

이축대칭단면 HSB800 강재 플레이트거더의 비탄성 횡비틀좌굴강도의 해석적 평가

박용명¹⁾ · 이건준^{2)*} · 최병호³⁾ · 황민오⁴⁾

¹⁾ 교수, 부산대학교 토목공학과 ²⁾ 박사과정, 부산대학교 토목공학과 ³⁾ 부교수, 한밭대학교 건설환경공학과 ⁴⁾ 책임연구원, 포항산업과학연구원

Numerical Analysis of Inelastic Lateral Torsional Buckling Strength of HSB800 Steel Plate Girders with Doubly Symmetric Section

Park, Yong Myung¹⁾ Lee, Kun Joon^{2)*} Choi, Byung Ho³⁾ Hwang, Min O⁴⁾

¹⁾ Professor, School of Civil Engineering, Pusan University, Busan, 609-735, Korea

²⁾ Ph.D., School of Civil Engineering, Pusan University, Busan, 609-735, Korea

³⁾ Associate Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Hanbat University, Deajeon, 305-709, Korea

⁴⁾ Senior Researcher, Research Institute of Industrial Science and Technology, Incheon, 406-840, Korea

ABSTRACT : In this paper, lateral-torsional buckling(LTB) strength of HSB800 steel plate girder under uniform bending moment was estimated by the nonlinear analysis. Doubly symmetric sections with slender, noncompact and compact webs were considered and the LTB strength in the inelastic range was estimated by taking initial imperfection and residual stress into account. For the numerical analysis, single-panel model and three-panel model were considered and analysis of SM490 steel plate girder was performed to judge the validity of the constructed models by comparing the results with AASHTO, AISC, Eurocode and KHBDC(LSD) codes. By using the same models, LTB strength of HSB800 girder was evaluated and it was acknowledged that the current codes can be applied to HSB800 girders with doubly symmetric section in the inelastic LTB range.

KEYWORDS : HSB800 steel, plate girder, inelastic LTB, doubly symmetric section, single panel model, three panel model

1. 서 론

강재 I-단면 플레이트거더의 휨강도는 압축플랜지의 국부 좌굴강도와 횡비틀좌굴(Lateral-Torsional Buckling, 이하 LTB) 강도 중 작은 값에 의해 결정된다. 국부좌굴강도는 압축플랜지의 폭-두께비에 따라 조밀, 비조밀 및 세장한 판으로 구분하고 각각 좌굴 발생 없음, 비탄성좌굴 및 탄성좌굴에 의해 강도가 결정된다. 한편, LTB 강도는 횡방향 비지지길이

(unbraced length)에 따라 좌굴 발생 없음, 비탄성 및 탄성 LTB에 의해 강도가 결정된다.

AASHTO LRFD(2007) 기준의 본문 6.10.8.2에서는 비합성단면의 최대 휨강도를 항복모멘트(M_y) 이하로 제한하는 탄성설계법을 기본으로 하지만, 부록 A6에서는 탄성 판좌굴이 발생하지 않는 조밀 또는 비조밀 복부판을 갖는 거더에 대해서는 복부판 소성화계수(web plastification factor) 개념을 적용하여 휨강도의 증가를 허용하고 있다. 그러나 AASHTO 부록 A6 규정은 플랜지와 복부판의 항복강도가 485MPa 이하인 경우로 제한하고 있다^[1]. 한편, 도로교한계상태설계기준(2010)에서도 항복강도가 460MPa를 초과하는 고강도강 거더에 대해서는 단면의 조밀성 및 비지지길이에 관계없이 최대 휨강도를 항복모멘트 이하로 제한하고 있다^[2]. 이러한 제한은 고강도강 플레이트거더의 휨강도 평가를 위한 실험 및 해석 연구가 아직 충분하지 않기 때문이다.

Note.-Discussion open until October 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 31, 2012; revised February 19, 2013; approved on March 25, 2013.
© KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-51-510-1460 Fax. +82-51-513-9596
E-mail: kunjoon@pusan.ac.kr

HSB800과 같은 고강도강은 응력-변형을 특성이 일반강과 달리 yield plateau가 존재하지 않고 극한강도에서의 변형률(ϵ_u)이 일반강에 비해 작으며 항복비는 크다(이철호 등^[3]). 따라서 이러한 재료 특성이 휨강도에 영향을 미칠 수 있으므로 현재 설계기준의 고강도강에의 적용성 평가를 위해서는 고강도강이 적용된 거더의 휨강도에 대한 연구가 필요하다.

강재보 및 플레이트거더의 비탄성 LTB 강도 평가를 위한 본격적인 이론 및 실험 연구는 1960년대 이후 많은 연구자들(Lay 등^[4], Trahair and Kitipornchai^[5], Nethercot and Trahair^[6])에 의해 시작되었으며, 고강도강 거더의 LTB 강도 평가에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. Earls^[7]는 균일휨모멘트를 받는 HPS483W(항복강도 539 MPa)와 HSLA552(항복강도 586MPa) 강재보의 플랜지 조밀도와 비지지길이에 따른 회전 성능(rotation capacity)을 해석으로부터 평가하였으며, 고강도 강재보의 연성비에 대해서는 단면의 조밀성 및 비지지길이에 대해 새로운 기준이 필요하다고 제안하였다. Earls와 Shah^[8]는 단면의 조밀성에 따른 국부좌굴과 비지지길이에 따른 LTB 강도를 편의상 별도로 고려하는 현재 설계개념이 고강도강에서도 타당한지를 평가하기 위해 HPS483W 거더의 내부지점부 부모멘트 구간에 대해 해석적 연구를 수행하였다. 이들은 단면의 조밀성 및 비지지 간격에 대한 AASHTO 기준이 HPS483W 강거더의 내부지점부 부모멘트 구간에서는 비안전측일 수 있다고 제안하였다.

한편, 국내에서는 김종민 등^[9]이 HSB800 거더의 비탄성 구간 LTB 강도를 해석적으로 평가하였는데, 잔류응력을 고려한 경우 AISC LRFD의 휨강도 기준에 조금 못미치는 결과를 얻었다. 조은영과 신동구^[10]는 세장한 복부판을 갖는 HSB600, HSB800 균질단면 강거더와 하이브리드 거더에 대해 잔류응력과 초기처짐을 고려하여 LTB 강도를 해석적으로 평가하였으며, 고강도강 거더에서도 AASHTO LRFD 기준의 휨강도가 얻어졌다고 제시하였다. 한편, 이철호 등^[11]은 HSB800 조립 H-형 보에서 플랜지 세장비가 휨강도 및 회전성능에 미치는 영향을 실험으로 평가하였으며, 일반강 대비 휨강도는 만족스러우나 회전능력은 부족하였다고 제시하였다.

본 연구의 목적은 일반강에 비해 강도 및 재료 특성이 다른 고강도강에 대해서 현재의 기준을 확장하여 적용할 수 있는지를 평가하는 것이다. 이를 위해 세장, 비조밀 및 조밀단면의 HSB800 강재 플레이트거더에 대해 비지지길이에 따른 휨강도 평가를 위한 해석적 연구를 수행하였다. 균일모멘트 상태의 이축대칭 단면을 대상으로 하였으며, 횡방향 비지지길이는 비탄성 구간을 대상으로 하였다. 또한, 단일패널모델과

3-패널모델에 대해 각각 비탄성 LTB 강도를 해석적으로 평가하고 각국 기준과 비교 분석하였다.

2. 횡비틀좌굴강도 설계기준

2.1 AASHTO LRFD 기준^[1]

2.1.1 AASHTO LRFD 본문 기준

비합성단면의 휨강도는 본문 6.10.8항에 제시된 압축플랜지의 국부좌굴강도와 LTB 강도 중 작은 값으로 최종 결정한다. 비지지길이(L_b)에 따른 압축플랜지의 LTB 강도 F_{nc} 는 다음과 같다.

$$L_b \leq L_p \text{ 인 경우 : } F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \tag{1a}$$

$$L_p < L_b \leq L_r \text{ 인 경우 : } F_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] R_b R_h F_{yc} \leq R_b R_h F_{yc} \tag{1b}$$

- 여기서, R_b : 복부판의 휨강도감소계수
 R_h : 하이브리드계수
 C_b : 모멘트경사계수
 F_{yc} : 압축플랜지의 항복강도
 F_{yr} : 잔류응력 영향을 포함한 항복강도
 L_p : 조밀한계점 ($1.0 r_t \sqrt{E/F_{yc}}$)
 L_r : 비조밀한계점 ($\pi r_t \sqrt{E/F_{yr}}$)
 E : 강재의 탄성계수
 r_t : 압축플랜지와 압축복부판 높이의 1/3단면의 복부판 축에 대한 단면회전반경

2.1.2 AASHTO LRFD 부록 A6 기준

다음 조건들을 만족하는 조밀 또는 비조밀 복부판을 갖는 단면은 부록 A6 규정을 적용할 수 있다.

$$F_y \leq 485 \text{ MPa}$$

$$\frac{2D_c}{t_w} (= \lambda_w) < 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} (= \lambda_{rw}) \tag{2}$$

$$\frac{I_{yc}}{I_{yt}} \geq 0.3$$

- 여기서, F_y : 강재의 항복강도
 D_c : 탄성범위에서 압축축 복부판의 높이

- λ_w : 복부판의 세장비
- λ_{rw} : 복부판의 비조밀 한계세장비
- I_{yc} : 압축플랜지의 복부판 축에 대한 단면2차모멘트
- I_{yt} : 인장플랜지의 복부판 축에 대한 단면2차모멘트

비지지길이에 따른 플레이트거더의 LTB 휨강도 M_{nc} 는 다음과 같다.

$$L_b \leq L_p \text{ 인 경우 : } M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (3a)$$

$L_p < L_b \leq L_r$ 인 경우 :

$$M_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}} \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] R_{pc} M_{yc} \leq R_{pc} M_{yc} \quad (3b)$$

여기서, M_{yc} : 압축플랜지가 항복강도에 도달할 때의 휨모멘트

S_{xc} : 압축플랜지의 단면계수

L_p : 본문규정과 동일

$$L_r : 1.95 r_t \frac{E}{F_{yr}} \sqrt{\frac{J}{S_{xc} h}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left(\frac{F_{yr} S_{xc} h}{E J} \right)^2}} \quad (4)$$

J : 비틀상수

h : 플랜지 중심간 거리

R_{pc} : 복부판 소성화계수

여기서, 복부판 소성화계수 R_{pc} 는 다음과 같다.

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq \lambda_{pw(D_{cp})} \text{ (조밀복부판) : } R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (5a)$$

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

$$R_{pc} = \left[1 - \left(1 - \frac{R_h M_{yc}}{M_p} \right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw(D_c)}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw(D_c)}} \right) \right] \frac{M_p}{M_{yc}} \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (5b)$$

여기서, D_{cp} : 소성단면에서 압축축 복부판의 높이

M_p : 소성모멘트

$\lambda_{pw(D_{cp})}$: 조밀복부판 한계세장비

$$(\lambda_{pw(D_{cp})}(D_c/D_{cp}) \leq \lambda_{rw})$$

2.2 AISC LRFD 기준^[12]

조밀 및 비조밀 복부판을 갖는 플레이트거더의 휨강도는 AISC LRFD(2010) Sec. F4에, 세장 복부판을 갖는 거더

의 휨강도는 Sec. F5에 각각 제시되어 있다. 비탄성구간 ($L_p < L_b \leq L_r$) 의 LTB 강도는 다음과 같다.

조밀 및 비조밀복부판 :

$$M_n = C_b \left[R_{pc} M_{yc} - (R_{pc} M_{yc} - F_L S_{xc}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq R_{pc} M_{yc} \quad (6a)$$

세장 복부판 :

$$M_n = R_{pg} F_{cr} S_{xc}, F_{cr} = C_b \left[F_y - (0.3 F_y) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq F_y \quad (6b)$$

여기서, F_L : 잔류응력의 영향을 고려한 항복강도. 단면의 형상에 따라 $0.5 \sim 0.7 F_y$

$$L_p : 1.1 r_t \sqrt{E/F_{yc}}$$

L_r : 조밀 또는 비조밀 복부판의 경우 AASHTO LRFD 부록 A6 규정과 같고, 세장복부판의 경우 AASHTO LRFD 본문 규정과 같다.

R_{pc} : 복부판 소성화계수(AISC LRFD Sec. F4)

R_{pg} : AASHTO LRFD의 휨강도감소계수 R_b 와 같다.

2.3 Eurocode 3^[13]

균일휨모멘트를 받는 플레이트거더의 LTB 강도($M_{b,Rd}$) 는 다음과 같다.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_y F_y}{\gamma_{M1}} \quad (7)$$

여기서, W_y : 단면의 세장비 등급(class)에 따른 단면계수

γ_{M1} : 좌굴안정성에 대한 부분안전계수

χ_{LT} : LTB 강도감소계수

EN 1993-1-1(2003) 6.3.2에서는 LTB 강도에 대해 일반 경우(6.3.2.2항)와 압연형강 또는 등가용접단면에 대한 경우(6.3.2.3항)을 제시하고 있는데 6.3.2.3항에서 χ_{LT} 는 다음과 같다.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \begin{cases} \leq 1.0 \\ \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y F_y / M_{cr}}$
 $\Phi_{LT} = 0.5 [1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$
 β : 거더의 높이와 폭의 비(h/b)로 최소값은 0.75
 $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$ (최대값)
 α_{LT} : 초기치짐계수로서 Eurocode3-curve c를 사용하는 경우=0.49, Eurocode3-curve d를 사용하는 경우=0.76
 M_{cr} : 단일패널의 탄성 LTB 강도(Timoshenko and Gere^[14])로서 다음과 같다.

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y (GJ + \frac{\pi^2 EI_w}{L_b^2})} \quad (9)$$

여기서, I_y : 복부판 축에 대한 단면2차모멘트
 G : 전단탄성계수
 I_w : 뒤틀림상수

2.4 도로교한계상태설계기준^[2]

도로교한계상태설계기준(2012)에서는 복부판의 조밀도에 따라 비합성단면의 LTB강도를 다음과 같이 제시하고 있다.

$$\frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_b \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \text{ 인 경우 :}$$

$$M_n = 3.14 E C_b R_h \left(\frac{I_{yc}}{L_b}\right) \sqrt{0.772 \left(\frac{J}{I_{yc}}\right) + 9.87 \left(\frac{d}{L_b}\right)^2} \leq R_h M_y \quad (10a)$$

그 외의 경우 : $L_b \leq L_r = 4.44 r_t \sqrt{\frac{I_{yc} d}{S_{xc} F_{yc}}}$ 일 때,

$$M_n = C_b R_h R_h M_y \left[1 - 0.5 \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)\right] \leq R_h R_h M_y \quad (10b)$$

여기서, $\lambda_b = 5.76 (D_c \leq D/2 \text{ 인 단면})$
 $= 4.64 (D_c > D/2 \text{ 인 단면})$
 D : 복부판 높이
 d : 강재단면의 높이
 $L_p = 1.76 r_t \sqrt{E/F_{yc}}$ 로서 AASHTO LRFD 기준보다 다소 크게 설정되어 있음

3. 해석 모델 및 해석 방법

3.1 단일패널 및 3-패널모델

앞의 식 (9)의 탄성 LTB 강도는 다음 Fig. 1(a)와 같은 단일패널에 대한 이론적 강도이다(Timoshenko and Gere^[14]). 그러나 대부분의 거더는 일정한 간격으로 수직브레이싱이나 크로스빔으로 지지되어 있어 LTB 발생 구간의 압축플랜지 변형을 인접 패널이 구속하는 효과, 즉 warping 변형을 구속하는 효과가 있다. 따라서 단일패널 모델의 LTB 강도는 실제 상황에 비해 안전측의 값이 된다. 본 연구에서는 모델의 차이에 따른 LTB 강도를 비교하기 위해 Fig. 1(a)의 단일패널모델과 Fig. 1(b)의 3-패널모델을 각각 고려하였다.

단일패널모델에서는 Fig. 1(a)와 같이 상부플랜지 양단에는 압축하중을, 하부플랜지 양단에는 인장하중을 재하하여 균일휨모멘트 상태로 고려하였으며, 3-패널모델에서는 Fig. 1(b)와 같이 단순보의 1/3 및 2/3 지점에 연직하중을 재하

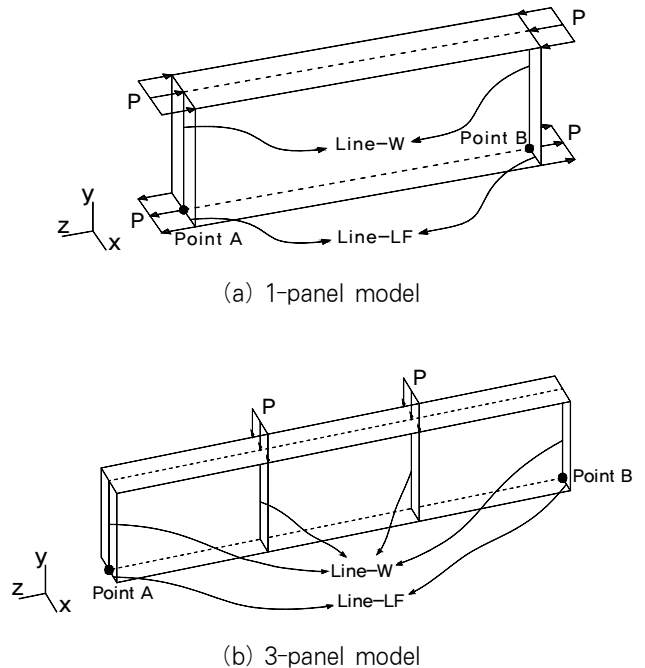


Fig. 1 Configuration of numerical model

Table 1. Boundary conditions

Location	Dx	Dy	Dz
Point A	Fix	Fix	Fix
Point B	Fix	Fix	-
Line-W	Fix	-	-
Line-LF	-	Fix	-

하여 중앙패널 구간이 순수휨 상태가 되도록 고려하였다. 즉, 3-패널모델은 휨실험에서 적용하는 4점재하 휨실험모델에 해당된다. 각 모델에서 지점부 및 하중재하점에서는 국부변형을 방지하기 위해 복부판 두께의 수직보강재를 부착하였다. 모델들의 지지조건은 Table 1과 같고 D_x , D_y , D_z 는 각각 x, y, z축 이동변위이다.

3.2 초기처짐 및 잔류응력

초기처짐의 크기는 LTB 강도에 영향을 미치는데, 본 연구에서는 Yura 등^[15]이 제시한 Fig. 2의 초기처짐 형상을 고려하였다. 즉, 패널 중앙점을 기준으로 복부판의 상단은 $L_b/1,000$ 의 횡방향 초기처짐을, 압축플랜지의 양단은 $\pm 0.001L_b/D(b_f/2)$ 의 연직방향 초기처짐을 고려하였다.

한편, 용접제작에 따른 잔류응력도 LTB 강도에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 Kang 등^[16]이 제시한 HSB800 용접 거더의 잔류응력 측정 결과에 근거한 Fig. 3의 잔류응력 분포를 고려하였다. Fig. 3의 잔류응력 분포는 ECCS^[17]의 잔류응력 분포 형상과 같고, 잔류응력의 크기는 ECCS 잔류응력의 60%에 해당한다.

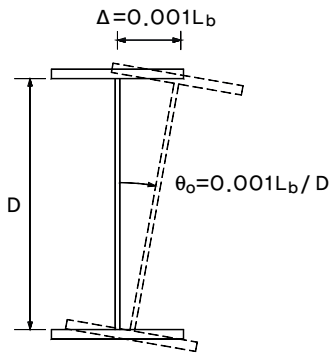


Fig. 2 Initial imperfection model

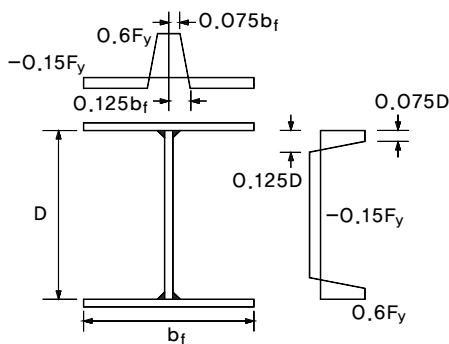


Fig. 3 Residual stress model(ECCS)

3.3 재료모델 및 비선형해석

SM490 및 HSB800 강재의 재료모델은 Fig. 4에 보인 바와 같이 Multi-linear 모델로 고려하였다. 재료모델의 상세한 정보는 Table 2에 보인 바와 같다. 강재의 탄성계수는 $E=205$ GPa을, 항복기준은 Von Mises 기준을 적용하였으며 변형률경화구간에서는 isotropic strain hardening 모델을 사용하였다.

비선형해석은 ABAQUS/Standard^[18]를 사용하였으며, 모든 부재는 S4R 쉘요소를 사용하여 모델링하였다. Fig. 3의 잔류응력분포를 적절히 고려하기 위해 주거더의 플랜지는 편측당 6개의 요소를 사용하였고, 복부판은 높이 방향으로

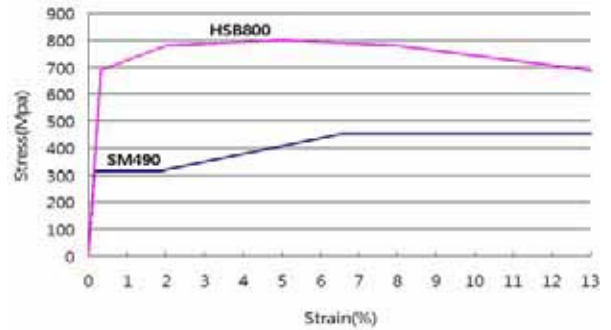


Fig. 4 Idealized stress-strain curves

Table 2. Material properties used in the analysis

SM490		HSB800		비고
Stress(MPa)	Strain	Stress(MPa)	Strain	
315	0.00154	690	0.00337	F_y
332.5	0.0190	780	0.020	
490	0.06046	800	0.050	F_u
-	-	780	0.080	
-	-	650	0.150	

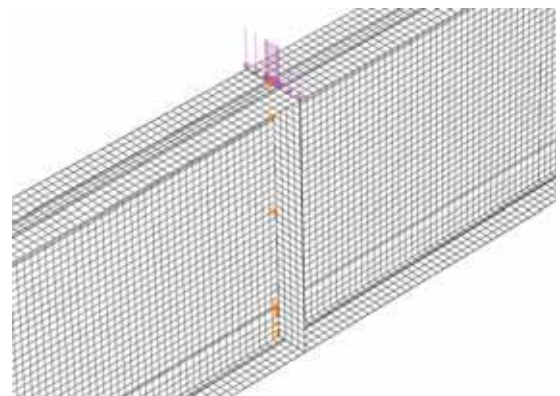
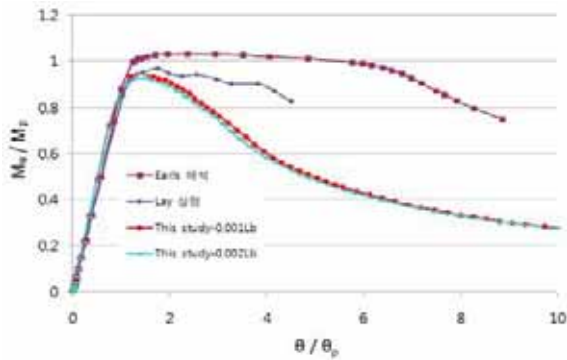


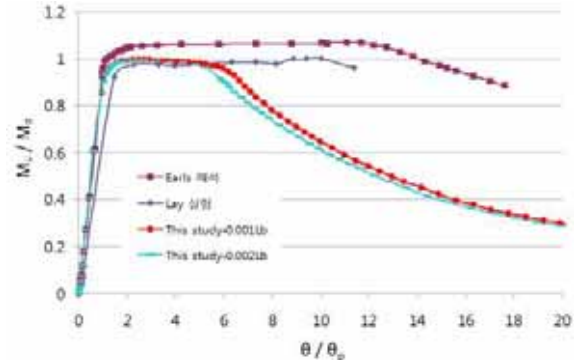
Fig. 5 Partial view of 3-panel finite element model

Table 3. Comparison of numerical and the experimental results by lay et al.⁽⁴⁾

Specimen	Section	L_b (mm)	L_b/r_y	M_p (kN-m)	M_{Test}	FEA_{Earls}	$FEA_{Present}$
HT-36	H-254×146×6.4×10.9	2404	45.0	186	180	192	173.2
HT-41		1335	25.0		187	199	185.2



(a) HT-36



(b) HT-41

Fig. 6 Comparison of test and numerical analysis results

35개의 요소로 분할하였다. Fig. 5는 유한요소망의 형상(3-패널모델의 1/3지점 부분)이다.

3.4 적용 모델의 검증해석

본해석에 앞서 본 연구에서 설정한 모델링 방법의 타당성을 검증하기 위해 기존 실험 연구 예에 대하여 해석을 수행하기로 한다. 대상 거더는 Lay 등⁽⁴⁾의 실험 중 2개의 거더를 대상으로 하였으며 제원은 Table 3에 보인 바와 같다. 재료모델은 Earls⁽⁷⁾의 논문에 제시된 모델을 고려하였는데 $F_y = 354.4\text{MPa}$, $F_u/F_y = 1.49$, $\epsilon_u/\epsilon_y = 72.4$, $\epsilon_{st}/\epsilon_y = 9.66$ 이다. 2개의 거더에 대해 Fig. 2의 초기처짐을 각각 $L_b/1,000$ 및 $L_b/500$ 으로 고려하고 Fig. 3의 잔류응력을 고려하여 3-패널모델의 해석으로부터 구한 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

Fig. 6에서 Earls⁽⁷⁾의 해석결과는 3-패널모델에 의한 결과로서 중앙패널에 비해 인접패널의 강성을 매우 크게 고려하였으며, 잔류응력을 고려하지 않고 초기처짐은 압축플랜지의 처짐만을 고려하였다. 본 해석의 두가지 초기처짐에 따른 극한휨강도의 차이는 그다지 크지 않았으며, Table 3에서 본 연구의 3-패널모델 결과는 초기처짐을 $L_b/1,000$ 로 고려하고 잔류응력을 고려한 결과이며, Lay 등⁽⁴⁾의 실험값과 비교적 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다.

4. LTB강도 평가 해석

4.1 해석 대상 거더의 제원

HSB800 강거더의 휨강도 평가 해석에 앞서 SM490 일

Table 4. Dimension of girders considered in this study

Steel	Sec. ID	Compression and Tension Flange	Web	Eurocode3 Class			r_y (mm)	L_p (mm)	L_r (mm)
				Web	Flg.	Sec.			
SM490	NFSW	250×11	1000×6.7	4	3	4	48.5	1,553	5,830
	NFNW	250×11	1000×9	4	3	4	44.5	1,481	5,674
	CFNW	250×18	1000×9	4	1	4	51.1	1,594	6,203
	CFCW	250×18	1000×12	3	1	2	47.3	1,532	5,998
HSB800	NFSW	250×18	1000×9	4	3	4	51.1	1,077	4,045
	NFNW	250×18	1000×12	4	3	4	47.3	1,035	3,963
	CFNW	250×25	1000×12	4	1	4	51.6	1,083	4,190
	CFCW	250×25	1000×18	3	1	2	46.4	1,023	3,992

반강 거더에 대해서 그림 1의 단일패널모델과 3-패널모델로 휨강도 평가를 수행하고 이를 각 기준과 비교하기로 한다. 본 연구에서 고려한 강종별 단면은 표 4와 같다. 본 표에서 단면의 세장비를 AASHTO LRFD 기준에 따라 구분하고 비조밀 및 조밀 플랜지를 'NF', 'CF'로, 세장, 비조밀, 조밀 복부판을 'SW', 'NW', 'CW'로 표기하였으며, 또한 Eurocode 3에 의한 복부판, 플랜지 및 단면의 등급을 제시하였다.

한편, Table 4에 제시한 L_p 및 L_r 은 AASHTO 부록 A6의 조밀 및 세장 비지지길이 한계이며, 세장복부판을 갖는

단면의 경우 L_r 은 AASHTO 본문 규정의 비지지길이이다. 해석에서 고려한 비지지길이는 각 단면에 대해 L_p , L_r 을 기준으로 $L_m = (L_p + L_r)/2$, $L_{pm} = (L_p + L_m)/2$, $L_{mr} = (L_m + L_r)/2$ 의 총 5개이다.

4.2 SM490 거더 해석 결과

SM490 강재 거더에 대해 잔류응력을 고려한 단일패널모델 및 3-패널모델의 극한휨모멘트에서의 변형 및 von Mises

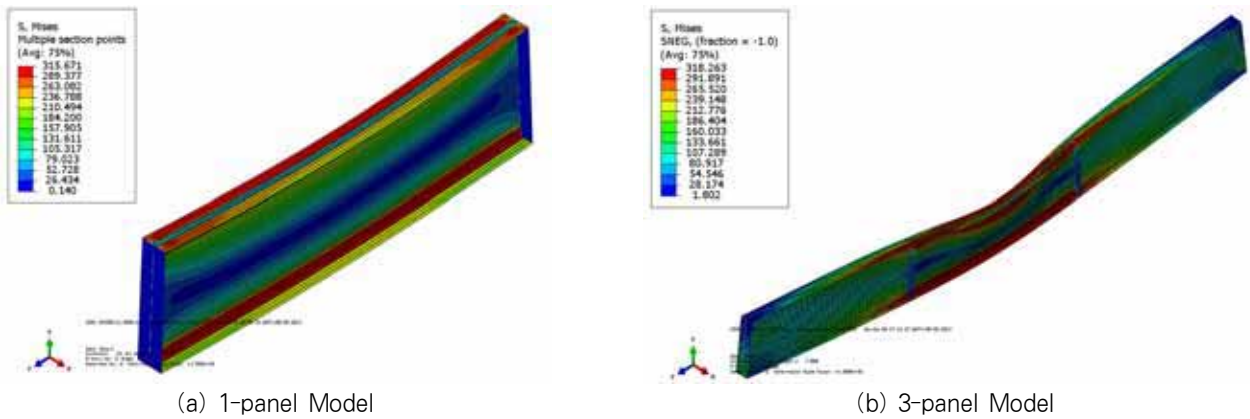


Fig. 7 Von mises stress contour at ultimate moment : SM490, CFNW-section, $L_b = L_m = 3,898\text{mm}$

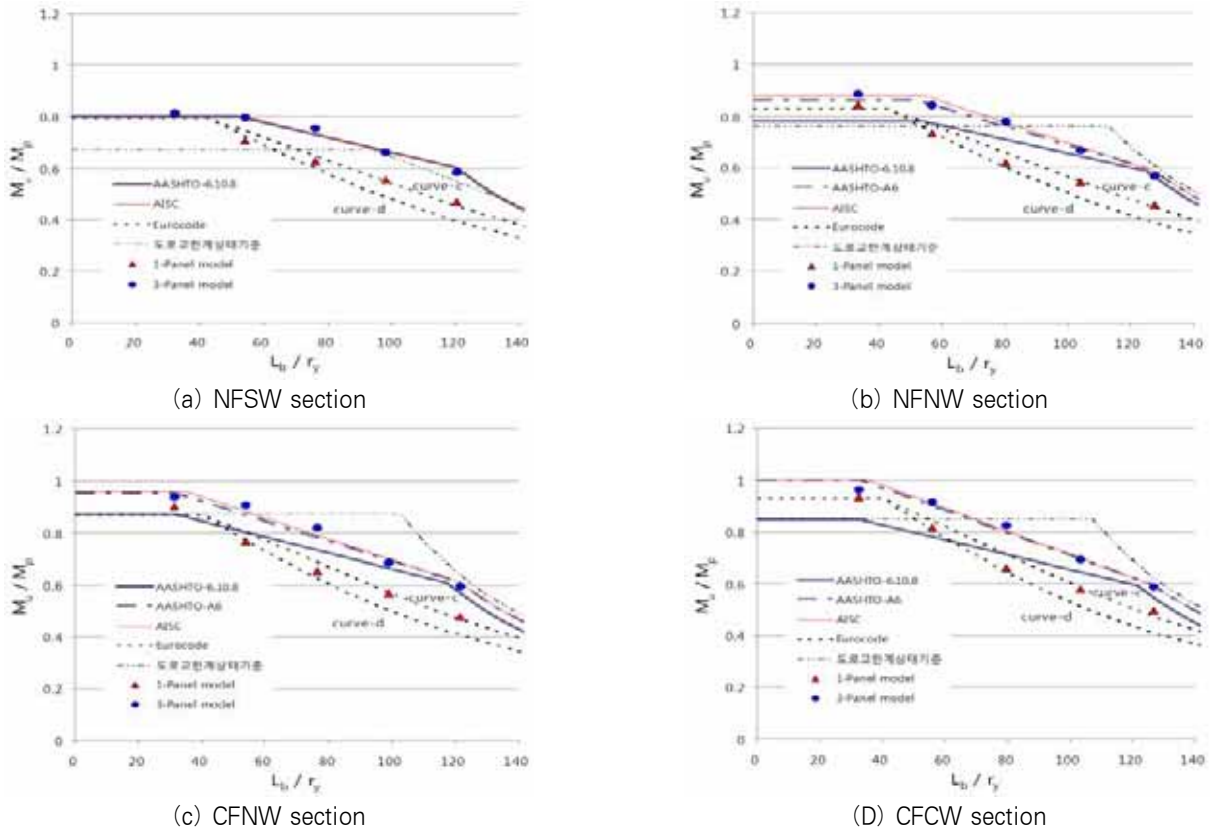


Fig. 8 Evaluated flexural resistance of SM490 girders

응력선도의 예를 Fig. 7에 제시하였으며, 각 단면별 비지지 길이 세장비(L_b/r_y)에 따른 휨강도는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 각 LTB 강도곡선은 플랜지좌굴강도가 지배적인 경우 해당 기준의 플랜지 좌굴강도를 고려한 것이다. Fig. 8으로부터 모든 단면에서 단일패널모델에 의한 휨강도는 비지지길이 가 짧은 경우에는 Eurocode 3의 buckling curve d ($\alpha_{LT}=0.76$)를 적용한 경우에 가깝고, 비지지길이 가 증가함에 따라 buckling curve c($\alpha_{LT}=0.49$)를 적용한 경우에 가까운 강도를 보였다.

한편, 3-패널모델의 결과는 세장복부판을 갖는 단면은 AASHTO LRFD 본문 규정의 강도에, 조밀 및 비조밀복부판을 갖는 단면들은 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC LRFD 규정의 휨강도에 대체로 부합한 결과를 보였다. 이는 예상한 바와 같이 단일패널모델의 결과가 3-패널모델에 비해 작은 LTB 강도를 제공하는 것을 알 수 있으며, Eurocode 3 기준은 식 (9)의 단일패널의 LTB 강도를, AASHTO 및 AISC 기준은 Fig. 1(b)와 같은 4점재하 휨실험 결과에 주로 근거하였기 때문에 판단된다.

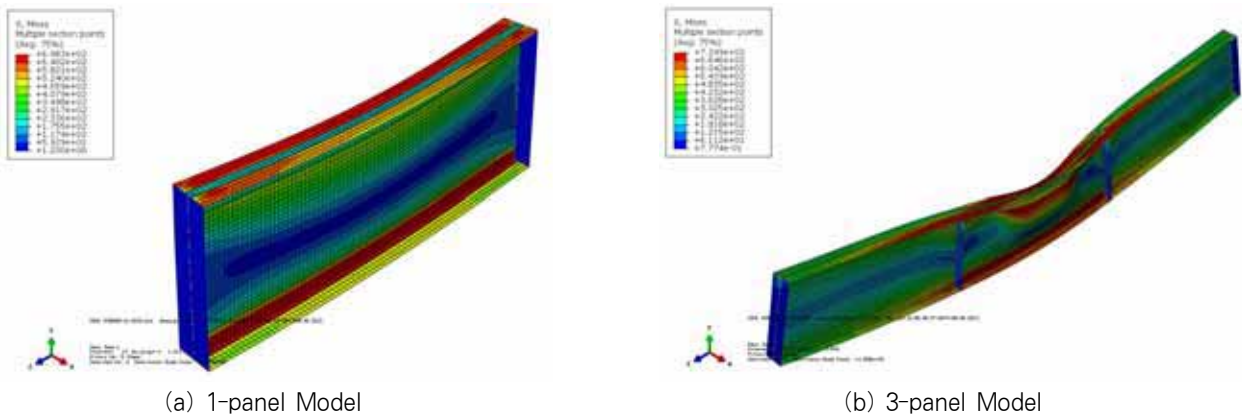


Fig. 9 Von mises stress contour at ultimate moment : HSB800, CFNW-section, $L_b = L_m = 2,636\text{mm}$

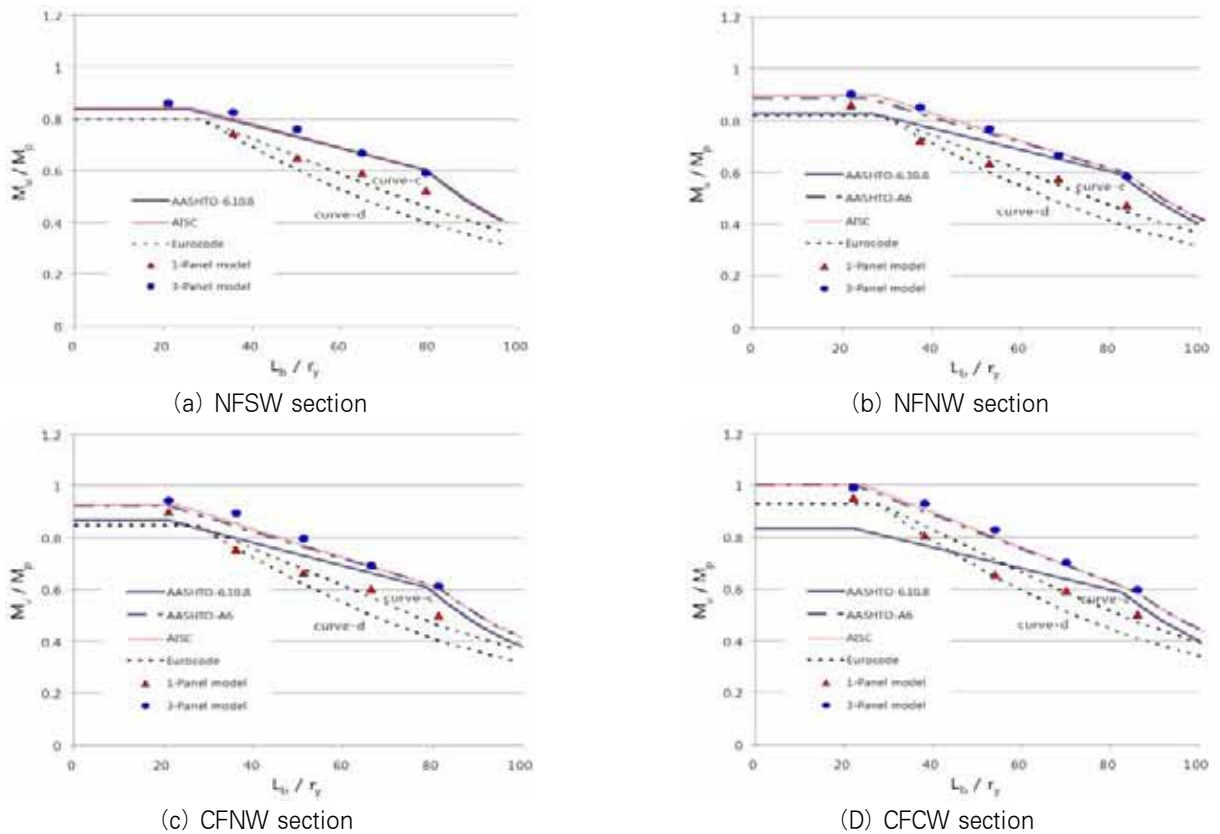


Fig. 10 Evaluated flexural resistance of HSB800 girders

한편, Fig. 8(b)~(d)로부터 $L_m \sim L_r$ 구간에서 LTB 강도는 도로교한계상태기준의 비조밀 및 조밀복부판에 대한 식 (10a)의 LTB 강도에 비해 작게 평가되었다. 비조밀 및 조밀복부판에 대한 LTB 강도 기준으로 제시된 식 (10a)는 2002년 AASHTO LRFD 기준이었으나 이후 식 (1b)으로 개정되었으며, 따라서 식 (10a)은 재고되어야 할 것으로 보인다.

SM490 강거더에 대한 해석 결과를 요약하면 단일패널모델은 Eurocode 3에 부합하는 휨강도를, 3-패널모델은 세장복부판을 갖는 단면은 AASHTO LRFD의 본문 규정에, 비조밀 및 조밀복부판을 갖는 단면은 AASHTO 부록 A6에 부합하는 휨강도를 보였다.

4.3 HSB800 거더 해석 결과

이축대칭단면 HSB800 강재 거더에 대해 잔류응력을 고려한 비탄성 LTB 구간의 휨강도 해석 역시 단일패널모델 및 3-패널모델을 각각 고려하였으며, 극한휨모멘트에서의 변형 및 von Mises 응력선도의 예를 Fig. 9에 제시하였다. LTB 강도의 비교는 Fig. 10에 제시하였으며, SM490 강재와 동일하게 각 LTB 강도곡선은 플랜지좌굴강도가 지배적인 경우 해당 기준의 플랜지 좌굴강도를 고려한 것이다. 한편, 전술한 바와 같이 도로교한계상태기준은 비조밀 및 조밀복부판에 대해서는 문제점이 있는 것으로 나타나 비교에서 제외하였다.

먼저 Fig. 10(a)~(d)로부터 단일패널모델에 의한 휨강도는 SM490 거더의 결과와 유사하게 비지지길이가 짧은 경우에 Eurocode 3의 curve d를 적용한 경우에 가깝고, 비지지길이가 증가함에 따라 curve c를 적용한 경우에 가까운 강도를 보였다. 한편, Fig. 10(a)의 세장복부판을 갖는 NFSW 단면은 AASHTO LRFD 본문 강도(식 (1b)) 및 AISC의 강도(식 (6b))를 만족하는 것으로 평가되었다. 그리고, Fig. 10(b)와 (c)로부터 비조밀복부판을 갖는 NFNW 및 CFNW 단면 모두 AASHTO LRFD의 부록 A6 및 AISC 규정의 휨강도가 얻어졌다. 또한, Fig. 10(d)로부터 조밀복부판을 갖는 CFCW 단면 역시 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC 규정의 휨강도가 얻어졌다.

HSB800 강거더에 대한 LTB 강도 해석 결과를 요약하면 SM490 강거더와 마찬가지로 단일패널모델은 Eurocode 3에 부합하는 휨강도를, 3-패널모델은 세장복부판을 갖는 단면의 경우 AASHTO LRFD의 본문 규정에, 비조밀 및 조밀복부판을 갖는 단면은 AASHTO 부록 A6 규정에 부합하는 휨강도를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 일반강에 비해 재료 특성이 다른 고강도강에 대해서 현재의 휨강도 기준을 적용할 수 있는지, 그리고 조밀 및 비조밀 복부판을 갖는 단면에 대해 복부판 소성화계수 개념에 의한 휨강도의 증가를 허용할 수 있는지 여부를 평가하기 위해 HSB800 고강도강 적용 플레이트 거더의 횡비틀좌굴강도를 비선형해석을 통해 평가하였다. 이축대칭단면을 대상으로 하였으며, 단일패널모델과 3-패널모델을 사용하여 단면의 조밀도에 따른 해석적 평가를 수행하고 각국 기준과 비교하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) SM490 강재에 대한 해석으로부터 세장비에 따른 4가지 단면 모두 단일패널모델은 Eurocode 3의 LTB 강도를, 3-패널모델은 AASHTO 본문(세장복부 단면) 및 AASHTO 부록 A6(비조밀 및 조밀복부 단면)의 휨강도를 만족하여 본 연구에서 사용한 해석모델이 타당함을 알 수 있었다.
- (2) SM490 강재에 대한 해석으로부터 국내 기준⁽²⁾은 비조밀 및 조밀복부판을 갖는 단면의 LTB 강도를 일부 비지지구간에서 비안전측으로 평가하는 것으로 나타났으며 (Fig. 8(b)~(d)), 이에 대해서는 개정이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) HSB800 강재에 대한 해석 결과 SM490 강재와 유사하게 세장비에 따른 4가지 단면 모두 단일패널모델은 Eurocode 3의 LTB 강도를, 3-패널모델은 AASHTO 본문(세장복부 단면) 및 AASHTO 부록 A6(비조밀 및 조밀복부 단면)의 휨강도를 만족하였다.
- (4) 이상으로부터 비탄성 영역에 대해 세장복부판을 갖는 이축대칭단면은 AASHTO 본문 규정을, 조밀 및 비조밀복부판을 갖는 단면은 AASHTO 부록 A6 규정을 HSB800 강재 플레이트 거더의 LTB 강도 규정으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 R&D정책인프라사업(과제번호11 기술표준화01-01)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Ed.*, Washington D.C.
- [2] 한국도로교통협회(2012) 도로교설계기준(한계상태설계법), 국토해양부 제정.
Korea road and transportation Association (2012) *Korea Highway Bridge Design code(Limit State Design)*, sponsored by Ministry of land, Transport and Maritime Affairs.
- [3] 이철호, 한규홍, 박창희, 김진호, 이승은, 하태휴(2011) 국부좌굴을 고려한 고강도 조립 H형강 부재의 휨성능 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제4호, pp.417-428.
Lee, C.H., Han, K.H., Park, C.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Ha, T.H. (2011) *Flexural Test of H-Shape Members Fabricated of High-Strength Steel with Considering Local Buckling*, KSSC, Vol. 23, No. 4, pp.417-428 (in Korean).
- [4] Lay, M.G., Adams, P.E., and Galambos, T.V. (1965) *Experiments on High Strength steel members*, *Welding Research Council Bulletin*, No. 110, Publication No. 287.
- [5] Trahair, N.S. and Kitipornchai, S. (1972) *Buckling of Inelastic I-beams under Uniform Moment*, *Journal of the Structural Div.*, ASCE, Vol. 98, No. ST11, pp.2551-2566.
- [6] Nethercot, D.A. and Trahair, N.S. (1976) *Inelastic Lateral Buckling of Determinate Beams*, *Journal of the Structural Div.*, ASCE, Vol. 102, No. ST4, pp.701-717.
- [7] Earls, C.J. (2001) *Constant Moment Behavior of High Performance Steel I-shaped Beams*, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 57, No. 7, pp.711-728.
- [8] Earls, C.J. and Shah, B.J. (2002) *High Performance Steel Bridge Girder Compactness*, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, No. 5-8, pp.859-880.
- [9] 김종민, 황민오, 강영종(2010) 고강도강 플레이트거더의 횡-비틀림 좌굴, 2010년도 학술대회 발표집, 한국강구조학회, pp.79-80.
Kim, J.M., Hwang, M.O., and Kang, Y.J. (2010) *Lateral-Torsional Buckling of Plate Girders with High Strength Steel*, *Proceedings of Annual Conference Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp. 79-80 (in Korean).
- [10] 조영은, 신동구(2011) HSB 강거더의 비탄성 횡비틀림 좌굴에 의한 휨강도-세장 복부판 단면, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제2호, pp.217-231.
Cho, E.Y. and Kang, D.K. (2011) *Flexural Strength of HSB Steel Girders Due to Inelastic Lateral-Torsional Buckling - Sections with Slender Web*, *Journal of Korean Society of steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 2, pp.217-231 (in Korean).
- [11] 이철호, 한규홍, 김대경, 박창희, 김진호, 이승은, 하태휴(2012) 800MPa급 고강도강 보 부재의 국부좌굴 및 비탄성 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.479-490.
Lee, C.H., Han, K.H., Kim, D.K., Park, C.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Ha, T.H. (2012) *Local Buckling and Inelastic Behaviour of 800 MPa High-Strength Steel Beams*, *Journal of Korean Society of steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 4, pp.479-490 (in Korean).
- [12] American Institute of Steel Construction (2010) *Specifications for Structural Steel Buildings*, Chicago, IL.
- [13] Eurocode 3 (2005) *Design of steel structures Part 1-1: General rules and rules for buildings*, EN 1993-1-1.
- [14] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. (1961) *Theory of Elastic Stability, 2nd Ed.*, McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, NY.
- [15] Yura, T.A. (2001) *Fundamentals of Beam Bracing*, *Engineering Journal*, First Quarter, pp.11-26.
- [16] Kang, S.C., Kim, K.S., and Lee, J.K. (2011) *Experimental investigation of residual stresses in HSB800 structures by the sectioning method*, IABSE-IASS, London.
- [17] ECCS (1991) *Essentials of Eurocode 3 Design Manual for Steel Structures in Building*, ECCS Advisory Committee, No. 65.
- [18] ABAQUS (2004) *Analysis user's manual version 6.5*, ABAQUS, Inc., Pawtucket, RI.

요 약: 본 연구에서는 균일휨모멘트를 받는 HSB800 강재 플레이트거더의 횡비틀림좌굴(LTB) 강도를 비선형해석으로 평가하였다. 세장, 비조밀 및 조밀 복부판을 갖는 이축대칭단면들을 대상으로 하였으며, 초기처짐과 잔류응력의 영향을 고려하여 비탄성좌굴 영역의 LTB 강도를 평가하였다. 본 연구에서는 단일패널모델과 3-패널모델을 각각 고려하였으며, 이들 모델의 타당성을 평가하기 위해 SM490 강재 거더에 대해 해석을 수행하고 AASHTO, AISC, Eurocode 및 국내 도로교한계상태기준과 비교하였다. 이후 동일한 방법으로 HSB800 강재거더에 대해 LTB 강도 평가 해석을 수행하였으며, 비탄성 영역의 LTB 강도에 대한 현재 기준이 이축대칭 HSB800 강재 거더에서도 적용될 수 있는 것으로 평가되었다.

핵심 용어: HBS800 강재, 플레이트거더, 비탄성 LTB, 이축대칭단면, 단일패널모델, 3-패널모델
