

# 균일모멘트를 받는 초간편 일단 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도

박중섭\*, 김재홍\*, 김종민\*\*, 강영중\*\*

\*상명대학교 토목환경공학부

\*\*고려대학교 건축사회환경공학과

e-mail:jonpark@smu.ac.kr

## Inelastic Lateral-Torsional Buckling Strength of Simplified Singly Stepped I-Beam Subjected to Uniform Moment

Jong Sup Park\*, Jae Heung Kim\*, Jong Min Kim\*\*, Young Jong Kang\*\*

\*Dept of Civil & Environmental Engineering, Sangmyung University

\*\*Dept of Architectural & Civil & Environmental Engineering, Korea University

### 요 약

본 연구에서는 기존 연구를 토대로 하여 비탄성 구간에 있는 계단식 I형보의 횡-비틀림 좌굴강도를 범용구조해석 프로그램 ABAQUS(2006)를 이용하여 산정하고, 간편한 설계식을 제안하고 있다. 본 연구 결과는 다양한 형식의 I형보가 사용되는 빌딩 및 교량의 경제적이고 합리적인 설계의 근간을 제공해 줄 것이며, 향후 다양한 하중 조건을 가지는 양단 또는 일단 계단식 단면 변화보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 계산할 수 있는 설계식 개발에 적극 활용 될 수 있을 것이다.

### 1. 서 론

일반적으로 연속경간을 가지는 I형강 강합성 교량에 있어서 내부 지점부근에서 상대적으로 큰 부모멘트가 발생하게 되는데, 이에 경제적인 단면 활용을 위하여 변단면을 사용하고 있다. 특히, 내부 지점부위에서 계단형의 단면변화를 주거나, 내부보강재를 사용하는 것이 간편하고 경제적이다. 계단형 보는 플랜지에 플레이트를 추가로 설치하거나, 부재압연 시 플랜지의 두께 혹은 너비를 변화시켜 만들게 된다. 주로 단면의 휨 강성을 증진시키기 위하여 복부의 형상은 유지하되 플랜지의 두께와 너비를 증가시키는 형태로 제작된다.

보(Beam)의 휨강도를 고려하여 강교량을 설계하기 위해서는 항복강도, 국부좌굴강도, 횡-비틀림 좌굴강도를 검토하여야 한다. 대부분의 설계시방서에, 두 횡지지 사이에 놓이게 되는 보의 횡-비틀림 좌굴강도 산정시 균일단면으로 고려하여 계산하고 있다. 즉, 브레이싱 등의 횡지지 부재 사이에 계단식 단면변화를 가지는 보가 설치되더라도 비지지 길이

내의 작은 단면이 전체에 설치된 것으로 추정하여 안전측으로 횡-비틀림 좌굴 강도를 계산하고 있는 실정이다.

미국의 AISC-LRFD 시방서(2004)는 I형보의 횡-비틀림 좌굴 강도 계산시 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;  $G$ =전단탄성계수;  $J$ =비틀림 상수;  $C_w$ =뒹 상수이다.  $M_{ocr}$ 는 단순보가 균일모멘트를 받을 때 발생하는 횡-비틀림 좌굴모멘트이다.  $C_b$ 는 하중변화에 따른 좌굴강도 산정을 위해 사용되는 모멘트구배 수정계수로서, 균일모멘트를 받을 때 1의 값을 가진다.

Park 등(2003, 2006)은 유한요소해석을 통해 균일모멘트가 작용하는 계단식 I형보의 탄성 횡-비틀림 좌굴강도 설계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$M_{ost} = C_{st} M_{ocr} = [1 + 6\alpha^2 (\beta\gamma^{1.3} - 1)] M_{ocr} \quad (2)$$

여기서  $M_{ocr}$ 은 식 (1)과 같고,  $C_{st}$ 는 제안된 스텝보 상수로서 단면 스텝보 상수인  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 함수로 표현하였다. 식 (2)는 보의 횡 비지지 길이가 탄성거동을 유발하는 경우에 적극 활용될 수 있다.

본 연구에서는 미국의 AISC-LRFD 시방서(2004)의 설계 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 계산식과 기존 계단식 단면 변화보의 연구결과를 토대로 하여 비탄성 구간에서 한쪽 면에 계단식 단면변화를 가지는 I형보의 횡-비틀림 좌굴강도를 유한요소해석 프로그램을 통하여 산정하고, 실무에서 손쉽게 적용 가능한 간편 설계식을 개발·제안하고자 한다.

### 2. 유한요소 해석모델

범용구조해석프로그램 ABAQUS(6.6-1)의 S4R(4절점 쉘요소)가 해석에 사용되었다. 단면은 국내·외에서 많이 사용되는 I형강 W36×160 단면을 대상으로 하였으며 단면 치수 및 제원은 그림 1 및 표 1과 같다. 한쪽 끝단에 계단식 단면을 가지는 보에 대해서 고려하였고, 플랜지 길이방향 비를  $\alpha$ , 너비방향 비를  $\beta$ , 두께의 비를  $\gamma$ 로 정의하였다. 계단식 I형보의 평면도 및 정면도는 그림 2와 3과 같다.

해석에 사용된 매개변수는 표 2와 같이 총 36개의 경우에 대하여 범위를 산정하였고, 하중은 보에 균일모멘트가 작용하게 적용시켰으며, 비지지 길이 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 5개의 길이에 대하여 구조해석을 수행하여 총 180개 부재의 구조해석을 수행하였다.

균일모멘트를 받는 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위하여 3차원 범용구조해석프로그램 ABAQUS(6.6-1)가 사용되었으며, 4절점 쉘요소인 S4R요소가 해석에 이용되었다.

표 1. 부재 제원

탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	단면 2차 모멘트 (약축, m <sup>4</sup> )	비틀림 상수 (m <sup>4</sup> )	뒹 상수 (m <sup>6</sup> )
210	80.77	1.20×10 <sup>-4</sup>	4.663×10 <sup>-6</sup>	2.368×10 <sup>-5</sup>

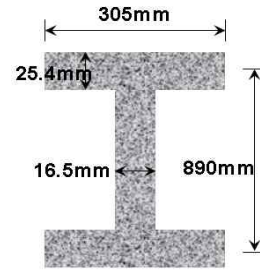


그림 1. 해석에 사용된 단면형상

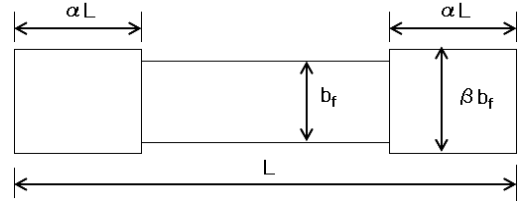


그림 2. 계단식 I형보 평면도

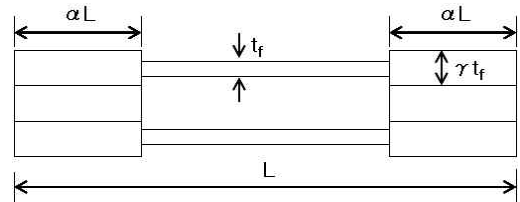


그림 3. 계단식 I형보 정면도

표 2. 일단 스텝보의 매개변수 해석 범위

길이 방향( $\alpha$ )	너비 방향( $\beta$ )	두께의 비( $\gamma$ )
0.167	1.0	1.2; 1.4; 1.8
0.167	1.2	1.0; 1.4; 1.8
0.167	1.4	1.0; 1.4; 1.8
0.250	1.0	1.2; 1.4; 1.8
0.250	1.2	1.0; 1.4; 1.8
0.250	1.4	1.0; 1.4; 1.8
0.333	1.0	1.2; 1.4; 1.8
0.333	1.2	1.0; 1.4; 1.8
0.333	1.4	1.0; 1.4; 1.8
0.500	1.0	1.2; 1.4; 1.8
0.500	1.2	1.0; 1.4; 1.8
0.500	1.4	1.0; 1.4; 1.8

비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위한 비선형해석 수행을 위해, 단면내 잔류응력과 부재의 초기결함 및 재료비선형성을 고려하였다. 잔류응력은 그림 4에 나타낸 바와 같이 Pi(1995)등이 고려한 단순화된 형태의 분포로 가정하여 범용구조해석 프로그램 ABAQUS의 초기응력(Initial Stress) 옵션으로 고려하였다. 부재의 초기결함은 국내 I형강 표준 치수 허용치(현대제철, 2006)에 근거하여 부재 길

이의 0.1%를 초기 최대 횡 변위로 적용하여 초기제 작오차로 고려하였으며, 해석에 사용된 재료는 그림 5와 같이 응력-변형률 곡선이 탄소성(Elasto-plastic) 형태를 갖는 재료를 사용하였다. 탄성계수는 210GPa, 항복응력은 280MPa 이다.

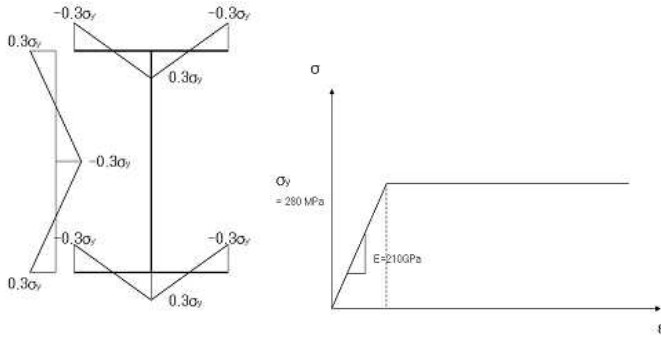


그림 4. 잔류 응력 패턴

그림 5. 응력-변형률 곡선

AISC-LRFD 시방서(2004)에 따라 본 유한요소해 석에 사용된 단면의  $L_p$ 와  $L_r$  및  $M_p$ 와  $M_r$ 을 계산하 여, 그림 6에 단면의 휨-내하력 곡선을 나타내었다. 그림 6의 휨-내하력 곡선은 본 연구에 사용된 계단 식 단면 변화보의 단면 중 작은 단면이 보 전체 비 지지 길이내 균일 단면으로 설치되었을 때를 고려한 경우이다. 그림 6에서  $L_p=3.075m$ ,  $L_r=8.648m$ 이며, 이 때의 공칭모멘트는 각각  $M_p= 2895 kN-m$ ,  $M_r= 1875 kN-m$ 로 계산되었다. 산정된  $L_p$ 와  $L_r$  에 근거 하여 유한요소해석 모델의 비지지 길이는  $L_b=4m$ ,  $5m$ ,  $6m$ ,  $7m$ ,  $8m$ 로 결정하였다. 그림 6의 비탄성 구간은 AISC-LRFD 시방서(2004)에 근거하여 소성구 간, 탄성구간의 점을 단순 직선으로 연결하여 나타 내었으며 이때의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도와 본 유한요소해석 프로그램을 이용한 결과값을 표 3에 나타내었다. 두 값의 비교결과, 유한요소해석값이 5% 오차범위내에서 AISC-LRFD 시방서(2004) 제안 값보다 대체적으로 큰 값을 나타내었다. 이는 휨-내 하력 곡선에서 비탄성구간을 선형으로 나타낸 것으 로 인해 발생한 오차이다.

### 3. 해석 결과 및 설계 제안식

본 연구를 통해 제안된 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 강도 설계식은 다음과 같다.

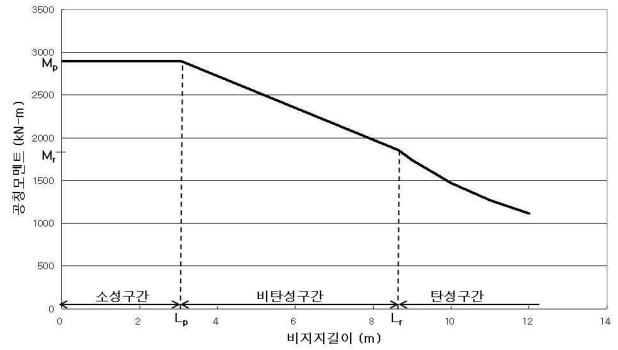


그림 6. 해석에 사용된 단면의 휨-내하력 곡선

표 3. AISC값과 해석결과 비교

비지지 길이	휨내하력 곡선(AISC) (kN-m)	ABAQUS 해석결과 (kN-m)	오차 (%)
4m	2726.	2974	+2.5
5m	2543.	2638	+3.7
6m	2360	2480	+5.1
7m	2177	2243	+3.4
8m	1994	2031	+1.9

$$M_{ist} = C_{ist} M_{icr} \tag{3}$$

$$C_{ist} = 1 + 0.7\alpha^2(\beta\gamma^{1.05} - 1) \tag{4}$$

(3)에서  $M_{ist}$ 는 균일모멘트를 받는 일단 계단식 단면 변화보의 임계 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 이다.  $M_{icr}$ 은 보 전체 길이에 따라 작은 단면의 균 일단면이 사용된 보의 비탄성 휨-비틀림 좌굴강 도이며,  $M_{icr}$ 은 그림 6의 AISC-LRFD 시방서 (2004)의 휨-내하력 곡선을 통해 산정되었다. 식 (4)의  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 그림 2과 3에 정의된 계수이다.

그림 7은 각각 비지지 길이( $L_b$ ) 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 일 때 유한요소해석 결과와 제안된 식과 의 비교를 나타낸 것으로, 식 (4)의  $C_{ist}$ 는 실선으 로 표시하였고 유한요소해석 결과값은 점으로 표 시하였다.

일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 식은  $\alpha^2(\beta\gamma^{1.05})$ 와 선형성을 보이고 있다. 제안된 식과 유 한요소해석 결과값 비교 중 가장 안전측으로 나타난 경우는  $L_b=6m$ ,  $\alpha=0.500$ ,  $\beta=1.4$ ,  $\gamma=1.8$  일 때로 이때 의 오차는 5.5% 로 나타났다.

4. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 균일모멘트를 받는 일단 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 저항모멘트를 산정하는 새로운 설계식을 제안하였다. 향후 다양한 하중조건을 가지는 일단 계단식 단면 변화보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 계산할 수 있는 설계식을 개발, 제안할 예정이다. 본 연구 결과는 다양한 형식의 I형보가 사용되는 빌딩 및 교량의 경제적이고 합리적인 설계에 크게 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 건설핵심기술연구개발사업(자유공모)으로 선정된 “초간편 H형강 교량 개발(과제번호:06건설핵심 C17)” 연구의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

[1] 박종섭, Stallings, J.M., 강영중 (2006) "계단식 단면 변화보의 모멘트구배 수정 계수식 개발을 통한 횡-비틀림 좌굴 강도 산정", 대한토목학회 2006년도 정기 학술대회 논문집, pp. 17~20

[2] 현대제철, Korea Standard 치수 허용차

[3] ABAQUS (2006) *Standard User's Manual*, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Vols. 1, 2 and 3, Version 6.6.

[4] American Institute of Steel Construction (AISC) (2004) *LRFD Specifications*, 2nd Edition, Chicago, Illinois.

[5] Park, J.S. and Stallings, J.M. (2003) "Lateral-Torsional Buckling of Stepped Beams", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, pp. 1457-1465.

[6] Pi, Y.L. and Trahair, N.S. (1995) "Inelastic Torsion of Steel I-Beams", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, pp. 609-620.

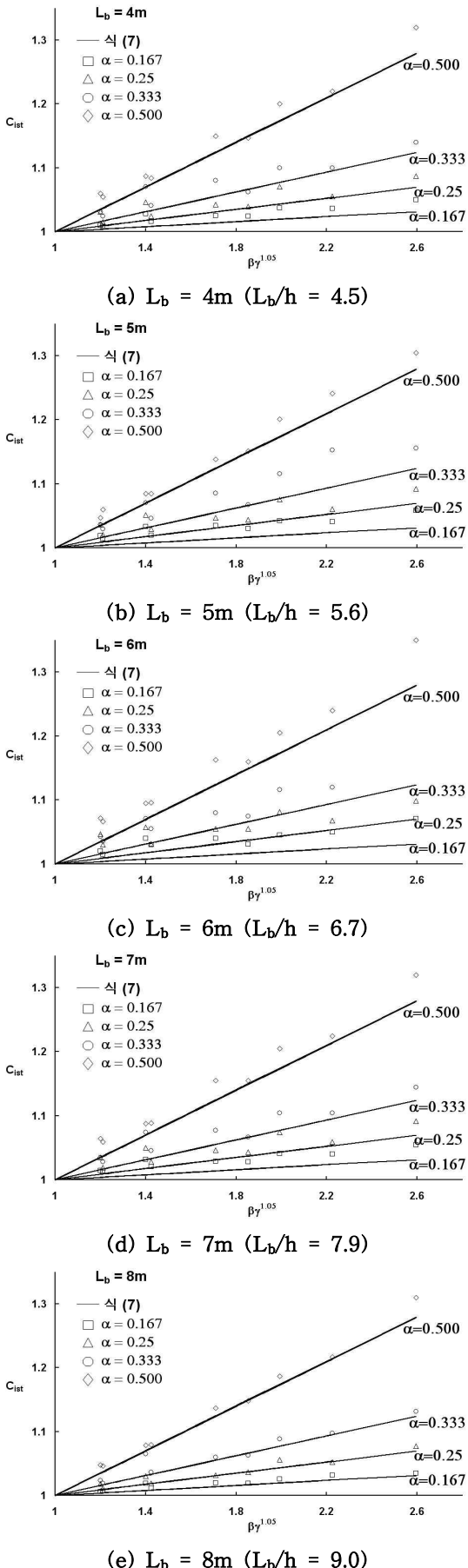


그림 7. 일단 스텝보의 유한요소해석결과와 제안식 비교