



도시가스 고압배관의 합리적인 위험감소조치 선정을 위한 비용-편익분석

†류영돈 · 김영섭 · 이수경*

한국가스안전공사, 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 가스공학과*
(2010년 8월 17일 접수, 2011년 3월 22일 수정, 2011년 3월 22일 채택)

Cost-Benefit Analysis in order to Select the Reasonably Practical Risk Reduction Measures(RRMs) on High Pressure Urban Gas Pipelines

†Young-Don Ryou · Young-Seob Kim · Su-Kyung Lee*

Korea Gas Safety Corporation, Seoul National University of Science & Technology*
(Received August 17, 2010; Revised March 22, 2011; Accepted March 22, 2011)

요 약

위험성 평가에서 비용-편익분석의 목적은 위험성 평가를 통해 도출된 부가적인 위험감소조치의 편익이 그 조치를 수행하는 데 든 비용보다 많음을 확인하고, 그 조치를 이행하는 것이 적절함을 보여주는 데 있다. 본 논문에서는 도시가스 고압배관의 위험성 평가에 따라 도출한 위험감소조치를 이행함에 있어 가장 효과적이고 합리적인 조치를 선정하기 위하여 비용-편익 분석을 실시하였다. 도출한 위험감소조치를 적용하여 위험성 평가를 다시 실시한 결과, 배관부식방지조치, MOV 설치 및 타공사 방지조치를 하도록 한 10번 조치가 위험감소효과가 75 %로 가장 컸으며, 비용-편익 분석 결과 합리적으로 실행가능한 것으로 판단되어 본 논문의 연구대상 배관의 위험감소조치로 선정하였다.

Abstract - The purpose of CBA(cost-benefit analysis) in risk assessment is to show whether the benefits of implementing additional risk reduction methods(RRMs) derived through risk assessment outweigh its costs and it is proper to implement the methods. In this paper CBA has been conducted in order to select the most effective and reasonable RRM as implementing the RRM derived after QRA for the high pressure urban gas pipelines. As conducting QRA again by applying the derived RRMs, No. 10 measure which includes pipeline corrosion monitoring, MOV(motor operated valve) installation and the method to protect pipeline damage caused by third-party mechanical interference has showed the highest risk reduction effect. Also it has been considered to be reasonably practicable by conducting CBA and then is selected as the most effective and reasonable RRM on the objects of this paper.

Key words : quantitative risk assessment, high pressure urban gas pipelines, cost-benefit analysis

1. 서 론

위험성 평가 분야에서 비용-편익분석의 목적은 위험성 평가 결과 도출된 여러 위험감소조치가 ALARP(As low as reasonably practicable) 의사결정에

따라 합리적으로 이행가능함을 결정하는 데 있다. 즉, 안전조치로 인해 발생한 이득(benefit)이 안전 조치를 위해 사용된 비용(cost) 보다 많음을 보여주고, 안전조치를 이행하는 것이 비용 측면에서 합리적인 결과를 보여주기 위한 것이다. 비록 비용-편익분석의 결과는 최종적인 의사결정을 제공할 수는 없지만, 이것은 의사결정에 있어 중요한 가이드(guide)를

†주저자:rydon@kgs.or.kr

제공하게 된다[1].

위험을 감소시키는 안전조치와 경제성 사이에는 분명한 상반관계(trade-off)가 존재한다. 즉, 안전조치를 많이 하면 할수록 안전이 증강되어 사고는 감소하지만 그에 따른 비용이 상승하게 되고, 안전조치를 완화하면 안전관리투자 비용은 줄어들지만 그만큼 사고의 위험은 커지게 된다. 안전조치의 이행 여부를 결정하는 의사결정방법은 여러 가지가 있는데, 현대의 정량적 위험성 평가에서는 종종 위험기준(risk criteria)과 비용-편익분석(CBA)을 조합한 의사결정을 사용하고 있다[1].

본 논문에서는 도시가스 고압배관의 위험성 평가에 따라 도출한 위험감소조치를 이행함에 있어 어느 정도의 비용을 투자하는 것이 합리적인 것인지 판단하기 위하여 비용-편익 분석을 실시하였으며 이를 통하여 가장 합리적인 위험감소조치를 선정하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 정량적 위험성 평가

정량적 위험성 평가란 시설에 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 Fig. 1과 같이 위험지역을 구분하고 있다[4].

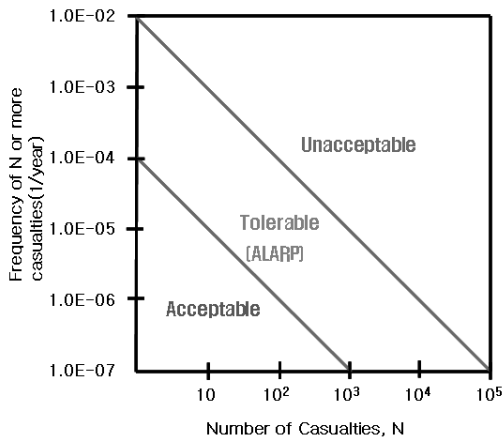


Fig. 1. Societal risk criteria[4,7,11].

2.2. 비용-편익 분석과 생명의 가치화

위험성 평가분야에서 비용-편익 분석은 부가적인 안전조치의 합리적인 실행 여부를 평가하는데 사용된다. 즉, 안전조치를 이행하는 비용과 안전조치를 함으로써 사고를 피하게 되어 얻는 이득을 비교하여 추가적인 안전조치의 이행 여부를 평가한다. 비교를 하기 위해서는 비용과 편익을 공통 단위로 표현하여야만 하는데, 전통적으로 이것은 금전의 단위(monetary units)를 이용하고 있다. 죽음의 위험을 다루는 비용-편익 분석에서는 생명의 가치(valuation of life)를 이득으로 보고 이를 금전으로 평가하는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 생명의 가치를 금전적인 관점으로 보는 것에 대하여는 논쟁이 되고 있다[1].

생명의 가치를 이용한 의사결정 방법은 영국에서 가장 잘 발달되었다. 영국에서는 안전조치에 대한 비용-편익분석에서 안전조치로 인한 편익을 측정하는데 VPF(value of preventing a fatality; 1인의 사망자를 예방하는 비용)를 이용하였다[1]. VPF는 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[5]. 또한 VPF는 실제 사람의 생명에 부여하는 가치가 아니라 많은 사람에게 발생할 수 있는 작은 죽음의 확률을 줄이는 통합된 가치(aggregated value)이며, 사람들이 평균적인 위험을 감소시키기 위하여 얼마를 지불할 준비가 되어 있는지의 다른 표현 방식으로써 비용-편익분석에서 많이 사용되는 값이다[5, 6].

생명의 가치에 대한 접근법은 인적자본접근법(human capital approaches), 지불의사접근법(WTA; willingness-to-pay approaches), 법원의 판결(court decision), 생명보험 가입 정도 등을 이용하는데, DNV Technica(1999)에서는 지불의사접근법(WTA)을 비록 평가(estimates)가 매우 가변적이라고 할지라도 일반적으로 가장 신뢰할 수 있는 접근법으로 간주하고 있다[1].

미국의 DOT와 영국의 HSE는 비용-편익분석을 하는 경우 VPF로 각각 \$5.8m(2007년 기준)와 £1.312m(2003년 기준)를 사용하도록 권고하고 있으나[6,7], 국내에는 도시가스 고압배관의 위험감소조치에 대해 비용-편익분석을 하는 경우 제시된 VPF 값이 없다. 따라서 본 논문에서는 국·내외의 다른 분야에서 사용되는 VPF 값을 조사하고, 이를 토대로 국내에서 비용-편익분석을 하는 경우 사용할 수 있는 적절한 VPF 값을 선정하였다. 즉, 영국과 미국, 그리고 한

Table 1. Proper VPF estimates

Classification	VPF	2009.7(₩)	Remark
DOT(2007), USA	\$5,800,000 (2007)	4,690,362,595	PPP & CPI
HSE & DfT(2004), UK	£ 1,312,260(2003)	1,997,208,699	PPP & CPI
Road Traffic Authority (2007), Korea	₩411,707,100(2006) ¹⁾	2,083,237,420	(1:3.6) ⁴⁾ & CPI
		2,058,535,500	Heinrich Method (1:4)
Hawang Mt. fire compensation cost (2009), Korea	₩400,000,000~700,000,000 ²⁾	2,000,000,000~3,500,000,000	Heinrich Method (1:4)
Francois Bellavance (2007), Canadian paper	\$1,552,525 ³⁾ (2000)	1,630,556,614	PPP & CPI

국의 VPF 값 등을 조사하고, PPP(Purchasing Power Parity, 구매력평가지수)와 CPI(Consumer Product Index, 소비자 물가지수)를 적용하여 2009년 7월 기준 한국의 화폐단위로 변환한 후 Table 1과 같이 적정한 VPF 값을 산정하였다. 미국의 DOT에서 제시한 VPF(약 47억원)는 국내에 적용하기에는 지나치게 큰 값으로 보이며, 캐나다에서 한국의 VPF로 계산한 값(1985)은 산정시기가 오래되고 다른 나라의 값과 비교하여 너무 작은 것으로 보이므로 본 논문에서는 국내의 도시가스 고압배관의 안전조치에 대한 비용-편익분석에 적정한 VPF 값으로 영국의 DfT에서 제공(2003.6월)하는 VPF 값(약 20억원)을 사용하였다. Table 1에서 1)은 교통관리공단에서 추산한 VPF로 이는 2006년도 교통사고 1인당 순평균 추계 비용으로 위자료, 장례비, 생산손실, 의료비 등을 합한 금액이며, 미국의 DOT(Department of transportation)와 영국의 DfT(Department of Transport)에서 다루는 Human Cost 등을 무시한 비용이다. 2)는 2009년 화왕산 참사 사망보험금으로 이는 위로금, 특별 위로금과 호프만식 계산법으로 산정한 개인별 보상금 등을 포함하였다.

3)는 캐나다에서 PPP와 CPI를 이용하여 한국의 VPF 값을 계산한 값이며[9], 4)는 도시가스 사고사례를 통한 직접비 대 간접비의 평균 비율을 적용한 것이다.

III. 비용-편익 분석을 통한 위험감소조치 선정

3.1. 위험감소조치 도출 및 위험감소 효과

본 논문에서 합리적인 위험감소조치를 선정하기 위하여 이용한 사례연구 대상은 A 관리소 ~ OO에너지 도시가스 공급배관이며, 공급배관의 규격 및 재질 등은 Table 2와 같다.

Table 2. 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

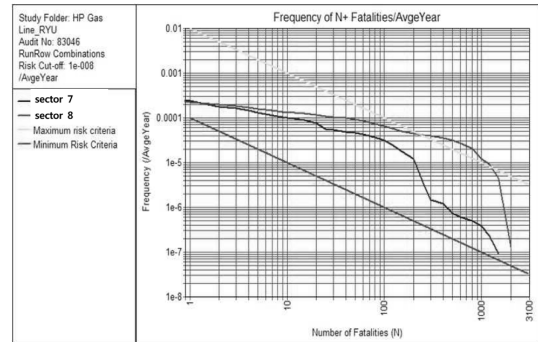


Fig. 2. F-N curve before applying RRM.

A 관리소 ~ OO에너지 도시가스 공급배관의 정량적 위험성 평가결과, 7구간과 8구간의 잠재적 사망자수(PLL)는 $5.08 \times 10^{-2} / \text{km} \cdot \text{year}$ 이고 배관의 사회적위험이 Fig. 1과 같이 허용영역밖에 위치하므로 위험을 감소시키기 위한 위험감소조치를 도출하였다. 위험감소조치의 도출은 배관의 설계단계에서부터 시공 및 운전단계에서 발생할 수 있는 모든 손상 메커니즘을 파악한 후 각각의 원인을 해소하거나 제거할 수 있는 것으로 하였다. 도출된 위험감소조치는

Table 3. RRM vs. risk reduction rate

No.	RRMs	△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

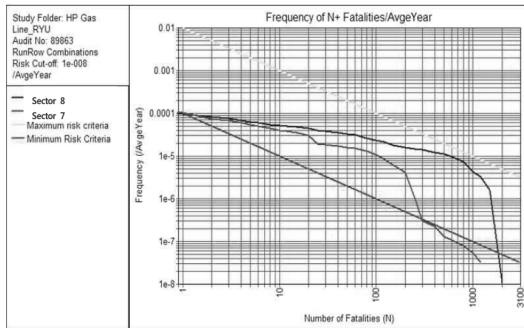


Fig. 3. F-N curve after applying RRM(No. 10).

전기방식 조치, 배관의 피복조치, 배관두께 증강조치 및 one-call system 등 10개이다. Table 3은 도출한 10개의 위험감소조치와 각각의 위험감소조치에 대해 위험도를 재산정한 후 위험감소율을 산정한 것을 나타내었다.

3.2. 합리적인 위험감소조치 선정

본 논문에서는 합리적인 위험감소조치를 선정하기 위하여 비용-편익 분석을 실시하였다. 비용-편익 분석은 식(2)를 사용하였으며, 이 식은 식(1)의 비용/편익 비율로부터 유도하였다. 영국의 산업안전보건청

(HSE; Health and Safety Executive)에서는 PF의 상한값을 10으로 제시하고 있으며, 노르웨이의 NORSOK 표준에서는 약 2.5의 값을 사용하였다[3,8]. 본 논문에서는 적절한 PF 값으로 영국의 가스안전규칙에서 채택하고 있는 1.7을 사용하여 비용-편익 분석을 실시하였다.

$$PF = \frac{\text{Cost}}{\text{Benefit}} \tag{1}$$

$$PF = \frac{\text{ICAF [사망자를 막는데 들어간 비용]}}{\text{VPF [사망자 1인을 예방하는 비용]}} \tag{2}$$

$$\text{ICAF} = \frac{C_{\text{RRMs}}}{L \times \Delta\text{PLL}} = \frac{C_{\text{RRMs}}}{L \sum (N(f_1 - f_2))} \tag{3}$$

여기서, L은 배관의 수명, C_{RRMs}는 위험감소조치(risk reduction measures, 개선조치) 비용, ΔPLL은 위험감소조치 전·후의 잠재적 사망자수의 변화(Change in PLL following implementation of the measure), ICAF는 위험감소조치를 통하여 사망자를 막는 데 들어간 비용(implied cost of averting fatalities), N은 사망자수, f₁은 위험감소조치 전 사고발생빈도, f₂는 위험감소조치 후의 사고 발생 빈도를 나타낸다.

각 위험감소조치의 비용 산정은 Table 4부터 Table 6과 같이 견적서 등을 이용하여 계산하였다. 콘크리트 슬라브(15t)의 설치비용은 Table 4와 같이 단위길이(M)당 재료비, 시공비 및 간접비의 합으로 산출하였고, 배관의 등급(grade)을 높이는 경우의 비용은 Table 5와 같이 배관 판매자의 견적서를 이용하였으며, API 5L X42와 API 5L X65의 가격 차이를 이용하여 전체 배관의 설치비용 차이를 Table 6과 같이 산정하였다.

위험감소조치의 이득(benefit)은 그 조치를 이행함으로써 잠재적 사망자수가 줄어든 것으로 산정할 수 있으므로 Table 3의 ΔPLL과 VPF를 이용하여 구하였다.

비용-편익분석 결과 Table 7 및 Table 8과 같이 PF가 1.7보다 작으므로 각 위험감소조치는 모두 합리적인 조치로 판단되었다.

다만, 조치 2번(ILI; 배관내부검사)의 경우 PF가 2.821로 1.7보다 크므로 동 조치는 15년 후에 실시하도록 하였다.

위험감소조치별 위험감소효과와 비용-편익분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

조치 1번(C/S 15t)과 조치 5번(완전방호조치)은 모두 타공사로부터 배관을 보호하는 조치로서 같은 목적의 조치이나 비용-편익분석 결과 5번 조치는 1번 조치보다 PF가 약 3배가 크므로 비용-효과 측면에서

Table 4. Cost estimates for concrete slab 15t

Size(mm)	Q'TY	Unit	Material cost(₩)	Construction cost(₩)	Indirect cost(₩)	Total (₩)
700*1200*150	1	M	37,943	23,733	4,542	66,218

Table 5. Cost of pipe for each grade

Size	Description	Q'TY	Unit	Cost(₩)
16"	API 5L X65 9.5t (3-LAYER PE-Coating)	1	M	263,030
16"	API 5L X65 9.5t	1	M	263,030
16"	API 5L X42 9.5t (3-LAYER PE-Coating)	1	M	236,680
16"	API 5L X42 9.5t	1	M	236,680

Table 6. Total cost for pipe up-grade

RRMs	Cost Estimates
Pipe grade up	Sector 7: 36,890,000 ₩ = 26,350 ₩×14,000 m Sector 8: 42,160,000 ₩ = 26,350 ₩×16,000 m

Table 7. Cost and benefit estimates for RRM on sector 8

No. of RRM	CRRMs	Disc. rate	ΔPLL	ICAF	PF
1	105,948,800		2.31E-02	1.53E+08	0.076
2	125,038,758	74,634,462	7.39E-04	5.64E+09 (3.37E+09)	2.821 (1.684)
3	230,987,558		2.40E-02	3.21E+08	0.160
4	240,000,000		1.82E-02	4.40E+08	0.220
5	393,412,800		2.60E-02	5.05E+08	0.252
6	11,000,000		5.41E-04	6.77E+08	0.339
7	481,987,558		2.66E-02	6.04E+08	0.302
8	40,000,000		7.61E-03	1.75E+08	0.088
9	42,160,000		2.57E-02	5.48E+08	0.027
10	521,987,558		3.12E-02	5.47E+08	0.273

* ()는 3.5%로 할인하는 경우

1번 조치를 이행하는 것이 타당한 것으로 확인되었다.

7번 조치(C/S 15t+ILI+CCTV+DCVG)는 위험감소 효과가 63%로서 두 번째로 효과가 높았고 PF는 7구간과 8구간이 각각 1.399와 0.302로서 합리적인 것

로 판단되었다.

8번 조치(MOV)는 위험감소 효과가 15%이며, PF가 0.088로서 비용-효과적인 위험감소조치로 판단되었다.

Table 8. Cost and benefit estimates for RRM on sector 7

No. of RRM	CRRMs	Disc. rate	△PLL	ICAF	PF
1	92,705,200		4.73E-03	6.53E+08	0.326
2	125,038,758	74,634,462	7.39E-04	5.64E+09	2.821
				(3.37E+09)	(1.684)
3	217,743,958		4.92E-03	1.48E+09	0.738
4	240,000,000		3.72E-03	2.15E+09	1.075
5	344,236,200		5.31E-03	2.16E+09	1.080
6	10,000,000		1.23E-04	2.70E+09	1.350
7	457,743,984		5.45E-03	2.80E+09	1.399
8	40,000,000		7.61E-03	1.75E+08	0.088
9	36,890,000		5.23E-03	2.35E+08	0.117
10	497,743,984		6.69E-03	2.43E+09	1.215

* ()는 3.5%로 할인하는 경우

9번 조치(Pipe up-grade)는 61 %의 위험감소효과를 가져오는 것으로 평가되었으며, PF는 0.027(8 구간)과 0.117(7 구간)로서 타공사를 방지하는 조치(1, 4, 5번 조치)보다 더 비용-효과적일 뿐만 아니라 위험감소 측면에서도 뛰어난 것을 알 수 있었다. 따라서 배관의 설계단계에서 배관의 등급을 높여 설치하는 것이 위험감감 효과가 큰 것으로 판단되었다

조치 10번(C/S 15t+ILI+CCTV+DCVG+ MOV)의 경우 위험감소효과가 75 %로 가장 높게 나타났지만, 위험감소조치 후의 위험은 여전히 F-N 곡선의 조건부허용영역에 위치(Fig. 3 참고)하고 있었다. 조치 10번에 대한 비용-편익분석 결과, PF가 8 구간의 경우에는 0.273으로 비용-효과적임을 알 수 있었으며, 7 구간의 경우에는 1.215로 본 논문에서 제시한 PF보다 작아서 그 조치는 합리적으로 실행가능함을 확인하였다. 따라서 본 논문의 연구대상 공급배관의 위험성평가 및 비용-편익분석 결과, 위험감소효과가 가장 크고 합리적으로 실행가능한 위험감소조치로 10번 조치를 선정하였다.

IV. 결론

본 논문에서 가장 효과적이고 합리적인 위험감소조치의 선정방법은 위험성평가 결과 도출한 위험감소조치들을 연구대상 도시가스 고압배관에 적용하고 위험성평가를 재실시하여 위험감소효과가 가장 큰 조치를 선택하는 것으로 하되, 비용-편익분석 결과

합리적이 아닌 것으로 판단되는 경우에는 차선의 조치를 선정하는 것으로 하였다. 위험감소조치를 적용하여 위험성 평가를 다시 실시한 결과, Table 3 과 같이 조치 10이 위험감소효과가 75 %로 가장 컸고 위험감소조치별 비용-편익 분석 결과 Table 7과 Table 8에서 보는 바와 같이 PF는 1.215와 0.283으로 본 논문에서 제시한 PF보다 작으므로 합리적으로 실행가능한 것으로 판단되었다. 따라서 조치 10을 본 논문의 연구대상 배관의 위험감소조치로 선정하였다.

본 논문에서 이용한 비용-편익 분석 방법은 배관 이외의 다른 가스시설에 대한 위험감소조치의 합리적인 이행여부를 판단하고자 하는 경우에도 적용가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] John Spouge, A Guide To Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations, DNV Technica, 1999.
- [2] 류영돈, 광채식, 김종모, 이경식, 이수경, "도시가스 고압배관 설치를위한 비용-편익분석에 관한 연구", 한국가스학회 추계학술발표회 논문집, pp. 113-119, 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] HSE, "Reducing risks, protecting people", <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf>.
- [6] HSE, Cost Benefit Analysis(CBA) checklist, <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpcheck.htm>.
- [7] Revised Departmental Guidance, "Treatment of the Value of Preventing Fatalities and Injuries in Comparing Economic Analyses", (2007).
- [8] NORSOK Standard, Z-013, Risk and Emergency Preparedness Analysis, Rev. 2, (2001).
- [9] Francois Bellavance, Georges Dionne, and Martin Lebeau, "The Value of a Statistical Life: A Meta-Analysis with a Mixed Effects Regression Model", Canada Research Chair in Risk Management Working paper 06-12, (2007).