KIGAS Vol.4, No.3, September, 2000
(Journal of the Korean Institute of Gas)

CNG 충전소의 누출 · 확산에 대한 위험성 평가

최 종 운 · 이 수 경*
서울산업대학교 재료공학과, *서울산업대학교 안전공학과
(1999년 7월 10일 접수, 2000년 9월 30일 채택)

The Hazard Assessment of Release and Dispersion of CNG Service Station

Jong-Woon Choi · Su-Kyung Lee*
Dept. of Material Eng., Dept. of Safety Eng.,
**Seoul National University of Technology*
(Received 10 July 1999 ; Accepted 30 September 2000)

요 약

CNG 충전소에 대한 사고영향평가(CA) 분석을 실시하였고 이미 고압법에 의해 설치되어 있는 LPG 충전소에 대한 CA를 실시하여 서로 비교하였다. CNG 충전소와 LPG 충전소에 대한 누출 확산 및 복사열의 영향평가 결과 연소하한계에 도달하는 거리는 CNG 충전소가 LPG 충전소에 비해 약 1.5배 컸으며, 복사열의 경우 공정장치에 손상을 줄 수 있는 복사열량이 CNG 충전소에서는 나타나지 않았으나 LPG 충전소의 경우 37.5 kw/m^{2}에 해당하는 복사열이 12.6 m 반경으로 나타나 주변의 상가지역까지 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 목재를 태울 수 있을 정도의 복사열량인 12.5 kw/m^{2}은 LPG 충전소가 CNG 충전소에 비해 약 3배 가량 큰 것으로 나타났다.

Abstract - It was carried out consequence analysis(CA) of CNG (compressed natural gas) service station and we compared the results of CA of CNG service station with LPG service station which was installed by high pressure gas law. The results of CA were that distance of CNG LFL was 1.5 times than the length of LPG LFL. Thermal radiation effect about CNG may not be showed damage of process facilities, but in the case of LPG, it was enough to have an large damage effect on a downtown. The thermal radiation of 37.5 kw/m^2 extended 12.6 m. Also, in the case of 12.5 kw/m^2 which was able to burn wood, the radiation effect of LPG is 3 times than CNG.

Key words : CA(Consequence Analysis), CNG, Radiation effect, LFL

1. 서 론

자동차 배출가스로 인한 대기 오염이 심화되면서 청정연료 차량 개발의 필요성이 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있다. 이를 위해 CNG(compressed natural gas) 차량이 현재 시범운행 중에 있으며 차량에 공급할 연료를 위한 충전소 시스템에 대한 개발연구가 한창 진행 중에 있다. 그러나 최근에 있었던 일련의 도시가스 폭발사고와 누출 및 가스 공급 중단 등은 천연가스의 편리함과 청정성에도 불구하고 이러한 국민 불안심리를 고무시키기에 충분하다. 이에 본 연구에서는 CNG 차량개발에 즈음하여 CNG 충전설비에 대한 누출 및 확산에

†주저자 : lsk@duck.snut.ac.kr

의한 영향평가를 실시하여 CNG 충전소의 위험성을 평가하고자 한다.

2. CNG 충전소

CNG 충전시스템은 NGV(natural gas vehicle) 차량에 연료를 충전하기 위한 설비로 NGV의 보급촉진을 위한 기반의 구축에 필수적인 시스템이다. CNG 충전소가 설치되어 있지 않으면 NGV가 연료를 공급받지 못하게 되어 운행이 불가능하고, NGV가 보급되지 않으면 CNG 충전소의 설치의미가 상실되기 때문이다. 따라서 CNG 충전소와 NGV는 동시에 서로의 요구조건을 만족하는 수준으로 보급되지 않으면 안된다. CNG 충전소의 충전방법에 따라 보통 6가지로 분류되며 Table 1과 같다.[1]

Table 1. Methods of refuel of CNG service station

종 류	주 요 내 용	장 단 점
Fast/Quick Fill	· NG를 고압으로 저장용기에 저장 후 충전하는 방법 · 수요자 요구시 즉시 공급이 가능토록 설비 구축	· 설비가격 높음 · 충전시간 짧음 (2-5분) · 상업용 대상
Slow/Time Fill	· 저장설비없이 압축설비만으로 충전하는 방법 · 단거리 업무용 차량이용	· 설비가격 낮음 · 충전시간 길다 (6-7 hr) · 소규모, 개인 대상
Home Fill	· 가정에서 개인용으로 사용할 수 있는 설비	· 개인만 사용 가능
Mother-Daughter Fill	· NG가 공급되지 않는 지역에서 차량(Mother)을 이용 충전설비(Daughter)에 충전	· 투자비 높음
Mobile Fill	· 충전통을 탑재한 차량이 충전소가 없는 곳에서 차량에 공급하는 설비	· 투자비 높음
Combination Fill	· Slow와 Quick를 조합하여 동시에 운영	· 설비가격 및 공간 큼

3. 이론적 배경

CNG 충전소의 특성상 우리가 고려할 수 있는 화재모델은 Jet Fire 모델이며 Jet Fire 모델은 API 모델과 TNO모델로 특징지워진다.

3.1. API 모델식[2]

API RP-521에서 수직적인 방향의 Jet Fire로부터 열복사를 계산하기 위하여 Brzustowski와 Sommers(1973)에 의한 접근방법을 사용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$I_{th} = \frac{r\beta Q_{th}}{4\pi D^2} \qquad (1)$$

여기서 I_{th} = 열복사 [kW/m²]
r = 투과성 [-]
Q_{th} = 전체 방출열 [kW]
β = 복사된 열의 분율 [-]
D = 화염 중심에서부터 대상물까지의 거리 [m]

3.2. TNO Jet Fire 모델식[3]

TNO(1992)는 다음 그림과 같은 단순한 Jet 분산 모델에 기초하여 Jet Fire 모델을 설명하였다.

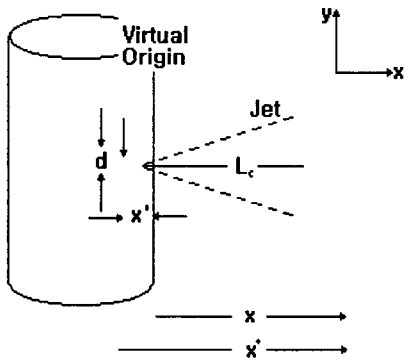

Fig. 1. TNO Jet Fire Model

여기서 d = 방출점의 직경 [m]
x = 방출점에서부터 측정한 Jet의 축에 따른 거리 [m]
y = Jet축에서부터 측정한 수직거리 [m]
x′= 방출점에서부터 측정한 실제발단의 위치
x″= x′ + x

TNO Jet Fire모델에서는 화염상당길이(equivalent flame length) L_f와 화염직경 D_f는 다음과 같이 주어졌다.

$$L_f = \frac{d}{K_1} \tag{2}$$

$$D_f = \frac{d}{2K_1 b_2^{1/2}} \tag{3}$$

$$K_1 = \frac{0.32\rho'_{g,a}}{\sqrt{\rho'_{g,a}}} \frac{b_1}{b_1 + b_2} C_{st} \tag{4}$$

여기서 L_f = 화염상당길이 [m]
D_f = 화염상당직경 [m]
K_1 = 화염농도변수(부피 혹은 몰분율)
C_{st} = 연료-공기 혼합물의 양론농도 (부피 혹은 몰분율)

따라서 원추형 Jet Fire에서 열플럭스는 다음 식에서부터 추정할 수 있다.

$$I_{th} = \tau F E \tag{5}$$

여기서 I_{th} = 거리 C에서 받는 복사열 [W/m^2]
τ = 대기중의 투과성 [-]
F = 기하학적 인자 [-]
E = 표면방출 플럭스 [W/m^2]

3.3. Pool Fire

본 연구에서 고려한 LPG 화재의 경우 Pool fire를 가정하였다. Pool fire의 경우 본 연구에서 사용한 PHAST는 SFRM 모델을 사용하였다. 누출된 액체가 점화될 때 풀 화재가 전개되는데, 풀 화재의 지름은 누출 형태, 누출양(누출속도), 연소속도에 따라 좌우된다.
연속적인 누출의 경우에 액체는 전체 연소속도가 누출 속도와 같아질 때까지 확산되고 연소지역은 증가한다. 이 경우, 풀 화재의 지름은 다음 식과 같이 제시된다.[4]

$$D_{eq} = 2\left[\dot{V}_L/\pi\dot{y}\right]^{1/2} \tag{6}$$

평형지름은 다음 식에 제시된 시간 동안 도달하게 된다.

$$t_{eq} = 0.564\frac{D_{eq}}{\left[g'\dot{y}D_{eq}\right]^{1/3}} \tag{7}$$

Thomas(1963)는 실험에 의해 난류 화염 확산 화염의 높이에 대한 상호관계를 다음과 같은 식으로 전개하였다.[5]

$$H = 42D\left(\frac{m}{\rho_a\sqrt{gD}}\right)^{0.61} \tag{8}$$

4. CNG 충전소와 LPG 충전소의 CA

4.1. 입력 데이타

CNG 충전소와 LPG 충전소의 CA를 위하여 본 연구에서는 DNV Technica에서 개발한 PHAST 프로그램을 사용하였다. 여기에 적용된 기상 데이터는 서울의 평균 기상 조건을 적용시켰으며 다음과 같다.

Table 2. Meteorological data

		CNG	LPG
Atmospheric Information	Wind	0.5 m/sec, 1.5 m/sec 3.0 m/sec	1 m/sec, 1.5 m/sec 3.0 m/sec
	Stability class	B	B
	Relative humidity	25 %	25 %
	Air temperature	13℃	13℃
	Ground roughness	Urban of Forest	Urban of Forest
	Cloud cover	1	1

본 연구에서 적용한 사례들은 CNG 충전소 및 LPG 충전소의 홀을 통한 누출에 의한 연소하한계 농도 및 화재에 의한 복사열 영향평가를 위해 PHAST 프로그램을 사용하였다. 이를 위해서 사고 시나리오를 작성하였다. 사고 시나리오는 지난 '82년부터 '97년까지 선진국의 CNG 충전소에서 일어난 사고를 배경으로 가정하였다. 가정한 사고는 다음과 같이 분류된다.

(1) CNG 충전소의 hole을 통하여 가스가 연

속적으로 분출한다.

(2) 디스펜서의 충전 호스가 파열되어 충전 호스를 통하여 가스가 연속적으로 분출한다.

CNG 충전소의 가스누출을 셋방향으로 나누어 고려하였다. 세 방향은 수평, 45 °, 수직방향의 3가지 경우에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 또한, 누출크기를 각각 2 mm, 4 mm, 8 mm로 시뮬레이션을 실시하였으며 바람의 세기 또한 0.5 m/s, 1.5 m/s, 3.0 m/s로 민감도를 분석하였다. 또한, 시뮬레이션에 적용시킬 용기 내부의 온도는 1년 평균 온도보다 10℃ 높은 25℃로 설정하였으며, 압력은 250bar로 설정하였다. 시뮬레이션의 실제적인 적용 및 차후 CNG 충전소를 도심지에 건설할 경우에 대한 위험성 평가를 위해 현재 주유소로 활용중인 곳을 택하여 적용하였다. 주유소의 대지면적은 총 400m^{2}이며 위험물 저장량은 20,000 ℓ 이었다.

4.2. 수평방향 누출의 시뮬레이션 결과

CNG 충전소에서 수평방향으로 누출이 일어났을 경우에 대한 시뮬레이션 결과 풍속 및 누출 크기에 대한 연소하한계 도달거리는 Table 3과 같았다.

Table 3. Distance of LFL

누출공 (㎜)	농도(mole%)	풍속(m/s)		
		0.5	1.5	3.0
2	4.5	4.22	4.22	4.22
4	4.5	5.31	5.31	5.32
8	4.5	5.02	5.02	5.02

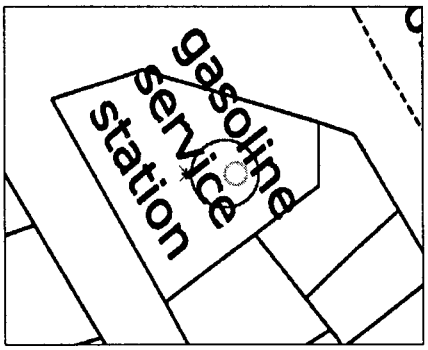

Fig. 2. Radiation effect of CNG jet fire(horizontal type)

이 결과 누출 크기에 따른 최대 거리는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한, 이때 복사열의 크기를 보면 Fig. 2와 같다. 바깥쪽 타원형의 곡선은 4 KW/m^{2}을 의미하며 안쪽의 타원은 12.5 kw/m^{2}을 의미한다. 이 결과 내부적으로 공정설비에 영향을 미칠 수 있는 복사열인 37 kw/m^{2}에는 이르지 않는 것으로 나타났다.

4.3. 45° 방향 누출의 시뮬레이션 결과

Table 4에서 볼 수 있듯이 수평방향의 누출 결과에 비교하여 보면 연소하한계에 도달하는 거리는 더 짧아졌음을 알 수 있다. 또한, 풍속이 증가할수록 연소하한계에 도달하는 거리가 짧은 것은 확산속도가 비교적 빠르기 때문이며 또한, PHAST 자체 프로그램의 특징상 지면의 농도만 측정하기 때문이다.

Table 4. Distance for LFL

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

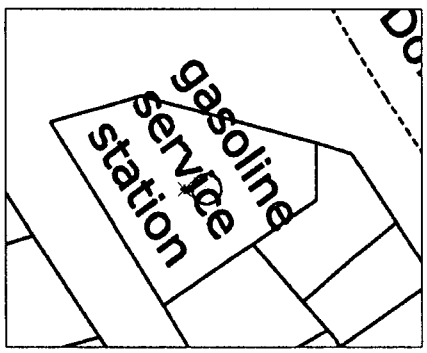

Fig. 3. Radiation effect of CNG jet fire(45° type)

Fig. 3과 같이 지면에 대한 복사열의 영향은 수평방향의 누출보다 훨씬 작아진 것을 알 수 있다.

4.4. 수직방향 누출의 시뮬레이션 결과

CNG 충전소의 수직방향 누출 시뮬레이션 결과, 지면에서의 연소하한계에 도달하는 거리는 매우 짧음을 알 수 있다. 또한, 이 경우에는 풍속이 증가함에 따라 거리가 증가함을 알 수 있다.

Table 5. Distance for LFL

누출공 (㎜)	농도(mole%)	풍속(m/s)		
		0.5	1.5	3.0
2	4.5	0.04	0.09	0.15
4	4.5	0.05	0.13	0.20
8	4.5	0.06	0.14	0.22

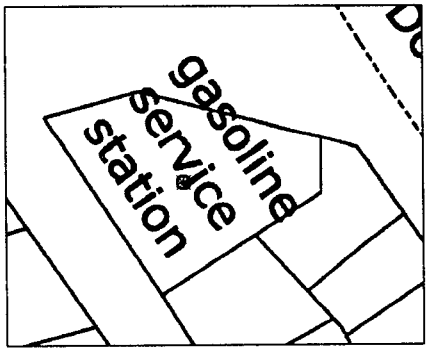

Fig. 4. Radiation effect of CNG jet fire(vertical type)

또한, 복사열 영향도 그 범위가 매우 적음을 Fig. 4를 통해 볼 수 있다. 즉, 수직방향의 누출의 경우 CNG의 물리화학적 특성으로 인하여 주변으로의 복사열 영향이 매우 적음을 나타낸 것이다.

4.5. LPG 충전소의 시뮬레이션 결과

LPG 충전소의 경우 8 mm의 hole에서 누출될 경우를 가정하였다. 기액상 누출을 하므로 연소하한계에 도달하는 거리는 CNG에 비하여 짧으나 Jet Fire 뿐 아니라 pool fire에 의한 복사열 영향이 심각한 것으로 나타났다. Table 6과 같이 LPG의 연소하한계에 도달하는 거리는 최고 3.76 m로 짧았으나, 복사열 영향평가를 한 결과 Fig. 5와 같은 결과를 보였다.

Table 6 Distance for LFL

누출공 (㎜)	농도(mole%)	풍속(m/s)		
		0.5	1.5	3.0
8	1.68	3.76	3.26	3.12

시뮬레이션 결과 공정장치에 큰 손상을 줄 수 있는 37.5 kw/m^{2}에 해당하는 열량이 충분히 발생하며 그 미치는 거리는 반경 12.6 m에 이르는 것으로 나타났다. 이 결과는 충전소 주변지역의 상가에도 화염확산을 일으킬 수 있는 것이다.

6. 결 론

연료의 청정성과 환경적 친화성을 지닌 CNG 차량의 개발에 발맞추어 충전소의 개발이 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서는 CNG 충전소에 대한 CA를 실시하였으며, 이미 고압법에 의해 설치된 LPG 충전소에 대한 CA도 함께 실시하여 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

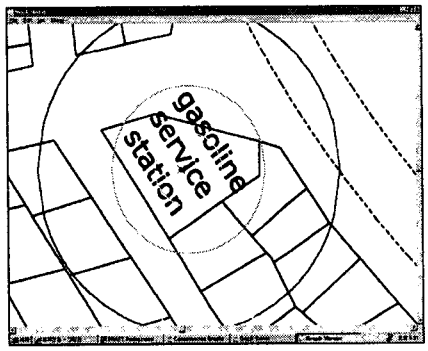

Fig. 5. Radiation effect of LPG pool fire

1. CNG 충전소의 경우 나타날 수 있는 화재는 jet fire이며, 수평 방향으로의 누출 경우 연소하한계에 도달하는 거리는 5.3 m에 달하였으며, 공정장치에 손상을 줄 수 있는 37.5 kw/m^{2}에 해당하는 복사열은 방출되지 않았으며, 목재를 태울 수 있을 정도의 열량인 12.5 kw/m^{2}에 해당하는 복사열이 9 m에 이르는 것으로 나타났다.

2. LPG 충전소에 대한 8 mm 누출 크기에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과 연소하한계에 도달하는 거리는 CNG 충전소보다 작은 3.8 m로 나타났으며, 공정장치에 손상을 줄 수 있는 37.5 kw/m^2에 해당하는 복사열이 12.6 m 반경으로 나타나 주변의 상가지역까지 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 또한 12.5 kw/m^2에 해당하는 복사열은 반경 26 m에 달하였다. 이는 전체 주유소 면적을 모두 덮는 것이다.

3. CNG 충전소와 LPG 충전소에 대한 누출확산 및 복사열 영향평가 결과, 연소하한계에 도 달하는 거리는 CNG 충전소가 LPG 충전소에 비해 약 1.5배 컸으며, 복사열의 경우 공정장치에 손상을 줄 수 있는 복사열량이 CNG 충전소에서는 나타나지 않았으며 LPG 충전소가 CNG 충전소에 비해 약 3배 가량 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국가스공사, "패키지형 CNG 충전시스템 개발에 관한 중간보고", 한국가스공사 연구개발원(1997)
2. Crowly, W.A. and Louvar, J.F., : "Chemical Process Safety : Fundamental with Applications", Prentice-Hall Inc., New York(1990)
3. Vandenberg A.C. and H.G.,: "Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials(TNO Green Book)", 2nd edtion, CPR 16E, Netherlands Organization of Applied Scientific Research(TNO)(1992)
4. Mudan, K.S. and P.A.Croce, "Fire Hazard Caculations for Large open Hydrocarbon Fires", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, First Edition(1988)
5. P.H. Thomas, "The Size of Flames from Natural Fires", 9th Int. Combustion Symposium, Comb. Inst., Pittsburgh, PA, pp. 844-859(1963)