순수 휨 하중을 받는 비조밀 플랜지 H형 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도

Inelastic Lateral-Torsional Buckling Strengths of Stepped H-Beams with Noncompact Flanges Subjected to Pure Bending

손지민* · 박종섭**

Son, Ji Min · Park, Jong Sup

Abstract

This paper investigates inelastic lateral-torsional buckling of doubly and singly stepped beams with noncompact flange subjected to pure bending. A three-dimensional finite-element program ABAQUS(2007) and a regression program MINITAB(2006) were used to analytically develop new design equation. Ratios of flange thicknesses, flange widths, and stepped lengths of the beam based on a typical section of W14×90 were considered as analytical parameters. Two groups of 27 and 36 cases for doubly and singly stepped beam, respectively, with a total of 252 case, were analyzed in the inelastic buckling range. The combined effects of residual stresses and geometrical imperfection on inelastic lateral-torsional buckling of beams are considered. The new proposed equation will definitely improve the current design methods for the inelastic lateral-torsional buckling problem and will increase the efficiency in building and bridge design. The solution can be easily used to develop new design equations for inelastic lateral-torsional buckling resistance of stepped beams subject to general loading condition such as a concentrated load, a series of concentrated loads or uniformly distributed load.

Key words : Inelastic Lateral-Torsional Buckling, Stepped Beam, Noncompact Section, Beam Design

요 지

본 논문에서는 비조밀 플랜지가 사용된 H형강 휨부재에 양단 또는 일단 플랜지 보강된 스텝보에 순수 휨 하중을 받는 경우의 비탄성 횡-비틀림 좌굴에 관한 연구를 수행하였다. 3차원 유한요소 해석 프로그램 ABAQUS(2007)가 사용되었으며, 회귀분석 프로그램 MINITAB(2006)을 이용해 휨강도를 평가하기 위한 간편 설계식을 제안하였다. 해석에 사용된 비조밀 단면은 W14×90 단면을 기본으로 하였으며, 양단 또는 일단 스텝보 계수는 길이방향비, 플랜지 너비방향비 및 두께비로 나타내었다. 양단 스텝보의 매개변수는 27개, 일단 스텝보는 36개의 매개변수와 비탄성 범위내 4가지 비지지 길이를 고려하여 총 252개의 유한요소해석을 실시하였다. 하중 조건으로는 양단에 균일모멘트가 작용하는 것을 고려하였으며, 비선형 해석을 위해 잔류응력 및 초기변형을 고려하였다. 본 연구를 통해 제안된 휨강도 산정식은 경제적이고 합리적인 설계에 쉽게 적용 가능할 것이며, 다양한 하중조건을 가지는 양단 또는 일단 계단식 단면 변화보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도 설계식 개발에 적극 활용 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 비탄성 횡-비틀림 좌굴, 스텝보, 비조밀 단면, 보설계

1. 서 론

일반적으로 연속경간을 가지는 구조물일 경우 내부지점 부근에서 상대적으로 큰 부모멘트가 발생하게 되며 경제적인 단면 활용을 위하여 모멘트 분포에 따라 단면변화를 주는 것이 경제적이다. H형강 단면을 사용하는 보 및 거더의 경우 경간 길이에 따라 연속적으로 단면의 변화가 존재하는 테이퍼 보(Tapered Beam)와 계단식의 단면변화를 플랜지 두께와

폭에 변화를 주는 스텝보(Stepped Beam)가 변단면으로 활용되고 있다. 특히 스텝보의 경우 경간내 일부구간에 플랜지 단면보강이 가능하기에 비조밀 플랜지 단면보가 사용된 경우 경제적인 단면 활용을 극대화 할 수 있다.

국중식과 신영석(2000)은 미국 AISC-LRFD 설계기준에 의한 연속보 주부재의 조밀 및 비조밀 단면 최적화 설계에 대한 연구에서 비조밀(Noncompact) 단면이 조밀(Compact) 단면보다 단면의 경제성이 높다고 판단하였다. 비조밀 플랜지에

*정회원 · 하경엔지니어링(E-mail : jmlove7777@nate.com)

**정회원 · 상명대학교 건설시스템공학과 교수(교신저자)

표 1. 비조밀-조밀 단면 분류 기준

요소	λ	λ_p	λ_r
플랜지 (Flange)	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
복부 (Web)	$\frac{h}{t_w}$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.79 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

국부좌굴(Local buckling)이 발생하는 경우 H형 보의 횡-비틀림 좌굴 강도식을 AISC-LRFD 설계기준(2005)에서 다음과 같이 제안하고 있다.

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \quad (1)$$

여기서 C_b =모멘트구배 수정계수, M_p =공칭소성휨강도, F_y =항복응력, S_x =단면계수, λ =폭-두께비, λ_p =조밀단면의 폭-두께비 상한, λ_r =비조밀 단면의 폭-두께비 상한이다. λ , λ_p , λ_r 는 표 1에 의해 계산되어진다.

H형 보의 횡-비틀림 좌굴강도는 비지지 길이에 따라 탄성과 비탄성 구간으로 나누어 적용한다. AISC-LRFD 설계기준(2005)에서 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도는 다음 식 (2)로 계산되며, 단면에 국부좌굴이 발생하지 않을 때 적용한다.

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2)$$

여기서 L_b =비지지 길이, L_p =소성모멘트 대응지간길이, L_r =잔류응력을 고려한 항복모멘트 대응지간길이이다. 플랜지 비조밀 단면이 사용되는 경우 플랜지 국부좌굴을 고려한 공칭강도(M_n)는 플랜지 국부좌굴을 고려한 식 (1)과 횡-비틀림 좌굴 강도를 고려한 식 (2) 중에 최소값으로 결정한다.

스텝보에 대한 연구로는 Trahair(1993)가 비지지 길이내 경간 중앙에서 계단식 단면 변화를 가지는 H형보에 대한 간략식을 제안하였으나 연속경간 보에 많이 적용되는 비지지 구간 양단 또는 일단에 스텝보 형식을 가지는 경우에는 적용이 부적절하다. Park과 Stallings(2003)은 유한요소해석을 통해 비지지 구간 양단 및 일단에 스텝보가 적용된 보의 탄성 횡-비틀림 좌굴 강도 설계식을 제안하였으며, 스텝보가 탄성거동을 하는 경우 적극 활용 될 수 있다. 박종섭과 손지민(2008)은 유한요소해석결과를 이용하여 스텝보에 선형모멘트 하중을 받는 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도를 다음 식을 이용하여 계산하는 간략식을 제안하였다.

$$M_{ist}^L = C_{bist}^L C_{ist} M_{icr} \quad (3)$$

$$C_{bist}^L = 1.48 + 0.35\lambda - 0.078\lambda^2 \text{ for DSB} \quad (4a)$$

$$C_{bist}^L = 1.3 + 0.5\lambda + 0.20\lambda^2 \leq 1.6 \text{ for SSB} \quad (4b)$$

$$C_{ist} = 1 + 4\alpha^2(\beta\gamma^{1.1} - 1) \text{ for DSB} \quad (4c)$$

$$C_{ist} = 1 + 0.7\alpha^2(\beta\gamma^{0.5} - 1) \text{ for SSB} \quad (4d)$$

여기서 C_{bist}^L =선형모멘트 구배계수, λ =양단모멘트 비율(M_0/M_1)을 나타낸다. 식 (4a)는 양단 스텝보(Doubly Stepped Beam: DSB)일때 사용되며, 식 (4b)는 일단 스텝보(Singly Stepped Beam: SSB)일때 사용된다. C_{ist} 는 김종민(2008)등이 제안한 식으로서 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 계산식은 식 (4c)와 같고, 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 계산식은 식 (4d)와 같이 계산된다. α 는 플랜지의 길이방향의 스텝비율, β 는 플랜지 너비방향의 스텝비율, γ 는 플랜지 두께에 대한 스텝비율이며, M_{icr} 은 식 (2)로 계산된다. 식(3)과 (4)는 조밀단면 H형강이 사용된 보에 적용이 가능한 것으로 비조밀 단면이 사용된 스텝보의 비탄성 휨강도 평가에 적용하는 것은 적절치 못하다.

본 논문에서는 미국 AISC-LRFD 설계기준(2005)의 비탄성 휨강도 계산식과 조밀단면 스텝보 연구결과를 토대로 플랜지에 비조밀 단면이 사용된 H형강의 상하 플랜지에 단면보강된 스텝보의 휨강도 평가식을 제안하고자 한다. 비탄성 휨강도 평가를 위해 유한요소해석 프로그램을 활용한 거동특성 분석이 실시되었으며, 다중회귀분석 프로그램을 이용해 간편 설계식을 개발하였다.

2. 유한요소해석 모델링

순수 휨 하중을 받는 H형강 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위해 범용구조해석 프로그램 ABAQUS(2007)를 사용하였으며, 탄성 및 비탄성 좌굴해석에 사용된 요소는 4절점요소 S4R이다.

2.1 해석모델 및 경계조건 결정

스텝보의 구조해석을 실시하기 위해 앞서 균일단면보에 순수 휨 하중을 받았을 때 요소 수에 따른 탄성 횡-비틀림 좌굴강도 해석값의 수렴성을 조사하였다(손지민, 2009). 그 결과 플랜지는 4개, 복부는 6개, 길이 방향으로는 가로:세로 비율이 1:1의 비율이 되도록 적용하여 3%내외의 오차로 요소의 최적화를 판단하였다. 그림 1은 본 연구에서 적용되는 유한요소 해석 모델의 단순보 경계조건 중 힌지 모습을 보여주고 있다. 힌지경계조건의 경우 복부 가운데 절점은 1, 2, 3방향 변위와 1방향에 대한 회전을 구속하였으며, 반대 쪽 롤러 지점의 경우 복부 가운데 절점은 2, 3방향 변위와 1방향의 회전을

그림 1. 유한요소해석모델 경계조건(힌지)

표 2. AISC-LRFD 제안값과 해석결과 비교

구분	L_b (m)	L_b/h	AISC (kN-m)	FEM (kN-m)	비교 (%)
(1)	5	14.8	841	849	1.0
(2)	7	20.8	774	760	1.9
(3)	9	26.7	703	679	3.5
(4)	13	38.5	565	561	0.7

그림 2. 비지지 길이에 따른 휨강도 곡선

그림 3. 균일단면보 모델($L_b=5$ m)

구속하였다. 플랜지는 3방향 변위가 구속되었으며, 복부와 플랜지가 만나는 절점은 2, 3방향 변위를 구속하였다.

표 2는 AISC-LRFD 설계기준(2005) 제안값과 순수휨이 작용하는 최적화 균일단면 모델을 이용한 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도 산정결과를 비교한 것이다. 해석모델에는 잔류응력이 고려되었으며, 단면 초기변형은 고려되지 않았다. 표 2에서 알 수 있듯이 해석 모델의 결과와 설계기준 제안값과의 차이가 약 3.5%이내의 작은 오차를 보이고 있으며, 그림 2는 비지지 길이에 따른 휨강도 곡선에 해석결과를 나타낸 것이다. 그림 2의 FLB(Flange Local Buckling)는 플랜지 국부좌굴 고려식 (1)을 사용하여 계산된 휨강도를 나타내고 있다. 그림 3(a)는 균일단면보 해석모델을 나타내며, 그림 3(b)는 플랜지에 국부좌굴이 발생한 후 횡-비틀림 좌굴이 발생하여 파괴되는 좌굴형상을 보여주고 있다.

비탄성 횡-비틀림 좌굴강도 판단은 그림 4와 같이 최대변위가 발생하는 보 중앙지간에 횡변위(Lateral Displacement)

그림 4. 하중-변위 곡선($L_b=5$ m)

또는 회전변위(Center Twist Rotation)와 하중 곡선으로부터 그래프가 비례적으로 증가하다가 급격히 꺾여 기울기가 0이 되는 부분(Point A)을 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도로 판단하였다(Papangelis와 Trahair, 1987).

2.2 비선형 재료특성

비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하기 위한 비선형 해석시 적용된 응력-변형률관계는 탄소성재료(Elasto-plastic Material) 조건을 적용하였으며, 그림 5와 같이 항복응력(σ_y)은 345 MPa이며, 탄성계수는 210 GPa를 사용하였다.

단면 내 잔류응력(σ_r)과 초기변형 등의 초기조건을 고려하여 비탄성 해석을 수행하고자 잔류응력은 그림 6에 나타난 바와 같이 Pi와 Trahair(1995)가 H형강 연구에 고려한 단순 직선분포를 적용하였으며, 부재의 초기변형은 그림 7에 나타난 바와 같이 Avery와 Mahendran(2000)이 고려한 부재변형(Member Imperfection)과 국부변형(Local Imperfection)을

그림 5. 응력-변형률 곡선

그림 6. 잔류응력 패턴

그림 7. 초기변형

적용하였다. 부재변형은 복부 수직도 편심(e_o)에 지간길이(L)/1000, 국부변형에서 플랜지 변형은 플랜지폭(b_f)/150, 복부변형은 복부높이(d_f)/150를 적용하였다. 복부초기변형의 경우 부재변형과 복부국부변형 중 큰 값이 해석에 적용되었다. 적용된 부재변형은 국내 현대제철(2006) H형강 품질관리기준과 같으며, 국부변형은 유럽설계기준(Euro Code)와 유사한 값을 나타내고 있다.

2.3 변단면 해석변수 및 재하하중

비조밀 플랜지 H형강 기본단면은 AISC-LRFD 설계매뉴얼의 W14×90 단면을 토대로 그림 8과 같으며, 표 3은 그림 8의 표준단면의 폭-두께비와 표 1의 기준값들을 계산한 것으로 플랜지는 비조밀 단면($\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$)이고, 복부는 조밀단면($\lambda < \lambda_p$)임을 알 수 있다. 표 4는 유한요소해석에 적용된 재료값과 단면값을 나타내고 있다.

그림 2는 AISC-LRFD 설계기준(2005)을 근거로, 그림 8의 표준단면이 균일단면으로 비지지 길이(L_b , m)에 따라 적용되었을 때의 휨강도를 비지지 길이내하력 곡선으로 나타낸 것이다. 곡선의 수평축은 비지지 길이를 나타내며 수직축은 공칭모멘트 (M_n , kN-m)를 나타내고 있다. 소성구간, 비탄성구간, 탄성구간을 구분하기 위한 기준값을 계산하면, $L_p=4.1$ m, $L_r=13.4$ m이다. 본 해석모델 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도특성을 비지지 길이에 따른 거동분석을 위해 비탄성 구간 ($L_p < L_b < L_r$)내에서 (1) $L_b=5$ m ($L_b/h=14.8$), (2) $L_b=7$ m ($L_b/h=20.8$), (3) $L_b=9$ m ($L_b/h=26.7$), (4) $L_b=13$ m ($L_b/h=38.5$)의 4가지의 비지지 길이를 가지는 해석모델을 선정하였다.

그림 8. 해석모델단면

본 연구에 적용된 스텝보는 그림 9와 그림 10과 같이 양쪽 끝단에 계단식 단면변화를 가지는 양단 스텝보(Doubly Stepped Beam)와 한쪽 끝단에 계단식 단면변화를 가지는 일단 스텝보(Singly Stepped Beam)이며, α 는 플랜지의 길이방향비, β 는 너비방향비, γ 는 두께의 비를 나타낸다.

표 5는 양단 스텝보의 매개변수 해석범위를 나타내고 있으며, α 는 0.167~0.333으로 하나의 비지지 길이 모델에 27가지 스텝비율을 가지는 모델 해석이 수행 되었다. 또한 일단 스텝보의 매개변수 해석 범위는 표 6에 나타내었으며, α 는 0.167~0.5로 하나의 비지지 길이 모델에 36가지 스텝비율을 가지는 모델이 해석에 사용되었다.

그림 11은 순수 휨 하중을 받는 스텝보를 보여주고 있으며,

표 3. 폭-두께비 및 단면특성값

요소	λ	λ_p	λ_r
플랜지	10.21	9.37	24.65
복부	30.18	92.77	142.85

표 4. 유한요소해석 재료값 및 단면값

탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	단면2차멘트 (약축, m^4)	비틀림상수 (m^4)	뒹상수 (m^6)
210	80.77	1.5×10^{-4}	1.59×10^{-6}	4.28×10^{-6}

(a) 정면도

(b) 평면도

그림 9. 양단 스텝보(DSB) 해석모델

(a) 정면도

(b) 평면도

그림 10. 일단 스텝보(SSB) 해석모델

표 5. 양단 스텝보 해석변수

길이 방향 비율(α)	플랜지 폭 비율(β)	플랜지 두께 비율(γ)
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

표 6. 일단 스텝보 해석변수

길이 방향 비율(α)	플랜지 폭 비율(β)	플랜지 두께 비율(γ)
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

(a) 양단 스텝보

(b) 일단 스텝보

그림 11. 순수 휨 하중을 받는 스텝보

양단 스텝보의 경우 4가지의 비지지 길이에 표 5의 매개변수를 적용시켜 총 108개 모델의 유한요소해석을 실시하였으며, 일단 스텝보의 경우 4가지 비지지 길이에 표 6의 매개변수를 적용시켜 총 144개의 유한요소해석 결과를 얻었다.

3. 유한요소해석결과 및 설계식 제안

유한요소해석 프로그램 ABAQUS(2007)을 통하여 얻어진 해석결과를 회귀분석 프로그램 MINITAB(2006)을 이용하여 다중회귀분석식을 초기 추정한 후 순수 휨 하중을 받는 단순

지지된 스텝보의 비선형 횡-비틀림 좌굴 강도 간편 설계식을 개발·제안 하였다.

3.1 양단 스텝보

$$M_{ist} = C_{ist} M_{icr} \quad (5)$$

$$C_{ist} = 1 + 1.2\alpha^{1.7}(\beta\gamma^{1.2} - 1) \quad (6)$$

여기서, M_{ist} =순수 휨 하중을 받으며 비조밀 플랜지가 사용된 양단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도, M_{icr} =보 전체 비지지 길이에 균일단면으로 적용된 보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도로서 AISC-LRFD 설계기준에 따라 식 (1)와 식 (2)의 값 중 최소값으로 적용한다. 식 (6)의 α , β , γ 는 그림 9에 나타난 스텝보 계수이다.

그림 12(a)는 비지지 길이(L_b) 5 m($L_b/h=14.8$)일 때의 제안식과 유한요소해석 결과를 비교한 것이다. 실선은 식(6)의 C_{ist} 를 나타내며 점들은 유한요소해석 결과를 나타낸다. 해석결과와 제안식 (6)을 비교하면 -6%~5%의 차이를 보이고 있다. 비지지 길이 7m($L_b/h=20.8$) 일 때의 식 (6)과 유한요소해석 결과를 비교한 그림 12(b)의 경우 -5%~2%의 차이를 보이고 있다. 그림 12(c)와 12(d)는 각각 비지지 길이 9 m($L_b/h=26.7$)일 때와 13 m ($L_b/h=38.5$)일 때의 식 (6)과 유한요소해석 결과를 비교한 것으로 비지지 길이 9 m($L_b/h=26.7$) 일 때의 -1%~5%의 차이를 보이고, 비지지 길이가 13 m($L_b/h=38.5$)일 때는 -1%~9%의 차이를 보이고 있다. 그림 12(e)는 그림 12(a)~12(d) 유한요소해석결과를 하나의 그래프에 나타난 것으로 가장 큰 차이를 보이는 경우는 $L_b=13$ m, $\alpha=0.5$, $\beta=1$, $\gamma=1.8$ 일 때 9%의 차이를 보이고 있으며, $L_b=5$ m, $\alpha=0.5$, $\beta=1.4$, $\gamma=1.8$ 일 때 -6%의 차이를 나타내었다. 그림 12(e)를 살펴보면 C_{ist} 계수는 검토된 스텝보 계수 범위에서 1.0~1.4 범위의 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림 13은 스텝보 계수 α , β , γ 중 가장 좌굴 강도에 영향을 많이 미치는 플랜지 두께비(γ)를 수평축으로 하여 각각의 비지지 길이에 따라 유한요소해석 결과와 제안식을 비교하고 있다. 제안식과 유한요소해석결과가 같은 값을 나타내는 모델은 수직축값이 1.0이 될 것이며, 1.0보다 큰 값을 나타내는 경우는 제안식이 보수적으로 안전한 값을 제안하고 있음을 나타낸다. 그림 13에서 알 수 있듯이 비교값은 대부분 0.95-1.05 사이에 위치하여 제안식이 해석결과를 토대로 9% 이내의 오차에서 개발, 제안되었다.

3.2 일단 스텝보

$$M_{ist} = C_{ist} + M_{icr} \quad (7)$$

$$C_{ist} = 1 + 0.5\alpha^{1.7}(\beta\gamma^{1.1} - 1) \quad (8)$$

여기서, M_{ist} 는 순수 휨 하중을 받는 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도이며, M_{icr} 은 보 전체 비지지 길이에 균일단면으로 적용된 보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도로서 AISC-LRFD 설계기준에 따라 계산된다. 식 (8)의 α , β ,

그림 12. 스텝보계수를 고려한 해석결과와 제안식 비교

그림 13. 유한요소해석결과와 제안식 비교

γ 는 그림 10과 표 6에 정의된 스텝보 계수이다.

그림 14(a)는 비지지 길이 5 m($L_b/h=14.8$)일 때 제안식과 유한요소해석 결과를 비교한 것으로 실선은 제안식 (8)이며, 점들은 해석결과들이다. 비지지 길이 5 m인 모델의 경우 해석결과와 제안식 (8)의 차이는 -4%~5%로 나타났다. 그림

14(b)와 그림 14(c)는 비지지 길이 7 m($L_b/h=20.8$), 9 m($L_b/h=20.8$)의 유한요소해석 결과와 식 (8)을 비교한 것으로 비지지 길이 7 m($L_b/h=20.8$)일 때 -2%~4%의 차이를 보이고, 비지지 길이 9 m($L_b/h=20.8$)일 때 -2%~5%의 차이를 나타내었다. 비지지 길이 13 m($L_b/h=38.5$) 일 때의 비교 그래프인 그림

그림 14. 스텝보계수를 고려한 해석결과와 제안식 비교

그림 15. 유한요소해석결과와 제안식 비교

14(d)에서 유한요소결과와 제안식 (8)과의 차이는 -0.6%~6%로 나타났다. 그림 14(e)는 그림 14(a)~14(d)까지의 모든 유한요소해석 결과를 하나의 그래프에 나타낸 것이다. 가장 큰 차이를 보이는 것은 $L_b=13\text{m}$, $\alpha=0.5$, $\beta=1$, $\gamma=1.4$ 일 때 6%

의 차이를 보이며, $L_b=5\text{m}$, $\alpha=0.5$, $\beta=1.4$, $\gamma=1.8$ 일 때 -4%의 차이가 발생하였다. 그림 14(e)를 살펴보면 C_{ist} 계수는 검토된 스텝보 계수 범위에서 1.0~1.3 범위의 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림 15는 스텝보 계수 α , β , γ 중 가장 좌굴 강도에 영향을 많이 미치는 플랜지 두께비(γ)를 수평축으로 하여 각각의 비지지 길이에 따라 유한요소해석 결과와 제안식을 비교하고 있다. 제안식과 유한요소해석결과가 같은 값을 나타내는 모델은 수직축값이 1.0이며, 1.0보다 큰 값을 나타내는 경우는 제안식이 안전측 값을 제안하고 있음을 나타낸다. 그림 15에서 알 수 있듯이 비교값은 대부분 0.95-1.05 사이에 위치하고, 제안식이 해석결과를 토대로 6%이내의 오차 내에서 개발, 제안되었다.

4. 결 론

본 연구는 비조밀 플랜지단면이 사용된 H형강의 상하 플랜지에 일부 단면보강된 스텝보(Stepped Beam)의 휨강도 평가에 대해서 기술하고 있으며, 3차원 유한요소해석 프로그램 ABAQUS(2007)와 회귀분석 프로그램 MINITAB(2006)을 이용하여 순수 휨 하중을 받는 단순보의 양단 및 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도 산정식을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 순수 휨 하중을 받는 비조밀 플랜지 단면의 양단 및 일단 스텝보 비탄성 횡-비틀림 좌굴 강도 산정결과 플랜지 폭 스텝보 계수(β)보다 플랜지 두께 스텝보 계수(γ)가 강도에 미치는 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었으며, 플랜지 두께비(γ)가 1.8배로 보강된 단면의 경우 국부좌굴이 발생되지 않아 일부구간 플랜지 두께보강으로 비조밀단면을 경제적으로 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 제안된 설계강도식은 안전측 설계를 고려하여 해석결과보다 작은값을 가지도록 개발되었으며, 양단 스텝보의 경우 $L_b=13\text{ m}$, $\alpha=0.5$, $\beta=1$, $\gamma=1.8$ 일 때 9%, 일단 스텝보의 경우 $L_b=13\text{ m}$, $\alpha=0.5$, $\beta=1$, $\gamma=1.4$ 일 때 6%의 최대 차이가 발생하였다.
- 3) 양단 및 일단 스텝보의 비지지 길이에 따른 유한요소해석 결과로부터 비탄성 횡-비틀림 구간내에서 비지지 길이 비율(L_b/h)이 낮은 경우 국부좌굴발생 후 전체파괴모드가 발생되었으며, 비지지 길이 비율이 클수록 횡-비틀림 좌굴 파괴모드가 지배적이다. 이러한 현상은 비율이 클수록 탄성 횡-비틀림 좌굴거동에 근접하기에 발생되는 것으로 판단된다.
- 4) 양단 및 일단 스텝보의 제안식과 유한요소해석 결과비교로부터 양단 스텝보 제안식이 일단 스텝보 제안식의 차

이보다 범위가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 양단 스텝보일 때 단면변화에 따른 강도변화의 차이가 일단 스텝보 보다는 상대적으로 크게 발생되기 때문으로 분석된다.

본 연구결과는 비조밀 플랜지 단면이 사용된 H형강 건축구조(Building Structures) 휨부재에 적용 가능하며, 판형교(Plate Girder Bridges) 적용을 위해서는 추가적인 연구진행이 필요할 것으로 판단된다. 또한 개발된 식은 복잡한 유한요소해석을 거치지 않고 간편하게 사용될 수 있으며, 다양한 하중 조건을 고려한 양단 또는 일단 스텝보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도를 산정하는 설계식 개발로 확장 개발될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 국중식, 신영석 (2000) LRFD에 의한 연속보 주부재의 조밀 및 비조밀 단면 최적화 설계, **한국강구조학회논문집**, 제12권, 제3호 pp. 329-337.
- 김종민, 김승준, 박종섭, 강영중 (2008) 균일모멘트를 받는 계단식 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴에 관한연구, **한국강구조학회논문집**, 제20권, 제2호, pp. 237-246.
- 박종섭, 손지민 (2008) 선형 모멘트 하중을 받는 계단식 단면변화 I형보의 비탄성 횡-비틀림 좌굴강도산정을 위한 모멘트 구배계수 연구, **한국방재학회논문집**, 제8권, 제6호, pp. 53-60.
- 현대제철 (2006) Korean Standard 치수하용치.
- ABAQUS (2007) Standard User's Manual (Ver.6.7-2), Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.
- AISC-LRFD Specifications (2005) 13th Edition, Chicago, Illinois.
- Avery, P. and Mahendran, M. (2000) Distributed plasticity analysis of steel frame structures comprising non-compact sections, **Engineering Structures**, Vol. 22, pp. 901-919.
- MINITAB 14 Korean (2006) Statistic, Minitab Inc.
- Papangelis, J.P. and Trahair, N.S. (1987) Flexural-Torsional Buckling Tests on Arches, **Journal of Structural Engineering**, Vol.113, pp.1433-1443.
- Park, J.S. and Stallings, J.M. (2003) Lateral-Torsional Buckling of Stepped Beams, **ASCE, Journal of Structural Engineering**, Vol. 129, No. 11, pp. 1457-1465.
- Pi, Y.L. and Trahair, N.S. (1995) Inelastic Torsion of Steel I-Beam, **ASCE, Journal of structural Engineering**, Vol. 121, pp. 609-620.
- Trahair, N.S. (1993) Flexural-Torsional Buckling of Structures, CRC Press.

◎ 논문접수일 : 11년 09월 26일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 09월 27일
 ◎ 심사완료일 : 12년 02월 21일