

# 화학공장에서의 정량적 위험성 평가를 이용한 비상 대응 계획 시스템 개발

임차순<sup>†</sup> · 서재민 · 임성인\* · 백종배\*\* · 고재욱  
광운대학교 화학공학과 · \*(주)아스프 · \*\*충주대학교 안전공학과  
(2001. 1. 4. 접수 / 2001. 6. 21. 채택)

## Development of Emergency Response Plan System Using Quantitative Risk Assessment in Chemical Plants

Cha-Soon Im<sup>†</sup> · Jae-Min Seo · Sung-In Um\* · Jong-Bae Baek\*\* · Jae-Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University · \*Advanced Service Provider Co. Ltd

\*\*Department of Safety Engineering, Chungju National University

(Received January 4, 2001 / Accepted June 21, 2001)

**Abstract** : In this study, we analyzed the accident scenarios of chemical plants through the analysis of lots of chemical accidents and using experts knowledge, and looked into the method of prevention and response. Moreover, we developed a systemic and actual Emergency Response Plan Software(ERPS) that could prevent, prepare and respond totally for the chemical industry facilities using the data from the accident effect estimation from the local society and the geographic information of a chemical plant. The ERPS consists of the information for the plant and process, the consequence analysis and the ERPTA(Emergency Response Plan Tree Analysis). In conclusion, the program developed in this study could help effectively all the chemical industry facilities to prevent and respond to possible accidents.  
**Key Words** : QRA, ERPS, prevention, preparedness, response, recovery

### 1. 서 론

현대의 화학공장 및 석유·가스산업시설에서는 소비자의 요구를 충족시키는 생산품 생산 및 제품의 고급화, 규격화 등으로 인하여 공정 및 설비가 더욱 복잡해지고 세분화됨으로써 대규모의 잠재 위험성이 증가하는 실정이다. 따라서 산업현장에서는 다양한 잠재위험으로 인하여 화재, 폭발, 독성물질 누출 등의 중대산업사고의 발생 가능성 및 사고결과 의 피해 범위가 증가되고 있다. 만약 사고가 발생 한다면 현장의 근로자, 인근지역 주민 그리고 주변의 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있으며 사회적·경제적 불안 요소를 제공하게 된다.

본 연구에서는 화학공장에서 PSM과 SMS 보고서를 제출하는 항목에 포함되어 일괄적으로 구축된 비

상대응계획을 검토하여 비상계획의 문제점을 찾아내어 보완할 사항을 검토함으로써, 효율적이고 이상적인 비상대응계획 시스템을 구축하고자 한다. 또한, 현장의 사고영향 평가와 화학공장의 사고사례 분석 및 자문을 통하여 국내 화학공장의 사고 시나리오를 분석·선정하여 사고 시나리오별 예방책과 대응 방안을 검토한다. 그리고 사고영향 평가 분석을 통하여 얻은 사고 결과 데이터와 인근주변의 지역사회와 화학공장의 지형 정보 및 기타 필요한 정보(즉, 화학물질 정보, 공장 정보, 공정정보, 인구밀도 등)를 이용하여 산업체에서 활용할 수 있도록 실제적이고 체계적인 비상대응계획 프로그램을 개발한다.

비상대응계획 프로그램을 개발하기 위해서는 외국의 비상대응 S/W 분석 및 국내 화학공장에서 발생하는 사고 형태를 체계적으로 분석하여 비상대응계획을 검토하게 된다. 그리고 사고영향 평가 분석을 통한 시나리오 선정과 시나리오별 대응 체계를 구축한다. 또한 공장 및 공정 정보, 사고결과분석과

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
csim@procsys.kwangwoon.ac.kr

비상대응계획 트리 분석을 통해서 구축된 S/W를 개발하여 사용자들이 현장에서 유용하고 실제적으로 사용할 수 있도록 활용하는 것이다.

## 2. 비상대응 접근방법

비상대응 계획을 수립하는 접근방법은 예방, 준비, 대응, 복구의 사이클 4단계를 통하여 구축된다.

예방 단계에서는 공정의 위험성을 파악하여 그에 적합한 운전절차, 운전자 훈련, 예방 관리, 변경 관리 그리고 인적오류 분석을 체계적으로 구성하고 완화대책을 수립한다. 준비 단계는 사고 결과 및 영향 분석에 따른 사고 시나리오를 분류, 선정, 확인을 하며 비상대응계획에 대한 설비 및 시스템, 지원사항을 검토하여 적절한 비상계획의 모델링을 구축한다. 대응 단계는 비상대응을 위한 대응 전략 및 상호 지원시스템 및 대응 설비를 확인·검토하는 것으로 사고명령체계(incident command system)를 정의하고, 사고명령체계를 어떻게 이행할 것인가를 확인한다. 복구 단계는 비상사태로부터 복구에 걸리는 시간, 사람, 필요한 자원 및 설비의 안전적인 확보와 빠른 대책 수립을 위한 관리자의 리더쉽이 요구되는 단계이다. 또한 복구를 위한 소요 시간에 따른 근본적인 소요비용의 상관관계가 중요하게 다루어진다<sup>1)</sup>.

## 3. 정량적위험성평가와 비상대응 적용 단계

### 3.1. 정량적 위험성 평가

정량적 위험성 평가란 공정에서의 잠재위험을 확인하여 시나리오에 대한 사고 빈도와 사고 결과분석을 통해서 위험성을 표현하는 것으로 화재나 폭발 또는 독성물질로 인한 중대 사고에 의해서 인체나 건물에 미칠 수 있는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다<sup>2)</sup>. Fig. 2는 정량적 위험성 평가의 절차를 나타내고 있다.

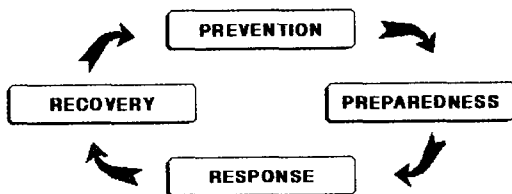


Fig. 1. Four phases of emergency management

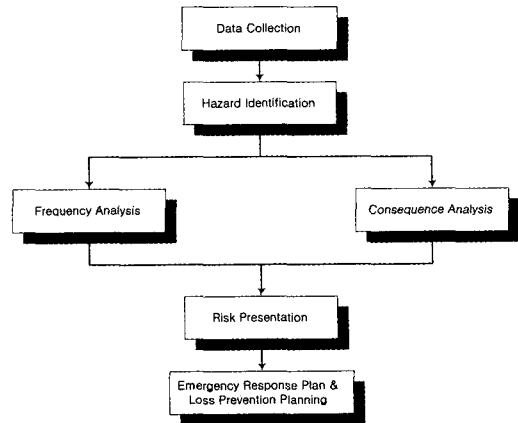


Fig. 2. The procedure of quantitative risk assessment

### 3.2. 최악의 사고시나리오 선정(EPA)

EPA(Environmental Protection Agency)는 누출지점으로부터 가장 큰 영향거리의 결과를 가져오는 규정된 물질의 가장 많은 양의 누출을 최악의 사고시나리오(worst-case scenarios)라고 정의하였다. 그리고 다음과 같이 독성 물질과 가연성 물질에 대한 영향 거리에 대해서 평가하였다<sup>6)</sup>.

### 3.3. 비상대응 3단계 수준

#### 3.3.1. 비상대응 1단계 수준

최악의 사고시나리오가 발생하였을 경우 영향 지역(effect zone)내의 지역주민에게 피해를 미치지 않은 공정이며 사고결과분석을 통하여 과거 5년 동안 어떠한 사고도 발생하지 않은 공정은 비상대응 프로그램 1단계 수준이 적용된다. 이 프로그램 수준에서는 한정된 잠재위험 평가와 최소의 비상 대응 및 예방 필요성이 요구된다.

#### 3.3.2. 비상대응 2단계 수준

비상대응 2단계 수준은 비상대응 1단계 또는 3단계 수준에 적용되지 않으며 공정안전보고서(PSM)를 제출하지 않는 공정으로써 효율적인 예방 프로그램뿐만 아니라 세부적인 잠재위험 평가, 관리 그리고 비상시 적절한 대응의 필요성이 요구된다.

#### 3.3.3. 비상대응 3단계 수준

비상대응 1단계 수준에 적용되지 않거나, PSM 제출 사업장 그리고 공정이 SIC(Standard Industrial Classification) 코드에 포함되어 있는 경우 비상대응 3단계 수준이 적용된다. 이 단계에서는 PSM 기준이

Table 1. Criteria for emergency response program level

1 단계	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ No accidents in the previous five years that resulted in any offsite :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Death</li> <li>• Injury</li> </ul> </li> <li>• Response or restoration activities at an environmental receptor</li> <li>■ No public receptors in worst-case circle</li> <li>■ Emergency response coordinated with local responders</li> </ul>
2 단계	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ The process is not eligible for program 1 or subject to program 3</li> </ul>
3 단계	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Process is not eligible for program 1</li> <li>■ Process is subject to PSM</li> <li>■ Process is classified in SIC code</li> </ul>

적용되며 예방 프로그램 및 세부적인 잠재위험 평가, 관리 그리고 비상대응의 필요성이 요구된다<sup>8)</sup>.

#### 4. 화학산업시설에서의 비상대응계획 구축

##### 4.1. 비상대응계획의 체계 구축

Fig. 3은 비상대응계획의 구축절차를 순차적으로 나타낸 것이다.

##### 4.2. 비상대응계획 프로그램 개발

###### 4.2.1. ERPS 개발 및 절차

ERPS 프로그램은 화학공장에서 발생할 수 있는 사고를 총괄적으로 예측, 예방, 대응, 관리할 수 있

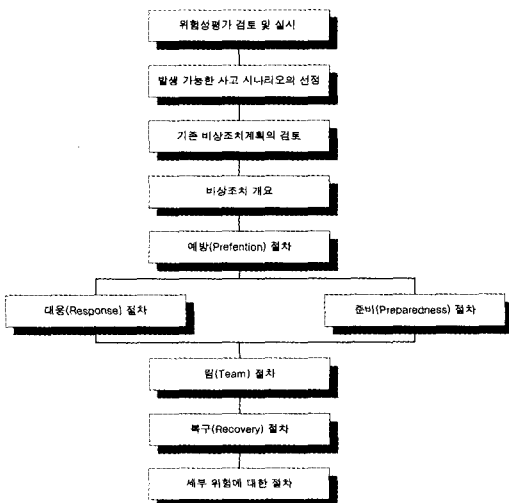


Fig. 3. Establishment procedure of emergency response plan

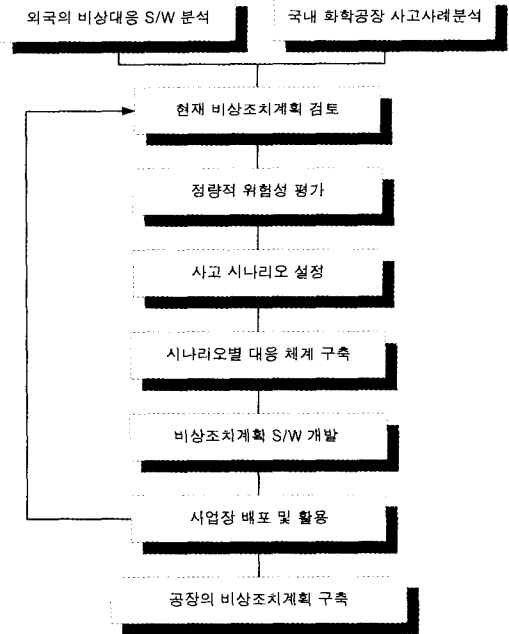


Fig. 4. Development procedure of emergency response plan program

도록 개발하였다. ERPS 개발의 목적은 다음과 같다.

- 중대사고 발생의 예방과 사고 발생시 효과적인 비상대응방법 제시
- 사고 발생시 파생되는 주변지역의 인적·물적 피해를 사전에 예측할 수 있는 모델 제시
- 현장에서 체계적인 비상대응시스템을 구축

현장의 비상대응계획 프로그램을 개발하기 위한 절차는 Fig. 4와 같다.

###### 4.2.2. ERPS 구조도 및 구성요소

본 연구에서 개발하고자 하는 비상대응계획 프로그램(Emergency Response Plan System, ERPS)의 총괄 구조도는 Fig. 5와 같다. 공장 및 공정 정보, 공정에서 사용하는 물질정보, 운전조건을 토대로 정량적 위험성 평가를 실시한다. 그리고 정량적 위험성 평가 분석을 통해서 사고 시나리오를 선정, 확인하여 비상대응 체계를 구축하여 비상대응체계를 구축할 수 있도록 구성되어 있다.

프로그램은 프로젝트별로 공장 정보, 공정 목록 사고결과 분석, 비상대응체계분석(ERPTA), 보고서의 다섯 가지 구성 요소에 데이터를 입력하고, 그 입력한 데이터를 통해서 평가를 수행하게 된다.

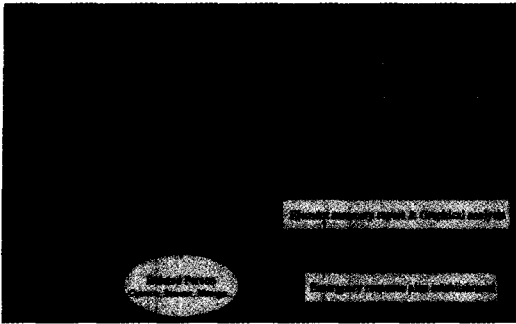


Fig. 5. Conceptual flowchart of emergency response plan

## 5. 사례연구

### 5.1. 저장탱크 시설 묘사

사례 검토 대상 공정은 프로판 5기, 부탄 8기, 프로필렌 5기, C4 Raffinate 2기, C3 Mixture 1기의 저장 탱크 시설 지역이다. 총 21기의 저장 볼 탱크 시설에서 평가할 대상 시설은 프로판 볼 탱크 시설이며, 평가를 수행할 탱크 정보와 운전조건 그리고 물질 정보는 Table 2와 같다.

Fig. 6은 사례검토 대상 공정인 프로판 저장시설의 P&ID 도면으로 선박에서 파이프라인을 통해 프로판 볼 탱크(20-D-13)에 이송된 물질을 저장하고 출하하는 공정도면이다. 사고의 형태는 볼 탱크 주변의 화재로 인한 BLEVE와 볼 탱크에서 누출에 의한 VCE로 선정하였다.

### 5.2. 비상대응계획 시스템 구축

#### 5.2.1. 공장 및 공정 목록 구축

ERPS의 항목 중에서 공장 정보에는 일반정보, 안전조직, 비상연락망, 비상대응체계 체크리스트의 하위항목이 있으며, 공정 목록에는 공정 개요, 공정장치리스트, 안전장치 목록 및 모니터링 시스템, 물질

Table 2. Information of propane ball tank

볼 탱크 No.	Propane 20D-13
물질 정보	프로판(CAS# 74-98-6), C3H8
저장량	84,218 ft <sup>3</sup> ×31.68 lb/ft <sup>3</sup> ×80% = 2,134,420.99 lb (968 ton)
저장 상태	온도 25.7 °C, 압력 72.5 psi
폭발 한계	2.37 % ~ 9.5 %

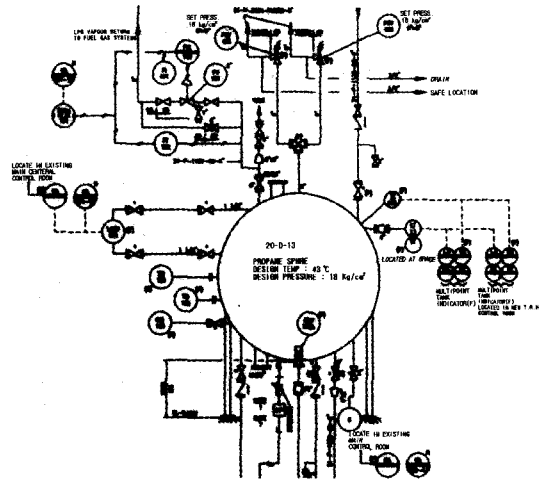


Fig. 6. P&ID of propane and butane storage tank

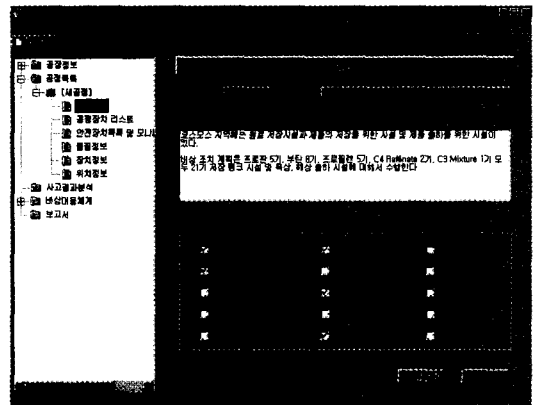


Fig. 7. Database establishment form for process information

정보, 장치정보, 위치정보로 구성되어 있다. Fig. 7은 공정목록 중에서 공정개요를 구축한 화면이다.

#### 5.2.2. 사고결과 분석

ERPS를 사용하여 물질 정보, 저장 형태, 시나리오를 입력하여 누출계산에 따른 사고결과를 나타낸다. 사고형태는 비등액체폭발, 물리적 폭발, 증기운 폭발, 풀 화재, 제트 화재, 플래쉬 화재, 독성 누출로 구성된다.

Fig. 8은 propane tank 968 ton이 완전 파열되었을 경우 시나리오 요약을 보여주는 화면이다.

프로판 저장탱크 주변에 화재로 인하여 BLEVE 사고가 발생할 경우, 발생하는 복사열(thermal radiation) 4.0, 12.5, 37.5 Kw<sup>2</sup>의 피해거리는 Table 3과 같다.

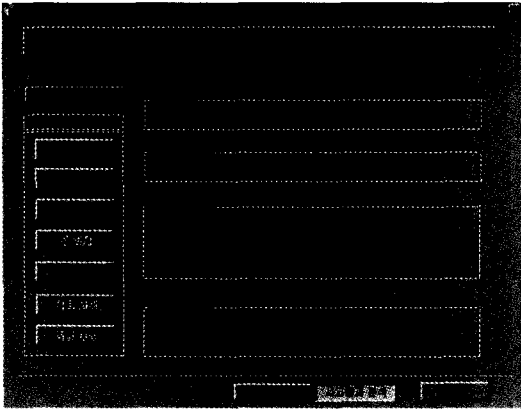


Fig. 8. Establishment form for consequence analysis

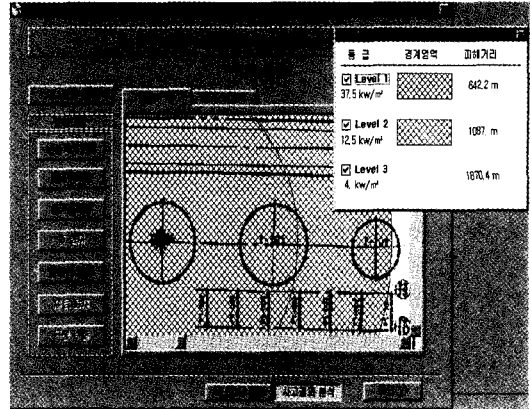


Fig. 9. BLEVE effect area analysis form of propane tank

Table 3. Simulation results for propane BLEVE using ERPS

Radiation levels [kw/m <sup>2</sup> ]	Propane
	1.5m/s, F
4.0	1870.4
12.5	1087.0
37.5	642.2

Table 4. Simulation results for propane VCE using ERPS

Overpressure [psig]	Propane[rapture]	propane[Zinch]
	1.5m/s, F	
0.30	3304.0	127.7
1.91	892.6	70.1
3.00	702.0	65.5

프로판 저장탱크의 손상 또는 인접 파이프라인의 파손 등의 이유로 연속적으로 가연성 물질이 누출될 경우 전체 공정에 심각한 영향을 가져올 수 있는 VCE 사고가 발생할 수 있다. VCE 사고 시나리오는 프로판 이송 파이프라인에서의 완전파열과 2" 누출을 가정하였다.

Fig. 9는 BLEVE가 발생했을 경우, 현장의 도면상에 피해범위를 나타낸 것으로 복사열 기준에 따른 피해거리 및 영향 범위를 표시하고 있다.

5.2.3. 비상대응계획 트리 분석(ERPTA) 구축

사고 결과 분석을 통하여 예상되는 사고 시나리오 오는 크게 외부 열원에 의하여 탱크가 가열, 폭발하

는 BLEVE 사고와 연속적인 누출로 인하여 발생된 증기운에 의하여 점화, 폭발하는 VCE 사고로 나눌 수 있다.

본 연구에서 정량적 위험성 평가 결과를 근거로 비상대응 방법 및 대피거리를 비상대응계획트리에 구축한다.

비상대응계획 트리 분석(ERPTA)에서는 사고 시나리오 중에서 BLEVE와 VCE 사고가 발생할 경우 체계적인 비상 대응 계획을 순차적으로 구축하였다. 초기 사건은 프로판 20D-13볼 탱크의 완전파열(rupture)로 인하여 사고가 발생하게 된다. 트리 분석은 사고 시나리오별로 최초발견자의 대응사항부터 복구단계까지의 세부적인 비상대응 사항과, 책임 부서 및 책임자 그리고 각 사항에 따른 행동 절차를 파일별로 연결하여 프로판 볼 탱크의 사고에 따른 비상대응 절차를 구축할 수 있다.

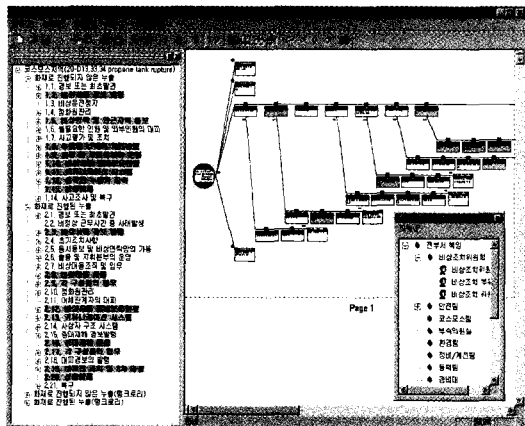


Fig. 10. Establishment form for ERPTA

## 6. 결 론

본 연구에서는 현재의 화학산업시설에서 발생할 수 있는 화재, 폭발 그리고 독성가스 누출 등의 중대재해 사고에 대한 정량적 위험성 분석을 통해서 사고 발생 가능성 및 피해 영향에 대해서 위험성을 평가하는 방법뿐만 아니라 설비의 결함, 작업자의 실수, 장비의 오작동 등으로 인하여 뜻하지 않은 사고가 발생하게 되면, 신속하고 정확한 사고 대응 절차를 통해서 중대사고에 따른 인적 및 재산 피해를 최대한 감소시킬 수 있는 비상사태 대응체계에 대한 전반적인 시스템을 구축하였다. 또한 본 연구에서 개발한 ERPS는 외국의 비상대응 프로그램에서 포함하지 않거나 미흡하게 다루어지는 사고결과분석 방법과 비상대응체계분석을 사고시나리오별로 체계적이며 다각적인 대응 방법으로 구축함으로써 실제 사고가 발생하였을 때 효과적인 대응 방법을 제시하였다. 현장의 화학 공정에서 비상대응계획 시스템의 일환으로 ERPS를 적용한다면 비상시 전반적인 대응체계를 조정하고 관리 할 수 있으며, 비상 사고 발생에 따른 경제적·사회적 손실을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. ERPS 개발에 따른 효과는 다음과 같다.

1. 현장에서의 중대사고 발생의 예방과 사고 발생시 비상대응 방법에 대한 새로운 방향을 제시하였다.
2. 외국 비상대응계획 프로그램의 국내 적용상의 문제점을 상당 부분 극복할 수 있으며 향후 국내 현실에 적합한 안전관련 프로그램 개발의 기초가 될

수 있는 기반을 제공하였다.

3. 화학물질 사고 발생시 파생되는 주변지역의 인적·물적피해 및 환경 피해를 사전에 예측할 수 있는 모델을 제공하였다.

**감사의 글 :** 본 연구는 과학기술정책연구원과 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- 1) CCPS, *Guideline for Technical Planning for On-site Emergencies*, AIChE, New York, 1995.
- 2) CCPS, *Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, AIChE, New York, 1989.
- 3) CCPS, *Guideline for Hazard Evaluation Procedure*, AIChE, New York, 1989.
- 4) CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*. AIChE, New York, 1994.
- 5) Crowl, D. A. and J. F. Louvar : *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
- 6) EPA, *Guidance on The Application of Refined Dispersion Models to hazardous/Toxic Air Pollutant Release*, 1993.
- 7) Louis Theodore, Joseph P. Reynolds, Francis B. Taylor : *Accident and Emergency Management*, John Wiley & sons, Inc., 1989.
- 8) The Office of The Federal Register National Archives and Records Administration, *40 CFR Part 68*, 1998.