

정량적 위험성 평가에 의한 안전관리 투자의 비용-편익분석
Cost-Benefit Analysis for Safety Management Cost
using Quantitative Risk Analysis

장서일
Seo-Il Jang
이헌창
Hun Chang Lee
장영준
Joon Young Jang
조지훈*
Ji-Hoon Cho
김태옥
Tae-Ok Kim

서 론

화학공업에서 발생될 수 있는 사고는 타 업종에 비하여 발생빈도가 낮으나 사고강도는 높아서 중대산업사고(major industrial accident)로 분류하고 있으며, 특히 가스산업에서 발생하는 사고는 사고강도가 매우 높다. 현재 산업사고를 예방하기 위한 제도와 기술적 방안이 마련되고 있으나 가스사고를 효율적으로 예방하기 위한 안전관리 투자는 과학적인 분석이 없이 기업의 주관적인 판단에 의해서 결정되고 있는 실정이다.

비용-편익분석(cost-benefit analysis)은 사고예방을 위한 안전활동에서의 투자 의사 결정 및 투자효과 평가에 매우 중요한 역할을 할 수 있다[1]. 그러나 비용-편익분석 방법을 적용시키기 위해서는 안전관리 비용에 대한 편익을 측정하여 수치화 하여야 하는데 사고발생이 없는 경우에는 편익을 측정하기가 용이하지 못하다.

비용과 편익은 과제의 성격에 따라 음의 효과(negative effect)와 양의 효과(positive effect)로 구분될 수 있으며, 비용은 음의 효과부분으로 편익은 양의 효과부분으로 정의될 수 있다[2]. 그러나 안전관리에서 비용-편익분석을 적용하는데 있어서 문제는 편익과 비용효과를 어떻게 객관적으로 수치화 시킬 수 있느냐 하는 것이다.

이를 해결하기 위해서 공정 위험성 평가방법 중에서 정량적 위험성 평가는 정성적 위험성 평가를 기초로 가상의 사고 시나리오를 정하고 사고의 가능성 및 결과의 잠재적 충격을 정의함으로써 위험을 평가하는 방법으로[3], 이 방법은 위험성 감소에 대한 비용효과를 정량적으로 제공한다.

따라서 본 연구에서는 중대산업사고 중의 하나인 가스사고의 예방을 위한 투자효과의 정량적 평가방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 가스 공정설비에 대하여 정량적 위험성 평가를 실시하고 이를 바탕으로 잠재재해 손실비를 추산하여 비용-편익분석에 의해 현재의 안전관리 투자효과를 분석하였다.

연구방법 및 고찰

본 연구에서는 가스 공급기지를 대상공정으로 설정하고, 검토구간을 5개 구간으로 나누어 정성적 위험성 평가를 실시한 결과를 기초로 결함수 분석(fault tree analysis, FTA)과 사고 결과분석(consequence analysis, CA)을 실시하고, 이를 바탕으로 하여 안전관리 투자비에 대한 잠재재해 손실비를 추산하여 안전관리 투자효과를 평가하기 위한 비용-편익분석을 실시하였다.

1. 정량적 위험성 평가

1-1. 결함수 분석

정성적 위험성 평가에서 분석된 사고결과 중에서 가스누출을 정상사상으로 하여 FTA 프로그램인 KwTree 4.8을 사용하여 결함수 분석을 실시하였다. 대상공정 설비는 비정상 조업 중에 유지보수 오류가 발생할 수 있으며, 정상조업 중에는 전단에서 유입되는 높은 압력에 의해서 가스누출이 발생할 수 있고 각 구간에서도 구간특성에 따라 가스누출이 발생할 수 있다. 따라서 중간사상으로 유지보수 오류, 높은 유입압력, [구간 1], [구간 2], [구간 3], [구간 4], [구간 5]로 설정하여 FTA를 작성하였다. 기본사상의 신뢰도 데이터는 IEEE[4]와 CCPS[5]의 자료를 사용하였다.

대상공정에 대한 FTA에서 안전관리에 해당하는 기본사상들이 모두 있는 경우와 없는 경우에 대해서 가스누출에 대한 연간 발생빈도를 평가하였다. 안전관리가 모두 포함되어 있는 경우에 가스누출의 발생빈도는 2.033×10^{-4} /년으로 중간사상 중에서 [구간 1]과 [구간 3], 그리고 [구간 5]의 경우의 기본사상들의 조합이 전체의 발생빈도의 각각 10.39 %, 21.9 %, 그리고 45.17 %를 나타내었으며, 이중에서 [구간 5]의 자동적인 이상 감지설비(가스누출감지기 등) 실패, 시스템 보호 및 유지 실패, FT-0101 실패, PT-0102 실패, 인력에 의한 안전점검 실패, 배관 안전성 향상조치 실패의 조합이 영향을 크게 주는 기본사상 조합으로 평가되어 상대적으로 다른 중간사상들의 기본사상보다 안전관리가 필요한 것으로 평가되었다. 안전관리가 모두 포함되어 있지 않은 경우에 가스누출의 발생빈도는 4.067×10^{-1} /년으로 [구간 4]의 모니터링 장치실패의 기본사상인 FT-0101 실패, PT-0102 실패와 PSV-0101실패의 기본사상인 PSV-0101 개방 실패에 의한 소규모 파열의 조합이 전체 발생빈도의 20.9 %와 19.67 %를 나타내어 안전관리 효과가 가장 큰 구간은 [구간 4]로 평가되었다.

또한 안전관리 투자비에 대한 비용-편익분석에서 안전관리의 상호관계에 따라 사고 발생빈도에 영향을 미치는 효과가 달라질 수 있기 때문에 안전관리를 조합하여 사고의 발생빈도를 각각 산출하였다.

1-2. 사고결과 분석

사고결과 분석은 가스누출 중에서 가장 재산손실이 크게 발생하는 사고를 증기운 폭발로 가정하였고, FTA의 중간사상인 유지보수 오류, 높은 유입압력, [구간 1], [구간 2], [구간 3], [구간 4], [구간 5]의 경우에 대한 공정조건에서 사고가 발생하는 7개의 누

출시나리오를 설정하였다. 이때 누출공의 크기는 배관직경의 25 %와 50 %로 하였다.

누출속도는 25 %와 50 %의 경우, 유지보수 오류의 [시나리오 1]과 [구간 2]의 [시나리오 4]에서 각각 25.414 kg/s와 101.656 kg/s로 가장 큰 값으로 평가되었고, 또한 가장 낮은 값은 [구간 5]의 [시나리오 7]에서 각각 2.177 kg/s와 8.707 kg/s로 평가되었다.

각 시나리오별 관심농도의 분산거리를 결정하기 위하여 누출이 10분 이상 지속되었다고 가정하여 연속누출을 적용하였다[6]. 이때 누출높이는 대상공정의 배관이 지하에 매설되어 있으므로 0.01 m로 가정하였고 대기안정도는 D, 지역은 시골로 가정하였다.

연속누출인 경우 누출공의 크기변화에 따른 각 시나리오별 UFL과 LFL까지의 거리와 도달시간은 25 %인 경우에 연소가능 범위는 53.7~348.6 m를 나타내었으며, 증기운이 도달하는 시간은 약 3.4~21.8 분으로 계산되었다. 또한 50 %인 경우에 연소가능 범위는 109.5~767.8 m를 나타내었으며, 증기운이 도달하는 시간은 약 6.9~48.1 분으로 계산되었다. 분산모델의 결과와 풍향을 고려해 보았을 때 대상공정은 인근지역과 약 1 km 떨어진 시골지역으로 풍향에 따른 영향지역인 남동, 동, 동남동 지역으로 연소가능 최대범위인 767.8 m까지 발화원을 집중적으로 단속하여야 할 것으로 평가되었다. 또한 대상공정의 설비가 반경 350 m에 집중되어 있으므로 설비내의 안전대책, 시설관리 및 안전관리에 특히 주의를 기울여야 할 것으로 판단되었다.

TNT 당량모델[7]을 사용하여 100, 150, 200, 250, 350 m의 관심거리에서 과압 및 충격량을 산출하였다. 증기운 폭발에 의해 발생하는 과압은 누출공이 배관의 직경의 25 %인 경우에 [시나리오 1]과 [시나리오 4]가 거리에 따라 가장 큰 값을 나타내었고, 100 m에서는 347.342 kPa을 나타내었으나 거리가 증가할수록 급격히 감소하여 350 m에서 28.552 kPa을 나타내었다. 반면에 [시나리오 7]이 가장 낮은 과압이 발생하는 것으로 산출되었다. 또한 50 %의 경우도 [시나리오 1]과 [시나리오 4]가 거리에 따라 가장 큰 값을 나타내어 100 m에서는 1788.709 kPa을 나타내었으며 350 m에서는 110.886 kPa을 나타내어 25 %보다 약 5~4배가 크게 발생하였다.

구조물의 손상을 Eisenberg[8]의 식에 의해 각 시나리오별 probit를 계산하여 probability[9]를 평가하였다. 반경 100 m이내에서는 직경 25 %의 [시나리오 7]을 제외하고는 모든 경우에서 구조물이 전파되었으며 과압이 가장 낮은 [시나리오 7]이 관심거리에서 가장 낮은 구조물 손상을 나타내었다.

2. 비용 산출

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 있을 뿐만 아니라, 특히 본 연구대상의 경우와 같이 재해발생에 의한 손실비 자료가 없는 경우에는 안전관리 투자비를 성격에 따라 항목들을 분류하여 분석할 수 밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 안전관리 투자비를 인력에 의한 안전관리, 자동적인 이상 감

지설비에 의한 기계적인 안전관리, 안전관리시스템 보호 및 유지, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리, 위험요소 대응에 대한 안전조치 등 총 5개 항목으로 분류하여 산출하였다.

2-2. 잠재재해 손실비

7개의 사고 시나리오에 대한 잠재재해 손실비는 대상공정의 총 재산 평가액에서 산출된 거리별 probability를 곱해서 산출하였다. 이때 대상공정은 반경 350 m이내에 건물과 공정이 산재되어 있기 때문에 본 연구에서는 350 m를 기준으로 관심거리의 면적비를 산출하여 대상공정의 총 재산 평가비와 거리별 폭발영향을 곱하여 관심거리내의 구조물의 손상금액을 산출하였다. 그 결과, 누출공의 크기가 배관직경의 25 %인 경우는 최대 약 38억원에서 최소 약 3억7천만원으로 평가되었으며, 배관직경의 50 %인 경우에는 최대 40억원에서 최소 20억원으로 평가되었다.

안전관리 조합에 대한 잠재재해 손실비는 안전관리 조합별 중간사상의 발생빈도와 사고 시나리오별 잠재재해 손실비를 곱하여 산출하였다. 그 결과, 손실비가 가장 적은 경우는 안전관리가 모두 있는 경우로 25 %에서는 약 37만원이었고, 50 %에서는 약 63만원이었다. 또한 손실비가 가장 큰 경우는 안전관리가 모두 없는 경우로 25 %에서는 약 116만원이었고, 50 %에서는 약 150만원이었다.

3. 비용-편익분석[10,11,12]

대상공정에 대한 안전관리의 비용-편익 분석을 실시하기 위하여 지출비용인 안전관리 투자비를 비용으로 산출하였고, 각 안전관리 조합에 대한 편익은 위험성 평가에 의해 산출된 최대 잠재재해 손실비와 각 조합별 손실비의 차액으로 산출하였다. 전체 안전관리 투자비에 대한 편익을 사용하여 산출한 편익/비용은 25 %인 경우는 2.5이었고 50 %인 경우에는 3.3이었다. 이것은 25 %와 50 %에서 사고 발생빈도는 동일하지만 결과분석 결과가 50 %인 경우가 25 %보다 크게 분석되어 최대 잠재재해 손실비의 증가에 의해 편익이 상대적으로 증가하였기 때문이다.

안전관리 조합별 편익/비용은 인력에 의한 안전관리>안전관리시스템 보호 및 유지와 자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리 조합>자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리>배관의 안전성 향상을 위한 안전관리>위험요소 대응에 대한 안전조치와 자동적인 이상 감지설비에 의한 기계적인 안전관리 조합의 순서였으며 각각의 값은 25 %에서는 97.2, 43.1, 24.8, 24.5, 22.2이었고, 50 %에서는 130.5, 58.2, 33.5, 35.4, 29.1이었다.

전체 편익/비용보다 낮은 안전관리 조합은 위험요소 대응에 대한 안전조치, 위험요소 대응에 대한 안전조치와 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리 조합으로 25 %에서는 각각 0.8, 1.7을 나타내었고, 50 %에서는 각각 0.8, 2.2이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 중대산업사고 중의 하나인 가스사고의 예방을 위한 투자효과의 정량적 평가방법을 제시하기 위해서 공정 위험성 평가 중에서 정량적 위험성 평가인 FTA와 CA에 의해 잠재재해 손실비를 추산하여 비용-편익분석에 의해 현재의 안전관리 투자효과를 분석하였다.

FTA와 CA의 수행결과, 연구 대상공정의 위험도는 누출공이 배관직경의 25 %와 50 %일 때 각각 약 37만원/년과 약 63만원/년으로 평가되었다.

정량적 위험성 평가를 바탕으로 잠재재해 손실비를 추산하고 비용-편익 분석을 실시한 결과, 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.

참 고 문 헌

1. 장서일, 한정민, 오신규, 이중희, 조지훈, 김태욱, "가스공급기지에서 위험성 평가에 의한 투자효과분석", 화학공학의 이론과 응용, 6(2), pp2817~2820(2000).
2. Sassone P. G., and Schaffer W. A., "A Handbook ; Cost-Benefit Analysis", Academic Press, New York, San Francisco, London(1978).
3. American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", New York(1999).
4. IEEE(Institute of Electrical & Electronic Engineers) std-500(1984).
5. American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", New York(1989).
6. Turner, D. B., "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", Cincinnati, OH : U.S. Department of Health, Education and Welfare(1970).
7. Baker W. E., Cox P. A., Westine P. S., Kuesz J. J., and Strehlow R. A., "Explosion Hazards and Evaluation", New York, Elsevier(1983).
8. Eisenberg N. A., Lynch C. J., and Breeding R. J., "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).
9. Clancey V. J., "Diagnostic Features of Explosion Damage", 6th International Meeting on Forensic Sciences, Edinburgh, Scotland(1972).
10. Sassone P. G., and Schaffer W. A., "A Handbook ; Cost-Benefit Analysis", Academic Press, New York, San Francisco, London(1978).
11. 김홍배, "비용편익분석론", 홍문사(1997).
12. 김동건, "비용편익분석", 전영사(1997).