



## 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단강도 연구

김대혁<sup>1</sup> · 한상윤<sup>2</sup> · 김정훈<sup>3</sup> · 강영종<sup>4</sup>

고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정<sup>1</sup>, 고려대학교 초고층초장대 기술연구소 연구교수<sup>2</sup>,  
 고려대학교 건축사회환경공학과 연구교수<sup>3</sup>, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수<sup>4</sup>

## Elastic Shear Buckling Strength of Steel Composite Box Girder Web Panel

Kim, Dae-Hyeok<sup>1</sup> · Han, Sang-Yun<sup>2</sup> · Kim, Jung-Hun<sup>3</sup> · Kang, Young-Jong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD. Candidate, Department of Architecture, Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Research Professor, Institute for Supertall and Superlong Structure Technology, Korea University, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Post-Doc Research Associate, Department of Architecture, Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul, Korea

<sup>4</sup>Professor, Department of Architecture, Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Abstract:** It is same such as the provision of shear buckling strength of steel composite box girder web panel and plate girder web panel in Korea Highway Bridge Design Standards(2012). But the web panel of steel composite box girder is different from the web of plate girder in that the upper slab and lower flange are connected to the web. So a different shear behavior of the girders is expected. In this study, To calculate a reasonable elastic shear buckling strength of steel composite box girder web panel, ABAQUS program was used. The results from F.E.A and previous studies are compared. It is shown that the web shear buckling strength of steel composite box girder of Korea Highway Bridge Design Standards(2012) is the most conservative.

**Key Words:** Steel composite, Box girder, Shear buckling coefficient

### 1. 서론

강합성 박스거더란 박스단면의 거더를 교량 주형(Main Girder)으로 하는 강교량으로 다른 형식의 교량에 비해 휨 강성과 비틀림 강성이 뛰어나 중장경간교량 및 곡선교량에 효율적으로 적용할 수 있는 강교량 형식이다. 강합성 박스거더는 시공성이 뛰어나 복잡한 구조에도 적용이 가능하며, 콘크리트 교량에 비하여 장시간 구조에 유리하다. 국내에서는 중장경간인 고속도로 횡단교량의 대부분을 강합성거더 교량이 적용되고 있으며, 접속교 및 램프교에서도 주로 활용되고 있

다. 최근에는 자동화 설계를 위한 설계 프로그램이 개발 및 보급되어 신속한 설계가 가능하며, 공장위주의 제작방식으로 인하여 품질이 우수하고 현장조립이 용이한 장점을 가지고 있다.

미국 및 일본에서는 강교량의 합리적 설계를 권장하고 있으며, 이를 통하여 안정성과 경제성을 추구하고 있다. 합리적 설계란 후판 및 고강도 강판을 사용하여 부재의 수를 줄이며, 설계 상세를 단순화한 교량 설계를 의미한다. 합리적 설계에서는 고성능강재의 사용을 권장하며, 불필요한 부부재의 설치를 최소화함으로써 경제적이며 구조적으로 안전한 강합성 박스거더 설계를 유도하고 있다.

강합성 박스거더의 부부재의 최적설계를 위해서는

**주요어:** 강합성, 박스거더, 탄성전단좌굴계수

**Corresponding author:** Kang, Young-Jong

339, Engineering Buildong, 5-1, Anam-Dong, Seongbuk-Gu, Seoul 136-713, Republic of Korea  
 Tel: +82-2-3290-3310, Fax: +82-2-921-5166, E-mail: yjkang@korea.ac.kr

투고일: 2013년 8월 14일 / 수정일: 2013년 9월 12일 / 게재확정일: 2013년 9월 23일

우선적으로 강합성 박스거더의 정확한 단면강도가 산정되어야 한다. 단면의 강도 중에서, 도로교 설계기준(2012)에 제시되어 있는 박스거더 전단강도 산정식은 플레이트거더 전단강도와 동일한 식을 적용하도록 제시되어 있다. Fig. 1은 합성전 플레이트 거더 단면과 합성된 강합성 박스거더 단면으로, 도로교 설계기준(2012)에 제시된 강합성 박스거더 복부판의 전단강도는 합성으로 인한 상부플랜지의 강성의 증가와 두 개의 복부판이 연결된 하부플랜지에 의한 복부판의 전단강도 증가를 고려하지 않고 있다.

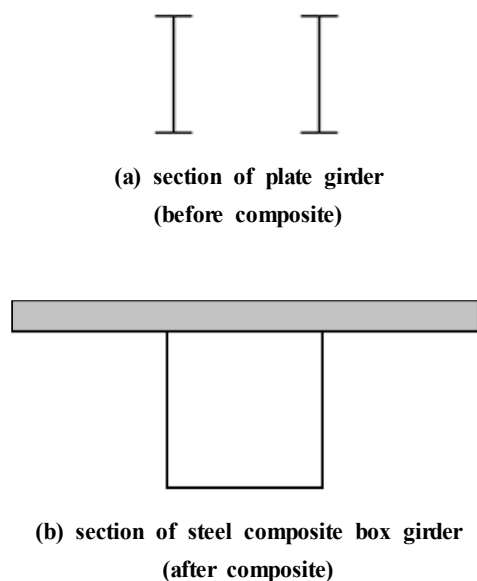


Fig. 1 Sections of Plate Girder and Steel Composite Box Girder

탄성전단좌굴강도에 대한 연구로는 Timoskenko와 Gere(1961)가 판의 탄성전단좌굴강도 식을 유도하였으며, Galambos (1988)는 판의 경계조건에 따른 탄성전단좌굴계수 연구를 하였으며, Lee 등 (1996)은 플레이트 거더에서 상·하 플랜지의 영향을 고려한 탄성좌굴강도를 산정하는 연구를 수행하였다. 박스 거더의 연구는 합성전 박스 거더를 전단좌굴 실험을 하여, 플레이트 거더의 전단강도 보다 증가된 전단강도 실험 연구가 있지만(Lee et al., 2003), 합성 후 강합성 박스 거더의 복부판 전단강도에 대한 연구는 없었다.

본 연구는 합리적인 강합성 박스거더의 복부판 전단강도를 산정하기 위한 연구로, 세장한 강합성 박스 거더에서 상부 슬래브와 하부플랜지가 강합성 박스 거더 복부판의 전단거동에 미치는 영향을 하부플랜지 두께와 복부판두께의 비( $\frac{t_{bf}}{t_w}$ )와 강합성 박스거더의 형

상비를 고려하여 연구를 수행하였다.

## 2. 본론

본 연구는 강합성 박스거더의 단면에서 상부슬래브와 하부플랜지가 강합성 박스거더 복부판의 전단거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 기초연구로, 범용해석프로그램인 ABAQUS를 이용하여 고유치 해석을 수행하였고, 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단좌굴강도 및 탄성전단좌굴계수를 산정하고 이를 비교·분석하였다.

### 2.1 탄성전단좌굴강도식

Timoskenko와 Gere(1961)가 제시한 판의 탄성좌굴강도는 식(1)과 같다.

$$V_{cr} = k \times \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \times D \times t_w \quad (1)$$

여기서,  $E$  는 판의 탄성계수(MPa),  $D$  는 판의 높이(mm),  $t_w$  는 판의 두께(mm),  $\mu$  는 푸아송 비이고,  $k$  는 탄성전단좌굴계수이다.

이 후, Galambos (1988)은 판의 경계조건에 고려한 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 제시하였고, Lee 등 (1996)은 플레이트 거더의 상·하부플랜지가 복부판의 전단강도에 미치는 영향을 고려한 새로운 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 제시하였다.

Galambos (1988)는 판의 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 2개의 식으로 제시하였다. 판의 네 변이 모두가 단순지지 일 때 탄성전단좌굴계수를  $k_{ss}$ 으로, 판의 네 변 중 두변은 단순지지이고 나머지 두변은 고정지지 일때 탄성전단좌굴계수를  $k_{sf}$ 으로 나타내었다.

판의 네 변이 모두가 단순지지 일 때, 탄성전단좌굴계수  $k_{ss}$ 는 식(2)(3)으로 제시하였다.

$$\frac{a}{D} < 1 \text{인 경우, } k_{ss} = 4.00 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{D}\right)^2} \quad (2)$$

$$\frac{a}{D} \geq 1 \text{인 경우, } k_{ss} = 5.34 + \frac{4.00}{\left(\frac{a}{D}\right)^2} \quad (3)$$

그리고, 판의 두변은 단순지지, 나머지 두변은 고정지지 일 때, 탄성전단좌굴계수  $k_{sf}$ 는 식(4)(5)으로 제시하였다.

$$\frac{a}{D} < 1 \text{인 경우;} \quad k_{sf} = \frac{5.34}{\left(\frac{a}{D}\right)^2} + \frac{2.31}{\left(\frac{a}{D}\right)} - 3.44 + 8.39\left(\frac{a}{D}\right) \quad (4)$$

$$\frac{a}{D} \geq 1 \text{인 경우;} \quad k_{sf} = 8.98 + \frac{5.61}{\left(\frac{a}{D}\right)^2} - \frac{1.99}{\left(\frac{a}{D}\right)^3} \quad (5)$$

Lee 등 (1996)이 제시한 플레이트 거더 복부판의 탄성전단좌굴계수  $k$  는 플레이트 거더 플랜지 두께와 복부판 두께의 비( $t_f/t_w$ )로 분류하여, 식(6)(7)로 제안하였다.

$$\frac{1}{2} < \frac{t_f}{t_w} < 2 \text{인 경우;} \quad k = k_{ss} + \frac{4}{5}(k_{sf} - k_{ss}) \left[ 1 - \frac{2}{3} \left( 2 - \frac{t_f}{t_w} \right) \right] \quad (6)$$

$$2 \geq \frac{t_f}{t_w} \text{인 경우;} \quad k = k_{ss} + \frac{4}{5}(k_{sf} - k_{ss}) \quad (7)$$

여기서  $k_{ss}$ 와  $k_{sf}$ 는 Galambos (1988)가 제시한 판의 탄성전단좌굴계수이다.

도로교 설계기준(2012)에서 강합성 박스거더의 복부판 전단강도는 플레이트 거더의 복부판 전단강도 식으로 산정하도록 되어있다. 도로교 설계기준(2012)에서 제시된 플레이트 거더의 복부판 전단강도는 보강된 복부판의 공칭강도와 비보강 복부판의 공칭강도로 분류되고 있으며, 보강된 복부판의 공칭강도는 다음 식(8)(9)와 같다.

$$V_n = V_{cr} = V_p \left[ C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_0}{D}\right)^2}} \right] \quad (8)$$

$$V_p = 0.58 F_{yw} D t_w \quad (9)$$

$C$ 는 전단항복강도에 대한 전단좌굴응력의 비로써 식(10)(11)(12)과 같다.

$$\frac{D}{t_w} < 1.10 \sqrt{\frac{E k}{F_{yw}}} \text{인 경우, } C=1.0 \quad (10)$$

$$1.10 \sqrt{\frac{E k}{F_{yw}}} \leq \frac{D}{t_w} < 1.38 \sqrt{\frac{E k}{F_{yw}}} \text{인 경우;} \quad C = \frac{1.10}{\frac{D}{t_w}} \sqrt{\frac{E k}{F_{yw}}} \quad (11)$$

$$\frac{D}{t_w} > 1.38 \sqrt{\frac{E k}{F_{yw}}} \text{인 경우;} \quad C = \frac{1.52}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \sqrt{\frac{E k}{F_{yw}}} \quad (12)$$

$k$ 는 탄성전단좌굴계수로써 식(13)와 같다.

$$k = 5 + \frac{5}{\left(\frac{d_0}{D}\right)^2} \quad (13)$$

형상비( $a/D$ )가 1~6까지 고려된 Galambos (1988), Lee 등 (1996) 및 도로교 설계기준(2012)의 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 비교·분석하기 위하여, Galambos (1988)의  $k_{sf}$  값과의 비( $k/k_{sf}$ )로 Fig. 2에 나타내었다.

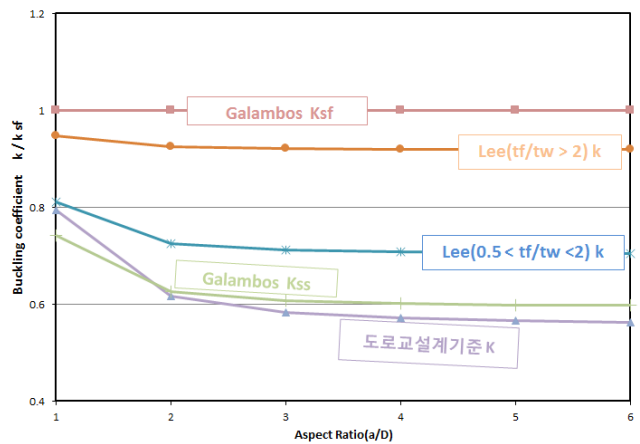


Fig. 2 Coefficient  $k$  of Elastic Shear Buckling

Fig. 2 에서 Galambos (1988)가 제안한 판의 경계 조건에 따른 탄성전단좌굴계수  $k_{ss}$ 와  $k_{sf}$  중,  $k_{ss}$ 는 네 변이 단순지지일 경우로, 형상비( $a/D$ )가 1일 때, 네 변 중 두변이 단순지지 나머지 두변이 고정지지일 경우의  $k_{sf}$ 보다 25% 작은 값을 가지며, 형상비( $a/D$ )가 2 이상부터는  $k_{sf}$  보다 40% 작은 값을

가졌다.

Fig. 2에서 Lee 등 (1996)가 제안한 플레이트 거더의 탄성전단좌굴계수  $k$ 는 플랜지와 복부판의 두께의 비가  $\frac{1}{2} < \frac{t_f}{t_w} < 2$  인 경우 형상비( $a/D$ )에 따라서 15% 큰 값을 가졌다. Galambos (1988)가 제안한  $k$ 값과 Lee 등 (1996)가 제안한  $k$ 값을 비교하면, 플레이트 거더의 플랜지와 복부판의 두께의 비가  $\frac{1}{2} < \frac{t_f}{t_w} < 2$  일 경우, 플랜지와 복부판의 연결부가 단순지지 일 때  $k$ 값 보다 값을 가졌으며, 플레이트 거더의 플랜지와 복부판의 두께의 비가  $2 \geq \frac{t_f}{t_w}$  일 경우, 플랜지와 복부판의 연결부가 고정지지 일 때  $k$ 값 보다 작은 값을 가졌다.

Fig. 2에서 도로교 설계기준(2012)의 탄성전단좌굴계수  $k$ 는 형상비( $a/D$ )가 1일 때 Galambos (1988)의  $k_{ss}$ 보다 5% 높은 값을 가지지만, 형상비( $a/D$ )가 2보다 클 경우 Galambos (1988)의  $k_{ss}$ 보다 3% 낮은 값을 가지며, Lee 등 (1996)가 제시한 플레이트 거더 탄성전단좌굴계수  $k$ 는 형상비( $a/D$ )가 1일 때 비슷한 값을 갖지만, 형상비( $a/D$ )가 2이상인 경우에는 20% 낮은 값을 보이고 있어, 도로교 설계기준(2012)에 제시된 플레이트 전단강도 규정은 가장 보수적인 설계임을 알 수 있다.

## 2.2 유한요소 해석

### 2.2.1 판 고유치 해석

본 연구에 적용된 해석의 경계조건 및 방법에 대한 적절성과 신뢰성을 평가하고자 Fig. 3 과 같은 네변이 단순 지지된 판의 고유치 해석을 수행하여, 해석결과를 Timoshenko 와 Gere(1961)의 탄성전단좌굴강도 식 (1)과 비교하여 검토하였다.

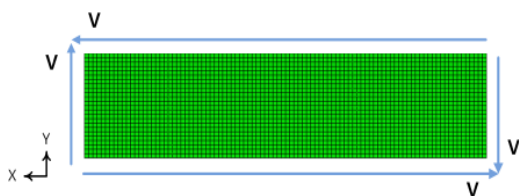


Fig. 3 Plate Model

Fig. 3의 판 높이는  $1,000mm$ , 두께는  $12mm$ 로 일정하게 하면서 판 길이를  $1,000mm$ ,  $2,000mm$ ,  $3,000mm$ ,  $4,000mm$ 까지, 형상비( $a/D$ )를 1부터 4까지 해석을 수행하였다. 이 때, 적용된 판의 물성치는

탄성계수  $E=205,000MPa$ , 프와송 비  $\mu=0.3$ , 항복응력  $F_y=380MPa$ 을 적용하였다.

Table 1. Analysis Condition of Finite Element Model

Material of Property		
Modulus of elasticity( $MPa$ )	Yield stress ( $MPa$ )	Poisson's ratio
205,000	380	0.3
Section of Property		
Depth of Plate( $mm$ )	Length of Plate( $mm$ )	Aspect Ratio
1,000	1,000 ~ 4,000	1 ~ 4

판의 경계조건은 판의 네 변은 면외방향( $Z$ 방향)을 고정하여 단순지지 하였으며, 판의 중심은 길이방향( $X$ 방향)과 횡방향( $Y$ 방향) 및  $Z$ 축 회전을 하였다. 판에 순수전단력을 재하하기 위하여 Fig. 3에 표시되어 있는 화살표 방향으로 같은 크기의 전단력을 재하여 힘이 발생되지 않도록 하였다.

Table 2. Comparison between FEM Result and the Theoretical Result

Aspect Ratio	FEM result	Theoretical Result	Difference
1	2958.95kN	2990.35kN	1.05%
2	1951.50kN	2029.85kN	3.86%
3	1821.42kN	1851.98kN	1.65%
4	1766.10kN	1789.73kN	1.32%

Table 2에서 FEM의 결과값과 Timoshenko 와 Gere (1961)의 탄성전단좌굴강도 이론값을 나타내었다. Table 2에서 FEM의 결과값은 Timoshenko and Gere (1961)가 제시한 이론값과 3%이내로 잘 일치하였으며, 본 연구에 적용되는 해석 방법에 대한 신뢰성 및 적절성을 검증하였다.

### 2.2.2 강합성 박스거더의 복부판 탄성전단좌굴 해석

강합성 박스거더의 해석단면은 Fig. 4 와 같다. 강합성 박스거더의 콘크리트 슬래브의 두께는  $200mm$ 으로, 슬래브의 폭은  $3,000mm$ 이며, 박스 하부플랜지의 두께는 강합성 박스거더 하부플랜지두께와 복부판 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 로 1~4까지 고려하였다. 강합성 박스 거더의 높이는  $1,000mm$ 으로 일정하게 하였으며, 형상비( $a/D$ )는 1~6까지 고려하였다.

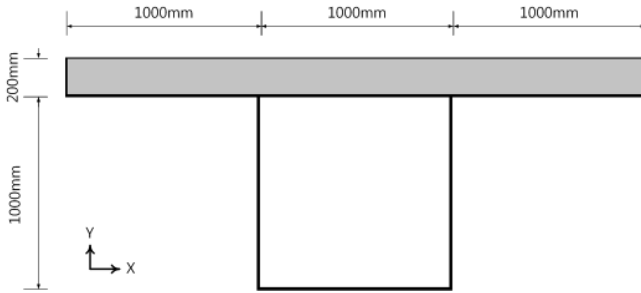


Fig. 4 Section of Composite Steel Box

콘크리트로 슬래브는 8절점 Solid요소로, 강박스는 4절점 Shell요소를 적용하였다. Fig. 5은 경계조건으로 강박스 복부판의 양단은 단순지지이고, 나머지 두변은 복부판과 상부슬래브, 하부플랜지와 연결지지 조건에 의한 탄성전단좌굴을 모사하기 위하여 상부슬래브와 하부플랜지의 양 끝단 또한 단순지지하였다. Fig. 5에서 강박스 거더 복부판 양 끝단(①)은 복부판의 네 변 중 두변을 단순지지를 하기 위하여 면외방향(X방향)만 고정하였으며, 콘크리트의 상부 플랜지, 강재의 하부 플랜지양 끝단(②)은 면외방향(Y방향)을 고정하였다. 그리고 강박스 거더 복부판의 중심(③)은 Z방향, Y방향 및 X축 회전을 고정하여 해석에서 회전이 발생하지 않도록 하였다. 하중재하방법은 Fig. 5에서 강합성 박스거더의 복부판에 있는 화살표 방향(파란색)으로, 같은 크기의 하중을 재하하여 강합성 박스 복부판에는 순수전단력만 재하되도록 하여, 휨이 발생되지 않도록 하였다.

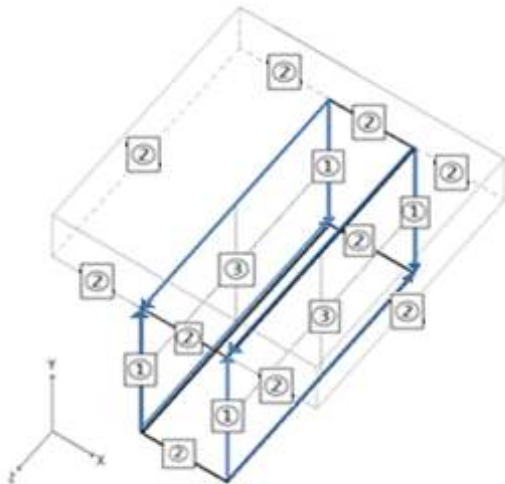


Fig. 5 Boundary Condition of Composite Steel Box

콘크리트의 물성치는 탄성계수  $E=29,285MPa$ , 프와송 비  $\mu=0.18$  으로 하였으며, 강재의 물성치는 탄성계수  $E=205,000MPa$ , 프와송 비  $\mu=0.3$ , 항복응력  $F_y=345MPa$ 을 적용하였다.

Table 3. Analysis Condition of Finite Element Model

Material of Property(Concrete)			
Modulus of elasticity ( $MPa$ )		Poisson's ratio	
29,285		0.18	
Material of Property(Steel)			
Modulus of elasticity ( $MPa$ )	Yield stress ( $MPa$ )	Poisson's ratio	
205,000	345	0.3	
Section of Property			
Thickness of slab ( $mm$ )		Depth of girder web ( $mm$ )	
200		1,000	
Parameter			
Length of girder ( $a, mm$ )	Aspect Ratio	Slenderness ratio of web	Ratio of flange thickness to web thickness
1,000 ~ 6,000	1 ~ 6	120 ~ 300	1 ~ 4

## 2.3 해석결과

### 2.3.1 탄성좌굴강도

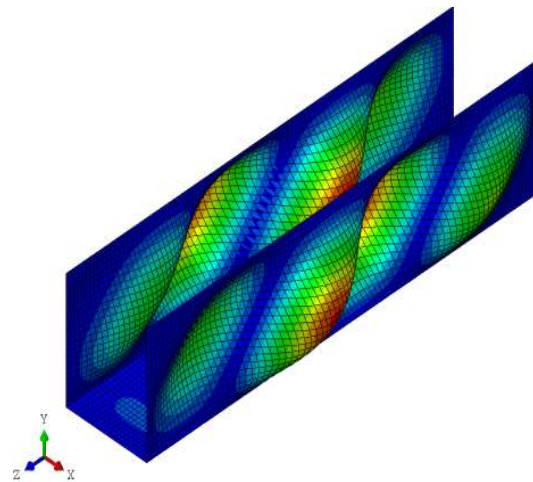


Fig. 6 Elastic Shear Buckling Mode Shape of Steel Composite Box Girder Web Panel ( $a/D=4$ )

Fig. 6은 형상비( $a/D$ )가 4일 경우, 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단좌굴 모드형상이다. 그리고 Table 4,5,6는 형상비( $a/D$ )가 1,3,5 일 때 Lee 등 (1996)이 제시한 탄성좌굴계수  $k$ 를 이용한 탄성좌굴강도 그리고 도로교설계기준(2012)를 나타낸 것이다.

**Table 4. Elastic Shear Strength of Steel Composite Box Girder Web Panel. FEM (a/D=1)**

$D/t_w$	FEM analysis result(kN)				도로교 설계기준 (2012)(kN)	Lee et al. (1996)(kN)	
	$t_f/t_w=1$	$t_f/t_w=2$	$t_f/t_w=3$	$t_f/t_w=4$		$t_f/t_w=1$	$t_f/t_w \geq 2$
300	157.6	168.1	170.1	170.6	134.2	136.0	159.1
250	280.5	299.2	302.7	303.6	238.9	242.1	283.4
200	547.2	583.5	590.4	592.2	466.7	472.9	553.4
180	768.1	819.1	828.7	831.2	655.7	664.4	777.5
150	1313.2	1400.1	1416.5	1420.9	1122.9	1137.8	1331.6
120	2489.1	2653.5	2684.5	2692.8	2134.7	2163.2	2531.6

**Table 5. Elastic Shear Strength of Steel Composite Box Girder Web Panel. FEM (a/D=3)**

$D/t_w$	FEM analysis result(kN)				도로교 설계기준 (2012)(kN)	Lee et al. (1996)(kN)	
	$t_f/t_w=1$	$t_f/t_w=2$	$t_f/t_w=3$	$t_f/t_w=4$		$t_f/t_w=1$	$t_f/t_w \geq 2$
300	112.5	124.6	127.5	128.3	74.5	90.3	116.9
250	200.1	221.8	226.9	228.4	132.7	160.9	208.2
200	390.4	432.6	442.7	445.5	259.3	314.2	406.7
180	547.9	607.2	621.3	625.3	364.3	441.4	571.4
150	936.6	1037.8	1062.1	1068.9	623.8	756.0	978.6
120	1774.7	1966.4	2012.5	2025.5	1186.0	1437.2	1860.5

**Table 6. Elastic Shear Strength of Steel Composite Box Girder Web Panel. FEM (a/D=5)**

$D/t_w$	FEM analysis result(kN)				도로교 설계기준 (2012)(kN)	Lee et al. (1996)(kN)	
	$t_f/t_w=1$	$t_f/t_w=2$	$t_f/t_w=3$	$t_f/t_w=4$		$t_f/t_w=1$	$t_f/t_w \geq 2$
300	108.6	120.7	123.4	124.2	69.8	86.3	112.5
250	193.3	214.8	219.7	221.0	124.2	153.8	200.4
200	377.0	418.9	428.4	431.0	242.7	300.3	391.4
180	529.1	587.9	601.3	604.9	340.9	421.9	549.9
150	904.2	1004.8	1027.6	1034.0	583.9	722.6	941.9
120	1713.0	1903.8	1947.0	1959.1	1110.1	1373.8	1790.6

강합성 박스거더 복부판의 탄성전단좌굴강도는 형상비가 1 일 때는 형상비가 2이상 보다 큰 값을 보였으며, 형상비가 2보다 클 때는 비슷한 값을 가졌다.

강합성 박스거더 하부플랜지두께와 복부판두께의 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 가 1인 경우 본 연구에 의한 복부판의 탄성전단좌굴강도는 Lee 등 (1996)와 도로교 설계기준(2012)의 탄성전단강도 보다 10% 큰 값을 가졌다.

다. 강합성 박스거더 하부플랜지두께와 복부판두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 가 2이상일 경우, 비슷한 값을 가졌다.

### 2.3.2 탄성전단좌굴계수 $k$

형상비(a/D)에 따라 강합성 박스거더 상부 슬래브와 하부 플랜지가 복부판의 전단강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단강도를 Timoskenko와 Gere(1961)가 제시한 판의 탄성좌굴강도 식(1)에 대입하여, 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단좌굴계수  $k$  를 계산하였다. 그리고 Galambos (1988)가 제시한 탄성전단좌굴계수  $k_{ss}$ 와  $k_{sf}$ , Lee 등 (1996)이 제시한 탄성전단좌굴계수  $k$  그리고 도로교 설계기준(2012)에 제시된 거더의 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 비교를 통하여 상·하 플랜지가 복부판의 전단거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여, Galambos (1988)의  $k_{sf}$ 로 나누어 상대적인 값을 Fig. 7,8,9로 나타냈다.

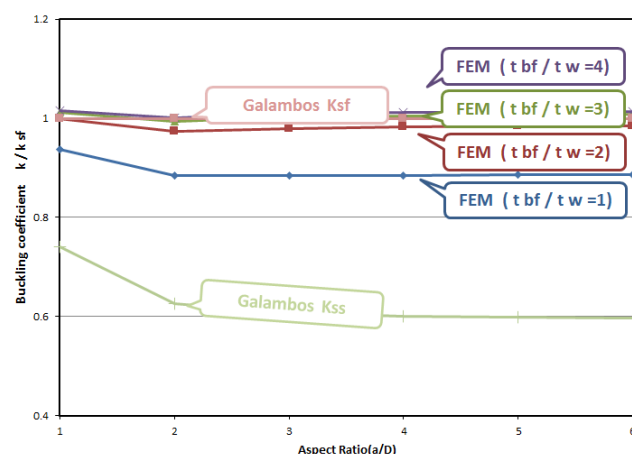
**Fig. 7 Comparison the Buckling Coefficient between Galambos (1988) and FEM**

Fig. 7은 Galambos (1988)가 제시한 판 탄성전단좌굴계수  $k_{ss}$ 와  $k_{sf}$ 를 강합성 박스거더의 하부플랜지 두께와 복부판 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 를 1에서 4까지를 고려한 탄성전단좌굴계수  $k$ 의 그래프이다. 강합성 박스거더의 하부플랜지 두께와 복부판두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 가 1인 경우, Galambos (1988)가 제안한 탄성전단좌굴계수  $k_{ss}$ 보다 큰 값을 가지고 있어, 강합성 박스거더의 상부플랜지와 하부플랜지의 연결부분이 단순지지 이상의 특성을 가지며, 강합성 박스거더의 하부플

랜지의 두께와 복부판 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 가 2 이상인 경우, Galambos (1988)가 제안한 탄성전단좌굴계수  $k_{sf}$ 에 수렴하는 것으로 보아 강합성 박스거더의 상부슬래브와 하부플랜지의 연결부분이 고정지지 특성을 가짐을 알 수 있다.

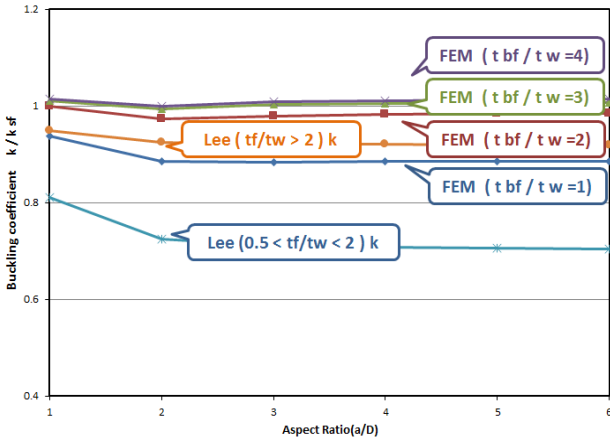


Fig. 8 Comparison the Buckling Coefficient between Lee (1996) and FEM

Fig. 8은 Lee 등 (1996)가 제안한 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 강합성 박스거더의 하부플랜지두께와 복부판두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 를 1에서 4까지를 고려한 탄성전단좌굴계수  $k$ 의 그래프이다. 강합성 박스거더 하부 플랜지 두께와 복부판의 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 가 1인 경우, Lee 등 (1996)의  $\left(\frac{1}{2} < \frac{t_f}{t_w} < 2\right)$ 일 때의 탄성전단좌굴계수  $k$ 보다 15% 큰 값을 가졌다. 그리고 강합성 박스거더 하부 플랜지 두께와 복부판의 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 가 2이상인 경우, Lee 등 (1996)의  $\left(\frac{t_f}{t_w} > 2\right)$ 일 때의 탄성전단좌굴계수  $k$ 보다 5% 큰 값을 가졌다.

Fig. 9은 도로교 설계기준(2012)에 제시된 탄성전단좌굴계수  $k$ 를 강합성 박스거더의 하부플랜지의 두께와 복부판의 두께의 비  $\left(\frac{t_{bf}}{t_w}\right)$ 를 1에서 4까지를 고려한 탄성전단좌굴계수  $k$ 의 그래프이다. 도로교 설계기준(2012)에 제시된 탄성전단좌굴계수  $k$ 와 강합성 박스거더의  $k$ 와 큰 차이를 보이고 있어, 도로교 설계기준(2012)이 보수적인 설계임을 알 수 있다.

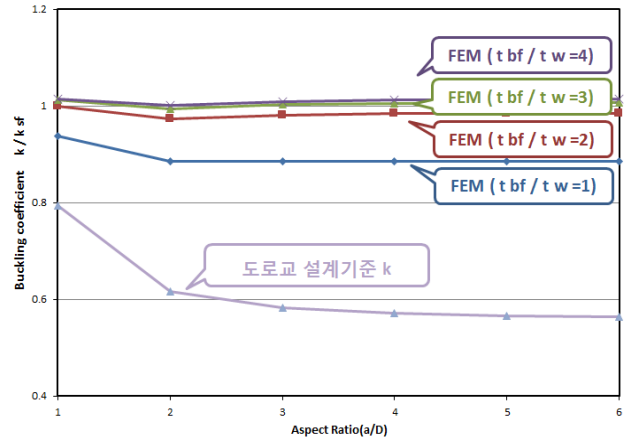


Fig. 9 Comparison the Buckling Coefficient between Korea Highway Bridge Design Standards (2012) and FEM

### 3. 결론

본 연구에서는 합리적인 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단강도를 산정하기 위한 연구로 세장한 강합성 박스단면의 탄성전단강도를 분석하였다. 상부 슬래브와 하부플랜지가 강합성 박스거더 복부판의 전단거동에 미치는 영향을 알기 위해서 하부플랜지의 두께 및 형상비를 변수로 선정하여 탄성전단강도를 산정한 후 이를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Galambos (1988)가 제안한  $k_{ss}$ ,  $k_{sf}$ 와 강합성 박스거더 복부판의  $k$  비교한 결과, 강합성 박스거더 복부판의  $k$ 는, Galambos (1988)가 제시한  $k_{sf}$ 에 근접한 값을 가졌다. 이는 강합성 박스거더 상부 슬래브·하부 플랜지와 복부판과의 연결부 특성이 고정지지 특성을 가졌다.

2) Lee 등 (1996)가 제안한 플레이트 거더의  $k$ 와 강합성 박스거더 복부판의  $k$  비교한 결과, Lee 등 (1996)가 제안한 플레이트 거더 복부판의  $k$ 는 Galambos (1988)가 제시한  $k$ 보다 합리적인 값을 제시하고 있지만, 강합성 박스거더의 복부판의  $k$ 의 값과 차이를 보였다.

3) 도로교 설계기준(2012)의  $k$ 는 형상비( $a/D$ )가 2 이상부터 Galambos (1988)의  $k_{ss}$ 보다 3% 낮은 값을 보였다. 이는 도로교 설계기준(2012)에 제시된 플레이트 거더의  $k$ 는 네 변이 단순지지된 판의  $k$ 보다 보수적인 설계를 하고 있음을 보여주는 근거로서, 도로교 설계기준(2012)에서 제시하는 강합성 박스거더 복부판의 탄성전단강도는 가장 보수적인 설계임을 알

수 있다.

4) 앞의 결론들을 종합해 보면, 도로교 설계기준 (2012)에서 제시하는 복부판의  $k$ 는 가장 보수적인 설계이며, Galambos (1988)와 Lee 등 (1996)이 제시한  $k$ 는 거더의 상·하부 플랜지의 강성을 고려하여  $k$ 를 제시하였다. 하지만 본 연구를 통하여 실제 강합성 박스거더 복부판의  $k$ 를 산정해본 결과 Galambos (1988)와 Lee 등 (1996)도 강합성 박스거더 복부판의  $k$ 를 정확하게 산정하지 못했다. 그 원인은 이전의 모든 연구가 강합성 박스거더 복부판의 상부플랜지가 콘크리트 슬래브와 합성되어 아주 큰 강성을 갖는 것과 하부플랜지가 두 개의 복부판이 연결된 강합성 박스거더의 거동을 정확히 모사하지 못한 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant(10CTIPB01- Modular Bridge Research & Business Development Consortium) from Smart Civil Infrastructure Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) of Korea government and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA).

## References

- Bulson, P.S. (1970), *Stability of flat plates*, Elsevier, New York, USA.
- Galambos, T.V. (1998), *Structural stability research council guide to stability design criteria for metal structures 4th Ed*, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Ministry of Land, infrastructure and transport (2012), Design code for highway bridges (in Korea)
- Lee, S.C., Davison, J.S., and Yoo, C.H. (1996), "Shear buckling coefficients of plate girder web pannel", *Computer and Structures*, 59(5), pp. 789-795.
- Lee, S.C., Yoon, D.Y., and Jeong, U.Y. (2003), "Experimental Study on the Ultimate Behavior of Steel Box Girder Webs", *Korean Society of Civil Engineers*, 23(6A), pp. 1295-1302.
- Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (1961), *Theory of elastic stability 2nd Ed*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, USA.