

직사각형 밀폐공간내에 기체연료 밀면 누출시 가연성 혼합기 생성에 관한 연구

A Study on Flammable Mixture Formation in a Rectangular Enclosure with Gaseous Fuel Leak from the Bottom

정 낙 규*, 김 호 영**
N. K. Chung, H. Y. Kim

Key words: Flammable Mixture(가연성 혼합기), Enclosure(밀폐공간), Aspect Ratio(중횡비), Finite Difference(유한차분)

Abstract

Numerical method is applied to predict the time variation behavior of flammable mixture formation in a two dimensional enclosure from the beginning of gas leak. Additionally experimental method is used to consider qualitative aspects.

Characteristics of flammable mixture formation such as distribution of flow and fuel mass fraction at various locations in the enclosure are determined for the following parameters: the various locations of leak at the bottom and aspect ratio of the enclosure.

In the case of gas leak with small leak velocity from the bottom of enclosure gravitational force affects the formation of flammable mixture. Aspect ratio of the enclosure also affects the formation of flammable mixture. The volume of the region of recirculating flow is dominant factor affecting the formation mixture.

기 호 설 명

- A : 밀폐공간의 가로길이 (m)
- B : 밀폐공간의 세로길이 (m)
- C : 좌측벽에서 노즐 중심까지의 거리 (m)
- D : 노즐 간격 (m)
- D : 질량확산계수 (m^2/s)
- g : 중력가속도 (m/s^2)
- Le : 확산 선호도비 (Lewis number)
- n : 벽면에 수직방향
- p : 압력 (N/m^2)
- R^0 : 일반기체상수 ($kJ/kmolK$)
- t : 시간 (s)
- T : 밀폐공간의 온도 (K)

- u : 가로방향 속도 (m/s)
- v : 세로방향 속도 (m/s)
- v_e : 노즐 출구속도 (m/s)
- W_i : 성분기체 i 의 분자량
- X : 가로방향 좌표
- Y : 세로방향 좌표
- Y_F : 기체연료의 질량분률
- Y_i : 성분기체 i 의 질량분률

그리이스 문자

- μ : 점성계수 (Ns/m^2)
- μ_F : 연료의 점성계수 (Ns/m^2)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- ρ_a : 공기의 밀도 (kg/m^3)
- ϕ : 일반변수 (압력, 질량분률)

*조선대학교 기계설계공학과

**고려대학교 기계공학과

1. 서 론

오늘날 액화천연가스나 액화석유가스와 같은 기체연료는 연소의 용이함, 적은 량의 공해물질 배출, 연소기 조작의 용이, 작은 크기의 연소기 등 많은 장점들로 인하여 사용이 점점 증가되고 있으며, 산업, 발전용은 물론 가정용 난방, 온수공급을 위한 연소기의 주 연료의 자리를 넓혀가고 있다.

기체연료의 이러한 장점들에도 불구하고 보관시 누출 및 빠른 연소속도로 인하여 폭발의 위험성을 지니고 있으며 피해는 액체연료나 고체연료 사용시의 경우와 비교할 수 없을 정도이다. 기체연료의 폭발은 대부분이 취급의 부주의, 보수정비의 불량 및 안전시설의 부적합으로 인하여 일어나며, 재산 또는 인명에 많은 피해를 준다. 따라서 이러한 기체연료의 폭발에 대한 방지대책이 필요하다.

기체연료가 밀폐공간내에 누출되었을 때의 폭발 방지대책은 누출된 후 공간 내의 상태를 명확히 파악 분석한 후 환기 등의 방법이 취해져야 하지만, 이를 위하여는 기체연료의 누출이 시작된 후 시간에 따라 변화하는 공간 내의 상태 즉, 공간 내의 가연성 혼합기의 형성과정에 대한 연구가 기본적으로 반드시 선행되어야 한다.

지금까지 밀폐공간에 대한 연구들 중 대부분은 난방이나 냉방시 또는 열교환기 등의 자연대류, 및 복사에 대한 연구들¹⁻⁸⁾이 대부분이며 질량전달에 대한 연구는 거의 없다. 환경공학자들은 독성, 인화성 가스 등을 담은 탱크, 자동차 혹은 이러한 물질을 취급하는 공장에서 수송배관의 파괴로 인하여 가스가 대기중에 누출되었을 때 기상상태 등을 고려하여 가스가 확산되는 최대반경과 반경에 따른 가스의 질량분율을 이론과 실험을 통하여 연구하였으며,^{9,10)} Masliyah와 Nguyen,¹¹⁾ Law와 Masliyah¹²⁾ 등은 평평한 표면에 대한 2차원 층류 공기분사의 충돌시 국부 질량전달계수를 구하기 위해 실험과 이론을 통해서 연구하였다. 이들의 연구들은 밀폐공간내의 자연대류 및 열전달에 대한 연구들이거나 대기중에 기체연료가 누출되었을 때의 연구들이며 밀폐공간내에 가스가 누출될 때 가연성 혼합기의 형성과정에 대한 연구는 없는 실정이다.

본 연구는 밀폐공간의 밀면에서 공간내부로 기체연료가 누출될 때 초기에 밀폐공간내의 아래쪽에 가연성 혼합기가 형성될 때까지의 기건동안 시간에

따른 혼합기 생성과정 즉, 각부분에서의 시간에 따른 혼합기의 가연, 불가연 여부를 예측하는 직사각형 시스템을 해석하고 실험을 통해 확인함으로써 폭발방지 연구에 대한 기본자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 이론분석

2.1 기본 시스템

본 연구에서는 건물의 내부와 같은 2차원 밀폐공간의 밀면 특정위치에서 기체연료의 누출이 있을 때 밀폐공간내의 시간에 따른 유동상태, 혼합기 형성상태 등을 예측하는 시스템을 개발한 후 수치실험을 통하여 각 변수 즉, 가스의 누출위치, 누출속도, 공간의 종횡비 등의 변화에 따른 혼합기 생성과정 등의 시간에 따른 변화를 예측하는 것을 내용으로 하며, 본 연구에서 채택한 기본적인 시스템은 Fig. 1과 같다.

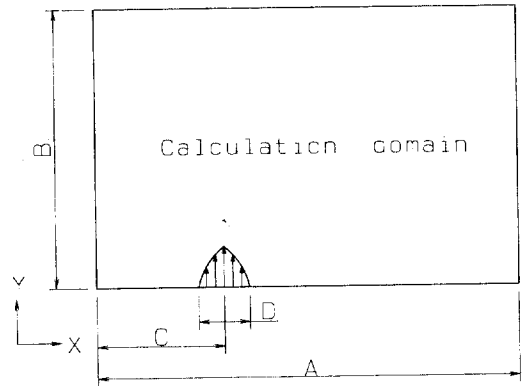


Fig. 1 schematic system for calculation

Fig. 1과 같은 공기가 채워져 있는 밀폐공간에 어느 순간 특정위치에서 기체연료의 누출이 시작되면 이로 인하여 공간내의 유동이 생기며 누출원로부터 나온 기체연료는 유동에 의한 대류 질량전달과 분자운동에 의한 질량확산에 의하여 공기와 혼합이 된다. 이 때 혼합기의 시간 및 위치에 따른 상태는 유동상태 및 질량확산속도에 지배를 받게 되며 이는 누출위치, 누출속도, 공간의 형태에 전적으로 좌우될 것이다.

2.2 지배방정식

확산 선호도비(Lewis number)는 1이라는 가정

을 이용하여 2차원 밀폐공간의 과도 유동영역에 대한 지배방정식을 유도^{13,14)}하면 다음과 같다.

· 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

· 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho uv) \\ = -\frac{\partial p}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial X}(\mu \frac{\partial u}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\mu \frac{\partial u}{\partial Y}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho vv) \\ = -\frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{\partial}{\partial X}(\mu \frac{\partial v}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\mu \frac{\partial v}{\partial Y}) - \rho g \end{aligned} \quad (3)$$

· 성분보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_F) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho u Y_F) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho v Y_F) \\ = \frac{\partial}{\partial X}(\rho D \frac{\partial Y_F}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(\rho D \frac{\partial Y_F}{\partial Y}) \end{aligned} \quad (4)$$

· 상태방정식

$$p = \rho R^o T \sum_i \frac{Y_i}{W_i} \quad (5)$$

2.3 초기조건 및 경계조건

· 초기조건 $t=0, 0 \leq X \leq A, 0 \leq Y \leq B$ 일

때

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_a \\ u &= 0 \\ v &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

· 경계조건

(1) 노즐 출구에서의 경계조건

노즐 출구에서의 주유동 방향 속도는 분출 속도로 하고, 주유동에 수직인 속도는 0으로 주고, 나머지 모든 변수들은 분출되는 연료의 상태량을 준다.

$$u=0, v=v_e, Y_F=1 \quad (7)$$

(2) 벽면에서의 경계조건

밀폐공간의 벽면에서의 모든 속도성분은 점착(no slip)조건을, 압력 및 질량분율은 벽면에 수직인 방향으로의 기울기가 0인 Neumann형의 경계조건을 준다.

$$u=0, v=0, \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

3. 수치해석

이상의 지배방정식을 이론해석하기 위하여 다음과 같은 수치해석 기법을 사용하여 유한차분방정식을 구한다.

각 방정식의 비정상항에 대해서는 Fully Implicit Scheme을, 대류 및 확산항에 대해서는 Power Law Scheme을 사용하여 유한차분식을 얻고 유동장의 해석에는 SIMPLE 알고리즘을 사용한다. 또한 각각의 종속변수를 계산하는데는 TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm)를 사용하여 해를 구한다.

계산과정중 운동량 보존방정식은 압력장이 정확히 해석된 경우에만 정확한 해를 얻을 수 있으므로 유한차분 연속방정식으로부터 밀폐공간내에서 공기와 연료의 압축성을 고려하여 압력수정방정식을 유도¹⁴⁾하여 계산에 사용한다. 이때의 계산순서는 다음과 같다.

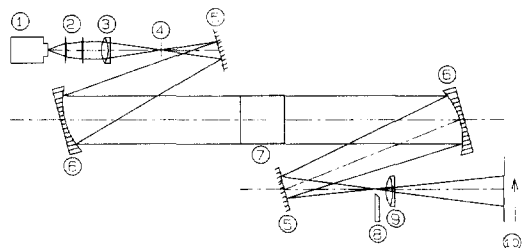
- 1) 모든 상태량을 지정한다.
- 2) 전 계산영역에 걸쳐 모든 변수들의 초기치를 가정한다.

3) 일정 시간단계에서 밀폐공간내의 유동장에 대해 모든 변수가 수렴될 때까지 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 해석하고 각 변수들의 계산에는 TDMA 알고리즘을 사용한다.

4) 밀폐공간 내의 혼합기의 상태가 가연한계에 도달될 때까지 위의 과정을 반복한다.

4. 실험

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 쉬리렌 시스템



- ① Light source
- ② Condenser lens
- ③ Focusing lens
- ④ Pin hole
- ⑤ Plane mirror
- ⑥ Schlieren mirror
- ⑦ Test section
- ⑧ Knife edge
- ⑨ Objective lens
- ⑩ Camera

Fig. 2 Schlieren arrangement

(Schlieren System)을 이용하여 밀폐공간내에 누출되는 연료의 유동상태를 가시화하였다. 광원으로는 헬륨-네온 레이저(He-Ne Laser)를 사용하였고 두개의 쉐리렌 미러(Schlieren Mirror) 사이에 아크릴판과 투명유리판으로 만든 직사각형 밀폐공간(0.4 m×0.4 m×0.2 m)을 놓고 이 밀폐공간의 밑면에 노즐을 설치하여 프로판(propane; C₃H₈) 가스 용기와 연결하였으며 누출속도를 조절하기 위하여 유량계를 그 사이에 설치하였다. 쉐리렌 사진을 찍기 위해서는 실내조명을 모두 꺼야하기 때문에 유량계의 눈금을 읽기 위한 조명을 따로 설치하고 이 조명이 쉐리렌 시스템에 영향을 미치지 않도록 차폐용 암막커튼을 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 연료는 프로판(C₃H₈)이며 초기의 밀폐공간내에는 공기만 존재하는 것으로 생각하였고 공기는 산소와 질소만으로 구성되어 있다고 가정하였다. 밀폐공간의 중횡비는 1:1과 2:1의 경우를 택하였으며, 밑면에서의 연료의 누출위치는 각각의 중횡비에 대해 좌측벽으로부터 가로방향 길이의 1/2, 1/3, 1/4의 경우를 해석하였다. 시간에 따른 변화가 고려되었으므로 대단히 많은 결과가 얻어졌고 이들 중 몇 가지 경우에 대하여 고찰하였다.

Fig. 3은 중횡비는 1:1, 누출위치는 좌측벽으로

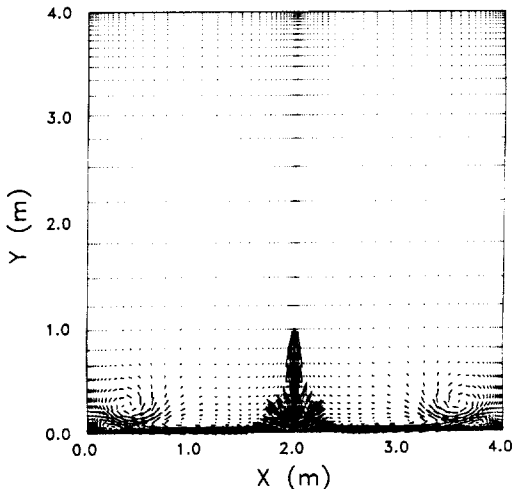


Fig. 3 Velocity field (AR=1:1, C=2.0m, V=0.98m/s, t=10sec)

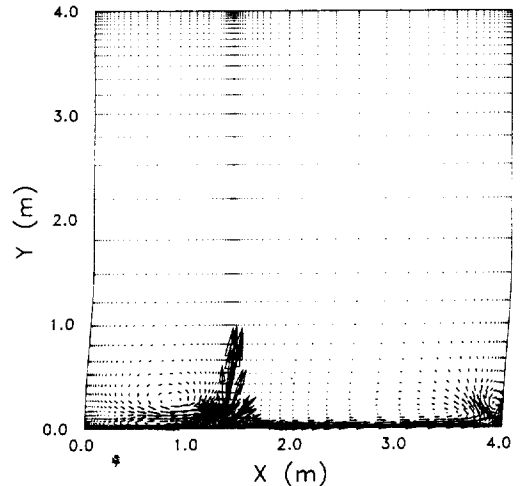


Fig. 4 Velocity field (AR=1:1, C=1,33m, V=0.98/s, t=10sec)

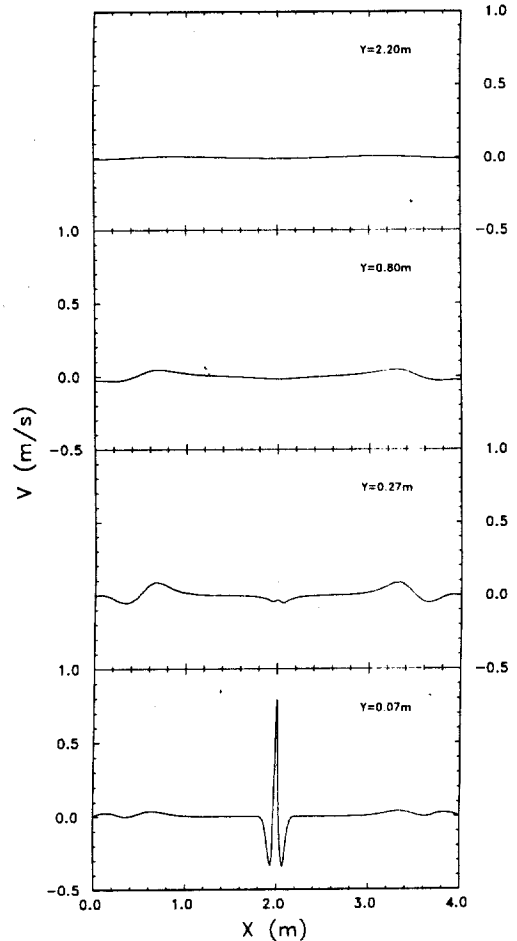


Fig. 5 Distribution of V velocity for various Y location along X-direction (AR=1:1, C=2.0m, V=0.98m/s, t=10sec)

부터 가로방향 길이의 1/2, 시간은 10초, 누출속도는 0.98 m/s인 경우의 유동장을 벡터선도로 나타낸 것으로 누출위치로부터 거리가 멀어질수록 운동량 전달이 감소됨을 알 수 있으며 특히 누출된 연료가 중력의 영향에 의해 Y방향보다는 X방향으로 더 많이 전달됨을 보여주고 아래 양쪽 코너부근에서 재순환이 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 비교해 누출위치만 좌측면으로부터 가로방향길이의 1/3로서 다를뿐 다른 조건은 동일하여 보여주는 경향도 대체로 비슷하지만 왼쪽 벽의 영향으로 재순환 영역 및 유동현상이 달라졌음을 보여주고 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 누출위치가 각각 좌측벽으로부터 가로방향길이의 1/2, 1/3의 경우이며 그림에서

가로축은 밀폐공간의 가로방향길이를 나타내며 세로축의 좌우는 세로방향속도를 나타낸다. 연료의 누출이 시작된 후 일정시간 10초에서의 Y방향의 위치변화에 따른 누출속도 v 의 X방향분포를 도시한 것으로 누출위치로부터 Y방향으로 진행할수록 X방향으로의 운동량전달 및 중력의 영향에 의해 최대속도는 감소하고 누출부위 근처에서는 공기에 비해 상대적으로 무거운 연료가 중력의 영향으로 밀폐공간의 아래쪽으로 이동하는 속도 즉, 음의 속

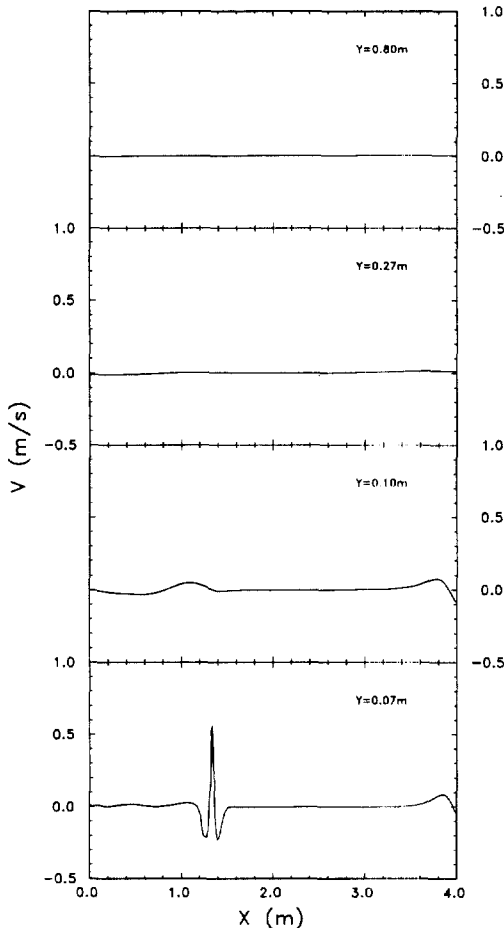


Fig. 6 Distribution of V velocity for various Y location along X-direction (AR=1:1, C=1.33m, V=0.98m/s, t=10sec)

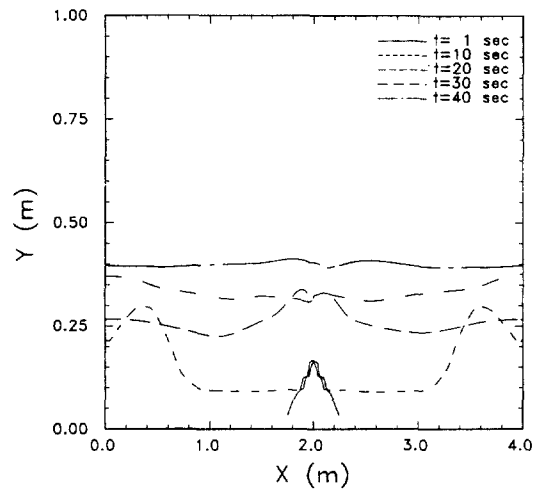


Fig. 7 Time variation of stoichiometric ratio contours (AR=1:1, C=2.0m, V=0.98m/s)

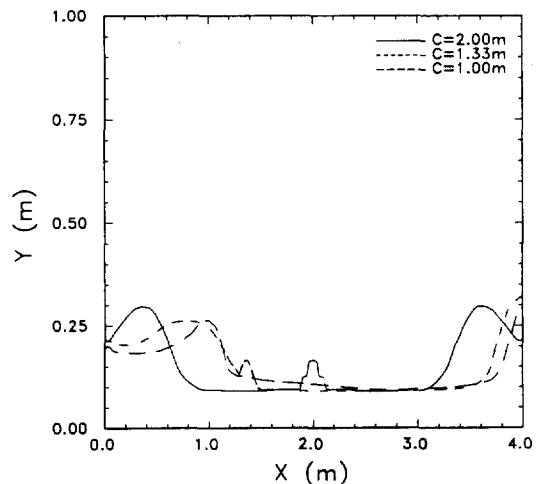


Fig. 8 Variation of stoichiometric ratio contours for various location of leak center (AR=1:1, V=0.98m/s, t=10sec)

도 및 음의 속도를 갖는 영역이 증가하다 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 7은 종횡비는 1:1, 누출위치는 좌측벽으로부터 가로방향길이의 1/2, 누출속도는 0.98 m/s의 경우 밀폐공간 내에서 연료의 질량분율이 당량비 0.0601을 만족하는 위치 즉, 연료가 가장 점화되기 쉬운 위치를 시간의 변화에 따라 도시한 것으로 시간이 증가함에 따라 Y방향으로의 전달보다는 X방향으로의 전달이 증가하다가 Y방향으로의 전달이 증가하며 중력의 영향에 의해 밑부분으로 쌓이면서 전달되기 때문에 어느 시간이 지나면 X축에 평행하게 증가함을 보여준다.

Fig. 8은 연료의 누출이 시작된 후 일정시간 10초때 누출위치의 변화에 따른 당량비를 만족하는 연료의 질량분율의 분포를 나타낸 것으로 벽부근에서 더 많은 영역이 당량비를 만족하고 있음을 보여준다.

Fig. 9에서부터 Fig. 12까지는 모두 종횡비 2:1의 경우로서 종횡비가 혼합기 생성특성에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위한 것이다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Fig. 3 및 Fig. 4의 경우에 비해 종횡비의 영향때문에 동일 시간에 아래쪽으로

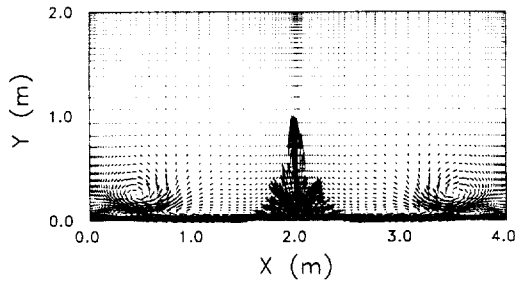


Fig. 9 Velocity field (AR=2:1, C=2.0m, V=0.98m/s, t=10sec)

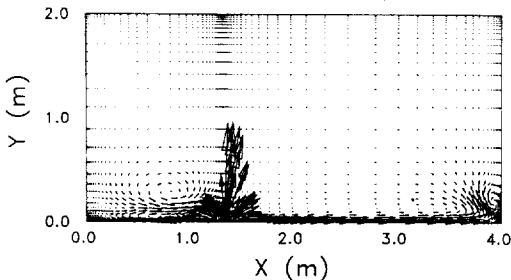


Fig. 10 Velocity field (AR=2:1, C=1.33m, V=0.98m/s, t=10sec)

쌓이는 기체연료의 양이 많아짐을 보여주며 재순환 영역이 더욱 뚜렷하게 형성됨을 보여준다.

Fig. 11은 밀면 누출의 경우로서 누출위치는 가로방향길이의 1/2이다. 그림에서 가로축은 밀폐공간의 가로방향길이를 나타내고 세로축은 좌우 모두 세로방향속도를 나타내고있다. 종횡비가 1:1인 Fig. 5의 경우에 비해 세로방향 위치에 따른 세로방향속도 v 의 변화가 좀 더 커짐을 보여준다.

Fig. 12는 누출위치가 가로방향길이의 1/2이며 가로축과 세로축은 각각 밀폐공간의 가로방향길이와 세로방향길이를 나타내고 시간의 변화에 따른 가연범위를 보여준다. 또한 Fig. 7의 경우와 거의 비슷한 영향을 보여주고 있으나 종횡비의 영향때문

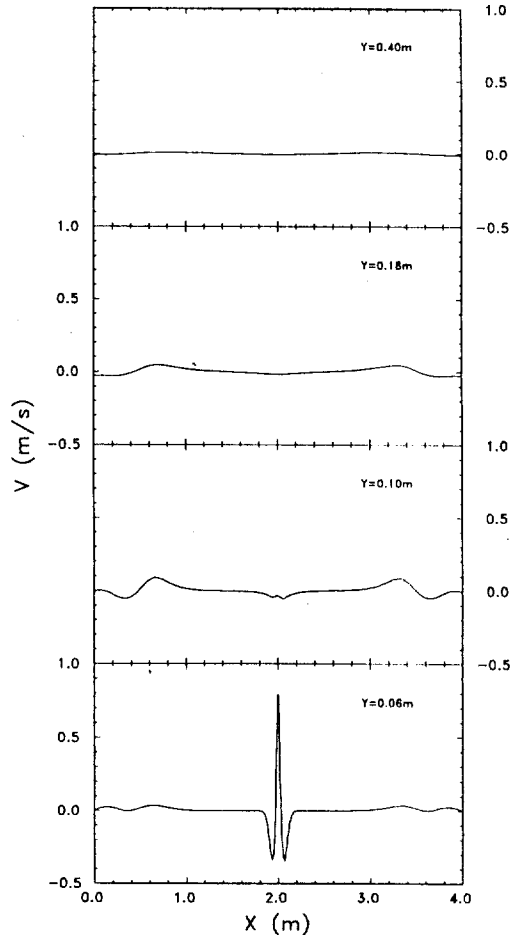


Fig. 11 Distribution of V velocity for various Y location along X-direction (AR=2:1, C=2.0m, V=0.98m/s, t=10sec)

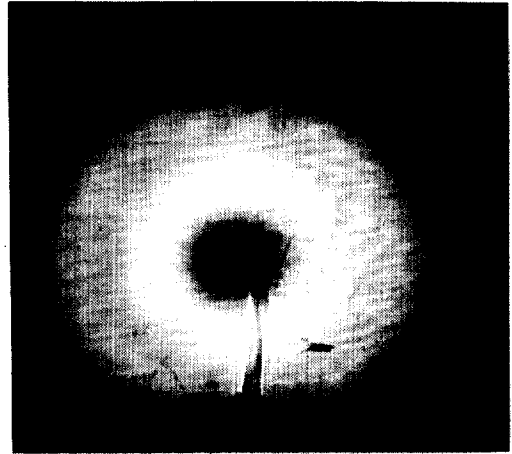
에 동일시간에 밀폐공간 내에서 연료의 질량분율이 당량비를 만족하는 위치가 조금씩 달라짐을 보여준다.

Fig. 13은 슈리렌 시스템을 이용하여 얻은 사진들로서 밀폐공간의 크기는 앞에서 명시한 바와같이 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 이며 누출위치는 가로방향길이의 1/2의 경우이며 밀면누출초기의 경우이다. 장치의 제약으로 인하여 농도가 작은 유동장은 파악하기 어렵지만 농도가 큰 유동장은 사진에서 짙은 부분으로 표시되고 있다.

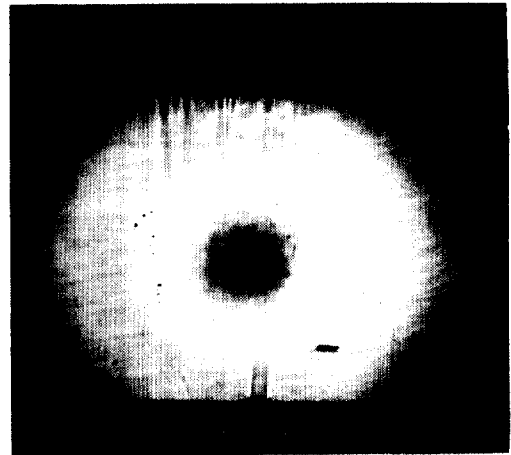
(a)의 경우는 누출속도 0.2 m/s , 시간1초의 경우로서 누출속도가 작고 시간경우가 짧아서 노즐로부터 Y방향으로의 유동만이 관찰되며 밀폐공간의 많은 영역에 아직 질량이 전달되지않고 있음을 보여준다.

(b)와 (c)의 경우는 각각 누출속도 0.35 m/s , 0.5 m/s 이고 시간 2초의 경우로서 누출속도 및 시간의 증가에 따라 밀폐공간내의 연료의 전달이 점점 많아지는 것과 중력의 영향이 작용하여 밀으로 내려오고 있는 것을 보여주고 있다.

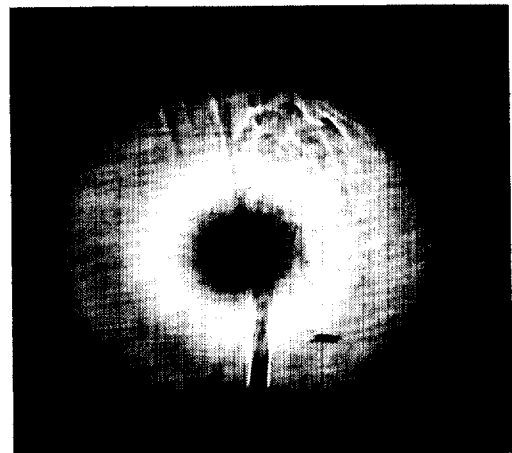
수치해석의 결과와 실험결과가 완전히 일치하지 못한 이유는 수치해석의 경우는 실제크기에 가까운 2차원 공간시간을 채택하여 해석하고 실험의 경우는 3차원 밀폐공간으로 쉘리렌미러(Schlieren Mirror)의 크기에 제약을 받아 작은 밀폐공간을 채택한 때문이며 농도가 작은 영역에대한 가시화의 어려움때문이다. 그러므로 수치해석의 결과가 주가



(a) $V=0.2\text{ m/s}$, $t=1\text{ s}$



(b) $V=0.35\text{ m/s}$, $t=2\text{ s}$



(c) $V=0.5\text{ m/s}$, $t=2\text{ s}$

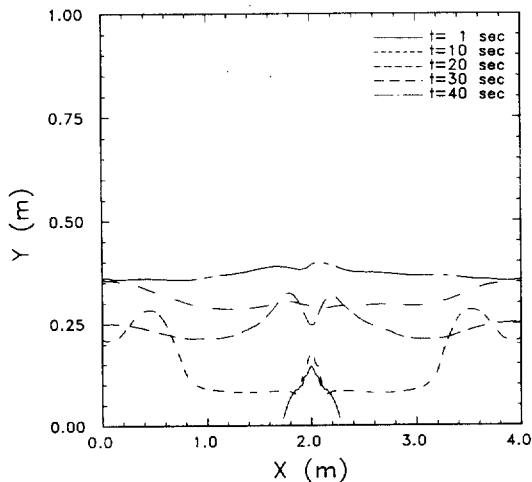


Fig. 12 Time variation of stoichiometric ratio contours (AR=2:1, C=2.0m, V=0.98m/s)

Fig. 13 Flow patterns (size = $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, C=1/2)

되며 실험결과는 단순히 정성적인 면만을 비교한 것이다.

6. 결 론

밀폐공간의 밑면에서 기체연료의 누출이 있을때 시간 및 위치에 따른 유동특성과 혼합기 생성특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 밑면누출의 경우 누출운동량에 비하여 중력의 영향이 커서 누출부위로부터 누출방향으로 보다는 누출방향의 직각방향으로 더 많은 질량전달이 이루어진다.

2) 밑면누출의 경우 혼합기 생성특성에 미치는 중횡비의 영향은 적지만 중횡비가 작을수록 윗 벽면의 영향을 받아 동일시간에 밀폐공간내의 아래쪽에 쌓이는 질량이 많아진다.

3) 누출위치가 측벽에 가까울수록 아래 중앙쪽에 쌓이는 연료의 질량이 많아진다.

4) 혼합기 생성에 미치는 중요한 인자는 중력의 영향에 의해 형성되는 재순환 영역의 크기이다.

후 기

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비로 이루어진 것으로 이에 관계제위께 감사를 표합니다.

참고문헌

(1) 김상호, 정인기, 김중엽, 1984, "밑면에서 部分加熱을 받는 傾斜 4각형 密閉空間 内の 自然對流 熱傳達 및 流動特性," 空氣調和 冷凍 工學, 第13卷, 第3號, pp. 148~156.

(2) 남평우, 이재현, 박만홍, 김석현, 1985, "冷凍 冷藏庫의 室內位置에 따른 에너지 消費量의 變化에 관한 研究," 空氣調和 冷凍工學, 第14卷, 第3號, pp. 26~37.

(3) 이택식, 이상우, 1987, "水平傳導壁과 間막이 가 直四角形 密閉空間에서의 2차원 층류 자연대류에 미치는 영향," 空氣調和 冷凍工學, 第6卷, 第2號, pp. 204~215.

(4) 김기훈, 이택식, 이준식, 1987, "直四角形 密閉空間內에서의 輻射 및 自然對流 熱傳達," 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第2號, pp. 331~344.

(5) Nicolette, V. F. and Yang, K. T., 1985, "Transient cooling by natural convection in a two-dimensional square enclosure," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 28, No. 9, pp. 1721~1732.

(6) Warrington, R. O., 1985, "The transfer of heat by natural convection between bodies and their enclosures," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 28, No. 2, pp. 319~330.

(7) Markatos, N. C. and Pericleous, K. A., 1984, "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 755~771.

(8) Litsek, P. A. and Bejan, A., 1988, "Transient natural convection between two zones in an insulated enclosure," Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME, pp. 116~125.

(9) Burgees, D., Murphy, J. N., Zabetakis, M. G. and Perlee, H. E., 1974, "Volume of flammable mixture structure resulting from the atmospheric dispersion of leak or spill," Fifteenth Symposium on Combustion, pp. 289~303.

(10) Britter, R. E., 1989, "Atmospheric dispersion of dense gases," Ann. Rev. Fluid Mech., pp. 317~344.

(11) Masliyah, J. H. and Nguyen, T. T., 1979, "Mass Transfer due to an impinging Slot Jet," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp. 237~244.

(12) Law, H. S. and Masliyah, J. H., 1984, "Mass transfer due to a confined laminar impinging two-dimensional jet," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 4, pp. 529~539.

(13) Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., 1960, "Transport phenomena," John Wiley. & Sons, Inc.

(14) Patankar, S. V., 1980, "Numerical heat Transfer and fluidflow," Hemisphere Publishing Co.