總 說

화재 Simulation에서의 Field Model

A Review on The Field Model for Fire Simulation

김 진 곤*
Kim, Jin-Kon

Abstract

The review of field model for fire simulation is presented. The approach to predict fire growth by solving the conservation equations over time and 2- or 3-dimentional space with appropriate boundary conditions is called field model. The finite difference method is adopted to solve the governing equations. The results is give qualititively and quantitatively good results but complicate and difficult to handle. But it is useful tool to undersatand detail phenomenons and to make decision for fire safety.

1. 서 론

화재의 규모, 다양성 및 매우 복잡한 물리/화학적 현상으로 인해, 화재의 현상을 파악하기 위한 실험이나, 수학적 해석은 어렵고 그 범위 또한 제한적일 수 밖에 없다. 현대에 와서 일반용 혹은 산업용 건물이의 구조나 용도는 매우 다양하고, 복잡해지고 있으며, 건축물의 내장재 또한 다양하다. 이러한 구조물에서의 방재나 피난계획은 법규나 기본적인 실험에 전적으로 의존될 수 없음이 자명해진다. 법규에서 제시한 방제규정은 최소한의 조건이며, 가장 효과적인 방법이라고 말하기는 어렵다. 또한 기본적인 시험도 실제상황을 대변하기 못하며, 실제상황은 무수히 많은 변수를 포함하고 있음으로 해서 이들을 정확하게 실험적으로 구현한다는 것이 어려운 일이다. 또한, full scale 시험도 경우에 따라서는 일반적인 결론 보다는 그 당시의 특수한 상황만이 제시될 우려가 있으며, 시험에 많은 비용이 들기 때문에 자주 실행하지 못하는 상황이다. 따라서, 설계자, 전문 종사자를 위한 화재의 성상에 대한 모사의 요구가 대두되었다.

1970년대 후반 Havard 대학에서 zone모델을 이용한 화재 모사 컴퓨터 프로그램[1]이 개발되었으며, 이후 컴퓨터의 급속한 발달로 복잡한 수학적인 모델을 계산할 수있는 field모델이 1977년 Nortre Damm대학에서 개발되었다.[2] 이중 field 모델의 수학적개념과 방법은 이미 여러분야에서 적용되었지만 화재의 분야에는 1980년대 들어서 활성화 되어 많은 논문들이 발표되고 있다. 이러한 모델은 비록 다루기 어렵고 복잡하나, 여러 복잡한 현상을 비교적 정확하게 모사할 수 있으며, 수치적으로도 실제에 접근된 결과를 얻을 수 있다. 또한 다양한 건물의 구조 및 주변조건등을 상세하게 나타낼 수 있다. 따라서, 방재 전문가나 건물 설계자에게 보다 현실적으로 방재 시스템

* 한국항공대학교 기계설계학과

결정이나, 내부구조의 변경을 위한 유용한 tool로 사용될 수 있다.

따라서, 본논문은 이러한 field model을 구성하고 있는 일반적인 수학적, 물리적 배경 및 기본 식들을 제시하고, 실제 응용된 사례를 제시하고자 한다.

2. 기본 방정식[3][4][5]

화재를 구성하는 기본적인 물리적 현상은 3차원 공간에 시간에 따른 변화를 포함하고 있다. 이들은 보존법칙을 기본으로, 물질, 운동량, 에너지 및 화학 성분의 전달방정식으로 표현된다. 이들은 시간과 공간에 대한 편미분 형태로 나타난다. 이를 연소기에 적용할 때는 정상상태로 시간에 대한 변화를 고려하지 않으나, 화재의 성장에 적용할 때는 시간의 함수로 비정상 상태로 나타난다. 일반적으로 화재에서 나타나는 유체의 유동은 음속에 비해서 매우 작기 때문에 비압축성 유체로 취급될 수 있다.

화재에서 나타나는 유동은 대부분이 난류이다. 따라서, 제시된 기본 방정식들은 난류상태에 대한 것이며, 변수들의 평균은 연소가 있는 경우 질량평균(Favre average)을 사용하는것이 적절하나, 본 논문에서는 시간평균(Tume average)을 사용하였다. 그리고, 에너지와 화학종 보존 방정식에서 나타나는 Dufour, Soret 효과는 무시하였다. 또한, 복사열전달은 화재에 있어서 매우 중요한 사항이지만 본 논문에서 다루지 않았다.

2-1. 지배 방정식

난류를 수학적인 형태로 나타내기 위해서는 변수(ϕ)의 평균값(mean value)과 요동(fluctuation)으로 분리하는 것이 편리하다. 따라서, 임의 이 순간에서의 변수는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

공간의 고정된 점에서 시간평균은

$$\bar{\phi} = \frac{1}{t_1}\int_{t0}^{t0+t1} \phi dt$$

이 시간 평균은 시간에 완전히 독립적일 정도로 충분히 긴 시간간격 t_1 하에서 얻어진 것이다. 한편, 요동의 평균값은 0이된다.

$$\bar{\phi'} = 0$$

이러한, 평균과 요동에 대한 기본 정리를 갖고 난류 유동에 대한 지배방정식을 구성하면 다음과 같다.

－연속 방정식(Continuity Equation)

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\,\bar{U}_j) = 0$$

－운동량 보존 방정식(Momentum conservation equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\,\bar{U}_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\,\bar{U}_i\,\bar{U}_j+\bar{\rho}\,\overline{u_i u_j}) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}+\bar{S}_{ui}$$

여기서,

$$\delta_{ij} \text{ is the Kronecker－Delta function} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = \bar{P}\delta_{ij} - \mu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)+x\frac{2}{3}\bar{\mu}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\delta_{ij}$$

그리고, S_{Ui}는 부력을 나타낸다.

－에너지 보존 방정식(Energy conservation equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\,\bar{H})+\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\,\bar{U}_j\,\bar{H}+\bar{\rho}\,\overline{u_j h})$$

$$=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_h C_p \frac{\partial T}{\partial x_j}\right)+\bar{S}_H$$

S_H는 연소에 의한 발생열을 나타낸다.

－화학종 보존 방정식(Chemical species equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\,\bar{Y}_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\,\bar{U}_j\,\bar{Y}_i+\bar{\rho}\,\overline{u_j Y_i})$$

$$=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_a \frac{\partial Y}{\partial x_j}\right)+\bar{S}_Y$$

S_Y는 연소에 의한 화학종의 변화를 나타낸다.

2-2. 화학 반응식

임의의 단순한(single) 화학반응식은 아래와 같다.

$$\sum_{i=1}^{N} \nu'_i W_i \rightarrow \sum_{i=1}^{N} \nu''_i W_i$$

여기서 ν'은 반응물의 stoichiometric 계수이고, ν''은 생성물의 계수이다. W_i는 반응에 나타나는 반응물과 생성물의 화학종을 나타낸다.

3 난류 모델

위의 지배방정식을 풀기위해서는 난류항 $\bar{\rho}\,\overline{u_iu_j}$, $\bar{\rho}\,\overline{u_jh}$, $\bar{\rho}\,\overline{u_jY_j}$의 모델링이 필요하다. 이를 위한 운동량 방정식에서 나타나는 난류항은 Reynold stress라 부르고 Boussinesque는 이를 유체의 전단력으로 가정하였다.[3]

$$\bar{\rho}\,\overline{u_iu_j} = \mu_t \frac{\partial \overline{U}}{\partial x_j}$$

여기서 나타나는 μ_t는 난류점성계수로 유체의 성질이 아닌 유동장의 특성으로 나타난다. 따라서, 이계수를 구할 수 있는 몇가지 방식을 간단하게 소개하고자 한다. 한편, 에너지 와 화학종의 난류모델은 난류 Prandtl수와, 난류 Schmidt수로 구할 수 있다.

3-1. Prandtl의 혼합거리(Mixing Length)

Prandtl은 난류점성계수를 혼합거리를 사용하여 다음과 같이 표현하였다.[3]

$$\mu_t = \rho l^2 \left| \frac{d\overline{U}}{dy} \right|$$

여기서, l은 혼합거리이다. 이 혼합거리는 흐름의 양상에 따라 다양한 모델이 존재한다.[6] 이 방식은 난류에너지의 국부평형(local equilibrium)이라는 가정이 도입되어 있으므로 물리적으로 모순되는 면이 있으나, 간편하고, 비교적 단순한 형태의 흐름에서는 좋은 결과를 보여주고 있다.

3-2. $\kappa-\varepsilon$ 전달 방정식[6]

난류의 특성중의 하나가 흐름의 요동(fluctuation)이다. 따라서, 전반적인 유동이 이 요동에 의존되며 Reynold stress는 요동 에너지(Turbulent kinetic energy : κ)와 이 요동의 점성에 의한 소산(Dissipation rate : ε)에 의존되고, 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\rho}\,\overline{u_iu_j} = \frac{2}{3}\bar{\rho}\,\kappa\delta_{ij} - \mu_t\left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i}\right)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$$

여기서,

$$\kappa = \frac{1}{2}\overline{u_iu_i}, \quad \varepsilon = \frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\overline{\partial u_i}}{\partial x_j}\,\frac{\overline{\partial u_i}}{\partial x_j}\right)$$

이다. 이 두변수 κ, ε은 다음의 2개의 전달 방정식에 의해 구해진다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\bar{\rho}\,\overline{U}_j\kappa = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\,\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right) - \bar{\rho}\,\overline{u_iu_j}\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho}\,\varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\bar{\rho}\,\overline{U}_j\varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\,\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) - \bar{\rho}\,\frac{\varepsilon}{\kappa}(C_1G + C_2\varepsilon)$$

$$G = \overline{u_iu_j}\left(\partial \overline{U}_i / \partial x_j\right)$$

이식들에 사용된 상수는 다음과 같다.

C_μ	C_1	C_2	σ_κ	σ_ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.22

이 모델은 비록 제한적인 범위가 있기는 하지만, 일반적인 난류유동, 연소가 있는 유동 그리고 화재의 field모델 등 비교적 많이 쓰이고 있다.

4. 연소 모델

연소는 단순히 화학반응의 문제만은 아니다. 유

동이 있는 영역에서의 연소는 연료와 공기의 혼합 그리고 난류에 의한 반응물, 온도의 요동등이 연소에 관여한다. 따라서, 화학반응 특성시간과 물리적 특성시간에 따라 에너지와 화학종 방정식의 생성항(S_H, S_Y)이 각각 다르게 결정되어야 한다. 이를 위한 3가지 방식만을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

4-1. 무한 화학반응율(Infinitely fast chemical reaction rate)[4][5]

확산화염에서 화학반응율은 기체의 확산율에 비해 매우 빠르므로, 연소는 연료기체와 산소의 혼합에 의존된다. 연료와 산소의 접촉면은 Stoichiometric값을 유지한다. 그리고 에너지와 화학종 방정식은 Schvab-Zeldovich변수에 의해 변환되며, Lewis수가 1이면 두개의 식은 동일한 식이 되면서 각식의 생성항은 소거된다. 화염면을 기준으로 연료와 산소가 양분되며, 이때 얻어지는 화염면의 온도는 단열화염온도가 된다. 이러한 온도는 실제로 불합리 하므로 속도, 밀도 및 열발생등의 부정확한 값을 제시한다. 이러한 모순을 수정하기 위해 물질농도의 요동을 고려한 방식이 제시되었다. 즉, 무차원 Schvab-Zeldovich변수(f)의 요동인 g'^2 전달 방적식이 요구되며, 이들의 국지적인 분포를 나타내는 확율밀도함수가 도입되어야 한다.

$$\int = \overline{\int} + g'$$

이러한 방식은 부분적인 해석에 많이 사용되고 있으며, 확율밀도함수는 Clipped Gausian등이 사용되고 있다.

4-2. 유한화학반응율(Finite chemical reaction rate)[6]

화학반응율은 반응물의 충돌과 상대속도를 나타내는 확율에 비례하고 있다. Arrhenius는 이러한 기본적인 현상을 갖고 비가역 단순반응에 대하여 다음과 같은 수식을 제시하였다.

$$S_{fu} = A_0 \rho^2 M_{fu} M_{ox} \exp(-E/RT)$$

난류의 경우 이식은 다음과 같이 수정된다.

$$\overline{S}_{fu} = A_0 \overline{\rho}^2 \overline{M}_{fu} \overline{M}_{ox} \exp(-E/R\overline{T})(1+F)$$

여기서, F는 시간평균 반응율에 대한 난류의 영향을 의미한다. 이를 위해서는 물질의 질량분율(Mass fraction)과 온도의 요동에 대한 또다른 모델이 요구된다.

4-3. Eddy Break-Up 모델

Spalding[7]은 물질의 요동과 eddy의 break-up에 기초한 반응율 모델을 제시하였다.

$$\overline{S}_{fu} = C_R \overline{\rho} \frac{\varepsilon}{\kappa} (\overline{m_{fu}^2})^{1/2}$$

예혼합 연소에서, Arrhenius식과 위의 식을 diffusion time scale(τ_s)과 chemical time scale (τ_k)에 따라 선택적으로 사용하였다. 한편, 이를 수정한 식이 사용되기도 한다.

$$\overline{S}_{fu} = A \overline{\rho} \frac{\varepsilon}{\kappa} \min[\overline{m_{fu}}, \frac{\overline{m}_{ox}}{s}]$$

5. 수치해석[8][9]

일반적으로 field 모델에서 나타나는 미분방정식은 elliptic형태이다. 그리고 비정상 상태 및 2차원 혹은 3차원 흐름이 된다. 이의 수치적 해법은 유한차분법(Finite Difference Mothod)를 사용한다. 이는 기본적으로 Taylor series를 사용하여 미분방정식들을 차분형태(Difference form)로 전환하여 해를 구하는 방식이다. 그러나 격자점간의 단순한 Taylor series의 사용보다는 격자점 사이의 제어체적을 구성하여 사용하는 방식이 많이 쓰이고 있다. 이는 물리적으로 제어체적 내에서의 본존 법칙을 만족 시킬 수 있기 때문이다. 이렇게 변형된 차분식은 Tridiagonal matrix로 구성되며, inverse하여 해를 구한다. 그리고, 해는 경우에 따라 수배번 반복 계산하여 구해진다. 격자점을 많이 구성하면 해의 정확도는 증가하나, 계산 시간과 컴퓨터의 용량의 제한이 있으므로 적절한 선택

이 요구된다.

6. 응용의 예 및 검토

본절에서는 위에서 제시한 수학적 모델을 화재성상에 사용한 예를 제시한다.

6-1. 항공기 내에서의 화재 모델[10]

K. T. Yang등은 Nortre Dame 대학에서 개발한 UNDSAFE code를 이용하여, 항공기 내에서의 화재성상을 모사하였다.(그림 1) 흐름은 2차원 비정상 상태이다. 좌석 밑이 열려있는 경우와 막혀있는 경우 2가지를(그림 2) 고려하였다. 그결과 그림 3은 화재발생후 29초에서의 속도장의 형태를 나타내고 있으며, 그림4는 온도, 그리고 그림 5는

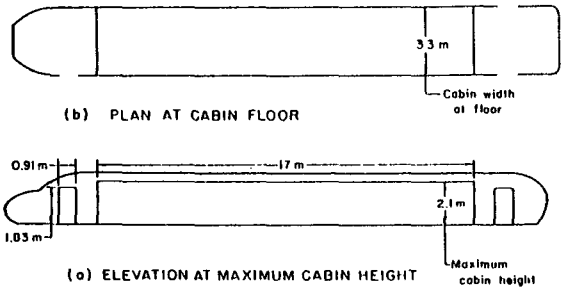

Fig. 1 737 Test Cabin Geometry

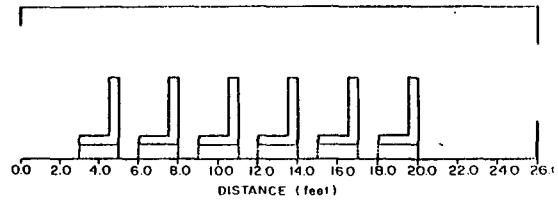

Fig. 2 Simulated Wide-Body Aircraft Cabin Geometry

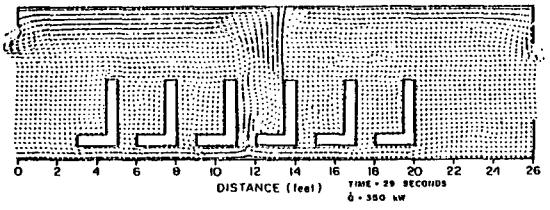

Fig. 3 Velocity Fields for Open-Bottom Seats, Case A

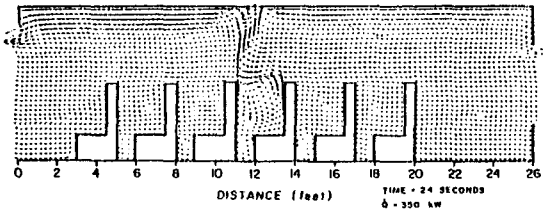

Fig. 4 Velocity Field for Solid Seats, Case A

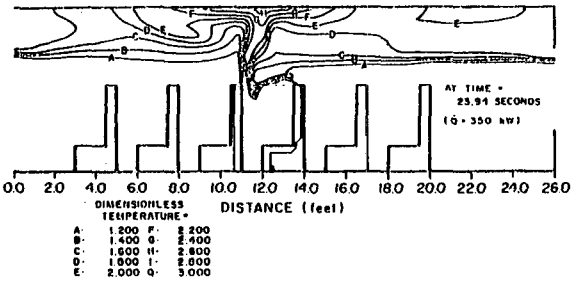

Fig. 4-1 Isotherms for Solid Seats, Case A

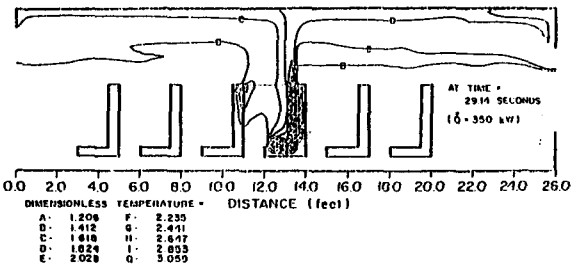

Fig. 4-2 Isotherms for Open-Bottom Seats, Case A

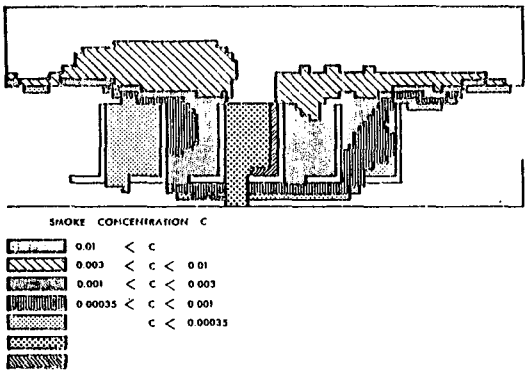

Fig. 5-1 Smoke Distribution for Open-Bottom Seats, CaseIA

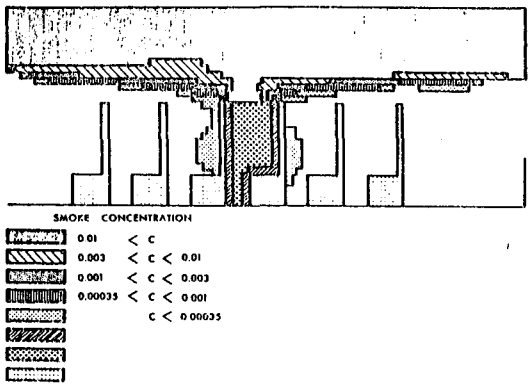

Fig. 5-2 Smoke Distribution for Solid States, Case A

smoke의 분포를 나타내고 있다. 좌석 밑의 형상의 영향을 극명하게 볼수 있으나, Zode model에서는 이러한 상세한 움직임을 파악 할 수 없다. 특히 이 모델에서 연소는 다루지 않았으며, 화재가 발생했을 경우와 유사한 heat flux를 사용하였다. 그리고, 난류모델로는 Prandtl의 혼합거리를 수정해서 사용하였다.

6-2. Turbine Hall에서의 화재 모델[11]

R. Huhtanen은 3차원 비정상 상태의 흐름을 상용 프로그램인 PHOENIC code를 사용하여 해석하였다. 적용된 기하학적 공간은 그림 6과 같고, oil pool에서 연소가 발생한다. 그림 7, 8은 유동의 움직임을 보여주고 있으며, 특히 그림 8에서 아래 환풍구의 영향으로 흐름이 바뀌는 것을 볼 수 있

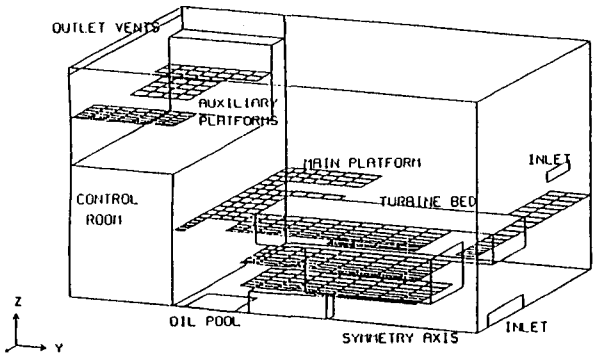

Fig. 6 Geometry of the modelled volume. The totally blocked cells as well as platforms are shown

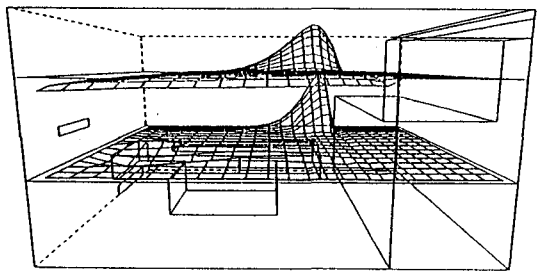

Fig. 7 Vertical velocity profile on levels z/ H=0.35 and z/ H=0.75. The values are between −1.5 ··· 13m/ s and −1.9 ··· 11m/ s respectively. The time is 360 seconds after ignition

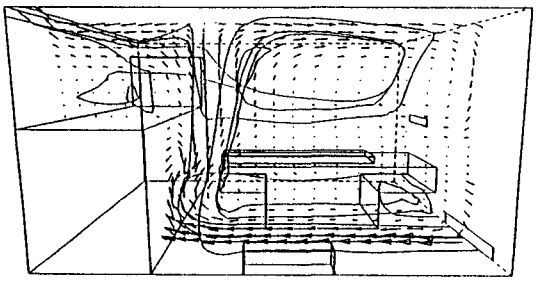

Fig. 8 Velocity vectors at plane x/ X=0.8 at time 360 seconds after ignition. Maximum velocity 10m/ s. Streamlines starting from the lower inlet. Note that the streamlines are not in the same plane as the velocity vectors

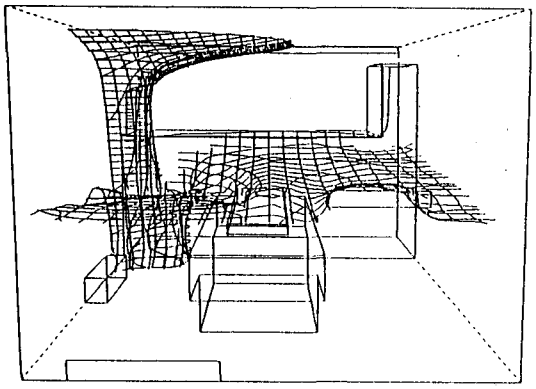

Fig. 9 Temperature surfaces of 373 K and 473 K

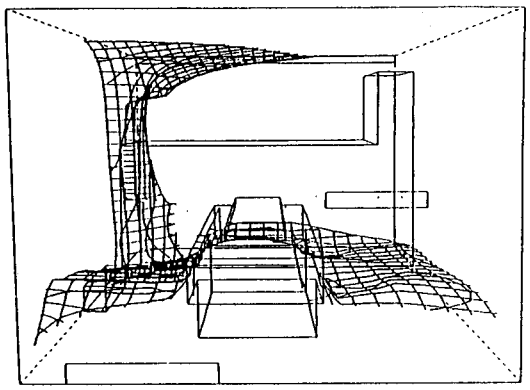

Fig. 10 Surfaces of mass fraction of burning products. The upper surface value is 2.5% and the lower 0.5%

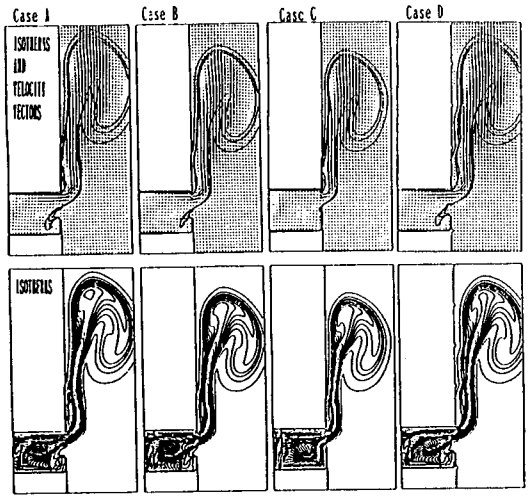

Fig. 11 Early stage flow patterns of fire gas ejected from a window.(t=9.8sec)

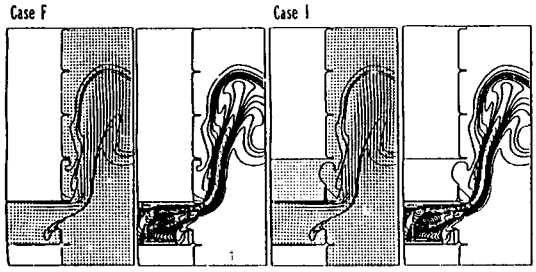

Fig. 12 Early stage flow patterns of fire gas ejected from a window.(t=9.8sec)(The left figure is displayed by isotherms and velocity vectors and the right figure is by isothrms in each case.)

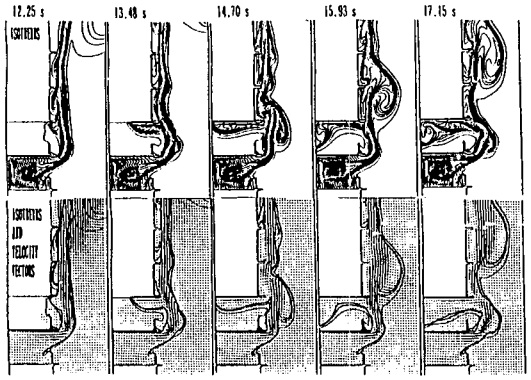

Fig. 13 Fire gas entering the room just above the fire foom(Case Ⅰ)

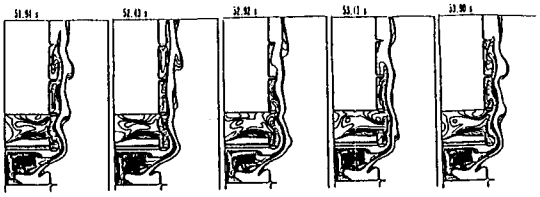

Fig. 14 Periodic behavior of upward fire gas along exterior wall(Case Ⅰ, Q=1.5MW)

다. 그림 9는 온도의 분포를 나타내고, 그림 10은 연소 생성물의 분포를 나타낸다.

특히, 연소모델로는 eddy-break-up 모델을 사용하였다.

6-3. 창문으로의 연기이동 모델[12]

K. Sato등은 창문과 창문을 통한 연기의 이동을 field medel을 사용하여 해석하였다. 발코니가 있는 경우, 없는 경우에 각각 해석하였고, 위의 창문을 통하여 연기의 전파를 보여주고 있다. 그림 11, 12는 여러 경우에 대한 속도와 온도의 분포를 보이고 있으며, 특히 그림 13, 14은 윗층으로의 연기이동을 잘 모사하고 있다.

이밖에 3차원 공간에서의 연기이동등 field 모델을 이용한 여러 사례들이 있다.[13]

7. 결 론

이상으로 서술한 바와 같이 화재성상에서의

field 모델은 다양하게 적용됨을 알 수 있으며, 화재성상 혹은 연기의 이동등 컴퓨터를 통하여 실제의 상황을 모사하고, 상세한 현상의 변화를 재현할 수 있다. 그러나, 난류나 연소모델등 아직 보완해야할 사항이 있고, 사용하기 어렵다는 단점에도 불구하고 PHOENICS, FLUENT 등의 상용 code를 사용하면 비교적 쉽게 해석할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 모델의 잠재적 가치는 매우 높으며, 적용의 범위를 넓힐 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. H. W. Emmons, H. E. Mitler L. N. Trefethem, 'Computer Fire Code Ⅲ', Home Fire Project Tech. Report No. 25, Havard univ., Cambridge, 1978
2. K. T. Yang, L. C. Chang, 'UNDSAFE-Ⅰ ; A Computer Code for Bouyant Flow in an Enclosure', NBS-GCR-77-84, 1977
3. H. Schlichting, Boundary Layer Theory, 7th ed. McGraw-Hill, 1979
4. K. K. Kuo, Principles of Combustion, 1st ed. John Wiley & Sons, 1986
5. E. E. Khalil, Modelling of Furnaces and Combustors, 1st ed. Abacus Press, 1982
6. P. Bradshaw, T. Cebeci, J. H. Hhittelaw, 'Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow, 1st ed. Academic Press, 1981
7. D. B. Spalding, 'Development of the eddy break-up model of turbulent combustion', Proc. 16th Symp.(Int.) on Combustion, 1967
8. W. J. Minkowycz, 'Hand Book of Numerical Heat Transfer', 1st ed. John Wiley & Sons, 1988
9. S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer, 1st ed., McGraw Hill, 1980
10. K. T. Yang, 'Numerical Calculations of Turbulent Buoyant Flow in Aircraf Cabins', DOT/FAA/CT-82/61, 1983
11. R. Huhtanen, 'Numerical Fire Modelling of a Turbine Hall', Fire Safety Science, 1988
12. K. Sato, K. Kuwahara, 'A Numerical Study of Window-to-Window Propagation in High Rise Building Fires', Fire Safety Science, 1991
13. R. H. Rehm, 'Bouyant Convection in an inclined Enclosure', Fire Safety Science, 1991

기 호 목 록

A_0	Frequency factor
H	Enthalpy
l	Mixing length
P	Pressure
T	Temperature
U	Velocity
W	Chemical species
x	coordinate
Y	Mass fraction of chemical species
Γ	Molecular diffusivity
μ	Molecular viscosity
ρ	Density
σ	Stress