

구조 강재의 온도에 따른 재료적 특성에 대한 실험적 연구

김소영¹ · 추다솜² · 이희두³ · 신경재^{4*}

¹박사과정, 경북대학교, 건축공학과, ²석사과정, 경북대학교, 건축공학과

³전임연구원, 경북대학교, 건축안전기술연구소, ⁴교수, 경북대학교, 건축공학과

Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperature

Kim, So-Yeong¹, Chu, Da-Som², Lee, Hee-Du³, Shin, Kyung-Jae^{4*}

¹Ph.D Student, Dep. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

²Graduate Student, Dep. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

³Research Fellow, Dep. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

^{4*}Professor, Dep. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

Abstract - Recently, a fire resistance performance design method has been introduced in which members having fire resistance according to fire growth are selected and applied considering the form and characteristics of the building. However, domestic fire resistance performance design mainly follows the material characteristics of structural members based on Eurocode^[5]. Therefore, in this study, the mechanical properties of structural steels (SS275 (SS400), SM355 (SM490)), which are mainly used for steel structures in Korea, were investigated. The high-temperature tensile test was carried out at room temperature, 400, 500, 600, 700 and 800°C, and according to ASTM 21M-09^[10]. As a result, the yield strength, tensile strength and elastic modulus of SS275 (SS400) and SM355 (SM490) steels decreased with increasing temperature. In addition, the decrease of the strength according to the high temperature of the test specimen was significantly different from the Eurocode^[5] at the temperature below 500°C. Above 600°C, there is a difference between the strength reduction factors proposed in the AII Recommendations for fire resistant design of steel structures. At other temperatures, the tendency was similar to the strength reduction factors proposed in Kwon^[11], ASCE^[12] and AISC^[14].

Keywords - Structural Steel, High temperature, Thermal properties, Mechanical properties, Reduction factor

1. 서론

건축물의 화재는 1차적으로 실내 외장재를 포함한 가연성 물질의 연소로 인해 발생하는 유해가스 등으로 재실자의 생명을 위협하고, 2차적으로 주요 구조재의 하중 저항성능을 감소시켜 건축물의 붕괴로 인한 재산손실 및 화재 대피자의 인명 피해를 유발한다. 따라서, 건축법 제52조 건축물 마감재료에서 내불연, 준불연 재료의 사용을 명시하여 1차적 화재 피해를 최소화하고, 내화

설계를 통해 건축물의 화재로 인한 붕괴와 같은 2차적 피해를 예방하고 있다.

건축법의 내화구조는 건축물의 피난·방화 구조 등의 기준에 관한 규칙의 제3조(내화구조)에 명시된 구조 부재에 적합한 구조로 건축물의 용도별 층수 및 높이에 따른 규모에 따라 정해진 시간 이상을 견딜 수 있는 내화성능을 확보한 구조를 말한다. 이는 사양적 내화설계로 설계작업이 단순하고 확실하지만 건축물의 화재하중이나 공간 조건 등을 고려할 수 없어 비경제적인 내화설계가 될 요인을 가지고 있다^[1]. 이에 건축물의 형태와 특성을 고려하여 화재 성장에 따른 내화성능을 가진 부재를 선택하여 적용하는 설계법인 성능적 내화설계법을 도입하고자 2000년도 초반부터 노력해 왔다^{[2],[3],[4]}.

성능적 내화설계는 구조재료의 열전도 및 기계적 성질을 고려한 구조물의 한계온도를 결정하여 목표 내화성능시간 이후에도 달하도록 설계한다. 하지만 국내의 내화 성능설계에서는 주로

Note.-Discussion open until April 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 06, 2018; revised September 04, 2018; approved on September 05, 2018.

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-53-950-5591 Fax. +82-53-950-6590

E-mail. shin@knu.ac.kr

Eurocode^[5]에 기반한 구조부재의 온도상승에 따른 기계적 성질의 변화와 해석을 따라왔다. 국내에서 사용중인 강재에 대한 고온 시 기계적 특성에 관한 연구를 통해 국내 내화설계의 실용화 기반 구축에 노력하고 있으나^{[6],[7]}, 기초적인 자료의 부족과 국외 기준에 대한 의존적인 태도로 인해 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 강구조물의 주요부재로 주로 사용되는 강재인 SS275(SS400), SM355(SM490)를 대상으로 고온 시 변화하는 기계적인 특성을 실험을 통해 도출하고, 그 결과를 기존 국내의 실험결과 및 국외의 기준과 비교 평가하고자 한다.

2. 온도에 따른 인장시험

상온의 인장시험은 KS B 0802^[8]에 의해 수행되었으며, 고온에서의 인장시험은 KS D 0026^[9]과 ASTM E21^[10]을 고려하여 시험하였다. 인장시험편은 Fig. 1.의 형상으로 가공하여 양 끝단부의 볼트체결을 통해 인장력을 가하도록 계획하였다. 상온 및 고온 인장시험에 사용된 강재는 KS 규격의 SS275(SS400, ASTM A36 또는 S275), SM355(SM490, ASTM 572-50 또는 S355)이며, 각 강종에 대한 기계적 특성은 Table 1과 같다.

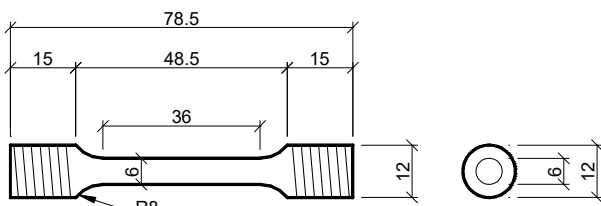


Fig. 1. Dimension of tensile test specimen

SS275와 SM355 강재는 Fig. 2.와 같은 시험편을 제작하여 상온, 400℃, 500℃, 600℃, 700℃, 800℃에서 각 3번씩 인장시험을 수행하였다. 일반적으로 내화성능을 판단할 경우 내화한계시간 내에 강재의 평균온도 538℃, 표면 측정온도 649℃를 넘지 않도록 정하고 있기에 평균온도 및 표면온도를 포함하는 구간의 고

온 인장시험으로 계획하였다.

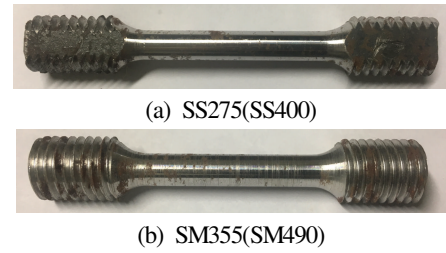


Fig. 2. Tensile test specimens of SS275(SS400), SM355(SM490)

고온 챔버는 최대온도 1000℃까지 승온이 가능한 장비를 활용하였으며, 300kN 용량의 만능재료시험기와 시험편의 변형률 측정을 위한 장치 및 연신율계, 열전대를 사용하였다. Fig. 3.은 실험체 고온 챔버 내부 및 지그 설치 전경을 나타낸다. Fig. 4.는 변형률 측정을 위한 장치의 작동방법에 대한 상세 도면을 나타내며, 이 장비는 자체 개발하였다. 고온 챔버 내부에는 나사선 물림부를 고정할 수 있는 지그를 이용하여 시험편을 고정하였으며, 스테인리스 타이를 이용하여 열전대를 고정하였다. 또한 직접 제작한 변형률 측정 장치를 물림부를 시험편의 표점거리를 조정하여 고정하였다. 고온 챔버 외부로는 변형률 측정장치의 하부 양 옆에 각각 연신율계를 설치하여 두 개의 값을 평균내어 연신율을 측정하였다.

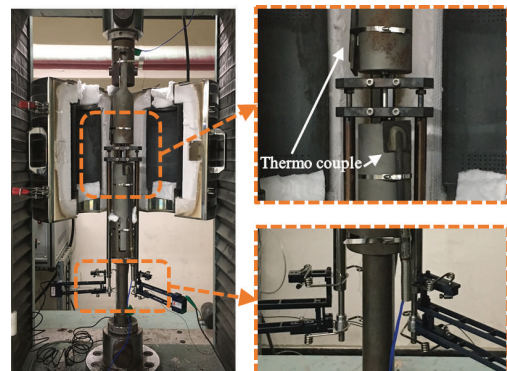


Fig. 3. Installation of tensile test at high temperature

Table 1. Chemical and mechanical properties of specimens

Steel	C	Si	Mn	P	S	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
SS275 ¹⁾	≤0.25	≤0.45	≤1.40	≤0.050	≤0.050	≥275	410~550	≥18
SM355 ¹⁾	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.035 ²⁾	≤0.035 ²⁾	≥355	490~630	≥17

1) Thickness is greater than 5 and less than 16, 2) For SM355A grade steel

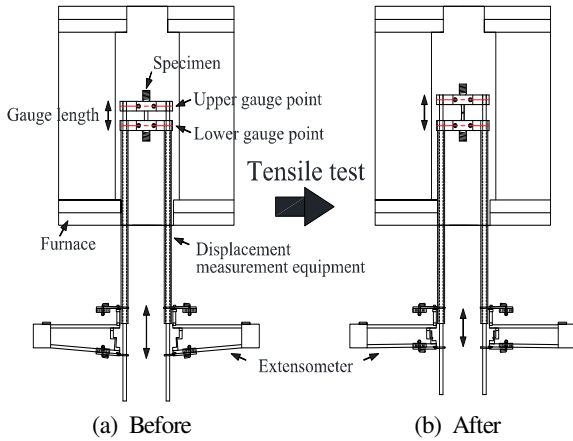


Fig. 4. Displacement measurement equipment

고온 인장시험은 ASTM 21M^[10]에 따라 목표온도에 도달 후 강재의 표면 뿐만 아니라 내부까지 균일한 온도가 될 수 있도록 20분 이상의 유지시간을 가지도록 하였다. 실험 속도는 항복강도에 도달하기 이전에 0.25mm/min의 속도를 유지하여 항복강도를 측정하고, 그 이후에 2mm/min의 속도로 파단 시까지 진행하였다.

2.1 SS275(SS400) 강재의 고온시험

Fig. 5.는 SS275 강재의 각 온도에 따른 대표적인 응력-변형률 곡선을 나타내며, 20℃와 400℃의 곡선은 탄성구간과 소성영역에서는 거의 흡사한 거동을 보이다가 변형도 경화구간 및 파단 영역에서 차이가 발생하며, 500℃이상의 고온에서 응력-변형률 곡선은 모든 구간에서 명확한 차이를 보인다. Fig. 6.은 각 온도에서의 파괴형상을 보여준다.

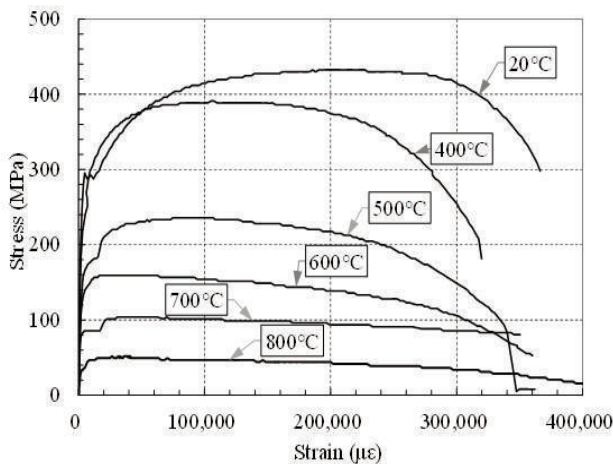


Fig. 5. Stress-strain relationship of SS275(SS400) at elevated temperature

Table 2에서는 SS275 강재의 항복강도, 인장강도, 연신율의 변화 추이를 정리하였다. 항복강도는 0.2% offset법을 통해 산정하였다. 고온일수록 기계적인 특성은 점차 낮아지는 경향을 보였다. 연신율은 큰 차이가 없었으나 800℃이상에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

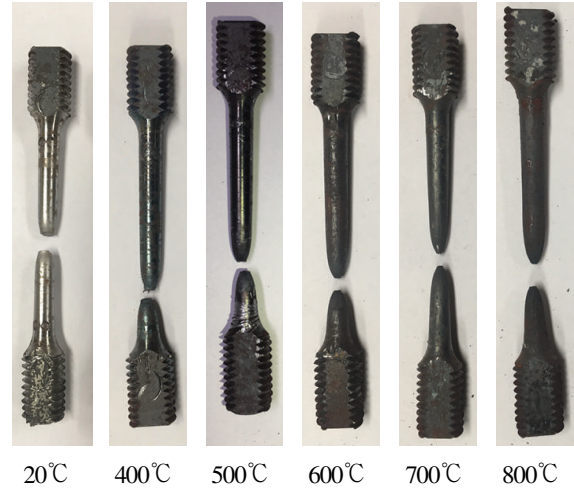


Fig. 6. Failure shape of SS275 (SS400) at elevated temperature

Table 2. Tensile test results of SS275 (SS400) grade steel

Temperature (°C)	Yield strength $f_{y,\theta}$ (MPa)	Tensile strength $f_{u,\theta}$ (MPa)	$f_{u,\theta}/f_{y,\theta}$	Elongation (%)
20°C	287.5	432.6	1.50	36.6%
	300.6	450.7	1.50	36.6%
	295.4	432.7	1.46	28.8%
400°C	221.6	391.1	1.76	32.0%
	205.9	373.1	1.81	39.2%
500°C	220.1	344.5	1.57	31.9%
	164.1	236.0	1.44	36.2%
	177.6	256.7	1.45	34.5%
600°C	165.1	184.2	1.12	33.3%
	133.7	159.2	1.19	36.0%
	116.3	150.3	1.29	33.1%
700°C	146.0	171.1	1.17	28.7%
	83.5	103.9	1.24	35.0%
	58.7	101.2	1.72	36.3%
800°C	57.8	106.4	1.84	41.1%
	38.5	52.0	1.35	45.3%
	32.2	64.9	2.02	57.4%
	23.3	64.9	2.78	56.1%

2.2 SM355(SM490) 강재의 고온시험

Fig. 7.은 SM355 강재의 각 온도에 따른 대표적인 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 20℃와 400℃의 곡선의 항복강도 및 인장강도의 차이보다 400℃와 500℃의 곡선의 차이가 명확하게 발생하였으며, 고온일수록 큰 차이를 보여준다. Fig. 8.은 각 온도에서의 파괴형상을 보여준다.

Table 3은 SM355강재의 항복강도, 인장강도, 연신율의 변화 추이를 정리하였다. 항복강도는 0.2% offset법을 통해 산정하였다. 고온일수록 기계적인 특성은 점차 낮아는 경향을 보였다. 연신율 또한 점차 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

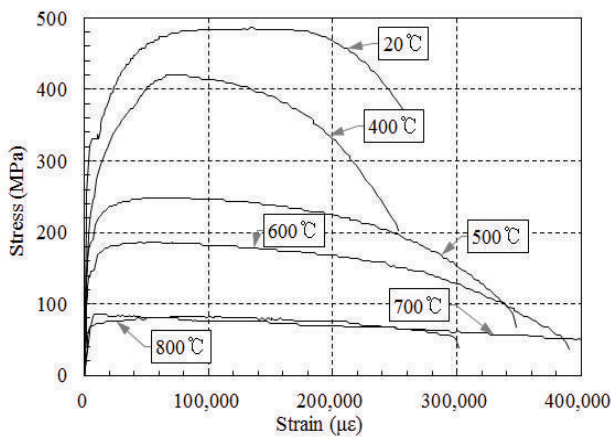


Fig. 7. Stress-strain relationship of SM355(SM490) at elevated temperature



Fig. 8. Failure shape of SM355 (SM490) at elevated temperature

Table 3. Tensile test results of SM355 (SM490) grade steel

Temperature (°C)	Yield strength $f_{y,\theta}$ (MPa)	Tensile strength $f_{u,\theta}$ (MPa)	$f_{u,\theta}/f_{y,\theta}$	Elongation (%)
20	310.1	486.8	1.57	26.0%
	317.8	476.6	1.50	28.4%
	321.7	474.1	1.47	38.3%
400	222.3	419.6	1.89	25.3%
	228.7	435.1	1.90	28.5%
	252.7	391.1	1.55	29.0%
500	179.6	248.8	1.39	34.8%
	209.7	264.3	1.26	35.6%
	156.1	217.6	1.39	40.3%
600	141.0	186.7	1.32	39.1%
	138.2	155.7	1.13	36.0%
	107.1	155.7	1.45	41.5%
700	85.6	85.7	1.00	39.3%
	75.4	98.6	1.31	34.8%
	55.5	83.1	1.50	39.8%
800	70.0	83.1	1.19	30.2%
	34.8	83.0	2.38	35.1%
	36.3	64.9	1.79	42.3%

3. 국내외 연구에서의 고온특성

3.1 국내 연구

국내에서는 구조용 강재와 용접용 강재를 대상으로 고온 시 기계적 특성의 데이터베이스 구축을 위한 연구를 수행해 왔으며, 지속적으로 개발되고 있는 고강도강과 내화 강재에 대한 고온특성 연구를 수행하고 있다. 하지만 내화성능 설계에 직접적으로 활용되지는 못하고 있으며, 이를 위해서는 추가적인 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구의 대상인 SS275 (SS400), SM355(SM490) 강재의 고온특성은 Kwon(2007)^[11]의 연구와 비교하며, 식 (1), (2)는 SS275 강재, 식 (3), (4)는 SM355 강재의 탄성계수와 항복강도의 회귀식이다.

$$E_T = \begin{cases} 210,000 & T \leq 200^\circ\text{C} \\ -257.89 \times T + 261,126 & 200^\circ\text{C} \leq T \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{y,T} = \begin{cases} 240 & T \leq 200^\circ\text{C} \\ -0.31 \times T + 294.72 & 200^\circ\text{C} \leq T \end{cases} \quad (2)$$

$$E_T = \begin{cases} 210,000 & T \leq 200^\circ\text{C} \\ -259.9 \times T + 264,385 & 200^\circ\text{C} \leq T \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{y,T} = \begin{cases} 330 & T \leq 200^\circ\text{C} \\ -0.48 \times T + 452.88 & 200^\circ\text{C} \leq T \end{cases} \quad (4)$$

3.2 Eurocode^[5]

유럽에서는 온도에 따른 감소계수(k : Reduction factor)의 적용이 가능한 응력-변형도 곡선을 제시하고 있으며 각 감소계수는 비례한도, 탄성계수, 유효 항복강도를 포함한다. Table 4는 강재의 탄성계수, 유효 항복강도와 인장강도의 감소계수를 나타낸다. 온도의 사이 값은 선형보간을 통해서 결정되며, 제시된 곡선은 300°C까지는 인장강도가 항복강도의 1.25배의 값을 가지며, 400°C 이후 항복강도와 인장강도가 동일한 모델로 인장강도의 감소 또한 동일한 것으로 나타난다.

Table 4. Reduction factors for steel at elevated temperatures

Steel Temperature θ_a	Reduction factors	
	Linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	Effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$ $(f_{u,\theta}/f_{y,\theta})^*$
20°C	1.000	1.000 (1.25)
100°C	1.000	1.000 (1.25)
200°C	0.900	1.000 (1.25)
300°C	0.800	1.000 (1.25)
400°C	0.700	1.000 (1.00)
500°C	0.600	0.780 (1.00)
600°C	0.310	0.470 (1.00)
700°C	0.130	0.230 (1.00)
800°C	0.090	0.110 (1.00)
900°C	0.0675	0.060 (1.00)
1,000°C	0.0450	0.040 (1.00)
1,100°C	0.0225	0.020 (1.00)
1,200°C	0.0000	0.000 (1.00)

* When $\theta_a \leq 300^\circ\text{C}$, $f_{u,\theta} = 1.25f_y$
 When $300^\circ\text{C} \leq \theta_a < 400^\circ\text{C}$, $f_{u,\theta}/f_{y,\theta} = 2 - 0.0025\theta_a$
 When $\theta_a > 400^\circ\text{C}$, $f_{au,\theta} = f_{ay,\theta}$

3.3 미국 기준^{[12],[14]}

미국에서는 2000년도 이전부터 ASCE^[12]에서 온도변화에 따른 강재를 포함한 콘크리트, 목재를 대상으로 기계적 특성의 변화에 대해 기준으로 제시하였다. 식 (5)와 (6)은 강재의 탄성계수와 항복강도의 변화를 나타내며, 인장강도의 변화에 대한 내용은 포함되지 않았다. 2000년 이후 세계무역센터의 붕괴 원인을 파악

하는 과정에서 강재의 온도 변화에 따른 특성의 변화에 주목하게 되었으며, 세계무역센터에 사용된 강종을 대상으로 고온시험을 통해 강재의 고온특성을 데이터화 및 모델화 하였다^[13].

$$E_T = \begin{cases} \left[1.0 + \frac{T}{2,000 \ln\left(\frac{T}{1,100}\right)} \right] E_o & T \leq 600^\circ\text{C} \\ \left(\frac{690 - 0.69T}{T - 53.5} \right) E_o & 600^\circ\text{C} < T \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{yT} = \begin{cases} \left[1.0 + \frac{T}{900 \ln\left(\frac{T}{1,750}\right)} \right] f_{yo} & T \leq 600^\circ\text{C} \\ \left(\frac{340 - 0.34T}{T - 240} \right) f_{yo} & 600^\circ\text{C} < T \end{cases} \quad (6)$$

또한 AISI^[14]에서는 Table 5와 같이 각 온도에 따른 탄성계수, 항복강도 및 인장강도와 볼트의 강도의 감소계수를 제시하여 화재설계에 활용하고 있다.

Table 5. Properties of steel at elevated temperatures

Steel Temperature θ_a	Coefficients		
	Elastic modulus $k_E = E(T)/E$	Yield stress $k_y = F_y(T)/F_y$	Tensile stress $k_u = F_u(T)/F_y$
20°C	1.00	**	**
93°C	1.00	**	**
200°C	0.90	**	**
320°C	0.78	**	**
400°C	0.70	1.00	1.00
430°C	0.67	0.94	0.94
540°C	0.49	0.66	0.66
650°C	0.22	0.35	0.35
760°C	0.11	0.16	0.16
870°C	0.07	0.07	0.07
980°C	0.05	0.04	0.04
1,100°C	0.02	0.02	0.02
1,200°C	0.00	0.00	0.00

*When θ_a is 150°C, $k_b=0.95$ and θ_a is 480°C, $k_b=0.59$

**Use ambient properties

3.4 일본 기준^[15]

일본건축학회에서 발행한 강구조내화 설계지침에서는 강재의 고온 유효항복강도에 따른 강도감소계수, 고온 시 강재의 응력-변형도관계 및 고강도 볼트용 강재의 고온인장강도에 따른 감소계수를 제시하고 있다. 일본에서 제시하는 항복강도감소계수의

경우 각 강재 별 감소계수를 달리 적용하고 있다. 식 (7)은 강재온도 T 에서의 유효항복응력을 나타내며, $k(T)$ 를 사용하는 강재의 경우 사용강재의 고온인장실험을 수행하여 얻어진 유효항복강도의 평균치를 0.9배 해서 얻는 값이 $F \times k(T)$ 를 밑돌지 않음을 확인해야 한다. 식 (8)은 강재의 고온 유효항복강도에 따른 강도감소계수를 나타낸다.

$$\sigma_y(T) = F \times k(T) \quad (7)$$

$$k(T) = \begin{cases} 1 & : T_{RT} \leq T \leq T_1 \\ 1 - \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} & : T_1 \leq T \leq T_2 \end{cases} \quad (8)$$

Table 6. Equation for each type of steel

Steel	SS400 SN400 BCP235	SM490 SN490 BCP325	BCR295*
F [MPa]	235**	325**	295
T_1 [°C]	300	250	300
T_2 [°C]	750	700	750

* The Japan iron and steel federation product

** When the plate thickness is more than 40 mm, SS400 and SN400 is 215, SM490 and SN490 is 295.

4. 고온특성 비교

고온 인장시험을 통한 SS275, SM355 강재의 고온특성과 국내 연구 및 국외기준을 비교하였다. 국내의 경우 기준으로 제시된 고온특성 데이터가 없기 때문에 3.1장의 국내연구 데이터를 참조하였으며, 국외기준은 3장에 정리한 내용을 고려하였다. Fig. 9.은 SS275, SM355 강재의 고온 인장시험에 의한 항복강도의 감소계수를 나타낸다. 400°C와 500°C에서 Eurocode와 AISC의 경우 가장 큰 차이를 나타냈으며, 600°C 이상에서는 일본기준과 차이가 나타났다. 이 외에는 국내연구 및 국외기준에 잘 부합하는 것으로 나타났다. Fig. 10.는 SS275, SM355 강재의 고온 인장시험에 의한 인장강도의 감소계수를 나타낸다. 기존 연구에서 인장강도에 대한 감소계수는 AISC에서 다루고 있으며, 항복강도 감소계수와 동일한 계수를 사용하며 실험에서의 인장강도 감소계수는 고온에서의 인장강도를 상온에서의 항복강도로 나누어 산정하였다. 400°C에서는 기준과 큰 차이가 났으나 500°C 이상에서는 기준에 잘 부합하는 것으로 나타났다. Table 7은 고온에서의 항복강도, 인장강도와 탄성계수를 상온을 기준으로 한 비로 나타내었다.

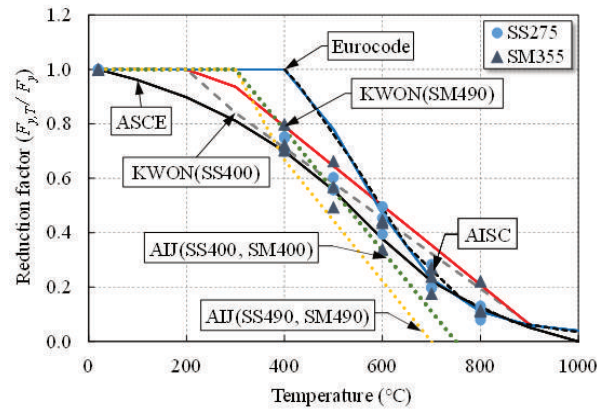


Fig. 9. Reduction factors of tests and standards for yield strength

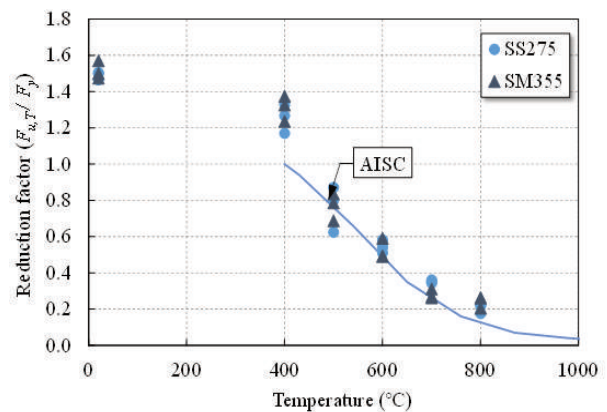


Fig. 10. Reduction factors of tests and standards for ultimate strength

Table 7. Reduction factors of tensile test results at elevated temperatures

Temperature (°C)	SS275		SM355	
	k_y	k_u	k_y	k_u
20	1.0	1.50	1.0	1.53
400	0.75	1.33	0.70	1.33
	0.70	1.27	0.72	1.37
	0.75	1.17	0.80	1.24
500	0.56	0.80	0.57	0.79
	0.60	0.87	0.66	0.84
	0.56	0.63	0.49	0.69
600	0.45	0.54	0.45	0.59
	0.39	0.51	0.44	0.49
	0.50	0.58	0.34	0.49
700	0.28	0.35	0.27	0.27
	0.20	0.34	0.24	0.31
	0.20	0.36	0.18	0.26
800	0.13	0.18	0.22	0.26
	0.11	0.22	0.11	0.26
	0.08	0.22	0.11	0.21

5. 결 론

본 연구는 철골구조에서 구조용 및 용접용으로 주로 사용되는 SS275, SM355 강재에 대한 고온특성을 파악하기 위해 고온인장 시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 실험한 모든 강종은 고온에 도달할수록 항복강도, 인장강도 및 탄성계수의 감소가 명확하게 나타났다.

2) 항복강도감소계수는 SS275, SM355강재 모두 Eurocode와 AISC 기준과 비교 시 500℃ 이하에서 더 낮게 나타났으며 600℃ 이후에서 그 경향이 비슷하게 나타났다. 국내논문과 비교 시 600℃까지 유사한 경향을 나타냈지만 700℃ 이상에선 약 0.1 정도의 오차를 보였다. ASCE와 비교 시 다른 기준들에 비해 가장 유사하게 나타났다.

3) 인장강도감소계수의 경우 AISC 기준과 비교 시 온도에 따른 감소계수 경향이 매우 유사하게 나타났다.

4) SS275, SM355 강재 모두 고온일수록 기계적인 특성은 점차 낮아지는 경향을 보였다. SS275강재의 연신율은 큰 차이는 없었으나 800℃이상에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다. SM355강재의 연신율 또한 점차 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

5) 고온 400℃부터 600℃ 사이의 물성치 변화가 가장 심하게 나타났으며, 각 온도에서 항복강도감소계수의 평균값으로 산정하였을 때 응력비 0.5에 도달한 온도는 SS275강재는 558.71℃, SM355 강재는 544.41℃로 나타났다.

6) 국외 기준을 활용한 화재화중비와 한계온도 설정은 SS275, SM355강종에 대해 적용 가능할 것으로 파악된다. 하지만 계속 개발되는 신강종과 고강도강에 대해서 국내 추가적인 연구를 통해 국내 강종을 위한 기준마련이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임(18TBIP-C144420-01).

참고문헌(References)

- [1] 김홍열, 김형준(2012) 강구조 내화성능설계 방법, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제24권, 제6호, pp.7-10.
Kim, H.-Y., and Kim, J.-H. (2012) Performance Based Fire Resistant Design Method for Steel Structure, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.7-10 (in Korean).
- [2] 민병렬 등(2000) 내화구조기준 개정연구(II): 최종보고서, 연구보고서, 한국건설기술연구원.
Min, B.-Y., et al. (2000) *A Study on the Revision of Fire Resistant Standard (II): The Final Report, Research Report*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (in Korean).
- [3] 김화중(2001) 철골구조물의 내화기술, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제13권, 제4호, pp.22-30.
Kim, H.-J. (2001) Fire-Resistance Technology in Structural Steel buildings, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.13, No.4, pp.22-30 (in Korean).
- [4] 최승관 등(2007) 구조물 성능기반 화재거동 해석 및 설계기술 연구(I), 연구보고서, 한국건설기술연구원.
Choi, S.-K., et al. (2007) *An Advanced Study on Performance-Based Fire Safety of Structures in Fire (I), Research Report*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (in Korean).
- [5] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1993-1-2: 2005), Belgium.
- [6] 권인규, 지남용(2001) SS400 강재의 고온 시 기계적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집- 구조계, 대한건축학회, 제17권, 제5호, pp.89-96.
Kwon, I.-K., and Jee, N.Y. (2001) Experimental Study on the Mechanical Properties of Structural Steel (SS400) at High Temperature, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.17, No.5, pp.89-96 (in Korean).
- [7] 권인규(2003) 구조용 강재의 내화 특성에 관한 실험적 연구, 박사학위논문, 한양대학교.
Kwon, I.-K. (2003) *Experimental Study on the Fire Resistant Performance of Structural Steels*, Ph.D. Dissertation, Hanyang University, Korea (in Korean).
- [8] 국가기술표준원(2003) 금속재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2003).
Korean Agency for Technology and Standards (2003)

- Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).
- [9] 국가기술표준원(2002) 철강 재료 및 내열 합금의 고온 인장 시험 방법 (KS D 0026: 2002).
Korean Agency for Technology and Standards (2002) *Method of Elevated Temperature Tensile Test for Steels and Heat-Resisting Alloys* (KS D 0026: 2002), Korea (in Korean).
- [10] American Society for Testing Materials (2009) *Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Test of Metallic Materials* (ASTM E21-09), USA.
- [11] 권인규(2007) 고열 환경에서의 구조용 강재 특성 데이터베이스 구축, 한국화재소방학회 논문지, 한국화재소방학회, 제21권, 제3호, pp.47-55.
Kwon, I.-K. (2007) Derivation of the Mechanical Properties of Structural Steels at High Temperatures, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, KIFSE, Vol.21, No.3, pp.47-55 (in Korean).
- [12] Lie, T.T. (1992) *Structural Fire Protection (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78)*, American Society of Civil Engineering, USA.
- [13] Luecke, W.E., Banovic, S.W., and McColskey, J.D. (2011) *High-Temperature Tensile Constitutive Data and Models for Structural Steels in Fire*, NIST Technical Note 1714, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [14] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [15] 日本建築學會(2017) 鋼構造耐火設計指針, 日本建築學會, 日本 Architectural Institute of Japan (2017) *AIJ Recommendations for Fire Resistant Design of Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).

기 호(Notation)

f_y : 상온에서 재료의 항복강도 ($=f_{yo}, F$), N/mm²
 f_u : 상온에서 재료의 인장강도, N/mm²
 E : 상온에서 재료의 탄성계수 ($=E_a, E_o$), N/mm²
 $f_{y,\theta}$: 유효항복강도; 고온에서 재료의 항복강도 ($=F_{y,T}, f_{yT}F_y(T), \sigma_y(T)$), N/mm²
 $f_{u,\theta}$: 유효인장강도; 고온에서 재료의 인장강도 ($=F_{u,T}, F_u(T)$), N/mm²
 $E_{a,\theta}$: 유효탄성계수; 고온에서 재료의 탄성계수 ($=E_T, E(T)$), N/mm²
 k_y : 항복강도 감소계수 ($=k_{y,\theta}, k(T)$)
 k_u : 인장강도 감소계수
 $k_{E,\theta}$: 탄성계수 감소계수 ($=k_E$)
 T : 강재온도, °C
 T_{RT} : 상온 (20°C를 대표치로 함), °C
 T_1 : 항복강도가 상온 시의 값을 유지하는 상한온도, °C
 T_2 : 항복강도가 0이 되는 온도, °C

요 약 : 최근 건축물의 형태와 특성을 고려하여 화재성장에 따른 내화성능을 가진 부재를 선택하여 적용하는 내화성능설계법을 도입하고 있다. 그러나 국내의 내화 성능설계에서는 주로 Eurocode^[5]에 기반한 구조부재의 재료적 특성을 따르고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 강구조물에 주로 사용되는 강재(SS275(SS400), SM355(SM490))에 대해 고온에 따른 기계적 물성치를 도출하고자 실험을 수행하였다. 고온인장시험은 상온, 400도, 500도, 600도, 700도, 800도에 대해 진행하였고, 시험방법은 ASTM 21M-09^[10]에 따라 수행되었다. 실험결과, SS275(SS400), SM355(SM490)강재 모두 온도의 증가에 따라 항복강도, 인장강도, 탄성계수의 감소가 명확하게 나타났다. 또한, 시험편의 고온에 따른 강도의 감소는 500°C 이하에서는 Eurocode^[5]와 차이가 크게 나타났으며, 600°C 이상에서는 일본 강구조내화설계지침에서 제시하는 강도감소계수와 차이가 나타났다. 그 외의 온도에서는 국내연구^[11], ASCE^[12], AISC^[14]에서 제시하는 강도감소계수와 국외연구결과와 비슷한 경향을 보였다.

핵심용어 : 구조용 강재, 고온, 열특성, 기계적특성, 감소계수