

밀폐공간내에서의 화재에 의한 연기의 유동 이론 (The Theory of Smoke Movement by a Fire in an Enclosure)

노재성*(중앙대 기계공학과 대학원), 유홍선(중앙대 기계공학과)
J. S. No(Graduate School, Chung Ang Univ.), H. S. Ryou (Chung Ang Univ.)

Abstract

In foreign country such as U.S.A and Japan, considerable research has been done regarding the spread of smoke in room of fire involvement by using computer. but, in our country it has not been. So, this paper presents a detailed qualitative description of phenomena which occurs during typical fire scenarios through numerical analysis.

This research, in the view of field model, is focused on finding out the smoke movement and temperature distribution. And it is planned to analyze governing equation including smoke diffusion equation by numerical analysis with finite volume method and non-staggered grid system. The SIMPLE method for pressure-velocity couple and power-law scheme for convection terms are used. It shows that a plume is formed, hot plume gases impinge on the ceiling and they spread across it. then, it eventually reaches the bounding walls of the enclosure. It takes 60s for smoke to fill the enclosure.

1. 서론

오늘날 과학의 발달과 예술의 발달로 인한 인구증가로 인하여 건축의 대형화와 고층화가 심화되고 있는 상황이다. 이러한 대형화, 고층화가 진행되는 건축물에 대한 화재 위험성은 층래의 건물과 비교할 때 더욱 더 커지고 있다. 대형고층건물내에서 화재가 발생하였을 때 많은 열뿐만 아니라 연소 과정에서 생기는 많은 연기가 발생하는데 이 연기는 시계의 불투명성에 의한 피난의 어려움 및 질식에 의해 야기되는 인명피해의 주된 원인이다. 또한 다량의 연기는 화재진압 활동에도 큰 방해원인이 되고 있다. 실제로 화재로 인한 사망자 중 연기 피해에 의한 사망자의 비율이 선진국에서 더 높게 나타나므로 우리 나라에서도 점차 그 비율이 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 연기거동에 대한 보다 정확한 해석은 건물의 배연설비 및 피난대책에 있어 매우 중요하다.

연기의 유동은 연소현상과 풍압, 건물 구조 및 환기와 같은 요인과 물질전달, 열전달, 화학 반응 등이 포함된 매우 복잡한 메카니즘에 의해 변화한다. 이러한 모든 조건을 감안할 때 고층, 대형건물에서의 연기유동을 예측한다는 것은 아주 복잡한 문제이다. 따라서 화재실내의 열 유동 현상을 공학적으로 해석하기 위하여 각 조건에 따라 시험 연구를 한다는 것이 불가능하기 때문에 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법이 도입되어지고 있는 실정이다. 현재 미국, 일본의 나라에서 방화설계를 위한 화재 모델이 개발 단계를 거쳐 현재 실용화 단계까지 이른 것이 많다. 그러나, 우리나라의 경우 컴퓨터를 이용한 화재 현상의 분석은 극히 초기단계에 머무르고 있는 상태이다.

현재 연구 동향을 살펴보면 김광선등[1]은 SIMPLE Algorithm을 이용하여 한 쪽면이 개방된 화재실에서의 열, 유체를 수치해석하였다. 여기서는 화재실의 연소상태를 규명하기 위하여 물질전달, 열전달, 운동량전달, 와류 에너지전달, 화학 반응열을 고려하여 실제 화재실을 단순 모델링하였다. 여기서는 향후 더욱 효과적인 SIMPLE 알고리즘 적용을 위한 여러 방법도 도입함으로써 경제적인 계산시간(Computing Time)내에 계산을 수행할 수 있도록 화재 현상 연구분야 분석의 기초 자료를 제공하였다.

김진곤[2]은 상용프로그램들(UNSAFE, PHOENIC, etc.)을 이용하여 화재성상 혹은 연기의 유동등을 컴퓨터를 통하여 실제의 상황을 모사하여 화재성상에서의 field 모델이 다양하게 적용됨을 보여주었다. 또한, 김화중[3]등은 고층 빌딩의 아트리움 공간에서 화재성상에 관하여 실험적인 연구를 하였다. 일반 건축공간과는 다른 특성을 지닌 아트리움 공간에서 화재시 수직 방향으로의 화염의 확대가 매우 급격하다는 것을 보여주었고, 아트리움의 폭에 대한 높이의 비가 커질수록 화재초기온도가 높아짐을 보여주었으며, 안중기[4]등은 수직평판 위에 형성된 층류 확산화염의 현상적인 문제를 파악하는 수치적 연구를 수행하였다. 여기서는 복사열전달을 고려하여 층류 확산 화염의 전형적인 현상들을 관찰하고 이를 통해 복사열전달의 영향에 따른 제반 현상들을 파악하고 비교, 분석하였다. 밀폐공간내에서 화재가 발생하였을 때 안전 대책으로는 연기를 환기시키는 방법과 발화원을 차단하는 방법이 취해져야 하지만 이를 위해서 시간이 따른 연기의 유동이론이 선행되어야 하겠다.

따라서 본 연구에서는 밀폐공간내에서 국

부적으로 물질이 연소할 때 연소경과시간의 변화에 따른 연기의 거동 및 유동장, 온도장 등을 예측하고 건물이나 지하로 등의 배연설비 및 피난대책에 대한 Data base 및 이론적 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론 해석

[1]. 지배 방정식

화재에서 나타나는 유동은 대부분이 난류이지만 본 연구에서는 층류로 하여 지배 방정식을 제시하였다. 또한, 복사열전달은 화재에 있어서 매우 중요한 사항이지만 본 연구에서는 다루지 않았다.

지배방정식은 2차원 밀폐공간의 유동영역에 대한 것으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \circ \text{연속 방정식} \\ & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v) = 0 \\ & \circ \text{운동 방정식} \\ & \text{X방향} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho uv) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X}(\mu \frac{\partial u}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\mu \frac{\partial u}{\partial Y}) \\ & \text{Y방향} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho vv) \\ & = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X}(\mu \frac{\partial v}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\mu \frac{\partial v}{\partial Y}) - \rho g \\ & \circ \text{성분보존 방정식} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u Y_s) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v Y_s) \\ & = \frac{\partial}{\partial X}(\rho D \frac{\partial Y_s}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho D \frac{\partial Y_s}{\partial Y}) \\ & \circ \text{에너지 방정식} \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u T) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v T) \\ & = \frac{\partial}{\partial X}(\rho \alpha \frac{\partial T}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho \alpha \frac{\partial T}{\partial Y}) \end{aligned}$$

[2]. 초기조건과 경계조건

1) 초기조건

밀폐공간내에는 초기에 공기만 있는 것으로 하며 공기의 유동속도는 없고 공기의 온도는 300K로 일정하다.

$$\begin{aligned} & \text{즉, } t=0 \text{ 일 때} \\ & \rho = \rho_a \\ & u = 0 \\ & v = 0 \\ & T = 300K \\ & Y_s = 0 \end{aligned}$$

2) 경계조건

(1) 연소지역에서의 경계조건

연소지역에서의 plume의 수직속도를 입구조건으로 하고 plume의 수평방향의 속도는 0으로 한다. 나머지 모든 변수들은 분출되는 연기의 상대량을 준다.

$$\begin{aligned} & \text{즉, } Y = 0 \text{ 에서} \\ & u = 0 \\ & v = v_{in} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_s \\ Y_s &= 1 \\ \mu &= \mu_s \\ q'' &= 800 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

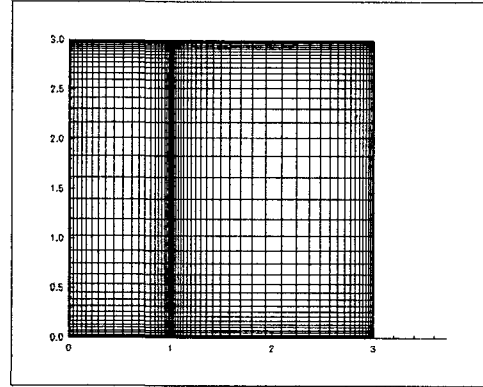
(2) 벽면에서의 경계조건

밀폐공간의 벽면에서의 모든 속도성분은 no slip조건을, 압력 및 질량분율은 벽면에 수직인 방향으로 기울기가 0인 Neumann형의 경계조건을 준다.

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ v &= 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} &= 0 \end{aligned}$$

[3]. 격자체계

앞에서 유도한 지배방정식들은 비선형 편미분 방정식들로서 해석적 방법으로 해를 구하기는 어려우며 따라서 수치해석적인 방법으로 해를 구한다. 그림1은 본 해석에 사용될 격자(55×40)의 구조를 나타내었다.



[Fig.1] Grid system of calculation domain

3. 수치해석 방법

위의 지배방정식과 경계조건을 각 격자점에서 제한 체적에 적용하여 차분방정식을 유도하고 압력항을 풀기 위해서는 속도와 압력을 서로 연관시켜 계산하는 SIMPLE 알고리즘을 이용하였다. 또한, 대류항 처리법으로는 맥스웰식을 사용하였고 최종적인 이산화방정식의 해를 구하기 위한 solver로는 SIP을 사용하였다. Time step은 0.05로 하여 100초가 될 때까지 수치해를 구하였고 수렴조건으로는 residual의 합이 0.1%이내이면 수렴된 것으로 간주하였다. 또한, 이완 계수를 0.532로 택하였으며 시간이 지날수록 수렴하는데 어려움이 있었다.

연기는 일종의 혼합기체이므로 연기의 viscosity가 필요하며 이를 계산하는 방법으로 다음과 같은 식을 사용하였다.

Chung method[5]로 각 성분에 대한 점성계수를 계산하였다.

$$\eta = 40.785 \frac{(MT)^{\frac{1}{2}}}{V_c^{\frac{2}{3}}}$$

$$\eta = \text{viscosity, } \mu F$$

$$M = \text{molecular weight, g/mol}$$

$$T = \text{temperature, K}$$

$$V_c = \text{critical volume, } c \text{ m}^3/\text{mole}$$

각 성분의 viscosity를 구하면 Wilk method[5]를 이용하여 연기의 점성계수를 계산한다.

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \eta_i}{\sum_{i=1}^n y_i \xi_{ij}}$$

여기서,

$$\xi_{ij} = \frac{[1 + (\eta_i / \eta_j)^{\frac{1}{2}} (M_i / M_j)^{\frac{1}{4}}]^2}{[8(1 + M_i / M_j)]^{\frac{1}{2}}}$$

y_i =mole fraction

불로부터 발생되는 연기의 상승속도는 많은 사람들의 실험을 통하여 모델화되어 있다. 현재 가장 많이 사용하는 식으로

$$w = B_w (g q'' / \rho_a C T_a)^{1/3}$$

이 있는데[6] 본 연구에서는 이 식을 수치계산의 입구 조건으로써 사용하고자 한다.

4.결과 및 고찰

밀폐된 공간내에서 가연성물질의 연소가 일어날 때 시간의 변화에 따른 밀폐공간내의 연기의 유동을 예측하기 위하여 연기의 점성계수, plume의 수직속도가 필요하며 이들을 열거하면 다음과 같다.

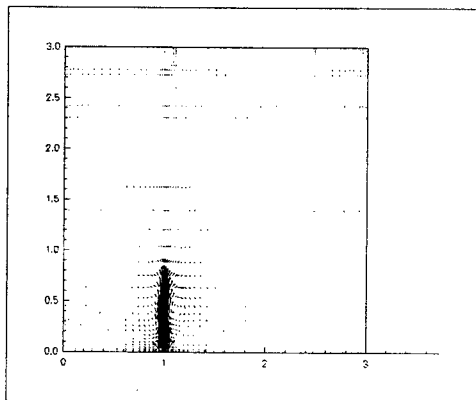
$$\mu_s = 0.00003492595 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\omega = 0.5191 \text{ m/sm/s}$$

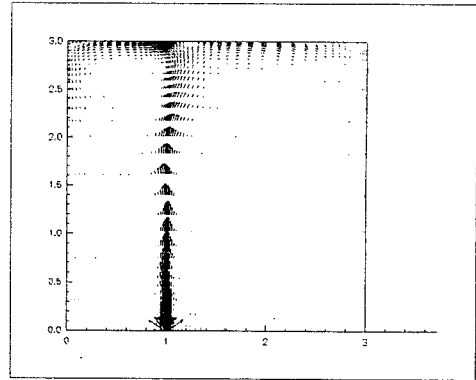
이론적 모델의 수치계산결과로써 속도분포, 연기의 질량분율, 연기의 온도를 각 격자점에 대해 얻었으며 이 결과로부터 연기의 유동현상을 고찰했다.

그림2부터 그림4은 연소경과시간에 따른 정사각형의 밀폐공간에서 유동장의 벡터선도를 나타낸 것으로 시간이 지날수록 재순환영역은 점점 커지며 두 개의 큰 반대방향으로 회전하는 eddy가 생기는데 벽면과 가까운 쪽에 있는 eddy가 벽면의 영향을 받아 더 작게 형성됨을 알 수 있다. 아래쪽 공기층에서는 연소진행에 따라 연소에 필요한 신선한 공기가 연소지역쪽으로 연기유동 방향과 역방향으로 유동한다.

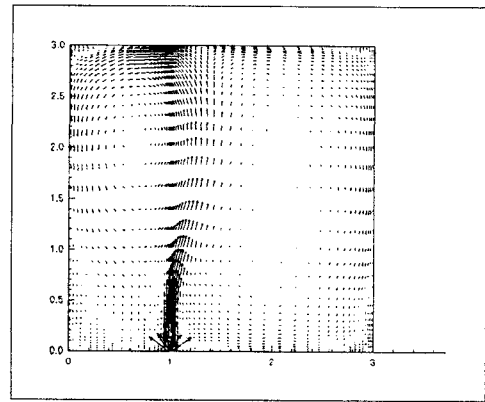
실제로 부력에 의한 유동 발생은 온도차이에 비례하기 때문에 연소지역에서의 초기 온도차이가 매우 중요하다. 그림에서 볼 수 있듯이 이러한 온도차이에 의한 수직성분의 속도는 시간이 지남에 따라 가스를 수송하게 되며 약 t=60s에서 거의 정상상태에 이르게 됨을 알 수 있다.



[Fig.2] Velocity vector at t=2s



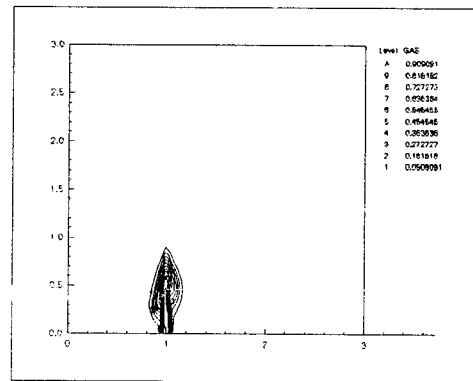
[Fig.3] Velocity vector at t=12s



[Fig.4] Velocity vector at t=60s

그림5부터 그림7은 시간에 따른 연기의 확산 과정을 나타낸 것이다.

그림5은 2초 후의 연기의 분포이다. 화재가 밀폐공간내에서 일어나면 화염은 빨리 확산되며 아주 많은 열량을 낸다. 불은 계속 성장하며 에너지뿐만 아니라 연소 과정에서 생기는 여러가지 생성가스를 낸다.



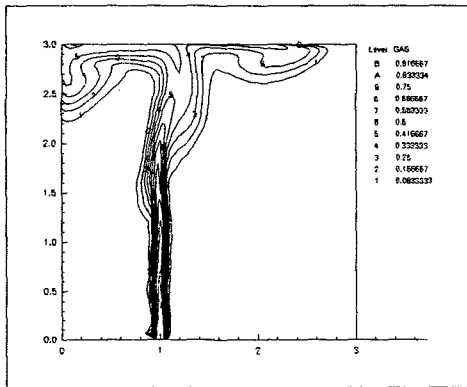
[Fig.5] Contour of gas distribution at t=2s

연기의 온도차이로 인해 생겨난 부력은 연소지역으로부터 연기의 유동을 일으키게 되어 plume은 불위로 형성된다. plume 주위의 비교적 움직이지 않고 차가운 기체는 plume과 같이

끌려가게 되어 plume gas와 혼합하게 된다. 이런 수반된 공기의 유동으로 인해 plume에서의 total mass flow는 증가한다.

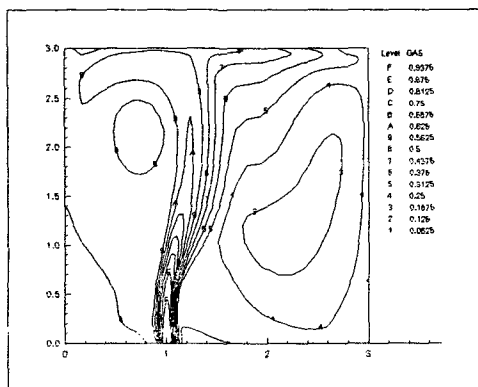
그림6은 12초 후의 plume이 이미 발달되어 천장을 따라 계속 확산하다가 plume과 천장, 벽사이의 상호 작용을 하게 되는 것을 보여 준다. 온도가 높은 plume gas가 천장과 부딪칠 때 그 가스는 비교적 얇은 제트(jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 확산한다. 이러한 더운 제트(jet)는 천장 표면 밑에서 벽쪽으로 확산될 때 압력구배에 의해 밑에 있는 주위 공기를 끌어 오는데 이 더운 제트(hot jet)는 천장 표면으로의 마찰력에 의해 점점 감쇠하고 밑으로부터 끌려온 공기에 운동량을 전달한다. 모든 이런 유동에 의하여 천장 제트(ceiling jet)는 계속 연기 농도와 속도가 감소한다.

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(downward wall jet)는 주위 공기보다 높은 온도와 낮은 밀도를 가지므로 부력에 의해 점점 감쇠하고 결국 멈추게 된다. 벽 제트(wall jet)는 또한 벽표면에서 마찰력에 의해 감쇠한다. 그리고 제트의 외부 유동은 전단력이 감소하게 되어 부력으로 인해 다시 위로 유동을 일으키게 된다.



[Fig.6] Contour of gas distribution at t=12s

그림7은 60초가 지난 후의 연기의 분포이다. 시간이 지날수록 밀폐공간내에 연기가 계속 차는 것을 알 수 있다.

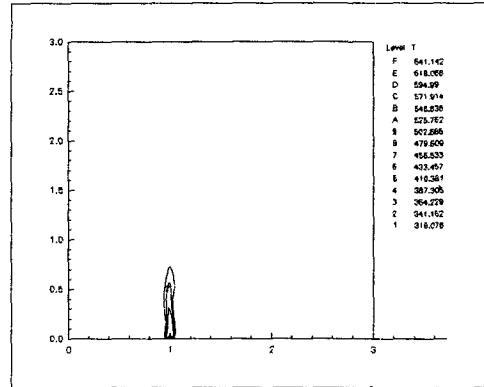


[Fig.7] Contour of gas distribution at t=60s

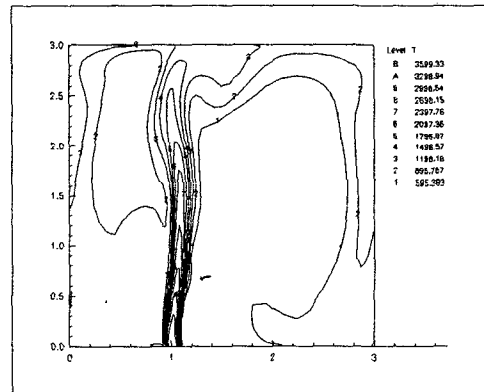
그림8부터 그림10까지는 연기의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그림8은 2초 후의 연기의 온도 분포이다.

아직까지 밀폐공간내에 열이 확산되지 못하고 있다.

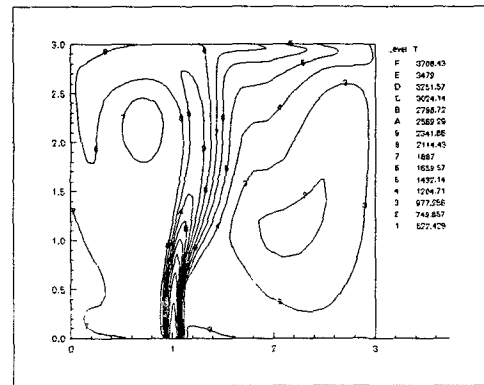
그림9는 36초 후의 연기의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 연기의 평균온도는 plume의 높이가 높아짐에 따라 계속 감소한다. 이는 plume주위의 비교적 차가운 기체가 plume을 따라 수반되면서 plume gas와 혼합하게 되어 열전달이 이루어지기 때문이다. 또한 천장과 벽면 그리고 밀폐된 단열조건이므로 열이 밖으로 빠져나가지 못하고 계속 밀폐공간내에 쌓이게 되어 밀폐공간내의 온도는 시간이 지날수록 매우 온도가 크다는 것을 알 수 있다.



[Fig.8] Contour of gas temperature at t=2s



[Fig.9] Contour of gas temperature at t=12s



[Fig.10] Contour of gas temperature at t=60s

그림10은 60초 후의 연기의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 이 때에는 밀폐공간내에 뜨거운 연기가 가득 채워져 밀폐공간내의 온도가 상당히 높은 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 밀폐공간내의 화재시 연기의 발생과 유동현상을 규명하기 위해서 수치적인 방법으로 해를 구하였다. 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 부력에 의한 유동발생은 초기 온도차이가 매우 중요하다. 초기 온도차이로 인한 부력은 천장제트(ceiling jet)의 강도와 벽 제트(wall jet)의 강도를 결정하게 된다.
2. 화재가 발생하면 plume이 형성되고 부력에 의해 연기는 높은 온도를 갖고 밀폐공간내의 윗부분에서부터 차기 시작한다.
3. 길이와 높이가 3m인 밀폐공간내에 화재가 발생할 경우 연기는 약 60초 후에 가득 차게 될 것으로 예상된다.
4. 사면이 단열조건일 때 일정한 열플럭스가 나오게 되면 밀폐공간내에는 상당히 높은 온도가 될 것이다.

끝으로, 앞의 지배 방정식에서 언급한 것과 같이 대부분의 화재에 의한 유동은 난류 유동이므로 난류 유동에 대한 연구는 추후 연구과제로 남겨둔다.

기호 목록

- B_u : 실험적 상수
- C : 비열
- D : 질량확산계수 (m^2/S)
- g : 중력가속도 (m/s^2)
- p : 압력 (N/m^2)
- q'' : 열플럭스 (W/m^2)
- T : 밀폐공간의 온도(K)
- T_a : 공기의 온도(K)
- t : 시간(s)
- u : 가로방향속도(m/s)
- v : 세로방향속도(m/s)
- X : 가로방향좌표(m)
- Y : 세로방향좌표(m)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- ρ_a : 공기의 밀도 (kg/m^3)
- ρ_s : 연기의 밀도 (kg/m^3)
- Y_s : 연기의 질량분율
- ω : Plume의 수직속도
- a : 열확산계수 (m^2/s)
- ϕ : 일변수(압력, 질량분율등)
- μ : 점성계수 ($N \cdot s/m^2$)
- μ_s : 연기의 점성계수 ($N \cdot s/m^2$)
- M : 분자량(g/mol)
- V_c : critical volume ($cm^3/mole$)
- y_i : 몰분율

참고문헌

1. 김광선, 손봉세, "SIMPLE Algorithm을 이용한 화재실의 열 유체의 수치해석" 한국소방학회지 6권 1호(통권 제13호), 1992.3
2. 김진곤, "화재 Simulation에서의 field model", 한국소방학회지 8권 1호(통권 17호), 1994.3
3. 김화중, 양승호, 최금란, "고층빌딩의 아트리어 공간에 있어서 화재성상에 관한 실험 연구", 한국소방학회지 7권 2호(통권 제16호), 1993.10
4. 안중기, 김진곤, "수직평판에서 복사열전달을 고려한 층류확산화염에 관한 수치적 연구", 한국소방학회지 8권 1호(통권17호), 1994.3
5. Robert C. Reid, John M. Prausnitz, Bruce E. Poling, "The Property of gases and Liquids"
6. P. H. THOMAS, "On the upward movement of smoke and Related Shopping Mall Program"
7. 윤원중, "건축물 화재의 연기제어", 소방기술자료집, 통권7호, 1996
8. JOHN H. KLOTE, "Computer Modeling for Smoke Control Design", Fire Safety Journal, Vol.9, pp.181-188, 1985
9. I. NAKAYA and K. AKITA, "A Simulation Model for Compartment Fires", Fire Safety Journal, Vol.5, pp.157-165, 1983
10. H. R. BAUM, R. G. REHM and G. W. MULHOLLAND, "Prediction of Heat and Smoke Movement in Enclosure Fires", Fire Safety Journal, Vol.6, pp.193-201, 1983