

[Research Paper]

유해화학물질 누출궤적 평가모듈 개발을 통한 화학공장 방류벽 높이의 적정성 평가

유병태 · 김형기^{*†}

환경부 화학물질안전원 공업연구관, *한국소방안전원 대전충남지부 사무국장

Appropriateness Assessment of Dike Height of a Chemical Plant through Development of a Hazardous Chemical Leakage Trajectory Evaluation Module

Byungtae Yoo · Hyeonggi Kim^{*†}

Senior Research Officer, National Institute of Chemical Safety,

^{*}Secretary General, Korea Fire Safety Institute Daejeon-Chungnam Branch Office

(Received July 15, 2019; Revised July 22, 2019; Accepted July 22, 2019)

요 약

정부는 2015년 보다 체계적이고 안전하게 화학물질을 관리하고 취급 할 수 있도록 법 제명 변경과 함께 「화학물질관리법」을 전부개정 하였으며, 특히 유해화학물질을 제조·저장·보관하는 취급시설의 설치 및 관리 기준을 대폭 강화하였다. 하지만, 일부 취급시설 기준의 경우 물리적인 공간부족과 시설개선과정 중 사고발생우려 등의 이유로 강화된 기준을 이행하기 어려운 상황이 생김에 따라 이러한 시설에 대해 2018년부터 “안전성평가”라는 특례를 운영하고 있다. 본 연구에서는 유해화학물질 누출궤적 평가모듈 개발을 통해 현장에 설치된 염산과 황산 저장탱크의 방류벽 높이 적정성을 검증하고 이격거리에 따른 방류벽 높이를 제시하였다. 이를 활용하여 산업현장에서는 보다 손쉽게 해당 취급시설의 안전성 평가 특례신청이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구의 결과는 유해화학물질 취급시설의 설계에도 활용하여 유해화학물질 취급시설의 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

ABSTRACT

The Chemical Control Act of 2015 was enhanced to ensure the safe management of hazardous chemicals. In particular, there have been substantial changes in the standards for the installation and management of handling facilities for manufacturing and storing hazardous chemicals. However, some standards for handling facilities are difficult to implement due to a lack of physical space or because of safety accidents during facility improvements. Therefore, the Safety assessment system (SAS) has been operating for such facilities since 2018. This study developed a leakage trajectory evaluation module that can easily evaluate the outside of a dike for safety evaluation. We analyzed two case studies on a dike for hydrochloric acid and sulfuric acid storage tanks with this module and suggest a reasonable plan for the facility. We believe that it will be possible to more easily submit SAS reports at chemical plants by using this evaluation module. This study is expected to contribute to the improvement of the safety design of hazardous chemical handling facilities.

Keywords : Mitigation system, Physical barrier, Storage tank, dike, Chemical accident

1. 서 론

화학물질 유·누출로 인한 사고는 사업장 내 근로자뿐만 아니라 지역주민 및 주변 환경에도 악영향을 미치는 원인

이 될 수 있다. 또한 해당 사고로 인한 사업장 내 설비 손실 및 개보수 등으로 인한 경제적인 손실과 재가동을 위한 상당한 시간이 요구된다⁽¹⁻³⁾. 매년 화학물질 취급시설의 결함, 노후화 및 작업자 실수 등의 이유로 지속적으로 화학사

[†] Corresponding Author, E-Mail: 3son@kfsi.or.kr. TEL: +82-42-638-4119, FAX: +82-42-634-7119

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

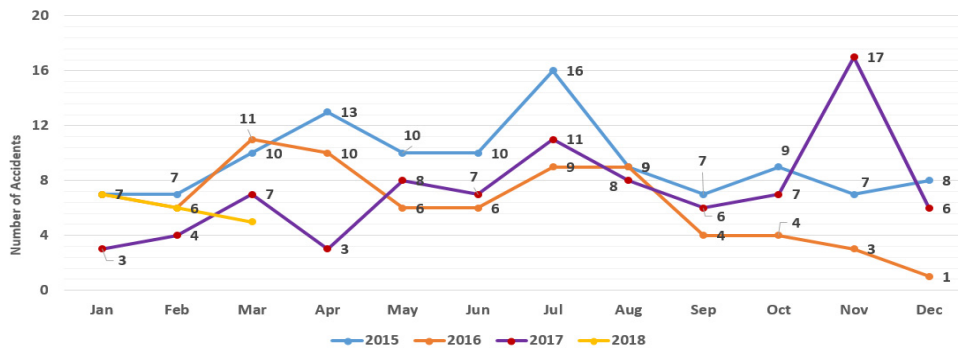


Figure 1. Distribution of chemical accidents over a four-years period (2015-2018)⁽⁴⁾.

Table 1. Major Chemical Accident Substances over a Two-years (2016-2017)⁽⁴⁾

(Number of Accidents)

| Rank | Year | |
|------|----------------------------|-----------------------------|
| | 2016 | 2017 |
| 1 | Hydrogen Chloride Acid (8) | Hydrogen Chloride Acid (13) |
| | Ammonia (7) | Ammonia (8) |
| 2 | Nitric Acid (7) | Nitric Acid (8) |
| | Sulfuric Acid (7) | Formaldehyde (8) |
| 5 | Formaldehyde (3) | Chlorine (5) |
| 6 | Toluene (2) | Waste Acids (4) |
| 7 | Ethyl Acetate (2) | Sulfuric Acid (3) |
| 8 | Waste Acids (2) | Toluene (2) |
| 9 | Phosgene (1) | Sodium Hypochlorite (2) |
| 10 | Hydrogen Fluoride (1) | Hydrogen (2) |

고가 발생하고 있다(Figure 1). 특히 Table 1 결과에서 나타 나듯이 기체상태 화학물질뿐만 아니라 염산, 황산 및 질산 등처럼 액체상태의 화학물질 사고가 자주 발생하고 있는 현실 속에서 해당 화학물질을 저장하고 사용하고 있는 사업장의 피해를 경감하기 위한 방안들과 이로 인한 적절한 비상대응계획이 필요한 시점이다.

화학 사고를 예방하고 피해를 최소화하기 위하여 정부에서는 화학물질이 보다 안전하게 취급·관리될 수 있도록 2015년 「화학물질관리법」의 법 제명을 바꾸는 등 전부개정 하였다. 특히, 취급시설에 대한 기준을 70여개에서 413개로 대폭 확대·강화하였으며 확대·강화된 새로운 기준을 기존 시설에 소급하여 적용하였다. 다만, 기존 시설의 경우 2019년 12월말까지 유예기간을 규정하였다⁽⁵⁻⁷⁾. 하지만, 기존 시설의 경우 대폭 강화된 취급시설기준을 준수하기 위해서는 물리적 공간 부족, 벽면 및 배관 등 주변시설 간섭에 따른 확장이 어렵거나 또는 대규모 시설에 따른 안전사고 발생 우려가 지속적으로 제기되었다. 정부에서는 이러한 한계점을 개선하기 위하여 2018년 1월 1일부터 ‘안전성평가 제도’라는 특례를 신설하여 시행 중이다. 물리적 조건 등으로 취

급시설기준 이행이 어려운 시설에 대해 해당 사업장에서는 동등 이상의 안전성이 확보될 수 있는 대체방안을 마련하여 심사·평가를 통해 특례를 인정받을 수 있는 제도이다⁽⁶⁾.

안전성평가 대상시설은 4가지이며 그 중 대표적인 시설이 방류벽(Dike)이다. 방류벽은 용어의 차이가 있지만 안전 관련 부처의 관련법령에서 설치 및 관리 기준을 규정하고 있다. 화학물질을 취급하고 있는 시설에서 유·누출 사고 및 2차 사고를 예방하기 위한 중요한 시설 중 하나이다. 「화학물질관리법」에서는 방류벽의 용량과 이격거리를 규정하고 있기 때문에 안전성평가 제출대상의 경우 해당 사업장에서 기존시설의 용량과 이격거리를 분석·평가하여 이에 상응하는 동등이상의 대체방안을 마련하고 그 안전성을 기술적으로 증명해야 한다. 이를 위해서는 해당 저장시설에 대한 사고 시나리오를 분석하고 피해영향범위를 평가하여 시설개선 등을 고려해야 한다. 특히, 피해영향범위를 평가하기 위해서 저장탱크 누출 위치와 누출되었을 경우 지면도달거리 산정이 무엇보다 중요하다. 그 이유는 이를 바탕으로 시설 개선 등의 안전성 확보 방안을 마련할 수 있기 때문이다.

하지만, 전문인력과 예산이 충분한 대기업의 경우와 달

리 안전·환경이 상대적으로 열악한 중소기업의 경우 누출 시나리오에 따른 영향범위를 예측하는 것이 상당히 어려울 수 있다. 또한, 해당 분야에 대한 국내·외 연구는 다른 분야에 비해 상대적으로 활발하지 못하다.

Lyu 등⁽⁸⁾, Lim 등⁽⁹⁾은 Computational fluid dynamics (CFD)를 이용하여 설비로부터 독성가스 사고 누출에 대한 완화 조치로서 방호설비 설치의 효율성에 대해 연구하였다. Buchlin⁽¹⁰⁾, Rana와 Mannan⁽¹¹⁾은 천연액화가스의 확산을 예방하기 위하여 수막설비(Water curtain)에 대한 현장실험을 통해 방호조치의 효율성을 연구하였다. Prashanth 등⁽¹²⁾, Pitblado 등⁽¹³⁾은 사고예방을 위하여 방호조치의 개념과 필요성 대해 연구하였다. Lee 등⁽¹⁴⁾, Jeong 등⁽¹⁵⁾, Lee 등⁽¹⁶⁾은 액체 상태의 화학물질 저장탱크에 대해 수학적 공식을 이용하여 누출거리를 산정하여 방류벽 및 확산방지시설의 필요성을 제시하였다. 특히, Lee 등⁽¹⁴⁾과 Lee 등⁽¹⁶⁾은 Bernoulli's 원리 기반의 Torricelli의 법칙을 수학적 모델링을 실시하고 누출계적 모의실험을 통해 신뢰성 검증연구를 수행하였다. 하지만, 대부분의 연구들이 가스상 물질의 누출 및 확산에 따른 완화조치에 대한 연구가 주로 이뤄지고 있으며 일부 모델들은 고압의 독성가스들을 다루는 저장탱크, 파이프로부터 독성가스가 누출되어 확산되는 가능성을 예측하는데 활용되고 있다^(14,15). 또한, 현장에서 근로자가 활용할 수 있는 현장중심의 연구결과로는 다소 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 「화학물질관리법」에 따른 취급시설 설치 및 관리기준을 준수하지 못하는 시설 중 방류벽 내에 설치되어 있는 액상저장탱크에서 누출지점 및 탱크압력 등 운전조건에 따라 외부누출 여부를 손쉽게 분석할 수 있는 평가 모듈을 Bernoulli's 원리를 기반으로 한 Torricelli의 법칙을 이용하여 평가하였다. 이를 활용하여 염산(35 wt%), 황산(98 wt%) 저장탱크에 설치되어 있는 방류벽 사례연구를 통해 해당 모듈에 대한 효율성을 분석하였으며, 방류벽에 대한 합리적 방안을 제시하였다.

2. 방류벽(Dike)에 대한 국내기준

방류벽은 유해화학물질 유·누출 시 외부 확산을 방지하고 2차 사고예방 등 효율적인 사고대응을 위한 취급시설에 설치된 안전시설 중 하나로서 국내·외 화학물질안전관련 법령의 기술기준에서 취급시설 주위에 설치토록 규정하고 있다. 각각의 법령에서 그 용어와 기술기준은 달리하고 있지만 목적은 같다. 다음은 국내 대표적인 화학물질 안전관련 법령에서 정하고 있는 방류벽의 용어와 상세 세부기술기준이다.

① 용어정의

- 「화학물질관리법」 : 방류벽
- 「위험물안전관리법」 : 방유제
- 「고압가스 안전관리법」 : 방류독
- 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 : 방유제

② 방류벽 높이 기준

- 화학물질관리법 : 0.5 m 이상
- 위험물안전관리법 : 0.5 m 이상 3 m 이하
- 고압가스 안전관리법 : 방류독 내의 저장탱크 등의 안전관리 및 방재활동에 지장이 없는 범위에서 방류독 내에 체류한 액의 표면적이 될 수 있는 한 최소화
- 산업안전보건기준에 관한 규칙 : 0.5 m 이상 3 m 이하

③ 이격거리(저장탱크 외면으로부터 방류벽까지의 거리)

- 화학물질관리법 : ㉠1.5 m 이상 ㉡탱크 직경이 15 m 미만인 경우에는 탱크 높이의 3분의 1 이상의 거리 ㉢탱크 직경이 15 m 이상인 경우에는 탱크 높이의 2분의 1 이상
- 위험물안전관리법 : ㉠1.5 m 이상 ㉡탱크 직경이 15 m 미만인 경우에는 탱크 높이의 3분의 1 이상의 거리 ㉢탱크 직경이 15 m 이상인 경우에는 탱크 높이의 2분의 1 이상
- 고압가스 안전관리법 : 별도규정 없음
- 산업안전보건기준에 관한 규칙 : 1.5 m 이상

④ 용량

- 화학물질관리법 : 최대저장용량의 110% 이상
- 위험물안전관리법 : ㉠탱크용량의 110% 이상 ㉡취급탱크가 1기인 제조소인 경우 취급탱크 용량의 50% 이상, ㉢ 취급탱크가 2기 이상인 제조소인 경우 최대탱크용량의 50% + 나머지탱크 용량합계의 10% 이상)
- 고압가스 안전관리법 : 저장능력에 상당하는 용적
- 산업안전보건기준에 관한 규칙 : 저장탱크 용량 이상

3. 화학물질관리법령상 안전성평가제도

2015년 「화학물질관리법」 전면 개정에 따라 화학물질의 신규 설치 및 관리기준도 대폭 강화되었다. 그 대표적 항목 중 하나가 방류벽으로 개정 전에는 별도 규정을 두고 있지 않았지만 「화학물질관리법」 개정 시 방류벽 내 저장탱크의 유·누출사고를 예방하거나 피해를 최소화하기 위하여 저장탱크 외면에서부터 방류벽까지 최소이격거리를 1.5 m 또는 탱크 지름(15 m)에 따라 탱크높이의 1/3 이상 또는 1/2 이상 이격거리를 두도록 규정하고 있다.

다만, 2015년 이전에 이미 설치가 된 방류벽의 경우 2019년 12월 31일까지 해당 조건을 만족할 수 있도록 5년간의 유예기간을 두었다. 하지만, Figure 2와 같이 2015년 이전에 설치된 상당수의 방류벽의 경우 소방도로 또는 주변 건축물들과 인접해 있는 등 물리적 공간 제약 등으로 해당 법규를 준수하기 쉽지 않은 실정이며 해당 시설을 무리하게 개선하는 과정에서 오히려 안전상의 문제가 발생할 우려가 제기되었다. 환경부에서는 2015년 이전 설치·착공한 기존시설에 한해 동등 이상의 안전성을 확보한 안전관



Figure 2. Difficulties facilities in applying the standard.

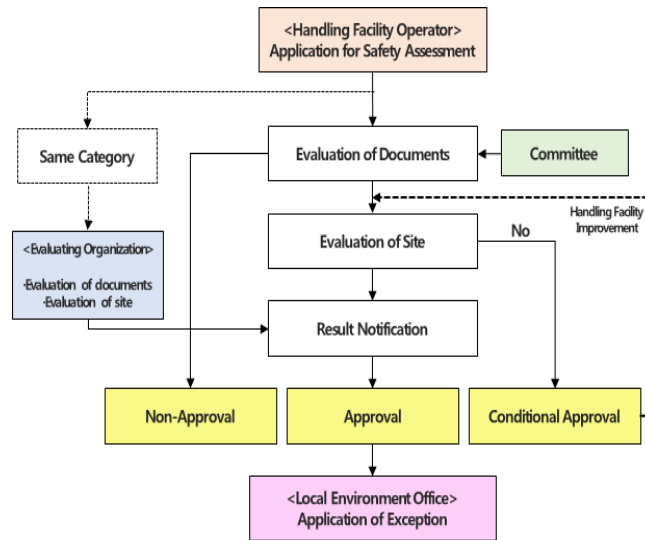


Figure 3. Safety assessment system procedure⁽¹⁷⁾.

리 방안을 해당 사업장에서 화학물질안전원에 제시하면 심사·평가를 통해 관련 법적 규정을 준수 한 것으로 인정해주는 안전성 평가 제도를 마련하여 2018년 1월부터 시행하고 있다(Figure 3)⁽⁶⁾.

안전성 평가대상에 포함되는 시설로는 1) 방류벽 2) 방지턱 3) 집수설비 4) 사외배관 긴급차단밸브로 한정하고 있다. 2018년 한 해 동안 안전성평가를 위해 화학물질안전원에 제출된 사례들을 분석해보면 제출된 28건 모두 방류벽에 대한 것들이다. 사업장에서는 안전성 평가를 통해 특례를 인정받기 위해 전산유체역학 프로그램인 Computational fluid dynamics (CFD) 등 상용 프로그램을 활용하여 누출계적과 시간에 따른 누출량 산정 및 지면도달거리 등을 평가하고 누출지점을 고려하여 차단벽을 추가 설치하거나 지면도달 거리만큼 별도의 트렌치를 확장하는 등의 대체방안을 제시하였다.

하지만, 전문인력, 자본 및 경험이 대기업에 비해 상대적으

로 부족한 중소기업의 경우 취급시설의 저장탱크와 방류벽에 대한 누출사고 시나리오 선정과 영향범위 예측이 쉽지 않아 안전성 평가 신청 과정에서 적잖은 어려움을 겪고 있다.

4. 유해화학물질 누출계적 평가모듈

본 연구에서는 기존에 설치된 방류벽이 저장탱크에서 누출된 화학물질을 차단할 수 있는지 평가하기 위해 중형 저장탱크의 일정 높이에서 누출된 물질의 누출속도(m/s)와 지면으로 낙하하는 물질의 궤적을 계산하여 방류벽이 설치된 위치에서 누출물질이 방류벽에 의해 차단되는지를 평가하였다.

만약 방류벽이 설치된 위치에서 누출물질 궤적의 높이가 방류벽 높이보다 높으면 설치된 방류벽으로는 해당 누출을 차단할 수 없기 때문에 외부누출을 차단하기 위해 기존의 방류벽 높이와 궤적의 차이만큼 방류벽 높이를 추가

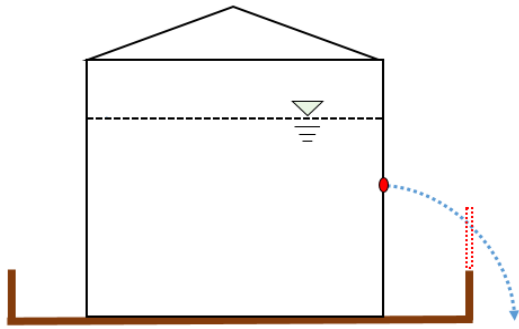


Figure 4. Liquid discharge through a hole.

해야 함을 의미한다(Figure 4). 여기에서 낙하하는 물질의 궤적 계산은 Bernoulli's 원리를 기반으로 한 Torricelli의 법칙을 적용하여 계산하였다⁽¹⁸⁾.

누출궤적 평가 모듈은 누구나 손쉽게 사용할 수 있도록 개발하였다. 평가모듈 구성은 취급저장물질, 온도, 압력 및 방류벽 조건 등 저장탱크 기본정보 부분과 최대누출거리, 도달시간 및 누출속도 등 누출결과를 보여주는 부분, 그리고 해당 결과의 이해를 돕기 위해 저장탱크에 대한 도식화 부분으로 구성하였다(Figure 5).

먼저, 저장탱크 기본정보는 취급하는 저장물질을 선택하면 해당물질의 액상밀도가 자동적으로 입력된다. 저장탱크의 압력, 저장높이를 입력하고 가상사고 누출 지점을 설정한다. 이때 누출지점은 저장탱크의 플랜지 등 누출가능 위치를 사용자가 취급환경을 고려하여 입력할 수 있다. 그리고 현재 설치되어 있는 방류벽 이격거리와 높이에 대한 기본정보를 입력한다.

둘째, 평가결과 부분은 앞서 설명한 것처럼 최대거리의 누출높이 및 도달거리와 저장압력, 저장높이 및 누출지점에 따른 누출속도, 지면도달거리를 도달시간과 함께 나타낸다. 결과적으로 기존에 설치되어 있는 방류벽 이격거리와 높이를 비교하여 방류벽 외부누출 여부를 확인할 수 있으며 외부누출 시 이를 차단하기 위해 필요한 최소 방류벽 높이(Dh2)를 산정할 수 있도록 설계하였다.

마지막으로 저장탱크 정보와 누출 결과를 손쉽게 이해할 수 있도록 해당 정보를 도식화하여 구성하였다.

5. 사례연구

외부 시설물 간섭 등으로 「화학물질관리법」에 따른 취급시설 기준을 충족하지 못하여 안전성평가서 제출 대상인 염산(35 wt%), 황산(98 wt%) 옥외저장탱크를 대상으로 본 연구에서 개발한 평가모듈을 적용하여 현재 설치되어 있는 방류벽의 추가설치 여부 및 최소 필요 높이, 시간에 따른 지면도달거리 등을 평가하였다. 다만, 평가 시 화학물질 누출 시 영향을 미칠 정도의 바람은 없는 것으로 가정하였다.

5.1 사례연구 1

염산(35 wt%) 저장탱크 방류벽의 경우 4면 중 3면이 이격거리(「화학물질관리법」 상 기준 ①: 1.23 m)를 충족하지 못하는 상황이다(Figure. 6). 저장탱크의 북쪽과 서쪽은 건축물 외벽과 인접하여 설치되어 있어 물리적으로 확장이 어려운 환경으로 안전성평가 대상 시설이 된다. 다만, 건축물 외벽이 방류벽 기능을 대체할 수 있기 때문에 추가 증설이 필요 없는 반면, 남쪽은 증설이 가능한 조건으로 이격거리(430 mm)가 법적 기준을 충족하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 남쪽의 방류벽에 대한 대체방안으로 방류벽 높이를 높이거나, 확장을 하는 방안으로 제시할 수 있을 것이다(Figure 7).

염산(액상밀도: 1,192 kg/m³) 저장탱크 지름 2.7 m, 높이 3.7 m에 액위는 평균적으로 3.0 m로 저장되어 있다. 먼저, 현장에 설치되어 있는 실제 사례를 바탕으로 현재 높이의 방류벽이 외부확산을 방지할 수 있는 누출지점을 분석하였으며, 저장탱크 접합부가 있는 2.0 m 지점에서 누출을 가정하여 누출속도, 지면도달거리 및 도달시간 그리고 외부유출을 방지하기 위해 필요한 방류벽 높이 등을 평가하였다. 접합부를 사고지점으로 선정할 이유는 저장탱크 자체의 결합에 따른 누출위험보다 접합부의 위치가 사고위험이 높기 때문에 해당 위치를 누출지점으로 선정하였다. 저장조건은 대기압 상태(0.0 kgf/cm², 0.1 kgf/cm²)로 구분하였으며 누출공

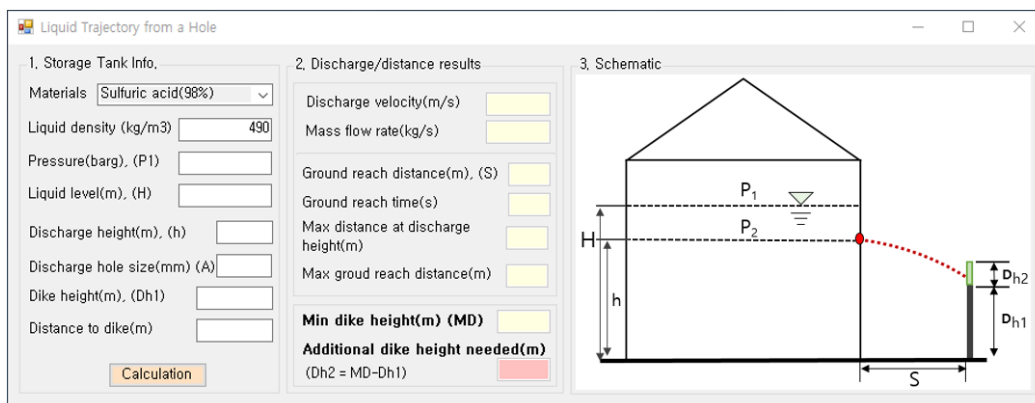


Figure 5. Framework of a liquid trajectory evaluation module.



Figure 6. Facility subject to safety evaluation for noncompliance with legal requirement.

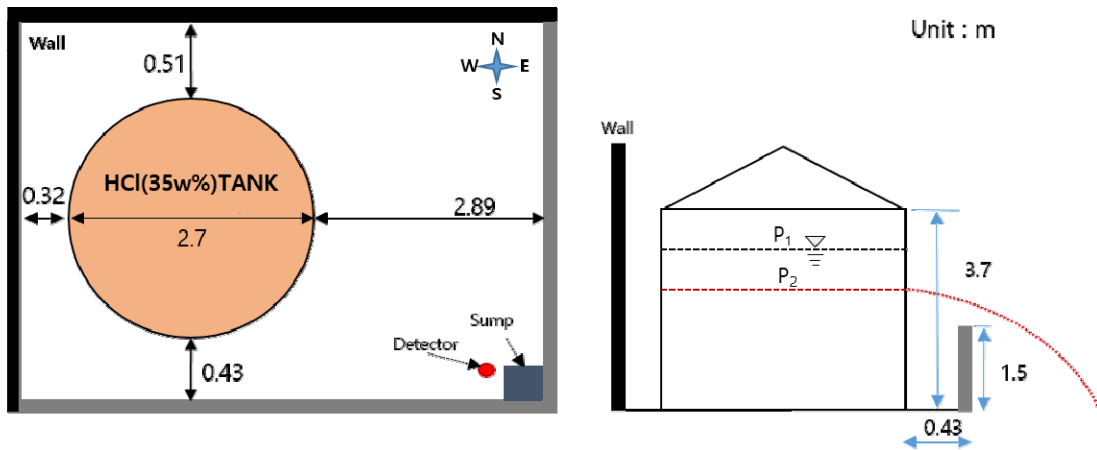


Figure 7. Layout of HCl (35 wt%) storage tank with dike.

Table 2. Operating Conditions of the HCl (35 wt%) Storage Tank

| Chemical | Size (m) | Operating Conditions | | Storage Level Height (m) | Dike (m) | |
|--------------|--|----------------------|---------------------------------|--------------------------|----------|--------|
| | | Temperature (°C) | Pressure (kgf/cm ²) | | Distance | Height |
| HCl (35 wt%) | Diameter (D) : 2.7 Height (H) : 3.7 | 20 | 0 | 3 | 0.43 | 1.5 |

사이즈는 10 mm, 대기온도는 20 °C로 가정하였다(Table 2).

평가 결과 저장탱크 압력이 0 kgf/cm², 누출지점이 1.5 m에서 지면도달 거리는 1.9 m, 도달시간은 0.55 s이었으며 외부 확산이 차단되는 것으로 평가되었다. 저장탱크 압력이 0.1 kgf/cm² 누출지점이 2.0 m의 경우 지면도달거리는 2.44 m, 도달시간은 0.64 s이며 이때 외부 유출을 위해 필요한 방류벽 높이는 1.94 m로 현재 방류벽 높이보다 최소 0.49 m 추가 설치가 필요한 것으로 분석되었다(Table 3).

5.2 사례연구 II

200 m³ 황산(98 wt%) 저장탱크가 위치한 방류벽의 경우 4면 중 동쪽 방류벽이 이격거리(「화학물질관리법」 상 기준 ①: 1.5 m)를 충족하지 못하는 환경이다(Figure 8). 서쪽 방류벽이 제조설비들과 주변 배관의 간섭으로 물리적으로 확장이 어려운 환경으로 안전성평가 대상이 된다. 사례연구 1과 유사하게 동쪽의 방류벽에 대한 대체방안으로 방류벽 높이를 높이거나 확장을 하는 방안으로 제시할 수 있을 것이다(Figure 9).

황산(액상밀도: 490 kg/m³) 저장탱크 지름 6.0 m, 높이

Table 3. Ground Reach Distance and Time by Discharge Height of HCl (35 wt%) Storage Tank

| | Pressure (kgf/cm ²) | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|
| | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| Discharge Height (m) | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 |
| Discharge Velocity (m/s) | 3.43 | 4.30 | 2.80 | 3.81 |
| Mass Flow Rate (kg/s) | 0.32 | 0.40 | 0.26 | 0.36 |
| Ground Reach Distance (m) | 1.90 | 2.38 | 1.79 | 2.44 |
| Ground Reach Time (s) | 0.55 | 0.55 | 0.64 | 0.64 |
| Max Distance at Discharge Height (m) | 1.50 | 1.93 | 1.50 | 1.93 |
| Max Ground Reach Distance (m) | 1.90 | 2.44 | 1.90 | 2.44 |
| Minimum Required Dike Height (m) | 1.42 | 1.45 | 1.88 | 1.94 |
| Additional Dike Height (m) | - | - | 0.43 | 0.49 |



(a)



(b)

Figure 8. Facility subject to safety evaluation for noncompliance with legal requirement.

Table 4. Operating Conditions of the H₂SO₄ (98 wt%) Storage Tank

| Chemical | Size (m) | Operating Conditions | | Storage Level Height (m) | Dike (m) | |
|--|------------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------|----------|--------|
| | | Temperature (°C) | Pressure (kgf/cm ²) | | Distance | Height |
| H ₂ SO ₄ (98 wt%) | Diameter (D) : 6 Height (H) : 7 | 25 | 0 | 4.5 | 0.73 | 1.7 |

7.0 m에 액위가 평균적으로 4.5 m로 저장되어 있다(Table 4). 본 연구에서 개발한 평가모듈을 통해 현재 높이의 방류벽이 외부확산을 방지할 수 있는 누출지점을 분석하였으며, 저장탱크 접합부가 있는 3.0 m 지점에서 누출을 가정하여 누출속도, 지면도달거리 및 도달시간 그리고 외부유출을 방지하기 위해 필요한 방류벽 높이 등을 평가하였다. 저장 조건은 대기압 상태(0.0 kgf/cm², 0.1 kgf/cm²)로 구분하였으며 누출공 사이즈는 10 mm, 대기온도는 25 °C로 가정하였다(Table 4).

평가 결과 저장탱크 압력이 0 kgf/cm², 누출지점이 1.7 m에서 지면도달 거리는 3.0 m, 도달시간은 0.59 s 이었으며 외부 확산이 차단되는 것으로 평가되었다. 저장탱크 압력

이 0.1 kgf/cm² 누출지점이 3.0 m의 경우 지면도달거리는 4.43 m, 도달시간은 0.78 s 이며 이때 외부 유출을 위해 필요한 방류벽 높이는 2.92 m로 현재 방류벽 높이보다 최소 1.22 m 추가 설치가 필요한 것으로 분석되었다(Table 5).

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 유해화학물질을 취급하는 사업장의 저장탱크에서 화학물질이 유·누출되었을 때 사업장 내외부로 확산되는 것을 막는 시설인 방류벽이 「화학물질관리법」 개정에 따른 기존시설 소급적용 정책으로 인하여 법적 기준을 준수하지 못하는 시설에 대해 추가 안전성을 확보하기

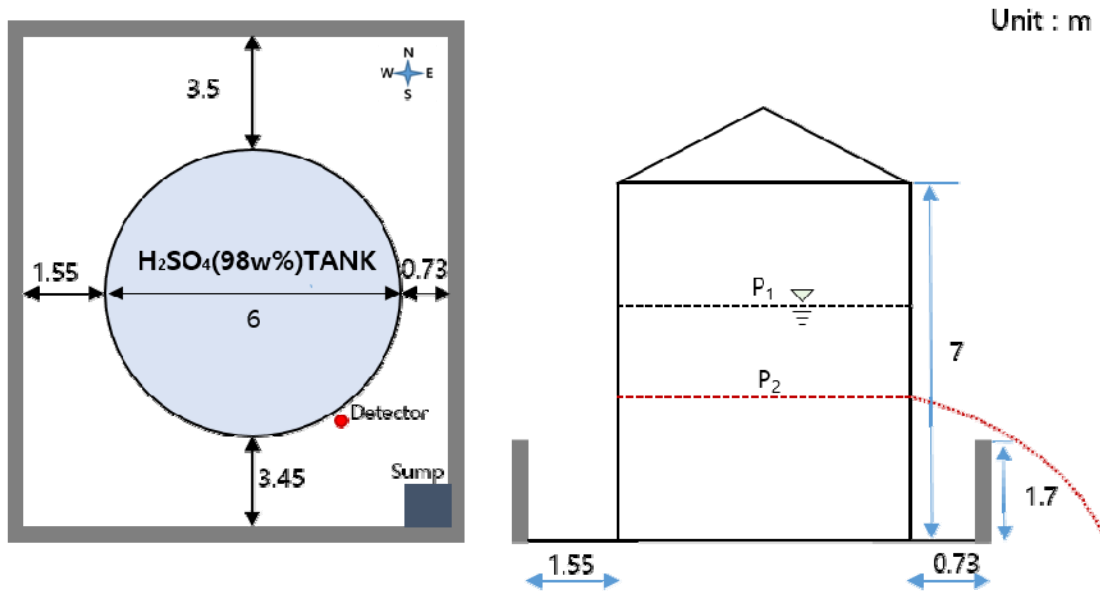


Figure 9. Layout of H₂SO₄ (98 wt%) storage tank with dike.

Table 5. Ground Reach Distance and Time by Discharge Height of H₂SO₄ (98 wt%) Storage Tank

| | Pressure (kgf/cm ²) | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|------|------|------|
| | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| Discharge Height (m) | 1.7 | 1.7 | 3.0 | 3.0 |
| Discharge Velocity (m/s) | 5.09 | 6.50 | 3.96 | 5.66 |
| Mass Flow Rate (kg/s) | 0.20 | 0.25 | 0.15 | 0.22 |
| Ground Reach Distance (m) | 3.00 | 3.83 | 3.10 | 4.43 |
| Ground Reach Time (s) | 0.59 | 0.59 | 0.78 | 0.78 |
| Max Distance at Discharge Height (m) | 2.50 | 3.54 | 2.50 | 3.54 |
| Max Ground Reach Distance (m) | 3.16 | 4.48 | 3.16 | 4.48 |
| Minimum Required Dike Height (m) | 1.60 | 1.64 | 2.83 | 2.92 |
| Additional Dike Height (m) | - | - | 1.13 | 1.22 |

위해 활용할 수 있는 유해화학물질 누출 궤적 모듈을 개발하였다. 사업장의 저장탱크 및 방류벽에 대한 취급시설 정보를 손쉽게 입력할 수 있도록 설계하고 평가 결과를 빠르게 확인할 수 있다.

이를 활용하여 실제 화학공장에 설치되어 운영되고 있는 염산(35 wt%)과 황산(98 wt%) 저장탱크를 대상으로 현재 수준의 방류벽 설치 현황을 분석하였다. 실제 운전조건을 고려하여 현재 설치되어 있는 방류벽 정보를 바탕으로 사고시나리오에 따른 저장압력 및 누출지점을 고려한 방류벽 외부 누출 여부, 지면도달거리 및 시간 등을 평가하여 외부누출 차단을 위해 필요한 방류벽 최소 높이를 제시하였다.

사례연구 결과 염산(35 wt%) 저장탱크 방류벽의 경우, 저장탱크 압력이 0 kgf/cm², 누출지점이 1.5 m에서 지면도달 거리는 1.9 m로 외부 유출이 차단되는 것으로 평가되었으며 저장탱크 압력이 0.1 kgf/cm² 누출지점이 2.0 m의 경

우 지면도달거리는 2.44 m로 이때 외부 유출을 위해 필요한 방류벽 높이는 1.94 m로 현재 방류벽 높이보다 최소 0.44 m 추가 설치가 필요한 것으로 평가되었다. 황산(98 wt%) 저장탱크 방류벽의 경우, 저장탱크 압력이 0 kgf/cm², 누출지점이 1.7 m에서 지면도달 거리는 3.0 m이었으며 외부 유출이 차단되는 것으로 평가되었다. 저장탱크 압력이 0.1 kgf/cm² 누출지점이 3.0 m의 경우 지면도달거리는 4.43 m로 이때 외부 유출을 위해 필요한 방류벽 높이는 2.92 m로 현재 방류벽 높이보다 최소 1.22 m 추가 설치가 필요한 것으로 평가되었다.

본 연구결과는 화학물질 사전예방 및 화학물질 누출 시 피해 최소화를 위해 2018년부터 새롭게 시행되고 있는 안전성평가제도에 대해 대기업뿐만 아니라 상대적으로 전문인력과 경험이 부족한 중·소기업 환경안전담당자에 합리적 완화시스템을 마련하는데 많은 도움이 될 것으로 판단

된다. 또한, 향후 본 연구를 바탕으로 다양한 액체 화학물질을 저장하는 탱크의 방류벽 이격거리와 높이가 적정한지 여부를 평가할 수 있으며, 더 나아가 설계단계부터 방류벽의 필요높이를 적용할 수 있을 것이다. 이를 통해 현장 적용성이 높은 화학사고 피해경감을 위한 다양한 완화시스템 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 향후 본 연구를 바탕으로 실효성 있는 화학물질 안전관리 제도가 운영될 수 있도록 다양하고 지속적인 추가 연구가 필요하다.

References

1. K. H. Lee, H. M. Kwon, S. S. Cho, J. Y. Kim and I. Moon, "Improvements of Safety Management System in Korean Chemical Industry After a Large Chemical Accident", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 42, pp. 6-13 (2016).
2. B. T. Yoo and S. D. Choi, "Emergency Evacuation Plan for Hazardous Chemicals Leakage Accidents Using GIS-based Risk Analysis Techniques in South Korea", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 16, No. 11, p. E1948 (2019).
3. B. T. Yoo and M. H. Moon, "Development of Emergency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan", *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 3, pp. 311-319 (2018).
4. National Institute of Chemical Safety (NICS), "Chemical Safety Clearing-house", Retrieved from <http://csc.me.go.kr>.
5. E. B. Lee and B. T. Yoo, "A study on the Rationalization of Safety Management in Chemical Facilities : Focused on Architecture Fire Resistance Standards", *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 11-12 (2019).
6. B. T. Yoo, E. B. Lee and J. G. Kim, "Development on the Safety Management System of Hazardous Chemicals under the Chemicals Control Act: Focusing on Safety Assessment System", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 14, No. 9, pp. 111-120 (2019).
7. E. B. Lee and B. T. Yoo, "A Study on the Rationalization of Criteria for Facilities Handling Toxic Chemicals in Consideration of the Threshold Quantity", *Crisisonomy*, Vol. 14, No. 9, pp. 111-120 (2018).
8. B. Lyu, K. H. Lee, T. J. Kim, H. T. Cho and I. Moon "Damage Reduction Strategies Against Chemical Accidents by using a Mitigation Barrier in Korean Chemical Risk Management", *Safety Science*, Vol. 110, pp. 29-36 (2018).
9. H. Y. Lim, K. S. Um and S. H. Jung, "A Study on Effective Mitigation System for Accidental Toxic Gas Releases", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 49, pp. 636-644 (2017).
10. J. M. Buchlin, "Mitigation of Industrial Hazards by Water Spray Curtains", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 50, pp. 91-100 (2017).
11. M. A. Rana and M. S. Mannan, "Forced Dispersion of LNG Vapor with Water Curtain", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 23, No. 6, pp. 91-100 (2010).
12. I. Prashanth, G. J. Fernandez, R. G. Sunder and B. Boardman, "Factors Influencing Safety Barrier Performance for Onshore Gas Drilling Operations", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 49, pp. 291-298 (2017).
13. R. Pitblado, M. Fisher, B. Nelson, H. Fløtaker, K. Molazemi and A. Stokke, "Concepts for Dynamic Barrier Management", *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 43, pp. 741-746 (2016).
14. E. B. Lee, S. L Kwak and Y. B. Choi, "Technical Criterion of Safety Evaluation of Leakage Preventing Plates for Alleviating Space Shortage Between Chemical Storage Tank and Dike", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 33, No. 5, pp. 42-50 (2018).
15. Y. S. Jeong, I. S. Woo and J. W. Lim, "Risk Management for Ammonia Unloading and Storage Tank Facility", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 21, No. 1, pp. 95-103 (2017).
16. K. O. Lee, J. Y. Park and C. J. Lee, "Evaluation of a Mitigation System for Leakage Accidents using Mathematical Modeling" *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 35, No. 2, pp. 348-354 (2018).
17. National Institute of Chemical Safety (NICS), "Facilities Installation Standard Guide" (2017).
18. D. A. Crowl and J. Louvar, "Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications", 3rd Edition, Pearson Education (2011).