구속효과를 고려한 내부 구속 중공 철근콘크리트의 비선형 재료 모델 개발

Development of Material Nonlinear Models for Internally Confined Hollow Reinforced Concrete

한택희¹⁾ 윤기용²⁾ 이창수³⁾ 강진욱⁴⁾ 이명섭⁵⁾ 강영종⁶⁾ Han, Taek Hee Yoon, Ki-Yong Lee, Chang-Soo 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 a R.C 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 R.C member named as an ICH(Internally Confined Hollow) R.C member, was developed to overcome the low ductility of the hollow member and the low strength of the hollow R.C member. A material nonlinear model for the concrete in an ICH R.C 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.

1. 서론

기둥의 자중의 감소나 재료의 절감의 장점으로 중공 R.C 부재가 사용되고 있다. 중공 부재의 경우 동일 단면적을 갖는 일반 중실 기둥에 비해, 더 큰 단면이차모멘트를 갖게 되므로 더 효율적 인 단면 활용이 가능하다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고, 중공 R.C 부재는 안쪽면의 취성 파 괴로 인하여 낮은 연성 거동을 하게 된다. 이러한 안쪽면의 취성파괴는 중공 R.C 부재의 바깥면 의 콘크리트는 횡철근에 의해 구속되어 있으나, 내측면의 콘크리트에는 구속력이 작용하지 않는 것에 기인한다. 따라서 중공 R.C 부재의 취성파괴 방지를 위해서는 중공 내면에도 구속력을 작용 시켜, 콘크리트를 3축 구속 상태로 만들어주는 것이 필요하다. 이러한 중공 R.C 부재의 문제점을 해결하기 위하여, 중공 R.C 부재의 내부에 강관을 삽입하여 내부 구속력을 발생시킴으로써, 중공 부재 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

¹⁾ 고려대학교 공학기술연구소 연구조교수

²⁾ 선문대학교 건설공학부 교수

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수

⁴⁾ 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 차장

⁵⁾ 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 부장

⁶⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과, 교수

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 내부 구속 중공 R.C 부재의 해석을 위하여 구속효과를 고려한 비선형 콘크리트 모델을 개발하였다. 내부 구속력을 발 생시키기 위해 삽입되는 튜브는 강관, PVC관 또는 FRP관 등 다양한 재료의 튜브가 사용될 수 있 으며, 형상 또한 일반적인 튜브 외에도 파형 튜브의 적용이 가능하며, 해석 모델은 이러한 변수를 모두 고려할 수 있도록 개발되었다. 그림 1과 그림 2는 원형단면과 구형단면의 ICH(내부 구속 중 공) R.C 부재의 단면을 나타낸 그림이며, 본 연구는 원형 단면에 대해 수행되었다.



그림 2 ICH R.C 부재 (구형단면)

구속된 콘크리트는 비구속된 콘크리트에 비해 향상된 강도와 연성을 갖게 된다. 그림 3은 구 속된(confined) 콘크리트와 비구속된(unconfined) 콘크리트의 응력-변형율 관계를 비교한 그림이 다. 콘크리트의 연성과 강도의 증가는 구속 응력의 영향을 받으며, R.C 부재에서 이러한 구속 응 력은 횡철근에 의해 결정된다.



Compressive Strain, ε_{c}

그림 3 구속된 콘크리트와 비구속된 콘크리트의 거동

중공 R.C 부재는 재료의 절감 면에서 매우 경제적이나 콘크리트가 삼축으로 구속되지 않고 2 축 구속 상태가 되어, 연성의 큰 증가를 기대하기는 어렵다. 비록 이축 구속된 콘크리트가 비구속 된 콘크리트보다는 우수한 구조적 거동을 보이지만, 성능의 개선 증가분은 크지 않다. 그림 4는 원형 중공 R.C 부재의 2축 구속 상태를 보여준다. 콘크리트 요소(concrete wall element)는 축방향 응력과 원주방향 응력에 의해 2축 구속되나, 원주 방향으로의 구속응력은 존재하지 않는다. 이러 한 상태에서 콘크리트 요소의 취성 파괴가 발생한다.



그림 4 중공 R.C 부재의 2축 구속 상태

그림 5는 내부 횡철근에 의해 중공 R.C 부재의 콘크리트가 3축 구속된 상태를 보여준다. 내 부 횡철근이 원주방향으로 구속 응력을 제공하고, 콘크리트 요소를 3축 구속 상태로 만들어 주게 된다. 하지만 이러한 형태의 부재는 내측면의 피복 콘크리트의 탈락 이후 내부 횡철근이 쉽게 좌 굴하게 되어 그림 6과 같이 2축 구속 상태로 변화하게 되어 취성 파괴에 이르게 된다. 또한, 내부 횡철근은 튜브와 달리 연속적으로 존재하지 않기 때문에, 연속적인 내부 구속력을 기대할 수 없 다.



그림 5 내부 횡철근에 의해 3축 구속된 콘크리트



그림 6 내부 횡철근의 좌굴 이후 콘크리트의 2축 구속 상태



그림 7 내부 튜브에 의한 콘크리트의 3축 구속 상태

따라서 그림 7과 같이 중공 R.C 부재의 안쪽 면에 튜브를 삽입하여, 연속적인 내부 구속력을 제공하는 방법이 부재의 강도와 연성을 향상시킬 수 있는 가장 효과적인 방법이라 판단된다.



2. Mander의 콘크리트 모델

본 연구에서는 Mander의 콘크리트 모델(1988)을 바탕으로 CFT 부재와 ICH CFT부재 내의 콘크리트에 대한 비선형 모델을 개발하였다. Mander는 횡철근으로 구속된 콘크리트에 대한 모델 을 제시하였으며, 본 연구에서는 이러한 Mander의 모델을 수정하여 중공 R.C 부재에서의 콘크리 트 모델을 개발하고, 내부에 튜브가 삽입된 경우인 내부 구속 중공 R.C 부재(ICH R.C)의 콘크리 트에 대한 모델을 개발하였다. Mander의 콘크리트 모델에서 모든 주요 인자는 구속응력에 의해 결정되므로, 본 연구에서는 각 부재 내에서 존재하는 구속응력을 새롭게 정의함으로써, 해석모델 을 제시하였다. 콘크리트 모델은 단조 압축 및 인장 하중에 대한 모델 및 반복 인장 및 압축 하중 에 대한 모델이 제시되었으며, 본 연구에서도 동일하게 적용되었다. 단조 압축 하중에 대해 Mander가 제시한 모델은 Popovics(1973)에 의해 제안된 모델을 적용하였으며, 다음과 같다. 1973 년에 Popovics는 구속된 콘크리트와 비구속된 콘크리트가 압축을 받는 경우에 대해 그림 8과 같 이 응력과 변형율의 관계를 제시하였으며, 이때의 응력-변형율 관계를 식 1과 같이 정의하였다. 다른 연구자들과는 달리 Popovics는 응력-변형율 관계를 정의함에 있어, 구간별로 따로 정의하지 않고 하나의 통일된 식으로 정의하였으며, 이는 Mander의 연구³⁾에서 그대로 채용되어 연구가 이 루어졌다. 이 연구에서 해석 모델은 모두 일정한 구속 응력(f')에 기반을 두어 정의되었다. 여기 서, fc는 콘크리트의 응력, c는 일축 변형율, f'cc는 콘크리트의 구속 강도, cc는 구속된 콘크리트 의 최대 강도에서의 변형율이다. 구속되지 않은 콘크리트의 탄젠트 접선 계수(E_)는 500√f'cc로 추산될 수 있으며, 구속된 콘크리트의 최대 강도(f',,)는 식 5에 의해 계산된다. 여기서, f',는 비 구속 콘크리트의 강도이며, f',은 횡구속 압력이다.

$$f_{c} = \frac{f'_{cc} X r}{r - 1 + X^{r}}$$
(A) 1)

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} , r = \frac{E_c}{(E_c - E_{sec})} , E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}$$
(4) 2)

$$f'_{cc} = f'_{c} \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_{l}}{f'_{c}}} - \frac{f'_{l}}{f'_{c}} - 1.254 \right)$$
(A)

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c}} - 1 \right) \right]$$
(4)

3. 원형 중공 R.C 부재 내의 평형 방정식

중공 R.C 부재에서, 콘크리트는 방사방향으로 구속 응력을 발생시킬 수 있는 콘크리트 코어 가 존재하지 않으므로 후프 철근이나 횡철근 안쪽의 콘크리트는 3축 구속되지 않는다. 하지만 원 주 방향으로는 아치액션으로 인하여 콘크리트는 구속된다. 따라서 원형 중공 R.C 내의 콘크리트 는 원주방향으로는 구속되나 방사방향으로는 구속되지 않는 것으로 가정하여, 이 가정에 따라서 그림 10과 같은 2축 구속 상태의 콘크리트에 대한 자유물체도를 얻을 수 있다.



그림 10 원형 중공 R.C 부재 내 콘크리트에 작용하는 구속응력

그림 10과 같은 후프 철근에 의해 구속된 원형 중공 R.C 부재의 단면의 자유물체도를 고려하 면 연직하중 작용 시 포아송비에 의해 콘크리트가 팽창하게 되며 이로 인해 횡철근에 일정한 인 장력이 발생한다. 이 횡철근은 콘크리트를 원주방향으로 구속하나, 내부의 중공으로 인해 방사방 향으로는 구속하지 못한다. 원주방향으로의 구속응력(f_{lc})은 식 6과 같이 구할 수 있으며, 방사방 양으로의 구속응력(f_{lr})은 0으로 가정한다. 여기서, *D*는 구속된 콘크리트의 직경, *D*_l는 중공의 직경, f_{lr} 는 후프철근의 항복강도, A_{sp} 는 후프철근의 단면적, *S*는 후프철근의 간격이다.

$$f_{lc} = (D' - D_{j})s = 2f_{yh}A_{sp}$$
 (4 5)

$$f_{lc} = \frac{2I_{yh}A_{sp}}{(D' - D_{s})s}$$
(4)6)

Mander(1986)는 각각의 방향으로 서로 다른 압력으로 구속되는 콘크리트의 강도에 대한 연구 를 수행하였으며, 실험적 연구를 통하여 그림 9와 같은 도표를 작성하였다. 원형 중공 R.C 부재는 2축 구속된 상태라 가정하면 도표에서 해당되는 곡선을 찾아 회귀분석을 하면 식 9를 얻을 수 있 다. 여기서 f' ~는 비구속된 콘크리트의 강도이며, f' ~는 구속된 콘크리트의 강도이다.

$$f'_{cc} = -2.75 \frac{f_{lc}^2}{f'_{co}} + 1.835 f_{lc} + f'_{co}$$
(4 9)



그림 11 내부 구속 중공 R.C 부재 내의 구속응력

3. 내부 구속 원형 중공 R.C 부재 내의 평형 방정식

중공 R.C 부재 내부에 튜브가 상비되어 내부 구속력이 제공되면, 콘크리트는 외측 횡철근이 나 내측 튜브의 파괴 이전까지는 완전히 삼축으로 구속된다. 그림 11은 내부 구속 중공 R.C 부재 내의 구속 응력과 자유물체도를 보여준다.

3.1 내부 구속 중공 R.C 부재의 파괴 모드

내부 구속 중공 R.C 부재에서 내부 튜브의 파괴와 외측 횡철근의 항복 파괴를 고려한다면 세 가지의 파괴 모드를 가정할 수 있다. 첫 번째 파괴모드는 횡철근의 항복 이전에 내부 튜브가 좌굴 되거나 항복되어 파괴되는 경우이며, 두 번째 파괴모드는 내부 튜브의 파괴 이전에 횡철근이 먼저 항복하여 파괴되는 경우이다. 세 번째의 파괴모드는 횡철근과 내부 튜브가 동시에 파괴되는 경우 를 생각할 수 있다. 첫 번째 파괴모드에서 콘크리트는 튜브의 파괴 전까지 완전히 구속된다. 하지 만, 튜브의 파괴 이후에는 내부의 튜브는 더 이상의 구속력을 제공하지 못하여 콘크리트는 2축 구 속 상태가 되며 이는 중공 R.C 부재에서의 콘크리트와 같은 응력상태가 된다. 내부 튜브의 파괴 전과 후의 구속응력은 식 10과 식 11로 나타낼 수 있다.

$$f_{lc} = f_{lr} = f_{l} \neq 0 \tag{(4) 10}$$

$$f_{lr} = 0 \quad \text{and} \quad f_{lc} \neq 0 \tag{(4) 11}$$

두 번째 파괴모드에서 콘크리트는 횡철근이 항복하여 부재가 파괴되기 전까지는 완전히 구속 된다. 이러한 파괴 모드에서 부재의 파괴는 횡철근의 항복에 의해 결정된다. 횡철근의 파괴 이전 까지 콘크리트는 완전히 구속되므로, 이 경우의 콘크리트는 중실 R.C 부재내의 콘크리트와 동일 한 거동을 보이게 된다. 이 경우에서의 구속응력은 식 10과 같이 나타내어진다. 세 번째 파괴모드 는 드문 경우로서 두 번째 파괴 모드와 동일하게 가정할 수 있다. 첫 번째와 두 번째의 파괴모드 와 같이 튜브의 파괴 이전에 횡철근이 파괴될 때의 평형방정식은 식 12와 같이 구할 수 있으며, 이 경우에서 튜브는 횡철근비에 기여를 하지 않는다고 가정한다. 그림 11의 오른쪽 그림에서 식 13을 얻을 수 있으며, 식 13을 식 12에 대입하여 식 14를 구할 수 있다. 여기서 *f_f*은 콘크리트에 작용하는 구속응력, *f_{yh}*는 횡철근의 항복 강도, *f_{tube}*는 튜브에 작용하는 응력, *t*는 튜브의 두께이 다.

$$\{f_{I}(D'-D_{i})+2f_{tube}t\}s=2f_{yh}A_{sp}$$
(4) 12)

$$f_{tube} = \frac{f_i D_i}{2t} \tag{A} 13$$

$$f_{I} = \frac{2f_{vh}A_{sp}}{D's} \tag{A} 14$$

3.2 내측 튜브의 항복 파괴 조건

내부 구속 중공 R.C 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 15와 같이 표현되며, 내측 튜브의 파괴 이전에 외측 횡철근의 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 16과 같 이 나타낼 수 있다. 여기서 *t*,는 이를 만족하는 최소의 두께이며, *t*는 내측 튜브의 두께이다.

$$f_{I} = \frac{2t}{D_{i}} f_{tube} = \frac{2f_{yh} \cdot A_{sp}}{D' \cdot s}$$
(4) 15)

$$t > \frac{D_{i} \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{D' \cdot s \cdot f_{yt}} = t_{y}$$
(4 16)

3.3 내측 튜브의 좌굴 파괴 조건

내부 구속 원형 중공 R.C 부재의 내부에 삽입된 튜브는 콘크리트에 의해 튜브의 내측 방향으 로의 변위 발생은 가능하나, 외측 방향으로는 콘크리트에 의해 구속되어 변위 발생이 불가능한 일 방향 구속 상태(unilaterally restrained)가 된다. 이러한 경계 조건으로 인하여, 내측에 삽입된 튜브 는 일반적인 아치나 링의 바이퍼케이션(bifurcation) 좌굴과는 다른, 얕은 아치의 스냅-스루 (snap-through) 좌굴과 같은 형상을 보인다. 이때의 좌굴 강도(f_{α})는 식 17과 같이 나타낼 수 있 다.⁴⁾ 여기서, *R*은 내측 튜브의 반지름, *E*는 탄성계수, *f*는 내측 튜브의 단면이차모멘트이다. 좌 굴 파괴가 발생하지 않을 조건은 식 18과 같으며 이를 정리하면 식 19와 같은 좌굴파괴 방지를 위한 최소 두께(t_{tk})에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$f_{cr} = 2.27 \frac{EI}{R^2 t}$$
 or $f_{cr} = \frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2}$ (4 17)

$$\frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} > \frac{2f_{ytr}A_{sp}}{D's}$$
(4 18)

$$t > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{D_i^2 f_{yh} A_{sp}}{D' E s}} = t_{bk}$$
 (4 19)

항복 파괴가 발생하지 않을 최소 두께(*t_j*)와 좌굴 파괴가 발생하지 않을 최소 두께(*t_{kk}*) 중, 작 은 값을 *t_{im}*라 정의하면 내측 튜브의 두께에 의한 부재의 파괴 형태는 식 20과 같이 표시된다. 내부 튜브가 파형일 경우에는 파형의 형상을 일반적인 튜브에서 등가의 단면이차모멘트로 치환하 여, 좌굴 방지를 위한 최소 두께를 식 21과 같이 정의할 수 있다.

t>t_{lim} : 파괴 모드 2 (식 16b)

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

4. 해석 결과

4.1 원형 중공 R.C 부재의 해석

원형 중공 R.C 부재에서 콘크리트의 응력-변형율 관계를 구하는 방법은 수정된 구속 응력의 적용을 제외하면 기본적으로 Mander의 콘크리트 모델을 이용한 계산과정과 동일하다. 개발 프로 그램을 이용하여 원형 중공 R.C 부재 콘크리트의 응력-변형율 관계를 구하고 이를 무근 구속되지 않은 콘크리트와 중실 R.C 부재 콘크리트의 해석결과와 비교하였다.



(a) 비구속 부재 (b) 중실 R.C 부재 (c) 중공 R.C 부재 그림 12 해석 대상 모델의 제원



그림 13 각 부재 내 콘크리트의 응력-변형율 관계 비교

해석에 사용된 부제의 제원은 그림 12와 같다. 구속된 콘크리트의 직경은 60cm, 중공 직경은 50cm, 횡철근의 직경은 1.3cm로 하였으며, 비구속 콘크리트의 일축압축 강도는 25MPa, 횡철근의 항복강도와 극한 변형율은 각각 294.3MPa와 0.20으로 입력하였다. 해석 결과는 그림 13과 같으며, 2축 구속을 받는 중공 R.C 부재내의 콘크리트는 비구속된 콘크리트보다는 큰 강도와 연성을 가지 나, 3축 압축을 받는 중실 R.C 부재내의 콘크리트보다는 더 작은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

4.2 내부 구속 원형 중공 R.C 부재의 해석

내부 구속 중공 R.C 부재의 해석에서는 내부 튜브가 일반 튜브(ICH R.C-FT)인 경우와 파형 튜브(ICH R.C-CT)인 경우, 두 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석 모델의 제원은 그림 14 와 같으며, 비구속 콘크리트의 강도는 25MPa이다. 횡철근의 직경과 배치 간격은 각각 1.3cm, 10cm이며, 항복강도와 극한 변형율은 각각 294.3MPa와 0.20이다. 내부 튜브의 항복강도와 탄성계 수는 196.2MPa, 206,010MPa이며, 튜브의 두께와 중공비를 변화시켜 거동을 분석하였다. 해석결과 그림 15및 16과 같은 결과를 얻었다.



그림 14 해석 대상 ICH R.C 부재의 제원



응력-변형율 관계 (중공비=0.7)

5. 결론

본 연구에서는 Mander의 콘크리트 모델을 기본으로 하여, 구속효과를 고려한 중공 R.C 부재 와 내부 구속 중공 R.C(Internally Confined Hollow R.C; ICH R.C)부재 내의 비선형 콘크리트 모 델을 유도하고, 컴퓨터 프로그램화하였다. 해석 결과 개발된 해석 모델은 합리적인 결과를 나타내 었으며, 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 부 재에 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, 지원 기관에 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*
- 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*
- R. Haftka, W. Nachbar (1970) Post Buckling Analysis of an Elastically Restrained Column , *Int. J. Solids Structures*, Vol. 6, pp.1433 -1449