

아트리움 공간에 있어서 연기 유동에 관한 수치해석적 연구

A Numerical Study of Smoke Movement In Atrium Space

노 유 정 김 윤 김 김
재 흥 연 총 명 진 명
성 선 태 익 오 곤 배^{*}
^{*} ^{**} ^{***} ^{****}

.....

Abstract

The smoke filling process for the atrium space containing a fire source is simulated using two types of deterministic fire model : Zone model and Field model. The zone model used is the CFAST(version 1.6) model developed at the Building and Fire Research Laboratories, NIST in the USA. The field model is a self-developed fire field model based on Computational Fluid Dynamics(CFD) theories. This article is focused on finding out the smoke movement and temperature distribution in atrium space which is cubic in shape.

For solving the linked set of velocity and pressure equation, the PISO algorithm, which strengthened the velocity-pressure coupling, was used. Since PISO algorithm is a time-marching procedure, computing time is very fast. A computational procedure for predicting velocity and temperature distribution in fire-induced flow is based on the solution, in finite volume method and non-staggered grid system, of 3-dimensional equations for the conservation of mass, momentum, energy, species and so forth.

The fire model i. e Zone model and Field model predicted similar results for clear heights and the smoke layer temperature.

Key Words : Atrium, Zone model, Field model, PISO algorithm, Non-staggered Grid

.....

* 중앙대학교 기계공학과
** 서울시립대학교 건축공학과, 학술이사
*** 항공대학교 기계설계학과, 학술이사
**** 한국기계연구원 산업설비 연구부

국문 요약

아트리움 공간에서 화재 발생시 연기 유입 과정에 대하여 두 가지 형태의 화재 모델인 zone 모델과 field 모델을 이용하여 시뮬레이션 했다. 사용된 zone model은 NIST에서 개발된 CFAST(version 1.6) 모델이며 Field 모델은 전산유체역학 이론을 바탕으로 자체 개발된 화재 모델이다. 본 연구는 정육면체 모양의 아트리움 공간에서 연기 유동과 온도 분포에 대하여 해석하고자 한다.

속도와 압력의 coupling 문제를 해결하기 위하여 time-marching procedure이기 때문에 계산 시간이 매우 빠른 PISO 알고리즘을 사용했다. 화재로 인해 야기된 유동에 대하여 속도장과 온도장을 예측하기 위한 계산 과정은 유한체적법 및 비엇갈림격자계를 이용하여 질량, 운동량, 에너지 및 성분 보존 방정식 등에 대한 3차원 비정상상태 지배방정식을 사용했다.

수치해석 결과 zone 모델과 field 모델의 화재 모델에 의해 예측된 연기 층 평균 경계 높이와 상부 더운 연기 층의 평균 온도에 대하여 거의 유사한 결과를 얻었다.

1. INTRODUCTION

오늘날 과학의 발달과 의술의 발달로 인한 인구 증가로 인하여 건축의 대형화와 고층화가 심화되고 있으며, 이와 동시에 아트리움이 있는 건축물 계획 및 건설이 성행되고 있다. 이러한 대형화, 고층화가 진행되는 건축물에 대한 화재 위험성은 종래의 건축과 비교할 때 더욱 더 커지고 있다. 특히 연소 과정에 의해 생겨난 연기는 매우 심한 독성으로 인하여 질식되기도 하여 인명피해를 가져오기도 한다. 그러므로 화재 안전은 건축가나 공학자들이 반드시 신중히 고려되어야 할 사항이지만 현재 건축 산업에서는 과학적 근거에 의거해 건축물을 설계하는 가이드가 거의 없는 실정이다. 특히 아트리움 공간은 분명히 일반 건축 공간과는 다른 특징을 지니고 있기 때문에 화재가 발생하였을 때 공간 특성에 따른 연기 유동을 파악하는 것은 매우 중요하다. 예를 들면, 화재 발생시 연기가 외부로 빠지지 않고 내부로 확산될 수 있으며 수평 방향으로의 화염의 확대보다는 수직 방향으로의 화염의 확대가 크고 아트리움은 천정이 높아 통상적인 스프링클러나 자동 화재 감지 설비로는 그 기능을 충분히 발휘하지 못한다. 이렇게 일반적인 건축 공간과는 다른 특징을 갖기 때문에 아트리움 공간에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다^{1~3)}. 더군다나 화재로 인한 연기 유동은 열 및

질량 전달, 화학반응이 포함된 매우 복잡한 메카니즘과 굴뚝 효과와 풍압 같은 다양한 외부 조건에 의해 변화하기 때문에 실제 크기로 실험 연구를 한다는 것은 경제적이거나 시간적으로 어려운 현실이다. 이러한 점을 고려해 볼 때 연기 거동을 해석하기 위하여 실험 연구의 대용으로 수치해석법이 사용되고 있다. 연기 유동 해석 모델에는 두 가지 종류 Zone Model⁴⁾과 Field Model⁵⁾이 있다. Zone model에서는 화재실을 두 개의 상부 더운 연기 층과 하부 차가운 공기 층으로 나누어 그 지역 내에서는 기체의 성질이 균일하다고 가정하여 여러 가지 방정식을 상미분 방정식으로 풀기 때문에 계산 시간이 매우 빠르지만 근부적인 지역에서의 자세한 정보는 얻을 수가 없다는 단점을 지니고 있다. 반면에 Field Model은 여러 보존 방정식을 수치해석적인 방법으로 컴퓨터를 이용하여 근사적으로 해를 얻게 됨으로써 모든 부분에서의 속도, 온도, 연기 농도 등의 자세한 정보를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 많은 zone model들이 사무실이나 화재실에서의 화재 성상을 잘 기술하고 있고 많은 연구에서 검증이 되어 왔다^{6~8)}. 그러나, 아트리움 공간 같은 큰 공간 구조의 건축물에 대해서 Chow가 zone model을 사용하여 세 가지 형태의 아트리움에 대하여 수치해석을 하였지만²⁾ zone model을 사용할 때는 반드시 고려해야 할 사항이 있다. 첫 번째로, 아트리움 공간이 매우 큰 반면 화재의 크기가 크지 않을 경우, 높은 아트

리움 공간의 상부 영역에서도 안정한 연기 층이 형성될 수 있는가 하는 문제이다. Zone model에서는 상부의 더운 연기층과 하부의 차가운 공기층으로 명확히 구분을 지어 각 층에서의 기체 특성이 모두 균일하다고 가정하기 때문이다. 두 번째로는 작은 화재실과는 달리 큰 atrium 공간에서는 적절한 plume 방정식이 선택되어야 한다. 즉, atrium의 구조 특성에 알맞은 수반 계수가 선택되어야 하겠다. 이와 같이 큰 공간 구조에 대해서 zone model은 그 적용 범위가 제한성을 갖게 된다. 그러나, 전산 유체역학(CFD)의 빠른 발달로 인하여 화재 field model이 훌륭하게 발달되어 이와 관련된 연구가 이루어지고 있다^{9~11)}. Chow는 세 가지 형태의 atrium 공간에 대하여 field model과 zone model과의 비교를 통하여 zone model도 atrium 공간에 대해 사용할 수 있다는 것을 보여주었다³⁾. 그러나, 이 논문에서는 비정상상태 유동장임에도 불구하고 압력장을 풀기 위하여 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 많은 계산 시간이 필요하게 되어 field model의 단점을 드러내게 되었고 연기의 농도에 대한 방정식을 풀지 않아 연기 유동을 공기의 유동으로 가정하여 수치 해석을 하였다. 그러나 공기와 연기의 특성은 차이가 있으므로 실제 연기 유동을 적절하게 기술하였다고 볼 수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 비정상상태 유동장의 압력장을 해석하기 위하여 계산 시간이 빠른 PISO 알고리즘을 사용하였고 성분 방정식을 풀어 연기의 유동을 해석하였다.

따라서 본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있는 atrium 공간에서의 연기 유입 과정에 대하여 수치 해석을 하여 화재 경과 시간에 따른 연기의 유동을 예측하고 zone model 및 다른 field model과 비교함으로써 일반 건축물과 다른 성질을 갖는 atrium 공간에 대하여 화재 발생시 방재 전문가나 건축 설계자들에게 보다 현실적으로 유용한 연기 제어 설비의 기본 자료를 제공하려 한다.

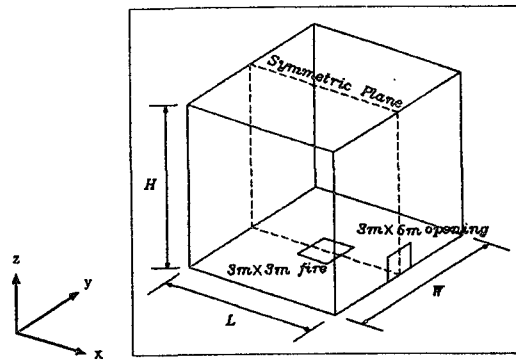
2. FIRE FIELD MODEL

2.1 해석 모델

atrium의 형태와 크기는 Fig. 1에 나타나 있다. 폭이 5m이고 높이가 3m인 vertical opening이 있고 가운데에 3m×3m인 영역에서 화재가 일어나고 있다고 가정한다. 연기 층 경계 높이와 상부의 더운 연기 층의 온도는 atrium 화재를 해석하는데 사용되는 중요한 parameter가 되므로 이러한 두 가지 값에 초점을 맞추어 수치해석 결과를 분석하고자 한다. 열유속 Q (in W)은 Fig. 2와 같이 시간(s)의 제곱에 비례($Q=47t^2$)한다고 가정하며 178.6초 후에는 1.5MW으로 일정하게 유지된다.

2.2 지배 방정식

Fig. 1에 도시된 모델에 대한 지배방정식은 3차



$C=25.2m, W=25.2m, H=25.2m$

Fig. 1. Configuration for the atria.

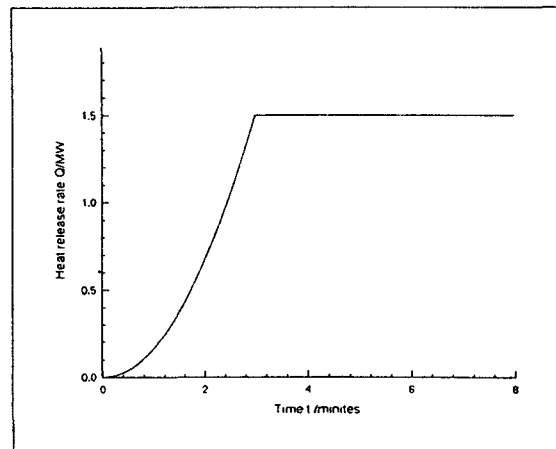


Fig. 2. heat release rate used for the fire simulation.

원 비정상상태의 화재로 인해 야기된 유동영역에 대한 것으로서 다음과 같다.

• 연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

여기서 아래첨자 1, 2, 3은 직교좌표계에서 x, y, z 방향을 의미한다.

• 운동량 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

• 일반적인 유체 수송 스칼라 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \end{aligned} \quad (3)$$

• 상태방정식 :

$$P = \rho RT \quad (4)$$

여기서, 변수 ϕ 는 속도 성분, 온도, 연기 농도 같은 변수를 의미한다. Γ_ϕ 는 변수 ϕ 의 확산계수이고 S_ϕ 는 생성항이다.

3. 수치해석

3.1 격자계

Figure 3은 본 해석에 사용될 3차원 격자의 구조를 나타낸 그림이다. Fig. 3의 격자는 fire source 주위 및 벽 근처에서는 변수들의 변화율이 크기 때문에 보다 정확히 해석하기 위해 조밀한 상태를 유지하며 변수들의 변화율이 적은 부분에서는 조대해지는 불균일 격자를 사용하였다. 아트리움이 가운데 평면에 대해서 대칭이므로 공간의 반만을 계산 영역으로 하였다.

3.2 이산화 방정식

비정상상태 3차원 유체유동의 지배 방정식들

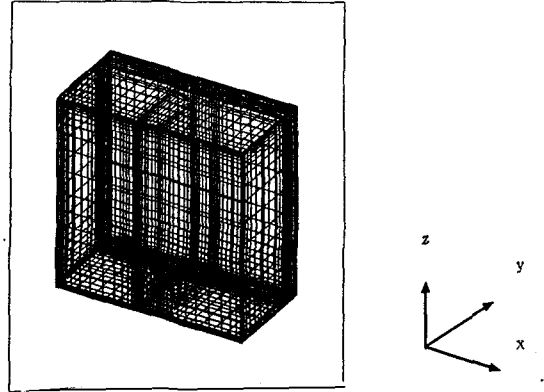


Fig. 3. The grid system for atrium.

즉 식(1)-(4)는 다음의 일반 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho u \phi) \\ = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \end{aligned} \quad (5)$$

앞에서 유도한 지배 방정식들은 비선형 편미분 방정식들로서 해석적 방법으로 해를 구하기는 어려우며 따라서 제어 체적에 대해 적분함으로써 대수적인 형태로 이산화하여 수치해석적인 방법으로 해를 구한다. 식(5)는 다음과 같은 형태로 이산화할 수 있다¹²⁾.

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (6)$$

$$\text{여기서, } a_p = \sum a_{nb} + \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} - S_p$$

$$b = S_c + \rho_p \phi_p \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (7)$$

여기서 아래첨자 nb는 주위노드를 의미한다. 일반적으로 수치적 안정성을 위해 대류항에는 상류 차분 도식이 사용되었고 생성항을 선형화 형태($S_c + S_p \phi_p$)로 나타내었다. 최종적인 이산화 방정식의 해를 구하기 위한 solver로는 Stone's Implicit Procedure(SIP)을 사용하였다.

3.3 압력장 계산

속도와 압력의 coupling 문제를 해결하기 위하여 PISO 알고리즘을 이용한다¹³⁾. 이 PISO 알

고리즘은 한번의 예측 단계와 두 번의 보정 단계를 거치게 되는데 비반복 방법을 사용하기 때문에 계산 시간이 매우 빠르다. 특히 비정상상태 문제를 해결하기 위하여는 PISO 알고리즘 매우 적절하다. 이 PISO 알고리즘에 의한 해석 과정을 대략적으로 정리하면 다음과 같다.

- (1) 격자를 생성한다.
- (2) 여러 변수들을 읽어들이고 그 변수들을 초기화한다.
- (3) 예측된 압력을 이용하여 운동량 방정식을 푼다.
- (4) 위의 과정에서 얻어진 속도성분을 이용하여 압력 보정 방정식을 푼다.
- (5) 보정된 압력장을 이용하여 속도장을 보정한다.
- (6) 보정된 속도장을 이용하여 두 번째 압력장을 보정한다.
- (7) 두 번째 보정된 압력장을 이용하여 다시 속도장을 보정한다.
- (8) 위의 속도장을 이용하여 스칼라 성분들이 다시 보정된다.
- (9) 다음 시간 단계로 진행되다.
- (10) 위의 단계(3)부터 (8)을 반복한다.

3.4 경계조건 및 초기 조건

초기 온도와 압력은 293K과 101325Pa으로 가정한다. Fire plume 부분에서는 더 큰 초기 속도가 기대되므로 본 시뮬레이션에서는 fire plume부분에서 속도는 1m/s로 주었다. 또한, Vertical opening이 포함된 벽을 제외하고는 모든 벽이 단열 조건을 적용하였고 아트리움 공간이 가운데 평면에 대해서 대칭이므로 중앙 평면에서 대해서는 대칭 조건을 적용하였다.

4. 결 과

예측된 유동장과 온도 및 연기 농도장으로부터 연기 층 경계 높이는 연기의 농도가 수직 방향으로 0.01이 되는 곳으로 정하였다. 연기 층 경계 높이보다 더 높은 영역은 상부의 더운 연기 층으로 간주하였고 연기 층의 평균 경계 높

이는 다음과 같은 식으로 구한다

$$h_{av} = \frac{\sum \Delta T_i(\text{cells in the smoke layer})}{(\text{Area of floor})} \quad (8)$$

또한, 상부 더운 연기 층의 평균 온도는 다음과 같은 식으로 구한다.

$$T_{av} = \frac{\sum T_i \Delta V_i(\text{cells in the smoke layer})}{\sum \Delta V_i(\text{cells in the smoke layer})} \quad (9)$$

여기서 ΔT_i 은 셀의 부피이고 T_i 은 셀의 온도이다.

상부 더운 연기 층의 평균 온도와 평균 연기 층 경계 높이가 시간에 따라 발달하는 과정이 Fig. 4와 Fig. 5에서 Chow's Field Model과 CFAST(version 1.6) 그리고 본 field Model에 대하여 나타나있다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 두 개의 field model과 zone model인 CFAST(version 1.6)와의 5분 후의 온도 차이는 약 5도 정도 차이가 있는 것을 알 수 있고 두 field model의 온도차이는 약 1도 정도로 거의 근사한 값을 나타내고 있다. 세 가지 모델에서 얻어진 결과는 거의 근사하다. 또한, CFAST(version 1.6)에 의해 예측된 연기층 경계높이는 60초 후에 21.2m가 되고 0.067m/s의 속도로 내려오는 것을 알 수 있고 Chow의 field model과 본 시뮬레이션에서의 연기층 경계 높이는 60초 후에는 각각 22m와 18.8m로 0.0533m/s와 0.1067m/s의 속도로 내려오는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 화재 경과 시간에 따른 아트리움 공간내에서의 벡터 선도를 나타낸 것으로서 시간에 지날수록 재순환영역은 점점 커지며 두 개의 큰 반대 방향으로 회전하는 eddy가 생기게 되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 7에서는 시간에 따른 온도장을 나타낸 그림인데 연기의 평균 온도는 plume의 높이가 높아짐에 따라 계속 감소하게 되고 이는 plume주위의 비교적 차가운 공기가 plume을 따라 수반되면서 plume gas와 혼합하게 되어 열전달이 이루어지기 때문이다.

Fig. 8에서는 시간에 따른 연기의 농도장에 대하여 나타낸 그림이다. 화재가 일어나게 되면

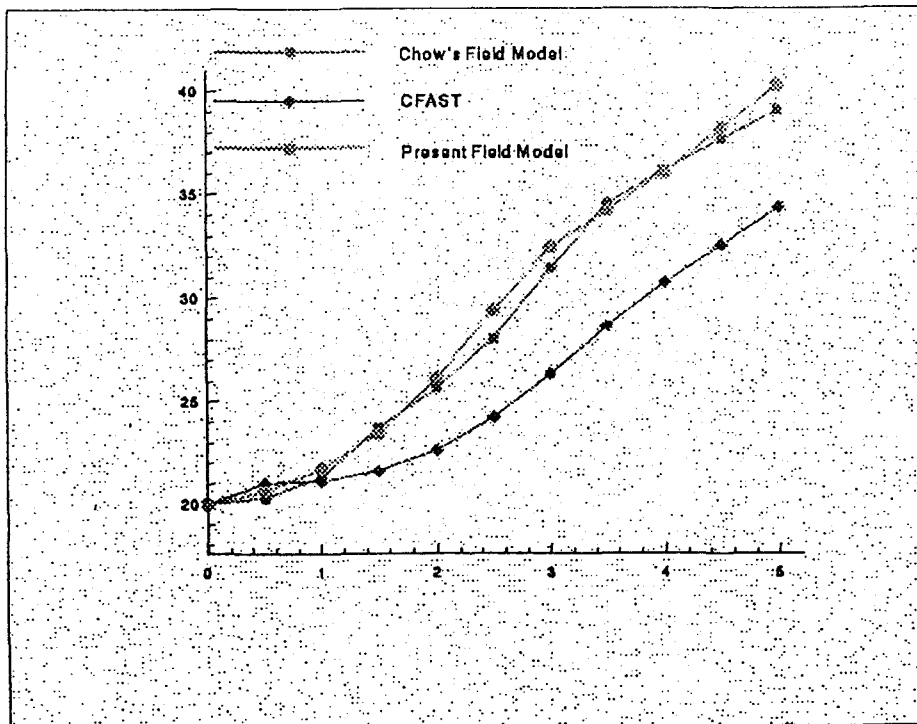


Fig. 4. Hot layer temperature.

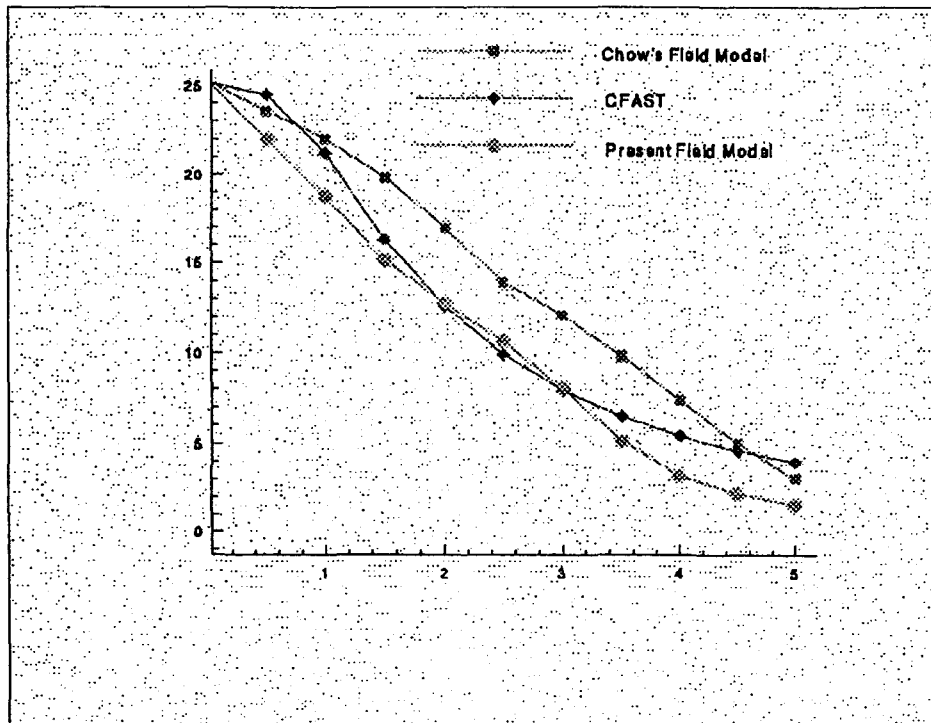
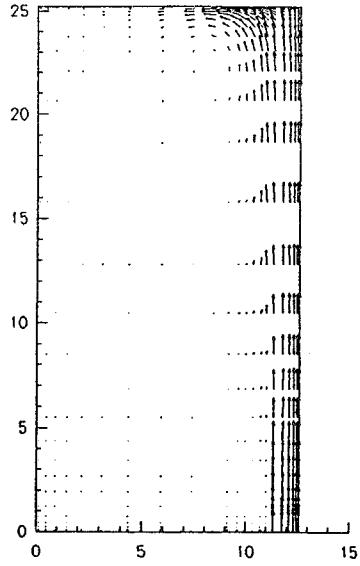
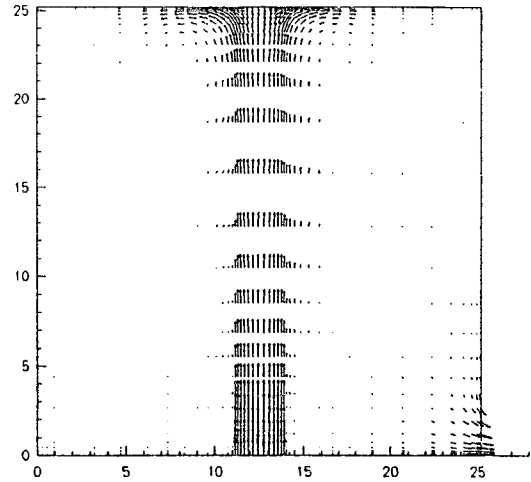


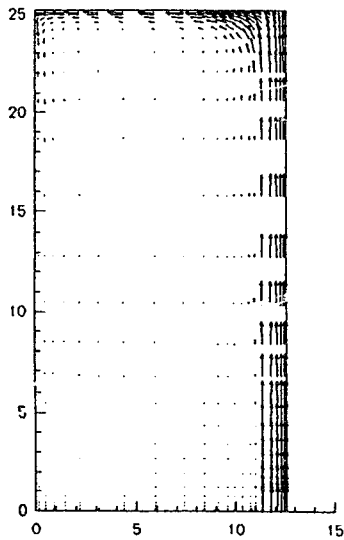
Fig. 5. Predicted smoke layer interface heights.



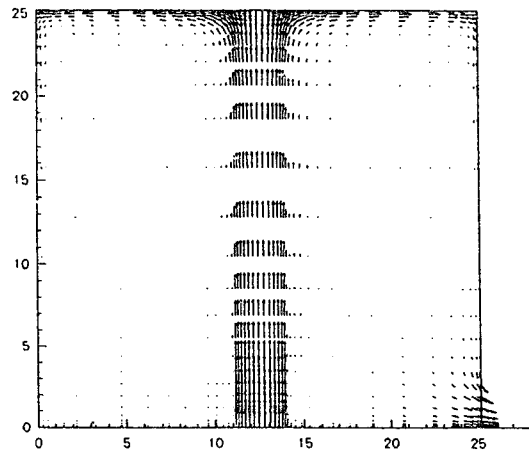
(a) Velocity Field (view for y-z plane) at 60s



(c) Velocity Field (view for x-z plane) at 60s

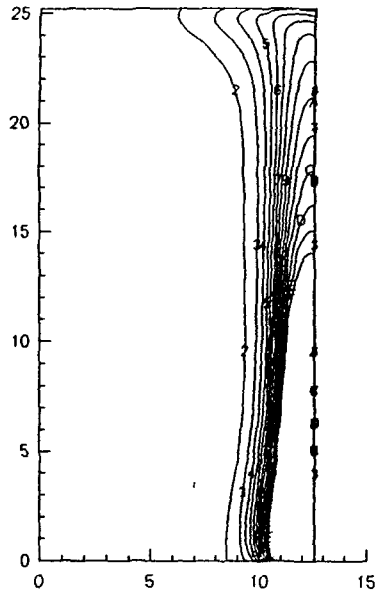


(b) Velocity Field (view for y-z plane) at 150s



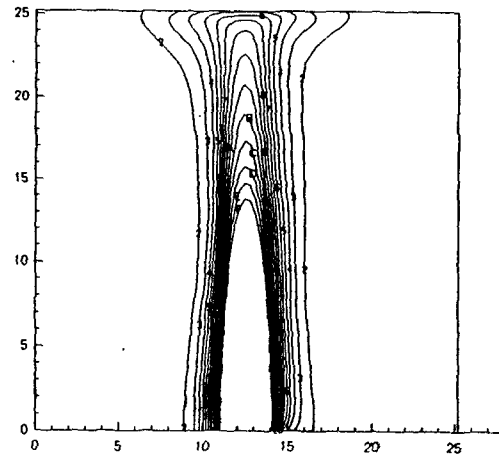
(d) Velocity Field (view for x-z plane) at 150s

Fig. 6. Transient Velocity Field.



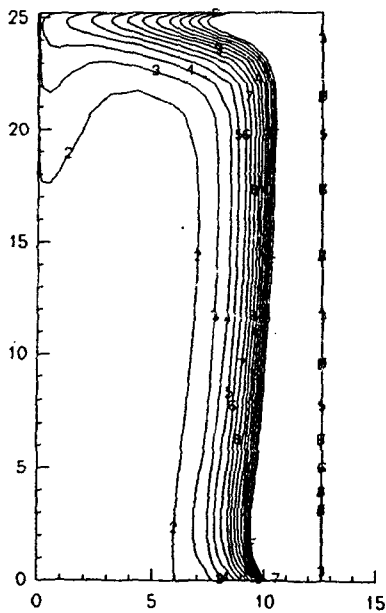
Level T	
F	400
E	392.357
D	384.714
C	377.071
B	369.429
A	361.786
9	354.143
8	346.5
7	338.857
6	331.214
5	323.571
4	315.929
3	308.286
2	300.643
1	293

(a) Temperature Field (view for y-z plane) at 60s



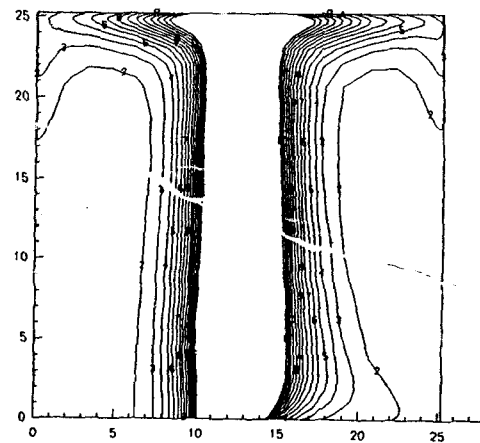
Level T	
F	400
E	392.35
D	384.71
C	377.07
B	369.42
A	361.78
9	354.14
8	346.5
7	338.85
6	331.21
5	323.57
4	315.92
3	308.28
2	300.64
1	293

(c) Temperature Field (view for x-z plane) at 60s



Level T	
F	400
E	392.357
D	384.714
C	377.071
B	369.429
A	361.786
9	354.143
8	346.5
7	338.857
6	331.214
5	323.571
4	315.929
3	308.286
2	300.643
1	293

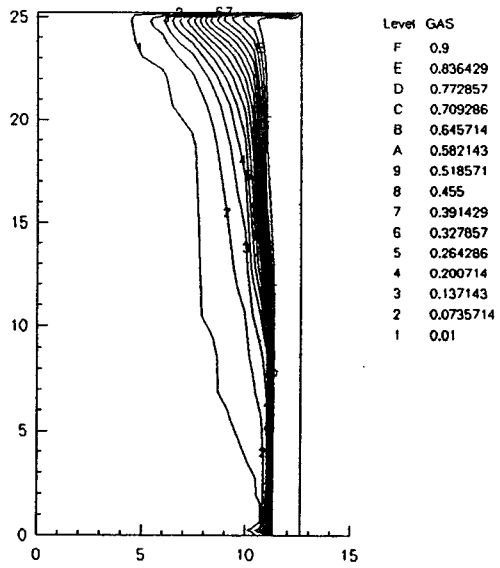
(b) Temperature Field (view for y-z plane) at 150s



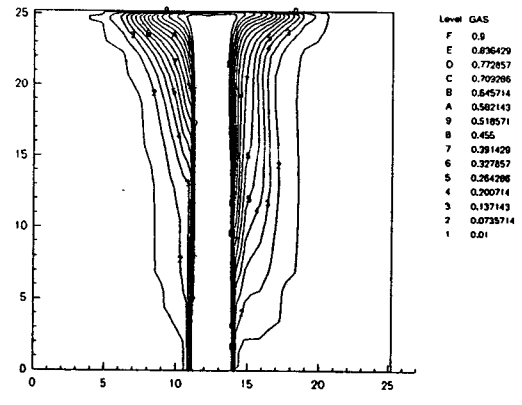
Level T	
F	400
E	392.357
D	384.714
C	377.071
B	369.429
A	361.786
9	354.143
8	346.5
7	338.857
6	331.214
5	323.571
4	315.929
3	308.286
2	300.643
1	293

(d) Temperature Field (view for x-z plane) at 150s

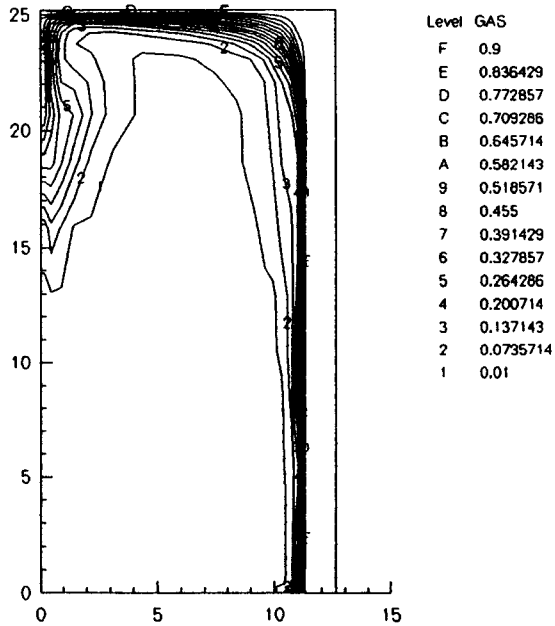
Fig. 7. Transient Temperature Field.



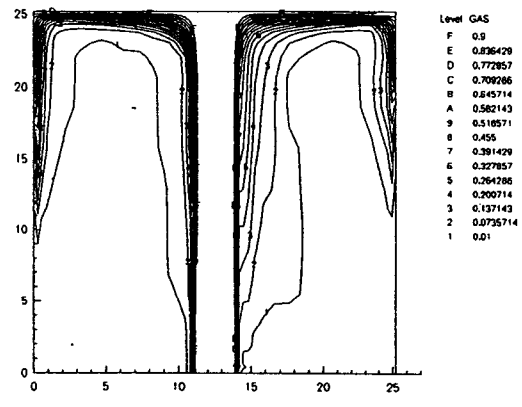
(a) Smoke concentration Field(view for y-z plane)
at 60s



(c) Smoke concentration Field(view for x-z plane)
at 60s



(b) Smoke concentration Field(view for y-z plane)
at 150s



(d) Smoke concentration Field(view for x-z plane)
at 150s

Fig. 8. Transient Smoke concentration Field.

plume이 발달하게 되고 연기의 온도 차이로 인해 생겨난 부력은 화재 지역으로부터 연기의 유동을 일으키게 된다. Plume 주위의 비교적 움직이지 않고 차가운 기체는 plume과 같이 끌려가게 되어 plume gas와 혼합하게 되고 이런 수반된 공기의 유동으로 인해 plume에서의 전체 질량 유량은 증가한다. plume이 발달하여 천장과 부딪쳐 천장을 따라 계속 확산하고 결국 벽과 부딪치게 된다. 온도가 높은 plume gas가 천장과 부딪칠 때 비교적 얇은 제트(jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 확산한다. 이러한 더운 제트는 천장 표면 밑에서 벽쪽으로 확산될 때 압력 구배에 의해 밑에 있는 주위 공기를 끌어 오는데 이 더운 제트는 천장 표면으로의 마찰력에 의해 점점 감소하고 밑으로부터 끌려온 공기에 운동량을 전달한다. 이러한 이유로 하여 천장 제트(ceiling jet)는 계속 연기 농도와 속도가 감소하게 된다. 천장 제트(ceiling jet)는 천장 표면 밑에서 벽쪽으로 계속 움직이며 결국 벽과 부딪치게 되어 밑으로 향하는 벽 제트(wall jet)를 시작하게 된다. 하향 벽 제트(wall jet)는 주위 공기보다 높은 온도와 낮은 밀도를 가지므로 부력에 의해 점점 감소하고 결국 멈추게 된다. 벽 제트는 또한 벽 표면에서 마찰력에 의해 감소하게 되어 부력으로 인해 다시 위로 유동을 일으키게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 길이가 25.2m인 정육면체 모양의 아트리움 공간에 대하여 연기 유입 과정에 대하여 수치해석하여 화재 경과 시간에 따른 연기의 유동을 예측하고 zone model 및 다른 field model과 비교 분석하였으며, 그 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Chow의 Field model과 본 연구에서 사용된 field model 그리고 zone model인 CFAST(version 1.6)을 사용하여 시간 변화에 따른 상부의 더운 연기 층의 평균 온도와 평균 연기 경계층의 높이에 대해서 얻어진 결과는 매우 근사한 것을 알 수 있다.

2. Zone model은 큰 아트리움 공간에서조차도 안정하고 균일한 연기 층이 형성된다고 가정하기 때문에 아트리움 같은 큰 공간 구조를 해석하기 위해서는 field model이 적당하다고 할 수 있다. 그러나, 정육면체 모양의 아트리움에 대하여 zone model을 이용하여 수치해석한 결과 상부의 더운 연기 층의 평균 온도와 연기 층의 평균 경계 높이가 두 종류의 field model과 비교하여 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로, 정육면체 모양의 아트리움의 경우, zone model을 사용하여도 연기 유동을 해석하는데 사용할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 비교적 높이가 큰 아트리움 공간에 대해서는 zone model을 사용하는 데 제약성이 있게 됨으로 앞으로 다른 구조의 아트리움에 대해서 field model과 zone model을 비교 분석이 이루어져야 하겠다.

3. 25.2m의 길이를 갖는 정육면체의 아트리움 공간에서 평균 연기 층의 경계 높이가 5분 후에도 약 4m정도가 되므로 이 시간까지 피난 시간을 확보할 수 있다고 사료된다.

4. 대부분의 field model에서는 비정상상태 문제임에도 불구하고 압력장을 해석하기 위해서 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 많은 계산 시간이 필요하게 되지만 본 연구에서는 PISO 알고리즘을 사용하여 계산 시간을 많이 감소시켜 field model의 단점을 어느 정도 극복하게 되었다.

본 연구는 과학기술처 국책사업인 “공공건물의 화재 안전 진단 및 피난 구조 기술 개발” 연구 사업 지원하에 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kim, W. J., Yang, S. H. and Choi, K. R., 1993, “The Experimental Study of Fire Properties in Atrium Space of High-rise Buildings”, Journal of KIFSE, Vol.7, No.2, pp.

13-23.

2. Chow, W. K. and Wong, W. K., 1993, "On the Simulation of Atrium Fire Environment Hong Kong usig Zone Model", J. Fire Sci., Vol.11, pp.3-51.
3. Chow, W. K., 1995, "A Comparison of the Use of Fire Zone and Field Models for Simulating Atrium Smoke-filling Process", Fire Safety Journal, Vol.25, pp.337-353.
4. Jones, W. W., 1985, "Multi-compartment Model for the Spread of Fire, Smoke and Toxic Gases" Fire Safety Journal, Vol.9, 55-79.
5. Baum, H. R. and Rehm, R. G., 1984, "calculation of Three Dimensional Buoyant Plumes in Enclosures", Combustion Science and Technology, Vol.40, pp.55-77.
6. Thomas, P. H., 1983, "Modeling of Compartment Fires", Fire Safety Journal, Vol.5, pp. 181-190.
7. Klote, J. H., 1985, "Computer Modeling for Smoke Control Design", Fire Safety Journal, Vol.9, pp.181-188.
8. Peacock, R. D., Forney, G. P., Reneke, P. A., Portier, R. M. and Jones, W. W., "CFAST, the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport", NIST Technical Note 1299.
9. Chow, W. K. and Leung, W. M., 1990, "Solid-wall Boundary Effect on a Building Fire Field Model", Combust. Sci. and Vol.71, pp.77-93.
10. Markatos, N. C. Malin, M. R. and Cox, G., 1982, "Mathematical Modeling of Buoyancy-induced Smoke Flow in Enclosures", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.25, pp.63-75.
11. Cox, G., Kumar, S., Cumber, P. and Thomson, V., 1990, "Fire Simulation in the Design Evaluation Process: An Exemplication of the Use of a Computer Field Model", Interflam '90, Interscience Communications Ltd. pp.55-66

12. Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill-Washington, D. C.
13. Issa, R. I., 1985, "Solution of the Implicit Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting", Journal of Computational physics, Vol.62, pp.40-65.

NOMENCLATURE

g : Gravitational acceleration
 u_1, u_2, u_3 : Velocity component of x, y and z direction in the Cartesian co-ordinate
 x_1, x_2, x_3 : Cartesian co-ordinates
 Γ : Exchange coefficient
 σ : Prandtl number
 ϕ : General dependent variable
 μ : Viscosity
 ρ : Density
 t : Time
 T : Temperature
 L : The length of the atrium
 W : The width of the atrium
 H : The height of the atrium
 P : Pressure
 S_x, S_y : Component of source term
 Q : Heat release rate
 V : Volume
 h : Clear height

Subscript

P : The node point at the enter of the cell
 nb : The node point at the neighbor cell
 av : The average value

Superscript

o : Value at the previous time step