



# 구획 내 플래시오버 발생 한계 열방출률 예측 방법에 관한 연구

## Prediction of Limit of Heat Release Rate during Flashover in a Compartment Space

이병훈\*

Lee, Byeong-Heun\*

### Abstract

This study derives a predictive equation for calculating the marginal heat release rate of flashover in a compartmentalized space. Moreover, other variables (in addition to the surface area and opening area of the compartment, which are used as variables in existing studies) were derived and modified. By collecting and analyzing the results of existing flashover experiments, the thermal inertia of the compartment wall was judged to be a variable that directly affects the indoor temperature rise. An equation constructed using this variable was found to be up to 6.5% more reliable than the existing predictive equations. However, for use in design prediction, the developed equation had to be adjusted to derive values lower than the experimental results; thus, an equation that corrected the safety rate was derived. From this calculation, a design prediction equation was derived, from which flashover is predicted to occur before the time predicted in existing experiments.

**Key words :** Building Fire Safety, Flashover, Heat Release Rate, Hand Calculation

### 요 지

본 연구는 구획 내 플래시오버 발생 한계 열방출률을 계산하기 위해 예측식을 도출하는 연구로서 기존의 변수로 활용되던 구획 내 표면적, 개구부의 면적 이외에 추가적인 변수를 도출하고 이를 수식화하였다. 기존의 플래시오버 실험결과를 모두 취합해 분석한 결과 벽체의 열관성이 실내 온도 상승과 직접적인 영향을 미치는 변수로 판단되어 이를 이용한 수식을 구축한 결과 기존의 예측식들과 비교했을 때 최대 6.5% 이상 신뢰성이 높을 것으로 나타났다. 다만, 설계용 예측식으로 사용하기 위해서는 실험결과보다 낮은 수치가 도출될 필요가 있어 안전율을 보정한 식을 도출하였다. 계산 결과 기존 실험 결과보다 낮은 시점에 플래시오버가 발생하는 것으로 계산되는 설계용 예측식을 도출하였다.

**핵심용어 :** 건축물 화재안전, 플래시오버, 열방출률, 수작업 계산

## 1. 서 론

일반적으로 구획 내에서 발생한 화재는 충분한 양의 가연물과 산소가 존재한다는 전제하에 가연물의 연소 특성에 영향을 받는 연료 지배형 화재(Fuel-Controlled Fires)에서 실내의 온도가 상승하는 과정에서 플래시오버(Flashover)라는 과도기적인 현상을 거쳐 환기랑에 지배받는 환기 지배형 화재(Ventilation-Controlled Fires)로 전환되고 외벽 개구부 등과 같이 산소가 유입되는 통로를 거쳐 외부로 분출된다.

이렇듯 구획 내에서 발생한 화재는 외부로 분출되면 대형 화재로 확대될 위험성이 높아지는데 구획 공간에서 최성기로 화재가 확대되는 주요 요인은 기존의 실험적 연구에서 개구부와 상관관계가 높은 것으로 제안된 바 있다(Kweon and Kang, 2020; Kang, 2021; Kang, 2022).

따라서, 구획 내 화재의 성장에 따라 개구부가 개방되고 외부로 화재가 확대되는 과정에서 화재가 대형화되는 것을 방지하기 위해서는 외벽의 방화성능 향상과 더불어 구획 내의 화재가 플래시오버를 거쳐 외부로 분출되는 일련의

\*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 박사후연구원(Tel: +82-31-369-0530, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: bhlee@kict.re.kr)  
Corresponding Author, Member, Researcher, Fire Research Institute, KICT

과정에 대한 연구가 요구된다.

국내의 경우 2012년, 2015년, 2018년, 2021년에 걸쳐 단열재에 대한 성능 기준을 강화하고 있으며, 실규모 화재시험 기준이 도입되는 등 분출화염을 통한 화재확대를 방지하기 위한 다수의 대책이 마련되고 있다.

그러나 플래시오버에 관한 연구는 비교적 실험 중심으로 이뤄지고 연구자들마다 실험 조건 등이 각기 다르다 보니 해당 결과를 범용적으로 적용하기 어렵다는 단점이 있으며, 실제 사례에 대입했을 때 계산된 수치가 실험 결과 보다 높게 계산되는 등 여러 가지 보완점이 요구되어 연구가 시급히 이뤄질 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 구획 내 플래시오버가 발생 한계 열방출률에 대한 기존 문헌 및 실험결과를 바탕으로 설계에 적용이 가능한 수준의 플래시오버 발생 예측식을 도출하는 것에 목적이 있다.

## 2. 플래시오버에 관한 기존 문헌

### 2.1 플래시오버 발생에 관한 이론

기존의 연구에서는 플래시오버 발생 한계 열방출률을 예측하기 위해 많은 실험과 모델화를 통해 다양한 예측식을 제안하고 있다. 하지만 플래시오버를 수반하는 실규모 실험은 안전성과 제약이 수반되므로 한정적인 조건으로 이뤄진다. 따라서 실험 결과의 상관관계를 통해 도출된 예측식을 실제 구획 공간에 그대로 적용할 수 있는지에 대해서는 의견이 다양하다.

다만, 모든 식의 근간은 2층 Zone Model에 근거해 계산되고 있으며 벽체 및 개구부의 열손실보다 내부 가연물의 열방출률이 더 높아지는 경우 발생한다고 판단된다.

이를 좀 더 풀어보자면 기존의 플래시오버 발생 한계 열방출률의 예측은 실내 공간의 열적 조건에 근거하게 된다.

가연물의 연소에 의해 생성된 고온의 상부층 온도는 실내의 개구부로부터 환기에 의해 외부로 방출되는 열손실속도와 기둥, 벽, 천장 등의 벽체의 열흡수 속도의 합이 가연물의 열방출률과 상관관계를 이룰 수 있도록 Eq. (1)과 같이 결정된다.

$$Q = c_p m_a (T_s - T_0) + h_k A_T (T_s - T_0) \quad (1)$$

여기서,  $c_p$ 는 연기의 비열(kJ/kg · K),  $m_a$ 는 질량유량(kg/s),  $T_s$ 는 연기층 온도(K),  $T_0$ 는 외기온도(K),  $h_k$ 는 주벽의 유효 열전달율(kW/m<sup>2</sup> · K),  $A_T$ 는 실의 내표면적(m<sup>2</sup>),  $Q$ 는 연소에 의한 열방출률(kW)을 의미한다. 첫째 항은 연기의 방출로 인한 개구로의 열손실, 둘째 항은 실내의 벽체에 의한 열손실을 뜻한다. 일반적으로 연기층 온도가 500 °C~600 °C 또는 바닥면으로부터 복사 열유속이 20 kW/m<sup>2</sup>에 이르면 바닥에 위치한 가연물에 일시에 착화가 발생하여 플래시오버에

이른다고 가정한다. 기존의 연구자들은 다음과 같이 플래시오버 예측식에 대해 제안하고 있다.

### 2.2 플래시오버 발생에 관한 기존 연구

Babrauskas (1980)는 공간 상부층에 대한 가스 유량을 근사적으로 나타내, 실내의 에너지 손실은 Eq. (2)와 같이 연기층과 온도가 유사한 벽체의 복사를 통해서 발생하도록 제안했다(Babrauskas, 1980).

$$q_{loss} = \epsilon \sigma (T_g^4 - T_\infty^4) (0.40 A_T) \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 고온 가스의 복사능(Emissivity),  $\sigma$ 는 슈테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 상수,  $T_g$ 는 구획 내 최대 온도(K),  $T_\infty$ 는 상온(K)을 나타낸다.

이 때, 공기를 이용해 완전 연소될 수 있는 화학 양론적 양을 고려했을 때 공기의 단위질량 당 방출되는 열은 3,000 kJ/kg 정도로 일정하므로 이를 Eq. (3)에 대입했을 때는 Eq. (4)와 같은 형태의 화학 양론적 최대 열방출률을 도출할 수 있다.

$$\dot{m}_g = 0.5 A \sqrt{H} \quad (3)$$

$$Q_{FO} = 1500 A \sqrt{H} \quad (4)$$

여기서, Babrauskas (1984)는 근사값에 가까운 수치로서 0.5 ( $Q_{FO}$ )를 제안하였으며 Eq. (5)를 한계 열방출률에 대한 표현식으로 제안하였다.

$$Q_{FO} = 750 A \sqrt{H} \quad (5)$$

McCaffrey et al. (1981)은 플래시오버의 발생조건으로서 실내온도 변화 값을  $\Delta 500$  K로 가정하고 Eq. (6)을 이용해 Flashover가 발생하기 위한 조건을 Eq. (7)과 같이 예측했다 (McCaffrey et al., 1981).

$$\frac{\Delta T_g}{T_\infty} = 1.6 \left( \frac{Q}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} A \sqrt{H}} \right)^{2/3} \times \left( \frac{h_k A_T}{c_p \rho_\infty \sqrt{g} A \sqrt{H}} \right)^{-1/3} \quad (6)$$

$$Q_{FO} = 610 (h_k A_T A \sqrt{H})^{1/2} \quad (7)$$

McCaffrey et al. (1981)의 예측식에서는 플래시오버가 발생하기 위한 한계 열방출률에 영향을 미치는 인자를 실효 열전달계수, 구획실내표면적(m<sup>2</sup>) 및 환기인자로 구분하고 있다.

여기서  $h_k$ (kW/m<sup>2</sup> · K)는 주벽의 실효열전달계수로 Eq.

(8)과 같이 근사된다.  $t_c$ 는 특정시간(초),  $\delta$ 는 주벽재료의 두께(m)이다.

$$h_k = \max(\sqrt{k\rho c/t_c}, k/\delta) \quad (8)$$

Thomas (1981)는 상부 가스층으로부터의 복사 및 대류열 전달에 의한 손실되는 열량(kW)을 계산하기 위해 Eq. (9)를 유도했다(Thomas, 1981).

$$q_{loss} \approx h_c(T_g - T_w) \frac{A_T}{2} + \epsilon\sigma(2T_g^4 - T_w^4 - T_{Floor}^4) \frac{A_T}{6} \quad (9)$$

여기서  $A_T$ 는 구획실의 총 표면적(m<sup>2</sup>),  $h_c$ 는 대류열전달계수(kW/m<sup>2</sup>·K),  $T_w$ 는 상부 벽 온도(K),  $T_{Floor}$ 는 바닥 온도(K)를 의미한다.

Thomas (1981)는 실험을 통해 해당 계수로서 평균 7.8을 도출하였다. 이 때 플래시오버의 발생기준을  $\Delta T = 600$  °C를 가정하면 이 때 발생한계 열방출률에 대한 예측식은 Eq. (10)과 같다.

$$Q_{FO} = 7.8A_T + 378A\sqrt{H} \quad (10)$$

Hägglund (1980)는 열방출률을 예측하기 위해 실험실에서 주벽재료로 콘크리트, 경량콘크리트 등의 고밀도 벽체를 이용해 실험을 진행했으며, 이를 적용해 Eq. (11)을 제안했다(Hägglund, 1980).

$$Q_{FO}/A\sqrt{H} = \frac{1050(A_T/A\sqrt{H})}{1.2/(A_T/A\sqrt{H}) + 0.247^3} \quad (11)$$

Lee and Harada (2017)는 플래시오버의 발생에 벽의 열전

달율이 영향을 미치는 것으로 판단했으며, 특히, 구획공간의 표면적이 열관성에 영향을 받을 것으로 추정했다. 이를 적용해 구획실의 체표면적과 열관성을 적용한 예측식을 Eq. (12)와 같이 제안했다(Lee and Harada, 2017).

$$Q_{FO} = 7.22(\sqrt{k\rho c}A_T)^{1.07} + 39(A\sqrt{H})^{0.45} \quad (12)$$

Lee and Harada (2017)는 예측식을 실용화하는 과정에서 기존 실험 데이터의 95% 수준의 열방출률만이 예측되도록 조정했기 때문에 실제 실험 결과보다 과도하게 낮은 수치가 예측되는 경우도 존재한다. 다만, 안전율을 보정하기 위한 목적으로 적용한 것이기 때문에 실제 설계 단계에서 사용성은 높을 것으로 생각된다.

기존의 연구 결과에서 확인한 바와 같이 기존의 플래시오버 예측식의 경우 대부분 벽체의 면적과 개구부의 크기에 기반한 예측식을 제안하고 있고, McCaffrey et al. (1981)과 Lee and Harada (2017)의 경우 각각 실효열전달계수와 벽체의 열관성을 고려하여 식을 제안했다.

하지만, 실효열전달계수의 경우 계산에 위해 플래시오버가 발생하는 시점의 시간이 요구되기 때문에 이를 배제한 방식을 채택하고 열관성을 변수로 하는 플래시오버 예측방법을 검토한다.

### 3. 플래시오버 발생 한계 열방출률 예측

#### 3.1 기존 실험결과 정리

기존 문헌은 다양한 조건의 화재실을 바탕으로 실험을 실시하고 플래시오버 발생 여부를 구분해서 결과값을 표시하고 있다. 따라서 구획실의 크기, 개구부의 크기, 벽체의 조건, 플래시오버의 발생여부, 한계 열방출률 등에 대해 Table 1과 같이 정리했다(Heselden et al., 1966; Quintiere, 1979; Fang and Breese, 1980; Babrauskas, 1984; Lee, 1985; Holborn, 1993; Bwalya et al., 2007; Chen et al., 2011; Seo,

**Table 1.** Past Experiments with Flashover

Division	$A_T$ (m <sup>2</sup> )	$A\sqrt{H}$ (m <sup>5/2</sup> )	$\sqrt{k\rho c}$ (kW <sup>1/2</sup> /m <sup>2</sup> K)	$Q_{FO}$ (kW)	etc.
Quintiere (1979)	0.79~0.85	0.002~0.03	0.15~0.19	3.8~14.5	Small scale
Holborn (1993)	0.9~0.94	0.01~0.04	0.19	4.7~10.4	
Chen et al. (2011)	1.002~1.054	0.01~0.03	0.14~0.64	5.6~18.1	
Lee (1985)	46.086	1.34	1.51	1,700~2,900	Large scale
Fang and Breese (1980)	51.2~69.41	2.26	0.633~2.9	1,030~2,420	
Bwalya et al. (2007)	48.98	1.93	0.24	167.7~889.9	
Heselden et al. (1966)	114.5~119.9	7.24~14.49	0.53~1.27	6,180.8~7,200	
Hägglund (1980)	56.1~96.09	0.89~5.34	1.15~1.47	1,124~3,425.3	
Babrauskas (1980, 1984)	43.87~51.92	2.2~3.67	0.5~0.79	1,030~1,940	
Seo (2014)	46.08	2.26	1.51	1,354~1,471	

2014).

다만, 한계 열방출률의 예측에 있어 플래시오버의 발생 여부만을 표기하거나 실험 결과만을 표기한 문헌의 경우에는 한계 열방출률을 파악하기 어려운 부분이 있다.

따라서 Fig. 1과 같이 온도 그래프를 통해 600 °C 이상이거나, 또는 Fig. 2와 같이 구획 내 바닥면적 기준 20 kW/m<sup>2</sup> 이상이거나 개구부를 통해 분출화염이 발생하는 시점을 플래시오버 발생 한계 열방출률로 판단하고 정리했다. 플래시오버가 발생한 시점을 표기한 문헌은 그대로 기입했다.

또한, 구획의 크기가 표기되지 않은 경우에는 개구인자를 기반으로 역산해서 구획 공간의 표면적을 산정했다. 벽체의 열관성을 표시하지 않고 벽체의 종류만을 정리한 경우에는 SFPE 등의 데이터를 이용하여 열전도도, 비열, 밀도의 제공 근을 통해 벽체의 열관성을 산정했다. 구획 공간의 표면적 범위는 0.85~119.9 m<sup>2</sup> 내에 존재한다.

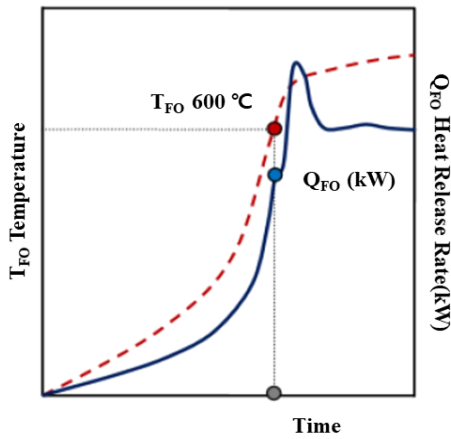


Fig. 1. Method of Determining Flashover according to Temperature

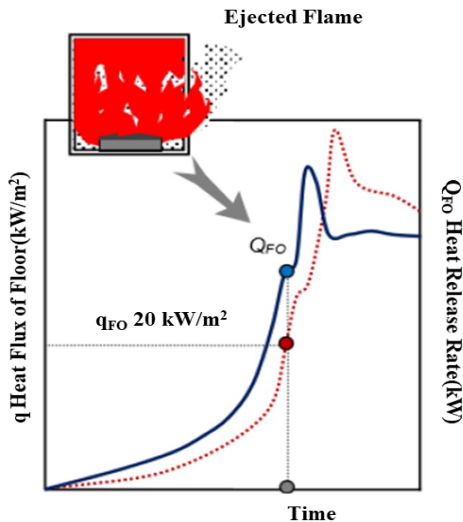


Fig. 2. Method of Determining Flashover according to Heat Flux / Ejected Flame

### 3.2 기존 실험결과를 통한 변수 분석

조사결과에 따라 정리된 플래시오버 실험결과를 바탕으로 각 변수별로 어느 정도 연관성을 가지는지 검토하기 위해 데이터별로 정리를 실시한다.

먼저 플래시오버 발생 한계 열방출률( $Q_{FO}$ )과 개구인자( $A\sqrt{H}$ ) 간의 비례관계를 살펴보면 Fig. 3과 같이 표현되며 비례관계를 직관적으로 확인하기 위해 추세선을 이용했다. 구획 내에서 발생하는 열방출률( $Q_{FO}$ )은 개구인자( $A\sqrt{H}$ )와 비례관계에 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Babrauskas (1984)가 제안한 것과 같이 열방출률이 구획 공간의 개구부에 비례하는 것을 의미한다. 다만, Bwalya et al. (2007)의 실험결과는 해당 범위를 벗어나는 형태를 보이며, 축소 실험과 실물 실험 모두에서 발생하기에 개구인자만이 변수가 아니라는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 열방출률과 구획의 내표면적( $A_T$ ) 간의 상관관계를 나타낸 것이다.

기존의 연구자들이 변수로 사용하는 개구인자와 표면적

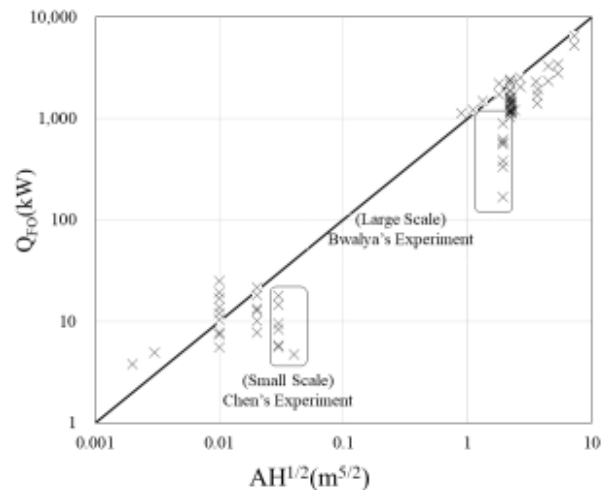


Fig. 3. Correlation between  $Q_{FO}$  and  $A\sqrt{H}$

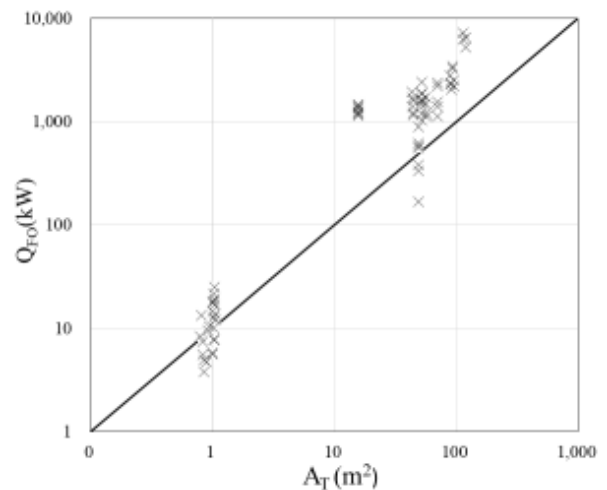


Fig. 4. Correlation between  $Q_{FO}$  and  $A_T$

간의 상관관계를 다시 한번 확인할 수 있다. Fig. 5는 열관성 ( $\sqrt{kpc}$ )과 열방출률 간의 상관관계를 나타낸 것으로 열관성이 1.0 이상인 그룹은 열방출률과 어느 정도 비례관계에 놓인 것으로 보인다. 1.0 이하의 그룹에서는 특별한 비례관계가 관찰되지 않지만 열관성이 낮을수록 열방출률이 높은 것을 알 수 있다.

다만, 이는 구획 내 표면적과의 관계도 있기 때문에 구획의 표면적과의 관계를 고려해 추가적으로 비례관계를 확인 할 필요가 있다. 이를 나타낸 것은 Fig. 6으로서 열관성과 구획의 표면적을 곱한 값과 열방출률 간의 상관관계를 나타낸 것이다.

여기서는 열관성이 1.0 이하인 그룹과 1.0 이상인 그룹의 추세가 분리되는 것을 볼 수 있으며, Fig. 5와는 달리 열관성이 낮은 그룹에서도 열방출률과 어느 정도 비례관계에 놓인 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 통해 확인한 바와 같이 구획 내 열방출률에 영향을 미치는 요소는 개구부의 크기와 벽체의 표면적으로

구분할 수 있다. 다만, Fig. 6에서 나타난 바와 같이 벽체의 열관성이 플래시오버 발생 조건에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 생각되나 크기에 따른 경향만이 관찰되어 단일 변수로 사용하기에는 어려움이 있다고 판단된다.

따라서 구획공간의 열방출률이 개구인자에 비례한다는 전제하에 벽체의 면적과 열관성 간의 상관관계를 확인할 필요가 있다.

Fig. 7과 같이 열방출률/개구인자와 내표면적/개구인자를 통해 비례관계를 확인하면 구획 내에서 발생한 열방출률/개구인자가 구획의 내표면적/개구인자와 비례하지 않는 것을 확인할 수 있다.

특히 열관성이 낮은 그룹에서 이러한 경향이 높아지며, 독립변수와 종속변수 간의 상관성을 설명하는 지표인 결정 계수(R-Squared)  $R^2$ 가 0.206으로 나타났다.

이 때, 벽체의 표면적에 열관성을 반영하게 되면 Fig. 8과 같이 열관성의 크기와는 상관없이 어느 정도 데이터가 밀집

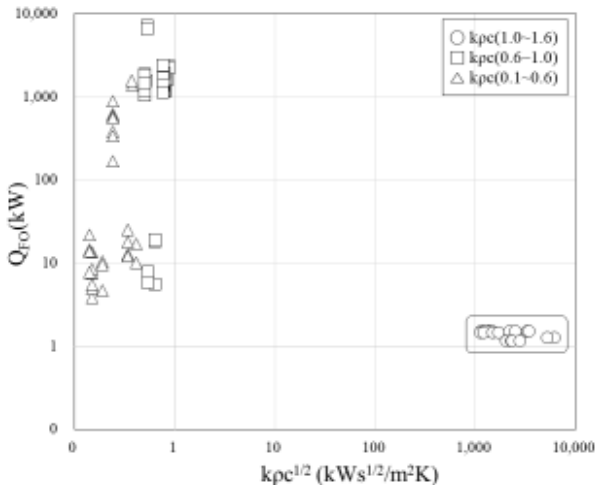


Fig. 5. Correlation between  $Q_{FO}$  and  $\sqrt{kpc}$

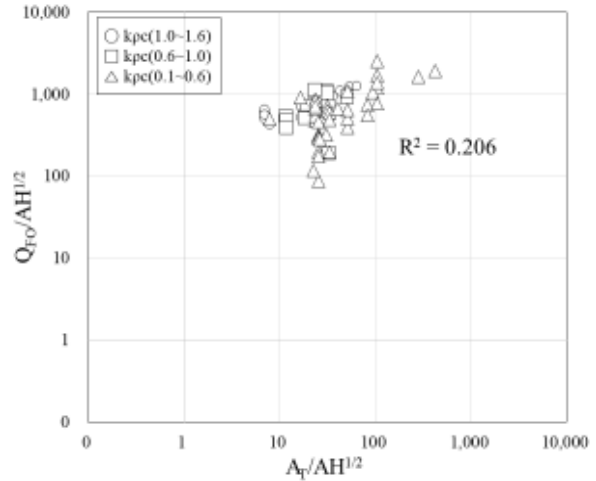


Fig. 7. Correlation between  $Q_{FO}/A\sqrt{H}$  and  $A_T/A\sqrt{H}$

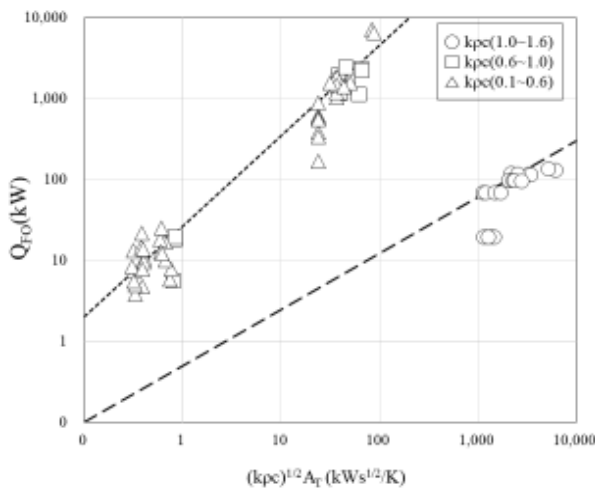


Fig. 6. Correlation between  $Q_{FO}$  and  $\sqrt{kpc}A_T$

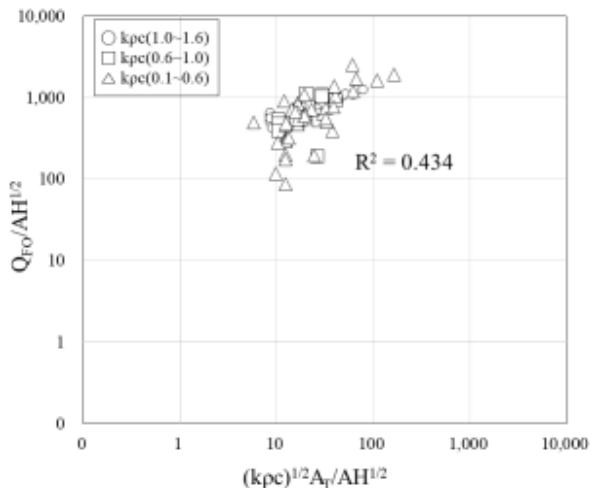


Fig. 8. Correlation between  $Q_{FO}/A\sqrt{H}$  and  $\sqrt{kpc}A_T/A\sqrt{H}$

히는 모습을 확인할 수 있으며 결정계수인 R<sup>2</sup>의 값이 0.434로 기존의 변수보다 훨씬 높은 상관관계에 있는 것을 보여준다.

다만, 실험 데이터의 표면적과 개구의 크기 등이 일정하지 않기 때문에 데이터가 일치하는 모습은 나오기 어렵다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 벽체를 통한 열손실을 계산하는데 좀 더 나은 변수로서 활용이 가능할 것이라 사료 된다. 이를 해석해보자면 다음과 같이 정리할 수 있다.

먼저 구획 내 플래시오버 발생 한계 열방출률은 개구부의 크기와 벽체의 면적에 영향을 받는다. 두 번째, 열관성의 크기가 1.0을 기점으로 추세가 구분된다. 세 번째, 구획의 표면적은 열방출률과 상관관계에 있지만 열관성이 작을수록 비례관계에서 벗어나는 모습을 보인다. 네 번째, 열관성이 작은 벽체를 사용하는 구획공간의 열방출률을 예측하기 위해서는 구획의 표면적과 개구인자와 더불어 벽체의 열관성을 변수로 적용할 필요가 있다. 따라서 열관성을 변수로서 플래시오버 발생 한계 열방출률 예측식을 도출한다.

### 3.3 계수를 적용한 예측식 검토

플래시오버가 발생하는 조건에 다양한 변수가 있지만 구획 내 표면적과 벽체의 열관성 그리고 개구인자가 주요 변수인 것으로 도출했다.

플래시오버의 발생조건은 구획 내 화재가 최성기에 도달하기 이전에 일어나는 과도기적 현상이라는 것을 고려했을 때 최대한 안전율을 고려해 산정하는 것이 적절하다고 생각된다.

Fig. 9는 실물 실험만을 적용한 것으로 약 85%의 범위 안에 해당되는 데이터의 위치관계에 따라 수식을 도출하면 Eq. (13)과 같다.

$$Q_{FO} = 7.56 \sqrt{k\rho c} A_T + 310 A \sqrt{H} \quad (13)$$

해당 식을 적용해 기존에 취합한 모든 데이터를 적용해 실험결과와 예측식을 이용해 계산한 결과를 비교하면 Fig. 9와 같이 결정계수가 0.8099로 실험 결과와 계산 결과간의

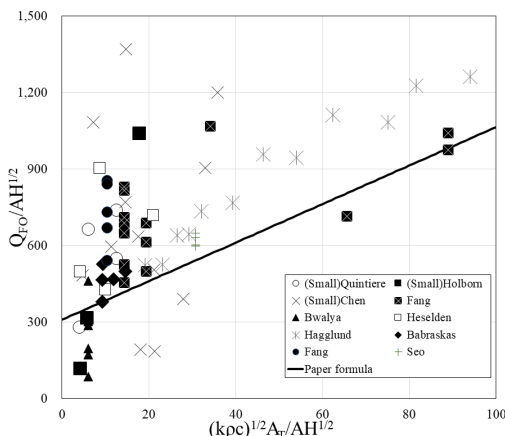
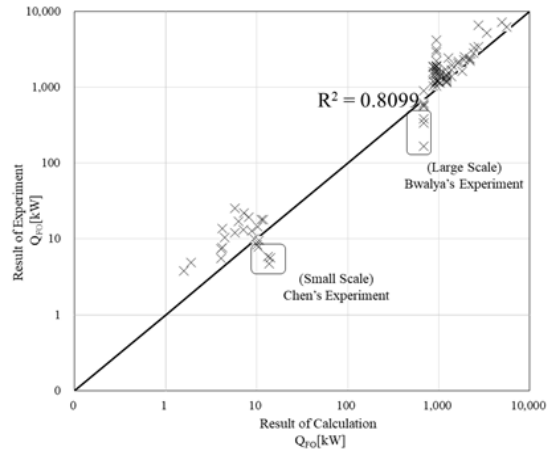


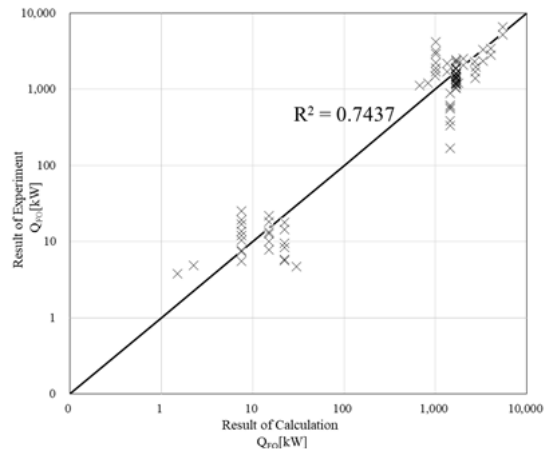
Fig. 9. Derive Formula Using 85% Range

일치도가 약 80.99%인 것으로 나타났으며, 대부분의 실험결과보다 낮은 계산결과가 도출된다.

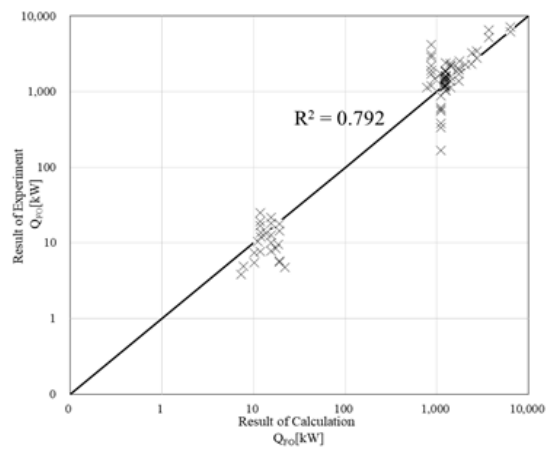
따라서 예측식의 경우 어느 정도 신뢰성이 확보된 것으로 생각되며, 열관성을 변수로 사용하지 않는 Babraskas (1984), Thomas (1981)의 예측식과 비교결과는 Fig. 10과 같으며,



(a) Eq. (13)



(b) Babraskas's Equation



(c) Thomas's Equation

Fig. 10. Comparison of Equation

약 1.7~6.5%의 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

비교 결과 본 연구에서 제안한 예측식이 기존 예측식에 비해 비교적 나은 신뢰성을 가진다고 사료된다. 다만, 비교 결과에서 확인할 수 있듯이 여전히 Bwalya et al. (2007)과 Chen et al. (2011)의 실험 결과는 잘 맞지 않는 결과를 보인다. 특히 실험 결과보다 Eq. (13)의 계산 결과가 더 높게 계산되어 유사한 환경에서 설계 시 위험성을 반영하지 못할 우려가 있다.

$$Q_{FO} = 10.73 \sqrt{kpc} A_T + 21.5 A \sqrt{H} \quad (14)$$

이러한 위험성을 제어하기 위해 하단 값의 추세에 따라 계산식을 수정하면 Eq. (14)와 같은 결과를 도출할 수 있으며 실험결과와 비교한 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 12는 계산결

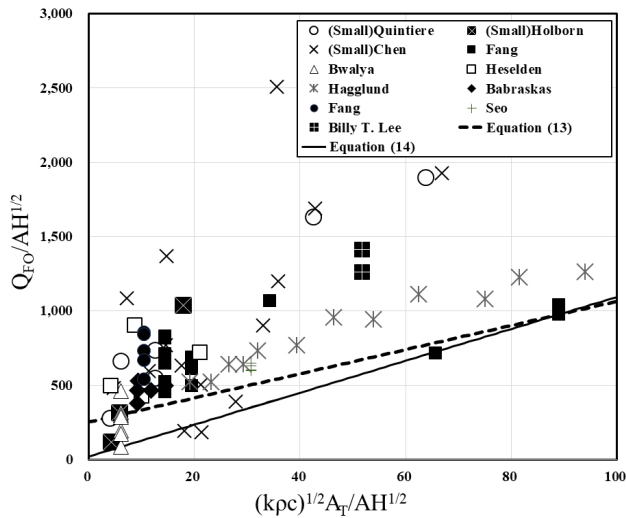


Fig. 11. Modified Formulas Considering Trends

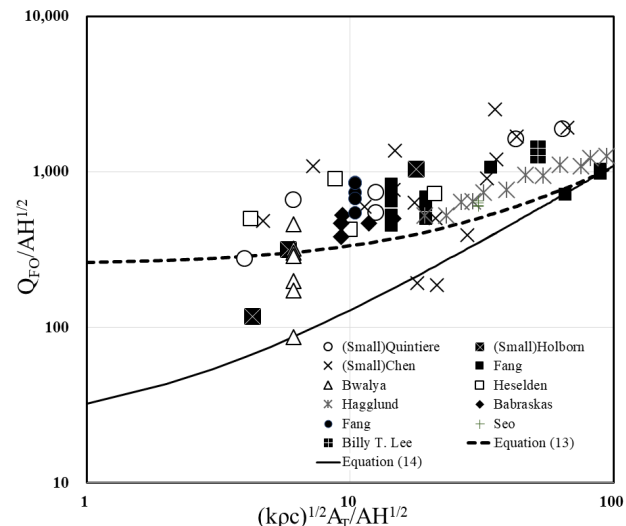


Fig. 12. Modified Formula Considering Trend (Log-Function)

과를 로그 그래프로 나타낸 것으로 결과적으로 축소실험 결과 2개를 제외한 모든 수치보다 낮은 수치가 계산되는 것을 알 수 있다.

축소실험 2개의 실험결과를 제외하면 실험결과보다 낮은 열방출률이 계산되기 때문에 화재공학 측면에서 안전율을 고려해 설계용 예측식으로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## 4. 결론

본 연구는 구획 내 플래시오버 발생 한계 열방출률 예측에 관한 연구로서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기존의 예측식에서 변수로 활용하는 구획 내 표면적과 개구부의 크기 이외에도 열량 손실에 영향을 미치는 요소를 도출하기 위해 각각 변수를 분석한 결과 벽체 재료의 열관성이 구획 내 표면적을 통한 열 손실에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다만, 열관성 자체를 변수로서 활용하기에는 어려워 이를 벽체의 표면적과 함께 이용하는 방식을 채택했다.
- 2) 계산을 통해 도출된 예측식을 실험결과와 비교한 결과 최초 도출된 Eq. (10)은 기존에 사용되던 예측식보다 좀 더 나은 신뢰도를 보이는 것으로 나타났다. 다만, 설계용 예측식으로 활용하기 위해서는 계산결과가 실험결과보다 낮게 나오는 것이 위험성을 평가하기에 적절하지 않다고 판단했다. 이에 안전율을 고려한 Eq. (14)를 추가적으로 도출하였고 결과적으로 2개의 축소 모형 실험을 제외한 모든 실험 결과와 유사하거나 좀 더 낮은 수치가 계산되어 안전율을 확보한 설계용 예측식으로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(RS-2022-00156237).

## References

- Babrauskas, V. (1980). Estimating room flashover potential. *Fire Technology*, Vol. 16, pp. 94-103.
- Babrauskas, V. (1984). Upholstered furniture room fire measurements comparison with furniture calorimeter data, and flashover predictions. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 2, No. 1, pp. 5-19.
- Bwalya, A.C., Zalok, E., and Hadjisophocleous, G.V. (2007). *Design fires for commercial premises-results of phase II*. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
- 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, No. 7, pp. 397-405.
- Fang, J.B., and Breese, J.N. (1980). *Fire development in residential basement rooms*. Interim Report (NBSIR 80-2120).
- Hägglund, B. (1980). *Estimating flashover potential in residential rooms*. FOA Rapport C 20369-A3, Forsvarets Forskningsanstalt.
- Heselden, A.J.M., Smith, P.G., and Theobald, C.R. (1966). *Fires in a large compartment containing structural steelwork, Detailed measurements of fire behaviour*. Fire Safety Science, Vol. 646, Fire Research Station Borehamwood.
- Holborn, P.G. (1993). Experimental and theoretical models of flashover. *Fire Safety Journal*, Vol. 21, No. 3, pp. 257-266.
- Kang, S.G. (2021). Examination of spreading-induced changes in fire properties in upper layer of compartment. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 21, No. 5, pp. 139-146.
- Kang, S.G. (2022). Effect of shape on the temperature of an opening jet plume at the bottom of a horizontal member. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 22, No. 3, pp. 89-94.
- Kweon, O.S., and Kang, H. (2020). An experimental study of vertical fire spread through openings in compartments. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 20, No. 3, pp. 81-87.
- Lee, B.T. (1985). Standard room fire test development at the national bureau of standards. *ASTM International*, pp. 29-45.
- Lee, S.C., and Harada, K. (2017). A prediction formula for critical heat release rate of flashover based on experimental correlations. *Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering*, Vol. 67, No. 2, pp. 107-112.
- McCaffrey, B.J., Quintiere, J.G., and Harkleroad, M.F. (1981). Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire data correlations. *Fire Technology*, Vol. 17, pp. 98-119.
- Quintiere, J.G. (1979). Experimental and theoretical analysis of quasi-steady small-scale enclosure fires. *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 17, No. 1, pp. 1125-1137.
- Seo, D.G. (2014). *The analysis on the design factor such as design fire, occupant density and sprinkler droplet for performance based fire safety design*. Ph.D. dissertation, Hoseo University.
- Thomas, P. (1981). Testing products and materials for their contribution to flashover in room. *Fire and Materials*, Vol. 5, No. 3, pp. 103-111.

---

<i>Received</i>	June 27, 2023
<i>Revised</i>	June 28, 2023
<i>Accepted</i>	July 17, 2023