

## 구획공간 화재의 열유속 특성 - 축소 실험 Characteristics of Heat Flux in a Compartment Fire - Reduced Scale Test

김성찬<sup>†</sup> · 고권현\*

Sung-Chan Kim<sup>†</sup> · Gwon-Hyun Ko\*

경일대학교 소방방재학부, \*동양대학교 건축소방행정학과  
(2011. 8. 23. 접수/2011. 10. 7. 수정/2011. 10. 7. 채택)

### 요 약

본 연구는 구획공간화재에서 화재특성과 위치에 따른 공간내부의 열유속 특성을 파악하기 위해 ISO-9705 표준화재실의 40% 크기로 축소된 공간에서 화재 실험을 수행하였다. 열유속의 측정은 Schmit-Boelter type 열유속계를 이용하였으며 화재실의 내부와 출입구쪽의 중앙바닥면에서 열유속이 각각 측정되었다. 실험에 사용된 연료는 천연가스, 헵탄, 톨루엔, 에탄올, 폴리스티렌 등이다. 실험결과 화재발열량과 상층부의 온도가 증가함에 따라 화재실 내부 바닥에서의 열유속이 출입구쪽에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 또한 그을음의 생성이 많은 연료일수록 화재실 바닥면에서 열유속의 공간적인 편차가 상대적으로 크게 나타났다. 본 연구를 통해 공간내 하층부에서의 열유속 분포는 화재가 성장함에 따라 화염 및 상층부에서 방출되는 복사열과 밀접한 관계가 있고 이는 상층부의 온도뿐만 아니라 연소가스의 조성이나 그을음 농도(soot concentration), 환기조건 등과 같은 화재특성에 크게 영향을 받는다는 사실을 파악하였다.

### ABSTRACT

The present study performs a series of 40% reduced scale of ISO-9705 fire test to investigate the characteristics of heat flux on the floor level in terms of fire characteristics and location in the compartment. The heat flux was measured with Schmidt-Boelter type heat flux gauge at two locations on the floor level of inside and doorway side of the compartment. Different types of fuel - methane, heptane, toluene, ethanol, polystyrene - were burned in this test series. The measured heat flux inside of the compartment was relatively higher than that of front side as the heat release rate of fire and upper layer temperature increased. The difference of measured heat flux at inside and doorway side increased for high sooty fire. The present study shows that the heat flux distribution at lower layer greatly depend on the thermal radiation from fire and upper layer, not only the upper layer temperature but also various fire characteristics such as composition of combustion gases, soot concentration, ventilation condition and so on.

**Key words** : Heat flux, Compartment fire, Reduced scale test, Fire test

### 1. 서 론

화재특성을 이해하기 위한 여러 가지 물리적 변수들 중에 열유속(heat flux)은 온도와 함께 화재로부터의 열적 특성을 이해하기 위한 중요인자 중의 하나이다. 특히, 가연물의 점화나 화염전파 등과 같이 화재의 시작이나 화염전파, 화재발달 과정에 관한 물리적 특성을

이해하기 위해서는 열유속에 기초한 표면에서의 열적 특성 평가가 매우 중요하다. 대표적인 예로써 임계열유속(critical heat flux)은 가연물의 점화를 유도하는 최소열유속으로써 가연물의 점화 메커니즘을 이해하거나 화재실 내부에서 급격한 화재의 성장을 예측하는데 중요한 인자로 인식된다. 즉, 화재공간 내부에서 화재특성에 따른 열유속의 크기정도를 파악하는 것은 가연물의 예열을 통한 연소 가속화나 전실화재(flashover)로의 발달 등 전반적인 화재성장 과정을 이해하는데 큰 도

<sup>†</sup>E-mail: sungkim@kiu.ac.kr

움이 된다. 화재공간 내 열유속의 측정은 열전대를 이용한 온도측정에 비해 부가적인 냉각장치를 필요로 하고 측정된 결과의 보정과정 등이 필요하다. 뿐만 아니라 열전대에 비해 상대적으로 고가이며 측정장치가 크기 때문에 온도측정에 비해 제한적인 실험결과가 제공되어 왔다. 그러나 동일 온도조건에 대해서도 화재특성에 따라 방출/흡수되는 복사열의 정도가 차이를 보이기 때문에 화재공간내 표면에서의 열전달 특성을 이해하고 가열정도를 평가하기 위해서는 열유속 측정이 매우 중요하다.

구획화재에서 공간내의 열유속을 정량화한 대표적인 연구로서 Quintiere와 McCaffrey는 구획공간에서 목재와 플라스틱 크립 화재에 대하여 공간내의 온도분포에 따른 천정부와 바닥면에서의 열유속을 측정하고 화재공간의 내부온도에 따른 열유속특성을 파악하여 전실화재로의 발달여부를 분석하였다.<sup>1)</sup> 실험을 통해 고체가연물의 임계열유속에 도달하는 연층의 평균온도가 약 500~600 °C 정도임을 파악하였고 이는 전실화재에 대한 연층온도의 단순기준으로 인식 되고 있다.<sup>2,3)</sup> 그러나 구획공간에서의 열유속 분포는 화재특성이나 공간내 위치에 따라 달라 질 수 있기 때문에 상세 특성을 고려하여 공간내 열유속 분포를 이해할 필요가 있다.

본 연구에서는 축소모형실험을 통해 화재발달에 따른 구획공간 내부와 출입구의 바닥면에서 열유속 변화를 측정하고 화재특성에 따른 공간내 열유속 특성을 분석한다. 이러한 연구를 통하여 초기화재에서 전실화재로의 발달 과정을 이해하고 구획화재의 열적특성을 파악함과 동시에 수치해석 등 관련 연구를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 화재실험

실험 대상 화재공간은 0.98 m × 0.98 m × 1.46 m로써 ISO-9705 화재실을 40 % 크기로 축소한 모형이며 Figure 1과 같이 표준 출입구 크기는 폭 0.48 m, 높이 0.81 m이다. 화재실의 변형을 막고 내장재를 고정하기 위해 스틸 구조물을 제작하였으며 내부에 내화성 내장재로써 마리나이트(marinite)판과 세라믹섬유판을 이용하여 화재실을 제작하였다.

실험에 사용된 화원은 기체연료인 천연가스(Natural Gas, 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 폴리스티렌(C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>) 고히분(pellet)을 이용하였으며 이들 연료는 그을음의 생성율(soot yield)이 다를뿐만 아니라 연소상태

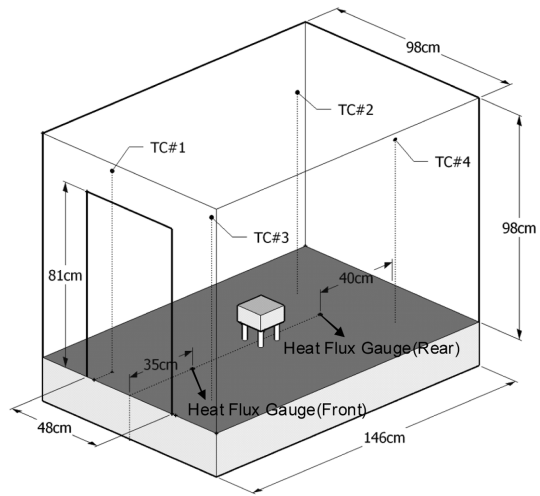


Figure 1. Schematic of the tested reduced scale compartment.

에 따라 그을음의 형성과정이 영향을 받는다.

천연가스 화재는 한 변의 길이가 25 cm인 정사각용기에 5 mm 크기 정도의 미소자갈(gravel)을 채운 가스 버너를 이용하였으며 질량유량제어장치(MFC)를 적용하여 연료의 유량을 제어함으로써 화재강도를 조절하였다. 분무화재(spray fire)는 직경이 40 cm, 높이가 12.5 cm인 원형용기 위에 분무 노즐을 설치하고 분사되는 분무의 양을 제어하여 발열량을 조절한다. 분무는 full cone형태로 분사되며 분무노즐의 직경은 1.4 mm, 분사각은 90°이며 분무액적의 평균직경은 250 μm 정도이다. 풀화재(pool fire)는 한 변의 길이가 25 cm이며 깊이가 6.5 cm인 정사각형 용기를 이용하였으며 풀의 벽면과 단면이 이루는 각이 24° 정도로 기울어지게 제작되었다. 화재실험동안 화원의 과열과 변형을 막기 위해 풀의 하부는 외부에서 공급된 물에 의해 지속적으로 냉각된다. 풀화재의 화재강도는 외부에서 풀로 공급되는 연료의 양을 조절하여 풀의 단면적과 깊이가 일정하게 유지하도록 하여 준정상상태의 발열량을 얻었다. 폴리스티렌 화재의 경우 직경이 40 cm, 높이가 8 cm인 원형용기에 폴리스티렌 고히분을 채운 후 파일럿 점화를 통해 초기발화를 유도하였다.

열유속은 측정오차가 약 ±6 % 정도인 직경 6.4 mm의 Schmit-Boelter type 열유속계(heat flux gauge)에 의해 계측되며<sup>4)</sup> 화재실의 중앙 바닥면의 출입구쪽과 화재실 내부 안쪽에서 각각 측정되었다. 화재실 상층부의 온도는 측정오차를 최소화 하기 위하여 4개의 이중차폐 흡입식 열전대(double shielded aspirated TC)를 이용하였다.<sup>5,6)</sup> TC#1과 TC#2의 설치위치는 측벽면에서

29 cm, 바닥면으로부터 88 cm 높이며 TC#3와 TC#4는 측면벽에서 20 cm, 바닥면에서 80 cm 높이에 설치되었다. 화재실에서 발생한 연소가스는 한 변의 길이가 3 m인 후드를 통해 채집되어 직경 49 cm의 배기덕트를 통해 외부로 배출되며 이 과정에서 산소소모법을 적용하여 화재발열량을 산정한다.<sup>8)</sup>

### 3. 결 과

Figure 2는 직경이 40 cm인 원형팬에서 발생된 폴리스티렌 고휘분(pellets) 화재에 대한 연층의 온도 및 화재실 바닥에서 열유속의 시간변화를 나타낸다. 폴리스티렌 고휘분은 초기 점화 이후 원형팬 내에서 방사형으로 화염전파가 이루어지고 점화 후 약 12분 경과하여 준정상상태(quasi-steady state)의 화재에 도달한다. 준정상상태의 화재발열량은 약 70 kW 정도이며 약 16분 동안 화재가 지속된 후 잔존연료량이 감소함에 따라 화재성상은 감퇴하게 된다. 준정상상태에서의 화재실 상층부( $z/H=0.82$ )에서의 온도는 화재실 내부 쪽이나 출입구 쪽에 관계없이 약  $460^{\circ}\text{C}$  정도로 거의 일정하게 나타났으나 바닥면의 열유속은 화재실 안쪽의 경우  $23\text{ kW/m}^2$ 이고 출입구쪽 바닥에서 약  $17\text{ kW/m}^2$ 으로 화재실내부가 출입구쪽에 비해 상대적으로 높은 열유속 분포를 보였다.

일반적으로 화재공간내부의 열유속 분포는 화원부의 화염 형태, 출입구를 통한 유입유동, 가연물의 연소특성, 상층부의 열적특성 및 연소생성물의 조성, 주변 벽면의 열적상태, 화재실의 연소상태 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다. 주로 화재발생 초기에는 출입

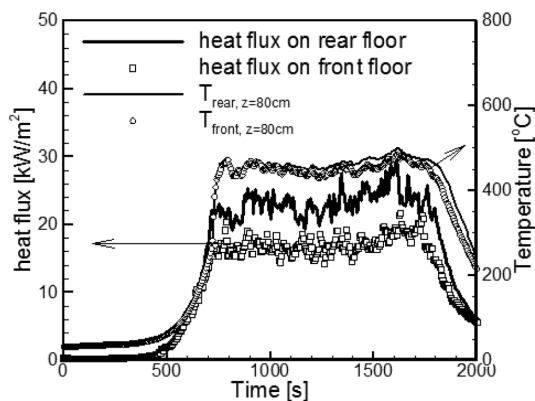


Figure 2. Time history of measured heat flux on the floor level and temperature at upper layer for a polystyrene pellets fire ( $D = 40\text{ cm}$ ).

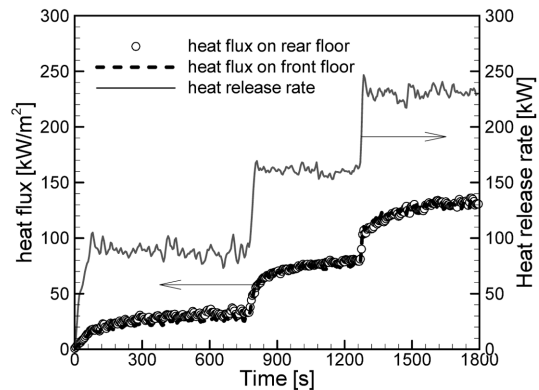


Figure 3. Measured heat release rate and heat flux on the floor level for heptane spray fire.

구를 통한 유입유동의 영향이 적고 상층부의 열적상태 및 연소생성물의 조성이 비교적 균일하기 때문에 화재공간의 바닥면에서 열유속의 차가 크지 않다. 그러나 화재가 성장함에 따라 출입구를 통한 유입유동의 영향이 증가하고 상층부의 열적상태나 연소생성물의 조성, 상층부 경계면 높이의 불균일 정도가 심화됨에 따라 공간내 바닥 면에서의 열유속분포의 차이가 증가하는 것으로 생각된다.

Figure 3은 헵탄 분무화재에 대한 화재발열량의 변화 및 화재실 바닥에서의 열유속 변화를 나타낸다. 준정상상태의 발열량과 열유속을 얻기 위하여 연료의 분사유량을 제어하여 화재발열량을 조절하고 바닥면의 열유속이 준정상상태에 도달할 때까지 주어진 발열량에 대한 실험을 지속하였다. 헵탄 분무화재의 경우 노즐에서 원뿔(cone)형태로 분사된 액적이 증발하여 연소되기 때문에 화염의 거동에 미치는 유입공기의 영향이 상대적으로 적다. 준 정상상태에서의 발열량은 약 88 kW, 160 kW, 227 kW 정도이며 화재실 내부의 바닥에서 측정된 열유속은 약  $30\text{ kW/m}^2$ ,  $77\text{ kW/m}^2$ ,  $134\text{ kW/m}^2$ 으로 출입구쪽 바닥면에서의 열유속에 비해 큰 차이는 없었으나 최대  $5\text{ kW/m}^2$  이내에서 화재실 내부 바닥의 열유속이 출입구쪽에 비해 약간 높게 측정되었다.

Figure 4는 톨루엔 폴화재시 발열량 변화와 화재실 바닥면에서의 열유속 변화를 나타낸다. 발열량이 200 kW 이하에서는 화재실 내부와 출입구 쪽에서의 열유속의 차이가 거의 없지만 발열량이 400 kW 정도에서는 화재실 내부쪽의 열유속이 출입구쪽에 비해 최대  $100\text{ kW/m}^2$  이상 커지는 것으로 나타났다. 화재발열량이 200 kW 이상에서는 화재실의 상층부에 화염이 존재하고 발열량이 증가함에 따라 상층부의 화염 경계면은 하강하게

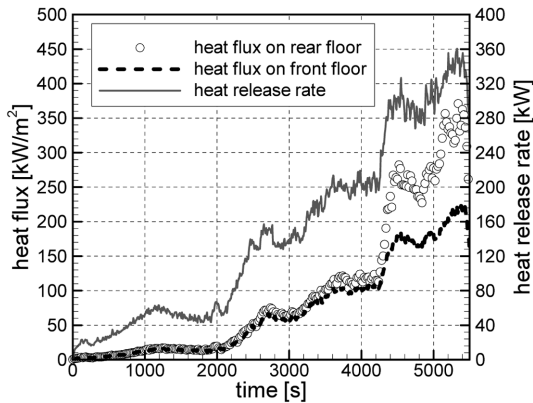


Figure 4. Measured heat release rate and heat flux on the floor level for toluene pool fire.

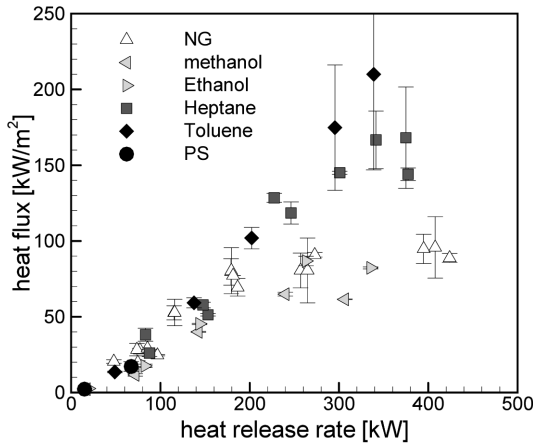


Figure 5. Measured mean heat flux with heat release rate for various fuel types.

되는데 이러한 화염면의 하강은 공기공급이 상대적으로 원활한 출입구쪽에 비해 화재실의 안쪽에서 심화된다. 따라서 상층부에 형성된 화염의 직접적인 영향 증가와 불완전 연소로 인한 그을음(soot)의 생성 증가, 유입유동에 의한 출입구 바닥면의 냉각 등 복합적인 요인에 의해 화재실 안쪽 바닥에서의 열유속이 출입구쪽에 비해 급격히 증가하는 것으로 판단된다.

Figure 5는 본 실험에 적용된 연료에 대하여 준정상상태의 화재조건에서 발열량에 따른 화재실 내부와 출입구쪽에서 측정된 열유속의 평균값을 나타낸다. 여기서 기호와 함께 표기된 세로막대는 화재실의 내부쪽과 출입구쪽에서 측정된 열유속의 차를 나타낸다. 일반적으로 발열량이 증가함에 따라 공간내부의 열유속은 증가하는데 그을음(soot)의 생성이 많은 폴리스티렌, 톨

루엔, 헵탄 등의 연료가 그을음의 생성이 상대적으로 적은 천연가스나, 알콜계열의 화재보다 동일 발열량 대비 열유속이 상대적으로 더 크다는 사실을 알 수 있다. 그을음의 생성이 많은 화재의 경우 광학적으로 두꺼운(optically thick) 특성을 가지고 있으며 적외선 파장대 범위에서 연속적으로 복사열을 방출하지만 그을음의 생성이 적고 광학적으로 얇은(optically thin) 특성을 가진 천연가스나 알콜계열의 화재의 경우 특정파장대에서의 복사열 방출이 주로 일어나기 때문에 방출되는 복사열은 상대적으로 적다. 또한 그을음의 생성이 많고 화재 발열량이 증가할수록 화재실 바닥면에서 열유속의 공간적인 편차가 상대적으로 크게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있다.

Figure 6은 연료종류에 따른 화재실 내부와 출입구쪽에서 측정된 열유속의 관계를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 천연가스, 에탄올 화재의 경우 출입구쪽과 화재실 내부바닥면에서 측정된 열유속이 거의 같지

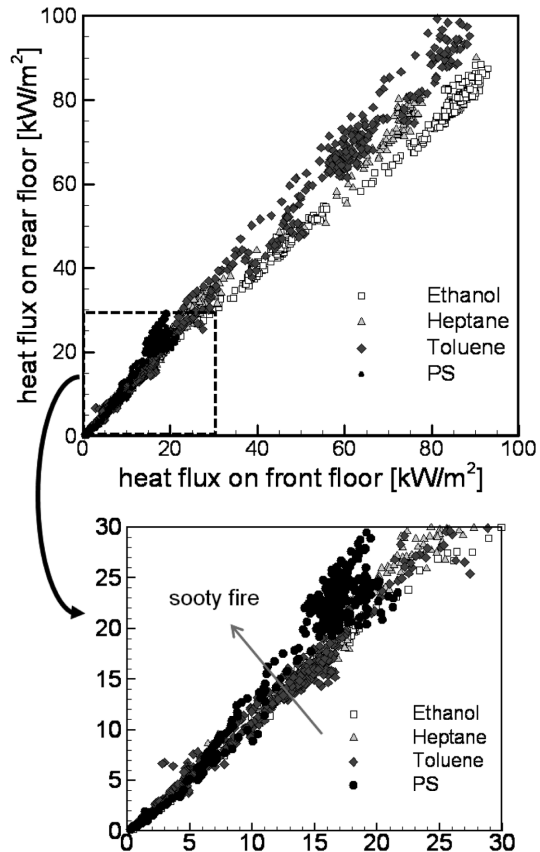


Figure 6. Relation of measured heat flux between front and rear floor level for the various fuel types.

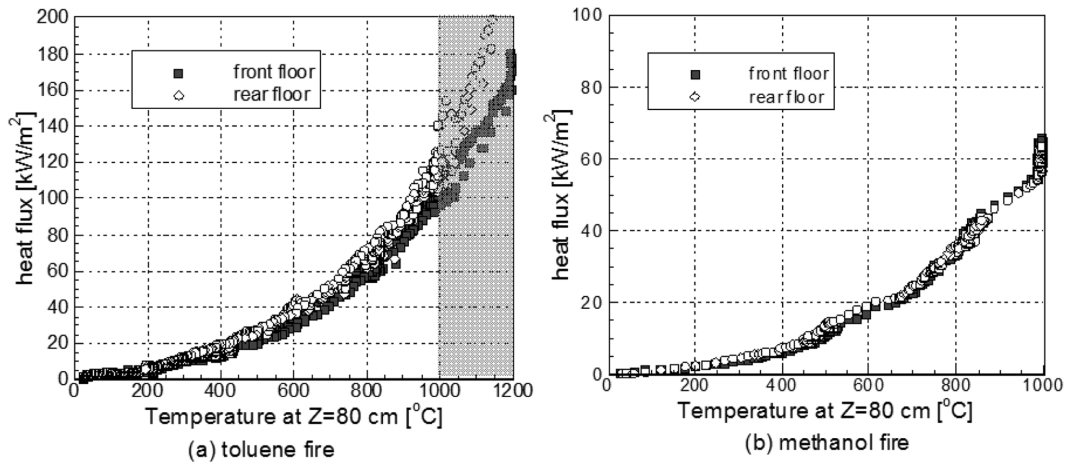


Figure 7. Measured heat flux on front and rear floor level with temperature at  $z = 80$  cm.

만 톨루엔이나 폴리스틸렌화재의 경우 화재실 안쪽의 열유속이 출입구쪽에 비해 상대적으로 더 크다는 사실을 알 수 있다. Figure 6의 아래 그림은  $30 \text{ kW/m}^2$  범위를 확대하여 나타낸다. 열유속이 약  $10 \text{ kW/m}^2$  이하인 경우 화재실 내부와 출입구쪽에서의 열유속은 연료의 종류에 상관없이 거의 동일하게 나타난다.

앞서 언급한 바와 같이 화재발열량이 상대적으로 작은 경우 상층부의 온도가 높지 않기 때문에 연소가스 내 그을음의 농도나 가스의 조성에 따라 방출되는 복사열의 영향이 상대적으로 적고 공간내 연층의 성층화가 비교적 균일하게 이루어지기 때문에 바닥면에서의 열유속 분포 또한 비교적 균일한 분포를 나타낸다. 그러나 화재강도가 증가하면 연소가스의 온도가 상승하여 연소가스의 조성에 따른 복사열의 영향이 상대적으로 증가하게 되고 외부공기의 유입량과 화염의 기울어짐이 커지기 때문에 화재공간 내부와 출입구쪽에서의 비대칭적인 열유속 분포를 보이는 것으로 생각된다. 따라서 공간내부의 열유속 분포에 관한 세부적인 정보를 얻기 위해서는 실험결과와의 비교를 통해 수치해석 결과를 검증하고 이를 기초로 공간내부의 열유속 분포특성을 추가적으로 파악할 필요가 있다.

Figure 7은 톨루엔과 메탄올화재에 대한 화재실 상층부( $z/H = 0.82$ )에서 측정된 온도에 따른 바닥면 열유속의 관계를 각각 나타낸다. 메탄올 화재의 경우 상층부의 온도변화에 따라서 화재실의 내부와 출입구 쪽에서 열유속 분포가 큰 차이가 없이 유사한 경향을 보인다. 그러나 톨루엔 화재에서 상층부 온도가 상대적으로 낮은 경우 화재실 안쪽과 출입구쪽의 열유속 차이는 거의 없지만 상층부의 온도가 증가함에 따라 바닥

면에서의 열유속 차이는 증가한다. 특히 상층부의 온도가  $1000^\circ\text{C}$  이상에서 화재실 안쪽과 출입구쪽에서의 열유속 차이가 급격히 증가하게 된다. 메탄올 화재의 경우 상층부의 온도가  $600^\circ\text{C}$  정도인 경우 바닥면의 열유속은  $20 \text{ kW/m}^2$  정도를 보였으나 톨루엔 화재의 경우 동일 온도에서 바닥면에 도달하는 열유속은  $40 \text{ kW/m}^2$ 으로 약 2배 정도 더 높게 나타났다. 이는 톨루엔 화재의 복사분율이 메탄올 화재에 비해 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 화재공간의 하층부에서의 열유속은 화염 및 상층부에서 방출되는 복사열에너지와 밀접한 관계가 있고 이는 상층부의 온도뿐만 아니라 연소가스의 조성이나 그을음농도(soot concentration)에 크게 영향을 받는다. 또한 가연물의 종류나 연소특성, 출입구를 통한 유입유동등 다양한 요소에 의해 지배된다는 사실을 파악하였다.

일반적으로 전실화재는 화재공간내 주된 열전달 메커니즘이 대류열전달에서 복사열전달로 전환되는 시점으로 인식될 수 있는데 이러한 전실화재의 상세해석을 위해서는 공간내부의 온도조건과 함께 복사열전달 기구를 지배하는 화염의 기하학적 형상 및 연소생성물의 조성 등에 대한 정보가 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 축소실험을 통해 구획공간화재에서 화재발열량, 화원의 종류 및 상층부의 온도 등과 같은 화재특성에 따른 화재실 바닥면에서의 열유속 변화를 정량적으로 파악하여 구획화재의 열적특성을 이해함과 동시에 관련 연구를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) 화재발열량이 상대적으로 작은 경우 화재실의 상층부 온도가 높지 않고 출입구를 통한 유입유동의 영향이 적고 상층부의 열적상태 및 연소생성물의 조성이 비교적 균일하기 때문에 화재공간의 바닥면에서의 열유속 분포의 차이가 크지 않지만 화재가 성장함에 따라 출입구를 통한 유입유동의 영향이 증가하고 상층부의 열적상태나 연소생성물의 조성, 상층부의 경계면 높이의 불균일 정도가 심화되어 열유속분포의 차이가 증가하는 것으로 판단된다.

2) 화재공간의 바닥면에서의 열유속은 화염 및 상층부에서 방출되는 복사에너지와 밀접한 관계가 있는데 그을음의 생성이 많은 화재의 경우 동일 발열량에 대해 바닥면 열유속이 상대적으로 더 크게 나타났으며 그을음의 생성이 많고 화재 발열량이 증가함에 따라 화재실 바닥면에서 열유속의 공간적인 편차가 상대적으로 크게 나타났다. 화재공간내부의 전실화재(flashover) 조건은 널리 알려진 상층부의 온도조건 뿐만 아니라 복사열전달 기구를 지배하는 화염부의 위치와 연소생성물의 조성 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다는 사실을 파악하였다.

3) 공간내부의 열유속 분포에 관한 세부적인 정보를 얻기 위해서는 실험결과와의 비교를 통해 수치해석 결과를 검증하고 이를 기초로 공간내부의 화재특성에 따른 열유속 분포특성을 추가적으로 파악할 필요가 있다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 경일대학교 신입교원정착연구비 지원에 의해 수행된 것임.

## 참고문헌

1. J.G. Quintiere and B.J. McCaffrey, "Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure", NISTIR 80-2054, Vol.1(1980).
2. SFPE, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3rd Ed. Society of Fire Protection Engineering(2002).
3. B. Karlsson and J.G. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press LLC(2000).
4. C.T. Kidd and C.G. Nelson, "How the Schmidt-Boelter gage really works", Proceedings of the 41st International Instrumentation Symposium, pp.347-388(1995).
5. S.C. Kim and A. Hamins, "On the Temperature Measurement Bias and Time Response of an Aspirated Thermocouple in Fire Environment", Journal of Fire Science, Vol.26, No.6, pp.509-529 (2008).
6. 김성찬, "열전대에 의한 화재유동의 온도측정에 관한 검토 - 측정오차", 한국화재소방학회 논문지, Vol.24, No.6, pp.98-103(2011).
7. M. Budny, A. Hamins, E.L. Johnsson, S.C. Kim, G.H. Ko, and D.B. Lenhart, "Measurement of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation Limited Compartment Fires", NIST Technical Note 1483(2007).
8. R.A. Bryant, T.J. Ohlemiller, E.L. Johnsson, A. Hamins, B.S. Grove, W.F. Guthrie, A. Maranghides, and G. Mulholland, "The NIST 3 MW Quantitative Heat Release Rate Facility - Description and Procedures", NISTIR 7052(2004).