

# 다수의 T-단면 보강재로 보강된 압축판의 좌굴계수 평가

박용명<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>교수, 부산대학교, 사회기반시스템공학과

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

Park, Yong Myung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, 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)<sup>[1]-[3]</sup>. 현재 AASHTO LRFD 교량설계기준(이하 AASHTO 기준)<sup>[4]</sup>과 국내 KDS 기준<sup>[5]</sup>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<sup>[6]</sup>.

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<sup>[7]</sup>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.*<sup>[8]</sup>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.

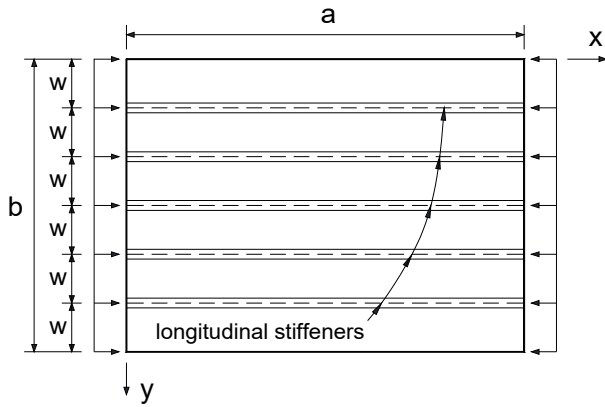


Fig. 1. Longitudinally stiffened plate ( $n = 5$ )

## 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<sup>[7]</sup>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,  $\gamma$ 와  $\delta$ 는 각각 보강재 1개의 ‘휨강성비’와 ‘단면적비’이다.

### 2.2 Wang et al.의 좌굴계수식

Wang et al.<sup>[8]</sup>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,  $\beta_{cr}$ 은 식 (3)의  $k_f$ 가 최소값을 보이는 한계 형상 비로서 다음과 같다.

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

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

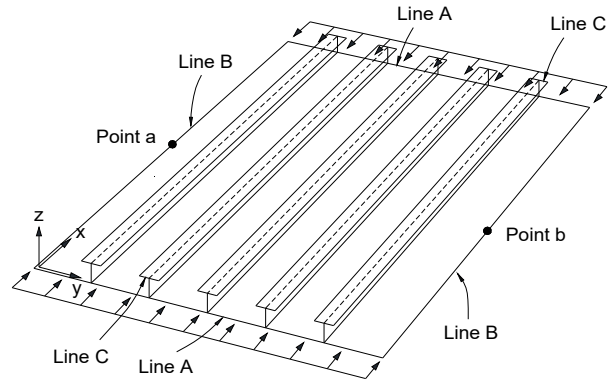
Wang *et al.* 역시 식 (4a)의  $\gamma$  산정 시  $I_s$ 를 AASHTO 기준과 같이 보강재의 하단에 대한 단면2차모멘트로 고려하였다.

### 3. 전산 모델 및 예비 분석

#### 3.1 전산 모델

보강판의 좌굴고유치해석은 ABAQUS 프로그램<sup>[9]</sup>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 ( $n = 5$ )

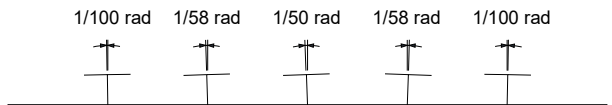


Fig. 3. Initial imperfection of stiffeners at centerline

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.

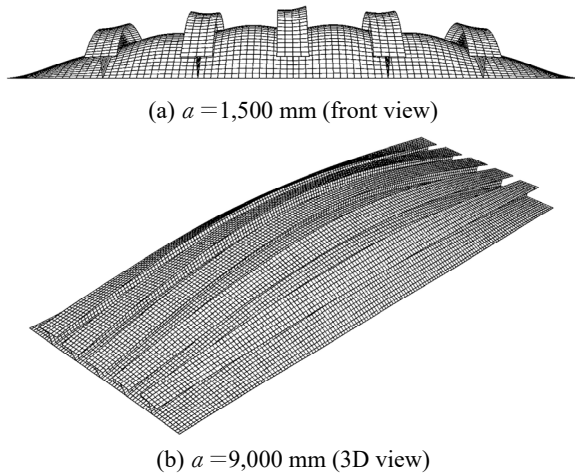
#### 3.2 단면2차모멘트 산정 방안 및 좌굴계수식 도출을 위한 예비 분석

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).

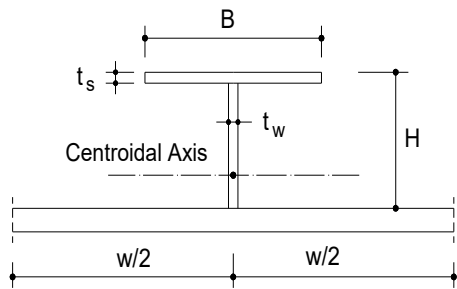
Table 1에서  $I_s$ 는 AASHTO 기준에 따라 T-보강재 하

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

$a$ (mm)	$\beta$	T-stiffener ( $H \times B \times t_w \times t_s$ )	$k_{FEA}$	$I_s$ (AASHTO)			$I_{sc}$ (centroidal axis)		
				$I_s$ ( $\times 10^6\text{ mm}^4$ )	$\beta/\beta_{cr}$	$k_f$ Eq. (3)	$I_{sc}$ ( $\times 10^6\text{ mm}^4$ )	$\beta/\beta_{cr}$	$k_f$ 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

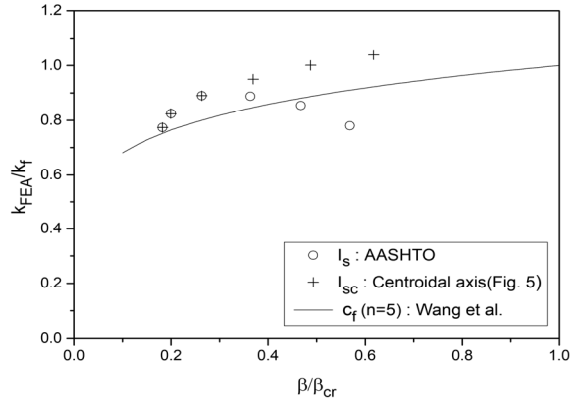


**Fig. 4.** Buckling shapes :  $n=5, t_f=32\text{ mm}$ ,  
 (a)  $a=1,500\text{ mm}$ , T-135×200×12×12,  
 (b)  $a=9,000\text{ mm}$ , T-265×400×22×22



**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  $\beta_{cr}$ 과  $k_f$ 를 식 (6)과 식 (3)으로부터 산정하였다.



**Fig. 6.**  $\beta/\beta_{cr}$  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  $\beta/\beta_{cr}$ 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<sup>[7]</sup>, 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,  $\beta/\beta_{cr}$ 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  $\beta/\beta_{cr}$ 이 작을수록 그 영향이 커지기 때문이다. 이를 고려하고자 Wang *et al.*<sup>[8]</sup>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 ( $\lambda_f$ )는 18.8과 33.3, 그리고 서브패널의 폭( $w$ )은 600 mm, 형상비( $\alpha$ )는 15까지 고려하였다.  $\alpha = 15$ 일 때 간격 ( $a$ )은 9,000 mm가 되는데, 이는 Hall and Yoo<sup>[10]</sup>가 강박 스거더교에서 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  $\beta/\beta_{cr}$ 이 작을수록, 또한 판의 세장비( $\lambda_f$ )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 <sup>2</sup> )	$k_{FEA}$	$k_f$ Eq. (3)	This study		$\frac{k_{FEA}}{k_c}$
							$\beta/\beta_{cr}$	$k_c$ 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)

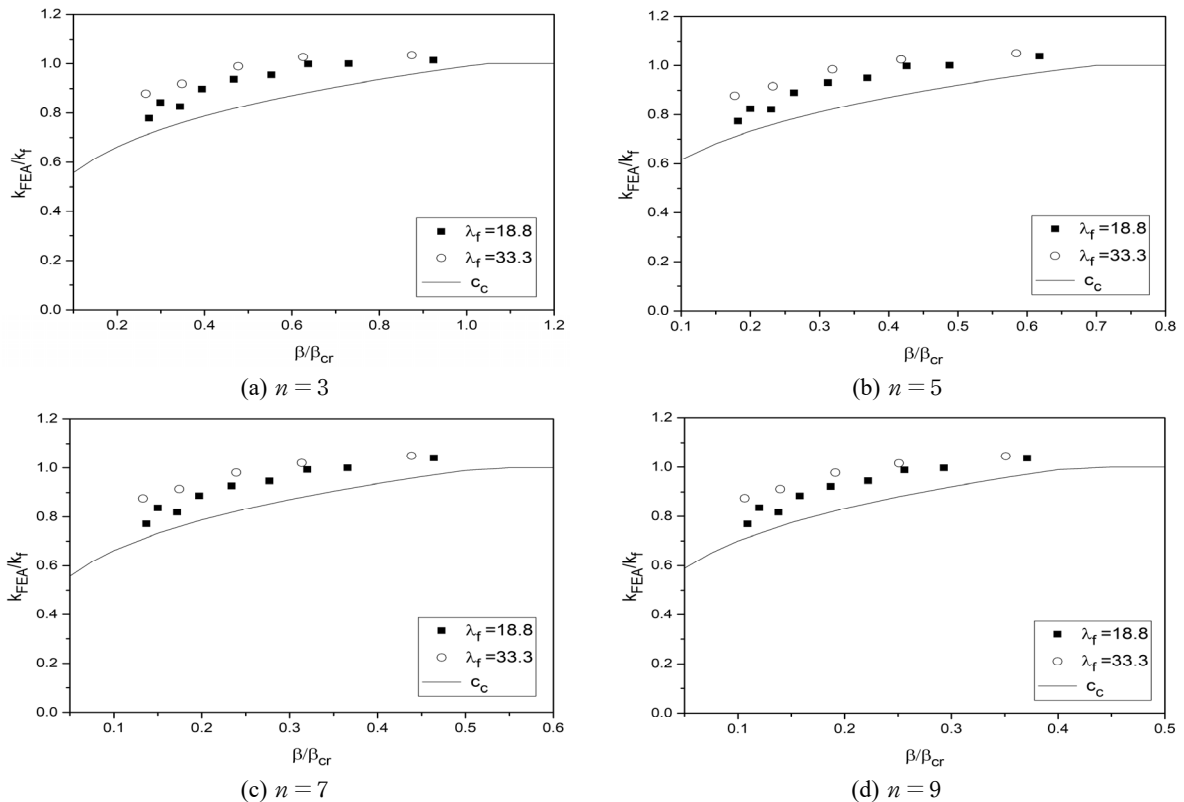
$t_f$ (mm)	$a$ (mm)	aspect ratio	T-stiffener $H \times B \times t_w \times t_s$	$I_{s,min}$ ( $\times 10^6$ mm <sup>2</sup> )	$k_{FEA}$	$k_f$ Eq. (3)	This study		$\frac{k_{FEA}}{k_c}$
							$\beta/\beta_{cr}$	$k_c$ Eq. (8)	
32	1,500	$\alpha = 2.5$	125×190×10×10	32.429	2.21	2.68	0.20	1.96	1.13
		$\beta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

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

**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 <sup>2</sup> )	$k_{FEA}$	$k_f$ Eq. (3)	This study		$\frac{k_{FEA}}{k_c}$
							$\beta/\beta_{cr}$	$k_c$ 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	
6,000	$\alpha = 10.0$ $\beta = 1.0$	215×320×18×18	242.745	0.93	0.94	0.29	0.86	1.08	
		255×380×21×21	419.153	1.40	1.42	0.26	1.26	1.11	
9,000	$\alpha = 15.0$ $\beta = 1.5$	265×400×22×22	479.695	0.74	0.71	0.37	0.69	1.07	
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
	4,000	$\alpha = 6.67$ $\beta = 0.67$	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
	9,000	$\alpha = 15.0$ $\beta = 1.5$	180×270×15×15	106.611	0.99	0.95	0.35	0.91	1.09



**Fig. 7.**  $\beta/\beta_{cr}$  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  $\lambda_f$ 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.*<sup>[8]</sup>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( $\lambda_f$ )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.

---

**요 약:** 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

---