

## 건축 내장재의 Flashover 시간 및 열방출량 예측에 관한 연구 A Study on the Prediction of Flashover Time and Heat Release Rate(HRR) for Building Interior Materials

하 동 명<sup>†</sup>

Dong-Myeong Ha<sup>†</sup>

세명대학교 안전공학과  
(2004. 7. 2. 접수/2004. 8. 18. 채택)

### 요 약

화재성장기 동안의 중요한 특징은 국부연소에서 전실연소로 전이되는 플래시오버 현상이다. 본 연구의 목적은 건축내장재의 플래시오버 시간 및 발화시간 그리고 열방출량을 예측에 있다. Response Surface Methodology(RSM) 방법과 문헌자료를 사용하여 플래시오버 시간 및 발화시간 그리고 열방출량을 예측하는 식을 제시하였다. 예측식에 의해 계산된 플래시오버 시간과 문헌값의 A.A.P.E.는 38.74초, A.A.D.는 51.42초 그리고 상관계수는 0.975이다. 발화시간의 예측값과 문헌값의 A.A.P.E.는 10.96초, A.A.D.는 1.97초 그리고 상관계수는 0.962이다. 또한 시간에 의한 플래시오버 열방출량의 예측값과 문헌값의 A.A.P.E.는 29.92, A.A.D.는 514 그리고 상관계수는 0.830이다. 제시한 예측식에 의한 계산값은 문헌값과 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 식이 다른 건축내장재 연구에도 이용되기를 기대한다.

### ABSTRACT

An important characteristics during fire growth is the phenomena of flashover, which is the transition from the local combustion to the full-room fire. The aim of this study is to predict the flashover times, the ignition times and HRR(heat release rate) of flashover for building interior materials. By using the literature data and RSM(response surface methodology), the new equations for predicting the flashover time, the ignition time and the HRR of building interior materials are proposed. The A.A.P.E.(average absolute percent error) and the A.A.D.(average absolute deviation) of the reported and the calculated flashover times were 38.74sec and 51.24sec respectively, and the correlation coefficient was 0.975. The A.A.P.E and the A.A.D of the reported and the calculated ignition times were 10.96sec and 1.97sec, and the correlation coefficient was 0.962. Also the A.A.P.E and the A.A.D. of the reported and the calculated HRR of flashover by means of times were 29.92 and 514, and the correlation coefficient was 0.830. The values calculated by the proposed equations were in good agreement with the literature data. Therefore, it is expected that this proposed equations will support the use of the research for other building interior materials.

**Keywords :** Flashover, Building interior materials, Ignition times, Heat release rate(HRR)

## 1. 서 론

최근 대구지하철화재사건을 비롯한 다양한 다중이용업소의 화재사건을 계기로 내장재의 화재위험성에 대한 연구 필요성이 증대되고 있으며, 또한 이 분야는 화재 연구의 어떤 분야보다 과거 수 십 년 동안 연구자

들에 의해 많은 관심사가 되고 있다. 위험성평가는 위험으로 발생하는 인명과 재산 손실 등의 결과 확률을 계산하는 것으로 이루어져 있다. 화재 위험성평가 모델은 원자력 발전 산업에서 사용되기 시작하여 다양한 분야로 전개되었고, 최근에 와서는 건물 화재의 위험성평가에 많이 적용되고 있다.

화재 시나리오 상 화재의 성장기, 감지, 억제에서 발생할 수 현상은 각 단계에서 관여되는 여러 가지 변수

<sup>†</sup> E-mail: hadm@semyung.ac.kr(www.chollian.net/~hadm)

들과 상관관계가 있다. 따라서 여러 매개변수를 이용함으로써 화재 결과인 인명 피해나 재산 피해를 보다 체계적으로 예측할 수 있다.<sup>1)</sup>

일반적으로 화재 시나리오에 관련되는 매개변수(parameter)는 수 없이 많지만 대표적으로 화재지연특성, 열방출량, 연소생성물의 특성, 플래시오버(flashover), 화염전파속도(flame spread rate) 등을 들 수 있다. 그러나 화재시나리오에서 출화기에 관련된 매개변수들은 방화설비의 특성, 점화원, 연료의 특성 및 조건, 환기 조건, 입주자의 특성 및 위치, 구조물과 기타 장비의 조건 등을 들 수 있다.<sup>2)</sup>

화재는 여러 가지 특성들이 복합적으로 작용하는 복잡한 현상이다. 그럼에도 불구하고 화재의 위험성을 평가하는 전통적인 화재시험에서 총괄적인 화재위험성을 평가하기보다는 화염전파특성, 발화성, 소화의 용이성, 내화성, 연기의 특성, 독성 등의 개별적 측정에 많은 연구가 이루어지고 있다. 이렇게 단순히 개별적인 화재 특성만을 파악하다 보면 한 가지 시험에서 측정된 특성이 다른 시험에서는 정반대의 부정적인 작용을 하는 모순이 발생하기도 한다.

화재에 관련된 특성을 파악하기 위해서 단일 매개변수에 의해서도 특성 예측이 가능할 경우도 있으나 일반적으로 매개변수간의 상호작용에 의한 영향도 알아야만 정확한 정량적 위험성평가가 될 수 있다.<sup>3,4)</sup>

본 연구에서는 화재성장기 동안의 중요한 특징인 국부연소에서 전실연소로 전이되는 flashover 현상을 고찰하고, 수학적 및 통계학적 방법을 이용하여 건축내장재의 flashover 시간, 발화시간 및 flashover 열방출량을 예측할 수 있는 식을 제시하였다. 제시된 식은 다른 건축 내장재의 정량적 위험성평가에 도움을 주고, 또한 제시된 방법론이 성능설계기준(PBD : performance based design)의 적용에 있어 보다 폭넓게 이용되기를 기대한다.

## 2. Flashover와 Flashover 시간에 영향을 주는 인자

### 2.1 Flashover 정의 및 영향을 주는 인자

Flashover란 실내화재 시 연소열에 의해 천정류(ceiling jet)의 온도가 상승하여 600°C 정도가 되면 천정류에서 방출되는 복사열에 의하여 실내에 있는 모든 가연물질이 분해되어 가연성 증기를 발생하게 됨으로써 실내 전체가 연소하게 되는 상태를 이야기하며, 이러한 현상을 전공간화재(full space involvement : FSI)라고 표현하기도 한다. Flashover는 pre-flashover와 post-flashover로 구

**Table 1.** Minimum condition for the onset of flashover observed by several research studies

Sources	Temperatures (°C)	Heat flux (kW/m <sup>2</sup> )
Hägglund	600	No data
Fang	450-650	17-33
Bock and Klein	673-771 634-734	15
Lee and Breese	650	17-30
Babrauskas	600	20
Fang and Breese	706±92	20
Quintiere and McCaffrey	600	17.7-25
Thomas	520	22
Parker and Lee	No data	20

분할 수 있다.<sup>5,6)</sup>

발화공간에서의 제한 가능성을 추정할 때 고려해야 할 인자들은 공간의 형상과 크기, 연료의 특성, 연료함의 크기와 수량, 연료공간의 배치(예 : 적재, 분리, 벽에 인접 등) 등을 들 수 있다.

그러나 최근 Peacock 등은 flashover에서의 최소 조건에 대해 여러 연구의 결과를 종합 정리하여 Table 1과 같이 나타내었다.<sup>4)</sup> 여기서 flashover 온도는 실험조건에 따라 차이가 있는 것을 알 수 있지만 450°C~700°C의 온도 분포를 가지고 있으며, 열량은 15 kW/m<sup>2</sup>~33 kW/m<sup>2</sup>를 보이고 있다.

Flashover를 일으키는 열량에 관한 연구는 그 동안 꾸준히 진행되고 있으며, Babrauskas는 flashover 열량 예측식을 다음과 같이 제시하였고,<sup>7)</sup>

$$Q_{FO} = 750A_0\sqrt{h_0} \tag{1}$$

여기서  $Q_{FO}$ 는 전실화재를 일으키기 위한 발화원의 발열량이다.

또한 Hägglund는 two-zone 컴퓨터 모사(simulation)로부터 다음과 같은 식을 제시하였다.<sup>8)</sup>

$$Q_{FO} = 10508A_T \left( \frac{1.2}{A_T/A_T\sqrt{H}} + 0.247 \right)^3 \tag{2}$$

McCaffery는 실험결과에 의하면 다음과 같은 식을 제시하였다.<sup>9)</sup>

$$Q_{FO} = 610(h_k A_T A_{WH}^{1/2})^{1/2} \tag{3}$$

Thomas는 다음과 같은 열량 예측식을 제시하였다.<sup>10)</sup>

$$Q_{FO} = 7.8A_T + 378A_0\sqrt{h_0} \quad (4)$$

Pre-flashover에서 실내 화재가 flashover 화재로 전이 여부는 화재안전에서 가장 중요한 특성 가운데 하나로서 연구자들의 큰 관심사가 되고 있다. 그 이유는 이 기간 중에 화재의 탐지 및 거주 인원의 안전 피난이 이루어지기 때문이다. 따라서 flashover 전 단계의 화재 위험분석은 거주 인원의 화재 안전을 예측하는데 매우 중요한 역할을 한다.

일단 flashover 화재로 발전하게 되면 실내온도는 계속 상승하여 1200°C 이상까지 도달하게 된다. Post-flashover에서 실내 온도를 결정하는 변수는 연료의 연소열량, 연소에 필요한 공기의 유입 상태, 단열 효과 등이다. 같은 종류의 연료일 지라도 연소 시 공급되는 공기의 양이 달라지면, 실내온도의 변화가 달라진다. Post-flashover 상태에서는 일반적으로 창문의 크기 및 창문의 높이, 연료의 연소속도 등에 따라 환기 지배형 화재(ventilation control fire)와 연료 지배형 화재(fuel control fire)로 나누어지게 된다. 환기 지배형 화재의 경우 최고 실내 온도 및 화재 지속 시간 등은 환기 조건에 따라 달라지게 된다.

최근 Kim 등<sup>11)</sup>은 발화에서 flashover에 도달하는 과정을 연구하기 위해 인자들로 바닥 면적(floor area), 배출구 폭(vent width), 배출구 높이(vent height), 바닥에서의 배출구 높이(vent height above floor), 천장높이(ceiling height), 화재 특성(fire specification), 화재 위치(fire location), 벽과 천장 재료(wall and ceiling materials), 화재 복사률(fire radiation fraction), 화재 최대 열방출량(fire maximum heat release rate) 등을 이용하였다.

## 2.2 Flashover 시간에 영향을 주는 인자

Flashover 시간은 특별한 구획에 관련된 화재위험을 결정하는 중요한 인자로서, flashover 시간이 길면 길수록 감지, 억제, 인명을 안전하게 피난 할 수 있는 기회는 커진다.

Flashover 시간에 영향을 주는 인자들은 실의 형태(shape of compartment), 발화원의 위치(position of ignition source), 연료 높이(fuel height), 환기개방(ventilation opening), 연료의 밀도(bulk density of fuel), 연료의 지속성(fuel continuity), 라이닝(lining), 발화원 면적(ignition source area), 열방출량(heat release rate), 발화시간(time to ignition), 재료의 특성(characteristics of materials), 재료의 질량손실(mass loss of materials)

등을 들 수 있다.

그러나 위의 변수들만 고려되는 것이 아니고 그 날의 상태 조건 즉, 습도 등도 고려되어야 한다. 그러나 단 실험적으로 고찰하는 경우 위의 변수들을 고려하여 flashover 시간 예측이 가능하다.

또한 영향을 주는 순수 특성치만 고려하는 것이 아니고, 각 변수들 간의 상호작용을 고려함으로써 보다 정확한 정량적 평가가 이루어 질 것으로 본다.

최근 문헌에서 flashover 시간에 4단계의 온도를 고려하여 다음과 같은 계산식을 제시하였다.<sup>3)</sup>

$$t_{fo} = t_{jet} + t_{spr} + t_{exp} + t_i \quad (5)$$

여기서  $t_{jet}$ 는 천장에 도달하기 위해서 상승하는 부력 jet에 필요한 시간,  $t_{spr}$ 는 천장에 따라 고온 가스확산에 필요한 시간,  $t_{exp}$ 는 연기층 팽창에 필요한 시간,  $t_i$ 는 유도시간(induction time)이다.

여기서 각 항은 다음과 같이 전개된다.

$$t_{jet} = \frac{3}{2c_v} \frac{\sqrt{D^*}}{g} \left[ \left( \frac{H+Z_0}{D^*} \right)^{4/3} - \left( \frac{Z_0}{D^*} \right)^{4/3} \right] \quad (6)$$

$$c_v = 3.87^{20}$$

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5}$$

$$t_{spr} = 5.7 \frac{L^{11/6}}{Q_0^{1/3} H^{1/2}} \left[ 1 - 0.024 \left( \frac{H+1.5\sqrt{A_f}}{L} \right)^{11/6} \right] \quad (7)$$

$$t_{exp} = \frac{A\Delta}{c_m \sqrt{g} H^{5/2} Q_H^{1/3}} \quad (8)$$

$$t_i = t_0 + \frac{3}{2} \frac{Q_0}{c_p m_{p1,H} \Delta} \frac{H}{\Delta} \left[ \left( \frac{H}{H-\Delta} \right)^{2/3} - 1 \right] \quad (9)$$

여기서  $D^*$ 는 유효부력직경,  $H$ 는 높이,  $Z$ 는 수직배위(vertical coordinate),  $c_v$ 는 상수,  $Q$ 는 열방출량,  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 비열,  $T$ 는 온도,  $L$ 은 순열손실,  $A$ 는 표면적,  $m$ 은 질량,  $\Delta$ 는 배출구 가로대 깊이이다.

Flashover 시간에 관한 여러 연구 들을 고찰해 보면 flashover 시간에 영향을 주는 변수들을 다음과 같은 함수 관계로 나타낼 수 있다.

$$t_{fo} = \psi \{ \Delta q'', \rho, c_p, k, T_{ig}, T_0, L, H, A \} \quad (10)$$

이런 변수들을 고려함으로써 flashover시간을 보다 정량적으로 평가할 수 있다고 본다.

결론적으로 flashover 화재에 이르게 되는 경로 및 변수를 연구함으로써 flashover 화재의 가능성을 배제하거나, flashover에 이르는 시간을 연장할 수 있다. 특히 flashover 화재에 도달하는 시간을 연장함으로써 인명 및 재산의 손실을 최소화할 수 있다. 건물에 일단 flashover 화재가 발생하면, 화재를 진압하기가 어렵고, 화재 및 연기가 전체 건물로 번지게 되므로 인명 피해가 커지고, 건물의 구조에도 영향을 주게 된다. 따라서 설계 시 flashover 화재의 가능성을 최소화하는 일이 매우 중요하다.

### 3. 화재 위험성평가 방법론

#### 3.1 다중회귀 분석 및 원인 결과 선도

자연현상은 여러 가지 변수(독립변수)가 변화하므로 응답(종속변수, response 혹은 solution variable)에 미치는 영향도 여러 가지 상태로 나타난다. 이러한 변수와 응답의 관계를 구명하기 위해서 학문이 발달해 왔고, 우리가 여기서 연구하고자하는 화재의 잠재적 위험성 평가도 이러한 변수와 응답의 관계를 구명하는 연구 분야이다.

이러한 관계를 보다 정량적으로 표시하기 위해서 사용된 방법으로 수학과 통계학적인 방식에 의거해서 종속변수와 독립변수의 관계식을 구하는 방법을 다중회귀(multiple regression)라 하며, 이 방법론은 그 동안 최적조건(optimum condition)을 구하는 방식 또는 최

적화(optimization)에 널리 이용되어 왔다. 변수들에 의한 화재 위험성 평가를 위한 상관관계를 나타낼 수 있는 추산 모델들 가운데 최적화된 모델을 찾기 위해 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 이용하였다.<sup>12-14)</sup>

제시한 모델을 다항식의 일반적인 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$Y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots + px^p + \dots \quad (11)$$

여기서 각 매개변수 a, b, c, d, e, ...을 추산하기 위해 최소화(minimization) 방법을 이용하였다. 이 방법은 S.S.D.(sum of square of deviation)을 구하기 위해 각 매개변수를 편미분하여 이를 영(zero)으로 두어서 얻어지는 정규식(normal equation)의 해를 구하면 된다.

제시된 방법론을 이용하여 침구류, 가구 및 내장재의 flashover 시간, 발화시간, 최대열방출량 뿐만 아니라 화재가혹도, 산소소비량, 열방출량, 화염높이 등의 화재위험특성들을 예측이 가능하다.

Fig. 1에서는 화재의 잠재위험성을 평가하기 위해 필요한 여러 인자들에 대해 원인 결과 선도(cause-effect diagram)로 나타낼 수 있으며, 또한 각 위험 특성에 대해 각 입력 파라미터를 선정할 수 있다.

이 선도를 이용하면 화재의 잠재 위험성평가를 위한 각 각의 위험성 고찰뿐만 아니라 각 위험성 인자들의 상호 관계도 용이하게 고찰할 수 있다.<sup>6)</sup>

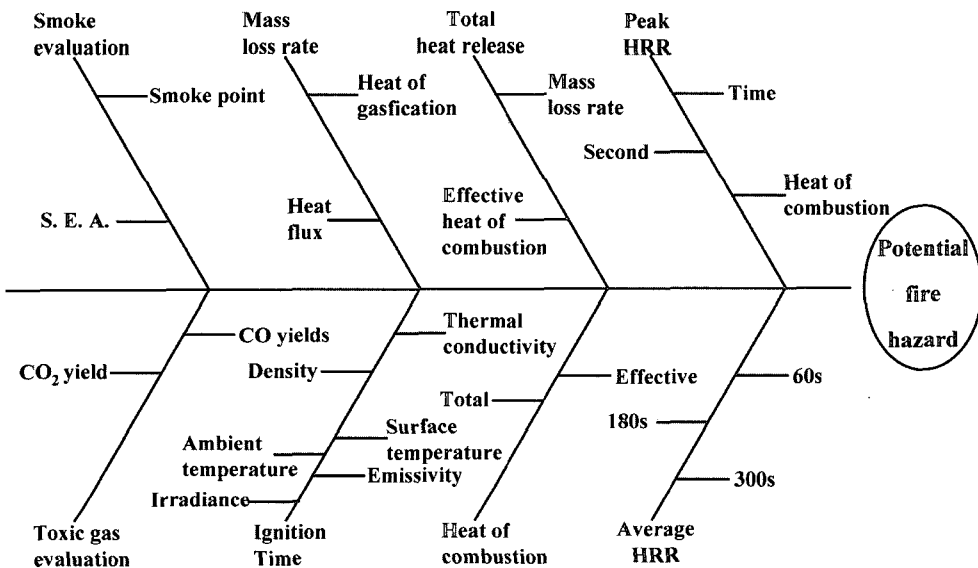


Fig. 1. A cause-effect showing the various parameters affecting the potential fire hazard.

### 3.2 문헌값과 예측값의 비교 방법

제시한 모델들 가운데 추산식에 의해 추산된 추산값과 실험값의 차이 정도를 알고 가장 정확한 추산식을 찾기 위해 통계학에서 많이 이용하는 A.A.P.E.(average absolute percent error)와 A.A.D.(average absolute deviation)를 사용하였으며 구하는 식은 다음과 같다.<sup>15,16)</sup>

$$\text{A.A.P.E.} = \frac{\sum \left| \frac{t_{\text{est.}} - t_{\text{exp.}}}{t_{\text{exp.}}} \right|}{N} \times 100 \quad (12)$$

$$\text{A.A.D.} = \frac{\sum |t_{\text{est.}} - t_{\text{exp.}}|}{N} \quad (13)$$

여기서  $t_{\text{est.}}$ 는 추산식에 의해 예측된 특성치,  $t_{\text{exp.}}$ 는 실험값,  $N$ 은 자료(data)수이다.

또한 측정값과 예측값의 통계 분석을 위해 표준편차와 표준 결정계수를 사용하였다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (14)$$

$$r^2 = \frac{\text{SSR}}{\text{SST}} \quad (15)$$

$$r = \frac{\text{SSR}}{\text{SST}} \quad (16)$$

여기서  $S$ 는 결정값의 표준오차,  $r^2$ 은 표준 결정계수,  $r$ 은 상관계수,  $\text{SSR}$ 은 회귀에 의한 제곱합(sum of squares due to regression),  $\text{SST}$ 는 총 제곱합(total sum of squares)이다.

## 4. 건축내장재의 Flashover 시간, 발화시간 및 Flashover 열방출량 예측

### 4.1 Flashover 시간 및 발화시간 예측

발화시간 및 flashover 시간의 예측은 화재를 예방하기 위해서 중요한 연구가 된다. 2장에서도 설명하였지만 flashover 열량 및 시간은 많은 인자에 영향을 받는다. 본 연구에서는 건축내장재의 flashover 시간 예측에 대해 발화시간, 열방출량, 질량손실 그리고 밀도를 이용한 예측이 가능한지를 고찰하였다. Flashover 시간 예측을 위해 Ostman 등의 자료를 이용하였다.<sup>17)</sup>

Ostman 등은 flashover 시간이 정확하게 실험되지 않은 6개 자료를 포함하여 28개 자료를 이용하여 flashover 시간을 예측할 수 있는 경험적인 선형회귀모델(regression model)을 다음과 같이 제시하였다.<sup>17)</sup>

$$t_{\text{FO}} = 0.07 \frac{t_{\text{IG}}^{0.25} \rho^{1.7}}{\text{THR}_{300}^{1.3}} + 60 \quad (17)$$

여기서  $t_{\text{FO}}$ 는 room corner test에서 flashover 도달 시간[s],  $t_{\text{IG}}$ 는 50 kW/m<sup>2</sup>에서 발화도달시간[s],  $\text{THR}_{300}$ 는 50 kW/m<sup>2</sup>에서 발화 후 300초 동안 총열방출량[MJ/m<sup>3</sup>],  $\rho$ 는 평균밀도[kg/m<sup>3</sup>]이다.

건축 내장재의 flashover 시간과 발화시간의 예측은 화재를 예방하기 위해서 중요한 연구가 된다. 본 연구에서도 Table 2 자료를 이용하여 flashover 시간 및 발화시간을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

최적화된 예측식을 찾기 위해 RSM(response surface methodology) 방법을 이용하였다.<sup>6,15)</sup>

본 연구에서는 flashover 시간을 발화시간, 열방출량, 질량손실 그리고 밀도의 함수로 놓았으며, 여러 모델을 분석한 결과 다음과 같은 최적화된 예측식을 얻었다.

$$\begin{aligned} t_{\text{FO}} = & 67.223 + 6.497X_1 + 23508.19 \left( \frac{1}{X_2} \right)^2 \\ & - 1355.513 \left( \frac{1}{X_3} \right) - 1.006 \times 10^{-3} X_4^2 - 0.146 X_1 X_3 \\ & - 9.677 \times 10^{-3} X_1 X_4 - 6.485 \times 10^{-3} X_2 X_4 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $t_{\text{FO}}$ 는 flashover 시간,  $X_1$ 은 발화시간,  $X_2$ 는 총 열방출량,  $X_3$ 는 질량손실량,  $X_4$ 는 평균밀도이다.

식 (18)를 이용하여 flashover 시간을 예측한 결과 예측값과 문헌값의 A.A.P.E.는 38.74, A.A.D.는 51.24초, 표준편차는 64.16, 결정계수( $r^2$ )는 0.950 그리고 상관계수( $r$ )는 0.975로써 문헌값과 예측값은 일치하고 있다.

문헌값과 예측식에 의한 예측값 비교 결과를 보다 쉽게 볼수 있도록 Fig. 2에 나타내었다.

또한 flashover 시간에 중요한 인자로 작용하는 발화시간에 대한 예측을 살펴보기 위해 flashover시간 예측 방법을 사용한 결과 다음과 같은 발화시간 예측식을 제시한다.

$$\begin{aligned} t_{\text{IG}} = & -3.907 + 2.232X_1 + 0.738X_2 - 2.022 \times 10^{-3} X_3 \\ & - 0.115X_1 X_2 - 2.111 \times 10^{-3} X_1 X_3 \\ & + 8.976 \times 10^{-4} X_2 X_3 + 1.308 \times 10^{-4} X_1 X_2 X_3 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $t_{\text{IG}}$ 는 발화시간,  $X_1$ 는 총열방출량,  $X_2$ 는 질량손실량,  $X_3$ 는 평균밀도이다.

식 (19)를 이용하여 연소시간에 의한 발화시간을 예측한 결과 A.A.P.E.는 10.96, A.A.D.는 1.91초, 표준 편

**Table 2.** Time to flashover in the room fire test and cone calorimeter data with retainer frame at 50 kw<sup>-2</sup> and horizontal orientation

No.	Products	Room test time to flashover [s]	Cone calorimeter			Mean density [kg/m <sup>3</sup> ]	Prediction flashover time [s]
			Time to ignition [s]	THR <sub>300</sub> [MJ/m <sup>2</sup> ]	Mass loss <sub>300</sub> [kg10 <sup>-3</sup> ]		
1	Painted gypsum paper plasterboard	>20	47	7.0	10.7	800	-
2	Ordinary birch plywood	150	30	38.0	37.0	600	119
3	Texttle wallcovering on gypsum paper plasterboard	660	25	12.8	14.8	800	611
4	Melamine-faced high-density non-combustible board	>20	29	9.8	17.0	1055	-
5	Plastic-faced steel sheet on mineral wood	>20	53	3.7	1.9	640	-
6	FR particle board, type B1	630	21	10.4	18.7	630	520
7	Combustible-faced mineral wood	80	5	4.0	0.9	87	63
8	FR particle board	>20	700	17.0	13.8	750	-
9	Plastic-faced steel sheet on polyurethane foam	195	19	17.2	14.2	160	114
10	PVC-wallcarpet on gypsum paper plasterboard	655	15	11.9	15.3	800	674
11	FR extruded polystyrene foam	80	31	22.3	7.8	37	91
12	Birch plywood	137	28	36.6	33.8	600	146
13	FR plywood	>20	459	8.7	4.9	620	-
14	Melamine-faced particle board	182	34	32.9	23.0	680	233
15	FR polystyrene foam	67	25	24.2	6.8	30	35
16	Particle board	157	34	45.9	32.1	670	130
17	Insulating wood-fibre board	59	12	33.2	22.3	250	47
18	Medium-density wood-fibre board	131	31	52.6	31.5	655	103
19	Wood panel, spruce	131	20	25.0	25.1	450	151
20	Melamine-faced particle board	466	41	19.8	25.1	870	494
21	Plastic wallcovering on gypsum board	611	10	9.2	11.9	725	694
22	Textile wallcovering on gypsum board	629	20	12.1	14.7	725	554
23	Textile wallcovering on rockwool	43	11	8.5	4.8	150	172
24	Paper wallcovering on particle board	143	33	29.8	29.3	670	229
25	Rigid polyurathane foam	0:06	2	17.4	8.9	32	1
26	Expanded polystyrene	115	39	32.8	9.9	18	139
27	Paper wallcoverering on gypsum board	640	21	9.4	10.5	725	645
28	Gypsum board	>20	34	6.7	9.1	725	-
	A.A.P.E.	-	-	-	-	-	36
	A.A.D.	-	-	-	-	-	42

차는 2.89, 결정계수는 0.925 그리고 상관계수는 0.962로서 flashover 시간 예측 보다는 차이가 있지만 상관계수 값으로 보면 문헌값과 예측값은 일치한다고 본다.

여기서 제시한 식을 이용하여 앞으로 새로운 건축재의 flashover 및 발화시간 연구에 이용되고, 기존의 재료에 대한 위험성평가에 이용되기를 기대한다. 또한 화

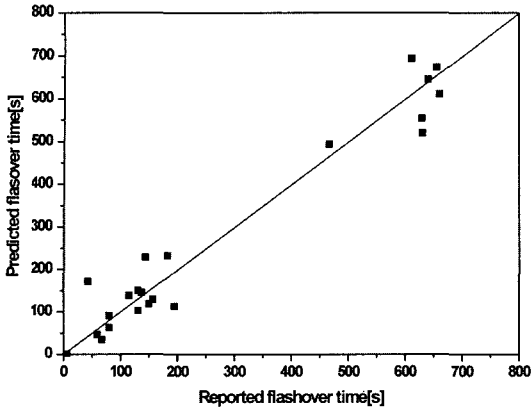


Fig. 2. Comparison between the reported and predicted flashover time of building interior materials.

재 시나리오 적용에 있어 본 연구에서 제시한 방법이 폭넓게 사용될 것으로 본다.

4.2 Flashover 열방출량 예측

최근 Babrauskas 등은 ISO 9750 시험을 통해 화재 위험성 계산을 위한 flashover 정의에서 flashover 열량과 시간관계를 고찰하여 Table 3에 나타내었다.<sup>18)</sup>

Table 3에서 33개의 내장에 대해 Flashover 열량과 시간의 관계에서 평균열량은 1975±1060 kW이고, 1000 kW 이하는 melamine-faced particle board를 비롯한 단 3개의 내장재이다. 또한 flashover 시간은 대부분 100s를 초과하였으나, flashover 시간이 8초인 rigid polyurethane foam을 비롯한 6개의 내장재는 100s 이하였다.

Table 3의 자료를 이용하여 flashover에서의 열량과 시간의 상관관계를 살펴보고자 한다. 먼저 열량과 시간의 관계를 graphical method로 살펴본 결과 열방출량에 의한 flashover 시간의 관계를 다음과 같은 예측 모델로 표현할 수 있으며,

$$t_{FO} = \alpha + \beta HRR^{\gamma} \tag{20}$$

Table 3. HRR values needed for flashover of ISO 9705 room test

No.	Materials	HRR at flashover [kW]	Time to flashover [s]	Predicted HRR at flashover [kW]
1	Plywood, 5.6 mm thick	1700	195	1679
2	Plywood, 12.8 mm thick	1900	140	1775
3	Polystyrene foam	4200	71	2079
4	"" (different burner program)	3100	101	1900
5	Polyisocyanurate foam	2200	19	3494
6	""(different burner program)	2900	42	2466
7	""(different burner program)	3200	315	1580
8	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1030	117	1839
9	Concrete walls, gwb ceiling, mixed furniture	1620	178	1703
10	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1190	114	1849
11	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1880	108	1871
12	Gwb walls and ceiling, mixed furniture	2420	100	1904
13	Plywood walls, acoustic tile ceiling, mixed furniture	1560	123	1820
14	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1610	106	1879
15	Plywood walls, gwb ceiling, mixed furniture	1470	225	1645
16	Rigid polyurethane foam	5950	8	5751
17	Textile wall covering on mineral wool	3490	33	2710
18	Wood fiberboard	2210	64	2142
19	Expanded polystyrene foam	1700	127	1809
20	Medium density fiberboard	1080	128	1806

Table 3. Continued

No.	Materials	HRR at flashover [kW]	Time to flashover [s]	Predicted HRR at flashover [kW]
21	Spruce paneling	1330	131	1798
22	Paper wall covering on particle board	980	133	1793
23	Particle board	950	138	1780
24	“(replicate of above)”	1160	146	1761
25	“(different burner program)”	1970	141	1772
26	Melamine-faced particle board	1000	447	1529
27	PVC wall covering on gw b	1160	609	1495
28	Textile wall covering on gw b	2000	622	1493
29	Acrylic glazing	1920	618	1494
30	FR extruded polystyrene foam, 40 mm	1650	160	1733
31	Lacquered wood paneling	1830	109	1868
32	FR expanded polystyrene foam, 80 mm	1740	803	1471
33	FR plywood	1080	645	1490
	A.A.P.E.	-	-	29.91
	A.A.D.	-	-	514

또한 flashover 시간에 의한 열방출량의 관계를 다음과 같은 예측 모델로 나타낼 수 있다.

$$HRR_{FO} = \alpha + \beta t^{\gamma} \tag{21}$$

본 연구에서는 flashover 시간에 의한 열방출량의 관계를 고찰하기 위해 식 (21)을 이용하여 최적화를 시도 다음과 같은 예측식을 얻었다.

$$HRR_{FO} = 1390.966 + 25596.07t^{-0.84} \tag{22}$$

식 (22)에 의한 이용하여 flashover의 방출열량을 예측한 결과 A.A.P.E.는 29.92, A.A.D.는 514, 결정계수는 0.689 그리고 상관계수는 0.830이었다. 문헌값과 예측식에 의한 예측값 비교 결과를 Table 3에 나타내었고, 보다 쉽게 볼 수 있도록 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 3000kW~400kW에 있는 재료들은 문헌값과 예측값이 차이를 보이고 있으므로 이에 대한 재료와 열량 특성 연구를 보다 구체적으로 해야 할 것으로 사료된다. Flashover 시간과 방출열량과 상관관계는 다른 특성의 상관관계 보다 그리 크지 않으므로 성능설계기준에 필요한 화재시나리오 연구를

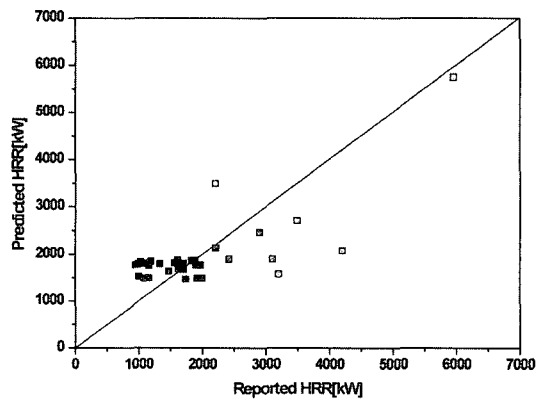


Fig. 3. Comparison between the reported and predicted flashover HRR of ISO 9705 test room.

위해서는 많은 이론 및 실험 그리고 최적화 방법 연구가 필요하다.

건축물화재안전 확보와 관련하여 flashover의 발생 여부는 거주자의 실내 체류 가능시간 및 피난요소시간과 더불어 대단히 중요한 요소이므로, 이에 관한 연구는 필수적이다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법론을 통해 flashover 현상 연구에 폭 넓게 이용되기를 기대한다.



## 5. 결 론

본 연구에서는 최근에 발표되고 있는 건축 내장재의 flashover 온도, 시간, 및 열량 그리고 발화시간에 대한 자료와 ISO 9705 room corner test에 이용한 건축 재료의 flashover 시간의 실험 자료들을 수학적 및 통계학적으로 고찰하였으며, flashover에 관련된 매개변수들을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 건축내장재의 flashover시간 예측식은 다음과 같다.

$$t_{FO} = 67.223 + 6.497X_1 + 23508.19\left(\frac{1}{X_2}\right)^2 - 1355.513\left(\frac{1}{X_3}\right) \\ 1.006 \times 10^{-3}X_4^2 - 0.146X_1X_3 - 9.677 \times 10^{-3}X_1X_4 \\ - 6.485 \times 10^{-3}X_2X_4$$

여기서  $t_{FO}$ 는 flashover 시간,  $X_1$ 은 발화시간,  $X_2$ 는 총 열방출량,  $X_3$ 는 질량손실율,  $X_4$ 는 평균밀도이다.

2) Flashover는 재료의 발화특성 가운데 발화도달시간과 밀접한 상관관계가 있으므로 발화시간에 대한 연구가 필요하다.

3) Flashover 시간과 방출열량과 상관관계가 크지 않으나, 시간에 의한 열방출량의 관계를 최적화한 결과 다음과 같은 예측식을 얻었다.

$$HRR_{FO} = 1390.966 + 25596.07t^{-0.84}$$

4) Flashover에 관련된 인자가 많기 때문에 기존에 발표되는 자료 및 문헌을 보다 정확하게 고찰하여 화재 위험성에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 필요가 있다.

## 참고문헌

- M. Brandyberry and G. E. Apostolakis, "Response Surface Approximation of Fire Risk Analysis Computer Code", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 29, pp.1534-184(1990).
- NFPA, "SFPE Handbook Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts(1995).
- T. L. Graham, G. M. Makhvilade, and J. P. Roberts, "On the Theory Flashover Development", Fire Safety Journal, Vol. 25, pp.229-259(1995).
- R. D. Peacock *et al.*, "Defining Flashover for Fire Hazard Calculation", Fire Safety Journal, Vol. 32, pp.331-345(1999).
- D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed., John Wiley & Sons(1998).
- 하동명, "화재위험분석을 위한 응답표면방법론(RSM: Response Surface Methodology)의 적용", 제 17소방 학술세미나, 행정자치부, 한국소방안전협회, pp.45-91(2002).
- V. Babrauskas, "Estimating Room Flashover", Fire Technology, Vol. 16, No. 2, pp.94-104(1980).
- B. Hägglund *et al.*, "Estimating Flashover Potential in Residual Rooms", FOA Report C 20369-A3, Forsvarets Forskningsanstakt, Stockholm(1980).
- P. H. Thomas, "Testing Products and Materials for their Contribution to Flashover in Rooms", Fire and Materials, Vol. 5, No. 3, pp.103-111(1981).
- B. J. McCaffrey *et al.*, "Estimating Room Fire Temperature and the Likelihood of Flashover Using Fire data Correlation", Vol. 17, No. 2, pp.98-119(1981).
- H. J. Kim and D. G. Lilley, "Flashover : A Study of Parameter Effects on Time to Reach Flashover Conditions", J. of Propulsion and Power, Vol. 18, No. 3, pp.669-673(2002).
- G. E. P. Box and N. R. Draper, "Empirical Model-Building and Response Surface", John-Wiley & Sons, Inc.(1987).
- D. G. Kleinbaum, L. L. Kupper, and K. E. Muller, "Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods", 2nd ed., PWS-KENT Publishing Company, Boston(1988).
- D. M. Ha, "Interrelationship of Fire and Explosion Properties for Chlorinated Hydrocarbons", J. of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 17, No. 4, pp.126-132(2002).
- D. M. Ha, "A Study on Explosive Limits of Flammable Material", J. of the Korean Institute for Industrial Safety, Vol. 14, No. 1, pp.93-100(1999).
- D. M. Ha and S. K. Lee, "A Study Flash Point of a Flammable Substances - Focused on Prediction of Flash points in Ternary System by Solution Theory-", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 15, No. 3, pp.14-20(2001).
- B. A. Ostman and T. D. Tsantraidis, "Correlation between Cone Calorimeter Data and Time to Flashover in the Room Fire Test", Fire and Materials, Vol. 19, pp.205-209(1994).
- V. Babrauskas, R. D. Peacock, and P. A. Reneke, "Defining Flashover for Fire Hazard Calculation : Part II", Fire Safety Journal, Vol. 38, pp.613-622(2003).