한국화재·소방학회, 제17권 제3호, 2003년
[논 문]

T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 17, No. 3, 2003

염소저장탱크에서의 가스 누출시 공정위험검토 및 결과영향분석

Process Hazard Review and Consequence Effect Analysis for the Release of Chlorine Gas from Its Storage Tank

고재선† · 김 효

Jae-Sun Ko† · Hyo Kim

서울시립대학교 화학공학과

(2003. 7. 21. 접수/2003. 9. 16. 채택)

요 약

화학공장에서 발생되는 사고 중 대부분은 저장탱크나 운송배관의 손상에 의한 휘발성 유독성물질의 대량 누출이며, 이 경우 누출된 지역의 자연환경과 대기조건에 따른 유동성물질의 확산거동이 안전성평가의 가장 중요한 관심 대상이 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 누출물질에 대한 대기 중 확산을 모사하기 위하여 염소저장탱크에서 염소가 누출될 경우를 예제로 선택하여, 위험성평가와 확산모델(dense gas model)을 이용한 결과해석을 수행하였다. 해석결과를 살펴보면 Fire & Explosion Index를 적용한 결과 포괄적인 위험의 정도는 90.7로서 약간 위험한 정도로 나타났으며, 대기확산 모델(PHAST6.0/ALOHA)은 소프트웨어 운용한 결과, Gas Model에 대한 입력 자료 값에 따라 미치는 결과영향이 다소 차이가 있음을 발견하였으나 각 시나리오별 경향은 상당히 일치함을 나타내고 있다. 따라서 향후 보다 정확한 물성입력자료와 지형인자를 고려한다면 이와 같은 연구방법은 유독성물질 누출에 따른 위험성평가를 보다 효율적으로 수행하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

ABSTRACT

Most of the accidents occurred from the chemical plants are related to the catastrophic gas release events when the large amount of toxic materials is leaked from its storage tank or transmitting pipe lines. In this case, the greatest concerns are how the spreading behaviors of leakages are depended on the ambient conditions such as air stability and other environmental factors. Hence, we have focused on the risk assessments and consequential analysis for chlorine as an illustrative example. As appeared in the result, Fire & Explosion Index depicted it a bit dangerous with presenting the comprehensive degrees of hazard 90.7. And as a result of Phast6.0/ALOHA, the trends of each scenario appeared considerably identical although there are some differences in the resulting effects according to the input data for the Gas Model. The consequence analysis is performed numerically based on the dense gas mode. In the future, using more correct input data, material properties, and topographical configuration, the method of this research will be useful for the guideline of the risk assessment when the release of toxicants breaks out.

Keywords : Fire & Explosion Index, Dense gas model, Hazard and operability, Pobit function, Fault tree analysis, Threshold limit values, Threshold

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 화학공정설비 규모의 증대 및 반응성이 높은 물질의 사용량과 저장량이 증가함에 따라 누출로 인한 사고발생 가능성도 증가하고 있다. 화학공장에서 독성물질의 누출로 인하여 발생한 사고는 공장시설의 파괴는 물론 근로자 및 인근지역의 주민들에게까지 치명적인 피해를 미칠 수 있으므로, 이에 대한 체계적인 연구와 방지를 위한 적절한 대책의 마련이 반드시 필요

†E-mail: 119kjs@hanmail.net

하다. 따라서, 유해한 독성물질의 폭넓은 사용증가에 대비한 이들 물질의 누출사고발생 시 피해지역을 추정하는 수치모델의 필요성이 증대되고 있다. 또한 외국의 동향을 살펴보면 이미 미 환경보호국(USEPA)은 1996년 "최종 유해위험성 관리프로그램(The final risk management program, RMP) Rule 40 CFR 68을 제정하여 1996년에 최종 발표하였고, 이 Rule은 USEPA의 대기청정법(The clean air act amendments of 1990, CAAA)의 section 112(r)하에서 규제화학물질 사고 누출방지 법규조항을 만족시키고 있으며, "미 산업안전보건국(The occupational safety and health administration, OSHA)"의 "공정안전관리(Process safety management, PSM)" Rule[12]까지 확장되고 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 "공정안전 및 유해위험성관리(Process safety and risk management, PSRM)을 이용하여 누출로 인한 개인, 장치설비 및 주위 인근의 지역사회에 미치는 공정관련사고를 방지하기 위한 것으로, 공정관련 산업재해 및 사고를 예방하려는데 그 목적이 있다.

1.2 연구방법

PSRM의 14개 구성요소 중 "공정 유해위험성분석"은 크게 공정유해위험성검토(Process hazard review)와 결과 영향분석(Consequence analysis)의 2분야로 이루어 진다. 따라서, 본 연구는 염소 저장탱크에서 Fire and Explosion index와 HAZOP에 의해 "공정유해위험성검토"를 수행하고 다음으로 "공정유해위험성 검토"로부터 분석된 염소저장탱크의 누출 시나리오에 대해 Integrated approach를 통하여 "결과 영향분석"을 수행하여 보다 체계적이고 정량적인 "공정안전 및 유해위험성 관리"방안을 수립하기 위한 것이다. Fig. 1은 본 연구의 방법론을 나타낸 것으로 화학공장에서 발생되는 사고 중 저장탱크나 운송배관의 손상에 의한 휘발성, 유독성물질의 대량 누출에 대한 위험성평가 흐름도이다.

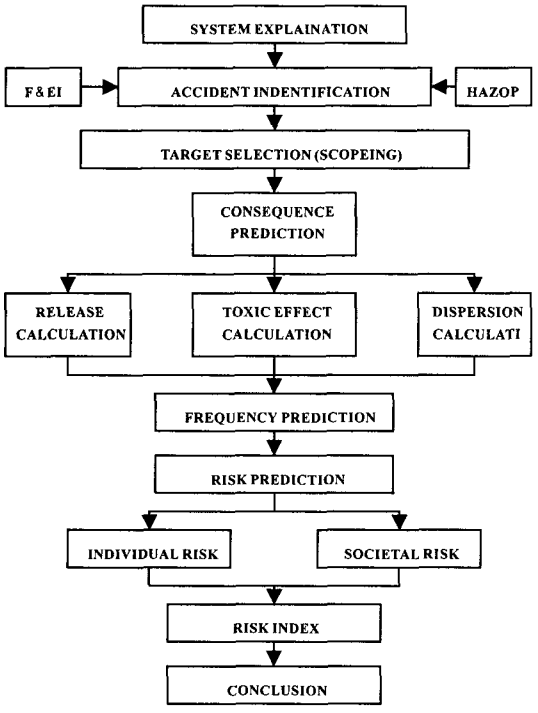

Fig. 1. Flow chart for the risk analysis.[1]

앞서 기술한 바와 같이 첫 번째 Screen 단계로서 Fire & Explosion Index[1]를 적용하여 포괄적인 위험의 정도를 표현하고자 하였으며, 이와 병행하여 수행된 HAZOP을 통해 사고의 대표시나리오를 도출하였다. 두 번째로는 Scoping 단계로 각 시나리오 별 유해독성물질의 누출사고 발생시 피해지역을 추정하는 이론적 수치모델과 함께 누출관련 대기확산 모델(PHAST6.0/ALOHA)을 운용하여, 이를 기반으로 Gas Mode[2]에 대한 입력 자료 값에 따라 미치는 결과영향 및 전반적인 위험지수인 개인적 위험 및 사회적 위험을 예측 제시하고자 하였다.

1.3 액체 염소 저장탱크 시스템

Fig. 2는 본 연구의 대상설비인 액체 염소 저장탱크 시스템의 배관도표를 나타낸 것이다. 공급탱크는 계량눈금(weigh scale)위에 장착되며 가압질소를 사용하여 액체 염소가 운반용 tank car(5 ton)에 전달된다. 액체필(liquid fill) 및 증기회수라인은 연결부가 홈이 파이고 짧은 구간의 콘 스테인레스 강 호스가 있는 tank car에 연결된다. 2개의 원격 작동식 비상 차단 벨브의 위치는 그림과 같으며 저장탱크에 비상 벤트가 있다. 염소공급탱크와 플렌트 질소 시스템 사이의 역 흐름은 체크 벨브에 의해 방지된다.

1.4 사전 예비 분석

1.4.1 화재폭발지수를 이용한 개략적 공정 위험성 평가

화재폭발위험지수의 주 대상으로는 화학공정에 있어서 가연성(Nf), 반응성(Nr) 또는 독성(Nh) 물질을 저장취급하는 곳에 있어서 포괄적인 위험성의 정도를 평가하기 위해 개발된 것으로, 본 연구에서는 사전 예비 분석의 첫 번째 도구인 Fig. 3의 화재폭발위험지수(Fire & Explosion Index)를 적용함으로서 포괄적인 위험의

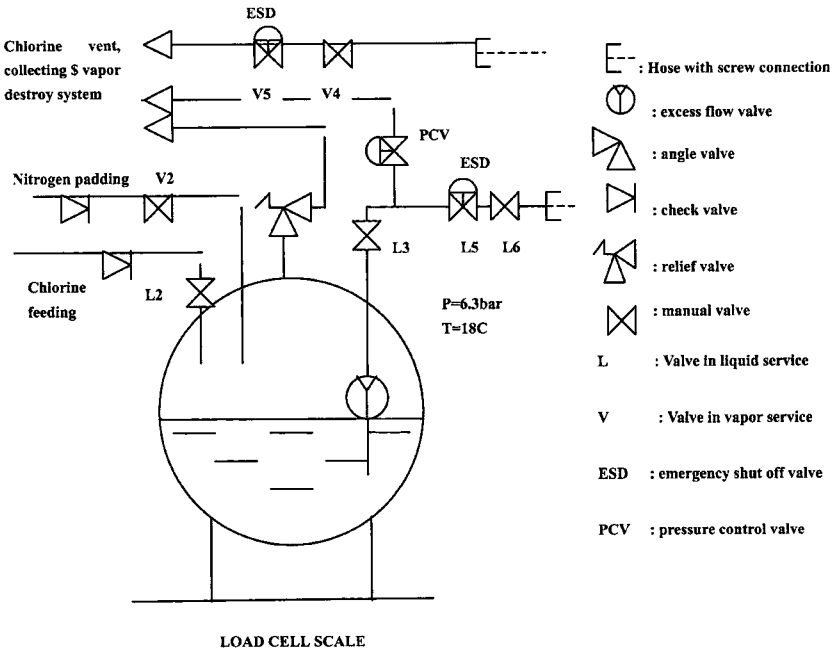

Fig. 2. Diagram of liquid chlorine batch storage tank system.

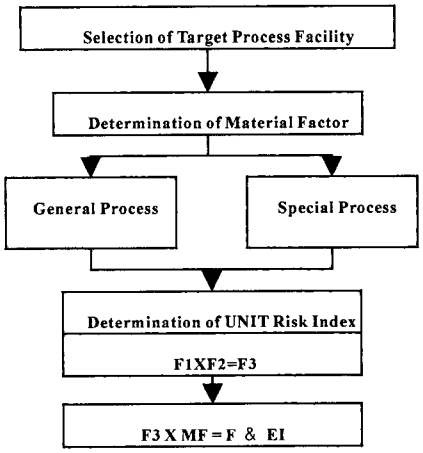

Fig. 3. Flow chart of fire and explosion index calculation.

정도를 검토하였다.

1.4.2 조업과 위험도 분석을 통한 평가

Screen 단계의 두 번째 도구인 HAZOP Review (Table 2)를 통해 가장 위험한 사고시나리오 3가지를 도출하였다(Table 3).

Table 3에서 열거된 사고는 역사적 자료와 공학적 판단을 기준으로 사고의 발생 시 누출크기 및 누출기간을 설정하였다.

Table 1. Risk assessment by fire and explosion index

F1 : 일반공정		F2 : 특수공정	
내 용	벌점	내 용	벌점
기본계수	1.0	기본계수	1.0
A,B. 발열 및 흡열반응 없음	-	A. 독성물질 : 0.2 X Nh(4)NFPA704적용	0.8
C. 물질 취급 및 이송 : line 연결물질을 매뉴얼로 첨가하거나 창고내 가연성물질의 저장 및 야적물이 없음	-	B. 진공 : 절대 압력이 500 mmHg일 때만 적용하므로 미적용	-
D. 실내에 있는 공정 : 밀폐 또는 실내 단위공정이 없음	-	C. 인화점 범위내(근처)운전 운반기구인 Tank Car사용.	0.30
E. 접근로 : 접근로가 2개이상 확보되어 있으나 도로에서 접근할 수 없는 경우에 해당.	0.35	D. 분진 : 이송, 혼합, 제분등과 관련된 분진폭발위험 없으므로 미적용	-
F. 배출 및 유출통제 : 방류둑은 설치되어 있으나 방류둑 내의 모든 설비가 노출	0.50	E. Relief Pressure : 가연성물질을 취급하는 공정과 운전조건이 대기압 이상인 경우가 아니므로 미적용	-
.....	...	.....	...
종합벌점	1.85	종합벌점	3.5
단위 위험지수결정(F3)		F3 = F1×F2	6.48
화재폭발지수		F3 X MF	90.7

Table 2. HAZOP Review Results for Chlorine Batch Storage Tank

Guide Word	Deviation	Possible Causes	Consequence	Action Required
1. 없음	흐름	A. 수동벨브차단 B. ESD벨브차단 C. 파이프 막힘	A-D 운전지연	A-D 흐름이 없는 모든 사례를 안전하게 교정할 수 있는 운전관련 지시사항 확인
2. 높음	흐름	A. 플렌지 누출	A. 독성누출	A.1. 플렌지 연결부 최소화 A.2. 개스킷 사양의 적합성 점검 A.3. ESD 작동지침 활용 용이 위치 및 2작동 고려 A.4. Breathing apparatus의 위치 점검
		B. 벨브누출	B. 독성위험	B. 플렌지 누출과 유사함.
		C. 충격으로 파이프 누출	C. 독성위험	C. 염소 라인 주변의 활동을 최소로 줄임
		D. 호스누출	D. 독성위험	D. 호스에 대한 예방 보수 프로그램 개발
3. 높음	레벨	A. 계량눈금 오류	A. 염소기 relief valve를 통과-독성위험	A. 기존의 설계 및 계량눈금 시스템이 적절한 것으로 간주
4. 높음	온도	A. 인근으로부터화재 (1) 가연성 물질을 취급하는 운반차량 (2) 가연성 물질이 있는 상승된 배관	A.1. relief valve 릴리프로 많은 증기 유출 통과 A.2. 쉘(shall)고장 비상재해성 파열-독성위험	A. 위험분석이 필요. 풀화재를 진압하는데 대략 60분이 소요되는 소화 시설물이 적합. 화재 이전의 재해성 파열의 제어가 불가능.
5. 높음	압력	A. 질소공급 과압	A. 릴리프벨브 리프트 및 비상벨트 독성위험.	A. 필요한 조치가 없음. 비상벨트에 대한 질소공급의 압력제어장치와 PCV가 적합함.
6. 기타	부식	A. 탱크나 파이프 이음관의 내부부식	A. 증기 액체누출. 독성위험	A. 정기내부검사로 초기부식을 감지해야 함.

Table 3. Accident scenarios select by HAZOP review

사고 번호	내 용
소규모 액체누출(12 mm Hole), 누출시간=10 min	
1	밸브누출(5밸브, 3 호스누출, 3 액체 연결관 충격고장)
소규모 증기누출(12 mm), 누출시간=10 min	
2	밸브누출(6 밸브, 3호스누출, 2 증기 연결관의 충격고장, 2 릴리프 밸브 누출)
대규모 증기누출, 누출시간 = 60 min[화재 진압(Fire suppression)) 수단으로 염소 탱크를 냉각(cooling) 시키고 배출을 멈추는데 예상되는 시간]	
3	외부 화재로 릴리프 밸브가 열림.

2. 본 론

2.1 배출속도 계산

HAZOP Review[3]를 통한 Screening 단계에서 도출한 3가지 대표적인 사고시나리오에 대해 서로 다른 각각의 배출속도를 계산하였고, 본 연구에서의 누출은 파이프 길이와 기하학적 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다.

Table 4에서의 사고시나리오 3의 외부화재에 직면한 압력용기 안에서 생성된 증기는 NFPA 58공식으로 예측할 수 있다. 화재 입열은 $Q_{in} = 34{,}500FA^{0.82}$로 나타내며 화재 입열을 계산하기 위해서는 변환인자 $Q_{in} = 34{,}500FA^{0.82}[2.93\times10^4(kJ/s)/(Btu/hr)]$를 사용한다.

2.2 염소 독성계산

2.2.1 염소노출에 대한 LC_{50} 계산

염소 증기에 노출 시 사망을 예측하기 위한 확산분석(Dispersion Analysis)[4]을 수행하기 위해서는, 즉, 치명적인 영향을 예측하기 위해서는 Withers와 Lees (1985)의 확률 분석 방정식인 Pobit Function[5]을 사용하였다. 본 연구에서 Table 5에서와 같이 가정된 염소의 LC_{50}(노출의 50%에 대한 치명적인 농도 : Pr=5)의 경계는 염소의 LC_{50}의 운 내에 있는 모든 사람은 죽으며 그 경계밖에 있는 모든 사람이 살아남을 것이라고 가정한다. 즉, 이 가정은 LC_{50} 경계내의 생존자가 이

Table 4. Applied equations to calculate the release velocity in each scenario

사고번호	사고형태	이용 방정식	배출속도(kg/s)	누출량(kg)
1	액체누출 (10 min)	$G_L = C_d A\left(\frac{2(P-P_a)}{\rho}+2gh\right)^{1/2}$ $F_V = C_p\frac{(T-T_b)}{h_{fg}}$	1.9 0.17 (발화계수)	752 (대략 1톤의 액체 pool 형성!)
2	증기누출 (10 min)	$P_{crit} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \left(\frac{2.32}{2}\right)^{(1.32/0.32)} = 1.84$ $G_V = C_d\frac{A\rho}{a_0}\varphi,\ \varphi = \gamma\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$ $G_V = C_d A_p = \left[\frac{\gamma M}{RT}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}\right]^{-0.5}$	0.26	-
3	릴리프밸브배출 (60 min)	(NFPA 58) $Q_{in} = 34{,}500FA^{0.82}$ $Q_{in} = 34{,}500FA^{0.82}[2.93\times10^4(kJ/s)/(Btu/hr)]$ $G_{rv} = Q_{in}/h_{fg}$	2,4	-

Table 5. Estimated LC_{50} for the accident types

$P_r = -8.29 + 0.92\ln C^2t$			
사고번호	노출시간	사고형태	LC_{50}
1	10(min)	액체누출	433 ppm
2	10(min)	증기누출	433 ppm
3	60(min)	릴리프 밸브 배출	175 ppm

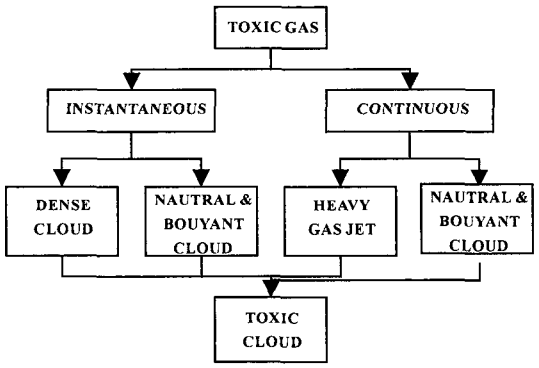

Fig. 4. Typical model sequence for toxic gas release.

경계 밖의 사망자 수와 균형을 이룬다는 것이다. 이 경우, 사고 1과 2는 10분의 기간을 가지며 사고 3은 60분간 지속된다고 가정하고, t=10분 및 60분에 대한

Table 6. Used equations to chlorine dispersion calculation through Pasquill-Gifford Guassian vapor model

Pasquill-Gifford Guassian 증기 모델	
Pasquill-Gifford 방정식	$C = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left(-\frac{y^2}{2}\sigma_y^2\right)\left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)+\exp\left(\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right]$
단순화	$C = \frac{G}{\pi\sigma_y\sigma_z u}$
변환인자 (ppm)	$C_{ppm} = \frac{G}{\pi\sigma_y\sigma_z u}\frac{RT}{MP}\times10^6$
확산변수	$\sigma_y = 0.16(1+0.004x)^{-0.5}$ $\sigma_y = 0.14(1+0.003x)^{-0.5}$

LC_{50}에 대한 염소농도는 Pr를(LC_{50})조건으로 설정하고 C에 대한 방정식을 풀면 된다.

2.2.2 수치적 모델식을 이용한 확산계산

이 사례연구에서 염소배출에 대한 확산계산은 Fig. 4와 같이 Pasquill-Gifford Guassian[7,12] 증 기운모델을 통해 구할 수 있다.

Table 6은 중앙선 농도 ppm을 누출원(x)으로 부터의

거리의 함수로 계산하기 위해 변환인자를 사용하여 단순화시킨 일반식이다. 또한, Table 7은 배출속도인 G=1.9, 0.26, 2.4(kg/s) 및 절대온도 T=293K, 풍속 u=5 m/s, 분자량 M=71 kg/kg-mol, 압력 P=1 atm을 Table 7의 단순화된 일반 식에 대입하여 계산된 결과이다. 즉, 각 사고에서 염소농도가 LC_{50}(사고 1과 2의 경우 430 ppm, 사고 3의 경우 175 ppm)에 도달하는 거리가 강조되고, 염소에 대한 기초입력자료를 통해 염소농도가 LC_{50}에 도착하는 거리, 즉, 누출지점에서 떨어진 거리를 결정할 수 있다.

Table 8는 각각의 시나리오에 대해 치사백분율에 대한 Probit function값 및 그에 따른 거리 및 농도를 계산한 결과이다.

2.2.3 범용적인 도구 PHAST와 ALOHA를 이용한 확산계산

유해독성 화학물질의 누출사고의 가장 큰 특징은 일반 환경대기의 비중보다 더 무거운 증기 운을 형성한다는 것이다. 일반 대기오염물질의 모사에서는 바람장의 상태에 의존하는 수동적인 대기확산의 움직임을 나타내는데 반하여, 누출된 유해화학물질은 많은 경우 상당 시간 동안 주위의 공기보다 무거운 상태에서 대기 중 움직임을 보이고, 충분히 공기와 혼합이 이루어진 후 수동적인 대기확산을 나타낸다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 누출된 유해화학물질의 대기 중 움직임을 수치적으로 모사하기 위해서, 대기 중 이동 및 확산을 모사하는 범용적인 도구인 PHAST6.0 및 ALOHA를 사용하여, 가장 발생확률이 높은 최악의 경우의 시나리오를 설정, 그 결과를 분석 함으로써 유해독성물질의 누출사고 발생시 그 특성들을 도출하고자 하였다.

Table 9는 USEPA의 유해독성가스 누출에 따른 대기 중 유해독성가스별 독성농도 기준(한계농도) 및

Table 7. Chlorine concentrations around its source point under the downwind condition for the proposed 3 scenarios

NO.1 액체누출 (1.9 kg/s, 10 min)			NO.2 증기누출 (0.26 kg/s, 10 min)			NO.3 릴리프벨브배출 (2.4 kg/s, 60 min)		
X(m)	C(kg/m^3)	C(ppm)	X(m)	C(kg/m^3)	C(ppm)	X(m)	C(kg/m^3)	C(ppm)
50	0.284615	96312.19	50	0.038947	13179.56	100	0.012488	4225.738
100	0.009886	3345.376	100	0.001353	457.7882	150	0.004054	1371.838
110	0.00736	2490.641	**102**	**0.00127**	**429.7278**	200	0.00211	713.9287
120	0.005728	1938.48	150	0.000439	148.6158	250	0.001332	450.7397
130	0.00461	1559.984	200	0.000229	77.34227	255	0.001281	433.3339
150	0.003209	1086.039	250	0.000144	48.83014	260	0.001232	417.0001
200	0.00167	565.1935	255	0.000139	46.9445	265	0.001187	401.6487
210	0.001506	509.6839	260	0.000133	45.17501	270	0.001144	387.1993
220	0.001367	462.5718	265	0.000129	43.51194	271	0.001136	384.4112
225	0.001305	441.6262	270	0.000124	41.94659	272	0.001128	381.6558
228	**0.00127**	**429.7927**	271	0.000123	41.64455	275	0.001104	373.58
230	0.001248	422.189	272	0.000122	41.34604	280	0.001066	360.7258
240	0.001144	387.2691	275	0.00012	40.47117	285	0.00103	348.5782
250	0.001054	356.8356	280	0.000115	39.07863	290	0.000996	337.0844
255	0.001014	343.056	285	0.000112	37.76264	295	0.000964	326.1965
260	0.000976	330.1251	290	0.000108	36.51748	300	0.000933	315.8709
265	0.00094	317.9719	295	0.000104	35.33795	350	0.000698	236.3143
270	0.000906	306.5328	300	0.000101	34.21934	400	0.000546	184.9161
275	0.000874	295.7508	350	7.57E-5	25.60071	**410**	**0.000523**	**176.8112**
280	0.000844	285.5746	400	5.92E-5	20.03258	450	0.000442	149.5231
285	0.000815	275.9578	450	4.79E-5	16.19833	500	0.000366	123.971

Table 8. Chlorine concentrations and distance to the each probit value for the proposed 3 scenarios

구 분		NO.1 액체누출 (1.9 kg/s, 10 min)		NO.2 증기누출 (0.26 kg/s, 10 min)		NO.3 릴리프밸브배출 (2.4 kg/s, 60 min)	
%	Pr	X(m)	C(ppm)	X(m)	C(ppm)	X(m)	C(ppm)
10	3.72	635	64.7	218	64.7	900	44.5
20	4.16	493	100.54	178	100.54	700	69
30	4.48	410	238.4	155	238.4	580	95.1
40	4.75	350	381.4	138	381.4	493	124.6
50	5.0	228	429.7	102	429.7	410	176.8
60	5.25	213	487.3	115	487.3	327	269.1
70	5.52	207	591.7	105	591.7	275	370.6
80	5.84	198	639.4	95	639.4	222	575
90	6.78	167	837.6	84	837.6	139	1644

Table 9. Comparison of toxicity and threshold quantities for the typically regulated toxic substances to prevent the release

Chemical	Toxicity Threshold Concentration(ppm)					Threshold Quantity lbs (kg)
	TLV-TWA	TLV-STEL (15 min)	OSHA/PEL	IDLH (30 min)	ERPG-3 (60 min)	
Ammonia	25	35	25	500	1,000	10,000(4,540)
Chlorine	**0.5**	**1**	**0.5**	**30**	**20**	**2,500(1,135)**
Hydrogen Chloride	5	-	5	100	100	5,000(2,270)
.....						
Hydrogen Cyanide	10	5	10	50	-	2,500(1,135)
Sulfur Dioxide	2	5	2	100	15	5,000(2,270)

Threshold [6]: 역치, 사람이 느낄 수 있는 최소한의 자극.
Ref : USEPA, CAAA of 1990, section 112(r)68130-the federal register 04/15/96.

Table 10. Dispersion parameters and initial values

배출속도 G(kg/s)			온도 T(K)	풍속U(m/s)/ 대기안정도	분자량 M (kg/kg-mol)	저장상태 압력 P(bar)
No.1	No.2	No.3				
1.9	0.26	2.4	293	3, 5/D	71	6.3
물질			염소	노출시간(IDLH)		30 min(1800s)
누출직경			10 m	방출지점의 직경		12 mm
저장량			1,000 kg	운 량		50%
누출 높이			13 m	상대습도		70%
탱크 사이즈			(D) 8.5 m×(H) 15.5 m, Vertical Cylindrical Tank			
기 준			IDLH	Immediately Dangerous to Life and Health		

Threshold 양을 요약하여 정리한 것이다.

일반적으로 대기확산모델의 입력자료는 배출원 관련 자료, 기상관련자료 그리고 수용자 관련자료의 세 가지로 구분된다. 이 중 본 연구에서는 수용자 관련자료로서 30분 이상 노출시 치명적인 농도 값인 IDLH의 최대 풍하측 거리에 대하여 설정된 한계값으로 한정하였다. 그리고 배출원자료, 즉 누출에 대한 설정은 Table 10과 같다.

Fig. 5와 6은 PHAST을 운용한 결과의 일부를 수록한 것으로 Fig. 5는 PHAST를 이용하여 나타낸 확률함수(Probit function)에 상응하는 거리를 나타낸 것이고, Fig. 6은 염소가스 누출시 거리에 따른 증기운의 높이를 형상화 한 것이다. 누출점으로 부터 증기운의 높이는 결과 영향 즉 확산에 크게 영향을 주지 않음을 보여주고 있으며, 또한 Fig. 6에서 누출 후 주변공기보다 무거운 상태를 나타내는 경우(증기운의 높이가 낮음) 그렇지 않은 경우보다(증기운의 높이가 높음) 확산속도 및 범위가 작음을 나타내고 있다.

Fig. 7과 8은 ALOHA를 운용한 결과의 일부를 나타낸 것으로 대기안정도를 D로 고정시키고 액체와 기체

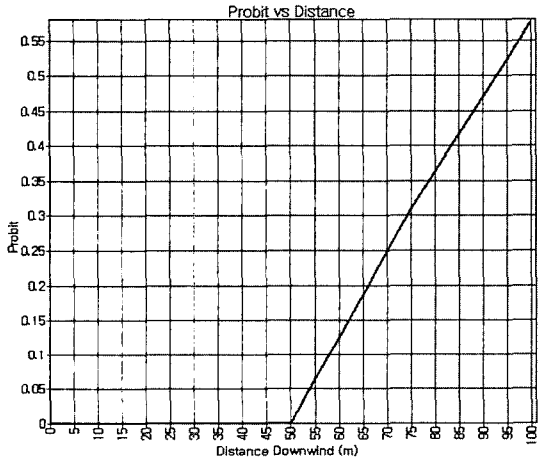

Fig. 5. Probit vs distance calculated by PHAST.

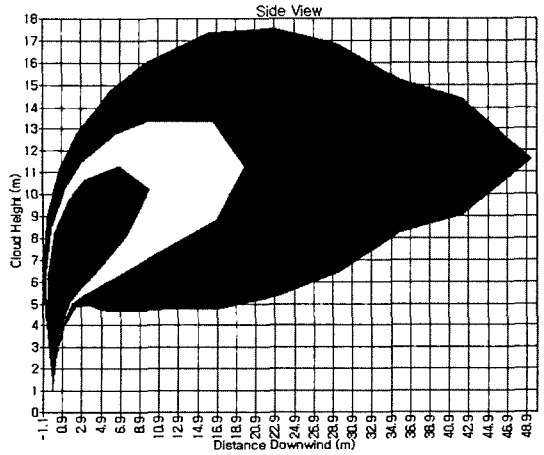

Fig. 6. Side view to distance and downwind cloud height calculated by PHAST.

상태의 염소 누출 시 풍속의 변화(3, 5 m/s)에 따른 확산범위를 나타낸 것이다. 여기서 실선은 풍속이 3 m/s이고 점선은 풍속이 5 m/s로서 풍속이 빠를수록 누출물질의 확산이 잘 일어나며, 피해범위가 작아짐을 볼 수 있다. 또한 확산을 주도하는 영향요소로는 기상조건으로서 대기 안정도 보다는 풍향 및 풍속이 가장 영향을 미침을 알 수 있다. Table 11은 기상관련 시나리

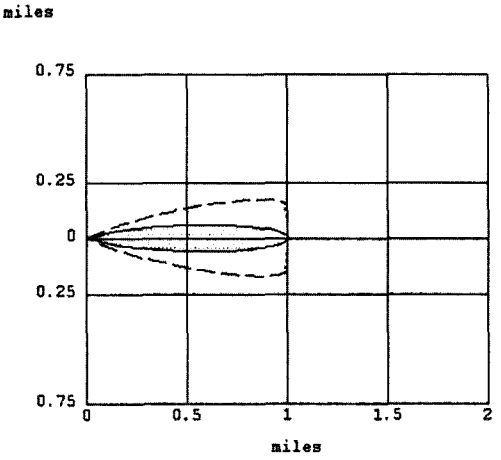

Fig. 7. Foot print for liquid chlorine Phase (3, 5 m/s, D, ALOHA).

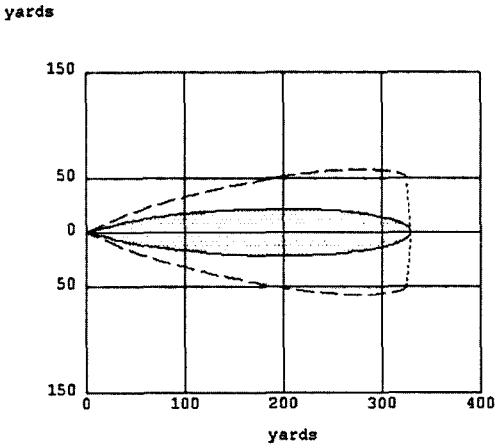

Fig. 8. Foot print for vapor chlorine Phase (3, 5 m/s, D, ALOHA).

Table 11. Ambient condition scenarios

온도	12.5	상대습도	65%
풍속	2.35 m/ses	운량	50%

오로서 기상 인자 값을 설정하였으며, 이 값들은 서울 지역에 대한 1991년부터 2000년까지의 10년 동안의 평균 값이다.

일반적으로, 대기확산모델에서는 대기 안정도를 추정하기 위한 방법으로 이 또한 Pasquill-Gifford의 방법을 사용하는데, 이 방법은 풍속과 운량을 가지고 주간과 야간에 대하여 대기의 안정도를 6개 등급으로 나누는 방법이다(A,B,C,D,E,F)[12] 본 연구에서는 풍속을

Table 12. Index for ground roughness of representative regions

A surface of ice	A runway	Open country	Tall tree	Industrial area
0.001	0.1	3	9	100

Table 13. IDLH ranges from the results of ALOHA(unit : km)

풍속 (m/s)	운 량(주간)		
	100%	50%	0%
1.35	3.0	2.2	1.8
2.35	2.7	1.7	1.7
3.35	2.3	1.4	1.4
4.35	2.0	1.6	1.6
5.35	1.8	1.4	1.4
6.35	1.7	1.7	1.7
7.35	1.5	1.5	1.5

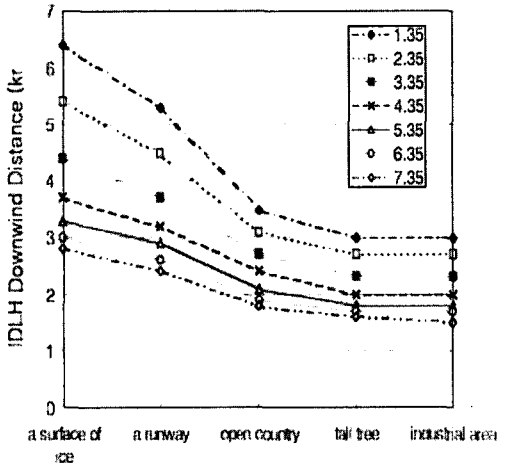

Fig. 9. Variations of damage range affected by the ground roughness and the velocity of wind when the atmospheric stability is the degree of D.

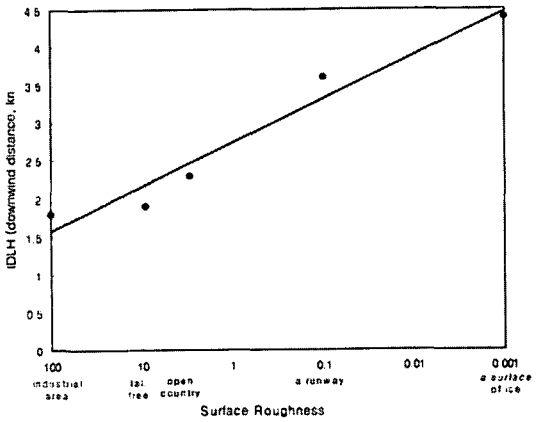

Fig. 10. Variations of damage range affected by the ground when the atmospheric stability is the degree of A (semi-log coordinates for roughness.)

1.35, 2.35, 3.35, 4.35, 5.35, 6.35 그리고 7.35 m/s로 변화시키며 ALOHA의 결과를 분석하였으며, 운량은 0, 50, 100%로 그 값을 변화시켜 보았으며, 또한, 지표면과 가까운 기층의 난류형성에 많은 영향을 주는 지면거칠기는 Table 12와 같이 설정하여 각 값들을 변화시키며 결과를 비교하였다. 이들 변수들을 모든 경우의 수에 대하여 dense gas 모델인 ALOHA를 운영한 결과 중 일부를 나타낸 것이 Table 13과 Fig. 9이다.

Table 13에서 알 수 있듯이 풍속이 빠를수록 누출물질의 확산이 잘 일어나 IDLH로 대표되는 피해범위가 작아진다. 또한 Fig. 9와 10에서 지면 거칠기가 클수록 즉 지면의 마찰력이 클수록 풍속의 피해범위의 추정에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다. 또한 지면 거칠기가 적을수록 풍하 측의 피해범위는 지수적으로 증가함을 볼 수 있다.

3. 사고빈도 예측

도출된 대표적인 각 사고시나리오의 발생가능성은 시설물 설계에 있어서 역사적 기록과 시설물의 유사한 역사적 통계학을 통해 사고빈도를 도출하였다. 이것은 사고시나리오 1과 2에 해당 되고, 설계의 역사적 자료와 다르거나 관련된 역사자료가 없으면 Fig. 14와 같이 결함수목방법(fault Tree Analysis)[8]을 사용하여 고장빈도를 예측할 수 있는데, 이 방법은 사고 3에 적용 된다. Table 10에서 12 mm 구멍으로 표시된 누출의 빈도 예상수치는 Rijnmond[9-11](1982)에서 도출된 것이다.

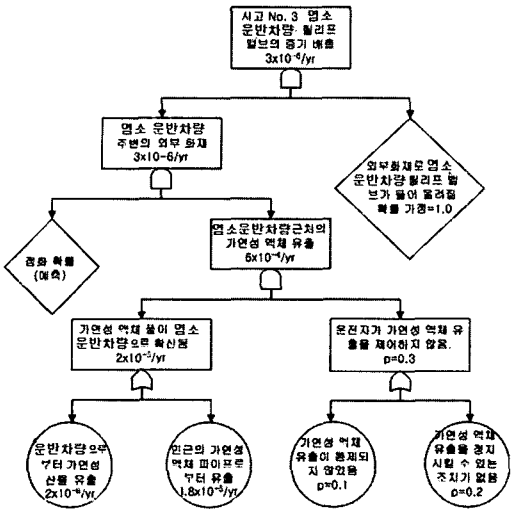

Fig. 11. Fault tree analysis for outside fire around of the batch chlorine storage tank.

4. 위험평가

4.1 개인적 위험

본 논문에서는 개인적 위험 계산을 위해 단순한 접근방법을 고려 하였고, 개인적 위험 예상수치는 3가지 대표적인 사고시나리오에 대해서 그 발생가능성, 영향권 및 풍향분포 등을 통해 염소저장탱크시설물 주변에서 계산하였으나 대피나 피난 같은 완화인자는 고려하지 않았다.

Table 15는 최종적인 개인적 위험 빈도이다. 각각의 시나리오에 대해 개인적 위험성 계산 및 위험등고선(risk counter) 그리기 위해서는, 첫 번째로 영향권이 가장 큰 사고결과를 선택하는 것이고, 이 경우는 사고 3의 릴리프밸브 누출(410 m)이 해당되며, 다음은 두 번째로 영향권이 긴 사고 1는 액체누출(228 m), 마지막으로 영향권이 가장 작은 사고 2는 증기누출(102 m)를 Table 15에 수록된 방향인자를 제공하는 방정식인 $f_{id} = f_i(\theta_i, 360)$와 $IRC_i = f_i(\text{or } f_{id}) + IRC_{i-1}$를 사용하여 방향인자에 따라 사고 빈도를 감소시킨 후 개인적 위험 등고선을 그린 것이 Fig. 12이다. Table 15와 Fig. 12에 나타난 결과인 빈도 및 위험등고선을 살펴보면, 사고 2(증기누출)가 인구 지역에 거의 도달하지만, 사고 1과 3은 충분히 도달한다는 것을 알 수 있다. 릴리프 밸브 배출인 사고 3은 인구지역의 주요부분에 영향을 미치지만, 나머지 사고보다 빈도가 더 낮음을 알 수 있다.

Table 14. Estimated failure frequency for chlorine storage tank components and predictive values of accident frequencies for 3 scenarios

고장형태	고장빈도	$F_i = \sum_j^n f$			
밸브누출	1×10^{-5}	사고번호	사고형태	구성품	예상빈도, yr^{-1}
호스누출	5×10^{-4}	1	액체누출	밸브-5, 3-호스, 파이프충돌 고장-3	3.8×10^{-4} (228 m)
파이프 충돌 고장	1×10^{-5}	2	증기누출	밸브-6, 호스-3, 파이프충돌고장-2, 릴리프밸브배출-1	5.8×10^{-4} (102 m)
릴리프 벨브 배출 (정상운전 압력)	1×10^{-4}	3	릴리프 벨브 배출	외부화재로 대규모 증기누출	3.0×10^{-6} (410 m)

Table 15. Summary of representative scenarios with its associated effect zones and frequencies

방향인자 제공 방정식 : $f_{id} = f_i(\theta_i, 360)$, $IRC_i = f_i(\text{or } f_{id}) + IRC_{i-1}$								
사고번호	사고형태	염소누출 속도 (kg/s)	누출시간 (min)	LC_{50} (ppm)	영향지역		발생빈도 yr^{-1}	개인적위험 yr^{-1}
					LC_{50}까지의 거리	증기운 아크 (deg)		
1	액체누출	1.9	10	430	228 m	15	3.8×10^{-4}	1.3×10^{-7}
2	증기누출	0.26	10	430	102 m	15	5.6×10^{-4}	1.6×10^{-5}
3	릴리프벨브배출	2.4	60	175	410 m	15	3.0×10^{-6}	1.7×10^{-5}

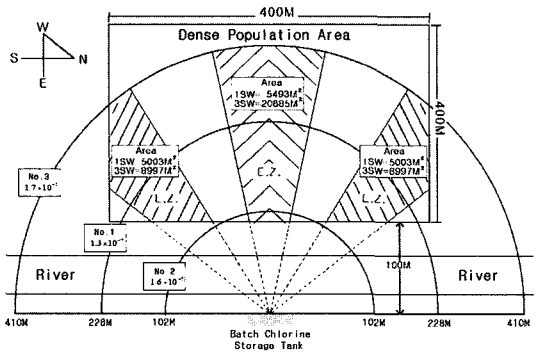

Fig. 12. *Individual risk contours around a chlorine storage tank.*

4.2 사회적 위험

사회적 위험계산은 특정위치의 사망가능성을 예측하는 것이 아니라 각 사고 결과 사례에 의해 사망하는 사람의 수를 예측하는 것이다(F-N곡선).

본 연구에서는 한 가지 기후사례(D 대기안정도 및 5 m/s 풍속)를 대표적으로 고려하였고 풍향은 다르게 가정하였다.

Table 16. List of scenario outcome cases amusing an 8 point wind rose

No. of Accident	Frequency (yr^{-1})	Accident Result lists			Note
		No.	Wind Direction Probability	Frequency (yr^{-1})	
1	3.8×10^{-4}	1SW	0.125	4.8×10^{-5}	EA
		1W	0.125	4.8×10^{-5}	EA
		1NW	0.125	4.8×10^{-5}	EA
		1N	0.125	4.8×10^{-5}	NEA
		1NE	0.125	4.8×10^{-5}	NEA
		1E	0.125	4.8×10^{-5}	NEA
		1SE	0.125	4.8×10^{-5}	NEA
		1S	0.125	4.8×10^{-5}	NEA
3	3.0×10^{-6}	3Sw	0.125	3.8×10^{-7}	EA
		3W	0.125	3.8×10^{-7}	EA
		3NW	0.125	3.8×10^{-7}	EA
		3N	0.125	3.8×10^{-7}	NEA
		3NE	0.125	3.8×10^{-7}	NEA
		3E	0.125	3.8×10^{-7}	NEA
		3SE	0.125	3.8×10^{-7}	NEA
		3S	0.125	3.8×10^{-7}	NEA

EA : Effect Zone in Population Area, NEA : Non-Effect Zone in Population Area.

Table 17. Estimated casualty calculated from the proposed scenarios

$Area = \pi r^2 A\frac{\theta}{360} = M^2$					
사고결과목록				최종빈도 (F, yr^{-1})	예상 사망자 수
풍향	빈도 (F, yr^{-1})	영향면적 (m^2)	풍향확률		
1SW	3.8×10^{-4}	5,003	0.125	7.3×10^{-5}	12
1W	3.8×10^{-4}	5,493	0.125	7.3×10^{-5}	14
1NW	3.8×10^{-4}	5,003	0.125	7.3×10^{-5}	12
3SW	3.0×10^{-6}	8,997	0.125	3.8×10^{-7}	23
3W	3.0×10^{-6}	20,685	0.125	3.8×10^{-7}	52
3NW	3.0×10^{-6}	8,997	0.125	3.8×10^{-7}	23

Table 16은 각각의 시나리오에 대해 8 point 풍배도에 따라 Fig. 12을 참조하여 영향 지역과 비 영향 지역을 구분하고, 발생 빈도를 계산한 결과이다.

Table 17는 Table 16의 영향 받는 지역의 풍향에 따른 발생빈도에 대해 $\theta = 15°$로, 인구밀도를 25명/10,000 m^2로 가정하고 계산한 그 지역의 예상 사망자

Table 18. Societal risk calculation and F-N curve data

$F_N = N_i \geq N$		
예상사망자 수	N이상의 사망자에 대한 누적빈도	관련 사고 결과 목록
N>52	0	-
23<N≤52	3.8×10^{-7}	3W
14<N≤23	1.1×10^{-6}	3W, 3SW, 3NW
N=14	7.3×10^{-5}	3W, 3SW, 3NW, 1W
N≤12	2.2×10^{-4}	3W, 3SW, 3NW, 1W, 1SW, 1NW

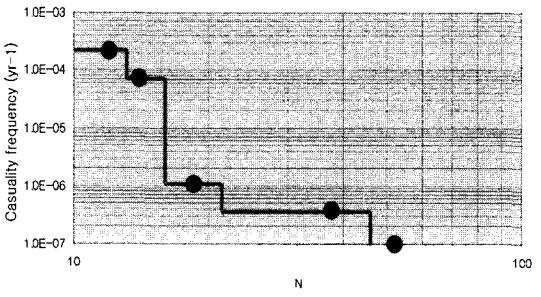

Fig. 13. Societal risk F-N curve for the batch chlorine storage tank.

Table 19. The results obtained from the dispersion model by using PHAST and ALOHA

구 분	내 용
누출시간	영향 지역의 확산범위가 증대
확산 영향요소	기상조건으로서 대기 안정도 보다는 풍향 및 풍속이 가장 영향을 미침, 이에 따라 계절적으로는 봄과 여름이 가장 주목(Fig. 7, 8).
풍 속	풍속이 빠를수록 누출물질의 확산이 잘 일어나며, 피해범위가 작아짐(Fig. 7, 8).
지형 완곡도	지면 거칠기 즉 마찰력이 클수록 풍속이 피해범위에 미치는 영향이 작고, 지면 거칠기가 적을수록 풍하 측의 피해범위는 지수적으로 증가함(Fig. 9, 10).
누출 높이	결과 영향 즉 확산에 크게 영향을 주지 않음을 보여주고 있으며, 누출 후 주변공기보다 무거운 상태를 나타내는 경우 그렇지 않은 경우보다 확산속도 및 범위가 작음을 나타냄(Fig. 6).
공통점	ALOHA모델의 결과값은 약간의 차이를 나타내고 있으나, 각 시나리오 별 경향은 상당히 일치 함(Fig. 7, 8).
비 고	확산모델링에 의한 예측농도를 기준치(IDLH, ERPG-3)와 비교 함으로서 유해독성가스의 독성에 대한 완충거리를 결정할 수 있고, 유해 독성가스 누출에 대한 지역사회 비상대응체계 수립 시 적절하게 활용할 수 있음.

수이다.

Table 18은 Table 17를 기초로 하여 N이상의 사람에게 영향을 미치는 모든 사고 결과 사례의 빈도를 구한 것이고, Fig. 13는 Table 18의 N 이상의 사망자수를 야기하는 사고 결과 사례에 대한 누적 빈도 FN을 대수(logarithm) F-N 곡선으로 그린 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 화학공정 설비에 있어서 염소저장시설물에 대한 위험성을 예측하기 위해서, 첫 번째 Screen 단계에서 Fire & Explosion Index를 적용한 결과 포괄적인 위험의 정도는 90.7로서 약간 위험한 정도로 나타났으며, 병행 수행된 HAZOP review를 통해 사고의 대표 시나리오인 액체누출, 증기누출, 릴리프벨브 누출의 3가지를 도출하였고, 이를 기반으로 하여 개인적 위험 및 사회적 위험 모두를 예측하고 제시하였다. Table 15와 Fig. 12에 나타난 결과인 빈도 및 위험등고선에서 개인적 위험성을 살펴보면 사고 2(증기누출)가 인구 지역에 거의 도달하지만, 사고 1과 3은 충분히 도달한다는 것을 알 수 있고, 릴리프 밸브 배출인 사고 3은 인구지역의 주요부분에 영향을 미치지만, 나머지 사고보다 빈도가 더 낮음을 알 수 있고, 사회적 위험은 Table 16, 17, 18을 통하여 Fig. 13의 Societal risk F-N curve 작성하였다.

또한 유해독성물질의 누출사고 발생시 피해지역을 추정하는 이론적 수치모델과 함께 누출관련 대기확산 모델(PHAST6.0/ALOHA)을 운용한 결과, Dense Gas Model에 대한 입력 자료 값에 따라 미치는 결과영향이 다소 차이가 있음을 발견하였으나 Fig. 7과 8에서와 같이 각 시나리오 별 경향은 상당히 일치함을 나타내고 있다.

Table 19은 범용적인 dense gas 모델인 PHAST와 ALOHA를 실행하여 얻은 확산에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 내용을 요약한 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 향후 유해독성가스의 누출에 따른 결과 영향을 가장 적절하게 평가할 수 있는 수치적 이론 및 software model들을 검토하여 누출에 대한 결과 모델링(Consequence Model)을 개발 함으로써, 인체의 건강, 환경, 안전에 미치는 영향을 평가하기 위한 정량적인 유해위험성 평가기술에 대한 보다 정확한 가이드 라인을 제공하여야 할 것이다. 이러한 것들은 첫째, 기업이나 기타 사회적으로 포괄되는 위험목표와 비교할 수 있고, 둘째, 사고의 결과나 발생의 빈도를 감소시킬 수 있는 위험감소 수단으로서, 마지막으로 유해 시설물의 위치 같은 보다 근본적인 설계변수도 모두 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서 각 시설의 옵션에 대한 비용효과가 밝혀지고 위험 감소 수단을 고려하면 합리적인 기준이 보장될 수 있다.

참고문헌

1. NFPA., "Explosion prevention systems", NFPA 69. National fire protection association, quincy, MA(1986).
2. Jaward S. Touma, "Performance evaluation of dense gas dispersion model", journal of applied meteorology, Vol. 34(1995).
3. Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar, "Chemical

process safety: Fundamentals with applications", PRT prentice hall(1990).
4. Manju Mohan, M P. Singh, "Development of dense gas dispersion model for emergency preparedness", Atmospheric environment Vol. 29, No 16(1995).
5. Lees, F. P., "Loss presentation in the process industries", Butterworth London, Boston, Vol. 2, (1980).
6. AIGIH., "TLV"s, threshold limit values for chemical substances in the work environment", American conference of governmental industrial hygienists, Cincinnati, OH(1987).
7. Gifford, F. A., "Atmospheric dispersion models for environmental pollution applications", Proceedings on lectures on air pollution and environmental impact analysis, AMS workshop on meteorology and environmental assessment(1975).
8. Fussell, J. B. and Wesely, W. E., "A new methodology for obtaining cut sets for fault trees", Transactions of the American nuclear society, Vol. 15(1972).
9. Rijnmond Public Authority. A risk analysis of 6 potentially hazardous industrial objects in the Rijnmond area-a pilot study. D. Reidel, Dordrecht, The Netherlands and Boston, MA(1982).
10. "IEEE guide to the collection and representation of electrical, electronic, sensing component, and mechanical equipment reliability data for nuclear power generating stations", IEEE std-500-1984, The institute of electrical and electronics engineers, Inc., Nov.(1993).
11. "Guidelines for process equipment reliability data", center for chemical process Safety(1989).
12. AIChE/CCPS, guidelines for safe storage and handling, of high toxic hazard materials, center for chemical process safety, American institute of chemical engineers(1988).
13. Kenneth Wark, Cecil Warner, "Air pollution 2nd edition", Harper Collins publishers(1981).

Nomenclature

[Table 4]

G_L : 액체 배출 속도(kg/s)
G_{rV} : 가스의 배출 속도(kg/s)
G_V : 증기 배출 속도(kg/s)
h : 액두(*0 m 가정*)
C_d : 배출 계수(액체 사용시 0.61[-])
A : 구멍의 횡단 면적(12 mm의 경우 1.13×10^{-4} m^2)
ρ : 염소의 밀도(1420 kg/m^3)
P : 유입측 압력(6.3×10^5 N/m^2 abs.)
P_a : 대기 압력(1.0×10^5 N/m^2 abs.)
g : 중력으로 인한 가속도(9.8 m/s^2)
F_V : 증기로 발화된 액체의 부분
C_p : T로부터 Tb(0.950 kJ/kg °C)까지의 평균 액체 열용량
T : 초기온도(20°C)
T_b : 최종 온도=대기 비등점(-34°C)
h_{fg} : 증발열(-34°C, 285 kJ/kg)
P_{crit} : 임계 압력비
γ : 열용량비(염소의 경우, 1.32)
M : 분자량(mg/kg-mol) 염소의 경우 71
R : 가스 상수(8310 J/kg-mol K)
T : 유입측 온도(291K)
Q_{in} : 용기 벽을 통과하는 입열(kJ/s)
F : 확산인자(API RP-52에서 절연 탱크의 경우, F=0.3을 사용)

[In Table 7]

C : x, y, z 위치에서의 농도(kg/m^3)
G : 속도(kg/s)
H : 대지 높이(m) 이상의 누출원 높이
σ_x, σ_y, σ_z : 확산 변수(m), 순풍 거리의 함수
u : 풍속(m/s)

[In Table 11]

f_i : 대표적인 사고 i에 포함된 부품 j의 고장 빈도
F_i : 대표적인 사고 i의 전체 빈도

[Table 12]

$f_{i,d}$: 사고결과 사례 i가 균일한 풍향 분포를 가정하는 특정 방향 지점에 영향을 미치는 빈도
f_i : 사교 결과 사례 i의 예상 발생 빈도
θ_i : 사고 결과 사례 i의 영향권으로 둘러싸인 각도
IRC_i : 고려중인 사고 결과 사례에 대한 등고선에서의 개인적 위험값(yr^{-1})
IRC_{i-1}: 다음 위험 등고선에서의 개인적 위험값

[In Table 15]

F_N : N 이상의 사람에게 영향을 미치는 모든 사고 결과 사례의 빈도
F_i : 사고 결과 사례의 i빈도
N_i : 사고 결과 사례 i의 영향을 받는 사람의 수