

도시가스 수송배관의 위험성에 관한 연구

조영도, 박교식, 안범종*

한국가스안전공사

* 한국산업기술대학교 화학공학과

A Study on the Hazard of Transmission Pipeline Carrying City Gas

Young Do Jo, Kyo-Shik Park, Bum Jong Ahn*

Korea Gas Safety Corporation

* Department of Chemical Engineering, Korea Polytechnic University

서론

국내에서 도시 가스로 메탄을 주성분으로 이루어진 천연가스를 주로 사용하고 있다. 천연가스는 가스공사의 주 배관을 통하여 도시가스회사 또는 공장에 공급되고, 공급압력을 낮추어 가정집에 공급된다. 가스배관은 크게 수송배관과 분배배관으로 나누어진다. 분배배관은 가정집에 공급되는 저압배관을 말하고, 수송배관은 대량의 가스를 타지역으로 수송하는 배관을 말한다. 수송배관은 많은 양의 가스를 공급지역으로부터 수 백 미터 또는 수십 킬로미터 떨어져 있는 타지역으로 수송하고, 직경이 수 미터까지 되기도 하고, 농촌지역 또는 인구 밀도가 높은 도심지역을 통과하기도 한다. 이러한 연유로 가스배관의 파손사고에 의하여 근방에 있는 건물이나 인명에 심각한 피해를 유발할 수 있다. 이러한 사고에 의한 위험성은 배관파손 형태, 점화시간, 주변환경, 그리고 기상조건에 영향을 받는다. 가스배관의 파손빈도는 Jones 등의 연구결과에 의하면 약 1.25 회/1000mile·year이다[1].

가스배관의 사고형태는 취성파괴에 의한 배관의 완전파손에서 용접결함에 의한 누출사고까지 다양하다. 고압가스배관은 내부에너지가 높기 때문에 작은 결함이 발생하게 되면, 일정한 시간 뒤에 완전파손으로 발전할 수 있다. 운전압력이 배관재료 항복응력의 0.3배 이상이 되면 작은 결함이 완전파괴로 발전할 가능성이 있다[2].

아래 그림과 같이 고압천연가스배관의 파손에 의하여 여러 가지 형태의 사건(event)이 일어날 수 있다.

개방공간에서 천연가스의 증기운 폭발압력은 거의 무시할 수 있을 정도로 약하다. 만약 가스운 근방 또는 내부에 건물 등과 같은 구조물이 있을 경우에는 연소생성물 팽창을 방해하게 되어 심각한 피해를 유발할 수 있는 폭발압력이 발생할 수 있다. 따라서 가스누출에 의하여 형성되는 최소연소한계농도 내에 있는 건물은 폭발에 의하여 붕괴될 수 있다[5]. 일반적으로 누출된 천연가스는 부력에 의하여 지표면에 연소범위농도에 있는 가스운을 형성하기 어려우므로 플래시 화재의 피해는 무시할 수 있다. 따라서 고압천연가스배관 파손에 의한 피해는 주변 건물에 의하여 발생하는 폭발에 의한 피해와, 화재에 의한 복사열 피해이다.

본 연구에서는 고압천연가스배관의 파손에 의하여 위험성을 예측할 수 있는 단순한 식을 제시하고자 한다.

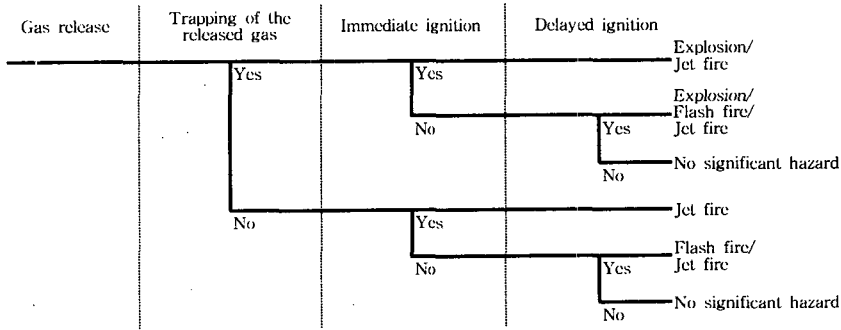


Figure 1. Event tree for high pressure natural gas pipeline

본론

배관 파손에 의한 피해는 폭발과 화재에 의한 복사열에 의한 것으로, 이를 예측하기 위하여 가스의 누출속도, 연소하한계농도의 위치, 복사열전달을 아래와 같이 고려하였다.

가스누출속도

가스누출속도는 배관내의 압력과 가스흐름에 대한 저항에 의존하게 된다. 배관의 전체압력은 배관에서 압력강하와 파손부위에서 대기중으로 음속누출에 의한 압력강하의 합과 같다. 배관에서 압력강하에 따른 유속은 Fanning식을 이용하고, 단열과정으로 가정하면 다음과 같다[4].

$$Q_b = \frac{\pi}{4} \sqrt{-\frac{\rho_0 P_0 d^5}{2f_F L} \left(\frac{\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{P_e}{P_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} - 1 \right)} \quad (1)$$

$$f_F = \frac{1}{4[1.14 - 2.0 \log(\epsilon/d)]^2} \quad (2)$$

여기서 P_0 는 배관의 운전압력, P_e 는 배관 파손부위의 압력, γ 는 비열비, ρ_0 는 가스밀도, d 는 가스배관의 직경, f_F 는 Fanning의 마찰계수, 그리고 ϵ 는 배관표면 거칠도 이다.

배관 파손부위에서 음속누출속도는 다음식과 같다.

$$Q_h = C_D A \sqrt{\gamma \rho_e P_e \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

여기서 C_D 는 방출계수 그리고 A 는 파손부위의 단면적이다. 배관완전파손의 경우, 파손부위의 단면적은 배관의 단면적과 같고, 방출계수는 1이다. 물질보존법칙에 의하여 식(1)에서 구한 값과 식(3)에서 구한 값이 같아야 하므로, 위 식으로부터 가스누출속도를 구할 수 있다.

연소하한계농도까지 길이

연소하한계농도까지 길이는 누출가스가 주변공기와 난류혼합에 의하여 희석되고 농도분포가 가우스분포를 가진다고 가정하여 물질 수지식과 모멘텀 수지식으로부터 구할 수 있다 [3].

$$l \sim 120d \sqrt{\left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)\left(\frac{P_e}{P_a}\right)\left(\frac{P_0}{P_a}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} - \frac{d}{0.32} \sqrt{\frac{P_e}{P_a}} \quad (4)$$

여기서 ρ_a 는 공기의 밀도, ρ_g 는 1기압에서 메탄의 밀도 그리고 P_a 는 대기압이다. 위 식의 첫째 항은 가스누출형태가 가상의 점으로부터 원추형을 이룰 때 연소최소한계농도까지 길이이고, 둘째 항은 실제 파손부위와 가상의 점 사이의 차이이다.

복사열

화재로부터 떨어져 있는 임의의 위치에서 복사열 강도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$I = \frac{\eta \tau_a Q_h H_c}{4\pi r^2} \quad (5)$$

여기서 I 는 복사열강도, η 는 총 연소열에 대한 복사열 비율, τ_a 는 대기중에서 복사열투과도(transmissivity), Q_h 는 가스누출속도, H_c 는 연소열 그리고 r 은 화염과의 거리이다. 메탄에 대한 복사열 비율은 약 0.2이다. 그리고 대기중의 복사열 투과도는 물분자 농도에 의존한다.

위험성 예측

누출위치에서의 압력은 배관의 길이에 따라서 급격히 감소하게 되므로 배관의 길이가 일정값 이상인 경우 식(1)의 평방근 괄호내에 있는 첫째 항을 무시하여 가스누출속도를 단순화 할 수 있다. 또한 Fanning 마찰계수는 일반 고압가스배관의 사용조건에서 약 0.025에서 0.032까지 변하므로 보수적으로 고려하여 0.025를 사용하여 단순화하고, 식(4)의 둘째 항을 무시하면, 가스누출속도와 최소연소한계까지 농도는 다음 식과 같이 단순화된다.

$$Q = 9.095 \times 10^{-3} P_0 d^2 \sqrt{\frac{d}{L}} \quad (6)$$

$$l \sim 482d \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{0.71}{2.42}} \left(\frac{P_0}{P_a}\right)^{\frac{0.5}{1.42}} \quad (7)$$

식(7)에 의하여 누출가스에 의한 폭발위험성을 분석할 수 있다.

일반적인 목재건물의 점화에 대한 임계복사열강도는 15kW/m^2 으로 알려져 있으므로, 복사열에 대한 위험성은 식(5)와 (6)으로부터 예측할 수 있다.

$$r \sim 0.981 \frac{P_0^{\frac{1}{2}} d^{\frac{5}{4}}}{L^{\frac{1}{4}}} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)에서 구한 값은 고압천연가스배관 운전압력이 10에서 100기압 사이에 있을 때 거의 유사하므로, 배관의 위험성을 단순화된 식(8)로부터 예측할 수 있다.

결론

본 연구에서 고압천연가스의 배관이 완전히 파손될 경우에 배관주변은 폭발위험성과 화재에 의한 복사열의 위험성을 고려하였다. 이 두 가지 위험성의 근사적인 계산거리는 거의 같으며, 운전압력의 평방근, 배관경의 5/4승에 비례하고, 배관길이의 1/4승에 반비례한다. 여기서 제시한 근사적인 위험성 예측식은 고압천연가스배관에 안전관리에 유용하게 활용할 수 있다.

참고문헌

1. Jones, D.J., et al., "An Analysis of Reportable Incidents for Natural Gas Transmission and Gathering Line-1970 through June 1984", American Gas Association; NG-18, Report No. 158, 1986
2. Townsend, N.A. and Fearnough G.D., "Control of Risk from UK Gas Transmission Pipelines", Presented at the 7th Symposium on Line Pipe Research, AGA, Houston, October 1986
3. Jo, Y.D., "A Study on the Minimum Safe Separation Distance from LPG Filling Station", J. of the Korean Institute of Gas, 3(2), 24(1999)
4. Frank, P.L., "Loss Prevention in the Process Industries" 2nd edition, Butterworth-Heinemann, p15/139(1996)
5. Jo, Y.D., Kim, J.Y., "Explosion Hazard Analysis in Partially Confined Area", Korean J. Chem. Eng. 18(3), p292 (2001)