

고열 환경에서의 구조용 강재 특성 데이터베이스 구축 Derivation of the Mechanical Properties of Structural Steels at High Temperatures

권인규

In-Kyu Kwon

강원대학교 소방방재학부
(2007. 4. 25. 접수/2007. 8. 30. 채택)

요약

화재와 같은 고열환경에서 강구조 건축물의 구조적 붕괴 예측 및 화재피해 건축물의 안전진단 그리고 보수보강을 위해서는 고온에서의 항복강도와 탄성계수 등과 같은 특성치가 반드시 요구된다. 따라서 본 연구에서는 강구조 건축물의 주요 구조부에 적용되는 주요 강종인 일반 구조용 SS 400과 용접 구조용 SM 490을 대상으로 상온에서 100 °C 간격으로 900 °C까지 고온인장시험을 통하여 0.2% 오프셋 항복강도, 1% 오프셋 항복강도, 인장강도 및 탄성계수 등을 측정하였다.

ABSTRACT

The mechanical properties such as 0.2% and 1% offset proof strength and elastic modulus are essential for a structural steel structure when the structure would be evaluated and designed to identify the performance of the structural stability exposed to fire condition. To obtain the mechanical properties for the structural steels at high temperature which are consisted of ordinary and marine ones, the tensile tests at various high temperatures had been conducted with two kinds of specimen of general structural steel SS 400 and welded steel SM 490 at the range of room temperature to 900 °C at interval of 100 °C.

Keywords : Fire design, Fire resistance, Structural steels, Structural stability

1. 서론

건축물 화재로 인한 인명과 재산 등의 피해 예방 및 최소화 노력이 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 건축물의 화재안전 목적을 달성하기 위하여 건축물의 기둥부재, 보부재와 같은 주요 구조부에는 일정 시간 이상의 내화성능 확보가 의무화되고 있으며 이는 각 국가별로 건축법규 또는 빌딩코드에 규정되어 있다.

화재와 같은 고온 환경하에서 건축물의 내화성능 확보 방법은 두 가지로 대별된다. 첫째는 일정 건축물의 규모, 용도 등에 따라 해당 주요 구조부에 요구되는 내화시간을 규정하는 시방적 내화설계 방법과 일정 건축물에 존재하는 가연물의 양, 개구부 크기에 의해 결정되는 화재 크기 및 고온에서의 항복강도, 탄성계수

등을 적용하여 구조적 안정성을 평가하는 공학적 내화설계 방법이 있다. 현재 우리나라에는 건축법 제40조, 건축법 시행령 제2조, 건축물 피난방화구조 등에 관한 규칙 제3조 및 건교부 고시 제 2005-122호 등에 시방적 내화설계 방법을 규정하고 있으나, 공학적 내화설계의 절차 등은 준비되어 있지 않다.

공학적 내화설계는 1960년대부터 스웨덴, 영국 등을 중심으로 개발되기 시작하였으며 강구조 건축물의 화재 시 구조 안전성 평가를 위한 해석적 방법 도출을 위하여 대형 내화실험이 많이 진행되었다. 그 결과, 1991년 뉴질랜드 건축법(building act)과 1992년 호주 빌딩코드가 공학적 내화설계 방법을 채택하였다. 일본은 1999년 건축기준법을 성능기초로 변경하면서 공학적 내화설계를 법제화하였으며, 미국은 빌딩코드의 세계적 표준화를 표방하기 위해서 2000년 IBC와 2003년 NFPA 5000을 제정하면서 공학적 내화설계를

수용하였다.

구조물의 화재 시 안전성 평가 그리고 화재 피해를 입은 구조물의 안전진단 및 보수보강을 위한 내화공학설계에 반드시 요구되는 각종 건축 재료의 고온 기계적 특성은 각국의 건축법규, 빌딩코드 또는 유러코드의 구조 해당부분에 언급되어 있다.

국내에서는 내화공학설계의 적극적 도입을 위한 기반연구를 수행하여 2006년 내화공학설계의 법률적 토대를 구축하였지만 적용을 위한 기술적 자료확보는 아직 미진한 수준이다.

따라서 본 논문에서는 강구조 건축물의 내화공학설계에 반드시 요구되는 고온 기계적 특성 데이터베이스 구축을 목적으로 하고, 강구조 건축물의 주요 구조부를 형성하는 항복강도 330 MPa 이하인 구조용 강재 SS400와 SM490를 범위로 한다.

2. 구조용 강재의 고온 인장 시험

항복강도와 탄성계수 등과 같은 기계적 특성은 온도가 높아짐에 따라 재료 결합이 이완되어 저하하게 된다. 따라서 화재와 같은 고열환경에 노출된 기둥부재와 보부재 등은 급격한 온도상승에 의한 강도저하로 인하여 상부 하중을 지지하지 못하고 구조적 붕괴를 유발할 수 있다. 따라서 부재와 가구의 구조적 붕괴 예측은 구성 재료의 고온에서의 기계적 특성에 따라 결정될 수 있다.

구조용 강재에 대한 고온에서의 기계적 특성 평가 연구는 포스코, 건설교통부 등에서 수행된 연구결과가 있다. 이는 구조용 강재의 허용온도 평가 관점에서 이루어진 것으로써 상온에서 600 °C까지의 온도 범위에 대한 결과이다. 따라서 본 연구에서는 구조적 붕괴를 예측할 수 있도록 0.2%, 1% 윅셀내력, 탄성계수, 인장강도 및 연신율의 데이터베이스 확보를 위하여 상온에서 900 °C까지의 시험을 수행한다.

2.1 SS 400

상온 및 고온 인장시험은 포항산업과학연구원 강구조 실험동에서 수행되었으며, 시험방법은 한국산업규격 KS D 0802(금속재료의 인장시험방법)로 진행되었다. 고온인장 시험에는 항복점, 인장강도, 탄성계수 및 연신율이 측정되었다. 응력-변형도 곡선에서 항복점이 나타나지 않는 부분은 영구 변형률을 적용한 0.2% 윅셀로 평가하였으며, 소성 시 붕괴를 논할 때 사용되는 1% 윅셀로 유효내력을 평가하였다. 시험에는 900 °C까지 승온이 가능한 고온챔버와 탄성계수를 측

정하기 위해 고온 신률계(extensometer)가 사용되었다.

건축용 내화강재의 고온인장시험은 모재 표면으로부터 강판 두께의 1/4위치 및 나비의 가장자리에서 나비의 1/4위치에서 채취하였다. 또한 시편 제작 시의 열영향을 최소화하기 위해서 각 시편은 최소 5 cm 이상 거리를 확보하였으며, 압연방향으로 채취하였다. 시험은 상온 및 고온(100 °C 간격으로 100 °C~900 °C) 3개씩 각각 수행하였다. 건축용 내화강재의 상온 및 고온인장시험에 적용된 재하속도 및 온도한계는 Table 1과 같다.

Table 1. Loading speed for tests

구분	재하속도		온도한계
	항복점까지	항복점부터	
상온	17 N/mm ² ·sec	20%/min	-
고온	7 N/mm ² ·sec	7.5%/min	300 °C~600 °C = 3 °C 600 °C~800 °C = 4 °C 시험온도 도달 후 15분 평형상태 유지

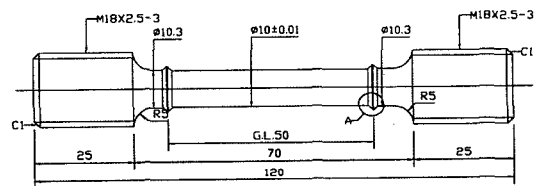


Figure 1. Dimension of specimen.

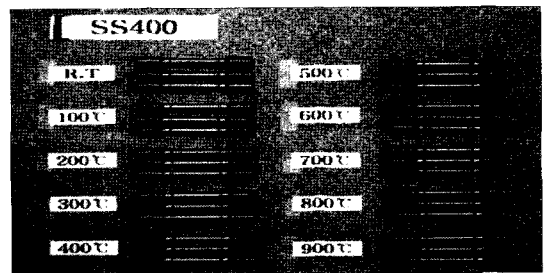


Figure 2. Specimens before tensile tests.

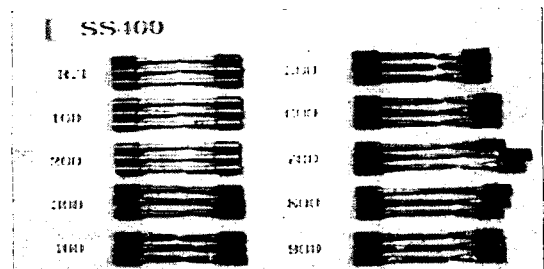


Figure 3. Specimens after tensile tests.

Table 2. Results of mechanical properties according to temperatures(SS 400)

온도(°C)	수량	항복점(MPa)		인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)	연신율(%)
		0.2% 오�셋	1.0% 오�셋			
상온	1	276.69	277.94	459.49	194400.70	35.12
	2	277.69	288.68	459.99	222127.64	34.76
	3	287.68	277.44	456.49	226823.05	36.78
	평균	280.69	281.35	458.66	214783.80	35.55
100	1	248.97	211.00	420.03	207126.47	32.34
	2	249.72	250.22	420.78	214007.77	33.67
	3	244.23	252.72	417.04	204905.27	33.93
	평균	247.64	237.98	419.28	208679.83	33.31
200	1	232.99	267.45	495.70	183374.85	23.03
	2	236.99	235.99	504.94	180832.97	22.74
	3	238.24	268.70	497.70	203820.66	22.32
	평균	236.07	257.38	499.45	189342.83	22.70
300	1	180.80	261.46	496.95	182021.54	32.49
	2	182.55	262.96	493.20	191992.90	30.96
	3	186.04	262.96	502.19	184443.77	33.83
	평균	183.13	262.46	497.45	186152.73	32.43
400	1	172.31	241.98	400.31	226557.29	31.50
	2	176.30	246.23	402.05	173770.25	33.45
	3	176.55	244.48	408.55	177203.55	35.98
	평균	175.06	244.23	403.64	192510.36	33.65
500	1	169.06	209.27	258.21	103963.85	44.69
	2	159.32	207.27	266.45	158102.22	38.56
	3	169.81	221.50	286.43	140698.43	39.12
	평균	166.07	212.68	270.37	134254.50	40.79
600	1	116.87	141.34	159.32	100153.96	59.95
	2	125.36	146.84	162.57	125228.49	62.52
	3	116.12	142.84	162.82	108462.13	62.10
	평균	119.45	143.67	161.57	111281.53	61.52
700	1	73.92	81.16	83.66	41848.35	58.59
	2	56.19	61.43	65.43	42979.64	93.38
	3	60.18	66.18	67.68	50905.35	110.93
	평균	63.43	69.59	72.25	45244.45	87.63
800	1	36.71	49.20	59.93	60419.53	75.60
	2	37.21	19.69	59.18	54192.23	64.36
	3	35.46	47.45	59.68	56178.36	55.58
	평균	36.46	48.78	59.60	56930.04	65.18
900	1	28.97	33.21	51.69	41920.13	55.37
	2	27.97	31.71	37.71	34184.38	37.55
	3	23.44	25.72	29.97	39611.07	36.22
	평균	26.79	30.22	39.79	38571.86	43.05

고온인장시편의 제원은 Figure 1과 같고, SS 400 강재의 고온 인장 시험 전·후의 시편 모양은 Figure 2~3과 같다. 상온 및 고온 인장시험 결과는 Table 2와 같고, 각각의 온도별 응력-변형도 곡선은 Figure 4~5에 제시하였다. 또한, 온도변화에 따른 각종 기계적 특성의 변화는 Figure 6~10과 같다.

상온에서 100 °C 간격으로 900 °C까지 인장시편을 각각 승온한 후 수행된 고온인장시험의 항복강도와 탄성계수의 온도구간별 회귀식은 Table 3과 같으며, 항

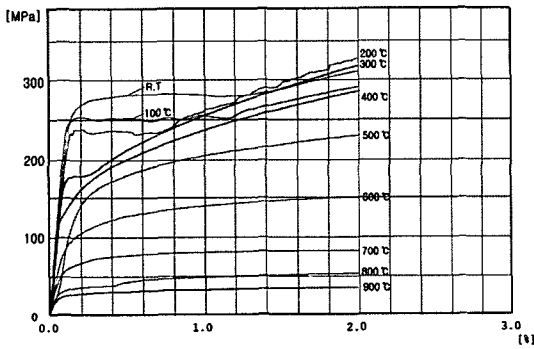


Figure 4. Stress-strain relation with temperatures (2% strain).

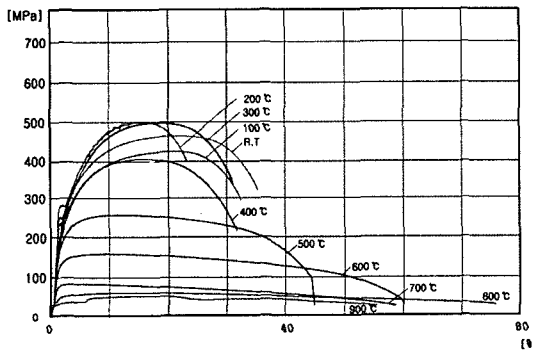


Figure 5. Stress-strain relations with temperatures.

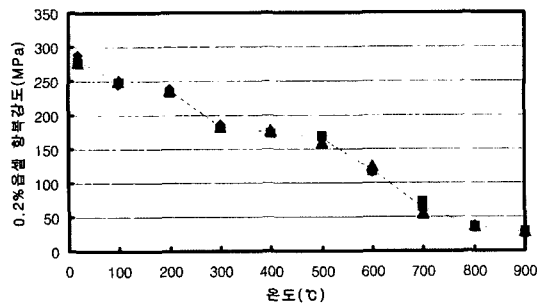


Figure 6. Patterns of yield strength (0.2% offset strength).

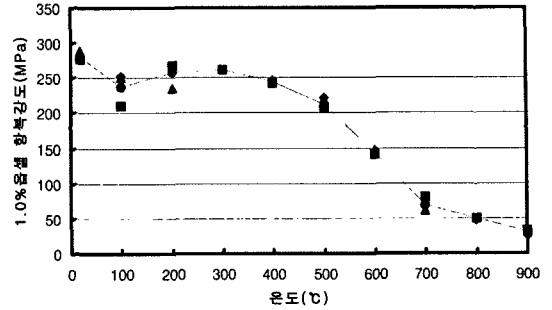


Figure 7. Patterns of effective strength (1% offset strength).

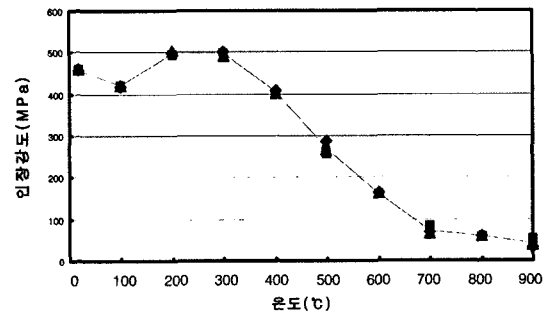


Figure 8. Patterns of tensile strength with temperatures.

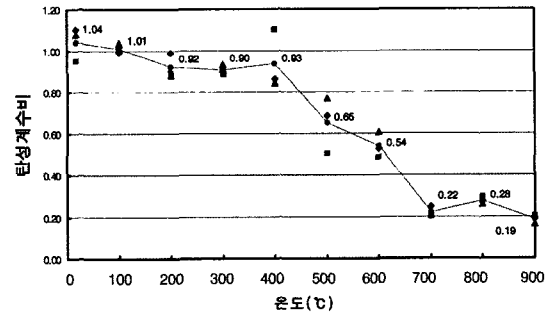


Figure 9. Patterns of residual elastic modulus with temperatures.

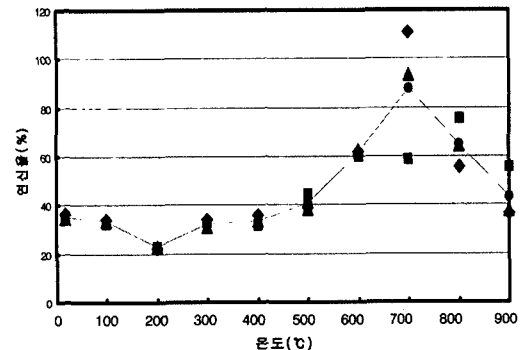


Figure 10. Patterns of elongation with temperatures.

Table 3. Regression equations for mechanical properties(SS 400)

구분	온도구간	회귀식	비고
항복강도	T ≤ 200 °C	상온값	240 MPa
	200 °C < T	-0.31×온도+294.72	R ² =0.96
탄성계수	T ≤ 200 °C	상온값	210,000 MPa
	200 °C < T	-257.89×온도+261126	R ² =0.90

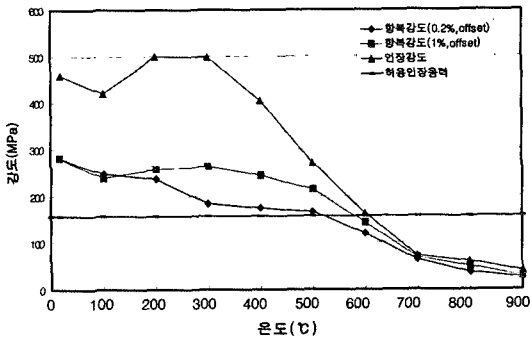


Figure 11. Summation of mechanical properties with temperatures.

복강도(0.2%, 1% 변형도), 인장강도 및 허용인장응력을 종합하면 Figure 11과 같다. 상온에서 200 °C 구간에서의 항복강도와 인장강도는 상온값과 거의 유사한 값을 보였으므로 상온에서 200 °C까지의 온도 구간과 200 °C 이상 900 °C 구간으로 나누어 회귀식을 제시하는 것이 향후 고온 특성치를 이용한 구조 안전성 예측에 신뢰성을 높일 것이라 판단되었다.

SS 400강종의 기계적 특성 종합인 Figure 11에서 0.2% 오프셋에 의한 항복강도와 인장강도는 기준 240 MPa와 400 MPa를 초과하고 있으며, 고온화될수록 1% 오프셋에 의한 항복강도가 0.2% 오프셋 항복강도보다 강도 저감율이 낮게 나타났다. 따라서 0.2% 오프셋 항복

강도에 의한 부재와 가구의 구조 안전성은 1% 오프셋에 의한 항복강도보다 다소 높은 안전율을 가질 수 있을 것으로 판단되었다. 본 고온인장시험에서 SS 400은 500 °C 이상에서 허용인장응력을 초과하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행된 SS 400강종의 항복강도와 탄성계수와 일본의 安部 武雄이 수행한 동종간의 항복강도와 탄성계수를 Table 4에 제시하였다.

Table 4에서 비교된 바와 같이 고온에서의 항복강도와 탄성계수값 그리고 각각의 저감비율에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

2.2 SM 490

용접구조용 강재인 SM 490의 상온 및 고온인장시험 결과는 Table 5와 같고, 각각 온도에 대한 응력-변형도 곡선은 Figure 12~13과 같다. 또한 온도변화에 따른 각종 기계적 특성의 변화는 Figure 14~18에 나타내었다.

본 시험결과를 토대로 도출한 SM 490의 회귀식은 Table 6과 같으며, 시험결과를 종합하여 Figure 19에 제시하였다. 상온과 200 °C 온도구간에서 항복강도와 탄성계수는 큰 변화가 없었으므로 본 구간에서의 회귀식은 상온의 값을 제시하였고, 200 °C 이후는 각각의 온도에 대한 결과를 이용하여 회귀식을 산정하였다.

SM 490의 고온 시 항복강도와 인장강도 변화를 나

Table 4. Comparison of result with Japanese one

온도(°C)	본 연구결과		일본	
	항복강도(Mpa)	탄성계수(Mpa)	항복강도(Mpa)	탄성계수(Mpa)
상온	280.69	214,783.8	243.92	210,700
100	247.64	208,679.83	232.16	198,940
200	236.07	189,342.83	218.74	202,860
300	183.13	186,152.73	183.16	182,280
400	175.06	192,510.36	161.90	183,260
500	166.07	134,254.5	151.61	156,800
600	119.45	111,281.53	102.61	145,040

Table 5. Results of mechanical properties according to temperatures(SM 490)

온도 (°C)	수량	항복점(MPa)		인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	연신율 (%)
		0.2% 윽셀	1.0% 윽셀			
상온	1	422.78	419.04	588.10	239890.36	30.54
	2	412.54	409.30	574.36	205869.26	30.64
	3	401.80	413.54	578.86	194517.12	30.16
	평균	412.38	413.96	580.44	213425.58	30.45
100	1	380.33	379.58	537.65	184812.50	30.12
	2	377.08	378.83	535.91	176726.79	29.58
	3	379.83	383.32	539.65	189992.35	30.09
	평균	379.08	380.58	537.74	184843.88	29.93
200	1	341.12	365.10	527.66	208683.76	27.09
	2	331.88	370.34	524.42	208788.69	25.31
	3	352.86	381.33	538.65	212725.06	26.08
	평균	341.95	372.25	530.25	210065.84	26.16
300	1	294.17	375.33	530.03	179643.43	28.88
	2	285.93	379.83	549.39	180875.14	28.39
	3	295.42	382.58	552.39	185333.23	30.55
	평균	291.18	379.25	543.94	181950.60	29.27
400	1	278.94	355.86	490.46	173268.15	31.70
	2	289.43	365.59	494.20	151060.09	31.95
	3	285.43	357.60	467.98	165978.90	29.45
	평균	284.60	359.68	484.21	163435.71	31.03
500	1	257.96	323.39	391.82	153349.94	38.48
	2	245.98	304.41	365.59	151414.11	41.04
	3	243.23	301.92	360.10	141770.29	40.31
	평균	249.06	309.91	372.50	148844.78	39.94
600	1	171.81	206.52	219.26	109600.67	48.51
	2	177.55	217.01	232.74	110549.95	51.20
	3	171.56	206.77	222.25	94536.64	49.51
	평균	173.64	210.10	224.75	104895.76	49.74
700	1	106.38	116.12	117.37	73515.28	63.86
	2	115.12	126.86	128.86	76029.11	60.50
	3	109.38	125.86	127.11	72390.36	56.57
	평균	110.29	122.95	124.44	73978.25	60.31
800	1	52.44	62.43	70.17	50597.22	87.00
	2	54.94	64.43	70.92	55474.05	73.20
	3	53.69	65.43	70.92	57530.20	97.37
	평균	53.69	64.10	70.67	54533.83	85.86
900	1	28.72	32.96	54.44	40121.11	69.44
	2	26.22	30.47	52.94	22230.91	60.92
	3	24.47	28.72	36.21	39090.34	56.60
	평균	26.47	30.72	47.86	33814.12	62.32

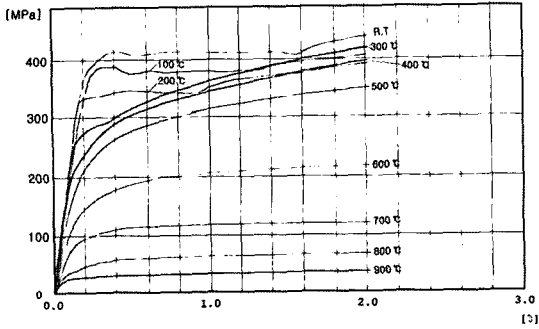


Figure 12. Stress-strain relation with temperatures (2% strain).

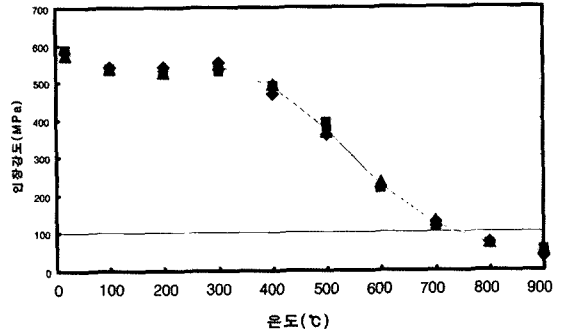


Figure 16. Patterns of tensile strength with temperatures.

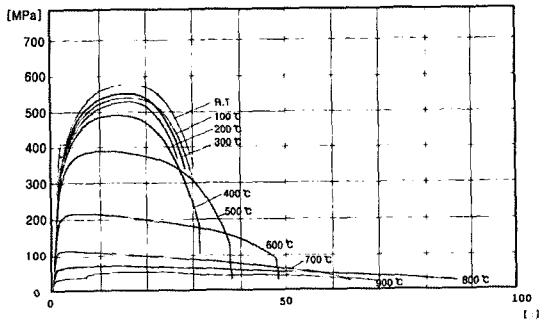


Figure 13. Stress-strain relations with temperatures.

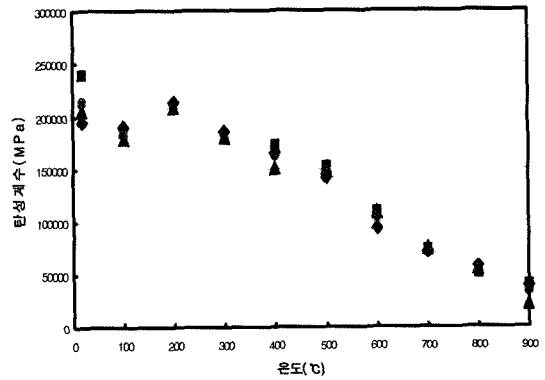


Figure 17. Patterns of elastic modulus with temperatures.

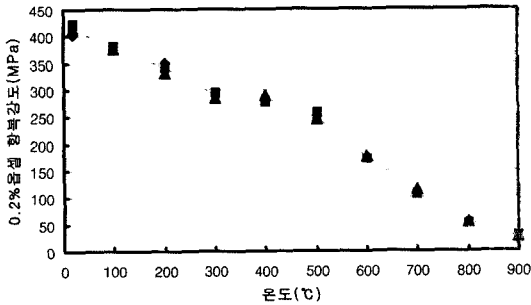


Figure 14. Patterns of yield strength (0.2% offset strength).

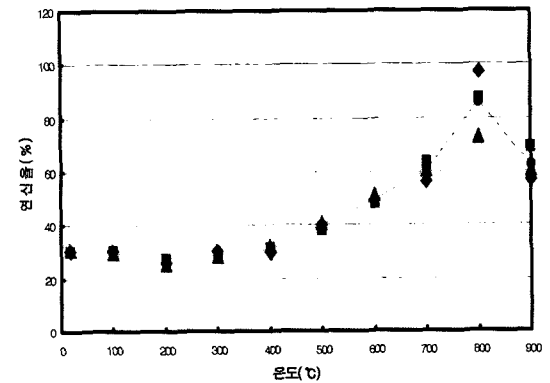


Figure 18. Patterns of elongation with temperatures.

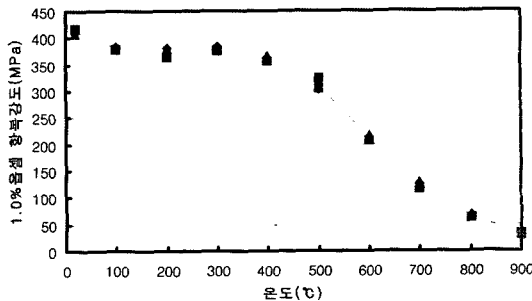


Figure 15. Patterns of effective strength (1% offset strength).

타내고 있는 Figure 19에서 0.2% 오프셋에 의한 항복강도와 인장강도는 기준 330 MPa와 490 MPa를 초과하고 있으며, SS 400과 동일하게 고온화될수록 1% 오프셋에 의한 항복강도가 0.2% 오프셋 항복강도보다 강도 저감률이 낮게 나타났다. 따라서 0.2% 오프셋 항복강도를 적용한 부재와 가구의 구조 안전성은 1% 오프셋에 의한 항복강도보다 다소 높은 안전율을 가질 수 있을 것으

Table 6. Regression equations for mechanical properties (SM 490)

구분	온도구간	회귀식	비고
항복강도	$T \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	상온값	330 MPa
	$200\text{ }^{\circ}\text{C} < T$	$-0.48 \times \text{온도} + 452.88$	$R^2=0.97$
탄성계수	$T \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	상온값	210,000 MPa
	$200\text{ }^{\circ}\text{C} < T$	$-259.9 \times \text{온도} + 264385$	$R^2=0.99$

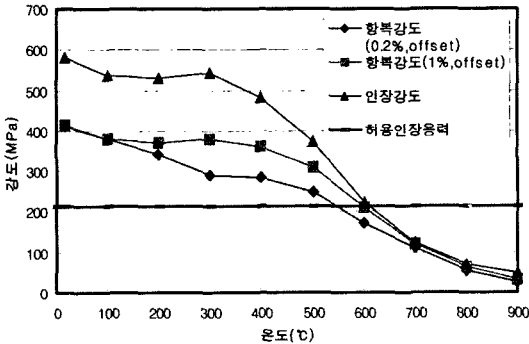


Figure 19. Summation of mechanical properties with temperatures.

로 판단되었다. 본 시험에서도 구조용 강재는 500 °C 이상에서 허용인장응력을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 일반 구조용 강재의 허용온도는 영국과 미주 지역에서 활용되는 500 °C~550 °C의 범위로 판단되었다.

본 연구에서의 수행된 SM 490강종의 고온 항복강도, 탄성계수와 일본의 安部 武雄이 수행한 동종간의 항복강도와 탄성계수를 Table 7에 제시하였다.

Table 7에서 비교된 바와 같이 항복강도는 일본의 결과에 비해서 다소 높은 수치를 보이고 있고, 탄성계수값은 다소 낮은 특성을 보이고 있으나 대체적으로 유사한 결과를 보이고 있다.

Table 7. Comparison of result with Japanese one

온도 (°C)	본 연구결과		일본	
	항복강도(Mpa)	탄성계수(Mpa)	항복강도(Mpa)	탄성계수(Mpa)
상온	412.38	213,425.58	350.06	210,700
100	379.08	184,843.88	333.79	210,700
200	341.95	210,065.84	304.49	196,980
300	291.18	181,950.6	253.62	192,080
400	284.6	163,435.71	246.18	194,040
500	249.06	148,844.78	215.60	152,880
600	173.64	104,865.76	149.45	136,220

3. 결 론

화재와 같은 고온 환경하에서의 강구조 건축물의 구조적 안전성 평가를 위해서는 고온 기계적 특성 자료가 반드시 요구된다. 따라서 강구조 건축물에서 주요 강종인 SS 400강종과 SM 490강종을 대상으로 상온에서 100 °C 간격으로 900 °C까지의 항복강도, 탄성계수 및 인장강도 등을 측정하는 고온인장시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) SS 400강재와 SM 490강재의 고온에서의 기계적 특성(항복강도, 탄성계수, 인장강도 및 연신율)을 평가하였으며, 각각의 강종에 대해서 항복강도와 탄성계수에 대한 회귀식을 도출하였다.
- 2) 고온화될수록 1% 오프셋에 의한 항복강도가 0.2% 오프셋에 의한 항복강도보다 강도 저감률이 낮게 나타났다. 따라서 0.2% 오프셋 항복강도를 적용한 부재와 가구의 구조 안전성은 1% 오프셋에 의한 항복강도보다 다소 높은 안전율을 가질 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 구조용 강재의 허용온도는 유럽과 미주지역에서 활용되는 500 °C~550 °C의 범위로 판단되었다.

참고문헌

1. 국회법령자료 홈페이지, “건축법, 건축법시행령, 건축

- 의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”(2006).
2. 건설교통부, 한국건설기술연구원, “건축물 내화설계 기술 개발”(2004).
 3. 권인규, 지남용, “SS400강재의 고온 시 기계적 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 구조계 논문집, 제 17권, 제5호, pp.89-96(2001).
 4. Patrick, V. H. and Heimo, T., “Description of Swedish System of Fire Performance based Regulation and Temperature Analysis of Structural Sections”(2003).
 5. Lie, “A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members”, Fire and Materials, pp.40-48 (1984).
 6. CEN, “Eurocode 3 : Design of Steel Structures Part 1.2 : General Rules Structural Fire Design”, pp.15-21(1995).
 7. New Zealand Building Act(1991).
 8. AISI, “Fire Protection Through Modern Building Codes”, pp.131-149(1981).
 9. ICC, “ICC Performance Code for Buildings and Facilities”(2000).
 10. NFPA, “Building Construction and Safety Code NFPA 5000”(2003).
 11. 安部 武雄, 東京工業大學, 建築構造用鋼材および鋼材の高温クリープ挙動に関する研究(1983).