

연단보강된 직교이방성 Channel 단면 압축재의 탄성국부좌굴

최원창* · 정상균** · 윤순중***

Elastic Local Buckling for Orthotropic Channel Section Compression Members with Edge Stiffeners

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

Key Words: orthotropic, compression members, local buckling, edge stiffeners.

Abstract

This paper presents the analytical investigation pertaining to the local buckling behavior of orthotropic channel section compression members stiffened with unsymmetric stiffeners at its free edges. In the analysis, the edge stiffener is modeled as a beam element or a plate element. The result of both cases is presented in graphical form so that the effects of edge stiffeners on the local buckling strength of edge stiffened channel section member can be found.

기호설명

E_{11}, E_{22} : 재료의 성질방향 1과 2에 대한 탄성계수
 D_{11}, D_{22} : 재료의 성질방향 1과 2에 대한 판의 휨강성
 G_{12} : 직교이방성 판의 전단탄성계수
 k : 판의 좌굴계수
 ν_{12}, ν_{21} : 재료의 성질방향 1과 2에 대한 포아슨 비
 λ : 판의 길이와 폭의 비 (= a/b)
 χ, ψ : 초월함수에 사용된 매개변수
 α, β : 지배미분방정식의 해의 매개변수

1. 서 론

구조용 압축재의 좌굴문제에 대한 연구는 여

러 분야에서 폭넓게 진행되어 왔으며 일반 구조용 강재의 경우 많은 이론적, 실험적 연구결과들을 토대로 합리적인 설계식이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 섬유보강 열경화성 플라스틱 복합재와 같은 직교이방성재료는 각종 산업 시설물에서 그 사용이 날로 증가되고 있음에도 불구하고 직교이방성 압축재의 좌굴거동에 대한 연구가 아직은 미흡한 실정이다.

개방단면 압축재의 국부좌굴강도를 증가시키기 위한 방법중의 하나로 압축재의 연단에 보강재를 하중작용방향과 평행하게 설치할 경우 개방단면 압축재의 국부좌굴거동은 보강재의 폭에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 연단에 보강재가 내측 또는 외측으로 설치된 직교이방성 Channel 단면 압축재의 보강재를 보요소와 판요소로 각각 모델링한 경우에 대한 국부좌굴해석을 정밀해법으로 유도하였다. 각각의 경우에 대해 유도된 좌굴해석식을 사용하여 직교이방성⁽¹⁾과 등방성 압축재의 복부와 보강재의 폭비(b_L/b_w)에

* 홍익대학교 대학원 토목공학과 석사과정

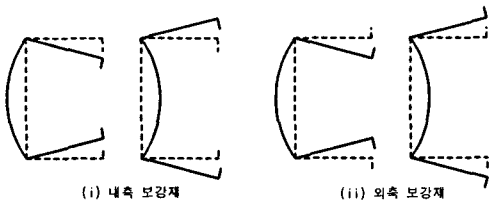
** 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 홍익대학교 토목공학과 부교수

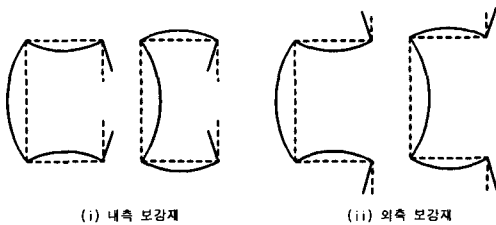
대한 좌굴응력을 그래프로 제시하였으며, 그 결과를 등방성 Channel 단면 압축재에 대한 이론적, 실험적 연구결과 및 유한요소해석에 의한 연구결과와 비교 검토하였다.

2. 연단보강재가 설치된 직교이방성 Channel 단면 압축재의 국부좌굴거동

Channel 단면 압축재의 좌굴강도를 증가시키는 방법으로 연단에 보강재를 내측 또는 외측으로 설치할 경우 보강재의 폭이 작으면 플랜지의 연단에서 보강재의 강축에 대한 휨강성이 작아서 그림 1(a)와 같이 플랜지와 보강재 접합부에서 면외치짐이 발생하게 되며, 이 경우 보강재는 보거동을 하는 요소로 간주될 수 있다. 그러나 보강재의 폭이 증가하게 되면 그림 1(b)와 같이 보강재와 플랜지의 접합부가 직선을 유지하는 국부좌굴이 발생하므로 보강재는 판요소로 간주되어져야 한다^{(2),(3)}. 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같이 연단에 보강재가 내측 또는 외측으로 설치된 직교이방성 Channel 단면 압축재의 보강재를 보요소와 판요소로 각각 모델링하고 각 경우에 대한 국부좌굴해석식을 정밀해법으로 유도하였다.



(a) 보강재가 보거동을 하는 경우



(b) 보강재가 판거동을 하는 경우

그림 1. 국부좌굴이 발생한 Channel 단면 압축재의 단면 모양

3. 보강재가 설치된 직교이방성 Channel 단면 압축재의 국부좌굴해석식

3.1 보강재를 보요소로 간주한 경우

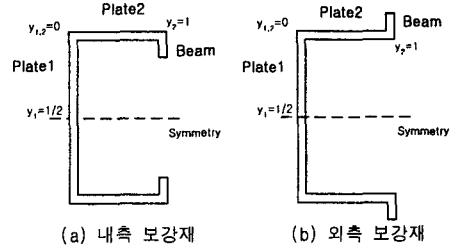


그림 2. 보요소 보강재

그림 2(a,b)와 같이 보요소 보강재가 설치된 Channel 단면 압축재의 각 판요소의 좌굴에 대한 지배미분방정식으로부터 일반해를 구하고 구조재를 이루는 각 판요소의 경계조건과 판요소들 접합부의 경계조건, 그리고 보강재와 판요소 접합부의 경계조건 등을 고려하여 국부좌굴해석식을 유도하면 다음 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 첨자 1, 2는 각각 복부와 플랜지를 나타낸다⁽⁴⁾.

$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 + \left(\frac{SFr - SS \cdot LFR}{FFr - FS \cdot LFR}\right)_2 = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 SSy, FSy, SFr, FFr, SS, FS는 하중이 재하되지 않는 두변의 경계조건에 따른 판하나의 좌굴해석식으로 부록⁽⁵⁾에 수록하였다. 또한 LFR은 보요소 보강재와 관련된 항으로 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$LFR = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \left\{ b_L D_{III} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - A_L \sigma_x \right\} \quad (2)$$

식 (2)에서 보강재의 휨강성(D_{III})은 플랜지 중립축에서의 값을 사용하였으며 비틀림강성의 영향은 미소하다고 보고 되었으므로 무시하였다⁽⁴⁾. 좌굴응력은 유도된 식으로부터 구해진 국부좌굴계수 및 재료의 역학적 성질과 판의 치수를 사용하여 구할 수 있다⁽⁴⁾.

3.2 보강재를 판소로 간주한 경우

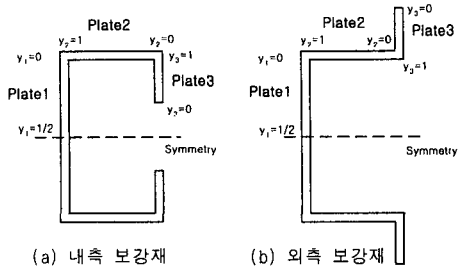


그림 3. 판요소 보강재

그림 3 (a,b)와 같이 보강재가 판요소로 간주될 경우 한쪽 대칭부가 2개 이상의 접합부를 갖게 되므로 여러 개의 판요소가 연속적으로 접합된 경우에 대하여 국부좌굴해석식을 유도하여야 한다. 부재를 이루는 각 판요소에는 독립적인 좌표를 고려하여야 하며 판요소의 지배미분방정식으로부터 일반해를 구해 구조재를 이루는 각 판요소의 경계조건과 판요소들 사이의 접합부의 경계조건을 고려하여 국부좌굴해석식을 유도하면 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 첨자 1, 2, 3은 각각 복부와 플랜지 그리고 판요소 보강재를 나타낸다⁽⁶⁾.

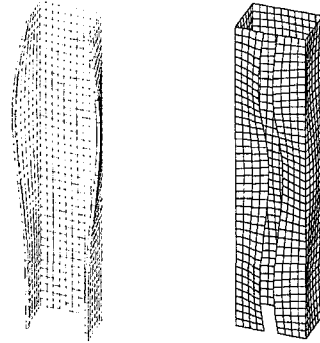
$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 + \left(\frac{SS}{FS}\right)_2 + \left(\frac{SFR}{FFr}\right)_3 - \left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 \left(\frac{FF}{FS}\right)_2 \left(\frac{SFR}{FFr}\right)_3 = 0 \quad (4)$$

좌굴응력은 유도된 식으로부터 구해진 국부좌굴계수 및 재료의 역학적 성질과 판의 치수를 사용하여 구할 수 있다.

4. 유한요소해석

이론적인 좌굴해석 방법중 하나인 유한요소법을 사용하여 연단보강된 개방단면 압축재의 좌굴해석을 수행하였다. 본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 GTSTRUDL⁽⁷⁾을 사용하였으며 면의 처짐 및 면내 변위가 발생할 수 있는 자유도를 가지는 SBHQ6 (Stretching and Bending Hybrid Quadrilateral) 요소를 사용하였다.

해석에 사용된 부재는 연단에 보강재가 내측 또는 외측에 설치된 Channel 단면으로 부재의 길이를 12 in (30.48 cm)로 일정하게 하고 직교이방성 등방성 압축재의 복부와 보강재의 폭비(b_l/b_w)를 변화시켜가며 유한요소해석을 수행하였다.

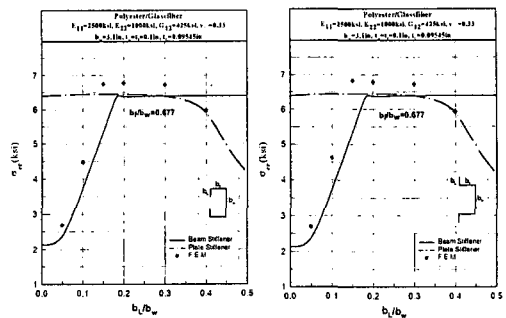


(a) 보요소 보강재 (b) 판요소 보강재
그림 4. 보강재 폭에 따른 압축재의 좌굴거동

그림 4 (a,b)는 내측 보강재가 설치된 Channel 단면의 좌굴거동을 보강재의 폭에 따라 나타낸 것으로 이론식의 모델링 방법과 유사하게 좌굴거동을 나타낸다.

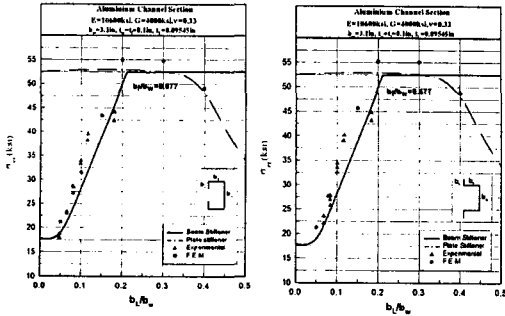
5. 해석결과

본 연구에서는 내측 또는 외측 보강재를 각각 보요소와 판요소로 모델링하여 유도한 국부좌굴해석식을 사용하여 직교이방성 Channel 단면 압축재의 복부와 보강재의 폭비(b_l/b_w)의 변화에 따른 좌굴응력과 유한요소해석으로부터 구한 좌굴응력을 그림 5에 제시하였다. 여기서 1 ksi = 6.895 Mpa, 1 in = 2.54 cm 이다. 등방성재료의 역학적 성질⁽²⁾을 식 (1), (4)에 대입하여 얻은 이론적인 결과, 실험값⁽²⁾, 그리고 유한요소해석결과를 그림 6에 나타내었다.



(a) 내측 보강재 (b) 외측 보강재

그림 5. 연단보강된 직교이방성 Channel 단면 압축재의 좌굴응력



(a) 내측 보강재 (b) 외측 보강재

그림 6. 연단보강된 등방성 Channel 단면 압축재의 좌굴응력

6. 결론

직교이방성 판요소로 이루어진 Channel 단면 압축재의 연단에 보강재가 설치된 경우 보강재를 보요소와 판요소로 모델링하여 각 경우에 대한 국부좌굴해석식을 유도하였고 유도된 이론식에 의해 계산된 좌굴응력과 실험에 의한 좌굴응력과의 차는 1%~20% 이내에 있으며 유한요소해석에 의한 좌굴해석은 이론식에 의해 수행된 좌굴해석과 유사한 개형을 나타내었다.

보강재를 보요소로 모델링하였을 경우 복부와 보강재의 폭비(b_L/b_w)가 증가함에 따라 좌굴응력이 증가하는 경향을 나타내다가 보강재를 판요소로 모델링한 경우의 좌굴응력의 최대값으로 수렴해 감을 알 수 있었다.

보강재를 판요소로 모델링하였을 경우 복부와 보강재의 폭비(b_L/b_w)가 증가함에 따라 좌굴응력은 일정한 값을 나타내다가 보강재 폭과 복부 폭의 비가 약 0.3을 초과하게 되면 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 보강재를 판요소로 간주하였을 경우 보강재가 플랜지나 복부보다 먼저 좌굴을 일으켜 전체부재의 국부좌굴을 유발하는 결과라고 판단된다.

참고 문헌

- Strongwell (1997) *Extern Fiberglass Structural Shapes Design Manual*, Morrison Molded Fiberglass Company, Bristol, Virginia.
- Dwight, J. B. (1964) "Aluminium Sections with Lipped Flanges and Their Resistance to Local

Buckling," Symposium on Aluminium in Structural Engineering, Aluminium Federation, June.

- Thomas, P. D., and George, W. (1981) "Edge Stiffeners for Thin-Walled Members", Journal of the Structural Division, February.
- Jeong, S. K. (1998) "Elastic Buckling of Orthotropic Open Section Compression Members with Edge Stiffeners", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 2, No. 4, pp.377-386.
- Lee, S. S. (1999) "Elastic Buckling of Edge Stiffened Orthotropic Plate under Uniform Compression", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 3, No. 2, pp.101-111.
- Chilver, A. H. (1953) "A Generalized Approach to the Local Instability of Certain Thin-Walled Struts", *Aeronautical Quarterly*, Vol. IV, August.
- GTSTRUDL (1999). *GTSTRUDL User's Manual*, Latest Revision, K, May, GTICS Systems Laboratory, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.

부록

경계조건	직교이방성판의 좌굴해석식
S-Fr	$SFr = \frac{Dz^3}{b^3} (a^2 + \beta^2) (a\beta^2 \cosh a \sin \beta - \beta^2 \sinh a \cos \beta)$
F-Fr	$F Fr = -\frac{Dz^2}{b^2} \{ 2a\beta x \phi + a\beta (x^2 + \phi^2) \cosh a \cos \beta + (\beta^2 x^2 - a^2 \phi^2) \sinh a \sin \beta \}$
S-Sy	$SSy = -\frac{Dz^2}{b^2} \{ a\beta (a^2 + \beta^2)^2 \cosh \frac{a}{2} \cos \frac{\beta}{2} \}$
F-Sy	$FSy = -\frac{Dz^2}{b^2} a\beta (a^2 + \beta^2) \left(a \sinh \frac{a}{2} \cos \frac{\beta}{2} + \beta \cosh \frac{a}{2} \sin \frac{\beta}{2} \right)$
S-F	$SF = -\frac{Dz^2}{b^2} (a^2 + \beta^2) (a \cosh a \sin \beta - \beta \sinh a \cos \beta)$
S-S	$SS = \frac{Dz^2}{b^4} (a^2 + \beta^2) \sinh a \sin \beta$
F-F	$FF = -\frac{1}{b^2} \{ 2a\beta (1 - \cosh a \cos \beta) + (a^2 - \beta^2) \sinh a \sin \beta \}$
χ, ψ	$\chi = a^2 - \nu_{12} \left(\frac{m\pi}{\lambda} \right)^2, \quad \psi = \beta^2 + \nu_{12} \left(\frac{m\pi}{\lambda} \right)^2$