

# 단면 내 응력분포를 고려한 I형 및 Box형 단면의 PFRP 압축재의 설계

## Design of PFRP I and Box Shape Compression Members Considering Stress Distribution in the Cross-section

최진우 Choi, Jin-Woo\* · 김재욱 Kim, Jae-Wook\*\* · 주형중 Joo, Hyung-Joong\*\*\* · 윤순중 Yoon, Soon-Jong\*\*\*\*†

(Received February 3, 2011 ; Revised February 25, 2011 ; Accepted March 2, 2011)

### ABSTRACT

Pultruded fiber reinforced polymeric plastic (PFRP) structural members may be one of attractive alternatives of the structural members in the civil engineering applications because of its many advantageous mechanical properties. However, they have relatively low modulus of elasticity and also cross-sections of structural shapes are composed of thin plate components such as flange and web. Therefore, structural stability is an important issue in the design of pultruded structural compression members. For the design of pultruded structural member under compression, buckling and post-buckling strengths of plate components may be taken into account. In the structural steel design following AISC/LRFD, in addition to the buckling strength, the nonuniform stress distribution in the section is incorporated with a form factor. In this paper, the form factor for the design of PFRP structural member under compression is investigated through the analytical study. Furthermore, the process for the determination of the form factor is suggested.

### 요 지

펄트루전 FRP 구조용 부재는 많은 유용한 역학적, 물리적 성질 때문에 토목분야에서 구조부재의 매력적인 대체부재로 고려될 수 있다. 그러나 펄트루전 FRP는 탄성계수가 상대적으로 낮고, 부재의 단면이 복부와 플렌지 등의 얇은 판요소로 구성되어 있기 때문에 압축재로 설계할 때 구조적인 안정성은 매우 중요한 고려사항이 된다. 따라서, 압축을 받는 구조용 부재의 설계를 위해, 판요소의 좌굴 및 후좌굴강도를 고려해야 한다. AISC/LRFD의 강구조 설계기준에서는, 후좌굴강도에 추가적인 단면 내 일정하지 않은 응력분포의 영향을 형상계수(form factor)를 사용하여 고려하고 있다. 이 논문에서는 압축력을 받는 펄트루전 FRP 구조용 부재의 형상계수를 해석적으로 연구하였으며, 형상계수를 설정하는 과정에 대하여 제안하였다.

**Key Words:** pultruded FRP(펄트루전 FRP), buckling(좌굴), post-buckling(후좌굴), form factor(형상계수)

## 1. 서 론

섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Polymeric Plastic, FRP)은 높은 강도와 강성을 갖고 인성이 좋으며 내부 식성이 크다는 것 등 많은 역학적, 물리적 성질에서 장점을 갖고 있기 때문에, 최근 토목분야에서 구조용 재료로써 그 이용분야가 점차 증가되고 있다. FRP 부재의 생산방법은 여러 가지가 있으나 구조용 부재를 생산하기에 적합한 방법은 펄트루전 공정(pultrusion process)이다. 펄트루전 공정은 수지에 함침시킨 보강섬유를 가열장치가 되어있는 작업대를 통하여 일정한 단면을 갖는 성형몰드를 통과시켜 인발하면서 연속적으로 동일한 단면의 부재를 생산하는 방법이다. 이런 공정특성상 펄트루전 FRP(pultruded FRP, PFRP) 부재는

부재의 길이방향과 이에 직각되는 방향의 재료의 역학적 성질이 서로 다른 직교이방성(orthotropic material)로 가정할 수 있다.

PFRP는 다른 구조용 재료에 비하여 낮은 탄성계수를 가지고 단면이 얇은 판요소로 구성되어 있기 때문에, 압축재로 사용되기 위해서는 전체좌굴, 국부좌굴 및 후좌굴강도에 대한 영향을 고려한 설계가 필요하다. 특히 압축재에 국부좌굴이 발생할 경우, 단면 내에 발생하는 응력은 각 판요소의 하중이 작용하지 않는 단부의 경계조건에 따라 다른 분포를 보인다. 미국 강구조 설계기준인 AISC/LRFD의 경우, 국부좌굴이 발생할 때 단면 내에서 다르게 나타나는 응력분포의 영향을 형상계수(form factor)를 이용하여 압축재 설계에 반영하고 있다(AISC, 1999). 이 연구에서는 기존의 연구 자료와 AISC/LRFD를 참고하여 PFRP 압축재를 설계할

\* 학생회원· 홍익대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 학생회원· 홍익대학교 토목공학과 공학석사

\*\*\* 정회원· 홍익대학교 토목공학과 공학박사

\*\*\*\*† 정회원· 홍익대학교 토목공학과 교수, 교신저자(sjyoon@hongik.ac.kr)

때 국부좌굴강도와 후좌굴강도의 영향을 고려할 수 있는 형상계수를 해석적으로 제안하였다.

### 2. FRP 압축재의 파괴형상과 형상계수

구조용 압축재로 사용되는 FRP의 파괴모드는 재료 파괴, 전체좌굴, 국부좌굴로 나눌 수 있다. 재료파괴는 재하된 압축력에 의해 발생한 FRP 부재의 축방향 응력이 극한강도(ultimate strength)를 초과할 때 발생하며, 재료가 가지는 역학적 성질에 의해 결정된다. 좌굴은 압축력에 의해 부재가 하중이 재하되는 방향에 대해 직각방향으로 변위를 일으켜 구조재로서의 기능을 상실하는 파괴모드로서 전체좌굴과 국부좌굴로 구분된다. 전체좌굴은 부재 전체가 변위를 일으켜 압축능력이 저하되는 현상으로 재료의 역학적 성질 뿐만 아니라 부재의 길이, 단면의 형상 및 치수 등에 따라 차이를 나타낸다. 국부좌굴은 부재의 단면을 구성하는 판 요소들이 접합부에서는 직선을 유지하면서 면외방향으로 변위가 발생하여 구조재로서의 기능을 상실하는 파괴모드이다. FRP 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. 따라서 FRP 압축재의 설계시 좌굴에 대한 검토는 필수적으로 수행되어야 한다. Fig. 1은 전체좌굴과 국부좌굴이 발생한 I형 단면 FRP 압축재를 유한요소해석 프로그램인 GTSTRUDL(Ver. 31)을 사용하여 각각 나타낸 것이다.



(a) 전체좌굴 (b) 국부좌굴  
Fig. 1 FRP I형 단면 부재의 좌굴모드

압축재에 국부좌굴이 발생할 경우, 단면을 구성하는 각 판요소는 좌굴이 발생한 후에도 어느 정도 추가적인 강도증가를 보이는데 이를 후좌굴강도(post-buckling strength)라고 한다. 단면을 구성하는 각 판요소의 응력은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 분포한다.

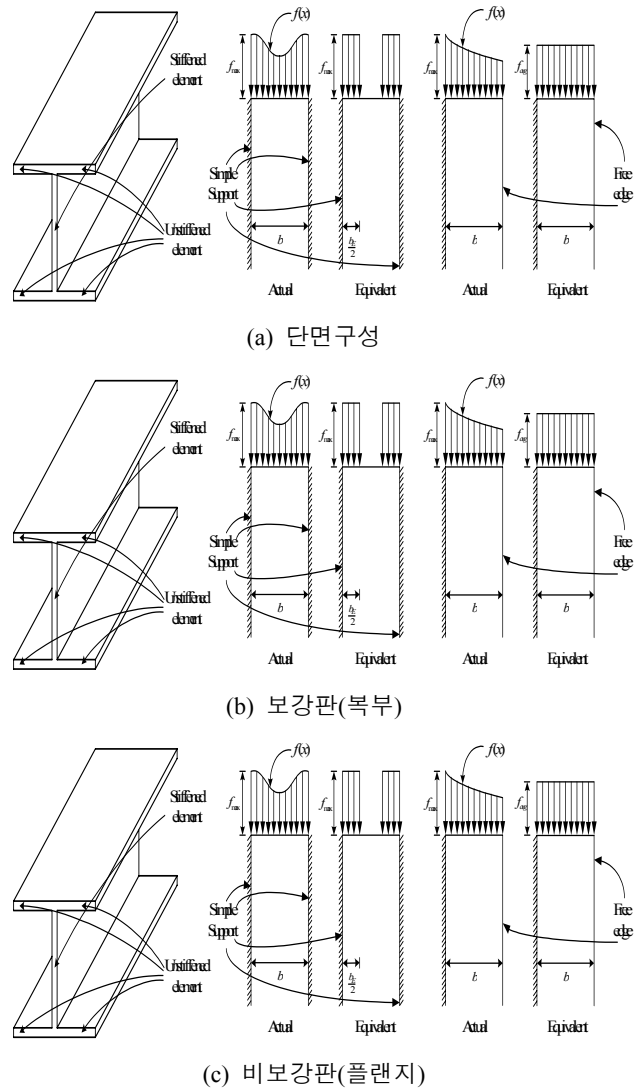


Fig. 2 판요소의 응력분포(Salmon, et al., 2009)

Fig. 2(b)에 나타낸 보강판(복부)의 공칭강도는 식 (1)과 같이 표현되며, 식 (1)의 적분식을 단순화하기 위하여 유효폭(effective width) 개념을 도입하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n = t \int_0^b f(x) dx \tag{1}$$

$$P_n = t b_E f_{max} = A_{eff} f_{max} \tag{2}$$

식 (1)에서  $f(x)$ 는 Fig. 2(b)에 나타낸 보강판의 응력분포식을 나타낸 것이며,  $t$ 는 판요소의 두께를 나타낸 것이다. 또한, 식 (2)에서  $f_{max}$ 는 보강판의 최대응력을 나타내고,  $b_E$ 는 최대응력이 판요소에 등분포로 작용한다고 가정할 때의 유효폭을 나타내며,  $A_{eff}$ 는 유효폭에 해당하는 판요소의 단면적을 나타낸 것이다.

Fig. 2(c)에 나타낸 비보강판의 응력분포는 보강판처럼 판의 중심에 대하여 대칭이 아니기 때문에, 응력분포의 평균이 최대응력보다 작다고 가정할 때, 공칭강도는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n = tb f_{avg} = A_{gross} f_{avg} \quad (3)$$

식 (3)에서  $b$ 는 판요소의 폭,  $f_{avg}$ 는 응력분포의 평균,  $A_{gross}$ 는 판요소의 전체 단면적을 나타낸다.

식 (2)와 (3)은 실제 설계에 적용하기 위하여  $A_{gross}$ 와  $f_{max}$ 의 함수로 표현하여야 하며 이는 각각 식 (4), (5)와 같다.

$$P_n = \frac{A_{eff}}{A_{gross}} A_{gross} f_{max} = Q_a A_{gross} f_{max} \quad (4)$$

$$P_n = A_{gross} \frac{f_{avg}}{f_{max}} f_{max} = Q_s A_{gross} f_{max} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서  $Q_a$ 는 보강판에서 유효단면적과 전체단면적의 비이고,  $Q_s$ 는 비보강판에서 평균응력과 최대응력의 비를 나타낸 것이다.  $Q_a$ 와  $Q_s$ 는 감소계수(reduction factor)로서 각각 단면(첨자:  $a$ )과 응력분포(첨자:  $s$ )에 대한 형상계수(shape factor or form factor)라고 정의하고 있다(Salmon, et al., 2009).

전체 단면에서 I형 단면과 같이 보강판과 비보강판이 모두 존재하는 경우, 평균응력( $f_{avg}$ )은 비보강판을 기준으로 결정하고, 보강판의 유효폭은 최대응력과 평균응력이 동일한 것( $f_{avg} = f_{max}$ )으로 가정한다. 따라서 단면 전체의 공칭강도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (4)와 식 (5)를 참고하여 식 (6)은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n = f_{avg} A_{eff} \quad (6)$$

$$P_n = \frac{f_{avg}}{f_{max}} (f_{max}) \frac{A_{eff}}{A_{gross}} (A_{gross}) = Q_s Q_a A_{gross} f_{max} = Q A_{gross} f_{max} \quad (7)$$

식 (7)에서  $Q$ 는 형상계수(form factor)를 나타내며,  $Q_s$ 와  $Q_a$ 를 곱한 값이다.  $Q$ 가 1이면 국부좌굴이 발생하지 않으며, Fig. 2와 같은 응력분포가 발생하지 않음을 의미한다.

기존 연구에서는 PFRP 압축재에 국부좌굴이 발생했을 때의 거동을 실험을 통하여 확인하였다(Yoon, 1993). Fig. 3~4는 기존 연구에서 수행한 실험과 실험 결과를 각각 나타낸 것이다.

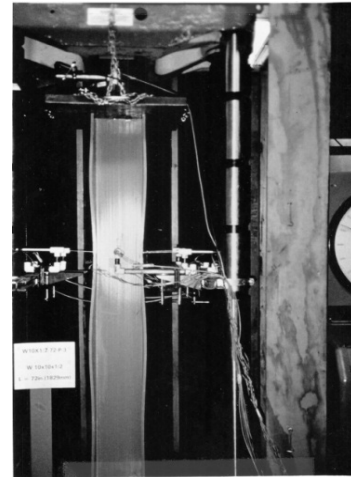


Fig. 3 국부좌굴실험(Yoon, 1993)

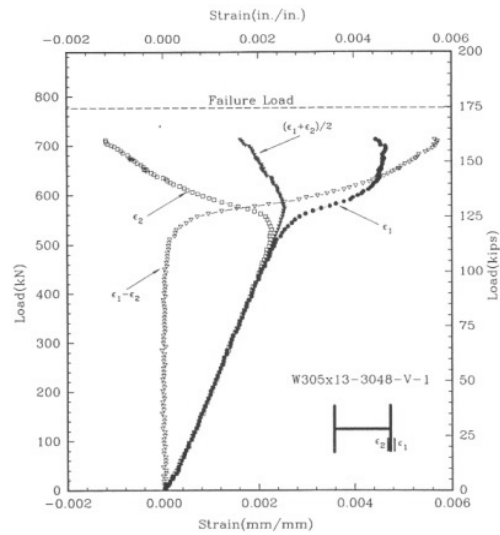


Fig. 4 국부좌굴실험결과(Yoon, 1993)

### 3. PFRP의 형상계수

#### 3.1 유한요소해석

AISC/LRFD가 제시하는 압축재의 설계방법에서는 단면의 형태에 따라 별도의 형상계수를 구할 수 있는 식을 제시하고 있다. 따라서 PFRP 압축재를 설계하기 위해선 단면별로 국부좌굴이 발생한 후의 단면 내 응력분포에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 GTSTRUDL(Ver. 31)을 사용하여, PFRP I형 및 Box형 단면 압축재에 국부좌굴이 발생했을 때의 단면 내 응력분포를 구하고 이를 통해 형상계수를 제안하였다. 유한요소해석은 SBHQ6 (Stretching-Bending Hybrid Quadrilateral) 요소를 사용하였으며, 재료의 역학적 성질은 기존 연구(Yoon, 1993)를 참고로 하여 Table 1에 나타낸 것과 같은 직교이방성 재료로 가정하여 수행하였다.

Table 1 재료의 역학적 성질(Yoon, 1993)

	$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu_{12}$
Case 1	18.8	11.1	3.3	0.309
Case 2	16.5	9.6	4.2	0.301
Case 3	18.0	10.7	3.3	0.326
Case 4	17.6	9.1	2.9	0.307

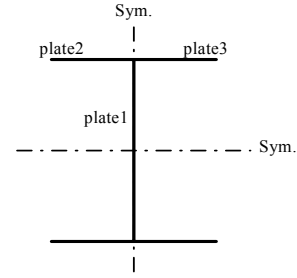
유한요소해석에 적용한 I형과 Box형 단면 압축재의 길이는 Table 1에 제시된 역학적 성질을 가진 PFRP에 대한 국부좌굴의 정밀해법을 통하여 결정하였다. I형 및 Box형 단면을 갖는 직교이방성 압축재의 좌굴해석에 대한 정밀해법식은 각각 식 (8)~(9)와 같으며, 이를 통해 구할 수 있는 국부좌굴강도식은 식 (10)과 같다.

$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 + 2\frac{b_1}{b_2}\left(\frac{SFr}{FFr}\right)_2 = 0 \tag{8}$$

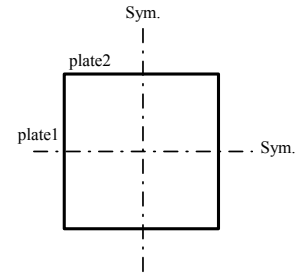
$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_1 + \frac{b_1}{b_2}\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_2 = 0 \tag{9}$$

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 \sqrt{E_{11}E_{22}}}{2(1-\nu_{12}\nu_{21})\left(\frac{b_f}{t_f}\right)^2} \tag{10}$$

식 (8)과 (9)에서  $SSy$ ,  $FSy$ ,  $SFr$ ,  $FFr$ 은 하중이 재해되지 않는 변의 경계조건이 각각 단순지지-대칭, 고정단-대칭, 단순지지-자유단, 고정단-자유단인 경우 단면을 구성하는 판요소의 국부좌굴해석식을 나타낸 것이고,  $b_1$ 과  $b_2$ 는 판요소의 폭을 나타낸 것이다. 또한, 식 (10)에서  $k$ 는 판요소의 좌굴계수,  $E_{11}$ 는 길이방향 탄성계수,  $E_{22}$ 는 길이직각방향 탄성계수,  $\nu_{12}$ 는 길이방향에 대한 포아송 비,  $\nu_{21}$ 는 길이직각방향에 대한 포아송 비,  $b_f$ 는 플랜지의 폭,  $t_f$ 는 플랜지의 두께를 나타낸 것이다. 식 (8)~(9)에서 모든 항의 첨자는 Fig. 5에 나타낸 단면을 구성하는 판요소의 번호를 나타낸 것이다. 또한  $SSy$ ,  $FSy$ ,  $SFr$ ,  $FFr$ 로 표현된 각 판요소의 좌굴해석식은 식 (11)~(14)에 나타내었다.



(a) I형 단면



(b) Box형 단면

Fig. 5 단면을 구성하는 판요소

$$SSy = \alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)\cosh\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sinh\left(\frac{\beta}{2}\right) = 0 \tag{11}$$

$$FSy = -\alpha\beta\left\{\alpha\sinh\left(\frac{\alpha}{2}\right)\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + \beta\cosh\left(\frac{\alpha}{2}\right)\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right\} = 0 \tag{12}$$

$$SFr = (\alpha^2 + \beta^2)(\beta\chi^2\sinh\alpha\cos\beta + \alpha\psi^2\cosh\alpha\sin\beta) = 0 \tag{13}$$

$$FFr = -2\alpha\beta\chi\psi - \alpha\beta(\chi^2 + \psi^2)\cosh\alpha\cos\beta - (\beta^2\chi^2 - \alpha^2\psi^2)\sinh\alpha\sin\beta = 0 \tag{14}$$

식 (11)~(14)에서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 직교이방성 판의 좌굴 지배 미분방정식에서 사용된 해의 최대값과 최소값에 대한 매개변수이고,  $\chi$ ,  $\psi$ 는  $\alpha$ ,  $\beta$ 에 대한 매개변수이다. 식 (15)~(18)은 각 매개변수에 대한 식이다.

$$\alpha = m\pi s\lambda_2 \sqrt{1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^4}{\lambda_2^4}\left(1 - \frac{k}{m^2 s^2 \lambda_1^2}\right)}} \tag{15}$$

$$\beta = m\pi s\lambda_2 \sqrt{-1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^4}{\lambda_2^4}\left(1 - \frac{k}{m^2 s^2 \lambda_1^2}\right)}} \tag{16}$$

$$\chi = \alpha^2 - \nu_{12} m^2 \pi^2 s^2 \quad (17)$$

$$\psi = \beta^2 + \nu_{12} m^2 \pi^2 s^2 \quad (18)$$

식 (15)~(18)에서  $m$ 은 half-sine 형상의 수,  $s$ 는 폭-두께 비( $b/t$ ),  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 직교이방성 판의 각 방향에 대한 휨강성의 비를 나타내는 매개변수이다.  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 는 식 (19)~(20)에 나타낸 것과 같다.

$$\lambda_1 = \left( \frac{D_{11}}{D_{22}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \left( \frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

I형 단면은 보강판과 비보강판이 모두 존재하기 때문에 단면과 응력에 대한 형상계수( $Q_a, Q_s$ )가 모두 존재하지만, Box형 단면은 보강판만 존재하기 때문에 단면에 대한 형상계수( $Q_a$ )만을 고려한다. 유한요소해석결과는 Table 2~4에 각각 나타내었다. 또한, Fig. 6은 해석한 부재의 좌굴형상, Fig. 7은 해석결과 판요소 내의 응력분포를 나타낸 것이다.

Table 2 I형 및 Box형 단면을 갖는 압축재의  $Q_a$

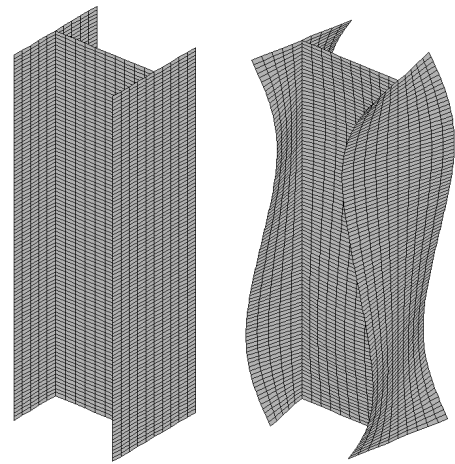
		$b_{gross}$ (mm)	$b_{eff}$ (mm)	$Q_a$
I형	Case 1	202	190.95	0.945
	Case 2		189.26	0.937
	Case 3		192.73	0.954
	Case 4		195.36	0.967
Box형	Case 1	202	158.11	0.783
	Case 2		154.78	0.766
	Case 3		159.93	0.782
	Case 4		163.46	0.809

Table 3 I형 단면을 갖는 압축재의  $Q_s$

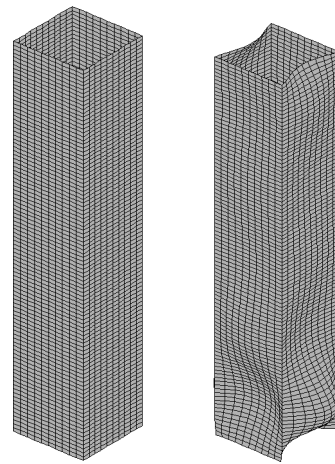
	$f_{max}$ (MPa)	$f_{avg}$ (MPa)	$Q_s$
Case 1	47.92	40.34	0.823
Case 2	54.58	43.09	0.820
Case 3	46.76	38.45	0.822
Case 4	41.37	32.45	0.860

Table 4 I형 및 Box형 단면을 갖는 압축재의  $Q$

		$Q_a$	$Q_s$	$Q$
I형	Case 1	0.945	0.823	0.778
	Case 2	0.937	0.820	0.768
	Case 3	0.954	0.822	0.784
	Case 4	0.967	0.860	0.832
Box형	Case 1	0.783	-	0.783
	Case 2	0.766	-	0.766
	Case 3	0.782	-	0.782
	Case 4	0.809	-	0.809



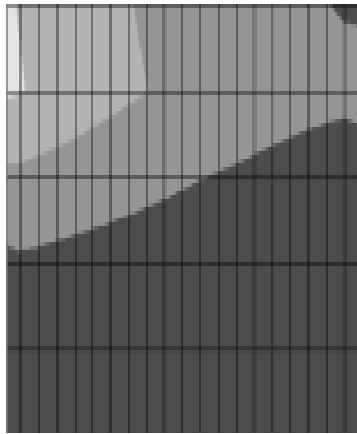
(a) I형 단면



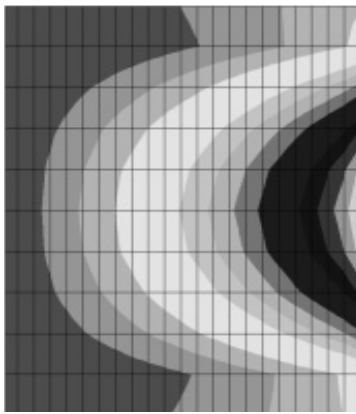
(b) Box형 단면

Fig. 6 해석한 부재의 좌굴 형상





(a) 비보강판



(b) 보강판

Fig. 7 판요소의 국부좌굴 발생 후 응력분포

펠트루전 공정은 생산과정에서 단면 내 섬유 배치 형태에 따라 재료의 역학적 성질에 영향을 준다 (Berthelot, 1999). 기존 연구에서 Yoon(1993)은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 FRP 단면 내 플랜지의 섬유배치가 비보강부는 비교적 균일한 섬유배치를 보이는 반면, 보강부(접합부, junction)는 섬유배치가 균일하지 못한 것을 현미경을 통해 관찰하였다. 또한, 단면 내에서 18개의 시편을 채취하여 인장실험을 실시한 결과 길이 방향 탄성계수( $E_{11}$ )는 공정 중에 발생하는 단면 내 섬유배치의 차이로 인해 전체 평균의  $\pm 23\%$ 의 범위로 분포함을 알아내었다(Yoon, 1993). 국부좌굴하중은 재료의 역학적 성질 및 단면치수 등의 함수이기 때문에, 단면 내 재료의 역학적 성질의 차이는 국부좌굴하중에 영향을 미친다. 기존 연구에 따르면, 좌굴강도는 단면 내의 탄성계수 차이로 인해 정밀해법을 이용한 해석결과와 비교하여 I형 단면의 경우 약  $\pm 4\%$ , Box형 단면의 경우 약  $\pm 6\%$ 의 차이를 보인다(최, 2009). 이런 좌굴강도의 차이는 공칭강도의 강도감소계수로 적용할 수 있으며, Table 5는 Table 4에 나타난 형상계수에 단면 내 섬유배치의 차이를 고려한 강도감소계수를 나타낸 것이다.



Fig. 8 FRP 플랜지의 섬유배치(Yoon, 1993)

Table 5 형상계수와 단면 내 섬유배치 차이를 고려한 강도감소계수

		$Q$	섬유배치 영향	강도감소계수	
				$Q_{proposed}$	Average
I형	Case 1	0.778	-4.52 %	0.743	0.755
	Case 2	0.768		0.733	
	Case 3	0.784		0.749	
	Case 4	0.832		0.794	
Box형	Case 1	0.783	-6.34 %	0.733	0.735
	Case 2	0.766		0.717	
	Case 3	0.782		0.732	
	Case 4	0.809		0.758	

### 3.2 형상계수 결정 과정

유한요소해석에서 고려한 압축재의 형상계수는 최대 변위가 발생하는 부분의 절점의 응력을 이용하여 계산하였다. 즉, 각 절점에서 발생하는 응력과 절점간의 거리를 변수로 설정하여 11개의 절점으로 구성된 보강판은 10차 다항식, 6개의 절점으로 구성된 비보강판은 5차 다항식으로 가정하여 회귀분석을 수행하였다. 가정

하여 결정된 식은  $Q_a$ 를 구하기 위한 유효폭과  $Q_s$ 를 구하기 위한 평균응력을 산정하기 위하여 적분을 수행하였다.

3.1절에서 제시한 결론은 유한요소법을 통한 직교이방성 I형 및 Box형 압축재의 형상계수로서 실제 PFRP 압축재의 형상계수와는 다소 차이가 있을 수 있다. 유한요소해석은 여러 판(mat)들이 적층되어 있는 실제 PFRP의 특성을 정확하게 반영하기 어려우며, 제작과정에서 발생하는 잔류응력, 판요소 간의 접합각도 등의 영향을 고려할 수 없다. 따라서, 다양한 종류의 레진(resin)과 섬유(fiber)로 만들어진 PFRP로 실험을 실시하여 더 정확한 형상계수를 결정하여야 한다.

이 연구에서는 3.1절에서 제시한 것과 같은 PFRP 압축재의 형상계수를 결정할 수 있는 과정을 제시하고자 한다. PFRP 압축재의  $Q_a$ 와  $Q_s$ 를 결정하기 위한 Flow-Chart는 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다.

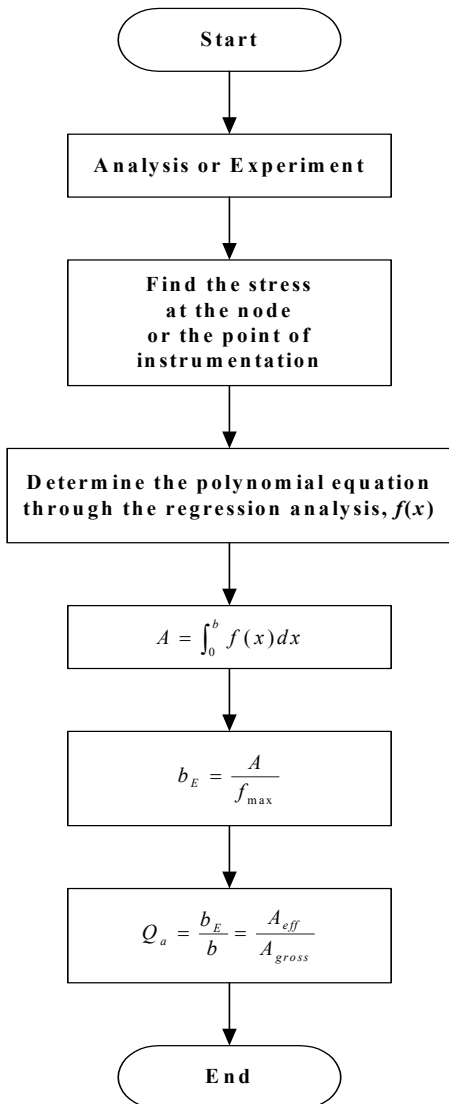


Fig. 9  $Q_a$ 를 결정하기 위한 Flow-Chart

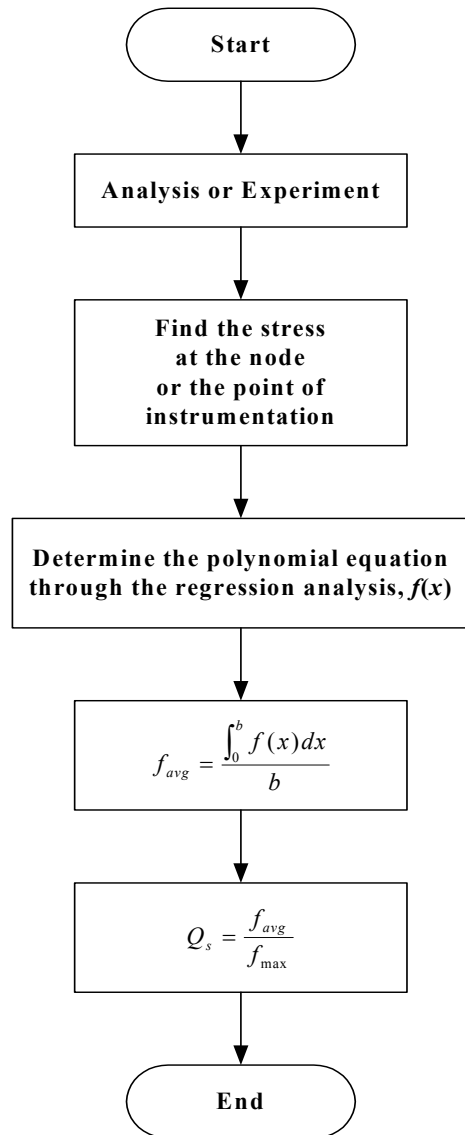


Fig. 10  $Q_s$ 를 결정하기 위한 Flow-Chart

#### 4. 결론

이 연구에서는 AISC/LRFD 강구조 매뉴얼과 기존 연구자료를 참고로 하여 PFRP I형 및 Box형 단면 압축재의 형상계수를 제안하였다. 즉, 특정한 PFRP I형 및 Box형 단면 압축재에 대한 유한요소해석을 수행하여 각 절점에서의 응력 차에 대한 회귀분석결과를 토대로 형상계수를 제안하였다.

해석결과, I형 단면의 경우 형상계수는 0.733~0.794로 분포하였으며, 그 평균은 0.755로 나타났다. 또한, Box형 단면의 경우 형상계수는 0.717~0.809로 분포하였으며, 그 평균은 0.735로 나타났다.

이 연구에서 제안한 형상계수는 특정한 재료의 역학적 성질과 단면을 갖는 PFRP I형 및 Box형 단면 압축재에 대한 유한요소해석을 수행하여 얻은 결과이며,

실제 모든 PFRP의 특성을 정확하게 반영하였다고 보기 어렵다. 따라서 다양한 변수에 대한 실험이 추가적으로 이루어져야 할 것이다. 또한, 이 연구에서 제시한 형상계수를 찾는 데 사용한 과정은 구조적 설계를 위한 정확한 형상계수를 결정하는데 유용할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 기초연구사업 (No. R01-2008-000-21103-0)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 이 연구의 일부 내용은 2010년 한국복합신소재구조학회에서 발표하였으며 이 논문은 그 논문을 확장, 보완한 것임을 밝힙니다.

### 참고 문헌

1. 최진우 (2009). 면내 재료의 역학적 성질 변화에 따른 펄트루전 FRP 구조용 부재의 국부좌굴하중, 석사학위논문, 홍익대학교.
2. 최진우, 김재욱, 주형중, 윤순중 (2010). I형과 Box형 단면을 갖는 펄트루전 FRP 압축재의 형상계수, 한국복합신소재구조학회 학술발표회논문집, pp. 65-66.
3. AISC (1999). Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings.
4. Salmon, C. G., Johnson, J. E., Malhas, F. A. (2009). *Steel Structures, Design and Behavior*, Pearson Prentice Hall.
5. Strongwell (2010). Information on <http://www.strongwell.com>.
6. Yoon, S. J. (1993). Local Buckling of Pultruded I-Shape Columns, *Ph. D. Thesis*, Georgia Institute of Technology.