

# I. 화학공장의 비상대응계획 시스템

광운대학교 화학공학과  
고재욱

# 화학공장의 비상 대응 계획 시스템

## 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 사고결과에의 피해 범위가 증가되고 있다. 만약 현장에서 사고가 발생한다면 현장의 근로자, 인근 지역 주민 그리고 주변의 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있으며 사회적·경제적 불안 요소를 제공하게 된다. 그러므로 국내 화학공장 및 석유·가스산업시설에서 발생할 수 있는 사고를 총괄적으로 예측, 예방, 대비, 대응, 관리할 수 있는 체계적인 비상조치계획 시스템을 구축하고 현장에서 위험관리 시스템으로 활용할 수 있는 비상조치계획 프로그램(ERPS)을 개발하여야 한다.

지금까지 회사내에서 구축하고 있는 비상조치계획은 체계적이고 효과적인 시스템을 구축하기보다는 정부의 규제인 산업안전공단의 PSM(Process Safety Management) 보고서와 한국가스안전공사의 SMS(Safety Management System) 보고서를 제출하기 위해서 규정된 형식에 적합하도록 비상조치계획이 구축되어 온 것이 사실이다. 또한 회사내 절차서나 지침서에 의해서 문서화는 되어 있지만 비상사태에 대한 다방면의 대응 체계는 여러 가지 미흡한 것이 현실이다. 따라서 회사 현장에서 적절하게 사용할 수 있고 실제적으로 사고를 예측, 예방하고 대비, 대응할 수 있는 비상조치 체계를 구축하는 것이 필요하게 되었다.

선진외국의 경우 비상사고시 피해를 사전에 예방하고 위험 관리 계획을 구축하기 위해서 다양한 비상 대응 프로그램의 개발을 시도하고 있으며 이미 상용화된 프로그램도 상당수 있다. 외국의 경우, 비상조치프로그램은 과거에 경험하였던 대형사고를 토대로 많은 부분 정량적 위험성 평가(화학물질사고 예측프로그램, 수송사고 대응 시스템 및 화학물질사고 비상대응 시스템 등)에 대한 연구가 수행되었으며, 그 결과를 분석할 수 있는 상용화된 소프트웨어를 판매하고 있다. 특히 미국의 DNV Technica와 Dyadem에서 판매하고 있는 RMP-Pro 98이나 EPA(Environmental

Protection Agency)와 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 개발한 CAMEO(Computer Aided Management of Emergency Operation)와 같은 프로그램은 국내에 다수의 사용자를 확보하여 판매하고 있다. 그러나 비상조치프로그램인 외국산 S/W를 국내에 적용할 경우, 적용되는 법규 및 국내 사용자의 편의성 등의 많은 문제점들을 감수하여야 한다. 따라서 국내 실정에 적합한 화학공장에서의 비상조치계획 시스템 구축 및 관련 소프트웨어를 개발하고, 국내 화학산업시설에 적용하여 비상조치 시스템의 효율성 및 유용성을 검증해야만 한다.

비상조치계획 프로그램을 개발하기 위해서는 외국의 비상대응 S/W 분석 및 국내 화학공장에서 발생하는 사고 형태를 체계적으로 분석하여 비상조치계획을 검토하게 된다. 그리고 사고영향 평가 분석을 통한 시나리오 선정과 시나리오별 대응 체계를 구축한다. 또한 공장 및 공정 정보, 사고결과 분석과 비상조치계획 트리 분석을 통해서 구축된 S/W를 개발하여 사용자들이 현장에서 유용하고 실제적으로 사용할 수 있도록 활용되어야 한다.

## 2. 비상조치 접근방법

비상조치 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 비상조치계획에 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. 그리고 사고를 완화하기 위해서 요구되는 중요한 대책에 대해서 토의한다. 특히, 화재, 폭발, 오염물 및 독성가스 제거를 위한 효과적인 대응 전략을 구축한다. 복구 단계는 비상상태로부터 복구에 걸리는 시간, 사람, 필요한 자원 및 설비의 안전적인 확보와 빠른 대책 수립을 위한 관리자의 리더십이 요구되는 단계이다. 또한 복구를 위한 소요 시간에 따른 근본적인 소요비용의 상관관계가 중요하게 다루어진다[1,11].

Fig. 1은 예방, 준비, 대응, 복구의 4단계 사이클을 통하여 비상조치계획

을 구축하는 것을 나타낸다.

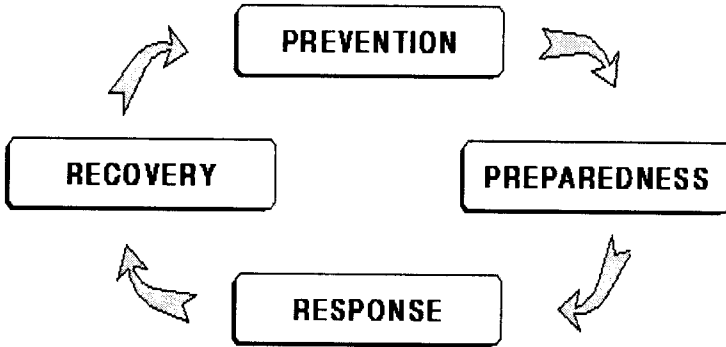


Fig. 1. Four phases of emergency management

### 3. 정량적 위험성 평가와 비상대응 프로그램 검토

#### 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[2,5,6]. Fig. 2는 정량적 위험성 평가의 절차를 나타내고 있다.

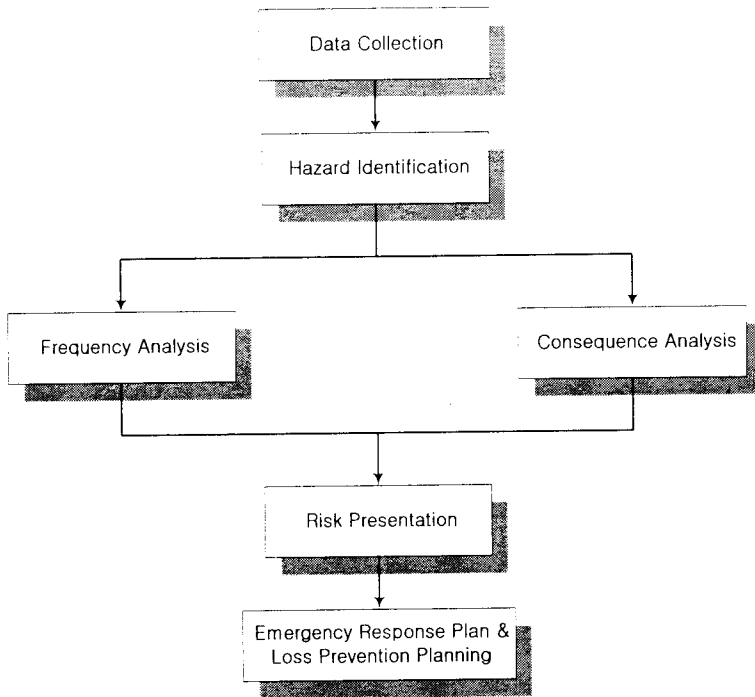


Fig. 2. The procedure of quantitative risk assessment

Fig. 2에서 잠재위험 확인 단계는 위험성 평가에 필요한 자료수집과 함께 공정내에 존재하는 잠재 위험성을 정성적 위험성 평가 방법으로 확인하는 단계이다. 사고결과 분석 단계에서 누출 모델은 위험한 물질이 탱크나 파이프라인으로부터 외부로 누출이 발생할 경우의 물질 누출 속도, 총 누출량, 누출 시간 등을 계산하는 단계이며, 분산 모델은 위험 물질의 누출 확산 형태와 인자에 의해서 피해 거리와 그에 따른 위험 수준을 계산하는 단계이다. 마지막으로 영향 모델은 누출된 위험 물질에 대한 독성물질 영향, 복사열 영향 그리고 폭발 영향에 따른 인적, 물적 피해 영향을 평가하는 것이다. 즉, 사고결과 분석은 위험물질이 대기중으로 방출될 경우 예상되는 피해 유형 및 크기를 계산하여 인체나 건물에 미치는 영향력을 평가하는 것이며, 빈도 분석은 사고결과 분석에서 평가한 사고 시나리오의 발생 빈도를 분석하는 것이다.

따라서 정량적 위험성 평가를 통해서 화학공장의 사고시나리오별 비상조치계획 및 손실방지대책을 구축하여야 한다.

### 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 영향거리에 대해서 평가하였다[13].

- 각각의 규제 독성 물질에 대해서 독성물질의 농도에 대한 영향거리를 사용할 수 있다. 독성물질에 대한 최악의 사고 시나리오 분석을 통해서 누출 조건과 누출된 양과 관련된 어떤 보정적인 가정을 사용하여 영향거리에서의 대기 확산에 대한 농도를 평가하여야 한다.
- 증기운 폭발(VCE)은 가연성 물질에 대한 최악의 사고 시나리오의 대표적인 사고결과이다. 가연성 물질에 대한 최악의 사고시나리오를 분석함으로써 규정된 가연성 물질이 저장 용기 또는 공정 파이프라인 고장으로 부터 물질의 가장 많은 양을 포함하고 있는 증기운 폭발로 인하여 1 psi 과압이 미치는 영향거리를 평가하여야 한다.

### 3.3. Event Tree를 이용한 사고시나리오 확인

위험한 물질 누출로 인한 사고 시나리오를 확인하기 위해서 ETA(event tree analysis)방법을 이용하여 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 사고 시나리오는 BLEVE, VCE, pool fire, jet fire의 사고와 thermal hazard의 위험성이 발생한다는 것을 알 수 있다[3,4]. 이 사고들은 저장 탱크나 설비에서 초기 누출에 따른 순차적인 일련의 절차에 따른 사고결과를 나타내는 것으로 이 사고를 제어할 수 있는 전반적인 안전 관리 방법을 제안하고 있다.

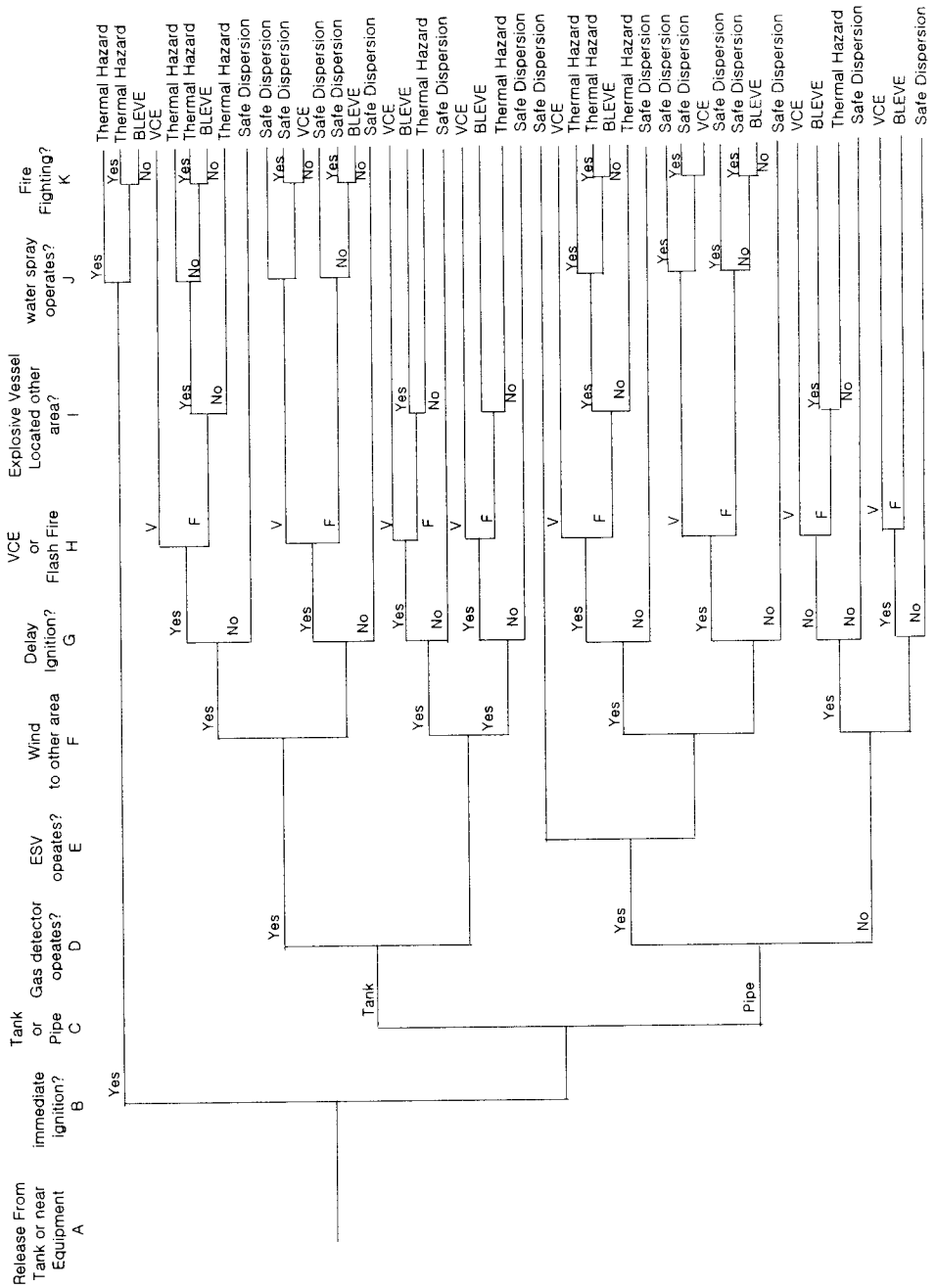


Fig. 3. Accident propagation procedure from hazardous material release.

### 3.4. 비상대응 프로그램 3단계 수준

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

■ 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.

■ 비상대응 3단계 수준 : 비상대응 1단계에 적용되지 않거나, PSM 제출 사업장 그리고 공정이 SIC(Standard Industrial classification) 코드에 포함되어 있는 경우 비상대응 3단계 수준이 적용된다. 이 단계에서는 PSM 기준이 적용되며 예방 프로그램 및 세부적인 잠재위험 평가, 관리 그리고 비상대응의 필요성이 요구된다.

Table 1. Criteria for emergency response program level

Program 1	<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>
Program 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ The process is not eligible for program 1 or subject to program 3</li> </ul>
Program 3	<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>



Table 2. Comparison of program requirements

Program 1	Program 2	Program 3
<b>Hazard Assessment</b>		
Worst-case release analysis	Worst-case release analysis	Worst-case release analysis
	Alternative release analysis	Alternative release analysis
	5-year accident history	5-year accident history
	Document management system	Document management system
<b>Prevention Program</b>		
Certify no additional prevention steps needed	Safety Information	Process Safety Information
	Hazard Review	Process Hazard Analysis
	Operating Procedures	Operating Procedures
	Training	Training
	Maintenance	Mechanical Integrity
	Incident Investigation	Incident Investigation
	Compliance Audit	Compliance Audit
		Management of Change
		Pre-Startup Review
		Contractors
		Employee Participation
		Hot Work Permits
<b>Emergency Response Program</b>		
Coordinate with local responders	Develop plan and program and coordinate with local responders	Develop plan and program and coordinate with local responders
<b>Risk Management Plan Contents</b>		
Executive Summary	Executive Summary	Executive Summary
Registration	Registration	Registration
Worst-case Data	Worst-case Data	Worst-case Data
5-year Accident History	Alternative Release Data	Alternative Release Data
Certification	5-year Accident History	5-year Accident History
	Prevention Program Data	Prevention Program Data
	Emergency Response Data	Emergency Response Data
	Certification	Certification

## 4. 화학산업시설에서의 비상조치계획 구축

### 4.1. 비상조치계획의 체계 구축

Fig. 4는 비상조치계획의 구축절차를 순차적으로 나타낸 것이며 세부적인 구축 절차의 내용은 다음과 같다.

1. 위험성 평가 검토 및 실시  
기존에 실시한 위험성 평가를 검토하고 미비한 점에 대한 위험성 평가(정성적, 정량적)를 실시한다.
2. 발생 가능한 사고 시나리오의 선정  
위험성 평가 결과를 통해서 발생 가능한 사고 시나리오를 선정하여 시나리오별 비상조치계획을 수립한다.
3. 기존 비상조치계획의 검토  
기존에 수립된 비상조치계획을 검토하여 부족한 점을 파악하고 새롭게 보완해야 할 비상조치계획에 대한 자료를 조사 및 수집한다.
4. 비상조치 개요  
조직, 책임과 권한, 비상조치의 수준, 신고, 설비 등이 포함된 비상조치 대응 관리 프로그램의 개요를 설명한다.  
비상사태의 예측, 확실한 사고, 기타상황에 대해서 설명한다.
5. 예방 절차  
이 절차서는 발생 가능한 비상사태의 확인과 피해 영향의 최소화 대책을 위해서 사고 시나리오별로 기술한다.  
절차서에는 안전계획 또는 기타문서가 포함된다.
6. 준비 절차  
테스트, 연중검사, 지역사회와의 관계, 상호지원의 협정, 장비의 확보, 기술 훈련, 연습을 포함한 비상조치계획에 대한 사람 및 설비의 모든 준비 활동을 포함한다.
7. 대응 절차  
필요한 보고서, 절차서, 공공정보, 상호원조, 보완, 배출, 통신, 경보를 포함한 모든 비상사태 대응 절차가 포함된다. 설비의 운전, 사용될 장비, 적절한 개인 및 조직이 수행할 비상조치의 자세한 절차를 포함한다.
8. 팀 절차  
비상조치팀을 구성하고 비상 대응 절차서를 작성한다.

9. 세부 위협에 대한 절차

확실한 사고 시나리오(화재, 폭발, 독성물질 누출 등) 및 자연재해와 같이 특정 비상사태에 대한 대응 방안을 구축한다.

10. 복구 절차

비상사태 대응의 종료 후, 실시하여야 할 복구절차, 사고조사과 근로자의 지원, 외부기관과의 커뮤니케이션 절차가 포함된다.

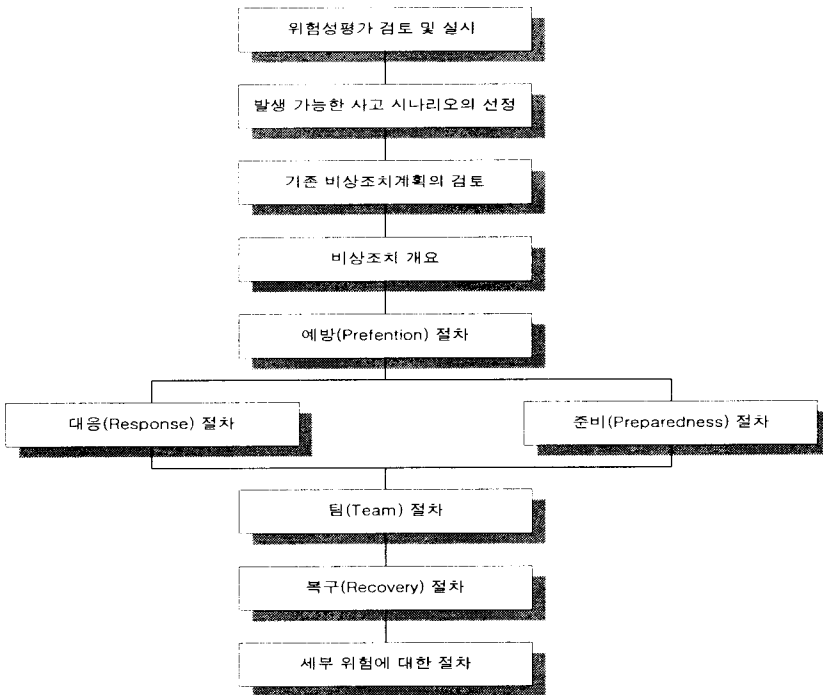


Fig. 4. Establishment procedure of emergency response plan

4.2. 비상조치계획 체크리스트 구축

본 체크리스트는 넓은 범위의 비상계획에 해당되므로 일어날 수 있는 어떤 특수한 비상사태에 대한 충분한 계획과 현재 조직의 문제점을 나타낼 수 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서 적절한 안전성 향상과 비상계획을 수립하여야 한다.

체크리스트 사용시 다음의 단계들은 비상제어계획(Emergency Control

Plans)을 평가하고 분석하는데 도움이 될 수 있다.

1. 각 지역에 적용 할 항목을 조사한다. 적용되지 않는 것은 제외한다.
2. 공장 비상제어계획과 체크리스트를 비교하고 누락된 것은 리스트에 추가한다.
3. 필요하다면 공장의 비상 계획을 수정한다. 연단위로 조사한다.

### 4.3. 비상조치계획 프로그램(ERPS) 개발

#### 4.3.1. ERPS 개발 및 절차

ERPS 프로그램은 화학공장에서 발생할 수 있는 사고를 총괄적으로 예측, 예방, 대응, 관리할 수 있는 비상조치계획 시스템을 구축할 수 있는 S/W로써 활용할 수 있도록 개발한다.

ERPS 개발의 목적은 다음과 같다.

- 중대사고 발생의 예방과 사고발생시 효과적인 비상조치 방법 제시
- 사고 발생시 파생되는 주변지역의 인적·물적 피해를 사전에 예측할 수 있는 모델 제시
- 현장에서 체계적인 비상조치계획 시스템을 구축

현장의 비상조치계획 프로그램을 개발하기 위한 절차는 다음과 같다. 그리고 프로그램을 개발하기 위해서는 현장의 비상조치체계의 전반적인 사항을 명확하게 알고 있어야 한다.

Table 3. Action checklist for emergency control plan

Emergency Control Plan - Action Checklist
1. 비상상태와 재난의 정의
1) 누가 비상제어계획을 실행하는데 책임을 가지고 있는가 ?
2) 어떻게 비상제어계획이 활용되고 있는가 ?
3) 어떤 종류의 비상상태와 재난이 포함되는가 ?
2. 비상상태 경보 체계는 어떠한가 ?
1) 일반적인 비상상태 경보 체계는 ?
2) 전력중단이 발생하여 경고가 실패할 경우 조치는 어떠한가 ?
3) 경보가 발령한 후, 사원들의 행동 지침은 어떻게 이루어지는가 ?
4) 전체 대피의 표시는 어떻게 이루어지는가 ?
5) 어떻게 위험 지역이 공시되는가 ?
6) 어떻게 비번인 주요 감독자에게 통보되는가 ?
3. 비상제어센터
1) 주 비상제어센터의 위치, on-off site 위치
2) 모든 비상제어센터에 비치되어있는 장비와 설비의 유용성과 적합성
4. 비상제어조직
1) 조직 차트, 책임 사항 그리고 비상상태 전,후에 행동해야할 책임
2) 지위에 따른 조직에서의 책임 사항
5. 사원
1) 훈련에 대해서 평가되는 과정
2) 근무교대의 형태, 정보의 수집, 편집과 보고
3) 사원의 방문자, 외부자, 계약자, 매각인의 대피 행동 지침
6. 실종자 또는 사상자 가족에게 신고
7. 대피 시점
1) 각각의 건물은 위치를 표시할 수 있도록 설계되어야 한다.
2) 대피 시점의 결정과 절차, 안전 대피소와 임시 대피소의 지정
3) 전체 공정과 단위 공정에 대한 신호체계
8. 조업 중지
9. Fume Release-누출물질, 기상조건, 대피, 통제, 전달방법등
10. Outside agencies-공고, 경보, 원조 요구
11. 지역사회와의 관계와 관리
- 현장관리의 역할, 공무원의 역할, 비상대책 프로그램
12. 통신
13. 대중의 직무-교육, 공고 등
14. 설비와 서비스-소방수 공급, 전력공급, 펌프작동 여부
15. 잠재적인 책임 사항
16. 폭탄 위협에 대한 대응책

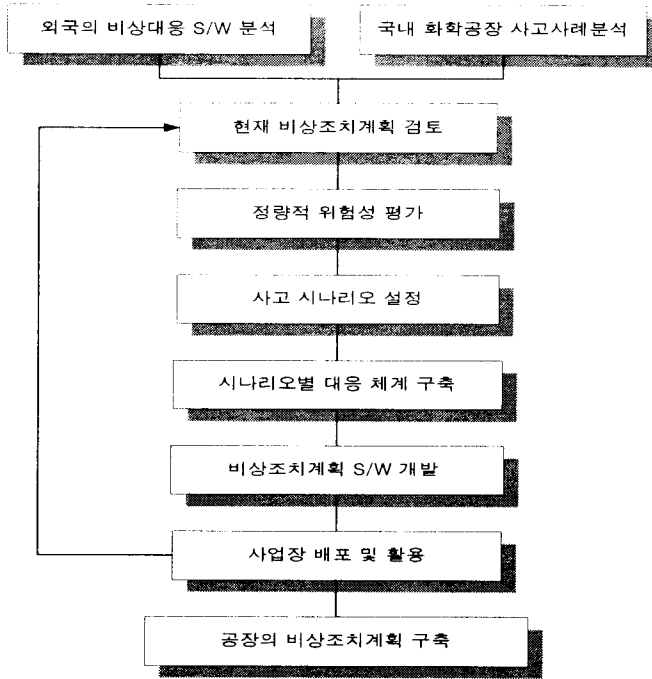


Fig. 5. Development procedure of emergency response plan program

#### 4.3.2. ERPS 구조도 및 구성요소

비상조치계획 프로그램(Emergency Response Plan System, ERPS)의 총괄 구조도는 Fig. 6과 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.

Fig. 7은 비상조치계획 프로그램의 초기화면으로써 프로젝트별로 공장 정보, 공정 목록 사고결과 분석, 비상대응체계분석(ERPTA), 보고서의 다섯 가지 구성 요소에 데이터를 입력하고, 그 입력한 데이터를 통해서 평가를 수행하게 된다. ERPS의 구성요소는 다음과 같다.

##### 1. 공장 및 공정 정보

비상 대응 계획을 수립할 공장의 일반적인 정보 즉, 공장의 위치, 주소, 본사, 안전정보, 규제 물질 등으로 구성되어 있으며, 공정정보에는 공정 개요, 공정 설명, 공정 조건, 사용 물질 등의 정보가 데이터베이스로 구축된다.

##### 2. 사고결과 분석

공장 및 공정의 정보를 기초로하여 현장의 정량적 위험성 평가를 통하여 최악의 사고 시나리오와 대안적인 사고 시나리오에 대한 사고결과를 평가한다.

### 3. 비상대응체계분석(ERPTA)

사고결과 분석을 통하여 선정된 사고시나리오에 대한 대책을 수립하기 위해서 트리 구조로 구성하여 원인에 의한 사고결과에 대한 대응체계를 수립한다.

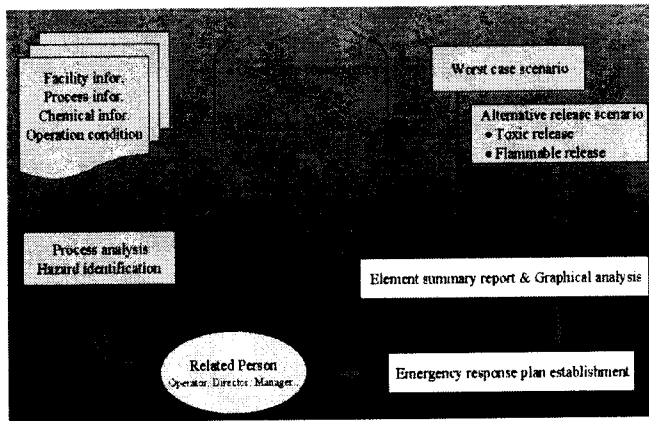


Fig. 6. Conceptual flowchart of emergency response plan

Fig. 7. Initial form of ERPS(Open of the new project)

## 5. 사례연구

본 사례연구에서는 개발한 ERPS를 이용하여 화학 공장내의 위험물 저장시설에 대한 일반적인 공장 및 공정에 대한 정보 구축 및 사고결과 분석을 수행하여 발생 가능한 사고 시나리오를 분석하고 그에 따른 사고 시나리오별 비상 대응 트리 분석을 통하여 보다 효율적이고, 체계적인 비상대응계획에 대한 방향을 제시하고자 한다. 사례 검토 대상은 화학 공장내에 위치한 프로판 저장시설에 대해서 수행하였다.

### 5.1. 저장탱크 시설

#### 5.1.1. 시스템 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 다음과 같다.

Table 4. Information of propane ball tank

볼 탱크 No.	Propane 20D-13
물질 정보	프로판(CAS# 74-98-6), C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
저장량	$84,218 \text{ ft}^3 \times 31.68 \text{ lb/ft}^3 \times 80\% = 2,134,420.99 \text{ lb (968 ton)}$
저장 상태	온도 25.7 °C, 압력 72.5 psi
폭발 한계	2.37 % ~ 9.5 %

Fig. 8은 사례검토 대상 공정인 프로판 저장시설의 P&ID 도면으로 프로판 볼 탱크(20-D-13)에 선박에서 파이프라인을 통해 이송된 물질을 저장하고 출하하는 공정도면이다. 사고의 형태는 볼 탱크 주변의 화재로 인한 BLEVE와 볼 탱크에서 누출에 의한 VCE로 선정하였다.



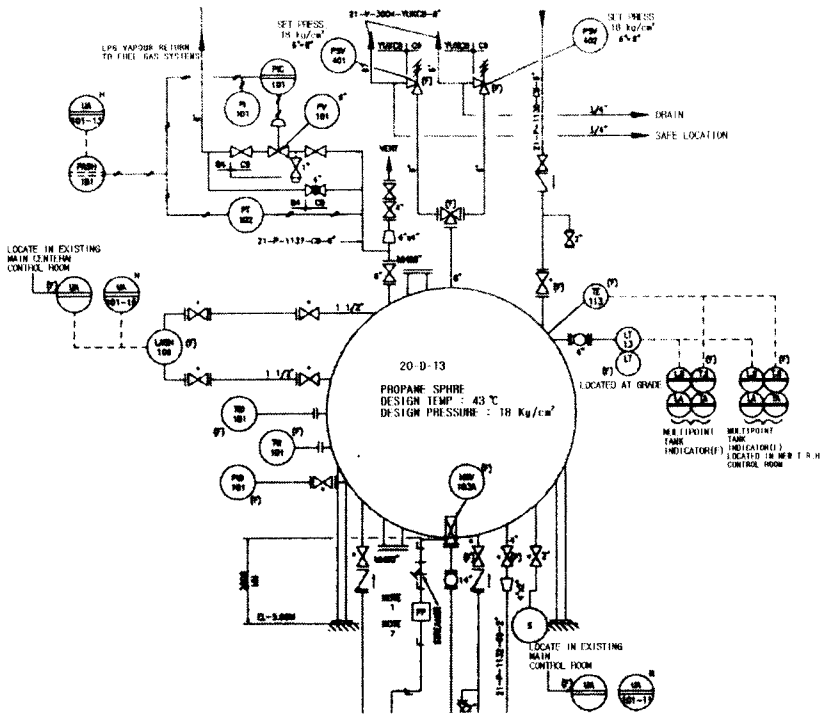


Fig. 8. P&ID of propane and butane storage tank

### 5.1.2. 사고결과 분석 평가 기준

가능한 사고 형태는 불 탱크 저장 시설주변에서 화재가 발생하여 저장탱크가 국부적으로 가열되어 과열하는 형태인 BLEVE와 저장 탱크로부터 가연성 가스의 누출로 인하여 증기 운을 형성하였다가 점화원에 의해서 발생하는 VCE 사고로 분석되었다. 사고에 의한 복사열과 과압력 평가시 다음 표에서 제시한 기준으로 분석하였다[2,5,6].

Table 5. Application criterion of thermal radiation

Thermal radiation의 적용 기준	
4 Kw/m <sup>2</sup>	사람에게 충분히 고통을 줌, 보호장비를 착용하지 않을 경우, 피부에 물집이 생기는 2도화상을 입을 수 있는 복사열
12.5Kw/m <sup>2</sup>	플라스틱을 녹일 수 있고, 목재의 점화를 도와주는 최소 에너지
37.5Kw/m <sup>2</sup>	공정 장치에 충분히 심각한 영향을 줄 수 있는 복사열



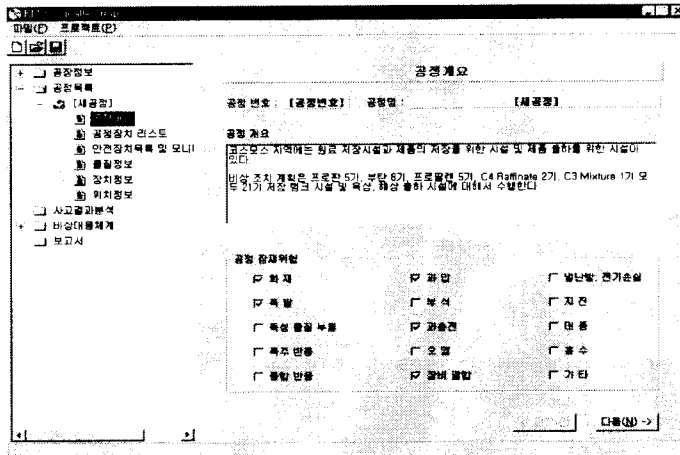


Fig. 10. Database establishment form for process information

### 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. 11은 propane tank 968 ton이 완전 파열되었을 경우 시나리오 요약 을 보여주는 화면이다.

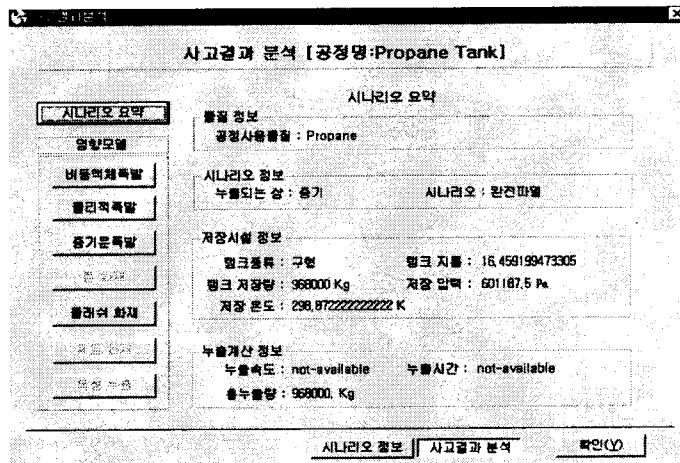


Fig. 11. Establishment form for consequence analysis

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 7과 같다. 프로판 저장탱크의 손상 또는 인접 파이프라인의 파손 등의 이유로 연속적으로 가연성 물질이 누출될 경우 전체 공정에 심각한 영향을 가져올 수 있는 VCE사고가 발생할 수 있다. VCE 사고 시나리오는 프로판 이송 파이프라인에서의 완전파열과 2" 누출을 가정하였다.

Table 7. 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 8. Simulation results for propane VCE using ERPS

Overpressure [psig]	Propane[rupture]	propane[2inch]
	1.5m/s, F	
0.30	3304.0	127.7
1.91	892.6	70.1
3.00	702.0	65.5

Fig. 12는 프로판 볼 탱크에서 BLEVE 사고가 발생했을 경우, 현장의 도면상에 피해범위를 나타낸 것으로 복사열 기준에 따른 피해거리 및 영향 범위를 표시하고 있다.

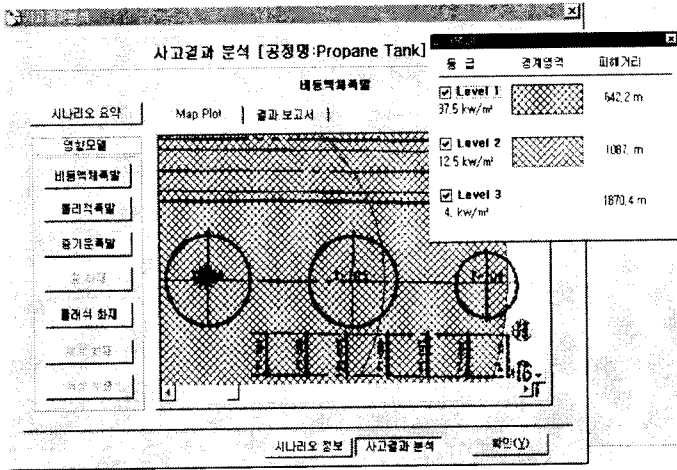


Fig. 12. BLEVE effect area analysis form of propane tank

### 5.2.3. 비상대응계획 트리 분석(ERPTA) 구축

사고 결과 분석을 통하여 예상되는 사고 시나리오는 크게 외부 열원에 의하여 탱크가 가열/폭발하는 BLEVE 사고와 연속적인 누출로 인하여 발생된 증기운에 의하여 점화/폭발하는 VCE 사고로 나눌 수 있다.

본 사례연구 지역에서 발생 가능한 사고 시나리오의 전개 과정은 다음과 같이 4가지 경우가 분석되었다.

- 탱크 혹은 인접한 라인에서의 누출 ⇒ 탱크주변에 pool 형성 ⇒ 점화 ⇒ Pool fire 발생 ⇒ 탱크가열 [최소 20분] ⇒ BLEVE
- 탱크 혹은 인접한 라인에서의 누출 ⇒ 즉각적인 점화 ⇒ Jet fire 발생 탱크가열 [최소 30분] ⇒ BLEVE
- 탱크 혹은 라인에서의 연속적인 누출 [누출량 1톤 이상] ⇒ 가연성 증기운 형성 ⇒ 점화 ⇒ 폭발 [VCE]
- 탱크 혹은 라인에서의 연속적인 누출 [누출량 1톤 이하] ⇒ 가연성 증기운 형성 ⇒ 점화 ⇒ 폭발 [Flash fire]

본 사례연구에서 정량적 위험성 평가 결과를 근거로 비상대응 방법

및 대피거리를 요약한 것으로 비상대응계획 트리를 구축하는데 다음의 내용이 포함된다.

1) pool fire가 dike내에서 발생할 경우, 2도 화상을 입을 수 있는 복사열  $4 \text{ kw/m}^2$ 에 이르는 거리를 기준으로 1차 대피거리는 80 m이다.

2) Jet fire가 탱크 또는 인접라인에서 발생할 경우, 2도 화상을 입을 수 있는 복사열  $4 \text{ kw/m}^2$ 에 이르는 거리를 기준으로 1차 대피거리는 250 m이다.

3) 만약, pool fire가 dike내에서 발생하여 20분 이내에 화재가 진압되지 않을 경우, BLEVE가 발생할 수 있으므로 2도 화상을 입을 수 있는 복사열  $4 \text{ kw/m}^2$ 에 이르는 거리를 기준으로 저장시설에서의 대피거리는 1870m 이상 되어야 한다.

4) 만약, jet fire가 탱크 또는 인접라인에서 발생하여 30분 이내에 화재가 진압되지 않을 경우, BLEVE가 발생할 수 있으므로 2도 화상을 입을 수 있는  $4 \text{ kw/m}^2$ 에 이르는 거리를 기준으로 대피거리는 1870m 이상이 되어야 한다.

5) VCE가 발생하여 건물의 부분적인 파손의 영향을 미치는 1.91 psig의 과압이 미칠 수 있는 거리가 70m이기 때문에 누출지점으로부터 1차 대피거리는 적어도 70m이상 되어야 한다. 그리고 0.30 psig의 과압이 미치는 안전거리는 128m이기 때문에 2차 대피거리는 적어도 128m이상 설정되어야 한다.

ERPTA에서는 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 조치사항부터 복구단계까지의 세부적인 비상대응 사항과, 책임 부서 및 책임자 그리고 각 사항에 따른 행동 절차서를 파일별로 연결하여 프로판 볼 탱크의 사고에 따른 비상대응 절차를 구축할 수 있다.



2. 외국 비상조치계획 프로그램의 국내 적용상의 문제점을 상당 부분 극복할 수 있으며 향후 국내 현실에 적합한 안전관련 프로그램 개발의 기초가 될 수 있는 기반을 제공할 수 있다.
3. 화학물질 사고 발생시 파생되는 주변지역의 인적·물적피해 및 환경 피해를 사전에 예측할 수 있는 모델을 제시할 수 있다.

## 참 고 문 헌

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 Use of Vapor Cloud Dispersion Models*. AIChE, New York, 1987.
5. CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*. AIChE, New York, 1994.
6. Crowl, D. A. and J. F. Louvar, *Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications*, Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
7. EPA, *Guidance on The Application of Refined Dispersion Models to hazardous/Toxic Air Pollutant Release*, 1993.
8. Hammer, Willie, *Handbook of System and Product Safety*, Prentice-Hall, 1972.
9. Lambert, H.E., *Failure Modes and Effects Analysis*, Advanced Study Institute, NATO, 1978.
10. Louis Theodore, Joseph P. Reynolds, Francis B. Taylor, *Accident and Emergency Management*, John Wiley & sons, Inc., 1989.
11. *Major HAZARD Control : A Practical Manual*, International Labour Office, Genova, 1988.
12. The Office of The Federal Register National Archives and Records Administration, *40 CFR Part 68*, 1998 Revised.