

# 일반 구조용 강재 적용 H형강 보부재의 해석에 의한 고온내력 평가 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

## Evaluation of Structural Stability at High Temperature for H-section Beams Made of Ordinary Strength Steels by Analytic Method

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received February 28, 2014; Revised April 22, 2014; Accepted April 22, 2014)

### 요 약

화재와 같은 고온 시 구조부재의 붕괴를 방지함으로써 재실자와 소방관계자 그리고 재산을 보호할 수 있는 방법은 구조부재의 내화성능을 확보하는 것이며, 이는 시방적 내화설계방법인 내화시험을 통하여 확보되어 왔다. 그러나 내화시험에 수반되는 시험체 제작과 운반 그리고 막대한 시험 비용의 반복적 사용 등은 새로운 공법과 재료 개발의 문제점으로 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 일반 등급(SS 400) 강재의 고온 시 항복강도, 탄성계수와 열전달 및 열응력 해석을 적용하여 H형강 보부재의 표면온도 상승 및 고온 시 내력 변화를 평가하였다. 또한 H형강 보부재의 길이 변화에 따른 고온 시의 보부재의 내력평가를 수행하여 각각의 길이변화에 따른 내력 변화의 차이를 평가하였다.

### ABSTRACT

Structural stability of structural beams at high temperature had been evaluated though a horizontal furnace and a standard fire curve. If a structural method and a material are satisfied with the fire test, those are seemed to be guaranteed the safety of residences, fire services men, and properties of the buildings. However, that requires not only longer period but higher cost for making and testing of each structural element. That restrained from developing new methods and new fire protective materials. In this study, an analytic method was executed to demonstrate whether the analytic method using mechanical properties of structural steel at high temperature with heat transfer theory works is working. In this paper, the surface temperature rising and variance of structural stability of a simple H-section beam with a standard fire curve were evaluated and structural stabilities of H-section beam according to differences from length of beam were suggested.

**Keywords :** Beam, Yield strength, Elastic modulus, Fire resistance, Structural stability

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

건축물에서의 예기치 않은 화재 발생은 주요 구조부의 2차 응력과 변형을 유발함으로써 연속적 붕괴와 같은 재난을 초래할 수도 있다. 특히 구조적 강도와 기하학적 특성이 가미된 H형강이 적용된 대형스팬에서의 처짐과 팽창은 사용성 문제와 인접 공간으로 구조적 성능 저하를 유발시킴으로써 구조물 전체의 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 보부재에 대한 화재 저항성은 내화성능의 확보를 통하여 평가되고 있으며, 우리 나라에서는 건축법규 및 한국산업규격에 따라 적용과 평가되고 있다. 특히 새로운 내

화피복 재료 및 신공법에 관한 내화성능 평가는 한국산업표준(KS F 2257-1, KS F 2257-6)의 규정에 따라 재하가 열시험 또는 비재하가열시험방법으로 진행되고 있다. 이러한 내화시험을 통한 내화성능 평가는 일정한 시험규격에 맞는 시험체의 제작, 운반 및 시험 등의 과정을 요구하고 있으므로 반복적인 시험에 관한 문제점과 시간 및 비용에 관한 문제점 또한 간과할 수 없는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 H형강 보부재를 대상으로 적용 강재의 고온 시 기계적 특성과 열적 특성을 토대로 열전달 이론과 열응력 해석을 이용하여 화재와 같은 고온에서의 구조적 거동을 평가함으로써 향후 해석적 방법을 통한 강재 보부재의 내화성능 평가의 기초자료 제공을 목적으로 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

고온에서의 구조적 거동을 평가하기 위해서는 먼저 화재와 같은 고온에서의 재료 특성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 일반 구조용 강재인 SS 400(항복강도 240 MPa)을 설정하였다. 그리고 강구조 건축물의 보부재에 적용되는 롤러단과 힌지단의 조합인 단순보로 설정하였고, 스패는 수평 가열로에서 평가되는 보부재의 스패 4,100 mm를 기본으로 설정하였으며, 강구조 건축물의 장점인 스패의 자유도에 따라서 300 mm씩 증가시킨 스패 4,400 mm와 4,700 mm를 최대 내력 변화의 평가 대상으로 설정하였다. 내화성능에 적용된 화재 크기는 한국산업표준에 정의된 표준온도 가열곡선으로 하였고, 열전달 및 열응력 해석은 일차원 해석으로 진행하였다. 해석의 대상은 표준 온도 가열곡선에서의 H형강 보부재의 표면온도 변화와 길이 변화 그리고 보부재의 길이 변화에 따른 보부재의 최대 내력의 변화이다.

2. 기존연구의 고찰

강재로 구성된 보부재는 한정된 공간에 작용하는 하중을 부담하여 구조적 안전성을 확보하는 역할을 수행하기 때문에 주요 구조부로 간주되며, 화재가 발생된 경우에는 지속적인 하중 전달 목적을 위하여 일정시간의 내화성능 확보를 규정하고 있다. 구조적 관점에서 보부재의 내화성능은 기둥부재보다는 다소 완화될 수 있다고 판단되나, 건축물의 화재 안전성을 높이기 위하여 기둥부재와 동일한 3시간의 내화성능을 요구하고 있다<sup>(1)</sup>. 강재 보부재는 주로 H형강으로 형성되고 있으며, 이는 H형의 기하학적 특성에 기인한 것으로 평가되고 있고, 구조적 특성에 따라 강관 및 립채널 등의 경량형강이 사용되는 경우도 있다. 이와 같은 강재 보부재의 내화성능은 하중의 재하방식에 따라 재하가열시험방법과 비재하가열시험방법인 시방적 내화설계가 있으며, 고온 시의 구조적 특성과 열응력과 열전달 해석을 통한 공학적 내화설계가 있다. 현재 우리나라에서는 전자에 의한 내화성능 평가가 이루어지고 있으며, 후자의 내화설계에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다<sup>(2)</sup>.

국내의 강재 보부재에 대한 내화성능 평가 연구는 하중비에 의한 보부재의 내화성능 평가 연구가 권인규<sup>(3)</sup>에 의해서 진행되었고, 박수영에 의한 상용 유한요소 프로그램에 의한 비대칭 H형강 보부재의 해석적 연구<sup>(4)</sup>와 TSC와 iTECH 보부재를 대상으로 실험과 해석으로 평가한 김성배 등<sup>(5)</sup>과 임윤희 등<sup>(6)</sup>의 연구가 있다. 국외의 관련 연구로써는 슬림 플로우 보부재를 대상으로 실험과 해석을 수행한 Newman<sup>(7)</sup>과 Ma 등의 연구<sup>(8)</sup>가 있고, 횡구속 조건에서의 보부재 거동 평가에 관한 Liu 등<sup>(9)</sup>의 연구가 있으며, 보부재 처짐에 관한 해석적 연구가 Yin 등<sup>(10)</sup>에 의해서 수행되었다.

Table 1. Variances for Analysis of Structural Stability

Section	H-400 × 200 × 8 × 13	Section area (119.80 cm <sup>2</sup> ), SS 400
Support conditions	Simple beam	
Span of beam (mm)	4100, 4400, 4700	
Fire curve	Standard fire curve	KS F 2257-1,6

3. H형강 보부재의 고온 내력평가

3.1 보부재의 구조적 특성

보부재는 일정 부분의 바닥 하중을 균등하게 배분하고, 수직 부재인 기둥부재로 전달하는 역할을 수행하기 때문에 2차 단면모멘트의 크기에 그 성능이 좌우된다. 따라서 기하학적인 특징이 가장 우수하고 대량 생산이 가능한 H형강이 가장 많이 사용되고 있다.

화재와 같은 고온 조건에서 H형강 보부재의 고온 내력을 평가하기 위하여 보부재의 내화성능 평가 시험에 일반적으로 사용되고 있는 H-400 × 200 × 8 × 13을 선택하였고, 단순보 조건과 화재곡선 등은 다음 Table 1과 같다.

3.2 고온 해석에 적용된 재료 데이터베이스

단순보 조건의 강재 보에 대한 고온 시 내력평가를 목적으로 항복강도 240 MPa인 일반 구조용 강재 SS 400의 고온 특성을 사용하였으며, 기계적 특성과 비열 그리고 열팽창에 관한 자료는 다음 Table 2~4와 같다<sup>(11)</sup>.

3.3 고온 해석 수행

3.3.1 표면온도 예측

고온 시 구조내력을 평가하기 위해서는 표준온도 가열곡선상의 열원으로부터 강재 보부재의 표면온도 예측이

Table 2. Mechanical Properties at High Temperatures

Properties	Temperature (°C)	Regression equation
Yield strength	T ≤ 200	Cold value (240 MPa)
	200 < T ≤ 900	-0.32T + 303.21
Elastic modulus	T ≤ 100	Cold value (210 GPa)
	100 < T ≤ 900	-0.22T + 232.16

여기서, T = 온도(°C).

Table 3. Specific Heat at High Temperatures

Temperature (°C)	Regression equation (J/gK)	Remarks
T ≤ 620	0.00006T + 0.39	R <sup>2</sup> = 0.96
620 < T ≤ 720	0.007T - 3.54	R <sup>2</sup> = 1
720 < T ≤ 820	-0.005T + 4.97	R <sup>2</sup> = 1
820 < T	0.008T + 0.38	R <sup>2</sup> = 1

여기서, T = 온도(°C).

**Table 4.** Linear Expansion Coefficient at High Temperatures

Temperature (°C)	Regression equation (E-03/°C)	Remarks
$T \leq 190$	$0.073T - 4.23$	$R^2 = 0.94$
$190 < T \leq 710$	$0.009T + 7.93$	$R^2 = 0.92$
$710 < T \leq 820$	$-0.025T + 31.22$	$R^2 = 0.98$
$820 < T$	$0.0099T + 2.19$	$R^2 = 0.99$

여기서, T = 온도(°C).

요구된다. 따라서 무내화피복 강재 보의 표면온도 예측은 매 시간의 주변 온도 변화에 따른 강재의 표면온도를 계산하고, 이를 토대로 다음 시간 증분에 따른 표면온도 계산을 수행하는 등 반복 계산을 하게 된다. 본 연구에서는 다음 수식(1)을 사용하여 표면온도를 계산하였다<sup>(12)</sup>.

$$\Delta\theta_s = \frac{\alpha}{\gamma_s c_{ps}} \cdot \frac{F_s}{V_s} (\theta_t - \theta_s) \Delta t \quad (1)$$

여기서,  $\Delta\theta_s$ 는 강재의 표면온도 차(°C),  $\alpha$ 는 대류와 복사에 의한 열전달계수(W/m<sup>2</sup>°C),  $\gamma_s$ 는 강재의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $c_{ps}$ 는 강재의 비열(J/kg·K),  $F_s$ 는 화재에 노출된 강재의 단위 길이당 강재 표면적(m<sup>2</sup>/m),  $V_s$ 는 강재의 단위 길이당 체적(m<sup>3</sup>/m),  $\theta_t$ 는 시간 t에서의 표면온도가 열곡선상의 온도(°C),  $\theta_s$ 는 시간 t에서 강재단면의 온도(°C)이다.  $\Delta t$ 는 시간 간격이다. 상기 식에 요구되는 대류와 복사의 열전달계수는 다음 식(2)를 적용하였다.

$$\alpha = 23 + \frac{5.77\varepsilon_r}{\theta_t - \theta_s} \left[ \left( \frac{\theta_t + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_s + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

여기서,  $\varepsilon_r$ 는 복사능이며, 0.5를 적용하였다<sup>(12)</sup>.

### 3.3.2 고온 시 길이변화와 허용응력 계산

구획공간에서의 화재 발생은 복사, 대류 그리고 전도 과정을 거쳐 상부 보부재의 온도변화가 일어나고, 부재의 길이방향 팽창이 발생된다. 수평방향의 길이변화는 보부재에 연결된 기둥부재의 휨응력 발생 등 2차 응력을 유발시켜 구조적 성능저하를 가속화할 수 있다. 따라서 화재와 같은 고온에서의 보부재의 길이 변화 산정은 매우 중요한 의미를 가진다. 강재 보의 길이 변화는 작용하중에 의한 길이 변화와 강재의 선팽창계수에 의한 길이 변화의 합으로 산정하는 것이 정확하지만, 중력방향으로 작용하는 하중은 처짐 등의 구조적 변형을 유발하지만, 부재 길이 방향으로의 변형에는 크게 영향을 미치지 못한다. 따라서 본 연구에서 길이 방향의 변화량은 열팽창에 의한 길이 방향의 변화량을 고려하였으며, Table 4에 제시된 강재의 표면온도별 선팽창계수에 따라 계산하였다.

보부재의 표면온도 변화와 최대하중 산정 과정에서 강재의 단면적 변화는 없는 것으로 가정하였고, 또한 횡좌굴

등과 같은 국부 좌굴은 발생되지 않는 것으로 가정하였다. 상온 시 강재 보에 작용하는 최대하중은 193.6 kN으로 계산되었으며, 그 과정은 다음과 같다.

보부재에 작용되는 최대 휨응력도 산출은 압연형강으로써 폭두께비의 제한을 만족하는 부재이고, 강축에 대해서 휨을 받는 경우이므로 다음 두식(4)와 (5)에서 큰 값으로 계산하였다<sup>(13)</sup>.

$$f_b = \frac{900}{\left( \frac{l_b \times h}{A_f} \right)} = \frac{900}{\frac{410 \times 40}{20 \times 1.3}} = \frac{900}{630.77} = 142.7(\text{MPa}) \quad (4)$$

여기서,  $f_b$ 는 허용휨응력도(MPa),  $l_b$ 는 압축플랜지의 지점 간 거리(cm),  $h$ 는 보춤,  $A_f$ 는 압축축 플랜지의 단면적(cm<sup>2</sup>)이다.

$$f_b = \left[ 1 - \frac{0.4 \left( \frac{l_b}{i_b} \right)^2}{C_m \cdot (\lambda_p)^2} \right] \times f_t = \left[ 1 - \frac{0.4 \left( \frac{410}{5.26} \right)^2}{1 \times 120^2} \right] \times 160 = 133.0(\text{MPa}) \quad (5)$$

여기서,  $i_b$ 는 단면 2차변경,  $\lambda_p$ 는 한계세장비이고,  $f_t$ 는 허용인장응력도이다.

본 연구에 적용된 H형강의 주요 제원은 다음과 같으며, 한계세장비 120은 다음 식(6)으로 계산되었다.

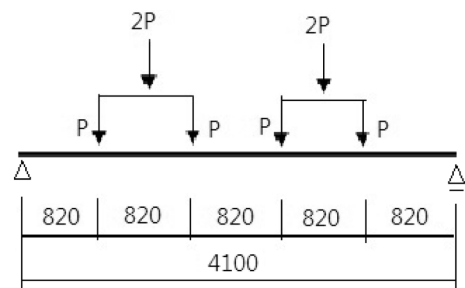
$$f_t = 160 \text{ MPa}, i_b = 5.26 \text{ cm}, l = 410 \text{ cm}, Z = 1,190 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F_y}} = \sqrt{\frac{(3.14)^2 \times 2,100}{0.6 \times 2.4}} = 120 \quad (6)$$

본 연구에 적용된 보부재는 단순보이므로 중앙부 모멘트가 최대이고, 양단부의 모멘트는 0이다. 따라서  $C_m = 1$ 로 계산하였으며, 강재 보부재의 허용 휨응력도는 142.7 MPa로 설정되었다.

보부재에 작용하는 최대하중은 다음 식(7)으로 계산하였으며, 강재보에 작용하는 최대 모멘트의 계산은 다음 Figure 1과 같이 4점 재하에 의한 것으로 하였다.

$$f_b = \frac{M}{Z} \quad (7)$$



**Figure 1.** Loading diagram for simple beam.

여기서,  $M$ 는 최대모멘트( $N \cdot m$ ),  $Z$ 는 단면계수( $m^3$ )이다.  
 4점 재하에 의한 강재 보의 최대 휨모멘트는 다음 식(8)과 같다.

$$M_{max} = 2P \times (0.82 + 0.82 + 0.41) - P \times (0.82 + 0.41) - P(0.41) = 2.46P \quad (8)$$

따라서 강재 보 한 점  $P$ 에 작용할 수 있는 최대하중은 다음 식(7)에 의해서  $P$ 는 69 kN으로 계산되었으며, 보부재에 작용할 수 있는 최대하중은  $4P = 276$  kN이다.

### 4. 해석 결과 분석

#### 4.1 보부재의 표면온도 및 길이 팽창

표준온도 가열곡선<sup>(14)</sup>에 따른 H형강 보부재의 표면온도 변화, 길이 방향 변화는 강재의 단면특성, 고온특성을 입력할 수 있으며, 전열해석과 응력해석이 가능하도록 프로그램된 STR-FR을 사용하여 계산하였으며<sup>(15)</sup>, 동일 단면에 대한 보부재 내화실험 결과<sup>(16)</sup>와의 비교를 Figure 2에 나타내었다. 내화실험은 구조적 한계인 22분까지의 결과이

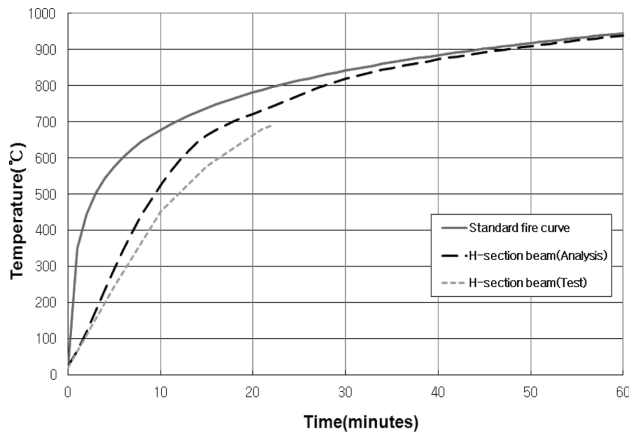


Figure 2. Surface temperature of H-section versus time on the standard fire curve.

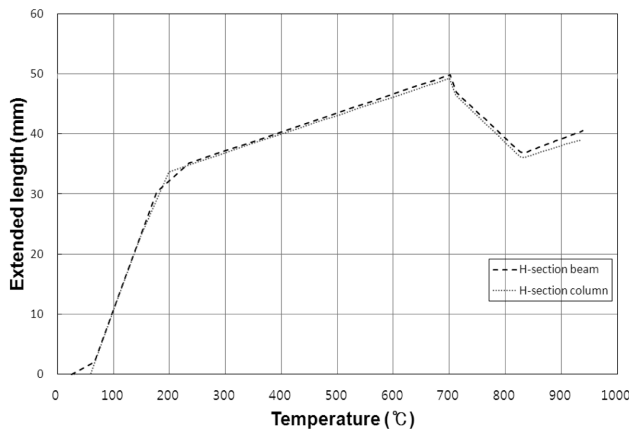


Figure 3. Extended length versus surface temperatures of each H-section.

고, 실험체가 T형보 슬래브 형식으로 구성되었기 때문에 순수 보부재보다는 표면온도가 낮게 나타났다고 판단되며, 이후 온도구간에서는 해석결과와 유사한 온도가 될 것으로 판단되었다. 보부재 길이 방향의 변화 결과는 Figure 3에 각각 제시하였다.

H형강 보부재의 길이 방향 변화는 200 °C까지 급격히 증가하다가 이후 700 °C까지는 다소 완만한 상승을 보이고 이후 구간에서는 감소와 상승의 반복현상을 보이고 있다. 길이 변화의 최대치는 표면온도 700 °C에서 약 50 mm 정도로 나타났다. 일반적으로 강재가 700 °C~800 °C에 도달하게 되면 상변태가 일어나게 되는데, 이때 많은 열 에너지를 소모하게 되므로 일시적으로 체적의 변화가 줄어들게 된다. 또한 이 구간에서는 길이 변화가 상대적으로 줄어들지만 짧은 시간에 발생되므로 구조적으로 큰 변화는 일어나지 않을 것으로 판단된다. 본 길이 방향의 증가 패턴을 H형강 기둥부재의 길이 변화와 비교한 결과, 기둥부재의 경우가 약간 낮은 결과를 보이고 있다. 이는 강재의 단면적 차이 그리고 보부재의 경우는 하중에 의한 길이 변화를 포함하지 않은 결과로 판단되었다.

#### 4.2 H형강 보부재의 고온 시 내력 평가

단순보인 H형강 보부재가 지지할 수 있는 최대 내력도출을 위하여 4점 재하 형식을 가정하였다. 이는 강재 보부재의 내화성능평가의 한 방법인 재하가열시험이 이러한 형식으로 진행되기 때문이다. 상온에서 도출된 최대하중의 경우, 초기는 항복강도와 탄성계수의 차이가 거의 없기 때문에 상온 내력을 유지하다가 200 °C 이후 구간에서 점차 내력의 감소가 발생하고 있으며, 약 550 °C 구간에서 최대 내력의 50% 수준으로 떨어지는 것으로 나타났다.

#### 4.3 부재 길이 변화에 따른 H형강 보부재의 고온 시 내력평가

건축물의 용도에 따라 보부재의 크기는 다양하게 변화

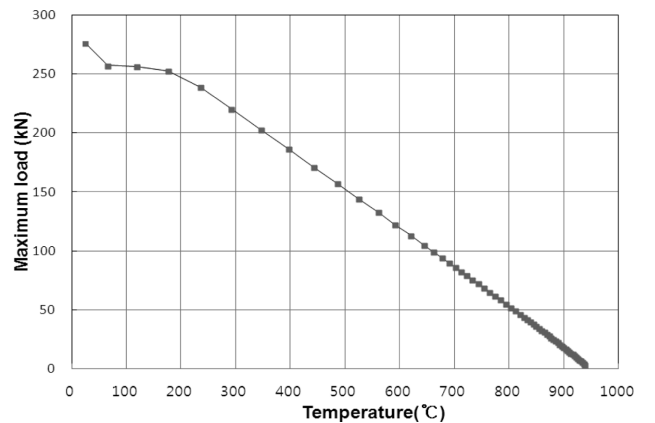


Figure 4. Maximum load versus surface temperature of H-section beam.

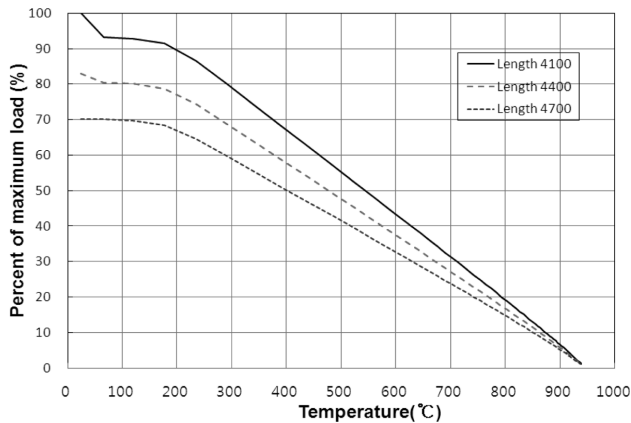


Figure 5. Comparison of a maximum load according to different beam lengths.

될 수 있다. 따라서 본 절에서는 보부재의 스패에 따른 고온 시의 내력특성을 평가하여 Figure 5에 제시하였다. 보의 지지 조건은 단순보이며, 보부재 길이는 스패 4100 mm를 기본으로 하고, 각각 300 mm씩 증가시켜, 4400 mm 그리고 4700 mm를 대상으로 하였다. 4400 mm와 4700 mm 보부재의 하중간 적용 간격은 4100 mm에 적용된 하중간 적용 간격으로 설정하였다. 보 부재의 최대내력은 각 보부재의 최대 모멘트를 계산함으로써 산정하였으며, 스패 별 최대 모멘트의 크기는 2.46P, 2.76P 그리고 3.06P이다. 각 보부재 길이별 최대내력 대비 비율은 4100 mm 길이 보부재의 상온 시 내력을 최대로 하였을 경우에 대비하여 각 부재별 그리고 각 부재의 표면온도별의 내력 백분율로 표시하였다. 보부재 스패 4400 mm와 4700 mm의 경우, 보부재 스패 4100 mm의 상온 시 최대내력 대비 약 83%, 70%의 낮은 결과를 나타내었으며, 600 °C까지 86%, 75%를 나타내는 등 보부재의 표면온도가 증가될수록 그 차이는 점차적으로 줄어들고 있다. 따라서 보부재의 스패 4100 mm로 평가된 내화피복두께를 보다 긴 보부재에 동일하게 적용하는 것은 건축물 내력유지에 문제가 있다고 판단되며, 이에 대한 조치가 강구되어야 할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

일정 구획공간에서의 화재 발생은 바닥에 작용하는 수직하중을 기둥부재로 전달하는 보부재의 내력성능 저하를 유발함으로써 국부적 붕괴로 이어질 수 있다. 따라서 강재 보부재에 대한 내화성능의 평가가 요구되고 있으나, 현재 우리 나라에서는 수평 가열로에 의한 반복적인 내화시험으로 이루어지고 있어 비용적, 기술적 문제점이 대두되고 있고, 표준 크기 시험체로부터 도출된 내화피복두께를 모든 크기의 시험체에 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 보완하기 위한 대안 제시의 기본자료 도출을 목적으로 일반 구조용 강재(SS 400)의 고온 시

특성과 해석적 방법을 통하여 H형강 보부재의 고온 시 구조내력을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 스패 4100 mm 인 무내화, 무보강 H형강 보부재의 경우, 콘크리트 슬래브 T형 합성보보다 표면온도가 높게 나타났으며, 상온에서 200 °C 구간에서는 큰 내력저하가 없었고, 이후 구간부터 내력의 감소가 발생되어 약 550 °C 구간에서 상온 내력의 1/2 수준을 나타내었다.

2. H형강 보부재의 스패 변화에 따른 고온 시 내력평가 결과(4400 mm, 4700 mm 보부재의 하중간 적용 간격은 4100 mm의 하중간 적용 간격과 동일함), 부재가 길어질수록 내력저하가 크게 나타났으며, 보부재 스패 4400 mm와 4700 mm의 경우, 보부재 스패 4100 mm의 상온 시 최대내력에 비해서 약 83%, 70%로 나타났으며, 이후 600 °C 까지 86%, 75%를 유지하다가 표면온도가 상승함에 따라 그 차이는 점차적으로 줄어들었다.

3. 따라서 일정 규격의 수평 가열로에 의해서 평가된 H형강 보부재의 내화피복두께를 평가된 강재보보다 긴 강재 보부재에 적용하는 것은 화재 시 구조적 내력저하를 유발함으로써 국부 붕괴의 위험성을 증대시키는 요소라 판단되며, 이에 대한 보완이 요구된다.

## References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Building Act", Gwachenon, Korea (2013).
2. Ministry of Construction and Transportation, "Development of Fire Engineering Technique", Gwachenon, Korea (2002).
3. I. K. Kwon, "Evaluation of Fire Resistance according to Load Ratio of Structural Steel Elements", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 4, pp 55-62 (2010).
4. S. Y. Park, H. Y. Kim and K. P. Hong, "Analytic Study on the Fire Resistance of the Asymmetric H-Section Slim Floor Beam Concerning the Load Ratio", Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 26, No. 9, pp 55-62 (2010).
5. S. B. Kim, S. K. Choi, C. N. Lee and S. S. Kim, "Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Beam", Journal of Korean Steel Structure, Vol. 18, No. 1, pp. 113-122 (2006)
6. Y. H. Him, S. D. Kang, M. H. Oh, M. H. Kim and S. D. Kim, "Analytical Study on the Fire Resistance of iTech Composite to Beam", Journal of Korean Steel Structure, Vol. 18, No. 5, pp. 655-664 (2006)
7. G. M. Newman, "Fire Resistance of Slim Floor Beams", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 33, pp. 87-100 (1995).
8. Z. Ma and P. Makelainen, "Structural Behaviour of Composite Slim Floor Frames in Fire Conditions", Journal of

- Constructional Steel Research, Vol. 62, pp. 1282-1289 (2006).
9. T. C. H. Liu, M. K. Fahad and J. M. Davies, "Experimental Investigation of Behaviour of Axially Restrained Steel Beams in Fire", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, pp. 1211-1230 (2002).
  10. Y. Z. Yin and Y. C. Wang, "A Numerical Study of Large Deflection Behaviour of Restrained Steel Beams at Elevated Temperatures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, pp. 1029-1047 (2004).
  11. I. K. Kwon, "An Analytic Study on Structural Stability according to Boundary Conditions and H-section Column Lengths made of An Ordinary Grade Structural Steels (SS 400) at High Temperatures", *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 20-25 (2014).
  12. Swedish Institute of Steel Construction, "Fire Engineering Design of Steel Structures", Stockholm, Sweden (1976).
  13. D. G. Kim, C. K. Ma, J. C. Chung and J. J. Ju, "H Section Steel Structure Design", Seoul, Korea (2003).
  14. Korean Standard Association, KS F 2257-1, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements", Seoul, Korea (2010).
  15. I. K. Kwon, "Development of Analytic Program for Calculation of Fire Resistant Performance on Steel Structures", *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 11, No. 3, pp. 201-208 (2009).
  16. Research Institute of Science & Technology, "Technical Development of Fire Engineering Design for Steel Structure (I)" (2002).