

## CNG 충전소의 누출·확산에 대한 위험성 평가

이수경, 강제명\*  
서울산업대학교 안전공학과

### The Hazard Assessment of Release and Dispersion of CNG Service Station

Su-Kyung Lee, Gye-Myoung Kang\*

Dept. of Safety Eng., Seoul National University of Technology, Dept. of Safety Eng., Seoul National University of Technology\*

#### 1. 서론

세계적으로 산업 각 분야에서 석유 소비가 증가하면서, 석유 의존도가 날로 심화되고 있다. 특히 우리 나라는 원유 전량을 수입에 의존하고 있는 실정으로 수송분야의 경우 석유 의존도가 절대적으로 높아 이를 줄이기 위해서는 대체 연료 차량 개발이 절대적으로 필요하다. 이에 본 연구에서는 CNG 차량 개발에 즈음하여 CNG 충전설비에 대한 누출 및 확산에 의한 영향평가를 실시하여 CNG 충전소의 위험성을 평가하고자 한다.

#### 2. 누출모델

화학공장에서 사고로 연결되는 위험성 가스누출은 파이프라인 또는 저장탱크의 파손에 의하여 내부물질의 누출이 있으며, 누출된 물질의 상태에 따라 액체가 누출되어 증발되거나 가스가 누출되어 증기운을 형성하게 된다. 누출원 모델의 목적은 누출되는 물질의 형태 즉 고체, 액체, 또는 증기와 누출되는 물질의 전체양과 누출되는 속도를 계산하는데 있다.

##### 2.1 Hole을 통한 증기의 흐름

누출모델은 배출되는 오염물질의 형태를 구분하고, 배출물질의 배출량, 및 배출속도의 결정에 있어서 중요한 역할을 한다. 기계적 에너지 수지식은 흐르는 유체에 대한 여러 가지 형태를 나타내고 있다.

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{u^2}{2g_c}\right) + \frac{g}{g_c} dz + dh_{fs} = 0 \quad [1]$$

where, P : 압력 (kg/cm<sup>2</sup>)

u : 유체의 평균순간속도 (m/s)

Z : 높이 (m)

$\rho$  : 유체의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)

$g_c$  : 중력계수 (m/s<sup>2</sup>)

F : 마찰손실

Ws : 축일

m : 질량 (kg)

구멍을 통한 증기의 흐름은 질량 속도로부터 다음 식과 같다.

$$Q_m = C_0 A_0 P_0 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_0} \frac{r}{r-1} \left[ \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{r}} - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{r+1}{r}} \right]} \quad [2]$$

where, r : 열용량의 비( $C_p/C_v$ )

$C_0$  : 누출계수

$A_0$  : hole 면적( $m^2$ )

P : 대기압(kPa)

$P_0$  : 공급압력(kPa)

$g_c$ : 중력환산계수  $\{(1kgm/s^2)/N\}$

M : 빠져나가는 기체나 증기의 분자량(kg)

$R_g$ : 이상기체 상수( $kPa \cdot m^3 / kg\text{-mole} \cdot K$ )

$Q_m$  : 질량유속(kg/s)

## 2.2 누출 및 난류 혼합

모든 가스누출 확산 과정이 순간적이거나 연속적인 방출이거나 관계없이 대부분의 경우 다음의 표 1.에서 제시하는 4가지 단계를 거쳐 확산이 일어난다.

표 1. 분산모델의 특성

Stage	Phase	Model	Entrainment Regime	Edge Spreading Regime	Concentration Profile
1	Turbulent Mixing	Uniform jet model	Turbulent(jet)	Turbulent	Uniform
	Turbulent mixing	Gaussian Jet Model	Turbulent(je)	Turbulent	Gaussian
2	Hybrid	Hybrid Model	Turbulent(jet)	Slumping	Uniform
3	Dense Cloud	Dense Cloud Model	Dense	Slumping	Uniform
4	Passive	Passive Dispersion Model	Atmospheric Turbulence	Passive	Gaussian

초기 난류단계 이후에 증기운 가장자리 부분이 중력에 의하여 퍼져나갈 때 대칭적으로 일어나며, 이때 방출가스는 위에서 4단계의 확산과정 중에서 2단계인 혼합(Hybrid)과 Slumping단계가 시작되고, 혼합모델(Hybrid Model) 또는 공기보다 무거운 증기운 모델(Dence Gas Model)로 변화시켜 해석하여야 한다.

## 3. 확산모델

### 3.1 확산모델의 개요

일단 가스가 누출되면 누출가스의 제거는 거의 불가능하기 때문에, 이와 관련된 일반적인 연구방향은 누출가스의 확산현상을 예측하기 위한 모델링의 구축이 최우선과제로서, 해석적인 방법을 통한 간단한 모델링과 함께 확산모델링은 지형조건의 영향까지 고려하기 위한 방대한 프로그래밍이 병행되고 있다.

표 2. 확산모델 해석 프로그램 종류

Model	Type	Developer	Computer
INPUFF	Puff/ Gaussian/ Variable trajectory	EPA	PC
TXDS	Continuous plume/ Gaussian	NJ Dept. of Environmental Protection	PC
DEGADIS	Jet release/ Heavy gas dispersion	Spicer et al., 1986 / EPA 1989	DEC VAX PC
CAMEO II Air Model	Continuous Plume/ Gaussian	NOAA-Hazardous Mat. Response Branch	PC/ MacIntosh
SPILLS	Pool evaporation/ Puff/ Continuous plume/ Gaussian	Shell Devel. Center	PC
PHAST	Source emissions/ Jet/ Puff/ Continuous plume/ Gaussian/ Heavy gas/ Real-time use	Technica, Int.	PC

### 3.2 대기 확산모델

물질의 일정한 속도로의 배출과 관련된 플럼모델(Plume Model)과 순간적인 배출과 관련된 퍼프모델(Puff Model)이 포함된다. 플럼모델은 발생원으로부터 계속해서 누출되는 물질의 정상상태 농도를 표현하며, 퍼프모델은 일정한 양의 물질이 간헐적으로 누출되었을 때 각각의 단일원 누출에 대한 순간농도를 표현한다. 대기 확산현상을 예측하기 위한 모델들은 배출지역으로부터 유독물질의 대기상전달현상(airborne transport)의 해석을 위하여 채택되어지고 있다. 대기상의 전달현상은 일반적인 확산과는 매우 다른 메카니즘을 따르게 된다. 이와 같은 조건들은 난류동에서의 난류혼합에 의하여 바람의 흐름축방향에 대하여, 누출물질의 최대오염농도에 대한 분포를 결정하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 이때 난류흐름에 대한 확산지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{운동방정식 : } \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\rho \hat{K} \cdot \nabla \vec{u}) + (\rho - \rho_{air}) \vec{g} \quad [3]$$

$$\text{연속방정식 : } \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad [4]$$

$$\text{물질수지방정식 : } \frac{\partial \rho C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho C = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho \hat{K} \cdot \nabla \rho C) \quad [5]$$

여기서  $\vec{u}$ ,  $C$ ,  $\hat{K}$ 는 속도벡터, 농도, 난류의 확산도를 각각 나타낸다.

## 4. 누출 및 확산모델의 적용

### 4.1 ALOHA 모델

ALOHA 모델은 Tank, Pipe, Puddle 및 Direct로부터 발생되는 가연성가스의 누출 및 확산 위험성 평가를 할 수 있는 Program이다. 즉, 개방된 공간에서의 확산정도를 매우 정확하게 계산할 수 있다. 본 논문에서는 ALOHA 모델 중 누출모델로는 hole에서의 누출을 고려하여 Direct 모델을 사용하였으며, 누출량의 계산은 식[2]를 이용하여 계산하였고, 확산모델로는 CNG의 경우 Gaussian 모델을, LPG의 경우 Heavy Gas 모델을 사용하여 계산

하였다.

#### 4.2 PHAST 모델

PHAST Professional은 플럼모델 및 퍼프모델 모두에 적합하게 개발되어 있으며, 바람의 흐름 방향에 대하여 3차원 위치에 대한 농도분포를 제공하게 된다. 반면에 PHAST Professional은 폭발 등 사고해석에 적합하게 활용되고 있으나, 시나리오의 설정에 있어서 제약성을 내포하고 있다. 즉, 사고의 조건만이 Windows 상에서 입력되고, 정상상태의 경우 가우시안 플럼모델하에서, 그리고 비정상상태에서는 퍼프모델을 위주로 확산모델이 수행되어 진다.

### 5. CNG 충전소의 위험성 영향 평가

본 연구에서 적용한 사례들은 CNG 충전소 및 LPG 충전소의 Hole을 통한 누출에 관한 확산에 대하여 ALOHA 모델과 PHAST 모델을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 또한, 본 연구에 앞서 국내 LPG 충전소의 사고사례와 이미 CNG 충전소를 설치하여 NGV가 운행 중인 선진 외국의 15년간 42건의 사고사례를 분석하여 충전소에서 일어날 수 있는 사고를 가정하였다. 가정한 사고는 다음과 같이 분류된다.

- CNG 충전소의 hole을 통하여 가스가 연속적으로 분출한다.
- 디스펜서의 충전 호스가 파열되어 충전호스를 통하여 가스가 연속적으로 분출한다.

#### 5.1 시뮬레이션에 사용된 가스의 물성

분자량은 각 성분들의 몰분율에 따른 값을 계산하였으며, 연소한계는 Le Chatelier식을 이용하여 구하였다.

#### 5.2 hole의 크기

일반적으로 파이프의 파열 또는 틈새를 통한 hole의 직경은 배관 직경의 10~20%를 사용하므로 본 논문에서는 hole의 크기를 각각 LPG의 충전소의 경우 8mm, CNG 충전소의 경우 2mm, 4mm와 8mm(충전호스를 통한 누출)를 가정하여 시뮬레이션 하였다.

#### 5.3 가스압력

CNG 충전소에서는 일반적으로 압축기에서 250bar까지 승압하여 저장용기에 저장한 후 디스펜서를 통하여 최고 250bar까지 차량에 충전한다. 본 논문에서는Hole로부터 분출되는 가스의 압력을 CNG의 경우 250bar, LPG의 경우 20bar로 가정하였다.

#### 5.4 가스의 누출량 및 기상자료

누출 hole로부터 분출하는 가스의 질량유량은 압력을 CNG의 경우 250bar, LPG의 경우 20bar, 온도를 13℃로 하여 등엔트로피 팽창을 하므로 식[1]로부터 구할 수 있다. 풍속에 따른 영향을 평가하기 위하여 각각 0.5m/s, 1.5m/s, 3.0m/s에 대하여 시뮬레이션 하였다. 본 논문에서는 ALOHA 모델을 사용하여 지면에서의 농도를, PHAST 모델을 사용하여 수

평, 45° 방향 및 수직형 모델을 평가하고자 한다.

### 5.5 ALOHA 모델의 평가 결과

ALOHA 모델을 사용하여 관찰해본 결과 누출 Hole의 크기가 2mm일 경우 CNG 농도 4.5%, 1.125%에 해당하는 확산범위는 0.63m/s, 1.5m/s, 3.0m/s에서 모두 10m이하로 고찰되었다. 이것은 확산정도를 계산할 수 없을 정도로 작은 경우에 해당하는 값이다. 또한 충전호스에서 나오는 경우를 가정한 8mm의 경우 본 논문의 관심농도인 연소하한계에 도달하는 영역이 없음을 나타낸다. 그리고, 연소하한계의 10% 범위인 0.45%의 경우 0.63m/s일 때 31m, 1.5m/s일 때 19m, 3.0m/s일 때 관심농도에 도달하는 영역이 없음을 나타내고 있다. LPG의 경우 연소하한계인 1.68V%에 해당하는 거리는 풍속이 클수록 확산 범위가 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 연소하한계의 25%에 해당하는 0.42V%에 도달하는 거리는 풍속이 클수록 작아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 풍속이 클수록 확산의 정도가 거리에 따라 넓게 분포되어 작아짐을 알 수 있다.

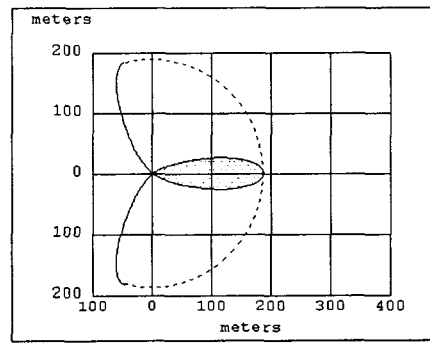
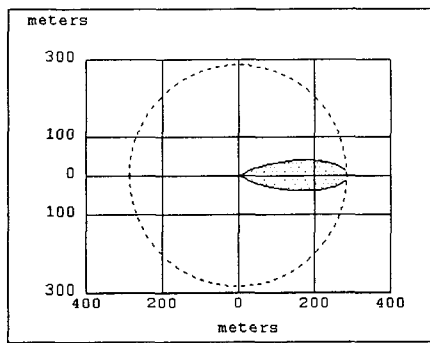


그림 1. 8mm를 통한 누출결과 (풍속 0.63m/s)      그림 2. 8mm를 통한 누출결과 (풍속 1.5m/s)

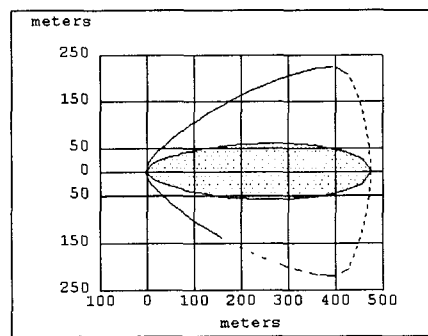
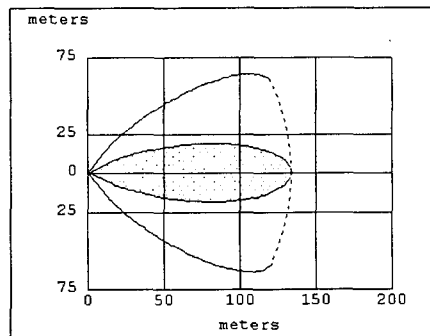


그림 3. 8mm를 통한 누출결과 (풍속 3.00m/s)

### 5.6 PHAST 모델의 평가 결과

본 연구에서는 CNG 충전소와 LPG 충전소 대한 실제적인 영향 평가를 실시하기 위하여 축적(1:1000) 지도를 이용하여 그 영향 범위를 산출하였다. ALOHA 모델과 마찬가지로 Hole의 크기가 2mm, 4mm, 8mm일 경우 CNG, LPG의 확산영역에 대하여 시뮬레이션

하였다.

### 5.6.1 CNG 충전소

45 Degree Type : 여러 방향의 누출이 있을 수 있겠으나 대표적인 모델로 수직방향에서 45도 방향으로의 누출을 가정하여 시뮬레이션 하였다.

#### 1) 복사열 영향

복사열은 거리가 증가할수록 풍속이 증가할수록 복사열의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 점화 후 복사열 영향이 가장 큰 경우는 누출공의 크기가 8mm인 경우로 2m 지점에서 약 4.8kW정도를 나타내고 있다. 이 열의 강도는 사람에게 2도화상을 미칠 수 있는 정도의 세기이다.

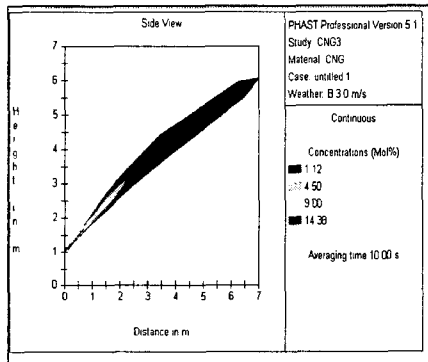


그림 4. 2mm 구멍을 통한 확산 및 복사열향

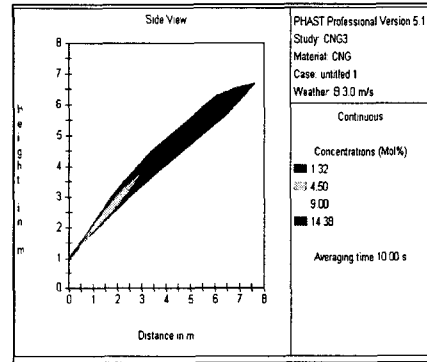


그림 5. 4mm 구멍을 통한 확산 및 복사열향

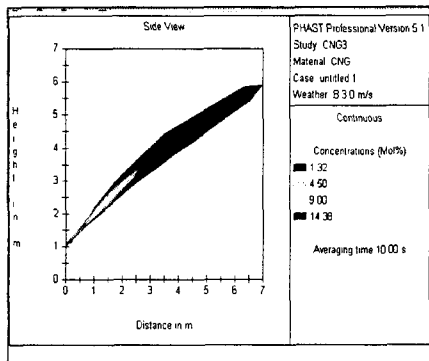


그림 6. 8mm 구멍을 통한 확산 및 복사열향

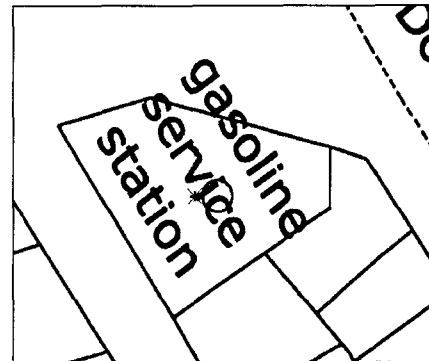


그림 7. 8mm 구멍을 통한 복사열 열향

#### 2) 연소하한계 도달거리(m)

표 3. 연소하한계 도달거리

누출공(mm)	농도(mole%)	풍 속(m/s)		
		0.5m/s	1.5m/s	3.0m/s
2	4.5 mole%	2.64	2.52	2.24
4	4.5 mole%	3.52	3.16	2.93
8	4.5 mole%	3.16	2.88	2.58

### 5.6.2 LPG 충전소의 영향평가

#### 1) 연소하한계 도달거리

누출공 8mm일 경우 풍속에 따른 center line 농도 분포에 약간의 차이가 있으나 거의 3m내외에서 폭발하한계 이르는 확산범위를 이루고 있다.

#### 2) 복사열 영향

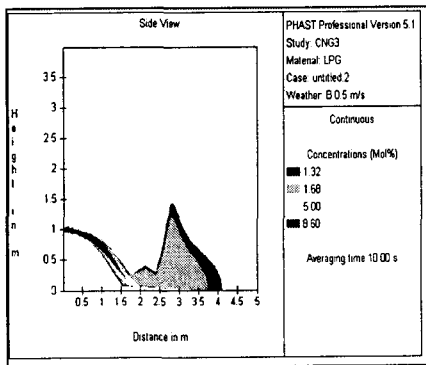


그림 8. LPG 누출시 Side view

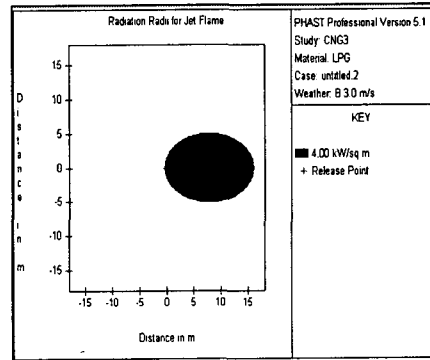


그림 9. Jet Flame에 의한 복사열 영향

### 5.7 ALOHA 모델 및 PHAST 모델의 비교

표 4. PHAST and ALOHA의 비교

모델 \ 거리	PHAST			ALOHA		
	0.5m/s	1.5m/s	3.0m/s	0.5m/s	1.5m/s	3.0m/s
2m	105,057	105,099	105,169	245,000	103,000	51,400
5m	45,283	45,280	45,285	61,700	25,900	12,900
10m	21,075	20,998	20,922	16,400	6,890	3,450

PHAST와 ALOHA에서는 풍속에 따라 차이가 나타나고 있음을 보이고 있다. 이것은 각각의 모델에서 사용하는 식과 사용하는 계산과정이 다르기 때문에 나타난다. PHAST의 경우 누출공의 크기에 상관없으므로 정상적으로 데이터를 입력하여 나온 결과 이다. PHAST의 경우 풍속에 관계없이 농도가 일정한 것을 볼 수 있는데 이것은 누출공의 크기가 작을뿐만 아니라 고압에 의해 빠른 속도로 누출되고 빠른 속도로 확산되기 때문이다.

## 6. 결론

- 1) ALOHA 모델을 이용하여 계산한 결과 60분 누출동안 LFL 4.5V% 및 1.125V%에 도달하는 거리는 CNG의 경우
  - hole의 크기가 2mm, 4mm, 8mm인 경우 풍속에 관계없이 10m이하로 관찰되었고
  - LPG의 경우 LFL이 1.68%에 도달하는 거리는 풍속이 셀수록 확산거리가 짧아짐을 알 수 있다.
- 2) PHAST 모델 적용 결과  
대표적으로 이용되고있는 45° 방향의 누출에 관하여 고찰한 결과 수평형으로 기울어질수록 누출거리가 길어지고, Jet Flame에 의한 복사열 영향범위가 넓어짐을 알 수 있다.
- 3) LPG 충전소의 누출  
LFL에 도달하는 거리는 CNG보다 짧으나 Jet Flame에 의한 복사열 영향과 Pool Fire에 의한 복사열영향은 인근 주변상가 뿐 아니라 그외의 지역에도 영향을 미쳤다.
- 4) ALOHA모델과 PHAST모델을 사용하여 CNG와 LPG 충전소의 위험성 평가를 실시하였다. PHAST를 이용하여 복사열에 의한 영향평가를 실시한 결과 CNG가 LPG 충전소보다 더 안전한 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. “패키지형 CNG 충전시스템 개발에 관한 중간보고” 한국가스공사 연구개발원, 효성중공업(주) 기술연구소, 1997. 7.
2. “NGV 연구중간결과 및 공청회 발표자료“, 한국가스공사, 1997. 7.
3. Warren L. McCabe/Julian C. Smith/Peter Harriott: Unit Operations of Chemical Engineering, 1993. pp 100-117