

일축대칭단면 HSB800 강재 플레이트거더의 비탄성 횡비틀좌굴강도의 해석적 평가

박 용 명¹⁾ · 이 건 준^{2)*} · 최 병 호³⁾ · 황 민 오⁴⁾

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 Girder with Monosymmetric 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 high strength steel plate girder with monosymmetric section under uniform moment was evaluated by nonlinear analysis. The unbraced length in inelastic LTB range was considered for the sections whose smaller or larger flange is in compression with slender, noncompact and compact web. Analyses of SM490 steel girders were first performed with the single-panel and three-panel model to judge the validity of the constructed models by comparing those results with Eurocode 3, AASHTO and AISC codes. By using the same models, LTB strength of HSB800 girder was evaluated and it was found that the sections whose smaller flange is in compression with noncompact flange-slender/noncompact web could not reach the flexural strength of the design codes.

KEYWORDS : HSB800 steel, plate girder, monosymmetric section, inelastic LTB, single-panel model, three-panel model

1. 서 론

I-단면 플레이트거더의 휨강도는 판의 국부좌굴과 횡비틀좌굴(Lateral-Torsional Buckling, 이하 LTB) 강도로부터 결정된다. 일축대칭단면 I-거더는 이축대칭단면과는 달리 압축플랜지와 인장플랜지의 단면적 비에 따라 압축측 복부판의 세장비가 변하므로 이로 인한 복부판의 좌굴강도가 거더의 휨강도에 영향을 미치게 된다. 또한, 일축대칭단면 I-거더에서는 단면의 도심과 전단중심(shear center)이 일치하지

않고, 이로 인해 이축대칭단면과는 달리 비틀좌굴이 발생하는 동안 휨압축응력과 휨인장응력에 의한 비틀모멘트의 불균형(unbalanced torque)이 발생하게 된다. 이러한 현상을 Wagner 효과라고 하며, 압축플랜지 단면이 인장플랜지 단면에 비해 작은 경우에는 전단중심이 인장플랜지 측에 가까우므로 Wagner 효과를 고려하지 않은 것에 비해 LTB 강도가 감소하고 압축플랜지 단면이 큰 경우에는 반대의 현상을 보이게 된다⁽¹⁾.

이러한 현상을 고려한 일축대칭 I-거더의 탄성 LTB 강도는 여러 연구자들에 의해 일축대칭변수(monosymmetry parameter)를 사용하여 제안되었는데, Anderson과 Trahair⁽¹⁾는 합당한 일축대칭변수를 결정하기 위하여 캔티레버에 대한 실험을 수행하고 Goodier의 일축대칭변수(2장의 식 (10) 및 식 (11))가 타당하다고 제안하였다. 한편 Bradford⁽²⁾는 국부좌굴과 LTB 외에 복부판이 얇은 경우 복부판의 distortional buckling에 의해 거더의 휨강도가 감소함을 일축대칭단면 I-거더를 대상으로 제시하였다.

Note.-Discussion open until October 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 23, 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

플레이트거더의 휨강도와 관련하여 AASHTO LRFD (2007) 기준^[3]의 본문 6.10.8.2에서는 최대 휨강도를 항복 모멘트(M_y) 이하로 제한하는 탄성설계법을 기본으로 하지만, 부록 A6에서는 조밀 또는 비조밀복부판을 갖는 거더에 대해서는 복부판소성화계수(web plastification factor)를 적용하여 휨강도의 증가를 허용하고 있다. 단, 부록 A6 규정의 적용은 플랜지와 복부판의 항복강도가 485MPa 이하이고 $I_{yc}/I_{yt} \geq 0.3$ 인 경우로 제한하고 있다. 여기서 I_{yc} 와 I_{yt} 는 각각 압축플랜지와 인장플랜지의 복부판 축에 대한 단면2차 모멘트이다. 한편, AISC LRFD 기준^[4]에서도 조밀 또는 비조밀 복부판을 갖는 거더에 대해 복부판소성화계수를 적용하고 있는데, 본 기준에서는 AASHTO LRFD와 달리 $I_{yc}/I_y > 0.23$ 인 경우와 $I_{yc}/I_y \leq 0.23$ 인 경우로 구분하여 제시하고 있다. 여기서, I_y 는 복부판 축에 대한 단면2차모멘트이다.

최근 개발된 HSB800 고강도강은 응력-변형률 특성이 일반강과 달리 yield plateau가 존재하지 않고 극한강도에서의 변형률(ϵ_u)이 일반강에 비해 작으며 항복비는 크다(이철호 등^[5]). 이러한 재료 특성이 고강도강 거더, 특히 일축대칭 I-거더의 휨강도에 영향을 미칠 수 있는데 반해 아직 이에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 따라 각 기준에서는 복부판소성화계수의 적용시 강재의 항복강도에 제한을 두고 있으며, AASHTO LRFD에서는 항복강도 485MPa, 국내 도로교환계상태설계기준^[6]에서는 항복강도 460MPa를 초과하는 강재 거더에 대해서는 최대 휨강도를 항복모멘트로 제한하고 있다.

본 연구의 목적은 압축플랜지의 단면비가 상기 AASHTO 및 AISC의 조건을 만족하는 일축대칭단면 HSB800 강재 플레이트거더에서 복부판이 세장한 경우 각 기준의 휨강도에 도달하는지, 그리고 복부판이 조밀 또는 비조밀인 경우에는 복부판소성화계수를 적용한 휨강도에 도달하는지를 평가하는 것이다. 이를 위해 조밀, 비조밀 및 세장 복부판을 갖는 일축대칭단면 HSB800 강재 플레이트거더에 대해 비지지길이(L_b)에 따른 LTB 강도를 해석적으로 평가하였다. 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작은 경우와 큰 경우를 각각 고려하였으며, 횡방향 비지지길이는 비탄성 구간을 대상으로 하였다. 또한, 단일패널모델과 3-패널모델에 대해 각각 비탄성 LTB 강도를 평가하고 각국 기준과 비교 분석하였다.

2. 횡비틀좌굴강도 설계기준

강재 I-거더의 상세한 휨강도식은 관련 기준을 참조하기로

하고, 본 논문에서는 단면비의 제한과 복부판소성화계수에 관한 기준 위주로 요약하기로 한다.

2.1 AASHTO LRFD 기준^[8]

2.1.1 AASHTO LRFD 본문 기준

I-거더의 복부판 및 플랜지는 다음의 단면비 제한조건을 만족하여야 한다.

$$\text{복부판} : D/t_w \leq 150 \text{ (수평보강재 없는 경우)} \quad (1a)$$

$$\text{플랜지} : b_f/2t_f \leq 12, b_f \geq D/6, t_f > 1.1t_w,$$

$$0.1 \leq \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 10 \quad (1b)$$

여기서, D : 복부판 높이, t_w : 복부판 두께, b_f, t_f : 압축 및 인장플랜지의 폭과 두께, I_{yc}, I_{yt} : 압축 및 인장플랜지의 복부판 축에 대한 단면2차모멘트이다. 비합성 I-거더 및 부모멘트 구간의 합성 I-거더에서 압축플랜지의 국부좌굴강도와 LTB 강도는 6.10.8.2에 제시되어 있으며, 조밀한계 비지지길이(L_p) 및 비조밀한계 비지지길이(L_r)은 다음과 같다.

$$L_p = 1.0 r_t \sqrt{E/F_{yc}} \quad (2a)$$

$$L_r = \pi r_t \sqrt{E/F_{yr}} \quad (2b)$$

여기서, r_t : 압축플랜지와 압축축 복부판 높이의 1/3단면의 복부판 축에 대한 단면회전반경, E : 강재의 탄성계수, F_{yc} : 압축플랜지의 항복강도, F_{yr} : 잔류응력 영향을 포함한 압축플랜지의 항복강도로서 $0.7F_{yc}$ 와 F_{yw} (복부판 항복강도) 중 작은 값으로 $0.5F_{yc}$ 보다 작을 필요는 없다.

2.1.2 AASHTO LRFD 부록 A6 기준

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

$$F_y \leq 485 \text{ MPa} \quad (3a)$$

$$\frac{2D_c}{t_w} (= \lambda_w) < 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} (= \lambda_{rw}) \quad (3b)$$

$$\frac{I_{yc}}{I_{yt}} \geq 0.3 \quad (3c)$$

여기서, F_y : 강재의 항복강도, D_c : 탄성범위에서 압축측 복부판의 높이, λ_w : 복부판의 세장비, λ_{rw} : 비조밀 복부판의 한계세장비이다. 부록 A6에는 조밀 및 비조밀복부판을 갖는 단면에 대해 압축 및 인장플랜지에 대한 복부판소성화계수 R_{pc} 와 R_{pt} 가 제시되어 있으며 R_{pc} 는 다음과 같다.

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq \lambda_{pw(D_{cp})} \text{ (조밀복부판)} : R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (4a)$$

$$\frac{2D_c}{t_w} \leq 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \text{ (비조밀복부판)} : R_{pc} = \left[1 - \left(1 - \frac{R_h M_{yc}}{M_p} \right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw(D_c)}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw(D_c)}} \right) \right] \frac{M_p}{M_{yc}} \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (4b)$$

여기서, D_{cp} : 소성단면에서 압축측 복부판의 높이, M_p : 소성모멘트, R_h : 하이브리드 계수, $\lambda_{pw(D_{cp})}$: 조밀복부판 한계세장비(AASHTO LRFD 식 (A6.2.1-2) 참조), $\lambda_{pw(D_c)} = \lambda_{pw(D_{cp})} (D_c / D_{cp}) \leq \lambda_{rw}$ 이다.

비합성 I-거더 및 부모멘트 구간의 합성 I-거더에서 압축 플랜지의 국부좌굴강도와 LTB 강도는 부록 A6.3에 제시되어 있으며, 조밀한계 비지지길이(L_p)는 식 (2a)와 같고 비조밀한계 비지지길이(L_r)은 다음과 같다.

$$L_r = 1.95 r_t \frac{E}{F_{yr}} \sqrt{\frac{J}{S_{xc} h}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left(\frac{F_{yr} S_{xc} h}{E J} \right)^2}} \quad (5)$$

여기서, S_{xc} : 압축플랜지의 단면계수, J : 비틀상수, h : 플랜지 중심간 거리이다.

AASHTO LRFD 부록 A6 규정에 의한 경우 $L_b \leq L_p$ 인 조밀단면의 휨강도는 $M_{nc} = R_{pc} M_{yc}$ 로부터 소성모멘트 (M_p)까지 허용된다.

2.2 AISC LRFD 기준^[4]

조밀 및 비조밀 복부판을 갖는 I-거더의 휨강도는 AISC LRFD(2010) Sec. F4에, 세장 복부판을 갖는 거더의 휨강도는 Sec. F5에 각각 제시되어 있다. 조밀 및 비조밀 복부

판을 갖는 단면에는 복부판소성화계수를 적용하며, AASHTO LRFD 기준과는 달리 압축플랜지의 단면비에 따라 다음과 같이 구분하여 적용하고 있으며 압축플랜지의 복부판소성화 계수는 다음과 같다.

$$I_{yc}/I_y > 0.23 \text{ 인 경우 : } R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (6a)$$

$$\text{비조밀복부판 : } R_{pc} = \left[\frac{M_p}{M_{yc}} - \left(\frac{M_p}{M_{yc}} - 1 \right) \left(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}} \right) \right] \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (6b)$$

$$I_{yc}/I_y \leq 0.23 \text{ 인 경우 : } R_{pc} = 1.0 \quad (6c)$$

여기서, I_y : 복부판 축에 대한 단면2차모멘트, λ : 복부판 세장비, λ_{pw} : 조밀복부판 한계세장비(AISC Table B4.1b 참조), λ_{rw} : 비조밀 복부판의 한계세장비(= $5.7 \sqrt{E/F_y}$) 이다.

본 기준은 전체적으로 AASHTO LRFD 기준과 동일하나 비조밀플랜지의 한계세장비(λ_{rf})와 조밀한계 비지지길이($L_p = 1.1 r_t \sqrt{E/F_{yc}}$) 규정이 조금 다르다.

2.3 Eurocode 3 기준^[7]

본 기준에서는 비대칭단면의 단면비 제한에 대한 별도의 규정은 없으며, EN 1993-1-1에서 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(일반적 경우 : EN 1993-1-1 6.3.2.2, 압연형강 또는 등가용접단면 : 6.3.2.3)로서 6.3.2.3에서 χ_{LT} 는 다음과 같다.

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

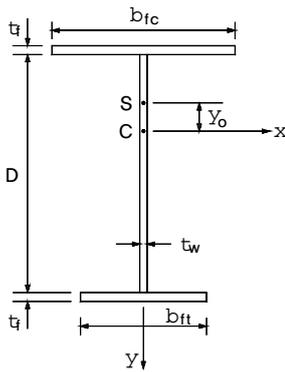


Fig. 1 Properties of section

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 0.75, $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$ (최대값), α_{LT} : 초기처짐계수로서 Eurocode3-curve c를 사용하는 경우=0.49, Eurocode3-curve d를 사용하는 경우=0.76이다. M_{cr} 은 탄성 LTB 강도로서 단일대칭단면의 LTB 강도는 다음과 같다^[1].

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ} \left[\frac{\pi\delta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\pi\delta}{2}\right)^2 + \left(1 + \frac{\pi^2 EI_w}{GJL_b^2}\right)} \right] \quad (9)$$

여기서, G : 전단탄성계수, J : 비틀상수, I_w : 뒀비틀상수이며, δ 는 일축대칭변수로서 다음과 같다.

$$\delta = \frac{\beta_x}{L_b} \sqrt{\frac{EI_y}{GJ}} \quad (10)$$

여기서, β_x 는 다음과 같다.

$$\beta_x = \frac{1}{I_x} \int_A (x^2 y + y^3) dA - 2y_o \quad (11)$$

여기서, I_x 는 강축에 대한 단면2차모멘트이며, y_o 는 Fig. 1에 보인 바와 같이 도심(C)과 전단중심(S)과의 거리이다.

2.4 도로교한계상태설계기준^[6]

국내 도로교한계상태설계기준(2012)에서는 압축플랜지의 단면비를 다음과 같이 제한하고 있으며,

$$0.1 \leq \frac{I_{yc}}{I_y} \leq 0.9 \quad (12)$$

I-거더의 LTB 강도는 복부판의 조밀도에 따라 다음과 같이 제시하고 있다.

$$\frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_b \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \text{인 경우 :} \\ M_n = 3.14 EC_b R_h \left(\frac{I_{yc}}{L_b}\right) \sqrt{0.772 \left(\frac{J}{I_{yc}}\right) + 9.87 \left(\frac{d}{L_b}\right)^2} \leq R_h M_y \quad (13a)$$

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

$$M_n = C_t R_b R_h M_y \left[1 - 0.5 \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq R_b R_h M_y \quad (13b)$$

여기서, $\lambda_b = 5.76$ ($D_c \leq D/2$ 인 단면), $\lambda_b = 4.64$ ($D_c > D/2$ 인 단면), D : 복부판 높이, d : 강재단면의 총높이이며, 조밀한계 비지지길이 $L_p = 1.76 r_t \sqrt{E/F_{yc}}$ 로서 AASHTO 및 AISC 기준에 비해 다소 크게 설정되어 있다.

3. 해석 모델 및 해석 방법

3.1 단일패널 및 3-패널모델

본 연구에서는 일축대칭단면 I-거더의 LTB 강도를 평가하기 위해 Fig. 2(a)의 단일패널모델과 Fig. 2(b)의 3-패널모델을 각각 고려하였다. 그 이유는 Eurocode 3는 식 (9)의 단일패널의 LTB 강도를 기초로 하고 있고, AASHTO 및 AISC 기준은 3-패널에 대한 4점 휨재하실험 결과에 바탕을 두고 있기 때문이다. 실제로 대부분의 거더는 일정한 간격으로 수직브레이싱이나 크로스빔으로 지지되어 있어 횡비틀좌굴이 발생하는 패널의 압축플랜지의 warping 변형을 인접 패널부가 구속하는 효과가 있다. 이에 비해 단일패널모델은 플랜지 양단의 warping 변형이 구속되지 않으므로 실제 상황에 비해 안전측의 LTB 강도를 제공한다.

균일휨모멘트 상태를 구현하기 위하여 단일패널모델에서는 Fig. 2(a)와 같이 상부플랜지 양단에는 압축하중을, 하부플랜지 양단에는 인장하중을 재하하였으며, 하중의 재하폭은 상·하부플랜지 중 작은 폭에 대해 같은 크기의 선하중을 재하하였다. 3-패널모델에서는 Fig. 2(b)와 같이 단순보의 1/3 및 2/3 지점에 연직하중을 재하하여 중앙패널 구간이 순수휨 상태가 되도록 하였다. 각 모델에서 지점부 및 하중재하점에서는 국부변형을 방지하기 위해 복부판 두께의 수직보 강재를 부착하였다. 모델들의 지지조건은 Table 1과 같고 Dx, Dy, Dz는 각각 x, y, z축 이동변위이다.

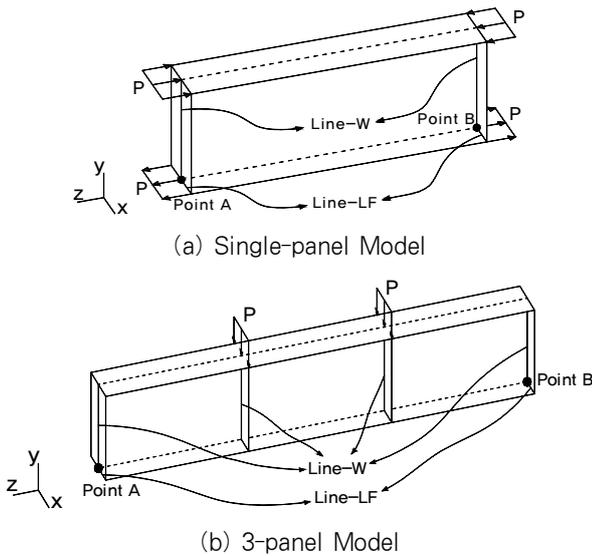


Fig. 2 Configuration of numerical model

Table 1. Boundary conditions

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

3.2 초기처짐 및 잔류응력

본 연구에서는 Yura 등^[8]이 제안한 Fig. 3의 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 잔류응력의 분포와 크기는 Kang 등^[9]이 제시한 HSB800 용접 거더의 잔류응력 측정 결과에 근거한 Fig. 4의 잔류응력 분포를 고려하였다. Fig. 4의 잔류응력 분포는 ECCS^[10]의 잔류응력 분포와 형상은 같고 잔류응력의 크기는 ECCS 잔류응력의 60%에 해당한다.

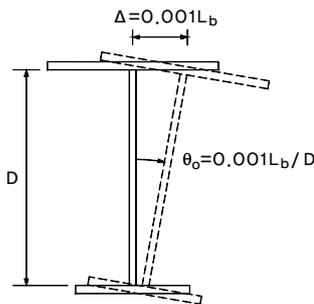


Fig. 3 Initial imperfection model

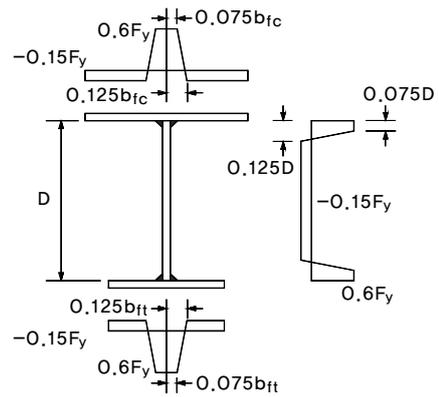


Fig. 4 Residual stress model

3.3 재료모델 및 비선형해석

HSB800 강재 거더의 휨강도 평가에 앞서 본 연구의 해석 방법의 타당성 평가 측면과 항복강도 460MPa 이하의 일반강 거더에 대해 휨강도를 평가하고 이를 각 기준과 비교하고자 SM490 강재 거더에 대해서도 해석을 수행하였다. 해석에서 SM490 및 HSB800 강재의 재료모델은 Fig. 5에 보인 바와 같이 Multi-linear 모델로 고려하였으며, 재료모델의 상세한 정보는 Table 2와 같다. 강재의 탄성계수는 $E=205$ GPa을, 항복기준은 Von Mises 기준을 적용하였으며 변형률경화구간에서는 isotropic strain hardening 모델을 적용하였다.

비선형해석은 ABAQUS/Standard^[11]를 사용하였으며, 모든 부재는 S4R 쉘요소를 사용하여 모델링하였다. Fig. 4의 잔류응력분포를 적절히 고려하기 위해 폭이 넓은 플랜지는 편측당 8열의 요소로, 폭이 좁은 플랜지는 편측당 6열의 요소로 분할하였으며 복부판은 높이 방향으로 42열의 요소로 분할하였다. Fig. 6는 구축된 유한요소모델의 예(3-패널모델의 1/3지점 부분)이다. 유한요소모델의 타당성 검토는 이전 논문^[12]에서 확인되었으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

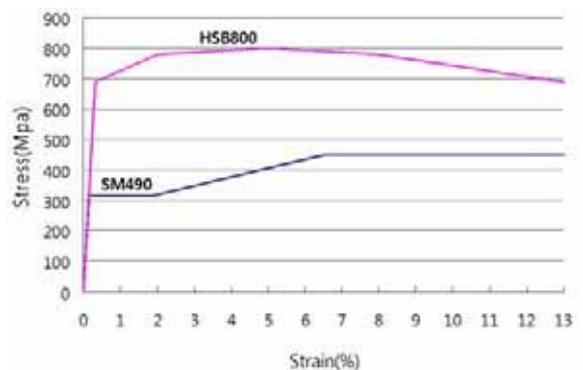


Fig. 5 Idealized stress-strain curves

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	

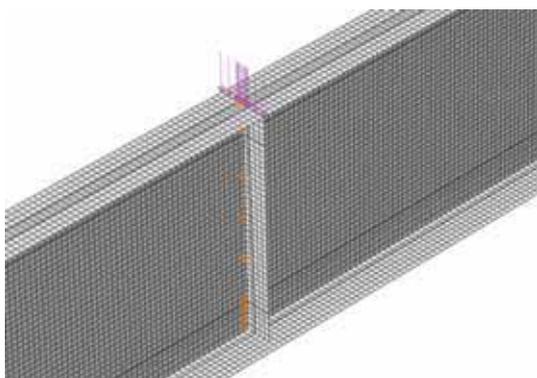


Fig. 6 Partial view of a 3-panel finite element model ($A_{fc} < A_{ft}$)

4. LTB강도 평가 해석

4.1 해석 대상 거더의 제한

본 연구에서 고려한 강종별 단면은 Table 3과 같고 압축 플랜지 폭이 인장플랜지에 비해 좁은 단면은 식 (3c)의 조건을

고려하여 결정하였다. 본 표에서 단면의 세장비를 AASHTO LRFD 기준에 따라 구분하고 비조밀 및 조밀플랜지를 'NF', 'CF'로, 세장, 비조밀, 조밀복부판을 'SW', 'NW', 'CW'로 표기하였으며, 압축플랜지가 인장플랜지에 비해 작은 단면은 '-S'로, 큰 단면은 '-L'로 명명하였다. 또한 Eurocode 3에 의한 복부판, 플랜지 및 단면의 등급(class)을 제시하였다.

한편, Table 3에서 한계 비지지길이는 AASHTO LRFD 기준으로 산정한 길이이며 L_p 는 식 (2a), L_r 은 세장복부판을 갖는 단면은 식 (2b), 조밀 및 비조밀복부판 단면은 식 (5)에 의한 것이다. L_r 의 계산시 F_{yr} 은 $0.7F_{yc}$ 로 고려하였으며, 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 5가지 경우를 고려하였다.

4.2 압축플랜지 단면이 작은 경우

4.2.1 SM490-S 단면 해석 결과

SM490-S 단면에 대해 잔류응력을 고려한 단일패널모델 및 3-패널모델의 극한휨모멘트에서의 변형 및 von Mises 응력선도의 예를 Fig. 7에 제시하였으며, 각 단면별 비지지 길이 세장비(L_b/r_y)에 따른 휨강도는 Fig. 8에 제시하였다. Fig. 8에서 각 휨강도곡선은 압축플랜지 좌굴강도가 지배적인 경우 해당 기준의 압축플랜지의 좌굴강도를 고려한 것이다. Fig. 8로부터 모든 단면에서 단일패널모델에 의한 휨강도는 비지지길이가 짧은 경우에는 Eurocode 3의 buckling curve d($\alpha_{LT} = 0.76$)를 적용한 경우에 가깝고, 비지지길이가 증가함에 따라 buckling curve c($\alpha_{LT} = 0.49$)를 적용한 경우에 가까운 강도를 보였다.

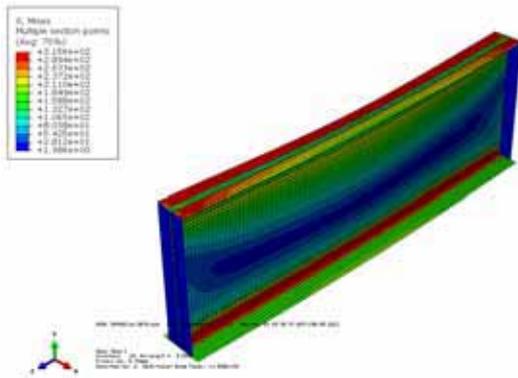
Table 3. Dimension of monosymmetric girders considered in this study

Steel	Section ID	Comp-Flg ($b_{fc} \times t_{fc}$)	Tens-Flg ($b_{ft} \times t_{ft}$)	Web ($D \times t_w$)	Eurocode3 Class			I_{yc}/I_{yt}	I_{yc}/I_y	r_y	L_p (mm)	L_r (mm)
					Web	Flg	Sec					
SM490 $A_{fc} < A_{ft}$	NFSW-S	220×10	320×10	1000×7	4	3	4	0.32	0.25	54.0	1292	4850
	NFNW-S	220×10	320×10	1000×9	4	3	4					
	CFNW1-S	220×15	320×15	1000×9	4	1	4					
	CFNW2-S	220×15	320×15	1000×12	3	1	2					
HSB800 $A_{fc} < A_{ft}$	NFSW-S	220×15	320×15	1000×9	4	3	4	0.32	0.24	56.4	895	3362
	NFNW-S	220×15	320×15	1000×12	4	3	4					
	CFNW1-S	220×20	320×20	1000×12	4	1	4					
	CFNW2-S	220×20	320×20	1000×18	3	1	2					
SM490 $A_{fc} > A_{ft}$	NFNW1-L	320×14	220×14	1000×6.7	4	3	4	3.08	0.75	59.6	2130	8159
	NFNW2-L	320×14	220×14	1000×9	3	3	3					
	CFNW-L	320×20	220×20	1000×9	3	2	2					
	CFCW-L	320×20	220×20	1000×12	2	1	2					
HSB800 $A_{fc} > A_{ft}$	NFSW-L	320×15	220×15	1000×9	4	4	4	3.08	0.75	56.4	1405	5275
	NFNW-L	320×15	220×15	1000×12	3	4	4					
	CFNW-L	320×25	220×25	1000×12	3	3	3					
	CFCW-L	320×25	220×25	1000×19	2	3	3					

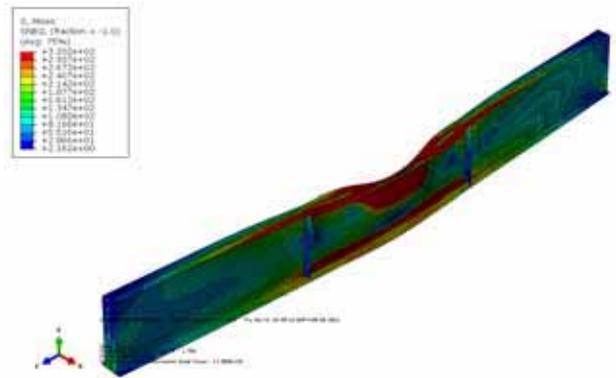
한편, Fig. 8에서 3-패널모델의 결과는 세장복부판을 갖는 NFSW-S 단면은 AASHTO LRFD 본문 규정의 강도에 부합하는 결과를 보였으며, 비조밀플랜지-비조밀복부판의 NFNW-S 단면은 비지지길이 L_m 이후 $\sim L_r$ 구간에서 AASHTO LRFD 본문 규정 휨강도는 만족하였으나 복부판소성화계수가 적용되는 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC LRFD 규정의 휨강도에는 조금 못 미치는 결과를 보였다. 한편, 조밀플랜지-비조밀복부판 단면(CFNW1-S 및 CFNW2-S 단

면)은 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC LRFD 규정의 휨강도에 근접하였다.

한편, Fig. 8(d)로부터 CFNW2-S 단면은 $L_m \sim L_r$ 구간에서 도로교한계상태기준 식 (13a)의 LTB 강도에 비해 작게 평가되었다. 식 (13a)는 비조밀 및 조밀복부판을 갖는 단면의 LTB 강도에 대한 2002년 AASHTO LRFD 기준이었으나 이후 개정되었으며, 따라서 식 (13a)는 재고되어야 할 것으로 판단된다.

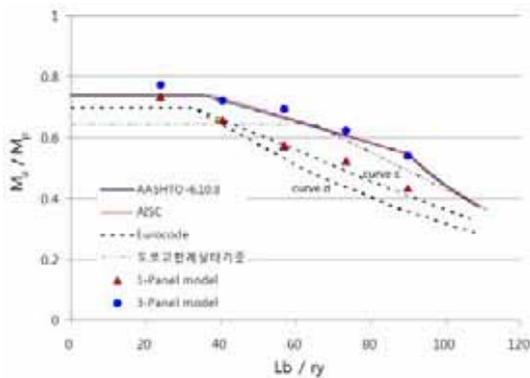


(a) Single-panel model

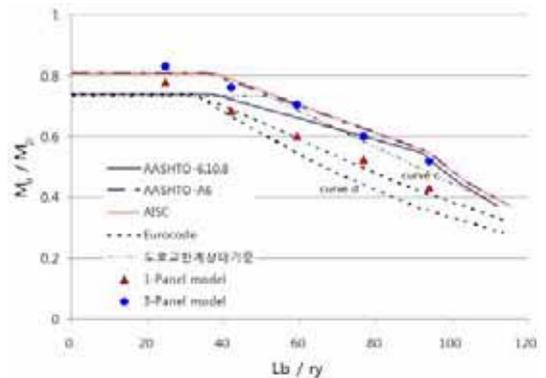


(b) 3-panel model

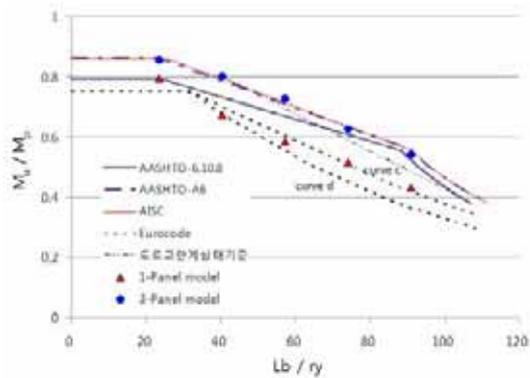
Fig. 7 Deformed shape and von mises stress contour at ultimate moment(SM490 NFNW-S section, $L_b = L_m = 2,976\text{mm}$)



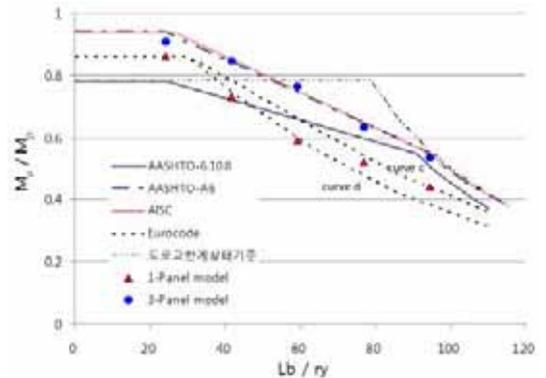
(a) NFSW-S



(b) NFNW-S



(c) CFNW1-S



(d) CFNW2-S

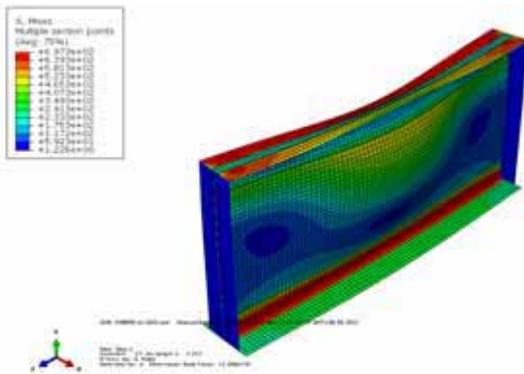
Fig. 8 Evaluated flexural resistance of SM490-S sections($A_{fc} < A_{ft}$)

4.2.2 HSB800-S 단면 해석 결과

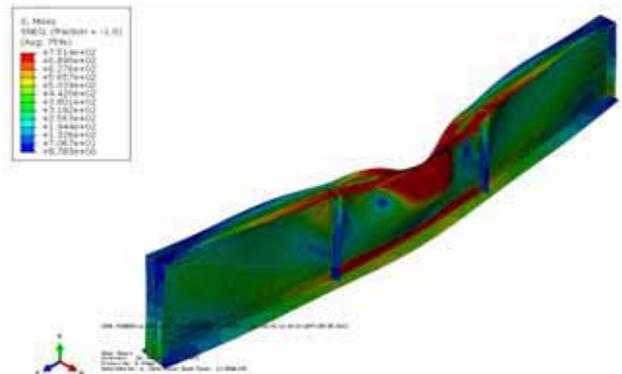
HSB800-S 단면에 대해 잔류응력을 고려한 단일패널모델 및 3-패널모델의 극한휨모멘트에서의 변형 및 von Mises 응력선도의 예를 Fig. 9에 제시하였다. LTB 강도의 비교는 Fig. 10에 제시하였으며, 전술한 바와 같이 도로교한계상태 기준은 문제점이 있는 것으로 나타나 비교에서 제외하였다.

먼저 Fig. 10(a)~(d)로부터 단일패널모델에 의한 휨강도는 SM490 거더의 결과와 마찬가지로 모든 단면에서 비지지

길이가 짧은 경우에는 Eurocode 3의 curve d를 적용한 경우에, 비지지길이가 증가함에 따라 curve c를 적용한 경우에 가까운 휨강도를 보였다. 한편, Fig. 10(a)로부터 세장복부판을 갖는 NFSW-S 단면은 L_m 이후~ L_r 구간에서 AASHTO LRFD 본문 강도에 미치지 못하는 것으로 평가되었다. 또한, Fig. 10(b)로부터 비조밀플랜지-비조밀복부판의 NFNW-S 단면은 L_m 이후~ L_r 구간에서 휨강도가 AASHTO LRFD의 본문 규정에도 미치지 못하였다. 반면에, Fig. 10(c)~(d)로

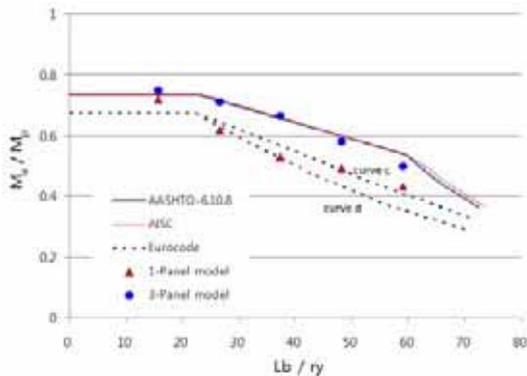


(a) Single-panel model

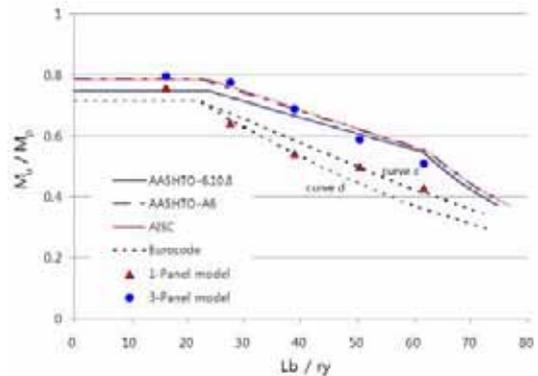


(b) 3-panel model

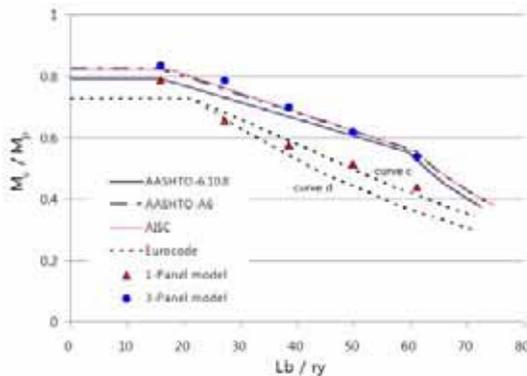
Fig. 9 Deformed shape and von mises stress contour at ultimate moment(HSB800 NFNW-S section, $L_b = L_m = 2,025\text{mm}$)



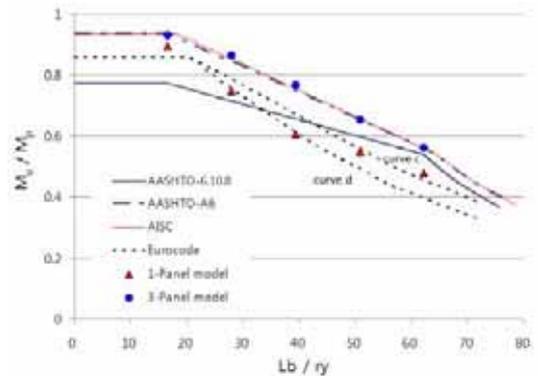
(a) NFSW-S



(b) NFNW-S



(c) CFNW1-S



(d) CFNW2-S

Fig. 10 Evaluated flexural resistance of HSB800-S sections($A_{fc} < A_{ft}$)

부터 조밀플랜지-비조밀복부판을 갖는 단면들(CFNW1-S 및 CFNW2-S 단면)은 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC 규정의 휨강도에 도달하였다.

4.3 압축플랜지 단면이 큰 경우

4.3.1 SM490-L 단면 해석 결과

SM490-L 단면에 대해 잔류응력을 고려한 단일패널모델

및 3-패널모델의 극한휨모멘트에서의 변형 및 von Mises 응력선도의 예를 Fig. 11에 제시하였으며, 각 단면별 비지지 길이 세장비(L_b/r_y)에 따른 휨강도는 Fig. 12에 제시하였다. Fig. 12에서 각 LTB 강도곡선은 압축플랜지 좌굴강도가 지배적인 경우 해당 기준의 플랜지 좌굴강도를 고려한 것이다. Fig. 12로부터 모든 단면에서 단일패널모델에 의한 휨강도는 비지지길이 가 짧은 경우에는 Eurocode 3의 buckling curve d를 적용한 경우에, 비지지길이 가 증가함에 따라

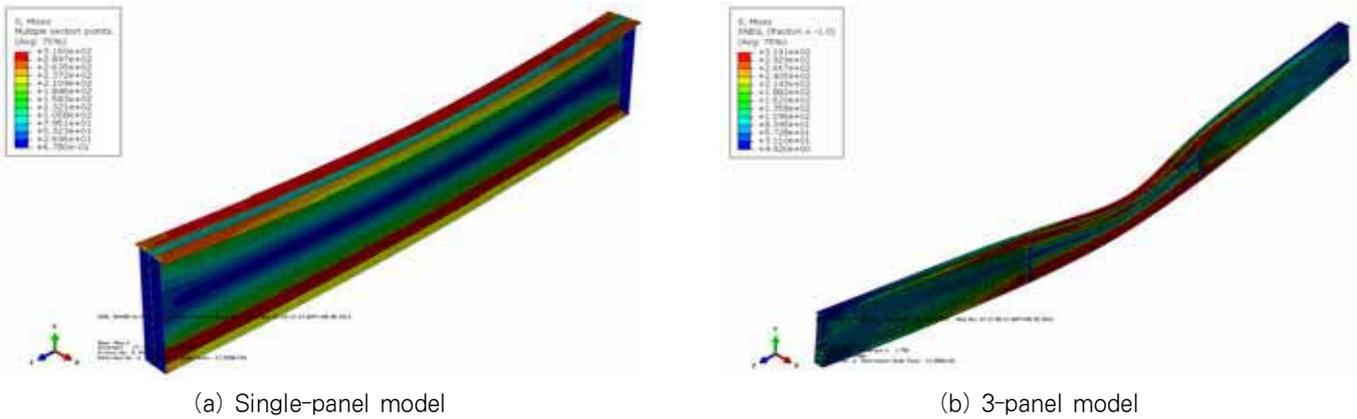


Fig. 11 Deformed shape and von mises stress contour at ultimate moment(SM490 NFNW2-L section, $L_b = L_m = 4,994\text{mm}$)

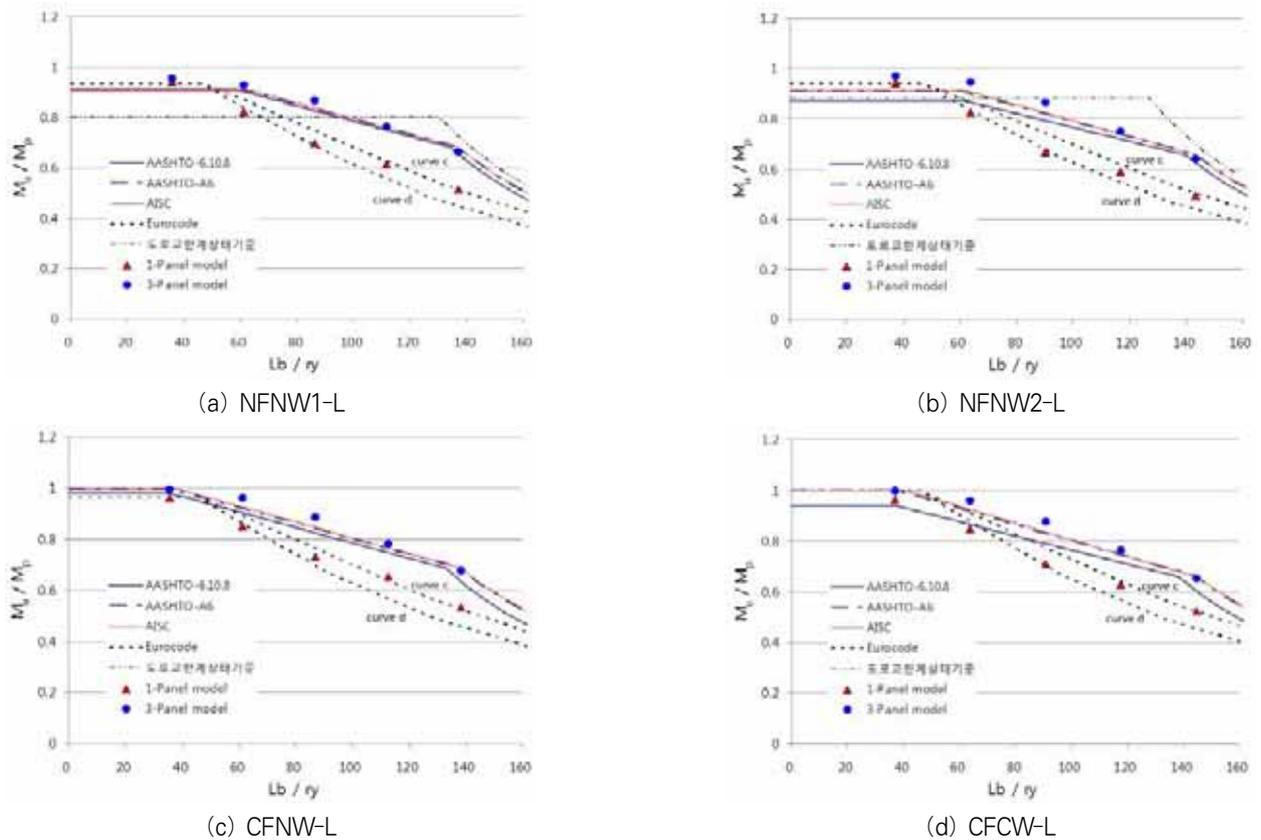


Fig. 12 Evaluated flexural resistance of SM490-L sections($A_{fc} > A_{ft}$)

buckling curve c를 적용한 경우에 가까운 강도를 보였다.

한편, 3-패널모델의 결과는 비조밀복부판-비조밀플랜지를 갖는 NFNW1-L 및 NFNW2-L 단면 모두 복부판소성화계수가 적용되는 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC LRFD 규정의 휨강도에 미치는 결과를 보였다. 아울러, 조밀플랜지를 갖는 단면은 비조밀 및 조밀복부판 모두(CFNW-L 및 CFCW-L 단면) AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC LRFD 규정의 휨강도가 얻어졌다.

한편, Fig. 13(a)~(d)로부터 도로교한계상태기준의 비조밀 및 조밀복부판 단면에 대한 LTB 강도식인 식 (13a)는 문제가 있는 것으로 평가되었다.

4.3.2 HSB800-L 단면 해석 결과

HSB800-L 단면에 대해 잔류응력을 고려한 단일패널모델 및 3-패널모델의 극한휨모멘트에서의 변형 및 von Mises 응력선도의 예를 Fig. 13에 제시하였다. LTB 강도의 비교

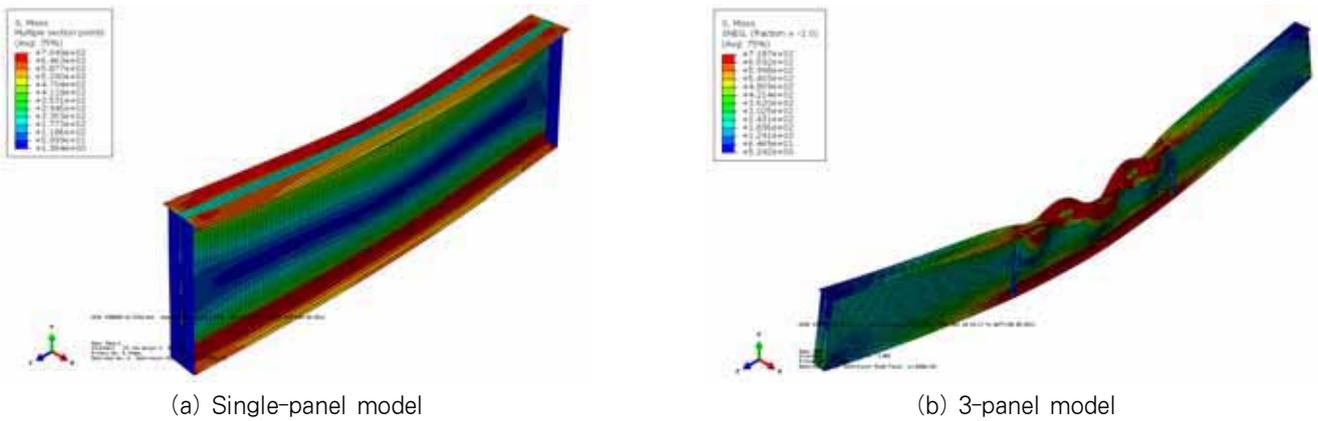


Fig. 13 Deformed shape and von mises stress contour at ultimate moment(HSB800 NFNW-L section, $L_b = L_m = 3,256\text{mm}$)

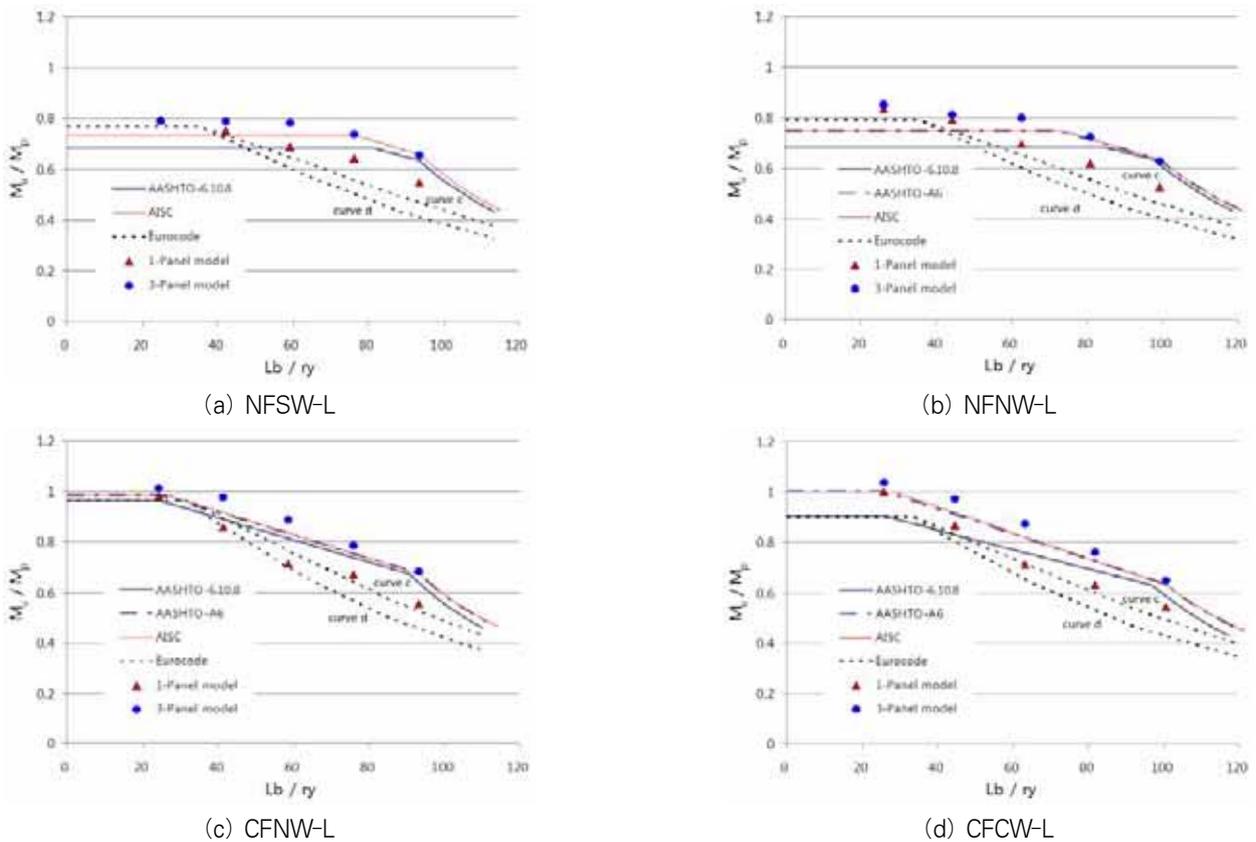


Fig. 14 Evaluated flexural resistance of HSB800-L sections($A_{fc} > A_{ft}$)

는 Fig. 14에 제시하였으며, 도로교한계상태기준은 비교에서 제외하였다.

먼저 Fig. 14(a)~(d)로부터 단일패널모델에 의한 휨강도는 SM490 거더의 결과와 마찬가지로 비지지길이가 짧은 경우에는 Eurocode 3의 curve d를 적용한 경우에, 비지지길이가 증가함에 따라 curve c를 적용한 경우에 가까운 휨강도를 보였다. 한편, Fig. 14(a)로부터 세장복부판을 갖는 NFSW-L 단면은 AASHTO LRFD 본문 강도에 부합하였으며, Fig. 14(b)~(d)로부터 비조밀 및 조밀복부판을 갖는 단면들은 모두 AASHTO LRFD 부록 A6 및 AISC 규정의 휨강도가 얻어졌다.

5. 결 론

본 연구에서는 고강도강이 적용된 일축대칭단면 I-거더의 휨강도 평가에 현재의 기준들을 적용할 수 있는지, 그리고 조밀 및 비조밀 복부판을 갖는 단면에서는 복부판소성화계수에 의한 휨강도의 증가를 허용할 수 있는지 여부를 평가하기 위해 HSB800 강재 거더의 횡비틀좌굴강도를 비선형해석을 통해 평가하였다. 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작은 경우와 큰 경우를 고려하였으며, 단일패널모델과 3-패널모델을 사용하여 각각 Eurocode 3와 미국의 기준들과 비교하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작은 단면 : 단일패널모델에 의한 결과로부터 두 강재 모두 모든 단면에서 Eurocode 3에 부합하는 휨강도를 보였다. 그러나 3-패널모델에 의한 결과로부터 L_m 이후 L_r 구간에서 SM490 강거더는 비조밀플랜지-비조밀복부판 단면(NFNW-S)에서 AASHTO LRFD 부록 A6 규정에 조금 못 미치는 휨강도를 보였으며, HSB800 강거더에서는 비조밀플랜지-세장복부판 단면(NFSW-S)은 AASHTO LRFD 본문 규정의 휨강도에, 비조밀플랜지-비조밀복부판 단면(NFNW-S)은 본문 규정에도 미치지 못하였다.
- (2) 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 큰 단면 : 두 강재 모두 모든 단면이 단일패널모델에 의한 결과는 Eurocode 3에 부합하는 휨강도를, 3-패널모델에 의한 결과는 AASHTO LRFD 본문 및 부록 A6 규정의 휨강도를 만족하였다.
- (3) 한편, 참고문헌^[11]에서 이축대칭단면 HSB800 거더에서도 단면 세장비와 비지지길이 변화에 따른 휨강도는 현재 기준과 부합하였다. 따라서 압축플랜지가 인장플랜지에 비해 같거나 큰 단면은 현재의 휨강도 기준을 HSB800 강재 거더에 적용할 수 있는 것으로 판단된다.

- (4) 그러나, 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작고 비조밀플랜지를 갖는 세장복부판 및 비조밀복부판 단면의 거더에 대해서는 I_{yc}/I_{yt} 의 비, 플랜지와 복부판의 세장비 변수를 고려한 보완 연구가 필요한 것으로 나타났다.
- (5) SM490 강재 거더에 대한 해석으로부터 도로교한계상태기준^[5]은 비조밀 및 조밀복부판을 갖는 단면의 LTB 강도를 일부 비지지구간에서 비안전측으로 평가하는 것으로 나타났으며, 이에 대해서는 개정이 필요할 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] Anderson, J.M. and Trahair, N.S. (1972) *Stability of Monosymmetric Beams and Cantilevers*, Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 98, No. ST1, pp.269-286.
- [2] Bradford, M.A. (1985) *Distortional Buckling of Monosymmetric I-Beams*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 5, No. 2, pp.123-136.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Ed.*, Washington D.C.
- [4] American Institute of Steel Construction(2010) *Specifications for Structural Steel Buildings*, Chicago, IL.
- [5] 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).
- [6] 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.

[7] Eurocode 3 (2005) *Design of steel structures Part 1-1: General rules and rules for buildings*, EN 1993-1-1.

[8] Yura, T.A. (2001) *Fundamentals of Beam Bracing*, Engineering Journal, First Quarter, pp.11-26.

[9] 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.

[10] ECCS (1991) *Essentials of Eurocode 3 Design Manual for Steel Structures in Building*, ECCS Advisory Committee, No. 65.

[11] ABAQUS (2004) *Analysis user's manual, version 6.5*, Pawtucket(RI), ABAQUS, Inc.

[12] 박용명, 이건준, 최병호, 황민오(2012) 이축대칭단면 HSB800 강재 플레이트거더의 비탄성 횡비틀좌굴강도의 해석적 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제2호, pp.141-151.

Park, Y.M., Lee, K.J., Choi, B.H., and Hwang, M.O. (2012) *Numerical Analysis of Inelastic Lateral Torsional Buckling Strength of HSB800 Steel Plate Girders with Doubly Symmetric Section*, Journal of Society of Steel Construction, KSSC, Vol. 25, No. 2, pp.141-151.

요 약: 본 연구에서는 균일휨모멘트를 받는 일축대칭단면 HSB800 고강도강 플레이트거더의 횡비틀좌굴(LTB) 강도를 비선형해석으로 평가하였다. 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작은 경우와 큰 경우에 대해 각각 세장, 비조밀 및 조밀 복부판을 갖는 단면들을 고려하였으며, 비지지길이는 비탄성 LTB 영역을 대상으로 하였다. Eurocode 3 및 AASHTO, AISC 기준들과의 비교를 위해 단일패널모델과 3-패널모델을 각각 고려하였으며, 모델의 타당성을 평가하기 위해 SM490 강재 거더에 대해 먼저 해석을 수행하고 각 기준과 비교하였다. 이후 동일한 방법으로 HSB800 강재거더에 대해 LTB 강도 평가 해석을 수행하였으며, 압축플랜지 단면이 인장플랜지에 비해 작고 비조밀플랜지-세장/비조밀복부판 단면들은 현재 기준의 휨강도에 도달하지 못하는 결과를 얻었다.

핵심 용어: HSB800 강재, 플레이트거더, 일축대칭단면, 비탄성 횡비틀좌굴, 단일패널모델, 3-패널모델