



## 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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

화학사고 발생 시 피해예측 모델과  
연계된 실시간 비상대응체계  
설계에 대한 연구



2022년 8월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

안 전 공 학 과

하 준 호

공 학 석 사 학 위 논 문

화학사고 발생 시 피해예측 모델과  
연계된 실시간 비상대응체계  
설계에 대한 연구

지도교수 이 창 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2022년 8월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

안 전 공 학 과

하 준 호

하준호의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022 년 8월 26일



위원장 공학박사 이 의 주



위 원 공학박사 오 창 보



위 원 공학박사 이 창 준



# 목 차

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 제 1 장 서 론 .....                               | 1  |
| 1.1 연구 배경 및 목적 .....                          | 1  |
| 1.2 피해예측의 한계 및 연구 방향 .....                    | 3  |
| 제 2 장 연구 내용 .....                             | 8  |
| 2.1 Consequence Analysis .....                | 8  |
| 2.2 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정/작성 .....              | 15 |
| 2.3 Consequence Analysis 소프트웨어(e-CA) .....    | 19 |
| 제 3 장 연구 대상 .....                             | 20 |
| 3.1 연구 대상 및 누출 시나리오 설정 .....                  | 20 |
| 3.2 사고 발생 시 대응 model 도출 .....                 | 31 |
| 3.3 피해예측을 위한 각종 정보 Searching & List-up .....  | 33 |
| 3.4 비상대응절차 수정 .....                           | 34 |
| 제 4 장 연구 결과 및 사례 연구 .....                     | 36 |
| 4.1 사고 발생 시 사고정보를 활용한 피해예측 및 대응체계<br>구축 ..... | 36 |
| 4.2 비상대응절차 수정 .....                           | 48 |
| 4.3 사례 연구 .....                               | 51 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 제 5 장 결 론 ..... | 71 |
|-----------------|----|

|             |    |
|-------------|----|
| 참고 문헌 ..... | 73 |
|-------------|----|



## Table List

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 1. Consequence analysis for worst/alternative case scenario ...                                 | 5  |
| Table 2. Consequence analysis for reflecting actual weather condition<br>and leak duration time ..... | 6  |
| Table 3. Leak model .....                                                                             | 13 |
| Table 4. Dispersion model .....                                                                       | 14 |
| Table 5. Guide of leak hole size for alternative case scenario .....                                  | 18 |
| Table 6. Benzene tank specification .....                                                             | 23 |
| Table 7. Guide of leak hole size for alternative case scenario .....                                  | 28 |
| Table 8. Atmospheric stability .....                                                                  | 29 |
| Table 9. Method for collecting accident information .....                                             | 47 |
| Table 10. Result of CA for “Step 1. immediately after the accident” ...                               | 52 |
| Table 11. Result of CA for “Step 2. immediately after the accident” ...                               | 54 |
| Table 12. Result of CA for “Step 3. in action” .....                                                  | 56 |
| Table 13. Result of CA by changing “leak duration time” .....                                         | 62 |
| Table 14. Result of CA by changing “Atmospheric stability” .....                                      | 64 |
| Table 15. Result of CA by changing “wind speed” .....                                                 | 66 |
| Table 16. Result of CA by changing “Temperature” .....                                                | 68 |
| Table 17. Result of CA by changing “Humidity” .....                                                   | 70 |

## Figure List

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 Hazard evaluation procedure for quantitative risk assessment··· | 10 |
| Fig. 2 Step of consequence analysis ···········                        | 12 |
| Fig. 3 Benzene one page sheet ···········                              | 21 |
| Fig. 4 Benzene tank location ···········                               | 24 |
| Fig. 5 Weather information by Korea Meteorological Administration···   | 27 |
| Fig. 6 Response model in case of an accident ···········               | 38 |
| Fig. 7 “Step 1. immediately after the accident” flow chart ··········· | 40 |
| Fig. 8 “Step 2. After initial action” flow chart ···········           | 42 |
| Fig. 9 “Step 3. In action” flow chart ···········                      | 44 |
| Fig. 10 Damage impact distance – 1 ···········                         | 58 |
| Fig. 11 Damage impact distance – 2 ···········                         | 59 |

# The Research on the Design of the Real-time Emergency Response Plan in Conjunction with Consequence Analysis for Chemical Accidents

Jun-ho Ha

Department of Safety Engineering, Graduate School of Industry  
Pukyong National University

## Abstract

Recently, massive dangerous substances have been produced and handled in South Korea. Thus, the emergency response plans, which is a procedure to protect workers and residents, have been introduced and their roles are really critical. In general, the consequence analysis on KOSHA guide provides a basic tool for designing the emergency response plans for chemical accidents. However, the consequence analysis is evaluated according to assumed accident cases or the worst case. Therefore, the emergency response plan based on the consequence analysis can provide excessive damage area and this may increase huge efforts and costs. As time passes after an accident occurs, more information and parameters, which are necessary to simulate the consequence analysis, are available. This means that the results of consequence analysis based on the detailed information provide more realistic results than the results based on the assumed accidents. This study aims to reduce the efforts and costs for the emergency response plan. In order to make the proposed model clear, the existing procedures and manuals are revised to adopt the results of the real-time

consequence analysis. To verify the efficacy of the proposed model, the existing emergency response plan is compared and this comparison indicates that this proposed model can provide better performances.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

1960년대부터 우리나라의 석유화학산업은 괄목할만한 성장을 이루었고, 생산된 제품은 자동차, 건설, 전자, 통신, 생활용품을 비롯하여 합성섬유, 합성고무, 비료, 농약, 안료, 페인트 등 현대의 인간생활 전반에 걸쳐 없어서는 안 되는 필수 불가결한 기간산업으로 자리매김하였다. 반면 이러한 석유화학공업은 대량의 유해위험물질과 화학물질을 저장, 취급하는 설비가 대부분이므로 누출사고로 인한 독성물질의 확산, 화재 및 폭발 등과 같은 대규모 화학사고의 발생가능성이 상존하고 있다<sup>1)</sup>.

석유화학산업 등 유해위험물질을 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 의거하여 공정안전관리(Process Safety Management; PSM)제도를 시행하고 있다. 2012년 구미에서 발생한 불산 누출사고를 예를 들어보면 구미의 작은 공장에서 발생한 사고로 사고발생 공장뿐만 아니라 인근지역의 주민 및 근로자, 방재작업에 투입된 인력, 주변 농축산물, 환경 등에 천문학적인 피해를 입혔다. 이 사고로 인하여 현대의 인간생활 전반에 걸쳐 사용중인 화학물질에 대한 일반 대중에게 매우 부정적

인 인식을 갖게 만들었다. 과거에는 크게 이슈되지 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<sup>2)</sup>.

2022년 1월에는 중대산업재해, 중대시민재해 등의 중대재해를 예방하기 위해 “중대재해 처벌 등에 관한 법률 (약칭 : 중대재해처벌법)”이 시행되었다. 중대재해를 예방하기 위해서는 제대로된 안전보건관리체계를 구축하고 운영할 것을 요구하고 있으며, 안전보건관리체계 구축을 위한 7가지 핵심요소로 “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 개선”을 언급하고 있다<sup>3)</sup>.

이는 공정안전관리제도(PSM)의 12개 요소와 맥락을 같이하고 있으며, 실제 화학사고를 예방하기 위해 중요한 요소로 “3. 위험요인 파악, 4. 위험요인 제거·대체 및 통제, 5. 비상조치계획 수립”을 들 수 있다.

이에 대한 실행방안으로 정성적 기법으로 공정 위험성평가를 실시하고, 위험성평가 결과 위험도가 높은 구간에 대해서는 e-CA, PHAST 프로그램 등을 활용하여 정량적 위험성평가를 실시한다. 그 결과를 바탕으로 만약 발생할 수 있는 화학사고를 대비하여 비상대응 시나리오를 작성하고, 이 시나리오를 바탕으로 정기적인 비상대응훈련을 실시, 사후 평가하여 실제 화학사고를 가정하여 대비한다.

만약 실제 화학사고가 발생하였을 때에는 비상대응체계를 가동하여 작성된 비상대응 시나리오를 따라 조치하여 피해를 최소화하고, 단기간에 피해복구를 할 수 있도록 한다.

## 1.2 피해 예측의 한계 및 연구 방향

공정안전관리제도(PSM)에 대한 상세 기준인 노동부 고시 “공정안전보 고서의 제출·심사·확인 및 이행상태 등에 관한 규정”에 따라 단위공장별로 인화성가스·액체에 따른 화재·폭발 및 독성물질 누출사고에 대하여 각각 1 건의 최악의 사고 시나리오와 각각 1건 이상의 대안의 사고 시나리오를 선정하여 정량적 위험성평가(피해 예측)를 실시한 후 그 결과를 반영하여 관련 서식을 작성하고 사업장의 배치도 등에 표시하도록 하고 있으며, 최악 및 대안의 사고 시나리오의 피해예측 결과를 구체적으로 반영한 비상조치계획을 수립하고, 비상훈련을 정기적으로 실시하여야 한다<sup>4)</sup>.

“최악의 사고 시나리오”는 누출·화재 또는 폭발을 일으킨 지점으로부터 끝점의 거리가 가장 먼 가상 사고를 말하며, “끝점”은 주어진 농도, 과압 또는 복사열 등의 수치에 도달하는 지점을 말한다. “대안의 사고 시나리오”는 최악의 사고 시나리오 이외에 사업장에서 현실적으로 발생 가능성이 높은 사고 시나리오 중 영향범위가 최대인 시나리오를 말한다<sup>5)</sup>.

공정안전관리제도(PSM)에 따라 모든 대상 사업장은 사고 유형/시나리오, 풍속, 대기안정도, 대기온도/습도 등 다양한 변수 등에 대해 최악 및 대안의 사고 시나리오 기준에 따라 정량적 위험성평가를 실시하고, 이를 실제 사고에 활용을 하고 있다.

법에 따라 작성된 최악 및 대안의 사고 시나리오는 과연 실제 사고가 발생하였을 때 피해예측 data로 활용이 가능한지 의문점이 생겼으며, 울산 울주군 온산읍 소재 S사의 경우 ‘22년 1월 중 특정 날짜의 기상청의 풍향,

풍속, 대기안정도, 대기온도/습도 등의 기상정보를 바탕으로 독성물질인 “벤젠”의 누출 사고 시나리오에 대한 정량적 위험성평가를 실시한 결과 ERPG-2 확산범위 결과값이 최악/대안의 사고 시나리오 기준 피해예측 결과는 5,532m/1,563m인 반면, 실제 기상조건 및 누출시간(1200s)을 반영한 피해예측 결과는 439~1,344m로 많은 차이를 보였다.



Table 1. Consequence analysis for worst/alternative case scenario

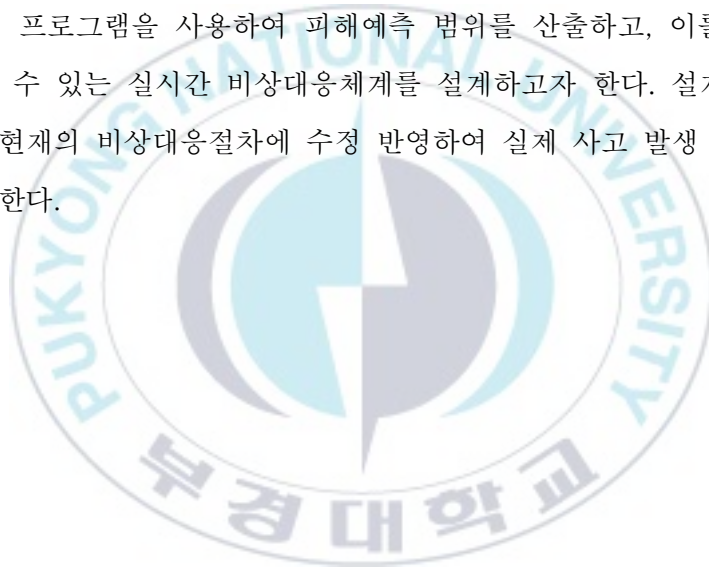
| Variable                   |                             | Worst case  | Alternative case |
|----------------------------|-----------------------------|-------------|------------------|
| Weather Condition          | Wind direction              | N           | N                |
|                            | Wind speed(m/s)             | 1.5         | 3                |
|                            | Temperature (°C)            | 40          | 25               |
|                            | Pressure(atm)               | –           | –                |
|                            | Humidity (%)                | 50          | 50               |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | F           | D                |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 12          | 2.4              |
|                            | Leak duration time (s)      | 600 (total) | 1200             |
| Leak amount (kg)           |                             | 5,932,828   | 45,416.2         |
| Damage impact distance (m) | ERPG1                       | 14,420      | 3,593            |
|                            | ERPG2                       | 5,532       | 1,563            |
|                            | ERPG3                       | 1,345       | 447              |

Table 2. Consequence analysis for reflecting actual weather condition and leak duration time

| Variable                   |                             | 2022.01.04<br>20:30 | 2022.01.18<br>14:00 |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| Weather Condition          | Wind direction              | N                   | SSE                 |
|                            | Wind speed(m/s)             | 5.8                 | 2.6                 |
|                            | Temperature (°C)            | 5.4                 | 6.5                 |
|                            | Pressure(atm)               | —                   | —                   |
|                            | Humidity (%)                | 12                  | 8                   |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | D                   | B                   |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 2.4                 | 2.4                 |
|                            | Leak duration time (s)      | 1200                | 1200                |
| Leak amount (kg)           |                             | 45,416              | 45,416              |
| Damage impact distance (m) | ERPG1                       | 3,035               | 835                 |
|                            | ERPG2                       | 1,344               | 439                 |
|                            | ERPG3                       | 393                 | 157                 |

이는 실제 사고가 발생하는 경우 기상조건, 사고정보 (누출공 size, 누출시간 등)의 다양한 변수에 따라 확산범위가 달라짐을 의미하며, 법에 따라 기 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 발생에 따른 사고 당시/이후의 사고정보, 기상정보를 수집하고, 이러한 정보를 바탕으로 CA(Consequence Analysis) 프로그램을 사용하여 피해예측 범위를 산출하고, 이를 비상대응에 활용할 수 있는 실시간 비상대응체계를 설계하고자 한다. 설계된 비상대응체계를 현재의 비상대응절차에 수정 반영하여 실제 사고 발생 시 적극 활용하고자 한다.



## 제 2 장 연구 내용

### 2.1 Consequence Analysis

위험은 발생가능성(빈도)과 발생으로 인한 영향(결과)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\text{위험 (Risk)} = \text{빈도 (Frequency)} \times \text{결과 (Consequence)}$$

위험성 평가는 공장에서의 잠재위험(Hazard)을 확인하여 가상 시나리오에 대한 사고 발생 가능성(Accident Frequency)과 사고결과(Accident Consequence)분석을 통해서 위험성(Risk)을 계산 및 표현하는 것으로 사고에 의하여 인체나 건물에 미칠 수 있는 피해를 평가하는 것이다. 많은 위험성 평가(Risk Assessment)방법들이 공정에 대한 잠재적인 위험 확인 및 위험성 감소의 역할을 할 뿐 아니라 운전성(Operability), 경제적 문제(Economical Problem) 및 환경적 문제(Environmental Problem)와 같은 안전 이외의 필요조건을 충족시키는데 도움을 주고 있다<sup>6)</sup>.

위험성 평가의 일반적인 절차는 공정에 대한 모든 장치, 설비, 작업자 그리고 작업 환경 등의 분석이 완료되면 공정이 가지고 있는 모든 잠재위험 확인 작업이 수행된다. 그리고 발생할 수 있는 사고에 대한 다양한 가상 시나리오가 정해지며, 그 다음으로 사건의 발생 확률과 결과에 대한 연구가

동시에 수행이 된다. 이 정보들은 최종 위험성 평가에 이용되는데 만약 결과로 도출된 위험도가 허용가능한 정도의 위험성으로 판명되면 분석 결과는 성공적으로 수행되어 공정은 정상적인 가동이 가능하다. 반면, 그렇지 못할 경우는 시스템을 변경하여 앞의 절차를 다시 반복적으로 수행하게 된다<sup>7)</sup>.



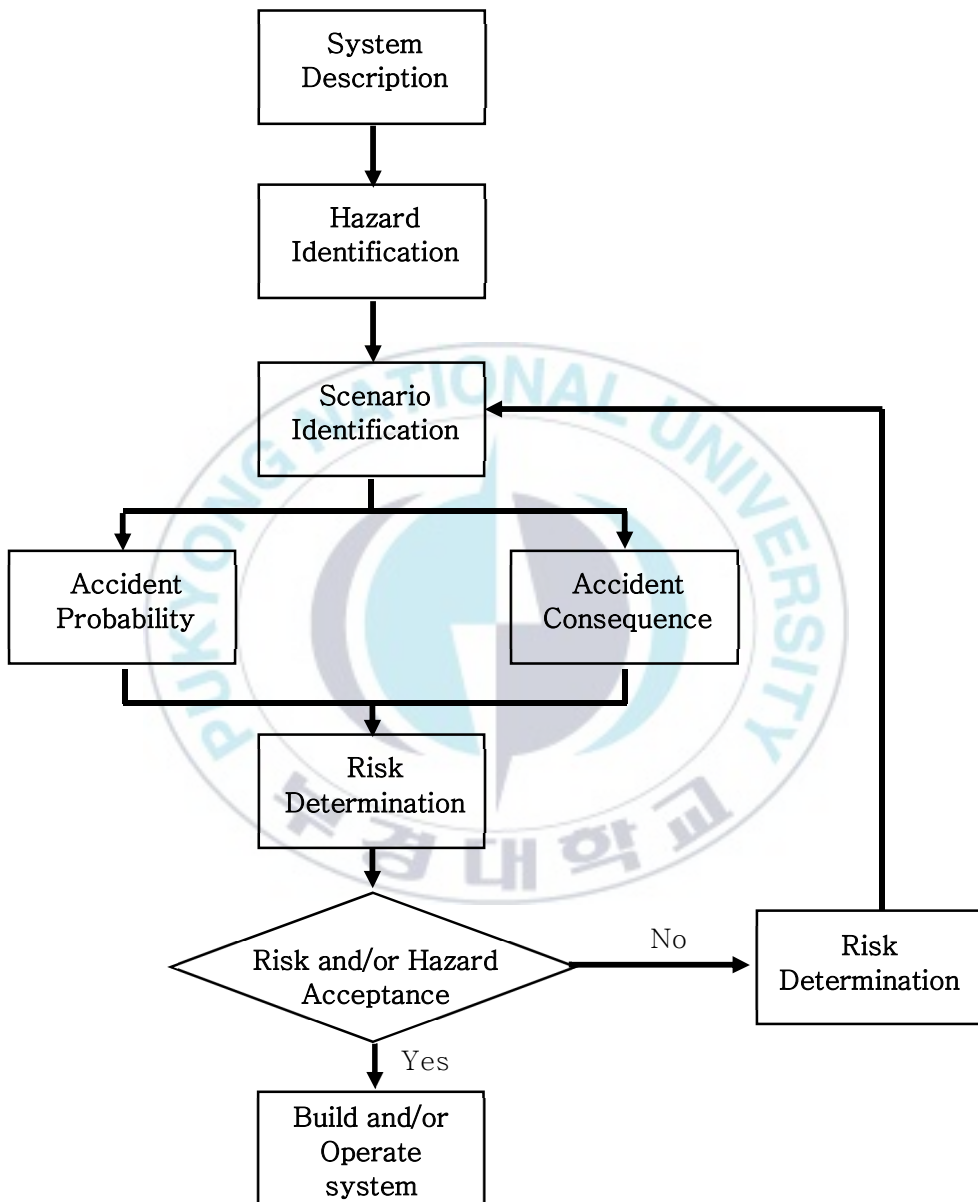


Fig. 1 Hazard evaluation procedure for quantitative risk assessment

위험성평가는 방법에 따라 크게 정성적 위험성평가와 정량적 위험성평가로 구분되는데 정성적 위험성평가 기법으로는 HAZOP, PHA, CHECK LIST, What-if법 등이 있으며, 정량적 위험성평가 기법으로는 빈도에 대한 평가를 수행하는 FTA, ETA와 사고의 결과에 대해 분석을 하는 CA (Consequence Analysis)가 있다<sup>2)</sup>.

CA는 Fig. 2에 따라 일반적으로 4단계로 나누어 수행이 가능하다<sup>8)</sup>.

1단계인 근본적인 위험요소 확인은 정성적인 위험성평가 단계로서 주로 위험과 운전분석 (HAZOP) 또는 CHECK LIST 기법 등에 의하여 공정 내에 잠재하고 있는 위험요소를 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 계산한다. 누출모델은 Table 3.에 따른 구분으로 각각의 모델링이 가능하며, 세부적인 모델링 방법은 “누출원 모델링에 관한 기술지침 (KOSHA guide P-92-2012)”, “사고 피해예측 기법에 관한 기술지침 (KOSHA guide P-102-2021)” 등에 명시하고 있다<sup>2)</sup>.

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

4단계인 피해예측은 누출되는 위험물질이 인화성가스 또는 인화성액체인 경우에는 화재·폭발로 인하여 사업장 내의 근로자 및 주변 시설에 미치는 화재·폭발의 영향을 계산하며 독성물질인 경우에는 작업자, 인근 주민 또는 주변 환경에 미치는 영향을 계산한다.

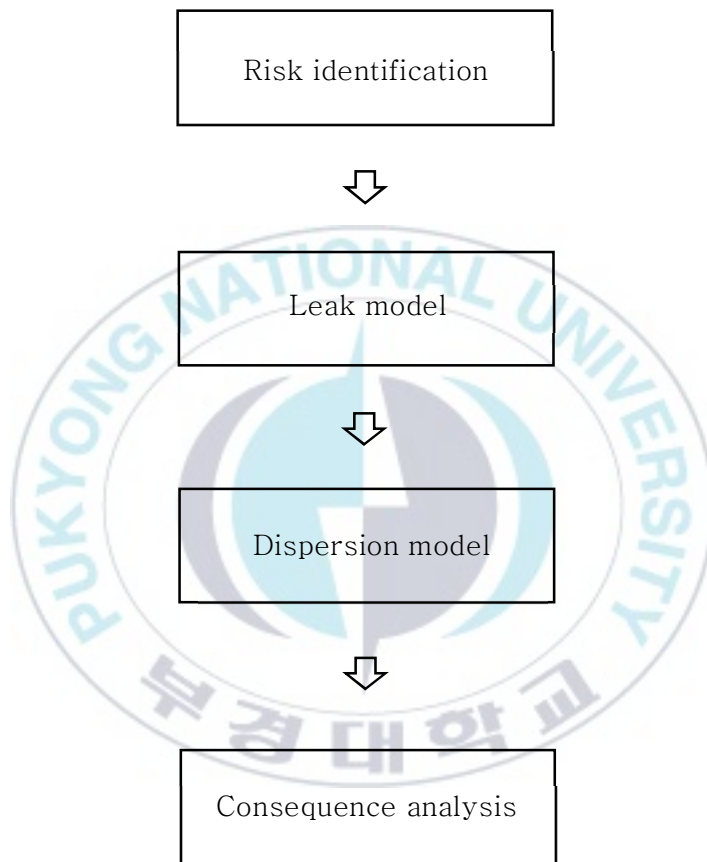


Fig. 2. Step of consequence analysis

Table 3. Leak model

| Classification      | Modeling method                     |
|---------------------|-------------------------------------|
| Leak duration time  | Instantaneous leak, continuous leak |
| Vapor cloud density | Light gas, heavy gas                |
| Leak position       | Vessel leak, pipe leak              |
| Material status     | Gas, liquid, 2-phase (liquid–vapor) |

Table 4. Dispersion model

| Classification | Continuous leak     | Instantaneous leak |
|----------------|---------------------|--------------------|
| Light gas      | Gaussian plume      | Gaussian Puff      |
| heavy gas      | HMP model, BM model | BM model           |

## 2.2 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정/작성

사고 발생초기 CA의 수행을 위하여 파악이 불가능한 정보는 “최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침 (KOSHA guide P-107-2020)”에 따라 가정하여 CA를 수행한다<sup>5)</sup>.

최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침에서는 각각의 변수 결정방법에 대한 가이드를 아래와 같이 제시하고 있다.

### 1) 끝점

사업장 밖에서의 누출 시나리오 분석을 하기 위한 기준이 되는 지점

- 독성물질 : 농도가 끝점농도(ERPG-2)에 도달하는 지점
- 인화성가스 및 인화성액체
  - 폭발 :  $0.07\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 과압이 걸리는 지점
  - 화재 : 40초 동안  $5\text{kW}/\text{m}^2$ 의 복사열에 노출되는 지점
  - 누출 : 누출된 물질의 폭발하한농도의 100%에 이르는 지점

### 2) 풍속 및 대기안정도

- 최악의 사고 시나리오 : 지상 10 m 높이에서 초당 1.5 m의 풍속으로 하고 대기안정도는 F등급을 사용
- 대안의 사고 시나리오 : 풍속은 과거 1년 이상 그 지역의 평균 기상조건 및 대기안정도를 사용한다. 단, 확인불가 시 풍속은 지상 10 m 높이에서 초당 3 m로 하고, 대기안정도는 D등급으로 사용

### 3) 대기온도 및 습도

- 최악의 사고 시나리오 : 대기온도는 40℃, 습도는 50%
- 대안의 사고 시나리오 : 과거 1년 이상의 그 지역의 평균 온도 및 평균 습도를 사용 (단, 확인불가 시 25℃, 50%)

### 4) 누출원 높이

- 최악의 사고 시나리오 : 지표면에서 누출
- 대안의 사고 시나리오 : 실제 누출되는 높이

### 5) 지표면의 굴곡상태

- 도시와 시골지형 중에 선택
  - 도시지형 : 건물과 나무 등이 많은 지형
  - 시골지형 : 평탄한 지형을 의미

### 6) 누출물질의 온도

- 최악의 사고 시나리오 : 냉동액체를 취급하는 경우 운전온도. 냉동액체 이외의 액체를 취급하는 경우에는 낮 시간의 최고온도 또는 운전온도 중 큰 수치를 사용
- 대안의 사고 시나리오 : 운전온도

### 7) 최악의 사고 시나리오 분석

- 시나리오 분석 대상
  - (1) 모든 독성물질의 누출 사고를 대표하는 사고 시나리오 1개 이상
  - (2) 인화성가스 및 인화성액체 (가연성물질 포함)의 화재·폭발 대표 사고 시나리오 1개 이상

- 최악의 누출량 산정 (다음 수치 중 큰 것으로 선택)
  - (1) 사고 시 비상조치가 가능한 범위 내에서 단일 용기에 저장되는 최대량
  - (2) 사고 시 비상조치가 가능한 범위 내에서 단일 배관계에 보유하고 있는 최대량
- 사고 시나리오 분석 : 독성물질(가스)은 10분동안 누출되어 확산되는 것으로 가정하며, 독성물질(액체)은 순간적으로 누출되어 액체층을 형성하는 것으로 가정하며, 인화성가스/액체는 누출량이 기화되어 증기운 폭발을 일으키는 것으로 가정하며, 누출량 중 증기운 폭발로 연계되는 양은 가스인 경우 누출 전량, 액체인 경우는 최초 10분간 증발된 양으로 한다.

## 8) 대안의 사고 시나리오 분석

- 시나리오 선정 시 고려사항 : 설비에 연결된 화학물질의 주 인입 또는 배출 배관의 크기에 따라 "누출원 모델링에 관한 기술지침 (KOSHA guide P-92-2012)<sup>8)</sup>", "화학공장의 피해 최소화 대책수립에 관한 기술지침 (KOSHA guide P-110-2012)<sup>9)</sup>" 또는 "Risk-Based Inspection Technology (API RP 581)" 등을 참조하여 선정한다. 선정기준 예시는 Table 5.를 참고 한다.

Table 5. Guide of leak hole size for alternative case scenario

| Actual pipe diameter (in) | Alternative case leak diameter (in) <sup>*)</sup> |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| 2                         | 2                                                 |
| 3                         | 2                                                 |
| 4                         | 2                                                 |
| 5                         | 2                                                 |
| 6                         | 2                                                 |
| 8                         | 2                                                 |
| 10                        | 2                                                 |
| 12                        | 2.4                                               |
| 16                        | 3.2                                               |
| 18                        | 3.6                                               |
| 20                        | 4                                                 |
| 22                        | 4.4                                               |
| 24                        | 4.8                                               |
| 50                        | 10                                                |

\*) Application criteria : 20% of pipe diameter. However, in the following cases, the pipe diameter is selected as the diameter of the actual leaking hole

- ① When the pipe diameter of the largest connector is less than 50 mm.
- ② Special chemical facilities (operating temperature is over 350℃ or operating pressure is over 10 kg/cm<sup>2</sup>).
- ③ In case of high probability of damage such as other tank lorry fastening parts

## 2.3 Consequence Analysis 소프트웨어 (e-CA)

사고발생초기 앞서 연구한 CA를 단계별로 수행하는 것은 시간 등의 여건을 고려할 때 불가능하여 CA 수행을 쉽게 할 수 있는 소프트웨어를 확인해 보았다. CA 소프트웨어는 DNV사에서 개발하여 유상으로 판매하고 있는 PHAST, EPA(미국 환경청)에서 개발하여 무료로 배포하고 있는 ALOHA가 있으며, 산업안전보건공단에서 국내 최악/대안의 사고 시나리오에 적용할 수 있도록 개발하여 무료로 배포하고 있는 e-CA가 있다.

본 연구에서는 노동부 고시, KOSHA guide 최악/대안의 사고 시나리오를 쉽게 도출할 수 있도록 개발되었고, 국내 석유화학업종에 종사하는 안전담당자들이 배포된 매뉴얼에 따라 쉽게 배우고, 운영할 수 있는 e-CA 프로그램을 사용하였다<sup>10)</sup>.

## 제 3 장 연구 대상

### 3.1 연구 대상 및 누출 시나리오 설정

#### 1) 대상 물질

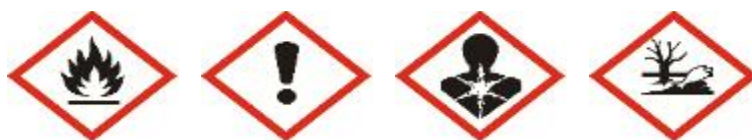
본 연구에서는 S사에서 취급하고 있는 독성물질 중 상대적으로 저장량이 많은 “벤젠”을 대상 물질로 선정하였다.

벤젠은 산업안전보건법상 관리대상 유해물질이자, 특별관리물질로 지정되어 있다. TWA 0.5ppm으로 독성이 강하며, 발암성이 있는 물질로 익히 알려져 있다. 누출되어 확산되는 경우 근로자 및 인근 지역주민에게 피해를 끼칠 수 있기 때문에 누출이 되지 않도록 철저한 관리가 필요하며, 만약 누출이 되었을 경우 단시간 내 비상조치를 취하여 확산되지 않도록 신속하게 조치해야 한다.

벤젠의 ERPG (Emergency Response Planning Guideline)는 ERPG-1 50ppm, ERPG-2 150ppm, ERPG-3 1000ppm 이며, 본 연구에서는 “끝점”에 해당하는 ERPG-2 150ppm을 기준으로 진행하였다.

벤젠의 상세 data는 Fig. 3 (출처. 안전보건공단 제공 MSDS)와 같다.

# Benzene



| Name and contents |             |          |              |
|-------------------|-------------|----------|--------------|
| Name              | Common name | CAS No.  | Contents (%) |
| Benzene           | –           | 71–43–2  | 99.87        |
| Toluene           | –           | 108–88–3 | 0.03 below   |
| n–Hexane ; Hexane | –           | 110–54–3 | 0.13 below   |

| Properties      |        |                  |      |
|-----------------|--------|------------------|------|
| Boiling point   | 80℃    | Melting point    | 5.5℃ |
| Flash point     | –11℃   | Ignition point   | 498℃ |
| Explosion range | 1.2~8% | specific gravity | 0.88 |

| Hazardous                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H225 : Highly flammable liquid and vapor. H340 : May cause genetic defects. H350 : May cause cancer. H370 Causes damage to organs through exposure. H372 : Causes damage to the vascular system in the body through prolonged or repeated exposure. |

| First Aid Instructions |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inhalation             | If exposed or concerned : Get medical advice/attention. Do not induce vomiting. Remove to fresh air. If not breathing, give artificial respiration. If breathing is difficult, give oxygen.                                                                                                                                                                                                                |
| Skin contact           | If on skin (or hair) : Take off all contaminated clothing. Rinse skin with water/shower. If skin irritation occurs : Get medical advice/attention. Remove contaminated clothing and shoes and isolate contaminated area. In case of burns, immediately cool the affected area with cold water for as long as possible, and do not remove clothing that adheres to the skin. Wash skin with soap and water. |
| Eye contact            | If in eyes : Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses if possible. Continue washing. If eye irritation persists, get medical advice/attention                                                                                                                                                                                                                                |

Fig. 3 Benzene one page sheet

## 2) 대상 저장탱크

최악의 사고 시나리오 시 “최악의 누출량”은 사고 시 비상조치가 가능한 범위 내에서 단일 용기에 저장되는 최대량으로 정하고 있기 때문에 본 연구에서는 S사에 “벤젠”을 취급하는 저장탱크 중 용량이 가장 큰 저장탱크를 대상으로 선정하였다.

벤젠 저장탱크의 specification/location은 Table 6./Fig. 4 (출처. Google Earth)와 같다.

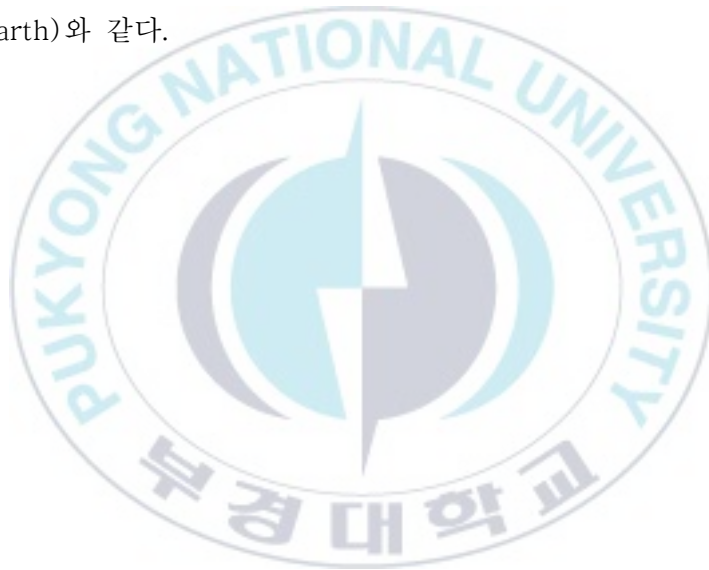


Table 6. Benzene tank specification

| Classification    | Data                 |
|-------------------|----------------------|
| Name of content   | Benzene              |
| Diameter          | 27.43 m              |
| Storage amount    | 5932.82 kg (약 5900톤) |
| Dike area         | 6400 m <sup>2</sup>  |
| Max pipe diameter | 12 inch              |
| Temperature       | 40 ‘C                |
| Pressure          | Atmospheric pressure |



Fig. 4 Benzene tank location

### 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 정하였으며, 실제 기상정보 등을 반영한 추가적인 대안의 사고 시나리오는 기상청 관측소 중 S사와 가장 인접한 “이진리 관측소”의 실시간 기상 data를 활용하였다. 상세 기상청 인터넷 화면은 Fig. 5 (출처: <https://www.weather.go.kr/w/index.do#>)와 같다.

#### – 최악의 사고 시나리오

누출 사고 시나리오는 해당 탱크의 최대 배관 직경인 12inch 배관 flange가 파단되어 탱크에 저장되는 최대량이 10분동안 누출되어 확산되는 기준으로 하였다.

풍향은 1년치 평균값인 북향으로, 풍속은 지상 10m 높이에서 1.5m/s로 하고, 대기안정도는 F등급 사용하였다. 대기온도는 40°C, 습도는 50%를 사용하였다. 지표면의 상태는 도시 지형을 선택하였다.

독성물질 확산범위는 ERPG-2로 벤젠의 경우 150ppm을 기준으로 하였다.

#### – 대안의 사고 시나리오

누출 사고 시나리오는 해당 탱크의 최대 배관 직경인 12inch의 20%인 2.4inch를 누출공 사이즈 (Table 7. 참조)로 하였고, 이 누출공에서 20분동안 누출되어 확산되는 기준으로 하였다.

풍향은 1년치 평균인 북향, 풍속은 지상 10m 높이에서 3m/s로 하고, 대기안정도는 D등급을 사용하였다. 대기온도는 25°C, 습도는 50%를 사용하였다. 지표면의 상태, 독성물질 확산범위는 최악의 사고 시나리

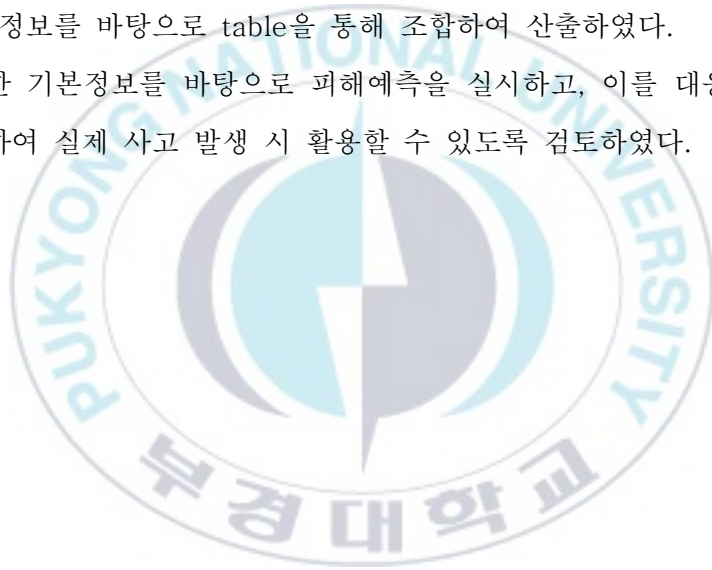
오와 동일하게 도시 지형, ERPG-2 기준으로 하였다.

– 사고 발생 시 대응 model 기준 피해 예측

사고 발생 시 대응 model을 마련하고, 각종 변수 및 수집방안을 정의하고, 기상조건은 최악/대안 사고 시나리오의 기본값과 달리 ‘22년 1월 임의의 날짜 정하여 풍향, 풍속, 대기온도, 상대습도 등을 기상청 사이트 내 실시간 기상정보를 활용하였다.

대기안정도는 풍속과 낮의 경우 복사강도의 크기, 밤의 경우 흐림/맑음 등의 정보를 바탕으로 table을 통해 조합하여 산출하였다.

이러한 기본정보를 바탕으로 피해예측을 실시하고, 이를 대응 model에 적용하여 실제 사고 발생 시 활용할 수 있도록 검토하였다.



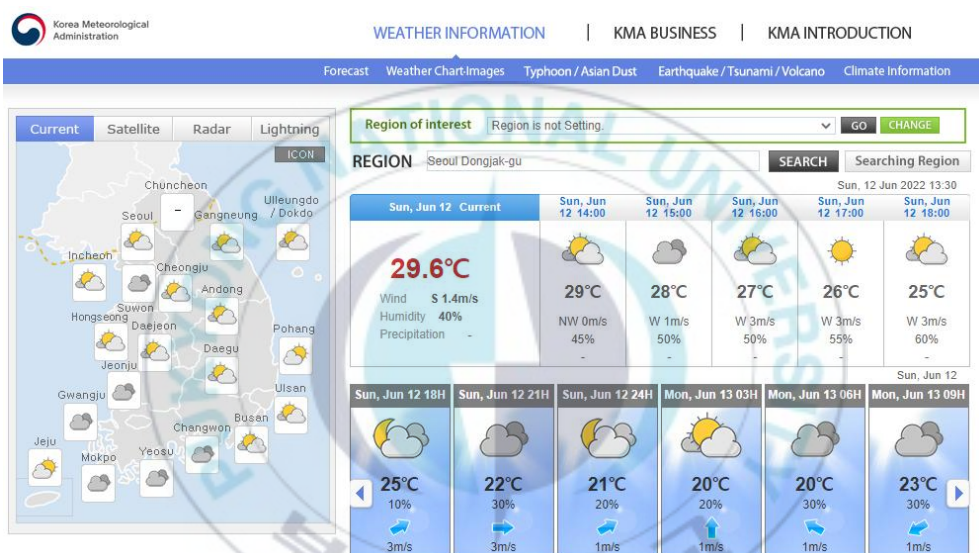


Fig. 5 Weather information by Korea Meteorological Administration

Table 7. Guide of leak hole size for alternative case scenario

| Actual pipe diameter (in) | Alternative case leak diameter (in) <sup>*)</sup> |
|---------------------------|---------------------------------------------------|
| 2                         | 2                                                 |
| 3                         | 2                                                 |
| 4                         | 2                                                 |
| 5                         | 2                                                 |
| 6                         | 2                                                 |
| 8                         | 2                                                 |
| 10                        | 2                                                 |
| 12                        | 2.4                                               |
| 16                        | 3.2                                               |
| 18                        | 3.6                                               |
| 20                        | 4                                                 |
| 22                        | 4.4                                               |
| 24                        | 4.8                                               |
| 50                        | 10                                                |

\*) Source : KOSHA guide P-107-2020

Table. 8 Atmospheric stability

| Wind speed<br>(m/s) | Day                 |        |      | Night  |       |
|---------------------|---------------------|--------|------|--------|-------|
|                     | Radiation intensity |        |      |        |       |
|                     | Strong              | Middle | Weak | Cloudy | Sunny |
| $S \leq 2$          | A                   | A-B    | B    | F-G    | G     |
| $2 \leq S \leq 3$   | A-B                 | B      | C    | E      | F     |
| $3 \leq S \leq 5$   | B                   | B-C    | C    | D      | E     |
| $5 \leq S \leq 6$   | C                   | C-D    | D    | D      | D     |
| $6 \leq S$          | C                   | D      | D    | D      | D     |

\*) Source : KOSHA guide P-107-2020

#### 4) 피해예측에 활용한 Consequence Analysis 소프트웨어

본 연구에서는 산업안전보건공단이 개발 배포한 “e-CA” 소프트웨어를 사용하여 피해예측 자료로 활용하였다<sup>10)</sup>.



### 3.2 사고 발생 시 대응 model 도출

S사가 위치하고 있는 울산 울주군 온산공단에는 석유화학사, 비철금속사 등 다양한 산업체가 분포하고 있으며, S사와 인접하여 북쪽으로는 석유화학사인 D사, 남쪽으로는 비철금속사인 L사, K사 등이 위치하고 있다. 인접한 주거지로는 북쪽으로 약 7km 거리에 울산 시내가 있으며, 서쪽으로 약 2.5km 거리에 온산읍 덕신리 마을이 있다.

온산공단의 산업체에서 취급하고 있는 독성물질이 누출되어 인근으로 확산되는 경우 인근 타 사업장, 나아가 지역주민에 인적/물적 피해를 끼칠 수 있으며, 이에 대한 관리 및 피해 최소화 목적으로 산업안전보건법상 공정안전관리제도(PSM)에 따라 주민홍보계획을 수립하여 주기적으로 최신화하고, 주변 사업장, 인근 지역주민 등에 유해위험물질 및 설비정보, 사고 시 나리오, 비상신호 체계 등을 고지하고 있다.

현재의 산업안전보건법상 주민홍보계획에 따른 고지는 기본적인 정보만을 포함하고 있다. 실제로 독성물질 누출사고가 발생하였을 때 어떤 독성물질이 얼마의 양이 누출되었고, 얼마나 확산되었고, 확산범위에 따라 타 사업장, 인근 지역주민의 대피 여부를 결정하기 위한 정확한 정보의 제공이 이루어지고 있지 않다.

본 연구를 통해 사고 발생 시 수집된 사고정보, 기상정보를 바탕으로 즉시 피해예측을 하고, 이를 반영하여 활용할 수 있는 대응체계 model을 설계하였다<sup>11)</sup>.

피해예측을 위한 각종 정보에 대해 시간의 흐름에 따라 사전준비, 사고 즉시, 초기조치 후, 조치 중 등 각 단계별로 수집시점, 수집 담당자를 정의하고, 구체적인 수집방법을 마련하여 flow chart로 작성하였다.

설계된 대응 model은 비상대응절차에 반영하여 실제 사고 발생 시 사고 발생팀/당사자가 해당 절차를 쉽게 활용하게 하였다.



### 3.3 피해예측을 위한 각종 정보 Searching & List-up

e-CA를 통한 피해예측을 위해서는 여러가지 정보가 필요하다. 해당되는 정보는 피해예측 뿐 아니라, 사고대응에 필요한 정보도 있으며, 관련된 모든 정보를 정리 및 list-up하고, 각 정보별로 수집방법, 수집시점을 정의하고, 수집담당자를 지정하여 향후 사고 발생 시 해당 업무를 수행 할 수 있게 하였다.

피해예측을 위한 각종 정보는 아래와 같다.

- 장소정보 : 지역, 고도, 위도, 경도, 인근사업장/거주지와 거리 등
- 기상정보 : 풍향, 풍속, 대기온도, 상대습도, 대기안정도 등
- 물질정보 : 물질명, 독성정보(ERPG-1/2/3), 인화점 등
- 공정정보 : 탱크 직경/높이/최대 저장량, 최대 배관직경, 방유제면적, 운전온도/압력
- 사고정보 : 사고시각, 탱크 실제 저장량, 누출공 size, 누출시간, 누출량, 확산범위

### 3.4 비상대응절차 수정

피해예측을 위한 각종 정보 및 정보에 대한 수집방법을 정의하고, 각 정보에 대한 담당자를 assign 하였고, 이를 실제 사고 발생 시 활용하기 위해서는 관련된 비상대응절차가 마련되어야 한다<sup>12)</sup>.

동 벤젠 탱크에 대해 Flange 누출에 대한 시나리오 기준으로 비상대응절차가 작성되어 있는지 확인하고, 해당 절차에 금번 연구를 통해 확인된 사항을 반영하여 보완하였다.

사고 발생 시 대응 model을 반영하고, 피해 예측을 위한 각종 정보, 그에 대한 수집방법/담당자 등을 포함하며, 대응 model에 따른 대응요령을 추가로 반영하였다.

해당 비상대응절차에는 산업안전보건법상 최악/대안의 사고 시나리오를 기본적으로 반영하고, 추가로 해당 비상대응절차를 활용하는 생산팀 운전원에게 다양한 피해예측 결과를 제공하기 위해 임의의 날짜상 실제 기상정보를 바탕으로 산출된 피해예측 결과를 포함하여 기상정보에 따른 독성물질의 확산범위 정보를 포함하였다.

또한, 연구를 통해 기상정보 중 온도, 풍속 등 각 개별 변수를 조작하여 피해예측 결과상 확산범위가 어떻게 변하는지 확인하고, 이를 운전원들에게 교육 등을 통해 안내하여 피해예측 프로그램의 특성을 이해할 수 있게 하였다<sup>13)</sup>.

마지막으로 공정안전관리제도(PSM)에 대한 상세 기준인 노동부 고시 “공정안전보고서의 제출·심사·확인 및 이행상태 등에 관한 규정” 제 40조에 따라 비상조치계획절차는 17개 항목을 포함하여 작성되어야 하며, 세부 내용은 KOSHA guide 등을 참고해야 한다. 노동부 고시/KOSHA guide를 반영하여 기존 S사의 비상대응절차 format을 보완하고, 이를 전사 공유하여 상향 표준화 하였다<sup>14)</sup>.



## 제 4 장 연구 결과 및 사례 연구

### 4.1 사고 발생 시 사고 정보를 활용한 피해예측 및 대응체계 구축

#### 1) 사고 발생 시 비상대응 model 마련

사고 발생 시 사고 정보를 활용한 피해예측을 실시하고, 이를 활용하는 대응 model을 Fig. 6과 같이 마련하였다.

실시간 피해예측을 위해 각종 정보를 수집하는 담당자, 피해예측 프로그램을 사용하여 피해예측을 실시하는 담당자가 추가로 필요하였다.

“사전 준비” 단계로 비상대응절차를 준비하고, 해당 절차 내 최악/대안의 사고 시나리오를 반영한 피해예측 결과를 반영하였고, 추가적인 피해예측 결과도 반영하여 다양한 변수에 따른 피해예측 결과를 담당자가 활용하게 하였다.

사고 발생 후 각 단계를 “사고 즉시”, “초기 조치 후”, “조치 중”으로 세분화 하였다. 이렇게 세분화한 사유는 각 단계별로 집중해야 하는 인적/물적 자원이 다르고, 주요 비상조치방안에 차이가 있기 때문에 단계를 구분하였다.

“사고 즉시”의 경우는 누출 사고 후 인근으로 벤젠의 확산을 방지하여 추가적인 피해를 최소화하기 위해 모든 인적/물적 자원을 확보/투입하는데 역량을 집중해야 한다. 예를 들어 비상대원이 현장으로 출동하여 초동 방재 활동을 펼치며, 방유제 내 누출된 벤젠을 회수할 수 있는 장비인 vacuum car와 벤젠 회수용 임시 pump를 사고현장에서 사용하여 조속히 누출물질을 회수해야 한다. 또한 가능하다면 누출 point에 대해서도 추가적인 누출이 발생하지 않도록 막음 등의 조치를 즉각 시행하여야 한다.

“초기 조치 후”의 경우는 누출물질을 회수하는 조치를 진행하면서, 누출 point에 대한 지속적인 관리가 필요하다. 누출물질인 벤젠은 독성물질이자, 인화성물질 이므로 화재/폭발과 같은 2차 사고가 발생하지 않도록 주변 가스농도를 폭발하한값(%LEL) 이하로 관리해야 하며, 확산지역 내 점화원도 철저한 관리가 필요하다.

“조치 중”의 경우는 기본적인 조치방안이 모두 정립되고, 정해진 조치방안으로 지속적인 조치가 이루어지는 상태로 향후 비상상황 종료, 피해복구를 염두하여 관리가 필요하다. 비상상황 종료를 대비하여 최종 누출시간/누출량을 확보하고, 이를 바탕으로 최종 확산범위를 산출한다. 산출된 확산범위를 바탕으로 작업환경측정, 건강진단 등의 대상/범위를 선정하여 진행하며, 신속한 복구를 위한 피해부분을 확인하고, 복구를 위한 관련 자재 등을 확보한다.

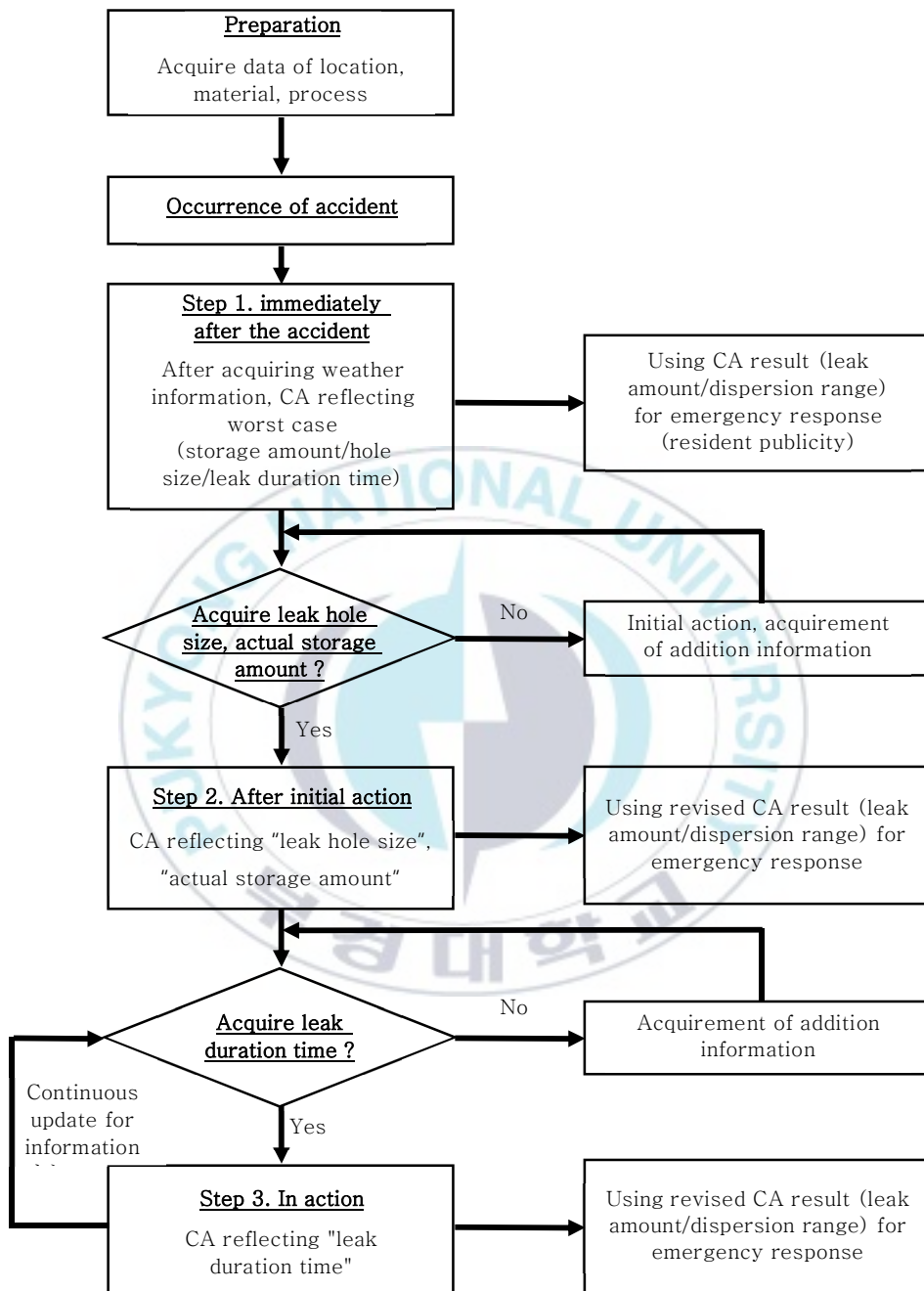


Fig. 6 Response model in case of an accident

사고 발생 시 대응모델은 “사고 준비” 단계에서 기본적인 정보를 수집하고, 이를 비상대응절차에 반영하여 준비하는 단계이다.

사고가 발생하면 비상사태가 발령되고, “Step 1. 사고 즉시 (Fig. 7)”에 따라 공정 엔지니어가 피해예측 업무를 수행할 담당자가 된다.

공정 엔지니어는 우선 기상청 사이트에 접속하여 기상정보를 수집하고, 사고 현장으로부터 사고정보를 지속적으로 수집한다.

- 기상정보 : 풍향, 풍속, 대기온도, 상대습도, 대기안정도 (풍속, 복사강도, 흐림/맑음 등 정보로 산출)
- 사고정보 : 누출공 사이즈, 누출시간, 누출량 등

공정 엔지니어는 수집된 기상정보를 바탕으로 사고정보는 최악의 사고 시나리오 기준으로 e-CA 프로그램을 사용하여 피해예측을 실시한다. e-CA를 통해 누출량, 독성물질 확산범위를 산출하고, 이를 비상대응에 활용할 수 있도록 비상대응본부로 전달한다.

비상대응본부는 사고 당시의 기상정보를 반영한 피해예측 결과를 대외 기관에 공유하여 긴급재난문자 등을 통해 주민홍보에 활용한다.

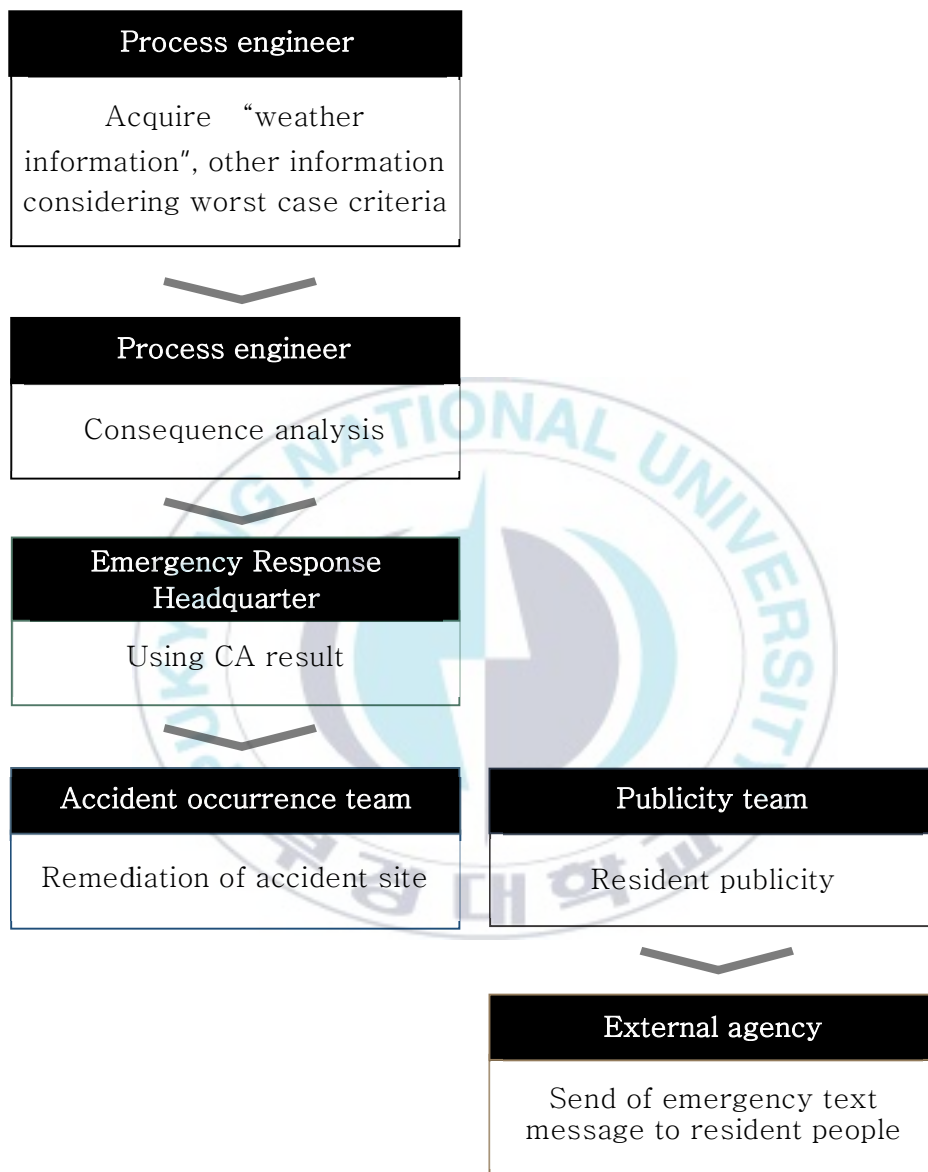


Fig. 7 “Step 1. immediately after the accident” flow chart

긴급조치가 우선적으로 이루어진 직후 “Step2. 초기 조치 후(Fig. 8)” 단계에서는 사고발생팀은 사고 point에 접근하여 누출공 size에 대한 정보를 지속적으로 수집한다. 누출공 size를 확인하기 위해서는 사고 지점에 접근해야 하며, 방독마스크 등 개인보호구를 반드시 착용해야 한다. 정확한 누출공 size를 한번에 확인이 불가능한 경우에는 단계적으로 해당 정보를 수집하며, 우선 size를 크게 추정하고, 점점 작게 확인해 나가는 과정으로 진행한다. 만약 누출 point가 지하매설 지역인 경우는 굴착해야 하므로 반드시 굴착작업허가서를 득하고 작업을 진행해야 한다.

저장탱크의 실제 저장량은 control room 내 DCS(Distributed Control System) 또는 local level gauge 등을 통해 확인하여 정보를 수집한다.

공정 엔지니어는 수집된 정보를 전달받아 피해예측을 실시하고, 이를 비상대응본부에 전달하여 이를 사내 사고현장 수습 등에 활용한다.

참고로 주민고지는 “Step 1. 사고 즉시” 단계에서 사고 당시 기상정보만을 반영한 최악 사고 시나리오 기준의 피해예측 결과를 안내하였고, “Step 2. 초기 조치 후” 단계에서는 빈번한 안내로 인한 혼란을 막기 위해 실시하지 않는다.

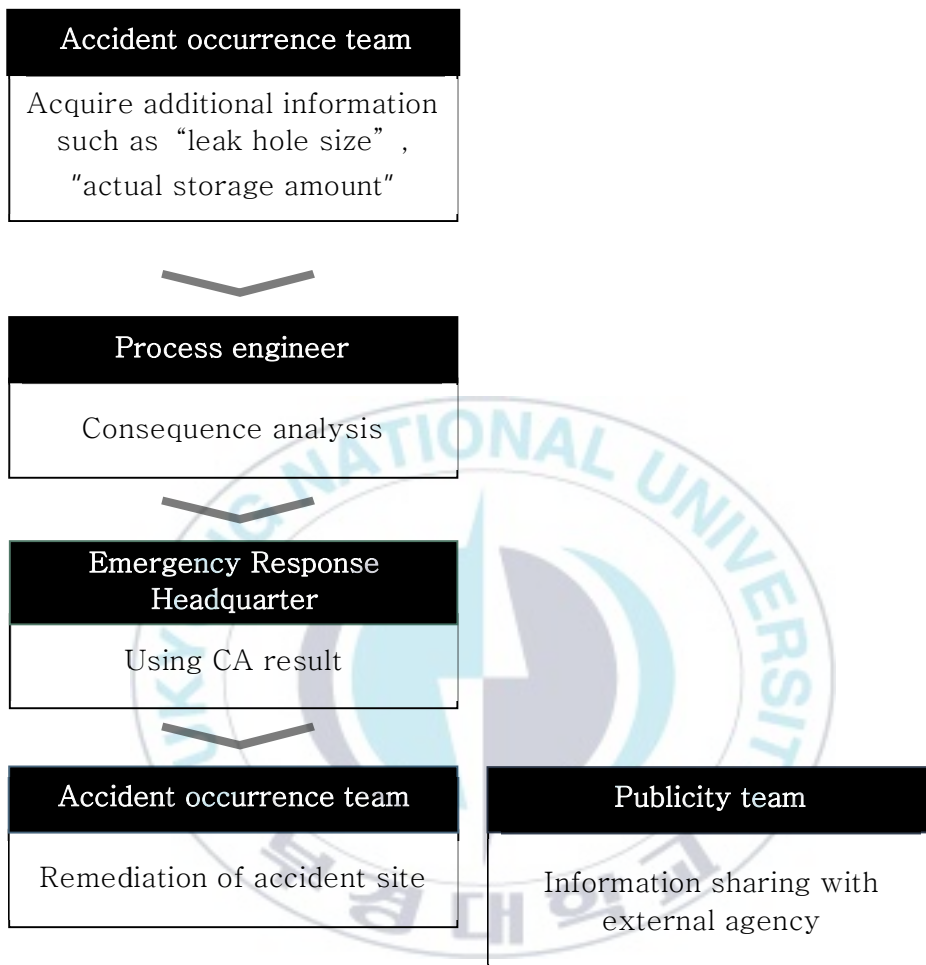


Fig. 8 “Step 2. After initial action” flow chart

어느정도 조치가 이루어지고, 안정화 단계에 접어든 경우 “Step 3. 조치 중 (Fig. 9)”단계로 진행되며, 이 단계에서는 비상상황 종료를 대비하여 누출시간을 확보하고, 이를 반영하여 최종 피해 확산범위를 산출한다.

사고발생팀은 최초 누출시간 및 종료시간을 확인하여 누출시간을 확정하고, 공정 엔지니어는 누출시간을 전달받아 이를 반영하여 피해예측을 실시한다.

공정 엔지니어는 피해예측 결과를 도출하여 비상대책본부에 전달하고, 비상대책본부는 이를 바탕으로 작업환경측정, 건강진단 등의 필요여부, 대상/범위 등을 검토 후 관련 업무를 진행한다. 또한 신속한 피해복구를 위해 피해부분을 확인하고, 관련 자재를 확보한다.

홍보대는 최종 피해예측 결과를 대외기관에 전달하여 긴급재난문자로 주민고지를 실시하고, 인근 지역 주민의 피해 사항을 파악하고, 조치를 취한다.

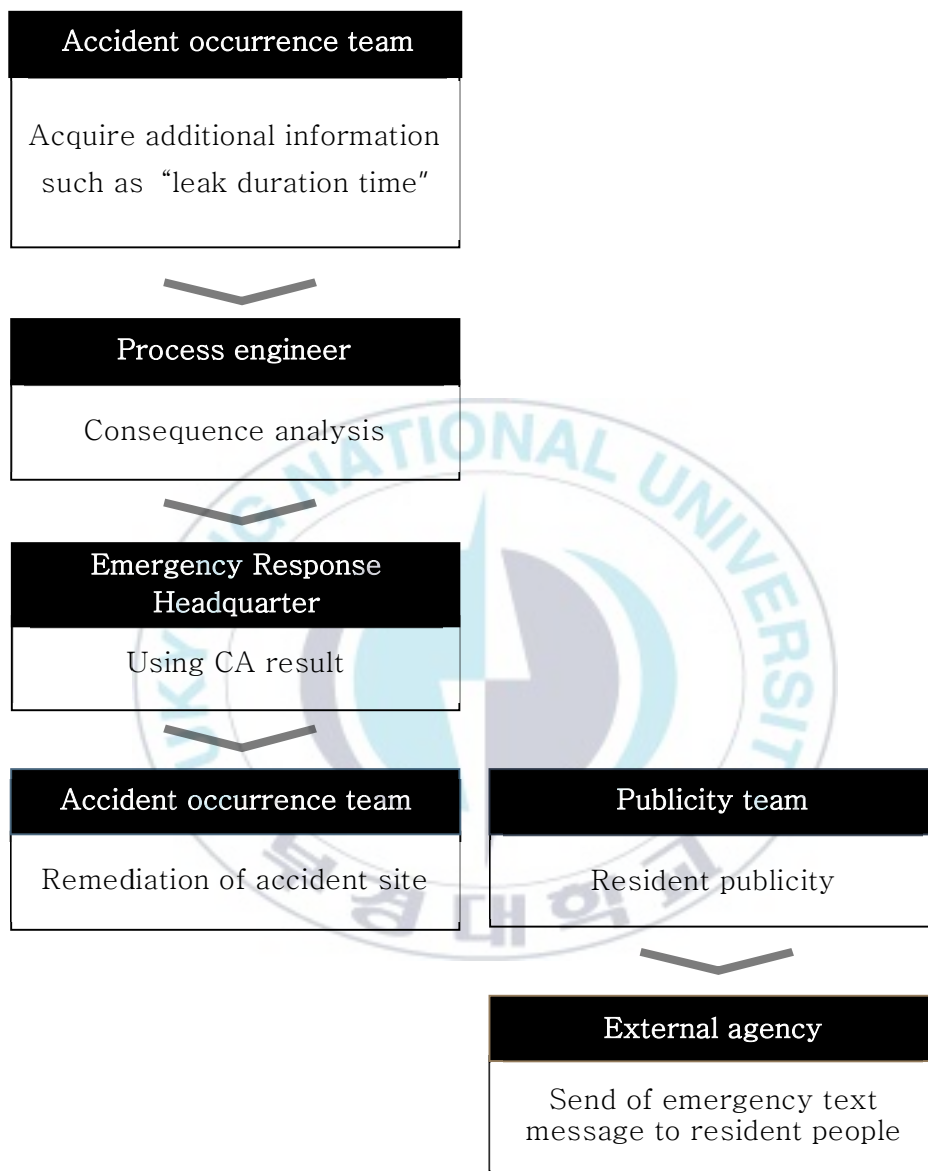


Fig. 9 “Step 3. In action” flow chart

## 2) 피해예측을 위한 각종 정보 및 수집방안 마련

피해예측, 비상대응에 필요한 각종 정보를 정의하고, 그에 대한 수집시점, 담당자, 수집방법을 표로 정리하였고, 이를 비상대응절차에 반영하였다.

장소정보는 지역, 고도, 위도, 경도, 인근사업장/거주지와 거리 등이 있으며, 공정 엔지니어가 담당자가 되고, 지도정보를 활용하여 고도, 경도, 타 사업장/거주지간 거리를 사전에 확보하였다.

기상정보는 풍향, 풍속, 대기온도, 상대습도, 대기안정도 등이 있으며, 공정 엔지니어가 담당자가 되고, 최악/대안의 사고 시나리오 기준값은 사전에 확보하였고, 사고 발생 즉시 해당 기상정보는 기상청에 접속하여 “이진리 관측소” data를 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 정보를 준비하였다.

공정정보는 탱크의 직경, 높이, 최대 저장량, 최대 배관직경, 방유제 면적, 운전 온도/압력 등이 있으며, 공정 엔지니어가 담당자가 되어 사내 공정 안전자료 (도면, 장치 및 설비 명세), 안전운전절차 등의 자료를 사전에 확보하여 준비한다.

사고정보는 사고시각, 탱크 실제 저장량, 누출공 size, 누출시간, 누출량, 확산범위 등이 있으며, 사고발생팀장 및 공정 엔지니어가 업무분장에 맞게 담당하였다.

사고시각, 실제저장량, 누출공 size, 누출시간은 사고발생팀에서 담당하여 정보를 수집하고, 누출량, 확산범위는 공정 엔지니어가 담당하여 피해예측 결과를 통해 확보하며, 상세 수집시점, 수집방법은 Table. 9와 같다.

누출공 size의 경우 사고 즉시 또는 초기 조치 후 정보를 수집하며, 사고현장 출동하여 육안으로 사고 point를 확인하여 파악한다. 단, 누출 point가 지하매설 지역인 경우 굴착작업허가서를 득하고, 굴착작업 후 확인한다.

실제 저장량은 현장에 설치된 Local level gauge, DCS 그래픽 등 현장 운전정보를 파악하여 확보한다.

누출시간은 초동 조치가 완료(누출 point 막음 or 잔존 저장물질 이송 완료조치)될 때까지의 시간을 확인하여 산정한다.

누출량은 초동 조치가 완료될 때까지의 탱크 level 변화량을 통해 산출하거나, 피해예측 프로그램을 활용하여 확보한다.

Table. 9 Method for collecting accident information

| Information           | Collecting time |   |   |   | Collecting method                                                                                                                                                   |
|-----------------------|-----------------|---|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       | ①               | ② | ③ | ④ |                                                                                                                                                                     |
| 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 In advance, ② Immediately after the accident,

③ After initial action, ④ After accident action

## 4.2 비상 대응 절차 수정

### 1) 사고 발생 시 비상대응 model을 비상대응절차에 반영

사고 발생 시 활용할 수 있는 비상대응 model을 설계하였고, 이를 비상대응절차에 반영하였다. 비상대응 model을 운영하기 위해 담당자/임무를 비상대응절차 내 “임무별 행동요령”에 반영하였고, 비상훈련 시나리오상에도 실시간 피해예측을 위한 임무를 반영하였다.

사고발생팀장, 공정 엔지니어에 대한 임무를 추가하였다. 사고발생팀장은 누출공 size, 실제 저장량 등의 추가 사고정보를 확보하는 것이 추가되었고, 공정 엔지니어는 장소정보, 물질정보, 공정정보를 사전 확보하고, 기상정보는 사고 즉시 확보하여 e-CA 프로그램을 통해 피해예측을 실시하고, 피해예측 결과를 비상대응본부 등에 공유하는 업무가 추가되었다.

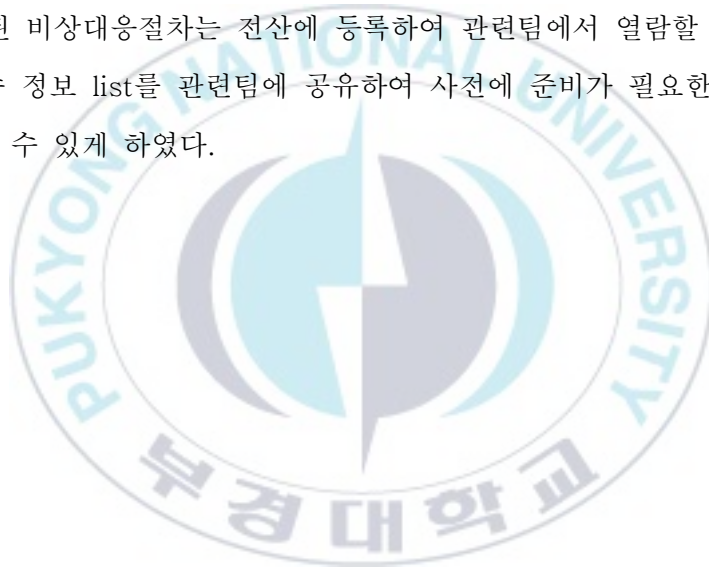
피해예측 결과인 누출량, 독성물질 확산범위는 비상대응본부로 전달되고, 사내 비상대응 방안에 활용하며, 구체적으로 누출량 최소화를 위한 긴급이송 작업, 방제작업, 방제자원 (인력/보호구 등) 투입, 누출물질의 2차 재해인 화재/폭발 발생 예방을 위한 누출원 인근 점화원 관리, 사내 임직원/협력업체 작업자 대피경로 등의 set-up에 활용한다.

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

## 2) 피해예측을 위한 각종 정보 및 수집방안을 비상대응절차에 반영

피해예측을 위한 각종 정보를 장소정보, 기상정보, 물질정보, 공정정보, 사고정보에 따라 분류하였고, 이 정보들의 수집시점을 사고 전 사전, 사고 즉시, 초기 조치 후, 사고 종료 후로 나누어 정리하였고, 이 정보들의 담당자를 지정하고, 정보를 수집하는 방법을 table로 정리 후 비상대응절차에 반영하였다.

작성된 비상대응절차는 전산에 등록하여 관련팀에서 열람할 수 있게 하였고, 각종 정보 list를 관련팀에 공유하여 사전에 준비가 필요한 정보에 대해 파악할 수 있게 하였다.



### 3) 노동부 공정안전관리(PSM) 평가를 대비하여 비상대응절차 수정

고용노동부는 매 4년마다 공정안전관리제도(PSM)에 대한 정기평가를 실시하고 있으며, 비상대응분야에서 좋은 평가를 받기 위해 금번 연구를 겸하여 비상대응절차의 미비점을 확인하고, 이를 보완하였다.

Case별 비상대응체계에서는 금번 연구를 통해 설계된 비상대응 model을 추가로 반영하였고, 신규로 공정엔지니어의 role을 추가하였다.

사내 규정에 따라 연간 비상대응 모의훈련 계획을 수립하여 정기적으로 훈련을 실시하고 있으며, 해당 훈련 전 시나리오에 대해 사전 검토할 수 있도록 check sheet를 작성하여 절차에 반영하였고, 훈련 후 훈련평가를 실시할 수 있도록 정량화된 훈련평가 sheet를 추가하였다.

기존 비상훈련 시나리오는 간단한 table 형식으로 작성되어 있었으나, 운전원들의 가독성을 높이기 위해 flow chart 형식에 관련 그림 등을 추가하여 PSM 제도에서 요구하는 “알기 쉬운 절차/지침”에 충족될 수 있도록 수정/보완하였다.

## 4.3 사례 연구

### 1) 사고 발생을 가정한 비상대응 model 적용

금번 연구를 통해 설계한 비상대응 model을 기준으로 실제 사고가 발생하였다고 가정하고, 각 단계별 각종정보 수집에 따른 피해예측 결과를 시물레이션 하였다.

‘22년 1월 4일 20:30 벤젠 탱크의 12in flange에서 누출 사고가 발생했다고 가정하였다. 실제 저장량은 탱크 level의 80% (4,746,262kg), 누출공은 1in, 누출시간은 1200s로 가정하였고, 해당 정보는 각 단계별 정보수집활동을 통해 단계별로 확보한다.

“사고 전 사전 준비” 단계에서는 최악/대안의 사고 시나리오 기준으로 기본적인 공정정보를 수집하여 피해예측을 실시하고, 비상대응절차를 마련하여 비상사태 발생 시 대응할 수 있도록 준비한다. 이 단계에서 계산된 피해 확산범위는 ERPG-2 기준으로 5,532m이다.

‘22년 1월 4일 20:30에 벤젠 탱크 12in flange에서 누출 사고가 발생하였으며, “Step 1. 사고 즉시” 단계에서 공정 엔지니어는 기상청의 기상정보를 수집하고, 누출시간은 1200s로 가정하고, 그 외 누출공, 실제 저장량 등 정보는 최악의 사고 시나리오 기준으로 피해예측을 실시한다. 이 단계에서 계산된 피해 확산범위는 ERPG-2 기준으로 1,344m이다. e-CA 프로그램에서 10분 전량 누출은 최악 사고 시나리오(풍속/대기안정도 고정값 적용)에만 적용되어 누출시간은 임의로 20분으로 설정하였다.

Table. 10 Result of CA for “Step 1. immediately after the accident”

| Variable                            |                                | Preparation<br>(worst case) | Step 1.<br>immediately after<br>the accident |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|
| Weather<br>Condition                | Wind direction                 | N                           | N                                            |
|                                     | Wind<br>speed(m/s)             | 1.5                         | 5.8                                          |
|                                     | Temperature<br>(° C)           | 40                          | 5.4                                          |
|                                     | Pressure(atm)                  | —                           | —                                            |
|                                     | Humidity (%)                   | 50                          | 12                                           |
|                                     | Atmospheric<br>stability (A~D) | F                           | D                                            |
| Scenario                            | Leak hole size<br>(in)         | 12                          | 12                                           |
|                                     | Actual storage<br>amount       | 5,932,828 (max)             | 5,932,828 (max)                              |
|                                     | Leak duration<br>time(s)       | Total leak with in<br>600s  | 1200s                                        |
| Leak amount (kg)                    |                                | 5,932,828                   | 1,083,097                                    |
| Damage<br>impact<br>distance<br>(m) | ERPG1 (50ppm)                  | 14,420                      | 3,035                                        |
|                                     | <b>ERPG2(150ppm)</b>           | <b>5,532</b>                | <b>1,344</b>                                 |
|                                     | ERPG3(1000ppm)                 | 1,345                       | 393                                          |

\*) Note : The information collected at that step is colored gray

“Step 2. 초기 조치 후” 단계는 누출물질 회수를 위해 임시 pump 설치, vacuum car 등이 현장에 준비가 완료되고, 누출물질 회수를 시작하고, 누출 point를 관리할 수 있는 단계이다.

이 단계에서는 벤젠은 독성 및 인화성물질로 2차 재해인 화재/폭발 방지를 위한 조치도 필요하다. 가스농도 관리가 필요한 point에는 실시간 가스모니터링 시스템을 설치하여 지속적으로 가스농도를 모니터링하고, 확산 지역 내 점화원도 철저한 관리가 필요하다.

사고발생팀은 control room 내 DCS 그래픽을 통해 사고 탱크의 level이 80%임을 확인한다. 실제 저장량은 설계 최대용량 대비 80%로 계산하여 4,746,262kg로 산출한다.

누출공은 멀리서 확인하였을 때 어림짐작으로 12in보다 작다고 판단되어 초기에는 5in 이하로 추정하며, 지속적인 조치로 사고 누출 point에 접근하여 누출공의 사이즈가 1in임을 최종 확인한다.

누출공 사이즈가 정확해짐에 따라 이를 공정 엔지니어에게 전달하고, 이를 반영한 피해확산 범위도 점점 감소하는 것을 확인한다. 누출공 사이즈가 5in → 2.4in → 2in → 1in로 감소함에 따라 피해 확산범위도 1,344m → 1,091m → 854m → 359m로 감소함을 확인할 수 있다. 산출된 확산범위를 반영하여 추가 재해가 발생하지 않도록 가스측정 등에 활용한다.

Table. 11 Result of CA for “Step 2. immediately after the accident”

| Variable                   |                             | Step 2. immediately after the accident |              |            |            |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|--------------|------------|------------|
| 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)         | 5                                      | 2.4          | 2          | 1          |
|                            | Actual storage amount (kg)  | 4,746,262                              |              |            |            |
|                            | Leak duration time(s)       | 1200s                                  |              |            |            |
| Leak amount (kg)           |                             | 175,005                                | 40,612       | 28,222     | 7,063      |
| Damage impact distance (m) | ERPG1(50ppm)                | 3,035                                  | 2,405        | 1,833      | 708        |
|                            | <b>ERPG2(150ppm)</b>        | <b>1,344</b>                           | <b>1,091</b> | <b>854</b> | <b>359</b> |
|                            | ERPG3(1000ppm)              | 393                                    | 329          | 266        | 122        |

\*) Note : The information collected at that step is colored gray

어느정도 조치가 이루어지고, 안정화 단계에 접어든 경우 “Step 3. 조치 중” 단계로 진행되며, 이 단계에서는 비상상황 종료를 대비하여 누출시간을 확보하고, 이를 반영하여 최종 피해 확산범위를 계산한다.

사고발생팀은 최초 누출시각 및 종료시각을 확인하여 최종 누출시간을 1200s로 확정하고, 누출공 사이즈는 1in로 확정하고, 이를 공정 엔지니어 전달하여 최종 피해예측을 실시할 수 있도록 한다.

공정 엔지니어는 피해예측 결과를 도출하여 비상대책본부에 전달하고, 비상대책본부는 이를 바탕으로 작업환경측정, 건강진단 등의 필요여부, 대상/범위를 검토하고 진행한다. 또한 신속한 피해복구를 위해 피해부분을 확인하고, 관련 자재를 확보한다.

홍보대는 최종 피해예측 결과를 대외기관에 전달하여 긴급재난문자로 주민고지를 실시하고, 인근 지역 주민의 피해 사항을 파악하고, 조치를 취한다.

만약 비상 대응을 위한 충분한 장비를 보유하고, 적극적인 대응을 통해 누출시간을 단축했을 경우를 가정하여 누출시간 단축 case를 반영하여 피해예측을 실시하였다. 누출시간이 1200s → 900s → 600s로 단축됨에 따라 피해 확산범위도 359m → 303m → 239m로 감소함을 확인하였다.

Table. 12 Result of CA for “Step 3. in action”

| Variable                   |                             | Step 3. in action |            |            |
|----------------------------|-----------------------------|-------------------|------------|------------|
| 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        |
|                            | <b>ERPG2(150ppm)</b>        | <b>359</b>        | <b>303</b> | <b>239</b> |
|                            | ERPG3(1000ppm)              | 122               | 105        | 84         |

\*) Note : The information collected at that step is colored gray

'22.1.4. 20:30 벤젠이 누출된 사고를 가정하고, 설계된 비상대응 model에 그 당시의 기상정보를 반영하여 시뮬레이션 해본 결과 독성물질의 확산범위는 사고 당시 기상정보에 굉장히 의존적이며, 피해예측/비상조치 관련 정보를 수집하고, 그 결과를 피해예측에 반영함에 따라 확산범위가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

정확한 확산범위가 산출되고, 이 정보를 바탕으로 추가적인 화재/폭발 사고 방지를 위한 가스농도 측정 등의 필수적인 비상대응활동에 집중할 수 있게 하여 불필요한 인적/물적 자원이 투입되는 것을 방지할 수 있었다.

사고 발생 후 누출시간을 단축시키는 것은 확산범위를 감소시킬 수 있고, 사고피해 최소화에 기여할 수 있다. 단시간에 누출물질을 회수하고, 누출 point의 막음 조치를 가능케 하는 장비를 사전에 추가 확보하는 것이 중요하겠다.

금번 시뮬레이션을 통해 확인한 피해반경을 review 하였다. 피해반경이 최악 사고 시나리오의 경우 5,532m이며, 이 경우 주거지는 울산시 울주군 남창, 덕신이 포함되고, 공단은 온산, 용연공단까지 피해반경에 포함된다. 피해반경이 1,344~1,091m인 경우 주거지 영향은 없었고, 공단은 온산, 용연공단까지 피해반경에 포함된다. 피해반경이 854~239m인 경우 온산공단 내 S사 인접 공장에 영향이 있음을 확인하였다. 따라서 사고정보를 반영하여 정확한 피해반경을 계산하고 이를 인근 사업장/주민홍보계획에 활용한다면 불필요한 인적/물적 자원의 loss를 방지할 수 있겠다.

참고로 실제 e-CA 프로그램을 통한 피해예측 결과값은 타원형으로 그려진다. 아래 Fig.의 확산반경은 풍속은 고려하지 않고 인근 주거지, 공단까지의 피해범위를 참고하기 위해 원형으로 표기하였다.

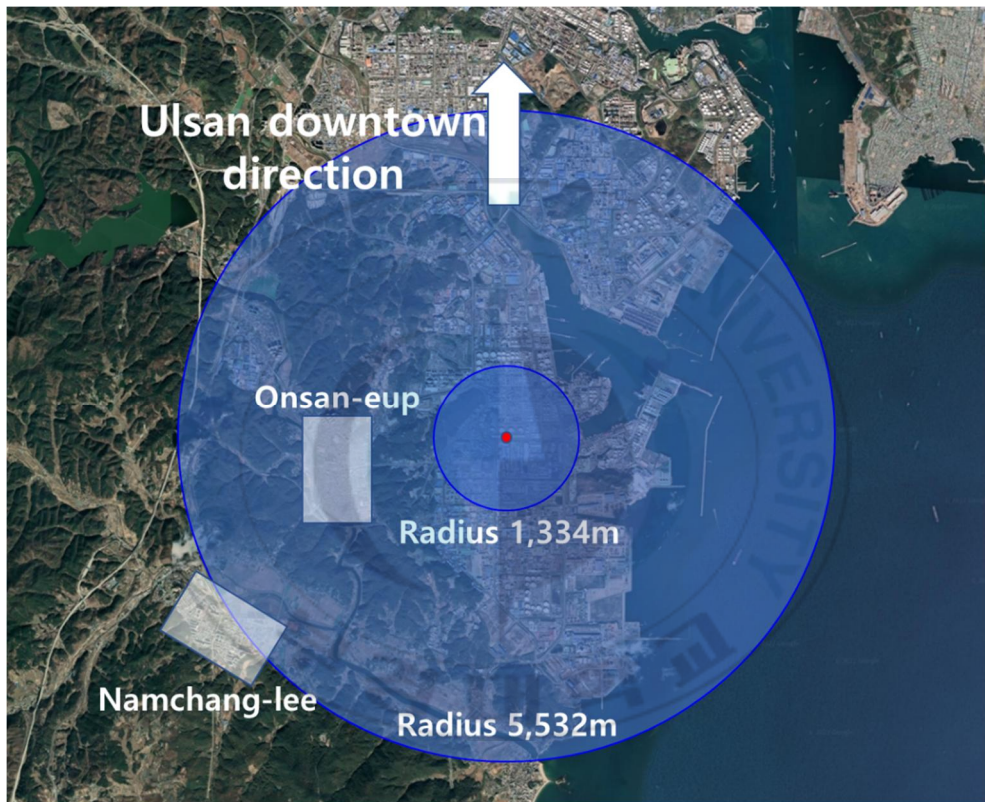


Fig. 10 Damage impact distance – 1

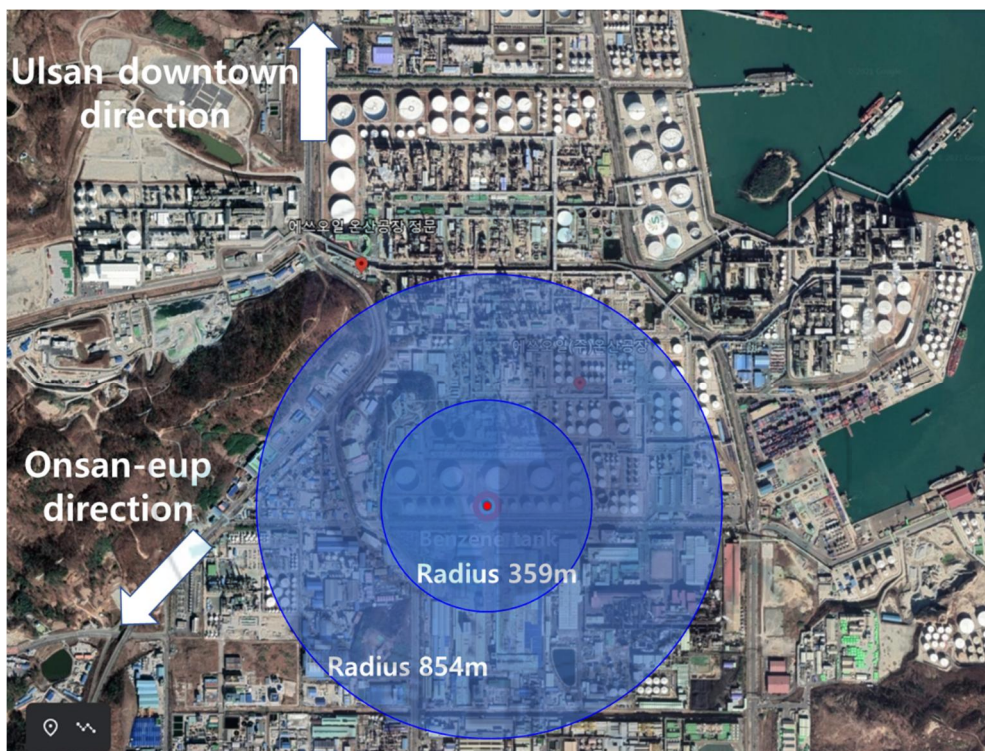


Fig. 11 Damage impact distance – 2

## 2) 최악/대안의 사고 시나리오 기준으로 “기상조건/누출시간”을 변경 후 피해예측 실시

벤젠 탱크의 누출 사고에 대한 최악/대안의 사고 시나리오를 기준으로 기상조건, 누출시간을 다양하게 변경하여 독성물질 확산범위의 끝점인 ERPG-2가 어떻게 변경되는지 확인하였다. 이 정보는 향후 운전원의 교육 교재로 활용하여 각종 변수에 따라 피해예측 결과값이 어떻게 변하는지 이해할 수 있게 하여 운전원들의 피해예측 프로그램에 대한 이해도를 높일 수 있게 할 예정이다.

대안의 사고 시나리오를 기준으로 실제 발생 가능성이 높은 사고를 가정하여 변수를 조정해 보았다. 사고 발생 시 조치완료를 10분 이내 완료한다고 가정하고, 피해예측 결과값을 구했고, 누출시간을 30분, 60분으로 증가시켰을 때 ERPG-2값 기준 피해 확산범위를 확인하였다.

– 누출시간 변경 : 10분 → 30분, 60분

대안의 시나리오 기준으로 누출시간을 10분으로 피해예측 하였고, 누출시간을 30분, 60분으로 증가 시켜 보았다.

누출량은 시간에 비례하여 증가하나, ERPG-2는 10분 누출에서 852m, 30분 누출에서 1,563m로 증가하나, 60분 누출에서도 1,563m로 동일함을 알 수 있다. 특정 기상조건에서 누출시간을 무한히 증가시켜도 확산반경은 어느 수준까지는 증가하다가 수렴함을 알 수 있다. 이는 누출 물질이 액체로 누출되면서 방유제에 모이고, 방유제 표면에서 증발하여 대기로 확산이 이루어진다. 해당 기상조건 및 사고 발생 탱크의 방유제

표면적( $6400\text{m}^2$ ) 기준에 따라 확산범위의 최대치가 정해지고, 누출시간을 증가시키면 확산범위가 증가하다가 결국 최대치인 특정값에 수렴하게 된다. 만약 동일조건에 방유제 면적만을 증가시킨다면 확산범위가 증가하는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.



Table. 13 Result of CA by changing “leak duration time”

| Variable                   |                             | Worst case         | Alternative case | Alternative case (leak duration time change) |              |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|----------------------------------------------|--------------|
| Weather Condition          | Wind direction              | N                  | N                | N                                            | N            |
|                            | Wind speed (m/s)            | 1.5                | 3                | 3                                            | 3            |
|                            | Temperature (° C)           | 40                 | 25               | 25                                           | 25           |
|                            | Pressure (atm)              | —                  | —                | —                                            | —            |
|                            | Humidity (%)                | 50                 | 50               | 50                                           | 50           |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | F                  | D                | D                                            | D            |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 12                 | 2.4              | 2.4                                          | 2.4          |
|                            | Leak duration time (s)      | Total leak in 600s | 600              | 1,800                                        | 3,600        |
| Leak amount (kg)           |                             | 5,932,282          | 22,730           | 68,059                                       | 135,725      |
| Damage impact distance (m) | ERPG1 (50ppm)               | 14,420             | 1,828            | 3,593                                        | 3,593        |
|                            | <b>ERPG2 (150ppm)</b>       | <b>5,532</b>       | <b>852</b>       | <b>1,563</b>                                 | <b>1,563</b> |
|                            | ERPG3 (1000ppm)             | 1,345              | 265              | 447                                          | 447          |

\*) Note : The information changed is colored gray

－ 대기안정도 변경 : D → E, F

대안의 사고 시나리오 조건에서 누출시간을 60분으로 하고, 대기안정도를 E, F로 더욱 안정하게 변경하였다.

대기가 안정하게 됨에 따라 확산범위는 1,563m에서 3,263m, 4,637m로 증가하게 된다. 기상조건 중 대기안정도의 변화에 따라 확산범위의 차이가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

대기가 불안정함에 따라 누출물질은 공기와의 급속한 난류 혼합으로 인해 대기권으로 빠르게 희석되어 확산범위가 줄어드는 것을 설명할 수 있다.

대기가 안정할 때는 되도록 누출물질을 취급하는 작업을 지양하는 것도 이러한 이유와 같다.

Table. 14 Result of CA by changing “Atmospheric stability”

| Variable                   |                             | Atmospheric stability |              |              |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|
|                            |                             | D                     | E            | F            |
| Weather Condition          | Wind direction              | N                     | N            | N            |
|                            | Wind speed(m/s)             | 3                     | 3            | 3            |
|                            | Temperature (° C)           | 25                    | 25           | 25           |
|                            | Pressure (atm)              | —                     | —            | —            |
|                            | Humidity (%)                | 50                    | 50           | 50           |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | <b>D</b>              | <b>E</b>     | <b>F</b>     |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 2.4                   | 2.4          | 2.4          |
|                            | Leak duration time(s)       | 3,600                 | 3,600        | 3,600        |
| Leak amount(kg)            |                             | 135,725               | 135,725      | 135,725      |
| Damage impact distance (m) | ERPG1 (50ppm)               | 3,593                 | 8,002        | 12,012       |
|                            | <b>ERPG2 (150ppm)</b>       | <b>1,563</b>          | <b>3,263</b> | <b>4,637</b> |
|                            | ERPG3 (1000ppm)             | 447                   | 875          | 1,177        |

\*) Note : The information changed is colored gray

– 풍속 변경 : 3m/s → 1m/s, 6m/s

대안의 사고 시나리오 조건에서 누출시간을 60분으로 하고, 풍속을 1m/s, 6m/s로 변경하였다.

풍속이 느려 질수록 확산범위는 1,402m(6m/s), 1,563m(3m/s), 1,862m(1m/s)로 증가하였다. 이는 풍속이 빠를수록 누출물질은 공기와의 급격한 난류 혼합으로 인해 대기권으로 빠르게 희석되어 확산범위가 줄어들기 때문이다<sup>15)</sup>.



Table. 15 Result of CA by changing “wind speed”

| Variable                   |                             | Wind speed   |              |              |
|----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                            |                             | 3m/s         | 1m/s         | 6m/s         |
| Weather Condition          | Wind direction              | N            | N            | N            |
|                            | Wind speed (m/s)            | <b>3</b>     | <b>1</b>     | <b>6</b>     |
|                            | Temperature (° C)           | 25           | 25           | 25           |
|                            | Pressure (atm)              | —            | —            | —            |
|                            | Humidity (%)                | 50           | 50           | 50           |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | D            | D            | D            |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 2.4          | 2.4          | 2.4          |
|                            | Leak duration time (s)      | 3,600        | 3,600        | 3,600        |
| Leak amount (kg)           |                             | 135,725      | 135,725      | 135,725      |
| Damage impact distance (m) | ERPG1 (50ppm)               | 3,593        | 4,372        | 3,183        |
|                            | <b>ERPG2 (150ppm)</b>       | <b>1,563</b> | <b>1,862</b> | <b>1,402</b> |
|                            | ERPG3 (1000ppm)             | 447          | 519          | 408          |

\*) Note : The information changed is colored gray

– 대기온도 변경 :  $25^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}$

대안의 사고 시나리오 조건에서 누출시간을 60분으로 하고, 대기온도를  $0^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}$  로 변경하였다.

$25^{\circ}\text{C}$ 일 때 보다  $0^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}$ 처럼 온도가 낮거나, 높을 때 확산범위가 약간 증가함을 확인하였다.



Table. 16 Result of CA by changing “Temperature”

| Variable                   |                             | Temperature  |              |              |
|----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                            |                             | 25 ° C       | 0 ° C        | 40 ° C       |
| Weather Condition          | Wind direction              | N            | N            | N            |
|                            | Wind speed (m/s)            | 6            | 3            | 3            |
|                            | Temperature (° C)           | 25           | 0            | 40           |
|                            | Pressure (atm)              | —            | —            | —            |
|                            | Humidity (%)                | 50           | 50           | 50           |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | D            | D            | D            |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 2.4          | 2.4          | 2.4          |
|                            | Leak duration time (s)      | 3,600        | 3,600        | 3,600        |
| Leak amount (kg)           |                             | 135,725      | 135,725      | 135,725      |
| Damage impact distance (m) | ERPG1 (50ppm)               | 3,183        | 3,351        | 3,738        |
|                            | <b>ERPG2 (150ppm)</b>       | <b>1,402</b> | <b>1,468</b> | <b>1,619</b> |
|                            | ERPG3 (1000ppm)             | 408          | 424          | 461          |

\*) Note : The information changed is colored gray

– 상대습도 변경 : 50% → 30%, 70%

대안의 시나리오 조건에서 누출시간을 60분으로 하고, 상대습도를 30%, 70%로 변경하였다.

상대습도의 변화에서는 확산범위의 차이가 확인되지 않았다.



Table. 17 Result of CA by changing “Humidity”

| Variable                   |                             | Humidity     |              |              |
|----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                            |                             | 50%          | 30%          | 70%          |
| Weather Condition          | Wind direction              | N            | N            | N            |
|                            | Wind speed (m/s)            | 3            | 3            | 3            |
|                            | Temperature (° C)           | 25           | 25           | 25           |
|                            | Pressure (atm)              | —            | —            | —            |
|                            | Humidity (%)                | 50           | 30           | 70           |
|                            | Atmospheric stability (A~D) | D            | D            | D            |
| Scenario                   | Leak hole size (in)         | 2.4          | 2.4          | 2.4          |
|                            | Leak duration time (s)      | 3,600        | 3,600        | 3,600        |
| Leak amount (kg)           |                             | 135,725      | 135,725      | 135,725      |
| Damage impact distance (m) | ERPG1 (50ppm)               | 3,593        | 3,593        | 3,593        |
|                            | <b>ERPG2 (150ppm)</b>       | <b>1,563</b> | <b>1,563</b> | <b>1,563</b> |
|                            | ERPG3 (1000ppm)             | 447          | 447          | 447          |

\*) Note : The information changed is colored gray

## 제 5 장 결 론

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

본 연구를 통해 산업안전보건법/노동부 고시상 사전에 마련된 최악/대안의 사고 시나리오를 실제 사고에 활용하는 경우 사고 당시의 기상조건, 사고정보에 따라 피해예측 결과값이 달라지고, 비상대응이 과소, 때로는 과대하게 실행이 될 수 있다. 과대한 대응은 인근 지역 주민에 불편을 초래하고, 인근 타 사업장에 많은 man power loss를 유발할 수 있으며, 반대로 빈약한 대응은 타 사업장 및 인근 지역 주민의 대피가 지연되어 안전/보건상 악영향을 끼칠 수 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 화학사고 발생 시 피해예측 모델과 연계된 실시간 비상대응체계를 설계하고 활용하는 것이 필요하다고 판단되었다. 사고 발생 시 당시 기상정보, 사고정보를 수집하여 e-CA를 통해 피해예측을 실시하고, 이를 사고 현장 수습에 활용하며, 대외 기관과 긴밀한 연락체계를 구축하여 긴급재난문자 등을 통해 인근 타 사업장, 지역 주민에게 공유토록 하는 사고 피해 최소화를 위한 비상대응체계를 구상해 보았다. 나아가 본 연구를 통해 마련된 비상대응체계를 비상대응절차에 반영하였다.

기존 최악/대안의 사고 시나리오에 대한 기상정보, 사고정보에 대해 guideline이 정해져 있으나, 본 연구에서는 기상정보, 사고정보 등의 변수를 변경하여 변수의 변화에 따라 확산범위의 변화 특성을 확인하였다.

기상정보의 경우 대기안정도, 풍속에 따라 확산범위의 증감이 큰 것을 확인하였고, 누출시간을 증가시켰을 때는 확산범위가 증가하다가 특정값에 수렴하는 것도 확인하였다. 기존 최악/대안의 사고 시나리오 피해예측 결과 값 외 추가로 다양한 변수의 변경에 따른 피해예측 결과값을 비상대응절차에 반영하여 실제 사고 발생 시 운전원들이 비상대응에 해당 결과값을 참고할 수 있게 하였다.

수정된 비상대응절차를 바탕으로 '22년 1월 중 임의의 기상조건을 반영하여 시뮬레이션을 실시하고, 해당 절차를 운영하는 조직에서 사고 발생 시 사용하는데 문제가 없는지 체크를 완료하였다.

본 연구를 통해 수정된 비상대응절차를 바탕으로 정기적인 비상모의 훈련을 실시하여 숙련화 하고, 실제 사고에 활용하는 경우 인적, 물적 피해를 최소화 하는데 도움이 될 것으로 판단되며, 확산시간을 최소화 하기 위해 vacuum car 및 dike 내 누출 물질 회수를 위한 임시 pump 추가 확보 등에 대해서도 향후 검토가 필요하겠다.

## 참고 문헌

1. Advanced safety TF(S-OIL/Dupont Ulsan/Korea Trinzio/Lotte BP/BASF/Baker Chemical), “Safety system research of advanced petrochemical industry”, 2018
2. Byung-Gon Jung, “Consequence Analysis Based Research for the Initial Response of Chemical Accidents”, Pukyong National University Department of Safety Engineering, 2014
3. MOEL (Ministry of Employment & Labor), “Safety and Health Management System Guidebook for the Prevention of Industrial Accidents”, 2022
4. MOEL (Ministry of Employment & Labor), Ministry of Labor Notice No. 2020-55. “Regulations on Submission, Review, Confirmation, and Implementation Status of Process Safety Management”, 2020
5. Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA Guide(P-107-2020), “Technical guidance on the selection of worst and alternative case scenario”, 2020
6. Jong-Bae Baek, “A Study on the Establishment of Infrastructure for Quantitative Risk Assessment in Chemical Processes”, Kwangwoon University, 1995
7. Jung-soo Shin, “A study on quantitative risk assessment and model application for gas manufacturing facilities”, Chonnam National University, 2011
8. Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA Guide(P-92-2012), “Technical guidance on leak source modeling”, 2012
9. Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA Guide(P-

- 110–2012), “Technical Guideline for Establishment of Damage Minimization Measures for Chemical Plants”, 2012
10. Korea Occupational Safety and Health Agency, “e-CA program user manual”, 2017
  11. Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA Guide(P-102–2021), “Technical guideline for accident damage prediction techniques”, 2021
  12. Korea Occupational Safety and Health Agency, “Example Collection of Process Safety Management Report”, 2020
  13. Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA Guide(P-101–2012), “Technical guideline for Establishment of Emergency Response Plan”, 2012
  14. Korea Occupational Safety and Health Agency, KOSHA Guide(P-163–2017), “Technical guideline for Preparing Emergency Response Plan according to accident scenario”, 2017
  15. Gyeong-Sam Jeong, “Liquid chlorine leak damage modeling of Petrochemical Complex”, Department of Fire Service Administration Graduate School of Dongshin University, 2015