

고온 시의 구조내력 평가를 위한 SM 400강재의 고온 특성 평가 연구

권인규

강원대학교 소방방재학부

A Study on the Properties of SM 400 for Evaluation of Structural Stability at High Temperature

In-Kyu Kwon

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received May 10, 2013; Revised June 26, 2013; Accepted August 9, 2013)

요 약

건축물에서의 화재 발생은 인명피해, 구조물 피해 등 재해적 요소를 많이 포함하고 있으며, 가연물의 증가에 따라 화재 발생빈도와 피해 규모는 점차 증대하는 추세이다. 특히 강재로 구성되는 기둥부재와 보부재의 고온 시 내력의 급격한 감소는 구조물의 붕괴와 같은 매우 위험한 상황에 도달될 수 있으므로 화재 시 강구조 건축물의 구조 안전성 확보를 위해서는 적용 강재의 신뢰성 있는 고온 물성자료가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 강구조 건축물에서 많이 활용되는 용접구조용 강재인 SM 400강재를 대상으로 고온 시 항복강도, 탄성계수를 측정하여 내력평가에 활용할 수 있는 실험식을 제시하고, 화재 시의 온도평가와 응력 계산에 요구되는 열전도율과 열팽창계수 등의 열적 특성의 자료를 제시한다. 또한 일반 구조용 강재인 SS 400과의 고온 특성을 비교, 평가함으로써 고온에서의 내력 특성을 확인한다.

ABSTRACT

Recently, the risk of fire outbreak is going up because of newly developed combustible materials are intended to apply more. Especially the steel framed structure can lose its load-bearing capacity when it is exposed to higher temperature condition such as a fire. So the pre-evaluation of fire resistance of the structure is very essential that the mechanical properties of yield strength and elastic modulus and thermal properties such as conductivity and linear expansion be required. To get the databases for SM 400 or welding structural steels at high temperature, various temperature conditions were used for deriving the yield strength, elastic modulus, linear expansion, and conductivity and the results were compared to those of SS 400, ordinary structural steel, respectively.

Keywords : SM 400, Mechanical properties, Thermal properties, Load-bearing capacity

1. 서 론

화재와 같은 고열에서 강재 기둥과 보 그리고 기둥과 보로 구성된 강재 가구(frame)는 점진적으로 내력감소가 발생되어 구조적 한계에 도달되며, 이후에는 붕괴라는 재해가 발생할 수도 있다. 따라서 각 국가별로 이와 같은 강구조 부재와 가구의 구조적 불안전성을 해소하기 위하여 적절한 내화피복의 수단을 강구하고 있다.

최근에는 건축물 내부에서 발생하는 화재크기의 예측과 구조해석 기술의 발달을 토대로 화재로 인한 구조물의 내력적 변화를 정량적으로 평가할 수 있는 공학적 내화설계

기술을 많이 적용하고 있다.

그러나 화재 시 구조적 거동을 평가하기 위해서는 해당 구조물을 형성하는 재료의 고온에서의 정확한 자료의 입력이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 일반 구조용 강재와 동일한 등급이나 용접성을 향상시킨 SM 400강재를 대상으로 고온 시의 기계적 특성과 탄성계수의 온도별 데이터 베이스를 구축하고, 이를 바탕으로 고온 시 내력을 예측할 수 있는 실험식을 제시한다. 또한, 고온 시의 부재 온도와 이차응력을 평가할 수 있는 열전도율과 선형 열팽창률을 제시하고, SM 400강재로부터 도출된 고온 시 각 특성을 SS 400강재와 비교, 분석함으로써 고온 시의 내력적 특성

을 확인하고자 한다.

2. 구조용 강재의 고온 특성 연구

고온으로 갈수록 구조용 강재의 내력은 점차적으로 감소하여 약 550 °C 수준에서는 허용응력 수준까지 감소하는 것으로 알려져 있으며, 이 온도 범위를 각 국가별로 강구조 부재의 내화성능평가의 기준 온도로 활용되고 있다. 그러나 각 부재와 가구의 내화성능을 기준 온도에 의해서 평가하지 않고, 해당 건축물의 가연물량과 환기조건 그리고 주요 구조부재를 형성하는 재료의 고온 상태에 따라 평가하는 공학적 내화설계기술이 발달하여 이를 활용한 내화설계가 활발히 진행되고 있다.

화재 발생 시나리오 등을 활용한 강구조 부재와 가구의 내화설계에는 해당 부재를 제작하는데 적용된 강재의 고온 특성이 필연적으로 요구되고 있으나, 이에 대한 자료 확보는 한계가 있다. 일반적으로 강구조 부재와 가구의 고온 내력을 평가하기 위하여 적용되는 자료는 유러코드 3에 제시된 자료와 영국 및 뉴질랜드 등의 자료를 활용하고 있다⁽¹⁻³⁾. 그러나 유러코드에 제시된 자료는 여러 종류의 일반 등급 구조용 강재의 특성으로 구성되어 있다. 따라서 특정 강재로 구성된 부재와 가구의 고온 내력평가가 요구될 때, 유러코드 등의 자료 활용은 그 결과에 대한 신뢰성의 한계가 있을 수 있다.

강재의 고온특성 평가의 연구는 1990년 후반 Twilt와

Cooke 등이 일반 구조용 강재를 대상으로 많은 연구 결과를 도출하였고^(4,5), 2000년대 이후에는 Outinen, Young, Brnic 등의 연구가 꾸준히 이루어지고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 최근에는 원자력 발전용으로 활용될 수 있는 특수강재와 스테인리스 강재의 고온특성 평가가 Daw와 Gardner를 중심으로 이루어지고 있다^(9,10). 우리나라의 경우는 권인규에 의한 강재의 고온 물성에 관한 연구가 일부 진행되었다⁽¹¹⁾. 강재의 단점 중의 하나인 용접성을 향상시킨 SM 400로 구성된 부재와 가구의 고온 시 정확한 내력 평가를 위해서는 고온 시의 항복강도, 탄성계수 그리고 열팽창계수와 열전도율 등과 같은 열적 특성 자료가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 SM 400강재를 대상으로 고온 기계적 특성과 열적 특성 자료를 도출하고, 동일 강도인 SS 400과 비교분석함으로써 고온 시의 내력 특성을 평가하고자 한다.

3. SM 400 강재의 고온특성 평가 시험

본 연구에 적용된 시편은 압연방향의 원판에서 채취하였고, 각 시편간의 최소 거리는 5 cm를 유지하였다. 항복강도와 탄성계수를 도출을 위해 상온에서 900 °C까지 100 °C 간격으로 승온한 이후 각 해당 온도에서의 안정성을 확인하고 고온인장시험을 수행하였다. 시험에 적용된 스트로크와 시편 온도의 허용범위는 Table 1과 같다.

인장시험은 KS D 0802(금속재료의 인장시험방법)과

Table 1. Testing Speeds and Temperature Tolerance

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

Table 2. Mechanical Properties of SM 400 at High Temperatures

Temperature (K)	Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (%)
	0.2 % offset	1.0 % offset			
20	315.84	304.75	485.63	204325.70	35.03
100	278.34	277.28	462.07	194563.87	29.47
200	264.87	301.83	535.99	215084.86	21.69
300	223.17	318.06	530.83	213705.72	30.37
400	221.75	294.01	459.91	154537.52	30.62
500	186.88	243.06	317.54	131525.71	36.09
600	136.76	159.99	173.47	131892.74	49.16
700	82.16	92.23	93.60	90951.40	73.83
800	47.78	56.77	69.26	39234.66	91.78
900	32.13	36.04	56.02	30454.18	54.13

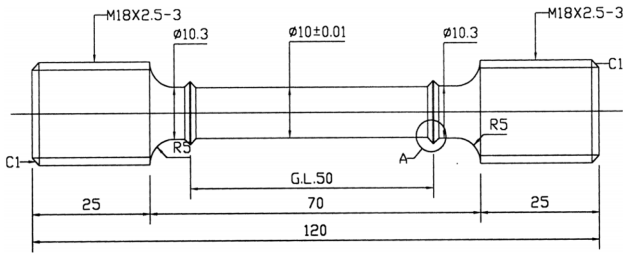


Figure 1. Specimen dimension for tensile test.

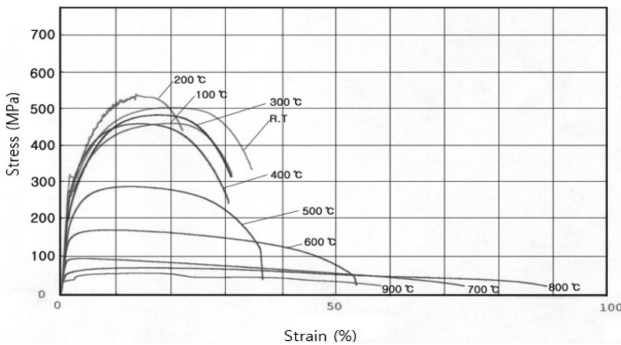


Figure 2. Stress-strain relations according to temperature history.

KS D 0026(철강재료 및 내열합금의 고온인장시험방법)에 의해서 수행되었으며, 항복점, 인장강도, 탄성계수 및 연신율 등을 측정하였다. 명확한 항복점이 나타나지 않는 부분은 영구 변형율을 적용한 0.2% 오프셋내력과 소성 시 구조물의 붕괴를 예측할 때 사용할 수 있는 1% 오프셋으로 유효내력을 평가하였다. 탄성계수 측정을 주 목적으로 항복점까지는 변형제어를 하고, 이후 구간에서는 응력제어로 인장시험을 수행하였다.

고온인장시험에 사용된 기기는 100톤 UTM과 이에 부착되어 900 °C까지 승온이 가능한 고온챔버이며, 시험편의 크기는 Figure 1과 같다.

온도변화에 따른 항복강도와 탄성계수 및 연신률 등의 시험결과는 Table 2와 같고, 각 온도별 응력-변형도 관계는 Figure 2와 같다.

각 온도별 시험편의 항복강도와 탄성계수의 저감 특성은 Figure 3~4와 같고, 향후 SM 400강재를 적용한 기둥부재와 보부재 그리고 가구의 화재 시 구조내력 평가를 위한 온도별 항복강도와 탄성계수의 실험식을 Table 3에 제시

Table 3. Regression Equations for Mechanical Properties

Properties	Temperature	Regression equation	Remarks
Yield strength	$T \leq 200\text{ }^\circ\text{C}$	Cold value (235 MPa)	
	$200\text{ }^\circ\text{C} < T$	$-0.29T + 293.44$	$R^2 = 0.95$
Elastic modulus	$T \leq 200\text{ }^\circ\text{C}$	Cold value (210000 MPa)	
	$200\text{ }^\circ\text{C} < T$	$-255.9T + 261180.29$	$R^2 = 0.97$

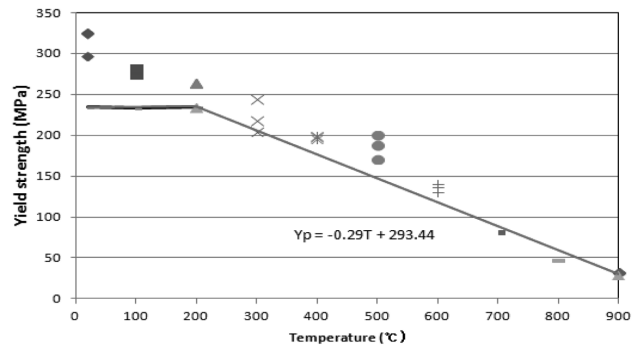


Figure 3. Reduction pattern of yield strength according to temperatures (0.2% offset proof stress).

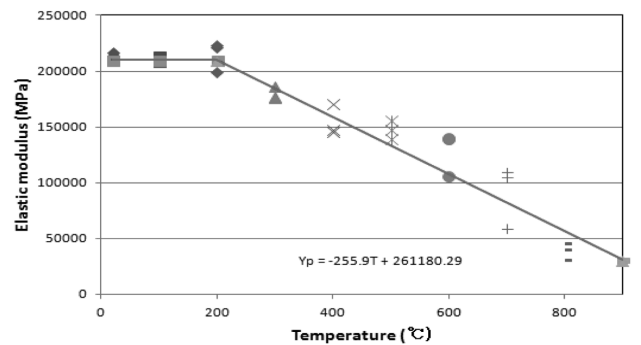


Figure 4. Reduction pattern of elastic modulus according to temperatures.

하였다.

여기서, T=온도(K)

3.1 열적특성

3.1.1 고온열팽창계수

물질에 열에너지가 공급되면 원자간의 거리가 멀어지게 됨으로써 길이의 변화가 발생되며, 화재와 같은 상황에서 구조물은 처짐발생과 휨모멘트가 추가적으로 발생할 수 있다. 따라서 강구조 건축물에서의 화재 시 구조물 거동에 측을 위해서는 해당 강재의 온도변화에 따른 정확한 열팽창률이 요구된다.

SM 400강재의 열팽창률 측정은 1300 °C까지 측정이 가능한 High Temperature Dilatometer를 사용하였고, 상온에서 1000 °C까지 100 °C 단위로 측정하였으며, 그 결과는

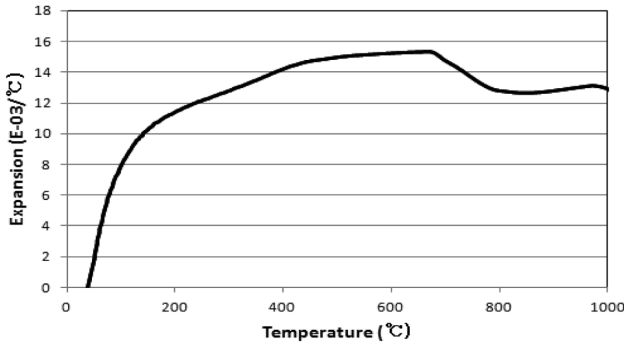


Figure 5. Results of linear expansion at high temperature.

Figure 5와 같다.

SM 400강재의 고온 선팽창률은 상온에서 700 °C 구간까지는 지속적인 증가율을 보이고 있으며, 특히 상온에서 200 °C 온도구간에서 가장 빠른 증가율을 보이고 있다. 반면, 700 °C에서 800 °C 구간에서는 감소하는 경향을 보였고, 이후 온도 구간에서는 거의 일정한 열팽창특성을 나타내었다.

3.1.2 고온열전도율

강재 기둥과 보부재 등은 일체의 체적을 가지고 있으며, 화재 발생 시 화재 노출면에서 평면, 수직 방향으로 점차적으로 온도가 상승하게 되며, 온도크기의 결정은 해당 재료의 열전도율에 좌우된다. 따라서 SM 400강재로 구성된 부재의 정확한 온도산정을 위해서는 각 온도에서의 열전도율이 필요하다.

열전도율 측정을 위한 시편은 지름 10 mm, 두께 (1~1.2) mm의 원형이고, 상온에서 1500 °C의 온도범위까지 (0.1~400) W/mK 범위를 측정할 수 있는 Sinku-Riko사의 TC 7000를 사용하였다. 열전도율은 밀도를 알고 있는 시편의 열확산계수 및 비열을 Laser Flash법에 의해 직접 측정된 뒤 $k=\alpha \cdot \rho \cdot C_p$ 에 의해서 계산하였으며(여기서, k=열전도율, α =열확산계수, ρ =밀도, C_p =비열), 그 결과는 Table 4와 같다.

열전도율은 상온에서 800 °C까지 대체적으로 유사한 값을 나타내고 있으나, 300 °C에서 700 °C 구간에서는 감소

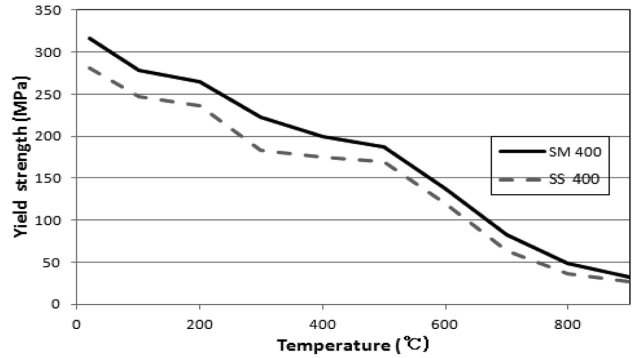


Figure 6. Comparison of yield strength measured at 0.2% offset proof strength between high strength and ordinary structural steel at high temperature.

경향을 보이고 있으며, 이후 온도 구간에서는 증가하는 경향을 보였다.

4. 용접구조용 강재(SM 400)와 일반구조용 강재(SS 400)의 고온특성 비교

용접 구조용 강재(SM 400)의 고온 시 기계적 특성과 열적 특성을 일반 구조용 강재(SS 400)과 비교, 분석함으로써 화재와 같은 고열조건에서 SM 400으로 제작된 기둥, 보 및 가구의 구조적 안전성을 상대적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4.1 기계적 특성

용접 구조용 강재와 일반 구조용 강재의 0.2% 윽셀 내력과 탄성계수를 비교하였으며, 이 결과는 각각 Figure 6~7에 나타내었다.

SM 400강재는 전체 온도구간에서 SS 400강재보다 다소 높은 항복강도를 보이고 있으며, 항복강도의 감소는 전 온도구간에서 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 화재와 같은 고열조건에서 SM 400강재로 구성된 부재는 SS 400강재로 구성된 부재와 유사한 내력적 감소 특성을 보일 것으로 판단되었다.

두 가지 강재 모두 전 온도구간에서 감소 경향을 보이고

Table 4. Results of Thermal Conductivity at High Temperature

Temperature (K)	Coefficient of heat diffusion (cm ² /s)	Specific heat (J/gK)	Heat conductivity (W/m · K)	Density (kg/m ³)
24	0.1080	0.4947	41.486	7770
304	0.0871	0.6217	42.071	
502	0.0659	0.7531	38.545	
702	0.0351	1.1990	32.704	
804	0.0433	1.1987	40.284	
901	0.0538	1.3578	56.709	

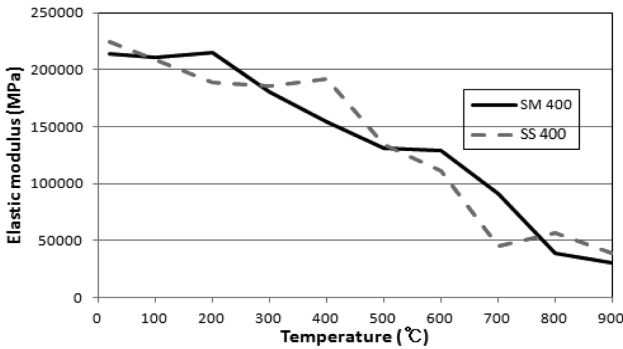


Figure 7. Comparison of elastic modulus between high strength and ordinary structural steel at high temperature.

있으나, 100~300 °C 구간과 500~800 °C 온도구간에서는 SM 400강재가 SS 400강재보다 변형에 대한 저항력이 높은 것으로 나타났다. 반면, 300 °C에서 500 °C 구간에서는 SS 400강재가 변형에 대한 저항력이 높은 것으로 나타났다. 따라서 500 °C 이상의 고온 시에는 SM 400강재를 적용한 부재가 구조적 내력저하성능이 다소 완화될 것으로 판단되었다.

4.2 열적 특성 비교

고온에서의 용접구조용 강재(SM 400)와 SS 400강재의 열특성을 비교하였으며, 그 결과는 Figure 8~9와 같다.

Figure 8에 나타난 바와 같이 상온에서 700 °C 구간까지는 거의 동일한 열전도율 분포를 나타내고 있으나, 600~800 °C 구간에서는 SM 400강재가 보다 낮은 열전도율을 보이고 있다. 따라서 전체적으로 열전도율에 의한 강재의 온도상승은 거의 비슷할 것으로 판단되나, 600 °C 이후 구간에서는 SM 400강재를 적용한 부재가 다소 안전측이라고 판단된다.

Figure 9와 같이, 상온에서 1000 °C까지 SM 400강재와 SS 400강재의 열팽창률은 거의 유사한 경향으로 증가와 감소가 일어나고 있으며, 전 온도구간에 걸쳐서 열팽창률은 SM 400강재가 SS 400강재보다 높은 것으로 나타났다.

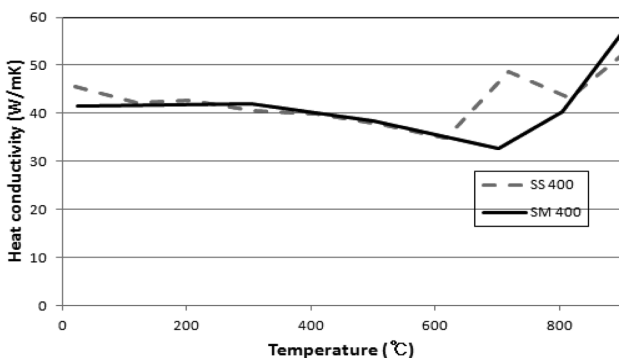


Figure 8. Comparison of heat conductivity between high strength and ordinary strength steel at high temperature.

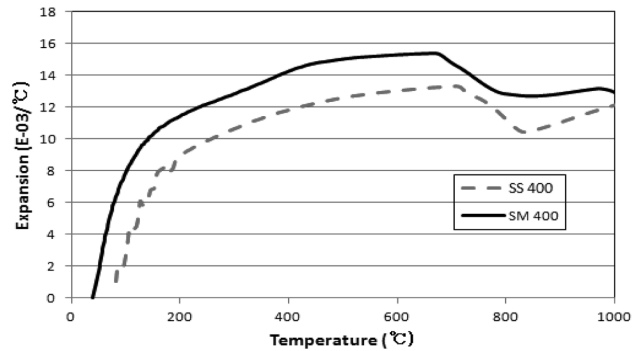


Figure 9. Comparison of heat expansion between high strength and ordinary strength steel at high temperature.

따라서 열팽창률의 결과로 판단할 때, SM 400강재로 구성된 기둥과 보의 경우, SS 400강재로 제작된 부재보다 다소 많은 팽창이 발생할 수 있어 부재 자체와 가구의 2차 변형에 다소 많은 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

고온에서의 기계적 특성과 열적 특성을 고려할 때, 기둥과 보와 같은 단일부재 고온 내력은 전 온도구간에 걸쳐 항복강도가 다소 높게 나타난 SM 400이 우수할 것으로 판단되고, 단부 구속조건인 가구의 경우는 열팽창률이 다소 낮은 SS 400 부재가 안전측으로 판단되었다.

향후 각종 강구조 부재의 고온 시 내력평가를 주 목적으로 경계조건, 단면, 길이 변화 등을 대상으로 해석적 연구와 실험적 연구의 병행이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

용접성을 향상시킨 SM 400강재를 대상으로 고온에서의 내력평가를 위한 기계적 특성과 열적 특성 자료를 도출하고, 동일 강도인 SS 400강재의 고온 시 물성과의 비교, 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고온내력 평가가 가능한 SM 400강재의 항복강도 (0.2 % 율셀내력, 1.0 % 율셀내력)와 탄성계수의 온도구간별 실험식을 각각 제시하였다.
- (2) 고온 시의 기둥부재와 보부재 등의 온도계산과 가구의 2차 응력 계산에 요구되는 SM 400강재의 열전도율과 열팽창률을 각각 제시하였다.
- (3) SM 400강재의 고온 기계적 특성을 동일 강도의 SS 400강재와 비교한 결과, 전 온도구간에서 유사한 감소 경향을 보였으며, SM 400강재의 항복강도가 전 구간에 걸쳐 다소 높고, 500~700 °C 구간의 탄성계수가 SS 400보다 다소 높은 것을 고려할 때, SM 400강재를 적용한 부재의 고온내력이 SS 400강재의 고온내력보다 안전측이라고 판단되었다.
- (4) SM 400강재와 SS 400강재의 고온 열전도율과 열팽창률을 비교분석한 결과, 전체 온도구간에서 유사한 경향을 보였으나, 유사한 열전도율 특성임을 감안하면 전체 온

도구간에서 높은 열팽창률을 보인 SM 400강재가 다소 불리한 조건으로 판단되었다.

References

1. CEN, "Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1, 2: General Rules Structural Fire Design", CEN, Brussel (1995).
2. BSI, "BS 5950:Part8: Structural Use of Steel Work in Building", U.K. (1990).
3. SNZ, "NZS 3404: Part 1: Steel Structures Standard", Wellington (1997).
4. L. Twilt, "Strength and Deformation Properties of Steel at Elevated Temperature; Some Practical Implications", Fire Safety Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 9-15 (1988).
5. G. M. E. Cooke, "An Introduction to the Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperatures", Fire Safety Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 45-54 (1988).
6. J. Outinen and P. Makelainen, "Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperatures and after Cooling Down", Fire and Materials, Vol. 28, No. 2-4, pp. 237-251 (2004).
7. J. Chen and B. Young, "Experimental Investigation of Cold-formed Steel Materials at Elevated Temperatures", Thin-Walled Structures, Vol. 45, No. 1, pp. 96-110 (2007).
8. J. Brnic, M. Canadija, G. Turkalj and D. Lanc, "Structural Steel ASTM A709-Behavior at Uniaxial Tests Conducted at Lowered and Elevated Temperatures, Short-time Creep Response, and Fracture Tough Calculation", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 136, No. 9, pp. 1083-1089 (2010).
9. J. E. Daw, J. L. Rempe and D. L. Knudson, "Thermal Properties of Structural Materials Used in LWR Vessels", Journal of Nuclear Materials, Vol. 401, No. 1, pp. 65-70 (2010).
10. L. Gardner and K. T. Ng, "Temperature Development in Structural Stainless Steel Sections Exposed to Fire", Fire Safety Journal, Vol. 41, No. 3, pp. 185-203 (2006).
11. I. K. Kwon, "Derivation of the Mechanical Properties of Structural Steels at High Temperatures", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 47-55 (2007).