

다수의 T-단면 보강재로 보강된 압축판의 좌굴계수 평가

박용명^{1*}

¹교수, 부산대학교, 사회기반시스템공학과

Evaluation of Buckling Coefficients for Compression Plates Reinforced with Multiple T-section Stiffeners

Park, Yong Myung^{1*}

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

Abstract - A study was conducted to propose a buckling coefficient equation for a wide compression plate reinforced with multiple T-section stiffeners. The commentary C6.11.11.2 of AASHTO LRFD bridge design specifications presents a buckling coefficient equation for the plates with up to 5 stiffeners. This equation is based on the approximate buckling coefficient equation(k_f) of Timoshenko and Gere, but it has the limitation of being unable to determine the size of stiffeners considering the aspect ratio and the magnitude of buckling coefficient. A series of eigenvalue analysis was performed for plates with up to 9 stiffeners, including the aspect ratio, width-to-thickness ratio and the size of stiffeners as variables. By comparing the buckling coefficient from FE analysis with the k_f equation, correction factor(c_c) was derived for $n \leq 3$ and $n > 3$ (n : number of stiffeners) respectively and a buckling coefficient equation incorporating c_c was proposed. In addition, a method for calculating the second moment of inertia of the stiffener was proposed when determining the buckling coefficient.

Keywords - Compression plate, Multiple stiffeners, Buckling coefficient equation, Aspect ratio, Moment of inertia of stiffener

1. 서론

강박스 거더의 압축플랜지와 같은 압축판은 소정의 좌굴강도 확보를 위해 종방향보강재로 보강하게 된다 (Fig. 1)^{[1]-[3]}. 현재 AASHTO LRFD 교량설계기준(이하 AASHTO 기준)^[4]과 국내 KDS 기준^[5]에서는 좌굴계수로부터 정의한 판의 ‘조밀’ 및 ‘비조밀’ 한계세장비에 따라 보강판의 압축강도를 산정토록 하고 있어 좌굴계수의 정확한 평가가 중요하다.

AASHTO 기준의 본문 6.11.11.2에서는 보강재 개수 (n) ≤ 2일 때 보강재의 단면2차모멘트(I_s)에 따른 좌굴계수 산정식을 제시하고 있다. 보강재는 횡비틀림좌굴

(lateral torsional buckling)에 유리한 T-단면을 전제로 하며, I_s 값은 보강재의 하단에 대해 산정하도록 규정하고 있다. $n \leq 2$ 로 제한한 이유는 본문 규정의 식은 종방향보강재가 매우 길다는 가정으로 인해 n 이 증가할수록 보강재 제원이 과도하게 커지는 문제가 있기 때문이다^[6].

한편, AASHTO 기준의 해설부 C6.11.11.2에서는 $n \leq 5$ 까지의 판에 적용할 수 있는 좌굴계수식을 별도로 제시하고 있다. 이 식은 Timoshenko and Gere^[7]가 에너지법으로 유도한 좌굴강도(F_{cr}) 식을 토대로 한 것이다. 단, 해설부의 좌굴계수식은 판의 형상비와 좌굴계수 크기에 따른 보강재의 제원을 유연하게 결정할 수 없는 제약이 있다. 또한 Timoshenko and Gere의 식은 좌굴 형상을 종방향 및 횡방향(Fig. 1의 x 축 및 y 축 방향)으로 각각 half-sine wave로 가정한 근사식에 해당된다. 이에 Wang *et al.*^[8]은 Timoshenko and Gere 식의 적정성을 평가하기 위해 $n \leq 3$ 에 대해 판의 형상비, 세장비(폭-두께비) 그리고 보강재의 제원 변화에 따른 좌굴계수 평가 해석을 수행하고 Timoshenko and Gere의 식에 보정계수(c_c)를 적용한 좌굴계수식을 제안한 바 있다.

Note.-Discussion open until February 28, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 12, 2024; revised on August 05, 2024; approved on August 08, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-2350 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. ympk@pusan.ac.kr

거더 폭이 큰 해상 교량과 같은 경우에는 다수의 종방향 보강재가 필요할 수 있다. 본 연구의 목적은 다수의 보강재가 적용되고 서브패널 형상비($\alpha = a/w$, Fig. 1 참조)가 큰 범위까지 Timoshenko and Gere의 좌굴계수식의 적용성을 평가하는 것이다. 이를 위해 $n \leq 9$, 즉 서브패널 10개까지에 대해 판의 형상비, 세장비 및 보강재의 제원 변수를 고려한 좌굴고유치해석을 수행하고 보강재의 단면2차모멘트 산정 방안과 좌굴계수 산정식을 제안하였다.

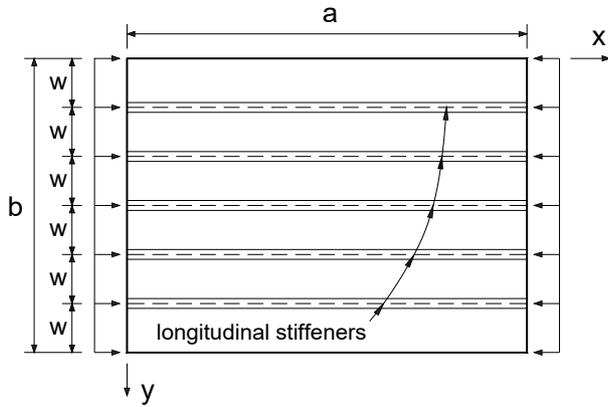


Fig. 1. Longitudinally stiffened plate ($n = 5$)

2. 압축판의 좌굴계수식

2.1 AASHTO 기준

본문 6.11.11.2에서는 $n = 1, 2$ 에 대해 좌굴계수식을 다음 식 (1)로 제시하고 있다. 식 (1)은 종방향보강재가 매우 길다는 가정에 의한 것이어서 형상비 관련 변수가 포함되지 않는다.

$$k = \left(\frac{8I_s}{wt_f^3} \right)^{1/3} : n = 1 \quad (1a)$$

$$k = \left(\frac{0.894I_s}{wt_f^3} \right)^{1/3} : n = 2 \quad (1b)$$

여기서, 주목할 사항은 보강재는 T-단면으로 적용하되 단면2차모멘트(I_s)는 압축판의 면(즉, T-단면 보강재의 하단)에 대해 산정하도록 규정하고 있다.

한편, 해설부에서는 $n \leq 5, \beta \leq 3$ 인 조건에서 다음 식 (2)의 적용을 허용하고 있다.

$$k = \frac{(1 + \beta^2)^2 + 87.3}{(n + 1)^2 \beta^2 [1 + 0.1(n + 1)]} \leq 4.0 \quad (2)$$

여기서 $\beta (= a/b)$ 는 압축판의 세장비이다. 단, 본 기준에서는 식 (2)의 적용 시 T-단면 보강재의 $I_s = 8wt_f^3$ (t_f : 판의 두께, w : 서브패널 폭)가 되도록 규정하고 있어 판의 형상비와 목표 좌굴계수 크기에 따른 보강재의 제원을 유연하게 결정할 수 없다.

식 (2)는 Timoshenko and Gere^[7]가 에너지법으로 유도한 좌굴강도(F_{cr}) 식으로부터 최종 유도되는 다음 식 (3)을 토대로 한 것이다. 식 (3)은 형상비를 고려하고 목표 좌굴계수 값에 해당하는 보강재 제원의 선정이 가능하다.

$$k_f = \frac{(1 + \beta^2)^2 + (n + 1)\gamma}{(n + 1)^2 \beta^2 [1 + (n + 1)\delta]} \quad (3)$$

여기서,

$$\gamma = \frac{EI_s}{bD} \quad (4a)$$

$$\delta = \frac{A_l}{bt_f} \quad (4b)$$

그리고, $D = Et_f^3/12(1 - \nu^2)$: 판의 휨강성, $\nu (= 0.3)$: 포아송 비, A_l : 보강재 1개의 단면적이며, γ 와 δ 는 각각 보강재 1개의 ‘휨강성비’와 ‘단면적비’이다.

2.2 Wang et al.의 좌굴계수식

Wang et al.^[8]은 압축판의 형상비와 목표 좌굴계수 값에 따라 보강재 제원을 결정할 수 있도록 하기 위해 식 (3)의 적용성을 평가하였다. 이를 위해 판의 형상비, 서브패널의 폭-두께비($\lambda_f = w/t_f$), 그리고 보강재의 제원을 주요 변수로 하여 보강재 3개까지에 대해 좌굴고유치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 바탕으로 식

(3)에 수정계수(c_f)를 도입하여 좌굴계수 산정식을 다음 식 (5a) 및 식 (5b)로 제안하였다.

• $\beta/\beta_{cr} \leq 1.0$ 일 때

$$k_{fc} = \frac{(1 + \beta^2)^2 + (n + 1)\gamma}{(n + 1)^2 \beta^2 [1 + (n + 1)\delta]} \cdot c_f \leq 4.0 \quad (5a)$$

• $\beta/\beta_{cr} > 1.0$ 일 때

$$k_{fc} = k_{f,\min} = \frac{2[1 + \sqrt{1 + (n + 1)\gamma}]}{(n + 1)^2 [1 + (n + 1)\delta]} \quad (5b)$$

여기서, β_{cr} 은 식 (3)의 k_f 가 최소값을 보이는 한계 형상 비로서 다음과 같다.

$$\beta_{cr} = \sqrt[4]{1 + (n + 1)\gamma} \quad (6)$$

$$c_f = \left(\frac{\beta}{\beta_{cr}}\right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (7)$$

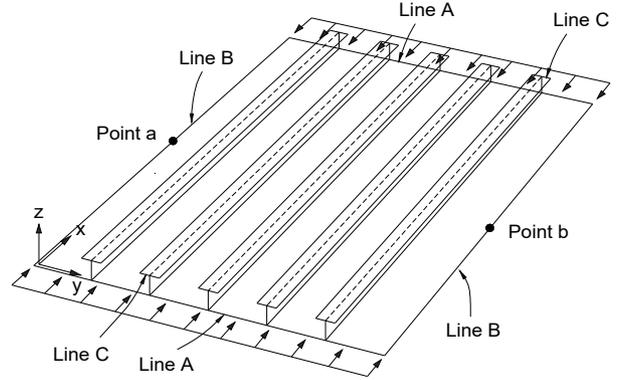
Wang *et al.* 역시 식 (4a)의 γ 산정 시 I_s 를 AASHTO 기준과 같이 보강재의 하단에 대한 단면2차모멘트로 고려하였다.

3. 전산 모델 및 예비 분석

3.1 전산 모델

보강판의 좌굴고유치해석은 ABAQUS 프로그램^[9]으로 수행하였다. 판과 T-단면 보강재는 모두 S4R 쉘 요소로 모델링하였으며, 요소의 크기는 20 mm × 20 mm 내외로 충분히 세분화하였다. 경계조건은 Fig. 2에 $n=5$ 의 예를 보였으며, 여기서 U 는 이동변위, R 은 회전변위이다. Line A에는 x 축 방향 이동변위(U_x)를 동일하게 부여하기 위해 ‘coupling: kinematic’ 옵션을 적용하였다.

본 모델은 4변 모두 단순지지 조건에 해당하여 인접 패널에 의한 구속 효과(즉, continuity effect)를 고려하지 않으므로 안전측의 좌굴계수를 제공할 것이다. 한편 하중은 Fig. 2에 보인 바와 같이 압축플랜지와 보강재



* Compression loads were also applied to the stiffeners (not shown)

| Location | U_x | U_y | U_z | R_x | R_y | R_z |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Point a | fix | fix | - | - | - | - |
| Point b | fix | - | - | - | - | - |
| Line A, B | - | - | fix | - | - | - |
| Line C | - | - | - | fix | - | - |

Fig. 2. Loadings and boundary conditions ($n = 5$)

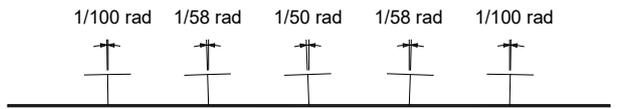


Fig. 3. Initial imperfection of stiffeners at centerline

에 단위 압축응력(1 MPa)에 해당하는 선하중을 재하하였다.

한편, 보강재의 초기처짐을 고려하였으며 Fig. 3에 보인 바와 같이 종방향의 중앙선을 기준으로 횡방향으로는 중앙점에서 최대 1/50 rad 회전된 것으로 고려하였다.

3.2 단면2차모멘트 산정 방안 및 좌굴계수식 도출을 위한 예비 분석

좌굴계수식의 도출을 위한 본 해석에 앞서 예비 분석을 수행하였다. $n=5$, $t_f=32$ mm, $w=600$ mm로 하였으며 간격(a)과 보강재 제원은 Table 1에 제시하였다. Table 1에서 k_{FEA} 는 좌굴고유치해석에 의한 좌굴계수이며 $a=1,500$ mm와 $a=9,000$ mm의 좌굴형상을 Fig. 4에 예시하였다(Fig. 4는 좌굴형상을 명확히 보이기 위해 요소 크기를 (a) 45 mm × 45 mm와 (b) 60 mm × 60 mm로 크게 한 것임).

Table 1에서 I_s 는 AASHTO 기준에 따라 T-보강재 하

Table 1. Preliminary analysis cases ($n=5, t_f=32\text{ mm}, w=600\text{ mm}$)

| a (mm) | β | T-stiffener ($H \times B \times t_w \times t_s$) | k_{FEA} | I_s (AASHTO) | | | I_{sc} (centroidal axis) | | |
|-------------|---------|---|-----------|--|--------------------|------------------|---|--------------------|------------------|
| | | | | I_s ($\times 10^6\text{ mm}^4$) | β/β_{cr} | k_f Eq. (3) | I_{sc} ($\times 10^6\text{ mm}^4$) | β/β_{cr} | k_f Eq. (3) |
| 1,500 | 0.625 | 125×190×10×10 | 2.21 | 32.4 | 0.20 | 2.68 | 32.4 | 0.20 | 2.68 |
| 1,500 | 0.625 | 135×200×12×12 | 2.85 | 47.4 | 0.18 | 3.69 | 47.4 | 0.18 | 3.69 |
| 2,400 | 1.0 | 150×230×13×13 | 1.89 | 72.7 | 0.26 | 2.13 | 72.7 | 0.26 | 2.13 |
| 4,000 | 1.67 | 185×280×15×15 | 1.36 | 156.9 | 0.36 | 1.53 | 146.0 | 0.37 | 1.43 |
| 6,000 | 2.5 | 215×320×18×18 | 1.01 | 290.3 | 0.47 | 1.18 | 243.7 | 0.49 | 1.01 |
| 9,000 | 3.75 | 265×400×22×22 | 0.85 | 672.9 | 0.57 | 1.09 | 481.7 | 0.62 | 0.82 |

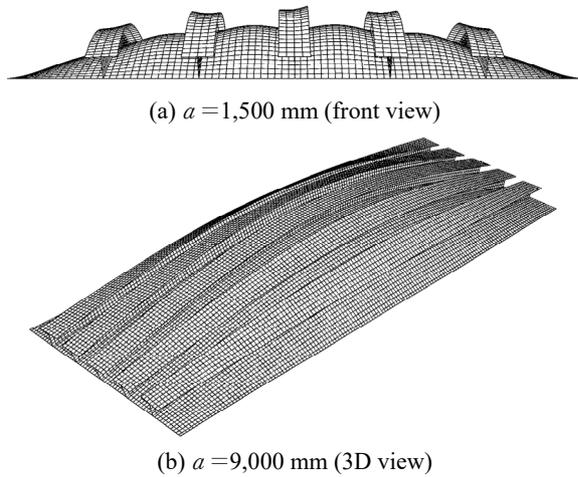


Fig. 4. Buckling shapes : $n=5, t_f=32\text{ mm}$,
 (a) $a=1,500\text{ mm}$, T-135×200×12×12,
 (b) $a=9,000\text{ mm}$, T-265×400×22×22

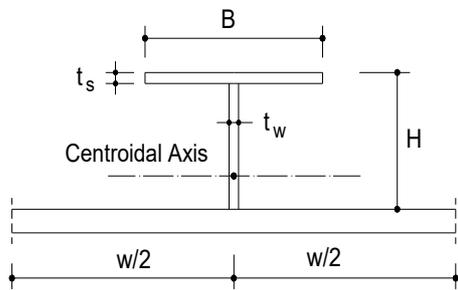


Fig. 5. Considered section for I_{sc} (second moment of inertia of stiffener and sub-panel about centroid)

단에 대해 산정한 단면2차모멘트이다. 반면 I_{sc} 는 압축판(총폭 b)과 보강재들이 이루는 총단면의 도심축에 대해 서브패널과 보강재가 이루는 단면(Fig. 5 참조)의 단면2차모멘트이다. 단, 도심축이 압축판의 면내에 있는 경우에는 I_s 와 같다고 고려하였다. 이로부터 각 경우별 β_{cr} 과 k_f 를 식 (6)과 식 (3)으로부터 산정하였다.

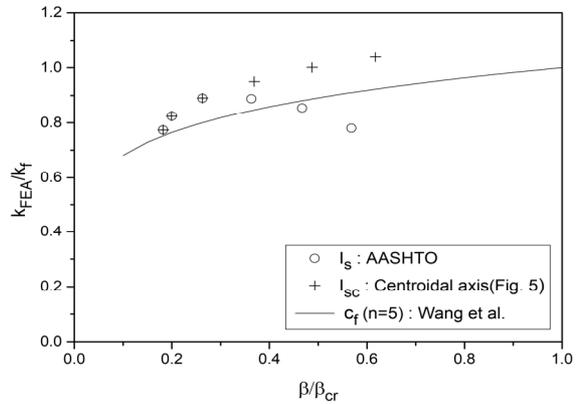


Fig. 6. β/β_{cr} vs. k_{FEA}/k_f (k_f based on I_s and I_{sc})

단면2차모멘트 산정 방식별 k_{FEA}/k_f 비를 Fig. 6에 도시하였다. 이로부터 AASHTO 방식으로 산정한 I_s 적용 시 형상비 변수 β/β_{cr} 이 증가함에 따라 k_{FEA}/k_f 비가 다시 감소하는 결과를 보인다. 보강재 개수가 적은 경우 및 보강재 제원이 크지 않은 경우(일반적으로 형상비가 작을 때)에는 압축판과 보강재들이 이루는 총단면의 도심이 압축판 내 또는 보강재 하단 근처에 있게 된다. 이에 따라 Timoshenko and Gere는 압축판의 기여는 작으므로 무시하고 보강재의 단면2차모멘트를 보강재 하단에 대해 산정토록 규정하였으며^[7], AASHTO 기준도 이를 따르고 있다. 그러나, 보강재 수가 많은 경우와 보강재의 제원이 커지면 도심은 보강재의 스템 내에 존재하게 된다. 이 경우 $I_s > I_{sc}$ 가 되며, 따라서 Fig. 6으로부터 단면2차모멘트를 I_{sc} 로 고려하는 것이 적절함을 알 수 있다.

한편, β/β_{cr} 이 작을수록 k_{FEA}/k_f 비가 감소하는 이유는 식 (3)의 k_f 가 좌굴모드를 종방향과 횡방향으로 half-sine wave로 가정하여 유도된 반면, Fig. 4(a)에서와 같이 횡방향으로 보강재 위치에서 국부변형의 발생

으로 인한 차이가 발생하며 β/β_{cr} 이 작을수록 그 영향이 커지기 때문이다. 이를 고려하고자 Wang *et al.*^[8]은 $n \leq 3$ 에 대해 수정계수(c_f)를 식 (7)로 제안하였다. 만약 $n=5$ 인 경우에 적용하면 $c_f = (\beta/\beta_{cr})^{1/6}$ 이 되며 이를 Fig. 6에 도시하였다. 이로부터 I_{sc} 를 적용하더라도 보강재 개수가 많은 경우($n > 3$)에는 보정계수를 새로이 도출하여야 함을 보여준다.

4. 고유치해석 및 좌굴계수식 제안

4.1 고유치해석 및 결과

보강재 개수(n)는 3, 5, 7 및 9, 서브패널의 폭-두께비 (λ_f)는 18.8과 33.3, 그리고 서브패널의 폭(w)은 600 mm, 형상비(α)는 15까지 고려하였다. $\alpha = 15$ 일 때 간격 (a)은 9,000 mm가 되는데, 이는 Hall and Yoo^[10]가 강박스거더교에서 뒤틀림응력(distortional stress)을 제한하기 위해 제안한 최대 간격 30 feet(=9.14 m)에 해당된다. 보강재의 제원은 형상비에 따라 식 (3)의 k_f 가 4.0에

서 1.0의 값을 갖도록 선정하였다. 좌굴해석 경우와 결과를 Table 2에서 Table 5까지 제시하였다. 이들 Table에서 보강재의 단면2차모멘트($I_{s,min}$)은 다음과 같다.

- 총단면 도심이 압축판 내에 있는 경우 : 압축판의 기여는 무시하고 보강재의 압축판 면에 대한 단면2차모멘트(= I_s)
- 총단면의 도심이 보강재 스템 내에 있는 경우(Fig. 5) : 도심축에 대한 보강재와 서브패널판의 단면2차모멘트(= I_{sc}). 단, 도심이 보강재 스템 내에 있으나 압축판의 표면에 가까울 때 I_{sc} 가 I_s 보다 조금 크게 되는 경우가 있는데, 이 때는 I_s 를 적용한다.

즉, 보강재의 단면2차모멘트는 I_s 와 I_{sc} 중 작은 값을 적용하기로 한다. 이로부터 k_{FEA} 와 식 (3)에 따라 산정한 k_f 의 비를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7로부터 β/β_{cr} 이 작을수록, 또한 판의 세장비(λ_f)가 작을수록 k_{FEA}/k_f 비가 더 작은 결과를 보인다.

Table 2. Analysis cases and results for $n=3$ ($w=600$ mm, $b=2,400$ mm)

| t_f (mm) | a (mm) | aspect ratio | T-stiffener $H \times B \times t_w \times t_s$ | $I_{s,min}$ ($\times 10^6$ mm ²) | k_{FEA} | k_f Eq. (3) | This study | | $\frac{k_{FEA}}{k_c}$ |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|--|-----------|------------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| | | | | | | | β/β_{cr} | k_c Eq. (8) | |
| 32 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.63$ | 125×190×10×10 | 32.429 | 2.32 | 2.75 | 0.30 | 2.02 | 1.15 |
| | | | 135×200×12×12 | 47.381 | | | 0.27 | 2.69 | 1.09 |
| | 2,400 | $\alpha = 4.0$ $\beta = 1.0$ | 150×230×13×13 | 72.713 | 1.99 | 2.22 | 0.39 | 1.74 | 1.14 |
| | | | 175×265×15×15 | 126.507 | | | 0.34 | 2.64 | 1.09 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 1.67$ | 185×280×15×15 | 146.998 | 1.52 | 1.60 | 0.55 | 1.36 | 1.12 |
| 225×340×19×19 | | | 289.525 | 0.47 | | | 2.09 | 1.15 | |
| 6,000 | $\alpha = 10.0$ $\beta = 2.5$ | 215×320×18×18 | 245.610 | 1.27 | 1.27 | 0.73 | 1.17 | 1.09 | |
| 9,000 | $\alpha = 15.0$ $\beta = 3.75$ | 255×380×21×21 | 424.680 | 1.72 | 1.73 | 0.64 | 1.53 | 1.12 | |
| 18 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.63$ | 90×135×8×8 | 9.457 | 3.81 | 4.34 | 0.27 | 3.08 | 1.24 |
| | | | 110×165×10×10 | 21.420 | | | 0.35 | 2.71 | 1.21 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 1.67$ | 140×210×12×12 | 47.358 | 2.62 | 2.65 | 0.48 | 2.18 | 1.20 |
| | | | 165×245×14×14 | 81.347 | | | 0.63 | 1.78 | 1.17 |
| | 9,000 | $\alpha = 15.0$ $\beta = 3.75$ | 180×270×15×15 | 107.966 | 1.62 | 1.56 | 0.87 | 1.50 | 1.08 |

Table 3. Analysis cases and results for $n = 5$ ($w = 600$ mm, $b = 3,600$ mm)

| t_f (mm) | a (mm) | aspect ratio | T-stiffener $H \times B \times t_w \times t_s$ | $I_{s,min}$ ($\times 10^6$ mm ²) | k_{FEA} | k_f Eq. (3) | This study | | $\frac{k_{FEA}}{k_c}$ |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|--|--------------|------------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| | | | | | | | β/β_{cr} | k_c Eq. (8) | |
| 32 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.42$ | 125×190×10×10 | 32.429 | 2.21 | 2.68 | 0.20 | 1.96 | 1.13 |
| | | | 135×200×12×12 | 47.381 | 2.85 | 3.69 | 0.18 | 2.64 | 1.08 |
| | 2,400 | $\alpha = 4.0$ $\beta = 0.67$ | 150×230×13×13 | 72.713 | 1.89 | 2.13 | 0.26 | 1.67 | 1.13 |
| | | | 175×265×15×15 | 125.678 | 2.77 | 3.37 | 0.23 | 2.56 | 1.08 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 1.11$ | 185×280×15×15 225×340×19×19 | 146.004 287.126 | 1.36 2.24 | 1.43 2.40 | 0.37 0.31 | 1.22 1.97 | 1.11 1.14 |
| 6,000 | $\alpha = 10.0$ $\beta = 1.67$ | 215×320×18×18 255×380×21×21 | 243.666 420.906 | 1.01 1.48 | 1.01 1.48 | 0.49 0.43 | 0.92 1.31 | 1.10 1.13 | |
| 9,000 | $\alpha = 15.0$ $\beta = 2.5$ | 265×400×22×22 | 481.740 | 0.85 | 0.82 | 0.62 | 0.80 | 1.06 | |
| 18 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.42$ | 90×135×8×8 | 9.457 | 3.74 | 4.26 | 0.18 | 3.03 | 1.23 |
| | | | 110×165×10×10 | 21.304 | 3.15 | 3.44 | 0.23 | 2.62 | 1.20 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 1.11$ | 140×210×12×12 | 47.028 | 2.44 | 2.48 | 0.32 | 2.04 | 1.20 |
| | | | 165×245×14×14 | 80.692 | 1.80 | 1.76 | 0.42 | 1.55 | 1.16 |
| | 9,000 | $\alpha = 15.0$ $\beta = 2.5$ | 180×270×15×15 | 107.043 | 1.13 | 1.07 | 0.58 | 1.03 | 1.10 |

Table 4. Analysis cases and results for $n = 7$ ($w = 600$ mm, $b = 4,800$ mm)

| t_f (mm) | a (mm) | aspect ratio | T-stiffener $H \times B \times t_w \times t_s$ | $I_{s,min}$ ($\times 10^6$ mm ²) | k_{FEA} | k_f Eq. (3) | This study | | $\frac{k_{FEA}}{k_c}$ |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|--|--------------|------------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| | | | | | | | β/β_{cr} | k_c Eq. (8) | |
| 32 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.31$ | 125×190×10×10 | 32.429 | 2.22 | 2.65 | 0.15 | 1.94 | 1.14 |
| | | | 135×200×12×12 | 47.381 | 2.83 | 3.66 | 0.14 | 2.62 | 1.08 |
| | 2,400 | $\alpha = 4.0$ $\beta = 0.5$ | 150×230×13×13 | 72.713 | 1.86 | 2.10 | 0.20 | 1.65 | 1.13 |
| | | | 175×265×15×15 | 125.402 | 2.74 | 3.34 | 0.17 | 2.53 | 1.08 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 0.83$ | 185×280×15×15 225×340×19×19 | 145.674 286.345 | 1.32 2.19 | 1.39 2.37 | 0.28 0.23 | 1.19 1.94 | 1.11 1.13 |
| 6,000 | $\alpha = 10.0$ $\beta = 1.25$ | 215×320×18×18 255×380×21×21 | 243.030 419.691 | 0.95 1.42 | 0.95 1.43 | 0.37 0.32 | 0.87 1.27 | 1.09 1.12 | |
| 9,000 | $\alpha = 15.0$ $\beta = 1.88$ | 265×400×22×22 | 480.322 | 0.76 | 0.74 | 0.46 | 0.71 | 1.07 | |
| 18 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.31$ | 90×135×8×8 | 9.457 | 3.71 | 4.24 | 0.13 | 3.01 | 1.23 |
| | | | 110×165×10×10 | 21.266 | 3.12 | 3.41 | 0.17 | 2.59 | 1.20 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 0.83$ | 140×210×12×12 | 46.919 | 2.40 | 2.44 | 0.24 | 2.01 | 1.19 |
| | | | 165×245×14×14 | 80.478 | 1.74 | 1.70 | 0.31 | 1.50 | 1.16 |
| | 9,000 | $\alpha = 15.0$ $\beta = 1.88$ | 180×270×15×15 | 106.744 | 1.03 | 0.98 | 0.44 | 0.94 | 1.10 |

Table 5. Analysis cases and results for $n=9$ ($w = 600$ mm, $b = 6,000$ mm)

| t_f (mm) | a (mm) | aspect ratio | T-stiffener $H \times B \times t_w \times t_s$ | $I_{s,min}$ ($\times 10^6$ mm ²) | k_{FEA} | k_f Eq. (3) | This study | | $\frac{k_{FEA}}{k_c}$ |
|---------------|-------------|-----------------------------------|---|--|-----------|------------------|--------------------|------------------|-----------------------|
| | | | | | | | β/β_{cr} | k_c Eq. (8) | |
| 32 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.25$ | 125×190×10×10 | 32.429 | 2.21 | 2.64 | 0.12 | 1.94 | 1.14 |
| | | | 135×200×12×12 | 47.381 | 2.81 | 3.65 | 0.11 | 2.61 | 1.08 |
| | 2,400 | $\alpha = 4.0$ $\beta = 0.4$ | 150×230×13×13 | 72.713 | 1.85 | 2.09 | 0.16 | 1.64 | 1.13 |
| | | | 175×265×15×15 | 125.278 | 2.72 | 3.33 | 0.14 | 2.53 | 1.08 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 0.67$ | 185×280×15×15 | 145.525 | 1.30 | 1.38 | 0.22 | 1.18 | 1.10 |
| | | 225×340×19×19 | 285.997 | 2.17 | 2.35 | 0.19 | 1.92 | 1.13 | |
| 18 | 1,500 | $\alpha = 2.5$ $\beta = 0.25$ | 90×135×8×8 | 9.457 | 3.69 | 4.22 | 0.11 | 3.0 | 1.23 |
| | | | 110×165×10×10 | 21.248 | 3.09 | 3.39 | 0.14 | 2.58 | 1.20 |
| | 2,400 | $\alpha = 4.0$ $\beta = 0.4$ | 140×210×12×12 | 46.870 | 2.37 | 2.43 | 0.19 | 2.0 | 1.19 |
| | | | 165×245×14×14 | 80.383 | 1.71 | 1.68 | 0.25 | 1.48 | 1.15 |
| | 4,000 | $\alpha = 6.67$ $\beta = 0.67$ | 180×270×15×15 | 106.611 | 0.99 | 0.95 | 0.35 | 0.91 | 1.09 |

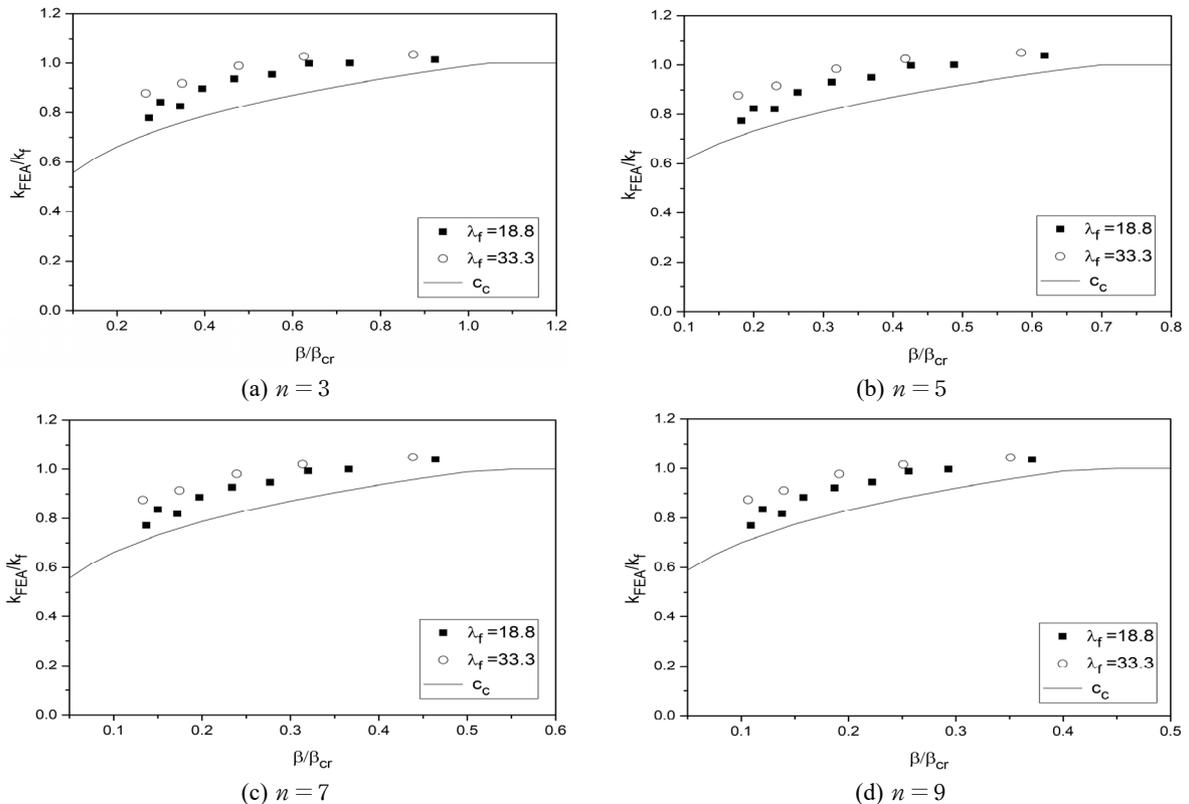


Fig. 7. β/β_{cr} vs. k_{FEA}/k_f

4.2 좌굴계수식 제안

Fig. 7로부터 합리적인 좌굴계수식의 도출을 위해서는 식 (3)의 k_f 식에 수정계수가 필요함을 보여준다. 곡선접합(curve fitting)으로부터 $\lambda_f=18.8$ 과 $\lambda_f=33.3$ 의 평균값에 해당하는 수정계수식을 도출한 후, 안전율을 감안하되 λ_f 가 작을수록 k_{FEA}/k_f 비가 더 작은 값을 보이므로 $\lambda_f=18.8$ 의 경우를 포괄하도록 최종 수정계수식(c_c)을 도출하였다. 세장비 $\lambda_f=18.8$ 은 항복강도 460 MPa까지의 강박스거더에서 최소 세장비 수준으로 생각된다.

$\beta/\beta_{cr} \leq 1.0$ 일 때 적용되는 보정계수 c_c 는 $n \leq 3$ 과 $n > 3$ 으로 구분하여 도출하였으며, 이를 적용한 좌굴계수 k_c 는 다음 식 (8), 식 (9a) 및 식 (9b)와 같다.

$$\bullet \beta/\beta_{cr} \leq 1.0 : k_c = k_f \cdot c_c \leq 4.0 \quad (8)$$

$$n \leq 3 : c_c = \min(0.7[(n+1)\frac{\beta}{\beta_{cr}}]^{\frac{1}{n+1}}, 1.0) \quad (9a)$$

$$n > 3 : c_c = \min(0.7[(n+1)\frac{\beta}{\beta_{cr}}]^{0.25}, 1.0) \quad (9b)$$

$$\bullet \beta/\beta_{cr} > 1.0 : k_c = k_{f,\min} \quad (10)$$

Fig. 7(a)–(d)에 보정계수 c_c 를 도시하였다. 한편 $\beta/\beta_{cr} > 1.0$ 일 때 식 (10)의 $k_{f,\min}$ 은 앞의 식 (5b)와 같다. Table 2–Table 5에 제시한 k_{FEA}/k_c 값으로부터 k_c 식은 다수의 보강재가 설치된 압축판에서 좌굴계수를 합당하게 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 $n=1$ 과 2에 대해 별도의 좌굴해석을 수행하지 않았으나, 식 (9a)의 c_c 는 Wang *et al.*^[8]이 제안한 식 (7)의 c_f 와 단지 1 % 차이를 보인다. 따라서 c_c 는 $n=1$ 과 2에서도 타당할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 폭이 큰 압축판을 고려하기 위해 다수의 T-단면 보강재로 보강된 압축판의 좌굴계수식을 제안하기 위한 연구를 수행하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 광폭의 압축판을 고려하고 판의 형상비에 따른 합리적인 보강재 제원을 결정할 수 있도록 보강재 개수(n)는 9개까지, 서브패널의 형상비(a)는 15까지, 그리고 판의 폭-두께비(λ_f)는 18.8과 33.3의 조건에 대해 좌굴고유치해석을 수행하였다. 에너지법으로부터 유도된 식 (3)의 좌굴계수 k_f 와 FE 해석에 의한 좌굴계수 k_{FEA} 와의 차이를 보정하기 위한 보정계수 c_c 를 $n \leq 3$ 과 $n > 3$ 에 대해 구분하여 식 (9a)와 식 (9b)로 제안하였다. 이로부터 좌굴계수(k_c)는 $\beta/\beta_{cr} \leq 1.0$ 과 $\beta/\beta_{cr} > 1.0$ 일 때 각각 식 (8)과 식 (10)으로부터 구한다.
- (2) 좌굴계수 산정 시 AASHTO 기준은 T-보강재의 단면2차모멘트(I_s)를 보강재의 하단(즉, 압축플랜지의 면)에 대해 산정하도록 규정하고 있는데, 이는 압축판과 보강재들이 이루는 총단면의 도심이 압축판 내에 있다는 가정에 의한 것이다. 그러나, 보강재 개수가 많은 경우 및 보강재 제원이 커지는 경우(형상비 증가에 따라) 총단면의 도심이 T-보강재의 스템 내에 있게 된다. 이 경우, 도심이 압축판의 표면에 가까운 경우를 제외하면 도심에 대해 보강재와 서브패널이 이루는 단면의 단면2차모멘트 I_{sc} (Fig. 5 참조)가 I_s 보다 통상 작게 된다. 이에 따라 k_f 산정시 T-보강재의 단면 2차모멘트는 I_s 와 I_{sc} 중 작은 값을 적용하는 것이 타당한 것으로 나타났다.
- (3) 제안한 좌굴계수식(k_c)이 AASHTO 기준에서 정의한 보강판의 압축강도를 합당하게 평가하는지 여부는 초기처짐과 잔류응력을 고려한 비선형해석으로부터 추후 검증할 예정이다.

참고문헌(References)

- [1] Narayanan, R. (1983) *Plated Structures: Stability and Strength*, Applied Science Publishers, London and New York.
- [2] Yoo, C.H., Choi, B.H., and Ford, E.M. (2001) Stiffness Requirements for Longitudinally Stiffened Box-girder Flanges, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp.705-711.
- [3] Kim, K.S. (2019) In-Plane Compressive Strength of

- Hybrid Steel Stiffened Plate with Single Stiffener, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.1, pp.65-73 (in Korean).
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (2020) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (9th Ed.), AASHTO, USA.
- [5] Korea Construction Standards Center (2024) *Design Standards for Steel Members(Load and Resistance Factored Design)*, KDS 14 31 10, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).
- [6] Choi, B.-H. (2002) *Design Requirements for Longitudinal Stiffeners for Horizontally Curved Box Girders*, Ph.D. Dissertation, Auburn University, USA.
- [7] Timoshenko, S., and Gere, J.M. (1961) *Theory of Elastic Stability* (2nd Ed.), McGraw-Hill, USA.
- [8] Wang, L., Park, Y.M., Liu, Y., and Choi, B.H. (2021) Proposal of Buckling Coefficient Equation Considering Aspect Ratio of Compression Plates Stiffened with Tees, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.5, pp.275-283 (in Korean).
- [9] Dassault Systèmes Simulia (2022) *Abaqus Analysis User's Manual*, DSS, USA.
- [10] Hall, D.H., and Yoo, C.H. (1998) *Improved Design Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges*, NCHRP Project 12-38, National Cooperative Highway Research Program, USA, Appendix D.

요약: 본 연구에서는 폭이 큰 압축판에서 다수의 T-단면 보강재로 보강된 판의 좌굴계수식을 제안하기 위한 연구를 수행하였다. AASHTO LRFD 교량설계기준의 해설부 C6.11.11.2에서 보강재 5개까지 갖는 판에 대해 좌굴계수식을 제시하고 있다. 이 식은 Timoshenko and Gere의 근사적인 좌굴계수식(k_f)을 토대로 한 것이나, 형상비와 좌굴계수의 크기를 감안한 보강재의 제원을 결정할 수 없는 문제가 있다. 본 연구에서는 보강재 9개까지의 판에 대해 형상비와 폭-두께비 그리고 보강재 제원을 변수로 하여 고유치해석을 수행하였다. FE 해석에 의한 좌굴계수를 k_f 식과 비교함으로써 수정계수(c_c)를 보강재 개수(n)에 따라 $n \leq 3$ 과 $n > 3$ 에 대해 각각 도출하고 이를 반영한 좌굴계수식을 제안하였다. 한편, 좌굴계수 산정 시 보강재의 단면2차모멘트 산정 방안에 대해 제안하였다.

핵심용어: 압축판, 다수 보강재, 좌굴계수식, 형상비, 보강재 단면2차모멘트
