



하중저항계수설계법 및 정밀해법에 의한 PFRP I형 단면 압축재의 국부좌굴강도

최진우¹ · 서수홍¹ · 주형중² · 윤순종³

(주)아이시스이엔씨 팀장¹, (주)아이시스이엔씨 대표이사², 홍익대학교 토목공학과 교수³

Local Buckling Strength of PFRP I-Shape Compression Members Obtained by LRFD Design Method and Closed-Form Solution

Choi, Jin-Woo¹ · Seo, Su-Hong¹ · Joo, Hyung-Joong² · Yoon, Soon-Jong³

¹Team Manager, ISIS E&C, Seoul, Korea

²President, ISIS E&C, Seoul, Korea

³Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Abstract: Fiber reinforced polymeric plastic (FRP) materials have many advantages over conventional structural materials, i.e., high specific strength and stiffness, high corrosion resistance, right weight, etc. Among the various manufacturing methods, pultrusion process is one of the best choices for the mass production of structural plastic members. Since the major reinforcing fibers are placed along the axial direction of the member, this material is usually considered as an orthotropic material. However, pultruded FRP (PFRP) structural members have low modulus of elasticity and are composed of orthotropic thin plate components the members are prone to buckle. Therefore, stability is an important issue in the design of the pultruded FRP structural members. Many researchers have conducted related studies to publish the design method of FRP structures and recently, referred to the previous researches, pre-standard for LRFD of pultruded FRP structures is presented. In this paper, the accuracy and suitability of design equation for the local buckling strength of pultruded FRP I-shape compression members presented by ASCE are estimated. In the estimation, we compared the results obtained by design equation, closed-form solution, and experiments conducted by previous researches.

Key Words: PFRP, LRFD, local buckling, experiment, closed-form solution

1. INTRODUCTION

섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Polymeric Plastic, FRP)은 단위중량당 강도 및 강성이 크고, 단위중량이 작으며, 내화특성이 큰 많은 역학적, 물리적 장점을 가지고 있기 때문에 최근 건설분야에 적용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 대표적인 예로 필라멘트 와인딩 공정(filament winding process)으로 제작한 FRP를 활용한 상하수도관과 인천대교 일부구간에 시공된 콘크리트 스트럿의 보강재가 있으

며, 펄트루전 공정(pultrusion process)으로 제작한 FRP를 활용한 수상 부유식 태양광발전 구조물 등이 있다.

펄트루전 공정으로 제작한 FRP (Pultruded FRP, PFRP)는 수지에 함침시킨 보강섬유를 가열장치가 되어 있는 성형몰드에 통과시켜 인발하면서 연속적으로 일정한 단면을 생산하는 방법으로서, 구조용 부재를 경제적으로 생산하기에 적합한 방법 중 하나로 알려져 있다(Joo, 2010; Choi et al., 2012). 이러한 제작공정의 특성상 PFRP 부재는 부재의 길이방향과 이에 직각되는 방향의 재료의 역학적 성질이 서로 다른 직교이방성 재료(orthotropic)로 가정할 수 있다(Yoon, 1993; Choi, 2009; Joo, 2010).

주요어: PFRP, 하중저항계수설계, 국부좌굴, 실험, 정밀해법

Corresponding author: Yoon, Soon-Jong

Department of Civil Engineering, Hongik University, 72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 172-732, Korea.
 Tel: +82-2-3141-0774, Fax: +82-2-3141-0774, E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr

투고일: 2014년 5월 29일 / 수정일: 2014년 6월 23일 / 게재확정일: 2014년 6월 24일

PFRP는 다른 구조용 재료에 비하여 강도에 대한 탄성계수의 비가 작고, 단면이 얇은 판요소로 구성되어 있기 때문에 압축재로 사용하기 위해서는 국부좌굴에 대한 영향을 고려해야 한다. 그러나 PFRP 부재는 구체적인 설계법이 확립되지 않아 보편적인 건설 재료로 사용하기가 어려운 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 등방성 재료의 국부좌굴에 대한 정밀해법을 적용하여 PFRP와 같은 이방성 재료의 국부좌굴에 대한 거동을 분석하기 위한 연구가 진행되었고(Yoon, 1993, Lee, 2003), PFRP의 재료 특성을 고려한 좌굴강도 영향 및 후좌굴강도에 대한 연구가 진행되었으며(Choi, 2009; Choi et al., 2011), 정밀해법과 에너지법(energy method) 등을 이용한 압축재 설계식 개발에 대한 연구가 이루어졌다(Zureick and Steffen, 2000; Kollar, 2003; Joo, 2003; Chae, 2005; Joo, 2010). 또한 이러한 연구결과로 최근 미국토목학회(American Society of Civil Engineers, ASCE)에서는 에너지법에 의한 해석방법 및 기존 연구에서 수행한 실험 결과를 바탕으로 하중저항계수설계법(Load & Resistance Factor Design, LRFD)에 기초한 PFRP 부재의 잠정설계기준(pre-standard)를 제시한 바 있다(ASCE, 2010).

이 연구에서는 I형 단면을 갖는 PFRP 압축재에 대하여 기존 연구(Yoon, 1993, Choi, et al., 2011)에서 수행한 국부좌굴실험 결과, ASCE (2010)에서 제시한 압축재 설계시 고려하는 국부좌굴강도식 결과 및 정밀해법의 내용을 정리하고, 각각을 비교하여 설계식의 정확성 및 적절성을 검토하였다.

2. LOCAL BUCKLING STRENGTH OF PFRP I-SHAPE COMPRESSION MEMBERS

2.1 ASCE Design Manual

ASCE에서 제시한 PFRP 부재의 하중저항계수설계법 중 압축재 설계는 기존 연구(Yoon, 1993; Zureick and Steffen, 2000; Kollar, 2002; Kollar, 2003)에서 제시하고 있는 실험결과 및 이방성 재료의 에너지법에 의한 해석적 연구를 기반으로 제안되었다. 기존 연구(Zureick and Steffen, 2000; Kollar, 2002)에서는 PFRP I형 단면 압축재의 플랜지의 국부좌굴강도를 구하기 위해 Fig. 1에 나타난 것과 같이 하중재하방향은 단순지지(simply support, SS), 하중이 재하되지 않는 방향에서 플랜지와 복부의 접합부(junction)는 단순지지, 그리고 플랜지의 반대쪽은 자유단(free)으로 가정하여 식 (1)과 같이 구하였다. 식 (1)에서 F_{crf} 는 플랜지의 국부좌굴응력, G_{LT} 는 PFRP의 전단탄성계수, b_f 는 단면의 폭, t_f 는 플랜지의 두께를 의미한다.

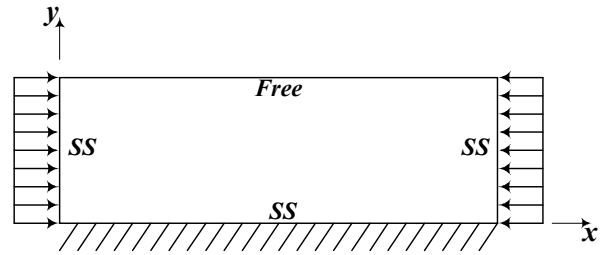


Fig. 1 Boundary Condition of Uniaxially Loaded Plates (Kollar, 2002)

$$F_{crf} = \frac{G_{LT}}{\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^2} \quad (1)$$

또한 복부의 국부좌굴강도는 모든 면이 단순지지로 가정된 판으로 가정하여 식 (2)와 같이 유도하였다(Zureick and Steffen, 2000).

$$F_{crw} = \frac{\left(\frac{\pi^2}{6}\right) \left[\frac{\sqrt{E_L E_T}}{(1-\nu_{LT}\nu_{TL})} + \frac{\nu_{LT} E_T}{(1-\nu_{LT}\nu_{TL})} + 2G_{LT} \right]}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 F_{crw} 는 복부의 국부좌굴강도, E_L 은 길이방향 탄성계수, E_T 는 폭방향 탄성계수, ν_{LT} 는 폭방향에 대한 길이방향 포아송 비, ν_{TL} 은 길이방향에 대한 폭방향 포아송 비, h 는 복부의 높이, t_w 는 복부의 두께를 의미한다.

ASCE (2010)에서 제안한 플랜지의 국부좌굴강도는 식 (1)을 그대로 적용하여 구하도록 제안하고 있다. 또한 식 (2)에서 $1-\nu_{LT}\nu_{TL}$ 은 일반적인 직교이방성 재료에서 0.9~1.0의 범위를 나타낸다(Zureick and Steffen, 2000; ASCE, 2010). 따라서 복부의 국부좌굴강도식은 $1-\nu_{LT}\nu_{TL}$ 을 1로 가정하여 식 (3)과 같이 제안하고 있다.

$$F_{crw} = \frac{\left(\frac{\pi^2}{6}\right) \left[\sqrt{E_L E_T} + \nu_{LT} E_T + 2G_{LT} \right]}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2} \quad (3)$$

ASCE(2010)가 제안한 하중저항계수설계법에서, 식 (1)과 식 (3)으로부터 구한 국부좌굴강도는 길이방향에 대한 역학적 성질만을 고려한 오일러 좌굴강도(Euler buckling strength)와 비교하여 설계하도록 제안하고 있다.

ASCE(2010)가 제안한 하중저항계수설계법에서 PFRP 압축재는 세장비에 대하여 식 (4)와 같이 제한하고 있고, 부재의 초기결함(initial out-of-straightness)에 따른 강도감소는 식 (5)와 같이 고려하도록 제안하고 있으며, 오일러 좌굴강도는 강도감소계수 0.7, 국부좌굴강도는 강도감소계수 0.8을 도입하고 있다.

$$\frac{KL}{r} \leq \min \left[1.4 \sqrt{\frac{E_L A_g}{P_D}}, 300 \right] \quad (4)$$

$$\phi_0 = 1 - 500 \frac{\delta_0}{L} \quad (5)$$

식 (4)에서 K 는 유효좌굴계수(effective buckling coefficient), L 은 부재 길이, r 은 단면2차반경, A_g 는 전단면적, P_D 는 하중계수가 도입되지 않은 고정하중에 의한 압축력을 의미한다. 또한 식 (5)에서 ϕ_0 는 초기결함에 대한 강도감소계수, δ_0 는 초기 결함에 의한 최대변위를 의미한다.

또한 계수하중(factored load)에 대하여 오일러 좌굴강도, 국부좌굴강도 및 계수(0.7)를 도입한 압축과괴강도를 식 (6)과 같이 고려하고, 사용하중(serviceability load)에 대하여 초기결함을 고려한 전체좌굴강도와 계수(0.3)를 도입한 압축과괴강도를 식 (7)과 같이 고려하도록 규정하고 있다.

$$P_u \leq \lambda \phi_c P_n = \lambda \phi_c F_{cr} A_g \leq 0.7 \lambda F_L^c A_g \quad (6)$$

$$P_s \leq \phi_0 \frac{\pi^2 E_L}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} A_g \leq 0.3 F_L^c A_g \quad (7)$$

식 (6)에서 P_u 는 계수하중에 의한 압축력, λ 는 하중조합에 따른 시간영향계수(time effect factor), ϕ_c 는 강도감소계수를 의미한다. 또한 식 (7)에서 P_s 는 사용하중에 의한 압축력을 의미한다.

2.2 Closed-Form Solution

정밀해법에 의한 PFRP 압축재의 국부좌굴강도는 Fig. 3과 같은 등분포 압축력이 재하되는 판요소의 좌굴강도에 대한 해석이 선행되어야 한다. 고전적 직교이방성 판이론에 의한 직교이방성 판의 좌굴해석은 Levy의 방법을 적용하여 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 등분포 압축력 P 가 작용하고, 하중이 작용하는 두 변은 단순지지, 하중이 재하되지 않는 두 변은 임의의 경계조건인 상태에서 수행할 수 있다(Choi, 2009; Choi et al., 2012).

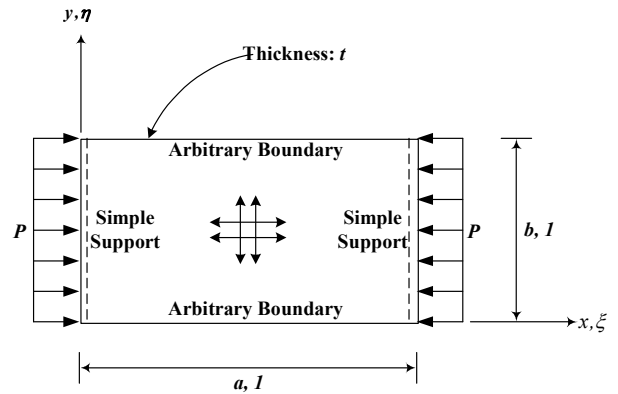


Fig. 2 Orthotropic Plate(Choi, 2009; Choi et al., 2012)

Fig. 3에 나타낸 복합재 판요소의 국부좌굴강도는 다음과 같은 가정사항을 적용한다(Yoon, 1993; Choi, 2009; Joo, 2010).

- (1) 판을 구성하는 재료는 탄성이고 균질한 직교이방성이다.
- (2) 판은 하중이 재하되기 전에는 완전한 평면을 유지한다.
- (3) 판의 두께는 폭과 길이에 비해 매우 작다.
- (4) 판의 처짐은 판의 두께에 비해 매우 작다.
- (5) 판의 두께는 일정하다.
- (6) 변형된 판의 중립면에 대한 처짐각은 매우 작다.
- (7) 판 두께 방향의 전단력(transverse shear)에 의한 변형은 무시한다.

이와 같은 가정사항을 적용하여 식 (8)과 같은 지배미분방정식을 풀이하면 식 (9)와 같은 처짐식을 유도할 수 있다. 또한 식 (9)는 하중이 재하되지 않는 판의 양변의 경계조건식을 대입하면 식 (10)과 같은 4원 1차 제차연립방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{D_{11}}{a^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \frac{2(D_{12} + 2D_{66})}{a^2 b^2} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \frac{D_{22}}{b^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4} = -\frac{P}{a^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \quad (8)$$

$$w = (A_1 \cosh \alpha \eta + A_2 \sinh \alpha \eta + A_3 \cos \beta \eta + A_4 \sin \beta \eta) \sin m \pi \xi \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ C_9 & C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (8)에서 ξ 와 η 는 각각 변수 x , y 를 무차원화한 좌표, D_{11} , D_{22} 는 1, 2방향에 대한 판의 휨강성, D_{66} 는

비틀림강성, a 는 판의 길이, b 는 판의 폭을 의미한다. 또한, 식 (9)에서 A_i ($i=1, 2, 3, 4$)는 직교이방성 판의 처짐형상을 나타내는 계수, α, β 는 각각 식 (8)에 대한 해의 최대값 및 최소값에 대한 매개변수를 의미하며, 식 (10)에서 C_i ($i=1\sim 16$)는 4원 1차 제차연립방정식의 계수이다.

식 (10)에서 A_i ($i=1, 2, 3, 4$)의 값이 0이 되지 않는 해(non-trivial solution)를 구하기 위해서는 계수행렬의 행렬값(determinant)이 0이 되는 고유치문제(eigenvalue problem)를 해결해야 한다. 이때, 고유치는 판의 좌굴계수 k 가 되고 고유벡터는 좌굴모드를 나타낸다. I형 단면 압축재를 구성하는 판요소의 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건은 플랜지는 단순지지-자유단(SFr)과 고정지지-자유단(FFr) 사이의 탄성조건(Elastically Restrained)이고, 복부는 대칭단순지지(SSy)와 대칭고정지지(FSy) 사이의 탄성조건이며, 이에 대한 경계조건에 따른 고유치문제를 해결한 초월함수식은 각각 식 (11)~(14)와 같다.

$$SFr = -(\chi^2 + \psi^2) \cdot (\beta\chi^4 \sinh\alpha \cos\beta - \alpha\psi^4 \cosh\alpha \sin\beta) = 0 \quad (11)$$

$$FFr = 2\alpha\beta\chi\psi + (\beta^2\chi^4 - \alpha^2\psi^4) \sinh\alpha \sin\beta + \alpha\beta(\chi^2 + \psi^2) \cosh\alpha \cos\beta = 0 \quad (12)$$

$$SSy = \alpha\beta(\chi^2 + \psi^2) \cosh \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} = 0 \quad (13)$$

$$FSy = \alpha\beta(\alpha \sinh \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2} + \beta \cosh \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\beta}{2}) = 0 \quad (14)$$

식 (11)~(14)에서, χ, ψ 는 각각 α, β 및 좌굴시 half-sine 곡선의 수, 판의 길이에 대한 폭의 비(a/b)를 변수로 하는 매개변수방정식이다. 직교이방성 압축재의 국부좌굴은 식 (11)~(14)에 나타난 것과 같은 판의 좌굴해석식을 이용하여 해석할 수 있으며, 여러 가지 단면 형상에 대하여 이미 발표된 바 있다(Yoon, 1993; Joo, 2010). Fig. 3은 x 축 방향으로 압축력이 작용하는 직교이방성 I형 단면 압축재이며, Fig. 4는 국부좌굴이 발생하기 전과 후의 I형 단면의 형태를 나타낸 것이다.

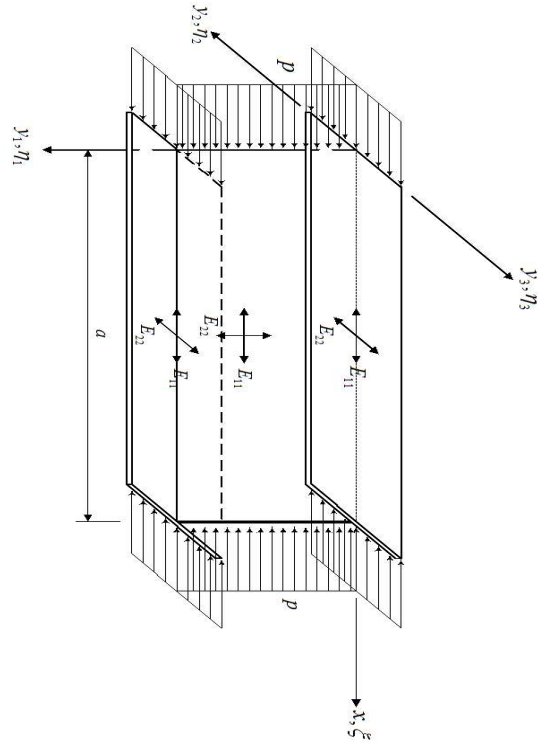


Fig. 3 Orthotropic I-Shape Compression Members (Choi, 2009; Choi et al., 2012)

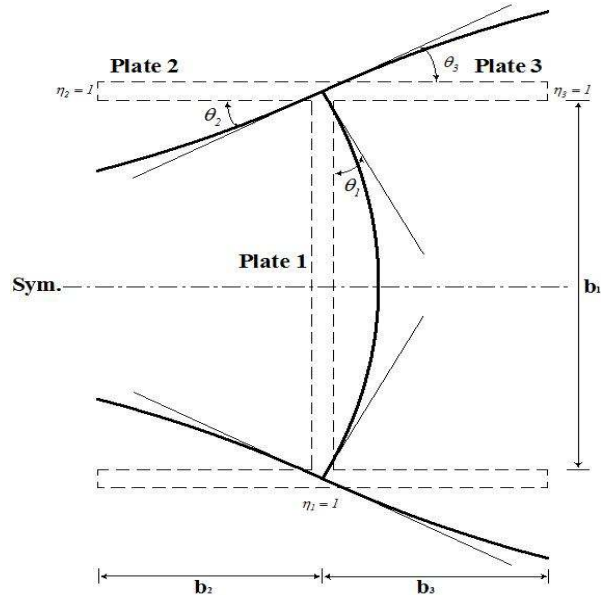


Fig. 4 Buckled Mode Shape of Orthotropic I-Shape Compression Members (Choi, 2009; Choi et al., 2012)

PFRP I형 단면 압축재의 국부좌굴강도는 다음과 같은 가정사항을 추가로 도입한다(Yoon, 1993; Choi, 2009; Joo, 2010).

- (1) 각 판요소들의 접합부에서의 면외처짐은 발생하지 않는다.
- (2) 좌굴이 발생하기 전 각 판요소들 사이의 작은 좌굴발생 후에도 일정하다.
- (3) 접합부에서 각 판요소에 작용하는 모멘트의 총합은 0이다.

단면이 2축 대칭이고, 재료의 역학적 성질과 두께가 전단면에서 일정하다고 가정하면, PFRP I형 단면 압축재의 국부좌굴해석식은 식 (15)와 같으며, 좌굴강도는 식 (16)과 같다.

$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_w + 2\frac{b_w}{b_f}\left(\frac{SFr}{FFr}\right)_f = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_g} = k_{min} \frac{\pi^2 \sqrt{E_L E_T}}{12(1-\nu_{LT}\nu_{TL})\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (16)$$

식 (15)에서 아래첨자 f , w 는 각각 플랜지와 복부, b 는 판요소의 폭을 의미한다. 또한 식 (16)에서 σ_{cr} 은 국부좌굴강도, P_{cr} 은 국부좌굴하중, k_{min} 은 플랜지와 복부 중 작은 유효좌굴계수를 의미하며, 유효좌굴계수는 판의 좌굴계수와 부재 길이의 관계 그래프(garland curve)를 작성하여 구한다. I형 단면 부재의 판의 좌굴계수와 부재 길이의 관계 그래프의 예는 Fig. 5와 같다(Choi et al., 2012).

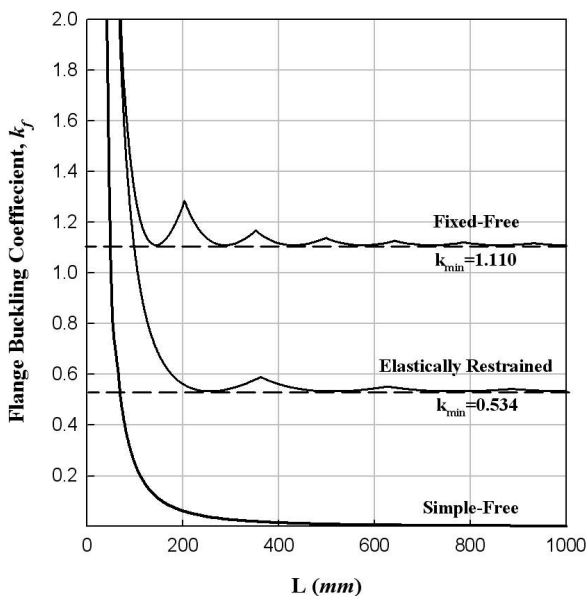


Fig. 5 Example of Garland Curve for Flange buckling (Choi et al., 2012)

3. COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL RESULTS

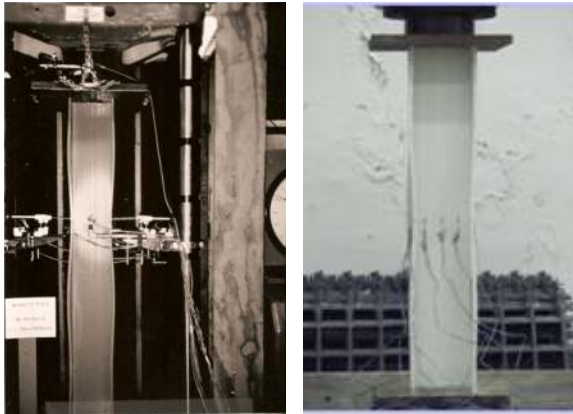
3.1 Experimental Results

기존 연구에서 Yoon(1993)은 비닐에스터(Vinylester) 및 폴리에스터(polyester) 레진을 사용하여 다양한 단면과 길이를 갖도록 제작한 PFRP I형 단면 압축재에 대한 좌굴강도실험을 실시하였으며, Choi et al.(2011)는 동일 단면의 PFRP I형 단면 압축재를 사전좌굴해석을 통해 half-sine curve의 개수를 달리하여 좌굴강도실험을 실시하였다. 또한 각각의 실험체에 대한 인장강도 시험, 압축강도시험 및 전단강도시험 등을 통해 재료의 역학적 성질을 정리하였다. 기존 연구에서 수행한 좌굴강도실험은 Fig. 7에 나타내었으며, 재료의 역학적 성질은 Table 1, 단면 형상 및 좌굴강도는 Table 2에 정리하였다. Table 1, 2에서 V1~V10, P1~P21은 각각 Yoon(1993)이 수행한 비닐에스터 및 폴리에스터 레진 FRP의 실험결과이며, P22는 Choi et al.(2011)에 의한 실험결과의 평균이다.

3.2 Analytical Results and Discussion

이 연구에서는 2장에 정리한 ASCE의 국부좌굴설계식(B)과 정밀해법에 의한 국부좌굴강도해석법을 적용하여 Table 2의 좌굴하중을 단면적으로 나누어 구한 좌굴강도와 비교하였다. 국부좌굴해석은 Table 1의 역학적 성질을 적용하여 수행하였으며, 해석결과는 Table 3에 정리하였으며, 비교 결과는 Table 4에 정리하였다. Table 3에서 f_{ex} (A)는 실험결과, f_d (B)는 ASCE 설계식을 적용한 결과, f_{cs} (C)는 정밀해법에 의한 결과를 의미하며, 강도감소계수는 적용하지 않았다.

해석결과 ASCE 설계식 및 정밀해법 모두 플랜지의 유효좌굴계수가 더 작았기 때문에, 모든 실험체는 플랜지의 국부좌굴강도에 의해 지배되었으며, 모든 경우에서 정밀해법에 의한 결과가 ASCE 설계법에 의한 결과보다 약 1.45배 이상 크게 나타났다(C/B). 또한 ASCE 설계식에 의한 결과는 실험결과에 비해 약 1.018~2.150배 차이를 나타내었고(A/B), 정밀해법에 의한 결과는 실험결과에 비해 약 0.705~1.141배 차이를 나타내었다(A/C). 따라서 ASCE 설계법에 의한 결과는 정밀해법에 의한 결과보다 상대적으로 정확한 좌굴강도를 평가할 수는 없으나, 모든 경우에서 더 작은 결과로 예측되었기 때문에 안전측 설계를 유도할 수 있음을 확인하였다.



(a) Yoon (1993) (b) Choi et al. (2011)

Fig. 7 Local Buckling Test

Table 1. Mechanical Properties (Yoon, 1993; Choi et al., 2011)

Specimen Designation	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	ν_{LT}
V1	18.8	11.1	3.3	0.309
V2	16.5	9.6	4.2	0.301
V3	18.0	10.7	3.3	0.326
V4	17.6	9.1	2.9	0.307
V5	18.0	9.4	3.2	0.309
V6	18.0	9.8	4.2	0.305
V7	18.1	10.5	4.3	0.331
V8	17.5	12.9	3.5	0.325
V9	17.7	8.9	3.8	0.310
V10	17.6	8.6	3.6	0.298
P1	16.3	8.4	3.7	0.302
P2	15.5	7.3	4.4	0.297
P3	14.9	8.5	3.2	0.300
P4	18.2	10.0	4.3	0.290
P5	18.4	8.1	3.5	0.295
P6	18.4	8.8	3.1	0.340
P7	16.7	7.0	3.5	0.320
P8	16.1	9.1	3.5	0.300
P9	18.7	8.3	5.1	0.323
P10	17.5	7.6	5.3	0.298
P11	16.0	6.8	3.2	0.305
P12	16.5	8.6	2.9	0.277
P13	17.1	6.4	4.2	0.315
P14	16.9	7.3	4.1	0.313
P15	17.7	8.1	4.0	0.280
P16	15.7	10.0	3.6	0.299
P17	17.5	7.5	3.1	0.310
P18	21.4	7.2	2.9	0.305
P19	20.2	7.4	3.1	0.305
P20	18.0	7.9	2.9	0.300
P21	18.1	6.1	3.3	0.295
P22	32.7	13.1	5.3	0.260

Table 2. Test Results (Yoon, 1993; Choi et al., 2011)

Specimen Designation	h and b (mm)	t (mm)	P_{cr} (kN)
V1	305	13	546
V2			516
V3			650
V4			570
V5	254	13	712
V6	254	10	259
V7	203	13	813
V8			803
V9	203	10	345
V10	152	10	468
P1	305	13	523
P2			525
P3			519
P4			501
P5			502
P6			499
P7			516
P8			521
P9	254	13	612
P10			601
P11			520
P12			560
P13	254	10	236
P14			246
P15			248
P16			246
P17	203	10	307
P18			354
P19			330
P20			326
P21	152	10	390
P22	150	10	790

Table 3. Experimental and Analytical Results

Specimen Designation	f_{ex} (A, MPa)	f_d (B, MPa)	f_{cs} (C, MPa)
V1	47.24	26.16	50.02
V2	44.65	33.30	54.07
V3	56.24	26.16	49.31
V4	49.32	22.99	43.67
V5	74.42	37.25	68.81
V6	34.91	28.22	46.66
V7	107.27	80.52	136.43
V8	105.95	65.54	127.08
V9	58.57	40.81	68.87
V10	107.34	71.41	122.78
P1	45.25	29.34	48.47
P2	45.43	34.89	52.07
P3	44.91	25.37	43.89
P4	43.35	34.09	56.13
P5	43.44	27.75	47.43
P6	43.18	24.58	45.59
P7	44.65	27.75	45.35
P8	45.08	27.75	47.65
P9	63.96	59.36	89.51
P10	62.81	61.69	89.12
P11	54.35	37.25	62.23
P12	58.53	33.75	62.24
P13	31.81	28.22	42.37
P14	33.15	27.55	42.75
P15	33.42	26.87	43.09
P16	33.15	24.19	41.74
P17	52.12	33.29	58.60
P18	60.10	31.14	58.09
P19	56.03	33.29	59.98
P20	55.35	31.14	57.38
P21	89.45	65.46	108.36
P22	183.68	107.55	194.06

Table 4. Comparison Results between Experiments and Analyses

Specimen Designation	A/B	A/C	C/B
V1	1.806	0.944	1.912
V2	1.341	0.826	1.624
V3	2.150	1.141	1.885
V4	2.145	1.129	1.900
V5	1.998	1.082	1.847
V6	1.237	0.748	1.653
V7	1.332	0.786	1.694
V8	1.617	0.834	1.939
V9	1.435	0.850	1.688
V10	1.503	0.874	1.719
P1	1.542	0.934	1.652
P2	1.302	0.872	1.492
P3	1.770	1.023	1.730
P4	1.272	0.772	1.647
P5	1.565	0.916	1.709
P6	1.757	0.947	1.855
P7	1.609	0.985	1.634
P8	1.625	0.946	1.717
P9	1.077	0.715	1.508
P10	1.018	0.705	1.445
P11	1.459	0.873	1.671
P12	1.734	0.940	1.844
P13	1.127	0.751	1.501
P14	1.203	0.775	1.552
P15	1.244	0.776	1.604
P16	1.370	0.794	1.726
P17	1.566	0.889	1.760
P18	1.930	1.035	1.865
P19	1.683	0.934	1.802
P20	1.777	0.965	1.843
P21	1.366	0.825	1.655
P22	1.708	0.947	1.804

4. CONCLUSION

이 연구에서는 최근 ASCE에서 제안한 PFRP 부재의 하중저항계수설계법 중 I형 단면 압축재의 국부좌굴강도에 대한 설계식의 적절성을 평가하기 위하여 정밀해법 및 기존 연구(Yoon, 1993; Choi et al., 2011)에서 수행한 실험결과와 비교분석하였다. ASCE에서 제시한 I형 단면 압축재의 국부좌굴강도는 정밀

해법에 의한 결과보다 정확성이 다소 부족하지만, 실제 거동에 비해 낮은 국부좌굴강도를 얻을 수 있기 때문에 안전측 설계를 유도하는 것으로 나타나 적절한 것으로 판단되었다.

References

- American Society of Civil Engineers (2010), *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Structures*, American Composites Manufacturers Association.
- Chae, S. H. (2005), A Study on the Analysis and Design of Orthotropic Thin-Walled Columns, *PhD Thesis*, Hongik University, Seoul. (in Korean).
- Choi, J. W. (2009), Local Buckling Load of Pultruded Structural Members with Material Properties Variations in the Cross-Section, *MS Thesis*, Hongik University, Seoul. (in Korean).
- Choi, J. W., Lee, K. Y., Park, J. H., and Yoon, S. J. (2012), "An Analytical Study on the Buckling of Orthotropic Plates and Local Buckling of Compression Members," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 3, No. 1, pp. 21-28. (in Korean).
- Choi, J. W., Lee, S., Joo, H. J., Kim, C. W., Ok, D. M., and Yoon, S. J. (2011), "Design Consideration of the Nonuniform Stress Distribution of Pultruded Structural Member under Compression," *Advanced Materials Research*, Vols. 250-253, pp. 3564-3570.
- Joo, H. J. (2003), A Study on the Local Buckling Analysis of Orthotropic I-Shape Compression Members, *MS Thesis*, Hongik University, Seoul. (in Korean).
- Joo, H. J. (2010), Buckling Behavior and Design of Pultruded Thin-Walled Open Section Compression Members, *PhD Thesis*, Seoul, Hongik University.
- Kollar, L. (2002), "Buckling of Unidirectionally Loaded Composite Plates with One Free and One Rotationally Restrained Unloaded Edge," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 9, pp. 1202-1211.
- Kollar, L. (2003), "Local Buckling of Fiber-Reinforced Plastic Composite Structural Members with Open and Closed Cross Sections," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 11, pp. 1503-1513.
- Lee, S. (2003), Flexural-Torsional Buckling of Pultruded T-Sections, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Yoon, S. J. (1993), Local Buckling of Pultruded I-Shape Columns, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Zureick, A. and Steffen, R. (2000), "Behavior and Design of Concentrically Loaded Pultruded Angle Struts," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 3, pp. 406-416.