

단부구속효과를 고려한 관통 가셋트 부착 강관부재의 좌굴내력 및 유효세장비 산정에 관한 연구

A Study on the Buckling Strength and Effective Length of Tubular Member with Gusset Plate Considering End Restraints

김 우 범¹⁾

Kim, Woo Bum

요 약 : 단부에 관통 가셋트판이 부착된 강관부재의 좌굴거동은 단부의 형상 및 상태에 따라 구속정도가 상이하게 되며 단부요소는 세장비에 따라 탄성 및 비탄성 거동 특성을 보임에 따라 이론적 좌굴내력을 도출하는 것은 사실상 불가능하다. 본 연구에서는 탄성좌굴의 이론적 접근을 바탕으로 세장비(λ), 강성비(β), 지지길이비(G), 강관크기, 부재의 초기변형 등을 고려하여 비탄성 유한요소 해석을 수행하여 각각의 영향요소가 좌굴하중에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 유한요소 모델링시 세장비(λ), 강성비(β), 지지길이비(G), 강관크기 등의 매개변수 분석을 통하여 강도식을 도출하였다.

ABSTRACT : A tubular member with through-gusset plate is often used to transmit axial compression in an electric transmission towers. In current code, the strength of tubular member is evaluated with an effective length factor $k=0.9$ without considering the deformation of boundary element. A buckling strength of member with end gusset plate is affected by stiffness ratio(β) and the length ratio(G) between main tubular member and end gusset plate. In this study theoretical mechanism based on the elastic buckling behavior was investigated, and finite element analysis was performed to propose a formula for the buckling strength and effective length factor of tubular member in elastic and inelastic ranges.

핵심용어 : 가셋트판, 유효세장비, 좌굴내력, 강성비

KEYWORDS : Gusset, Effective length, Buckling lode, Stiffness ratio

1. 서론

최근에 국내 송전철탑의 접합부는 용접으로 가셋트판을 주재와 사재에 각각 부착시키고 사재에는 C형강, H형강 또는 십자형 등의 가셋트판을 사용하고 있다. 이런 접합부에서 주재에 부착된 가셋트와의 접합부에 대한 거동 및 내력에 관한 연구는 많이 수행된바 있으나 사재의 좌굴내력에 대해서는 구체적인 연구가 수행된 사례가 없는 관계로, 현행 철탑설계기준에서는 사재에 대하여 유효좌굴길이계수 $k=0.9$ 를 일률적으로 적용하여 사재의 좌굴내력을 산정하고 있다. 부재를 C형강으로 사용할 경우에는 가셋트판을 사용하지 않고 부재간의 연결을 볼트에 의해 직접 체결하므로 상기 계수 0.9는 어느 정도 합리적인 값이라 할 수 있으나 단부에 관통 가셋트판이 부착된 원형 강관부재는

단면성능이 다른 두 부재로 이루어져 있으므로 가셋트판의 강성과 강관의 강성과의 비 β , 가셋트판의 길이와 강관 길이의 비 G 에 따라 좌굴내력이 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 가셋트판 중 가장 기본이 되는 평판을 적용한 압축 강관 부재에 대하여 지난 연구에서 수행한 탄성좌굴 이론해석을 바탕으로 탄성 및 비탄성 좌굴영역에서의 유한요소 해석을 수행하였으며 이들에 의한 분석을 통해 세장비에 따른 좌굴내력식과 적정 유효세장비를 제안하였다.

2. 이론적 탄성해석

가셋트판이 관통한 원형강관 부재는 원형강관과 형상을 달리하는 가셋트판이 부착됨으로 인해, 가셋트판과 원형강관 부

1) 정회원, 공주대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
(Tel. 041-850-8655, Fax. 041-854-8659, E-mail:wbk@kongju.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

재가 하나의 부재와 같이 거동하여 좌굴하는 전체 좌굴모드(그림 1)와 가세트판만 좌굴하게 되는 부분 좌굴모드(그림 4)가 발생하게 된다. 전체좌굴과 부분좌굴의 발생여부는 β 와 G 의 값에 좌우되며, 본 연구에서는 우선 G 와 β 의 영향을 살펴보기 위하여 전체좌굴과 부분좌굴에 대한 이론적 탄성해석을 수행하고, 이를 토대로 유한요소해석을 수행하였다.

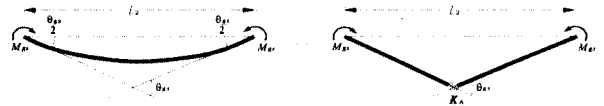


그림 2.(b) 가세트부 회전강성 모델

2.1 전체 좌굴에 대한 이론적 탄성해석

본 연구의 대상이 되는 가세트판이 관통한 강관 부재는 좌굴하중을 지배하는 휨 강성의 차이에 따라 그림 2(a)와 같이 2부분으로 분할된다. 전체 좌굴모드에 대한 모델은 가세트 부분의 중앙에 회전 스프링이 위치하도록 하고, 강관을 탄성 부재로 생각하여 모델화한다. 부재 단부의 회전 강성 K_A 는 그림 2(b)를 참고하여 다음 식으로 표현된다.

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

여기서,

E : 탄성 계수 (modulus of elastic)

I_{tb} : 강관 부분의 단면 2차 모멘트

I_{gs} : 가세트 부분의 단면 2차 모멘트

l_1 : 강관 부분의 길이 (강관의 양끝단부 사이 거리)

l_2 : 가세트 부분의 길이

(가세트판만이 면의 휨강성에 기여하는 부분으로 강관단부에서 첫째 볼트까지의 거리)

M_{gs} : 가세트부의 단위 회전각을 발생시키는 모멘트

θ_{gs} : 가세트부의 회전각



그림 1. 전체 좌굴거동

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. 좌굴내력은 식(4)와 같이 유도되며 유도과정은 참고문헌(1)에 기술되어있다.

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

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

여기서, $k = \sqrt{\frac{P}{EI_{tb}}}$

E : 탄성계수 (modulus of elastic)

I_{tb} : 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.

$$P_{cr} = P_e \left(\frac{2l_1 \alpha}{\pi l} \right)^2 = P_e \left(\frac{2\alpha}{\pi(1+G)} \right)^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{cr, A} = \frac{E}{\lambda^2} \left(\frac{2\alpha}{1+G} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, $\lambda = l_1 / \sqrt{I_{tb}/A_{tb}}$ (6)

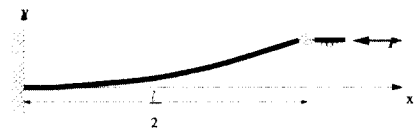


그림 2.(c) 부재 절반 부분 모델

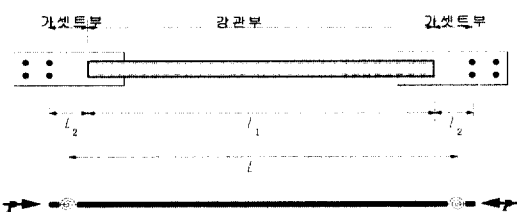


그림 2.(a) 가세트-강관부 모델

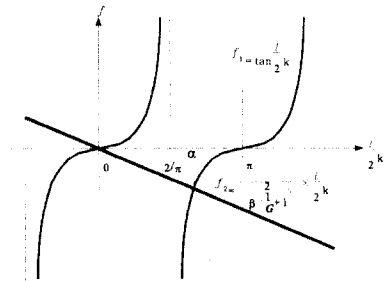


그림 3. 도해법

2.2 부분 좌굴모드에 대한 이론적 탄성해석

부분 좌굴모드는 그림 5(a)와 같이 2부분으로 나누어 가셋트부의 중앙, 가셋트부와 강관의 접합부에 회전스프링으로이 모델화한다.

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

$${}_{tb}K = \frac{2EI_{tb}}{l_1} \quad (7)$$

여기서, 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

$$\begin{aligned} P_{cr} &= \frac{2}{\pi^2 G} ({}_{gs}\overline{K}_B + {}_{tb}\overline{K}_B) P_e \\ &= \frac{1}{\pi^2 G} \left(\frac{\beta}{G} + \frac{2\beta}{2G+\beta} \right) P_e \end{aligned} \quad (8)$$

$${}_{tb}\sigma_{cr, B} = \frac{2}{\pi^2 G} \left(\frac{\beta}{G} + \frac{2\beta}{2G+\beta} \right) \times \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (9)$$

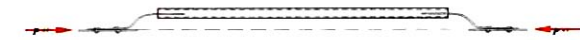


그림 4. 부분좌굴모드

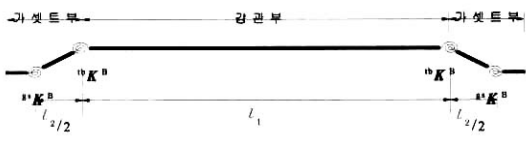


그림 5.(a) 부분 좌굴모드의 좌굴모델

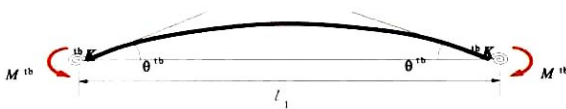


그림 5.(b) 강관의 회전강성 모델

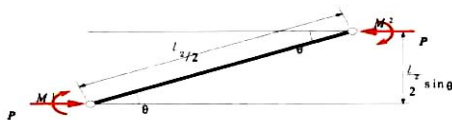


그림 6. 단부 변형시의 힘의 조합

단, P_{cr} : 단부구속이 고려된 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 $\left(\frac{l_2}{l_1} \right)$

2.3 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(6)에 의해 부분좌굴모드는 식(7)에 의해 나타난 것이다.

그림 7에서 알 수 있듯이 G 가 증가함에 따라 두 가지 좌굴모드 모두 구속도가 감소하고 있으며, 전체 좌굴모드의 경우 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 좌굴이 발생한다.

그림 8은 강성도 β 가 0.01~0.045까지 변할 경우 강성도에 따라 좌굴모드가 변하는 G 의 경계값을 구하여 나타난 것으로 β 가 증가함에 따라 전체 좌굴거동을 할 수 있는 좌굴모

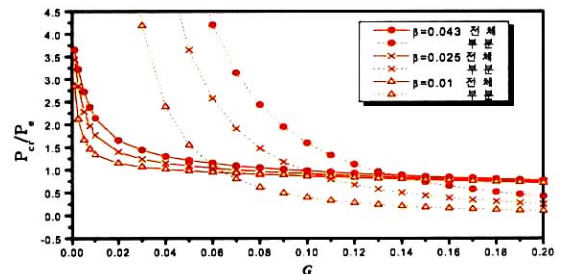


그림 7. 전체좌굴모드와 부분좌굴모드의 거동

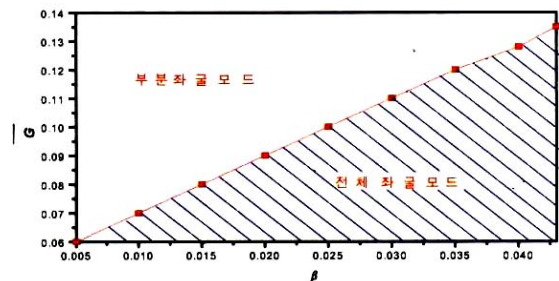


그림 8. 이론식에 의한 좌굴모드의 경계값

드의 영역이 β 와 G 에 따라 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

그림 9는 강관의 평균 응력도를 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 항복 응력인 $\sigma_y=3.3\text{tf/cm}^2$ 을 초과하지 못하고 β 의 값에 따라 굽은 실선에 대응하는 응력도를 갖게 된다.

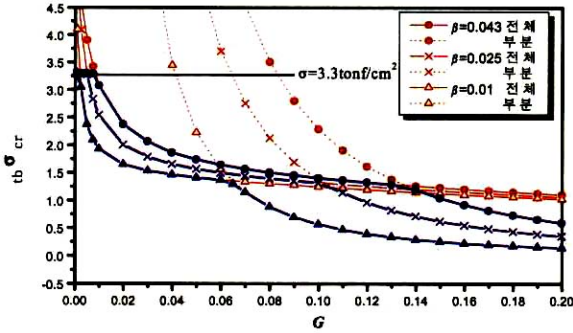


그림 9. 강관의 평균응력도

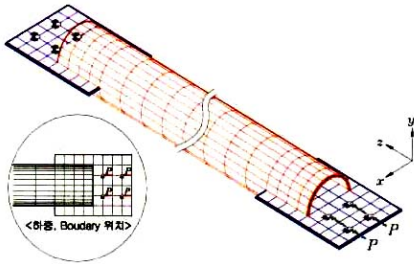


그림 10. 해석 시험체 모델

3. 유한요소해석에 의한 탄성 및 비탄성좌굴내력

3.1 유한요소 해석과 시험체의 개요

이론해석의 결과는 탄성거동을 전제로 하고 있으므로 여기에서는 보다 더 정확한 결과를 도출하기 위해 ABAQUS 5.8 범용 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 탄성 및 비탄성 유한요소 해석을 수행 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 요소(1)를 분할하여 모델링 하였다. 가셋트판은 강관 직경사이에는 4등분으로 돌출된 부분은 강관직경 사이를 분할한 요소의 크기와 동일하게 분할하고, 길이 방향으로는 분할된 요소의 크기 비가 1대 2를 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 적용하였다.

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, y축 방향으로의 이동은 구속하고 z축 방향으로의 이동 및 x축 회전은 가능한 롤러 지지로 설정하였다.

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

3.2 탄성유한요소해석

3.2.1 이론식과 유한요소해석 결과의 비교

탄성한계내에서의 좌굴내력을 이론식과 유한요소해석에 의하여 구한 결과는 그림11과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 모드의 전환점에 가까워 질수록 이론식과 유한요소해석 결과의 차이가 적어짐을 알 수 있는데 이는 이론식의 경우 가셋트판의 부분좌굴모드만이 고려되었으며 부분좌굴과 전체좌굴의 상호작용이 고려되지 않았기 때문이다. 상호작용을 이론적으로 규명하기 위해서는 추가적인 연구를 필요로 한다.

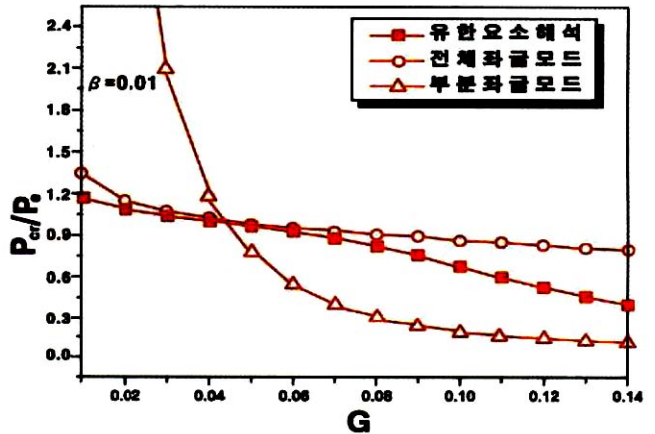


그림 11. 이론식과 유한요소해석의 결과 비교

3.2.2 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 거리가 길어지게 되어 강관이 세장비에 따라 좌굴내력이 저하하는 것과 같은 구속효과의 감소가 가셋

구속효과만을 파악하기 위해 가셋트판의 폭과 강관직경을 동일하게 시험체를 계획하여 유한요소 해석을 수행하였다.

해석시험체 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 $t_{gs}=2\text{cm}, 1.23\text{cm}, 0.7\text{cm}$ 로 변화시켰다. 이 때 가셋트판의 두께 $t_{gs}=2\text{cm}, 1.23\text{cm}, 0.7\text{cm}$ 에 대한 강성비는 $\beta=0.043, 0.01, 0.0018$ 에 해당한다.

그림 12는 강성비에 따른 P_{cr}/P_e-G 와의 상관관계를 해석 결과 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 나타내었는데, 이는 강관이 좌굴하중에 도달하기 이전에 가셋트판에서 먼저 좌굴이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 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 오일러 좌굴 하중보다 적어지는 경우가 발생함을 알 수 있다.

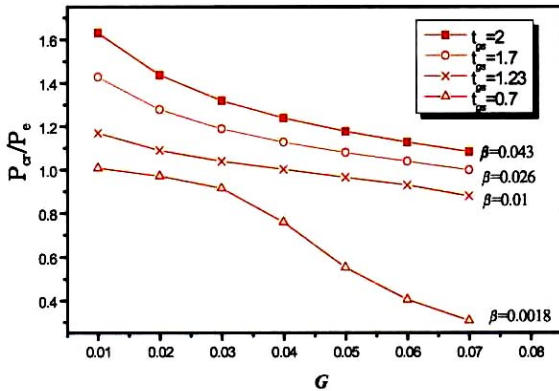


그림 12. P_{cr}/P_e-G 의 상관관계

3.2.3 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 13은 $G=0.01, 0.02, 0.04$ 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 핀 지지인 강관의 탄성좌굴하중 이상의 좌굴내력을 나타내고 있다.

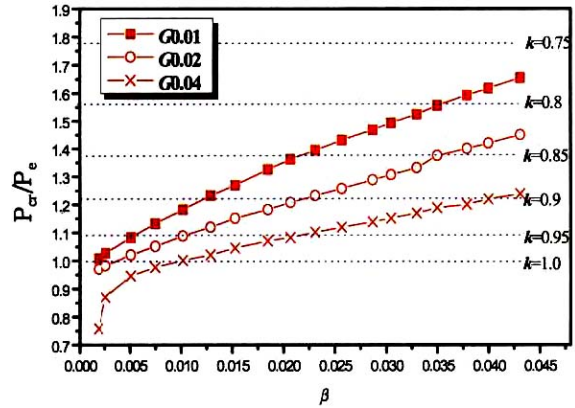


그림 13. $P_{cr}/P_e-\beta$ 의 상관관계

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.

그림12에서 $G=0.04$ 이면서 $\beta=0.0019, 0.025$ 일 경우 P_{cr}/P_e 가 극히 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있는데, 실제 이 있어 β 는 대체로 0.08보다 큰 값을 갖기 때문에 이러한 내력의 저하는 나타나지 않을 것으로 사료된다.

3.3 비탄성 유한요소해석

3.3.1 강성비(β)에 의한 영향

비탄성영역에서는 강관의 크기나 G 가 좌굴내력에 미치는 영향은 강성비 및 세장비 만큼 크게 영향을 미치지 않으므로, 강관은 직경 $D=11.43\text{cm}$, 두께 $t_{tb}=0.32\text{cm}$, $G=0.01$ 의 단면 성능을 갖도록 하고, 가셋트판은 각각의 강성도 (β)를 갖도록 $t_{gs}=3.034\text{cm}, 2.46\text{cm}, 2\text{cm}, 1.7\text{cm}$ 로 두께를 조절하였다. 이것은 앞에서 탄성해석을 통하여 고찰된 바와 같이 구속력을 높이기 위해서는 폭을 증가시키는 것보다 두께를 증가시키는 것이 더욱 효율적이기 때문이다.

해석결과 각 시험체 별 $P_{cr}/P_e-\beta$ 의 관계는 그림 13과 같다. 그림 14는 세장비에 대하여 강성도 β 를 증가시키면서 이에 따른 구속력을 평가한 그래프로, 세장비가 100이상인 탄성영역에서는 β 가 증가함에 따라 좌굴내력이 증가하는 경향을 보이나, 세장비가 100이하인 비탄성영역에서는 β 가 증가하여

도 좌굴내력 값이 변화가 없음을 나타낸다.

β : 강관의 단면 2차 모멘트에 대한 가셋트판의 단면 2차 모멘트의 비

3.3.2 세장비(λ)에 의한 영향

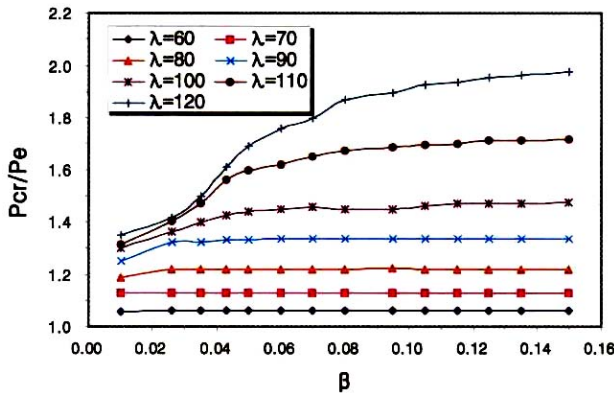


그림 14. P_{cr}/P_e - β 의 상관관계

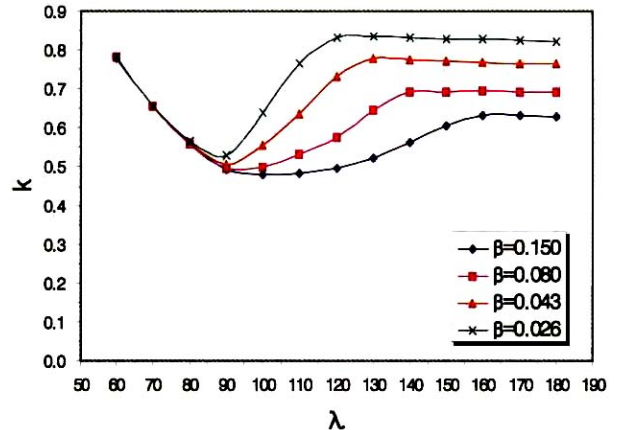


그림 15. 유효좌굴길이계수(k)와 λ 의 관계

탄성영역에서는 그림 15와 같이 세장비가 커질수록 구속효과가 증가하였다. 시험체의 유한요소해석 결과 λ 가 큰 범위에서 가셋트판의 두께가 큰 시험체가 작은 시험체보다 구속력이 크게 되는데, 본 시험체의 경우에는 강성비 $\beta=0.15$ 일 때 세장비 차이로 인한 구속력의 차이가 가장 크고, 강성비가 줄어들면서 구속효과의 차이가 점차 줄어들고 있다. 실제 송전 첩탑에 많이 사용되고 있는 평판의 강성비가 0.15에 가까운 값을 가지므로 세장비가 커질수록 좌굴내력이 상당히 증진됨을 알 수 있다.

세장비에 따른 유효좌굴길이계수(k)를 산출한 그림 15로부터 비탄성범위에서는 현재 기준으로 정하고 있는 $k=0.9$ 보다 더 큰 내력의 확보가 가능함을 알 수 있다. 그러므로 k 값에 대한 조정이 필요할 것으로 판단된다. 세장비 90 이하인 비탄성영역에서는 유효좌굴계수가 강성비의 영향을 받지 않고 일정하게 줄어들지만, 세장비 90 이상인 탄성영역에서는 유효좌굴계수가 β 에 의해서도 영향을 받으므로, 좌굴내력식도 아래와 같이 세장비 100을 중심으로 탄성영역, 비탄성영역 좌굴내력식으로 제안하였다.

$$60 \leq \lambda < 100$$

$$P_{cr}/P_e = 0.01(46.6 + 0.94\lambda + 17.55\beta)$$

$$k = 0.01(113.33 - 0.63\lambda - 28.18\beta)$$

$$100 \leq \lambda < 180$$

$$P_{cr}/P_e = 14.186 - 0.01(4.6\lambda - 6285.3\beta + 28.4\lambda\beta - 4372/\lambda\beta)$$

$$k = 0.01(32.9 + 0.3\lambda - 61.8\beta - 0.3\lambda\beta)$$

여기서, $0.08 \leq \beta \leq 0.15$

λ : 세장비

4. 결 론

관통 가셋트판에 의해 단부구속을 받는 강관부재의 좌굴내력을 이론해석 및 유한요소해석에 의해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이론해석에 의한 좌굴내력은 전체좌굴이 발생할 경우에는 유한요소해석 결과와 거의 일치하고 있으나 부분좌굴이 발생할 경우에는 유한요소해석 결과치보다 낮게 나타나며 이는 전체좌굴과의 상호작용이 고려되지 않았기 때문이다.
- (2) 강성비 β 가 감소할수록, 지지길이비 G 가 증가할수록, 좌굴내력은 감소하며 강성비가 적을 경우에는 지지길이비 증가에 따라 좌굴내력이 더욱 크게 감소한다.
- (3) 세장비 λ 가 100이상 정도인 탄성영역에서는 강성비가 증가함에 따라 구속효과가 증가하는 경향을 보이나, 세장비 100이하 정도인 비탄성영역에서는 강성비가 증가하여도 구속효과는 변화가 없다.
- (4) 단부접합조건이 고려된 압축력을 받는 강관 부재의 좌굴내력을 추정된 결과, 제안된 좌굴내력식을 현행 설계 기준과 비교해 볼 때, 기준에서 사용하고 있는 k 값 0.9는 보수적인 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 강성비에 따라 k 값을 0.9~0.5까지 적용 가능함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김우범 외, (1997.3) 가셋트를 부착한 원형강관 접합부에 관한 연구, 대한건축학회 논문집,
 한국전력공사 (1996) 765kV 송전전용 철탑설계 및 제조기술 개발에 관한 연구,
 鰐尾健三, (昭和38年 9月) 鋼管割り込みがセットプレート継手の研究, 日本建築學會論文集, 第90号, pp. 19-24
 Yoshiyuki Mitsui, et al.,(1985年 3月) Experimental Study on Ultimate Strength and Deformation Capacity of Welded Tube-to-through Gusset

Plate Joints, 構造工學論文集, Vol.31.B, pp. 143-156
 日本建築學會, (1980) 塔狀剛構造設計指針, pp 70-74
 Kitipornchai, S.,Dux, P.F and Richter, N. J. (Sept.,1984) "Buckling and bracing of cantilever", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.110, No.9, pp. 2250-2262
 Schilling, C.G., (Oct., 1965) Buckling strength of circular tube, *Journal of the Structural Engineering, ASCE*, Vol. 91, No.5, pp. 325-348
 ASCE, (December, 1991) *Design of Latticed Steel Transmission Structures, ANSI/ASCE 10-90*, pp. 3-6

(접수일자 : 2003. 1. 3 / 심사일 2003. 1. 18 / 심사완료일 2003. 3. 12)