

논·문

밀폐 공간내에서의 화재에 의한 연기의 유동

Smoke Movement by a Fire in an Enclosure

노재성*

No, Jae Seong

유홍선*

Ryou, Hong Sun

김충익*

Kim, Choong Ik

윤명오**

Yoon, Myung Oh

Abstract

In foreign country such as USA 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 occure during typical fire scenarios through numerical analysis.

The governing equations are solved by using FVM method with non-staggered grid. 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 20s for smoke to fill the enclosure.

국문요약

미국이나 일본같은 외국에서는 컴퓨터를 이용하여 화재가 발생하였을 경우 건물내에서의 연기의 거동에 대한 수치해석적 연구가 활발히 연구되고 있다. 그러나, 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 이 논문은 수치해석을 통하여 전형적인 화재 발생시 일어나는 현상을 정성적으로 해석하고자 한다.

지배방정식은 유한 체적법 및 비엇갈림격자계를 사용하여 수치해석을 한다. 압력장을 해석하기 위해서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 대류항에 대해서는 멱승도식을 사용하였다.

본 논문에서는 plume이 형성된 후 뜨거운 plume 가스가 천장에 부딪쳐 넓게 확산되어 결국 밀폐공간의 벽에 다다르게 되는 것을 보여 주며 밀폐공간내에 연기가 가득 채워지는데 20초 가량 걸린다는 것을 알 수 있었다.

* 중앙대학교 공과대학 기계공학과

** 명지대학교 공과대학 건축학과 부교수, 학술이사

1. 서 론

오늘날 과학의 발달과 의술의 발달로 인한 인구증가로 인하여 건축의 대형화와 고층화가 심화되고 있는 상황이다. 이러한 대형화, 고층화가 진행되는 건축물에 대한 화재 위험성은 종래의 건물과 비교할 때 더욱 더 커지고 있다. 대형고층 건물내에서 화재가 발생하였을 때 많은 열뿐만 아니라 연소 과정에서 생기는 많은 연기를 내는 데 목재나 건초 등을 사용했던 옛날과는 달리 과학의 발달로 인해 플라스틱 등 석유화학제품, 합성 섬유로 된 신건축자재를 사용함으로써 화재시 발생하는 다양한 연기는 그 독성으로 인하여 질식되기도 하여 인명 피해를 가져오게 되는데 연기의 독성 내용은 자극성 독성물질, 최면마취성 가스, 감지할 수 없는 독성가스, 체내산소농도의 결핍 등으로 볼 수 있다. 또한 다양한 연기는 화재진압 활동에도 큰 방해원인이 되고 있다. 실제로 화재로 인한 사망자 중 연기피해에 의한 사망자의 비율이 선진국에서 더 높게 나타나므로 우리나라에서도 점차 그 비율이 증가할 것으로 예상된다.

연기는 눈으로 볼 수 있는 성분이 있기도 하지만 일산화탄소, 사염화탄소와 같이 무색투명한 기체여서 눈으로 볼 수 없는 성분도 있다. 여기의 정확한 정의는 없지만 대개 다음과 같이 정의 할 수 있다. “가연물이 연소할 때 생성되는 물질인 고상의 미립자, 액상의 타르적 등 액적립자, 무상의 증기 및 가상의 분자가 공기중에서 부유 확산하는 복합혼합물이다.”¹⁾

건물의 밀폐공간내에서 화재의 연소 현상과 그에 따른 연기의 유동은 굴뚝효과(Stack Effect), 풍압, 건물구조 및 환기와 같은 요인과 물질전달 열전달 화학반응 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 수치적

해석 방법이 도입되어지고 있는 실정이다. 현재 미국, 일본 등의 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 살펴 보면 김광선 등²⁾은 SIMPLE Algorithm을 이용하여 한 쪽면이 개방된 화재실에서의 열, 유체를 수치해석하였다. 여기서는 화재실의 연소상태를 규명하기 위하여 물질전달, 열전달, 운동량전달, 와류 에너지 전달, 화학 반응열을 고려하여 실제 화재실을 단순 모델링하였다. 여기서는 향후 더욱 효과적인 SIMPLE 알고리즘 적용을 위한 여러 방법을 도입함으로써 경제적인 계산시간(Computing Time)내에 계산을 수행할 수 있도록 화재 현상 연구분야 분석의 기초 자료를 제공하였다.

COOPER³⁾은 화재가 일어난 방과 자유롭게 연결된 이웃 공간에서 연소 생성물로써 생겨난 연기의 물리적 현상을 기술하여 그러한 공간내에서 생명이나 적당한 화재안전을 위해 건축물을 설계하는데 이용될 수 있는 연기의 유동이론을 제시하였고 김진곤⁴⁾은 상용프로그램들(UNSAFE, PHOENIC, etc.)을 이용하여 화재성상 혹은 연기의 유동 등을 컴퓨터를 통하여 실제의 상황을 모사하여 화재성상에서의 field 모델이 다양하게 적용됨을 보여주었다. 또한, 김화중⁵⁾ 등은 고층빌딩의 아트리움 공간에서 화재성상에 관하여 실험적인 연구를 하였다. 일반 건축공간과는 다른 특성을 지닌 아트리움 공간에서 화재시 수직방향으로의 화염의 확대가 매우 급격하다는 것을 보여주었고, 아트리움의 폭에 대한 높이의 비가 커질수록 화재초기 온도가 높아짐을 보여주었다.

안중기⁶⁾ 등은 수직평판 위에 형성된 층류 확산화염의 현상적인 문제를 파악하는 수치적 연구를 수행하였다. 여기서는 복사열전달을 고려하여 층류확산화염의 전형적인 현상들을 관찰하고 이를 통해 복사열전달의 영향에 따른 제반 현상들을 파악하고 비교, 분석하였다.

추병길⁷⁾은 화재실 모델을 수치해석을 통하여

지하화재 발생시 유동장 및 속도장의 특성을 방연벽과 연계성을 보여주었다.

오늘날 같이 대형고층건물이 많은 실정에서 화재에 의한 연기로 인하여 많은 피해가 늘어남에 따라 건축물을 설계하는데 있어 밀폐배연방식, 자연배연방식, 기계배연방식 등의 연기제어 설비에 대하여 많은 연구와 실험을 통하여 화재안전 대책을 강화하고 있다.

밀폐공간내에서 화재가 발생하였을 때 안전 대책으로는 연기를 환기시키는 방법과 발화원을 차단하는 방법이 취해져야 하지만 이를 위해서는 시간에 따른 연기의 유동이론이 선행되어야 하겠다.

따라서 본 연구에서는 밀폐공간내에서 국부적으로 물질이 연소할 때 연소경과시간의 변화에 따른 연기의 유동을 예측함으로써 건물의 밀폐공간내에서 화재가 발생하였을 경우에 대하여 방재 전문가나 건물 설계자에게 보다 현실적으로 유용한 연기제어설비의 기본자료를 제공하려 한다.

2. 이론 해석

(1) 해석 모델

본 연구의 목적은 건물의 내부와 같은 밀폐된 공간의 특정위치에서 가연성물질의 연소가 일어날 때 시간의 변화에 따른 밀폐공간내의 연기의 유동을 예측하는 것이다. 본 연구에서는 2차원 직교 좌표계를 택하며 길이와 높이가 3m인 밀폐 공간에 왼쪽 밀바닥에서부터 1m만큼 떨어진 0.05간격(연소면적)에서 가연성물질이 연소하고 있다. 이때 갑작스러운 연소로 인해 많은 열이 발생하게 되며 온도차이로 인한 부력항의 생성으로 인해 가연성물질에서 생겨난 연기가 비교적 빠른 속도로 plume을 형성하기 시작한다.

(2) 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.

○ 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v) = 0$$

○ 운동 방정식

X방향

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho vu) \\ = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X}(u \frac{\partial u}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(u \frac{\partial u}{\partial Y}) \end{aligned}$$

Y방향

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho vv) \\ = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X}(v \frac{\partial v}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(v \frac{\partial v}{\partial Y}) - \rho g \end{aligned}$$

○ 성분보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_s) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u Y_s) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v Y_s) \\ = \frac{\partial}{\partial X}(\rho D \frac{\partial Y_s}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho D \frac{\partial Y_s}{\partial Y}) \end{aligned}$$

○ 에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u T) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v T) \\ = \frac{\partial}{\partial X}(\rho \alpha \frac{\partial T}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho \alpha \frac{\partial T}{\partial Y}) \end{aligned}$$

(3) 초기조건과 경계조건

1) 초기조건

밀폐공간내에는 초기에 공기만 있는 것으로 하며 공기의 유동속도는 없고 공기의 온도는 295K로 일정하다.

즉, $t=0$ 일 때

$$\rho = \rho_0$$

$$u = 0$$

$$v = 0$$

$$T = 295K$$

$$Y_s = 0$$

2) 경계조건

① 연소지역에서의 경계조건

연소지역에서의 주유동 방향 속도는 부력에 의

한 연기분출 속도로 하고, 주유동에 수직한 속도는 0으로 주고, 나머지 모든 변수들은 분출되는 연기의 상태량을 준다.

즉 $Y=0$ 에서

$$u=0$$

$$v=1m/s$$

$$\rho=\rho_s$$

$$Y_s=1$$

$$\mu=\mu_s$$

$$T=800K$$

② 벽면에서의 경계조건

밀폐공간의 벽면에서의 모든 속도성분은 no slip 조건을, 압력 및 질량분율은 벽면에 수직한 방향으로 기울기가 0인 Neumann형의 경계조건을 준다.

$$u=0$$

$$v=0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}=0$$

(4) 격자체계

앞에서 유도한 지배방정식들은 비선형 편미분 방정식들로서 해석적 방법으로 해를 구하기는 어려우며 따라서 수치해석적인 방법으로 해를 구한다. 그림 1은 본 해석에 사용될 격자의 구조를 나타내었다.

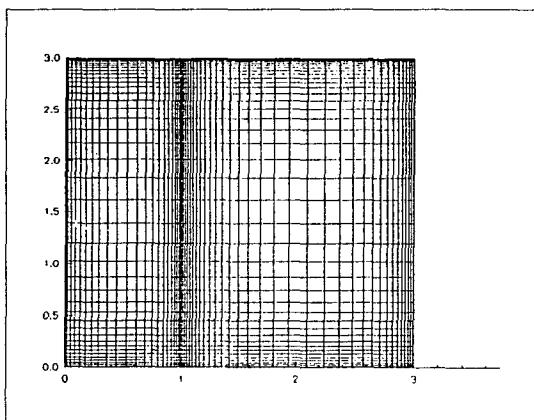


Fig. 1. Grid system of calculation domain.

그림 1의 격자는 연기의 연소부위 및 밀폐공간 내의 벽면부근에서는 변수들의 변화율이 크기 때

문에 보다 정확히 해석하기 위해 조밀한 상태를 유지하며 변수들의 변화율이 적은 나머지 영역에 대해서는 연소지역 부위에서 멀어질수록, 벽면에서 멀어질수록 조밀해지는 불균일 격자를 사용하였다. 격자점을 많이 구성하면 해의 정확도는 증가하지만 계산시간(Computing Time)과 컴퓨터의 용량의 제한이 있으므로 적절한 선택이 요구된다. 본 연구에서는 종속변수들의 값이 변화가 없기 시작한 (55×40) 격자 체계를 사용하였다.

3. 수치해석 방법

위의 지배방정식과 경계조건을 각 격자점에서의 제한 체적에 적용하여 차분방정식을 유도하고 압력항을 풀기위해서는 속도와 압력을 서로 연관시켜 계산하는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 방법을 이용하였다. 또한, 대류항 처리법으로는 Power-law scheme을 사용하였고 최종적인 이산화 방정식의 해를 구하기 위한 solver로는 SIP을 사용하였다. 또한 격자구성을 비엇갈림격자계를 이용하여 엇갈림 격자계가 갖는 단점, 즉 복잡한 기하학적 형상에 따른 수치해석적 어려움을 극복하였다. Time step은 0.02로 하여 20초가 될 때 까지 수치해를 구하였고 수렴조건으로는 residual의 합이 0.1% 이내이면 수렴된 것으로 간주하였다. 또한, 이완 계수를 0.8로 택하여 각 time step에서 수렴될 때까지 걸린 시간은 약 2분정도였다.

계산순서는 다음과 같다.

- (1) 계산에 필요한 모든 수치를 입력한다.
- (2) 격자를 생성한다.
- (3) 주유동 방향속도를 계산한다.
- (4) 주유동 방향에 수직한 방향의 속도를 계산한다.
- (5) 압력수정 p' 를 계산하고 p , u , v 를 수정한다.
- (6) 연기의 질량분율 Y_s 를 계산한다.
- (7) (3)부터 (6)의 과정을 수렴할 때 까지 반복한다.
- (8) 수렴하면 수치를 출력하고 시간단계를 증

가시켜 (3)부터 (8)의 과정을 반복한다.

화재시 발생되는 가스는 연소과정에서 생기는 가열된 증기와 재료에 따라 다르겠지만 100여 가지 이상의 해로운 생성물, 그리고 불완전 연소된 분해 등의 혼합물로 구성되며 연기의 발생량은 연소물질의 양, 형태와 화재시의 환기조건에 의해 크게 변한다. 그러나, 우리의 생활에서 많이 쓰이고 있는 아크릴섬유, 나일론, 폴리우레탄수지, 우레아수지, 메라민수지 등의 질소계 건축재료는 연소생성물로써 주로 CO , CO_2 , HNC , NH_3 등의 가스를 발생시킨다. 연기는 앞에서 언급한 것과 같이 일종의 혼합 기체이므로 연기의 viscosity가 필요하며 이를 계산하는 방법으로 다음과 같은식을 사용하였다.

Chung method⁸⁾로 각 성분에 대한 점성계수를 계산하였다.

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

η =viscosity, μF

M=molecular weight, g / mol

T=temperature, K

V_c =critical volume, cm^3/mol

각 성분의 viscosity를 구하면 Wilk method⁸⁾를 이용하여 연기의 점성계수를 계산한다.

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \eta_i}{\sum_{j=1}^n y_j \zeta_{ij}}$$

여기서,

$$\zeta_{ij} = \frac{[1 + (\eta_i / \eta_j)^{\frac{1}{2}} (M_j / M_i)^{\frac{1}{3}}]^2}{[8(1 + M_i / M_j)]^{\frac{1}{2}}}$$

y_i =mole fraction

4. 결과 및 고찰

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

그림 2부터 그림 5는 연소경과시간에 따른 정사각형의 밀폐공간에서의 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 공기총에서는 연소진행에 따라 연소에 필요한 신선한 공기가 연소지역쪽으로 연기 유동방향과 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 $t=20s$ 에서 거의 정상상태에 이르게 됨을 알 수 있다.

그림 6부터 그림 9은 시간에 따른 연기의 확산 과정을 나타낸 것이다.

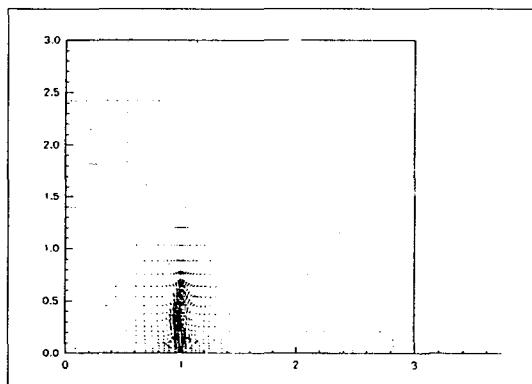


Fig. 2. Velocity vector at $t=0.64s$.

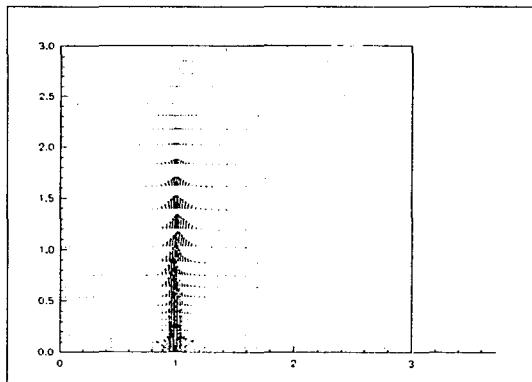


Fig. 3. Velocity vector at $t=2s$.

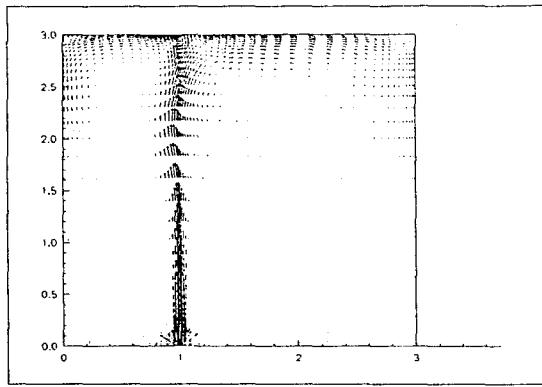


Fig. 4. Velocity vector at $t=8s$.

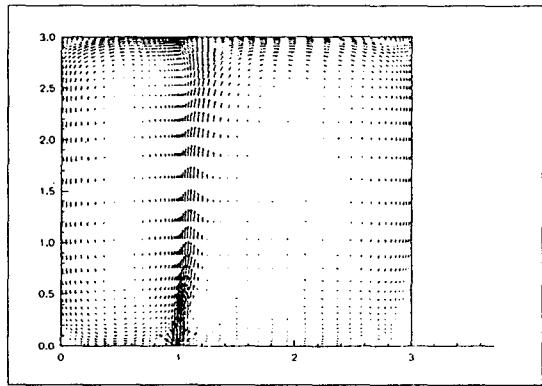


Fig. 5. Velocity vector at $t=20s$.

그림 6은 0.64초 후의 연기의 분포이다. 화재가 밀폐공간내에서 일어나면 화염은 빨리 확산되며 아주 많은 열량을 낸다. 불은 계속 성장하며 에너지 뿐만 아니라 연소 과정에서 생기는 여러 가지 생성가스를 낸다.

그림 7은 2초 후의 plume의 발달 과정을 나타내는데 연기의 온도차이로 인해 생겨난 부력은 연소지역으로부터 연기의 유동을 일으키게 되어 plume은 불위로 형성된다. plume 주위의 비교적 움직이지 않고 차가운 기체는 plume와 같이 끌려가게 되어 plume gas와 혼합하게 된다. 이런 수반된 공기의 유동으로 인해 plume에서의 total mass flow는 증가한다.

그림 8은 8초 후의 gas의 분포이다. 이 때에는 이미 천장을 따라 계속 확산하다가 plume과 천장, 벽사이의 상호 작용을 하게 되는데 온도가 높은 plume gas가 천장과 부딪칠 때 그 가스는

비교적 얇은 제트(jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 확산한다. 이러한 더운 제트(jet)는 천장표면 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 천장표면 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. 제트로부터 운동량과 열의 전달이 벽으로부터 일어나고 제트의 외부 유동은 전단력이 감소하게 되어 부력으로 인해 다시 위로 유동을 일으키게 된다. 또한, 벽면과 가까운 쪽에서는 공간이 작기 때문에 단위면적당 연기의 농도가 크지만 벽면과 면 쪽에서는 더 멀리 확산이 되기 때문에 연기의 농도가 작다.

그림 9는 200초가 지난 후의 연기의 분포이다. 시간이 지날수록 밀폐공간내에 연기가 계속 차는 것을 알 수 있다.

그림 10부터 그림 13까지는 연기의 온도 분포를 나타낸 그림이다.

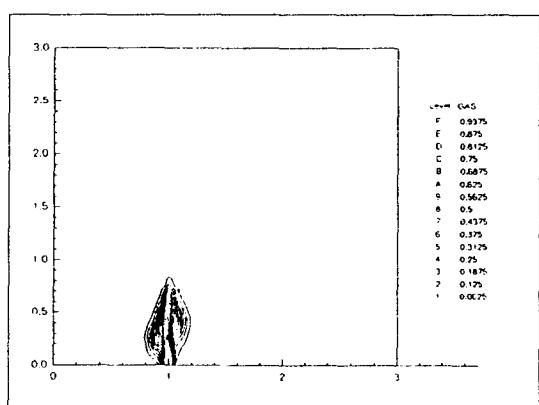


Fig. 6. Contour of gas distribution at $t=0.64s$.

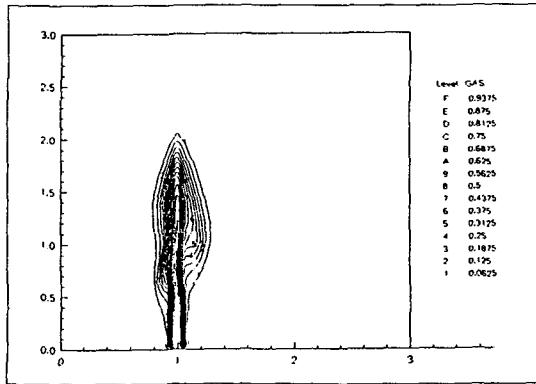


Fig. 7. Contour of gas distribution at $t=2s$.

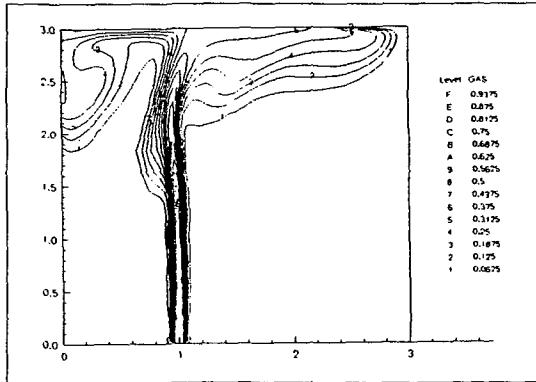


Fig. 8. Contour of gas distribution at $t=8s$.

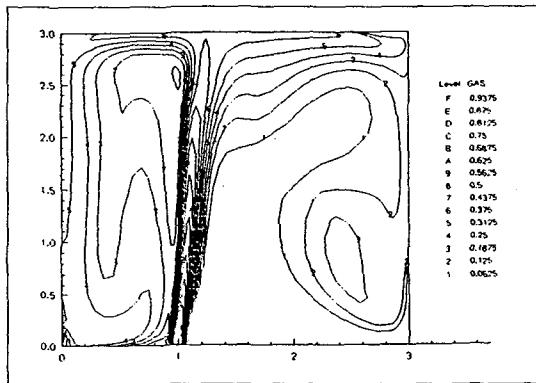


Fig. 9. Contour of gas distribution at $t=20s$.

그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 연기의 평균온도는 plume의 높이가 높아짐에 따라 계속 감소한다. 이는 plume 주위의 비교적 차가운 기체가 plume를 따라 수반되면서 plume gas와 혼합하게 되어 열전달이 이루어지기 때문이다.

그림 12는 8초 후의 연기의 온도를 나타낸 그림이다. 더운 천장 제트(ceiling jet)는 전도에 의해 비교적 차가운 주위 천장 표면으로 열을 전달하고 대류에 의하여 수반된 공기로 열을 전달하게 하기 때문에 제트의 온도는 계속 감소하게 된다.

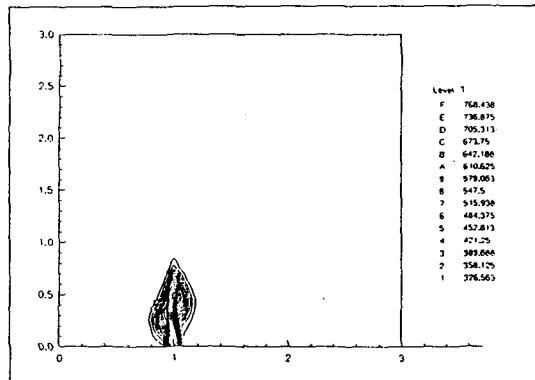


Fig. 10. Contour of gas temperature at $t=0.64s$.

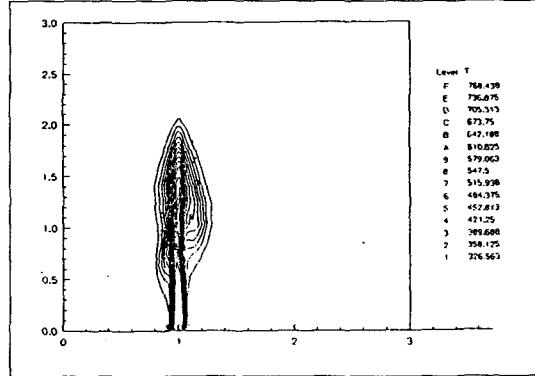


Fig. 11. Contour of gas temperature at $t=2s$.

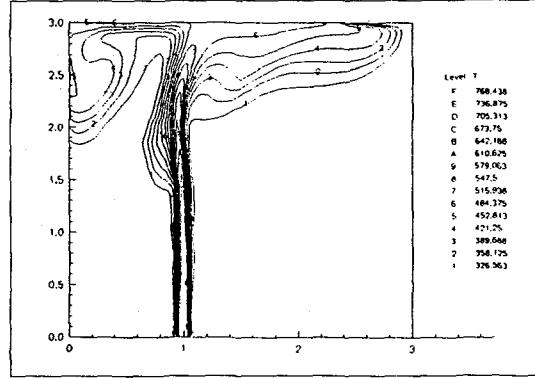


Fig. 12. Contour of gas temperature at $t=8s$.

그림 13은 20초가 지난 후의 연기의 온도를 나타낸 그림인데 벽 표면이 연소지역과 가까울 수록 천장과 벽의 접합부분에서 천장 제트의 온도가 더 큰 것을 알 수 있다.

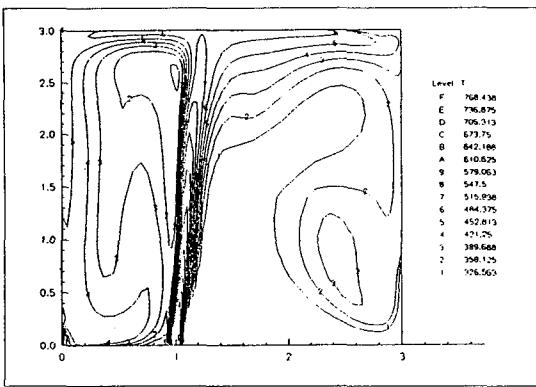


Fig. 13. Contour of gas temperature at $t=20s$.

5. 결 론

본 연구에서는 밀폐공간내의 화재시 연기의 발생과 유동현상을 규명하기 위해서 수치적인 방법으로 해를 구하였다.

그 결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 부력에 의한 유동발생은 초기 온도차이가 매우 중요하다. 초기 온도차이로 인한 부력은 천장 제트(ceiling jet)의 강도와 벽 제트(wall jet)의 강도를 결정하게 된다.
- 화재시 밀폐공간내의 윗부분이 가장 먼저 연기로 가득 차게 될 것으로 예상된다.
- 길이와 높이가 3m인 밀폐공간내에 화재가 발생할 경우 연기는 약 20초 후에 가득 차게 될 것으로 예상된다.

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

기호 목록

D : 질량확산계수(m^2/s)

g : 중력가속도(m^2/s)

p : 압력(N/m^2)

T : 밀폐공간의 온도(K)

t : 시간(s)

u : 가로방향속도(m/s)

v : 세로방향속도(m/s)

ρ : 밀도(kg/m^3)

ρ_a : 공기의 밀도(kg/m^3)

ρ_s : 연기의 밀도(kg/m^3)

X : 가로방향좌표(m)

Y : 세로방향좌표(m)

Y_s : 연기의 질량분율

a : 열확산계(m^2/s)

ϕ : 일반변수(압력, 질량분율등)

μ : 점성계수(Ns/m^2)

μ_s : 연기의 점성계수(Ns/m^2)

M : 분자량(g/mol)

V_c : critical volume(cm^3/mol)

y_t : 물분율

참 고 문 헌

- 양성환, “건축물의 화재와 연기제어”, 소방기술 자료집, 1984
- 김광선, 손봉세, “SIMPLE Algorithm을 이용한 화재실의 열 유체의 수치해석”, 한국소방학회지 6권 1호(통권 제13호), 1992. 3
- LEONARD Y. COOPER, “Smoke Movement in Rooms of Fire Involvement and Adjacent Spaces”, fire Safety Journal, Vol. 7, pp. 33-46, 1984
- 김진곤, “화재 Simulation에서의 field model”, 한국소방학회지 8권 1호(통권 17호), 1994. 3
- 김화중, 양승호, 최금란, “고층빌딩의 아트리움 공간에 있어서 화재성상에 관한 실험 연구”, 한국소방학회지 7권 2호(통권 제16호), 1993. 10
- 안중기, 김진곤, “수직평판에서 복사열전달을 고려한 층류확산화염에 관한 수치적 연구”, 한국소방학회지 8권 1호(통권 17호), 1994. 3
- 추명길, “빌딩 지하공간에 있어서 연소가스 유동 및 피난, 제연 대책”, '95 제10회 소방학술 세미나

8. Robert C. Reid, John M. Prausnitz, Bruce E. Poling, "The Property of gases and Liquids"
9. 윤원중, "건축물 화재의 연기제어", 소방기술 자료집, 통권 7호, 1996
10. JOHN H. KLOTE, "Computer Modeling for Smoke Control Design", Fire Safety Journal, Vol. 9, pp.181-188, 1985.
11. I. NAKAYA and K. AKITA, "A Simulation Model for Compartment Fires", Fire Safety Journal, Vol. 5, pp.157-165, 1983
12. A.D. Burns, D.S. Clarke, P. Guilbert, I.P Jones, S. Simcox and N.S. Wilkes, "The Application of CFD to The Modeling of Fires in Complex Geometries"
13. 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