

대도시 위해·위험시설에 대한 안전도 수용기준 정립에 관한 연구 Study on the Establishment of a Safety Allowance Level of Disastrous and Hazardous Facilities in Large Cities

고재선[†]·윤명오

Jae-Sun Ko[†]·Myoung-O Yoon

서울시립대학교 지진·방재연구소
(2001. 02. 05 접수/2001. 02. 26 채택)

요 약

현대 사회에 있어서 인구 과밀화와 더불어 대도시의 사회기반시설(SOC) 증가에 따른 화학물질 사용시설의 중대사고의 경향이 높아져 가고 있다. 기존 위해·위험시설의 안전사고의 문제점과 더불어 신규 위해·위험시설물의 증가에 따른 안전사고의 심각성을 낮추기 위해 필요한 노력을 하지 않으면 안된다. 선진국에서는 산업시설 그리고 지역사회의 전문위원회가 잠재적인 위해 산업의 사고에 대한 off site 및 on site의 피해 심각성에 대한 평가와 이에 대한 적절한 조인 및 대책을 강구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내의 위해·위험시설에 대한 안전도 수용기준 정립을 위하여 첫째, 영국 HSE(Health & Safety Executive)의 QRA(Quantified Risk Assessment)와 Matrix of Risk of Evaluated Sources of Hazard를 적용한 사회적 위험성 평가 방법과 둘째, FTA(Fault Tree Analysis) 또는 ETA(Event Tree Analysis) 등 정량적인 사고 발생 확률과 시뮬레이션 및 계산식을 통해 국내 임의의 지역에 대하여(서울시 위해·위험시설) 사고 피해 정도의 개인적 위험성을 평가, 적용함으로써 기존 시설 또는 신설 부지 개발을 위한 제한시 포괄적 안전도 수용기준(수용가능성) 여부를 판별하고자 한다.

ABSTRACT

In today's world, rise in the establishment of social infrastructure resulting from population saturation in large cities has led to more extensive and frequent use of chemical materials on facilities. A result, unexpected and serious accidents, hazards, contingencies and disasters are more prevalent than ever. Such phenomenon calls for more devoted and concerted efforts towards finding ways to reduce the safety hazards that are seen to take place more often than before with the increase in the number of facilities that are prone to bring disaster and hazard coupled with the conventional safety problems that continue to exist even today. In developed countries, such challenge is addressed by various appropriate countermeasures drawn up by local professional committees on industrial facilities, whose members conduct offsite and onsite evaluation on the potential industrial disasters and its seriousness and provide their advice thereof. Against this backdrop, this study aims at identifying a comprehensive safety allowance level (safety acceptable level) when imposing limitation on the development of conventional or new facilities, for the purpose of establishing a safety allowance level of disastrous and dangerous facilities in Korea. This is done by assessing and applying the level of danger each individual is exposed to in a randomly selected region (disastrous and dangerous areas in Seoul) based on probability of quantitative hazards, as well as simulation and calculation methods which include: i) social disaster evaluation method applying Quantified Risk Assessment of Health & Safety Executive of UK and Matrix of Risk of Evaluated Sources of Hazard; ii) Fault Tree or Event Tree Analysis and etc.

Keywords : Quantified risk assessment, Approximate risk integral, F-N curve, Societal risk, Contour, Matrix, Criteria, Cumulative frequency

[†]E-mail: hameg@hanmail.net

1. 서 론

현대 사회에 있어서 대도시 인구 과밀화와 더불어 사회기반시설(SOC) 증가에 따른 화학물질 사용시설의 중대사고의 경향이 높아져 가고 있다. 기존 위해 · 위험시설의 안전사고의 문제점과 더불어 신규 위해 · 위험시설물의 증가에 따른 안전사고의 심각성을 낮추기 위해 필요한 노력을 하지 않으면 안된다. 선진국에서는 산업시설 그리고 지역사회가 잠재적인 위해 산업의 사고에 대한 off site 및 on site의 피해 심각성에 대한 평가와 이에 대한 적절한 대책을 강구하고 있다. 세반 이러한 문제성을 해결하기 위하여 위해 분석과 위험성 평가 등의 방법에 의하여 기술적인 해석의 구체화가 이루어져야 하며 결과적으로 토지 이용규제 계획에 적용되어져야 할 것이다. 먼저 해외관련기준의 동향을 살펴보면 국제노동기구(ILO)에서는 중대 산업사고 예방을 위한 범국가적 차원의 체계적인 조치를 인식하여 전문위원회를 구성하고 안전관리 시스템 및 위험성 평가를 위한 중대산업사고 예방 매뉴얼(Major Hazard Control ; A Practical Manual)을 작성하여 대규모의 새로운 개발 신청이나 기존 위해 산업시설 단지에 적용하기 시작하였으며 지역 안전보호를 위한 토지이용 계획이 안전계획에 가장 중요한 부분으로 그 중심을 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내의 위해 · 위험시설에 대한 안전도 수용기준 정립을 위하여 첫째, 영국 HSE(Heath & Safety Executive)의 QRA(Quantified Risk Assessment)와 Matrix of Risk of Evaluated Sources of Hazard를 적용한 사회적 위험성 평가 방법과 둘째, FTA(Fault Tree Analysis) 또는 ETA(Event Tree Analysis) 등 정량적인 사고 발생 확률과 시뮬레이션 및 계산식을 통해 사고 피해 정도의 개인적 위험성을 평가, 적용함으로써 기존 시설 또는 신설 부지 개발을 위한 제한시 포괄적 안전도 수용기준(수용가능성) 여부를 판별하고자 한다.

2. 위험물질에 대한 사회적 위험성 평가 예

2.1 영국 HSE(Heath & Safety Executive)의 QRA(Quantified Risk Assessment)

영국의 화학적 주요 사고위험 설비의 대부분 유형에 통상 적용되는 방법으로서 영국의 보건안전 위원회(HSE : Heath & Safety Executive)의 중요 위험사고 평가단(MHAU : Major Hazards Assessment Unit)에서 위해 · 위험 설비의 실제적 위험을 추정하기 위하

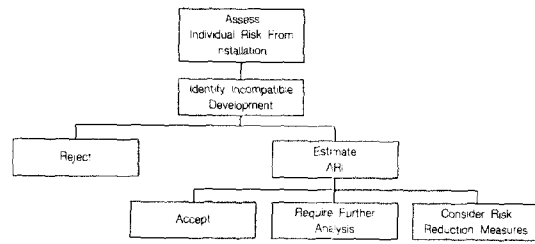


Fig. 1. Strategy for Considering a New Installation.

여 사용하는 방법론이다.

2.1.1 초기 고려사항

- 계획된 설비의 인근에 있는 부지 사용들과 모순성 확인
- 거주 주민에 부과될 개인위험수준추정에 의해 거주주민의 분류와 계획된 공장의 신설시 상호타협점 모색
- 중대 위험 평가단(MHAU)의 RI("Risk Integral") 수행
 - "최악의 경우"사건의 가능성과 결과의 분석
 - 부지사용 계획의 Societal Risk 양상을 초기단계에서 검토 및 많은 사례를 통해 비상시 대응책 고려

2.1.2. 정량적 위험성평가의 일반적 결과 산출물

- 그 지역도 상에 그려지는 일련의 세 개의 동심원을 나타냄
 - Inner Zone : 개인 위험이 연간 100만 분의 10 (10 cpm)보다 큰 지역, 일반적으로 소규모나 평범한 산업개발과 다른 소규모 개발 및 모든 개발을 금하도록 권고
 - Outer Zone : 개인위험이 0.3 cpm이상 1 cpm 이내, 공공의 또는 민감한(Institutional or Sensitive) 개발은 위치에 관계없이 개발 금지 및 대규모 쇼핑, 레저 개발을 금하도록 권고
 - Middle Zone : 개인위험이 1 cpm~10 cpm 이내 또는 개발이 zone경계를 걸쳐 있을 때 개발은 각각의 장점에 대해 고려
 - ※ cpm : chance per million
- 이것은 거주지 인근에서 모든 시간을 보내는 가상의 거주자가 설비로부터 폭로 되는 위험할 정도로 위험 인자량을 받을 때 개인적 위험의 수준을 추정
- 위험이 소형 LPG에서 BLEVE나 Fireball처럼 명백히 정의되고 지배적인 위험으로 나온 경우에 등고선(Contour)으로 단지 결과 수준을 보여줌
- 등고선들은 지역계획전문가들에게 장래 부지사용에 대하여 보건안전위원회의 충고의 기초를 제공

2.1.3. Societal Risk F-N Curve

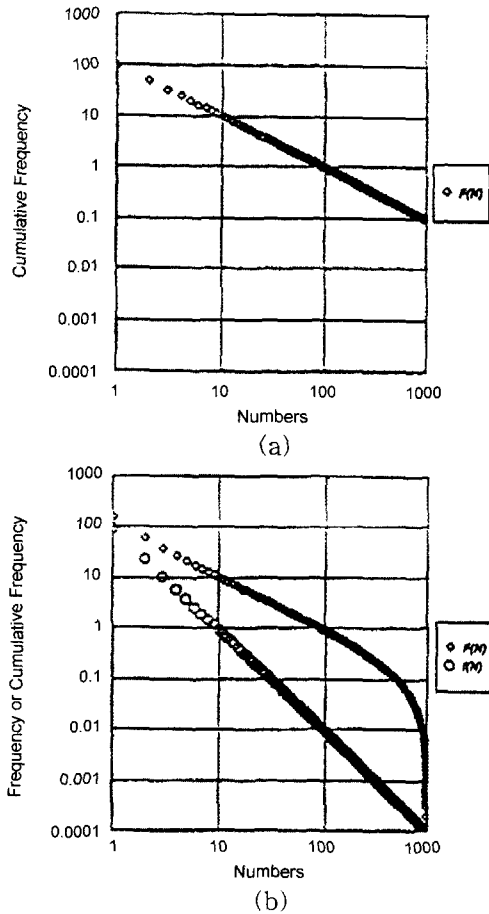


Fig. 2. (a) and (b) Algebraically-Based Examples of f-N and F-N Plots.

- 위험설비로부터의 societal risk는 중요 사고로 인해 수반될 수 있는 사망자수 N과 N이란 사망자가 일어날 것으로 예상되는 확률 f사이의 관계로써 표현된다.
- f와 N 사이의 관계 그리고 N 또는 보다 많은 사상자를 낼 수 있는 사건들의 누적 빈도인(Cumulative frequency) F를 포함한 대응관계(Corresponding Relationship)는 일반적으로 log-log 좌표에 의해서 그래프형태로 나타내진다.
- Example Plots
- Fig. 2(a)
 $F(N)=100/N$ 을 사용하여 $N_{max}=1000$ 에 이르는 것으로 구성, N에 대한 F의 좌표가 그 길이 전체에 대해 -1의 기울기를 가짐
- Fig. 2(b)

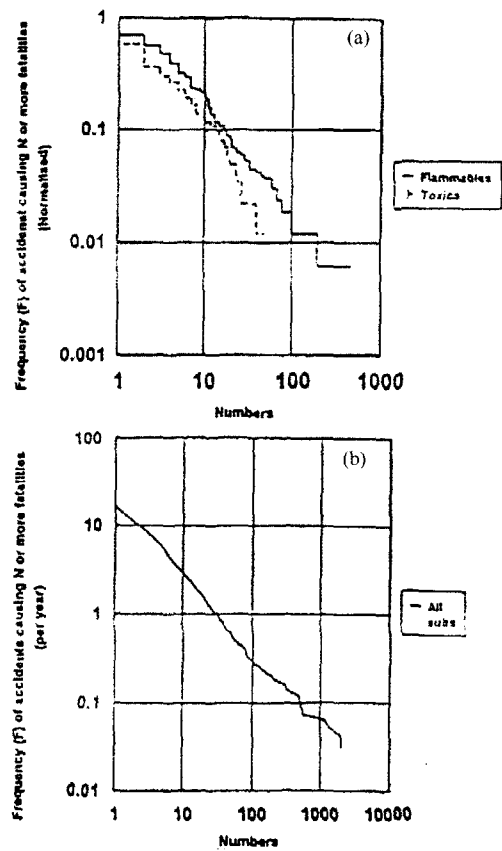


Fig. 3. (a) and (b) Experience-Based F-N Plots.

$F(N)=100/N^2$ 을 사용하여 $N_{max}=1000$ 에 이르는 것으로 구성, N에 대한 F의 좌표가 초기에는 -1의 기울기를 가지지만 N_{max} 에 도달할 때쯤보다 급격하게 떨어진다.

- 주요 사고 기록에서의 증거는 화학 설비들의 F-N 도면이 이 보기들과 유사함을 보여주고 있음.
- 주요사고 기록 검토
- 유럽공동체의 연합연구센터의 연구 보고서 -Fig. 3(a)
 (Joint Research Centres of the European Community)
- 가연성가스에 의해 사망자를 낸 159개의 사고와
- 독성가스에 의해 사망자를 낸 84개의 사고 확인
- 가연성 물질 사고에 대한 누적 F-N도면은 사망자의 최대수에 이를 때 -1기울기의 직선에 가까움
- 독성 가스사고에 대해서는 유사한 경사이나 사망자수가 증가함에 따라 보다 급격하게 떨어지려 한다는 연구 결론을 입증
- AEA Technology plc에 의해 개발된 MHIDAS

database - Fig. 3(b)

- 대규모로 대중에게 심각한 영향을 끼쳤던 위험물질을 포함한 사고들의 내부 사항을 기록한 것
- 전 세계에 대한 사고들로서 특히 미국, 영국, 캐나다, 독일, 프랑스 그리고 인도 등이 포함
- 1994년 database에서 8000개 이상의 기록들로부터 사망자를 낳은 1600개 사고들로 추려냄.
- 도표는 전체 길이에 대해 -1의 기울기의 직선에 매우 가까움을 보여주고 있다.

$$EV(Expectative Value) = \sum [f(N) \times N] \quad (1)$$

$$RI(Risk Integral) = \sum [F(N) \times N],$$

$$= \sum [f(N) \times (N + N^2) / 2] \quad (2)$$

$$SRI(Societal Risk Integral) = \sum [F(N) \times N] / A$$

$$= \sum [f(N) \times (N + N^2)] / 2A$$

$$= \sum [f(N) \times (N + 1) \times N / A / 2] \quad (3)$$

Flammability Materials

$$ARI(Approximate Risk Integral) = F(N_{max}) \times N_{max}^2 \quad (4)$$

Toxic Materials

$$RI(Approximate Risk Integral) = 0.5 \times f(N_{max}) \times N_{max}^3 \quad (5)$$

N : Fatality Numbers(person) A : Area

2.2 Matrix of Risk of Evaluated Sources of Hazard

유해 · 위험물에 대한 Risk Matrix 방법은 그 물질의 제조, 취급, 운반, 저장 시설물들에 대한 위험성 평가 방법의 하나로 사고의 형태에 따른 심각성의 산출과 사고의 발생빈도에 대한 X-Y축으로 한 위험성 수준을 판별할 수 있다. 이는 그 물질에 대해 여러 해에 걸쳐 발생한 사고사례 분석을 통해 발생 빈도와 사망자수를 분석하여 유해 · 위험물에 대한 사회적 위험도를 판별할 수 있다. 또한 개별적인 공정이나 시설물에 대한 개인적 위험성 평가를 위해서도 FTA(Fault Tree Analysis)

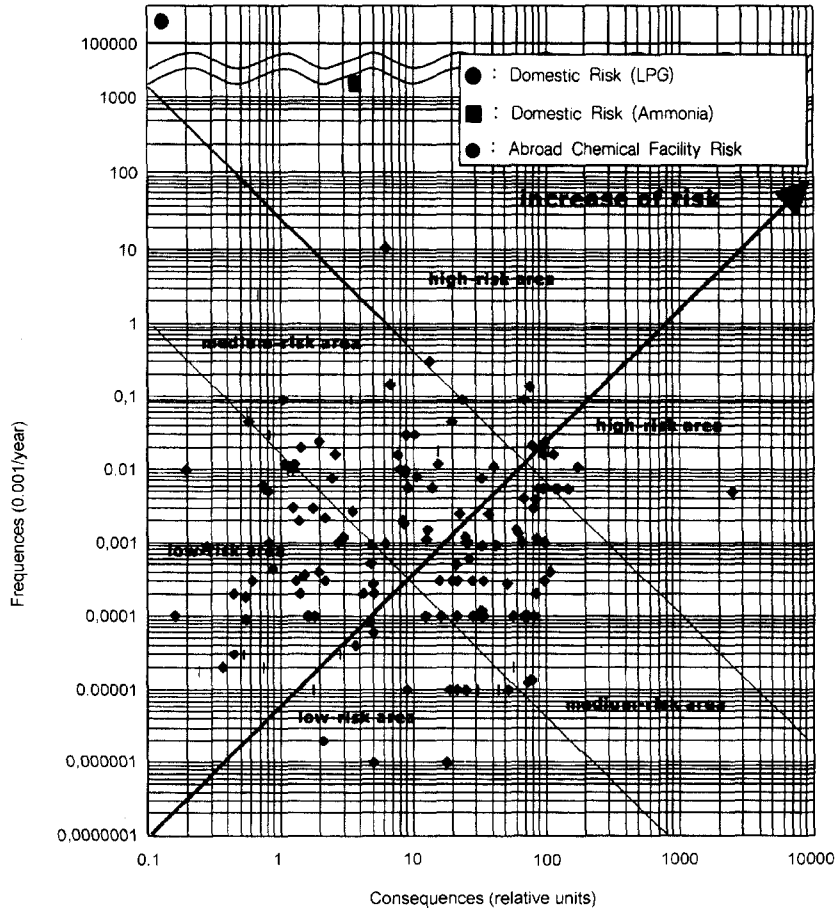
Materials		NFPA			Accident Type	Frequency (cpm)	ARI Safety Criteria limit	Acceptable Population (person)
		Nh	Nr	Nf				
Flammability	LPG	0	0	4	Transportation BLEVE	2.9	10000	59
Toxic	Chlo-rine	4	0	0	Release	2.0×10^{-2}	10000	79

Table 1. Risk Criteria

Year	Source	Risk Level/yr	Contents
1976	Advisory Committee on Major Hazards	1×10^{-4}	Severe Accident Frequency (In the Facility level)
1976	Royal Commission on Environmental Pollution	1×10^{-5} $< 10^{-6}$	Attentive Individual Risk Acceptable Individual Risk
1981	HSE Canvey study, UK	20×10^{-6} to 400×10^{-4} (Individual Death Risk)	Needless Line off
1983	Royal Society Study Group	$< 1 \times 10^{-6}$ $> 1 \times 10^{-3}$	Acceptable Risk Non-acceptable Risk
1989	Netherlands Government	$< 10^{-6}$ (Acceptable Risk)	Acceptable Risk from Individual Risk
1989	HSE, UK	$< 1 \times 10^{-6}$, $< 0.3 \times 10^{-6}$	Acceptable Risk Sensitive Area
1989	Dutch National Environmental Policy Plan	1×10^{-6} 1×10^{-8} $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$	Maximum Tolerance Value Ignorable Risk Require the Risk Reduction
1990	Department of Planning NSW, Australia	$< 1 \times 10^{-6}$ $< 0.5 \times 10^{-6}$	Acceptable Risk Sensitive land use

Table 2. LPG Facility Accident in Recent 10 Years of Domestic

Year	91	92	93	94	95	96	97	98	99	2000	
Accident (Acc.)	60	48	67	86	288	369	320	296	181	148	186.3 Acc./yr
Fatality	13	35	18	27	33	40	59	34	19	23	0.162 Fatality/Acc.

**Fig. 4.** Matrix of Risk of Evaluated Domestic LPG & Ammonia Facility Accident.

또는 ETA(Event Tree Analysis)등의 정량적 사고 발생 확률의 분석과 더불어 사고시 발생할 수 있는 최악의 사례에 대해 시뮬레이션 및 수식에 의해 계산되어진 사고의 심각성을 표현하여 개별적 위험성 수준을 파악할 수 있다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 Risk Level을 High, Medium, Low의 3단계로 나타낼 수 있다. 예를 들어 유해·위험물의 시설물 입지선정에 있어 사고시 여러 후보지의 Severity를 산출하여 Low 범위에 들 수 있는 입지를 선정하는데 이용될 수 있다(Fig. 4 참조).

3. 대상 물질의 적용

3.1 가연성 물질(LPG)

3.1.1 국내 사고사례를 통한 사회적 위험성 평가

1991년부터 2000까지 10년간 한국가스안전공사의 LPG에 관한 사고 통계를 바탕으로 하여 사회적 위험도를 Risk Matrix를 이용하여 Fig. 4에 표현한 결과 High Risk Area의 범주에 속하였다. 사고 통계를 바탕으로 한 LPG의 사회적 위험도의 특징은 발생건수

Table 3. Abroad Chemical Facility Risk Data

Designation of Risk Source	Consequences (relative units)	Frequency of Accidents (0.001/year)	Risk of level (relative units)
# 1	0.0025	10.655	1.0000
# 2	1.0000	0.005	0.1909
# 3	0.0301	0.137	0.1573
# 4	0.0274	0.090	0.0942
# 5	0.0053	0.300	0.0608
# 6	0.0391	0.024	0.0358
# 7	0.0093	0.090	0.0320
# 8	0.0415	0.018	0.0285
# 9	0.0687	0.0108	0.0283

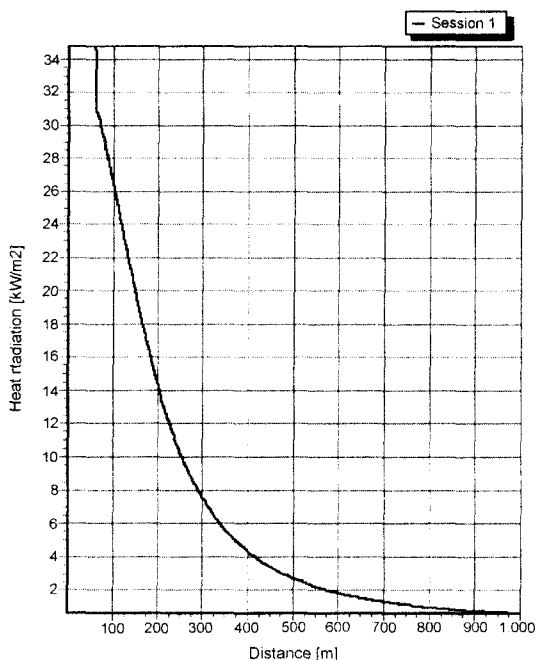


Fig. 5. Heat radiation vs. distance for LPG vessel BLEVE

가 현저히 높는데 반해 사망건수는 낮은 것으로 나타났다.

3.1.2. LPG 취급 시설물에 대한 개인적 위험성 평가
서울시 강서구에 위치한 “K 도시가스”를 모델로 하여 LPG 시설에 대한 개인적 위험성 평가를 실시하였다. 위험성 평가에서 Consequence 수준의 산정은 Netherlands의 TNO에서 개발한 EFFECTS 4.0

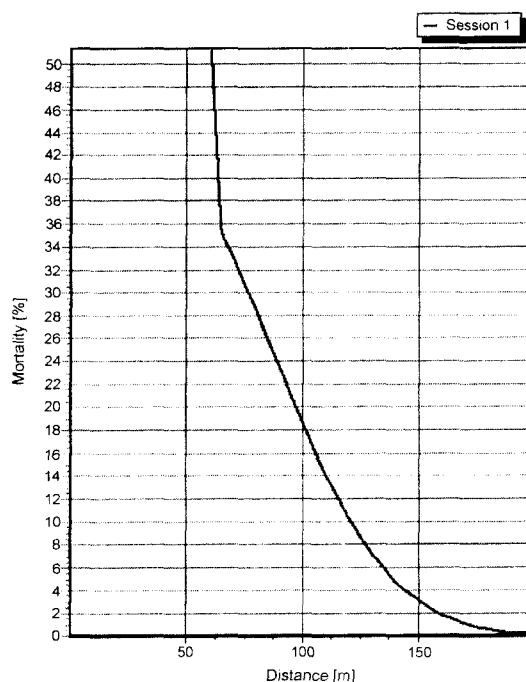
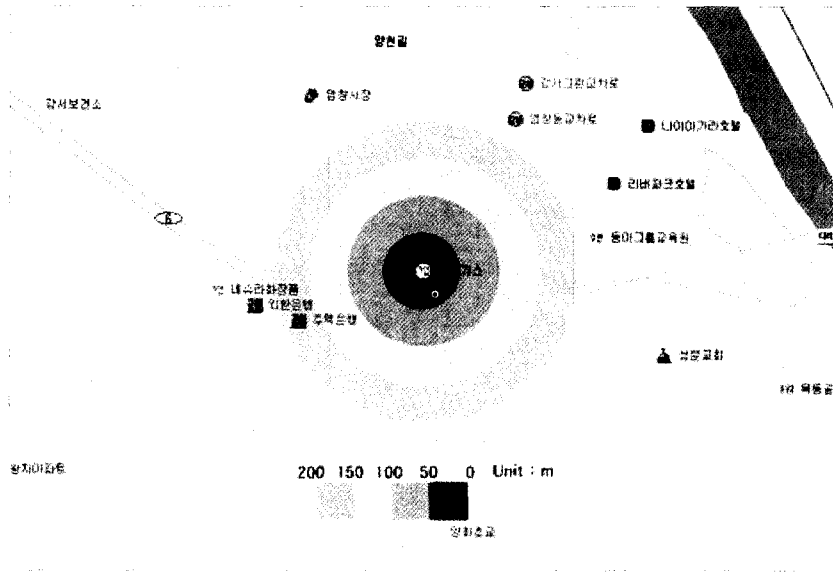


Fig. 6. Mortality vs. distance for LPG vessel BLEVE.

Program을 이용하여 거리에 따른 사망확률을 계산함으로써 이 지역에 대한 인구밀도를 적용하여 산정하였다. LPG Case Study에서 아래의 Input Data를 적용시킨 결과, Fig. 5의 거리에 따른 복사열량에 관한 결과 값과 Fig. 6의 거리에 따른 사망 확률을 나타내었다. 이러한 사망확률에 이 지역을 인구밀도를 적용시킨 결과 Fig. 7과 같은 결과를 보였다.

INPUT

- Model name : BLEVE
- Case description : Session 1
- Chemical name : LPG
- Total mass in vessel : 10000 kg
- Temperature in vessel : 15°C
- Burst pressure vessel : 10 Bar
- Orientation to fireball : 0 deg
- Ambient temperature : 15°C
- Ambient relative humidity : 70%
- Fraction CO₂ in atmosphere : 0.03%
- Distance from centre of vessel : 1000 m
- (X-axis)
- Density : 12,631 person/km² (2000 year)



Distance (m)	50	100	150	200	Total
Mortality Average (%)	60	18	3	0	
Fatality (person)	60	54	16	-	130

Fig. 7. LPG Risk Assessment Contour.

RESULT

Heat radiation level at X-axis : 0.59817 kW/m²
 Heat emission from surface of the fireball : 227.25 kW/m²
 Duration of the fireball : 9.342 s
 Radius of the fireball : 64.646 m
 Height bottom of the fire ball : 64.646 m
 View factor : 0.46064 m
 Atmospheric transmissivity : 57.141%
 Flame temperature : 1141.7°C

3.2 독성 물질

3.2.1 국내 사고사례를 통한 사회적 위험성 평가

1991년부터 2000까지 10년간 한국가스안전공사와 한국화재보험협회의 암모니아에 관한 사고 통계를 바탕으로 하여 사회적 위험도를 Risk Matrix를 이용하여 Fig. 4에 표현한 결과 High Risk Area의 범주에 속하였다. 사고 통계를 바탕으로 한 암모니아의 사회적 위험도의 특징은 LPG보다는 발생건수는 훨씬 작지만 발생건수에 따른 사망자수는 다소 높은 경향을 보였다.

3.2.2 암모니아 취급 시설물에 대한 개인적 위험성 평가

서울시 도봉구에 위치한 “D”사의 암모니아 저장탱크를 모델로 하여 이 시설에 대한 개인적 위험성 평가를 실시하였다. 위험성 평가에서 Consequence 수준의

Table 4. Ammonia Facility Accident in Recent 10 Years of Domestic

Year	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	2000	
Accident (Acc.)	-	1	2	1	6	7	8	5	4	1	3.5 (Acc./yr)
Fatality	-	1	2	-	6	1	-	-	-	-	0.286 (Fatality/Acc.)

Source : Korea Gas Safety Corporation & Korean Fire Protection Association.

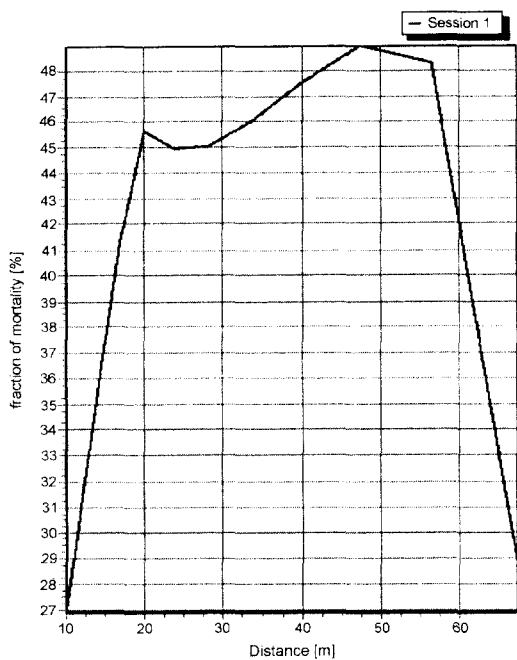


Fig. 8. Distance vs. fraction mortality for Ammonia toxic dose.

산정은 Netherlands의 TNO에서 개발한 EFFECTS 4.0 Program을 이용하여 거리에 따른 사망확률을 계산함으로써 이 지역에 대한 인구밀도를 적용하여 산정하였다. 암모니아 Case Study에서 아래의 Input Data를 적용시킨 결과, Fig. 8과 같이 암모니아의 누출시 발생할 수 있는 사망 확률을 나타내었으며 이를 Fig. 9에 표현하였다.

INPUT

Model name : Dense gas; evaporating pool; toxic dose
 Case description : Session 1
 Chemical name : Ammonia
 Mass flow rate of the source : 10 kg/s
 Duration of the release : 600 g
 Fixed pool surface : 1500 m²
 Temperature after release : -33.43°C
 Wind speed at 10 m height : 2m/s
 Pasquill stability class : F (Very Stable)
 Ambient temperature : 15°C

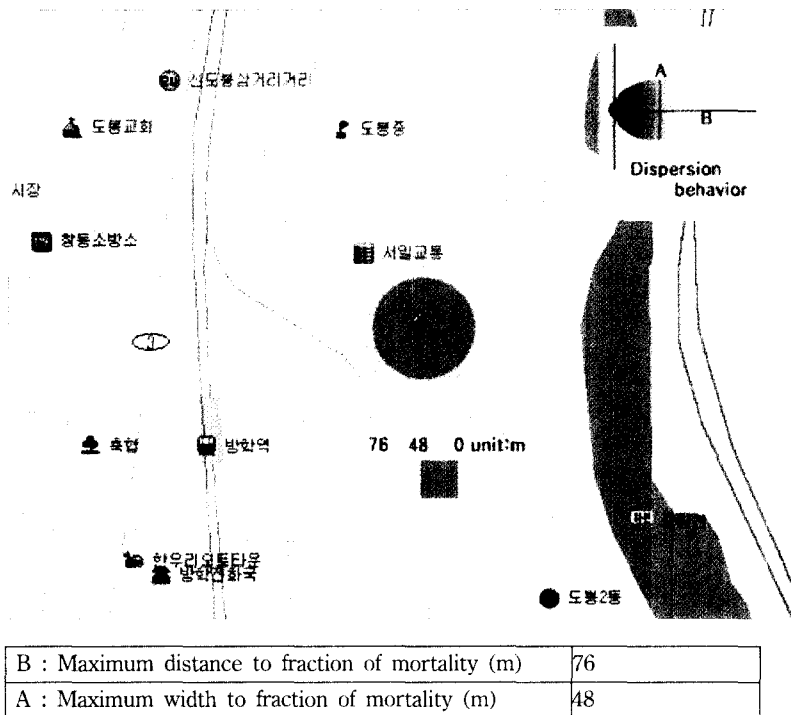


Fig. 9. Maximum width to fraction mortality for Ammonia Risk Assessment Contour.

Ambient relative humidity	: 70%
Roughness length description	: Habitated land : 600 s
Concentration averaging time	: 1000 m
Distance from release (X-axis)	: 0 m
Distance perpendicular to wind direction (Y-axis)	: 0 m : 1%
Height (Z-axis)	
Fraction of mortality for distance calculation	: 1800 s
Exposure duration	: 18066 person/km ² (1999 year)
Density	

RESULT

Maximum Concentration at X-axis	: 2.055E-35 mg/m ³
Arrival time maximum concentration at X-axis	: 424 s
Arrival time cloud at X-axis	
Departure time cloud at X-axis	: 361 s
Dose at X, Y, Z -axis	: 959 s
Maximum dose at	: 2.925E ⁻³⁸ min * (mg/m ³) ⁿ
Maximum distance to fraction of mortality	: 1.052E ⁹ min * (mg/m ³) ⁿ
Maximum width to fraction of mortality	: 76 m
Maximum width to fraction of mortality at distance to the source	: 48 m : 56 m

4. 결 론

1. 위에 적용된 기법의 활용성을 검증한 결과 위험 지역에서 발생할 수 있는 화재, 폭발, 독성의 잠재적 위험성 산정을 통하여 위해·위험시설의 수용여부를 검토할 수 있는 사전 안전성 평가의 도구로서 타당성

을 갖는다는 것이 확인되었다.

2. 개별적 및 사회적 위험도평가 사용의 결과로 나타난 각각의 위험수치는 위해·위험시설시설과 그 인근의 주거지역이나 공공시설사이를 어떻게 격리 수용되어야 하는지를 다루는 토지 이용규제의 이론치로 활용할 수 있다. 또한 유해화학물질의 사고시 신속한 대응 및 배치 기타 취약지역 관리에 유효한 도구로서 활용할 수 있다.

앞으로 국내실정에 알맞은 위해·위험시설에 대한 화재, 폭발, 독극물 누출에 대한 자료축적을 지속하고 파라미터를 산출하므로써 위험성분석의 정확성이 더욱 제고될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Risk Criteria for Land Use Planning in the Vicinity of Major Industrial Hazard, health & Safety Executive(1989).
2. Carter D.A., The Scaled Risk Integral, Loss Prevention & Safety Promotion in the Process Industries, Antwerp, Vol. II(1995).
3. Haastrup P. and ; Rasmussen K., A Study of F-N curves for accidents involving highly flammable gases and some toxic gases, Trans IChemE, 72B, 205-210, November(1994).
4. UK Health and Safe, Executive and AEA Technology plc; MHIDAS : Major Hazard Incident Data Service, 1986, plus updates to 1994.
5. Hirst I. L., Risk Assessment - A note on F-N curves, expected numbers of fatalities, and weighted indicators of Risk, Journal of Hazardous Materials 57(1998).
6. First Report of the Advisory Committee on Major Hazards. Health & Safety Commission(1976).
7. Hirst I.L. and Carter D.A., "Worst Case", Methodology for Risk Assessment of Major Accident Installations, Paper for CCPS Conference, San Francisco, September(1999).