

[Research Paper]

해석적 방법에 의한 TMC 건축용 내화강재 적용 보부재의 고온 내력평가 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

A Study for Structural Stabilities of Beams Built with TMC Fire Resistant Steels by Analytical Method at High Temperatures

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received October 20, 2017; Revised November 6, 2017; Accepted November 7, 2017)

요 약

화재 발생 시 강구조 건축물은 재료의 급격한 강도저하에 따른 처짐과 내력저하로 구조물의 붕괴가 발생될 수 있다. 따라서 구조용 강재의 고온 시 강도저하의 최소화 및 강판 두께 차이에 따른 설계기준강도 차이의 해결과 용접성을 향상하기 위한 필요성이 제기되었으며, 이 결과 TMC 건축용 내화강재가 개발되었다. 본 연구에서는 TMC 건축용 내화강재의 고온 시 구조내력을 평가하기 위하여 일정 길이의 보부재를 대상으로 단순지지 및 고정단 보 조건으로 처짐과 최대내력 변화를 해석적으로 도출하였으며, 건축용 내화강재와 그 성능을 비교분석하였다. 그 결과, TMC 건축용 내화강재를 적용한 보부재가 내화강재 적용 보부재보다 고온 시 구조적 성능이 다소 열위임을 확인하였다.

ABSTRACT

Steel framed building can be destroyed due to deterioration of structural stabilities in a fire. This leads a TMC Fire Resistant Steels and this study analyzed the structural stabilities such as a deflection and a reduction of maximum load capacity for the structural beams built with a TMC Fire Resistant Steel. In this study the structural stabilities were evaluated using a mechanical properties in high temperatures not only a heat transfer theory but a heat stress analysis with a statistically determinated beam and a statistically indetermined one. The results showed that a TMC Fire Resistant Steels demonstrated a little lower those of Fire Resistant Steels.

Keywords : TMC Fire Resistant Steels, Mechanical Property in High Temperatures, Structural Stability, Steel Framed Building

1. 서 론

1.1 연구 목적

건축의 생산기술 발전과 건축재료의 성능향상은 건축물의 고층화, 대형화 그리고 복합화를 가능하게 하였으며, 이와 더불어 건축물 내부의 가연성 물질의 증가는 화재 발생 시 인명피해와 재산, 건축물에 의한 피해를 가중시키고 있다.⁽¹⁾ 건축물의 화재 피해를 최소화하기 위한 노력은 크게 두 가지 전략으로 집약될 수 있다. 첫째는 예방에 대한 노력이며, 두 번째는 화재를 제어하는 전략개발이라 판단된다. 본 연구에서는 건축물에서의 화재를 제어하는 전략 중

강구조 건축물을 형성하는 구조용 강재의 고온 시 내력향상에 관한 것으로서 고온 시 내력유지 성능이 우수하고 강판 두께에 따른 설계기준강도 차이와 용접성이 우수한 TMC 건축용 내화강재 적용 보부재를 해석하였다.

일반적으로 구조용 강재는 압연의 연속과정을 통하여 필요한 두께로 생산되는데, 후판의 경우 두께에 따라 설계기준강도가 달라지게 된다. 즉 40 mm 이상의 두께를 가진 강판의 설계기준강도는 40 mm 이하의 강판에 비해서 압연의 방향과 기술에 따른 응력차이로 낮은 설계기준강도를 가지는 특징이 있다.⁽²⁾ 이러한 두께별 설계기준강도 차이를 제조기술로 극복한 강재가 Thermo-Mechanical Control Process

(TMCP) 강재이다.

후판의 적용이 예상되는 고층 건축물에서는 설계기준강도의 저감없고, 용접성이 확보되는 TMC 강재의 적용이 확대되는 추세에 있다.⁽³⁾ 따라서 본 연구에서는 기존의 건축용 내화강재(FR490; Fire Resistant Steels)에 압연제어기술이 적용된 TMC 건축용 내화강재(TMC FR490)의 고온 시 내력을 해석적으로 평가하여 화재 시 구조 건전성 평가 자료 확보를 목적으로 한다.

1.2 연구 방법 및 범위

일반적으로 강구조 고층 건축물의 구조 형식은 모멘트 저항능력을 강화시킨 고정단을 주요 조건으로 설계하고 있다. 따라서 본 연구에서는 TMC 건축용 내화강재를 적용한 보부재를 대상으로 고온 시의 내력특성을 해석적으로 평가하고, 이를 건축용 내화강재와 비교분석하고자 한다.

고온 시의 구조적 특성은 TMC 건축용 내화강재의 고온 시 기계적 특성 값을 기반으로 열전달 해석과 열응력 해석을 수행함으로써 도출하고, 처짐과 최대내력의 감소 추이를 대상으로 한다. 대상부재와 화재크기의 선정은 우리나라의 강재 보부재의 내화성능을 평가하는 크기와 화재크기로 하고, 무피복 보부재임을 감안하여 1시간으로 한다. 보부재의 크기는 일반적으로 수평 가열로에서의 실시되는 보부재 내화성능평가 시 적용되는 4,100 mm을 기준으로 300 mm 모듈로 증가되는 길이로 설정하였다.

2. 기존연구의 고찰

후판의 설계기준강도 저감의 문제점을 극복하기 위한 압연제어 제조방식에 관한 연구는 고층용 강재 개발을 위한 Kawano⁽⁴⁾의 연구와 지진 대비 구조성능을 향상시킨 Nakagawa⁽⁵⁾ 등의 연구가 대표적이며, 건축구조용으로 활용하기 위한 연구로써 SM490TMC 소재 및 건축용 적용을 위한 Kim⁽⁶⁾의 연구와 SM570TMC의 건축구조용으로의 적용 기준개발을 위한 Lee⁽⁷⁾ 등의 연구가 있다.

해석적 방법으로 강구조 부재의 구조적 내력을 평가한 연구로써 자연화재곡선을 활용한 Bennett⁽⁸⁾, Barnett⁽⁹⁾의 연구와 모델링 방법에 따른 Law⁽¹⁰⁾의 연구, 열전달과 열응력을 적용한 Lawson⁽¹¹⁾ 등의 연구가 있으며, 구조용 강재의 고온

Table 1. Parameters for Analysis

Sorts	H-400×200×8×13	Section Area (84.12 cm ²),
Support Conditions	Simple and Fixed Beam	TMC FR 490, FR 490
Lengths of Beam (mm)	4100, 4400, 4700, 5000, 5300	
Fire Curve	Standard Fire Curve (1 hour)	KS F 2257-1

시 내력을 향상시킨 건축용 내화강재에 관한 Kwon⁽¹²⁾의 연구와 TMCP 강재의 고온물성 평가와 기둥부재의 고온 시 내력을 평가한 Kwon⁽¹³⁾의 연구가 있다.

구조용 강재 적용 부재의 고온내력 평가에는 구조용 강재의 고온 특성이 필수적으로 수반되며, 이에 대한 자료로써는 직접적인 실험적 자료와 기술적 자료집의 활용이 가능하다. 대표적인 기술적 자료집은 유로 코드⁽¹⁴⁾, 뉴질랜드 코드⁽¹⁵⁾ 등이 있다.

3. 보부재의 내화성능 평가

3.1 해석적 내화성능 조건

주어진 건축물의 조건을 대상으로 화재 시 구조적 내력을 해석적으로 평가하는 공학적 내화설계법에 의한 TMC 적용 보부재의 고온 시 구조내력 변화는 Table 1과 같은 조건으로 수행하였다. 보부재의 경계조건으로써는 정적 구조물인 단순보 조건과 부정정 구조물 조건인 고정단으로 설정하였다. 그리고 보부재의 길이는 수평 가열로에서의 강재 보부재의 내화성능 평가 시 일반적으로 적용가능한 4,100 mm를 기준으로 건축의 기본 모듈인 300 mm씩 증가되는 길이로 설정하고, 최대 5,300 mm로 하였다. 이는 길이 변화에 따른 처짐과 최대 내력의 변화 자료를 도출함과 동시에 현재 강구조 보부재의 내화성능 평가에 적용되는 부재 길이로써 실제 구조물의 모든 보부재에 적용되는 문제점을 분석하기 위함이기도 하다.

보부재의 경계조건과 작용하중간의 관계는 보부재 재하 가열시험조건과 유사한 조건으로 설정하였고, Figure 1과 같다.

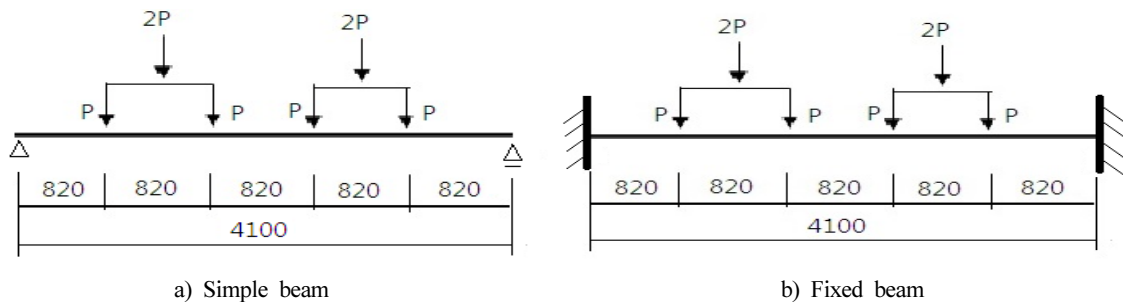


Figure 1. Loads distribution condition for each beam.

3.2 구조 거동 평가⁽¹⁶⁾

1) 정정 보부재

회전단과 힌지단으로 구성되는 단순보는 양단에서의 모멘트에 대한 저항성이 없기 때문에 중앙부에서 발생하는 최대 모멘트에 견디도록 설계되는 특징을 갖는 보의 형식이다. 본 연구에서는 단순보에서의 고온 시 처짐과 내력의 추이 자료를 도출하기 위하여 길이 4,100 mm를 기본으로 설정하고 H형강 400×200×8×13단면에 작용되는 최대 하중과 휨모멘트를 산출하였다. 고온 시 보부재에 작용하는 휨응력 산출을 위해서 단면적의 변화와 횡좌굴은 발생되지 않는 것으로 가정하였다.

보부재의 허용 휨응력은 다음 식 (1), (2)에서 큰 값으로 설정한다.

$$f_b = \frac{900}{\left(\frac{\ell_b \times h}{A_f}\right)} = \frac{900}{\frac{410 \times 40}{20 \times 1.3}} \quad (1)$$

$$= \frac{900}{630.77} = 142.7(\text{MPa})$$

여기서, f_b 는 허용휨응력도(MPa), ℓ_b 는 압축플랜지의 지점 간 거리(cm), h 는 보의 춤, A_f 는 플랜지의 단면적(cm^2)이다.

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

$$= \left[1 - \frac{0.4 \left(\frac{410}{4.24}\right)^2}{1 \times 103.04^2} \right] \times 216.7 = 150.10(\text{MPa})$$

i_b 는 단면 2차 반경, λ_p 는 한계 세장비이다.

최대 휨응력도는 150.10 MPa이며, 보부재 최대하중은 식 (3)으로 도출된다.

$$f_b = \frac{M}{Z} \quad (3)$$

M 는 최대모멘트($N \cdot m$), Z 는 단면계수(m^3)이다.

4점 재하방식의 최대 휨모멘트는 식 (4)와 같다.

$$M_{\max} = 2P \times (0.82 + 0.82 + 0.41) - P \times (0.82 + 0.41) - P(0.41) = 2.46P \quad (4)$$

따라서 한 점 P에 작용하는 하중은 72.61 kN이고, 전체 최대하중은 4P=290.44 kN이다.

2) 부정정 보부재

부정정 구조물은 차수에 따라 여력의 힘으로 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있는 반면, 여력의 차수를 구하기 위한 수치적 노력이 요구되는 특징이 있다. 본 연구에서는 양단 고정단 조건인 부정정 보부재를 대상으로 보부재에 작용하는 최대하중을 도출하였다. 부정정 보부재를 한 개의 단순보와 양단 모멘트가 작용하는 단순보로 구분하여 양단 처짐의 합은 0이 되는 조건으로 산출한다. 보부재에 작용하는 반력을 구하기 위하여 한 점의 처짐각은 그 점에 작용하는 전단력과 같다는 Mohr의 정리를 적용하여 길이 4,100 mm의 단부 처짐값을 식 (5)와 같이 도출하였다.

$$\theta_{A_1} = \frac{3.35P}{EI} \quad (5)$$

여기서, E 는 탄성계수, I 는 단면 2차모멘트이다.

다음 식 (6), (7), (8)은 휨이 작용되는 단순보의 단부 처짐각과 단부 모멘트 계산에 이용된다.

$$\theta_{A_2} = -\frac{M_A \ell}{2EI} \quad (6)$$

여기서, M_A 는 A지점에 작용 모멘트이다.

따라서

$$\theta_{A_1} = \theta_{A_2} = \frac{3.35P}{EI} = -\frac{M_A \ell}{2EI} \quad (7)$$

보부재 길이 4,100 mm에서의 단부 모멘트의 크기는 1.63P이다.

$$M_A = M_B = 1.63P \quad (8)$$

고정단 보에 작용하는 하중의 크기는 다음 식 (9)에 따라 계산된다.

$$1.63P = f_b \cdot Z \quad (9)$$

따라서 P=109.58 kN이므로, 4점 지지의 하중은 438.33 kN이다.

보의 처짐은 탄성하중법에 따라 작용하는 모멘트로 계산하고, 단순보 조건의 보 최대 모멘트는 식 (10)로 산출한다.

$$M = \frac{4.10P}{EI} \quad (10)$$

그리고 단순보에 작용하는 휨모멘트에 의한 최대 모멘

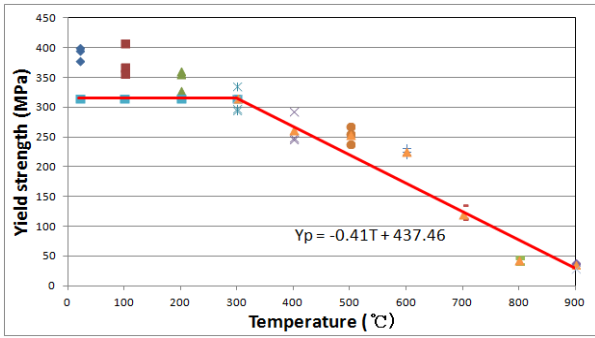


Figure 2. Yield points versus temperature variances.

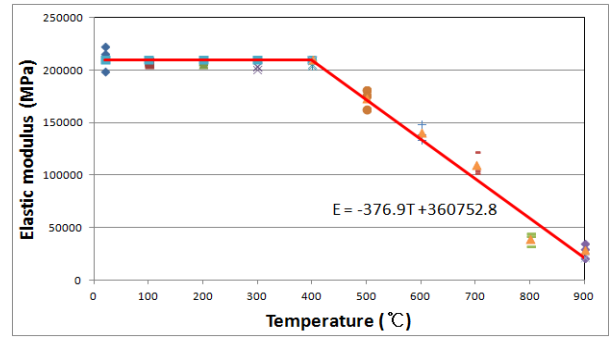


Figure 3. Elastic modulus versus to temperature variances.

Table 2. Criterion for Fire Resistance Test of Structural Beams

Criterion		Remarks
Load Bearing Capacity	· Deflection : $L^2/400d$ · Rate of Deflection : $L^2/9000d$	L : Length of Specimen d : Distance Between Tensile and Compressive Position

트는 식 (11)으로 산출한다.

$$M = \frac{3.42P}{EI} \quad (11)$$

식 (9)와 식 (10)에 의해서 고정단 보의 최대 모멘트가 산출되고(식 12), 이 값이 최대 처짐량이다.

$$M = \frac{0.68P}{EI} \quad (12)$$

3.3 보부재의 고온 특성

TMC 건축용 내화강재가 적용된 부정정 보부재의 고온 시 처짐과 최대 내력의 감소 특성을 평가하기 위해서는 고온 시의 항복강도와 탄성계수의 온도에 따른 특성 변화값을 필요로 한다. 본 연구에 적용된 항복강도와 탄성계수의 모델값은 Figure 2-3과 같다[13].

3.4 보부재의 내화성능 평가 기준

구조물은 작용하는 하중의 크기에 따라 처짐과 응력의 변화가 발생되고 있으며, 보부재는 일정 이상 처짐이 발생하게 되면 구조적 붕괴에 도달될 수 있다. 따라서 강재 보부재의 경우, 내화성능 평가에는 한국산업규격 KS F 2257-1, 6, 건축구조부재의 내화성능시험방법(일반요구사항, 보의 성능평가)이 적용되고 있다(Table 2).

4. 보부재의 내화성능 해석 및 결과

TMC 건축용 내화강재의 보부재 길이변화 및 경계조건

Table 3. Maximum Moments and Maximum Loads Versus Lengths of Beam (Simple Beam)

Lengths (mm)	Maximum Moment (kN/m)	Maximum Load (kN)
4100	2.46P	290.4
4400	2.76P	241.5
4700	3.06P	201.0
5000	3.36P	166.9
5300	3.66P	137.1

Table 4. Maximum Moments and Maximum Loads Versus Lengths of Beam (Fixed Beam)

Lengths (mm)	Maximum Moment (kN/m)	Maximum Load (kN)
4100	1.63P	438.3
4400	1.83P	364.2
4700	1.99P	309.0
5000	2.16P	259.3
5300	2.94P	214.5

에 따른 최대하중과 처짐의 계산은 STA-FR[17]을 이용하였다.

4.1 최대하중 변화

보부재가 지지할 수 있는 최대하중의 크기는 경계조건별로 길이가 증가할수록 감소됨을 예측할 수 있다. 특히 화재와 같은 고열상태에서 감소폭은 확대될 것을 예상되나, 이에 대한 자료는 거의 없다. 따라서 단순보 조건과 고정단 조건에서의 길이변화에 따른 최대 모멘트와 최대하중의 변화를 Table 3-4에 각각 제시하였다.

경계조건별 최대하중은 부재의 길이가 증가할수록 지지하는 하중의 크기는 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 고정단에서의 지지하중은 단순보에 비해서 많은 하중을 지지할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 단순보에서는 중앙부에서의 모멘트가 최대로 발생되고 있으므로 길

Table 5. Deflection Versus Sorts of Beam

Lengths (mm)	Sorts of Beam	
	Determination	Indetermination
4100	4.1P/EI	0.68 P/EI
4400	5.34P/EI	0.99P/EI
4700	6.74P/EP	1.23P/EP
5000	8.37P/EP	1.62P/EP
5300	10.21P/EP	2.09P/EP

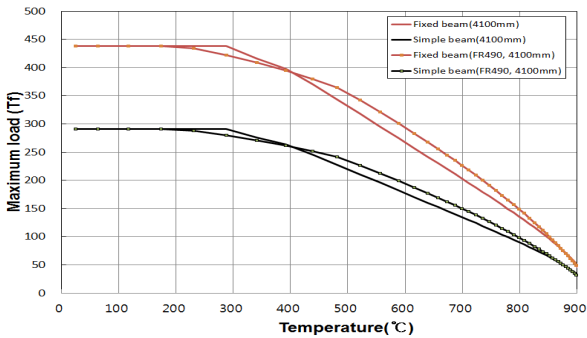


Figure 4. Maximum loads depending on steel temperatures (4100 mm).

이가 증가됨에 따라 작용하중에 비해서 상대적으로 모멘트가 크게 발생됨을 확인할 수 있었다. 또한 단순보에서의 모멘트는 고정단 조건에서의 모멘트보다 상대적으로 크게 나타나는 것도 확인할 수 있었다.

경계조건별 처짐의 크기는 Table 5와 같다. 보부재의 길이에 따라 부정정 보형식이 정정 보형식에 비해서 처짐의 양이 크게 감소되는 특성을 보여주고 있으며, 길이가 길어짐에 따라 모두 증가하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 강구조 보부재의 재하가열시험에 적용된 보부재보다 긴 부재에 대해서도 동일한 내화성능을 부여하는 것은 불합리하다고 판단되었다.

강재의 표면온도 상승에 따른 최대 내력의 감소 경향을 보부재 길이 4,100 mm을 기준으로 경계조건별로 건축용 내화강재(FR 490)와의 비교를 Figure 4에 나타내었다.

전 온도구간에서 고정단의 최대하중이 단순보의 최대하중보다 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

단순보 및 고정단보 조건에서 약 300 °C까지는 두 가지 강종 모두 항복강도를 유지하는 특징을 보였으나, 이후 온도구간에서 최대하중은 감소하기 시작하였다. 특히 400 °C를 구간에서 TMC 건축용 내화강재를 적용한 보부재의 최대하중이 건축용 내화강재를 적용한 보부재보다 감소의 폭이 큰 것으로 나타났다. 따라서 400 °C 이후 구간에서는 TMC 건축용 내화강재를 적용한 보부재의 내화성능 보장을 위한 조치가 필요한 것으로 판단되었다.

고정단 조건을 기준으로 보부재의 길이변화에 따른 최대 내력의 추이를 Figure 5에 제시하였다. 보부재 길이가

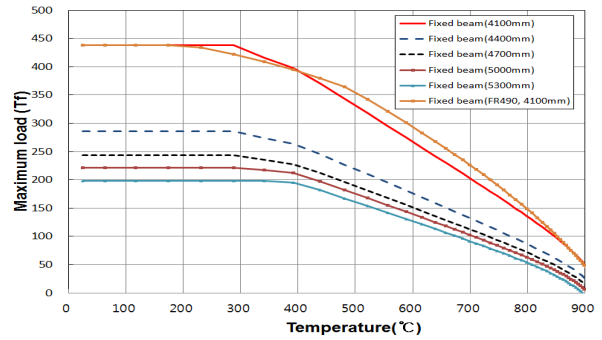


Figure 5. Maximum loads versus lengths (Fixed beam).

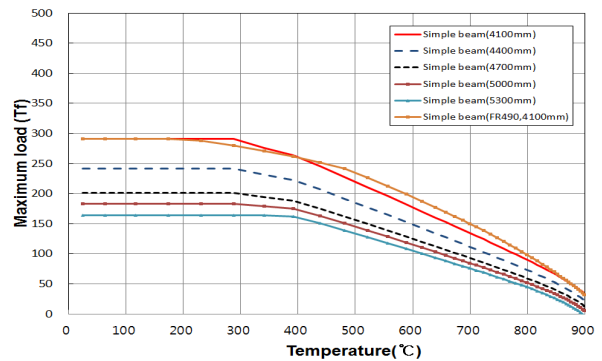


Figure 6. Maximum loads versus lengths (Simple beam).

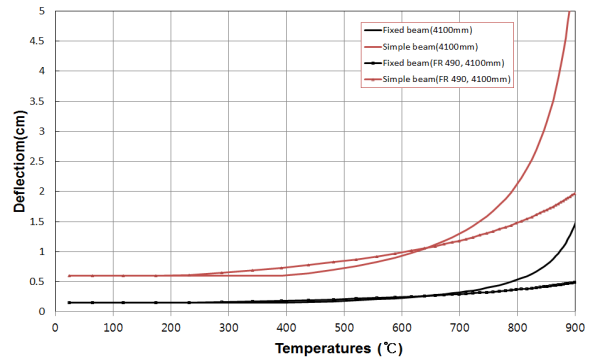


Figure 7. Deflections versus different type of beam (4100 mm).

증가함에 따라 최대내력의 감소폭은 줄어드는 것으로 나타났다.

단순보 조건에서의 길이변화에 따른 최대 내력의 감소 추이는 Figure 6에 제시하였다. 단순보 또한 길이증가에 따라 최대내력은 감소하였으나, 감소폭은 길이가 증가됨에 따라 줄어드는 것으로 나타났다.

4.2 처짐

보의 경계조건별 처짐의 크기를 보부재 4,100 mm을 기준으로 동일한 조건에서의 건축용 내화강재 적용 타입과 비교하였으며, 그 결과를 Figure 7에 제시하였다.

처짐의 크기는 단순보의 형태가 고정단 조건보다 크게 발생하였으며, 강재의 표면온도가 650 °C이후 구간에서

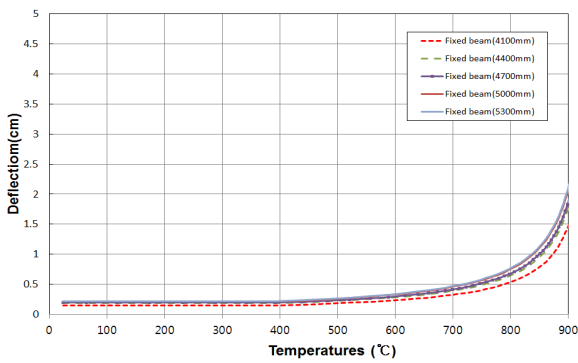


Figure 8. Deflections versus different surface temperatures and lengths (Fixed beam).

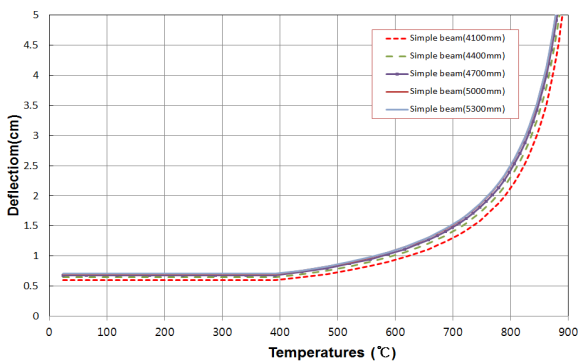


Figure 9. Maximum loads versus lengths (Simple beam).

TMC 건축용 내화강재를 적용한 보부재의 처짐이 급격히 증가하는 현상을 보였다.

고정단 조건에서의 처짐은 약 700 °C 이후 구간에서 TMC 건축용 내화강재 적용 보부재의 처짐이 급격히 증가하였다. 따라서 TMC 건축용 내화강재 적용 보부재는 건축용 내화강재 적용 보부재보다 고온에서 최대내력의 저하와 처짐 발생 등의 구조적 거동이 열세함을 확인할 수 있었으며, 이에 대한 내화성능 향상을 위한 대안이 필요하였다.

고정단 조건에서 보부재의 길이변화에 따른 처짐의 추이를 Figure 8에 나타내었다. 고정단 조건에서의 처짐 증가는 길이에 따라서 증가하는 경향을 보이지만 그 크기는 매우 제한적으로 나타났다. 강재의 표면온도 약 500 °C 구간 이내에서는 처짐량의 변화는 거의 없고, 이후 구간에서 증가하는 경향을 보였으나, 길이의 증가에 따른 처짐량의 크기는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

단순보 조건에서의 보부재 길이변화에 따른 처짐량 추이는 Figure 9와 같다. 강재 표면온도 400 °C 구간 이내에서는 처짐변화가 거의 나타나지 않았으나, 이후 구간에서는 급격히 증가하는 경향을 보였다. 따라서 단순보 조건에서의 처짐은 고정단보다 상대적으로 보부재의 구조적 성능저하의 중요한 요인으로 판단되었다. 그리고 강구조 보부재의 재하가열시험 평가에 적용된 보부재 길이보다 큰 부재를 동일한 내화구조의 성능이 있는 것으로 평가하는 것은

불합리하다고 판단되었다. 또한 정정 조건에서의 내화성능 평가는 부정정 조건에 비하여 안전측이라 판단된다.

따라서 보부재의 경계조건과 길이변화 등에 따른 내화성능평가는 각각의 조건을 고려할 수 있는 공학적 내화설계의 개발과 적용이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

화재 시 구조내력 유지성능, 용접성 그리고 강판 두께에 따른 설계기준강도의 분리적용 문제를 해결한 TMC 건축용 내화강재를 적용한 보부재를 대상으로 해석적 내화성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. TMC 건축용 내화강재의 정정 및 부정정 보부재의 고온 시 처짐과 최대하중의 변화를 해석적으로 도출하였다.
2. 부정정 보부재의 고온 시 처짐과 최대하중 유지능력이 정정 보부재보다 우수한 것으로 나타났다.
3. 부재의 길이가 증가할수록 처짐과 최대하중 유지능력이 감소하는 것으로 나타났다.
4. 강구조 보부재의 내화성능평가에 적용된 길이보다 큰 부재에 대해서 동일한 내화성능을 부여하는 것은 불합리하고, 이에 대한 보완이 필요하다고 판단된다.
5. 정정 조건에서의 내화성능평가는 부정정 보부재 조건에 비해서 안전측이라 판단된다.
6. 따라서 보부재의 경계조건과 길이변화 등에 따른 내화성능평가는 각각의 조건을 고려할 수 있는 공학적 내화설계의 개발과 적용이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-620160069).

References

1. Ministry of Public Safety and Security, “Fire Statistical Yearbook”, Seoul, Korea (2016).
2. B. D. Kang, “Steel Structure Design”, Gumisukwan, Seoul, Korea (2016).
3. S. W. Im, “SM570TMC Steel for Building Structure”, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 16, No. 2, pp. 12-17 (2004).
4. H. Kawano, M. Shibata, S. Okano and Y. Kobayashi, “TMCP Steel Plate with Excellent HAZ Toughness for High-rise Buildings”, R&D Kobe Steel Engineering Reports, Vol. 54 pp. 110-113 (2004).
5. K. Nakagawa, M. Hirota, H. Shimokawa, “TMCP-type 590 N/mm² Grade Steel for Seismic-resistant Buildings”, IABSE Symposium Report, IABSE Conference 2015: Elegance in

- Structures, pp. 340-341 (2015).
6. S. S. Kim, C. H. Lee, E. T. Lee, T. H. Han, Y. H. Choi and J. R. Kim, "A Study of Material Characteristics of 120 mm-Thick SM490TMC Plate", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 28, No. 5, pp. 313-323 (2016).
 7. M. J. Lee, Y. S. Oh and E. T. Lee, "The Specified Minimum Yield Stress of SM570TMC in Composite Columns", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 20, No. 1, pp. 195-203 (2008).
 8. I. D. Bennetts, "Fire Engineering Design - Case Studies", *Australian Journal of Structural Engineering*, Vol. 3, pp. 23-34 (2000).
 9. C. R. Barnett and G. C. Clifton, "Examples of Fire Engineering Design for Steel Members, Using a Standard Curve Versus a New Parametric Curve". *Fire and Materials*, Vol. 28, No. 2-4, pp. 309-322 (2004).
 10. A. Law, "The Role of Modelling in Structural Fire Engineering Design", *Fire Safety Journal*, Vol. 80, pp. 89-94 (2016).
 11. R. M. Lawson, "Fire Engineering Design of Steel and Composite Buildings", *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 57, No. 12, pp. 1223-1247 (2001).
 12. I. K. Kwon, "Study of Structural Stability for H-section Beams Made of Fire Resistant Steels (FR 490) at High Temperatures by Analytical Method", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 52-57 (2014).
 13. I. K. Kwon, "Evaluation of Structural Stability of Fire Resistant Steel Produced by Thermo-Mechanical Control Process at High Temperature", *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 21-25 (2013).
 14. EN 1993-1-2, "Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: Structural Fire Design", European Committee for Standardization (CEN), Brussels (1993).
 15. NZS 3404:Part 1, "Steel Structures Standard", Wellington, New Zealand (2009).
 16. D. C. Jang and S. H. Jang, "Solution of Architectural Structural Dynamic", Seoul, Korea (2005).
 17. 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).