

## 공정 위험성 평가에 의한 최적 안전관리 투자수준 결정

장 서 일, 이 헌 창, 조 지 훈\*, 김 태 옥

명지대학교 공과대학 화학공학과

\* 한국산업안전공단 산업안전교육원

### Determination of Optimum Investment Level for Safety Management using Process Risk Assessment

Seo-II Jang, Hern-Chang Lee, Ji-Hoon Cho, Tae-Ok Kim

Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University

\* Industrial Safety Training Institute, KOSHA

#### 서 론

사고로 인한 인적·물적 손실을 방지하기 위한 안전관리가 실패하는 경우에는 국가적으로나 기업경영 측면에서 막심한 손실을 가져올 수 있기 때문에 선진국에서는 산업재해에 따른 경제적 손실비용을 감소시키기 위하여 비용항목을 설정하고 손실비용을 산출하여 적극적으로 안전·보건에 심혈을 기울이고 있다.

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 & benefit analysis, CBA)이 널리 사용되고 있다[1,2].

비용-편익분석에 의해 안전관리 투자수준의 판단기준을 설정을 하기 위해서는 안전관리 투자비에 대한 편익과 효과를 수치화하고 객관화할 필요가 있으며, 특히 투자비와 손실비에 대한 자료가 부족한 경우에는 투자비에 대한 손실비의 산출이 문제가 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 장 등[2-4]은 위험성 평가에 의한 CBA방법을 제시하였다.

본 연구에서는 가스 공급설비를 대상으로 공정 위험성 평가에 의해 잠재재해 손실비와 편익을 산출하여 안전관리의 투자수준을 결정하는 방법을 제시하였다.

#### 본 론

안전관리에 대한 투자효과 분석은 투자비에 대한 손실비를 평가하는 것이 일반적인 방법이나 본 연구에서는 사고발생이 가능한 경우에 대하여 공정 위험성 평가를 실시하여 재해손실비를 산출하고, 이를 바탕으로 잠재재해 손실비와 편익을 산출하여 적정 투자수준을 결정하였다.

### 1. 위험성 평가

#### 1-1. HAZOP 평가

가스 공급설비에 대한 위험요인을 확인하기 위하여 공정조건에 따라 검토구간을 5개 구간으로 나누어 HAZOP(hazard and operability study)을 수행하였다. 그 결과, 대상공정에서 발생될 수 있는 사고결과는 가스공급 중단과 가스누출이었고, 사고원인은 기계적인 실패, 조업자 실수, 공정이탈, 외부 사고 등으로 나타났다. 또한 현재 안전관리 관련 사항으로는 인간에 의한 안전점검, 자동적인 기계적 안전시스템인 가스누출감지기 등, 배관의 안전성 향상조치, 모니터링 시스템, 안전조치로 구분할 수 있었다[3].

#### 1-2. 결합수 분석

HAZOP에서 분석된 사고결과 중에서 가스누출을 정상사상으로 하여 KwTree 4.8 프로

그램을 사용하여 결함수 분석(fault tree analysis, FTA)을 실시하였다. 대상 공정설비에 서 비정상 조업 중에는 유지보수 오류가, 정상조업 중에는 전단에서 유입되는 높은 압력에 의한 가스누출이, 그리고 각 구간에서도 구간특성에 따라 가스누출이 각각 발생할 수 있었다[3]. 따라서 중간사상으로는 유지보수 오류, 높은 유입압력, [구간 1], [구간 2], [구간 3], [구간 4], [구간 5]로 설정하고 FTA를 작성하였다. 이때 기본사상의 신뢰도 데이터는 IEEE[5]와 CCPS[6]의 자료를 사용하였다.

또한 안전관리 투자비에 대한 편익을 산출하기 위하여 대상공정에 대한 FTA에서 안전관리에 해당하는 기본사상들이 모두 있는 경우와 없는 경우, 그리고 안전관리의 상호관계에 따라 사고 발생빈도에 영향을 미치는 효과가 달라질 수 있기 때문에 안전관리를 조합하여 사고 발생빈도를 각각 산출하였다.

### 1-3. 사고 결과분석

사고 결과분석(consequence analysis, CA)은 FTA의 중간사상인 유지보수 오류, 높은 유입압력, [구간 1], [구간 2], [구간 3], [구간 4], [구간 5]의 경우에 대한 공정조건에서 가스사고가 발생하는 7개의 누출시나리오를 설정하고 분석하였다. 각 시나리오에 대해 적용된 누출원모델은 단열흐름에서 배관을 통한 압축성 가스누출의 경우를 적용하였으며, 이때 누출공 크기는 배관직경 25 %로 가정하여 누출속도를 산출하였다.

가스분산은 연속누출인 경우에 대해 Gaussian 분산모델[7]을 적용하여 거리별 농도를 산출하였다. 또한 가스 누출사고 중에서 재산손실이 가장 크게 발생할 수 있는 경우인 증기운 폭발사고에 대해 TNT 당량모델을 사용하여 거리별 과압을 산출하여 폭발영향을 평가하였다.

### 1-4. 재해손실비 산출

각 시나리오별 재해손실비는 가스 공급기지의 총 재산 평가액과 1-3절에서 산출된 거리별 폭발영향인 probability를 곱하여 산출하였다. 산출된 결과는 [시나리오 1]이 3,817,284,758 원, [시나리오 2]가 2,116,845,399 원, [시나리오 3]은 2,005,922,538 원, [시나리오 4]는 3,806,759,231 원, [시나리오 5]는 3,759,799,188 원, [시나리오 6]은 3,058,961,025 원, [시나리오 7]은 367,988,615 원이었다.

## 2. 비용 및 편익 산출

### 2-1. 비용 산출

대상공정의 안전관리 투자비는 법 상의 안전관리 투자항목대로 시행되고 있으나 안전관리 투자비 항목이 안전성 확보에 기여하는 요소와 정도가 서로 보완적인 성격을 띄고 있을 뿐만 아니라 재해발생에 의한 손실비 자료가 부족한 경우에는 안전관리 투자비를 성격에 따라 분류하여 해석할 수 밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 안전관리 투자비를 인력에 의한 안전관리, 자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리, 안전관리시스템 보호 및 유지, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리, 위험요소 대응에 대한 안전조치 등 총 5개 항목으로 분류하여 산출하였다. 또한 안전관리 조합별 투자비용은 FTA에서 중간사상에 대한 안전관리 사상을 고려하여 각각의 안전관리비를 산출하였다.

### 2-2. 편익 산출

안전관리 조합별 잠재재해 손실비는 각 시나리오에 대해 조합별 중간사상의 발생빈도와 중간사상별 재해손실비를 곱하여 산출하고, 이를 합하였다. 산출결과, 최소 잠재재해 손실비는 안전관리가 모두 있는 경우로 371,312 원이었고, 최대 잠재재해 손실비는 안전관리가 모두 없는 경우로 1,159,886,536 원이었다. 또한 안전관리 조합별 편익은 위험성

평가에 의한 구조물 손상에 따른 잠재재해 손실비 감소액으로 산출하였다.

### 3. 투자수준 결정

일반적으로 대상공정의 잠재재해 손실비는 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 따른 비용이 과소 또는 과잉투자될 수 있다고 판단될 뿐만 아니라 실제 안전관리 투자비에 대한 편익경향은 예측하기가 어렵다. 따라서 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 잠재재해 손실비를 산출할 수 없다.

이를 해결하기 위해서 각각의 중간사상별 투자비와 편익을 최대 투자비와 최대 편익으로 나누어 비용율과 편익율을 산출하고, 비용율의 변화에 따른 편익율을 플롯트한 결과, Fig. 2와 같이 전 중간사상에 대하여 유사한 경향을 갖는 무리군을 형성하였다.

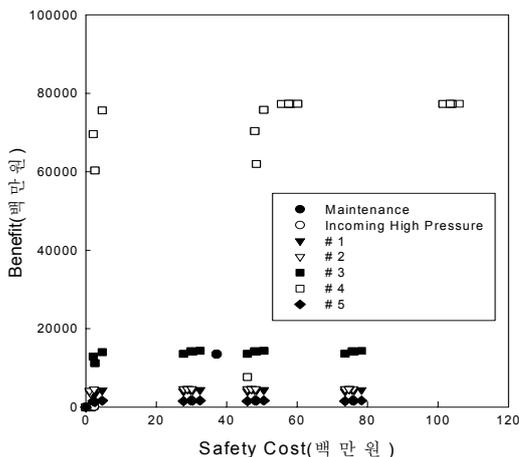


Fig. 1. Cost-Benefit Plots of Intermediate Events.

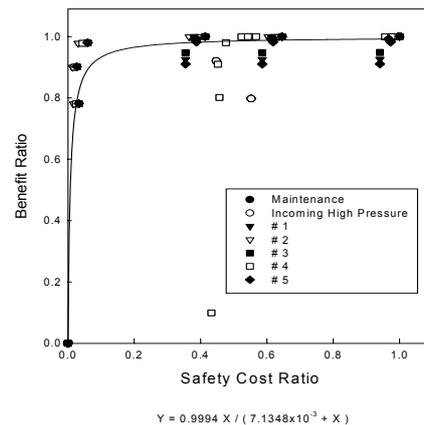


Fig. 2. Ratio Plots of Cost & Benefit.

따라서 비용율에 대한 편익율의 상관식을 비선형 회귀분석방법으로 얻고, 이 상관식을 사용하여 현재 투자된 안전관리 투자비와 최대 편익으로 확장하여 실제 편익과 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다. 그림에서 곡선 윗 부분인 A영역은 비용에 대한 편익이 상관식에 의해 산출된 편익보다 많으므로 과소 투자된 영역으로 정의할 수 있다. 또한 곡선의 아랫부분인 B영역은 비용에 대한 편익이 산출된 편익보다 적으므로 과잉 투자된 영역으로 정의할 수 있다.

적정 투자수준을 결정하기 위해 본 연구에서는 정량적인 위험성 평가에 의해 산출한 잠재재해 손실비를 직접비로 가정하였으나, 실제의 경우에는 인적, 물적 손실이외에 기업의 이미지 실추에 따른 추정손실, 가동정지로 인한 생산손실, 재해수습 여비 등의 간접비를 고려하여야 할 뿐만 아니라 경제적인 측면이외에 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[8], 즉 직접비와 간접비가 1 대 4를 적용하여 간접비를 산출하고 총 잠재재해 손실비를 산출하였다.

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

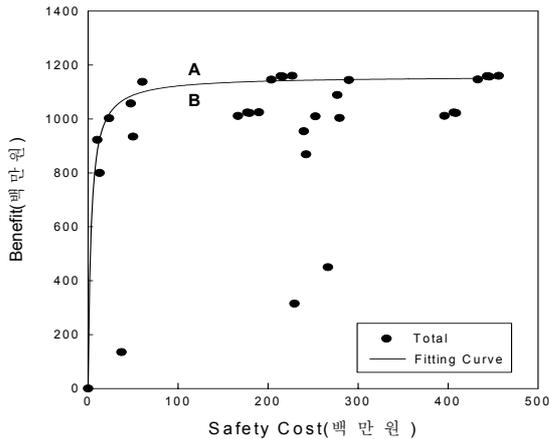


Fig. 3. Expansion Plots of Cost-Benefit.

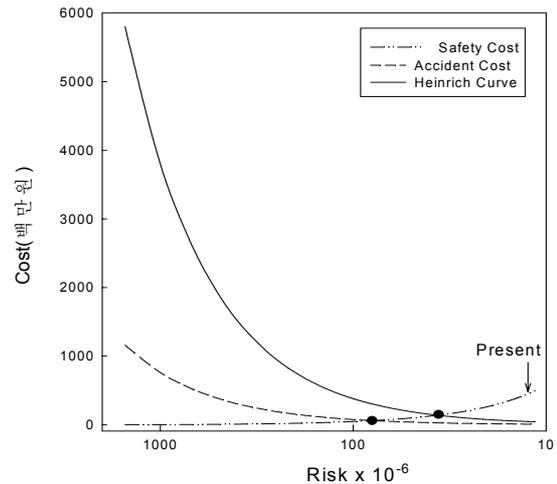


Fig. 4. Optimum Investment Level for Safety Management.

## 결론

가스 공급설비에 대한 공정 위험성 평가(HAZOP, FTA, CA)에 의해 안전관리비에 대한 잠재재해 손실비와 편익을 산출하고, 비용-편익분석을 실시하여 과소 또는 과잉 투자된 안전관리비 항목을 분류할 수 있었다. 또한 안전관리 투자비와 잠재재해 손실비를 비교·분석하여 직접비 또는 간접비를 고려한 적정 안전관리 투자수준을 결정할 수 있었다.

## 참고문헌

1. Sassone, P. G. and Schaffer, W. A., "A Handbook; Cost-Benefit Analysis", Academic Press, New York(1978).
2. 장서일, 한정민, 오신규, 이중희, 조지훈, 김태욱, "가스공급기지에서 위험성 평가에 의한 투자효과분석", *화학공학의 이론과 응용*, 6(2), 2817-2820(2000).
3. 장서일, 이헌창, 장영준, 조지훈, 김태욱, "정량적 위험성 평가에 의한 안전관리 투자의 비용-편익분석", *안전경영과학회 추계학술대회 논문집*, 175-179(2001).
4. 장서일, 이헌창, 조지훈, 오신규, 김태욱, "가스공급기지에서 FMEA/HAZOP에 의한 안전관리 비용-편익분석", *안전경영과학회지*, 3(4), 1-9(2001).
5. IEEE(Institute of Electrical & Electronic Engineers) std-500(1984).
6. American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", New York(1989).
7. Turner, D. B., "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", Cincinnati, OH : U.S. Department of Health, Education and Welfare(1970).
8. Heinrich, H. W., "Industrial Accident Prevention", McGraw-Hill, New York(1931).