



수평보강재로 보강된 세장복부판을 갖는 플레이트거더의 휨강도 평가 실험

박용명¹ · 이건준^{2*} · 주호중³ · 조성훈³

¹교수, 부산대학교, 토목공학과, ²박사과정, 부산대학교, 토목공학과, ³석사과정, 부산대학교, 토목공학과

Experiments on Flexural Resistance of Longitudinally Stiffened Plate Girder with Slender Web

Park, Yong Myung¹, Lee, Kun Joon^{2*}, Ju Ho Jung³, Jo Sung Hoon³

¹Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

²Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

³M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

Abstract - In this paper, a series of experiments for the evaluation of flexural resistance of longitudinally stiffened plate girder with slender web were conducted. For the purpose, four plate girder specimens with and without longitudinal stiffener were fabricated for the web slenderness of 219 and 156. The test results were compared with the current AASHTO LRFD and Eurocode 3 codes, respectively. As presented in the previous paper by the authors, it was acknowledged that the AASHTO LRFD code could considerably underestimate the flexural resistance of longitudinally stiffened girder with slender web and the proposed method in the previous paper could estimate the flexural resistance reasonably.

Keywords - Longitudinal stiffener, Slender web, Plate girder, Flexural resistance, AASHTO LRFD, Eurocode 3

1. 서론

플레이트거더 교량은 대부분의 단면에서 전단력보다는 주로 휨모멘트에 의해 설계가 지배된다. 따라서, 가급적 복부판의 두께를 얇게 하는 것이 경제적이며, 이 때 복부판의 좌굴강도를 향상시키기 위해 수평보강재를 적용하고 있다.

본 논문의 목적은 Park *et al.*^[1]이 선행 논문에서 제안한 '수평보강재로 보강된 세장복부판을 갖는 플레이트거더의 휨강도 평가 방안'의 타당성을 실험으로 검증하기 위한 것이

다. 수평보강재로 보강된 플레이트거더의 휨강도에 대한 기존 연구들에 대해서는 선행 논문에서 제시한 바와 같으므로 여기서는 생략하기로 한다.

비보강 복부판에 비해 수평보강재로 보강된 복부판의 휨좌굴 강도는 크게 증가한다. 하지만, 현재 강구조설계기준^[2]이나 AASHTO LRFD 기준^[3]에서는 수평보강재의 유무에 관계없이 비보강 복부판의 세장비 기준을 일률적으로 적용하고 있으며, 세장복부판과 비조밀복부판의 경계가 되는 한계 세장비(λ_{rw})를 $5.7\sqrt{E/F_y}$ 로 규정하고 있다. 이는 선행 논문에서 제시한 바와 같이 세장복부판일지라도 수평보강재로 보강된 복부판의 휨좌굴강도(F_{crw} , 뒤의 식 (1) 참조)가 항복강도보다 크면 탄성좌굴이 발생하지 않으므로 비조밀복부판으로 고려될 수 있음에도 불구하고 이를 고려하지 않는 문제점이 있다. 이러한 문제점은 최근 Shin *et al.*^[4]에 의해서도 제기되었다.

또한, 선행 논문에서 제시한 바와 같이 수평보강재가 설

Note.-Discussion open until June 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 06, 2014; revised October 25, 2014; approved on October 29, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-1460 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. kunjoon@pusan.ac.kr

치될 경우 압축측 복부판의 강성이 증가함에 따라 복부판이 압축플랜지의 회전을 구속하는 효과가 증가하고, 이로 인해 압축플랜지의 좌굴강도가 증가한다^[5]. 하지만, 현재 국내 강구조설계기준이나 AASHTO LRFD 기준에서는 보강 복부판에 대해 복부판의 세장비 기준과 더불어 압축플랜지 회전 구속 효과의 증가를 고려하지 않고 있어 현재의 설계기준들이 수평보강재로 보강된 거더의 휨성능을 과소 평가할 소지가 있다.

이러한 문제점들로 인해 선행 논문^[1]에서는 수평보강재로 보강된 플레이트거더에 대한 해석적 연구로부터 현재의 AASHTO LRFD 기준^[3]이 보강 거더의 휨강도를 지나치게 안전측으로 평가함을 제시하였다. 또한, 이러한 문제점의 해결을 위해 수평보강재로 보강된 복부판의 비조밀 한계세장비를 제안하였으며, 아울러 플랜지의 비조밀 한계세장비 ($\lambda_{rf} = 0.95 \sqrt{Ek_c/F_{yf}}$)를 합리적으로 산정하기 위한 압축플랜지의 좌굴강도계수(k_c)를 제안하였다^[1].

본 연구에서는 이러한 제안 사항들을 고려한 거더의 휨강도 평가 방안의 타당성을 검증하기 위해 4개의 거더 시험체를 제작하고 실험을 수행하였다. 복부판 세장비는 각각 219와 156인 두 가지 경우를 고려하였으며, 각각 수평보강재가 없는 경우와 설치된 경우를 고려하였다. 실험으로부터 현재 AASHTO LRFD 기준은 보강 복부판을 갖는 거더의 휨강도를 크게 과소평가하는 것이 확인되었으며, 선행 논문에서 제안한 플레이트거더의 휨강도 평가 방안은 실제 휨강도를 보다 합리적으로 평가할 수 있음을 제시하였다.

2. 휨강도 관련 현행 기준

휨강도와 관련하여 현행 AASHTO LRFD 기준과 Eurocode 3 기준에 대해서는 선행 논문^[1]에서 상세히 기술하였다. 하지만, 본 논문의 전개 상 필요한 내용은 여기서 다시 제시하였다.

2.1 AASHTO LRFD 기준^[3]

2.1.1 복부판 휨좌굴강도

복부판의 휨좌굴강도(F_{crw})는 다음 식 (1)과 같다.

$$F_{crw} = \frac{0.9Ek}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \quad (1)$$

여기서, E : 강재의 탄성계수, D : 복부판 높이, t_w : 복부판 두께이며, 복부판의 보강 유무에 따른 좌굴계수 k 는 다음과 같다.

$$\cdot \text{비보강 복부판} : k = \frac{9}{(D_c/D)^2} \quad (2a)$$

· 보강 복부판

$$\frac{d_s}{D_c} \geq 0.4 : k = \frac{5.17}{(d_s/D)^2} \geq \frac{9}{(D_c/D)^2} \quad (2b)$$

$$\frac{d_s}{D_c} < 0.4 : k = \frac{11.64}{\left(\frac{D_c - d_s}{D}\right)^2} \quad (2c)$$

여기서, D_c : 탄성범위에서의 압축측 복부판 높이, d_s : 압축플랜지 중심과 수평보강재 중심간 거리이다.

2.1.2 플랜지강도감소계수

세장 복부판을 갖는 단면은 압축측 복부판의 탄성좌굴로 인해 하중저항 능력이 저하되고(web load-shedding), 이로 인해 휨강도의 저하가 발생된다. 이를 AASHTO LRFD 기준에서는 플랜지 강도감소계수(R_b)로 고려하고 있다. 본 기준에서는 복부판의 탄성좌굴이 발생하지 않는 경우, 즉 비보강 복부판은 식 (3a), 한 개 또는 그 이상의 수평보강재로 보강된 경우는 식 (3b)를 만족할 경우 플랜지 강도감소계수(R_b)는 1.0로 제시하고 있다.

$$\cdot \text{비보강 복부판} : \frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \quad (3a)$$

$$\cdot \text{보강 복부판} : \frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yc}}} \quad (3b)$$

이를 만족하지 않을 경우, 플랜지 강도감소계수(R_b)는 다음 식으로 구한다.

$$R_b = 1 - \left(\frac{a_{wc}}{1200 + 300a_{wc}}\right) \left(\frac{2D_c}{t_w} - \lambda_{rw}\right) \leq 1.0 \quad (4)$$

여기서, k : 복부판 휨좌굴계수(식 (2) 참조), F_{yc} : 압축플랜

지의 항복강도, a_{wc} : 압축측 복부판 넓이의 2배와 압축플랜지 넓이의 비 ($=2D_c t_w / b_f t_{fc}$)이며, λ_{rw} 는 비조밀복부판의 한계세장비로서 다음과 같다.

$$\lambda_{rw} = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (5)$$

2.1.3 압축플랜지 국부좌굴강도 : 본문 6.10.8 기준

비합성단면 또는 부모멘트를 받는 합성단면의 압축플랜지 국부좌굴강도는 본문 6.10.8.2.2항에 제시되어 있으며, 응력으로 표현한 압축플랜지의 국부좌굴강도(F_{nc})는 다음과 같다.

$$\cdot \lambda_f \leq \lambda_{pf} \text{인 경우} : F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (6a)$$

· 그 외의 경우 :

$$F_{nc} = \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_h F_{yc}} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc} \leq R_b R_h F_{yc} \quad (6b)$$

여기서, λ_f : 압축플랜지 세장비($=\frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$), b_{fc} : 압축플랜지 폭, t_{fc} : 압축플랜지 두께, R_b : 플랜지 강도감소계수, R_h : 하이브리드단면 계수, F_{yr} : 잔류응력 영향을 포함한 항복강도이며, λ_{pf} 와 λ_{rf} 는 각각 조밀 및 비조밀플랜지의 한계세장비로서 다음과 같다.

$$\lambda_{pf} = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (7a)$$

$$\lambda_{rf} = 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} \quad (7b)$$

2.1.4 압축플랜지 국부좌굴강도 : 부록 A6 기준

앞의 2.1.3에서 제시한 AASHTO LRFD 본문 6.10.8.2.2의 기준에 의하면 거더의 최대 휨강도는 항복모멘트(M_y)로 제한된다. 그러나, 조밀단면에서는 최대 휨강도가 소성모멘트(M_p)까지 도달하므로 이를 감안하기 위하여 다음 세 조건들을 만족하는 조밀 또는 비조밀 복부판을 갖는 단면은 부록 A6 기준을 적용할 수 있다.

$$F_y \leq 485 \text{ MPa}, \quad \frac{2D_c}{t_w} < 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}}, \quad \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \geq 0.3 \quad (8)$$

여기서, F_y : 강재의 항복강도, $\lambda_w (=2D_c/t_w)$: 복부판의 세장비, I_{yc} : 압축플랜지의 연직축에 대한 단면2차모멘트, I_{yt} : 인장플랜지의 연직축에 대한 단면2차모멘트이다.

이 때 압축플랜지의 국부좌굴강도에 의한 휨강도는 다음과 같다.

$$\cdot \lambda_f \leq \lambda_{pf} \text{인 경우} : M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (9a)$$

· 그 외의 경우 :

$$M_{nc} = \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_{pc} M_{yc} \quad (9b)$$

여기서, S_{xc} : 압축플랜지에 대한 단면계수, M_{yc} : 압축플랜지에 대한 항복모멘트이며, λ_{rf} 는 비조밀플랜지 한계세장비로서 다음과 같다.

$$\lambda_{rf} = 0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_{yr}}} \quad (10)$$

여기서, k_c : 압축플랜지 국부좌굴계수($=4.0/\sqrt{D/t_w}$, 단, $0.35 \leq k_c \leq 0.76$)

그리고 복부판 소성화계수 R_{pc} 는 다음과 같다.

$$\cdot \frac{2D_{cp}}{t_w} \leq \lambda_{pw(Dcp)} \text{(조밀복부판)} : R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (11a)$$

$$\cdot \frac{2D_c}{t_w} \leq 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \text{(비조밀복부판)} :$$

$$R_{pc} = \left[1 - \left(1 - \frac{R_h M_{yc}}{M_p} \right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw(Dc)}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw(Dc)}} \right) \right] \frac{M_p}{M_{yc}} \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (11b)$$

여기서, D_{cp} : 소성단면에서 압축측 복부판의 높이, $\lambda_{pw(Dcp)}$: 조밀복부판 한계세장비

$$= \frac{\sqrt{E/F_{yc}}}{(0.54 \frac{M_p}{R_h M_y} - 0.09)^2} \leq \lambda_{rw} \left(\frac{D_{cp}}{D_c} \right) \quad (12)$$

여기서, $\lambda_{pwDc} = \lambda_{pw(Dcp)}(D_c/D_{cp}) \leq \lambda_{rw}$

2.1.5 수평보강재

AASHTO LRFD 기준에서는 1) 수평보강재의 국부좌굴을 억제하기 위한 보강재의 폭-두께비 제한, 2) 보강재가 복부판의 휨변형을 억제하기 위해 필요한 단면2차모멘트, 3) 보강재가 횡좌굴을 일으키지 않고 축방향 압축력에 저항하기 위한 강성을 확보하도록 단면회전반경에 대한 규정을 제시하고 있다. 이 중 수평보강재의 휨강도와 관련되는 필요 단면2차모멘트에 대한 규정은 다음과 같다.

$$I_t \geq Dt_w^3 \left[2.4 \left(\frac{d_0}{D} \right)^2 - 0.13 \right] \beta \quad (13)$$

여기서, I_t : 복부판과 접하는 면에 대한 수평보강재의 단면2차모멘트, d_0 : 수직보강재의 간격, β : 곡선거더에 설치되는 수평보강재의 곡률 보정계수(직선거더=1.0)이다.

2.2 Eurocode 3 기준

Eurocode 3의 단면 휨강도 산정은 EN 1993-1-5^[6]에 제시되어 있는데 압축응력을 받는 판에 대해 판의 세장비에 따라 감소계수(ρ)를 적용하여 유효폭(b_{eff})을 계산하고, 이로부터 유효단면에 대한 휨강도를 구하는 개념이다. 압축플랜지와 비보강 및 보강 복부판에 대한 유효폭 산정은 선행 논문^[1]에 제시되어 있으므로 여기서는 상세한 설명은 생략한다. 참고로 Fig. 1에 보강 복부판을 갖는 단면의 유효폭(빗금친 부분)에 대한 개념을 제시하였다.

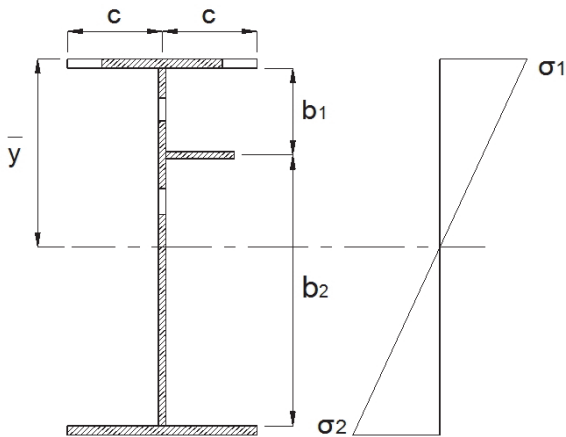


Fig. 1. Effective cross-section by Eurocode 3^[1]

3. 실험 내용 및 결과

3.1 시험체의 제원

거더 시험체는 Fig. 2와 같이 단순보의 중간 두 점에 동일 연직하중을 재하하여 중앙패널 구간이 순수휨 상태가 되도록 계획하였다. 중앙패널 구간은 600mm로 하였으며, 하중 재하점에서 지점까지의 사이드패널 구간의 길이는 각각 1,100mm로 하였다. 사이드패널 구간에는 휨 및 전단에 의한 복부판의 좌굴을 방지하기 위하여 Fig. 2와 같이 적절한 간격으로 수평보강재와 수직보강재를 설치하였다.

시험체 설계 시 고려한 변수는 복부판의 세장비와 수평보강재 유무이며, 이를 위해 4개의 거더를 제작하였다. 복부판의 높이(D)는 모두 700mm, 공칭 두께는 각각 3.2T와 4.5T로 고려하였으며, 이 때 세장비는 각각 219와 156으로서 세장 복부판으로 계획하였다. 상·하부 플랜지의 폭(b_f)은 200mm, 공칭 두께는 6.0T로 고려하였고 이 때 플랜지의 세장비는 16.7로서 비조밀 플랜지로 계획하였다. 한편, 실제 플랜지와 복부판 제원의 측정치 및 세장비를 Table 1에 제시하였다. 공칭 제원(I_n) 대비 실제 제원(I_m)에 의한 단면2차모멘트의 오차는 최대 3% 이내로 시험체는 적절히 제작된 것으로 판단된다. 하지만, 이후 결과 분석에서는 실제 측정치를 기준으로 하기로 한다.

수평보강재는 0.4 D_c 위치에 복부판의 편측에만 설치하였으며 AASHTO LRFD 기준인 식 (13)의 필요 휨강도를 만족하도록 결정하였다. 3.2T와 4.5T 복부판의 경우 필요 휨강도 대비 실제 휨강도의 비는 다음과 같다.

- 3.2T 복부판 시험체

$$I_{t,req} = 27,463 \text{ mm}^4 < I_{t,prov.} = 97,200 \text{ mm}^4$$

- 4.5T 복부판 시험체

$$I_{t,req} = 104,182 \text{ mm}^4 < I_{t,prov.} = 187,500 \text{ mm}^4$$

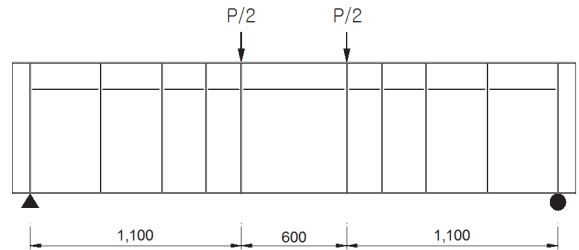


Fig. 2. Configuration of test specimen

Table 1. Dimension of girders

Specimen No.	Nominal web thickness	Measured dimension (mm)							Stiffener ($b_s \times t_s$)	F_y	
		b_f	t_f	$b_f/2t_f$	D	t_w	D/t_w	I_m/I_n		Flange	Web
No.1	3.2T	199.7	5.78	17.28	703	3.14	224	0.972	none	313	305
No.2		200.0	5.83	17.15	703	3.16	222	0.984	45×3.2		
No.3	4.5T	199.7	5.90	16.92	706	4.44	159	1.003	none	351	281
No.4		200.0	5.72	17.48	704	4.46	158	0.977	50×4.5		

한편, 각 시험체의 플랜지와 복부판에 적용된 강판에서 3 개씩의 쿠폰을 채취하여 수행한 강도 테스트 결과를 Table 1 에 제시하였다. 3.2T 복부판 시험체(No.1 및 No.2)는 플랜지와 복부판의 강도 차이가 크지 않으나, 4.5T 복부판 시험체(No.3 및 No.4)는 다소 차이가 컸다. 이러한 차이를 감안하여 휨강도 평가 시 AASHTO LRFD 기준의 하이브리드계수(R_h)를 적용하여 고려하기로 한다.

3.2 측정 장치 개요

각 시험체에는 중앙점에서의 연직변위와 복부판의 면외

변형을 측정하기 위한 변위계를 설치하였다. 플랜지와 복부판의 변형률을 측정하기 위해 1축 변형률계이치를 설치하였으며, 복부판에는 동일 위치에서 양측에 설치하였다. 수평 보강재가 없는 시험체의 측정 장치 개요는 Fig. 3(a), 수평 보강재가 설치된 시험체의 측정 장치 개요는 Fig 3(b)에 제시하였다.

3.3 복부판 초기처짐 측정 결과

실험에 앞서 각 시험체의 중앙점에서 복부판의 연직방향 및 수평방향 초기처짐을 측정하였으며 이를 Fig. 4에 제시

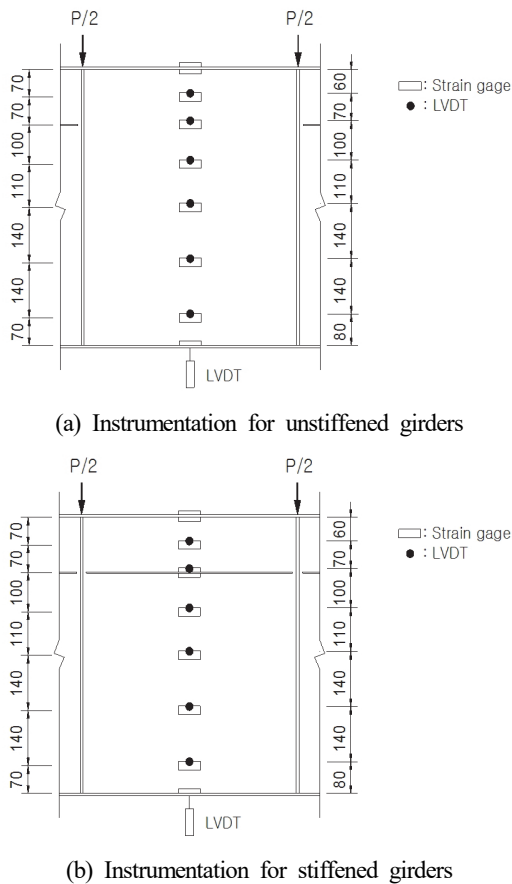


Fig. 3. Instrumentation of LVDT and strain gauge

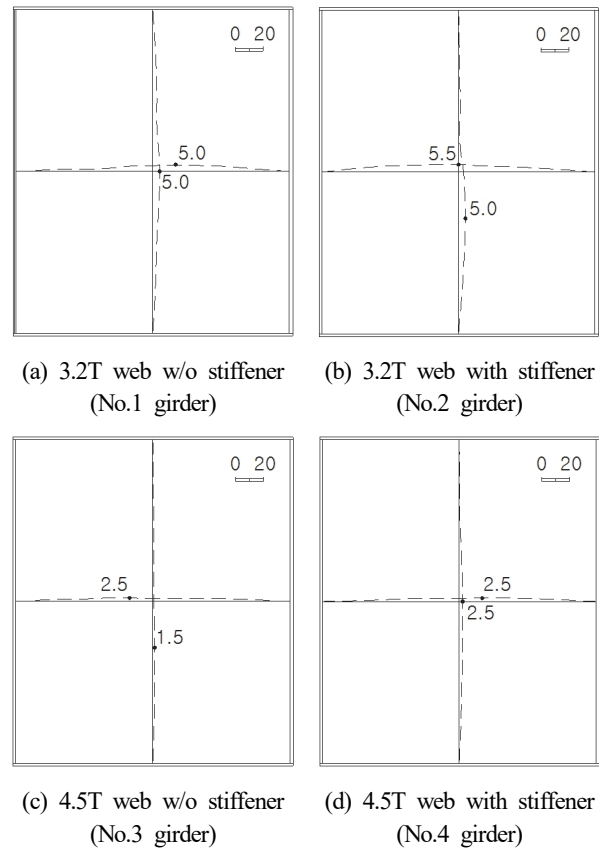


Fig. 4. Initial imperfection of webs

하였다. 복부판 공칭 두께가 3.2T인 No.1 및 No.2 시험체에서는 최대 초기처짐이 약 5mm 수준으로 동일하며, 공칭 두께 4.5T의 No.3 및 No.4 시험체에서는 최대 2.5mm 수준으로 동일하였다. 이로부터 초기처짐의 크기는 수평보강재 유무보다는 복부판의 두께와 연관성이 있으며 용접 제작시 열영향으로 인한 변형은 판두께가 얇을수록 불리한 것으로 파악되었다.

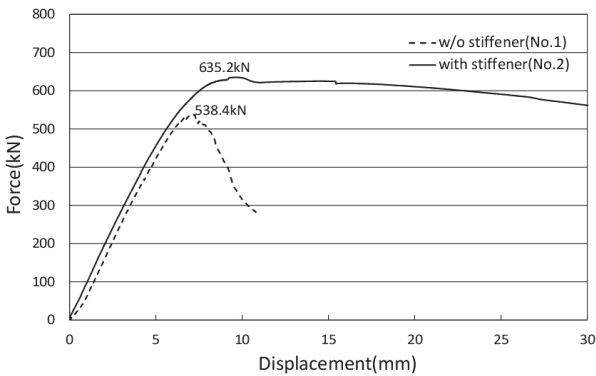
3.4 실험 결과

3.4.1 하중-변위 결과

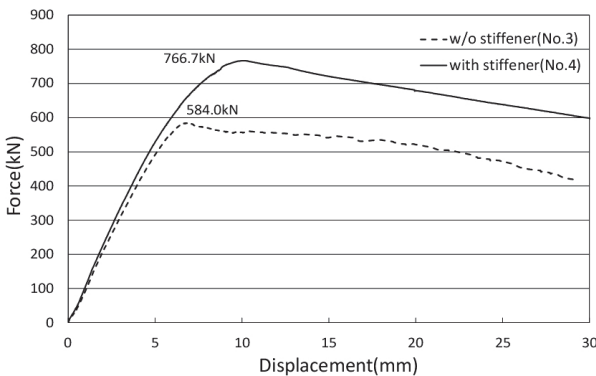
가력은 1,000kN UTM을 사용하였으며, 가력속도는 2mm/min로 하였다. 실험으로부터 얻은 각 시험체의 하중-연직 변위 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 참고로 3.2T 비보강 시험체(No.1)는 최대하중 도달 이후 가력 도중에 압축플랜지와 복부판의 용접부가 떨어져 국부적으로 플랜지의 변형이 크게 발생하여 이후 가력을 중단하였다. 최대하중 도달 시 비보강 시험체에서는 복부판의 면외변형 및 플랜지의 회전변

형이 육안으로 관측되었으나, 보강 시험체에서는 이러한 변형을 육안으로 파악하기 어려울 정도였다. 실험 종료 후 각 시험체의 최종 변형 형상은 Fig. 6에 제시하였는데, 비보강 거더에 비해 수평보강 거더는 종국 상태에서도 중앙패널 구간의 플랜지와 복부판의 변형이 매우 작게 발생하였음을 알 수 있다.

한편, Fig. 5(a)로부터 3.2T 복부판 시험체에서 비보강 대비 수평보강 거더의 최대 하중비는 $635.2\text{kN}/538.4\text{kN}=1.18$ 배 증가하였으며, Fig. 5(b)로부터 4.5T 시험체에서는 $766.7\text{kN}/584.0\text{kN}=1.31$ 배 증가하였다.



(a) 3.2T web girders



(b) 4.5T web girders

Fig. 5. Load vs. vertical displacement



(a) 3.2T web w/o stiffener(No.1 girder)



(b) 3.2T web with stiffener(No.2 girder)



(c) 4.5T web w/o stiffener(No.3 girder)



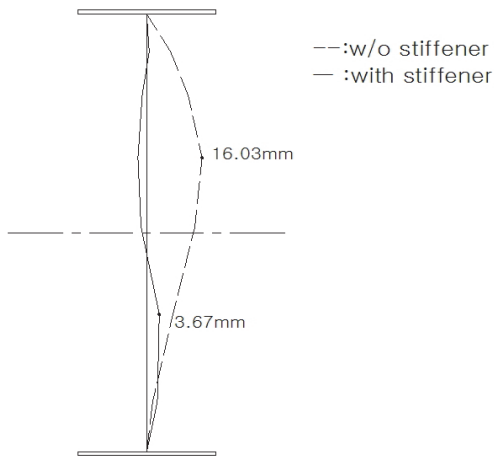
(d) 4.5T web with stiffener(No.4 girder)

Fig. 6. Deformed shapes after experiments

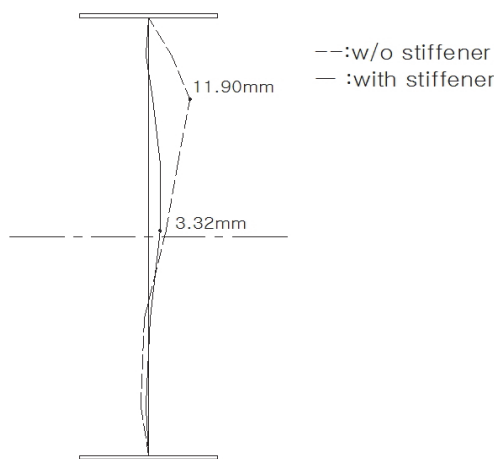
3.4.2 복부판 및 압축플랜지 변형

각 시험체별로 최대 하중에서의 복부판의 면외변형 분포를 Fig. 7에 제시하였는데, 수평보강재가 설치된 복부판의 면외변형은 비보강 복부판에 비해 약 1/4 수준으로 줄어들었다. 이로부터 수평보강재가 압축측 복부판의 면외방향 휨 변형을 매우 효율적으로 억제한 것을 알 수 있으며, 이로 인해 복부판의 휨좌굴강도가 향상된 것을 확인할 수 있었다.

또한, 압축플랜지의 연직방향 변위를 측정하지는 못하였으나 비보강 시험체에서는 복부판의 탄성좌굴 이후 압축플랜지의 회전이 육안으로 관측되었지만, 보강 시험체에서는 육안으로 구분하기 힘들 정도였다. 따라서, 복부판의 면외 휨변형이 감소함에 따라 압축플랜지의 회전을 구속하는 효과가 증대되어 압축플랜지의 좌굴강도가 향상된 것을 확인할 수 있었다.



(a) 3.2T web girders

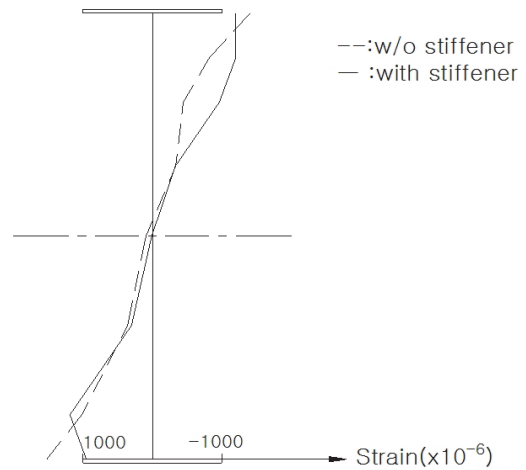


(b) 4.5T web girders

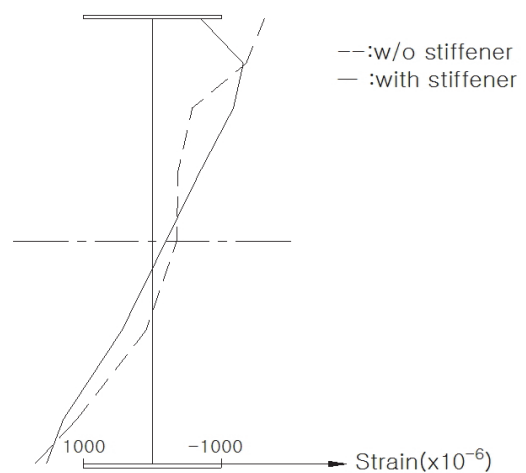
Fig. 7. Deformation of webs at maximum load

3.4.3 변형률 분포

3.2T와 4.5T 복부판 시험체에서 각각 비보강 시험체에서의 최대 하중(3.2T 시험체 : 538.4kN, 4.5T 시험체 : 584.0kN)을 기준으로 플랜지와 복부판의 변형률 분포를 Fig. 8에 제시하였다. 상부플랜지와 복부판의 변형률은 각각 상·하면 및 양면에 부착한 변형률게이지의 평균값이다. Fig. 8로부터 비보강 시험체는 압축측 복부판의 탄성좌굴로 인해 좌굴 미발생 시에 비해 저항능력이 감소하는 이른바 web load-shedding이 발생하였으나, 보강 복부판에서는 이러한 현상이 발생하지 않았음을 볼 수 있다. 이로부터 수평보강재가 세장복부판의 휨좌굴 강도 저하를 억제하는 역할을 하였음을 알 수 있다.



(a) 3.2T web girders(P=538.4kN)



(b) 4.5T web girders(P=584.0kN)

Fig. 8. Strain distribution of flange and web

4. 현행 기준 및 제안 방법과의 비교

4.1 현행 기준과의 비교

실험에 의한 휨강도(M_u)와 실제 제원 측정치를 적용한 압축플랜지에 대한 항복모멘트(M_{yc})를 Table 2에 제시하였다. 이 때 플랜지와 복부판의 항복강도 차이는 하이브리드계수(R_h)로 고려하였으며, 보강 시험체에서는 수평보강재가 단면계수(S_{xc})에 미치는 영향을 고려하였다. Table 2로부터 비보강 시험체(No.1 및 No.3)들은 항복모멘트($R_h M_{yc}$)에 미치지 못하였으나, 보강 시험체(No.2 및 No.4)들은 각각 항복모멘트에 도달하는 휨강도를 보였다.

먼저, AASHTO LRFD 기준(본문 6.10.8)의 휨강도와와의 비교를 위해 앞의 2.1.3 항에 제시한 조밀(λ_{pf}) 및 비조밀 플랜지 한계세장비(λ_{rf}), 하이브리드계수(R_h), 압축플랜지 강도감소계수(R_b)와 식 (6b)로부터 산정한 압축플랜지에 대한 휨강도 $M_{nc}(=F_{nc}S_{xc})$ 평가 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 2로부터 실험 휨강도(M_u) 대비 AASHTO LRFD 본문 기준 휨강도의 비는 비보강 거더에서는 0.71(No.1)과 0.85(No.3)인 반면, 보강 시험체에서는 0.70(No.2)과 0.66(No.4)으로, 특히 보강 거더의 휨강도를 약 30% 이상 작게 평가하였다.

한편, Eurocode 3에 의한 압축플랜지에 대한 휨강도(M_{nc}) 평가 결과를 Table 2에 제시하였다. 참고로 Eurocode 3에 의한 휨강도 산정을 위해 간단한 프로그램을 작성하였다. 이 때 Table 1에 제시한 플랜지와 복부판의 항복강도를 각각 고려하였으며, 수평보강재를 휨강도 산정 시 포함하였다. Table 2로부터 Eurocode 3 기준은 비보강 시험체에서는 0.80(No.1)과 0.93(No.3)으로, 보강 시험체에서는 0.84(No.2)와 0.87(No.4)로 AASHTO LRFD 기준에 비해 비보강 거더 뿐만 아니라 특히 보강 거더의 휨강도를 적절히 평가함을 알 수 있다.

4.2 제안 방법과의 비교

앞의 4.1절에서 보인 바와 같이 현행 AASHTO LRFD 기준은 수평보강재로 보강된 세장복부판을 갖는 거더의 휨강도를 크게 저평가하는 것이 입증되었다. 이에 선행 논문^[1]에서는 수평보강재가 $0.4D_c$ 위치에 설치된 경우 좌굴계수 $k=129$ 를 적용하여 복부판의 비조밀 한계세장비(λ_{rw}')를 다음과 같이 제안하였다.

$$\lambda_{rw}' = \sqrt{\frac{k\pi^2}{12(1-\nu^2)} \frac{E}{F_{yc}}} \approx 10.8 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (14)$$

한편, 현재 AASHTO LRFD에서 비조밀플랜지의 한계세장비는 식 (10)을 근간으로 하고 있으며, 이 때 압축플랜지의 좌굴계수 k_c 는 Johnson^[7]의 비보강 거더에 대한 실험으로부터 결정된 다음 값을 적용하고 있다.

$$k_c = \frac{4.0}{\sqrt{D/t_w}} \quad (0.35 \leq k_c \leq 0.76) \quad (15)$$

AASHTO LRFD 본문 기준(6.10.8 항)의 식 (7b)는 식 (15)에서 k_c 의 하한치인 0.35를 적용한 것이다. 따라서, 수평보강재로 보강되더라도 식 (5)에 의해 세장복부판으로 분류되면 비조밀플랜지 한계세장비는 식 (7b)가 적용된다.

하지만, 선행 논문에서 제시한 바와 같이 수평보강재가 설치된 복부판은 압축플랜지의 회전을 구속하는 효과가 크게 증가하였고, 이로부터 수평보강 거더의 비조밀플랜지 한계세장비를 다음과 같이 제안하였다.

$$\lambda_{rf}' = 0.95 \sqrt{\frac{k_c' E}{F_{gr}}} \quad (16)$$

Table 2. Flexural resistance by AASHTO LRFD and Eurocode 3

(unit : kN·m)

Specimen No.	M_u from Experiment	$S_{xc}(\text{mm}^3)$	R_h	$R_h M_{yc}$	AASHTO LRFD 6.10.8						M_{nc} by Eurocode 3
					λ_{pf}	λ_{rf}	λ_{rw}	R_b	F_{nc}/F_{yc}	M_{nc}	
No.1	296.1	1.06273×10^6	0.9998	332.6	9.725	17.13	146	0.9160	0.6358	211.5 (0.71)	236.6 (0.80)
No.2	349.4	1.11333×10^6	0.9998	348.4				1.0	0.6991	243.6 (0.70)	292.9 (0.84)
No.3	321.2	1.19468×10^6	0.9828	412.1	9.183	16.18	138	0.9717	0.6508	272.9 (0.85)	297.3 (0.93)
No.4	421.7	1.22366×10^6	0.9821	421.8				1.0	0.6473	278.0 (0.66)	368.6 (0.87)

Note : The values in the parenthesis are the ratio of M_{nc}/M_u

Table 3. Proposed k'_c for λ'_{rf}

D/t_w	294	250	222	≤ 220
k'_c	0.37	0.46	0.71	0.76

여기서, k'_c 은 수평보강재로 보강된 경우의 압축플랜지 좌굴 계수로서 선행 논문에서 제안한 값은 Table 3과 같다. 단, k'_c 에 대해서는 선행 논문에서 언급한 바와 같이 강재의 강도, 플랜지의 세장비 등을 고려한 향후 보완 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Table 3으로부터 No. 2 시험체($D/t_w = 222$)에 대해서는 $k'_c = 0.71$, No. 4 시험체($D/t_w = 158$)에 대해서는 $k'_c = 0.76$ 으로 고려하였다. 이로부터 산정한 비조밀플랜지 한계세장비(λ'_{rf})를 Table 4에 제시하였다. 본 λ'_{rf} 를 AASHTO LRFD 본문 기준의 휨강도인 식(6b)에 적용하여 휨강도를 구한 결과를 Table 4에 제시하였다. 이로부터 산정한 휨강도와 실험강도의 비는 각각 0.847(No.2)과 0.839(No.4)로서 현행 AASHTO LRFD 기준에 의한 것 (Table 2로부터 각각 0.70과 0.66)보다는 훨씬 합리적으로 휨강도를 평가함을 알 수 있다.

한편, 제안 식 (14)로부터 비조밀복부판 한계세장비를 산정하면 No. 2와 No.4 시험체의 λ'_{rw} 은 각각 276.4와 261.0 이 된다. 따라서, 이들 복부판 세장비($2D_c/t_w$)는 218.4와 154.1이므로 제안 기준을 적용하면 비조밀복부판에 해당된다. 한편, 비조밀 및 조밀 복부판을 갖는 단면에 대해서는 AASHTO LRFD 부록 A6의 복부판 소성화계수를 고려하는 기준을 적용할 수 있다. 이를 감안하여 λ'_{rf} 과 λ'_{rw} 을 식 (11b)에 적용하여 복부판 소성화계수(R_{pc})를 산정하고 이들을 식 (9b)에 적용하여 구한 휨강도를 Table 4의 마지막 칸에 제시하였다. 이로부터 산정된 휨강도는 실험강도 대비 각각 0.864(No.2)와 0.860(No.4)으로서 AASHTO LRFD 본문 기준에 적용한 것에 비해 각각 1.7% 및 2.1% 증가하였다.

복부판 소성화계수 적용 시 휨강도의 증가 정도는 크지 않으나 식 (14)를 수평보강재로 보강된 세장복부판의 비조밀 한계세장비로 적용 가능함을 의미한다.

이상으로부터 수평보강재로 보강된 플레이트거더의 휨강도를 현행 AASHTO LRFD 기준으로 평가하고자 하는 경우 비조밀플랜지 한계세장비를 식 (16) 및 Table 3의 k'_c 값을 적용하고, 또한 식 (14)의 비조밀복부판 한계세장비로 판정하였을 때 비조밀복부판에 해당되는 경우에는 AASHTO LRFD 부록 A6 기준을 적용함으로써 수평보강 플레이트거더의 휨강도를 지나치게 안전측으로 평가하는 문제점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 공칭 두께 기준 세장비가 219와 156인 세장 복부판을 갖는 플레이트거더의 수평보강 유무에 따른 휨강도 평가 실험 연구를 수행하였으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 복부판의 세장비가 219인 거더에서는 수평보강재 설치 시 휨강도가 1.18배, 세장비 156인 거더에서는 1.31배 증가하는 결과를 보였다.
- (2) 수평보강재가 설치된 시험체들(No.2 및 No.4)에서는 비보강 시험체(No.1 및 No.3)에 비해 복부판의 면외변형이 현저히 감소하였다. 또한 비보강 시험체에서는 압축복부판에서 web load-shedding 현상이 발생하였으나, 보강 시험체에서는 이러한 현상이 발생되지 않았다. 이로부터 수평보강재가 세장복부판의 휨좌굴을 효율적으로 억제한 것이 확인되었다.
- (3) 선행 논문^[1]의 해석적 연구로부터 제시한 바와 같이

Table 4. Flexural resistance by proposed method

(unit : kN·m)

Specimen No.	M_u from Experiment	Proposed method						
		M_{nc} by AASHTO LRFD 6.10.8 with λ'_{rf}			M_{nc} by AASHTO LRFD Appendix A6 with λ'_{rf} and λ'_{rw}			
		λ'_{rf}	F_{nc}/F_{yc}	M_{nc}	$\lambda_w (= 2D_c/t_w)$	λ'_{rw}	R_{pc}	M_{nc}
No.2	349.4	24.49	0.8489	295.8 (0.847)	218.4	276.4	1.0340	301.7 (0.864)
No.4	421.7	23.92	0.8233	353.6 (0.839)	154.1	261.0	1.0293	362.5 (0.860)

Note : The values in the parenthesis are the ratio of M_{nc}/M_u

Eurocode 3는 비보강 및 수평보강 거더의 휨강도를 대체로 적절하게 평가하였으나, AASHTO LRFD 기준은 수평보강 세장복부판 거더의 휨강도를 약 30% 이상 과소평가하는 문제점이 확인되었다.

- (4) 수평보강재로 보강된 세장복부판을 갖는 플레이트거더의 휨강도를 AASHTO LRFD 기준으로 평가하고자 하는 경우 식 (16)으로 제안한 압축플랜지의 비조밀 한계 세장비(λ_{rf})를 적용하고, 또한 식 (14)에서 제안한 비조밀복부판의 한계세장비(λ_{rw})로 판정하였을 때 비조밀복부판에 해당되는 경우에는 AASHTO LRFD 부록 A6 기준을 적용함으로써 수평보강 플레이트거더의 휨강도를 비교적 합리적으로 평가할 수 있는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 박용명, 이근준, 최병호, 백성용(2014) 수평보강재로 보강된 세장 복부판을 갖는 플레이트 거더의 휨강도 평가 방법의 제안, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제2호, pp.119-132.

- Park, Y.M., Lee, K.J., Choi, B.H., and Back, S.Y. (2014) A Proposal for an Evaluation of Flexural Resistance of Longitudinally Stiffened Plate Girder with Slender Web, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.2, pp.119-132 (in Korean).
- [2] 국토해양부(2009) 하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (2009) *Steel Structure Design Code (Load and Resistant Factored Design)*, Korea (in Korean).
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2012) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (6th Ed.),USA.
- [4] 신동구, 김경식, 안준태(2014) 비조밀 또는 세장 웹을 갖는 HSB800 플레이트거더의 휨저항강도, 한국강구조학회 2014년 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.225-226. Shin, D.K., Kim, K.S., and Ahn, J.T. (2014) Flexural Resistance of HSB800 I-Girders with Noncompact or Slender Web, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.225-226 (in Korean).
- [5] Galambos, T.V. (1988) *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures* (5th Ed.), John Wiley & Sons, USA.
- [6] European Committee for Standardization (2006) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-5: Plated Structural Elements* (EN 1993-1-5: 2006), Belgium.
- [7] Johnson, D.L. (1985) An Investigation into the Interaction of Flanges and Webs in Wide Flange Shapes, *Proceedings of SSRC Annual Technical Session: Stability Aspects of Industrial Buildings*, Structural Stability Research Council, USA, pp.395-405.

요 약 : 본 연구에서는 수평보강재로 보강된 세장복부판을 갖는 플레이트거더의 휨강도 평가를 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 복부판 세장비가 219와 156이며 수평보강재가 없는 경우와 설치한 경우의 총 4개 거더를 제작하였다. 실험으로부터 구해진 휨강도를 현행 AASHTO LRFD 기준과 Eurocode 3 기준과 비교하였다. 이로부터 AASHTO LRFD 기준은 저자들이 발표한 선행 논문에서 제시한 바와 같이 수평보강 거더의 휨강도를 크게 저평가하는 것이 입증되었으며, 선행 논문에서 제안한 휨강도 평가 방법은 보강 거더의 휨강도를 합리적으로 평가할 수 있음이 입증되었다.

핵심용어 : 수평보강재, 세장복부판, 플레이트거더, 휨강도, AASHTO LRFD, Eurocode 3
