

웹 변단면보의 탄성좌굴에 대한 AISC 기준의 수정계수(B)에 관한 연구

A Study of the Modification Factor(B) in the AISC Specification for Elastic Buckling of Web-Tapered Beams

류효진* · 임남형**

Ryu, Hyo Jin · Lim, Nam Hyoung

Abstract

This paper investigated the accuracy of the current design formulae for the elastic buckling strength of web-tapered I-beams in AISC-LRFD specification. The basic concept is to replace a tapered beam by an equivalent prismatic beam with a different length, but with a cross section identical to that of the smaller end of the tapered beam. The modification factor, B, is used to account for the stress gradient within the unbraced length and the lateral restraining effects offered by the adjacent segments. The modification factor(B) suggested in AISC-LRFD specification was compared with the finite element method(FEM) results. This paper presented a redefined method to calculate the modification factor(B).

Key words : Web-tapered beam, Elastic buckling, Stress gradient, Restraining effect

요 지

본 논문에서는 미국 AISC-LRFD 기준에서 제시하고 있는 웹 변단면 I형 보의 탄성 좌굴강도 산정식을 고찰하였다. 미국 AISC-LRFD 기준의 기본 개념은 웹 변단면 보를 가장 작은 단면과 동일한 크기를 가지면서 길이가 다른 등가 일정단면보로 대체하는 것이다. 또한 비지지 구간에 작용하는 응력 구배와 이웃한 보의 횡방향 구속효과를 고려하기 위하여 수정계수(B)를 적용하고 있다. AISC-LRFD 기준에 제시된 수정계수(B)와 유한요소해석결과와의 비교를 통해 본 논문에서는 수정계수(B)를 산정하기 위한 재 정의된 방법을 제안하였다.

핵심용어 : 변단면 보, 탄성 좌굴, 응력 구배, 구속효과

1. 서 론

최근 건설재료의 성능향상과 시공기술의 발달로 장스팬 거더 교량과 철골조 건물이 많이 건설되고 있다. 이와 같이 구조물이 장스팬화 될수록 부재내의 위치에 따른 응력이 차이가 커서 기존의 일정단면 부재를 적용할 경우 최대응력이 발생하는 위치의 가장 불리한 단면을 기준으로 전체 부재의 단면 크기가 결정되므로 그에 따른 재료적인 손실이 많았다. 이에 비해 변단면 부재를 사용하면 부재 전체가 단면크기에 따라 응력을 적절히 분담하도록 부재를 설계할 수 있어서 장스팬 구조물의 경제성을 향상시킬 수 있다.

미국 AISC-LRFD 기준(1999)에 제시된 변단면 보의 좌굴강도 산정 방법은 Lee 등(1972)의 연구결과를 기초로 작성된 것이다. Jimenez(1998)는 변단면 부재의 비탄성 좌굴에 관한 연구를 수행하였으며 AISC-LRFD 기준의 좌굴 강도식은 변단면 부재의 좌굴강도를 과소 또는 과다평가하고 있다고 지

적하였다. 심현주 등(2007)은 판-폭두께비와 횡 비지지 길이를 주요변수로 변단면 부재의 좌굴강도에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 이성희 등(2007)은 변단면 부재의 재료 및 기하학적 비선형해석을 수행하여 변단면 부재의 구조 내력과 붕괴 메커니즘을 평가하였다.

미국 AISC-LRFD 기준(1999)과 건축구조설계기준(2005)에서는 변단면 보의 설계 휨응력 산정 시, 비지지 구간에 작용하는 응력 구배와 이웃한 보의 횡방향 구속효과를 고려하기 위하여 수정계수(B)를 적용하고 있다. 이와 같은 수정계수(B)는 응력의 구배 영향과 구속효과의 영향이 동시에 고려된 계수이므로 수정계수(B)의 정확성을 검증할 필요가 있다. 본 논문에서는 수정계수(B)와 범용유한요소프로그램인 ABAQUS를 사용한 유한요소해석결과와의 비교를 통해 수정계수(B)를 산정하기 위한 재 정의된 방법을 제안하고자 한다.

*충남대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail: zino98@hanmail.net)

**정회원 · 교신저자 · 충남대학교 토목환경공학부 교수

2. 설계기준(AISC-LRFD)

미국 AISC-LRFD(1999) 기준에서는 다음과 같은 조건을 만족하는 웹 변단면보에 대한 모멘트 좌굴강도를 제시하고 있다.

- 변단면 부재에 모멘트가 작용할 경우 단면은 휨평면에 수직으로 적어도 하나 이상의 대칭축을 가져야 한다.
- 변단면 부재의 플랜지는 일정하며 같은 단면적을 가진다.
- 변단면 부재의 춤(d)은 다음과 같이 직선적으로 변화한다.

$$d = d_o \left(1 + \gamma \frac{z}{L} \right) \quad (1)$$

여기에서, d_o 는 변단면 부재에서 가장 작은 단면의 춤을, L 은 변단면 부재의 비지지 길이를, z 는 변단면 부재의 가장 작은 단면으로부터의 거리를, 그리고 γ 는 변단비(taper ratio)를 각각 나타낸다. 변단비, γ 는 다음과 같다.

$$d = \frac{d_L - d_o}{d_o} \leq \text{the smaller of } 0.268 \frac{L}{d_o} \text{ or } 6.0 \quad (2)$$

식 (2)에서, d_L 는 변단면 부재에서 가장 큰 단면의 춤을 나타낸다.

휨-비틀림 좌굴에 대한 변단면 부재의 공칭강도(M_n)는 다음과 같이 허용 좌굴응력(F_{br})과 변단면 부재의 비지지 길이 내 위험단면의 탄성단면계수(S_x')의 곱으로 표현된다.

$$M_n = \frac{5}{3} \cdot S_x' \cdot F_{br} \quad (3)$$

식 (3)에서 (5/3)는 허용응력을 한계상태응력으로 환산해 주기 위해 사용된 증가량이다. 허용 좌굴응력(F_{br})이 강제 항복응력(F_y)의 1/3보다 작거나 같으면(탄성좌굴 영역) 다음과 같은 허용 좌굴응력을 사용하도록 규정하고 있다.

$$F_{br} = B \sqrt{F_{sr}^2 + F_{wr}^2} \quad (4)$$

$$F_{sr} = \frac{0.41E}{h_s L d_o / A_f} \quad (5)$$

$$F_{wr} = \frac{5.9E}{(h_w L / r_{T_0})^2} \quad (6)$$

여기에서, F_{sr} 는 순수 비틀림에 대한 변단면 부재의 좌굴응력을 그리고 F_{wr} 는 뒹(warping)에 대한 변단면 부재의 좌굴응력을 나타낸다. E 는 탄성계수를 나타내며 h_s 와 h_w 는 변단면 부재를 가장 작은 단면과 동일한 크기를 가지면서 길이가 다른 등가 일정단면 부재로 대치시키기 위한 길이 수정계수로 다음과 같이 정의된다.

$$h_s = 1.0 + 0.023 \cdot \gamma \sqrt{L d_o / A_f} \quad (7)$$

$$h_w = 1.0 + 0.00385 \cdot \gamma \sqrt{L / r_{T_0}} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)에서 A_f 는 압축 플랜지의 단면적을, 그리고 r_{T_0} 는 가장 작은 단면에서 압축 플랜지에 압축 웹 면적의 1/3을 더한 단면의 웹 축에 대한 회전반경을 각각 나타낸다.

휨을 받는 변단면 부재의 비지지 구간에 작용하는 응력 구배와 이웃한 부재의 횡방향 구속효과의 영향을 고려하기 위하여 식 (4)와 같이 허용 좌굴응력에 수정계수(B)를 적용하도록 규정하고 있다. 수정계수(B)는 Lee 등(1972), Morrell and Lee(1974), 그리고 Lee and Morrell(1975)에 의해 식 (9)와 같은 개념을 근거로 산정되었다.

$$B = \frac{(\sigma_{cr})_{LR}}{|(\sigma_{cr})_{SS}|_{\alpha=k}} \quad (9)$$

여기에서, $(\sigma_{cr})_{LR}$ 는 이웃한 보에 의한 횡방향 구속효과가 고려된 변단면 보의 탄성좌굴응력을, $|(\sigma_{cr})_{SS}|_{\alpha=k}$ 는 단순 지지되고 균일한 휨 응력을 받는 변단면 보의 탄성좌굴응력을 각각 나타낸다. 식 (9)에서 k 는 작은 단과 큰 단의 탄성 단면계수의 비를, α 는 작은 단과 큰 단의 모멘트 비를 각각 나타내는 것으로 $\alpha=k$ 는 변단면 보에 작용하는 휨 응력이 균일함을 의미한다.

3. 수정계수, B

Lee 등(1972), Morrell and Lee(1974), 그리고 Lee and Morrell (1975)의 연구결과에 의해 산출되어 미국 AISC-LRFD(1999) 기준에서 적용하고 있는 변단면 부재의 좌굴강도를 산정하기 위한 수정계수(B)는 이웃한 보에 의한 구속효과와 응력 구배 효과가 복합적으로 고려되어 있다.

본 논문에서는 식(9)와 같은 개념의 수정계수(B)를 다음과 같이 이웃한 보에 의한 구속계수(R)와 응력 구배계수(B')를 분리하여 수정계수(B)를 재 정의하였다.

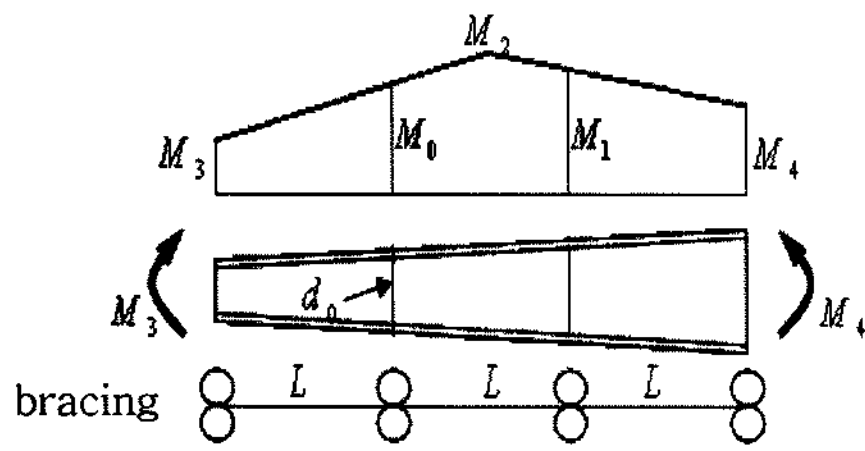
$$B = B' \times R \quad (10)$$

$$B' = \frac{|(\sigma_{cr})_{SS}|_{\alpha \neq k}}{|(\sigma_{cr})_{SS}|_{\alpha=k}} \quad (11)$$

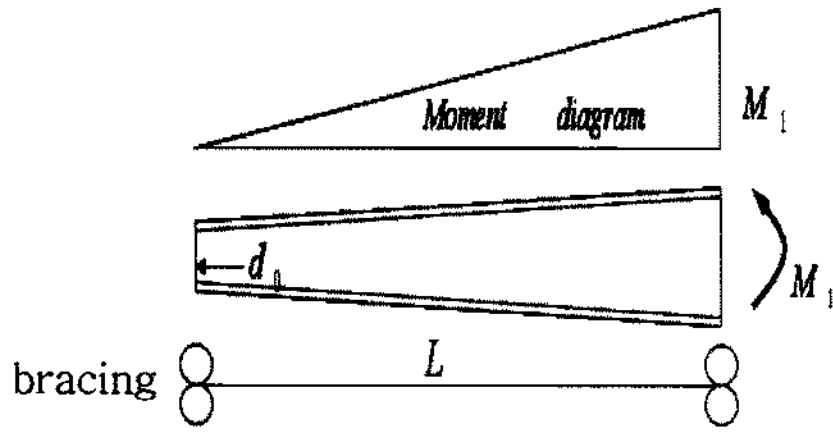
$$R = \frac{(\sigma_{cr})_{LR}|_{\alpha \neq k}}{|(\sigma_{cr})_{SS}|_{\alpha \neq k}} \quad (12)$$

식 (11)의 응력 구배 계수(B')는 일정단면보(prismatic beam)에서 적용하고 있는 모멘트 구배 수정계수의 개념을 적용한 것으로 균일한 응력을 받는 단순 지지된 변단면 보의 좌굴응력에 대한 응력 구배하중을 받는 단순 지지된 변단면 보의 좌굴응력 비를 나타낸다. 식(12)의 이웃한 보에 의한 구속계수(R)는 응력 구배하중을 받는 단순 지지된 변단면 보의 좌굴응력에 대한 동일한 구배하중을 받으면서 이웃한 보에 의한 구속효과가 고려된 변단면 보의 좌굴응력 비를 나타낸다.

본 논문에서 제안한 수정계수(B)의 재 정의된 방식인 식 (10)의 각 계수를 산출하여 적용성과 정밀도를 검토하고 변단면보에 응력구배를 발생시키기 위하여 다음 그림과 같은 두



(경우-1)



(경우-2)

그림 1. 모델

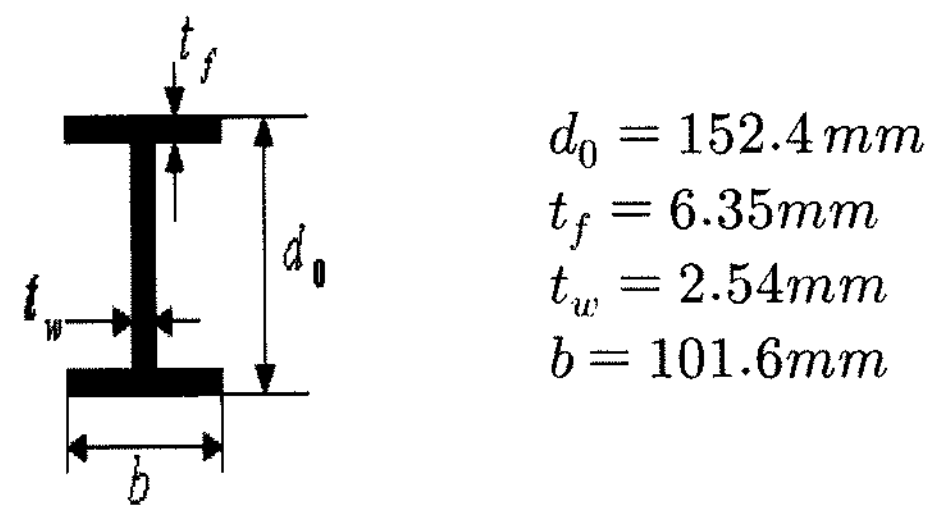


그림 2. 단면 제원(작은 단)

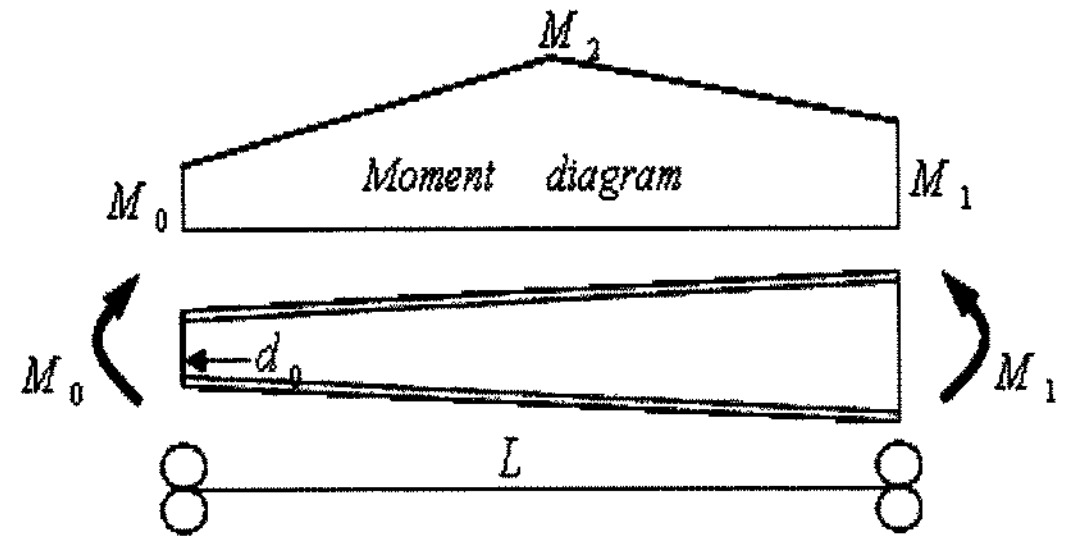


그림 3. 경우-1-1 모델

가지 경우를 고려하였다.

그림 1에서 경우-1은 연속하여 접해있는 3구간으로 이루어진 변단면 보에서 각 구간의 비지지 길이가 동일하고, 최대 휨모멘트 M_2 가 중앙 지간의 보에 존재하며 M_4 가 M_3 보다 큰 경우를 나타내는 모델로 AISC-LRFD(1999)에서는 다음과 같은 수정계수(B)를 제안하고 있다.

$$B = 1.0 + 0.37 \left(1.0 + \frac{M_4}{M_2} \right) + 0.5\gamma \left(1.0 + \frac{M_4}{M_2} \right) \geq 1.0 \quad (13)$$

식 (13)에서 모멘트 비(M_4/M_2)는 단일곡률일 경우에는 (-)를 취하고 (+)일 경우에는 0을 취한다. 또한 경우-2는 변단면 보의 가장 작은 단에서의 휨 응력이 0인 경우를 나타내는 모델로 AISC-LRFD(1999)에서는 다음과 같은 수정계수(B)를 제안하고 있다.

$$B = \frac{1.75}{1.0 + 0.25\sqrt{\gamma}} \quad (14)$$

3.1 유한요소해석 모델

범용 유한요소프로그램인 ABAQUS 6.5를 사용하였으며 S8R5 쉘요소를 적용하였다. 비지지 길이(L)는 4,000 mm, 탄성계수(E)는 200,000 MPa, 그리고 포아송 비는 0.3을 적용하였다. 위험 지간에서의 가장 작은 단의 단면은 그림 2와 같으며 변단비(taper ratio)는 0.0에서 1.2까지 그리고 모멘트 비(M_4/M_2 , M_1/M_2)는 0.0에서 1.0까지 적용하였다.

변단면 보의 양단의 경계조건은 단순지지로 가정하였으며 브레이스가 위치하는 곳에서는 완전 횡방향 구속을 적용하였다. 경우-1 모델의 하중조건을 나타내기 위하여 위험 지간(중앙 지간)의 중앙부에 집중하중을 작용시켰다.

경우-1 모델에서 응력 구배계수(B')를 산출하기 위하여 그림 1의 경우-1 모델에서 위험 지간(중앙 지간)만을 분리하여 그림 3과 같은 모델(경우-1-1)을 사용하였다.

3.2 응력 구배계수, B'

경우-1 모델의 위험지간(중앙지간)의 좌굴강도 산정에 필요한 응력 구배계수(B')를 산출하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 식 (11)에서 $[(\sigma_{cr})_{SS}]_{\alpha=k}$ 는 균일한 응력을 받는 단순지지된 변단면보의 좌굴응력을 나타내는 것으로 경우-1-1 모델에서 M_0 와 M_1 만을 작용시켜 균일한 응력상태를 설정하고 좌굴해석을 실시하였다. 또한 식(11)에서 $[(\sigma_{cr})_{SS}]_{\alpha \neq k}$ 는 응력 구배를 받는 단순지지된 변단면보의 좌굴응력을 나타내는 것으로 경우-1-1 모델에서 M_0 는 고정시키고 M_1 과 M_2 를 변화시키면서 좌굴해석을 실시하였다. 해석결과는 그림 4와 같으며 해석결과에 대한 회귀분석을 실시한 구배계수(B')는 다음 식(15)와 같다.

$$B' = 1.2173 - 0.2057 \frac{M_1}{M_2} + 0.0796 \left(1 + 0.8266 \frac{M_1}{M_2} \right) \gamma \quad (15)$$

여기에서, 모멘트 비(M_1/M_2)는 단일곡률일 경우 (+)를 취한다.

경우-2 모델의 좌굴강도 산정에 필요한 응력 구배계수(B')

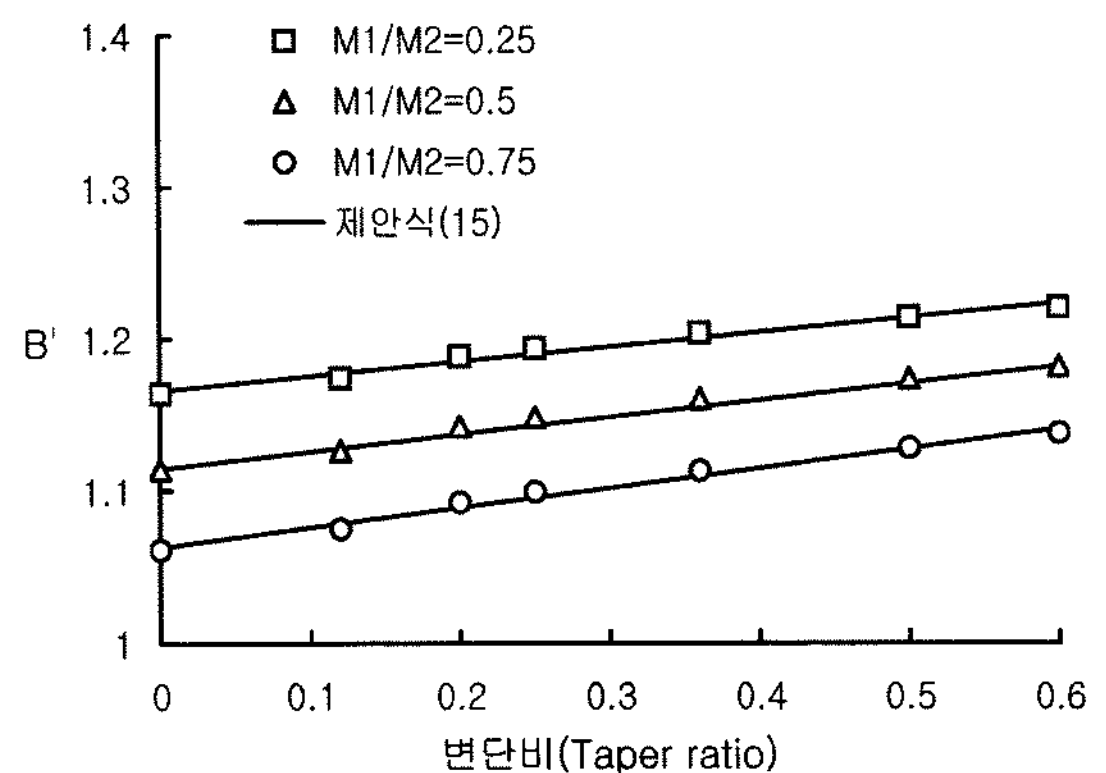


그림 4. 경우-1의 구배계수(B')

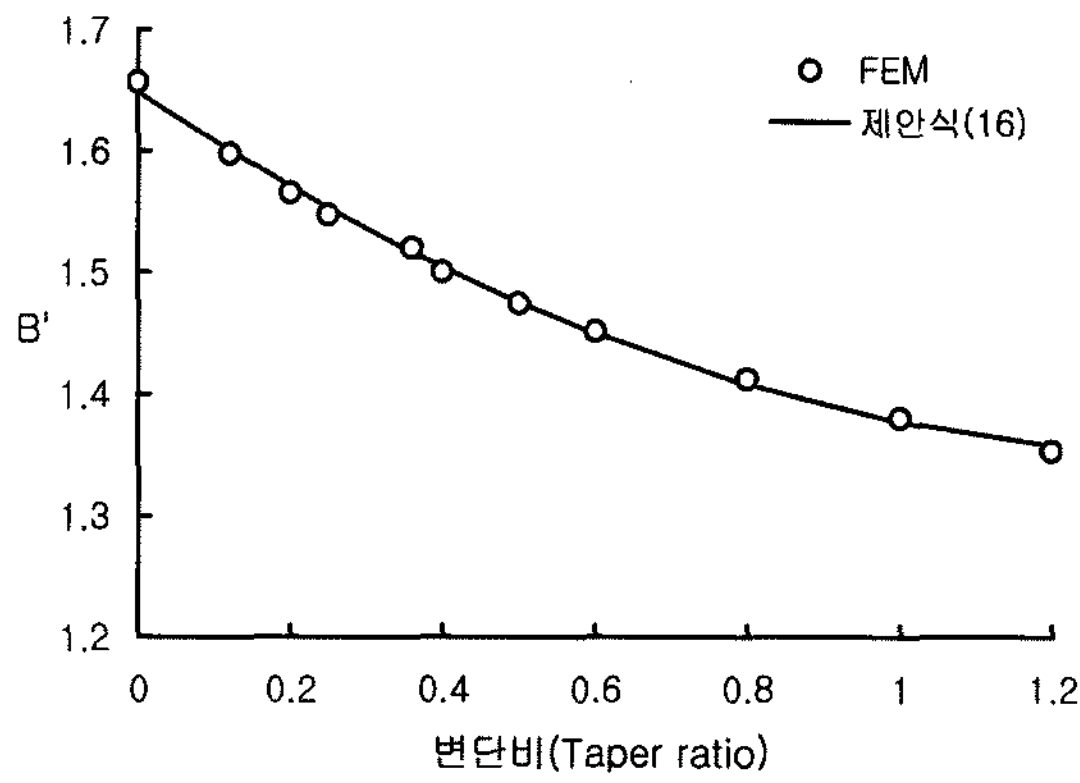


그림 5. 경우-2의 구배계수(B')

를 산출하기 위하여 유한요소해석을 실시하였으며 해석결과는 그림 5와 같다. 해석결과에 대한 회귀분석을 실시한 구배계수(B)는 다음 식(16)과 같다.

$$B' = 1.6489 - 0.4212\gamma + 0.149\gamma^2 \quad (16)$$

3.3 구속계수, R

경우-1 모델의 위험지간(중앙지간)의 좌굴강도 산정에 필요한 이웃한 보에 의한 구속계수(R)를 산출하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 식 (12)에서 $|(\sigma_{cr})_{SS}|_{\alpha \neq k}$ 는 응력 구배를 받는 단순지지된 변단면보의 좌굴응력을 나타내는 것으로 3.2절의 경우-1-1모델에 대한 좌굴해석을 실시하였다. 또한 식 (12)에서 $|(\sigma_{cr})_{LR}|_{\alpha \neq k}$ 는 응력 구배를 받으며 이웃한 보에 의한 구속 효과가 고려된 좌굴응력을 나타내는 것으로 경우-1-1모델에서 적용된 응력구배를 유지하면서 경우-1 모델에 대한 좌굴해석을 실시하였다. 해석결과는 그림 6과 같으며 해석결과에 대한 회귀분석을 실시한 구속계수(R)는 다음 식 (17)과 같다.

$$R = 1.2551 - 0.1798M_4 / M_2 + (0.3268M_4 / M_2 - 0.0403)\gamma - (0.1556M_4 / M_2 + 0.06)\gamma^2 \quad (17)$$

여기에서, 모멘트 비(M_4 / M_2)는 단일곡률일 경우 (+)를 취한다.

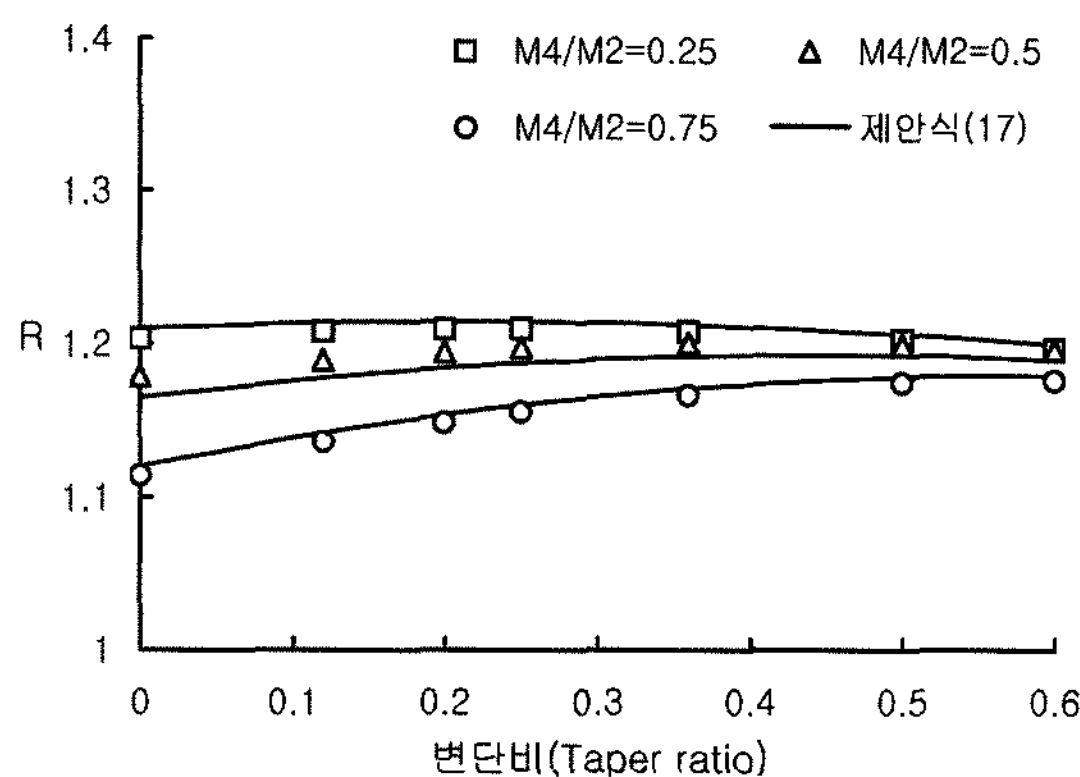


그림 6. 경우-1의 구속계수(R)

3.4 변단면 보의 탄성좌굴응력 비교

3.2절과 3.3절에서 산출된 구배계수와 구속계수를 적용하여 산정되는 변단면 보의 탄성좌굴응력과 유한요소 해석에 의한 탄성좌굴응력을 비교하였다. 미국 AISC-LRFD(1999) 기준에 의한 탄성좌굴응력은 다음과 같다.

$$F_{br-AISC}^* = \frac{5}{3}F_{br} = \frac{5}{3} \times B \cdot \sqrt{F_{sr}^2 + F_{wr}^2} \quad (18-1)$$

$$B = Eq.(13) \text{ or } Eq.(14) \quad (18-2)$$

본 논문 결과에 의한 탄성좌굴응력은 다음과 같다.

$$F_{br}^* = \frac{5}{3}F_{br} = \frac{5}{3} \times B \cdot \sqrt{F_{sr}^2 + F_{wr}^2} \quad (19)$$

경우-1 모델에 대한 수정계수(B)는 식(20)과 같이 산출되며 경우-2 모델에 대한 수정계수(B)는 식(21)과 같이 산출된다.

$$B = B' \times R = Eq.(15) \times Eq.(17) \quad (20)$$

$$B = B' \times R = Eq.(16) \times 1.0 \quad (21)$$

그림 7은 경우-1 모델에 대한 탄성좌굴응력을 비교한 그래프이다. 미국 AISC-LRFD (1999) 기준에 의한 탄성좌굴응력은 변단비가 증가하면서 유한요소 해석결과와의 오차가 증가하며 작용하는 모멘트 비가 증가하면서 탄성좌굴응력을 과소 또는 과다평가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 재 정의된 수정계수를 사용하면 약 0.5%이내의 오차를 보이고 있다.

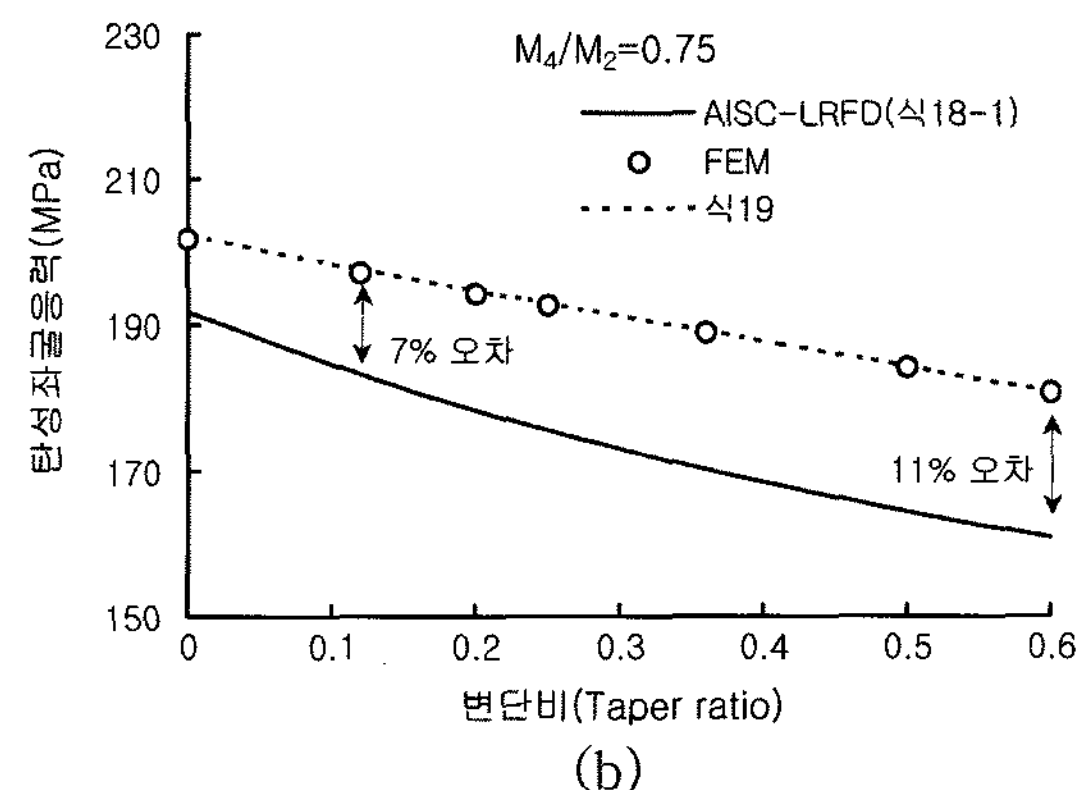
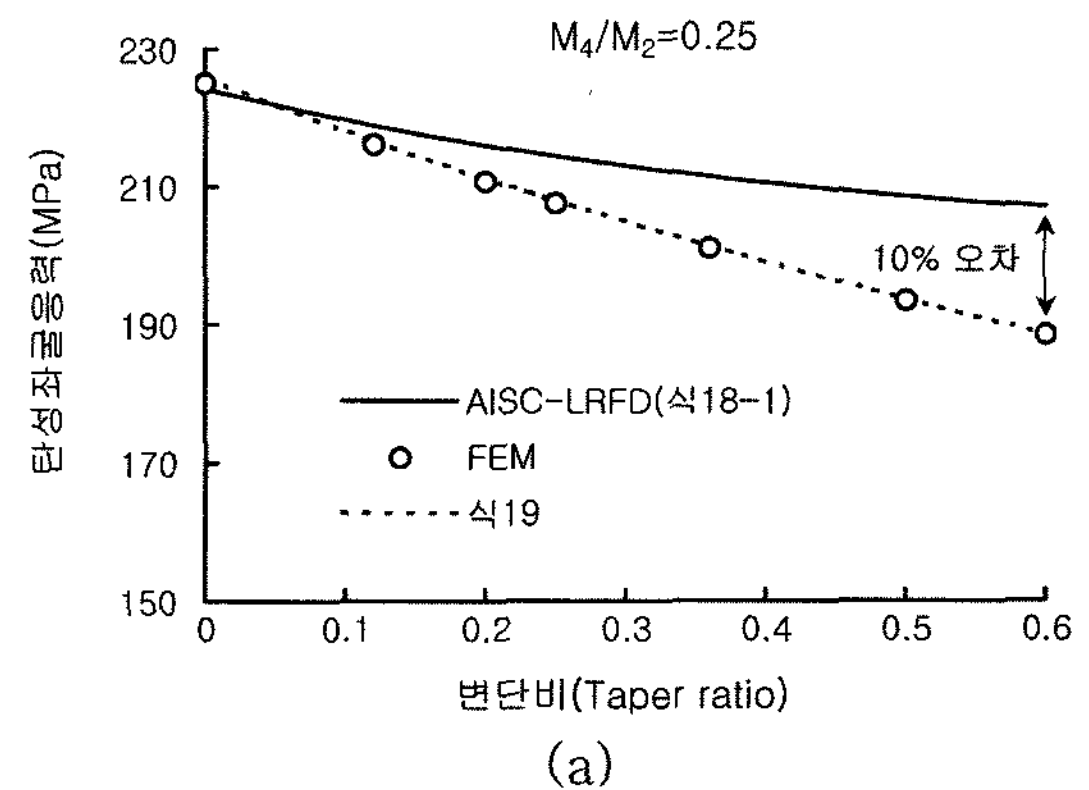


그림 7. 탄성좌굴응력 비교(경우-1)

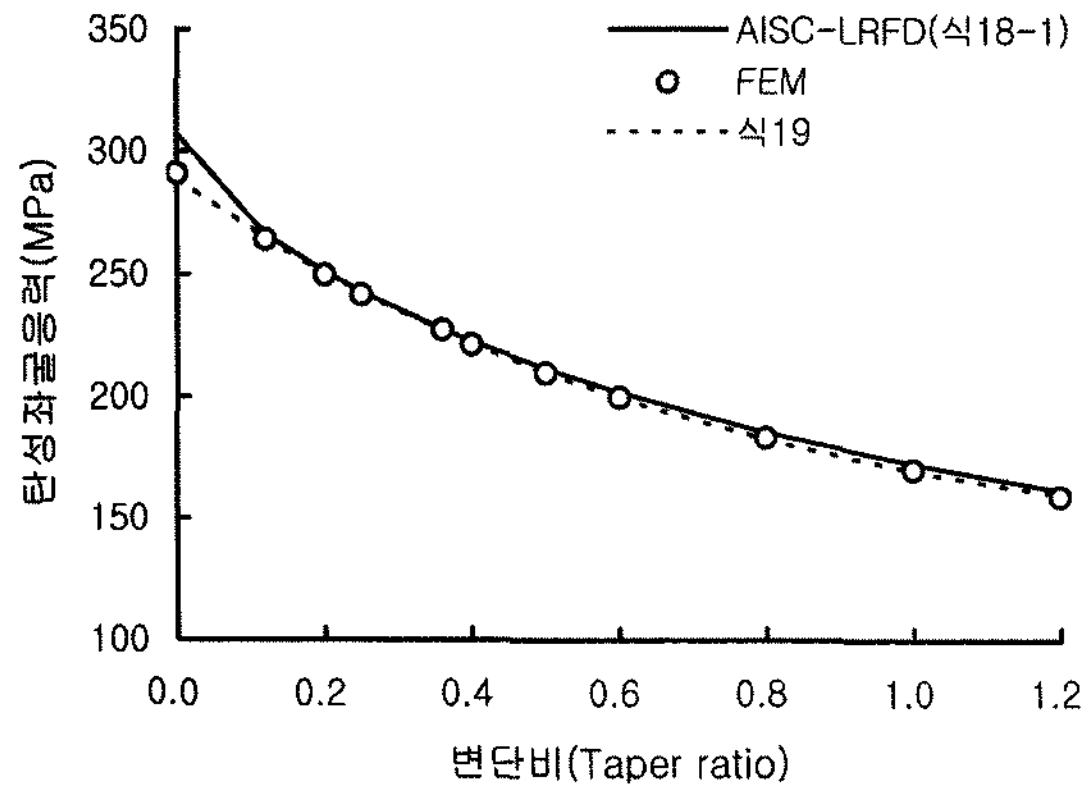


그림 8. 탄성좌굴응력 비교(경우-2)

그림 8은 경우-2 모델에 대한 탄성좌굴응력을 비교한 그래프이다. 미국 AISC-LRFD (1999) 기준에 의한 탄성좌굴응력과 본 논문에서 재 정의된 수정계수를 사용한 탄성좌굴응력 모두 유한요소 해석결과와 약 1%이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 미국 AISC-LRFD(1999) 기준의 변단면 보 좌굴강도 산정식에서 사용되고 있는 수정계수(B)를 합리적으로 재 정의하였다. 유한요소 해석 결과와의 비교를 통해 본 논문에서 제안한 수정계수(B)가 현 설계기준보다 응력 구배 효과와 이웃한 보의 구속효과를 정밀하게 반영하고 있음을 보였다.

다양한 경계조건과 하중조건에 대한 추가적인 연구를 수행하여 변단면 보의 사용 증가에 부응할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준. 대한건축학회.
- 심현주, 이성희, 김진호, 이은택, 최성모 (2007) 춤이 큰 웹 변 단면 H형 보의 휨내력에 대한 실험적 평가. 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제5호, pp. 483-492.
- 이성희, 심현주, 이은택, 홍순조, 최성모 (2007) 춤이 큰 웹 변 단면 H형 보의 휨내력에 대한 해석적 평가. 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제5호, pp. 493-501.
- American Institute of Steel Construction (1999) *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. AISC.
- Jimenez G. (1998) *Inelastic Stability of Tapered Structural Members*, Doctoral dissertation, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Lee G. and Morrell M. (1975) Application of AISC Design Provisions for Tapered Members. *Engineering Journal*, AISC, First Quarter, pp. 1-13.
- Lee G., Morrell M. and Ketter R. (1972) *Design of Tapered Members*. Welding Research Council Bulletin, 173, pp. 1-32.
- Morrell M. and Lee G. (1974) *Allowable Stress for Web-Tapered Beams with Lateral Restraints*. Welding Research Council Bulletin, 192, pp 1-10.

- ◎ 논문접수일 : 2008년 02월 12일
 ◎ 심사의뢰일 : 2008년 02월 12일
 ◎ 심사완료일 : 2008년 02월 20일