

EPS 공정의 정량적 위험성 평가를 통한 안전의사결정에 관한 연구

A Study on the EPS Process of Quantitative Risk Assessment for the Safety Decision Making

정재희* · 김형석** · 최광석** · 이영순*

J.H. Chung · H.S. Kim · K.S. Choi · Y.S. Lee

(1998년 8월 6일 접수, 1999년 5월 24일 채택)

ABSTRACT

The quantitative risk assessment and consequence analysis by accident scenario in the process of EPS(Expendable Poly Styrene) reaction process are conducted. And the decision making process is studied followed by selecting various alternatives to safety management and facility improvement. The result are as follows:

- 1) The object of decision making through comprehensive risk assessment are the scenario which can cause four major accident, which are made by process analysis, work analysis and hazard identification.
- 2) Frequency analysis of ETA, FTA, HRA and consequence analysis of accident to each have been conducted. The each frequency values are yielded $9.2 \times 10^{-5}/\text{yr}$ to scenarios 1, $8.2 \times 10^{-4}/\text{yr}$ to scenario 2, $4.5 \times 10^{-6}/\text{yr}$ scenario 3 and $1.8 \times 10^{-7}/\text{yr}$ to scenario 4. The each scenarios have been conducted consequence analysis.
- 3) The calculated values have been obtained 4.00 to scenario 1, 3.25 to scenario 2, 2.43 to scenario 3 and 1.34 to scenario 4, as the weight value had been applied to the quantitative and normalized criteria of all components. As a risk criteria, scenario 1 have been selected, which is the most dangerous scenario as a result of ranking the scenario.
- 4) According to the importance of FTA and contribute to scenario 1, the cost-benefit values are

* 서울산업대학교 안전공학과

** 서울산업대학교 산업대학원 안전공학과

yielded 8.05×10^9 [₩/yr] to final alternative(A1), 1.55×10^9 [₩/yr] to final alternative(A2) and 2.32×10^5 [₩/yr] to final alternative(A3).

As a result of final alternative(A1) has been selected, which is the most optimized alternative.

1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

국내에 적용하려는 정량적 위험성 평가는 크게 확률론적 위험분석과 사고결과 영향분석 방법으로 나눌 수 있다. 이들을 평가하기 위해서는 상당히 많은 노력과 기술, 자원 등이 투입된다. 그러나 어렵게 평가한 결과를 직접 경영활동에 적용시켜 활용하는 방법이 아직 미흡하다.

기업 활동에 있어서 기업의 경영전략과 상반되는 안전 전략은 채택되기 어렵다. 특히 정량적 위험성 평가를 통해 사고가 일어날 결과 및 확률은 본질적으로 정량적 위험성 평가 자체가 불확실성을 내포하고 있기 때문에 이것만으로는 큰 의미가 없다. 따라서 정량적 위험성 평가가 이루어진 후 이를 기반으로 하여 기업 경영활동에 위배되지 않으면서도 가장 효과적인 대안을 제시하고, 이 대안에 걸맞는 적절한 안전 조치를 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 EPS(Expendable Poly Styrene) 공정을 연구대상으로 하여 사고 시나리오를 정하고 각 시나리오별로 정량적 위험성 평가를 실시하여 사고 발생빈도 및 사고 결과영향을 결정하였다. 이를 기준으로 대안을 제시하여 최적의 대안을 찾는 안전 의사 결정을 하는 과정 및 방법을 연구하였다.

1.2 안전의사결정에 관련된 문제

공장을 경영하면서 여러 가지 문제에 직면하게 된다. 그 중 안전과 관련한 여러 문제 중 몇 가지 중요한 문제를 열거하면 다음과 같다.

첫째, 사고 발생 가능성의 문제로 “어디서 무엇이 잘못될 수 있으며, 사고발생 가능성은 얼마나 되는가” 하는 것이다.

둘째, 사고 결과에 미치는 영향의 문제로 “허용할 수 있는 피해규모는 얼마나 되며, 우리가 부담해야 할 손실비용은 얼마나 되는가” 하는

것이다.

셋째 관리적인 문제로 “위험한 기기는 전체 중 얼마나 되며, 인력 및 자원을 어떤 곳에 집중적으로 투자하여야 하고, 공정 내에 존재하는 모든 위험을 줄이기 위해 플랜트와 운전 설비들에 대해 어떻게 자원을 분배해야 하는가” 또한 “공정 내에 존재하는 위험을 줄이기 위해 어떤 조치를 취해야 하고, 위험을 줄이기 위한 많은 대안들 중 어떤 것을 선택해야 하며 이들 위험 설비를 개선한다면 가장 최적의 방법은 무엇인가” 등이 있다.

사고를 일으킬 수 있는 수천 가지의 기기 중에서 사고에 직접 영향을 주는 기기는 불과 수십 가지에 불과하다. 따라서 사고를 일으키는 가장 중요한 기기는 무엇인가를 파악하는 것이 중요하다.

1.3 연구 방법

1.2절에서 제시한 문제를 해결하기 위해서 각 단계에 적용시킨 평가 방법은 다음과 같다.

- ① 사고 가능성의 문제-확률론적 위험성 평가
- ② 사고 결과에 미치는 영향 문제-사고 결과 영향 평가
- ③ 자원의 분배 및 투자 문제-확률론적 위험성 평가의 중요도 분석
- ④ 대안 도출의 문제-중요도 및 기여도 분석
- ⑤ 위험 감소 완화 조치 문제-사고 확률 및 사고 결과영향 평가
- ⑥ 시나리오 도출의 문제-HAZOP 자료 검색
- ⑦ 도출된 시나리오 선택의 문제-사고 확률 및 사고 결과영향 가중치 산출
- ⑧ 선택된 대안의 최적 방법 도출 문제-비용 효과분석(Cost-benefit analysis)

2. 이론적 배경

일반적으로 위험(risk)은 사고가 일어날 가능

성(Frequency)과 사고결과영향(Consequence)을 곱한 값으로 표시할 수 있다. 그러나 같은 사고라도 피해 정도가 크다면 받아들이는 위험이 달라질 수 있기 때문에 이들 변수를 고려하여 식(1)과 같이 제안할 수 있다.

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

여기서 α 는 사고 결과에 대한 가중치, C는 정규화(normalization)된 사고 결과이다.

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

$$B(X) = k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots + k_n X_n (\$/\text{yr}) \dots\dots\dots (2)$$

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

여기서 X는 위험감소 속성인자(Risk reduction attribute), k는 속성의 가치(attribute value)이고, Y_i는 대안선택 비용이다.

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

$$Ev(\$/\text{yr}) = B(X) - Q(Y) \dots\dots\dots (4)$$

3. EPS 종합공정의 안전의사결정

3.1 공정개요

EPS 종합공정은 회분식 반응공정(batch reaction process)으로 크게 혼합 및 중합, 탈수, 건조, 선별, 코팅, 포장 등의 6단계로 구분된다.

EPS 종합공정은 EPS 수지를 생산하기 위하여 현탁 중합방법을 이용하여 스티렌 모노머, 순수, 분산제, 개시제 등 기타 물성항상제를 일정비율로 반응조에 투입한 후 가열하여 정해진 중합을 만큼 중합을 진행하고, 여기에 펜탄, 부탄가스를 반응조에 투입하여 PS수지내에 가스가 함침된 상태의 EPS수지를 만드는 공정이다.

EPS 생산 공정의 공정흐름도는 Fig. 1과 같다. 중합(반응)공정은 수용성 용액(aqueous solution)와 유기용제(organic solution)를 반응기에 공급한 다음 반응기의 자켓(jacket)을 통해서 약 90℃까지 승온 후 75% 정도의 변환이 이루어지

면, 펜탄(pentane)을 공급한 다음 110℃까지 상승시킨다. 중합이 끝난 다음 35℃까지 냉각시켜서 일정 시간동안 유지하면 이 공정은 모두 끝나게 된다.

3.2 사고시나리오의 작성

반응공정의 잠재적 위험을 확인하기 위해 HAZOP(Hazard and Operability) 평가 자료를 활용하였다. 평가결과 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 개시제 과량 투입, 질소 퍼지 불량, 온도지시제어 경보기(TICA : temperature indicator control alarm) 고장, 압력방출장치고장(relief device failure), 반응중지제(STC) 투입 잘못 등으로 조사되었다. EPS 반응공정에 대한 HAZOP을 통한 얻어진 사고 시나리오는 Table 1과 같다.

Table 1 Accident scenecario in the EPS batch process

SCENARIO 1	EPS 반응기의 온도가 상승되어 반응폭주가 발생되었다. 이때 압력방출장치(relief device)가 고장나서 반응기 압력 상승으로 반응기가 폭발하였다.
SCENARIO 2	EPS 반응기에 온도가 상승되어 반응폭주가 발생되었다. 이때 발생된 압력은 압력방출장치를 통해 대량의 슬러지가 대기로 방출하였다.
SCENARIO 3	반응이 끝난 물질이 배출된 후 N ₂ 퍼지 라인의 고장으로 인하여 반응조 내부가 치환이 안된 상태에서 내부원료 투입시 점화원에 의해 폭발이 발생하였다.
SCENARIO 4	분산제(pentane, butane) 저장탱크에서 반응기로 투입하는 라인의 필터 막힘이 발생하여 분산제가 누출되어 화재가 발생하였다.

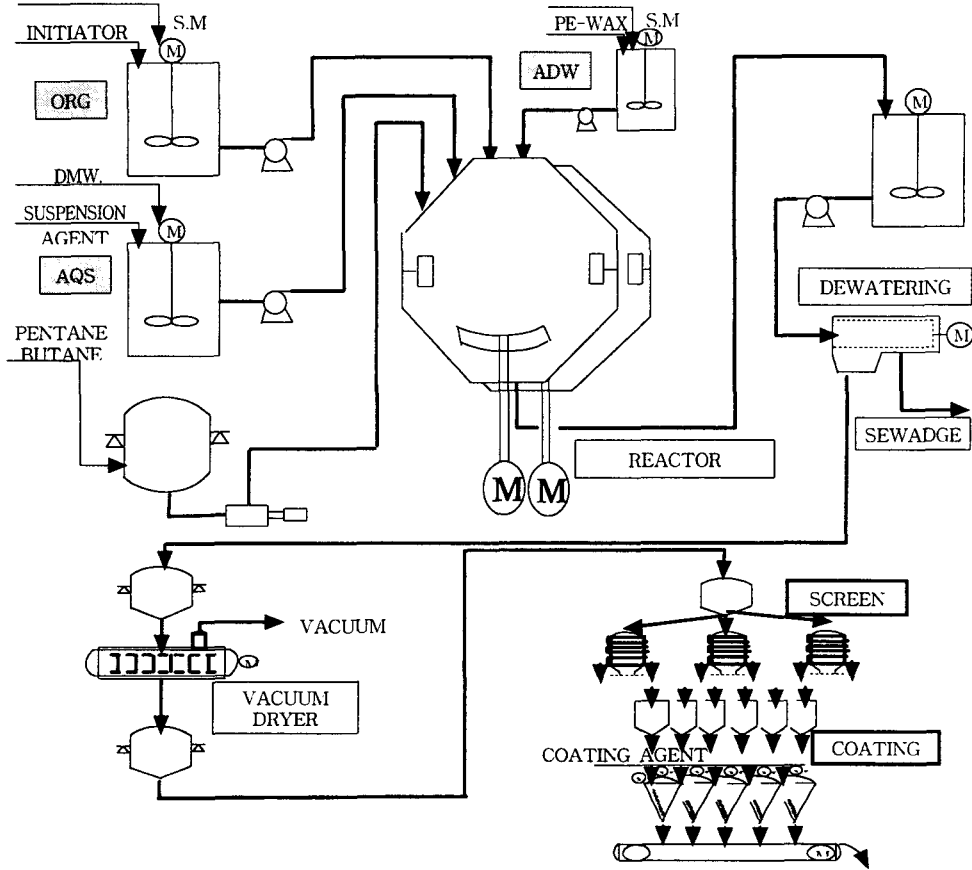


Fig. 1 EPS process flow diagram

3.3 Event Tree 분석

EPS 공정의 각 시나리오를 ETA(Event Tree Analysis)와 FTA(Fault Tree Analysis)를 실시하였다. 여기서는 ETA로 각 시나리오의 사고경위를 나타내고 ETA의 표제를 FTA로 상세 분석하였다. 이러한 이유는 파열, 누출, 넘침(overflow), 외부화재(external fire), 파국적 인적오류 등을 제외한 대부분의 공정사고는 순차적 사고(sequence accident)를 갖는다. 이들 순차적 사고를 가장 잘 표현할 수 있는 것이 ETA(Event Tree Analysis)법이다¹⁾. 그러나 지진, 홍수, 화재 등은 고려하지 않았고, 배전반의 고장은 고려하지 않았으며 안전장치의 전기적 문제만을 대상으로 하였다. Fig. 2는 4개의 시나리오 중

시나리오1에 대한 ETA도를 나타내었다.

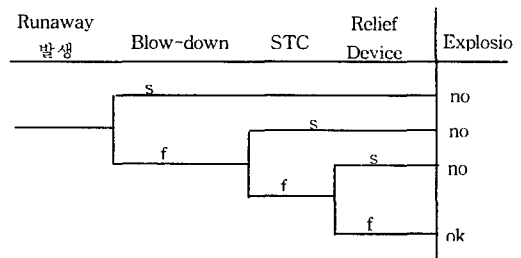


Fig. 2 The accident scenario1 shown in ETA diagram

3.4 FTA(Fault Tree Analysis) 분석

EPS 중합공정에 대한 FTA 분석법은 다음과

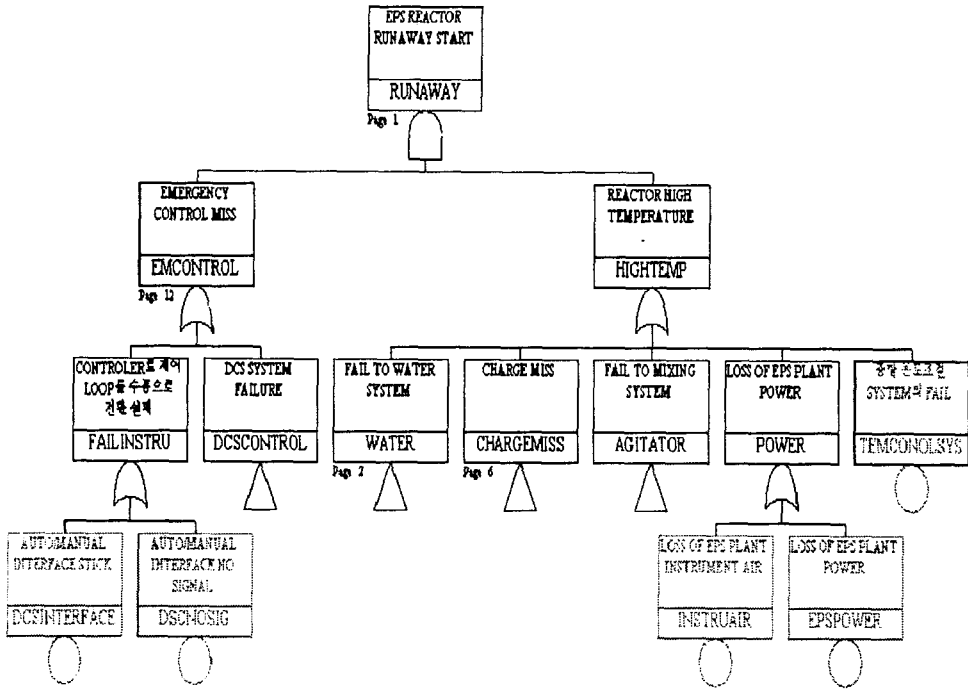


Fig. 3 FT diagram in the accident scenario 1

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 발생위치(vessel, pipe) ④ 고장형태(Failure mode) ⑤ 고장을 일으키는 원인 ⑥ 사고의 최종 원인 등을 고려한 계층구조로 구성하였다²⁾. 고장을 데이터는 CCPS(Center for Chemical Process Safety)와 원자력 연구소의 일반 고장율(Generic Database: GDB) 등을 활용하였고, 인간 오류분석 값은 보수적인 값을 사용하였다³⁻⁶⁾. 또한 FTA 평가를 위한 Tool은 KIRAP Ver. 1.0을 사용하였으며 Minimal Cut Set 및 중요도 분석은 KCUT Version 4.5g를 이용하여 계산 및 분석하였다.

시나리오 1에 대한 FT도를 작성하면 Fig. 3과 같다.

3.5 사고확률분석 결과

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

Table 2 The frequency of major accident to scenario 1, 2, 3, 4

SCENARIO	major accident	frequency
1	EXPLOSION	9.2×10^{-9} /yr.
2	RELEASE	8.2×10^{-4} /yr.
3	EXPLOSION	4.5×10^{-8} /yr.
4	FIRE	1.8×10^{-7} /yr

3.6 사고결과분석 Tool

본 평가에 사용된 결과분석 프로그램은 Super-Chems Version 3.1 Professional Edition (Arthru D Little)이다. Super-Chems은 Vessel, Pipe로부터 증기, 2상흐름, 액체흐름 누출이 발생되어 독성, 화재, 폭발 등의 사고에 대한 상세한 위험분석을 할 수 있는 프로그램이다⁷⁾.

Table 3 The consequence of major accident to scenario 1, 2, 3, 4

시나리오	사고결과영향					
	사상자 수 (명)	재산손실액 (설비+수리비) (천만원)	조업중단일수 (일)	최대 영향거리 (m)	사고결과 설비에 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

4. 안전의사결정

같은 플랜트 혹은 같은 공정에서 중대 사고를 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 식(1)과 같이 결정해야 한다.

4.1 시나리오 선택

사고결과 영향평가로 얻어진 결과 값을 나타내면 Table 3과 같다. Table 3은 사고형태, 인구 밀도, 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 엔트로피방법을^{8,9)} 사용하여 가중치(w_j)를 구하면 $w_j = \{0.08, 0.108, 0.146, 0.385, 0.268, 0.013\}$ 이다.

그러나 의사 결정자가 어떤 문제에 대한 통찰력과 경험에 근거한 의사 결정의 주관적 또는 직관적 지식을 반영해야 한다. 대개 의사 결정자는 확실하지는 않지만 의미 있는 약간의 정보를 가지고 있을 수 있으므로 판단이나 경험을 배제시키는 것이 아니라 판단 및 경험이 직접 적용될 사건에 의사 결정자의 선호도 가중치(s_j)를 부여함으로써 가능하다.

만약 의사 결정자가 시나리오를 선택하는데 있어서 6가지 요소 중 인근 주민의 피해 정도가

가장 중요하고, 사상자 수, 재산손실, 조업 중단 일 순으로 의사 결정자의 선호도 가중치를 갖는다면 s_j 는 다음과 같다.

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

이들 각 6가지의 요소 합은 1이 되어야 한다.

의사 결정자의 가중치를 고려하여 α 를 결정하면 다음과 같다.

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

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

각 시나리오에 대한 위험의 크기 Rs으로부터 시나리오 1을 선택한다.

4.2 최종 대안에 대한 의사결정

최종 대안을 선택하는데 있어서 고려해야 할 사항은 채택된 대안이 위험을 감소시키는데 얼마나 이익이 있는가의 가치를 평가해야 한다.

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 $1.540 \times 10^{-6} / \text{yr}$ 로 감소한다. A1에 대한 cost-

benefit 분석을 하면 Table 4와 같고, 대안선택으로 인한 비용은 Table 5와 같다.

Table 4 Risk reduction value for the alternative A1

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^{-2} [일/yr]
· 대안선택으로 인한 인적사고 감소 1.23×10^{-5} [사상자/yr]	· 대안선택으로 인한 재산손실 감소 1.54×10^5 [₩/yr]	· 대안선택으로 인한 생산중단 감소 1.12×10^{-3} [일/yr]
· Risk reduction 7.24×10^{-4} [사상자/yr]	· Risk reduction 9.05×10^4 [₩/yr]	· Risk reduction 6.59×10^{-2} [일/yr]
5.86×10^3 [₩/yr]	9.05×10^3 [₩/yr]	6.59×10^2 [₩/yr]

Table 5 Input cost by chosen alternative A1

buy a safety system cost	720 [₩/yr]
installation cost	270 [₩/yr]
operation & management cost	190 [₩/yr]
system energy cost	90 [₩/yr]
Total	1.27×10^3 [₩/yr]

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

식(4)에서 경제적 가치가 가장 큰 것이 A1이므로 이를 선택한다.

따라서 대안 A1에 대해 사고를 완화시키기 위해서 선택한 개선사항을 적용한다.

Table 6 Comparing the calculated value in the alternative A1, A2, A3

최종대안 가치	A1 [₩/yr]	A2 [₩/yr]	A3 [₩/yr]
B(X):			
인적사고	5.86×10^4	8.65×10^4	3.32×10^4
재산손실	9.05×10^4	1.23×10^5	7.23×10^4
생산중단	6.59×10^5	7.69×10^5	1.89×10^5
Q(Y):			
cost	1.27×10^3	8.24×10^2	6.26×10^4
최종값	8.06×10^2	1.55×10^2	2.32×10^2

5. 결 론

EPS(Expendable Poly Styrene) 중합 공정을 연구 대상으로 이에 관한 사고 시나리오별 종합적 위험성 평가를 실시하여 대안을 추출하고, 안전 의사결정을 실시하여 효과적인 안전관리 및 시설 개선 방향을 제시하는 안전 의사결정을 하는 과정 및 방법을 연구하였다. 이들 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 종합적인 위험성 평가를 통한 의사 결정의 대상은 중대사고를 발생시킬 수 있는 결과에 대해서 공정 분석, 작업 분석, 위험 확인을 통하여 4가지의 중대사고를 발생시킬 수 있는 시나리오를 작성하였다.
- 2) 각 시나리오에 대해 ETA, FTA, HRA 등의 사고 발생 빈도분석 및 사고결과 영향 평가를 실시하였다. 시나리오 1, 2, 3, 4의 사고 발생빈도는 9.2×10^{-5} /yr, 8.2×10^{-4} /yr, 4.5×10^{-6} /yr, 1.8×10^{-7} /yr이었으며 시나리오별 사고 영향을 평가하여 피해범위를 산출하였다.
- 3) 위험의 크기를 산출하기 위하여 각 시나리오에 대해 위험의 구성 요소를 6가지로 구분하여 의사 결정기법을 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 안전의사결정의 최적화를 시도한 결과 A1이 채택되었다.

6. 추후 연구과제

본 논문에서 사용된 설비의 신뢰도 값은 원자력 분야 및 외국에서 사용되는 고장율을 적용하였으므로 우리 나라 실정에 적합한 값이 아니고, 사고손실 비용 또한 공장에서 예측하는 비용을 참조하여 분석하기 때문에 공인된 사고손실비용이 아니다. 또한 사고결과 피해예측 프로그램 또한 대부분 외국의 제품들로 국내에서 이

들 프로그램이 아직 개발되어 있지 못한 실정이다. 따라서 이들과 관련된 문제는 향후 지속적인 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 원자력연구소, "Accident Sequence Quantification with KIRAP", KAERI/TR-848, pp. 24~51, 1997.
- 2) CCPS, "Guidelines For Hazard Evaluation Procedures 2nd Ed.", AIChE, New York, pp. 160~173, 1992.
- 3) 원자력연구소, "Development of a Human Reliability Analysis Procedure for a Low Power/Shutdown Probabilistic safety Assessment in Pressurized Light Water Reactors", KAERI/TR-913, pp. 9~25, 1997.
- 4) Lees F.P., "Loss Prevention in the Process Industries", Bofferworths Heinemann Ltd, Vol. II, London & Boston, 1980.
- 5) CCPS, "Guidelines For Process Equipment Reliability Data", AIChE, New York, pp. 127~212, 1989.
- 6) 이영순 외, "PBL 공정의 정량적 위험성 평가", 용역연구보고서, 안전과학연구소, pp. 110~138, 1997.
- 7) "SuperChems™ Professional User Guide Version 3", Arthur D. Little, Inc. Cambridge, Massachusetts 02149, 1997.
- 8) 김성희 외3, "의사결정분석 및 응용", 영지문화사, pp. 300~312, 1997.
- 9) Shannaon, C.E. & W. Weaver., "The Mathematical Theory of Communication", The Univ. of Illinois Press., 1947.