



## 에너지 시설물의 위험성 평가에 따른 비상대응 시스템 구축

\*이헌석 · 강승균 · 정인희 · 김범수 · 유진환\* · 박철환 · 김대흠 · 고재욱

광운대학교 화학공학과, \*(주) 세이프티아

(2008년 5월 19일 접수, 2008년 6월 17일 수정, 2008년 6월 17일 채택)

## Development of Emergency Response System by Risk Assessment Methodology in Energy Facility

†Heon Seok Lee · Seung Gyun Kang · In Hee Jung · Bum Su Kim · Jin Hwan Yoo\* · Chulhwan Park · Daeheum Kim · Jae Wook Ko

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

\*SafeTia Co., Ltd., Seoul 137-895, Korea

(Received May 19, 2008, Revised June 17, 2008, Accepted June 17, 2008)

### 요 약

도시에는 에너지 시설물로서 고압가스 저장시설 및 고압가스 배관 등 위험물을 취급하는 시설이 산재해 있고, 이런 시설들의 효율적인 위험성 분석 및 관리시스템의 부재로 사고 가능성이 상존하며 선진국에 비해 상대적으로 높은 사고율을 보이고 있다. 에너지 시설물에서 발생하는 사고는 시설 자체의 막대한 피해 뿐만 아니라 시설 주변 지역에 미치는 영향이 매우 크므로, 본 연구에서는 사고영향 분석을 통한 비상대응 시스템을 적용하여 사고피해 정도에 대한 정보를 이용한 체계적인 대응체제를 구축하였다.

**Abstract** – There are many facilities, such as facilities for high pressure gas storage and systems related to high pressure pipes, to handle hazardous materials in energy industries. Because the foundation of the proper risk analysis and management system has not been established, there is the possibility of an accident and Korea has met higher accident rate than developed countries. These accidents in energy facilities could cause great damage to facilities including the surrounding area, We have conducted the present research in order to systematize the emergency response system (ERS) using a lot of information on the degree of damage in an accident by consequence analysis.

**Key words** : emergency management, LNG, QRA, jet fire

### I. 서 론

에너지 시설물에서는 가스의 저장 및 운반 특성상 고압상태의 액체나 기체를 다루고 있어 사고발생시 대규모로 확대될 잠재적 위험이 매우 크며, 부천 충전소 사고와 같은 여론의 이목을 집중시키는 중대사고가 종종 발생하고 있다.

본 연구에서 개발한 에너지 시설물의 통합비상대응 시스템(prototype)은 다음과 같이 5개 모듈(module)로 구성되어 있으며, 각 모듈은 사고위험요인 진단/평가 시스템, 사고원인 분석 시스템, 사고빈도 분석 시스템, 폭발위험 해석 시스템, 비상대응 시스템으로 구성되어

있다. 이는 통합비상대응 시스템이 사고발생 원인부터 사고발생시 정량적 위험성 평가를 통하여 각각의 상황에 맞는 비상대응 계획을 준비할 수 있게 하여 사용자가 현장에서 실질적으로 활용할 수 있도록 하였다.

### II. 정량적 위험성 평가와 비상대응 계획

#### 2.1. 정량적 위험성 평가

정량적 위험성 평가란 공정에서의 잠재위험을 확인하여 시나리오에 대한 사고빈도와 사고결과 분석을 통하여 위험성을 표현하는 것으로 화재나 폭발 또는 독성물질로 인한 중대 사고에 의해서 인체나 건물에 미칠 수 있는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다[1].

†주저자:hundoly@kw.ac.kr

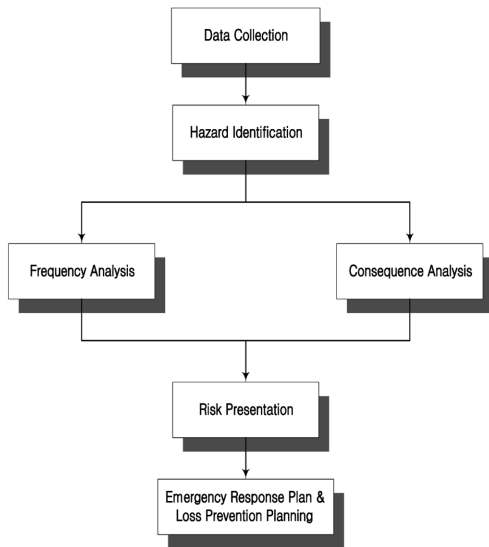


Fig. 1. Procedure of quantitative risk assessment.

2.2. 비상대응 계획

비상대응 계획을 수립하는 접근방법은 예방, 준비, 대응, 복구의 4단계의 사이클 통하여 구축된다. Fig. 2는 예방, 대비, 대응, 복구의 4단계 사이클을 나타낸다.

2.2.1. 예방(Prevention)

비상사태를 예방하고 완화하기 위해서는 공정 위험성을 파악하여 적합한 운전절차, 교육훈련, 예방관리, 변경관리 그리고 인적오류 분석을 체계적으로 구성하고 수행하여야 한다.

또한 공정설계는 근본적으로 화재, 폭발, 누출 등의 사고를 예방할 수 있도록 안전성을 고려하여 설계되어야 하며, 사고원인 및 결과의 사전확인이 가능하다면, 수립된 비상대책은 사고 가능성을 최소화하고 공장 및 주변지역에 대한 사고의 피해 영향을 감소시킬 수 있다.

2.2.2. 대비(Preparedness)

대비단계는 공정설비에서 예측하기 어려운 사고의

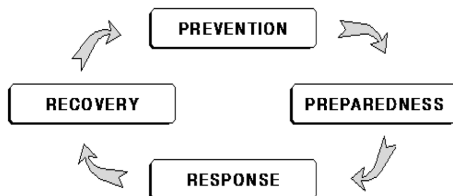


Fig. 2. Emergency management.

예방, 완화 대책 그리고 제어 시스템의 실패에 의해서 일어날 수 있는 비상사태에 대해서 준비하는 단계이다. 사고시나리오의 확인은 공정의 잠재적 위험 분석을 통하여 확인될 수 있다.

2.2.3. 대응(Response)

대응단계에서는 비상대응을 위한 대응전략 및 상호 지원 시스템을 확인하는 것으로 사고명령 체계(incident command system)를 정의하고 사고명령 체계를 어떻게 이행할 것인가를 확인한다. 그리고 사고를 완화하기 위해서 요구되는 중요한 대책에 대해서 토의한다. 또한 화재, 폭발 등을 완화하기 위해서 효과적인 대응대책을 구축 한다.

2.2.4. 복구(Recovery)

비상대응 계획의 마지막 단계로서 시간, 사람, 자원 과 관리자의 리더십이 필요하다. 복구를 위해서 사전에 계획된 능력은 복구하는데 소요되는 시간과 보다 중요한 근원적인 비용의 상관관계로 인하여 주요한 요소 중 하나로 취급되고 있다[2].

- 피해의 크기 및 규제기관의 요구
- 복구를 위한 사람, 자원/재정 책임과 유효성
- 기타(날씨, 중요 품목에 대한 전달 등)

2.3. 비상대응 시스템

비상대응 시스템은 에너지 시설물에서 발생할 수 있는 사고를 총괄적으로 예측, 예방, 대응, 관리할 수 있는 비상대응 시스템을 구축할 수 있는 소프트웨어로써 활용할 수 있어야 하며, 비상대응 시스템의 목적은 다음과 같다.

- 중대사고 발생의 예방과 사고발생시 효과적인 비상조치 방법 제시
- 사고발생시 파생되는 주변지역의 인적·물적 피해를 사전에 예측할 수 있는 모델 제시
- 현장에서 체계적인 비상조치 계획 시스템 구축

현장의 비상대응 프로그램을 개발하기 위해서는 현장의 비상조치 체계의 전반적인 사항을 명확하게 알고 있어야 한다[3].

공장 및 공정정보, 공정에서 사용하는 물질정보, 운전조건을 토대로 정량적 위험성 평가를 실시한다. 그리고 정량적 위험성 평가 및 분석을 통해서 사고시나리오를 선정, 확인하고 비상대응 체계를 구축하여 비상대응 체계를 구축할 수 있도록 구성되어야 한다.

공장 및 공정정보는 비상대응 계획을 수립할 공정의 일반적인 정보 즉, 공정의 위치, 주소, 분사, 안전정보,

규제물질 등으로 구성되어 있으며, 공정정보에는 공정 개요, 공정설명, 공정조건, 사용물질 등의 정보가 데이터베이스로 구축되며, 사고결과 분석은 공정의 정보를 기초로 하여 현장의 정량적 위험성 평가를 통하여 최악의 사고시나리오와 대안적인 사고시나리오에 대한 사고결과 분석을 통하여 선정된 사고시나리오에 대한 대책을 수립하기 위해서 트리(tree) 구조로 구성하여 원인에 의한 사고결과와의 대응체계를 수립할 수 있다.

### III. 통합비상대응 시스템

통합비상대응 시스템은 에너지 시설물에서 사고위험 요인을 파악하고, 위험요인에 따른 피해영향 분석과 발생 가능한 메커니즘 분석을 통하여 발생 가능한 최악의 시나리오를 선정하고, 그에 따른 비상대응 체계를 구축할 수 있도록 구성되어 있으며, 세부 모듈은 다음과 같다.

#### 3.1. 사고위험요인 진단/평가 시스템

에너지 시설물의 잠재적 위험원인 파악, 분석 및 진단을 실시하여, 위험을 제거를 위한 잠재적 위험요소

파악 및 현재의 안전관리 수준을 진단/평가하는 기능을 수행한다.

본 연구에서는 에너지 시설물에서 일어날 수 있는 인적, 정치적 위험요인을 정성적, 정량적인 방법을 다각적으로 접근하여 잠재된 사고요인을 진단/평가 하는 시스템을 개발하였다(Fig. 3(a))[4].

#### 3.2. 사고원인 분석 시스템

국내의 에너지 시설물의 사고조사시 사고원인을 체계적으로 분석할 수 있도록 한 시스템으로 사고에 대한 사례를 분석하여 사고원인 별로 분류하여, 사고의 근본원인 및 메커니즘에 분석을 통하여 인적오류, 장치 결함, 외부 요인을 시작점으로

사고의 근본원인을 찾아갈 수 있는 시스템(Fig. 3(b))으로 이는 사고조사자가 사고의 근본원인을 쉽게 찾을 수 있도록 하여 많은 비슷한 사고의 재발을 막을 수 있다.

#### 3.3. 사고빈도 분석 시스템

에너지 시설물에서의 물질의 누출 및 폭발 사고사태에 대한 데이터베이스 시스템과 사고 위험요인 진단 시

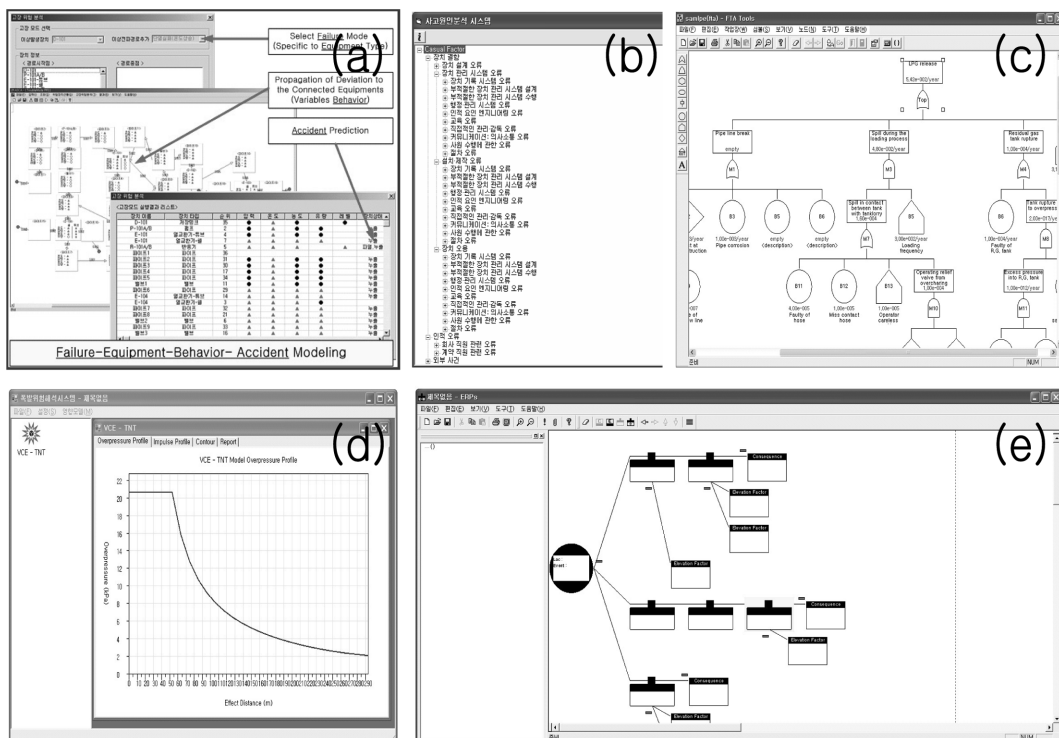


Fig. 3. Emergency management system outline. (a) accident risk factor diagnosis/assessment system, (b) causes of accident analysis system, (c) fault tree analysis system, (d) explosion risk assessment system, (e) emergency response system.

시스템을 바탕으로 발생 가능한 사고들을 예상하고, 빈번하게 일어날 가능성이 있는 사고를 제시하여 능동적으로 대응하여 사고예방에 도움이 될 수 있는 시스템(Fig. 3(c))을 제시하였다. 본 시스템은 결함수목(fault tree) 구조로서 구현되며, 사고 가능성이 높은 메커니즘을 우선적으로 수행 가능하도록 최소컷세트(minimal cut set)를 자동 연산하여 사용자가 효율적으로 위험관리를 수행할 수 있는 편의성도 함께 포함하고 있다.

### 3.4. 폭발위험 해석 시스템

가스 사고의 경우, 밀폐 공간 또는 개방공간에서의 발생빈도가 높은 가스폭발 사고에 대하여 나타날 수 있는 과압에 관한 피해영향을 모사하고, 그 피해범위, 피해강도 등을 정량적으로 예측할 수 있는 시스템(Fig. 3(d))이다.

### 3.5. 비상대응 시스템

폭발위험 해석 시스템을 통해 얻을 수 있는 사고피해에 대한 데이터를 지리, 지형 정보에 적용하여 피해영향 평가를 단순 거리에 의한 피해가 아닌 에너지 시설물에서의 구체적인 위치에 따른 피해영향 평가와 대응기관 등에 대한 정보를 이용하여 에너지 시설물의 운용요원이 사고발생 경과에 따른 대응 체계를 구축하여 비상시를 대비한 연습 등에 실용적으로 활용할 수 있는 비상대응 시스템(Fig. 3(e))이다.

## IV. 사례 연구

### 4.1. 대상 공정 묘사

본 연구에서 사례 검토 대상인 LCNG/LNG 충전소는 대지는 1089 m<sup>2</sup>(건물 면적 : 293.7 m<sup>2</sup>)이며, 여기에는 LNG 저장탱크, LNG 1차·2차펌프, 열교환기, 기화기, CNG 저장탱크, LNG 및 CNG 충전기 등의 주요설비와 가스감지 장치 등 부속설비로 설치되어 있다. 평가를 수행할 탱크 정보와 운전조건 그리고 물질정보는 Table 1과 같다.

공정의 가상시나리오는 10톤 용량의 탱크로리에서

Table 1. Information of LNG tank truck.

Material	LNG
Mass	15 ton
Pressure	8 bar
Temperature	-160°C
Phase	Liquid

LNG 저장탱크로 하역작업을 하던 중 작업자의 실수로 인한 탱크로리에서 누출(leak, 20 mm)이 발생하여 LNG가 누출되었을 때의 경우를 선정하였다.

### 4.2. 사고결과 분석

본 통합비상대응 시스템의 폭발위험해석 시스템을 적용하여 폭발 과압이 발생하였을 경우의 피해 범위를 예측하였다(Fig. 5). LNG의 경우, 누출 시 특수한 상황(밀폐공간)을 제외하고는 폭발이 나타나지는 않지만, 발생할 경우에 대하여 분석한 결과 2.4 kPa의 과압 영향은 700 m로 나타났다.

Fig. 6(PHAST 6.5)은 LNG 탱크로리에서 LNG가 누출되었을 때 거리에 따른 LNG의 최대 농도분포를 나타낸 것으로 UFL은 형성범위는 누출부로부터 약 12~18 m까지 형성되며 그 면적은 10.7 m<sup>2</sup>이며, LFL은 형성범위는 누출부로부터 약 7~90 m까지 면적은 4305.07 m<sup>2</sup>를 형성된다. 이는 상온(25°C)에서 기체로 존재하는 메탄의 특성상 LNG가 누출되면서 팽창하여, 가연한계(Flammable Limit)의 형상으로 유추해 볼 때 Jet fire를

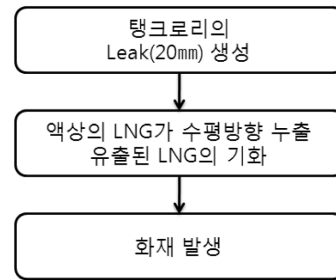


Fig. 4. Accident scenario.

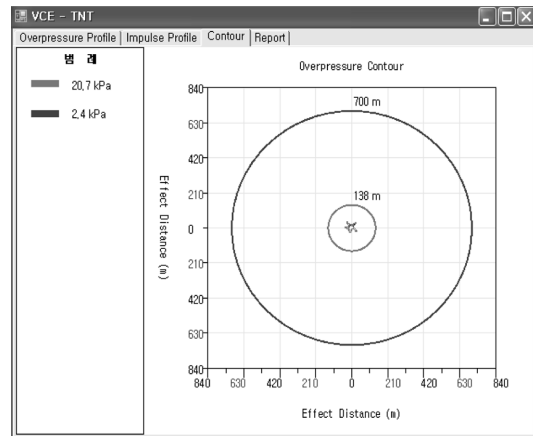


Fig. 5. Overpressure of LNG VCE.

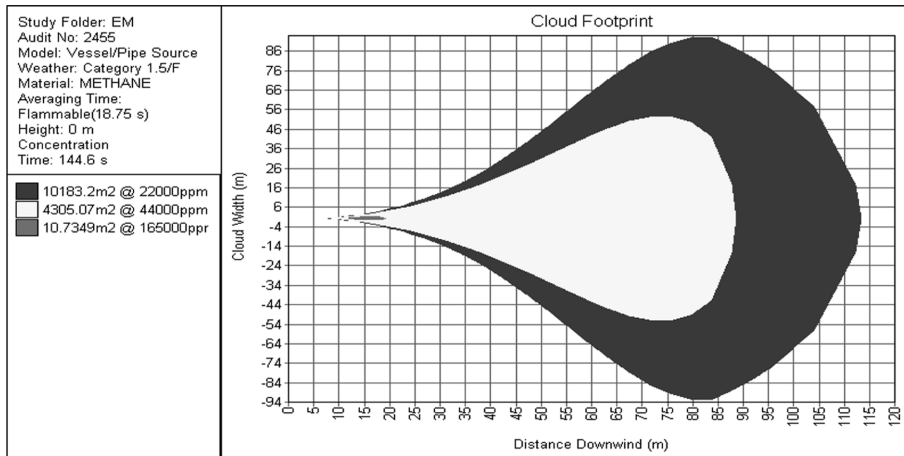


Fig. 6. Maximum concentration of flammable limit (PHAST 6.5).

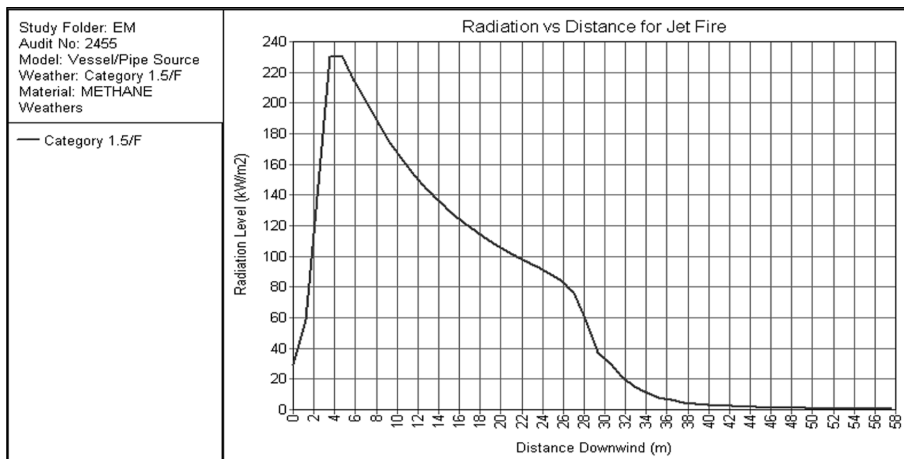


Fig. 7. Radiation vs distance for jet fire (PHAST 6.5).

형성할 것으로 예측된다.

Fig. 7(PHAST 6.5)은 Jet fire의 복사열을 나타낸 것으로, 4m에서 최대 복사열인 230 kW/m<sup>2</sup>을 나타낸다. 20.7m에서 37.5 kW/m<sup>2</sup>의 복사열을 나타내고, 28.8m에서 12.5 kW/m<sup>2</sup>을, 40.3m에서 4 kW/m<sup>2</sup>을 나타낸다. 이는 누출부로부터 40.3m 이후에서 대응을 할 수 있음을 추정할 수 있다.

### 4.3. 비상대응 계획

본 연구에서는 LCNG/LNG 충전소에서의 설정한 사고시나리오의 정량적 위험성 평가 결과를 근거로 비상대응 방법 및 대피거리를 비상대응 시스템에 트리로 구축하였다.



Fig. 8. Establishment form for Emergency Planning.

탱크로리의 결함(leak)으로 인하여 LNG의 누출이 발생하여, 기화되면서 VC가 1/2 LFL이 116.7m까지 형성되며 방출된 LNG는 Jet fire를 형성할 경우 사고시나리오를 순차적으로 기록하고, 그 순서에 따라 최초 발견자의 대응단계의 조치사항부터 복구단계까지 각 사항에 따른 행동절차서를 작성하여, LNG 탱크로리의 사고 발생에 따른 비상대응 체계를 구축할 수 있다.

## VI. 결 론

본 연구에서는 에너지 시설물에서 발생할 수 있는 사고시나리오를 선정하여 분출된 LNG의 연소한계의 범위와 발생될 화재의 종류와 화염에 따른 복사열의 범위에 적합한 피해 영향에 대한 정량적 위험성 분석을 하였으며, 통합비상대응 시스템을 이용한 비상대응 체계를 구축하였다.

상술한 에너지 시설물의 위험성 평가에 따른 비상대응 시스템은 실제 사고대응에 적합하도록 설계되었으며, 이는 사고발생에 따른 경제적·사회적·인적 피해를 최소화하기 위한 범용 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대에너지안전연구단”의 연구 결과입니다(세부과제번호: 2007-M-CC23-P-02-1-000).

## 참고문헌

- [1] CCPS, Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, AIChE, New York, (1989)
- [2] 유진환, 김민섭, 고재욱, “독성가스 시설의 정량적 위험성 평가를 이용한 비상대응시스템 구축”, *한국가스학회지*, **9(2)**, (2005)
- [3] 임치순, 서재민, 엄성인, 백종배, 고재욱, “화학공장에서의 정량적 위험성 평가를 이용한 비상 대응 계획 시스템 개발”, *한국산업안전학회지*, **16(2)**, (2001)
- [4] 소방방재청, “가스 누출·폭발 사고의 위험성 평가 및 예측 기술개발”, (2006)