

압축을 받는 내부 구속 중공 RC 기둥의 내부 구속력

원 덕 희¹⁾ · 한 택 희²⁾ · 김 승 준³⁾ · 강 영 종^{4)*}

¹⁾ 연구원, 한국해양과학기술원, 연안개발에너지연구부 ²⁾ 선임연구원, 한국해양과학기술원, 연안개발에너지연구부
³⁾ 박사후과정, Texas A&M University, Zachry Department of Civil Engineering · 고려대학교, 건축사회환경공학부
⁴⁾ 교수, 고려대학교, 건축사회환경공학부

Internal Confining Stress of Internally Confined Hollow Columns under Compressive Load

Won, Deok Hee¹⁾ Han, Taek Hee²⁾ Kim, Seungjun³⁾ Kang, Young Jong^{4)*}

¹⁾ Post-Doc Research Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan, 426-744, Korea
²⁾ Senior Research Scientist, Coastal Development & Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ansan, 426-744, Korea
³⁾ Post-Doc Research Associate, Zachry Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843, U.S
⁴⁾ Professor, School of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University, Seoul, 156-701, Korea

ABSTRACT : Internally Confined Hollow RC(ICH RC) column consisted of concrete, transverse reinforcement, longitudinal reinforcement, and inner tube. It had good strength and ductility by core concrete was become triaxial confining state with transverse reinforcement and inner tube. There were two confining stress as external confining stress and internal confining stress in an ICH RC column. While external confining stress was researched by former researchers, internal confining stress has not researched. In this paper, confining stress of both Hollow RC column and ICH RC column was investigated using FEA program. Relation between theoretical confining stress and internal confining stress was drawn by analysis results. Modified failure condition equations of inner tube were suggested to base on failure condition equations of inner tube by former researcher. When thickness of inner tube was calculated by modified equations, it could be economic because thickness of inner tube was reduced 50% compared with former researcher equations in order to same confining stress.

KEYWORDS : columns, internal confining stress, theoretical confining stress, inner tube, equation of failure condition

1. 서 론

중공 기둥은 상부구조에서 발생하는 축하중이 작고 허용 횡변위가 작을 경우 그리고 도로교량과 철도교량의 고교각에서 많이 적용되고 있다. 또한 중공기둥은 중실기둥이 대형화 될 경우 큰 자중에 의하여 지진력이 증가되는 것을 막는 것

을 목적으로 많이 적용되고 있다. 중공 철근 콘크리트기둥(Hollow Reinforced Concrete ; H-RC)에는 일반적으로 Fig. 1과 같이 내측에 횡철근과 종철근이 배근되지 않은 중

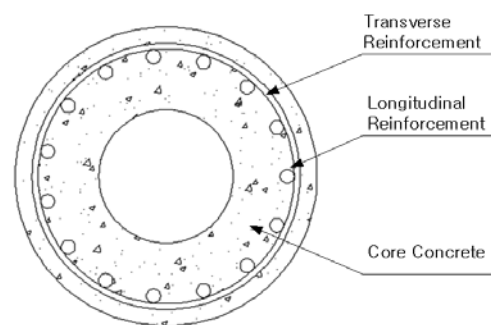


Fig. 1 Constitution of hollow RC columns

Note.-Discussion open until December 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 10, 2012; revised March 19, 2013; approved on May 29, 2013.
 © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-2-3290-3310 Fax. +82-2-921-5166
 E-mail: yjkang@korea.ac.kr

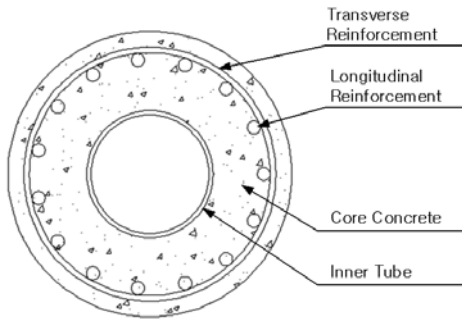


Fig. 2 Constitution of ICH RC column

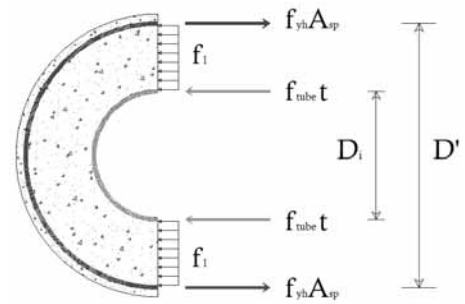


Fig. 3 Confining stress of ICH RC column⁽¹⁾

공 기둥과 단면 내측과 외측에 횡철근과 종철근이 배근된 중공 기둥으로 나뉘진다. 또한 중공 합성 기둥으로는 Fig. 2와 같이 Han *et al.*(2008)에 의하여 제안된 내부 구속 중공 RC(Internally Confined Hollow RC ; ICH RC) 기둥이 있다⁽¹⁾. 이 기둥은 내측에 횡철근과 종철근이 배근되지 않는 중공 RC기둥의 중공면에 튜브를 삽입한 구조로서 내측 부분이 완벽하게 구속되기 때문에 중공부에서 파괴되는 것을 방지할 수 있으며, 코어 콘크리트를 횡철근과 내부 튜브를 이용하여 3축 구속 상태에 놓이게 하여 강도와 연성도를 증진시킨 구조이다^{(1),(2),(3)}. 이밖에도 내부튜브를 삽입한 구조의 비선형 해석에 대한 연구가 있다⁽⁴⁾.

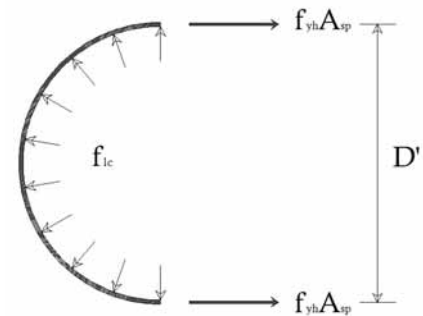


Fig. 4 Confining stress by transverse reinforcement⁽¹⁾

또한 위의 기둥과 같이 강재와 콘크리트의 압축거동에 대한 연구가 다양하게 많은 연구자들에 의하여 진행되었다^{(5),(6)}. H-RC기둥과 ICH RC 기둥의 구속효과에 대한 연구는 이론 및 실험 연구를 통하여 외부 횡철근에 의한 구속효과에 대하여 분석하였다⁽¹⁾. 이에 반하여 내부 횡철근 혹은 내부 튜브에 의하여 발생하는 내부 구속 응력에 대한 연구는 진행되지 않고 있는 실정이다.

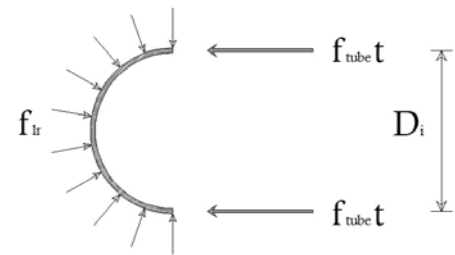


Fig. 5 Confining stress by inner tube⁽¹⁾

본 연구에서는 ICH RC 기둥의 유한요소 해석을 통하여 내부구속응력을 분석한 후 내부구속응력을 정량적으로 예측할 수 있는 방법을 제시하려고 한다. 또한 Han *et al.*(2008)⁽¹⁾이 제시한 내부튜브의 파괴조건식을 수정하여 합리적인 내부 튜브의 두께를 산정할 수 있는 수정 파괴조건식을 제안하고자 한다.

2. 배경이론

Han *et al.*(2008)⁽¹⁾은 ICH RC 기둥의 비선형 재료 모델을 제시하기 위하여 내부튜브의 파괴모드와 내부튜브의 항복 및 좌굴 파괴 조건식을 제시하였다. Fig. 3은 ICH RC 기둥의 구속응력을 자유물체도로 나타낸 것으로 횡철근과 내부튜브에 의하여 코어 콘크리트에 구속응력이 발생하는 것을 나타낸 것이다. 여기서, f_l 은 구속응력, f_{yh} 는 횡방향철근의

항복강도, A_{sp} 는 횡방향철근의 면적, f_{tube} 는 내부튜브의 항복강도, t 는 내부튜브의 두께, D_i 는 구속콘크리트의 내부 직경, 그리고 D' 은 구속 콘크리트의 외부 직경을 나타낸다.

Fig. 4와 5는 ICH RC 기둥이 압축을 받았을 경우에 횡철근과 내부튜브에 가해지는 구속력을 나타낸 것이다. Fig. 4는 압축을 받는 코어 콘크리트가 횡팽창하면서 횡철근에 가하는 구속응력을 나타낸 것이며, Fig. 5는 콘크리트가 내부 튜브에 가하는 구속응력을 나타낸 것이다. 코어 콘크리트는 내부튜브와 횡철근의 구속에 의하여 3축 구속 상태에 놓이게 되며, 이때의 구속응력은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$f_l = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{D's} \tag{1}$$

여기서, s 는 횡철근의 간격이다.

Han *et al.*(2008)^[1]은 식 (1)에 의하여 산정된 구속응력과 외측(f_{lc} 과 내측(f_{lr})의 구속응력이 식 (2)와 같이 모두 동일하다고 가정하였다.

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

2.1 항복 파괴 조건

ICH RC 기둥에서 재료의 성질이 일정하다면, 내부 튜브의 항복과 좌굴조건은 내부튜브의 두께에 지배되므로 파괴 형태는 내부 튜브의 두께를 조절함으로써 제어될 수 있다^[1].

내부 튜브의 항복 파괴조건식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 내부튜브에 작용하는 구속응력은 Fig. 5의 조건을 이용하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\left\{ f_l(D' - D_i) + 2 \frac{f_l D_i}{2t} t \right\} s = 2f_{yh} A_{sp} \quad (3)$$

$$f_{tube} = \frac{f_l D_i}{2t} \quad (4)$$

내부튜브에 의한 구속응력과 이론 구속응력 식 (1)과 동일하다고 가정하였기 때문에 구속응력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_l = \frac{2t}{D_i} f_{tube} = \frac{2f_{yh} A_{sp}}{D' s} \quad (5)$$

식 (5)를 내부튜브의 항복강도로 나타내면,

$$f_{tube} = \frac{D_i f_{yh} A_{sp}}{D' s t} \quad (6)$$

식 (6)을 내부튜브 두께 t 에 대해서 정리하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 계산된 내부튜브의 두께는 내부튜브의 항복파괴를 방지할 수 있는 최소 두께이다.

$$t > \frac{D_i f_{yh} A_{sp}}{D' s f_{tube}} \quad (7)$$

2.2 좌굴 파괴 조건

ICH RC 기둥의 내부에 삽입된 튜브는 내측 방향으로 변

위 발생이 가능하지만 튜브의 외측 방향으로는 콘크리트에 의해 구속되어 변위 발생이 불가능한 일방향 구속 상태(unilaterally restrained)가 된다. 이러한 경계 조건으로 인하여, 내부에 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 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, R 은 내부튜브의 반지름, E 는 튜브의 탄성계수, I 는 내부튜브의 단면 2차모멘트이다. 좌굴 파괴가 발생하지 않을 조건은 식 (9)와 같으며, 이를 정리하면 식 (10)과 같은 좌굴 파괴 방지를 위한 최소 두께(t_{bk})에 관한 식을 얻을 수 있다.

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

$$\frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} > \frac{2f_{yh} A_{sp}}{D' s} \quad (9)$$

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

3. 해석방법 연구

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS^[7]를 이용하여 ICH RC 기둥의 내부구속력을 분석하려고 한다. 유한요소해석방법을 적용하기 위해서는 적용하려는 방법의 검증이 이루어져야 한다. ICH RC 기둥을 해석하기 위해서는 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석방법의 검증과 내부튜브와 코어 콘크리트 사이의 접촉부분의 검증이 이루어져야 한다. 여기에서 콘크리트와 튜브 사이의 접촉부분의 적용 옵션은 무마찰인 Frictionless으로 실험과의 비교를 통하여 이미 원덕희(2012)에 의하여 제시되어졌기 때문에 이 옵션을 그대로 적용한다^[8]. 본 연구에서는 오직 콘크리트에만 하중을 주어 콘크리트의 구속응력에 대한 효과만 분석하였다. 만약 콘크리트와 튜브가 완전 합성거동을 하거나 내부튜브에 축하중이 작용하게 될 경우에 정확한 내부 구속응력을 파악하기 힘들기 때문에 고려를 하지 않았다.

3.1 철근콘크리트 구조 해석 방법

ABAQUS^[7]를 이용하여 철근 콘크리트 구조를 해석하기 위하여 Antonio and Gabriel(1998)^[9]의 철근콘크리트 비

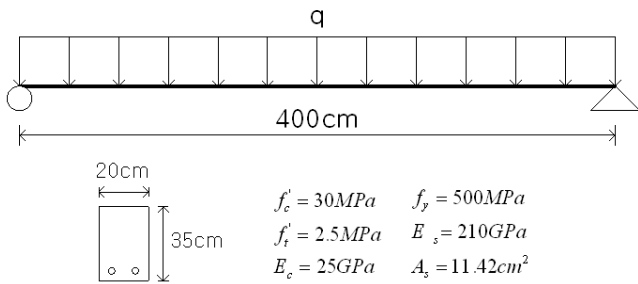


Fig. 6 Dimensions of beam for analyze

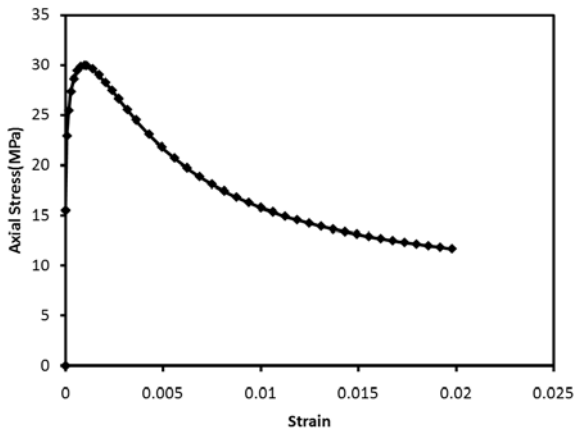


Fig. 7 Stress-Strain curve of unconfined concrete

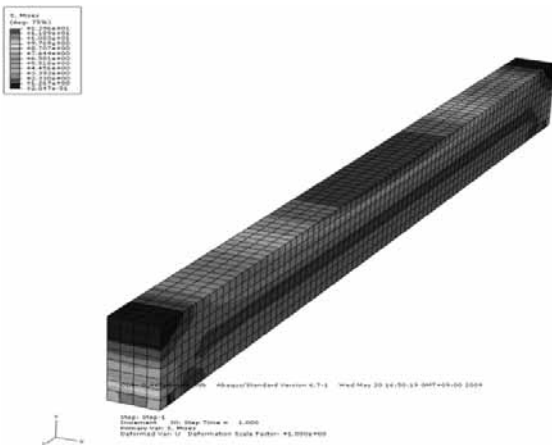


Fig. 8 Deformed shape of RC beam

선형 모델과 비교하였다. 해석 대상모델은 Fig. 6과 같으며, 단순보에 등분포하중을 가하였다. 띠철근을 배치하지 하고 중 철근만 배근한 모델이다. 콘크리트의 압축강도는 30MPa, 콘크리트의 인장강도 2.5MPa, 콘크리트의 탄성계수는 25GPa, 철근의 항복강도 500MPa, 철근의 탄성계수는 210GPa, 그리고 철근의 단면적으로 11.42cm²이다.

비선형 해석을 위한 ABAQUS⁽⁷⁾의 콘크리트 모델은 Solid 요소(C3D8R)를 적용하였으며, 철근은 Truss 요소(T3D2R)

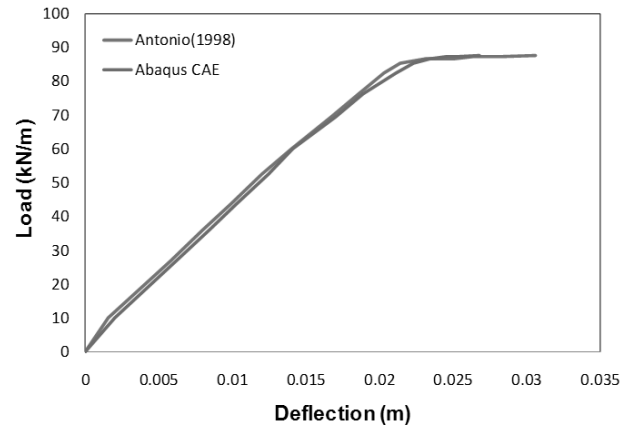


Fig. 9 Comparison of antonio's results and ABAQUS results

을 적용하였다. 콘크리트와 철근 간의 접촉면은 Embedded Region 옵션을 적용하였다. 콘크리트의 강도는 Fig. 7과 같은 재료모델을 사용하였으며, 강재는 Elastoplastic 옵션을 적용하였다. 보의 우측은 힌지, 좌측을 롤러 조건을 고려하였다.

Fig. 8은 대상 모델의 변형형상을 나타낸 것으로 중앙부에 처짐이 가장 크고 응력도 크게 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 9는 Antonio and Gabriel(1998)⁽⁹⁾의 결과와 ABAQUS 결과를 비교한 것으로 두 개의 결과가 거의 유사한 것으로 볼 수 있으며, 평균적으로 약 1.339%정도의 오차를 갖는다. 본 해석에서 가정한 콘크리트 Solid 요소, 철근 Truss 요소, 그리고 Embedded Region 옵션의 가정이 합리적인 것으로 판단되며, 향후 연구에 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

4. 압축을 받는 ICH RC 기둥의 구속응력 분석

압축을 받는 ICH RC 기둥의 구속응력을 분석하기 위하여 먼저 내부튜브를 삽입하지 않은 경우, 즉 중공 RC 기둥의 구속응력을 분석하였다. 내부튜브가 삽입되지 않았을 경우에 구속 콘크리트의 외부구속응력과 내부구속응력을 나타내었으며, 또한 내부 튜브가 삽입된 구조인 ICH RC 기둥에서의 외부 및 내부 구속 응력을 비교 검토하였다.

4.1 중공 RC 기둥의 구속응력

먼저 내부튜브가 삽입되지 않은 구조인 H-RC 기둥에 압축력이 가해질 경우 구속응력을 분석하였다. 재료 물성치 및 제원은 Table 1과 같다. 중공비(Di/D')를 0.1~0.9, 이론 구속응력(f_l)은 10MPa, 외경(D) 400mm, 철근의 항복강

Table 1. Dimensions of H-RC column (unit : mm,N)

Di/D'	fl	D	fyh	Asp	s
0.1	10	400	350	507	89
0.2	10	400	350	507	89
0.3	10	400	350	507	89
0.4	10	400	350	507	89
0.5	10	400	350	507	89
0.6	10	400	350	507	89
0.7	10	400	350	507	89
0.8	10	400	350	507	89
0.9	10	400	350	507	89

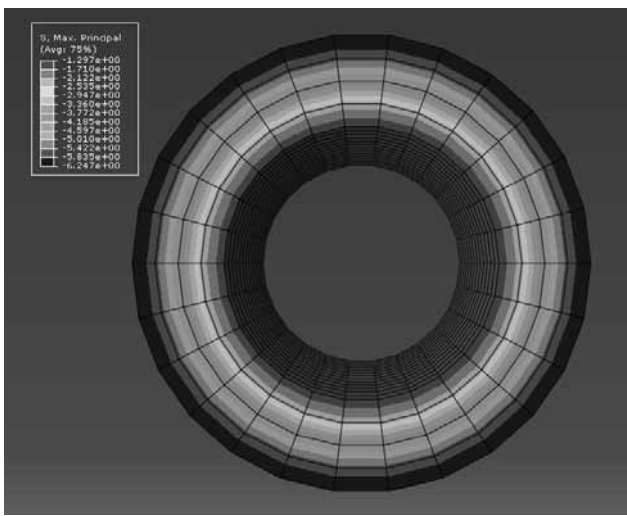


Fig. 10 Deformed shape of confined concrete

도(f_{yh})는 350MPa, 횡철근의 면적 A_{sp} 는 $507mm^2$, 그리고 횡철근간의 간격은 89mm로 하였다. 여기서 기둥의 높이는 1m로 모두 동일하게 하였다. 이론적 구속응력(f_l)은 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

하중 및 경계조건으로는 콘크리트 상단에 축하중을 작용하였으며, 지점부분은 Local 좌표계를 이용하여 Tangential 방향과 축방향 변위를 고정하였다.

Local 방향의 좌표계를 이용함으로써 Fig. 10과 같이 일정하게 응력이 분포되도록 하였으며, 콘크리트의 구속응력은 횡철근이 항복할 때의 응력을 확인함으로써 결과를 분석하였다.

Fig. 11은 H-RC 기둥의 구속응력비를 나타낸 것으로 이론 구속응력 대비 외부 구속응력, 내부 구속응력을 나타낸 것이다. 중공비 0.3까지는 외부 구속응력이 이론 구속응력과 거의 동일한 것으로 나타났으며, 중공비 0.3 이후부터 0.7까지 외부 구속응력이 점차 감소하여 이론 구속응력의 약 90% 수준으로 감소되는 것으로 나타났으며, 중공비 0.7이후에는 급격하게 감소되어 중공비 0.8에서는 이론 구속 응력 대비

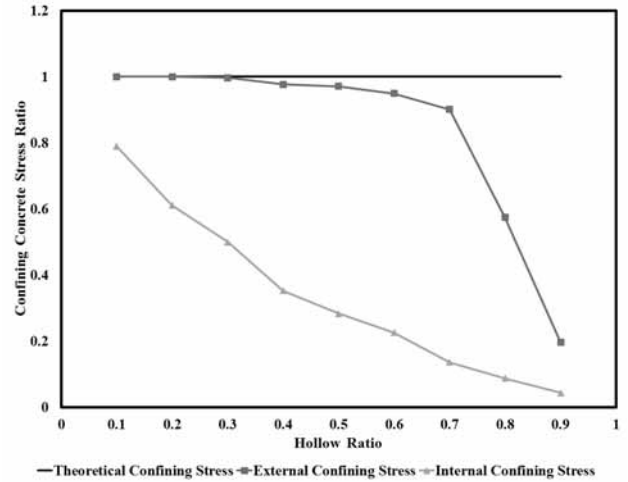


Fig. 11 Confining stress ratio of H-RC column

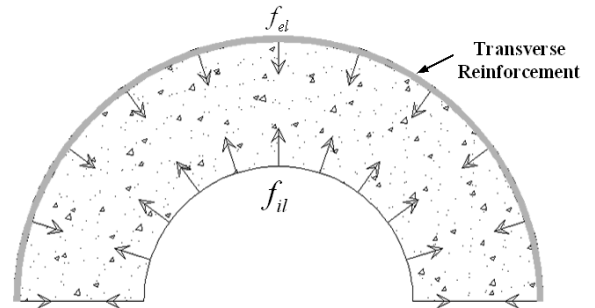


Fig. 12 External and internal confining stress in a H-CFT

60% 수준, 중공비 0.9에서는 약 20%수준까지 감소하는 것으로 나타났다. 이에 반해 내부 구속응력은 중공비 0.1에서 이론구속응력 대비 80%수준에서 출발하여 점차 감소하여 중공비 0.2에서는 4% 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 중공비 0.3이전에서는 튜브를 삽입하지 않아도 콘크리트의 아칭액션에 의하여 구속응력이 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 압축을 받는 코어 콘크리트가 횡철근에 의하여 구속되어 외부 구속응력이 발생하는 반면 내측에는 내부의 구속 없이도 콘크리트 자체가 횡팽창에 저항하여 충분한 내부 구속을 이루는 것으로 판단된다.

그러나 중공비가 상승할수록 콘크리트의 두께가 얇아지기 때문에 콘크리트 자체의 아칭액션에 의하여 발생하는 구속응력이 점차 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 중공비가 작을 때에는 콘크리트 면적을 충분히 확보 가능하여 코어 콘크리트가 3축 구속 상태에 놓이나 중공비가 커져 콘크리트 면적이 작아지면 내측에서 충분히 구속해주지 못하기 때문에 외부 구속응력이 이론 구속응력에 비해서 현저하게 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 코어 콘크리트가 3축 구속 상태에 놓이지 않는 것을 의미하며 이로 인해 연성도와 강도가 현격하게 감

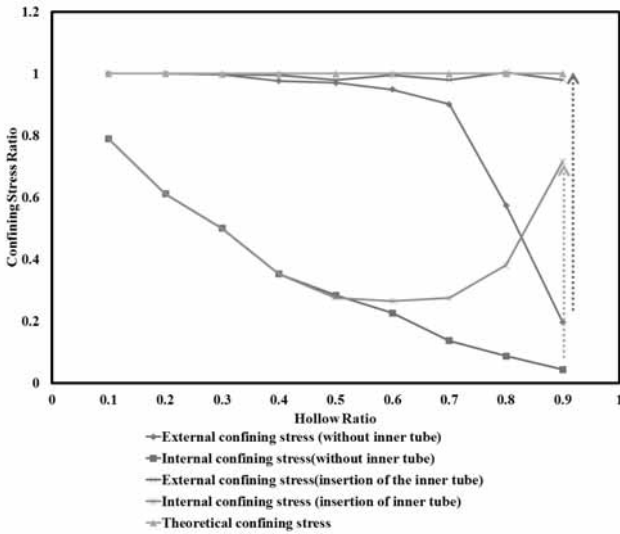


Fig. 13 Confining stress ratio after insertion of inner tube

소할 것으로 판단된다. 즉, 중공비가 큰 중공기둥에서는 반드시 내측 중공부분에 보강을 해주어야 코어 콘크리트가 3축 구속 상태에 놓여 우수한 강도 및 연성도를 발휘할 수 있을 것이다.

4.2 ICH RC 기둥의 구속응력

내부 튜브가 구속응력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 1의 제원을 바탕으로 식 (7)과 식 (10)으로 산정된 값 중 큰 값을 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 13은 내부튜브 삽입 후에 구속응력 변화를 나타낸 것이다. 내부튜브 삽입 이후에 외부 구속 응력은 이론 구속응력과 거의 유사한 값을 보이는 것으로 나타났으며, 내부 구속 응력은 거의 외부 구속응력 증가량만큼 증가된 것을 볼 수 있다. 내부튜브가 삽입됨으로서 코어 콘크리트의 구속응력이 증가되어 3축구속상태가 되는 것으로 나타났다. 이렇듯 ICH RC 기둥이 이론에 의한 구속효과, 강도, 그리고 연성도를 발휘하려면 반드시 내부튜브가 삽입되어야 한다.

4.3 매개변수 연구

ICH RC 기둥의 구속응력에 가장 크게 영향을 미치는 인자를 도출하기 위하여 Table 2와 같이 직경을 300mm에서 3500mm까지 증가시키면서 해석을 수행하였으며, 이 모델들의 철근배근 간격(s)은 모두 다르며, 이론구속응력(f_l)도 거의 다르게 선정하였다. 이 모델들은 모두 중공비를 0.1~0.9 까지 나누어서 모델링 하였으며, 이때의 내부튜브의 두께는 해석을 통하여 Try and Error방법을 이용하여 내부튜브와

Table 2. Dimensions of ICH RC column

D	Ash	fyh	s	fl
300	506.7	350	177.35	6.67
400	506.7	350	141.88	6.25
500	506.7	350	101.34	7.00
600	506.7	350	88.67	6.67
800	506.7	350	70.94	6.25
900	506.7	350	59.12	6.67
1000	506.7	350	54.57	6.50
1200	506.7	350	47.29	6.25
1200	506.7	350	47.29	6.25
1500	506.7	350	37.34	6.33
1500	506.7	350	37.34	6.33
1600	506.7	350	35.47	6.25
1800	506.7	350	30.84	6.39
2000	506.7	350	28.38	6.25
2000	506.7	350	28.38	6.25
2100	506.7	350	27.28	6.19
2400	506.7	350	23.65	6.25
2500	506.7	350	22.88	6.20
2800	506.7	350	20.27	6.25
3000	506.7	350	19.17	6.17
3500	506.7	350	16.12	6.29

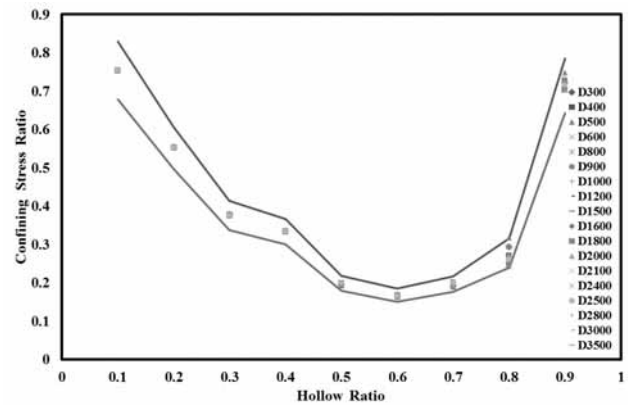


Fig. 14 Confining stress ratio about all models

외부튜브가 동시에 항복될 경우를 선택하였다. 해석 모델의 총 개수는 189개이다.

Fig. 14는 Table 2와 같은 제원을 가진 189개의 모델의 이론 구속응력 대비 내부 구속 응력을 나타낸 것이다. 여기서 외부 구속 응력비는 Fig. 13과 같이 이론 구속 응력비와 거의 유사한 값을 나타내기 때문에 표시를 하지 않았다. Table 2에 고려된 변수는 단면직경, 횡철근의 간격, 이론 구속응력의 크기, 그리고 중공비이다. Fig. 14의 결과를 분석해 보면

단면직경, 횡철근의 간격, 이론 구속응력의 크기에 의한 내부 구속응력비의 차이가 최대 10%의 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 중공비의 경우에는 중공비가 변할 경우에 따라서 내부 구속 응력비가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 중공비 0.6을 기점으로 0.6이하의 중공비에서는 중공비가 커질수록 내부 구속응력비가 감소되는 반면 0.6이상의 중공비에서는 중공비가 커질수록 내부구속응력비가 커지는 것을 볼 수 있다. 원래 내부가 구속이 되지 않았을 경우에 모든 모델의 내부 구속응력은 Fig. 13의 튜브 삽입 이전의 내부 구속 응력 변화와 거의 유사한 형태를 가진다. 중공비 0.1~0.5의 모델에서의 외부 구속응력이 이론 구속응력과 거의 유사한 것으로 나타났으며, 0.5이후에 외부 구속응력이 감소하다 중공비 0.7을 기점으로 급격하게 감소한다. 중공비 0.7이전까지는 내부의 콘크리트의 아칭액션에 의하여 콘크리트가 구속된 반면 중공비 0.7이후부터는 콘크리트의 면적이 감소하여 아칭액션이 급격히 감소된 것으로 판단된다. 이렇게 감소된 외부 구속력을 이론 구속응력만큼 발휘하도록 하려면 중공부

에 튜브를 삽입하여 구속 콘크리트를 3축 구속상태에 놓이게 하는 것이다. 구속 콘크리트의 내부 구속응력은 내부 튜브 삽입 후 외부 구속응력이 상승분만큼 내부 구속응력이 상승하게 된다. 이러한 이유로 내부 튜브 삽입 후 중공비 0.6을 기

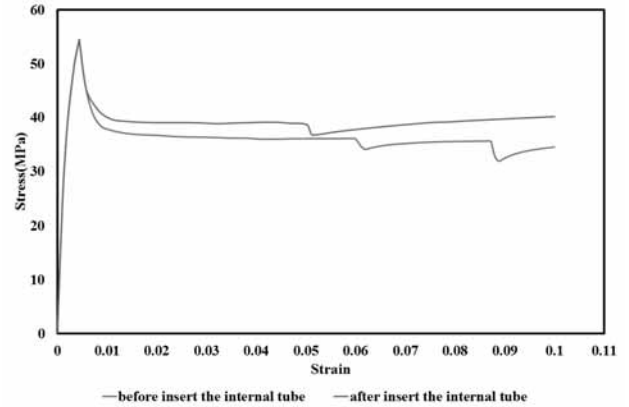


Fig. 17 Stress-Strain curve at hollow ratio 0.7 of D2800 models

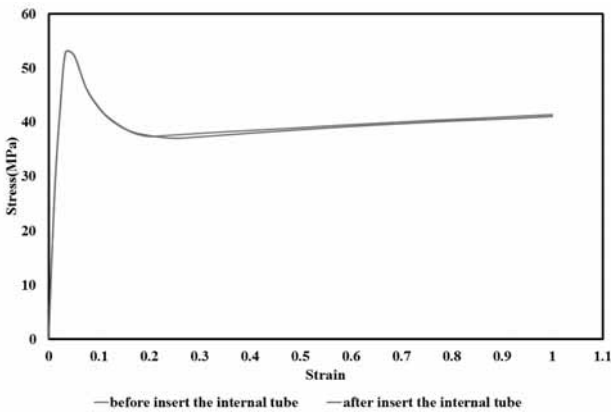


Fig. 15 Stress-Strain curve at hollow ratio 0.5 of D2800 models

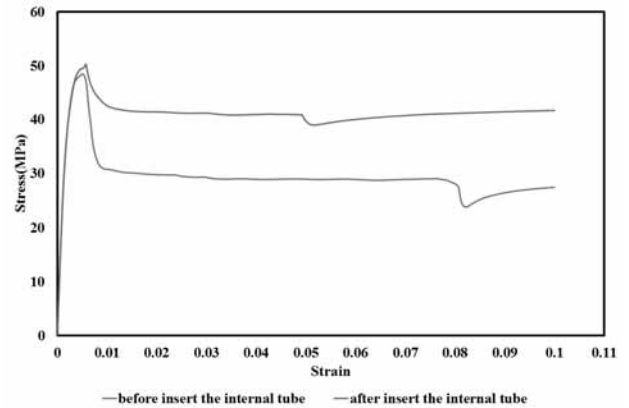


Fig. 18 Stress-Strain curve at hollow ratio 0.8 of D2800 models

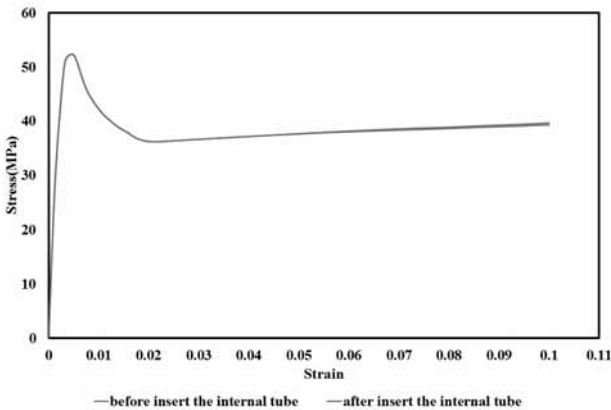


Fig. 16 Stress-Strain curve at hollow ratio 0.6 of D2800 models

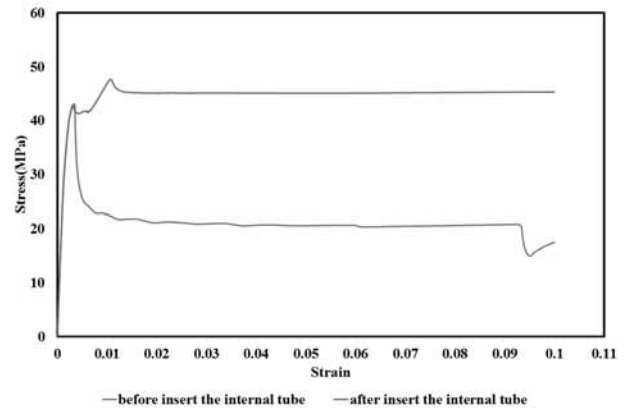


Fig. 19 Stress-Strain curve at hollow ratio 0.9 of D2800 models

점으로 내부 구속응력이 상승하는 것이다.

다음으로는 직경 D2800 모델 중 중공비 0.5~0.9의 응력-변형률 곡선으로 내부튜브를 삽입하기 전과 후를 나타낸 것이다. Fig. 15의 중공비 0.5와 Fig. 16의 중공비 0.6의 응력-변형률 곡선은 내부 튜브의 삽입 유무에 따라서 크게 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 13에서 보면 중공비 0.5와 0.6에서는 내부 구속응력의 증가량이 매우 작았기 때문으로 판단된다. 이에 반해 Fig. 17~19는 중공비 0.7~0.9 모델을 나타낸 것으로 소성구간의 콘크리트 강도가 증가되는 것을 볼 수 있으며, 이는 내부 튜브의 삽입으로 인해 구속응력이 증가되는 양과 거의 유사한 패턴으로 증가되는 것을 볼 수 있다. 이렇듯 구속 콘크리트의 구속 여부는 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 중공 철근 콘크리트 기둥을 분석하여 보면 외경 대비 중공부 직경이 약 70~80%로 Fig. 13과 14에서의 구속응력 감소 구간에 해당되는 것으로 분석되었으며, ICH RC 기둥의 중공비 역시 0.7 이상을 대상으로 개발되어 현재 강합성 풍력타워에 적용하기 위하여 많은 노력을 하고 있다. 풍력타워의 경우에는 중공비 0.8~0.85 정도를 적용하려고 연구 중에 있어, 위의 해석 결과와 같이 내부튜브의 보강이 필수적이다.

5. 수정파괴 조건식

유한요소해석법에 의하여 ICH RC 기둥의 내부 구속 응력을 분석하였다. 분석한 결과 기존에 식 (2)에서 가정한 것과 같이 내부 구속 응력과 외부 구속 응력 그리고 식 (1)의 외부 구속 응력이 내부튜브의 삽입과 중공비에 따라서 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 내부튜브가 삽입되었을 경우에 구속 콘크리트의 외부 구속 응력은 식 (1)과 같은 이론 구속응력과 동일해 지는 것으로 나타났으며, 내부 구속 응력은 중공비에 따라서 크게 변하는 것으로 나타났다. Han *et al.*(2008)^[1]이 제시한 내부튜브 파괴조건식은 내부 구속 응력을 외부 구속응력과 동일하게 하였기 때문에 과다 설계 가능성이 크다. 이론 구속 응력과 내부 구속 응력의 관계를 분석하여 내부 구속 응력을 산정하며, 이를 이용하여 파괴 조건식을 수정한다.

Fig. 20~22는 Fig. 3~5의 구속응력을 수정한 것이다. 단면내에서 구속응력은 Fig. 20에 나타난 바와 같이 외측이 가장 크고 내측이 가장 작은 형태이며, 비선형 형태인 것으로 판단된다. Fig. 21은 횡철근에 의한 구속 콘크리트를 나타내며 외부 구속응력은 f_{el} 로 나타낼 수 있다. Fig. 22는 내부 튜브에 의한 내부 구속응력(f_{il})을 나타낸다.

5.1 수정 항복파괴 조건식

수정 항복 파괴 조건식을 제시하기 위하여 이론 구속응력과 내부 구속응력의 관계를 이용하려고 한다. ICH RC 기둥의 코어 콘크리트가 3축 구속상태에 있다면, 식 (8)과 같이 이론 구속응력과 외부 구속응력의 크기는 같고 내부 구속응력은 다를 것이다. 이론 구속 응력과 내부 구속 응력은 일정

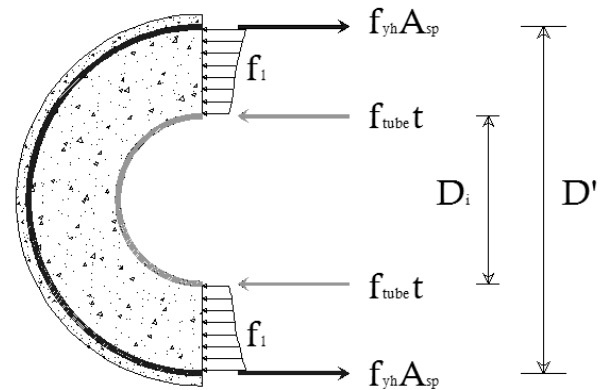


Fig. 20 Modified confining stress of ICH RC column

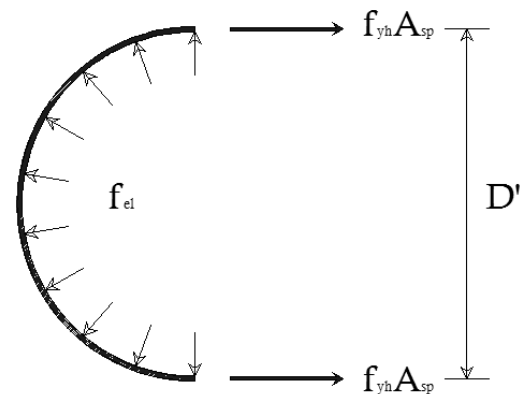


Fig. 21 Modified confining stress by transverse reinforcement

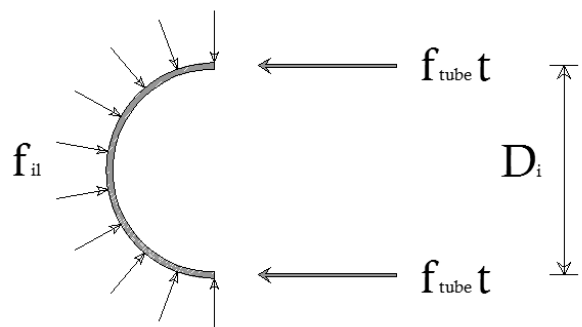


Fig. 22 Modified confining stress by inner tube

한 감소계수(γ)와의 차이를 가지고 있다고 식 (9)와 같이 가정한다.

$$f_l = f_{el} \neq f_{il} \quad (8)$$

$$f_{il} = \gamma f_l \quad (9)$$

Fig. 22의 자유물체도에 의하여 내부 튜브에 의한 구속응력 f_{il} 을 나타내면 식 (10)과 같다. 식 (10)을 식 (9)에 대입하여 이론적 구속응력(f_l)에 대하여 나타낼 수 있다.

$$f_{il} = \frac{2f_{tube}t}{D_i} \quad (10)$$

$$f_l = \frac{2f_{tube}t}{\gamma D_i} \quad (11)$$

식 (1)과 (11)을 정리하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 내부튜브의 두께(t)의 향으로 나타내면 식 (13)과 같다.

$$\frac{f_{yh}A_{sp}}{D's} = \frac{tf_{tube}}{\gamma D_i} \quad (12)$$

$$t > \frac{\gamma D_i f_{yh} A_{sp}}{f_{tube} D's} \quad (13)$$

5.2 수정 좌굴파괴 조건식

Han *et al.*(2008)^[1]에 의하여 제안된 좌굴파괴와 동일한 스냅-스루(Snap-Through)좌굴이 발생한다고 가정하고 이때의 좌굴 강도식은 식 (8)을 적용한다. 식 (14)와 같이 내부 튜브의 좌굴강도(f_{cr})은 외력인 내부구속응력(f_{il})보다 크다고 가정하며, 이때 내부 구속응력은 식 (14)의 우항과 같은 관계를 갖는다. 식 (14)의 우항에 식 (1)을 대입하면 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{cr} > f_{il}, f_{il} = \gamma f_l \quad (14)$$

$$\frac{2.27}{3} \frac{t^2 E}{D_i^2} = \frac{\gamma 2 f_{yh} A_{sp}}{D's} \quad (15)$$

식 (16)은 식 (15)를 내부튜브의 두께에 대해서 나타낸 것으로 내부튜브의 좌굴을 방지하기 위한 최소 두께(t_{bk})가 제시될 수 있다.

$$t_{bk} > \sqrt{\frac{6}{2.27} \frac{\gamma D_i^2 f_{yh} A_{sp}}{D' E s}} \quad (16)$$

5.3 감소계수의 제시

앞서 내부튜브의 항복파괴 조건식과 좌굴 파괴조건식이 제시되어 졌다. 위의 식들은 이론 구속응력(f_l)과 내부 구속응력(f_{il})의 관계를 나타내주는 감소계수(γ)에 의하여 그 신뢰성이 좌지우지 할 것으로 판단된다. 감소 계수(γ)는 이전 장에서 수행된 해석결과를 바탕으로 제시할 수 있다.

Fig. 23은 Fig. 14를 이용하여 내부 구속응력비를 나타낸 것이다. 검정색 선은 해석 결과 값들의 평균을 나타낸 것이고, 파란색 선은 해석 값들의 upper limit를 나타낸 것이다. 이때 내부튜브가 파괴되는 것을 방지하기 위하여 upper limit에 안전율 10%를 주어 빨간 선과 같이 새로운 내부 구속응력비를 제안하였다.

새롭게 제안된 내부 구속응력비를 가장 큰 영향 인자인 중공비를 이용하여 회귀분석 식을 제안하였다. 회귀분석 식은 중공비 0.7를 기준으로 나뉘어서 제안하였다. 중공비 0.7 이하는 식 (17)에 의하여 산정가능하며, 중공비 0.7 초과에서는 식 (18)을 이용하여 산정가능하다.

$$\gamma_{0.1 \leq \phi \leq 0.7} = 1.88\phi^2 - 2.38\phi + 1.01 \quad (17)$$

$$\gamma_{0.7 < \phi \leq 0.9} = 11.45\phi^2 - 16.11\phi + 5.94 \quad (18)$$

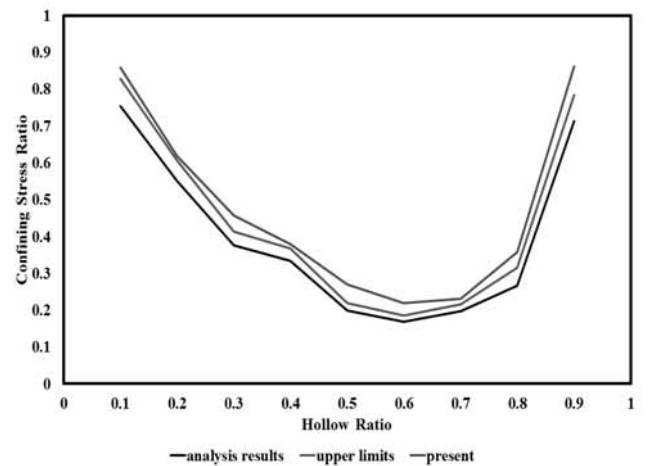


Fig. 23 Presentation of internal confining stress ratio

Table 3. Dimensions for design (unit : N,mm)

Articles	Dimensions
Di/D'	0.8
D'	2500
Di	2000
s	100
Asp	506.7
ftube	250
fyh	350
Es	210000

Table 4. Thickness of inner tube by han's and modified equations

	Yield failure condition	Buckling failure condition
Han's equation	5.67mm	5.97mm
Modified equation	2.15mm	3.68mm

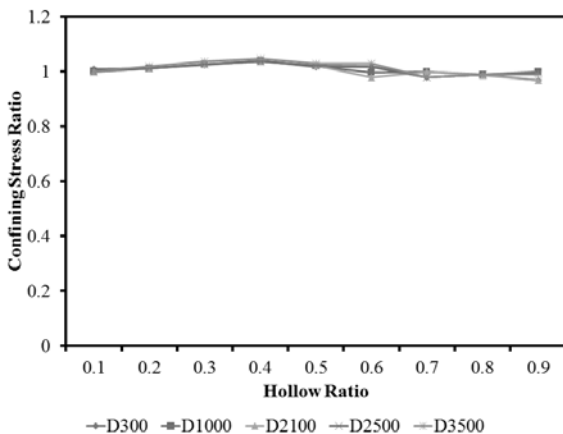


Fig. 24 External confining stress of verification models

식 (17)과 식 (18)에 의한 감소계수를 이용하여 내부 구속응력이 계산 가능하다. 내부 구속응력은 식 (9)의 관계에 식 (1)의 이론구속응력을 대입하여 도출가능하다.

$$f_{il}(0.1 \leq \phi \leq 0.7) = \gamma_{0.1 \leq \phi \leq 0.7} \cdot f_l \tag{19}$$

$$= \gamma_{0.1 \leq \phi \leq 0.7} \left(\frac{2f_{yh}A_{sp}}{D's} \right)$$

$$f_{il}(0.7 < \phi \leq 0.9) = \gamma_{0.7 < \phi \leq 0.9} \cdot f_l \tag{20}$$

$$= \gamma_{0.7 < \phi \leq 0.9} \left(\frac{2f_{yh}A_{sp}}{D's} \right)$$

제안된 수정 항복 파괴 조건식과 좌굴 파괴 조건식을 이용하여 설계를 하고자 한다. 대상 기둥의 상세 제원은 Table 3

Table 5. Dimensions of models for verification (unit : N,mm)

D	Ash	fyh	s	fl
300	450	350	120	8.75
1000	500	350	90	3.89
2100	550	350	65	2.82
2500	600	350	77	2.18
3500	700	350	34	4.12

과 같다. Han et al(2008)^[1]과 수정식에 의한 항복 및 좌굴 파괴 조건식을 비교하였다. Table 4는 항복 및 좌굴 파괴 조건식에 의하여 계산된 내부튜브의 두께를 나타낸 것으로 기존의 식보다 제안된 수정 조건식의 두께가 약 50%감소된 것을 볼 수 있었으며, 이는 동일 구속응력 대비 경제성 있는 기둥을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

5.4 검증

수정식을 검증함에 있어서 모델의 제원은 Table 3의 제원을 적용하고 중공비는 0.1~0.9로 하였다. 이때의 내부 튜브의 두께는 수정 파괴조건식으로 산정된 두께를 적용하였다.

Fig. 24는 Table 5의 제원을 적용하여 해석한 결과를 나타낸 것으로 외부 구속응력이 이론 구속응력과 거의 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보아 제안된 수정 파괴 조건식에 의한 내부튜브 산정식 그리고 내부 구속 응력을 예측할 수 있는 감소계수가 매우 신뢰성이 큰 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 압축을 받는 내부 구속 중공 RC 기둥의 최적 구속력 평가를 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 Han et al(2008)^[1]이 제시한 내부튜브 파괴 조건식을 바탕으로 수정 파괴조건식을 제시하였으며, 내부 구속응력을 도출할 수 있는 방법을 제시하였다.

- (1) 중공 RC 기둥이 압축을 받을 경우 중공비가 0.3 이하에서는 코어 콘크리트 단면만으로도 충분한 구속효과가 발현되는 것으로 나타났으며, 중공비 0.4~0.7의 경우에는 코어 콘크리트 단면이 감소하면서 내부 구속 응력이 서서히 감소되어 이론 구속응력 대비 90%에 도달되며, 중공비 0.7 이후부터 급격하게 감소되어 중공비 0.9에서는 이론 구속응력 대비 20%수준까지 감소한다.
- (2) ICH RC 기둥은 중공 RC 기둥에 내부튜브를 삽입한

구조로 내부튜브두께가 요구두께 이상으로 삽입될 경우에 구속 콘크리트의 외부 구속응력이 이론 구속응력과 거의 유사하게 발현되는 것으로 나타났으며, 내부 튜브를 삽입하지 않을 경우와 비교하여 내부 구속응력은 외부 구속응력이 증가된 만큼 증가되는 것으로 나타났다. 주로 중공비 0.7 이후에서 큰 증가량을 보인다. 중공비 0.7이상의 중공 기둥 단면에서는 반드시 내부를 구속해 주어야 콘크리트가 3축구속 상태에 놓이게 된다.

- (3) 매개변수 연구를 수행한 결과 내부 구속응력비에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 중공비로서 그 이외의 변수인 직경, 내부튜브의 두께, 횡철근의 간격, 이론 구속응력 등은 약 10%내외의 오차를 가지고 변한다.
- (4) 해석을 통하여 도출된 이론 구속응력 대비 내부 구속응력비를 이용하여 회귀분석식을 도출하여 감소계수(γ)를 제안하였다. 감소계수(γ)를 이용하여 손쉽게 내부 구속응력을 도출할 수 있다.
- (5) 이론 구속응력과 내부 구속응력의 관계를 이용하여 내부 튜브의 수정 파괴 조건식을 제시하였다. 수정 파괴조건식은 항복파괴 조건식과 좌굴파괴조건식으로 나뉘어 제시되었다. 수정된 산정식을 이용하여 내부튜브의 두께를 산정할 경우 기존 식에 비하여 약 50%의 두께를 감소시킬 수 있어 동일 구속응력 대비 경제성 있는 기둥을 건설할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술원(KIOST)의 창의연구사업 중 기관역량강화사업인 “해상풍력 지지구조물 건설기술 개발연구(과제번호:PE99122)”의 연구비로 수행되었으며, 서울산업통상진흥원에서 시행한 2011년도 “특허기술상품화 기술개발 지원사업(PA110020)”의 부분지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌(References)

- [1] Han, T.H., Lim, N.H., Han, S.Y., Park, J.S., and Kang, Y.J. (2008) Nonlinear concrete model for an internally confined hollow reinforced concrete column, *Mag Concr Res.*, Vol. 60, No. 6 pp.429-438.
- [2] Han, T.H., Yoon, K.Y., and Kang, Y.J. (2010) Compressive strength of circular hollow reinforced concrete confined by an internal steel tube *Construction and Building Materials*, Vol. 24,

pp.1690-1699.

- [3] 한택희, 원덕희, 이규세, 강영중(2009) 내부구속 중공 RC 기둥의 거동 특성, *한국콘크리트학회논문집*, 한국콘크리트학회, 제21권, 제5호, pp.657-668.
Han, T.H., Won, D.H., Yi, G.S., and Kang, Y.J. (2009) Behavior of Internally Confined Hollow RC Columns, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 5, pp.657-668 (in Korean).
- [4] 한택희, 원덕희, 강영중(2011) 내부 구속 중공 CFT 기둥의 비선형 해석, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제23권, 제4호, pp.439-454.
Han, T.H., Won, D.H., and Kang, Y.J. (2011) Nonlinear Analysis of Internally Confined Hollow CFT Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 4, pp.439-454 (in Korean).
- [5] 황현중, 엄태성, 박홍근, 이창남, 김형섭(2012) 고강도 앵글을 적용한 선조립 합성 기둥의 압축 실험, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.361-369.
Hwang, H.J., Eom, T.S., Park, H.G., Lee, C.N., and Kim, H.S. (2012) Compression Test for Prefabricated Composite Columns Using High-Strength Steel Angles, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 24, No. 4, pp.361-369 (in Korean).
- [6] 한홍수, 최병정, 한권규(2011) 폭두께비에 따른 강판콘크리트구조의 압축거동, *한국강구조학회논문집*, 한국강구조학회, 제23권, 제2호, pp.229-236.
Han, H.S., Choi, B.J., and Han, K.G. (2011) Compression Behavior of Steel Plate-Concrete Structures with the Width-to-Thickness Ratio, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol 23, No.2, pp. 229-236 (in Korean)
- [7] ABAQUS 6.10.1, SIMULIA.
- [8] 원덕희, 한택희, 윤나리, 강영중(2012) 일축압축을 받는 내부 구속 중공 CFT 기둥의 최적 구속 효과 연구, *대한토목학회논문집*, 대한토목학회, 제32권, 제4A호, pp.227-235.
Won, D.H., Han, T.H., Yoon, N.R., and Kang, Y.J. (2012) A Study on Optimum Confined Effect for Internally Confined Hollow CFT Columns under Uniaxial Compression, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 4A, pp. 227-235 (in Korean).
- [9] Antonio, F.B. and Gabriel, O.R. (1998) Analysis of Reinforced Concrete Structures using Ansys Nonlinear Concrete Model, *Computational Mechanics*, New trends and application, Barcelona, Spain, pp.1-7.

요 약: 내부구속중공 RC(Internally Confined Hollow RC, ICH RC) 기둥이란 중공 RC 기둥의 중공부에 내부튜브를 삽입하여 코어 콘크리트를 3축 구속 상태에 놓이게 하여 기둥의 강도와 연성도를 증가시킨 기둥이다. ICH RC 기둥의 구속응력에 대한 연구는 선행 연구자에 의하여 이루어 졌으나 외부 구속응력에 대한 연구만 진행된 상태이다. 본 연구에서는 중공 RC 기둥과 ICH RC 기둥의 구속응력을 유한요소 해석프로그램을 이용하여 분석하였다. 이론 구속응력과 외부 구속응력 그리고 내부 구속응력과의 관계를 도출하였으며, 이를 이용하여 기존의 내부 튜브 파괴조건식을 기반으로 수정 내부튜브 파괴 조건식을 제안하였다. 이론 구속응력과 내부 구속응력과의 관계를 회귀 분석식을 이용하여 나타내어 내부 구속응력을 쉽게 산정할 수 있다. 또한 수정 내부 튜브 파괴 조건식을 이용하여 ICH RC 기둥을 설계할 경우 동일 구속응력대비 기존의 파괴조건식보다 약 50%의 내부 튜브 두께를 감소할 수 있어 경제성을 확보하였다.

핵심 용어: 기둥, 이론구속응력, 내부 구속응력, 내부튜브, 파괴조건식
