

고온 강구조 압축재의 좌굴 강도에 관한 연구

A Study on Buckling Strengths for Steel Compression Members at High Temperatures

최 현 식*
Choi, Hyun-Sik

Abstract

The high-temperature properties of mild steels were studied by comparing the test results of Kwon and the yield strength, tangent modulus predicted by the design provisions of ASCE and Eurocode(EC3). The column strengths for steel members at high temperatures were determined by the elastic and inelastic buckling strengths according to elevated temperatures. The material properties at high temperatures should be used in the strength evaluations of high temperature members. The buckling strengths obtained from the AISC, EC3 and approximate formula proposed by Takagi et al. were compared with ones calculated by the material nonlinear analysis using the EC3 material model. The newly simplified formulas for yield stress, tangent modulus, proportional limit and buckling strength which were proposed through a comparative study of the material properties and buckling strengths. The buckling strengths of proposed formulas were approximately equivalent to ones obtained from the formulas of Takagi et al. within 4% . They were corresponded to the lower bound values among the buckling strengths calculated by the design formulas and inelastic buckling analysis.

Keywords : Column strength, High temperature, Inelastic buckling strength, Slenderness ratio, Yield stress

1. 서론

고온의 강구조 압축재에 대한 압축 강도를 평가하기 위한 설계 기준과 연구 성과가 많은 연구자들에 의하여 축적되어 있다¹⁻¹¹⁾. 고온의 콤팩트 단면 압축재의 압축 강도에 대한 연구 결과를 비교하고, 다양한 강도 저하 요인을 고려하여 하한의 압축 강도 평가와 평가식의 단순화를 목적으로 비교 연구하였다. 또한 본 논문과 직접적인 관련성이 있는 연구 동향을 간략히 소개하고자 한다.

고온 강재의 재료 특성에 대하여 Kwon(2007)에 의한 실험적 연구가 수행되었다²⁾. SS275와 SM355 강재의 경우 상온에서 평균 280MPa, 412MPa, 500°C에서 평균 166MPa, 249MPa의 항복 강도(0.2% offset)로 평가되었으며, 인장 강도, 탄성 계수, 연신율의 평가 결과를 제시하고 있다. Kim et al.(2018)은 SS275와 SM355 강재의 고온 시험을 통

해 SS275 경우 상온에서 평균 295MPa, 500°C에서 평균 168MPa의 항복 강도(0.2% offset)를 측정하여 공칭 항복 강도 275MPa의 근거를 마련하였다³⁾. Eurocode 3 (EC3)(2005)⁴⁾, ASCE(1992)⁵⁾, AIJ 기준의 재료 모델과 Kwon(2007)의 실험 결과²⁾를 토대로 항복 강도와 탄성 계수 등을 비교 분석하였다. 항복 강도는 500°C 이하에서 EC3와 ASCE 기준에 비하여 낮게 평가되었으며, 600°C 이상에서는 유사한 결과를 나타냈다³⁾.

SS275 H형강 압축재의 파괴 온도에 대한 실험이 Kim, Kang & Choi(2014)에 의하여 수행되어 초기 설정된 압축력의 유지 상태에서 가열에 의한 파괴 온도를 평가하였다⁶⁾. SS400(SS275) 강재의 공칭 항복 강도 235MPa를 적용하고 파괴 온도에 대한 EC3 기준의 재료 모델을 적용한 비탄성 좌굴 강도는 초기 설정된 압축 응력도의 64%에 해당하는 낮은 값으로 평가되었다. 2016년 개정된 한국산업표준(KS)이 규정하고 있는 SS275(SS400)의 항복 강도 275MPa를 적용하면 약 75%의 값으로 평가될 수 있다.

Kodur, Dwaikat & Fike(2010)는 강재의 고온 특

* 주교신저자, 정회원, 계명대학교 건축공학전공 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Keimyung University
Tel: 053-580-5276 Fax: 053-580-5165
E-mail: hsc261@kmu.ac.kr

성에 대하여 ASCE, EC3 재료 모델과 Poh 모델을 적용한 보의 처짐 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다⁷⁾. 고온에서의 응력-변형률 관계에서 세 모델은 다소 차이를 나타내고 있으며, EC3의 응력-변형률 관계식을 사용할 때 ASCE 모델에 비하여 실험에 근접하는 것으로 평가되었다. 압축 강도와 연관되는 용어로서 기둥의 압축 강도(Column strength) P_n 은 휨 좌굴 강도 F_{cr} 에 압축재의 전단 면적 A 를 곱한 값으로 정의된다. 본 논문에서는 압축 강도를 결정하는 휨 좌굴 강도 F_{cr} 을 사용하여 압축 강도에 대한 비교 및 논의를 한 후 휨 좌굴 강도를 단순히 좌굴 강도 F_{cr} 로 표기하기로 한다.

온도 상승에 따른 강구조 압축재의 강도 평가와 관련하여 Takagi & Deierlein(2007)⁸⁾은 AISC(2005)⁹⁾, EC3의 설계 기준과 비선형 유한 요소 해석 및 H형강 실험의 결과를 비교하였다. EC3 재료 모델을 사용한 비선형 유한 요소 해석 결과에 대하여 EC3 기준의 압축 강도는 10~20% 범위 내, AISC의 결과는 2배 정도의 큰 값을 나타내는 경우가 있다. 초기 변형, 잔류 응력 등에 의한 좌굴 내력의 저하 현상을 고려하여 하한 값에 해당하는 좌굴 강도식을 제안하고 있다⁹⁾.

고온 강재의 재료 특성에 관한 실험 결과와 설계 기준과의 비교 연구가 수행되고 있으며, EC3 재료 모델이 비선형 해석 등에 널리 활용되고 있다⁸⁾. EC3 재료 모델은 변형률 0.02에 대한 항복 강도를 기준으로 응력-변형률 관계를 정의하고 있으며, 온도 변화에 대한 항복 강도 저감 계수를 표현하고 있다. 400°C까지의 온도 변화에 대해서는 항복 강도 저감 계수가 1.0으로 표현된다⁴⁾. 그러나 좌굴 강도 식이나 공칭 항복 강도에 사용하는 경우 변형률 0.02에 대응하는 저감 계수 1.0을 사용하는 것은 적절하지 않다고 판단된다.

400°C 이하의 온도에서 EC3 재료 모델의 공칭 항복 강도에 대한 감소 계수의 검토가 필요하다고 사료된다. 이러한 배경에서 재료 모델들의 비교를 통한 감소 계수와 단순화를 검토하기로 한다. 아울러 Takagi & Deierlein(2007)⁸⁾, AISC, EC3의 설계 기준에 의한 압축 강도와 비탄성 좌굴 강도 해석 결과에 대한 비교 연구를 통하여 콤팩트 단면의 단순화된 좌굴 강도식을 제안하고자 한다.

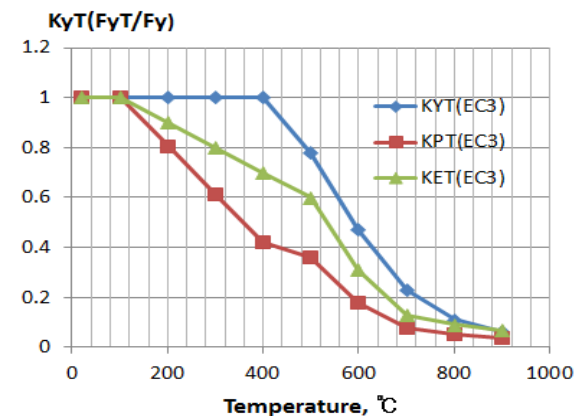
2. 고온 강재의 재료 특성 비교와 단순화 모델

2.1 항복 강도

온도 변화에 따른 강재의 항복 강도, 탄성 계수, 비례 한도를 결정할 수 있는 EC3 재료 모델의 저감 계수는 <Table 1> 및 <Fig. 1>과 같다. 저감 계수는 상온에서의 변형률 0.02에 대한 항복 강도와 탄성 계수에 대한 감소율을 나타내고 있다. 본 논문에서는 구조용 부재의 내력을 평가하는 점을 고려하여 800°C 이하로 한정하여 표기하고자 한다. 기준이 되는 상온에서의 항복 강도 F_y , 탄성 계수 E 에 <Table 1> 및 <Fig. 1>에서의 저감 계수 k_{yT} , k_{pT} , k_{ET} 를 각각 곱하여 온도 변화에 따른 항복 강도 F_{yT} 비례 한도 응력도 F_{pT} , 탄성 계수 E_{T0} 를 결정할 수 있다.

<Table 1> Reduction factors defined by EC3⁴⁾

Temperature (°C)	$k_{yT}(EC3)$ (F_{yT}/F_y)	$k_{pT}(EC3)$ (F_{pT}/F_y)	$k_{ET}(EC3)$ (E_{T0}/E)
20	1.0	1.0	1.0
100	1.0	1.0	1.0
200	1.0	0.80	0.9
300	1.0	0.61	0.8
400	1.0	0.42	0.7
500	0.78	0.36	0.6
600	0.47	0.18	0.31
700	0.23	0.07	0.13
800	0.11	0.05	0.09

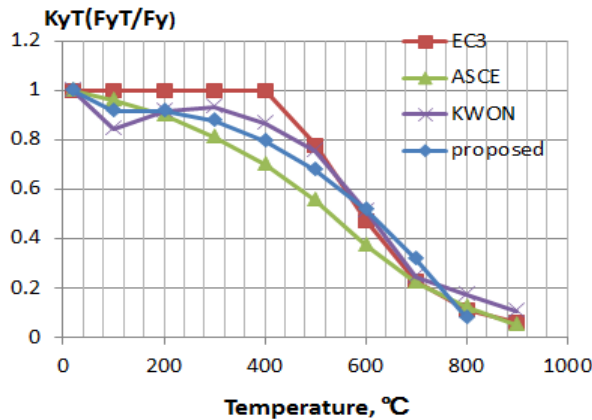


<Fig. 1> Comparison of reduction factors for yield stress, tangent modulus and portional limit in EC3⁴⁾

항복 강도는 고온 강재의 압축 강도에 크게 영향을 미칠 수 있으며, EC3의 항복 강도 저감 계수, ASCE⁵⁾와 Kwon(2007)의 항복 강도(1.0% offset) 실험 결과²⁾에 대한 저감 계수를 비교하기로 한다. ASCE 기준의 온도 T 에 따른 항복 강도 저감 계수는 식 (1) 및 식 (2)와 같다⁵⁾.

$$k_{yT(ASCE)} = 1.0 + \frac{T}{900 \ln\left(\frac{T}{1750}\right)}: T \leq 600^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$k_{yT(ASCE)} = \frac{340 - 0.34T}{T - 240}: T > 600^\circ\text{C} \quad (2)$$



<Fig. 2> Reduction factors k_{yT} for yield strength in EC3, ASCE⁵⁾, Kwon²⁾ and proposed $k_{yT(Proposed)}$

<Fig. 2>에서 보는 바와 같이 Kwon(2007)²⁾의 실험 결과와 ASCE 재료 모델⁵⁾은 600°C 이하에서 EC3 재료 모델⁴⁾의 저감 계수와 차이가 있고, 400°C에서 EC3에 비하여 각각 86%, 68%의 낮은 값을 나타내고 있다. 500°C 이상에 대하여 Kwon의(2007) 실험 결과와 EC3 재료 모델은 근사하게 평가되고 있다. 변형률 0.02에 대한 항복 강도를 기준으로 할 경우 400°C까지는 응력도가 같은 값을 나타낸다²⁾. EC3 재료 모델을 사용한 응력도-변형률 곡선에서도 이를 확인할 수 있다. 온도 상승에 따른 비선형 또는 비탄성 영역에서 EC3와 AISC⁹⁾의 좌굴 강도식에 항복 강도 감소 계수 1.0을 적용하는 것은 적합하지 않는 것으로 판단된다. 이러한 경우 400°C 이하에서도 낮은 값의 항복 강도를 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 따라서 이들 간의 저감 계수를 비교하여 낮은 값으로 단순화된 저감 계수 식을 식 (3)과 같이 제안한다.

$$k_{yT(Proposed)} = 2 \times 10^{-6} T^2 + 0.0006 T + 0.8762 \quad (3)$$

식 (3)에 대한 항복 강도 감소 계수는 <Fig. 2>에 서와 같이 EC3, ASCE, Kwon(2007)의 실험 결과 중간에 위치하는 값을 나타내고 있다. 특히 좌굴 강도 식을 사용할 경우 좌굴 발생 시 변형률이 0.02보다 낮은 레벨이 될 것으로 판단된다. 이러한 현상을 고려하면 400°C 이하에서 항복 강도 저감 계수를 <Fig. 2>와 같이 1.0 이하로 채택할 필요가 있다. 제안된 항복 강도 감소 계수는 Kwon(2007)의 실험 결과²⁾에 근접하여 표현되고 있다.

2.2 탄성 계수와 비례 한도

고온 강재의 탄성 계수 감소 계수 k_{ET} 는 EC3 재료 모델에서 <Table 1>과 같이 제시되어 있다. 탄성 계수는 항복 강도의 감소율에 비해 높은 비율로 감소되고 있다. 탄성 계수에 대한 비교를 위해 ASCE⁵⁾의 재료 모델과 Kwon(2007)의 실험 결과²⁾를 채택하고자 한다. ASCE 재료 모델의 감소 계수식은 식 (4) 및 식 (5)와 같다⁵⁾.

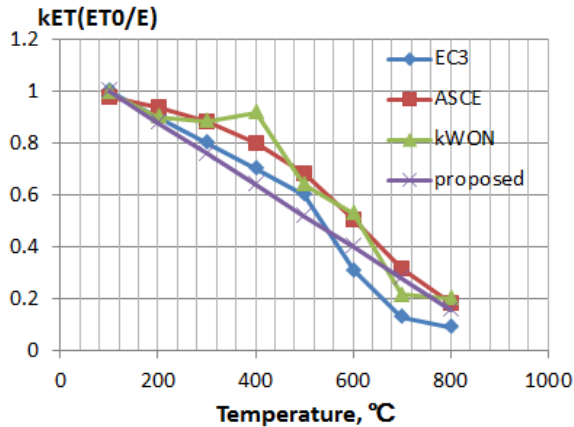
$$T \leq 600^\circ\text{C}: k_{ET} = 1.0 + \frac{T}{2000 \ln\left(\frac{T}{1100}\right)} \quad (4)$$

$$T > 600^\circ\text{C}: k_{ET} = \frac{690 - 0.69T}{T - 53.5} \quad (5)$$

$$k_{ET(Proposed)} = -0.0012T + 1.1197 \quad (6)$$

이들 탄성 계수에 대한 감소 계수는 <Fig. 3>과 같이 비교되며, 탄성 계수 감소 계수를 단순화된 선형으로 모델화하여 식 (6)과 같이 제안한다.

<Fig. 3>에서 ASCE 재료 모델과 Kwon(2007)의 실험 결과²⁾는 EC3 재료 모델보다 높은 값을 보이고 있다. 제안된 모델은 EC3 재료 모델에 비해 500°C 이하에서 낮은 값, 500°C 이상에서는 높은 값의 저감 계수로 표현되었으나, ASCE 및 실험 결과와 비교하면 전반적으로 비탄성 좌굴 강도를 낮게 평가하는 방향으로 모델화 된다. 비례 한도 응력도의 감소 계수에 대하여 ASCE 재료 모델에서는 항복 강

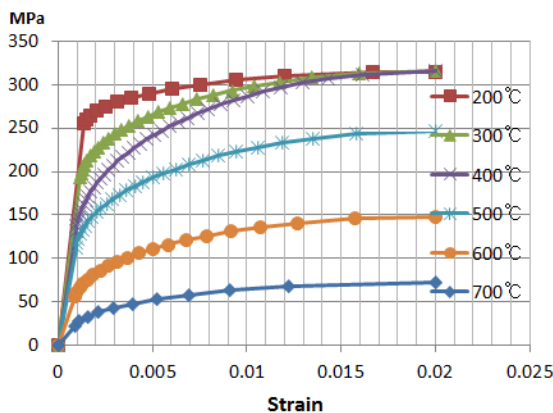


<Fig. 3> Reduction factors k_{ET} for elastic modulus in EC3⁴⁾, ASCE⁵⁾, Kwon²⁾, and proposed $k_{ET(Proposed)}$

도가 비례 한도 응력도 F_{pT} 가 되는 Bi-linear 모델로 되어 있다. EC3 재료 모델에서는 <Fig. 1>과 같이 표현되어 있으나 이를 선형으로 단순화하여 식 (7)과 같이 제안한다.

$$k_{pT(Proposed)} = -0.0012T + 1.0172 \quad (7)$$

<Fig. 4>는 EC3 재료 모델을 사용한 SS275 강재의 온도 변화에 따른 응력도-변형률 곡선을 나타낸다. 선형 구간에는 <Table 1>의 $k_{pT(EC3)}$, $k_{ET(EC3)}$ 를 사용하고, 비선형 구간의 응력도-변형률 관계, 접선 계수는 식 (8)~(12)와 같다⁴⁾. ϵ , ϵ_{yT} , ϵ_{pT} 는 변형률, 항복 변형률 0.02, 비례 한도 변형률, F 는 응력도를 나타낸다.



<Fig. 4> Stress-strain relations for yield strength 275MPa (Yield strength 316MPa at 0.2% strain obtained by using EC3)

$$F = F_{pT} - c + (b/a)[a^2 - (\epsilon_{yT} - \epsilon)^2]^{0.5} \quad (8)$$

$$E_T = \frac{b(\epsilon_{yT} - \epsilon)}{a[a^2 - (\epsilon_{yT} - \epsilon)^2]^{0.5}} \quad (9)$$

$$a^2 = (\epsilon_{yT} - \epsilon_{pT})(\epsilon_{yT} - \epsilon_{pT} + c/E_{T0}) \quad (10)$$

$$b^2 = c(\epsilon_{yT} - \epsilon_{pT})E_{T0} + c^2 \quad (11)$$

$$c = \frac{(F_{yT} - F_{pT})^2}{(\epsilon_{yT} - \epsilon_{pT})E_{T0} - 2(F_{yT} - F_{pT})} \quad (12)$$

상온에서의 항복 강도 275MPa를 대상으로 할 경우 EC3 재료 모델은 변형률 0.02에 상응하는 강도를 항복 강도로 정의하고 있다. 따라서 약 15%의 응력도 증가분을 고려하여 316MPa를 항복 강도로 정의한 결과의 응력도-변형률 곡선은 <Fig. 4>와 같다.

3. 강재의 온도 변화에 따른 좌굴 강도

3.1 EC3 재료 모델을 사용한 비탄성 좌굴 강도

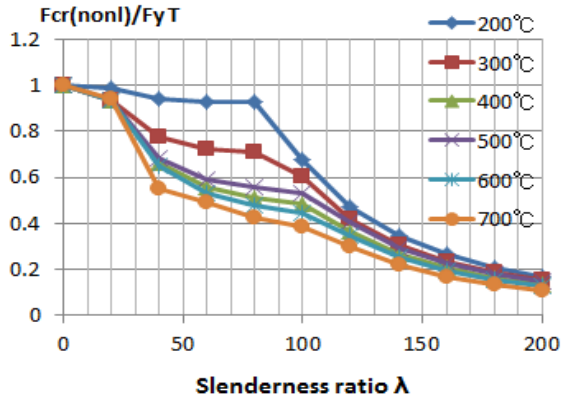
초기 변형이 존재하지 않는 이상적인 압축재의 비탄성(재료 비선형) 좌굴 강도와 관련되는 접선 계수 이론과 오일러의 비탄성 좌굴 강도식 $F_{cr(nonlinear)}$ 은 식 (13)과 같이 정의될 수 있다^{4),10)}.

$$F_{cr(nonlinear)} = \frac{\pi^2 E_T}{\lambda^2} \quad (13)$$

식 (13)에서 λ 는 압축재의 세장비, E_T 는 식 (9)의 비탄성 영역 접선 계수를 나타낸다⁴⁾. 고온 강재의 비탄성 좌굴 강도는 접선 계수에 의하여 결정된다. 접선 계수는 비례 한도 이후 급격히 감소하는 현상을 보인다. 실험 결과에 비하여 EC3 재료 모델의 적용 결과가 낮게 평가되므로 접선 계수 값을 높이고 급변하는 특성을 완화하고 방안으로 Kim(2014)은 EC3에서의 항복 변형률 0.02를 0.003으로 수정하여 접선 계수를 증대시키는 방안을 제안하였다¹¹⁾.

앞서 논의한 바와 같이 EC3 재료 모델을 채택하여 고온에서의 비탄성 영역에 대한 응력도, 변형률,

접선 계수의 관한 식 (8)~(12)와 좌굴 강도식 식 (13)을 사용하여 온도 변화와 변형률의 함수가 되는 접선 계수 E_T 에 의한 비탄성 좌굴 강도 $F_{cr(nonlinear)}$ 를 해석한 결과는 <Fig. 5>와 같다.



<Fig. 5> Buckling strengths obtained by material nonlinear analysis at high temperatures

<Fig. 4>의 응력도-변형률 곡선에서 200°C의 경우 완전 탄소성 모델에 근접하며, 이러한 재료 특성에 따라 좌굴 강도도 급변하는 현상을 <Fig. 5>에서 볼 수 있다.

<Fig. 5>에서 종축은 온도에 따른 항복 강도와 좌굴 강도의 비를 나타내었다. 400°C 이상에서 재료 비선형 특성이 응력도-변형률 곡선과 좌굴 강도 특성에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

이러한 비선형 해석의 좌굴 강도와 AISC, EC3 등의 설계 강도 기준을 적용한 결과를 비교 분석할 수 있다. 이상적인 압축재에 대한 좌굴 이론 및 해석과 달리 실제 부재에 존재하는 잔류 응력, 초기 변형 등 강도의 저감 요인이 존재하며 이러한 현상과 실험의 결과 등을 반영하여 좌굴 강도 기준이 제정되어 있다. 따라서 좌굴 강도 기준을 사용한 결과와 해석 결과를 비교하여 이들 간의 차이점을 파악하기로 한다.

3.2 EC3 재료 모델을 사용한 설계 기준의 좌굴 강도와 비탄성 해석 결과의 비교

압축재의 좌굴 강도를 결정하는 EC3 및 AISC⁵⁾ 설계 기준식에 의한 좌굴 강도와 비탄성 해석 결과를 비교하기로 한다. 먼저 AISC 기준과 EC3 기준의 좌굴 강도식의 경우 상온에서의 기둥 강도식에 온도 변화에 따른 탄성 계수, 항복 강도를 대체함으로써 고온 압축재의 좌굴 강도를 평가하도록 되어 있다. AISC 기준⁵⁾은 식 (14) 및 식 (15)와 같이 표현된다. 여기서 식 (13)의 좌굴 강도식에 온도 함수로 표현되는 탄성 계수 E_{T0} 를 적용한 오일러의 좌굴 응력도를 F_{euT} 로 나타낸다⁵⁾.

$$F_{yT} \leq 2.25F_{euT}: F_{cr(AISC)} = \left[0.658 \frac{F_{yT}}{F_{euT}}\right] \quad (14)$$

$$F_{yT} > 2.25F_{euT}: F_{cr(AISC)} = 0.877 F_{euT} \quad (15)$$

고온 압축재에 대한 EC3의 좌굴 강도식은 식 (16)~(20)과 같다. 식 (20)의 α 는 부재의 초기 변형에 대한 영향 계수로써 0.13~0.76 사이의 변수로 표현된다^{3),8)}.

$$F_{cr(EC3)} = \Phi_T F_{yT} \quad (16)$$

$$\Phi_T = \frac{1}{\psi_T + [\psi_T^2 - \bar{\lambda}_T^2]^{0.5}} \leq 1.0 \quad (17)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{F_{yT}/F_{euT}} \quad (18)$$

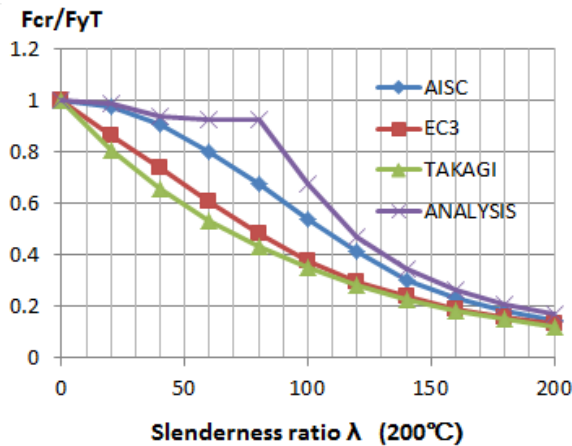
$$\Psi_T = 0.5[1 + \alpha \bar{\lambda}_T + \bar{\lambda}_T^2] \quad (19)$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/F_y} \quad (20)$$

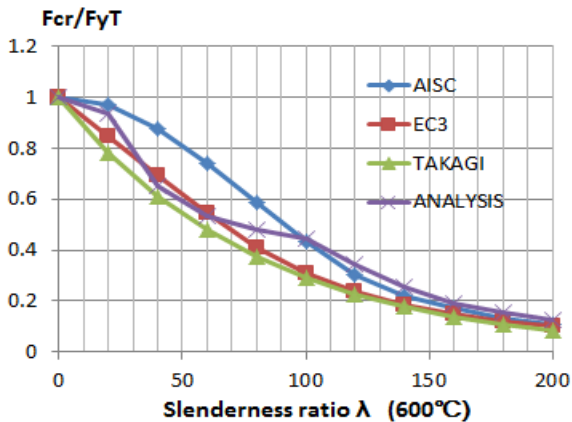
Takagi & Deierlein(2007)의 좌굴 강도 제안식⁸⁾은 식 (21)과 같이 단순하게 표현된다.

$$F_{cr(Takagi)} = [0.42 \sqrt{F_{yT}/F_{euT}}] F_{yT} \quad (21)$$

이들 좌굴 강도식의 적용과 재료 비선형 해석 결과의 비교를 위하여 고온 강재의 재료 특성은 앞에서 언급한 EC3 재료 모델을 사용하기로 한다. 200°C, 600°C에서 세장비에 따른 좌굴 강도의 계산 결과를



<Fig. 6> Comparison of inelastic buckling stresses with ones of design formulas (200°C)



<Fig. 7> Comparison of inelastic buckling stresses with ones of design formulas (600°C)

<Fig. 6>, <Fig. 7>에서 비교할 수 있다. 여기서의 계산 예는 상온에서의 항복 강도 $F_y = 275MPa$ 를 채택하였다.

계산된 좌굴 강도 F_{cr} 은 EC3 재료 모델의 온도에 따른 항복 강도 F_{yT} 에 대한 비로 표현되고 있다.

<Fig. 6>과 <Fig. 7>에서 보는 바와 같이 재료 비선형 해석(ANALYSIS)의 좌굴 강도에 비하여 설계 기준식의 좌굴 강도가 낮게 평가되고 있다. AISC 좌굴 강도식⁵⁾의 경우 탄성 한계 영역을 $0.44F_y$ 로 설정하고 있으며, EC3 좌굴 강도식³⁾과 Takagi & Deierlein(2007)의 경우 잔류 응력과 초기 변형 등에 따른 강도 저하 현상을 고려한 좌굴 강도의 기준⁸⁾을 제시하고 있다. 전체적으로 AISC 기준이 EC3 기준이나 Takagi & Deierlein(2007)의 제안식⁸⁾에 비하

여 높은 좌굴 강도를 보이고 있다. 이는 EC3 기준에서 초기 변형이 큰 경우에 대한 좌굴 강도식의 적용 때문이다. <Fig. 6>에서 보는 바와 같이 600°C에서의 재료 비선형 해석의 결과는 EC3 강도식과 Takagi & Deierlein(2007)의 제안식에 대한 결과에 근접하는 경향을 보인다. 비탄성 구간에서 AISC 기준의 좌굴 강도는 EC3 기준에 비하여 온도 200°C : 세장비 40의 경우 23%, 세장비 80의 경우 42%, 온도 600°C : 세장비 40의 경우 25%, 세장비 80의 경우 39% 높은 강도로 평가되고 있다. 400°C 이상에서의 좌굴 강도를 비교하면 재료 비선형 해석의 결과와 EC3 및 Takagi & Deierlein(2007)의 좌굴 강도식⁸⁾의 결과가 비교적 상응하는 경향을 보이며 하한의 압축 강도 값을 나타내고 있다. 전반적으로 설계 기준과 재료 비선형 해석의 차이는 상온에 가깝고, 단주에 근접하는 세장비가 작은 비탄성 영역에서 크게 나타나고 있다.

4. 좌굴 강도식의 제안과 설계 기준 비교

4.1 좌굴 강도식의 제안

고온 압축재의 좌굴 강도를 평가함에 있어 설계 기준을 적용할 수 있으나, 앞에서의 비교를 통하여 단순화된 좌굴 강도식을 식 (22)~(23)과 같이 제안한다. 이 식에서 항복 강도와 접선 계수는 EC3 등의 재료 모델을 사용할 수 있으며, 본 논문에서 제안한 재료 모델을 사용할 경우 식 (24)~(25)를 적용할 수 있다. 설계의 관점에서 비교된 좌굴 강도 중 하한 값에 상응하는 좌굴 강도식으로 사료된다.

$$F_{cr(Proposed)} = [0.28 \frac{\lambda}{\lambda_{pT}}] F_{yT} \tag{22}$$

$$\lambda_{pT} = \pi \sqrt{E_{T0}/0.4F_{yT}} \tag{23}$$

$$E_{T0} = k_{ET(Proposed)} E = [-0.0012T + 1.1197] E \tag{24}$$

$$F_{yT} = k_{yT(Proposed)} F_y = [2 \times 10^{-6} T^2 + 0.0006 T + 0.8762] F_y \tag{25}$$

4.2 좌굴 강도의 비교와 고찰

<Table 2>에 세장비 60에 대한 좌굴 강도를 비교하였다. EC3 재료 모델을 사용하여 EC3과 제안된 좌굴 강도식의 결과를 $F_{cr(EC3)(EC3)}$, $F_{cr(prop.)(EC3)}$ 로 표기하였다. 제안된 재료 모델을 사용하여 Takagi & Deierlein(2007)에 의해 제안된 강도식⁸⁾의 적용 결과를 $F_{cr(Takagi)(prop.)}$, $F_{cr(prop.)(prop.)}$ 로 표기하였다. <Table 2>에서 보는 바와 같이 제안된 좌굴 강도식은 EC3 기준의 91~94% 범위에 있다.

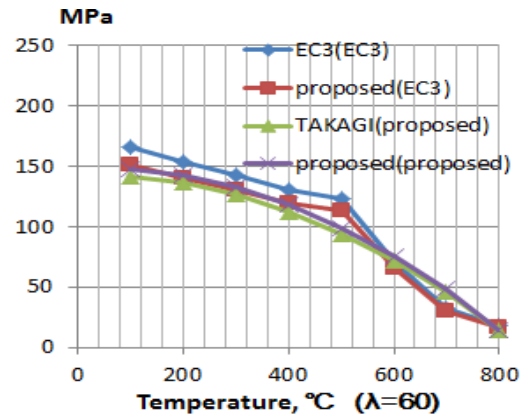
제안된 재료 모델과 좌굴 강도식의 적용 결과는 600°C 이하에서 92~107% 범위에 있다. 또한 Takagi & Deierlein(2007)의 제안식⁸⁾과 유사한 결과를 나타내며 약 4% 높은 값을 나타내고 있다. 실제 설계에서 중요한 고온의 범위는 300~600°C로 판단된다.

<Table 2> Comparison of buckling stresses of proposed formula with ones of EC3³⁾ and Takagi⁸⁾

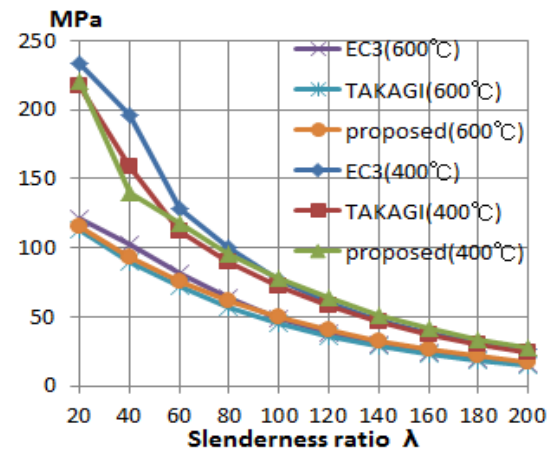
T (°C)	$\lambda = 60$			
	$F_{cr(EC3)}$ (EC3)	$F_{cr(prop.)}$ (EC3)	$F_{cr(Takagi)}$ (prop.)	$F_{cr(prop.)}$ (prop.)
200	154.1 (1.0)	140.7 (0.91)	136.6 (0.88)	142.8 (0.92)
300	142.3 (1.0)	130.1 (0.91)	126.6 (0.89)	132.6 (0.93)
400	130.2 (1.0)	119.2 (0.91)	112.2 (0.86)	117.7 (0.90)
500	123.5 (1.0)	113.7 (0.92)	93.8 (0.76)	98.6 (0.79)
600	70.2 (1.0)	65.1 (0.92)	71.8 (1.16)	75.4 (1.07)
700	32.1 (1.0)	30.2 (0.94)	46.0 (1.43)	48.1 (1.49)

<Fig. 8>은 상온 항복 강도 275MPa, 세장비 60에 대한 좌굴 강도를 비교한 것이다. 제안된 좌굴 강도식의 좌굴 강도와 EC3, Takagi & Deierlein(2007)의 좌굴 강도식⁸⁾에 의한 결과를 비교하기로 한다.

각 좌굴 강도식에 본 논문에서 제안한 재료 모델을 동일하게 사용하여 400°C와 600°C의 경우를 <Fig. 9>에서 비교하였다. 400°C의 경우 세장비 60 이하에서 EC3의 좌굴 강도가 다소 높은 값을 나타



<Fig. 8> Comparison of buckling stresses of proposed formula with ones of EC3 ($\lambda = 60$)



<Fig. 9> Comparison of buckling strengths of proposed formula with ones of EC3³⁾ and Takagi⁸⁾

내고 있으나 Takagi & Deierlein(2007)의 좌굴 강도⁸⁾와 근접하게 나타난다. 400°C 이하, 세장비 60 이하에서 EC3의 좌굴 강도식의 결과와 차이가 다소 크게 나타나는 경향이 있다.

고온 압축재의 좌굴 강도 평가에서 잔류 응력, 초기 변형 등의 강도 저감 요인을 고려한 하한 값을 목표로 좌굴 강도식을 제안하였다. 좌굴 강도에 대한 비교를 통하여 탄성 영역, 비탄성 영역, 상온 및 고온 등의 여러 인자들을 포함하는 좌굴 강도식에서 400°C 이상, 세장비 40 이상의 영역에서 합리적인 좌굴 강도의 평가가 될 수 있을 것으로 사료된다. 300°C 이하, 단주 영역의 좌굴 강도에 대해서는 설계 기준과 비탄성 해석 결과들의 차이가 상대적으로 크게 나타남을 파악할 수 있었다.

5. 결론

고온 압축재의 좌굴 강도를 평가하기 위해서 일반 좌굴 강도식에 고온 재료의 항복 강도, 탄성 계수를 반영하게 된다. 고온 강재의 재료 특성, 좌굴 강도의 기준식과 선행된 연구 결과를 비교하여 단순화된 재료 모델과 하한 값에 상응하는 좌굴 강도 평가식을 제안하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1) AISC 기준의 좌굴 강도는 EC3 기준에 비하여 200°C, 600°C 및 세장비 40, 80에서 23~42%의 높은 값을 나타내었으며, 전반적으로 높은 값의 좌굴 강도로 평가되었다.

2) EC3 재료 모델에서 400°C까지는 변형률 0.02에 대한 항복 강도를 기준으로 감소 계수 1.0으로 되어 있다. 좌굴 강도식 또는 공칭 항복 강도의 평가에서는 항복 강도 저감 계수를 사용하여야 할 것으로 사료되며 단순화된 재료 모델을 제안하였다.

3) 온도 변화에 따른 재료 비선형 해석에서는 EC3의 응력-변형률 관계식에 변형률 0.02에 대한 항복 강도를 사용해야 하며, 상온의 공칭 항복 강도보다 약 15% 높은 값을 사용해야 한다.

4) 제안된 좌굴 강도식은 동일한 재료 모델을 사용할 경우 세장비 60일 때 EC3 기준에 비하여 91~94%가 되며 전반적으로 낮은 값의 좌굴 강도로 평가되었다. 제안된 재료 모델과 좌굴 강도식의 적용 결과는 300~600°C 범위에서 EC3 기준에 대하여 93~107%의 좌굴 강도를 나타내었으며, Takagi & Deierlein(2007)의 제안식⁸⁾에 비해 약 4% 높은 유사한 경향을 나타내었다.

5) 고온 압축재에 대한 재료 비선형 해석의 결과는 400°C 이상에서 EC3, Takagi & Deierlein(2007) 및 제안된 좌굴 강도식에 근접하고, 300°C 이하에서는 AISC 기준에 근접하는 경향을 보였다. 따라서 제안된 좌굴 강도식은 400°C 이상, 세장비 40 이상의 고온 압축재의 좌굴 강도 평가에 더욱 적합할 것으로 사료된다.

References

1. Bazant, Z. P., & Cedolin, L., "Stability of structures : elastic, inelastic, fracture, and damage theories", Oxford University Press, 1991.
2. Kwon, I. K., "Derivation of the Mechanical Properties of Structural Steels at High Temperature", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.21, No.3, pp.47~55, 2007
3. Kim, S. Y., Chu, D. S., Lee, H. D., & Shin, K. J., "Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperature", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.30, No.5, pp.257~264, 2018
4. European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures- Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design, EN 1993-1-2, Brussels, 2005
5. ASCE, "Structural Fire Protection", ASCE Committee on Fire Protection, Manual No. 78, Reston, 1992
6. Kim, J. E., Kang, S. D., & Choi, H. S., "Failure Temperatures of Steel H-Section Columns under Elevated Temperatures", International Journal of Steel Structures, Vol.14, No.4, pp.821~829, 2014
7. Kodur, V., Dwaikat, M., & Fike, R., "High-Temperature Properties of Steel for Fire Resistance Modeling of Structures", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.22, No.5, pp.423~434, 2010
8. Takagi, J., & Deierlein, G. G., "Strength design criteria for steel members at elevated temperatures", Journal of Constructional Steel Research, Vol.63, No.8, pp.1036~1050, 2007
9. American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, USA, 2005

10. Bleich, F., Ramsey, L. B., & Bleich, H. H.,
"Buckling strength of metal structures",
McGraw-Hill, pp.1~508, 1952.
11. Kim, J. E. (2014). A Study on the Resistance
Forces and the Failure Temperature of
H-Shaped Steel Compressive Members by
Elevated Temperature (Doctoral dissertation).
Keimyung University, Republic of Korea.

- Received : April 30, 2019
- Accepted : May 08, 2019