



해석적 방법에 기초한 내화강재 휨 부재의 한계온도 평가

김승환¹ · 경갑수^{2*} · 박진은³

¹석사과정, 한국해양대학교, 건설공학과, ²교수, 한국해양대학교, 건설공학과,
³연구교수, 한국해양대학교, 산학협력선도대학사업단

Evaluation of Critical Temperature in Flexural Member Using Fire Resistant Steels Based on Analytical Method

Kim, Seung Hwan¹, Kyung, Kab Soo^{2*}, Park, Jin Eun³

¹Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

³Research professor, Leaders in INdustry-university Cooperation+, Korea Maritime & Ocean University, Busan, 49112, Korea

Abstract - Fire caused on the structure lowers the strength of the member and it is likely to cause a collapse. In order to cope with this, fire resistant steels have been developed, in which yield strength at 600 °C more than 2/3 times of yield strength at room temperature. However, it is difficult to apply and commercialize fire resistant steels because the critical temperature based on general structural steel is applied to performance evaluation uniformly in the domestic standard. In this study, the loading test at high temperature using the thermal analysis of ABAQUS was simulated. And based on the load bearing capacity performance criteria, the critical temperature of flexural member using fire resistant steels were evaluated more safely and reasonably.

Keywords - Fire resistant steels, Critical temperature, Thermal analysis, Fire resistance performance, Flexural member

1. 서론

구조물에 발생한 화재는 구조부재의 내력을 저하시키며 더 나아가 구조물 붕괴를 야기하여 중대한 피해를 유발할 가능성이 크다. 이와 같이 구조화재공학(structural fire engineering)적인 관점에서 화재에 대한 구조물 안전성 확보를 위한 연구 및 소재 개발이 활발히 진행되어 왔다.

대표적인 소재 개발은 일본 N사에서 개발된 내화강재(SM490-NFR)로 현 KS 규격상 SM355에 대응되며, 600 °C에서의 항복강도가 상온 항복강도 대비 2/3이상을 발휘한다^{[1],[2]}. 내화강재는 일반적인 구조용 강재와 비교하여 고온에서의 내력 성능이 탁월하므로 내화강재 사용 시 피복량 절

감이 가능하며, 공사비 절감 및 미관 향상의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 국내에서는 설계기준적(시방적) 내화설계에 기초한 국내의 내화구조 인정기준이라는 제도운영 및 구조형식에 관계없이 일률적인 내화성능기준 적용 등의 복합적 원인에 의하여 내화강재의 장점을 충분히 활용하는 상용화가 어려운 실정이다.

내화성능을 평가하는 방법은 하중지지력 성능기준에 따라 평가하는 재하시험, 그리고 한계온도로 평가하는 비재하시험으로 구분된다^{[3],[4]}. 재하시험은 절차가 복잡하고 고비용 시험비 등의 제한이 있어서 비재하시험을 통하여 목표 내화 성능시간까지 한계온도를 초과할 수 없도록 피복 등의 적절한 조치를 취하여 내화구조 인증을 받는 것이 일반적이다. 그러므로 내화강재의 내화성능은 한계온도와 밀접한 관계가 있다.

내화설계기준으로는 AISC 360^[5], Eurocode 3^[6], BS 5950: Part 8^[7] 등이 대표적인데, 이 기준은 일반강재에 국한하여 한계온도 및 재료의 기계적 특성을 제시하고 있으므로 내화강재 구조부재의 성능평가에는 한계가 있다. 그러므로 내화강재 상용화를 위해서는 한계온도에 대한 평가가 필요할 것

Note.-Discussion open until June 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 24, 2019; revised November 15, 2019; approved on November 16, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-410-4464 Fax. +82-51-403-3762

E-mail. kyungks@kmou.ac.kr

으로 생각된다. 그러나 단순히 재료의 강도정수를 통한 내화강재의 한계온도 평가는 재하시험에 기초한 결과와 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 내화강재 구조부재에 대하여 기능, 형상, 하중비, 강종 등의 다양한 변수를 고려하는 한계온도 평가에 대한 연구는 그 대상이 광범위할 것으로 생각된다.

이 연구에서는 일반적인 내화강재 휨부재의 하중비 0.65에 대한 한계온도를 평가하기 위하여 N사에서 개발한 SM490-NFR을 대표적인 내화강재로 선정하고, 내화강재 휨부재의 고온재하시험을 ABAQUS의 열해석으로 구현하여 KS F 2257-1^[3]의 하중지지력 성능기준에 기초하여 해석적 방법에 의해 내화강재의 한계온도 평가에 대한 절차를 제시하였다.

2. 내화강재 한계온도에 관한 연구 및 기준

2.1 기존 연구

한계온도를 하중지지력 성능기준을 토대로 부재 기능, 형상, 하중비에 따라 한계온도를 평가하는 연구가 다수 수행되었다. Kwon은 적용 하중비에 따라 한계온도가 좌우되는 것을 규명하고, 재하가열시험을 통해 무피복 H형강 보부재와 웹부재 콘크리트가 충전된 합성보에 대하여 한계온도를 평가하였다^[8]. Lee *et al.*은 보부재 및 기둥부재의 재하가열시험을 통해 한계온도를 평가하고 국내 내화성능기준의 한계온도와 비교하였다^[9]. Cho *et al.*은 H형강 기둥의 한계온도를 유한요소해석법을 통해 평가하였으며 재하시험을 통한 한계온도 평가가 유리하다는 것을 제안하였다^[10].

내화강재 관련 연구는 Kwon이 대표적인데 폴리브덴, 크롬 등의 특수합금을 첨가한 국내 내화강재에 대하여 고온물성을 구축하였고^[11], 또한 TMCP 내화강재에 대한 고온 내력에 대하여 연구하였다^[12]. Ding *et al.*은 일본에서 개발한 SM490-NFR에 대하여 고온물성을 조사하고 이를 적용한 부재의 내화 성능에 대하여 연구하였다^[13]. 그 외에도 기존 국내 기준의 일률적으로 적용되는 한계온도의 비합리적인 부분을 규명하기 위한 연구가 많이 수행되었다^{[14][16]}. 또한 내화강재의 내화성능에 관한 연구가 보부재에 한하여 일부 연구되었다^{[17][19]}. 그러나 내화강재에 대한 한계온도 평가의 연구는 아직 미진한 것으로 생각된다. 따라서 일률적으로 적용되는 기존의 한계온도보다 내화강재만의 한계온도 설정이 필요하며 이와 관련된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2.2 국내외 내화성능기준

2.2.1 국내 내화성능기준

내화성능시험^[3]은 하중이 재하되는 부재에 가열을 실시하여 하중지지력 성능기준을 통해 내화성능을 판단하는 재하시험과 단순 가열 후 단면 한계온도 성능기준을 통해 내화성능을 판단하는 비재하시험으로 구분된다. 여기서 시험에 적용되는 가열조건은 ISO 834-1^[20]에서 제시한 표준화재곡선을 따르며, Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서의 곡선을 나타낸 식 (1)은 표준화재곡선 공식으로 θ_g 는 가열 온도, t 는 시간(min)이다.

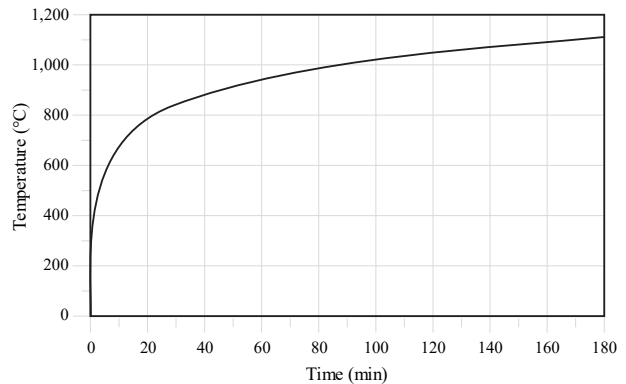


Fig. 1. Standard fire curve: ISO 834-1

$$\theta_g = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

Table 1에 휨부재의 내화성능기준을 나타내었다. 재하시험의 경우, 처짐 및 처짐속도의 두 조건을 모두 초과하는 순간까지를 내화성능시간으로 판단한다. 안정된 상태에 도달할 때까지 상대적으로 급속한 변형이 발생할 수 있으므로, 변형률 성능은 변형량이 $L/30$ ^[3]을 초과할 때부터 적용한다.

비재하시험의 경우 평균온도와 최대온도의 두 조건 중 하나라도 초과하는 순간까지를 내화성능시간으로 판단한다. 앞에서 기술한 것과 같이 국내·외에서 통상 내화설계에서 적용되는 하중비는 0.65이다. 따라서 이 연구에서는 다양한 하중비 가운데 국내 내화성능기준의 한계온도 수준인 하중비 0.65에 대한 한계온도를 산정하였다. 여기서, 하중비란 부재의 상온 소요설계강도와 화재영향에 의하여 감소한 소요설계강도와의 비율이다. 소요설계강도는 안전측의 한계온도 결과를 위하여 소성휨강도를 적용하였다.

Table 1. Criteria for fire resistance performance

Loading Test		Unloading Test	
Limit displacement (mm)	Limit strain velocity (mm/min)	Limit average temperature	Limit maximum temperature
$D = L^2/400d$	$dD/dt = L^2/90000d$	538 °C	649 °C

L = Span of the beam, d = Height of the cross section

2.2.2 국외 내화성능기준

한계온도는 Eurocode 3^[6]에 상세히 정의되어 있으며, 화재시 설계하중 감소계수와 하중비(강도비)에 따라 결정된다. 식 (2)에 화재시 설계하중 감소계수 η_{fi} 를 나타내었는데, 이것은 화재시 인명대피 및 연소에 따른 감소된 설계하중을 상온 설계하중으로 나눈 값이다. 이 값을 사용하여 식 (3)과 같은 하중비 μ_0 가 계산되는데, 여기서, $\gamma_{M,fi}$ 와 γ_{M0} 는 안전적인 측면에서 각각 1이 적용된다^{[6],[21]}. 따라서 화재시 설계하중 감소계수는 하중비와 동일한 값을 가지므로, 하중비가 한계온도에 영향을 주는 변수인 것을 알 수 있다. 식 (4)에 강재의 한계온도를 나타내었는데, 이것은 온도에 따른 강재의 강도저감계수와 동일한 의미를 갖는다. 식 (4)를 사용하여 다양한 하중비에 대한 한계온도를 결정할 수 있으며, 이 기준에 의해 비재하시험으로 내화성능을 평가할 수 있다.

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d}}{E_d} \tag{2}$$

$$\mu_0 = \eta_{fi}(\gamma_{M,fi}/\gamma_{M0}) \tag{3}$$

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674\mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 \tag{4}$$

- η_{fi} : 화재시 설계하중 감소계수
- $E_{fi,d}$: 화재시 하중효과에 의한 설계하중
- E_d : 상온시 설계하중
- μ_0 : 상온시 강재부재의 하중비(강도비)
- $\gamma_{M,fi}$: 화재시 단면의 강도감소계수
- γ_{M0} : 상온시 단면의 강도감소계수
- $\theta_{a,cr}$: 강도비에 따른 강재 한계온도

ISO/TC 92에서는 한계온도를 허용온도로 나타내었으며 강재의 허용온도를 538 °C, 최고온도를 649 °C로 제시하였고, 국내 내화기준은 이를 그대로 준용하고 있다^[22]. 이것은 Eurocode 3와 비교하면 하중비가 0.65일 때의 한계온도인 것을 알 수 있다. 또한 독일기준에서도 하중비 0.65에 대해 한계온도를 고려하고 있다. 그러므로 하중비 0.65에 대한 한계온도가 세계적으로 사용되는 대표적인 값인 것을 알 수 있다^[21]. BS 5950-8^[7]에서는 다양한 하중비 뿐만 아니라 부재 기능 등의 다양한 조건에 따라 각각의 한계온도를 제시하고 있다. 한편 국내 내화성능기준^{[3],[4]}의 한계온도는 부재 기능, 단면, 하중비, 강종 등을 고려하지 않는 설계기준적 내화설계를 일률적으로 적용하여 과다설계 가능성이 있으므로, 그 적용에 있어서는 다양한 검토를 수행하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

3. 내화강재의 해석적 연구

3.1 해석변수

해석적 방법을 통한 화재 시 구조물 거동을 구현하기 위해서는 온도에 따라 변화하는 재료 물성치에 대한 정보가 매우 중요하다. 이 연구에서는 무피복 강재보에 대한 열해석에 대하여 항온 시의 일반 구조용강재, 그리고 내화강재의 열적 특성 및 기계적 특성을 조사하였다. 강재의 합금 화학조성이 변화하면 재료 물성치도 변화하므로, 이 연구에서는 대표적인 한계온도 평가를 위하여 사용되는 대표적인 재료모형을 선정하였다.

일반 구조용강재는 Eurocode 3에서 제시하는 재료모형을 사용하였으며, 내화강재에 대해서는 SM490-NFR의 고온실험을 통해 제시된 재료모형을 사용하였다. 강재의 특성상 온도가 상승할수록 항복점이 불명확해지며 비선형적으로 변하는데 이러한 비선형성을 표현하기 위한 응력-변형률 관계의 모델은 Ramberg-Osgood 모델이 대표적으로 사용되고 있으나, 기존연구^[23]에서는 Eurocode 3의 재료 모델이 보다 합리적인 것을 규명하였다. 따라서 이 연구에서는 내화강재의 고온시 응력-변형률을 Eurocode 3에서 제시하는 모델을 적용하였다. 또한 정확한 해석 결과를 위하여 변형에 의한 단면변화를 고려한 진응력-변형률 선도로 변환하여 해석에 사용하였다.

3.1.1 일반 구조용강재

Eurocode 3^[6]에서는 일반 구조용강재의 열적 및 기계적 특성을 제시하고 있다. Table 2에 일반 구조용강재의 고온 시 열전도율, 비열, 연신율 등의 열적 특성을 각 온도 구간별로 일반식으로 나타내었다. 열팽창계수는 직접적으로 제시되어 있지 않으나, 연신율 곡선의 접선기울기를 의미하므로 계산을 통해 값을 얻었다. 열적 특성은 강재의 온도변화에 영향을 미치는 주요 변수로서 열전달해석을 수행할 때 사용된다.

Table 2. Thermal properties formulas^[6] of general steel

Properties	Equations	Steel temperature (θ_a , °C)
Density (kg/m ³)	$\rho = 7850$	-
Conductivity (W/m°C)	$\lambda_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a$	$20 \leq \theta_a < 800$
	$\lambda_s = 27.3$	$800 \leq \theta_a \leq 1,200$
Specific heat (J/kg°C)	$c_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3$	$20 \leq \theta_a < 600$
	$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$	$600 \leq \theta_a < 735$
	$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$	$735 \leq \theta_a \leq 900$
Elongation	$\Delta l/l = 1.2 \times 10^{-5} \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4}$	$20 \leq \theta_a < 750$
	$\Delta l/l = 1.1 \times 10^{-2}$	$750 \leq \theta_a \leq 860$
	$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a + 6.2 \times 10^{-3}$	$860 < \theta_a \leq 1,200$

Fig. 2에 고온 기계적 특성을 강도저감계수를 나타내었다. 그래프는 상온 항복강도 448 MPa 이하의 모든 구조용강재에 적용이 가능하다. Fig. 2로부터 일반 구조용강재의 항복강도는 400 °C 이후로 급격한 저하가 시작되며, 600 °C 이후에는 상온 항복강도의 50 % 이하로 저감되었다. 온도에 따른 항복강도의 저감비율만 결정되는 한계온도법에 의한 대표적인 하중비인 0.65에 대한 한계온도는 538 °C인 것을 확인할 수 있다. 따라서 하중지지력성능을 고려한 한계온도와의 평가하여 기존의 한계온도와 비교가 필요할 것으로 판단된다.

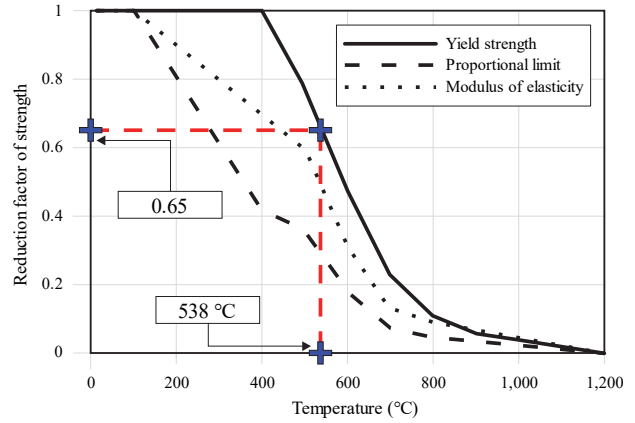


Fig. 2. Reduction factor of strength for general structural steels at high temperature – Eurocode 3

Eurocode 3에서는 탄소강에 대하여 응력-변형률 관계에 대한 구체적인 모델을 제시하고 있다. Fig. 3에 이 응력-변형률 모델을 사용하여 항복강도, 비례한도, 그리고 탄성계수의 온도 상승에 따른 저감을 반영하여 일반 강재의 응력-변형률 선도를 나타내었다. Fig. 3으로부터 온도가 상승할수록 비례한도의 급격한 저감에 의하여 비선형성이 커지며, 400 °C 이후부터는 항복강도가 급격히 저하되는 것을 알 수 있다.

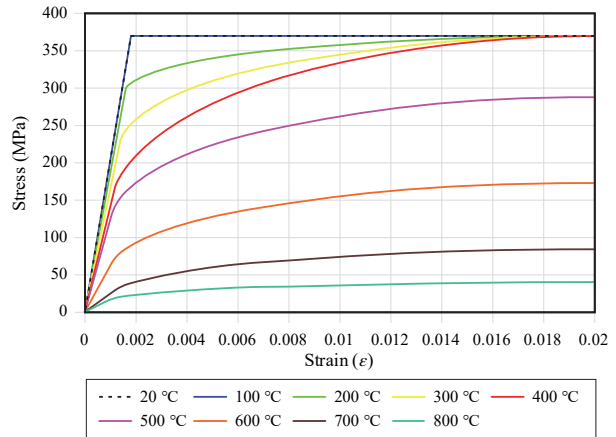


Fig. 3. Relationship between stress and strain of general structural steel at high temperature

3.1.2 내화강재 (SM490-NFR)

내화강재의 한계온도를 평가하기 위하여 이 연구에서는 SM490-NFR을 대표적인 내화강재로 선택하였다. N사의 내화강은 고온 기계적 및 열적 특성에 대한 실험적 연구를 통해 최소제공법에 의한 회귀식이 제안되었다^[13].

Table 3에 내화강재의 열전달해석에 적용되는 열적 물성치를 회귀식으로 나타내었다. 그리고 Table 4에 내화강재의 항복강도 및 탄성계수의 온도에 따른 강도저감계수를 회귀식으로 나타내었다. Fig. 4에 강도저감계수를 그래프로 나타내었다. 항복강도의 저감비에 의해 결정되는 한계온도법에 의하면 대표적인 하중비인 0.65에 대한 한계온도가 600 °C인 것을 확인할 수 있다. 일반 구조용강재와 비교하였을 때 62 °C 정도의 향상된 한계온도를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 여기서 계산된 한계온도는 부재기능, 하중지지력성능 등을 고려하지 않은 값이므로 보다 합리적으로 한계온도를 도출하기 위하여 하중지지력성능을 고려한 한계온도 평가가 필요할 것으로 생각된다. Fig. 5에 내화강재의 강도저감계수 정보를 토대로 도출된 응력-변형률 관계를 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 일반 구조용강재의 응력-변형률 관계와 비교하면 내화강재가 선형구간 기울기가 크며, 400 °C 이후의 항복강도가 높은 수준으로 유지되는 경향으로 나타났다.

Table 3. Thermal properties formulas^[13] of fire resistance steel

Properties	Equations	Steel temperature (θ_a , °C)
Density (kg/m ³)	$\rho = 7850$	-
Conductivity (W/m°C)	$\lambda_s = 54 - 2.56 \times 10^{-2}\theta_a$	$20 \leq \theta_a \leq 1,200$
Specific heat (J/kg°C)	$c_a = 473.1 + 6.89 \times 10^{-1}\theta_a - 1.58 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 1.95 \times 10^{-6}\theta_a^3$	$20 \leq \theta_a \leq 1,200$
Expansion coefficient (α)	$\alpha = (0.0062\theta_a + 11.48) \times 10^{-6}$	$20 \leq \theta_a \leq 1,200$

Table 4. Mechanical properties formulas^[13] of fire resistance steel

Properties	Equations of reduction factor	Steel temperature (θ_a , °C)
Yield strength	$k_{y,\theta} = 1 - \frac{(0.001724 \times \theta_a - 0.034482)^{3.2}}{3}$	$20 \leq \theta_a \leq 800$
Modulus of elasticity	$k_{E,\theta} = -2.22 \times 10^{-7}\theta_a^2 - 2.097 \times 10^{-7}\theta_a + 1.005$	$20 \leq \theta_a \leq 1,200$

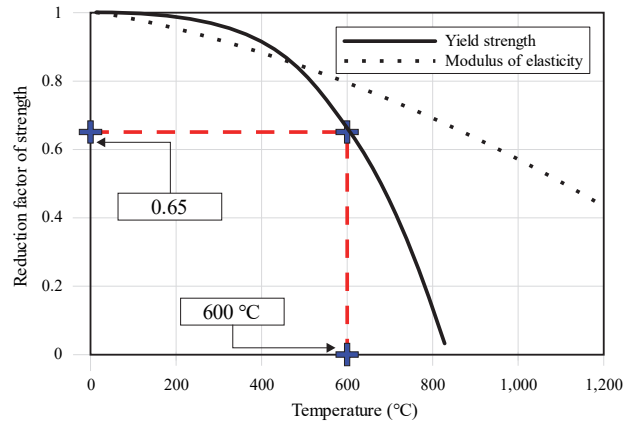


Fig. 4. Reduction factor of strength for fire resistance steel (SM490-NFR) at high temperature

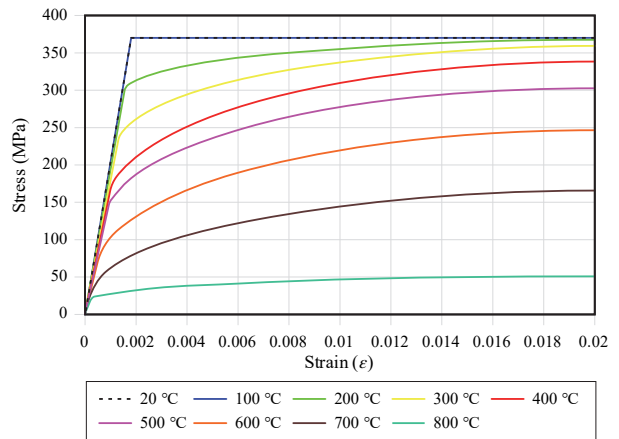


Fig. 5. Relationship between stress and strain of fire resistance steel at high temperature

3.2 유한요소해석

내화강재의 내화성능을 평가하기 위하여 내화성능시험 중의 재하시험을 유한요소해석으로 구현하였다. 사용된 프로그램은 ABAQUS^{[24],[25]}이다. 이 프로그램은 신뢰성 있는 열전도 해석부분을 포함하고 있어 가정하는 화재 조건에 대한 비선형적인 열전도 해석이 가능하다^[26]. 또한 열해석의 신뢰성 확보를 위한 모델링 기법에 대한 기존 연구가 많으므로 이 연구에의 적용성이 적합할 것으로 판단된다.

ABAQUS를 사용한 열해석 방법은 크게 두 가지로 나눈다^[27]. 첫 번째 방법은 완전연성 열-응력해석(fully coupled thermal-stress analysis)으로 온도하중과 외력을 동시에 고려하여 수행되는 방법이다. 이 방법은 열응답과 기계적 응답의 상호작용을 고려할 수 있으나, 해석시간이 상당히 소요되기 때문에 비효율적이다. 두 번째 방법은 순차연성 열-응

력해석(sequentially coupled thermal-stress analysis)으로 열 전달해석과 구조해석을 각각 분리하여 두 단계에 걸쳐 수행된다. 먼저 열전달해석을 수행하고 시간에 따른 구조물의 비선형 온도분포 결과를 얻은 후에 그 결과를 구조물 온도 경계조건으로 설정하여 재하하중에 대한 구조해석을 실시한다. 이 방법은 완전연성 열-응력 해석에 비하여 비교적 단순하고 해석시간이 효율적이다. 따라서 이 연구에서는 순차 연성 열-응력 해석방법을 사용한 열해석을 수행한다.

3.2.1 열전달해석

가열조건에 따른 구조물의 시간 변화에 따른 비선형적인 온도분포를 예측하기 위하여 비정상상태(transient) 열 전달해석을 수행하였다. 해석은 두께방향 열전달이 가능한 3차원 8절점 솔리드 요소인 DC3D8을 사용하여 수행하였다. 프로그램에서 계산되는 열전달 지배방정식은 Green and Naghdi의 에너지평형이론^[25]에 기초하였으며, 전도, 대류, 복사에 의한 강재 온도변화를 가정하였다. 전도는 강재를 이루는 입자들 사이에 발생하는 열전달 현상을 의미하며, 이 현상을 해석으로 표현하기 위하여 앞에서 기술한 강재의 열적 물성치가 사용된다. 대류 및 복사는 강재 주변의 외기 조건에 의한 강재표면의 온도 변화에 관여되는 현상이다. Table 5에 대류 및 복사를 구현하기 위한 해석변수인 대류 열전달계수(convective heat transfer coefficient), 방사율(emissivity), Stefan-Boltzmann 상수를 나타내었다. 이 값은 Eurocode 3에서 제시하는 권장값이다.

Table 5. Value about surface heat transfer

Contents	Default value
Covective heat transfer coefficient (h)	25 W/m ² ·K
Emissivity (ϵ_m)	0.7
Stefan-Boltzmann coefficient (σ)	5.67 × 10 ⁻⁸ W/m ² ·K ⁴

3.2.2 구조해석

구조해석은 열전달해석을 통한 구조물 온도분포 결과를 온도 경계조건으로 설정하여 각 절점에 온도정보를 입력하여 수행된다. 이로부터 온도에 따른 기계적 성질 변화에 따라 재하하중에 의한 연속적 변화를 확인할 수 있다. 열전달 해석결과를 각 절점에 적용하기 위해 동일한 3차원 8절점의 솔리드 요소가 적용되었으며, 전단잠김(shear-locking) 현상

에 의한 강성의 왜곡을 방지하고자 전적분(fully integration)이 아닌 감차적분(reduced integration)요소인 C3D8R을 사용하였다^[25].

3.2.3 모델링기법 검증

이 연구에서 사용되는 열해석 모델링 기법의 타당성을 확보하기 위하여 기존연구^[28]와의 검증을 실시하였다. 기존연구에서는 SAFIR를 사용하여 단순보를 포함한 4가지 지지 조건의 보에 대하여 거동을 분석하였다. SAFIR은 내화 거동을 분석하는 특수 목적의 프로그램으로, Cardington 실물 화재실험 구현 등과 같은 분야에서 많은 연구성과를 갖고 있다^[26].

검증모델은 25 kN/m의 상재하중이 작용하는 8 m 연장의 H단면 강재보이다. 강재는 Eurocode 3의 일반 구조용강재 범주에 속하며, 상온 항복강도는 430 MPa, 탄성계수는 210 GPa이다. 단면 치수는 H-602×228×10.6×14.8이며, 가열조건은 10 °C/min으로 승온시켜 상부플랜지의 윗면을 제외한 나머지 3면에 대하여 가열하였다. Fig. 6에 모델의 제원 및 경계조건을 나타내었다.

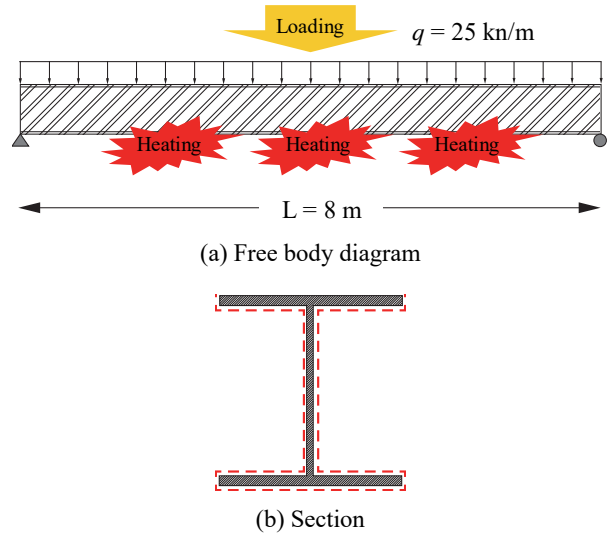


Fig. 6. Analysis condition of verification model

이 연구의 해석과 기존연구와의 비교는 시간에 따른 보에서의 강재온도, 보 중앙부의 처짐 및 응력을 사용하여 검토하였다. Fig. 7(a)에 강재 보에서의 시간에 따른 온도변화를 Eurocode 3에서 제시하는 무피복 강재의 온도상승 공식의 계산 값과 ABAQUS를 사용한 열전달해석 결과를 비교하였으며, Fig. 7(a)와 같다. Eurocode 3에 기초한 계산 값과 해

석결과는 75분에 발생하는 굴곡의 경향을 포함하여 거의 모든 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 7(b), 7(c)에 재하하중에 대한 구조해석을 통해 시간에 따른 중앙부의 처짐 및 응력 결과를 기존연구와 비교하여 나타내었다. 해석결과와 기존연구의 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 이 연구에서 수행되는 열 해석 모델링 기법은 충분한 타당성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

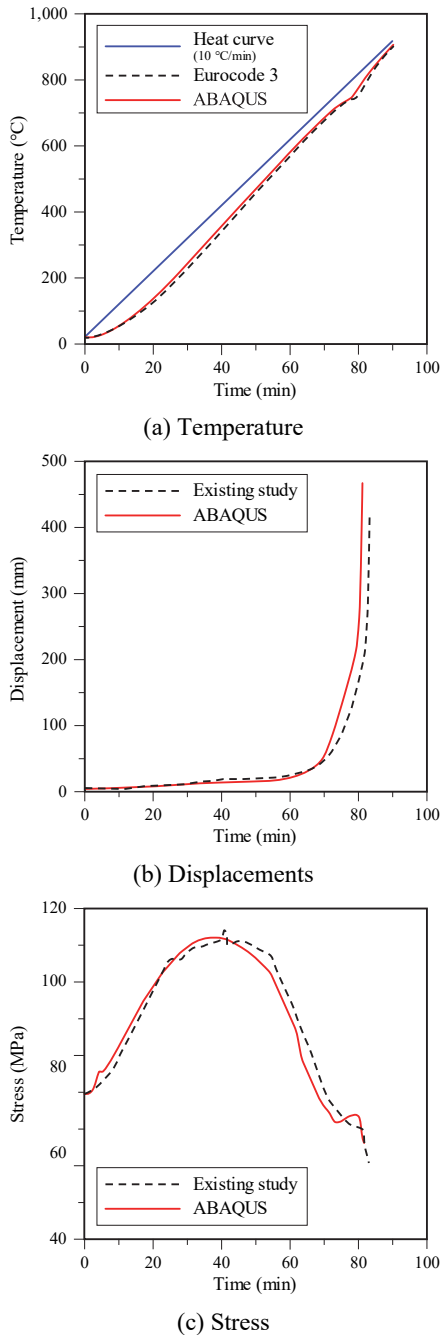


Fig. 7. Verification results for existing study

3.3 해석적 방법에 기초한 한계온도 평가

이 절에서는 검증된 열해석 모델링 기법을 기본으로 하여 고온재하시험으로 KS F 2257-1의 하중지지력 성능기준에 따라 강재의 한계온도를 평가하였다. Table 6에 한계온도의 평가를 위하여 수행된 해석 케이스의 상세한 조건을 나타내었다. 고온재하시험은 실제 건축물의 상황을 반영하여 보 상부에 슬래브가 있는 것으로, 나머지 3면에 대하여 Fig. 1에 나타난 표준온도곡선으로 1시간 가열을 실시하였다. 이러한 가열조건 하에 3가지의 단면 및 2가지 강종을 변수로 하여 총 6개의 케이스에 대하여 한계온도를 평가하였다.

일반 구조용강재와 내화강재의 상온시 항복강도는 370 MPa, 탄성계수는 210 GPa이며, 3.1 절에서 기술한 비선형 재료모델을 해석에 각각 적용하였다. 재하하중 조건은 보수적이면서 합리적인 한계온도를 산정하기 위하여 좌굴영향에 의한 공칭모멘트강도 저감을 고려하지 않고, 소성모멘트의 65%에 해당하는 등분포하중을 적용하였다. 해석결과는 하중지지력 성능기준의 한계변형, 한계변형률을 고려하여 이것을 초과하는 순간을 내화성능시간으로 정의하고, 그 때 단면의 평균온도와 최대온도로서 한계온도를 평가하였다. 온도측정 위치는 보의 중앙부 단면이며, 단면 내의 구체적인 측정 부위는 Fig. 8에 나타내었다. 평균 및 최고온도는 측정된 Point 1/2/3/4의 평균값과 최대값이다.

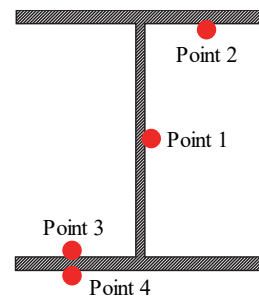


Fig. 8. Measurement location of temperature

Table 7에 열해석의 결과를 시간에 따른 변위, 변형속도, 단면온도로 나타내었으며, 단면 제원별로 강재 종류를 변수로 하여 비교하였다. 모든 단면의 경우에는 내화강재가 일반 구조용강재와 비교하여 변형 및 변형속도의 진전이 확연히 느린 것으로 나타났으며, 반면에 단면온도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 내화강재가 고온시 하중지지력성능이 우수한 것을 의미하며, 차열성능의 향상은 없는 것을 나타낸다.

Table 6. List of analysis case

Case	Section	Material	Load (kN·m) load ratio = 0.65	Load bearing-capacity criteria (KS F 2257-1)			Common condition
				Limit displacements D_{lim} (mm)	Limit strain velocity dD/dt_{lim} (mm/min)	$L/30$ (mm)	
1	H-400×200×8×13	SM490 (General steel) $F_y = 370$ MPa $E = 210$ GPa	315	100	4.44	133	$L = 4$ m, Simple supported, 3-side heating by ISO 834
2	H-350×175×7×11		208	114	5.08		
3	H-300×150×6.5×9		130	133	5.93		
4	H-400×200×8×13	SM490-NFR (FR steel) $F_y = 370$ MPa $E = 210$ GPa	315	100	4.44		
5	H-350×175×7×11		208	114	5.08		
6	H-300×150×6.5×9		130	133	5.93		

Model specification

$$w = \frac{8 \times (0.65 M_p)}{L^2}$$

Table 7. Analysis results

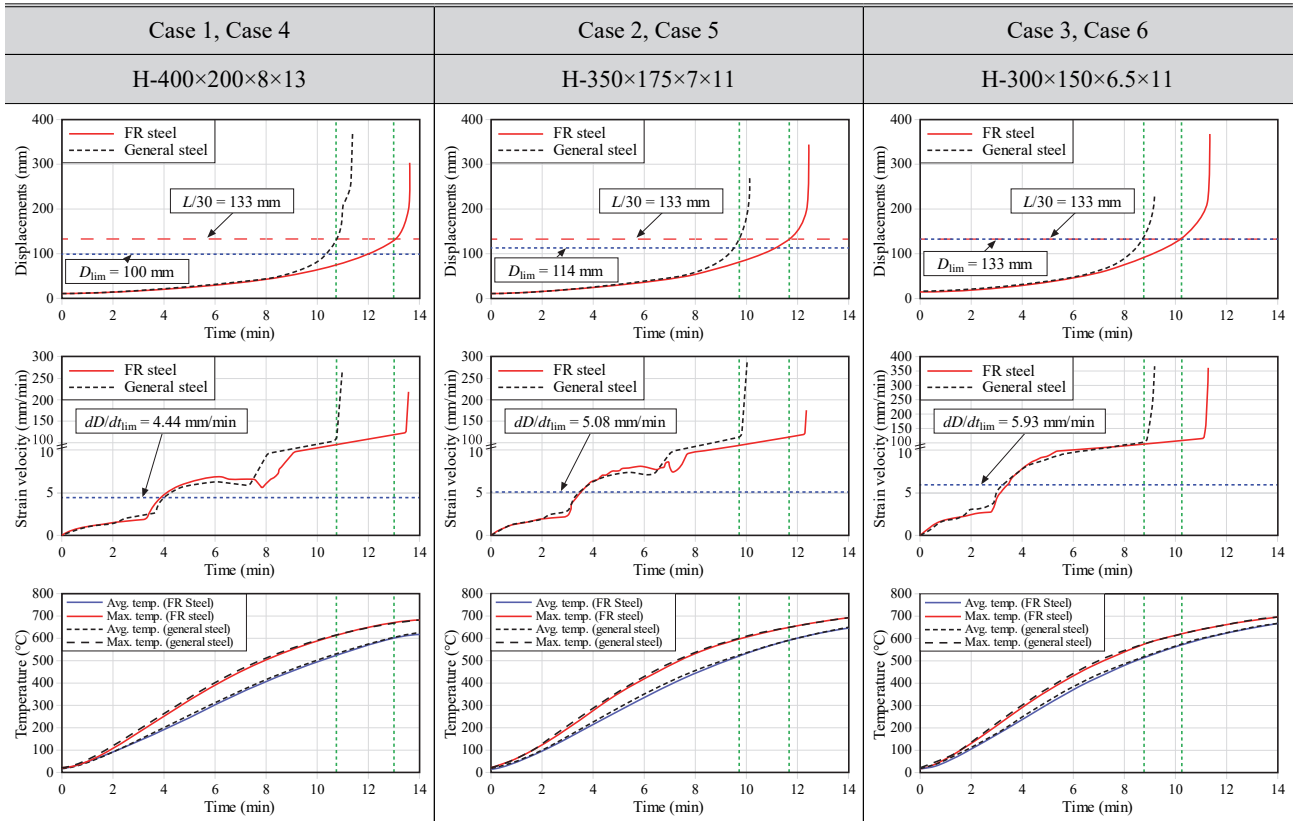


Table 8에 일반 구조용강재와 내화강재의 내화성능시간을 정량적으로 나타내었다. 내화강재는 일반 구조용강재 대비 평균적으로 약 2분(18.9%)의 추가적인 내화성능시간을 확보하였다. 부재의 기능 및 층수에 따라 요구되는 내화성능시간이 기본적으로 1시간 이상이므로 무피복으로 사용할 때는 큰 효과가 없는 것으로 나타났다. 그러나 내화 피복이 시공되면 입열량이 감소하여 가열시간에 따른 강재온도의 상승 속도가 대폭 낮아지며, 일반 구조용강재와 비교하여 내화성능시간이 크게 향상될 것으로 예상된다.

Table 8. Fire resistance performance

Section	Fire resistance performance time (min)		Improvement ratio (%)
	General structural steel	Fire resistance steel	
H-400×200	10.8	13.1	21.3
H-350×175	9.8	11.7	19.4
H-300×150	8.8	10.2	15.9

Table 9에 일반 구조용강재를 사용한 Cases 1-3에 대해 한계온도를 산정하고, 국내의 KS F 2257-1에서 제시하는 한계온도와의 비교를 나타내었다. 이 비교는 기존의 한계온

도범과 하중지지력성능을 고려한 한계온도의 차이를 나타내는 것이다.

Case 1의 경우 평균온도는 533 °C, 최고온도는 613 °C이고, Case 2의 경우 평균온도는 532 °C, 최고온도는 603 °C, Case 3의 경우 평균온도는 521 °C, 최고온도는 575 °C로 나타났다. Table 9로부터 단면치수가 클수록 내화성능시간이 높게 나타났으나 이에 따른 한계온도는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이와 같은 현상의 원인은 단면형상계수가 작을수록 상대적으로 온도상승속도가 빠르게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 여기서 단면형상계수란 무피복 강재의 경우에는 단위길이당 화재 노출면적을 단위길이당 체적으로 나누는 값이다. Table 9의 일반강재에 대한 한계온도는 국내 기준과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 경향이 있으며, 평균온도는 최대 3.3 %, 최고온도는 최대 12.5 % 차이가 나타났다. 국내기준에서 제공하는 단순히 강도비로 결정된 한계온도와 비교하면, 하중지지력성능을 고려한 한계온도는 약간 저하하는 경향을 나타내고 있다. 그러므로 일반강재에 대해 단순 강도비로 한계온도를 결정하는 것에는 보다 많은 주의를 요구하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

동일 방법으로 내화강재가 사용된 Cases 4-6에 대한 한계온도를 산정하였다. Table 10에 해석을 통해 산정된 일반 구

Table 9. Evaluation of critical temperature for general structural steel

Case	Critical temperature			
	Average temperature (°C)	Different ratio (% , against KS criteria)	Maximum temperature (°C)	Different ratio (% , against KS criteria)
1	533	-0.9	613	-5.5
2	532	-1.1	603	-7.3
3	521	-3.3	575	-12.5
Mean	529	-1.7	607	-8.4

Table 10. Evaluation of critical temperature for fire resistance steel

Case	Critical temperature					
	Average temperature			Maximum temperature		
	Temperature (°C)	Impovement ratio (% , against general structural steel)	Different ratio (% , against KS criteria)	Temperature (°C)	Impovement ratio (% , against general structural steel)	Different ratio (% , against KS criteria)
4	620	16.3	15.2	675	8.9	4.0
5	613	15.2	13.9	659	7.5	1.8
6	587	12.7	9.1	630	7.3	-3.0
Mean	607	14.7	12.7	655	7.9	2.9

조용강재의 한계온도와 내화강재의 한계온도를 비교하여 나타내었다. 내화강재의 한계온도는 Case 4의 경우 평균온도가 620 °C, 최고온도가 675 °C이며, Case 5의 경우 평균온도가 613 °C, 최고온도가 659 °C, Case 6의 경우 평균온도가 587 °C, 최고온도가 630 °C로 나타났다. 해석을 통한 내화강재의 한계온도는 일반 구조용강재의 해석결과와 비교하여 평균온도의 경우 최대 16.3 % 향상하였으며, 최고온도의 경우 최대 8.9 % 향상되었다. 평균적으로 평균온도는 14.7 % 향상하였고, 최고온도는 7.9 % 향상하였다. 국내 기준과 비교를 하면 평균온도의 경우 최대 15.2 % 향상하였으며, 최고온도의 경우 최대 4 % 향상하였다. 그러나 Case 6는 한계 최고온도가 630 °C로 내화강재에도 불구하고 국내 기준에서의 한계 최고온도에 못 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 9에 Table 9와 Table 10의 내용 및 국내의 한계온도 기준과 동시에 그래프로 나타내었다. 하중지지력성능을 고려한 한계온도는 기존 한계온도법으로 결정되는 값보다 낮은 경향이 있으며, 단면제원의 영향을 무시할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서 내화 설계시 단면제원과 하중지지력성능을 충분히 고려하는 것이 필요하다고 판단된다.

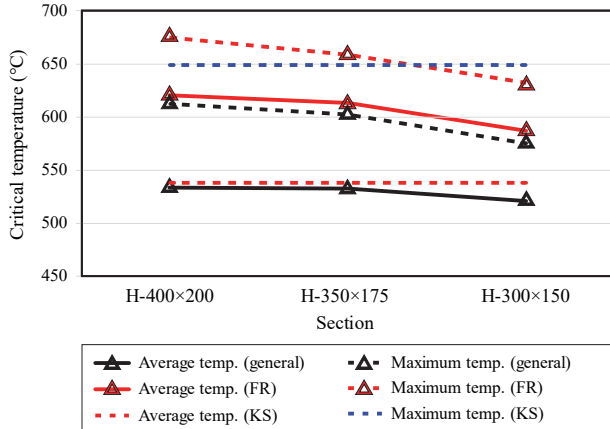


Fig. 9. Comparison of critical temperature

4. 결론

이 연구에서는 내화강재의 한계온도를 평가하기 위하여 ABAQUS 열해석에 기초하여 휨 부재의 고온재하시험 하에서의 하중지지력 성능기준에 따른 한계온도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이 연구에서 사용된 열-응력 해석기법의 타당성을 확

인하기 위하여 기존연구에 대한 검증 실시하였다. 그 결과 응력 및 변위, 그리고 온도분포의 경향이 기존연구와 일치하는 것으로 나타났으며, 이 연구에서 사용된 해석기법의 신뢰성을 확보하였다.

- (2) Eurocode 3에서 제시하는 일반 구조용 강재의 재료의 열적 및 기계적 물성치를 적용한 휨 부재에 하중비 0.65에 대한 한계온도를 평가하였으며, KS F 2257-1의 한계온도와 비교한 결과 해석에 의한 한계온도가 전체적으로 낮은 경향을 나타내었으며, 평균적으로 평균온도는 1.7 %, 최고온도는 8.4 % 차이가 있다.
- (3) 내화강재의 한계온도 평가를 위하여 N사에서 개발한 SM490-NFR을 일반적인 내화강재로 가정하고 실험적 연구를 통한 열적 및 기계적 재료물성치를 해석에 적용하였다. 내화강재는 일반 구조용 강재와 비교하여 평균적으로 한계 평균온도가 최대 14.7 %, 한계 최고온도가 최대 7.9 % 향상하는 것으로 나타났다. 이 연구를 통해 내화강재를 적용한 휨 부재의 하중비 0.65에 대한 한계온도는 평균온도에 대해서는 607 °C, 최고온도에 대해서는 655 °C인 것으로 나타났다.
- (4) 내화강재가 일반 구조용 강재와 비교하여 평균적으로 14.7 % 향상된 한계온도를 가지기 때문에 피복량 절감 등의 경제적 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이 연구에서는 휨 부재 단위의 내화 거동으로 한계온도를 평가하였기 때문에 내화강재를 사용한 기둥-보 연결 등 철골조의 내화 성능에 대해서는 열에 의한 보 부재 팽창으로 인한 인접 기둥 부재에 대한 영향을 고려하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호: 2017-0087-03).

참고문헌(References)

[1] Sakumoto, Y., Yamaguchi, T., Ohashi, M., and Saito, H. (1992) High-Temperature Properties of Fire-Resistant

- Steel for Building, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.118, No.2, pp.392-407.
- [2] Sakumoto, Y., and Nishida, I. (1998) Experimental Study on Fire Resistance of Fire-Resistant Steel Beams, *Journal of Fire Science & Technology*, Tokyo University of Science, Vol.18, No.1, pp.1-9.
- [3] Korean Agency for Technology and Standards (2014) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements* (KS F 2257-1: 2014), Korea (in Korean).
- [4] Korean Agency for Technology and Standards (2014) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - Specific Requirements for Beams* (KS F 2257-6: 2014), Korea (in Korean).
- [5] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [6] European Committee for Standardization (1995) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design* (ENV 1993-1-2: 1995), Belgium.
- [7] British Standard Institution (1990) *Structural Use of Steelwork in Building, Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design* (BS 5950-8: 1990), UK.
- [8] Kwon, I.K. (2010) Experimental Study on Limiting Temperature of Structural Beams Made with Structural Steel According to Load Ratios, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp. 581-588 (in Korean).
- [9] Lee, S.-R., Kwon, I.-K., and Jee, N.Y. (2002) Evaluation for Critical Temperature of Steel Columns and Beams by Using the Different Load Ratios, *Proceedings of 2002 Annual Fall Conference of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.22, No.2, pp.399-402 (in Korean).
- [10] Cho, G.-H., Ahn, J.-K., Yeo, I.-H., and Hwang, K.-J. (2019) An Analytical Study on the Limiting Temperature of H-Shape Column According to Load Ratio, *Proceedings of 2019 Annual Spring Conference of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, KIFSE, pp. 153-154 (in Korean).
- [11] Kwon, I.-K. (2013) Experimental Study on Making Databases for Fire Resistant Steel at High Temperature, *Fire Science and Engineering*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.27, No.5, pp.1-7 (in Korean).
- [12] Kwon, I.-K. (2013) Evaluation of Structural Stability of Fire Resistant Steel Produced by Thermo-Mechanical Control Process at High Temperature, *Fire Science and Engineering*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.27, No.6, pp.21-25 (in Korean).
- [13] Ding, J., Li, G.-Q., and Sakumoto, Y. (2004) Parametric Studies on Fire Resistance of Fire-Resistant Steel Members, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.60, No.7, pp.1007-1027.
- [14] Kwon, I.-K., and Kim, H.-Y. (2010) Evaluation of Fire Resistance According to Load Ratio and Limit Temperature, *Proceedings of 2010 Annual Spring Conference of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, KIFSE, pp.395-399 (in Korean).
- [15] Yoon, S.K., Lee, C.H., and Koo, B.H. (2015) Calculation of Limit Temperature on H-Beam Flexural Member Through the Thermal Stress Analysis Under the Lateral Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.4, pp.387-397 (in Korean).
- [16] Xiong, M.-X., Huang, Z.-Y., and Rechar Liew, J.Y. (2015) Modified Critical Temperatures for Steel Design Based on Simple Calculation Models in Eurocode 3, *Fire Technology*, Springer, Vol.53, No.1, pp.227-248.
- [17] Kwon, I.-K. (2014) Study on Structural Stability for H-Section Beams Made of Fire Resistant Steels (FR 490) at High Temperatures by Analytical Method, *Fire Science and Engineering*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.28, No.5, pp.52-57 (in Korean).
- [18] Kwon, I.-K. (2016) Analytical Study of the Fire Resistance for Beams Consisting of Fire Resistant Steels with a Both Fixed Boundary Conditions, *Fire Science and Engineering*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.30, No.5, pp.82-86 (in Korean).
- [19] Kwon, I.-K. (2017) A Study for Structural Stabilities of Beams Built with TMC Fire Resistant Steels by Analytical Method at High Temperatures, *Fire Science and Engineering*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.31, No.6, pp.60-66 (in Korean).
- [20] International Organization for Standardization (1999) *Fire Resistance Test - Elements of Building Construction, Part 1: General Requirements* (ISO 834-1: 1999), Switzerland.
- [21] Shin, T.S. (2009) An Analysis and Evaluation of Fire Resistance Performance for the Protected Steel Columns in Korea, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.1, pp.27-35 (in Korean).

- [22] Kim, G.-C., Kim, S.-H., and Choi, S.-M. (2015) Review on the Limitation and Allowable Temperature of Thermally Protected Column in Fire, *Proceedings of 2015 Annual Spring Conference of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.35, No.1, pp.383-384 (in Korean).
- [23] Yoon, J.-H. (2016) *A Study on Fire Resistance of H-Section Compression Members with Initial Imperfection*, Master's Thesis, Pusan National University, Korea (in Korean).
- [24] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2016) *ABAQUS Analysis User's Manual, Ver. 6.12*, DSS, USA.
- [25] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2016) *ABAQUS Theory Manual, Ver. 6.12*, DSS, USA.
- [26] Kim, H.-Y. (2012) *An Advanced Study on Performance-Based Fire Safety (Final Report)*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (in Korean).
- [27] Ahn, J. (2015) *Experimental and Numerical Studies of CFT Columns and Composite Beams Toward Performance-Based Fire Safety Design*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea (in Korean).
- [28] Buchanan, A., Moss, P., Seputro, J., and Welsh, R. (2004) The Effect of Stress-Strain Relationships on the Fire Performance of Steel Beams, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.26, No.11, pp.1505-1515.

요 약: 구조물에 발생한 화재는 부재 내력을 저하시키고 붕괴를 야기할 가능성이 높다. 이에 대응하기 위하여 내화강재가 개발되었으며 600 °C에서 상온 항복강도의 2/3이상을 발휘한다. 그러나 국내 내화성능기준에서는 일반 구조용강재를 기준으로 된 한계온도가 성능평가에 일률적으로 적용되고 있기 때문에 내화강재의 적용 및 상용화가 어려운 실정이다. 이 연구에서는 ABAQUS 열해석을 이용한 고온 재하 시험을 모사하였으며 하중지지력 성능기준을 통해 내화강재를 사용한 휨부재의 한계온도를 보다 안전하고 합리적으로 평가하였다.

핵심용어: 내화강재, 한계온도, 열해석, 내화 성능, 휨 부재
