

# TMCP 내화강재의 고온 내력 평가 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

## Evaluation of Structural Stability of Fire Resistant Steel Produced by Thermo-Mechanical Control Process at High Temperature

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received September 20, 2013; Revised December 6, 2013, Accepted December 6, 2013)

### 요 약

대형화, 초고층 및 고스팬에 부응하기 위한 강재 기술개발의 노력으로 용접성능과 내진성능 그리고 내화성능이 부여된 새로운 강재인 Thermo-mechanical control process (TMCP) 내화강재가 개발되었다. TMCP 내화강재는 기존의 내화강재 생산과정 시 압연과 동시에 정밀한 열처리를 병행함으로써 인장력과 용접성을 향상시킬 수 있는 새로운 기술인 TMCP 방법으로 개발되었으며, 화재와 같은 고온에서의 구조적 안전성에 관한 내력평가가 요구되었다. 따라서 본 연구에서는 고온 시 TMCP 내화강재의 내력평가를 목적으로 고온 시 항복강도, 탄성계수를 평가하고 각각에 대한 온도영역별 실험식을 제시하였으며, 이를 일반 내화강재의 고온 특성과 비교, 분석하였다. 또한 각각의 소재로 설정된 H형강 기둥부재를 대상으로 고온 시의 내력을 계산하여 그 안전성을 확인한 결과, TMCP 내화강재의 고온 시 내력특성은 일반강 내화강재의 고온 내력저하 특성보다 열위인 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

Fire resistance steel, grading 490 MPa, had developed by using Thermo-mechanical control process (TMCP) and it has better performance at welding, seismic resistance than those of the ordinary structural steel, But the fire resistance performance is required to verify against the ordinary fire resistance, FR 490. Therefore this study was done to make database of mechanical properties at high temperature and to evaluate the structural stability at high temperature in terms of materials and structural member such as H-section from that of FR 490. The result of this study was that the structural stability of TMCP was lower than that of ordinary FR 490 at the range up about 700 °C.

**Keywords :** TMCP fire resistant steel; Mechanical property at high temperature; FR 490; Yield strength, Elastic modulus

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

고온조건에서 강재의 내력은 급격히 저감되며, 강구조 부재와 가구의 경우, 하중 저항능력의 한계이하로 도달되면 붕괴로 이어질 수도 있다. 따라서 강구조 부재는 허용응력 이하의 내력저하가 발생되지 않도록 내화설계 등의 조치가 요구된다<sup>(1)</sup>. 내화설계는 법규, 시방적 규정에 따라서 시행되거나 정의된 타입을 적용하는 시방적 내화설계와 해당 건축물의 화재조건에 따라 고온 시의 구조 안전성을 평가하는 공학적 내화설계로 대별된다<sup>(2,3)</sup>. 공학적 내화설계는 구조재료의 고온 시의 기계적 특성과 열적 특성을 바탕으

로 구조부재 및 가구의 고온 시 내력평가가 이루어진다.

최근 구조물의 대형화, 고층화 추세에 따라 구조재료, 특히 강재도 고강도 및 고성능화되는 경향을 보이고 있다. 이러한 특징을 가장 잘 보여주는 대표적인 강재가 가속 냉각법을 적용한 Thermo-mechanical Control Process (TMCP)<sup>(4)</sup>로 만들어진 내화강재라고 할 수 있다.

내화강재(FR 490)는 용접 구조용 강재(SM 490)와 강도는 동일하나 고온 시의 내력 유지 성능이 우수한 강재이고, TMCP 내화강재는 내화성능과 용접성 그리고 내진성을 향상시킨 고성능강재이다.

TMCP 내화강재로 구성된 구조용 부재와 가구의 고온 시 내력평가를 위해서는 고온 시의 특성 자료가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 TMCP 내화강재의 고온 시의 항복강도, 탄성계수를 시험을 통하여 제시하고, 이를 일반 내화강재 비교함으로써 고온 시 특성을 비교한다. 또한 TMCP 내화강재와 일반 내화강재로 설정된 H형강 기둥부재를 대상으로 고온 시 구조내력을 평가함으로써 상호 구조적 안전성을 확인하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 강구조 건축물의 주요 구조부와 강교량의 박스거더 등에 적용되고 있는 TMCP 고강도 구조용 강재와 동일한 과정으로 생산된 인장강도 490 MPa의 TMCP 내화강재(이하 TMCP FR 490)의 고온 시 내력평가를 목적으로 항복강도, 탄성계수 등의 자료 제시를 목적으로 고온시험을 수행한다. 또한 일반 압연과정으로 생산된 내화강재(이하 FR 490)와의 고온 시 특성 비교 그리고 각각의 소재로 설정된 H-형강 기둥부재를 대상으로 각 고온 시 특성을 적용한 구조내력의 평가를 통하여 TMCP 내화강재로 시공된 기둥부재의 안전성 확인을 그 범위로 한다.

2. 기존연구의 고찰

고층화, 대형화에 대응하기 위하여 구조용 강재는 용접성과 내진성이 우수한 강재를 개발하기 시작하였으며, 이의 대표적인 강재가 가속 냉각법을 이용하여 제조된 TMCP 구조용 강재이다. TMCP 구조용 강재는 용접성과 내진성능이 우수하기 때문에 건축구조물과 강교량의 주요 재료로 활용되는 경우가 많다<sup>(5)</sup>. TMCP방법을 적용한 400 MPa~500 MPa 수준의 특성 평가는 Wang, Zhuang, Porter 등의 연구<sup>(6-8)</sup>가 있고, 900 MPa 이상의 초고강도 TMCP 강재 개발은 Nie 등에 의해서 이루어지고 있다<sup>(9)</sup>.

구조용 강재는 용접성이 우수하기 때문에 예열없이 바로 용접이 가능하므로 비용 절감과 시간 단축 등의 장점이 있으며, 인성이 높고, 항복비가 낮기 때문에 한국국제전시장, 광안대교 등과 같은 대형 구조물의 구조성능과 내진요구조건을 만족시키고 있다. 그러나 강구조 건축물의 최대 단점은 화재 시의 구조적 내력감소에 의한 안전성 저하에 있다. 따라서 가속 냉각 과정을 통하여 저 탄소당량으로 개발된 TMCP 내화강재의 고온 내력평가는 매우 중요한 의미가 있다고 판단된다.

3. TMCP 내화강재의 고온인장 시험 및 평가

3.1 고온특성 시험계획

고온 특성평가에 사용된 TMCP FR 490의 상온 기계적 특성값은 Table 1과 같다.

3.2 기계적 특성 평가 시험

고온 인장시험을 위한 시편은 원판의 끝부분에서 10 cm

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 (%)
TMCP FR 490	16 ≥ t 16 < t ≤ 40 t > 40	over 325 over 315 over 295	490~610	over 17 over 21 over 23

Table 2. Testing Plans

Specification	Conditions	Total numbers
	Measuring temperatures (°C)	
TMCP 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 °C 600~900 °C = ±4 °C

이격된 곳에서 채취하였고, 각 시편간의 거리는 최소 5 cm 를 유지하였다. 규정된 인장강도의 확인을 목적으로 시편은 압연방향으로 확보하였다.

인장시험 계획과 조건은 다음 Table 2~3과 같다.

인장시험은 KS D 0802(금속재료의 인장시험방법)과 KS D 0026(철강재료 및 내열합금의 고온인장시험방법)에 따라 수행되었으며, 고온 시의 응력-변형도 곡선에서 뚜렷한 항복점이 나타나지 않을 경우에는 0.2% 윽셀과 1.0% 윽셀으로 항복강도를 측정하였다.

고온인장시험에 사용된 시편의 크기는 다음 Figure 1과 같다.

상온 및 고온인장시험 결과인 기계적 특성값은 Table 4에 제시하였다. Table 4에 나타난 바와 같이 TMCP FR 490 강재는 상온 시의 항복강도와 인장강도 기준을 만족하였다.

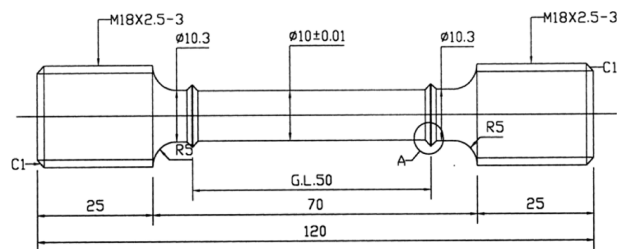
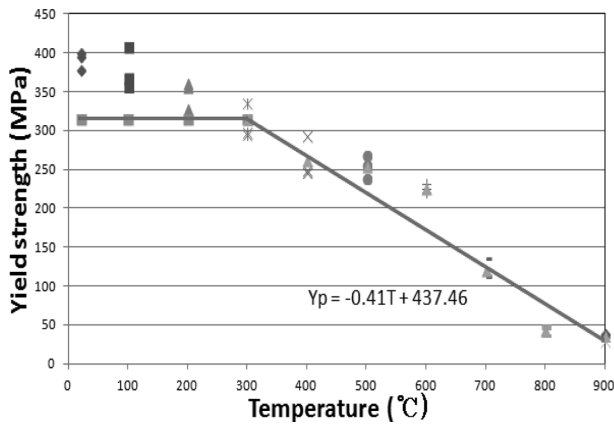


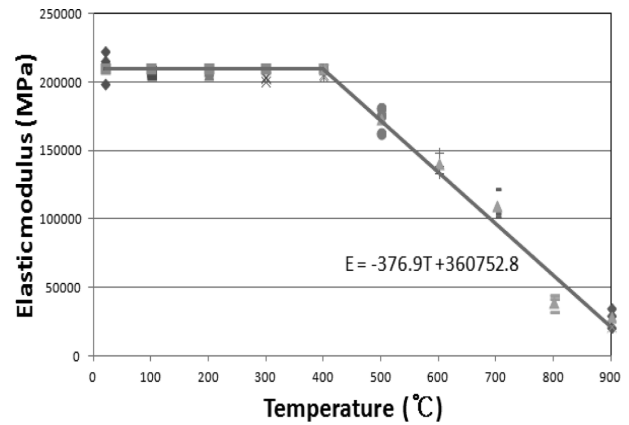
Figure 1. Specimen dimension for tensile test.

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

Temperature (°C)	Yield point (MPa)		Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (%)
	0.2% offset	1.0% offset			
20	390.82	398.31	537.40	211979.76	29.04
100	376.58	379.58	494.20	190656.26	28.21
200	348.36	382.49	501.61	204736.27	26.69
300	308.74	389.65	524.59	196617.37	27.59
400	262.54	350.19	505.11	196452.95	31.69
500	254.47	328.55	433.69	173474.74	30.67
600	226.58	275.11	300.08	140737.00	35.34
700	120.53	132.52	133.60	109936.71	65.61
800	43.87	59.02	60.02	39806.38	89.25
900	36.63	51.11	59.93	28788.56	65.12



**Figure 2.** Reduction pattern of yield points according to temperature variances (0.2% proof stress).



**Figure 3.** Reduction pattern of elastic modulus according to temperature variances.

TMCP FR 490강재의 0.2% 율셀내력과 탄성계수의 온도변화에 따른 감소특성은 각각 Figure 2~3과 같다.

고온인장시험을 토대로 향후 구조부재의 고온 시 내력 산출에 활용할 수 있도록 제안된 TMCP 내화강재의 온도 구간별 항복강도와 탄성계수의 실험식은 Table 5와 같다.

여기서, T = 온도(°C)를 나타낸다.

항복강도와 탄성계수 모두 일정한 온도범위에서 예측이 가능한 관계를 나타내고 있으나, 0.2% 율셀으로 평가된 항복강도의 경우, TMCP 내화강재는 일반 내화강재보다 상온의 기준값을 유지하는 온도 범위가 상대적으로 낮은

300 °C로 나타났으며, 탄성계수의 상온 기준값 유지 온도 범위는 400 °C로 나타났다. 이 결과로 판단해보면, 내력유지 성능은 일반 내화강재가 우수할 것으로 예상되고, 변형저항능력은 TMCP 내화강재가 우수할 것으로 판단되었다.

### 3.3 고온 기계적 특성 비교 평가

TMCP방법에 의한 구조용 강재의 제조결과는 조직의 조밀성 강화에 따라 항복강도와 인장강도가 높아지는 경향이 있다<sup>(6)</sup>. 그러나 이러한 특성이 고온에 도달되었을 때의 변화에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구

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

Properties	Temperature	Regression equation	Remarks
Yield strength	T ≤ 300 °C	Cold value (315 MPa)	R <sup>2</sup> = 0.93
	300 °C < T	-0.41T+437.46	
Elastic modulus	T ≤ 400	Cold value (210,000 MPa)	R <sup>2</sup> = 0.97
	400 °C < T	-376.9T+360752.8	

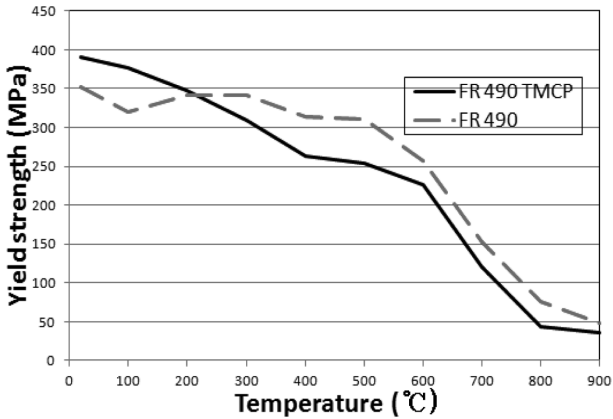


Figure 4. Comparison of yield point between FR 490 and SM 490 at high temperature.

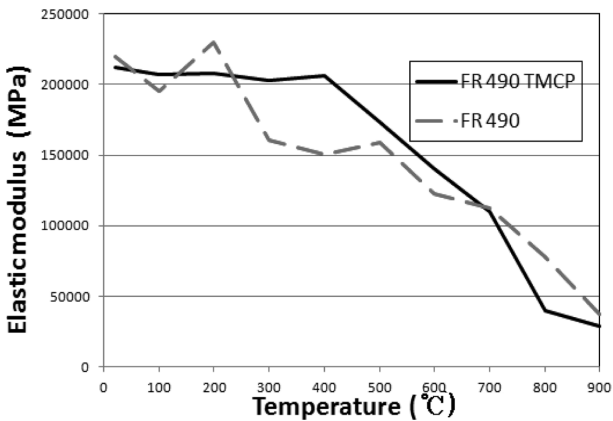


Figure 5. Comparison of elastic modulus between FR 490 and SM 490 at high temperature.

에서는 TMCP 내화강재와 일반 내화강재의 고온 시 내력을 비교함으로써 고온 시 내력유지 성능을 상대적으로 비교, 평가할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 목적으로 0.2% 윱셀의 항복강도와 탄성계수의 비교결과를 Figure 4~5에 나타내었다.

Figure 4에 나타난 바와 같이 내력저하 능력은 두 강재 모두 거의 동일한 패턴을 보였으나, 고온영역에서는 일반 내화강재가 TMCP 내화강재보다 우수한 것으로 나타났다. 따라서 고온에서의 내력유지는 TMCP 내화강재가 일반 내화강재보다 약화될 것으로 판단되었다.

항복강도와는 달리 탄성계수는 TMCP 내화강재가 상온에서 700 °C 구간까지 우수한 것으로 나타났고, 이후 온도 구간에서는 일반 내화강재가 다소 우수한 것으로 나타났다. 따라서 고온에서의 변형에 대한 능력은 TMCP 내화강재가 우수할 것으로 판단되었다.

고온 시의 항복강도와 탄성계수만으로 화재 시의 구조 거동에 의한 안전성 확인은 한계가 있는 것으로 판단되고, TMCP 내화강재와 일반 내화강재로 구성된 부재의 화재 시 구조 거동의 안전성 평가는 내력 평가를 통하여 확인될

것으로 사료되었다.

### 3.4 H형강 기둥부재의 고온 내력평가

고온에서의 내력 유지 성능이 우수한 TMCP 내화강재와 내화강재로 설정된 H형강 기둥부재를 대상으로 화재와 같은 조건에서의 내력성능을 평가함으로써 구조 안전성을 확인하고자 한다.

고온 시 구조내력 평가에 설정된 화재조건은 KS F 2257-1에 제시된 표준온도곡선(Equation (1))을 이용하고, 5분, 10분, 15분, 20분 및 25분에서의 내력변화를 비교하고자 한다.

$$345\text{Log}(8t+1)+T_0 \tag{1}$$

여기서, t: 시간(분), T<sub>0</sub>: 주변온도(°C)

표준온도곡선에 의한 TMCP 내화강재 및 일반 내화강재로 설정된 H형강의 표면온도 도출을 위해 복사능은 0.5로 설정하였고, 비열은 온도에 따라 달라지나 여기서는 상대적인 비교를 위하여 일정한 값인 583 J/kg °C를 적용하였다<sup>(10)</sup>.

경과시간에 대한 표준온도와 H형강 기둥부재의 도출된 표면온도는 Table 6과 같다.

내력평가에 설정된 H형강 기둥부재는 길이 3.5 m, 단면 300×300×10×15(단면적 119.80 cm<sup>2</sup>)이며, 양단 경계조건은 고정단으로 설정하였다.

고온 시 부재의 최대응력은 항복강도, 탄성계수에 의한 응력과 열팽창에 의한 2차 응력의 합으로 계산된다. 그러

Table 6. Temperatures at Lapsed Time

Time (Minutes)	Temperature (°C)	
	Fire curve	Surface of H-section
0	20	24.7
5	576	206.2
10	678	447.4
15	739	638.0
20	781	689.1
25	815	709.8

Table 7. Expansion at Surface Temperature of H-section

Time (Minutes)	Surface of H-section (°C)	Expansion (mE-03)
0	24.7	0.4
5	206.2	9.7
10	447.4	12.9
15	638.0	13.8
20	743.1	13.9
25	796.8	13.9

**Table 8.** Comparison Results of Maximum Load between TMCP FR 490 and FR 490

Time (minutes)	Surface temperature of H-section (°C)	Maximum load (Ton)	
		TMCP FR 490	FR 490
0	24.7	212.87	212.87
5	206.2	137.42	164.90
10	447.4	107.46	121.71
15	638.0	89.64	95.64
20	743.1	76.81	76.65
25	796.8	66.68	61.52

나 본 연구에서는 TMCP 내화강재와 내화강재로 설정된 H형강 기둥부재의 고온 시 내력평가에 관한 것이므로 열팽창의 크기만 계산하고, 부재의 최대내력 계산에는 포함시키지 않았다.

열팽창 계산에 적용된 열팽창계수는 일반 내화강재의 고온시의 열팽창계수이며, 계산 결과는 Table 7과 같다.

H형강 기둥부재의 최대 내력은 다음 Equation (2)로 구한 응력을 이용하여 계산하였고, 그 결과는 Table 8에 제시하였다.

$$\sigma_{ct} = \left(1 - 0.4 \frac{\lambda}{\lambda_{pt}}\right)^2 F_{yt} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda$ 는 세장비,  $\lambda_{pt}$ 는 한계세장비  $\sqrt{\pi^2 E_t / \sigma_{ct}}$ 이며,  $F_{yt}$ 는 고온에서의 항복강도이다.

고온 시 H형강 기둥부재의 내력을 평가한 결과, TMCP 내화강재로 설정된 부재가 표준온도곡선 20분 이후의 내력을 제외한 전 구간에서 일반 내화강재로 구성된 기둥부재보다 급격한 내력저하를 보였다. 따라서 TMCP 내화강재로 구성된 기둥부재의 내화성능은 일반 내화강재 기둥부재보다 약 700 °C 온도구간까지 약화되며, 일반 내화강재 기둥부재와 동일한 내화성능 확보를 위해서는 내화피복 보강 등이 필요한 것으로 판단되었다.

#### 4. 결 론

고층화, 대형화를 충족시키기 위한 급속냉각법으로 제조된 내화강재의 고온 시 내력을 평가하기 위하여 고온 특성 데이터베이스를 구축하고, 이 결과를 일반 내화강과 비교하였으며, 각각의 재료로 설정된 H형강 기둥부재를 대상으로 고온 시 내력을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가속 냉각법으로 제조된 TMCP 내화강재의 고온 시 항복강도는 일반 내화강재보다 낮게 나타났고, 탄성계수에는 큰 영향을 미치지 않았다. 따라서 TMCP 내화강재의 고온 시 내력성능은 다소 약화될 것으로 예측되나 변형 능력은 두 강종 모두 유사할 것으로 판단되었다.

2. 표준온도가열곡선 20분 이내 구간에서 TMCP 내화강재 적용 H형강 기둥부재의 최대 내력유지 성능을 해석적으로 평가한 결과, 일반 내화강재 적용 H형강 기둥부재보다 약화되었다. 따라서 TMCP 내화강재 기둥부재가 일반 내화강재를 적용한 기둥부재와 동일한 내화성능 확보를 위해서 별도의 내화피복 보강 등이 필요한 것으로 평가되었다.

#### 후 기

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

#### References

1. I. K. Kwon, "Building Fire Protection", Donghwa Technology Publishing Co., Kyungido, Korea (2007).
2. S. H. Lee, H. Y. Kim and B. Y. Min, "Development of Fire Engineering Technique", KICT 2002, Korea Institute of Construction Technology (2002).
3. A. H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", Chichester, UK (2001).
4. G. S. Jung, "Building Materials", Kwangmoon, Seoul, Korea (1999).
5. C. R. Kayser, J. A. Swanson and D. G. Linzell, "Characterization of Material Properties of HPS-485W (70W) TMCP for Bridge Girder Applications", Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 99-108 (2006).
6. S. H. Wang, C. C. Chiang and S. L. I. Chan, "Effect of Initial Microstructure on the Creep behavior of TMCP EH 36 and SM 490C Steels", Materials Science and Engineering, Vol. 344, No. 1-2, pp. 288-295 (2003).
7. L. Zhuang, "Effect of Thermo-mechanical Controlled Processing on Mechanical Properties of 490 MPa Grade Low Carbon Cold Heading Steel", Journal of Iron and Steel Research, International, Vol. 16, No. 3, pp. 43-48 (2009).
8. D. Porter, A. Laukkanen, P. Nevasmaa, K. Rahka and K. Wallin, "Performance of TMCP Steel with Respect to Mechanical Properties after Cold Forming and Post-forming Heat Treatment", International Journal of Pressure and Piping, Vol. 81, No. 10-11, pp. 867-877 (2004).
9. Y. Nie, C. H. Shang, Y. You, X. C. Li, J. P. Cao and X. I. He, "960 MPa Grade High Performance Weldable Structural Steel Plate Processed by Using TMCP", Journal of Iron and Steel Research, International, Vol. 17, No. 2, pp. 63-66 (2010).
10. CEN, Eurocode 3: "Design of Steel Structures, Part1. 2: General Rules-structural Fire Design", Brussel, Belgium (1995).