

사고 시나리오에 따른 안전관리 비용-편익분석

- Cost-Benefit Analysis for Safety Management with Accident Scenario -

장 서 일 *, 이 영 재 *, 이 현 창 *, 김 태 옥 *

요 약

본 연구에서는 계절별 기후인자를 고려하여 정성적 및 정량적 위험성 평가를 실시하여 사고 시나리오를 설정하였고, 비용-편익분석을 실시하여 사고 시나리오별 안전관리비의 효율을 분석하였다. 그 결과, 최악의 시나리오는 비정상조업에서 유지보수 오류이었고, 가능성 있는 시나리오는 HAZOP 구간#4에서 발생하는 가스 누출사고이었으며, 각 사고 시나리오에서 전체 안전관리 투자비에 대한 편익/비용은 0.043과 0.13이었다. 이때 각 사고 시나리오에서 비용 효과적인 안전관리 항목을 평가할 수 있었다.

1. 서 론

고도의 기술 집약적인 장치산업인 화학공장에서 발생하는 사고는 사고강도가 높기 때문에 중대산업사고로 분류하고 있으며, 특히 가스산업에서 발생하는 사고는 사고강도가 매우 높아서 관련 기관들에 의해 사고예방 대책수립을 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 또한 현재 국내에서 실시하고 있는 PSM(process safety management)에서는 주요 위험설비 내에 잠재되어 있는 위험성을 찾아내고, 위험성을 제거하거나 사고영향을 최소화하기 위해 필수적으로 공정 위험성 평가를 수행하고 있다. 일반적으로 공정의 잠재 위험성은 현재의 화학공정이 정보기술의 발달로 집약적이고 복잡해지고 있기 때문에 사고 시나리오를 설정하여 평가하고 있다. 그러나 현재 가스사고를 효율적으로 예방하기 위한 안전관리는 과학적인 분석이 없이 기업의 주관적인 판단에 의해 투자되고 있는 실정이다. 따라서 비용-편익분석(cost-benefit analysis, CBA)[1]을 사용하여 사고예방을 위한 안전활동에서 투자의 의사결정 및 투자의 효율성을 평가할 수 있다.

본 연구는 전보[2-4]에 이어 우리나라의 계절별 기후인자를 고려하여 사고 시나리오를 최악의 시나리오(catastrophic scenario)와 가능성 있는 시나리오(likely scenario)로 구분하고, 각 사고 시나리오에 대한 비용-편익분석을 실시하여 안전관리비의 효율을 분석하였다.

* 명지대학교 화공학과

2. 사고 시나리오 설정

본 연구에서는 천연가스를 인근 도시가스 회사로 공급하는 A 가스공급기지를 대상 공정으로 하여 정성적 및 정량적 공정 위험성 평가에 의하여 최악의 시나리오와 가능성 있는 시나리오를 설정하였다. 이때, 공정 위험성 평가에서 사고원인과 결과는 HAZOP(hazard and operability study)[5,6]을 사용하였고, 사고 발생빈도는 FTA(fault tree analysis)[7,8] 프로그램인 KwTree 4.8 프로그램을 사용하였다. 그리고 사고 결과 분석(consequence analysis, CA)에서 누출원모델과 분산모델은 지역의 위도, 경도, 고도를 고려하고, 다양한 기후조건을 평가할 수 있는 ALOHA 5.2.3을 사용하였고, 사고 영향은 가스 누출사고에서 가장 재산손실이 크게 발생할 수 있는 증기운 폭발사고로 가정하여 본 연구진이 자체 개발한 RCPMJ-CBA를 사용하였다.

대상공정을 5개의 검토구간으로 나누어 HAZOP을 수행한 결과, 사고결과는 가스공급 중단과 가스누출이었으며, 사고원인과 현재 안전관리 사항을 파악할 수 있었다[3,4]. 또한 HAZOP 결과를 바탕으로 사고 시나리오를 비정상조업과 정상조업으로 구분하고, 비정상조업은 유지보수 오류[MS1]로, 그리고 정상조업은 높은 유입압력[MS2]과 5개의 구간([MS3]~[MS7])으로 설정하고, 각 시나리오에서 직경이 가장 큰 파이프 누출일 때 누출공이 25% 발생하는 것으로 가정하였다.

KwTree 4.8 프로그램에서는 Fig. 1과 같이 7개 중간사상을 설정하여 FTA를 작성하였고, 신뢰도 데이터는 IEEE[9]와 CCPS[10]의 자료를 적용하여 중간사상의 사고 발생빈도를 산출하였다. 또한 안전관리의 상호관계에 따라 사고결과에 미치는 효과가 달라질 수 있기 때문에 안전관리 분류를 기본사상에 포함시켜 안전관리를 조합하여 사고 발생빈도를 각각 산출하였다[3,4].

중간사상에 대한 7개 시나리오에서 사고 결과분석은 대상 공정지역의 기후조건, 즉 월평균 풍속(m/s)과 천분율로부터 산출한 계절별 바람속도와 바람방향 및 평균온도(Table 1)를 사용하여 ALOHA 5.2.3으로 분석하였으며, 시나리오 [MS1]에 대한 결과는 Table 2와 같다.

Table 1. Conditions of Climate with Season

계절	월	평균기온(°C)	풍속(m/s)	풍향
봄	3-5	12	1.9	W
여름	6-8	25	1.4	E
가을	9-11	16	1.3	E
겨울	12-2	-2	1.6	WNW

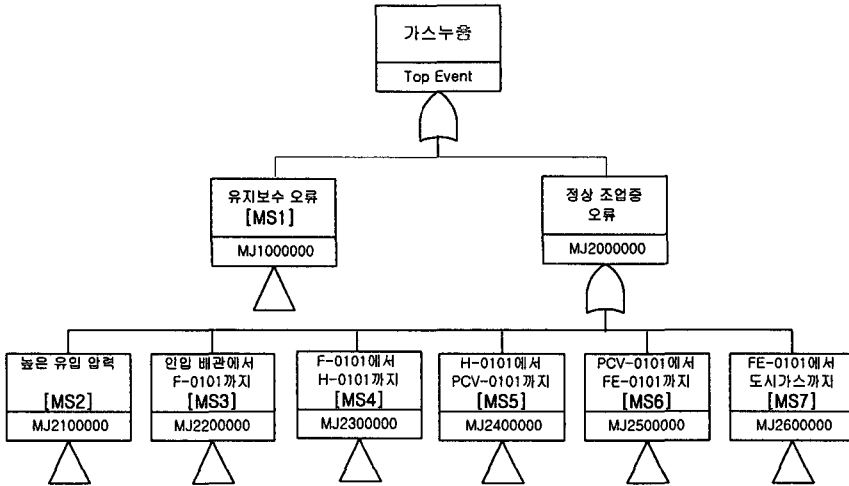


Fig. 1. Fault Tree for Top Event.

Table 2. Calculation Results of Scenario [MS1] by ALOHA

계절	기상인자		총누출량(kg)	UFL(m)	LFL(m)
봄	풍속(m/s)	1.9	355	151	235
	기온(℃)	12			
	상대습도(%)	5			
	구름량(thenths)	0			
여름	풍속(m/s)	1.4	355	163	246
	기온(℃)	25			
	상대습도(%)	5			
	구름량(thenths)	0			
가을	풍속(m/s)	1.3	355	163	244
	기온(℃)	16			
	상대습도(%)	5			
	구름량(thenths)	0			
겨울	풍속(m/s)	1.6	355	154	235
	기온(℃)	-2			
	상대습도(%)	5			
	구름량(thenths)	0			

ALOHA 5.2.3의 산출결과를 바탕으로 RCPMJ-CBA 프로그램에 의해 관심거리에 따른 구조물의 폭발영향을 분석한 결과는 Table 3과 같다.

이때 대상공정은 반경 350m 이내에 산재되어 있으므로 각 시나리오에서 관심거리별 면적비, probability(%), 그리고 대상공정의 총 재산가치를 곱하고, 이들을 합하여 총손실비를 산출하였다. 그리고 총손실비에 안전관리가 모두 없는 경우에 KwTree 4.8에 의해 산출된 발생빈도를 곱하여 잠재재해 손실비를 산출하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Structural Damages of Scenarios at Various Distances by RCPMJ-CBA

거리 \ 시나리오	[MS1]		[MS2]		[MS3]		[MS4]		[MS5]		[MS6]		[MS7]	
	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%	Probit	%
100 m	6.2	88	4.5	31	4.7	37	6.2	88	6.0	85	5.7	56	2.7	1.3
150 m	4.4	58	3.0	2	3.1	3	4.4	28	4.3	24	3.5	7	1.3	0
200 m	3.3	4.5	1.9	0	2.1	0	3.3	4.5	3.2	3.5	2.5	0	0.2	0
250 m	2.5	0	1.1	0	1.2	0	2.5	0	2.3	0	1.7	0	-0.8	0
300 m	1.8	0	0.4	0	0.5	0	1.8	0	1.7	0	1	0	-1.1	0
350 m	1.2	0	-0.3	0	-0.1	0	1.2	0	1.1	0	0.4	0	-	-

Table 4. Potential Accident Cost at Various Scenarios

구분 \ 시나리오	[MS1]	[MS2]	[MS3]	[MS4]	[MS5]	[MS6]	[MS7]
총손실비(원)	551,836,735	115,918,367	142,857,143	551,836,735	499,591,837	234,285,714	4,244,898
발생빈도(/yr)	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}
잠재재해 손실비(원)	19,507,429	55,108	3,118,571	6,721,371	19,084,408	59,227,429	194,416

Table 4에서와 같이 총손실비가 가장 큰 최악의 시나리오는 [MS1]이었고, 가장 가능성이 있는 시나리오는 발생빈도가 큰 [MS6]이었으며, 이 중에서 가장 위험성이 큰 경우는 잠재재해 손실비가 큰 시나리오 [MS6]이었다.

3. 안전관리 비용-편익분석

3.1. 안전관리 투자비

대상공정의 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 산출하였으며, 그 결과는 전보[3,4]와 같다.

3.2. 비용-편익분석

최악의 시나리오 [MS1]과 가능성 있는 시나리오 [MS6]의 경우에 안전관리 투자비에 대한 비용-편익분석은 지출비용인 안전관리 투자비를 비용으로 하고, 각 안전관리 조합에 대한 편익을 산출된 최대 잠재손실액에서 각 조합별 잠재재해 손실비의 차액으로 RCPMJ-CBA 프로그램에 의해 분석하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서와 같이 최악의 시나리오에서와 가능성 있는 시나리오에서 전체 안전관

리 투자비에 대한 편익/비용은 각각 0.043과 0.13이었고, 안전관리 조합별 편익/비용은 각각 [A,E]>[A,D]>[A,D,E]와 [B]>[D,E]>[E]>[A,E] 순서로 값은 각각 0.41, 0.39, 0.32와 5.69, 2.49, 1.43, 1.12이었다. 따라서 안전관리 항목 중에서 비용 효과적인 항목은 최악의 시나리오에서는 위험요소 대응에 대한 안전조치, 안전관리시스템 보호 및 유지, 그리고 자동적인 이상감지설비에 의한 기계적인 안전관리이었고, 가능성 있는 시나리오에서는 인력에 의한 안전관리와 자동적인 이상감지설비에 의한 기계적인 안전관리로 평가되었다.

Table 5. Cost-Benefit Evaluations for Various Combination of Safety Managements

조 합	비용(천원)	편익(천원)		편익/비용	
		Catastrophic	Likely	Catastrophic	Likely
[All]	456,277	19,498	59,227	0.043	0.130
[None]	0	0	0	0	-
[A]	166,533	19,498	0	0.117	0
[B]	10,402	0	59,198	0	5.691
[C]	12,848	0	5,881	0	0.458
[D]	229,369	0	46,196	0	0.201
[E]	37,125	0	53,305	0	1.436
[A,B]	203,658	19,498	59,198	0.096	0.291
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
[A,C,D,E]	289,744	19,498	58,054	0.067	0.200

- 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

4. 결 론

본 연구는 우리나라의 계절별 기후인자를 고려하여 공정 위험성 평가(HAZOP, FTA, CA)를 실시하여 사고 시나리오를 설정하였고, 비용-편익분석을 실시하여 사고 시나리오별 안전관리비의 효율을 분석하였다.

그 결과, 최악의 시나리오는 비정상조업에서 유지보수 오류이었고, 가능성 있는 시나리오는 HAZOP 구간#4에서 발생하는 가스 누출사고이었으며, 각 사고 시나리오에서 전체 안전관리 투자비에 대한 편익/비용은 0.043과 0.13이었다. 이때 각 사고 시나리오에서 비용 효과적인 안전관리 항목을 평가할 수 있었다.

5. 참고문헌

- [1] P. G. Sassone and W. A. Schaffer, "A Handbook; Cost-Benefit Analysis", Academic Pres, New York(1978).
- [2] 장서일, 이헌창, 조지훈, 오신규, 김태욱, "가스공급기지에서 FEMA/HAZOP에 의

- 한 안전관리 비용-편익분석”, *안전경영과학회지*, 3(4), 1-9(2001).
- [3] 장서일, 조지훈, 김태욱, “정량적 위험성 평가에 의한 안전관리 투자의 비용-편익 분석”, *안전경영과학회지*, 4(4), 15-26(2002).
- [4] 장서일, 김태욱, “가스공급기지에서 공정 위험성 평가에 의한 최적 안전관리 투자 수준 결정”, *한국가스학회지*, 7(3), 1-6(2003).
- [5] Chemical Industries Association Limited, “A Guide to Hazard and Operability Studies”, London, 42(1977).
- [6] J. Suokas and Rouhiainen, “Quality Management of Safety and Risk Analysis”, Elsevier Science Publishers B.V.(1993).
- [7] American Institute of Chemical Engineers, “Guidelines for Hazard Evaluation Procedures”, New York(1985).
- [8] H. E. Lambert, “Systems Safety Analysis and Fault Tree Analysis”, UCID -16238, 31(1973).
- [9] IEEE(Institute of Electrical & Electronic Engineers) std-500, 1984.
- [10] Center for Chemical Process Safety(CCPs)/AIChE, “Guidelines for Process Equipment Reliability Data”, New York(1989).