

# 구속효과를 고려한 내부 구속 중공 CFT 부재의 비선형 콘크리트 모델 개발

## Development of a Nonlinear Concrete Model for Internally Confined Hollow Members Considering Confining Effects

한택희<sup>1)</sup> · 염응준<sup>2)</sup> · 한상윤<sup>3)</sup> · 강영종<sup>4),†</sup>  
*Han, Taek Hee · Youm, Eung Jun · Han Sang Yun · Kang, Young Jong*

요약 : CFT(Concrete Filled Steel Tube, 콘크리트 충전 강관) 부재는 뛰어난 구조거동으로 인하여 그 사용 영역이 점차 확대되고 있는 추세이나, 대단면의 부재로 사용될 경우에는 자중과 경계성에서 불리할 수 있다. 본 연구에서는 CFT 부재의 단면을 중공으로 만듦으로써, 콘크리트 사용량을 절감하여 부재의 자중을 감소시키고, 중공면에 강관 또는 FRP 튜브를 삽입하여 성능을 향상시킨 내부 구속 중공 CFT 부재의 합리적인 해석을 위하여 비선형 콘크리트 모델을 개발하였다. 개발된 비선형 콘크리트 모델은 구속효과를 고려한 Mander의 일축 압축 콘크리트 모델을 기본으로 하였으며, 내부 구속 중공 CFT 부재 내 콘크리트의 응력-변형을 선도를 결정하기 위해서, 내부 구속 중공 CFT 부재의 발생 가능한 파괴 형상을 제시하고, 각각의 파괴 형상이 발생할 때의 구속응력을 평형방정식을 통하여 유도하였다. 유도된 식을 통하여, 컴퓨터를 이용한 해석 프로그램이 작성되었으며, 매개변수 연구가 수행되었다. 해석결과, 내부 구속된 콘크리트는 비구속 상태 또는 이축 구속 상태의 콘크리트에 비하여, 향상된 강도와 연성을 갖는다는 것을 확인하였다.

ABSTRACT : There is a growing range of applications for concrete-filled steel tube (CFT) member because of its superior performance. But a CFT member may be uneconomical or has weight problems because it is fully filled with concrete. In this study, a new type of member, called internally confined hollow (ICH) CFT member, was developed to solve the high cost and weight problems of the CFT member. To determine stress-strain model of the concrete in an ICH CFT column, possible failure modes of an ICH CFT column were suggested and confining pressure was derived from equilibriums for each failure mode. From the derived equations, a computer program was coded and parametric studies were performed for some examples. Analytical results showed that internally confined concrete has enhanced strength and ductility compared with those of unconfined or biaxially confined concrete.

핵심용어 : 비선형, 콘크리트 모델, CFT, 구속 콘크리트, 구속 효과

KEYWORDS : nonlinear, concrete model, CFT, confined concrete, confining effect

### 1. 서론

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 RC(Reinforced Concrete, 철근 콘크리트) 기둥이며, 최근 CFT(Concrete Filled Steel Tub, 콘크리트 충전 강관)기둥이 최근 많이 연구되어 사용되고 있다. 하지만 이러한 부재의 해석에 있어 현재 선형 해석을 사용하여 설계가 이루어지고 있으며, 콘크리트의 구속 효과도 반영되지 않은 실정이다. 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트는 그 거동이 큰 차이를 보이므로, 구조물의 정확한 해석과 설계를 위해서는 콘크리트의 구속효과를 고려한 비선형 모델이 반

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1) 정희원, 고려대학교 공학기술연구소 연구교수, 공학박사  
2) 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사  
3) 정희원, 고려대학교 강구조협동과정 박사과정, 공학석사  
4) 교신저자, 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사  
(Tel. 02-3290-3317, Fax. 02-921-5166, E-mail: yjkang@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

드시 필요하다고 판단된다. 또한, 부재의 자중 감소와 재료의 절감을 위해 중공 RC 부재를 많이 사용하고 있으나, 이러한 부재내의 콘크리트는 3축 구속 상태를 이루지 못하고 2축 구속 상태로 존재하게 되어, 연성과 강도 증진에 불리하다. 이러한 중공 RC 부재의 문제점을 해결하기 위하여, 중공 RC 부재의 내부에 강관을 삽입하여 내부 구속력을 발생시킴으로써, 중공부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하는 내부 구속 중공 RC 부재(ICH RC member : Internally Confined Hollow RC member)가 개발되었으며(Kang & Han, 2005), 이러한 개념을 CFT 부재에 적용한 ICH CFT 부재(ICH CFT member : Internally Confined Hollow Concrete Filled Steel Tube member)가 개발되었다(Han et al., 2005).

본 연구에서는 ICH CFT 부재의 정확한 해석을 위해, 구속 효과를 고려하여 CFT 부재와 ICH CFT 부재 내 콘크리트에 대한 비선형 모델을 개발하고 검증하였다. 일반적인 철근 콘크리트의 구속 효과에 대해서는 Roy와 Sozen(1964) 및 Popovics (1973)에 의해 연구가 시작된 이래로 많은 연구자들에 의해 지속적인 연구가 수행되어 왔다. 그 중, Mander (1988)는 압축을 받는 콘크리트의 항복 이후와 이전의 거동을 예측할 수 있는 통합된 응력-변형률 모델을 제안하였다. 그 외에 Kent와 Park (1971), Leslie(1974), Desayi, Iyengar 와 Reddy(1978) 등의 연구자들에 의해 철근으로 구속된 콘크리트의 거동에 대해 많은 연구가 수행되었으며, 최근에는 튜브로 구속된 콘크리트의 강도에 대한 연구가 널리 이루어지고 있다. 최근의 강관 튜브에 의해 구속된 콘크리트의 거동에 대한 연구는 Candappa(2001) 등에 의해 고강도 콘크리트를 이용한 CFT 부재에 대한 연구가 수행되었으며, 이 외에도 FRP(Fiber Reinforced Polymer, 섬유 보강 폴리머) 튜브에 의해 구속된 콘크리트의 거동에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 하지만 모두 종실 단면의 콘크리트의 강도에 대한 연구로서, 중공 단면의 구속 콘크리트나, 내부 구속 효과에 대한 연구는 이루어지지 않은 실정이다.

## 2. 해석 모델

콘크리트가 3축으로 구속되면 비구속된 콘크리트에 비해 강도와 연성이 증가한다. 따라서 ICH CFT 부재의 정확한 해석을 위해서는 정확하고 합리적인 콘크리트 재료 모델이 필요하다. 본 연구에서는 ICH CFT 부재에서의 콘크리트에 대한 응력-변형률 관계를 유도하고 FORTRAN 언어를 사용하여 응력-변형률 관계를 계산하는 프로그램을 작성하였다. 개발된 콘크리트 재료 모델은 Mander(1988)에 의해 개발된 콘크리트

재료 모델을 수정하여 유도되었으며, ICH CFT 부재에서의 자유물체도와 파괴 조건에 따라 구속응력을 다시 정의함으로써 응력-변형률 관계를 정의하였다. 본 연구는 세 가지 기본 가정을 전제로 수행되었으며, 그 가정은 다음과 같다. 첫째, 부재 내측에 삽입된 튜브는 파괴되지 않는다면 완전한 구속응력을 제공한다. 둘째, 삽입된 튜브가 파괴된다면 삽입 튜브는 구속응력을 전혀 제공하지 못한다. 셋째, 부재는 외측 튜브가 파괴될 경우에 완전히 파괴된다.

Mander의 일축 압축 콘크리트 모델에서 콘크리트의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 구속응력이다. 만약 어떤 콘크리트 재료 모델에 대하여 구속응력이 정의된다면 Mander의 콘크리트 재료 모델을 기초로 응력-변형률 관계를 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 부재 내에서 구속응력을 정의하는 것에 주안점을 두었으며, 정의된 구속응력으로부터 ICH CFT 부재 내의 콘크리트에 대한 합리적인 응력-변형률 관계식을 유도하고 이를 컴퓨터 프로그램으로 작성하였다. 본 논문에서는 Mander의 콘크리트 모델을 CFT 부재에 적용하여 CFT 부재에서의 콘크리트 모델을 개발하고, 이에 대한 실험적 검증을 수행하였으며, 이러한 검증을 바탕으로 ICH CFT 부재에 대한 해석 모델을 개발하였다.

### 2.1 Mander의 일축 압축 콘크리트 재료 모델

1988년에 Mander는 일축 압축 응력을 받는 구속된 콘크리트에 대하여 항복 전후의 거동을 예측할 수 있는 통합된 응력-변형률 해석법을 제안하였다. 이 해석 방법에서 Mander는 단조 증가하는 압축 하중 및 인장 하중 조건, 반복 재하되는 압축 및 인장 하중 조건에 대한 콘크리트 재료 모델을 제안하였다. 본 연구에서 개발된 콘크리트 재료 모델은 Mander의 일축 압축 콘크리트 재료 모델을 기초로 하고 있으며, Mander에 의해 제안된 해석법을 간략히 설명하면 다음과 같다. Mander의 해석법 중 단조 증가하는 압축 하중에 대한 구속된 콘크리트와 비구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계는 그림 1과 같이 Popovics(1973)에 의해 제안된 관계식을 따른다. Popovics에 의해 제안된 식을 사용할 경우, 응력-변형률 곡선에서 상승 구간과 하강 구간의 식을 따로 분리하여 정의할 필요 없이 식 1과 같이 통합된 하나의 식으로 정의할 수 있는 장점 때문에 Mander는 그의 콘크리트 모델에 이 식을 차용하였으며, 이 모델은 일정한 구속 응력을 받는다는 가정에 기초하고 있다.

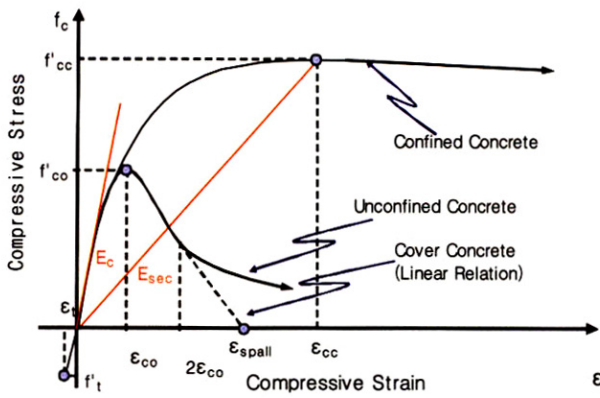


그림 1. 일축 압축 시의 구속 콘크리트와 비구속 콘크리트의 응력-변형을 관계 (Popovics, 1973)

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} \quad (3)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (4)$$

여기서,  $f_c$ 는 콘크리트의 응력,  $\epsilon$ 는 축방향 변형율,  $f'_{cc}$ 는 구속된 콘크리트의 최대 강도,  $\epsilon_{cc}$ 는 구속된 콘크리트가 최대 강도를 발휘할 때의 변형율이다. 비구속 콘크리트의 접선 계수 ( $E_c$  : tangent modulus)는  $5000\sqrt{f'_{cc}}$  (MPa)로 산정되며, 구속된 콘크리트의 최대 강도( $f'_{cc}$ )는 식 5에 의해서 구할 수 있다.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - \frac{2 f'_l}{f'_{co}} - 1.254 \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

$$f'_l = k_e \cdot f_l \quad (7)$$

여기서  $f'_{cc}$ 는 비구속된 콘크리트의 최대 강도이며,  $f'_l$ 는 유효 구속응력이다. 구속된 콘크리트의 최대 강도에서의 변형율  $\epsilon_{cc}$ 는 식 6과 같이 비구속된 콘크리트의 최대 강도에 해당하는

변형율  $\epsilon_{co}$ 의 함수로서 정의되며,  $\epsilon_{co}$ 는 일반적으로 0.002로 알려져 있다. 나선철근이나 후프철근의 경우에는 전체 콘크리트를 완전히 구속할 수 없으므로, 최초 발생된 구속응력( $f_l$ )은 식 7과 같이 감소계수  $k_e$ 를 적용하여 사용된다. 그림 2와 같이 원형 후프 철근에 의해 구속된 콘크리트를 고려하면, 콘크리트에 작용하는 구속압에 의해 후프철근에 등분포의 인장력이 작용할 때 횡구속 응력은 식 8에 의해 계산된다. 여기서  $s$ 는 후프철근의 배근 간격이며,  $A_b$ 는 후프철근의 단면적,  $f_s$ 는 후프철근에 작용하는 인장응력이다.

$$f_l = \frac{2 f_s A_b}{s d_s} \quad (8)$$

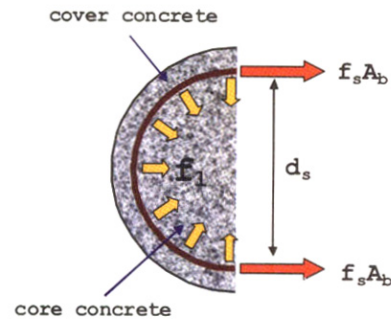


그림 2. 중실 RC 부재에서 콘크리트에 작용하는 구속 응력 (Mander, 1988)

### 3. ICH CFT 부재의 비선형 콘크리트 모델

#### 3.1 CFT 부재 내의 구속응력

CFT부재 내의 콘크리트는 외부 튜브의 항복 전까지 완전한 삼축 구속 상태로 존재하게 된다. CFT 부재내의 콘크리트와 RC 부재 내의 콘크리트의 차이는 연속적인 구속력과 불연속적인 구속력에 있다. CFT 부재의 경우에는 외부 튜브에 의해 콘크리트가 연속적으로 구속되며, 이로 인해 구속응력을 산정할 때 감소계수를 적용하지 않는다. 그림 3은 CFT 부재 단면의 자유물체도를 보여주며, 이로부터 식 9와 식 10이 유도된다. 여기서  $f_{ot}$ 는 외부 튜브에 작용하는 응력,  $f_{oty}$ 는 외부 튜브의 항복 강도이며,  $t_{ot}$ 는 외부 튜브의 두께이다.

$$D' f_l = 2 f_{oty} t_{ot} \quad (9)$$

$$f_l = \frac{2 f_{oty} t_{ot}}{D'}, \quad f'_l = f_l \quad (10)$$

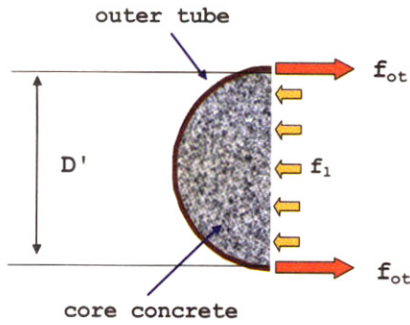


그림 3. CFT 부재 내의 구속응력

### 3.2 ICH CFT 부재 내의 구속 응력

ICH CFT 부재는 중공 CFT 부재 내부에 일반 튜브 또는 파형 튜브를 내측 중공면에 삽입하여 만든 부재이다. 따라서 내측 튜브와 외측 튜브가 콘크리트에 연속적인 구속력을 제공하며, 내측 튜브와 외측 튜브 중 어느 하나가 파괴되지 않는다면 지속적인 구속응력을 제공하며, 파괴 이후에는 구속응력을 제공하지 못한다고 가정한다. 그림 4는 ICH CFT 부재 단면의 자유물체도이다.

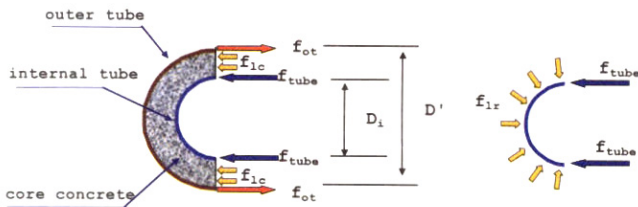


그림 4. ICH CFT 부재 내의 구속응력

### 3.3 ICH CFT 부재의 파괴 모드

내측과 외측 튜브의 파괴를 고려할 때, ICH CFT 부재의 파괴 모드로서 3가지의 경우를 가정할 수 있다. 첫 번째 파괴 형태는 외측 튜브의 파괴 이전에 내측 튜브가 항복파괴 또는 좌굴파괴 되는 경우이다. 두 번째 파괴형태는 내부 튜브의 파괴 이전에 외부 튜브가 항복하여 파괴되는 경우이며, 세 번째 파괴 형태는 내부와 외부의 튜브가 동시에 파괴되는 경우이다. 첫 번째 파괴 형태의 경우, 콘크리트는 내부 튜브의 파괴 이전까지는 완전히 3축 구속된 상태이나, 내부 튜브의 파괴 이후에는 구속을 받지 못하는 비구속 콘크리트로서 거동한다. ICH RC(Internally Confined Hollow Reinforced Concrete) 부재의 경우에는 철근과 콘크리트는 합성되어 있다고 가정하나, ICH CFT 부재의 경우에는 외측 튜브와 콘크리트는 비합성 상태로 가정을 하여, 내측 튜브 파괴 이후의 콘크리트는 비

구속 콘크리트로서 거동하한다고 가정한다. 이러한 내부 튜브 파괴 이전과 이후의 구속 응력은 식 11과 식 12에 의해 표현된다. 여기서  $f_{lc}$ 는 원주방향(circumferential)의 구속응력,  $f_{lr}$ 은 방사방향(radial)의 구속응력이다.

$$f_{lc} = f_{lr} = f_l \neq 0 \tag{11}$$

$$f_{lc} = f_{lr} = f_l = 0 \tag{12}$$

두 번째 파괴 형태에서의 콘크리트는 외측 튜브의 파괴로 인한 부재의 전체 파괴이전까지 완전한 삼축 구속 상태로 존재한다. 이러한 파괴 형태에서는 부재의 파괴는 전적으로 외측 튜브의 항복 파괴에 의해 결정되며, 콘크리트는 일반 CFT 부재 내의 콘크리트와 같이 완전히 구속된 콘크리트의 거동을 한다고 가정한다. 임의의 방향으로 작용하는 구속응력을  $f_l$ 이라 정의하면 이는 식 11과 같이 표현될 수 있다. 세 번째 파괴 형태는 매우 드문 경우로서, 이의 파괴 형태는 두 번째 파괴형태와 유사하다. 두 번째와 세 번째의 파괴 형태일 경우, 평형 방정식은 식 13과 같이 나타내어지며, 그림 4로부터 식 14를 구할 수 있으며, 식 15를 식 13에 대입하고  $f_{ot}$  대신  $f_{oty}$ 를 적용하면, 식 16을 얻는다. 여기서,  $f_l$ 은 콘크리트에 작용하는 구속응력,  $f_{oty}$ 는 외측 튜브의 항복강도,  $f_{tube}$ 는 내측 튜브에 작용하는 응력,  $D'$ 는 구속된 콘크리트의 직경,  $D_i$ 는 내측 튜브의 외경,  $t_{ot}$ 와  $t$ 는 각각 외측과 내측 튜브의 두께이다.

$$f_l(D' - D_i) + 2f_{tube}t = 2f_{ot}t_{ot} \tag{13}$$

$$f_l D_i = 2t f_{tube} \tag{14}$$

$$f_{tube} = \frac{f_l D_i}{2t} \tag{15}$$

### 3.4 내측 튜브의 항복 파괴 조건

ICH CFT 부재에서, 재료의 성질이 일정하다면, 내측 튜브의 항복과 좌굴 조건은 내측 튜브의 두께에 지배되므로, 파괴 형태는 내측 튜브의 두께를 조절함으로써 제어될 수 있다. 내측 튜브의 항복 파괴 조건은 식 16과 같이 표현되며, 내측 튜브의 파괴 이전에 외측 튜브의 파괴를 유도하기 위해서는 내측 튜브에 작용하는 응력이 내측 튜브의 항복 강도보다 작아야 한다. 이러한 조건에 의해 내측 튜브의 항복파괴가 일어나지 않기 위한 최소의 두께 조건은 식 17과 같이 나타낼 수 있다. 여

기서  $t_y$ 는 내부 튜브가 항복 파괴되지 않을 최소의 두께이며,  $t$ 는 내측 튜브의 두께,  $f_{yt}$ 는 내측 튜브의 항복강도이다.

$$f_l = \frac{2t}{D_i} f_{tube} = \frac{2f_{oty} \cdot t_{ot}}{D'} \quad (16)$$

$$t > \frac{D_i \cdot f_{oty} \cdot t_{ot}}{D' \cdot f_{yt}} = t_y \quad (17)$$

### 3.5 내측 튜브의 좌굴 파괴 조건

ICH CFT 부재의 내부에 삽입된 튜브는 내측 방향으로의 변위 발생은 가능하나, 튜브의 외측 방향으로는 콘크리트에 의해 구속되어 변위 발생이 불가능한 일방향 구속 상태 (unilaterally restrained)가 된다. 이러한 경계 조건으로 인하여, 내측에 삽입된 튜브는 일반적인 아치나 링의 바이퍼케이션(bifurcation) 좌굴과는 다른, 얇은 아치의 스냅-스투(snap-through) 좌굴과 같은 형상을 보인다. 이때의 좌굴 강도( $f_{cr}$ )는 식 18과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $R$ 은 내측 튜브의 반지름,  $E$ 는 탄성계수,  $I$ 는 내측 튜브의 단면이차모멘트이다. 좌굴 파괴가 발생하지 않을 조건은 식 19와 같으며 이를 정리하면 식 20과 같은 좌굴파괴 방지를 위한 최소 두께 ( $t_{bk}$ )에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$f_{cr} = 2.27 \frac{EI}{R^2 t} \quad \text{or} \quad f_{cr} = \frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} \quad (18)$$

$$\frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} > \frac{2f_{oty} t_{ot}}{D'} \quad (19)$$

$$t > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 f_{oty} t_{ot}}{D' E}} = t_{bk} \quad (20)$$

항복 파괴가 발생하지 않을 최소 두께( $t_y$ )와 좌굴 파괴가 발생하지 않을 최소 두께( $t_{bk}$ ) 중, 작은 값을  $t_{lim}$ 라 정의하면 내측 튜브의 두께에 의한 부재의 파괴 형태는 식 21과 같이 표시된다.

$$t < t_{lim} : \text{파괴 형태 1} \quad (21a)$$

$$t > t_{lim} : \text{파괴 형태 2} \quad (21b)$$

$$t = t_{lim} : \text{파괴 형태 3} \quad (21c)$$

내부 튜브가 파형일 경우에는 파형의 형상을 일반적인 튜브에서 등가의 단면이차모멘트로 치환하여, 좌굴 방지를 위한 최소 두께를 정의할 수 있다. 파형 튜브의 경우, 자체의 기하학적 특성으로 인하여 일반 튜브에 비해 상당히 큰 좌굴 강도를 갖는다. 따라서 내부 튜브로서 파형 튜브가 삽입될 경우, 더 작은 두께로 일반 튜브와 동일한 구속력을 제공할 수 있다. 이 경우, 파형 튜브는 일반 튜브보다 큰 좌굴강도 값을 갖기 때문에 좌굴에 의한 파괴 조건식은 수정되어야 한다. Timoshenko (1959)의 연구에 의하면, 파형 판은 등가의 두께를 갖는 평판으로 해석될 수 있다. 그림 5와 같은 파형 판에 대하여 파형의 형상이 식 22와 같이 Sine 함수로 표현될 때, x방향의 휨강성  $D_x$ 와 y방향의 휨강성  $D_y$ 는 식 23과 식 24로 나타내어진다. 여기서  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 포아송 비,  $s$ 는 파형이 반주기일 때의 호의 길이,  $h$ 는 판의 두께,  $l$ 은 파형 반주기의 길이(파형의 길이),  $f$ 는 파형의 높이이다.

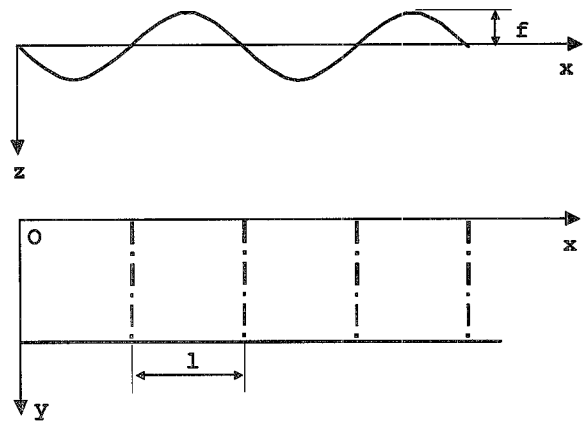


그림 5. 파형 판의 형상 (Timoshenko, 1959)

$$z = f \cdot \sin \frac{\pi x}{l} \quad (22)$$

$$D_x = \frac{l}{s} \cdot \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (23)$$

$$D_y = EI \quad (24)$$

근사적으로 파형의 반주기에 해당하는 호의 길이  $s$ 와 파형 판의 단면 이차 모멘트  $I$ 는 식 25와 식 26과 같이 구해진다. 따라서 파형 판의 등가 두께를  $t_{eq}$ 라 하고, 파형 판의 두께  $h$ 를  $t$ 로 치환하면, 단면 이차 모멘트는 식 27과 같이 나타낼 수 있으며, 등가 두께  $t_{eq}$ 는 식 28과 같이 유도된다.

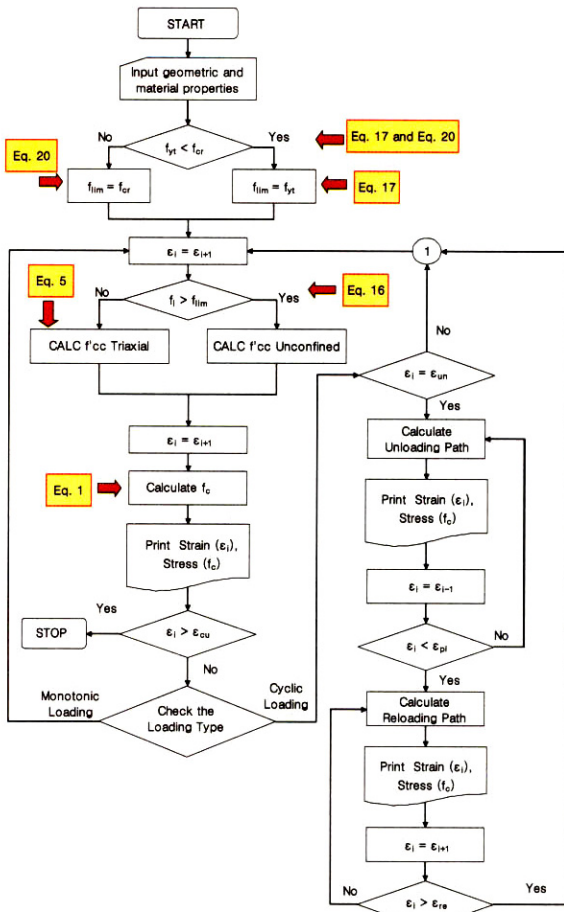


그림 6. ICH CFT 부재에서 콘크리트의 응력-변형률 관계 해석 순서도

$$s = l \left( 1 + \frac{\pi^2 f^2}{4l^2} \right) \quad (25)$$

$$I = \frac{f^2 h}{2} \left[ 1 - \frac{0.81}{1 + 2.5 \left( \frac{f}{2l} \right)^2} \right] \quad (26)$$

$$I = \frac{f^2 t}{2} \left[ 1 - \frac{0.81}{1 + 2.5 \left( \frac{f}{2l} \right)^2} \right] = \frac{t_{eq}^3}{12} \quad (27)$$

$$t_{eq} = \sqrt[3]{6f^2 t \left[ 1 - \frac{0.81}{1 + 2.5 \left( \frac{f}{2l} \right)^2} \right]} \quad (28)$$

ICH CFT 부재에서 콘크리트의 응력-변형률 관계는 그림 6과 같은 순서도에 따라서 해석되며, 이 순서에 따라 FORTRAN 언어를 이용하여 해석 프로그램이 작성되었다.

#### 4. 해석 결과

개발된 해석 프로그램을 이용하여, 임의의 모델에 대한 해석을 수행하였으며, CFT 부재의 경우, 기존 연구(임석빈 등, 2006)에서 수행된 실험의 결과와 비교를 하였다.

##### 4.1 외부 강관 두께 변화에 따른 CFT 부재 내 콘크리트의 거동 분석

CFT 부재 모델에 대한 해석을 수행하였다. 해석 모델은 임석빈 등(2006)의 실험에서 수행된 시험체와 조건으로 해석을 수행하였으며, 강관의 두께를 변화시킴으로써 최대 구속 응력의 변화를 주었다. 해석 모델에 대한 제원은 표 1에 나타내었다.

표 1. CFT 해석 모델의 단면 제원 및 재료 물성치 (임석빈 등, 2006)

단면 제원	단면 외경 (cm)	10
	튜브의 두께 (mm)	0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0
재료 물성치	비구속 콘크리트의 압축 강도	Group 1 : 27.65MPa Group 2 : 23.89MPa
	튜브의 항복 강도	235.44 MPa
	튜브의 최대 변형률	0.20

그림 7은 해석 결과이며, 외부 튜브의 두께가 증가함에 따라 콘크리트의 강도와 연성이 증가함을 알 수 있다. 또한 그림 8은 튜브의 두께가 0.8mm인 모델에 대해서, 0.03의 변형률에서 하중을 제거한 후 다시 가력하였을 때의 결과이다.

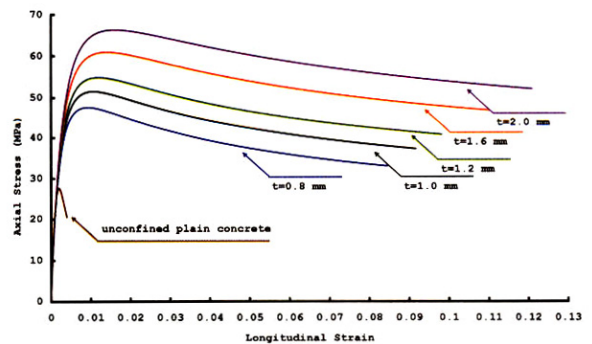


그림 7. CFT 부재의 해석 결과 (Group 1)

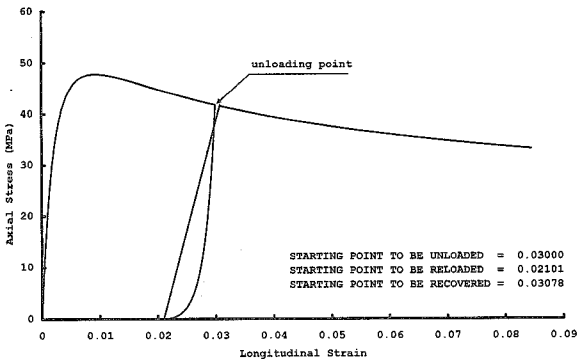


그림 8. 반복하중 재하 시 CFT 부재의 해석 결과 (Group 1, 튜브 두께=0.8mm)

그림 9는 콘크리트 압축강도가 27.50MPa, 튜브두께가 1.2mm인 경우의 실험치와 해석치의 비교이며, 그림 10은 콘크리트 압축강도가 23.89MPa, 튜브두께가 1.0mm인 경우의 실험치와 해석치의 비교이다. 실험치와 비교한 결과 해석 모델이 실제 부재의 거동을 정확히 예측함을 알 수 있다.

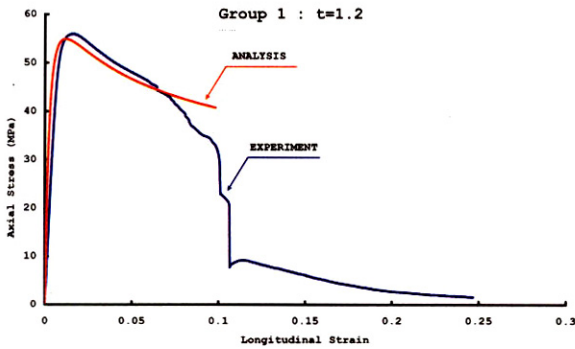


그림 9. 해석치와 실험치의 비교 (Group 1, t=1.2mm)

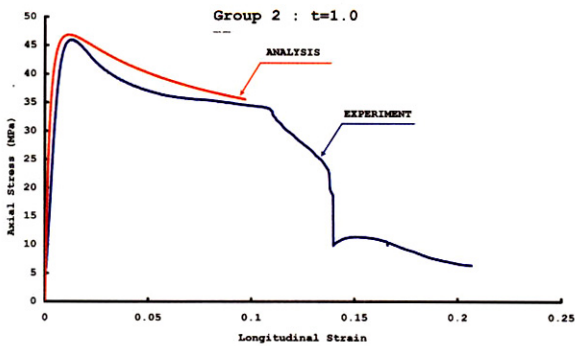


그림 10. 해석치와 실험치의 비교 (Group 2, t=1.0mm)

#### 4.2 ICH CFT 부재 내 콘크리트의 거동 분석

ICH CFT 부재의 해석에서는 내부 튜브가 일반 튜브(ICH

CFT-FT)인 경우와 파형 튜브(ICH CFT-CT)인 경우, 두 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석 모델의 제한은 그림 11 및 그림 12와 같으며, 비구속 콘크리트의 강도는 25MPa이다.

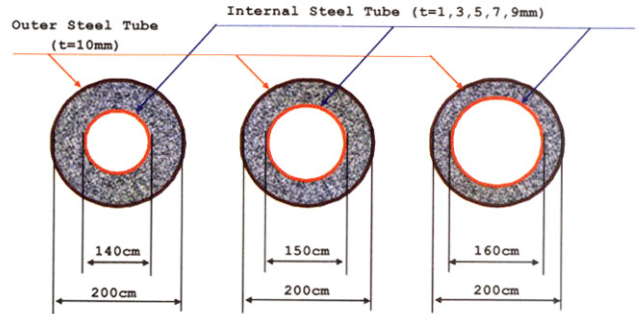


그림 11. ICH CFT-FT 부재 해석 모델의 제한

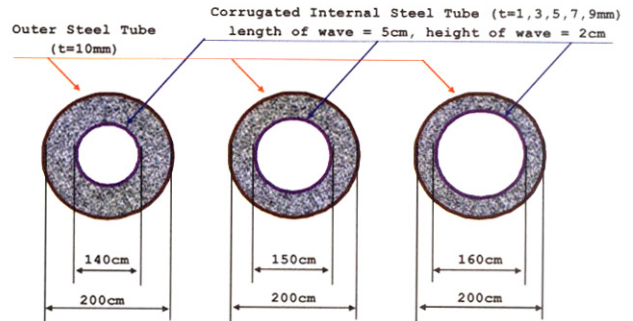


그림 12. ICH CFT-CT 부재 해석 모델의 제한

그림 13은 내측 튜브로서 일반 강관을 사용한 경우, 중공비가 0.7일 때의 해석결과이며 그림 14는 중공비가 0.8인 경우의 해석 결과이다. 중공비가 0.7일 때, 내측 튜브의 두께가 파괴되지 않는 조건인 경우(t=5, 7, 9mm)에는 큰 강도와 연성을 보이거나, 내측 튜브가 파괴된 경우(t=1, 3mm)에는 일정 수준까지 강도가 증가하다가 내측 강관의 파괴와 함께 급격히 강도가 저하됨을 알 수 있다.

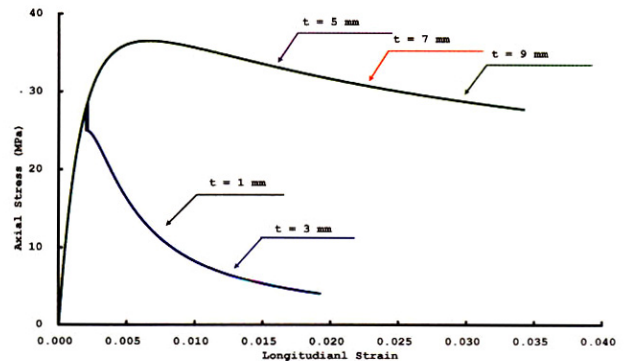


그림 13. ICH CFT-FT 부재의 해석 결과 (중공비=0.70)

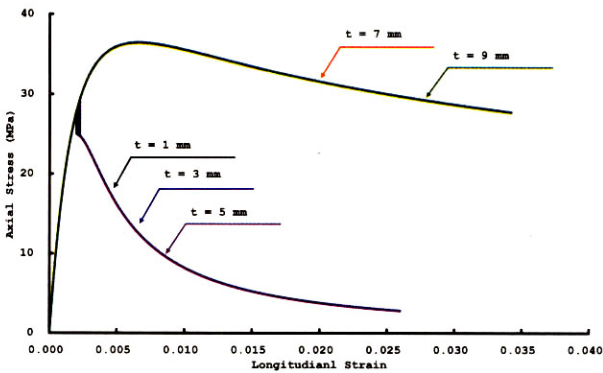


그림 14. ICH CFT-FT 부재의 해석 결과 (중공비=0.80)

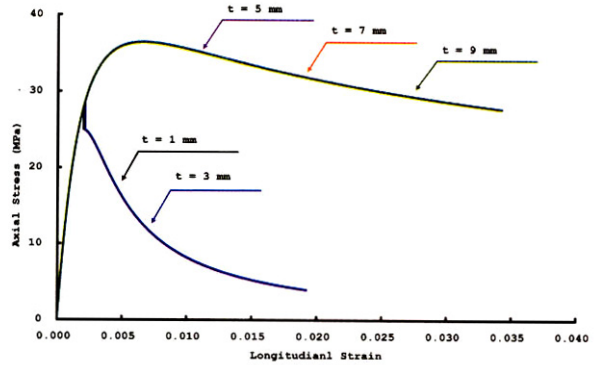


그림 16. ICH CFT-CT 부재의 해석 결과 (중공비=0.70)

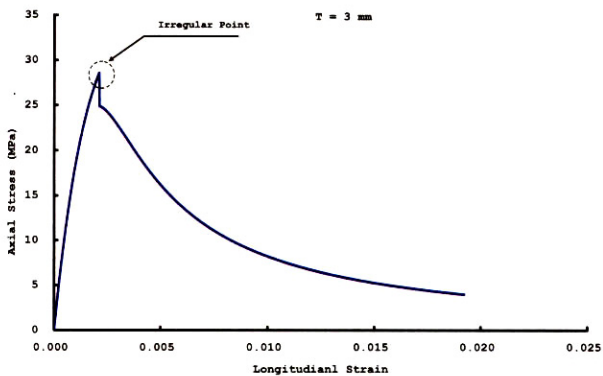


그림 15. ICH CFT-FT 부재 내 콘크리트의 응력-변형을 관계 (중공비=0.75, t=3mm)

삽입된 내부 튜브의 좌굴강도와 항복강도를 계산하였을 때, 그림 13의 결과에서 나타난 일반 튜브를 삽입한 경우에는 내부 튜브가 파괴될 때 좌굴 파괴가 발생함에 비해, 파형 튜브를 삽입한 경우에는 좌굴강도의 증가로 인하여 내부 튜브가 파괴될 때 항복 파괴가 발생함을 알 수 있다. 이러한 파괴의 차이는 삽입된 튜브의 좌굴강도와 항복강도, 그리고 튜브에 작용하는 구속응력을 계산함으로써 알 수 있으나, 응력-변형을 선도 상에서는 모두 강도의 저하가 발생하는 불규칙점으로 표현된다. 또한 그림 13과 그림 16에서 내부 튜브의 두께가 5mm 이상인 경우는 모두 내부 튜브의 파괴가 발생하지 않으므로, 콘크리트는 모두 외부 튜브의 파괴 때까지 완전한 3축 구속 상태를 유지하게 되어 CFT 부재와 동일한 응력-변형 관계를 나타내게 된다.

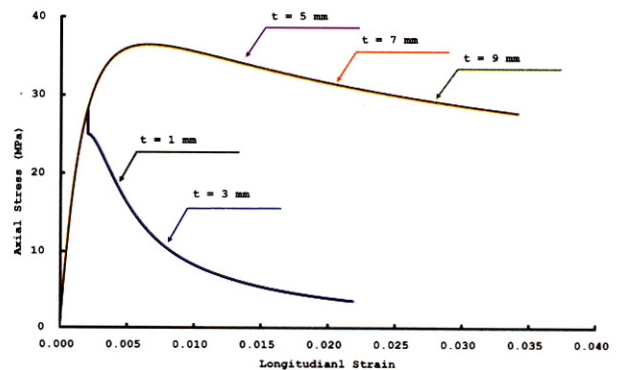


그림 17. ICH CFT-CT 부재의 해석 결과 (중공비=0.75)

ICH CFT-FT 부재에서 중공비가 0.7인 경우에 내부 튜브가 항복하지 않을 최소 두께는 4.67mm이며, 좌굴하지 않을 최소 두께는 4.97mm로 계산되며, 이에 따라 내부 튜브의 두께가 5mm 이상인 경우에 파괴가 발생하지 않음을 알 수 있다. ICH CFT-FT 부재에서 중공비가 0.8인 경우에는 내부 튜브가 항복하지 않을 최소 두께는 5.34mm이며, 좌굴하지 않을 최소 두께는 5.67mm로 계산되며, 내부 튜브의 두께가 7mm 이상인 모델은 외부 튜브의 항복 이전에 내부 튜브가 파괴되지 않는다. 그림 15는 중공비가 0.75이고 내부 튜브의 두께가 3mm일 때 내부 튜브의 파괴로 인하여 응력-변형을 선도 상에 내부 튜브의 파괴점에서 응력-변형을 선도가 급격히 변화하는 것을 보여준다.

그림 16은 ICH CFT-CT 부재에서 중공비가 0.70인 경우의 해석 결과이다. 이 경우에 내부에 삽입된 파형 튜브가 항복하지 않을 최소 두께는 4.67mm이며, 좌굴하지 않을 최소 두께는 0.58mm로 계산된다. 그림 13에서 나타난 동일한 중공비와 내부 튜브 두께를 갖는 ICH CFT-FT 부재와 비교해 보면 내부 튜브 좌굴강도가 크게 증가하였음을 알 수 있다.



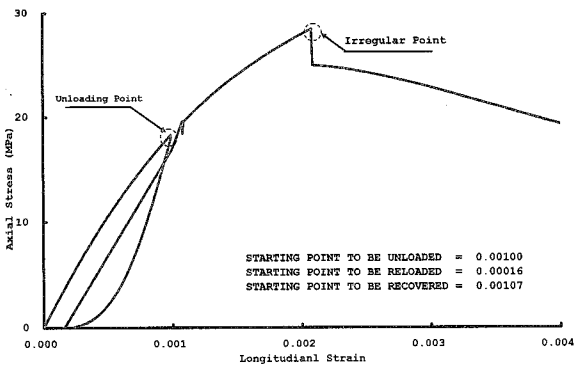


그림 18. ICH CFT-CT 부재의 해석 결과  
(중공비=0.80, t=3mm)

그림 17은 ICH CFT-CT 부재의 중공비가 0.75인 경우의 해석 결과이며, 그림 18은 ICH CFT-CT 부재의 중공비가 0.75이고 내부 튜브의 두께가 3mm인 경우에 반복하중을 받는 경우이며, 내측 튜브의 파괴로 인하여 급격한 강도의 감소를 보이고 있다. 그림 18에서 변형을 0.004 이후의 구간은 생략되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Mander의 콘크리트 모델을 기본으로 하여, 구속효과를 고려한 원형단면을 갖는 CFT(Concrete Filled Tube, 콘크리트 충전 튜브) 부재와 ICH CFT(Internally Confined Hollow Concrete Filled Tube, 내부 구속 중공 콘크리트 충전 튜브) 부재 내의 비선형 콘크리트 모델을 유도하고, 컴퓨터 프로그램화하였다. 개발 모델은 기존의 CFT 부재의 실험 결과와 검증하였다. 현재 새롭게 개발된 내부 구속 중공 부재에 대하여는 매개변수를 이용한 해석 연구를 수행하였으며, 해석 결과는 합리적인 결과를 보여 주었다. 추후, ICH CFT 부재에 대한 실험이 수행된다면 본 개발 모델에 대한 추가적인 검증이 수행될 수 있을 것이다. 본 해석 모델은 비선형 재료 모델을 적용하여 콘크리트의 정확한 거동 예측이 가능하므로, 일반 범용 해석 프로그램에 적용 가능하며, 전용 프로그램의 개발이 가능하게 되어, 원형단면을 갖는 새로운 부재 및 기존 부재에 대한 정확한 해석과 설계를 가능하게 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임 (No. M1050

0000119-06J0000-11910).

## 참고 문헌

- 임석빈, 한택희, 한상윤, 강영중, 구속 조건에 따른 콘크리트 응력-변형률 관계, 대한토목학회논문집, 제26권 4A호, 2006, pp.743-752.
- 홍원기, 김희철, 윤석한, 박순섭, 탄소섬유튜브로 황구속된 각형 콘크리트 기둥의 압축강도 성능에 관한 연구, 한국지진공학 회논문집, 제7권 제1호, 2003, pp.1~7.
- D. C. Candappa, J. G. Sanjayan, and S. Setunge, Complete Triaxial Stress-Strain curves of High-Strength Concrete, *Journal of Materials in civil Engineering*, May/June 2001, pp.209~215.
- D.C. Kent, R. Park, Flexural Members with Confined Concrete, ASCE, Vol. 97, ST 7, 1971, pp.1969~1990.
- H.E.H. Roy, M.A. Sozen, Ductility of Concrete, Proceedings of the International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ASCE-ACI, 1964, pp.213~224.
- Houssam A. Toutanji, Durability Characteristics of Concrete Columns Confined with Advanced Composite Materials, *Composite Structures*, Vol. 44, 1999, pp.155-161.
- Huei-Jeng Lin, Chin-I Liao, Compressive Strength of Reinforced Concrete Column Confined by Composite Material, *Composite Structures*, 2003.
- J.B. Mander, M.J.N. Priestly, R. Park, Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, Aug. 1988, pp.1804~1826
- M. Demers and K.W. Neale, Confinement of Reinforced Concrete Columns with Fibre-Reinforced Composite Sheets-an Experimental Study, *Can. J. Civ. Eng.*, Vol 26, 1999, pp.226-241.
- P. Desayi, K.T.S.R. Iyengar, T.S. Reddy, Equations of Stress-Strain Curve of Concrete Confined in Circular Steel Spiral, *Materiaux et Constructions*, Sept/October 1978, pp.339~345.
- P.D. Leslie, Ductility of Reinforced concrete Bridge Piers, M.E. Report, University of Canterbury, New Zealand, 1974
- R. Haftka, W. Nachbar, Post Buckling Analysis of an Elastically Restrained Column, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 6, 1970, pp.1433-1449.

S. Popovics, A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 5, 1973, pp.583 ~599.

S.P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, Inc., 1959.

T.H. Han, K.H. Han, S.Y. Han, S.N. Kim, J.O. Kang, Y.J. Kang, The Behavior of an Internally Confined Hollow Concrete Filled Steel Tube Column,

Proceeding of the 8th Korea-Japan Joint Seminar, 2005

Y.J. Kang, T.H. Han, Behavior of an Internally Confined Hollow R.C Pier, Proceedings of Korea-China-Japan Symposium on Structural Steel Construction, KSSC, 2005, pp.91~97.

(접수일자 : 2006. 6. 28 / 심사일 2006. 8. 7 /  
심사완료일 2006. 12. 28)