

## 내화강재의 고온특성 데이터베이스 구축 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

### Experimental Study on Making Databases for Fire Resistant Steel at High Temperature

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received July 2, 2013; Revised October 11, 2013; Accepted October 11, 2013)

#### 요 약

가연물의 증가는 건축물 화재의 발생 위험성과 재해발생 규모를 점차적으로 증대시키는 요인이 되고 있다. 따라서 강 구조 건축물의 화재에 대비한 기술개발이 요구되었으며, 이 결과로 내화강재가 개발되었다. 본 연구에서는 FR 490강재의 고온 시 기계적, 열적 특성을 실험적으로 평가하고, 이 결과를 상온 시 구조적 내력이 동일한 용접구조용 강재인 SM 490과 상호 비교함으로써 고온 시의 내력유지 성능이 우수함을 확인하였다.

#### ABSTRACT

Fire at building can occur enormous damages to life, properties, and environment and the risk of fire breakout is going up higher because of application of combustible materials than before. Therefore, the steel industries are trying to develop fire resistant steel in order to sustain the load bearing capacity of steel structures during fire situation. In this paper, to give the basis data-bases for evaluation of structural stability of steel structures applied fire resistant steel, FR 490, the tests of mechanical and thermal properties at high temperature were conducted and the comparisons are done with the SM 490 that has the same mechanical one.

**Keywords :** Fire resistant steel, 0.2% offset proof stress, Mechanical property at high temperature, Thermal property at high temperature

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

건축물에서의 화재 발생은 인명피해와 구조물의 손상 그리고 주변 자연환경의 파괴 등 많은 피해를 유발하고 있다. 특히 건축물 내부에 증가되고 있는 가연물은 보다 높은 화재크기를 유발시킴으로써 구조물에 미치는 영향은 한층 더 높아지고 있는 실정이다. 특히 화재와 같은 고온에서 구조적 내력이 급격히 감소되는 강구조 부재는 시멘트 압면 뿔철공법 또는 내화도료 등으로 보호됨으로써 내화성능을 확보하고 있다<sup>(1,2)</sup>.

최근 강구조물의 내화성능의 확보 및 검증 방법은 표준 가열곡선과 가열로에 의한 시방적 내화설계방법에서 가연물량에 의한 화재크기 예측과 구조물의 고온 시 거동평가에 의한 공학적 설계방법으로 발전하고 있는 추세이나, 현

재 우리 나라에서는 시방적 내화설계만이 적용되고 있고, 공학적 내화설계의 기반을 확보하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>(3,4)</sup>.

강구조 건축물을 대상으로 내화공학설계를 수행하기 위해서는 고온 시의 내력 감소 및 이차 응력 평가를 위하여 항복강도, 탄성계수 및 열팽창계수 그리고 고온 시의 강재 온도예측을 위해서 열전도율, 비열 등의 열적 특성이 요구된다. 현재 일반 구조용 강재를 대상으로 고온 시의 기계적 특성과 열적 특성 평가 연구를 일부 진행되고 있으나, 일반 구조용 강재보다 고온 시 내력 유지 능력이 우수한 내화강재에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다. 특히 내화강재의 개발을 위해서는 고온 시의 내력 향상을 목적으로 다양한 원소의 선택과 배합이 요구되는 것으로 알려지고 있다.

따라서 본 연구에서는 고온 시 내력 유지성능이 우수한

내화강재를 대상으로 고온 시의 기계적 특성과 열적 특성을 실험적으로 평가하고, 이를 일반 구조용 강재와 비교, 평가함으로써 화재 시 내력 유지성능을 확인하고자 한다.

## 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 문헌 등을 통하여 내화강재의 일반적 특성을 고찰하고, 용접구조용 강재인 SM 490의 고온 시 능력을 향상시킨 FR 490 내화강재를 대상으로 각 온도 영역의 항복강도와 탄성계수를 도출하고, 향후 고온 시 내력평가를 목적으로 실험식을 제안한다. 또한 고온에서 이차 응력을 유발할 수 있는 선팽창계수와 강재온도 계산을 위한 비열과 열전도율을 도출한다. 그리고 내화강재의 고온 시 각 특성을 용접 구조용 강재인 SM 490강재와 비교함으로써 고온 시 내력 유지 능력의 평가를 그 범위로 한다.

## 2. 기존연구의 고찰

내화강재는 일본 법규정의 구조용 강재 허용온도의 한계를 초월하기 위하여 신일본제철에서 최초로 개발한 강재이며, 강재의 허용응력도에 도달되는 온도가 600 °C 이상되는 강재이다. 내화강재는 고온 시 내력을 유지할 수 있는 원소를 첨가한 특수강이며<sup>(5,6)</sup>, 우리나라에서는 포스코에서 다양한 종류의 내화강재를 개발한 것으로 알려져 있다<sup>(7)</sup>. 새로운 내화강재의 개발을 위해서는 다양한 성분의 조합과 제조방법이 요구되는데 여기에는 Muratove 등<sup>(8)</sup>과 Panigrahi<sup>(9)</sup> 등의 연구가 있다.

고온 시의 구조부재와 가구의 내력 평가에 사용되는 구조용 강재의 대표적인 고온 특성 데이터베이스는 유러코드 3에 제시되어 있으나, 이는 일반 구조용 강재를 대상으로 도출되었다<sup>(10)</sup>. 따라서 내화강재를 적용한 구조물의 고온 시의 구조내력 평가를 유러코드의 고온 데이터베이스를 적용하는 것은 한계가 있기 때문에 별도의 연구가 진행되었다. 이는 주로 일본과 유럽 중심으로 이루어졌으며, 대표적인 연구사례로써는 Sakumodo 등<sup>(11-13)</sup>와 Sha 등<sup>(14,15)</sup>의 연구가 있다. 최근에는 내화강재를 대상으로 보부재와 기둥부재의 고온 시의 내력평가가 Yang, Chung을 중심으로 진행되고 있다<sup>(16-18)</sup>.

이와 같이 일본, 유럽 등에서는 고온 시 내력증가에 위한 몰리브덴(Mo), 바나듐(V) 그리고 니오브(Nb) 각각 또는 혼합 첨가된 내화강재의 기계적 특성 및 부재의 내화성능에 관한 기술적 자료가 체계적으로 제시되고, 최근 대만 등에서는 부재의 고온 내력 평가를 위한 실험적 연구가 진행되고 있으나, 우리나라에서는 몰리브덴, 크롬 등의 특수합금 첨가에 의한 내화강재가 개발되었음에도 불구하고 구체적인 기술적 자료 축적은 이루어지지 않고 있다.

구조용 강재의 기계적 특성은 강재 개발에 소요된 구성 성분과 제조 조건에 따라서 달라지므로, 우리나라에서 개발된 내화강재의 고온 특성은 또 다른 특성을 가질 수 있

다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 개발된 FR 490의 내화강재를 대상으로 연구를 진행하였다.

## 3. 내화강재의 고온 특성 평가 시험

### 3.1 고온특성 시험계획

고온 특성평가에 사용된 내화강재의 상온 기계적 특성 값은 Table 1과 같다.

### 3.2 기계적 특성 평가 시험

고온 특성을 평가하기 위한 시험편은 내화강재의 원소재 끝부분에서 최소 10 cm 이격된 곳에서 채취하였으며, 열영향부를 최소화하기 위해서 각 시험편은 최소 5 cm 이상 거리를 확보하였고, 축방향으로 채취하였다.

고온인장시험에 대한 시험계획과 시험조건은 Table 2~3과 같다.

고온 인장시험은 KS D 0026(철강재료 및 내열합금의 고온 인장시험방법)을 적용하였으며, 상온과 동일한 항목을 측정하였다. 항복점이 나타나지 않는 부분은 영구 변형을 적용한 0.2% 율내력으로 평가하였고, 고온 시의 내력을 평가할 때 사용되는 1.0% 율내력 또한 측정하였다.

상온 및 고온 인장시험 결과인 기계적 특성치는 Table 4에 제시하였고, 각각의 온도별 응력-변형도 곡선은 Figure

**Table 1.** Mechanical Properties of Fire Resistant Steel at Cold

Specification	Mechanical properties			
	Thickness	Yield point (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
FR 490	16≥t	over 325	490~610	over 17
	16<t≤40	over 315		over 21
	t>40	over 295		over 23

**Table 2.** Testing Plans

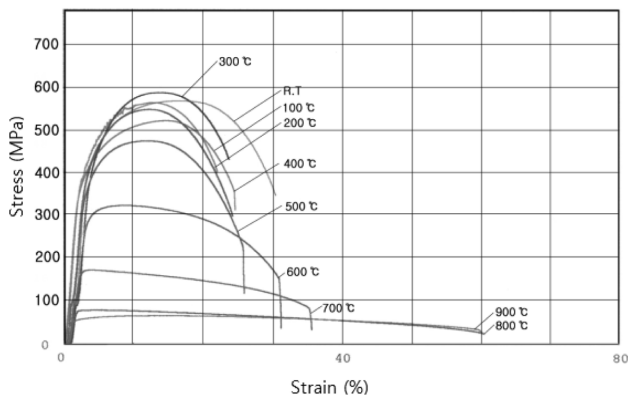
Specification	Conditions	Total numbers
	Measuring temperatures (°C)	
FR 490	20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900	30

**Table 3.** Testing Speeds and Temperature Tolerance

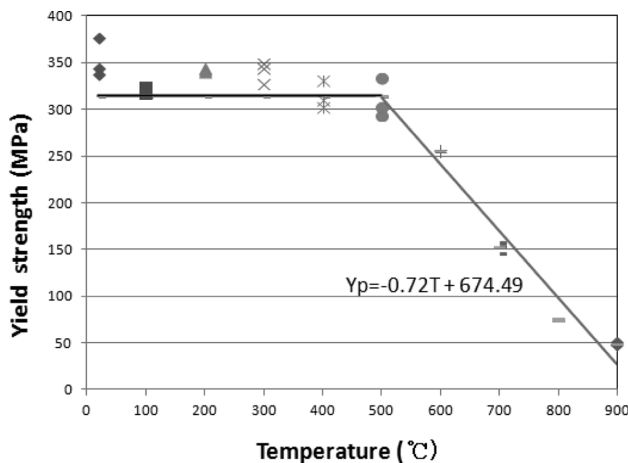
Temperatures	Ram speed		Temperature tolerance
	Till yield point	After yield point	
Room	17 N/mm <sup>2</sup> · sec	20%/min	-
High	7 N/mm <sup>2</sup> · sec	7.5%/min	300~600 °C=±3 600~900 °C=±4

**Table 4.** Mechanical Properties of FR 490 at High Temperatures

Temperature (°C)	Yield point (MPa)		Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (%)
	0.2% offset	1.0% offset			
20	352.90	436.15	571.07	200333.75	30.22
100	319.48	391.40	522.67	195385.99	26.15
200	341.95	424.51	569.45	229917.69	22.43
300	340.90	435.40	586.31	160813.10	23.87
400	314.50	413.33	543.32	150363.83	24.57
500	310.61	389.74	476.37	158749.46	24.85
600	256.79	300.85	324.21	122952.05	31.66
700	152.96	167.84	168.34	112557.1	33.15
800	75.93	79.60	80.35	77518.73	58.07
900	49.01	57.43	68.27	37189.59	58.31



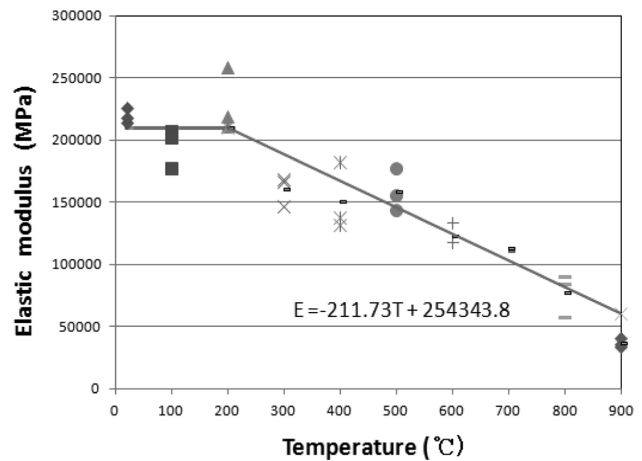
**Figure 1.** Stress-strain relations versus temperatures.



**Figure 2.** Yield strength versus temperatures (0.2% proof stress).

1과 같다. Figure 1에 나타난 바와 같이 FR 490강재는 상온 시의 항복강도 기준인 315 MPa를 만족하였고 동시에 인장강도 기준도 만족하였다.

FR 490강재의 각 온도영역별 0.2% 유효내력과 탄성계수



**Figure 3.** Elastic modulus versus temperature variances.

의 온도증가에 따른 감소특성은 각각 Figure 2~3과 같다.

고온 인장시험을 토대로 도출된 내화강재의 온도구간별 항복강도와 탄성계수의 실험식은 Table 5와 같다.

0.2% 유효내력으로 평가된 항복강도는 상온에서 500 °C 구간에서는 상온의 항복강도를 유지하는 것으로 나타났으며, 이후 온도영역에서는 직선적인 감소를 보였다. 탄성계수는 상온에서 200 °C 구간은 상온의 탄성계수 특성을 유지하였고, 이후 구간에서는 항복강도의 특성보다 다소 높은 산포를 보였으나 직선적인 관계에 있는 것으로 분석되었다. 폴리브덴과 니오브가 첨가된 내화강재를 사용한 Sha의 연구는 700 °C까지의 기계적 특성 평가결과를 제시하고 있으나, 상온에서 600 °C까지 상온 내력을 유지하는 점과 700 °C에서 상온내력의 50%를 유지하는 점은 본 연구결과와 유사하였다<sup>(19)</sup>.

Euro코드<sup>(20)</sup>의 항복강도 감소계수는 상온에서 400 °C까지 상온 내력을 유지하고, 이후 구간에서는 급격히 감소하는 것으로 제시하고 있다. 이에 비하면 본 실험에 적용된 내화강재의 고온 시 내력이 우수함을 알 수 있다.

**Table 5.** Regression Equations for Mechanical Properties of Fire Resistant Steel at High Temperature

Properties	Temperature	Regression equation	Remarks
Yield strength	$T \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$	Cold value (315 MPa)	
	$500 \text{ }^\circ\text{C} < T$	$-0.72T + 674.49$	$R^2 = 0.97$
Elastic modulus	$T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$	Cold value (210,000 MPa)	
	$200 \text{ }^\circ\text{C} < T$	$-211.73T + 254343.8$	$R^2 = 0.99$

여기서, T=온도( $^\circ\text{C}$ ).

**Table 6.** Test Plans

Sorts	Conditions of test	
	Measuring temperatures	Numbers
FR 490	From room temperature to $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ with interval of $100 \text{ }^\circ\text{C}$	3 per each

### 3.3 열적 특성 평가 시험

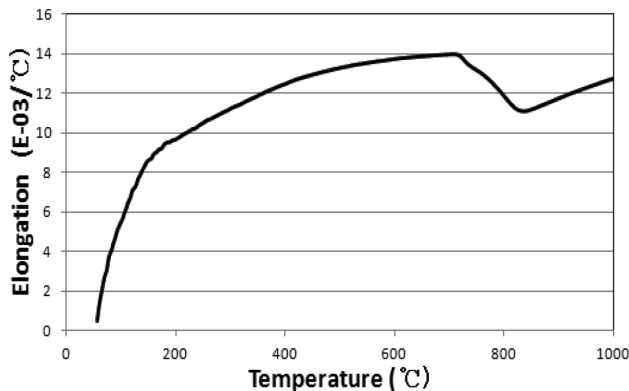
#### 3.3.1 고온열팽창계수

물체가 고온화될수록 물질을 구성하는 원자간의 거리를 멀어지게 됨으로써 길이의 증가가 발생된다. 이러한 길이 변화는 화재 시 구속된 가구에서 추가적인 휨을 발생시킴으로써 구조적 안전성에 위험이 가중되게 된다. 따라서 주어진 가구를 구성하고 있는 강재의 열팽창율을 알고 있는 것은 가구의 열변형을 예측하는데 매우 중요한 자료이다. 열팽창율 측정의 시편계획 및 시험조건은 Table 6과 같고, 시편의 크기는 단면적  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 길이  $50 \text{ mm}$ 인 각형 막대형태이다.

High Temperature Dilatometer를 이용하여 선팽창율을 측정하였으며, 결과는 Figure 4와 같다.

FR 490강재는 상온에서  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  구간까지 지속적인 증가를 보이고 있으나,  $700 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  구간에서는 다소 감소하는 특징을 보였으며, 이후 구간에서는 다시 증가하는 특징을 나타내었다.

일본 내화강재의 열팽창계수<sup>(13)</sup>는 다음 식(1)로 제시되고 있으나, 본 연구 결과보다 낮은 경향을 보이고 있다.

**Figure 4.** Result of elongation at high temperatures.

$$\alpha_s = (0.0062T + 11.48) \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m}^\circ\text{C}) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_s$ =열팽창계수, T=온도

#### 3.3.2 고온열전도율

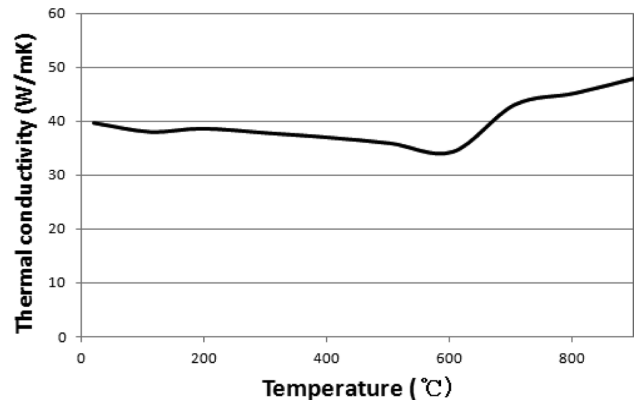
강구조 건축물에서의 화재 발생은 시간 경과에 따라 기둥과 보부재 등으로 온도의 증가를 유발시켜 내력 감소가 발생되게 된다. 따라서 화재와 같은 고열조건에서의 내력 감소를 예측하기 위해서는 구성 부재의 온도계산이 선행되어야 하며, 각 부재의 정확한 온도계산을 위해서는 각 온도영역에서의 열전도율 특성이 요구된다.

열전도율 측정을 위한 시편은 지름  $10 \text{ mm}$ , 두께  $1 \sim 1.2 \text{ mm}$ 의 원형 판형태이고, 평행도는  $0.01 \text{ mm}$  정도를 유지시켰다. 열전도율의 측정은 상온에서  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도범위까지  $0.1 \sim 400 \text{ W/mK}$  범위를 측정할 수 있는 Sinku-Riko사의 TC 7000를 사용하였다. 열전도율의 측정은 열확산계수와 비열을 Laser Flash법에 의해 직접 측정한 뒤 다음 식(2)를 이용하여 계산하였다.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (2)$$

여기서, k=열전도율,  $\alpha$ =열확산계수,  $\rho$ =밀도,  $C_p$ =비열

FR 490강재의 열전도율 측정시험 결과는 다음 Figure 5과 같으며, 열전도율 시험결과, 상온에서  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  영역까지는 완만한 감소 특성을 보였으나, 이후 온도영역에서는 점차 증가하는 특성을 보였다.

**Figure 5.** Thermal conductivity at high temperatures.

일본 내화강재의 열전도율은 다음 식(3)과 같으며<sup>(13)</sup>, 상온에서 600 °C까지는 본 연구보다 높은 값을 가지고 있고, 이후 구간에서는 낮은 값을 가지고 있다.

$$\lambda_s = -0.0256T + 54 \text{ W/(m}^\circ\text{C)} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_s$ =열전도율

#### 4. 고온 특성 비교평가

고온 시 내력 저감특성을 완화시킨 특성을 가진 FR 490 내화강재의 고온 시 특성을 확인하기 위하여 상온에서의 기계적 특성 기준이 동일한 SM 490강재의 고온 기계적 특성과 열적 특성을 비교, 분석하였다.

##### 4.1 기계적 특성 비교 평가

FR 490강재와 SM 490강재의 고온 시 항복강도와 탄성계수 저감특성을 Figure 6~7에 나타내었다.

항복강도 비교에서 SM 490강재는 상온에서 900 °C 구간까지 지속적인 직선적 감소경향을 보이고 있으나, FR 490강재는 상온에서 500 °C 구간까지는 항복강도 기준치인 315 MPa를 유지하는 것으로 나타났고, 이후 온도구간에서도 SM 490강재보다 내력저감이 완화되는 특징을 보였다. 따라서 FR 490강재가 SM 490강재보다 고온 시 내력유지 특성이 우수할 것으로 판단되었다. 구조부재의 내력유지 특성을 평가하는 허용온도의 경우, SM 490강재는 현재 KS F 2257-6에 규정된 온도 수준이나, FR 490강재의 경우는 이 보다 우수한 약 630 °C로 나타났다. 이는 폴리브덴과 니오브 첨가에 의한 Sha<sup>(19)</sup>의 연구 결과와 유사하고, 폴리브덴 첨가에 의한 Yang의 결과보다는 다소 높은 결과를 나타내었다<sup>(17)</sup>. 따라서 FR 490강재는 적용 특수원소에 따라서 고온 시의 허용온도가 다소 달라짐을 확인하였다. 또한 내화강재 적용 구조부재의 고온 시 정확한 구조적 내력평가를 위해서는 고온 내력 향상 원소가 포함

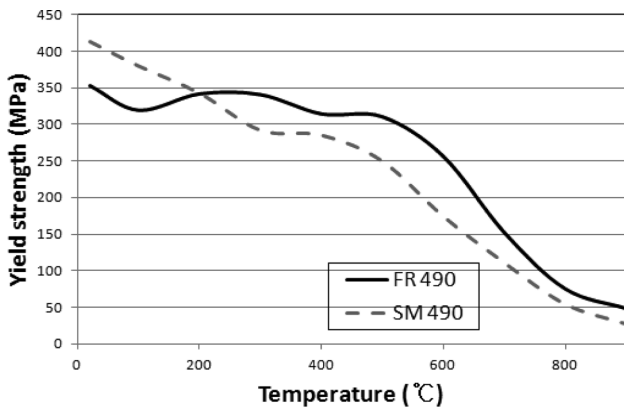


Figure 6. Comparison of yield strength between FR 490 and SM 490 at high temperatures.

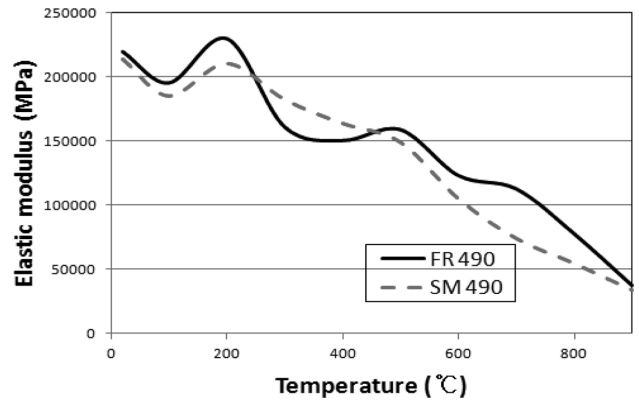


Figure 7. Comparison of elastic modulus between FR 490 and SM 490 at high temperatures.

된 재료의 고온 시 기계적 특성 데이터베이스가 요구됨을 확인하였다.

탄성계수 저감능력을 비교한 결과, 전체 온도영역에서 FR 490강재와 SM 490강재가 비슷한 경향을 보였으나, FR 490강재가 500 °C 이상 구간에서 SM 490강재보다 다소 완만하게 감소하였다. 따라서 FR 490강재가 SM 490강재보다 고온에서 구조적 내력성능이 우수할 것으로 판단되었다.

##### 4.2 열적 특성 비교 평가

FR 490강재와 SM 490강재의 고온 시 선팽창계수와 열전도율의 특성 비교를 Figure 8~9에 나타내었다.

고온영역에서 선팽창계수는 거의 동일한 경향을 나타내고 있으나, 700~800 °C에서 FR 490강재가 다소 낮은 열팽창계수를 보였다. 상온에서 200 °C까지는 거의 동일한 수준의 열전도율을 보이고 있으나, 이후 구간에서는 FR 490강재가 낮은 열전도율을 보이고 있다. 따라서 고온에서 FR 490강재가 SM 490강재보다 열전도가 낮기 때문에 상대적으로 구조내력이 오래 유지될 것으로 판단되었다.

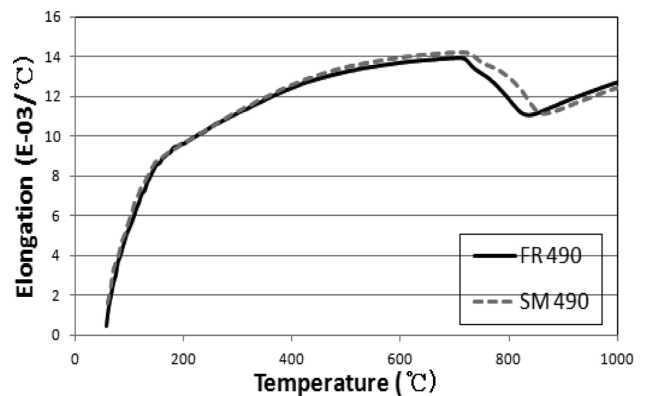


Figure 8. Comparison of elongation between FR 490 and SM 490 at high temperatures.

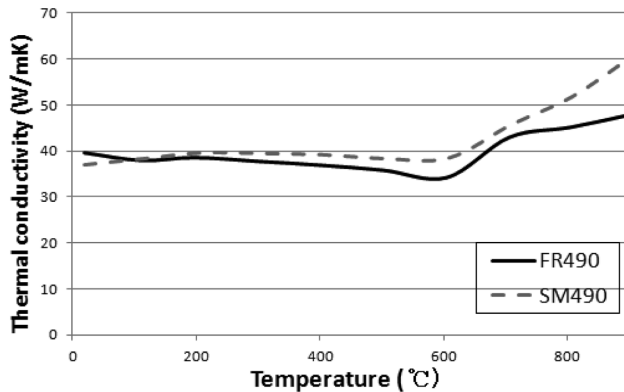


Figure 9. Comparison of heat conductivity between FR 490 and SM 490 at high temperature.

## 5. 결 론

내화강재를 적용한 건축물의 화재 시 구조내력을 평가하기 위한 기계적 특성과 열적특성 데이터베이스를 도출하고, 내화강재의 고온 시 내력을 평가하기 위한 본 연구 결과, 다음과 같은 도출하였다.

1. FR 490 내화강재의 항복강도와 탄성계수의 실험식과 열팽창계수와 열전도율의 측정값을 각각 제시하였다.
2. 고온 시의 항복강도와 탄성계수를 SM 490강재와 비교한 결과, FR 490강재가 SM 490강재보다 우수하게 나타남을 확인하였고, 강재의 허용온도의 경우, FR 490강재는 약 630 °C 수준으로 SM 490강재보다 높게 나타나 고온에서 내력유지 성능이 향상될 것으로 판단되었다.
3. 고온 시의 열적 특성의 비교결과, FR 490강재가 SM 490보다 낮은 열전도율을 보이고 있으며, 또한 대부분의 온도구간에서 거의 동일한 선팽창율을 보이고 있으나 고온(700~800 °C) 영역에서 보다 낮은 선팽창율을 보이므로, 화재와 같은 고열환경에서 FR 490강재를 적용한 구조물의 내력유지 능력이 SM 490보다 우수할 것으로 판단되었다.
4. 내화강재에 제조된 첨가되는 고온 내력 향상 원소에 따라 허용온도가 달라짐을 확인하였으며, 고온 시 내화강재의 정확한 내력 평가를 위해서는 해당 원소가 포함된 내화강재의 고온 시 데이터베이스가 필요하다고 판단되었다.

## 후 기

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

## References

1. I. K. Kwon, "Building Fire Protection", DongHwa, Kyungido, Korea (2007).
2. Research Industry of Science & Technology, "Develop-

ment of Fire Engineering Technique of Structural Steels", Whasung, Korea (2004).

3. I. K. Kwon, "Derivation of the Mechanical Properties of Structural Steels at high temperatures", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 47-55 (2007).
4. I. K. Kwon and S. G. Shin, "Evaluation of Fire Resistance Using Mechanical Properties at High Temperature for Steel Column Made of Rolled Steels (SS 400)", Korean Journal of Metal Materials, Vol. 49, No. 9, pp. 671-677 (2011).
5. M. S. Walp, J. G. Speer and D. K. Matlock, "Fire-resistant Steels", Advanced Materials & Processes, Vol. 162, No. 10, pp. 34-36 (2004).
6. Y. Sakumoto, T. Yamaguchi, M. Ohash and M. Saito, "High-temperature Properties of Fire Resistant Steel for Buildings", Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 2, pp. 392-407 (1992).
7. Architectural Institute of Korea, "Evaluation and Application Study of Fire Resistant Steels", Seoul, Korea (1997).
8. A. N. Muratov and Y. D. Morozov, "Technology for the Commercial Production of Fire-resistant Steel for Building Structures", Metallurgist., Vol. 51, No. 7-8, pp. 446-453 (2007).
9. B. K. Panigrahi, "Microstructures and Properties of Low-alloy Fire Resistant Steel", Bulletin Material Science, Vol. 29, No. 1, pp. 59-66 (2006).
10. EN 1993-1-2. European Committee for Standardization (CEN), "Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: Structural Fire Design", CEN, Brussels (1993).
11. 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).
12. 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).
13. J. Ding, G. Q. Li and S. Sakumodo, "Parametric Studies on Fire Resistance of Fire-resistant Steel Members", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 60, No. 7, pp. 1007-1027 (2004).
14. 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, No. 5, pp. 606-612 (1999).
15. F. S. Kelly and W. Sha, "A Comparison of the Mechanical Properties of Fire-resistant and S275 Structural Steels", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 50, No. 3, pp. 223-233 (1999).
16. K. C. Yang, H. H. Lee and O. Chan, "Experimental Study of Fire-resistant Steel H-columns at Elevated Tempera-

- ture”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, No. 6, pp. 544-553 (2006).
17. 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, No. 4, pp. 553-565 (2005).
  18. 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, No. 2, pp. 289-303 (2010).
  19. W. Sha, “Fire Resistance of Floors Constructed with Fire-resistant Steels”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 6, pp. 664-670 (1998).
  20. CEN, “Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules”, Brussel (1995).