

실내화재에서 연기거동에 미치는 복사영향에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Study of Radiation Effect under Smoke Movement in Room Fire

정진용* · 유홍선** · 홍기배***

J. Y. Jeong* · H. S. Ryou** · G. B. Hong***

*중앙대학교 기계공학과 대학원

**중앙대학교 기계공학과

***충주대학교 열공학과

요 약

본 연구는 두 가지 유형의 3차원 실내 공간 내에서 화재 발생시 연기거동에 미치는 복사영향을 알아보기 위해 자체개발한 SMEP(Smoke Movement Estimating Program) field 모델을 사용하여 수치해석하였다. PISO 알고리즘과 부력항을 포함한 수정 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한 SMEP은 연속, 운동, 에너지, 농도 그리고 복사 열 전달 방정식을 풀었으며, 복사 열 전달 방정식의 해석을 위하여 S-N 구분종좌표법을 채택하여 사용하였다. 수치해석 결과 연기의 온도분포는 복사를 고려하지 않고 대류만을 고려했을 경우 실험치와 많은 오차를 보였으나 복사를 함께 고려했을 경우는 실험치와 작은 오차범위로 비슷한 경향을 나타내었다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H_2O 와 CO_2 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재해석에 있어서 복사는 반드시 고려되어야만 한다.

ABSTRACT

This paper describes the smoke movement of a fire field model based on a self-developed SMEP(Smoke Movement Estimating Program) code to the simulation of fire induced flows in the two types of compartment space containing the radiation effect under smoke movement in room fire. The SMEP using PISO algorithm solves conservation equations for mass, momentum, energy and species, together with those for the modified $k-\epsilon$ turbulence model with buoyancy term. Also it solves the radiation equation using the discrete ordinates method. The result of the calculated smoke temperature containing radiation effect has shown reasonable agreement compared with the experimental data. On the other hand, a difference of a lot was found between the temperature predicted by the SMEP with only convection effect and obtained by the experimental result. This seems to come from the radiation effect of H_2O and CO_2 gas under smoke productions. Thus, the consideration of the radiation effect under smoke in fire may be necessary in order to produce more realistic result.

Keywords : Smoke movement SMEP, Room fire, Radiation

1. 서 론

실내공간에서 화재로 야기되는 열 및 연기를 초기에 감지함으로써 연기 및 유독가스의 흐름을 효율적으로 제어한다면 인명피해를 줄일 수 있고, 또한 연소가스

에 의한 화재영역의 확산을 방지할 수 있기 때문에 그동안 이 분야에 대한 연구는 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 화재가 발생하면 열 뿐만 아니라 연소과정에서 많은 연기가 발생하는데 목재나 건초 등을 사용했던 옛날과는 달리 과학의 발달로 인해 플라스틱 등 석유 화학제품, 합성 섬유로 된 신건축 자재를 사용함으로써 화재시 발생하는 다량의 연기는 그 독성으로 인하

† E-mail: jyjeong@ms.cau.ac.kr

여 질식사와 같은 인명피해를 가져오게 된다. 또한 세계의 불투명성으로 인해 화재 진압 활동에도 큰 방해 원인이 된다. 이처럼 실내 주거공간에서 방화 대상물의 안전성 확보를 위하여 과학적이고도 엄밀한 연구가 필요해지고 있는 실정이다.

화재 현상에 대한 실험적 연구는 실측크기의 실험수행이 어렵고 연소 특성상 모형실험의 어려움으로 인하여 많은 제한을 받아왔다. 또한 실내공간내에서 화재의 연소 현상과 그에 따른 연기의 유동은 굴뚝효과(stack effect), 풍압, 건물구조 및 환기와 같은 요인과 물질전달, 열 전달, 화학반응 등이 포함된 매우 복잡한 메카니즘에 의해 변화한다 또한 연소에 발생되는 그을음(soot)이나 물, 이산화탄소 등과 같은 매질의 비회색특성으로 인한 복사는 그 중요성에도 불구하고 지금까지 화재에 관련된 연구는 부족한편이다.

화재와 관련된 물리적 현상의 복잡성으로 인하여 화재에서의 연소 및 복사 열전달 현상에 대한 이론적인 연구는 주로 부분밀폐공간 내에서 화재발생 영역을 일정한 크기의 열원으로 가정한 후 부력으로 야기되는 유동장을 해석한 경우가 주를 이루고 있다.^{1,2)} 화재 성상을 해석하기 위한 컴퓨터 모델은 일반적으로 Zone 모델과 Field 모델로 나눌 수 있는데, Zone 모델에 대한 연구로서 Jones³⁾는 화재로부터 발생되는 연기와 독가스의 수송을 예측할 수 있는 상업용 코드인 CFAST에 대하여 기술하였다. Field 모델에 대한 연구로서 정진용 등^{4,5)}은 PISO 알고리즘과 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용한 SMEP 코드를 사용하여 천장에 열 유속을 갖는 아트리움 공간에서 화재발생시 연기거동에 대하여 수치해석 하였고, Baum⁶⁾은 밀폐된 공간에서 화재가 발생하였을 때 그에 따른 공기의 유동과 온도에 대하여 해석하였으며, Cooper⁷⁾는 화재가 일어난 방과 자유롭게 연결된 이웃 공간에서 연소생성물로서 생겨난 연기의 물리적 현상을 기술하여 이러한 공간내에서 화재안전을 위한 건축물을 설계하는데 이용될 수 있는 연기유동 이론을 제시하였다. 그러나 이들은 난류효과와 고온의 참여가스로부터의 복사 열 전달을 무시함으로써 계산결과는 실험치와 비교적 큰 오차를 나타내었다. 또한 본 연구에서 채택한 구분중좌표법과 관련된 연구를 살펴보면 Fiveland 등⁸⁾과 Jamaluddin 등⁹⁾이 있는데 이들은 2,3차원 직사각형 밀폐공간에서 DOM의 차수를 변화시키면서 복사열전달 만의 특성을 분석하였고, Yucel 등¹⁰⁾은 2차원 직사각형 밀폐공간에서 층류 자연대류-복사현상을 수치적으로 해석하였다. 그리고 정진용 등¹¹⁾은 대형공간 화재에서 연기거동에 미치는 복사에 대한 영향을 비교분석 하였다.

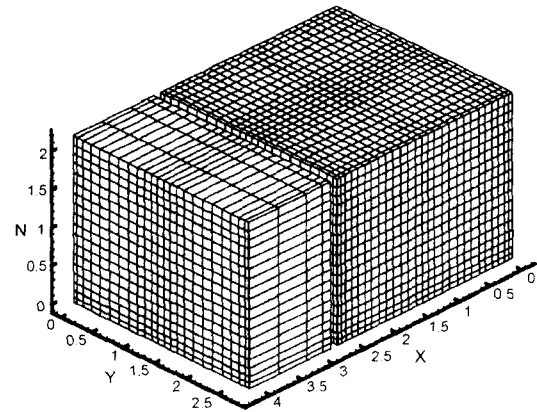


Fig. 1. Grid of the room geometry.

따라서 본 연구에서는 3차원 실내공간내에서 화재 발생시 야기되는 열 및 유동특성을 알아보기 위해 자체개발한 SMEP field 모델을 사용함으로써 문 또는 창문이 있는 두 가지 유형의 실내공간에 대해서 복사를 고려했을 경우와 복사를 고려하지 않았을 경우의 연기 온도분포를 실험치와 비교하였으며 또한 연층의 농도 분포를 구하였다.

2. 물리적인 조건

본 연구에서 사용한 기하학적 모양은 가로와 세로가 $2.8\text{ m} \times 2.8\text{ m}$ 이고 높이가 2.18 m 인 실내공간이며 바닥의 중앙면에 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 의 크기를 갖는 화원이 존재한다. 또한 한쪽 벽면에는 문 또는 창문과 같은 개구부가 중앙면에 놓여 있다. 문의 경우 폭이 0.74 m 이고 바닥으로부터 높이가 1.83 m 이며, 창문의 경우는 바닥으로부터 1.37 m 위에 폭이 0.74 m 이고 높이가 0.46 m 로 놓여 있다. 화재 소스의 열 발생률은 실험^{1,2)}과 같은 62.9 kW 를 사용하였다. Fig. 1은 수치해석을 위한 격자계의 구성을 보여주고 있는데 external boundary condition이 적용되는 개구부 위치에는 유입과 유출의 양방향 유동을 모델하기위해 1.4 m 의 확장영역을 구성하였으며 벽면 및 화재소스 부근은 fine mesh로서 조밀격자로 구성되었다. 문이 고려되었을 경우 확장영역을 포함한 전체 격자수는 13044 개이며 창문이 고려되었을 경우 전체 격자수는 14973 개의 격자를 사용하였다.

3. 수학적 모델

보존 방정식들은 질량, 운동량, 에너지 그리고 농도

Table 1. The Flux and Source Terms for the Conservation Equations

Φ	Γ_{Φ}	S_{Φ}
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_{\text{eff}}\nabla\cdot\vec{u})\right]$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_{\text{eff}}\nabla\cdot\vec{u})\right]$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{\text{eff}}\frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu_{\text{eff}}\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_{\text{eff}}\nabla\cdot\vec{u})\right] + g(\rho_{\infty} - \rho)$
e	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_e}$	$-\rho\nabla\cdot\vec{u} - \nabla\cdot\vec{q}_{\text{rad}}$
k	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k}$	$G_k + G_B - \rho\varepsilon$
ε	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\varepsilon}}$	$\frac{\varepsilon}{k}[C_1(G_k + G_B) - C_2\rho\varepsilon] + C_3\rho\varepsilon\nabla\cdot\vec{u}$
f	$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_f}$	0

등에 대한 오일러리안 형태의 방정식이며 밀도변화에 대한 압축성 효과를 고려하였다. 난류 유동에 대해서는 부력항이 포함된 수정 $k-\varepsilon$ 난류 모델을 이용하였으며, 직교 좌표계를 이용하여 일반적인 종속 변수 Φ 에 대한 지배방정식의 형태를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\Phi}\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) + S_{\Phi} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, u , v 와 w 는 각각 x , y , z 방향으로의 속도 성분들을 의미한다. 각 지배방정식에 대한 확산계수 Γ_{Φ} 와 생성항 S_{Φ} 는 Table 1에서 정의된다. 본 연구에서 사용된 난류모델은 압축성 효과를 고려하여 생성항으로 처리하고 부력항이 포함된 수정 $k-\varepsilon$ 모델이며, 연속, 운동량, 에너지, 농도 및 난류 방정식에 대한 생성항들은 Table 1에 나타나 있다. 여기에서 난류 운동에너지의 생성항(G_k)과 부력항(G_B)은 다음과 같다.

$$G_K = \mu_{\text{eff}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$G_B = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_h}g\left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial\rho}{\partial z}\right) \quad (3)$$

여기서, μ_{eff} 는 유효 점성 계수를 나타내며 난류 모델 상수들은 Table 1에 나타나 있다.

복사 열 전달 해석을 위한 방법에는 Zone 법, Monte-Carlo 법 그리고 플럭스(flux) 법 등으로 대별되는데, 본 연구에서는 복사 열 전달 해석을 위하여 단위 면적당, 단위 파장 길이당, 단위 각도당의 복사강도를 종속변수로 하는 S-N(4) 구분종좌표(24개의 방향)법을 사용하였다.

각 보존 방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서는 제어체적 내에서 체적 적분으로 차분화시키는 유한 체적법을 사용하였으며, 음함수법에 의해 차분화된 시간 종속적인 유동 방정식들에 대한 압력-속도 연결문제는 반복계산에 의존하지 않는 시간진행(time marching)방법인 PISO 알고리즘¹³⁾에 의해 처리되었다.

입구 경계조건은 입구에서 모든 종속변수들의 값을 알고 있다는 Dirichlet 형태를 사용하였고, 출구 경계조건은 Neumann 형태를 사용하였으며 벽면 경계조건은 No-slip 조건을 적용하였다. 난류 유동의 경우 벽 근처 영역에서의 유동은 흐름 방향에 따라 압력구배가 없는 1차원 Couette 유동처럼 거동하며 전단력은 일정하다고 가정한다. 그리고 벽 근처에서는 국부적으로 난류 운동에너지의 생성과 소멸이 같다는 등방성이 지배

적이라는 가정하에 벽 법칙을 적용하여 벽 근처에서의 확산계수들을 고려하였다.

연소생성물은 global single-step reaction으로 완전연소하여 H₂O와 CO₂의 가스상태로만 존재한다고 가정하였다. 따라서 가스상태에서는 입자가 포함되지 않기 때문에 복사의 산란영향을 무시하였으며 복사 에너지의 흡수 및 방출영향을 고려하기 위하여 흡수계수가 과장에 대해 상수인 경우(gray gas approximation)에 대하여 고려하였다. 모든 고체 벽면에 대해서는 균일한 반사를 하는 불투명한 벽면(diffusely reflecting opaque walls)을 가정하여 벽면에서의 복사강도를 다음과 같이 고려하였다.

$$I_w(x, y, z, \Omega) = \epsilon_w T_w^4(x, y, z) + \frac{1 - \epsilon_w}{\pi} \int_{\Omega'} \frac{\rho}{r} I_w(x, y, z, \Omega') d\Omega' \quad (4)$$

또한 화재 소스 입구부와 개구부는 가스의 온도에 해당하는 가상적인 흑체면으로 고려 하였다.

수치해석의 수렴조건은 온도장에 대한 최대 허용상대오차는 복사강도에 대하여는 10⁻⁶, 난류유동하에서의 임의의 종속변수값에 대하여는 10⁻³으로 취하였다. 머신으로는 팬티엄III 600 PC를 사용하였으며 time step을 0.002초로 하여 화재 경과시간이 약 12초가 되었을 때 정상상태에 도달하였다.

4. Plume 이론 및 입구조건

화재 plume을 통한 질량 유입율은 많은 사람들의 실험을 통하여 모델화(entrainment model) 되어 있으며, 본 연구에서는 Cetegen¹⁴⁾에 의해 제안된 plume의 높이에 따른 질량 유동률, \dot{m}_z 은 다음 식에 의해서 얻어진다.

$$\dot{m}_z = 0.62Z^{3/4}D_f \quad (5)$$

여기서, Z는 plume의 높이이며 D_f는 풀(pool) 화재의 직경을 나타낸다. Plume 높이, Z에서의 수직 상승속도, v는 다음 식에 의해서 구해진다.

$$v = \frac{\dot{m}_z}{A\rho_\infty} \quad (6)$$

여기서, A는 풀 화재의 단면적이며 $\rho_\infty = 1.211 \text{ kg/m}^3$ 이다. 그리고 평균 flame 온도는 Heskestad¹⁵⁾에 의해 제안된 다음과 같은 식을 사용하고자 한다.

$$T_{zf} = T_\infty + 25 \frac{Q_c^{2/3}}{Z_f^5/3} \quad (7)$$

여기서, 평균 화염(flame)의 높이는 $Z_f = 0.166 \dot{Q}_c^{2/5}$ (NFPA 92B16))이고 T_∞는 대기온도이며 \dot{Q}_c 는 연소효율 0.7이 고려된 발열량이다.

따라서 본 연구에서는 이 식들을 수치계산의 입구 조건으로써 사용하고자 한다.

5. 수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 문 또는 창문이 있는 두 가지 실내공간에서 화재 발생시 복사의 영향으로 인한 연기의 수직 온도분포를 예측하여 실험치와 비교분석 하였다. 또한 가스의 수직 농도분포를 구함으로써 연층의 높이를 예측하였다. 수치해석 데이터는 화재가 정상상태(화재 경과시간 약 12초후)에 도달한 후 실내공간의 개구부 면쪽 코너에서 x = 0.25 m, y = 0.3 m 떨어진 위치에서 구하였다.

Fig. 2는 개구부가 문일때 대류만을 고려했을 경우와 대류와 복사를 함께 고려했을 경우 수직 온도분포를 실험치와 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 대류만을 고려했을 경우 전체적으로 실험치보다 약 25°C 높게 예측되고 있으며 복사를 함께 고려했을 경우는 연층의 아래부분에서 실험치보다 약 3°C 높게 그리고 연층의 윗부분에서는 실험치보다 약 7°C 낮게 예측하면서 대류만을 고려했을 경우보다 전체적으로 실험치와 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H₂O와 CO₂ 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 화재에서의 복사에 대한 고려는 필수적임을 알 수 있다.

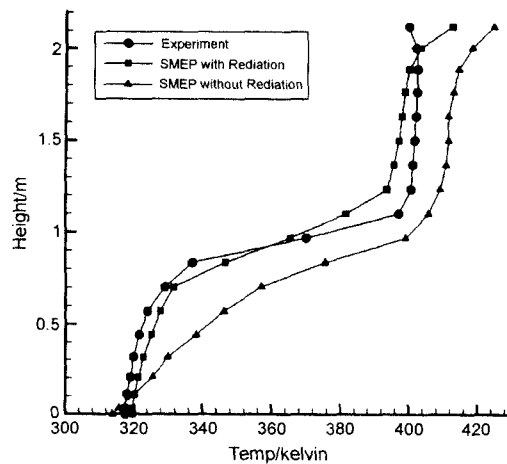


Fig. 2. Vertical temperature distribution in the corner for room with door.

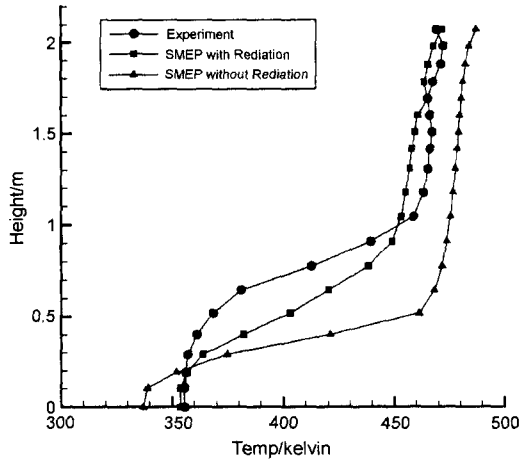


Fig. 3. Vertical temperature distribution in the coner for room with window.

Fig. 3은 개구부가 창문일 때 대류만을 고려했을 경우와 대류와 복사를 함께 고려했을 경우 수직 온도분포를 실험치와 비교한 그래프이다. 대류만을 고려했을 경우 수직 온도분포가 연기의 아랫부분에서는 실험치보다 약 50°C 이상 높고 연기의 윗부분에서는 약 25°C 정도 높게 예측되고 있으며 복사를 함께 고려했을 경우는 연층의 윗부분에서 실험치와 그래프이다. 대류만을 고려했을 경우 수직 온도분포가 연기의 아랫부분에서는 실험치보다 약 50°C 이상 높고 연기의 윗부분에서는 약 25°C 정도 높게 예측되고 있으며 복사를 함께 고려했을 경우는 연층의 윗부분에서 실험치와 약 -5°C의 오차를 나타내고 있고 아랫부분에서는 약 20°C 정도 높게 나타나고 있다. 문이 있는 경우와 마찬가지로 대류와 복사를 함께 고려했을 경우가 대류만을 고려했을 경우보다 전체적으로 실험치와 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 개구부가 문인 경우와 마찬가지로 복사를 고려했을 경우 연층의 아랫부분에서는 실험치보다 높은 온도를 보여주고 있는데 이것은 연기 자체의 복사열에 의한 에너지손실보다는 고온의 화재 소스에 의해 전달되는 복사 열 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4는 개구부가 문으로 놓여 있고 대류와 복사를 함께 고려했을 경우 가스의 농도분포를 보여주고 있다. 여기서 가스의 농도는 연소생성물들(CO₂, H₂O, CO, H₂, O₂ 그리고 N₂)의 몰비(mole fraction)로서 정의되며, 본 연구에서는 완전연소를 가정하고 연기의 농도로서 N₂를 제외한 CO₂와 H₂O의 농도를 구하였다. 연층의 상층부에서 연기의 농도가 약 25%정도임을 알

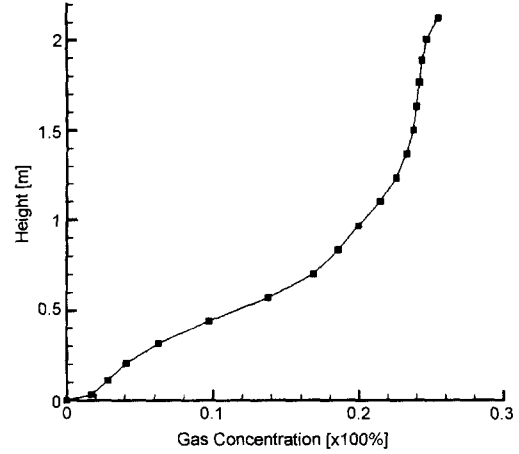


Fig. 4. Vertical gas concentration in the coner for room with door[X100%].

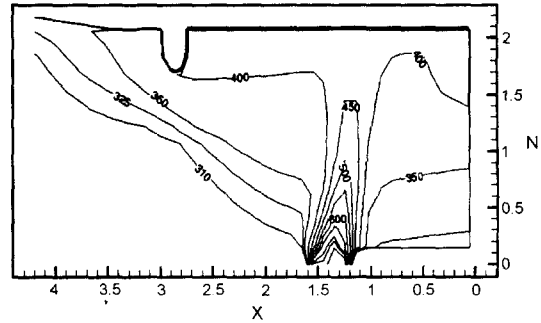


Fig. 5. Smoke temperature contour in the door center [K].

수 있고 전체적으로 선형적인 증가 분포를 나타내고 있다. 또한 연기의 농도가 4% 이상일 때를 smoke의 경계로 가정할 경우 연층의 높이가 바닥에서 약 0.2 m 위치까지 내려와 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 복사와 대류가 함께 고려되어 문이 있는 경우 문의 중심부근에서의 온도 contour를 보여주고 있다. Fig. 2에서 보면 실내의 코너 부근에서 높이가 약 0.9 m이하일 때 연기의 온도가 약 320 K를 유지하고 있으나 문의 중심부근에서는 높이 0.9 m인 지점에서 연기의 온도가 약 310 K임을 확인할 수 있다. 이것은 문의 하부에서 외부공기의 유입으로 인한 열손실 때문이다. 또한 천장부근에서는 연층의 온도가 약 400 K이며 바닥의 화재소스 부근에서는 plume안으로의 공기 유입으로 인하여 오른쪽으로 plume이 약간 기울어진 모습을 볼 수 있다.

Table 2는 개구부에서 공기의 질량유입율을 보여주

Table 2. Air mass flow-in rate [kg/s] in the door or window

Opening configuration	Door	Window
Experiment	0.561	0.125
Convection	0.6068	0.1635
Convection+Radiation	0.5779	0.1133

고 있다. 개구부가 문일 때 대류만을 고려했을 경우 약 8%, 대류와 복사를 함께 고려했을 경우 약 3%의 오차를 나타내고 있다. 그리고 개구부가 창문일 때 대류만을 고려했을 경우 약 30%, 대류와 복사를 함께 고려했을 경우 약 9%의 오차를 보여주고 있다. 공기의 질량유입율도 마찬가지로 복사와 대류를 함께 고려했을 경우가 대류만을 고려했을 경우보다 실험 결과와 좀더 근사한 값을 보여주고 있는데 이것은 복사를 함께 고려했을 때보다 대류만을 고려했을 경우 더 높은 실내 온도분포를 갖게되고 이로 인하여 개구부에서 외기와 밀도차가 커지게 되어 외부 공기 유입량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

6. 결 론

1. 개구부가 있는 실내화재에서 대류만을 고려했을 경우와 대류와 복사를 함께 고려했을 경우의 수직 온도분포는 복사를 고려했을 경우 좀더 실험치와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H₂O와 CO₂ 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재해석에 있어서 복사의 고려는 필수적이라 할 수 있다.

2. 문이 있고 62.9 kW의 화재소스(0.3×0.3 m)가 바닥의 중심에 있는 실내공간(2.18×2.18×2.18 m)의 경우 연층이 정상상태가 되는 시간은 약 12초 정도이며 이 때 천장근처에서 공기를 제외한 연기의 농도는 약 25%이고 연층의 경계높이는 바닥에서 약 0.2 m정도가 됨을 확인할 수 있었다.

3. SMEP 화재 모델은 개구부가 있는 실내공간에서 화재발생시 국부적인 연기 농도와 온도분포를 구할 수 있으며, 자세한 유동정보를 얻음으로써 화재 안전설계 자료의 제공과 함께 방화 계획 방향 설정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2000년도 중앙대학교 교내 학술 연구비

지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호 목록

- A : 풀 화재의 단면적, [m²]
- C₁, C₂, C₃, C₄, C_m : 실험 상수
- D_f : 풀 화재의 특성길이(지름), [m]
- g : 중력 가속도, [m/s²]
- G : 생성항
- I : 복사강도, [W/(m² · sr)]
- \dot{m} : 유입량, [kg/s]
- \vec{n} : 수직 단위 벡터
- Q̇ : 화재의 열 발생률, [kW]
- Q̇_c : 유효 발열량, [kW]
- t : 시간, [sec]
- T_{fl} : Flame의 평균온도, [K]
- T_∞ : 대기 온도, [K]
- Z_f : 화염 높이, [m]

Greek symbols

- ε : 난류 운동에너지 소산율
- ε_w : 벽면의 방사율
- Ø : 종속 변수
- Γ : 확산 계수
- μ : 점성, [kg/m · sec]
- ρ : 밀도, [kg/m³]
- σ : Prandtl number
- σ_k, σ_ε, σ_e, σ_f : 실험 상수
- Ω : 산란 위상함수(방향)
- Ω' : 입사각 위상함수(방향)

Subscript

- B : 부력
- e : 내부 에너지
- eff : Effective
- f : Species or flame
- k : 난류 운동 에너지
- w : 벽면
- z : Plume 높이
- ∞ : 외기

참고문헌

1. Steckler, K. D., Quintiere, J. G. and Rinkinen, W.

- J., "Flow Induced by Fire in a Compartment," Nineteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 913-920(1982)
2. Quintiere, J. G., "A Perspective on Compartment Fire Growth," Combustion Science and Technology, Vol. 39, pp. 11-54(1984)
3. Jones, W. W., "A multicompartment model for the spread of fire, smoke and toxic gases", Fire Safety J., Vol. 9, pp. 55-79(1985)
4. 정진용, 유홍선, 김성찬, "PISO알고리즘을 이용한 세 가지 형태의 아트리움 공간에서 화재발생시 연기거동에 대한 수치해석적 연구", 한국화재 소방학회지, 제 13권, 제 1호, pp. 21-30(1999)
5. J. Y. Jeong, H. S. Ryou, S. C. Kim and C. I. Kim, "A Numerical Study of Smoke Movement in Atrium Fires with Ceiling Heat Flux", 4th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, May 22-28, 2000. Tokyo, JAPAN
6. Baum, H. R., Rehm, R. G. and Mulholland, G. W., "Prediction of heat and smoke movement in enclosure fires", Fire Safety J., Vol. 6, pp. 193-201(1983)
7. Cooper, L. Y., "Smoke movement in rooms of fire involvement and adjacent spaces", Fire Safety J., Vol. 7, pp. 33-46(1984)
8. Fiveland, W. A., "Discrete-Ordinate Solutions of the Radiative Transfer Equation for Rectangular Enclosure", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 669-706(1984)
9. Jamaluddin, A. S. and Smith, P. J., "Predicting Radiative Transfer in Rectangular Enclosure using the Discrete Ordinate Method," Combustion Science and Technology, Vol. 59, pp. 321-340, (1988)
10. Yucel, A., Archarya, S. and Williams, M. L., "Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 15, pp. 261-278(1989)
11. 정진용, 유홍선, 김충익, "대형공간 화재에서 연기거동에 미치는 복사영향에 대한 수치해석적 연구", 2000년도 화재 소방학회 춘계학술대회 논문집, pp. 43-49(2000)
12. Quintiere, J. G., Rinkinen, W. J. and Jones, W. W., "The Effect of Room Openings on Fire Plume Entrainment", Comb. Sci. Tech., Vol. 26, pp. 193-201(1981)
13. Issa, R. I., "Solution of the Implicit Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting," Journal of Computational Physics, Vol. 62, NO. 1, pp. 40-65(1985)
14. Cetegen, B. M., Zukoski, E. E. and Kubota, T., "Entrainment in the near and far field of fire plume", Comb. Sci. Tech., Vol. 39, pp. 305-331 (1984)
15. Heskestad, G., Virtual origins of fire plumes. Fire Safety J., Vol. 5, pp. 109-114(1983)
16. Klote, J. H., "Method of Predicting Smoke Movement in Atria With Application to Smoke Management", NISTIR 5516(1994)