[Research Paper]

화재시 개구분출화염으로부터의 복사열에 의한 화재확대위험성평가 프로세스 정립

신이철 · 박수영* · 박계원*† · 최동호** · 이길용** · 최정민***

한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 선임연구원, *한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 수석연구원,

한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 연구위원, *한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 책임연구원

Fire Spread Risk Assessment Process for Radiant Heat Flux of Flame Ejected from Opening in Fire

Yi-Chul Shin · Soo-Young Park* · Kye-Won Park*† · Dong-Ho Choi** ·
Gil-Yong Lee** · Jung-Min Choi***

Senior Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea,

*Principal Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea,

**Research Fellow, Fire Insurers Laboratories of Korea,

***Senior Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea

(Received November 26, 2021; Revised November 18, 2021; Accepted December 7, 2021)

요 약

건축물의 구획에서 화재시 플래시오버가 발생하면 화재실 내의 온도가 급격히 상승하며 화재규모가 폭발적으로 증가하고 구획 내 가연물의 완전연소를 위한 산소가 부족하게 된다. 그 결과 화재의 성상이 연료지배형화재에서 환기지배형화재로 변경되면서 구획 내의 미연소가스가 개구부를 통하여 외부로 분출된다. 분출된 미연소가스는 외부 산소와 만나 격렬하게 반응하여 대규모 분출 화염을 형성하게 되고 이로 인해 화재가 상층부로 빠르게 확산된다. 또한 분출화염은 주변 건축물 및 시설물에 고온의 복사열을 방출하여 외장재 및 인접 사물로의 화재 확산에 주된 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 구획실에서 화재가 발생한 경우의 화재가 완전히 발달한 최성기화재를 가정하여 개구분출화염으로부터 발생하는 복사열이 외장재 및 인접 사물에 미치는 열적 영향을 평가하기 위한 정량적 평가 프로세스를 수립하였다.

ABSTRACT

When a flashover occurs from a fire in a building compartment, the fire intensifies explosively and changes from a fuel-controlled fire to a ventilation-controlled fire. As a result, flames and unburnt gas are ejected from openings. The ejected unburnt gas reacts violently with external oxygen to form a large-scale ejected flame, which causes the fire to expand to the upper layer. Moreover, the radiation of extreme heat to neighboring buildings contributes to fire spreading between buildings. In this study, a quantitative evaluation process was established to evaluate the thermal effect of radiant heat generated from an open fire on the exterior materials of facilities, assuming a fully developed fire.

Keywords : Radiant heat flux, Unburnt gas, Fire spread risk assessment process, Ejected flame from an opening, Flashover

1. 서 론

최근 인구가 수도권에 집중되면서 건축물의 형태가 고층화되고 있으며, 한정된 공간으로 인해 밀집되는 경향이

있다. 이러한 경향은 산업계에서도 동일하게 나타나고 있으며, 건물 내부에 가연성 물질을 다량으로 저장하고 있어 소규모 화재 발생으로도 급속한 화재확대로 인해 대규모 화재로 이어질 위험성이 매우 높다.

† Corresponding Author, TEL: +82-31-887-6696, FAX: +82-31-887-6680, E-Mail: 25hyun@daum.net

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

건축물에서 화재가 발생할 경우 구획 내의 온도가 급격히 상승하게 되고 이로 인해 플래시오버가 발생하여 최성기화재에 다다르게 되면 화염이 외벽면의 개구부로 분출되게 된다. 이 경우 화염으로부터의 복사열로 인하여 외장재 및 인접 사물로 화재가 확대되어 심각한 인명 및 경제적 피해가 초래될 수 있다.

복사열은 온도의 4승에 비례하여 증가하므로, 전도 및 대류열에 비하여 고온의 조건에서는 위험도가 급격하게 증가하며, 특히 플래시오버 조건에서는 화염전파를 야기시키는 원인 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 요소이다. 그러나 현재 우리나라의 경우 이러한 건축물에서 화재 발생시 복사열에 의한 화재확대위험성평가에 대해 가이드라인 및 표준화된 문건이 미비한 상황이다. 또한 건축물 화재시 발생하는 복사열이나 화원의 강도 등을 사전에 추정하여 위험성을 평가하고, 이를 통해 화염이 주변 환경에 미치는 열적 영향을 사전에 파악함으로써 화재시 발생 가능한 피해를 최소화 시키기 위한 설계방안은 고려되고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 기존 연구문헌을 분석하여 개구부의 화염이 분출되는 면적을 나타내는 아스팩트비 n 이 1 이상 5 이하의 조건, 종장형 개구부에 대해 최성기 화재를 가정하여 개구분출화염이 발생한 경우, 이로부터 발생하는 복사열이 외장재 및 인접 사물에 미치는 복사열적 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 프로세스를 정립하고자 한다.

2. 개구분출화염에 관한 기존문헌 분석

단일 구획의 화재시 개구분출화염 성상에 관한 연구는 지금까지도 많은 연구가 이루어지고 있으며, 그 중에서도 Yokoi⁽¹⁾에 의해 선구적인 연구가 이루어졌다. Yokoi⁽¹⁾는 최성기 화재시 개구부로부터 분출화염의 성상에 대하여 실험을 통해 개구분출화염의 중심축 궤도 및 온도를 추정하는 평가방법을 정립하였다.

Margaret Law⁽²⁾은 구획의 기하학적 요인과 구획의 가연물량에 따라 개구에서 분출화염 성상을 예측하는 방법을 보고하고 있다. 여기서 구획의 기하학적 요인은 개구 및 구획의 크기를 대상으로 하고 있으며, 주벽의 재질 등은 고려하지 않는다. 또한 가연물량은 구획 내의 가연물의 재질에 따라 열방출률이 다를 경우 나무 무게로 환산하여 가연물량을 계산하여 실험을 수행하고 그 결과를 보여주고 있다.

Hagglund 등⁽³⁾은 가연성 물질로 목재 크리브를 이용한 구획 모형 실험을 실시 분출 화염의 발생 유무를 열방출률로 결정하는 방법을 제안하고 있다. 실험 결과에서 분출화염의 발생 조건으로 발생 한계 열방출률이 존재 해, 그 열방출률은 개구 요인에 의해서만 결정된다고 보고하고 있다. 즉 구획 내의 열방출률이 발생 한계 열방출률 보다 큰 경우에는 개구에서 분출 기류가 화염으로 발생하는 것으로 보고하고 제안식을 도출하였다.

Jansson와 Onnermark⁽⁴⁾은 주택 거실의 크기를 상정한 실규모 화재 실험을 실시, Hagglund 등⁽³⁾과 마찬가지로, 개구인자에 따른 분출화염이 발생하는 발생 한계 열방출률을 제안하였다.

Oleszkiewicz⁽⁵⁾은 개구분출화염 관한 실규모 실험을 실시 개구 분출 화염이 건물의 외부 벽면에 미치는 영향을 검토하여 화원의 열방출률, 개구의 크기, 개구의 형상에 따라 변화한다고 보고하고 있다.

Hasemi⁽⁶⁾는 Oleszkiewicz⁽⁵⁾의 가스버너를 이용한 실규모 화재 실험의 결과와 구획 모형 화재 실험 결과를 비교했다. 그 실험 결과를 해석함에 있어 Hagglund 등⁽³⁾과 같이 분출화염이 발생하는 발생 한계 열방출률인 Q_{crit} 가 있다고 판단했다. Hagglund 등⁽³⁾은 전술 한 바와 같이 그 발생 한계 열방출률이 개구 요인에 의해 결정된다고 한 반면, Hasemi⁽⁶⁾는 구획의 크기도 발생 한계 열방출률에 영향을 주는 것으로 보고했다. 또한, 발생 한계 열방출률은 구획의 열적 특성을 나타내는 온도 인자 $A_T/AH^{1/2}$ 과의 관계로 실험 결과를 정리하였다. A_T 는 구획실 벽면적 총합이며, A 는 개구부 면적 [m^2], H 는 개구부 높이[m]이다.

Ohmiya와 Hori⁽⁷⁾는 개구부 바로 위에 벽이 있는 경우 미연소 가스의 연소를 고려하여 Hasemi⁽⁶⁾가 밝힌 $Q_{crit}/AH^{1/2}$ 와 $A_T/AH^{1/2}$ 의 상관성을 검토하고, 분출화염 중의 미연소 가스의 발열량을 구하는 수식을 도출하였다.

Sugawa 등⁽⁸⁾은 개구부로부터 분출 화염에 외기 바람의 영향을 고려하여 실험 연구를 실시했다. 개구부에 대해 정면 및 측면에서 바람을 받는 경우를 대상으로 각각의 조건에서 벽면을 따라 화염의 온도와 유속의 감소 성상, 풍속을 고려한 개구분출화염의 궤도에 대한 모델을 제안하였다.

Yamaguchi 등⁽⁹⁾은 개구 형상 및 발코니 등 디자인 적 요소에 의한 상부층으로의 연소 확대 방지 효과를 평가하는 방법을 구축하기 위해 모형 실험을 실시했다. 개구분출화염의 기류축을 포함한 모든 영역에서 무차원 온도 Θ 의 분포는 개구 및 발코니의 기하학적 형상에 의존하는 것으로 보고하고 있다. 또한 발코니를 설치하는 것은 상부층으로의 연소 확대 방지에 상당히 유효하며, 발코니의 길이가 동일한 경우에는 폭이 넓을 수록 그 효과는 큰 것으로 나타났다.

그 밖에, Böhm와 Rasmussen⁽¹⁰⁾은 개구분출화염의 높이와 복사열 측정 방법에 대한 검토, Thomas and Law⁽¹¹⁾, Seigel⁽¹²⁾, Webster 등⁽¹³⁾은 개구분출화염의 높이 등 모델에 대한 검토, 또한 Ohmiya 등⁽¹⁴⁾, Yamada 등⁽¹⁵⁾은 발코니 등을 고려하여 개구분출 화염 성상에 관한 검토를 실시하였다.

분출화염에 대한 기존 연구를 분석한 결과 1960년대부터 지속적으로 다양한 주제의 연구가 진행되어 왔다. 그러나 현재까지의 연구 결과를 토대로 구획 화재시 플래시오버가 발생한 이후의 개구분출화염에 대한 종합적인 평가 프로세스는 정립되어 있지 않은 실정이다.

4.1.3 개구부 질량유량 및 분출화염의 열방출률

개구부로 분출되는 화염의 열방출률은 Kawagoe⁽¹⁶⁾가 제안한 식 (3)의 개구인자를 활용한 개구부의 질량유량 수식 이용하여 식 (4)에 의해 산출된다.

$$m_{in} = m_{out} = 0.5A\sqrt{H} \quad (3)$$

$$Q_e = c_p m_{out} \Delta T_f \quad (4)$$

여기서, m_{in} 및 m_{out} 은 개구부의 질량유량[kg/s], Q_e 는 개구부로 분출되는 화염의 열방출률, c_p 는 비열[kJ/kg/K]이다.

4.1.4 미연소가스에 의한 분출화염의 열방출률

구획내 플래시오버가 발생하여 환기 지배형 화재 조건이 되면 구획 내 가연물이 산소부족으로 불완전연소를 하게 된다. 이로 인해 미연소가스가 발생하게 되고 발생한 미연소가스는 개구부로 분출되어 외기의 산소와 만나 다시 연소하게 된다. Ohmiya와 Hori⁽⁷⁾는 이러한 미연소가스에 대한 기존 개구분출화염 관련 실험 논문을 회귀분석 하여 개구분출화염의 발생하한계를 제시하였다. 따라서 식 (5)와 같이 구획실 내 화원의 열방출률에서 개구분출화염의 발생하한계를 제함으로써 미연소가스에 의한 열방출률 산정한다.

$$Q_f = Q - 150A_T^{2/5} (A\sqrt{H})^{3/5} \quad (5)$$

여기서, Q 는 개구부로 분출되어 연소되는 미연소가스의 열방출률[kW], Q_f 는 구획실 내 화원의 열방출률[kW], A_T 는 구획실 내의 벽면적 합계[m²]이다.

4.1.5 개구분출화염의 총 열방출률

개구부로 분출되는 화염의 총 열방출률은 구획내에서 연소하여 분출되는 화염의 열량과 미연소가스가 분출되어 외기의 산소와 결합하여 재발화하는 열량을 합한 식 (6)과 같다.

$$Q_{ef} = Q_e + Q_f \quad (6)$$

여기서, Q_{ef} 는 개구분출화염의 총 열방출률[kW]이다.

4.2 개구분출화염의 영역별 온도 설정

개구분출화염으로부터의 복사열을 보다 간편하게 추정하기 위해 화염의 영역을 Figure 3과 같이 연속화염 및 간헐적화염, 2개의 영역으로 분리하였다. 각 영역의 온도는 미국철강협회⁽¹⁷⁾ 및 일본건축학회의 강구조내화설계지침⁽¹⁸⁾에서 제시한 연속화염영역 820 °C, 간헐적화염영역 704 °C로 설정하였다. Plume 영역은 온도가 낮아 복사열의 발생량이 적기 때문에 계산에서 제외하였다.

Figure 3. Shape of a flame as a source of radiation and the set temperature of each area.

Figure 4. Notation of dimensionless temperature for the central axis.

4.3 개구분출화염의 무차원온도

개구분출화염의 궤도를 유추하기 위해서는 Yokoi⁽¹⁾가 모형실험을 통해 제안한 개구분출화염의 중심축 무차원온도 Θ [-]를 식 (7)에 의해 산출하여야 한다. Figure 4는 개구분출화염 중심축의 무차원온도 Θ [-]의 계산에 필요한 인자에 대해 표현한 그림이다.

$$\Theta = \frac{\Delta T_e r_0^{5/3}}{\left(\frac{T_\infty Q_{ef}^2}{c_p^2 \rho_e^2 g} \right)^{1/3}} \quad (7)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{B(H - Z_n)}{\pi}} \quad (8)$$

여기서, r_0 는 상단개구 반경[m], g 는 중력가속도[m/s²], ΔT_e 는 개구분출화염의 중심축 상승온도[°C], ρ_e 는 분출화염의 밀도[kg/m³], B 는 개구폭[m]이다.

4.4 개구분출화염의 궤도

4.4.1 개구분출화염 궤도의 길이

개구분출화염의 중심축 궤도는 수열부가 받는 복사열 산출 시 형태계수를 결정하는데 매우 중요하게 작용한다. Ohmiya와 Hori⁽⁷⁾는 기존 연구문헌들의 실험 결과에 대한 회귀분석을 통하여 개구분출화염의 중심축 궤도 길이 z' 에 대한 식 (9)를 도출하였다. 또한 개구분출화염의 과도한 온도계산 결과에 대한 보정값으로 Δz 에 대한 식 (10)도 제안하였다.

$$z' = (-4 \ln(2\Theta))^{5/4} r_0 - \Delta z \quad (9)$$

$$\Delta z = 0.04 Q_{ef}^* r_0 \quad (10)$$

$$Q_{ef}^* = \frac{Q_{ef}}{c_p \rho_\infty T_\infty g^{1/2} r_0^{5/2}} \quad (11)$$

여기서, z' 는 궤도에 따른 개구분출화염의 높이[m], Δz 는 가상 화원의 높이[m], Q_{ef}^* 는 개구분출화염의 무차원 총 열 방출률[-]이다(Figure 5 참조).

4.4.2 개구분출화염 궤도의 수직 및 수평거리

개구부로부터 분출화염 중심축을 기준으로 한 분출화염 말단의 수직 및 수평거리에 대해서는 Yokoi⁽¹⁾에 의해 모델이 정립되었으나, 실험 조건상 한계로 인하여 종장개구에 대해서는 신뢰도가 떨어지는 문제점이 있었다. 이러한 문제 해결을 위해 Harada 등⁽¹⁹⁾은 추가 보완 실험 및 회귀분석을 통하여 아스팩트비에 따른 수직 및 수평거리 대한 새로운 모델 식을 제안하였다. 제안된 모델에 따르면 수직거리 z 는 식 (12)~(15), 수평거리 x 는 식 (16)~(19)에 의해 산출 가능하다.

$$\frac{z' - z}{H - Z_n} = C \exp(-an^m) \quad (12)$$

$$C = 0.345 \exp(-0.297n^{1.07}) + 0.0833 \quad (13)$$

$$a = -0.321n^2 + 2.09n + 1.54 \quad (14)$$

$$m = -0.023n^2 + 0.122n + 0.571 \quad (15)$$

$$\frac{x}{H - Z_n} = C' \left(\frac{z}{H - Z_n} \right) \exp \left\{ -a' \left(\frac{z}{H - Z_n} \right)^{m'} \right\} \quad (16)$$

$$C' = 110 \exp(-0.209n^{2.36}) + 0.945 \quad (17)$$

$$a' = 3.31 \exp(-0.0121n^{4.13}) + 1.59 \quad (18)$$

Figure 5. Notation of distance along the central axis of ejected flame from an opening.

$$m' = -1.12 \exp(-0.00175n^{4.32}) + 1.25 \quad (19)$$

4.5 개구분출화염 및 수열부 간의 형태계수

개구분출화염이 방출하는 전체 복사열 중에서 수열부가 받는 복사열을 산출하기 위해서는 형태계수를 구해야 한다. 수열부를 기준으로한 사물의 형태에 따른 계수 F 는 Mudan⁽²⁰⁾에 의해 제안되었으며, 제안식은 식 (20)~(22)와 같다(Figure 6 참조).

$$F = 2 \left[\left\{ f_{\text{rect-v}} \left(\frac{S \sin \theta}{B/2}, \frac{S \cos \theta}{B/2} \right) + f_{\text{rect-v}} \left(\frac{L_e - S \sin \theta}{B/2}, \frac{S \cos \theta}{B/2} \right) \right\} \cos \theta + \left\{ f_{\text{rect-h}} \left(\frac{S \sin \theta}{B/2}, \frac{S \cos \theta}{B/2} \right) - f_{\text{rect-h}} \left(\frac{L_e - S \sin \theta}{B/2}, \frac{S \cos \theta}{B/2} \right) \right\} \sin \theta \right] \quad (20)$$

$$f_{\text{rect-v}}(l_e, x_e) \equiv \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{1+x_e^2}} \tan^{-1} \frac{l_e}{\sqrt{1+x_e^2}} + \frac{l_e}{\sqrt{l_e^2+x_e^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{l_e^2+x_e^2}} \right) \quad (21)$$

$$f_{\text{rect-h}}(l_e, x_e) \equiv \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{1}{x_e} - \frac{x_e}{\sqrt{l_e^2+x_e^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{l_e^2+x_e^2}} \right] \quad (22)$$

Figure 6. Geometry of a tilted flame and location of a target.

4.6 개구분출화염으로부터의 복사열 추정

상기 계산과정들을 통하여 도출된 계산 결과를 종합하여 최종적으로 식 (23)에 의해 개구분출화염이 인접한 사물에 미치는 복사열 추정이 가능하다.

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^k F_i T_i^4 \quad (23)$$

여기서, q_{rad} 는 개구분출화염으로부터의 복사열[kW/m²], ε 는 복사능[-], σ 는 stefan- Boltzmann 상수 5.67×10^{-11} [kW/m²/K⁴]이다.

5. 개구분출화염으로부터의 복사열 추정 종합프로세스 정립

4장의 복사열 추정 절차를 순서대로 정리하여 Figure 7에 개구분출화염으로부터의 복사열 추정 프로세스를 나타냈다. 본 프로세스에 따라 구획 화재시의 기본조건인 구획실의 크기, 온도, 개구부 크기, 화원의 열방출률의 정보만으로 플래시오버 이후 조건에서 개구분출화염으로부터 수열부가 받는 복사열에 대하여 정량적으로 추정 가능하다.

정립된 개구분출화염으로부터의 복사열 추정 프로세스를 활용하여 건축 및 산업시설 등에 화재 발생시 건축물 외장재 또는 인접한 사물이 받는 열적영향을 추정함으로써 정량적인 화재확대위험성평가가 가능할 것으로 판단된다. 또한 이러한 평가를 통하여 위험도가 높은 곳에는 사전에 방호구획 및 방호벽, 수막설비 등 물리적 예방장치를 선제적으로 설치하여 실제 화재 발생시 인명 및 경제적 피해를 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존 연구문헌을 분석하여 건축물에서 화재 발생시 개구분출화염으로부터의 복사열에 의한 건축

Figure 7. Calculation process of heat flux received by a target from ejected flame.

물 외장재 및 인접 사물로의 화재확대위험성평가에 대한 연구를 수행하여 복사열 추정 프로세스를 구축하였다.

구축한 개구분출화염의 복사열 추정 프로세스를 활용하여 산업계에서 설계자 또는 안전관리자 등이 간이 계산식에 따라 복사열에 의한 화재확대 위험성을 보다 쉽게 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이를 통해 사전에 방호구획 및 방호벽 등의 물리적 예방 계획을 선제적으로 수립함으로써 사고 발생시 피해를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 정립한 추정 프로세스에 대해서 다양한 조건에서의 실험을 통해 신뢰성 검증이 반드시 필요하며, 개구부 아스펙트비 5이상의 횡장형 개구부에 대한 평가 방법 구축도 필요할 것으로 판단된다. 또한, 실제 상황과 유사한 조건에 대한 평가가 가능하도록 바람 및 대기조건을 반영하여야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 / 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21RMPP-C163162-01).

References

1. S. Yokoi, "Study on the Prevention of Fire—Spread Caused by Hot Upward Current", BRI Report No. 34, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan (1960).
2. M. Law, "Development of calculation methods for the design of structural fire protection", Structural Survey, Vol. 3, No. 2, pp. 103-109 (1985).
3. B. Hagglund, R. Jansson and B. Onnermark, "Fire Development in Residential Rooms after Ignition from Nuclear Explosions", FOA Report C20016-D6(A3) (1974).

4. R. Jansson and B. Onnermark, "Fire Development in Residential Rooms after Nuclear Explosions", FOA Report C20445-A3 (1982).
5. I. Oleszkiewicz, "Fire Exposure to Exterior Walls and Flame Spread on Combustible Cladding", Fire Technology, Vol. 26, pp. 357-375 (1990). <https://doi.org/10.1007/BF01293079>.
6. Y. Hasemi, "Behavior of Ejected Flame from an Opening at the time of room fire", Safety Engineering Symposium in Japan, pp. 215-218 (1993).
7. Y. Ohmiya and Y. Hori, "Properties of external Flame Tanking into Consideration Excess Fuel Gas Ejected from Fire Compartment", Journal of Architecture and Planning (transactions of Architectural Institute of Japan), No. 545, pp. 1-8 (2001).
8. O. Sugawa, H. Satoh and Y. Oka, "Flame Height from Rectangular Fire Sources Considering Mixing Factor", Fire Safety Science-proceedings of the Third International Symposium, pp. 435-444 (1991).
9. J. Yamaguchi, Y. Iwai, T. Tanaka, K. Harada, Y. Ohmiya, T. Wakamatsu, "Applicability of Nondimensional Temperature for Scaling the Temperatures of Window Jet Plume", Journal of Architecture and Planning (transactions of Architectural Institute of Japan), No. 513, pp. 1-7 (1998).
10. B. Böhm and B. M. Rasmussen, "The Development of a Small-scale Fire Compartment in Order to Determine Thermal Exposure Inside and Outside Buildings", Fire Safety Journal, Vol. 12, pp. 103-108 (1987). [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(87\)90026-9](https://doi.org/10.1016/0379-7112(87)90026-9).
11. P. H. Thomas and M. Law, "The Projection of Flames from Burning Buildings on Fire", Fire Prevention Science Technology, No. 10, pp. 19-26 (1974). <https://doi.org/10.1007/BF02591612>
12. L. G. Seigel, "The Projection of Flames from Burning Buildings", Fire Technology, Vol. 5, pp. 43-51 (1969). <https://doi.org/10.1007/BF02591612>.
13. C. T. Webster, M. M. Raftery and P. G. Smith, "The Burning of Well Ventilated Compartment Fires Part III the Effect of the Wood Thickness", Fire Research Note 474, Joint Fire Research Organization (1961).
14. Y. Ohmiya, S. Yusa, K. Matsuyama and K. Harada, "Prediction Method of Opening Jet Plume Behavior in the Presence of an Opening Soffit", Proceedings of the 5th AOSFST, pp. 171-185 (2001).
15. T. Yamada, K. Takanashi, E. Yanai, T. Suzuki, A. Sekizawa, H. Satoh and H. Kurioka, "An Experimental Study of Ejected Flames and Combustion Efficiency", Fire Safety Science Vol. 7, pp. 903-914 (2003).
16. K. Kawagoe, "Fire Behaviour in Rooms, Report of the Building Research Institute", No.27, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan (1958).
17. American Iron and Steel Institute, "Fire Safe Structural Steel, A Design Guide" (1979).
18. Architectural Institute of Japan, "AIJ Recommendations for Fire Resistant Design of Steel Structures" (2017).
19. K. Harada, D. Nii, Y. C. Shin, K. W. Park, M. Noaki and Y. Ohmiya, "A Practical Formula for Trajectory of Flame Ejected From an Opening", IFireSS 2019 – 3rd International Fire Safety Symposium, pp. 404-412, Ottawa, Ontario, Canada, June 5-7 (2019).
20. K. S. Mudan, "Geometric View Factors for Thermal Radiation Hazard Assessment", Fire Safety Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 89-96 (1987).