

온도상승에 따른 H-형강 기둥의 내력에 관한 연구

A Study on the Capacity of H-Shape Columns at Elevated Temperatures

구 본 율* 장 명 웅** 강 문 명***
Koo, Bon-Youl Jang, Myung-Woong Kang, Moon-Myung

요 약

본 논문은 화재시 온도상승에 따른 H-형강 기둥의 내력에 관한 연구이다. 주요 매개변수는 온도, 세장비와 하중비이다. 온도 상승시 강재의 물리적 특성은 EC3 Part1.2에 따랐다. 온도상승에 따른 국부좌굴의 임계온도는 재료의 항복강도와 판폭두께 비가 클수록 더 낮아진다. 균등한 열을 받는 철골 기둥의 내력 평가는 LRFD에 따른 축력과 강축 및 약축 모멘트에 대하여 고려하였다.

Abstract

This paper shows the study on the capacity of H-shape column at elevated temperature in fire. The main parameters are temperatures, slenderness ratios and load ratios. The physical properties of steel material at elevated temperatures are according to EC3 Part 1.2. The critical temperature of local buckling at elevated temperatures are lower when the yield strength of the material is higher, and when the ratios of width-thickness of plates are larger. The evaluation capacity of uniformly heated steel columns were considered to axial forces, moments of strong axis and weak axis to the LRFD.

keywords : capacity, local buckling, elevated temperature, load ratio, critical temperature, slenderness ratio.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

건물이 고층화, 대형화가 됨에 따라 건물의 자중 경감과 건설기간 단축의 장점으로 철골구조 건물이 많이 건설되어 왔다. 그러나, 철골구조는 콘크리트 구조에 비해 온도상승에 따른 열전도가 높아 빠른 속도로 재료의 강도 및 철골건물의 강성이 저감된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 새로운 피복

재료 및 설계방법을 개발하는데 많은 투자를 하고 있는 추세이며 유럽지역에서는 영국을 중심으로 1960년부터 강재의 내화성능에 관하여 연구개발이 되어 왔었다.

화재 발생으로 인명 및 재산을 보호하기 위하여 국가별 내화에 관한 규정이 있으며, 현재 국내에는 철골재의 온도 상승에 따른 ISO834와 같이 1999년 11월에 평균온도 538°C 최고온도는 649°C로 되어 있으나,^[10] 화재 발생시 하중의 비에 따른 강재의 허용온도에 대한 정립이 되어 있지 않은 상태이다.

현행 우리나라 건축법 내화 시방서에는 주요 구조부재를 1~3시간까지 내화 등급으로 구분, 표기되어 있으나 최근 국내에서 발생한 대형 화재와 같은 예기치 않은 건축물의 주요 부재에 대한 내구력 평가를 해석적 방법에 의한 연구는 없는 실정이다.

1.2 연구방법 및 범위

* 정희원 · (주)본구조엔지니어링 대표, 공학박사, 구조기술사, 건축사

Tel : 051-505-7737, Fax : 051-505-7739

E-mail : archibon@intizen.com

** 학생회원 · (주)본구조엔지니어링 대리, 공학석사

E-mail : jmw9018@hanmailnet

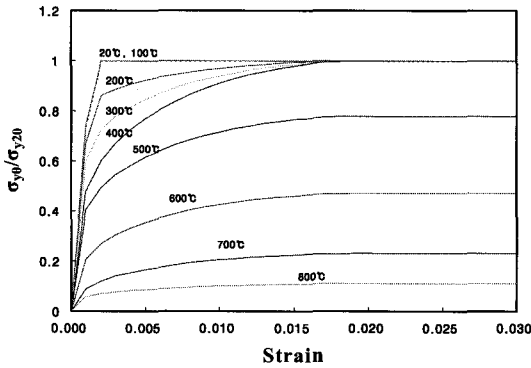
*** 정희원 · 경북대학교 건축학부 교수, 공학박사

E-mail : kmm@bh.knu.ac.kr

본 연구는 화재시와 같이 H형 철골부재가 고온상태일 때, 강재의 항복강도와 탄성계수 감소를 EC3 (Eurocode3) Part 1.2^[1] 관계식을 근거로 하여 하중비와 단면크기 및 세장비에 따른 철골 기둥의 내력을 한계상태 설계법^[11]을 이용하여 해석적 방법으로 내력을 연구하고자 한다.

2. 온도상승에 따른 강재의 특성

본 연구에 사용된 EC3 모델^[1]은 온도변화에 따른 응력-변형률 관계는 <그림 1>과 같고, <그림 1>과 같이 선형에서 곡선으로 고온시 구조용 강재의 응력



<그림 1> EC3 모델의 응력-변형률 관계

<표 1> 온도상승에 의한 강재의 항복강도와 탄성계수의 감소 계수

강재 온도 (°C)	온도가 20°C 일때, σ_{y20} , E_{20} 에 대한 온도 θ 일때 감소계수		
	유효항복강도에 대한 감소계수 $k_{y\theta} = \sigma_{y\theta} / \sigma_{y20}$	비례한계에 대한 감소계수 $k_{p\theta} = \sigma_{p\theta} / \sigma_{y20}$	탄성계수에 대한 감소계수 $k_{E\theta} = E_{\theta} / E_{20}$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	1.000	0.807	0.900
300	1.000	0.613	0.800
400	1.000	0.420	0.700
500	0.780	0.360	0.600
600	0.470	0.180	0.310
700	0.230	0.075	0.130
800	0.110	0.050	0.090
900	0.060	0.0375	0.0675
1000	0.040	0.0250	0.0450
1100	0.020	0.0125	0.0225
1200	0.000	0.0000	0.0000

주 기 : 강재온도의 중간 값에 대해서는 직선 보간하여 사용한다.

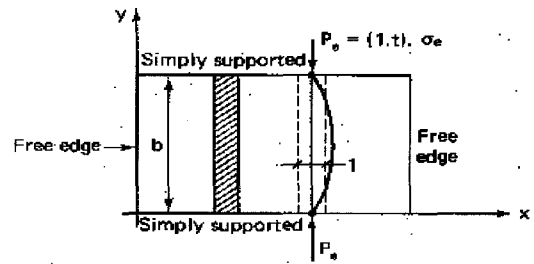
-변형관계를 보여주고 있다.

응력-변형 곡선의 변수 (E_{θ} , $\sigma_{p\theta}$, $\sigma_{y\theta}$)값은 <표 1>에 주어져 있다.

3. 국부좌굴

3.1 국부좌굴 이론

4번 단순지지 균일한 평판의 종 방향 압축응력을 받는 판에 대한 탄성국부좌굴응력 해석은 Bryan (1891)에 의해 발표되었고, 긴 평판의 탄성임계응력 (Elastic Critical Stress)은 폭두께비(b/t), 판의 길이 방향 구속조건, 재료성질에 의해 결정된다.



<그림 2> 오일러 좌굴 응력

<그림 2>와 같은 독립된 작은 판(단면; $1 \times t$)을 고려하면 오일러응력(Euler Stress)은 식(1)과 같다.

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 EI}{b^2} \cdot \frac{1}{(1 \cdot t)} \tag{1}$$

여기서, $I = 1 \cdot t^3 / 12$.

식(4.18)에 I를 대입하면 다음 식(2)와 같다

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{2}$$

실제 작은 판은 판은 전체 판에 분리된 것이 아닌 것이므로, E를 $E/(1-\mu^2)$ 로 사용하여 다음 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{3}$$

판 좌굴에 대한 미분방정식은 Timoshenko, S. R

와 J. M. Gere^[8]에 의해 연구되었으며 임계 및 좌굴 응력으로 모든 하중상태의 경우를 다음 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4)$$

그리고, 온도상승시 강재 판의 탄성 국부좌굴이 발생하는 경우의 식은 다음 식(5)와 같다.

$$\sigma_{cr\theta} = \frac{k\pi^2}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} E_{\theta} > \sigma_{y\theta} \quad (5)$$

이때 좌굴계수(k)는 하중상태, 형상비($\alpha = a/b$), 판의 단부 지지조건(또는 경계조건)에 따른다. 형상비에 따른 좌굴계수(k)는 다음 식(6)과 같다.

$$k = \left(\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m}\right)^2 \quad (6)$$

여기서, m과 n은 x, y 각각 방향에 싸인의 반과 수이며, m, n은 좌굴응력을 결정하며, m=2, n=1인 경우 좌굴계수(k)는 다음 식(7)과 같다.

$$k = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \quad (7)$$

3.2 국부좌굴 계수

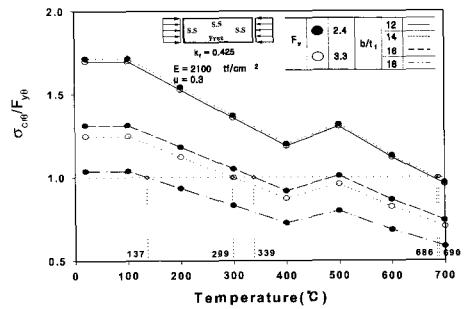
압축과 힘을 받는 판의 좌굴계수는 <표 2>와 같다.^[7]

<표 2> 판의 지지조건 및 응력상태에 따른 좌굴계수

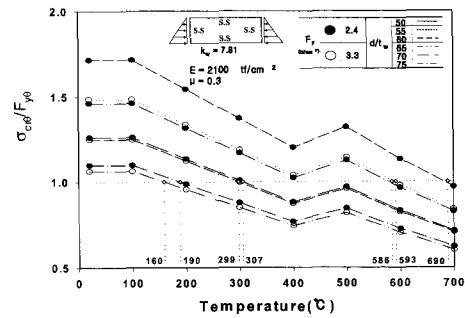
	지지조건	응력 형태	좌굴계수(k)
(a)		압축	4.0
(b)		압축	6.97
(c)		압축	0.425
(d)		압축	1.28
(e)		압축	5.42
(f)		압축	5.0
(g)		압축	7.81

3.3 온도상승시 탄성 국부좌굴 응력

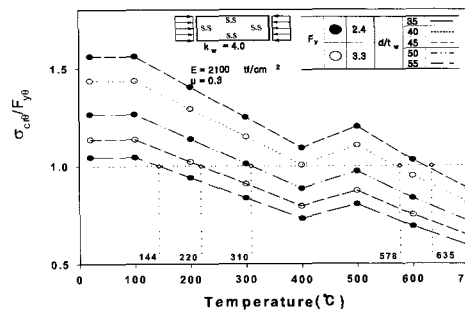
온도상승에 따른 강재 판의 폭두께비에 의한 재료강도를 <표 1>에 따라 감소치를 고려하면 항복강도와 탄성 국부좌굴 응력관계 <그림 3>과 같다.



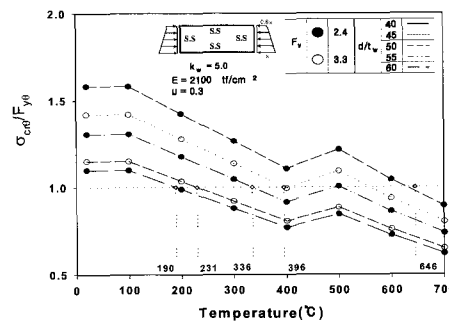
(1) 1축 압축을 받는 플랜지($k_f = 0.425$)



(2) 압축 및 힘을 받는 웨브($k_w = 7.81$)



(3) 1축 압축을 받는 웨브($k_w = 4.0$)



(4) 압축 및 힘을 받는 웨브($k_w = 5.0$)

<그림 3> 항복응력에 대한 탄성 국부좌굴 응력비

<표 3> 탄성국부좌굴에 대한 온도

좌굴계수 (k)	판의 폭두께비	온도(°C)		
		Fy=2.4(tf/cm ²)	Fy=3.3(tf/cm ²)	
0.425	b/tf	12	-	686°C
		14	690°C	299°C
		16	339°C	-
		18	137°C	-
4.0	d/tw	40	-	578°C
		45	635°C	220°C
		50	310°C	-
		55	144°C	-
7.81	d/tw	55	-	593°C
		60	690°C	299°C
		65	586°C	160°C
		70	307°C	-
		75	190°C	-
5.0	d/tw	45	-	396°C
		50	646°C	231°C
		55	336°C	-
		60	190°C	-

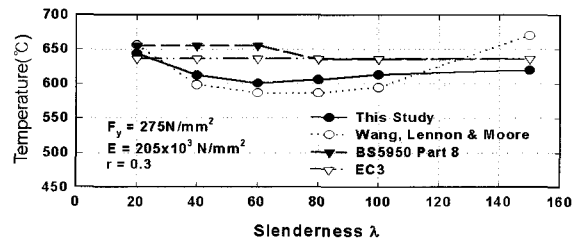
주: $\sigma_{cr0}/F_{y0} \leq 1.0$ 조건에 해당함.

다음 <표 3>은 평판에 압축응력, 압축 및 휨 응력이 작용할때, 판의 폭두께비에 따라 재료의 항복강도-온도의 관계를 나타낸 것이다. 즉, 동일한 판의 폭두께비일 때는 항복강도가 낮으면, 항복 응력과 탄성좌굴응력이 같은 점의 온도(<그림 3>의 응력비가 1.0인 선과 만나는 온도)는 높고, 판의 폭두께비가 클수록 낮은 온도에서 재료의 항복강도에 의해 좌굴이 발생된다. 또한, 판의 좌굴응력과 항복응력이 만나는 온도이상에서 탄성 좌굴응력에서 국부좌굴이 발생하는 것으로 나타났다.

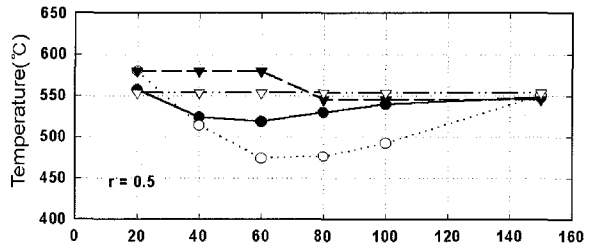
4. 온도상승에 따른 기둥 내력

4.1 하중비에 따른 임계온도

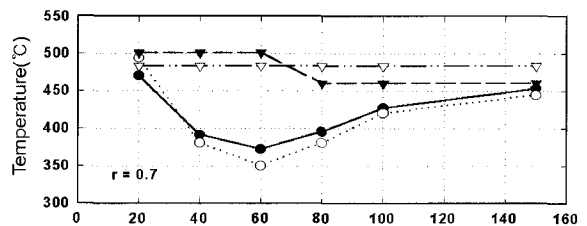
기둥의 임계온도에 관한 세장비 효과는 Najjar^[9], Burgess^[5], Wang에 의해 연구되어 왔다. Wang, Lennon, Moore^[3]에 의한 유한요소해석을 통한 기둥의 임계온도와 EC3^[1], BS5950^[2] 기준의 세장비에 따른 임계온도를 본 연구에서 해석한 임계온도와 비교한 <그림 4>와 같다.



(1) 하중비 = 0.3



(2) 하중비 = 0.5



(3) 하중비 = 0.7

<그림 4> 하중비에 따른 세장비 효과를 고려한 기둥의 임계온도 비교

기둥의 세장비가 작을 때($\lambda \leq 20$)는 서로일치 되나, 세장비가 큰 경우($\lambda \geq 100$)에는 BS5950 Part 8의 임계온도와 비교하여 정확성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 기둥에 대한 일반적인 세장비($40 < \lambda < 100$)는 BS5950 Part 8의 임계온도가 해석된 온도보다 높은 것으로 나타났다. BS5950 Part 8의 한계온도의 과대평가는 고온시 강재의 응력-변형 관계는 높은 비선형 거동에 관련 있다. 기둥의 세장비가 낮은 때 기둥파괴는 강도에 지배되고 BS5950 Part 8의 한계온도는 정확하다. 만약 기둥의 세장비가 높으면($\lambda > 100$), 기둥의 좌굴응력은 낮고 고온시 강재의 응력-변형곡선은 반드시 직선인 것으로 나타났다.

본 연구 해석은 하중비 0.3, 0.5일 때는 EC3와 BS5950 Part 8에 접근하나, 하중비 0.7일 때는 Wang의 연구에 접근하는 것으로 나타났고 전체적으로 기존연구와 세장비 변화에 따른 임계온도는 중앙값으로 신뢰가 있음이 확인되었다.

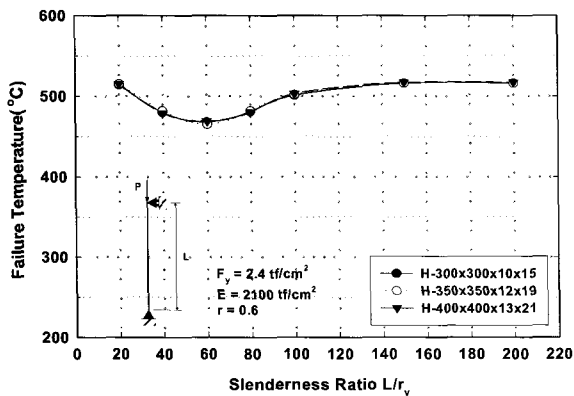
4.2 단면크기에 따른 임계온도

세장비(Slenderness)는 기둥의 길이와 단면의 크기에 관련이 있으며, <그림 5>는 등분포 열을 받고 하중비 0.6인 <표 5>와 같은 하중을 적용하였다. 세장비 20, 40, 60, 80, 100, 150 각각의 해석을 수행한 결과 단면의 크기에 따른 임계온도의 분산의 차이는 미미한 것으로 나타났으며, Najjar^[9]가 발표한 것과 유사한 것으로 나타났다.

<표 4> 세장비에 따른 기둥의 임계온도비교

하중비	조건	임계온도(°C)					
		세장비(λ)					
		20	40	60	80	100	150
0.3	①	644	512	600	605	613	619
	②	656	598	586	586	594	670
	③	655	655	655	635	635	635
	④	636	636	636	636	636	636
0.5	①	557	524	518	529	540	548
	②	580	514	474	476	492	550
	③	580	580	580	545	545	545
	④	554	554	554	554	554	554
0.7	①	470	391	372	395	427	453
	②	512	454	288	226	194	178
	③	501	501	501	460	460	460
	④	483	483	483	483	483	483

- ① 본 연구
- ② Wang, Lennon & Moore
- ③ BS5950 Part 8
- ④ EC3



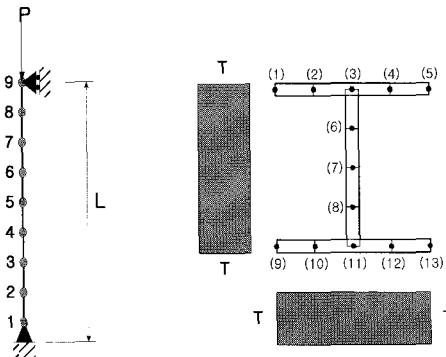
<그림 5> 기둥 단면크기에 따른 세장비와 임계온도 관계

<표 5> 단면크기에 따른 작용하중

단면크기	작용하중(tf)					
	세장비					
	20	40	60	80	100	150
H-300x300x10x15	171.1	151.2	129.5	106.2	84.5	47.7
H-350x350x12x19	248.3	219.5	188.0	154.2	122.7	69.3
H-400x400x13x21	312.3	276.0	236.4	194.0	154.3	87.1

4.3 모델해석

기둥의 크기에 따라 하중비(Load Ratio) 0.3, 0.5, 0.7 중심 축하중이 <표 6>과 같이 작용할 때 부재의 최대응력과 최대 수평, 수직변위를 온도의 상승에 따라 해석하였다. 해석 모델은 그림 6 와 같고, 부재 단면과 길이 및 하중은 <표 6>과 같다. 항복강도와 탄성계수는 2.4tf/cm^2 , 2100tf/cm^2 이며, 부재의 중간 높이에서는 강축과 약축에 대해서 L/1000의 초기 불안정성을 가진다.

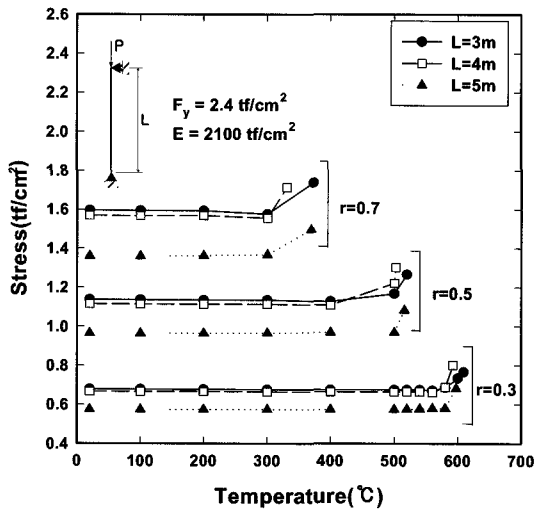


<그림 6> 해석 모델

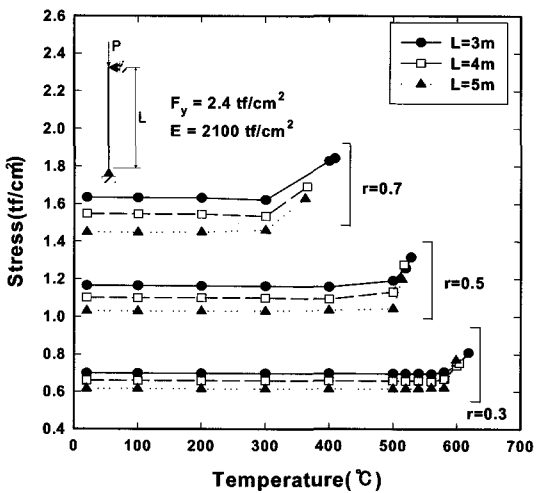
<표 6> 기둥부재의 길이, 하중비에 대한 작용하중

부재 단면	부재 길이 L (m)	작용하중 P (tf)		
		0.3	0.5	0.7
H-300x300x10x15	3	75.63	126.05	176.46
	4	72.30	120.50	168.70
	5	60.94	101.57	142.20
H-350x350x12x19	3	114.20	190.33	266.46
	4	105.77	176.28	246.79
	5	96.80	161.34	225.87
H-400x400x13x21	3	147.46	245.76	344.07
	4	138.38	230.64	322.89
	5	128.86	214.76	300.66

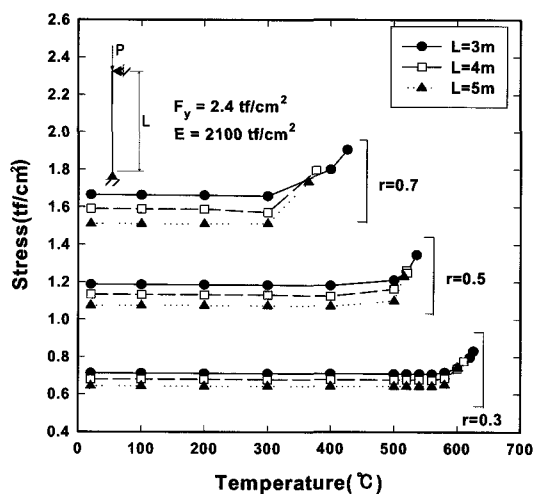
해석 결과는 <그림 7>~<그림 9>와 같다.



(1) H-300x300x10x15

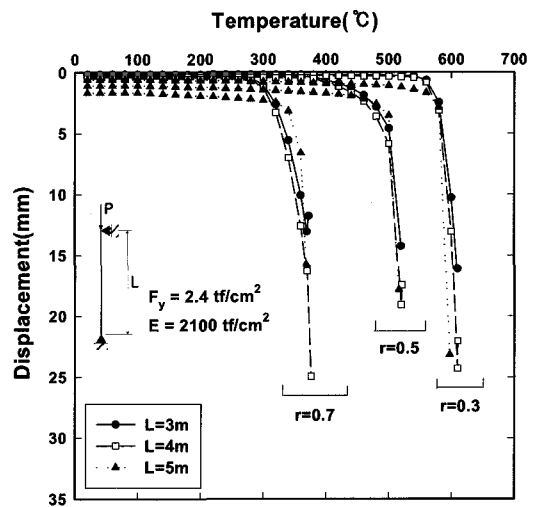


(2) H-350x350x12x19

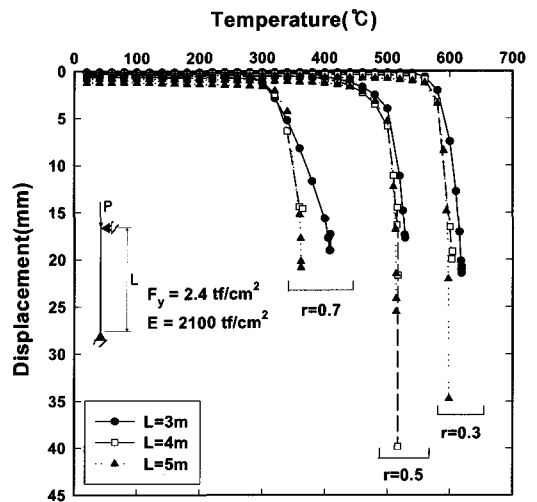


(3) H-400x400x13x21

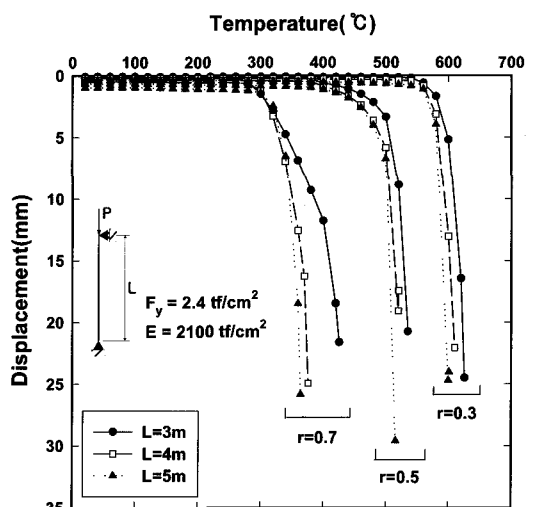
<그림 7> 기둥부재에 대한 온도-응력



(1) H-300x300x10x15

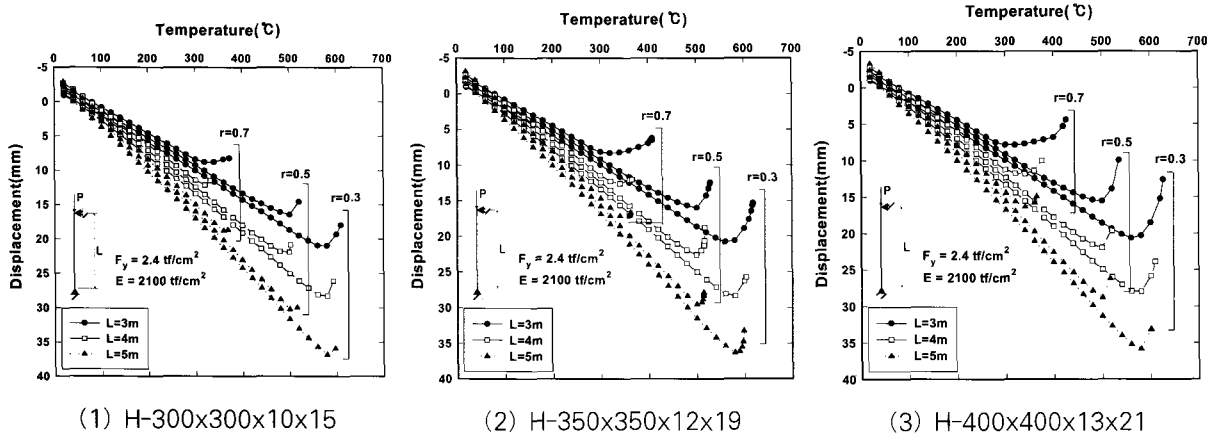


(2) H-350x350x12x19



(3) H-400x400x13x21

<그림 8> 기둥부재에 대한 온도-최대 수평 변위



〈그림 9〉 기둥부재에 대한 온도-최대 수직 변위

〈표 7〉 기둥부재 단면크기에 따른 축력 및 모멘트

단면크기	층고 (m)	세장비(λ)	최대 축력	X-축 모멘트	Y-축 모멘트
H-300×300×10×15	3	39.9	265.5	36.0	16.2
	4	53.3	249.6	82.4	16.2
	5	66.6	230.5	79.4	16.2
H-294×200×8×12	3	63.7	140.1	66.2	13.4
	4	84.9	118.5	58.9	13.4
	5	106.2	95.6	51.6	13.4

5. 온도상승에 따른 기둥 내력

5.1 기둥부재의 작용하중

온도상승에 따른 기둥부재의 내력을 해석하기 위해 항복강도가 24tf/cm²인 부재에 다음 <표 7>과 같이 층고, 세장비, 축력 및 강축과 약축의 모멘트를 각각 적용하였다.

5.2 하중비에 따른 내력

기둥에 작용하는 축력 및 모멘트를 상온에 대한 온도상승으로 내력비를 <그림 10>~<그림 11>과 같다.

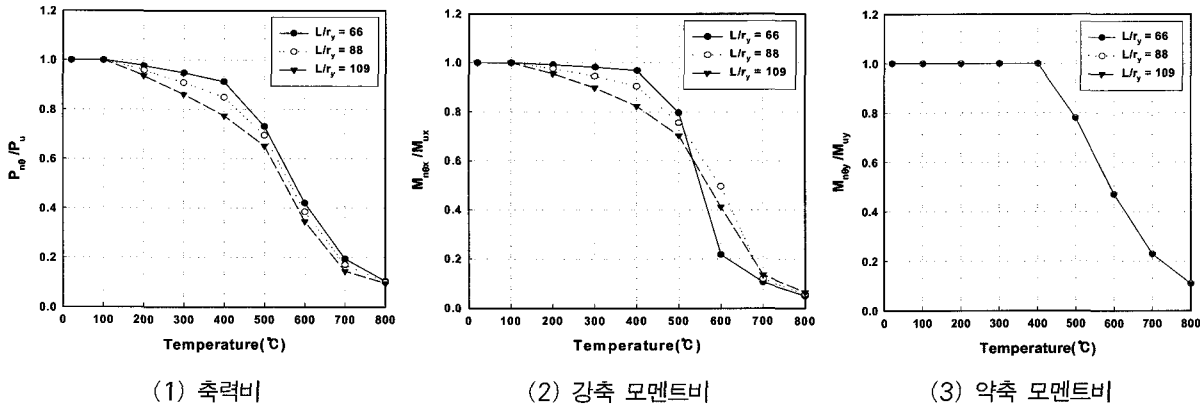
6. 결론

화재시 등분포 온도상승에 따른 철골 기둥의 국부좌굴 및 세장비를 고려한 축하중과 모멘트의 내력을 해석적 방법으로 평가하였다.

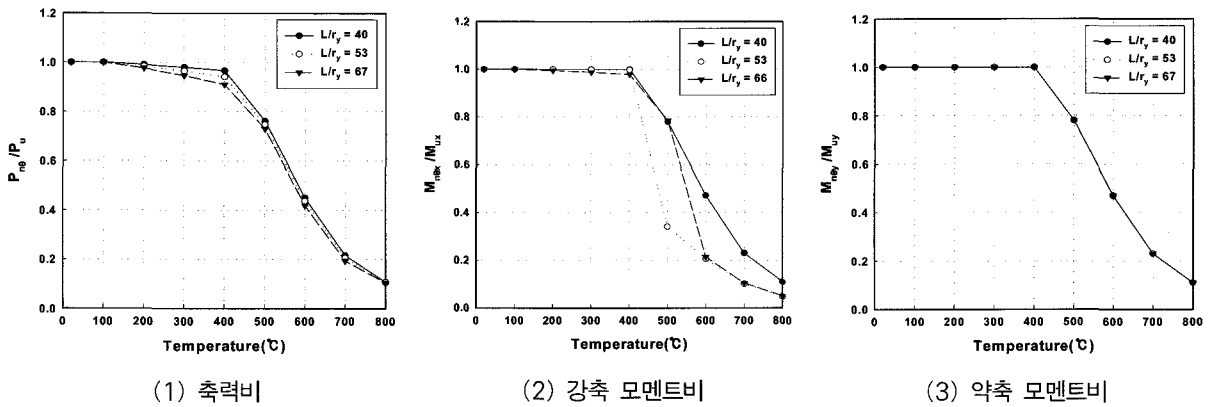
본 연구에서는 등분포 온도상승시 부재의 한계상

태와 신뢰성에 대한 확률적 결정을 고려한 한계상태 설계법^[1]으로 부재내력을 평가함으로써 신뢰성을 확보함과 동시에 사용성이 편리하도록 하였다. 기둥부재의 내력평가 결과는 다음과 같다.

- (1) 기둥부재 내력비(축력비, 강축 모멘트비, 약축 모멘트비)를 한계상태 설계식에 의해 작성된 <그림 10>, <그림 11>의 의해 내력비의 총합이 1.0이하이면, 안전함을 확인 할 수 있다
- (2) 온도상승시 판의 폭두께비가 클수록 낮은 온도에서 국부좌굴이 발생하며, 항복강도가 낮을수록 높은 온도에서 좌굴이 발생됨이 확인되었다.
- (3) 하중비가 증가할수록 파괴응력은 높으나 반면에, 파괴온도는 낮아진다. 부재 단면크기에 관련이 없고 하중비에 따라 응력은 파괴온도까지 거의 일정하게 나타났다.
- (4) 하중비에 따른 기둥, 보의 내력비는 400℃이후에 급격한 감소를 보임을 알 수 있었다.



(1) 축력비 (2) 강축 모멘트비 (3) 약축 모멘트비
 <그림 10> 기둥부재의 축하중 및 모멘트 내력비(H-294x200x8x12)



(1) 축력비 (2) 강축 모멘트비 (3) 약축 모멘트비
 <그림 11> 기둥부재의 축하중 및 모멘트 내력비(H-300x300x10x15)

참고 문헌

1. Eurocode 3: "Design of Steel Structures. Part 1.2: Structural Fire Design", Commission of the European Communities, Brussels, 1993.
2. BS5950 : "Structural Use of Steelwork in Buildings. Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design", British Standards Institution, London, 1990.
3. Wang, Y.C. and Moore, D.B., 1994, "Steel Frames in Fire : Analysis," Structural Design Division, Building Research Establishment, Watford, UK.
4. Li, G. Q., Jiang, S. C. and He, J. L., "The First Code on Fire Safety of Steel Structures in China", ADVANCES IN STEEL STRUCTURES, Vol. II, pp. 1031~1038, 1999.
5. Burgess, I. W., El-Rimawi, J. and Plank, R. J., "Studies of the behaviour of steel beams in fire," J. Constr. Steel Research, Vol 19, pp.285-321, 1991.
6. Salmon, C. G. and Johnson, J. E., "Steel Structures : Design and Behavior Third Edition," Harper & Row, 1995.
7. Hancock, G. J., Murray, T. M. and Ellifritt, D. S., "Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification", Marcel Dekker, 2001.
8. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., "Theory of elastic stability," Mcgraw-Hill Book Co. Inc., New York, N.Y.
9. Najjar, S.R., "Three-Dimensional Analysis of Steel Frames and Subframes in Fire", Ph.D. thesis, Dept. Civil and Structural Eng., Univ. Sheffield.

10. 권인규, 지남용, 이세현, “철골기둥 및 보 부재의 허용온도에 관한 시험적 연구”, 대한건축학회. 18권 10호, pp.45-52, 2002.10.
11. 대한건축학회, “한계상태기준에 의한 강구조 설계 예제집”, 기문당, 2002.