

# 고압천연가스 수송배관의 위험평가

조영도, 박교식, 김지윤

한국가스안전공사, 가스안전연구개발원

## Risk analysis of transmission pipeline carrying natural gas

Young-Do Jo, Kyo-Sick Park and Ji.-Yoon Kim

Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

### 1. 서론

고압천연가스 배관은 가스를 다른 지역으로 수송하기 위한 수단으로, 가스를 공급받는 도시가스사나 공장은 가스공급지역으로부터 수 백 미터 또는 수십 킬로미터 떨어져 있으며, 가스수송용 배관은 직경이 수 미터까지 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 가스누출 속도의 제곱근에 비례한다[1]. 따라서 천연가스 배관의 안전관리가 매우 중요하다. 배관의 경우 선상으로 위험 원이 형성되어 있으므로 일반적인 화학공장에서 위험성 평가하는 방법과 구별하여야 한다[2].

지금까지 고압천연가스 파손에 의하여 국내에서 심각한 사고는 발생하지 않았지만, 1994년 미국 뉴저지에서 일어난 배관폭발화재 사고에서 볼 수 있듯이 언론을 비롯하여 사회적 관심을 유발하게 된다. 이 사고가 계기가 되어 미국에서는 천연가스배관의 위험구간을 정의하고 여기에 대한 관리방법을 법적으로 추진하고 있다. 일반적으로 위험은 개인적 위험과 사회적 위험으로 나타낸다. 개인적 위험은 임의의 위치에 있는 사람이 배관에서 사고로 1년 동안 사망할 수 있는 확률로 나타낸다. 그리고 사회적 위험은 한번의 사고로 N명 이상의 사상자가 발생할 수 있는 누적된 사고빈도로 표현한다. 본 연구에서는 고압천연가스 배관의 개인적 위험평가를 위한 간단한 모델을 제시하고, 이를 근거로 하여 안전거리에 대하여 고찰하고자 한다.

### 2. 본론

#### 사고발생빈도

배관의 사고발생 빈도는 주변환경과 운전조건 등을 고려하여 예측하여야 한다. 그러나 예측 값의 불확실성 때문에 기존에 발생한 사고 자료로부터 산출한 통계자료를 이용하기도 한다. 유럽의 가스배관에서 사고가 발생한 자료를 근거로 도출한 배관의 결함 크기에 따른 사고발생 빈도는 표 1과 같다[3].

Table 1. Failure frequencies based on failure causes and hole size

배관손상원인	배관손상빈도 (회/년.km)	결함크기에 따른 비율		
		소결함	중결함	대결함
타공사에 의한 손상	$3.0 \times 10^{-4}$	25	56	19
건설에 의한 손상	$1.1 \times 10^{-4}$	69	25	6
부식에 의한 손상	$8.1 \times 10^{-5}$	97	3	<1
지반 움직임에 의한 손상	$3.6 \times 10^{-5}$	29	31	40
기 타	$5.4 \times 10^{-5}$	74	25	<1
합 계	$5.75 \times 10^{-5}$	48	39	13

실제 가스 배관손상빈도에 있어서 타공사에 의한 손상빈도는 순찰정도, 배관의 매설깊이, 배관의 두께, 배관의 보호조치, One-call 시스템의 적절한 가동 등에 영향을 받는다. 건설에 의한 손상빈도는 배관의 품질관리, 용접 기술자의 능력, 비파괴검사 등에 영향을 받는다. 부식에 의한 손상빈도는 배관의 피복손상 정도, 배관 피복제의 종류, 방식방법, 방식상태, 타 시설물과 간섭, 토양의 상태 등에 영향을 받는다. 그리고 지반 움직임에 의한 손상빈도는 도로횡단, 토양의 다짐도, 토질, 지진발생 가능성 등에 영향을 받으므로 이와 같은 변수들을 고려하여 빈도를 구하거나 일부 주요 변수를 활용하여 빈도를 구할 수 있다[4]. 일반적으로 빈도의 불확실성이 매우 크다. 표 1의 자료는 미국 DOT의 자료 또는 영국 British Gas Transco자료와 비교하여 보면 약 10배정도 사고 빈도가 높다. 그러나 본 연구에서는 보수적으로 계산하기 위하여 개인적 위험평가에 표 1의 자료를 이용하였다.

### 영향분석

천연가스 누출에 의한 사고시나리오는 폭발과 화재를 고려할 수 있으며, 일반적으로 화재에 의한 사고시나리오가 주를 이루고 있는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 화재로부터 인근 사람의 사망확률은 국내의 평균기온 285K와 평균습도 65%를 적용하여 다음 식으로부터 구할 수 있다[5].

$$Pr = 16.67 + 3.4 \ln(Q/r^{2.09}) \quad (1)$$

여기서 r은 가스 누출지점으로부터 사망확률을 계산하고자 하는 지점까지 거리를 나타내고, Q는 가스누출속도를 나타낸다. 위 식은 사람이 복사열에 노출되었을 때 30초 동안 피하고, 천연가스의 연소열은  $5.001 \times 10^7$  J/kg으로 가정하여 유도하였다.

고압 천연가스배관으로부터 누출속도는 다음 식으로부터 구할 수 있다[6].

$$Q_{eff} = CQ_{peak} \quad (2)$$

$$Q_{peak} = \frac{\pi d^2 \alpha}{4} \sqrt{\rho_0 P_0 \left[ \frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

$$C = \max \left[ 0.3, 1/\sqrt{1 + \frac{4\alpha^2 f_p L}{d} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}}} \right] \quad (4)$$

### 개인적 위험평가

개인적 위험성 평가는 배관을 따라서 사고발생 가능성 있는 모든 사고 시나리오에 대하여 적분함으로써 구할 수 있다. 만약 관심 있는 배관의 구간에서 사고발생빈도가 일정하다고 가정하게 되면 개인적 위험은 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$IR = \sum_i \varphi_i \int_0^L F_i dL \quad (5)$$

위 식에서 적분 항을 치명적 손상길이(Fatal Length)로 정의하게 되면 개인적 위험은 단순히 치명적 손상길이와 배관의 사고발생빈도 곱으로 구할 수 있다. 명적 손상길이는 그림 1을 이용하여 천연가스의 누출속도에 따라 구할 수 있다.

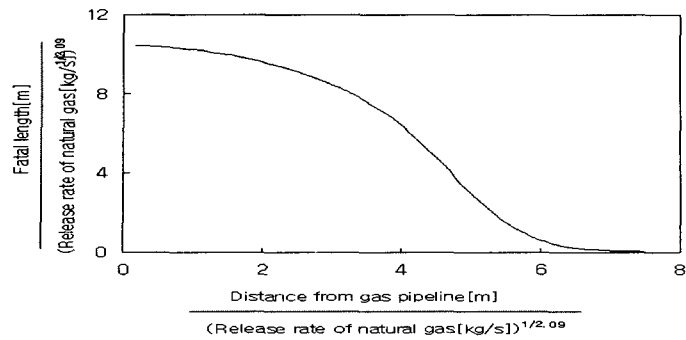


Fig. 1. Fatal length of natural gas pipeline with release rate.

개인적 위험이 최대가 되는 곳은 배관의 바로 직상부가 되며, 이 위치에서 개인적 위험을 습도 변화에 따라 구하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 습도가 25% 이상이 되게 되면 개인적 위험 변화에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 습도의 변화와 관계없이 그림 1로부터 개인적 위험을 구할 수 있다.

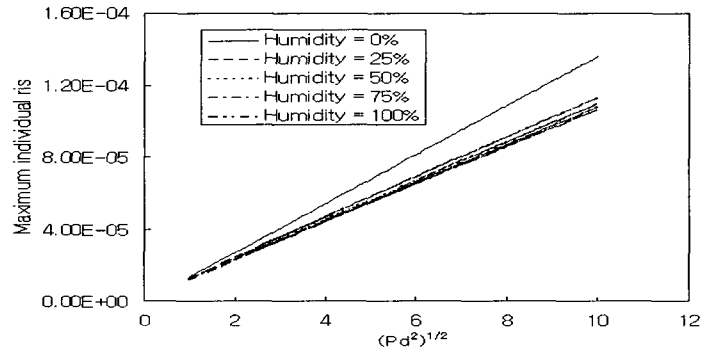


Fig. 2. Effect of humidities on the individual risk.

개인적 위험은 배관의 직경에 비례하고 운전압력의 제곱근에 비례한다. 배관으로 일정한 개인적 위험을 나타내는 이격거리를 구하여 보면 그림 3과 같다.

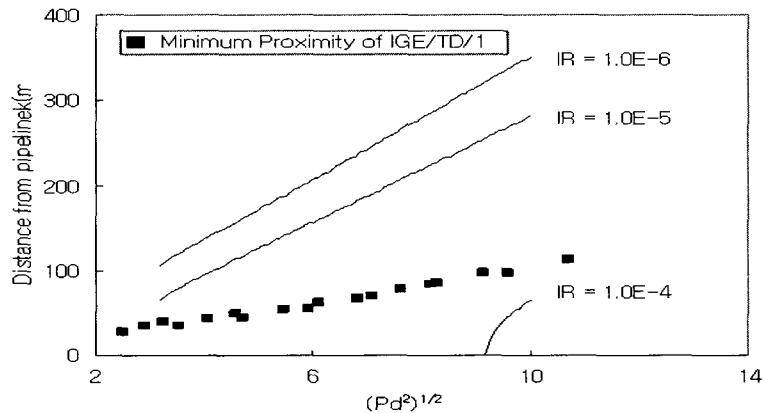


Fig. 3. Comparing the individual risk with minimum building proximity distance for rural area.

그림 3에서 볼 수 있듯이 영국의 법규에 의한 안전거리는 개인적 위험이  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$  사이에 있다. 만약 사고발생 빈도를 영국 British Gas Transco자료를 적용하여 구하게 되면, 안전거리는  $10^{-5}$ 과  $10^{-6}$  사이에 있게 된다. 이는 일반적인 교통사고 및 화학공장의 사고에 의한 개인적 위험보다 낮은 수치이며 허용 가능한 위험으로 볼 수 있다. 일정한 개인적 위험에 대한 배관으로부터 이격거리는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$H = a\sqrt{pa^2} + b \quad (6)$$

여기서 a와 b는 개인적 위험에 따라 정해지는 상수 값으로 표 1과 같다.

Table 1. Coefficients of Eq. (6) with risk levels(T = 285 K)

Individual Risk	1.00E-04	5.00E-05	1.00E-05	5.00E-06	1.00E-06
a	53.28431	20.32762	30.67457	32.67509	35.34244
b	-467.413	-55.8151	-26.4722	-19.1336	-2.83841

식 (6)과 표 1을 이용하여 천연가스 배관의 개인적 위험에 대한 이격거리를 쉽게 구할 수 있다. 이는 향후 고압배관의 안전관리에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 결론

정량적 위험평가는 최근 배관의 안전관리에 효율적으로 위험수준을 낮추기 위하여 사용하고 있는 방법이다. 본 연구에서는 치명적 손상길이에 대한 변수를 소개하였고, 이를 이용한 개인적 위험평가 방법을 제시하였다. 그리고 천연가스 배관의 개인적 위험평가 모델식을 제시하였다. 이러한 방법을 근거로 영국에서 시행하고 있는 천연가스 배관의 안전거리를 검토하여 보면 개인적 위험이  $10^{-5}$ 과  $10^{-6}$  사이에 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시한 위험평가 모델은 효율적인 배관안전관리에 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 4. 참고문헌

- [1] 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, 15 (2002), p179.
- [2] IGE, Steel Pipeline for High Pressure Gas Transmission, IGE Code TD/1 Edition 4, Communication 1670, 2001.
- [3] European Gas Pipeline Incident Data Group, Gas Pipeline Incidents 4th Report 1970-1998, 1999.
- [4] M. John, B Chris, P. Andrew, T. Charlotte, An Assessment of Measures in Use for Gas Pipeline to Mitigate against Damage Caused by Third Party Activity, Printed and Published by the Health and Safety Executive, C1 10/01, 2001.
- [5] Young-Do Jo, Bum Jong Ahn, "A Method of Quantitative Risk Assessment for Transmission Pipeline Carrying Natural Gas", J. of Hazardous Materials, .
- [6] Y.-D. Jo, B. J. Ahn, A Simple Model for the Release Rate of Hazardous Gas from a Hole on High-Pressure Pipelines, Journal of Hazardous Materials, 97 (2003), p31.