

정량적 위험성 평가에 의한 안전관리 투자의 비용-편익분석

- Cost-Benefit Analysis for Safety Management Cost using Quantitative Risk Analysis -

장 서 일 *

Jang Seo Il

조 지 훈 **

Cho Ji Hoon

김 태 옥 *

Kim Tae Ok

Abstract

The quantitative evaluation method of the safety management cost was suggested to prevent a gas accident as a major industrial accident. In a gas governor station, process risk assessments such as the fault tree analysis(FTA) and the consequence analysis were performed. Based on process risk assessments, potential accident costs were estimated and the cost-benefit analysis(CBA) was performed. From the cost-benefit analysis for five classification items of safety management cost, the order of the cost/benefit ratio was estimated.

1. 서 론

화학공업에서 발생하는 사고는 타 업종에 비해 발생빈도는 낮으나 사고강도가 높기 때문에 중대산업사고로 분류하고 있으며, 특히 가스산업에서 발생하는 사고는 사고강도가 매우 높다. 현재 국내의 경우 이와 같은 산업사고를 예방하기 위한 제도와 기술적 방안은 마련되어 있으나, 가스사고를 효율적으로 예방하기 위한 안전관리는 과학적인 분석이 없이 기업의 주관적인 판단에 의해 투자되고 있는 실정이다.

안전관리 투자효과를 분석·평가하는 방법인 비용-편익분석(Cost & Benefit Analysis, CBA)[1]은 사고예방을 위한 안전활동에서 투자의 의사결정 및 투자의 효율성 평가에

* 명지대학교 공과대학 화학공학과

** 한국산업안전공단 산업안전교육원

중요한 역할을 하고 있으나, 국내에서는 그 필요성을 인식하고 있음에도 불구하고 이에 관한 연구가 매우 미흡할 뿐만 아니라 수행방법을 잘 알지 못하여 일반화되지 못하고 있다.

특히, 비용-편익분석 방법을 안전관리 부문에 적용시키기 위해서는 안전관리 비용에 대한 편익을 측정하여 수치화 하여야 하는데, 가스산업과 같이 사고발생이 거의 없거나 사고에 의한 손실비 자료가 부족한 경우에는 편익을 산출하기가 용이하지 않다.

그러나 현재 기업에서 수행하고 있는 공정 위험성 평가 중에서 정성적 위험성 평가를 기초로 사고의 가능성 및 결과의 잠재적 충격을 정의하여 위험을 평가하는 정량적 위험성 평가는 위험성 감소에 대한 비용효과를 정량화 할 수 있다[2].

본 연구에서는 중대산업사고 중의 하나인 가스사고를 예방하기 위하여 정성적 위험성 평가에 의한 CBA 연구[3]에 이어 투자효과의 정량적 평가방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 LNG 공급설비를 대상으로 정량적 위험성 평가를 실시하여 사고로 인한 잠재재해 손실비와 편익을 추산하고, CBA를 실시하여 투자효과를 분석하였다.

2. 이 론

2-1. 정량적 위험성 평가

2-1-1. 결함수 분석

결함수 분석(Fault Tree Analysis, FTA)은 '공정실패의 원인이 될 수 있는 성분실패와 이들의 조합으로 여러 가지 설계에 대한 정량적인 비교와 매우 세부적으로 심각한 사고위험의 원인을 연구하는 방법으로, 시스템 고장(사고)을 발생시키는 원인들의 관계를 AND와 OR의 논리게이트 조합에 의해 나뭇가지 모양의 결함수(Fault Tree, FT)로 만들고, 이를 바탕으로 시스템의 고장확률을 산출함으로써 시스템의 신뢰도를 개선하는 정량적 고장해석과 신뢰성을 평가할 수 있다.

FTA는 결함에 대한 각각의 원인을 기호로써 연결하는데, 기호에는 사상(event) 기호와 게이트(gate) 기호가 있으며[4], 사상 발생확률 평가는 부울대수(boolean algebra)를 사용하여 FT를 수식으로 표현하거나 간소화한다.

2-2-2. 사고결과 분석

(1) 누출원모델

배관을 통한 압축성 가스누출에서 기상 누출흐름인지를 판별하기 위한 조건은 $P_v > P_1 > P_a$ 이다. 여기서 P_v 는 증기압, P_1 은 배관 압력, P_a 는 대기압이다. 또한 가스누출에서 $P_1 > P_{choked} > P_a$ 이면 음속흐름으로 판단한다[5].

$$\frac{P_{choked}}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 P_{choked} 는 최대누출속도에서 압력이고, k 는 열용량비[-]로 문헌[6]에 나타나 있으며, 통상 단원자 가스는 1.67, 2원자 가스는 1.4, 그리고 3원자 가스는 1.32를 사용하고 있고, 심사목적으로 사용하는 경우 API에서는 1.4를 적용한다[7].

이상기체 흐름에서 음속과 그렇지 않은 경우에 질량유속은 Dary 식을 적용하며 식 (2)와 같다[6].

$$\dot{m} = YA \sqrt{\frac{2g_c \rho_1 (P_1 - P_2)}{\sum K_f}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 \dot{m} 는 질량유속[kg/s], Y 는 가스팽창인자[-], A 는 누출공의 단면적[m²], ρ 는 밀도[kg/m³], K_f 는 excess head loss[-]이고, P_2 는 배출압력[Pa]이다.

식 (2)에서 K_f 는 배관의 경우 식 (3)을, 그리고 배관 부속품 및 배관의 입구와 출구에 대해서는 각각 Hooper의 2-K 방법[8]에 의한 식 (4)와 식 (5)를 사용한다.

$$K_f = \frac{4fL}{D} \dots\dots\dots (3)$$

$$K_f = \frac{K_1}{N_{Re}} + K_\infty \left(1 + \frac{25.4}{D_{mm}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$K_f = \frac{K_1}{N_{Re}} + K_\infty \dots\dots\dots (5)$$

여기서 f 는 Fanning 마찰계수(friction factor, -)로 식 (6)과 같으며, L 은 배관길이[m], D 는 배관직경[m], N_{Re} 는 Reynolds 수[-], 그리고 K_1 과 K_∞ 는 배관 부속품과 밸브 종류별 상수[-]이다. 특히, 식 (5)에서 배관입구에서 난류흐름인 경우는 통상 $K_1=160$ 과 $K_\infty=0.50$ 을 사용하고, Bord형 입구에서는 1.0을, 그리고 배관출구에서는 $K_1=0$ 과 $K_\infty=1.0$ 을 각각 사용한다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log_{10} \left(\frac{\epsilon/D}{3.7065} - \frac{5.0452 \log_{10} X}{N_{Re}} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$X = \frac{(\epsilon/D)^{1.1098}}{2.8257} + \left(\frac{7.149}{N_{Re}} \right)^{0.8981} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 ϵ 는 배관의 거칠음 인자[-]로써 재질에 따라 문헌[9]에 제시되어 있다.

또한 식 (2)에서 가스팽창인자, Y는 k와 $\sum K_f$ 에 의존하므로 upsteam Mach 수, Ma와의 관계식 (8)을 이용하여 시행오차(trial-and-error) 방법으로 산출한다.

$$\frac{k+1}{2} \ln \left[\frac{2Y}{(k+1) Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + k \sum K_f = 0 \dots\dots\dots (8)$$

그리고 압력비는

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1} = 1 - Ma \sqrt{\frac{2Y}{k+1}} \dots\dots\dots (9)$$

와 같으며, 최종적으로 Y는 다음 식으로부터 계산한다.

$$Y = Ma \sqrt{\frac{k \sum K_f}{2} \left(\frac{P_1}{P_1 - P_2} \right)} \dots\dots\dots (10)$$

(2) 분산모델

기체분산에 영향을 미치는 바람속도는 지상 10 m 높이의 속도를 기준으로 누출높이에 따라 Hanna 등[10]이 제시한 식 (11)을 사용한다.

$$u_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \dots\dots\dots (11)$$

여기서 u_z 는 z 높이의 바람속도[m/s], u_{10} 은 10 m 높이의 바람속도[m/s], 그리고 지수 계수[-], p는 Pasquill 대기 안정도와 표면 거칠기의 함수이다.

증기누출의 확산평가에 가장 일반적으로 사용하는 Gaussian 분산모델에서 연속누출의 경우 분산된 증기농도는 누출속도, 대기조건, 누출높이, 그리고 누출지점으로부터 거리의 함수로 나타나며 평균 농도식은 다음 식과 같다[11].

$$\begin{aligned} \langle C \rangle (x, y, z) = & \frac{\dot{m}}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \dots (12) \end{aligned}$$

여기서 <C>는 평균농도[mg/m³], $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 각각 x,y,z 방향의 분산계수(m), H는 누출높이[m], x는 downwind 방향, y는 crosswind 방향, z는 지표면에서 높이[m]를 나타낸다.

(3) 증기운 폭발모델

개방공간 증기운 폭발의 영향을 평가하기 위해 제시된 모델 중에서 가장 널리 사용되는 TNT 당량모델에서 폭발에 의해 방출되는 에너지를 TNT 당량, W[kg]로 나타내면 식 (13)과 같다[12].

$$W = \frac{\eta M \Delta H_C}{\Delta H_{TNT}} \dots\dots\dots (13)$$

여기서 W는 TNT의 질량[kg], η 는 폭발계수[-], M은 가연성 누출물질의 질량[kg], ΔH_C 는 가연성 누출물질의 연소열[kJ/kg], ΔH_{TNT} 는 TNT의 연소열[kJ/kg]이다.

식 (13)에서 산출된 TNT 당량을 사용하여 식 (14)에 의해 환산거리, Z[-]를 산출하고 문헌[12]에 의해 관심거리, X[m]에서 과압[kPa]을 산출할 수 있다.

$$Z = \frac{X}{W^{1/3}} \dots\dots\dots (14)$$

(4) 폭발영향모델

Eisenberg 등[13]은 핵폭발 자료에 근거하여 직접적인 폭풍영향으로 인한 사람과 구조물의 상해정도를 Probit 모델로 제시하였는데, 구조물에 대한 Probit 모델은 구조물 손상의 경우

$$\text{Probit} = -23.8 + 2.92 \ln P^0 \dots\dots\dots (15)$$

와 같고, 유리파손의 경우는

$$\text{Probit} = -18.1 + 2.79 \ln P^0 \dots\dots\dots (16)$$

와 같다. 또한 Clancey[14]는 장치나 구조물에 미치는 피해정도를 판단도표로 제시하였고 probit와 probability[%]의 상관관계를 나타내었다.

2-2. 비용-편익 분석

비용-편익 분석은 사업 대안들에 대한 각각의 비용과 편익을 측정하고 비교·평가하여 최선의 대안을 도출하는 기법으로, 평가방법에는 순평균 수익률, 순현재 가치, 비용-편익 비율, 그리고 내부수익률이 있다[1]. 이 중에서 비용-편익 비율은 편익/비용이 높은 사업일수록 경제적 타당성이 높은 것으로 평가하며, 다년간에는 사회적 할인율을 적용하여 비율을 계산하는데, 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{B}{C} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \dots\dots\dots (17)$$

여기서 B_t 와 C_t 는 각각 t 년에서 이익과 비용, n 은 사업의 기간(연수), 그리고 r 은 사회적 할인율이다.

3. 위험성 평가 및 비용-편익분석

본 연구에서는 가스 공급기지를 대상공정으로 설정하고, 검토구간을 5개 구간으로 나누어 정성적 위험성 평가방법인 위험과 운전분석(Hazard & Operability Study, HAZOP)을 수행한 결과[3], 사고결과는 가스공급 중단과 가스누출이며, 사고원인은 기계적인 실패, 조업자 실수, 공정이탈, 외부 사고 등으로 분석되었다. 또한 현재 안전관리를 인력에 의한 안전관리, 자동적인 이상 감지 설비에 의한 기계적인 안전관리, 안전관리시스템 보호 및 유지, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리, 위험요소 대응에 대한 안전조치로 분류할 수 있었다. 이를 바탕으로 정량적 위험성 평가방법인 FTA와 사고결과 분석(Consequence Analysis, CA)을 실시하여 잠재재해 손실비를 추산하고, 안전관리 투자비에 대한 CBA를 실시하여 투자효과를 평가하였다.

3-1. 정량적 위험성 평가

3-1-1. 결합수 분석

사고결과 중에서 가스누출을 정상사상으로 하고, 대상공정의 조업 중에 발생할 수 있는 실패 요인을 정상상태와 비정상상태인 유지보수 오류로 구분하여 Fig. 1과 같이 7개 중간사상을 설정하여 FTA를 작성하였다. 이때 신뢰도 데이터는 IEEE[15]와 CCPS [16]의 자료를 적용하여 FTA 프로그램인 KwTree 4.8로 분석하였다. 또한 본 연구에서는 안전관리의 상호관계에 따라 사고결과에 미치는 효과가 달라질 수 있기 때문에 안전관리 분류를 기본사상에 포함시켜 안전관리를 조합하여 사고발생빈도를 각각 산출하였다.

FTA 분석에서 신뢰도 데이터는 낮은 값, 중간 값, 높은 값을 각각 적용하여 가스누출의 발생빈도를 평가한 결과, 각각 8.443×10^{-7} , 2.033×10^{-4} , 6.514×10^{-2} 횟수/년이었는데, 낮은 값과 높은 값은 대상공정의 위험도가 과소 또는 과대 평가될 수 있으므로 중간 값을 선택하여 안전관리를 조합한 31개의 항목에 대하여 7개 중간사상의 발생빈도를 산출하였으며, Table 1에 대표적인 예를 나타내었다.

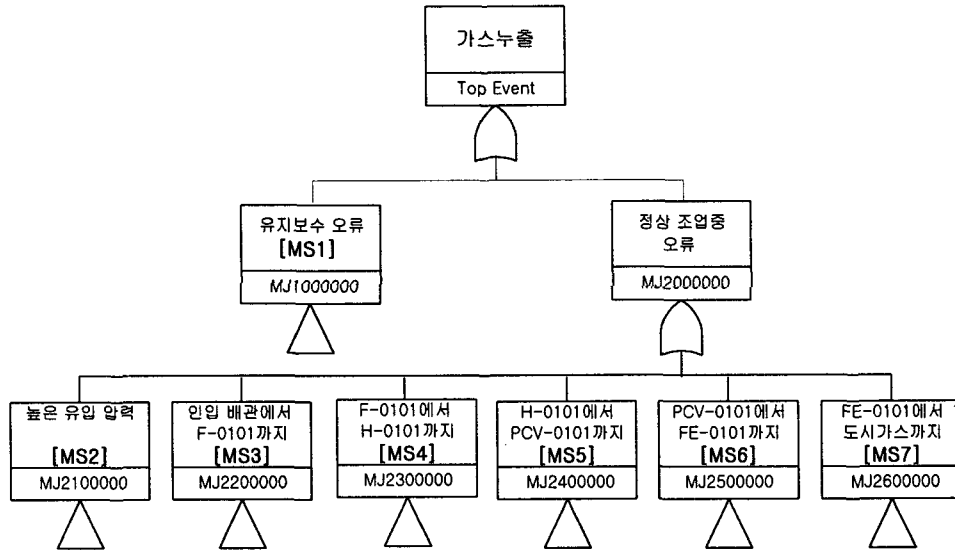


Fig. 1. Fault Tree for Top Event.

Table 1. Example of Frequencies for Intermediate Events with Combinations of Safety Managements

(unit : /yr)

Intermediate event No.	[MS1]	[MS2]	[MS3]	[MS4]	[MS5]	[MS6]	[MS7]
[All]	1.767×10^{-5}	1.046×10^{-5}	3.631×10^{-5}	6.699×10^{-11}	4.453×10^{-5}	2.505×10^{-6}	9.184×10^{-5}
[None]	3.535×10^{-2}	4.754×10^{-4}	2.183×10^{-2}	1.218×10^{-2}	3.820×10^{-2}	2.528×10^{-1}	4.580×10^{-2}
[A]	1.767×10^{-5}	4.754×10^{-4}	2.183×10^{-2}	1.218×10^{-2}	3.820×10^{-2}	2.528×10^{-1}	4.580×10^{-2}
[B]	3.535×10^{-2}	4.754×10^{-4}	1.661×10^{-3}	6.090×10^{-6}	2.042×10^{-3}	1.264×10^{-4}	4.195×10^{-3}
[C]	3.535×10^{-2}	4.754×10^{-4}	1.661×10^{-3}	6.090×10^{-6}	2.042×10^{-3}	2.277×10^{-1}	4.195×10^{-3}
[D]	3.535×10^{-2}	1.046×10^{-4}	4.803×10^{-3}	2.680×10^{-3}	8.405×10^{-3}	5.562×10^{-2}	1.008×10^{-2}
[E]	3.535×10^{-2}	4.754×10^{-5}	2.183×10^{-3}	1.218×10^{-3}	3.820×10^{-3}	2.528×10^{-2}	4.580×10^{-3}

- A : 위험요소 대응에 대한 안전조치
- B : 인력에 의한 안전관리
- C : 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리
- D : 안전관리시스템 보호 및 유지
- E : 자동적인 이상감지설비에 의한 기계적인 안전관리

3-1-2. 사고결과 분석

사고결과 분석은 가스 누출사고 중에서 가장 재산손실이 크게 발생될 수 있는 증기운 폭발사고로 가정하고, 7개 중간사상 대해 Table 2와 같은 공정조건에서 사고가 발생하는 누출시나리오를 설정하였다. 이때 누출공의 크기는 배관직경의 25 %로 가정하였고, LNG의 주성분인 메탄으로 결과분석하였다.

Table 2. Process Conditions of Scenarios

Scenario	Pressure[kg/cm ² G]	Temperature[°C]	Pipe ID[cm]
[MS1]	70.0	10	25.40
[MS2]	8.5	0	40.64
[MS3]	70.0	10	15.24
[MS4]	70.0	10	25.40
[MS5]	70.0	45	25.40
[MS6]	8.5	0	50.80
[MS7]	8.5	0	20.32

누출원모델에서 각 시나리오별 공정조건을 메탄의 증기압과 비교한 결과, 누출흐름은 기상이었고, 식 (1)에 의해 음속흐름임을 알 수 있었다. 또한 배관누출에서 식 (2)에 의해 각 시나리오별 누출가스의 질량유속을 산출하였다.

분산모델에서 대상공정의 누출높이는 지표면, 대기안정도는 D, 지역은 시골, 누출시간은 10분 이상으로 가정하고, 바람속도는 대상공정 지역의 평년 평균값인 1.5 m/s를 사용하여 각 시나리오별 관심농도의 분산거리를 식 (12)에 의해 산출하였다.

Table 3. Calculation Results of Source Term and Dispersion Models

Scenario	ṁ[kg/s]	Distance[m]		Duration time[s]	
		UFL	LFL	UFL	LFL
[MS1]	25.414	192.3	348.6	722.7	1310.2
[MS2]	9.174	112.5	200.7	422.9	754.0
[MS3]	8.657	109.2	194.5	410.3	731.1
[MS4]	25.414	192.3	348.6	722.7	1310.2
[MS5]	23.975	186.4	337.6	700.6	1268.8
[MS6]	14.482	142.9	256.4	536.9	963.6
[MS7]	2.177	53.7	94.4	201.7	354.6

또한 대상공정은 반경 350 m 이내에 산재되어 있기 때문에 분산모델에서 평가된 UFL과 LFL 범위까지 누출된 가스총량으로부터 TNT 당량모델을 사용하여 관심거리에서 과압과 충격량을 산출하였고, 식 (15)에 의해 각 시나리오별 probit를 계산하여 probability(%)를 평가하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Structural Damages of Scenarios at Various Distances

Scenario Distance	[MS1]		[MS2]		[MS3]		[MS4]		[MS5]		[MS6]		[MS7]	
	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%
100 m	13.454	100.0	10.014	100.0	9.833	100.0	13.454	100.0	13.248	100.0	11.503	100.0	6.086	86.0
150 m	10.811	100.0	7.735	99.7	7.579	99.5	10.811	100.0	10.619	100.0	9.036	100.0	4.351	16.5
200 m	9.082	100.0	6.315	91.0	6.175	88.0	9.082	100.0	8.907	99.9	7.479	99.3	3.234	4.0
250 m	7.854	99.8	5.311	62.0	5.182	57.0	7.854	99.8	7.693	99.6	6.383	91.5	2.410	0.0
300 m	6.926	97.5	4.544	32.0	4.421	28.0	6.926	97.5	6.776	96.0	5.553	71.0	1.748	0.0
350 m	6.158	88.0	3.899	13.0	3.782	11.0	6.158	87.0	6.016	84.0	4.860	44.5	1.155	0.0

3-2. 비용 산출

3-2-1. 안전관리 투자비

대상공정의 안전관리 투자비는 「도시가스안전관리기준통합고시」상의 19개 안전관리 투자항목대로 시행되고 있다. 그러나 안전관리 투자비를 항목별로 비용-편익분석을 실시하기에는 안전관리 투자비 항목이 안전성 확보에 기여하는 요소 및 정도가 서로 보완적인 성격을 띄고 있기 때문에, 본 연구에서는 안전관리 투자비 항목들을 성격에 따라 HAZOP에서 분류된 총 5개 항목으로 안전관리 투자비를 산출하였다. 그 결과, 인력에 의한 안전관리 비용은 166,533 천원, 자동적인 이상 감지 설비에 의한 기계적인 안전관리 비용은 10,402 천원, 안전관리시스템 보호 및 유지비용은 12,848 천원, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리 비용은 229,369 천원, 그리고 위험요소 대응에 대한 안전조치 비용은 37,125 천원이었다.

3-2-2. 잠재재해 손실비

각 사고 시나리오에 대한 재해손실비는 350 m를 기준으로 관심거리의 면적비를 산출하여 대상공정의 총 재산 평가비와 거리별 폭발영향을 곱하여 관심거리내의 구조물의 손상금액으로 산출한 결과, 각 시나리오, 즉 [MS1]~[MS7]별 재해 손실비는 각각 3,817,285 천원, 2,116,845 천원, 2,005,923 천원, 3,806,759 천원, 3,759,799 천원, 3,058,961 천원, 367,989 천원으로 최대 약 38억원에서 최소 약 3억7천만원이었다.

또한 안전관리 조합에 대한 잠재재해 손실비는 Table 1과 같은 안전관리 조합별 중간사상의 발생빈도와 Table 5의 재해 손실비를 곱하여 산출하였으며, Table 6에 대표적인 예를 나타내었다. 그 결과, 최소 잠재재해 손실비는 안전관리가 모두 있는 경우로 약 37만원이었고, 최대 잠재재해 손실비는 안전관리가 모두 없는 경우로 약 116천만원이었다.

Table 6. Example of Potential Accident Cost for Various Combinations of Safety Managements

(unit : Won/yr)

Intermediate event No.	[MS1]	[MS2]	[MS3]	[MS4]	[MS5]	[MS6]	[MS7]
[All]	67,451	22,142	72,835	0	167,424	7,663	33,796
[None]	134,941,016	1,006,348	43,789,289	46,366,327	143,624,329	773,305,347	16,853,879
[A]	67,451	1,006,348	43,789,289	46,366,327	143,624,329	773,305,347	16,853,879
[B]	134,941,016	1,006,348	3,331,837	23,183	7,677,510	386,653	1,543,712
[C]	134,941,016	1,006,348	3,331,837	23,183	7,677,510	696,525,425	1,543,712
[D]	134,941,016	221,422	9,634,446	10,202,115	31,601,112	170,139,412	3,709,325
[E]	134,941,016	100,635	4,378,929	4,636,633	14,362,433	77,330,535	1,685,388

3-3. 비용-편익분석

안전관리 투자비에 대한 비용-편익분석은 지출비용인 안전관리 투자비를 비용으로 하고, 각 안전관리 조합에 대한 편익을 산출된 최대 잠재재해 손실비에서 각 조합별 잠재재해 손실비의 차액으로 식 (17)에 의해 당해 년도를 기준으로 분석하였으며, Table 7에 대표적인 예를 나타내었다. 표에서와 같이 전체 안전관리 투자비에 대한 편익/비용은 2.5이었고, 안전관리 조합별 편익/비용은 [B]>[D,E]>[E]>[C]>[A,E] 순서이었으며, 각각의 값은 97.2, 43.1, 24.8, 24.5, 22.2이었다. 또한 전체 편익/비용보다 낮은 안전관리 조합은 [A]와 [A,C] 조합으로 각각 0.8과 1.7을 나타내었다.

Table 7. Example of Cost-Benefit Evaluations for Various Combinations of Safety Managements.

Combination	Cost(Won)	Benefit(Won)	Benefit/Cost
[All]	456,277,000	1,159,515,224	2.5
[None]	0	0	-
[A]	166,533,000	134,873,565	0.8
[B]	10,402,000	1,010,976,276	97.2
[C]	12,848,000	314,837,503	24.5
[D]	229,369,000	799,437,687	3.5
[E]	37,125,000	922,450,968	24.8

4. 결론

본 연구에서는 중대산업사고 중의 하나인 가스사고 예방을 위한 안전관리 투자의 정량적 평가방법을 제시하기 위해 정량적 위험성 평가(FTA, CA)에 의해 잠재재해 손실비를 산출하고, CBA에 의해 현재의 안전관리 투자효과를 분석하였다.

그 결과, 연구 대상공정의 위험도는 약 37만원/년으로 평가되었고, 전체 대상공정의

편익/비용은 인력에 의한 안전관리>안전관리시스템 보호 및 유지와 자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리>자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리>배관의 안전성 향상을 위한 안전관리>위험요소 대응에 대한 안전조치와 자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리의 순서를 나타내었다. 또한 전체 편익/비용보다 낮은 안전관리 조합은 위험요소 대응에 대한 안전조치, 위험요소 대응에 대한 안전조치와 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리 조합으로 이 중에서 위험요소 대응에 대한 안전조치는 편익/비용이 0.8로 1보다 낮게 평가되었다.

5. 참 고 문 헌

- [1] P. G. Sassone and W. A. Schaffer, "A Handbook; Cost-Benefit Analysis", Academic Pres, New York, 1978.
- [2] AIChE(American Institute of Chemical Engineers), "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", New York, 1999.
- [3] S. I. Jang, H. C. Lee, J. H. Cho, S. K. Oh, and T. O. Kim, "Cost and Benefit Analysis for Safety Management Cost by FMEA/HAZOP at Governor Station", J. of Safety Management & Science, Vol. 13, pp. 1-9, 2001.
- [4] AIChE, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", New York, 1985.
- [5] D. A. Crowl and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety Fundamentals and Applications", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1990.
- [6] Crane, "Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe", Technical Paper No. 410, New York, Crane Co., 1986.
- [7] API(American Petroleum Institute), "A Guidance Manual for Modeling Hypothetical Accidental Release to the Atmosphere", Washington D.C., 1996.
- [8] W. B. Hooper, "The Two-K Method Predicts Head Losses in Pipe Fittings", Chemical Engineering, August 24, pp. 96-100, 1981.
- [9] O. Levenspiel, "Engineering Flow and Heat Exchange", Plenum Press, New York, 1984.
- [10] S. R. Hanna, G. A. Briggs, and R. P. Jr. Hosker, "Handbook on Atmospheric Diffusion", Oak Ridge, TN. : Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, DOE/TIC 11223, 1982.
- [11] D. B. Turner, "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", Cincinnati, OH : U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1970.
- [12] F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries", 2nd Ed., Butterworths, London, 1996.
- [13] N. A. Eisenberg, C. J. Lynch, and R. J. Breeding, "Vulnerability Model : A

Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills", U.S. Coast Guard, CG-D-136-75 and NTIS AD-015-245, 1975.

[14] V. J. Clancey, "Diagnostic Features of Explosion Damage", 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland, 1972.

[15] IEEE(Institute of Electrical & Electronic Engineers) std-500, 1984.

[16] Center for Chemical Process Safety(CCPS)/AIChE, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", New York(1989).

저 자 소 개

장 서 일 : 명지대학교 가스안전센터 연구원(공학박사), 관심분야는 공정 위험성 평가 및 안전관리 비용-편익 분석

조 지 훈 : 한국산업안전공단 산업안전교육원 교수(공학박사), 관심분야는 공정 위험성 평가, 비용-편익분석 및 전문가 시스템

김 태 욱 : 명지대학교 화학공학과 교수(공학박사)/명지대학교 공과대학장/가스안전센터 소장, 관심분야는 가스안전 및 공정 위험성 평가