

가스 공급기지에서 FMEA/HAZOP에 의한 안전관리 비용-편익분석

- Cost and Benefit Analysis for Safety Management Cost by
FMEA/HAZOP at Governor Station -

장 서 일*

Jang Seo Il

이 현 창*

Lee Hern Chang

조 지 훈**

Cho Ji Hoon

오 신 규***

Oh Shin Kyu

김 태 옥*

Kim Tae Ok

Abstract

Cost-benefit analysis was investigated to propose the analysis method of the effect of investment and the optimum investment level of safety management cost for preventing gas accident in the B governor station.

From five classifications of safety management costs consisting of cost items with similar characters and potential accident costs calculated by risk assessments (FMEA/HAZOP), we found that the order of the benefit(the reduction cost of the potential accident cost) was the instrument increase and repair cost > the safety checking and inspection cost > the labor and training cost > the safety equipment and corresponding cost > the research and development cost. As the benefit was increased with increasing the investment cost, the effect of investment was increased with decreasing the investment cost. As a result, the optimum safety management cost was estimated and the investment level was analyzed by the model of optimum investment level.

* 명지대학교 공과대학 화학공학과

** 한국산업안전공단 산업안전교육원

*** 한국가스공사 연구개발원

1. 서 론

전 세계적으로 기업의 활동규모가 커지고 활동범위도 다양해짐에 따라 안전·보건 관리의 실패에 따른 손실비용과 이에 따른 기회비용은 점차적으로 증가하고 있다. 노동부에서 발표한 통계자료에 의하면 우리 나라의 2000년 산재보상금 지급액(경제적 직접 손실액)은 1조 4,562억원이었고, 하인리히 법칙[1]에 따른 직접비 대 간접비의 비율(1:4)을 적용하여 추산한 총 경제적 손실액은 7조 2,813억원으로 전년 대비 14.3%가 증가한 것으로 나타났다[2].

산업사고 중에서 가스사고는 일반사고에 비해 발생빈도가 매우 낮으나, 사고발생 시 엄청난 물질·인적 피해를 일으킬 뿐만 아니라 사고강도가 다른 산업사고보다 매우 높아서 일반적으로 거대위험(catastrophic risk) 또는 집적위험(accumulation risk)으로 분류하고 있다[3].

이와 같은 가스사고를 예방하기 위하여 우리나라는 「고압가스안전관리법」, 「도시가스사업법」, 「액화석유가스의안전및사업관리법」을 제정하여 사업장에서의 안전의식을 고양시키고 안전투자를 유도하고 있다.

안전투자의 궁극적인 목적은 사고로 인한 인적·물질 손실을 방지하여 기업의 경쟁력을 제고시킴과 동시에 기업의 경영목적인 이윤을 극대화하는데 있으나, 안전투자비에 대한 투자효과를 정량적으로 분석·평가하는 방법은 현재까지 마련되어 있지 못한 실정일 뿐만 아니라 안전관리 투자비는 과학적인 분석없이 기업의 주관적인 판단에 의하여 결정되고 있는 실정이다.

안전관리 투자효과를 분석·평가하는 방법인 비용-편익분석(cost & benefit analysis, CBA)[4-7]은 사고예방을 위한 안전활동에서 투자의 의사결정 및 투자의 효율성 평가에 중요한 역할을 하고 있으나 국내에서는 그 필요성을 인식하고 있음에도 불구하고 이에 관한 연구가 매우 미흡할 뿐만 아니라 수행방법을 잘 알지 못하여 일반화되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 기업의 생산성 향상과 원가절감을 도모하기 위한 적정 안전관리 투자비의 산출방법과 안전관리 투자효과의 분석방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 가스 공급설비에 대하여 공정 위험성 평가방법 중에서 FMEA(Failure Mode Effect Analysis)[8]와 HAZOP(Hazard and Operability Study)[9,10]을 이용하여 사고로 인한 잠재재해 손실비와 편익을 산출하고 비용-편익분석을 실시하여 적정 안전관리 투자비 산출과 투자효과를 분석하였다.

2. 위험성 평가 및 비용 산출

가스산업은 가스의 생산, 저장, 공급설비가 전국적으로 산재되어 있어서 모든 공정을 대상으로 안전관리 투자효과를 분석하기에는 현실적으로 문제가 있으므로 가스 공급설비 중에서 B 공급기지를 대상으로 공정 위험성 평가를 실시하고 이를 바탕으로 편익을 산출하여 비용-편익분석에 의한 안전관리 투자효과를 정량적으로 분석·평가하였다.

2-1. 안전관리 투자비 산출

현재 B 공급기지의 안전관리 투자비는 「도시가스안전관리기준통합고시」에 의한 19개 투자항목 대로 투자되고 있으며 안전 기술개발, 인력 유지비, 활동비, 시설장비 투자비, 교육비 등 넓은 분야가 포함되어 있다[11]. 이 중에서 점검비, 안전교육비 등과 같은 항목들은 특정 안전조치에만 국한되지 않고 광범위하게 영향을 미칠 뿐만 아니라 안전성 확보에 기여하는 요소와 정도가 서로 보완적인 성격을 띄고 있으므로, 19개의 안전관리 투자비에 대하여 위험성 평가에 의해 잠재재해 손실비를 산출하기는 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 [표 1]과 같이 안전관리 투자비를 성격이 비슷한 항목들로 구성된 5가지 분류로 구분하였으며, 이때 분류별 투자비는 항목별 안전관리 투자비의 합으로 산출하였다.

[표 1] 안전관리 투자비 분류

구분 분류	분류 명칭	안전관리 투자항목 ¹⁾	투자비 (천원)
[분류 1]	설비증설 및 보수비	15, 16, 17, 18, 19	273,232
[분류 2]	안전장비 및 조치비	6, 14	39,199
[분류 3]	안전점검 및 검사비	1, 2, 4, 9, 13	112,962
[분류 4]	인건비 및 교육비	7, 8	52,328
[분류 5]	연구개발비	3, 10, 11, 12	393

¹⁾ 「도시가스안전관리기준통합고시」의 안전관리 투자비 항목번호

2-2. 편익 산출

B 공급기지는 산업재해로 인정할 수 있는 사고가 전혀 발생되지 않았기 때문에 공정 위험성 평가에 의한 잠재재해 손실비를 추산하여 편익을 산출하였다. 즉, 계기 및 기기 등의 단일 기능설비에 대해서는 FMEA를 실시하고, 공정에 대해서는 HAZOP을 각각 실시하여 사고발생 시에 수반되는 인적·물적 피해를 잠재재해 손실비로 간주하여 산출하였고, 안전관리에 의한 잠재재해 손실 감소액을 산출하여 편익으로 하였다. 본 연구에서 개발한 잠재재해 손실비 및 편익의 산출절차는 [표 2]에 나타내었다.

2-2-1. 위험성 평가(FEMA/HAZOP)

B 공급기지의 P&ID를 이용하여 instruments, valve, heater류 등 기능이 비교적 단순하고 일정한 기능을 수행하는 기기에 대해서는 FMEA 기법을 사용하였고 pipe, control, process 등에 대해서는 HAZOP 기법을 사용하였다.

[표 2] 잠재재해 손실비 및 편익의 산출절차

단 계	수 행 내 용
1단계	① 위험성 평가를 실시하고자 하는 대상기지 선정 ② 위험성 평가를 실시하고자 하는 대상도면 선정 ③ 위험성 평가를 실시하고자 하는 대상기기 선정(FMEA의 경우) ④ 위험성 평가를 실시하고자 하는 대상 study node 결정(HAZOP의 경우)
2단계	① 안전관리 투자비 내용 및 규모 파악 ② 5가지 분류의 세부항목 결정
3단계	① 안전관리비를 투자했을 경우와 투자하지 않았을 경우에 대한 위험등급의 변화 확인 ② 안전관리비로 안전조치를 수행했을 경우 전 항목에 대하여 각각이 차지하는 분을 결정(전문가 의견 반영)
4단계	① 안전관리비를 투자하지 않았을 경우(Non-protected)의 위험빈도 및 강도 결정을 위한 위험성 평가 실시 ② 안전관리비를 투자하지 않았을 경우의 위험등급 결정
5단계	① 제3단계 및 제4단계에 의하여 위험 빈도 및 강도 결정 ② 제3단계 및 제4단계에 의하여 위험등급 결정
6단계	① 위험등급표에 의해 각 effect(FMEA의 경우) 또는 consequences(HAZOP의 경우)에 대하여 잠재재해 손실비 추산 ② 각 effect(FMEA의 경우) 또는 consequences(HAZOP의 경우)에 대하여 잠재재해 손실감소액 추산
7단계	① 5가지 분류에 대한 잠재재해 손실비 및 손실 감소액(편익) 산출 ② 5가지 분류가 전체 설비에서 차지하는 비용-편익 비율 결정

본 연구에서 수행한 FMEA와 HAZOP은 안전관리 투자비가 시설·설비는 물론 인원의 안전을 확보하는데 어느 정도의 역할을 하느냐를 중점적으로 판단하기 위한 것으로서 일반적으로 사용되는 위험성 평가 기록지를 변형시켜 사용하였으며, [표 3]과 [표 4]에 FEMA와 HAZOP에 의한 위험성 평가의 예를 나타내었다.

[표 3] FMEA에 의한 위험성 평가의 예

Study : B G/S
Section : From B To M, P, S line
Reference : B-01

Identity	Component	Fail Mode	Effects	Protected			Protection Now	Rate of Protected	Non-protected		
				C	F	R			C	F	R
3V-001-1/2	Globe valve	Rupture	Large gas leakage	4	C	C4	① Gas detector	0.09	1	A	A1
3V-003-1/2							② Operator patrol	0.1			
							③ Monitoring system	0.1			
							④ Maintenance	0.6			
							⑤ Safety inspection	0.1			
							⑥ Others	0.01			

[표 4] HAZOP에 의한 위험성 평가의 예

Node-Line or Vessel : [#1] From B To M
 Design Intention : Main Supply Pipe Line(70 kg/cm²G)
 Reference : B-01

Deviation	Cause	Consequences	Protected			Protection Now	Rate of Protected	Non-protected		
			C	F	R			C	F	R
Low Pressure	Line and valve leakage	Medium gas leakage	2	D	D2	① Monitoring system	0.1	1	C	C1
						② Operator patrol	0.1			
						③ Maintenance	0.49			
						④ Gas detector	0.1			
						⑤ Safety inspection	0.2			
						⑥ Others	0.01			

변형된 위험성 평가 기록지에서 Protection Now는 현재의 안전조치, Non-protected는 안전관리 비용을 투자하지 않았을 때의 위험등급, Rate of Protected는 각 안전조치가 안전도 향상에 기여하는 분율, Protected는 안전관리비를 투자했을 때의 위험등급을 나타낸다. 또한 Protected와 Non-protected의 위험등급 결정에서 사고로 인한 피해의 크기(C, accident consequences)는 사망 및 부상, 생산 중단기간 및 재산피해 크기 등으로 그 영역을 나눌 수 있으며, 분류기준은 국가별 기준 또는 회사내의 정책에 따라 정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 사고영향에 따른 사고의 크기구분과 사고의 발생빈도(F, accident frequency)를 ILO에서 제시한 「대형사고시 지역사회의 비상대책(APELL)」 권고안을 기준으로 하였다. 또한 발생빈도와 피해크기로부터 산정한 점수에 따라 위험등급(R, risk)을 분류하고 위험등급 대조표에 의해 위험등급별 잠재재해 손실비를 산출하였다.

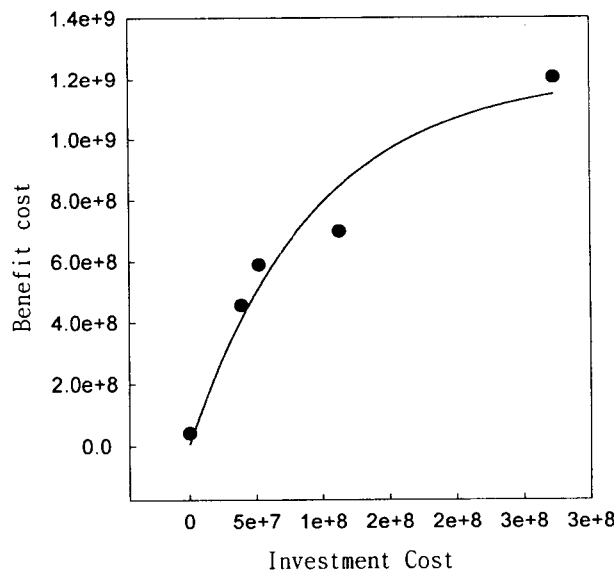
2-2-2. 잠재재해 손실감소액 산출

위험성 평가에 의해 B 공급기지의 전체 공정설비 및 장치에 대한 잠재재해 손실비를 산출한 결과, 안전관리비를 투자하여 안전조치를 취할 경우(Protected 경우)는 약 24백만원으로 추산되었고, 안전관리 투자비 항목대로 안전조치를 취하지 않을 경우(Non-protected 경우)는 약 30억원이었다. 따라서 각 Protection Now가 차지하는 비율, 즉 Rate of Protected를 설정하여 각각의 안전조치가 당해 사고를 방지하는데 미치는 영향을 판단하여 안전관리 투자비의 각 분류별 예상되는 잠재재해 손실감소액을 산출하였으며, 산출결과는 [분류 1]이 1,204,001 천원, [분류 2]가 455,870 천원, [분류 3]이 697,907 천원, [분류 4]가 588,887 천원, 그리고 [분류 5]가 41,471 천원이었다.

3. 비용-편익분석 및 적정 안전관리 투자비 산출

3-1. 비용-편익분석

2-1절 및 2-2절에서 산출된 분류별 안전관리 투자비와 잠재재해 손실감소액(편익)은 [분류 1] > [분류 3] > [분류 4] > [분류 2] > [분류 5]의 순서를 나타내었다. 또한 비용-편익분석 방법중의 하나인 비용-편익 비율, 즉 분류별 안전관리 투자비 대 잠재재해 손실감소액은 [분류 5]가 105.6으로 가장 높고 [분류 2]가 12, [분류 4]가 11.3, [분류 3]이 6.2이었으며 [분류 1]이 4.4로 가장 적었다. 이것은 [그림 1]에서와 같이 안전관리 투자비에 대한 편익곡선의 특성상 투자비가 적을수록 투자효과가 상대적으로 높기 때문으로 생각된다. 따라서 설비증설 및 보수비에 해당하는 [분류 1]과 안전점검 및 검사비에 해당하는 [분류 3]은 투자효과가 평균값(전체 투자비에 대한 비용-편익 비율인 6.2)보다 다소 낮지만 가스공급 설비의 특성상 안전관리 투자비 항목 중에서 가장 큰 비중을 차지하기 때문에 현재 수준으로 투자하되 장기적으로는 설비의 노후화를 고려하여 투자를 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다. 그리고 연구개발비에 해당하는 [분류 5]는 투자비가 적어서 상대적으로 높은 투자효과를 나타내는 성질을 가지고 있으나 높은 투자효과와 적은 투자비를 고려할 때 투자비를 현재보다 상당히 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 또한 안전장비 및 조치비에 해당하는 [분류 2]와 인건비 및 교육비에 해당하는 [분류 4]는 현재 수준 또는 그 이상으로 투자를 증가시켜야 필요가 있다고 판단된다.



[그림 1] 안전관리 투자비에 대한 편익의 변화

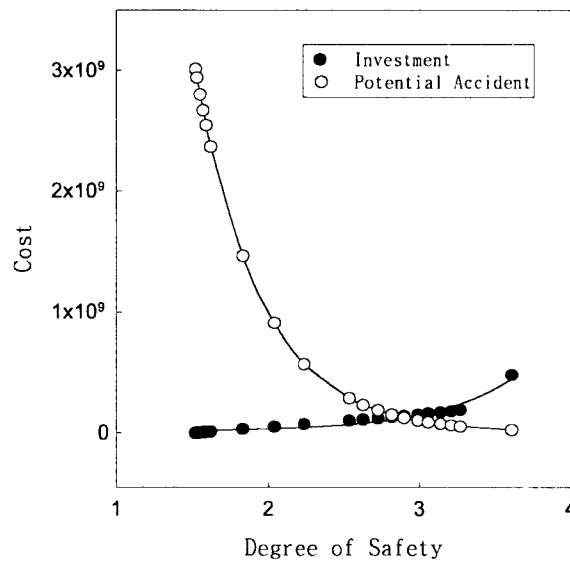
3-2. 투자효과 및 적정 안전관리 투자비 분석

본 연구에서는 안전관리 투자효과를 분석하는 방법을 제시하기 위하여 투자경향을 분석하고 이를 바탕으로 적정 안전관리 투자비를 결정하는 방법을 제시하였다.

[그림 1]에서와 같이 편익은 투자비의 증가에 따라 지수함수 형태를 유지하며 일정

한 값에 접근하는 전형적인 형태를 나타내고 있다. 즉, 투자비가 적은 경우에는 편익이 급격히 증가하여 높은 투자효과를 나타내지만 투자비의 증가에 따라 편익의 증가폭은 둔화되고 있다. 따라서 B 공급기지의 안전관리 투자효과는 [그림 1]의 경향을 갖는다고 가정하였다. 즉, [그림 1]에서 투자비 분류별 잠재재해 손실감소액에 대하여 비선형 회귀분석(Nonlinear Regression)을 통하여 투자비에 대한 손실감소액의 상관식을 얻었다. 그리고 총 안전관리 투자비에 대한 총 잠재재해 손실감소액의 실제값을 사용하여 상관식에 의한 값에 의해 보정비를 산출하고 동일한 보정방법에 의해 각 분류별 투자비에 대한 잠재재해 손실비를 산출하였다.

이상과 같은 방법으로 산출된 B 공급기지의 안전관리 투자비 및 잠재재해 손실비를 안전등급에 대하여 나타낸 수리적 적정 안전관리비 산출모형[12]은 [그림 2]와 같다. 그림에서 안전관리 투자비의 증가에 따라 잠재재해 손실비는 감소하고 안전등급은 증가하고 있으며, 이 결과는 일반적인 재해발생 수준모형과 유사하다. 즉, 안전관리 투자비를 투자하지 않았다고 가정한 경우에는 잠재재해 손실비가 약 30억으로 안전등급이 1~2등급을 나타내었고, 안전관리 투자비가 적게 투자된 범위에서는 투자비의 증가에 따라 손실비가 급격히 감소하지만 위험등급이 약 2~3이상의 범위에서는 안전관리 투자비의 증가에 따라 손실비의 감소경향은 둔화되고 안전등급은 급격히 증가하고 있다.



[그림 2] 적정 안전관리 투자비 산출모형

또한 전체 안전관리 투자비에 대한 잠재재해 손실비는 약 24백만원으로 안전등급이 약 3~4등급에 접근하고 잠재재해 손실비는 투자비보다 적음을 알 수 있다. 특히, 투자비와 손실비를 합한 총비용이 최저값을 갖는 이론상 적정 안전관리 투자비는 [그림 2]에서 투자비 곡선과 손실비 곡선이 교차하는 지점의 비용으로 투자비 및 잠재재해

손실비가 약 135백만원이고 안전등급이 약 3등급으로 나타나고 있다. 그러나 본 연구에서는 손실비에 간접비가 포함되지 않았기 때문에 실제의 경우는 예상 잠재재해 손실비가 산출값보다 상당히 커서(하인리히 법칙을 적용한 경우는 산출값의 5배) 적정 투자비는 현재보다 오른쪽 방향으로 이동하게 된다.

이와 같은 결과로 B 공급기지는 위험등급이 약 3~4등급으로 비교적 적정한 안전관리비를 투자하고 있는 것으로 판단되었으며, 간접 손실비를 고려하는 경우에는 투자효율이 현재보다 상당히 증가될 것으로 판단된다.

4. 결 론

B 가스 공급기지를 연구대상으로 위험성 평가(FMEA/HAZOP)에 의한 비용-편익분석(CBA)에 의해 안전관리 투자효과와 적정 안전관리 투자수준을 정량적으로 분석·평가하여 가스사고 예방을 위한 투자효과와 분석방법을 제시하였다.

안전관리 투자비를 성격이 비슷한 항목들로 구성된 5가지 분류로 구분하고 위험성 평가에 의해 잠재재해 손실비를 산출하였다. 또한 산출된 잠재재해 손실감소액(편익)은 투자비와 동일한 순서, 즉 설비증설 및 보수비>안전점검 및 검사비>인건비 및 교육비>안전장비 및 조치비>연구개발비 순서를 나타내었으며, 투자비의 증가에 따라 편익이 지수함수 형태로 증가하는 경향을 나타내어 투자비가 적을수록 높은 투자효과를 나타내었다. 그리고 적정 안전관리 투자수준 모형에 의해 적정한 안전관리 투자비를 산출하였고 투자수준을 분석하였다.

Acknowledgement

본 연구는 한국가스공사 연구개발원의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

5. 참고문헌

- [1] Heinrich H. W., "Industrial Accident Prevention", McGraw-Hill, New York (1931).
- [2] http://www.kosha.or.kr/korea/safety_news/2001/073002.htm.
- [3] 한국가스공사, "정량적 위험성 평가", 한국안전전문기관협의회(1999).
- [4] Anderson E. V., "Chlorine Producers Fight Back against Call for Chemical's Phaseout", *Chemical and Engineering News*, 7(9), 11-12(1993).
- [5] Birkner L. R., and Salzman L. S., "Assessing Exposure Control Strategy Cost-Effectiveness", *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(1), 50-54(1986).
- [6] Sassone P. G., and Schaffer W. A., "A Handbook; Cost-Benefit Analysis", Academic Pres, New York(1978).
- [7] 김홍배, "비용편익분석론", 홍문사(1997).

- [8] Dhillon, B. S., and Sinh, C., "Engineering Reliability; New Techniques and Applications", John Wiley, New York(1981).
- [9] Balemans A. W. et al., "Hazard and Operability Study Why? When? How?" Voorburg, Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs, Report 3E, 61(1979).
- [10] Chemical Industries Association Limited, "A Guide to Hazard and Operability Studies", London, 42(1977).
- [11] 「도시가스안전관리기준통합고시」 산업자원부고시 제1998-30호, 제1998-107호, 제1999-36호.
- [12] Pasman H. J., "Risk Informed Resource Allocation Policy : Safety Can Save Costs", *J. of Hazardous Materials*, **71**, 375-394(2000).

저 자 소 개

장 서 일 :

- 명지대학교 가스안전센터 전임연구원(공학박사), 관심분야는 안전관리 비용-편익분석 및 화학공정의 위험성 평가

이 현 창 :

- 명지대학교 대학원 화학공학과 박사과정 재학, 관심분야는 화학공정의 안전성 평가 및 위험기반 검사기법 개발

조 지 훈 :

- 한국산업안전공단 산업안전교육원 교수(공학박사), 관심분야는 공정 위험성 평가 및 사고결과 분석

오 신 규 :

- 한국가스공사 연구개발원 안전방재연구팀장(공학박사), 관심분야는 가스설비의 위험성 평가

김 태 옥 :

- 명지대학교 화학공학과 교수/명지대학교 공과대학장/가스안전센터 소장, 관심분야는 가스안전 및 화학공정의 위험성 평가