

순수 휨하중 받는 일축대칭 스텝보의 성능평가기법에 관한 연구

오정재*, 김용희*, 박종섭*, 김병삼**
*상명대학교 · **다산 컨설턴트
e-mail: jonpark@smu.ac.kr

A Study on Capacity Evaluation for Singly Symmetric Stepped Beam with Pure Bending

Jeong Jae Oh*, Yong Hee Kim*, Jong Sub Park*, Byung Sam Oh**
*Sangmyung University · **Dasan Consultant

요 약

본 연구에서는 기존에 수행된 균일단면을 가지는 I형 보의 좌굴 강도에 대한 해석적·이론적 연구를 토대로 일축대칭을 이루는 변단면 I형보의 좌굴강도를 산정하고자 범용구조해석프로그램 ABAQUS (2007)를 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석에는 4절점 쉘요소인 S4R이 사용되었고, 플랜지 길이방향 비, 너비방향 비, 두께의 비로 일축대칭 스텝보를 사용하였으며, 균일모멘트를 작용시켰다. 개발된 좌굴강도 제안식은 해석결과와 비교하여 -11%~2%의 오차범위를 나타내었다. 본 연구 결과는 다양한 형식의 일축대칭 I형보가 사용되는 빌딩 및 교량 구조물의 경제적이고 합리적인 설계에 활용 될 수 있을 것이다.

1. 서론

최근 경제적이고 시공이 용이한 다양한 형식의 I-형보가 빌딩 및 교량 구조물에 널리 사용되고 있다. 특히 연속경간을 가지는 강합성 I형강 교량에 있어서 내부 지점부근에 상대적으로 큰부모멘트가 발생하게 되어, 경제적인 단면 활용을 위해 상부 또는 하부플랜지에 추가적인 덮개판을 설치하거나 부재 압연 시 플랜지의 두께 혹은 너비를 보강한 변단면을 사용하고 있다.

균일 단면을 가지는 I형 보의 횡-비틀림 좌굴에 대한 해석적·이론적 연구는 이미 많은 연구자들에 의해 수행되었고(Timoshenko 등, 1961; Trahair, 1993), AISC LRFD 설계기준(2005), 도로교 표준시방서-하중저항계수설계법(1996)등은 휨강도 계산 시 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 기준식을 제안하고

있다. AISC LRFD 설계기준(2005)은 이축대칭 단면을 가지는 I형 보의 횡-비틀림 좌굴강도를 다음의 식으로 계산하도록 제안하고 있다.

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

여기서 C_b =모멘트 구배 수정계수; L_b =비지지 길이; E =탄성계수; I_y =y축에 대한 단면 2차 모멘트; G =전단탄성계수; J =비틀림상수; C_w =뒹 상수이다.

SSRC Guide(1998)는 Kitipornchai 와 Trahair (1980), Nethercot (1983)의 연구결과를 토대로 일축대칭 I형단면의 횡-비틀림 좌굴 산정방법을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$M_{cr} = \frac{\pi C_b}{KL_b} \left[\sqrt{EI_y GJ} (B_1 + \sqrt{1 + B_2 + B_1^2}) \right] \quad (2)$$

여기서 K =경계조건계수; $B_1 = \frac{\pi \beta_x}{2(KL_b)} \sqrt{\frac{EI_y}{GJ}}$; $B_2 = \frac{\pi^2 EC_w}{(KL_b)^2 GJ}$; $\beta_x = 0.9d \left(\frac{2I_{yc}}{I_y} - 1 \right) \left[1 - \left(\frac{I_y}{I_x} \right)^2 \right]$, d =단면의 총 높이; I_{yc} =y축에 대한 압축플랜지의 단면 2차모멘트; I_x =x축에 대한 단면 2차모멘트이다.

Trahair(1993)는 비지지 길이내 경간 중앙에서 계단식 단면 변화를 가지는 I형보에 대해 다음의 간략식을 제안하였다.

$$M_{st} = \alpha_{st} M_{yz} = [1 - 2.4\alpha(1 - \beta\gamma)] M_{yz} \quad (3)$$

여기서 M_{yz} 는 식(1)에서 C_b 계수를 제외한 값(M_{ocr})과 같으며, α, β, γ 는 단면변화 상수이다. 위의 식은 연속경간에 사용되는 비지지 길이내 양끝단 단면변화에 적용할 수 없다.

Park과 Stallings(2003)는 유한요소해석결과를 이용하여 균일모멘트가 작용하는 양단 계단식 단면변화 I형보의 탄성 횡-비틀림 좌굴강도 설계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$M_{ost} = C_{st} M_{ocr} = [1 + 6\alpha^2(\beta\gamma^{1.3} - 1)] M_{ocr} \quad (4)$$

여기서 은 식 (1)과 같고, C_{st} 는 새롭게 제안된 계산식으로 단면 상수 α, β, γ 의 함수로 표현된다.

본 연구에서는 SSRC Guide(1998)의 제안식을 토대로 비지지 길이내 양쪽 끝단에 계단식 변화를 나타내는 일축대칭 스텝보의 M_{ocr} 좌굴강도 산정식을 개발·제안하고자 한다.

2. 유한요소 해석 모델링

횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위하여 3차원 범용구조해석프로그램인 ABAQUS(2007)가 사용되었으며, 쉘요소(Shell Element)인 S4R요소가 사용되었다. 그림 1은 본 연구에 사용된 일축대칭 I형단면을 나타내고 있으며, 그림 2는 양단 계단식 단면변화 I형보의 정면도와 평면도를 보여주고 있다. 표 1은 해석에 사용된 입력 재료값을 나타내고 있다.

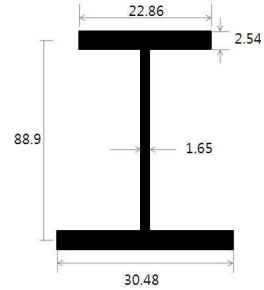


그림 1. 해석모델단면(단위 cm)

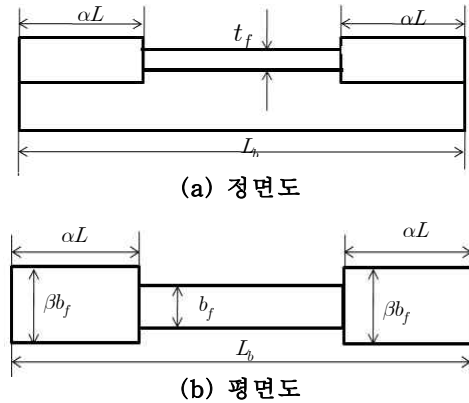


그림 2. 해석모델

표 2. 유한요소해석모델 물정치 및 단면계수

탄성계수	210 GPa
전단탄성계수	80.77 GPa
단면2차모멘트 (약축)	$8.57 \times 10^{-5} \text{m}^4$
비틀림상수	$4.24 \times 10^{-6} \text{m}^4$
뒹상수	$1.49 \times 10^{-5} \text{m}^6$

일축대칭 스텝보 해석에 앞서서 단면변화가 비지지 길이내 존재하지 않는 I형 단면을 ABAQUS(2007) 프로그램을 이용하여 유한요소 해석을 실시하였다.

해석결과는 모델 검증을 위하여 SSRC Guide 제안식인 식(2)와 비교하였다. 해석에 사용된 모델의 경우 플랜지는 8개, 복부는 12개, 길이방향으로는 236개의 쉘요소가 적용되었다. 일축대칭 I-Beam의 단면매개변수 α (플랜지의 길이방향의 비), β (너비방향의 비), γ (두께의 비)의 범위는 일반적으로 사용되는 변단면 일축대칭 I-Beam 부재 사례조사를 토대로 $\alpha=0 \sim 0.333$, $\beta=1 \sim 1.4$, $\gamma=1 \sim 1.8$ 로 결정하였다. 표 2는 해석에 사용된 모델의 α, β, γ 값을 나타내고 있으며, 표 2의 해석모델은 일축대칭도($\rho = \frac{I_{yc}}{I_y}$)가 0.3, 0.7 인 두 경우에 모두 적용되었다.

표 2. 일축대칭 스텝보 매개변수범위

ρ	α	β	γ
0.3	0.167	1.0	1.2; 1.4; 1.8
	0.167	1.2	1.2; 1.4; 1.8
	0.167	1.4	1.2; 1.4; 1.8
&	0.250	1.0	1.2; 1.4; 1.8
	0.250	1.2	1.2; 1.4; 1.8
	0.250	1.4	1.2; 1.4; 1.8
0.7	0.333	1.0	1.2; 1.4; 1.8
	0.333	1.2	1.2; 1.4; 1.8
	0.333	1.4	1.2; 1.4; 1.8



그림 3. 3차원 유한요소해석 모델

3. 유한요소해석 결과

유한요소해석 결과분석을 통하여 균일모멘트를 받는 단순 지지된 스텝보의 횡-비틀림 좌굴강도식을 다음과 같이 개발·제안하였다.

$$M_{st} = C_{st}^1 M_{ocr} \quad (5a)$$

$$C_{st}^1 = 1 + 1.25\alpha^{0.45} (\beta\gamma^{1.4} - 1) \quad (5b)$$

$$C_{st}^1 = 1 + 1.2\alpha^{0.6} (\beta\gamma^{1.5} - 1) \quad (5c)$$

여기서 M_{st} 는 균일모멘트를 받는 양단 계단식 단면 변화를 가지는 일축대칭 I형보의 횡-비틀림 좌굴강도를 나타내며, M_{ocr} 은 비지지 길이내 작은 단면이 비지지 길이 전체에 균일단면으로 사용된 보의 횡-비틀림 좌굴강도를 의미한다. 식 (5b)는 일축대칭도(ρ)가 0.3인 경우이며, 식 (5c)는 일축대칭도(ρ)가 0.7인 경우이다.

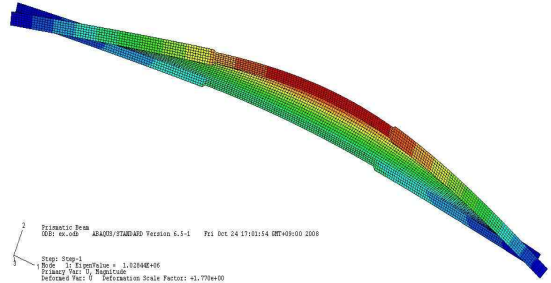


그림 4. 좌굴 모드 ($\rho=0.3$)

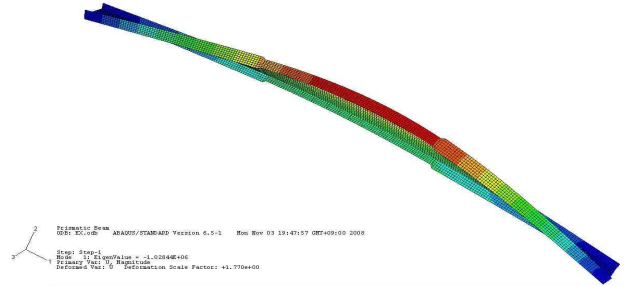
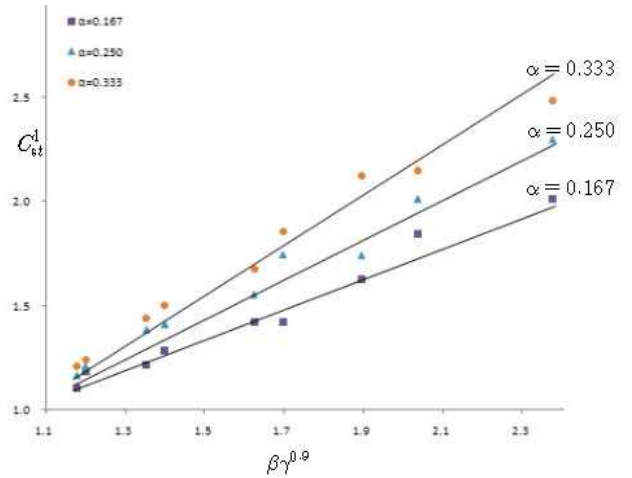
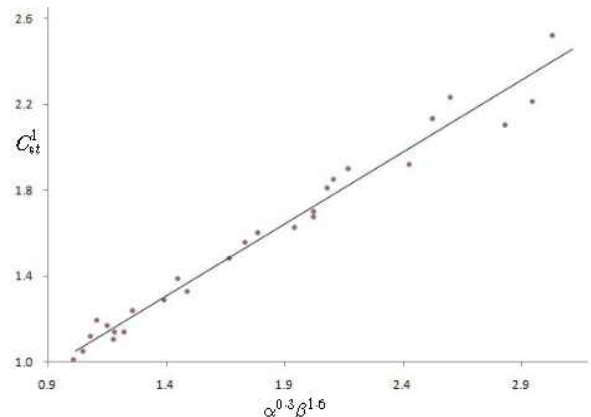


그림 5. 좌굴 모드 ($\rho=0.7$)

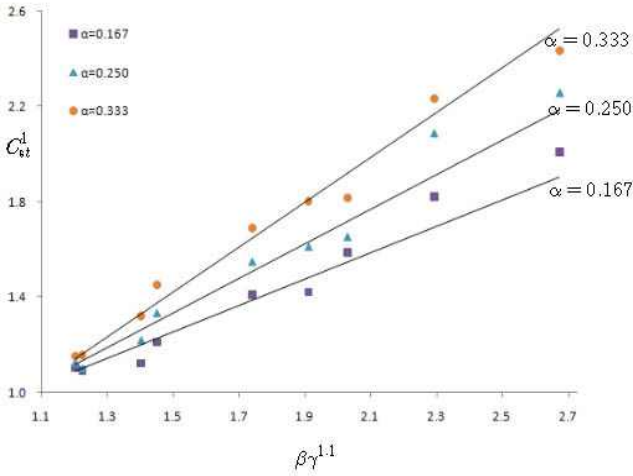


(a) 플랜지 길이 스텝변수(α)

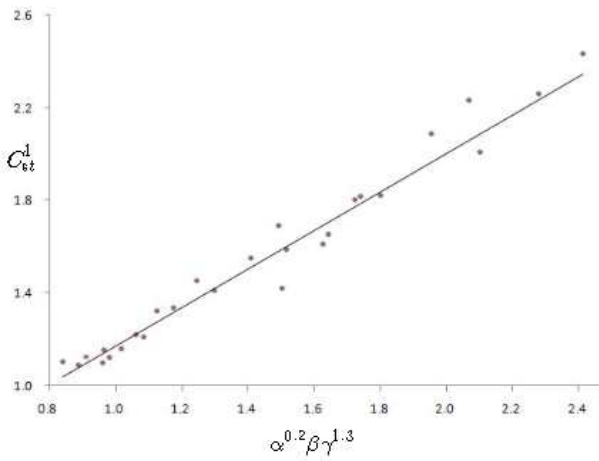


(b) 전체해석결과

그림 6. 해석결과와 제안식 비교($\rho=0.3$)



(a) 플랜지 길이 스텝변수(α)



(b) 전체해석결과

그림 7. 해석결과와 제안식 비교($\rho=0.7$)

그림 6과 7은 비지지 길이 내에서 유한요소해석 결과와 제안된 식의 결과를 비교하고 있다. 제안된 식은 실선으로 표시하였고 유한요소해석 결과값들은 점으로 표시하였다. 일축대칭도(ρ)가 0.3인 경우 제안식의 결과와 유한요소해석결과와의 오차범위는 -11%~1%이고, 일축대칭도(ρ)가 0.7인 경우 오차범위는 -11%~2 %이다.

4. 결론

본 연구는 교량에서의 경제적인 단면활용을 위해 사용되는 계단식 변단면 일축대칭 I형보의 탄성 횡-비틀림 좌굴강도 산정식을 유한요소해석을 이용하여 제안하였다. 제안식으로 계산된 결과는 유한요소해석을 통해 얻어진 결과와 10%내외의 오차를 보이고 있다. 본 연구에서 제안된 설계식은 다양한 하중은

받는 일축대칭 I-Beam의 설계식 개발에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

2008년 한국건설교통기술평가원이 시행하는 스마트하이웨이사업단 핵심1과제 5세부 Smart Structure 설계기술 개발 연구의 일환으로 수행되었다. 적극적인 지원을 아끼지 않는 승화E&C, 다산건설턴트 및 상명대학교의 협조에 감사드립니다.

참고문헌

- [1]. 김종민, 김승준, 박종섭, 강영중(2008), “균일모멘트를 받는 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제 20권, 2호, pp.237~246
- [2]. 대한토목학회 (1996), 도로교표준시방서-하중저항계수설계법
- [3]. ABAQUS Ins. (2007), ABAQUS/Standard User's Manual(ver. 6.7-2)
- [4]. American Institute of Steel Construction (AISC) (2005), LRFD Specification, 4th. Edition, Chicago, Illinois
- [5]. Theodore V. Galambos (1998) Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Fifth Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [6]. Kitipornchai, S. and Trahair, N. S. (1980), “Buckling Properties of Monosymmetric I-Beams”, Journal of the Structural Division, Vol. 106, No. ST-5, pp. 941-957
- [7]. Park, Jong S. and J. Michael Stallings(2003), “Lateral-Torsional Buckling of Steeped beams”, Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 11, pp.1457~1465
- [8]. Timoshenko, S., and Gere, J. (1961). Theory of elastic stability, McGraw-Hill, New York
- [9]. Trahair N.S.(1993), Flexural-Torsional Buckling of Structures, CRC Press.