

## 건물화재시 연기층 형성과 영역모델에 관한 연구

### A Study on the Formation of Smoke Layer and the Zone modelling in Compartment Fire

허 만 성\*

Man-Sung Hur

(1997년 3월 18일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

#### ABSTRACT

The objective of this research is to study on the upper and lower layer temperature, interface height and pressure in case of carpet, chair, trashcan and wardrobe fires in a residential room by performing the theoretical and experimental studies.

The theoretical results of the upper and lower layer temperature, the interface height and the pressure were qualitatively well coincided with the experimental results. The uniformly distributed fire in case of carpet showed that the ignition and the initial growth period were relatively short while the fully developed period was considerably long. The concentrated fires such as the wardrobe showed that the ignitions and the initial growth periods were relatively long. The interface heights were around 1m as the steady state. However, at the time of the maximum temperature, the interface height was lowered to 0.5m from the floor. The pressure variation in the fire room ranged between 0.1mmAq and 0.4mmAq, and the temperature reached the highest while the pressure was maximum.

#### 1. 서론

건물화재는 해마다 증가하고 있지만 국내에서의 화재실험은 물론 이론적인 연구도 아주 미비한 현실이다. 미국, 일본 등에서는 연료의 종류 및 형태에 따른 실내화재 실험은 물론 이론

적인 모델링도 활발히 진행되어 상용단계에 접어들었다고 할 수 있겠다. 1958년 Kawagoe는 정확도가 크게 떨어지지 않고 계산의 복잡성을 줄이기 위해 여러 가정들을 적용하여 화재성상을 해석하는 영역 또는 제어체적모델을 처음 시도하였다<sup>1)</sup>. 1977년 Tanaka는 개구부 가스들은

\* 중경공업전문대학 소방안전과

인접한 하부층 혹은 상부층 사이에서의 흐름과 같고 상부에서 하부로는 흐르지 않는다는 단순화된 가정으로 여러 구획 모델을 공식화 하였다<sup>2)</sup>. 1982년 Cooper는 닫힌 문을 가진 방에서 더운 연기층의 온도와 위치를 계산하고 유효가능한 대피시간을 계산하는 단순한 모델(ASET)을 개발하여 거의 모든 컴퓨터에서 쉽게 계산할 수 있게 되었다<sup>3)</sup>. 1983년 Tanaka는 여러개 방의 화재시 화재의 번짐 모델(BRI)을 개발하였다<sup>4)</sup>. 1985년 Walton은 ASET보다 축소된 상태의 모델(ASET-B)을 발표하였다<sup>5)</sup>. 또한 같은 해에 Jones은 network model과 finite difference model 사이의 절충인 뚜렷한 가스영역(gas zone) 개념을 이용한 모델(FAST)을 개발하였다<sup>6)</sup>. 이후에도 많은 프로그램들이 개발되어 왔지만 이와같은 영역모델링은 어디까지나 실험을 하여 얻어진 기본자료에 바탕을 두고 개발되어진 것들이어서 실험자료가 없는 우리로서는 바로 이용할 수 없는 문제점들을 안고 있다.

실험연구로는 1982년 Parker는 여러물질의 산소 소비량에 대한 열방출량을 계산하였고<sup>7)</sup>, Harland와 Anderson은 화재시 인간의 사망에 영향을 주는 가스를 분석한 결과 사망자 중 50%이상이 일산화탄소에 의한 사망이었음을 밝혔고<sup>8)</sup>, 1985년 Lee는 침실화재시 연기, 일산화탄소의 발생량을 측정하여 플래시오버의 발생시간을 계산하였다<sup>9)</sup>. 일본에서는 1988년 동경소방청에서 지하공간에 대한 축소된 실험에서 배연설비 효과와 지하 아트리움내의 연기유동 현상을 파악하였다<sup>10)</sup>. 1991년 Lilly는 실제 화재실험을 통하여 ASET프로그램으로 온도와 플래시오버시간을 계산하였다<sup>11)</sup>. 1992년 Gottuk, Roby와 Peatross는 연료로 헥산, 전나무, PMMA, 폴리우레탄폼의 4가지 연료를 2.2m<sup>3</sup> 구획에서 연소시켜 연소가스를 측정하였다<sup>12)</sup>.

한편, 국내에서는 1993년 정길순은 목재연료의 실내 모형화재실험에서 연기층의 온도와 안전대피시간을 구하였고<sup>13)</sup>, 최금란은 아트리움에 대한 내부온도분포를 측정하여 수치계산 결과와 비교하였을 뿐이다<sup>14)</sup>. 1996년 윤명오는 철근콘크리트 구조 공동주택 실물화재실험에서 온도 및 연기농도 변화값을 측정하고, 인간의 생존가능

시간을 파악하였다<sup>15)</sup>.

따라서 본 연구의 목적은 건물 내부에서 카펫, 의자, 쓰레기통 및 장농의 화재시 실내에서의 경계면의 높이, 경계면 상부와 하부의 온도분포상태 및 압력의 변화상태를 이론과 실험결과를 비교 분석하므로써 화재실 내의 열적성상을 파악하는 것은 물론 2영역 모델링의 타당성을 검토하는데 그 목적을 두고자 한다.

## 2. 이론적 방법

본 연구에서 사용한 영역모델(zone model)의 기본적인 방정식들은 질량, 운동량, 에너지 보존식들과 상태방정식에서 유도된다. 보존식들을 상부층과 하부층 2개의 영역인 두개의 제어체적으로 나누어 각 제어체적에 대하여 다음의 가정하에 본다.

- 1) 제어체적은 상부층과 하부층의 2개층으로 구분한다.
- 2) 2개의 영역은 별개이며, 각기 동질(homogeneous)이고, 안정한 층상구역이다.
- 3) 제어체적 내에서는 온도, 연기 및 가스농도가 일정하다.
- 4) 상부층은 화염과 부력 때문에 천정아래에 축적되는 더운 가스로 간주한다.
- 5) 하부층은 열적이동이 느리고, 주위조건과 같은 비교적 찬공기로 구성되어 있다.
- 6) 영역들 사이에서의 질량과 에너지 전달은 열기동 및 환기에 의한 혼합, 층들 사이의 복사, 그리고 벽에 따라 흐르는 질량흐름에 의하여 공급된다.
- 7) 구역내의 가스층의 여러조건들은 마루에서 천정까지에 걸쳐 수직방향으로만 변한다.
- 8) 구역의 모든 벽들은 평평하고 사각모양이다.

### 2.1 지배방정식

구역을 상부층과 하부층 2개의 제어체적으로 나눌 때 임의의 층의 가스질량( $m_i$ ), 내부에너지( $E_i$ ), 밀도( $\rho_i$ ), 온도( $T_i$ ), 체적( $V_i$ ) 및 전체구역의 압력( $P$ )들의 관계, 질량보존방정식 그리고 열역학 제1법칙으로부터 압력에 대한 미분방정식은 다음과 같다<sup>6)</sup>.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma-1}{V} (\dot{h}_u + \dot{h}_L) \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\gamma$  : 비열비  
 $V$  : 전체체적(m<sup>3</sup>)  
 $\dot{h}_u$  : 상부층의 엔탈피(W)  
 $\dot{h}_L$  : 하부층의 엔탈피(W)

체적에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{\gamma P} \left\{ (\gamma-1) \dot{h}_i - V_i \frac{dP}{dt} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

내부에너지에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left( \dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dt} \right) \dots\dots\dots (3)$$

밀도에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{-1}{C_p T_i V_i} \left\{ (\dot{h}_i - C_p \dot{m}_i T_i) + \frac{V_i}{\gamma-1} \frac{dP}{dt} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

온도에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_p \rho_i V_i} \left\{ (\dot{h}_i - C_p \dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dt} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

화재에 영향을 주는 물리적 현상이 원천항이고 기본방정식의 오른쪽에 나타난다. 원천항에는 화재시 발열량, 열기둥흐름, 환기흐름, 열전달 등이 있으며 에너지식은 다음의 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_j &= \dot{Q}_f(j) + \dot{Q}_r(j) + \dot{Q}_c(j) \\ &+ \sum_j C_p \dot{m}_{i,j}^{in} (T_i - T_u) \\ &+ \sum_j C_p \dot{m}_{i,j} (T_j - T_k) \\ &+ \sum_j R \dot{m}_{i,j} (T_a - T_u) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \sum_j \dot{Q}_f(j) + \dot{Q}_r(j) + \dot{Q}_c(j) \\ &+ \sum_j \sum_j C_p \dot{m}_{i,j}^{in} (T_i - T_j) \\ &+ C_p \dot{m}_j (T_j - T_a) + C_v \dot{m}_j T_j \dots\dots (7) \end{aligned}$$

여기서,  $i$  = 구역

$\dot{E}_j$  = 구역에서의 에너지 변화량

$$\begin{aligned} \dot{m}_{i,j} &= \dot{m}_{i,j}^{in} - \dot{m}_{i,j}^{out} \\ \dot{m}_j &= \sum_j \dot{m}_{i,j}^{in} - \dot{m}_{i,j}^{out} \end{aligned}$$

$\dot{S}$  = 원천항  
 $T_k = T_u$ : if  $j=L$  (하부층)  
 $T_k = T_L$ : if  $j=u$  (상부층)

구속화재(constrained fire)에서 연소에 필요한 산소와 연료의 최소치에 기준을 한 열방출식에 대하여 Jones<sup>6)</sup>은 다음과 같이 표현하였다.

$$\dot{Q}_f = H_c \dot{m}_b - C_p (T_u - T_v) \dot{m}_b - \dot{Q}_p \dots (8)$$

여기서,  $\dot{Q}_f$  : 화재의 총 열방출량(W)  
 $H_c$  : 연료의 연소열(J/kg)  
 $\dot{m}_b$  : 연료의 연소량(kg/s)  
 $\dot{Q}_p$  : 증발로 인한 에너지손실(W)

화재시 상부층으로 질량 플럭스의 유입을 나타내는 식은 McCaffrey의 실험식으로 열기둥의 질량흐름을 높이의 변화에 따라 불꽃구역(continuous flame region), 중간구역(intermittent region), 열기둥구역(plume region)의 3단계 구역으로 나누었다<sup>16)</sup>.

불꽃구역(continuous flame region) :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}} &= 0.011 \left( \frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{0.566}, \\ 0.00 &\leq \left( \frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}} \right) < 0.08 \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

중간구역(intermittent region) :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}} &= 0.026 \left( \frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{0.909}, \\ 0.08 &\leq \left( \frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}} \right) < 0.20 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

열기둥구역(plume region) :

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}_e}{\dot{Q}} &= 0.124 \left( \frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{1.895}, \\ 0.20 &\leq \left( \frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}} \right) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

여기서,  $Z$ : 높이로서 불꽃구역, 중간구역, 열기둥구역으로 변환다.(m)

$\dot{m}_e$ : 열기둥으로의 공기유입량(kg/s)  
 $\dot{Q}$ : 화재로 발생하는 에너지량(W)  
 개구부 흐름에 대한 식은 다음과 같다<sup>17)</sup>

$$\dot{m}_{i \rightarrow o} = \frac{1}{3} C (8\rho) A_{slab} \left\{ \frac{|P_t| + xy + |P_b|}{x + y} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

여기서,  $x = |P_t|^{1/2}$ ,  
 $P_t$ : 슬랩의 상부에서 개구부 전후 압력차(Pa)  
 $y = |P_b|^{1/2}$ ,  
 $P_b$ : 슬랩의 하부에서 개구부 전후 압력차(Pa)  
 $A_{slab}$ : 슬랩의 단면적(m<sup>2</sup>)  
 $\rho$ : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

경계면의 위치를 구하는 식은 다음과 같다<sup>17)</sup>.

$$N = \left\{ \frac{P_a - P}{\rho_a - \rho_u} \right\} + \left\{ \frac{\rho_l - \rho_u}{\rho_a - \rho_u} \right\} Z_1 \dots\dots\dots (13)$$

2.2 열전달 모델

2.2.1 전도 열전달

열전도는 천정, 상부벽, 하부벽 및 마루로 구분하여 계산한다. 한 구역에서 순수한 열 손실량은 내부물체의 가열은 물론 벽으로 손실이 있다.

열전도 방정식:  $\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left( \frac{k}{\rho c} \nabla T \right) \dots\dots\dots (14)$

1차원 열전도 방정식:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \left( \frac{k}{\rho c} \nabla T \right) \cong \frac{k}{\rho c} \nabla^2 T \cong \frac{k}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots (15)$$

여기서,  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ : 열확산계수(thermal diffusivity) (m<sup>2</sup>/s)

$k$ : 열 전도율(thermal conductivity) (J/m · s · K)  
 $\rho$ : 밀도(density) (kg/m<sup>3</sup>)  
 $c$ : 벽 물질의 비열 (J/kg · K)  
 $t$ : 시간 (sec)

2.2.2 대류 열전달

대류는 연소발생물의 온도의 반사이며, 화재시 발생하는 더운가스로 나타나며 이들이 통하는 천정, 다른 표면 및 장애물을 가열한다. 대류는 가스층들이 벽이나 다른 물체들에 에너지를 잃거나 또는 얻거나 하는 메카니즘으로 얇은 경계층을 통한 열전달이다. 열플럭스는 다음식으로 쓰여진다.

$$\dot{Q}_c = h_c (T_g - T_w) A_w \dots\dots\dots (16)$$

여기서,  $h_c$ : 열전달계수(W/m<sup>2</sup> · K)  
 $T_g$ : 가스층의 온도(K)  
 $T_w$ : 벽의 온도(K)

2.2.3 복사 열전달

복사는 화재실에서 열교환의 중요한 메카니즘이다. 복사는 구역내의 온도분포와 부력에 영향을 줄 수 있기 때문에 적용하는데 매우 중요하다. 열전도는 천정, 상부벽, 하부벽 및 마루로 구분하여 계산한다. 벽, 화원과 가스층들 사이의 복사열전달은 n개벽을 고려한 복사모델을 사용한다. 알고리즘은 Hottel의 연구에 기초를 둔 Howell과 Siegel이 개발한 방정식을 근거로 하였다<sup>18)</sup>.

$$\frac{\Delta q_k}{\epsilon_k} = \sum_{j=1}^N \frac{(1 - \epsilon_j)}{\epsilon_j} \Delta q_j F_{k-j} \tau_{j-k} = \sigma T_k^4 - \sum_{j=1}^N \sigma T_j^4 F_{k-j} \tau_{j-k} - \frac{C_k}{A_k} \dots\dots\dots (17)$$

여기서,  $\sigma$ : Stefan-Boltzman 상수 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )  
 $\epsilon_k$ : k 벽의 방사율  
 $T_k$ : 벽의 온도(K)  
 $C_k$ : 가스층이나 화재원과 같은 화원의 종류  
 $F_{j-k}$ : 형태계수(configuration factor)로 표면 j를 떠나서 표면 k에 도달하는 에너지의 비율  
 $\tau_{j-k}$ : 투과계수(transmission factor)로 표면 j에서 가스층을 투과해서 표면 k에 도달하는 에너지의 비율  
 $\Delta q_k$ : 1에서 n까지의 각 벽요소 k에 대한 열유속이다.

2.3 수치해석

대부분의 방정식들은 간단한 1차 상미분방정식이다. 이 방정식들을 풀기위한 초기조건은 상부층과 하부층의 온도는 주위조건으로 하였다. 주위압력은 대기압으로 하였으며, 외부온도와 압력은 주위온도와 같게하고, 초기 연료온도는 대기온도로 하고, 바람은 없는 것으로 하였다.

해석이 간편하도록 계산은 다음과 같은 여러 개의 부분별로 나누어 계산하였다.

- 1) 화재실내의 연소식, 열기둥, 개구부 흐름의 식을 푼다.
- 2) 열전달에서 전도, 대류, 복사에 대한 식을 푼다.
- 3) 지배방정식인  $(dy/dt)=f(y, t)$ ,  $y(t_0)=y_0$ 를 푼다.
- 4) 상부층과 하부층의 온도, 중립면의 위치를 얻는다.
- 5) 화재시 열방출량은 실험의 결과에서 열방출량을 역 산출하여 이용하였다.

계산과정에서 구획내에서의 운동량은 무시하고, 압력은 층의 온도 혹은 경계높이와 같은 다른 양들보다 훨씬 빨리 조건들이 변하므로 영역모델의 상미분방정식을 푸는데는 Runge-Kutta 방법이 사용되었다. 개구부 계산시의 흐름계수는 0.85를 사용하였으며 열전달해석에서는 열전도 방정식은 1차원 해석으로 하였다. 방정식을 풀 때 초기온도는 주어지고, 고체 주위온도는 일정하다. 벽온도 구배계산은 유한차분법이 사용되었다. 내부경계조건은 미분방정식의 해로서 계산이 되고, 외부경계조건은 일정한 열유속이고, 단열되어 있으며, 일정한 압력으로 하였다. 방정식의 차분적용은 중심차분, 노드점에 대해 대칭인 implicit scheme을 사용하였다. 대류계산시에는 자연대류의 열전달계수를 사용하고, 대류에 사용된 방위계수는 수직방향일 때  $C_0=0.13$ , 수평방향일 때  $C_0=0.21$ 을 사용하였다. 복사계산시에는 모델의 표면들이 거의 흑체( $\epsilon \approx 1$ )이거나 가스층이 두텁다면  $\tau \approx 0$ 이므로 복사방정식을 푸는데 수렴을 하게된다. 따라서, 화재시물레이션에서 일반적으로 사용되는 물체에 대한 방사율  $\epsilon = 0.9$ 를 사용하였다.

3. 실험방법

화재실험은 1층 슬라브건물에서 실시하였다. Fig. 1은 실험한 건물에 설치된 실험장치의 개략도이다. 여기서, A, B, C, D, E, F 및 G는 열전대의 측정위치이고, C는 천정에서의 가스 측정점이고, F는 벽의 상부쪽 압력측정점이며, G는 비디오 촬영점이다.

실험시 가연물의 제원은 Table 1에 나타낸다. 가연물은 화재실의 중앙 바닥에 두고 점화원은 신문지를 사용하였다. 의자와 장롱의 점화원은 신문지 17장이 들어 있는 원형 쓰레기통(20l)을 사용하여 점화시켰고, 모든 창문과 현관문은 밀폐된 상태로 실험을 하였다. 다만 화재실에서 복도로 통하는 문은 완전히 열린상태로 하였다.

온도측정은 0.6 mm K-type(chromel-alumel) 열전대로 화재가 발생한 방의 온도분포를 측정하였다. Fig. 1에서 화재실의 온도 측정 지점은 6개(A, B, C, D, E, F)를 선정하고 각 지점의 측정위치는 방바닥에서 0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m, 2.3m, 2.5m, 2.7m, 2.9m의 9개 지점에 열전대를 각각 설치하여 총 54개를 설치하였다. 여러 측정점에서 온도값들은 프로세스 링크(KA-YE instruments inc. DIGISTRIP-4, 128 channel)를 사용하여 개인용 컴퓨터(PC-486)에 10초 간격으로 저장하였다. 압력측정은 화재가 발생한 실내의 압력변화를 측정하기 위하여 화재실의 상부벽에 피토관을 설치하고 여기에 경사마노미터와 digital micro-manometer를 연결하여 압력을 측정하였다.

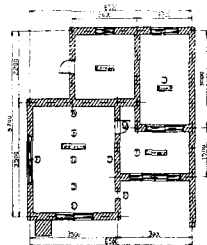


Fig. 1 Sketches of the test configuration with indications of the locations of instrument arrays

Table 1 Characteristics of various fire sources

name	크 기[cm]	재 질
carpet	190×250	-
chair	36×51×88	polyethylene
trashcan	23×29×49	polyethylene
wardrobe	103×61×190	3mm veneer

#### 4. 이론과 실험의 결과

Fig. 2는 카페트 화재시 상부층과 하부층의 온도변화 및 경계면의 높이에 대한 실험과 이론적 결과를 비교한 것이다. 상부층과 하부층의 구분은 화재실에서 측정된 온도를 같은 높이별로 평균온도를 구하여 온도변화가 가장 크게 변하는 지점을 경계면으로 보고 경계면 상부의 온도를 평균하여 상부층의 온도로 하였고, 경계면 하부의 온도를 평균하여 하부층의 온도로 정하였다. 이 경우 상부층의 온도는 카페트가 균등 분산화재이므로 화재의 초기점화기간에서 성장기가 매우 짧고 완전히 발달된 기간이 매우 길게 나타나는 것이 이론과 실험의 결과가 아주 잘 일치하였다. 하부층의 온도는 바닥에 깔려 있는 카페트의 온도측정점이 불꽃에 닿은 부분의 온도 상승으로 실험의 평균온도값이 이론값보다 조금 높게 나타났으나 전반적으로 잘 일치하였다. 경계면의 높이는 최대온도를 나타내는 시간에 더욱 바닥으로 내려왔다가 정상상태인 1m를 유지하였다. 이론값이 실험값보다 조금 높게 나타났으나 전반적으로 잘 일치하였다.

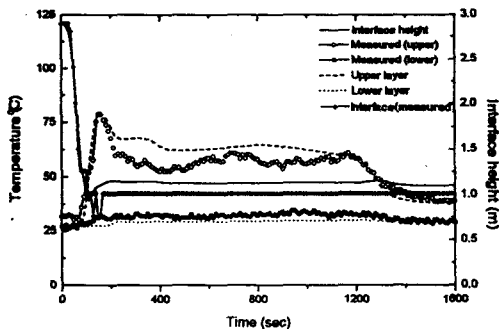


Fig. 2 Comparison of the measured and predicted interface heights and temperatures in the carpet fire

Fig. 3은 카페트 화재시 상부층 압력변화의 비교를 나타낸 것으로 실험의 결과는 압력 변동의 진폭이  $\pm 0.05 \text{ mmAq}$ 를 나타내고, 최대압력은  $0.13 \text{ mmAq}$ 를 나타내었다. 이론적 결과는 압력의 요동이 없지만 실험값은 데이터값을 읽는 시간의 간격 때문에 압력의 요동이 있었으나 대체로 이론과 비슷한 경향을 나타내었다.

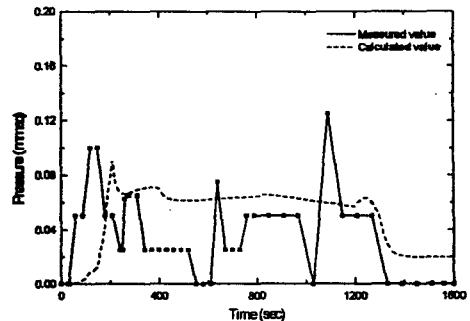


Fig. 3 Comparison of the measured and predicted pressures of the upper layer in the carpet fire

Fig. 4는 의자화재시 상부층과 하부층의 온도변화와 경계면의 높이에 대한 실험과 이론적 결과를 비교한 것이다. 상부층의 온도는 화재의 전기간에 걸쳐 정성적으로 잘 일치하였으나 이론적인 결과가 실험값보다 높게 나타났다. 하부층의 온도는 전반적으로 잘 일치하였다. 경계면의 높이는 상부층의 온도가 급격히 상승하여 붕우리가 생기는 기간에 실험값은 경계면이 0.5 m 까지 하강하였으나 이론적 결과치는 반대의 현상이 나타났다. 이것은 실험값을 기본으로 열방출량을 추정할 때 정확한 값을 찾아내지 못했던 관계로 사료됩니다.

Fig. 5는 의자화재시 화재실 상부의 압력변화의 비교를 나타낸 것으로 실험값은 압력 변동이 거의 없는 일정한 상태를 계속 유지하다가 첫째 붕우리의 온도가 감소되는 시간에 압력이 떨어졌다가, 다시 두 번째 붕우리에서 급상승한 후 감소하기 시작하였다. 이때 최대 압력은  $0.1 \text{ mmAq}$ 를 나타내고, 불꽃의 흔들림에 따른 압력의 진폭은  $\pm 0.03 \text{ mmAq}$ 를 나타내었다. 화재초기는 이론과 실험값이 다소 차이는 있었으나 전반적인 경향은 잘 일치하였다.

Fig. 6는 쓰레기통 화재시 상부층과 하부층의

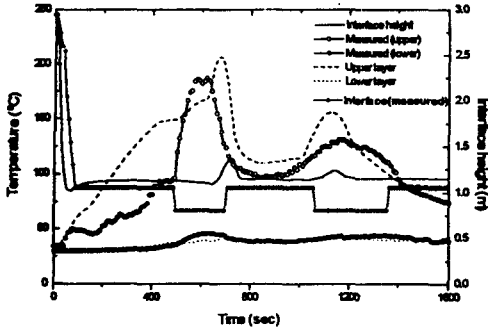


Fig. 4 Comparison of the measured and predicted interface heights and temperatures in the chair fire

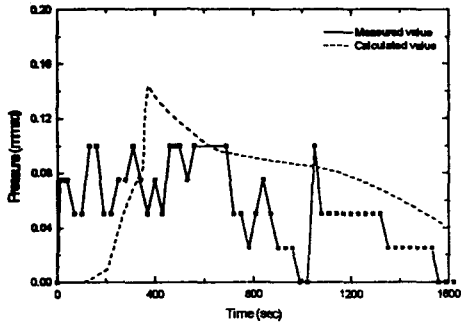


Fig. 5 Comparison of the measured and predicted pressures of the upper layer in the chair fire

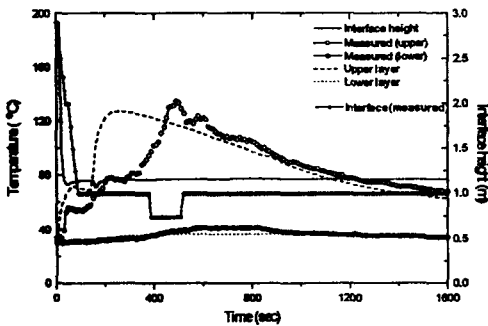


Fig. 6 Comparison of the measured and predicted interface heights and temperatures in the trashcan fire

온도변화 및 경계면의 높이에 대한 이론 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 상부층의 온도는 화재의 초기 점화기간과 성장기는 잘 일치하지만, 플래시오버 기간에는 실험과 잘 일치하지 않았

고, 하부층은 전반적으로 아주 잘 일치하였다. 경계면의 높이는 화재의 초기 점화기간에서 성장기까지는 실험값이 이론값보다 천천히 그리고 더욱 낮게 내려왔다. 최대온도에 이를 때는 경계면이 0.75 m까지 내려왔다가 다시 정상상태인 1 m를 유지하여 쇠퇴기까지 지속되었다.

Fig. 7은 쓰레기통 화재시 상부층 압력변화의 비교를 나타낸 것으로 실험의 결과는 최대온도 근처에서 0.23 mmAq를 나타내고, 이 후는 점차 압력이 강하하였다. 또한 불꽃의 흔들림에 따른 압력변동의 진폭은  $\pm 0.03$  mmAq를 나타내었다.

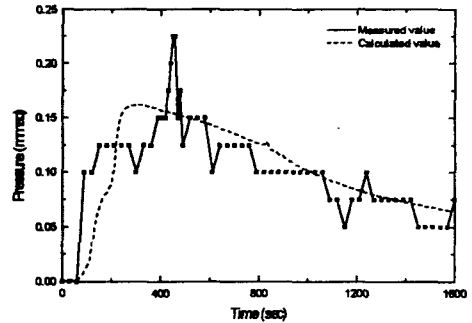


Fig. 7 Comparison of the measured and predicted pressures of the upper layer in the trashcan fire

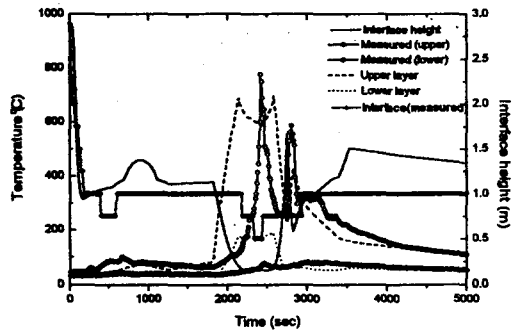


Fig. 8 Comparison of the measured and predicted interface heights and temperatures in the wardrobe fire

Fig. 8는 장농 화재시 상부층과 하부층의 온도변화 및 경계면의 높이에 대한 이론 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 상부층의 온도는 화재의 초기점화기간과 성장기가 매우 길게 나타난 것은 아주 잘 일치 하였다. 그러나 전반적으로 상부층의 온도변화와 경계면의 높이변화는

화재의 전기간에 걸쳐 정성적으로는 잘 일치하였으나 상부층의 온도변화는 이론적 결과가 실험적 결과보다 조금 높게 나타났고, 경계면의 높이변화는 실험적 결과와 이론적 결과가 다소 차이를 나타내었다. 최대온도 시기에는 경계면의 높이가 0.5m까지도 내려왔다.

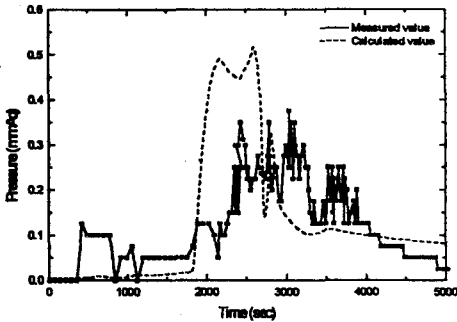


Fig. 9 Comparison of the measured and predicted pressures of the upper layer in the wardrobe fire

Fig. 9은 장농 화재시 상부층 압력변화의 비교를 나타낸 것으로 실험의 결과는 압력 변동의 진폭이  $\pm 0.1$  mmAq를 나타내고, 최대압력은 0.35 mmAq를 나타내었다. 이 경우는 다른 화재에 비하여 연소의 변동이 심한 관계로 최대온도 시기에는 압력의 요동이 매우 심하게 나타났다.

### 5. 결 론

주거용 건물내의 가구화재시 실내의 상부층과 하부층의 온도변화, 경계면의 높이 및 압력변화에 대하여 2영역 모델을 사용하여 수치해석하고, 실제 건물화재 실험을 통하여 얻은 결과와 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 화재실험에 의한 상부층과 하부층의 평균온도, 경계면의 높이 및 압력변화는 이론적인 2영역 모델의 결과와 정성적으로 잘 일치하였다.

둘째, 균등분산화재인 카페트는 상부층의 온도변화가 초기 점화시간과 성장기 및 쇠퇴기는 매우 짧고, 최성기는 매우 길게 나타났다. 반면에 쓰레기통과 장농은 가연물이 물려있는 집중화재인 관계로 화재 전기간에 비하여 초기 점화

기간과 성장기가 매우 길게 나타났다.

셋째, 경계면 높이는 이론과 실험이 모두 1m 근처에서 일정한 값을 유지하였고, 최대온도를 나타내는 시간에는 경계면이 바닥으로 더욱 내려왔다.

넷째, 화재실 상부의 압력변화는 0.1 mmAq에서 0.4 mmAq의 범위를 나타내었고, 압력이 최대일 때 온도도 최대치를 나타내었다. 실험의 결과는 불꽃의 요동에 의해 압력의 진폭이 생겼지만 이론적 결과는 압력의 요동이 나타나지 않았다.

### 참 고 문 헌

- 1) Kawagoe, K., "Fire behavior in rooms", Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, Report No. 27, Tokyo, 1958.
- 2) Tanaka, T., "A mathematical model of a compartment fire", Building Research Institute (Japan), Report 70, 1977.
- 3) Cooper, L. Y., "A mathematical model for estimating available safe egress time in fires", Fire and Materials, Vol. 6, pp. 135~144, 1982.
- 4) Tanaka, T., "A model of multiroom fire spread", NBSIR, 1983.
- 5) Walton, W. D., "ASET-B: A room fire program for personal computers", Fire Technology, Vol. 21, No. 4, p. 293, 1985.
- 6) Jones, W. W., "A multicompartment model for the spread of fire, smoke and toxic gases", Fire Safety Journal, pp. 55~79, 1985.
- 7) Parker, W. J., "Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications", National Bureau of Standards, March, 1982.
- 8) Harland, W. A. and Anderson, R. A., "Causes of Death in Fires", Proceedings Smoke and Toxic Gases from burning plastics, 15/1, London, 1982.



- 9) Lee, B. T., "Effect of wall and room surfaces on the rates of heat, smoke and carbon monoxide production in a Park lodging bedroom fire", NBSIR 85-2998, February, 1985.
- 10) 東京消防廳 火災豫防審議會, "都市の地下空間における施設の防火安全対策に係る調査報告書", March, 1991.
- 11) Lilly, D. G., "Computerized reconstruction of building fires", ASME international computers in engineering conference, Santa Clara, CA, August 18~22, 1991.
- 12) Gottuk, D. T., Roby, R. J. and Peatross, M. J., "Carbon monoxide production in compartment fires", J. of Fire Prot. Engr., Vol. 4, pp. 133~150, 1992.
- 13) 정길순, "목재연소의 실내화재성상과 안전 대피시간", 충북대학교 산업안전공학과, 석사논문, 1993.
- 14) 최금란, "고층건물의 아트리움 공간에 있어서 화재성상에 관한 연구", 경북대학교 건축공학과, 석사논문, 1993.
- 15) 윤명오, "철근콘크리트 구조 공동주택 실물 화재 실험연구-화재성상 파악 및 취약부위 도출을 중심으로-", 한국화재·소방학회지, Vol. 10, September, 1996.
- 16) McCaffrey, B. J., "Momentum implications for buoyant diffusion flames", Combustion and Flame, Vol. 52, pp. 149~167, 1983.
- 17) Cetegen, B. M., "Entrainment and Flame Geometry of Fire Plumes", Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, 1982.
- 18) Howell, J. R., and Siegel, R., Thermal radiation heat transfer, Hemisphere publishing Corporation, New York, Second ed., 1981.