

# 구조물 사용성 증진을 위한 변단면 휨부재에 대한 해석적 연구

손지민\*, 김재홍\*, 박종섭\*, 곽성민\*\*

\*상명대학교 · \*\*다산 컨설턴트

e-mail: jonpark@smu.ac.kr

## A Numerical Study on Nonprismatic Flexural Member for Evaluating Structural Capacity

JiMin Son\*, JaeHeung Kim\*, JongSup Park\*, SungMin Gwak\*\*

\*Sangmyung University · \*\*Dasan Consultant

### 요 약

일반적으로 연속경간을 가지는 강합성 I-형강 교량에 있어서 내부 지점 부근에서 상대적으로 큰 부모멘트가 발생하므로, 이에 경제적인 단면 활용을 위하여 변단면을 적용하여 휨강도를 증가시킨다. 본 연구에서는 기존 강도계산식에 관한 연구를 토대로 하여 비탄성 구간에 있는 변단면 I형보의 횡-비틀림 좌굴강도를 유한요소해석프로그램 ABAQUS(2007)를 이용하여 산정하고, 간편한 설계식을 제안하고 있다. 지간 한 쪽 끝에 계단식 단면변화를 가지는 보에 대해서 고려하였으며, 플랜지 길이방향 비, 너비방향 비, 두께의 비로 계단식 I형보를 나타내었다. 해석에 사용된 단면매개변수는 36가지 조합이며, 비탄성 횡-비틀림 거동을 고려하기 위하여 잔류응력 및 초기결함을 고려한 비선형해석을 실시하였는데, Pi(1995)등이 고려한 잔류응력의 형상과 국내 I형강 표준 치수 허용치에 근거하여 부재 길이의 0.1%를 초기제작오차로 고려하였다. 해석모델의 양쪽 끝단에는 모멘트하중을 재하하였다. 개발·제한된 식은 선형 모멘트 하중이 작용할 때 적용 가능한 식으로 경제적이고 합리적인 설계에 적극 활용될 수 있을 것이다.

### 1. 서론

일반적으로 연속경간을 가지는 강합성 I-형강 교량에 있어서 내부 지점 부근에서 상대적으로 큰 부모멘트가 발생하므로, 경제적인 단면 활용을 위해 부모멘트 발생구간에 변단면을 적용하여 휨강도를 증가시킨다. 변단면이 적용된 I-형강 교량은 경간 길이에 따라 연속적으로 단면의 변화가 존재하는 테이퍼 보(Tapered Beam)와 계단식의 단면변화가 사용되는 스텝보(Stepped Beam)로 구분될 수 있다. 스텝보는 I-형보의 플랜지에 추가적인 플레이트를 설치하거나, 부재 압연시 플랜지의 두께 혹은 너비를 변화시켜 제작된다.

I-형 스텝보에 대한 연구로는 Trahair(1993)가 비지지 길이내 경간 중앙에서 계단식으로 단면변화

가 존재하는 단순보의 횡-비틀림 좌굴강도를 산정할 수 있는 모멘트구배계수를 제안한 바 있다. 하지만 간략식으로 연속경간 교량에 많이 적용되는 비지지 구간 양단에 단면변화 형식을 가지는 보에는 적용할 수 없다. Park 등(2004 a)은 비지지 구간 양단에 계단식 단면변화를 가지며 순수휨이 작용하는 부재의 탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 식을 제안하였다. 또한, Park 등(2004 b)은 선형적인 모멘트 하중이 작용하는 경우의 탄성 횡-비틀림 좌굴강도 산정에 적용 가능한 수정 계수식을 제안한 바 있다.

미국의 AISC-LRFD 설계기준(2007)은 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 고려한 휨강도를 다음의 식으로 계산하도록 제안하고 있다.

$$M_n = C_b \left[ M_P - (M_P - M_r) \left( \frac{L_b - L_P}{L_r - L_P} \right) \right] \leq M_P \quad (1)$$

여기서  $C_b$ =모멘트 구배 수정계수,  $M_P$ =공칭소성휨강도,  $M_r$ =잔류응력을 고려한 항복모멘트,  $L_b$ =비지지 길이,  $L_P$ =소성모멘트 대응지간길이,  $L_r$ =잔류응력을 고려한 항복모멘트 대응지간길이이다.

김종민 등(2008)은 유한요소해석결과를 이용하여 순수 휨이 작용하는 일단 계단식 단면변화보(Singly Stepped Beam: SSB)의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 계산식을 식(3)과 같이 제안하였다.

$$M_{ist} = C_{ist} M_{icr} \quad (2)$$

$$C_{ist} = 1 + 0.7\alpha^2 (\beta\gamma^{0.5} - 1) \quad (3)$$

여기서  $M_{icr}$ 은 식(1)로 계산되고,  $C_{ist}$ 는 SSB 계수로서 위의 제한된 식과 같이  $\alpha, \beta, \gamma$ 의 함수로 표현된다.  $\alpha$ 는 플랜지의 길이방향의 스텝비율,  $\beta$ 는 플랜지 너비방향의 스텝비율,  $\gamma$ 는 플랜지 두께에 대한 스텝비율이다.

본 연구에 앞서서 김종민 등(2008)의 연구결과를 검토하여 사용성을 확인한 후, 선형모멘트 하중이 작용하는 양단 및 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 유한요소해석을 통하여 평가하고 간편 설계식을 개발하고자 한다.

## 2. 유한요소해석 모델링

선형모멘트 하중을 받는 I형 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위해 범용구조해석 프로그램 ABAQUS(2007)의 S4R(4절점 쉘요소)가 사용되었다. 유한요소해석 모델링을 위한 대표적인 I-형단면은 그림 1과 같으며 해석모델의 물성치는 표 1에 나타내었다. 그림 2는 유한요소해석에 사용될 SSB모델의 정면도와 평면도를 나타내고 있다.

그림 3은 AISC-LRFD 설계기준(2007)에 근거하여 본 해석단면의 비지지 길이에 따른 휨강도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 3에 나타낸 바와 같이  $L_p=3.07m$ ,  $L_r=8.74m$ 이다. 본 해석모델의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위하여 비탄성 구간( $L_p < L_b$ ) <math> < L\_r </math>)내에서 3가지 종류의 비지지 길이를 가지는 해석모

델을 선정하였다. (1)  $L_b=3.56m$  ( $L_b/h=4.0$ ) (2)  $L_b=5m$  ( $L_b/h=5.6$ ) (3)  $L_b=8.5m$  ( $L_b/h=9.6$ )이다.

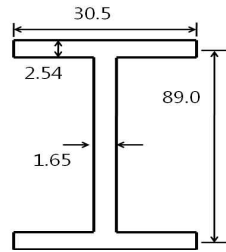
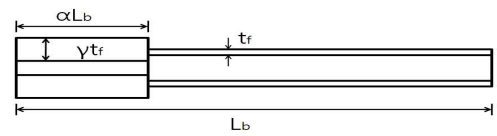


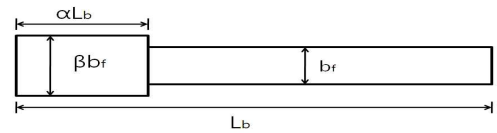
그림 1. 해석모델단면 (단위:cm)

표 1. 유한요소해석 입력값

탄성계수 (GPa)	210
전단탄성계수 (GPa)	80.77
단면2차모멘트 (약축, m <sup>4</sup> )	$1.20 \times 10^{-4}$
비틀림상수 (m <sup>4</sup> )	$4.63 \times 10^{-6}$
툼상수 (m <sup>6</sup> )	$2.384 \times 10^{-5}$



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 2. 스텝보 해석모델

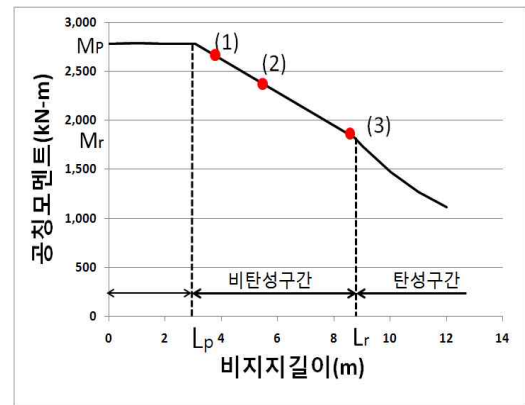


그림 3. 비지지 길이에 따른 휨강도 곡선

해석모델에는 S4R 쉘요소(Shell Element)가 플랜지:복부:길이방향으로 1:2:2로 적용되었으며 모델링의 적용성 및 오차는 본 연구를 위한 해석에 앞서서 탄성 휨강도 및 김종민 등(2008)의 기존 제안식과 비교·검토되어 결정되었다.

일단 스텝보의 매개변수 해석범위는 표 2와 같으며, 하나의 비지지 길이 모델에 36가지 스텝비율을 가지는 모델이 해석에 사용되었다.

표 2. 해석 매개변수 해석범위

길이 방향 비율( $\alpha$ )	플랜지 폭 비율( $\beta$ )	플랜지 두께 비율( $\gamma$ )
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
0.5	1.0	1.2; 1.4; 1.8
0.5	1.2	1.0; 1.4; 1.8
0.5	1.4	1.0; 1.4; 1.8

비탄성 횡-비틀림 좌굴해석을 위해 단면에 잔류응력과 부재의 초기결함을 고려하였다. 잔류응력은 그림 4와 같이 Pi(1995)등이 고려한 단순직선분포로 가정하였으며, 사용된 재료는 그림 5와 같다. 부재의 초기결함은 국내 I형강 표준 치수 허용치에 근거하여 현대제철(2006)에서 적용하고 있는 부재길이의 0.1%를 초기 최대 횡변위로 적용하였다. 그림 6은 선형모멘트를 받는 일단 스텝보의 작용하중을 나타내고 있으며 3가지 지간길이를 가지는 표 2의 36가지 모델에 5가지 하중종류( $\lambda=-1, -0.5, 0, 0.5, 1$ )를 작용시켜 총 540개의 해석결과를 얻었다.

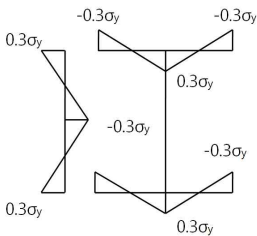


그림 4. 잔류 응력 패턴

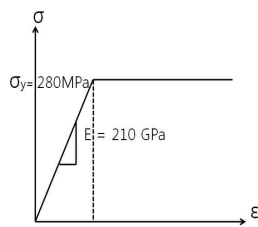


그림 5. 응력-변형률 곡선

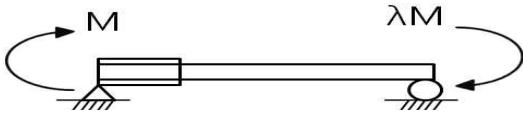


그림 6. 선형모멘트하중을 받는 변단면보

### 3. 유한요소해석 결과

ABAQUS(2007) 유한요소해석을 통해 얻어진 결과를 MINITAB(2006)을 이용한 회귀분석을 통하여 선형모멘트를 받는 단순지지된 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 설계식을 다음과 같이 제안한다.

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

$$C_{bist}^L = 1.3 + 0.5\lambda - 0.202\lambda^2 \leq 1.6 \quad (5)$$

식 (4)에서  $M_{ist}^L$  는 선형모멘트를 받는 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도이다.  $M_{icr}$  은 보 전체 비지지길이에 균일단면으로 적용된 보의 비탄성 횡-비틀림좌굴강도이며, 그림 3에 나타난 AISC-LRFD 설계기준(2007)의 휨-내하력 곡선을 통해 산정된다.  $C_{ist}$  는 순수 휨이 스텝보에 작용할 때 제안된 식(3)을 적용하여 계산된다. 식 (5)의  $\lambda$  는 양단의 모멘트 변화율을 나타내고 있다.

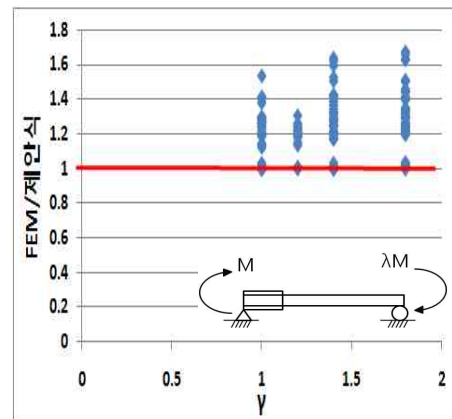
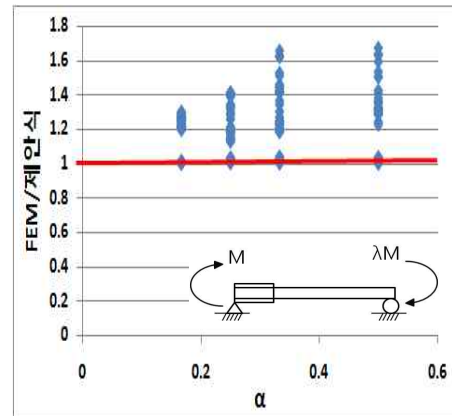
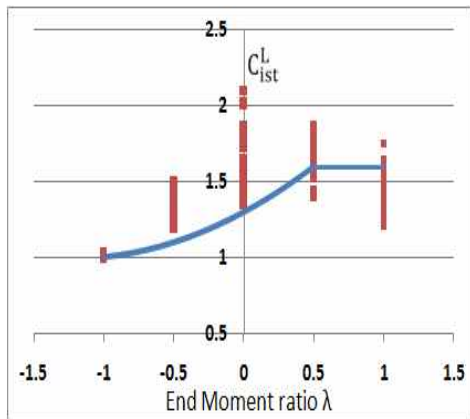


그림 7. 해석결과와 제안식 비교 ( $L_b = 8.5m, L_b/h = 9.6$ )

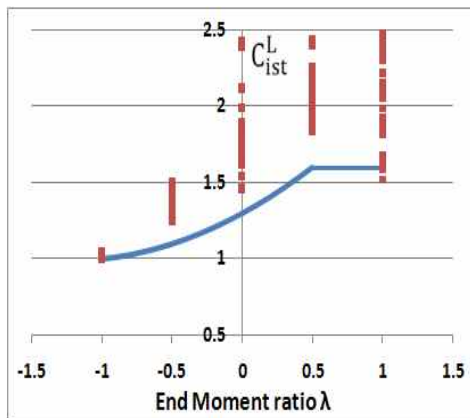
그림 7은 비지지 길이 8.5m 를 가지는 모델의 유한요소해석결과와 제안식 결과의 비교를 길이비( $\alpha$ )와 플랜지 두께 변화비( $\gamma$ )로 나타내고 있다.

그림 8 (a), (b)는 일단 스텝보에 작용하는 선형모멘트 변화에 따른 제안식의 결과와 각각의 비지지 길이 3.56m( $L_b/h=4$ ), 8.5m( $L_b/h=9.6$ )의 유한요소해석 결과를 비교하고 있다. 그림의 실선은 제안식 (5)를

나타내고 있으며, 그림의 점들은 유한요소해석 결과이다. 제안식 (5)로 부터  $\lambda=-1$ 의 경우  $C_{bist}^L=1.00$ ,  $\lambda=-0.5$ 의 경우  $C_{bist}^L=1.10$ ,  $\lambda=0$ 의 경우  $C_{bist}^L=1.30$ ,  $\lambda=0.5$ 의 경우  $C_{bist}^L=1.60$ ,  $\lambda=1$ 의 경우  $C_{bist}^L=2.00$ 이다. 그러나 그림 15에서  $\lambda=1$ 일 때를 자세히 살펴 보면  $\lambda=0.5$ 일때 보다 일부 큰 값을 나타내고 있으나, 해석결과분석을 통해  $\beta$ 와  $\gamma$ 의 비율이 커질수록  $\lambda=0.5$ 일 때와 비슷한 값 또는 조금 작은 값을 나타내었다. 따라서  $\lambda=0.5$  일 때의  $C_{bist}^L$ 을 최대 1.6으로 제한하였다.



(a) 3.56m ( $L_b/h=4$ )



(b) 8.5m ( $L_b/h=9.6$ )

그림 8. 유한요소해석결과와 제안식 비교

대부분의 모델의 경우 제안식이 안전측의 값을 나타내고 있으며, 3.56m길이 모델의 경우 제안식이 해석결과들의 중간 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 최대 오차는  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 1.4$ ,  $\gamma = 1.8$  일 때 약 9% 오차를 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 교량에서 경제적인 단면활용을 위해 사용되는 계단식 변단면 변화보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 사용성을 유한요소해석결과를 통해 검토하였다. 제한된 식은 선형 모멘트 하중이 작용할 때 적용가능한 식으로 경제적이고 합리적인 설계에 적극 활용될 수 있을 것이며, 다양한 하중을 받는 단면변화보의 연구에 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, 다산컨설턴트 및 상명대학교의 협조에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 김종민(2008), “균일모멘트를 받는 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴에 관한연구”, 한국강구조학회논문집, 제20권, 2호, pp237~246.
- [2] 현대제철(2006), Korea Standard 치수 허용차.
- [3] ABAQUS(2007), Standard User's Manual (Ver.6.7-2), Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.
- [4] MINITAP 14 Korean (2006), Statistic, Minitap Inc.
- [5] Park, J.S. and Kang, Y.J(2004a), “Flexural-Torsional Buckling of Prismatic Beam subjected to Pure Bending”, KSCE, Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No. 1, pp75~82.
- [6] Park, J.S. and Kang, Y.J(2004b), “Lateral Buckling of Stepped Beams under Linear Moment Gradient”, KSSC, Journal of Steel Structures Vol, 4, pp71~81.
- [7] Pi, Y.L. and Trahair, N.S.(1995), “Inelastic Torsion of Steel I-Beam,” ASCE, Journal of structural Engineering, Vol.121, pp609~620.
- [8] Trahair, N.S.(1993), Flexural-Torsional Buckling of Structures, CRC Press.