

액화염소 누출의 위험도 분석 및 위험경감조치에 대한 연구

이주연* · 천영우* · 황용우* · 이익모*

*인하대학교 대학원 환경안전융합전공

A Study on Risk Assessment and Risk Mitigation Measures of Liquefied Chlorine Leak

Ju-Youn Lee* · Young-Woo Chon* · Yong-Woo Hwang* · Ik-Mo Lee*

*Department of Environment & Safety Engineering, INHA University

Abstract

As the chemical industry becomes more advanced, the awareness of chemical accidents is rising, and legal systems for chemical safety management are strengthened. In this study, quantitative risk assessment of liquid chlorine leak was conducted.

Risk assessment was performed in the order of frequency analysis, consequence analysis, and risk calculation. The individual risk was presented in the form of contour lines. The social risk was expressed by the FN curve. The risk of day and night was in an unacceptable area, so it was required to mitigate risk. Therefore in-building, which could trap the pool, was selected as a risk mitigation measure. As a result of the cost benefit analysis, it was concluded that this measure should be reasonably implemented.

Keywords : Seoul Metropolitan Fire & Disaster Headquarters(SMFDH), Golden Time Targeting, SPSS 24

1. 서론

화학물질이 누출되면 화재나 폭발과 같은 사고가 발생할 수 있고, 독성이 있는 물질이라면 치명적인 결과를 초래할 수 있다1). 이러한 화학물질 사고는 인명과 환경에 광범위한 피해를 입힌다. 따라서 사전에 화학물질 누출에 대한 피해를 예측하는 노력이 계속되고 있다.

현재까지 국내와 국외에서 화학물질에 대한 위험성 평가는 다수 진행되었다. 주로 빈도분석 후 피해 영향 범위를 계산하였고, 위험도를 산출하였다. 그러나 도출된 위험에 대해 안전관리 방안을 제시할 뿐 안전조치에 대한 위험감소 효과를 분석한 연구는 적은 실정이다2).

최근 5년간 국내 염소 가스사고 수를 살펴보면 2013

년에 5건, 2014년에 1건으로 총 6건이 발생하였다3). 이는 전체 고압가스 사고 발생 건수 중, 암모니아사고(28.8%)와 산소사고(15.1%) 다음으로 염소사고(8.2%)가 많이 발생되었음을 의미하며, 6건 모두 누출로 인한 사고였다. 또한, 염소는 호흡기를 자극하는 독성가스로서, 흡입 시 두통, 구토, 호흡곤란, 경련, 발작, 혼수 등이 나타날 수 있다.

따라서 본 연구에서는 염소 누출에 대한 정량적 위험성 평가(QRA, Quantative Risk Assessment)를 통해 위험도를 산출하고, 수용될 수 없는 위험에 대해 물질 특성을 고려한 적절한 위험경감조치를 도출하였다. 이후, 선정된 경감조치에 대해 비용편익 분석을 실시하여 본 조치가 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)에 근거하여 합리적으로 이행 가능한지를

†Corresponding Author : Young-Woo Chon, Environment&Safety Engineering, INHA UNIVERSITY, 100, inha-ro, Nam-gu, Incheon, E-mail: ponychon@inha.ac.kr

판단하였다.

2. 이론적 배경

2.1 정량적 위험성 평가

2.1.1 사고 발생 빈도 분석

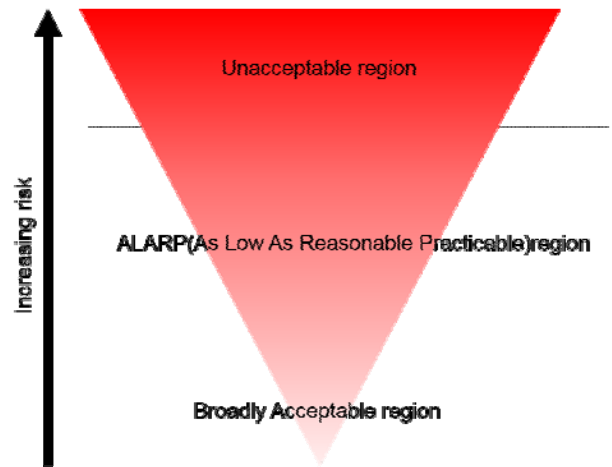
유해·위험요인을 인지한 후, 사고의 빈도를 분석하기 위한 기법으로는 대표적으로 결함수 분석(FTA, Fault Tree Analysis)과 사건수 분석(ETA, Event Tree Analysis) 등이 있다⁴⁾. 빈도는 연간 발생할 확률(Fr./yr)로서 표현된다.

2.1.2 사고 피해 영향 분석

사고피해 영향분석(Consequence analysis)이란 선정된 사고 시나리오의 대해 피해가 어떻게, 어디까지 미칠 것인가를 분석하는 것이다⁴⁾. 이는 누출물질의 상과, 누출량, 누출되는 기간 등을 예측하는 누출원 모델링(Discharge modeling), 영향이 미친 거리와 평균 증기 농도를 계산하는 확산 모델링(Dispersion modeling), 피해의 구체적인 영향을 분석하는 영향 모델링(Effect modeling)으로 구성된다. 독성가스의 누출이 초기 원인 사고의 경우, 독성가스 확산과 독성효과를 분석한다.

2.1.3 위험의 해석

위험은 [Figure 1]에 나타내었듯이 세 가지 수준으로 정의할 수 있다⁵⁾. 가장 위쪽의 영역은 위험을 수용할 수 없는 범위(Unacceptable region)이며, 설비로 인한 어떠한 이익과도 관계없이 받아들일 수 없는 것으로 간주된다. 반면에 아래쪽의 영역은 광범위하게 수용되는 범위(Broadly acceptable region)를 나타내는데, 해당 시설이 비교적 안전함을 의미하고, 이 영역에 속하는 위험을 줄이기 위해 추가적인 조치를 하지 않는다. 두 영역 사이에 위치한 영역은 중간 범위의 위험 수준으로서 허용 가능한 범위(ALARP region, As Low As Reasonable Practicable region)을 뜻한다. 이 영역에 해당하는 위험은 비용을 고려하여 효과적으로 감소할 수 있는 방안이 마련되어야 한다.



[Figure 1] Three region framework for risk criteria

2.2 비용편의 분석

2.2.1 비용편의 분석의 정의 및 선행 연구

비용편의 분석은 본래 국가 차원에서 공공의 목표 달성을 위해 여러 대안들에 대한 비용과 편익을 측정하고, 이를 비교·평가함으로써 최선의 대안을 도출하는 방법이다⁶⁾.

비용편의 분석은 여러 분야에서 활용되는데, 공공투자사업 분야에 대해 나진영⁷⁾은 고도 정수처리공정의 도입에 있어 총비용을 산정하고 수질개선편의 등을 추정하여 도입의 타당성을 평가하였다. 또, 기술 사업화 분야에서 서중학⁸⁾은 설비투자 시나리오를 순현재가치법으로 손익분기점을 계산하였다. 나아가 위험성평가 분야에서 적용될 수 있는 비용편의 방법도 연구되고 있는데, 영국 산업안전보건청(HSE, Health and Safety Executive)은 설비에 대한 ALARP 결정을 위해 위험감소조치가 합리적으로 실행 가능한 지를 판단할 수 있는 비용편의 분석 방법을 제시하고 있다⁹⁾. 국내에서 류영돈¹⁰⁾은 이를 활용하여 도시가스 고압배관의 위험성 평가 후, 개선사항의 합리성을 판단하였다.

2.2.1 Proportion Factors

영국 HSE에서는 위험경감조치의 합리성을 판단하기 위해 식(1)을 사용하고 있다⁹⁾. PF(Proportion Factors)는 비용/편익으로서, 비용이 편익에 비해 매우 커서 비율이 심각한 불균형을 이루지 않는 한 경감조치는 합리적으로 실행가능하다.

$$PF = \frac{\text{Cost}}{\text{Benefit}} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

이때, PF의 상(上)한값을 정하여 이보다 큰 경우는 비합리적인 것으로 판단한다. <Table 1>에 영국 HSE에서 제시하고 있는 PF 값을 나타내었다¹¹⁾.

<Table 1> PF according to regulations in UK

Regulations	Year	PF
Control of Legionellosis Regs. And ACOP	1990	2.6-8.5
Gas Safety (Management) Regs.	1996	1.4-1.7
Adventure Activities Licensing	1996	5.4
Confined Spaces	1996	1.0-2.2
Railway Safety	1999	7.1-10.5

2.2.2 위험감소 조치에 대한 비용편익 분석

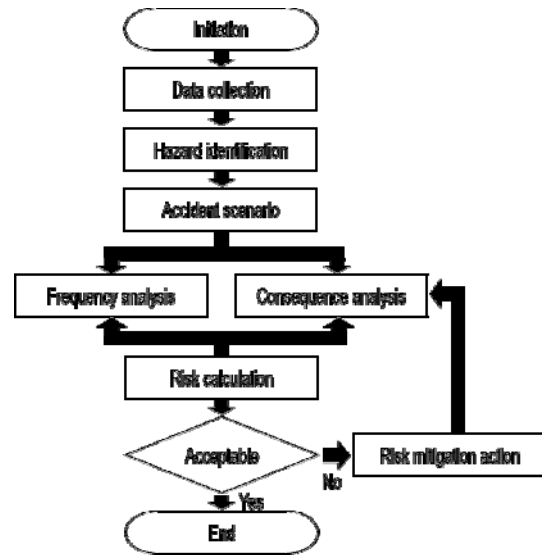
위험을 감소시키기 위해 가해진 조치들의 합리성을 판단하기 위해 비용편익 분석이 이용된다. 그러나 생명이나 환경 등은 금전적으로 평가될 수 없기 때문에, 영국 HSE에서는 사람이 위험을 감소하기 위해 평균적으로 지불할 의지를 액수(WTP, Willingness To Pay)로서 표현한 VPF(Value of Preventing a Fatality)를 편익으로 채택하고 있다.

3. 정량적 위험성 평가

3.1 정량적 위험성 평가 절차

본 연구에서 정량적 위험성 평가는 [Figure 2]의 순서로 진행되었다. 위험성 평가의 수행을 위해 대상 공정의 특성과 운전 조건 등의 자료를 수집하였고, P&ID를 통해 위험요인을 파악하였다. 사고 상황을 설정하기 위해 기상 데이터를 수집하였으며, 누출공의 크기와 끝점을 선정하였다. 이후, 사건수 분석 기법으로 누출 발생 빈도를 계산하였다. 사고 발생빈도와 피해영향을 이용하여 위험도를 나타내었고, 영국 HSE에서 정의한

위험의 3가지 영역을 기준으로, 평가된 위험의 수용여부를 판단하였다.



[Figure 2] Risk assessment

3.1.1 대상 공정 및 설비

본 연구의 대상이 되는 공정은 염화칼륨을 전기분해하여 부산물로 생성된 수소 등을 통해 염소를 생산하는 공정이다. 이 중, 전해조에서 발생된 염소가스를 냉각 및 가압하여 저장하는 액화염소의 고압 탱크를 대상 설비로 선정하였다. 본 탱크의 운전 압력은 8bar, 운전 온도는 -15℃이다.

3.1.2 사고 시나리오

사고영향범위 예측을 위한 풍향은 국내 I지역의 2016년 기상청 바람장미 데이터를 활용하여 설정하였다¹²⁾. 또한, 국내 시나리오 선정 지침에 의하면 최악의 시나리오의 풍속 및 대기안정도(Pasquill-Gifford Atmospheric Stability Factor)를 1.5 m/s 및 F등급으로 설정하며, 대안의 시나리오의 경우에는 3 m/s 및 D등급으로 설정한다¹³⁾. 따라서 본 연구에서는 기온 역전이 발생하는 밤이 대기가 안정하다고 가정하였고, 밤의 기후 조건을 1.5 m/s, F등급으로, 낮의 기후 조건을 3 m/s, D등급으로 선정하였다. 누출공의 크기는 CCPS guideline에 따라 소규모, 중규모, 대규모 누출을 대표하는 5 mm, 25 mm, 100 mm로 선정하였다¹⁴⁾. 또한, 독성 영향을 산정할 수 있는 끝점은 염소 인체 영향 중, 사망 가능성이 최소인 30 ppm으로 선정하였다.

3.1.3 사고 발생 빈도

본 연구의 대상인 고압탱크에서 누출이 일어날 수 있는 장치는 파이프와 밸브이었으며, 장치의 개수와 IOGP(International association of Oil & Gas Producers)의 고유 고장 빈도 값을 곱하여 누출 발생 빈도를 계산하였다¹⁵⁾. 누출공의 크기별 누출 발생 빈도는 <Table 2>와 같다. 밸브에서 누출공이 5mm 일 때, 빈도가 8.03E-04로 가장 컸다.

<Table 2> Release frequency data

	Leak hole (mm)	Release frequency
Piping	5	6.28E-04
	25	6.88E-05
	100	7.60E-06
Manual valve	5	8.03E-04
	25	1.31E-04
	100	1.10E-05

3.1.4 사고피해 영향 분석

고압탱크에 저장되어 있는 염소는 누출 초기에 Flash현상이 동반되며 2상(相)으로 누출된다. 전체 염소의 일부는 증기로서 확산되고, 일부는 물방울로서 떨어지는데, 이때 물방울 형성(Rain-out) 비율을 산정할 수 있다¹⁶⁾. <Table 3>에는 낮과 밤 조건의 누출공의 크기별 Rain-out의 비율 산정 결과를 나타내었으며, 낮과 밤의 차이가 크지 않았다. 낮의 경우, 누출공의 크기가 5 mm일 때 61.37%가 액체로서 떨어졌고, 25 mm일 때 64.92%, 100 mm일 때 69.99%가 떨어졌다.

<Table 3> Rain-out fraction according to leak hole by weather condition

	Leak hole (mm)	Rain-out fraction(%)
Day	5	61.37
	25	64.92
	100	69.99
Night	5	62.00
	25	65.53
	100	70.95

이후, 염소의 확산 거리를 계산하였다. 이때, 총 누출 시간을 몇 개의 영역(Segments)으로 나누어 확산과정을 해석하였다¹⁶⁾. <Table 4>에는 최종적으로 계산된 최대 확산 거리를 나타내었다. 독성 구름은 풍속이 작고 대기가 안정된 밤 조건에서, 누출공의 크기가 100 mm일 때, 11,108 m만큼 가장 멀리 확산 되었다.

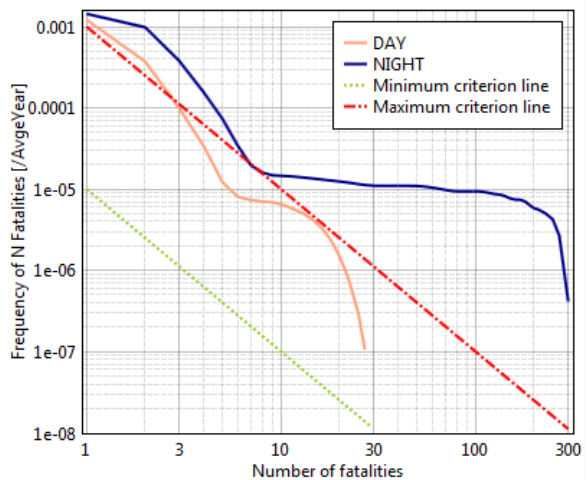
<Table 4> Maximum downwind distance by leak hole in weather condition

Leak hole (mm)	Maximum downwind distance (m)	
	Day	Night
5	546.742	2250.17
25	2069.41	8415.31
100	7478.63	11108.20

3.1.5 위험도 도출 및 위험 판단

위험도 계산에 앞서, 주변지역의 인구분포와 낮과 밤에 따른 인구 이동형태 등 인구 데이터를 수집하였다. 밤에는 낮보다 실내에 있는 인구 비율이 높았고, 사업장과 주변 사업단지의 인구가 감소하였다.

이후, 개인적 위험도는 등고선의 형태로 나타내었고, 사회적 위험도는 [Figure 3]와 같이 FN curve로 나타내었다. 위험의 3가지 영역을 기준으로 사회적 위험을 판단하였다. 낮과 밤의 경우 모두 Unacceptable region에 해당하여 반드시 위험경감조치가 이루어져야 한다고 판단하였다.



[Figure 3] FN curve

또한, 낮과 밤의 잠재적 사망자 수(PLL, Potential Loss of Life)를 계산하여 <Table 5>에 나타내었다. 낮의 경우 잠재적 사망자 수는 1.81E-03이고, 밤의 경우 5.25E-03이었으며, 밤의 사망자 수가 낮보다 3 배 크게 계산되었다.

<Table 5> PLL according to weather condition

	PLL(per yer)
Day	1.81E-03
Night	5.25E-03

4. 위험경감조치 선정 및 효과

4.1 위험경감조치 선정

본 연구의 대상 설비인 액화염소 저장탱크의 경우, 적용될 수 있는 경감조치 방안과 효과를 <Table 6>에 나타내었다. Water spray를 설치하면 확산을 억제 할 수 있고, 설비를 실내화 하면 액면 증발 현상을 무시할 수 있다17).

<Table 6> Risk mitigation measures and effects

No.	Risk reduction measures	Effect
1	Water spray	Diffusion is inhibited.
2	In-Building	Pool vaporization is ignored.

4.1.1 Water spray

1986년에 NTS(Nevada Test Site)에서는 Goldfish series라 하는 액체불화수소 누출실험을 총 6번 진행하였다. 1번부터 3번까지는 독성구름의 확산 과정을 확인하였고, 4번부터 6번까지는 Water spray의 설치를 통해 물에 의한 희석 현상을 확인할 수 있었다. <Table 7>에 Water spray의 효과를 요약하여 나타내었다. Water spray의 적용 유무에 따라, 누출지점으로부터 300 m에 해당하는 지점의 불화수소 농도를 측정하였다. Water spray가 없었을 경우, 해당 지점의 농도는 2028 ppm이었고, Water spray가 작동했을 때는 36~49%만큼 농도가 감소한 것으로 나타났

다.

<Table 7> Result of water spray effect

Downwind distance (m)	No water spray (ppm)	Water spray (ppm)	Effect
300	2,028	1,034 ~1,298	36~49% Reduction

본 연구에서는 Goldfish series에서 입증된 결과를 토대로, 고압탱크의 염소 누출에 대한 Water spray의 효과를 도출하였다. 비교를 위해 CRC Handbook의 불화수소와 염소의 수용해도(Solubility) 값을 살펴보면 <Table 8>와 같다18).

<Table 8> Solubility of hydrogen fluoride and chlorine

	Solubility (g/100gH ₂ O)	Qualitative Solubility
Hydrogen fluoride	-	vsH ₂ O
Chlorine	-	sH ₂ O

일반적으로 수용해도란, 25℃ 물에서 1 kg당 녹을 수 물질의 g으로 나타낼 수 있으나, 이러한 정량적인 값(Quantitative solubility)이 활용가능하지 않을 경우, 정성적 용해도(Qualitative solubility)로 표현할 수 있다19).

불화수소에 해당하는 'Very soluble' 은 1 mL 물에 1 g이상의 물질이 녹을 수 있음을 뜻한다. 즉, 용해도 값이 100 g/100 mL 이상임을 뜻한다. 염소의 용해도는 'Slightly soluble' 로서 0.7 g/100 mL이며, 불화수소와의 용해도 차이가 대략 100배 이상이므로 Goldfish series에서 도출되었던 효율에 미치지 못할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 수용해도 외의 누출되는 물질의 특성과 확산에 대한 Water spray의 효과를 고려하지 않았으며, 따라서 Water spray를 위험경감조치로 선정하지 않았다.

4.1.2 설비의 실내화

물질의 누출 시 해당 설비가 건물 내부에 있는지 또는 건물 외부에 있는지에 따라, 확산 과정에서 확연한 차이를 보인다20). 그 이유는 Flash 현상으로 흩어지

는 물방울들과 물방울로부터 형성된 액면을 실내에 가둘 수 있다고(Trapped)로 가정하기 때문이다.

즉, 형성된 액면에서 증발되는 양은 독성 구름의 농도에 영향을 미치지 않으며, 결과적으로 확산거리 및 거리에 따른 사망 가능성 또한 감소하게 된다.

설비를 실내에 두기 전과 후의 사망가능성이 0이 되는 지점을 <Table 9>에 나타내었다. 설비의 실내화(In-building)는 액면 증발량을 무시할 수 있어서 사망가능성이 0이 되는 지점까지의 거리가 감소한 것으로 파악되며, 위험도 감소조치로서 효과가 있는 것으로 판단되므로 본 연구에서 위험경감조치로 선정하였다.

<Table 9> Fraction of rain-out according to leak hole by weather condition

	Leak hole (mm)	Before mitigation		After mitigation	
		Indoor (m)	Outdoor (m)	Indoor (m)	Outdoor (m)
Day	5	250	325	100	125
	25	225	500	250	350
	100	275	825	250	350
Night	5	825	1,075	450	525
	25	675	1,175	825	1,325
	100	650	2,025	825	1,325

4.2 위험경감조치 효과

위험경감조치 후, 개인적 위험도를 표현한 등고선의 지름을 위험도별로 측정하였다. <Table 10>과 <Table 11>에는 경감조치 전과 후의 위험도별 등고선의 지름을 나타내고 있으며, 낮과 밤 조건에서 모든 위험의 크기가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

조치 후의 FN curve는 [Figure 4]와 같다. 위험이 감소하여 낮과 밤의 곡선 모두 ALARP 영역에 들어온 것을 확인하였다.

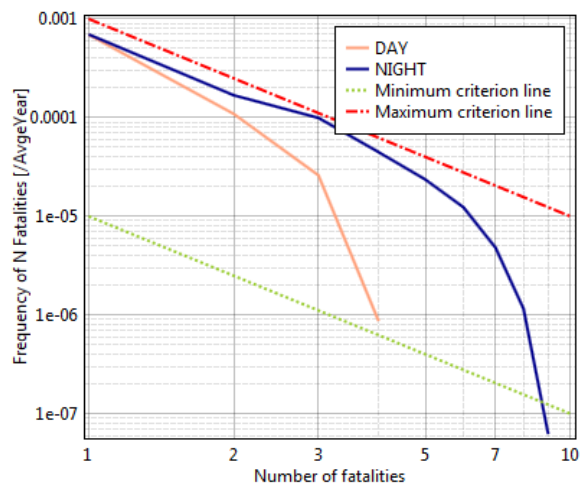
또한, 잠재적 사망자 수의 변화를 <Table 12>에 나타내었다. PLL은 위험경감조치 전후의 PLL의 차이를 뜻하고, 이를 이용하여 위험 감소 효과를 표현하였다. 낮의 경우 54.2%, 밤의 경우 80.0%만큼 위험이 감소하였다.

<Table 10> Change of contour diameter in day

Day	Contour diameter (m)	
	Before mitigation	After mitigation
1.00E-04	161.29	71.98
1.00E-05	388.54	153.73
1.00E-06	832.78	282.97
1.00E-07	1142.19	443.21
1.00E-08	1379.18	611.73
1.00E-09	1619.64	695.29

<Table 11> Change of contour diameter in night

Night	Contour diameter (m)	
	Before mitigation	After mitigation
1.00E-04	395.51	212.26
1.00E-05	885.60	488.67
1.00E-06	1799.72	916.80
1.00E-07	2421.33	1491.27
1.00E-08	3317.29	2184.87
1.00E-09	3970.00	2586.46



[Figure 4] FN curve after risk mitigation measures

<Table 12> PLL according to weather condition

	ΔPLL	Effect of risk reduction(%)
Day	9.81E-04	54.2
Night	4.20E-03	80.0

5. 비용편의 분석

5.1 PF 및 VPF

류영돈10)은 도시가스 고압배관에 대해 PF 값을 1.7을 채택하였고, VPF는 20억으로 선정하였다. 본 연구에서는 선행 연구에서 입증한 결과와 <Table 1>의 Gas Safety (Management) Regs.에서 제시하는 값을 바탕으로 PF를 1.4로 채택하였다. 또한, 선행 연구에서 채택한 VPF 값에 <Table 13>과 같이 소비자 물가 지수를 반영하여 최종적으로 23억을 VPF 값으로 선정하였다.

<Table 13> Monetary value calculation from 2009 to 2016

VPF(2009)	VPF(2016)	CPI
2,000,000,000	2,284,000,000	1.142times

5.2 위험경감조치에 대한 비용 산정

본 연구에서 선정한 설비의 실내화 비용은 6cm 방화벽의 콘크리트 재료를 기준으로 약 3천 3백만 8십만 원으로 산정되었다. 또한, 인명피해만 고려하는 비용편의 분석을 위해 식(2)와 같은 류영돈10)이 제시한 비용산정식(ICAF, Implied cost of averting fatalities)을 이용하였다. L은 배관의 수명은 나타내며, Crms는 위험경감조치비용을 뜻한다.

$$ICAF = \frac{C_{rms}}{L \times \Delta PLL} \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

5.3 위험경감조치에 대한 비용편의 분석

낮의 경우, 식(3)과 같이 비용을 산정하였고, 식(4)와 같이 도출된 PF 값은 1.4보다 작다.

$$ICAF = \frac{33,849,696}{30\text{년} \times (9.81) \times 10^{-4}} = 1,150,176,555 \dots\dots\dots \text{식 (3)}$$

$$PF = \frac{ICAF}{VPF} = \frac{1,150,176,555}{2,284,000,000} = 0.50 \dots\dots\dots \text{식 (4)}$$

밤의 경우, 식(5)와 같이 비용을 산정하였고, 식(6)와 같이 도출된 PF 값 또한 1.4보다 작다. 따라서 설비의 실내화는 합리적으로 이행되어야 하는 경감조치로 판단된다.

$$ICAF = \frac{33,849,696}{30\text{년} \times (4.20) \times 10^{-3}} = 268,648,381 \dots\dots\dots \text{식 (5)}$$

$$PF = \frac{ICAF}{VPF} = \frac{268,648,381}{2,284,000,000} = 0.12 \dots\dots\dots \text{식 (6)}$$

6. 결론

본 연구에서는 염소누출 대해 정량적 위험성 평가를 실시하고, 평가된 위험을 줄이기 위해 위험경감조치를 선정하였다. 그리고 비용편의 분석을 통해 경감조치의 합리성을 판단하였다.

누출 시 고압탱크 내 염소의 Rain-out 비율은 누출공의 크기가 클수록 높았고, 독성 구름의 확산거리는 풍속과 대기안정도에 따라 큰 차이를 보였다.

위험성 평가 결과, 위험도는 낮과 밤 모두 수용 불가 지역에 있어 도출된 위험에 대해 위험경감조치로 설비의 실내화(In-Building)를 선정하였고, 조치전과 조치후의 위험감소효과가 낮의 경우 54%, 밤의 경우 80%로 나타났다.

이후, 위험경감조치에 대해 ALARP의 원리를 이용하여 비용편의분석을 하였다. PF 값은 1.4로, VPF는 약 23억으로 선정하여 분석한 결과, 본 조치는 합리적인 것으로 판단되었다.

6. References

[1] Jung, G.S.(2015), "Liquid chlorine leak damage modeling of petrochemical complex"

- Dongshin univ., 19-78
- [2] Shin, D.M.(2017), "A study on risk reduction through protection layers for ethylene oxide storage facilities" Myongji univ., 1-5
- [3] Korea Gas Safety Corporation(2017), 2016 Gas accident yearbook, 140-145
- [4] Moon, I., et al(2016), Introduction to Chemical Safety, Cheongsong, 8-182
- [5] Health and Safety Executive, U.K.(2010), Reducing risks, protecting people, 42-65
- [6] Kim, D.G(2012), Cost benefit analysis, Pakyoungsa, 39-110
- [7] Na, J.Y.(2013), "Cost-benefit analysis of the introduction of advanced water treatment process : focused on the case of 'K-water B water treatment plant" Seoul national univ., 8-10
- [8] Seo J.H.(2014), "Economic analysis of the used magnesita-carbon brick recycling using microwave" Pohang univ. of science & technology, 2-3
- [9] Health and Safety Executive, U.K., "Cost Benefit Analysis(CBA) checklist" <http://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarpcheck.htm>
- [10] Ryu, Y.D.(2010), "Cost-Benefit Analysis for Risk Mitigation Measures on High Pressure Urban Gas Pipelines" Seoul national Univ. of science and technology, 15-103
- [11] Health and Safety Executive, U.K., "Guidance on ALARP Decisions in COMAH Annex 1" http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/permissioning/spc_perm_37/annex1.pdf
- [12] Korea Meteorological Administration, "Meteorological data link portal" Climatic statistics analysis, <https://data.kma.go.kr>
- [13] Korea Occupational Safety & Health Agency(2016), Technical Guidelines for Selecting the worst-case scenario for the worst-case scenario, 2-10
- [14] American Institute of Chemical Engineers(2000), Center for Chemical Process Safety, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd Edition. New York : Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 64-65
- [15] International Association of Oil & Gas Producers(2010), Risk Assessment Data Directory Report No. 434-1, Process release frequencies,7-9
- [16] DNV · GL(2014), Theory Unified Dispersion Model ,54-93
- [17] Sam Mannan(2012), Lees' loss prevention in the process industries : hazard identification, assessment, and control, volume1, Oxford : Butterworth-Heinemann/Elsevier, 1031-1040
- [18] David R. Lide(2004), CRC Handbook of chemistry and physics, 84th edition, CRC Press, 4-51,4-61
- [19] "Solubility of Things," Levels of solubility, <http://www.solubilityofthings.com/>
- [20] DNV · GL(2014), Theory Indoor Dispersion 1-3

저자 소개

이주연



한양대학교 화학공학과 학사 취득. 현재 인하대학교 대학원 환경·안전융합전공 석사과정 중. 관심분야 : 화학공정안전, 화학물질 관리, 환경규제 대응 등

천영우



인하대학교 대학원 환경·안전융합전공 교수. 인천대학교 안전공학 전공. 관심분야 : 화학물질안전, 장외영향 평가, QRA, Risk 분석 등

황용우



인하대학교 대학원 환경·안전융합전공 교수. 동경대학교 환경공학 전공. 관심분야 : 하폐수처리, 환경전과정 평가, 장외영향평가, QRA 등

이익모



인하대학교 화학과 교수. The Ohio State Univ. 무기화학 전공. 관심분야 : 화학물질안전·위해성, 연구실 안전, QRA, 장외영향평가 등