

# 웹 2단 보강 플레이트거더의 수평보강재 휨강성 요건에 대한 실험 연구

김병준<sup>1</sup> · 박용명<sup>2\*</sup> · 박찬희<sup>3</sup> · 성택룡<sup>3</sup>

<sup>1</sup>공학박사, (주)수성엔지니어링, 구조부, <sup>2</sup>교수, 부산대학교, 토목공학과, <sup>3</sup>공학박사, 포스코 기술연구원 구조연구그룹

## Experimental Study on the Bending Rigidity Requirements of Longitudinal Stiffeners for Plate Girder Webs Reinforced by Two Stiffeners

Kim, Byung Jun<sup>1</sup>, Park, Yong Myung<sup>2\*</sup>, Park, Chan Hee<sup>3</sup>, Seong, Taek Ryong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Dept. of Structures, SooSung Engineering Co., Ltd., Seoul, 05836, Korea

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>3</sup>Ph.D., Steel Structure Research Group, POSCO, Incheon, 21985, Korea

**Abstract** - Two longitudinal stiffeners are often applied to the web of plate girders with a high profile. AASHTO LRFD bridge design specifications provide the bending rigidity requirements of stiffener when reinforced by one stiffener, but not by two stiffeners. Rockey and Cooper, and Kim *et al.* suggested a required rigidity for the webs stiffened by two stiffeners from theoretical and computational analysis, respectively. According to this, a higher rigidity is required than for the case of one stiffener. In this study, an experiment was performed to estimate the rigidity requirements of longitudinal stiffeners for the plate girder webs reinforced by two stiffeners. One unreinforced and two reinforced girder specimens with web aspect ratio of 1.0 and slenderness ratio of 345 were fabricated. From the experiments, the bending rigidity of stiffeners required for the compression flange to reach yield strength was evaluated and the validity of the rigidity requirement proposed by the previous researchers were investigated.

**Keywords** - Plate girder, Stiffened web, Two longitudinal stiffeners, Experiments of girder flexural strength, Bending rigidity of stiffeners

### 1. 서론

플레이트거더교는 지간이 길어질수록 휨모멘트와 처짐이 증가하므로 이에 대응하기 위해 웹의 높이가 커지게 된다. 이때 거더 웹을 가급적 얇게 하는 것이 경제적이지만, 휨압축 좌굴(web-bend buckling)이 발생할 우려가 있기 때문에 좌굴강도의 확보를 위해 수평보강재를 설치한다. 보강재의 단수는 강재량과 제작비를 포함하여 경제성이 유리한 쪽으로 결정하겠지만, 웹의 높이가 매우 큰 경우 두께

가 고정된다면 1단보다는 2단으로 설치할 때 좌굴강도가 훨씬 증가한다. 한편, 수평보강재는 웹의 면외변형을 억제함으로써 이른바 좌굴절선(nodal line)을 형성할 수 있도록 소정의 휨강성(bending rigidity)을 가져야 한다.

1단 수평보강 웹의 휨압축 좌굴계수와 보강재의 휨강성 요건에 대한 연구는 Dubas<sup>[1]</sup>, Rockey and Leggett<sup>[2]</sup>, Frank and Helwig<sup>[3]</sup> 등 다수의 연구자들에 의해 수행되었다. 수평보강재의 최적 위치는 웹 상·하단을 단순지지 조건으로 가정하였을 때 압축플랜지로부터  $0.4D_c$  ( $D_c$ 는 웹의 압축축 높이)이며, 2축대칭단면일 때 좌굴계수는 129.3으로 제시되었다.

2단 보강의 경우, Rockey and Cook<sup>[4],[5]</sup>은 2축대칭 단면 조건에서 Fig. 1(a)와 같이 수평보강재가 웹 양측에 설치될 때 보강재의 최적위치와 해당 휨압축 좌굴계수를 에너지 법으로 유도하였다. 이로부터 웹의 상·하단이 단순지지일 때 최적위치는  $0.123D$ 와  $0.275D$ , 고정지지일 때는  $0.136D$

Note.-Discussion open until October 31, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 12, 2022; revised on February 22, 2022; approved on February 26, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

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

E-mail. ympk@pusan.ac.kr

와  $0.284D$ ( $D$ 는 웹 높이)이며 좌굴계수는 각각 313, 356으로 제시하였다. 한편, Kim *et al.*<sup>[6]</sup>은 Fig. 1(b)와 같이 보강재가 편측에 설치되고 단면의 비대칭성을 고려하기 위해 보강재 위치를 변수로 고려한 좌굴 고유치해석을 수행하였다. 이로부터 2단 수평보강 웹의 좌굴계수 산정을 위한 실용적 식과 보강재의 휨강성 요건을 제안하였다.

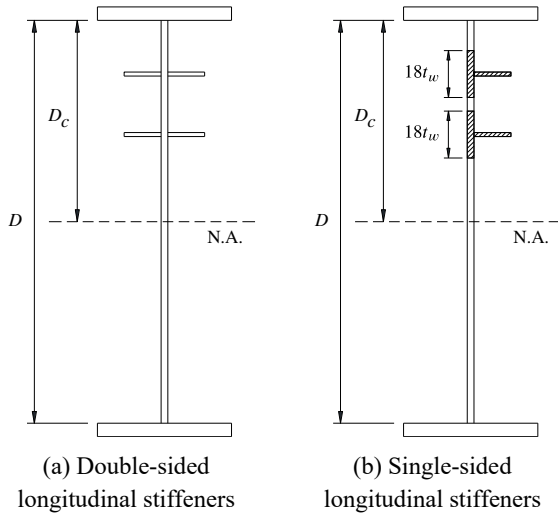


Fig. 1. Stiffened web with two longitudinal stiffeners

현재 AASHTO LRFD 교량설계기준<sup>[7]</sup>(이하 AASHTO 기준)은 1단 보강 웹에 대해 Frank and Helwig가 제시한 좌굴계수식을 채택하였고 보강재의 휨강성 요건은 Massonnet<sup>[8]</sup>와 Cooper<sup>[9]</sup>의 제안을 바탕으로 하였다. 하지만 2단 수평보강에 대한 기준은 제대로 제시되지 않았는데, 좌굴계수는 1단 보강 웹의 좌굴계수를 안전측으로 적용하거나 또는 설계자가 직접 좌굴해석으로부터 결정할 수 있다고 기술하고 있다. 보강재의 휨강성 요건에 대해서는 별도의 언급이 없는데, 이는 관련 실험 연구의 부족이 한 원인이라고 할 수 있다. 종래 허용응력설계법에 의한 도로교설계기준<sup>[10]</sup>에서는 3단 보강 웹까지 허용하였으나, AASHTO LRFD 기준과 이를 바탕으로 한 강구조부재설계기준<sup>[11]</sup>에서는 실질적으로 1단 보강만 허용되어 웹 높이가 매우 큰 거더가 필요한 경우 대응에 애로가 있다.

본 연구에서는 웹 2단 보강 플레이트거더에서 수평보강재의 휨강성 변화에 따른 거더의 휨강도 평가를 위한 실험을 수행하였다. 거더 시험체는 비보강 및 2가지 보강재 강성을 고려하여 총 3개의 거더에 대해 실험을 수행하였다. 시험체들의 웹 세장비는 347, 형상비는 1.0이며, 보강재는 실무에서 적용되는 편측 보강재(Fig. 1(b))를 고려하였다. 실

험결과로부터 항복모멘트에 도달하기 위해 필요한 수평보강재의 휨강성을 분석하고 기존 연구들<sup>[5],[6]</sup>에서 제시된 2단 보강 시 보강재의 강성 요건과 비교하였다.

## 2. 수평보강재의 휨강성 요건

### 2.1 AASHTO LRFD 교량설계기준

AASHTO 기준<sup>[7]</sup> 및 강구조부재설계기준<sup>[11]</sup>은 웹 1단 보강 시 수평보강재에 대해 2개의 요건을 규정하고 있다. 첫 번째 요건은 Massonnet<sup>[8]</sup>의 제안에 따른 것으로 보강재가 웹의 면외변형을 억제함으로써 좌굴절선을 형성하기 위해 필요한 등가 T-단면의 단면2차모멘트를 식 (1)로 규정하고 있다.

$$I_l \geq Dt_w^3 [2.4\alpha^2 - 0.13]\beta \quad (1)$$

여기서,  $D$ : 웹 높이,  $t_w$ : 웹 두께,  $I_l$ : 등가 T-단면(Fig. 1(b)에서 빗금친 부분으로 수평보강재와 웹의  $18t_w$  부분)의 도심축에 대한 단면2차모멘트,  $d_o$ : 수직보강재의 간격,  $\alpha$ : 형상비(=  $d_o/D$ ),  $\beta$ : 곡률보정계수(직선거더는 1.0)이다.

두 번째 요건은 Cooper<sup>[9]</sup>의 제안에 근거하여 등가 T-단면이 기동형태의 좌굴에 저항하기 위한 요건으로서 단면회전반경 요건을 다음과 같이 규정하고 있다.

$$r \geq \frac{0.16d_o \sqrt{\frac{F_{ys}}{E}}}{\sqrt{1 - 0.6 \frac{F_{yc}}{R_h F_{yc}}}} \quad (2)$$

여기서,  $r$ : 등가 T-단면의 회전반경,  $E$ : 강재의 탄성계수( $E = 210,000 \text{ MPa}$ ),  $F_{yc}$ : 압축플랜지의 항복강도,  $R_h$ : 하이브리드 계수이다.

한편, 수평보강재의 국부좌굴을 억제하기 위해 보강재의 폭-두께비를 다음과 같이 제한하고 있다.

$$b_s \leq 0.48t_s \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \quad (3)$$

여기서,  $b_s$ ,  $t_s$ : 수평보강재의 폭 및 두께,  $F_{ys}$ : 수평보강재의 항복강도(MPa)이다.

전술한 바와 같이 식 (1)과 식 (2)는 1단 보강 시 보강재의 강성 요건이며, 2단 보강 시에는 별도의 언급이 없다.

2.2 Rockey and Cook<sup>[5]</sup>

Rockey and Cook<sup>[5]</sup>은 2축대칭단면에 대해 웹 상·하단이 각각 단순지지 및 고정지지일 때 2단 보강 시 수평보강재의 강성 요건을 에너지법으로부터 유도하였다. 단, Fig. 1(a)와 같이 보강재가 웹 양측에 대칭 설치되는 조건으로 고려하였으며 보강재의 비틀림강성(torsional rigidity)을 무시하고 형상비( $\alpha$ ) 0.5~1.6의 범위에서 상·하단 보강재 강성이 같을 때 보강재의 휨강성비( $\gamma$ )를 아래 식으로 제안하였다.

- 단순지지(simply supported):

$$\gamma = (30.69 + 202.7\delta)\alpha^2 - (4.87 + 20.69\delta)\alpha^3 \quad (4a)$$

- 고정지지(fixed):

$$\gamma = (35.37 + 195.8\delta)\alpha^2 - (11.29 + 15.94\delta)\alpha^3 \quad (4b)$$

여기서,  $\gamma$ : 보강재의 휨강성비,  $\delta$ : 보강재의 면적비로서 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma \equiv \frac{EI_l}{DD_p} \quad (5)$$

$$\delta \equiv \frac{A_s}{Dt_w} \quad (6)$$

여기서,  $D_p = Et_w^3/12(1 - \nu^2)$ : 웹 판의 휨강성,  $\nu$ : 포아송비 (= 0.3),  $A_s$ : 보강재의 단면적이다.

2.3 Kim et al.<sup>[6]</sup>

Kim et al.<sup>[6]</sup>은 Fig. 1(b)와 같이 편측 보강재로 2단 보강된 2축대칭 및 1축대칭단면에 대해 수평보강재의 필요 휨강

성을 좌굴 고유치해석으로부터 평가하였다. 이때 각 보강재의 강성이 같고 웹 상·하단을 안전측으로 단순지지로 가정하였다. 형상비( $\alpha$ ) 0.5에서 1.5 범위를 고려하였으며 웹 브 세장비( $D/t_w$ )  $\geq 250$ 인 조건에 대해 강성비를 다음 식으로 제안하였다.

$$\gamma = 59.5\alpha^2 - 41.3\alpha + 15.1 \quad (7)$$

3. 플레이트거더 실험개요

3.1 시험체 제원

거더 시험체의 개요는 Fig. 2와 같다. 상·하 플랜지의 단면적이 같은 2축대칭단면으로 계획하였으며 중앙의 테스트 패널 구간이 순수휨 상태가 되도록 4점 재하방식을 적용하였다. 웹의 높이( $D$ )는 1,000 mm, 중앙패널의 웹 두께( $t_w$ )는 3 mm로 계획하였으며 양측 빗금친 구간의 웹은 좌굴을 방지하기 위해 6 mm로 하였다. 중앙패널의 간격( $d_o$ )은 1,000 mm로 하여 형상비( $\alpha$ )를 1.0으로 계획하였다. 플랜지의 폭( $b_f$ )은 최소폭 규정( $b_f \geq D/6$ )에 따라 180 mm로 하였고 두께( $t_f$ )는 식 (8)의 조밀플랜지 조건을 만족하도록 10 mm( $\lambda_f = 9.0$ )로 계획하였다.

$$\lambda_{pf} \left( = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \right) \quad (8)$$

시험체는 비보강거더 1개와 보강거더 2개를 제작하였다. 시험체의 명칭은 T3-40(비보강)와 수평보강재의 크기에 따라 T3-4A, T3-4B로 표기하였다. 보강시험체에서 수평보강

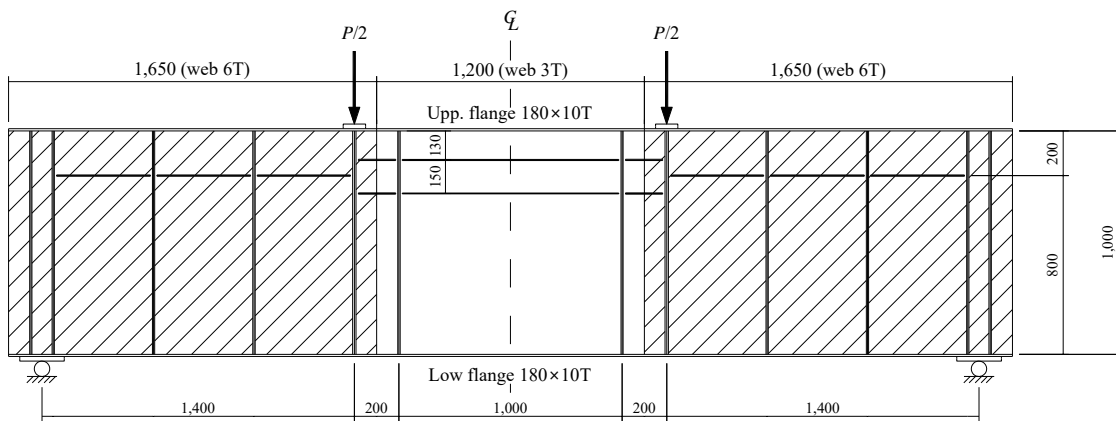


Fig. 2. Configuration of test specimens

재의 강성비( $\gamma$ )는 40과 60으로 계획하였다. 한편, 상단 수평 보강재는 0.13D, 하단 수평보강재는 0.28D 위치에 설치하였으며, 용접치수  $z = 3 \text{ mm}$ 의 양면 필렛용접으로 웹에 부착하였다.

3개 시험체의 제작 시 플랜지, 웹, 그리고 수평보강재는 각각 동일 강판이 사용되었으며, 각 강판에서 시험 전에 시험편을 3개씩 채취하여 UTM으로 인장강도 테스트를 수행하였다. 각 평균 항복강도( $F_y$ )와 거더 시험체의 실측 제원을 Table 1에 제시하였다.

한편, 2축대칭 거더에서 비보강 및 보강웹의 비조밀세장비 한계( $\lambda_{rw}$ )<sup>[7]</sup>는 식 (9a), 식 (9b)와 같다.

- 비보강웹

$$\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (9a)$$

- 보강웹

$$\lambda_{rw} = 0.95 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} \quad (9b)$$

따라서, 비보강시험체 T3-40의 비조밀웹 세장비 한계는 식 (9a)로부터  $\lambda_{rw} = 147$ 이다. 보강시험체 T3-4A와 T3-4B는 웹의 상·하단을 단순지지로 가정하면  $k = 313$ 이므로 식 (9b)로부터  $\lambda_{rw} = 433$ 이 된다. 따라서 Table 1로부터 실측 웹 두께  $t_w = 2.88 \text{ mm}$ 를 고려하면 T3-40는 세장웹(sleender web), T3-4A와 T3-4B는 비조밀웹가 된다.

### 3.2 측정 장치

시험체에 설치한 측정 장치를 Fig. 3에 도시하였다. 플랜지와 웹의 변형률을 측정하기 위해 Fig. 3(a) - Fig. 3(c)와 같이 상부플랜지와 웹은 양면에, 하부플랜지는 하면에만 1축 변형률게이지를 부착하였다. 하중 재하점 외측에 설치한 게이지 S-F1 ~ S-F4로부터 예비가력 시 하중의 대칭성을

평가하였다. 한편, Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 거더의 연직 처짐 측정을 위해 하부플랜지 중앙에 변위계(LVDT)를 설치하였다.

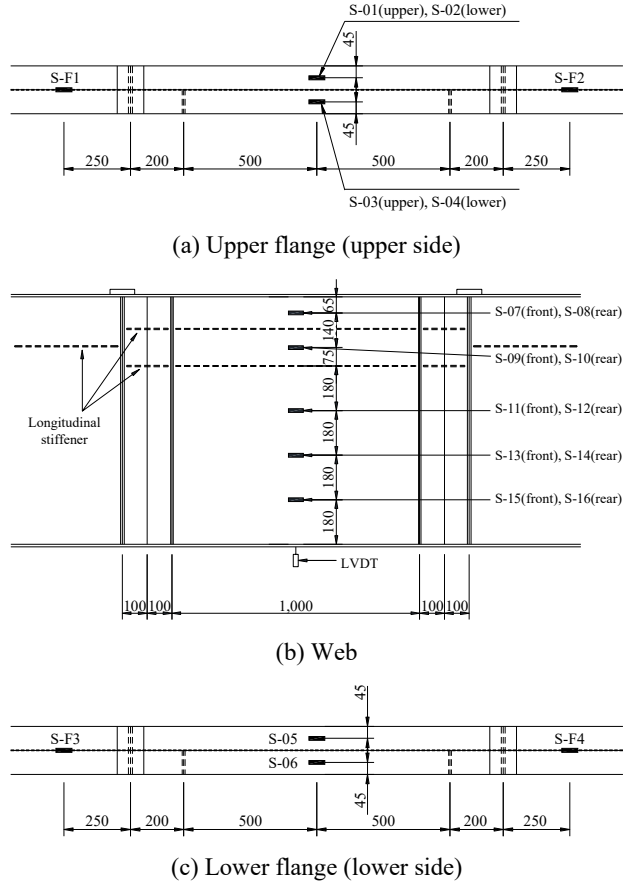


Fig. 3. Instrumentation of strain gauge and LVDT

### 3.3 웹 초기처짐 측정

시험 전에 각 시험체 웹의 면외방향 초기처짐을 측정하였다. 중앙패널의 웹에 100 mm × 100 mm 간격으로 격자를 작성하고 캘리퍼스so 직접 측정한 결과를 Fig. 4에 등고선 형태로 제시했다. 여기서, (+)값은 수평보강재 방향으로의 처짐이다. 비보강시험체 T3-40에서는 (+)9 mm - (-)5 mm

Table 1. Measured data of test specimens

(Unit : mm)

Specimen	Web			Flange		Stiffener		$F_y$ (MPa)		
	$t_w$	$D$	$D/t_w$	$b_{fc} \times t_{fc}$	$b_{ft} \times t_{ft}$	$b_{s1} \times t_{s1}$	$b_{s2} \times t_{s2}$	Flange	Web	Stiffener
T3-40	2.88	994	345	181.0×9.90	180.7×9.93	-	-	317	313	308
T3-4A		993	345	181.0×9.85	180.7×9.87	45.3×3.94	45.1×3.97			
T3-4B		993	345	181.0×9.89	181.0×9.88	55.0×3.96	55.3×3.97			

의 초기처짐을 보였다. T3-4A와 T3-4B 시험체들은 상부플랜지에서 하단 수평보강재 사이의 패널에서는 ( $\pm$ )5 mm 이내의 초기처짐을 보였고, 하단 수평보강재와 하부플랜지 사이의 패널에서는 최대 9 mm의 초기처짐을 보였다. 따라서 웨브의 최대 초기처짐은  $D/110$ 이다. 참고로 AWS 기준<sup>[12]</sup>의 허용치는  $\min(D/100, d_o/100)$ 이다.

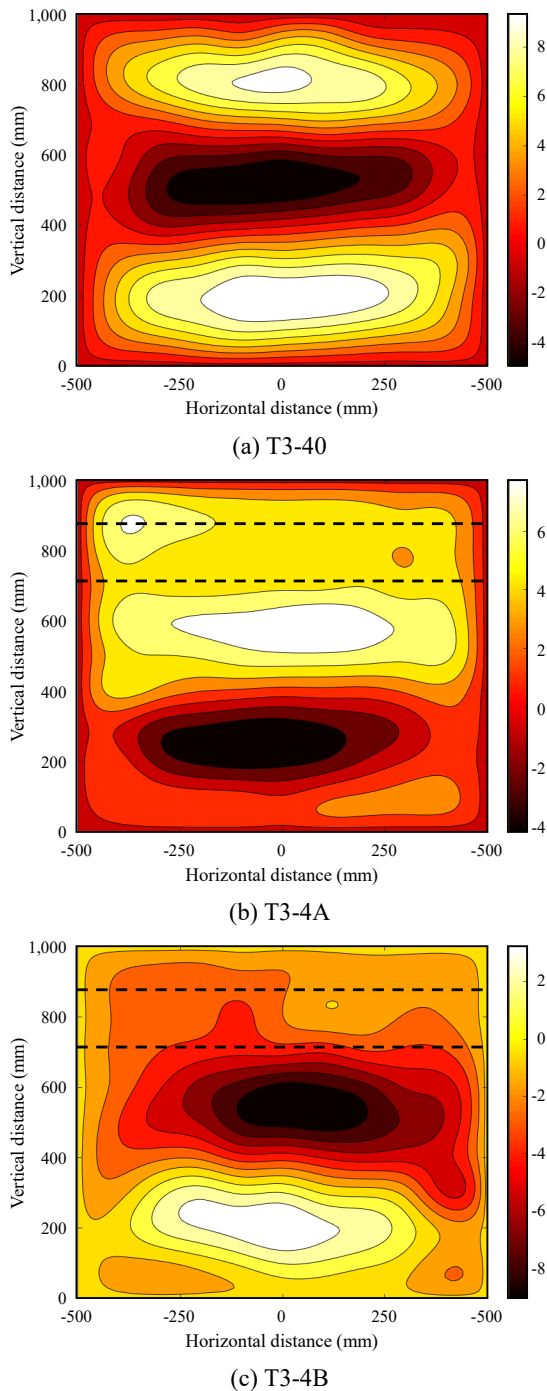


Fig. 4. Initial imperfections of webs

## 4. 실험결과

### 4.1 하중-변위 선도

가력은 3,000 kN UTM으로 2 mm/min의 속도로 가력하였으며, 각 시험체의 최대하중 도달 이후 최대하중의 85% 수준으로 감소하였을 때 실험을 종료하였다. 시험체들의 하중-변위 선도를 Fig. 5에 제시하였고, 실험종료 직후의 변형 형상을 Fig. 6에 제시하였다. 가력 중 관측에 의하면 T3-40 시험체에서는 웨브 상부에서 국부좌굴에 의한 면외변형이 먼저 발생하였고, 이후 상부플랜지의 좌굴에 의한 회전이 발생하였다. T3-4A 시험체 및 T3-4B 시험체에서는 압축축 웨브가 보강재 방향으로 변형함과 동시에 압축플랜지와 수평보강재 사이의 패널에서 국부좌굴이 발생하였고, 이후 플랜지의 회전이 발생하였다.

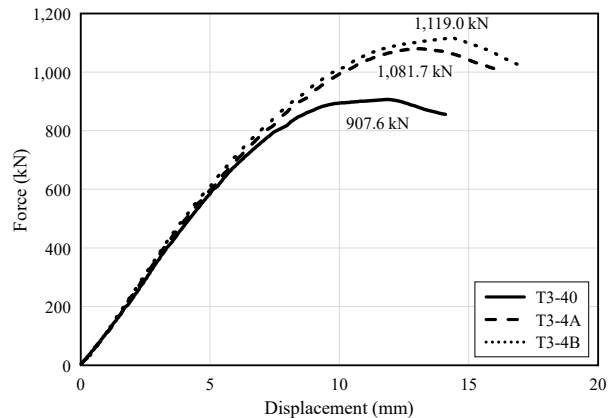


Fig. 5. Load-vertical displacement

### 4.2 웨브 변형 및 응력 분포

각 시험체별로 최대하중에서 가력을 일시 중단한 후 거더 중앙에서 연직방향 100 mm 간격으로 측정된 웨브의 면외 방향 변형을 Fig. 7에 제시하였다. 측정은 중앙패널 양단의 수직보강재 위에 강성이 큰 막대를 올리고 캘리퍼스를 이용하여 직접 측정하였다. Fig. 7은 보강재의 강성이 클수록 웨브의 면외변형이 억제되는 경향을 보여준다. 보강 웨브에서는 수평보강재 위치에서 기둥의 1차 좌굴모드 형태와 같이 단곡률 변형을 보였으며, 상부 서브패널에서는 국부좌굴 변형이 관측되었다. 그리고, 웨브는 초기처짐의 방향과 관계 없이 수평보강재 방향으로 중곡 변형을 보였다.

한편, 각 시험체의 플랜지와 웨브의 종방향 응력 분포를 Fig. 8에 제시하였다. 응력은 플랜지와 웨브 양면의 변형률

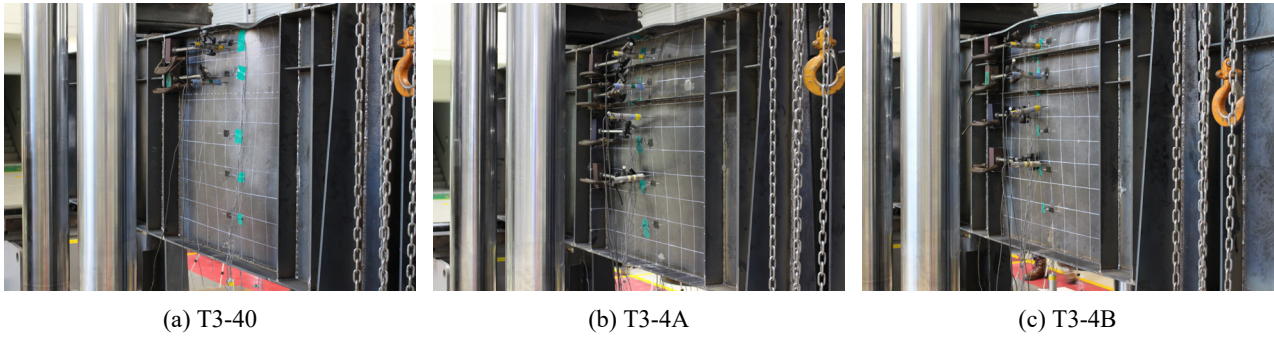


Fig. 6. Deformed shapes at the end of experiments

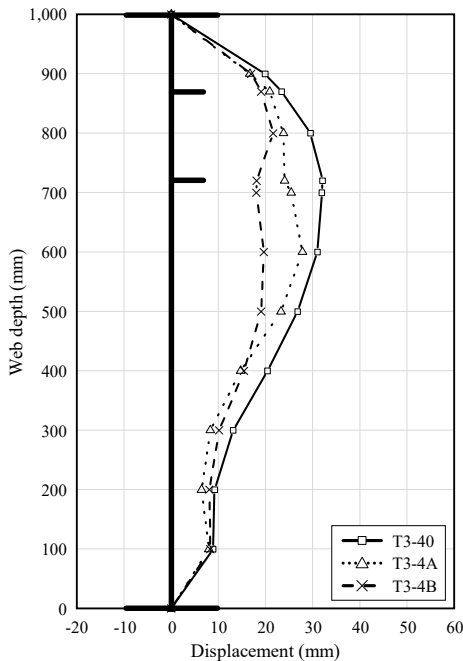


Fig. 7. Out-of-plane deformation of webs

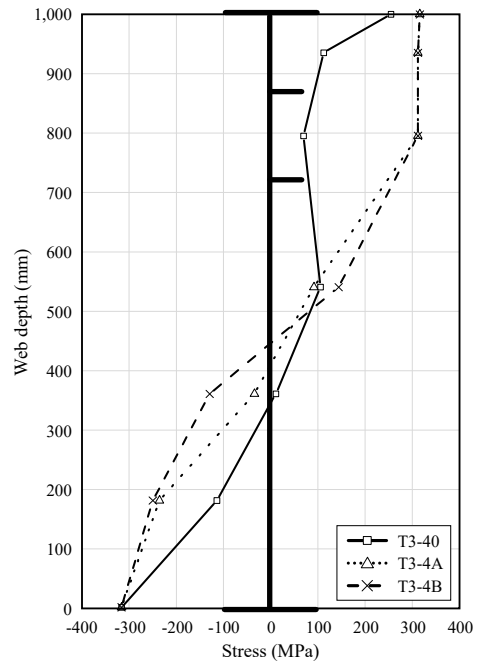


Fig. 8. Stress distributions of flange and web

게이지의 평균값에 탄성계수( $E$ )를 곱하여 산정하였으며, 비례한도를 초과하면 항복강도로 제시하였다. Fig. 8으로부터 비보강시험체(T3-40)는 압축영역 웹브의 탄성좌굴로 인해 응력이 선형분포에 이르지 못하는 web load-shedding 현상을 보였으며, 압축플랜지가 항복강도에 도달하지 못하였다. 반면, 보강시험체들(T3-4A, T3-4B)에서는 상·하단 보강재의 중간점 위쪽의 웹브가 항복강도에 도달하고 압축플랜지 또한 항복강도에 도달하였으며, 웹브 국부좌굴에 의한 web load-shedding 현상은 발생하지 않았다.

#### 4.3 시험체 검증 전산해석

실험이 적절히 이루어졌는지 평가하기 위해 시험체에 대해 재료 및 기하 비선형해석을 ABAQUS<sup>[13]</sup>로 수행하였다.

초기치짐은 Fig. 4의 실측치로 모델링하였으며, 각 두께별 강판의 항복강도는 Table 1의 값을 적용하였다. T3-4A 시험체의 변형 형상을 Fig. 9에 예시하였고, FEA에 의한 하중-변위 선도를 실험결과와 함께 Fig. 10에 제시하였다. Fig. 10으로부터 최대하중비( $P_{u,FEA}/P_{u,exp}$ )는 각 시험체별로 0.99, 0.97, 1.01로 잘 일치하는 것을 보여준다.

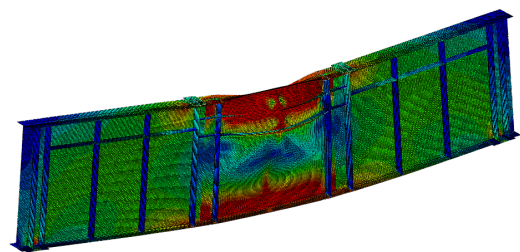


Fig. 9. Deformed shape: T3-4A

한편, Fig. 11과 Fig. 12에 FEA에 의한 웹 변위변위와 종방향응력을 제시하였다. 실험에 의한 Fig. 7 및 Fig. 8과 값의 차이는 보이나 경향은 서로 일치하는 것을 보여준다.

#### 4.4 거더 휨강도

Fig. 5의 각 시험체별 최대하중( $P_u$ )으로부터 산정한 단면 휨강도( $M_{u,exp}$ )와 Table 1의 실측치를 기준으로 산정한 휨강성비( $\gamma$ ), 단면적비( $\delta$ ) 그리고 항복모멘트( $M_{yc}$ )를 Table 2에 제시하였다. 항복모멘트  $M_{yc}$ 는 상부플랜지의 압축응력이 항복강도에 도달한 조건으로부터 산정한 것이며,  $M_{yc}$  산정 시 수평보강재를 포함한 경우와 제외된 경우를 고려하였다. 현재 설계 관행에서는 휨강도 산정 시 수평보강재를 포

함하지 않지만, 설계기준에서는 포함 여부를 명시하지 않고 있기 때문에 여기서는 두 가지 경우를 모두 고려하고자 한다. 한편, 플랜지의 항복강도가 웹의 항복강도보다 1.3% 크지만 그 차이가 작으므로 하이브리드계수( $R_h$ )는 1.0으로 간주하였다.

휨강성비( $\gamma$ )와  $M_{u,exp}/M_{yc}$ 의 비를 Table 2에 제시하고 이를 Fig. 13에 도시하였다. 여기서 비보강시험체 T3-40는 항복모멘트의 88.2%의 휨강도를 보이고, 보강시험체 T3-4A와 T3-4B는 보강재를 포함한  $M_{yc}$ 보다 각각 2.9%와 6.0% 큰 휨강도를 보였다. 보강시험체에서 항복모멘트에 도달하기 위해 필요한 최소강성비를 직선보강으로부터 구하면 보강재 포함 여부에 따라  $\gamma$  값은 26.1과 30.0이 된다.

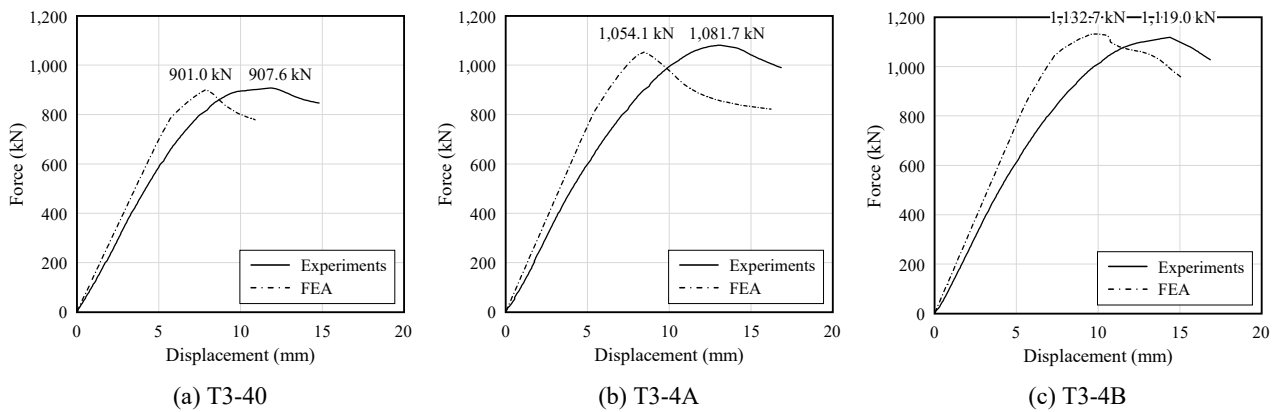


Fig. 10. Experiments vs. FEA

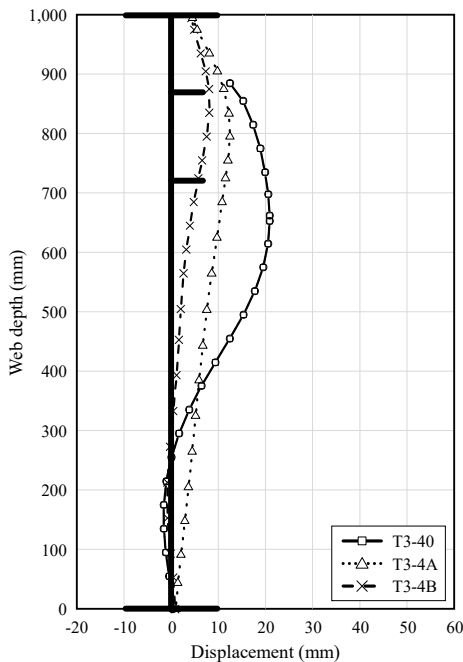


Fig. 11. Web deformation from FEA

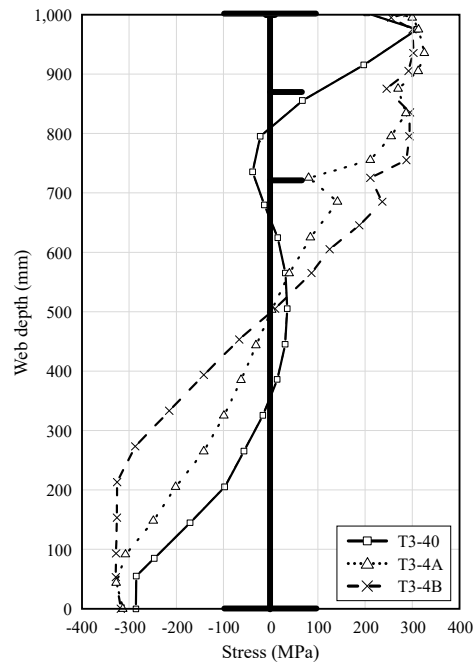
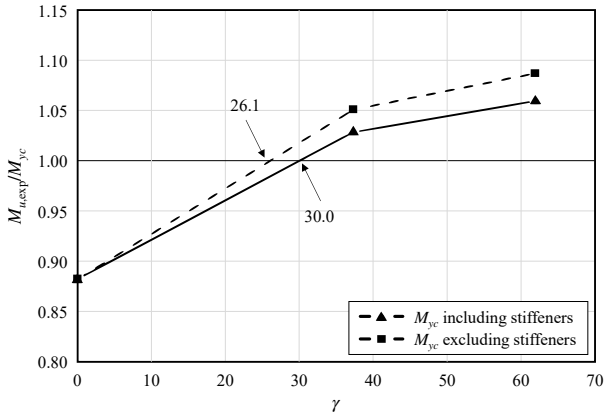


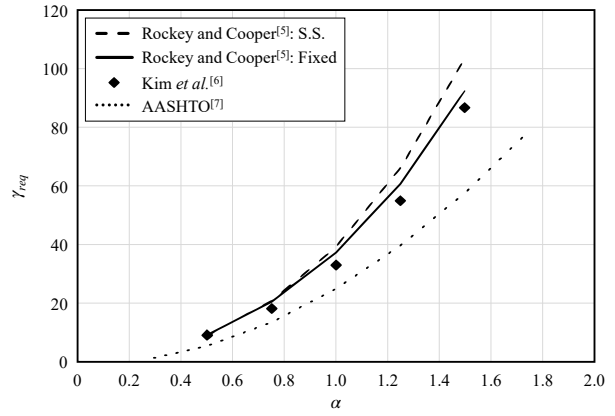
Fig. 12. Stress distribution from FEA

**Table 2.** Ultimate moment from experiments

Specimen	$P_u$ (kN)	$M_{u,exp}$ (kN·m)	$M_{yc}$ (kN·m)		$M_{u,exp}/M_{yc}$		$\gamma$	$\delta$
			Excluding stiffeners	Including stiffeners	Excluding stiffeners	Including stiffeners		
T3-40	907.6	635.3	720.2	720.2	0.882	0.882	0	0
T3-4A	1,081.7	757.2		735.9	1.051	1.029	37.3	0.063
T3-4B	1,119.0	783.3		739.2	1.088	1.060	62.1	0.077



**Fig. 13.**  $\gamma$  vs.  $M_{u,exp}/M_{yc}$



**Fig. 14.** Aspect ratio( $\alpha$ ) vs.  $\gamma_{req}$

### 5. 수평보강재 휨강성 요건 고찰

2장에서 제시한 AASHTO 기준 및 기존 연구들에 의한 웹브 형상비( $\alpha$ )와 수평보강재의 필요 휨강성비( $\gamma_{req}$ ) 관계를 Fig. 14에 도시하였다. 여기서, Kim *et al.*<sup>[6]</sup>에 의한 강성비는  $D/t_w = 250$ 인 2단 보강 웹브에 대한 좌굴 고유치해석으로부터 좌굴절선이 형성될 때의 하한치이다. 그 결과를 단면적비( $\delta$ )와 함께 Table 3에 제시하였으며 식 (7)은  $\alpha$  변수에 대해 보간하여 도출한 식이다. Rockey and Cook<sup>[5]</sup>이 2단 보강 웹브에 대해 제안한 식 (4a)와 식 (4b)는 웹브의 상·하단을 각각 단순지지 및 고정지지로 가정하였을 때의 필요 강성비로서  $\alpha$  외에 단면적비( $\delta$ )를 변수로 포함하고 있다. Table 3에서 Kim *et al.*에 의한  $\delta$ 를 식 (4a)와 식 (4b)에 적용하였을 때의 휨강성비를  $\gamma_{Rockey}$  칸에 제시하고 Fig. 14에 도시하였다. 이로부터 형상비가 증가함에 따라  $\gamma_{Rockey}$ (S.S.)는  $\gamma_{Rockey}$ (Fixed)와  $\gamma_{Kim}$ 에 비해 조금씩 큰 값을 보인다. 한편, AASHTO 기준인 식 (1)은 1단 보강시의 휨강성비 요건으로 상기 연구자들이 제안한 2단 보강보다는  $\gamma_{req}$  값이 작다. 그리고 식 (2)는 식 (1)보다 일반적으로 지배적이지 않은 것으로 분석되었다<sup>[14]</sup>.

**Table 3.**  $\alpha$  vs.  $\gamma_{req}$

Aspect ratio ( $\alpha$ )	Area ratio ( $\delta$ )	$\gamma_{Kim}$ <sup>[6]</sup>	$\gamma_{Rockey}$ <sup>[5]</sup>	
			S.S.	Fixed
0.5	0.033	8.9	8.7	9.0
0.75	0.051	17.9	20.6	20.4
1.0	0.073	32.9	39.1	37.2
1.25	0.100	54.9	66.1	60.7
1.5	0.132	86.8	103.6	92.5

수평보강재의 휨강성 요건으로 거더의 휨강도가 최소한 항복모멘트에 도달할 것으로 고려할 수 있을 것이다. 1단 보강에 대한 AASHTO 기준인 식 (1)을 식 (5)에 대입하면  $\alpha = 1$ 일 때  $\gamma = 24.8$ 이 되어 실험에 의한  $\gamma_{req} = 30.0$ (수평보강재 포함 시)보다 비안전측의 강성이 예상된다. 한편, Table 3에서  $\alpha = 1$ 일 때  $\gamma_{Kim} = 32.9$ ,  $\gamma_{Rockey}$ (S.S.) = 39.1,  $\gamma_{Rockey}$ (Fixed) = 37.2로서 실험에 의한  $\gamma_{req} = 30.0$ 보다 조금 크게 요구된다. 또한 Fig. 14으로부터 형상비가 증가함에 따라  $\gamma_{Rockey}$ (S.S.)는  $\gamma_{Kim}$ 보다 큰 강성을 요하는데, 이는 Kim *et al.*은 Fig. 1(b)의 편측 보강재 조건에서 단면2차모멘트( $I$ )를 등가 T-단면에 대해 고려한 반면 Rockey and Cook은 Fig. 1(a)의 양측



보강재의 단면2차모멘트를 웹 중심에 대해 고려한 점, 그리고 Rockey and Cook은 보강재의 비틀림강성을 무시한 반면 Kim *et al.*의 전산해석에서는 비틀림강성이 자동으로 고려된 점 등에 있다고 판단된다.

이상으로부터 Kim *et al.*의 제안식과 더불어 양측 보강재 조건으로 제안된 Rockey and Cook의 제안식 또한 편측 보강재의 강성 요건으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 단, 본 연구의 실험은 웹 형상비  $\alpha = 1.0$ 에 대해 수행하였으므로 다양한 웹 형상비를 포함하여 웹 세장비, 보강재의 위치 그리고 단면의 비대칭성 등을 고려한 후속 연구가 필요하며 해석적 연구에 의할 시 본 연구의 실험결과를 검증 모델로 활용할 수 있을 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 웹이 편측 수평보강재로 2단 보강된 플레이트거더의 휨강도 평가를 위한 실험을 수행하였다. 실험의 목적은 2단 보강 시 보강재의 휨강성 요건을 분석하기 위한 것으로 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) AASHTO LRFD 기준<sup>[7]</sup>과 국내 강구조부재설계기준<sup>[11]</sup>은 2단 수평보강 웹의 좌굴계수 및 보강재의 휨강성 요건을 제시하지 않고 있어 형고가 큰 거더의 합리적 설계를 위해서는 이에 대한 기준이 필요하다.
- (2) 웹 2단 보강 시 수평보강재의 휨강성 요건으로 Rockey and Cook<sup>[5]</sup>은 양측 보강재 조건에 대해 에너지법으로부터 식 (4)를, Kim *et al.*<sup>[6]</sup>은 편측 설치 보강재에 대한 좌굴 고유치해석으로부터 식 (7)을 제안하였다. 본 연구에서는 이들 제안식의 타당성을 평가하기 위해 보강재의 강성이 다른 3개의 거더 시험체에 대해 휨강도 평가 실험을 수행하였다. 실험으로부터 식 (4) 및 식 (7)에 해당하는 휨강성을 갖는 보강재가 설치된 T3-4A 시험체에서 웹의 web load-shedding 현상이 억제되고 압축플랜지가 항복강도에 도달하는 결과를 보였다.
- (3) 따라서 수평보강재의 휨강성 요건으로 거더의 압축 플랜지가 항복에 도달할 것으로 설정하면 식 (4)와 식 (7)은 편측 보강재의 휨강성 요건으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.
- (4) 본 연구의 실험은 웹 형상비  $\alpha = 1.0$ 에 대해 수행하

였으므로 향후 다양한 웹 형상비를 포함하여 웹 세장비, 보강재 위치 그리고 단면의 비대칭성 변수를 고려한 휨강성 요건을 수립하기 위한 후속 연구가 필요하며, 해석적 연구에 의할 시 본 연구의 실험결과를 검증모델로 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가 R&D사업(과제번호 22SMIP-A158708-03)”의 지원으로 수행하였습니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Dubas, Ch. (1948) Contribution à l'étude du voilement des tôles raidies (A Contribution to the Study of Buckling of Stiffened Plates), *Rapport du congrès AIPC (IVBH Kongressbericht, IABSE Congress Report)*, Vol.3, pp.129-136 (in French).
- [2] Rockey, K.C., and Leggett, D.M.A. (1962) The Buckling of a Plate Girder Web Under Pure Bending When Reinforced by a Single Longitudinal Stiffener, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, ICE*, Vol.21, No.1, pp.161-188.
- [3] Frank, K.H., and Helwig, T.A. (1995) Buckling of Webs in Unsymmetric Plate Girders, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.32, No.2, pp.43-53.
- [4] Rockey, K.C., and Cook, I.T. (1965) Optimum Reinforcement by Two Longitudinal Stiffeners of a Plate Subjected to Pure Bending, *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, Vol.1, No.1, pp.79-92.
- [5] Rockey, K.C., and Cook, I.T. (1965) The Buckling Under Pure Bending of a Plate Girder Reinforced by Multiple Longitudinal Stiffeners, *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier, Vol.1, No.2, pp. 147-156.
- [6] Kim, B.J., Park, Y.M., Kim, K., and Choi, B.H. (2019) Web Bend-Buckling Strength of Plate Girders with Two Longitudinal Web Stiffeners, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno-Press, Vol.69, No.4, pp.383-397.

- [7] American Association of State Highway and Transportation Officials (2020) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (9th Ed.), USA.
- [8] Massonnet, Ch. (1954) Essais de Voilement sur Poutres à Âme Raidle, *IABSE Publications (Mémoires AIPC)*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.14, pp.125-186 (in French).
- [9] Cooper, P.B. (1967) Strength of Longitudinally Stiffened Plate Girders, *Journal of Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.93, No.2, pp.419-451.
- [10] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2010) *Road Bridge Design Code*, Korea (in Korean).
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standard of Steel Structural Members* (KDS 14 31 10), Korea (in Korean).
- [12] American Welding Society (1994) *Structural Welding Code - Steel* (ANSI/AWS D1.1-94), USA.
- [13] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*, DSS, USA.
- [14] Kim, H.S., Park, Y.M., Kim, B.J., and Kim, K. (2018) Numerical Investigation of Buckling Strength of Longitudinally Stiffened Web of Plate Girders Subjected to Bending, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno-Press, Vol.65, No.2, pp.141-154.

---

**요 약:** 형고가 높은 플레이트거더의 웹브는 2단 수평보강재가 종종 적용된다. AASHTO LRFD 교량설계기준은 1단 보강 시 보강재 휨강성에 대한 기준은 제시하지만 2단 보강에 대한 기준은 미흡하다. Rockey and Cook, Kim *et al.*은 2단 보강 시 보강재의 필요 휨강성을 각각 이론적 및 전산해석 연구로부터 제안하였는데, 이에 따르면 1단 보강시보다 큰 강성이 필요하다. 본 연구에서는 플레이트거더 웹브의 2단 보강시 수평보강재의 휨강성 요건 평가를 위한 실험을 수행하였다. 웹브 형상비가 1.0, 세장비가 345인 비보강거더 1개와 2개의 보강거더 시험체를 제작하였다. 이로부터 압축플랜지가 항복강도에 도달하기 위해 필요한 보강재의 휨강성을 평가하고 기존 연구자들이 제안한 강성 요건의 타당성을 평가하였다.

**핵심용어:** 플레이트거더, 보강 웹브, 2단 수평보강재, 거더 휨강도 실험, 보강재 휨강성

---