

일축대칭 I형보의 탄성좌굴강도 산정에 관한 연구

A Study on the Evaluation of elastic buckling strength of Singly Symmetric I-Beams

구소연* · 류효진** · 임남형*** · 이진옥****

Ku, So Yeun · Ryu, Hyo Jin · Lim, Nam Hyung · Lee, Jin Ok

Abstract

The elastic critical moment of I-beams subjected to moment is directly affected by the following factors: loading type; loading position with respect to the mid-height of the cross section; end restraint conditions. Most design specifications usually provide buckling solutions derived for uniform moment loading condition and account for variable moment along the unbraced length with a moment gradient correction factor applied to these solutions. In order for the method in the SSRC Guide to be applicable for singly symmetric I-beams, improved moment gradient correction factors were proposed in this study. Finite element buckling analyses of singly symmetric I-beams subjected to transverse loading applied at different heights with respect to the mid-height of the cross section were conducted. Transverse loads consisting of a mid-span point load and a uniformly distributed load were considered in the investigation.

key words : elastic critical moment, moment gradient correction factors, beam

모멘트 하중을 받는 I형 보의 탄성좌굴강도는 하중의 종류, 하중의 단면 내 작용위치, 그리고 구속조건 등과 같은 인자들에 의해 영향을 받는다. 대부분의 시방기준에서는 균일한 모멘트 조건에 대한 좌굴강도를 사용하고 있으며 비균일한 모멘트 효과를 고려하기 위하여 모멘트 구배 수정계수를 적용하고 있다. 본 논문에서는 SSRC 지침서의 방법을 일축대칭 I형 보에 적용할 수 있도록 개선된 모멘트 구배 수정계수를 제안하였다. 단면 내 임의의 높이에 작용하는 연직방향 하중에 대한 일축대칭 I형 보의 유한요소 좌굴해석을 실시하였으며 연직방향 하중은 지간 중앙에 작용하는 집중하중과 등분포 하중을 고려하였다.

1. 서 론

모멘트 하중을 받는 I형 보의 탄성좌굴강도는 하중의 종류, 하중의 단면 내 작용위치, 그리고 구속조건 등과 같은 인자들에 의해 영향을 받는다. 보에 작용하는 단면 내 하중은 상부 또는 하부에 작용하게 되는데, 단면의 상부에 연직하중이 작용하면 단면의 중앙에 작용하는 경우보다 단면의 비틀림을 증가시켜 좌굴강도를 감소시키며, 역으로 하부에 작용하면 좌굴강도를 증가시키게 된다. 또한, 연직방향 하중은 비지지 구간 내에서 비균일 모멘트를 유발시키는데, 대부분의 시방기준에서는 균일한 모멘트 조건에 대한 좌굴강도를 사용하고 있으며 비균일한 모멘트 효과를 고려하기 위해 모멘트 구배 수정계수를 적용하고 있다.

본 연구에서는 SSRC 지침서의 C-방정식을 일축대칭 I형 보에 적용할 수 있도록 개선된 모멘트 구배 수정계수를 제안하였다.

* 비회원 · 충남대학교 토목환경공학부 · 박사과정 · E-mail : kitigu@cnu.ac.kr
** 비회원 · 충남대학교 토목환경공학부 · 박사과정
*** 정회원 · 충남대학교 토목환경공학부 · 조교수
**** 정회원 · 충남대학교 토목환경공학부 · 교수

2. 이론적 배경 및 유한요소 해석

현재 시방서에 제시되어 있는 모멘트 구배 수정계수 식은 하중고 효과를 고려하지 않은 단순 지지된 이축대칭 보에 대한 수정계수이므로 하중고 효과가 고려된 이축대칭 보에 그대로 적용하면 좌굴강도를 과다 또는 과소평가할 수 있다. 이러한 하중고 효과와 다양한 경계조건의 영향을 고려하기 위하여 SSRC 지침서(1998)에서는 Nethercot와 Rockey(1972)의 연구를 근거로 식(1)과 같은 모멘트 산출 식을 사용하고 있다.

$$M_{cr} = C \cdot M_{ocr} \quad (1)$$

식 (1)에서 C -방정식은 두개의 변수인 A 와 B 로 구성되며, A 는 양단의 경계조건의 영향을 그리고 B 는 작용하는 하중의 하중고 효과를 각각 반영하는 변수들이다.

$$\text{하중위치 : 상부 플랜지 } C = A/B \quad (2a)$$

$$\text{하중위치 : 단면 중앙 } C = A \quad (2b)$$

$$\text{하중위치 : 하부 플랜지 } C = A \cdot B \quad (2c)$$

$$\text{비틀림 계수 } W = \frac{\pi}{L} \cdot \sqrt{\frac{EI_w}{GK_T}}$$

표.1 계수 A와 B (SSRC 지침서)

Transverse loading	Restraint	A	B
Mid-span point load	단순지지	1.35	$1 - 0.180 W^2 + 0.649 W$
	완전고정지지	$1.916 - 0.424 W^2 + 1.851 W$	$1 - 0.466 W^2 + 0.923 W$
Uniformly distributed load	단순지지	1.12	$1 - 0.154 W^2 + 0.535 W$
	완전고정지지	$1.643 - 0.405 W^2 + 1.771 W$	$1 - 0.339 W^2 + 0.625 W$

본 논문에서는 절점당 7자유도를 가지는 보요소가 적용된 유한요소 프로그램을 사용하였으며, 일축대칭도의 범위를 0부터 1까지 고려하기 위하여 그림 1과 같이 상부 또는 하부 플랜지의 폭을 변화시켰다. 또한 다양한 비틀림 세장변수를 고려하기 위하여 보의 높이(h)와 비지지 길이(L)의 비(L/h)를 10, 15, 20, 25로 취하였다.

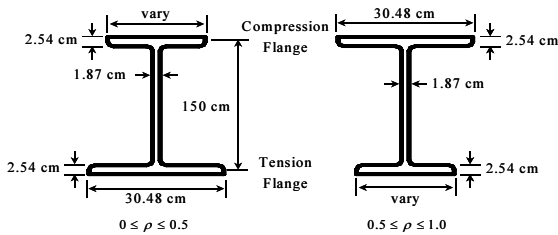


그림 1. 해석단면과 제원

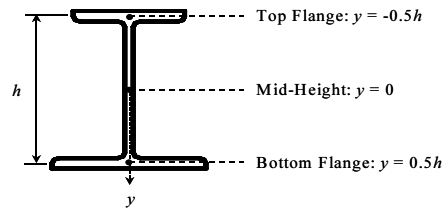


그림 2. 하중 위치

고려하는 하중은 지간 중앙에 작용하는 집중하중과 등분포하중을 적용하였으며 단면 내 작용하는 하중의 위치는 그림 2와 같이 3개위치(상부 플랜지, 단면 중앙, 하부 플랜지)를 적용하였다. 면내 경계조건은 단순지지(단일 곡률만 고려)이며 면외 경계조건은 단순지지와 고정지지를 사용하였다.

3. 해석결과와 탄성좌굴 산정 식

3.1 단순지지된 일축대칭 I형 보 (단순지지)

횡방향 하중이 일축대칭 I형 보의 중심이 아닌 단면의 중앙점에 작용하는 경우는 SSRC 지침서의 식이 적용가능 하지만, 플랜지의 상부 또는 하부에 작용할 경우에는 적용하는데 문제가 있다고 판단된다. 일축대칭 I형 보의 좌굴강도는 수정된 비틀림 세장변수(\bar{W})의 영향을 받으며, 이것으로부터 SSRC 지침서의 변수 A, B 를 식(3),(4)와 같이 수정하였다.

$$\text{하중위치: 상부 플랜지 } C_m = A_m/B_m \quad (3a)$$

하중위치: 단면 중앙 $C_m = A_m$ (3b)

하중위치: 하부 플랜지 $C_m = A_m \cdot B_m$ (3c)

지간 중앙 집중 하중인 경우(면외 단순지지) $A_m = 1.35$; $B_m = 1 - 0.18 \overline{W}^2 + 0.649 \overline{W}$ (4a)

등분포 하중인 경우(면외 단순지지) $A_m = 1.12$; $B_m = 1 - 0.154 \overline{W}^2 + 0.535 \overline{W}$ (4b)

수정된 비틀림 계수 $\overline{W} = \frac{\pi \cdot h}{L} \cdot \sqrt{\frac{EI_y}{4GK_T}}$

그림 3은 각각 지간 중앙 집중하중과 등분포하중에 대하여 일축 대칭도에 따라 수정된 모멘트 구배방정식 C_m 의 값과 유한요소 해석결과인 C_{FEM} 을 비교한 것이다. 비틀림 세장변수(\overline{W})로 치환하여 수정된 식은 단순지지된 일축대칭 I형 보의 탄성좌굴 강도를 산정하는데 충분히 사용될 수 있음(약6%이내의 오차율)을 알 수 있다.

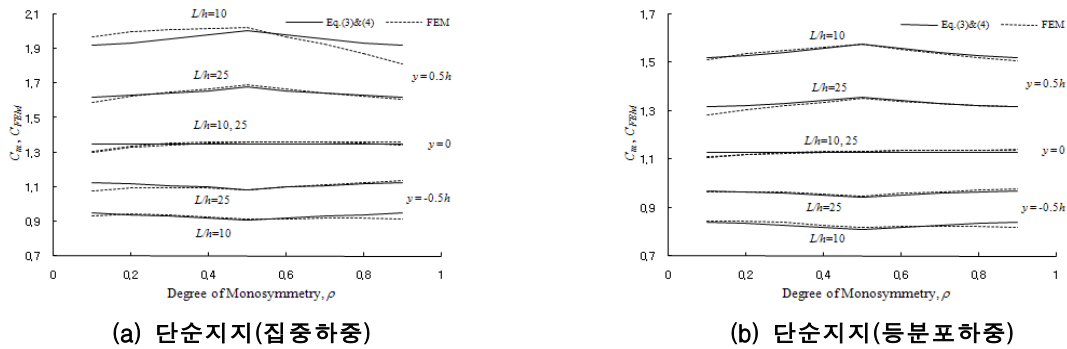


그림 3. C, C_{FEM} .vs. 일축대칭도

3.2 양단 고정지지된 일축대칭 I형 보 (완전고정지지)

양단이 고정지지된 일축대칭 I형 보의 경우에는 그림 4와 같이 고정지지된 일축대칭 I형보의 C_{FEM}/C_m 값은 비틀림 세장변수(\overline{W})보다 일축대칭도(ρ)에 더욱 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 고정지지된 일축대칭 I형보의 탄성좌굴 모멘트를 산정하기 위한 C_m -방정식은 비틀림 세장변수(\overline{W})와 일축대칭도(ρ)의 함수로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 고정지지된 일축대칭 I형보의 탄성좌굴 모멘트를 구하기 위한 C_m -방정식을 다음과 같이 제안하였다.

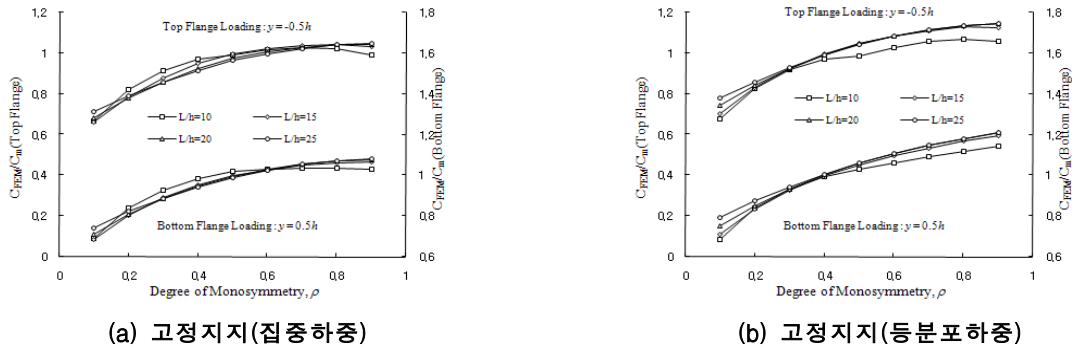


그림 4. C_{FEM}/C_m .vs. 일축대칭도

하중위치: 상부 플랜지 $C_m^* = A_m/B_m \times D_m$ (5a)

하중위치: 단면 중앙 $C_m^* = A_m$ (5b)

하중위치: 하부 플랜지 $C_m^* = A_m \cdot B_m \times D_m$ (5c)

지간 중앙 집중하중인 경우(면외 고정지지)

$A_m = 1.916 - 0.424 \overline{W}^2 + 1.851 \overline{W}$

$$B_m = 1 - 0.466 \overline{W}^2 + 0.923 \overline{W} \quad (6a)$$

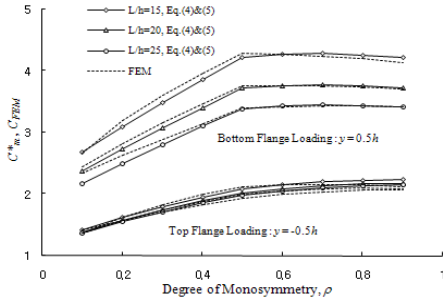
$$D_m = 0.583 - 0.623 \rho^2 + 1.116 \rho$$

등분포 하중인 경우(면외 고정지지)

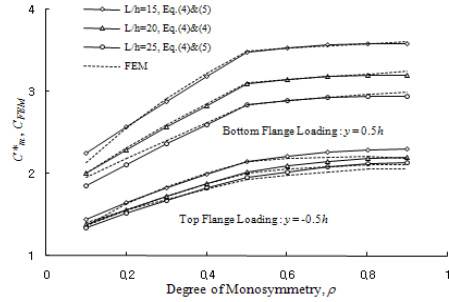
$$A_m = 1.643 - 0.405 \overline{W}^2 + 1.771 \overline{W}$$

$$B_m = 1 - 0.339 \overline{W}^2 + 0.625 \overline{W} \quad (6b)$$

$$D_m = 0.616 - 0.526 \rho^2 + 1.056 \rho$$



(a) 고정지지(집중하중)



(b) 고정지지(등분포하중)

그림 5. C_m^* , C_{FEM} .vs. 일축대칭도

그림 5로부터 식(5),(6)과 같은 C_m^* -방정식은 양단이 고정지지된 일축대칭 I형 보의 탄성 좌굴 모멘트를 산정하는데 충분히 사용할 수 있음을 알 수 있다.(약 8%이내의 오차율)

4. 결론

본 연구에서는 비지지 구간내에 연직방향 하중을 받는 일축대칭 I형 보의 탄성 좌굴 강도를 산정하기 위한 방법을 논의하였으며, SSRC 지침서(1998)에서 제안하고 있는 이축대칭 I형 보를 위한 C -방정식을 일축대칭 I형 보에 적용시키기 위한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 일축대칭도가 0.1에서 0.9까지인 일축대칭 I형 보에 적용된다.

- (1) 양단이 단순지지된 일축대칭 I형 보의 탄성 좌굴 모멘트를 산정하기 위해서는 SSRC 지침서의 방법을 그대로 적용하고 변수 A 와 B 를 계산하기 위해 비틀림 세장변수(\overline{W})로 치환하여 사용한다.
- (2) 양단이 고정지지된(면외 휨과 뒤 구속) 일축대칭 I형 보의 탄성 좌굴 모멘트를 산정하기 위해서는 식 (5)와 같이 SSRC 지침서의 방법에 일축대칭도의 함수로 표현되는 새로운 변수 D_m 을 적용하여야 한다. 또한 단순지지된 경우와 동일하게 비틀림 세장변수(\overline{W})를 사용한다.

감사의 글

본 논문은 건설교통R&D정책·인프라사업, “성능중심의 건설기준 표준화” 과제(‘06~’11)연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. AISC (2005) Specification for Structural Steel Buildings, Chicago IL : American Institute of Steel Construction.
2. Galambos TV(1998) Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, John Wiley & Sons Inc
3. Nethercot DA, Rokey KC. (1972) "A Unified Approach to the Elastic Lateral Buckling of Beams", AISC Engrg J, Vol.9, No.3, pp.96-107.
4. Lim NH, Park NH, Kang YJ, Sung IH. (2003) "Elastic Buckling of I-Beams under Linear Moment Gradient", J Solids Struct, Vol.40, pp.5635-5647.