공학적 수단에 의한 구조용 강재 보부재의 화재 시 거동평가 연구

Analytical Evaluation of Fire Behavior in Beams built with Structural Steels

권인규*

Kwon, Inkyu*

Abstract

A fire in a compartment results in weakness in the structural stability of elements, such as columns and beams, in a steel-framed building. In this study, to support the design of structural fire engineering in steel-framed structures, design fires, such as standard and parametric fire curves, were applied as fire sources to analytically evaluate the structural stability of a structural beam made of SS 275. The results showed that the structural stability evaluation performed by the parametric fire curve was more rational than that by the standard fire curve.

Key words : Structural Fire Engineering Design, Steel Framed Building, Standard Fire Curve, Parametric Fire Curve

요 지

강구조 건축물에서의 화재는 구조부재의 온도를 상승시켜 내력감소를 유발시킴으로써 구조물의 안전성 확보에 치명적인 약점으로 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 향후 건축물의 공학적 내화설계의 기초 자료 확보를 목적으로 강구조 건축물에 사용되는 일반 구조용 강재인 SS 275를 적용한 보부재를 대상으로 표준화재곡선과 일정 화재구획내의 변수화재곡선에 의한 단순보와 고정보의 최대내력과 처짐을 해석적으로 도출하였으며, 그 결과 변수화재곡선에 의한 내력평가가 표준화재곡선보다 합리적임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 구조내화설계, 강구조 건축물, 표준화재곡선, 변수화재곡선

1. 서 론

1.1 연구의 목적

건축기술은 인류의 보다 나은 삶의 질과 안전한 생활을 유지할 수 있도록 발달하고 있으며, 일상생활에서 발생될 수 있는 화재로부터 안전하고, 합리적인 구조 시스템의 개발은 화재 기술자 뿐만 아니라 설계자, 감리자 및 건축주 등 모든 건축 관계자에게 매우 중요한 사항이므로 인식되고 있다.

건축물 화재로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 노력은 관련 건축 법규, 표준의 적용으로 도출된 내화피복 적용으로 이루어지고 있으며, 일본, 유럽 및 미국 등에서는 주어진 건축물의 화재 발생 위험성과 건축물의 제반 조건 등을

종합적으로 판단하여 안전성을 확보할 수 있는 구조내화설계 방식을 적용하고 있다고 Kwon and Chang (2001) 및 LaMalva (2018)는 주장하고 있다. 본 연구에서는 일반적으로 가혹한 조건이라 설정되는 표준화재곡선과 주어진 공간구획의 화재하중과 개구부 조건 등으로 결정되는 변수화재곡선을 도출하고, 이를 바탕으로 보부재의 고온 시 구조거동을 공학적 수단을 통하여 평가함으로써 향후 강구조 건축물의 내화설계 적용 시 참고자료로 활용하고자 한다.

1.2 연구방법 및 범위

적은 단면으로 많은 하중을 전달함으로써 건축물 내부의 면적을 최대한으로 활용할 수 있는 장점을 지닌 구조용 강재는

*교신저자, 정회원, 강원대학교 소방방재공학전공 교수(Tel: +82-33-570-6433, Fax: +82-33-570-6819, E-mail: kwonik@kangwon.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

주철로 시작된 18세기 근대건축부터 현대까지 대표적인 구조재료로 적용되고 있다.

강구조 건축물의 발달은 다양한 강재의 개발과 접합소재의 적용 용이성 등이 어우러지면서 다양한 형태로 발전하여 왔으나, 화재 시 구조내력 저하와 부식 발생 등은 치명적인 약점으로 인식되어 왔다. 부식 방지 및 고온 시의 내력 저하 성능은 내후성 강재 및 건축구조용 내화강재의 개발 노력으로 그 약점을 조금씩 보완하고 있는 추세에 있다.

본 연구에서는 건축물 내부에서 발생될 수 있는 화재의 크기를 유러코드에 정의된 변수조건으로 도출된 화재곡선과 가장 가혹한 조건으로 평가되는 한국산업규격의 표준화재곡선으로 설정하고, 강구조 건축물의 보부재를 대상으로 최대하중과 처짐 등을 평가한다. 또한 적용 보부재의 길이는 내화구조 평가 시 사용되는 수평 가열로의 길이와 유사한 4,100 mm으로 하고, 경계조건을 단순보와 고정보 두가지로 설정한다.

2. 기존 연구의 고찰

강구조 건축물의 고온 시 내력평가에 관한 연구의 경우, 구조물 전체 거동에 관한 국내 연구는 극히 미진한 수준이며, 부재의 거동에 관한 평가는 강재의 고온물성 평가와 내화구조 성능평가 등의 Kwon (2015)의 연구와 내화강재의 성능평가에 관한 Yu (1995) 및 피복재를 도포한 SN 강재와 무피복 내화강재의 고온 시 거동평가를 수행한 Ahn et al. (2019)의 연구가 있다.

2015년부터 건축물의 화재 시 안전성 확보 방안을 사양적 내화설계에서 성능기반 구조내화설계로 확대하기 위한 연구가 국내 한국건설기술연구원 화재연구단(KICT Fire Research Group, 2018) 중심으로 진행되고 있다.

강구조 건축물의 부재와 접합부의 고온 시 거동평가의 물성치와 기준은 Eurocode EN 1991-1-2 (2002)에 제시되어 있으며, 미국은 2018년 ASCE (2018)중심의 새로운 가이드라인을 개발하여 발표하였다. 또한 미국의 철강사들의 협회인 AISC (2016)에서는 강구조 부재의 해석적 수단을 제시한 자료를 제공하고 있다. 뉴질랜드에서는 Buchanan and Abu (2017)의 내화공학설계 자료집에서 화재의 발생과 구조물의 평가에 관한 정보가 제시되어 있다.

3. 보부재의 내화성능 평가

3.1 화재크기 산정

건축물 내부의 화재크기를 도출하기 위하여 가로와 세로의 크기가 3,000 mm × 4,000 mm이고, 높이 2,500 mm인 구획으로 설정하였다. 본 구획은 강재 보부재의 내화성능을 평가하는 수평 가열로와 유사한 크기이며, 향후 실험과의 비교를 위한 공간으로 설정하였다. 공간내부의 마감재로는

일반 석고보드마감으로 가정하였다. 또한 실내의 공간을 화재크기를 평가하기 위하여 사무공간으로 설정하고, 목재 환산 화재하중의 크기는 32 kg/m²이며, 목재의 연소열은 18 MJ/kg과 같다.

공간 내부의 개구부는 출입문(900 mm × 2,000 mm) 1개소 그리고 2,000 mm × 1,500 mm 인 창문 1개소를 포함하는 것으로 설정하였다. 또한 변수화재를 산정하기 위하여 화재성장률(fire growth rate)을 보통(medium)으로 한다. 변수화재크기를 계산하기 위하여 Eq. (1)과 같은 유러코드 (2002)의 변수화재크기 산정식을 적용하였다.

$$T = 20 + 1325(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}) \quad (1)$$

여기서, $t^* = t \cdot \Gamma$ 에 의해 주어진 가상적

시간 [시간]

t : 시간 [시간]

$\Gamma = [O/b]^2 / (0.04/1160)^2$ [-]

b : $\sqrt{\text{열관성}} = \sqrt{\rho c \lambda}$ [$J/m^2 s^{1/2} K$]

ρ : 구획경계 밀도 [kg/m^3]

c : 구획경계의 비열 [J/kgK]

λ : 구획경계의 열전도율 [W/mK]

O : 개구부 계수, $A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$ [$m^{1/2}$]

A_v : 벽체에서의 수직 개구부전체 면적 [m^2]

h_{eq} : 모든 벽체의 창문 높이의 평균 [m]

A_t : 구획의 전체 면적 [m^2]

본 연구에 적용된 표준화재곡선은 Eq. (2)와 같다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (2)$$

여기서, t = 시간(분)이고, T_0 = 주위 온도($^{\circ}C$)

변수화재곡선 식을 적용한 화재크기와 우리 나라 산업표준화법에 규정된 표준화재곡선의 시간 변화에 따른 화재크기는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Temperatures History Versus Elapsed Time (minutes)

변수화재곡선으로 산정된 화재의 최고 온도는 14분 경과 시 869 ℃로 나타났으며, 사무공간에서의 화재성장률에 의한 최고온도 도달시간(0.333시간)이 Eq. (3)으로 계산된 화재 하중에 의한 최고온도 도달시간(0.222시간)보다 크게 나타나, 연료지배형으로 판단되었다.

$$t_{\max} = 0.2 \times 10^{-3} q_{td} \frac{A_t}{A_v \sqrt{h_{eq}}} \quad (3)$$

여기서,

q_{td} = 화재하중(MJ/m²)

h_{eq} = 개구부의 가중 평균 높이(m)

최고온도 도달 이후에는 화재하중의 감소 등으로 내부공간 온도가 감소하는 경향을 보이며, 최고온도 도달시간과 Gamma (Γ)의 곱으로 산출되는 $t_{\max}^*$ 가 0.01을 나타내므로 Fig. 1과 같은 감소경향을 보이고 있다.

본 연구의 변수화재곡선에서도 화재하중이 적용되지만, 실험적으로 평가되는 자연화재곡선의 경우, 가연물량의 정량적 크기인 화재하중밀도, 목재환산 화재하중이 사용될 수 있으며, 향후 이에 대한 비교연구가 필요하다고 사료된다. 또한 변수화재곡선 도출에 적용되는 구획공간의 크기와 개구부의 크기에 따른 설계화재곡선 도출 연구도 필요하다고 판단된다.

표준화재곡선은 실내의 가연물량 감소와 무관하게 지속적인 화재온도의 증가가 지속되고, 변수화재곡선에서는 최고온도 도달이후 화재온도가 감소됨을 알 수 있다. 본 연구에서 설정된 공간구획에서는 초기부터 변수화재온도곡선이 표준온도곡선보다 가혹한 조건임을 알 수 있고, 24분 경과 시 810℃를 정점으로 표준온도곡선보다 낮은 실내온도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 실제 건축 구조물에서의 화재 발생 시 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 표준온도화재곡선의 적용보다는 실질적인 화재의 성상을 구현할 수 있는 변수화재곡선의 사용이 보다 합리적임을 알 수 있었고, 구획의 크기와 개구부의 조건을 다양화함으로 화재 크기를 자료화할 수 있음을 확인하였다.

3.2 부재의 고온 내력 평가

현존하는 내화구조 성능평가는 산업표준화법에 의한 각 구조부재별의 표준화재시험방법을 통한 구조부재의 고온내력평가 방식이다. 표준화재시험방법은 표준화된 시험체의 규격과 가열로의 정형화된 크기 그리고 실제조건과 상이한 구획에서의 감소되지 않는 가열온도로 평가되고 있다. 이와 같은 정형화된 평가방식은 현존하는 건축물의 다양한 조건하에서 구조부재의 고온 내력을 평가하는 것은 현실적이지 않다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 변수화재곡선과 표준화재곡선에 의한 구조부재의 내력평가를 비교하고

자 한다.

표준온도화재곡선을 이용하는 내화구조시험에서의 자유단과 고정단에서의 하중전달 체계는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2. Load Distribution Conditions for a Structural Beam

3.3 구조거동 평가

3.3.1 단순보

단순보의 형태는 양단부에 회전 모멘트에 저항하는 능력이 발휘되지 않기 때문에 부재 중앙부에 최대 휨모멘트가 발생되는 특징을 가지며, 구조거동평가에 사용된 H형강은 400 × 200 × 8 × 13 (단면적 8.4E3 mm², 단면계수 1.19E6 mm³)이다.

고온 시의 구조내력을 평가하기 위하여 부재에는 횡좌굴과 단면적의 변화는 없는 것으로 가정하였다. 보부재의 허용 휨응력은 Eqs. (4), (5)에서 큰 값으로 설정한다.

$$f_b = \frac{900}{\left(\frac{\ell_b \times h}{A_f}\right)} = \frac{900}{\frac{410 \times 40}{20 \times 1.3}} = \frac{900}{630.77} = 142.7 (MPa) \quad (4)$$

여기서, f_b 는 허용휨응력도(MPa), ℓ_b 는 압축플랜지의 지점 간 거리(m), h 는 보의 총, A_f 는 플랜지의 단면적(m²)이다.

$$f_b = \left[1 - \frac{0.4 \left(\frac{\ell_b}{i_b}\right)^2}{C_m \cdot (\lambda_p)^2} \right] \times f_t = \left[1 - \frac{0.4 \left(\frac{410}{4.54}\right)^2}{1 \times 103.04^2} \right] \times 216.7 = 150.12 (MPa) \quad (5)$$

여기서, i_b 는 단면 2차 반경, λ_p 는 한계 세장비이다.

최대 휨응력도는 150.12 MPa이며, 보부재 최대하중은 Eq. (6)으로 도출된다.

$$f_b = \frac{M}{Z} \quad (6)$$

M 는 최대모멘트($N \cdot m$), Z 는 단면계수(m^3)이다.

4점 재하방식의 최대 휨모멘트는 Eq. (7)과 같다.

$$M_{\max} = 2P \times (0.82 + 0.82 + 0.41) - P \times (0.82 + 0.41) - P(0.41) = 2.46P \quad (7)$$

따라서 한 점 P 에 작용하는 하중은 59.84 kN이고, 전체 최대하중은 $4P = 239$ kN이다.

3.3.2 고정단

고정단은 부정정 구조물로서 정적조건으로 해결할 수 없는 여력의 조건을 해결하기 위한 수치적 노력을 하여야 한다. 고정단 A와 B에서의 처짐이 0 이므로, A점과 B점의 반력 모멘트를 부정정 여력으로 설정하고, 고정단 보를 4개의 집중하중이 작용하는 한 개의 단순보와 여력 모멘트가 하중으로 작용하는 또 다른 단순보로 분리하여 A점의 처짐 각을 산정한다. 집중하중에 의한 단순보 처짐각 A_1 과 반력 모멘트를 하중으로 작용시킨 단순보의 처짐각 A_2 은 Eqs. (8), (9)과 같이 도출되었다.

$$\theta_{A_1} = \frac{3.36P}{EI} \quad (8)$$

여기서, E 는 탄성계수, I 는 단면 2차모멘트이다.

$$\theta_{A_2} = -\frac{M_A \ell}{2EI} \quad (9)$$

여기서, M_A 는 A지점의 작용 모멘트이다. 따라서

$$\theta_{A_1} = \theta_{A_2} = \frac{3.36P}{EI} = -\frac{M_A \ell}{2EI} \quad (10)$$

보부재 길이 4,100 mm에서의 단부 모멘트의 크기는 $1.64P$ 이다.

$$M_A = M_B = 1.64P \quad (11)$$

고정단 보에 작용하는 하중의 크기는 Eq. (12)에 따라 계산된다.

$$1.64P = f_b \cdot Z \quad (12)$$

따라서 $P = 89.8$ kN이므로, 4점 지지 하중은 359 kN이다.

보의 처짐은 탄성하중법에 따라 작용하는 모멘트로 계산하고, 보 최대 모멘트는 Eq. (13)으로 산출한다.

$$M = \frac{4.10P}{EI} \quad (13)$$

따라서 단순보의 최대 모멘트는 Eq. (14)로 산출하고, 고정단 보의 최대 모멘트는 Eq. (15)로 계산한다.

$$M = \frac{3.42P}{EI} \quad (14)$$

$$M = \frac{0.68P}{EI} \quad (15)$$

3.4 보부재의 고온특성

화재와 같은 고온조건에서의 보부재의 내력평가를 위해서는 항복강도, 탄성계수와 같은 기계적 특성과 비열, 선팽창 계수 등의 열적 특성이 요구되며, 본 연구에 적용된 항복강도와 탄성계수의 모델값은 Table 1과 같다.

Table 1. Mechanical Properties of Applied Structural Steels at High Temperatures

Sorts	Properties	Temperature	Regression Equation
SS 275	Yield strength	$T \leq 200^\circ\text{C}$	Cold value (240 MPa)
		$200^\circ\text{C} < T$	$-0.32T + 303.21$
	Elastic modulus	$T \leq 200^\circ\text{C}$	Cold value (210GPa)
		$100^\circ\text{C} < T$	$-0.22T + 232.16$

4. 보부재의 내화성능해석 및 결과

강재 보부재의 화재크기에 따른 최대하중과 처짐의 계산은 Kwon (2009)가 개발한 STA-FR를 이용하였다.

4.1 강재온도 변화

적용 화재곡선에 따른 강재 보부재의 온도상승 변화곡선은 Fig. 3과 같다.

4.2 최대하중 변화

화재곡선에 따라 보부재가 보유하는 최대내력은 Fig. 4에 제시하였다. 표준온도화재곡선에서는 시간경과에 따라 최대하중의 감소가 지속적으로 발생하는 것을 알 수 있고,

Fig. 3. Maximum Steel Temperatures According to Fire Curves

Fig. 4. Reduction Pattern of the Maximum Loads Versus Elapsed Time

Fig. 5. Deflection Pattern Versus Elapsed Time (simple beam)

Fig. 6. Deflection Pattern Versus Elapsed Time (fixed beam)

변수화재곡선의 경우는 14분 경과 시부터는 최대내력이 조금씩 상승하는 것을 보여주고 있다. 즉 구획내부의 온도가 감소되는 변수화재곡선에서는 강재의 내력이 다소 회복됨을 알 수 있으며, 구조적으로 다소 안전성을 회복할 수 있음을 보여주고 있다.

화재곡선에 따른 단순보에서의 처짐 발생은 Fig 5와 같다. 표준화재곡선에서는 처짐의 발생이 지속적으로 발생하고 있으나, 변수화재곡선에서는 14분 경과 시 2.54 mm의 발생 이후 서서히 감소경향을 보이고 있다. 따라서 구획내부의 온도감소에 의한 보부재의 온도하강에 따라 구조 능력이 회복되고 있음을 보여주고 있다.

고정단 보에 있어서 시간경과에 따른 처짐발생의 크기는 Fig 6에 제시하였으며, 단순보와 같은 경향을 보이고 있으며, 발생되는 처짐의 크기는 매우 작은 것으로 나타났다. 변수화재곡선에서는 14분 경과 시, 0.62 mm의 처짐이 발생되었고 이후 시간경과에서는 처짐의 양이 점차적으로 줄어드는 경향을 보였다. 이는 공간 내부의 온도감소와 따른 보부재의 온도감소에 따라 구조적 능력이 회복된 것으로 판단되었다.

화재크기의 종류에 따른 보부재의 내력을 평가한 결과, 변수화재곡선을 적용하는 것이 보다 합리적이라 판단되었다. 따라서 향후 다양한 구획크기와 개구부 조건을 변수로

설정하고, 화재크기 및 주변 구조부재의 내력을 평가함으로써 보다 많은 구조적 안전성 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

화재 발생 시 구획의 화재크기 예측과 이를 토대로 실행되는 구조부재의 내력평가는 실제 구조물에서의 발생될 수 있는 붕괴와 같은 위험을 최소화할 수 있는 성능기반 내화설계의 핵심기술이다. 따라서 일정 규모의 구획과 개구부 조건을 설정하고, 유러코드의 변수화재곡선과 우리나라의 표준화재곡선을 토대로 구조부재의 내력을 해석적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 일정 규모의 구획공간을 대상으로 화재하중과 개구부 조건을 포함하는 변수화재곡선을 적용하여 화재크기를 도출하였다.
- (2) 변수화재곡선은 실제 구조물에서의 화재특성을 반영하는 곡선으로 평가되며, 최대온도 도달 이후 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 강재 보부재의 고온 내력을 평가할 때 표준화재곡선보

- 다 변수화재곡선의 적용이 합리적이라 판단되었다.
- (4) 본 연구에 설정된 조건의 경우, 변수화재곡선이 초기에서 22분까지 표준화재곡선보다 가혹한 조건이었으며, 이후 온도구간에서는 감쇠기를 보임으로써 보다 구조 안전성 측면에서 안정적이라 판단되었다.
- (5) 향후 구획공간과 개구부 조건의 다양성을 부여한 해석 자료의 도출이 필요하다고 사료되었다.

감사의 글

본 연구비는 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-620170029) 및 국토교통부 도시건축사업 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 19AUDP-B100358-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, J.K., Hwan, Y.I., Cho, K.H. (2019). Fire Performance of Fire-Resistant Steel Structural Members with Fire Protection, *Proceeding of 2019 Spring Annual Conference*, Korean Society of Steel Construction, pp. 13-14.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *Specification for structural steel buildings*. ANSI/AISC 360-16, Chicago, IL, USA.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2018). *Structural fire engineering*. ASCE Manuals of Practice No. 138.
- Buchanan, A.H., and Abu, A.K. (2017). *Structural design for fire safety* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- EN 1991-1-2. (2002). *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. Comité Européen de Normalisation (CEN).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) Fire Research Group. (2018). *Development of standard for the performance based fire design and guideline*.
- Kwon, I.K. (2009). Development of analytic program for calculation of fire resistant performance on steel structures. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 11, No. 3, pp. 201-208.
- Kwon, I.K. (2015). Analytic evaluation of fire performance according to boundary conditions and lengths for steel columns built with SM 520 and SM 570 at high temperatures. *Materials Research Innovations*, Vol. 19, No. Sup8, pp. 486-489.
- Kwon, I.K., and Chang, I.H. (2001). *Development of the fire engineering techniques of structural steels*. Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST).
- LaMalva, K.J. (2018). *Developments in structural fire protection design: A US perspective*. New ASCE/SEI7 Standard, The Institute of Structural Engineer, pp. 25-29.
- Yu, J.Y. (1995). *Development of 50 kgf/mm² fire resistance steels using Cr-Mo for building structure*. Pohang: POSCO Laboratory.

Received	■ August 27, 2019
Revised	■ September 4, 2019
Accepted	■ September 16, 2019