



HAZOP 및 BOW-TIE를 이용한 위험물질 취급공정의 위험성평가

남민서 · †유병태*

한국교통대학교 안전공학과 석사과정, *한국교통대학교 안전공학과 부교수
(2023년 10월 25일 접수, 2024년 1월 19일 수정, 2024년 1월 20일 채택)

Hazardous Material Process Risk Evaluation Using HAZOP and Bow-tie

Min-Seo Nam · †Byung-Tae Yoo

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation
(Received October 25, 2023; Revised January 19, 2024; Accepted January 20, 2024)

요약

산업 및 과학기술의 고도화로 인해 신규 화학물질 수와 사용량은 꾸준히 증가하고 있으며 이에 따른 화학물질 안전관리의 중요성이 사회적으로 부각됨에 따라 국민적 요구가 높아지고 있다. 정부적인 차원에서 화학물질의 안전관리에 대해 부처별로 역할을 구분하여 관리하고 있으나 시설 노후화 및 취급 부주의 등의 문제로 매년 화학물질로 인한 사고가 빈번하게 발생되고 있는 실정이다. 국내에서 발생한 화학물질 관련 사고사례를 바탕으로 사고 유형을 분석한 결과, 누출·폭발·화재·기타 등의 순으로 사고가 발생하고 있으며 사고의 원인은 시설결함, 안전관리 미준수로 순으로 분석되었다.

본 연구에서는 화학물질 중 불산을 취급하고 있는 사업장을 대상으로 HAZOP을 통해 취급공정에 대한 유해위험요인을 파악하여 Bow-Tie를 활용한 위험성평가를 수행하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 동종·유사 사업장의 화학사고 예방을 위한 안전관리 계획을 개선할 수 있을 것이며 이를 통해 화학사고를 사전에 예방할 수 있는 화학 안전관리 체계의 선진화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract - With continuous advancements in industry, science, and technology, there is a steady increase in the number and utilization of new chemicals. The growing societal emphasis on chemical safety management is paralleled by an increasing public demand for robust safety measures. While various ministries at the government level oversee the safety management of chemical substances, the occurrence of accidents related to chemical substances remains frequent each year due to problems such as aging facilities and careless handling. Upon analyzing domestic chemical accident cases, incidents occurred predominantly in the sequence of leakage, explosion, fire, and others. The main causes of these accidents were examined, revealing facility defects and non-compliance with safety management as the primary contributing factors. In this study, Hazard and Operability Analysis (HAZOP) was employed to identify hazardous risk factors associated with the handling of hydrofluoric acid in workplaces, and a risk assessment was performed using Bow-Tie method. Based on the results of this study, it is expected to enhance safety management plans aimed at preventing chemical accidents in workplaces dealing with similar facilities. Ultimately, these insights contribute to the development of an advanced chemical safety management system, capable of proactively preventing potential chemical accidents.

Key words : chemical accidents, hydrofluoric acid, cause analysis, HAZOP-study, bow-tie

†Corresponding author: flyduck@ut.ac.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

산업 및 과학기술이 발전함에 따라 화학물질의 수와 사용량은 꾸준히 증가하고 있으며 화학사고 발생 비율 또한 지속적으로 높아지고 있다[1]. 화학물질로 인한 사고는 인간의 건강과 환경을 위협하고 화재·폭발 등의 2차 피해까지 초래하므로 화학물질의 안전관리에 대한 국민적 요구가 잇따른다.

화학물질은 정부적인 차원에서 유해화학물질, 사고대비물질, 유해위험물질, 독성가스, 위험물 등으로 구분되어 유형별로 관리되고 있으며 취급시설 설치·관리기준 진단, 취약시설 현장 맞춤형 안전교육 등 안전 역량을 강화할 수 있는 사업이 지원되고 있다[2]. 화학물질 안전관리에 대한 각 분야의 다양한 노력들이 이어지고 있지만 2012년 9월 27일 발생한 불화수소 누출사고 이후 불산에 대한 사회적 관심이 커진 상태에서 불산, 염산, 염소 등의 화학물질 누출 사고가 잇달아 발생하며 근로자 및 인근주민의 건강과 농경지 및 자연에 피해를 주어 사회적인 문제가 야기되고 있는 실정이다 [3].

화학물질종합정보시스템을 통해 2014년부터 2022년까지 국내에서 발생한 화학사고의 유형과 원인을 분석하였다. 화학사고 유형의 경우에는 누출이 559건으로 전체의 80%를 차지하는 것으로 분석되었다. 사고 원인의 경우 215건(39%)이 시설결함으로 나타났으며, 그 다음으로는 197건(35%)이 안전관리 미준수로 집계되었다. 화학물질 통계조사 결과, 2014년 497건, 2016년 518건, 2018년 745건 등으로 불산을 취급하는 업체는 꾸준히 증가하고 있다. 불산 취급 업체가 증가하는 만큼 불산 사고의 가능성 또한 증가하고 있으며, 2014년 이후 국내에서 발생한 불산 누출 사고 사례를 보면 Table 1과 같이 매년 발생하는 것을 확인할 수 있다.

이에 본 연구에서는 화학사고 예방관리를 위해 불산을 취급하는 사업장을 대상으로 Hazard and Operability(HAZOP), Bow-Tie를 적용하여 위험성평가를 실시하였으며 이를 통해 사고 원인분석을 수행함으로써 유사 사업장의 화학사고 예방을 위한 안전관리 계획을 개선할 수 있을 것이라 판단한다. 더 나아가 화학사고를 사전에 예방할 수 있는 안전환경체계의 선진화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 국내 화학사고 유형 및 원인 분석

화학물질종합정보시스템을 통해 최근 8년동안(2014년~2022년) 국내에서 발생한 화학사고의 유형을 살펴보면, 먼저 사고유형의 경우 전체 701건의

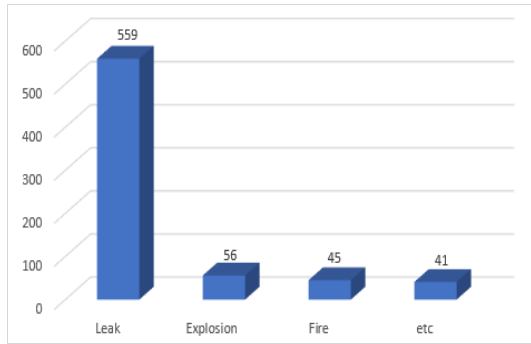


Fig. 1. Type of accident

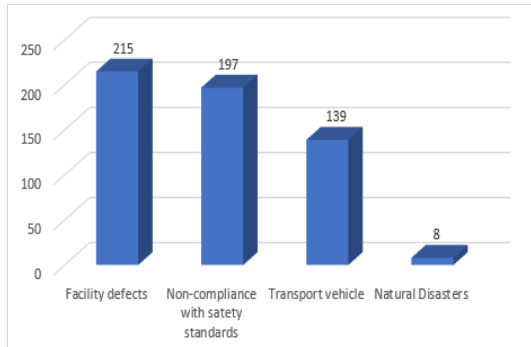


Fig. 2. Cause of the accident

화학사고 중 559건(80%)이 누출사고로 나타났으며 폭발(56건), 화재(45건) 및 기타(41건) 순으로 분석되었다.

화학사고의 원인의 경우, 시설결함 215건(39%), 안전기준 미준수 197건(35%), 운송사고(139건), 자연재해(8건) 순으로 사고의 원인이 분석되었다.

III. 대상물질 및 사례연구

3.1. 대상물질 선정

불산(Hydrofluoric acid)은 무수불산, 불산수용액 등 불화수소를 함유하고 있는 화학물질을 말하며 높은 반응성을 가지는 특성으로 촉매제나 탈수제로 이용된다. 특히 반도체 공정에서는 강산인 황산, 과산화수소, 불산을 이용하여 웨이퍼에 형성된 불필요한 자연 산화막이나 유기물을 제거하기 때문에 필수 화학물질 중 하나로 사용되고 있다[4].

불산의 National Fire Protection Association(NFPA) Code는 유해성(4), 인화성(0), 반응성(1)로서 유해성이

Table 1. hydrofluoric acid leakage accidents

No	Date of loss	Area	Accident substance	Cause of accident	Accident type
1	14.02.25	ulsan	hydrofluoric acid	Facility defects	Leak
2	14.07.21	dangjin	hydrofluoric acid, sulfuric acid, nitric acid	Non-compliance with safety standards	fire
3	14.08.24	geumsan	hydrofluoric acid	Non-compliance with safety standards	Leak
4	14.10.23	seoul	hydrofluoric acid	Non-compliance with safety standards	Leak
5	15.09.02	yeong cheon	hydrofluoric acid nitric acid, water	Non-compliance with safety standards	Leak
6	15.11.16	ulsan	hydrofluoric acid	Facility defects	-
7	16.06.04	geumsan	hydrofluoric acid	Facility defects	Leak
8	17.05.11	yangsan	hydrofluoric acid, nitric acid	Facility defects	Leak
9	18.04.17	ulsan	hydrofluoric acid	Facility defects	Leak
10	20.03.06	kongju	hydrofluoric acid, nitric acid	Non-compliance with safety standards	Leak
11	21.04.06	icheon	hydrofluoric acid	Non-compliance with safety standards	Leak
12	22.05.02	paju	hydrofluoric acid	Non-compliance with safety standards	Leak

높으며 다른 산과 달리 피부를 뚫고 조직 속으로 쉽게 침투해 강한 독성을 일으킨다. 불산을 취급하는 공정에서는 불산의 물리적 특성 및 독성 등에 의하여 오염물과 부산물이 발생하며, 이는 장치 및 환경에 부정적인 영향을 끼치므로 근원적인 안전을 확보할 필요성이 있다.

국내에서 발생한 불산 누출 사고를 분석한 결과, 2014년부터 2022년까지 총 12건의 사고가 발생하였다(Table 1). 해당 12개 사고의 원인 중 7건이 안전기준 미준수, 5건이 시설결함으로 분석되었다. 이처럼 지속적으로 발생하고 물질 특성상 사고 시 피해영향범위가 넓을 수 있는 불산에 대한 안전성을 분석하고자 하였다.

3.2. 대상 공정 분석

위험성평가 대상 사업장은 불화수소 또는 불산을 원료로 사용하여 반도체 식각액, 박리액, 마스크 세정액 등을 제조한다[5].

대상 사업장의 공정은 지게차를 이용하여 IBC 탱크를 입고하고 이송펌프를 수동 조작하여 이송라인을 통해 불산이 필터하우징으로 이동되고 불산 탱크 로리로 상차 후 출하하는 공정절차를 갖추고 있다. 불산 이송 시 과압이 발생하면 필터하우징에 설치된 파열판이 작동하여 배출라인을 통해 비상피트로 이동되고 레벨 센서 및 연동된 수증펌프의 작동의 작동을 통해 폐수조로 배출되도록 구성되어 있다[6].

정상적인 공정은 IBC 탱크로 입고된 불산이 탱크

로리로 상차하고 출하하는 흐름을 가지지만, 불산 이송 과정 중 필터 막힘으로 인해 필터하우징에 과도한 압력이 가해지고 필터하우징의 파열판이 작동하고 이후 파열판을 통해 실내저장Pit로 모아진다. 이때 수증펌프가 미작동하여 불산이 폐수조로 이동되지 못하고 실내저장Pit 외부로 누출되는 사고가 발생하였다.

V. 위험성평가

4.1. 위험성평가 진행 순서

위험성평가는 HAZOP-Study, Bow-tie 순으로 진행하였다. 공정에 존재하는 위험요인과 운전상의 문제를 파악하기 위해 HAZOP기법을 사용하였으며, HAZOP기법을 활용하여 불산 취급 공정의 검토구간을 구분하고 유해위험요인을 추정하였다. 도출된 결과를 바탕으로 유해위험요인의 실태를 파악하고 이를 평가 및 관리하기 위해 Bow-tie를 실시하였으며 Bow-tie를 통해 사고의 원인과 결과 및 대책을 도식적으로 나타냄으로써 대책의 적정성을 검토하였다.

4.2. HAZOP-Study 수행

위험성평가 진행 시, 파악한 유해위험요인의 위험도 판단을 위해 Risk Matrix를 선정해야 된다. 이에 빈도와 강도를 이용하여 위험성의 크기를 산출하고자 Risk matrix를 마련하였다. 고용행정통계를 통해 사업장현황을 파악하고 고용노동부 고시 제2020-53호(사업장 위험성평가에 관한 지침)를 활용하여 Fig. 3.과

Likelihood	Severity				
	1	2	3	4	5
5	5	10	15	20	25
4	4	8	12	16	20
3	3	6	9	12	15
2	2	4	6	8	10
1	1	2	3	4	5

같이 Risk Matrix를 완성하였다. HAZOP-Study를 통해 선정된 공정에 존재하는 위험을 최대한 분석하였으며 유해위험요인에 대한 위험도와 개선사항, 권고사항을 순차적으로 마련하고 필요시 위험등급을 감소대책을 마련하고자 하였다. 본 연구에서는 불산의 이송구간과 필터 후단 불산 처리구간을 기본적인 구분하였다.

Fig. 3. Risk matrix

Table 2. Remedial Action Plan

Action Number	Action Priority	Risk Level		Improvement Recommendations	Action plan
		Before Action	After Action		
7	1	20	9	Installation of Hydrofluoric Acid Leak Detector	Installation of Bottom Leakage Detector for the Facility Installation of Upper Gas Detector for the Facility
				Establishing Countermeasures through Damage Prediction Assessment	Developing Emergency Response Plans Using Damage Prediction Programs
				Issuance of Portable Hydrofluoric Acid Detector	Issuance of Portable Hydrofluoric Acid Detectors for Each Worker
3	2	15	9	Issuance of Portable Hydrofluoric Acid Detectors for Each Worker	Establishing Procedures for Hot Work Permit during Welding Operations
				Installation of Safety and Health Signs in the Workplace	Attachment of MSDS by Substance or Affixing MSDS for Each Substance
2	3	12	9	Differential Pressure Gauge Installation and Visual Inspection Management	Installation of Pre- and Post-Filter Housing Differential Pressure Gauges, Creation and Implementation of Inspection Checklist
				Establishing Measures Through Damage Prediction Assessment	Development of Emergency Response Plans Using Damage Prediction Program
9	4	12	9	Detector-Linked Fire Suppression System	Installation and Integration of Hydrofluoric Acid Detectors and Sprinkler Systems
				Establishing Measures through Damage Prediction Assessment	Establishing Emergency Response Plans through Damage Prediction Program
8	5	12	8	Installation of Spare Blower	Parallel Installation of Spare Blower in the Suction Line
1	6	12	9	Placement of a Safety Valve Downstream of the Pressure Regulator	Installation of a Safety Valve at the Downstream of the Pressure Regulator
4	7	10	8	Change Management and Risk Assessment Implementation	Compliance with Change Control Guidelines and Conducting Risk Assessment
6	8	10	8	Attachment of Level Contact Sensors	Attachment of Emergency Pit Interior Level Contact Sensors
				Real-time Monitoring	Enhancement of Dockyard CCTV Installation and Control Room Monitoring
5	9	10	8	Installation of Standby Submersible Pump	Parallel Installation of Standby Submersible Pumps in the Conveyance Line
				Change Management and Risk Assessment Implementation	Compliance with Change Control Guidelines and Implementation of Risk Assessment

HAZOP 및 BOW-TIE를 이용한 위험물질 취급공정의 위험성평가

Node 1은 IBC탱크에서 탱크로리로 불산을 이송하는 구간이며, Node 2는 파열판이 파열된 후 하역장을 거쳐 수증펌프를 통해 폐수조로 이동되는 구간이다. Node 3은 누출된 불산이 송풍기를 통해 스크러버로 향하는 구간이다. Table 5, 6, 7은 HAZOP 수행 결과를 각각 보여주고 있다. Node 1에서는 4개, Node 2에서는 3개, Node 3에서는 2개의 허용불가 항목을 도출하였으며 총 9개의 허용불가 항목이 도출되었다.

허용불가위험 등급이 부여된 9개의 항목에 대해 불산 취급사업장의 위험성평가 결과, 사고조사 보고서 등 다양한 문헌 조사를 바탕으로 개선권고사항을 마련하였으며 그에 따른 조치계획을 수립하였다. 위험 등급이 가장 높은 단계는 '7. 불화수소 감지기' 항목임을 확인하였다. 불산은 불화수소와 물성이 상이하기 때문에 불산이 누출될 경우를 대비한 감지기를 별도로 설치해야 하지만 사업장 내에는 불화수소 감지기만 설치되어 있어 불산을 조기에 감지하지 못했다. 이에 감지설비 미설치에 대해 높은 빈도 등급을 부여하고 위험도를 크게 부여하였다. 불산 이송라인에 문제가 생겨 불산 누출 사고 발생 시, 이송되는 불산의 양이 많아 중대재해로 이어질 가능성이 높기 때문에 우선 위험저감감소 관리순위는 위험등급을 1순위로 설정하고 위험등급이 동일할 경우 강도를 2순위로 설정하였으며 그 후에는 Node 번호가 빠른 것으로 Table

2와 같이 우선순위를 결정하였다.

평가 결과를 바탕으로 허용불가 항목에 대한 위험 요소 비율을 산정하여 Table 3과 같이 나타내었으며 불산 누출이 78%로 가장 높게 차지하는 것을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 HAZOP-Study를 통해 도출된 불산 누출을 Top EVENT로 선정하였으며 불산 누출에 대한 공장의 내외부 피해를 분석하고 안전장치의 타당성을 파악하고자 반정량적 Bow-Tie 기법을 활용한 위험성평가를 추가적으로 수행하였다.

Table 3. Non-Permissible Item Risk Ratio Calculation

Division	Ratio
Loading Delay	0%
Pipe Damage	22%
Excessive Discharge Pressure of the Transfer Pump	11%
Plate Cracking	11%
Overfilling	11%
Hydrofluoric Acid Leak	78%

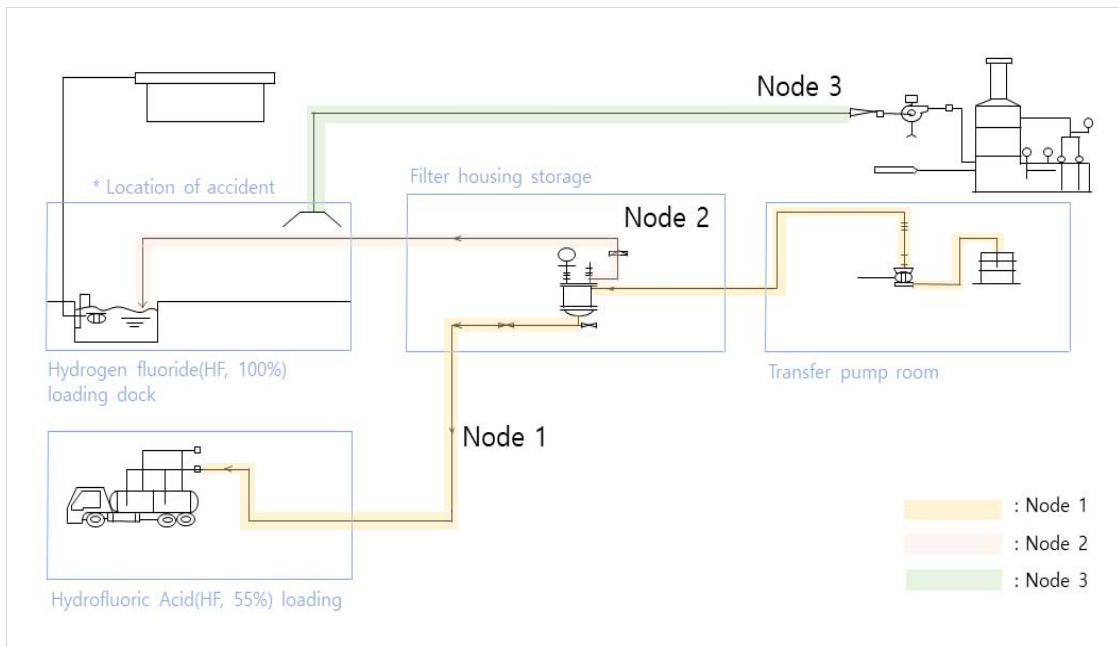


Fig. 4. Process Diagram and Node

Table 4. HAZOP Study(Node 1)

P&ID NO.	Node. 1		Study node	Transferred from IBC storage tank to hydrofluoric acid tank through filter housing					
target process	Transferred from IBC storage tank to hydrofluoric acid tank through filter housing		Design intent	Tank lorry hydrofluoric acid filling					
Deviation		causes	Consequence	Safeguards	current risk			improvement number	Recommendations for Improvement
					frequency	severity	Risk		
1	No/ Less flow	Pump and Valve Failures	Hydrofluoric acid filling delay	Periodic inspection operator training Check valve open/closed status	2	2	4	-	-
					3	2	6		
					4	2	8		
		Faulty Pipe Connection Filter Housing	HF Acid Gas Leak, Acid Refill Delay, Low Pressure	Regular Pipe Sealing and Internal Pressure Testing, Pressure Gauge Installation and Maintenance	3	3	9		
3	3				9				
2	More flow	Pump Malfunction, Valve Failure, Transfer Pump Misoperation	HF Acid Overfill, Cavitation, Excess Pump Discharge Pressure	Inspection, Training, Regulator and Rupture Disc Installations	2	2	4	1	Safety Valve Installation after Pressure Regulator
					3	2	6		
					4	3	12		
3	Safety	Forklift Overturn Due to IBC Overloading	Hydrofluoric Acid Leak	Issuance of Heavy Equipment Work Permit	2	4	8	-	-
		Pipe Welding Operation	Fire within the Process	Fire Extinguisher Placement, Worker Training, Fire Watch Deployment	3	5	15	3	Hot Work Permit Issuance, Workplace Safety Signage Installation
		Inadequate Change Management of the Transfer Pump	Hydrofluoric Acid Leak		2	5	10	4	Installation of Safety and Health Signs in the Workplace

Table 5. HAZOP Study(Node 2)

P & ID NO.	Node.2		Study node	Moving from Discharge Line to Dockyard and then to Wastewater Tank via Submersible Pump Line					
target process	Transferring and Filling Hydrofluoric Acid from Storage Tank to Tank Lorry Process		Design Intent	Transporting Hydrogen Fluoride to the Wastewater Tank at a Flow Rate of 145LPM					
Deviation		causes	Consequence	Safeguards	current risk			improvement number	Recommendations for Improvement
					frequency	severity	Risk		
1	Parts of flow	Submersible Pump Malfunction Due to Inadequate Form Change Management	Excess HF Acid Leak from Emergency Sump	Emergency Shelter Provision	2	5	10	5	Standby Pump Install, Change Management, Risk Assessment Apply
2	More level	Malfunction Due to Foreign Material Jamming in the Level Switch	HF Acid Leak from Pump Failure	Routine Inspection, Debris Removal, Manual Pump Operation	2	5	10	6	Attachment of Level Contact Sensor, Live Monitoring
3	Safety	Hydrogen Fluoride Detector Not Installed	HF Acid Leak with Response Inability	Emergency Response Training and Implementation	4	5	20	7	HF Acid Detector Installation, Portable Detector Issuance, Impact Assessment Implementation

Table 6. HAZOP Study(Node 3)

P & ID NO.		Node.3	Study node	Process of Transferring and Filling Hydrofluoric Acid from Storage Tank to Tank Lorry					
target process		Process of Transferring and Filling Hydrofluoric Acid from Storage Tank to Tank Lorry	Design Intent	Hydrofluoric Acid Neutralization					
Deviation		causes	Consequence	Safeguards	current risk			improvement number	Recommendations for Improvement
					frequency	severity	Risk		
1	No/Less flow	Section Failure Due to Blower Malfunction	Hydrofluoric Acid Gas Leak'	Routine Inspection	3	4	12	8	Installation of Backup Blower
		Piping Connection Flaw	Hydrofluoric Acid Gas Leak'	Routine Inspection, Weld Joint Testing, Pipe Tightness & Pressure Tests	3	4	12	9	Detector Install, External Impact Assessment Setup
2	More flow	Excessive Hydrofluoric Acid Supply	pH Concentration Changes in the Scrubber	Periodic pH Level Monitoring	2	3	6	-	-
3	Safety	Main Power Supply Disconnection	Untreated Gas Discharge, Neutralization Delay, Infeasibility	Emergency Generator	2	3	6	-	-
		Extreme Cold	Freezing of Water Inside the Scrubber	Insulation of Heater Water Pipes	2	3	6	-	-

4.3. BOW-TIE 분석 수행

HAZOP-Study를 통해 도출된 유해위험요인 중에서 허용불가 항목에 대한 위험요소 비율을 산정하여 ‘불산 누출 및 확산’을 Top event로 선정하였다. Top event를 발생시킨 원인을 분석하여 나열하고 그에 따른 결과에 적합한 안전관리 방안을 수립하는 단계로 BOW-Tie를 진행하였다. BOW-Tie XP Tool을 사용하여 원인에 대한 내용은 Category, Frequency로 표현하고 방벽에 대한 내용은 Type, Brf code, Criticality, 유해위험요인 부분은 Affects(피해영향 확인), 결과 부분은 Category로 표현하여 조치 전/후 위험등급을 산정하였다. 반정량적 BOW-Tie평가를 위해 Action을 활용하였으며, 이후 예방대책과 감소대책을 세워 보통(9)이하로 위험성을 낮췄다. HAZOP-Study에서 표현하지 못한 악화요소를 나타내어 원인 외의 사고 방지와 예방대책 등에 부정적인 영향을 주는 요소를 쉽게 도출하였다.

먼저, T3 이송펌프 압축공기 과다공급으로 인해 필

터하우징에 파열판을 설치할 경우 불산에 의한 부식이 발생할 수 있으므로 이에 대해 PTFE(Polytetrafluoroethylene) 라이닝 처리를 하여 부식을 방지하는 대책을 수립하였다. 구동축에 압력 조절기를 설치할 경우 압력 조절기가 고장으로 압력을 해소하지 못할 경우를 대비해 안전밸브를 설치하였다. T4 필터하우징 막힘으로 인해 압력계이지를 수시로 확인할 경우에도 압력계이지 고장으로 인해 제대로 된 확인이 불가할 수 있으므로 압력계이지 관리절차 확립 대책을 세웠다. 필터 하우징 전, 후단에 차압계를 설치할 경우 차압계가 고장나서 압력을 해소하지 못할 경우를 대비해 차압계 관리절차 확립 대책을 세웠다. T5 레벨 스위치 오작동으로 인해 수중펌프 수동조작을 할 경우 수동펌프가 동작하지 않을 수 있기 때문에 예비 수동펌프를 설치하였다.

불산 감지기를 설치할 경우 물지에 따른 적합한 위치를 선정하였다. C1 공장 내 인명 피해를 막기 위해서는 중화처리설비 및 폐수조 처리설비를 설치하였

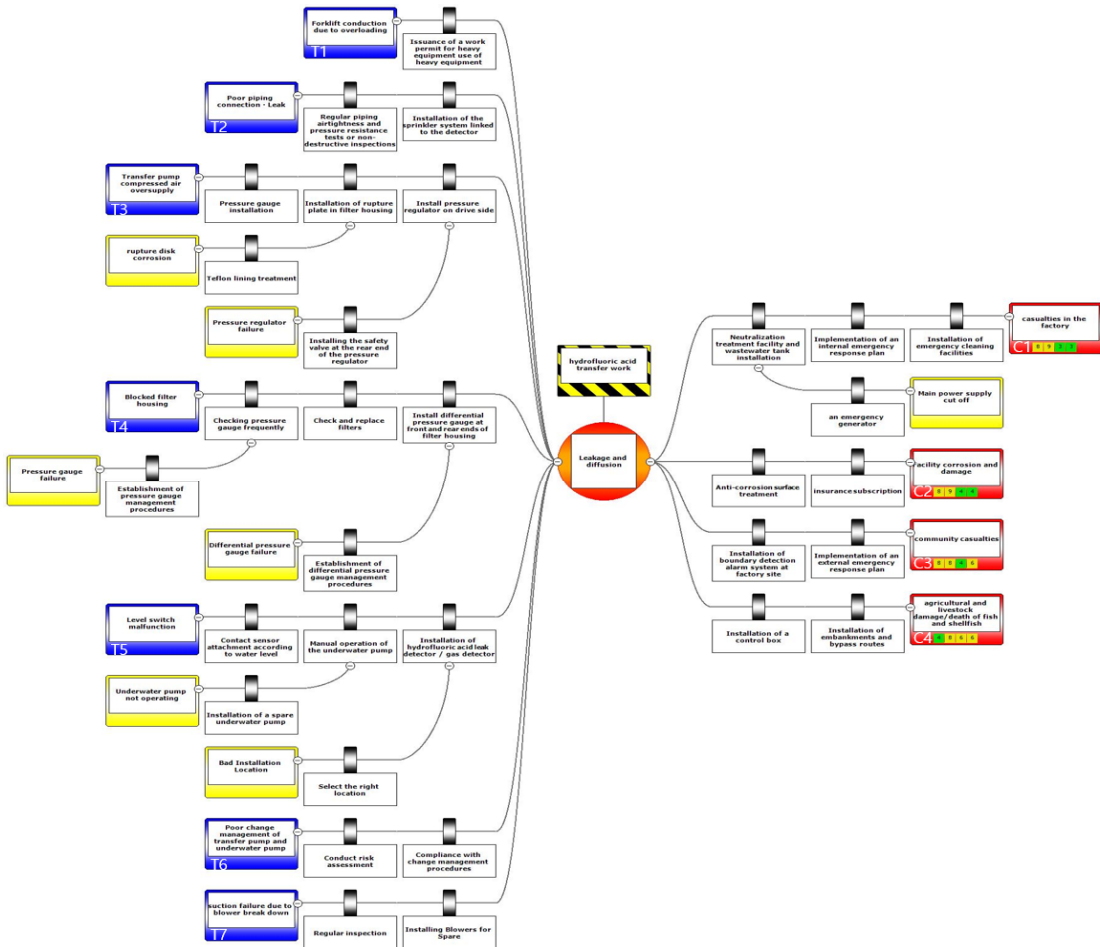


Fig. 5. Risk Analysis Diagram using Bow-Tie

지만, 정전으로 Main 전원 공급이 차단될 수 있으므로 비상 발전기를 대책으로 선정하였다.

BOW-Tie를 활용한 반정량적 리스크 평가의 리스크 평가 순서는 목표수준, 발생확률 환산점수, 점화확률 환산점수, 예방 및 감소대책의 독립방호계층 성능 점수 선정 순으로 진행하였다. 이러한 점수들은 안전 보건공단의 ‘반정량적 보우타이 리스크 평가 기법에 관한 지침’을 활용하여 기입하였다.

목표 수준이 적합하지 않은 항목들에 대해서는 대책수립을 추가하거나 변경을 통해 평가를 반복하며 목표수준에 부합되도록 평가를 실시하였다. 리스크 평가 결과, 28개 중 총 3개의 항목이 부정적으로 확인되었다. T1(과적제로 인한 지게차 전도)-C3(지역사회 인명 피해), T1-C4(농축산물 피해/어패류 폐사)의 독립방호계층 P1(허용하중 준수), P2(후진서행 및 유도자 배치)를 P1(중장비 사용 작업 허가서 발급)으로 변경하여 적정성 평가를 진행하였다. 그 결과 각 2점에서 0점,

를 도출하지 못하였으며 리스크 평가 결과 예방대책 및 감소대책에서 미흡한 점을 발견하였다. 따라서 T1의 해당되는 P1(허용하중 준수), P2(후진서행 및 유도자 배치) 및 C4의 M1(오염모니터링)의 예방, 감소대책이 반정량적 보우타이 리스크 평가 기준에 참고하여 성능점수가 해당되지 않아 해당되는 항목으로 변경하였다. 이에 독립방호계층의 보완이 필요하다 생각하여 반정량적 보우타이 리스크평가 기법에 관한 지침을 참고하여 점수를 산정하였다. 초치 전 BOW-Tie에서 T1(과적제로 인한 지게차 전도)-C3(지역사회 인명 피해), T1-C4(농축산물 피해/어패류 폐사)의 독립방호계층 P1(허용하중 준수), P2(후진서행 및 유도자 배치)를 P1(중장비 사용 작업 허가서 발급)으로 변경하여 적정성 평가를 진행하였다. 그 결과 각 2점에서 0점,

2점에서 -2점, 조치 전 T7-C4의 M1(오염 모니터링)을 방재함 설치로 변경하여 2점을 부여하였고 -1점으로 적정성 평가를 만족하는 결과를 도출하였다. BOW-Tie를 통해 도식화함으로써 비전문가도 쉽게 접근하여 위험성을 파악할 수 있도록 연구를 수행하였으며, 대책의 적정성을 검토하여 개선이 필요한 방호계층을 도출하고자 하였다. 이를 통해 다양한 방호대책을 개선 및 관리할 수 있도록 대책을 수립할 수 있었다.

VI. 결론

본 연구에서는 화학사고 예방관리를 위해 불산 취급공정을 대상으로 정성적, 반정량적 위험성평가를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) HAZOP-Study를 통해 유해위험요인을 파악하는 과정을 수행함으로써 불산을 취급하는 공정의 경우 ‘누출’ 위험이 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 누출 사고 분석 결과, 사고 발생 이전에는 변경관리 및 위험성평가 활동이 미흡했으며 누출사고 이후에는 안전장치 미설치, 비상조치계획 미실시 등의 기본 안전수칙 미준수가 사고의 핵심 원인임을 확인하였다.

(2) BOW-Tie기법을 활용하여 HAZOP-Study에서 표현하지 못한 약화요소를 나타내어 사고 예방 대책 등에 부정적인 영향을 주는 요소를 쉽게 파악할 수 있었다. 또한 사업장 장외에 대한 피해감소대책이 미흡한 것을 확인할 수 있었으며 안전장치의 적정성을 파악하고 도출된 결과를 구체화할 수 있었다.

사업장 내 유해위험요인을 파악하고 제거하기 위해서는 위험성평가를 지속적으로 실시하고 최신의 상태로 유지해야 한다. 꾸준한 관리 및 개선 활동 뿐만 아니라 서류와 함께 현장에 대한 목시평가의 역할이 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (과제 번호: 20227310100060)

REFERENCES

[1] Lee, J. J, “Analysis of Vulnerability during Business and Off-businessHours in Case of Hazardous

Materials Release Accidents”, *KOSHAM*, 22(4), 19-31, (2022)

- [2] Yoo, B. T, “A Study on Improvement Safety Management through Chemical Accident Investigations”, *KOSDI*, 17(3), 403-414, (2021)
- [3] Park, K. S., KIM, T.O., KIM, J.Y., YOO, B.H, “A Study on Consequence Analysis of Hydrofluoric Acid Release Accident in Gumi Industrial Area”, *KIHM*, 1(1), 13-19, (2013)
- [4] Lee. H. S, Yim, J. P, “A Study on Prevention Measure Establishment through Cause Analysis of Chemical-Accidents”, *KOSOS*, 32(3), 21-27, (2017)
- [5] Yoo, B. T., Lee, E.B., Kim, J.G., “Development on the Safety Management System of Hazardous Chemicals under the Chemicals Control Act: Focusing on Safety Assessment System”, *KOSOS*, 34(3), 96-101, (2019)
- [6] Yoo, B. T., Moon, M. H., “Development of Emergency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan”, *KOSHAM*, 18(3), 311-319(2018)
- [7] Ministry of Employment and Labor, “Risk investigation of hazardous substances such as hydrofluoric acid and research on strengthening research on strengthening regulations such as the PSM system”, (2014)
- [8] KOSHA, “No. 6_Leakage due to rupture of rupture disk during hydrofluoric acid transfer operation” (2017)
- [9] KIM, D.H., and Choi.S.R., and Cheon, Y.W and Lee.M.H and Heo. J.H., “A Study on Sharing System Construction on Emergency Response Information”, *Korean Journal of Hazardous Materials*, 8(1), 46-53(2020)
- [10] Tae,C.H., Byun, C.H, Lee, H.S., Yang, J.M., Park, C.H., KO,J.W., “A Study on Risk Analysis of Manufacturing Process Using the Bow-Tie Method”., *KIGAS*, 17(3), 33-38, (2013)
- [11] Yang, J.M., Seol, J.W., Yong, J.W., Ko, S.W., Park, C.H., Yoo,B.T., Ko,J.W., “A Method to Develop for Emergency Response Guidelines using Business Continuity Plan in Chemical Plant”, *KICHE*, 52(6), 743-749, (2014)