

염소(Cl₂)시설에 대한 누출가능성 예측
이재준*, 김태수*, 이대희**, 유병태***, 백종배*, 고재욱**, 안형환*
충주대학교*, 광운대학교**, 국립방재연구소***

Likelihood Estimation of Release Incidents in Chlorine(Cl₂) Facility
Lee Jae-Jun*, Kim Tae-Su*, Lee Dae-Hee, Yoo Byung-Tae***, Baek Jong-Bae*,**
An Hyung-Hwan*, Ko Jae-Wook**
Chungju National University, Kwangwoon University**, National Institute for Disaster
Prevention****

Abstract

Likelihood analysis was used for the revision of release probability/frequency in chlorine Injection facilities used in chlorine process. Typically these facilities consist of pressure cylinder, vaporizer, pipeline, measuring equipment and safety equipment. This paper described the incident scenarios considered, likelihood analysis procedure and the selection and application of basic events and for failure rates of mechanical components. Human errors were also considered.

The major objective of this paper is to estimate the likelihood of each determined incident scenarios.

We estimated failure rates of mechanical components based on likelihood analysis procedure. Human errors were also considered. It was estimated to have 5.73×10^{-5} Cl₂ leak per year during the major Cl₂ handling process. The probability of failure in scrubber system was 4.11×10^{-2} /demand.

1. 서론

1997년 유럽연합(EU)에서 Seveso Directive II를 제정하면서 화학물질을 저장·생산·운반 등을 수행하는 대형 산업시설은 사고발생시 인근 지역에 미칠 수 있는 영향에 대해서도 QRA(Quantitative Risk Analysis)를 하도록 권고하고 있다. 또한 미국의 경우도 CCPS(Center for Chemical Process Safety)에서 유해화학물질의 취급 및 운반에 대한 지침에 따라 산업 활동을 하도록 지시하고 있으며 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 화학물질 사고로 인한 환경오염을 방지하기 위하여 다양한 방법을 통한 사고예방 프로그램을 개발하여 적용하고 있다. 그 밖에 UNEP(United Nations Environment Programme), IAEA(International Atomic Energy Agency), WHO(World Health Organization), UNIDO(United Nations Industrial Development Organization) 등의 세계기구에서도 대형 산업시설물의 안전성 확보를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다¹⁾. 특히, EPA (Environmental Protection Agency)를 비롯하여 OSHA 등에서는 탄화수소 계열의 연료를 사용하는 염소가스 투입시설의 안전성 확보를 위한 지침을 제정하여 권고하고 있다²⁾.

이 연구에서는 사고 발생 시 재산과 인명에 대해 심각한 영향을 야기할 수 있는 독성물질인 염소가스를 사용하는 시설에 대해 발생 가능한 사고 시나리오를 확인·분석하고, 그에 따른 사고발생 경로와 사고발생 확률을 예측하였다.

2. 이 론

2-1 염소(Cl₂) 및 공정 개요

(1) 염소(Cl₂)가스의 독성

염소(Cl₂)는 자극적인 냄새를 내는 기체로 흡입 시 유해하며 호흡기와 눈에 화상을 입히며 심한 피부자극을 일으킬 수 있는 주요한 건강위험성을 내포하고 있다. 그리고 용기가 열에 노출되면 파열되거나 폭발할 수도 있다.

Table 1은 NIOSH에서 제시한 염소 가스의 독성 농도기준이다⁴⁾.

Table 74 Toxic Concentration of Chlorine

	ERPG ¹⁾			IDLH ²⁾	STEL ³⁾	LC ₅₀ ⁴⁾
	ERPG1	ERPG2	ERPG3			
Chlorine Concentration[ppm]	1	3	20	1	3	250
Exposure Time[min]	60	60	60	30	15	30

참조 : 1) ERPG : Emergency Exposure Guidance Levels
 2) IDLH : Immediately Dangerous to Life or Health
 3) STEL : Short Time Exposure Limit
 4) LC : Lethal Concentration

(2) 공정 개요

염소가스 투입공정에서 염소 가스는 1톤 용기 8개를 상시 저장하고 있으며, 액체 상태로 저장된 염소를 기화기를 통하여 강제 기화시켜 공정에 투입해 사용한다. 일일 사용량은 대략 500~600 kg/day 으로 투입공정에 대한 배관 및 장치는 Fig. 1과 같다.

염소설비가 있는 공장 내부뿐만 아니라 주변지역에는 많은 민가가 위치하고 있으며, 집단수용시설로는 초등학교가 있다.

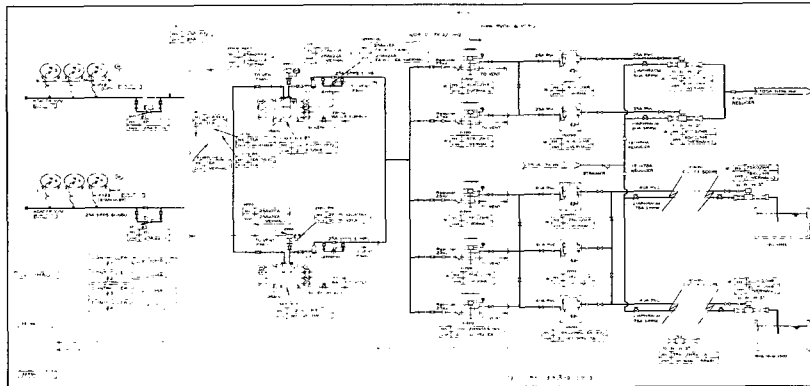


Fig. 241 The Pipe & Instrument Diagram of Chlorine Process

Table 75 Storage Data of Chlorine Facilities

번호	탱크번호	염소가스 무게(kg)	잔가스 무게(kg)	저장압력 (psi)	번호	탱크번호	염소가스 무게(kg)	잔가스 무게(kg)	저장압력 (psi)
1	PV-01	1,000	1,000	100	9	EV-01	-	-	100
2	PV-02	1,000	1,000	100	10	EV-02	-	-	100
3	SV-01	1,000	1,000	100	11	EV-03	-	-	100
4	SV-02	1,000	1,000	100	12	EV-04	-	-	100
5	SV-03	1,000	1,000	100	13	EV-05	-	-	100
6	SV-04	1,000	1,000	100	14	EV-06	-	-	100
7	SV-05	1,000	1,000	100	15	EV-07	-	-	100
8	SV-06	1,000	1,000	100	16	EV-08	-	-	100

참조 : 현재 염소가스 투입시설에는 평균 16개의 용기가 있으며, 최대 8개의 용기만 염소가스가 충전되어 있다.

Table 3은 장치 및 인적 오류에 대한 probability/frequency Data로 AIChE의 CCPS에서 발간하는 『Process Equipment Reliability Databook』 과 IEEE에서 발간하는 『IEEE std. 500』 에서 발췌하였다⁵⁾.

Table 76 Failure Data of Instruments

Basic event	Probability	Frequency
B 1 / 가스 감지기 고장	3.00×10^{-4}	3.80
B 2 / 제어판 고장	3.00×10^{-2}	1.62
B 3 / 흡입 펌프 고장		1.08×10^{-2}
B 4 / 저장용기의 물리적 결함		8.83×10^{-5}
B 5 / 저장용기의 용접 불량		1.88×10^{-4}
B 6 / 저장용기의 부식		1.00×10^{-3}
B 7 / 접합 플랜지 손상		1.88×10^{-4}
B 8 / 가스 검지기 고장(B2 Redundancy)	3.00×10^{-4}	3.80
B 9 / 배관 부식		1.00×10^{-3}
B10 / 비상 알람 시스템 고장	3.30×10^{-4}	
B11 / 작업자 5분 이내 미인식	9.50×10^{-2}	
B12 / 용기 교체후 B/V-1 미개방		5.01×10^{-5}
B13 / 안전 밸브 미작동	1.18×10^{-3}	
B14 / 감압 차단변 고장		1.12×10^{-4}

(3) 기후 및 입지조건

공장 내에는 본관동에 40여명, 경비실과 협력업체 20여명 등 총 60여명의 근로자가 상시 근무하고 있다. 주변지역 주민 분포는 염소시설에서 근접한 거리인 200m 이내에는 상시 근무자 외에 8명의 주민이 생활하고 있으며, 200m에서 500m 근방에 300명, 500m에서 1,000m 반경에 500명이 거주하고 있다. 특히, 500m에서 1,000m 반경 내에 초등학교가 있어서 최악의 경우 많은 사상자를 유발할 수 있다. 더욱 심각한 사항은 풍향이 공장에서 인근 주거지역으로 향한다는 점이며, 공장주변의 풍향을 고려할 때 염소가스의 누출사고가 발생할 경우 인근지역에 직접적인 영향을 가져올 수 있다.

2-2. 사고 발생가능성 분석 방법

(1) FTA 방법에는 gate-by-gate 방법과 minimal cut set 방법이 있는데, 대상 공정이 연속라인 또는 대규모일 경우에 minimal cut set 방법을 이용하면 보다 효과적으로 시스템의 손실 경로를 파악할 수 있다. Minimal cut set 방법을 이용할 경우 정상사상(top event)을 cut set 형태로 표현할 수 있어 tree의 정량적 평가나 중요도 분석을 수행할 때 용이하다는 장점이 있다. Table 3은 minimal cut set 방법에서 사용하는 부울대수 법칙을 제시하고 있다.

Minimal cut set 방법은 정상 사상을 발생시킬 수 있는 다양한 종류의 기본 사상들의 조합을 의미하는데 Table 3에 제시한 Boolean 대수 법칙을 이용하여 정상 사상(top event)을 기본 사상의 조합 형태로 변환시킨 후 식 [1]을 이용하여 정상 사상의 사고발생 빈도를 계산할 수 있다^{1),6)}.

$$F_T = \sum_i F_i \quad \text{or} \quad P_T = \sum_i P_i \quad \dots [1]$$

중요도 분석(importance analysis)은 정성적 분석 단계와 정량적 분석 단계를 통하여 얻어진 모든 cut set의 사고발생 빈도를 정상 사상의 사고발생 빈도에 대한 분률로 표현하여 정상사상의 발생에 가장 큰 영향을 미치는 cut set 즉, 가장 큰 손실경로를 파악하기 위하여 사용하는 방법으로 관계식은 식 [2]와 같다.

$$\text{Cut set importance} = \text{Cut set frequency/top event frequency} \times 100 \quad \dots [2]$$

Table 77. Rules of Boolean Algebra⁵⁾

Rule	Mathematical Form
Commutative Rule	$A \cdot B = B \cdot A$ $A + B = B + A$
Associative Rule	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$ $A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributive Rule	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$ $A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$
Idempotent Rule	$A \cdot A = A$ $A + A = A$
Rule of Absorption	$A \cdot (A + B) = A$ $A + A \cdot B = A$

Table 5. Rules for Gate-by-gate FT Calculation⁵⁾

Gate	Input pairing	Calculation for output	Units
OR	P_A OR P_B	$P(A \text{ OR } B) = 1 - (1 - P_A)(1 - P_B)$ $= P_A + P_B - P_A P_B$ $= P_A + P_B$	t^{-1}
	F_A OR F_B P_A OR F_B	$F(A \text{ OR } B) = F_A + F_B$ Not permitted	
AND	P_A AND P_B	$P(A \text{ AND } B) = P_A P_B$	-
	F_A AND F_B	Unusual pairing, reform to F_A AND P_B	
	F_A AND P_B	$F(A \text{ AND } B) = F_A P_B$	t^{-1}

[Note] P : Probability . F : Frequency (time-1). t : time (usually year)

(2) Gate-by-gate 방법의 경우 트리 구조 내에 같은 기본 사상이 한 차례 이상 다른 부분에서 발견된다면 계산상의 오류를 가져올 수 있어서 대단위 공정의 정량적 평가에는 적합하지 못하다. 즉, 대상 공정 내에 redundancy 시스템이 존재할 경우 gate-by-gate에 의한 계산결과는 오차를 가져올 수 있다. 그리고 단순히 작성한 tree를 gate를 따라 올라가면서 계산하는 방식이다. Table 5는 gate-by-gate를 이용하여 fault tree의 빈도분석을 수행할 경우 적용되는 간단한 법칙들을 제시하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 염소가스 누출사고 경로

Hazop study 결과 염소가스 투입시설에 설치되어 있는 저장탱크에 대한 사고발생 경로는 저장용기 및 배관에서의 누출[부식, 외부충격, 내부압력 상승]이다. 특히, 저장용기의 물리적 결함이나 내부압력 상승에 의한 누출이 발생될 경우 적절한 제어장치나 차단장치가 없기 때문에 용기의 내부에 있는 염소가스 전량이 누출된다고 할 수 있다. 염소가스 투입시설에 대한 사고 전개과정을 분석한 결과 염소가스의 누출이 지속적으로 유지될 수 있는 경우는 크게 탱크 파열에 의한 것과 배관에서의 누출로 크게 나눌 수 있으며 가스 감지기의 미 작동 및 자동제어시스템의 고장 등에 의한 염소가스의 확산으로 볼 수 있다. 그 결과 저장용기의 파열에 의한 누출의 경우 가스 중화기에 의존하는 대책 외에 적절한 제어 대책이 없기 때문에 사고 시 대형재해를 유발할 소지가 매우 높다고 볼 수 있다.

3-2. 염소가스 누출사고 분석 결과

Table 6은 분석결과로 염소누출사고의 대표적인 minimal cut sets이다. Fig. 2, 3은 염소가스 투입시설에서 설치되어 있는 염소가스 저장용기 및 관련 배관에서 발생 가능한 누출사고의 Fault Tree Diagram 이다.

Table. 6 Minimal cut sets of Basic events.

Number	Basic event	MCS Number	Number	Basic event	MCS Number
1	B2-B4	MCS 2	7	B3-B6	MCS 9
2	B3-B4	MCS 3	8	B2-B9-B11	MCS 17
3	B2-B5	MCS 5	9	B3-B9-B11	MCS 18
4	B3-B5	MCS 6	10	B2-B11-B12	MCS 26
5	B1-B6	MCS 7	11	B2-B7-B11	MCS 44
6	B2-B6	MCS 8	12	B3-B7-B11	MCS 45

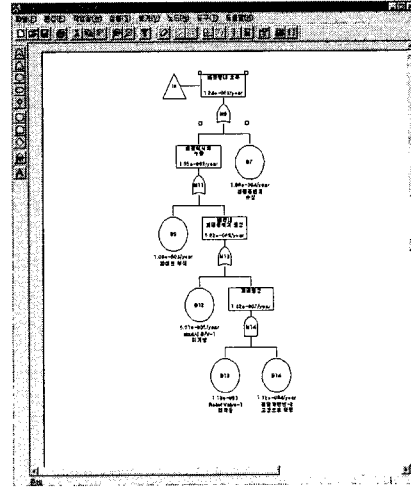
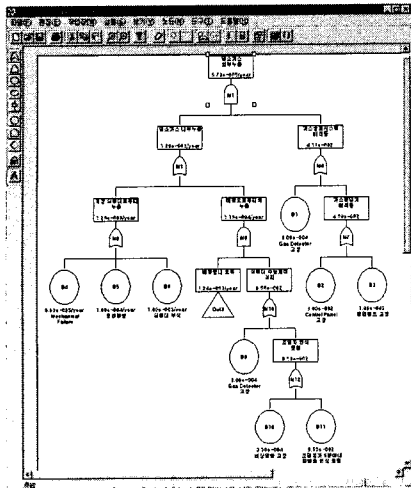


Fig. 2 Fault tree for failure of chlorine release. Fig. 3 Fault tree of Transfer Symbol A

그리고 염소가스 공정에서 염소가스가 누출될 수 있는 빈도를 gate-by-gate 방법으로 계산한 결과 5.73×10^{-5} /year로 나타났으며, 저장탱크에서의 누출은 1.28×10^{-3} /year, 배관에서의 누출은 1.18×10^{-4} /year로 각각 예측되었다. 그리고 누출 후 가스 중화시스템의 미 작동으로 인하여 누출사고의 확산이 이루어질 수 있는 확률은 4.11×10^{-2} /demand로 일반적인 안전 시스템 기준인 1.00×10^{-2} /demands 기준에는 약간 못 미치는 결과를 가져왔다. 누출사고를 유발할 수 있는 확률이 가장 큰 경로는 저장탱크 및 배관에서의 물리적 결합에 의한 사고가 가장 많은 것으로 분석 결과 밝혀졌으며, 이 결과는 TNO에서 발간하는 대형재해 분석 보고서의 결과와 일치함을 알 수 있다²⁾. Table 7은 각각의 cut set이 정상사상인 염소가스의 누출사고에 영향을 줄 수 있는 중요도를 나타내고 있다. 그리고 사고의 가장 큰 원인은 파이프라인, 플랜지, 그리고 저장탱크의 물리적 결합에 의한 (특히, 부식 등의 mechanical integrity의 문제) 사고임을 Table 6을 통하여 알 수 있다.

Table 80 Cut set importance & Frequency of Minimal cut sets

Minimal cut set	Frequency of cut set	Cut set importance
MCS 2	2.65×10^{-6} /yr	4.62
MCS 3	9.54×10^{-7} /yr	1.66
MCS 5	5.64×10^{-6} /yr	9.84
MCS 6	2.03×10^{-6} /yr	3.54
MCS 7	3.00×10^{-7} /yr	0.52
MCS 8	3.00×10^{-5} /yr	52.36
MCS 9	1.08×10^{-5} /yr	18.85
MCS 17	2.85×10^{-6} /yr	4.97
MCS 18	1.03×10^{-6} /yr	1.80
MCS 26	1.43×10^{-7} /yr	0.25
MCS 44	5.36×10^{-7} /yr	0.94
MCS 45	1.93×10^{-7} /yr	0.34

Top event frequency = $\sum C_i = 5.73 \times 10^{-5}$ per year

4. 결 론

염소가스(Cl_2)는 독성이 매우 강하기 때문에 단 한 번의 누출로 인하여 주변의 근로자 및 인근주민에게 커다란 피해를 가져올 수 있다. 따라서 선진외국의 경우 독성이 강한 염소가스의 경우 저장방법뿐만 아니라 저장용기의 규격까지 갖추어 규제를 하고 있다. 염소공정에 대한 사고발생 가능성 평가결과, 사고 발생 시 사업장은 물론 주변에 거주하는 주민에게 심한 독성 영향을 가져올 수 있는 가능성이 매우 크다고 판단된다.

염소 공정에서 염소가스가 누출할 수 있는 사고에 대한 발생빈도는 $5.73 \times 10^{-5}/\text{year}$ 로 계산되었으며 주요 누출사고 발생경로는 저장탱크에서의 누출 가능성이 $1.28 \times 10^{-3}/\text{year}$ 이고, 배관에서의 누출 가능성이 $1.18 \times 10^{-4}/\text{year}$ 이다. 그리고 가스 중화시스템이 미 작동하여 누출이 확산될 가능성이 $4.11 \times 10^{-2}/\text{demand}$ 로 각각 예측되었다.

또한 FTA 결과를 보면 알 수 있지만 염소가스 누출사고의 주요 원인이 Interlock 시스템의 오작동에 의한 사고보다는 물리적 결함(특히, 부식이나 외부충격)에 의한 사고 발생 가능성이 매우 크게 분석되었다.

따라서 누출사고를 예방하기 위해서는 탱크 표면과 파이프라인 부식상태에 대한 정기점검을 철저히 준수하여 시행하여 물리적인 결함을 최소화 하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있으며, 배관 이음부에 대한 정밀 진단도 정기적으로 수행되어야 한다고 판단된다.

5. 참고 문헌

1. CCPS, Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2000, pp 297-330
2. R.J Walter, Practical Compliance with the EPA Risk Management, AIChE, 1999, pp 2-4
3. CCPS, Guideline for Hazard Evaluation Procedures 2nd, 1992, 251-258
4. Occupational Health Guideline for Chlorine, U.S. DOL, 1978, pp 1- 3.
5. Nuclear Power Engineering Committee, IEEE Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronic, Sensing Component, and Mechanical Equipment Reliability Data for Nuclear-Power Generating Stations, 1984
6. Ernest, Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall, Inc, 1981, pp44-102
7. TNO, 30년 재해 통계집, 1997