



정량적 위험성 평가를 통해 제안된 도시가스 고압배관의 위험경감조치별 위험감소효과

류영돈 · 조영도 · 박영길 · 이수경

한국가스안전공사, 서울산업대학교 에너지환경대학원 가스공학과*
(2010년 4월 10일 접수, 2010년 7월 19일 수정, 2010년 8월 23일 채택)

Risk Reduction Rate for Each Risk Mitigation Measure on High Pressure Urban Gas Pipelines Proposed by Quantitative Risk Analysis

Young Don Ryou · Young Do Jo · Young Gil Park · Su Kyung Lee

Korea Gas Safety Corporation, Seoul National University of Technology*
(Received 10. April. 2010, Revised 19. July. 2010, Accepted 23. August. 2010)

요 약

이 논문에서는 실제 설치예정인 도시가스 고압배관에 대하여 정량적 위험성 평가를 실시하고, 평가 결과 위험이 허용영역 밖에 위치하는 경우에는 위험경감조치를 도출하였다. 또한, 도출한 위험경감조치별 위험감소율을 계산하였다. 정량적 위험성 평가결과, 복사열에 의한 사고피해거리의 바람의 속도와 대기안정도에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 위험감소율이 가장 큰 조치는 배관의 부식관리, MOV 설치 및 타공사로 인한 배관손상방지조치를 모두 이행하도록 하는 10번 조치로서 75%의 위험감소효과가 있었다.

Abstract - After conducting QRA(quantitative risk assessment) for the high pressure urban gas pipelines planned to be installed, RMMs(risk mitigation measures) when the societal risk is outside the acceptable region have been derived in this paper. Also risk reduction rates are calculated for each RMM. As a result of QRA, we find out that damaged distance caused by radiational heat is largely dependent upon the wind velocity and the atmospheric stability. The measure that has the highest risk reduction effect is No. 10 which includes pipeline corrosion monitoring, MOV(motor operated valve) installation and the method to protect pipeline damage caused by third-party mechanical interference, and which shows 75 % of risk reduction effect.

Key words : Risk Mitigation Measures, Quantitative Risk Assessment, High Pressure Urban Gas Pipelines

1. 서 론

국내의 경우 고압(1MPa이상)의 도시가스 배관은 도매사업자인 한국가스공사가 설치하고, 일반도시가스사업자는 중압이하의 배관만을 설치할 수 있었다. 그런데, 최근 선진형 집단에너지 사업자들이 도시가스를 고압으로 공급해줄 것을 요청함에 따라 정부에서는 도시가스사업법 시행규칙을 개정하여 한국가스안전공사로부터 안전성평가를

받고 그 결과에 따라 배관을 설치하거나 안전관리 조치를 하는 경우에는 일반도시가스사업자도 4MPa 이하의 압력으로 가스를 공급할 수 있도록 하였다 [1]. 이에 따라 한국가스안전공사에서는 객관적인 안전성평가를 수행하기 위해 학계와 업계의 의견을 들어 도시가스 고압배관에 대한 안전성평가 지침을 개발하고 정부의 승인을 득하였다[4].

본 연구에서는 개발된 안전성평가 지침에 따라 실제 설치예정인 A 관리소 ~ OO에너지 도시가스 공급배관에 대한 정량적 위험성 평가를 실시한 후 사회적 위험이 허용영역 밖에 위치하는 경우에 대

*주저자:rydon@kgs.or.kr

하여 위험을 낮추기 위한 안전관리강화조치(위험경감조치)를 도출하였으며, 도출한 위험경감조치별 위험감소효과를 계산하였다. 위험감소율이 가장 큰 조치는 배관의 부식관리, MOV 설치 및 타공사로 인한 배관손상방지조치를 모두 이행하도록 하는 10번 조치임을 알 수 있었다.

II. 이론적 배경

미국, 영국 등 선진국에서는 도심지에 고압배관을 설치할 때 위험성평가를 의무적으로 실시하도록 하고 있다. 위험성 평가란 사실에 존재하는 다양한 위험성(hazards)을 인지하고 그에 따른 위험(risks)을 분석·평가하여 이를 안전하게 관리(control)하기 위한 적합한 방법을 결정하는 과정을 말한다[2].

위험은 사고발생빈도와 사고피해영향의 곱으로 계산하며, 계산한 위험의 크기에 따라 허용영역(Broadly acceptable region), 허용불가영역(Unacceptable region) 및 조건부 허용영역(Tolerable region or ALARP)으로 구분한다[3]. 국내의 도시가스배관 위험성평가 지침에서는 영국의 위험기준(risk criteria)을 따라 Fig. 1과 같이 위험지역을 구분하고 있다[4]. 일반적인 사고 피해 영향 감소방안으로는 배관경로 재선정, 공급 압력 강하 등이 있고, 사고의 빈도 감소방안으로는 배관두께 강화, 매설심도 강화, 감시시스템 증강 등이 있다[5].

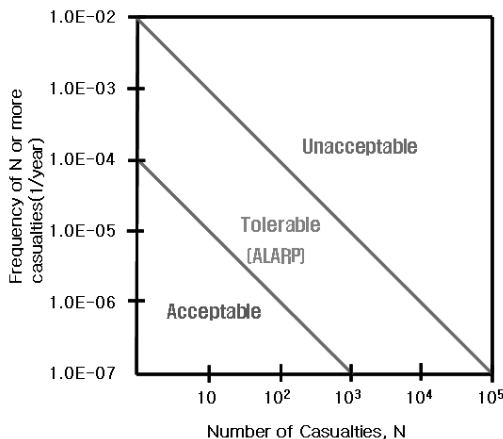


Fig. 1. Societal risk criteria[4, 7, 11].

III. 정량적 위험성 평가를 통한 위험경감조치 도출

3.1 정량적 위험성 평가

3.1.1 위험성 평가절차

위험성 평가 절차는 Fig. 2와 같이 평가대상을 선정하고, 자료수집, 사고 시나리오 구성, 사고발생빈도 및 피해분석, 위험도 계산 및 판단, 위험의 허용여부 결정 순서로 하였으며, 사고피해영향 분석은 PHAST RISK 6.53을 이용하였다.

3.1.2 평가대상 선정

정량적 위험성 평가대상은 A 관리소 ~ OO에너지 도시가스 공급배관이다. 공급배관의 규격은 Table 1과 같이 재질은 API-5L-X42, 관경은 400A이며, 배관의 길이는 3 km이다.

3.1.3 사고시나리오

배관에서 가스가 누출되는 경우 사고는 시간에 따라 Fig. 3의 Event tree와 같이 전개되며, Table 2의 누출빈도 및 점화확률에 따라 제트화재(jet fire), 플래시화재(flash fire) 및 단순 누출사고(material loss)로 전개된다.

3.1.4 기후입력 데이터

풍속 및 대기 안정도에 따른 다양한 사고 피해 영향 결과를 산정하기 위해서는 기후자료가 필요하다. OO에너지 사업소 공급배관의 위험성 평가를 위한 기후데이터는 2008년 기상청의 서울지역의 연간기후 데이터[8]를 사용하였다. 다만, 가혹한 대기조건으로 화재를 시뮬레이션하기 위해 대기온도는 Table 3과 같이 지표면 온도 13.3°C 대신

Table 1. Pipeline specification for QRA.

Pipe diameter	400A
Material	Polyethylene coated steel pipeline
Pipeline standard	API-5L-X42
Length of pipeline	3 km
Wall thickness	9.5 mm

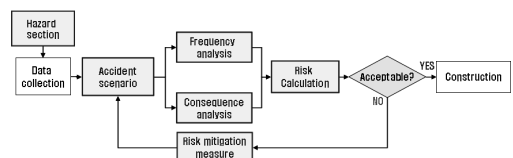


Fig. 2. Procedure of QRA for pipeline[11].

Table 2. Failure frequency of pipelines[6].

Failure causes \ Failure mode	Small release	Medium release	Rupture
External interference	3.32×10^{-5}	3.98×10^{-5}	3.68×10^{-5}
Construction defects	7.60×10^{-5}	2.80×10^{-5}	6.60×10^{-6}
Corrosion	7.90×10^{-5}	2.40×10^{-6}	8.10×10^{-7}
Ground movement	1.00×10^{-5}	1.10×10^{-5}	1.40×10^{-5}
Others/unknown	4.00×10^{-5}	1.40×10^{-5}	5.40×10^{-7}
Total frequency(1/year · km)	2.38×10^{-4}	9.52×10^{-5}	5.88×10^{-5}

Table 3. Annual climate data for Seoul[8].

Ambient temperature	21 °C
Ground temperature	13.3 °C
Wind speed(m/s)	10
Solar radiation(W/m ²)	600
Atmospheric pressure	1 bar
Relative humidity	62 %

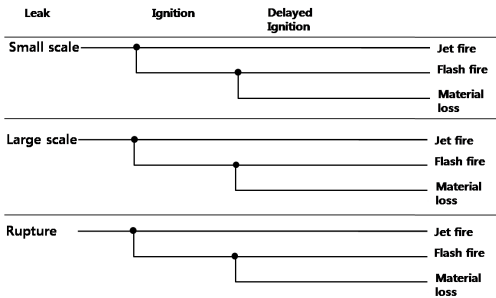


Fig. 3. An example of ETA for natural gas incidents[7, 10].

21 °C를 사용하였으며, 태양복사에너지(solar radiation)는 600 W/m²을 사용하였다.

3.1.5 사고피해영향분석

배관에서 천연가스가 누출되어 가연성 범위를 형성하고, 점화원에 의해 즉시 점화 될 경우에는 제트화재가 발생하는데, 천연가스 고압배관에서 누출된 가스에 의해 발생할 수 있는 가장 심각한 사고는 제트화재로 인한 피해이다[9]. 본 연구의 대상배관인 A관리소 ~ OO에너지 도시가스 공급 배관에 대한 사고피해 영향을 PHAST RISK 6.53을 이용하여 분석한 결과, 천연가스가 누출된 후 점화

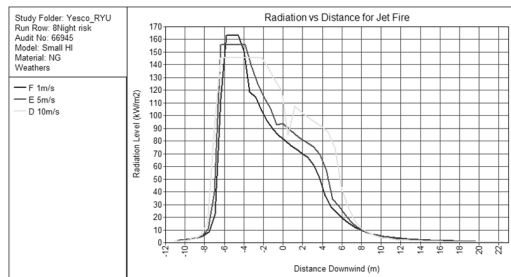


Fig. 4. The radiation level vs. distance for jet fire according to wind velocity in case of small release scenario.

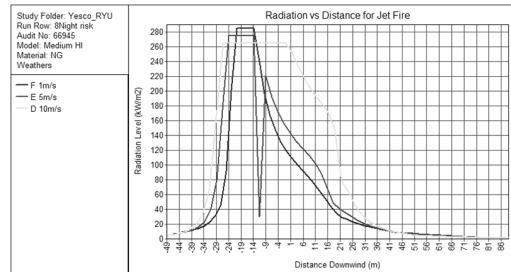


Fig. 5. The radiation level vs. distance for jet fire according to wind velocity in case of medium release scenario.

원에 의해 제트화재가 발생할 경우 복사열의 크기 및 형상은 Fig. 4 ~ Fig. 6과 같고, 4 kW/m², 12.5 kW/m² 및 37.5 kW/m²의 복사열이 미치는 거리와 영역은 Table 4와 같았다.

Table 4에서 보는 바와 같이 플라스틱 튜브를 녹이고 나무를 점화할 수 있는 12.5 kW/m²의 복사열에 의한 사고피해거리는 최대 165.05 m까지 나타났으며,

Table 4. Damaged distance(m) affected by jet fire radiation.

Release scenario	Radiation (kW/m ²)	Daytime / Nighttime		
		1A/1F	5B/5E	10C/10D
Small (20mm)	4	12.4	11.93	10.93
Medium(100mm)		75.02	75.22	75.49
Rupture(400mm)		277.25	278.77	282.54
Small (20mm)	12.5	7.26	7.54	7.84
Medium(100mm)		42.19	42.31	41.97
Rupture(400mm)		157.64	161.61	165.05
Small (20mm)	37.5	5.71	6.19	6.98
Medium(100mm)		23.51	26.86	31.31
Rupture(400mm)		85.73	89.92	98.4

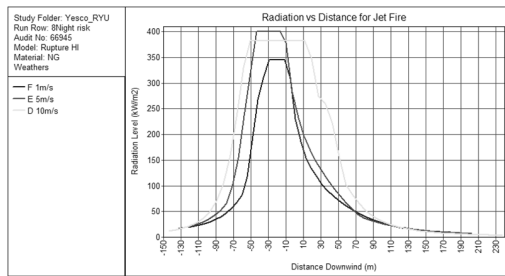


Fig. 6. The radiation level vs. distance for jet fire according to wind velocity in case of large release scenario.

개인이 통증을 일으킬 수 있는 4 kW/m²의 복사열은 대기가 약간불안정(C)하고 풍속이 10m/s인 때 가장 먼 거리(282.54 m)까지 영향을 미쳤다. 제트화재에 의한 복사열의 크기는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 대기상태가 약간 안정(E)되고 풍속이 5m/s이며 대누출(rupture)에 의한 사고일 때 반경 40 m에서 최대 400 kW/m²에 이르렀다.

3.1.6 위험도

일반적으로 고압배관의 위험은 개인적 위험보다 사회적위험을 더 고려[9]하므로, 본 연구에서 개인적 위험은 나타나지 않았다. OO에너지 도시가스 공급 배관에 대한 위험성 평가결과, 사회적 위험은 Fig. 7과 같은 F-N 곡선으로 나타났다. F-N 곡선은 예상되는 사고의 누적 빈도(F)와 사고결과에 따라 발생하는 예상 사망자수(N) 사이의 관계를 나타낸 것으로, 7구간의 위험은 국내의 위험성평가기준에서 제시한

Table 5. PLL for each sector before RMMs.

Sector	Release scenario	PLL	%
Sector 7	Small(20 mm)	2.58×10 ⁻⁵	0.3 %
	Medium(100 mm)	7.42×10 ⁻⁴	8.5 %
	Rupture(400 mm)	7.98×10 ⁻³	91.2 %
	Subtotal	8.75×10 ⁻³	
Sector 8	Small(20 mm)	1.35×10 ⁻⁵	0.03 %
	Medium(100 mm)	1.60×10 ⁻³	3.81 %
	Rupture(400 mm)	4.04×10 ⁻²	96.2 %
	Subtotal	4.20×10 ⁻²	
Total		5.08×10⁻²	

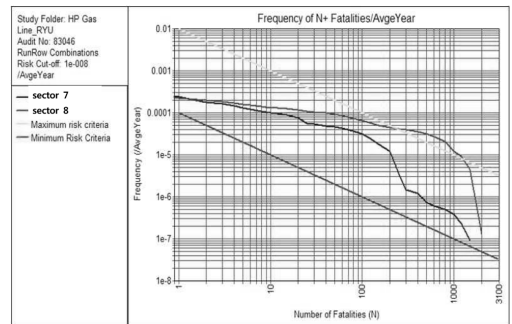


Fig. 7. F-N curve before RMMs.

사회적 위험기준의 조건부허용영역에 대부분 위치하였으나, 8구간의 위험은 일부가 허용 불가영역에 위치하였다.

각 시나리오별 잠재적 사망가능성을 나타내는 PLL은 Table 5와 같으며, 7구간과 8구간의 PLL은 5.08×10⁻²/km·year로 나타났다.

3.2 위험경감조치 도출 및 위험감소효과

위험이 허용영역 밖에 위치하는 경우, 즉 위험이 조건부허용영역과 허용불가영역에 해당하는 경우에는 위험을 감소시키기 위한 위험경감조치를 도출하였다. 위험경감조치의 도출은 배관의 설계단계에서부터 시공 및 운전단계에서 발생할 수 있는 모든 손상 메커니즘을 파악한 후 각각의 원인을 해소하거나 제거할 수 있는 조치를 선정하였다. 위험감소조치로는 전기방식 조치, 배관의 피복조치, 배관두께 증강조치 및 One-call system 등을 도출하였으며, 도시가스사업법령에 따라 배관을 설치 시 또는 유지관리 시 의무적으로 실시토록 한 배관의 피복조치와 On-call system 등은 본 연구의

Table 6. Failure frequency of pipelines.

Failure causes \ Failure mode	Small release	Medium release	Rupture
External interference	3.32×10^{-6}	3.98×10^{-6}	3.68×10^{-7}
Construction defects	7.60×10^{-5}	2.80×10^{-5}	6.60×10^{-6}
Corrosion	7.90×10^{-5}	2.40×10^{-6}	8.10×10^{-7}
Ground movement	1.00×10^{-5}	1.10×10^{-5}	1.40×10^{-5}
Others/unknown	4.00×10^{-5}	1.40×10^{-5}	5.40×10^{-7}
Total frequency(1/year · km)	2.08×10^{-4}	5.94×10^{-5}	2.33×10^{-5}

Table 7. RMMs vs. risk reduction rate.

No.	RMMs	△PLL		Risk reduction rate(%)
		sector 7	sector 8	
1	C/S 15t	4.73E-03	2.31E-02	55 %
2	ILI	7.39E-04		2 %
3	C/S 15t + ILI	4.92E-03	2.40E-02	57 %
4	CCTV	3.72E-03	1.82E-02	43 %
5	CIC	5.31E-03	2.60E-02	62 %
6	DCVG	1.23E-04	5.41E-04	1.3 %
7	C/S 15t+ILI+ CCTV+DCVG	5.45E-03	2.66E-02	63 %
8	MOV	7.61E-03		15 %
9	X42→X65	5.23E-03	2.57E-02	61 %
10	C/S 15t+ILI+CCTV+ DCVG+ MOV	6.69E-03	3.12E-02	75 %

* CIC : Concrete inverted channel

위험경감조치에서 제외하였다.

타공사 등 제3자에 의한 고압배관의 손상확률을 줄이기 위해 배관상부에 철근콘크리트 구조물(C/S)을 설치하여 배관을 보호할 수 있도록 하였으며, 미국의 뉴저지주 등에서 도시지역에 고압배관 설치를 허가할 때 허가 조건으로 하고 있는 ILI(In-line inspection, 배관 내부검사)를 하도록 하였다. 또한, 타공사 등으로부터 배관을 보호하고 감시하기 위하여 CCTV를 설치하도록 하였으며, 배관의 외부 부식관리를 위하여 배관의 외면검사 방법인 DCVG(direct current voltage gradient) 등을 실시하도록 하였다.

배관의 등급을 높이는(up-grade) 경우, 즉 SMYS(specified minimum yield strength)가 20%(설계계수 0.2)이하 일 경우에는 대누출로 인한 사고가 거의

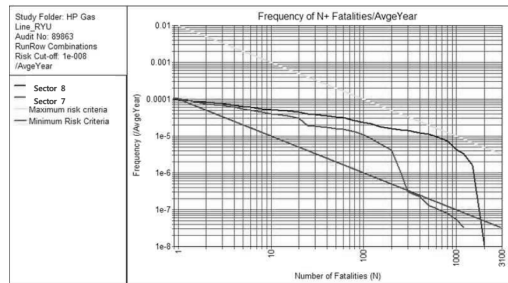


Fig. 8. F-N curve after RMMs(No. 10)

발생하지 않는 것으로 알려져 있으므로, 배관의 등급을 X42→X65로 향상시키는 경우 Table 2의 사고빈도는 Table 6과 같이 감소되는 것으로 계산하였다.

최종적으로 도출한 위험경감조치는 10개이며, 각각에 대하여 위험도를 재산정한 후 Table 7과 같이 위험감소율을 산정하였다.

부식으로 인한 대누출 사고빈도가 8.10×10^{-7} 로 너무 작아서(Table 2 참고) ILI와 DCVG를 이행하는 경우 위험감소율이 2%와 1.3%로서 타공사 방지조치에 비해 아주 작음을 확인하였다. 위험감소율이 가장 큰 조치는 타공사로 인한 사고방지조치와 부식관리 및 MOV 설치를 모두 이행하는 10번 조치(C/S 15t + ILI + CCTV + DCVG + MOV)로서 75%의 위험감소효과가 있었다.

두 번째로 위험감소효과가 큰 조치는 타공사로 인한 사고방지조치와 부식관리를 하도록 한 7번 조치(C/S 15t + ILI + CCTV + DCVG)로서 63%의 위험감소효과가 있었다. 타공사를 방지하기 위한 5번 조치(완전방호구조물 설치)는 위험감소율이 62%로서 세 번째 순위였다.

Fig. 8은 위험경감조치 10번(No. 10)을 이행한 경우 사회적 위험이 감소된 결과를 나타내었다.

IV. 결 론

연구대상으로 한 A관리소-OO에너지 도시가스 공급배관에 대한 정량적 위험성 평가결과, 제트 화재의 경우 12.5 kW/m^2 의 복사열에 의한 사고피해거리는 최대 165 m이고, 4 kW/m^2 의 복사열은 대기가 약간불안정(C)하고 풍속이 10 m/s 인 때 가장 먼 거리(282.54 m)까지 영향을 미쳤다. 복사열의 크기는 대기상태가 약간 안정(E)되고 풍속이 5 m/s 이며, 대누출일 때 반경 40 m에서 최대 400 kW/m^2 에 이르렀다.

연구대상 고압배관의 정량적 위험성 평가결과, 위험이 허용영역 밖에 위치하는 경우에는 위험경감 조치를 하였으며, 위험경감조치별 위험감소율을 확인하였다. 위험감소율이 가장 큰 조치는 타공사로 인한 사고방지조치와 부식관리 및 MOV 설치를 모두 이행하는 10번 조치(C/S 15t + ILI + CCTV + DCVG + MOV)로서 75 %의 위험감소효과가 있었다.

부식을 방지하는 조치(No. 2와 No. 6)는 부식으로 인한 대누출 사고빈도(8.10×10^{-7})가 너무 작아서 두 조치로 인한 위험감소율은 다른 조치에 비해 매우 작게 나타났다. 하지만 배관의 부식으로 인한 사고는 2000년 뉴멕시코 Carlsbad에서 발생한 도시가스 폭발 사고에서 보듯이 배관의 파열로 이어져 대형 가스사고를 유발할 수 있으므로 도심지에 고압 배관을 설치하는 경우 미국이나 영국과 같이 반드시 부식을 방지하는 조치로 ILI를 이행할 것을 제안한다. 아울러, 위험경감조치의 합리적인 이행여부를 판단하기 위해서는 비용-편익 분석이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 한국가스안전공사, 도시가스사업법, (2008)
 [2] 류영돈, 채충근, 광채식, 조영도, 윤영기, 이경식, 이수경, "도시지역에 고압배관 설치를 위한 선진

외국의 안전조치 기준 비교", 한국가스학회 춘계 학술발표회 논문집, 316-322, (2008)

[3] HSE, Guidance on 'as low as reasonably practicable'(ALARP) decisions in control of major accident hazards (COMAH), <http://www.hse.gov.uk/comah/circular/perm12.htm>
 [4] 한국가스안전공사, 2000-11 도시가스고압배관의 안전성평가 지침, (2008)
 [5] R.J. Harris, "DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF RISK ASSESSMENT METHODS FOR NATURAL GAS PIPELINES", International Conference with Special Focus on Gas Safety, (2001)
 [6] European Gas Pipeline Incident Data Group, Gas Pipeline Incidents fourth Report 1970-1998, (1999)
 [7] 류영돈, 이수경, 이경식, "정량적 위험성 평가를 통해 제안된 도시가스 고압배관의 안전조치에 대한 비용-편익 분석", KIGAS, 13(3), 22-27, (2009)
 [8] 기상청, Annual climatological report, (2008)
 [9] Young-Do Jo, Bum Jong Ahn, "A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas", Journal of Hazardous Materials, A123, (2005)
 [10] Stephens, M.J., "A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines", GRI Report no GRI-00/0189, Canada, October (2000)
 [11] 이경식, 류영돈 외, "도시가스고압배관의 정량적 위험평가 절차에 관한 연구" KIGAS 12(2), 25-39, (2008)