

화재 발생시 연기 거동에 대한 수치해석적 연구

— 아트리움 공간을 중심으로 —

A Numerical Study of Smoke Movement by Fire In Atrium Space

노재성* · 유홍선* · 정연태*

J.S. No · H.S. Ryou · Y.T. Jeong

(1997년 12월 3일 접수, 1998년 2월 27일 채택)

ABSTRACT

The smoke filling process for the atrium space containing a fire source is simulated using two types of deterministic fire models: 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. 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 the clear height and the smoke layer temperature.

1. 서론

오늘날 과학의 발달과 의술의 발달로 인한 인구증가로 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 화재안전은 건축가나 공학자들이 반드시 신중히 고려

* 중앙대학교 기계공학과

되어야 할 사항이지만 현재 건축 산업에서는 과학적 근거에 의거해 건축물을 설계하는 가이드가 거의 없는 실정이다. 특히 atrium 공간은 분명히 일반 건축 공간과는 다른 특징을 지니고 있기 때문에 화재가 발생하였을 때 공간특성에 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 atrium은 천정이 높아 통상적인 스프링클러나 자동 화재 감지 설비로는 그 기능을 충분히 발휘하지 못한다. 이렇게 일반적인 건축 공간과는 다른 특징을 갖기 때문에 atrium 공간에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 더군다나 화재로 인한 연기유동은 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 경제적으로 어려운 현실이다. 이러한 점을 고려해 볼 때 연기거동을 해석하기 위하여 실험 연구의 대용으로 수치해석법이 사용되고 있다. 연기 유동 해석모델에는 두 가지 종류, zone model⁴⁾과 field model⁵⁾이 있다. Zone model에서는 화재실을 두 개의 상부 더운 연기 층과 하부 차가운 공기층으로 나누어 그 지역 내에서는 기체의 성질이 균일하다고 가정하여 여러 가지 방정식을 상미분 방정식으로 풀기 때문에 계산 시간이 매우 빠르지만 국부적인 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 성장을 잘 기술하고 있고 많은 연구에서 검증이 되어왔다⁶⁻⁸⁾. 그러나, atrium 공간에 비해 화재의 크기가 크지 않을 경우, 높은 atrium 공간의 상부 영역에서도 안정한 연기 층의 형성 여부는 zone model의 적용성에 큰 영향을 미친다. 그러나, 전산유체역학(CFD)의 빠른 발달로 인하여 화재 field model이 훌륭하게 발달되어

이와 관련된 연구가 많이 이루어지고 있다⁹⁻¹¹⁾. Chow는 세 가지 형태의 atrium 공간에 대하여 field model과 zone model과의 비교를 통하여 zone model도 atrium 공간에 대해 사용할 수 있다는 것을 보여 주었다³⁾. 그러나 연기의 농도에 대한 방정식을 풀지 않고 연기 유동을 공기의 유동으로 가정하여 수치 해석을 하였기 때문에 공기와 연기의 특성은 차이가 있으므로 실제 연기 유동을 적절하게 기술하였다고 볼 수는 없다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 연기 성분 방정식을 풀어 연기의 유동을 해석하였다.

따라서 본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있는 atrium 공간에서 화재 발생시 연기 유동 현상에 대하여 수치 해석을 하여 화재 경과시간에 따른 연기의 유동을 예측하고 zone model 및 다른 field model과 비교함으로써 일반 건축물과 다른 성질을 갖는 atrium 공간에 대하여 화재 발생시 방재 전문가나 건축설계자들에게 보다 현실적으로 유용한 연기 제어설비의 기본 자료를 제공하려 한다.

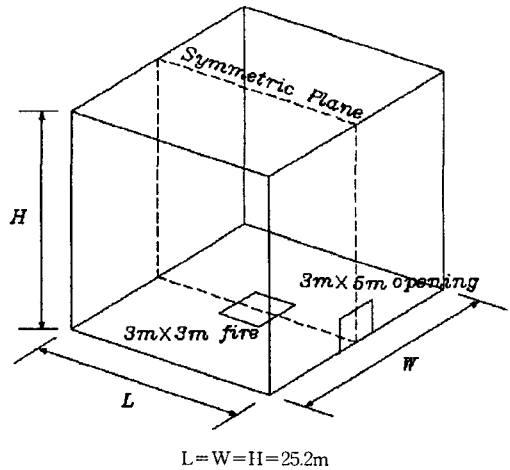


Fig. 1 Configuration and dimension for the atrium

2. 이론 해석

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 아트리움 화재를 해석하는데 사용되는 중요한 parameter가 되므로 이러한 두 가지 값에 초점을 맞추어 수치해석결과를 분석하고자 한다. 열유속 Q(W)은 시간(s)의 제곱에 비례(Q=47t²)한다고 가정하며 178.6초 후에는 1.5MW으로 일정하게 유지된다.

2.2 지배 방정식

Fig. 1에 도시된 모델에 대한 지배방정식은 3차원 비정상상태의 화재로 인해 야기된 난류유동이다. 난류를 수학적인 형태로 나타내기 위해서는 변수(Φ)를 평균값(mean value)과 요동(fluctuation)으로 분리하여 난류 유동에 대한 지배방정식을 구성하면 다음과 같다.

연속 방정식:

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

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

운동량 방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) \\ &= - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \dots\dots(2) \end{aligned}$$

일반적인 스칼라 수송방정식:

(e.g. 연기 농도, 온도)

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \Phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff, \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

상태방정식:

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

여기서 변수 Φ는 속도 성분, 온도, 연기 농도 등을 나타낸다. μ_{eff}은 유효 점성계수이고 Γ_{eff,Φ}은 유효 확산 계수이고 S_Φ은 생성항이다. 위의 지배방정식을 풀기 위해서는 국부적인 μ_{eff}과 Γ_{eff,Φ}의 값을 구해야 한다. 여기서는 two-equation κ-ε model을 사용한다. 표준 κ-ε 모델에서 Reynolds stress는 요동 에너지(Turbulent

kinetic energy: κ)와 이 요동의 점성에 의한 소산(Dissipation rate: ε)에 의존된다.

$$\mu_t = \frac{C_D \rho k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \dots\dots\dots (6)$$

유효 확산 계수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{eff} = \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 σ과 σ_t은 각각 층류와 난류의 Prandtl 수이다.

변수 κ와 ε은 다음의 2개의 수송 방정식에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &- \rho \epsilon + G_B + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_1 \frac{\epsilon}{\kappa} \left[\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + G_B \right] - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

여기서 부력에 의한 k, ε의 source term G_B는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$G_B = \mu_t g \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \dots\dots\dots (10)$$

위의 식들에 사용된 상수는 다음과 같다.

$$C_1=1.44, C_2=1.92, C_D=0.09, \sigma_\kappa=1.0, \sigma_\epsilon=1.3$$

3. 수치 해석

3.1 격자계

Fig. 2는 본 해석에 사용될 3차원 격자의 구조를 나타낸 그림이다. Fig. 2의 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 대칭이므

로 공간의 반 만을 계산 영역으로 하였다.

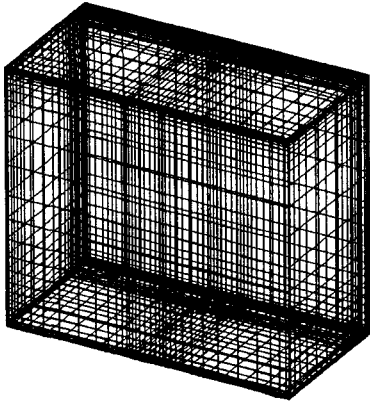


Fig. 2 The grid system for atrium

3.2 이산화 방정식

위의 비정상상태 3차원 지배방정식들은 다음의 일반 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho \bar{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad} \Phi) + S_{\phi} \dots \dots \dots (11)$$

앞에서 유도한 지배 방정식들은 비선형 편미분 방정식들로서 해석적 방법으로 해를 구하기는 어려우며 따라서 제어 체적에 대해 적분함으로써 대수적인 형태로 이산화하여 수치해석적인 방법으로 해를 구한다. 이 때 비엇갈림 격자체계¹³⁾를 사용하여 모든 유체의 변수들이 같은 계산 노드에 위치하도록 하였다. 식(11)는 다음과 같은 형태로 이산화할 수 있다¹⁴⁾.

$$a_p \Phi_p = \sum a_{nb} \Phi_{nb} + b \dots \dots \dots (12)$$

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

$$b = S_C + \rho \sum \Phi_p \frac{\Delta V}{\Delta t} \dots \dots \dots (13)$$

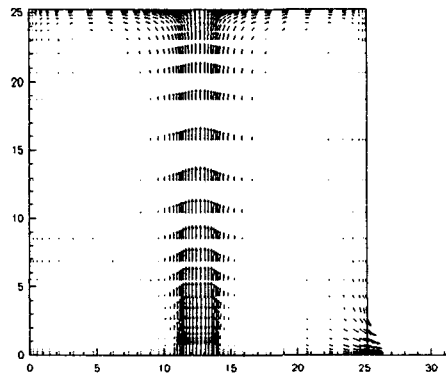
여기서 아래첨자 nb는 주위노드를 의미하고 일반적으로 수치적 안정성을 위해 대류항에는 상류차분식이 사용되었고 생성항을 선형화형태(S_C+S_pΦ_p)로 나타내었다. 최종적인 이산화방정식의 해를 구하기 위한 solver로는 Stone's Implicit Procedure(SIP)을 사용하였고 압력장을 풀기 위하여 SIMPLE algorithm을 사용하였다.

3.4 경계조건 및 초기 조건

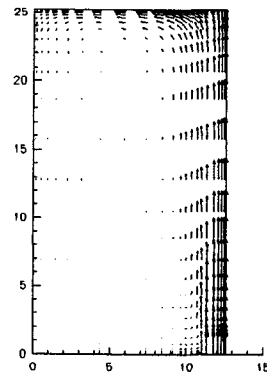
초기 온도와 압력은 293K과 101325Pa으로 가정한다. Fire plume 부분에서는 더 큰 초기속도가 기대되므로 본 시뮬레이션에서는 fire plume 부분에서 속도는 1m/s로 주었다. 또한, vertical opening이 포함된 벽을 제외하고는 모든 벽이 단열 조건을 적용하였고 아트리움 공간이 가운데 평면에 대해서 대칭이므로 중앙 평면에서 대해서는 대칭 조건을 적용하였다.

4. 결 과

예측된 유동장과 온도 및 연기 농도장으로부터 연기 층 경계 높이는 연기의 농도가 수직 방향으로 0.01이 되는 곳으로 정하였다. 연기 층



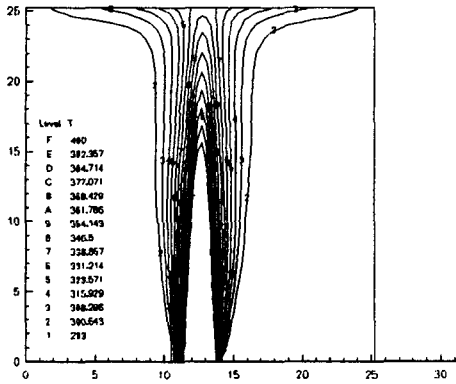
(a) In the x-z plane



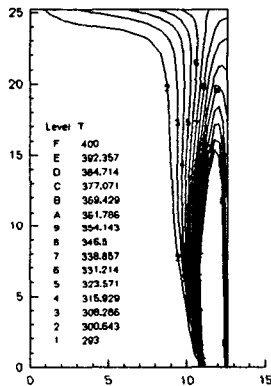
(b) In the y-z plane

Fig. 3 Velocity vectors at 150s

경계 높이보다 더 높은 영역은 상부의 더운 연기 층으로 간주하였고 연기 층의 평균 경계 높이는 다음과 같은 식으로 구한다.



(a) In the x-z plane



(b) In the y-z plane

Fig. 4 Temperature contours at 150s

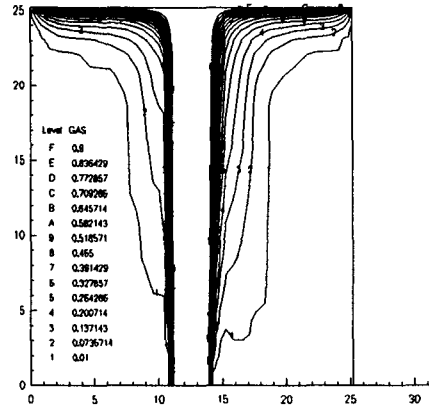
$$h_{av} = \frac{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} \Delta \tau_i}{\text{Area of floor}} \dots\dots\dots (14)$$

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

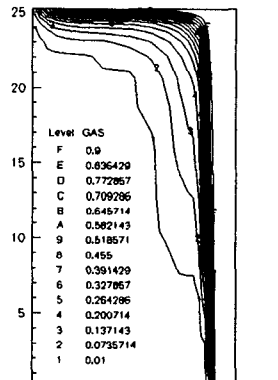
$$T_{av} = \frac{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} T_i \Delta \tau_i}{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} \Delta \tau_i} \dots\dots\dots (15)$$

여기서 $\Delta \tau_i$ 은 셀의 부피이고 T_i 은 셀의 온도이다. 비정상상태 속도장과 온도 및 연기 농도장이 Fig. 3부터 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 뜨거운 plume은 천장에 부

딛치면서 비교적 얇은 제트(jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 확산한다. 이 더운 천장 제트



(a) In the x-z plane



(b) In the y-z plane

Fig. 5 Smoke concentration contours at 150s

(ceiling jet)는 천장 표면으로의 마찰력에 의해 점점 감소하고 비교적 차가운 주위 공기로 대류에 의해 에너지를 전달한다. 이러한 이유로 하여 천장 제트(ceiling jet)는 계속 속도와 온도 및 연기 농도가 감소하게 되고 반면에 천장 제트의 두께와 넓이는 증가하게 된다. 천장 제트는 계속 확산하게 되어 결국 벽과 부딪치게 되어 벽 제트를 형성한다. 상부 더운 연기 층의 평균 온도와 평균 연기 층 경계 높이가 시간에 따라 발달하는 과정이 Fig. 6과 Fig. 7에서 Chow의 field model과 CFAST(version .1.6) 그리고

본 field Model에 대하여 나타나 있다.

Fig. 6에서 볼 수 있는 것과 같이 세 가지 모델에서의 연기 층의 온도는 약간의 차이가 있지만 비슷한 것을 알 수 있다. 예를 들어, zone 모델인 CFAST(version 1.6)와 다른 field 모델 사이의 온도 차이는 5분 후에 각각 5도 정도 차이가 있는 것을 알 수 있다. 또한, 연기 층 경계 높이의 경우는 세 가지 모델에서 얻어진 결과가 매우 근사하다는 것을 알 수 있고 화재가 일어난 지 5분 후에는 경계 높이가 약 5m로 0.0167 m/s의 속도로 연기가 내려오고 있다.

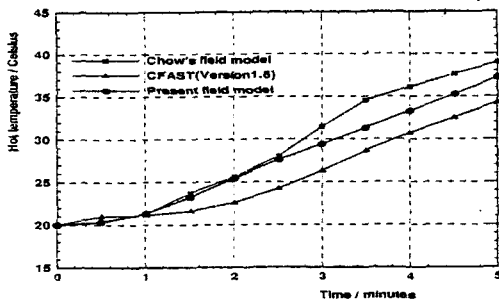


Fig. 6 Predicted smoke layer temperature

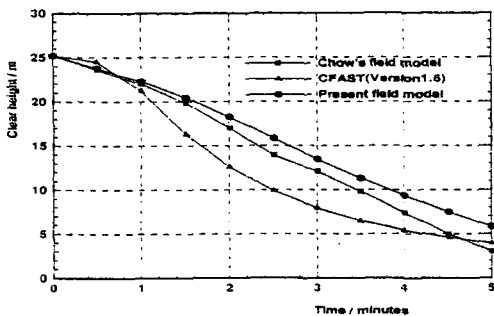


Fig. 7 Predicted smoke layer interface heights

5. 결론

본 연구에서는 길이가 25.2m인 정육면체 모양의 아트리움 공간에 대하여 연기 유동과정에 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 연기층의 평균 온도와 평균 연기 경계층의 높이에 대해서 얻어진 결과는 매우 근사하는 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 모양이 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 5m정도가 되므로 이 시간까지 피난 시간을 확보할 수 있다고 사료된다.

기 호 설 명

C_1, C_2, C_D : Empirical constants in the turbulence model

g : Gravitational acceleration

U_1, U_2, U_3 : Velocity component of x, y and z direction in the Cartesian coordinate

X_1, X_2, X_3 : Cartesian coordinates

ϕ : General dependent variable

μ : Viscosity [Ns/m^2]

ρ : Density [kg/m^3]

t : Time [s]

T : Temperature [K]

k : Turbulent kinetic energy

P : Pressure [Pa]

S_c, S_p : Component of source term
 Q : Heat release rate [W]
 V : Volume
 h : Clear height
 [Greek symbols]
 Γ : Exchange coefficient
 σ : Prandtl number
 ε : Turbulent energy dissipation rate
 [Subscript]
 B : Buoyancy
 P : The node point at the enter of the cell
 nb : The node point at the neighbor cell
 av : The average value
 eff : effective
 t : turbulent
 [Superscript]
 o : Value at the previous time step

이 논문은 1997학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 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 KIFSE*, Vol. 7, No. 2, pp. 13~23, 1993.
- 2) Chow, W.K. and Wong, W.K., "On the Simulation of Atrium Fire Environment Hong Kong using Zone Model", *J. Fire Sci.*, Vol. 11, pp. 3~51, 1993.
- 3) Chow, W.K., "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, 1995.
- 4) Jones, W.W., "Multi-compartment Model for the Spread of Fire, Smoke and Toxic Gases" *Fire Safety Journal*, Vol. 9, pp. 55~79, 1985.
- 5) Baum, H.R. and Rehm, R.G., "calculation of Three Dimensional Buoyant Plumes in Enclosures", *Combustion Science and Technology*, Vol. 40, pp. 55~77, 1984.
- 6) Thomas, P.H., "Modeling of Compartment Fires", *Fire Safety Journal*, Vol. 5, pp. 181~190, 1983.
- 7) Klote, J.H., "Computer Modeling for Smoke Control Design", *Fire Safety Journal*, Vol. 9, pp. 181~188, 1985.
- 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., "Solid-wall Boundary Effect on a Building Fire Field Model", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 71, pp. 77~93, 1990.
- 10) Markatos, N.C. Malin, M.R. and Cox, G., "Mathematical Modeling of Buoyancy-induced Smoke Flow in Enclosures", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 63~75, 1982.
- 11) Cox, G., Kumar, S., Cumber, P. and Thomson, V., "Fire Simulation in the Design Evaluation Process: An Exemplification of the Use of a Computer Field Model", *Interflam '90*, Interscience Communications Ltd. pp. 55~66, 1990.
- 12) Zhou Lixing, "Theory and Numerical Modeling of Turbulent gas-particle Flows and Combustion", Science press. CRC press INC.
- 13) Peric, M., "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid flow In Complex Ducts", Ph.D. Imperial College, 1985.
- 14) Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill-Washington, D.C., 1980.