

파이프라인에서의 가스누출 확산과 폭발 영향평가

정인구 · 유상빈* · 이수경* · 김래현

서울산업대학교 화학공학과

서울산업대학교 안전공학과*

Assessment of Gas Release Dispersion and Explosion in Pipeline

In-Gu Jung · Sang-Bin Yoo* · Su-Kyung Lee* and Lae-Hyun Kim

1. 서 론

80년대 말 천연가스 보급정책에 의해 도시가스가 급속히 보급된 이후 가스의 누출에 의한 화재폭발 위험성이 잠재된 상태에 있다. 그 결과로 94년 아현동 지하공급기지 폭발사고와 대구지하철 공사장 도시가스 폭발사고가 잇달아 발생하여 수백명의 사상자와 엄청난 재산 피해를 입게 되었다. 그러나, 이러한 대형사고에 대한 정확하고, 공학적인 조사가 제대로 실시되지 않은 채로 마무리되어 갔다. [1]

이에 본 논문에서는 아현동 지하공급기지 폭발사고와 대구 지하철 공사장 도시가스 폭발사고를 재조명하고자 하였다. 즉, 두 대형사고의 전체 누출량을 추산하고 점화원에 의해 폭발된 후 폭발효율에 대해 추산하였다. 또한 똑같은 양의 도시가스 누출이 개방계에서 이루어졌을 경우에 대해 복사열을 계산하였다. 화재와 폭발에 의한 복사열과 과압에 의한 피해를 계산하기 위하여 ALOHA, PHAST 프로그램을 이용하여 계산을 실시하였고, probit 분석에 의한 피해분석을 실시하였다. 그리하여, 가스폭발이 이루어졌을 경우에 대한 사례분석을 실시하여 예상되는 피해에 대처함으로써 그 손실의 규모를 최소화하는데 목적이 있다.

2. 이론적배경

2.1 hole을 통한 증기의 흐름

기상누출은 음속이거나 음속 이하의 속도로 누출되는데, 이를 구별하기 위하여 먼저 임계류압력비(Critical flow pressure ratio)에 대한 조건식이 아래와 같다. [2, 3]

$$\frac{P_s}{P_a} \geq \left[\frac{\gamma+1}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

만약 위 조건식을 만족하면 방출기체는 음속으로 누출되며, 누출속도는 다음식으로 표현된다.

$$(Q_m)_{choked} = C_o A_o P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_o} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(r+1)/(r-1)}} \quad (2)$$

2.2 폭발의 영향범위 산정

1. Scaling법칙을 이용한 계산[2]

Scaling법칙을 이용하면, 특정 질량의 TNT가 폭발할 때 어느 거리에 어느 정도의 피해를 줄 수 있는가를 추정할 수 있다.

$$W_{TNT} = \frac{\Delta H_c \times W_c}{1120} \times \eta \quad (3)$$

2. Jarrett식을 이용한 계산[2]

Jarrett는 가스 등이 폭발할 때 주거지의 주택에 여러 가지 상태의 피해를 주는 범주를 예측하는 거리(반경)를 예측하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$R = \frac{KW^{1/3}}{[1 + (7000/W)^2]^{1/6}} \quad (4)$$

여기서 K는 아래에 정하는 피해의 정도를 기술하는 상수이다.

K = 9.5 거의 모든 구조물 완전 파괴

K = 14 벽돌조의 외벽이 50~70% 파손

K = 24 가옥거주 불능 - 지붕의 부분 또는 전파, 하나 둘 정도의 외벽 파괴

K = 70 약간의 구조물이 파괴, 접합부분 이탈

K = 140 수리하면 주거가능 - 천정·타일 등 파손, 10% 창유리 파손

이 식은 Scaling 법칙의 근사식으로 여러 나라에서 사용되고 있다.

2.3 폭발의 영향(Explosion Effect)

Eisenberg 등은 핵폭발로 인한 사람의 손상정도를 확률단위(Probit)모델을 사용하여 폐출혈로 인한 치명적 손상에 대하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$Pr = -77.1 + 6.91 \ln(Ps) \quad (5)$$

또한 고막파열은 다음과 같은 식으로 산출할 수 있다.

$$Pr = -15.6 + 1.93 \ln(Ps) \quad (6)$$

3. 사례연구

본 논문에서는 아현동 지하공급기지 폭발사고와 대구지하철 공사장 폭발사고를 각각 밀폐계와 개방계로 나누어 분석하였다. 개방계의 경우 LNG와 LPG로 나누어 비교 고찰하였으며, ALOHA모델과 PHAST모델을 사용하여 확산범위, 복사열 영향평가를 실시하였다.

3.1 밀폐계 폭발

3.1.1 아현동 지하공급기지 폭발사고[5]

1) 사고의 개요

1994년 12월 7일 14시 50분경 아현동 지하공급기지에서 계량라인의 밸브 내부누설과 관련하여, 14:10분경 계량라인 양측에 설치된 전동, 수동밸브를 잠그고 서울도시가스 공급 계량라인 양쪽 차단밸브의 누설량을 정밀점검하기 위한 가스방출 작업 중, 원인불명의 점화원에 의하여 인화되어 폭발과 화재가 발생하여 사망

12명, 부상 101명의 인명피해와 가옥파손 145채, 차량파손 93대, 이재민 336명, 총 715건의 재산피해가 발생한 재해이다.

2) 사고시나리오 설정

아현동 폭발사고당시의 사고시나리오를 다음과 같이 설정하였다.

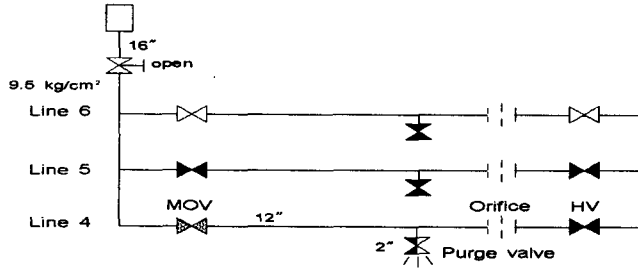


Fig. 1. P&ID of underground supply base, AHYUN

1. 가스가 누출되는 상태에서 Orifice 교체작업을 실시할 때는 먼저 배관양단의 수동밸브와 전동 구동식 볼밸브를 완전 차단시키고, 방출밸브를 전개한 후 0.05cm배관 속의 잔존 도시가스를 방출시켰으나, 전동 구동식 MOV 04가 불완전하게 차단되어 있어 배관 Line NO. 4 방출밸브를 통하여 계속 Valve Station 실내로 누출되어 폭발하고 화재가 발생되었다고 가정한다.
2. 모든 마찰손실은 무시한다.
3. 도시가스가 누출된 시간을 총 40분이다.
4. hole을 통한 연속적인 누출이다.

3) 누출모델 적용

아현동 도시가스의 성분을 보면, 메탄 89.09%, 에탄 9.55%, 프로판 1.87%, 부탄 0.45%, 질소 0.02%로 구성되어 있다. 기체와 증기가 갖고 있는 에너지는 압력의 형태로 나타나며 기체와 증기가 구멍을 통하여 팽창하거나 빠져나갈 때 압력에너지는 운동에너지로 변환된다. 직경 2in의 관을 관통하는 경우 9.5kg/cm² 가스는 자유팽창 방출을 하며 대부분의 압력에너지는 운동에너지로 전환한다. 그러므로 식 (2)를 이용하여 계산하면 가스는 1.88kg/s의 속도로 분출되어 나온다. 이 양이 약 40분간 빠져나왔으므로 총 누출량은 약 4508kg이 된다. 만일, 같은 조건하에서 LPG의 총 유량을 계산하면 6401kg이 된다.

4) 피해영향분석

가스폭발에 대한 TNT당량 환산식을 이용하여 LPG, LNG의 가스 누출량을 TNT당량으로 환산하면 다음과 같다.

$$\text{LNG의 TNT당량} : W_{TNT} = \frac{\Delta H_c \times W_c}{1120} = \frac{13299 \times 4508}{1120} = 53530 \text{ (kg)}$$

$$\text{LPG의 TNT당량} : W_{TNT} = \frac{\Delta H_c \times W_c}{1120} = \frac{12059.2 \times 6401}{1120} = 68920 \text{ (kg)}$$

폭발효율에 대한 정확성을 기하기 위해 당시의 신문을 참조하였다. (1) 주변 50m내의 가옥 1백 50여채가 전소되거나 파손됐다. (2) 반경 3백m내 빌딩의 유리창 1백여장이 폭발에 따른 충격으로 깨졌다 [6].

위 신문기사의 내용을 토대로 (1)의 예에 대해서는 가스등이 폭발할 때 주거지 주택에 미치는 손상등을 예측하는 Jarrett 식을 사용하여 당시의 폭발효율에 대해 예측하였다. 즉, 식 (4)를 사용하였고 이 때 K값은 14를 가정하였다. 이 계산에 의하면 폭발효율이 약 3%일 경우 반경 50m 이내의

가옥에 심한 파손을 입히게 된다.

또한 (2)의 예를 위하여 반경 300m이내에서 빌딩의 유리창이 폭발에 따른 충격으로 깨지기 위한 과압은 4.8kPa이고 이것은 LNG 폭발효율이 약 9%일 경우에 해당하는 값이다.

3.1.2 대구지하철 공사장 LPG 도시가스 폭발사고

1) 사고의 개요

1995년 4월 28일 7시 50분경 대구광역시 달서구 상인동에서 S사(주)측이 그라우팅 보링 천공작업을 하던 중, 07:10분경 천공작업 인부가 지하에 매설된 도시가스 중압배관을 천공기로 관통시켜, 분출된 가스가 일부 파손된 우수관을 통하여 지하철 공사장으로 가스가 유입되어 원인 미상의 불씨에 의해 인화되어 폭발된 사고로써 사망 101명, 중상 201명의 인명피해와 가옥파손 195채, 차량파손 152대, 지하철 복강판 400m붕괴, 복강판 1000여개가 6층 높이까지 치솟았다. 이 사고는 LPG누출로써 작업자의 부주의로 일어난 가장 대표적인 사고이다.

2) 사고시나리오 설정

대구 폭발사고당시의 사고시나리오를 설정하면 다음과 같다.

1. 그라우팅 보링 천공작업시 지하 1.5m에 매몰된 직경10cm, 압력 4kg/cm²의 도시가스관을 인지하지 못하고 작업도중 그라우팅 기계가 도시가스관을 관통하였다. 이 때 분출된 가스는 1.4m가량 떨어진 300mm 우수관으로 전량 흘러 들어간 것으로 가정한다.

2. 도시가스는 70m 가량의 곡관을 흘러 전량 대구 지하철 공사장으로 유입된 것으로 가정하며, 곡관의 마찰손실은 무시한다.

3. 도시가스가 누출된 시간을 총 40분이다.

4. hole을 통한 연속적인 누출이었다.

3) 누출모델 적용

1995년 당시 대구광역시와 경산시·군 일대에 공급하는 도시가스(LPG)의 성분은 프로판 55.63%, 부탄 6.18%, 공기 38.19%로 이루어져 있다. 직경 10cm의 관을 관통하는 경우 4kg/cm² 가스는 자유 팽창 방출을 하며 대부분의 압력에너지는 운동에너지로 전환되며 대기압 상태에서 등엔트로피 팽창을 하게 된다. 아현동 폭발사고와 마찬가지로 LNG 및 LPG에 관하여 서로 비교평가하였다. 그 결과 LPG의 총 누출량은 24319kg이고 LNG의 총 누출량은 17148kg이다.

4) 피해영향분석

가스폭발에 대한 TNT당량 환산식을 이용하여 LPG, LNG의 가스 누출량을 TNT당량으로 환산하면 LPG의 경우 261,846.15kg이고, LNG의 경우 203,630.97kg에 해당하는 값이 된다.

폭발효율의 정확한 계산을 위하여 아현동 사건과 마찬가지로 신문의 기사내용을 참조하여 결과치를 얻어냈다 [7~9].

1) 4km 떨어진 아파트의 창문이 부서지고, 큰 소음이 있었다.

2) 폭발사고 당시 280kg의 복공판 1000여개가 지상에서 50m정도 높이로 치솟았다.

1)의 예는 과압이 0.27kPa정도에서 나타나는 특징으로서 이것을 계산한 결과 폭발효율이 3%에 해당한다. 또한 2)의 예에서 폭발사고 당시의 280kg의 복공판 1000여개가 지상에서 50m정도 높이까지 솟을 때의 에너지를 환산하여 폭발효율을 계산하면 약 11.2%에 해당한다. 즉, 대구지하철 공사장 폭발사건 당시의 폭발효율을 계산한 결과 최소 3%에서 최대 11.2%였던 것으로 예측된다.

3.2 개방계 확산 및 복사열 영향평가

파이프 라인에서의 누출에 의한 개방공간에서의 확산정도와 피해영향평가를 구체적인 사례로서 평가하기 위하여 아현동 지하공급기지와 대구지하철 공사장의 밀폐계 누출을 개방계로 이동시켜 각각 LNG와 LPG의 확산에 대한 영향평가를 실시하였다. 이를 위하여 ALOHA 모델과 PHAST 모델을 사용하였다. ALOHA 모델을 사용하여 지면에서의 농도를 평가하였고, PHAST 모델을 사용하여 수직형으로 분출할 경우 확산범위와 복사열에 의한 영향에 대하여 평가하였다. 각 모델에 대한 데이터는 다음과 같다 [10~12].

Table 1. User defined inputs for dispersion modeling in ALOHA & PHAST models (AHYUN) [13]

Component		LNG	LPG
Information			
Chemical Information	Molecular Weight	18.25	39.14
	Boiling Point	-161.49℃	-42.04℃
Atmospheric Information	Wind	5m/sec	5m/sec
	Stability Class	D	D
	Relative Humidity	40%	40%
	Air Temperature	10℃	10℃
	Ground Roughness	Urban of Forest	Urban of Forest
	Cloud Cover	1	1
Dispersion Model		Gaussian Model	Heavy Gas Model

Table 2. User defined inputs for dispersion modeling in ALOHA & PHAST models(TAEGU)

Component		LNG	LPG
Information			
Chemical Information	Molecular Weight	18.25	39.14
	Boiling Point	-161.49℃	-42.04℃
Atmospheric Information	Wind	0.7m/sec	0.7m/sec
	Stability Class	B	B
	Relative Humidity	60%	60%
	Air Temperature	10℃	10℃
	Ground Roughness	Urban of Forest	Urban of Forest
	Cloud Cover	6	6
Dispersion Model		Gaussian Model	Heavy Gas Model

3.2.1 ALOHA모델 적용

본 연구에서는 다음과 같은 3가지 농도에 대하여 영향평가를 실시하였다 [13, 14].

1) 연소하한 농도 2) 가스검지기 작동농도 3) 평상시 사람이 냄새를 맡을 수 있을 정도의 농도로 구분하여 적용한 결과 Table 3과 같은 값을 얻었다. 표에서 보면 알 수 있듯이 LPG가 약간 더

많이 확산되어 나가는 것을 알 수 있으며, 특히 사람이 냄새를 맡을 수 있을 정도의 농도 분포는 그림에서와 같이 LPG의 확산범위가 약 15배정도 더 넓음을 알 수 있다.

Table 3. The dispersion length of LNG and LPG concentration

	Concentrations (ppm)	AHYUN Model	TAEGU Model
		Dispersion Length(m)	Dispersion Length(m)
LNG	45100	30	49
	11275	61	96
	225.5	586	625
LPG	32900	22	81
	8225	53	136
	164.5	655	1100

meters

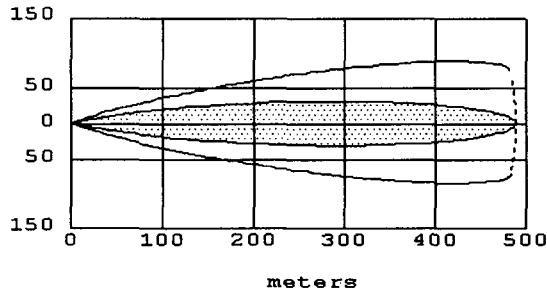


Fig. 2. Dispersion length of LNG for AHYUN model(Concentration 225.5ppm)

meters

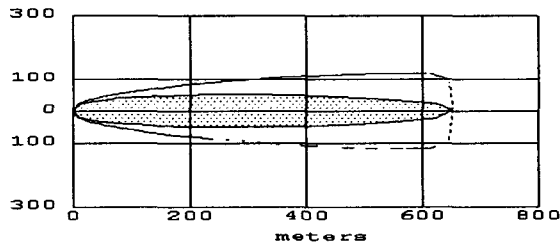


Fig. 3. Dispersion length of LPG for AHYUN model(Concentration 164.5ppm).

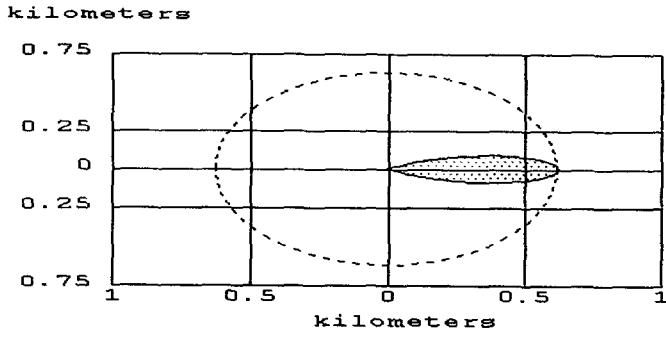


Fig. 4. Dispersion length of LNG for TAEGU model(Concentration 225.5ppm)

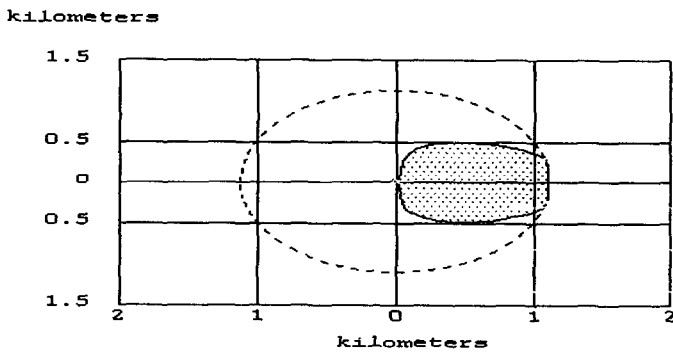


Fig. 5. Dispersion length of LPG for TAEGU model(Concentration 164.5ppm)

3.2.2 PHAST모델 적용

1) 아현동모델

PHAST를 사용하여 아현동 모델에 대해 수직상방향으로의 누출에 대해 적용하였다. Table 4와 같이 폭발 한계에 대한 거리가 LPG가 더 넓게 분포됨을 알 수 있었다. 그리고 복사열에 대해 비교 평가하였을 경우 관심 거리 10m, 20m, 50m에 대해 LPG의 복사열 강도가 큼을 알 수 있다. 또한, 복사열방출에 대해 살펴본 결과 Fig.8~11에서 볼 수 있듯이 LPG가 더 많은 복사열을 방출하는 것을 알 수 있다. 특히 Fig.10, Fig.11은 축적 1000 : 1의 지도에 적용하여 살펴보았다.

Table 4. The dispersion length of LNG and LPG concentration

	Concentration (mol %)	Dispersion length (m)	Distance (m)	Radiation (kw/m ²)
LNG	4.51	0.61	10	6.03
			20	1.82
			50	0.27
LPG	3.29	0.81	10	7.97
			20	2.58
			50	0.38

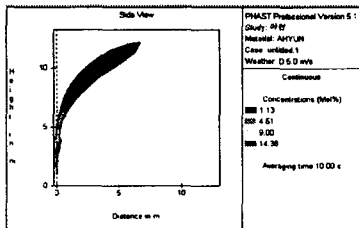


Fig. 6. Dispersion length of LNG concentration

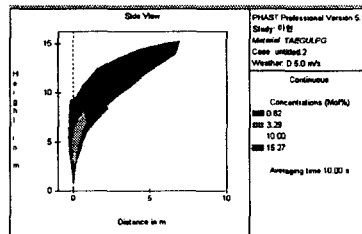


Fig. 7. Dispersion length of LPG concentration.

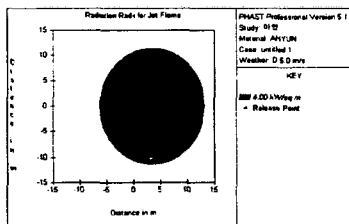


Fig. 8. Radiation effects for jet flame of LNG

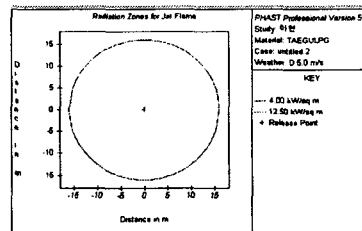


Fig. 9. Radiation effects for jet flame of LPG

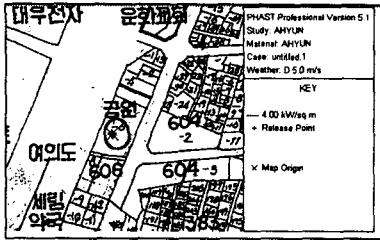


Fig. 10. Application of real map for jet flame(LPG)

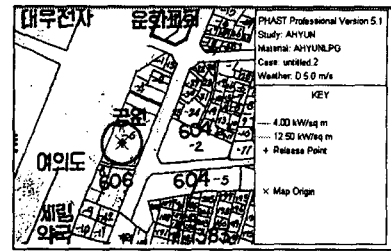


Fig. 11. Application of real map for jet flame(LPG)

2) 대구모델

ALOHA와 마찬가지로 대구지하철 공사장 폭발사고 당시의 조건으로 모델화하여 수직상방향으로의 누출에 대해 PHAST를 적용시켰다(Fig.12, Fig.13 참조). 그 결과 LNG 파이프라인에서 누출할 경우 Jet Flame에 의한 복사열 영향은 없는 것으로 나타났으며, LPG 파이프라인에서 누출할 경우 Jet Flame에 의한 복사열 영향이 Fig.14, Fig.15와 같이 나타났다. Fig.15의 경우 축적 20000 : 1의 지도에 적용하였다. 관심거리 10m, 20m, 50m에 대한 복사열 영향은 Table 5와 같다.

Table 5. The dispersion length of LNG and LPG concentration

	Concentration (mol %)	Dispersion length (m)	Distance (m)	Radiation (kw/sqm)
LNG	4.51	0.32	10	3.97
			20	2.87
			50	0.81
LPG	3.29	0.54	10	4.29
			20	3.41
			50	1.08

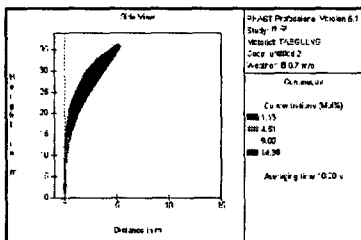


Fig. 12. Dispersion length of LNG concentration

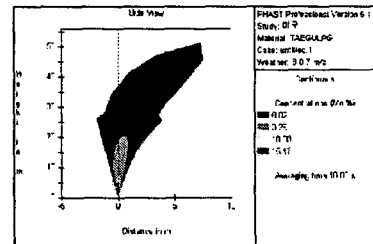


Fig. 13. Dispersion length of LPG concentration

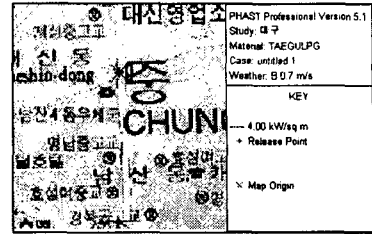
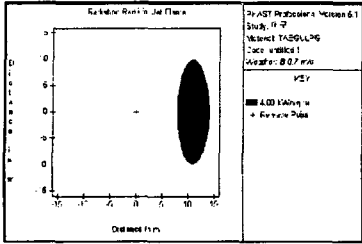


Fig. 14. Radiation effects for jet flame of LPG

Fig. 15. Application of real map for jet flame of LPG

3.3 폭발이 인체에 미치는 영향

폭발의 직접적인 영향으로 인체손상 확률을 Probit 분석으로 적용하였다.

1) 아현동 모델

폐 출혈에 의한 사망 확률은 다음과 같다. 폭발의 직접적인 영향으로 반경 31m이하에서 폐 출혈로 인해 사망할 확률은 99%이다. 또한 폐손상으로 인하여 사망할 확률이 1%일 경우는 반경 43m이다.

반경 40m미만에서 고막파열이 일어날 수 있는 확률은 99%이며, 50m의 경우에는 82%가 고막파열이 일어난다. 또한, 고막파열이 1%일 경우는 반경 152m인 경우이다.

2) 대구 모델

폭발효율이 11.2%일 경우에 대하여 분석하면, 폐출혈로 인하여 사망할 확률이 99%인 경우는 55m이고, 1%만이 폐손상에 의해 사망할 확률은 77m이다.

또한, 고막손상이 일어날 확률은 100m일 경우 74%가 고막파열이 일어나며, 99%가 고막파열이 일어날 수 있는 거리는 반경 71m이다. 또한, 고막파열이 일어날 확률이 1%인 경우는 277m이내이다.

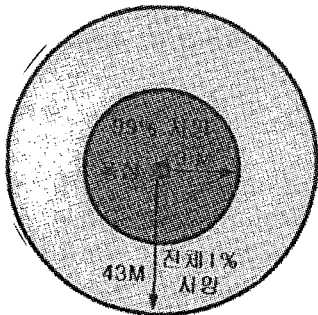


Fig. 16. Deaths from lung hemorrhage (AHYUN)

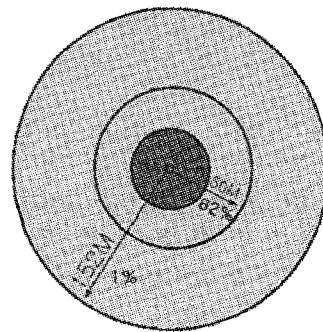


Fig. 17. Eardrum ruptures(AHYUN)

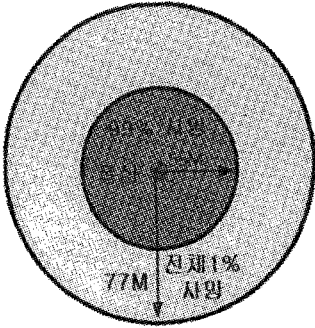


Fig. 18. Deaths from lung hemorrhage (TAEGU)

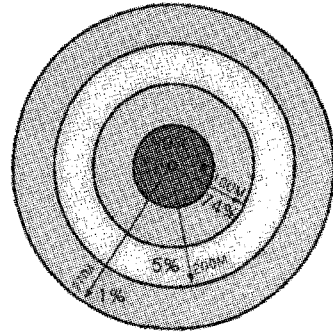


Fig. 19. Eardrum ruptures(TAEGU)

4. 결론

본 연구에서는 파이프라인 가스 수송시예의 가스누출사고에 관하여 LNG의 경우 1994년 12월 아현동 지하공급기지 폭발사고와 LPG의 경우 1995년 5월 대구지하철 공사장 폭발사고를 중심으로 고찰하였다. 실제 사고당시 밀폐계 폭발효율을 계산하고 또한, 개방공간에 대하여 ALOHA 및 PHAST 모델을 이용하여 확산범위, 복사열 강도를 예측하고 폭발과압이 인체에 미치는 영향에 대해 Probit 분석을 이용하여 예측하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 아현동 지하공급기지 폭발사고

- ① 현장조사 피해보고 결과를 토대로 할 때 폭발효율을 계산하면 최소 3%에서 최대 9%로 나타났다.
- ② ALOHA 모델 결과 확산범위에서 LPG가 LNG보다 넓게 분포되었으며 PHAST모델을 적용하여 수직방향으로 관찰해 본 결과 LNG가 LPG보다 복사열에 대한 영향이 적음을 알 수 있다.
- ③ Probit분석에서 폭발의 직접적인 원인에 의해 반경 31m안에 있는 사람이 폐출혈로 사망할 확률은 99%이고, 반경 43m안에서 폐출혈로 사망할 확률은 1%로 나타났다. 또한 고막손상이 일어날 확률은 반경 40m에서 99%이고, 반경 152m에서 1%이다.

(2) 대구 지하철 공사장 폭발사고

- ① 폭발효율을 계산한 결과 최소 3%에서 최대 11.2%로 나타났다.
- ② 위와 동일한 양의 가스가 개방계로 누출되었다고 가정할 때 ALOHA에 모델결과는 LNG의 폭발한계 범위내의 확산면적은 LPG에 비해 15배 정도 적은 것을 알 수 있다. PHAST모델 결과 복사열에 대한 영향도 LPG가 LNG보다 크게 나타났다.
- ③ 폭발과압으로 인해 반경 55m안에 있는 사람이 폐출혈로 사망할 확률은 99%이고, 반경 77m안에서 폐출혈로 사망할 확률은 1%로 나타났다. 또한 고막손상이 일어날 확률은 반경 277m에서 1%이고, 반경 71m에서 99%로 나타났다.

ALOHA모델과 PHAST 모델을 적용하여 아현동 지하공급기지 폭발사고와 대구 지하철 폭발사고를 LNG와 LPG로 나누어 비교, 조사해 본 결과 LNG가 LPG보다 더 안전한 것으로 나타났다.

사용기호

- γ : Gas specific heat ratio [C_p/C_v]
 C_0 : Discharge coefficient
 A_0 : Area of hole [m^2]
 P : Atmospheric pressure [kPa]
 P_0 : Ambient pressure [kPa]
 g_c : Gravitational constant [$(1kgm/s^2)/N$]
 M : Molecular weight of the escaping vapor or gas [kg]
 R_g : Ideal gas constant [kPa m^3 / k mol K]
 Q_m : Mass flow rate [kg/s]
 ρ : Density [kg/m^3]
 z_e : Scaling parameter [$m/kg^{1/3}$]
 r : Distance from the ground zero point of explosion [m]
 m : Equivalent mass of TNT [kg]
 P_s : Peak pressure [N/m^2]
 ΔH_c : Heat of combustion [kcal/kg]
 W_c : Mass of vapor or gas [kg]
 η : Coefficient of explosion(dimensionless)
 K : Prescribed coefficient of damage
 W : Mass of TNT [lb]

참고문헌

1. 김래현, 조영도, : “ 가스누출 확산모델과 폭발피해 영향평가 ” 가스안전공사, 1997
2. Crowl, D. A. and J. F. Louvar : “ Chemical Process Safety : Fundamentals with application ”, Prentice-Hall, New Jersey, pp 82-151, 1990.
3. Center for Chemical Process Safety , “ Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Model ”, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1996.
4. 이수경, 하동명, : “ 최신화공안전공학 ”, 동화기술, 1997
5. 한국가스 안전공사 “ 10대 대형가스 사고 사례집 ”, 1995.
6. “ 동아일보 ” : 1994년 12월 8일
7. “ 동아일보 ” : 1995년 4월 29일
8. “ 조선일보 ” : 1995년 4월 29일
9. “ 문화일보 ” : 1995년 5월 4일
10. 기상청 “ 기상연보 ”, 1994-1995
11. National Safety Council, : “ALOHA User's Manual ”, 1996.
12. DNV Technica, “ PHAST 5.00 Manual ”, 1995.
13. 74TH EDITION : “ Handbook of Chemistry and Physics ” 1993, p 6.20-6.27
14. McCabe, W. L., Smith J. C. and Harriott, P : “ Unit Operations of Chemical Engineering ” 1993, pp 120-139.
15. Lees : “Loss Prevention in the Process Industries” , p. 589
: Bodurtha, Industrial Explosion Prevention and Protection, p. 99.