

# 해석적 방법에 의한 고강도 강재(SM 570) 적용 보부재의 고온 시 내력 평가

권인규

강원대학교 소방방재학부

## Evaluation of Structural Stability at High Temperatures for Beams Made of High Strength Structural Steels (SM 570) by Analytical Method

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received April 7, 2014; Revised June 27, 2014; Accepted June 27, 2014)

### 요 약

일정 스패너의 하중을 기둥부재로 전달하는 보부재의 경우, 화재 발생 시 팽창과 수축 그리고 내력저하로 인하여 구조적 불균형을 유발한다. 따라서 일정 규모 이상의 강구조 건축물의 보부재도 내화성능 확보를 의무화하고 있으나, 보부재의 크기와 조건에 의한 시방적 방법으로 내화성능의 평가가 진행되고 있는 것이 현 실정이다. 고강도 강재가 적용된 보부재의 스패너 변화에 대한 고온 시 내력평가는 이루어지지 않고 있어 정확한 구조적 내력평가에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 고강도 강재가 적용된 단순보를 대상으로 고온 시의 표면온도 변화, 팽창, 처짐 및 길이 변화에 따른 내력을 일반 강재와 비교함으로써 화재 시의 내력적 성능변화를 확인하고자 한다.

### ABSTRACT

Beams play an important role to transfer an applied load on the floor into columns. However, if the beams affected by a fire the length will be changed longer or shorter and the structural stability decreased gradually and resulted in structural failure. Therefore, the fire regulation requires that structural beam has to satisfied with a constant fire resistance. The fire resistance conducted by a constant size and boundary condition in an horizontal furnace. But this is not enough to adopt a beam made of high structural steels having various lengths. In this study, in order to suggest structural behaviors of beams made of high structural steels at high temperature, mechanical properties at high temperature and heat stress analysis were used and the surface temperature, expansion, displacement and variance of maximum load according to lengths of the beam were compared with those of SM 400.

**Keywords :** Mechanical properties at high temperatures, Structural behavior, Deformation, Expansion

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

기술과 산업의 발달로 인하여 건축재료의 품질은 점차적으로 고성능화되고 있다. 구조용 강재의 경우, 항복강도와 용접성이 우수한 고강도 용접 구조용 강재의 적용이 점차 증대하고 있는 실정이고, 초고층 건축물의 주요 건축재료로 활용되고 있다<sup>(1)</sup>. 이와 더불어 내부 가연물질의 증가로 인하여 건축물의 화재 발생 위험성은 점차 증대하고 있는 실정이다. 따라서 고강도 강재로 구성된 건축 구조부재의 내화성능에 대한 평가는 새로운 관점에서 진

행되어야 할 시기라고 판단된다. 특히 보부재의 경우, 일정 스패너에 작용하는 바닥하중을 중력방향의 기둥부재로 전달함으로써 전체 구조의 안전성을 유지하고 있는 역할을 수행하고 있는 바, 화재와 같은 고온 상황에서의 팽창과 처짐 그리고 내력저하 등은 매우 심각한 구조적 불균형을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 고강도 용접 구조용 강재로 제작된 H형강 보부재를 대상으로 화재 시의 표면온도 변화, 길이의 팽창 및 처짐 그리고 보부재의 길이 변수에 의한 고온 시의 내력변화를 해석적으로 평가하고, 이를 일반 구조용 강재의 H형강 보부재의 내력적 특성과 비교함으로써 그 안전성을 확인하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

고강도 용접구조용은 SM 570 강재를 대상으로 하고, 고온 시 기계적, 열적 특성 자료를 활용하여 고온 시의 H형강 보부재의 내력적 변화를 평가하고자 한다. 보부재의 크기와 경계조건은 시방적 내화성능에 활용되는 크기(H-400 × 200 × 8 × 13, 스패 4100 mm)와 단순보로 하고, 길이변화는 300 mm씩 증가시킨 4400 mm, 4700 mm로 설정한다. 고온 시 내력평가의 열원은 한국산업규격에 제시된 표준 온도 가열곡선으로 하고, 무내화피복 시의 구조내력조건이므로 1시간 동안의 열응력 해석을 수행한다. 주요 도출 내력요소는 화재조건에서의 표면온도, 처짐 그리고 내력변화이며, 각각에 대해서 일반 구조용 강재(SM 400) 적용 결과와 비교한다.

2. 기존연구의 고찰

강재 보부재에 관한 내화성능 평가는 내화피복 재료의 두께 결정을 위하여 스패 4100 mm인 H-400 × 200 × 8 × 13 단면크기 그리고 경계조건은 한단 힌지 그리고 타단 롤러인 단순보를 가정하여 일반적으로 진행되고 있다. 반면 특수한 보부재 단면의 고온 시 내력평가를 목적으로 하는 내화시험과 해석적 방법이 일부 진행되었으며, 이는 TSC와 iTech 보부재를 대상으로 수행된 김성배 등<sup>(2)</sup>과 임윤희 등<sup>(3)</sup>의 연구가 대표적으로 알려져 있다. 국외의 관련 연구로서는 고강도강재 코어를 목재보에 적용한 Borri 등의 연구<sup>(4)</sup> 그리고 스텔레스 강재보의 고온 시 거동을 연구한 Chen 등<sup>(5)</sup>의 연구가 있다.

3. 보부재의 고온 시 구조내력 평가

3.1 보부재의 조건

고온 시의 구조내력 특성을 평가하기 위하여 다음 Table 1과 같은 조건의 H형강과 경계조건 그리고 부재길이 등의 변수를 설정하였고, 화재의 조건을 모사하기 위하여 표준 온도곡선을 이용하였으며, 그 시간은 1시간으로 설정하였다. 고온 내력 평가에 적용된 H형강은 무내화피복이므로 실제적으로 약 20분 내외의 구조적 내력을 유지할 것으로 사료되지만, 전체적인 경향을 파악하기 위하여 1시간으로 설정하였다. 경계조건 또한 현재 보부재의 내화성능 평가

Table 1. Variances for Analysis of Structural Stability

Section	H-400 × 200 × 8 × 13	Section area (84.12 cm <sup>2</sup> ), SM 570
Support conditions	Simple beam	
Spans of beam (mm)	4100, 4400, 4700	
Fire curve	Standard fire curve	KS F 2257-1,6

시에 적용되는 단순보를 그대로 따랐으며, 실제 화재 시의 구조거동 또한 양단 고정단보다 열악한 조건으로 판단되기 때문이다.

3.2 보부재 구성재료의 고온 물성

고온 시의 H형강 보부재의 표면온도 변화, 팽창, 처짐 그리고 내력변화를 계산하기 위해서는 SM 570 강재의 고온 시 기계적 특성과 열적 특성 등의 자료가 요구된다. 따라서 본 연구에는 다음 Table 2~4에 제시된 자료를 이용하여 고온 시 구조적 특성을 평가하였다. SM 570 강재의 고온 시 특성은 계산 시의 오차범위를 최소화하기 위하여 각 온도구간별 회귀식을 도출하여 각각 구간에 대한 특성치를 평가하였다<sup>(6)</sup>.

3.3 보부재의 고온 내력 평가

3.3.1 보부재의 표면온도 계산

화재조건으로 가정된 표준온도 곡선은 시간 증분에 따라 일정한 분위기 온도를 형성하게 된다. 따라서 강재 보부재의 경우 또한 시간의 변화에 따라 표면온도가 상승하게 되며, 이는 적용 강재의 비열, 밀도 그리고 노출되는 부재의 단면특징 등에 좌우되며, 다음 식(1)에 따라 계산

Table 2. Mechanical Properties at High Temperatures

Properties	Temperature (°C)	Regression equation
Yield strength	T ≤ 400	Cold value (450 MPa)
	400 < T ≤ 900	-0.93T + 820.74
Elastic modulus	T ≤ 200	Cold value (210 GPa)
	200 < T ≤ 900	-0.83T + 267.86

여기서, T = 온도(°C).

Table 3. Specific Heat at High Temperatures

Temperature (°C)	Regression equation (J/Kg · K)	Remarks
T ≤ 610	0.52T + 333.2	R <sup>2</sup> = 0.94
610 < T ≤ 710	4.94T - 2289.5	R <sup>2</sup> = 1
710 < T ≤ 810	-3.33T + 3547.6	R <sup>2</sup> = 1
810 < T	1.11T - 20.37	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 ≤ 160	0.059T + 3.56	R <sup>2</sup> = 0.97
160 < T ≤ 700	0.007T + 9.67	R <sup>2</sup> = 0.89
700 < T ≤ 750	-0.026T + 31.51	R <sup>2</sup> = 0.98
750 < T	-0.004T + 15.51	R <sup>2</sup> = 0.99

여기서, T = 온도(°C).

된다<sup>(7)</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  $t$ 에서의 표면온도가열곡선상의 온도(°C),  $\theta_s$ 는 시간  $t$ 에서 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>(7)</sup>.

### 3.3.2 고온 시 길이변화, 처짐 및 최대하중 계산

물질의 경우, 온도의 증분에 따라 부피의 변화가 수반되는데, 이는 물질의 최소 구성단위의 활발한 에너지 전이로 발생된다. 따라서 고강도 용접구조용 강재로 구성되는 H형강 보부재의 경우 또한 하부의 열원으로부터 대류, 복사로 인한 열전달의 결과로 표면온도의 변화가 발생되고, 이로 인하여 부피변화 및 길이 변화가 발생된다. 부피변화는 보부재 자체의 온도차이로 인한 휨발생으로 제2차의 처짐이 발생할 수 있고, 길이변화는 인접된 보부재 또는 기둥부재의 반력에 의해서 보부재 자체의 휨모멘트가 추가적으로 발생할 수도 있다. 따라서 보부재의 표면온도 변화에 따른 보부재의 길이 변화 계산은 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 연구에서는 부피 팽창에 따른 처짐발생은 고려하지 않고, 길이방향의 변화를 Table 4에 제시된 구조재료의 선팽창계수에 따라 계산하였다.

고온 시 구조내력의 평가는 곧 보부재의 내력 휨응력을 유발시킬 수 있는 최대하중의 변화로 판단할 수 있으며, 보부재의 최대하중은 다음 식(3)과 (4)의 큰 값으로 결정하였다<sup>(8)</sup>. 보부재의 표면온도 변화와 최대하중 산정 과정에서 강재의 단면적 변화는 없는 것으로 가정하였고, 또한 황좌굴 등과 같은 국부 좌굴은 발생되지 않는 것으로 가정하였다.

상온 시 강재보에 작용하는 최대하중은 396.7 kN으로 계산되었으며, 그 과정은 다음과 같다.

$$f_b = \frac{900}{\left( \frac{l_b \times h}{A_f} \right)} = \frac{900}{\left( \frac{410 \times 40}{20 \times 1.3} \right)} = \frac{900}{630.77} = 124.4(\text{MPa}) \quad (3)$$

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

$$f_b = \left[ 1 - \frac{0.4 \left( \frac{l_b}{i_b} \right)^2}{C_m \cdot (\lambda_p)^2} \right] \times f_t$$

$$= \left[ 1 - \frac{0.4 \left( \frac{410}{5.26} \right)^2}{1 \times 87.57^2} \right] \times 300 = 204.93(\text{MPa}) \quad (4)$$

여기서,  $i_b$ 는 단면 2차반경,  $\lambda_p$ 는 한계세장비이고,  $f_t$ 는 허용인장응력이다.

본 연구에 적용된 H형강의 주요 제원은 다음과 같으며, 한계세장비 87.57은 다음 식(5)로 계산되었다.

$$f_t = 300 \text{ MPa}, i_b = 5.26 \text{ cm}, l = 410 \text{ cm}, Z = 1,190 \text{ cm}^3$$

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 F_y}} = \sqrt{\frac{(3.14)^2 \times 2,100}{0.6 \times 4.5}} = 87.57 \quad (5)$$

본 연구에 적용된 보부재는 단순보이므로 중앙부 모멘트가 최대이고, 양단부의 모멘트는 0이다. 따라서  $C_m = 1$ 로 계산하였으며, 강재 보부재의 허용 휨응력은 205 MPa로 설정되었다.

보부재에 작용하는 최대하중은 다음 식(6)으로 계산하였으며, 강재보에 작용하는 최대 모멘트의 계산은 다음 Figure 1과 같이 4점 재하에 의한 것으로 하였다. 4점 재하의 위치는 재하가열시험을 위한 하중틀의 간격으로 설정하였으며, 길이변화에 따른 하중 재하는 Figure 1과 같이 보의 중앙부에서 좌우로 410 mm 이격된 점 그리고 좌우로 각각 820 mm에 위치한 점으로 설정하였다.

$$f_b = \frac{M}{Z} \quad (6)$$

여기서,  $M$ 는 최대모멘트(N·m),  $Z$ 는 단면계수(m<sup>3</sup>)이다.

4점 재하에 의한 강재보의 최대 휨모멘트는 다음 식(7)과 같다.

$$M_{\max} = 2P \times (0.82 + 0.82 + 0.41) - P \times (0.82 + 0.41) - P(0.41) = 2.46P \quad (7)$$

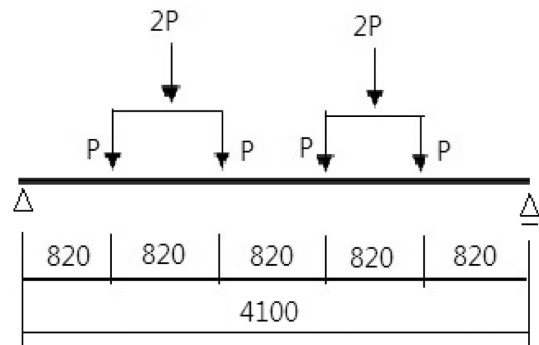


Figure 1. Loading diagram for simple beam.

따라서 강재보 한 점 P에 작용할 수 있는 최대하중은 다 음 식(7)에 의해서 P는 99.17 kN으로 계산되었으며, 보부 재에 작용할 수 있는 최대하중은  $4P = 396.7$  kN이다.

#### 4. 보부재의 고온 시 내력해석 결과

##### 4.1 보부재의 표면온도 및 길이 팽창

보부재의 표면온도 변화는 전열해석과 응력해석이 가능 하도록 설계된 STR-FR을 사용하여 계산하였으며<sup>(9)</sup>, 그 결 과는 Figure 2에 제시하였다. Figure 2에는 일반 용접구조 용 강재인 SM 400의 표면온도 상승결과와 비교하였고, SM 570 강재로 구성된 보부재의 표면온도가 SM 400보다 높게 나타났다<sup>(10)</sup>. 각 보부재의 표면온도 차이는 10분을 경계로 확대와 축소되었으며, 10분 경과 시 SM 570 강재 보가 SM 400 강재보보다 약 35°C 높게 나타났다. 이는 식(1)에서 나타난 바와 같이 동일한 단면의 경우, 비열에 반비례하는 특성이 있으며, SM 400 강재가 SM 570 강재 보다 고온 시의 비열이 높기 때문이다.

온도변화에 따른 보부재의 길이방향 변화는 Figure 3에

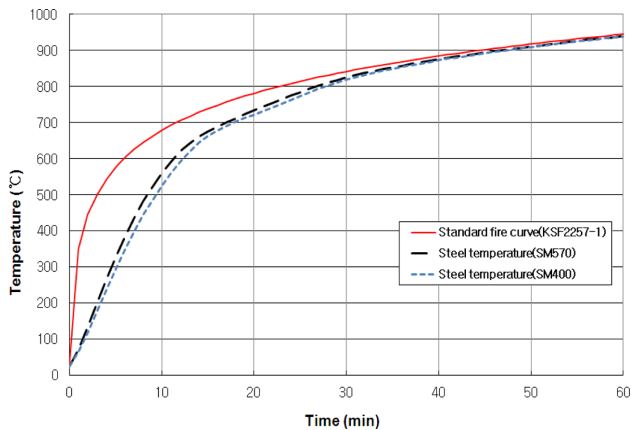


Figure 2. Surface temperatures of H-section beams made of SM 570 and SM 400.

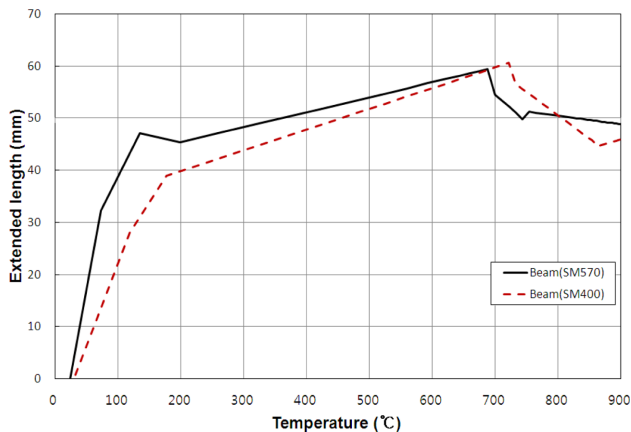


Figure 3. Extended lengths H-section beams made of SM 570 and SM 400 versus standard fire curve.

제시하였으며, SM 570 강재보가 600°C 구간까지는 높은 신장을 높이고 있으나, 이후 온도구간에서는 변동적인 결 과를 보이고 있다. 이는 각 강종의 선팽창계수의 차이에 따른 것으로 판단된다. 따라서 고온 시의 구조내력의 관점 에서 SM 570 강재보의 경우가 SM 400 강재보보다 높은 신장을 높이고 있으므로 보의 중앙부에서 발생할 것으로 사료되는 최대 처짐과 보부재의 양단부의 고정조건에 따 른 반력발생 등으로 고온 내력의 감소가 빨리 발생할 것으 로 예측되었다.

##### 4.2 H형강 보부재의 고온 시 처짐

보부재의 경우, 내력의 감소와 더불어 처짐의 발생은 인 간의 주거생활과 보관기능을 억제함으로써 한계에 도달하 게 된다. 따라서 고온에서의 보부재의 처짐은 매우 중요한 요소이며, 본 연구에서는 4점 재하방식에 의한 단순보의 최대 처짐을 모아의 정리에 따라 모멘트를 하중으로 산정 하여 계산하였으며<sup>(11)</sup>, 이 결과는 Figure 4와 같다. Figure 4에서 SM 570 강재를 사용한 보부재는 10분 경과 시부터 급격한 처짐이 발생됨으로써 구조적 역할을 수행이 어려 울 것으로 판단되었다. 반면 SM 400 강재를 사용한 보부 재는 상대적으로 건전함을 보였고 60분 경과시 최대 처짐 은 약 65 cm로 나타났다. 이는 보부재의 최대하중에 비례 하고, 탄성계수의 크기에 반비례하는 처짐량의 결과이며, SM 570 강재보의 경우, 작용 최대하중이 SM 400 강재보 보다 크고, 또한 전 온도구간에서 SM 570 강재의 고온 시 탄성계수가 SM 400 강재보다 상대적으로 적기 때문에 판단된다. SM 400 강재의 4400 mm와 4700 mm의 경우, 최대 처짐량은 각각 95 mm와 114 mm로 나타났다. 따라 서 보부재의 처짐 관점에서 구조적 거동을 판단할 때 화재 시 고강도 강재의 적용은 신중해야 될 것으로 판단되었다.

##### 4.3 부재 길이 변화에 따른 보부재의 고온 시 내력평가

본 연구에서는 보부재의 길이 변화에 따른 고온 시의 내 력변화를 평가하였으며, 그 결과는 Figure 5에 제시되어

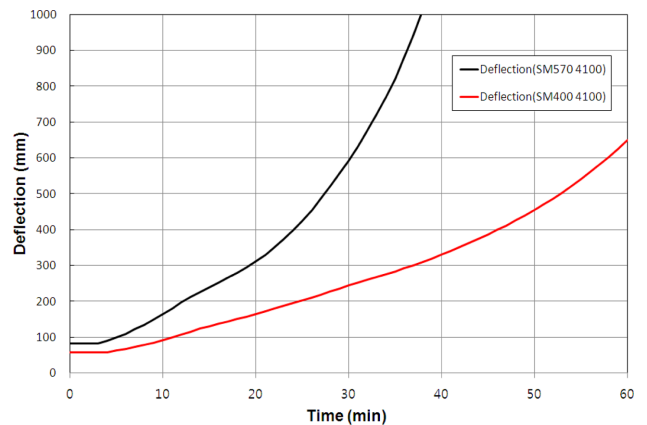


Figure 4. Maximum deflections versus time (min).

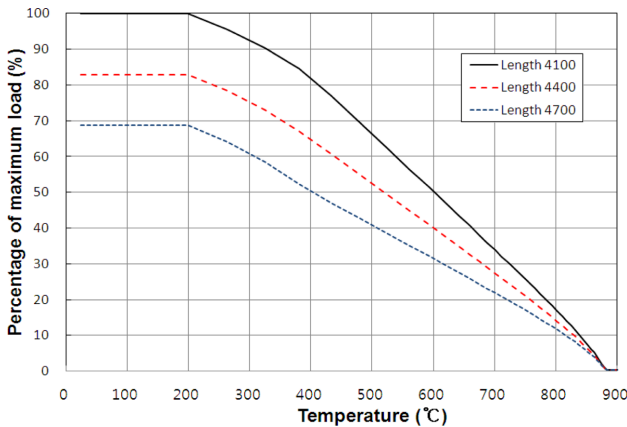


Figure 5. Comparison of a maximum load according to different beam lengths (SM 570).

있다. 스펠 4100 mm인 SM 570 강재보의 경우는 200°C까지 상온과 같은 내력을 유지하고 있으나, 이후 온도구간에서는 급격히 내력이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 길이 4400 mm인 SM 570 강재보는 4100 mm 강재보에 비해서 상온에서 약 200°C까지 약 83%의 내력을 유지하고 있으며, 스펠 4400 mm의 경우, 400°C~550°C 구간에서는 4100 mm에 비해서 약 79%의 내력을 유지하고, 스펠 4700 mm는 400°C~500°C 구간에서는 61%까지 유지되는 것으로 나타났다. 스펠 변화에 따른 내력 감소폭은 일반 구조용 강재의 스펠의 변화에 대한 내력 저하폭보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 SM 570 강재보의 내화피복은 길이의 증가에 따른 내력의 감소폭만큼 보강이 되어야 할 것으로 판단되었다. SM 400 강재보의 길이 변화에 따른 고온 시 내력변화를 Figure 6에 제시하였으며, 강재보 4400 mm와 4700 mm는 4100 mm 보에 비해서 상온 시 약 83%, 70%의 최대하중 비율을 보였고, 이는 SM 570 강재와 유사한 결과를 보였다. 강재 표면온도 150°C 이후 구간부터 내력 감소가 나타났기 시작하여, 500°C 구간에서는 4100 mm

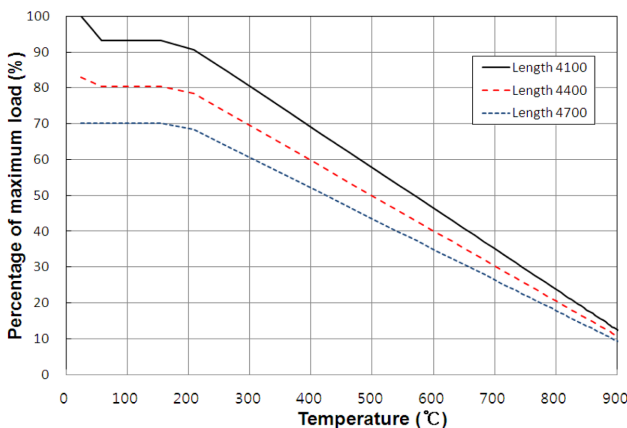


Figure 6. Comparison of a maximum load according to different beam lengths (SM 400).

대비 86%, 75%를 보임으로써 SM 570 강재보보다 다소 우수한 것으로 판단되었다.

### 5. 결 론

고강도 용접구조용 강재(SM 570)를 적용한 보부재의 고온 시 내력적 특성을 평가하기 위하여 표면온도 변화, 열팽창 과 처짐 및 그리고 보부재 길이 변화에 따른 최대 내력을 일반 등급의 용접구조용 강재(SM 400)를 적용한 보부재와 비교평가한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 보부재의 표면온도 상승은 비열에 반비례하는 특성에 따라, SM 570 강재보가 SM 400 강재보보다 높게 나타났으며, 10분 경과 시 35°C로 그 차이가 최대로 나타났다.
2. 표준화재온도곡선의 600°C까지 보부재의 길이방향 팽창은 SM 570 강재가 SM 400 강재보다 높게 나타났다. 따라서 고온에서의 고강도 강재의 적용은 일반 강재 적용에 비해서 2차적인 응력 발생 가능성이 높은 것으로 판단되었다.
3. 4점 재하 방식의 재하가열시험에 의한 보부재의 처짐 결과에서 고강도 강재를 적용한 보부재는 10분 경과부터 일반 강재의 보부재에 비해서 매우 급격한 변위가 발생되었다. 따라서 고온 시의 고강도 강재 적용 보부재의 구조적 붕괴는 매우 급격히 발생될 것으로 판단되었다.
4. 강재 보부재의 길이 변화에 따른 내력 평가 결과, 4400 mm 스펠의 경우 4100 mm에 비해서 21%, 4700 mm의 경우 31%까지의 내력감소가 나타나는 것으로 보부재 길이 증가에 따른 내화성능 보완은 반드시 필요하고, 이를 위해서는 적절한 내화피복의 증가가 필요한 것으로 판단되었다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단의 지원받아 수행되었으며 관계 제위께 감사드립니다(과제번호 NRF-2010-0004385).

### References

1. J. Chen, Y. Kang, J. Qian, S. Li and J. Qian, "Microstructures and Properties of 550 MPa Grade High Strength Thin-Walled H-Beam Steel", Journal of Wuhan University of Technology (Material Science Edition), Vol. 28, No. 6, pp. 1217-1222 (2013).
2. 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 Society of Steel Construction, Vol. 18, No. 1, pp. 113-122 (2006).
3. 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 Society of Steel

- Construction, Vol. 18, No. 5, pp. 655-664 (2006).
4. A. Borri and M. Corradi, "Strengthening of Timber Beams with High Strength Steel Cords", *Composites Part B*, Vol. 42, No. 6, pp. 1480-1491 (2011).
  5. J. Chen and W. L. Jin, "Behaviour of Cold-Formed Stainless Steel Beams at Elevated Temperatures", *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 9, No. 11, pp. 1507-1513 (2008).
  6. I. K. Kwon, "Evaluation Study on the Mechanical and Thermal Properties of High Strength Structural Steel at High Temperature", *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol 27, No. 3, pp. 72-79 (2013).
  7. Swedish Institute of Steel Construction, "Fire Engineering Design of Steel Structures", Stockholm, Sweden (1976).
  8. D. G. Kim, C. K. Ma, J. C. Chung and J. J. Ju, "H Section Steel Structure Design", Seoul, Korea (2003).
  9. 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).
  10. I. K. Kwon, "A Study on the Properties of SM 400 for Evaluation of Structural Stability at High Temperature", *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol 27, No. 4, pp. 7-12 (2013).
  11. H. J. Ahn, B. W. Wu and I. M. Park, "Architectural Structural Mechanics", Goomibook, Seoul, Korea (2005).