

독성물질 사용·저장시설에 대한 개인적 위험성 산정에 관한 연구

A Study on the Individual and Societal Risk Estimation for the Use and Storage Facility with Toxic Materials

김성빈*·김윤화*·이철*·엄성인*·고재욱*·백종배**
S. B. Kim · Y. H. Kim · C. Lee · S. I. Um · J. W. Ko · J. B. Baek
(1996년 5월 29일 접수, 1997년 3월 28일 채택)

ABSTRACT

These days leakage incidents of toxic materials cause serious effects on the nearby residents as well as the workers around the accidents accompanying massive material losses and human damages through widening influential areas. The risk measure through adequate quantitative analysis as well as the qualitative analysis of the leakage incidents of toxic materials becomes an urgent issue.

The damage of the leakage incident on the surrounding area of the dangerous toxic material facilities was calculated quantitatively by adopting several models in this research. First, the calculations of the leakage velocity from the factories were performed by using source model for the assessment of the influential area, and the damages on the nearby residents were calculated by using the dispersion model and the effect model. The probability of the incidents was computed based on "The manual for classification and prioritization of major incidents" published by IAEA(International Atomic Energy Agency). Above calculated damage area and incident probability were further adopted in this study to induce the individual and societal risk, quantitatively. The calculated data of the real incident of the toxic material leakage showed reasonable agreements to the actual damage of the incidents, which showed a validity of this study. The result of this study might be a helpful measure for predicting damages and preparing safety systems for similar kinds of incidents.

* 광운대학교 화학공학과

** 충주산업대학교 안전공학과

1. 서 론

1960년대 이후 우리나라는 경제 및 산업구조를 근대화시키기 위한 정부의 중화학공업 육성정책에 의해서 발전을 지속하였다. 특히 화학공업의 발달은 산업발전에 획기적인 전기가 되어 신흥공업국으로 발전하는데 중추적인 역할을 하였다. 그러나 각종 공정 설비의 규모가 증가하고 유해한 화학물질의 사용이 크게 증가함에 따라 화재 폭발 및 독성물질의 누출 사고 등으로 작업중인 근로자는 물론 인근지역 주민과 주변 환경에까지 영향을 미칠 가능성 즉, 잠재적 사고의 위험성이 증가하였다. 위험물질에 의한 화재, 폭발, 누출 등과 같은 유형의 산업사고들은 1940년대 이후 선 후진국 구분없이 전세계적으로 끊임없이 발생하고 있다. 따라서 이러한 피해의 광역화를 방지하기 위하여 유사한 사고로부터의 교훈을 토대로 하여 안전설계, 작업 안전 관리 등에 대한 공학적, 기술적 연구가 진행되어 오고 있다.

우리 나라 화학공장의 경우 설비중 약 58%가 10년(울산공단 69년말 조성, 여천공단 70년대말, 경인지역 60~90년대 등) 이상 되어 설비 노후로 인한 사고 위험성은 계속 증가할 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 사고 위험성이 공장 외부에 미치는 피해의 방지나, 누출 피해 범위를 축소하기 위한 제도적 장치가 정확히 마련되어 있지 않고 안전기준의 설정이란 차원에서 이러한 안전 관련 법들은 경험에 바탕을 둔 최소한의 필요한 조치만 규정하고 있을뿐 공학적인 접근에 의한 구체적인 적용방법이 마련되어 있지 못한 실정이었다.

따라서 본 연구는 화학공장에서 사용·저장하는 독성물질에 대하여 사고결과(consequence) 및 발생 확률(probability) 계산을 위한 모델을 연구·검토하고자 하였으며, 연구·검토한 모델들을 국내에서 발생한 누출재해 사례에 적용하여 그 타당성을 비교·검증하고자 하였다. 또한 위험성(사고결과와 확률) 산정에 있어서 공장내 근로자 뿐만 아니라 공장 주변지역에 거주하는 주민에게 미칠 수 있는 피해 정도에 초점을 맞추어 독성물질 사고로 인한 인명피해를 계산하고자 하였다.

먼저, 잠재위험의 피해범위 산정에 있어서는 누출 모델(source model)을 연구·검토하여 독성물질의 누출속도를 계산하였다. 그리고 확산 모델

(dispersion model)과 영향 모델(effect model)을 연구·검토하여 독성물질의 농도에 따른 피해거리 및 그에 따른 대피시간(evacuation time)을 계산하였다. 계산 과정중 확산 모델은 Pasquill-Gifford Gaussian의 플럼(plume) 모델을 사용하였으며, 영향 모델(effect model)에 대해서는 probit function을 사용하여 독성 물질의 독성 수준(toxic level)을 계산하였다. 사고 발생 확률 산정은 국제 원자력 기구(IAEA)가 발행한 '중대산업사고에 대한 위험성 분류와 우선순위를 위한 지침서'가 제시한 방법을 이용하여 계산하였다.

결론적으로 앞에서 계산하여 얻은 사고결과와 사고 발생 확률을 주변 환경과 기후 조건 등의 변수들을 고려하여 개인적 위험성으로 표현하였으며, 국내에서 발생한 실제 사고사례와 비교하여 본 논문에서 연구·검토한 모델들의 타당성을 검증하였다.

2. 독성물질 누출에 따른 사고결과 (consequence) 산정

독성 물질 누출에 의한 피해 범위(effect zone) 및 인명 피해 규모를 산정하기 위해서는 다음과 같은 연구들이 수행되어야 한다.

- 잠재위험 확인(hazard identification)
- 누출 모델(source model)
- 확산 모델(dispersion model)
- 영향 모델(effect model)

잠재위험 확인 단계는 위험성 평가에 필요한 자료수집과 아울러 공정/시스템내에 존재하는 위험원을 파악하는 단계이다.

누출 모델 단계는 독성 물질의 누출이 발생할 경우 독성 물질의 누출 속도, 총 누출량, 누출 시간 등을 계산하는 단계이며, 분산 모델 단계는 독성 물질의 누출에 의한 피해 거리와 그에 따른 독성 수준(toxic level)을 계산하는 단계이다.

영향 모델 단계는 누출된 독성 물질의 시간에 대한 치사 농도를 계산하는 과정이 되며, 분산 모델과 결합하여 개인적 위험성 및 사회적 위험성을 산출하는데 있어서 자료를 제공하게 된다.

2.1 누출 모델(Source model)

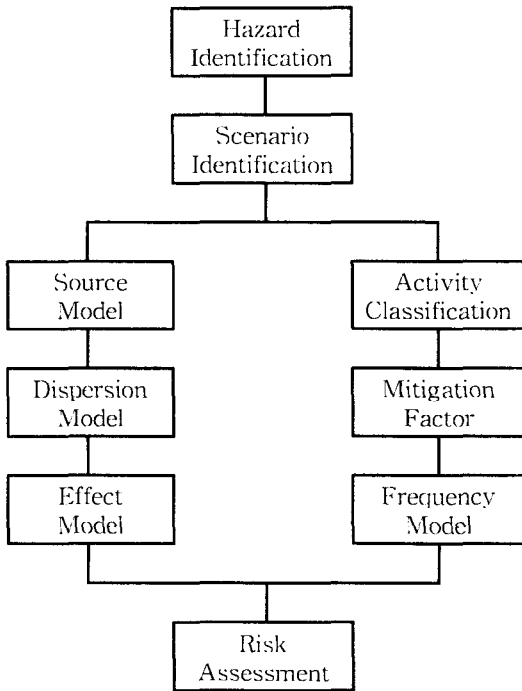


Fig. 1 Overall Logic Diagram for the Risk Assessment

화학 공장에서 발생하는 대부분의 중대재해는 가연성 또는 독성 물질등의 누출에 의한 사고로부터 발생한다. 이러한 누출 사고의 원인으로는 저장탱크나 공정장치의 균열이나 파열, 파이프 라인의 부식에 의한 파열, 그리고 밸브의 마모에 의한 누출 등 다양한 경로를 통하여 발생 할 수 있다. 따라서 누출 모델(source model)을 통하여 얻어진 독성물질의 누출 속도, 총 누출량 그리고 누출 물질의 물리적·화학적 특성과 같은 정보는 사고 결과를 산정하는데 있어서 중요한 정보를 제공하게 된다.

일반적으로 누출의 형태로는 과압이나 저장탱크의 폭발과 같이 단 시간내에 많은 양이 누출되는 경우와 비교적 작은 구멍이나 틈을 통하여 계속적으로 누출되는 경우가 있다⁵⁾.

2.2 분산 모델(Dispersion model)

분산 모델(dispersion model)은 유독물질이 사고 지점에서 공장이나 다른 인근 지역으로의 풍매 전달(airbone transport)을 설명하는 모델이다. 대표적인 분산 형태를 살펴보면 플럼(plume) 모델 형

태와 퍼프(puff) 모델의 형태가 있다.

플럼 모델은 연속적인 누출 근원지로 부터 방출되는 물질의 정상 상태 농도(steady-state concentration)를 나타내며 퍼프 모델은 고정된 양의 단일 방출로 인한 물질의 일시적인 농도를 나타낸다. 플럼 모델의 전형적인 예는 굴뚝으로부터 기체의 연속적인 누출이며, 퍼프 모델의 전형적인 예는 저장탱크가 파열되어 저장된 유해물질이 갑자기 누출되는 경우이다.

누출된 독성 물질은 바람에 의해 이동하게 되며, 누출된 독성 물질의 최대 농도는 누출지점에서 발생하지만 꼭 지표면이 아닐 수도 있다. 그러나 대부분의 경우에 있어서 독성 물질의 최대 농도는 지표면에서 나타나는 것으로 밝혀져 있다.

본 본문에서는 Pasquill-Gifford 분산 계수(dispersion coefficient)를 이용한 플럼 모델과 퍼프 모델을 연구·검토하였다.

2.2.1 플럼 모델 (Plume model)

Pasquill-Gifford 플럼 모델식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^{1,2)}.

$$(C)(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi \rho_y \rho_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\rho_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\rho_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\rho_z}\right)^2\right] \right\} \dots\dots\dots (1)$$

분산 계수 ρ_y, ρ_z 은 도표를 통하여 얻을 수 있으며, 기후 안정(weather stability) 정도에 따라 값이 달라진다.

2.2.2 퍼프 모델 (Puff model)

Pasquill-Gifford 퍼프 모델은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다^{1,2)}.

$$(C)(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{(2\pi)^{3/2} \rho_x \rho_y \rho_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\rho_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\rho_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\rho_z}\right)^2\right] \right\} \dots\dots\dots (2)$$

분산 계수 ρ_x, ρ_y, ρ_z 은 도표를 통하여 얻을 수 있으며, 퍼프 조건(puff condition)에 따라 값이 달라진다.

2.3 영향 모델(Effect model)

폭발과 화재로 부터의 피해는 상대적으로 작은 지역에 한정되지만 독성물질은 매우 넓은 지역에 걸쳐 바람과 물에 의해 그 효과가 전해지고 사람과 환경에 대해 지속적으로 손상을 미칠 수 있다. 따라서 독성 물질로 부터의 피해는 독성 물질의 농도와 노출 지속시간의 함수로 나타낼 수 있다¹⁾.

독극물 누출에 대한 영향은 분산 모델과 probit function 모델을 사용하여 얻어질 수 있다. 분산 모델을 이용하여 거리에 따른 농도, 시간을 구할 수 있으며 다음 식에서 probit 값을 계산할 수 있다¹⁾.

$$Pr = a + b \log_e(C^n t) \dots\dots\dots (3)$$

Probit 값을 계산하는데 사용하는 상수 a, b, n 은 각 물질마다 크게 다르며, 다음의 Table 1에서 얻을 수 있다.

Table 1 Constants for lethal toxicity probit equation¹⁾

Substance	a(ppm)	b(ppm)	n(min)
Ammonia	-35.90	1.85	2
Benzene	-109.78	5.3	2
Carbon monoxide	-37.98	3.7	1
Chlorine	-8.29	0.92	2
Formaldehyde	12.24	1.3	2
Hydrogen chloride	-16.85	2.00	1.00
Hydrogen cyanide	-29.42	3.008	1.43
Hydrogen sulfide	-31.42	3.008	1.43
Methyl isocyanate	-5.642	1.637	0.653
Nitrogen dioxide	-13.79	1.4	2
Phosgene	-19.27	3.686	1
Propylene oxide	-7.415	0.509	2.00
Sulfur dioxide	-15.67	2.10	1.00
Toluene	-6.794	0.408	2.50

3. IAEA manual에 의한 빈도(frequency) 산정

IAEA manual은 중대산업사고에 대한 위험성 분류와 우선순위를 위한 것으로 위험물질을 취급하는 시설, 물질의 형태와 특성 그리고 취급량만 안다면 각각의 표를 이용하여 적은 시간과 노력으로 치사율에 따른 사고의 발생확률을 간단하게 산정할 수 있다³⁾.

Fig. 2에서와 같이 물질의 특성, 형태, 그리고 공정에 대한 약간의 정보만 있다면 manual이 정하는 참고번호(reference number)를 결정하게 된다. 또한 앞에서 결정한 참고번호를 근거로 하여 공정

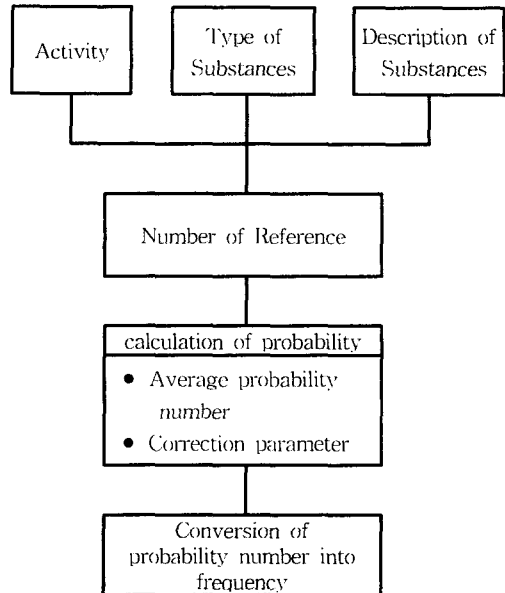


Fig. 2 Logic diagram of IAEA manual³⁾

Table 2 List of substances³⁾

Ref. number	Type of substance	Substances(example)
∴	∴	∴
30, 35	Toxic gas low	Ethylamine Ethylene oxide Vinyl chloride
31, 36, 40	Toxic gas medium	Ammonia Carbon monoxide Sulphur dioxide Trimethylamine Vinyl bromide
32, 37, 41, 42	Toxic gas high	Carbonyl sulphide Chlorine Formaldehyde Hydrogen bromide Hydrogen chloride Hydrogen sulphide Nitrogen monoxide
33, 38	Toxic gas very high	Boroethane Carbonyl chloride
∴	∴	∴

의 평균 확률값과 보정계수를 결정하며, 그에 따른 사고 발생 확률 까지 손쉽게 구할 수 있다.

3.1 Activity의 분류

평가 대상이 되는 독성 물질, 공정 상태, 물질의 형태, 그리고 activity 등에 대하여 Table 2와 3을 이용하여 참고번호를 결정한다.

Table 3 Classification of toxic substances by activity³⁾

Ref. No.	Type of substance	Description of substance	Activity					
∴	∴	∴	∴					
22	Toxic liquid	High toxicity	Storage with t/p					
23			Road/rail					
24			Water					
25			Other					
26			Storage with t/p					
27	Very high toxicity		Road/rail					
28			Water					
29			Other					
30			Toxic gas	Low toxicity	Liquified by pressure			
31					Medium toxicity			
32	High toxicity							
33							Very high toxicity	
34								
35			Low toxicity	Liquified by cooling				
36					Medium toxicity			
37	High toxicity							
∴							∴	∴

* t/p : tank pit

3.2 빈도 산정

참고번호가 결정되면 다음 표들을 이용하여 독성 물질(하첨자 i)을 취급하는 위험 설비(하첨자 j)의 사고 발생 확률값($N_{i,s}$)은 식 (4)로부터 계산할 수 있다³⁾.

$$N_{i,s} = N^*_{i,s} + n_1 + n_0 + n_p \dots \dots \dots (4)$$

설비와 물질에 대한 평균 확률값은 Table 4을 이용하여 구한다.

Table 4 Average probability number ($N^*_{i,s}$) for the hazard installation³⁾

Substances (Reference numbers)	Activity	
	storage	processing plant
Toxic liquid (16~29)	5	4
Toxic gas (30~34)	6	5
Toxic gas (35~39)	6	—
Toxic gas (42)	5	4
Combustion products (43~46)	3	—

적재/적하 작업 빈도수에 대한 보정계수 (correction parameter)는 Table 5를 이용하여 계산하며, 안전 관리와 조직에 대한 보정계수는 Table 6를 이용하여 계산하게 된다. 예를 들어 독성 물질을 취급하는 시설에 대한 안전 조직이나 안전 시설이 미흡하다면 Table 6에 나와 있듯이 보정계수를 -0.5~-0.1로 보고 계산하게 된다.

Table 5 Correction parameter(n_1) for loading/unloading operation frequency³⁾

Frequency of loading/unloading(yr^{-1})	Parameter
1~10	+0.5
10~50	0
50~200	-1
200~500	-1.5
500~2000	-2

Table 6 Correction parameter (n_0) for organizational safety³⁾

Above average industry practice	+0.5
Average industry practice	0
Below average industry practice	-0.5
poor industry practice	-1
Limited to non-existence organizational safety	-1.5

또한, 바람이 주거지역을 불 가능성에 대한 보정계수는 Table 7로 부터 구하게 된다.

Table 7 Correction parameter (n_p) for wind direction³⁾

Effect area category	Part of the area(%) where people are living				
	100%	50%	20%	10%	5%
I	0	0	0	0	0
II	0	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5
III	0	+0.5	+0.5	+1	+1.5

Table 4~7로 부터 얻은 평균 사고 발생 확률값과 각각의 보정계수를 이용하여 식 (4)로부터 얻은 사고 발생 확률값 N은 식 (5)를 이용하여 사고 발생 빈도 P로 전환 할 수 있다³⁾.

$$N = | \log_{10} P | \dots \dots \dots (5)$$

4. 개인적 위험성 산정

독성물질은 주변지역 주민과 공장의 근로자들 양쪽에 영향을 미칠 수 있다. 폭발과 화재로부터의 피해 거리는 상대적으로 작은 지역에 한정되지

만 독성물질은 광범위한 지역에 걸쳐 바람에 의해 피해가 전해지고 인간과 환경에 대해 지속적인 영향을 미칠 수 있다. 독성물질로부터의 피해는 독성물질의 농도와 누출 지속기간의 함수로 나타난다. 독성물질을 계산하는 과정은 지형에 따라 약간의 보정계수가 필요하며, 고려대상은 인근 주민, 개인의 특성치에 따른 지형 시설물에 의해 복잡해진다.

일반적으로, 개인적 위험성이란 위험원 근처에 있는 사람에 대한 위험성을 말하며 표현 방법에는 다음과 같은 두가지 방법이 있다.

Risk contour plot는 위험시설 주변에서 같은 크기의 위험도(isorisk)를 갖는 지점을 연결하여 작도하는 것이며, individual risk profile은 위험 시설 주변으로부터 거리에 따른 위험성을 2차원적(risk vs. distance)형태로 표현한 형식이다.

개인적 위험성의 계산절차는 접근 방법을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정하에 위험성을 계산한다.

- 바람 분포(wind distribution)가 일정하여 모든 방향으로 사고가 일어날 수 있다.
- 오직 하나의 풍속과 기후 안정 등급을 사용한다.
- 대피나 피난 같은 완화계수는 고려하지 않는다.
- 누출원은 균일하게 분포되어 있어서 어느 지점에서든 사고가 발생할 수 있다고 가정한다.

계산과정은 먼저 가장 큰 피해반경을 갖는 사고를 선택하여 피해지역과 같은 반경으로 원을 그린 후 그 중에서 풍향에 영향을 받을 수 있는 지역을 결정한다. 따라서 특정 지역, 특정 방향에서의 사고빈도는 다음식으로 계산할 수 있다¹⁾.

$$f_{i,d} = f_i (\theta_i / 360) \dots\dots\dots (6)$$

다음 단계는 식 (6)에서 얻은 개인적 위험성 수치(강도와 빈도)를 도면상에 도식한 후 다음으로 큰 사고 강도를 갖는 경우에 대하여 식 (7)을 이용하여 개인적 위험성을 누적분 형태로 계산하게 된다¹⁾.

$$IRC_i = f_i (\text{or } f_{i,d}) + IRC_{i-1} \dots\dots\dots (7)$$

이러한 계산절차는 모든 위험이 산정될 때 까지 계속 반복하여 수행한다.

5. 사례 검토(Case study)

본 사례 검토에서는 독성물질 사용·저장시설에 대한 개인적·사회적 위험성 평가를 수행하여 공정내 근로자 및 위해시설 주변지역에 거주하는 주민에게 미칠 수 있는 피해를 산정하고자 하였다.

H사 (주) 독극물 누출사고

1994년 9월 8일 15 : 40분경 전남 여천시 소재 H사(주)에서 TDI(Toluene-di-isocyanate) 제조 공정의 분해탑 하부에서 reboiler에 이르는 노즐(8"-SUS 316L-S/40)이 42cm 정도 파열되면서 순간적으로 다량의 유독가스(TDI, HCl, Phosgene, Toluene)가 누출되어 인접 공장까지 확산, 3명 사망, 41명이 가스에 중독된 재해이다⁶⁾.

5.1 시스템 묘사(System description)

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 이 공정은 TDA (Toluene di-amine)와 400% 과잉의 포스젠(COCl₂)을 K-410 반응기에서 반응시킨 후 분해탑에서 포스젠과 TDI 그리고 염화수소를 분리해 내는 공정이다.

평상 조업시 공정 조건은 15기압에서 75~160°C 정도로 가동되었으며, 분해탑 상부로 HCl과 반응하고 남은 포스젠을 분리해내고, 분해탑 하부로는 TDI와 미량의 HCl과 포스젠을 분리해내는 공정이다⁶⁾.

- 사고공정 : 분해탑 하부(Fig. 3 참조)
- 누출물질 : TDI, HCl, Phosgene
- 운전압력 : 15 BAR(MAX. 20 BAR)
- 운전온도 : 75~160°C(MAX. 175°C)
- 재질 : SUS 316L(SA-204 TY 316L)
- 누출 원인 : 부식에 의한 파이프라인 파열

누출 물질인 TDI, 포스젠, HCl은 모두 맹독성 물질로 인체에 미치는 독성은 대단히 큰 물질들로써 인체에 미치는 대단히 크다고 할 수 있다⁴⁾.

재해 과정은 분해탑 상부에서 배출되는 염화수소 가스를 흡수하여 염산을 제조하는 흡수탑 공정에서 물 공급량과 염화수소 가스 공급량 비율 균형이 잘못되면서 염화수소 흡수량이 감소하면서, 흡수탑의 압력이 상승하여 부식된 파이프 라인에 파열되어 가스가 누출된 것으로 밝혀졌다⁶⁾.

5.2 사고결과 계산

계산 결과 부식된 파이프 라인을 통한 TDI, 포

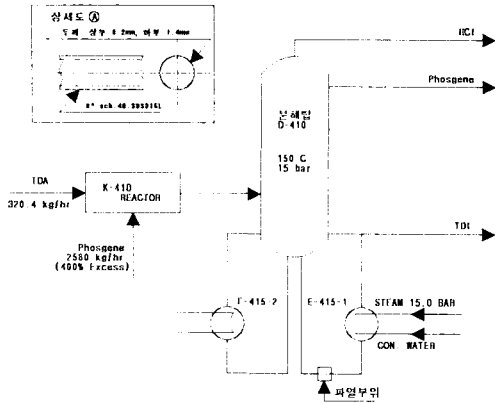


Fig. 3 Diagram for distillation of TDI. ⁶⁾

스젠, 염화수소의 누출 속도는 다음과 같다.

$$Q_{m.TDI} = 24.62 \text{ kg/sec}$$

$$Q_{m.Pho} = 0.51 \text{ kg/sec}$$

$$Q_{m.HCl} = 0.25 \text{ kg/sec}$$

누출 물질중 가장 강한 독성을 지니고 있으며, 증발속도가 빨라 가장 피해가 클 것으로 사료되는 포스젠에 대한 확산을 알아보았다.

Pasquill-Gifford Guassian 플럼 모델 식 (1)을 사용하여 누출 지점으로 부터의 최대 농도를 고려하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다. (가정 : $H=y=z=0$)⁵⁾

$$C = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \dots \dots \dots (8)$$

기후 안전 등급 D와 풍속 4m/sec에 해당하는 확산 계수(spread parameter)는 다음과 같다.^{1.5)}

$$\sigma_y = \exp \left[4.23 + 0.9222 \ln \left(\frac{x}{1000} \right) - 0.0087 \left[\ln \left(\frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right]$$

$$\sigma_z = \exp \left[3.414 + 0.737 \ln \left(\frac{x}{1000} \right) - 0.0316 \left[\ln \left(\frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right]$$

이 때 사용한 Probit function은 식 (9)와 같으며, 포스젠에 대한 상수는 표 1로부터 얻을 수 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Pr = -19.27 + 3.686 \log(Ct) \dots \dots \dots (9)$$

따라서 포스젠 누출에 대하여 각각의 치사율에 해당하는 치사거리를 계산하면 Table 8과 같다. Fig. 4는 각각 농도 대 치사율과 농도 대 치사거리

를 나타낸 그림이다.

Table 8 Phosgene conc. vs. effect distance for each fatality

Fatality	Concentration COCl ₂ (ppm)	Effect Distance (m)
10%	17.0	466
20%	19.2	434
30%	20.9	413
40%	22.5	396
50%	24.1	381
60%	25.8	367
70%	27.8	352
80%	30.3	335
90%	34.1	313
100%	52.7	244

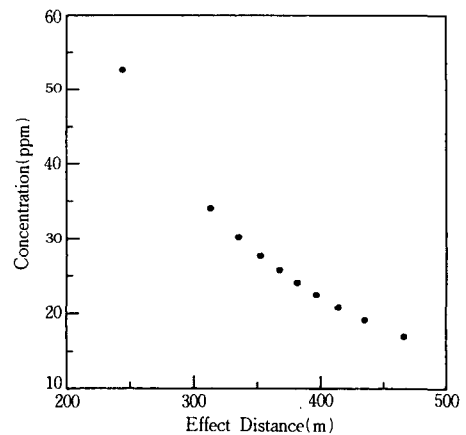
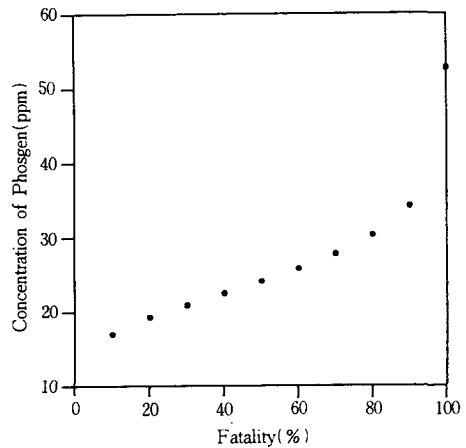


Fig. 4 Graph for
(a) fatality versus concentration
(b) concentration versus effect distance

시간당 포스겐의 농도와 피해거리는 Table 9와 같으며, 그에 해당하는 그래프는 Fig. 5와 같다.

Table 9 The phosgene concentration and effect distance for exposure time

Exposure time(min)	Phosgene concentration(ppm)	Effect distance(m)
5	561.9	67
10	280.9	97
20	140.2	141
30	93.7	177
40	70.3	208
50	56.2	236
60	46.8	261

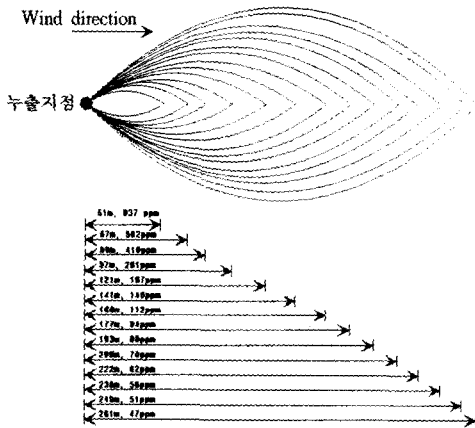


Fig. 5 The phosgene concentration and effect distance for exposure time

5.3 IAEA manual을 이용한 빈도 계산

먼저 Table 2와 3을 이용하여 포스겐에 대한 참고 번호(Reference number)를 구한 결과 33번으로 나타났다. 그리고 Table 4 부터 7까지 이용하여 공정에 대한 평균 확률값과 각각의 보정계수를 구하면 다음과 같다.

- $N_{i,s}^*$: 5(Processing plant)
- 보정 계수 n_1 : 0
- 보정 계수 n_0 : -1
- 보정 계수 n_p : 0.5(50%)

따라서, 사고 발생 확률값은 식 (4)를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$N_{i,s} = 5 + 0 - 1 + 0.5 = 4.5$$

결론적으로 식 (5)를 이용하여 확률값을 연간 사고 발생빈도로 나타내면 다음과 같다.

$$N_{i,s} = 4.5 \rightarrow 3 \times 10^{-5} / \text{year}$$

5.4 개인적 위험성 계산

포스겐 누출에 의한 50% 및 100% 피해거리와 사고 발생 확률을 개인적 위험성으로 표현하면 Fig. 6과 같다.

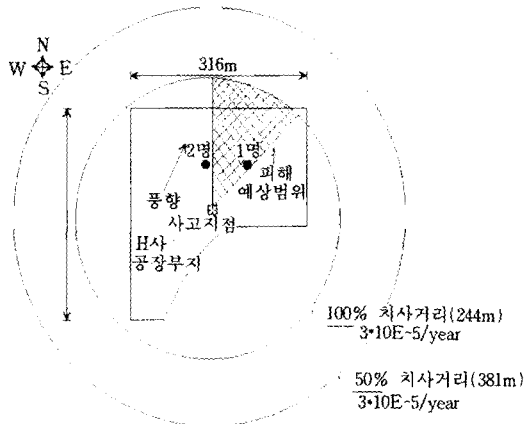


Fig. 6 Isorisk contour for individual risk

6. 결 론

본 연구는 화학공장에서의 독성물질을 사용, 저장하는 시설물에 존재하는 잠재 위험을 우선적으로 파악하고, 누출 시나리오의 형태를 확인한 후 누출 사고시의 누출량, 누출 형태에 대한 피해강도를 산정하였다. 그리고 IAEA manual을 적용하여 독성물질 취급 시설물을 취급하는 시설물에서의 누출 가능한 발생 확률값을 산정하였다. 또한 두 방법을 H사의 실제 사고 사례에 적용하여 위험성을 비교 검증하였다. 그 결과는 다음의 몇 가지로 요약하였다.

- 1) 강도 산정에서는 source, dispersion, effect model 등을 적용하여, 독성물질 누출 사고에 따른 주변지역에 미칠 피해의 심각성을 피해거리(effect distance)와 인체에 영향을 미칠 수 있는 치사농도를 산출하여 독성 물질 누출시 대피할 수 있는 객관적인 시간을 산출하였다.
- 2) 빈도(frequency) 산정은 FTA나 ETA등의 tree

구조의 빈도 산정 방식을 이용하여야 하지만, 국내 현실에서는 기초 data가 절대적으로 부족하여 적은 데이터로도 빈도산정 계산을 신속히 수행할 수 있는 IAEA manual의 빈도산정 방식을 사용하여 독성물질 누출사고의 발생 확률을 산출하였다.

- 3) 앞에서 산정된 강도와 빈도의 결과를 근거로하여, 위험지역안에 존재하는 사람들에 대한 개인적 위험성과 사회적 위험성을 산출하여 위험 영향권을 도식화하였다.
- 4) H사의 사고시 독성물질 누출량과 기후안정 등급, 풍속, 풍향, 지형조건 등을 이용하여 누출 지점으로 부터 위험 한계 거리를 산출한 결과는 사고 당시의 사망자가 속해있던 피해 거리와 거의 유사함을 알 수 있었다.
- 5) 따라서 본 연구의 결과를 화학공장에서의 독성물질 누출사고시 객관적인 자료로 사용하면 누출사고시 안전대책 및 대피, 방호 등에 이용이 가능할 것으로 사료된다.

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(과제번호 : 96-0602-01-01-3)지원과 포항공과대학교 지능자동차연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

기 호 설 명

- C=concentration of release material(ppm)
 f_i =estimated frequency of occurrence of incident outcome case i(yr^{-1})
 $f_{i,d}$ =frequency of incident outcome case i at any particular direction
 f_m =mitigation correction factor
 H_r =height of release point
 IRC_i =value of individual risk at the contour of the incident outcome case(yr^{-1})
 IRC_{i-1} =value of individual risk at the next

- further risk contour(yr^{-1})
 n_f =correction parameter for flammables
 n_l =correction parameter for loading/unloading
 n_o =correction parameter for organization
 n_p =correction parameter for wind direction
 N_i =number of people affected by incident outcome case i
 $N_{i,s}^*$ =average probability number for fixed installations
 $p_{f,i}$ =probability of fatality within the effect zone
 P_i =total number of people within effect zone
 Q =mass release rate(kg/sec)
 θ_i =angle enclosed by the effect zone for incident outcome case i
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ =dispersion coefficient

참 고 문 헌

- 1) Center for Chemical Process Safety, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", Newyork, 1989.
- 2) Crowl, D. A. and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety : Fundamentals with Application", Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
- 3) International Atomic Energy Agency, "Manual for the Classification and Prioritization of Risk from Major Accident in Process and Related Industries, 1991.
- 4) 노동부 "유해 화학물질 편람", 1992.
- 5) 김윤화, 백종배, 고재욱, "독성물질 누출의 강도 산정 방법에 관한 비교 연구", 한국산업안전학회, Vol. 9, No. 1, 1994.
- 6) 한국가스안전공사 "한국화인케미칼(주) 진단 보고서" 94-01, 10. 1994.
- 7) 김윤화, 엄성인, 고재욱, "화학공정 주변지역에 미치는 위험성(사회적 위험성 및 개인적 위험성) 평가 방법에 관한 비교 연구", 한국산업안전학회지, Vol. 10, No. 1, 1995.