

PISO 알고리즘을 이용한 세 가지 형태의 아트리움 공간에서
화재 발생시 연기 거동에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Study of Smoke Movement for the Three Types
of Atrium Fires using PISO Algorithm

정진용^{*} 유홍선^{**} 김성찬^{*}
Jeong, Jin-Yong^{*} · Ryou, Hong-Sun^{**} · Kim, Sun-Chan^{*}

Abstract

In this paper, the smoke filling process for the three types of atrium spaces are simulated using the two types of deterministic fire model; zone models and field models. The zone models used are the FIRST, CFAST, and CCFM.VENTS models developed at the Building and Fire Research Laboratories, NIST, USA and the NBTC one-room model of FIRECALC developed at CSIRO, Australia. The field models used are the fire field model developed by W. K. Chow and a self-developed SMEP(Smoke Movement Estimating Program) based on computational fluid dynamics theories. The results predicted by the two approaches are very similar. The field model using SIMPLE algorithm or SIMPLER algorithm requires much more computing time compared with the use of SMEP using PISO algorithm.

Key words : Smoke movement, Atrium, Field model, Zone model, SMEP

국문 요약

본 연구는 세 가지 유형의 아트리움 공간에 대해서 Zone 모델과 Field 모델을 비교하였으며, Zone 모델로는 FIRST, CFAST, NIST에서 개발된 CCFM.VENTS 그리고 CSIRO에서 개발된 NBTC 1-room 모델을 사용하였고 Field 모델로는 Chow에 의해 개발된 화재모델과 본 연구에서 개발된 SMEP을 사용하였다. 두 모델들에 대한 비교는 서로 유사한 결과를 보였으며, 특히 PISO 알고리즘을 사용한 SMEP의 경우가 SIMPLE 알고리즘 또는 SIMPLER 알고리즘이 적용된 field 모델에 비해 더 빠른 계산시간을 보여 주었다.

* 중앙대학교 기계공학과 대학원

** 중앙대학교 기계공학과

1. 서론

최근에, atrium 건물은 혼한 건물의 형태로써 쇼핑센터, 아케이드, 스포츠 센터, 전시관 그리고 비행기 격납고 등이 있으며 이러한 atrium 공간을 갖는 대형 공간내에서 화재 발생시 연기는 위 공간내로의 상승에 따라 온도가 감소하기 때문에 천장 근처에서의 연기 온도가 스프링클러의 작동 온도에 도달하지 못하게 되어 피난대책에 결정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 atrium 공간에서의 연기의 확산, 연층의 형성 및 하강에 대한 해석은 건물의 화재안전설계를 위하여 반드시 평가되어야 하는 중요한 분야이다. 그러나 현재 건축산업에 있어서 화재안전설계에 대한 적절한 과학적 배경을 갖는 설계가이드가 거의 없는 실정이다.

불규칙한 모양을 갖는 atrium 건물의 경우, 연기 제어시스템을 설계하기가 어렵고 Full size 모델을 갖는 실험적인 연구는 경제적으로 너무 비효율적이다. 따라서 atrium 건물에서 연층의 형성 및 연기의 확산에 관련된 중요한 물리적 요소를 결정하는데 주로 화재 모델들을 사용한다.

Cubic 모양을 갖는 Type 1 atrium의 경우는 주로 쇼핑 센터에서 볼 수 있으며 차원적으로 $L \times L \times L$ (length x width x height)의 형태를 갖는다. Flat 형의 Type 2 atrium은 높이에 비해 가로가 긴 형태이며 주로 큰 복합 구조물의 백화점이나 할인 매장 등에서 볼 수 있으며 차원적으로는 $2L \times L \times L$ 을 갖는다. High 형의 Type 3 atrium은 가로(길이 또는 폭)에 대한 높이의 비가 2보다 큰 경우이며 주로 사무실 빌딩에서 볼 수 있는 형태이며 차원적으로 $L \times L \times 2L$ 을 갖는다.

atrium 형태의 화재를 시뮬레이션하기 위한 화재모델로는 일반적으로 zone 모델과 field

모델이 사용되어진다. 그러나 아직까지 atrium 공간이나 공장과 같은 대형 건물 화재에서의 연층 형성과정에 대한 모델 정립이 되어 있지 않다. Duong¹⁾은 plume 방정식을 적절히 선택함으로써 큰 atrium 공간 화재의 시뮬레이션에 zone 모델을 적용할 수 있음을 보였고, Tanaka 와 Yamana²⁾는 atrium 공간에서 연기 배출을 위한 통풍 시스템이 있을 경우와 없을 경우에 대해 zone 모델을 적용하여 full-scale 실험과 비교 연구하였다. 그러나 atrium 화재에 zone 모델을 사용하는데에는 적어도 두 가지 문제점이 있다. 첫번째 문제점은 화재가 작고 atrium 공간이 클 때 atrium의 위쪽에서 안정된 연기 경계층이 형성될 수 있는가의 문제이다. 두번째 문제는 커다란 atrium 공간에서의 plume 방정식은 작은 공간에서 plume 방정식과 다를 수 있기 때문에 방정식의 계수 선택에 주의를 해야한다. 다시 말해 plume 방정식의 선택은 큰 공간에서의 예상결과에 영향을 미칠 수 있다.

Zone 모델의 이러한 단점에 반해, CFD의 급속한 발전과 함께 화재 field 모델도 성공적으로 발전해 왔다. atrium 화재의 경우 더운 연기와 대기의 밀도차이에 의한 관성력은 점성력보다 상당히 크게 되어 난류 유동이 되며, 난류모델로는 주로 $k-\epsilon$ 난류 모델이 사용되어 왔다. 일반적으로, 큰 건물이나 atrium 화재의 경우 연료의 산화 연소 과정의 시뮬레이션 없이 열적 소스만을 취급하는 pre-development 상태의 화재로 처리하여 연기 거동과 연층 형성과정을 묘사하는 방법이 많이 사용되고 있다. Field 모델은 또한 국부적인 연기 유동장의 속도 벡터와 온도 분포를 예측할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 이러한 field 모델로써 같은 기하학적 모양의 atrium 화재에 대해 Chow³⁾는 SIMPLER 알고리즘을 사용하였고, 노재성⁴⁾은 SIMPLE

알고리즘을 적용하여 연기거동을 수치해석하였다. 그러나 이러한 SIMPLER 나 SIMPLE 알고리즘은 많은 계산시간을 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 반복 계산법이 아닌 PISO 알고리즘을 이용해 계산시간을 단축하여 연기거동을 해석하고자 한다. 그러므로 full-scale 실험의 제약성으로 인해 아트리움 화재에서 타당성이 검증된 네 가지 zone 모델과 field 모델을 비교 연구하였다. Zone 모델로는 FIRST, CFAST, NIST에서 개발된 CCFM.VENTS 그리고 CSIRO에서 개발된 NBTC 1-room 모델을 사용하였고 field 모델로는 Chow에 의해 개발된 화재모델과 중앙대학교 전산유체연구실에서 개발된 SMEP 코드를 사용하여 세 가지 유형의 아트리움 화재에 대하여 비교 분석하였다.

2. 세 가지 유형의 아트리움 화재

본 연구에서는 같은 체적(16,000m³)을 갖는 세 가지 형태의 아트리움 건물을 고려하였으며 기하학적 모양은 Table 1에 정리되어 있다. 화재소스는 바닥의 중앙면에 3m x 3m의 크기로 놓여 있고, 수직 개구부는 한쪽면에 폭 5m 그리고 높이 3m로 중앙면에 Fig.1과 같이 놓여 있다. 풀화재의 열발생률(heat release rate)은 fast mode로서 시간의 제곱승에 비례하는 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\dot{Q} = 47 t^2$$

Chow의 field model 결과와 비교를 위해서 열 발생률은 178.6초 이후에는 1.5MW로 일정하게 유지된다.

Table 1 기하학적 모양

	Length	Width	Height	격자수
Type1	25.2m	25.2m	25.2m	12500
Type2	40 m	20 m	20 m	11424
Type3	20 m	20 m	40 m	13728

3. 지배 방정식

지배 방정식들은 질량, 운동량, 에너지 등에 대한 오일러리안 형태의 방정식이며 밀도변화

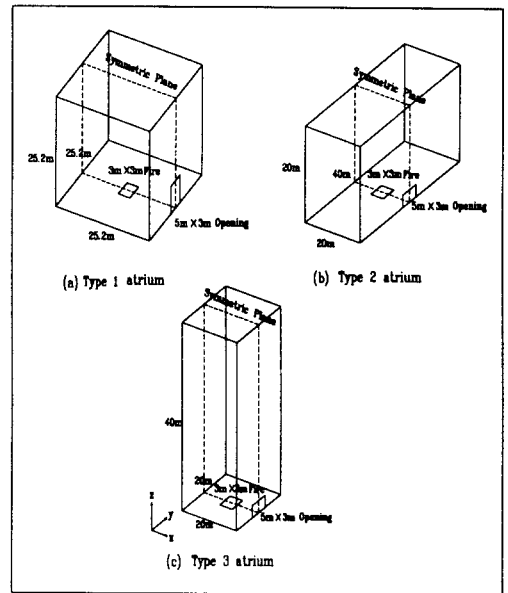


Fig. 1 아트리움의 기하학적 모양

에 대한 압축성 효과를 고려하였다. 난류 유동에 대해서는 수정 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였으며, 직교 좌표계를 이용하여 일반적인 종속 변수 ϕ 에 대한 지배방정식의 형태를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + S_\phi$$

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 2.1에서 정의 된다. 본 연구에서 사용된 난류모델은 압축성 효과를 고려하여 생성항으로 처리한 수정 $k-\epsilon$ 모델이며, 운동량방정식 및 난류방정식에 대한 생성항들은 Table 2.1 에 나타나고 있다. 여기에서 난류 운동에너지의 생성항 (G_k)과 부력항(G_B)은 다음과 같다.

$$G_k = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

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

여기서, μ_{eff} 는 유효 점성 계수를 나타내며 난류 모델 상수들은 Table 2.2 에 나타나 있다.

Table 2.1 확산 계수와 생성항

Φ	Γ_ϕ	S_ϕ
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_{eff} \nabla \cdot \vec{u}) \right]$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_{eff} \nabla \cdot \vec{u}) \right]$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_{eff} \nabla \cdot \vec{u}) \right] + g(\rho_\infty - \rho)$
h	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_h}$	\dot{Q}
k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k + G_B - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1 (G_k + G_B) - C_2 \rho \epsilon] + C_3 \rho \epsilon \nabla \cdot \vec{u}$

Table 2.2 $k-\epsilon$ 난류 모델의 계수

σ_k	σ_ϵ	C_μ	C_1	C_2	C_3	σ_h
1.0	1.22	0.09	1.44	1.92	-0.373	0.7

4. 수치해석 방법

각 보존 방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서는 편미분 형태의 방정식들을 유한 차분 형태로 나타내어 모든 계산 격자점에서 연립해를 구해야 한다. 본 논문에서는 직교 격자로 구성된 3차원 제어체적을 정의하고, 각 보존방정식을 이 제어체적 내에서 체적 적분으로 차별화 시키는 유한 체적법을 이용한다. 여기서 시간 영역에 대한 차별화는 오일러(Euler) 음함수(implicit) 방법을 이용하며, 공간 영역에 대해서는 하이브리드(hybrid) 방법을 이용한다. 음함수법에 의해 차별화된 시간 종속적인 운동 방정식들의 압력-속도 연결문제는 반복계산에 의존하지 않는 시간진행(time marching) 방법인 PISO 알고리즘⁵⁾에 의해 처리되었다. PISO 알고리즘의 기본 개념은 매 시간단계에서 1회의 예측과정(predictor step)과 2회의 보정과정(corrector step)을 통해 얻어진 해가 완전히 수렴된 상태는 아니지만 불완전 수렴에 의한 오차가 시간단계가 진행해 나가면서 발산하지 않고 수렴되어 가도록 함으로써 안정성을 가진 해를 얻을 수 있다는 데에 있다.

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 Couette유동처럼 거동하며 전

단력은 일정하다고 가정한다. 그리고 벽 근처에서는 국부적으로 난류 운동에너지의 생성과 소멸이 같다는 등방성이 지배적이라는 가정하에 벽 법칙을 적용하여 벽 근처에서의 확산계수들을 고려하였다.

5. Plume 이론

열 발생률에 대한 무차원 parameter는 다음과 같이 정의한다.(Cox⁶⁾)

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

여기서,

$$\left[\begin{array}{l} \dot{Q} : \text{열 발생률(heat release rate)[kW]} \\ \rho_\infty = 1.211 \text{ kg/m}^3 \\ T_\infty = 290 \text{ K} \\ C_{p\infty} = 1.0068 \text{ kJ/kgK} \\ g = 9.813 \text{ m/s}^2 \\ D : \text{폴화재의 특성길이} \end{array} \right.$$

열발생률 \dot{Q} 와 폴의 특성길이 D에 의한 Q_b^* 값이 1보다 큰 경우와 작은 경우에 따라 flame 높이, Z_{fl} 는 다음과 같이 구해진다.

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

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

폴화재 밑의 virtual flame 높이, ΔZ_f 는 Heskestad⁷⁾에 의해 다음식으로 정의된다.

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

위에서 구해진 flame의 높이에 따른 질량 유동률, \dot{m}_z 은 다음 식에 의해서 구해진다.(Heskestad⁸⁾)

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

Flame 높이, Z에서의 수직 상승속도, v 는 다음과 같다.(Chow⁶⁾, Nam⁷⁾)

$$v = C_v \left(\frac{g\dot{Q}}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{1/3} (Z + \Delta Z_f)^{-1/3} = 0.103 \left(\frac{\dot{Q}}{Z + \Delta Z_f} \right)^{1/3}$$

여기서,

$$\dot{Q} [\text{kW}], C_v = 3.4, C_p = 1015 \text{ J/kgK}, \rho_\infty = 1.211 \text{ kg/m}^3, T_\infty = 290 \text{ K}$$

Flame top에서의 온도, T_{zf} 는 열발생률 \dot{Q} 와 위에서 구해진 질량 플럭스, \dot{m}_z 에 의해 간단한 에너지 균형식으로부터 구해진다.

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

이상에서 얻어진 속도 v 와 T_{zf} 를 화재 소스의 입력 조건으로 사용한다.

6. 수치해석 결과

6.1 계산 시간

세 가지 유형의 아트륨에 대한 격자수는 Table 1과 같고, time-step은 0.25초로 하여 Pentium II 233 성능을 갖는 PC로 6분 이상을 시뮬레이션한 결과 약 7시간의 계산 시간이 소요되었다. 반면에 4개의 zone 모델들은 약 15분 정도의 계산시간이 소요되었으며 SIMPLER 알고리즘을 적용한 Chow³⁾의 field 모델은 격자수가 type 1은 17112, type 2는 7803 그리고 type 3은 20979로 하고 time-step을 1초로 했을 경우 VAX

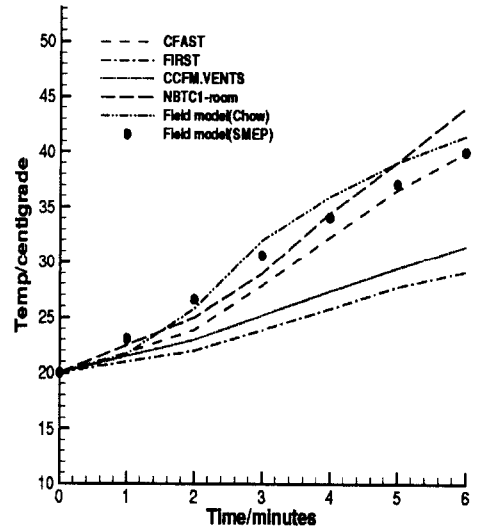
6420 super-minicomputer를 사용하여 약 800시간 이상의 계산시간이 소요되었다. 또한 SIMPLE 알고리즘을 사용한 노재성⁴⁾의 field 모델은 격자수가 type 1은 44800, type 2는 31050 그리고 type 3는 44000 으로 하고 time-step을 1초로 하였을 경우 pentium pro 200을 사용하여 약 40시간의 계산 시간이 소요되었다.

6.2 결과 및 고찰

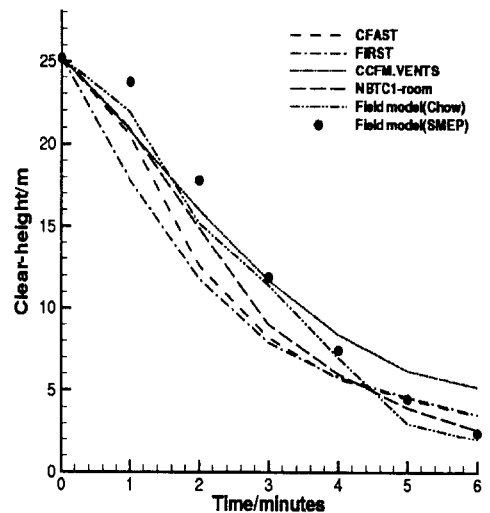
Fig. 3에서 Fig. 5는 FIRST, CFAST, CCFM.VENTS 그리고 NBTC 1-room 등의 zone 모델과 Chow의 field 모델 및 SMEP의 결과로서 연기 경계층의 평균온도와 높이를 나타내고 있다.

Cubic 모양의 Type 1 atrium(Fig.3)에서, zone 모델들의 경우 연층의 평균온도가 많은 차이를 보이고 있다. 예를 들어 FIRST 모델과 NBTC 1-room 모델은 약 10℃의 온도 차이를 나타내고 있다. 반면에 두 field 모델은 CFAST zone 모델과 비슷한 경향을 보이고 있다. 연기 경계층 높이는 네 개의 zone 모델과 Chow의 field 모델에 비해 초기에 SMEP이 약간 높게 예측하고 있으나 전체적으로 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4의 type 2 atrium의 경우 연층의 평균온도를 보면 CFAST model, NBTC 1-room model, Chow의 field model 그리고 SMEP이 한 그룹을 형성하고 있고 그 밑에 FIRST 와 CCFM.VENTS model이 다른 그룹을 형성하고 있다. 이 두 그룹간의 온도 차이는 약 10℃를 나타내고 있다. 연기 경계층의 높이에서는 Chow의 field 모델을 제외하고 네 개의 zone 모델과 SMEP model이 서로 비슷한 경향을 보여주고 있다.

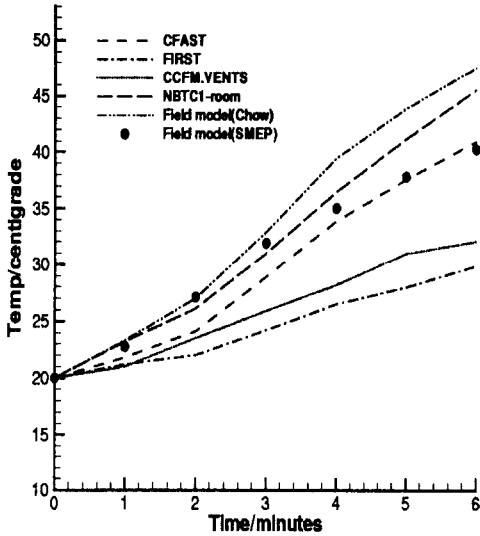


(a) 연기 경계층의 평균 온도

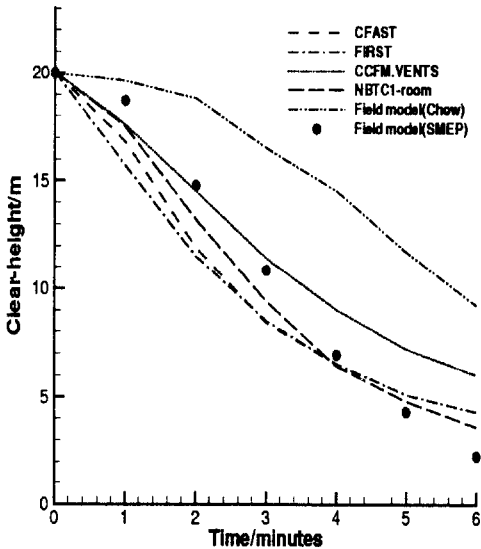


(b) 연기 경계층의 높이

Fig. 3 Type 1 atrium



(a) 연기 경계층의 평균 온도



(b) 연기 경계층의 높이

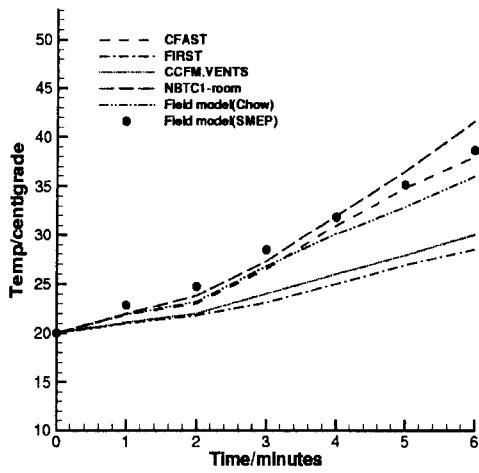
Fig. 4 Type 2 atrium

Type 3 atrium에서 연층의 평균온도는 CFAST, NBTC 1-room 그리고 Chow와 SMEP의 두 field 모델이 한 그룹을 형성하고 있고 FIRST와 CCFM.VENTS model이 또 한 그룹을 형성하고 있으며, 두 그룹간의 온도차는 약 8℃이다. 연기 경계층의 높이는 Chow와 SMEP field 모델이 초기에 네 개의 zone 모델에 비해 약간 높은 예측을 나타내고 있다.

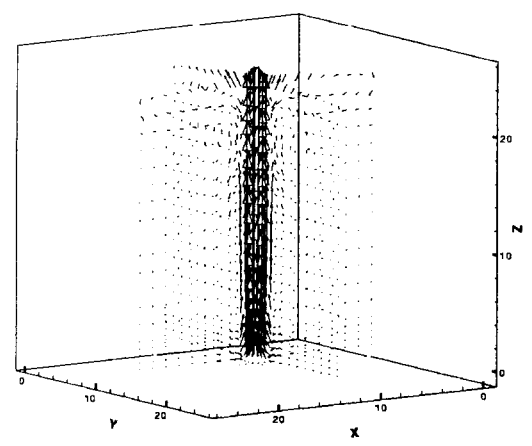
Fig. 6에서 Fig. 8은 SMEP field 모델을 사용하였을 때 세 가지 유형의 atrium 공간내에서 화재 경과 시간이 360s 일 때의 속도 벡터와 온도 분포를 나타내고 있다.

그림에서 볼 수 있는 것과 같이 연기 거동의 물리적 현상은 세 가지 형태의 atrium이 비슷한 결과를 나타내고 있다. 이 세 가지 유형의 atrium에 대한 속도벡터들을 보게되면 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 Fig. 6에서 Fig. 8의 온도분포에 나타난 것과 같이 연기의 평균 온도는 plume의 높이가 증가함에 따라 감소하게 된다.

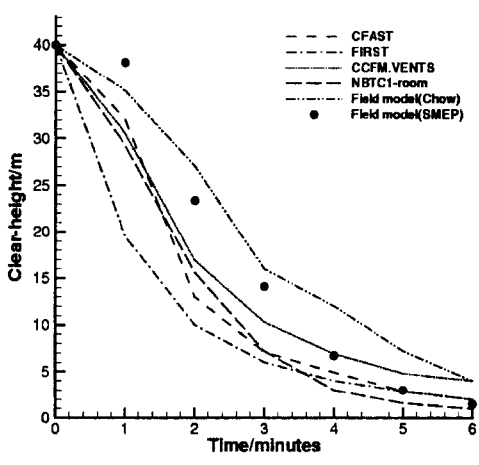
뜨거운 plume 기체가 천장과 부딪칠 때 그 기체는 비교적 얇은 방사 제트(radial jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 퍼진다. 이 더운 천장 제트(hot ceiling jet)는 천장 표면으로의 마찰력에 의해 감쇠되고 밑으로부터 수반된 공기에 난류 운동량을 전달한다. 모든 이러한 유동과 열전달에 의하여 천장 제트는 계속 연기의 온도와 속도가 감소하게 된다.



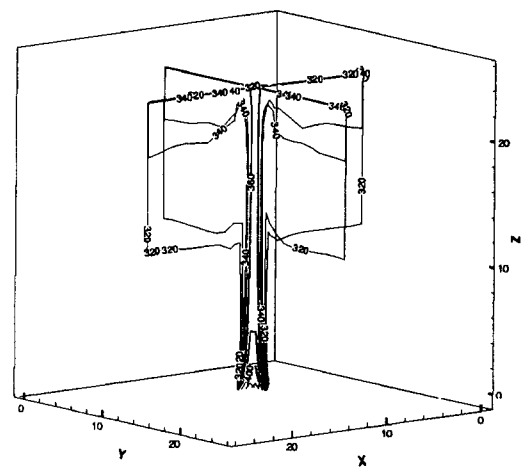
(a) 연기 경계층의 평균 온도



(a) 속도 벡터



(b) 연기 경계층의 높이

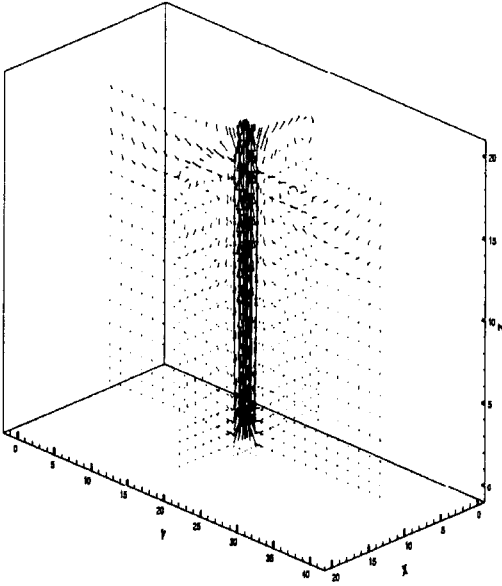


(b) 온도 분포

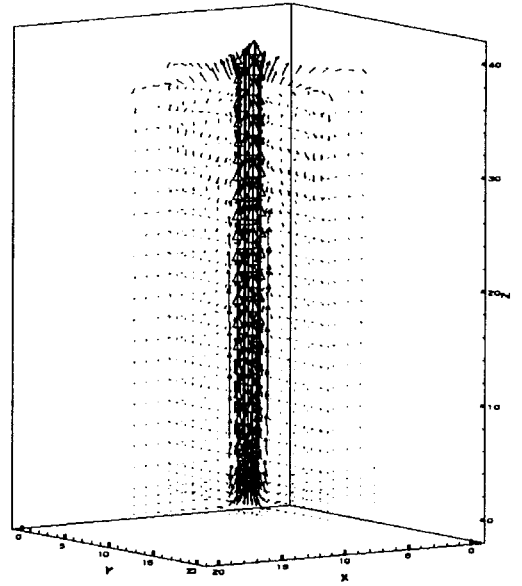
Fig. 5 Type 3 아트리움

Fig. 6 Type 1의 CFD 결과

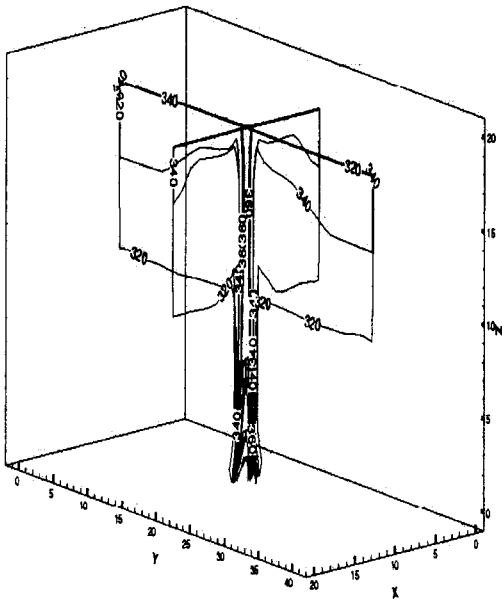
또한 천장 제트는 천장 표면 밑에서 밖으로 계속 움직이며 결국 아트리움 공간의 벽과 부딪치게 되어 하향 벽 제트(downward wall jet)를 시작하게 된다. 하향 벽 제트는 주위 공기보다 높은 온도와 낮은 밀도로 인한 부력과 벽 표면에서의 마찰력에 의해 감소하게 되어 결국 벽 제트(wall jet)의 하향 운동은 멈추게 된다.



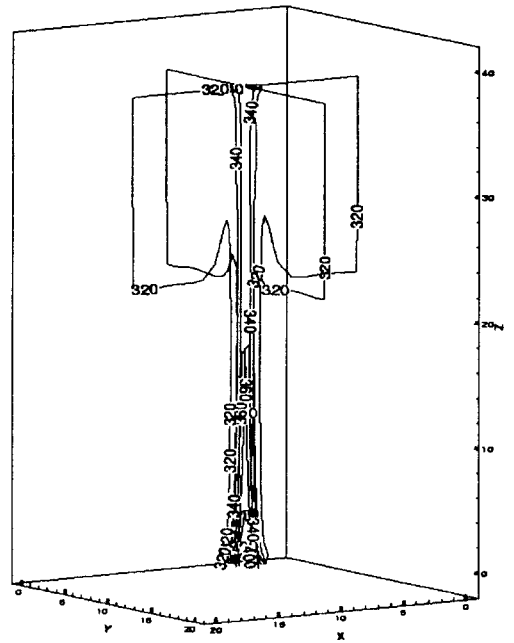
(a) 속도 벡터



(a) 속도 벡터



(b) 온도 분포



(b) 온도 분포

Fig. 7 Type 2의 CFD 결과

Fig. 8 Type 3의 CFD 결과

7. 결론

Zone 모델들은 연기 경계층의 평균 온도와 높이를 보여주고 있지만, 연층이 안정하고 균일하다는 가정을 수반한다. 반면에 field 모델은 위의 가정 없이 아트리움 공간에서의 유동장과 온도장을 예측하고 있으며, 또한 공간내에서의 수직 온도 분포 결과를 보여 줄 수 있다. 본 연구에서 수치해석 결과 zone 모델과 field 모델이 연층의 평균 온도와 높이를 비슷한 경향으로 예측하고 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 커다란 아트리움 화재의 경우 두 모델들의 적용은 타당하다고 볼 수 있다.

아트리움 화재에서의 연기층의 두께와 평균 온도를 빨리 얻고싶을 경우는 네 개의 zone 모델들 중 하나를 사용할 수 있다. 그러나 아트리움 공간내에서 스프링클러의 작동에 관련된 수직 온도 분포나 통풍 시스템 설치를 위한 유동 현상을 확인하기 위해서는 field 모델을 적용하여 자세한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 SIMPLER 알고리즘을 사용한 Chow³⁾의 field 모델과 SIMPLE 알고리즘을 적용한 노재성⁴⁾의 field 모델에 비교하여 좀더 빠른 계산 시간을 나타내고 있는 PISO 알고리즘을 적용한 SMEP model을 사용하여 아트리움 화재에서의 연기 거동과 온도분포 결과를 얻음으로써, 화재 안전설계 자료의 제공과 함께 아트리움 건물의 방화계획 방향 설정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) Duong, D. Q., "The Accuracy of Computer Fire Models: Some Comparison with Experimental Data form Australia", *Fire Safety Journal*, Vol.16, pp.415-413, (1990).
- 2) Tanaka, T. and Yamana, T., "Smoke Control in Large Scale Spaces-Part 1", *Fire Sci. and Technol.*, 5(1), pp.31-40, (1985).
- 3) Chow, W. K., "A Comparison of the Use of Fire Zone and Field Models for Simulating Atrium Smoke-filling Process", *Fire Safty Journal*, Vol.25, pp.337-353, (1995).
- 4) 노재성, "아트리움 공간에 있어서 화재 발생시 연기 거동에 대한 수치해석적 연구", 중앙대학교 석사학위 논문, (1997).
- 5) Issa, R. I., "Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting", *Journal of Comp. Phys.*, Vol.62, No.1, (1986).
- 6) Cox, G., "Combustion Fundamentals of Fire", ACADEMIC PRESS, (1995)
- 7) Heskestad, G., Virtual origins of fire plumes. *Fire Safety J.*, Vol.5, pp.109-114, (1983).
- 8) Chow, W. K., "On the Use of Time Constants for Specifying the Smoke Filling Process in Atrium Halls", *Fire Safety J.*, Vol.28, pp.165-177, (1997).
- 9) Nam, S. & Bill, R. G., Jr, "Numerical Simulation of Thermal Plume", *Fire Safety J.*, Vol.21, pp.231-256, (1993).