

균일모멘트가 작용하는 일축대칭 I형 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴에 관한 해석적 연구

박이슬¹, 박종섭^{1*}

¹상명대학교 공과대학 건설시스템공학과

A Numerical Study on Inelastic lateral Torsional Buckling Strength of Doubly Stepped and Singly Symmetric I-Beam Subjected to Uniform Moment

Yi Seul Park¹ and Jong Sup Park^{1*}

¹Department of Civil Engineering, College of Engineering, Sangmyung University

요 약 연속경간을 가지는 I형강 교량은 내부 지점 부근에 상대적으로 큰 부모멘트가 발생하게 된다. 따라서 경제적인 단면 활용을 위하여 내부지점부위의 상부 및 하부 플랜지에 플레이트를 보강한 변단면을 사용하고 있다. 본 논문에서는 기존 탄성 횡-비틀림 좌굴식에 관한 연구를 토대로 하여 비탄성 구간에 있는 일축대칭 I형 양단 스텝보의 횡-비틀림 좌굴강도 해석을 실시하였다. 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS가 사용되었으며, 회귀분석프로그램을 활용하여 간편 설계식을 제안하였다. 양단 스텝보에 순수휨이 작용할 때를 고려하였으며, 비선형 해석을 위해 잔류응력 및 초기변형을 고려하였다. 본 연구를 통하여 개발·제안된 식은 일축대칭 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도에 널리 사용될 수 있으며 유사연구에 크게 기여할 것이다.

Abstract The cross-sections of continuous multi-span beams are sometimes suddenly increased or stepped at the interior supports of continuous beams to resist high negative moments. This paper investigates inelastic lateral-torsional buckling of monosymmetric stepped I-beams subjected to pure bending. A three-dimensional finite-element program ABAQUS and a regression program were used to analytically develop new design equation. The flange thickness ratio, flange width ratio and stepped length ratio were considered as parameters of this study. The combined effects of residual stresses and geometric imperfection on inelastic lateral-torsional buckling of beams are considered. The proposed solution can be easily used to calculation for inelastic lateral torsional buckling strengths of monosymmetric beams with doubly stepped cross sections and to develop new design equations for inelastic lateral-torsional buckling resistances of stepped beams.

Key Words : Beam design, Doubly stepped beam, Inelastic buckling, Monosymmetric beam

1. 서 론

최근 변단면 거더의 경제성을 고려하여 장경간 거더 교량과 강골조 구조물에 변단면보의 사용이 증가하고 있으며, 고강도강의 등장으로 인해 변단면보의 정확한 좌굴 강도의 평가가 매우 중요시 되고 있다. 특히 연속경간을

가지는 I형강 교량은 내부 지점 부근에 상대적으로 큰 부 모멘트가 발생하므로 경제적인 단면 활용을 위하여 하중 의 분배에 따라 스텝보(Stepped Beam)를 적용하거나 내 부보강재를 사용하여 휨강도를 증가시킨다.

국내외 대부분의 설계기준에서는 횡 비지지 길이 사이 에 놓이게 되는 변단면 보의 횡-비틀림 좌굴강도 산정 시

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012-0007769).

*Corresponding Author : Jong Sup Park(Sangmyung Univ.)

Tel: +82-41-550-5314 email: jonpark@smu.ac.kr

Received April 2, 2013

Revised May 6, 2013

Accepted July 11, 2013

변단면 중 작은 단면이 전체 비지지 길이에 균일단면으로 작용한다고 가정하여 안전측으로 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하고 있다.

미국의 AISC-LRFD 설계기준[1]은 I형보의 탄성 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 길이, E =탄성계수, I_y = y 축에 대한 단면 2차 모멘트, G =전단 탄성계수, J =비틀림 상수, C_w =휨 상수이다. M_{ocr} 은 단 순지지된 보가 균일모멘트를 받을 때 발생하는 횡-비틀림 좌굴모멘트(Timoshenko 와 Gere[2])이다. C_b 는 하중 변화에 따른 좌굴강도 산정을 위해 사용되는 모멘트 구배 수정계수로 식 (2)와 같이 나타난다.

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3.0 \quad (2)$$

여기서 $R_m = 0.5 + 2\left(\frac{I_{yc}}{I_y}\right)^2$ 로 일축대칭 매개변수이며, I_{yc} = y 축에 대한 압축플랜지의 단면 2차 모멘트, I_y = y 축에 대한 단면 2차 모멘트이다. 일축대칭 단면을 가질 경우의 $R_m=1$ 이다. M_{max} , M_A , M_B , M_C 는 각각 비지지 길이 부분의 최대모멘트, 1/4지점, 1/2지점, 3/4지점의 모멘트 값으로 절대값을 적용한다.

Park과 Stallings[3]은 균일모멘트가 작용하는 I형 스텝보의 탄성 횡-비틀림 좌굴강도 설계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$M_{ost} = C_{st} M_{ocr} = [1 + 6\alpha^2 (\beta\gamma^{1.3} - 1)] M_{ocr} \quad (3)$$

여기서 M_{ocr} 은 식 (1)과 같고, C_{st} 는 새롭게 제안된 스텝보 상수로서 단면 스텝보 상수인 α , β , γ 의 함수로 표현하였다. 식 (3)은 보의 횡 비지지 길이가 탄성거동을 유발하는 경우에 적극 활용될 수 있다.

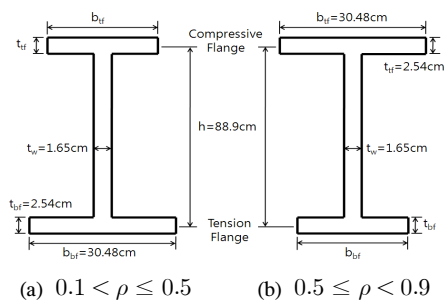
본 연구에서는 미국의 AISC-LRFD 설계기준[1]의 제안식과 기존 계단식 단면 변화보의 연구결과를 토대로 비지지 길이 내 양쪽 끝단에 계단식 단면 변화를 갖는 일축대칭 스텝보의 비탄성 횡비틀림 좌굴강도를 산정할 수 있는 간편 설계식을 제안하고자 한다. 제안식은 순수 휨

하중이 작용할 때를 기준으로 개발되었으며, 유한요소해석결과 분석을 통하여 일축대칭도($\rho = I_{yc}/I_y$)별로 간편 설계식을 제안하였다.

2. 유한요소해석 모델링

균일모멘트를 받는 일축대칭 I형 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위하여 범용구조해석프로그램인 ABAQUS[4]가 사용되었으며, 4절점 쉘요소인 S4R 요소가 해석에 이용되었다.

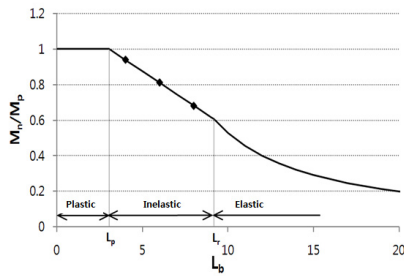
유한요소해석을 실시하기에 앞서 국내·외에서 많이 사용되는 I형강 중 대표적인 단면을 선정하였으며, Fig. 1은 본 연구에 사용된 대표적인 일축대칭 I형 부재의 기준단면 치수를 나타내고 있다.



[Fig. 1] Typical cross section for analysis

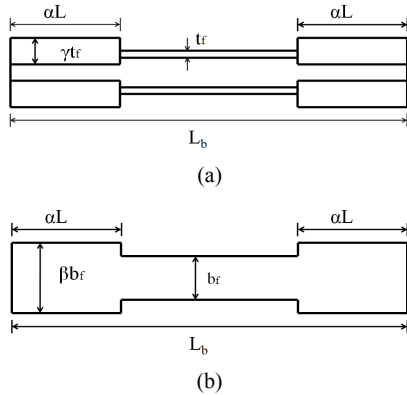
Fig. 1에 나타난 바와 같이 본 연구에 검토된 일축대칭 단면의 범위는 $0.1 \leq \rho \leq 0.9$ 로서 0.2의 간격으로 고려하였으며, ρ 와 $1-\rho$ 인 단면은 상부 플랜지와 하부 플랜지의 폭이 서로 뒤바뀐 경우이다. 일축 대칭 I형 보의 일축대칭도(ρ)는 0.5이다.

Fig. 2는 AISC-LRFD 설계기준[1]에 근거하여 본 해석 단면의 비지지 길이에 따른 휨강도 변화 그래프를 나타내고 있다. 수평축은 비지지 길이(L_b , m), 수직축은 소성 모멘트(M_p , kN-m)를 공칭모멘트(M_n , kN-m)로 나눈 값을 나타내고 있다. 비교 해석에 사용된 모델의 비지지 길이는 비탄성 구간($L_p < L_b < L_r$)내에 존재하는 ① $L_b = 4m(L_b/h=4.5)$ ② $L_b = 6m(L_b/h=6.75)$ ③ $L_b = 8m(L_b/h=9)$ 의 세 가지 해석모델이 검토되었으며, Fig. 2와 같이 모델링 및 해석결과는 AISC-LRFD 설계기준[1]과는 잘 일치하고 있다.



[Fig. 2] Flexural strength-unbraced length curve

해석 모델은 Fig. 3과 같이 양쪽 끝단에 계단식 단면 변화를 가지는 양단 스텝보(DSB, Doubly stepped beam)가 고려되었으며, 플랜지의 길이방향비 α , 플랜지 너비방향비 β , 플랜지 두께의 비 γ 의 스텝보 계수가 Fig. 3에 정의되었다. Table 1은 양단 스텝보의 매개변수 해석범위를 나타내고 있다. 3가지 비지지 길이 변수에 따라 5가지 일축대칭도(ρ)가 해석에 적용되었으며, 스텝보 계수(α , β , γ) 27가지 조합을 고려하여 총 405개의 모델에 대하여 유한요소해석이 수행되었다.

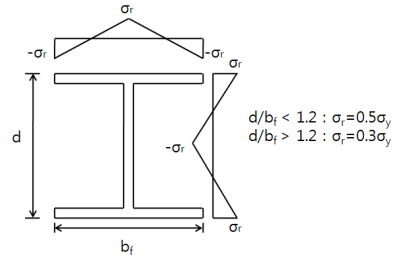


[Fig. 3] Analytical Model : (a)Elevation (b)Plan view

[Table 1] Analytical Parameter for DSB

ρ	α	β	γ
0.1	0.167	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8
0.3	0.25	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
0.5	0.25	1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8
0.7	0.25	1.4	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8
0.9	0.333	1	1.2; 1.4; 1.8
		1.2	1; 1.4; 1.8
		1.4	1; 1.4; 1.8

비탄성 비선형 휨강도를 산정하기 위한 유한요소해석을 위해 단면 내 잔류응력과 부재의 초기결함 및 재료비선형성을 고려하였다. 잔류응력은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 Pi & Trahair[3]가 고려한 단순 삼각형 분포로 가정하였고, 응력-변형률 곡선은 탄소성(Elasto-plastic) 형태를 갖는 재료를 사용하였으며 탄성계수는 210GPa, 항복응력은 280MPa이다.



[Fig. 4] Residual stress distribution

초기제작 오차는 잔류응력과 함께 보 또는 기둥의 좌굴 강도에 주요 원인이 되며, 비선형 해석 시 잔류응력에 의한 영향보다는 초기변형에 의한 영향이 좌굴 강도에 보다 큰 영향을 미친다(Chang et. al.[6]). 현대제철[7]의 H형강 치수 허용치에 따르면 플랜지의 높이가 180mm이하일 경우 길이의 0.3%, 180mm와 360mm 사이이면 길이의 0.15%, 360mm 초과일 경우는 길이의 0.1%를 허용 최대 횡 변위로 적용하고 있다. 본 연구에서는 양단 스텝보 일축대칭 I형 단면의 초기변형 영향을 고려하고자 설계식 개발에 앞서서 초기 변형도에 따른 스텝보의 좌굴강도 변화 정도를 검토하였고, 간편 설계식 개발에는 현대제철 치수 허용치를 적용한 길이의 0.1%를 최대 횡 변위로 적용하였다.

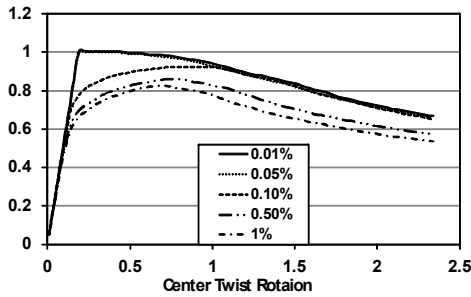
3. 유한요소해석 결과

3.1 초기 변형도에 따른 좌굴강도

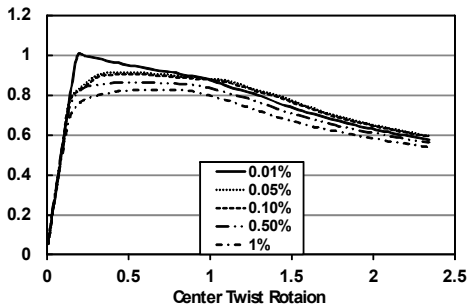
양단 스텝보 단면변화가 비지지 길이 내에 존재하는 일축대칭 I형강의 휨강도 변화를 초기 변형도에 따라 정량적으로 분석하였다. 비지지 길이(L_b)의 0%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%로 초기 횡 변형을 적용하고, 기준단면은 W36×160, 스텝보 계수는 대상모델의 중간값에 해당하는 $\alpha=0.25$, $\beta=1.2$, $\gamma=1.4$ 를 적용하였다.

Fig. 5는 3가지 비지지 길이를 가지는 모델에서 최대의 좌굴거동 변위를 나타내는 지간 중간의 상부 플랜지에서 얻어진 결과를 나타낸 것으로 수평축은 하중재하에

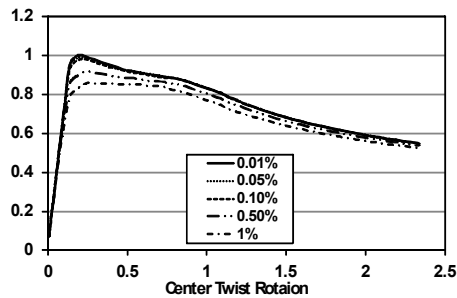
따른 회전변위를 나타내고, 수직축은 횡변위 0.01%의 결과를 기준으로 비교한 그래프이다.



(a) $L_b=4m(L_b/h=4.5)$



(b) $L_b=6m(L_b/h=6.75)$



(c) $L_b=8m(L_b/h=9)$

[Fig. 5] Strength Comparisons Based on Initial Imperfections

초기 횡변위가 비지지 길이의 0%가 적용된 경우에는 좌굴모드에 의한 극한강도가 나타나지 않았다. Fig.5(a)를 자세히 살펴보면 초기변형이 0.01%가 적용된 경우 탄소성 재료특성과 유사하게 극한강도 도달 전까지 직선의 관계를 보이고 있으며, 초기변형 0.05% 적용부터 비선형 거동 구간을 확연하게 나타내고 있다. Fig.5(c)를 살펴보면 초기변형이 0.01%, 0.05%, 0.1%가 적용된 경우 서로 큰 차이를 보이지 않고 유사한 크기의 극한강도를 보이고 있으며, 초기변형 0.5% 적용시부터 극한강도가 상대적으로 감소됨을 알 수 있다. 즉 비지지길이가 길어져 탄

성구간 횡비틀림 좌굴이 지배적인 구간에 근접할수록 초기 횡변위가 크지 않을 경우 강도에 크게 기여하지 않음을 Fig.5(c)로 확인할 수 있다.

[Table 2] Comparisons of flexural strength according to Initial Imperfection

Initial Imperfection (%)	M_n (kN-m)	Cf	M_n (kN-m)	Cf	M_n (kN-m)	Cf
0.01	2352	1	2265	1	1792	1
0.05	2352	1	2066	0.91	1767	0.99
0.1	2166	0.92	2053	0.90	1754	0.98
0.5	2016	0.86	1954	0.86	1643	0.92
1.0	1942	0.83	1866	0.82	1530	0.85
L_b/h	4.5		6		8	

Table 2는 해석을 통해 얻어진 공칭강도와 비교값을 나타내고 있다. 초기변형이 0.01% 적용된 경우 Bifurcation Buckling과 유사한 거동을 보여 비선형 거동이 약하게 나타났으며, 초기변형 0.05% 이상 적용된 경우 비선형 거동특성을 명확히 보이며, 초기변형이 커질수록 강도가 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2 좌굴강도 설계식 제안

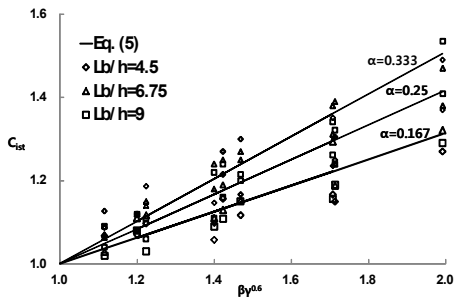
범용구조해석프로그램인 ABAQUS[4]을 통하여 얻어진 유한요소해석결과를 회귀분석프로그램인 MINITAB[8]을 이용하여 균일모멘트를 받는 단순지지된 일축대칭 I형 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 설계식을 일축대칭도(ρ)를 고려하여 개발 제안하였다.

$$M_{ist}^m = C_{ist}^m M_{icr}^m \quad (4)$$

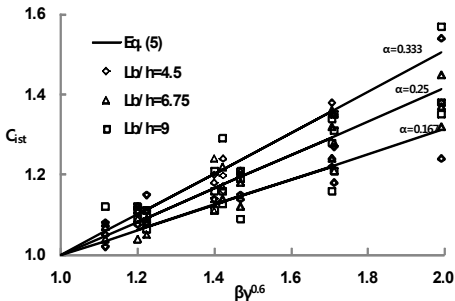
$$C_{ist}^m = 1 + 1.1\alpha^{0.7}(\beta\gamma^{0.6} - 1) \quad \text{for } \rho=0.1, 0.9 \quad (5)$$

$$C_{ist}^m = 1 + 0.8\alpha^{0.7}(\beta\gamma^{0.7} - 1) \quad \text{for } \rho=0.3, 0.7 \quad (6)$$

여기서, M_{ist}^m =균일모멘트를 받는 일축대칭 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도, M_{icr}^m =보 전체 비지지 길이에 균일단면으로 적용된 보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도로 AISC-LRFD 설계기준[1]에 따라 비탄성 구간내 횡비틀림 좌굴강도 산정 비례식과 식(2)를 적용하여 계산된다. $\alpha, \beta, \gamma, \rho$ 는 Fig.3과 Table 1에 나타난 바와 같이 스텝보 계수와 일축대칭도이다.



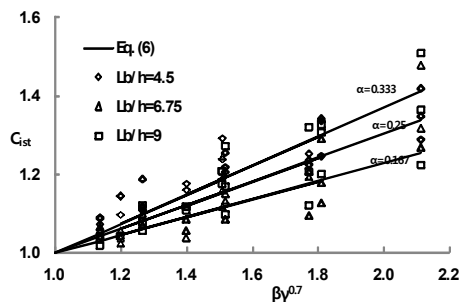
(a) $\rho = 0.1$



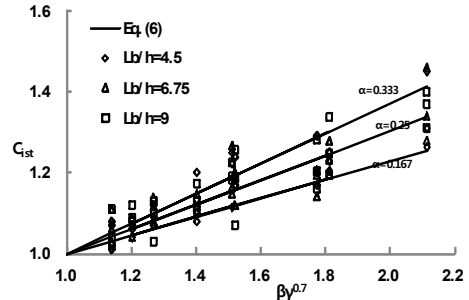
(b) $\rho = 0.9$

[Fig. 6] Comparisons between FEM and proposed equation ($\rho=0.1, 0.9$)

Fig. 6(a)와 6(b)는 비탄성 구간내 세 가지의 비지지 길이 즉 $4m(L_b/h=4.5)$, $6m(L_b/h=6.75)$, $8m(L_b/h=9)$ 가 적용되고 일축대칭도(ρ)가 0.1와 0.9일 때를 고려하여 개발한 제안식과 유한요소해석결과를 비교한 그래프이다. 그래프의 실선은 식 (5)의 C_{ist}^m 을 나타내며, 점들은 유한요소해석 결과를 나타낸다. 일축대칭도(ρ)가 0.1일 때 해석결과와 식 (5)을 비교한 Fig.6(a)로부터 비교의 범위가 -7.21%~6.51%의 분포를 나타내고 있음을 확인하였다. 일축대칭도(ρ)가 0.9일 때 식 (6)과 유한요소해석결과를 비교는 Fig.6(b)에 나타내었으며, -5.66%~6.27%의 차이로 분포되었다.



(a) $\rho = 0.3$



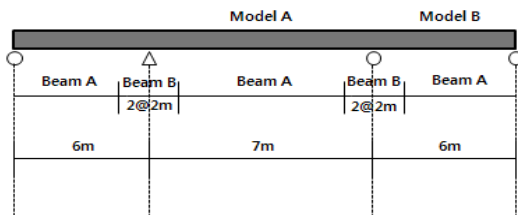
(b) $\rho = 0.7$

[Fig. 7] Comparisons between FEM and proposed equation ($\rho=0.3, 0.7$)

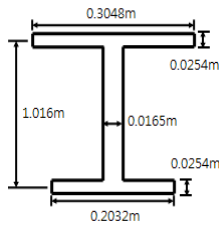
Fig.7(a)와 7(b)는 각각 비지지 길이 $4m(L_b/h=4.5)$, $6m(L_b/h=6.75)$, $8m(L_b/h=9)$ 일 때 양단 스텝보의 ρ 가 0.3, 0.7인 경우의 유한요소해석결과와 식 (6)을 비교한 그림이다. 실선은 식 (6)의 C_{ist}^m 을 나타내며, 점들은 유한요소해석 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 -7.07%~8.85%의 차이로 분포하고 있으며, 그림 7(b)는 ρ 가 0.7이 적용된 경우로서 식 (6)과 유한요소해석결과를 비교한 결과 -7.05%~6.63%의 차이를 보이고 있다. Fig. 6과 Fig. 7의 비교 그래프와 정량적 비교분포도 분석을 통하여 제안식이 유한요소해석결과를 잘 반영하여 개발되었음을 알 수 있다.

4. 예제교량 적용

본 논문에서 제안된 설계식의 적용성을 교량 예제를 통해 검토하고 설계식의 간편성을 살펴보았다. Fig.8는 일축대칭 I형보를 사용한 3경간 연속 교량을 단순화하여 나타내고 있으며, 내부 지점 부근에는 크기가 큰 단면을 사용하여 스텝보가 적용되었다. 예제 교량의 단면도는 Fig.9와 같으며, Table 3은 휨강도 계산에 필요한 단면상수 및 계산값들을 나타내고 있다.



[Fig. 8] Example flexural beam of a bridge



[Fig. 9] Cross section of model A

비탄성 구간($L_p < L_b < L_r$)내 존재하며 비지지 길이가 7m일 때 AISC-LRFD 설계기준[1]에 근거하여 구한 M_{icr}^m 의 값은 3210 kN·m로 계산된다. 일축대칭도인 ρ 가 0.7인 경우에 적용 가능한 식 (7)을 이용하여 구한 $C_{ist}^m = 1 + 0.8\alpha^{0.7}(\beta\gamma^{0.7} - 1) = 1.139$ 이다. 일축대칭 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 $M_{ist}^m = C_{ist}^m M_{icr}^m$ 이므로, $(1.139)(3210) = 3656\text{kN}\cdot\text{m}$ 이다. 유한요소해석을 통해 얻어진 좌굴강도는 3792kN·m이며, 본 논문에서 제안된 설계식과 유한요소해석 결과값은 3.7%의 차이를 보이고 있다.

[Table 3] Calculations for flexural strength

Equations	Coefficients
$R_{pc} = [\frac{M_p}{M_{yc}} - (\frac{M_p}{M_{yc}} - 1)(\frac{\lambda - \lambda_{pw}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw}})]$	$r_{ts} = 6.399 \times 10^{-2} m$
$= 1.11$	$S_{xc} = 9.68 \times 10^{-3} m^3$
$M_{yc} = F_y S_{xc}$	$J = 4.30 \times 10^{-6} m^4$
$= 2711.50 \text{ KN}\cdot\text{m}$	$F_L = 196 \text{ MPa}$
$L_p = 1.1 r_{ts} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$E = 210 \text{ GPa}$
$= 1.93 \text{ m}$	$v = 0.3$
$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{F_L} \sqrt{\frac{J}{S_{xco}}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_1}}$	$I_x = 4.61 \times 10^{-3} m^4$
$= 7.19 \text{ m}$	$I_y = 7.81 \times 10^{-5} m^4$
$X_1 = 6.76 (\frac{F_L S_{xc} h_0}{E J})^2$	$I_{yc} = 5.99 \times 10^{-5} m^4$
$= 32.45$	$\alpha = 2/7 = 0.286$
	$\beta = 38.1/30.48 = 1.25$
	$\gamma = 3.05/2.54 = 1.2$

5. 결론

본 논문은 경제적인 단면활용을 위해 양끝단에 계단식 변단면이 사용된 일축대칭 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 산정에 대한 연구를 수행하였다. 범용구조해석프

로그래밍 ABAQUS[4]을 사용하여 유한요소해석을 실시하였으며, 일축대칭도(ρ)별로 간편 설계식을 제안하였다. 본 해석연구를 통해 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 균일모멘트를 받는 일축대칭 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도 산정 제안식을 통하여 플랜지 두께방향 비($\gamma^{0.6}$)보다 플랜지 너비 방향 비($\beta^{1.0}$)가 강도에 미치는 영향이 조금 큰 것으로 제안식의 지수값을 통해 알 수 있었다.
2. 양단 스텝보의 초기변형 0%, 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1% 적용에 따른 비선형 좌굴강도 비교를 실시하였다. 0.01%의 초기변형을 적용한 경우 비선형 거동특성을 보이지 않았으며, 0.05% 적용부터 뚜렷한 비선형 거동을 보이고 있다. 지간이 길어져 탄성 구간에 가까이 놓이는 부재의 경우 초기변형이 0.5%로 크게 적용되어야 좌굴강도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
3. 제안된 설계식과 유한요소해석결과의 비교는 -6% ~ 9% 사이에 놓이고 있으며, 제안식은 일축대칭도 0.1, 0.3, 0.7, 0.9인 양단스텝보에 적용가능하며, 비선형 좌굴해석 수행 없이 간편하게 적용이 가능하다. 일축대칭도 0.5인 이축대칭단면의 경우 AISC-LRFD 설계기준[1]을 적용한다.
4. 본 논문에서 제안한 식의 적용간편성을 검토하고자 예제교량을 통하여 적용성을 평가하였다. 기존 AISC-LRFD 설계기준[1]을 활용하여 일축대칭단면의 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하고, 본 연구에서 개발된 스텝보계수식을 통해 추가적으로 좌굴강도를 산정한다면 구조물 설계에 쉽게 적용 가능함을 확인할 수 있었다. 간편 설계식의 결과와 유한요소해석결과의 차이는 3.7%이다.

References

[1] American Institute of Steel Construction Load and Resistance Factor Design Specifications, 14th Edition, Chicago, Illinois. 2011.

[2] S.P. Timoshenko and J.M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York, NY, 1961.

[3] J.S. Park and J.M. Stallings, Lateral-Torsional Buckling of Stepped Beams, *Journal of structural Engineering*, Vol. 129, pp. 1457~1465, 2003.

DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:11\(1457\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:11(1457))

- [4] ABAQUS, *Standard User's Manual* (Ver.6.7-2), Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., 2007.
- [5] Y.L. Pi and N.S. Trahair, "Inelastic Torsion of Steel I-Beams," ASCE, *Journal of structural Engineering*, Vol. 121, pp. 609~620, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:4\(609\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:4(609))
- [6] J.W. Chang, S.J. Kim, J.S. Park, Y.J. Kang, "Study on Ultimate Behavior of Steel Transmission Tower with Residual Stress and Initial Imperfection" *Korean Society of Steel Construction Journal*, Vol.20, No.3, pp. 421~436, 2008.
- [7] Hyundai Steel, Allowable Imperfection(KS D 3502), 2006.
- [8] MINITAP 14 Korean, *Statistic*, Minitap Inc., 2006
-

박 이 슬(Yi Seul Park)

[정회원]



- 2010년 8월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2010년 9월 ~ 2012년 8월 : 상명대학교 일반대학원 공학석사
- 2013년 3월 ~ 현재 : 포항산업과학연구원(RIST) 위촉연구원

<관심분야>

구조공학, 교량공학, 구조해석

박 종 섭(Jong Sup Park)

[정회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2002년 12월 : Auburn University (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 교량공학, 강구조좌굴, 유지보수