

위험성 평가 프로그램 PML-Chem 개발

The Development of Risk Assessment Program PML-Chem

김윤화* · 김형석** · 신동일*** · 김인원**** · 고재욱*

Y.H. Kim · H.S. Kim · D.I. Shin · I.W. Kim · J.W. Ko

(1998년 12월 10일 접수, 1999년 5월 12일 채택)

ABSTRACT

This study is to develop the quantitative risk assessment program for consequence analysis of fire and explosion (PML-Chem), which is applicable to the chemical plants. The advantages of PML-Chem is easy to use and acquire results. Especially, PML-Chem was embedded real weather condition database for major chemical plants in ○○ complex in country. Also, reliability of PML-Chem was verified through comparing PML-Chem with PHAST-Professional which is already commercial.

1. 서 론

화학공업은 고도의 기술집약적 장치산업이며 가연성 및 반응성이 높은 물질을 고온, 고압하에서 사용·저장하고 있기 때문에 화재 및 폭발 사고의 가능성이 항상 잠재하고 있다. 특히, 화학공장에서 사용하는 대부분의 물질이 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)와

VCE(Vapor Cloud Explosion) 폭발사고를 유발할 수 있는 가연성 물질이기 때문에 사회적 문제를 야기할 수 있을 정도의 중대재해가 발생할 수 있다.

실례로, 1984년 멕시코시티에서 발생한 프로판 가스 폭발사고, 1988년 미국 일리노이주에서 발생한 수소가스 폭발사고와 영국의 Flixborough에서 발생한 사이클로헥산 폭발사고는 대표

* 광운대학교 화학공학과

** (주)아스프 소프트웨어 개발팀

*** 서울대학교 자동화시스템 공동연구소

**** 건국대학교 화학공학과

적인 BLEVE, VCE 사고로 막대한 인적, 물적 피해를 가져왔다. 국내의 경우에도 1998년 9월에 발생한 부천시 대성에너지 폭발사고와 98년 10월에 발생한 익산 동양에너지 폭발사고가 최근에 발생한 BLEVE, VCE 사고이다.

선진외국의 경우 이러한 피해를 미연에 방지하기 위하여 다양한 정량적 위험성 평가 프로그램 개발을 시도하고 있으며, 이미 상용화된 프로그램도 상당수 있다. 특히 DVN Technica에서 개발한 PHAST와 SAFETI, Du Pont사의 SAFER 같은 프로그램은 상당히 비싼 가격으로 국내에 도입되고 있는 실정이다. 그러나, 국내의 경우에는 외국의 정량적 위험성 평가 프로그램과 비교할 수 있을 정도의 정량적 위험성 평가 프로그램이 개발되지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 실정에 적합하며, 화학플랜트에서 조업하는 근로자들이 손쉽게 사용할 수 있는 화재 및 폭발에 대한 effect modeling simulator인 PML-Chem(Possible Maximum Loss-Chemical Plant)을 개발하였다.

2. BLEVE와 VCE Mechanism

BLEVE와 VCE는 대표적인 폭발사고의 유형이지만 그 형태는 상이한 경향을 갖고 있다. 먼저 BLEVE의 경우에는 가연성 물질을 대기압보다 높은 공정압력으로 저장하는 탱크가 외부 열원에 의하여 증기압 팽창을 통한 폭발을 의미하며, VCE의 경우에는 가연성 물질이 대기로 누출된 후 연소 하한계(LFL)와 연소 상한계(UFL) 사이에서 점화원에 의한 폭발을 의미하기 때문이다. 특히 BLEVE의 경우에는 fireball을 동반하는 경우가 대부분이며 그에 따른 복사열(thermal radiation)에 의한 피해를 가져오며, VCE는 폭풍압(blast)에 의한 피해를 가져온다.

본 연구팀이 개발한 PML-Chem에서 사용한 BLEVE와 VCE 관계식을 요약하면 다음과 같다.

2.1 BLEVE Mechanism

BLEVE는 앞에서 설명하였듯이 가연성 물질이 외부 열원에 의하여 갑작스런 증기압 팽창

으로 인한 사고를 의미한다.

PML-Chem에서 사용한 BLEVE 관계식은 solid model을 사용하였으며, 간략하게 요약하면 식(1)~(3)과 같다^{1,2)}.

$$\frac{Q_R}{E} = \tau F_{21} + \left[p_w \left(\sqrt{H^2 + x^2} - \frac{D}{2} \right) \right]^{0.09} \frac{D^2}{4x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$E = \frac{F_{rad} M H_c}{\pi D_{max}^2 t_{BLEVE}} \dots\dots\dots (2)$$

$$F_{21} = \frac{D^2}{4x^2} \dots\dots\dots (3)$$

관계식에서 알 수 있듯이 BLEVE에 의한 피해효과는 fireball에서 방출되는 복사열과 피사체(target) 사이의 상관관계로부터 계산하게 되며, 그에 따른 복사열의 영향은 Table 1에 제시하였다^{1,8)}.

Table 1 Effects of thermal radiation

Radiation Intensity [kW/m ²]	Damages
37.5	Sufficient to cause damage to process equipment
25	Minimum energy required to ignite wood at indefinitely long exposure
12.5	Minimum energy required for piloted ignition of wood, melting of plastic tubing
9.5	Pain threshold reached after 8 sec ; second degree burns after 20 sec Rupture of oil storage tanks
4	Sufficient to cause pain to personnel if unable to reach cover within 20 sec ; 0% lethality
1.6	Will cause no discomfort for long exposure

2.2 VCE Mechanism

VCE는 가연성 물질이 누출되어 LFL과 UFL 사이에서 점화되어 폭발하는 유형으로, 폭풍압에 의한 피해효과를 가져온다.

본 연구에서는 일반적인 TNT 당량식을 사용하였으며, 그에 대한 관계식을 간략하게 요약하면 식(4)~(5)와 같다^{1,2)}.

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{cTNT}} \dots\dots\dots (4)$$

$$R = Z W^{1/3} \dots\dots\dots (5)$$

또한, 폭발과압에 대한 영향력은 1987년 Clancy가 제시한 기준을 사용하였으며, Table 2에 제시하였다^{1,8)}.

Table 2 Effects of overpressure

Over-pressure [psi]	Damages
0.03	Large glass windows which are already under strain broken
0.15	Typical pressure for glass failure
0.05 1	Large and small windows usually shattered
0.7	Minor damage to house structure
1.3	Steel frame of clad building slightly distorted
2.3	Non-reinforced concrete or cinder walls shattered
3- 4	Rupture of oil storage tanks
7	Loaded train wagons overturned
10	Probable total destruction of buildings

3. PML-Chem 개발

본 연구팀이 개발한 PML-Chem은 공정에서 조업하는 근로자가 손쉽게 사용할 수 있도록 개발된 정량적 위험성 평가 프로그램이다. PML-Chem은 화학플랜트에서 사용중인 가연성 물질이 외부조건에 의하여 누출되어 폭발하였을 경우 예상되는 최대 피해범위 및 피해정도를 예측하는 프로그램이다. PML-Chem의 장점은 사용자가 공정에 대한 간략한 정보와 취급하는 물질만 입력하면 프로그램 내부 데이터 베이스와 추론 엔진이 BLEVE나 VCE에 의하여 예상되는 최대 피해를 예측하게 되며, 그 피해효과는 다음과 같은 세 가지 형태를 고려하였다.

- Damage from overpressure (blast)
- Damage from thermal radiation
- Damage from fragment

Fig. 1은 PML-Chem의 내부적인 논리 흐름을 나타내는 그림이다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 VCE의 폭발 과압 계산은 TNT 당량식을 사용하였으며, BLEVE에

의한 복사열 계산은 시간인자와 열류량의 관계 식인 solid model을 사용하였다.

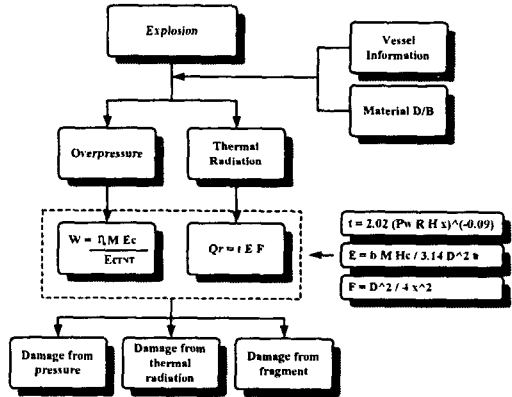


Fig. 1 Logic diagram for PMLs inside structure

Fig. 2부터 6까지는 PML-Chem을 실행하였을 때의 화면을 나타내고 있다.

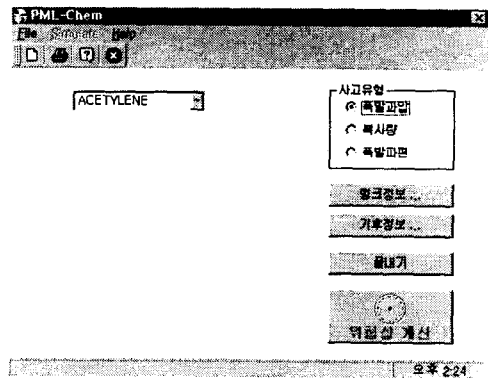


Fig. 2 Main menu of PML-Chem

4. Verification Study

본 연구팀이 개발한 PML-Chem의 신뢰도 및 효용성을 분석하기 위하여 상용 프로그램인 DNV-Technica의 PHAST-Professional과 비교하여 보았다.

PML-Chem과 PHAST-Professional을 비교한 모사 조건은 다음과 같다.

- 대상공정: Vessel and Tank

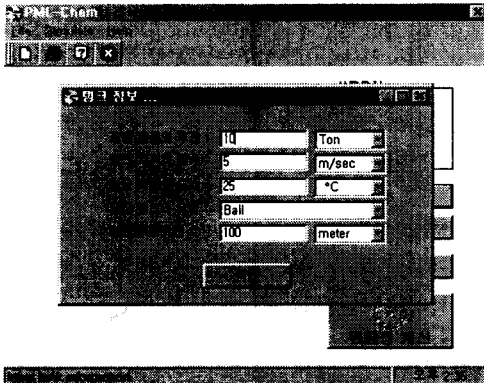


Fig. 3 Input form for vessel information

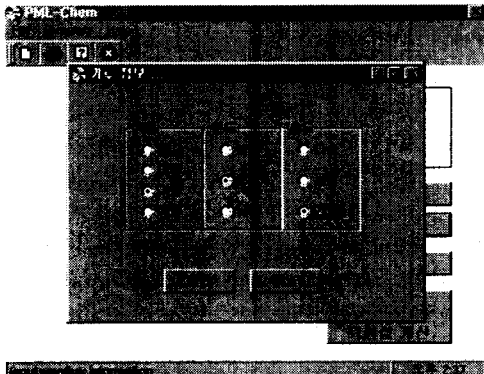


Fig. 4 Input form for weather conditions

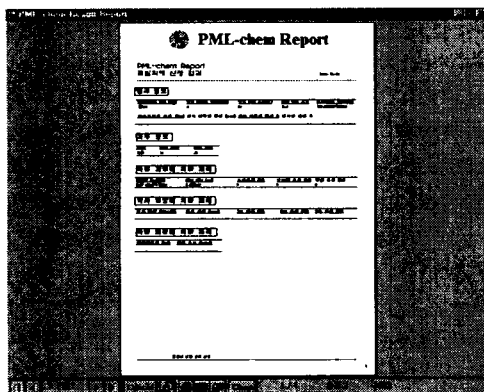


Fig. 5 Report result of PML-Chem

- 공정온도: Various
- 공정압력: Various

• 기후조건: PML-Chem D/B
 • 모사거리: 10m~1,000m [10m 간격]
 비교대상 물질은 국내 화학플랜트에 가장 많은 양을 취급하고 있는 가연성 물질 10종을 대상으로 하였다.

- Acetylene
- Benzene
- Butane
- Cyclohexane
- Ethane
- Hydrogen
- Methane
- Propane
- Toluene
- Xylene

비교분석 결과 본 연구팀이 개발한 PML-Chem의 결과치가 PHAST-Professional과 매우 근사한 결과값을 나타냈으나, VCE에 의한 overpressure 결과값은 다소 높은 산출 결과값을 나타내었다. 그 이유는 다음과 같은 원인에 기인한다고 판단된다.

- Thermal radiation effect 계산 과정에서 radiation fraction을 0.4로 최대값을 사용.
- Overpressure effect 계산 과정에서 explosion yield를 0.1로 최대값을 사용.

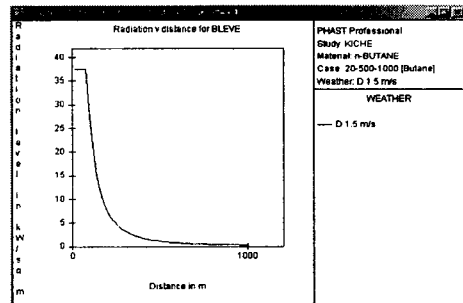


Fig. 6(a) Thermal radiation effect for butane [PHAST]

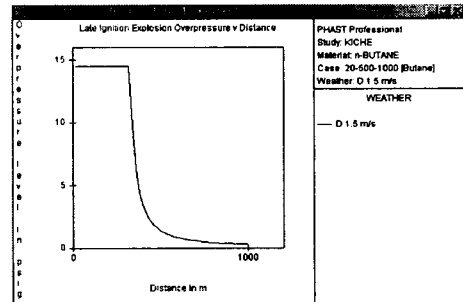


Fig. 6(b) overpressure effect for butane [PHAST]

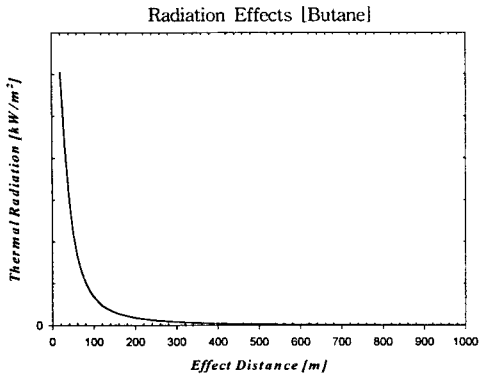


Fig. 6(c) Thermal radiation effect for butane [PML-Chem]

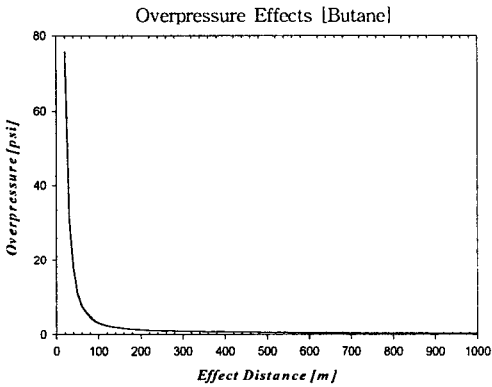


Fig. 6(d) Overpressure effect for butane [PML-Chem]

값을 그래프 형태로 표현한 결과 중에서 부탄과 프로판에 대한 결과를 Fig. 6과 7에 제시하였다.

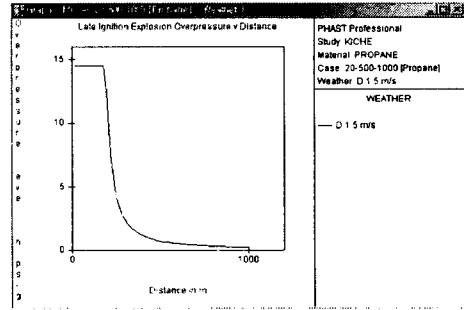


Fig. 7(b) Overpressure effect for propane [PHAST]

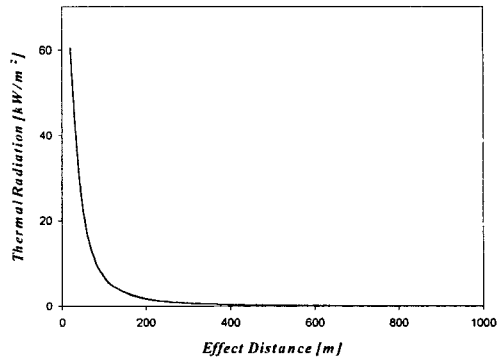


Fig. 7(c) Thermal radiation effect for propane [PML-Chem]

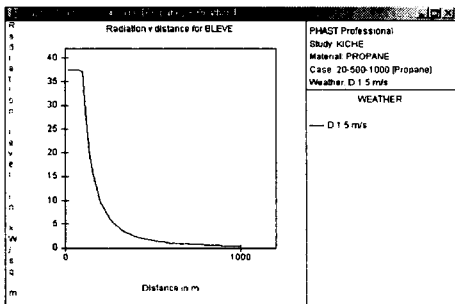


Fig. 7(a) Thermal radiation effect for propane [PHAST]

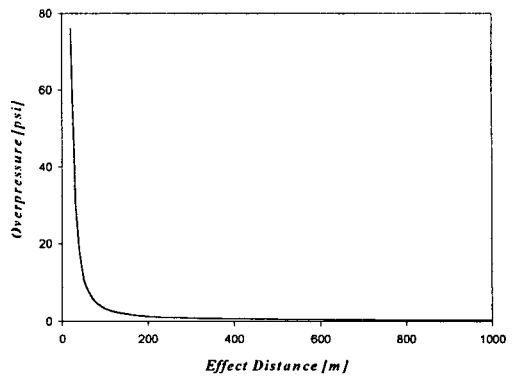


Fig. 7(d) Overpressure effect for propane [PML-Chem]

- 가연성 물질의 전량이 사고에 가담하였다고 가정.

PML-Chem과 PHAST-Professional의 결과

5. 결론 및 고찰

정량적 위험성 평가를 수행하기 어려운 작업 현장에서 간단하게 BLEVE와 VCE 사고에 의한 피해 예측을 수행·분석할 수 있도록 PML-Chem을 개발하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 가연성 물질의 BLEVE, VCE 피해효과를 모사할 수 있는 PML-Chem을 개발하였으며, 몇 가지 사고사례를 토대로 프로그램의 현장 적용성 및 신뢰성을 검증하여 보았다.
- 2) 본 연구팀이 개발한 PML-Chem을 Phast-Professional과 비교한 결과 BLEVE의 경우 근사한 값을(150% overestimation) 나타냈으나, VCE에 의한 overpressure는 다소 높은 결과(200% overestimation)을 나타내었다. 그 이유는 앞에서 제시한 세 가지 이유에 기인한다고 생각하며, 전문가 판단에 의하여 입력하는 explosion yield와 radiation fraction 값을 최대값이 아닌 평균값을 사용한다면 기존의 상용 프로그램과 유사한 결과를 가져올 수 있다고 판단된다.
- 3) 본 연구에서 개발한 PML-Chem을 이용하여 공정내에서 취급하는 가연성 물질의 취급 형태와 용량을 기준으로 간단하게 BLEVE와 VCE에 의한 사고피해 영향을 예측할 수 있으며, 비교적 적은 시간과 투자로 공정내의 위험성을 순위화하여 체계적인 방재 대책을 수립할 수 있다.

기 호 설 명

- D_{max} =peak fireball diameter [m]
- E =surface emitted flux [kW/m^2]
- E_c =lower heat of combustion of flammable gas [kJ/kg]
- E_{cTNT} =heat of combustion of TNT [4437~4765 kJ/kg]
- F_{rad} =radiation fraction [0.25~0.40]
- F_{21} =view factor

- H_c =heat of combustion [kJ/kg]
- M =mass of flammable material [kg]
- R_G =real distance [m]
- t_{BLEVE} =fireball duration [sec]
- W =equivalent mass of TNT [kg]
- x =distance from sphere center to target [m]
- Z_G =scaled distance [$m/kg^{1/3}$]
- η =empirical explosion yield [0.01~0.1]
- τ =atmospheric transmissivity [0~1]

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진연구인력 연구장려금 지원사업과 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화연구센터를 통한 한국과학기술단 우수연구센터 지원금에 의하여 수행하였으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) CCPS, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", AIChE, 1989.
- 2) CCPS, "Guideline for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fires, and BLEVE", AIChE, 1994.
- 3) Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Process Equipment Reliability Data with Data Table", AIChE, 1989.
- 4) CCPS, "Guideline for Use of Vapor Cloud Dispersion Models", AIChE, 1996.
- 5) Crowl, D.A. and J.F. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Application", Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
- 6) International Atomic Energy Agency, "Manual for the Classification and Prioritization of Risk from Major Accident in Process and Related Industries", 1991.
- 7) 고재욱의 2명, "화학공장 주변지역에 미치는 위험성 평가방법에 관한 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 10, No. 1, 1995.
- 8) 백종배, "화학공정에서의 정량적 위험성 평가를 위한 기반구조 구축에 관한 연구", 광운대학교, 1995.