

증기운 폭발시의 예상최대손실 산정을 위한 전문가 시스템 개발 (A Development of Expert System for the Estimated Maximum Loss of Vapor Cloud Explosion)

김원철(Kim, Won-Cheol)*

. 한국화재보험협회 위험관리정보센터

Abstract

The assessment of catastrophic accidents such as BLEVE, vapor cloud explosion, and toxic material releases in the chemical process industries(CPI) shall be carried out according to the Requirement of PSM/SMS enforced by Korea Government Agencies, but reasonable models are not proposed for the practical application.

The traditional models, TNT Equivalency Model, are well-known and helpful for the assessment of vapor cloud explosion. However, the estimated-damage-area using the traditional model has much more deviations comparing to the real damage caused by vapor cloud explosion suffered before. These are why an expert system for the assessment of vapor cloud explosion has been developed, which is based on theoretical, statistical and experimental data, and it would be helpful for CPI to evaluate the damage-area in case of vapor cloud explosion.

Key Words: VCE, EML, TNT Equivalency Model, Fuel-Air Charge Blast Model, TNO ME Model

I. 사고피해범위 예측 필요성

1974년 영국 Flixborough Cyclohexane 증기운 폭발사고, 1976년 이태리 Seveso Dioxine 유출 사고, 1984년 인도 Bophal MIC 유출사고, 1989년 미국 Pasadena Iso-butane 증기운 폭발사고 등 전세계적으로 화학공장에서는 엄청난 물질 피해와 인명손실을 가져온 사고가 발생하였다. 그러나 이들 사고는 표1과 같이 사소한 원인에 기인하였던 것으로서 정성적 위험성 평가를 통해 위험을 파악한 후 정량적 위험성 평가를 실시, 이를 토대로 한 공정관리 실시 및 비상대응 체계가 구축되었더라면 피해규모는 최소화할 수 있었을 것이다.

위의 사고의 후속조치로써 미국 및 유럽연합의 정부, 국가기관, 산업계와 국제노동기구에서는 전통적인 안전관리체계에서 진일보하여 유해화학물질 다량 유출에서 비롯될 수 있는 과국적 사고를 방지하기 위해 총괄적 개념에서의 위험관리 모델(예, Occupational Safety and Health Administration Process Safety Management,

Environmental Protection Agency Risk Management Program)을 제시하고 있다.

이러한 추세에 따라 국내에서도 화학장치산업계에 대한 PSM 및 SMS(Safety Management System) 제도가 법제화되어 시행되고 있다.

기업체가 작성·보고·이행해야 할 공정안전보고서 구성요소 중 공정위험성평가분야는 발견한 위험성에 대한 보완대책을 수립하여야 하고, 비상조치계획분야는 유사시에 대비한 비상대응대책을 수립하도록 요구하고 있다.

위험의 계량화에 필요한 빈도평가와 심도평가는 현실적으로 산업계에서 수용할 수 있는 모델이 미흡한 실정이며, 더욱이 발견한 위험에서 비롯될 수 있는 위험심도 예측 결과를 토대로 하지 않는 상태에서의 공정개선이나 비상계획은 형식적으로 이루어질 수 있으므로 PSM/SMS제도의 본 취지는 희석될 가능성이 있다.

따라서 이들 산업계에서 발생할 수 있는 독성물질누출, 비등액체팽창증기폭발(BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 및

Fireball, 증기운 폭발, 풀화재(Pool Fire), 분출 화재(Jet Fire), 용기의 물리적/화학적 폭발 등과 같은 사고에 대한 피해예측의 필요성이 요구된다고 하겠다.

표 1. 화학장치산업계 주요 파국적 사고

사고 개요
1974.6.1 영국 Flixborough Nypro사 반응기 가설 바이패스 배관 파열로 다량의 Cyclohexane 유출후 증기운폭발, 23명 사망. 문제점 : 변경관리
1976.7.10 이태리 Seveso Icmesa사 TCDD(2,3,7,8-tetrachloro-dibenzo-paradoxin) 압력방출변통해 대기 방출되어 1,807ha오염, 식물·동물감염, 암 발생. 문제점 : 맹독성 물질 배출시 처리시설 미설치
1982.12.3 인도Bophal Union Carbide사 MIC(methyl-isocyanate)저장탱크 물에 오염 안전변통해 대기로 배출, 3,800명('92.6)사망, 20만명 부상. 문제점 : 역류방지설계불량, 방호설비 고장
1989 미국 Pasadena Philips사 Iso-butane 유출로 증기운폭발 문제점 : 정비기간 중 운전실수

본 고에서는 과거 발생한 사고 중 최대의 물적 피해를 일으킨 사고이자 손해보험분야에서 보험인수 및 출재에 중요 기준이 되는 증기운 폭발 사고로 인한 피해범위를 추정할 수 있는 전문가 시스템을 이론적, 통계적 및 실험적 자료를 토대로 구축하였다.

II. 증기운 폭발 특성

증기운 폭발 사고사례에서 보면 증기운 폭발사고는 탄화수소를 취급하는 모든 시설에서 발생하는 것은 아니라는 것을 알 수 있으며, 주요 공통 인자인 폭발관련물질, 관련업종, 유출발생지점, 유출원인에 상당한 규칙성을 발견할 수 있다.

1. 증기운 폭발 발생 메커니즘

가연성 가스(압축가스, 액화가스 포함) 또는 비점 이상의 과열 상태에 있는 인화성 액체가 설비

결합, 조작실수 등으로 장치에서 외부로 유출되면 점화원(고온표면, 나화, 고속유출의 경우 전기나 마찰열)에 의해 즉시 착화되는 경우에는 화재가 발생하나, 착화가 지연되는 경우에는 공기와 혼합되어 가연성 혼합기의 증기운을 형성하며 확산하게 된다. 확산방향은 풍향, 풍속, 주변 장치구조물의 형태에 따라 결정된다.

증기운은 유출지점에서 멀어짐에 따라 농도가 낮아지며 폭발(연소)범위에 도달하게 되고, 폭발 범위에 이른 증기운 부분이 착화원과 접촉시 플래시화재(flash fire) 또는 폭발이 일어나게 된다.

이러한 형태로 발생하는 폭발이 모두 심각한 파괴현상을 일으키는 것은 아니며, 물질 자체가 빠른 연소속도를 가지거나 화염속도를 가속시키는 요소인 어느 정도의 장애물이 화염전파방향에 존재하여야 물적 피해 및 인명손실을 가져올 수 있는 폭발과압(explosion overpressure)을 생성한다.

2. 증기운 폭발 가능 물질

가연성 물질의 증기운 폭발은 가연성 가스 및 인화성 액체에서 발생할 수 있지만 인화점이 높은 물질은 실제 증기운 폭발이 발생한 사례가 없다. 또한 인화성 액체의 경우에도 비점이상 과열된 상태로 존재하여야만 대기로 유출시 증발하여 대규모 증기운을 형성, 증기운 폭발이 발생할 수 있다.

표 2. 증기운 폭발 관련 물질

구분	물질명(발생회수)
단일 물질	propane(18), butane(18), ethylene(10), butadiene(6), iso-butylene(6), propylene(6), hydrogen(3), cyclohexane(2), vinyl chloride(2), methane(LNG), dimethyl ether, acrolein, ethylene oxide, ethyl chloride 각 1회
혼합 물질	light hydrocarbon(4), hydrogen-naphta(2), methane-ethylene, hydrogen-carbon monoxide, hydrogen-heavy hydrocarbon 각 1회

중기운 폭발사고에 관련된 물질은 통계적으로 볼 때 표2와 같이 또 다른 중기운 폭발사고를 일으키는 특징을 발견할 수 있고, 프로판과 부탄은 중기운 폭발을 일으킨 사례가 가장 많으며, heavy hydrocarbon은 단일물질로는 중기운 폭발을 일으킨 사례가 없으나, 수소와 혼합된 상태에서 대기로 유출되는 경우에는 폭발이 발생한 사례가 있음을 유의할 필요가 있다.

3. 중기운 폭발 통계분포

업종별 중기운 폭발 분포는 그림 1과 같으며, Petrochemical과 Refinery부분이 가장 높을 알 수 있다.

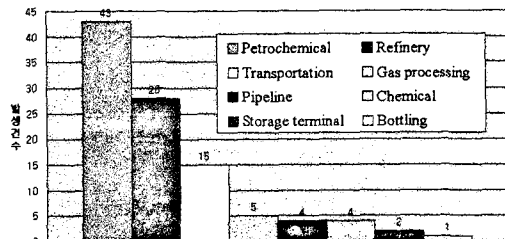


그림 1. 업종별 중기운 폭발 발생 분포

4. 유출원인 및 발생지점

중기운 폭발이 발생하기 위해선 시설내 들어있는 가연성 가스 또는 고 인화성 액체물질이 외부로 유출되어야 한다. 정유 및 석유화학공장에서 주요 누출 원인 및 발생지점은 각각 그림 2, 3과 같으며 공정장치에서의 누출이 75%로써 가장 높고, 배관, 밸브 또는 연결부 결합이 60.5%이다.

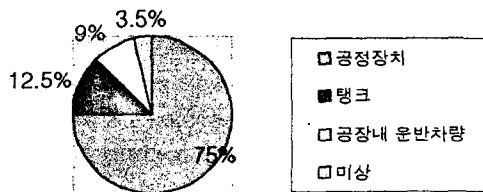


그림 2. 유출 발생 지점

III. 중기운 폭발 피해범위 예측방법 비교

중기운 폭발로 인하여 발생할 수 있는 피해예측 방법은 TNT Equivalency Model과 Fuel-Air Charge Blast Model로 대별된다.

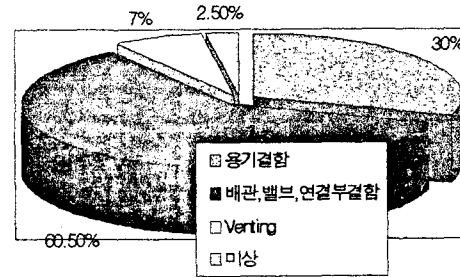


그림 3. 유출 발생 원인

1. TNT Equivalency Model

전통적인 중기운 폭발 모델링 방법으로써 증기운내 가용 연소 에너지를 TNT의 연소열과 비교, TNT 상당량을 계산 후 거리별 Peak side-on overpressure를 예측하는 방법으로써 환산 식은 식(1)과 같다.

$$W_{TNT} = \alpha_e \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \dots\dots(1)$$

여기서 W_{TNT} : TNT 환산량(kg)

α_e : 폭발효율

W_f : 물질량(kg)

H_f : 관련 물질의 연소열(J/kg)

H_{TNT} : TNT 연소열(J/kg)

이러한 고전적 평가방법은 증기량, 폭발효율, 사용하는 폭발과압 곡선에 따라 다음과 같은 여러 평가방법이 있다.

-Dow Chemical Co.(Brasie and Simpson,1968)
근거리 2%, 원거리 5% 폭발효율적용
유출전량 고려

-IIT Research(Eichler and Napadensky,1977)
20-40% 폭발효율
유출전량 고려

-HSE(1979, 1986)

3% 폭발효율 권장

증기운량 고려

폭발과의 양압지속시간 100 - 300 ms

-Exxon
 개방지역은 3%, 부분 장애물 있는 공간은 10%
 폭발효율 적용

-Industrial Risk Insurers(1990)
 2% 폭발효율 권장
 Probable Maximum Loss Potential에 대한 spill
 (원격차단변, 자동식 dump 또는 flare system을
 고려한 예상 유출량)과 Catastrophic Loss
 Potential에 대한 spill(저장시설 전량, 파이프라인
 인 30분간 유출량)

-Factory Mutual Research Corporation(1990)
 저장용기 및 파이프라인에서의 10분간 유출량,
 이동식 탱크는 전량을 물질량으로 선정
 물질의 반응성에 따라 Class I, II, III로 분류하
 여 폭발효율을 각각 5%, 10%, 15%로 적용

-Hazard Reduction Engineering Inc.
 (Prugh, 1987)
 중기운내 존재하는 물질량에 따라 폭발효율을
 적용(100kg은 2% - 1천만 kg은 70%)

-British Gas(Harris and Wickens, 1989)
 유출된 물질 총량보다는 어떤 아주 복잡한 증기
 운 지역내 화학양론적으로 포함될 수 있는 물질
 량을 물질량으로 하고, 폭발효율은 20%로 함.

2. Fuel-Air Charge Blast Model
 중기운 폭발시 손상을 일으키는 폭발과압은
- 주변시설물, 파이프랙, 건물 등 장애물에 의해
 실제로 영향을 받으며,
 - 거리에 따른 과압소멸 특성이 폭발의 폭발과
 상이하고,
 - 폭심 인근 지역에선 폭발의 폭발보다 낮으나,
 원거리에서는 높게 나타난다.

이러한 중기운 폭발 사고 경험과 가스폭발실험
 을 토대로 실제 가스폭발에 접근하기 위해 제시
 된 것이 Fuel-Air Charge Blast Model로써
 TNO Multienergy(ME) Model이 실용화되어 있
 다.

TNO ME Model에 의한 모델링 방법은 다음과
 같다.

- 평가공정 주변의 시설물 등을 고려하여 착화
 전 공정시설에서 유출된 화학양론적 증기량,
 V 예측
- V의 반구체 반경, Ro 결정
- 인화성 혼합물의 전체 에너지, E 예측
- 관심거리에 대한 Combustion Energy-Scaled
 Distance, \bar{R} 계산
 Charge strength를 정하고 TNO ME Model의
 "Combustion Energy-Scaled Distance"와
 "Dimensionless Maximum Side on
 Overpressure" Diagram을 이용하여
- \bar{R} 에 대한 무차원 최대 Static Overpressure,
 $\Delta\bar{P}_s$ 예측
- \bar{R} 에 대한 최대 Static Overpressure, ΔP_s ,
 계산

IV. 전문가 시스템, EML 2.0

1. 기반 Model

본 전문가 시스템은 다음과 같은 하위 Model을
 기반으로 하고 있다.

- 유출원 모델링
- 증발 모델링
- 대기확산 모델링
- 폭발 모델링
- 영향 모델링

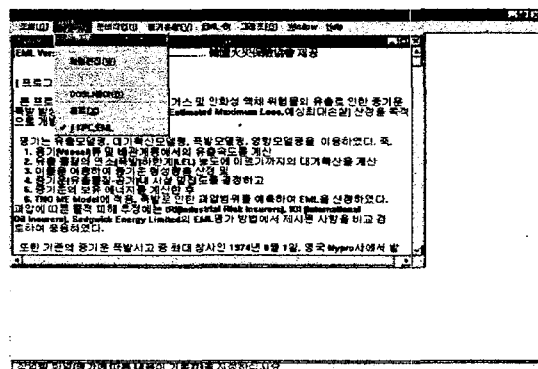
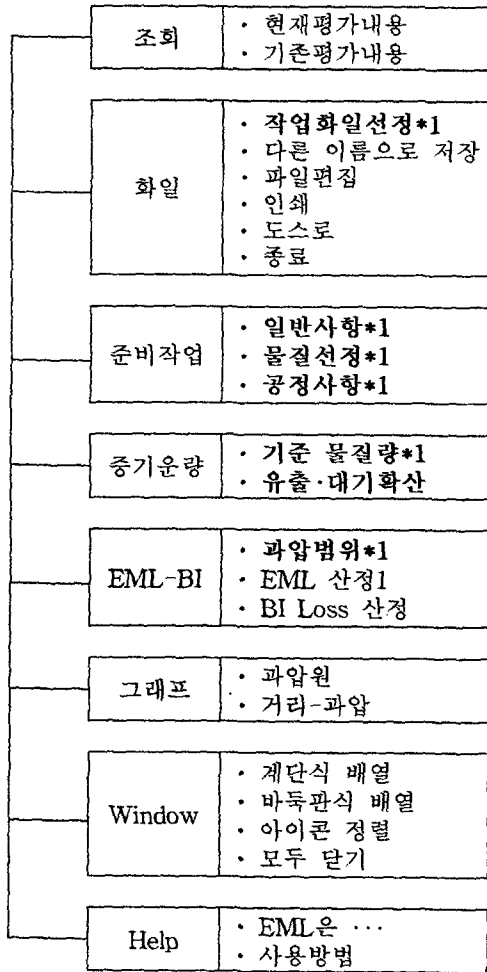


그림 4. EML 2.0 실행 화면

2. 시스템 구성



*1 필수 사항임.

3. 검증

3.1 Flixborough 사고

■ 실제피해(항공사진 분석)

- 건물전손
43m 이격 프로젝트 사무동, 57m 이격 주 사무동, 87m 이격 컨트롤룸(실내 18명 전원 사망), 139m 이격 창고동
- 옥외 플랜트 전손
당해 Cyclohexane Oxidation 공정, 48m 이격 Section 7, 95m 이격 Section 27, 143m 이격 수소공장

· 옥외 플랜트 분손

217m 이격 Acid공장, 반경 246m 이내 옥외 플랜트

· 저장탱크

261m 이격 탱크 전손. 단, 348m 이격 탱크 farm 손상되지 않음

■ 평가결과

피해정도		
IOI	IRI	KFPA
100% 63m이내	100% 79m이내	100% 89m이내
80% 63-115m	70% 79-107m	80% 89-148m
40% 115-230m	40% 107-213m	20% 148-277m 5% 277-600m

3.2 Pasadena 사고

■ 실제피해(IOI EML 평가방법 4판, 1992.11)

- No.6 반응기에서 사망으로 250m 까지 손실
- 500 - 600 m 범위내 사무실 건물 심한 손상 입음. 단, 냉각탑은 파손되지 않음.
- 반경 850m 범위내 20여개 이상의 저장탱크 중 8기 파손
- 수 마일까지 손실 발생

■ 평가결과

피해정도	
IOI	KFPA
100% : 63m 이내	100% : 89m이내
80% : 63-115m	80% : 89-148m
40% : 115-230m	20% : 148-277m 5% : 277-600m

V. 결론

앞서 제시한 실제 증기운 폭발사고 피해결과와의 비교에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 TNT Equivalency Model에 토대를 둔 기법은 추정피해범위가 실제 피해보다 현저하게 낮게 평가되나, Fuel-Air Charge Blast Model을 기초로 응용 개발한 전문가 시스템 EML 2.0 방법

은 실제피해에 근접함을 알 수 있다.
 하지만, TNT Equivalency Model에 기초한 방법은 평가에 필요한 고려사항이 단순하여 이용하기에 편리하고 신속하게 평가할 수 있는 장점이 있다.
 따라서 증기운 폭발로 인한 피해범위 산정시 공장배치, 공정조건 등의 자료가 불충분한 상태에서 신속한 평가가 요구되는 경우에는 TNT Equivalency Model에 의한 평가를 수행하고, 이들 자료가 구비되어 있는 경우로써 자세한 피해 예측이 요구되는 경우에는 동 전문가시스템을 이용할 것을 권장한다.

참고 문헌

1. "Hazard Evaluation Course 3 Book : Consequence Assessment and Mitigation", CCPS/AIChE, 1993
2. "Guidance on the Application of Refined Dispersion Models for Hazardous/Toxic Air Releases", EPA, 1992
3. "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs", CCPS/AIChE, 1994
3. A.C. van den Berg, C.J.M. van Wingerden and H.G. "Vapor Cloud Explosion Blast Prediction", Plant/Operations Progress Vol.8, No.4, 1989
4. A.C. van den Berg, C.J.M. van Wingerden and H.G. "Vapor Cloud Explosion Blast Modeling", International Conference and Workshop on Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, May 1991
5. Keith Gugan, "Unconfined Vapor Cloud Explosion", Gulf Publishing Co., 1979
6. "An Analytical Method for Estimating Overpressure from Theoretical Atmospheric Explosion", Annual Meeting of NFPA, 1974
7. W.C.Brasie & D.W.Simpson, "Guidelines for Estimating Damage Explosion", Dow Chemical Co., 1988
8. "Guidelines for Chemical Process Quantitative Analysis", CCPS/AIChE, 1989
9. "Guidelines for Vapor Release Mitigation", CCPS/AIChE, 1988
10. "VCE IOI Method", 4th edition, International Oil Insurers, 1992.11
11. "Oil and Chemical Properties Loss Potential Estimation Guide", IRInformation, Industrial Risk Insurers
12. Robert H. Perry, Don Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 6th edition, McGraw-Hill chemical engineering Book Co.,1984
13. Frank P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries, Volume 2", Butterworths; 1980
14. Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, "Chemical Process Safety : Fundamentals with Applications", Prentice Hall, 1990
15. "Combustion Handbook", 2nd edition
16. "Fire Hazardous of Materials", NFPA