

가스공급기지에서 사고 시나리오에 따른 안전관리비 평가

장 서 일 · 김 소 미 · † 김 태 옥
명지대학교 공과대학 화학공학과
(2004년 7월 5일 접수, 2004년 9월 16일 채택)

Assessment of Safety Management Cost with Accident Scenarios at Gas Governor Station

Seo-Il Jang · So-Mi Kim and Tae-Ok Kim
Department of Chem. Eng., College of Eng., Myongji University
(Receive 5 July 2004 ; Accepted 16 September 2004)

요 약

본 연구는 계절별 기후상태를 고려한 정성적 및 정량적 위험성 평가에 의해 최악의 시나리오와 가능성이 높은 시나리오를 설정하고, 비용-편익분석에 의해 시나리오별 안전관리비의 효율을 평가하였다. 그 결과, 최악의 시나리오는 비정상조업에서 유지보수 오류이었고, 가능성이 높은 시나리오는 HAZOP 구간 #4에서 발생하는 가스 누출사고이었다. 또한 각 시나리오에서 전체 안전관리비에 대한 편익/비용과 효과적인 안전관리 항목을 평가할 수 있었다.

Abstract - This study established a catastrophic scenario and a likely scenario by qualitative and quantitative risk assessments to consider climate condition with season, and assessed efficiency of safety management cost with scenarios by cost-benefit analysis. As results, the catastrophic scenario was the maintenance error for unsteady state operation, and the likely scenario was the gas release accident at node #4 of HAZOP. Also, benefit/cost ratios for total safety management cost and effective items of safety management could be assessed at each scenario.

Key words : safety management, cost-benefit analysis, accident scenario, LNG, catastrophic scenario, likely scenario

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, 그 위험성을 제

거하거나 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 평

† 주저자 : kimto@mju.ac.kr

가할 수 있다.

본 연구는 전보[2-4]에 이어 우리나라의 계절별 기후상태를 고려하여 사고 시나리오를 최악의 시나리오(catastrophic scenario)와 가능성이 높은 시나리오(likely scenario)로 구분하고, 각 시나리오에서 안전관리비에 대한 비용-편익분석을 실시하여 안전관리비의 효율을 평가하였다.

II. 사고 시나리오 설정

천연가스를 인근 도시가스 회사로 공급하는 A 가스공급기지를 대상공정으로 하여 정성적 및 정량적 공정 위험성 평가에 의해 최악의 시나리오와 가능성이 높은 시나리오를 설정하였다. 이때, 공정 위험성 평가에서 사고결과와 원인분석은 HAZOP(hazard and operability study)[5,6]을 사용하였고, 사고 발생빈도는 한국원자력연구소에서 개발한 FTA(fault tree analysis)[7,8] 프로그램인 KwTree 4.8 프로그램을 사용하였다. 그리고 사고 결과분석(consequence analysis, CA)에서 누출원모델과 분산모델은 지역의 위도, 경도 및 고도를 고려하고, 다양한 기후조건을 평가할 수 있는 ALOHA 5.2.3을 사용하였고, 사고영향은 가스 누출사고에서 가장 재산손실이 크게 발생할 수 있는 증기운 폭발사고로 가정하여 본 연구진이 자체 개발한 RCPMJ-CBA를 사용하였다. 이때, RCPMJ-CBA 프로그램은 사고 결과분석에

의해 비용-편익 분석을 수행하는 프로그램으로, 사고결과 분석에서 누출원모델은 Hopper[9]의 2-K 방법을, 그리고 증기운 폭발은 TNT 당량 모델[10]을 각각 사용하였다.

먼저 대상공정은 5개의 검토구간, 즉 인수지에서 이물질질을 걸어내는 필터(F-0101)까지의 천연가스 공급배관, 필터(F-0101)에서 히터(H-0101)까지의 배관, 히터(H-0101)에서 천연가스를 감압하는 압력조절밸브(V-0101)까지의 배관, 밸브(V-0101)에서 유량계(FE-0101)까지의 배관, 그리고 유량계(FE-0101)에서 도시가스까지의 배관으로 나누어 HAZOP을 수행하였다. 그 결과, 사고결과는 가스공급 중단과 가스 누출이었으며, 사고원인과 현재 안전관리 사항을 파악할 수 있었다[3,4]. 또한 정량적 위험성 평가를 실시하기 위해 HAZOP 결과를 바탕으로 사고 시나리오를 비정상조업과 정상조업으로 구분하고, Fig. 1과 같이 비정상조업은 유지보수 오류(시나리오 [MS1])로, 그리고 정상조업은 높은 유입압력(시나리오 [MS2])과 5개의 구간 #1~#5, 즉 시나리오 [MS3]~[MS7]로 설정하였다. 이때, 파이프 누출에서 누출공의 크기는 파이프 직경에 따라 다양하게 보고되어 있으나[11,12], 본 연구에서는 직경이 가장 큰 파이프에서 누출되고, 누출공은 파이프 직경의 25%로 가정하였다.

KwTree 4.8 프로그램에서는 Fig. 1과 같이 7개 중간사상, 즉 5개의 HAZOP 구간과 히터로 유입되는 배관에서의 유지보수 오류, 그리

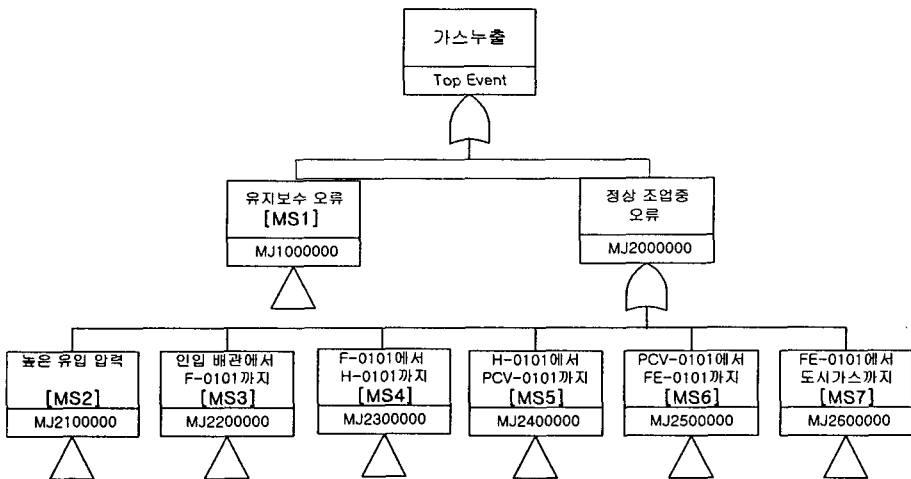


Fig. 1. Fault tree for top event.

가스공급기지에서 사고 시나리오에 따른 안전관리비 평가

고 압력조절밸브 고장에 의한 압력상승을 설정하여 FTA를 작성하였고, 시나리오의 공정조건은 Table 1과 같다. 그리고 신뢰도 데이터는 IEEE[13]와 CCPS[14]의 자료를 적용하여 중간사상([MS1]~[MS7])의 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 Table 2에서와 같이 대상공정지역의 기후조건[15], 즉 월 평균풍속(m/s)과 천분율로부터 산출한 계절별 바람속도와 바람방향 및 평균온도를 사용하여 ALOHA 5.2.3으로 분석하였으며, 시나리오 [MS1]에 대한 결과는 Table 3과 같다.

ALOHA 5.2.3의 산출결과를 바탕으로 RCPMJ-CBA 프로그램에 의해 관심거리에 따른 구조물의 폭발영향을 분석한 결과는 Table 4

Table 1. Process conditions of scenarios.

Scenario	Intermediate event	Pressure (kgf/cm ² G)	Temperature (°C)	Pipe diameter (in)
[MS1]	Failure of maintenance/repair	70.5	10	10
[MS2]	High pressure at inlet line	8.5	0	16
[MS3]	[#1]	70.0	10	6
[MS4]	[#2]	70.0	10	10
[MS5]	[#3]	70.0	45	10
[MS6]	[#4]	8.5	0	20
[MS7]	[#5]	8.5	0	8

Table 2. Climate conditions with season[15].

Season	Month	Average temp.(°C)	Wind speed(m/s)	Wind direction
Spring	3-5	12	1.9	W
Summer	6-8	25	1.4	E
Fall	9-11	16	1.3	E
Winter	12-2	-2	1.6	WNW

Table 3. Calculated results of scenario [MS1] by ALOHA

Season	Climate		Total release amount(kg)	UFL(m)	LFL(m)
Spring	Wind speed(m/s)	1.9	355	151	235
	Average temp.(°C)	12			
	Relative humidity(%)	5			
	Cloud cover(thenths)	0			
Summer	Wind speed(m/s)	1.4	355	163	246
	Average temp.(°C)	25			
	Relative humidity(%)	5			
	Cloud cover(thenths)	0			
Fall	Wind speed(m/s)	1.3	355	163	244
	Average temp.(°C)	16			
	Relative humidity(%)	5			
	Cloud cover(thenths)	0			
Winter	Wind speed(m/s)	1.6	355	154	235
	Average temp.(°C)	-2			
	Relative humidity(%)	5			
	Cloud cover(thenths)	0			

와 같다. 이때, 대상공정은 반경 350m 이내에 산재되어 있으므로 각 시나리오에서 관심거리별 면적비, probability(%), 그리고 대상공정의 총 재산가치를 곱하고, 이들을 합하여 총 손실비를 산출하였다. 그리고 총 손실비에 안전관리가 모두 없는 경우에 KwTree 4.8에 의해 산출된 발생빈도를 곱하여 잠재재해 손실비를 산출하였으며, 그 결과는 Table 5에 나타내었다.

보에 기여하는 요소와 정도가 서로 보완적인 성격을 띄고 있기 때문에, 본 연구에서는 안전관리비 항목들을 성격에 따라 HAZOP에서 총 5개 항목, 즉 인력에 의한 안전관리, 자동적인 이상감지설비에 의한 기계적인 안전관리, 안전관리시스템 보호 및 유지, 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리, 그리고 위험요소 대응에 대한 안전조치로 분류하고, 각 항목에 대한 안전

Table 4. Structural damages of scenarios with various distances by RCPMJ-CBA.

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

Table 5. Potential accident cost at various scenarios.

Scenario Classification	[MS1]	[MS2]	[MS3]	[MS4]	[MS5]	[MS6]	[MS7]
Total accident cost(Won)	551,836,735	115,918,367	142,857,143	551,836,735	499,591,837	234,285,714	4,244,898
Likelihood(/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}
Potential accident cost (Won)	19,507,429	55,108	3,118,571	6,721,371	19,084,408	59,227,429	194,416

Table 5에서와 같이 총 손실비가 가장 큰 최악의 시나리오는 비정상조업에서 유지보수 오류, 즉 시나리오 [MS1]이었고, 가능성이 높은 시나리오는 발생빈도가 큰 HAZOP 구간 #4, 즉 시나리오 [MS6]이었으며, 이 중에서 위험도가 가장 큰 경우는 잠재재해 손실비가 가장 큰 경우인 시나리오 [MS6]이었다.

관리비를 산출하였으며, 산출결과는 각각 166,533 천원, 10,402천원, 12,848천원, 229,369 천원, 37,125천원이었다[3,4].

III. 안전관리 비용-편익분석

3.1. 안전관리비

대상공정은 「도시가스안전관리기준통합고시」 상의 19개 안전관리 투자항목[16]대로 시행하고 있으나, 안전관리비 항목은 안전성 확

3.2. 비용-편익 분석

최악의 시나리오 [MS1]과 가능성이 높은 시나리오 [MS6]의 경우에 안전관리비에 대한 비용-편익분석은 RCPMJ-CBA 프로그램을 사용하였다. 즉, 지출비용인 안전관리비를 비용으로 하고, 각 안전관리 조합에 대한 편익을 산출된 최대 잠재손실액에서 각 조합별 잠재재해 손실비의 차액으로 산출하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Cost-benefit evaluations for various combination of safety managements.

Combination	Cost(Won)	Benefit(Won)		Benefit/Cost	
		Catastrophic	Likely	Catastrophic	Likely
[All]	456,277,000	19,498,000	59,227,000	0.043	0.130
[None]	0	0	0	0	-
[A]	166,533,000	19,498,000	0	0.117	0
[B]	10,402,000	0	59,198,000	0	5.691
[C]	12,848,000	0	5,881,000	0	0.458
[D]	229,369,000	0	46,196,000	0	0.201
[E]	37,125,000	0	53,305,000	0	1.436
[A,B]	203,658,000	19,498,000	59,198,000	0.096	0.291
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
[A,C,D,E]	289,744,000	19,498,000	58,054,000	0.067	0.200

- A : the manual safety management
- B : the mechanical safety management by automatic detecting instrument
- C : the maintenance and protection of safety management
- D : the safety management for upgrade of pipe safety
- E : the safety management for risk element

Table 6에서와 같이 최악의 시나리오에서와 가능성이 높은 시나리오에서 전체 안전관리 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 시나리오 경우 인력에 의한 안전관리, 위험요소 대응에 대한 안전조치, 그리고 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리이었고, 가능성이 높은 시나리오에서는 자동적인 이상감지설비에 의한 기계적인 안전관리와 위험요소 대응에 대한 안전조치로 평가되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 계절별 기후상태를 고려하여 정성적 및 정량적 공정 위험성 평가(HAZOP, FTA, CA)를 실시하여 최악의 시나리오와 가능성이 높은 시나리오를 설정하고, 안전관리비에 대한 비용-편익분석을 실시하여 시나리오별 안전관리비의 효율을 평가하였다.

공정 위험성 평가결과, 최악의 시나리오는 비정상조업에서 유지보수 오류이었고, 가능성이 높

은 시나리오는 HAZOP 구간 #4에서 발생하는 가스 누출사고이었다. 또한 각 시나리오에서 전체 안전관리비에 대한 비용-편익분석 결과, 편익/비용은 0.043과 0.13이었다. 이때, 비용 효과적인 안전관리 항목은 최악의 시나리오 경우 인력에 의한 안전관리, 위험요소 대응에 대한 안전조치, 그리고 배관의 안전성 향상을 위한 안전관리이었고, 가능성이 높은 시나리오에서는 자동적인 이상감지설비에 의한 기계적인 안전관리와 위험요소 대응에 대한 안전조치로 평가되었다.

참 고 문 헌

- [1] Sassone, P. G. and Schaffer, W. A., "A Handbook; Cost-Benefit Analysis", Academic Pres, New York(1978).
- [2] Jang, S. I., Lee, H. C., Cho, J. H., Oh, S. K., and Kim, T. O., "Cost and Benefit Analysis for Safety Management Cost by FEMA/HAZOP at Gas Governor Station", *J. of the Safety Management & Science*, 3(4), 1-9 (2001).
- [3] Jang, S. I., Cho, J. H., and Kim, T. O., "Cost-Benefit Analysis for Safety

- Management Cost using Quantitative Risk Analysis", *J. of the Safety Management & Science*, 4(4), 15-26 (2002).
- [4] Jang, S. I. and Kim, T. O., "Determination of Optimum Investment Level for Safety Management by Process Risk Assessment at Gas Governor Station", *J. of the Korean Institute of Gas*, 7(3), 1-6(2003).
- [5] Chemical Industries Association Limited, "A Guide to Hazard and Operability Studies", London, 42(1977).
- [6] Ford, K. A. and Brown, W. H., "Innovation Application of the HAZOP Technique", *the AIChE Spring National Meeting*, Orlando, March(1990).
- [7] American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", CCPS/AIChE, New York(1985).
- [8] Lambert, H. E., "Systems Safety Analysis and Fault Tree Analysis", UCID-16238, 31(1973).
- [9] Hooper, W. B., "The Two-K Method Predicts Head Losses in the Pipe Fittings", *Chem. Eng.*, 24, 96-100(1981).
- [10] Crowley, W. K., "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", Technical Manual TM 5-1300, U.S. Army & Air Force, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C(1969).
- [11] Kayses, P. J., "Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques", Office of Environmental & Scientific Affairs, World Bank, Washington, D.C(1985).
- [12] American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases", CCPS/AIChE, New York(1999).
- [13] IEEE(Institute of Electrical & Electronic Engineers) std-500(1984).
- [14] American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Process Equipment Reliability Data", CCPS/AIChE, New York(1989).
- [15] <http://www.kma.go.kr>
- [16] 「도시가스안전관리기준통합고시」 산업자원부고시 제1998-30호, 제1998-107호, 제1999-36호.