,j}$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서의 횡력
- $f_c$  : 콘크리트 강도
- $f_{cc}$  : 구속콘크리트의 최대 강도
- $f_{co}$  : 비구속 콘크리트 강도
- $f_l$  : 구속응력
- $f_s$  : 강재에 작용하는 응력
- $f_{sc}$  : 강재에 작용하는 압축응력
- $f_{st}$  : 강재에 작용하는 인장응력
- $f_u$  : 강재의 극한강도
- $f_y$  : 강재의 항복강도
- $f_{ym}$  : CFT 기둥의 강도
- $f'_l$  : 유효 구속응력
- $k_e$  : 유효 횡구속응력 감소계수
- $L$  : 기둥의 높이
- $L_p$  : 소성힌지의 길이
- $M_j$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서의 모멘트
- $M_j^{cc}$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 구속콘크리트에 작용하는 모멘트
- $M_j^T$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 강관에 작용하는 모멘트
- $M_n$  : 기둥의 중립축에 작용하는 모멘트
- $M_u$  : 기둥의 극한 모멘트
- $M_y$  : 기둥의 항복 모멘트
- $M(z)$  : 모멘트 함수
- $n$  : 분할된 기둥의 요소 수
- $P_A$  : 초기축력
- $P_j$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서의 축하중
- $P_j^{cc}$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 구속콘크리트에 작용하는 축하중
- $P_j^T$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 강관에 작용하는 축하중
- $P_n$  : 기둥의 중립축에 작용하는 축하중
- $S_{f,i}$  :  $i$ 번째 변형률 분포단계에서  $i$ 번째 기둥요소의 길이
- $t_s$  : 강관의 두께
- $z$  : 기둥 최하단으로부터의 거리
- $\Delta_j$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 기둥 기력점의 변위
- $\Delta_{j,i}$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서  $i$ 번째 기둥요소의 변위

- $\varepsilon$  : 콘크리트의 축방향 변형률
- $\varepsilon_{cc}$  : 구속 콘크리트의 최대 강도 때의 축방향 변형률
- $\varepsilon_{co}$  : 비구속 콘크리트의 최대 강도 때의 축방향 변형률
- $\varepsilon_L$  : 기둥 단면 좌단의 변형률
- $\varepsilon_R$  : 기둥 단면 우단의 변형률
- $\varepsilon_s$  : 강재의 변형률
- $\varepsilon_u$  : 강재의 극한변형률
- $\varepsilon_y$  : 강재의 항복변형률
- $\theta_{j,i}$  :  $i$ 번째 변형률 분포단계에서  $j$ 번째 기둥요소의 순수회전각
- $\phi_j$  :  $j$ 번째 변형률 분포단계에서 기둥의 곡률
- $\phi(z)$  : 곡률 함수

### 감사의 글

“이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.” (기초과학 분야 : KRF-2007-357-D00245)

### 참고문헌

강현식, 유영찬, 문태섭 (2000) 각형 CFT 단주의 하중-변형도 모델, **한국강구조학회 논문집**, 제12권 제1호, pp. 9-16.

윤복희, 이은택, 박지영, 장경호 (2004) 구속효과를 고려한 콘크리트 충전 원형 강관의 비틀림 거동, **한국강구조학회 논문집**, 제16권 제5호, pp. 529-541.

한국강구조학회 (2003) 콘크리트충전 강관구조 설계 및 시공지침.

한국콘크리트학회 (2004) 콘크리트구조설계기준 해설.

한택희, 염용준, 한상윤, 강영중 (2007) 구속효과를 고려한 내부 구속 중공 CFT 부재의 비선형 콘크리트 모델 개발, **한국강구조학회 논문집**, 제19권 제1호, pp. 43-52.

황원섭, 김동조 (2002) 콘크리트 구속효과를 고려한 정사각형 CFT단주의 강도, **한국강구조학회 논문집**, 제14권 제6호, pp. 813-822.

American Institute of Steel Construction (1998) Load and Resistance Factored Design : Manual of Steel Construction, Vol. 1.

Architectural Institute of Japan (AIJ) (1985) Design Recommendations for Composite Constructions.

Canadian Standard Association (CSA) (1994) Limit State Design of Steel Structures (CAN/CSA-S16.1-94), Clause 18, Rexdale, Ontario.

Elremaily, A., Aziznamini, A. (2002) Behavior and Strength of Circular Concrete-Filled Tube Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 1567-1591.

Fam, A., Qie, F.S., Rizkalla, S. (2004) Concrete-Filled Steel Tubes Subjected to Axial Compression and Lateral Cyclic Loads, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, pp. 631-640.

Fujimoto, T., Mukai, A., Nishiyama, I., Sakino, K. (2004) Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tubular Columns, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 2, pp. 203-212.

Hajjar, J.F., Gourley, B.C., Olson, M.C. (1997) A Cyclic Nonlinear Model for Concrete-Filled Tubes. II: Verification, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 6, pp. 745-754.

Hu, H.T., Huang, C.S., Chen, Z.L. (2005) Finite Element Analysis of CFT Columns Subjected to an Axial Compressive Force and Bending Moment in Combination, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, pp. 1692-1712



- Kato, B. (1996) Column Curves of Steel-Concrete Composite Members, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 39, No. 2, pp. 121-135.
- Kilpatrick A.E., Ranagan B.V. (1997) Deformation-control analysis of composite concrete columns, Research Report No. 3/97, School of Civil Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia.
- Knowles, R., Park, R. (1996) Axial Load Design for Concrete Filled Steel Tubes, *Journal of Structural Division, ASCE*, ST10, pp. 2125-2153.
- Mander, J.B., Priestly, M.J.N., Park, R. (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- O'Shea, M.D., Bridge, R.Q. (2000) Design of Circular Thin-Walled Concrete Filled Steel Tubes, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 11, pp. 1295-1303.
- Park R. (1988) Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing, Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol.8
- Popovics, S., (1973) A Numerical Approach to the Complete stress-strain curves of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, pp. 583-599.
- Sugano, S., Nagashima, T. (1992) Seismic Behavior of Concrete Filled Tubular Steel Columns, *10th Structural Congress 92, ASCE*, pp. 914-917.
- Xiao, Y., He, W., Choi K.K. (2005) Confined Concrete-Filled Tubular Columns, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 3, pp. 488-497.

© 논문접수일 : 2009년 04월 15일  
 © 심사의뢰일 : 2009년 04월 16일  
 © 심사완료일 : 2009년 11월 09일