

비대칭연단보강재가 설치된 직교이방성 압축재의 탄성 국부좌굴해석

최원창* · 정상균** · 윤순중***

Analysis of Elastic Local Buckling of an Orthotropic Compression Member with Asymmetric Edge Stiffeners

Choi, W. C., Jeong, S. K., and Yoon, S. J.

Key Words: orthotropic, compression member, local buckling, asymmetric edge stiffeners.

Abstract

This paper presents the analytical investigation pertaining to the local buckling behavior of orthotropic open section thin-walled compression members with asymmetric edge stiffeners. In the analysis, 3 different cases of the second moment of inertia are considered to find the asymmetric edge stiffener effect on the local buckling strength. The analytical study results are presented in the graphical form so that the edge stiffener effects on the local buckling strength can be easily found.

기호설명

- E_{11}, E_{22} : 재료의 성질방향 1과 2에 대한 탄성계수
 D_{11}, D_{22} : 재료의 성질방향 1과 2에 대한 판의 휨강성
 k : 판의 좌굴계수
 w : 판의 면외처짐
 δ : 플랜지와 복부의 폭비 ($= b_2/b_1$)
 ϕ : 판의 길이와 폭의 비 ($= a/b$)
 ω : 복부와 플랜지의 두께비 ($= t_1/t_2$)
 α, β : 지배미분방정식의 해의 매개변수

1. 서 론

구조용 강재 박판단면 압축재는 재료가 항복응력

에 도달하기 전에 좌굴에 의해 부재가 파괴되는 현상을 보인다. 건설을 비롯한 많은 분야에서는 이러한 구조적 안정성 문제에 대한 연구가 폭넓게 진행되어 왔으며 일반 구조용 강재는 많은 이론적 실험적 연구결과들을 토대로 설계식이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 섬유보강 열경화 플라스틱 복합재와 같은 직교이방성 재료는 역학적, 물리적 장점들을 갖고 있어(즉, 경량이면서 내후성이 크고 단위중량당의 강도가 크다는 점) 각종 산업 시설물에서 사용이 날로 증가되고 있음에도 불구하고 좌굴거동에 대한 연구가 아직은 미흡한 실정이다.

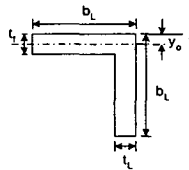
본 연구에서는 구조용 압축재의 국부좌굴강도를 증대시키기 위한 방법중 하나로서 자유단을 갖는 판요소의 연단에 비대칭보강재를 설치할 경우, 비대칭연단보강재의 단면2차모멘트를 변화시켜가며 압축재의 국부좌굴강도에 대해서 비대칭연단보강재가 미치는 영향을 검토하기 위해 정밀식을 유도하였다. 또한, 유도된 식을 등방성 재료와 직교이방성

* 홍익대학교 대학원 토목공학과 석사과정
** 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*** 홍익대학교 토목공학과 조교수

재료의 압축재에 적용시켜 복부의 최소국부좌굴계수와 형상비의 관계를 그래프로 나타내었다. 이론식의 유도에 있어서 하중이 재하된 변은 단순지지된 것으로 간주하고 파괴유형은 여러 가지 좌굴거동 중에서 국부좌굴만을 대상으로 하였으며, 단면은 압축재로 많이 사용되는 I형 단면을 고려하였고, 연단보강재는 보요소로 모델링하였다.

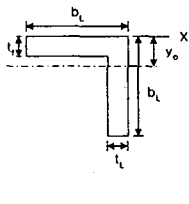
2. 비대칭연단보강재의 중립축 ($t_f=t_L$)

Case 1: 판의 중립축과 일치된 축



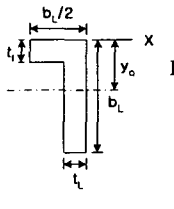
$$I_1 = \left(\frac{b_L \cdot t_L^3}{12} \right) + \left(\frac{t_L \cdot (b_L - t_L)^3}{12} \right) + (b_L - t_L) \cdot t_L \cdot \frac{b_L^2}{4}$$

Case 2: 보강재 부분의 중립축



$$I_3 = \frac{(b_L - t_L) \cdot t_L^3}{12} + \frac{(b_L)^3 \cdot t_L}{12} + (b_L - t_L) \cdot t_L \cdot \left(Y_o - \frac{t_L}{2} \right)^2 + b_L \cdot t_L \cdot \left(\frac{b_L}{2} - Y_o \right)^2$$

Case 3: 보강재에서 판과 일치되는 부분의 1/2 보강재의 중립축



$$I_3 = \frac{b_L \cdot t_L^3}{24} + \frac{b_L \cdot t_L}{2} \cdot \left(Y_o - \frac{t_L}{2} \right)^2 + \frac{(b_L - t_L)^3 \cdot t_L}{12} + (b_L - t_L) \cdot t_L \cdot \left(\frac{b_L + t_L}{2} - Y_o \right)^2$$

그림 1. 비대칭연단보강재의 단면2차모멘트

판의 좌굴강도를 증가시키는 방법으로 보강재를 설치할 경우 대칭보강재의 중립축은 판의 중립축과 일치하나 비대칭보강재의 경우는 그렇지 않다. 또한, 판의 연단에 비대칭보강재를 설치하면 판의 연단에서는 판의 휨강성이 증가하게 되는데 이 경우 비대칭연단보강재에 의한 판의 휨강성 영향 범위는 기존문헌(Bulson, 1969)에서 판 두께의 30 배에 해당하는 판부분을 보강재의 단면으로 포함시키고 있다. 그러므로 판의 휨강성에 영향을 미

치는 보강재의 단면2차모멘트를 결정하는 것은 판의 좌굴강도를 결정하는데 중요한 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 보강재의 단면2차모멘트를 3가지 경우로 모델링하여 복부판의 최소국부좌굴계수에 대한 영향을 검토하였다.

3. 경계조건에 따른 직교이방성판의 좌굴해석식

직교이방성판의 좌굴해석식은 하중이 재하되지 않은 두변의 경계조건에 따라 달라지며 각 경우 경계조건에 따른 특성방정식은(정, 1997) 다음과 같다.

표 1. 직교이방성판의 좌굴에 대한 특성방정식

| 경계조건 | 좌굴특성방정식 |
|--------------|--|
| S-Fr | $SFr = (a^2 + \beta^2)(a\psi^2 \cosh a \sin \beta - \beta x^2 \sinh a \cos \beta)$ |
| F-Fr | $FFr = \frac{2a\beta x\psi + a\beta(x^2 + \psi^2) \cosh a \cos \beta}{(\beta^2 x^2 - a^2 \psi^2) \sinh a \sin \beta}$ |
| S-Sy | $SSy = - \left[a\beta(a^2 + \beta^2) \cosh \frac{a}{2} \cos \frac{\beta}{2} \right]$ |
| F-Sy | $FSy = - a\beta(a^2 + \beta^2) \left(a \sinh \frac{a}{2} \cos \frac{\beta}{2} + \beta \cosh \frac{a}{2} \sin \frac{\beta}{2} \right)$ |
| S-F | $SF = - (a^2 + \beta^2)(a \cosh a \sin \beta - \beta \sin a \cos \beta)$ |
| S-S | $SS = (a^2 + \beta^2) \sinh a \sin \beta$ |
| χ, ψ | $\chi = a^2 - \nu_{12} \left(\frac{m\pi}{\lambda} \right)^2, \quad \psi = \beta^2 + \nu_{12} \left(\frac{m\pi}{\lambda} \right)^2$ |

4. 비대칭연단보강재가 설치된 직교이방성 압축재의 좌굴해석식

비대칭연단보강재가 설치된 직교이방성 압축재의 국부좌굴해석을 위해서는 판의 좌굴해석에 대한 가정과 판의 접합부에서의 가정 사항(Bulson, 1969)이 외에 추가적으로 다음과 같은 판과 보강재 접합부에 대한 가정 사항을 고려해야한다.

- (1) 보강재가 접합된 곳의 판의 면외처짐은 보강재의 처짐과 같다.
- (2) 판의 단면에 발생하는 전단력과 보강재에 전달되는 횡하중의 합은 0 이다.

그림 2에서와 같이 복부를 1번, 양쪽 플랜지를 각각

2, 3번 판이라 하고 위의 가정 사항과 판요소에 대한 좌굴특성방정식을 이용하면 비대칭연단보강재가 설치된 I형 단면 압축재의 국부좌굴해석식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 + \frac{1}{\delta_2 \omega_2^3} \left(\frac{SFr - SS \cdot LFR}{FFr - FS \cdot LFR}\right)_2 + \frac{1}{\delta_3 \omega_3^3} \left(\frac{SFr - SS \cdot LFR}{FFr - FS \cdot LFR}\right)_3 = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 LFR은 보강재와 관련된 항으로 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$LFR = \left(\frac{m\pi}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{b}{D_{22}}\right) \left\{ b_L D_{11L} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - A_L \sigma_X \right\} \quad (2)$$

양쪽 플랜지의 폭과 두께가 같을 경우 식 (1)은 식 (3)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 + \frac{2}{\delta_2 \omega_2^3} \left(\frac{SFr - SS \cdot LFR}{FFr - FS \cdot LFR}\right)_2 = 0 \quad (3)$$

또한 좌굴이 발생하면 1, 2, 3번 판의 좌굴응력이 모두 같으므로 각 판요소들의 국부좌굴계수 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$k_1 = k_2 \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 = k_3 \left(\frac{b_1}{b_3}\right)^2 \left(\frac{t_3}{t_1}\right)^2 \quad (4)$$

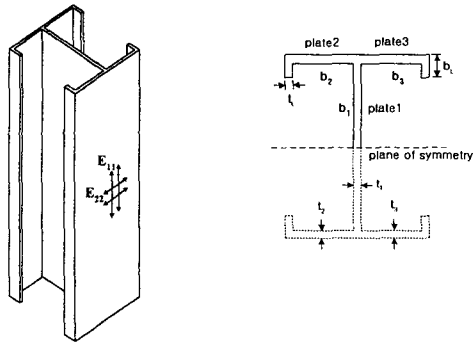
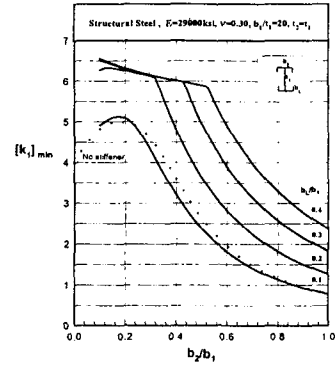


그림 2. 연단에 비대칭보강재가 설치된 I형 단면

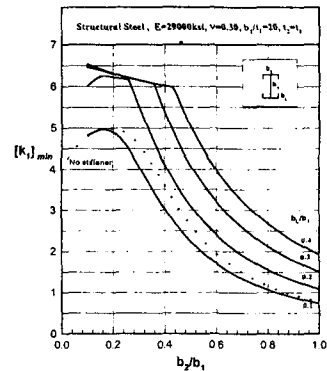
위의 식 (3)을 사용하면 비대칭연단보강재가 설치된 I형 단면의 최소국부좌굴계수를 구할 수 있다.

5. 결과분석 및 고찰

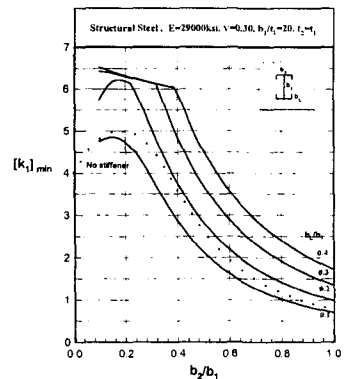
비대칭연단보강재가 설치된 I형 단면 압축재의 국부좌굴해석식을 사용하여 복부판의 최소국부좌굴계수와 형상비에 따른 복부판의 최소국부좌굴계수를 등방성 재료와 직교이방성 재료에 대해 각각 그래프로 나타내면 다음과 같다.



(a) Case 1

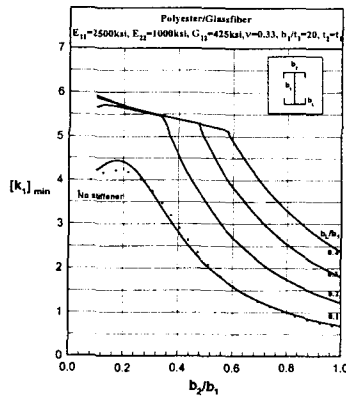


(b) Case 2

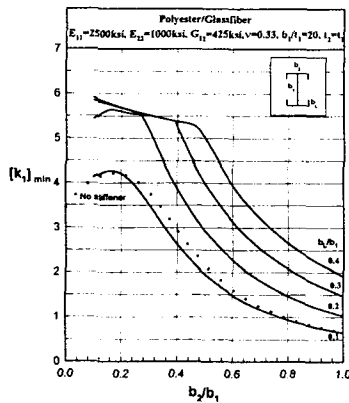


(c) Case 3

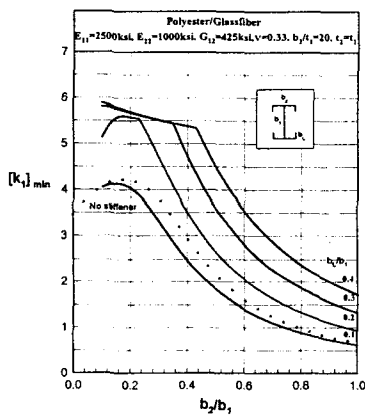
그림 3. 보강재가 설치된 등방성 I형 단면 압축재 복부판의 최소국부좌굴계수와 형상비의 관계



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

그림 4. 보강재가 설치된 직교이방성 I형 단면 압축재 복부판의 최소국부좌굴계수와 형상비의 관계

보강재를 보요소로 간주하였기 때문에 그림 3과 그림 4에서 보여준 바와 같이 보강재의 단면2차모멘트는 판의 좌굴강도 증가에 큰 역할을 하게 되므로 단면2차모멘트가 큰 비대칭연단보강재가 설치된 압축재의 복부판의 최소국부좌굴계수가 증가됨을 알 수 있다. 보강재(보요소)의 단면2차모멘트 계산에서 단면2차모멘트는 Case 1이 가장 크고 Case 3이 가장 작으므로 좌굴계수에서도 그 영향이 그대로 반영되어 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 직교이방성 재료로 구성되어 있는 개방단면 압축재(I형 단면)의 국부좌굴강도를 증가시키기 위해 비대칭연단보강재를 설치하는 방법에 대해 이론적으로 검토하였다. 연단보강재의 휨강성으로 인해 플랜지의 국부좌굴강도가 증가 됨을 알 수 있었다. 연단보강재의 휨강성 계산에서 단면2차모멘트가 휨강성에 가장 큰 영향을 주므로 단면2차모멘트를 어떤 축을 기준으로 계산하느냐에 따라서 연단보강재의 보강효과를 다르게 계산된다.

본 연구에서는 가능성이 큰 3가지 경우를 모델링하여 이론적으로 보강효과를 검토하였기 때문에 실제의 좌굴거동에 부합되는 모델링이 되기 위해서는 실험적 연구를 포함한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- (1) Bulson, P. S., Local Stability and Strength of Structural Section, Military Engineering Experimental Establishment, Christchurch, Hants., New York, 1969.
- (2) Timoshenko, S. P. and Gere, J. M., *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1963.
- (3) Dwight, J. B., Aluminium Sections with Lipped Flanges and Their Resistance to Local Buckling. Symposium on Aluminium in Structural Engineering, Aluminium Federation, June, 1964.
- (4) 정상균, Elastic Buckling of an Orthotropic Open Section Compression Member with Edge Stiffeners, *홍익대학교 석사학위논문*, 1997.
- (5) Bulson, P. S., *The Stability of Flat Plates*, American Elsevier Publishing Company Inc., New York, 1969.