

펄트루전 구조압축재의 국부좌굴 설계기준 개발에 관한 연구

A Study on the Design Criteria Relating to the Local Buckling of Pultruded FRP Structural Compression Members

주 형 중¹⁾ · 이 승 식²⁾ · 윤 순 종^{3)†}
Joo, Hyung Joong · Lee, Seung Sik · Yoon, Soon Jong

요 약 : 섬유강화 플라스틱은 강재의 단점을 보완할 수 있는 다양한 장점을 가지고 있기 때문에 현재 건설구조재로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 펄트루전 FRP를 구조압축재로 사용하기 위한 설계식의 개발에 관한 연구의 일부로서 설계강도에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 국부좌굴거동에 관한 연구이다. 직교이방성 판요소로 구성된 압축부재의 설계에서 국부좌굴의 발생 여부, 국부좌굴을 주도하는 판요소의 구별 등은 매우 중요한 설계요소이며, 이러한 거동을 정밀해법에 의해 계산하기란 매우 복잡하고 난해하다. 따라서, 본 연구에서는 펄트루전 압축부재의 설계기준 개발을 위해 필요한 국부좌굴계수를 정밀해법, 에너지법, 대개변수 해석 등의 방법을 적용하여 정확하면서도 쉽게 직교이방성판의 좌굴계수와 펄트루전 압축부재의 국부좌굴계수를 계산할 수 있는 근사식을 제안하였으며 제안된 근사식을 사용하여 펄트루전 압축부재의 국부좌굴발생 여부 및 국부좌굴을 주도하는 판요소를 구별할 수 있는 방법을 제안하였다.

ABSTRACT : Since FRP materials have various advantages over steel, many research activities to use them for the civil engineering applications are now in progress. The present paper deals with the local buckling behavior of FRP pultruded members as a first step toward the development of design criteria. In the design of compression members, it is very important to know not only if local buckling occurs or not but also which plate component governs local buckling, but it is not easy to perform this work in a rigorous manner. In the present paper, a simple and accurate equation which can compute the coefficients of buckling of orthotropic plates and local buckling of pultruded compression members is suggested by performing rigorous analysis, energy analysis, and parametric study. The local buckling strength and the plate component governing the local buckling behavior of thin-walled pultruded compression members can be easily determined by using the proposed equation.

핵심용어 : 섬유강화플라스틱, 펄트루전, 직교이방성, 압축부재, 국부좌굴, 설계기준

KEYWORDS : FRP, Pultrusion, Orthotropic, Compression Member, Local Buckling, Design Criteria

1. 서론

섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Plastic, FRP) 제조공정의 발달, 특히 펄트루전공정(Pultrusion Process)이나 필라멘트 와인딩공정(Filament Winding Process) 등과 같이 연속적으로 부재를 생산할 수 있는 공법들이 급속히 개발되고 발전하면서 건설재료로 사용하기에는 비경제적이라고 인식되어 왔던 FRP가 기존 건설재료들과 경쟁하기에 이르렀을 뿐만 아니라 강-콘크리트 합성재, 콘크리트-FRP 합성재, 강-콘

크리트 합성재와 같이 상호보완적인 관계까지 이르렀다. 특히, 펄트루전 FRP는 다양한 단면을 길이에 제한이 없이 생산할 수 있기 때문에 구조부재로 적당하다고 할 수 있으며 대부분의 보강섬유가 부재의 축방향으로 배치되므로 재료의 성질은 직교이방성으로 가정할 수 있다. 그러나 등방성 부재인 강재에 비해 구조적 해석절차가 복잡하고 보편화된 설계기준이 확립되어 있지 않기 때문에 FRP를 건설분야의 구조재로 사용하기 위해서는 이론적, 실험적 연구를 통한 설계기준확립이 시급한 실정이다.

1) 홍익대학교 토목공학과 박사과정(hj5898@daum.net)

2) 정희원, SK건설 연구소, 공학박사(drslee@skec.co.kr)

3) 교신저자, 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수, 공학박사

(Tel. 02-320-1479, Fax. 02-3141-0774, E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

필트루전 구조압축재는 단면의 효율적인 사용을 위해 대부분 판요소로 구성된 박판부재로 생산하여 사용하고 있으며, 이러한 부재는 강도는 크지만 강성이 비교적 작기 때문에 설계강도는 주로 좌굴강도에 의해 결정된다. 본 연구는 압축부재의 여러 가지 좌굴모드 중 국부좌굴거동에 대해 조사하였다. 구조재의 국부좌굴은 구조재를 구성하고 있는 판요소의 좌굴을 의미하므로 국부좌굴거동을 조사하기 위해서는 우선 구조재를 구성하고 있는 판요소의 좌굴에 대한 연구가 선행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 구조재를 구성하는 필트루전 평판의 좌굴거동에 대한 연구를 수행하여 하중이 재하되지 않는 변의 다양한 경계조건에 따른 좌굴계수를 정밀해법과 에너지법을 사용하여 결정하였고, 매개변수해석을 통해 좌굴계수를 추정할 수 있는 근사식을 제안하였다. 또한, 직교이방성판의 좌굴거동에 대한 연구결과를 사용하고, 정밀해법, 에너지법을 통한 국부좌굴 해석 및 매개변수 해석 등을 수행하여 다양한 단면을 갖는 필트루전 압축부재의 국부좌굴강도를 결정할 수 있는 근사식을 제안하였으며, 근사식들을 적용하여 국부좌굴 발생 여부와 국부좌굴을 주도하는 판요소의 구별 방법을 제안하였다.

2. 직교이방성판의 탄성좌굴

그림 1은 하중이 재하되지 않는 변이 임의의 경계조건을 가지며 면내등분포압축력을 받는 필트루전 평판을 나타낸 것이다. 이러한 필트루전 평판은 필트루전공정 특성상 재료의 성질을 직교이방성으로 가정할 수 있기 때문에 그림 1에서 하중이 재하되는 방향의 탄성계수와 그에 직각되는 방향의 탄성계수를 각각 E_{11} , E_{22} 로 나타내었다.

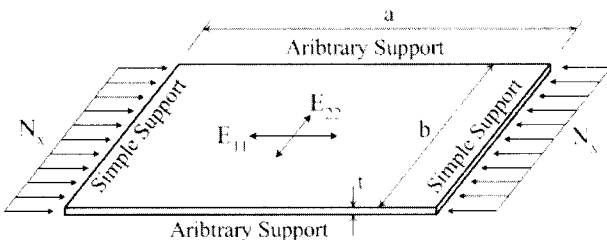


그림 1. 면내 등분포 압축력을 받는 직교이방성판

그림 1에 나타난 직교이방성판에 면내 등분포 압축력 N_x 가 작용하여 좌굴이 발생할 때 내부에 축적된 변형에너지와 면내 등분포 압축력이 판에 대해 한 일이 같다는 조건을 적용하고, 좌굴계수에 대해 정리하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다 (Timoshenko, 1961; Bulson, 1969).

$$k_p = \frac{C_1}{\phi_m^2} + C_2\phi_m^2 + C_3 \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ_m 은 판의 형상비(aspect ratio)를 half-sine 곡선의 수로 나눈 값이고, $C_i, i=1,2,3$ 는 직교이방성판의 폭방향 처짐식을 적분한 항과 재료의 성질로 구성된 계수로서 식 (2), (3), (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \quad (2)$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}} B_1 \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} B_2 - 2\nu_{21} \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} B_3 \quad (4)$$

식 (2), (3), (4)에서 섬유가 배치된 방향과 그 직각방향에 대한 탄성계수는 각각 E_{11} , E_{22} 이고, 전단탄성계수는 G_{12} 이며 각 방향에 대한 포아송비는 각각 ν_{12} , ν_{21} 으로 표현하였다. 또한, 식 (3), (4)에서 $B_i, i=1,2,3$ 은 하중이 재하하는 방향에 대한 직각방향(폭방향)의 처짐식을 적분한 항들의 곱으로 표현된 변수이다.

에너지법에 의해 유도된 식 (1)을 사용하여 직교이방성판의 좌굴해석을 수행할 경우 직교이방성판의 폭방향 처짐식을 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건에 따라 적절히 가정해야 하고 가정된 처짐식을 적분해야 하기 때문에 가정된 처짐식에 따라 오차가 크게 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 단순계산으로 정확한 직교이방성판의 좌굴계수를 계산할 수 있는 근사식을 다음과 같이 제안하였다.

식 (1)을 ϕ_m 으로 미분하고, 정리하면 최소좌굴계수를 나타낼 때의 ϕ_m 은 식 (5)와 같이 표현되고, 식 (5)의 ϕ_m 을 식 (1)에 대입하면 최소좌굴계수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_m = \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$k_{min} = 2\sqrt{C_1 C_2} + C_3 \quad (6)$$

식 (5), (6)에 정밀해법으로부터 구한 직교이방성판의 최소좌굴계수와 최소좌굴계수 값을 나타낼 때의 ϕ_m 을 적용하고 각

방향의 탄성계수로부터 계산된 C_1 을 대입하면 계수 C_2 , C_3 를 결정할 수 있다.

식 (3)에서 계수 C_2 는 변수 B_1 과 재료성질의 곱으로 표현되어 있다. 이 식의 양변에 $\sqrt{E_{11}/E_{22}}$ 를 곱하면 우변은 재료의 성질과 무관한 B_1 만 남게 된다. 즉, 재료의 성질이 변해도 좌변은 항상 일정한 값을 갖는다. 그러나, 식 (4)에서 우변의 두 항들이 모두 직교이방성판의 폭방향 처짐식과 재료의 성질에 관련되어 있기 때문에 C_2 의 경우와 같이 단순한 작업에 의해서 우변이 일정한 값을 갖게 표현할 수 없다. 따라서, 표 1에 나타난 다양한 재료의 역학적 성질을 기준에 연구되었던 정밀해법(Yoon, 1993)에 대입하여 매개변수 해석을 수행한 결과 식 (4)의 좌변에 재료의 역학적 성질 조합을 곱하여 재료의 성질이 변해도 일정한 값을 가지게 하는 식으로 표현할 수 있었다. 이상에서 설명한 식들을 다시 C_2 , C_3 에 대해 정리하여 표 2와 같이 각 경계조건별로 나타내었다.

표 1. 해석에 사용된 재료의 역학적 성질 (Shih, 1994)

재료	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
GFRP (E-glass/Vinylester)	17.2	6.9	2.9	0.33
GFRP (E-glass/Polyester)	31.6	7.0	3.0	0.35
BFRP(B(4)/N5505)	203.9	18.5	5.6	0.23
CFRP(AS/H3501)	138.0	9.0	7.1	0.30
CFRP(IM6/Epoxy)	203.0	11.2	8.4	0.32
Structural Steel	200.0	200.0	76.9	0.30

표 2. 경계조건에 따른 C_2 , C_3 의 표현

경계조건	C_2	C_3
SS	$\sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}}$	$\frac{4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} + 2\nu_{21}\sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$
SFr	0	$\frac{1.22G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}}$
FF	$5.182\sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}}$	$\frac{4.85G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} + 2.42\nu_{21}\sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$
FFr	$0.133\sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}}$	$\frac{1.78G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} - 0.243\nu_{21}\sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$

표 2에 나타난 경계조건은 그림 1에서 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건으로서 SS, SFr, FF, FFr은 각각 단순지지-단순지지, 단순지지-자유단, 고정지지-고정지지, 고정지

지-자유단을 나타낸다. 표 2에 나타난 값들을 식 (1)에 대입하여 계산한 직교이방성판의 좌굴계수는 정밀해법에 의한 좌굴계수와 비교하여 그림 2에 GFRP를 예로 들어 나타내었으며, 정밀해법과 비교할 때 폭방향 처짐식을 가정할 필요가 없으므로 그에 따른 오차를 줄일 수 있고, 단순계산에 의해 직교이방성판의 좌굴계수를 계산할 수 있으며, 해석결과를 비교할 때 최대오차는 약 1.5% 이내로서 정확한 값을 얻을 수 있었다.

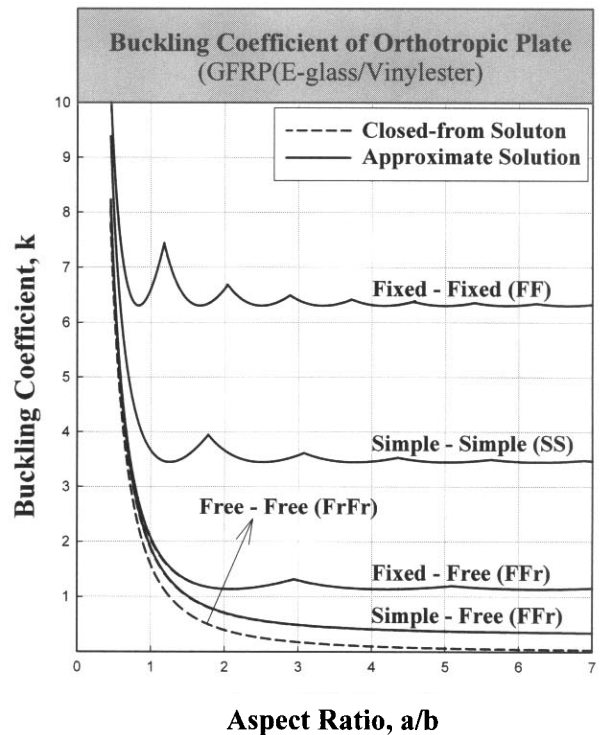


그림 2. 직교이방성판의 형상비에 따른 좌굴계수

3. 필트루전 FRP 압축재의 국부좌굴

3.1 L, T, Box형 단면 압축재의 탄성국부좌굴

필트루전 구조압축재는 단면의 효율적 사용 및 재료의 경제적 사용 등을 위해 판요소로 구성되어 있다. 이와 같이 판요소로 구성된 필트루전 구조압축재의 국부좌굴거동에 대한 연구는 이미 여러 차례 연구, 보고된 바 있으므로 본 연구에서는 기존문헌의 연구결과를 도입하여 국부좌굴계수를 얻기 위한 근사식을 제안하였다.

그림 3은 등분포 압축력을 받는 필트루전 L, T, Box형 단면 압축부재이다. 그림 3에서 a, b는 각각 부재의 길이와 각 판요소들의 폭이며, 첨자 1, 2는 각각 폭이 긴 판요소와 폭이 짧은 판요소를 의미한다. 이러한 필트루전 L, T, Box형 단면 압축부재에 대해 정밀해법으로부터 유도된 국부좌굴

해석식은 표 3에 나타내었다(Yoon, 1993). 표 3의 국부좌굴해석식에서 사용된 기호 SFr , FFr , SSy 는 각각 단순지지-자유단, 고정지지-자유단, 단순지지-대칭면에 대해 정밀해법으로부터 유도된 직교이방성판의 좌굴해석식이고, δ 는 각 판요소의 폭비(b_1/b_2)를 나타낸다.

표 3의 L형 단면의 국부좌굴해석식으로부터 해석한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 국부좌굴계수는 L형 단면 압축재를 구성하는 판요소 중 폭이 긴 판요소의 좌굴계수이다.

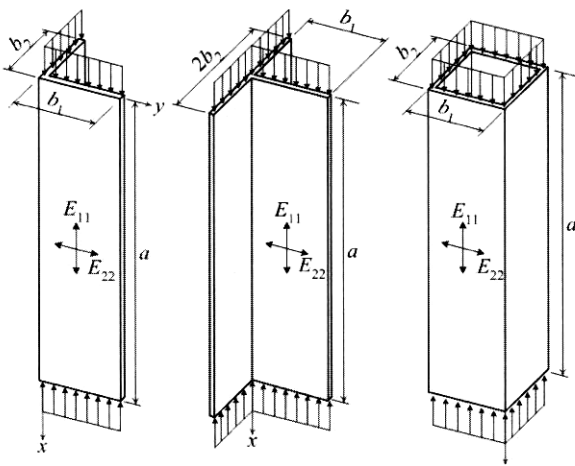


그림 3. 등분포 압축력을 받는 필트루전 L, T, Box형 단면 압축재

표 3. L, T, Box형 단면 압축재의 국부좌굴해석식

단면	국부좌굴 해석식
L형 단면	$\frac{SFr_1}{FFr_1} + \frac{1}{\delta} \frac{SFr_2}{FFr_2} = 0$
T형 단면	$\frac{SFr_1}{FFr_1} + \frac{2}{\delta} \frac{SFr_2}{FFr_2} = 0$
Box형 단면	$\frac{SSy_1}{FSy_1} + \frac{1}{\delta} \frac{SSy_2}{FSy_2} = 0$

구조압축재의 국부좌굴해석은 인접판에 의한 탄성구속효과를 고려한 판 하나의 좌굴해석으로 대신할 수 있다(Timoshenko, 1961).

L형 단면 압축재에서 두 판요소의 폭과 두께가 동일할 경우 접합부의 경계조건을 회전에 대해 단순지지로 가정한 직교이방성판의 좌굴해석으로 대치할 수 있음을 그림 4의 해석결과($\delta = 1.0$)로부터 확인할 수 있다. 또한, 판요소들의 폭비를 증가시키면 상대적으로 폭이 긴 판요소의 좌굴계수는 감소하여 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건이 자유단-자유단인 직교이방성판의 좌굴계수로 수렴해가는 경향을 나타내고 있다. 반대로, 상대적으로 폭이 짧은 판요소의 경우 접합부의 경계조건은 단순지지된 경계조건에서 고정지지된 경계조건을 갖는 판의 좌굴계수로 수렴해 간다.

T형 단면 압축재는 표 3에 나타난 정밀해법으로 해석한 결과 좌굴계수가 L형 단면 압축재의 경우와 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그러나, Box형 단면 압축재에 대해 정밀해법으로 해석한 결과 모든 판요소들이 인접판에 의해 구속되어 있고 상대적으로 폭이 긴 판요소의 접합부에서 경계조건의 범위는 단순지지와 자유단 사이에 존재하고 상대적으로 폭이 짧은 판요소에서 경계조건의 범위는 단순지지-단순지지와 고정지지-고정지지 사이에 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 각 단면에서 접합부의 한계상태 경계조건을 고려한 필트루전 압축재의 국부좌굴계수의 범위는 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

표 4. 필트루전 압축재를 구성하는 판요소들의 좌굴계수 범위

단면	각 판요소의 좌굴계수의 범위	
	폭이 긴 판요소	폭이 짧은 판요소
L형 단면	$k_{eFr} > k_{L1} \geq k_{eSFr}$	$k_{SFr} > k_{L2} \geq k_{FrFr}$
T형 단면	$k_{FrFr} > k_{T1} \geq k_{SFr}$	$k_{SFr} > k_{T2} \geq k_{FrFr}$
Box형 단면	$k_{FrFr} > k_{B1} \geq k_{SS}$	$k_{SS} > k_{B2} \geq k_{FrFr}$

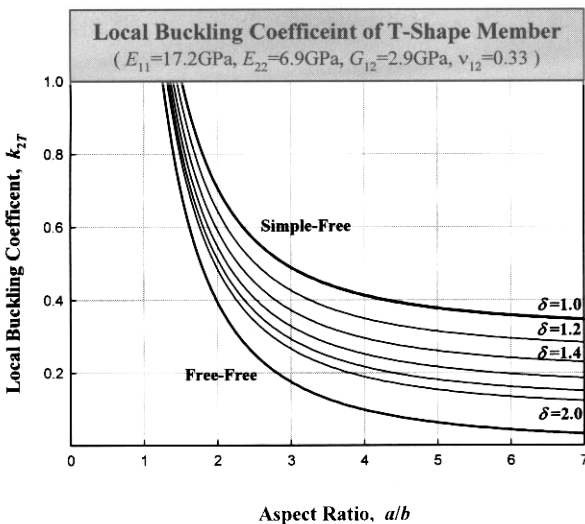


그림 4. 필트루전 L형 단면 압축재의 국부좌굴계수

앞서 설명한 바와 같이 L형, T형 단면에서 상대적으로 폭이 긴 판요소의 좌굴계수는 형상비에 따라 연속적으로 변화하는 유사한 모양을 나타내고, 폭비의 변화율에 대한 좌굴계수의 변화율이 일정하게 나타나며 모든 곡선들의 형태가 일정한 경향을 나타내고 있음을 그림 4에서 확인할 수 있다. 따라서, 접합부의 경계조건을 고려하고 폭비의 변화에 따른 매개변수 해석을 수행하여 필트루전 L, T형 단면 압축재의 국부좌굴계수를 식 (7), (8)과 같이 나타내었다.

$$k_L = k_{SFr} - (k_{SFr} - k_{FrFr}) \times (0.081\delta^3 - 0.765\delta^2 + 2.443\delta - 1.737) \quad (7)$$

$$k_T = k_{SFr} - (k_{SFr} - k_{FrFr}) \times (0.072\delta^3 - 0.7\delta^2 + 2.315\delta - 1.696) \quad (8)$$

식 (7), (8)은 판요소들의 폭비 범위가 $1 \leq \delta \leq 3.5$ 인 경우에 대해 유도된 근사식이며 각각의 좌굴계수 계산에 사용되는 단순지지-자유단인 직교이방성판의 좌굴계수는 2절에서 유도한 근사식을 사용하면 쉽고도 정확하게 국부좌굴계수를 계산할 수 있다.

Box형 단면의 경우 국부좌굴계수는 판의 형상비가 증가할 수록 half-sine 곡선모양의 수에 따라 주름진 모양(Garland Curve)을 나타내며 접합부의 한계상태 경계조건을 나타내는 고정지지-고정지지, 단순지지-단순지지인 직교이방성판의 좌굴계수 또한 형상비가 증가할수록 그림 2에 나타난 바와 같이 half-sine 곡선모양의 수에 주름진 모양을 나타내므로 식 (7), (8)과 같은 관계를 유도하기는 어렵다. 그러나 형상비가 증가하면 좌굴계수값의 변화는 사라지고 결국 최소좌굴계수값에 접근하게 되며, 인접판들의 폭비 변화에 따른 최소좌굴계수 사이에는 일정한 규칙성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 표 4에 나타난 접합부의 경계조건을 고려한 매개변수 해석을 수행하여 상대적으로 긴 판요소에 대한 최소좌굴계수를 식 (9)와 같이 나타내었다.

$$k_B = 2 \left[1 + \left(\frac{2G_{12}(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} + \nu_{21} \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \right) \right] \times (-2\bar{\delta}^3 + 3.438\bar{\delta}^2 - 2.268\bar{\delta} + 1.824) \quad (9)$$

식 (9)에서 $\bar{\delta}$ 는 인접한 판요소들의 폭비(b_2/b_1)를 나타내며, $\bar{\delta}$ 의 범위가 $0 < \bar{\delta} \leq 1$ 일 때 유도된 근사식이다. 이 식에 의한 해석결과는 정밀해법에 의한 해석결과와 비교할 때 정확히 일치하는 결과를 얻을 수 있고, 대부분의 필트루전 압축재에 사용되는 판요소의 형상비는 비교적 큰 값을 가지고 있기 때문에 설계강도를 계산할 때는 최소좌굴계수값을 사용하는 것이 합리적이라고 할 수 있다.

3.2 I형 단면 압축재의 탄성국부좌굴

등분포 압축력을 받는 필트루전 I형 단면 압축재는 그림 5에 나타내었으며 기존의 연구결과 정밀해법으로 유도된 국부좌굴해석식은 식 (10)과 같다(Yoon, 1993). 식 (10)에서 첨자 w, f 는 각각 복부와 플랜지를 의미하고, SSy, FSy 는 각각 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건이 단순지지-대칭면, 고정지지-대칭면을 갖는 정밀해법에 의한 직교이방성판의 좌굴해석식이고, 초월함수로 구성되기 때문에 식 (10)을 사용하여 필트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴 해석을 수행하기 위해서는 수치해석적인 방법을 사용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 필트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴해석을 간단하고 쉽게 수행할 수 있는 근사식을 유도하고자 하였다.

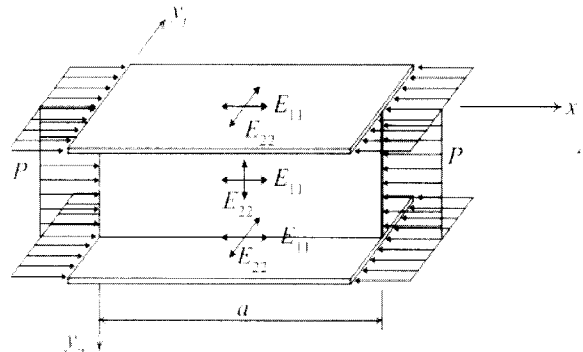


그림 4. 필트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴계수

$$\left(\frac{SSy}{FSy} \right)_w + 2 \left(\frac{t_f}{t_w} \right)^3 \left(\frac{b_w}{b_f} \right) \left(\frac{SFr}{FFr} \right)_f = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 사용하여 수치해석적으로 해석한 결과를 그림 5에 형상비에 따른 플랜지의 좌굴계수로 나타내었다.

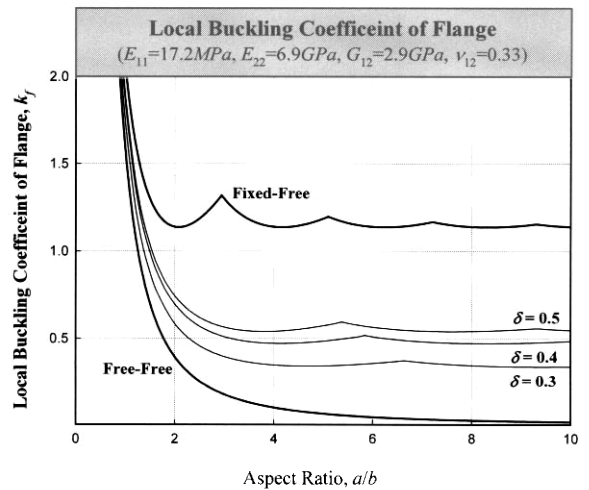


그림 5. 필트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴계수(플랜지)

필트루전 I형 단면 압축부재의 국부좌굴은 앞서 설명한 바와 같이 인접판에 의해 탄성구속된 직교이방성판 하나의 좌굴해석으로 대신할 수 있다. 인접판에 의한 탄성구속효과는 재료의 역학적 성질과 두께가 동일할 경우 인접판의 폭에 따라 변화한다. I형 단면 압축재에서 플랜지의 좌굴계수는 폭비를 변화시켜 해석한 결과 그림 5에 나타난 바와 같이 접합부의 경계조건이 고정지지와 단순지지 사이에 있음을 확인하였다. 즉, I형 단면 압축재의 국부좌굴계수는 하중이 재하되지 않는 변이 고정지지-자유단, 자유단-자유단인 직교이방성판의 좌굴계수 사이에 존재함을 알 수 있다. 이와 유사하게 복부의 좌굴계수는 자유단-자유단, 고정지지-고정지지인 직교이방성판의 좌굴계수 사이에 존재함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 식 (7), (8)에 나타난 바와 같이 하중이 재하되지 않는 변에서 특정경계조건을 갖는 직교이방성판들의 좌굴계수 사이의 상관관계로부터 I형 단면 국부좌굴계수를 근사적으로 표현하기 위한 연구를 수행하였다. 그러나 그림 5에 나타난 바와 같이 고정지지-자유단인 직교이방성판의 좌굴계수는 half-sine 곡선의 수에 따라 주름진 모양(Garland Curve)을 나타내며, 하중이 재하되지 않는 변이 자유단-자유단인 경우 직교이방성판의 좌굴계수는 연속적으로 작아지는 현상을 나타내므로 두 곡선 사이에 변화율은 다르고 일정한 규칙성을 찾기가 매우 힘들다. 따라서 필트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴해석을 단순하고 쉽게 수행하기 위한 근사식을 다음과 같이 유도하였다.

필트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴 해석은 탄성구속된 직교이방성판 하나의 좌굴해석을 대신할 수 있으므로 I형 단면 압축재를 구성하는 플랜지의 좌굴계수를 에너지법에 의해 유도하면 식 (1)과 유사하게 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_f = \frac{C_{1f}}{\phi_m^2} + C_{2f}\phi_m^2 + C_{3f} \quad (11)$$

$$C_{1f} = \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \quad (12)$$

$$C_{2f} = \sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}} B_{1f} \quad (13)$$

$$C_{3f} = \frac{4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} B_{2f} - 2\nu_{21} \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} B_{3f} \quad (14)$$

식 (11)에서 변수 $C_{if}, i=1,2,3$ 은 식 (2), (3), (4)와 유

사하지만 식 (13), (14)에서 하중이 재하되지 않는 폭방향 처짐식에 관련된 상수 $B_{if}, i=1,2,3$ 가 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건을 포함한 변수로서 I형 단면 압축재에서는 인접판에 의한 탄성구속효과를 반영하는 변수라고 할 수 있다. 즉, 식 (11)에서 C_{2f}, C_{3f} 는 재료의 성질과 접합부에서의 탄성구속조건을 모두 포함하고 있는 변수가 된다. 따라서, 변수 C_{2f}, C_{3f} 를 인접판에 의한 탄성구속효과를 반영하는 폭비와 재료의 성질을 포함한 함수로 표현되며, 단순계산에 의해 쉽게 계산할 수 있다면 식 (12)에 의해 필트루전 I형 단면 압축재의 플랜지에 대한 좌굴해석을 수행할 수 있게 된다. C_{2f}, C_{3f} 의 유도과정은 직교이방성판의 좌굴계수를 계산하기 위한 C_2, C_3 의 유도과정과 유사하게 다음과 같은 절차에 의해 결정하였다.

식 (10)의 정밀해법으로부터 얻은 결과를 사용하여 플랜지의 최소좌굴계수와 최소좌굴계수를 나타낼 때의 ϕ_m 을 표 1에 나타난 다양한 재료성질에 대해 계산하고, 이 값들을 식 (5), (6)과 유사하게 식 (11)을 미분하고 정리한 식을 사용하면 C_{2f}, C_{3f} 값을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산된 C_{2f}, C_{3f} 를 플랜지와 복부의 폭비에 따라 그래프로 나타내면 재료별로 다른 값들을 나타내지만 변화의 경향은 유사하게 나타난다. 식 (12), (13)의 관계로부터 식 (13)의 양변에 C_{1f} 을 곱해주면 우변은 인접판의 탄성구속에 관련된 플랜지와 복부의 폭비의 함수로 재료성질에 무관한 식으로 표현되고, 좌변은 C_{2f} 와 재료성질만을 포함하는 식으로 표현된다.

C_{3f} 의 경우 식 (14)에서 우변의 두 항 중 두번째 항의 영향은 첫 번째 항의 영향에 비해 무시할 정도로 작게 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 C_{3f} 의 계산에서 근사적으로 우변의 첫 번째 항만을 고려하였다. C_{2f} 의 경우와 마찬가지로 양변을 $4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})/\sqrt{E_{11}E_{22}}$ 으로 나누고 정밀해법에 의해 계산된 결과들을 사용하여 매개변수 해석을 수행한 결과 폭비 변화와 재료의 성질의 영향을 분리시켜 고려할 수 있는 근사식을 추정할 수 있었다. 이상의 관계들로부터 재료성질에 관계없이 일정한 값을 갖는 값들을 플랜지와 복부의 폭비에 따른 곡선으로 표현하고 회귀분석하여 정리하면 C_{2f}, C_{3f} 를 식 (15), (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{2f} = \frac{-0.0048 + 0.033(b_f/b_w)}{\sqrt{E_{11}/E_{22}}} \quad (15)$$

$$C_{3f} = \{-0.26 + 2.05(b_f/b_w) - 1.82(b_f/b_w)\} \times 4G_{12}(1 - \nu_{12}\nu_{21}) / \sqrt{E_{11}/E_{22}} \quad (16)$$

식 (15), (16)은 플랜지와 복부의 두께 및 재료의 역학적 성질은 동일하며, 폭비(b_f/b_w)는 0.3~0.6으로서 현재 생산되어 사용되고 있는 필트루전 I형 단면의 폭비는 대부분 이에 해당되므로 설계식으로 사용하기에 적합하다. 또한, 식 (15), (16)을 식 (11)에 대입하여 얻은 해석결과는 정밀해법과 비교할 때 최대오차가 1.7% 미만으로서 정확하고도 쉽게 필트루전 I형 단면 압축부재의 국부좌굴해석을 수행할 수 있다.

4. 필트루전 압축재의 국부좌굴강도

직교이방성판의 좌굴계수는 식 (17)과 같이 정의되며 (Timoshenko, 1961), 식 (17)에서 D_{11} , D_{22} 는 각각 부재 축방향과 그에 직각되는 방향의 휨강성으로 직교이방성판의 두께와 재료의 성질로 구성된다.

$$k = \frac{N_x b^2}{\pi^2 \sqrt{D_{11} D_{22}}} \quad (17)$$

식 (17)에 휨강성을 대입하고 면내좌굴하중(N_x)에 대해 정리한 후 판의 두께로 나누어 좌굴응력으로 표현하면 식 (18)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 \sqrt{E_{11} E_{22}}}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})(b/t)^2} \quad (18)$$

재료의 성질과 단면의 크기가 결정되면 좌굴계수를 대입하여 식 (18)에 의해 좌굴응력을 계산할 수 있다. I형 단면 압축재에서 플랜지를 예로 들어 설명하면 플랜지의 좌굴계수(k_f)를 식 (18)의 k 에 대입하고 재료성질 및 플랜지의 폭두께 비를 대입하면 국부좌굴응력을 계산할 수 있다. 또한, 압축부재의 국부좌굴이 발생할 때 각 판요소들의 좌굴응력은 동일하므로 I형 단면 압축재의 경우 각 판요소의 두께와 재료성질이 동일하다고 가정하면 플랜지와 복부의 좌굴계수 사이에는 식 (19)과 같은 관계가 성립하며 이러한 관계는 모든 압축재에 적용시킬 수 있다. 따라서, 압축재를 구성하고 있는 판요소 중 하나의 판요소에 대한 좌굴계수를 알면 나머지 판요소들의 좌굴계수를 쉽게 계산할 수 있다.

$$\frac{k_w}{k_f} = \left(\frac{b_w}{b_f}\right)^2 \quad (19)$$

5. 필트루전 압축재의 국부좌굴에 대한 설계 기준

5.1 압축재의 국부좌굴계수

구조용 강재 압축재의 국부좌굴계수를 계산하는 설계식의 경우(AISC/LRFD) 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건이 자유단을 갖는 비보강판(unstiffened element)과 자유단을 가지고 있지 않은 보강판(stiffened element)으로 구분하여 식 (20), (21)에 의해 각각 근사적으로 계산하도록 제안하고 있다 (Salmon 등, 1996).

$$k_{unstiffened} = k_{SFR} + \frac{1}{3}(k_{FFR} - k_{SFR}) \quad (20)$$

$$k_{stiffened} = k_{SS} + \frac{1}{3}(k_{FF} - k_{SS}) \quad (21)$$

식 (20), (21)은 비보강판과 보강판의 접합부 경계가 단순지와 고정지지 사이에 존재하는 것을 의미하며, 판요소들의 폭비에 따른 인접판의 구속효과를 계수 1/3로 고정하여 적용하고 있다. 강재에 대한 국부좌굴계산에서 계수 1/3은 충분한 실험결과와 이론적 해석이 뒷받침되어 있으며, 현재 표준단면 압축재로 생산되는 단면의 폭비 변화가 비교적 크지 않기 때문에 인접판의 구속효과를 고정하여 사용하고 있다고 생각된다. 그러나 FRP의 경우 일반적으로 강재에 비해 강성이 작고 부재의 축방향으로는 보강섬유가 거의 배치되지 않기 때문에 폭비 변화에 따른 좌굴계수의 변화폭 또한, 강재에 비해 크다고 할 수 있으며, 국내의 경우 표준화된 제조방법 및 단면 등이 없기 때문에 압축재의 국부좌굴을 계산할 때 본 연구에서 제안한 방법과 같이 폭비의 변화를 고려해야 할 것으로 생각된다.

5.2 압축재의 국부좌굴계수 관련 기준

강구조 부재의 하중-저항계수 설계법에서 압축재를 설계할 경우 판요소로 구성된 구조압축재는 대부분 좌굴에 의해 설계강도가 결정되기 때문에 좌굴의 발생여부를 판단하는 것은 중요한 문제라 할 수 있다.

압축부재의 국부좌굴 발생여부는 국부좌굴응력과 재료의 극한강도를 비교하여 식 (22)로 검토할 수 있다.

$$\sigma_{cr} = \lambda_r k \frac{\pi^2 \sqrt{E_{11} E_{22}}}{12(1 - \nu_{12} \nu_{21})(b/t)^2} \geq \sigma_u \quad (22)$$

식 (22)에서 λ_r 은 잔류응력이나 재료의 결함 등을 고려한 감소계수이며 강재의 경우 0.7을 적용하고 있다. 또한, 강재의 경우 식 (23)에 재료성질 및 항복응력을 대입하여 실제설계식에서는 폭두께비로 간단하게 국부좌굴 여부를 판별하고 있다. 그러나 FRP는 앞서 설명한 바와 같이 표준화된 생산 방법이 없고 재료의 역학적 성질 변화에 영향을 미치는 변수가 많기 때문에 강재에서와 같이 표준화된 재료의 성질 및 강도가 결정되어 있지 않으므로 식 (22)를 사용하여 국부좌굴 발생여부를 검토해야 할 것이다.

L, T, Box형 단면과 같이 모든 판요소가 비보강판 또는 보강판만으로 구성된 단면의 경우 국부좌굴을 주도하는 판요소는 폭이 가장 긴 판요소가 될 것이다. 그러나 I형 단면과 같이 비보강판과 보강판으로 구성된 압축재일 경우 각 판요소의 접합부에서의 경계조건이 다르기 때문에 단순히 국부좌굴을 주도하는 판요소를 구별하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 I형 단면 압축재의 국부좌굴계수에 제안된 근사식을 사용하여 비교적 간편하게 국부좌굴을 주도하는 판요소의 구별 절차를 다음과 같이 제안하였다.

판요소로 구성된 압축재에서 국부좌굴은 접합부가 직선을 유지하면서 각 판요소들이 좌굴을 일으키는 것을 의미한다. 따라서, 판요소들이 동시에 좌굴을 일으킬 경우 판요소들간 상호구속작용은 사라지게 되고 접합부의 경계조건을 단순지지로 가정할 수 있게 된다. 즉, I형 단면 압축재에서 플랜지와 복부가 동시에 좌굴을 일으킬 때 접합부는 회전에 대해 단순지지로 가정할 수 있게 된다. 따라서, 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건이 단순지지-단순지지, 단순지지-자유단을 갖는 직교이방성판에 대한 근사식을 각각 복부와 플랜지의 좌굴해석식으로 가정하면 식 (1)로부터 식 (24), (25)와 같이 표현할 수 있다.

$$k_{SS} = \frac{C_{1w}}{\phi_{mw}^2} + C_{2w}\phi_{mw}^2 + C_{3w} \quad (24)$$

$$k_{SFr} = \frac{C_{1f}}{\phi_{mf}^2} + C_{2f}\phi_{mf}^2 + C_{3f} \quad (25)$$

식 (24), (25)에서 ϕ_{mw} 와 ϕ_{mf} 는 각각 플랜지와 복부의 형상비를 half-sine 곡선모양의 수로 나눈 값으로 식 (26)

과 같은 관계가 성립한다.

$$\phi_{mf} = \left(\frac{b_f}{b_w} \right) \phi_{mw} \quad (26)$$

식 (26)을 식 (25)에 대입하고 식 (24), (25)를 식 (20)에 대입하여 정리하면 플랜지와 복부에 동시에 좌굴이 발생하는 ϕ_{mw} 를 얻을 수 있으며 이 값을 식 (24)에 대입하면 플랜지와 복부가 동시에 좌굴을 일으킬 경우의 국부좌굴계수를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 결정된 국부좌굴계수와 식 (12)에 의한 결과를 비교하여 두 값이 동일한 값을 갖게 될 때의 플랜지와 복부의 폭비를 얻을 수 있으며, 그때의 폭비가 국부좌굴을 주도하는 판요소의 경계가 되는 것이다. 이와 같이 결정된 국부좌굴계수를 주도하는 판요소의 국부좌굴 발생여부는 식 (23)에 의하여 검토할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 펄트루전 압축재의 국부좌굴에 대한 설계기준을 개발하기 위한 연구의 일부로서 직교이방성판의 좌굴거동 및 펄트루전 압축재의 국부좌굴거동에 대한 정밀해와 매개변수 해석을 수행하여 정확하고도 쉽게 좌굴계수를 추정할 수 있는 근사식을 제안하였으며, AISC/LRFD에서 제안하고 있는 국부좌굴 관련 설계기준과 유사한 방법으로 본 연구에서 제안한 근사식들을 사용하여 펄트루전 압축재의 국부좌굴 관련 설계기준의 일부를 제안하였다. 본 연구에서 사용한 부재는 펄트루전 FRP 압축재이며 재료성질은 직교이방성으로 가정하였고, 압축재들을 구성하고 있는 각 판요소들의 두께와 재료성질은 모두 동일하다고 가정하였다. 본 연구에서 제안한 설계기준의 일부는 모두 이론적 해석결과로부터 제안된 방법으로서 실제 설계에 적용하기 위해서는 실험 등을 통해 얻어지는 감소계수 등을 적용시켜야 안전한 설계가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(No. R01-2005-000-10395-0)의 연구비 지원과 산학협동재단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 두 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 윤순중, 문환두, 이원복 (1995) 직교이방성 박판부재의 국부좌굴 설계기준에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제15권, 제3호, pp. 533~544.
- 주형중, 정재호, 이승식, 윤순중 (2004) 펄트루전 I형 기둥의 국부좌굴강도, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 629~634.
- 주형중, 최대진, 윤순중 (2006) 하중-저항계수설계법을 적용한 강구조부재의 설계전산화, 한국강구조학회 학술발표 논문집, pp. 626~631.
- 정재호, 윤순중 (2003) 펄트루전 구조용 휨부재의 국부좌굴 거동, 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 147~151.
- 채수하 (1994), 직교이방성 박판단주의 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.
- Jung, J. H. (2003) A Simplified Analytical Model for the Local Buckling of Pultruded Box-Shape Flexural Members, *Ph. D. Thesis*, Hongik University, Seoul.
- Jung, J. H., Yoon, S. H., and You, S. K. (2003) Approximate Solution for Finding the Buckling Strength of Orthotropic Rectangular Plates, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, No. 5, pp. 28~31.
- AISC (2003) *Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design*, 3rd ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- Bulson, P. S. (1969) *The Stability of Flat Plates*, American Elsevier Publishing Company Inc., New York.
- Salmon, C. G. and Johnson, J. E. (1996) *Steel Structures (Design and Behavior)*, Fourth ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Shih, B. H. (1994) On the Analysis of Fiber Reinforced Polymeric Bridge Components, *Ph. D. Thesis*, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Timoshenko, S. P. and James, M. G. (1961) *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Yoon, S. J. (1993) Local Buckling of Pultruded I-Shape Columns, *Ph. D. Thesis*, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

(접수일자 : 2006. 8. 14 / 심사일 2006. 9. 6 /
심사완료일 2006. 10. 10)