

# 건축용 내화강재(FR 490) 적용 H형강 보부재의 고온내력 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

## Study of Structural Stability for H-section Beams Made of Fire Resistant Steels (FR 490) at High Temperatures by Analytical Method

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received July 2, 2014; Revised September 30, 2014; Accepted October 17, 2014)

### 요 약

구조용 강재는 고온 시 물질 내부의 구성 물질의 결합력 약화로 인하여 내력과 변형이 추가적으로 발생됨으로써, 구조적 성능이 저하되고, 국부 및 연속적 붕괴로 이어질 수 있다. 따라서 강재로 구성된 구조부재는 화재 시 열영향부를 최소화하기 위한 수단이 강구되는 내화설계가 요구된다. 건축용 내화강재(FR 490)는 용접 구조용 강재(SM 490)와 상온 시 특성은 동일하나, 고온 시의 내력유지 성능이 우수한 강종으로써 이로 구성된 보부재의 고온 시 내력 평가 자료는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 FR 490강재로 구성된 보부재의 고온 시 거동을 고온 시 재료 특성과 이론적 방법을 통하여 해석적으로 평가하고, 이를 SM 490강재보와 비교함으로써 내화성능을 확인하고자 하였으며, 그 결과 FR 490 강재보의 경우 SM 490강재보에 비해서 고온 시 내력유지 성능이 우수하였다.

### ABSTRACT

When structural elements of steel framed structures are exposed to fire situations, the structural stability begins to decrease due to dislocation of substantial. The increase of the beam length causes an additional stress and deflection. These can be serious factors to cause a severe failure of structures. To improve the fire resistance of beams, prevention of the heat from a fire by coating with fire protection material is essential for beams. The FR 490 was developed to enhance fire resistance compared with SM 490 steel. However, the fire resistance of FR 490 H-beams has not been evaluated by analysis method since it was developed. In this paper, materials properties in high temperature and a heat transfer and thermal stress theory were used in the evaluation of the fire resistance of FR490 H-beams. The fire resistance of FR490 steel beams was compared with that of SM490 beams. The comparison verified that the structural stability of FR490 beams at high temperature was superior to that of SM490 beams.

**Keywords :** Structural steels, FR 490, SM 490, Structural stability, Material property at high temperatures

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

화재로부터 인명과 재산 그리고 자연피해의 최소화를 목적으로 다양한 수단이 개발되어 왔으며, 건축물의 내화설계는 대표적인 대안으로 자리매김하고 있다. 특히 재료의 고강도, 고품질을 바탕으로 건축물의 주요 구조부에 적용되고 있는 일반적인 강재는 화재와 같은 고열에서 강도의 저하 그리고 팽창이 발생됨으로써 구조물의 안전성 확보에 특별한 조치가 요구되고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 고열에서의 입자 이격을 방지하기 위하여 크

롬(Cr)과 몰리브덴(Mo)을 첨가한 특수 강재가 개발되었으며<sup>(1)</sup>, 한국산업규격에 건축용 내화강재(이하 FR 490강재)라고 명명되어 있다<sup>(2)</sup>.

FR 490강재에 관한 고온 시 재료 특성에 관한 해석적 연구는 일부 진행되었으나, FR 490강재로 제작된 보부재의 고온 시 거동에 관한 연구는 없다. 따라서 본 연구에서는 고온 시의 특성을 활용하여 FR 490강재로 구성된 보부재의 고온 시 구조적 거동을 해석적으로 평가하고자 한다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

보부재는 일정 규모의 면적에 작용하는 바닥하중을 기

등부재와 내력벽체와 같은 수직 내력부재에 전달하는 역할을 한다. 따라서 화재와 같은 고온 시 H형강으로 구성된 보부재의 거동은 보부재의 팽창으로 인한 인접 기둥부재의 휨모멘트 추가 발생 그리고 내력감소에 의한 처짐을 지속적 증가 그리고 냉각 시 인접 기둥부재의 내부 경사짐에 의한 휨모멘트 추가 그리고 보부재로의 인장력 추가 발생 등의 구조적 변화가 발생된다. 따라서 고온 시의 보부재 온도 상승, 처짐 발생 그리고 보부재의 내력저하 등을 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 이와 같은 고온 시의 구조적 거동을 평가하기 위하여 한국산업규격 KSF 2257-1에 규정된 표준화재 온도곡선을 이용하고<sup>(3)</sup>, 1시간의 가열시간을 적용하였다. H형강 보부재의 크기는 강재 기둥의 내화피복 두께 설정 시 통상적으로 사용되는 H-400 × 200 × 8 × 13(단면적 84.12 cm<sup>2</sup>)을 이용하였다. 보부재에 적용된 FR 490강재는 항복강도 330 MPa이며, 사용된 보부재의 경계조건은 강구조 건축물의 보부재에 적용되는 물러단과 힌지단의 조합인 단순보로 설정하였고, 스패는 수평 가열로에서 평가되는 보부재의 스패 4,100 mm를 기본으로 하고, 스패를 300 mm씩 증가시킨 스패 4,400 mm와 4,700 mm로 설정하였다.

## 2. 기존연구의 고찰

강재 보의 구조적 거동은 강도보다는 처짐에 저항할 수 있는 횡강성에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 따라서 높은 탄성계수와 단면 2차 모멘트와 같은 기하학적 형태가 중요한 요소로 작용하므로 고강도 특성을 가진 특수 재료의 적용이 활발하지 못하였던 것으로 판단된다. 그러나 화재와 같은 극한 상황에서는 고온 시의 내력 유지 성능이 우수한 강재의 보부재로의 적용은 매우 바람직할 것으로 판단되나, 이에 대한 연구는 아직 없다.

건축용 내화강재에 관한 연구로서는 크게 고온 시의 재료측면 연구와 부재 측면의 고온 거동에 관한 연구로 나눌 수 있다. 재료 측면의 연구로써는 일본과 유럽 그리고 한국에서의 자료가 있으며, 여기에는 Sakumodo<sup>(4)</sup>와 Sha<sup>(5)</sup>의 그리고 권인규<sup>(6)</sup>가 대표적이다. 부재측면의 연구는 Sakumoto<sup>(7,8)</sup>, Yang<sup>(9,10)</sup>에 의해서 수행된 기둥부재에 관한 것이 대부분이며, 일부 보-기둥부재에 관한 Chung<sup>(11)</sup>의 연구가 제한적으로 수행되었다.

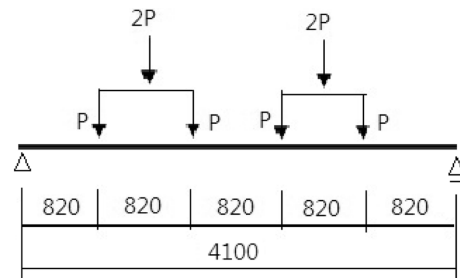
## 3. FR 490 보부재의 고온 내력평가

### 3.1 보부재의 해석조건

고온 시 내력유지 성능이 일반 용접구조용 강재보다 우수한 FR 490강재로 제작된 보부재의 고온 시 내력평가를 목적으로 다음 Table 1과 같은 조건을 설정하였다. 설정 시 주요 고려조건은 내화성능 평가 시험에 사용되는 조건을 바탕으로 하였고, 적용 스패 그리고 지점 조건 또한 일

**Table 1.** Conditions for Analysis

Section	H-400 × 200 × 8 × 13	Section area (84.12 cm <sup>2</sup> ), FR 490
Support conditions	Simple beam	
Span of beam (mm)	4100, 4400, 4700	
Fire curve	Standard fire curve	KS F 2257-1,6



**Figure 1.** Uniform distribution diagram for a simple beam.

부 내화시험기관의 하중 적용 조건과 지점 조건을 고려하였다. 해석의 최소 스패와 하중 재하방식은 다음 Figure 1에 제시하였다.

**Table 2.** Mechanical Properties at High Temperatures

Properties	Temperature (°C)	Regression equation
Yield strength	T ≤ 500	Cold value (315 MPa)
	500 < T ≤ 900	-0.72T + 674.49
Elastic modulus	T ≤ 200	Cold value (210000 MPa)
	200 < T ≤ 900	-211.73T + 254,343

여기서, T = 온도(°C).

**Table 3.** Specific Heat at High Temperatures

Temperature (°C)	Regression equation (J/g · K)	Remarks
T ≤ 600	0.0006T + 0.40	R <sup>2</sup> = 0.94
600 < T ≤ 700	0.006T - 2.86	R <sup>2</sup> = 1
700 < T ≤ 800	-0.003T + 3.33	R <sup>2</sup> = 1
800 < T	-0.002T + 2.37	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 ≤ 140	0.087T - 3.53	R <sup>2</sup> = 0.97
140 < T ≤ 720	0.009T + 7.94	R <sup>2</sup> = 0.92
720 < T ≤ 840	-0.025T + 32.10	R <sup>2</sup> = 0.99
840 < T	0.009T + 3.26	R <sup>2</sup> = 0.99

여기서, T = 온도(°C).

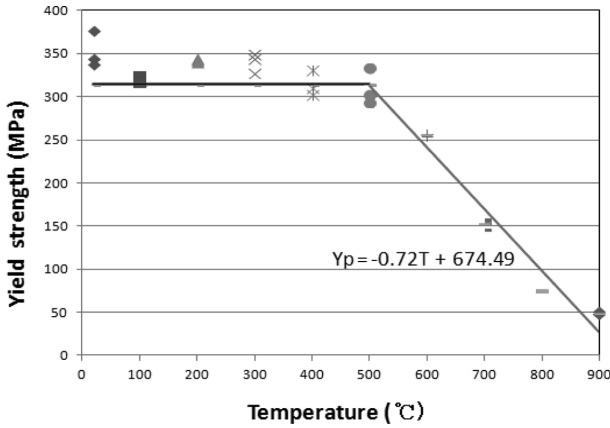


Figure 2. Yield strength versus temperature.

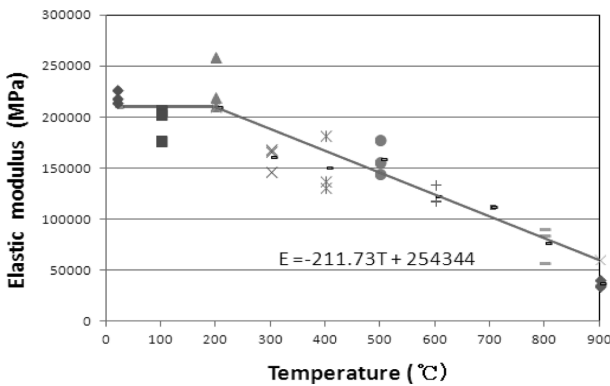


Figure 3. Elastic modulus versus temperature.

3.2 적용 재료의 고온 데이터베이스

항복강도 490 MPa인 FR 490강재의 고온 시 내력평가를 위한 온도 구간별 고온 특성 데이터베이스는 다음 Table 2~4와 같고, 항복강도와 탄성계수의 온도에 따른 변화는 Figure 2~3과 같다<sup>(6)</sup>.

3.3 고온 해석 수행

3.3.1 보부재의 온도 예측

표준온도 가열곡선의 시간 경과에 따른 주변부 온도는 보부재의 온도를 높이게 되며, 이 온도에 따라 팽창과 처짐 그리고 구조적 내력저하가 발생하게 된다. 따라서 보부재의 온도 계산은 매우 중요하며, 다음 식(1)에 따라 시간 변화에 따른 온도차를 계산함으로써 온도를 산정하였다<sup>(12)</sup>.

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

여기서,  $\Delta\theta_s$ 는 강재의 온도 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 표면온도가열곡선상의 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.

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

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

3.3.2 고온 시 길이변화와 최대 내력 그리고 처짐 계산

보부재의 수평방향의 길이변화는 FR 490강재의 고온 시 열팽창 특성 그리고 하중 재하로 유발되는 처짐에 따른 미소변화의 합으로 발생된다. 본 연구에서는 열팽창에 의한 수평방향의 길이 변화만을 대상으로 하였다.

고온 시의 보부재의 최대 내력 계산은 4점 재하방식에 따른 최대 모멘트와 허용 휨응력 산정에 따라 도출하였다. 고온 시의 최대 내력 계산 시 강재의 단면적 변화와 횡좌굴 발생은 없는 것으로 가정하였다. 스패น 4100인 보부재의 허용 휨응력은 다음 두식(3)과 (4)에서 큰 값을 적용하였다.

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

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.

$$f_b = \left[ 1 - \frac{0.4 \left( \frac{l_b}{i_b} \right)^2}{C_m \cdot (\lambda_p)^2} \right] \times f_t = \left[ 1 - \frac{0.4 \left( \frac{410}{5.26} \right)^2}{1 \times 102.26^2} \right] \times (220) = 168.87 (\text{MPa}) \tag{5}$$

여기서,  $i_b$ 는 단면 2차 반경,  $\lambda_p$ 는 한계 세장비이고,  $f_t$ 는 허용 인장응력도이다.

본 연구에 적용된 H형강의 주요 제원은 다음과 같으며, 한계세장비 102.26은 다음 식(6)으로 계산되었다.

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F_y}} = \sqrt{\frac{(3.14)^2 \times 2,100}{0.6 \times 3.3}} = 102.26$$

따라서 본 연구에 적용된 최대 휨응력도는 168.87 MPa이며, 최대 하중은 Figure 1의 재하방식에 따른 최대 모멘트를 다음의 식(7)에 적용하여 도출하였다.

$$f_b = \frac{M}{Z} \tag{7}$$

여기서, M는 최대 모멘트(N·m), Z는 단면계수(m<sup>3</sup>)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 P에 작용할 수 있는 최대 하중은 다음 식(7)에 의해서 P는 81.69 kN으로 계산되었으며, 보부재에 작용할 수 있는 최대 하중은 4P = 326.76 kN이다.

### 4. 해석 결과 분석

#### 4.1 보부재의 온도 및 길이 팽창

고온 시 구조내력을 평가하기 위해서는 열원에 따른 보부재의 온도 계산이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 온도 변화에 따른 비열과 단면 특성을 고려하여 산출하였으며, 상온 시 동일한 항복강도를 가지는 SM 490의 온도 값과 비교하였고, 그 결과를 Figure 4에 제시하였다. 본 그림에서 10분 경과 시(678 °C)까지는 두 강재 모두 비슷한 온도 상승률을 보이고 있으나, 이후 구간에서는 SM 490강재가 FR 490강재의 온도보다 다소 낮은 상승률을 보이고 있으며, 최대 차이는 약 12 °C 수준으로 나타났다. 이는 SM 490

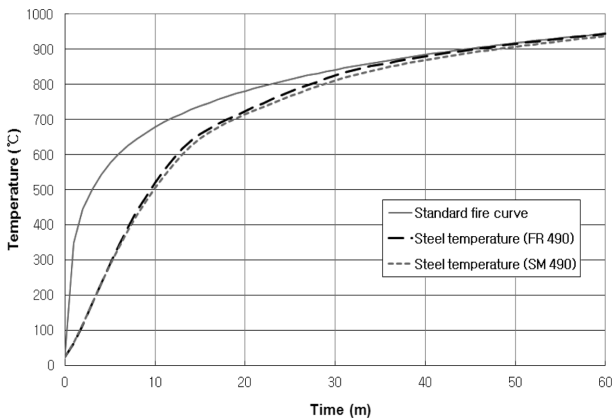


Figure 4. Surface temperature of H-section versus time on the standard fire curve.

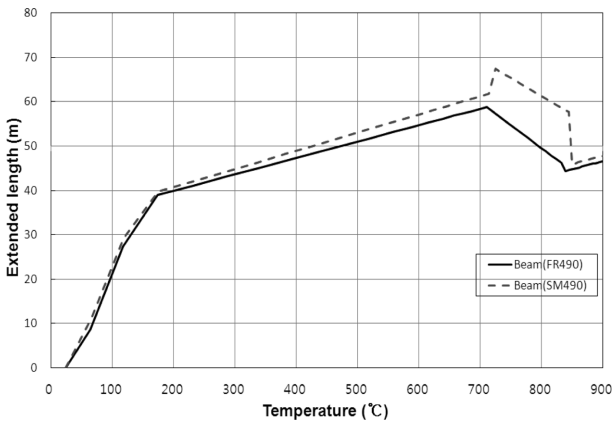


Figure 5. Extended length versus surface temperatures of each H-section.

강재가 FR 490강재보다 높은 비열값을 가지기 때문이며, 이로 인한 내력의 차이는 거의 없을 것으로 판단되었다.

온도상승에 따른 보부재의 길이 변화는 인접 기둥부재의 추가적인 모멘트를 발생시킴으로써 구조적 위험성을 배가시킬 수 있다. 따라서 보부재 길이 방향의 변화량은 큰 의미를 가지고 있으며, FR 490강재보와 SM 490강재보 각각 Figure 5에 그 변화량을 제시하였다. 본 그림에서 FR 490강재와 SM 490강재는 비슷한 변화량의 증가를 보이고 있으나, 상대적으로 FR 490강재보가 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 특히 190 °C까지는 급격히 증가하였고, 이후 700 °C 부근까지는 완만하게 상승하였으며, 이후 구간에서는 감소하는 경향을 보이고 있다. 전 온도구간에서 FR 490강재의 보부재가 SM 490강재 보부재에 비해서 보부재의 길이 변화량의 크기가 상대적으로 적은 것으로 나타나, 인접 기둥부재의 안전성에 미치는 영향은 상대적으로 낮기 때문에 구조적으로 안정될 것으로 판단되었다.

FR 490강재보의 경우는 크롬과 몰리브덴 등의 합금에 의한 원자간 결합유지 온도가 제어되고, 마르텐사이트 상변태가 발생되었기 때문에 길이 변화가 감소된 반면, SM 490강재를 적용한 보부재는 고온 시의 이러한 작용이 없기 때문에 700 °C 이후 구간에서 변화량이 증가한 이후 감소하는 경향을 보인 것으로 판단되었다.

#### 4.2 H형강 보부재의 고온 시 내력 평가

FR 490강재의 특징은 고온 시 내력유지 성능이 일반 구조용 강재에 비해서 우수하다는 점이다. 따라서 이를 확인하기 위하여 SM 490강재와 함께 보부재의 온도에 따른 최대 내력의 크기를 비교하였으며, 이 결과를 Figure 6에 나타내었다. 그림에서 FR 490 보부재는 상온에서 약 490 °C 까지 최대 내력의 특성을 유지하고 있으며, 이후 구간에서는 내력의 감소 폭이 크게 나타났으나, 전 온도구간에서 FR 490 보부재가 SM 490강재보보다 내력적으로 우수한 것으로 나타났다. 따라서 일반적인 용도의 건축물에서 FR 490강재를 적용한 보부재는 SM 490강재보에 비해서 내화

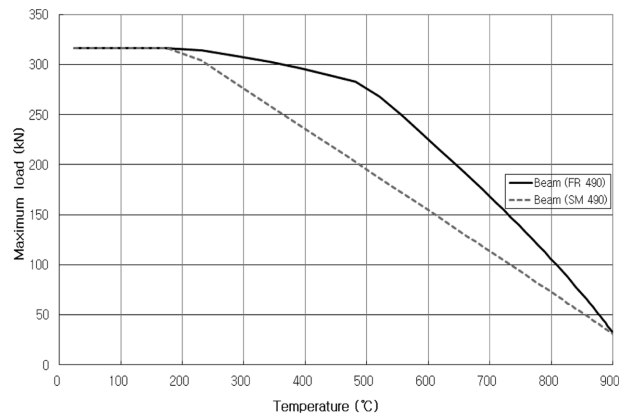
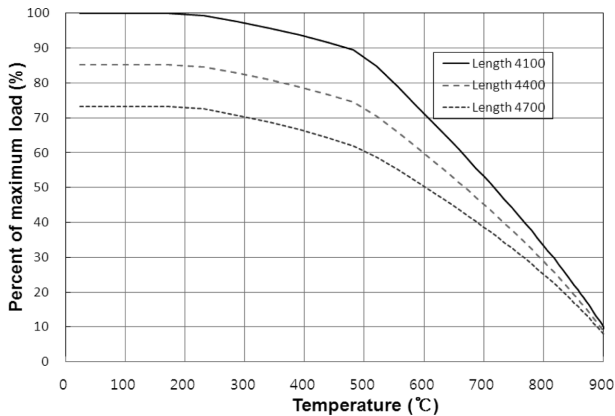


Figure 6. Maximum load versus surface temperatures of H-section beam.



**Figure 7.** Comparison maximum loads according to different beam lengths.

**Table 5.** Maximum Moments and Maximum Loads According to Span

Span (mm)	Maximum moment (kN/m)	Maximum load (kN)
4100	2.46 P	326.76
4400	2.76 P	277.87
4700	3.06 P	237.71

피복재를 경감시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

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

FR 490강재보의 길이 변화에 따른 내력 특성을 평가하였고, 그 결과를 Figure 7에 나타내었다. 스패 길이 별 최대 모멘트와 최대 하중의 크기는 다음 Table 5와 같다.

스패이 길어질수록 발생 최대 모멘트는 커지고, 작용할 수 있는 최대 하중의 크기는 점차 감소하고 있다. 이러한 조건에서 스패의 차이에 따른 고온 시 내력의 감소는 4100 mm를 기준으로 했을 때, 85%와 73%로 각각 나타났다. 따라서 고온 시 스패에 따른 내력의 감소는 현저하게 나타났으므로 4100 mm 기준으로 평가된 보부재의 내화피복두께를 보다 큰 스패에도 동일하게 적용하는 것은 국부 파괴 등의 우려가 높을 것으로 판단되었다. 따라서 4100 mm 기준으로 평가된 내화피복두께를 보다 큰 스패에 적용하기 위해서는 최대 하중의 감소를 만큼의 내화피복재 보강이 필요하다고 판단되었다.

## 5. 결 론

화재와 같은 고온 시의 구조적 내력 유지 성능이 우수한 건축용 내화강재(FR 490)를 적용한 보부재의 고온 시 내력적 특성을 해석적으로 평가하고, 이 결과를 상온에서의 구조적 내력이 동일한 용접구조용 강재(SM 490)와 비교

분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 시간경과별 강재 보부재의 온도 상승 평가 결과, FR 490강재보가 SM 490강재보와 유사하였으며, 길이 방향의 신장은 SM 490강재보가 약간 크게 나타났다. 따라서 FR 490강재보가 구조적으로 다소 안전성이 높은 것으로 판단되었다.

2. 보부재의 하중 작용 간격이 동일한 경우, H형강 보부재의 스패 변화에 따른 고온 시 내력평가 결과, 부재가 길어질수록 내력저하가 크게 나타났으며, 보부재 스패 4400 mm와 4700 mm의 내력은 보부재 스패 4100 mm의 상온 시 최대 내력에 비해서 약 85%, 73%로 나타났다.

3. 고온 시 특성이 우수한 건축용 내화강재도 스패이 길어짐에 따라 고온 내력이 급격히 감소하였다. 따라서 통상적 내화시험으로 도출된 내화피복두께를 보다 긴 스패에 적용하기 위해서는 내력저감 특성만큼의 내화피복재의 보강이 필요한 것으로 판단되었다.

## 후 기

본 연구는 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-220140090).

## References

1. Posco Laboratory, "Development of 50 kgf/mm<sup>2</sup> Fire Resistance Steels using Cr-Mo for Building Structure" (1995).
2. Korean Standard Association, KS D3865, "Fire Resistance Steels for Building Structure", Seoul, Korea (2011).
3. Korean Standard Association, KS F 2257-1, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements", Seoul, Korea (2010).
4. Y. Sakumoto, T. Yamaguchi, M. Ohash and M. Saito, "High-Temperature Properties of Fire Resistant Steel for Buildings", Journal of Structural Engineering, Vol. 119, pp. 392-407 (1992).
5. W. Sha, F. S. Kelly and Z. X. Guo. "Microstructure and Properties of Nippon Fire-Resistant Steels", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 8, pp. 606-612 (1999).
6. I. K. Kwon, "Experimental Study on Making Databases for Fire Resistant Steel at High Temperature", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No. 5, pp. 1-7 (2013).
7. Y. Sakumoto, T. Okada, M. Yoshida and S. Tasaka, "Fire Resistance of Concrete-Filled, Fire-Resistant Steel-Tube Columns", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 169-184 (1994).
8. Y. Sakumoto, T. Yamaguchi, T. Okada, M. Yoshida, S. Tasaka and H. Saito, "Fire Resistance of Fire-Resistant

- Steel Column”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 4, pp. 1103-1121 (1994).
9. K. C. Yang, H. H. Lee and O. Chan, “Experimental Study of Fire-Resistant Steel H-columns at Elevated Temperature”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp. 544-553 (2006).
  10. K. C. Yang, S. J. Chen, C. C. Lin and H. H. Lee, “Experimental Study on Local Buckling of Fire-Resistant Steel Columns under Fire Load”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, pp. 553-565 (2005).
  11. H. Y. Chung, C. H. Lee, W. J. Su and R. Z. Lin, “Application of Fire-Resistant Steel to Beam-to Column Moment Connections at Elevated Temperatures”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, pp. 289-303 (2010).
  12. Swedish Institute of Steel Construction, “Fire Engineering Design of Steel Structures”, Stockholm, Sweden (1976).