



## 도시가스 고압배관의 내부검사(ILI) 이행시기 결정을 위한 비용-편익 분석

†류영돈 · 김영섭 · 이수경\*

한국가스안전공사, \*서울과학기술대학교

(2010년 6월 29일 접수, 2011년 2월 8일 수정, 2011년 2월 8일 채택)

### Cost-Benefit Analysis for Determination of the Time to Implement In-line Inspection(ILI) 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 June 29, 2010; Revised February 8, 2011; Accepted February 8, 2011)

#### 요 약

본 논문에서는 정량적 위험성 평가 결과 위험경감조치로 제시한 ILI (In-line inspection, 배관내부검사)가 합리적으로 이행가능함을 판정하기 위해 비용-편익 분석을 실시하였으며, 비용-편익 분석을 통해 ILI의 합리적인 이행시기를 결정하였다. 본 논문에서 편익의 산정은 인간의 생명 가치를 측정하는 VPF (Value of Preventing a Fatality; 사망자를 막는 가치)를 이용하였으며, 국내의 도시가스 고압배관의 위험경감조치에 대한 비용-편익 분석에 적절한 VPF 값은 20억원으로 하였다. 두 개의 사례연구 결과 위험경감조치로 제시된 ILI의 이행시기는 13년을 주기로 2회 (13년 및 25년) 또는 15년이 되는 해 1회 실시하는 것이 가장 합리적임을 알 수 있었다.

**Abstract** - Cost-benefit analysis (CBA) has been performed in order to decide whether the ILI (in-line inspection) suggested as risk mitigation measure (RMM) from quantitative risk assessment is reasonably practicable. As a result of CBA, we could find out the reasonable intervals of implementation of ILI. In order to assess the benefit, value of preventing a fatality (VPF), which measures value of human life, has been used. The adequate VPF figure of high pressure urban gas pipelines for CBA used in this paper is two billion won. As a result of 2 case studies, we found that the most reasonable intervals of ILI suggested as RMM were 13 years or 15 years.

**Key words** : cost-benefit analysis, risk mitigation measures, high pressure urban gas pipelines, ILI (in-line inspection)

#### 1. 서 론

도시가스사업법령에 따라 일반도시가스사업자는 고압배관을 설치하려는 경우 한국가스안전공사로

부터 안전성평가를 받고 그 결과에 따라 배관을 설치하거나 안전관리 조치를 하도록 하고 있으며[1], 위험성 평가 지침에 따라 위험성평가 결과 계산한 위험이 조건부허용영역에 들어오는 경우에는 위험을 낮추기 위한 안전조치(또는 위험경감조치)를 이행하도록 하고 있다[2]. 위험경감조치의 이행 여부를 결정하는 의사결정방법(decision making method)은 주관

†주저자:rydon@kgs.or.kr

적인 방법(subjective approach), 기준에 기초한 방법(code-based approach), 위험기준방법(risk criteria approach), 비용-편익 분석 방법(cost-benefit analysis approach)이 있는데, 현대의 QRA(정량적 위험성 평가)에서는 종종 위험기준(risk criteria)과 비용-편익분석을 조합한 의사결정을 하고 있다[3].

본 논문에서는 비용-편익 분석을 통하여 위험경감 조치로 제시한 ILI(In-line inspection, 배관내부검사)의 합리적인 이행시기를 결정하였다. 비용-편익분석에서 편익의 산정은 인간의 생명 가치를 측정하는 VPF(Value of Preventing a Fatality; 사망자를 막는 가치)를 이용하였다.

## II. 생명의 가치화

생명의 가치(valuation of life)와 관련된 의사결정의 명쾌한 사용은 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[3]. 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 보상으로서 지불하는 비용을 말하는 것은 아니다[4]. 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 방식으로서 비용-편익분석에서 많이 사용되는 값이다[4,5].

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[3].

미국의 DOT와 영국의 HSE는 비용-편익분석을 하는 경우 VPF로 각각 \$5.8m(2007년 기준)와 £ 1.312m(2003년 기준)를 사용하도록 권고하고 있으나[5,6], 국내에는 도시가스 고압배관의 위험경감조치에 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 산정하였다. 즉, 영국과 미국, 그리고 한국의 VPF 값 등을 조사하고, PPP와 CPI를 적용하여 2009년 7월 기준 한국의 화폐단위로 변환한 후 적정한 VPF 값을 산정하였다(Table 1. 참고) 미국의 DOT에서 제시한 VPF(약 47억원)는 국내에 적용하기에 지나치게 큰 값으로 보이며, 캐나다에서 한국의 VPF로 계산한 값(1985)은 산정시기가 오래되고 다른 나라의 값과 비

Table 1. Proper VPF estimates

Classification	VPF	2009.7 (₩)	Remark
DOT (2007), USA	\$5,800,000 (2007)	4,690,362,595	PPP <sup>4)</sup> & CPI <sup>5)</sup>
HSE & DfT (2004), UK	£ 1,312,260 (2003)	1,997,208,699	PPP & CPI
Road Traffic Authority (2007), Korea	₩411,707,100 (2006) <sup>1)</sup>	2,083,237,420	(1:3.6) <sup>6)</sup> & CPI
		2,058,535,500	Heinrich Method (1:4)
Hawang Mt. fire compensation cost (2009), Korea	₩440,000,000~700,000,000 <sup>2)</sup>	2,200,000,000 ~3,500,000,000	Heinrich Method (1:4)
Francois Bellavance (2007), Canadian paper	\$1,552,525 <sup>3)</sup> (2000)	1,630,556,614	PPP & CPI

- 1) 교통관리공단에서 제공한 비용은 2006년도 교통사고 1인당 순평균 추계비용으로 위자료, 장례비, 생산손실, 의료비 등을 합한 금액이며, 미국의 DOT(Department of transportation)와 영국의 DfT(Department of Transport)에서 제공하는 VPF에서 Human Cost 등을 무시한 비용임.
- 2) 화왕산 참사 사망보상금 : 위로금, 특별위로금, 호프만식 계산법으로 산정한 개인별 보상금 등을 포함
- 3) 캐나다의 보고서에서 PPP와 CPI를 이용하여 한국의 VPF 값을 계산한 값임.
- 4) PPP(Purchasing Power Parity, 구매력평가지수) 국가간의 통화 교환비율로 OECD 등에서 제공
- 5) CPI(Consumer Product Index, 소비자 물가지수) 측정 시기가 다른 물가의 변환 지수로 사용
- 6) 에너지경제연구원에서 산정한 도시가스 사고사례를 통한 직접비 대 간접비 평균 비율

교하여 너무 작은 것으로 보인다. 따라서 본 논문에서는 국내의 도시가스 고압배관의 안전조치에 대한 비용-편익분석에 적절한 VPF 값으로 영국의 DfT에서 제공(2003.6월)한 VPF 값(약 20억원)을 사용하였다.

### III. 비용-편익 분석

ALARP (as low as reasonably practicable)의 원리에 따르면 위험경감조치 결과, 위험이 허용영역에 해당하는 경우 그 위험은 ALARP에 해당하므로 그 조치를 이행하고 사업을 진행하게 되며, 위험이 ALARP의 영역에 해당하고, 비용-편익분석 결과 위험경감조치에 사용된 비용이 감소된 위험(이득)에 비해 상대적으로 많이 들지 않는(Not gross disproportion) 경우에는 반드시 그 위험경감조치를 이행하고 사업을 진행하여야 한다. 그러나 위험경감조치결과 위험이 ALARP의 영역에 해당하지만 비용-편익분석 결과, 위험경감조치에 사용된 비용이 감소된 위험(이득)에 비해 상대적으로 많은 것으로 판단된다면 그 조치는 이행하지 않아도 된다[7].

본 논문에서는 위험감소조치에 대한 비용-편익분석을 위해 식(2)를 사용하였으며, 이 식은 식(1)의 비용/편익 비율로부터 유도하였다. 영국의 산업안전보건청(HSE; Health and Safety Executive)에서는 PF의 상한 값을 10으로 제시하고 있으며, 노르웨이의 NORSOK 표준에서는 약 2.5의 값을 사용하였다[7,8]. 본 논문에서는 적절한 PF 값으로 영국의 가스안전규칙에서 채택하고 있는 1.7을 사용하여 비용-편익분석을 실시하였다.

$$PF = \frac{\text{Cost}}{\text{Benefit}} \quad (1)$$

$$PF = \frac{\text{ICAF [사망자를 막는데 들어간 비용]}}{\text{VPF [사망자1인을 예방하는비용]}} \quad (2)$$

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

여기서, L은 배관의 수명, C<sub>r mms</sub>는 위험경감조치(risk mitigation measures, 개선조치) 비용, ΔPLL은 위험경감조치 전·후의 잠재적 사망자수의 변화(Change in PLL following implementation of the measure), ICAF는 위험경감조치를 통하여 사망자를 막는 데 들어간 비용(implied cost of averting fatalities), N은 사망자수, f<sub>1</sub>은 위험경감조치 전 사고발생빈도, f<sub>2</sub>는 위험경감조치 후의 사고 발생 빈도를 나타낸다.

### IV. 배관내부검사(ILI) 이행시기 결정

위험경감조치의 이행시기 결정을 위한 사례연구 대상 배관은 A와 B 집단에너지 사업자(CES; Community Energy Supply System) 배관으로 관경, 공급압력 및 두께 등은 Table 2와 같다.

A 집단에너지 사업자의 위험성 평가결과, 배관의 사회적위험이 Fig. 1과 같이 조건부허용영역에 해당하므로, 배관의 설치는 허용되되 위험을 낮추기 위한 위험경감조치로 ILI를 하도록 제안하였다. ILI의 이행 비용은 견적서 (Table 3 참고) 등을 통해 계산한 결과 아래와 같이 약 1억 2천 6백 8십 만원으로 산출되었다.

Table 2. Proper VPF estimates

Classification	A CES	B CES
Pipe diameter	300A (12")	500A (20")
Target pipeline length	3,473 m	7.2 km
Service Pressure	3 MPa	3 MPa
Wall thickness	10.3 mm	12.7 mm

Table 3. Intelligence pig operation cost

Pipeline	Cost of ILI for natural gas pipeline			
	Low estimate		High estimate	
	\$ per mi	\$ per km	\$ per mi	\$ per km
Cleaning	500	313	500	313
Inspection	2,000	1,250	3,500	2,150
Operator oversight	100	62	100	62
Loss of throughput	600	375	1,200	750
Total	\$ 3,200	\$2,000	\$5,300	\$3,300

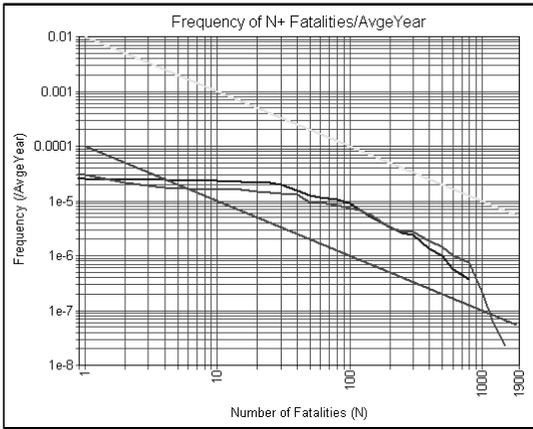


Fig. 1. F-N curve for A CES pipelines[9].

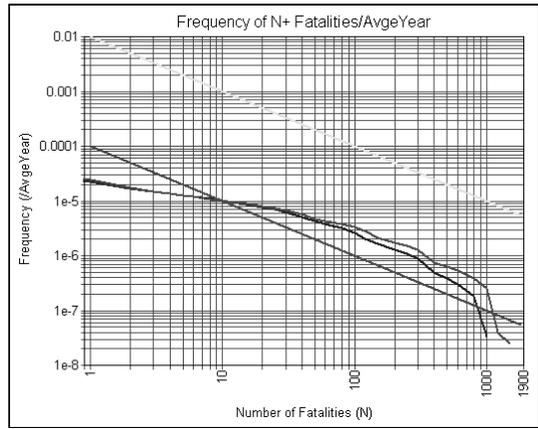


Fig. 2. F-N Curve for A CES's after RRM (ILI)[9].

Launcher/Receiver 설치비용 = 112,168,758원  
 운전비용=3,300\$/km×3.4 km×1,300 ₩/\$  
 = ₩14,586,000원(Table 3 참고)

ILI 이행 비용=Launcher/Receiver 설치비용 + 운전  
 비용 = 126,754,758 원

주간 위험도(사망자수×누적 빈도)는 위험경감 조치를 하기 전  $2.25 \times 10^{-3}/\text{year}$ 에서 위험경감조치(ILI) 후에는  $7.2 \times 10^{-4}/\text{year}$ 로 감소되었고, 야간의 위험도는 위험경감조치 전  $1.94 \times 10^{-3}/\text{year}$ 에서 위험경감조치 후  $9.4 \times 10^{-4}/\text{year}$ 로 감소되었다.

배관의 설계 년수를 30년으로 하고 있으므로, 배관의 잔존수명(L)을 30년으로 보고, 할인율과 인플레이션을 무시하였을 때 주간 경우 사망자를 피하는데 수반된 비용(ICAF)은 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$ICAF = \frac{126,754,758\text{원}}{30\text{년} \times (225 - 72) \times 10^{-5}} = 2,761,541,569\text{원}$$

본 논문에서는 VPF를 20억원으로 제시하였으므로,

$$PF = \frac{ICAF}{VPF} = \frac{2,761,541,569\text{원}}{2,000,000,000\text{원}} = 1.381\text{이 된다.}$$

야간의 경우에도 주간과 같은 방법으로 비용-편익 분석을 하면 다음과 같이 계산된다.

$$PF = \frac{ICAF}{VPF} = \frac{4,225,158,600\text{원}}{2,000,000,000\text{원}} = 2.113$$

야간의 경우 PF 값이 2.113으로 본 논문에서 제시

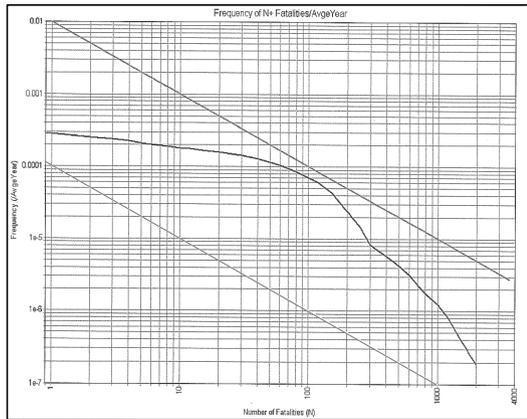
한 값(1.7)보다 크므로 제안된 위험경감조치(ILI)를 배관설치 시 이행하는 것은 합리적이지 않은 것으로 판단되었다. 미국과 영국 등에서는 ILI를 10년에서 15년 주기로 실시하고 있으므로 국내의 도시가스 고압 배관에 대하여도 ILI의 실시 주기를 정할 필요가 있다. 본 논문에서는 ILI의 합리적인 이행시기를 정하기 위하여 Table 4와 같이 이행주기를 달리하는 경우에 대하여 각각 비용-편익분석을 실시하였다. ILI를 위한 I-Pig (intelligence pig) Launcher와 Receiver는 ILI를 처음 실시하는 때에 설치하기로 하고, HSE에서 권고하는 할인율 3.5%를 적용하여 Table 4와 같이 PF를 다시 산정하였다.

Table 4로부터 ILI를 7년 이후에 실시하는 경우에는 PF가 본 논문에서 제시한 값(1.7)보다 작으므로 그 조치는 합리적으로 이행 가능한 것으로 확인하였고, ILI 실시 주기를 10년 주기 또는 13년 주기로 2회 실시하는 경우에도 그 조치는 합리적인 것임을 알 수 있었다. 그러나 7년 주기 또는 8년 주기로 ILI를 3회 실시하는 경우에는 PF가 본 논문에서 제시한 값보다 크므로 합리적이지 않은 것으로 분석되었다. 아울러, 위험성 평가결과 보고서에 따라 15년 이후에 ILI를 실시하는 경우 PF가 1.261로 그 조치는 합리적인 것으로 확인하였으며, 15년 주기로 2회 실시(15년, 30년)하는 경우에도 PF가 1.348로 합리적인 것으로 파악되었다. 다만 배관수명을 30년으로 설계하였으므로 30년차에 ILI를 실시하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 A 집단에너지 사업자에 대한 사례연구의 경우 위험경감조치로 제시된 ILI는 13년을 주기로 하여 2회(13년, 25년) 실시하는 것이 가장합리적인 방법임을 알 수 있었다.

B 집단에너지 사업자의 위험성 평가결과, 배관의 사회적위험이 Fig. 3과 같이 조건부허용영역에 해당

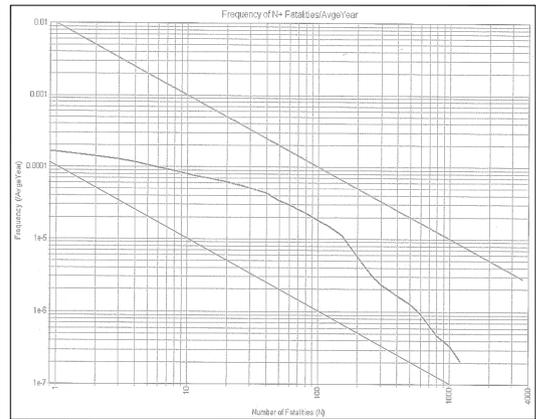
**Table 4.** PF estimates for A CES pipelines

Classification	Time of RRM	C <sub>RMM</sub>	ICAF	PF
Before discount	first year	126,754,758	4,225,158,600	2.113
	6th year	103,115,077	3,437,169,243	1.719
After discount (Discount rate; 3.5%)	7th year	99,628,094	3,320,936,467	1.660
	8th year	96,259,028	3,208,634,268	1.604
	10th year	89,858,833	2,995,294,422	1.498
	13th year	81,047,519	2,701,583,956	1.351
	15th year	75,658,726	2,521,957,531	1.261
	16th year	73,100,218	2,436,673,943	1.218
	20th year	63,702,617	2,123,420,569	1.062
	21th year	61,548,422	2,051,614,076	1.026
	24th year	55,513,151	1,850,438,351	0.925
	25th year	53,635,894	1,787,863,141	0.894
	10th & 20th year	97,189,259	3,239,641,955	1.620
	13th & 25th year	87,219,541	2,907,318,022	1.454
	15th & 30th year	80,555,403	2,695,180,094	1.348
	7th, 14th & 21st year	115,721,596	3,857,386,546	1.929
	8th, 16th, & 24th year	111,058,903	3,701,963,440	1.851



**Fig. 3.** F-N curve for B CES pipelines[10].

하므로, 배관의 설치에 허용하되 위험을 낮추기 위한 위험경감조치로 배관의 전구간에 대하여 ILI를 실시하고, 전기방식시설에 대한 원격감시시스템 및 철근 콘크리트 방호구조물 등을 설치하도록 권고하였다. ILI의 합리적인 이행시기 산정을 위해 비용-편익분석을 할 때 비용산정은 사업자의 견적서 등을 이용하여 계산하였으며, 안전조치 전·후의 편익은 위험경감조치(ILI) 전·후의 위험도 감소량을 이용하였다(Fig. 3, 4 참고).



**Fig. 4.** F-N curve for B CES's after RRM[10].

Table 5와 같이 할인율 3.5%를 이용하여 비용을 계산하고 PF를 산정한 결과, ILI는 10년 이후에 실시하는 경우 PF가 본 논문에서 제시한 값(1.7)보다 작으므로 그 조치는 합리적으로 이행 가능한 것으로 확인하였다. 또한 15년 주기로 2회 실시(15년, 30년)하는 경우에도 PF가 1.69로 합리적인 것으로 파악되었다. 다만 배관수명을 30년으로 하고 30년차에 ILI를 실시하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 사례연구 2의 경우에는 콘크리트 방호구

**Table 5.** PF estimates for B CES pipelines

Classification	Time of RRM	CRMM	ICAF	PF
Before discount	first year	1,214,056,758	3,515,947,750	1.758
	6th year	1,187,376,765	3,438,681,624	1.719
After discount (Discount rate 3.5%)	7th year	1,183,441,319	3,427,284,444	1.714
	8th year	1,179,638,955	3,416,272,677	1.708
	10th year	1,172,415,627	3,395,353,684	1.698
	13th year	1,162,471,085	3,366,553,968	1.683
	15th year	1,156,389,237	3,348,940,738	1.674
	16th year	1,153,501,678	3,340,578,274	1.670
	20th year	1,142,895,446	3,309,862,282	1.655
	21th year	1,140,464,199	3,302,821,312	1.651
	24th year	1,133,652,728	3,283,095,070	1.642
	25th year	1,131,534,036	3,276,959,271	1.638
	10th & 20th year	1,187,938,882	3,440,309,534	1.720
	13th & 25th year	1,175,541,249	3,404,405,588	1.702
	15th & 30th year	1,167,393,964	3,380,810,786	1.690
	7th, 14th & 21st year	1,217,521,677	3,525,982,267	1.763
	8th, 16th, & 24th year	1,210,979,867	3,507,036,975	1.754

조물, ILI를 위한 부지확보 및 전기방식 원격감시장치 등의 위험경감조치는 배관을 설치할 때 실시하고, ILI는 배관설치 후 15년이 되는 해에 실시하는 것이 가장합리적인 방법임을 알 수 있었다.

### V. 결론

본 논문에서는 위험성평가 결과 제시한 위험경감조치가 합리적으로 이행가능한지를 판단하기 위하여 ALARP의 원리와 PF를 이용한 비용-편익분석을 실시하였으며, 비용-편익분석을 통하여 위험경감조치로 제시한 ILI의 합리적인 이행주기를 결정하였다. 위험경감조치로 제시된 ILI는 13년을 주기로 하여 2회(13년 및 25년) 또는 15년이 되는 해 1회 실시하는 것이 가장합리적인 방법임을 알 수 있었다.

위험경감조치의 합리적인 이행여부를 판단할 때 본 논문에서 이용한 비용-편익분석 방법은 도시가스 고압배관에 대해서 뿐만 아니라 다른 가스시설에 대해서도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

[1] 한국가스안전공사, 도시가스사업법, (2008).  
 [2] 한국가스안전공사, 2000-11 도시가스고압배관의 안전성평가 지침, (2008).

[3] John Spouge, A Guide To Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations, DNV Technica, (1999).  
 [4] HSE, Reducing risks, protecting people, <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf>.  
 [5] HSE, Cost Benefit Analysis(CBA) checklist, <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpccheck.htm>.  
 [6] Revised Departmental Guidance, "Treatment of the Value of Preventing Fatalities and Injuries in Preparing Economic Analyses", (2007).  
 [7] 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>  
 [8] NORSOK Standard, Z-013, Risk and Emergency Preparedness Analysis, Rev. 2, (2001).  
 [9] 한국가스안전공사, 도천관리소~수완에너지 집단 에너지사업 천연가스 공급배관 안전성평가 결과 보고서, (2008).  
 [10] 한국가스안전공사, 목감관리소~광명열병합발전소 CES 공급배관 안전성평가 결과 보고서, (2009).  
 [11] Francois Bellavance, Geoges 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 Wor-

도시가스 고압배관의 내부검사(ILI) 이행시기 결정을 위한 비용-편익 분석

king paper 06-12, (2007).  
[12] Per-Olov JOHANSSON, "On the definition and estimation of the value of a statistical life", Depart-

mental Working Papers 2006-23, Department of Economics University of Milan Italy, (2006).