

화학사고 발생 시 피해예측 모델과 연계된 사업장의 실시간 비상대응 체계에 관한 연구

하준호¹ · 이창준^{2†}

The Research on the Real-time Emergency Response Plan for the Company based on Consequence Analysis for Chemical Accidents

Jun Ho Ha¹ · Chang Jun Lee^{2†}

[†]Corresponding Author

Chang Jun Lee
Tel : +82-51-629-6465
E-mail : changjunlee@pknu.ac.kr

Received : November 29, 2023
Revised : January 9, 2024
Accepted : February 14, 2024

Copyright©2024 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : The recent surge in the production and handling of hazardous materials in Korea necessitates developing and implementing robust emergency response plans. These plans are crucial in safeguarding the well-being of workers and residents in the event of an incident. The consequence analysis methodology outlined in the KOSHA guidelines provides a foundation for designing emergency response plans in the event of chemical accidents. However, the consequence analysis is evaluated based on assumed accident cases or worst-case scenarios. Consequently, the emergency response plan based on the consequence analysis may overestimate the damage area, complicating rescue efforts and unnecessarily increasing costs. More information and parameters become available after an accident, enabling more accurate consequence analysis. This implies that the results of consequence analysis based on this detailed information provide more realistic results than those based on assumed accidents. This study attempts to optimize the resource allocation and cost-effectiveness of emergency response plans for chemical accidents. Existing procedures and manuals are revised to elucidate the proposed model and conduct real-time consequence analysis. The existing emergency response plan is compared to verify the proposed model's efficacy. The obtained results indicate that the proposed model can exhibit better performance.

Key Words : emergency response plan, consequence analysis, chemical accidents

1. 서론

1960년대부터 우리나라의 석유화학산업은 괄목할만한 성장을 이루었고, 생산된 제품은 자동차, 건설, 전자, 통신, 생활용품 등을 비롯하여 합성섬유, 합성고무, 비료, 농약, 안료, 페인트 등 현대의 인간 생활 전반에 걸쳐 없어서는 안 되는 필수 불가결한 기간산업으로 자리매김하였다. 반면 이러한 석유화학공업은 대량의 유해 위험물질과 화학물질을 저장, 취급하는 설비가 대부분이므로 누출 사고로 인한 독성물질의 확산, 화재 및 폭발 등과 같은 대규모 화학 사고의 발생 가능성이

존재하고 있다¹⁾.

석유화학산업 등 유해 위험물질을 대량 저장·취급하는 사업장은 위험물질과 독성물질의 누출·확산 및 화재·폭발 등에 의해 근로자, 지역주민에 대한 인적 피해, 재산피해, 환경오염피해를 미칠 수 있다. 이러한 사고로 인하여 발생하는 중대산업사고에 대하여 우리나라에서는 1996년도부터 산업안전보건법에 따라 공정안전관리(PSM, Process Safety Management)제도를 시행하고 있다. 2012년 구미에서 발생한 불산 누출사고를 예를 들어보면 구미의 작은 공장에서 발생한 사고로 사고 발생 공장뿐만 아니라 인근 지역주민, 근로자,

¹부경대학교 안전공학과 박사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

²부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

방재작업에 투입된 인력, 주변 농축산물, 환경 등에 천문학적인 피해를 줬다. 이 사고로 인하여 현대의 인간 생활 전반에 걸쳐 사용 중인 화학물질에 대한 일반 대중에게 매우 부정적으로 인식하게 했다. 과거에는 크게 쟁점이 되지 않았던 화학물질 누출에 대한 전국민적인 관심이 고조되었고, 이 여파로 2015년 1월에 화학물질관리법 등이 시행됨에 따라 사업장 외부에 미치는 영향을 분석하여 보고하고 이에 대응하는 대책을 수립하여 운영·관리토록 법이 강화되었다^{2,3)}.

2022년 1월에는 중대산업재해, 중대시민재해 등의 중대재해를 예방하기 위해 중대재해 처벌 등에 관한 법률(약칭 : 중대재해처벌법)이 시행 되었다. 중대재해를 예방하기 위해서는 제대로 된 안전보건 관리체계를 구축하고 운영할 것을 요구하고 있으며, 안전보건 관리체계 구축을 위한 7가지 핵심 요소로 1. 경영자 리더십, 2. 근로자의 참여, 3. 위험요인 파악, 4. 위험요인 제거·대체 및 통제, 5. 비상조치계획 수립, 6. 도급·용역·위탁 시 안전보건확보, 7. 평가 및 개선을 언급하고 있다⁴⁾.

공정안전관리제도(PSM)에 대한 상세 기준인 노동부 고시 공정안전보고서의 제출·심사·확인 및 이행상태 등에 관한 규정에 따라 단위 공장별로 인화성 가스·액체에 따른 화재·폭발 및 독성물질 누출 사고에 대하여 각각 1건의 최악의 사고 시나리오와 각각 1건 이상의 대안 사고 시나리오를 선정하여 정량적 위험성 평가(피해예측)를 시행한 후 그 결과를 반영하여 관련 서식을 작성하고 사업장의 배치도 등에 표시하도록 하고 있으며, 최악 및 대안의 사고 시나리오의 피해예측 결과를 구체적으로 반영한 비상조치계획을 수립하고, 비상 훈련을 정기적으로 실시해야 한다⁵⁾.

최악의 사고 시나리오는 누출·화재 또는 폭발을 일으킨 지점으로부터 끝점의 거리가 가장 먼 가상 사고를 말하며, 끝점은 주어진 농도, 과압 또는 복사열 등의 수치에 도달하는 지점을 말한다. 대안의 사고 시나리오는 최악의 사고 시나리오 이외에 사업장에서 현실적으로 발생 가능성이 큰 사고 시나리오 중 영향 범위가 최대인 시나리오를 말한다⁶⁾.

공정안전관리제도(PSM)에 따라 모든 대상 사업장은 사고 유형/시나리오, 풍속, 대기안정도, 대기 온도/습도 등 다양한 변수 등에 대해 최악 및 대안의 사고 시나리오 기준에 따라 정량적 위험성 평가를 시행하고, 이를 실제 사고에 활용하고 있다. 하지만, 실제 사고가 발생하는 경우 최악 및 대안 사고 시나리오를 바탕으로 비상대응을 하는 경우 과잉/축소 대응할 수 있는 문제가 있을 수 있다. 보수적으로 접근하기 위해서는 최악 사

고 시나리오를 바탕으로 사고 발생 시 초기 비상대응을 진행해야 하지만, 사고대응을 하면서 실시간 기상 조건 및 사고정보(누출공의 크기 및 위치, 누출시간 등)의 수집이 가능하다면, 이를 바탕으로 신속하게 CA(Consequence Analysis)를 수행할 수 있고, 이를 통해 정확한 실시간 비상대응이 가능하게 된다. 이를 위해서는 사고 발생 및 대응 단계별로 수집해야 할 정보의 종류, 프로그램 운영, 보고 등의 체계는 절차에 정확하게 기재가 되어야 하며, 그 임무를 맡은 담당자도 명확하게 제시되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 S사 내 화학사고 발생 시 사고 당시/이후의 사고정보, 기상정보를 수집하고, 이러한 정보를 바탕으로 CA 프로그램을 사용하여 피해예측 범위를 산출하고, 이를 S사의 비상대응에 활용할 수 있는 실시간 비상대응체계를 설계하고자 한다. S사의 사례 연구 결과를 통해 현재의 비상대응절차를 수정하여 실제 사고 발생 시 적극적으로 활용하고자 한다.

2. Consequence Analysis

사고의 결과에 대해 분석을 하는 CA는 대표적인 정량적 위험성 평가기법 중 하나이다^{2,7,8)}.

CA는 Fig. 1에 따라 일반적으로 위험 확인(Risk identification), 누출 모델(Leak model), 확산 모델(Dispersion model), 피해 예측(Consequence analysis)과 같이 4단계로 나누어 수행이 가능하다²⁾.

1단계인 근본적인 위험 요소 확인은 정성적인 위험성 평가 단계로서 주로 위험과 운전분석(HAZOP, HAZard and OPerability) 또는 체크리스트 기법(Check List) 등에 의하여 공정 내에 잠재하고 있는 위험 요소를 확인한다.

2단계인 누출모델 작성은 누출모델은 물질이 어떻게 누출되는지를 분석하는 것으로서 배관의 파손, 플랜지 누출, 안전밸브 작동, 운전원 실수 등에 의한 잠재적인 누출원 등을 확인하여 방출되는 위험물질의 양, 온도, 밀도, 시간, 누출상태(가스, 증기, 액체, 혼합물) 등을 계산한다⁹⁾.

3단계인 확산모델은 2단계의 누출모델을 근거로 하여 대기 중으로 확산하는 위험물질의 거리에 따른 농도, 확산하는 증기운 구름의 크기, 농도, 형태를 예측한다.

4단계인 피해예측은 누출되는 위험물질이 인화성 가스 또는 인화성 액체의 경우에는 화재·폭발로 인하여 사업장 내의 근로자나 주변 시설에 미치는 화재·폭발의 영향을 계산하며 독성물질의 경우에는 작업자, 인근 지역주민 또는 주변 환경에 미치는 영향을 계산한다.

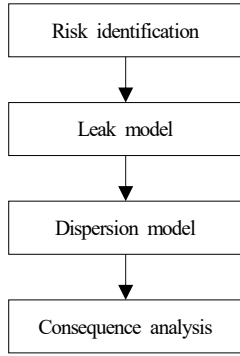


Fig. 1. Step of consequence analysis.

CA를 수행하기 위해 필요한 사고 시나리오는 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술 지침(KOSHA guide P-107-2020)에 제시되어 있으며, 사업장은 이에 따라 사전에 영향 범위를 산정하여, 이를 바탕으로 비상대응절차를 수립하고 있다^{6,10)}.

대표적인 CA 관련 소프트웨어는 DNV사에서 개발하여 유상으로 판매하고 있는 PHAST, EPA(미국 환경청)에서 개발하여 무료로 배포하고 있는 ALOHA가 있으며, 화학물질안전원에서 배포하고 있는 KORA, 산업안전보건공단에서 국내 최악/대안의 사고 시나리오에 적용할 수 있도록 개발하여 무료로 배포하고 있는 e-CA가 있다.

본 연구에서는 시간에 따른 농도변화 산출이 가능하다는 장점이 있으며, 실제 국내 석유화학업종에 종사하는 안전 담당자들에게 쉽게 배울 수 있도록 매뉴얼이 배포되고 있는 e-CA 프로그램을 사용하였다¹¹⁾.

3. 대상 물질 및 누출 시나리오 설정

본 연구에서는 실제 사업장을 대상으로 실시간 비상 대응체계를 개발하고자 하였다. 울산 울주군 온산읍 소재 S사의 실제 현장 정보를 활용하였으며, CA를 위해 필요한 정보를 정리하여, 실제 사고가 발생한 후, 현장에서 실시간 대응을 위해 필요한 정보가 무엇인지 정리하였다¹²⁾.

3.1 대상 물질

본 연구에서는 S사에서 취급하고 있는 독성물질 중 상대적으로 저장량이 많은 벤젠을 대상 물질로 선정하였다.

벤젠은 산업안전보건법상 관리 대상 유해 물질이자, 특별관리물질로 지정되어 있다. 안전보건공단 화학물질정보 기준으로 벤젠은 TWA(Time Weighted Average) 0.5ppm으로 독성이 강하며¹³⁾, 발암성이 있는 물질로 익

히 알려져 있다. 누출되어 확산하는 경우 근로자 및 인근 지역주민에게 피해를 끼칠 수 있으므로 누출이 되지 않도록 철저한 관리가 필요하며, 만약 누출되었을 경우 단시간 내 비상조치를 취하여 확산하지 않도록 신속하게 조치해야 한다.

벤젠의 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)는 미국산업위생학회 기준으로 ERPG-1 50 ppm, ERPG-2 150 ppm, ERPG-3 1000 ppm이며¹⁴⁾, 본 연구에서는 끝점에 해당하는 ERPG-2 150 ppm을 기준으로 진행하였다.

3.2 대상 저장탱크

최악의 사고 시나리오 시 최악의 누출량은 사고 시 비상조치가 가능한 범위 내에서 단일 용기에 저장되는 최대량으로 정하고 있으므로 본 연구에서는 S사에 벤젠을 취급하는 저장탱크 중 용량이 가장 큰 저장탱크를 대상으로 선정하였다.

벤젠 저장탱크의 Specification은 Table 1(S사 사내 지침 기준)에 나타난 바와 같이 탱크의 직경은 27.43 m, 총 저장량은 약 5,900 ton이며, 상압 저장탱크이고, Fig. 2에는 S사 내 벤젠 탱크의 위치를 보여주고 있다.

Table 1. The specifications of a benzene tank

Classification	Data
Name of content	Benzene
Diameter	27.43 m
Storage amount	5,932.82 kg
Dike area	6,400 m ²
Max pipe diameter	12 inch
Temperature	40°C
Pressure	Atmospheric pressure



Fig. 2. Plot layout of facilities.

3.3 누출 시나리오

최악 및 대안의 사고 시나리오에 대한 사고정보, 기상정보 등은 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침(KOSHA guide P-107-2020) 기준에 따라

Table 2. Worst/alternative case scenarios in S company

Variable	Worst case	Alternative case
Weather Condition		
Wind direction	N	N
Wind speed (m/s)	1.5	3
Temperature (°C)	40	25
Pressure (atm)	-	-
Humidity (%)	50	50
Atomospheric stability (A-D)	F	D
Scenario		
Leak hole size (in)	12	2.4
Leak duration (s)	600 (total)	1,200
Leak amount (kg)	5,932,82	45,416.2
Damage impact distance(m)		
ERPG1	14,420	3,593
ERPG2	5,532	1,563
ERPG3	1,345	447

정하였으며, 실제 기상정보 등을 반영한 추가적인 대안의 사고 시나리오는 기상청 관측소 중 S사와 가장 인접한 이진리 관측소의 실시간 기상정보를 활용하였다⁶⁾.

Table 2는 S사의 최악 및 대안 사고 시나리오를 보여주고 있다. 최악의 사고 시나리오는 해당 탱크의 최대 배관 지름인 12 inch 배관 플랜지가 파단되어 탱크에 저장되는 최대량이 10분 동안 누출되는 경우이다. 풍향은 2022년 평균값인 북향으로, 풍속은 지상 10 m 높이에서 1.5 m/s로 하고, 대기안정도는 F등급 사용하였다. 대기 온도는 40°C, 습도는 50%를 사용하였다. 지표면의 상태는 도시 지형을 선택하였다. 독성물질 확산범위는 ERPG-2 기준으로 벤젠의 경우 150 ppm을 기준으로 하였다.

대안의 사고 시나리오는 해당 탱크의 최대 배관 직경인 12 inch의 20%인 2.4 inch를 누출공 사이즈로 하였고, 이 누출공에서 20분 동안 누출되어 확산하는 기준으로 하였다. 풍향은 2022년도 1년 치 평균인 북향, 풍속은 지상 10 m 높이에서 3 m/s로 하고, 대기안정도는 D등급을 사용하였다. 대기 온도는 25°C, 습도는 50%를 사용하였다. 지표면의 상태, 독성물질 확산범위는 최악의 사고 시나리오와 동일하게 도시 지형, ERPG-2 기준으로 하였다.

3.4 피해예측을 위한 각종 정보 선정

e-CA를 통한 피해예측을 위해서는 여러 가지 정보가 필요하다. 해당 정보는 피해예측뿐 아니라, 사고대응에 필요한 정보도 있으며, 관련된 모든 정보를 정리 및 목록화하고, 정보별로 수집 방법, 수집 시점을 정의하고, 수집담당자를 지정하여 향후 사고 발생 시 해당 업무를 수행할 수 있게 하였다. 피해예측을 위한 각종

정보는 아래와 같다.

- 장소 정보 : 지역, 고도, 위도, 경도, 인근 사업장/거주지와 거리 등
- 기상정보: 풍향, 풍속, 대기 온도, 상대습도, 대기안정도
- 물질정보 : 물질명, 독성정보(ERPG), 인화점 등
- 공정 정보 : 탱크 직경/높이/최대 저장량, 최대 배관 직경, 방유제 면적, 운전온도/압력
- 사고정보 : 사고 시간, 탱크 실제 저장량, 누출공 크기, 누출시간, 누출량, 확산범위

4. 누출 사고 발생 시 사고정보를 활용한 피해예측 및 대응체계 구축

프로그램을 실제 사고대응에 활용하는 경우에는 먼저 최악 사고 시나리오를 바탕으로 확산범위가 달라짐을 의미하며, 법에 따라 이미 작성된 최악 및 대안의 사고 시나리오만으로 실제 사고 발생 시 대응하는 경우 과잉 대응 또는 소극 대응의 문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 화학사고 발생 이후 활용 가능한 실시간 기상정보, 사고정보 바탕으로 CA 프로그램을 사용하여 피해예측 범위를 산출하고, 이를 비상대응에 활용할 수 있는 실시간 비상대응체계를 설계하고자 하였다. 그리고, 이러한 비상대응체계를 현재의 비상대응절차에 수정 반영하여 실제 사고 발생 시 적극적으로 활용하고자 한다.

4.1 사고 발생 시 대응모델 마련

사고 발생 시 사고정보를 활용한 피해예측을 실시하고, 이를 활용하는 대응모델을 Fig. 3에 나타난 바와 같이 사고 전 준비단계, 사고 발생 후 단계로 구분하였고¹⁵⁾, 사고 발생 후 단계는 사고 즉시, 초기 조치 후, 조치 중으로 세분화하였다¹⁶⁾.

실시간 피해예측을 위해 각종 정보를 수집하는 담당자, 피해예측 프로그램을 사용하여 피해예측을 실시하는 담당자를 추가로 지정하였다.

사고 전 준비단계에서는 최악/대안의 사고 시나리오 기준으로 기본적인 공정 정보를 수집하여 피해예측을 실시하고¹⁷⁾, 비상대응절차를 마련하여 비상사태 발생 시 대응할 수 있도록 준비한다¹⁸⁾. Table 1을 바탕으로 계산된 피해확산 범위는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 ERPG-2 기준으로 최악의 사고 시나리오의 경우 5,532 m이며, 대안의 사고 시나리오의 경우 1,563 m였다⁶⁾.

사고 발생 후 각 단계를 사고 즉시, 초기 조치 후, 조치 중으로 세분화한 사유는 단계별로 집중해야 하는

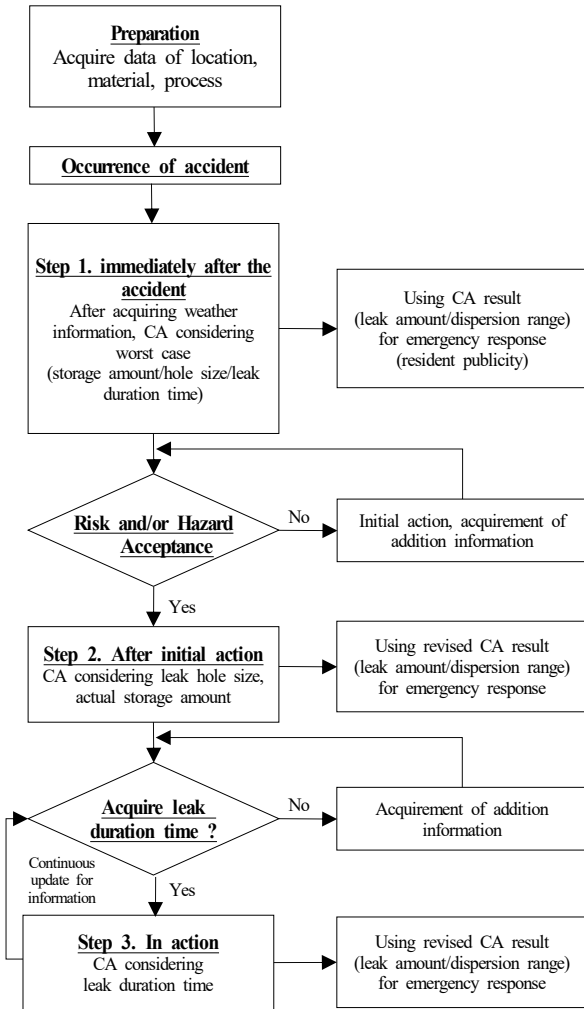


Fig. 3. A proposed emergency response model in this study.

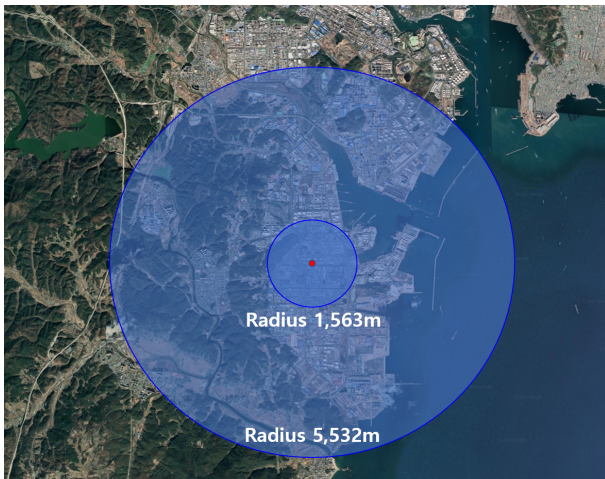


Fig. 4. The ERP2 distances on the worst/the alternative accidents.

인적/물적 자원이 다르고, 주요 비상조치 방안에 차이가 있으므로 단계를 구분하였다.

사고 즉시 단계의 경우는 누출 사고 후 인근으로 벤젠의 확산을 방지하여 추가적인 피해를 최소화하기 위해 모든 인적/물적 자원을 확보, 투입하는데 역량을 집중해야 한다. 예를 들어 비상 대원이 현장으로 출동하여 초동 방재 활동을 펼치며, 방유제 내 누출된 벤젠을 회수할 수 있는 장비인 진공 펌프 카와 벤젠 회수용 임시 펌프를 사고 현장에서 사용하여 조속히 누출물질을 회수해야 한다. 또한 가능하다면 누출공에 대해서도 추가적인 누출이 발생하지 않도록 막음, 탱크와 연결된 배관에 설치된 전단 및 후단 밸브를 닫는 등의 조치를 즉각 시행한다.

초기 조치 후 단계의 경우는 누출물질을 회수하는 조치를 진행하면서, 누출공에 대한 지속적인 관리가 필요하다. 누출물질인 벤젠은 독성물질이자, 인화성 물질이므로 화재/폭발과 같은 2차 사고가 발생하지 않도록 주변 가스 농도를 폭발 하한값(%LEL) 이하로 관리해야 하며, 확산지역 내 점화원도 철저한 관리가 필요하다.

조치 중 단계의 경우는 협의를 거쳐 추가 조치 방안을 수립하고, 이를 통해 피해 복구 및 비상상황 종료를 위한 지속적인 관리를 하는 단계이다. 최종 누출시간/누출량을 확보하고, 이를 바탕으로 최종 확산범위를 산출한다. 산출된 확산범위를 바탕으로 작업환경측정, 건강진단 등의 대상/범위를 선정하여 진행하며, 신속한 복구를 위한 피해 부분을 확인하고, 복구를 위한 관련 자재 등을 확보한다.

4.2 피해예측을 위한 각종 정보 수집 방안 마련

피해예측, 비상대응에 필요한 각종 정보를 정의하고, 그에 대한 수집 시점, 수집 방법을 Table 3에 정리하였다.

장소 정보는 지역, 고도, 위도, 경도, 인근 사업장/거주지와 거리 등이 있으며, 공정 엔지니어가 담당자가 되고, 지도정보를 활용하여 고도, 경도, 타 사업장/거주지 간 거리를 사전에 확보한다.

기상정보는 풍향, 풍속, 대기 온도, 상대습도, 대기안정도 등이 있으며, 공정 엔지니어가 담당자가 되고, 최악/대안의 사고 시나리오 기준값은 사전에 확보하고, 사고 발생 즉시 기상청에 접속하여 실시간 기상정보를 확보한다. 대기안정도는 풍속, 복사강도 정보로 산출하여 활용한다.

물질정보는 물질명, 독성정보(ERPG-1/2/3), 인화점 등이 있으며, 공정 엔지니어가 담당자가 되어 사내 MSDS 자료를 사전에 확보하여 준비한다.

공정 정보는 탱크의 직경, 높이, 최대 저장량, 최대 배관직경, 방유제 면적, 운전온도/압력 등이 있으며, 공

정 엔지니어가 담당자가 되어 사내 공정안전자료(도면, 장치 및 설비 명세), 안전운전절차 등의 자료를 사전에 확보하여 준비한다.

사고정보는 사고 시각, 탱크 실제 저장량, 누출공 크기, 누출시간, 누출량, 확산범위 등이 있으며, 사고 발생 팀장 및 공정 엔지니어가 업무를 분담하여 담당하였다.

사고 시각, 실제 저장량, 누출공 크기, 누출시간은 사고 발생팀에서 담당하여 정보를 수집하고, 누출량, 확산범위는 공정 엔지니어가 담당하여 피해예측 결과를 통해 확보하며, Table 3에 나타난 바와 같이 각종 정보 수집 시점을 사고 전 준비, 사고 즉시, 초기 조치 후, 조치 중으로 나누어 정리하였다.

누출공 크기의 경우 사고 즉시 또는 초기 조치 후 정보를 수집하며, 사고 현장 출동하여 육안으로 사고 지점을 확인하여 파악한다. 단, 누출 지점이 지하 매설 지역이면 굴착작업허가서를 득하고, 굴착작업 후 확인한다.

실제 저장량은 현장에 설치된 액위 센서, 분산제어 시스템 등 현장 운전정보를 파악하여 확보한다.

누출시간은 초동 조치가 완료(누출공 막음 또는 잔존 저장물질 이송 완료 조치) 될 때까지의 시간을 확인하여 정한다¹⁹⁾.

누출량은 초기 조치가 완료될 때까지의 탱크 액위 변화량을 통해 산출하거나, 피해예측 프로그램을 활용하여 확보한다.

Table 3. A strategy for collecting accident information

Information	Collecting time			Collecting method
	①	②	③	
Accident time	O			Confirmation through initial report by field operator
Actual storage amount	O	O		Acquiring after confirming field operation information such as local level gauge/DCS graphic
Leak hole size	O	O		Arriving at the accident site and visually checking the accident point (However, if the leak point is an underground area, it can be checked after additional work)
Leak duration time		O	O	Calculation of time until the initial action is completed (plugging the leak point or completing the transfer of the remaining stored material)
Leak amount		O	O	Calculation of tank level change until initial response is completed or using result of CA program
Dispersion range		O	O	Using result of CA program

* Note : ① Immediately after the accident, ② After initial actions, ③ In actions

4.3 비상대응절차 보완

사고 발생 시 활용할 수 있는 비상대응 모델을 설계하였고, 이를 비상대응절차에 반영하였다²⁰⁾. 비상대응 모델을 운영하기 위해 담당자/임무를 비상대응절차 내 임무별 행동 요령에 반영하였고, 비상 훈련 시나리오 상에도 실시간 피해예측을 위한 임무를 반영하였다²¹⁾.

S사의 경우 비상사태 발생 시 생산 현장에서 즉시 사내 신고를 하고, ECC(Emergency Control Center)에 상주하고 있는 안전팀 인력이 사고 접수 후 소방차 등 비상대응 차량이 현장으로 출동한다. 또한, 각종 카메라, 도면 등 PSM 자료를 열람할 수 있는 컴퓨터가 장착된 ECV(Emergency Control Vehicle)가 사고 발생 즉시 현장으로 급파되어 차량 외부에 부착된 카메라로 사고 현장을 근접 촬영하여 ECC로 영상을 송출한다. 사람 접근이 어려운 경우, 드론을 운영하는 시스템이 있으며, 지능형 CCTV를 설치하여 사고 지점을 조기에 확인할 수 있다.

사고 발생 팀장, 공정 엔지니어에 대한 임무를 비상대응절차에 추가하였다. 사고 발생 팀장은 누출공 크기, 실제 저장량 등의 추가 사고정보를 확보하는 것이 추가되었고, 공정 엔지니어는 장소 정보, 물질정보, 공정 정보를 사전 확보하고, 기상정보는 사고 즉시 확보하여 e-CA 프로그램을 통해 피해예측을 실시하고, 피해예측 결과를 비상대응본부 등에 공유하는 업무가 추가되었다. 조속한 누출공 크기 확인을 위해 각종 카메라가 장착된 ECV, 드론, 지능형 CCTV 등을 활용한다.

피해예측 결과인 누출량, 독성물질 확산범위는 비상대응본부로 전달되고, 사내 비상대응 방안에 활용하며, 구체적으로 누출량 최소화를 위한 긴급 이송 작업, 방제작업, 방제자원 (인력/보호구 등) 투입, 누출물질의 2차 재해인 화재/폭발 발생 예방을 위한 누출공 인근 점화원 관리, 사내 임직원/협력업체 작업자 대피경로 등의 설정에 활용한다.

유관 외부기관에 신고하고, 긴급재난문자 등을 통해 즉각 인근 사업장, 지역주민에게 안내가 필요한 사항 등 긴밀한 연락체계 가동 방안을 비상대응절차에 반영하였다¹⁵⁾.

피해예측을 위한 각종 정보를 장소 정보, 기상정보, 물질정보, 공정 정보, 사고정보에 따라 분류하였고, 이 정보들의 수집 시점을 사고 전 사전, 사고 즉시, 초기 조치 후, 사고 종료 후로 나누어 정리하였고, 이 정보들의 담당자를 지정하고, 정보를 수집하는 방법을 표로 정리 후 비상대응절차에 반영하였다¹⁸⁾.

작성된 비상대응절차는 전산에 등록하여 관련 팀에서 열람할 수 있게 하였고, 각종 정보 목록을 관련 팀

에 공유하여 사전에 준비가 필요한 정보에 대해 파악할 수 있게 하였다.

4.4 피해예측 결과 시뮬레이션

본 연구에서는 S사에서 특정 시간(2022년 1월 4일)에 실제 사고가 발생한 경우를 가정하였으며, 이를 토대로 단계별 각종 정보 수집에 따른 피해예측 결과를 시뮬레이션하였다¹⁷⁾. 벤젠 탱크는 1년 평균 저장량 80%로 운전되고 있어 저장량을 80%로 가정하였다. 사고시간은 야간 교대근무조의 교대 후 1차 현장 점검을 완료하고, 사무실에 복귀하는 시간으로 특정하였으며, 배관에 원인 미상의 1 inch의 작은 누출공이 발생했다고 가정하였다. 벤젠 탱크에는 누출을 감지할 수 있는 가스감지기, 지능형 CCTV가 설치되어 있어 누출 시 즉각 감지하고, 해당 배관 전, 후단에 긴급차단할 수 있는 밸브가 있어 최대 조치 가능 시간을 감안하여 누출시간을 1,200 s로 가정하였다.

2022년 1월 4일 20:30에 벤젠 탱크 12 inch 플랜지에서 누출 사고가 발생하였으며, Table 4에 나타난 바와 같이 사고 즉시 단계에서 공정 엔지니어는 기상청의 기상정보를 수집하고, 누출시간은 1,200 s로 가정하고, 그 외 누출공, 실제 저장량 등 정보는 최악의 사고 시나리오 기준으로 피해예측을 실시한다. 이 단계에서 계산된 피해확산 범위는 ERPG-2 기준으로 1,344 m이다. 공정 엔지니어는 피해예측 결과를 비상대응본부에

Table 4. Results of CA on the first step (Immediately after the accident)

Variable		Preparation (worst case)	Step 1. immediately after the accident
Weather Condition	Wind direction	N	N
	Wind speed (m/s)	1.5	5.8
	Temperature (°C)	40	5.4
	Pressure (atm)	-	-
	Humidity (%)	50	12
	Atmospheric stability (A~D)	F	D
Scenario	Leak hole size (inch)	12	12
	Actual storage amount (kg)	5,932,82(max)	5,932,82(max)
	Leak duration time (s)	Total leak with in 600	1,200
Leak amount (kg)		5,932,828	1,083,097
Damage impact distance (m)	ERPG1 (50 ppm)	14,420	3,035
	ERPG2 (150 ppm)	5,532	1,344
	ERPG3 (1,000 ppm)	1,345	393

* The information on a gray column is achieved at this step.

Table 5. Result of CA on the second step (After initial actions)

Variable		Step 2. After initial actions			
Weather Condition	Wind direction	N			
	Wind speed (m/s)	5.8			
	Temperature (°C)	5.4			
	Pressure (atm)	-			
	Humidity (%)	12			
	Atmospheric stability (A~D)	D			
Scenario	Leak hole size (inch)	5	2.4	2	1
	Actual storage amount (kg)	4,746,262			
	Leak duration time (s)	1,200			
Leak amount(kg)		175,005	40,612	28,222	7,063
Damage impact distance (m)	ERPG1 (50 ppm)	3,035	2,405	1,833	708
	ERPG2 (150 ppm)	1,344	1,091	854	359
	ERPG3 (1,000 ppm)	393	329	266	122

* The information on a gray column is achieved at this step.

전달하고, 비상대응본부는 대외기관에 공유하여 긴급 재난문자 등을 통해 최초 주민홍보에 활용한다.

Table 5에 나타난 바와 같이 초기 조치 후 단계는 누출물질 회수를 위해 임시 펌프 설치, 진공 펌프 카 등이 현장에 준비가 완료되고, 누출물질 회수를 시작하고, 누출공을 관리할 수 있는 단계이다.

이 단계에서는 벤젠은 독성 및 인화성 물질로 2차 재해인 화재/폭발 방지를 위한 조치도 필요하다. 가스 농도 관리가 필요한 지점에는 실시간 가스 모니터링 시스템을 설치하여 지속해서 가스 농도를 모니터링하고, 확산지역 내 점화원도 철저한 관리가 필요하다.

사고 발생팀은 조정실 내 분산제어시스템의 그래픽을 통해 사고 탱크의 액위가 전체 높이의 80%임을 확인한다. 실제 저장량은 설계 최대용량 대비 80%로 계산하여 4,746,262 kg로 가정한다.

S사의 경우, 실제 사람이 접근하기 어려운 경우에도 사고 규모를 다양하게 파악하기 위한 다양한 시스템을 운영하고 있으며, 사고 발생 초기에는 CCTV로 대략적인 사고 규모를 파악하고, ECV와 드론을 이용하면 정확한 사고 규모의 파악이 가능하기 때문에 정확한 누출공의 크기를 추정할 수 있다.

누출공은 CCTV를 통해 확인하였을 때 초기에는 5 inch 이하로 추정된다고 가정하였으며, 드론, ECV를 활용하여 조속히 사고 누출공에 접근하여 정확한 누출공의 크기를 추정한다고 가정하였다.

누출공 크기가 정확해짐에 따라 이를 공정 엔지니어에게 전달하고, 이를 반영한 피해확산 범위도 점점 감소하는 것을 확인한다. 누출공 크기가 5 → 2.4 → 2 →

1 inch로 추정되는 것으로 가정하면, 시뮬레이션을 통해 피해 확산범위도 ERPG-2 기준으로 1,344 → 1,091 → 854 → 359 m로 감소함을 확인할 수 있다. 산출된 확산범위를 반영하여 추가 재해가 발생하지 않도록 가스측정 등에 활용한다.

어느 정도 조치가 이루어지고, 안정화 단계에 접어들면 Table 6에 나타난 바와 같이 조치 중 단계로 진행되며, 이 단계에서는 비상상황 종료를 대비하여 누출 시간을 확보하고, 이를 반영하여 최종 피해 확산범위를 계산한다.

사고 발생팀은 최초 누출시각 및 종료시각을 확인하여 최종 누출시간을 1,200 s 로 확정하고, 누출공 크기는 1 inch로 확정하고, 이를 공정 엔지니어에게 전달하여 최종 피해예측을 실시할 수 있도록 한다.

공정 엔지니어는 피해예측 결과를 도출하여 비상대책본부에 전달하고, 비상대책본부는 이를 바탕으로 작업환경측정, 건강진단 등의 필요 여부, 대상/범위를 검토하고 진행한다. 또한, 신속한 피해 복구를 위해 피해 부분을 확인하고, 관련 자재를 확보한다.

홍보대는 최종 피해예측 결과를 외부기관에 전달하여 긴급재난문자로 주민 고지를 시행하고, 인근 지역 주민의 피해 사항을 파악하고, 조치한다.

만약 비상대응을 위한 충분한 장비를 보유하고, 충분한 훈련을 통해 재빠르게 사고 수습이 가능한 경우를 적용하여 누출시간을 줄일 수 있다고 가정하였다. Table 7은 누출시간이 줄어드는 경우의 확산범위를 보여주고 있다. 누출시간이 1,200 → 900 → 600 s로 단축됨에 따라 피해 확산범위도 ERPG-2 기준으로 359 → 303 → 239 m로 감소함을 확인하였다.

Table 6. Result of CA on the third step (In actions)

Variable		Step 3. In actions
Weather Condition	Wind direction	N
	Wind speed (m/s)	5.8
	Temperature (°C)	5.4
	Pressure (atm)	-
	Humidity (%)	12
	Atmospheric stability (A~D)	D
Scenario	Leak hole size (inch)	1
	Actual storage amount (kg)	4,746,262
	Leak duration time (s)	1,200
Leak amount(kg)		7,063
Damage impact distance (m)	ERPG1 (50 ppm)	708
	ERPG2 (150 ppm)	359
	ERPG3 (1,000 ppm)	122

* The information on a gray column is achieved at this step.

Table 7. Result of CA for the decrease of leak duration

Variable		Decrease of leak duration		
Weather Condition	Wind direction	N		
	Wind speed (m/s)	5.8		
	Temperature (°C)	5.4		
	Pressure (atm)	-		
	Humidity (%)	12		
	Atmospheric stability (A~D)	D		
Scenario	Leak hole size (in)	1		
	Actual storage amount (kg)	4,746,262		
	Leak duration time (s)	1200s	900s	600s
Leak amount (kg)		7,063	5,298	3,532
Damage impact distance (m)	ERPG1 (50ppm)	708	590	458
	ERPG2 (150ppm)	359	303	239
	ERPG3 (1000ppm)	122	105	84

* The information on a gray column is achieved at this step.

사고 발생 후 활용 가능한 정보를 수집하여 이를 바탕으로 피해예측에 반영한 결과 각 단계별로 대피 범위가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 가정된 사고가 최악이나 대안의 사고 시나리오보다 규모가 작기 때문이며, 만약에 최악의 사고 시나리오보다 더 큰 규모의 사고가 발생한 경우에도 보다 더 정확한 피해범위를 산정할 수 있다. 이를 통해, 정확한 주민 대피가 이뤄질 수 있으며, 피해 복구를 위한 효과적인 인적/물적 자원의 투입을 가능하게 할 수 있다.

5. 결론

공정안전관리제도(PSM)가 1996년 산업안전보건법으로 법제화된 이후 공정안전관리제도(PSM) 사업장은 최악/대안의 사고 시나리오를 포함한 비상조치 계획을 마련하고, 각 단위 공정별로 세분화하여 비상대응절차를 마련하여 운영하고 있다.

최악/대안의 사고 시나리오를 실제 사고에 활용하는 경우 실제 사고가 발생한 시점에서 기상 조건, 사고 정보가 틀리기 때문에 실제 피해 범위는 달라지게 된다. 따라서, 최악의 사고 시나리오를 바탕으로 수립된 비상대응은 실제 사고와 비교하여 축소 혹은 과잉 대응이 될 수 있다. 과잉 대응은 인근 지역주민에 불편을 초래하고, 인근 타 사업장에 큰 피해를 유발할 수 있으며, 이와 반대로 축소 대응은 타 사업장 및 인근 지역주민의 대피가 지연되어 안전/보건상 악영향을 끼칠 수 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 본 연구에서는 화학

사고 발생 시 사고 단계별로 획득 가능한 정보를 바탕으로 피해예측을 수행하여 이를 토대로 비상대응에 반영하는 전략을 수립하였다. 사고가 발생한 직후 최악의 사고 시나리오를 바탕으로 사업장 및 인근 지역주민에게 사고 발생을 전파하며, 지속적으로 획득이 가능한 기상정보, 사고정보를 바탕으로 피해예측을 수행하여, 사고피해 최소화 및 정확한 피해 복구를 위한 절차를 마련하였다²²⁾.

이를 위해서, 사고 단계별로 수행해야 할 업무에 대해 명시하였으며, 그 담당자도 지정하였다. 또한, 가정된 사고 시나리오를 바탕으로 해당 업무를 운영하는 조직에서 체계적으로 업무를 수행할 수 있도록 사고 발생 시 비상대응에 문제가 없는지 확인하였다.

향후 수정된 비상대응절차를 바탕으로 정기적인 비상 모의 훈련을 시행하여 숙련화하고, 실제 사고에 활용하는 경우 적기에 피해확산 범위를 구체화하고 주민 홍보에 활용하여 인접사업장의 작업 중지 등에 따른 생산 손실 및 지역주민의 불필요한 대피를 사전에 예방하는데 기여하고, 사내 비상대응절차에 정보의 획득, 프로그램 운영, 보고 등의 체계를 명확하게 기재하고, 비상대응 시 활용을 통해 비상대응 역량을 강화하여 공중안전 관리제도(PSM) 비상대응계획의 기본 취지인 인적, 물질 피해를 최소화하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

Acknowledgement: This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2020R1F1A1055442).

References

- 1) Advanced Safety Study Association (S-OIL/Dupont Ulsan/ Korea Trinzio/Lotte BP/BASF/Baker Chemical), "Safety System Research of Advanced Petrochemical Industry", p. 5, 2018.
- 2) B. G. Jung and C. J. Lee, "Consequence Analysis Based Research for the Initial Response of Chemical Accidents", Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 4, No. 2, pp. 22-29, 2016.
- 3) J. Y. Lee, D. H. Kim, S. H. Ban and C. J. Lee, "A Study of the Distance between a Tank and a Dike Considering a Leakage Velocity at an Opening Hole in case of a Leakage Accident", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 5, pp. 35-41, 2018.
- 4) Ministry of Employment and Labor(MOEL), "Safety and Health Management System Guidebook for the Prevention of Industrial Accidents", 2022.
- 5) Ministry of Employment and Labor(MOEL), "Regulations on Submission, Review, Confirmation, and Implementation Status of Process Safety Management", Ministry of Labor Notice, No. 2020-55, 2020.
- 6) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "Technical guidance on the selection of worst and alternative case scenario", KOSHA Guide(P-107-2020), 2020.
- 7) J. B. Baek, "A Study on the Establishment of Infrastructure for Quantitative Risk Assessment in Chemical Processes", pp. 5-7, 1995.
- 8) J. S. Shin, "A Study on Quantitative Risk Assessment and Model Application for Gas Manufacturing Facilities", pp. 5-7, 2011.
- 9) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "Technical guidance on leak source modeling", KOSHA Guide(P-92-2012), 2012.
- 10) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "Technical Guideline for Establishment of Damage Minimization Measures for Chemical Plants", KOSHA Guide(P-110-2012), 2012.
- 11) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "e-CA program user manual", 2017.
- 12) Y. J. Woo and C. J. Lee, "A Study of Emergency Response for the Leakage Accident of Hazardous and Noxious Substances in a Port", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 6, pp. 32-38, 2016.
- 13) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "Benzene MSDS - Exposure Limit", <https://msds.kosha.or.kr/MSDSInfo/kcic/msdsdetail.do>, 2024.01.05.
- 14) Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Benzene Chemical Database - AIHA Emergency Response Planning Guidelines", <https://www.osha.gov/chemicaldata/491>, 2024.01.05
- 15) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "Technical Guideline for Accident Damage Prediction Techniques", KOSHA Guide(P-102-2021), 2021.
- 16) S. J. Oh and C. O. Kim, "A Study on the Application of Disaster Management System for Business Area", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 1, pp. 132-136, 2013.
- 17) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), "Example Collection of Process Safety Management Report", 2020.

- 18) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), “Technical guideline for Establishment of Emergency Response Plan”, KOSHA Guide(P-101-2023), 2023.
- 19) G. S. Jeong, “Liquid Chlorine Leak Damage Modeling of Petrochemical Complex”, pp. 5-7, 2015.
- 20) Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA), “Technical guideline for Preparing Emergency Response Plan according to Accident Scenario”, KOSHA Guide (P-163-2017), 2017.
- 21) S. H. Song and C. J. Lee, “A Study on the Temporary Storage Facility for Mitigating the Leakage Accident”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 3, pp. 1-5, 2020.
- 22) S. H. Cha and C. J. Lee, “Study for the Plant Layout Optimization for the Ethylene Oxide Process based on Mathematical and Explosion Modeling”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 1, pp. 25-33, 2020.