

## 화재실 화재에서 바닥면의 열유속 특성연구

김성찬 · 고권현

경일대학교 소방방재학부 · 동양대학교 건축소방행정학과

### A Study on the Characteristics of Heat Flux on the Floor in a Compartment Fire

Kim, Sung Chan · Ko, Gwon Hyun

Kyung Il Univeristy · Dong Yang University

#### 요 약

본 연구는 화재조건에 따른 화재실 바닥면에서의 열유속특성을 파악하기 위해 ISO-9705 표준화재실의 40% 축소모형공간에 대하여 화재실험을 수행하고 화재성상에 따른 열유속변화와 공간적 분포를 분석한다. 또한 모형실험에서 측정된 열유속을 Scaling Law를 적용하여 실규모 크기의 결과로 환산하고 이를 기존의 다른 연구결과와 비교분석함으로써 화재발생으로 인한 공간내 열유속의 축소법칙의 적용성을 파악하고자 한다. 실험에 사용된 연료는 천연가스, 메탄올, 에탄올, 헵탄, 톨로엔, 폴리스틸렌등이며 모형실험의 최대발열량은 450 kW 정도로 실규모로 환산시 약 4.4 MW이다. 실험결과 화재실바닥면의 열유속은 연층의 온도와 연료의 종류에 따라 차이를 보였으나 측정위치별 차이는 크지 않았으며 Scaling Law를 적용한 결과 화재실 상층부 온도가 약 500~600℃ 정도에서 바닥면의 열유속은 약 20 kW/m<sup>2</sup> 정도로 기존연구와 유사한 경향을 보였다. 본 연구는 화재공간 내 열유속 측정을 통해 전실화재로의 화재성장을 파악하고 화재실내부의 열적특성을 분석하기 위한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

#### 1. 서 론

화재공학분야에서 열유속(heat flux)은 고체표면에서의 열전달 특성을 파악하기 위한 중요한자중의 하나이다. 특히, 가연물의 점화나 화염전파등과 같은 화재발달에 관한 물리적 특성을 이해하기 위해서는 열유속에 기초한 표면에서의 열적특성 평가가 매우 중요하다. 예를 들어 임계열유속(critical heat flux)은 가연물의 점화를 유도하는 최소열유속으로서 가연물의 점화 메커니즘을 이해하거나 화재실 내부에서 급격한 화재의 성장을 예측하고 전실화재(flashover)에 도달되는지의 여부를 판단하는데 중요한 인자로 작용한다. 즉, 화재공간 내부에서 화재특성에 따른 열유속의 분포를 파악하는 것은 가연물의 예열을 통한 연소 가속화나 전실화재로의 발달 등을 전반적인 화재발달 과정을 이해하는데 큰 도움이 된

다. 본 연구에서는 축소모형실험을 통해 화재실의 바닥면에서의 열유속 변화를 측정하여 화재특성에 따른 화재실 바닥면에서의 열유속 변화를 파악하고자 한다. 또한, 열유속에 대한 축소법칙(scaling law)을 도출하여 실제규모 공간에 대한 열유속 특성을 평가함으로써 공간화재에서 열유속의 상사법칙의 적용성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 화재실험

그림 1과 같이 실험 대상 화재공간은 0.98 m × 0.98 × 1.46 m 로써 ISO-9705 화재실을 40% 크기로 축소한 모형이며 표준 출입구 크기는 폭 0.48 m, 높이 0.81 m 이다. 실험에 사용된 연료는 기체상태인 메탄(CH<sub>4</sub>), 액체연료인 헵탄(C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>), 톨루엔(C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), 메탄올(CH<sub>3</sub>OH), 에탄올(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), 고체연료인 폴리스틸렌(C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>) 고형분(pellet)을 이용하였다. 열유속은 측정오차는 약 ± 6 % 정도인 직경 6.4 mm의 Schimit-Boelter type 열유속계(heat flux gauge)에 의해 계측되며 측정위치는 화재실의 중앙의 바닥면의 출입구쪽과 화재실 내부 안쪽에서 각각 측정되었다. 화재실 상층부의 온도는 4개의 이중 차폐 흡입식 열전대(double shielded aspirated thermocouple)에 의해 측정되며 TC#1과 TC#2의 설치높이는 바닥면으로부터 88cm 이고 TC#3과 TC#4는 80 cm 높이에 설치되었다. 실험에 관한 상세한 내용은 이전 연구를 참고한다 [1].

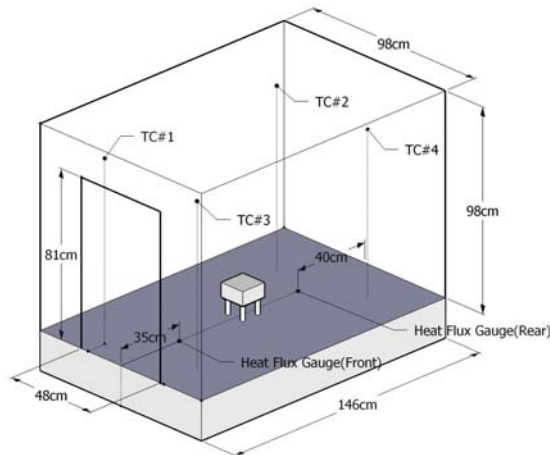


그림 1. 축소모형 실험공간의 치수 및 측정위치.

### 2.2 축소법칙

열유속에 대한 축소법칙은 에너지와 시간에 대한 축소법칙으로부터 도출할 수 있다. 일반적으로 에너지와 시간에 대한 축소법칙은 길이비의 3승과 1/2승에 각각 비례하는 것으로 알려져 있다 [2].

$$\frac{E_M}{E_F} = \left( \frac{L_M}{L_F} \right)^3, \quad t_M = \left( \frac{L_M}{L_F} \right)^{1/2}$$

여기서, E와 t는 에너지와 시간을 의미하고 하첨자 M과 F는 축소규모와 실규모를 나타낸다. 열유속은 단위시간당 단위면적당의 에너지의 차원으로 표시되고 축소법칙은 다음과 같이 길이비의 1/2승에 비례하게 된다.

$$\frac{\ddot{q}_M}{\ddot{q}_F} = \frac{\left(\frac{E_M}{A_M t_M}\right)}{\left(\frac{E_F}{A_F t_F}\right)} = \left(\frac{E_M}{E_F}\right) \left(\frac{t_F}{t_M}\right) \left(\frac{A_F}{A_M}\right) = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2}$$

### 3. 결과

그림 2는 헵탄 화재시 발열량의 변화와 화재실 출입구쪽과 내부벽면 쪽에서의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 발열량 변화 후 바닥면 열유속이 준 정상상태(quasi-steady state)에 도달하는 시간은 약 300 초 정도이며 열유속의 크기는 화재실의 출입구와 내부벽면 쪽에서 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 그림 3은 톨루엔 화재시 화재실의 상층부 평균온도에 따른 바닥면에서의 열유속 관계를 나타낸다. 상층부의 온도가 증가함에 따라 바닥면에 도달하는 열유속의 증가율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 상층의 온도가 1000 °C 이하에서는 화재실의 출입구와 내부벽면 쪽에서의 열유속은 큰 차이가 없지만 화재가 성장하여 화재실 온다가 약 1000°C 이상에서는 화재실 내부벽면 쪽에서의 열유속이 출입구 쪽에 비해 높은 열유속을 보였다. 환기량이 충분한 경우, 화재실 출입구 쪽에서는 외부 유입공기의 영향으로 내부 벽면에 비해 상대적으로 열유속이 낮게 나타난다.

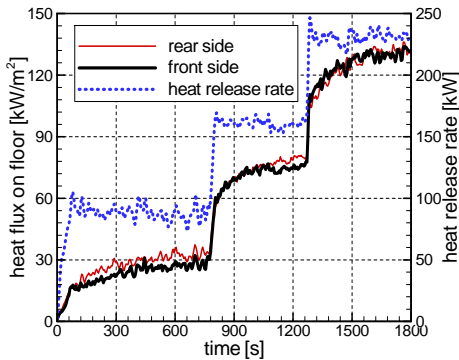


그림 2. 헵탄화재의 열유속 변화

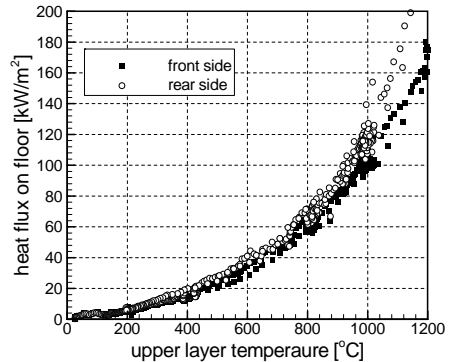


그림 3. 상층부 온도와 바닥면 열유속

그림 4는 준정상상태의 화재조건에 대하여 축소법칙을 적용하여 상층부 온도에 따른 화재실의 출입구쪽과 내부 벽면쪽에서의 열유속 관계를 나타낸다. 발열량이 낮은 경우 화재시 출입구쪽과 내부 벽면쪽의 열유속 차이가 거의 없고 발열량이 증가함에 따라 대부분의 화재에서 내부 벽면쪽의 열유속이 상대적으로 높게 나타났다. 그러나 메탄올과 에탄올 화재의 경우 발열량 크기에 상관없이 출입구와 내부 벽면에서의 열유속은 큰 차이 없이 거의 유사한 경향을 보였다. 뿐만 아니라 메탄올, 에탄올, NG 화재는 동일 발열량 조건에 대해서 바닥면에 도달하는 열유속의 크기정도가 매연(soot)의 생성이 상대적으로 많은 헵

탄, 톨루엔, 폴리스티렌 화재에 비해 현저히 낮은 값을 나타냈다. 따라서 화재실 바닥면에 도달하는 열유속은 바닥면의 유동조건과 연소상태나 상층부의 매연의 농도등에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 축소법칙을 적용한 경우 상층부 온도가 약 500-600°C 정도에서 대부분 고체의 임계열유속(critical heat flux)인 20~30 kW/m<sup>2</sup>에 도달하는데 이는 이전에 보고된 실험결과와 유사한 경향을 보여준다. 따라서 재료 물성에 관한 상세한 고려를 배제하고도 열유속에 관한 축소법칙이 유효할 수 있다는 사실을 보여준다.

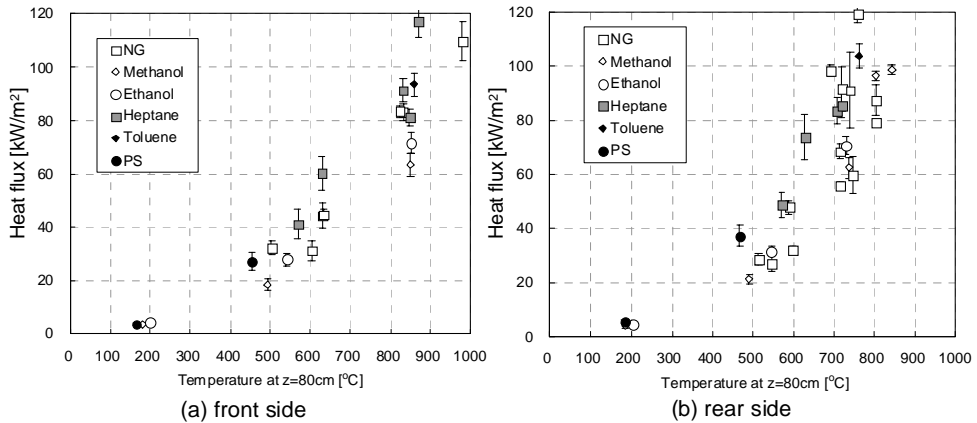


그림 4. 축소법칙을 적용한 화재실 내부에서의 준정상상태의 열유속 변화

### 3. 결 론

실험결과 메탄올과 에탄올 화재의 경우 발열량 크기에 상관없이 출입구와 내부 벽면에서의 열유속은 큰 차이 없이 거의 유사한 경향을 보였으나 발열량이 크고 매연의 생성이 많은 화재의 경우 화재실의 출입구와 내부 벽면쪽에서의 열유속은 큰 차이를 보였다. 축소법칙을 이용하여 온도에 따른 열유속변화를 파악한 결과 상층부 온도가 약 500-600°C 정도에서 바닥면의 열유속이 임계열유속 크기정도를 나타내며 이전 결과와 비교해 볼 때 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 재료 물성에 관한 상사법칙의 적용 없이 열유속에 관한 축소법칙을 적용하더라도 공간화재 특성을 파악하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0013091)

### 참고문헌

1. Bundy, M., Hamins, A., Johnsson, E. L., Kim, S. C., Ko, G. H. and Lenhart, D. B. (2007). "Measurement of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires", NIST TN 1483.
2. Quintiere, J. G. (1989). "Scaling Application in Fire Research", Fire Safety Journal, Vol. 15, pp. 3-29.