

고압배관으로부터 가연성가스의 누출속도 예측**조영도, 안범종***

한국가스안전공사, *한국산업기술대학교 화학공학과

Estimation of Release Rate of Flammable Gas from High-pressure Pipeline**Young-Do Jo and Bum Jong Ahn***

Korea Gas Safety Corporation, *Department of Chemical Engineering, Korea Polytechnic University

1. 서론

가연성가스의 누출은 마찰에 의한 압력손실이 발생하기 때문에 물리적 현상을 고려한 해석 식이 매우 복잡하다. 가스시설의 화재 등 위험성 분석에서 가장 우선적으로 행하여야 하는 것이 사고시나리오에 따른 누출속도 해석이다. 대부분 제안된 가연성가스 확산모델, 폭발모델, 그리고 화재모델들은 누출원의 특성을 해석하지 않고 사용할 수 있는 것은 매우 드물다. 따라서 특정한 조건 하에서 적용 가능한 누출특성의 근사적 해석 식들이 제안되어 있다[1,2]. 그러나 배관의 부식, 타공사 등에 의하여 발생하는 누출구로부터 가스누출 특성을 예측하기 위한 단순한 식이 없는 실정이다. 고압 천연가스배관의 경우 안전을 위하여 설계, 유지, 그리고 관리상에서 세심한 주의를 기울이고 있다. 고압천연가스 배관은 가스를 다른 지역으로 수송하기 위한 수단으로, 가스를 공급받는 도시가스사나 공장은 가스공급지역으로부터 수백 미터 또는 수십 킬로미터 떨어져 있으며, 가스수송용 배관은 직경이 수미터까지 되기도 하고, 농촌지역 또는 인구밀도가 높은 도심지역을 통과하기도 한다. 이러한 연유로 가스배관의 파손사고에 의하여 근방에 있는 건물이나 인명에 심각한 피해를 유발할 수 있다. 이러한 고압천연가스배관의 위험영역은 가스누출속도의 제곱근에 비례한다[3].

고압배관으로부터 가연성가스의 누출속도를 예측하기 위한 단순한 모델식을 개발하기 위하여 복잡한 이론식의 개조와 여러 가지 가정들이 필요하다. 이때 항상 오차가 동반하게 되는데, 안전을 고려하여 단순모델의 예측결과가 이론 값에 비하여 항상 큰 값이 되도록 하여야 한다.

본 연구에서는 고압배관으로부터 가연성가스의 누출속도 예측방법에 대하여 이론적으로 살펴보고 또한 단순한 식을 제시하고자 한다.

2. 본론

저장탱크로부터 노즐로 연결된 고압배관의 누출구로부터 누출되는 계를 그림 1에 나타내

었다. 일반적으로 누출속도가 매우 빠른 경우, 노즐과 누출구에서는 등엔트로피 팽창이 일어나고, 배관에서는 단열팽창이 일어난다고 가정할 수 있다. 노즐과 누출구의 길이(ϵ_1 , ϵ_2)는 배관의 길이에 매우 짧기 때문에 여기서 압력손실은 전체 압력손실에 비하여 무시할 수 있고, 대부분 매설된 천연가스배관은 열전도도가 매우 낮은 폴리에틸렌으로 코팅되어 있다.

Figure 1 시스템에서 이론적 누출속도는 다음 식들에 의하여 구할 수 있다[4].

$$\alpha = \frac{M_2}{M_3} \frac{p_2}{p_3} \sqrt{\frac{T_3}{T_2}} = \frac{M_2}{M_3} \left[\frac{(\gamma-1)M_3^2+2}{(\gamma-1)M_2^2+2} \right]^{\frac{\gamma+1}{2\gamma-2}} \quad (1)$$

$$\frac{4\gamma f_F L}{d} = \left(\frac{1}{M_1^2} - \frac{1}{M_2^2} \right) + \frac{\gamma+1}{2} \ln \left[\frac{M_1^2(2+M_2^2(\gamma-1))}{M_2^2(2+M_1^2(\gamma-1))} \right] \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \rho_1 M_1 \sqrt{\frac{\gamma R T_1}{M_w}} = \frac{\pi d^2}{4} M_1 \sqrt{\gamma \rho_1 p_1} \quad (3)$$

$$T_1 = T_0 \left(\frac{2}{(\gamma-1)M_1^2+2} \right) \quad (4)$$

$$p_1 = p_0 \left(\frac{2}{(\gamma-1)M_1^2+2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

여기서, α 는 누출구의 면적/배관 단면적, γ 는 비열비, T 는 온도, p 는 압력, f_F 는 Fanning 마찰계수, M 은 마하수, R 은 기체상수, d 는 배관경, 그리고 ρ 는 밀도이다. 아래첨자 0, 1, 2, 3은 그림 1에 나타낸 각 상태를 나타낸다. 고압배관의 경우 누출구에서 가스누출속도가 음

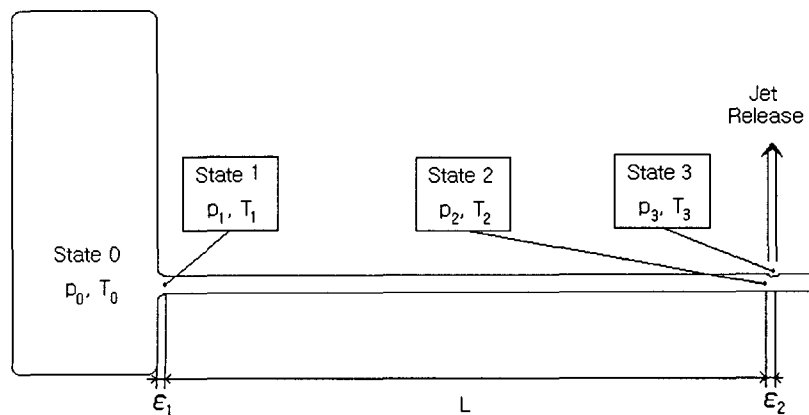


Figure 1. The system under study.

속일 때 상태 2에서 마하수는 식(1)에서 구할 수 있다. 따라서 누출속도는 상태 1에서 마하수를 식(2)로부터 구하고, 식(4), (5)로부터 온도와 압력을 구한 다음 식(3)으로부터 구할 수 있다.

단순한 수식을 만들기 위하여 가스의 흐름에 의한 배관에서 압력강하를 고려하여 누출구 입구의 압력을 구하면 아래 식과 같다.

$$p_{2t} = p_0 \left(\frac{1}{\alpha^2 M_3^2 \frac{2f_F L}{d} (\gamma+1) \left(\frac{2}{(\gamma-1)M_3^2 + 2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \quad (6)$$

따라서 음속누출의 경우, 아래 식에 의하여 누출속도를 근사적으로 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\frac{\pi d^2 \alpha}{4} \sqrt{\gamma \rho_0 p_0 \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}}{\sqrt{1 + \frac{4\alpha^2 f_F L}{d} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}} \quad (7)$$

누출속도와 배관의 길이를 무차원화하면 다음식과 같다.

$$\bar{Q} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\alpha^2 \bar{L} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}}} \quad (8)$$

여기서, \bar{Q} 는 배관에서 마찰손실을 고려한 누출속도를 마찰손실을 무시한 상태에서의 누출속도로 나눈 값이고, \bar{L} 은 배관길이를 배관직경으로 나누고 Fanning 마찰계수를 곱한 값이다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 위 식(8)으로 구한 값이 식(1)에서 (5)로 구한 값보다 항상 큰 값을 가지며, 오차는 20% 이내이다.

일반적으로 화재·폭발 위험성 해석 결과에 오차는 대부분 수십 % 이상 발생하게 되므로, 보수적인 차원에서 식 (8)은 가연성 가스의 화재 및 폭발 위험을 해석하기 위한 누출속도 예측에 사용할 수 있다.

3. 결론

고압배관으로부터 가연성가스의 누출속도 해석은 화재위험 해석에서 가장 우선적으로 행하여야 할 사항이다. 본 연구에서 제시한 누출속도예측 모델식은 가스의 종류와 관계없이 이론식에 비하여 20%오차 범위내에서 과대 예측할 수 있다. 이 오차는 비열비와 누출구가 작을수록, 배관의 길이가 짧을수록 감소하게된다. 누출속도 예측의 단순모델은 가스시설의

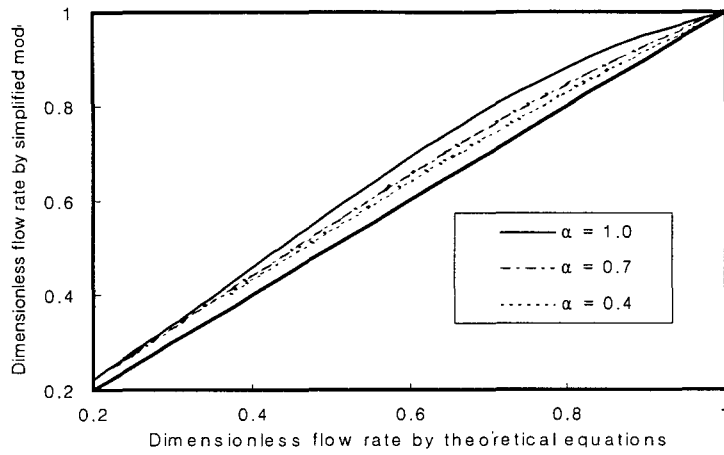


Figure 2. Flow rate by the simple model and the theoretical equations.

안전관리 및 위험분석에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

1. CCPS, Use of Vapor Cloud Dispersion Models, 2nd edn., AIChE, New York, p. 25(1996).
2. D. A. Crowl, J. F. Louvar, Chemical Process Safety : Fundamental with Applications, Prentice-Hall., p. 98(1990).
3. Y.-D. Jo, B. J. Ahn, Analysis of Hazard Area Associated with High-Pressure Natural-Gas Pipeline, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 15, p. 179(2002).
4. Submitted to Journal of Hazardous Materials.