KIGAS Vol. 13, No. 3, June, 2009
(Journal of the Korean Institute of Gas)

정량적 위험성 평가를 통해 제안된 도시가스 고압배관의 안전조치에 대한 비용·편익 분석

†류영돈 · 이수경 · 이경식*
서울산업대학교 에너지환경대학원 가스공학과, *한국가스안전공사
(2009년 4월 17일 접수, 2009년 6월 12일 수정, 2009년 6월 12일 채택)

Cost-Benefit Analysis for the Safety Measures about High Pressure Natural Gas Pipelines Proposed by Quantitative Risk Analysis

†Young Don Ryou, Su Kyung Lee, Kyung Sik Lee*
*Seoul National University of Technology, *Korea Gas Safety Corporation*
(Received 17. April. 2009, Revised 12. June. 2009, Accepted 12. June. 2009)

요 약

이 논문은 한국가스안전공사가 도시가스 고압배관에 대한 안전성평가를 실시하고 안전관리조치를 권고하는 경우 그 안전관리조치가 합리적으로 실행가능한 것인지를 판단하기 위한 비용·편익분석 방법으로 PF(Proportion Factor)를 사용할 것을 제시하였다. 또한, 설치 예정인 도시가스 고압배관에 대하여 정량적 위험성평가를 실시하고, 평가결과에 따라 개선 권고한 안전조치에 대하여 VPF와 PF를 이용한 비용·편익분석을 실시하여 제시한 위험감소조치가 합리적으로 실행가능한 것임을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 비용·편익분석방법은 국내에서 안전성평가를 실시하고 위험감소조치를 제시하는 경우 그 조치가 합리적으로 실행가능한 것인지를 입증하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract - Recently Urban Gas Business Companies have been allowed to construct High Pressure Natural Gas pipelines, if they adopt the Risk Reduction Measures(RRMs) recommended by Korea Gas Safety Corporation(KGS) after safety assessment. This paper presents a Cost Benefit Analysis(CBA) method, when KGS performs safety assessment and recommends RRMs to Safety Appraisal Committee, to help the Committee make judgements on whether the proposed RRMs are reasonably practicable. We carried out quantitative risk assessment to high pressure natural gas pipelines as a case study and analysed cost benefit for the suggested RRMs. In conclusion, we found out the presented CBA method using PF was proper in Korea.

Key words : risk reduction measures, quantitative risk assessment, cost benefit analysis

Ⅰ. 서 론

도시가스사업법 시행규칙의 개정으로 일반도시가스사업자가 한국가스안전공사로부터 배관설치에 대한 안전성평가를 받고 그 결과에 따라 안전관리조치를 하는 경우에는 3㎫의 고압으로 도시가스를 공급할 수 있게 되었다[1]. 이에 따라 한국가스안전공사에서는 객관적인 안전성평가를 수행하기 위해 도시가스 고압배관에 대한 안전성평가(Quantitative Risk Assessment) 지침서를 개발하였다. 평가지

†주저자:rydon@kgs.or.kr

침에 따라 계산된 개인적 또는 사회적 위험이 조건부허용영역에 해당하는 경우에는 위험감소 방안(RRMs, Risk Reduction Measures)을 제시하며, 안전성평가 위원회는 제안된 위험감소방안을 수행할 경우 위험이 허용가능한 수준인지 여부를 심의하게 된다[2,8].

본 연구는 도시가스 고압배관에 대하여 안전성평가를 실시하고 개선방안을 제시하는 경우 그 조치가 합리적으로 실행가능한 것인지를 판정할 수 있는 간단한 비용·편익분석방법을 소개한다. 또한, 비용·편익분석방법의 적정성을 확인하기 위하여 사례연구로서 설치 예정인 CES 사업자용 도시가스 고압배관에 대한 정량적위험성 평가를 실시하고, 평가결과 제안된 개선방안에 대한 비용·편익분석을 실시한다.

II. 정량적 위험성 평가

2.1 정량적 위험성 평가 절차

고압배관의 안전성평가절차는 한국가스안전공사의 지침에 따라 Fig. 1과 같이 평가대상을 선정하고 자료수집, 사고시나리오 구성, 사고발생 빈도 및 피해분석, 위험계산 및 판단, 허용여부 결정 순서로 한다. 평가 결과 위험이 조건부 허용영역에 해당하는 경우에는 위험감소방안의 적정성 여부 등을 심의하기 위하여 안전성평가 위원회를 구성하며, 동 위원회에서는 제시한 위험감소 방안의 적정성 여부를 판단한다. 사고시나리오는 사고 이력을 기초로 하여 Table 1과 같이 소누출, 중누출, 대누출로 구분하여 수립한다[2].

Table 1. Incident Scenario[2].

Incident Type	Hole Size	Leak Time
Small Release	25 mm	20분
Medium Release	100 mm	10분
Large Release	300 mm	5분

2.2 사고발생빈도 분석

사고발생빈도는 사고시나리오에 따라 소누출, 중누출, 대누출로 구분하여 산정한다. 타공사를 제외한 사고발생빈도는 Table 2.의 EGIG(the European Gas Pipeline Incident data Group) 자료를 이용하며, 타공사에 의한 사고발생빈도($\phi_{i,\text{타공사}}$)는 식(1)과 같이 계산한다[3,4].

$$\phi_{i,\text{타공사}} = \phi_{i,\text{타공사},d} \times K_{DC} \times K_{WT} \times K_{PD} \times K_{PM} \quad (1)$$

식(1)에서, $\phi_{i,\text{타공사},d}$는 배관의 직경에 따른 타공사의 발생빈도를 나타내며, 식(2)부터 (4)까지를 이용하여 계산한다. K_{DC}, K_{WT}, K_{PD}, K_{PM}는 각각 매설심도, 배관두께, 배관매설지역 및 타공사 방지조치에 따른 영향계수를 나타내며, 각 영향계수의 값은 BG Transco의 자료를 사용한다. 식(2)부터 (4)에서 d는 배관의 직경(m)을 나타낸다[2,4].

$$\phi_{\text{소누출},\text{타공사},d} = 0.001e^{(-4.18d-2.18562)} \quad (2)$$

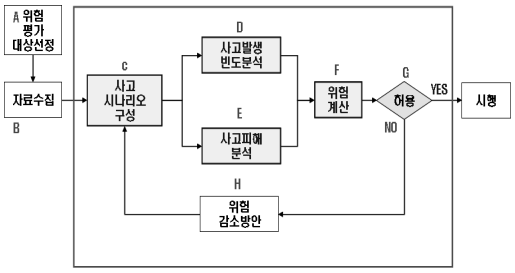

Fig. 1. QRA Procedure[2,8].

Table 2. Failure Frequency based on failure causes and hole size(EGIG, 1999)[3,4].

Failure causes	Failure frequency (1/year km)	Percentage of total failure rate(%)	Percentage of different hole size (%)		
			Small	Medium	Large
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	3.0×10-5	6	29	31	40
Others/unknown	5.4×10-5	10	74	25	<1

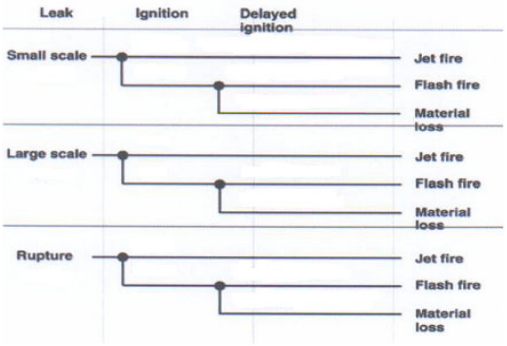

Fig. 2. The ETA of natural gas incidents[6]

$$\phi_{중누출,타공사,d} = 0.001e^{(-4.12d-2.02841)} \quad (3)$$

$$\phi_{대누출,타공사,d} = 0.001e^{(-4.05d-2.13441)} \quad (4)$$

2.3 사고피해영향 분석

사고피해영향분석은 인명피해를 위주로 실시한다. 배관에서 가스가 누출되는 경우 시간에 따른 사고를 정의하기 위해 Fig. 2와 같은 ETA를 수행한다[5,6]. 천연가스는 공기보다 가볍기 때문에 개방공간 증기운 폭발(UVCE, Unconfined Vapor Cloud Explosion)의 위험은 없으며, 점화원이 없는 경우 대부분 원료손실(material loss)로 사고가 종료되지만, 즉시 점화에 의한 제트화재(Jet Fire)나 지연점화에 의한 플래시화재(Flash Fire)가 발생할 수 있으므로 이의 영향을 고려해야 한다[5,6]. 열원에서 발생하는 열복사 강도와 이로 인한 치사율에 대해서는 Hymes(1983)가 제안한 바 있으며, 35.8kW/㎡의 열복사 강도(thermal inten sity)는 100%의 치사율을 갖는 것으로 보고되었다[6,7].

2.4 위험계산(Risk Calculation)

개인적 위험(Individual Risk)은 모든 사고 시나리오에 의한 사망자의 사망확률과 이에 대한 배관의 사고발생빈도를 이용하여 예측할 수 있으며, 사회적 위험(Societal Risk)은 사고발생누적빈도(F)와 사고로 인해 발생되는 예상 사망자수(N)로 표현한다[2,8]. 일반적으로 고압배관의 위험은 개인적 위험보다 사회적 위험을 더 고려한다.

2.5. 위험의 판단

위험이 허용가능한지 또는 허용 불가한지를 정하는 위험판단기준은 국가별로 달리 정하고 있으며, 개인적위험판단기준과 사회적위험판단기준이 다르다. 도시가스 고압배관의 안전성평가 지침 등에서는 사회적 위험 판단기준을 Fig. 3과 같이 정하고 있다[2,8].

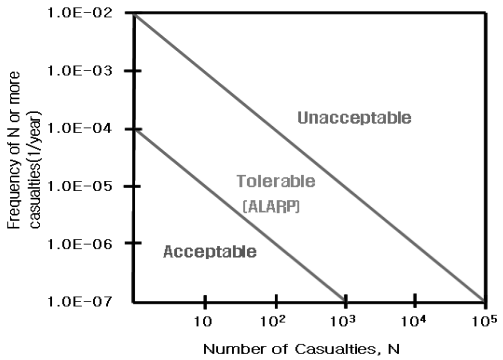

Fig. 3. Societal risk criterion[2,8]

2.6 위험의 판정기준

계산한 위험이 Fig. 3의 사회적 위험의 허용(Acceptable)영역에 해당하는 경우에는 별도의 개선이 필요 없는 것으로 하고 허용불가(Unaccep- table) 영역에 해당하는 경우에는 위험이 커서 배관의 설치가 허용되지 않는 것으로 한다. 계산한 위험이 조건부허용영역(ALARP)에 해당하는 경우에는 배관의 설치는 허용하되, 위험을 낮추기 위한 안전조치를 이행하여야 하는 것으로 한다[2,8].

2.7 위험감소 조치

위험이 조건부허용영역일 경우에는 안전성평가 위원회를 구성하고, 위원회에 다음과 같은 개선조치를 제시하게 된다[2,8,11].

(1) 두꺼운 배관의 사용
(2) 배관 위에 충격보호 장치의 설치
(3) 배관의 매설심도 증가
(4) 배관의 감시체계의 변경
(5) one-call system의 적용
(6) In line inspection(배관내부검사) 등

III. 비용 · 편익 분석

3.1. 비례계수(PF, Proportion Factor)

안전관리 투자에 있어 비용 · 편익분석은 제시된 안전관리조치에 대한 투자 의사결정 및 투자의 효율성을 평가하는 방법이다. 비용 · 편익 분석을 위해서는 모든 손실과 모든 이익을 금전적 가치로 환산하여야 한다. 그러나 사람의 가치를 금전으로 환산한다는 것은 그리 쉬운 일이 아니다.

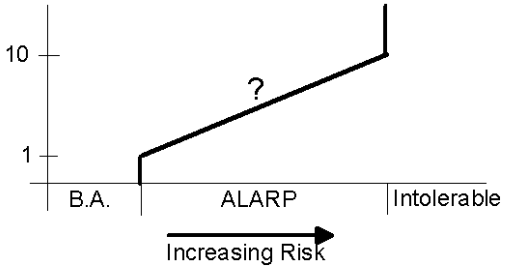

Fig. 4. Variation of PF according to increasing risk[9]

영국의 HSE에서는 안전성평가 결과에 따라 위험감소조치를 하는 경우 제시된 위험감소조치가 합리적으로 실행가능한지를 판단하기 위하여 비례계수(PF, Proportion Factor)를 사용하여 비용·편익 분석을 한다. 즉, CPF(Cost of Preventing Fatalities)와 VPF(Value of Preventing Fatalities)의 비율을 PF라 하며, 식(5)와 같이 나타낸다[9].

$$PF = \frac{CPF}{VPF} \tag{5}$$

PF는 위험에 따라 증가하는데, PF의 상한값을 결정하는 것이 어려운 일이다. HSE에서는 PF의 상한값을 10으로 제시하고 있으나, 위험에 따른 PF의 변화는 아직 명확하지 않다. 그러나 기본적인 원리는 Fig. 4와 같으며, Fig. 4에서 보는 바와 같이 위험이 증가함에 따라 PF의 값은 증가할 것으로 추정된다[9].

안전성평가 결과에 따라 제시된 위험감소조치에 대하여 PF를 계산한 결과 그 값이 어떤 정해진 값보다 크다면 비용은 이득과 총체적으로 불균형(grossly disproportionate)을 이루고 있다고 하며, 제안된 조치는 합리적으로 실행가능한(reasonably practicable) 것이라고 할 수 없게 된다[9].

식(5)에서 VPF(사상자를 예방하는 가치)는 영국의 DTLR(Department of Transport, Local Government and the Regions)이 도로안전조치의 평가를 위해 사용한 것으로서 위험을 감소시켜 안전을 보장받는데 필요한 비용을 말하며, 사회나 법원이 사망에 대한 보상으로 지불하는 비용을 말하는 것은 아니다. 영국에서는 관행적으로 VPF를 약 1백만 파운드(£1 m, 2001년 기준)로 채택하고 있다[10].

CPF는 안전조치에 필요한 비용을 안전조치에 따라 감소될 것으로 추정되는 전체 사상자(fatalities)수로 나눔으로써 구할 수 있다. 즉, CPF는 식 (6)으로 구할 수 있다[11,12].

Table 3. PF used in UK[9]

Regulations	Year	PF
Control of Legionellosis Regs. and ACOP	1990	2.6 - 8.5
Gas Safety (Management) Regs.	1996	1.4 - 1.7
Adventure Activities Licensing	1996	5.4
Confined Space	1996	1.0 - 2.2
Railway Safety	1999	7.1 - 10.5

$$CPF = \frac{C}{L(\Delta PLL)} = C\,(LN(f_1 - f_2))^{-1} \tag{6}$$

CPF : Cost of Preventing Fatalities
C : Cost of implementing measure(£)
L : Estimated lifetime of pipe(years)
PLL : Potential Loss of Life
ΔPLL : Change in PLL following implementation of the measure (fatalities per year)
N : Number of fatalities at a frequency of f_1 or f_2
f_1, f_2 : frequency per year

3.2 국내·외 VPF 및 PF 기준

Le Guen 등은 "Value of preventing a Fatality"에 관한 논문에서 Table 3과 같은 PF의 값을 제시하였으며, 영국의 법령에서는 그 값을 이용하고 있다[9].

UK NRPB(1986) 기준에서 PF는 개인적 위험에 따라 1～15가 사용되었고, NORSOK 표준 E6.2에 따르면 노르웨이에서는 약 2.5의 PF가 사용되었음을 알 수 있다[9,13].

영국의 경우 VPF를 약 1백만 파운드(약 20억원, '09.3월 기준)로 하고 있으며, 미국의 DOT에서는 사상자를 막는 가치를 계산할 때 $5.8m(약 80억)을 제시하고 있다[10,14].

국내의 경우에는 배관의 위험감소조치와 관련하여 제시된 VPF 값이 없다. 따라서, 본 논문에서 VPF 값은 HSE에서 사용하는 1백만 파운드를 사용하고 PF의 값은 영국의 가스안전규칙에서 제시하는 1.4～1.7을 사용할 것을 제안한다.

Ⅳ. 사례 연구

4.1 대상시설

사례연구 대상 배관의 사양은 길이 3,473m, 관경 323.9㎜, 재질 API-5L-X42, 두께 10.3t, 공급압력 3㎫이다.

4.2 사고발생빈도 분석

배관설계에 따른 배관의 영향계수는 Table 4와 같으며, Table 2와 식(2)~(4)를 이용하여 계산한 사고시나리오에 따른 사고발생빈도는 소누출(Small)인 경우 2.1×10^{-4}/y · km, 중누출(Medium)인 경우 6.5×10^{-5}/y · km, 대누출(Large)인 경우 3.1×10^{-5}/y · km로 평가되었다.

4.3 사고피해영향 분석

배관에서 천연가스가 누출되는 경우에는 Fig. 2와 같이 폭발에 의한 피해보다는 즉시점화로 인한 제트화재 또는 지연점화로 인한 플래시화재에 의한 피해가 발생할 수 있으므로 제트화재로 인하여 35kW/㎡의 복사열이 미치는 지역과 플래시화재로 인하여 피해가 발생하는 지역(3/4 발화범위의 농도가 확산되는 지역, 3/4 LFL지역)에 대하여 피해영향을 분석하였다.

4.4 위험계산(Risk Calculation)

고압배관의 위험은 개인적 위험보다 사회적 위험을 더 고려하므로 본 논문에서 배관의 위험은 사회적 위험만을 표시하였다. 배관주변의 인구밀도는 2.8×10^{-3}명/㎡이었고, 사회적위험 계산 결과 F-N 커브는 Fig. 5와 같았다.

4.5 위험의 판단

사회적위험은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 조건부 허용영역에 해당하므로 배관의 설치는 허용하되, 위험을 낮추기 위한 안전조치를 이행하여야 한다. 따라서 미국, 영국 등 선진국에서 고압배관의 설치를 허용할 때 개선조치로 실시하고 있는 ILI(배관내부검사, In Line Inspection)를 하도록 권고하였으며, 인구밀도가 높은 주거지역을 횡단하는 배관에 대하여는 철근콘크리트 구조물(Concrete Slab)로 배관을 보호하도록 하였다.

4.6 비용 · 편익 분석

개선조치를 하는 경우 그 개선조치가 합리적으로 실행가능한지를 판단하기 위하여 비용 · 편익분석을 실시하였다. 위험감소조치전의 잠재적 사망자수(PLL)는 3.72×10^{-3}/year이었으나, 개선조치 후의 잠재적 사망자수(PLL)는 2.71×10^{-3}/year로 감소되었다. 따라서, CPF와 PF를 식(5)와 (6)에 따라 구하면, 다음과 같이 된다.

$$CPF = \frac{165,143,400}{50\times(3.72-2.71)\times10^{-3}} = 3,270,166,337$$

$$PF = \frac{CPF}{VPF} = \frac{3,270,166,337}{2,000,000,000} = 1.63$$

상기 계산에서 배관의 잔존수명(L)은 50년으로 하였고, 비용(C)은 철근콘크리트 구조물 설치비용과 ILI를 위한 launcher 및 receiver의 설치비용을 합하였으며, 할인율과 인플레이션은 무시하였다.

제안한 두 개의 개선조치를 모두 하는 경우 PF 값은 Table 5와 같이 1.63으로 본 논문에서 제시하는 값의 범위 내에 있고, 철근콘크리트 구조물만을 설치하는 경우 PF 값은 0.7로 작으므로 두 조치는 합리적으로 실행가능한 것으로 판단된다. 그러나, ILI만을 하는 경우에는 PF 값이 4.2로 본 논문에서 제시하는 값보다 크다. 따라서 ILI를 하는 것은 비용면에서 합리적으로 실행 불가능한 것으로 판단된다. 따라서 안전성평가위원회에서는 도시가스사

Table 4. Correction factor according to pipeline design information

Classification	Pipeline Design Information	Factor
Depth of Cover (KDC)	1.5m	0.54
Pipeline Diameter & Wall Thickness(KWT)	300A, 10.3mm	0.2
Pipeline District Location(KPD)	Suburban	3.16
Third Party Failure Prevention Measure(KPM)	Line Marker Marking Tape Steel Plate Surveillance	1.00 0.91 0.91 0.91

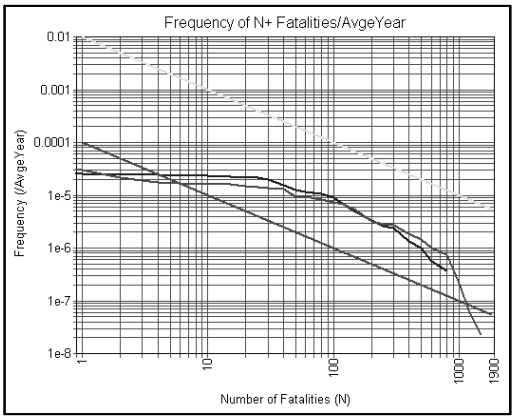

Fig. 5. F-N Curve

Table 5. PF and PLL after RRMs

	C/S	ILI	ILI+C/S
PLL	2.97×10^{-3}	3.46×10^{-3}	2.71×10^{-3}
PF	0.7	4.2(0.64)	1.63

* C/S : Concrete Slab, ( )안의 값은 15년 후 ILI를 수행하는 경우의 PF 값

업자와 협의하여 당장 필요하지 않은 ILI를 위한 launcher와 receiver를 15년 후에 설치하기로 협의하였다. 15년에 6% 할인율(0.103)[9]을 적용한 ILI의 설치 및 실행 비용으로 PF를 다시 계산하면 그 값은 0.64가 된다. 따라서, 15년 후의 ILI의 설치와 실행은 합리적으로 실행가능한 것으로 판단된다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 위험성평가 후 위험감소조치를 권고하는 경우 그 안전조치가 합리적으로 실행가능한지를 판단하기 위한 간단한 비용·편익 분석 방법으로 PF를 이용할 것을 제시하였다. 또한, 계산에 필요한 VPF 값은 20억으로 할 것을 제안하였고, 도시가스 고압배관의 안전조치에 합리적인 PF의 최대값은 1.4～1.7로 할 것을 제안하였다. 그리고 이의 타당성을 확인하기 위하여 CES사업자배관에 대하여 정량적위험성평가를 실시하고, 평가결과 제시된 위험감소조치에 대하여 비용·편익분석을 실시하였다. 사례연구 결과 본 논문에서 제시한 VPF와 PF 값을 이용하여 도시가스 고압배관의 안전조치에 대한 비용·편익분석을 하는 것이 타당성이 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 비용·편익분석 방법과 PF의 값은 국내에서 도시가스 고압배관에 대한 안전성평가를 실시하고 위험감소조치를 제시하는 경우 그 조치가 합리적으로 실행가능한지 여부를 판단하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 한국가스안전공사, "도시가스사업법", 강문정보문화(주) (2008)

[2] 한국가스안전공사, "2000-11 도시가스고압배관의 안전성평가 지침", (2008)

[3] European Gas Pipeline Incident Data Group, "Gas Pipeline Incidents fourth Report 1970-1998", (1999)

[4] Young-Do Jo, Bum Jong Ahn, "A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas", Journal of Hazardous Materials, A123, (2005) 4.

[5] Stephens, M.J., "A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines", GRI Report no GRI-00/0189, Canada, October (2000)

[6] K.S Park, J-H Lee and Y-D Jo, "An approach to risk management of city gas pipeline", Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, Part B, 82(B6); 446-452, November (2004)

[7] Hymes, I., "The physiological and pathological effects of thermal radiation", Systems Reliability Directorate, Report SRD, R275, Culcheth, Warrington, UK, (1983)

[8] 이경식, 류영돈 외, "도시가스고압배관의 정량적 위험평가 절차에 관한 연구"KIGAS 12(2), 25-39, June, (2008)

[9] 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

[10] HSE, "Reducing risks, protecting people", http://www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf

[11] HSE,, "A Simplified Approach to Estimating Individual Risk", http://www.hse. gov.uk/research/misc/vectra300-2017-r03.pdf

[12] The Institution of Gas Engineers(IGE), "Steel Pipeline for High Pressure Gas Transmission", IGE/TD/1 Edition 4, vol. 1670, 154-155, (2007)

[13] NORSOK Standard, Z-013 "Risk and Emergency Preparedness Analysis" Rev. 2, (2001)

[14] DOT guidance "Treatment of the Value of Preventing Fatalities and Injuries in Preparing Economic Analysis", (2008)