

등근 모서리를 갖는 절곡 자유돌출판의 유효폭 분석

최병호^{1*} · 조광일² · 김태봉³

¹교수, 한밭대학교, 건설환경공학과, ²공학박사, Structure Research Group, POSCO, ³석사과정, 한밭대학교, 건설환경공학과

A Study on Effective Width of Press-Braked Steel Plates with a Free Edge

Choi, Byung Ho^{1*}, Cho, Kwang Il², Kim, Tae Bong³

¹Associate Prof, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Ph.D., Structure Research Group, POSCO, 21985, Korea

³M.Sc. Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

Abstract - This study numerically investigates buckling behavior of press braked steel plates with a free edge that consists of the upper flange of U-shaped box girder. Since the press-braked plates include a rounded edge, the effective width to thickness ratio of the press-braked upper flange is obscure to determine the nominal compressive strength. This study performed 3D finite element analyses to evaluate an equivalent effective width of cold-formed plate with a free edge. Through the parametric numerical analyses, the elastic buckling stresses of the rounded corner plates were compared with those of general flat plates and then, the equivalent effective width has been estimated. A comparative study with Euler buckling formula speculated in the domestic design specifications has been conducted.

Keywords - Buckling, Effective width-to-thickness ratio, Free-edge plate, Press-braked plate, Structural Stability

1. 서론

절곡 등 냉간성형을 위한 제작 장비와 성능이 향상되어감에 따라, 강재 후판을 절곡하는 방식으로써 Fig. 1에 보이는 바와 같이 비교적 단순한 단면(U형)을 갖는 강형의 제작이 가능하다. 이에 따라, U형 단면 거더의 플랜지와 복부판을 형성하는데 소요되는 절단이나 용접 등의 조립과정이 간소화되므로 이로 인한 경제적 효과가 기대된다. 이에 반해, 절곡 등 냉간성형은 한계반경에 의거하여 이뤄지므로 각 단면의 부재는 필연적으로 절곡부를 가진다^[1](Fig. 1). 힘을 받는 교량 거더의 현행 설계기준 및 지침^[2]은 용접제작을 염두한

각진 모서리 부를 갖는 단면의 공칭성능에 대해 주로 제시하고 있다. 따라서 절곡부를 가진 후판 단면부재에 대해 해당 규정을 적용하는 방안이 명확히 제시되고 있지 않으며, 특히 핵심 설계변수인 유효폭을 규정하기에 모호한 면이 있다. 뿐만 아니라, 절곡된 부위의 강재는 변형 경화로 인한 영향으로 재료특성도 달라지는 것으로 알려져 있다.

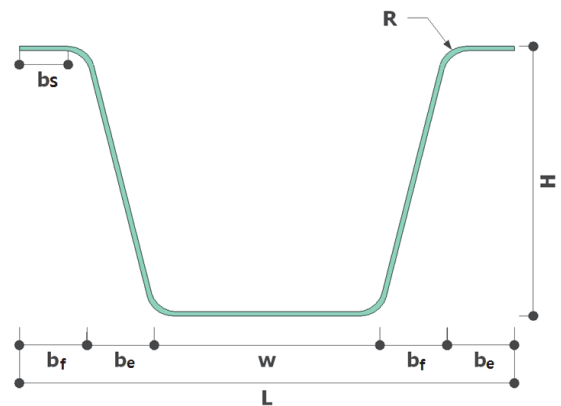


Fig. 1. U-shape section modular girder

Note.-Discussion open until April 29, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 4, 2016; revised July 19, 2016; approved on September 1, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1105 Fax. +82-42-821-1589

E-mail. bhchoi@hanbat.ac.kr

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 U형 단면 거더의 상부플랜지를 구성하는 곡면 모서리를 갖는 자유돌출판의 일축압축 좌굴특성을 수치 해석적으로 평가하고 이에 따른 적정 유효폭에 대해 논하고자 한다. 절곡 제작된 특성의 영향을 합리적으로 고려하기 위해 절곡부와 평탄부에서 각기 채취한 시편에 대해 실시한 인장강도 시험결과를 검토하였다. 절곡에 따른 곡면 모서리를 가진 자유돌출판의 해당 비지지 길이 구간 내 국부좌굴강도를 3차원 유한요소해석을 통해 평가하였고, 각진 모서리를 갖는 일반적인 자유돌출판의 좌굴강도와 유효폭-두께비(b/t)에 따라 상대적인 비교 분석을 실시하였다. 이로부터 절곡 상세의 좌굴강도에 대한 영향인자를 살펴보고 절곡부를 가진 자유돌출판의 적정 유효폭을 도출하였다. 국내 설계기준의 공칭 좌굴강도 공식에서 근거하고 있는 이론식과의 비교를 통해 해당 설계식의 적용 가능성에 대해 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 자유돌출판의 일축압축 좌굴강도 이론식

힘을 받는 교량 거더의 현행 설계기준 및 지침^[2]은 Fig. 2와 같은 자유돌출판의 공칭강도를 제시하고 있다. 이때, 자유돌출판의 유효폭(b)은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 제시되고 있으며, 본 규정이 주로 용접 제작을 염두한 각진 모서리부를 갖는 단면에 대한 것임을 볼 수 있다. 자유돌출판의 공칭강도는 유효폭-두께비(b/t)의 범위에 따라 아래 식 (1)이나 식 (2)에 의해 정해진다^[3].

$$f_{cr}/f_y = 1.0 \quad (R \leq 0.7) \tag{1}$$

$$f_{cr}/f_y = \frac{0.5}{R^2} \quad (R > 0.7) \tag{2}$$

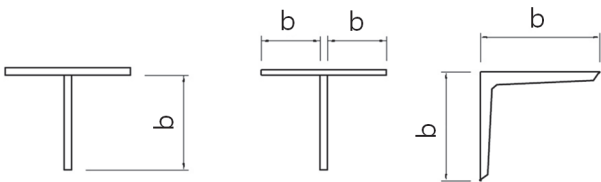


Fig. 2. Effective width of a plate with a free edge

여기서, $R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}}$

b : 판의 폭(mm)

t : 판의 두께(mm)

$\frac{b}{t}$: 유효폭-두께비

f_y : 강재의 항복점(MPa)

f_{cr} : 설계기준 공칭강도(MPa)

E : 탄성계수(MPa)

μ : 포와송비

k : 좌굴계수(자유돌출판에서 0.43)

평평한 자유돌출판의 국부판좌굴에 관한 Euler 좌굴강도식은 아래 식 (3)과 같다. 상기 식 (2)는 $R > 0.7$ 의 영역에서 Euler 좌굴강도의 1/2을 기준하여 제시된 것이다. 이는 폭과 두께의 비가 큰 영역에 한해서 면외 처짐이나 강도저하가 생기기 쉽다는 점을 고려해서 안전측으로 정해졌다^[3].

$$f_{cr}/f_y = \frac{1.0}{R^2} \tag{3}$$

2.2 등가유효폭(beq) 산정

Fig. 3에서 보이는 U형 단면 거더의 상부플랜지는 강판을 절곡하여 형성되어 길이 방향으로 동근 모서리를 가지므로 Fig. 2에 보이는 일반적인 평평한 자유돌출판과 단면 및 기하 형상에서의 차이가 분명하다. 이러한 절곡부를 갖는 자유돌출판의 국부판좌굴강도를 평가하는 데 있어서 식 (3)의 적용 방안이나 유효성이 명확하지 않다. 따라서 우선 곡면 모서리를 갖는 자유돌출판의 일축압축 국부판좌굴강도를 수치해석적으로 평가한 후 이를 유효폭-두께비에 따른 평판모형 자유돌출판의 좌굴강도곡선과 비교한다. 이러한 과정에

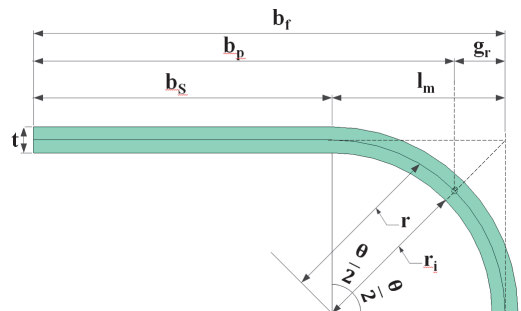


Fig. 3. Sectional view of rounded corner flanges

의해 평판모형 자유돌출판의 좌굴강도에 해당하는 유효폭이 파악될 수 있으며, 이를 둥근 모서리를 갖는 자유돌출판의 등가유효폭(b_{eq})으로써 추정할 수 있다.

Fig. 3에 표시된 바와 같이, 둥근 모서리를 갖는 플랜지의 폭에 관한 다양한 기하학적 파라미터들이 정의될 수 있다. b_r 는 북부판의 중심으로부터 자유돌출판 끝단에 이르는 폭이며, b_s 는 곡률이 없는 부분으로 즉, 절곡되지 않은 평탄부의 폭이 된다. 한편, 유러코드(Eurocode)^[4]는 냉간성형한 박판의 두께를 0.45~15mm 이내로 규정하고 있으며, 둥근 모서리를 갖는 단면에서 평평한 판 요소의 공칭 유효폭은 둥근 모서리에 서로 인접한 판 요소의 중간점 사이 간격인 b_p 로 결정된다. 둥근 모서리를 갖는 단면의 단면제원 특성은 아래 식(6)의 공칭 유효폭 b_p 에 근거해서 산정되었다. 유효폭(b_p)에 관해 다음과 같이 정하고 있다.

$$r = r_i + \frac{t}{2} \tag{4}$$

$$g_r = r \cdot \left[\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right] \tag{5}$$

$$b_p = b_f - g_r \tag{6}$$

여기서, r_i : 내부 휨 반경
 t : 판두께
 b_p : 공칭 유효폭

따라서 유러코드(Eurocode)에서 제시하는 b_p 는 이들 b_s 와 b_r 의 사이 어느 중간 값에 해당한다. 그러므로 본 논문에서는 등가유효폭(b_{eq})을 추정하기 위해 상기 플랜지 폭의 제원변수들에 대한 평판 자유돌출판의 국부판좌굴강도를 토대로 소요 좌굴강도곡선을 도출하고 절곡에 의해 둥근 모서리를 갖는 자유돌출판의 좌굴강도와 비교하였다.

3. 수치해석 모델링

3.1 단면제원

본 해석적 연구를 위한 해석모델은 Fig. 1과 같은 프로토타입 U형 모듈러 거더의 단면 중에서 절곡부를 가진 상부플랜지를 모사하였다(Fig. 3). 이러한 절곡된 U형 단면 강거더

는 반두께 강합성 바닥판에 의해 조기 합성하게 하여 시공 중 구조안전성을 높이고 횡비틀 좌굴의 영향을 최소화하도록 되어 있다. 반두께 강합성 바닥판은 절곡강판과 콘크리트에 의한 조기 합성구조로서, 거푸집 역할과 바닥판간 연결을 용이하게 수행하기 위해 연결포켓을 설치하여 폐합 단면을 형성한다. 따라서 상부플랜지의 면외 국부판좌굴에 대한 비 지지 길이는 콘크리트 바닥판과의 합성을 위한 포켓 간격에 해당되는 범위에서 형성된다. 이를 고려하여 절곡부를 가진 자유돌출판 해석모델의 단면 제원과 길이를 선정하였으며, 상세한 제원은 Table 1과 같다. 여기서, R은 절곡부를 가진 모형(Rounded corner)을 의미하며, 절곡부의 영향을 비교하기 위한 평판모형(Flat)은 F로 시작되는 모델명으로 구분하고 있다. 등가유효폭-두께비(b_{eq}/t)를 살펴보기 위해 각 동

Table 1. Free edge analysis model dimension

Model	t (mm)	L (mm)	r_i (mm)	b_f (mm)	b_p (mm)	b_s (mm)	l_m (mm)
R12L6T8	8	600	120	300	280	207	93
R12L6T10	10						
R12L6T12	12						
R12L6T15	15						
R12L6T18	18						
R12L6T24	24						
R12L12T8	8	1200	120	300	270	184	116
R12L12T10	10						
R12L12T12	12						
R12L12T15	15						
R12L12T18	18						
R12L12T24	24						
R13L6T10	10	600	130	300	270	184	116
R13L6T12	12						
R13L6T15	15						
R13L6T18	18						
R13L6T20	20						
R13L6T22	22						
R13L6T26	26	1200	130	300	270	184	116
R13L12T10	10						
R13L12T12	12						
R13L12T15	15						
R13L12T18	18						
R13L12T20	20						
R13L12T22	22	1200	130	300	270	184	116
R13L12T26	26						

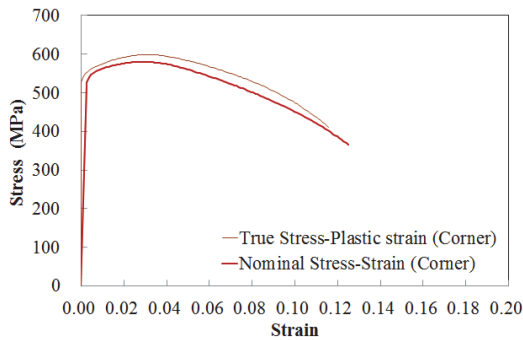
일한 두께의 자유돌출판 평판모형을 모델링하고 비교 변수 해석을 실시하였다 (Fig. 5의 (b) flat 타입). 여기서, b_p 는 절곡유효폭(b_p)으로써 앞서 설명된 바와 같이 유로코드 (Eurocode)^[4]에서 냉간성형 부재에 대해 제시하고 있는 유효폭을 의미한다.

3.2 재료특성

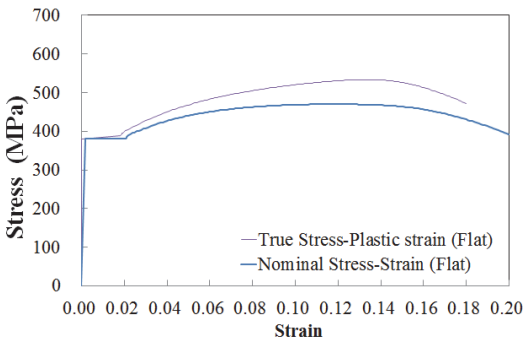
Fig. 4는 인장시험 결과^[5](HSB500, $r_i/t=5$)를 나타낸 응력-변형률 곡선이다. 인장시험 결과로부터 절곡부는 평탄부에 비해 항복강도는 증가하고 연성이 저감하는 재료특성이 명확히 드러남을 알 수 있다. 다만, 평탄부는 일반적으로 알려진 인장시험 시 결과와 강재의 재료특성과 대별되는 차이가 발견되지는 않았다. 따라서 본 연구에서는 상부플랜지 좌굴특성에 대한 절곡상세의 영향을 살펴보기 위해 고유치 해석을 수행하는 데 있어 현행 설계기준을 준용하여 재료의 탄성계수는 205,000MPa, 포아송비는 0.3을 각각 적용하였다.

3.3 유한요소모델링

유한요소모델은 절곡부를 가진 상부플랜지의 국부좌굴



(a) Rounded corner



(b) Flat region

Fig. 4. Stress-strain curve

영향 및 절곡단면 보에 적합한 단면강성의 설계 기준을 평가하기 위해 절곡모형(Rounded corner)과 평판모형(Flat)으로 구현하였으며, 핵심변수인 유효폭-두께비(b/t)의 영향을 검토하기 위해 강재 두께 8mm~26mm 범위에서 변수 해석을 실시하였다. 본 수치해석을 위해 유한요소해석 범용프로그램인 ABAQUS^[6]를 이용하였으며, S4R5 판 요소를 적용하였다. 경계조건은 바닥판 포켓 횡지지 간격을 기준한 단 순지지 조건을 적용하고 하중은 자유돌출판의 양 끝단에 길이 방향(X축) 면내 등분포하중을 재하 하였다.

해석모델의 종방향 길이는 포켓 간격에 의한 비지지 길이인 600mm를 기준으로 하고 실제 거더는 다수의 비지지 구간이 존재하는 점을 감안하여 1,200mm 모형도 함께 고려하였다. 본 탄성좌굴해석은 Lanczos 알고리즘을 사용하여 수행하였다.

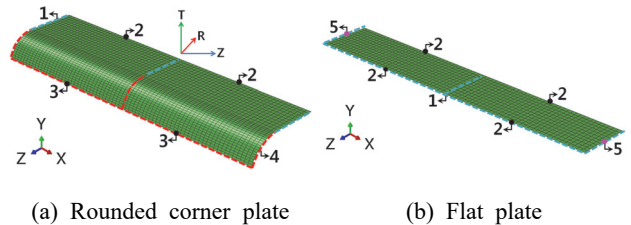


Fig. 5. Finite-element modeling with boundary condition

Table 2. Boundary condition

No.	U_x, U_r	U_y, U_θ	U_z, U_z	R_x, R_r	R_y, R_θ	R_z, R_z	Coord.System
1	○	●	○	○	○	○	Rectangular
2	●	○	○	○	○	○	Rectangular
3	○	○	●	○	○	○	Cylindrical
4	●	○	○	○	○	○	Cylindrical
5	○	○	●	○	○	○	Rectangular

○ Free ● Fixed

4. 해석결과

4.1 절곡부를 가진 자유돌출판의 좌굴모드

본 유한요소해석을 통해 나타난 절곡부를 가진 자유돌출판의 전형적인 좌굴모드는 Fig. 6에 보이는 바와 같고, 이에 비교될만한 삼면에서 지지된 평평한 자유돌출판의 좌굴모드는 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. 바닥판 포켓 간격 즉, 면외 방

향 거동의 비지지구간에서 반파장 사인(half-sine) 곡선의 면의 좌굴모드가 지배하는 것을 볼 수 있는데, 거더의 복부 판이 위치한 절곡부 또는 길이 방향 지지점으로부터 멀어질수록 면의 변위가 증가하는 거동이 뚜렷하며, 이는 절곡부를 가진 모형(Rounded corner)과 평평한 모형(Flat)에서 공통적으로 일어난다. 일정한 곡률에 의해 곡선 형상을 이루는 절곡부는 미약한 수준일지라도 제한적이거나 면의 방향의 좌굴거동이 연동되고 있는 것이 확인되었다. 이는 길이 방향으로 절곡 모서리를 가진 자유돌출판 부재의 유효폭을 적절히 결정하기 위한 중요한 근거가 될 것으로 보인다. 또한, 길이 방향 복수의 비지지 길이 모델의 좌굴모드에서 횡방향 거

동도 다소 나타나고 있어서 좌굴강도에 대한 영향을 검토해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.2 절곡 모서리를 가진 자유돌출판의 등가유효폭 추정

절곡 모서리를 가진 자유돌출판 모형의 등가유효폭(b_{eq})의 추정은 앞서 설명된 바와 같이 평판모형과의 압축좌굴강도와의 비교를 통해 이뤄졌다. Table 3은 유한요소해석으로부터 평가된 평판모형의 좌굴강도를 보이고 있으며, 각 모델의 단면 폭(b)은 Table 1에 제시된 b_s , b_p 및 b_f 등에 해당된다. 이를 토대로 Fig. 8과 같이 판두께 별로 유효폭에 따른 좌굴강도곡선이 작성되었다. 이로부터 등근 모서리를 갖는

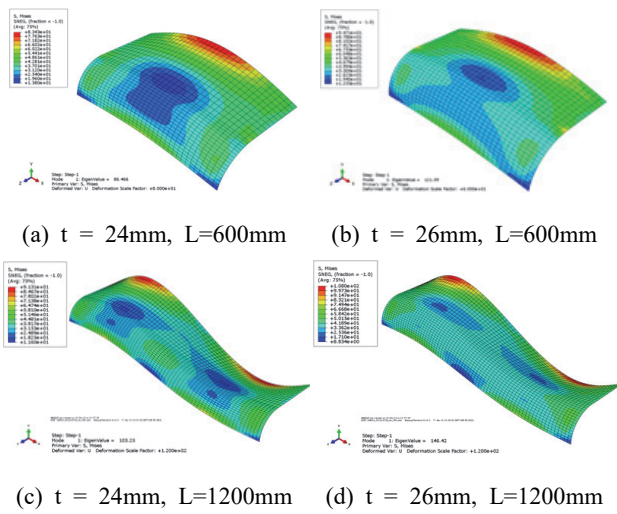


Fig. 6. Elastic buckling modes (Rounded corner)

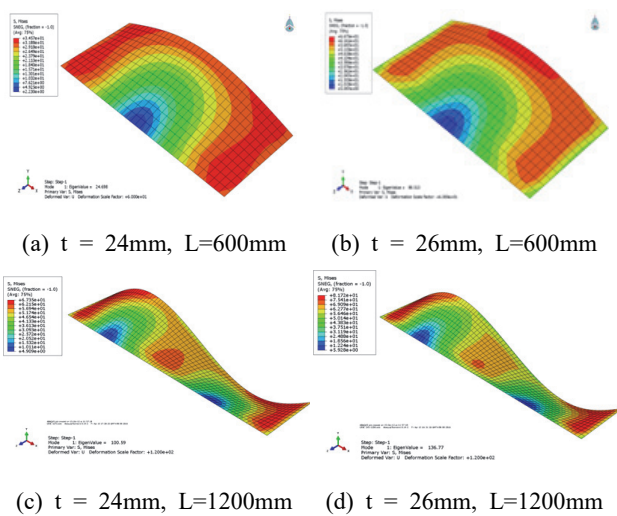


Fig. 7. Elastic buckling modes (Sharp corner, Flat)

Table 3. Elastic buckling stress of flat plate models along width b

Model	t (mm)	L (mm)	F _{cr} (MPa)		
			when b=b _f	when b=b _p	when b=b _s
F_R12L6T8	8	600	87.7	95.9	148.4
F_R12L6T10	10	600	136.5	149.2	230.7
F_R12L6T12	12	600	196.0	214.0	330.0
F_R12L6T15	15	600	304.0	332.0	510.0
F_R12L6T18	18	600	435.0	474.0	726.0
F_R12L6T24	24	600	759.0	827.0	1256.0
F_R12L12T8	8	1200	100.5	110.9	179.0
F_R12L12T10	10	1200	156.7	172.8	278.5
F_R12L12T12	12	1200	225.0	248.0	389.0
F_R12L12T15	15	1200	350.0	385.0	617.0
F_R12L12T18	18	1200	500.0	551.0	880.0
F_R12L12T24	24	1200	878.0	965.0	1527.0
F_R13L6T10	10	600	136.5	156.7	278.0
F_R13L6T12	12	600	196.0	224.6	397.5
F_R13L6T15	15	600	304.0	348.0	613.0
F_R13L6T18	18	600	435.0	497.0	871.0
F_R13L6T20	20	600	533.0	609.0	1064.0
F_R13L6T22	22	600	642.0	733.0	1275.0
F_R13L6T26	26	600	885.0	1010.0	1742.0
F_R13L12T10	10	1200	156.7	182.3	341.1
F_R13L12T12	12	1200	225.0	262.0	488.0
F_R13L12T15	15	1200	349.0	406.0	754.0
F_R13L12T18	18	1200	500.0	580.0	1072.0
F_R13L12T20	20	1200	615.0	713.0	1312.0
F_R13L12T22	22	1200	741.0	859.0	1572.0
F_R13L12T26	26	1200	1025.0	1185.0	2153.0

자유돌출판의 좌굴강도에 해당하는 유효폭을 파악하였고, 이에 대한 추세선 분석을 통해 절곡된 자유돌출판의 등가유효폭(b_{eq})을 추정하였다. 추정된 등가유효폭 값은 유리코드의 절곡유효폭(b_p)에 비해 대체적으로 작게 평가되었으며, 판두께에 따라 상당한 편차가 있다. 플랜지의 폭-두께비가 낮을수록, 즉 두께가 증가할수록 절곡유효폭(b_p)에 근접하는 것이 확인된다. 참고로, Fig. 8에 나타낸 각 좌굴강도 곡선의 좌측단과 우측단은 각각 평판의 폭이 b_f 및 b_s 인 경우의 좌굴강도에 해당되며, 중간 값은 평판 폭이 b_p 인 경우이다.

추정된 등가유효폭(b_{eq})을 검증하기 위해 이를 적용한 평판모형의 좌굴강도를 등근 모서리를 갖는 자유돌출판의 좌굴강도와 비교 분석하였다(Table 4). 등근 모서리를 갖는 자유돌출판 강도에 비해 각 경우에 따라 최대 약 8.1% 이내 차이로 근접한 보수적인 결과를 제시하고 있으며, 일관된 경향을 확인하였다. 이는 본 제안 방식으로 추정된 등가유효폭이 등근 모서리를 갖는 자유돌출판의 국부좌굴강도를 산정하

는데 있어서 충분한 유의미한 특성을 보여준다.

Fig. 9를 보면 절곡부를 가진 자유돌출판과 평판의 좌굴강도(Flat)를 유효폭-두께비에 따라 나란히 나타내고 있다. 이때, 절곡모서리를 가진 자유돌출판의 좌굴강도(Rounded corner)는 추정된 등가유효폭(b_{eq})을 적용하였다. 동일한 함수관계로써 표현될만한 유사한 경향을 보이고 있어 이를 통해 추정된 등가유효폭이 유효하며, 이러한 방법이 절곡모서리를 가진 자유돌출판의 공칭강도를 일관성 있게 제시하는데도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 유의미한 등가유효폭을 합리적으로 정립하면 기존 평판 자유돌출판의 공칭강도 기준을 활용해서 절곡부를 가진 자유돌출판의 압축좌굴강도를 적합하게 평가될 수 있을 것이다.

Fig. 10은 해석데이터를 근거로 하여 추정된 등가유효폭(b_{eq}) 추세식을 나타내고 있는데, 여기서 $Z = (b_p/t)^{-0.4}$ 로서, 절곡유효폭(b_p)과 판두께와의 높은 연관성을 보이며 절곡 곡률반경에 따른 영향도 볼 수 있다. 유사한 방식으로 보다 다

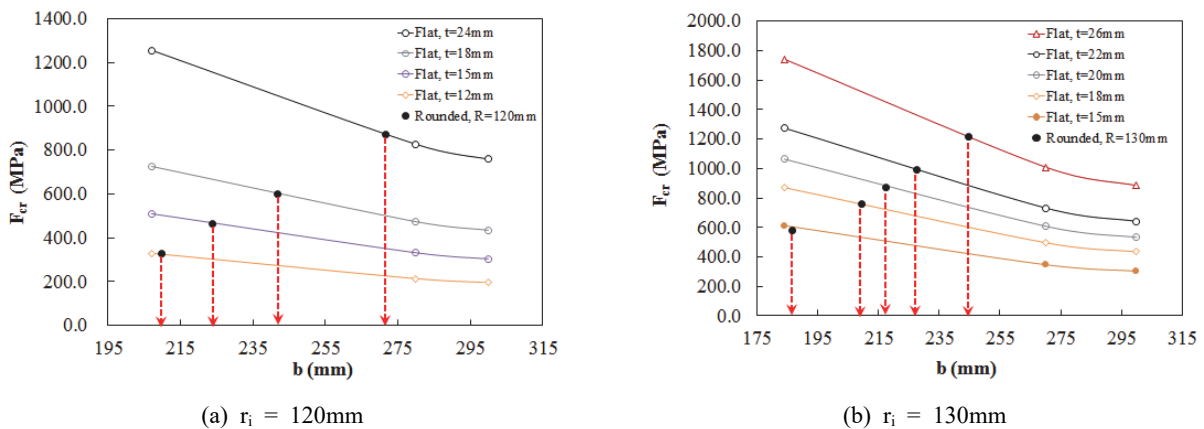


Fig. 8. Comparison of press-braked flange with flat plate

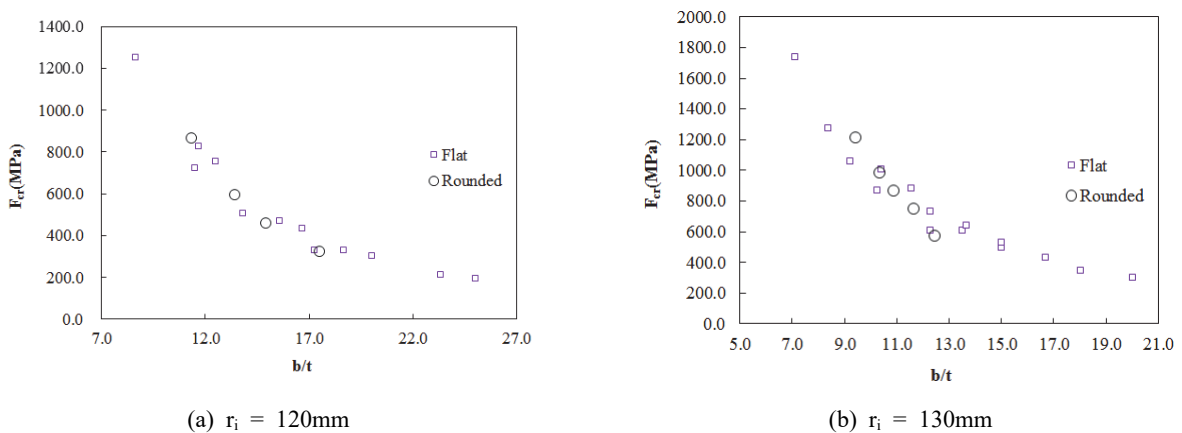


Fig. 9. Buckling strength along with the effective width to thickness ratio

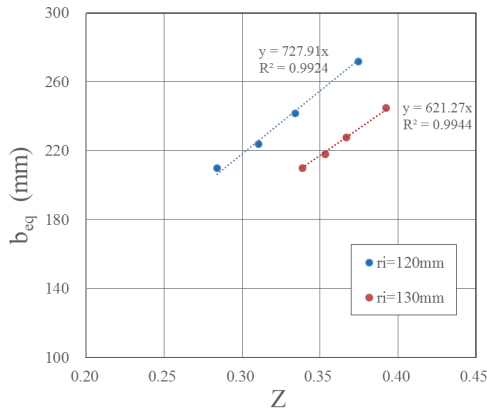


Fig. 10. Trend line analysis for the effective width, b_{eq}

양한 파라미터에 대한 변수연구를 통해 일반적인 범위에 적용될 등가유효폭 회귀식이 제안될 수 있을 것으로 사료된다. 이를 공칭강도식에 응용될 수 있으려면 비선형해석 등을 통해 검증되어야 할 것이다.

4.3 일축압축 좌굴강도식과의 비교 평가

평판 자유돌출판의 일축압축 탄성좌굴강도를 나타내는 식 (3)에 등가유효폭(b_{eq})을 적용한 결과를 등근 모서리를 갖는 자유돌출판의 좌굴강도와 비교하였다. Table 5에 나타난 분석 결과를 보면, 식 (3)을 적용해서 평가된 좌굴강도는 수치해석 결과에 비해 약 10~40%의 보수적인 특성을 보인다.

Table 4. Verification of equivalent effective width(b_{eq})

Model	t (mm)	L (mm)	b_{eq} (mm)	b_{eq}/t	F_{cr} (MPa)		
					Rounded corner	Sharp corner, Flat	Diff. (%)
R12L6T8	8	600	195	24.4	164.0	162.5	-0.9
R12L6T10	10	600	200	20.0	241.0	242.9	0.8
R12L6T12	12	600	210	17.5	325.0	323.1	-0.6
R12L6T15	15	600	224	14.9	458.0	453.2	-1.0
R12L6T18	18	600	242	13.4	593.0	578.1	-2.5
R12L6T24	24	600	272	11.3	865.0	859.5	-0.6
R12L12T8	8	1200	190	23.8	217.0	218.7	0.8
R12L12T10	10	1200	195	19.5	315.0	308.6	-2.0
R12L12T12	12	1200	210	17.5	418.0	389.7	-6.8
R12L12T15	15	1200	224	14.9	574.0	542.3	-5.5
R12L12T18	18	1200	242	13.4	728.0	685.7	-5.8
R12L12T24	24	1200	272	11.3	1035.0	1005.9	-2.8
R13L6T10	10	600	175	17.5	291.6	300.5	3.1
R13L6T12	12	600	182	15.2	398.0	404.3	1.6
R13L6T15	15	600	187	12.5	571.0	571.0	0.0
R13L6T18	18	600	210	11.7	749.0	711.1	-5.1
R13L6T20	20	600	218	10.9	867.0	823.4	-5.0
R13L6T22	22	600	228	10.4	984.0	925.3	-6.0
R13L6T26	26	600	245	9.4	1211.0	1149.5	-5.1
R13L12T10	10	1200	175	17.5	375.4	372.0	-0.9
R13L12T12	12	1200	182	15.2	501.0	496.9	-0.8
R13L12T15	15	1200	189	12.6	723.0	721.5	-0.2
R13L12T18	18	1200	210	11.7	935.0	860.2	-8.0
R13L12T20	20	1200	218	10.9	1073.0	992.1	-7.5
R13L12T22	22	1200	228	10.4	1207.0	1109.2	-8.1
R13L12T26	26	1200	245	9.4	1464.0	1367.7	-6.6

Table 5. Comparison of FEA results with buckling strength equation

Model	t (mm)	L (mm)	b (mm)			b_{eq}/t	b_p/t	F_{cr}				
			b_{eq}	b_p	Diff. (%)			FEA, Rounding (MPa)	Eq. (3), b_{eq}/t		Eq. (3), b_p/t	
									MPa	Diff. (%)	MPa	Diff. (%)
R12L6T8	8	600	195	280	-30.4	24.4	35.0	164.0	134.3	-18.1	65.2	-60.3
R12L6T10	10	600	200	280	-28.6	20.0	28.0	241.0	199.5	-17.2	101.8	-57.8
R12L6T12	12	600	210	280	-25.0	17.5	23.3	325.0	260.6	-19.8	146.6	-54.9
R12L6T15	15	600	224	280	-20.0	14.9	18.7	458.0	357.9	-21.9	229.1	-50.0
R12L6T18	18	600	242	280	-13.6	13.4	15.6	593.0	441.6	-25.5	329.9	-44.4
R12L6T24	24	600	272	280	-2.9	11.3	11.7	865.0	621.4	-28.2	586.4	-32.2
R12L12T8	8	1200	190	280	-32.1	23.8	35.0	217.0	141.5	-34.8	65.2	-70.0
R12L12T10	10	1200	195	280	-30.4	19.5	28.0	315.0	209.9	-33.4	101.8	-67.7
R12L12T12	12	1200	210	280	-25.0	17.5	23.3	418.0	260.6	-37.6	146.6	-64.9
R12L12T15	15	1200	224	280	-20.0	14.9	18.7	574.0	357.9	-37.6	229.1	-60.1
R12L12T18	18	1200	242	280	-13.6	13.4	15.6	728.0	441.6	-39.3	329.9	-54.7
R12L12T24	24	1200	272	280	-2.9	11.3	11.7	1035.0	621.4	-40.0	586.4	-43.3
R13L6T10	10	600	175	270	-35.2	17.5	27.0	291.6	260.6	-10.6	109.5	-62.4
R13L6T12	12	600	182	270	-32.6	15.2	22.5	398.0	347.0	-12.8	157.7	-60.4
R13L6T15	15	600	187	270	-30.7	12.5	18.0	571.0	513.6	-10.1	246.4	-56.9
R13L6T18	18	600	210	270	-22.2	11.7	15.0	749.0	586.4	-21.7	354.7	-52.6
R13L6T20	20	600	218	270	-19.3	10.9	13.5	867.0	671.8	-22.5	438.0	-49.5
R13L6T22	22	600	228	270	-15.6	10.4	12.3	984.0	743.1	-24.5	529.9	-46.1
R13L6T26	26	600	245	270	-9.3	9.4	10.4	1211.0	898.9	-25.8	740.1	-38.9
R13L12T10	10	1200	175	270	-35.2	17.5	27.0	375.4	260.6	-30.6	109.5	-70.8
R13L12T12	12	1200	182	270	-32.6	15.2	22.5	501.0	347.0	-30.7	157.7	-68.5
R13L12T15	15	1200	189	270	-30.0	12.6	18.0	723.0	502.8	-30.5	246.4	-65.9
R13L12T18	18	1200	210	270	-22.2	11.7	15.0	935.0	586.4	-37.3	354.7	-62.1
R13L12T20	20	1200	218	270	-19.3	10.9	13.5	1073.0	671.8	-37.4	438.0	-59.2
R13L12T22	22	1200	228	270	-15.6	10.4	12.3	1207.0	743.1	-38.4	529.9	-56.1
R13L12T26	26	1200	245	270	-9.3	9.4	10.4	1464.0	898.9	-38.6	740.1	-49.4

이는 두께가 증가할수록 편차가 커지는데 이는 탄성좌굴에 근거한 분석이므로, 비탄성좌굴에 해당되는 유효폭-두께 범위에 대해서는 추후 재료 특성의 영향을 고려한 엄밀한 분석이 필요한 것으로 사료된다.

식 (3)에 절곡유효폭(b_p)을 적용한 좌굴강도 값의 해석결과와의 편차는 등가유효폭(b_{eq})을 적용한 경우에 비해 두 배 이상 더 크게 나타나고 있다. 따라서 본 논문에서 분석된 등가유효폭(b_{eq})을 적용하면 보다 합리적인 좌굴강도의 평가가 이뤄질 것으로 판단된다. 아울러, 자유돌출판의 압축강도 평가 시에 일률적으로 절곡유효폭(b_p)을 적용하면 경우에 따라서 지나치게 보수적일 수 있으므로 개선될 필요성이 제기될 수 있으며, 본 논문의 접근방식이 이에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 앞서 좌굴모드 분석에서 보인 길이 방향 복수의 반사인곡선 좌굴에서 나타난 횡방향 거동의 영향은 유의미할 정도로 크지 않았다. 오히려, 상당

한 강도증가 수준을 보이고 있으므로, 보편적으로 다수 개의 반사인곡선 좌굴 모드 특성을 가질 플랜지 좌굴강도를 산정할 때 이러한 효과에 대해서도 심도 있게 평가될 필요성이 있을 것으로 보인다.

5. 결론

본 논문에서는 등근 모서리를 갖는 자유돌출판의 적정 유효폭-두께비를 분석하기 위해 일축압축 국부판좌굴강도를 수치 해석적으로 평가하고, 유효폭-두께비에 따른 평판모형 자유돌출판의 좌굴강도 곡선과의 비교 연구를 수행하였다. 이때, 절곡된 자유돌출판의 재료특성을 해석모델의 절곡부에 반영하였다. 본 연구로부터 도출된 주요 결론은 다음과 같다. (1) 축방향 압축을 받는 절곡부를 가진 자유돌출판의 좌굴모

드는 거더의 복부판 즉, 길이 방향의 지지점으로부터 멀어질수록 면외 변형이 반사인곡선 형상으로 증가하는 거동이 나타났다. 이는 절곡부가 없는 평평한 자유돌출판의 좌굴거동과 유사하다.

- (2) 절곡부를 가진 자유돌출판에 대해 추정된 등가유효폭은 유티코드의 절곡유효폭(b_p)에 비해 대체적으로 작게 평가되었으며, 판두께에 따른 상당한 편차가 있다. 본 연구범위내에서 플랜지의 폭-두께비가 낮을수록, 즉 두께가 증가할수록 절곡유효폭(b_p)에 근접하는 경향이 확인되었다.
- (3) 국내 도로교설계기준의 자유돌출판 기준강도식에 절곡유효폭(b_p)을 적용하여 등근 모서리를 갖는 자유돌출판의 좌굴강도를 산정하면 상당히 보수적인 평가가 이뤄질 것으로 파악되었으며, 추후 개선할 필요성이 있다. 해당 범위에 대해 본 논문의 해석결과에서 파악된 등가유효폭(b_{eq})을 적용하면 보다 합리적인 좌굴강도의 평가가 이뤄질 것으로 사료된다.
- (4) 길이 방향 복수의 반사인곡선 좌굴거동에서 상당한 강도증가를 보이고 있으므로, 보편적으로 다수 개의 반사인곡선 좌굴 모드 특성을 가질 플랜지 좌굴강도를 산정할 때 이러한 효과에 대해서도 심도있게 평가될 필요성이 보인다. 비탄성좌굴범위에 대해서는 추후 재료 특성의 영향을 고려한 엄밀한 분석이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 10기술혁신B01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 김태봉, 김정원, 최병호(2015) 절곡부를 가진 자유돌출판의 일축압축 좌굴응력 수치해석, 한국복합신소재구조학회 학술발표대회 논문집, 한국복합신소재구조학회, pp.69-71. Kim, T.B., Kim, J.W., and Choi, B.H. (2015) Numerical Analysis on Buckling Stress of Press-Braked Steel Plate with a Free Edge Under Uni-axial Compression, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, pp.69-71 (in Korean).
- [2] 국토해양부(2010) 도로교설계기준. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [3] 대한토목학회(2008) 도로교설계기준 해설, 기문당. Korea Society of Civil Engineers (2008) *Commentary for Highway Bridge Design Standard*, Kimoonang, Korea (in Korean).
- [4] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-3: General Rules - Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheet piling* (EN 1993-1-3), Belgium.
- [5] 최수영, 최병호(2013) 후판 절곡 Z형 보의 내부 힘 반경에 따른 연성거동, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제13권, 제1호, pp.97-103. Choi, S.Y., and Choi, B.H. (2013) Bending Behavior of Thick-Walled Press-Braked Z-Section Beams with Inside Bend Radii, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.13, No.1, pp.97-103 (in Korean).
- [6] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus Analysis User's Manual*, Ver. 6.14, DSS, USA.

요 약 : 본 논문은 절곡 제작된 U형 단면 거더의 상부플랜지를 구성하는 자유돌출판의 좌굴거동 특성에 논하고자 한다. 절곡된 판 부재는 등근 모서리를 가지므로 단면의 유효폭-두께비가 불명확하고 이에 따라 공칭 압축강도를 산정하는 데 모호한 면이 있다. 냉간성형에 의해 등근 모서리를 갖는 자유돌출판의 등가유효폭을 평가하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 절곡에 따른 재료특성과 기하학적 특성을 반영하였다. 본 변수 해석적 연구로부터 각진 모서리를 갖는 일반적인 자유돌출판의 좌굴강도와 비교 분석하여 등가유효폭-두께비를 추정하였다. 국내 설계기준의 공칭 좌굴강도식이 근거하고 있는 이론식과의 비교를 통해 기준공식의 적용 방안에 대해 검토하였다.

핵심용어 : 구조안정성, 좌굴강도, 유효폭-두께비, 자유돌출판, 절곡
