

[Research Paper]

미연소가스를 고려한 화재실 상부층 온도 예측에 관한 연구

강승구 · 이길용* · 정정호** · 신이철***†

동경이과대학 연구추진기구 종합연구원 PD연구원, *한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 화재환경연구센터 센터장,

**한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 화재환경연구센터 수석연구원,

***한국화재보험협회 부설 방재시험연구원 화재환경연구센터 선임연구원

Fire Compartment Upper-Layer Temperature Prediction Considering Excess Fuel Gas

Seung-Goo Kang · Gil-yong Lee* · Jeong-ho Jeong** · Yi-Chul Shin***†

PD Researcher, Research Institute for Science and Technology, Tokyo University of Science,

*Center Director, Fire Insurers Laboratories of Korea,

**Principal Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea,

***Senior Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea

(Received May 10, 2021; Revised May 26, 2021; Accepted May 27, 2021)

요 약

본 연구에서는 실규모 화재구획실을 이용하여 미연소가스가 발생하도록 화원조건을 설정하고, 개구조건을 변화시켜 연소실험을 실시하였다. 그 결과, 분출화염의 발생요인은 화재구획실내의 화원 열방출율 Q_c , 주벽표면적 A_T , 개구인자 $A\sqrt{H}$ 에 의존하는 것을 알 수 있었다. 또한, 전체의 실험조건에서 개구인자 $A\sqrt{H}$ 가 커질수록 구획내 상승 온도도 높아지는 것을 확인 할 수 있었다. 한편, McCaffrey 등에 의해 제안된 화재구획실 상부층 온도예측 모델의 수정된 경험식을 제시하고 유효성을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, combustion experiments were conducted by changing the fire source conditions and opening conditions for excess fuel gas using a large-scale fire compartment. It was found that the occurrence of external flames depends on the opening factor $A\sqrt{H}$, surface area of the wall A_T , and heat release rate (HRR) Q_c inside the fire compartment. Moreover, the larger the value of $A\sqrt{H}$ in the experiment, the greater is the temperature rise in the compartment. McCaffrey's proposed temperature prediction model for the upper layer of the fire compartment was also modified and validated.

Keywords : Large scale, Fire compartment upper layer temperature, Fully developed fire, Excess fuel gas

1. 서 론

사회의 발전에 따라 다양한 소재가 개발되고 있으며, 건축물 내부에 배치되는 가구 및 생활용품은 내구성, 가공성, 단열성, 편이성 등의 장점이 많은 플라스틱계 재료가 많은 공간에 사용되고 있다. 하지만, 플라스틱계 재료는 열에 매우 취약한 성질을 가지고 있으며, 고발열량을 내포하고 있는 경우가 많다. 해외의 연구^(1,2)에서도 목재와 플라스틱의 발열량을 직접 비교하여 플라스틱의 발열량이 현저히 높다

고 보고하고 있으며, 비금속 무기재료나 목재를 이용한 가연물보다 플라스틱을 이용한 가연물에서 열분해연소속도가 빠르게 반응하게 되기 때문에 동일한 가연물량에 대해서 급격한 연소 확대의 위험성이 크다.

한편, 건축물 구획의 내부에서 고발열량을 내포하고 있는 가연물에 착화되어 화재로 변화 할 경우, 빠른 시간 내에 플래시오버 현상을 동반하는 전실화재로 변모될 가능성이 매우 크다. 또한, 화재가 성장함에 따라 구획 내부에 열 분해 연소반응에 필요한 산소량의 산소농도가 0에 가까워

† Corresponding Author, TEL: +82-31-887-6619, FAX: +82-31-887-6680, E-Mail: shinyichul@gmail.com

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

지면 구획 내부에서 미연소가스가 발생하게 되며, 미연소가스가 개구부를 통하여 외부로 나가게 될 경우 외부의 산소와 연소 반응하여 분출화염을 형성하게 된다. 특히, 분출화염은 화재실의 인접되는 구획 및 건물과 상층부로의 연소 확대에 미치는 가장 큰 인자로 분류할 수 있으며, 분출화염의 규모는 미연소가스의 발생량에 의존한다고 보고되고 있다⁽³⁾. 이러한, 전실화재를 고려한 단일 구획실과 출화실에서 인접실로의 온도예측에 관한 연구는 선구적으로 보고되고 있으며, 주로 질량보존에 의거한 열수지와 화재 시 물레이션을 이용하여 화재실의 온도 예측 모델들이 검토되고 있다^(4,8). 기존의 연구들은 산소가 충분한 조건에서 구획내 가연물에 지배되는 연료지배형 화재조건과 개구부로부터의 산소의 공급량이 부족한 환기지배형 화재조건으로 분류하여 보고하고 있으며, 미연소가스의 발생량에 대해서는 기술하고 있지 않거나, 구획내 연소가 가능한 산소의 양을 이론적으로 계산하여 구획내 온도예측 모델을 구축하는 방법으로 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 기존의 연구에서는 실규모를 대상으로한 화재실험의 정량적인 데이터가 부족한 실정이며, 또한, 여러 가지의 개구부 형태를 고려하고 있지 않기 때문에 이에 대한 검토는 불가피하다.

따라서, 본 연구에서는 실규모 화재구획실을 이용하여 미연소가스가 발생하도록 화원조건을 설정하고, 개구조건을 변화시킨 연소실험을 실시하여 정량적인 화재실의 내부 온도를 수집하고, 또한, 열수지에 의거하여 미연소가스의 발생량을 고려한 화재실 상부층의 간이 온도 예측 모델의 검토를 목적으로 하였다.

2. 실험개요

2.1 실험장치

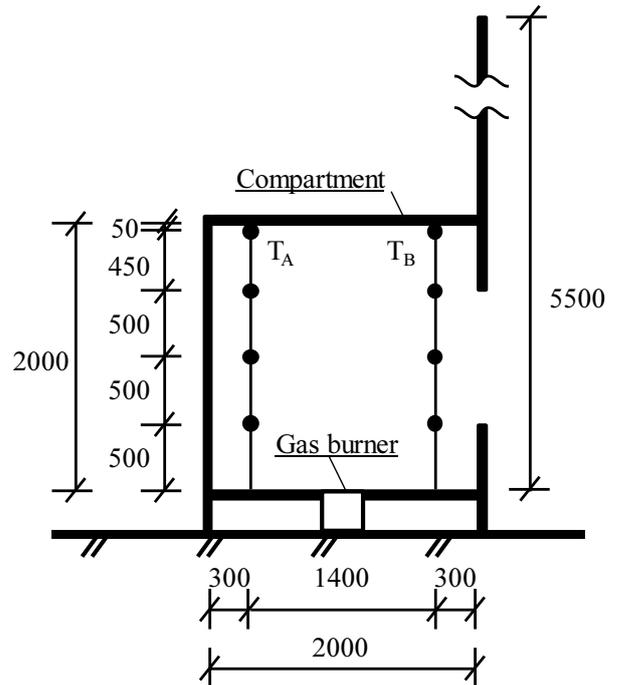
실험장치는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 화재구획실과 파사드를 구성시켰다.

화재구획실의 내부 치수는 폭 2 m × 길이 2 m × 높이 2 m로 설정하였으며, 사용재료로써, 주벽은 ALC판넬(두께 : 50 mm)을 이용하고, 주벽면 화재구획실 내측에 세라믹화이버(두께 : 25 mm)를 부착시켰다.

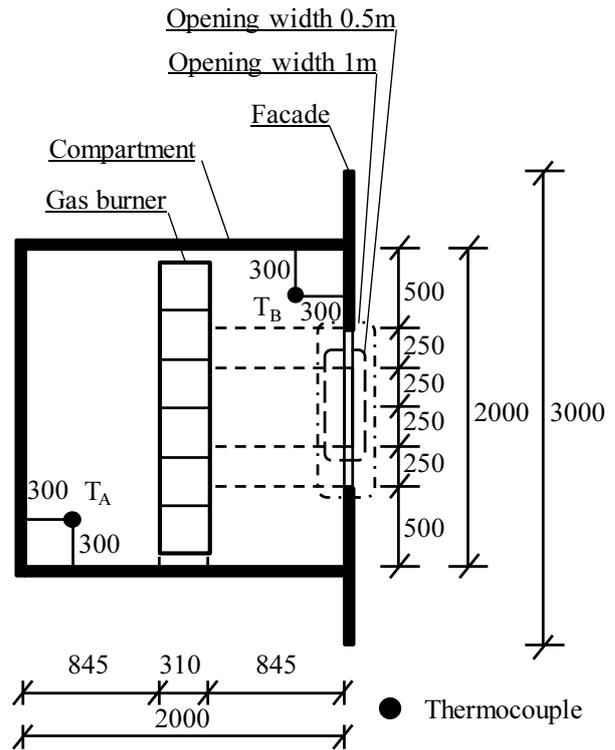
개구부는 화재구획실에 1개소 설치하였으며, 개구의 상단이 화재구획실내 천장면에서 바닥면 방향으로 0.5 m 높이에 위치하도록 설정하였다.

파사드는 폭 3 m × 높이 5.5 m의 실규모 부재를 이용하였으며, 口형 앵글의 골조와 규산칼슘판(두께 : 25 mm)을 구성하는 파사드 가열면측에 세라믹화이버(두께 : 50 mm)를 부착시켰다.

화원설정에 대하여, 가연물은 도시가스를 사용하였으며, 폭 0.3 m × 길이 1.8 m × 높이 0.3 m의 라인버너를 이용하여 화재구획실내 바닥면의 중심이 라인버너의 장변이 개구부에 병렬이 되도록 설치하고, 가스 분출면이 화재구획실 바닥면과 일치하도록 설치하였다. 또한, 라인버너의



(a) Cross-sectional diagram



(b) Plan diagram

Figure 1. Schematic diagram of experimental apparatus. (Unit : mm)

가스 공급량은 가스유량계(SLPM5000)를 이용하여 조절하였다.

Table 1. Experimental Condition

| Case | Opening conditions | | | | Surface area of wall | Fire source conditions | | | | | |
|-------|--------------------|--------|--------------|-------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | W | H | n | $A\sqrt{H}$ | | HC1 | HC2 | HC3 | HC4 | HC5 | HC6 |
| | Width | Height | Aspect ratio | Opening factor | | Q_{verit} | $(Q_{verit} + 1500AH^{1/2})/2$ | 1500 $AH^{1/2}$ | 1800 $AH^{1/2}$ | 2100 $AH^{1/2}$ | 2400 $AH^{1/2}$ |
| | [m] | [m] | [m] | [m ²] | [m ²] | [kW] | [kW] | [kW] | [kW] | [kW] | [kW] |
| Case1 | 0.5 | 1 | 1 | 0.50 | 23.5 | 349.9 | 549.9 | 750.0 | 900.0 | 1050.0 | 1200.0 |
| Case2 | 1 | 1 | 2 | 1.00 | 23.00 | 525.8 | 1012.9 | 1500.0 | 1800.0 | 2100.0 | 2400.0 |
| Case3 | 1 | 0.67 | 3 | 0.55 | 23.33 | 368.7 | 595.7 | 822.6 | 987.2 | 1151.7 | 1316.2 |
| Case4 | 1 | 0.5 | 4 | 0.35 | 23.50 | 284.2 | 407.3 | 530.3 | 636.4 | 742.5 | 848.5 |
| Case5 | 1 | 0.4 | 5 | 0.25 | 23.60 | 232.9 | 306.2 | 379.5 | 455.4 | 531.3 | 607.2 |
| Case6 | 1 | 0.33 | 6 | 0.19 | 23.67 | 196.1 | 240.2 | 284.4 | 341.2 | 398.1 | 455.0 |

Surface area : wall, ceiling and floor

2.2 측정항목

2.2.1 화원의 열방출율

데이터로거(MX100)로 측정된 가스공급량에 대하여 화재구획실 내부에서 가스가 완전 연소하는 것을 가정하여 화원의 열방출율을 산출하였다.

2.2.2 화재실온도

Figure 1에 나타난 바와 같이, T_A 와 T_B 의 2개소에 대하여 바닥면부터 천장 방향으로 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 1.95 m의 높이로 K-type 시스열전대($\phi 3.2$ mm)를 설치하여 화재구획실의 내부 온도를 측정하였다.

2.3 실험조건 및 방법

Table 1에 나타난 바와 같이, 개구조건은 개구아스펙트비($n = 2W/H$)가 1~6의 범위로 6조건을 설정하였다. 또한, 각각의 개구조건마다 화원 열방출율 HRR에 대하여 HC1~HC6의 6조건으로 설정하였고, 기존연구에서 제안되고 있는 분출 화염의 발생한계를 도출하는 식 (1)⁹⁾을 이용하여 산정한 분출화염 발생 한계량 Q_{verit} 및 개구조건에서 결정되는 개구인자 $A\sqrt{H}$ 에 계수를 곱한 값에 의거한 화원 열방출율을 설정하여, Q_{verit} , $(Q_{verit} + 1500A\sqrt{H})/2$, $1500A\sqrt{H}$, $1800A\sqrt{H}$, $2100A\sqrt{H}$, $2400A\sqrt{H}$ 로 설정하였다.

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

여기서, A_T 는 화재실 주벽면적 (m²), A 는 개구면적 (m²), H 는 개구높이 (m)이다. 기존연구에서 제안되고 있는 식 (1)은 개구에서 분출화염이 발생하는 한계열방출율이라고 정의되어 있으며, 본 연구에서는 Q_{verit} 를 초과하는 양의 가스를 공급한 경우 구획내에서 미연소가스가 증가하고 개구에서 미연소가스가 분출하는 것에 대하여 화재실 온도에 미치는 영향을 고려하였다.

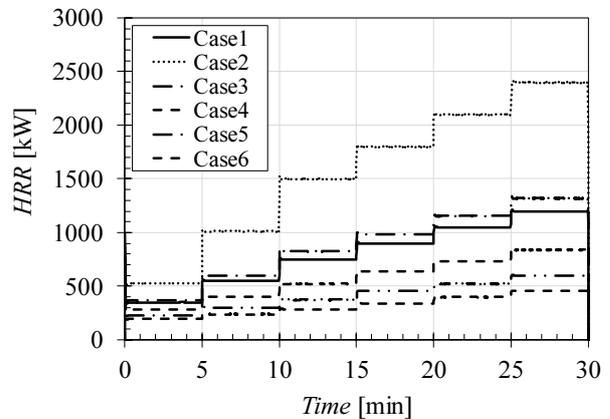


Figure 2. Variation of HRR as a function of time.

한편, 실험은 개구상부를 고정하여 개구조건을 변경하고 Figure 2에 나타난 화원 열방출율(상세 값은 Table 1에 표기)가 되도록 최소 값 HC1에서 최대 값 HC6까지 5 min 간격으로 단계적으로 가스공급량을 증가시켰다. 또한, 데이터 정리는 1 s 간격으로 측정된 데이터에 대하여 HRR을 증가시키기 전 20 s간의 평균값을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화원의 열방출율

Figure 3에 착화로부터 5 min 간격으로 30 min까지 HRR을 증가시킨 결과에 대하여, 화원 열방출율 Q_c 와 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 의 관계를 나타내었다. 여기서, Q_c 는 Figure 2의 HRR을 증가시키기 전 20 s간의 평균값이다. 또한, 그래프 안의 실선은 본 실험조건에서 식 (2)의 화원조건을 연결한 선이며, 식 (2)는 구획내 존재하는 산소가 구획실내에서 완전 연소하였다고 상정된 열방출율의 이론값이다¹⁰⁾. 또한, 그래프 안의 검은색 플롯은 개구로부터 분출화염이 확인되지 않은 구간으로 표기하였고, 흰색 플롯은 개구로부터 분

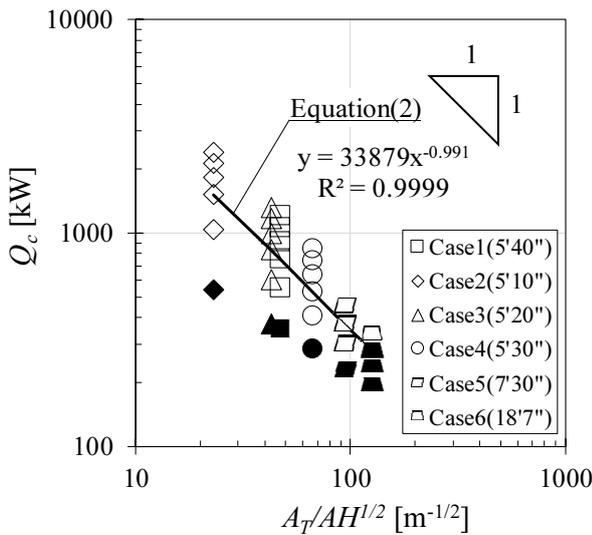


Figure 3. Relationship between Q_c and $A_T/A\sqrt{H}$.

출화염이 확인된 구간으로 표기하였으며, 그래프의 각 조건의 범례 옆에는 개구로부터 연속적으로 분출화염이 발생한 시간대를 육안으로 관찰하여 기록한 결과를 나타내었다.

$$Q_{v,max} = 1500A\sqrt{H} \quad (2)$$

Figure 3에 나타난 바와 같이, 식 (2)의 실선을 상회하지 않아도 Case1~Case5의 실험조건에서 분출화염이 발생하는 것이 확인되었다. 또한, 분출화염이 발생한 구간에 대하여 주목하면, Case1~Case5의 실험조건에서는 HC2 (5 min~10 min) 화원조건의 구간에서 분출화염이 발생한 것을 확인할 수 있었으며, Case6의 실험조건에서만 HC4 (15 min~20 min)의 화원조건의 구간에서 분출화염이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

한편, 화원 열방출율 Q_c 와 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 의 관계를 통하여, 식 (2)의 화원 열방출율 $Q_{v,max}$ 는 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 에 대하여 약 -1승에 비례하는 것을 알 수 있다. 또한, 분출화염이 발생한 열방출율에 주목하면, 개구인자 $A\sqrt{H}$ 를 고려한 동일한 화원조건에 대하여 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 가 작을수록 화원 열방출율 Q_c 가 크게 요구되는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 분출화염의 발생요인은 화재구획실내의 화원 열방출율 Q_c , 주벽표면적 A_T , 개구인자 $A\sqrt{H}$ 에 의존한다고 사료된다.

3.2 화재실온도

Figures 4(a-1)~(f-2)는 Figure 1에 나타난 T_A 와 T_B 위치에서 측정된 구획내 높이별 온도를 나타내었다.

Figures 4(a-1)~(f-2)에 나타난 바와 같이, 전체의 실험조건에서 개구인자 $A\sqrt{H}$ 가 커질수록 구획내 상승온도도 높아지는 것을 확인할 수 있었으며, Case1~Case5의 실험조건의 HC3 (15 min)~HC6 (30 min) 화원조건 구간에서는 온

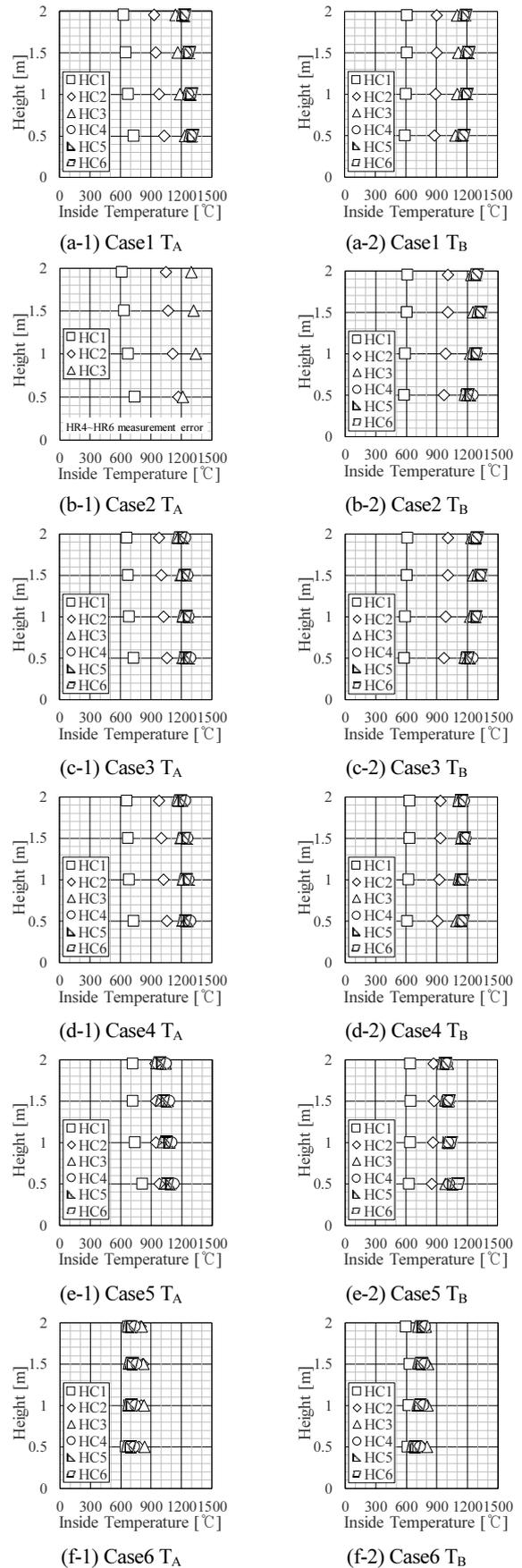


Figure 4. Relation of compartment height and inside temperature.

도차의 변화가 크지 않았다. 또한, T_A 와 T_B 의 각각의 위치에 따른 온도를 비교하면, 전체적으로 T_B 보다 T_A 에서 온도가 높게 나타났으며, 대부분의 동일한 화원조건에 대하여 T_A 의 경우 0.5 m높이에서 가장 높은 온도가 나타났으나, T_B 의 경우 0.5 m높이에서 가장 낮은 온도가 나타났다. 이러한 원인으로는 T_A 의 하부위치에서는 공기의 유입의 제한에 의해 압력이 저하되고 이에 따라 T_A 하부위치의 벽면 쪽으로 화염이 따라가는 현상으로 인하여 화염영역에 가까운 T_A 의 0.5 m높이의 온도가 가장 높게 나타났다고 사료된다. 반면, T_B 의 하부위치의 0.5 m의 경우 개구부 중성대보다 하부에 위치되어 있기 때문에 외부의 차가운 공기의 유입에 의한 영향으로 온도가 낮게 나타났다고 사료된다. 한편, Case6의 경우 HC1 (5 min)-HC2 (10 min)의 화원조건 구간에서 온도가 상승하였으나, HC3 (15 min)의 구간부터 온도가 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 원인으로는 구획실 내부의 화재성상이 연료지배화재에서 환기지배화재로 변화되었기 때문이라고 추측된다.

4. 미연소가스의 발생량을 고려한 화재실 상부층 온도예측 모델

McCaffrey등은 대략 600 K 이하의 화재 구획실의 상부층 상승온도에 대하여 100건을 초과하는 실험데이터를 수집하였으며, 이를 기반으로 회귀분석 한 결과를 간이 온도 예측식으로 제안하고 있다⁽¹¹⁾. 본 연구에서는 McCaffrey등이 제안한 화재실의 온도 예측식을 이용하여 화재실의 미연소가스량을 검토하도록 한다.

4.1 McCaffrey식을 이용한 화재실 상부층의 온도

화재 구획실의 열량보존은 식 (3)으로 나타낼 수 있으며, 식 (4)는 화재실에서의 열분해속도 Q_e 이며, 식 (5)는 고온 상부층 주벽의 열손실속도 Q_w 로 나타낼 수 있다. 여기서, Q_f 는 화재실의 열방출율 (kW), c_p 는 비열 (kJ/kgK), m_a 는 개구유량 (kg/s), T_f 는 화재실온도 (K), T_∞ 는 분위기온도 (K), h_k 는 실효열전달계수 (kW/m²K), A_T 는 화재실의 주벽면적 (m²)이다.

$$Q_f = Q_e + Q_w \tag{3}$$

$$Q_e = c_p m_a (T_f - T_\infty) \tag{4}$$

$$Q_w = h_k A_T (T_f - T_\infty) \tag{5}$$

또한, 식 (3)을 $\Delta T_f / T_\infty$ 에 대하여 정리하면, 화재 구획실의 무차원 온도상승은 식 (6)과 같이 도출된다.

$$\frac{\Delta T_f}{T_\infty} = \left(\frac{Q_f}{c_p T_\infty m_a} \right) / \left(1 + \frac{h_k A_T}{c_p m_a} \right) \tag{6}$$

여기서, 개구유량 m_a 을 $A\sqrt{H}$ 로 화재 구획실의 개구인자 로써 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있고, ρ_∞ 는 밀도 (kg/m³), g 는 중력가속도 (m/s²)이다.

$$m_a = \rho_\infty \sqrt{g} (A\sqrt{H}) \tag{7}$$

또한, 실효열전달계수 h_k 는 다음 식 (8)로 나타 낼 수 있으며, k_f 는 화재실 주벽의 열전도율 (kW/mK), δ_f 는 화재실 주벽의 두께 (m), ρ_f 는 화재실 주벽의 밀도 (kg/m³), c_f 는 화재실 주벽의 비열 (kJ/kgK), t 는 시간 (s), $(\alpha = k_f / c_f \rho_f)$ 는 열 확산계수 (m²/s)이다.

$$h_k = \begin{cases} \frac{k_f}{\delta_f} & \left(t > \frac{\delta_f^2}{4\alpha} \right) \\ \left(\frac{k_f \rho_f c_f}{t} \right)^{1/2} & \left(t \leq \frac{\delta_f^2}{4\alpha} \right) \end{cases} \tag{8}$$

식 (6)에 대하여 식 (7), 식 (8)을 정리하여 실험결과에 의한 회귀 분석을 하면 식 (9)가 도출된다.

$$\frac{\Delta T_f}{T_\infty} = 1.6 \left(\frac{Q_f}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} A \sqrt{H}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{c_p \rho_\infty \sqrt{g} A \sqrt{H}} \right)^{-1/3} \tag{9}$$

여기서, McCaffrey 등이 제안한 식 (9)를 이용하여 계산한 값과 본 연구에서 측정된 화재실 온도의 실험값을 비교하여 검토를 수행하였다.

Figure 5에 대하여, x축에는 상기 Figure 4의 T_A 와 T_B 를 평균한 화재실 상승온도의 실험값 $\Delta T_{f,exp}$ 과 y축에 식 (9)를 이용한 화재실 상승온도의 계산값 $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9)를 나타내었다. 또한, 화원조건에 대하여 HC1 (5 min)-HC3 (15 min)은 검은색 플롯을, HC4 (20 min)-HC6 (30 min)은 흰색 플롯으로 표기하였다.

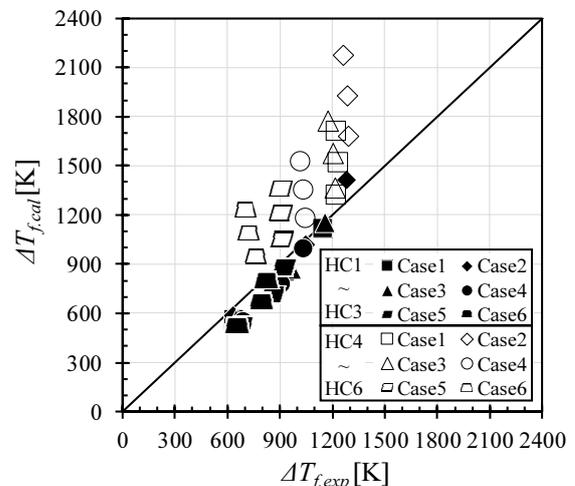


Figure 5. Comparison of $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9) and $\Delta T_{f,exp}$.

Figure 5의 결과로부터, 전체의 실험조건에서 HC1 (5 min)~HC3 (15 min)의 화원조건에서는 실험값 $\Delta T_{f,exp}$ 과 계산값 $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9)이 대체로 일치하는 결과가 나타났다. 하지만, 전체의 실험조건에서 HC4 (20 min)~HC6 (30 min)의 화원조건은 실험값 $\Delta T_{f,exp}$ 보다 계산값 $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9)에서 현저히 높은 온도의 결과가 나타났다. 이러한 결과를 분석해보면, 화원조건 HC4 (20 min)~HC6 (30 min)의 경우, 화재실내의 산소가 완전히 연소되는 것을 의미하는 상기 식 (2)를 상회하는 열방출율을 나타내고 있으며, 화재실내에서 식 (2)를 초과하는 화원 열방출율 Q_c 를 증가시킬 경우 화재실내의 산소 부족으로 인하여 불완전 연소된 미연소가스가 개구부를 통하여 외부로 배출되었다고 사료된다. 따라서, 식 (9)의 경우 외부로 배출되는 미연소가스량을 고려하고 있지 않기 때문에 계산값 $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9)가 실험값 $\Delta T_{f,exp}$ 보다 높게 나타났다고 판단되며, 식 (2)를 초과하는 화원 열방출율에 대해서는 식 (9)의 우변 2항의 분자에 있는 Q_f 에 대하여 미연소가스량을 고려한 검토가 필요하다고 사료된다.

4.2 미연소가스를 고려한 McCaffrey식의 검토

4.1절에서 기술 한 바와 같이 4.2절에서는 미연소가스의 발생량을 고려한 화재실 상부층의 온도예측을 검토하기 위하여 상기 식 (9)의 우변의 2항의 분자 Q_f 에 대하여 화재실내에서 발생한 미연소가스량 Q_{ex} 가 외부로 배출되는 것을 고려하여 화재실내부의 열방출율 Q_{total} 으로 변환한다. 또한, McCaffrey 등은 개구유량 m_a 에 대해서 대표치수 $\rho_\infty \sqrt{g} A \sqrt{H}$ 를 채용하고 있으나, Figure 4의 결과와 같이 Case1과 Case4처럼 동일한 개구 면적에도 개구 형상에 따라 화재성상이 다르기 때문에 대표치수를 D 로 변환하여 다음 식 (10)과 같이 표현한다.

$$\frac{\Delta T_f}{T_\infty} = a \left\{ \left(\frac{Q_{total}}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g} D^n} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{c_p \rho_\infty \sqrt{g} D^m} \right)^{-1/3} \right\}^3 \quad (10)$$

또한, 상기의 대표치수 D 에 대하여 개구형상을 고려하여 정방형 개구 조건과 장방형 개구조건으로 구분하도록 하고, 기존의 연구⁽¹¹⁻¹³⁾에서 정방형 개구조건 및 장방형의 종장형 개구조건과 장방형의 횡장형 개구조건에 대해서 아스펙트비 n 가 약 3.3을 기준으로 개구부를 통해 나가는 미연소가스의 화재성상이 달라진다고 보고하는 것을 참고하여, 본 보에서는 아스펙트비 n 을 4로 기준하여 구분한다.

또한, 장방형의 횡장형 개구조건인 경우 자유공간의 선화원과 같은 화재성상과 유사하기 때문에 장방형의 장변을 개구폭 W 으로 두고, 단변을 개구 중성대에서 개구상단 $H-Z_n$ 으로 설정하여, 다음 식 (11)과 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{total} = \begin{cases} Q_c - Q_{ex} & n < 4 \\ (Q_c - Q_{ex}) / W & 4 \leq n \end{cases} \quad (11)$$

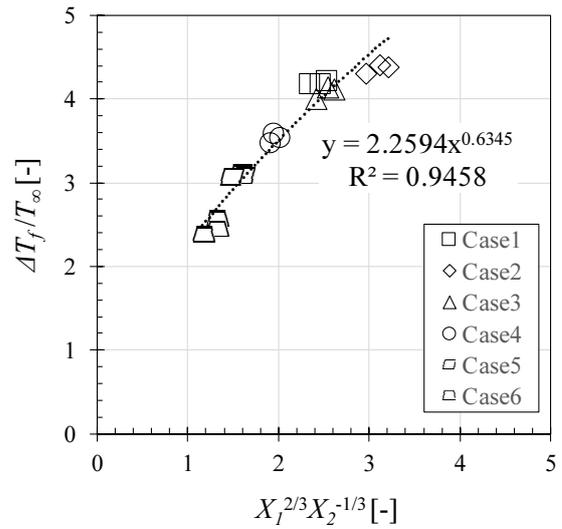


Figure 6. $\Delta T_f/T_\infty$ and $X_1^{2/3}X_2^{-1/3}$ relationship.

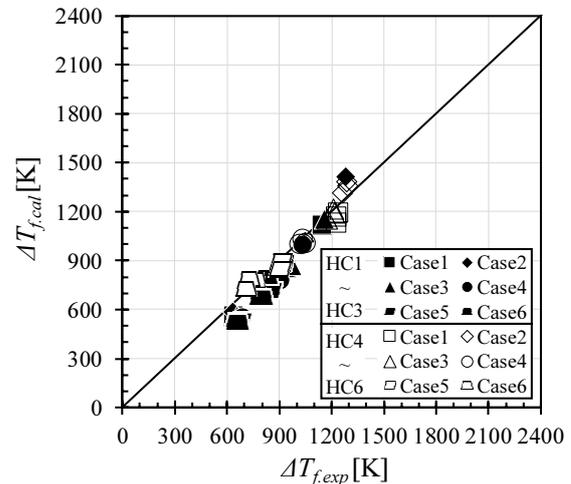


Figure 7. Comparison of $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9), (Eq.10) and $\Delta T_{f,exp}$.

$$D^n = \begin{cases} A\sqrt{H} & n < 4 \\ (H-Z_n)^{3/2} & 4 \leq n \end{cases}, \quad D^m = \begin{cases} A\sqrt{H} & n < 4 \\ (H-Z_n)^{5/2} & 4 \leq n \end{cases} \quad (12)$$

Figure 6은 전체 실험조건인 HC4 (20 min)~ HC6 (30 min)의 화원조건에 대해서 x축에는 상기의 식 (10)의 우변의 2항과 3항을 X_1 와 X_2 로 두고, y축에는 식 (10)의 좌변 $\Delta T_f/T_\infty$ 를 두어 회귀분석한 결과를 나타내었으며, Figure 7의 회귀분석 결과로부터, $y = 2.2594x^{0.6345}$ 를 도출하였다.

4.3 미연소가스를 고려한 McCaffrey의 화재실 상부층의 온도예측식 검증

Figure 7에 대하여, x축에는 상기 Figures 4(a)와(b)를 평균한 실험값 $\Delta T_{f,exp}$ 와 y축에는 HC1 (5 min)~HC3 (15 min)의 화원조건은 식 (9)를 이용하였으며, HC4 (20 min)~HC6 (30 min)의 화원조건에서는 상기 4.2절에서 미연소가스를 고려

한 회귀분석 결과 값을 이용하여 식 (10)의 α 에 2.2594 β 에 0.6345를 이용하여 계산한 값 $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9), (Eq.10)이다.

또한, 화원조건에 대하여 HC1 (5 min)-HC3 (15 min)은 검은색 플루트를, HC4 (20 min)-HC6 (30 min)은 흰색 플루트로 표기하였다.

Figure 7에 나타난 바와 같이 실험값 $\Delta T_{f,exp}$ 와 계산값 $\Delta T_{f,cal}$ (Eq.9), (Eq.10)가 대체로 일치하는 결과가 나타났으며, 식 (10)의 유효성을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 실규모 화재구획실을 이용하여 미연소가스가 발생하도록 화원조건을 설정하고, 개구조건을 변화한 연소실험을 실시하여 정량적인 화재구획실의 내부온도를 수집하는 것과, 열수지에 의거하여 미연소가스의 발생량을 고려한 화재구획실 상부층의 간이 온도 예측 모델의 검토를 목적으로 연구를 수행하였으며, 본 실험조건의 범위에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1) 화원의 열방출율

전체의 실험조건에서 개구부로부터 분출화염이 발생하였으며, 열방출율 Q_c 와 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 의 관계를 통하여, 온도인자 $A_T/A\sqrt{H}$ 가 작을수록 화원 열방출율 Q_c 가 크게 요구되는 것을 알 수 있으며, 분출화염의 발생요인은 화재구획실내의 화원 열방출율 Q_c , 주벽표면적 A_T , 개구인자 $A\sqrt{H}$ 에 의존하는 것을 알 수 있었다.

2) 화재실온도

전체의 실험조건에서 개구인자 $A\sqrt{H}$ 가 커질수록 구획내 상승온도도 높아지는 것을 확인 할 수 있었으며, Case1~Case5의 실험조건인 HC3 (15 min)-HC6 (30 min) 화원조건 구간에서는 온도차의 변화가 크지 않았다. 한편, Case6의 경우 HC1 (5 min)-HC2 (10 min)의 화원조건 구간에서 온도가 상승하였으나, HC3 (15 min)의 구간부터 온도가 감소하는 경향이 나타났다.

3) 미연소가스의 발생량을 고려한 화재실 상부층 온도예측 모델

McCaffrey 등에 의해 제안된 화재구획실 상부층 온도예측 모델에 대하여 미연소가스를 고려한 검토를 수행하였으며, 화재구획실 상부층 온도예측 모델의 수정된 경험식을 제시하고 유효성을 확인하였다.

후 기

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

References

1. Japan Association for Fire Science and Engineering, "Fire

and Building", Kyoritsu shuppan co., Ltd., pp. 66-67 (2002).

2. Y. Ohmiya, T. Tanaka and T. Wakamatsu, "Burning Rate of Fuels and Generation Limit of the External Flames in Compartment Fire", Fire Science and Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 1-12 (1996). https://doi.org/10.3130/aijs.60.149_1.

3. T. Tanaka, "Introduction to Building Fire Safety Engineering Revised Edition", The Building Center of Japan, p. 227 (2002).

4. K. Matsuyama, T. Tujita, H. Kaneko, Y. Ohmiya, T. Tanaka and T. Wakamatsu, "A Simple Predictive Method For Room Fire Behavior", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, Vol. 18, pp. 23-32 (1998). <https://doi.org/10.3210/fst.18.23>.

5. M. Sato, T. Tanaka and T. Wakamatsu, "Simple Formulas for Predicting Fire Temperatures in the Room of Origin and the Connected Corridor", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, No. 489, pp. 137-145 (1996).

6. T. Tanaka, M. Sato and T. Wakamatsu, "Simple Formula for Ventilation Controlled Fire Temperatures", Fire Science and Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 15-27 (1997). <https://doi.org/10.3210/fst.17.15>.

7. Y. C. Shin, G. W. Park and Y. H. Yoo, "A Study on Mechanism of Fire Spread between Rooms", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 15, No. 5, pp. 109-116 (2015). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.5.109>.

8. G. H. Ko, "Numerical Study on the Validity of Scaling Law for Compartment Fires", Fire Science and Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 29-34 (2014). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2014.28.4.029>.

9. Y. Ohmiya and Y. Hori, "Proteties 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 (2001). https://doi.org/10.3130/aija.66.1_7.

10. K. Harada, "Building Fire mechanism and fire safety design", The Building Center of Japan, pp. 76-78 (2007).

11. B. J. McCaffrey, J. G. Quintiere and M. F. Harkleroad, "Estimating Room Temperatures and Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations", Fire Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 98-119 (1981). <https://doi.org/10.1007/BF02479583>.

12. J. Yamaguchi and T. Tanaka, "Temperature Profiles of Window Jet Plume", Fire Science of Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 17-38 (2005). <https://doi.org/10.3210/fst.24.17>.

13. Y. Ohmiya, Y. C. Shin, M. Noaki and S. G. Kang, "Temperature distribution in the vicinity of vertical wall on opening fire plume ejected from horizontal opening", J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ, Vol. 81, No. 730, pp. 1055-1063 (2016). <https://doi.org/10.3130/aije.81.1055>.