



화학공장의 중대사고에 따른 예상손실액 산정 및 대책연구

A Study on Estimation and Management of Loss Due to Catastrophic Accident

구 남 주* · 엄 성 인** · 고 재 옥***

N.J. Ku · S.I. Um · J.W. Ko

(1999년 7월 28일 접수, 1999년 11월 30일 채택)

ABSTRACT

This study evaluated the effect of the accidents caused by fire, explosion, and toxic gas release by using SuperChems, quantitative hazardous material release modeling software, which estimates the potential area of damage. According to the loss severity, the appropriate risk management principles can be applied. Risk management is divided into the two methods which are risk control and risk financing. Risk control includes risk avoidance, risk spreading and diversification, and risk reduction. Risk financing includes risk retention and risk transfer. The results of this study can help the related company determine the appropriate reserve fund and the amount to be insured against the third party losses according to the estimated loss severity.

1. 서 론

1960년대 이후 화학공업의 발달은 산업발전에 획기적인 전기가 되어 신홍공업국으로 발전하는데 중추적인 역할을 하였다. 그러나 각종 공정 설비의 규모가 커지고 유해한 화학물질의 사용이 크게 증가함에 따라 대형사고의 위험성

도 증대되었다. 전세계적으로 막대한 경제손실을 유발하는 화재, 폭발, 누출과 같은 유형의 중대산업사고들은 끊임없이 발생하고 있으며 이로 인한 공장시설의 손실은 물론 주변사회의 경제적, 인적 손실이 증가하고 있다.

최근 부천 및 익산의 LPG충전소와 대구 가스폭발사고 등의 대형사고에서 볼 수 있듯이 국

* 삼성화재 위험관리연구소

** 한국가스안전공사 가스안전기술연구센터

*** 광운대학교 화학공학과

내 위험시설은 이러한 주변사회에 미치는 사고 영향에 대한 고려가 아직 미흡한 실정이다. 따라서 중대사고 발생시 인근지역의 경제적, 사회적 손실은 행정 자치단체의 부담 및 국민의 부담으로 남을 수밖에 없다. 또한 해당 사업장은 계속적인 경영이 불가능하게 되어 국가 경제적으로 큰 손실이 발생된다.

본 연구에서는 석유화학제품을 생산하는 울산의 ○○화학공장에서 중대사고가 발생하였을 경우, 최악의 사고 조건을 제시하여 예측되는 사고를 정량적으로 평가하고 사회적, 경제적 손실을 계산하였다^{1,8)}. 그리고 이러한 손실이 최소화될 수 있도록, 인구집중시설과 공공시설의 안전거리제시에 따른 기술적 위험관리, 해당 위험 공정시설의 위험준비금 적립 그리고 보험가입과 같은 재정적 위험관리를 수행하고자 한다.

2. 연구 방법

화학공장에서 위험물질에 의한 사고결과는 화재, 폭발, 독성물질의 확산으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 중대사고 중에서 큰 손실을 가져올 수 있는 증기운 폭발(VCE)로 인한 인근 지역에 발생 가능한 손실을 산정 하였다^{2,4)}.

중대사고로 인한 주변사회의 예상손실액 계산을 위해서 시스템 묘사 및 잠재위험 확인과정을 통하여 가장 중대한 결과를 가져올 수 있는 시설을 파악한다. 그리고 위험한 물질을 사고시나리오 대상으로 누출모델과 확산모델 계산을 통하여 누출량 결정과 확산형태, 확산범위를 산정 하였다³⁾. 이러한 결과들을 영향 모델에 적용하여 독성누출에 따른 인적피해와 증기운 폭발 및 BLEVE에 따른 물적 피해와 인적피해를 산정한다. 그리고 누출 모델링 및 결과 계산을 위해서 미국 환경청(EPA)이 공인하는 모델을 상용화한 Arthur D. Little, Inc의 SuperChem (V1.1)을 이용하였다.

3. 영향평가 및 위험관리 절차

정량적 위험성 평가는 주변재산 및 인명에 영향을 줄 수 있는 위험성을 규명하고 위험성의

결과를 평가함으로써 위험에 대한 대책을 마련할 수 있다. 위험성을 규명하고 그에 대한 결과의 산정과정은 Fig. 1과 같다^{9,10)}.

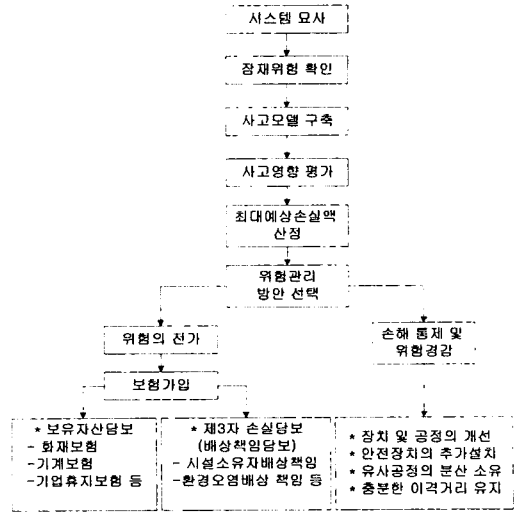


Fig. 1 The flow of risk assessment and risk management

4. 사고 모델 구축

해당 화학공장에서 발생할 수 있는 적절한 결과모델을 구축하기 위하여 해당 사업장에서 사용중인 가연성물질 및 독성물질의 누출시 발생할 수 있는 모든 결과들을 고려하여야 한다. 이러한 물질이 장치나 공정상의 결함으로 누출 되었을 때 발생할 수 있는 결과는 각기 물질의 위험특성에 따라 다르다⁶⁾.

사고모델은 최대 예상손실 계산을 위하여 시스템 묘사와 잠재위험 확인 과정을 거쳐 대량의 위험물질을 취급, 저장하는 저장시설 및 공정시설 또는 독성이 강한 위험물질을 다루는 장치에 대하여 사고모델을 구축하는 것이 필요하다. 따라서, 사고모델을 위한 사고발생조건은 사고에 따른 피해범위 및 손실이 최대가 될 수 있는 조건 즉, 단일용기의 전체량을 누출 최대량으로 산정하고, 배관의 경우, 최대지름을 가진 배관의 파열시의 누출량을 산정한다. 이때, 대기안전등급과 풍속 그리고 대기온도와 습도는 F등급, 1.5

m/s, 25°C, 50%를 적용하며, 최대누출시간은 10 분으로 설정한다⁸⁾.

5. 중대사고에 따른 예상손실액 산정

계산과정에서 가정되는 것은 누출모델, 분산 모델, 영향모델 등에서 각 사고들이 발생할 수 있는 최악의 조건이다. 이런 최악의 조건은 최대예상손실액의 계산을 위한 것이다. 최대 예상 손실액은 물적손실액과 인적손실액을 합산한 금액으로 평가된다^{5,7)}.

5.1 예상 물적손실액

본 연구에서 주변자산에 대한 물적 손실액에 대한 평가는 사고결과 산정을 통해 파악된 피해 범위 내에 위치한 주변자산을 금전적으로 평가하는 것이다. 주변자산에 대한 평가는 직접적으로 건물 및 동산에 피해를 줄 수 있는 손실과 주변 사업장이 사고로 인하여 입을 수 있는 기업휴지손실을 포함하여 산정한다. 이 중 건물, 구축물, 기계장치 등은 신축단가표 및 물가상승지수를 이용하여 평가한다. 신축단가표는 건물의 구조 및 사용목적에 따라 각 평방미터에 신축가액을 산출하여 각 건물의 면적에 곱한 금액이며, 물가지수를 이용한 평가는 각 건물 및 장치의 취득금액에 물가상승지수를 이용하는 평가방법이다. 물가상승지수는 한국은행에서 매월 발행하는 물가지수를 근거하여 지수를 산출하여 평가한다.

사고로 인한 주변사업장에 입힌 기업휴지로 인한 손실은 주변 사업장의 제조원가명세서, 손익계산서 등을 근거로 하여 1년 총 이익(annual gross profit)을 산출하여 예상 기업휴지 손실액을 산정한다⁵⁾.

5.2 예상 인적손실액

중대사고에 따른 인명피해가 발생하면 해당 사고 시설의 운영주체는 공장직원과 외부인원 즉, 제 3의 피해자에 대한 각각의 손해배상금을 합한 총합을 배상하여야 한다. 이러한 인명피해의 예상손해액은 인구자료를 토대로 독성물질

및 폭발사고 발생시의 피해자수를 예상하여 산정한다⁵⁾.

법원 인정기준의 손해배상금은 사망 시 현재 법원인정 기준으로 장례비, 일일수입, 위자료 및 그 외의 타당한 비용으로 되어 있다. 예상손실액 계산에 있어서 인적손실액 계산시 월 수입액을 산정하기 어렵기 때문에, 나이와 월 수입액은 국민 평균으로 산정하였다(평균나이 30세로 하며, 연평균 국민소득 6,000달러를 기준. 취업가능년수는 60세로 산정).

1인 사망 시에 해당되는 평균 배상금액은 위의 가정에 따라 추산하였을 경우, 약 1억3천3백만원으로 산출된다.

실제사고에 의한 1인당 인적 손실액은 법원 인정 기준과는 크게 차이가 난다. 이것은 법원 인정 기준의 경우, 최소한의 비용만을 산출한 것이나, 실제 사고시의 1인당 인적손실액은 정신적 피해보상 및 기타 기업의 이미지 유지를 위하여 위자료의 금액이 높고, 기타 제반비용이 사용되기 때문이다.

과거 실제 사고시(성수대교 붕괴사고, 대구지하철 폭발사고, 아현동 가스폭발 사고, 삼풍백화점 붕괴사고, 구포 열차 전복사고)의 평균 인당 보상금은 2억4천만원으로, 실제 화재, 폭발, 독성물질 누출 등의 사고에 따른 인적보상금은 위의 평균 보상금 이상이 될 것이다.

6. 사례 연구

6.1 증기운 폭발에 따른 최대 예상손실액산정

사고모델의 대상은 석유화학제품을 제조하는 석유화학업체로서 울산에 위치한 ○○화학을 선정하였다. 사고시나리오는 1,3-Butadiene을 저장하는 T-10을 대상으로 하였으며, 탱크하단에 연결된 지름 2 inch의 파이프가 파열된 것으로 가정하였으며, 1,3-Butadiene은 가압상태에서 액체로 누출시 기체와 액상의 형태로써 이상누출모델을 적용하였다. 탱크의 개략적인 그림은 Fig. 2와 같으며, 화학물질정보와 용기 및 대기조건은 Table 1과 같다. Table 2는 SuperChems의 이상누출모델을 이용한 계산 결과이다. 그리고 Table 3은 영향모델 계산을 위한 입력 자료와

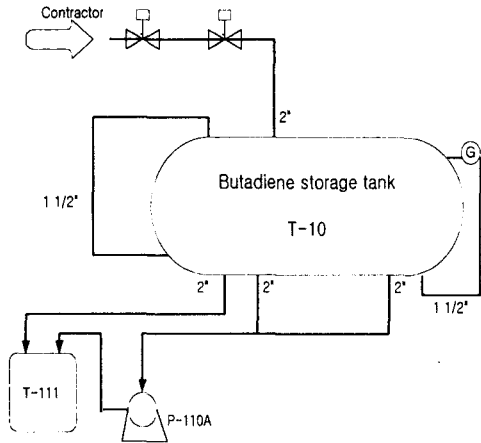


Fig. 2 The diagram of 1,3-Butadiene storage tank(T-10)

Table 1 User defined input data for release modeling in SuperChems

Input Data		1,3-Butadiene
Chemical Information	Molecular Weight	54.091
	Boiling Point	-4°C
Vessel Condition	Material Mass	1,560 kg
	Vessel Volume	11.5 m ³
	Storage Pressure	3.7 × 10 ⁵ (N/m ²)
	Release Hole	2 inch
Atmospheric Condition	Temperature	25°C
	Pressure	1.01 × 10 ⁵ (N/m ²)
	Discharge Coefficient	0.62
Release Model		Two Phase Release Model

Table 2 The output of 1,3-Butadiene release simulation

Subject	Output
Total release time	351 sec
Total release amount	1,427 kg
2-Phase mass flow rate	0.548 kg/s
Vapor mass flux	104 kg/m ² /s
Liquid mass flux	
Nozzle pressure / vessel pressure	346 kg/m ² /s / 0.975

그 결과를 나타낸다. 영향모델의 결과 과압에 따른 영향거리는 Table 4와 Fig. 3에 표시하였다. 또한 탱크의 위치 및 주변 지역에 대한 과

압거리의 피해범위는 Fig. 4에 나타내었다.

Table 3 User defined input data and results for effect modeling in SuperChems

Data	1,3-Butadiene
Yield Factor	0.03
Heat of Combustion (J/kmol)	2.4 × 10 ⁹
Cloud Mass	1,427 kg
Effect Model	UVCE Model
Equivalent TNT mass	395 kg

Table 4 The overpressure distance from UVCE

Xc	Overperssure, (N/m ²)	Overpressure, Psi
28 m	6.89 × 10 ⁴	10
38 m	3.44 × 10 ⁴	6
75 m	1.72 × 10 ⁴	2
122 m	6,893	1
308 m	2,069	0.3

Xc : Radial distance to user specified overpressure, m

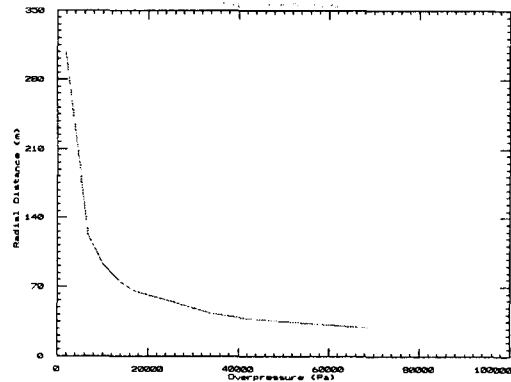


Fig. 3 Overpressure Vs. radial distance

Table 4에 근거하여 과압이 미치는 거리내에 위치한 인근 사업장의 자산규모를 조사하여 평가하였으며 과압에 의한 공정시설의 피해반경은 Walker가 제안한 “정유공장의 폭발피해에 대한 생산 및 복구노력의 평가”에 근거하였다. 이러한 적용기준에 따른 손실정도와 거리는 Table 5와 같다.

위의 계산결과에 따라 상기의 사고 시 피해를 입을 수 있는 주변시설의 고정자산금액은 현재 신품의 동종능력을 가진 물품으로 교체될 수

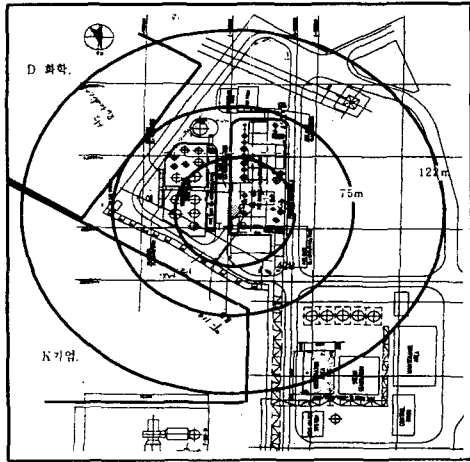


Fig. 4 The effect area on layout

Table 5 The distance and property damage by overpressure

Distance (m)	Overpressure (N/m ²)	Property Damage
38	3.44 × 10 ³	80% loss
75	1.72 × 10 ³	40% loss
122	6,893	5% loss

있는 교체 비용 값(replacement cost value)으로 산정하고 결산보고서상의 취득금액을 근거로 물가지수 및 건물신축단가표 등을 사용하여 평가하였다.

기업휴지손실(business interruption)은 손익계산서와 제조원가명세서를 근거로 연간 매출액(annual turnover)에서 변동비(variables)를 제외한 연간 총 이익(annual gross profit)을 산정하여 평가하였다.

이러한 자산평가를 통한 자산가치와 손실액은 Table 6과 같으며 이때의 손실율은 예상피해율을 해당사업장의 대지면적 대비 피해면적의 비를 적용하였으며, 피해범위 내에 위치한 시설의 기업휴지 손실은 미국의 Sedgwick Energy & Marine Ltd.의 기업휴지(business interruption)자료에 의해서 6개월로 산정하였다.

일반적으로 사고에 의한 기업휴지는 해당 사업장의 실사(survey)를 통하여 기업휴지기간을 결정하게 되는데, 본 연구의 사고사례에서 적용

된 사업장은 1997년말 실사의 결과 과압에 의해서 피해를 입는 장치류(공정 배관, 펌프, 냉각탑 등)의 재건설시 소요기간이 최장 6개월정도로 예상되어지므로 기업휴지 기간을 최장 6개월로 추정하게 되었다.

Table 6 Expected loss of surrounding plant

(Unit : Mil. won)

Plant	Property	Business interruption	Total	Damage (%)	Loss amount
D화학	40,000	33,000	73,000	5%	3,650
K기업	35,000	30,000	65,000	5%	3,250
합계	75,000	63,000	138,000		6,900

Table 6의 결과를 통하여 ○○화학의 1,3-Butadiene의 증기운 폭발은 최대 69억원의 손실을 가져올 수 있으며, CCPS에서 제시하는 안전거리인 2069 N/m²의 압력이 미치는 거리는 308 m에 이른다.

7. 평가결과 및 고찰

최악의 사고 조건을 적용한 증기운 폭발 및 독성물질 누출에 의한 중대사고시 발생될 수 있는 최대 예상손실금액과 손해의 통제에서 언급한 안전거리는 Table 7과 같다.

Table 7 The results of case study

구분	증기운 폭발
최대예상손실액	69억원
안전거리	CCPS : 308 m
	EPA : 122 m

이러한 막대한 경제적 손실을 발생시키는 위험에 대비하여 인적손실을 최소화하기 위해서는 안전거리내에 인구를 밀집시키는 공공시설 및 주거시설의 건축을 제한하여야 하고 이에 더불어 주변지역과 연계한 비상계획을 수립하여 사고 시 그 위험을 최소화하여야 한다.

또한 이러한 주변시설 및 인명에 미치는 사회적 위험을 재정적 위험관리방법인 보험 및 위험준비금의 적립을 통하여 전가한다면, 산출되어진 예상손실금액을 배상책임 보상한도액(Li-

mit of Liability)으로 설정하여 배상책임보험에 가입하거나 적립되어야 할 위험준비 적립금은 총 예상손실금액 수준이 되어야 주변 사회적 위험에 대한 충분한 재정적 위험관리가 될 것이다.

8. 결 론

본 연구는 위험공정시설에서 발생할 수 있는 중대사고를 화재, 폭발, 독성물질누출로 나누어 정량적으로 평가하였으며 각 사고로 인한 인근 지역의 경제적, 인적손실 정도를 경제적 가치로 평가하였고 경제적 손실정도에 따라 위험의 회피, 손해의 통제, 위험의 경감과 같은 기술적 위험관리방법과 위험의 보유, 위험의 전가 등과 같은 재정적 위험관리 방법을 제시하였다.

또한 사례연구를 통하여 최악의 사고 조건에서의 증기운 폭발 사고로 인한 물질, 인적손실액평가를 실제적으로 산정하였으며, 안전거리를 제시하였다.

본 연구에서 얻어진 결과 및 활용범위는 다음과 같다.

- 1) 위험물질을 취급 또는 저장하는 공정시설에서 발생할 수 있는 최악의 사고에 대한 기준들을 제시하였다.
- 2) 중대사고로 인하여 발생할 수 있는 인근 지역의 영향 및 경제적, 인적손실을 경제적 가치로 평가하여 제시함으로써 해당 사업장의 사고예방 및 안전관리의 중요성을 고취시키고 위험시설에 대한 안전시설 확충 및 인근 지역에 대한 비상조치계획수립의 필요성을 제시하였다.
- 3) 예측되는 사고의 경제적 손실정도에 따라 적합한 위험관리는 해당 사업장이 수행하도록 하는 기준이 될 수 있으며, 해당사업장이 대형사고로 인한 사회적 부담을 줄이고, 기업의 지속적인 사업의 영위를 위하여 보험 및 위험 준비금 적립을 통한 재무적 위험관리를 수행하는 경우, 적절한 보상한도액(Limit of liability)과 적립되어야 할 위험준비금 수준을 제시함으로써 효율적인 위험관리가 이루어질 수 있다.

- 4) 본 연구결과에서 산출된 위험시설에 대한 충분한 안전거리를 근거로 하여 사고로 인한 막대한 인적손실의 예방을 위하여 사고의 영향을 받을 수 있는 거리 내에 학교, 병원과 같은 인구집중시설 및 공공시설의 건축을 제한함으로써 중대사고를 사전에 예방하는 기준으로 활용될 수 있다.

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호: 96-0602-01-01-3)지원과 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- 1) AIChE, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, CCPS, New York, 1989.
- 2) AIChE, Guidelines for Evaluating The Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fire, and BLEVE, CCPS, 1994.
- 3) EPA, Guidance on The Application of Refined Dispersion Models to Hazardous/ Toxic Air Pollutant Release, 1993.
- 4) AIChE, Guideline for Use of Vapor Cloud Dispersion Model, CCPS, 2nd Edition, 1997.
- 5) David Cloughton, Riley on Business Interruption Insurance, 7th Edition, Sweet & Maxwell, 1991.
- 6) Robert I. Mehe & Bob A. Hedges, Risk Management Concepts and Application, 1974
- 7) Swiss Reinsurance Company, Guideline for Damage Estimation, 1987.
- 8) The Office of The Federal Register National Archives And Records Administration, 40 CFR Part 68, 1998 Revised.
- 9) 한국화재보험협회, 화재·폭발 위험분석 실무 지침, 1998.
- 10) 한국리스크관리학회, 효율적 위험관리와 기업성과, 1997.