

가스공급기지에서 공정 위험성 평가에 의한 최적 안전관리 투자수준 결정

장 서 일 · †김 태 옥
명지대학교 공과대학 화학공학과
(2003년 6월 3일 접수, 2003년 7월 13일 채택)

Determination of Optimum Investment Level for Safety Management by Process Risk Assessment at Gas Governor Station

Seo-II Jang and Tae-Ok Kim
Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University
(Received 3 June 2003 ; Accepted 13 July 2003)

요 약

본 연구에서는 가스공급기지를 대상으로 공정 위험성 평가에 의해 최적 안전관리 투자수준을 결정하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 가스공급기지에서 공정 위험성 평가(HAZOP, FTA, CA)를 실시하여, 안전관리비에 대한 잠재재해손실비와 편익을 산출하였다. 그 결과, 비선형 회귀분석법에 의하여 투자비와 편익의 경향을 알 수 있었으며, 안전관리 투자비와 잠재재해손실비를 비교·분석하여 적정 안전관리 투자수준을 결정할 수 있었다.

Abstract - This study has suggested a decision method which determine optimum investment level for safety management by process risk assessment at gas governor station. Hazard and operability study(HAZOP), fault tree analysis(FTA) and consequence analysis(CA) were carried out and potential accident cost and benefit for safety management were estimated. As a result, we could be found the trend of safety cost and benefit by the nonlinear regression method and could be determined the optimum investment level for safety management from analysis of safety management cost and potential accident cost.

Key words : safety management, process risk assessment, CBA(cost and benefit analysis), optimum investment level

1. 서 론

가스산업에서의 사고는 중대산업사고로서 발생빈도는 일반사고에 비해 매우 낮으나 한번의 사고로도 인적·물적으로 엄청난 피해를 일으킬 수 있다. 특히, 1994년 아현동 가스공급기지의 폭발사고는 사망 12명과 부상 101명이 발생하여 배상 및 보상액이 39억원이었으며, 재산손해가 152억원에 이르렀다. 뒤이어 발생한 대구 도시가스

폭발사고는 사망 101명과 부상 201명으로 배상 및 보상액이 474억원, 재산손해가 43억원으로 경제적인 손실뿐만 아니라 심각한 사회적 불안요소를 작용하여, 사회전반에 걸쳐 안전에 대한 인식을 새롭게 하는 계기가 되기도 하였다.

이와 같이 사고로 인한 인적·물적 손실을 방지하기 위한 안전관리가 실패하는 경우에는 국가적으로나 기업경영 측면에서 막대한 손실을 가져올 수 있기 때문에 선진국에서는 산업재해에

다른 경제적 손실비용을 감소시키기 위하여 비용항목을 설정하고 손실비용을 산출하여 적극적으로 안전·보건에 심혈을 기울이고 있다.

산업재해에 따른 경제적 손실비용은 크게 직접비(direct cost)와 간접비(indirect cost)로 구분되었으나, 지금까지의 직접비는 보통 보상 지불액이나 의료비용처럼 자금지출이 명백히 확인되는 비용을 의미해 왔고, 간접비는 분명한 지출이라기 보다는 경영활동 중에 증가하는 비용으로 사용하였다. 그러나 직접비와 간접비의 개념은 그 의미와 구분이 불충분하여 이러한 구별을 두는 것이 더 이상 불가능하기 때문에 보다 정확한 표현인 보험비용(insured cost)과 비보험비용(unsured cost)으로 대체된다[1,2].

기업의 입장에서 안전관리에 대한 투자결정은 쉬운 문제가 아니며, 투자수준의 판단방법 또한 제시되어 있지 못한 실정이다. 기업의 의사결정방법에는 여러 가지가 있으나 현재 미국, 일본 등 선진국에서는 안전관리투자에 대한 의사결정 및 투자효과를 평가하기 위한 방법으로 비용-편익분석(cost and benefit analysis, CBA)이 널리 사용되고 있다[3,4].

비용-편익분석에 의해 안전관리 투자수준의 판단기준을 설정하기 위해서는 안전관리 투자비에 대한 편익과 효과를 수치화하고 객관화할 필요가 있으며, 특히 투자비와 손실비에 대한 자료가 부족한 경우에는 투자비에 대한 손실비 산출이 문제가 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 장 등[4-6]은 위험성 평가에 의한 CBA 방법을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 가스공급기지를 대상으로 공정 위험성 평가에 의해 잠재재해손실비와 편익을 산출하여 최적 안전관리의 투자수준을 결정하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 안전관리에 대한 투자효과 분석은 투자비에 대한 손실비를 평가하는 것이 일반적인 방법이나 본 연구에서는 사고발생이 가능한 경우에 대해서 공정 위험성 평가를 실시하여 재해손실비를 산출하고, 이를 바탕으로 잠재재해손실비와 편익을 산출하여 적정 투자수준을 결정하였다.

II. 공정 위험성 평가

2.1. 정성적 위험성 평가

가스 공급설비에서 발생할 수 있는 위험요인을 확인하기 위해서 공정조건에 따라 검토구간을 5개 구간으로 나누어 정성적 위험성 평가

방법인 위험과 운전분석(hazard and operability study, HAZOP)을 수행하였다. 그 결과, 대상공정에서 발생할 수 있는 사고결과는 가스공급 중단과 가스누출이었고, 사고원인은 기계적인 실패, 조업자 실수, 공정이탈, 외부 사고 등으로 분석되었다. 또한 현재 안전관리 관련 사항을 인력에 의한 안전관리, 자동적인 이상감지 설비에 의한 기계적인 안전관리, 안전관리 시스템 보호 및 유지, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리, 위험요소 대응에 대한 안전조치로 분류할 수 있었다[6].

2.2. 정량적 위험성 평가

2.2.1. 결합수 분석

HAZOP에서 분석된 사고결과 중에서 가스 누출을 정상사상으로 설정하고, 대상공정의 조업 상태를 정상과 비정상 상태로 구분하여 결합수 분석(fault tree analysis, FTA)을 실시하였다. 이때 발생할 수 있는 실패요인을 7개 중간사상으로 나누어 FT(fault tree)를 작성하였다. 즉, 7개 중간사상은 비정상상태에서 발생할 수 있는 유지보수 오류[MS1]와 정상상태에서 발생할 수 있는 오류를 전체 공정과 HAZOP 검토구간 공정으로 세분화하여 높은 유입 압력[MS2], 인입 배관에서 F-0101까지[MS3], F-0101에서 H-0101까지[MS4], H-0101에서 PCV-0101까지[MS5], PCV-0101에서 FE-0101까지[MS6] 그리고 FE-0101에서 도시가스까지[MS7]로 설정하였다. 이때 기본사상들에 대한 신뢰도는 IEEE[7]와 CCPS[8] 자료를 사용하였다. 또한 안전관리의 상호관계에 따라 사고결과에 미치는 효과가 다를 수 있으므로 이를 분석하기 위해서 안전관리 분류들을 기본사상에 포함시켜 조합한 31개의 항목에 대해서 사고 발생빈도를 산출하였다[6].

2.2.2. 사고결과 분석

가스 누출사고 중에서 재산손실이 가장 크게 발생할 수 있는 증기운 폭발사고에 대하여 누출 시나리오를 7개 중간사상에 대해 공정조건을 고려하여 설정하고, 사고결과 분석(consequence analysis, CA)을 실시하였다. 이때 누출 시나리오에 의한 누출공의 크기는 배관직경의 25%로 가정하였고, LNG의 주성분은 메탄으로 가정하였다. 누출원모델에서는 단열 흐름에서 배관을 통한 압축성 가스누출로 가정하고 누출속도를 산출하였으며, 가스분산은 연속누출인 경우에 대해 Gaussian 분산모델[9]을

적용하여 거리별 농도를 산출하였다. 분산모델에서 대상공정의 누출높이는 지표면, 대기안정도는 D, 지역은 시골, 누출시간은 10분 이상으로 가정하였고, 바람속도는 대상공정 지역의 평년 평균값인 1.5 m/s를 사용하여 각 시나리오별 관심농도의 분산거리를 산출하였다. 또한 대상공정은 반경 350 m 이내에 집중되어 있기 때문에 분산모델에서 평가한 UFL과 LFL 범위까지 누출된 가스총량을 TNT 당량모델에 적용하여 관심거리별 과압과 충격량을 산출하여 probit와 probability(%)를 평가하였다[6].

2.2.3. 재해손실비 산출

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

III. 비용 및 편익 산출

3.1. 비용 산출

대상공정에 투자되고 있는 안전관리 투자비 항목들을 성격에 따라 HAZOP에서 분석된 총 5개 항목으로 분류하여 안전관리 투자비를 산출하였다. 그 결과, 인력에 의한 안전관리 비용은 166,533천원, 자동적인 이상감지 설비에 의한 기계적인 안전관리 비용은 10,402천원, 안전관리시스템 보호 및 유지비용은 12,848천원, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리 비용은 229,369천원, 그리고 위험요소 대응에 대한 안전조치 비용은 37,125천원이었다. 그리고 중간사상에 대한 안전관리 조합별 비용은 공정구간에 대해서 안전관리비가 동일하게 투자되고 있다고 가정하여 안전관리 항목을 고려하여 비용을 산출하였다.

3.2. 편익 산출

안전관리 조합별 잠재재해손실비는 각 시나리오에서 중간사상의 발생빈도와 재해손실비를 곱하여 산출하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 대상공정 전체에서 최소 잠재재해손실비는 안전관리가 모두 있는 경우로 약 371,300원이었고, 최대 잠재재해손실비는 안전관리가 모두 없는 경우

로 약 1,159,886천원이었으며, 안전관리 조합별 편익은 산출된 최대 잠재재해손실비에서 각 조합별 잠재재해손실비의 차액으로 평가되었다.

IV. 투자수준 결정

일반적으로 대상공정의 잠재재해손실비는 안전관리 투자비가 증가함에 따라 감소되어 최소 손실비에 접근하게 되고, 비용증가에 따른 편익도 증가곡선을 유지하다가 일정한 편익값을 형성하게 된다. 특히, 본 연구의 대상공정은 현재 주관적으로 안전관리 투자비를 설정하여 사용하고 있기 때문에 안전관리 항목에 대한 비용이 과소 또는 과잉 투자될 수 있다고 판단될 뿐만 아니라 실제 안전관리 투자비에 대한 편익경향은 예측하기가 어렵다.

본 연구에서는 전체 공정에 대한 안전관리 투자비와 편익을 예측하기 위해서 Fig. 1과 같이 각각의 중간사상에 대한 안전관리 투자비와 편익을 플롯트하였다. 그림과 같이 중간사상의 특성 때문에 안전관리 투자비에 따른 편익이 서로 동일하지 않으므로 전체 투자비의 변화에 대한 잠재재해손실비를 산출할 수 없었다.

이를 해결하기 위해 각각의 중간사상별 투자비와 편익을 최대 투자비와 최대 편익으로 나누어 비용율과 편익율을 산출하고, 비용율의 변화에 따른 편익율을 플롯트한 결과, Fig. 2와 같이 모든 중간사상에서 거의 동일한 경향을 갖는 무리군을 형성하였다.

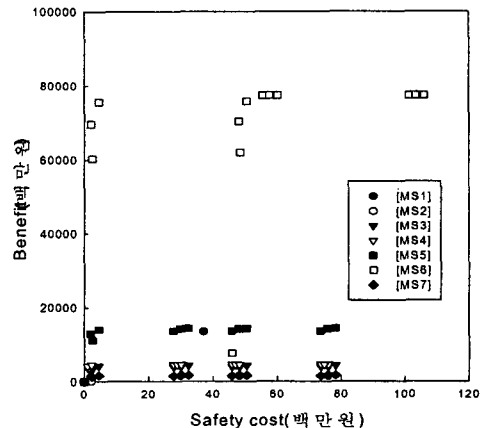


Fig. 1. Cost-benefit plots of intermediate events.

Table 1. Potential accident cost for various combinations of safety managements.

(unit : Won/year)

Intermediate Events 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
A,B	67,451	1,006,348	3,331,837	23,183	7,677,510	386,653	1,543,712
A,C	67,451	1,006,348	3,331,837	23,183	7,677,510	696,525,425	1,543,712
A,D	67,451	221,422	9,634,446	10,202,115	31,601,112	170,139,412	3,709,325
A,E	67,451	100,635	4,378,929	4,636,633	14,362,433	77,330,535	1,685,388
B,C	134,941,016	1,006,348	3,311,778	12	7,609,834	348,416	1,536,352
B,D	134,941,016	221,422	732,964	5,101	1,689,278	85,070	339,653
B,E	134,941,016	100,635	333,184	2,318	767,751	38,665	154,371
C,D	134,941,016	221,422	732,964	5,101	1,689,278	153,253,947	339,653
C,E	134,941,016	100,635	333,184	2,318	767,751	69,652,543	154,371
D,E	134,941,016	22,142	963,445	1,020,211	3,160,111	17,013,941	370,933
A,B,C	67,451	1,006,348	3,311,778	12	7,609,834	348,416	1,536,352
A,B,D	67,451	221,422	732,964	5,101	1,689,278	85,070	339,653
A,B,E	67,451	100,635	333,184	2,318	767,751	38,665	154,371
A,C,D	67,451	221,422	732,964	5,101	1,689,278	153,253,947	339,653
A,C,E	67,451	100,635	333,184	2,318	767,751	69,652,543	154,371
A,D,E	67,451	22,142	963,445	1,020,211	3,160,111	17,013,941	370,933
B,C,D	134,941,016	221,422	728,350	3	1,674,239	76,627	337,961
B,C,E	134,941,016	100,635	331,178	1	760,983	34,842	153,635
B,D,E	134,941,016	22,142	73,296	510	168,928	8,507	33,965
C,D,E	134,941,016	22,142	73,296	510	168,928	15,325,395	33,965
A,B,C,D	67,451	221,422	728,350	3	1,674,239	76,627	337,961
A,B,C,E	67,451	100,635	331,178	1	760,983	34,842	153,635
A,B,D,E	67,451	22,142	73,296	510	168,815	8,507	33,965
A,C,D,E	67,451	22,142	73,296	510	168,815	15,325,395	33,965

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

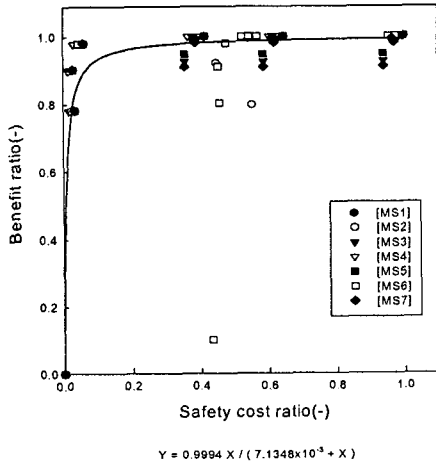


Fig. 2. Ratio plots of cost and benefit.

따라서 비용율에 대한 편익율의 상관관계를 비선형 회귀분석법으로 분석하고, 이 상관식을 사용하여 현재 투자된 안전관리 투자비와 최대 편익으로 확장하여 실제 편익과 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 그림에서 곡선의 윗부분인 A영역은 비용에 대한 편익이 상관식에 의해 산출된 편익보다 많으므로 과소 투자된 영역으로 정의할 수 있고, 곡선의 아랫부분인 B영역은 비용에 대한 편익이 산출된 편익보다 적으므로 과잉 투자된 영역으로 정의할 수 있다. 그 결과, 과잉 투자된 안전관리 항목은 위험요소 대응에 대한 안전조치, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리, 그리고 안전관리시스템 보호 및 유지이었다.

적정 투자수준을 결정하기 위해 본 연구에서는 정량적인 위험성 평가에 의해 산출한 잠재 재해손실비를 직접비로 가정하였으나, 실제의 경우에는 인적, 물적 손실이외에 기업의 이미지 실추에 따른 추정손실, 가동정지로 인한 생산손실, 재해수습 여비 등의 간접비를 고려하여야 할 뿐만 아니라 경제적인 측면 외에 인명사고 등과 같은 안전적인 측면을 고려하여야 한다. 따라서 본 연구의 대상공정은 사고가 한 건도 발생하지 않았기 때문에 간접비 항목을 정할 수 있는 근거가 부족하여 Heinrich 법칙[10], 즉 직접비와 간접비가 1 대 4를 적용하여 간접비를 산출하고, 총 잠재재해손실비를 산출하였다.

Fig. 4에서와 같이 적정 안전관리 투자비는 잠재재해손실비와 투자비가 일치하는 교점으로 산출할 수 있었으며, 하인리히 법칙을 적용한 경우에 적정 투자비는 현재보다 오른쪽 방향으로 이동하여 안전관리 투자비에 따른 편익은 현재보다 약 5배가 증가하고 안전도도 증가하였다. 이때, 산출한 적정 안전관리 투자비는 직접 손실비만 고려한 경우에는 약 6,000만원이었고, 하인리히 법칙에 의해 간접비를 고려한 경우에는 약 3억원이었다. 따라서 안전관리비는 최소 3억원 이상을 투자되어야 할 것으로 판단되었다.

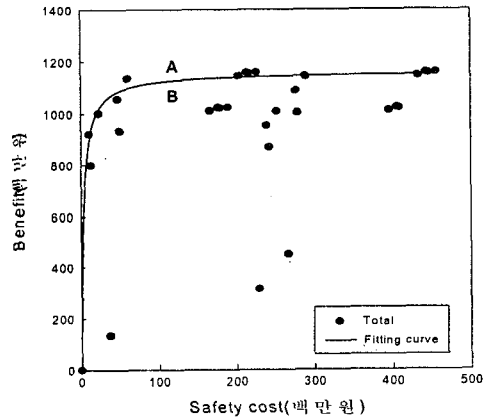


Fig. 3. Expansion plots of cost and benefit.

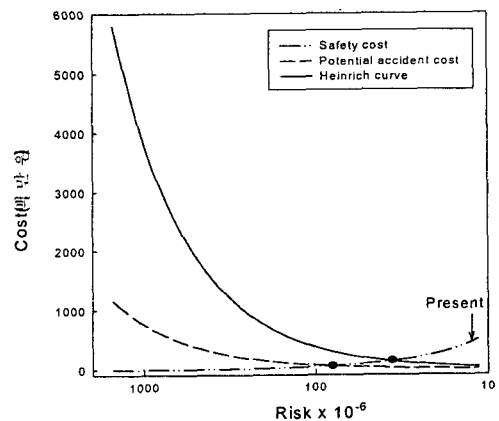


Fig. 4. Optimum investment level for safety management.

V. 결 론

가스 공급설비에 대한 공정 위험성 평가 (HAZOP, FTA, CA)에 의해 안전관리비에 대한 잠재재해손실비와 편익을 산출하고, 중간사상별 비용-편익 그래프와 결합수목에 의해 안전투자에 따른 편익경향과 편익경향에서 벗어난 시나리오별 투자항목을 선별하여 과소 또는 과잉 투자된 안전관리비 항목을 분류할 수 있었다. 또한 비선형 회귀분석법에 의하여 투자비와 편익의 경향을 알 수 있었으며, 안전관리 투자비와 잠재재해손실비를 비교·분석하여 직접비 또는 간접비를 고려한 적정 안전관리 투자수준을 결정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] ANSI, "American National Standard for Occupational Safety and Health Incident Surveillance, Z16.5", ANSI, June(1997).
- [2] National Safety Council, "Accident Facts", (1997).
- [3] Sassone, P. G. and Schaffer, W. A., "A Handbook: Cost-Benefit Analysis", Academic Press, New York(1978).
- [4] 장서일, 한정민, 오신규, 이중희, 조지훈, 김태욱, "가스공급기지에서 위험성 평가에 의한 투자효과분석", 화학공학의 이론과 응용, 6(2), 2817-2820(2000).
- [5] 장서일, 이현창, 조지훈, 오신규, 김태욱, "가스공급기지에서 FMEA/HAZOP에 의한 안전관리 비용-편익분석", 안전경영과학회지, 3(4), 1-9(2001).
- [6] 장서일, 조지훈, 김태욱, "정량적 위험성 평가에 의한 안전관리 투자의 비용-편익 분석", 안전경영과학회지, 4(4), 15-26(2002).
- [7] IEEE(Institute of Electrical & Electronic Engineers) std-500(1984).
- [8] American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", New York(1989).
- [9] Turner, D. B., "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", Cincinnati, OH : U.S. Department of Health, Education and Welfare(1970).
- [10] Heinrich, H. W., "Industrial Accident Prevention", McGraw-Hill, New York(1931).