열응력 해석을 이용한 H형강 기둥의 하중비에 따른 한계온도 분석에 관한 연구

Limiting Temperature of H-Columns based on Load Ratio using Thermal Stress Analysis

황규재* · 안재권** · 조규환*** · 여인환****

Hwang, Kyu-jae*, Ahn, Jae-kwon**, Cho, Gyu-hwan***, and Yeo, In-hwan****

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the fire resistance of steel structural members based on fire-resistant design and heat load tests. The limiting temperature was calculated for each case of load ratio based on the strength of the compression member. Based on the thermal stress analysis, the limiting temperature of the steel structural compression member was obtained as a function of the sectional shape, height, and load ratio.

Key words : H-Column, Thermal Stress Analysis, Load Ratio, Limiting Temperature

요 지

본 연구의 목적은 성능적 내화설계를 기반으로 한 강구조 기둥부재의 내화성능 평가를 최종 목표로 강구조 기둥부재를 대상으로 한 열응력 해석을 통한 내화성능평가로 단면형상, 높이 및 하중비를 변수로 부재의 내화성능 변화를 분석한다. 그리고 기둥부재의 압축강도를 기준으로 하중비에 따른 한계온도를 산정하였다. 열응력 해석 결과, 각종 변수에 따른 강구조 압축부재의 한계온도를 제시하였다.

핵심용어 : H형강, 열응력 해석, 하중비, 한계온도

1. 서 론

강구조 내화성능 평가를 위한 내화실험시 구조부재의 합리적인 평가를 위해 여러 변수를 고려하여야 한다. 현행 강구조 내화설계의 경우에는 기존의 확일적 한계온도기준(평균 538 ℃, 최고 649 ℃)을 바탕으로 한 비재하가열실험에 근거해 내화성능을 평가하고 있으나, 이는 오히려 재하가열

실험에 비해 구조부재의 내화성능을 지나치게 보수적으로 평가하고 있는 실정이다. 그러므로 강구조 부재의 합리적인 내화성능평가를 위해서는 부재조건에 따른 적절한 재하하중량과 한계온도를 반영하여야만 가능하다.

이에 본 연구에서는 압축부재인 강구조 기둥부재를 대상으로 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS의 열응력 해석을 통해 하중비에 따른 내화성능 변화를 검토하여 기존의 확일

*정회원, 한국화학융합시험연구원 선임연구원(E-mail: hkjthink@ktr.or.kr)

Member, Senior Researcher, Korea Testing & Research Institute

**정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

***정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology

****교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원(Tel: +82-31-369-0514, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: yeo@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology

적 한계온도기준과의 비교점토 및 그 개선안을 제시하고자 한다.

2. 압축재의 재하하중량 산정

국내 건축구조기준(KBC 2016)에서는 휨좌굴에 대한 압축재의 압축강도에 대해 다음과 같이 산정하고 있다(AIK, 2016). 공칭압축강도 P_n 은 휨좌굴에 대한 한계상태에 기초하여 Eq. (1)과 같이 산정한다.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (1)$$

그리고, 휨좌굴응력 F_{cr} 은 세장비(KL/r)를 기준으로 다음과 같이 산정한다.

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ or } F_y/F_e \leq 2.25 \text{ 인 경우} \quad (2)$$

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (3)$$

$$\frac{KL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \text{ or } F_y/F_e > 2.25 \text{ 인 경우} \quad (4)$$

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (5)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} F_y \quad (6)$$

여기서, A_g 는 부재의 총단면적(mm), F_y 는 강재의 항복강도(MPa), E 는 강재의 탄성계수(MPa), K 는 유효좌굴길이계수, L 은 부재의 휨좌굴에 대한 비지지길이(m) 그리고 r 은 좌굴축에 대한 단면2차반경(mm)을 의미한다.

3. 열응력 해석

3.1 온도상승에 따른 재료의 열적 특성

본 연구에서 적용되는 강구조 기둥부재의 온도상승에 따른 재료의 열적 특성은 이전의 국내외 연구에서 실험 및 해석연구를 통하여 국내의 화재시 구조거동과 비교적 정확하게 예측된 Eurocode (Eurocode 3, 2002)를 적용하였다. 강재의 밀도(Density)는 온도상승에 따라 변화없이 7,850 kg/m³을 적용하고, 그 외의 열전도율(Conductivity), 비열(Specific Heat)의 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Thermal Properties of Steel

Properties	Determine	scope
Density (kg/m ³)	7,850	-
Specific Heat (J/kgK)	$C_s = 425 + 0.773 T - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 2.22 \times 10^{-6} T^3$	$20 \leq T \leq 600$
	$C_s = 666 - \left(\frac{13002}{T - 738} \right)$	$100 < T \leq 900$
	$C_s = 545 + \left(\frac{17820}{T - 731} \right)$	$735 < T \leq 900$
Conductivity (W/mK)	$C_s = 650$	$900 < T \leq 1,200$
	$k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T$	$20 \leq T \leq 800$
	$k_s = 27.3$	$800 < T \leq 1,200$

3.2 온도상승에 따른 재료의 열역학적 특성

강재의 열역학적 특성은 Figs. 1, 2와 같이 Eurocode의 온도상승에 따른 응력과 변형율의 관계와 항복응력, 비례한도 및 탄성계수의 비를 적용한다. 일반적인 내화시험을 통한 온도상승에 따른 강재의 유효항복응력을 보면, 300 °C부터 강도 및 강성이 감소되기 시작하며 750 °C까지는 강도가 급격하게 저하되고 상온 강도의 약 23%만이 남게 된다. 800 °C에서는 11%, 900 °C에서는 6%의 강도만이 남게 되고 이후 대략 1,500 °C정도의 녹는점까지 강도는 천천히 감소된다.

Fig. 1. Stress-strain Relationship for Steel at Elevated Temperatures

Fig. 2. Reduction Factors for the Stress-strain Relationship of Steel at Elevated Temperatures

Eurocode에서 유효항복응력은 400 ℃에서부터 감소하기 시작하여 500 ℃ 이후 급속한 강도의 감소를 보이며, 560 ℃에서 상온 상태의 60% 이하로 감소하기 시작하여 1,200 ℃까지 강도의 감소계수를 나타내고 있다.

3.3 내화성능평가를 위한 유한요소해석 모델링

본 연구에서 수행한 내화해석은 열응력 해석으로 H형강 기둥부재의 4면이 화재에 동일하게 노출되어 있다는 가정 하에 수행하였으며, 열-구조 연성해석(Fully coupled thermal stress analysis)을 활용하였다. 구성부재인 강재의 모델링은 Coupled temperature displacement 요소인 C3D8T를 사용하여 Fig. 3과 같이 모델링 하였다.

Fig. 3. Shape of Model

온도변화에 따른 강재의 물성치 변화는 3.1절과 3.2절의 고온재료모델을 적용하였다. 내화해석의 가열조건은 대류 열전달계수 $2.5 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2\text{℃}$, 복사 경계조건으로 스테판-볼츠만 상수 $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 를 적용하였다.

3.4 열응력 해석 모델링의 유효성 검증

본 연구에서 수행하는 열응력 해석 모델링방법의 유효성을 검증하기 위하여, 강구조 H형강 기둥부재의 모델을 대상으로 한 기존 실험결과(KICT, 2018)와 비교분석하였다.

유효성 검증을 위한 대상 시험체는 Fig. 4와 같은 H-400 × 400 × 13 × 21의 단면을 적용하였으며, 기존 실험의 조건은 Table 2와 같으며, 강재는 SS275의 설계압축강도로 실험한 결과를 바탕으로 본 연구의 해석 모델링의 유효성을 검증하였다.

Fig. 4. Section Details of Specimen

Table 2. Model of Specimen

Section	Height (mm)	Fy (kN)	Pn (kN)	Load Ratio
400×400×13×21	4,000	324.0	6,775	0.5

H형강 기둥부재를 대상으로 재하가열실험을 수행한 결과를 Table 3과 같이 정리하였다. 압축부재의 내화성능 평가기준을 초과하는 시점의 한계온도를 측정하였으며, 재하가열실험의 경우에는 변형기준인 40 mm를 초과하는 시점의 한계온도가 599.1 ℃, 내화해석의 결과는 611.7 ℃로 나타났다. 이를 통해 실험과 해석결과에 약 2%의 차이가 발생한 것을 알 수 있었으며, 본 연구에서 적용한 강구조 압축부재의 열응력 해석 모델링의 유효성이 확보되었다고 판단하였다.

Table 3. Comparison of Results

List	Deflection (mm)	Temperature (℃)	Ana / Exp
Analysis	-43.11	611.7	1.02
Experiment	-40.07	599.1	

4. H형강 기둥의 내화성능평가

4.1 해석적용모델

H형강 기둥부재의 하중비에 따른 한계온도를 분석하기 위하여 해석적용모델에 관한 변수들은 Table 4와 같이 단면 형상, 부재높이와 하중비를 각각 변화시켜 해석모델에 적용 하였다. 내화해석은 본 연구에서 제시한 모델을 가지고 ABAQUS의 열응력 해석을 이용하여 수행하였으며, 가열곡선은 KS 표준시간-가열곡선을 적용하였다.

Table 4. Models of Fire Specimen

H-Section	Height (mm)	Load ratio	Axial Strength (kN)
200×200×8×12	3,000	0.5	1,492.7
	4,000	0.6	1,492.5
	5,000	0.7	1,492.1
300×300×10×15	3,000	0.5	2,815.1
	4,000	0.6	2,814.9
	5,000	0.7	2,814.7
400×400×13×21	3,000	0.5	5,139.2
	4,000	0.6	5,139.0
	5,000	0.7	5,138.8

4.2 내화성능 평가기준

재하조건에서 내화성능의 평가기준은 KS F 2257-1 「건축 부재의 내화 시험 방법-일반 요구 사항」(KS F 2257-1, 2014)에 따라 재하 부재의 경우에는 변형량과 변형률에 의해 판정하며, 변형량(7)과 변형률(8)의 기준을 모두 초과하였을 때, 내화성능 확보에 부적합한 것으로 간주한다. 여기에서, h 는 시험체의 초기높이(mm)를 의미한다.

$$C = \frac{h}{100} mm \quad (7)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} mm/min \quad (8)$$

4.3 열응력 해석결과

하중비와 단면형상에 따른 H형강 기둥부재의 내화성능을 평가하기 위하여 단면형상, 부재높이와 하중비를 변수로, 4.2절의 변형기준에 의한 한계온도를 Fig. 5와 같은 위치에서 측정된 온도와 비교분석하여 평가하였다. 여기서, 강구조 부재의 한계온도는 Table 5와 같은 BS 5950 Part 8의 한계온도법(Limiting Temperature Method)에서 제시하고 있는 허용온도 기준(BS 5950-8, 2003)과 비교분석하였으며, BS기준에서 제시하고 있는 하중비 이외의 한계온도에 대해서도 열응력 해석을 통해 각각의 강구조 부재의 한계온도를 다양하게 도출하였다.

Fig. 5. Position of Temperature

Table 5. Limiting Temperature of International Standard (°C)

Type	Load Ratio		
	0.4	0.6	0.8
Eurocode	620	554	496
BS 5950	620	555	520 (0.7)
New Zealand	629	491	353

4.3.1 하중비에 따른 단면별 변형량 변화

화재시 강재의 온도상승에 의한 부재의 내력저하로 압축재의 변형량이 급속도로 발생할 수 있어 정확한 화재시 하중지지력에 대응한 압축재의 재하하중량이 검토되어야 한다. 2절에서 검토한 바와 같이 강구조 압축부재의 휨좌굴에 대한 압축강도를 식을 바탕으로 하중의 크기를 0.5, 0.6, 0.7의 비로 분류하여 하중비에 따른 부재의 변위변화를 측정하였다.

부재의 변위변화는 4.2절의 KS에서 제시하고 있는 바와 같이 H형강 기둥 부재의 최대 변위를 측정하였으며, 내화성능평가는 변형량과 변형률의 값을 기준으로 모두 초과하는 시간을 내화시간으로 산정하여 Table 6과 같이 나타내었다.

Table 6. Consideration of the Limitations

Height	Deflection (mm)	Deflection per minute (mm/min)
3,000	30	9
4,000	40	12
5,000	50	15

전체적으로 작용 하중비에 의해 강구조 압축부재는 고온에 의한 열팽창 되었으며, 이 후 강재의 재료적 특성이 고온에 의해서 저하되고 부재로서의 전체 붕괴가 발생하며 KS의 내화성능기준을 초과하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 하중비에 따른 부재의 최대변위변화를 단면과 부재높이별로 나타내었고, 부재의 높이변화는 최대변위값에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 서론에서 언급한 바와 같이 기존의 획일적인 강재 허용온도기준(평균온도 538 °C, 최고온도 649 °C)과 같은 비재하가열실험의 경우에는 지나치게 보수적인 평가방법으로 Table 7을 바탕으로 정리한 Fig. 7을 보면 KS를 기준으로 한 내화성능시간 분포가 재하가열해석 결과에 비해 합리적이지 못한 것으로 나타났다.

하중비에 따라 최대 3분까지 내화성능시간의 차이가 발생하므로 이로 인해 기존의 강구조 내화성능평가의 온도기준만으로는 비경제적이고, 비합리적인 내화설계가 이루어질 수 밖에 없다고 판단된다.

4.3.2 하중비에 따른 단면별 한계온도 변화

앞서 언급한 바와 같이 기존의 국내 강구조의 내화성능평가로는 합리적인 평가가 어려운 실정이다.

그러나 구조부재의 한계온도는 화재 발생 당시 부재가 지지하는 최대하중 용량의 비율에 따라 크게 변화하므로 Table 5와 같이 국외기준에서는 하중비의 범위에 따라 다양한 유형의 한계온도를 제공하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 하중비에 따른 한계온도를 파악하였으며, 이를 Figs. 8과 9로 표현하였으며, 이를 Table 8과 같이 정리하였다.

(a) Section-200

(b) Section-300

(c) Section-400

Fig. 6. Deflection of Steel Column (Height=3,000 mm)

Fig. 7. Distribution of Time According to Load Ratio

Table 7. Fire Resistance Time to the Limit of the Deflection (min)

Column		Load Ratio			KS (min)
Section	Height	0.5	0.6	0.7	
200	3,000	17.34	16.17	15.13	15.37
	4,000	17.34	16.15	15.12	15.50
	5,000	17.32	16.15	15.11	15.37
300	3,000	19.67	18.42	17.29	16.87
	4,000	19.50	18.19	17.03	17.27
	5,000	19.80	18.42	17.31	17.50
400	3,000	23.06	21.56	20.16	20.30
	4,000	23.06	21.53	20.18	20.27
	5,000	23.05	21.56	20.16	20.30

Table 8. Limiting Temperature According to Load Ratio ($^{\circ}\text{C}$)

Column		Load Ratio		
Section	Height	0.5	0.6	0.7
200	3,000	605.7	572.9	541.2
	4,000	605.1	572.4	542.4
	5,000	604.7	572.8	540.7
300	3,000	629.7	597.7	566.6
	4,000	608.9	576.3	544.4
	5,000	600.3	566.1	535.8
400	3,000	611.7	579.9	546.3
	4,000	611.7	579.1	546.7
	5,000	611.6	579.8	546.2

Fig. 8. Numerical Simulation of the H-Column (Height=3,000 mm)

(a) Section-200

(b) Section-300

(c) Section-400

Fig. 9. Temperature of Steel Column (Height=3,000 mm)

Table 8과 같이 국내의 강구조 허용온도기준인 538 °C는 BS 5950에서는 하중비 약 0.7 (520 °C)정도의 강도를 고려한 기준이며, 이를 고려하지 않은 내화설계는 경제적이지 못한 구조설계가 이루어질 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 점을 고려할 때, 화재시 재하하중과 부재의 한계온도를 모두 고려한 재하가열실험이 이루어져야 합리적인 내화성능평가가 이루어질 수 있다고 판단된다.

200단면의 경우에 평균적으로 하중비 0.5에서는 605.2 °C, 하중비 0.6에서는 572.7 °C, 하중비 0.7에서는 541.4 °C로 나타났다. 그리고 300단면의 경우에도 하중비에 따라 각각 612.9 °C, 580.1 °C, 548.9 °C로 나타났으며, 400단면의 경우도 각각 611.7 °C, 579.6 °C, 546.4 °C로 부재의 한계온도

를 파악할 수 있었다.

이에 따라 하중비 및 단면크기, 부재높이에 따른 강구조 기둥부재의 한계온도를 Table 9와 같이 정리해보면, 다른 변수에는 거의 영향을 받지 않고 하중비에 의해 한계온도가 지배받고 있음을 알 수 있었다.

Table 9. Limiting Temperature (Avg.) According to Load Ratio (°C)

Section	Load Ratio		
	0.5	0.6	0.7
200	605.2	572.7	541.4
300	612.9	580.1	548.9
400	611.7	579.6	546.4
Avg.	609.9	577.5	545.6

이는 강구조 기둥의 내화설계 및 성능평가에 있어 하중비의 고려가 필수적임을 의미한다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강구조 기둥부재의 하중비에 따른 한계온도를 분석하기 위하여 여러 가지 구성인자를 변수로 한 열응력 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현행 KS에서는 재하가열실험을 실시할 경우, 평가기준을 변형량 및 변형률을 기준으로 있다. 그리고 한계온도는 참고사항으로 제시하고 있으나, 평균 538 °C, 최고 649 °C라는 확실적 한계온도만을 허용기준으로 표기하고 있는 실정이다.
- (2) 그러나, 구조부재의 한계온도는 부재가 견디는 하중에 따라 변화하므로 기존의 확실적인 허용온도기준만으로는 합리적인 내화성능평가가 이루어질 수 없다고 판단되며, 이에 따라 하중비에 따른 단면별 한계온도를 열응력 해석을 통해 수행하여 제안하였다.
- (3) 내화해석 결과, 구조부재의 하중비에 따라 한계온도가 변화하였으나, 단면형상 및 부재높이와 관련된 변수는 변화하더라도 동일 하중비의 경우에는 한계온도에 미치는 영향이 미비한 수준으로 판단된다.
- (4) 일반적 상온 구조설계에 의한 기둥부재의 하중비임을 감안하더라도 비재하가열실험 보다 재하가열실험의 경우가 오히려 내화성능을 평가하는데 있어 유리한 것으로 파악되었다.
- (5) 열응력 해석을 이용하여 제안하는 강구조 기둥부재의 한계온도는 하중비 0.5에서는 609.9 °C, 하중비 0.6에서는 577.5 °C, 하중비 0.7에서는 545.6 °C로 제안한다.

향후, 강구조 기둥부재 이외에도 보, 슬래브 등을 대상으로 다양한 변수를 적용한 강구조 한계온도에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부에서 지원하는 도시건축연구사업의 연구비지원(19AUDP-B100356-05)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Architectural Institute of Korea (AIK). (2016). *Korean building code and commentary*. Seoul: Architectural Institute of Korea

BS 5950-8. (2003). *Structural use of steelwork in building – Part 8 : Code of practice for fire resistant design*.

Eurocode 3. (2002). *Design of steel structures – Part 1.2 General actions – Actions on structures exposed to fire*.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2018). *Development of new assessment methods in fire resistant structural and hazardous combustion gases for the fire risk assessment*. KICT Report.

KS F 2257-1. (2014). *Methods of fire resistance test for elements of building construction - General requirements*. Korean Standard Association.

Received	September 24, 2019
Revised	September 24, 2019
Accepted	October 10, 2019