

관통한 가셋트판이 부착된 압축 강관 부재의 탄성좌굴내력

The elastic buckling strength of axially compressed tubular member
with through-gusset connection

김 우 범¹⁾ · 임 지 연²⁾
Kim, Woo-Bum Lim, Ji-Youn

요 약 : 축방향으로 가셋트판이 관통한 원형 강관 부재는 압축력을 전달하는 강관 트러스 구조물의 사재로 많이 사용된다. 본 연구의 대상이 되는 가셋트판이 관통한 원형 강관 부재는 단면 성능이 다른 두 부재로 이루어져 있으므로 탄성 좌굴내력은 강성비(β)와 각 부재 길이의 비 (G)에 의해 영향을 받게 된다. 그러나 현행 규준에서는 이러한 변수들에 대한 구체적인 연구 자료 없이 유효좌굴길이계수 $k=0.9$ 를 사재에 적용하여 설계하도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 탄성론에 근거한 이론적 분석과 유한요소 해석에 의한 분석을 수행하여 각 변수들에 의한 구속효과를 파악하였다.

ABSTRACT : A tubular member holding an axially through-gusset connection is often used to transmit axial compression in a steel truss structures. The elastic buckling loads of the member is affected by the stiffness ratio(β) and the length ratio(G) because of two elements with different properties. In current code, however, the strength is evaluated with an effective length factor $k=0.9$ without considering the above effect. Therefore this study analyzed a theoretical mechanism based on the elasticity theory and performed a finite element analysis to investigate the influence parameters on the elastic buckling strength of axially loaded member.

핵심용어 : 관통한 가셋트 집합, 탄성좌굴내력, 강성비, 유한요소해석,

KEYWORDS : Through-gusset connection, Elastic buckling loads, Stiffness ratio, Finite element method

1) 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수
2) 충남대학교 대학원 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

최근에 강관 트러스 구조물의 접합부는 용접으로 가셋트판을 주재와 사재에 각각 부착시키고 이 부착된 가셋트판을 볼트로 접합하는 방법이 많이 사용되어지고 있다. 이런 접합부에서 사재에서 주재로 힘이 가해지는 방법에 따른 거동과 영향력은 연구가 많이 진행되었음에도 불구하고 사재에 대해서는 구체적인 연구 자료 없이 현행 기준에서 유효좌굴길이계수 $k=0.9$ 를 적용하고 있는 실정이다. 특히 가셋트판이 관통한 원형 강관 부재는 단면성능이 다른 두 부재로 이루어져 있으므로 압축내력의 큰 변수인 강성도(β)와 각 부재 길이의 비(G)에 따라 탄성좌굴내력이 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 가셋트판 중 가장 기본이 되는 평판을 적용한 세장비 120인 압축 강관 부재에 대하여 이론해석과 유한요소 해석을 수행하였으며 이들에 의한 분석을 통해 각 변수에 따른 구속효과를 파악하고자 한다.

2. 이론적 해석에 의한 좌굴내력

2.1 개요

가셋트판이 관통한 원형강관 부재는 원형강관보다 강성이 작은 가셋트판이 부착됨으로 인해 가셋트판과 원형강관 부재가 하나의 부재와 같이 거동하여 좌굴하는 전체 좌굴모드(그림 1)와 가셋트판만 좌굴하게 되는 부분 좌굴모드(그림 4)가 발생하게 된다.

2.2 전체 좌굴모드에 대한 탄성좌굴하중

본 연구의 대상이 되는 가셋트판이 관통한 강관 부재는 좌굴하중을 지배하는 휨강성의 차이에 따라 그림 2(a)와 같이 2부분으로 분할된다. 전체 좌굴모드에 대한 모델은 가셋트부분의 중앙에 회

전 스프링이 위치하도록 하고, 강관을 탄성 부재로 생각하여 모델화 한다.

부재 단부의 회전 강성 K_A 는 그림 2(b)를 참고하여 다음 식으로 표현된다.

$$K_A = \frac{EI_{gs}}{l_2} \quad (1)$$

단, E : 탄성 계수 (modulus of elastic)

I_b : 강관 부분의 단면 2차 모멘트

I_{gs} : 가셋트 부분의 단면 2차 모멘트

l_1 : 강관 부분의 길이(강관의 양끝단부 사이 거리)

l_2 : 가셋트 부분의 길이(가셋트판만이 면의 휨강성에 기여하는 부분으로 강관단부에서 첫째 볼트까지의 거리)

M_{gs} : 가셋트부의 단위 회전각을 발생시키는 모멘트

θ_{gs} : 가셋트부의 회전각

좌굴조건과 거동이 대칭이므로 부재의 절반을 모델화하여 그림 2(c)와 같이 좌표계와 하중 P 를 고려한다면 식 (2)와 같은 탄성좌굴방정식이 주어지며, 이에 대한 일반해는 식 (3)과 같게 된다.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_b \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + P \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \quad (2)$$

$$y(x) = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 x + C_4 \quad (3)$$

$$\text{단, } k = \sqrt{\frac{P}{EI_b}} \quad (4)$$

E : 탄성계수 (modulus of elastic)

I_b : 강관 부분의 단면 2차 모멘트

C_1, C_2, C_3, C_4 : 적분 상수

이에 대한 경계조건은 그림 2.2-2(c)를 참고하여 다음과 같이 나타난다.

$$y(0) = 0 \quad (5)$$

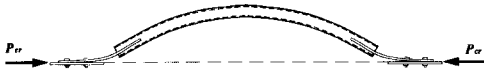


그림 1. 전체 좌굴거동

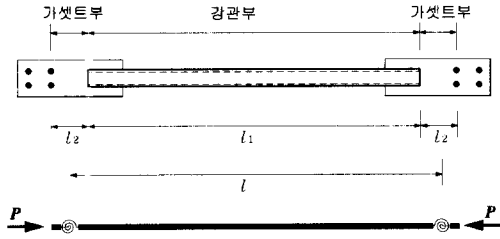


그림 2(a). 가셋트-강관부 모델

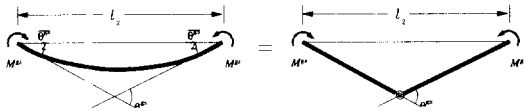


그림 2(b). 가셋트부 회전강성 모델

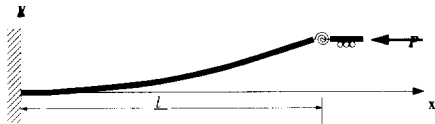


그림 2(c). 부재 절반 부분 모델

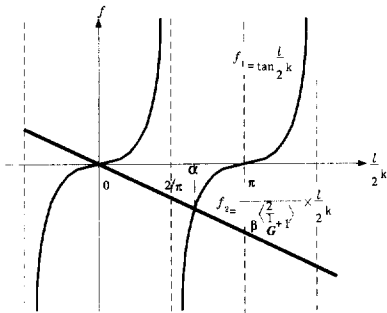


그림 3. 도해법

$$y'(0) = 0 \quad (6)$$

$$EI_{tb} \frac{d^3 y}{dx^3} \Big|_{x=\frac{l}{2}} + P \frac{dy}{dx} \Big|_{x=\frac{l}{2}} = 0 \quad (7)$$

$$EI_{tb} \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=\frac{l}{2}} + K_A \frac{dy}{dx} \Big|_{x=\frac{l}{2}} = 0 \quad (8)$$

탄성좌굴 방정식을 풀기 위하여 식 (3)을 미분하여 식 (5)~(8)에 대입정리하면 다음과 같다.

$$\left(EI_{tb} \times k \cos \frac{l}{2} k + K_A \sin \frac{l}{2} k \right) C_2 = 0 \quad (9)$$

윗식에서 $C_2=0$ 이면 해를 구할 수 없다. 즉

$$EI_{tb} \times k + K_A \tan \frac{l}{2} k = 0 \quad (10)$$

여기서 강성비 (β)와 각 부재 길이의 비 (G)는 식 (11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{I_{gs}}{I_{tb}} \quad (11)$$

$$G = \frac{l_2}{l_1} \quad (12)$$

이를 식 (10)에 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tan \frac{l}{2} k &= -\frac{EI_{tb}}{K_A} \times k = -\frac{l_2 k}{\beta} = -\frac{2l_2}{\beta l} \times \frac{l k}{2} \\ &= -\frac{2}{\beta \left(\frac{1}{G} + 1 \right)} \times \frac{l k}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

이 방정식은 $\frac{l}{2} k$ 에 대한 다음 2개의 함수가 만나는 교점을 구하여 그림 2.2-3처럼 푼다.

$$f_1 = \tan \frac{l}{2} k \quad (14)$$

$$f_2 = -\frac{2}{\beta\left(\frac{1}{G}+1\right)} \times \frac{l}{2} k \quad (15)$$

여기서 구한 해를 α 라 두고 식 (7)을 적용한다.

$$\frac{l}{2} k = \alpha \quad \frac{l^2}{4} k^2 = \alpha^2 \quad (16)$$

$$\therefore P_{cr} = \frac{4EI_{tb}\alpha^2}{l^2} \quad (17)$$

l : 좌굴 길이 (l_1+l_2)

P_e : l_1 에 대한 오일러 좌굴하중 $\left(\frac{\pi^2 EI_{tb}}{l_1^2}\right)$

이를 강관의 오일러 하중과 식 (12)로 표현하면 식 (18)이 되며, 식 (18)을 강관의 단면적 A_{tb} 으로 나누면 좌굴시의 평균 응력도 식 (19)가 된다.

$$P_{cr} = P_e \left(\frac{2l_1\alpha}{\pi l}\right)^2 = P_e \left(\frac{2\alpha}{\pi(1+G)}\right)^2 \quad (18)$$

$${}_{tb}\sigma_{cr,A} = \frac{E}{\lambda^2} \left(\frac{2\alpha}{1+G}\right)^2 \quad (19)$$

$$\text{단, } \lambda = l_1 / \sqrt{I_{tb}/A_{tb}} \quad (20)$$

2.3 부분 좌굴모드에 대한 탄성좌굴 하중

부분 좌굴모드는 전체 좌굴모드처럼 2부분으로 나누어 가셋트부의 중앙, 가셋트부와 강관의 접합부에 회전스프링이 위치하도록 모델화한다.

가셋트의 회전강성 ${}_{gs}K$ 는 식 (1)과 동일하며, 강관부의 회전강성은 그림 5(b)와 같게 된다.

$${}_{tb}K = \frac{2EI_{tb}}{l_1} \quad (21)$$

단, E : 탄성 계수 (modulus of elastic)

I_{tb} : 강관 부분의 단면 2차 모멘트

I_{gs} : 가셋트 부분의 단면 2차 모멘트

l_1 : 강관의 양끝 단부사이의 길이

l_2 : 가셋트 부분의 길이

M_{tb} : 강관부분의 단위 회전각을 일으키는 모멘트

θ_{tb} : 강관 부분의 회전각

그림 5(a)에서 알 수 있듯이 가셋트부와 강관부가 만나는 점에서의 휨강성 ${}_{tb}K_B$ 는 가셋트부와 강관부가 직렬로 연결되므로 다음처럼 주어진다.

$$\begin{aligned} {}_{gs}K_B = K_A &= \frac{EI_{gs}}{l_2} = \frac{I_{gs}}{I_{tb}} \frac{l_1}{l_2} \frac{EI_{tb}}{l_1} \\ &= {}_{gs}\overline{K}_B \frac{EI_{tb}}{l_1} \quad \therefore {}_{gs}\overline{K}_B = \frac{\beta}{G} \end{aligned} \quad (22)$$

$${}_{tb}K_B = \frac{1}{\frac{1}{{}_{gs}\overline{K}_B} + \frac{1}{{}_{tb}K}} = {}_{tb}\overline{K}_B \times \frac{EI_{tb}}{l_1} \quad (23)$$

$$\text{단, } {}_{tb}\overline{K}_B = \frac{1}{\frac{\beta}{G} + \frac{1}{2}} = \frac{2\beta}{2G+\beta} \quad (24)$$

이와 같은 모델의 양단에 힘 P 가 작용할 때, 단부가 θ 회전할 때의 힘의 조합은 그림 2.3-3을 참고하여 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{1}{\frac{l_2}{2} \sin \theta} (M_1 + M_2) \quad (25)$$

$$M_1 = {}_{gs}K_B \theta = {}_{gs}\overline{K}_B \times \frac{EI_{tb}}{l_1} \theta \quad (26)$$

$$M_2 = {}_{tb}K_B \theta = {}_{tb}\overline{K}_B \times \frac{EI_{tb}}{l_1} \theta \quad (27)$$

M_1, M_2 : 가셋트 양단부를 θ 만큼 회전시 필요한 모멘트

식 (26), (27)을 식 (25)에 대입 정리한다.

$$P = \frac{2}{l_2 \sin \theta} ({}_{gs}\overline{K}_B + {}_{tb}\overline{K}_B) \frac{EI_{tb}}{l_1} \theta \quad (28)$$

윗식을 식 (22), (14), (15)를 적용시키고 미

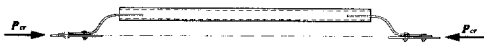


그림 4. 부분좌굴모드

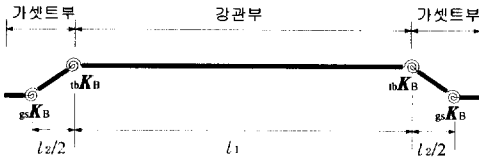


그림 5(a). 부분 좌굴모드의 좌굴모델



그림 5(b). 강관의 회전강성 모델

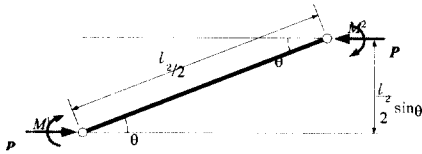


그림 6. 단부 변형시의 힘의 조합

소변위를 가정하면 $\sin \theta \approx \theta$ 이므로 정리하면 식 (29)가 된다. 이를 강관의 단면적으로 나누면 좌굴시 강관 단면의 평균응력도 식 (30)을 구할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{2}{\pi^2 G} (\overline{gK_B} + \overline{tbK_B}) P_e \quad (29)$$

$$= \frac{1}{\pi^2 G} \left(\frac{\beta}{G} + \frac{2\beta}{2G + \beta} \right) P_e$$

$$\overline{tb}\sigma_{cr,B} = \frac{2}{\pi^2 G} \left(\frac{\beta}{G} + \frac{2\beta}{2G + \beta} \right) \times \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (30)$$

단, P_{cr} : 탄성 좌굴 하중

P_e : 오일러 탄성 좌굴 하중 $\left(\frac{\pi^2 EI_{tb}}{l_1^2} \right)$

β : 강성비 $\left(\frac{I_{gs}}{I_{tb}} \right)$

G : 각 부재 길이의 비 $\left(\frac{l_2}{l_1} \right)$

단, λ 는 식 (26)과 동일하다.

2.4 탄성좌굴하중과 좌굴모드

그림 7은 β 와 G 에 의해 결정된 좌굴하중(P_{cr})을 강관의 오일러 좌굴하중(P_e)으로 무차원하여 평가한 것으로 전체 좌굴모드는 식 (20)에 의해 부분좌굴모드는 식 (31)에 의해 나타낸 것이다.

그림 7에서 알 수 있듯이 G 가 증가함에 따라 두 가지 좌굴 모드 구속도가 감소하고 있으며, 전체 좌굴모드를 따르는 구속도가 G 가 0에 가까울수록 구속도 P_{cr}/P_e 는 4에 근접하여 $G=0$ 일 경우 좌굴하중은 강관의 오일러 좌굴하중의 4배에 해당하는 구속도를 갖게 되며, 실제 최종 좌굴거동은 두가지 좌굴하중 중 작은 값으로 결정되므로 두가지 좌굴모드에 대한 P_{cr}/P_e 가 만나는 점을 경계로 G 가 작은 범위에서는 전체 좌굴거동을, G 가 큰 범위에서는 부분 좌굴거동이 발생한다.

그림 8은 강성도 β 가 0.01~0.045까지 변할 경우 강성도에 따라 좌굴모드가 변하는 G 의 경계 값을 구하여 나타낸 것으로 β 가 증가함에 따라 전체 좌굴거동을 할 수 있는 좌굴모드의 전환점 \overline{G} 가 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 식 (21), (32)에 의해 구한 강관의 평균응력도를 보여주는 것으로 $G=0$ 일 경우 이론식에 의해 구한 전체 좌굴모드의 구속도가 4 ($P_{cr}/P_e = 4.0$)에 해당하는 응력을 지지해야 하지만 부재의 단면성능을 고려해야 하므로 $\sigma_y = 3.3\text{tf/cm}^2$ 을 초과하지 못하고 결국 굽은 실선에 대응하는 응력도를 갖게 된다.

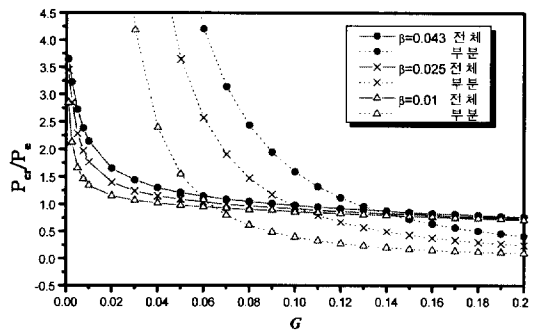


그림 7. 전체좌굴모드와 부분좌굴모드의 거동

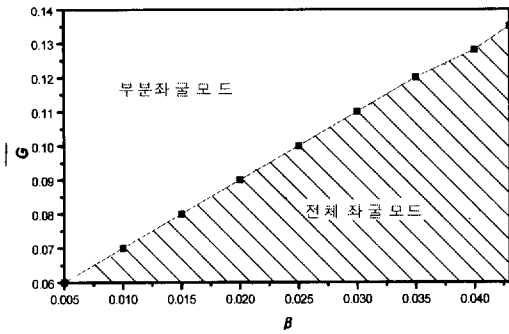


그림 8. 이론식에 의한 좌굴모드의 경계값

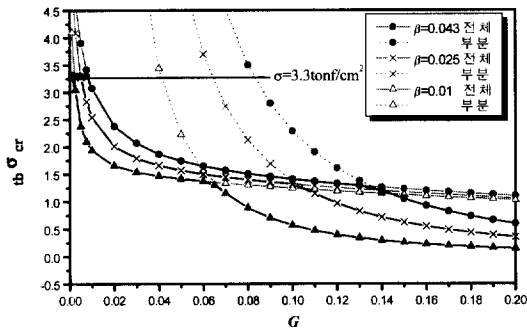


그림 9. 강관의 평균응력도

3. 유한요소 해석에 의한 좌굴내력

3.1 유한요소 해석과 시험체의 개요

본 3장에서는 이론해석의 결과보다 좀 더 정확한 결과를 도출하기 위해 ABAQUS 5.8 범용 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 유한요소 해석과 분석을 하도록 하였다.

해석에 쓰이는 원형 강관과 가셋트판 시험체는 ABAQUS의 S4R5(4node shell element)의 요소를 사용하고 강관은 원주를 20등분, 길이 방향에 대해서는 강관 주위 크기의 2~4배 정도로 요소를 분할하여 모델링 하였다. 가셋트판은 강관 직경사이에는 4등분으로 돌출된 부분은 강관직경 사이를 분할한 요소의 크기와 동일하게 분할하고, 길이 방향으로는 분할된 요소의 크기 비가 1대 2

를 넘지 않도록 element를 구성하였다.

유한요소 해석에 사용된 시험체의 항복응력은 강관과 가셋트판은 3.3tf/cm^2 이며, 탄성계수는 2100tf/cm^2 , 프와송비는 0.3으로 모든 유한요소 시험체에 동일하게 적용되었다.

경계 조건은 볼트의 위치를 지점으로 하여 한쪽 단부에서는 x, y, z 축 방향으로의 이동을 구속시켜 주고 회전은 가능하게 설정하였다. 다른 단부에서는 볼트의 위치에 강관의 축방향, 즉 x, y 축 방향으로의 이동은 구속하고 z 축 방향으로의 이동 및 x축 회전은 가능한 롤러 지지로 설정하였다.

본 연구에서는 볼트를 4개로 가정하여 대칭 배열하고 이렇게 배열된 볼트에 하중을 균등하게 가해 주었으며 모든 해석시험체의 가셋트판의 삽입길이를 1.2D로 동일하게 적용시켜 해석하였다.

본 연구의 유한요소 해석은 탄성좌굴해석(elastic buckling analysis)을 통해 이루어졌다.

3.2 단부 접합조건에 따른 구속효과

3.2.1 G에 따른 구속효과

가셋트판이 관통한 원형 강관 부재는 강성이 다른 두 부재로 이루어져 있으므로 압축력을 받으면 동일한 강관이라도 가셋트판의 비지지길이의 비(G, 강관 단부에서부터 강관에 인접한 첫째 볼트까지의 거리)가 길어지게 되어 강관이 세장비에 따라 좌굴내력이 저하하는 것과 같은 구속효과와 감소가 가셋트판에서도 발생하게 될 것이다. 따라서 가셋트판의 길이에 따른 구속효과만을 파악하기 위해 가셋트판의 폭과 강관직경을 동일하게 시험체를 계획하여 유한요소 해석을 수행하였다.

해석 시험체 중 강관은 직경 $D=11.43\text{cm}$, 두께 $t_{tb}=0.32\text{cm}$, 길이 $l_{tb}=471.36\text{cm}$ 인 120의 세장비를 갖도록 계획하였으며, 가셋트판은 폭 $B=11.43\text{cm}$, 길이 $l_{gs}=27.856\text{cm}$ 이며 두께는 $t_{gs}=2\text{cm}$, 1.23cm , 0.7cm 로 변화시켰다. 이 때 가셋트판의 두께 $t_{gs}=2\text{cm}$, 1.23cm , 0.7cm 에

대한 강성비는 $\beta=0.043, 0.01, 0.0018$ 에 해당한다.

그림 11은 강성비에 따른 P_{cr}/P_e-G 와의 상관관계를 해석결과 나타낸 것으로 유한요소 해석결과 가셋트판의 비지지길이 즉, G 가 증가함에 따라 구속력은 비선형적으로 감소하고 있으며 강성비가 클수록 강관의 오일러 좌굴하중과 동일한 구속력에 해당하는 G 의 값이 커짐을 알 수 있다. 특히 본 해석 시험체에서는 강성비 $\beta=0.0018$ 일 경우에 G 가 증가하면서 구속력이 급격히 감소하는 결과를 도출하였는데, 이는 가셋트판이 세장해지면서 강관이 좌굴하중에 도달하기 이전에 가셋트판에서 먼저 좌굴이 발생하기 때문으로 파악된다. 또한 위의 해석 결과 $\beta=0.043$ 일 경우 $G=0.01$ 에서 $G=0.03$ 으로 증가시 구속력은 20% 정도 감소하고, $\beta=0.01$ 일 경우는 $G=0.01$ 에서 $G=0.03$ 으로 증가시 11%정도 구속력이 감소하므로 강성비가 클 경우 G 에 대한 영향력이 커지며, 강성비가 지나치게 작거나 G 가 커지면 오일

러 좌굴 하중을 하회하는 경우가 발생함을 알 수 있다.

3.2.2 강성비(β)에 따른 구속효과

강관은 직경 $D=11.43\text{cm}$, 두께 $t_{tb}=0.32\text{cm}$, 세장비 $\lambda=120$ 의 단면 성능을 갖도록 하고, 가셋트판은 각각의 강성도 β 를 갖도록 폭과 두께를 조절하였다.

그림 12는 $G=0.01, 0.02, 0.04$ 에 대하여 강성도 β 를 증가시키면서 이에 따른 구속력을 평가한 그래프로, 해석 결과 강관에 대한 가셋트판의 강성비(β)가 증가함에 따라 구속력도 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

해석 결과 $G=0.01$ 일 경우에서 $\beta=0.0019$ 이상, $G=0.02$ 일 경우에는 $\beta=0.005$ 이상, $G=0.04$ 일 경우에는 $\beta=0.01$ 이상이면 양단 편 지지인 강관의 탄성좌굴하중 이상의 좌굴내력을 나타내고 있다.

또한 현재 사재에 대한 설계 기준으로 제시되고 있는 $k=0.9$ 이상의 좌굴내력을 유지하기 위해서는 $G=0.01$ 일 경우 $\beta=0.0126$ 이상, $G=0.02$ 일 경우 $\beta=0.0227$ 이상, $G=0.04$ 일 경우 $\beta=0.042$ 이상 확보해야 함을 알 수 있다.

그림 12에서 $G=0.04$ 이면서 $\beta=0.0019, 0.025$ 일 경우 P_{cr}/P_e 가 극히 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있는데, 가셋트판이 세장해지면서 가셋트판의 좌굴이 강관의 좌굴에 앞서 발생하기 때문으로 파악된다.

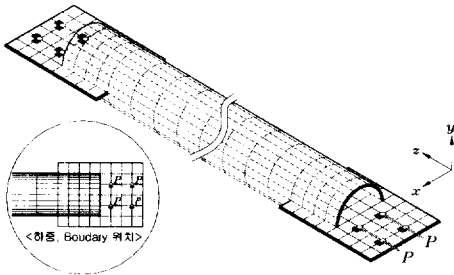


그림 10. 해석 시험체 모델

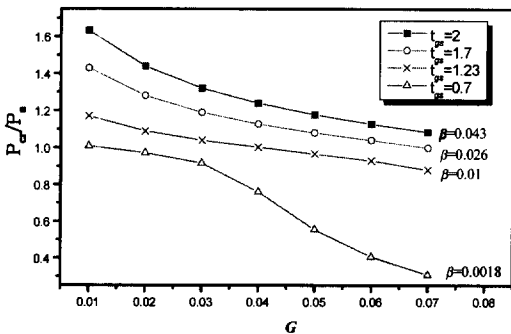


그림 11. P_{cr}/P_e-G 의 상관관계

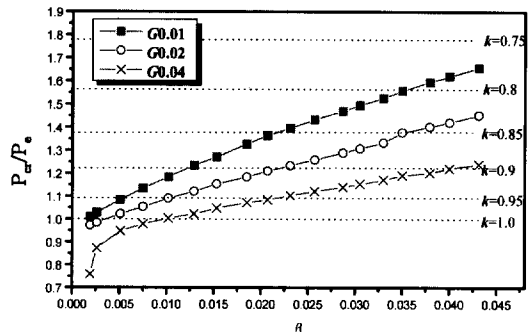


그림 12. $P_{cr}/P_e-\beta$ 의 상관관계

4. 이론해석과 유한요소해석 결과의 비교

4.1 G에 대한 구속력 비교

그림 13은 2장에서 도출한 이론해석에 의해 평균 구속력과 유한요소 해석에 의한 구속력을 비교하여 나타낸 것으로 이론해석에 의해 나타난 전체 좌굴모드와 부분 좌굴모드의 경계 부근에서 이론해석값과 유한요소 해석값의 차이가 가장 작으며, 대체적으로 이론해석의 전체 좌굴모드가 유한요소 해석에 의한 거동과 비슷함을 알 수 있다.

이론해석에 의한 좌굴거동은 전체 좌굴모드에서 부분 좌굴모드로 그 거동이 바뀌면 그 이후 좌굴 하중 값이 급격히 떨어지는 극단적인 모습을 나타내고 있는 반면, 유한요소 해석은 모드의 전환점이 시각적으로 뚜렷히 나타나지는 않는다.

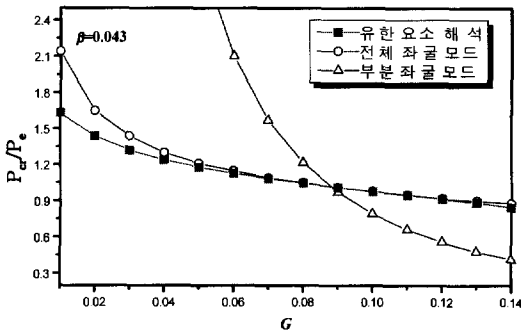


그림 13. G에 대한 이론해석과 유한요소해석의 비교

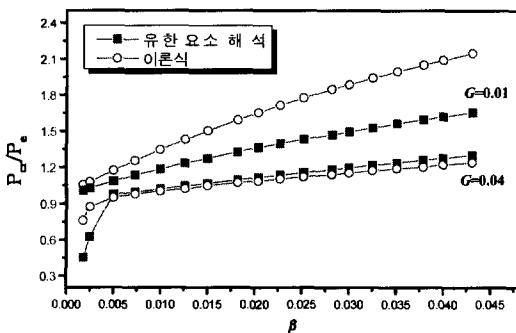


그림 14. β 에 대한 이론해석과 유한요소해석의 비교

그러나 이론해석에 의해 구한 모드의 전환점은 약 $P_{cr}/P_e=1$ 인 점에서 이루어지며, 이점을 경계로 유한요소 해석을 통해 구한 구속력도 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 점을 경계로 유한요소해석에서도 좌굴 모드전환이 이루어지고 있는 것으로 여겨진다.

4.2 강성비 β 에 대한 구속력 비교

(그림 4.2-1)은 $G=0.01, 0.04$ 일 경우의 이론해석에 의한 구속력과 유한요소 해석에 의한 구속력을 비교하여 나타낸 것이다.

$G=0.04$ 에 비해 $G=0.01$ 의 경우 이론해석과 유한요소 해석 결과의 차이가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이는 앞의 (그림 5.1-1)과 (그림 5.1-2)에서 보여지는 것처럼 모드의 전환점에 가까울수록 이론해석과 유한요소 해석의 결과 차이가 작게 나타나고, 전환점에서 멀어질수록 그 차이가 커지게 되기 때문이다.

이론해석에 의하면 G 가 0에 근접할수록, β 가 증가할수록 구속력 P_{cr}/P_e 는 4에 가깝게 증가하게 되지만 실제 유한요소 해석에 의하면 β 가 1 이상 무한히 증가하여도 P_{cr}/P_e 는 4에 접근하지 않는다. 이것은 가셋트판의 강성이 증가하여도 실제로 강관을 구속시키는 부분이 강관의 2점에 한정되므로 회전 대하여 완전히 구속시키지 못하기 때문으로 판단되며 $G=0.01$ 이면서 $\beta=0.0018, 0.0025$ 일 경우에 구속력이 매우 작는데 이는 부분 좌굴모드에 의해 결정된 좌굴이기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 부재 축방향으로 평판의 가셋트판이 관통한 원형 강관 부재의 탄성좌굴내력을 평가하였다. 주요 영향 변수로 강성비 β 와 각 부

재 길이의 비 G 에 따른 구속효과를 파악하기 위해 탄성론에 근거한 이론해석과 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 이론해석에 의한 분석 결과
- 강성비 β 와 G 에 의해 전체좌굴모드와 부분좌굴모드가 발생하며, 강성비 β 가 작을수록 G 가 커질수록 부분좌굴모드를 나타냄을 알 수 있었다.
 - 탄성론에 근거하여 유도된 각 좌굴모드에 대한 탄성좌굴식은 다음과 같다.
 전체좌굴모드 $P_{cr} = \left(\frac{2\alpha}{\pi(1+G)} \right)^2 P_e$
 부분좌굴모드 $P_{cr} = \frac{1}{\pi^2 G} \left(\frac{\beta}{G} + \frac{2\beta}{2G+\beta} \right) P_e$
 P_e : 강관 순길이에 대한 오일러 좌굴하중
 G : 강관의 순길이에 대한 가셋트판의 비지지 길이의 비
 β : 강관의 단면 2차 모멘트에 대한 가셋트판의 단면 2차 모멘트의 비
 - 전체좌굴에서 부분좌굴로 바뀌는 좌굴모드의 전환점 \bar{G} 는 강성비 β 가 증가할수록 선형적으로 증가한다.

- (2) 유한요소해석에 의한 분석결과
- G 가 증가할수록 구속력은 비선형적으로 감소하며, G 가 커질수록 β 가 작아질수록 부분좌굴거동으로 인해 오일러 좌굴하중을 하회하는 경우가 발생함을 알 수 있다.
 - 강성비 β 가 증가할수록 구속력도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 일본건축학회 "관통한 평판 가셋트형 집합식을 갖는 축력재의 탄성좌굴거동" 1998.1
- 김우범 외, "가셋트를 부착한 원형강관 집합부에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 1997.3
- 한국전력공사 "765kV 송전전용 철탑설계 및 제조기술 개발에 관한 연구", 1996
- 일본건축학회 "탑상 트러스골조의 좌굴내력에 관한 연구", 1992.4
- Kitipornchai, S., Dux, P.F and Richter, N. J., "Buckling and bracing of cantilever" J. Strut. Engrg, ASCE, 1984
- 일본건축학회, "강관구조설계지침 동해설", 1990
- Charles G. Schilling, "Buckling strength of circular tube" ASCE

(접수일자 : 2000년 11월 7일)