건축물 화재시 플래시오버의 발생한계 열방출률에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Occurrence Limit Heat Release Rate of Flashover in a Building Fire

강승구* · 신이철**

Kang, Seunggoo*, and Shin, Yi Chul**

Abstract

In this study, to allow the flashover to occur, combustion tests were conducted by setting the conditions of a fire source using a large-scale compartment and changing the opening condition. As a result, the inside temperature of the compartment was measured under the fire source conditions. Moreover, according to the “Handbook on Design Calculation Methods of Fire Behavior” by the Architectural Institute of Japan, the validity of the heat release rate required for the flashover to occur was verified through the correlation between Q_{FO}/Q_{vmax} and $A_T(kpc)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$.

Key words : Large-Scale, Fire Compartment Temperature, Flash Over, Heat Release Rate

요 지

본 연구에서는 플래시오버가 발생할 수 있도록 실규모 화재구획실을 이용하여 화원조건을 설정하고 개구조건을 변화시켜 연소실험을 실시하였다. 그 결과, 화원조건에 따른 화재실의 내부온도를 수집하였고, 또한, 일본건축학회 화재성상예측 계산 핸드북에서 제시하고 있는 Q_{FO}/Q_{vmax} 와 $A_T(kpc)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$ 의 상관관계를 통한 플래시오버 발생한계 열방출률에 대한 유효성을 확인하였다.

핵심용어 : 실규모, 화재실온도, 플래시오버, 열방출률

1. 서 론

건축물 내부에서 화재가 발생하여 초기소화에 실패할 경우, 화재실 상부에 가연성가스와 고온의 열이 축적됨에 따라 플래시오버(Flash Over) 현상이 발생하는 경우가 있다. 이러한 플래시오버 현상은 화재실의 온도를 급격히 상승시키고, 화재실 바닥면에 놓여진 가연물이 일제히 연소가 시작됨에 따라, 화재실 전체가 화염으로 휩싸이게 되어, 건축물

내부의 재실자가 피난하는데 있어서 극히 위험한 현상이다 (Harada, 2007).

한편, 이러한 플래시오버의 현상을 해명하기 위하여 여러 가지의 화재조건을 변화시킨 연소실험 등을 수행한 연구가 진행되어 왔다. Hagglund et al. (1974), Babrauskas (1980), Hagglund (1980)는 Thomas (1981), 열수지에 의거하여 화재실의 상부층 온도를 600 °C로 가정하고, 개구인자 $A\sqrt{H}$ 와 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 의 상관관계를 통하여 플래시오버의 발생

*정회원, 동경이과대학 연구추진기구 종합연구원 PD연구원, 공학박사(E-mail: kangseunggoo86@naver.com)

Member, Ph.D., PD Researcher, Research Institute for Science and Technology, Tokyo University of Science

**교신저자, 정회원, 한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 선임연구원, 공학박사(Tel: +82-31-887-6619, Fax: +82-31-887-6680,

E-mail: shinyicul@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Senior Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea

따라서, 본 연구에서는 실규모 화재 구획실을 이용하여 KS F ISO 13784-1에서 제시하고있는 플래시오버를 판정하는 내용중 하나인 「시험체 개구부로의 화염분출 순간」을 참고하여, 플래시오버 현상이 발생하도록 화원 조건을 설정하고, 개구조건을 변화시킨 연소실험을 실시하여 정량적인 화재실의 내부온도를 수집하고, 또한, 플래시오버의 발생한계 열발출률에 대한 검토를 목적으로 하였다.

실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 화재실을 상정한 구획과 파사드를 구성한 장치를 사용하였다. 구획의 내부치수는 폭 2 m × 길이 2 m × 높이 2 m로 하였으며, 주재료는 ALC판(두께: 50 mm)으로 구성하여 구획내 주변면에 세라믹화이버(두께: 25 mm)를 부착하였다. 구획에는 개구를 1개소 설치하였으며, 개구의 상단이 구획내 천정면에서 0.5 m의 높이에 위치하도록 설치하고, 개구의 폭 및 높이를 변화시켰다. 파사드는 폭 3 m × 높이 5.5 m를 이용하여 구획의 천정에서 개구를 설치한 벽면의 연직방향에 설치하였으며, 주재료는 규산칼슘판(두께: 25 mm)을 기반으로 하여 수열면측 표면에 세라믹화이버(두께: 50 mm)를 부착하여 구성하였다. 화원은 연료로써 도시가스를 사용하였으며, 구획내 바닥면의 중심이 가스버너(폭 0.3 m × 길이 1.8 m)의 장변이 개구에 병렬이 되도록 설치하고, 가스분출면을 구획바닥면과 일치시켰다. 또한, 가스버너로의 가스공급량은 가스유량계를 사용하여 조절하였다.

가스유량계(Fig. 2)로부터 가스공급량을 데이터로저

Fig. 2. Mass Flow Controller

Fig. 3. Data Logger (MX100)

Fig. 4. Thermocouple (K-type)

(Fig. 3)로 전송하여 가스가 완전 연소하는 것을 가정하여 화원의 열방출률을 산출하였다.

2.2.2 화재실온도

Fig 1에 나타난 바와 같이, 구획 내의 대각선 상의 구석부분 부근 2개소에 대하여 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 1.95 m의 높이로 K-type 시스열전대($\phi 3.2$ mm)(Fig. 4)를 설치하여 구획의 내부 온도를 측정하였다.

2.3 실험조건 및 방법

Table 1에 나타난 바와 같이, 개구조건은 개구아스펙트 비($n = 2W/H$)가 1~6의 범위로 6조건을 설정하였다. 또한, 각각의 개구조건마다 화원 열방출률 HRR에 대하여 HC1~HC4의 4조건으로 설정하였고, 기존연구에서 제안되고 있는 분출화염의 발생한계 열방출률을 도출하는 Eq. (1) (Ohmiya and Hori, 2001)을 이용하여 산정한 분출화염 발생 한계량 Q_{crit} 및 개구조건에서 결정되는 개구인자 $A\sqrt{H}$ 에 계수를 곱한 값에 의거한 화원 열방출률을 설정하여,

Table 1. Experimental Condition

Case	W	H	n	$A\sqrt{H}$	Surface area
	Width	Height	Aspect ratio	Opening factor	
	[m]	[m]	[m]	[m ^{5/2}]	
Case1	0.5	1	1	0.50	23.5
Case2	1	1	2	1.00	23.00
Case3	1	0.67	3	0.55	23.33
Case4	1	0.5	4	0.35	23.50
Case5	1	0.4	5	0.25	23.60
Case6	1	0.33	6	0.19	23.67

Surface area : wall, ceiling and floor

(a) Opening Conditions

HC1	HC2	HC3	HC4
Q_{crit}	$(Q_{crit} + 1500AH^{1/2}) / 2$	$1500AH^{1/2}$	$1800AH^{1/2}$
[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
349.9	549.9	750.0	900.0
525.8	1012.9	1500.0	1800.0
368.7	595.7	822.6	987.2
284.2	407.3	530.3	636.4
232.9	306.2	379.5	455.4
196.1	240.2	284.4	341.2

(b) Fire source Conditions

Q_{crit} , $(Q_{crit} + 1500A\sqrt{H})/2$, $1500A\sqrt{H}$, $1800A\sqrt{H}$ 로 설정하였다.

$$Q_{crit} = 150A_T^{2/5}(A\sqrt{H})^{3/5} \quad (1)$$

기존연구에서 제안되고 있는 Eq. (1)은 개구에서 분출화염이 발생하는 한계열방출률이라고 정의되어 있으며, 본 연구에서는 Q_{crit} 를 초과하는 양의 가스를 공급한 경우, Fig. 5에 나타난 바와 같이(실험조건의 직접비교를 위해 착화후 20분의 사진을 이용) 구획내에서 미연소가스가 증가하고 개구에서 분출화염이 발생하는 것에 대하여 플래시오버가 발생하였다고 가정하였다(Tanaka, 2002).

한편, 실험은 개구상부를 고정하여 개구조건을 변경하고 Fig. 6에 나타난 화원 열방출률(상세 값은 Table 1에 표기)가 되도록 최소 값 HC1에서 최대 값 HC4까지 5분 간격으로 단계적으로 가스공급량을 증가시켰다. 또한, 데이터 정리는 1초 간격으로 측정된 데이터에 대하여 HRR을 증가시키기 전 20초간의 평균값을 이용하였다.

Fig. 5. External Flame Shape (Cross-sectional diagram)

Fig. 6. Variation of HRR as a Function of Time

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화원의 열방출률

Fig 7에 착화로부터 5분 간격으로 20분까지 HRR을 증가시킨 결과에 대하여, 화원 열방출률 Q_c 와 개구인자 $A\sqrt{H}$ 의 관계를 나타내었다. 여기서, 그래프 안의 Eq. (2)는 구획내 화재시, 개구로부터 유입되는 공기가 화재실내에서 완전 연소한다고 상정한 열방출률의 이론값이다(Harada, 2007). 그래프 안의 검은색 플롯은 분출화염이 발생하지 않은 구간으로 표기하였고, 흰색 플롯은 분출화염이 발생한 구간으로 표기하였다. 또한, 그래프의 각 조건의 범례 옆에 실험시 개구로부터 분출화염이 발생한 시간을 육안으로 관찰하여 기록한 결과를 나타내었다.

$$Q_{cmax} = 1500A\sqrt{H} \quad (2)$$

Fig 7에 나타난 바와 같이, 전체의 실험조건에서 개구로부터 분출화염의 발생이 확인되었다. 또한, 분출화염이 발생한 구간에 대하여 주목하면, Case1~Case5의 실험조건에서는 HC2 (10 min)의 화원조건에서 분출화염이 발생하였으며, Case6의 실험조건에서만 HC4 (20 min)의 화원조건에서 분출화염이 발생한 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과를 통하여, 전체의 실험조건에서 Eq. (2)의 실선을 상회하는 플롯의 값은 분출화염이 발생하고 있는 것을 알 수 있으며, Eq. (2)의 이론식에 대한 타당성을 확인 할 수 있었다. 한편, 개구인자 $A\sqrt{H}$ 가 커질수록 Eq. (2)에 비교하여 화원 열방출률 Q_c 가 작은 조건에서 분출화염이 발생하는 경향이 나타났다. 이러한 요인에 대하여, 개구인자 $A\sqrt{H}$ 의 값이 0.19를 기준으로 Eq. (2)의 화원조건인 HC3 (15 min)의 전후로 분출화염이 발생하였으며, HC2 (10 min)의 화원조건에서 분출화염이 발생한 실험조건에 대하여 고찰하면, 열방출률의 증가에 대한 영향과 개구인자 $A\sqrt{H}$ 가 화재실 주벽면적에 대하여 상대적으로 크기 때문에 화재실 주벽면적의 손실열은 감소되었다고 생각되며, 반면, 유입되는 공기량은 많아지기 때문에 화재실내의 온도상승이 빨라져서 Eq. (2)의 화원조건 HC3 (15 min)보다 분출화염이 빨리 발생하였다고 사료된다.

Fig. 7. Relationship between Q_c and $A\sqrt{H}$

3.2 화재실 온도

Figs. 8(a) and 8(b)는 구획내의 2개소 위치에 설치한 열전대 에서 측정된 온도에 대하여 시간변화에 의한 화재실 내부온 도의 값을 나타내었다. 또한, 각 실험조건에 T_A 의 값과 T_B 의 값은 구획내부 바닥면에서 천정방향으로 설치한 열전대의 평균값이다.

Figs. 8(a) and 8(b)에 나타난 바와 같이, 전체의 실험조건에 서 HC1 (5 min)~HC3 (15 min)의 화원조건에서는 T_A 와 T_B 의 위치에 관계없이 화원 열방출률 Q_c 가 증가함에 따라 화재실온도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, HC4 (20 min)의 화원조건에 대하여 Case1~Case5의 실험조건에 서는 T_A 와 T_B 의 위치에 관계없이 화재실의 온도가 완만히 증가하거나 유지되는 추이를 보였으나, Case6의 경우 T_A 와 T_B 의 위치 모두에서 HC4 (20 min)의 화원조건 구간에서 화재실의 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 원인으로서는 HC3 (15 min)~HC4 (20 min)의 화원조건 구간에서 연료지배형 화재에서 환기지배형 화재로 변화되었다고 생 각되며, 이에 따라 화재실에 공급되는 연료의 열분해속도에 대하여, 외부에서 유입되는 산소량이 부족하여 연소반응이 느려졌기 때문에 화재실 온도가 감소하였다고 사료된다.

한편, T_A 와 T_B 의 위치의 화재실 온도결과에 대하여 주목 하면, 전체의 실험조건에서 T_B 보다 T_A 의 위치에서 온도가 높게 측정되었으며, 이에 대한 이유는 개구부 부근 외부에 존재하는 차가운 공기의 영향이 있었다고 사료된다.

(a) Back side of compartment

(b) Front of compartment

Fig. 8. Variation of T_A and T_B as a Function of Time

4. 플래시오버의 발생한계 열방출률

본 연구에서는 Architectural Institute of Japan (2018)과 Lee and Harada (2016)이 기존의 문헌을 정리하여 제시한 플래시오 버의 발생한계 열방출률(Q_{FO}/Q_{vmax} 와 $A_T(k\rho c)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$ 의 상관관계)에 대하여 본 실험의 결과 데이터를 이용하여 검토하도록 한다.

4.1 플래시오버의 발생한계 열방출률 예측식

화재 구획실의 열량보존은 Eq. (3)으로 나타낼 수 있으 며, 우변의 1항은 화재 구획실에서의 열분해속도이며, 우 변의 2항은 고온 상부층 주벽의 열손실속도로 나타낼 수 있다.

$$Q = c_p m_a (T_f - T_\infty) + h_k A_T (T_f - T_\infty) \quad (3)$$

여기서, McCaffrey et al. (1981)은 Eq. (3)에 대하여 100건을 초과하는 화재실험 데이터를 수집하여 회귀분석한 결과, 다음 Eq. (4)를 도출하였다.

$$\frac{\Delta T_f}{T_\infty} = 1.6 \left(\frac{Q}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g A \sqrt{H}}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{c_p \rho_\infty \sqrt{g A \sqrt{H}}} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

또한, 실효열전달계수 h_k 는 다음 Eq. (5)로 나타 낼 수 있으며, $\alpha (= k/c_p)$ 는 열확산계수[m²/s]이다.

$$h_k = \begin{cases} \frac{k}{\delta} & \left(t > \frac{\delta^2}{4\alpha} \right) \\ \left(\frac{k\rho c}{t} \right)^{1/2} & \left(t \leq \frac{\delta^2}{4\alpha} \right) \end{cases} \quad (5)$$

한편, 플래시오버의 발생조건에 대하여 화재실의 상승온 도 ΔT_f 를 500K로 가정하고, Eq. (4)의 우변 2항의 화재실의 열방출률 Q 를 플래시오버의 발생한계 열방출률 Q_{FO} 로 변 경하고, c_p , T_∞ , ρ_∞ , g 의 파라메타 값을 대입한 후 Q_{FO} 에 대해서 좌변으로 정리하면 다음 Eq. (6)이 도출되며, 플래시 오버 발생한계 열방출률의 예측식을 제안하고 있다.

$$Q_{FO} = 610 (h_k A_T A \sqrt{H})^{1/2} \quad (6)$$

4.2 주벽재료의 열관성을 고려한 플래시오버의 발생한계 열방출률 예측식 검토

Fig. 9에 Q_{FO}/Q_{vmax} 와 $A_T(k\rho c)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$ 의 상관관계 를 나타내었다. 여기서, 그래프 안의 플롯은 Babrauskas (1980), Hagglund (1980), McCaffrey et al. (1981), Thomas (1981), Chen, Francis, et al. (2011), Chen, Yang, et al., (2011) 본 연구의 실험 결과이며, 실선과 1점쇄선은 McCaffrey et

Fig. 9. Relationship between Q_{FO}/Q_{vmax} and $A_T(kpc)^{1/2}/0.5AH^{1/2}$

al. (1981)가 제안한 Eq. (6)에 실험 데이터의 플래시오버 발생시간의 평균값 시간 $t = 340s$ 와 $t = 1,000s$ 를 대입한 값이다. 또한, 실험(Full) 화재실험과 모형(Model) 화재실험에 대하여, 주벽의 열관성 $kpc^{1/2}$ 의 규모를 대(Large) 1~1.6, 중(Medium) 0.4~0.99, 소(Small) 0.1~0.39의 범위에 대하여 3개로 나누어 분류하였으며, 기존 문헌에서 예측식을 유도할 때 사용한 데이터는 use로 표기하였다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이, 기존 문헌의 실험(Full) 화재실험과 모형(Model) 화재실험의 주벽의 열관성 $kpc^{1/2}$ 의 규모 소(Small) 0.1~0.39의 분포범위(점선)에 본 실험 결과의 데이터 값이 위치하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 동일한 구획의 재료와 개구인자를 고려한 동일한 화원 열방출률에 대하여 개구조건을 변화시킬 경우, 개구인자가 작은 순서부터 Fig. 9의 x축의 파라메타 값이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 개구인자가 작을수록 플래시오버의 발생한계 열방출률이 개구인자가 큰 조건보다 더 많은 열량이 필요하다는 것을 의미하며, 외부의 공기 유입 및 열기류 유출량, 화재실 주벽의 손실열 등의 복합적인 영향이 기인하고 있다고 사료된다.

Fig. 9에 나타난 빨간색 점선과 같이, 본 연구의 실험범위 내에서 Q_{FO}/Q_{vmax} 와 $A_T(kpc)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$ 의 상관관계에 대하여 실험값을 회귀분석하면, $y = 0.1185x^{0.4}$ 의 플래시오버의 발생한계 열방출률의 예측식을 도출 할 수 있다. 또한, 본 연구의 도출 식과 McCaffrey et al. (1981)가 제안한 Eq. (6)을 비교하면, McCaffrey et al. (1981)의 예측식 $t = 340s$ (1점쇄선)을 상회하는 결과가 나타났으며, 상기 기술한 Fig. 8에 나타난 바와 같이 본 연구의 범위에서는 화재실의 상승 온도 $\Delta T_f = 500K$ 에 도달하는 시간이 약 60s~180s의 범위에

있었기 때문에 이와 같은 결과가 나타났다고 생각된다. 또한, 그래프 내의 각각의 예측식 $y = ax^b$ 의 관계에서 본 연구의 결과, x축 파라메타의 0.4승에 비례하는 반면, McCaffrey et al. (1981)의 제안식의 경우 0.5승에 비례하는 결과가 나타났다. 이는 Fig. 9의 x축 값이 작은 구간에서는 McCaffrey et al. (1981)의 식(340 sec)보다 본 연구에서 제시하는 값이 높은 값을 상회하는 결과를 나타내고 있으나, x축 값이 커질수록 McCaffrey et al. (1981)의 식(340 sec)의 값에 근접해가는 경향이 나타났다.

한편, Q_{FO}/Q_{vmax} 와 $A_T(kpc)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$ 의 상관관계에 대하여 본 실험의 결과 데이터를 이용하여 기존 연구의 데이터와 비교 검토한 결과, 플래시오버의 발생한계 열방출률에 대하여 유효성을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실험 화재구획실을 이용하여 플래시오버 현상이 발생하도록 화원조건을 설정하고, 개구조건을 변화한 연소실험을 실시하여 정량적인 화재실의 내부온도를 수집하는 것과, 플래시오버의 발생한계 열방출률에 대한 검토를 목적으로 연구를 수행하였으며, 본 실험조건 범위에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 화원의 열방출률

- 전체의 실험조건에서 개구부로부터 분출화염이 발생하였으며, 개구인자 $A\sqrt{H}$ 가 커질수록 Eq. (2)의 $1500A\sqrt{H}$ 에 비교하여 화원 열방출률 Q_c 가 작은 조건에서 분출화염이 발생하는 경향이 나타났다.

2) 화재실 온도

- HC1 (5 min)-HC3 (15 min)의 화원조건에서 T_A 와 T_B 의 위치에 관계없이 화원 열방출률 Q_c 가 증가함에 따라 화재실온도가 증가하였다. 반면, HC4 (20 min)의 화원조건에 대해서 Case1~Case5의 실험조건에서는 T_A 와 T_B 의 위치에 관계없이 화재실의 온도가 완만히 증가하거나 유지되는 추이를 보였으나, Case6의 경우 T_A 와 T_B 의 위치 모두에서 HC3 (15 min)-HC4 (20 min)의 화원조건 구간에서 화재실의 온도가 감쇠하는 경향이 나타났다.

3) 플래시오버의 발생한계 열방출률

- 본 실험 결과의 데이터 값이 기존 문헌의 실험(Full) 화재실험과 모형(Model) 화재실험의 주벽의 열관성 $kpc^{1/2}$ 의 규모 소(Small) 0.1~0.39의 분포범위에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있었다.
- Q_{FO}/Q_{vmax} 와 $A_T(kpc)^{1/2}/c_p 0.5AH^{1/2}$ 의 상관관계를 이용하여, 본 연구의 실험범위 내에서 $y = 0.1185x^{0.4}$ 의 플래시오버의 발생한계 열방출률의 예측식을 도출하였다.

한편, 본 연구는 플래시오버의 발생한계 열방출률에 대한 검토를 목적으로 구획내부를 단일조건으로 설정하여 기초적인 실험을 수행하였으며, 향후 구획내부의 내장재 및 개구에 설치되는 문, 창문 등을 고려한 연구가 필요하다고 사료된다.

사용기호

A	: 개구면적 [m^2]
A_T	: 주벽 면적 [m^2]
$A\sqrt{H}$	: 개구인자 [$\text{m}^{5/2}$]
c	: 화재실 주벽의 비열 [kJ/kgK]
c_p	: 비열 [kJ/kgK]
n	: 아스펙트비($2W/H$) [-]
W	: 개구폭 [m]
g	: 중력가속도 [m/s^2]
h_c	: 실효열전달계수 [$\text{kW/m}^2\text{K}$]
H	: 개구 높이 [m]
k	: 화재실 주벽의 열전도율 [kW/mK]
m_a	: 개구유량 [kg/s]
Q	: 화재실의 열방출률 [kW]
Q_c	: 화원열방출률 [kW]
Q_{FO}	: 플래시오버 발생한계 열방출률 [kW]
Q_{verit}	: 개구분출화염 발생한계량 [kW]
Q_{vmax}	: 구획내 산소가 완전히 연소되는 열방출률의 한계량 [kW]
t	: 시간 [sec]
T_f	: 화재실온도 [K]
T_∞	: 분위기온도 [K]
ρ	: 화재실 주벽의 밀도 [kg/m^3]
ρ_∞	: 분위기밀도 [kg/m^3]
δ	: 화재실 주벽의 두께 [m]

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 국가표준기술력향상사업(과제번호: 10079987)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Architectural Institute of Japan. (2018). *Handbook on Design Calculation Methods of Fire Behavior*. pp.112-113.

- Babrauskas, V. (1980). Estimating room flashover potential. *Fire Technology*, Vol. 16, pp. 94-103.
- Chen, A., Francis, J., Dong, X., and Chen, W. (2011). An experimental study of the rate of gas temperature rise in enclosure fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 46, pp. 397-405.
- Chen, A., Yang, S., and Dong, X. (2011). Studies of the combined effects of some important factors on the likelihood of flashover, *Fire and Materials*, Vol. 35, Issue 2, pp. 105-114.
- Hagglund, B. (1980). *Estimating flashover potential in residential rooms*. FOA Report C 20369-A3, Forsvarets Forskningsanstalt, Stockholm.
- Hagglund, B., Jansson, R., and Onnermark, B. (1974). *Fire development in residential rooms after ignition from nuclear explosions*. FOA Report C20016-D6 (A3), Forsevarets Forskingsantalt, Stockholm.
- Harada, K. (2007). *Building fire mechanism and fire safety design*. The Building Center of Japan, pp. 60-61.
- Lee, S.C., and Harada, K. (2016). A validation study of existing formulas for determining the critical heat release rate for flashover, Chapter 64, *Fire Science and Technology 2015 – the Proceedings of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, Springer, pp. 631-638.
- McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., and Harkleroad, M.F. (1981). Estimating room temperatures and likelihood of flashover using fire test data correlations. *Fire Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 98-119.
- Ohmiya, Y., and Hori, Y. (2001). Properties of external flame taking into consideration excess fuel gas ejected from fire compartment. *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, Vol. 66, No. 545, pp. 1-8.
- Tanaka, T. (2002). *Introduction to building fire safety engineering revised edition*. The Building Center of Japan, pp. 184-185.
- Thomas, P. (1981). Testing products and materials for their contribution to flashover in room. *Fire and Materials*, Vol. 5, pp. 103-111.
- Waterman, T.E. (1968). Room flashover-criteria and synthesis. *Fire Technology*, Vol. 4, pp. 25-31.

Received	November 23, 2020
Revised	November 24, 2020
Accepted	January 8, 2021