



고압 매물 천연가스 배관 누출사고 피해해석에 관한 연구

이승국 · *신현용*

한국가스안전공사, *서울과학기술대학교 화공생명공학과
(2013년 3월 25일 접수, 2013년 4월 16일 수정, 2013년 4월 16일 채택)

A Study on the Consequences of Underground High Pressure Natural Gas Pipelines

Seungkuk Lee · *Hun Yong Shin*

Korea Gas Safety Corporation, Gyeonggi-do 429-712, Korea

*Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received March 25, 2013; Revised April 16, 2013; Accepted April 16, 2013)

요약

천연가스의 사용량이 날로 증가됨에 따라 고용량의 가스를 운송하기 위해 고압배관의 설치·운영이 불가피하고 이에 따라 고압의 매물 천연가스배관에서 다양한 원인에 의한 결함 발생 시 대규모 누출로 이어지면 높은 압력의 가스 방출에 따른 대기 중 확산 그리고 점화원에 의한 화재·폭발로 인하여 큰 피해가 발생할 수 있다. 이 연구에서는 고압의 매물 천연가스배관에서 결함 발생 시 매물된 배관에서의 가스 누출 거동 분석과 가스 확산 및 지연 점화에 따른 플래시 화재의 피해 거리를 예측하여, 사고 영향을 감소할 수 있도록 대피거리의 산정 등에 의한 비상 조치계획을 세워 안전관리 활동에 도움이 되고자 한다.

Abstract - Due to rapid rise of consuming rate for natural gas, installation and operation of high pressure natural gas pipeline is inevitable for high rate of gas transportation. Accordingly incidents on the underground high pressure natural gas pipeline come from various reasons will lead to massive release of natural gas and gas dispersion in the air. Further, fire and explosion from ignition of released gas may cause large damage. This study is for release rate, dispersion and flash fire of natural gas to establish a safety management system, setting emergency plan and safety distance.

Key words : high pressure natural gas pipeline, risk assessment, release analysis, flash fire, gas dispersion, safety management system

1. 서론

대규모로 천연가스를 사용하는 집단에너지 발전소, 아파트 단지 및 도심형 생활 주택 등에 가스를 공급하는 공급배관은 도심에 위치하고 있어 사고 발생시 큰 위험성을 내포하고 있어 안전관리 강화를 위해 위험성 평가를 수행하였다.

배관에 부식이나 침식 또는 타공사 등에 의해 사

소한 결함이 생기면 높은 압력에 의해 배관이 파열되어 큰 위험에 빠질 수 있다. 파열된 배관 주변에는 파열시 분출되는 높은 압력에 의해 분화구가 생기고, 배관 양쪽에서 분출되는 가스는 상호 충돌하거나 분화구 벽에 충돌하여 모멘텀(Momentum)을 잃어버리고 이 시점으로 부터 자유 확산을 시작한다. 한편 하늘 방향으로 분출하는 가스는 분출 모멘텀에 의해 높은 위치까지 상승하고 운동량이 없는 시점에서 자유 확산을 시작하게 된다[1].

천연가스가 누출될 때 주변에 점화원이 있으면 즉시 점화되어 제트 화재(Jet Fire)가 발생하여 누출

†Corresponding author:hyshin@seoultech.ac.kr

된 가스가 연소를 계속한다. 한편, 점화원이 없으면 누출된 가스는 대기 중으로 확산을 하게 된다. 확산된 가스가 실내 등 제한된 공간(Confined area)으로 확산될 경우 점화되면 가스폭발의 가능성이 있지만, 개방된 공간(Unconfined area)에 확산되어 점화되면 플래시 화재(Flash Fire)가 발생하게 되므로, 연소 한계 농도의 가스가 확산될 수 있는 지역은 위험지역으로 분류하여 가스 누출사고 발생 시 점화원이 없도록 하고 조치하고 사람을 대피하여야 하는 등 비상조치가 필요한 지역으로 설정하고 안전관리를 강화하여야 큰 피해를 줄일 수 있다[2-4].

II. 이론적 배경

고압배관에서 부식, 침식, 피복손상, 타공사 등 다양한 원인에 의해 결함이 발생하면 천연가스는 배관으로부터 누출을 시작한다[5-8]. 이때 배관의 내부압력, 결함 누출부위의 크기, 배관의 두께, 배관의 강도 등 변수에 따라 고압배관은 파열을 할 수 있다. (고무풍선 바늘 터짐 효과) 배관이 파열하면 일시에 많은 양의 고압의 가스가 방출되어 매몰된 배관주변의 토양들이 비산되어 분화구가 생성된다.

배관파열의 최대결함크기의 계산은 (2-1)식 Shannon 관계식을 이용할 수 있다[9].

$$L_{crit} = \sqrt{2.5t \left(\frac{D-t}{2} \left[\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_h} \right)^2 - 1 \right] \right)} \quad (2-1)$$

Where,

L_{crit} = 누출/파단 판단 결함길이

(좁고 긴 형태의 결함)

D = 배관직경

t = 배관두께

σ_h = hoop stress

σ_f = flow stress

(항복응력(yield stress)의 약 1.15배)

$$D_{hole} = \frac{D}{198.8} \left(1 + \frac{0.52L_{crit}^2}{Dt} \right) \quad (2-2)$$

Where,

D_{hole} = 원 모양의 상당 결함직경

파열된 배관은 높은 압력으로 인해 주변의 흙과 멀리 비산하여 분화구(Crater)가 생기고, 파열된 배관 양 끝단에서 계속 가스는 분출된다. 고압의 가스

가 분출되는 방향에 따라 가스 확산의 결과는 크게 차이가 난다. 수평방향 및 아래쪽 수직방향으로 분출되는 고압가스는 분화구의 벽 또는 바닥에 부딪쳐 모멘텀을 잃어 분화구 주변부터 가스가 자유 확산을 하게 되지만, 상부 수직방향으로 누출되는 고압가스는 운동량에 의해 상당한 높이까지 상승하고 거기서 자유 확산을 하게 되므로 가스의 확산영역 결과가 큰 차이점을 보인다.

누출된 가스가 모멘텀을 잃고 공기 중에서 자유 확산을 하는데 해석하는 식은 관심 있는 지점의 농도를 일정시간 동안 평균 농도를 산정하는 가우스 분포(Gaussian Distribution) 식을 이용하고 배관으로부터 가스가 연속적으로 누출되어 확산되는 것은 다음 연속누출 모델식(Gaussian plume model for continuous release)을 이용한다[10].

$$C(x,y,z;H) = \frac{W}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \times \exp\left[-0.5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-0.5\left(\frac{H-z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2-3)$$

Where,

x, y, z : 관심 있는 위치의 좌표(m)

C : 관심 있는 지점의 농도(kg/m³)

W : 연속 누출속도(kg/s)

u : 누출 점에서의 풍속(m/s)

천연가스가 개방된 공간에 확산되어 점화되면 플래시 화재가 발생하기 쉽다. 플래시 화재는 확산된 가스의 농도가 폭발범위내의 영역에 점화원이 있으면 발생 가능하므로 피해범위는 폭발하한계(LFL, Lower Flammable Level) 농도가 확산할 수 있는 영역과 같으며 이의 해석을 위해 사고피해 영향평가는 PHAST RISK 6.6 프로그램을 이용하였다[11].

III. 매물 천연가스 배관 누출해석

3.1. 배관 사고 시나리오

고압배관의 사고 위험성을 평가하기 위해 사고 발생 시나리오는 유럽의 사고사례를 통해 제트화재와 플래시화재의 케이스를 산정하였다[5]. 제트화재의 경우는 누출 후 즉시점화에 의해, 플래시화재는 가스누출, 확산 및 지연 점화에 의한 결과로 나타날 수 있다.

긴 매물배관의 사고피해 영향평가는 석유화학 플랜트 등에 사용되는 Point Source Model과는 달리

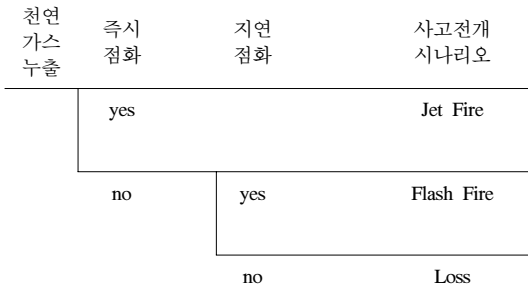


Fig. 1. Event Tree Analysis for natural gas accident

긴 파이프를 일정한 간격으로 사고가 발생한다는 가정하에 사고 피해영향을 예측하는 Route Model을 이용하였다. 또 지하에 매몰된 배관의 사고환경을 실제와 비슷하게 시뮬레이션 하기 위해 누출방향에 따라 수직분출(Vertical release model)과 충돌모델(Impingement release model)을 혼합하여 사용하였다. 가스분출 모멘텀은 확산해석에서도 아주 중요한 요소로 작용한다. 즉 배관 파열시 배관의 주변에는 파열시 분출되는 높은 압력에 의해 분화구가 생기고, 양 방향으로 수평방향으로 분출 되는 가스는 상호 충돌하여 모멘텀을 잃고, 분화구 벽에 충돌하는 가스도 모멘텀을 잃어 버려 이 시점으로 부터 자유 확산을 시작한다. 한편 하늘 방향으로 분출한 가스는 분출 모멘텀에 의해 높은 위치까지 상승하고 그 위에서 자유 확산을 시작하게 된다.

결합의 크기에 따른 누출 시나리오를 결정하기 위해 (2-1)식 및 (2-2)식에 의해 고압 천연가스 운송 배관이 파열이 될 수 있는 결합의 상당직경은 약 35mm로 계산된다. 그러므로 Small release case는 20mm 상당직경의 누출부위에서 누출되는 것으로, Large release case는 배관의 파열의 경우로 배관의 Full bore인 300mm에서 누출되는 2가지 사고 시나리오를 산정하였다

3.2. 가스 누출속도

배관에서 가스의 누출속도는 시나리오별 누출 직경에 따라 달라지며 시나리오별로 산출된 누출 속도는 Table 3과 같다.

3.3. 배관 누출사고 분석방법

연속누출 확산 가우스 식(2-3)을 이용하여 기상상태를 반영한 대기안정도에 따른 σ_y , σ_z 값은 Brigg's model의 혼합계수를 이용하며[10], 표면 거침도는 0.01~0.1, 평균농도 산정시간은 10분으로 하였다.

Table 1. Gas release direction and proportion for release of natural gas pipelines

구 분	비 율	비 고
상부방향 수직분출 (Vertical Release)	25%	180도
수평충돌 (Horizontal Impingement)	50%	90도 or 270도
적하부방향 수직충돌 (Vertical Impingement)	25%	0도
합 계	100%	

Table 2. Accident scenario according to scales of release source

구 분	누출직경	누출시간	비 고
Small Release	20 mm	20분	누출시간은 누출인지 후, 밸브 차단조치 등까지 걸리는 시간
Large Release	300 mm	5분	

Table 3. Release rate according to the scenario

시나리오	Small Scale	Large Scale
누출직경(mm)	20	300
누출시간(Min)	20	5
누출속도(kg/s)	3.2	473.3
누출속도(m/s)	380.65	

Table 4. Mixing factor of Brigg's model

대기 안정도	$\sigma_y (m)$	$\sigma_z (m)$
A - B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.001x)^{-1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	0.20x
C	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$
E - F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

3.4. 플래시 화재 피해 영향

매몰된 지하가스배관에서 가스가 누출될 경우 주로 개방된 지역(Confined area)에서 공기보다 가벼운 천연가스가 대기 중으로 쉽게 확산될 것이므로 폭발을 일으키기 위한 폭발범위의 농도의 가스가 지면에 모여 있기 어려우므로 이번 분석에서는 증기운 폭발의 영향은 배제하고 플래시 화재만 고려하였다. 플래시 화재는 확산된 가스 또는 증기의 점화에 의해 연소속도가 비교적 느린 편에 속하므로, 폭발 과압의 영향보다는 복사열에 의한 피해만을 고려하므로 피해영역은 천연가스의 폭발하한의 농도가 확산되는 지역까지만 산정한다.

가우시안 모델은 관심지점의 농도를 일정한 시간의 평균농도를 감안하므로, 안전율을 고려하여 플래시 화재가 가능한 가스 확산의 영역은 폭발범위 농도의 1/2 영역까지를 선정하였다[11].

Fig. 2-4에서와 같이 20mm 상당직경의 소누출의

경우 가스의 최대 확산 범위는 풍속이 5m/s이고 대기안정도 B의 기상조건에서 바람이 불어가는 방향으로 약 62m으로 나타나며, 풍속 1m/s, 대기안정도 A의 조건에서는 높이가 약 8.5m로 나타났으며, 이때 플래시 화재로 인한 피해거리는 각각 82m, 49m인 것으로 나타났다. 가스 확산은 풍속에 많은 영향을 받으므로 주간에는 풍속 1 m/s, 5 m/s, 9 m/s로, 야간에는 1 m/s, 3 m/s, 7 m/s의 경우를 각각 비교하였다.

Fig. 5-7에서와 같이 배관의 Rupture에 의한 300mm 상당 직경에서의 대누출의 경우, 풍속 9m/s, 대기안정도 C의 기상조건에서 화재가 가능한 농도의 최대 확산범위는 약 620m이며, 풍속 1m/s, 대기안정도 A의 조건에서 하늘 방향으로 화재가 가능한 농도가 확산되는 높이 약 90m로 나타로 평가되며, 이 경우 플래시 화재에 의한 피해거리는 각각 806m, 285m인 것으로 나타났다.



Fig. 2. Dispersion plane view at 1/2 LEL in case of small release scenario

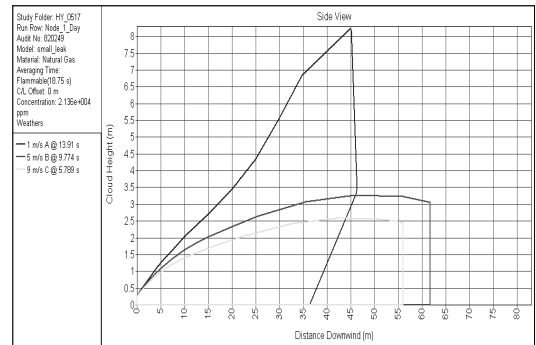


Fig. 3. Dispersion side view at 1/2 LEL in case of small release scenario

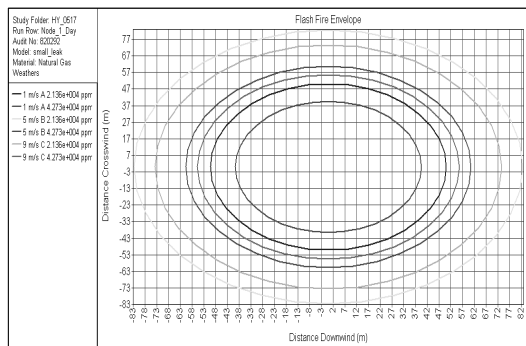


Fig. 4. The extent of damage of flash fire in case of small release scenario

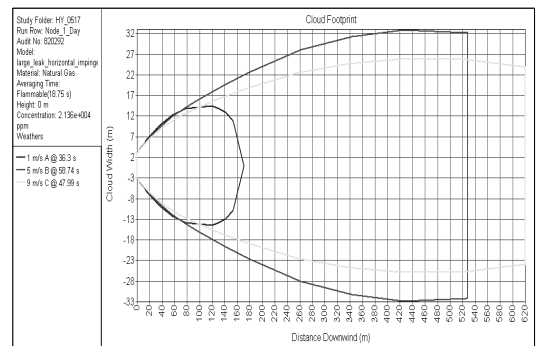


Fig. 5. Dispersion plane view at 1/2 LEL in case of large release scenario(horizontal direction)

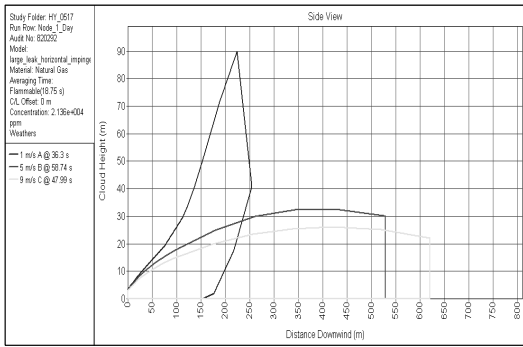


Fig. 6. Dispersion side view at 1/2 LEL in case of large release scenario(horizontal direction)

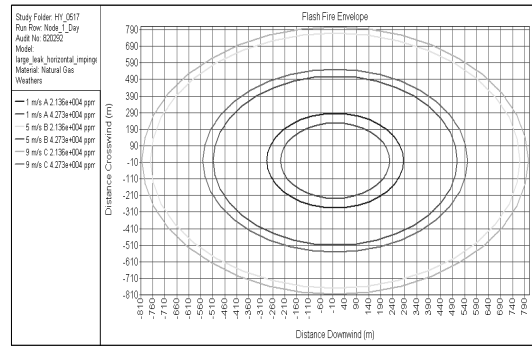


Fig. 7. The extent of damage of flash fire in case of large release scenario(horizontal direction)

Table 5. The extent of damage(m) of flash fire

구 분	대기 안정도	소누출 (20mm, 20분)		대누출 (300mm, 5분)	
		LEL	0.5 LEL	LEL	0.5 LEL
주간	1A	39 m	49 m	227 m	285 m
	5B	60 m	82 m	508 m	768 m
	9C	55 m	73 m	552 m	806 m
야간	1F	32 m	44 m	262 m	440 m
	3E	63 m	99 m	360 m	248 m
	7C	61 m	88 m	507 m	891 m

3.5. 플래시화재의 종합 피해거리

밤과 낮, 풍속 및 대기안정도 등 다양한 환경을 고려하여 누출 시나리오별 피해거리는 표 3-5와 같다. 소누출시 플래시 화재에 의한 위험거리는 최대 거리는 약 99m 정도이며, 대누출시에는 891m까지 예측되며, 모두 야간에 대기안정도가 안정할 때 가장 큰 피해를 입을 수 있는 것으로 평가된다.

IV. 결론

고압 천연가스배관에서는 결함의 크기에 따라 그 누출양상은 크게 달라진다. 배관에서 부식, 침식 등의 결함의 크기가 35mm 이상이면 배관내 높은 압력으로 인해 폭발이 발생할 수 있으며 누출되는 가스의 양은 초당 473 kg이 이르며, 고압의 가스 방출에 의하여 파열배관 주변은 분화구가 생성되며, 분

화구 주변의 지오메트리(Geometry)에 따라 수직분출, 수평충돌, 수직충돌 등 다양한 형태의 분출이 일어난다. 분화구에서 방출된 천연가스는 점화원이 없으면 대기 중으로 확산한다. 가장 피해거리가 크다고 예상되는 플래시 화재가 발생할 수 있는 영역은 누출시점에서 바람이 불어가는 방향으로 소규모 누출의 경우에는 99m, 대규모 누출(배관 파열)의 경우에는 891m까지 확산되는 것으로 평가된다. 이 영역은 천연가스의 50% 연소한계 농도에 해당하는 가스가 확산할 수 있는 거리이므로 최악의 상황에서 피해가 발생할 수 있는 지역이다. 그러므로 사고 발생 시 사고배관에서 약 900m까지 위험지역으로 설정하고 배관 사고 시 인원의 통제 및 대피, 점화원의 관리 등 비상조치계획을 반영해야 할 거리이다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] The Institution of Gas Engineers, "Steel Pipelines for High Pressure Gas Transmission", IGE Code TD1, 4th ed., Vol. 1670, (2001)
- [2] Spouge, J., "A Guide to Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations", DNV Technica, (1999)
- [3] Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York, USA, (2000)

- [4] Lees, F.P., "Loss Prevention in the Process Industries(2nd ed.) Vol. 1-3", Elsevier, (1996)
- [5] European Gas Pipeline Incident Data Group, "Gas Pipeline Incidents 7th Report 1970-2007", (2008)
- [6] Lee, Seungkuk, Cho, Eun-Goo, "Quantitative Risk Assessment in the Chemical Industry", Theories and Applications of Chemical Engineering, 3(1), 1657, (1997)
- [7] Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data-with Data Table", AIChE, New York, USA, (1989)
- [8] Korea Gas Safety Corp., "A Guideline for Risk Assessment", (2008)
- [9] GL Noble Denton, "Pipeline QRA of gas transmission pipelines operated by KOGAS", (2010)
- [10] Van den Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M. et al., "Methods for the calculation of physical effects part 1 & 2", Committee for the Prevention of Disasters, Netherlands, (1997)
- [11] Van den Bosch, C.J.H., Merx, W.P.M., "Methods for the determination of possible damages", Committee for the Prevention of Disasters, Netherlands, (1989)