

내부 구속 중공 CFT 부재 콘크리트의 비선형 재료 모델 개발

Development of Material Nonlinear Models for Concrete in Internally Confined Hollow Members Considering Confining Effect

한택희* · 한상윤** · 임남형*** · 강진욱**** · 이명섭***** · 강영종*****
 Han, Taek-Hee · Han, Snag-Yun · Lim, Nam-Hyoung · Kang, Jin-Ook · Lee, Myeoung-Sub · Kang, Young-Jong

ABSTRACT

When concrete is confined triaxially, its strength and toughness are enhanced. Hoop reinforcements or transverse reinforcements laterally confine concrete in the case of a R.C member and an outer tube confines concrete in a CFT(Concrete Filled Tube) member. But biaxially confined concrete, such as concrete in a hollow R.C member, does not have much enhanced strength and toughness. In this study, a new-type member, which is a hollow CFT member named as an ICH(Internally Confined Hollow) CFT member, was developed to overcome the low ductility of the hollow member and the high cost of the CFT member. A material nonlinear model for the concrete in an CFT member or an ICH CFT member was developed and coded as a computer program based on Mander's concrete model. Analysis results were verified with experimental results and the developed analysis model showed reasonable and accurate results.

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 R.C(reinforced concrete, 철근 콘크리트) 기둥이며, 최근 CFT 기둥(Concrete Filled Steel Tube column, 콘크리트 충전 강관 기둥)이 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 차이

* 정회원 · 고려대학교 공학기술연구소 연구조교수 · 공학박사 E-mail: taekie@korea.ac.kr
 ** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · 공학석사 E-mail: trussbassist@hanmail.net
 *** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 E-mail: kyyoon@sunmoon.ac.kr
 **** 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 차장 · 공학박사 E-mail: jin.kang@samsung.com
 ***** 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 부장 · 공학사 E-mail: ms2ce@samsung.com
 ***** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사 E-mail: yjkange@korea.ac.kr

를 보이므로, 구조물의 정확한 해석과 설계를 위해서는 콘크리트의 구속효과를 고려한 비선형 모델이 반드시 필요하다고 판단된다. 또한, 부재의 자중 감소와 재료의 절감을 위해 중공 R.C 부재를 많이 사용하고 있으나, 이러한 부재내의 콘크리트는 3축 구속 상태를 이루지 못하고 2축 구속 상태로 존재하게 되어, 연성과 강도 증진에 불리하다. 이러한 중공 R.C 부재의 문제점을 해결하기 위하여, 중공 R.C 부재의 내부에 강관을 삽입하여 내부 구속력을 발생시킴으로써, 중공부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하는 내부구속 중공 R.C 부재(ICH R.C member : Internally Confined Hollow R.C member)가 개발되었으며(Kang & Han, 2005)¹⁾, 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)²⁾. 본 연구에서는 ICH CFT 부재의 정확한 해석을 위해, 구속효과를 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-변형을 모델을 제안하였다. 그 외에 Kean과 Park(1971), Leslie와 Park(1974), Desayi, Iyengar와 Reddy(1978) 등의 연구자들에 의해 철근으로 구속된 콘크리트의 거동에 대해 많은 연구가 수행되었으며, 최근에는 튜브로 구속된 콘크리트의 강도에 대한 연구가 널리 이루어지고 있다. 강관 튜브에 의해 구속된 콘크리트의 거동에 대한 연구 외에도 FRP(Fiber Reinforced Polymer, 섬유 보강 폴리머) 튜브에 의해 구속된 콘크리트의 거동에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. Fadis(1981), Samaan(1998)에 의해 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer, 유리 섬유 보강 폴리머)로 구속된 콘크리트의 강도에 대한 연구가 수행되었으며, Saafi(1999), Shahawy(2000), Hsein-Kuang Lui(2000), Pessiki(2001)에 의해 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 탄소 섬유 보강 폴리머)로 구속된 콘크리트의 거동에 대한 연구가 수행되었다. 하지만 모두 중실 단면의 콘크리트의 강도에 대한 연구로서, 중공 단면의 구속 콘크리트나, 내부 구속 효과에 대한 연구는 이루어지지 않은 실정이다.

2. Mander의 콘크리트 모델

본 연구에서는 Mander의 콘크리트 모델(1988)을 바탕으로 CFT 부재와 ICH CFT부재 내의 콘크리트에 대한 비선형 모델을 개발하였다. Mander는 황철근으로 구속된 콘크리트에 대한 모델을 제시하였으며, 본 연구에서는 이러한 Mander의 모델을 수정하여 튜브로 구속된 콘크리트(CFT)의 모델을 개발하고 다시 중공 상태일 때의 구속응력을 구하여 내부 구속 중공 부재(ICH CFT)의 콘크리트에 대한 모델을 개발하였다. Mander의 콘크리트 모델에서 모든 주요 인자는 구속응력에 의해 결정되므로, 본 연구에서는 각 부재 내에서 존재하는 구속응력을 새롭게 정의함으로써, 해석모델을 제시하였다. 콘크리트 모델은 단조 압축 및 인장 하중에 대한 모델 및 반복 인장 및 압축 하중에 대한 모델이 제시되었으며, 본 연구에서도 동일하게 적용되었다. 단조 압축 하중에 대해 Mander가 제시한 모델은 Popovics(1973)에 의해 제안된 모델을 적용하였으며, 다음과 같다. 1973년에 Popovics는 구속된 콘크리트와 비구속된 콘크리트가 압축을 받는 경우에 대해 그림 1과 같이 응력과 변형률의 관계를 제시하였으며, 이때의 응력-변형률 관계를 식 1과 같이 정의하였다. 다른 연구자들과는 달리 Popovics는 응력-변형률 관계를 정의함에 있어, 구간별로 따로 정의하지 않고 하나의 통일된 식으로 정의하였으며, 이는 Mander의 연구³⁾에서 그대로 채용되어 연구가 이루어졌다. 이 연구에서 해석 모델은 모두 일정한 구속 응력(f'_l)에 기반을 두어 정의되었다. 여기서, f_c 는 콘크리트의 응력, ϵ 는 일축 변형률, f'_{cc} 는 콘크리트의 구속 강도, ϵ_{cc} 는 구속된 콘크리트의 최대 강도에서의 변형률이다. 구속되지 않은 콘크리트의 탄젠트 접선 계수(E_c)는 $500\sqrt{f'_{cc}}$ 로 추산될 수 있으며, 구속된 콘크리트의 최대 강도(f'_{cc})는 식 5

에 의해 계산된다. 여기서, f'_c 는 비구속된 콘크리트의 강도이며, f'_t 은 횡구속 압력이다.

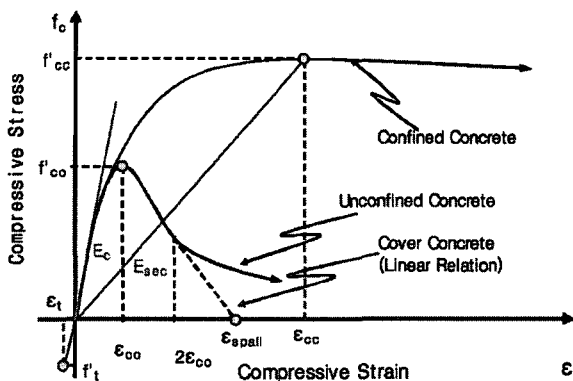


그림 1 구속된 콘크리트와 비구속된 콘크리트의 거동 (Popovics, 1973)

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r-1 + x^r} \tag{식 1}$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}}, \quad r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})}, \quad E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \tag{식 2}$$

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_c}} - \frac{f'_l}{f'_c} - 1.254 \right) \tag{식 3}$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1 \right) \right] \tag{식 4}$$

3. CFT 부재와 ICH CFT 부재 내 콘크리트의 비선형 모델

3.1 CFT 부재 내의 구속응력

CFT부재 내의 콘크리트는 외부 튜브의 항복 전까지 완전한 삼축 구속 상태로 존재하게 된다. CFT 부재 내의 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 2는 CFT 부재 단면의 자유물체도를 보여주며, 이로부터 식 5와 식 6이 유도된다. 여기서 f_{ot} 는 외부 튜브의 항복 강도이며, t_{ot} 는 외부 튜브의 두께이다.

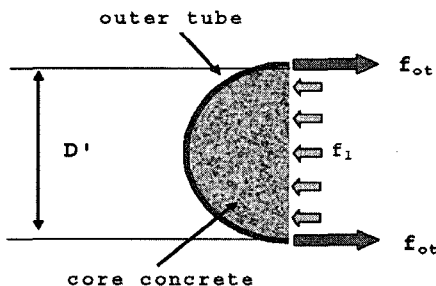


그림 2 CFT 부재내의 구속응력

$$D'f_l = 2f_{oty}t_{ot} \quad (\text{식 } 5)$$

$$f_l = \frac{2f_{oty}t_{ot}}{D'}, \quad f'_l = f_l \quad (\text{식 } 6)$$

3.2 ICH CFT 부재 내의 구속 응력

ICH CFT 부재는 증공 CFT 부재 내부에 일반 튜브 또는 파형 튜브를 내측 증공면에 삽입하여 만든 부재이다. 따라서 내측 튜브와 외측 튜브가 콘크리트에 연속적인 구속력을 제공하며, 내측 튜브와 외측 튜브가 중 어느 하나가 파괴되지 않는다면 지속적인 구속응력을 제공하며, 파괴 이후에는 구속응력을 제공하지 못한다고 가정한다. 그림 3은 ICH CFT 부재 단면의 자유물체도이다.

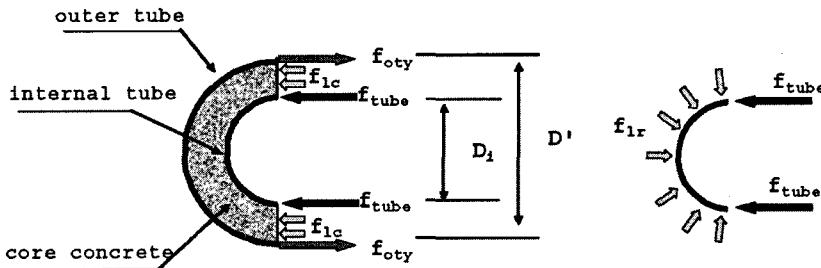


그림 3 ICH CFT 부재내의 구속응력

3.3 ICH CFT 부재의 파괴 모드

내측과 외측 튜브의 파괴를 고려할 때, ICH CFT부재의 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 삼축 구속된 상태이나, 내부 튜브의 파괴 이후에는 구속을 받지 못하는 비구속 콘크리트로서 거동한다. ICH R.C 부재의 경우에는 철근과 콘크리트는 합성되어 있다고 가정하나, ICH CFT 부재의 경우에는 외측 튜브와 콘크리트는 비합성 상태로 가정을 하므로, 내측 튜브 파괴 이후의 콘크리트는 비구속 콘크리트로서 거동하한다고 가정한다. 이러한 내부 튜브 파괴 이전과 이후의 구속 응력은 식 7과 식 8에 의해 표현된다.

$$f_{lc} = f_{lr} = f_l \neq 0 \quad (\text{식 } 7)$$

$$f_{lc} = f_{lr} = f_l = 0 \quad (\text{식 } 8)$$

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 부재내의 콘크리트와 같이 완전히 구속된 콘크리트의 거동을 한다고 가정한다. 임의의 방향으로 작용하는 구속응력을 \$f_l\$이라 정의하면 이는 식 7과 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 9와 같이 나타내어지며, 그림 3으로부터 식 10을 구할 수 있으며, 식 10을 식 9에 대

입하고 f_{ot} 대신 f_{oty} 를 적용하면, 식 11을 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.

$$f_l(D' - D_i) + 2f_{tube}t \quad (\text{식 9})$$

$$f_{tube} = \frac{f_l D_i}{2t} \quad (\text{식 10})$$

$$f_l = \frac{2f_{oty}t_{ot}}{D'} \quad (\text{식 11})$$

3.4 내측 튜브의 항복 파괴 조건

ICH CFT 부재에서, 재료의 성질이 일정하다면, 내측 튜브의 항복과 좌굴 조건은 내측 튜브의 두께에 지배되므로, 파괴형태는 내측 튜브의 두께를 조절함으로써 제어될 수 있다. 내측 튜브의 항복 파괴 조건은 식 12와 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 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 t_y 는 이를 만족하는 최소의 두께이며, t 는 내측 튜브의 두께이다.

$$f_l = \frac{2t}{D_i} f_{tube} = \frac{2f_{oty} \cdot t_{ot}}{D'} \quad (\text{식 12})$$

$$t > \frac{D_i \cdot f_{oty} \cdot t_{ot}}{D' \cdot f_{yt}} = t_y \quad (\text{식 13})$$

3.5 내측 튜브의 좌굴 파괴 조건

ICH CFT 부재의 내부에 삽입된 튜브는 콘크리트에 의해 튜브의 내측 방향으로의 변위 발생은 가능하나, 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-스루(snap-through) 좌굴과 같은 형상을 보인다. 이때의 좌굴 강도(f_{cr})는 식 13과 같이 나타낼 수 있다.⁴⁾ 여기서, R 은 내측 튜브의 반지름, E 는 탄성계수, I 는 내측 튜브의 단면이차모멘트이다. 좌굴 파괴가 발생하지 않을 조건은 식 14와 같으며 이를 정리하면 식 15와 같은 좌굴파괴 방지를 위한 최소 두께(t_{bk})에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$f_{cr} = 2.27 \frac{EI}{R^2 t} \quad \text{or} \quad f_{cr} = \frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} \quad (\text{식 13})$$

$$\frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} > \frac{2f_{oty}t_{ot}}{D'} \quad (\text{식 14})$$

$$t > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 f_{oty} t_{ot}}{D' E}} = t_{bk} \quad (\text{식 15})$$

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 16과 같이 표시된다. 내부 튜브가 파형일 경우

에는 파형의 형상을 일반적인 튜브에서 등가의 단면이차모멘트로 치환하여, 좌굴 방지를 위한 최소 두께를 식 17과 같이 정의할 수 있다.

$$t < t_{lim} : \text{파괴 형태 1} \tag{식 16a}$$

$$t > t_{lim} : \text{파괴 형태 2} \tag{식 16b}$$

$$t = t_{lim} : \text{파괴 형태 3} \tag{식 16c}$$

$$t_{eq} = \sqrt[3]{6f^2t \left[1 - \frac{0.81}{1 + 2.5\left(\frac{f}{2t}\right)^2} \right]} \tag{식 17}$$

4. 해석 결과

유도된 방정식을 이용하여, 임의의 모델에 대한 해석을 수행하였으며, CFT 부재의 경우, 기존 연구(임석빈의 3인, 2004)⁵⁾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. 강관의 두께를 변화시킴으로써 최대 구속 응력의 변화를 주었으며, 해석 모델에 대한 제원은 표 1에 나타내었다.

표 1 CFT 해석 모델의 단면 제원 및 재료 물성치

단면 제원	단면 외경	10 cm
	튜브의 두께	0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0 mm
재료 물성치	비구속 콘크리트의 압축 강도	27.65 MPa
	튜브의 항복 강도	235.44 MPa
	튜브의 최대 변형률	0.20

그림 4는 해석 결과이며, 외부 튜브의 두께가 증가함에 따라 콘크리트의 강도와 연성이 증가함을 알 수 있다. 또한 그림 5는 튜브의 두께가 0.8mm인 모델에 대해서, 0.03의 변형률에서 하중을 제거한 후 다시 가력하였을 때의 결과이다. 그림 6은 콘크리트 압축강도가 27.50MPa, 튜브두께가 1.2mm인 경우의 실험치와 해석치의 비교이며, 그림 7은 콘크리트 압축강도가 23.89MPa, 튜브두께가 1.0mm인 경우의 실험치와 해석치의 비교이다. 실험치와 비교한 결과 해석 모델이 실제 부재의 거동을 정확히 예측함을 알 수 있다.

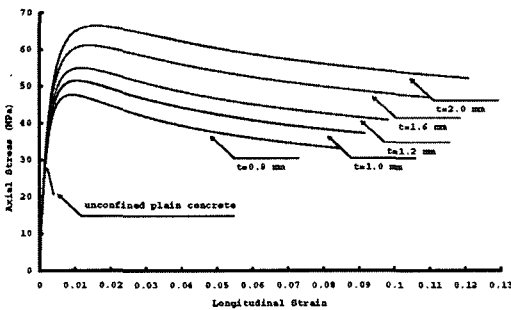


그림 4 CFT 부재의 해석 결과

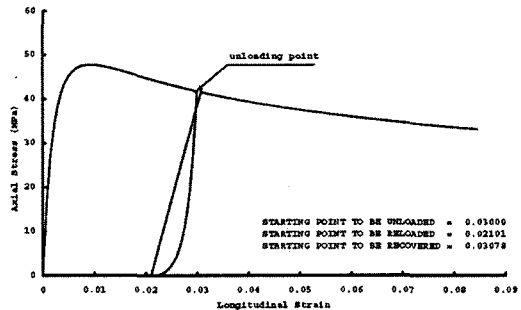


그림 5 CFT 부재의 해석 결과 (반복하중)

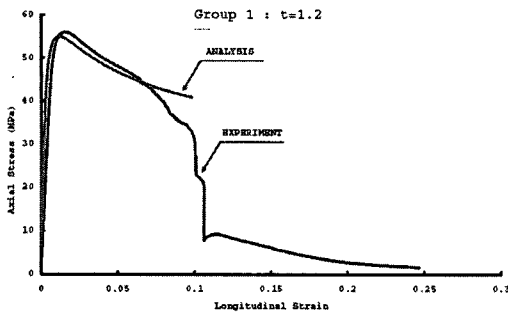


그림 6 해석치와 실험치의 비교 (1)

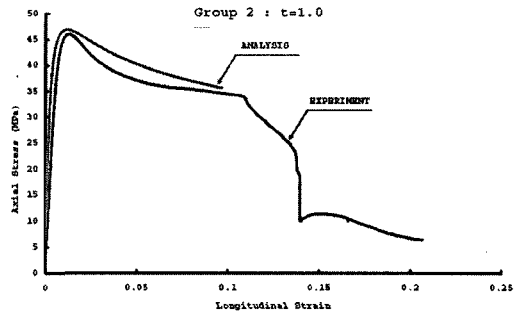


그림 7 해석치와 실험치의 비교 (2)

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 제원은 그림 8과 같으며, 비구속 콘크리트의 강도는 25MPa이다.

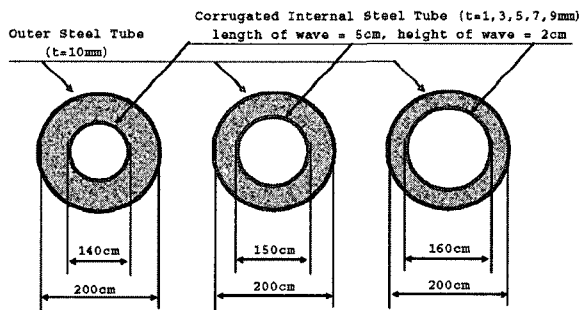


그림 8 ICH CFT 부재 해석 모델의 제원

그림 9는 내측 튜브로서 일반 강관을 사용한 경우이며, 내측 튜브의 두께가 파괴되지 않는 조건의 경우 ($t=5,7,9\text{mm}$)에는 큰 강도와 연성을 보이거나, 내측 튜브가 파괴된 경우($t=1,3\text{mm}$)에는 일정 수준까지 강도가 증가하다가 내측 강관의 파괴와 함께 급격히 강도가 저하됨을 알 수 있다. 그림 10은 ICH CFT-CT 부재가 반복하중을 받는 경우이며, 내측 튜브의 파괴로 인하여 급격한 강도의 감소를 보이고 있다.

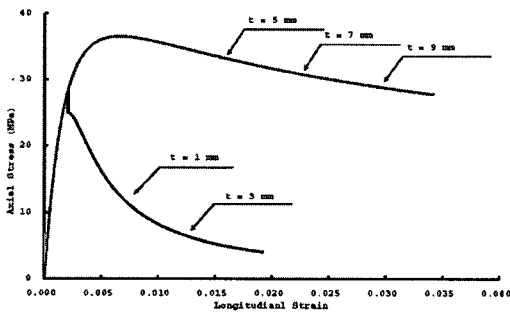


그림 9 ICH CFT-FT 부재의 해석 결과 (중공비 = 0.7)

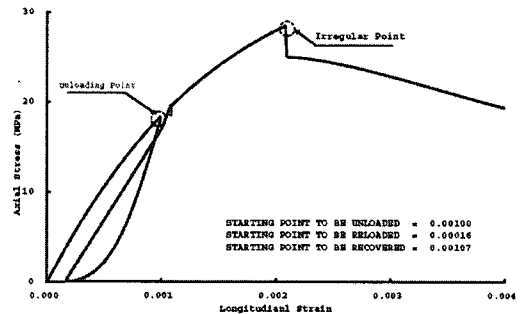


그림 10 ICH CFT-CT 부재의 해석 결과 (중공비 = 0.8, $t=3\text{mm}$)

5. 결론

본 연구에서는 Mander의 콘크리트 모델을 기본으로 하여, 구속효과를 고려한 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. 해석 결과 개발된 해석 모델은 실험결과에 근접하는 결과를 도출하여 해석모델의 정확성을 검증하였으며, 현재 새롭게 개발된 내부 구속 중공 부재에 대한 해석 기반을 제공하였다. 본 비선형 재료 모델을 적용하여 콘크리트의 정확한 거동 예측이 가능하므로, 일반 범용 해석 프로그램에 적용 가능하며, 전용 프로그램의 개발이 가능하게 되어, 새로운 부재 및 기존 부재에 대한 정확한 해석과 설계를 가능하게 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술평가원에서 시행한 『2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: D02-01)』의 연구비 지원과 『삼성물산(주) 건설부문』의 부분 지원에 의하여 수행되었으며, 지원기관에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- 1) Y. J. Kang and T. H. Han (2005) Behavior of an Internally Confined Hollow R/C Pier, *Proceeding of the 8th Korea-China-Japan Symposium on Structural Steel Construction*, pp.91-97
- 2) T. H. Han, K. H. Han, S. Y. Han, S. N. Kim, J. O. Kang, Y. J. Kang (2005) The Behavior of an Internally Confined Hollow Concrete Filled Steel Tube Column, *Proceeding of the 8th Korea-Japan Joint Seminar*
- 3) J. B. Mander, M. J. N. Priestly, and R. Park (1984) Seismic Design of Bridge Piers, *Research Report No. 84-2, Univ. of Canterbury, New Zealand*
- 4) R. Haftka, W. Nachbar (1970) Post Buckling Analysis of an Elastically Restrained Column, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 6, pp.1433 -1449
- 5) 임석빈, 한택희, 이명섭, 강영중 (2004) 구속조건이 콘크리트 응력-변형률 관계에 미치는 영향, 대한토목학회 학술발표대회 논문집