일축압축을 받는 내부 구속 중공 CFT 기둥의 최적 구속 효과 연구

A Study on Optimum Confined Effect for Internally Confined Hollow CFT Columns under Uniaxial Compression

원덕희* · 한택희** · 윤나리*** · 강영종****

Won, Deok Hee · Han, Taek Hee · Yoon, Na Ri · Kang, Young Jong

요 약

최근 기둥의 구속효과에 대한 연구가 많이 연구되어지고 있다. 주로 철근 콘크리트 기둥과 CFT(Concrete Filled Tube) 기둥과 같이 중실 기둥에 대한 연구로 한정되어 있는 반면 중공 기둥에 대한 구속효과 연구가 매우 미비한 실정이다. 중공 기둥의 외부 구속력에 대한 연구가 주로 연구되고 있고 내부 구속력을 외부 구속력과 동일하게 가정하고 구속 콘크리트의 구속효과를 평가하고 있다. 본 연구에서는 중공 CFT 기둥에 내부 튜브를 삽입하여 구속 콘크리트 3축 구속 상태로 놓이게 하여 연성 및 강도를 상승 시킨 내부 구속 중공 CFT 기둥(Internally Confined Hollow CFT, ICH CFT)의 최적 구속메커니즘을 도출하기 위한 연구를 하였다. 내부튜브 두께, 중공비, 기둥의 직경, 콘크리트와 외부튜브의 휨강성비를 매개변수로 삼아 범용 FEM 프로그램으로 비선형 해석 연구를 수행하여 최적 내부 구속력 도출을 통하여 수정 파괴 조건식을 제안하였다. 수정 파괴 조건식은 최적 내부 튜브의 두께를 산정하여 기둥이 경제성을 확보하도록 하였다.

핵심용어 : 기둥, 구속 효과, 내부 구속 응력, 중공비, 3축 구속 응력

Abstract

Recently, study of confining effect in column members is progressed. But these studies are limited to about RC column and external confining effect in hollow columns. Internal confining effect in hollow columns has not researched. Internal confining stress is assumed the same external confining stress in hollow columns. In this study, there are to investigate the internal direction confining effect in ICH CFT column by FEA analysis. FEA analysis methods have verified by experimental values. Parametric study has performed as thickness of internal tube, hollow ratio, diameter of column and bending stiffness between concrete and external tube. Modified equations have suggested to estimating economic and reasonable thickness of internal tube.

Keywords : column, confined effect, internal confined stress, hollow ratio, triaxial confining stress

1. 서 론

구조물에서 기둥은 주부재로서 상부 및 외부로부터 작용하는 연직 및 횡하중에 주로 저항한다. 이렇듯 기둥의 거동은 전체 구조물계에 큰 영향을 미치게 되므로 기둥의 정확한 해석 및 설계를 위하여 실제 구조물의 거동을 완벽하게 예측할 수 있어야 한다. 이에 대한 연구들은 일반적으로 가장 많이 사용되는 철근콘크리트 기둥(RC, Reinforced Concrete)을 중심으로 많이 이루어져 왔으며, 또한 최근에는 합성 구조를 가진 기둥이 성능이 매우 우수하다는 것이 밝혀져 꾸준한 연구가 진행되고 있는 실정이다.

합성 구조를 가진 기둥 중에 가장 널리 사용되는 것은 콘크리트 충전(CFT, Concrete Filled Steel Tube) 기둥이다.

이 기둥은 강재 튜브에 콘크리트로 채워진 구조로 되어 있어 콘크리트는 3축 구속 상태에 놓이게 되어 연성과 강도가 철근 콘크리트 기둥보다 크게 증진된다. 그러나 CFT 기둥은 그 직경이 커질 경우에는 자중이 크게 증가되어 내진성능이 매우 떨어지게 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 불필요한 자중의 증가를 막기 위해서 철근콘크리트 기둥에서는 중공 RC 기둥을 적용하고 있다. 현재 현장에 주로 적용되고 있는 중공 RC 기둥 형식은 중공부에 횡철근이나 무배근을 하는 방법으로 형식이 제안되었으나 이는 구속 콘크리트가 3축 구속 상태가 아니라 2축 구속 상태 혹은 그 이하의 구속 상태에 놓이기 때문에 중실 RC 기둥일 때의 성능을 발휘할 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 한택희(2007) 등은 중공 RC 부재의 중

*정회원 · 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지 연구부 연구연구원 · 공학박사 (E-mail : thekeyone@kiost.ac)

**정회원 · 한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지 연구부 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : taekheehan@kiost.ac)

*** 고려대학교 건축사회환경공학과 · 공학석사 (E-mail : nry1004@korea.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : yjkang@korea.ac.kr)

그림 1. ICH CFT 기둥의 구조

공부에 튜브를 삽입하여 내부 구속력을 발생시킴으로써 중공부재 내의 콘크리트를 3축 구속 상태로 존재하게 하며, 시공 시 내부 거푸집을 따로 설치할 필요가 없는 내부 구속 중공 RC 기둥(ICH RC, Internally Confined Hollow RC)이 제안되었다.

이러한 유사한 개념을 CFT 기둥에 적용한 내부 구속 중공 CFT(ICH CFT, Internally Confined Hollow CFT)가 1980년대 후반에 Shakir-Kahalil과 Illouli에 의해 그림 1과 같이 제안되었다.

본 기둥은 제안된 이후, Wei 등(1995), Zhao와 Grzebieta(2002), Tao 등(2004)에 의해 기둥의 축강도에 대한 연구가 이루어져 왔으며, Wei 등(1995)은 ICH CFT 기둥의 축강도가 내부강관, 외부강관, 콘크리트 각각의 강도의 합보다 10~30% 정도 크다고 보고 하였으며, 축강도에 대한 경험식도 제안하였다. 국내에서 한택희 등(2007)은 구속효과를 고려한 ICH CFT기둥의 파괴모드와 콘크리트의 재료모델을 제안하고 횡하중을 받는 ICH CFT 기둥의 거동에 대한 실험적 연구를 수행하여, ICH CFT기둥이 동일 직경의 RC 기둥에 비하여 두 배의 모멘트 저항능력을 가짐을 보여주었다.

그러나 한택희 등(2007)은 파괴모드를 정의함에 있어서 ICH CFT 기둥 내부에 발생하는 구속응력의 크기가 외측, 내측에 관계없이 모든 단면에 걸쳐 동일하다는 가정하에 재료모델을 제안하였다. 그러나 원형 단면의 경우에는 단면자체의 아칭액션에 의하여 내측부로 작용하는 구속응력이 외측부분보다 더 작을 가능성이 매우 클 것으로 판단된다. 본 연구에서는 FEM 해석연구를 통하여 일축압축을 받는 ICH CFT 기둥의 구속 콘크리트 내부에서 발생하는 합리적인 구속응력을 도출하여 경제적인 내부 튜브 설계식을 제안하였다.

2. 기본 이론

2.1 ICH CFT 기둥의 파괴 모드

ICH CFT 기둥의 파괴모드 등의 기본이론은 한택희 등(2007)에 의하여 제안되어졌다. 본 기둥은 중공 CFT 기둥 내부에 튜브를 삽입하여 만든 기둥으로 내측 튜브와 외측 튜브가 콘크리트에 연속적인 구속력을 제공하며, 내측 튜브와 외측 튜브 중 어느 하나가 파괴되지 않는다면 지속적인 구속응력을 제공한다. 그림 2는 ICH CFT 기둥 단면의 자유물체도이다.

내측과 외측 튜브의 파괴를 고려할 때, 본 기둥은 파괴모드로 3가지의 경우를 가정할 수 있다. 첫 번째 파괴 모드는 외측튜브의 파괴 이전에 내측 튜브가 항복 파괴 또는 좌굴 파괴되는 경우이다. 두 번째 파괴 모드는 내부 튜브의 파괴 이전에 외부튜브가 항복하여 파괴되는 경우이며, 세 번째 파

그림 2. ICH CFT 기둥 내의 구속 응력(한택희 등 2007)

괴 모드는 내부튜브와 외부튜브가 동시에 파괴되는 경우이다. 첫 번째 파괴 모드의 경우 콘크리트는 내부 튜브의 파괴 이전까지는 완전히 3축 구속된 상태이나, 내부 튜브의 파괴 이후에는 구속을 받지 못하는 비구속 콘크리트로서 거동한다. 이러한 내부 튜브 파괴 이전과 이후의 구속 응력인 식 (1)과 식 (2)에 의해 표현된다.

$$f_{lc} = f_{lr} = f_{lt} \neq 0 \quad (1)$$

$$f_{lc} = f_{lr} = f_{lt} = 0 \quad (2)$$

여기서, f_{lc} 는 원주방향(circumferential)의 구속응력, f_{lr} 는 방사방향(radial)의 구속응력이다.

두 번째 파괴 형태에서의 콘크리트는 외측 튜브의 파괴로 인한 부재의 전체 파괴이전까지의 완전한 삼축 구속 상태로 존재한다. 이러한 파괴 형태에서 부재의 파괴는 전적으로 외측 튜브의 항복파괴에 의해 결정되며, 콘크리트는 일반 CFT 부재 내의 콘크리트와 같이 완전히 구속된 콘크리트의 거동을 하게 된다. 임의의 방향으로 작용하는 구속 응력을 f_l 라 가정하면 이는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 세 번째 파괴 형태는 매우 드문 경우로서, 두 번째 파괴 모드와 유사하다. 두 번째와 세 번째의 파괴 형태일 경우, 평형 방정식은 식 (3)과 같이 나타내어지며, 그림 2로부터 식 (4)를 구할 수 있다. 식 (5)를 식 (3)에 대입하고 f_{ot} 대신 f_{oty} 를 적용하면, 식 (6)을 얻는다.

$$f_l(D' - D_i) + 2f_{tube}t = 2f_{ot}t_{ot} \quad (3)$$

$$f_l D_i = 2t_{it} f_{tube} \quad (4)$$

$$f_{tube} = \frac{f_l D_i}{2t_{it}} \quad (5)$$

여기서, f_l 는 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} , t_{it} 는 각각 외측과 내측 튜브의 두께이다.

2.2 내측 튜브의 항복 파괴 조건

2.1절에서 가정한 내부튜브의 파괴는 내부튜브가 항복파괴될 경우와 좌굴 파괴될 경우로 나눌 수 있다. ICH CFT 기둥에서 재료의 성질이 일정하다면, 내측 튜브의 항복과 좌굴 조건은 내측 튜브의 두께에 지배되므로, 파괴형태는 내측 튜브의 두께를 조절함으로써 제어될 수 있다. 내측 튜브의 항복파괴 조건식은 식 (6)과 같이 표현되며, 내측 튜브의 파괴 이전에 외측 튜브의 항복강도보다 작아야 한다. 이러한 조건에 의해 내측 튜브의 항복파괴가 일어나지 않기 위한 최소의 두께 조건은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_l = f_{il} \cdot f_{il} = \frac{2t_{it} f_{it}}{D_i} = \frac{2f_{oy} \cdot t_{ot}}{D'} \quad (6)$$

$$t_{it} > \frac{D_i \cdot f_{oy} \cdot t_{ot}}{D' \cdot f_{ity}} = t_y \quad (7)$$

여기서, f_{il} 은 내측방향으로 작용하는 구속응력, t_y 는 내부튜브가 항복 파괴되지 않을 최소 두께, t_{it} 는 내부튜브의 두께, f_{ity} 는 내측 튜브의 항복강도이다.

2.3 내측 튜브의 좌굴 파괴 조건

ICH CFT 기둥의 내부에 삽입된 튜브는 내측 방향으로 변위 발생은 가능하나, 튜브의 외측 방향으로는 콘크리트에 의해 구속도되어 변위 발생이 불가능한 일방향 구속 상태(unilaterally restrained)가 된다. 이러한 경계 조건으로 인하여 내측에 삽입된 튜브는 일반적인 아치나 링의 바이퍼케이션(bifurcation) 좌굴과 다른, 얇은 아치의 스냅-스루(snap-through) 좌굴과 같은 형상을 보인다. 이때의 좌굴 강도(f_{cr})는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 좌굴 파괴가 발생하지 않을 조건은 식 (9)와 같으며 이를 정리하면 식 (10)과 같은 좌굴파괴 방지를 위한 최소 두께(t_{bk})에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$f_{cr} = 2.27 \frac{EI}{R^2 t_{it}} \quad \text{or} \quad f_{cr} = \frac{2.27 t_{it}^2 E}{3 D_i^2} \quad (8)$$

$$f_l = f_{il} \cdot \frac{2.27 t_{it}^2 E}{3 D_i^2} > \frac{2 f_{oy} t_{ot}}{D'} \quad (9)$$

$$t > \sqrt{\frac{6 D_i^2 f_{oy} t_{ot}}{2.27 D' E}} = t_{bk} \quad (10)$$

여기서, R 은 내측 튜브의 반지름, E 는 탄성계수, I 는 내측 튜브의 단면이차모멘트이다.

항복파괴가 발생하지 않을 최소 두께 (t_y)와 좌굴 파괴가 발생하지 않을 최소 두께(t_{bk}) 중 작은 값을 t_{lim} 으로 정의하면 내측 튜브의 두께에 의한 부재의 파괴 모드는 식 (11)과 같이 표시 된다.

$$t < t_{lim} : \text{파괴모드 1} \quad (11a)$$

$$t > t_{lim} : \text{파괴모드 2} \quad (11b)$$

$$t = t_{lim} : \text{파괴모드 3} \quad (11c)$$

3. FEM 해석 모델의 검증

해석연구를 수행하기 위하여 범용 구조 해석 프로그램 ABAQUS를 이용하였다. 해석 방법으로 소성구간에서의 거동 특성을 확인하기 위하여 재료 비선형 해석을 수행하였다. 콘크리트는 Concrete Damaged Plastic, 강재는 Plastic 옵션을 각각 적용하였다.

해석에 사용된 요소로 콘크리트는 Solid 요소인 C3D8R(8절점 3자유도 요소), 강재는 Shell 요소인 S4R(4절점 8자유도 요소)를 각각 적용하였다.

콘크리트와 튜브의 접촉부분은 비합성으로 가정하여 압축을 받을 경우 콘크리트와 강재의 합성 정도에 따라서 발생하는 추가적인 영향을 줄이고자 하였으며, 실제 콘크리트와 강재 튜브 사이에서 발생하는 부착강도는 매우 미미하다.

그림 3. 하중 및 지점 조건

표 1. 재료 물성치

특성	강재	콘크리트
탄성계수(MPa)	210,000	25,742(22,540)
단위중량(kN/m³)	77	23
프아송비	0.3	0.18
항복강도(MPa)	250	30(23)

표 2. 해석 검증 모델의 제원

특성	강재	콘크리트
직경(외경)	102 mm	100 mm
높이	200 mm	200 mm
튜브두께	1 mm(0.8 mm)	-

이러한 해석 방법을 이용하여 해석을 수행하였으며, 검증 대상 모델은 임석빈 등(2004)에서 연구를 수행한 CFT 기둥의 실험모델을 이용하여 해석 모델을 검증하였다.

해석 모델을 실험 모델과 최대한 동일하게 하기 위하여 그림 3과 같이 지점부분에 Local 좌표계를 이용하여 접선방향과 축방향 변위를 고정하였으며, 하중은 기둥 상단의 콘크리트에만 가하였다. 실험모델은 CFT 기둥 단면이기 때문에 그림 3에서 내부튜브를 제거하고 콘크리트를 채운 모델이며, 지점의 경계조건은 동일하다.

해석 검증 모델은 표 1에서와 같이 콘크리트 강도별로 30 MPa, 23 MPa의 두 가지 모델로 각각 물성치가 적용되었으며, 모델의 제원은 표 2와 같이 튜브의 두께 및 높이 직경이 동일하며 튜브 두께는 콘크리트 강도가 30 MPa 일 때는 1 mm, 23 MPa 일 때는 0.8 mm 이다.

위에서 제안한 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 해석을 수행한 결과 그림 4와 5와 같은 그래프가 나타났다. 그림 4는 콘크리트 강도 30 MPa 모델을 비교한 것으로 해석치와 실험치의 탄성구간의 강성이 거의 유사하고 축방향 최대 응력 또한 유사한 것으로 나타났다. 그러나 축방향 최대 응력 도달이후 소성구간으로 접어들때의 축방향 변형률의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 콘크리트 강도 30 MPa와 같이 그림 5의 콘크리트 강도 23 MPa에 대한 모델 역시 탄성구간의 강성은 유사하나 최대 축방향 응력이

그림 4. 해석치와 실험치의 비교(콘크리트 강도 30 MPa, 튜브두께 1 mm)

그림 5. 해석치와 실험치의 비교(콘크리트 강도 23 MPa, 튜브두께 0.8 mm)

실험치에 비해서 해석치가 작게 나타나는 것으로 나타났으며, 소성구간의 변형상태도 상이한 것이 나타나는데 이는 실제 실험 모델의 경우 최대 강도 도달이후에 콘크리트가 균열이 발생하여 프아송비가 변하게 되나 본 해석 모델은 프아송비가 변형되지 않기 때문에 소성구간에서의 결과치가 차이가 발생할 것으로 판단된다.

본 해석 결과는 콘크리트의 비선형성을 고려하였을 때 그 결과치가 경향성이 실험값과 매우 유사한 것으로 판단되는 바 본 해석 방법으로 해석을 수행하였을 경우에 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단되어 이 해석 방법이 물성치를 ICH CFT 모델에 적용하여 해석 연구를 수행하였으며, 이하의 모델의 재료 물성치는 모두 동일하게 표 1을 이용하였다.

4. 중공 CFT 기둥과 ICH CFT 기둥의 구속 응력

ICH CFT 기둥 모델을 해석하기 전에 내부 튜브를 삽입하지 않은 모델인 중공 CFT 기둥 모델의 구속력 평가를 위하여 해석을 수행하였다.

표 3은 중공 CFT 기둥 모델의 재원을 나타낸 것으로 중공비(구속콘크리트 내경/구속콘크리트 외경)를 0.1~0.9까지

표 3. 중공 CFT 기둥 모델 재원

변 수	재원
중공비	0.1~0.9
콘크리트 외경	400 mm
외부튜브 두께	8 mm
이론식 응력	10 MPa

그림 6. 중공 CFT 기둥의 중공비에 따른 구속 응력의 변화

변화시키면서 해석을 수행하였으며, 외부튜브의 두께는 식 (12)와 같이 콘크리트 구조 설계 기준의 CFT 기둥의 외부 튜브 두께 산정식을 적용하였다.

$$t_{ot} = D' \sqrt{\frac{f_{oty}}{8E_s}} \quad (12)$$

여기에서, f_{oy} 는 외부 튜브의 항복강도, E_s 는 튜브의 탄성계수, D' 은 구속콘크리트의 외경이다.

그림 6은 중공비에 따른 구속 콘크리트의 구속 응력 변화를 나타낸 것이다. 이론 구속 응력(f_c)은 식 (6)의 최우측항으로 구할 수 있으며, 나머지값들은 이론식으로 나누어 주어 나타낸 것이다.

중공 CFT 기둥은 중공비가 커질수록 구속응력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 6에서 나타난 외부 구속 응력비는 중공비 0.1~0.3까지는 3축 구속 상태에 놓이다가 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 중공비 0.7까지 서서히 감소하다가 이후부터 급격하게 감소하여 외부튜브를 보강한 효과가 거의 나타나지 않은 것으로 나타났다. 실제로 중공 기둥의 효과를 극대화시키기 위해서는 중공비가 0.7이상 즉, 자중이 50%이상 감소되는 단면을 선택해야 하며, 실제 적용된 중공 기둥의 대부분이 중공비 0.7~0.8을 기본으로 삼고 있다. 이렇듯 중공 CFT 기둥에서 콘크리트가 3축 구속 상태에 놓이게 하고 우수한 성능을 발휘하기 위해서는 반드시 구속응력을 증가시킬 방안을 확보해야 할 것이다.

내부 구속 응력은 기존 연구자들의 경우에 외부 구속 응력과 동일하다고 가정하고 연구하였다. 그러나 실제 구속 콘크리트의 기하학적 형상에 의하여 단면 자체에서 아칭 효과가 발휘되는 것으로 판단된다. 중공비 0.1일 때는 이론식의 80%의 내부 구속 응력이 발생하는 반면 중공비가 점차 상승할수록 내부 구속 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는

표 4. 중공 CFT 기둥 모델 제원

변수	제원
중공비	0.1~0.9
콘크리트 외경	400 mm
외부튜브 두께	8 mm
내부튜브 두께	0.8~7.2 mm
이론식 응력	10 MPa

내측 부분으로 작용하는 작용력이 상대적으로 점차 작아지는 것으로 판단되며, 기존에 내부 구속 응력과 외부 구속 응력을 동일하게 가정한 것을 수정하여 최적 구속응력을 도출한다면 경제적인 내부튜브를 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

구속응력 확보 방안으로 내부튜브를 삽입하여 비교 분석하였다. 표 4는 ICH CFT 기둥 모델의 제원을 나타낸 것으로 중공 CFT 기둥 모델 제원과 동일하게 하고 내부튜브를 삽입하였다. 여기에서 내부튜브의 두께는 한택희 등(2007)에서 제안한 산정식 이상으로 설정하였다.

그림 7은 중공 CFT 기둥에 내부튜브를 삽입한 모델을 대상으로 해석연구를 수행한 것이다. 내부 튜브를 삽입한 전후에 기둥 단면내의 구속 콘크리트에서 나타나는 구속응력의 변화를 나타낸 것으로 이때의 외부튜브는 항복한 상태이다. 삽입 전후의 구속응력의 변화가 매우 큰 것을 볼 수 있다.

외부 구속 응력의 경우에는 중공비 0.3부터 서서히 감소하다가 0.7에서 급격하게 감소하는 중공 CFT 기둥과는 다르게 이론식에 비해서 최대 5%정도의 차이는 보이고 있지만 중공 CFT 기둥에 비해서는 구속응력이 급격하게 증가되어 구속 콘크리트가 3축 구속 상태에 놓이게 되는 것을 볼 수 있으며, 충실 CFT 기둥의 구속 응력과 동일하게 성능이 상승되는 것으로 판단된다. 튜브의 삽입은 기둥 성능 상승에 큰 효과가 있는 것으로 판단된다.

전반적으로 이론식에 접근한 외부 구속응력과는 다르게 내부 구속응력은 중공비 0.5까지는 기존의 내부 구속응력 크기를 유지하다가 중공비 0.6부터 증가되는 것을 볼 수 있는데 이는 내부 튜브의 삽입으로 인하여 증가된 외부 구속력에 따라서 종속적으로 변하는 것으로 판단되며, 이는 내부 튜브

로 작용하는 구속력이 증가된 것으로 말할 수 있으며, 기존에 제시된 내부 튜브 두께 산정식이 실제보다 더 두껍게 산정되어 경제성이 떨어질 가능성이 매우 큰 것으로 판단된다.

$$f_l \neq f_{el} \neq f_{il} \quad (13)$$

$$f_l = f_{el} \neq f_{il} \quad (14)$$

구속 콘크리트에서 발생하는 이론 구속응력은 내부 튜브가 삽입되지 않았을 경우에는 식 (13)과 같이 외부 구속응력(f_{el})과 내부 구속 응력(f_{il}) 모두 이론 구속응력(f_l)과 다르며, 내부 튜브가 삽입되었을 때는 식 (14)과 같이 외부 구속응력(f_{el})과 동일하며, 내부 구속응력(f_{il})과는 다르다. 내부 튜브가 삽입되었을 때의 최적 내부 구속 응력을 도출해야 할 것이다.

5. 매개변수 연구

본 장에서는 최적 내부 구속응력 도출하기 위해서 내부 구속응력 변화에 영향을 미칠 수 있는 변수를 찾기 위하여 매개 변수 연구를 수행하였다. 변수로는 중공비, 직경, 콘크리트와 외부튜브의 휨강성비, 내부 튜브 두께 이상 4가지를 선정하여 해석을 수행하였다.

중공비 및 직경에 따른 영향성을 분석하기 위하여 표 5와 같이 직경 및 중공비에 따라 모델링을 하였으며, 외부튜브의 두께는 식 (12)에 의하여 설계하였으며, 이론 구속 응력은 식 (6)에 의하여 계산되었다. 여기에서 내부튜브의 두께는 임의의 두께를 산정한 후에 시행착오 법을 통하여 내부튜브와 외부튜브가 동시에 항복하는 두께로 선정하였으며, 그때의 내부 구속응력을 결과값으로 도출하였다.

표 5. 중공비 및 직경에 따른 해석 모델 제원

직경 (mm)	중공비 (mm)	외부튜브두께 (mm)	이론 구속응력 (MPa)
D300	0.1~0.9	4	6.67
D800	0.1~0.9	10	6.25
D1500	0.1~0.9	19	6.33
D2100	0.1~0.9	26	6.19
D2800	0.1~0.9	35	6.25

그림 7. ICH CFT 기둥의 중공비에 따른 구속응력 변화

그림 8. 직경에 따른 내부 구속응력의 변화

표 6. 콘크리트와 외부튜브의 휨 강성비에 따른 모델

휨강성비	직경 (mm)	중공비	이론 구속응력 (MPa)
1.19	D1500	0.1~0.9	6.33
	D2800	0.1~0.9	6.25
1.41	D1500	0.1~0.9	7.33
	D2800	0.1~0.9	7.32
1.63	D1500	0.1~0.9	8.37
	D2800	0.1~0.9	8.39

그림 8은 직경에 따른 내부 구속 응력의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 중공비에 따라서 내부 구속 응력의 변화가 발생하고 직경의 변화에 따라서는 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

표 6은 콘크리트와 외부튜브의 휨 강성비에 따른 모델의 제원을 나타낸 것이다. 콘크리트와 외부튜브의 휨강성비 EI 값을 1.19, 1.41, 1.63 이렇게 세분류로 구분하였으며, 각 휨 강성비별로 D1500, D2800으로 직경을 달리하여 모델을 검토하였다. 모든 모델은 중공비 0.1~0.9까지 검토하였으며, 내부튜브의 두께는 파괴가 발생하지 않아야 하기 때문에 기존의 산정식을 이용하여 적용하였다. 이론 구속응력은 모델 별로 다르게 선정하였다.

그림 9. 휨강성비 1.19 일 때 내부 구속 응력

그림 10. 휨강성비 1.41 일 때 내부 구속 응력

그림 11. 휨강성비 1.63 일 때 내부 구속 응력

표 7. 내부 튜브 두께에 따른 모델

직경(mm)	중공비	외부튜브두께 (mm)	내부튜브두께 (mm)
D2800	0.8	35	16~40

그림 9~11은 휨강성비에 따른 내부 구속 응력을 나타낸 것으로 결과치는 이론 구속응력 대비 내부 구속 응력비로 나타내었다. 휨강성비와 직경에 따른 값의 차이는 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다. 중공비 0.1~0.9까지 거의 유사하게 나타난다. 여기에서도 앞선 모델과 같이 중공비가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

표 7은 내부 튜브 두께에 따른 모델을 나타낸 것으로 직경은 D2800, 중공비는 0.8, 외부튜브두께 35 mm를 동일하게 모델링하고 독립 변수로 내부튜브를 선정하여 16~40 mm까지 변화시켜 해석을 수행하였다.

그림 12는 내부튜브 두께에 따른 내부 구속응력비를 나타낸 것으로 모두 이론 구속응력 대비 23%정도로 형성이 되는 것을 볼 수 있다. 즉, 필요 두께 이상의 두께가 확보 되었을 경우에는 내부튜브의 두께를 증가 시켜도 구속 콘크리트 강도 증가에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

다음으로는 ICH CFT 기둥의 구속 콘크리트내의 구속응력 분포를 나타낸 것이다. 표 4의 모델 중에 중공비 0.8모델을

그림 12. 내부튜브 두께에 따른 내부 구속응력

그림 13. 구속 콘크리트 내부의 구속 응력 분포

선정하여 단면내 구속응력 분포를 분석하였다.

그림 13은 구속 콘크리트 내부의 구속 응력 분포를 나타낸 것으로 그림 2와 같이 기존 연구자들이 가정한 등분포가 아니라 실제로는 콘크리트의 재료 성능과 기하학적 형상에 의해서 비선형적인 분포를 가진 것으로 판단되며, 앞으로는 등분포로 가정하면 안될 것으로 판단된다.

6. 수정 파괴 조건식의 제안

본 절에서는 이론 구속 응력 대비 내부 구속 응력의 비율을 도출하여 감소계수 γ 를 제안하여 수정파괴 조건식을 제안하였다.

그림 14는 ICH CFT 기둥내의 수정 구속응력 상태를 나타낸 것으로 그림 2와는 다르게 단면내의 구속응력의 분포가 비선형적으로 감소하는 것을 나타내었다.

6.1 항복파괴 수정 조건식

내부튜브의 항복파괴 수정 조건식을 제안하기 위해서 외부 구속응력과 내부 구속 응력을 구분하여야 한다. 해석에서도 나타났듯이 외부 구속응력은 내부튜브를 삽입할 경우에 이론 구속응력에 거의 유사하기 때문에 외부 구속 응력 f_{el} 이 이론 구속 응력 f_l 과 동일하다고 가정할 수 있으며, 내부 구속 응력은 이론 구속 응력에 감소 계수 γ 를 도입하여 $f_{il} = \gamma f_l$ 이라는 관계로 가정하여 식 (16)과 식 (17)로 전개하였으며, 식 (19)와 같이 항복파괴 수정 항복파괴 조건식을 도출 되었다.

$$f_l = f_{ol} = \frac{2f_{oly}t_{ol}}{D'}, f_{il} = \frac{2t_{it}f_{ity}}{D_i} \quad (15)$$

$$f_{il} = \gamma f_l = \frac{2t_{it}f_{ity}}{D_i} \quad (16)$$

그림 14. ICH CFT 기둥내의 수정 구속 응력

$$f_l = \frac{2t_{it}f_{ity}}{\gamma D_i}, f_l = f_{el}, f_{il} = \gamma f_l \quad (17)$$

$$\frac{2t_{it}f_{ity}}{\gamma D_i} = \frac{2f_{oly}t_{ol}}{D'} \quad (18)$$

$$t_{ity} > \frac{\gamma f_{oly} D_i}{f_{ity} D'} \quad (19)$$

여기에서 t_{it} 는 내부튜브의 두께, t_{iy} 는 항복파괴시 내부 튜브의 두께이다.

6.2 좌굴파괴 수정 조건식

좌굴파괴 수정 조건식은 항복파괴 수정 조건식과 동일한 방법으로 제안되었다. 기존의 한택희 등(2007)의 좌굴파괴 조건식 (8)을 이용하여 좌굴 강도식을 유도하였다. 식 (20)과 같이 이론 구속응력(f_l)에 감소 계수(γ)를 적용하여 내부 구속 응력(f_{il})을 나타내었으며, 좌굴강도식의 항과 감소계수를 적용한 이론 구속 응력식을 식 (22)와 같이 연립하여 식 (23)과 같이 좌굴 파괴 수정 조건식을 도출하였다.

$$f_{cr} > f_b, f_{il} = \gamma f_l \quad (20)$$

$$\frac{2.27t_{it}^2 E}{3 D_i^2} > \gamma f_l \quad (21)$$

$$\frac{2.27t_{it}^2 E}{3 D_i^2} > \frac{\gamma^2 f_{oly} t_{ol}}{D'} \quad (22)$$

$$t_{bk} > \sqrt{\frac{6 \gamma D_i^2 f_{oly} t_{ol}}{2.27 D' E}} \quad (23)$$

여기서, t_{bk} 는 좌굴파괴시 내부튜브의 두께이다.

6.3 감소 계수(γ)의 제안

5절에서 매개 변수 연구를 수행한 결과 콘크리트의 구속응력에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 중공비인 것으로 나타났다. 다른 변수들은 구속응력의 변화에 미미한 영향을 미치기 때문에 중공비를 변수로 잡아 회귀 분석식을 제안하고자 한다. 그림 15는 감소 계수를 제안하기 위해 해석을 수행하여 발생한 Upper Limit를 고려하여 이 값보다 약 10% 더 크게 제안값을 제안하였다.

그림 15. 감소 계수의 제안

이렇게 제안된 내부 구속 응력값을 이용하여 회귀분석식을 제안하였다. 회귀분석식은 중공비를 변수로 하며, 중공비 0.6을 기준으로 두 개의 식 (24)와 식 (25)와 같이 제안하였다.

$$\gamma = 0.11 + 1.1e^{-x/0.26}, \quad 0.1 \leq x \leq 0.6 \quad (24)$$

$$\gamma = 0.19 + (2.5 \times 1.0^{-6})e^{x/0.072}, \quad 0.6 < x < 0.9 \quad (25)$$

여기서, x 는 중공비를 나타낸다.

식 (24)과 식 (25)를 이용하여 모든 제원에서의 내부 구속 응력을 도출할 수 있으며, 이를 식 (19)와 식 (23)에 적용하면 최적 내부튜브 두께를 산정할 수 있어 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

6.4 수정 제안식의 검증

제안된 수정식을 검증하기 위하여 수정식으로 설계된 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 모델의 제원은 표 8과 같으며, 해석에 필요한 재료 물성치는 앞에서 정의된 것을 이용하였다.

그림 16은 검증 모델 제원 표 8을 이용하여 해석을 수행한 결과로 이론 구속 응력 대비 외부 구속 응력비를 나타낸 것이다. 외부 구속응력비는 오차를 10%이내에서 이론식에 모두 접근 하는 것으로 나타났으며, 외부 구속 응력비가 중공비 0.7~0.9에서는 이론 구속응력의 크기에 비해서는 작지만 내부튜브 삽입 이전에 비해서는 충분히 큰 성능을 발휘하는 것으로 판단되며, 거의 일정하게 결과값이 도출되는 것으로 보아 제안된 수정식을 이용하여 내부튜브를 설계하여도 무방할 것으로 판단된다. 그리고 외부튜브 항복 시 내부 튜브에 발생하는 응력을 표 9에 나타내었다. 모두 응력이

표 8. 검증 모델의 제원

직경(mm)	중공비	외부튜브 두께(mm)	내부튜브 두께(mm)
D400	0.1~0.9	5	0.5~3.9
D1000	0.1~0.9	13	1.2~10.1
D1500	0.1~0.9	19	1.7~14.8
D2100	0.1~0.9	26	2.3~20.2
D2500	0.1~0.9	31	2.7~24.1
D2800	0.1~0.9	35	3.1~27.2

그림 16. 제안 모델의 검증(외부구속력)

표 9. 중공비 0.8일 경우 외부튜브 항복시 내부튜브의 응력

직경	외부튜브응력	내부튜브 응력
D400	250	36.4
D1000	250	52.5
D1500	250	59.8
D2100	250	36.3
D2500	250	61.6
D2800	250	38.1
D3000	250	22.6

표 10. 수정식의 적용(D1500)

중공비	기존 내부튜브 두께(mm)	수정 내부튜브 두께(mm)	감소율(%)
0.1	1.9	1.7	10.5
0.2	3.8	2.4	36.8
0.3	5.7	2.6	54.4
0.4	7.6	2.7	64.5
0.5	9.5	2.6	72.6
0.6	11.4	2.7	76.3
0.7	13.3	2.9	78.2
0.8	15.2	5.5	63.8
0.9	17.1	14.8	13.5

매우 작게 발생되어 항복이나 좌굴이 발생하지 않고 모두 파괴모드 2, 즉 외부튜브가 먼저 항복파괴가 발생하는 모드가 나타나는 것을 볼 수 있다.

표 10은 표 8의 해석모델 중에 직경 D1500을 나타낸 것으로 기존 내부튜브의 두께보다 최대 78.2%의 감소율을 보이는 것으로 나타났으며, 중공비 0.5~0.8에서 두께의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다.

이렇듯 본 해석연구를 통하여 ICH CFT 기둥의 최적 구속 응력 상태를 도출해 내었으며 이를 이용하여 내부 튜브 수정 산정식을 제안함으로써 경제성을 확보하였다고 판단된다.

7. 결 론

본 연구는 범용프로그램을 이용하여 ICH CFT 기둥의 구속 콘크리트에서 발생하는 최적 구속 응력을 도출하기 위하여 매개변수 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 수정 파괴조건식 및 최적 내부 구속 응력 도출식을 제안함으로써 본 기둥의 경제성을 확보하였다.

1. 중공 CFT 기둥은 내부의 중공부를 보강하지 않을 경우 중공비 0.5 이하에서는 단면의 기하학적 형상에 의하여 아칭액션이 발휘되어 이론 구속응력이 발휘되지만 중공비 0.6 이상에서는 이론 구속응력 대비 현저하게 구속 응력이 감소되어 3축 구속상태에 놓이지 않는 것으로 판단된다.
2. 기둥내부의 콘크리트에서의 구속응력 분포는 기존의 연구자들이 제안한 등분포가 아니라 최 외곽에서는 이론 구속 응력에 접근하며, 내측으로 갈수록 비선형적으로 구속응력의 분포가 감소하는 것으로 나타났다.
3. 중공 CFT 기둥에 튜브를 삽입할 경우 외부 구속 응력이 이론 구속응력값에 접근하였으며, 내부 구속응력도 외부

구속응력이 증가된 만큼 증가한다.

4. 내부 구속 응력은 이론식과는 다르게 내측으로 갈수록 구속응력이 감소하며, 중공비가 증가할수록 감소한다.
5. ICH CFT 기둥에서의 구성 요소 중 콘크리트의 구속응력에 영향을 미치는 요소를 매개 변수 연구를 통하여 분석해본 결과 중공비가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다으며, 중공비를 제외한 모든 변수에서의 변화 패턴은 모두 유사한 것으로 나타났다.
6. 수정 파괴 조건식을 제안하기 위하여 이론 구속응력 대비 내부 구속 응력의 비율을 경향성을 분석하였으며, 이를 이용하여 이론 구속 응력(f_i)에 감소계수를 적용(γf_i)하여 내부 구속응력(f_{ii})을 도출할 수 있는 감소 계수(γ)를 제안하였다.
7. 제안된 감소 계수를 이용하여 내부 튜브의 항복파괴 및 좌굴 파괴 수정식을 제안하였다.
8. 제안된 수정식을 검증한 결과 오차율 10%이내에서 외부 구속 응력이 이론식에 접근하는 것으로 나타났으며, 이는 구속 콘크리트가 3축 구속상태에 놓이게 된다는 것으로 판단된다.
9. 제안된 수정식으로 내부튜브를 산정할 경우 기존 산정식 대비 최대 약 78%가 감소되어 경제성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

“이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-355-D00066)”.

참고문헌

- 한국콘크리트학회(2007) 콘크리트구조설계기준 해설.
한택희, 엄웅준, 한상윤, 강영중(2007) 구속효과를 고려한 내부 구속 중공 CFT 부재의 비선형 콘크리트 모델 개발, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제19권 제1호, pp. 43-52.
한택희, 한상윤, 강영중(2007) 내부 구속 중공 철근 콘크리트 부재의 비선형 재료 모델 개발, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제1호, pp. 11-26.
Shakir-Khalil, H. and Illouli, S. (1987) composite columns of concentric steel tubes, *Proceeding of Conference on the Design and Construction of Non Conventional Structures*, pp. 73-82.
Tao, Z., Han, L.H., and Zhao, X.L. (2004) Behavior of concrete-filled double skin (CHS Inner and CHS Outer) Steel tubular stub columns and beam columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, pp. 1129-1158.
Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C., and Mantrala, S.K. (1995) Performance of new sandwich tube under axial loading: experiment, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No. 12, pp. 1806-1814.
Zhao, X-L. and Grzebieta, R. (2002) Strength and ductility of concrete filled double skin (SHS Inner and SHS Outer) tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 40, pp. 199-213.

(접수일: 2012.2.21/심사일: 2012.4.6/심사완료일: 2012.4.29)