이축 대칭 I형 거더의 플랜지 탄성좌굴에 대한 플랜지와 복부판 세장비의 영향

이정화¹, 이기세², 변남주¹, 강영종^{1*} ¹고려대학교 건축사회환경공학부, ²고려대학교 초대형구조기술연구소

Effects of flange and web slenderness ratios on elastic flange local buckling of doubly symmetric I-girders

Jeong-Hwa Lee¹, Kee-Sei Lee², Nam-Joo Byun¹, Young-Jong Kang^{1*} ¹School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, ²Research Institute for Mega Structure Technology, Korea University

요 약 건설 재료가 나날이 발전함에 따라 재료 강도는 과거에 비하여 획기적으로 증대 되었으며, 이는 구조물의 자중을 경감 시켜 경제적인 설계를 가능하게 할 뿐 아니라, 심미적 요건까지 만족 시키고 있다. 특히 고강도 강재의 경우, 항복강도는 약 480MPa로, 일반 구조용 강재 보다 약 50% 더 크다. 그러나 고강도 재료의 사용은 단면을 세장하게 하여 국부 좌굴 안정성 에 영향을 미칠 수 있다. 세장 단면은 탄성 좌굴을 일으킬 수 있으며, 탄성 좌굴 강도는 경계조건에 대하여 매우 민감하다. I형 거더의 경우 복부판은 압축 플랜지의 경계조건을 결정하므로, 복부판의 강성은 얇은 압축 플랜지의 탄성 좌굴 강도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 플랜지 및 복부판의 세장비가 휨 모멘트를 받는 이축대칭 I형 거더의 플랜지 탄성좌굴에 미치는 영향을 분석 하였다. 유한요소해석결과, 탄성좌굴강도와 좌굴모드는 복부판의 지지조 건의 영향 뿐 아니라 플랜지와 복부판의 세장비의 비율에 따라 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

Abstract Increasing the strength of structural materials allows their self-weight to be reduced and this, in turn, enables the structures to satisfy esthetic requirements. The yield strength of high-performance steel is almost 480 MPa, which is approximately 50% higher than that of general structural steel. The use of high strength materials, however, makes the sections more slender, which can potentially result in significant local stability problems. The strength of slender element sections might be governed by their elastic buckling behavior, and the elastic buckling strength is very sensitive to the boundary conditions. Because the web provides the boundary conditions of the compressive thin-flange, the stiffness of the web can affect the elastic buckling strength of the flange. In this study, therefore, the effects of the flange and web slenderness ratios on the elastic flange local buckling of I-girders subjected to a pure bending moment were evaluated by finite element analysis (FEA). The analysis results show that the elastic local buckling strength and buckling modes were affected not only by the web support conditions, but also by the flange and web slenderness ratios.

Keywords : Elastic buckling, Finite element analysis, Flange local buckling, Flange-web interaction, Elastic buckling coefficient

본 논문은 국토교통부 국토교통기술연구사업의 연구비지원(15CTAP-C098412-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. *Corresponding Author : Young-Jong Kang(Korea Univ.) Tel: +82-2-927-7715 email: yjkang@korea.ac.kr Received May 16, 2016 Revised (1st July 18, 2016, 2nd August 8, 2016) Accepted August 11, 2016 Published August 31, 2016

1. 서론

교량 및 건설 분야에서는 구조물의 자중 저감과 우수 한 내하력을 동시에 확보를 위하여, 고강도강재, 고강도 콘크리트, FRP계열의 복합재료 등 고강도 고성능의 신 재료를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 우 리나라에서는 2000년대에 들어서 HSB800 및 HSA800 등 고성능강종(High performance steel)이 개발되었고, 이를 건축 및 교량분야에 적용하기 위하여 기존 설계기 준에 대한 적용성 평가 등의 연구들이 이루어져 왔다. 고성능강의 경우, 재료의 항복이후 거동에서 항복고

원이 뚜렷하게 나타나지 않기 때문에, 기성 강재(SM400, 490 등)에 비하여 연성이 다소 불리하다.

이러한 점으로 인해 AASHTO[1]나 도로교설계기준[3] 등의 국내외 설계기준에서는 각각 항복강도가 485MPa, 460MPa이상인 고강도강재가 적용된 I형 거더의 휨 설 계에 대하여 단면의 소성강도로 평가하지 않고 탄성설계 만 가능한 비조밀 단면으로 설계하도록 규정되어 있다. 따라서, 비조밀, 세장단면에 대한 적절한 휨 강도평가는 고성능강 I형 거더에 있어서 매우 중요하다.

고성능강재에 관련된 기존의 연구로는 이철호 등[4] 에 의하여 조밀 및 비조밀 단면을 갖는 고성능강 I형 거 더에 대하여 실험적 연구가 수행되었다. 해석적인 연구 로는 조은영 등[6], 김정훈 등[7]에 의하여 조밀 및 비조 밀 단면을 갖는 고성능강 I형 거더에 대한 해석적인 연 구가 수행되어 현행 설계기준에 대한 적용성 검토 연구 가 수행되었다. 특히, 김정훈 등[7]의 연구에서는 플랜지 와 복부판에 대한 상호작용이 비탄성 국부좌굴 강도에 서로 영향을 미침을 해석적으로 검토하였다. 이정화 등 [8]은 I형 거더의 플랜지 탄성좌굴강도를 평가하고 이를 AISC[2]설계기준 강도와 비교하였다.

이러한 연구들은 조밀 및 비조밀 압축플랜지에 대한 비탄성 플랜지 국부좌굴의 성능 평가 혹은 설계기준의 적용에 대한 적합성을 평가하기 위한 연구가 주를 이루 고 있다.

조밀 및 비조밀 압축플랜지에 대한 연구에서는 주로 거더의 소성강도와 항복 및 국부좌굴이 동시에 발생되는 비조밀 영역의 비탄성 국부좌굴에 대한 연구내용이 주를 이루고 있다. 하지만, 고성능강과 같은 고강도의 재료를 이용할 경우, 단면이 매우 세장해 질 수 있으므로, 비조 밀 영역 뿐만 아니라 탄성 국부좌굴 거동 영역에 대한 강도 산정에 대한 정의는 매우 중요하며, 비조밀 및 세장 단면을 명확히 구분하기 위해서도 탄성 국부좌굴의 적절 한 평가는 중요할 수 있다.

본 연구에서는 이축 대칭 I형 거더에 대한 플랜지 탄 성 국부좌굴에 대하여 플랜지와 복부판의 상호작용효과 를 유한요소해석결과를 통해 검토하였다. 해석결과로부 터 도출된 플랜지 탄성 국부좌굴 강도 및 탄성 좌굴계수 및 좌굴모드 등을 검토하였다. 또한, AISC[2]에서 제시 하고 있는 탄성좌굴계수와 해석결과로부터 도출된 탄성 좌굴계수를 각각 비교하였고, 플랜지와 복부판의 세장비 가 탄성좌굴강도에 미치는 영향을 검토하였다.

플랜지 탄성국부좌굴에 대한 설계규정

2.1 AISC Specification for Structural Steel Buildings (2010)

I형 거더 플랜지는 판의 일종으로 탄성 국부좌굴강도 를 평가하기 위해서는 식(1)의 판 좌굴공식을 따르도록 되어 있다. 여기에서, k는 탄성좌굴계수이며 판부재의 하중의 종류와 판의 경계에 대한 지지조건에 따라 결정 되다.

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2}$$
 (1)

여기서, *E*는 재료의 탄성계수, *k*는 플랜지의 탄성좌굴 계수, μ는 포아송비, *b*/*t*는 플랜지의 세장비를 의미한 다.

I형 거더의 경우, 플랜지는 복부판에 의해 지지되어 있으므로, 복부판에 의해 지지되는 경계조건에 따라서 좌굴계수(k)가 달라진다. 만약 복부판의 효과가 무시할 정도로 작은 경우라면, 플랜지의 경계조건은 복부판에 의해서 힌지지지조건에 가깝게 되고, 복부판의 효과가 매우 큰 경우의 경계조건은 고정지지조건로 볼 수 있다. 이때, 복부판의 힌지지지 및 고정지지조건에 대한 이론 좌굴계수(k)는 각각 0.425, 1.277이다.[9]

이러한 복부판에 의한 지지조건을 고려하기 위한 설 계기준은 AISC[2]에서 찾아 볼 수 있다.

AISC[2]에서는 고전적인 판 좌굴공식을 이용하여 복

부판의 세장비에 따라 탄성 플랜지 국부좌굴 강도에 대 한 설계 식을 제시하고 있다.

조밀, 비조밀 복부판인 경우의 탄성 플랜지 좌굴강도 는 식(2)로 규정되어 있다.

$$M_n = \frac{0.9 E k_c S_{xc}}{\lambda^2}$$
 (2)

여기서, *E*는 재료의 탄성계수, *k_c*는 AISC(2010)의 식 (C-E7-1)에서 규정된 플랜지의 탄성좌굴계수, *S_{xc}*는 단 면계수, λ는 플랜지의 세장비를 의미한다.

세장한 복부판인 경우에는 세장한 복부판에 의한 강 도감소효과를 고려하기 위하여 휨강도 감소계수(R_{pg})를 고려하도록 규정되어 있으며, 식(3)과 같다.

$$M_n = R_{pg} \frac{0.9 E k_c S_{xc}}{\lambda^2}$$
⁽³⁾

식(3)의 R_{pq} 는 세장한 복부판에 의한 휨강도 감소 계 수로써 식(4)와 같이 계산이 가능하다.

$$R_{pg} = 1 - \frac{a_w}{1200 + 300 a_w} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \le \quad (4)$$

여기서, R_{pq} 는 AISC (2010)에 규정된 식(4)에 의해 계 산되는 휨강도 감소계수, a_w 는 AISC(2010)의 식(F4-12) 정의된 계수, h_c 는 중립축으로부터 압축플랜지 하단까지 의 거리의 2배, t_w 는 복부판의 폭, *E*는 재료의 탄성계 수, F_w 는 항복강도로 정의된다.

AISC(2010)에 규정된 탄성좌굴 강도식인 식(2), (3) 은 이론 판좌굴 공식인 식(1)로부터 유도된 식으로 다음 과 같이 표현된다. 여기에서, 상수인 $\frac{\pi^2}{12(1-\mu^2)}$ 은 0.9 로 단순화 될 수 있다.

여기에서, k_c 는 AISC(2010)의 식(C-E7-1)에 규정된 탄 성 플랜지 좌굴계수로 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$k_{c} = \frac{4}{\sqrt{h/t_{w}}} \left(0.35 \le k_{c} \le 0.76 \right) \qquad (6)$$

여기서, h는 복부판의 높이, t_w는 복부판의 두께를 의미 한다.

AISC[2]에서 제시하고 있는 k_c 는 복부판의 지지에 의한 좌굴계수의 범위를 0.35에서 0.76으로 정하고 있 다. 좌굴계수의 최소 값은 힌지지지조건(k=0.425)보다 보수적으로 보고 있으며, 상한 값도 고정지지조건 (k=1.277)보다 보수적으로 평가하고 있는 것으로 판단 된다.

이때 k_c 는 Johnson[5]의 연구결과를 바탕으로 19개의 플랜지 탄성 좌굴 실험에 근거를 하고 있으며, 실험결과 를 회귀분석을 통해 산정한 좌굴계수이다. 본 좌굴계수 는 복부판의 세장비의 제곱근에 반비례하도록 규정하고 있을 뿐, 플랜지와 복부판의 상호작용을 고려하지 못하 는 단점이 있다.

탄성 좌굴 강도를 적절히 평가하기 위해서는 플랜지 를 지지하는 복부판에 의한 경계조건을 정확히 고려하여 야 한다. 본 연구에서는 Johnson[5]이 제안한 탄성좌굴 계수 k_c 의 적정성을 평가하고, 플랜지와 복부판의 세장 비에 따른 탄성 좌굴 강도의 영향을 평가하였다.

유한요소해석에 의한 플랜지 탄성좌굴 강도 산정

3.1 해석 개요

플랜지 탄성 국부좌굴에 대한 플랜지 복부판의 상호 작용을 고려하기 위하여 3차원 탄성좌굴 해석(고유치 해 석)을 수행하였다. 해석 프로그램은 ABAQUS 6.13이 사용되었고 플랜지와 복부판은 3차원 쉘 요소(S4R)를 이용하여 모델링하였다. 거더의 경계조건은 단순지지조 건을 사용하였고, 플랜지에 등분포의 응력을 재하하기 위하여, 거더의 양단에 모멘트하중을 재하하였다. 또한, 횡비틀림 좌굴을 방지하기 위하여 Fig. 1과 같이 거더의 복부판에는 일정간격으로 수평방향의 변위를 구속시켰 다. 이때 복부판의 횡지지 간격은 플랜지의 국부좌굴에 큰 영향을 미치므로 횡비틀림이 발생하지 않는 범위에서 플랜지의 좌굴강도를 적절히 평가할 수 있도록 유한요소 해석을 통하여 결정하였다.



Fig. 1. Load and boundary conditions (a) Boundary conditions (b) Uniform moment

3.2 수렴도 검증

전술한 바와 같이 복부판의 횡지지 간격은 플랜지 유 효좌굴길이에 영향을 미치므로 이에 대한 검토가 필요하 다. 본 연구에서는 복부판의 횡지지 간격에 대한 플랜지 국부좌굴의 수렴도를 검토하였다. 해석 모델은 플랜지의 폭 500mm, 복부판의 높이 1000mm, 복부판의 두께 10mm, 플랜지 두께는 10-20mm에 대하여 각 해석 모델 별 수렴도를 검토하였다.



Fig. 2. Elastic flange local buckling strength according to unbraced length

Fig. 2는 횡지지 간격(a)별, 플랜지 세장비별 탄성 좌 굴 해석 결과를 횡지지 간격으로 나타낸 결과이다. 해석 결과를 바탕으로 횡지지 간격과 복부판 높이의 비(a/H) 가 2.8일 때 수렴한 것으로 보고 매개변수 해석에 이용 하였다.



Fig. 3. Elastic flange local buckling strength according numbers of flange elements

Fig. 3은 플랜지의 폭방향 요소 수를 변수로 탄성좌굴 강도를 검토한 결과이다. 플랜지의 폭을 기준으로 16개 의 요소 수에서 플랜지 좌굴강도가 적절히 산정되는 것 으로 판단되어, 매개변수연구에서는 플랜지의 요소수 개 수를 16개로 정하였으며, 복부판도 플랜지와 같은 간격 을 갖도록 요소 크기를 결정하였다.

3.3 매개변수 해석

Fig. 4와 Table 1은 유한요소해석에 이용된 거더의 단 면과 단면 치수이다. 본 연구에서는 이정화 등[8]에서 검 토한 해석 단면을 이용하여 다양한 단면 조건을 반영하 여 해석을 수행하였다. 단면의 선정은 플랜지와 복부판 의 영향을 평가를 위하여 실용적인 단면을 포괄하는 넓 은 범위에 대하여 선정을 하였다. 플랜지의 세장비(λ_f) 범위는 7.5에서 50, 복부판의 세장비(λ_w) 범위는 20에서 200으로, 플랜지와 복부판이 조밀, 비조밀, 세장단면일 경우를 모두 검토할 수 있도록 다양한 단면을 선정하였 다. 또한, 해석 모델의 탄성계수는 강재의 탄성계수인 205,000MPa를 사용하였다.



Fig. 4. Cross section of FEA model[8]

Table 1. FEA models[8]

b _f (mm)	D _w (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	λ_{f}	λ_w
500	1000	5-33.3	5-50	7.5-50	20-200
		(18cases)	(7cases)	(18cases)	(7cases)

3.4 해석결과

3.4.1 플랜지 세장비에 따른 좌굴 강도

Fig. 5는 유한요소해석결과를 토대로 플랜지 세장비 와 복부판의 세장비에 따라 산정된 플랜지 좌굴강도를 나타낸다. 또한, 해석결과와 고정 및 힌지 지지된 플랜지 에 대한 이론 강도와 비교하였다.



Fig. 5. Comparisons elastic flange local buckling strength from FEA with theoretical strength of hinged and fixed flanges[8]

비교결과, 복부판의 세장비(λ_w)가 20으로 매우 조밀 한 경우에는 고정지지조건의 이론 강도(k=1.277일 때) 와 유사하게 평가되었으며, 복부판의 세장비가 커질수록 좌굴강도가 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 경 향은 좌굴모드에서 또한 확인할 수 있다. 복부판의 세장비가 80, 90, 100, 200으로 크고 플랜지 의 세장비가 20이하로 작은 경우에는 복부판 휨 좌굴이 지배적이며, 이에 따라 이론적인 플랜지 국부좌굴 강도 보다 작은 고유 값을 보이게 된다.

3.4.2 좌굴 모드



Fig. 6. Flange and web-bend buckling mode shapes (a) $\lambda_w = 100$, $\lambda_f = 25$ (b) $\lambda_w = 100$, $\lambda_f = 20$ (c) $\lambda_w = 100$, $\lambda_f = 12.5$ (d) $\lambda_w = 100$, $\lambda_f = 10$

Fig. 6은 플랜지와 복부판의 좌굴모드가 뚜렷이 나타
나는 대표적인 해석모델로써, λ_w가 100이고, λ_f는 10,
12.5, 20, 25인 경우에 대한 좌굴 모드를 나타낸다. 플랜

지의 세장비가 큰 경우인 Fig. 6(a)-(b)는 플랜지에서 큰 좌굴변형이 발생하였으나, Fig. 6(c)와 같이 플랜지의 세 장비가 작아지면서 복부판의 좌굴도 함께 발생하는 것을 알 수 있다. 플랜지의 세장비가 매우 작아지는 경우인 Fig. 6(d)는 복부판의 휨 좌굴이 지배적으로 발생함을 알 수 있다.

복부판의 세장비가 100으로 고정인 상태에서, 플랜지 의 세장비 변화에 따라 플랜지와 복부판의 좌굴모드가 달라지며, 플랜지와 세장비가 매우 작았을 때는 복부판 의 좌굴이 지배적이다. 이는 플랜지와 복부판이 상호적 으로 영향을 미치며, 각각의 세장비의 상대적인 차이가 좌굴모드에 기여함을 나타낸다.

3.5 해석결과에 의한 AISC(2010) 탄성좌굴 계수 평가

플랜지의 탄성좌굴에 대한 복부판의 영향을 고려하기 위하여, Fig. 5의 해석결과를 토대로 탄성좌굴계수를 검 토하였다. 탄성좌굴계수는 식(1)으로부터 식(7)과 같이 탄성좌굴계수에 대해 정리할 수 있다.

$$k_{FEA} = \frac{12(1-\mu^2)(b_f/2t_f)^2 F_{cr,FEA}}{\pi^2 E} \qquad (47)$$

본 연구에서는 유한요소해석결과를 바탕으로 식(7)로 부터 계산된 탄성좌굴계수를 AISC[2]의 식(6)에 의해 산정되는 설계탄성좌굴계수와 비교검토 하였다.

Fig. 7은 유한요소해석으로 산정된 플랜지 탄성좌굴 계수(k_{FEM})와 식(6)에 의해 계산된 탄성좌굴계수(k_c)를 고정 및 힌지지지조건에서의 이론 좌굴계수와 비교한 결 과이다.

해석결과, 복부판의 세장비가 작아질수록 좌굴계수가 크게 산정되었으며, 그 반대인 복부판의 세장비가 커질 수록 좌굴계수는 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 복부판 의 두께가 클수록, 고정지지조건에 근접하며, 그 반대인 경우인 복부판의 두께가 얇은 경우에는 힌지지지조건에 근접함을 의미한다. 이러한 경향은 해석결과와 AISC[2] 의 식(6)의 경향성이 유사하였다.

그러나, AISC[2]의 식(6)에 의해 계산된 탄성좌굴계 수와 비교한 결과, 플랜지의 세장비가 7.5인 경우와 복 부판의 휨 좌굴이 발생하여 이론 좌굴계수 0.425보다 작 게 산정된 경우를 제외하면, AISC[2] 식에 의한 좌굴계 수는 보수적으로 평가되고 있다. 또한, Fig. 7의 유한요 소해석 결과는 AISC[2]의 복부판의 영향을 고려하기 위 한 휨 강도 저감계수를 고려하지 않은 좌굴계수로써, 이 를 고려하게 되면 더욱 보수적으로 평가될 수 있으므로 좌굴계수 산정 방법에 대한 개선이 필요할 것으로 판단 된다.

또한, 복부판의 세장비만을 고려하고 있는 AISC[2]의 식(6)과는 달리, 해석결과에서는 플랜지의 세장비도 플 랜지 탄성좌굴계수에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 플랜지의 세장비가 증가할수록 고정 지지조건에 가까워 지며, 플랜지의 세장비가 감소할수록 힌지 조건에 근접 하였다. 이는 복부판에 의한 플랜지의 경계조건이 각 요 소(플랜지, 복부판)의 세장비에 영향을 받는 다는 것을 의미하며, 결과적으로 좌굴 모드에 영향을 미치게 된다. 이로써 AISC[2]의 식(6)으로 설계된 세장 플랜지는 보 수적으로 설계 될 수 있을 뿐만 아니라, 실제 복부판에 의한 플랜지의 경계조건의 특징을 정확히 고려할 수 없 음을 의미한다.



Fig. 7. Elastic flange local buckling coefficient according to web slenderness ratios

3.6 플랜지와 복부판의 세장비가 탄성좌굴강 도에 미치는 영향

앞서 언급한 바와 같이, 플랜지의 경계조건은 복부판 의 영향 뿐 아니라, 플랜지 자체의 영향을 받게 되며, 플 랜지와 복부판의 상호작용적인 영향을 받게 된다. 따라 서, 플랜지의 세장비에 따른 플랜지 탄성 국부좌굴 계수 에 대한 결과의 분석이 필요하다.



Fig. 8. Elastic flange local buckling coefficient according to flange slenderness ratios



Fig. 9. Elastic flange local buckling coefficient according to flange to web slenderness ratios (λ_f / λ_w)

Fig. 8은 플랜지의 세장비에 따라 탄성좌굴계수를 나 타낸 그래프이다. Fig. 7에서 볼 수 있는 것과 같이 플랜 지의 세장비가 증가할수록 고정지지조건(k=1.277)에 수 렴하며, 플랜지의 세장비가 감소할수록 힌지조건 (k=0.425)에 가까워지는 것을 알 수 있다. 또한 플랜지 의 세장비가 매우작은 경우(λ_f<23)와 복부판의 세장비 가 매우 큰 경우(λ_w>80)에서는 힌지조건의 탄성좌굴계 수보다 낮게 평가되었다.

Fig. 7과 Fig. 8을 종합적으로 고찰해보면, 플랜지 탄 성좌굴계수에 영향을 미치는 변수는 복부판의 세장비 뿐 아니라, 플랜지의 세장비도 함께 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 탄성좌굴계수의 산정방법에서 복부판의 영향만을 고려하고 있는 AISC[2]기준이 실제 탄성 좌굴 강도를 정확히 평가할 수 없음을 나타낸다.

본 연구에서는 플랜지와 복부판의 영향을 함께 고려 하기 위하여, 해석결과로부터 도출된 탄성좌굴계수를 플 랜지와 복부판의 세장비의 비 (λ_f/λ_w) 에 대하여 결과를 정리하였다. 이는 플랜지와 복부판의 세장비가 서로에게 영향을 미치는 Fig. 7과 Fig. 8의 해석결과와 좌굴모드에 서 알 수 있듯이, 플랜지와 복부판의 상대적인 세장비 차 이를 반영하기 위함이다.

Fig. 9는 해석결과에 의한 플랜지 탄성좌굴계수 (k_{FEM})을 플랜지와 복부판의 세장비비(λ_f/λ_w)에 따라 정리한 결과이다. 플랜지의 세장비 그리고 복부판의 세 장비에 대해서 각각 정리한 Fig. 7과 Fig. 8과는 달리, 세 장비비(λ_f/λ_w)에 따라 하나의 곡선으로 수렴되는 결과 가 나타났다. 이를 미루어 볼 때, 플랜지 탄성좌굴계수는 플랜지와 복부판의 상대적인 차이를 나타내는 세장비비 에 직접적인 연관이 있는 것으로 판단된다. 이는 플랜지 와 복부판의 상호작용을 나타내는 결과로 판단되며, 제 시된 플랜지와 복부판의 세장비의 비로써 지배적인 좌굴 모드와 좌굴강도를 간접적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

세장비비(λ_f/λ_w)가 약 1인 경우에는 복부판에 의하 여 고정지지조건인 상태에 가까웠고, 세장비비(λ_f/λ_w) 가 그 이하인 경우에는 점차 탄성좌굴계수가 감소하다가 약 세장비비(λ_f/λ_w)가 0.125에서 핀지지조건의 탄성좌 굴계수에 도달하였다. 그 이하의 세장비비에서는 복부판 의 휨 좌굴에 의하여 탄성좌굴계수가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 세장비비가 0.125보다 작은 경우에 대 하여 면밀한 분석을 위하여, 산출된 플랜지의 응력을 바 탕으로 복부판에 발생하는 응력을 추정하였다. 이를 복 부판 휨 좌굴에 대한 좌굴계수로 나타내어 복부판의 탄 성 휨 좌굴계수를 평가하였다.



Fig. 10. Elastic web-bend buckling coefficient according to flange to web slenderness ratios(λ_t/λ_w)

Fig. 10은 해석결과로 도출된 복부판의 응력을 바탕

으로 복부판의 휨 좌굴계수와 플랜지와 복부판의 세장비 비에 따라 정리한 결과이다. 세장비비가 0.15보다 작은 경우는 복부판 휨 좌굴계수가 고정지지조건(k=39.6)과 힌지조건(k=23.9)사이에 위치하게 되어 전형적인 복부 판의 휨 좌굴계수가 산정되었다.[9] 또한, 플랜지의 국부 좌굴이 발생되는 세장비비가 0.125임을 감안하면, 세장 비비 0.125에서 0.15에서는 플랜지와 복부판의 좌굴계 수가 동시에 산정되는 구간임을 알 수 있다.

따라서, 플랜지의 국부좌굴에서 플랜지와 복부판의 상호작용은 세장비비에 관계가 깊은 것으로 판단되며, 세장비비(λ_f/λ_w) 0.125를 기준으로 플랜지 국부좌굴이 발생하며, 0.15를 기준으로 복부판 좌굴 모드가 결정됨 을 알 수 있다. 세장비비 0.125에서 0.15구간에서는 플 랜지와 복부판의 상호작용의 영향이 매우 큰 구간임을 유추할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 수행하여, 플랜지 탄 성 국부 좌굴에 대한 플랜지와 복부판의 세장비의 영향 을 평가하였다. 또한, 이를 바탕으로 AISC[2] 설계기준 강도 및 탄성좌굴계수를 평가하였으며, 검토결과를 요약 하면 다음과 같다.

- 플랜지 탄성 국부 좌굴 강도는 복부판의 영향뿐 아니라, 플랜지 세장비 자체의 영향도 받는 것으로 나타났다. 복부판의 세장해질수록 힌지조건의 좌 굴계수(k=0.425)에 근접하였고, 복부판의 세장비 가 조밀해질수록 고정조건의 좌굴계수(k=1.277)에 근접하는 경향을 보였다. 뿐만 아니라 플랜지의 세 장비가 복부판에 비하여 상대적으로 조밀한 경우, 복부판의 휨 좌굴이 지배적일 수 있으므로, 플랜지 와 복부판의 상대적인 세장비의 차이가 좌굴 강도 에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 좌굴 모드를 검토한 결과, 플랜지의 세장비가 매우 조밀하여 복부판 휨 좌굴이 지배적인 일부모델을 제외하면, 압축플랜지의 플랜지 국부좌굴과 복부 판의 휨 좌굴은 동시에 발생하였다. 또한, 플랜지 와 복부판의 상호적인 영향이 좌굴모드에 영향을 미쳐 각각의 플랜지와 복부판의 세장비의 상대적 인 차이에 따라 좌굴 모드가 달라지는 경향을 보였다.

- 3. 유한요소해석에 의한 플랜지 탄성좌굴계수와 AISC[2] 설계 식에 의한 탄성좌굴계수를 비교한 결과, 복부판이 조밀해질수록 고정지지조건의 좌 굴계수에 수렴하고, 복부판이 세장해질수록 힌지 지지조건의 좌굴계수에 근접하여 복부판의 세장비 에 따라서 유사한 경향을 보였다. 다만, 해석결과 에서는 플랜지의 세장비도 탄성좌굴계수에 영향을 미치는 것으로 평가되었으나, AISC[2]설계 식은 플랜지의 영향을 고려하지 않고 있다. 이로 인하여 AISC[2]설계 식은 실제 거동이 반영된 탄성좌굴 계수를 정확히 반영하지 못하며, 플랜지 세장비가 22.5이상인 경우에는 AISC[2] 설계 식에 의한 탄 성좌굴강도는 전반적으로 매우 보수적으로 평가되 었다. 따라서, AISC[2]의 탄성좌굴계수 설계 식은 플랜지와 복부판의 영향을 고려할 수 있도록 개선 이 필요할 것으로 판단된다.
- 4. 플랜지와 복부판의 세장비비(λ_f/λ_w)는 플랜지 국 부좌굴과 복부판 휨좌굴에 대한 인자로 간주될 수 있다. 세장비비 0.125를 기점으로 세장비비가 큰 경우는 플랜지의 국부좌굴이 지배적으로 판단되 며, 세장비비가 0.15보다 작은 경우는 복부판의 휨 좌굴이 발생되었다. 또한, 세장비비가 0.125에서 0.15에서는 플랜지와 복부판의 상호작용의 영향이 매우 큰 구간임을 유추할 수 있었다.

References

- AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D. C., 2014.
- [2] AISC, Specification for structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, 2010.
- [3] Korean Ministry of Construction and Transportation, Standard Specifications for Highway Bridges, Korea, 2012.
- [4] C. H., Lee, K. H., Han, D. K., Kim, C. H., Park, J. H., Kim, S. E., Lee and T. H., Ha, Local Buckling and Inelastic Behavior of 800 MPa High-Strength Steel Beams, Journal of Korean Society of Steel Construction, vol. 24, no. 4, pp. 479-490, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2012.24.4.479
- [5] D. L., Johnson, An investigation into the interaction of flanges and webs in wide-flange shapes, in: Proceedings 1985 Annual Technical Session, 1985.
- [6] E. Y., Cho and D. K., Shin, 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, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2012.24.2.217

- [7] J. H., Kim, K. Y., Kim, J. H., Lee, K. S., Kim, Y. J., Kang, Flange Local Buckling(FLB) for Flexural Strength of Plate Girders with High Performance Steel(HSB 800), Journal of Korean Society of Steel Construction, KSSC, vol. 26, no. 2, pp. 91-103, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2014.26.2.091
- [8] J. H., Lee, K. S., Lee, J. N., Byun, Y. J., Kang, Characteristics of Elastic Flange Local Buckling of Doubly Symmetric I-girder subjected to bending moment, Conference of Korean Society for Advanced Composite Structures, 2016.
- [9] S. P. Timoshenko, J. M. Gere, Theory of Elastic Stability, Dover Publications, Inc, N.Y., 1961.

변 남 주(Nam-Joo Byun)

[준회원]

- 2007년 3월 : 고려대학교 건축사회 환경시스템공학과 (학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 (석박통합과정)

<관심분야> 비선형해석, 강교, 좌굴

이 정 화(Jeong-Hwa Lee)

[정회원]



- •2011년 8월 : 서울과학기술대학교 건설공학부 토목공학 (공학사)
- •2013년 8월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 (공학석사)
- •2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (박사과정)

<관심분야> 구조공학, 구조해석, 합성구조, 해양구조

이 기 세(Kee-Sei Lee)

[정회원]



<관심분야> 구조공학, 구조해석

- 2009년 8월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- •2015년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 (공학박사)
- •2015년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (연구교수)

강 영 종(Young-Joung Kang)

[정회원]

- 1979년 3월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학사)
- 1983년 3월 : 고려대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1987년 9월 : Auburn univ(공학박 사)
- 1983년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경 정교수

<관심분야> 비선형해석, 구조물건전도모니터링, 구조공학