

건물화재시 개구부의 흐름계수에 관한 연구

A Study on the Flow Coefficient of Compartment Fire

허 만 성*
Hur, Man-Sung

.....
Abstract

The objective of this research is to study on the upper layer temperature, interface height and flow regime in case of several furniture fires such as trashcan, chair, carpet, sofa, mattress and wardrobe as a fire starter in a residential room by performing the experimental studies. The upper layer temperature and the interface height were relatively well agreed with the experimental results when the flow coefficient at the opening was 0.65-0.8 for the rectangular trashcan, 0.65-0.9 for the circular trashcan and chair, and 0.7-0.9 for the carpet, sofa, mattress and wardrobe.

The interface heights for the seven furniture fires were around 1[m] maintaining steady state. However, at the time of the maximum temperature, the interface height was lowered to 0.25[m]-0.75[m] from the floor.

The flow regime at the opening was filling and buoyant for the distributed fire, and for the concentrated fire it was filling and then quickly changed to flow, and the flow period was long.

The descending speed of the interface height was proportioned to the inflammability of the furniture and the contact surface area with air. The time required to come down around 1[m] was within 1-3 minutes.

국문요약

상층부의 온도, 경계면 높이 및 흐름형태를 연구하기 위하여 쓰레기통, 의자, 카펫, 소파, 매트리스 및 장롱화재 실험을 실제 건물에서 수행하였다. 상부층의 온도와 경계면의 높이는 사각 쓰레기통의 경우 개구부의 흐름계수가 0.65~0.8, 원형 쓰레기통 및 의자의 경우는 0.65~0.9, 카펫, 소파, 매트리스 및 장롱의 경우는 0.7~0.9일 때 실험치와 비교적 잘 일치하였다. 경계면의 높이는 가구화재시 1[m] 근처에서 정상상태를 유지하였다. 다만, 최대온도를 나타내는 시간에는 경계면 높이가 바닥에서 0.25[m]~0.75[m]까지도 내려왔다. 개구부의 흐름형태는 분산화재의 경우는 filling과 buoyant 흐름이 나타났고, 집중화재의 경우는 filling에서 바로 flow로 가고 또 flow 기간도 길게 나타났다. 경계면 높이가 내려오는 속도는 가구의 가연성 및 공기와의 접촉면적에 비례하여 경계면 높이가 1[m] 근처까지 내려오는데 소요되는 시간은 1분~3분 이내로 나타났다.

* 중경공업전문대학 소방안전관리과 교수

1. 서 론

건물내의 화재시 대부분의 가연물은 가구이지만 가구화재에 대한 국내에서의 이론 및 실험연구는 거의 찾아 볼 수 없다. 미국, 일본 등에서는 연료의 종류 및 형태에 따른 실내화재의 영역모델에 관한 이론 연구 및 실험이 활발히 진행되어 왔다. 1958년 Kawagoe는 정확도가 크게 떨어지지 않고 계산의 복잡성을 줄이기 위해 여러 가정을 방에 적용하여 화재성상을 해석하는 영역 또는 제어체적모델을 처음 시도 하였다¹⁾. 1977년 Tanaka는 개구부 가스들은 인접한 하부층 혹은 상부층 사이에서의 흐름과 같고 상부에서 하부로는 흐르지 않는다는 단순화된 가정으로 여러 구획 모델을 공식화 하였다²⁾. 1982년 Cooper는 닫힌 문을 가진 방에서 더운 연기층의 온도와 위치를 계산하고 유효가능한 대피시간(ASET)을 계산하는 단순한 모델을 개발하여 거의 모든 컴퓨터에서 쉽게 계산 할 수 있게 되었다³⁾. 1983년 Tanaka는 여러개 방 화재의 번짐 모델(BRI)을 개발하였다⁴⁾. 1985년 Walton은 ASET보다 축소된 상태의 모델(ASET-B)를 발표하였다⁵⁾. 또한 같은 해에 Jones는 network model과 finite difference model 사이의 절충인 뚜렷한 가스조운 개념을 이용한 모델(FAST)을 개발하였다⁶⁾. 이외에도 COMPBURN, HARVARD, OUS, HAZARD, CCFM, CFAST 등 많은 프로그램들이 개발되었지만 이와 같은 것들은 모두 많은 실험을 하여 얻어진 기본자료에 바탕을 두고 개발되어진 것들이어서 실험자료가 없는 우리로서는 바로 이용할 수 없는 문제점들을 갖고 있다.

실험연구는 1982년 Parker는 여러물질의 산소 소비량에 대한 열방출량을 계산하였고⁷⁾, 1985년 Lee는 침실화재시 연기, 일산화탄소의 발생량을 측정하여 플래시오버의 발생시간을 계산하였다⁸⁾. 일본에서는 1988년 동경소방청에서 지하공간에 대한 축소된 실험에서 배연설비 효과와 지하 아트리움내의 연기유동 현상을 파악하였다⁹⁾. 1991년 Lilly는 실제 화재실험을 통하여 ASET 프로그램으로 온도와 플래시오버 시간을 계산하

였다¹⁰⁾. 1992년 Gottuk, Roby와 Peatross는 연료로 헥산, 전나무, PMMA, 폴리우레탄폼의 4가지 연료를 2.2[m³] 구획에서 연소시켜 연소가스를 측정하였다¹¹⁾.

한편, 국내에서는 1993년 정길순은 목재연료의 실내 모형화재실험에서 연기층의 온도와 안전대피시간을 구하였고¹²⁾, 최금란은 아트리움에 대한 내부온도분포를 측정하여 수치계산 결과와 비교하였다¹³⁾. 1996년 윤명오는 철근콘크리트 구조 공동주택 실물화재실험에서 온도 및 연기농도 변화값을 측정하고, 인간의 생존가능시간을 파악하였다¹⁴⁾.

그리하여, 국내에서는 화재실험에 대한 기초자료가 부족한 관계로 외국의 영역모델(zone modeling)이나 전체구역모델(field model)의 프로그램을 사용하고자 하여도 외국의 실험자료가 우리나라 가연물의 화재하중이나 발열량과는 같지 않은 관계로 정확한 모델링을 할수 없는 것은 주지의 사실이다.

따라서 본 연구의 목적은 주거용 건축물 내부에서 쓰레기통, 의자, 카페트, 소파, 매트리스, 장농 화재가 발생하는 경우 화재진행과정을 실험을 통하여 분석하고, 이론적인 해석 방법으로는 고온가스의 상부층이 천정면으로부터 수평을 유지하면서 아래로 내려온다는 가정하에 영역모델링(zone modeling)의 기본방정식을 풀어서 개구부의 흐름계수의 변화에 따르는 화재실 내부의 온도분포와 경계면 높이의 하강특성 등을 비교 연구하여 영역모델의 기초자료는 물론 화재의 예방, 진압 및 방화관리 업무에도 도움을 주고자 한다.

2. 이론적방법

이론적인 해석방법으로는 영역모델링(zone modelling)을 사용하였다. Fig. 1은 영역모델링의 개략도이며, 영역모델링은 다음의 가정을 한다.

- (1) 화재실은 고온연소가스가 상부층의 천정면으로부터 수평을 유지하면서 아래로 내려오면서 상부층 과 하부층의 2영역(two-

zone)으로 구성된다.

- (2) 구획내의 화염과 열기둥에서 에너지손실은 총열 발생량의 비율로 나타낼 수 있다.
- (3) 구획내의 압력은 일정하다.
- (4) 공기유입은 가연물 표면과 경계면 높이사이에서 일어난다.
- (5) 준정적상태로 가정하였다.
- (6) 중립면(neutral plane)은 경계(interface)와 soffit 사이에 있다.
- (7) 하부층은 주위온도와 같다.

2.1 지배방정식

화재실의 더운 상부층의 엔탈피방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$E_{hl} = m_{hl} \cdot C_p \cdot T_h$$

여기서,

E_{hl} = 상부층의 에너지

m_{hl} = 상부층의 질량

C_p = 비열

T_h = 상부층의 온도

연기층 높이와 온도의 지배방정식은 다음과 같다^{5,15)}.

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= -C_1 \cdot Q_T - C_2 \cdot Q_T^{1/3} \cdot Z^{5/3} & 0 < Z < Z_0 \\ &= -C_1 \cdot Q_T & -F < Z \leq 0 \\ &= 0 & Z = -F \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= P[C_1 \cdot Q_T - (P-1) \cdot C_2 \cdot Q_T^{1/3} \cdot Z^{5/3}] \\ &\quad / (Z - Z_0) & 0 < Z \leq Z_0 \\ &= P \cdot C_1 \cdot Q_T / (Z_0 - Z) & -F \leq Z \leq 0 \end{aligned}$$

여기서

$$C_1 = (1 - L_c) Q_0 C_T / (T_a C_p \rho_a A C_L)$$

$$C_2 = (0.21 C_T / A) [(1 - L_R) Q_0 g C_L^2 / (T_a C_p \rho_a)]^{1/3}$$

P = 연기층의 평균온도

Q_T = 열방출량

t = 시간

Z = 연기층의 높이

Z_0 = 연기층의 초기높이

2.2 개구부흐름

일반적으로 개구부 흐름은 Fig. 2와 같이 filling, buoyant, flow, choked의 4가지 흐름 형태로 나눈다.

filling은 고온가스가 천정을 채우기 시작하여 가스의 피스톤 작용으로 찬공기를 바깥으로 밀어내는 것이고, buoyant는 더운공기와 찬공기가 함께 흘러나가는 것으로 피스톤 효과가 여전히 존재하지만 더운가스가 열린 벽(vent soffit)으로 내려오므로 배기되는 현상이다. flow는 더운 가스들은 나가고 찬공기가 들어오며, choked flow는 플래시오버 발생후 구획내에 공기가 희박할 때의 흐름이다.

구획을 빠져나가는 더운가스흐름은 다음과 같은 방정식으로 나타낸다¹⁶⁾.

$$\dot{m} = \frac{2}{3} C_0 B (Y_{vt} - Y_{np})^{3/2} [2\rho_h g(\rho_a - \rho_h)]^{1/2}$$

여기서,

B = 개구부의 폭

C_0 = 개구부의 흐름계수

ρ_a = 주위 공기의 밀도

ρ_h = 상부층 가스의 밀도

Y_{vt} = 바닥에서 개구부의 높이

Y_{np} = 바닥에서 유출되는 연기의 높이

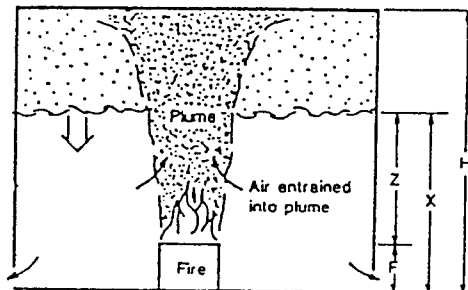


Fig. 1. Schematic of fire phenomenon.

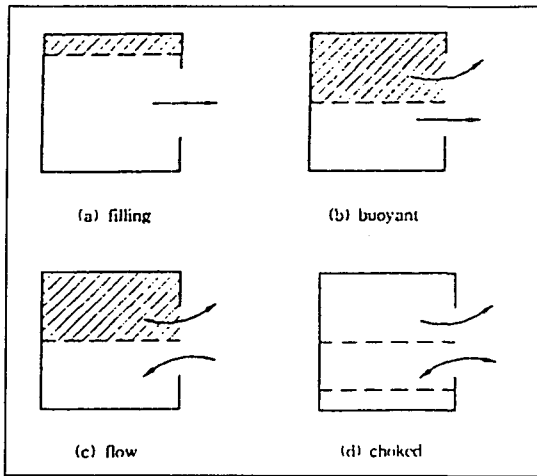


Fig. 2. Four flow regimes considered in the single compartment model

해석방법은 다음과 같다.

- (1) 시간스텝은 오일러의 방법이 사용되었다.
- (2) t 시간에서의 Z 와 P 가 주어지면 $(t+dt)$ 에서의 값을 계산한다.
- (3) 기본방정식은 predictor-corrector method가 사용되었다.
- (4) 유입(inflow)과 유출(outflow)의 절대 차이값이 0.001보다 작으면 해로 간주하였다.
- (5) 복사열 손실계수는 0.35로 하였다.
- (6) 화재시 열방출량은 실험의 결과에서 열발생량을 역 산출하여 이용하였다.
- (7) 개구부의 흐름계수는 0.4~0.9로 변화시켜 화재실의 온도변화와 경계면 높이의 변화상태를 알아보았다.

3. 실험방법

화재실험은 1층 슬라브건물에서 실시하였다. Fig. 3은 실험한 건물의 정면도이고, Fig. 4는 이 건물에 설치된 실험장치의 개략도이다. 여기서, ㉠, ㉡, ㉢, ㉣, ㉤, ㉥ 및 ㉦는 열전대의 측정위치이고, ㉧는 천정에서의 가스측정점이고, ㉨는 벽의 상부쪽 압력측정점이며, ㉩는 비디오 촬영점이다.

실험시 가연물의 제원은 Table 1에 나타냈고, 가연물은 화재실의 중앙 바닥에 두고 점화는 신문지를 사용하였다. 의자, 소파, 매트리스와 장농의 점화원은 신문지 17장이 들어 있는 원형 쓰레기통(20[l])을 사용하여 점화시켰고, 화재실에서 복도로의 방문과 복도에서 옆방으로의 문은 열려 있고, 다른 모든 창문과 현관문은 밀폐된 상태로 실험을 하였다.

온도측정은 0.6[mm] K-type(chromel-alumel) 열전대로 화재가 발생한 방의 온도분포를 측정하였다. Fig. 4에서 화재실의 온도 측정 지점은 6개(㉠, ㉡, ㉢, ㉣, ㉤, ㉥)를 선정하고 각 지점의 측정위치는 방바닥에서 0[m], 0.5[m], 1[m], 1.5[m], 2[m], 2.3[m], 2.5[m], 2.7[m], 2.9[m]의 9개 지점에 열전대를 각각 설치하여 총 54개를 설치하였다. 여러 측정점에서의 온도 값들은 프로세스 링크(KAYE instruments inc. DIGISTRIP-4)를 사용하여 개인용 컴퓨터(PC-486)에 10초 간격으로 저장하였다



Fig. 3. Plan view of experimental building.

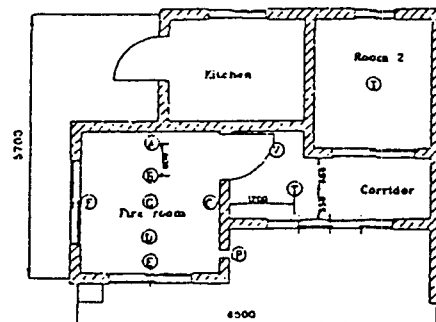


Fig. 4 Sketches of the test configuration with indications of the locations of instrument arrays.

Table 1. Characteristics of various fire sources.

가 연 물	크 기[cm]	재 질
원형쓰레기통	23×26×38	폴리에틸렌
사각쓰레기통	23×29×49	폴리에틸렌
의 자	36×51×88	폴리에틸렌(틀 : 나무)
카 페 트	190×250	-
소 파	73×73×80	폴리우레탄(틀 : 나무)
매 트 리 스	132×191×17	-
장 능	103×61×190	3mm 배니어판

4. 이론과 실험의 결과

Fig. 5과 Fig. 6 원형 쓰레기통화재에서 개구부의 흐름계수에 따른 상부층의 평균온도변화와 경계면의 높이변화를 이론결과와 실험결과를 비교한 것이다. 상부층의 온도는 화재의 초기 점화 시간, 성장기 및 플래시오버 기간은 대체로 일치하지만 최성기의 일부는 실험과 잘 일치되지 않았다. 이 경우는 집중화재이므로 상부층의 온도 곡선이 초기 점화기간과 성장기가 매우 길게 나타나는 것이 실험과 아주 잘 일치 하였다. 경계면의 높이는 1[m]근처에서 정상상태로 실험값이 좀더 작지만 전반적으로 아주 잘 일치하였다. 개구부의 흐름계수는 0.65~0.9일 때 실험적 결과와 오차가 적게 나타났다.

Fig. 7과 Fig. 8은 사각 쓰레기통화재에서 개구부 흐름계수에 따른 상부층 평균온도변화와 경계면의 높이변화를 비교한 것으로 상부층의 온도 변화는 화재의 초기 점화시간과 성장기는 잘 일치하지만, 플래시오버 기간에는 실험과 잘 일치 되지 않았다. 경계면의 높이는 화재의 초기 점화 기간에서 성장기에는 잘 일치하지만, 플래시오버 기간에는 실험과 잘 일치되지 않았다. 그러나 화재가 최성기 및 쇠퇴기에는 개구부 흐름계수가 0.8~0.9사이에서 상부층온도와 경계면의 높이 1[m] 근처로 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 의자화재에서 개구부의 흐름계수에 따른 상부층의 온도변화와 경계면의 높이변화를 실험결과와 비교한 것으로 상부층의 온도변화는 화재의 전기간에 걸쳐 정성적으로는 잘 일치하였으나 이론적 결과가 실험적 결과보다 조금 높게 나타났다. 화재초기의 가스흐름이 fill-

ing 상태일 때는 2영역의 구분이 분명하게 나타나지 않았다. 경계면의 높이는 1[m] 근처에서 정상상태를 유지하고 봉우리가 있는 곳에서 일시적으로 낮은 값을 유지하였다. 개구부의 흐름계수는 0.65~0.9사이가 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 카페트 화재에서 상부층의 온도변화와 경계면의 높이변화를 실험결과와 비교한 것을 나타내는 그림들이다. 이 경우는 등분포화재이므로 화재의 초기 점화기간에서 성장기가 매우 짧고 최성기가 매우 길게 나타나는 것이 아주 잘 일치 하였다. 상부층의 온도와 경계면의 높이는 실험적 결과와 아주 잘 일치 하였다. 흐름은 filling과 buoyant가 나타나고, 개구부의 흐름계수는 0.7~0.9사이가 실험적 결과와 오차가 적게 나타났다.

Fig. 13과 Fig. 14는 소파화재에서 개구부의 흐름계수에 따른 상부층의 온도변화와 경계면의 높이변화를 실험결과와 비교한 것을 나타내는 그림들이다. 소파화재는 집중화재이므로 화재의 초기상태와 성장기가 매우 짧게 나타나고, 전반적으로 상부층의 온도변화는 화재의 전기간에 걸쳐 정성적으로는 잘 일치하였으나 첫 번째 봉우리와 두 번째 봉우리사이에서는 오히려 실험적 결과가 높게 나타났다. 경계면의 높이변화도 실험적 결과가 이론적 결과보다는 조금 높게 나타났다. 개구부의 흐름계수는 0.7~0.9사이 일 때 실험적 결과와 비교적 오차가 적게 나타났다.

Fig. 15는 매트리스화재에서 상부층의 온도변화로 초기 점화기간과 성장기가 매우 길게 나타나는 것이 실험과 이론이 아주 잘 일치하였다. Fig. 16는 경계면의 높이변화로 실험값이 이론값보다 조금 높게 나타났다. 상부층의 온도변화와 경계면의 높이변화는 화재의 전기간에 걸쳐 정성적으로는 잘 일치하였고, 개구부의 흐름계수는 0.7~0.9사이 일 때 실험적 결과와 비교적 오차가 적게 나타났다.

Fig. 17은 장농화재에서 개구부의 흐름계수에 따른 상부층의 온도변화로 화재의 초기점화기간과 성장기가 매우 길게 나타난 것을 아주 잘 일치하였고, 상부층의 온도변화는 이론결과가 실험 결과보다 조금 높게 나타났다. Fig. 18은 경계면

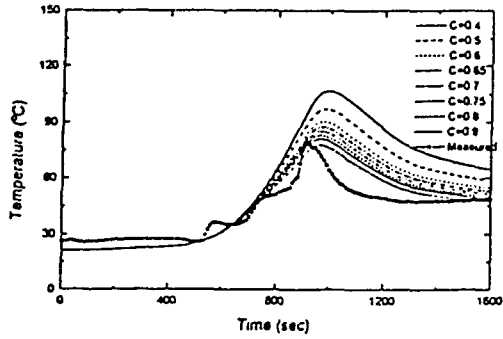


Fig. 5 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the circular trashcan fire.

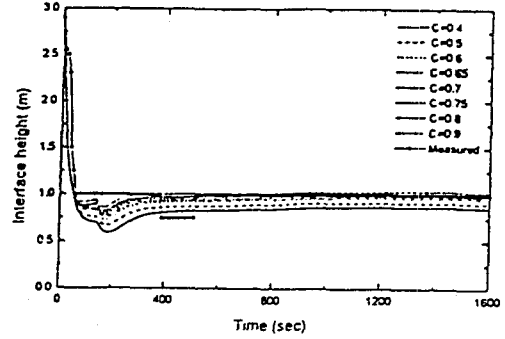


Fig. 8 Comparison of the measured and predicted interface heights for the rectangular trashcan fire.

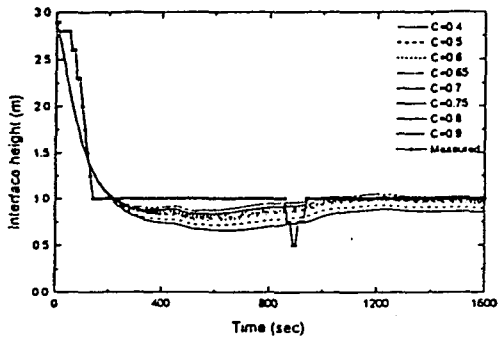


Fig. 6 Comparison of the measured and predicted interface heights for the circular trashcan fire.

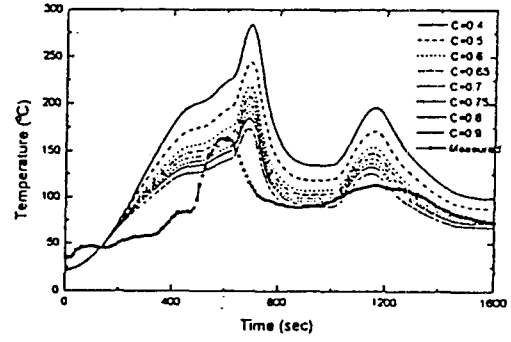


Fig. 9 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the chair fire.

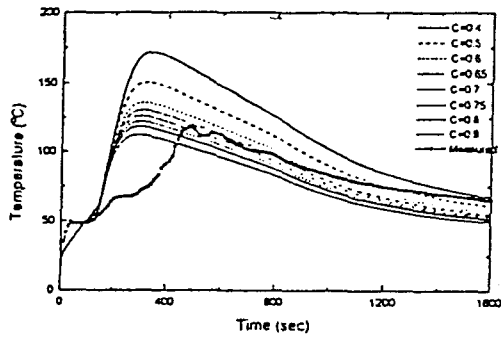


Fig. 7 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the rectangular trashcan fire.

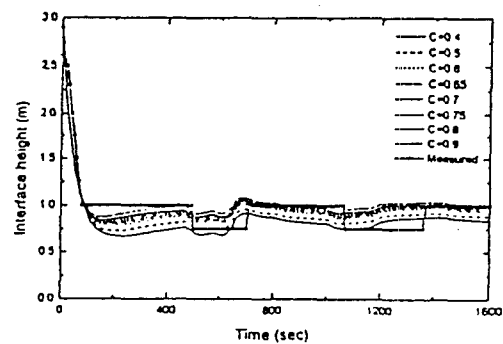


Fig. 10 Comparison of the measured and predicted interface heights for the chair fire.

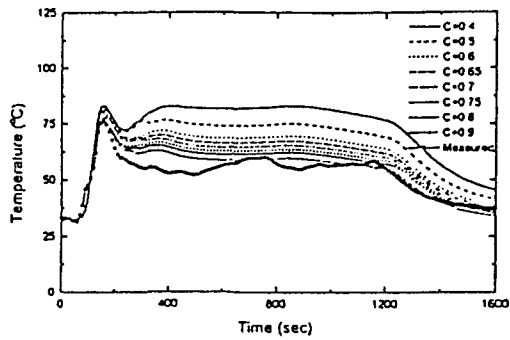


Fig. 11 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the carpet fire.

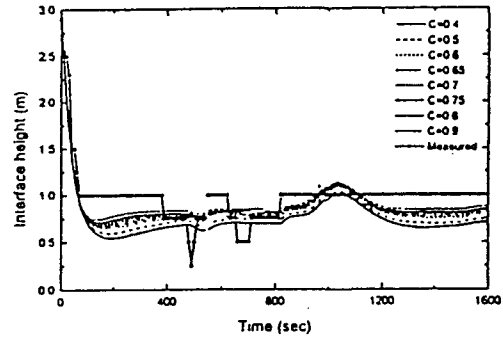


Fig. 14 Comparison of the measured and predicted interface heights for the sofa fire.

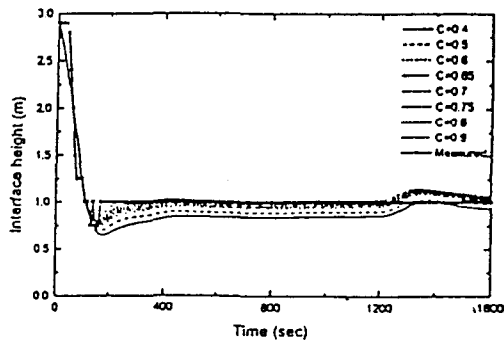


Fig. 12 Comparison of the measured and predicted interface heights for the carpet fire.

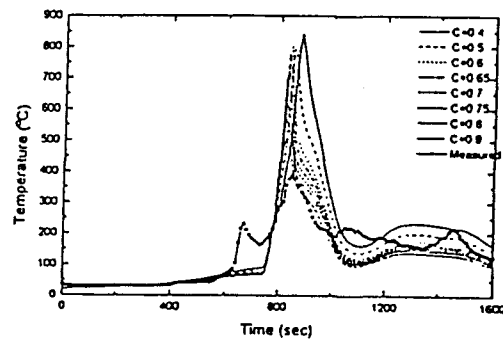


Fig. 15 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the mattress fire.

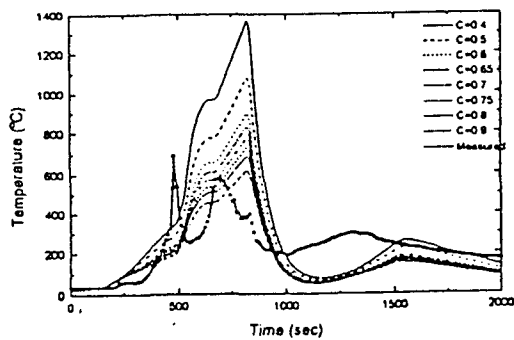


Fig. 13 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the sofa fire.

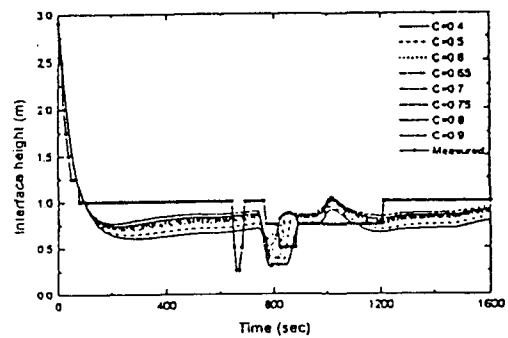


Fig. 16 Comparison of the measured and predicted interface heights for the mattress fire.

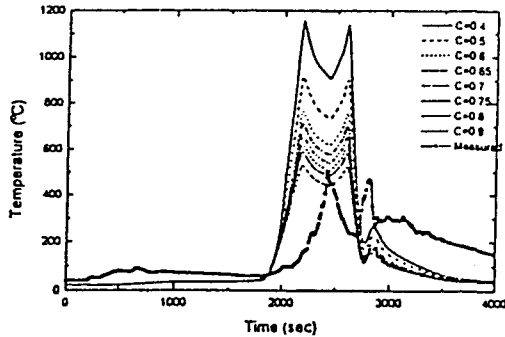


Fig. 17 Comparison of the measured and predicted upper layer temperatures for the wardrobe fire.

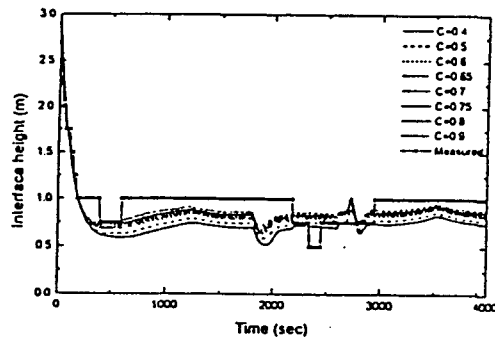


Fig. 18 Comparison of the measured and predicted interface heights for the wardrobe fire.

의 높이변화로 실험결과가 이론값보다 조금 높게 나타났다. 전반적으로 상부층의 온도변화와 경계면의 높이변화는 화재의 전기간에 걸쳐 정성적으로는 잘 일치하였고, 개구부의 흐름계수는 0.7~0.9사이 일 때 비교적 오차가 적게 나타났다.

5. 결 론

주거용 건물내의 쓰레기통, 의자, 카펫, 소파, 매트리스, 장농 화재시 연기층인 상부의 온도 분포상태와 경계면의 높이를 실험을 통하여 구하고, 이론적인 해석 방법으로는 영역모델링의 기본방정식을 개구부의 흐름계수의 변화에 따라 계산하여 비교 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 상부층의 온도와 경계면의 높이는 사각 쓰레기통의 경우 개구부의 흐름계수가 0.65~0.8, 원형 쓰레기통 및 의자의 경우는 흐름계수가 0.65~0.9, 카펫, 소파, 매트리스 및 장농의 경우는 흐름계수가 0.7~0.9일 때 실험치와 비교적 잘 일치하였다.

둘째, 개구부의 흐름형태는 카펫과 같이 분산화재(distributed fire)의 경우는 filling과 buoyant 흐름이 나타났고, 집중화재(concentrated fire)의 경우는 filling에서 바로 flow로 가고 또 유동기간도 길게 나타났다.

셋째, 상부층의 온도는 거의 일정하며 경계면의 높이는 가구화재시 모두 1[m] 근처에서 일정한 상태값을 유지하였다. 다만, 최대온도를 나타내는 시간에는 경계면높이가 바닥에서 0.25[m] 내지 0.75[m]까지도 내려왔다.

넷째, 경계면 높이가 내려오는 속도는 가구의 가연성 및 연소시 공기와의 접촉면적에 비례하여 경계면 높이가 1[m] 근처까지 내려오는데 소요되는 시간은 1분~3분 이내로 나타났다.

본 실험을 통해 얻은 결과를 기초자료로 이론적인 영역 모델링을 수행하므로써 실제화재상황을 보다 정확하게 해석 또는 예측하므로써 화재의 예방, 진압 및 방화관리에 기여할 수 있다.

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, 78, 79, 80
3. Cooper, L. Y., "A mathematical model for estimating available safe egress time in fires", Fire and Materials, 1982, 6(4), 135-144.
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, Nov. 1985, p.293

6. Jones, W. W., "A multicompartment model for the spread of fire, smoke and toxic gases", Fire Safety Journal, 1985, pp. 55-79
7. Parker, W. J., "Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications", National Bureau of Standards, March, 1982
8. 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
9. 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 防火安全對策に 係る 調査報告書," 平成 3年 3月
10. Lilly, D. G., "Computerized reconstruction of building fires", ASME international computers in engineering conference, Santa Clara, CA, August 18-22, 1991
11. Gottuk, D. T., Roby, R. J. and Peatross, M. J., "Carbon monoxide production in compartment fires", J. of Fire Prot. Engr., Vol 4(4), 1992, pp. 133-150
12. 정 길 순, "목재연소의 실내화재성상과 안전대피 시간", 충북대학교 산업안전공학과, 석사논문, 1993
13. 최 금 란, "고층건물의 아트리움 공간에 있어서 화 재성상에 관한 연구", 경북대학교 건축공학과, 석사 논문, 1993
14. 윤 명 오, "철근콘크리트 구조 공동주택 실물화재 실험연구-화재성상 파악 및 취약부위 도출을 중심으로-", 한국화재·소방학회지 10권 3호(통권23호), 1996, 9
15. NFPA Fire Protection Handbook, 16th ed., section 21/Chapter 3 pp.21-19 to 21-24
16. David M.B., "An introduction to mathematical fire modeling", Technomic Publishing AG, 1991
17. 공기조화 냉동공학회, "공기조화·냉동·위생공학편 략, 제2권 공기조화", pp. II 19-21, 1991년 9월