



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

HF(불화수소)저장시설의 누출시 CA 및
LOPA를 활용한 안전설비 최적화 연구



趙 皓 成

工學碩士學位論文

HF(불화수소)저장시설의 누출시 CA 및
LOPA를 활용한 안전설비 최적화 연구



2017年 11月

釜慶大學校産業大學院

安全工學科

趙皓成

趙皓成의 工學碩士 學位論文을
認准함

2017年 11月



主 審 工學博士 이 의 주 (인)

委 員 工學博士 오 창 보 (인)

委 員 工學博士 이 창 준 (인)

목 차

제 1 장 연구개요	01
1.1 연구의 배경 및 목적	01
1.2 연구내용 및 방법	05
제 2 장 연구대상물질 및 위험분석 기법	07
2.1 연구대상 물질	07
2.1.1 불화수소(HF)의 물리 화학적 특성	07
2.1.2 불화수소 와 불산의 특징	09
2.1.3 불화수소(HF)의 사용처 및 용도	11
2.2 불화수소(HF) 관련 사고사례연구	12
2.2.1 (주)휴브 글로벌 불화수소 누출 사고사례	12
2.3 위험분석기법	19
2.3.1 위험분석기법 선정 개요	22
2.3.2 위험요소 평가(HAZOP 기법 이론)	24
2.3.3 영향범위 예측(Consequence Analysis 이론)	25
2.3.4 KORA 및 예비위험분석	26
2.3.5 방호계층 분석(Layer Of Protection Analysis, LOPA)	32

제 3 장 연구결과	37
3.1 안전성 확보 방안	40
3.1.1 공정개요	40
3.1.2 Hazard and Operability Analysis 결과	42
3.1.3 CA(KORA) CASE별 시뮬레이션 입력자료 및 결과	45
3.1.4 LOPA 개시사건 및 결과	49
3.2 경제성 검토 및 안전장치 선정결과	54
3.2.1 개시 사건별 IPL 적용 및 위험도 감소 비용	54
3.2.2 비용 & 효율에 따른 분포표	64
제 4 장 결론 및 고찰	65
참고문헌	67

Table List

Table 1.1 Recent major accident case	03
Table 2.1 Physical and chemical properties of hydrogen fluoride	08
Table 2.2 Research method and flow(1)	20
Table 2.3 Research method and flow(2)	21
Table 2.4 Risk assessment technique	23
Table 2.5 Comparison of CA Software	25
Table 2.6 Preliminary risk analysis procedure	27
Table 2.7 Worst accident scenario selection	30
Table 2.8 Alternative accident scenario selection	31
Table 2.9 LOPA procedure for each step	36
Table 3.1 Typical frequency values of major initiating events	38
Table 3.2 Safety enhancing values of passive mitigation devices (independent protection devices)	39
Table 3.3 Safety enhancing values of active mitigation devices (independent protection devices)	39
Table 3.4 Process overview	40
Table 3.5 ISO Tank Loading/Unloading HAZOP (1)	43

Table 3.6 ISO Tank Loading/Unloading HAZOP (2)	44
Table 3.7 Necessary information for running KORA	45
Table 3.8 Average weather conditions for the year of the Ulsan	46
Table 3.9 Results of simulation by CASE	46
Table 3.10 Determining initiating event and calculate the frequency of risk of accident scenario	49
Table 3.11 Results of IPL application (1)	51
Table 3.12 Results of IPL application (2)	52
Table 3.13 Analysis results of LOPA safety improvement comparison	53
Table 3.14 Distribution table according to cost & efficiency	64

Figure List

Fig 2.1 MSDS of hydrogen fluoride	09
Fig 2.2 leakage accident of hydrogen fluoride scene in Hube-global	13
Fig 2.3 Plant full scene and dangerous substance tank lorry when leakage accident of hydrogen fluoride	13
Fig 2.4 Worker's work picture at the time of the accident	14
Fig 2.5 Crop damage status at the time of the accident	16
Fig 2.6 Independent protection layer	33
Fig 3.1 Process overview	41
Fig 3.2 CASE 1 Worst scenario damage range	47
Fig 3.3 CASE 2 Alternative scenario damage range	47
Fig 3.4 Piping rupture (risk reduction and cost by safety devices plot)	55
Fig 3.5 Piping leak/100m(10% equivalent diameter) (risk reduction and cost by safety devices plot) (1)	55
Fig 3.6 Piping leak/100m (10% equivalent diameter) (risk reduction and cost by safety devices plot) (2)	56

Fig 3.7 Atmosphere tank failure (risk reduction and cost by safety devices plot)	57
Fig 3.8 Gasket/packing blowout (risk reduction and cost by safety devices plot)	58
Fig 3.9 Safety valve open(failure) (risk reduction and cost by safety devices plot)	59
Fig 3.10 Pump seal failure (risk reduction and cost by safety devices plot)	60
Fig 3.11 Unloading/loading hose failure (risk reduction and cost by safety devices plot)	61
Fig 3.12 BPCS Instrument loop failure (risk reduction and cost by safety devices plot)	61
Fig 3.13 Regulator failure (risk reduction and cost by safety devices plot)	62
Fig 3.14 Small external fire (risk reduction and cost by safety devices plot)	63

**A Research on Optimized Safety Facilities by Using CA and
LOPA when Leaking of HF Storage Facilities.**

Ho Sung Cho

Department of Safety Engineering

Pukyong National University

Abstract

According to the chemical accident statistics of the past three years, chemical accidents caused by HF are continuously occurring.

This shows that the accident in the industrial site is not limited to the business premises, but has a significant impact on the resident and the surroundings of the business area outside the business establishment.

HF is estimated to be about 45,000 metric tons of domestic distribution in 2016, and the use of semiconductor gas and secondary batteries is increasing every year.

In particular, there are three business sites in the Ulsan National Industrial Complex, which accounts for 35 percent of the domestic distribution.

When toxic substances leak in Korea, research various ways to reduce the amount of damage and reduce it, several methods are currently being applied to reduce spreading scope of damage.

In this regard, the Ministry of Environment introduced a new system for Over Impact Assessment and the preparation of the Risk Management Plan,

Have a duty to submit the proper risk standard of business establishment by comparison and review the stability improvement rate of storage tank according to the level of application of easing device to use the over impact assessment general program since 2015.

In this research, Degree of danger is assessed using the risk Hazop of Portable storage facility related to HF leakage accident, a comparison of indoor and outdoor conditions and before and after discharge wall area were evaluated Based on one of the quantitative evaluation techniques : CA(Consequence Analysis).

Based on this, derive a potential risk accident scenario and suggest

improvement suggestion for scenario using LOPA(Layer Of Protection Analysis).

Also, analyze the applicability of optimized safety equipment and analyze the following before and after installation to minimize damage area and the amount of money by minimum economic safety facility investment money,

A research was conducted on the adequacy and applicability of the utilization to the guidelines for selection of protective gear range for disaster protection personnel and resident evacuation.

Based on this research, We hope to help minimize the damage to nearby residents that the devices that can reduce risk in the initial design part will complement, reflecting the safety improvement rate according to the level of application of the mitigation device to the HF business establishment.

Key words : HF Storage Tank, HAZOP, CA, LOPA

제 1 장 연 구 개 요

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라 산업구조는 화학부문이 차지하는 비중이 높아 2010년 기준 4조 1천억 USD로 세계 화학시장 점유율이 6위를 차지하고 있다. 현재까지 국내 상업적으로 유통된 화학물질은 약 4만4천종이며, 매년 약300종의 신규 화학물질이 국내시장에 출시되고 있다. 또한 UNEP[국제연합 환경계획]의 보고서에 따르면 2012년부터 2020년까지 화학물질 생산량이 약35% 증가할 것으로 평가하고 있고, 국내의 경우 화학물질의 종류로는 환경부의 유독물 및 사고대비물질 700여종, 고용노동부의 유해·위험물질 700여종, 지식경제부의 에너지 및 고압가스 50여종 및 국민안전처(기존 소방방재청)의 위험물 3,000여종 등을 포함하여 4,500여종이 각종 법규에 의해 규제를 받고 있으며 국내 기업체 현황은 울산, 여수, 온산, 대산, 시화등 대규모 화학 산업단지에 약 1,000개 업체가 있으며, 나머지 약 15,500개 업체는 중소형 산업단지 및 전국에 흩어져 있으며 특히 유해·유독한 물질의 취급으로 인하여 누출, 화재, 폭발 등이 발생하여 인근지역의 중대한 영향을 주는 중대재해산업사고 역시 전국 어디서나 발생되고 있다¹⁾.

이처럼 화학물질의 종류와 사용이 늘어나면서 화학사고도 더 많이 증가하고 있으며, 이에 따른 피해도 심각해지고 있다. 피해는 단순히 공장안에서 해결할 수 있는 수준이 아니고 공장주변의 주민과 환경에 회복하기 어려운 심각한 손실을 주고 있다.

최근 4년간 화학사고 통계조사 <Table 1.1>에 따르면 불화수소 취급으로 인한 화학 사고는 지속적으로 발생하고 있다.

HF(불화수소)는 2016년 기준 국내 유통량이 45,000 톤 정도이며, 주 용도는 프레온가스 냉매, 전자부품, 알루미늄 제조, 플라스틱 제조 등 여러 산업영역에서 광범위하게 사용되고 있다²⁾. 최근에 반도체가스 및 이차전지 제품의 원료로 투입되면서 사용량은 매년 증가하는 추세이다. 특히 울산국가산업단지에는 대기업에 해당하는 3개의 사업장이 있으며, 취급량도 국내유통량의 35%를 차지한다. 이처럼 불화수소의 사용량이 많아지는 반면 그에 따른 안전조치는 따라가지 못해서 중대재해산업사고 및 누출사고 등이 연이어 발생하고 있다.

안전사고의 주된 원인은 경비절감의 이유로 안전설비의 투자 및 기술자들을 충분히 확보하지 못해 도급업체에 의존하다 보니 정비 보수작업의 위험성이 커지고 있다.

Table 1.1 Recent major accident case³⁾

Accident Data	Region	Company	Accident Contents	Damage
12.09.27	Gumi	Hube-global	HF leakage from tank lorry(20ton) in Plant due to operator error(valve lever has opened)	Death 5 Injury 18
13.01.15	Cheongju	Global Display	A liquid leak containing 8% of the HF due to damage to the PVC pipe connected to the tank(Operator fall down and step down) when checking the LCD processing facility	Death 1 Injury 1
13.01.28	Hwaseong	Samsung	HF leakage due to poor flange fasteners (negligence of work), After changing the tank valve	Death 1 Injury 4
13.03.02	Gumi	LGsiltron	Leaking mixed acid(nitric acid, fluoric acid, acetic acid) due to container cover failure(negligence of work) during testing after filter cover replacement work	Injury 3
13.03.05	Gumi	Gumi-chemical	Chlorine leaks due to chlorine gas pipe cleanup unit failure(unconfirmed blower operating condition)	Injury 1
13.04	Ulsan	Samsung finechem	During the process of transferring liquid chlorine to the methyl chloride process, a 4-kilometer chlorine is discharged for 50 minutes due to pump failure	Injury 6
14.02.22	Ulsan	Koreazinc	Damage and leakage of a mixed xylene conveying piping buried underground during drilling to construct a bridge type steam piping column(30,000L)	
14.02.25	Ulsan	Isu-chemical	Pump internal permanent magnetic cover and separator cover contacts for internal&external permanent magnet caused by wear and tear, causing chemical(normal paraffin, mixed hydrofluoric acid) leaks	
14.08.24	Geumsan	Ram-technology	A leakage of hydrogen fluoride when opening the feed valve to transfer hydrogen fluoride to the production facility	Injury 7
15.11.15	Ulsan	Isu-chemical	1,000L of Hydrogen fluoride leakage due to drain valve failure of reactor during restart process of plant after routine maintenance	

예를 들면 과거 발생한 2012년 9월 27일 경상북도 구미시 제4국가 산업단지 내 (주)휴브 글로벌에서 일어난 불화수소 누출사고는 중소기업의 낮은 안전의식과 안전설비의 미비로 비롯된 대표적인 예라고 할 수 있다.

이 사고 외에 2013년 1월 27일에는 경기도 화성의 삼성 전자에서 50% 불화수소가 누출되어 근로자 1명이 사망하고 4명이 부상을 입는 사고도 연이어 발생하였다. 그리고 2015년 11월 16일 오전 0시 47분쯤 울산시 남구 울산 석유화학단지 내 합성세제 제조업체인 이수화학에서 농도 40% 불산 1000L 정도가 누출되어 인명 피해는 없었지만 지역 주민을 또 한 번 놀라게 하였다⁴⁾. 최근 발생한 이러한 크고 작은 불화수소 누출사고로 인하여 화학물질 누출에 대한 인식을 바꾼 전환점이 되어 정부와 국민의 관심이 높아져 화학물질 안전관리가 인근지역사회의 피해확산을 예방하기 위한 국가 정책의 중요한 과제로 대두되고 있다.

국내에서는 독성 물질 누출 시 피해정도와 이를 줄일 수 있는 방안에 다방면으로 연구 중이며, 피해확산범위를 줄이기 위한 여러 방법이 현재 적용되고 있다.

본 연구를 통하여 불화수소 저장시설에서 누출방지를 위한 안전설비의 적절한 선정에 관한 DATA를 확보하여, 설치단계에서 최적화된 안전장치 시스템을 구축하여 인근 지역 주민에 관한 2차 피해가 추가적으로 발생하지 않도록 위를 최소화해 도움이 되기를 기대한다.

1.2 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 HF(Hydrogen Fluoride) 누출사고와 관련된 이동식 저장설비의 정성적 평가 기법 중 Hazop(HAZard & Operability review)을 이용하여 잠재 위험성 사고시나리오를 도출하고, 정량적 평가 기법중 하나인 CA(Consequence Analysis)를 통해 실내/실외 조건 및 방류벽 설치 전후 등을 비교 평가하였다. 이를 통하여 LOPA(Layer Of Protection Analysis)를 활용하여 개시사건별 적용 가능한 IPL에 관한 개선안을 제시하였다. 또한 안전장치에 의한 위험도 감소와 비용을 비교하여 경제적인 안전설비 투자금액으로 피해지역 및 금액을 최소화 하여, 불화수소를 취급하는 중소기업 및 영세기업에 안전장치 설치 범위 산정의 가이드로의 적정성에 대하여 연구를 수행하였다⁵⁾.

또한, 위험도 산정기법(LOPA)을 적용하여 사고시나리오의 위험도를 산정하고 개시사건별 적용 가능한 안전장치를 적용하여 안정성 향상도를 산정하였다. 그리고 안전장치 적용 시 보수적 적용방안과 일괄적용 방안의 안정성 향상율을 각각 산정하고, 완화장치 적용 수준에 따른 안전성 향상율을 비교하고 HF 제조업체가 많은 울산 여천, 매암지역에 사고가 발생할 경우에 적용된 시뮬레이션의 결과로 최적화된 안전 시스템을 발굴하여 근본적

인 기업에서 위험도를 감소시켜 피해지역을 최소화 하여, 주민 대피 및 HF 저장시설의 안전장치 범위 선정의 가이드로의 활용 적정성 및 적용성에 대하여 연구를 수행할 것이다⁶⁾.

불화수소 누출사고와 관련된 이동식 저장설비의

- 1) 위험성평가의 정성적인 분석은 Hazop(Hazard & Operability review) 분석하여 사고 시나리오를 도출하였다.
- 2) 정량적 위험성평가 기법중 하나인 CA(Consequence Analysis)로 통해 실내/실외 조건 및 방류벽 설치 전후 등을 비교 평가하였다.
- 3) LOPA(Layer Of Protection Analysis)을 이용하여 위험도가 허용범위에 포함될 수 있는 IPL을 분석하여 안전설비의 위험도 감소방안에 대하여 개선안을 제안하였다.
- 4) 최적화된 안전장치에 의한 위험도 감소와 비용을 비교하여 경제적인 비용으로 피해지역 및 금액을 최소화 제시하였다.

제 2 장 연구물질 및 위험분석기법

2.1 연구대상 물질

2.1.1 불화수소(HF)의 물리 화학적 특성

불화수소(Hydrogen fluoride, HF)는 상압에서 대부분 기체 상태이며 무색, 자극적 냄새, 공기 중의 수증기와 반응하여 흰 연기(fume)를 형성한다.

불산(Hydrofluoric Acid)은 불화수소를 물에 녹여 만든 수용액으로 산성은 염산(HF(불산) $\ll$ HCl(염산) $<$ HBr $<$ HI)보다 강하지 않으나, 부식성이 크며, 인체에 노출 시, 조직 깊숙이 침투하여 수소이온과 Fluoride 이온으로 해리하며, 플루오린화 수소산은 강산으로 분류되는 염산이나 브로민화 수소산 등의 다른 할로젠화 수소들과 달리 플루오르와 수소 사이에 강한 수소 결합이 작용하여, 이온화가 잘 일어나지 않아 약산으로 분류된다.

$\text{HF} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{F}^-$ 하지만 플루오린화 수소의 농도가 높아지면 산도가 급격히 높아진다.



일반적으로 산업에 사용되는 불화수소의 종류 및 그 특성을 <Table 2.1>에 나타내었다.

Table 2.1 Physical and chemical properties of hydrogen fluoride

Property	Anhydrous HF (AHF)	Aqueous HF (70%)	Aqueous HF (50%)
Boiling Point	19.51 °C	66 °C	105 °C
Melting Point	-83.37 °C	-86 °C	-35 °C
Density at 25 °C	0.9576 g/cm ³	1.23 g/cm ³	1.17 g/cm ³
Vapor Pressure	922mmHg at 25 °C	150mmHg at 25 °C	12.4mmHg at 25 °C
Solubility in water	complete	complete	complete

2.1.2 불화수소 와 불산의 특징

1) 불화수소

불화수소(HF, Hydrogen Fluoride)는 상온, 상압에서 기체상태의 급성독성 물질로 무색이지만 강하고 자극적인 냄새가 나며 기체상태의 불화수소를 가압·냉각시키면 액화되어 다량으로 운반·보관이 가능하다.

2) 불산(Hydrofluoric Acid)

불화수소를 물에 녹여 만든 수용액으로 부식성물질이며 물의 함량이 높을 수록 증기압은 낮아지고 끓는점은 높아지므로 확산 위험성은 상대적으로 낮아진다.⁵⁾

물성	유해성
✓ 화학식: HF ✓ 분자량: 20.01 ✓ 비등점: 19.5°C ✓ 비중: 0.987	  부식성 급성독성 ✓ 흡입하면 치명적임 ✓ 피부에 접촉하면 치명적임 ✓ 삼키면 치명적임 ✓ 피부에 심한 화상과 눈에 손상을 일으킴

Fig 2.1 MSDS of hydrogen fluoride

3) 급성독성물질

산업안전보건법에 다음과 같은 물질을 급성독성물질로 규정하고 있다.⁵⁾

- 쥐에 대한 경구투입실험에 의하여 실험동물의 50퍼센트를 사망시킬 수 있는 물질의 양, 즉 LD50(경구, 쥐)이 킬로그램당 300밀리그램-(체중) 이하인 화학물질
- 쥐 또는 토끼에 대한 경피 흡수실험에 의하여 실험동물의 50퍼센트를 사망시킬 수 있는 물질의 양, 즉 LD50(경피, 토끼 또는 쥐)이 킬로그램당 1000밀리그램 - (체중) 이하인 화학물질
- 쥐에 대한 4시간 동안의 흡입실험에 의하여 실험동물의 50퍼센트를 사망시킬 수 있는 물질의 농도, 즉 가스 LD50(쥐, 4시간 흡입)이 2500ppm 이하인 화학물질, 증기 LD50(쥐, 4시간 흡입)이 10mg/ℓ 이하인 화학물질, 분진 또는 미스트 1mg/ℓ 이하인 화학물질

2.1.3 불화수소(HF)의 사용처 및 용도

불화수소는 탄화불소 계 플라스틱 제조, 냉매 제조, 석유정제(알킬화 공정) 우라늄 정련, 전자부품, 알루미늄 제조 등 여러 산업영역에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 스테인리스 강 산세, 유리에칭, 반도체, 프레온, 무기불화물 제조 원료 쓰이며, 도금용 전해제로도 사용되고 있다. 현재는 반도체 공정, 2차 전지 산업 쪽으로 발전하여 그 사용 범위를 넓혀 가고 있으며, 특히 크로로포름과 불화수소를 반응시켜 만든 사불화에틸렌으로 고분자 폴리테트라플루오르에틸렌(PTFE)이 흔히 말하는 테프론이다. 테프론은 광범위한 온도에서도 다양한 물질에도 반응하지 않은 소재로 불화수소를 원료로 하여 만들어 지고 있으며 최근 기능성 옷으로 떠오르는 고어텍스도 불소화합물인 PTFE를 변형해 막으로 만든 것이다. 이렇게 불화수소는 현재도 다양한 산업 범위에 걸쳐 사용되고 있으며 앞으로 그 용도는 더욱더 커질 것으로 예상된다²⁾.

2.2 불화수소(HF) 관련 사고사례연구

경북 구미 (주)휴브 글로벌 불화수소 누출 사고에 대하여 불화수소 누출 사고의 원인과 문제점, 피해 현황을 살펴보고, 그에 대한 대책을 강구하면서 당 논문의 연구 과제인 불화수소의 최적화 안전설비 SYSTEM을 연구하고자 한다.

2.2.1 (주)휴브 글로벌 불화수소 누출 사고사례

지난 2012년 09월 27일 15시 43분 경북 구미시 산동면 봉산리 구미 국가 산업단지 4단지 내 불산(55% HF 수용액) 제조업체인 (주)휴브 글로벌에서 무수불화수소(100% HF)가 누출되는 사고가 발생하였다. (주)휴브 글로벌은 2008년 8월에 설립되어 서울에 본사를 두고 제1공장은 충북 음성, 제2공장은 경북 구미에 설치하여 가동 중이었다. 구미공장은 직원 7명이 근무하면서 순도 99% 무수불화수소를 물과 희석하여 55%로 제조한 뒤 LCD Sliming 및 유리 식각용 원료로 납품을 하고 있었다.



Fig 2.2 leakage accident of hydrogen fluoride scene in
Hube-global

이 누출 사고로 약 8 ~9 Ton의 불화수소가 대기로 방출된 것으로 추정되며, 산업 단지 인근 지역의 농가에까지 불화수소 가스가 확산되어 지역주민, 가축, 농작물 등 살아있는 동식물에 급성 중독 현상이 나타나 피해가 속출하여 정부는 이 지역을 특별 재난 지역으로 선포하였다.



Fig 2.3 Plant full scene and dangerous substance tank lorry

when leakage accident of hydrogen fluoride

이 사고는 중국으로 부터 수입된 AHF(Anhydrous Hydrogen Fluoride) ISO Container(20 ton)에서 공장 회석탱크로 이송하기 위하여 호스를 연결하는 작업 과정에 근무자의 실수로 Valve가 Open되어 무수불화수소 약 8Ton이 누출된 사고이다. ISO Container의 상부에는 두개의 밸브(ON/OFF Type Ball Valve)가 부착되어 한 개는 액(Dip Pipe)을 이송하는 액체밸브이고 나머지 한 개는 질소 또는 공기를 가압하거나 벤트 시킬 때 사용하는 가스밸브이다. ISO Container의 무수불화수소를 이송하려면 액체용 호스를 연결하고 질소 호스를 연결하여 기밀시험을 실시하고 고압의 질소가스를 ISO Container에 주입하여 압력을 상승시키고 액체 밸브를 서서히 열면 AHF가 ISO Container 외부로 유도되어 목적하는 탱크까지 이송하는 원리이다.

<Fig 2.4>은 (주)휴브 글로벌 불화수소 누출사고 당시 근무자들의 작업 모습으로 사내 CCTV에 찍힌 화면이다.

Fig 2.4 Worker's work picture at the time of the accident

9월 구미의 평균온도가 19.6℃ 정도이고 AHF의 끓는점이 19.5℃ 이므로 ISO Container의 증기압은 0 kg/cm²G일 것으로 예상하지만 비응축 가스가 일부 포함되어 있으므로 0.3 ~ 0.5 kg/cm²G 정도의 압력은 될 수 있을 것으로 추정된다. <Fig 2.4>의 사진을 살펴보면 질소 호스를 들고 가는 것을

불화수소(HF) 누출 장면



볼 수 있다. 또한 작업자의 작업 모습은 정확히 보이지 않지만 액체밸브, 가스밸브의 블라인드 플랜지를 제거한 것으로 추정되고 근처에 가져다둔 가스호스를 연결하였다. 가스호스의 연결이 완료되고 한 작업자가 일어나면서 중심을 잃어 액체밸브의 레버를 발로 밟아 밸브가 오픈되어 AHF가 외부로 누출된 것이다. 호스를 연결하는데 필요한 작업 매뉴얼을 살펴보면 ISO Container내 압력을 확인하고 압력이 높으면(0.1Bar 이상) 가스밸브의 블라인드 플랜지를 제거하고 가스호스를 연결하여 재해설비로 압력을 벤트시키고 액체밸브의 블라인드 플랜지를 제거하고 액체용 호스를 연결하고 하도록 되어있다. 당시 공장 직원들은 작업 매뉴얼의 작업방법에 대한 교육이나, 개인 안전보호구 착용에 대한 필요성이 전혀 파악되지 못한 상태로 통상작업 방법으로 안전사고의 대비가 이루어지지 않은 상태로 작업하다 사고가 난 것으로 확인된다. 즉, 이번 사고는 작업장에서 갖추어야 할 안전수칙 불이행, 안전 보호복 및 안전보호 장비의 미착용, 열악한 근무환경과 안전 불감증에 의해 발생한 사고였다.

이번 누출 사고로 작업 중인 근무자를 포함하여 5명이 사망하였으며, 30명이 중경상을 입었고, 사고 발생 후, 2차 피해가 진행되면서 병원 치료를 받은 사람이 2,497명에 달하였다. 불화수소 노출에 대한 증상으로 사고 현장에 출동한 소방관, 경찰관은 물론 취재하던 기자, 주변 공장 직원, 인근 마을 주민, 사건 조사차 출동했던 공무원 등에서 피부 발진, 두통, 기침, 콧물, 호흡 곤란 등을 겪거나 눈이 따가운 증상이 나타났다⁷⁾.

또한, 환경적 피해 현황 <Fig 2.5>을 살펴보면, 구미시 산동면 봉산리를 중심으로 135헥타르의 농작물 피해와 가축 2,750여 마리 등의 피해가 접수되었다⁸⁾. 농작물에 대한 피해는 농작물이 고사하는 등 주로 포도, 사과, 배 등 과수 농가의 피해가 컸으며, 조경수와 가로수가 고사하였고, 가축에게는 기침과 콧물 증세가 나타났다.

이 누출 사고로 인해 사고가 발생한 공장뿐만 아니라 사고 현장 주변에 세워둔 차량 25대와 건물 외벽이 부식 현상을 보였으며, 구미 제4국가 산업단지 내 73개 업체가 94억 원의 피해를 보는 등의 경제적 손실을 입었다⁹⁾.



Fig 2.5 Crop damage status at the time of the accident

(주)휴브 글로벌 불화수소 누출 사고의 재발방지를 위한 안전 시스템을 고려해보면

1) 액상 유독물질을 취급하는 ISO Container 또는 탱크로리에는 On/Off 가 가능한 Ball Valve는 지향하고 Globe Valve를 설치하여 급격한 조작이 되지 않고 천천히 조작 가능하도록 한다.

2) ISO Container 또는 탱크로리의 가스 라인에는 역류 방지용 Check Valve 설치하고 압력 조정변을 설치하여 용기 내 압력이 일정하게 유지되도록 하며, 무수불화수소의 이송 배관에는 유량계와 ESV(Emergency Shut Off Valve)를 설치하여 유량이 일정 이상 초과하면 시스템을 중단하거나, 공급량의 1.5배를 초과하면 배관이 자동으로 차단되는 EFV(Excess Flow Valve)를 설치하여 누설 시 자동 차단되게 한다.

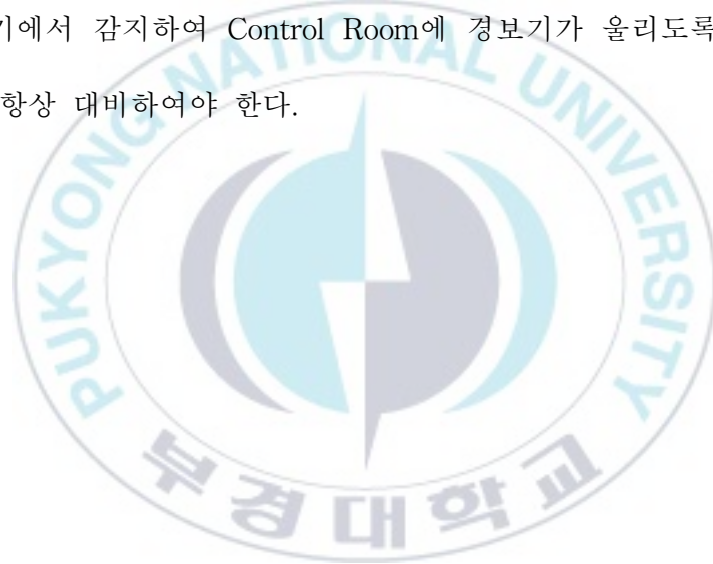
3) ISO Container 또는 탱크로리의 무수불화수소 이송 시 액체화물 하역 작업관리 시스템을 강화하여 유독물질 하역 시 방독 마스크, 안면 보호구, 전면 보호복 등 적합한 안전 보호구를 착용하도록 하며, 안전 작업 절차의 표준을 만들고, 물질 안전 보건 자료(해당 물질의 물리화학적 특성이나 누출 사고 시 대처 방법, 응급조치 요령, 취급이나 저장 방법 등)와 함께 근무자들을 교육하여야 한다.

4) 하역 작업 시 누출 사고를 대비하기 위하여 작업 장소를 밀폐된

Room으로 만들어 격리시키고, 가스가 누출되면 포집할 수 있도록 국소 배기 장치가 설치되어 있어야 한다.

5) Emergency Valve(긴급 차단 밸브)를 설치하여 불시의 누출 사고 시 원거리에서 자동으로 밸브를 조작할 수 있도록 하여 누출량을 최소화하는 동시에 근무자들의 안전을 고려하도록 해야 한다.

6) 밀폐된 작업 장소에 가스 감지기를 설치하여 가스가 미량 누출 시에도 가스 감지기에서 감지하여 Control Room에 경보기가 울리도록 하여 만약의 사태를 항상 대비하여야 한다.



2.3 위험분석기법

본 연구에서는 공정 위험성 분석을 위하여 Process Data를 활용 Hazop을 시행 하였고 실/내외 조건의 피해영향범위를 비교하기 위하여 CA기법 중 KORA를 통해 확산모델을 구동하였으며, 적합한 안전장치의 IPL을 적용하기 위하여 LOPA를 수행 할 계획이다.

주현수 등은 화학물질 누출사고의 위해성 평가를 통한 산업단지 환경영향평가 개선방안 연구에서 CARIS, NBC-RAMS 등 국내외 개발되어 사용 중인 6개의 모델 및 가이드라인을 이용하여 구미 불화수소사고의 피해범위를 산정하였고 고재선은 최근 불화수소 저장탱크에서의 가스 누출 시 공정 위험 및 결과영향 분석을 통하여 구미불화수소사고 케이스로 수치해석과 ALOHA를 이용한 결과해석을 수행하였다. 김건호는 사고시나리오별 위험도 산정을 통한 적정 위험도 기준 설정 김정환은 HF 누출사고 시 피해에 측범위 측정 및 장외영향평가를 위한 모델링 활용방법에 대한 연구를 수행하였다. 조가영은 사고대비물질 누출 시 독성피해 영향범위 상관관계식 개발에 관한 연구 등 앞서 소개한 연구들을 살펴보면 사고 발생이후 파악한 정보를 바탕으로 결과를 해석하여 사고피해범위를 정확하게 확보하려는 노력을 하고 있으나 초기 사고예방 및 사고피해범위를 줄일 수 있는 본질적

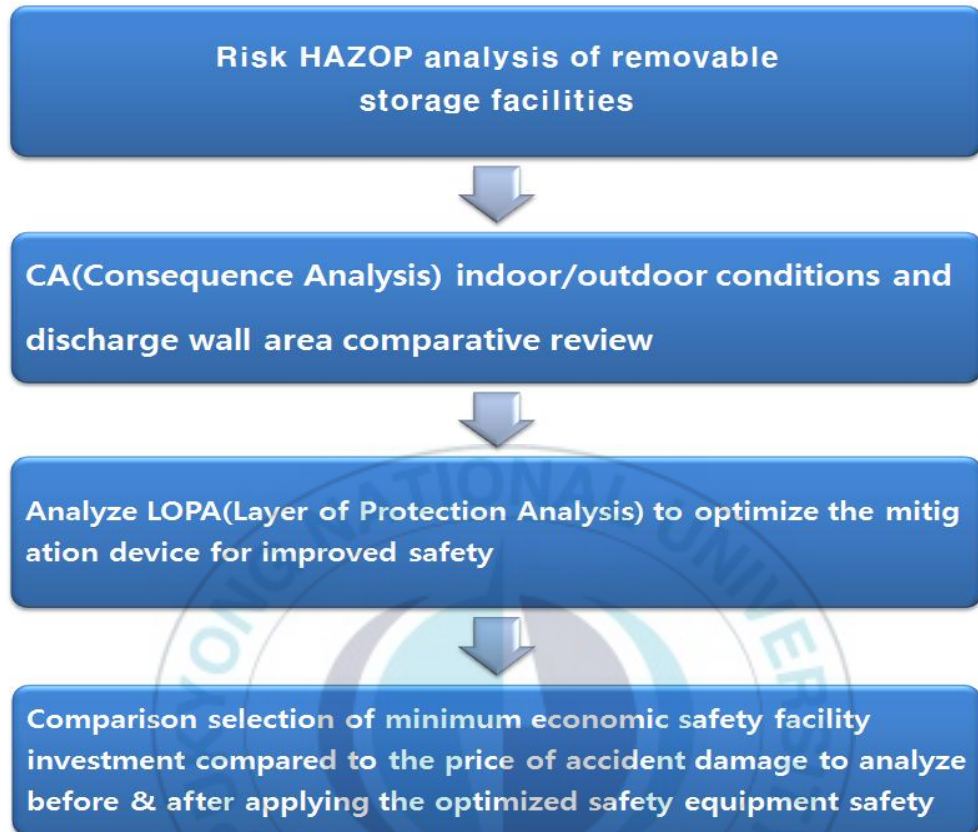
인 안전장치에 관해 활용하기에는 불가능하다고 볼 수 있다⁵⁾. 본 연구의 방법은 위험요소를 확인하는 정성적 위험성 평가는 위험과 운전 검토기법 (HAZOP)을 사용하고, 정량적평가인 CA 시뮬레이션 프로그램인 “KORA”를 이용한다. 또한 LOPA를 활용하여 위험도가 허용범위 내에 포함되는 지를 판단하여 위험도 감소 방안을 적용할지에 대한 판단을 내리게 된다. 만약 허용범위를 초과하는 위험도에 대해서는 방호계층분석법이나 적절한 방호설비를 제안하고, 감소된 위험도에 대한 피해영향 평가를 실시하여 적절성을 증명하는 과정을 수행한다¹⁰⁾.

Table 2.2 Research method and flow(1)

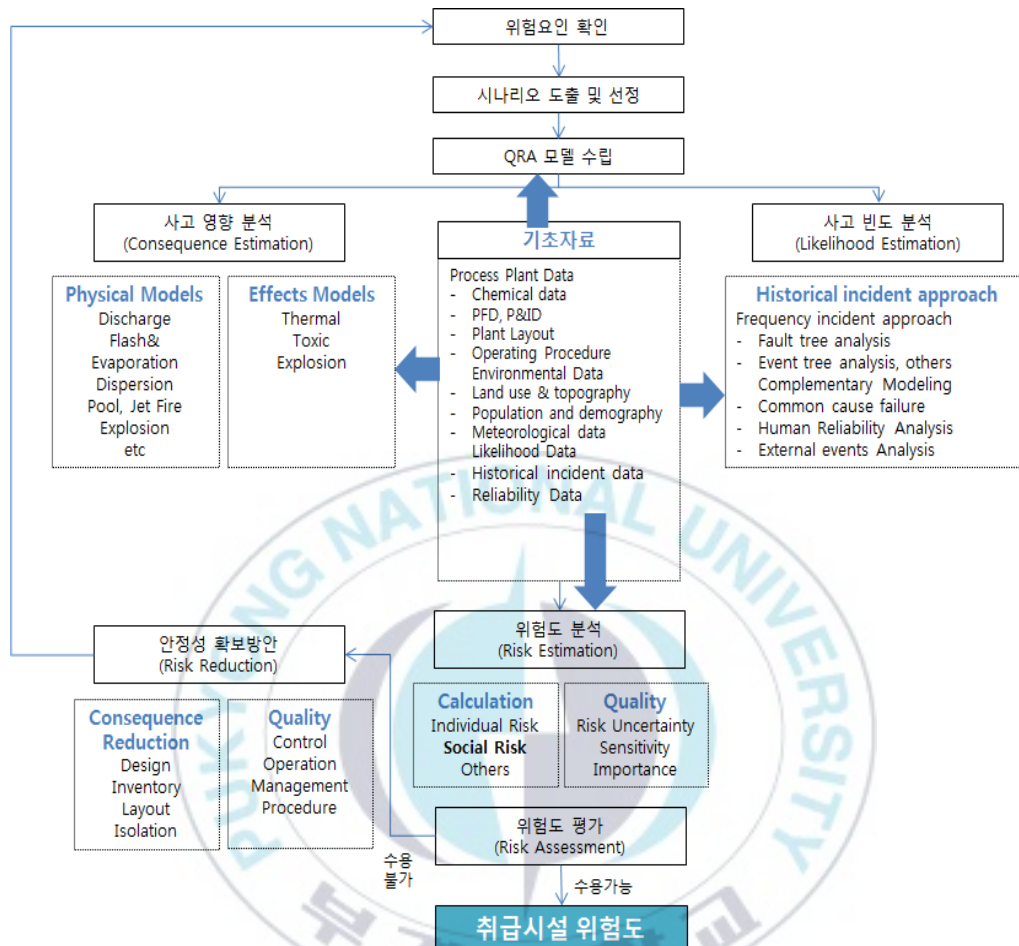
Table 2.3 Research method and flow(2)

2.3.1 위험분석기법 선정 개요

공정의 위험성을 평가하는 기법은 정성적 위험성 평가법과 정량적



위험성 평가법으로 나뉜다. 정성적 위험성 평가법은 대상공정에 대하여 상대적 위험성을 평가하는 방법으로 위험요인을 도출하고, 위험요인에 대한 안전대책을 확인하여 적절한 방안을 수립하는 방법으로 사용된다. 정량적 위험성 평가법은 대상공정에서 장치의 고장확률이나 예상되는 사고의 발생 확률을 계산하여 위험의 정도와 크기, 빈도를 이용하여 위험성을 평가하는 방법이다. 위험 요인 별로 사고로 발전할 수 있는 확률과 사고의 피해 크기를 수치적으로 계산하여 위험도를 나타내고, 사고위험성의 허용범위를 결정하여 허용범위를 벗어난 위험 요인이나 사고에 대하여 안전대책을



수립하는 방법으로 사용된다. 또한 정량적 위험성 평가법에 정성적 요소를 추가하여 위험성으로 분석하고 평가하는 반정량적 방법이 이용되기도 한다. 정성적, 정량적 위험성 평가법의 종류는 아래의 <Table 2.4>에서 보는 것과 같다.

Table 2.4 Risk assessment technique

정성적 위험성 평가법	정량적 위험성 평가법
상대위험순위(Relative Ranking)	결함수 분석(Fault Tree Analysis)
작업자 실수 분석	
체크리스트(Checklist Analysis)	사건수목 분석(Event Tree Analysis)
예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis)	원인-결과분석(Cause-Consequence Analysis)
위험과 운전분석(Hazard and Operability Analysis)	반정량적 위험성 평가법
이상위험도분석(Failure Mode and Effects Analysis)	방호계층분석(Layer Of Protection Analysis)
사고예상 질문 분석(What-If Analysis)	
What-If Checklist Analysis	

2.3.2 위험요소 평가(HAZOP 기법 이론)

정성적 위험성평가기법인 HAZOP는 공정에 존재하는 위험요소들과 운전상의 문제점을 알아내고자 이용되는 간단하고 구조적인 분석 방법이다. 이 방법은 설계의도에서 벗어나는 이탈현상을 찾아내고 공정의 위험요소와 운전상의 문제점을 알아내기 위하여 자유로운 토론방식(Brainstorming)을 사용하고 있다.

HF(불화수소)를 취급하는 저장시설에서 Unloading 작업 중 발생할 수 있는 모든 설비상의 문제점과 잠재 위험성을 찾아내고자 위험성평가를 실시하였다.

이 중 설비에 대해 각 설비별 공정 잠재위험 및 대상공정의 위험형태 파악이 가능하고, 설비별 위험요인에 따른 사고영향 시나리오 작성이 가능한 HAZOP기법을 사용하여 작성하였으며, 다음 각 호의 내용에 초점을 맞추어 위험성 분석을 실시하였다.

- 취급하는 유해화학물질의 종류
- 유해화학물질의 위험 유형
- 용기 또는 배관의 저장량
- 운전온도 및 운전압력 등 운전조건¹¹⁾

2.3.3 영향범위 예측(Consequence Analysis 이론)

1) Consequence Analysis (KORA)

위험성 평가 후 해당시설 또는 공정에서 유해화학물질이 어떻게 누출되는지를 분석하는 단계이다. 피해영향범위 예측모델의 기법은 확산모델, 화재모델, 폭발모델 단계로 구성되어 있으며, 누출분석은 배관의 파손, 플렌지 누출, 안전밸브 작동 운전원의 실수 등에 의한 잠재적인 누출원 등을 확인하여 방출되는 유해화학물질의 양, 온도, 밀도, 시간, 누출상태(가스, 증기, 액체, 혼합물)등을 계산한다¹²⁾.

CA Software의 종류는 <Table 2.5>와 같은 소프트웨어가 사용되고 있는 것을 알 많이 쓰이고 있는 것을 알 수 있다⁵⁾.

Table 2.5 Comparison of CA Software

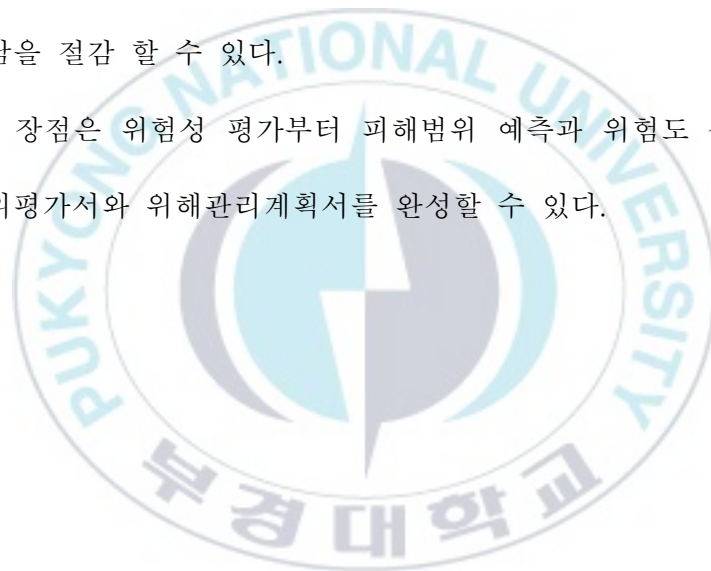
Division	TRACE	PHAST	ALOHA	KORA
Operate	SAFER Systems, Dupont	DNV GL	EPA, NOAA	Ministry of Environmental chemical substance
Feature	Reflect various accident data	Variety of flow analysis, Lots of material data, Frequency analysis	Simple modeling enables quick response	Simple modeling enables quick response

Cost	High cost	High cost	Free	Free
------	-----------	-----------	------	------

2.3.4 KORA 및 예비위험분석

본 연구에서는 2015년부터 시행된 화학물질관리법에 따라 화학물질을 취급하는 사업장은 장외영향평가 및 위해관리계획서를 제출해야하는 의무가 있기 때문에 무료로 활용할 수 있는 KORA 프로그램을 사용하여 업체의 비용과 부담을 절감 할 수 있다.

KORA의 장점은 위험성 평가부터 피해범위 예측과 위험도 산정까지 자동으로 장외평가서와 위해관리계획서를 완성할 수 있다.



1) 예비 위험 분석 절차

- 예비 위험 분석은 다음과 같이 3단계 절차에 따라 실시하였다.

Table 2.6 Preliminary risk analysis procedure

Step 1 (Identify risk factors and target equipment)	*Types of harmful chemical substance handling *Risk type of harmful chemical substance *Storage volume of containers and piping *Operating conditions such as operating temperature and pressure
	
Step 2 (Create impact matrix by risk factor)	*Toxic substance leakage *VCE *BLEVE *Pool fire *Jet fire
	
Step 3 (Analysis)	Analyse each scenario leakage condition

2) 단계별 분석내용

가. 1단계 (위험요인 및 대상설비 파악)

- 대상 공정에서 발생할 수 있는 사고 유형과 위험요인을 모두 파악하고 관련 설비를 선정하였다.(저장량, 고온/고압 운전조건, 독성, Light Component 등)

- 취급하는 유해화학물질의 화재, 폭발, 독성물질 유출, 누출 위험 등을 확인하여야한다.
- 주요 설비의 취급량, 저장량, 운전온도 및 압력 등의 운전조건을 모두 고려하여야한다¹¹⁾.

나. 2단계 (위험요인별 영향매트릭스 작성)

① 취급하는 유해화학물질의 위험 유형에 따라 고려할 수 있는 사고 영향을 영향매트릭스로 사고시나리오를 도출하여야 한다.

② 독성물질 - 누출에 의한 영향

③ 인화성 물질

- 지연점화로 인한 증기운 폭발 (VCE, Vapor cloud explosion)
- 즉시점화로 인한 BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)

- 저장탱크 또는 배관에서 인화성 물질이 누출, 그 물질이 액면을

형성하며 Pool fire 발생하는 형태이다.

- 압축 혹은 액화상태의 가스가 저장탱크나 배관에서 누출되어 Gas Jet을 형성하고 주위 공기와 혼합되면서 점화원과 접촉하여 Jet fire 발생하는 형태이다.

다. 3단계 (분석)

- 각각의 사고시나리오에 대한 누출조건을 매트릭스 형태로 분석한다.



Table 2.7 Worst accident scenario selection(valuation condition)

Sortation	Detail condition	Utilization of KORA
End point	- Concentration of toxic substances : ERPG-2 etc. - Radiant heat : 5kW/m² (40 seconds) - Overpressure : 1psi * Derived according to 「Technical Guidelines on Selection of Accident Scenarios」	Automatic setting (Enter the concentration of toxic substances in some cases)
Weather condition	- Wind velocity : 1.5m/s - Atmospheric stability : F (Stability) - Atmospheric temperature : 25℃ - Atmospheric humidity : 50%	Automatic setting
Leak point	Assuming leakage from the ground surface.	Automatic setting
Flexure of ground surface	- The condition of ground surface is selected between the cities and the countryside. · The cities : terrain with lots of buildings and trees · Countryside : flat terrain	Input required (weather condition)
Temperature of leak substance	- Use the operating temperature when a gas substance is handled by cooling it into a liquid state under atmospheric temperature and atmospheric pressure. - When handling liquids other than freezing liquid, apply a large figure of daytime maximum temperature or operating temperature.	Automatic application of condition input value
Leakage quantity	- apply a maximum amount stored within a single container or maximum amount retained in a single pipe(maximum operating capacity). - At this time, a reduction of leakage quantity by passive mitigation systems, such as physical barriers or prescribed procedures, such as the discharge walls, can be reflected. A method of calculating leakage quantity be prepared according to 「Technical Guidelines on Selection of Accident Scenarios」 .	Automatic application of condition input value
Leak Time	Maximum amount of containers or piping is considered as leakage for 10 minutes.	Automatic setting

Table 2.8 Alternative accident scenario selection(valuation condition)

Sortation	Detail condition	Utilization of KORA
End point	- Concentration of toxic substances : ERPG-2 etc. - Radiant heat : 5kW/m² (40 seconds) - Overpressure : 1psi * Derived according to 「Technical Guidelines on Selection of Accident Scenarios」	Automatic setting (Enter the concentration of toxic substances in some cases)
Weather condition	- Wind velocity : Apply a minimum of 1 year of average wind velocity for applying local weather, otherwise use 3m/s. - Atmospheric stability : Apply the most stable atmospheric stability during a minimum of one year of atmospheric conditions for applying local weather. Otherwise, use D(neutrality). - Atmospheric temperature : Apply a minimum of 1 year of average atmospheric temperature for applying local weather, otherwise use 25℃. - Atmospheric humidity : Apply a minimum of 1 year of average atmospheric humidity for applying local weather. otherwise use 50%.	Input required
Leak point	- Apply the height of the leakage surface of corresponding scenario.	Input required
Flexure of ground surface	- The condition of ground surface is selected between the cities and the countryside. · The cities : terrain with lots of buildings and trees · Countryside : flat terrain	Input required
Temperature of leak substance	- Use the operating temperature.	Input required
Leakage quantity	- Calculate according to 「Technical Guidelines on Selection of Accident Scenarios」 considering the reduced amount by passive and active mitigation systems, write by referring the method for calculating each of the following and submitting evidential matter on how to select the leakage quantity. ① KOSHA GUIDE(P-92-2012) Guidelines for leakage modeling ② KOSHA GUIDE(P-110-2012) Technical guidelines on measures to minimize damage to chemical plants ③ Calculation method of leakage according to risk based inspection criteria(API 581) of the American Petroleum Association	Input required
Leak Time	- Calculate according to 「Technical Guidelines on Selection of Accident Scenarios」 considering realistically potentially leak time, The calculation base shall be presented and the following methods apply.	Input required

	· Calculation method of leakage according to risk based inspection criteria(API 581) of the American Petroleum Association	
--	--	--

2.3.5 방호계층 분석(Layer Of Protection Analysis, LOPA)

방호계층 분석법은 위험을 분석하고 평가하는 반정량적 위험성 평가법이다. 사고결과와 특성을 찾아내고, 발생빈도를 예측하고, 예측된 사고의 발생빈도를 낮추기 위해 다양한 방호계층이 공정에 추천된다. 이 방법에서는 사고의 결과와 영향은 전문가의 의견에 의해 대략적으로 계산되고, 장비나 설비의 고장확률 정보와에 의해 사고발생 빈도를 계산하게 되며, 방호계층의 효과도 개략적으로 얻어진다.

방호계층 분석법의 목적은 특정 사고의 시나리오에 대해서 방호계층이 충분한가를 판단하는 것에 있다. 방호계층에 본질적으로 안전한 개념인 기

본 공정제어시스템과 운전가의 활동, 안전장치 시스템, 방호내벽과 같은 물리적 방호설비, 누출 후 물리적 방호, 공정의 비상조치계획과 지역사회의 비상조치 계획 등이 포함된다. 각각의 방호계층은 서로 독립적이며, 이를 독립방호계층(Independent Protection Layer, IPL)으로 칭한다. 이 방호계층의 개념을 <Fig 2.8>에 나타내었다. 하나의 시나리오에서도 여러 가지의 방호계층이 필요할 수 있는데, 공정의 복잡성이나 잠재사고의 피해 심각성 등에 따라 달라진다. 각 사업장 별로 위험수준의 허용범위가 다르고, 구분하는 기준이 다르기 때문에 허용가능 위험범위까지 위험을 감소하기 위해

충
수
방
층
공
추
어
한



분
한
의
호
계
이
정
에
가
되
야
다.

Fig 2.6 Independent protection layer

방호계층 분석법을 수행하는 중요단계는 다음과 같다. 사고결과 및 시나리오를 다른 것으로 선택하여 아래 과정을 반복한다.

- (1) 시나리오를 통한 사고의 결과를 도출한다.
- (2) 사고 시나리오 및 사고의 원인을 확인한다. 시나리오는 한 쌍의 원인-결과로 이루어진다.
- (3) 시나리오의 초기사건을 확인하고 초기사건은 모든 안전장치가 실패한 경우의 확률을 계산한다, 빈도는 시나리오가 타당하게 적용될 수 있는 운전 형태를 포함해야 한다¹¹⁾.
- (4) 선택한 사고결과에 유용한 방호계층을 조사하고, 각 방호계층의 실패 확률을 예측한다.
- (5) 사고시나리오의 영향, 초기사고, IPL date를 결합하여 사고시나리오의 위험도를 수학적으로 평가하는 단계이다. 초기사건의 발생빈도와 독립방호계층의 실패확률(Probability of Failure on Demand, PFD)을 곱하여 초기사건이 사고로 발생할 수 있는 가능성이 감소되었는지 확인하고 그 값을 도출한다.
- (6) 허용가능 위험범위에 속하는지 결정 후 허용할 수 없다면, 별도의 방호계층을 추가로 결정한다.

방호계층 분석법에서 사고 시나리오에 대한 빈도분석은 사고시나리오에 대한 실패빈도와 독립 방호계층에 대한 실패확률(PFD)을 활용하여 계산한

다. 각각의 독립방호계층(IPL)에 대한 실패확률(PFD)는 독립방호계층이 가장 작은 값이 10^{-1} 에서 가장 큰 값인 10^{-5} 까지 다양하다. 독립방호계층의 특정 시스템이나 조치사항을 분류하는 3가지 규칙은 다음과 같다.

(1) 독립방호계층(IPL)이 설계의도대로 기능을 수행할 때 효과적으로 사고의 진행을 방지할 수 있다.

(2) 초기사건과 다른 모든 독립방호계층(IPL)의 구성요소와 무관하게 독립방호계층(IPL) 기능은 같은 시나리오에 이용된다.

(3) 독립방호계층(IPL)은 지도검사가 가능해야 한다. 따라서 독립방호계층(IPL)의 실패확률(PFD)은 검토, 검사를 포함한 문서의 확인이 가능해야 한다.

이 방법에서는 특정 시나리오가 사고로 발전할 발생빈도는 다음 계산식을 이용한다.

$$\begin{aligned}
 f &= f \times \prod \text{PFD} \\
 &= f \times \text{PFD} \times \text{PFD} \times \cdots \times \text{PFD}
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

여기에서, f 는 초기사건 i 로 얻어지는 특정 사고의 결과 C 의 완화된 사고결과 빈도이며, f 는 초기사건 i 의 발생빈도이다. PFD는 특정 사고결과와 특정 초기사건 i 를 막을 수 있는 j 번째 독립방호계층(IPL)의 실패 확률이다.

Table 2.9 LOPA Procedure for each step

Step 1 : Selection and creation of accident scenario	- Determine the extent of the impact of the accident (Population number) - Selection of accident scenario zones
Step 2 : Occurrence frequency of initiating events	- Deduct all initiating events within the scenario area - Calculate the frequency of occurrence of each initiating event
Step 3 : Failure occurrence frequency	- IPL can mitigate each initiating event (Passive / Active easing device) - Increased reliability of stability by IPL in each initiating event
Step 4 : Risk analysis	- Number of residents within the range of impact x Failure occurrence frequency
Step 5 : Risk Assessment	- Steps to describe risk determination - Acceptance levels and comparisons
Step 6 : Secure safety measures	- If the risk is higher than the acceptable level - Establishment of risk reduction measures

제 3 장 연구결과

CA 평가에서 선정된 대안의 시나리오를 대상으로 분석된 사고의 영향과 사고발생빈도를 곱하여 위험도를 계산한다.

$$\text{사고 발생 빈도} = [\sum (\text{주요기기 고장빈도} \times \text{안전성향상도})]$$

- 1) '주요기기 고장빈도'는 각 사고를 발생시킬 수 있는 각 개시사건의 전형적인 빈도 값에 해당 건수를 곱하여 계산한다.
- 2) '안전성 향상도'는 수동적/능동적 완화장치의 설치로 인한 위험도 감소율을 반영하여, 완화장치가 복수인 경우에는 각각의 안전성 향상도를 곱하여 계산한다.
- 3) 주요 '개시사건의 전형적인 빈도 값' 및 '수동적/능동적 완화장치로 인한 위험도 감소율'은 다음의 <Table 3.1>를 이용하였다¹³⁾. 해당 표에 포함되지 않는 기타 위험도를 감소 완화장치의 경우 사용자 정의 완화장치로 별도로 추가하여 작성하였다.

Table 3.1 Typical frequency values of major initiating events¹²⁾

Division	Initiating event	Frequency
I-1	Pressure Vessel Failure(고압용기파열)	1×10^{-6}
I-2	Piping Rupture/100m(배관파열)	1×10^{-5}
I-3	Piping leak/100m(배관누출, 10%상당 직경)	1×10^{-3}
I-4	Atmosphere Tank Failure(상압 탱크 파열)	1×10^{-3}
I-5	Gasket/Packing Blowout(플랜지 등 가스켓 파손)	1×10^{-2}
I-6	Turbine/DieselEngineoverspeedwithcasingbreach (터빈등의 Overspeed로 인한 Casing 파손)	1×10^{-4}
I-7	Third-partyintervention (external impact by Back-hoe, vehicle, etc) 외부충격(차량등)	1×10^{-2}
I-8	Lightning strike(낙뢰)	1×10^{-3}
I-9	Safety valve open(Failure) (안전밸브고장)	1×10^{-2}
I-10	Cooling Water failure(냉각수 공급 중단)	1×10^{-1}
I-11	Pump Seal Failure(펌프 고장)	1×10^{-1}
I-12	Unloading/ Loading Hose Failure(입출하 시설 누출)	1×10^{-1}
I-13	BPCS Instrument Loop Failure(BPCS 결함)	1×10^{-1}
I-14	Regulator 등 Failure(조절밸브 고장)	1×10^{-1}
I-15	소규모 외부화재	1×10^{-1}
I-16	대규모 외부화재	1×10^{-2}

Table 3.2 Safety enhancing values of passive mitigation devices(independent protection devices)¹⁴⁾

Division	Protection devices	CONTENTS	Reduction rate
P-1	Dike (방류벽)	탱크로부터의 누출범위를 축소시킴	1×10^{-2}
P-2	Underground Drainage System (지하 누출 배관 설비)	배관으로부터의 누출범위를 축소시킴	1×10^{-2}
P-3	Open Vent with no valve	과압 방지설비(대기압)	1×10^{-2}
P-4	Fire Proofing (내화설비)	장비로의 열전달 보호로 인한 비상조치	1×10^{-2}
P-5	Blast wall/Bunker	대형 사고에 대한 범위를 축소시킴	1×10^{-3}
P-6	Inherently Safety Design	위험성평가 등을 고려한 근본적인 안전설계	1×10^{-2}
P-7	Flame Detonation Arrestor	화염원의탱크 또는 배관으로의 인입제한 (설계, 정비자료 보관조건)	1×10^{-2}

Table 3.3 Safety enhancing values of active mitigation devices (independent protection devices)¹¹⁾

Division	Protection devices	CONTENTS	Reduction rate
A-1	가스검지기 및 긴급차단밸브 (긴급차단시스템)	누출 시 즉시 감지하여 조치토록 하는 설비	1×10^{-2}
A-2	Relief Valve/Rupture Disc	기준 이상의 Over Pressure를 방지함	1×10^{-2}
A-3	Basic Process Control System	공정자동화시설	1×10^{-1}

3.1 안전성 확보 방안

3.1.1 공정개요

HAZOP 결과에 앞서 공정개요를 간략히 알아보면 HF 취급시설의 범위는 탱크로리에서 이송하여 저장탱크로 수취를 받는 사용설비까지이며, 공정의 HAZOP으로 도출한 잠재위험성으로는 과압, 부식, 과충전, 장비결함 등으로 독성물질누출 및 화재가 발생할 수 있다.

Table 3.4 Process overview

공정명	HF(불화수소) 취급시설		
공정개요	HF 탱크로리 차량으로 부터 저장탱크에 저장되며, 저장탱크에서는 각 공정의 원료 Feed Line으로 이송한다.		
주요 위험물질	HF		
공정 잠재위험 ¹²⁾	☒ 화재 ☐ 폭발 ☒ 독성 물질 누출 ☐ 폭발반응 ☐ 중합반응 ☐ 기타()	☒ 과압 ☒ 부식 ☒ 과충전 ☐ 오염 ☒ 장비결함	☐ 냉난방 · 전기손실 ☐ 지진 ☐ 태풍 ☐ 홍수
대상공정의 위험 형태	탱크로리 언로딩시 HF(불화수소)가 누출되어 대기 중으로 확산하는 경우이다		

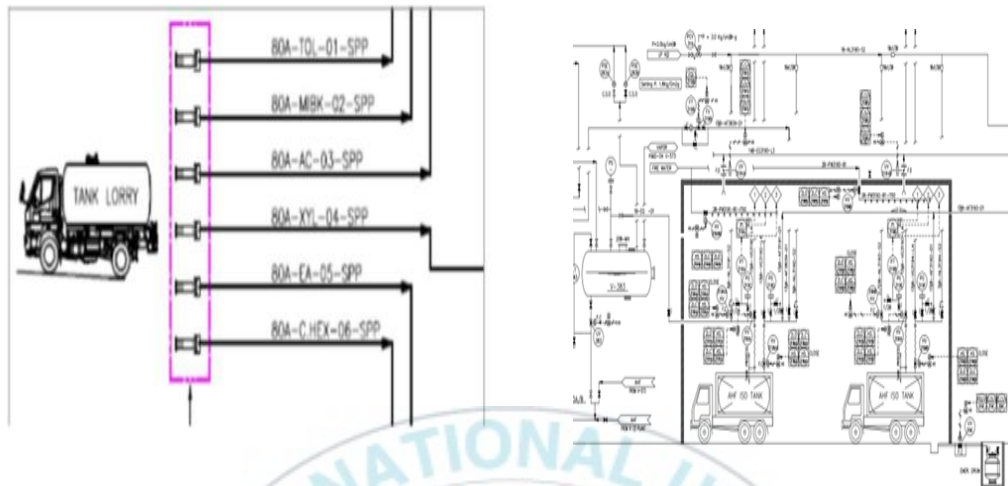
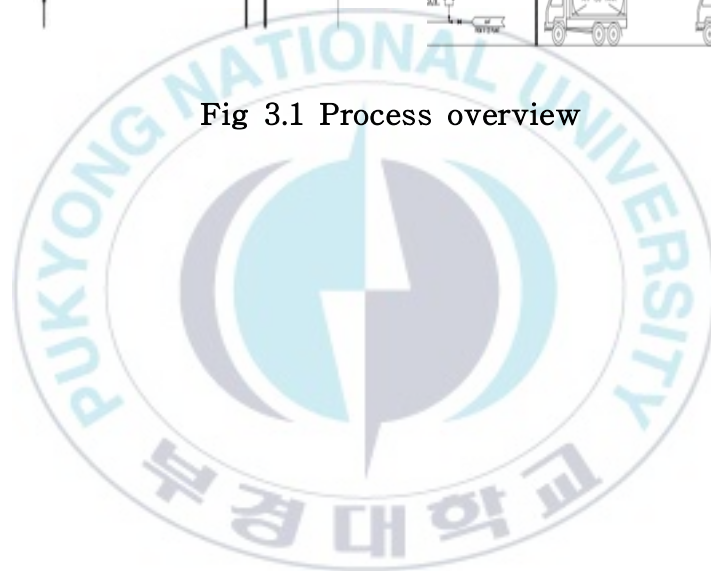


Fig 3.1 Process overview



3.1.2 Hazard and Operability Analysis 결과

- HF 저장 탱크의 HAZOP을 이용한 정성적 위험성 평가

Screen 단계의 HAZOP Review 결과를 <Table 3.5>, <Table 3.6>에 도출하였다. 그 결과를 분석하면 첫 번째 Guide Word가 없음(No)에 대해서는 Flow 중에 발생할 수 있는 가능한 원인으로는

- 1) Valve 오작동으로 인한 수동밸브 차단, 긴급차단밸브 차단, 배관 막힘의 3가지의 경우로서 이에 대해 나타나는 결과로는 운전지연이 되겠다.
- 2) Guide Word가 High의 도출된 가능한 원인으로는 Flow 중에 N2 가압 Valve Leak(과압), 수동밸브 차단으로 배관 내 압력 증가, 저장탱크와 균압 Valve Close 이로 인한 결과는 배관 파열 및 Flange 부에 HF 누출이 발생할 수 있으며, Guide word가 Low의 도출된 가능한 원인으로는 Flow 중에 N2 공급 중단으로 인한 HF의 역류로 위험성이 있는 것과
- 3) Temperature 부분에서 외부 화재발생으로 ISO Tank 내부 압력 상승으로 인한 Tank 파열로 화재 폭발 위험성이 있으며, Others Corrosion 배관 및 ISO Tank 부식으로 인한 HF 누출 발생에 대한 위험성을 도출하였다.

Table 3.5 ISO Tank Loading/Unloading HAZOP (1)

Guide Word	Deviation	Possible Causes	Consequence	Protection
No	Flow	a. Valve 오작동 - 수동밸브 차단 - 긴급차단밸브 차단 - 배관 막힘	a. 운전 지연	a.1 유량계를 설치하여 DCS에서 Monitoring a.2 DCS에서 긴급 차단밸브 조작가능 및 ON/OFF 상태 확인
High	Flow	a. N2 가압 Valve Leak(과압)	a. ISO Tank 손상, HF 누출	a.1 감압면 설치 a.2 ISO Tank Vent용 Valve 설치 (Interlock 설정) a.3 충전공간 완전 격리 a.4 ESD S/W 설치 a.5 충전장 내부 Vent 시스템 설치 a.6 물 분무 시스템 설치 a.7 충전공간 바닥 패수 유도용 Trench 설치 a.8 PT를 설치하여 ISO Tank 내부 압력 Monitoring(Alarm 설정) a.9 Gas Detector 설치 (누출 시 Alarm 발생)
		b. 수동밸브 차단으로 배관 내 압력 증가	b.1 배관 파열, HF 누출 b.2 Flange HF 누출	b.1 펌프 과전류 계전기 설치 b.2 이중배관 설치 b.3 ESD S/W 설치 b.4 충전장 내부 Vent 시스템 설치 b.5 물 분무 시스템 설치 b.6 충전공간 바닥 패수 유도용 Trench 설치 b.7 Gas Detector 설치 (누출 시 Alarm 발생)
		c. 저장탱크와 균압 Valve Close	c.1 배관 손상, HF 누출 c.2 Flange HF 누출	c.1 균압 Valve CSO 조치 c.2 이중배관 설치 c.3 ESD S/W 설치 c.4 충전장 내부 Vent로 시스템 설치 c.5 물 분무 시스템 설치 c.6 충전공간 바닥 패수 유도용 Trench 설치 c.7 PT를 설치하여 ISO Tank 내부 압력 Monitoring(Alarm 설정) c.8 Gas Detector 설치 (누출 시 Alarm 발생) c.9 Gasket & Flange cover
		d. Flow Meter 고장으로 인한 과충전	d.1 ISO Tank 손상, HF 누출	d.1 ISO Tank Vent용 Valve Open하여 충전(Emergency Tank로 연결) d.2 충전 공간 완전 격리 d.3 ESD S/W 설치 d.4 충전장 내부 Vent 시스템 설치 d.5 물 분무 시스템 설치 d.6 충전공간 바닥 패수 유도용 Trench 설치 d.7 PT를 설치하여 ISO Tank 내부 압력 Monitoring(Alarm 설정) d.8 Gas Detector 설치 (누출 시 Alarm 발생)

Table 3.6 ISO Tank Loading/Unloading HAZOP (2)

Guide Word	Deviation	Possible Causes	Consequence	Protection
High	Low	a. N2 공급 중단	a. HF의 역류	a.1 Check Valve 설치 a.2 이송중지 버튼 설치 a.3 비상용 N2 공급 배관 설치 a.4 PT를 설치하여 ISO Tank 내부압력 Monitoring (Alarm 설정)
Temperature	High	a. 외부 화재	a. ISO Tank 내부 압력상승으로 인한 Tank 파열, HF 누출	a.1 충전 공간 완전 격리 a.2 ISO Tank Vent용 Valve 설치 (Interlock 설정) a.2 충전장 내부 Vent 시스템 설치 a.3 충전장 상부 소방수 분사 시스템 설치 a.4 충전공간 바닥 폐수 유도용 Trench 설치 a.5 Gas Detector 설치 (누출 시 Alarm 발생)
Others	Corrosion	a. 배관 부식	a. 배관 부식, HF 누출	a.1 이중배관 설치 (Jacket 배관에 진공을 형성하여 진공상태 Monitoring)
		b. ISO Tank 부식	d. ISO Tank 부식, HF 누출	b.1 충전 공간 완전 격리 b.2 충전장 내부 Vent 시스템 설치 b.3 충전장 상부 소방수 분사 시스템 설치 b.4 충전 공간 바닥 폐수 유도용 Trench 설치 b.5 Gas Detector 설치 (누출 시 Alarm 발생)

3.1.3 CA(KORA) CASE별 시뮬레이션 입력자료 및 결과

<Table 3.7>은 CA를 분석 조건은 기본적인 끝점과 Tank의 재원은 최악/대안의 조건은 동일하며, 누출시간의 경우 최악의 경우 10분간 전량 누출되며, 대안의 경우 30분간 결속배관 직경의 100%인 40mm에서 누출되는 조건이다¹⁵⁾.

Table 3.7 Necessary information for running KORA¹⁶⁾¹⁷⁾

Accident Scenario Analysis Condition		
구분	최악의 시나리오	대안의 시나리오
끝점 (미국산업위생학회(AIHA))	복사열 : 5KW/m ²	복사열 : 5KW/m ²
	과압 : 0.1Mpa	과압 : 0.1Mpa
	독성영향 : ERPG-2	독성영향 : ERPG-2
용기형태	Tank type 수평형 탱크	Tank type 수평형 탱크
용기직경 (m)	2.7	2.7
용기높이 (m)	5.0	5.0
저장량 (Kg)	18,000	18,000
저장상태	액상	액상
저장액위 (M)	1.7	1.7
방류벽 면적 (m ²)	30	30
누출시간 (Sec)	600	1,800 (API 581)
풍속	1.5 m/s	1.5 m/s
누출률 (Kg/Sec)	30.0(총저장량의 10분간 누출속도)	4.33(총저장량의 30분간 누출속도)
총누출량 (Kg)	18,000	7,797
대기안정도	F(매우안정)	해당지역 1년간 평균 기상조건, D(중립)
대기온도 및 습도	25℃, 50%	25℃, 50%, NE
누출지점	지표면에 누출되는 것으로 가정	지표면에 누출되는 것으로 가정
누출량	최대량(10분 전량)	30분간 결속배관 직경의 100%인 40mm 누출

특이한 부분은 대기안정도에서 대안의 시나리오에서는 울산지역 1년간 평균 기상조건을 <Table 3.8>에 입력하였다.

Table 3.8 Average weather conditions for the year of the Ulsan

평균 온도	평균 습도	주 풍향	평균풍속	대기안정도	지표면의 굴곡도
(℃)	(%)		(m/s)		
15	64	NE	2.2	D	도시
년	월	평균 온도	평균 습도	주 풍향	평균 풍속
		(℃)	(%)		(m/s)
16년	1월	3.5	51	NNW	2.3
	2월	4.5	51	NW	2.3
	3월	8.9	49	NW	2.4
	4월	13.8	64	NE	2.4
	5월	20	54	W	2.2
	6월	21.5	78	NE	2.1
	7월	24.4	81	WSW	2.4
	8월	26.4	78	W	2.1
	9월	21.1	76	NE	2.3
	10월	16.6	59	W	2
	11월	12.4	76	NE	1.9
	12월	6.5	62	NW	2.1

Table 3.9 Results of simulation by case

CASE	Point of execution	실내, 방류벽 적용 전 (before)	피해범위 인구 수 (before)	실내, 방류벽 적용 후 (after)	피해범위 인구 수 (after)
CASE1	최악의 시나리오	ERPG-2 7,871.1M	553,960 명	ERPG-2 121.5M	2 명
CASE2	대안의 시나리오	ERPG-2 2,205.8M	5,729 명	ERPG-2 71.9M	2 명

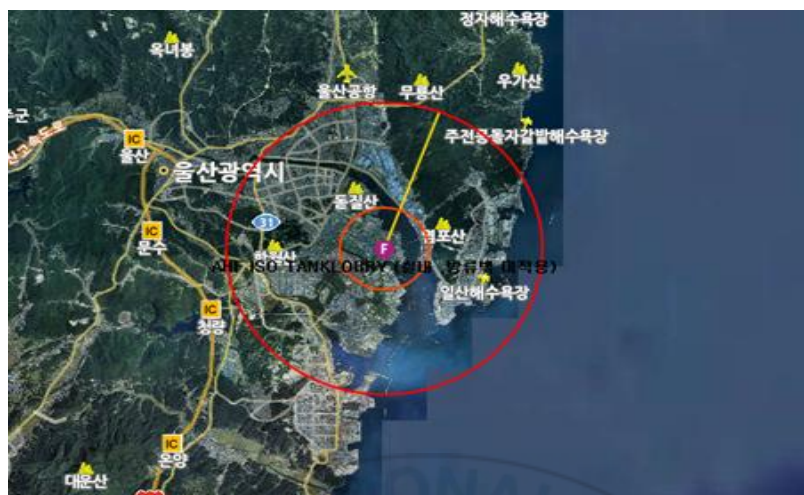


Fig 3.2 CASE 1 Worst scenario damage range



Fig 3.3 CASE 2 Alternative scenario damage range

CA 분석결과 피해영향범위를 줄일 수 있는 최대효과는 실내가 효율적임을 알 수 있다.

AHF ISO Tank의 실내/방류벽 적용 전, 후를 비교하면 실외에서 실내 및 방류터 설치 후 최악의 시나리오의 경우 64.78배 감소하였으며, 대안의 시나리오의 경우 30.67배 감소되었다.

최악의 시나리오의 경우 적용 전 피해반경은 ERP-2 기준으로 7.8 Km이고 인구수는 549,447명이며 적용 후 는 121.5m 피해범위 인구수는 2명으로 감소되었다.

대안의 시나리오의 경우 적용 전 피해반경은 ERP-2 기준으로 2.2 Km이고 인구수는 1,215명이며 적용 후 는 71.9m 피해범위 인구수는 2명으로 감소되었다.

(단 대상 기준은 울산 여천·매암 지역 영향범위 내 주민수와 인근 사업장 근로자수 등 사고의 강도를 고려한 위험반도이다.)

3.1.4 LOPA 개시사건 및 결과

1) 개시사건 적용

LOPA를 활용한 위험도 분석의 첫 단계인 잠재적 위험성 Hazop을 바탕으로 한 개시사건의 적용 및 발생빈도는 <Table 3.10>과 같다.

Table 3.10 Determining initiating event and calculate the frequency of risk of accident scenario¹²⁾

Division	Initiating event	Frequency
I-2	Piping Rupture/100m(배관파열)	1×10^{-5}
I-3	Piping leak/100m(배관누출, 10%상당 직경)	1×10^{-3}
I-4	Atmosphere Tank Failure (상압 탱크 파열)	1×10^{-3}
I-5	Gasket/Packing Blowout (플랜지 등 가스켓 파손)	1×10^{-2}
I-9	Safety valve open(Failure) (안전밸브고장)	1×10^{-2}
I-11	Pump Seal Failure (펌프 고장)	1×10^{-1}
I-12	Unloading/ Loading Hose Failure (입출하 시설 누출)	1×10^{-1}
I-13	BPCS Instrument Loop Failure(BPCS 결함)	1×10^{-1}
I-14	Regulator 등 Failure(조절밸브 고장)	1×10^{-1}
I-15	소규모 외부화재	1×10^{-1}

2) 개시사건별 안전장치 적용

개시사건별로 적용 가능한 안전장치를 검토한 IPL의 결과는 아래의 <Table 3.11>, <Table 3.12>과 같다.

배관파열로 인한 가스 누출 시 A-1은 Gas detector로 감지되어 Pump가 정지 되는 시스템이다. CCTV의 경우 제어실의 작업자가 상시 공정을 확인할 수 있으며 수동으로도 비상정지 제어가 가능한 시스템이다.

A-2(Relief valve & Rupture disc)는 배관이 파열되기 전 일차적으로 압력을 해소하는 장치이다.

A-3(BPCS)는 제어실에서 공정에 설치되어 있는 각종 압력계의 수치를 확인하여 작업자가 실시간 control 할 수 있는 시스템이다.

탱크로리의 입/출하 시설의 경우 Flexible Hose를 사용하게 되는데 고정식 배관이 아니라 체결 시 누출의 위험빈도가 높아 A-1, A-3를 적용하였다.

Table 3.11 Results of IPL application (1)

Equipment	Initiating event	IPL		PFDs
Steel Pipe	Piping Rupture/100m (배관파열)	A-1	Gas detector & Emergency shutoff valve & CCTV	1.00E ⁻⁰²
		A-2	Relief valve & Rupture disc	1.00E ⁻⁰²
		A-3	Basic Process Control System	1.00E ⁻⁰¹
	Piping leak/100m (배관누출, 10% 상당직경)	A-2	Relief valve & Rupture disc	1.00E ⁻⁰²
		A-6	Double Pipe	1.00E ⁻⁰²
		A-7	Air pollution prevention facility	1.00E ⁻⁰¹
Process Vessel	Atmosphere Tank Failure (상압 탱크 파열)	P-3	Open vent with no valve	1.00E ⁻⁰²
		A-1	Gas detector and emergency shutoff valve & CCTV	1.00E ⁻⁰²
		A-7	Air pollution prevention facility	1.00E ⁻⁰¹
		A-5	Emergency Tank	1.00E ⁻⁰²
Flange	Gasket/Packing Blowout (플랜지 등 가스켓 파손)	A-1	Gas detector and emergency shutoff valve & CCTV	1.00E ⁻⁰²
		A-8	Flange & Valve Cover	1.00E ⁻⁰¹
Valve	Safety valve open (Failure)	P-3	Open Vent with no valve	1.00E ⁻⁰²
		A-2	Relief valve & Rupture disc	1.00E ⁻⁰²
		A-1	Gas detector and emergency shutoff valve & CCTV	1.00E ⁻⁰²

Table 3.12 Results of IPL application (2)

Equipment	Initiating event	IPL		PFDs
Pump	Pump Seal Failure (펌프 고장)	A-1	Gas detector and emergency shutoff valve & CCTV	$1.00E^{-02}$
		A-7	Air pollution prevention facility	$1.00E^{-01}$
Loading/ Unloading facility	Unloading/ Loading Hose Failure (입출하 시설 누출)	A-1	Gas detector and emergency shutoff valve & CCTV	$1.00E^{-02}$
		A-3	Basic Process Control System	$1.00E^{-01}$
BPCS Instrument	BPCS Instrument Loop Failure	A-3	Basic Process Control System	$1.00E^{-01}$
		A-7	Air pollution prevention facility	$1.00E^{-01}$
Regulator	Regulator등 Failure (조절밸브 고장)	A-2	Relief valve & Rupture disc	$1.00E^{-02}$
		A-7	Air pollution prevention facility	$1.00E^{-01}$
Etc.	Small external fire	A-4	Fixed fire extinguishing system	$1.00E^{-01}$

3) LOPA의 분석 결과

불화수소 저장 Tank에서 개시사건 별 적용 가능한 모든 안전장치를 고려하여 사고시나리오의 안전성을 향상하도록 선정할 경우 IPL의 완화장치 적용사례 외에 추가로 완화장치를 적용하여 일괄 적용과 보수적 적용 시의 안전성 향상도를 <Table 3.13>에 비교하였다⁶⁾. Apply to all의 위험도는 $1.59\text{E}-03$, Conservative apply의 위험도는 $1.14\text{E}-02$ 으로 위험도가 7배가량 낮아지는 것으로 나타났다. (단 대상 기준은 대안의 사고시나리오 적용)

Table 3.13 Analysis results of LOPA safety improvement comparison

Division		LOPA		
		Apply to all	Conservative apply	Unapplied
Storage facilities	Storage tank (inside)	$1.59\text{E}-03$	$1.14\text{E}-02$	7.42^{-01}

3.2 경제성 검토 및 안전장치 선정결과

LOPA를 분석한 IPL의 장치들을 불화수소 취급 사업장 모두에게 적용할 수 없기에 개시사건별 안전장치에 의한 위험도 감소와 비용을 분석하여 중소기업에 적용할 수 있는 부분들을 제시하고자 한다.

3.2.1 개시 사건별 IPL 적용 및 위험도 감소 비용

<Fig 3.4>은 개시사건중 배관파열시 안전장치의 위험도대비 투자비용의 적정선은 (Relief Valve/Rupture Disc) + (Gas detector and emergency shut off valve & CCTV)을 알 수 있으며, 보수적 적용과 동일함을 알 수 있다.

<Fig 3.5>은 개시사건 중 Piping Leak 위험도 대비 비용의 경제적 효율은 (Relief Valve/Rupture Disc) + (Double Pipe Disc)을 알 수 있으나, <Fig 3.6> 법적인 설비인 (Air pollution prevention facility)은 사업장에서 의무적으로 설치하여야 함으로 (Relief Valve/Rupture Disc) + (Air pollution prevention facility)을 보수적적용으로 포함되었다. 그러나 추후 경제성 효율이 좋은 <Fig 3.5> (Relief Valve/Rupture Disc) + (Double Pipe Disc)로 개선되어야 될 것으로 판단된다.

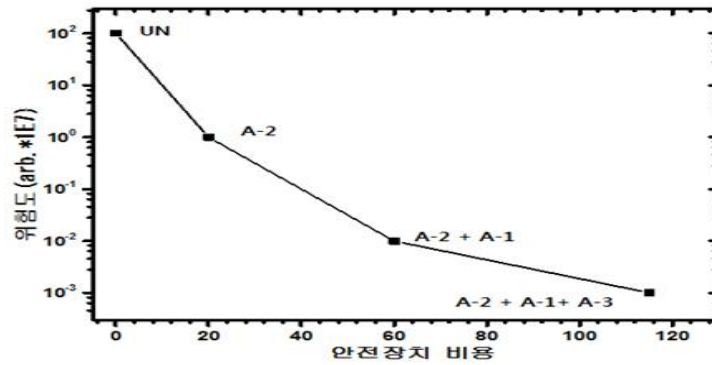


Fig 3.4 Piping rupture

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-2 ; Relief Valve/Rupture Disc.

A-1 ; Gas detector and emergency shut off valve & CCTV.

A-3 ; Basic Process Control System.

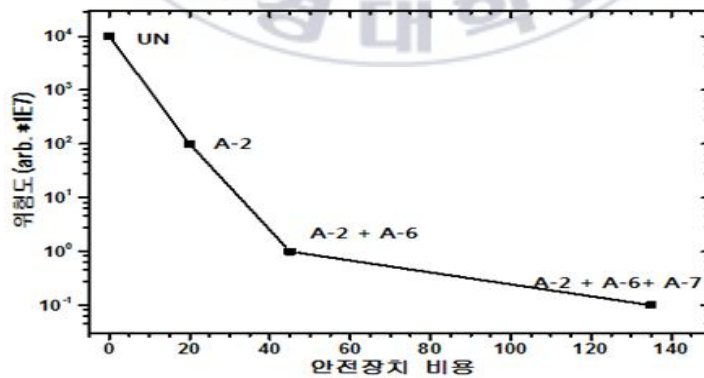


Fig 3.5 Piping Leak/100m(10% Equivalent diameter)

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN; unapplied.

A-2 Relief Valve/Rupture Disc.

A-6 Double Pipe Disc.

A-7; Air pollution prevention facility.

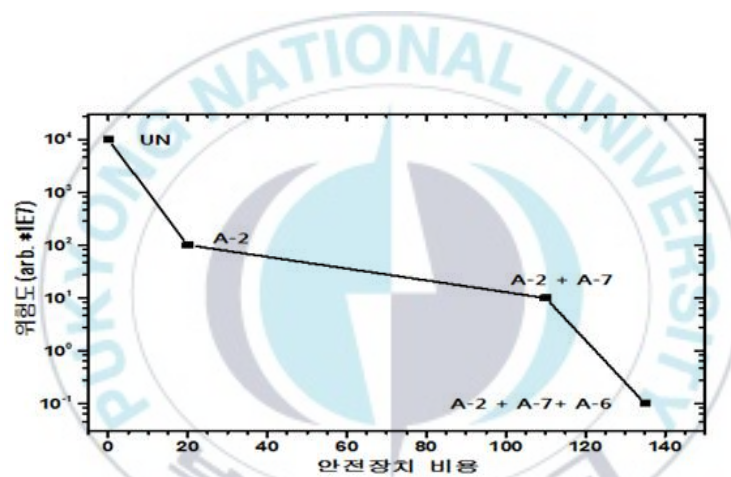


Fig 3.6 Piping Leak/100m(10% Equivalent diameter)
(risk reduction and cost by safety devices plot) (2)

UN ; unapplied.

A-2 ; Relief Valve/Rupture Disc.

A-6 ; Double Pipe Disc.

A-7 ; Air pollution prevention facility.

<Fig 3.7>는 개시사건 중 (상압탱크 파열) 안전장치의 보수적 적용은 (Open vent with no valve) + (Gas detector and emergency shut off valve & CCTV) + (Air pollution prevention facility)을 알 수 있다.

<Fig 3.8>은 개시사건 중(플렌지 등 가스켓 파손) 누출시 안전장치의 보수적 적용은 저비용 고효율 (Flange & Valve Cover) + (Gas detector and emergency shut off valve & CCTV)임을 알 수 있다.

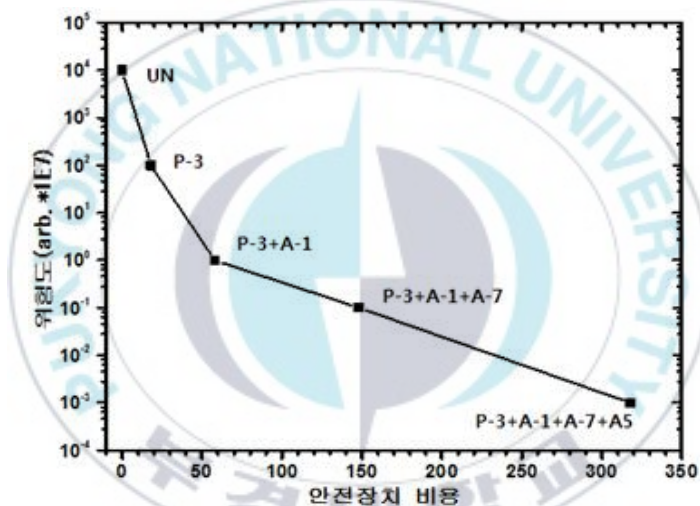


Fig 3.7 Atmosphere Tank Failure

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

P-3 ; Open vent with no valve.

A-1 ; Gas detector and emergency shut off valve & CCTV.

A-7 ; Air pollution prevention facility.

A-5 ; Emergency Tank.

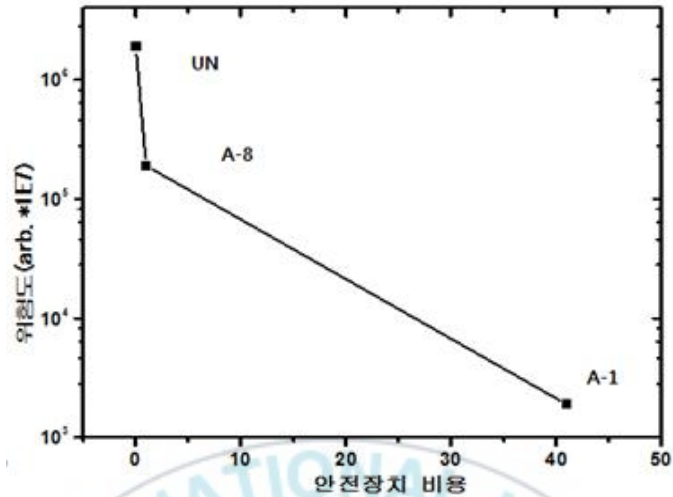


Fig 3.8 Gasket/packing blowout

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-8 ; Flange & Valve Cover.

A-1 ; Gas detector and emergency shut off valve & CCTV.

<Fig 3.9>은 개시사건 중 (안전밸브고장) 안전장치에 공통항목으로 저비용 고효율 으로 일괄 적용하여 (Open vent with no valve) + (Relief Valve/Rupture Disc) + (Gas detector and emergency shut off valve & CCTV)을 알 수 있다.

<Fig 3.10>은 개시사건 중 (펌프고장) 안전장치에 보수적용인 공통항목
(Gas detector and emergency shut off valve & CCTV)과 법적의무시설인
(Air pollution prevention facility)임을 알 수 있다.

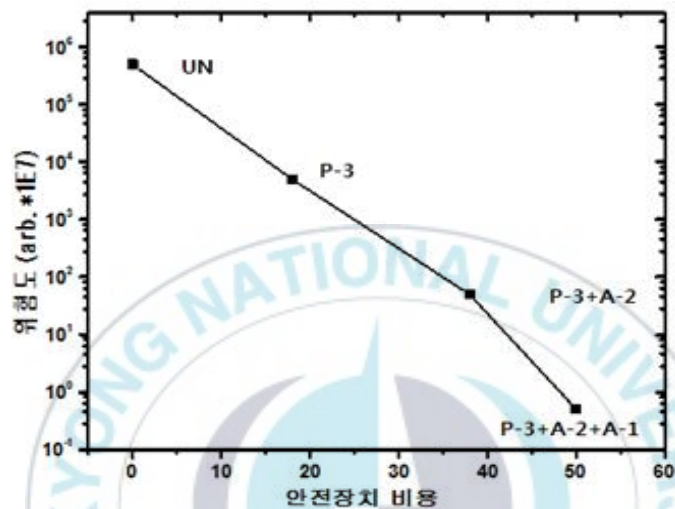


Fig 3.9 Safety valve open(failure)

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

P-3 ; Open vent with no valve.

A-2 ; Relief Valve/Rupture Disc.

A-1 ; Gas detector and emergency shut off valve & CCTV.

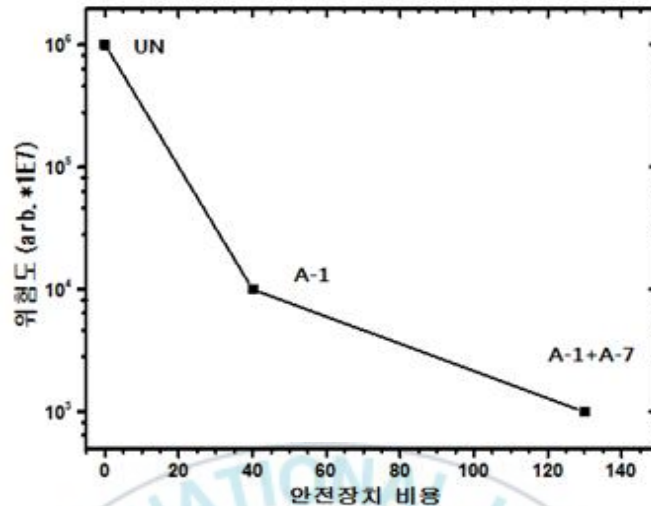


Fig 3.10 Pump seal failure (risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-1 ; Gas detector and emergency shut off valve & CCTV.

A-7 ; Air pollution prevention facility.

<Fig 3.11>은 Unloading/Loading hose Failure는 (Gas detector and emergency shut off valve & CCTV)적용(공통항목), (Basic Process Control System)(고비용 저효율)을 제외한다.

<Fig 3.12>은 BPCS 결함은 (Air pollution prevention facility)적용(법적의무사항), (Basic Process Control System)(고비용 저효율)을 제외한다.

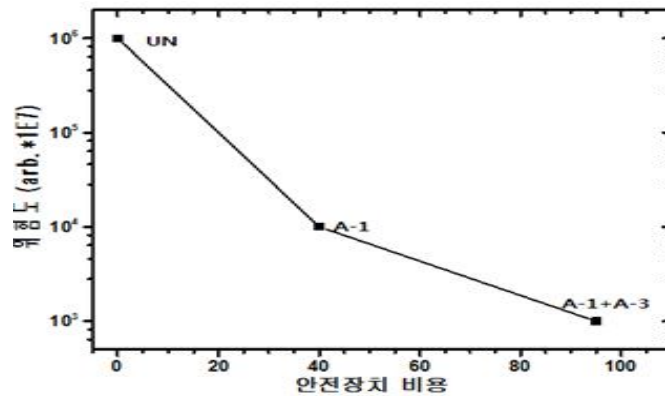


Fig 3.11 Unloading/loading hose failure (risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-1 ; Gas detector and emergency shut off valve & CCTV.

A-7 ; Air pollution prevention facility.

A-3 ; Basic Process Control System.

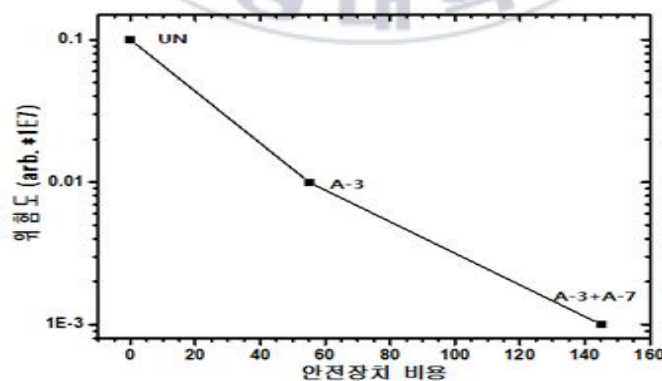


Fig 3.12 BPCS Instrument loop failure (risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-3 ; Basic Process Control System.

A-7 ; Air pollution prevention facility.

<Fig 3.13> Regulator 고장의 (Relief Valve/Rupture Disc), (Air pollution prevention facility)을 적용한다.((Relief Valve/Rupture Disc 저비용저효율공통)경우 (Air pollution prevention facility)(고비용 저효율, 법적의무사항))

<Fig 3.14> 소규모 외부화재에서 (Fixed fire extinguishing system)는 단독이며 법적사항이다.

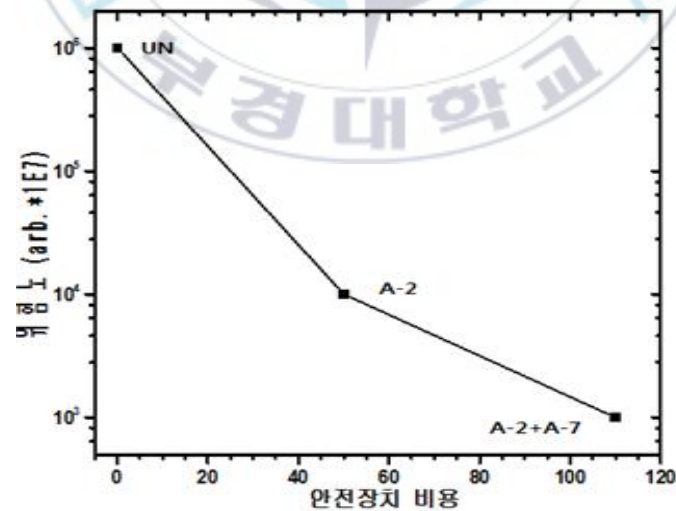


Fig 3.13 Regulator failure

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-2 ; Relief Valve/Rupture Disc.

A-7 ; Air pollution prevention facility.

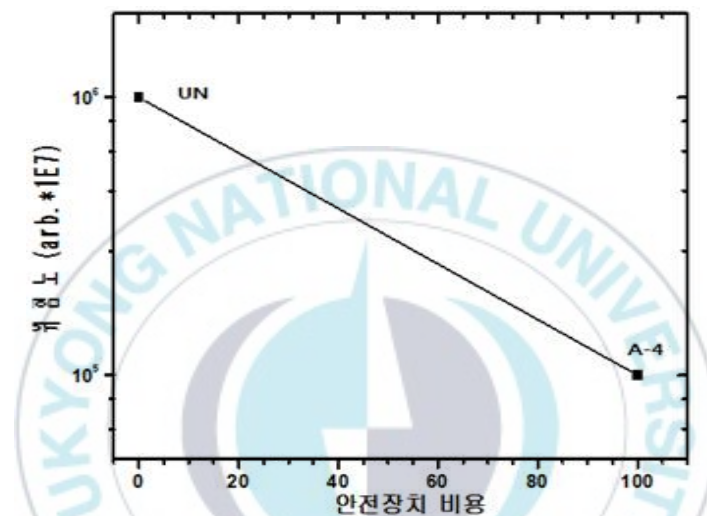


Fig 3.14 Small external fire

(risk reduction and cost by safety devices plot)

UN ; unapplied.

A-4 ; Fixed fire extinguishing system.

3.2.2 비용 & 효율에 따른 분포표

비용과 효율에서 저비용 고효율((Dike), (Open vent with no valve), (Gas detector and emergency shut off valve & CCTV), (Relief Valve/Rupture Disc))을 보수적 설비를 적용하면 허용 가능한 위험도를 얻을 수 있으나, 법적 의무사용을 적용을 배제할 수 없기에, (Fixed fire extinguishing system), (Air pollution prevention facility) 저비용고효율이지만 보수적 설비에 포함되어 있다. 그러나 장기적으로는 (Basic Process Control System), (Emergency Tank), (Double Pipe Disc)등의 안전장치를 도입하여 더욱더 안전한 위험도를 확보하여야 할 것으로 판단된다.

Table 3.14 Distribution table according to cost & efficiency

• 저비용 고효율 • 공통적 적용	P-1, P-3 A-1, A-2	• 저비용 저효율 • 선택적 적용
• 고비용 고효율 • 미래지향적 설비	A-3, A-5 A-6	• 고비용 저효율 • 법적 의무 사항

구분	방호장치
P-1	Dike
P-3	Open vent with no valve
A-1	Gas detector and emergency shutoff valve & CCTV
A-2	Relief valve & Rupture disc
A-3	Basic ProcessControl System
A-4	Fixed fire extinguishing system
A-5	Emergency Tank
A-6	Double Pipe
A-7	Air pollution prevention facility
A-8	비상방지 쉴드

제 4 장 결론 및 고찰

본 연구를 통해서 불화수소 누출사고와 관련된 이동식 저장설비의 안전 설비의 위험성평가를 정성적인 Hazop(HAZard & Operability review)분석 하여 사고시나리오를 도출하였으며 정량적 위험성평가 기법중 하나인 CA(Consequence Analysis)로 통해 실내/실외 조건 및 방류벽 면적 설치 전후 등을 비교 평가하였다. 이를 통하여 LOPA(Layer Of Protection Analysis)을 이용하여 개시사건별 적용 가능한 완화장치를 적용하여 안전성 향상도를 산정하였다.

위험도 분석 결과 HF 저장시설에 설치되어 있거나 설치 가능한 개별 안전장치의 사고방지 효과를 사고발생빈도의 정량적인 감소량으로 분석함으로써 간접적으로 측정할 수 있었다.

완화장치 적용 시 일괄적용 방안과 보수적 적용방안과 적용하지 않았을 경우를 안전성 향상율을 각각 산정하고, 완화장치 적용수준에 따른 안전성 향상을 위한 안전장치 투자금액과 위험도 산정결과를 비교하여 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CA 분석 결과 울산 여천/매암 지역의 피해영향범위를 줄일 수 있는 효과는 실내설비가 효율적이다.(피해범위 감소 : 최악 67 배, 대안 30 배)
2. LOPA 분석 결과는 Apply to all의 위험도는 Conservative Apply

에 비해 위험도가 7배가량 감소하였다.

3. 안전 설비의 투자금액은 Apply to all 651,825천원, Conservative Apply 417,450천원으로 Apply to all 대비 64% 수준으로 나타났다.

4. Conservative Apply의 경우 현행법에서 허용가능 한 위험도 수준이며 투자금액도 절감되기 때문에 Conservative Apply로 선정하였다.

5. 비용과 효율에서 고비용 저효율로 나타나지만 법적 의무 설치 사항이므로 Apply to all, Conservative Apply에 모두 적용하였으며, 고비용 고효율 부분은 향후 설비투자를 하여 위험도를 저감시켜야 한다.

본 연구를 통하여 불화수소 취급 사업장에서 초기 설계 시 위험도를 감소시킬 수 있는 안전장치를 사전에 검토하여 사업장뿐만 아니라 인근주민들의 피해를 최소화 하는데 도움이 되었으면 한다.

향후 이 연구를 바탕으로 개별안전장치에 대한 추가적인 개발이 필요하고 사고발생을 정량적으로 줄이면서 가격이 저렴한 순서대로 우선순위를 정해 Data Base하여 이를 중소기업이 효율적으로 활용할 수 있도록 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) G. W. Lee, “Current Status and Countermeasures of Chemical Substance Safety”, <http://www.gasnews.com>, 2015.
- 2) J. H. Kim, “A Study on the Corrosion Characteristics of Steel Alloy and Nickel Alloy According to Hydrofluoric acid Concentration”, Institute of e-Vehicle Technology at University of Ulsan, 2016.
- 3) H. Y. Song, “Improvement Plan of Chemical Substance Accident Response System”, Technical Research Division of Korea Fire Safety Association, 2013.
- 4) K. H. Kwon, “Once Again, Hydrofluoric acid Leakage Accident at Isu-Chemical in Ulsan”, <http://news.chosun.com>, 2015.
- 5) B. G. Jung, “Study of Chemical Accident Initial Response based on Consequence Analysis”, Master’s thesis of Safety Engineering at Pukyong National University, 2015.
- 6) G. H. Kim, “Establishment of Appropriate Risk Criterion Based on Risk Assessment per Accident Scenario”, Environment·Safety

Convergence at Inha University, 2017.

- 7) B. C. Choi, “A Study on the Potential Risk of Producing the by-product of the HFC Clean Fire Extinguishing Agent”, Urban Sciences at University of Seoul, 2015.
- 8) J. G. Park, “A Study on the Improvement of the Chemical Accident Response System”, Korea Environment Institute, 2013.
- 9) H. G. Lee, “Collaboration between Evaluation and Audit”, Korea Institute of Public Administration, 2013.
- 10) H. M. Kim, “A Study on Risk Assessment using Data Analysis Program for the Life Cycle in the Chemical Processes”, Seoul National University Graduate School, 2013.
- 11) National Institute of Chemical Safety, “Written Manual of Over Impact Assessment”, Ministry of Environment, 2017.
- 12) I. H. Kwak, “Developing a Prediction Technique for Estimating the Effects of Harmful Chemical Substance in the Environmental Basic Infrastructure Based on Domestic Weather Conditions”, Inha University Graduate School, 2017.

- 13) CCPS, “Simplified Process Risk Assessment: Layer of Protection Analysis”, D.A. Crowl, ed. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2001.
- 14) J. K. Park, “Improvement Measures for Chemical Accident Policies in the Chemicals Control Act and Measures to Support the Industry(I)”, Korea Environment Institute, 2016.
- 15) American Petroleum Institute, “API 581 – Risk Based Inspection Technology, Third Edition”, 2016.
- 16) KOSHA GUIDE P - 102-2013, “Technical Guidelines on Accident Damage Prediction Technique”, KOSHA, 2013.
- 17) KOSHA GUIDE P-91-2012, “Technical Guidelines on the Estimation of Chemical Exposure Impact Index”, KOSHA, 2012.