

## 수치해석에 의한 가스폭발사고 분석

채재우, V.M.Poutchcov, 조영도\*, 김상섭\*, 문종인, 이정석  
인하대학교 기계공학과, 한국가스안전공사\*

### A study on numerical analysis of the accidental gas explosion

J.O.Chea, V.M.Poutchcov, Y.D. Jho, S.S.Kim, J.I.Moon, J.S.Lee  
Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ., Korea Gas Safety Co.\*

#### 요 약

실내에서 가스폭발시 피해를 예측하기 위해서 폭발 화염면의 전파를 수치해석을 통해 해석했다. 확산방정식에 의해 가스누출에 의한 실내의 가스확산분포를 구했으며 문헌에서 선택한 누출의 초기조건을 사용했다. 화염온도를 계산하기 위해 각 가스 혼합비에 따른 엔탈피와 화학식에 대한 reduced mechanism을 사용했으며 문헌에서 찾은 각 가스의 농도별 층류연소속도를 혼합가스의 층류연소속도에 적용시켰다.  $k-\epsilon$  모델에서 turbulence energy를 층류연소속도와 결합시켜 난류화염 전파속도를 모델링 했다. 화염면의 전파를 분석하기 위해 실내의 위치에는 직각, 화염면의 전파에는 원통좌표계를 사용했다. 유리창의 파손에 의한 화염전파면의 변화에 따른 압력상승 요인을 해석하였으며 창문의 크기에 따라서 점화위치에 따른 실내 압력상승의 영향이 서로 다르게 나타나는 결과를 얻었다.

#### 1. 서 론

최근 가스 사용량의 급증으로 도시 곳곳에 가스라인이 설치되었고 사용자의 부주의에 의한 사고의 빈도가 높아짐에 따라 이를 위한 안전대책

이 크게 대두되고 있다.

이를 위한 연구는 선진국에서는 오래전 부터 수행되어져 왔다. 기초연구의 주 방법으로는 컴퓨터를 사용한 수치적 해석 및 실험에 의한 자료 확보이며 각종 사고의 자료에 의해 보다 실제 상황에 근접한 모사 프로그램이 개발되고 있다. 그러나 그 개발된 예측 소프트웨어의 프로그램은 비공개, 판매거부, 고가, 사용자의 전문성 요구가 뒤따르므로 국내실정으로는 이용에 제한이 많이 따른다. 본 연구는 모델은 밀폐/일부 개방 된 방에서 가스 누출이다. 물론 이러한 예측에는 매우 많은 변수가 작용하므로 일어날 수 있는 각각의 가능성을 세밀히 검토하여야 하며 결과의 신뢰도를 지속적인 증가를 위하여 자체적인 기술의 보유가 요망된다. 가스 사고의 대책 마련과 안전장치의 개발 및 설계에 기초자료를 확립하는데 있어서 가스의 확산점화, 연소, 혼합, 데플레그레이션 및 데토네이션의 기초 이론에 의한 컴퓨터 프로그램을 단계적으로 그리고 단순한 경우 부터 복잡한 경우로 발전 시켜 나감으로써 그에 따른 원리 및 이론의 전개의 흐름이 명쾌해 질 것이 예상된다. 또한 수치적인 모사 과정에서 발생할 수 있는 오류를 보완하기 위해 실험결과와 비교하여 신뢰도를 높이고 실제 폭발사고와 비교 검토 함으로써 지속적인 발전의 기반을 구축하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. 연구범위

밀폐/일부 개방된 공간 즉 실내에서 가스누출 후 최악의 사태인 폭발로 이어지는 과정과 이러한 과정에서 생길 수 있는 여러 현상과 결과(확산, 화염전파속도, 폭발압, 유리창 파손, 건물 파손 등) 들을 수치적으로 계산하고 예측하여 실험에 의한 자료로써 보다 신뢰할 수 있는 문답형식의 기초적 소프트웨어를 개발하는 동시에 지속적인 발전을 위한 기반을 확립한다. 입력 및 결과자료는 주로 다음과 같다.

- 입력요소 : 가스의 종류, 방의 벤트속도, 방의 기하학적 요소, 창문의 위치 및 크기, 가스의 누출속도, 가스의 누출량, 구조물의 강도, 점화요소 및 강도
- 결과자료 : 농도분포, 화염전파속도, 시간과 위치에 따른 압력, 유리창

의 파손시점, 건물의 파손시점, 건물내부 사람의 치명도 등.

## 2-2 세부연구내용

### 2-2-1 실내에서 가스의 농도분포

실내에 가스가 누출되는 원인은 사용자의 실수에 의한 누출 및 노후된 배관에서 누출 등으로 나눌수 있다. 전자의 경우는 누출압력이 낮으므로 누출원 주위에 gas-pool을 형성하며 주로 확산에 의해 느린속도로 실내로 전파된다. 후자의 경우는 강한 배관의 압력에 의해 제트류가 형성된다. 이 경우는 전자의 경우보다 급속도로 가연 가능 농도에 도달하게 된다. 본 논문에서는 후자의 경우를 고려한 경우의 방안의 가스농도를 해석했다.

#### A. 지배방정식

2차원 확산방정식을 사용한 확산장의 계산

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + U_x \frac{\partial C_f}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_f}{\partial y} = D_f \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C_f}{\partial y^2} \quad \text{식 1)}$$

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} + U_x \frac{\partial C_0}{\partial x} + V_y \frac{\partial C_0}{\partial y} = D_f \frac{\partial^2 C_0}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C_0}{\partial y^2} \quad \text{식 2)}$$

2차원 확산방정식을 사용한 확산장의 계산

$$C_f + C_0 = 1;$$

#### B. 경계 및 초기조건

속도 성분  $U_x$  과  $V_y$  는 가스관에서 누출, 즉 독립적인 난류분사의 개념에서 도입했다.

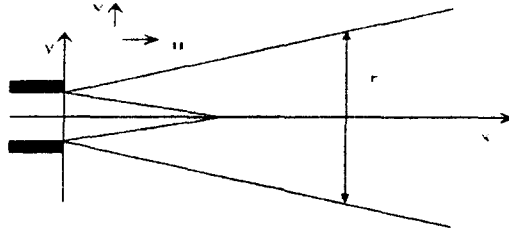
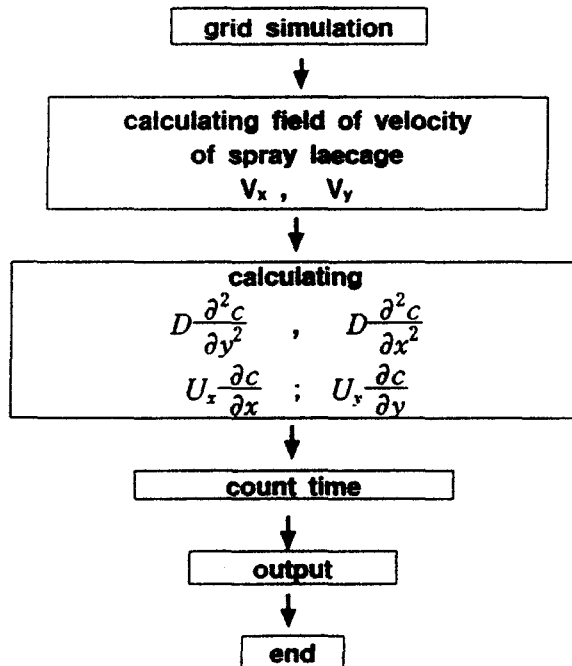


그림 1) 계산을 위해 사용한 2차원모델

$$\begin{aligned}
 C^{k+1}[i][j] = & C^k[i][j] + D_x(C^k[i+1][j] + C^k[i-1][j] - 2C^k[i][j])dt/d^2y \\
 & + D_y(C^k[i][j+1] + C^k[i][j-1] - 2C^k[i][j])dt/d^2x \\
 & - V_x[i][j](C^k[i+1][j] - C^k[i-1][j])dt/dx \\
 & - V_y[i][j](C^k[i][j+1] - C^k[i][j-1])dt/dy
 \end{aligned}$$

식 3)

The flow chart of program



C. 확산분포 계산결과

LX=3.0; LY=2.0; XFd=0.5;  
u0gas=0.25; rad0=0.001; vis=0.0001; dif=0.0001; Clim=0.003;

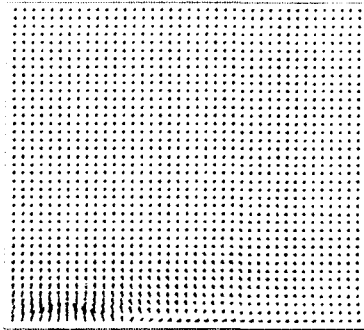


그림 9) 실내 flow field

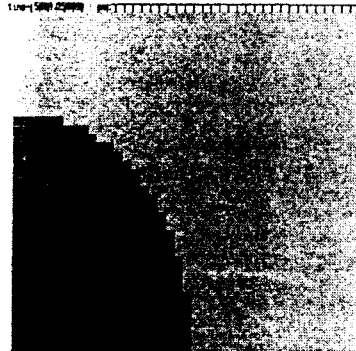


그림 10) 실내농도분포

LX=3.0; LY=2.0; XFd=0.5;  
u0gas=0.5; rad0=0.001; vis=0.0001; dif=0.0001; Clim=0.003;

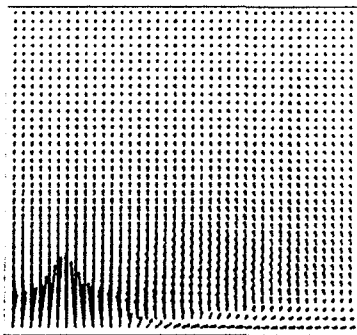


그림 11) 실내 flow field

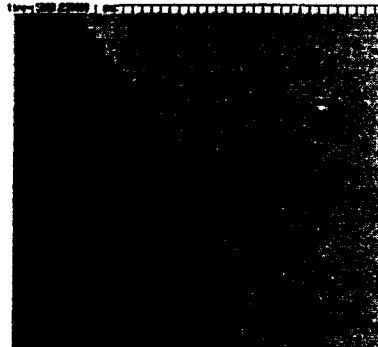


그림 12) 실내 농도분포

나. 실내에서의 화염전파

실내에서 가스폭발시 피해를 미치는 요인의 주요 변수는 화염면의 전파양상에 따라서 결정된다. 화염면의 전파속도는 혼합가스의 층류연소속도, turbulence energy를 고려한 난류연소속도를 고려한 모델링을 사용했다.

A. 지배방정식

a). 연소속도

$$U_{turb} = V_{fl} \quad \text{식 4)}$$

$$U_{lam} = f(C_f, P, T_0) \quad \text{식 5)}$$

(  $C_f$  - concentration of gas,  $U_{fl}$  the velocity of gas that is close to the burning front )

$$U_{fl_1} = U_{lam} ( 1 + \sqrt{K_{turb}} ) \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{0.6} \quad \text{식 6)-locked window}$$

$$U_{fl_2} = U_{fl_1} + U_{flw} \quad \text{식 7)-window broken}$$

b). 실내압력

직각좌표계로 정의된 실내에서 화염전파속도를 구한후 점화위치를 원점으로 하는 원통형 좌표계를 이용한 화염전파면을 경계로 연소와 미연소가스를 나눈다. 연소된 가스에 의한 상승압력의 분포는 연소속도가 음속에 비해 매우 작으므로 실내의 모든점에서 일정하다고 가정하였다.

$$P = \frac{M_b RT_g}{m_p V_0} + \frac{(M_0 - M_b) RT_0}{m_i V_0} \quad \text{- locked window}$$

$$P = \frac{M_b RT_g}{m_p V_0} + \frac{(M_0 - M_g - M_{wout}) RT_0}{m_i V_0} \quad \text{- open window}$$

$$M_0 = V_0 \rho_0 \quad \text{- initial mass of gas in the room.}$$

$$M_b = V_b \rho_b \quad \text{- mass of burned gas in the room.}$$

$$M_{wout} = \int_0^t S_{or} \cdot U_{vel} dt \quad \text{- mass of gas going through out broken window.}$$

$$\rho_0 \quad \text{- density of initial gas.} \quad \rho_b \quad \text{- density of burned gas.}$$

$$V_0 \quad \text{- volume of the room.} \quad V_b \quad \text{- volume of burned gas}$$

$$S_{or} \quad \text{- surface of window.} \quad T_0 \quad \text{- initial temperature.}$$

$$T_g \quad \text{- temperature of gas product.}$$

$$U_{vel} = \sqrt{2 ( P - P_i ) / \rho_0} \quad \text{- mass flow at the window.}$$

$$U_{flw} = \frac{U_{vel}S}{\rho_0 S_{or}} \quad S - \text{distance from window.}$$

### B. 경계 및 초기조건

초기 실내 flow field 는 모두 zero 값을 갖는다. 점화직후는 locked chamber 내의 화염면 전파에 의한 해석이 적용된다. 화염이 발달하여 실내압력이 유리창의 파괴강도를 넘어서면 유리창을 통한 실내가스의 방출에 의한 요소가 flow field 에 적용되며 화염면의 발달형태에 영향을 미친다.

### C. 화염전파 계산결과

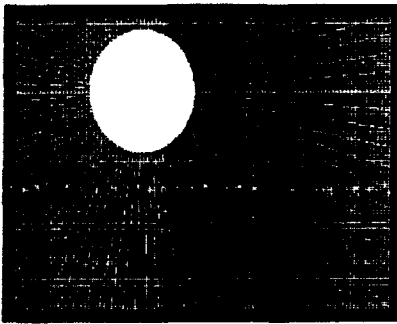


그림 8) 점화직후

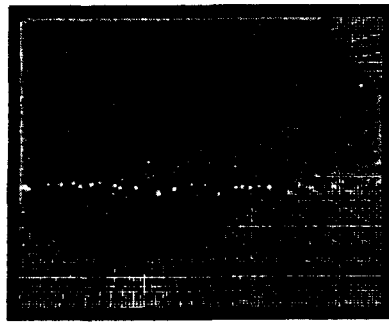


그림 9) 유리창 파손후

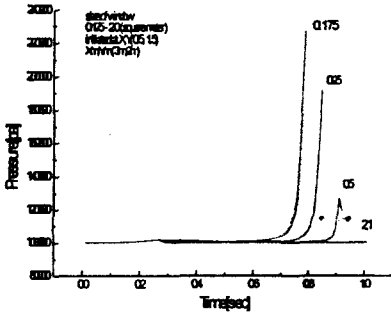


그림 15 창문과 원 점화위치일 때의 압력

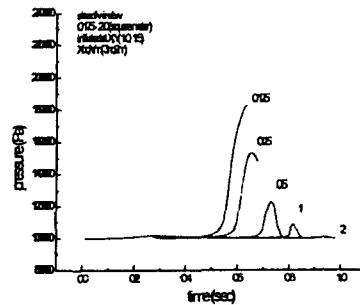


그림 16) 창문과 근점화위치일 때의 압력

input geometrical data (1)

LY = 2.0; LX = 3.0; LZ = 2.0;

xF = 0.5; yF = 0.5; radw = 0.3; xW = 3.0; yW = 1.0;

input geometrical data (2)

LY = 2.0; LX = 3.0; LZ = 2.0;

xF = 1.0; yF = 0.5; radw = 0.3; xW = 3.0; yW = 1.0;

일반적인 경우 실내 최고 압력은 점화위치가 창문에서 멀수록 높아진다. 하지만 창문이 일정크기를 넘어가면 실내압력은 점화위치가 창문에서 멀수록 낮아지는 것으로 나타났다. 창문이 크고 점화원이 창문에서 멀 경우 대부분의 혼합가스가 미연소 상태로 빠져나가게 된다. 그러므로 방안의 압력은 점화원 뒤의 혼합가스량에 의존한다. 반면 점화원이 창문과 가까이 있을 경우 대부분의 혼합가스가 방안에서 연소를 일으킨다. 창문으로 빠져나가는 연소가스에 의한 실내압력의 감소는 크지않다. 압력차에 의한 오리피스에서의 질유량은 압력차가 증가함에 따라 일정값에 수렴하기 때문이다.

### 3. 결 론

실내가스폭발의 완벽한 수치적 해석은 현재 나와있는 방법으로는 불가능하다. 그러나 본 연구에서는 보다 정확한 분석을 위한 프로그램의 개발에 앞서 간단한 물리적 개념과 부분적 가정에 의해 정성적인 현상을 도출하여 실험적 데이터에 의한 보정을 통해 정량적 수치의 접근을 꾀하는 것이다. 본 연구에서 현재까지 개발된 프로그램에 의해 다음과 같은 정성적 결과를 얻었다.

1. 가스누출 후 시간의 흐름에 따른 방안의 부분별 확산농도
2. 유리창 파손을 감안한 실내 점화 후 실내압력의 변화
3. 유리창 파손을 고려한 시간에 따른 화염 전파형태