

EPS 공정의 정량적 위험성 평가를 통한 안전의사결정에 관한 연구

정재희, 김형석*, 최광석*, 이영순

서울산업대학교 안전공학과, *서울산업대학교 산업대학원 안전공학과

1. 서론

기업을 경영하는 과정에서 사업주는 여러 가지 경영상의 문제점에 직면하게 되는 데 그 중 안전과 관련된 중요한 문제를 열거하면 다음과 같다. 첫째, 사고 발생 가능성의 문제로 “어디서 무엇이 잘못될 수 있으며, 사고의 발생가능성은 얼마나 되는가” 하는 것과 둘째, 사고결과에 미치는 영향의 문제로 “허용할 수 있는 피해규모는 얼마나 되며, 피해가 발생 가능하다면 우리가 부담해야 할 비용은 얼마나 되는가” 하는 것이다. 또한 관리적인 문제로 “위험한 기기는 전체 중 얼마나 되며, 인력 및 자원을 어떤 곳에 집중적으로 투자해야 하는가 또한 이들 위험 설비에 개선이 필요하다면 사용하는 방법이 가장 최적의 방법은 무엇인가” 등의 문제를 예로 들 수 있다.

안전에 있어서 의사결정은 복수의 기준이 존재하기 때문에 위험, 비용, 생산성 등 여러 기준을 고려하여 선택하게 된다. 이러한 의사결정의 최대 과제는 상충하는 기준들간의 절충이다. 즉, 위험을 최소로 하면서 비용, 안전, 생산성에서 가장 좋은 대안을 추구하는 것이 이상적이다. 이러한 다기준이 존재하는 의사결정의 문제는 광범위할 뿐만 아니라 복잡하기 때문에 다기준 의사결정문제에서 최적의 의사결정을 내리기 위해서는 여러 가지 분석이 이루어져야 한다. 즉, 종합적인 위험성 평가를 통한 의사결정이 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 EPS(Expanded Poly Styrene) 공정 중 중합공정의 위험성을 사고발생 빈도분석, 사고결과 영향분석 방법으로 평가하고, 이를 기준으로 여러 대안을 제시하여 각 대안에 대해 최적의 의사결정을 하는 과정 및 방법을 연구하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 위험(risk)은 사고가 일어날 가능성(Frequency)과 사고결과(Consequence)를 곱한 값으로 표시할 수 있는데 같은 사고라도 피해정도가 크다면 받아들이는 위험이 달라질 수 있기 때문에 이들 변수를 고려하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_s = F(\text{Frequency}) \times \sum \alpha C(\text{Consequence}) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 α 는 사고결과에 대한 가중치, C는 정규화(normalization)된 사고결과이다.

이익함수(benefit function) $B(X)$, 비용함수(cost function) $Q(Y)$ 은 식(2) 및 식(3)에 의해 산출할 수 있다.

$$B(X) = k_1X_1 + k_2X_2 + \dots + k_nX_n(\text{₩/yr}) \dots \dots \dots (2)$$

$$Q(Y) = \sum_{i=1}^n Y_i(\text{₩/yr}) \dots \dots \dots (3)$$

여기서 X 는 위험감소 속성인자(Risk reduction attribute), k 는 속성의 가치(attribute value)이고, Y_i 는 대안선택 비용이다.

경제적인 가치(Economical value) $Ev(\text{₩/yr})$ 는 식(4)에 의해 산출할 수 있다.

$$Ev(\text{₩/yr}) = B(X) - Q(Y) \dots \dots \dots (9)$$

3. EPS 중합공정의 안전의사결정

3.1 사고시나리오의 작성

EPS 중합공정은 회분식 반응공정(batch reaction process)으로서 위험성 평가를 실시한 결과 중대 사고를 일으킬 수 있는 대표적인 요인은 반응폭주에 의한 반응기 폭발 및 독성물질의 누출사고이다. 이와 같은 형태의 사고는 주로 기기의 고장과 운전자의 조작실수에 의해 야기될 수 있으며 원료투입잘못(charge miss), 교반기의 정지, 냉각시스템의 고장(normal cooling system, emergency cooling system), 스팀공급의 과잉(over steam supply), 분산제어시스템(DCS)에서의 의사결정 잘못, 정전 및 계장 공기공급 중단, 유기용액 제조시 BPO 과량 투입(Human error), 질소 퍼지 불량, 온도지시제어경보기(TICA : temperature indicator control alarm) 고장, 압력방출장치고장(relief device failure), 반응중지제(STC) 투입 잘못 등으로 조사되었다. EPS 반응공정에 대한 위험분석에서 얻어진 사고 시나리오는 표 1과 같다.

3.2 Event Tree 분석

중합공정에서 rupture, leak, overflow, external fire, 과국적 인적오류 등을 제외한 대부분의 공정사고는 sequence accident를 갖는다. 이들 sequence accident를 가장 잘 표현할 수 있는 것이 ETA법이다. 그러나 지진, 홍수, 화재 등은 고려하지 않았고, electric power panel의 고장은 고려하지 않았으며 안전장치의 전기적 문제만을 대상으로 하였다.

3.3 FTA 분석

EPS 중합공정에 대한 FTA 분석법은 다음과 같은 원칙에 의해 실시하였다. 위험을 화재, 폭발, 독성물질 누출로 분류하여 ① 폭발의 형태 ② 기여하는 요소(Contributing Factor) 즉, 위험을 일으키는 위험의 발생원(source) ③ 위험의 발생 위치(vessel, pipe) ④ 고장형태(Failure mode) ⑤ 고장을 일으키는 원인 ⑥ 사고의 최종 원인 등을 고려한 계층구조로 구성하였다.

표 1. EPS 회분식 반응공정의 사고시나리오

SCENARIO 1	EPS Reactor에 온도가 상승되어 반응폭주가 발생되었다. 이때 압력 방출장치(relief device)가 failure 되어 Reactor의 압력 상승으로 반응기가 폭발하였다.
SCENARIO 2	EPS Reactor에 온도가 상승되어 반응폭주가 발생되었다. 이때 발생된 압력은 relief device를 통해 대량의 슬러지가 대기로 방출하였다.
SCENARIO 3	EPS Reactor로 Discharge 후 N ₂ purge line의 고장으로 인하여 반응조 내부가 치환이 않된 상태에서 내부원료 투입시 점화원에 의해 폭발이 발생하였다.
SCENARIO 4	분산제(pentane, butane) 저장탱크에서 반응기로 투입하는 line에 leak가 발생하였다.

3.4 사고확률분석 결과

FTA, ETA 기법을 활용한 각 시나리오의 사고확률 분석 결과는 표 2와 같다.

표 2. 각 시나리오의 중대사고 발생 빈도

SCENARIO	major accident	frequency
1	EXPLOSION	$9.2 \times 10^{-3}/\text{yr.}$
2	RELEASE	$8.2 \times 10^{-4}/\text{yr.}$
3	EXPLOSION	$4.5 \times 10^{-6}/\text{yr.}$
4	FIRE	$1.8 \times 10^{-7}/\text{yr}$

4. 안전의사결정

같은 플랜트 혹은 같은 공정에서 중대사고를 발생시킬 수 있는 경로는 다양하며 다양한 경로에서 일어날 수 있는 사고 시나리오는 여러 가지가 있을 수 있다. 그러나 다양한 경로의 모든 시나리오에 대하여 대책을 수립 할 수는 없다. 상대적으로 위험이 큰 시나리오에 대하여 대책을 수립할 필요가 있으며 이렇게 하기 위해서는 위험의 크기를 (1)식과 같이 결정해야 한다.

4.1 시나리오 선택

사고결과 영향평가로 얻어진 결과 값을 나타내면 표 3과 같다. 표 3은 사고형태, 인구밀도, 설비의 중요도 등에 따라 사고결과영향을 미치는 결과 값이 다르게 나타날 수 있기 때문에 이들 요소를 구분하여 나타낼 수 있다. 그러나 사고결과 설비에 미치는 중요도 및 인근주민의 피해정도는 정성적인 양이기 때문에 이들을 구간척을 사용하여 정량화 하였다.

Shannon의 엔트로피 방법을 사용하여 가중치(w_j)를 구하면 $w_j = \{0.08, 0.108, 0.146, 0.385, 0.268, 0.013\}$ 이다.

표 3. 각 시나리오에 따른 사고결과영향

시나리오	사고결과영향					
	사상자 수 (명)	재산손실액 (설비+수리비) (천만원)	조업중단일수 (일)	최대 영향거리 (m)	사고결과 실비에 미치는 중요도	인근주민의 피해정도
시나리오 1	8	100	730	70	9	5
시나리오 2	20	2	30	2000	1	9
시나리오 3	8	100	300	55	9	5
시나리오 4	3	80	180	100	3	7

그러나 의사결정자가 어떤 문제에 대한 통찰력과 경험에 근거한 의사결정의 주관적 또는 직관적 지식을 반영해야 한다. 대개 의사결정자는 확실하지는 않지만 의미 있는 약간의 정보를 가지고 있을 수 있으므로 판단이나 경험을 배제시키는 것이 아니라 판단 및 경험이 직접 적용될 사건에 의사결정자의 주관적인 가중치(s_j)를 부여함으로써 가능하다. 의사결정자의 가중치를 고려하여 α 를 결정하면 다음과 같다.

$$s_j = \{ 0.25, 0.2, 0.2, 0.05, 0.01, 0.29 \}$$

$$\alpha = \{ 0.207, 0.224, 0.303, 0.199, 0.028, 0.039 \}$$

	F	$\Sigma \alpha C$	Rs
시나리오 1. (9.2×10^{-7} /yr)	6	0.667	4.00
시나리오 2. (8.2×10^{-4} /yr)	7	0.464	3.25
시나리오 3. (4.5×10^{-6} /yr)	5	0.486	2.43
시나리오 4. (1.8×10^{-7} /yr)	4	0.336	1.34

각 시나리오에 대한 위험의 크기 Rs으로부터 시나리오 1를 선택한다.

4.2 최종 대안에 대한 의사결정

FTA상에 나타난 중요도를 상위 10개까지의 목록에 대하여 가장 기여도 및 중요도가 큰 대안을 선택하였다. 선택된 대안은 비용수준(cost level)과 비교하여 채택여부를 결정한 최종대안은 다음과 같다.

- A1 : · Relief 장치를 병렬로 설치
- A2 : · 3way valve로 연결된 Normal cooling line과 Emergency cooling line을 별도로 설치
- A3 : · TICA(Temperature Indicator Control Alarm)을 병렬로 설치

최종대안 A1의 경우 폭발이 일어날 확률은 1.540×10^{-6} 이다. A1에 대한 cost-benefit 분석을 하면 표 4와 같다. 또한 대안선택으로 인한 비용은 표 5와 같다.

표 4. A1에 대한 위험감소의 가치

인적사고에 대한 위험감소 가치	재산손실에 대한 위험감소 가치	생산중단에 대한 위험감소 가치
· 인적사고 가치 8.1×10 ⁷ [₩/사상자]		· 생산중단 가치 1×10 ⁷ [₩/일]
· 빈도평가 값 7.36×10 ⁴ [사상자/yr]	· 빈도평가 값 9.2×10 ⁴ [₩/yr]	· 빈도평가 값 6.7×10 ⁴ [일/yr]
· 대안선택으로 인한 인적사고 감소 1.23×10 ⁵ [사상자/yr]	· 대안선택으로 인한 재산손실 감소 1.54×10 ³ [₩/yr]	· 대안선택으로 인한 생산중단 감소 1.12×10 ³ [일/yr]
· Risk reduction 7.35×10 ⁴ [사상자/yr]	· Risk reduction 9.05×10 ⁴ [₩/yr]	· Risk reduction 6.59×10 ⁴ [일/yr]
5.95×10 ⁷ [₩/yr]	9.05×10 ⁴ [₩/yr]	6.59×10 ⁴ [₩/yr]

표 5. 대안선택으로 인한 비용

buy a safety system cost	:	7240[₩/yr]
installation cost	:	2715[₩/yr]
operation & maagement cost:		1810[₩/yr]
system energy cost	:	905[₩/yr]
Total		1.27×10 ⁴ [₩/yr]

위와 같은 방법으로 나머지 A2, A3 분석한 최종 결과는 표 6과 같다.

표 6. 최종대안에 대한 결과 값[₩/yr]

최종대안 가치	A1	A2	A3
B(X) :			
인적사고	5.95×10 ⁵	8.65×10 ⁵	3.32×10 ⁵
재산손실	9.05×10 ⁴	1.23×10 ³	7.23×10 ¹
생산중단	6.59×10 ⁵	7.69×10 ⁵	1.89×10 ⁵
Q(Y) :			
cost	1.27×10 ³	8.24×10 ³	6.26×10 ⁴
최종값	1.34×10 ⁶	0.93×10 ⁶	0.53×10 ⁶

(4)식에서 경제적 가치가 가장 큰 것이 A1이므로 이를 선택한다. 따라서 대안 A1에 대해 사고를 완화시키기 위해서 선택한 개선사항을 적용한다.

5. 결론

EPS(Expended Poly Styrene) 중합공정을 연구대상으로 이에 관한 사고 시나리오별 종합적 위험성 평가를 실시하여 대안을 추출하고, 안전의사결정을 실시하

여 효과적인 안전관리 및 시설개선 방향을 제시하는 안전의사결정을 과정을 연구하였다. 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 종합적인 위험성 평가를 통한 의사결정의 대상은 중대사고를 발생시킬 수 있는 결과에 대해서 공정분석, 작업분석, 위험확인을 통하여 4가지의 중대사고를 발생시킬 수 있는 시나리오를 작성하였다.

2. 각 시나리오에 대해 ETA, FTA, HRA 등의 사고발생 빈도분석 및 사고결과 영향 평가를 실시하였다. 시나리오 1, 2, 3, 4의 사고발생빈도는 $9.2 \times 10^{-5}/\text{yr}$, $8.2 \times 10^{-4}/\text{yr}$, $4.5 \times 10^{-6}/\text{yr}$, $1.8 \times 10^{-7}/\text{yr}$ 이었으며 시나리오별 사고영향을 평가하여 피해범위를 산출하였다.

3. 위험의 크리를 산출하기 위하여 각 시나리오에 대해 위험의 구성요소를 6가지로 구분하여 의사결정기법을 적용하였다. 그 결과 시나리오 1에 대한 위험 값이 4.00으로 결정되어 시나리오 1이 채택되었다.

4. 채택된 시나리오는 사고발생 빈도분석에서 나타난 중요도를 토대로 공장에서 부담하여야 할 비용수준(cost level)을 설정하여 각 대안에 대해 개선대책을 수립함으로써 최종 대안 3개를 도출하였다. 도출된 최종 대안을 수행하는 데 있어서 기업에서 부담하여야 할 안전조치 비용과 예상되는 효과를 분석하여 안전 의사결정의 최적화를 시도한 결과 A1이 채택되었다.

6. 참고문헌

1. 원자력연구소, "Accident Sequence Quantification with KIRAP", KAERI/TR-848, 1997.
2. 정민근·정재희, "인간공학 및 시스템안전", 한국산업안전공단, 1994.
3. 이영순 외 4인, "화학안전공학", 대명사, 1994.
4. CCPS, "Guidelines For Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York, 1989.
5. CCPS, "Guidelines For Process Equipment Reliability Data", AIChE, New York, 1989.
6. 이영순 외, "화학설비의 위험성 평가 기법 개발", 노동부, 1993.
7. 김성희 외3, "의사결정분석 및 응용", 영지문화사, 1997.
8. 함병호, "크실렌증기 누출사고의 영향평가 및 사고결과에 미치는 매개변수의 민감도분석", 명지대학교 박사논문, 1995.
9. 정민근·정재희, "인간공학 및 시스템안전", 한국산업안전공단, 1994.
10. Baker, w.e., Cox P.a., Westine, P.S., Kulesz, J.J and Strehlow, R.A., "Explosion Hazards and evaluation" (Elesvier, Amsterdam, The Netherlands), 1983.
11. CCPS, "Tool for Making Acute Risk Decisions with Chemical Process Safety Applications" AIChE, New York, 1995.