

상부플랜지 연속 횡지지에 따른 초간편 H형강의 횡-비틀림 좌굴강도식 비교에 관한 연구

Equations for Calculating Lateral-Torsional Buckling Capacity of H-Beam with Continuous Lateral Top-Flange Bracing

박종섭* · 이선호** · 윤기용*** · 박정웅**** · 김상섭*****

Park, Jong Sup · Lee, Son Ho · Yoon, Ki Young · Park, Jeong Ung · Kim, Sang Seup

Abstract

Design equations for calculating the lateral-torsional buckling moment resistances of I-section beams with continuous lateral top-flange bracing subjected to several loading conditions are investigated based on elastic finite-element analyses. The equations presented in this study are compared with current moment gradient modifiers presented by other researchers and specifications. The equation suggested in the SSRC *Guides*(1998) has a good agreement with the results of finite-element analyses. The moment gradient correction factors proposed in the SSRC *Guides*(1998) should be easily used to calculate the lateral-torsional buckling moment resistance of I-beams with continuous lateral top-flange bracing.

1. 서 론

I형(또는 H형) 보(Beam)의 적용은 시공이 간편하고 유지관리비용이 저렴하여 빌딩 및 교량 구조물로 널리 사용되고 있다. I형 보를 적용한 교량의 일반적인 상부구조형식은 I형보가 설치된 후 콘크리트 슬래브를 타설하여 일체화를 실시하고 있다. 여러 개의 I형 보가 사용되는 다주형 교량의 경우 여러 개의 보를 설치하고 각각의 보는 가로보가 일정한 간격으로 설치되어 횡지지를 제공한다. 이 때, 가로보 설치간격은 시공 중 주형 보의 횡-비틀림 좌굴강도 산정을 위한 비지지 길이를 나타낸다. 슬래브가 타설된 후, 슬래브에 의해 연속적인 횡지지가 주형 보에 제공되면, I형 보의 횡-비틀림 좌굴 강도는 크게 증가된다.

균일 단면을 가지며 일정간격의 비지지 길이를 가지는 I형 보의 횡-비틀림 좌굴에 대한 해석적·이론적 연구는 많은 연구자에 의해 수행되었다 (Timoshenko and Gere, 1961; Trahair, 1993). 도로교 표준시방서-하중저항계수설계법(1996), AISC LRFD 시방서(2004)와 AASHTO LRFD 시방서(2004)등에서는 비지지 구간 내에 있는 보의 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 식을 제안하고 있으나, 연속 횡지지가 존재하는 경우 강도산정식은 제안하고 있지 못하다.

AISC LRFD 시방서(2004)는 이축대칭 단면을 가지는 I형 보의 횡-비틀림 좌굴강도를 다음의 식으로 계산하도록 제안하고 있다.

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} = C_b M_{ocr} \quad (1)$$

여기서 C_b =모멘트 구배 수정계수; L_b =비지지 지간 길이; E =탄성계수; I_y =y축에 대한 단면2차 모멘트; G =전단

* 정회원 · 상명대학교 토목환경공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: jonpark@smu.ac.kr - 발표자

** 정회원 · 석탑엔지니어링 기술연구소 이사 · 공학박사 E-mail: shlee@soltop.co.kr

*** 정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: kyyoon@sunmoon.ac.kr

**** 정회원 · 조선대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: jupark@mail.chosun.ac.kr

***** 정회원 · 한국기술교육대학교 건축공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: kimss@kut.ac.kr

탄성계수; J=비틀림 상수; C_w =뒹 상수이다. M_{ocr} 는 단순보에 순수 휨 하중만이 작용할 때 발생하는 횡-비틀림 좌굴모멘트이다. C_b 는 하중변화에 따른 좌굴강도 산정을 위해 사용되는 모멘트구배 수정계수이다.

AISC LRFD 시방서(2004)와 AASHTO LRFD 시방서(2004)는 비지지 지간 내 하중이 작용하는 보의 횡-비틀림 좌굴강도 산정을 위한 모멘트 구배 수정계수를 Kirby와 Nethercot (1979)의 연구결과를 토대로 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (2)$$

여기서 M_{max} =비지지 지간(L_b)내 발생 최대 모멘트; M_A, M_B, M_C = 비지지 지간내 $L_b/4, L_b/2, 3L_b/4$ 지점들의 모멘트이다. 사용되는 모든 모멘트 값들은 절대값이다. 식(2)은 비지지 지간 내에 이축대칭 단면에 하중이 중심에 작용할 때 유용한 식이다.

Helwig 등(1997)은 하중고 효과를 고려하여 단순지지된 I형 보의 간편한 모멘트 구배 수정계수식을 식(3)과 같이 제안하였다. 이 식은 기존에 제안된 하중고 효과를 고려한 모멘트 구배 수정계수식을 설계자들이 간편하게 사용할 수 있도록 유한요소해석 결과를 토대로 제안되었다.

$$C_b = 1.4^{2y/h} \left[\frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \right] \quad (3)$$

SSRC Guides(1998)는 비지지 길이 내 연속적인 횡지지가 존재하는 보의 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위해 식(4)의 모멘트구배 수정계수식을 제안하였다. Yura(1994)는 연속적인 회전지지가 상부플랜지에 존재하는 경우를 고려하여 식 (5)를 제안하였다. 하중은 상부플랜지에 작용되었으며, 식(4)의 M_0 과 M_1 은 양단의 모멘트이고, M_{CL} 은 경간 중앙에서의 모멘트이다. 식 (5)의 C_{cu} 와 C_{bb} 는 하중조건, β_T 는 유효회전강성, C_T 는 하중작용위치를 고려한 값으로 상부플랜지 하중작용인 경우 1.2를 사용한다.

$$C_b = 3.0 - \frac{2}{3} \left(\frac{M_1}{M_0} \right) + \frac{8}{3} \frac{M_{CL}}{(M_0 + M_1)} \quad (4)$$

$$M_{cr} = \sqrt{C_{cu} M_0^2 + \frac{C_{bb}^2 \beta_T EI_{eff}}{2C_T}} \quad (5)$$

Trahair(1993)는 회전강성이 매우 작은 보에 연속적인 횡방향 지지가 존재하는 경우를 고려하여 무차원 좌표를 토대로 다양한 그래프를 제안한 바 있다.

본 논문에서는 기존 연구를 토대로 하여 비지지 길이 내에 존재하는 I형보에 연속적인 상부플랜지 횡지지가 존재하는 경우의 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 최선의 방법을 찾고자 한다. 검토된 식들은 유한요소해석 프로그램을 통해 얻어진 값과 비교 분석되었다.

2. 유한요소해석 모델

유한요소해석 프로그램 ABAQUS(Version6.5)가 본 연구에 사용되었으며, ABAQUS의 S4R 셸(Shell)요소가 해석에 사용되었다. 하중은 상부플랜지에 작용되었고, 경계조건은 한쪽은 힌지, 다른 끝단은 롤러인 단순지지로 적용하였다. 단면의 플랜지와 복부판의 크기는 각각 $30.48\text{cm} \times 2.54\text{cm}$, $1.65\text{cm} \times 88.9\text{cm}$ 이며, 그림 1과 같이 q, M_0 , M_1 의 적용 하중에 변화를 주어 다양한 하중조건을 고려하였다. 그림 2는 해석결과로 얻어진 좌굴모드를 보여주고 있다.

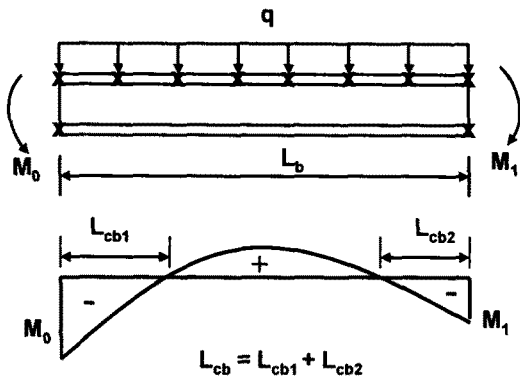


그림 1. 작용 하중

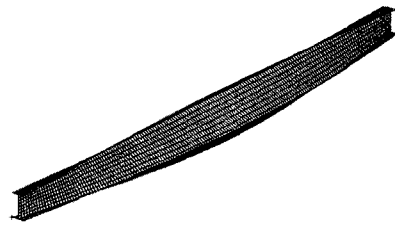


그림 2. 좌굴 모드

3. 유한요소해석 결과 및 설계식 비교

본 연구를 통해 검토된 식들은 탄성구간에 해당하는 I형보에 적용 가능하며, 연속적인 횡지지가 존재하는 I형 보를 위한 모멘트 구배계수식들의 적용성을 평가하였다. 표 1은 W36×230 단면과 31.7m 지간을 가지는 대상교량에 제안된 식들을 적용하여 얻어진 계산결과를 비교하고 있다. 작용된 하중은 등분포하중이 상부플랜지에 43.8 kN/m, 양쪽 끝단의 모멘트는 3315 kN-m이다.

표 1. 제안식의 결과와 유한요소해석 결과의 비교

대상교량	AISC-LRFD [식 (2)]	Helwig [식 (3)]	SSRC Guides [식 (4)]	Yura [식 (5)]	Trahair (1993)	유한요소 해석결과
W36×230, L _b =31.7m q=43.8kN/m M ₀ =M ₁ =3315kN-m	1682 kN-m	1207 kN-m	2835 kN-m	4137 kN-m	1180 kN-m	3210 kN-m
	52%	38%	88%	130%	37%	-

표 1에 비교 결과를 살펴보면 SSRC Guides(1998)에 의해 제안한 식 (4)가 유한요소해석을 통해 얻어진 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 그림 3은 다양한 단면과 하중 조건을 가지는 경우에 식 (4)를 적용한 결과와 유한요소해석결과를 전체 경간에 부모멘트를 가지는 구간비(L_{cb}/L_b)로 나타내고 있다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 식 (4)가 안전측으로 값을 보여주고 있으며, 설계에 적용 가능함을 알 수 있다.

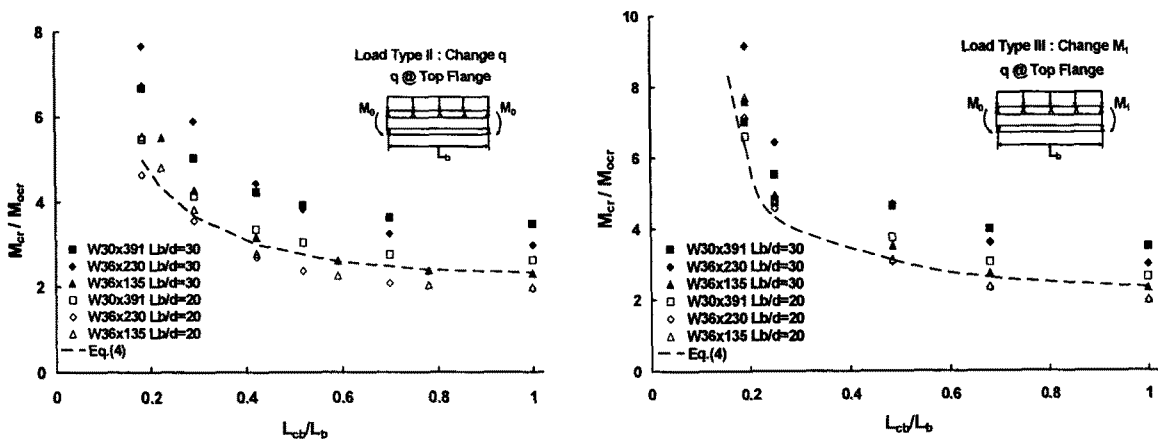


그림 3. 해석결과와 제안식과의 비교

4. 결 론

본 연구는 균일한 단면을 가지 보에 상부플랜지 연속 횡지지와 상부플랜지 하중을 받는 경우, 횡-비틀림 좌굴 저항모멘트를 산정하는 식들을 검토하였다. 검토된 식들은 연속경간을 가지는 교량에 발생 가능한 대부분의 하중 조건을 고려한 유한요소해석 결과와 비교·검토되었다. 본 연구를 통해 검토된 식들 중 SSRC Guides (1998)에 제안된 식이 저항모멘트 산정에 적합함을 알 수 있었다. 식(4)는 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 데 있어서 간편하고 합리적으로 설계에 적용할 수 있다. 그러므로 연속적인 횡방향 지지가 I형보의 상부플랜지에 제공되는 빌딩 및 교량의 경제적이고 합리적인 가로보 설계에 적극 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 건설핵심기술연구개발사업(자유공모)으로 선정된 “초간편 H형강 교량 개발(과제번호:06건설핵심 C01-79)” 연구의 일환으로 수행되었다. 본 연구를 위해 많은 지원과 협조를 아끼지 않는 한국건설교통기술평가원, 석탑엔지니어링, 상명대학교, 선문대학교, 조선대학교, 한국기술교육대에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 대한토목학회(1996) 도로교표준시방서-하중저항계수설계법. 대한토목학회.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2004) *LRFD Bridge Design Specifications*, 2nd Ed., Washington, D.C., USA.
3. American Institute of Steel Construction (AISC) (2004) *LRFD Specifications*, 2nd Edition, Chicago, Illinois. USA.
4. Kirby, P. A. and Nethercot, D. A. (1979) *Design for Structural Stability*, Wiley, New York, NY.
5. SSRC *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 5th Ed. (1998) John Wiley & Sons, Inc. New York, NY., USA.
6. Helwig, T. A., Frank, K. H., and Yura, J. A.(1997) "Lateral-Torsional Buckling of Singly Symmetric I-Beams." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 123(9), 1172-1179.
7. ABAQUS *Analysis User's Manual*, version 6.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA.
8. Timoshenko, S and Gere, J. Theory (1961) *Theory of Elastic Stability*, New York, McGraw-Hill.
9. Trahair, N. S. (1993) *Flexural-Torsional Buckling of Structures*, Boca Raton, Fla, CRC Press
10. Yura, J., Phillips, B., Raju, S., and Webb, S.(1992) *Bracing of Steel Beams in Bridges*, Research Report 1239-4F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, TX., USA.