

# 콘크리트충전 강관기둥의 내력 및 변형 능력에 관한 연구

## A Study on the Load Carrying Capacity and Energy Absorption Capacity of the Concrete Filled Steel Tube Column

정 경 수<sup>1)</sup> · 최 성 모<sup>2)</sup> · 김 동 규<sup>3)</sup>  
Chung, Kyung Soo Choi, Sung Mo Kim, Dong Kyu

**ABSTRACT :** It has been reported by the existing papers that the ultimate load capacity and energy absorption capacity of the CFST column are considerably higher than those resulting from a simple addition of the capacities of the concrete and the steel tube. It is normally believed that the confined effect for the infilled concrete due to the hoop tension of steel at the parameter of cross sections can remarkably improve the ductility and energy absorption capacities of the CFST columns.

This paper provides the results of a study on the load-carrying capacities and energy absorption capacities of the CFST columns, a numerical analysis method ,i.e. N-M interaction curves and Moment curvature relationships. The numerical approaches are verified by comparing with the existing test results and the circular and square steel tube sections are selected to clarify the amount of confinement effects to improve the ultimate deformable capacity(a ultimate strain value) of the infilled concrete. Then, an adequate value of the ultimate strain of the infilled concrete and an equation of the ultimate capacity of the CFST column are suggested.

**KEYWORDS :** beam-columns, concrete, steel tube, confinement

### 1. 서 론

최근 도시내의 신축되는 건물의 고층화는 도심지의 지가상승 및 용지확보의 어려움으로 인하여

필연적으로 진행되고 있다. 건축물의 고층화에 따라 구조계획 측면에서 공간의 효율성을 요구할 뿐 아니라 기동 또는 주요 구조부재에는 고인성, 고강도의 부재가 요구되고 있다. 또한 지진 및 태풍

1) 대림산업(주) 기술연구소 연구원

2) 경민전문대 건축공학과 조교수, 공학박사

3) 서울시립대 건축공학과 교수, 공학박사

등에 의한 수평하중은 건물의 주요부재에 치수(Dimension)를 결정하는 중요인자로서 작용하므로, 고축력하에서의 반복하중에 의한 기둥의 안전된 이력특성을 확보해야 한다. 고층건물은 내부공간에서 구조체 특히 기둥이 차지하는 면적이 증가하므로 공간 사용성의 확보라는 측면이 중요한 문제로 등장하고 있다. 또한 건물이 완공되기까지의 공사기간도 구조시스템(Structural System)을 결정하는 중요한 요소로서 작용하고 있다. 이러한 측면을 만족할 수 있는 구조형식이 콘크리트충전 강관 구조이다.

강관 및 콘크리트충전 강관기둥도 구조부재로서의 사용빈도가 증가하는 추세이고 특히 강관이 압축재로 사용될 때 강관 내부에 콘크리트를 채우는 방법은 기둥의 단면을 증가시키지도 않고도 부재내력을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 콘크리트충전 강관은 강관과 콘크리트의 상호 핵성 작용으로 인하여 각 부재의 강도를 단순히 누가한 것 이상의 내력을 발휘한다. 이는 콘크리트충전 강관기둥의 외부에 강관이 콘크리트를 구속하는 효과에 의하여 강관내부에 콘크리트 압축강도가 상승하며 콘크리트에 의하여 강관의 국부좌굴이 방지되므로 뛰어난 변형능력을 발휘하기 때문이다.

구속효과는 강관의 원주방향 축강성(Axial Stiffness)이 콘크리트를 구속하므로 콘크리트의 체적팽창을 강관이 억제시켜 주기 때문에 발생한다.

콘크리트충전 강관에 대한 연구는 일본과 미국을 포함한 서구 유럽일부 선진국가에서 1980년도에 들어서면서 본격적으로 시작되었으며, 국내에서도 1990년대부터 연구가 본격적으로 착수되었으며 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

본 논문은 수치해석을 통하여 콘크리트충전 강관기둥의 내력과 변형능력에 대하여 정량적으로 규명하며, 기존의 실험결과들과 비교분석에 의하여 해석결과들의 신뢰성을 확보하는데 목적이 있다. 강관기둥의 내력은 강관의 구속효과에 의하여 강관내부의 충전콘크리트의 강도가 증가되는데 이를 단일식으로 제안하고 있으며 구속효과에 의

한 에너지 흡수능력의 증가를 정량적으로 평가하기 위하여 강관내부의 충전콘크리트의 종국변형도( $\epsilon_u$ )값을 실험결과에서 추출하여 제시하였다.

또한 콘크리트충전 강관기둥의 내력 및 변형능력에 영향을 주는 변수인 강재의 강도, 콘크리트의 강도 및 철골비(콘크리트에 대한 강관의 단면적비)의 변화에 따른 축력-모멘트 관계 및 모멘트-곡률 관계에 대한 해석을 수행하였으며 결과를 비교평가 하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 해석의 기본 가정

콘크리트충전 강관기둥의 역학적 거동을 파악하기 위하여 축력-모멘트 관계와 모멘트-곡률 관계에 대하여 표 1과 같은 각 변수를 변화시키면서 수치해석을 수행한다.

이론해석상의 기본가정은 다음과 같다.

(1) 콘크리트의 인장강도는 무시한다.

(2) 콘크리트충전 강관기둥 단면의 평면유지를 가정하고 강관과 콘크리트 사이의 슬립(slip)현상이 없는 일체 단면으로 한다.

(3) 콘크리트는 단면내의 성질이 균일하다.

(4) 강관에서의 국부좌굴은 일어나지 않는다.

콘크리트충전 강관기둥의 구성재료인 강관기둥과 콘크리트 강도에 대한 기본가정은 다음과 같다.

강관의 응력-변형도 관계는 탄성 완전 소성(Perfectly Elasto-plastic)으로 평가하였으며 구속효과를 고려한 경우에는 Von Mises 항복 이론식<sup>1)</sup>을 이용하여 항복응력을 산정하며 탄성계수는 구속효과를 고려하지 않은 경우와 같다고 가정한다.

콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는 “대한건축학회 철근 콘크리트 구조계산 규준 및 동해설”의 제안식에 따른다. 구속효과를 고려하지 않은 경우에는 압축강도를  $0.85 \cdot F_c (F_c : 28\text{일 압축강도})$ 로 하여 탄성-완전소성으로 이상화하였으며, 종국변형도는 일반적인 실험값인 0.35%를 사용하였다. 원형강관

인 경우에서, 구속효과를 고려한 경우는 압축강도 ( $F'_c$ )를 표 2에서 정리한 바와 같이 사용하며 구속효과에 의한 인성증가를 고려한 종국변형도는 휨모멘트에 의하여 완전 구속이 일어나지 않음을 고려하여 여려문헌<sup>2,3,4)</sup>에서 제시한 값보다 다소 못 미치는 0.7%로 가정한다. 탄성계수값은 구속효과가 항복후에 일어나므로 변동이 없다고 가정한다.

각형강관의 경우는 구속효과에 대해서 고려하지 않았다.

비교평가를 위한 변수로는 표 1과 같다.

표 1 해석변수

단면모양	원형, 각형
강관의 강도 ( $F_y$ : kg / cm <sup>2</sup> )	2000, 3000, 4000
콘크리트 강도 ( $F_c$ : kg / cm <sup>2</sup> )	200, 300, 400
단면적비 ( $A_s / A_c$ : %)	3.70, 5.55, 7.46
구속효과 고려	유, 무

## 2.2 콘크리트충전 강관기둥의 구속효과

콘크리트충전 강관기둥에 축력이 작용하여 강관과 콘크리트의 응력이 탄성범위내에 있을 때 강관의 포아송비(0.3)가 콘크리트의 포아송비(0.15~0.2)보다 크기 때문에 강관은 콘크리트보다 횡방향으로 변형이 발생하여 콘크리트를 구속하지 못한다. 그러나 하중증가에 따라 콘크리트가 점차 항복하여 포아송비가 0.5~0.8정도 급격히 상승하면 강관에 의해 구속을 받게 되므로 콘크리트는 3축, 강관은 2축 응력상태가 된다.<sup>5)</sup>

기둥단면 형상이 원형인 경우 단면에 균일한 응력을 받아 내부 콘크리트를 구속하지만 각형단면인 경우는 면외 휨강성이 적어 내부콘크리트를 구속할 수 있는 힘이 작다. 오히려 콘크리트의 횡방향변위에 의한 강관벽의 부가응력과 부가변형이 기둥의 내력에 악영향을 줄 수 있다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 원형단면에서만 구속효과가 유효한

것으로 간주하였다.

비탄성 상태에서의 콘크리트의 강도와 측압  $\sigma_r$  (구속력)과의 관계는 구속계수( $K'$ )를 변수로 한 선형일반식<sup>7)</sup>으로서 구속을 고려한 콘크리트 강도는 아래식과 같이 표현할 수 있다

$$F'_c = c\sigma_r + K' \cdot c\sigma_r \quad (1)$$

여기서  $F'_c$ 는 구속효과를 고려한 콘크리트 압축강도이고,  $c\sigma_r$ 는 콘크리트의 일축 압축강도이며,  $c\sigma_r$ 은 콘크리트의 횡방향 구속응력이다.

콘크리트의 횡압력에 의한 강관의 응력상태는 2축응력 상태이므로 Von Mises의 항복 조건식<sup>1)</sup>을 적용하여 강관의 횡방향 응력분담비  $\alpha$ 와 중심압축방향 응력분담비  $\beta$ 를 적용하여 하기의 식으로 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \{ \sqrt{(4 - 3\alpha^2)} \pm \alpha \} \quad (2)$$

## 2.3 축력-모멘트 관계

내력평가 방법으로 일본 건축학회의 철골철근콘크리트 설계기준에서 단순누가이론과 일반화 누가 강도의 이론식<sup>8)</sup>이 있는데 본 해석에서는 후자를 택하며 이에 대한 기본식은 아래와 같다.

$$N = N_c + N_s, \quad M = M_c + M_s$$

여기에서  $N_c, M_c$ 는 콘크리트 부분의 축내력과 휨내력을,  $N_s, M_s$ 는 철골부분의 축내력과 휨내력을 나타낸다.

콘크리트충전 강관기둥의 각각 구성재료의 소성강도는 표 2와 같으며 구속을 고려한 경우에 강관은 2축 응력상태가 되므로 이를 고려하여 식(2)에 적용하였다.

$$* F'_c = F_c + \alpha \cdot K \cdot \frac{2t}{D} \cdot F_y$$

표 2 콘크리트 강관의 소성강도

	구속효과를 고려하지 않은 경우	구속효과를 고려한 경우
콘크리트	$0.85 \times F_c$	$F'_c$
강 관	$F_y$	$f_{yc} = -\beta_1 \cdot F_y$ $f_{yt} = \beta_2 \cdot F_y$

여기서  $\alpha$ 와  $K$ 의 값은 실험결과<sup>7,9)</sup>를 회귀분석한 값으로서 0.24와 4.01이며  $\beta_1, \beta_2$ 는 1.10, 0.86이다.

## 2.4 모멘트-곡률관계

변형능력평가를 위한 에너지 흡수량은 모멘트-곡률관계 곡선에서 최대 모멘트 값까지 아래의 면적으로 산정하였다.

부재에 작용하는 축력( $N$ )과 휨모멘트( $M$ )는 단면에 생기는 내력과 평형을 이룬다는 기본원칙

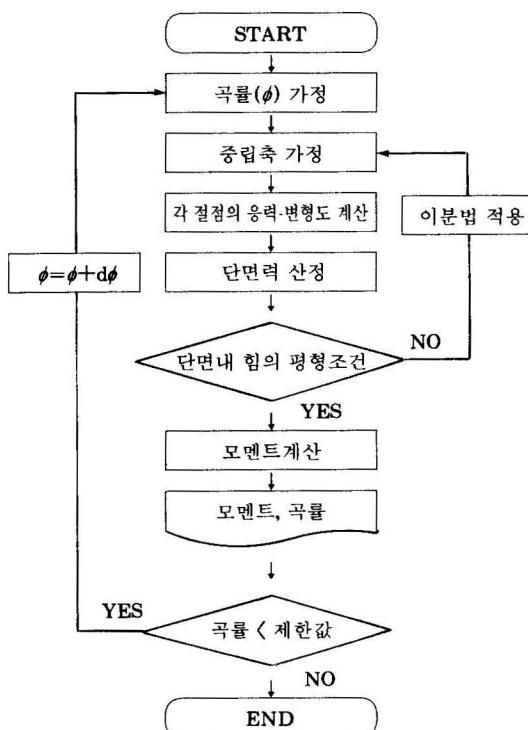


그림 1 모멘트-곡률관계 해석흐름도

아래 그림 1에서 보는 바와 같이 각 부재의 휨모멘트와 곡률은 변형도와 중립축 위치에 따라서 구하게 된다.

모멘트-곡률의 해석을 위한 각 구성재의 항복강도는 표 2에서 언급한 바와 같으며 강관의 응력과 변형도관계는 탄성-완전소성상태로 가정하여 콘크리트는 구속을 고려하지 않은 경우의 종국변형도( $\epsilon_u$ )를 0.35%로 구속을 고려한 경우는 종국변형도를 2배(0.7%)로 증가시켰으며 응력-변형도관계는 탄성-완전소성상태로 설정하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1 해석결과

표 1에서 언급한 바와 같이 해석대상 콘크리트 충전 강관기둥은 각형과 원형의 상대적인 효율성을 비교, 검증하기 위하여 동일한 소재강도와 철골비를 갖고 있다.

원형강관 기둥의 경우에는 구속효과를 고려하여 평가하였으나 각형강관 기둥의 경우에는 기존의 연구결과에서와 같이 구속효과를 배제하여 비교평가 하였다. 그림 2와 그림 3에서는 콘크리트 강도가  $300\text{kg/cm}^2$ , 강관의 강도가  $3000\text{kg/cm}^2$ 이고 철골비( $A_s/A_c$ )가 5.55%인 콘크리트충전 강관

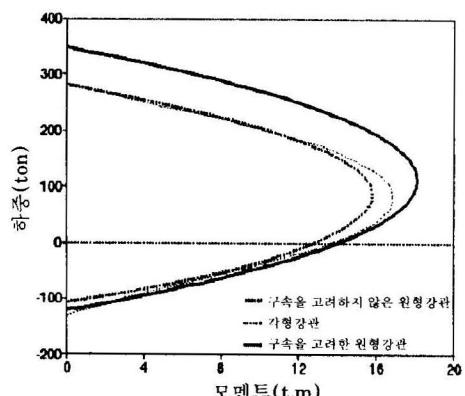


그림 2 콘크리트충전 강관기둥의 축력-모멘트 관계

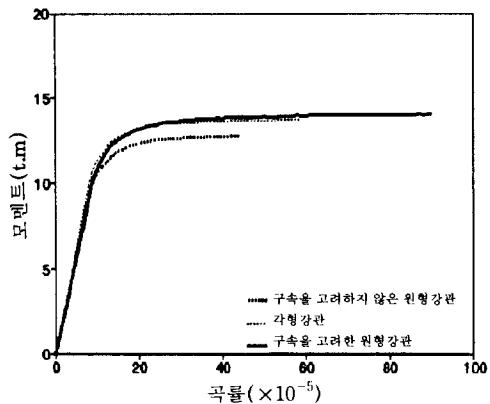


그림 3 콘크리트충전 강관기둥의 모멘트-곡률 관계

기둥의 축력-모멘트관계, 모멘트-곡률관계에 대한 해석결과를 보여주고 있다.

### 3.2 해석결과 검증

해석결과에 대한 검증을 위하여 기준의 실험결과<sup>9,10)</sup>를 기준으로 하여 내력과 에너지 흡수량에 대해서 비교·평가하였다.

원형강관의 이론적 내력은 그림 4에서 보는 바와 같이 구속효과를 고려한 것은 실험값의 73%정도이며 구속효과를 고려하지 않은 경우는 63%정도이다.

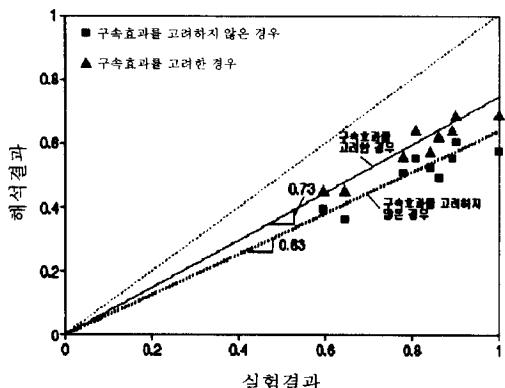


그림 4 원형강관기둥의 최대저항모멘트에 대한 실험결과의 무차원화

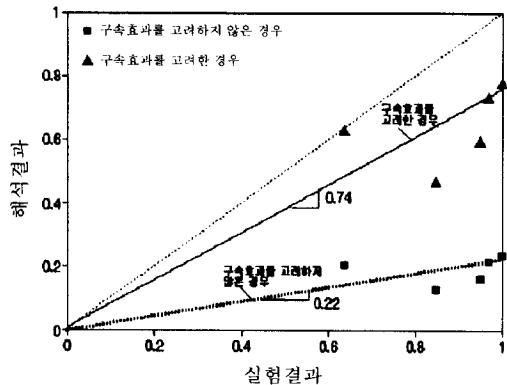


그림 5 원형강관기둥의 에너지흡수량에 대한 실험결과의 무차원화 비교

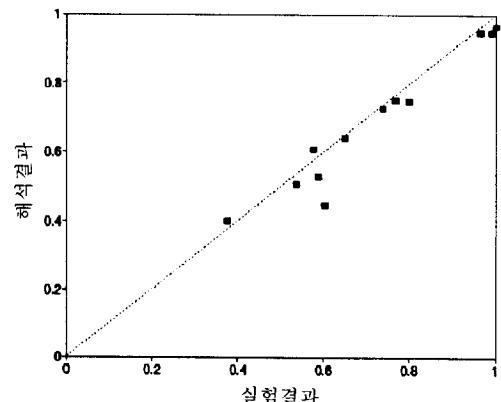


그림 6 각형강관기둥의 최대저항모멘트에 대한 실험결과의 무차원화 비교

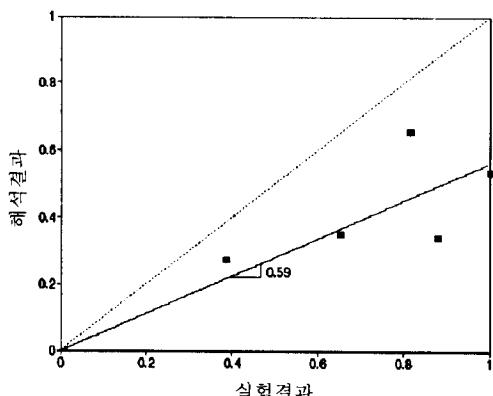


그림 7 각형강관기둥의 에너지흡수량에 대한 실험결과의 무차원화 비교

에너지 흡수량에 대하여는 그림 5에서 보는 바와 같다. 구속효과를 고려하지 않은 경우는 실험값에 비해서 22%로 매우 낮은 값을 보이며 구속효과를 고려한 경우는 74%를 나타내고 있다. 따라서 구속효과를 고려하여 콘크리트의 종국 변형도( $\epsilon_u$ )를 증가시켜(0.35→0.7%) 에너지 흡수능력을 평가하는 것이 실제 기둥에 유사하다고 판단할 수 있다.

각형강관의 경우는 그림 6, 7에서 보는 바와 같이 이론적 내력에서는 실험값과 거의 일치함을 알 수 있어 구속효과에 의한 콘크리트의 강도증가가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 에너지 흡수량 평가에서는 실험값과 비교한 경우를 보면 이론값이 실험값의 59% 정도이므로 콘크리트의 종국변형도에 강관의 구속효과가 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 최대저항모멘트(Maximum Resisting Moment)

본 이론 해석에서의 변수는 세가지로서 강관의 강도( $F_y$ ), 콘크리트 강도( $F_c$ ) 및 철골비( $A_s/A_c$ )이며 각 변수별 변화 범위는 기준값을 중심으로 1/3(33%)씩 변화시켜서 내력 및 변형능력 결과를 분석하였다.

그림 8에서 보는 바와 같이 각 변수의 증감에 따라 최대저항모멘트의 증감률은 11~22%범위였고 강관의 강도( $F_y$ ), 철골비( $A_s/A_c$ ), 콘크리트 강도( $F_c$ )의 순으로 최대모멘트의 증감에 민감하였다. 동일한 변수에 대하여 기둥형상의 변화에 따른 원형강관 기준으로 무차원화한 최대모멘트값의 변화는 그림 9에서 보는 바와 같이 각형강관 기둥은 구속효과를 고려하지 않은 원형강관기둥에 비하여 6~9%의 최대저항모멘트가 증가 하였으며 구속효과를 고려한 원형강관기둥은 구속효과를 고려하지 않은 원형강관기둥에 비하여 14~15%정도 최대저항모멘트가 증가 하였다. 변수별 최대모멘트의 증감률의 변화는 그다지 크지 않았으며 철

골비( $A_s/A_c$ )의 영향이 다소 크다는 사실을 확인할 수 있다. 구속효과를 고려한 원형강관기둥과의 최대저항모멘트값을 각형강관에 비하여 모든 변수에 대하여 5~8%정도 우수하게 나타났다. 모멘트가 가해지지 않고 축력만이 가해지는 경우 최대축력값의 상대적인 비교는 그림 10에서 무차원화하여 각형강관기둥과 구속효과를 고려한 원형강관기둥에 대하여 정리하고 있다. 두 기둥은 철골비와 단면적이 동일하므로 구속효과에 의한 축력부담능력의 증가에 따라 최대축력값이 변화하므로 충전콘크리트의 원형강관에 비하여 19~23%정도 최대축력이 증가하였으며 최대저항모멘트의 증감률보다 월등히 큰 차이가 발생하였다.

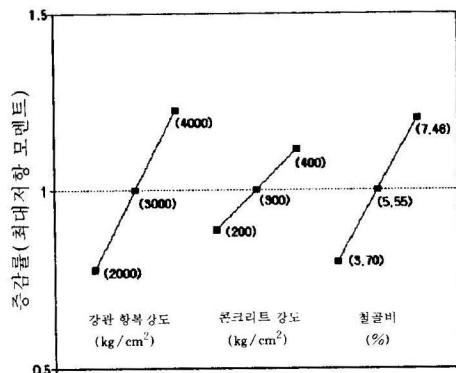


그림 8 각 변수별 원형강관기둥의 무차원화 최대저항모멘트

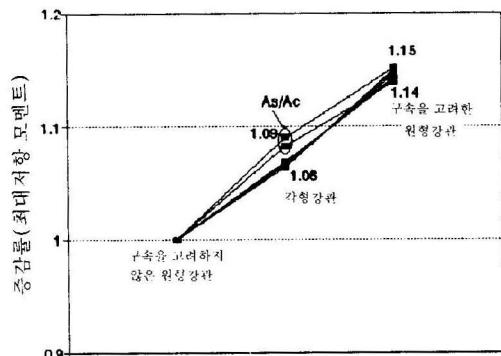


그림 9 각 변수별 원형 및 각형강관기둥의 무차원화 최대저항모멘트 비교

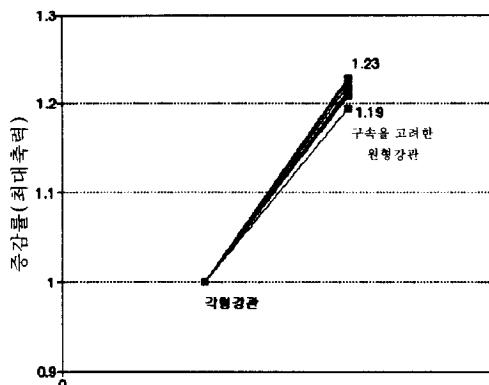


그림 10 원형 및 각형강관기등의 무차원화 최대축력

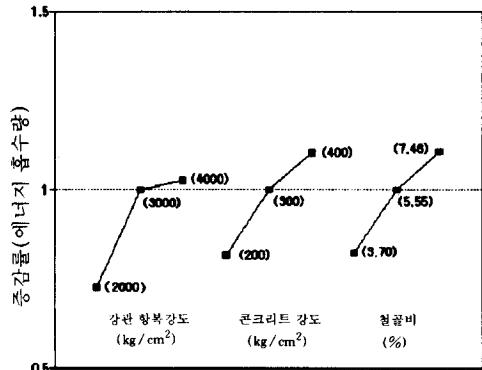


그림 11 각 변수별 원형강관기등의 무차원화 에너지 흡수량

### 3.4 변형능력 평가(Energy Absorption Capacity)

본 이론해석의 목적상 각 변수의 변화에 따른 변형능력을 평가하기 위하여 모멘트-곡률관계를 채택하였으며, 해석 및 비교평가를 명료화하기 위하여 축력이 없는 단지 곡률변화에 따른 모멘트변화곡선을 이용하였다. 골조의 변형능력을 평가하는 방법중에 일반적으로 많이 사용되는 방법인 모멘트-곡률 관계곡선에서 에너지 흡수량을 추출하여 원형강관기등과 각형강관기등에 대하여 비교·평가 하였다.

그림 11에서 보는 바와 같이 각 변수의 증감에 따라 3~28%의 변화의 분포를 나타내고 있으며 최대내력의 증감치보다 분산률이 높게 나타났다. 그림 12에서 보는 바와 같이 원형강관기등의 에너지 흡수량은 구속효과를 고려한 경우가 콘크리트의 종국변형도( $\epsilon_u$ ) 값의 증가( $0.35 \rightarrow 0.7\%$ )에 따라 2.43~2.65배로 크게 증가하였다. 구속효과를 고려한 원형강관기등은 각형강관기등에 비해서 38~78%정도 상회함을 보이고 있다. 이는 그림 13에서의 모멘트-곡률관계 곡선에서 보는 바와 같이 구속효과를 고려한 원형강관기등이 각형강관기등에 비하여 항복상태를 넘은 이후 비탄성상태를 오랜기간 유지할 수 있는 안정적인 거동의 영향때문으로 판단된다.

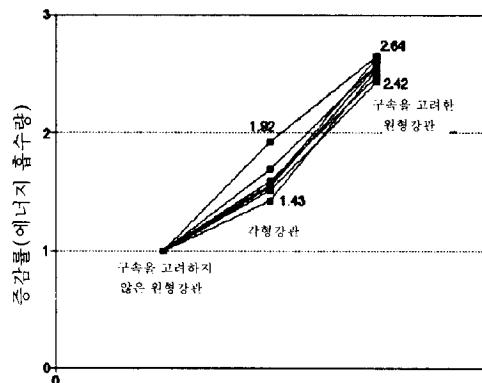


그림 12 각 변수별 원형 및 각형강관기등의 무차원화 에너지 흡수량

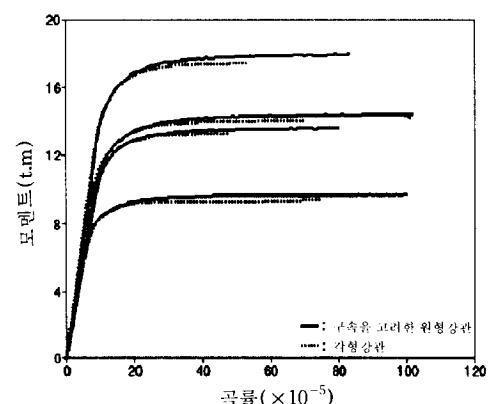


그림 13 각 변수별 충전강관기등의 모멘트-곡률관계 곡선

## 4. 결 론

이상의 콘크리트충전 강관기둥에 대해서 내력과 변형능력(에너지 흡수량)을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트충전 원형강관기둥에서 충전콘크리트의 종국변형도( $\epsilon_u$ )는 0.7%로 결정하는 것이 안전측이며 실제기둥의 거동과 유사하다고 판단된다.

2. 각 변수의 증감에 따른 콘크리트충전 강관기둥의 최대저항모멘트의 증감비는 11~22%범위였고, 강관의 강도( $F_y$ ), 철골비 ( $A_s/A_c$ ), 콘크리트강도( $F_c$ )순으로 민감하였다.

3. 철골비와 단면적이 동일한 콘크리트충전 원형과 각형강관과의 내력에 대한 상대적인 비교는 구속효과를 고려한 콘크리트충전 원형강관기둥이 각형에 비하여 최대저항모멘트에 대하여 5~8%, 축력에 대해서 19~23%정도 내력이 증가함을 알 수 있다.

4. 콘크리트충전 원형강관기둥의 에너지 흡수능력은 구속효과에 의하여 콘크리트충전 각형강관기둥에 비하여 38~78 %정도 상회하는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 현

1. W.F.Chen & D.J. Han, 1988, 'Plasticity for Structural Engineers', Mc Graw Hill.
2. W.F.Chen & Toshio Atsuta, 1936, 'Theory of Beam-Columns', Mc Graw Hill.
3. 松井千秋 外 3人, 1994. 9, '偏心圧縮力を受ける充填コンクリート鋼管長柱の解析', 日本建築學會大會學術梗概集.
4. 井出陰也 外 4人, 1989. 10, 'コンクリート充填鋼管柱の超高層建物への利用についての實驗的研究', 日本建築學會大會學術梗概集.
5. Bunzo Jsuji 외 2인, 1991. 9, 'Axial Compression Behavior of Concrete Filled Circular Steel Tubes', Conference committee of ICCS-3.
6. Ben Kato, 1995. 2, "Compressive Strength and Deformation Capacity of Concrete-Filled Tubular Stub-columns", AIJ, Struct. Constr. Eng.
7. 吉野茂 外 5人, 1993. 9, '鋼管コンクリート構造の開發', 日本建築學會大會學術梗概集.
8. 住友金屬工業株式會社, 1994. 4, 'コンクリート充填 STコラム設計施工指針', 住友金屬技術資料.
9. 김동규, 최성모 외 8인, 1994. 4, "구속효과를 고려한 콘크리트충전 원형강관기둥의 내력에 관한 연구", 대한건축학회 학술발표 논문집.