

PBL 반응공정의 정량적 위험성 평가에 관한 연구
- 결함수분석(FTA) 및 사고결과영향분석(CA)을 중심으로-

이영순 · 강순중* · 최봉선** · 김형석

서울산업대학교 안전공학과, *한국산업안전공단, **안전과학연구원
(1998년 3월 17일 접수, 1998년 4월 10일 채택)

**A Study on the Advancement of Quantitative Risk
Assessment for the PBL Process**

- The Center of FTA and Consequence Analysis-

Young-Soon Lee · Sun-Jung Kang* · Bong-Sun Choi** and Hyong-Shuk Kim

Dept. of Safety Eng., Seoul National Polytechnic University,
**Korea Industrial Safety Corporation,*
***Safety Science Research Consulting*

(Received 17 March 1998; accepted 10 April 1998)

요 약

PBL(Poly Butadiene Latex) 반응공정을 연구대상으로 하여 사고 시나리오를 작성하고 시나리오별 정량적 위험성 평가 및 사고결과 영향평가를 실시하였다. 정량적 위험성 평가 결과 PBL 반응기가 반응폭주로 인한 사고확률은 $9.197 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 로 나타났고, 중요도가 가장 큰 것은 압력방출장치(Relief Device)이다. 사고영향평가 결과 반응기가 폭발이 일어날 때 기준점에서의 최대폭발과압(peak overpressure)은 $5.066 \times 10^5(\text{Pa})$ 이고, 유리창이 파열될 수 있는 영향(피해) 범위는 거의 공장 전 지역을 포함한다. 폭풍의 직·간접적인 원인에 의하여 근로자가 사망할 수 있는 최대 영향반경은 27m이고, 고막의 손상을 일으키기 위한 최대 영향반경은 77m로 나타났다. PBL 반응기가 폭발했을 때 건축물과 같은 구조물이 받을 수 있는 손상 정도는 폭심으로부터 52m까지로 나타났다. 이들 평가 결과를 기준으로 효과적인 안전시설 투자에 대한 시설개선 방향을 제시하였다.

Abstract - A quantitative risk assessment and consequence analysis for PBL(Poly Butadiene Latex) reaction processes were performed. As a result of the quantitative risk assessment, for the accident probability of PBL reactors causing a reaction runaway, was calculated as $9.197 \times 10^{-5}/\text{yr}$

The most important factor that affected the accident probability of PBL reactor was the relief device. When the reactor exploded, peak overpressure at the target point was $5.066 \times 10^5(\text{Pa})$ and the range of effects windows to be broken occurred in almost all of the factory areas.

The maximum radius of effect was 27m, in which workers could be die by the direct, for eardrum damage was calculated at 77m. When the PBL reactor exploded, the extent of structural damage to buildings was calculated from the center of the explosion to a range of 52m.

The results of the study's assessment have provided a direction for facility's improvement as well as effective safety investment.

Key words : PBL reacting process, quantitative risk assessment, accident probability, radius of effect, safety investment

1. 서 론

산업기술의 발달은 우리의 생활을 더욱 편리하게 하였지만 산업구조와 사회구조가 점점 더 복잡해져 중대사고를 발생할 위험성 또한 커지고 있다. 특히 가스나 유기용제, 독성물질 또는 화학약품의 사용은 더 많아지나 이러한 물질들에 대한 위험성 평가는 실시되지 않고 있는 실정이다.

미국, 영국 등 선진국에서는 본질적으로 안전한 설비 (Inherently Safer Plant)를 개발하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 이는 지금까지의 안전장치를 부착하고 경보장치를 설치하는 등의 소극적인 방법에 의한 안전대책에서 위험을 근원적으로 없애거나 경감시켜 본질적으로 안전한 설비를 만들자는 것이다.

PBL(Poly Butadiene Latex) 공정은 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)수지 제조를 위한 유화 중합공정으로 부타디엔, 아크릴로니트릴, 스티렌모노머 등 가스 및 인화성 물질을 다량 취급하고, 반응조건이 고압, 고온이며 운전조건이 복잡하여 화재·폭발의 위험성이 큰 공정이다. 이러한 공정에 존재하는 모든 위험을 찾아내어 평가하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 정량적 위험성 평가를 통하여 한정된 비용으로 가장 효과적인 시설투자를 할 수 있도록 하는 기초자료를 얻기 위해서 정량적 위험성 평가를 실시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 종합적인 위험성 평가 모델링 절차

위험성 평가 모델링 절차를 나타내면 Fig. 1과 같다. Fig. 1과 같이 위험성을 평가할 때 가장 우선적으로 수행되어야 할 것은 잠재적 위험확인이다. 확인된 위험으로부터 사고 시나리오를 작성하고, 시나리오별 인적·물적·설비적 고장논리도를 작성하여 사고의 가능성 및 사고결과 영향평가를 실시한 후 위험의 크기와 영향을 산출한다. 이때에 분석된 사고의 영향은 인적·설비적 개선 및 피해 최소화

대책을 수립하는 등 안전관리 프로그램을 작성한다.

2.2 사고확률 평가

2.2.1 Minimal Cut Set(MCS)과 Minimal Path set(MPS)

구성된 FT(Fault Tree)에서 정상사상이나 중간사상의 발생확률을 계산하여 이것을 예측하는 것도 중요하지만 정상사상 발생에 영향을 미치는 요소를 파악하는 것도 확률계산 못지않게 중요하다고 할 수 있다.

이와 같이 정상사상의 위험성을 효과적이고 경제적으로 감소시키기 위하여 사용되는 방법이 최소 컷셋(Minimal Cut sets)과 최소 패스셋(Minimal Path sets)이다. MCS는 Fussell의 알고리즘으로 구할 수 있으며 MPS[3]는 FT의 논리게이트를 쌍대로 취하여 Fussell의 알고리즘을 통하여 구할 수 있다.

2.2.2 중요도 분석

중요도 분석은 중대사고(화재, 폭발, 독성)빈도에 어떠한 인자가 중요한 영향을 미치는 것 인지를 파악하는 것이다. 중요도 분석의 평가 척도로는 Fussell-Vesely(F-V)중요도, RRW (Risk Reduction Worth), RAW (Risk Achievement Worth) 등이 있다.[1]

F-V는 각 Basic event가 전체 시스템에 기여하는 정도를 나타내는 것으로서 basic event가 시스템에 얼마나 크게 기여하는가를 파악할 수 있다. F-V가 큰 것은 RRW 역시 크다.

RRW는 주어진 Basic event의 고장확률이 0, 즉 퍼펙트 하다고 가정하였을 때에 전체 고장확률이 감소되는 비이다. RRW가 높을 수록 선효과가 크다는 것을 뜻하며, 어떠한 기기나 운전절차, 보수절차 등이 개선되었을 때 큰 효과가 있는지를 파악할 때 사용될 수 있다. 즉, 어떤 것을 중점관리 해야 하는 것을 알 수 있다.

RAW는 주어진 Basic event의 고장확률이 1, 즉 해당하는 기기가 고장났다고 가정하였을 때에 전체고장확률이 증가되는 비이다. RAW가 높을수록 해당 기기의 고장이 큰 영향을 미친

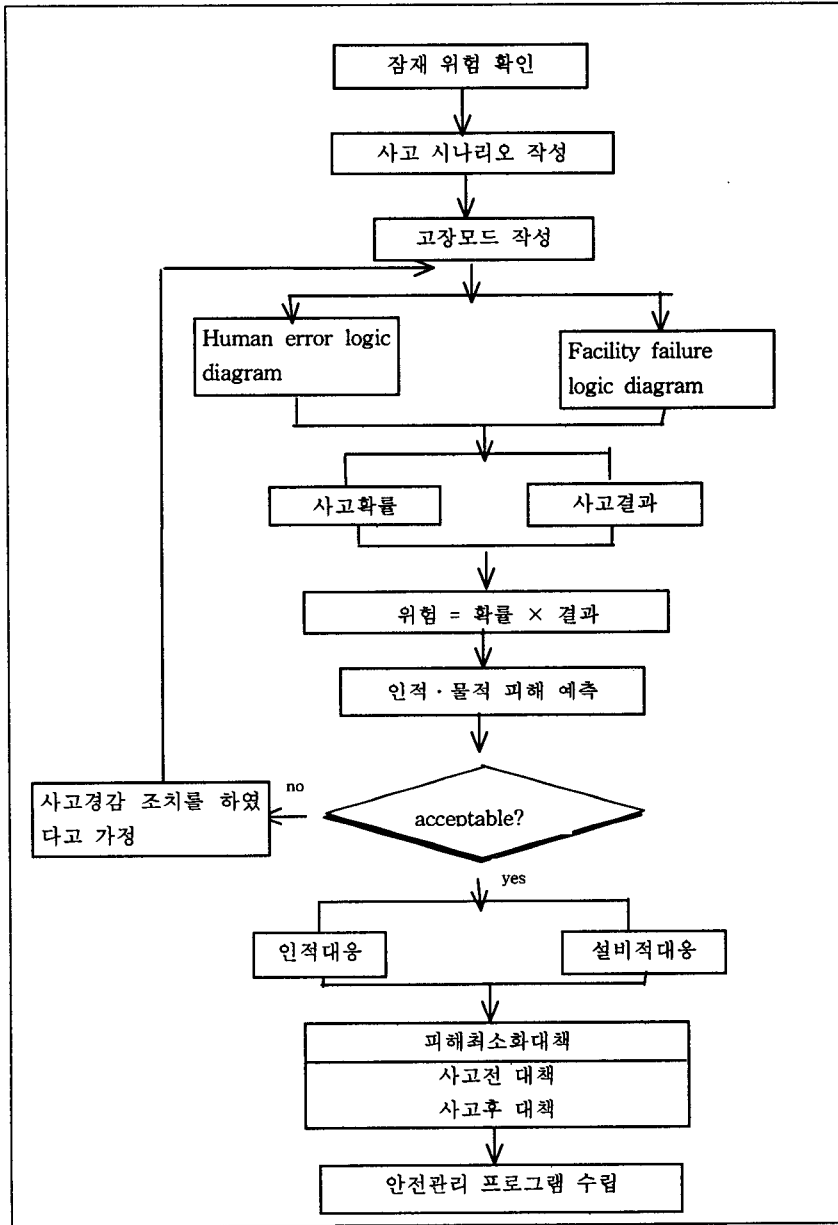


Fig. 1. Risk assessment procedure

다는 것을 뜻하며, 해당 기기 등이 고장나지 않도록 감시해야 하는 우선 순위 등을 파악하거나, 설비의 개선이 필요한 것을 파악할 때 사용될 수 있다. 즉, 어떤 곳에 우선 순위를 두어 투자할 것인가를 파악할 수 있다.

Top event에 대한 i event를 포함하는 Basic event들의 기여도 I_{Mi} 는

$$I_{Mi} = \frac{P(i \text{ Basic event를 포함하는})}{P(Top)} \quad (3)$$

또한 i Basic event의 RRW_i

$$RRW_i = \frac{P(Top \text{ when } P(i) \rightarrow 0)}{P(Top)} \quad (4)$$

i Basic event의 RAW는

$$RAW_i = \frac{P(Top \text{ when } P(i) \rightarrow 1)}{P(Top)} \quad (5)$$

따라서 I_{Mi} 와 RRW_i , RAW_i 의 관계식은

$$RRW_i = \frac{1}{1 - I_{Mi}} \quad (6)$$

$$RAW_i = 1 + I_{Mi} \left(\frac{1}{P(i)} - 1 \right) \quad (7)$$

2.3 사고결과 영향평가

사고결과 분석은 공정에서 발생하는 화재·폭발, 독성가스 누출 등의 중대산업사고가 발생하였을 때 인간과 주변 시설물에 미치는 피해와 손실이 어느 정도인가를 평가하는 것이다.

화학공정에서 발생하는 사고의 결과는 공정 특성에 따라 그 결과가 다르게 나타난다. 일반적으로 화학공정에서 발생하는 중대사고는 화재·폭발, 독성가스 누출 등이고, 이들에 의한 손상정도는 폭풍파(Blast wave), 복사열(Heat Radiation), 비산물(Missile), 독성(Toxicity)물질의 접촉에 의한다.

이와 같은 사고결과의 영향을 평가하는데 사용하는 모델로는 누출모델(Source Term Model)을 기본으로 하고, 화재·폭발모델(Fire & Explosion Model), 분산모델(Dispersion Model), 영향모델(Effect Model) 등이 있다.

2.3.1 복사열의 영향

복사열에 의한 인체 및 구조물에 미치는 영향은 목표물에 도달하는 열강도(Heat flux) 및 노출 시간에 의존한다. 복사열은 구조물에도 영향을 미치는데 강구조물인 경우에는 500-600°C에서 급격히 붕괴될 수 있으며, 구조물이 직접 화염에 의하여 가열 될 때에는 손상 정도가 더욱 심하다. 복사열이 인체와 구조물에 미치는 손상정도를 World Bank[4]와 TNO[5]에서 제시하였다.

2.3.2 폭발의 영향(Explosion Effect)

폭발은 폭풍이나 비산물 등에 의하여 인체나 구조물 등에 영향을 미친다. Lees[7] 등은 직·간접적인 폭풍효과에 의한 인체에 미치는 정도는 제시하였으며, 장치 및 구조물에 대한 영향은 Crowl[8][9] 책에 제시되었다.

TNO(1992)[6]에서는 폭풍의 직접적인 원인으로 폐출혈로 인한 사망과 고막이 손상될 확률 단위를 (8)식, (9)식과 같이 나타내었다.

$$Pr = 5.0 - 5.74 \ln \left(\frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \right) \quad (8)$$

$$\bar{P} = \frac{P}{Pa} \quad \text{and} \quad \bar{I} = \frac{Is}{P_a^{1/2} m_b^{1/3}}$$

$$Pr = -12.6 + 1.524 \ln(Ps) \quad (9)$$

TNO(1992)[5]에서는 폭풍의 간접적인 영향으로 사망에 대한 확률단위(Probit) 모델을 머리에 충격을 줄 확률단위 산출식 (10)식과 모든 신체충격을 줄 확률단위 산출식 (11)식으로 나누어 나타내었다.

$$Pr = 5.0 - 8.49 \ln \left(\frac{2.43 \times 10^3}{Ps} + \frac{4 \times 10^8}{Ps Is} \right) \quad (10)$$

$$Pr = 5.0 - 2.44 \ln \left(\frac{7.38 \times 10^3}{Ps} + \frac{1.3 \times 10^8}{Ps Is} \right) \quad (11)$$

여기서, P = 신체에 가하는 실제 압력으로 사람의 위치에 의존한다, (N/m²)

Ps = 과압, (N/m²)

Pa = 대기압, 1.013 × 10⁵ (N/m²)

Is = 양의 임펄스, N-s/m²

m_b = 사람의 무게, kg

3. PBL 반응공정의 화재·폭발·누출사고 결과 분석

3.1 PBL 반응공정

3.1.1 공정개요

PBL 공정은 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)를 생산하기 위한 유화중합공정으로 이 공정은 Fig. 2와 같이 부타디엔 정제공정, 중합공정(MAKE-UP공정), 잔류 부타디엔 회수공정 및 저장공정으로 구분된다. 이 공정에서는 부타디엔, 아크로니트릴, 스티렌모노머 등 인화성·폭발성 물질을 다량 취급하고 있으며 고온·고압의 운전 조건과 이상 발열반응을 일으킬 수 있는 위험이 있다.

정제된 부타디엔을 중합부에 투입하면서 물, 유화제, 중합조절제, 개시제 등을 일정하게 투입한 후, 가열 및 냉각의 온도조절을 행하면서 유화중합반응을 하여 제품(Latex)을 제조하는 공정이다.

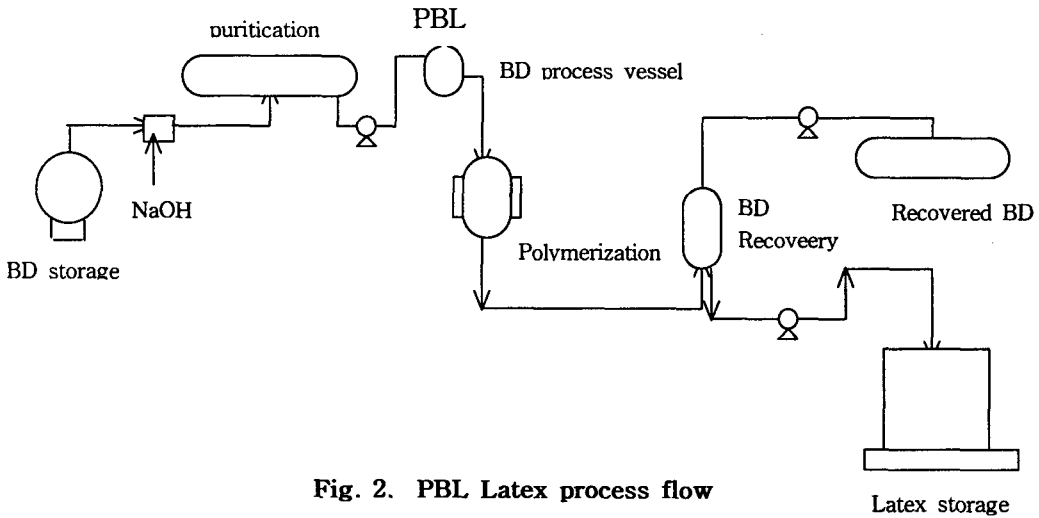


Fig. 2. PBL Latex process flow

3.1.2 대상 공정의 작업분석

기존 공정에 대한 위험성 평가를 실시하기 위해서는 많은 자료가 필요하다. 앞서 Fig. 1에서 예시한 바와 같이 확인된 위험은 설비의 고장논리도 및 인간오류 논리도를 파악해야 하며 사고결과영향 평가를 실시하기 위해서는 다양한 모델의 명확한 이해가 필요하다.

본 연구는 반응공정을 대상으로 반응기의 설계기준, 운전조건 및 반응조건 등을 조사하였고, 반응폭주(runaway)가 발생하였을 때 대응단계 및 각종 절차서 등을 분석하였다. 분석결과 PBL 반응기가 폭발을 일으킬 수 있는 반응폭주의 원인은 원료투입잘못(charge miss), 냉각장치의 고장, 반응중지제 투입시간 지연, 계장용 공기 등의 정상적인 공급이 중단될 경우 등을 들 수 있다.

3.1.3 원료투입잘못

반응공정의 원료투입 순서는 우선 질소(N₂)로 가압하여 압력이 -0.83kg/cm²이 된 후 투입을 시작한다. 반응시작 후 8시간이 지나면 반응기내의 압력은 8.5kg/cm²로 증가한다. 압력이 내려가기 시작하여 2.7kg/cm²가 되면 반응을 중단한다.

반응폭주를 일으킬 수 있는 가장 큰 원인은 원료투입잘못이다. 원료투입잘못이란 부타디엔을 기준으로 Table 1에 나타낸 것과 같이 RECIPE 설정 값에 비하여 과량 투입되거나, 소량 투입된 경우를 원료투입잘못이라 한다. 이러한 원인은 설비적인 원인과 인적인 원인으로 나눌 수 있다. 배치공정일 경우는 반응공정에 미치는 인적오류의 영향을 반드시 고려하여

야 한다.

Table 1. The upper, lower limit of charge to RECIPE setting point

Water	BD	SB	IB	MA	CHW	ISB
		1.3 PHM	0.3 PHM	1.3 PHM	1.06 PHM	2.2 PHM
↓(소)	↑(과)	↓(소)	↑(과)	↓(소)	↑(과)	↓(소)

3.2 사고 시나리오

반응공정의 잠재적 위험을 확인하기 위해 P&ID 및 관련 도면과 HAZOP 평가자료를 활용하였다. HAZOP 평가자료는 ACCESS 7.0을 사용하여 데이터베이스화 하였고, 구축된 데이터베이스는 SQL(Structured Query Language)를 활용하여 유사한 사고결과를 발생시킬 수 있는 레코드를 검색하여 중대사고를 발생시킬 수 있는 시나리오를 도출하였다. ACCESS 보고서 양식의 피일드와 레코드 설계는 Fig. 3과 같다.

시나리오 1 :

PBL 반응기에 이상상태가 발생하여 반응폭주가 일어났다. 이때 PSV와 PSD 중 어느 하나가 고장나서 반응기의 압력이 상승하여 반응기가 폭발하였다.

시나리오 2 :

POP CORN에 의해 스트레나와 유량측정기었다. 전단 필터에 막힘이 발생되. 이때 부타디

Top Event :																			
Date : 검색한 날짜					Node No : 사용된 노드					FTA File : 분석한 FTA File 명									
P&ID No : 사용된 P&ID					Design Intent: 사용된 Design Intent					ETA File : 분석한 ETA File 명									
File No	Deviation	Causes	Consequence	Safeguard	Action	Accident outcomes						PA		CAE		Ri	Cg	Eg No.	
						Fire				Explosion		Diper sion	FC	HEP	Cost				I/D
						FE	PF	JF	VCF	PE	CE								
File No : 해당 파일명 FB : Fire ball의 영향거리를 나타냄 PF : Pool Fire의 영향거리를 나타냄 JF : Jet Fire의 영향거리를 나타냄 VCF : Vapor Cloud Fire의 영향거리를 나타냄 PE : Physical Explosion의 영향거리를 나타냄 CE : Chemical Explosion의 영향거리를 나타냄 PA : Probabilistic Assessment 값을 나타냄						FC : Facility의 사고확률을 나타냄 HEP : Human Error Probability을 나타냄 CAE : Consequence Analysis Effect Cost : 사고결과로 인한 손실비용을 산출함 I/D : Injury/Dead의 수를 나타냄 Ri : Risk의 크기 Cg : Category로 I, II, III, IV, V Eg No. : 비상조치계획의 목록 번호													

Fig. 3. Report type of quantitative risk assessment

엔 투입 펌프는 계속 운전되고 있어서 배관내 압력이 상승되었다. 이로 인하여 배관내 취약 부분이 파열되어 부타디엔 누출이 발생되었다.

3.3 Top Event 선정의 타당성

Top Event의 선정의 타당성은 우선 도출된 Top Event가 HAZOP 결과 얻어진 사고원인을 사용하였다는 점이다. 또한 최근 HSE(Hazard Safety Evaluation)와 RIDDOR(The Reporting of Injuries and Dangerous Occurrences Regulation)에 따르면 1986년부터 1991년 동안 반응폭주를 일으킨 사고 총 135건 중 반응물 혹은 촉매의 Charge Miss가 전체의 36%(27건)으로 가장 높은 비율을 가지고 있다고 보고되고 있다. 그 다음은 반응의 열화학적 연구 부족이 20%(15건), 부정당한 온도 제어 18%(13건), 부적당한 교반 16%(12건), 원료의 질 12%(9건), 관리 잘못 11%(8건), 운전잘못 5%(4건), 기타 17%(13건)이라 하였다.[16]

3.4 FTA 분석

3.4.1 FTA 평가 Tool

FTA 확률분석을 위한 Top 사상은 반응폭주로 인한 폭발로 정하였다. FTA 평가를 위한 Tool은 KIRAP Ver. 1.0을 사용하였으며 Minimal Cut set 및 중요도 분석은 KCUT Version 4.5g를 이용하여 계산 및 분석을 하였다.[1]

3.4.2 인간오류 분석

본 공정의 인간오류 크게 ① TICA(Tempera-

ture Indicate Control Alarm) 및 RECIPE 설정 값 입력 잘못 ②비상시 Manual Valve 개방오류 ③ 압력방출장치의 설정압력 입력 잘못 및 교체작업시의 오류 등 3가지만 고려하였다. 이들 인간오류분석은 회복효과 및 상호의존성을 중심으로 하여 분석하였다.[2] 특히 ③항목은 "가스밸브기지의 인적오류분석에 관한 연구"에 나타난 것을 참고로 인적오류 값을 사용하였다 [17]. 인적오류분석을 위한 사용기법은 THERP 및 SLIM 기법을 활용하였다.

3.4.3 FTA 자료입력

FTA 분석자료로는 평균 고장률 자료를 사용하였다[11][18][19]. 그러나 기기 고장률 중에서 단위가 /d(demand)인 경우는 그냥 입력자료로 사용하였으나, 단위가 /hr인 경우는 임무시간 (mission time)을 고려하여 FTA에 대입함으로써 정량화 하였다.

3.4.4 FTA 분석 결과

FTA를 위한 FT도를 작성하면 그림 4와 같다. 그림 4는 총 15장의 FT도 중에서 일부를 나타낸 것이다. 여기서 중합중지제(STC) Charge line은 1개월에 1번씩 주기적인 점검을 한다고 가정하였다.

반응폭주 발생 확률 및 이에 영향을 주는 요인의 발생 확률을 나타내면 다음과 같다.

◆ 반응공정에서 반응폭주로 인한 폭발이 일어날 빈도

$$\text{발생빈도} = 9.197 \times 10^{-5} / \text{yr}$$

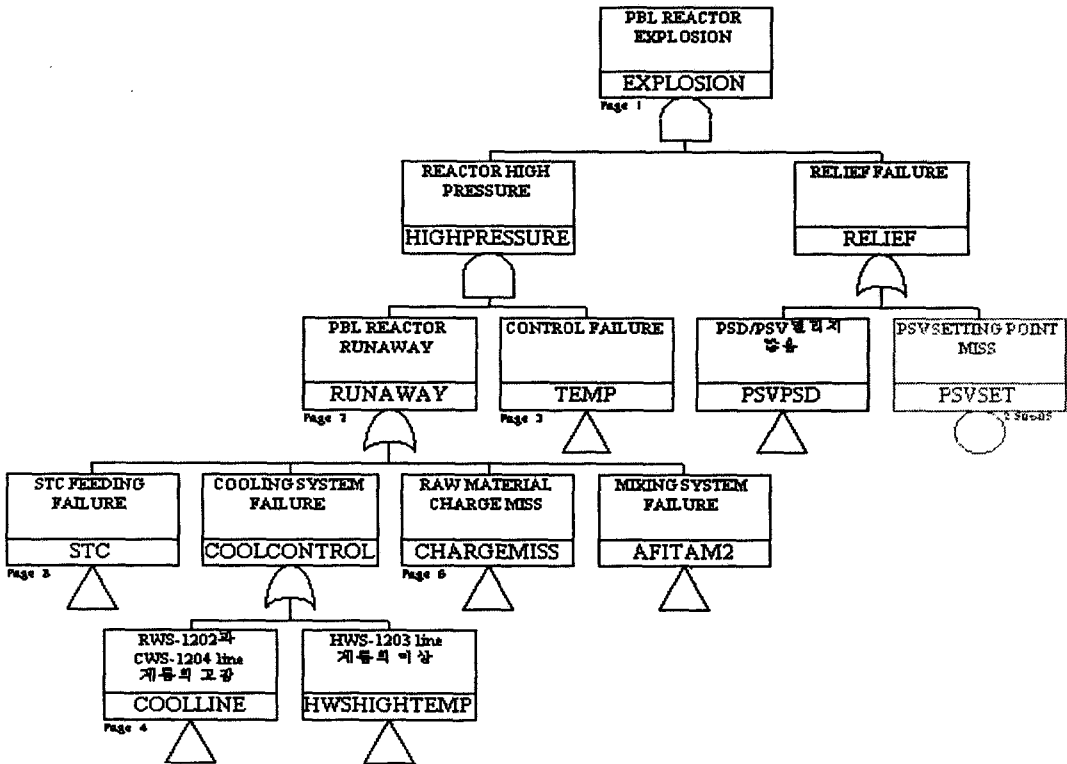


Fig. 4. FT diagram

- ☞ Relief Device Failure
 확률값 = 1.295×10^{-3}
- ☞ 냉각계통의 고장이 일어날 확률
 빈도값 = $2.901 \times 10^{-1}/\text{yr}$
- ☞ BD의 Charge Miss가 일어날 확률
 확률값 = $7.589 \times 10^{-2}/\text{yr}$
- ☞ IB의 Charge Miss가 일어날 확률
 확률값 = $1.922 \times 10^{-2}/\text{yr}$
- ☞ SB의 Charge Miss가 일어날 확률
 확률값 = $2.494 \times 10^{-2}/\text{yr}$
- ☞ MA의 Charge Miss가 일어날 확률
 확률값 = $2.661 \times 10^{-2}/\text{yr}$
- ☞ STC의 Charge Miss가 일어날 확률
 확률값 = $1.238 \times 10^{-1}/\text{yr}$

FTA를 이용하여 분석한 결과 반응기의 반응폭주로 인한 시스템에 미치는 기여도 및 중요도는 Table 2, Table 3과 같다. Table 2, 3에서 F-V중요도, RRW, RAW가 가장 큰 것은 압력방출장치로 나타났다. 이와 같은 이유는 Charge Miss가 발생하거나 냉각수에 이상이 생기더라도 압력방출장치가 적절하게 압력을

방출한다면 곧바로 반응기의 폭발로 이어지지 않는다고 가정하였기 때문이다. 또한 위와 같은 빈도 값은 반응중지제 배관을 제외하고는 주기적인 점검을 하지 않을 때 일어날 수 있는 빈도 값이다.

Table 2. Minmal Cut sets contribution

순위	확률값	f-v	f-v 누적	Minmal Cutset
1	1.189e-005	0.1293	0.1293	PSD1 HWSCONTROL TICACCA
2	7.627e-006	0.0829	0.2122	PSD1 HWSCONTROL TICAFAIL3
3	7.627e-006	0.0829	0.2951	PSD1 HWSCONTROL TICAFAIL4
4	5.075e-006	0.0652	0.3503	PSD1 HWSCONTROL TICAFAIL1
5	4.930e-006	0.0636	0.4039	PSD1 HWSCONTROL OVALAR1
6	4.100e-006	0.0446	0.4485	PSD1 TICACCA STCMANUAL1
7	3.210e-006	0.0349	0.4834	PSV1 HWSCONTROL TICACCA
8	2.630e-006	0.0286	0.5120	PSD1 STCMANUAL1 TICAFAIL4
9	2.630e-006	0.0286	0.5406	PSD1 STCMANUAL1 TICAFAIL3
10	2.544e-006	0.0277	0.5682	PSD1 HWSCONTROL TICAFAIL2

Table 3. Timportance of basic event

순위	Basic event	평균값	F-V	RRW	RAW
1	PSDI	1.000e-003	0.7722	4.3899	772.43
2	HWSCONTROL	2.900e-001	0.5299	2.1271	2.30
3	TICACCA	4.100e-002	0.2903	1.4090	7.79
4	PSV1	2.700e-004	0.2085	1.2634	772.99
5	TICAFAIL3	2.630e-002	0.1862	1.2288	7.89
6	TICAFAIL4	2.630e-002	0.1862	1.2288	7.89
7	STCMANUAL1	1.000e-001	0.1827	1.2236	2.64
8	TICAFAIL1	1.750e-002	0.1239	1.1414	7.96
9	OVALARI	1.700e-002	0.1204	1.1368	7.96
10	TICAFAIL2	8.770e-003	0.0621	1.0662	8.02

3.5 사고결과분석(Consequence Analysis)

사고결과 분석은 Super-Chems Version 3.1 Professional Edition(Arthru D Little)을 활용하였다.

3.5.1 시나리오 1의 사고결과분석

반응기 폭발에 의한 과압(Pa) 시나리오 값은 각각 207, 276, 689, 1034, 2068, 2757, 3446, 4825, 6893, 8961, 1.37×10^4 , 2.06×10^4 , 2.4×10^4 , 2.41×10^4 , 2.75×10^4 , 3.44×10^4 , 4.82×10^4 , 5.51×10^4 , 6.2×10^4 , 6.89×10^4 , 1.06×10^5 , 1.99×10^5 , 2.4×10^5 , 2.4×10^6 으로 설정하였다. 반응기 폭발을 실행할 때 반사압은 고려하지 않았다.

폭발 모델식은 TNO Multienergy Explosion 법을 사용하였다[20]. 이 모델의 특징은 밀폐된 장소나 용기 등에 적용할 수 있는 모델로 위험물의 연소에너지를 환산하여 계산한다. 또한 초기 폭발 세기는 (1-10)중에 9를 사용하였는데, 이는 가장 최악의 경우가 10이 된다. 초기 폭발의 세기 10이란 피크과압이 짧은 시간 내에 최대로 상승하는 것을 말한다.

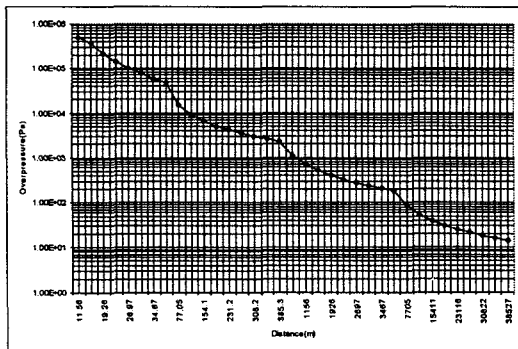


Fig. 5. Calculated distance vs. overpressure

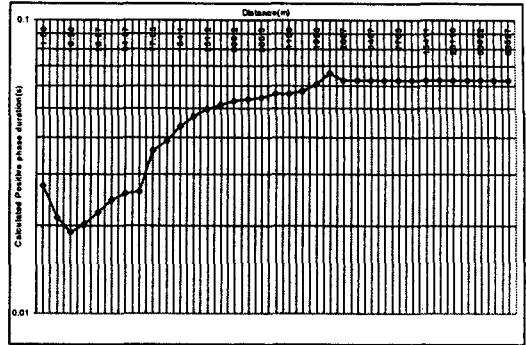


Fig. 6. Calculated distance vs. positive phase duration

계산 결과 기준 점에서의 피크과압은 5.066×10^5 (Pa)이며 연소에너지(J)는 5.794×10^9 로 나타났다. 시나리오 과압에 의한 영향반경과 반경에 대한 양의 임펄스 지속시간을 나타내면 Fig. 5, Fig. 6과 같다.

3.5.2 시나리오 2의 사고결과분석

1. 독성에 대한 사고결과

시나리오 2와 같은 사고가 발생하였을 경우에 부타디엔 증기가 대기 중으로 확산되어 인체에 미치는 영향을 분석결과 값은 Table 4와 같다.

Table 4에 의하면 부타디엔 누출시 ERPG 2에 해당하는 농도의 영향거리는 2098m이고, 그때의 면적은 2.533×10^6 (m²)이다.

Table 4. Result of toxic effect for scenario 2

시간(s)	증기운의 농도(ppm)	증기운 중심에서 바람방향의 영향거리(m)	누적영향면적 (m ²)
76.54	5000	77.7	3594
2097	50	2098	3.398E+05
5623	10	5624	2.164E+06

2. 화재에 대한 사고결과

시나리오 2에서 고려한 화재 사고는 Pool Fire로 가정하였다. 각각 37.5, 25, 12.5, 5(kW/m²) 복사열 강도를 가지는 영향범위를 나타내었다. Mass Flow Rate는 6(kg/sec)이고, Pool Fire을 형성하기 위한 누출시간은 600초로 가정하였다. 이때 화염의 길이는 73.52(m), 인체에 대한 영향범위는 40초에서 2도 화상을 입힐 수 있는 5kW/m²는 대략 64m로 나타났다.

4. 정량적 위험성 평가를 통한 개선 대책

정량적 위험성 평가를 통해 분석한 결과 값은 “받아 드릴 만 한 수준(risk level)인가?” 하는 질문에 답을 내릴 수 있어야 한다. 만약 위험 수준이 우리가 무시해도 좋은 것이라면 별 문제가 없다. 그러나 위험수준이 무시할 수 없다면 공학적 대처가 필요하며 반드시 비용이 수반된다. 아무리 위험 확률과 사고 영향이 크더라도 비용이 회사에서 수용할 만한 규모가 아니라면 개선 대책을 수립할 수가 없다.

따라서 위험성 평가는 여러 가지 안전의사 결정 대안이 나올 수 있고, 이러한 대안 중 사고 확률과 사고 영향, 비용을 고려하여 가장 효과적인 대안을 선택하여야 한다.

4.1 사고 확률 감소 대책

시나리오 1에서 위험수준을 낮추기 위한 방안은 사고가 발생했을 경우 사고의 크기를 작게 하거나 사고가 일어날 가능성을 낮추는 방법이다. 지금까지의 분석결과를 통해 전자와 후자의 대안 중 사고발생 가능성을 줄이기 위한 대안을 선택하기로 한다.

중대사고의 발생은 사회적으로 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 원자력 산업과 같은 $10^{-5} \sim 10^{-6}/\text{yr}$ 이하로 하는 것이 바람직하다고 사료되며 최소한 $10^{-5}/\text{yr}$ 이하로 하고 가급적이면 $10^{-6}/\text{yr}$ 이하로 하는 것이 바람직하다. 이를 위해서 우선 Table 2, 3과 같이 FTA상에 나타난 중요도를 상위 10개까지의 목록에 대하여 가장 기여도 및 중요도가 큰 것을 중심으로 대안을 제시하면 다음과 같다.

“Relief 장치를 병렬로 설치하였을 경우 폭발이 일어날 확률은 $1.540 \times 10^{-8}/\text{yr}$ 이다. 그러나 BD는 독성물질이기 때문에 이 장치는 PSV와 PSD를 시리즈로 설치하여야 함으로 대안 1은 PSV와 PSD를 함께 고려해야 한다.”

이렇게 하면 확률은 상당수준까지 낮아질 수 있다. 이들 대안은 만족스런 결정이 아니다. 따라서 Relief 장치를 제외하고 Reactor High Pressure를 Top 사상으로 하여 상위 10까지 중요도를 분석한 후 위의 대안과 같은 절차에 따라서 우리가 목표로 하는 사고확률을 낮춘 다음 공장에서 가장 활용 가능한 개선대책을 수립한다.

4.2 사고 결과 영향 감소 대책

반응기 반응폭주에 의한 폭발 사고나 압력용기 과압에 의한 폭발을 제외하고는 사고결과 크기는 위험물 누출량에 의해 결정된다. 위험

물 누출의 한계치 결정은 공장내에 사고 “영향 범위를 얼마까지 허용해야 하는가” 하는 결정이 우선되어야 한다. 시나리오 2와 같이 독성 가스 누출이 발생했다면 누출량이 얼마까지 허용할 것인가 하는 것이다. BD의 ERPG 2의 허용농도 50ppm 이다. 이때 시나리오 2에서 누출되는 시간은 600sec 일 때 부타디엔의 제한농도 50ppm에서 바람 방향의 영향거리는 2098m이었다. 영향거리의 제한을 1000m까지로 결정한다면 누출시간은 15sec이내에 누출을 감지하고 시간내에 즉시 누출을 차단해야 하는 개선이 필요하다.

5. 결론

PBL 반응공정에 관하여 사고 시나리오별 정량적 위험성 평가 및 사고결과 영향평가를 실시한 후 이를 기준으로 사고 발생시 피해의 범위와 영향을 계산하여 효과적인 안전 시설투자에 대한 시설개선 방향을 제시하였다. 이들 결과는 다음과 같다.

1. FTA 결과 반응폭주가 발생하여 PBL 반응기가 폭발할 빈도는 $9.197 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 로 나타났다. PBL 반응기가 폭발을 일으킬 수 있는 중요도가 가장 큰 것은 압력방출장치(Relief Device)이다.

2. 반응기가 폭발이 일어날 때 기준점에서의 최대폭발과압(peak overpressure)은 $5.066 \times 10^5(\text{Pa})$ 이고, 유리창이 파열될 수 있는 영향(피해) 범위는 거의 공장 전 지역을 포함한다. PBL 반응기가 폭발할 경우, 폭풍의 직접적인 원인에 의해 반경 15.41m안에 있는 사람이 폐출혈로 사망할 확률은 100%이고, 반경 19.29m 안에서 폐출혈로 인해 사망할 확률은 0.1%로 나타났다.

폭풍의 간접적인 영향으로 머리에 충격을 받아 사망할 확률은 폭심으로부터 반경 23.12m (과압 1.403×10^5)에서 사망할 확률은 45%이다. 또한 폭풍의 직·간접적인 원인에 의하여 근로자가 사망할 수 있는 최대 영향반경은 27m이고, 고막의 손상을 일으키기 위한 최대 영향반경은 77m으로 나타났다.

PBL 반응기가 폭발했을 때 건축물과 같은 구조물이 받을 수 있는 손상 정도는 폭심으로부터 52m까지로 나타났다.

3. 반응공정에서 파이프를 통하여 부타디엔 증기가 대량 방출하는 사고가 발생하였을 때 사람에게 비교적 큰 영향을 줄 수 있는 농도(50ppm)에 도달될 수 있는 최대거리는 2097m

이고, 플화재가 발생할 경우 40초에서 2도 화상을 입힐 수 있는 (복사열에너지 5kW/m²) 영향 반경은 64m로 나타났다.

참고문헌

1. 원자력연구소, "Accident Sequence Quantification with KIRAP", KAERI/TR-848 (1997)
2. 원자력연구소, "Development of a Human Reliability Analysis Procedure for a Low Power/Shutdown Probabilistic safety Assessment in Pressurized Light Water Reactors", KAERI/TR-913 (1997)
3. 정민근·정재희, "인간공학 및 시스템안전", 한국산업안전공단 (1994)
4. Hoftijzer G.W. and Duiser, J.A., "Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material(TNO Yellow Book) Chapter 3 : Turbulent Free Jet and Chapter 6 : Heat Radiation", 2nd ed., CPR 16E(ISBN 90-5304-052-4), Netherlands Organization of Applied Scientific Research(TNO), Hague (1992)
5. HSB Professional Loss Control, "Fire and Explosion Risk Management and Consequence Modeling Seminar, Pool Fire (1994)
6. Vandenberg A.C and H.G., The TNO Prins Maurits LAB., "Current Reasearch at TNO on Vapor Cloud Explosion Modeling", TNO Prins Maurits Laboratory Netherlands (1994)
7. Lees F.P., "Loss Prevention in the Process Industries", Bofferworths Heinemann Ltd, vol II, London & Boston, (1980)
8. Crowl D.A and Louvar J.F., "Chemical Process Safety Fundamentals with Application", Prentic E-Hall., New York (1990)
9. 이영순 외 4인 , "화공안전공학", 대명사 (1994)
10. CCPS, "Guidelines For Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, New York (1989)
11. CCPS, "Guidelines For Process Equipment Reliability Data", AIChE, New York (1989)
12. CCPS, "Guidelines For Hazard Evaluation Procedures 2nd Ed.", AIChE, New York (1992)
13. 강순중 외, "공정위험평가", 한국산업안전공단 (1993)
14. 이영순, "화학설비의 위험성 평가 기법 개발", 노동부 (1993)
15. 함병호, "크실렌 증기 누출사고의 영향평가 및 사고결과에 미치는 매개변수의 민감도 분석", 명지대학교 박사논문 (1995)
16. "1996 Process Plant Safety Symposium", Published by the South Texas Section of the American Institute of Chemical Engineers, Volume 1. (1996)
17. 이수경, 제무성 외 다수 , "가스밸브기지 위험성 평가", 한국가스공사 (1995)
18. J. R. Taylor., "Risk Analysis for Process Plant, Pipelines and Transport" Published by E&FN Spon, an imprint of Chapman&Hall 2-6 Boundary Row, London SE18HN, UK, First Edition. (1994)
19. "Component Failure Data", 원자력연구소, 1997.
20. "Super-Chems Version 3.1 Professional Edition & Expert Manual", Arthu D. Little. (1996)
21. Stephens, M.M., February., "Minimising Damage to Refineries(US Department of the Interior, Office of Oil and Gas) (1970)