한국화재·소방학회, 제15권 제1호, 2001년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 15, No. 1, 2001

아트리움에서 화재 발생시 복사가 고려된 연기거동에 대한 수치해석 연구

A Numerical Study of Smoke Movement with Radiation in Atrium Fires

정진용† · 유홍선* · 홍기배**

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

중앙대학교 기계공학과 대학원
*중앙대학교 기계공학과
**충주대학교 열공학과

(2000. 12. 17 접수/2001. 01. 15 채택)

요 약

본 연구는 3차원 아트리움 공간(일본의 SIVANS 아트리움) 내에서 화재 발생시 복사가 고려된 연기의 거동을 알아보기 위해 자체개발한 SMEP(Smoke Movement Estimating Program) field 모델을 사용하여 수치해석하였다. PISO 알고리즘과 부력항을 포함한 수정 k-ε 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 복사와 대류를 함께 고려했을 경우가 대류만을 고려했을 경우 보다 실험결과와 근사한 경향을 나타내었다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H_2O와 CO_2 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재해석에 있어서 연기의 복사 영향을 고려하는 것이 필요하다. 또한 연층의 하강 속도는 약 0.1 m/s이었으며 피난수준인 바닥 1.5 m까지 연층이 도달하는데에는 560 kW의 Ultra Fast Fire의 경우 약 450초의 시간이 걸렸다.

ABSTRACT

This paper describes the smoke filling process 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 atrium space (SIVANS atrium at Japan) containing smoke radiation effect. The SMEP using PISO algorithm solves conservation equations for mass, momentum, energy and species, together with those for the modified k-ε 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 a better prediction than the result calculated by only convection effect in comparison with the experimental data. 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 should be necessary in order to get more realistic result. Also the numerical results indicated that the the smoke layer is developing at a rate of about 0.1 m/s. It would take about 450 seconds after starting the ultra fast fire of 560 kW that the smoke layer move down to 1.5m above the escape level.

Keywords : Smoke filling process, SMEP, Atrium, Radiation, Convection

1. 서 론

현대식 건물들은 점점 고층화, 고밀도화됨에 따라 태양광선을 건물 중앙에 끌어 들이고 단순한 로비나 통행 공간으로서가 아닌 휴식을 취할 수 있는 쾌적한 장소로서 아트리움 공간의 수요가 점차 증가하고 있는 실정이다. 일반적으로 아트리움과 같은 대형건물에서 화재진압을 위한 스프링클러의 능력은 천장높이가 11 m

† E-mail: jyjeong@ms.cau.ac.kr

에서 15 m로 제한적이다.[1,2] 화재로 발생된 연기는 위 공간내로의 상승에 따라 새로운 공기의 유입으로 인하여 온도가 감소하기 때문에 천장 근처에서의 연기 온도가 화재 감지기나 스프링클러의 작동 온도에 도달하지 못하게 되고 또한 나중에 스프링클러가 작동하더라도 이미 화재가 성장하여 진압의 범위를 벗어날 수도 있다. 화재 발생시 연기가 외부로 빠지지 않고 내부로 확산될 수 있으며 수평 방향으로의 화염확대보다는 수직 방향으로의 화염확대가 크고 천장이 높기 때문에 기존의 관습적인 배기시스템으로는 연기를 제어하기가 어렵다.[3] 화재로 인한 연기거동은 열 및 질량전달, 화학 반응이 포함된 매우 복잡한 메카니즘과 굴뚝효과 그리고 풍압 같은 다양한 외부조건에 의해 변화하고 또한 막대한 비용 때문에 실제 크기로 실험연구를 한다는 것은 어려운 현실이다. 그러므로 최근에 컴퓨터의 발전과 더불어 실험연구의 대용으로 수치해석 기법이 사용되고 있다.

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.[4,5] 화재 성상을 해석하기 위한 컴퓨터 모델은 일반적으로 Zone 모델과 Field 모델로 나눌 수 있는데, Zone 모델에 대한 연구로서 Jones[6]는 화재로부터 발생되는 연기와 독가스의 수송을 예측할 수 있는 상업용 코드인 CFAST에 대하여 기술하였다. Field 모델에 대한 연구로서 정진용 등[7,8]은 SMEP 코드를 사용하여 천장에 열 유속을 갖는 아트리움 공간에서 화재발생시 연기거동에 대하여 수치해석 하였고, Baum[9]은 밀폐된 공간에서 화재가 발생하였을 때 그에 따른 공기의 유동과 온도에 대하여 해석하였으며, Cooper[10]는 화재가 일어난 방과 자유롭게 연결된 이웃 공간에서 연소생성물로써 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 구분종좌표법과 관련된 연구를 살펴보면 Fiveland 등[11]과 Jamaluddin 등[12]이 있는데 이들은 2, 3차원 직사각형 밀폐공간에서 DOM의 차수를 변화시키면서 복사열전달 만의 특성을 분석하였고, Yucel 등[13]은 2차원 직사각형 밀폐공간에서 층류 자연대류-복사현상을 수치적으로 해석하였다. 그리고 정진용 등[14]은 대형공간 화재에서 연기거동에 미치는 복사에 대한 영향을 Zone 모델들과 비교분석하였다.

본 연구에서는 횡장의 아트리움 공간에 대하여 화재발생시 야기되는 열 및 유동특성을 알아보기 위해 자체개발한 SMEP Field 모델을 사용하여 복사를 고려했을 경우와 복사를 고려하지 않았을 경우의 연기 온도분포를 실험치와 비교하였으며 또한 연층의 농도분포, 천장 속도 그리고 하강 속도 및 시간 등을 구하였다. 실제 실험에 사용된 아트리움은 일본 지포의 시반스 아트리움[15]으로 공간은 폭 19.2 m, 길이 102.4 m, 높이 28.7 m이며 출입구가 없는 밀폐공간이다.

2. 물리적인 조건

본 연구에서는 56426.5 m^3(폭 19.2 m × 길이 102.4 m × 28.7 m)의 체적을 갖는 횡장 아트리움 건물로 기하학적 모양과 온도 측정위치(T1~11)는 Fig. 1과 같으며 수치해석을 위한 격자(70 × 15 × 17)는 Fig. 2에 나

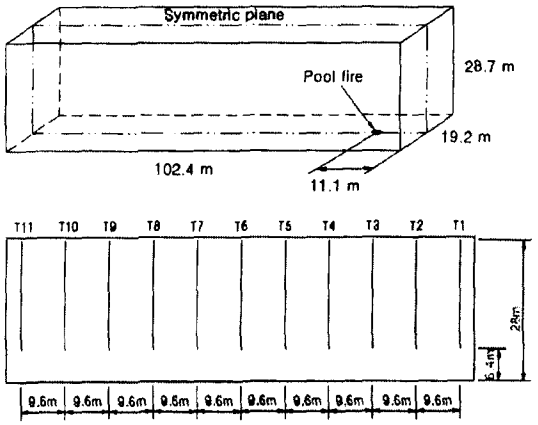


Fig. 1. Configuration and dimension for the atrium.

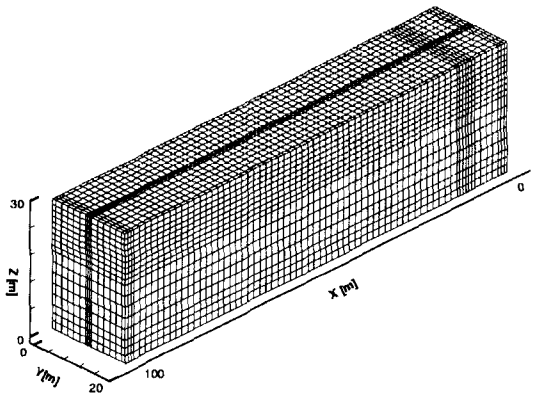


Fig. 2. Grid system for the atrium.

Table 1. Typical fire growth factors

t^2-Fires	Growth Factor, α (kW/s^2)
Slow	0.002931
Medium	0.01127
Fast	0.04689
Ultra Fast	0.1878

타나 있다. 화재소스는 오른쪽 벽에서 11.1 m 떨어진 바닥의 중앙면에 2 m^{2}의 크기로 놓여 있다. 풀 화재의 열 발생률(heat release rate)은 시간의 제곱승에 비례하는 다음과 같은 값을 갖는다.[16]

$$Q=\alpha\, t^2 \tag{1}$$

여기서 Q는 열발생률[kW], t는 시간[sec], 그리고 α는 화재 성장률 계수로서 Table 1에 정리되어 있다.

3. 수학적 모델

보존 방정식들은 질량, 운동량, 에너지 그리고 농도 등에 대한 오일러리안 형태의 방정식이며 밀도변화에 대한 압축성 효과를 고려하였다. 난류 유동에 대해서는 부력항이 포함된 수정 k-ε 난류 모델을 이용하였다.[14]

3.1 복사 열전달 방정식의 해석

복사 에너지 전달에 있어서 복사 강도는 위치, 각도 등의 함수이고 복사 열 전달 방정식은 적분-미분 방정식 형태이므로 해석하는데에 상당한 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 복사 열 전달 방정식의 해석을 위하여 S-N 구분종좌표법(S-N Discrete Ordinates Method)을 채택하여 해석하였다.

3.2 S-N 근사식

복사강도는 복사에너지의 전달에 있어서 기본적인 에너지 단위로써 단위 시간당, 단위 면적당, 단위 파장길이당, 단위 각도당의 복사 에너지량을 나타내며, 복사 열 전달 방정식은 복사 강도를 종속변수로 하여 표시할 수 있다. S-N 구분종좌표법은 양의 방향과 음의 방향 각각의 각도 구역에 대한 복사강도 값이 해석되어야 하므로, 각각의 제어체적에서 짝수개의 방향(짝수개의 연립 방정식)이 고려되어야 한다. 따라서 S-N 구분종좌표법은 S_2, S_4, S_6 … 등으로 나타내게 되며, 하첨자는 S-N법의 차수로서, 이러한 차수에 의하여 구분종좌표의 수가 결정된다. 이 방법에서는 복사 강도의 각도에 대한 함수관계를 완화하기 위하여 복사 열 전달 방정식을 어떤 고정된 임의의 각도구역에 대하여 표시하고 있다. 따라서 복사강도의 각도에 대한 영향을 총괄적으로 고려하기 위하여는 전체 각도 영역을 유한수의 각도 구역으로 나누어 각각의 각도구역에서의 평균 복사강도 값을 구함으로써 가능하다.

본 연구에서는 3차원 S-4 구분종좌표(24개의 방향)법을 사용하였고, 가스는 회색체를 가정하였으며 흡수계수 a=1.0[m^{-1}], 산란계수 σ_s=0.0[m^{-1}] 그리고 반사율 ρ_w=0.0으로 고려하였다.

복사 열 전달 방정식을 x-y-z 공간좌표내에 위치한 반지름이 1인 구면을 M개의 각도 구역으로 나누어 고려할 때, 즉 m=1, 2, … M에 대하여 다음과 같은 S-N 근사식(M개의 연립 편미분 방정식)으로 나타낼 수 있다.

$$\left[\mu_m\frac{\partial}{\partial x}+\eta_m\frac{\partial}{\partial y}+\xi_m\frac{\partial}{\partial z}+\beta(x,y,z)\right] I_m(x,y,z,\mu_m,\eta_m,\xi_m) = S_m(x,y,z,\mu_m,\eta_m,\xi_m) \tag{2}$$

여기서, S_m은 흡수, 방출 및 비등방 산란하는 매체에 대한 복사강도 생성항이다. 총 각도구역의 수 M은 S-N 법의 차수 N과 3차원인 경우에는 M=N(N+2)인 관계가 있다. 그리고 복사 열전달 방정식에서 복사 강도의 생성항에 포함된 각도에 대한 적분은 Gaussian 적분법을 이용한다.

3.3 S-N 근사식의 이산화

3차원 x-y-z 좌표계에 대한 S-N 근사식 (2)를 미소 제어체적에 대해 이산화한 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_m(A_E I_{E,m}-A_W I_{W,m})+\eta_m(A_N I_{N,m}-A_S I_{S,m})+\xi_m(A_U I_{U,m}-A_D I_{D,m})+\beta_P I_{P,m}\Delta V = a_P I_{bP}\Delta V+\frac{\sigma_{sP}}{4\pi}\Delta V\sum_{m=1}^{M} w_{m'}\Phi_{m',m} I_{P,m'} \tag{3}$$

여기서, 제어 체적의 표면적들은 각각 $A_E=A_W=\Delta y\Delta z$, $A_N=A_S=\Delta x\Delta z$ 및 $A_U=A_D=\Delta x\Delta y$이며, 제어 체적은 $\Delta V=\Delta x\Delta x\Delta y$이다. 이러한 표면적들 및 체적에서의 복사 강도의 평균값들 $I_{E,m}$, $I_{W,m}$, $I_{N,m}$, $I_{S,m}$, $I_{U,m}$, $I_{D,m}$ 및 $I_{P,m}$의 위치는 Fig. 3과 같이 미소체적에 대하여 표시될 수 있다.

이와 같은 이산화 방정식 (3)을 3차원 공간에서 계산하기 위하여는 μ_m, η_m 및 ξ_m의 값이 음인지, 양 인지에 따라 8가지 계산 진행 방향이 있는데 이러한 계

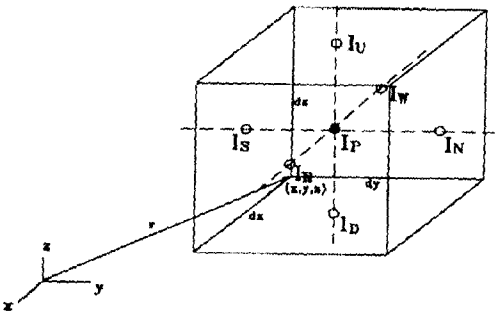


Fig. 3. Location of the average intensities and the differential control volume in the x-y-z coordinate system.

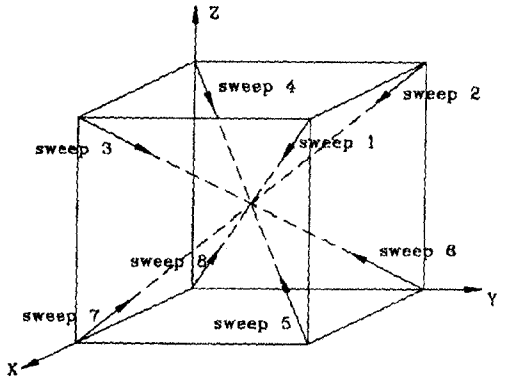


Fig. 4. Schematic diagram of the 8 sweep directions.

산 진행 방향은 Fig. 4에 표시된 바와 같다. 식 (3)에서 $I_{E,m}$, $I_{W,m}$, $I_{N,m}$, $I_{S,m}$, $I_{U,m}$, $I_{D,m}$ 및 $I_{P,m}$ 중에서 계산진행 방향에 따라 3개는 이미 알고 있는 값이므로, 미지수는 4개가 된다. 그런데 식은 하나뿐이므로 3개의 수식이 더 필요하다. 이러한 3개의 식은 $I_{P,m}$을 각 방향으로의 가중 선형 관계식들로 구해진다.

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 알고리즘[17]에 의해 처리되었다.

입구 경계조건은 입구에서 모든 종속변수들의 값들을 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 Coutte유동처럼 거동하며 전단력은 일정하다고 가정한다. 그리고 벽 근처에서는 국부적으로 난류 운동에너지의 생성과 소멸이 같다는 등방성이 지배적이라는 가정하에 벽 법칙을 적용하여 벽 근처에서의 확산계수들을 고려하였다.

연소생성물은 global single-step reaction으로 완전연소하여 H_2O와 CO_2의 가스상태로만 존재한다고 가정하였다. 따라서 가스상태에서는 입자가 포함되지 않기 때문에 복사의 산란영향을 무시하였으며 복사 에너지의 흡수 및 방출영향을 고려하기 위하여 흡수계수가 파장에 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.

$$I_w(x, y, z, \Omega) = \varepsilon_w T_w^4(x, y, z) + \frac{1-\varepsilon_w}{\pi}\int |\Omega' \cdot h| I_w(x, y, z, \Omega')d\Omega' \quad (4)$$

또한 화재 소스 입구부와 개구부는 가스의 온도에 해당하는 가상적인 흑체면으로 고려하였다.

수치해석의 수렴조건은 온도장에 대한 최대 허용상대오차는 복사강도에 대하여는 10^{-6}, 난류유동하에서의 임의의 종속변수값에 대하여는 10^{-3}으로 취하였다. 머신으로는 팬티엄III 600 PC를 사용하였으며 time step을 0.2초로 하였다.

4. Plume 이론 및 입구 조건

열 발생률에 대한 무차원 parameter는 다음과 같이 정의한다(Cox[18]).

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_{p\infty} T_\infty (gD)^{1/2} D^2} \quad (5)$$

여기서,

$\dot{Q}$ =열 발생률(heat release rate)[kW]

ρ_∞ =1.225 kg/m^3

T_∞ =228 K

$C_{p\infty}$ =1.0 kJ/kgK

g=9.813 m/s^2

D=풀화재의 특성길이

화염 높이는 화재 형상, 대기 조건, 연소 열 그리고 stoichiometric 비에 의존하며, 많은 연료의 경우에 사용할 수 있는 화염 높이 Z_f(m)는 열발생률 $\dot{Q}$와 풀의 특성길이 D에 의한 Q_D^* 값이 1보다 큰 경우와 작은 경우에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$Q_D^* < 1.0 \text{ 경우;} \quad Z_{fl} = 3.3 Q_D^{*2/3} D \tag{6}$$

$$Q_D^* > 1.0 \text{ 경우;} \quad Z_{fl} = 3.3 Q_D^{*2/5} D \tag{7}$$

풀화재 밑의 virtual flame 높이, ΔZ_f는 Heskestad[19]에 의해 다음식으로 정의된다.

$$\Delta Z_f = 1.02D - 0.083\dot{Q}^{2/5}$$

위에서 구해진 화염 높이에 따른 질량 유동률, $\dot{m}_z$ 은 다음 식에 의해서 구해진다(Heskestad[19]).

$$\dot{m}_z = 0.071\dot{Q}^{1/3}(Z + \Delta Z_f)^{5/3} [1 + 0.026\ \dot{Q}^{2/3}(Z + \Delta Z_f)^{-5/3}] \tag{8}$$

Plume의 평균 온도 T_{zf}(K)와 수직상승 속도 v는 열역학 1법칙을 적용하여 구할 수 있다. 즉 운동 에너지와 포텐셜 에너지의 변화를 무시함으로써 다음과 같은 plume 온도 방정식과 속도 방정식이 얻어진다.

$$T_{zf} = T_\infty + \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m}_z} \tag{9}$$

$$v = \frac{\dot{Q}}{A\rho_\infty C_{p\infty}\Delta T} \tag{10}$$

이상에서 얻어진 온도 T_{zf}와 속도 v를 수치해석을 위한 화재소스의 입력 조건으로 사용한다.

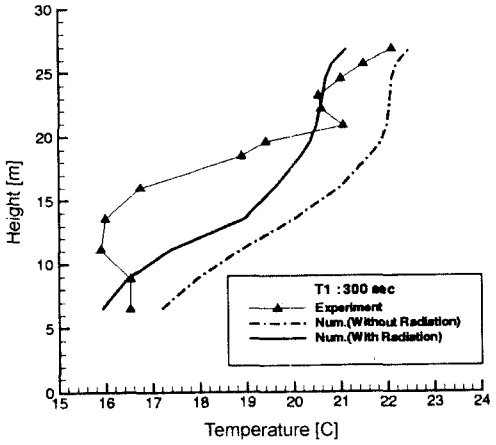
5. 수치해석 결과 및 고찰

예측된 연기의 온도 및 농도장으로부터 연기층 경계 높이는 연기(H_2O와 CO_2)의 농도가 수직 방향으로 1%(0.01)가 되는 곳으로 정하였다. 연기층 경계 높이보다 더 높은 영역은 상부의 더운 연기층으로 간주하였고 연기층의 경계 높이는 다음과 같은 식으로 구한다.

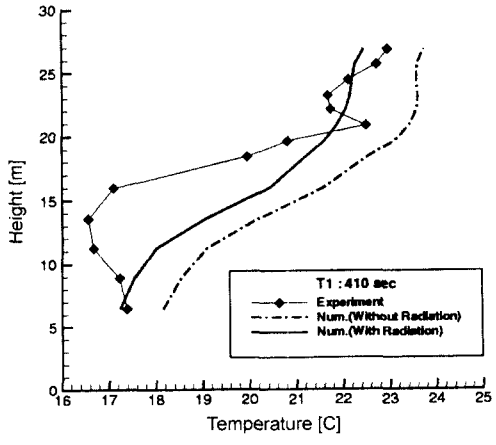
$$H_{cl} = \frac{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} \Delta V_i}{\text{Area of floor}} \tag{11}$$

본 연구에서는 아트리움 공간에서 2 m^2의 화원에 에탄올을 연소시켜 800 kW(연소효율 0.7을 고려할 경우 560 kW 상당)의 Ultra Fast 화재를 고려하였다. 실제 화재 안전에서 중요한 변수가 되는 상부의 더운 연기층의 높이, 수직 온도분포 그리고 연기의 천장속도 및 도달시간 등을 자체 개발한 SMEP code를 사용하여 복사를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우를 실험결과와 비교 분석하였다. 또한 3인용 소파(나무 프레임과 Polyolefin천 재질)를 태웠을 경우(3000 kW 상당, Ultra Fast Fire mode)와 Polyethene재질의 PET병이 채워진 나무상자(Pallet system)를 태웠을 경우(5000 kW 상당, Fast Fire mode)에 대하여 화재 경과 시간에 따른 연기의 거동 및 온도 분포를 예측하여 연기선단 속도 및 하강시간을 조사하였다.

Fig. 5~7는 560 kW(Ultra Fast mode)화재에서 각각 T1, T5 그리고 T11에서의 수직온도분포를 실험결과와 비교한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 연기의 복사를 고려했을 경우 실험치와 비슷한 경향으로 예측하고 있으며, 복사를 고려하지 않았을 경우는 실험치에 비해 약 2.5°C 상향 예측을 하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H_2O와 CO_2 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재현상을 이해하는데 있어서 복사에 대한 고려는

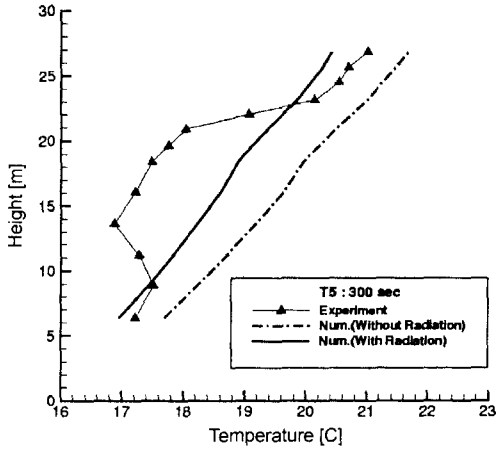


(a) T1 : 300sec

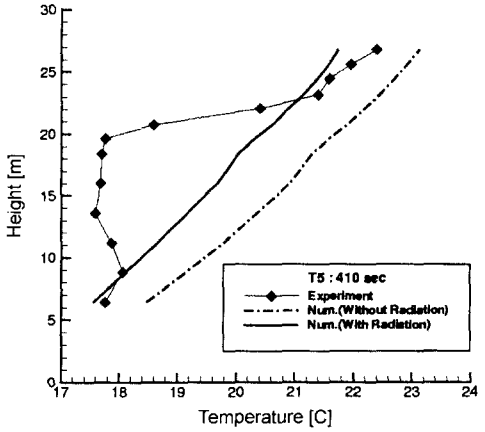


(b) T1 : 410sec

Fig. 5. Vertical temperature profiles at T1 (Ultra Fast Fire: 560 kW).

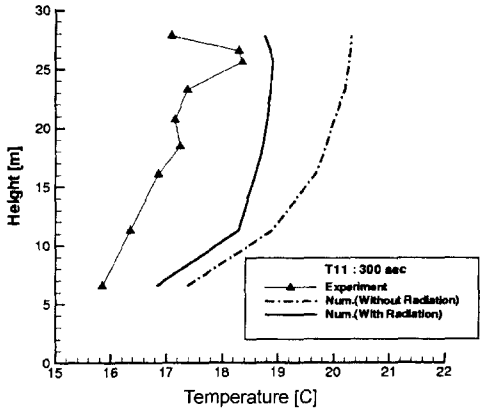


(a) T5 : 300sec

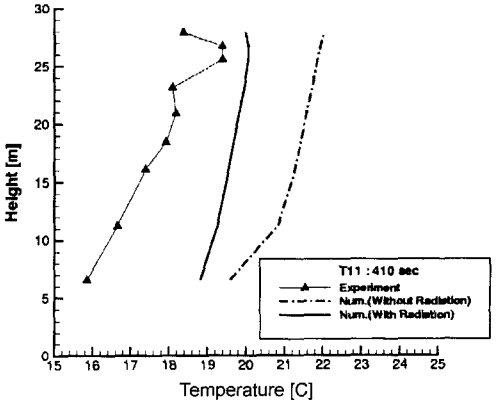


(b) T5 : 410sec

Fig. 6. Vertical temperature profiles at T5 (Ultra Fast Fire: 560 kW).



(a) T11 : 300sec



(b) T11 : 410sec

Fig. 7. Vertical temperature profiles at T11 (Ultra Fast Fire: 560 kW).

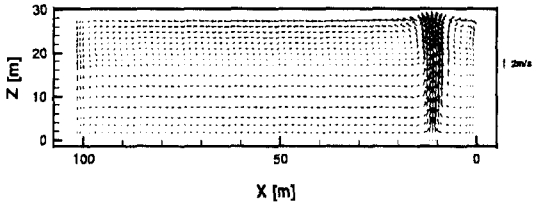


Fig. 8. Velocity vectors of Ultra Fast Fire (560 kW) at 450 sec.

필요하다. T11(Fig. 7)에서 수직온도분포 그래프는 T1과 T5에서의 그래프에 비해 급격한 경사도를 보이고 있는데 이것은 연층이 벽면에 도달하여 연기의 휘말림에 의한 연기의 급격한 하강에 의한 것이다. 그리고 T1과 T5에서 상부의 더운 연기층이하인 부분에서 선형적인 수치결과와 실제 실험치와 오차를 보이고 있는데 이것은 수치해석상에 단열조건 및 일정한 초기온도 설정 등에 따른 수치계산 문제인 것으로 생각되어진다.

Fig. 8은 560 kW(Ultra Fast mode)화재 발생 450초일 때 속도분포를 보여주고 있다. 화원 입구에서의 속도는 1 m/s이지만 높은 온도로 인한 주위 공기와의 밀도차에 의한 부력으로 인해 가속되어 상부로 올라갈수록 속도가 증가하여 약 4 m/s까지 이르게 된다. 천장 근처 plume 주위로 재순환 영역이 생기는 것을 볼 수 있으며 대부분의 화재 모델에서 볼 수 있는 것과 같이 plume의 아래쪽 부분에서 비교적 차가운 공기가 유입되고 있는 것을 볼 수 있다. 이렇게 수반된 공기에 의하여 plume의 총 유량은 증가하고 열 및 질량 전달로 인해 연기의 온도는 plume의 높이가 증가함에 따라 감소하게 된다.

Fig. 9와 10은 560 kW(Ultra Fast mode) 화재 발생

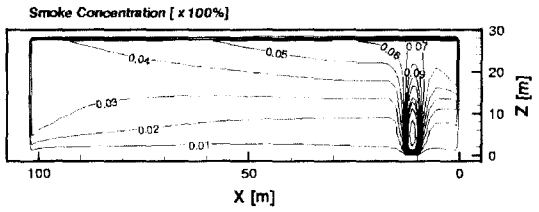


Fig. 9. Smoke contours of Ultra Fast Fire (560 kW) at 450 sec.

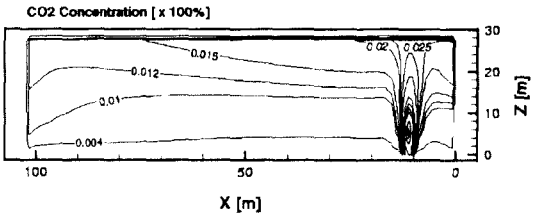


Fig. 10. CO_2 contours of Ultra Fast Fire (560 kW) at 450 sec.

450초일 때 연기 농도와 CO_2농도의 분포를 보여주고 있다. 여기서 연기의 농도는 연소생성물들(CO_2, H_2O, CO, H_2, O_2 그리고 N_2)의 몰비(mole fraction)로서 정의되며, 본 연구에서는 완전연소를 가정하고 연기의 농도로서 N_2를 제외한 CO_2와 H_2O의 농도를 구하였다. 연층의 상층부에서 연기의 농도가 약 5% 정도이고 CO_2의 농도는 약 1.5%임을 알 수 있고 전체적으로 선형적인 증가분포를 나타내고 있다. 또한 연기의 농도가 1% 이상 일 때를 연기의 경계로 가정할 경우 연층의 높이가 바닥에서 약 1 m 위치까지 내려와 있음을 확인할 수 있다.

뜨거운 plume 기체가 천장과 부딪칠 때 그 기체는 비교적 얇은 방사 제트(radial jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 퍼진다. 이 더운 천장 제트(hot ceiling jet)는 천장 표면으로의 마찰력에 의해 감쇠되고 밑으로부터 수반된 공기에 난류 운동량을 전달한다. 모든 이러한 유동과 열전달에 의하여 천장 제트는 계속 연

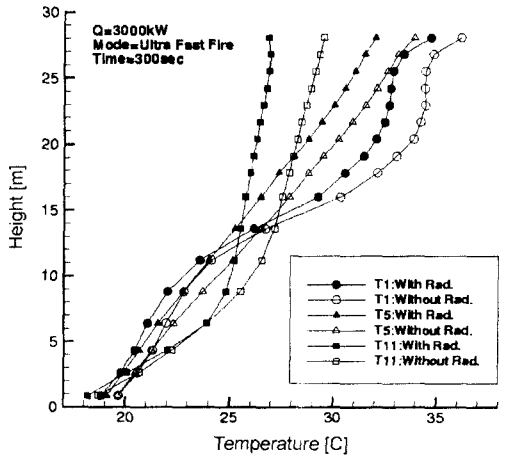


Fig. 11. Vertical temperature profiles of Ultra Fast fire (3000 kW) at 300 sec.

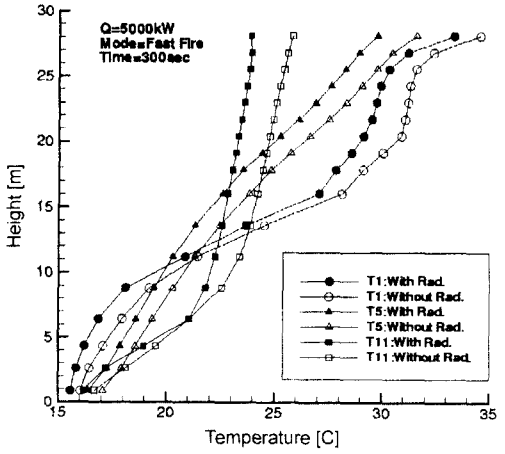


Fig. 12. Vertical temperature profiles of Fast fire (5000 kW) at 300 sec.

기의 온도와 속도를 감소시키게 된다. 또한 천장 제트는 천장 표면 밑에서 밖으로 계속 움직이며 결국 아트리움 공간의 벽과 부딪치게 되어 하향 벽 제트(downward wall jet)를 시작하게 된다. 하향 벽 제트는

Table 2. Smoke movement

발열량 (Ultra Fast)	반대쪽 벽까지 연기이동			피난수준 바닥 1.5m까지 연층하강		
	시간(복사)	시간(대류만)	속 도	시간(복사)	시간(대류만)	속 도
560 kW	215 sec 240 sec(실험)	205 sec	0.41 m/s 0.4 m/s(실험)	450 sec	435 sec	0.06 m/s
3000 kW	145 sec	140 sec	0.61 m/s	260 sec	250 sec	0.1 m/s
5000 kW	135 sec	130 sec	0.65 m/s	230 sec	220 sec	0.11 m/s

주위 공기보다 높은 온도와 낮은 밀도로 인한 부력과 벽 표면에서의 마찰력에 의해 감소하게 되어 결국 벽 제트(wall jet)의 하향 운동은 느려지게 된다.

Fig. 11과 12는 각각 3인용 소파(나무 프레임과 Polyolefin 천 재질)를 태웠을 경우(3000 kW 상당, Ultra Fast Fire mode)와 Polyethene재질의 PET병이 채워진 나무상자(Pallet system)를 태웠을 경우(5000 kW 상당, Fast Fire mode)에 대하여 T1, T5, T11위치에서 복사를 고려했을 경우와 복사를 고려하지 않았을 경우의 수직온도분포를 수치해석하여 비교한 그래프를 나타내고 있다. 화재의 모드가 다른 두 가지 경우이지만 대류만을 고려했을 경우가 복사를 고려했을 경우보다 약 2.5℃ 정도 높게 상향 예측하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 역시 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H_2O와 CO_2 가스의 복사 영향 때문이다.

Table 2는 화재 모드를 Ultra Fast Fire로 고정하고 발열량만을 증가시켰을 경우 반대쪽 벽면에 연기의 도달시간 및 연기의 선단 속도 그리고 피난 수준인 바닥 1.5 m까지 연층의 하강시간 및 하강 속도를 비교한 표를 나타내고 있다. 560 kW 화재의 경우 실험치에 비해 측면에 연기의 도달시간이 복사를 고려했을 경우 약 25초 빠르고 대류만을 고려했을 경우는 약 35초가 빠르게 나타났으며, 연기의 선단 평균속도는 0.41 m/s로 실제 실험에서 구한 0.4 m/s와 비슷한 결과를 얻었다. 연기의 선단 평균속도는 3000 kW 화재의 경우 0.61 m/s이고 5000 kW 화재의 경우 0.65 m/s를 나타내어 발열량이 증가할수록 연기의 선단 속도 역시 조금씩 증가함을 알 수 있었다. 피난수준인 바닥 1.5 m까지 연기의 하강시간은 560 kW 화재의 경우 450초이고 3000 kW, 5000 kW 화재의 경우 각각 260초와 230초이었으며 대류만을 고려했을 경우는 560 kW 화재의 경우 약 15초 그리고 3000 kW와 5000 kW 화재의 경우 약 10초 정도 빨리 하강함을 볼 수 있었다. 결과적으로 발열량이 증가함에 따라 연층의 하강시간이 빨라짐을 알 수 있었으며, 연층의 하강속도는 평균적으로 세 가지 경우 모두 약 0.1 m/s임을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

1. 아트리움 화재에서 화재 성상을 적절히 묘사할 수 있는 부력 plume 모델 및 DOM복사 모델을 적용하여 연기의 거동을 해석한 SMEP의 수치해석 결과가 실제 실험에 의한 값과 비교적 잘 일치하였다.

2. 아트리움 화재에서 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 H_2O와 CO_2 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재해석에 있어서 복사의 고려는 필요하다.

3. 연기 선단의 평균속도는 560 kW, 3000 kW, 5000 kW 화재의 경우 각각 0.41 m/s, 0.61 m/s, 0.65 m/s 정도로 예측되었고 연층의 하강 평균속도는 각각 0.06 m/s, 0.1 m/s, 0.11 m/s로 예측되었다. 결과적으로 발열량이 증가할수록 연층의 전파속도도 조금씩 증가함을 확인할 수 있었다.

4. 피난수준인 바닥 1.5 m까지 연층의 하강시간은 560 kW, 3000 kW, 5000 kW 화재의 경우 각각 450초, 260초, 230초로 예측되어 이 시간까지 피난시간이 확보됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-1-304-001-2)지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호 목록

a : 흡수 계수, [m^{-1}]
C_p : Plume 가스의 비열, [kJ/kgK]
D_f : 풀 화재의 특성길이(지름), [m]
g : 중력 가속도, [m/s^2]
H_{cl} : 연기층의 경계높이
I : 복사 강도, [$W/(m^2 \cdot sr)$]
$\dot{m}$: 유입량, [kg/s]
$\dot{Q}$: 화재의 열 발생률, [kW]
t : 시간, [sec]
T_{zf} : Plume의 평균온도, [K]
T_∞ : 대기 온도, [K]
w : 각도구역에 대한 가중치
Z_{fl} : 화염 높이, [m]
ΔZ_f : Plume의 virtual origin, [m]
x, y, z : x, y 및 z 좌표, [m]

Greek symbols

β : 복사 소멸계수, $=a+\sigma_s$ [m^{-1}]
$\varnothing$: 산란 위상 함수
μ, η, ξ : x, y, z방향의 방향여현
σ_s : 산란계수, [m^{-1}]

ρ : 밀도, [kg/m^3]
V : 제어셀에서 체적

Superscripts
' : 입사각

Subscript
b : 흑체
w : 벽면

참고문헌

1. Degenkolb, J.G., Fire safety for Atrium Type Buildings, Building Standards, Vol. 44, No. 2, pp. 16-18(1975).
2. Degenkolb, J.G., Atriums, Building Standards, Vol. 52, No. 1, pp.7-14(1983).
3. Kim, W.J., Yang, S.H. and Choi, K.R., The Experimental Study of Fire Properties in Atrium Space of High-rise Buildings, Journal of Korea Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 7, No. 2, pp.13-23(1993).
4. 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).
5. Quintiere, J.G., "A Perspective on Compartment Fire Growth", Combustion Science and Technology, Vol. 39, pp.11-54(1984).
6. Jones, W.W., "A multicompartment model for the spread of fire, smoke and toxic gases", Fire Safty J., Vol. 9, pp.55-79(1985).
7. 정진용, 유홍선, 김성찬, "PISO 알고리즘을 이용한 세 가지형태의 아트리움 공간에서 화재발생시 연기거동에 대한 수치해석적 연구", 한국화재 소방학회지, 제13권, 제1호, pp21-30(1999).
8. 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.
9. 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).
10. Cooper, L.Y., "Smoke movement in rooms of fire involvement and adjacent spaces", Fire Safety J., Vol. 7, pp.33-46(1984)
11. Fiveland, W.A., "Discrete-Ordinate Solutions of the Radiative Transfer Equation for Rectangular Enclosure", ASME J. of Heat Trasfer, Vol. 106, pp.669-706(1984).
12. 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).
13. 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).
14. 정진용, 유홍선, 김충익, "대형공간 화재에서 연기거동에 미치는 복사영향에 대한 수치해석적 연구", 2000 화재소방학회 춘계학술대회 논문집, pp43-49(2000).
15. KAKEGAWA Shuji et al. "An experimental study of the smoke movement in a full-scale atrium", 일본건축학회대회 학술강연경의집(東北)(1991. 9).
16. Klote, J.H., "Method of Predicting Smoke Movement in Atria With Application to Smoke Management", NISTIR 5516(1994).
17. Issa, R.I., "Solution of the Implict Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Spliting", J. of Computational Physics, Vol. 62, No. 1, pp.40-65 (1985).
18. Cox, G., "Combustion Fundamentals of Fire", ACADEMIC PRESS(1995).
19. Heskestad, G., Virtual origins of fire plumes. Fire Safety J., Vol. 5, pp.109-114(1983).