KIGAS Vol. 12, No. 2, June, 2008
(Journal of the Korean Institute of Gas)

도시가스 고압배관의 정량적 위험평가 절차에 관한 연구

†이경식 · 조영도 · 류영돈 · 고재욱*
한국가스안전공사 가스안전연구원, *광운대학교 화학공학과
(2008년 5월 2일 접수, 2008년 6월 2일 수정, 2008년 6월 2일 채택)

A Study on the Procedure of Quantitative Risk Assessment for High Pressure Natural Gas Pipeline

†Kyung-Sik Lee · Young-Do Jo · Young-Don Ryou · Jae-Wook Ko*
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation
**Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University*
(Received May 2, 2008, Revised June 2, 2008, Accepted June 2, 2008)

요 약

최근 들어 도시가스사업자들이 안전관리의 수준을 더욱 향상시키기 위하여 정량적 평가(Quantitative assessment)에 기초한 위험 관리(risk management)를 많이 고려하고 있는 상황이다. 이 논문은 천연가스 배관의 정량적 위험평가의 절차에 초점을 맞췄으며, 이를 위하여 European Gas Pipeline Incident Data Group과 BG Transco의 자료를 사용한 사고발생빈도의 계산방법, 화재에 의한 사고피해영향 분석방법, 개인적 위험(Individual Risk)과 사회적 위험(Societal Risk)의 계산 방법을 체계적으로 제시하였다. 또한 국내 집단에너지공급사업용 고압배관의 시범적용을 통하여 개인적 위험과 사회적 위험 기준을 제시하였다. 제시된 정량적 위험평가 절차는 고압배관 설계, 시공 및 변경 등의 위험관리에 유용할 것으로 판단된다.

Abstract – Recently risk management based on a quantitative assessment is considered to improve the level of safety in Korea. This paper focuses on the procedure of the quantitative risk assessment for natural gas pipelines. For that purpose, the methods to estimate failure frequency based on failure causes from European Gas Pipeline Incident Data Group and BG Transco, to analyze consequence caused by fire, and to calculate individual risk and societal risk have been proposed systematically in this paper. Risk criteria of individual risk and societal risk have been proposed by considering the environment of pipeline route in Korea. The proposed procedure of quantitative risk assessment may be useful for risk management during the planning and building stages of a new pipeline, and modification of buried pipeline.

Key words : individual risk, societal risk, natural gas pipeline, risk assessment

I. 서 론

최근 활성화되고 있는 집단에너지공급(CES, Community Energy Supply System)사업을 위하여, 일반도시가스사업자는 집단에너지사업자에게 도시가스를 3 MPa의 고압으로 공급하여야 하나, 관련 법규로 인하여 일반도시가스사업자는 최고사용압력이 중압이하로 규정되어 있으므로, 고압으로 가스를 공급할 수 없는 실정이었다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 지식경제부는 정량적 위험평가(quantitative risk assessment)를 통하여 안전성이 입증되는 경우에 집단에너지사업을 위한 배관에 한하여 최고사용압력을 3 MPa까지 상향 조정할 수 있도록 관련 법규를 개정하였다[1].

이에 따라 본 연구에서는 해외 가스사고 사례를 통하여 사고발생빈도 계산방법, 사고피해영향 분석방법, 개인적 위험(Individual Risk)과 사회적 위험(Societal Risk)의 계산방법, 위험의 기준 및 해석방안 등을 검토하여 도시가스 고압배관의 정량적 위험평가의 절차를 체계적으로 제시하고자 한다.

II. 정량적 위험평가 절차

배관의 사고발생빈도 표현은 석유화학공장의 사고발생빈도와 약간 상이하다. 석유화학공장의 사고발생빈도

†주저자:urinuri@kgs.or.kr

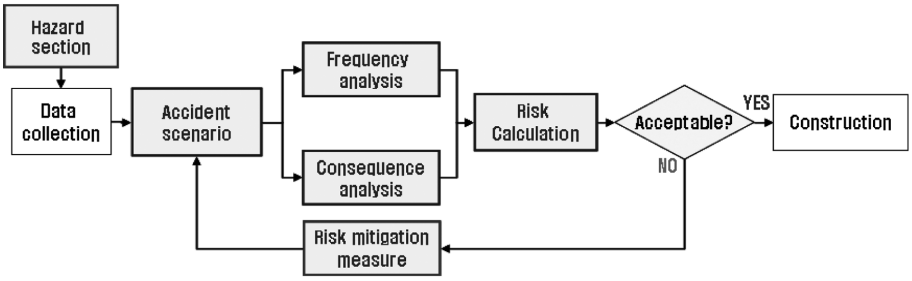

Fig. 1. Procedure of QRA for pipeline.

는 1년의 사고발생수로 나타내지만, 배관은 배관길이에 따라 어느 곳에서 사고가 발생할 지 알 수 없기 때문에 1년의 단위 길이 당 사고발생수로 나타낸다.

위험은 천연가스 고압배관의 배관길이 당 사고발생빈도와 그 사고에 따른 피해 정도의 곱으로 정의할 수 있으며, 지정된 위치에서 1년 동안 사망할 개인의 확률을 의미하는 개인적 위험 또는 사고의 결과로서 발생할 수 있는 피해자의 수와 사고발생 누적빈도의 관계로서 정의되는 사회적 위험으로 표현할 수 있다.

또한 위험이 수용이 가능하다는 것을 증명하기 위하여, 개인적 위험과 사회적 위험은 확립된 위험기준(risk criteria)과 비교함으로써 그 정도를 결정하는 것이 필요하다.

Fig. 1은 고압배관의 정량적 위험평가의 일반적인 절차를 보여준다.

2.1. 정량적 위험평가 대상 구간

위험구역은 배관의 임의 지점에서 배관 중심으로부터 좌우로 다음 위험거리 폭의 범위를 말하며, 위험구역 이내에 제1종 보호시설, 제2종 보호시설 또는 주거용 시설이 존재할 경우 이 시설과 위험거리 내에 있는 배관길이를 위험평가 대상 구간으로 한다. 단 가스누출속도는 완전파열로 가정하여 식 (6)으로 계산한다[2].

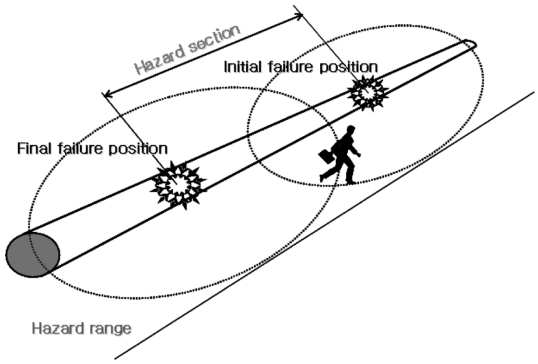

Fig. 2. Schematic drawing the concept of hazard section.

$$R = 10.285\sqrt{Q} \quad (1)$$

위험거리는 배관과 특정지점까지의 거리로서, 배관의 직경과 운전압력을 고려하여 사람이 사망할 확률이 1%인 거리를 의미한다.

즉 Fig. 2와 같이 특정지점에 영향을 주는 최초사고지점과 최종사고지점 사이의 배관을 위험평가 대상구간으로 한다.

2.2. 사고발생빈도 분석

정량적 위험평가에서는 일반적으로 모든 변수 들을 고려하는 것이 어려우므로 주요변수들에 대해서만 검토하며, 그 주요변수가 사고발생빈도에 영향을 미치는 정도는 사고통계 자료에서 구한다. Table 1의 자료에 따르면, 기본 사고빈도 중 가장 많은 영향을 주는 것은 타공사에 의한 사고(External interference)이며, 또한 BG Transco의 보고서에 따르면 타공사에 의한 사고발생빈도에 가장 영향을 많이 주는 인자는 매설심도, 지역(인구밀도), 배관두께, 타공사 방지조치이다[4].

따라서 본 연구에서는 타공사에 의한 사고발생빈도를 제외한 다른 원인에 의한 사고발생빈도 자료는 Table 1의 EGIG(the European Gas Pipeline Incident data Group)의 사고발생빈도 자료를 사용하고, 타공사에 의한 사고발생빈도는 다음과 같이 구한다. 이들의 사고원인별 사고발생빈도의 합을 배관의 사고발생빈도로 사용한다.

EGIG자료에 따라, 사고의 크기(사고에 의한 배관 구멍의 크기)는 다음과 같다.

(1) small(소누출) : 배관 구멍의 크기가 2 cm 미만인 경우

(2) medium(중누출) : 배관 구멍의 크기가 2 cm 이상부터 배관 관경이하인 경우

Table 1. Failure Frequency based on failure causes and hole size (EGIG, 1993) [3].

Failure causes	Failure frequency (1/year km)	Percentage of total failure rate (%)	Percentage of different hole size (%)		
			Small	Medium	Great
External interference	3.0×10^{-4}	51	25	56	19
Construction defects	1.1×10^{-4}	19	69	25	6
Corrosion	8.1×10^{-5}	14	97	3	<1
Ground movement	3.6×10^{-5}	6	29	31	40
Others/unknown	5.4×10^{-5}	10	74	25	<1
Total failure	5.75×10^{-4}	100	48	39	13

Table 2. Failure Frequencies caused by third party activity (BG Transco data) [4].

Diameter range (mm)	Representing diameter (mm)	Total failure rate (1/1000 km-year)	Failure rate (1/1000 km-year)		
			Small	Medium	Great
0~100	100	0.218	0.044	0.087	0.087
125~250	187	0.180	0.072	0.060	0.048
300~400	350	0.095	0.024	0.071	-
450~550	500	0.043	0.029	-	0.014
600~700	650	-	-	-	-
750~850	800	0.041	-	-	0.041
900~1000	950	-	-	-	-
1000+	1050	-	-	-	-

Table 3. Correction value for wall thickness (K_{WT}).

Diameter of pipeline (d, mm)	Minimum wall thickness (mm)	Correction value				
		wall thickness (t, mm)				
		$t \le 4.8$	$4.8 < t \le 6.4$	$6.4 < t \le 7.9$	$7.9 < t \le 9.5$	$9.5 < t$
$d \le 150$	4.8	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2
$150 < d \le 450$	6.4		1.0	0.4	0.2	0.2
$450 < d \le 600$	7.9			1.0	0.2	0.2
$600 < d \le 900$	9.5				1.0	0.2
$900 < d \le 1050$	11.9					1.0
$1050 < d$	12.7					1.0

(3) great(대누출) : 배관 구멍의 크기가 배관 구경을 초과하거나 완전파열인 경우

2.2.1. 타공사에 의한 사고발생빈도는 다음의 식과 같이 계산한다.

$$\phi_{i,\ 타공사} = \phi_{i,\ 타공사,\ d} \times K_{DC} \times K_{WT} \times K_{PD} \times K_{PM} \quad (2)$$

K_{DC}, K_{WT}, K_{PD}, K_{PM}는 각각 매설심도, 배관두께, 지역, 타공사 방지조치에 따른 영향계수를 나타내며 다음과 같다.

(1) 배관의 두께에 따른 영향계수(K_{WT})는 Table 3의 자료를 사용한다.

(2) 매설심도에 따른 영향계수(K_{DC})는 Table 4의 자료를 사용한다.

(3) 지역에 따른 영향계수(K_{PD})는 Table 5의 자료를 사용한다.

지역구분은 다음과 같다[5].

Table 4. Correction value for depth of cover (K_{DC}).

Depth of cover [h, m]	Correction value
h < 0.91	2.54
0.91 <h ≤ 1.22	0.78
h > 1.22	0.54

Table 5. Correction value for location (K_{PD}).

Location	Correction value
Rural	0.81
Suburban	3.16
Town	18.77

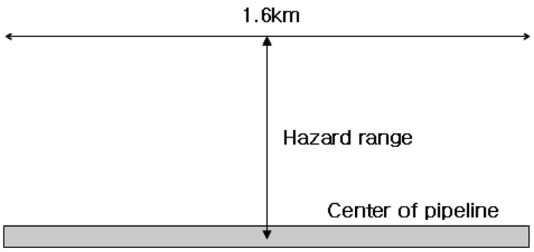

Fig. 3. Estimation of population density.

① Rural(전원지) : 전원지역으로 인구밀도가 2.5×10^{-4} 인/를 초과하지 않는 지역

② Suburban(교외지역) : 인구밀도가 2.5×10^{-4}인/를 초과하는 지역이고 주거시설, 학교, 상가 등이 건설될 가능성이 있는 지역

③ Town(도심지) : 교통량이 많은 도시의 중심지역으로서 고층빌딩이 있으며 지하에 여러 종류의 공익시설물이 있는 지역

인구밀도는 Fig. 3과 같이 배관의 임의 지점에서 1.6 km[6], 배관 중심으로부터 좌우로 각각 위험거리의 범위를 임의로 설정하여 측정하며, 인구밀도 산정 기준은 다음과 같다[7].

① 주거용 시설의 인구밀도를 산정할 때 세대수 산정은 단독주택의 경우에는 2세대로 하고 공동주택의 경우에는 전체세대수로 하며, 1세대의 인구수는 2명으로 산정한다.

② 업무용 및 그 밖의 시설의 인구밀도는 통계자료를 이용하거나 방문조사를 실시하여 산정한다.

(4) 타공사 방지조치에 따른 영향계수(K_{PM})는 Table 6의 자료를 사용한다.

2.2.2. 배관의 직경에 따른 타공사에 의한 사고발생빈도($\phi_{i,\,타공사,\,d}$)는 Table 2의 사고발생빈도 자료를 최소자

Table 6. Correction value for prevention measure (K_{PM}).

Prevention measure	Correction value
Mandatory measure	1.0
All other measures	0.91

승법을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$\phi_{소누출,\,타공사,\,d} = 0.001e^{(-4.18d-2.18562)} \quad (3)$$

$$\phi_{중누출,\,타공사,\,d} = 0.001e^{(-4.12d-2.02841)} \quad (4)$$

$$\phi_{대누출,\,타공사,\,d} = 0.001e^{(-4.05d-2.13441)} \quad (5)$$

사고발생가능성(likelihood of an accident)은 배관의 사고발생빈도(failure rate of pipeline)로 하여 보수적으로 추정할 수 있다.

2.3. 사고피해영향 분석

사고피해영향은 재산상의 피해는 여러 상황과 변수를 고려하여야 하므로 대부분 주로 인명피해로 분석한다. 사고피해영향은 다음과 같은 방법으로 분석한다. 감쇄계수를 고려한 배관 구멍에서의 가스누출속도는 다음과 같이 계산한다[8].

$$Q_i \times 1.783 \times 10^{-3} \times A \times \alpha_i \times P_0 \times \max\left[0.3, \frac{1}{\sqrt{1+(4.196\times 10^{-3}\alpha_i^2 L/d)}}\right] \quad (6)$$

2.3.1. 사망확률은 가스누출속도로 인한 정상상태의 순간적인 제트 화재로 근사적으로 해석함으로써 다음과 같이 예측할 수 있다[9].

$$I_i = \frac{\eta \tau_a Q_i H_c}{4\pi r^2} \quad (7)$$

대기투과도는 다음 식과 같이 계산한다.

$$\tau_a = 2.02(P_W X_S)^{-0.09} \quad (8)$$

2.3.2. 사망확률은 프로빗(Probit) 함수를 이용하여 다음 식과 같이 계산하거나 프로빗값에 대한 확률환산표를 이용한다.

$$P_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{Pr_i - 5} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right]du \quad (9)$$

$$Pr_i = -14.9 + 2.56\ln\left[\frac{tI_i^{4/3}}{10^4}\right] \quad (10)$$

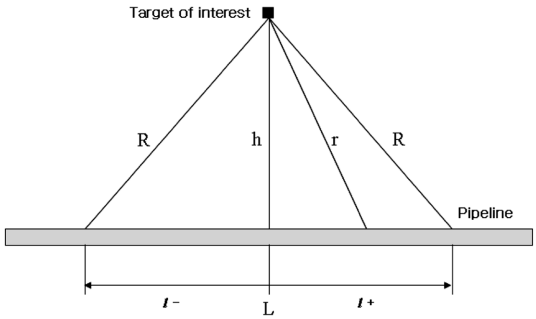

Fig. 4. Individual risk calculation.

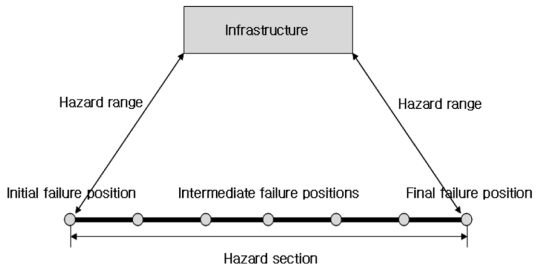

Fig. 5. Societal risk calculation.

2.4. 개인적 위험(Individual risk) 계산

배관에서 떨어진 특정 지점에서의 개인적 위험의 예측은 사고발생 지점을 알 수 없고 사고발생빈도가 배관을 따라 변화할 수도 있기 때문에 복잡하고 어렵다. 일반적으로 개인적 위험은 모든 사고 시나리오에 의한 사망자의 사망확률과 이에 대한 배관의 사고발생빈도를 Fig. 4와 같이 위험거리를 이용하여 다음과 같이 배관을 따라 적분함으로써 예측할 수 있다.

$$IR = 0.001\sum^{i}\int_{l-}^{l+}\phi_i PidL \tag{11}$$

2.5. 사회적 위험(Societal risk) 계산

치명적인 영향을 일으키는 잠재성을 갖고 있는 위험한 고압배관은 보통 사회적 위험이 개인적 위험보다 더 중요하게 고려된다. 사회적 위험은 사고발생누적빈도와 사고로 인해 발생되는 예상 사망자수로 표현된다.

사회적 위험은 F-N(Frequency-Number of fatality)커브를 작성하여 판단하므로 F-N커브를 작성하기 위한 사망자의 수와 사고발생빈도는 다음 식과 같이 계산한다[9].

(1) 사고 시나리오 i로 인한 사망자의 수는 다음 식과 같이 계산한다.

$$N_i = \sum_{x,y} N_{x,y} P_{i,xy} \tag{12}$$

(2) 모든 사고 시나리오에 대하여 N명 이상의 사망자를 발생시키는 사고의 누적발생빈도는 다음의 두 가지 값을 고려하여 결정할 수 있다. 하나는 사고 시나리오에 대한 사고발생빈도이고 다른 하나는 N명 이상의 사망자를 발생하는 사고를 일으키는 배관 길이이다.

N명 이상의 사망자를 발생시키는 사고의 누적발생빈도는 다음 식과 같이 계산한다.

$$F_N = 0.001\sum_i\int_{-l}^{+l}\phi_i \cdot u(N_i \geq N)dL \tag{13}$$

2.6. 위험의 해석 및 판단

위험의 해석은 개인적 위험과 사회적 위험으로 하고, 허용의 판단기준은 개인적 위험은 Fig. 6의 기준에 따라 판단하고, 사회적 위험은 Fig. 7의 기준에 따라 판

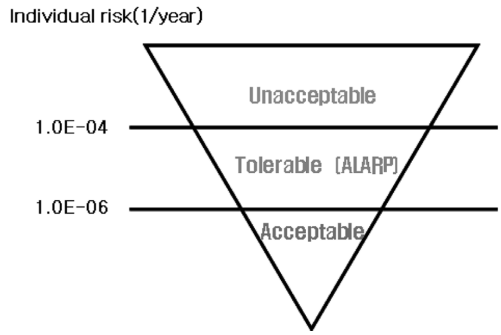

Fig. 6. Individual risk criterion.

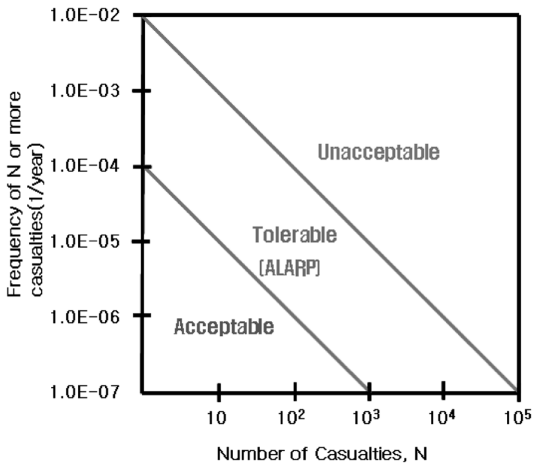

Fig. 7. FN criterion.

단한다[7].

2.7. 위험의 판정기준

2.7.1. 해당 배관의 위험이 개인적 위험과 사회적 위험이 위험판단 기준의 허용영역에 해당하는 경우에는 별도의 개선이 필요 없는 것으로 한다.

2.7.2. 해당 배관의 위험이 개인적 위험과 사회적 위험이 위험판단 기준의 조건부허용영역(ALARP, As low as reasonable practicable)에 해당하는 경우에는 배관의 설치는 허용하되, 위험을 낮추기 위한 개선사항을 이행하여야 하는 것으로 한다.

2.7.3. 해당 배관의 위험이 개인적 위험 또는 사회적 위험이 위험판단 기준의 허용불가영역에 해당하는 경우에는 배관의 설치가 허용되지 아니하는 것으로 한다.

2.8. 위험감소 조치

위험이 조건부허용영역일 경우에는, 위험을 낮추기 위한 개선사항을 고려하여야 하며 다음은 이와 같은 조치의 일부를 나타낸다[10].

(1) 배관과의 이격거리 증가
(2) 두꺼운 배관의 사용
(3) 배관 위의 충격보호 장치의 설치
(4) 배관의 매설심도 증가
(5) 배관의 감시체계의 변경
(6) one-call system의 적용
(7) 토지소유자와 연락체계 개선

III. 시범적용

국내 집단에너지사업에 사용되는 고압배관의 일부

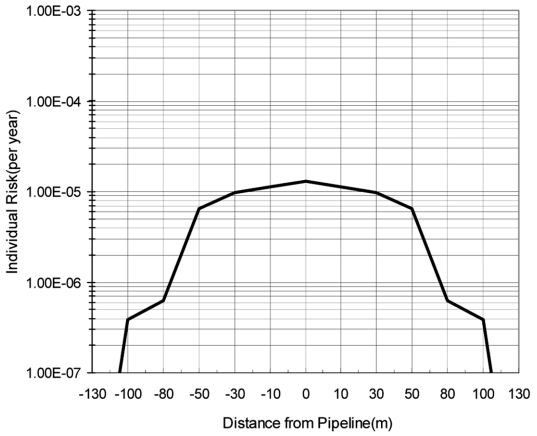

Fig. 8. Individual risk transection.

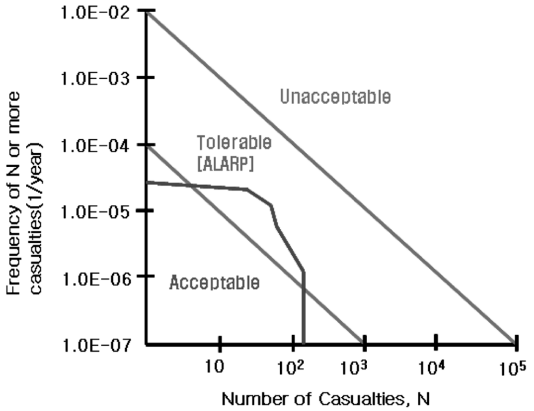

Fig. 9. F-N curve.

구간을 상기와 같은 방법에 따라 개인적 위험 단면도와 F-N 커브를 구하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

시범적용의 결과에 의거하여 위험기준을 Fig. 6, Fig. 7과 같이 규정하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

고압배관의 위험 계산은 위험평가 대상 구간의 길이에 따라 예측된 배관 화재로부터 영향을 고려하는 것이 필요하다. 위험평가 대상 구간의 길이는 관심지점 또는 전개되는 지점의 위험을 포함하는 배관길이이다. 개인적 위험은 가스배관으로부터 떨어진 거리와 특정 위치에서 계산되고 사회적 위험은 인구밀도의 예측 또는 현장적용 방법 등에 기초하여 건축물과 사람의 위치를 고려하여 일반적으로 계산된다.

본 연구에서는 위험평가 대상 구간의 선정, EGIG 및 BG Transco 자료를 이용한 사고발생빈도 계산, 사고피해영향 분석, 개인적 및 사회적 위험 계산방법, 위험의 해석과 판단, 위험감소방안 등의 고압배관의 정량적 위험평가 절차를 체계적으로 검토하여 제시하였으며, 이는 일반도시가스사의 집단에너지공급사업을 위한 고압배관 안전관리에 유용하게 활용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국도시가스협회와 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-03-1-000).

사용기호

A : cross-section area of pipeline (m^2)
d : pipe diameter (m)
F_N : frequency of all incident outcome cases affecting N or more people (1/year)
H_c : heat of combustion (J/kg)
h : distance from pipeline to a specified point (m)
I : radiational heat flux at the location of interest (W/m^2)
L : pipe length from gas supply station to leak point (m)
$l\pm$: end of hazard section (m)
N : expected number of fatalities (person)
P : probability of death
P_0 : stagnation pressure at operating condition (N/m^2)
Pr : Probability unit
P_W : water partial pressure (N/m^2)
Q : rate of gas release from a hole (kg/s)
R : hazard range (m)
r : radial distance from fire (m)
t : expose time (sec)
u : unit function
Xs : path length distance form the flame surface to the target (m)

하첨자

i : accident scenarios such as small, medium and great hole on the pipeline
x, y : location x, y

그리스 문자

α_i : dimensionless hole size
η : ratio of total heat radiated to total heat released from fire
ϕ : expected failure rate per unit pipe length (1/year · km)
τ_a : atmospheric transmissivity

참고문헌

[1] 지식경제부, http://www.mke.go.kr
[2] Jo, Y.-D. and B.J. Ahn, "A Simple Model for the Release Rate of Hazardous Gas from a Hole on High-pressure Pipelines", *Journal of Hazardous Materials*, A97, (2003)
[3] European Gas Pipeline Incident Data Group, "Gas Pipeline Incidents fourth Report 1970~1998", (1999)
[4] John, M., B. Chris, P. Andrew and T. Charlotte, "An Assessment of Measures in Use for Gas Pipeline to Mitigation against Damage Caused by Third Party Activity", *the Health and Safety Executive*, Cl 10/01, (2001)
[5] IGE, *Steel Pipeline for High Pressure Gas Transmission*, IGE Code TD1, 4th ed., Communication 1670, (2001)
[6] 한국가스안전공사, "도시가스안전관리기준 통합고시", 제2-22-2조, 남진사, (2002)
[7] 한국가스안전공사, "2000-10 안전성평가 지침", (2007)
[8] Jo, Y.-D. and B.J. Ahn, "A Method of Quantitative Risk Assessment for Transmission Pipeline Carrying Natural Gas", *Journal of Hazardous Materials*, A123, (2005)
[9] CCPS, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", Center for Chemical Process Safety, AIChE, New York, USA, (2000)
[10] Harris, R.J. and M.R. Acton, "Development and Implementation of Risk Assessment Methods for Natural Gas Pipelines", China gas 2001 International conference with special focus on gas safety, Chongqing, China, (2001)