

누출사고 시 저장탱크 위험물 누출속도를 고려한 탱크와 방유제 사이 간격에 관한 연구

이재열 · 김동현 · 반순희 · 이창준*

삼성디스플레이 환경안전팀 · *부경대학교 안전공학과
(2018. 7. 30. 접수 / 2018. 9. 29. 수정 / 2018. 10. 19. 채택)

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

Jae Yeol Lee · Dong Hyun Kim · Soon Hee Ban · Chang Jun Lee*

Environment and Safety Team, Samsung Display

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received July 30, 2018 / Revised September 29, 2018 / Accepted October 19, 2018)

Abstract : Chemical accidents generated during maintenance, repair, and normal operation, such as dispersion, fire, and explosions, can cause massive losses like a 2012 hydro fluorine leak in Gumi, South Korea. Since this accident, many researches have studied physical mitigation systems. However, due to the lack of potential costs and time, it is really hard for many companies to install mitigation systems without prior knowledge. Thus, the efficacy of mitigation system should be evaluated. This study assesses a dike design considering the fluid velocity at an open hole when a leakage accident occurs. It is assumed that leakage materials follow a free fall motion. Throughout case studies, a current KOSHA guide for a dike design was evaluated and new guidelines handling various conditions were proposed.

Key Words : torricellis' theorem, fluid velocity, dike design

1. 서론

현재 다양한 산업이 발전함에 따라 유해 화학물질의 사용이 급속도로 증가하고 있다. 또한, 고온, 고압의 위험한 운전 조건에서 운전되는 공정의 개수도 급증함에 따라 공정의 유지, 보수, 운전 과정 중에 발생하는 유해화학물질의 누출, 화재, 폭발 등의 사고는 사업장 내 뿐만 아니라 외부에도 막대한 손실을 초래할 수 있다¹⁾.

2012년 9월 27일에 발생한 구미 불산 누출사고가 대표적인 예이다. 이 사고로 인하여 사업장 내 근로자가 모두 사망하였으며, 사고 현장에 출동한 소방관, 경찰, 인근 주민 1만 1000여 명과 주변의 농작물, 가축에 또한 막대한 피해를 입혔다²⁾. 이러한 유해 화학물질 사고의 빈도와 위험성 때문에 최근에는 유해 화학물질에 대한 더욱더 전문적이고 종합적인 대책이 요구되고 있다³⁾. 또한, 최근에는 화학물질 등록 및 평가 등에 관한 법률과 화학물질 관리법의 시행으로 법적으로도 유해화학물질 관리의 중

요성이 주목받고 있다³⁾. 하지만 대부분 산업현장에서는 시간과 비용, 전문성 확보 등의 어려움 때문에 정량적인 대책보다 단순히 관련 규정이나 법률을 준수하는 정도의 정성적인 대책을 수립하여 대응하고 있다. 또한, 산업안전보건법이나 안전보건기술지침 등 위험물 관리 관련 규정에 대한 과학적인 검증에 관한 연구도 미흡하여 사고 발생 후에 관련 대응책이 얼마나 사고 영향 감소 효과가 있는지에 대한 분석이 필요하며, 이를 통해 다양한 설비의 특성을 고려하여 가장 효과적인 안전설비 및 관리방안을 도출하는 연구가 필요하다.

하지만, 이러한 연구는 반드시 실험을 통해 안전설비의 효과를 증명해야 하는 어려움이 있다. 외국의 경우, 다양한 실험을 통해 여러 안전설비가 사고 발생 시 얼마나 사고 피해를 줄이는지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Rana 등은 LNG 가스 누출 시 두 가지 종류의 Water curtain system에 대한 실험을 수행한 바가 있다⁴⁾. McQuaid와 Fitzpatrick는 무거운 가스의

* Corresponding Author : Chang Jun Lee, Tel : +82-51-629-6465, E-mail : changjunlee@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

plume이 발생하는 경우 water spray system에 대한 실험을 수행하였다⁵⁾. Suardin 등은 LNG가 누출되어 pool을 형성하고 화재가 발생하는 경우 화재가 발생한 표면 위에 복사열의 크기를 줄일 수 있는 물질을 분사하여 그 효용성에 관해 연구한 바가 있다⁶⁾.

하지만, 국내의 경우 큰 비용과 협소한 공간적 제약으로 인하여 이러한 실험을 하는 데 많은 어려움이 있어서, 사실상 이러한 실험은 불가능하다 할 수 있다. 그리고 이러한 실험은 매우 위험하여 많은 문제점을 발생시킬 가능성이 매우 크다. 이러한 어려움으로 인해 시뮬레이션을 통해 안전설비의 성능을 검증하는 방법이 큰 관심을 얻고 있다.

Busini와 Rota는 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 LNG 저장 탱크 주위에 다양한 모양의 방화벽을 설치하는 경우 어떻게 LNG가 확산하는지에 대한 연구를 수행하였다⁷⁾. Liu와 Wei는 무거운 가스 누출에 대한 거동을 CFD를 이용하여 연구하였다⁸⁾. MR Swain 등은 차고지에 연료 라인 누출사고 발생에 대한 시뮬레이션을 CFD로 연구하였다⁹⁾.

하지만 대부분의 연구가 CFD를 활용하여 가스 확산이 어떠한 식으로 전개될지에 관한 연구에 집중되어 있다. 따라서, 다양한 설비에 대한 시뮬레이션 기법을 활용한 성능 평가가 매우 중요하다.

본 연구에서는 위험물이 저장되어있는 저장 탱크에 누출 발생 시 누출구의 직경, 높이에 따라 누출속도를 계산하려고 한다. 저장 탱크 종류에 따라 수평형 원통, 수직형 원통, 구(sphere) 세 가지 경우로 나누어 누출 시 저장탱크 내 위험물이 저장된 양에 따라 누출속도를 계산하는 식을 도출하고자 한다.

누출속도의 계산으로는 액위와 누출구의 높이차와 대기압과 저장탱크 안에 압력 차에 의해서 누출되는 유체의 속도를 Bernoulli's principle을 기반으로 한 Torricelli의 법칙을 이용하여 계산하고자 한다. 미분방정식을 도출하여 이를 토대로 누출 구에서의 누출속도의 계산이 가능하다. 그리고, 위험물의 누출속도를 이용하여 위험물의 누출궤적을 자유 낙하 운동을 이용하여 계산하여 규정에 맞게 설치된 방유제가 그 역할을 제대로 수행할 수 있는지 평가하였다. 방유제의 기능은 탱크에서 누출 사고 발생 시 위험물을 외부로 방류하지 않도록 가두는 것이다¹⁰⁾. 방유제와 관련된 기존의 선행연구를 살펴보면, 곽영민 등은 방유제의 유무에 따라 누출 사고 발생 시 기체의 확산이 어떤 거동을 보이는지 계산하였으며¹¹⁾, 신창현 등은 방유제의 위험물에 대한 침투성을 연구하였다¹²⁾.

하지만, 위험물의 누출 속도나 궤적을 고려하여 방

유제와 탱크의 간격을 평가한 연구는 전무한 실정이다. 현재 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침¹³⁾에는 탱크 외벽과 방유제 내벽 사이의 거리가 1.5 m 이상을 유지하도록 규정되어 있다.

다양한 탱크의 운전 압력에 따라 누출궤적을 계산하여 이 규정이 어느 정도 유효한지에 대해 평가하고 추후에 어떠한 대책이 필요한지에 대해 제시하고자 한다. 시뮬레이션 도구로서 Matlab을 이용하여 미분방정식을 효과적으로 계산하고자 한다. 또한, 계산 결과가 얼마나 정확한지 검증하기 위해 실험을 수행하였다.

2. 누출속도 모델링

2.1 시나리오

저장 탱크에 crack이 발생하여 위험물이 외부로 누출되는 상황에서 누출직경 및 누출구의 위치에 따라 누출되는 위험물의 누출속도를 계산하고자 한다. 누출 시나리오를 위해 사전에 미리 정해야 하는 변수들은 다음과 같다.

- 1) 누출구의 직경
- 2) 누출구의 위치
- 3) 방유제의 위치
- 4) 저장탱크 운전 조건 및 대기 환경

저장탱크는 평상시에 총 설계용량의 90%의 용량으로 운영된다고 가정하였다. 저장탱크 내 물질은 액체 상태로 저장된다고 가정하였다. 방유제는 현재 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침¹³⁾에 나와 있는 탱크 외벽으로부터 1.5 m 떨어진 위치에 1 m 높이로 설치되었다고 가정하였다. 탱크의 운전 압력은 최소 1 atm부터 최대 5 atm까지 설정되었다고 가정하였으며, 공기가 탱크 내 비어 있는 공간에 존재한다고 가정하였으며, 누출이 발생하면서 부피 증가에 따라 압력이 감소한다고 가정하였다. 1 atm으로 위험물이 저장되고 있는 경우, 누출이 발생함에 따라 부피 증가에 따른 압력 감소가 발생하지만, 누출구를 통해 공기의 유입도 발생하기 때문에 늘 1 atm을 유지한다고 가정하였다.

누출구의 직경은 안전보건기술지침에 나와 있는 최대 직경을 이용하여 누출속도를 계산하고자 한다. 누출구 높이는 다양한 높이에서 발생하는 경우를 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

2.2 Torricelli's theorem

본 연구에서 위험물 누출속도 계산에 이용한 식은 Bernoulli 원리에 기반을 둔 Torricelli의 법칙이다. Torricelli

의 법칙은 액체의 높이차와 압력차에 의해 누출되는 유체의 속도를 계산하는 법칙으로 에너지 보존 법칙을 이용한 식이다. 방정식은 다음과 같으며 탱크 내부에 저장된 위험물은 비압축성 유체, 비점성 유체라고 가정하였다. 아래의 식 (1)은 Torricelli의 법칙을 나타내는 식이다.

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} = constant \quad (1)$$

v 는 유체의 속도, g 는 중력가속도, h 는 수위, P 는 압력, ρ 는 밀도이다. 이 식을 저장탱크에서 누출이 발생하는 상황을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{P_2}{\rho} \quad (2)$$

식(2)에서 첨자 1은 저장탱크 내 위험물 액위 상단을, 첨자 2는 누출구를 의미한다. 즉 액위 상단에서의 에너지는 누출구에서의 에너지와 동일하다고 가정하여 식을 유도한 것이다. 액위 상단에서의 유체의 속도는 결국 누출에 따른 액위 변화에 따라 결정된다. 본 연구에서는 위험물 누출 시 액위 상단의 유체 속도는 액위 변화와 일치한다고 가정하였다. 즉 v_1 은 dh_1/dt 와 같다고 가정하였다. 또한, 액위 상단의 압력은 저장탱크내의 공기 혹은 Inert gas의 압력에 의해서 결정된다. 누출이 발생함에 따라 점점 빈 공간의 부피는 증가하게 되며, 따라서 압력도 점차적으로 감소하게 된다. 이러한 부피와 압력의 상관관계는 Van der Waals 식을 따른다고 가정하였다.

$$P_1 = \frac{nRT}{V-nb} - a\left(\frac{n}{V}\right)^2 \quad (3)$$

식 (3)에서 n , V , T 는 Inert gas의 mole 수, 부피, 온도이며 a 와 b 는 기체 분자간의 척력 및 인력과 기체 분자 자체의 부피를 나타내는 Van der Waals 상수이다. 위에서 언급한 내용을 모두 결합하면 다음의 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2} \quad (4)$$

일반적으로 탱크에서 crack이 발생하는 경우 마찰에 의해 누출속도가 감소하게 된다. 실제 누출속도는 이러한 영향을 고려하여 식 (5)와 같이 배출계수 C_0 를 누

출속도에 곱하게 된다. Frank. P. Less¹⁴⁾는 C_0 에 대해 다음과 같이 제안하였다.

$$v_2 = C_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2} \quad (5)$$

- ① 끝이 날카로운(sharped-edged) 오리피스인 경우는 구멍에 크기에 무관하며, 0.61에 가깝다.
- ② 전체가 둥근 노즐인 경우는 1에 접근한다.
- ③ 용기에 접해있는 짧은 파이프(길이-지름의 비가 3미만)인 경우에는 0.81이다.
- ④ 배출계수가 알려지지 않았거나, 일정하지 않으면 계산된 흐름을 최대를 하기 위해 배출계수는 1을 사용한다.

2.3 수평형 실린더 탱크 누출속도 계산

탱크 유형에 따른 액위의 변화, 즉 dh_1/dt 를 계산해야 누출속도를 계산할 수 있다. 따라서 탱크 유형별로 액위 변화를 계산하는 식을 도출해야만 한다. 먼저 수평형 실린더 탱크의 경우를 살펴보도록 하자.

수평 원통형 저장탱크에서 단위 시간당 누출량은 액위 상단에서 단면적과 시간당 높이 변화의 곱은 누출구에서 단위시간 당 빠져나가는 유체의 양과 동일하다고 생각할 수 있다.

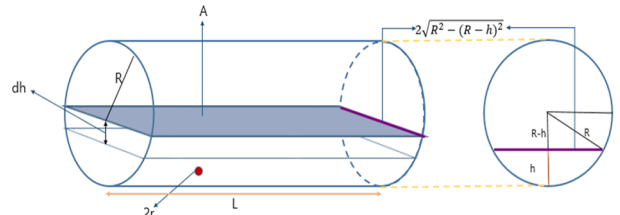


Fig. 1. Horizontal cylindrical vessel: red circle indicates an open hole with radius r .

액위 최상단에서 측면에서 바라본 액위의 세로 방향의 길이는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 저장탱크 반지름 R 과 반지름에서 액위의 높이 h 를 이용하여 피타고라스 정리를 통해 나타낼 수 있다. 그리고 가로 방향의 길이는 저장탱크의 길이 L 이라 할 수 있다. 따라서 시간당 저장탱크에서 변화는 유체의 부피는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$A \frac{dh_1}{dt} = 2L \sqrt{R^2 - |R - h_1|^2} \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (6)$$

A 는 액위 상단의 표면적이다. 식 (5)에서 구한 v_2 와 식

(6)를 결합하면 dh_1/dt 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{\pi r^2 C_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2}}{2L \sqrt{R^2 - (R - h_1)^2}} \quad (7)$$

식 (7)은 Matlab 상에서 ODE solver를 이용하여 계산할 수 있고 이를 토대로 식 (5)에서 누출구의 유체 속도를 계산할 수 있다.

2.4 수직형 실린더 탱크 누출속도 계산

수직형 실린더 탱크의 유체 속도는 Fig. 2에서 같이 액위 상단의 단면적이 계속 일정하므로 2.3에서 살펴본 수평형 실린더 탱크의 경우보다 간단하게 계산할 수 있다.

저장탱크의 누출량을 나타내는 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A \frac{dh_1}{dt} = \pi R^2 \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (8)$$

이를 식 (5)에 대입하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{\pi r^2 C_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2}}{\pi R^2} \quad (9)$$

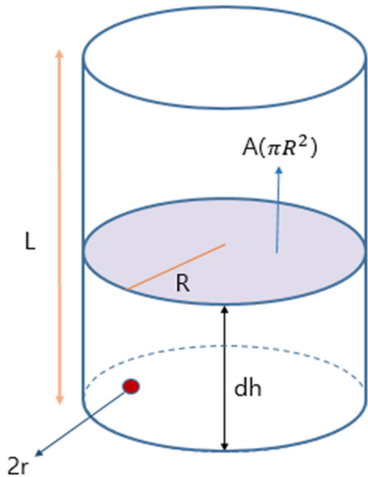


Fig. 2. Vertical cylindrical vessel: red circle indicates an open hole with radius r .

2.5 구형 탱크 누출속도 계산

Fig. 3은 구형 탱크의 경우를 보여주고 있다. 구형

탱크의 경우 액위 상단의 단면적은 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A \frac{dh_1}{dt} = \pi (\sqrt{R^2 - (R - h_1)^2})^2 \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (10)$$

액위 상단의 표면적이다. 식(5)에서 구한 v_2 와 식 (10)를 결합하면 dh_1/dt 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{\pi r^2 C_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2}}{\pi \sqrt{R^2 - (R - h_1)^2}} \quad (11)$$

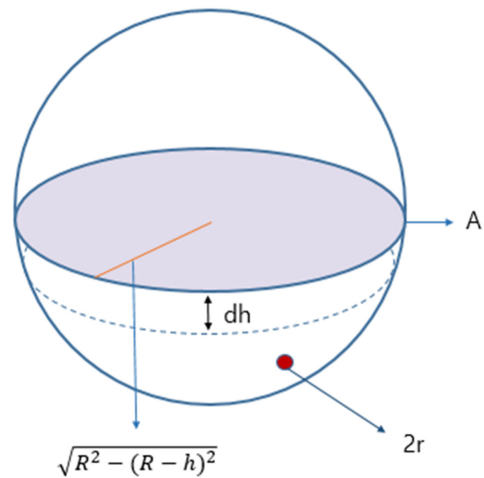


Fig. 3. Sphere vessel: red circle indicates an open hole with radius r .

3. 위험물 누출궤적 계산

위험물이 외부로 누출되는 경우 기체의 누출궤적은 대기 상태, 누출속도, 대기 안정도 등 다양한 주변 환경에 의해 결정된다. 하지만, 액체의 경우는 주로 누출 속도에 의해 그 궤적이 결정된다. 정확한 누출궤적을 계산하기 위해서는 대기조건, 풍속, 위험물 누출 시 탱크 내부로 공기가 들어가는 양 등 많은 불확실한 요소를 정확하게 알아야 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수평 방향으로 가장 멀리 날아가는 궤적으로 가정하여 계산하고자 한다. 즉, 누출구에서 위험물은 수평 방향으로 자유 낙하하는 형태로 누출된다고 가정하였다. 즉, 수직 방향의 속도는 0이고, 누출속도는 수평 방향의 속도와 일치한다고 가정하였다.

식 (5)를 통해 누출이 발생하는 시간별로 누출속도를 계산할 수 있고, 최대 누출속도를 계산할 수 있다. 유체가 최대 누출속도, v_{max} 로 수평 방향으로 누출되는

경우 지면에 수평 방향으로 가장 멀리 유체가 낙하하며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_x &= v_{\max} t \\ S_y &= h_2 - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \quad (12)$$

또한, 지면에 도달하기까지 걸리는 시간 \hat{T} 는 식 (13)과 같다. 이를 이용하여, 위험물의 누출궤적을 추정할 수 있다.

$$\hat{T} = \sqrt{2h_2/g} \quad (13)$$

4. 사례연구

방유제의 최적 설계를 위해 실제 저장탱크의 운전 조건 및 방유제 설계 조건을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 누출구의 위치는 탱크 액위 지점에서부터 일정 간격으로 아래 방향으로 탱크 지면에서부터 1.5 m 높이까지로 설정하였으며, 위험물이 누출구로 전량 누출되는 경우로 가정하였다. 시간에 따라 누출구에서 나오는 위험물의 유체속도를 계산하였다. 실제 산업현장에서 운전되고 있는 수직형 원통 염산 저장 탱크와 수산화나트륨 저장탱크를 기준으로 계산하였으며, Table 1에 설계 조건과 운전 조건을 정리하였다. 위의 두 물질을 선정할 이유는 일반적으로 디스플레이 및 반도체 제조업에서 가장 많이 사용하고 있는 물질이며, 저장용량은 탱크 전체 부피의 90%라고 가정하였다. 누출 발생 시 탱크 내 초기압력은 1 atm이며, 누출이 진행됨에 따라 탱크 내 기체의 부피가 증가하기 때문에 압력은 감소한다고 가정하였다.

또한, 탱크가 둥근 노즐 형태로 crack이 생기는 경우는 거의 불가능하며, 실제로는 탱크 외벽이 찢어지는 형태로 crack이 발생하기 때문에 식 (5)에서 배출계수 (C_0)는 0.61이라고 설정하였다. 누출구의 직경은 탱크

에 존재하는 파이프의 직경과 동일하다고 가정하였는데, 누출구의 직경은 누출속도에 영향을 미치지 않는다.

식 (5)와 (9)을 이용하여 다양한 누출구 높이에서 염산이 누출되는 경우에 시간에 따른 누출속도를 계산하였다. 누출구 높이에 따른 최대 누출속도를 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 얻은 최대 누출속도를 이용하여 식 (10)을 통해 누출구의 낙하 궤적을 계산하였으며, Fig. 4에서 결과를 확인할 수 있다. 염산과 수산화나트륨의 누출속도가 동일한 이유는 누출 최대속도는 액위와 누출구의 높이차와 탱크 내 압력과 누출구 외부 대기압의 차에 의해서 결정이 되는데, 현재 염산과 수산화나트륨 저장 탱크의 경우 상압으로 저장이 되다가 누출이 되는 경우 누출이 진행됨에 따라 탱크 내부의 압력은 대기압보다 낮아지게 되며 이는 누출속도를 낮추는데 기여하게 된다. 즉, 누출이 발생하는 시점에 압력 차가 존재하지 않고 높이차가 최대인 시점에서 저장물의 속도가 최대이다. 따라서 두 저장탱크의 저장 높이가 동일하기 때문에 누출 최대속도 또한 동일하게 계산되었다.

두 탱크 외벽에서 방유제까지의 거리가 0.6 m, 높이가 1 m임을 고려해 보면, 최대 누출속도 기준으로 누출되는 염산과 수산화나트륨 모두 방유제를 넘어가는 것을 확인할 수 있다. 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침을 따르는 경우, 즉 방유제까지의 거리가 1.5 m이고 높이가 1 m인 경우에도 염산은 방유제를

Table 2. Maximum leakage velocities according to various heights of opening holes in HCl tank

The height of an opening hole (m)	Maximum leakage velocity	
	HCl #1	NaOH #1
4	1.910	1.910
3.5	2.702	2.702
3	3.309	3.309
2.5	3.821	3.821
2	4.272	4.272
1.5	4.680	4.680

Table 1. Design specifications and operating conditions of HCl tank

Items	HCl #1	NaOH #1
Tank radius	3000 mm	4000 mm
Tank height	5000 mm	5000 mm
Tank volume	35 m ³	63 m ³
The max. radius of Pipe	80 mm	80 mm
Tank pressure	1 atm	1 atm
Tank temperature	25℃	25℃
The minimum distance between dike and tank wall	600 mm	600 mm

Table 3. A total leakage amount of HCl which flows over a dike

The height of an opening hole (m)	A total leakage amount (kg)	
	HCl #1	NaOH #1
4	147.27	1128.93
3.5	331.99	2659.63
3	531.20	4461.56
2.5	742.50	6553.1
2	953.57	8833.78
1.5	1093.24	10447.93

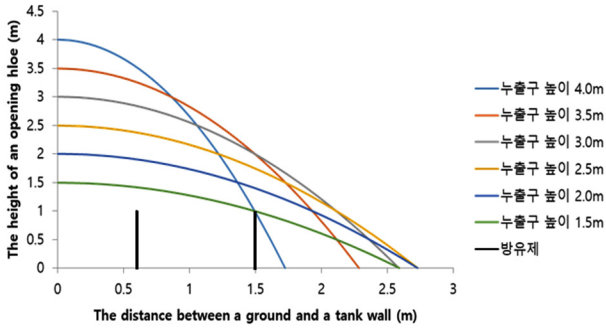


Fig. 4. The trajectory of HCl according to various heights of an opening hole.

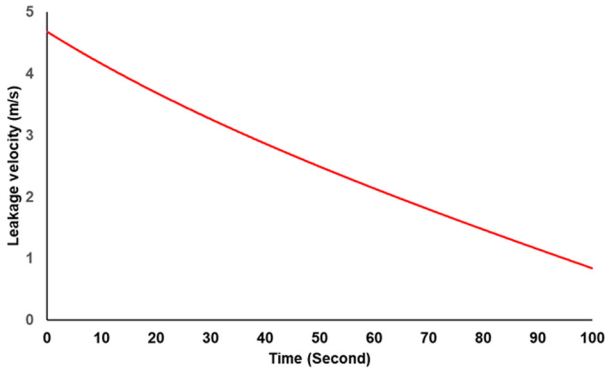


Fig. 5. The leakage velocity of HCl according to time.

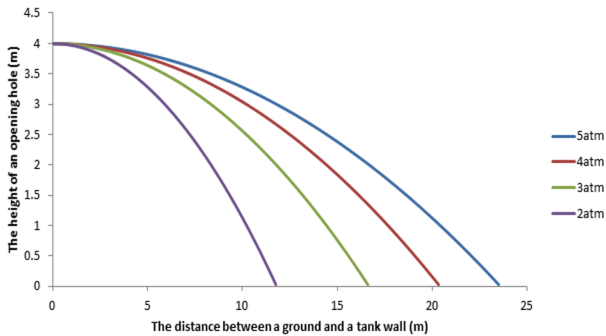


Fig. 6. The trajectory of HCl according to various pressure conditions when a leakage velocity is maximum.

넘어가게 된다. 누출이 진행됨에 따라 Fig. 5에서 보는 것처럼 누출속도는 감소하게 된다. Table 3은 누출속도가 감소함에 따라 염산과 수산화나트륨이 0.6 m 떨어져 있는 1 m 높이의 방유제를 넘지 않는 시점까지 방유제 외부로 누출되는 염산의 총 누출 무게를 정리한 표이다.

현재 산업현장에 설치된 방유제의 기준을 고려해 본다면, 고압으로 액체를 저장할 때는 더욱 누출사고 발생 시 100% 모든 누출 물질을 담아 두지 못한다고 할 수 있다. Fig. 6은 탱크 안의 저장압력이 변함에 따라 얼마나 x축 방향으로 낙하하는지 보여주고 있다. 따라서 앞으로 탱크 측면에서 위험물이 누출되는 경우 완

벽하게 외부로의 누출을 막기 위해서는 방유제 이외의 추가 안전설비에 관한 연구가 진행되어야 한다. 또한, 저장 탱크 안의 압력을 공정에 영향을 끼치지 않는 선에서 최대한 낮게 유지하도록 한다면 누출사고 발생 시 피해 범위를 최소화할 수 있다.

5. 실험

실제로 본 연구에서 계산한 결과가 어느 정도 정확한지 검증하기 위해 실제 Tank에 증류수를 채우고 누출이 발생할 때에 대한 실험을 수행하였다. 직경이 1.3 m이고, 높이가 1.6 m이며, 저장압력이 상압인 수직형 실린더 탱크에 바닥으로부터 0.9 m 위치에 직경 0.06 m 구멍을 뚫은 후 증류수를 1 m 높이까지 채우고 나서 실제 누출이 발생하는 경우, 누출구에서 증류수가 어떻게 낙하하는지에 대하여 관찰하였다. Fig. 6은 실제 실험과정을 보여주고 있으며, 누출이 발생하는 경우 탱크 외벽에서 최대 0.45 m 떨어진 곳에 낙하함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 식을 이용하여 계산하면 위의 실험 조건에서는 실제로 누출구를 원형으로 설계하였기 때문에 배출계수를 0.81로 가정하여 계산하면 0.486 m 정도 떨어진 곳에 낙하하는 것으로 예측된다. 이러한 결과는 본 연구에서 설계한 계산 식이 실제의 경우가 거의 유사함을 보여주고 있으며, 다소 계산 식 결과가 실험결과가 큰 이유는 누출이 발생하는 경우 누출구에서 수직 방향의 속도는 0이며, 수평 방향으로 지면에 평행하게 누출된다고 가정하였기 때문으로 추론할 수 있다. 이는, 실제 경우보다 다소 보수적으로 누출되는 거리를 계산하였음을 의미하며, 실제로 누출되는 경우에 수직 방향으로 누출구에서의 속도가 0이 아닌 어느 정도의 값을 가진다고 결론을 내릴 수 있다.

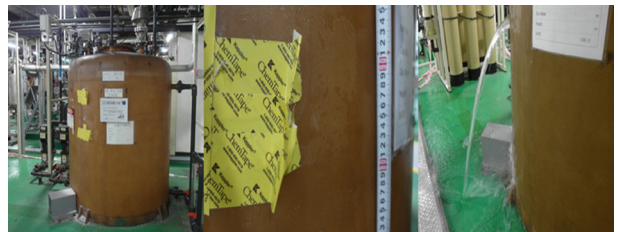


Fig. 7. Real pictures for a leakage experiment to verify the results of a simulation.

6. 결론

본 연구에서는 다양한 조건에서 위험물이 누출되는 경우 누출구에서의 최대속도를 계산하고 이를 통해 위험물이 자유 낙하 하는 궤적을 계산하여, 현재 설치된 방유제

가 제대로 그 역할을 할 수 있는지 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 수직 원통형 저장탱크 만을 고려하였고, Torricelli의 법칙에 따라 저장물질의 액위 높이와 누출구의 높이 차이가 벌어질수록 유체의 누출속도가 빨라짐을 계산 결과를 통해 확인할 수 있었다. 누출속도와 관련된 식을 보면 누출구 직경은 누출속도에 영향을 미치지 않으며, 누출속도와 누출량은 직경에 무관하며, 누출이 지속되는 시간에만 영향을 미친다. 그리고 누출이 진행됨에 따라 저장탱크 안의 압력이 감소하면서 속도는 감소함을 확인하였다. 실제 사례연구로 진행된 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침¹³⁾의 1.5 m보다 좁게 설계된 0.6 m 간격의 방유제의 경우 탱크 측면에서 발생하는 누출사고에 대해 일정 시간 동안은 저장물을 방어하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, KOSHA 기술지침을 준수하여 설치된 경우라도 일정 시간 동안은 누출물이 방유제 외부로 유출될 수 있는 한계가 있음을 확인할 수 있었다. 그리고, 실험을 통하여 본 연구에서 계산한 결과가 신뢰할 수 있음을 증명하였다.

따라서, 탱크 측면의 누출사고 확산을 예방하기 위해서는 더 넓은 간격의 방유제가 필요하다고 도출할 수도 있다. 하지만, 방유제의 단면적이 위험물의 기화량을 결정하는 주된 요인임을 고려한다면, 방유제와 탱크 외벽과의 간격이 좁아질수록 얻을 수 있는 이점도 분명히 존재한다. 따라서, 저장탱크 누출 시, 누출속도를 감소시키기 위한 가장 좋은 방법은 최대한 저장탱크 안의 운전 압력을 감압하는 것이 제일 좋은 방안이다. 또한, 누출 발생 시에 저장탱크에 설치된 다른 파이프를 동시에 개방하면, 저장탱크 안 액위가 급격하게 감소하며, 이는 누출속도를 더 빠르게 감소시킬 수 있으므로 방유제를 넘어가는 위험물의 양을 감소시킬 수 있다. 하지만, 이러한 방안은 추가로 감압설비나 제어시스템을 필요하므로 향후에 사고의 규모나 피해 범위를 완화할 수 있는 깊이 있는 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 저장탱크의 모양에 따라 누출속도를 산정하여 방유제가 그 역할을 제대로 할 수 있는지에 대한 평가에 기반이 되는 연구이며, 본 연구에서 적용된 수직 원통형 저장탱크 이외에도 수평 원통형, 구형 저장탱크에도 누출구에서 위험물 누출속도 계산이 모두 가능하다. 이를 통해 방유제 설계 시 이론적인 가이드라인을 제공할 수 있다.

References

1) J. Y. Park and C. J. Lee, "Principal Component Analysis Based Method for Effective Fault Diagnosis", J. Korean

Soc. Saf., Vol. 29, No. 10, pp. 73-77, 2014.
 2) <http://report.safedu.org/>
 3) <http://www.chemnavi.or.kr/main.do>
 4) M. A. Rana, Y. Guo and M. S. Mannan MS, "Use of Water Spray Curtain to Disperse LNG Vapor Clouds", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 23, No. 1, pp. 77-88, 2010.
 5) J. McQuaid and R. D. Fitzpatrick, "Air Entrainment by Water Sprays: Strategies for Application to the Dispersion of Gas Plumes", Journal of Occupational Accidents., Vol. 5, No. 2, pp. 121-133, 1983.
 6) J. A. Suardin, R. Qi, R. Benjamin, M. Rana, Y. Zhang and M. S. Mannan, "Application of Fire Suppression Materials on Suppression of LNG Pool Fires", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 24, No. 1, pp. 63-75, 2011.
 7) V. Busini and R. Rota, "Influence of the Shape of Mitigation Barriers on Heavy Gas Dispersion", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 29, pp. 13-21, 2014.
 8) D. Liu and J. Wei, "Modelling and Simulation of Continuous Dense Gas Leakage for Emergency Response Application", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 48, pp. 14-20, 2017.
 9) M. R. Swain and J. Shriber, "Comparison of Hydrogen, Natural Gas, Liquefied Petroleum Gas, and Gasoline Leakage in a Residential Garage", Energy and Fuels, Vol. 12, No. 1 pp. 83-89, 1998.
 10) Committee on Energy and Commerce, "Safe Aboveground Storage Tanks", Washington DC, U.S. Government Printing Office, 1994.
 11) Y. Kawg, J. Oak, S. Yoon and S. Jung, "A Study on the Safety Distance of Benzene and Acrylonitrile Releases in Accordance with Dike and Hole Size", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 22, No. 1, pp. 18-25, 2018.
 12) C. Shin, J. H. Park and J. Yoon, "Analysis on the Risk of the Impermeable Concrete Bottom of Dikes for Nitric Acid Storage Tanks", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 3, pp. 53-59, 2016.
 13) KOSHA, "Korea Occupational Safety and Health Agency, Technical Specifications for the Dike Installation", 2012.
 14) Frank P. Less, "Loss Prevention in the Process Industries", Butterworth, pp. 417, 1986.