

# 누출사고 시 저장탱크 위험물 누출속도를 고려한 방유제 설계에 관한 연구

이재열 · 김동현 · 반순희 · 이창준\*

삼성디스플레이 환경안전팀 · \*부경대학교 안전공학과

(2017. 11. 21. 접수 / 2017. 12. 1. 수정 / 2017. 12. 21. 채택)

## A Study of a Dike Design 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 Safety Team, Samsung Display

\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received November 21, 2017 / Revised December 1, 2017 / Accepted December 21, 2017)

**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 many difficulties including potential costs and lack 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 유해화학물질의 사용이 급속도로 증가하고 있다. 또한 고온, 고압의 위험한 운전 조건하에서 운전되는 공정의 개수도 급증함에 따라 공정의 유지, 보수, 운전 과정 중에 발생하는 유해화학물질의 누출, 화재, 폭발 등의 사고는 사업장 내뿐만 아니라 외부에도 막대한 손실을 초래할 수 있다<sup>1)</sup>.

2012년 9월 27일에 발생한 구미 불산 누출사고가 대표적인 예이다. 이 사고로 인하여 사업장 내 근로자 모두 사망하였으며, 사고 현장에 출동한 소방관, 경찰, 인근 주민 1만 1000여명과 주변의 농작물, 가축에 또한 막대한 피해를 입혔다<sup>2)</sup>. 이러한 유해화학물질 사고의 빈도와 위험성 때문에 최근에는 유해화학물질에 대한 더욱 더 전문적이고 종합적인 대책이 요구되어지고 있다<sup>3)</sup>. 또한, 최근에는 화학물질 등록 및 평가 등에 관한 법률과 화학물질관리법의 시행으로 법적으로도 유해

위험물질 관리의 중요성이 부각되고 있다<sup>3)</sup>. 하지만 대부분의 산업현장에서는 시간과 비용, 전문성 확보 등의 어려움 때문에 정량적인 대책보다 단순히 관련 규정이나 법률을 준수하는 정도의 정성적인 대책을 수립하여 대응하고 있는 실정이다. 또한, 산업안전보건법이나 안전보건기술지침 등 위험물 관리 관련 규정에 대한 과학적인 검증에 대한 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 관리 방안을 도출하는 연구가 반드시 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 줄이는 지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Rana 등은 LNG 가스 누출 시 두가지 종류의 water curtain system에 대한 실험을 수행한

\* 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

바가 있다<sup>4)</sup>. McQuaid 와 Fitzpatrick는 무거운 가스의 plume이 발생하는 경우 water spray system에 대한 실험을 수행하였다<sup>5)</sup>. Suardin 등은 LNG가 누출되어 pool을 형성하고 화재가 발생하는 경우 화재가 발생한 표면 위에 복사열의 크기를 줄일 수 있는 물질을 분사하여 그 효율성에 대해 연구한 바가 있다<sup>6)</sup>.

하지만, 국내의 경우 많은 비용과 협소한 공간적 제약으로 인하여 이러한 실험을 하는데 많은 어려움이 있어서, 사실상 이러한 실험은 불가능 하다 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 저장탱크 주위에 다양한 모양의 방화벽을 설치하는 경우 어떻게 LNG가 확산되는지에 대한 연구를 수행하였다<sup>7)</sup>. Liu와 Wei는 무거운 가스 누출에 대한 거동을 CFD를 이용하여 연구하였다<sup>8)</sup>. MR Swain 등은 차고지에 연료 라인 누출 사고 발생에 대한 시뮬레이션을 CFD로 연구하였다<sup>9)</sup>.

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 저장탱크에 누출 발생 시 누출구의 직경, 높이에 따라 누출속도를 계산하려고 한다. 저장탱크 종류에 따라 수평형 원통, 수직형 원통, 구(sphere) 세 가지 경우로 나누어 누출 시 저장되어 있는 양에 따라 누출속도를 계산하는 식을 도출하고자 한다.

누출속도의 계산으로는 수두압 (Hydraulic pressure)과 대기압과 저장탱크 안에 압력 차에 의해서 누출되는 유체의 속도를 Bernoulli's principle을 기반으로 한 Torricelli의 법칙을 이용하여 계산하고자 한다. 미분방정식을 도출하여 이를 토대로 누출구에서의 누출 속도의 계산이 가능하다. 그리고, 위험물의 누출속도를 이용하여 위험물의 누출궤적을 자유낙하운동을 이용하여 계산하여 규정에 맞게 설치된 방유제가 그 역할을 제대로 수행할 수 있는지 평가하였다. 현재 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침<sup>10)</sup>에는 탱크 외벽과 방유제 내벽사이의 거리가 1.5 m 이상을 유지하도록 규정되어 있다. 다양한 탱크의 운전 압력에 따라 누출궤적을 계산하여 이 규정이 어느정도 유효한지에 대해 평가하고 추후에 어떠한 대책이 필요한지에 대해 제시하고자 한다. 시뮬레이션 도구로서 Matlab을 이용

하여 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 정상시에 총 설계용량의 90%의 용량으로 운영된다고 가정하였다. 저장탱크내 물질은 액체상태로 저장된다고 가정하였다. 방유제는 현재 안전보건기술지침에 나와있는 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 비어있는 공간에 존재한다고 가정하였으며, 누출이 발생하면서 부피 증가에 따라 압력이 감소한다고 가정하였다. 1 atm으로 위험물이 저장되어 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 직경은 누출 속도에 영향을 미치지 않는데, 누출 속도는 직경에 무관하며, 누출구 직경은 누출량에만 영향을 미친다. 누출구 높이는 다양한 높이에서 발생하는 경우를 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

### 2.2 Torricelli's theorem

본 연구에서 위험물 누출속도 계산에 이용한 식은 Bernoulli 원리에 기반한 Torricelli의 법칙이다. Torricelli의 법칙은 수두압과 압력차에 의해 누출되는 유체의 속도를 계산하는 법칙으로 에너지 보존 법칙을 이용한 식이다. 방정식은 다음과 같으며 탱크 내부에 저장되어 있는 위험물은 비압축성 유체, 비점성 유체라고 가정하였

다. 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,  $\rho$ 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 저장탱크 상단의 비어 있는 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.

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

### 2.3 수평형 실린더 탱크 누출 속도 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 단위시간당 누출량은 액위상단에서 단면적과 시간당 높이 변화의 곱은 누출구에서 단위시간 당 빠져나가는 유체의 양과 동일하다고 생각할 수 있다.

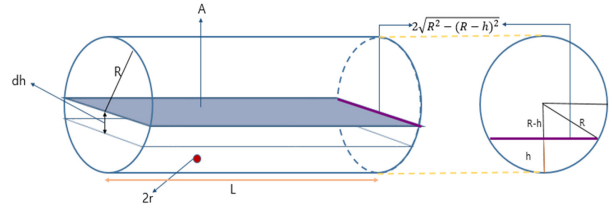


Fig. 1. Horizontal cylindrical vessel: red circle indicates an open hole with radius  $r$ .

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 변화하는 유체의 부피는 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$A \frac{dh_1}{dt} = 2L \sqrt{R^2 - (R-h_1)^2} \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (5)$$

$A$ 는 액위 상단의 표면적이다. 식 (4)에서 구한  $v_2$ 와 식 (5)를 결합하면  $dh_1/dt$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{\pi r^2 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2}}{2L \sqrt{R^2 - (R-h_1)^2}} \quad (6)$$

식 (6)은 Matlab 상에서 ODE solver를 이용하여 계산이 가능하고 이를 토대로 식 (4)에서 누출구의 유체 속도를 계산할 수 있다.

### 2.4 수직형 실린더 탱크 누출 속도 계산

수직형 실린더 탱크의 유체 속도는 Fig. 2에서 같이 액위 상단의 단면적이 계속 일정하기 때문에 2.3에서 살펴본 수평형 실린더 탱크의 경우보다 간단하게 계산이 가능하다.

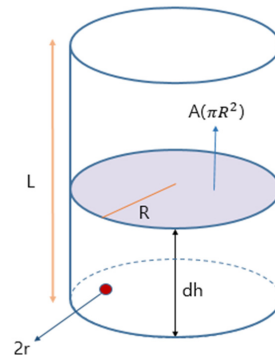


Fig. 2. Vertical cylindrical vessel: red circle indicates an open hole with radius  $r$ .

저장탱크의 누출량을 나타내는 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A \frac{dh_1}{dt} = \pi R^2 \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (7)$$

이를 식 (4)에 대입하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{\pi r^2 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2}}{\pi R^2} \quad (8)$$

### 2.5 구형 탱크 누출 속도 계산

Fig. 3은 구형 탱크의 경우를 보여주고 있다. 구형 탱크의 경우 액위 상단의 단면적은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A \frac{dh_1}{dt} = \pi (\sqrt{R^2 - (R - h_1)^2})^2 \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (9)$$

액위 상단의 표면적이다. 식(4)에서 구한  $v_2$ 와 식 (9)를 결합하면  $dh_1/dt$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{\pi r^2 \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2}}{\pi \sqrt{R^2 - (R - h_1)^2}} \quad (10)$$

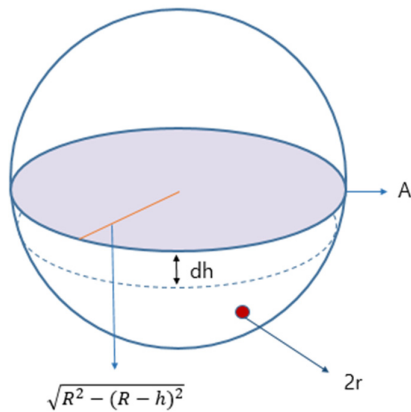


Fig. 3. Sphere vessel: red circle indicates an open hole with radius  $r$ .

### 3. 위험물 누출 궤적 계산

위험물이 외부로 누출되는 경우 기체의 누출 궤적은 대기 상태, 누출 속도, 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 계산이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 수평방향으로 가장 멀리 날아가는 궤적으로 가정하여 계산하고자 한다. 즉, 누출구에서 위험물은 수평방향으로 자유낙하 하는 형태로 누출된다고 가정하였다. 즉, 수직방향의 속도는 0이고, 누출속도는 수평방향의 속도와 일치한다고 가정하였다.

식 (4)를 통해 누출이 발생하는 시간별로 누출 속도를 계산할 수 있고, 최대 누출 속도를 계산할 수 있다. 유체가 최대 누출속도,  $v_{max}$ 로 수평방향으로 누출되는 경우 지면에 수평 방향으로 가장 멀리 유체가 낙하하며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_x &= v_{max} t \\ S_y &= h_2 - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \quad (11)$$

또한, 지면에 도달하기까지 걸리는 시간  $T$ 는 식 (11)과 같다.

$$T = \sqrt{2h_2/g} \quad (12)$$

이를 이용하여, 위험물의 누출궤적을 추정할 수 있다.

### 4. 사례연구

방유제의 최적 설계를 위해 실제 저장탱크의 운전 조건 및 방유제 설계 조건을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 누출구의 위치는 탱크 최고 액위 하단 지점에서부터 일정간격으로 아래방향으로 탱크 지면에서부터 1.5 m 높이까지로 설정하였으며, 위험물이 누출구로 전량 누출되는 경우로 가정하였다. 시간에 따라 누출구에서 나오는 위험물의 유체속도를 계산하였다. 실제 산업 현장에서 운전되고 있는 수직형 원통 염산 저장 탱크를 기준으로 계산하였으며, Table 1에 설계 조건과 운전 조건을 정리하였다. 저장용량은 탱크 전체 부피의 90%라고 가정하였다. 누출 발생 시 탱크 내 압력은 1 atm으로 일정하다고 가정하였다. 실제로 누출이 진행됨에 따라서 탱크내의 압력은 감소하게 되며 정확한 누출 속도를 계산하기 위해서는 압력 감소치도 산정해야 한다. 그리고 실제 외부에 있는 공기가 탱크 안으로 들어가는 경우도 있는지 살펴봐야 한다. 하지만, 이를 계산하는 것은 불가능한 일이며, 본 연구에서는 탱크내의 압력은 1 atm을 유지하는 것으로 가정하였다. 이는 누출속도를 최대치로 가정하여 보수적인 결과를 계산하였음을 의미한다.

Table 1. Design specifications and operating conditions of HCl tank

Items	HCl #1
Tank radius	3000 mm
Tank height	5000 mm
Tank volume	35 m <sup>3</sup>
The max. radius of Pipe	80 mm
Tank pressure	1 atm
Tank temperature	25 °C
The minimum distance between dike and tank wall	300 mm

식 (4)와 (8)을 이용하여 다양한 누출구 높이에서 염산이 누출되는 경우에 시간에 따른 누출속도를 계산하였다. 누출구 높이에 따른 최대 누출 속도를 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 얻은 최대 누출 속도를 이용하여 식 (10)을 통해 누출구의 낙하 궤적을 계산하였으며, Fig. 4에서 결과를 확인할 수 있다.

탱크 외벽에서 방유제까지의 거리가 0.3 m 임을 고려해 보면, 탱크내의 압력이 1 atm을 계속 유지하면 충분한 이격거리가 확보되었다고 할 수 있다. 방유제의 높이가 1 m 임을 고려한다면 염산 저장 탱크의 경우 현재 방유제 설계 기준은 이를 넘을 가능성이 없음을 계산결과로 확인이 가능하다.

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 (m/s)
4	0.091
3.5	0.128
3	0.157
2.5	0.181
2	0.203
1.5	0.222

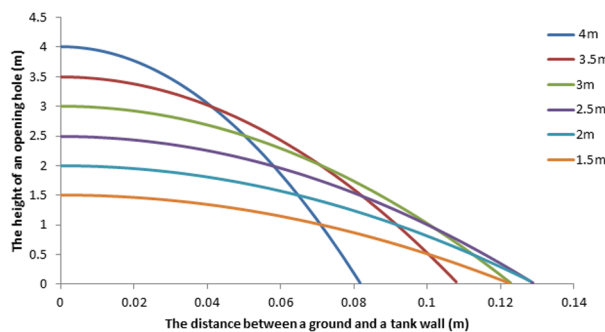


Fig. 4. The trajectory of HCl according to various heights of an opening hole. It is assumed that the pressure of a tank is 1 atm.

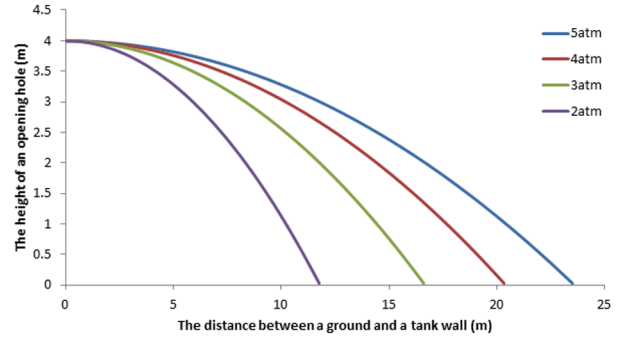


Fig. 5. The trajectory of HCl according to various pressure conditions when a leakage velocity is maximum.

현재 산업 현장에 설치된 방유제의 기준을 고려해 본다면, 고압으로 액체가 저장되어 있는 경우에는 누출 사고 발생시 100% 모든 누출 물질을 담아 두지 못한다고 할 수 있다. 위의 염산 저장 탱크의 경우 압력이 1.059 atm 이상이면 탱크 외벽에서부터 1.5 m 이격되어 있고 높이가 1 m 인 방유제를 넘어서 위험물이 누출될 가능성이 있음을 확인하였다. Fig. 5는 Tank안의 저장압력이 변함에 따라 얼마나 x축 방향으로 낙하하는지 보여주고 있다.

따라서 앞으로 방유제이외의 추가 안전 설비에 대한 연구가 진행되어야 한다. 또한, 저장탱크안의 압력을 공정에 영향을 끼치지 않는 선에서 최대한 낮게 유지하도록 한다면 누출 사고 발생 시 피해범위를 최소화할 수 있다.

## 5. 실험

실제로 본 연구에서 계산한 결과가 어느정도 정확한지 검증하기 위해 실제 Tank에 증류수를 채우고 누출이 발생하는 경우에 대해 실험을 수행하였다. 직경이 1.3 m 이고, 높이가 1.6 m 이며 저장압력이 상압인 수직형 실린더 탱크에 바닥으로부터 0.9 m 위치에 직경 0.06 m 구멍을 뚫은 후 증류수를 1m 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 0.6 m 정도 떨어진 곳에 낙하하는 것으로 계산이 된다. 실험치가 예상치보다 작게 나온 이유는, 본 연구에서는 누출이 발생하는 경우 누출구에서 수직방향의 속도는 0이며, 수평방향으로 지면에 평행하게 누출된다고 가정하였기 때문이다. 이는, 실제 경우보다 보수적으로 누출되는 거리





Fig. 6. Real pictures for a leakage experiment to verify the results of simulations.

를 계산하였음을 의미하며, 실제로 누출되는 경우에 수직방향으로 누출구에서의 속도가 0이 아닌 어느 정도의 값을 가진다고 결론내릴 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 다양한 조건에서 위험물이 누출되는 경우 누출구에서의 최대속도를 계산하고 이를 통해 위험물이 자유낙하 하는 궤적을 계산하여, 현재 설치되어 있는 방유제가 제대로 그 역할을 할 수 있을지 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 수직 원통형 저장탱크만 고려하였고, Torricelli의 법칙에 따라 저장물질의 액위 높이와 누출구의 위치 차이가 커질수록 유체의 누출 속도가 빨라짐을 계산 결과를 통해 확인이 가능하였다. 그리고 저장탱크안의 압력이 대기압과 같은 조건을 유지하면 위험물이 낙하하여 지표면에 닿는 거리가 매우 짧아져, 실제 사례 연구로 진행된 염산 저장탱크의 경우 비록 방유제가 탱크 외벽에 가깝게 설치되어 있지만, 모든 누출되는 염산을 모두 저장할 수 있음을 확인하였다. 그리고, 실험을 통하여 본 연구에서 계산한 결과가 신뢰할 수 있음을 증명하였다.

또한, 저장탱크안의 압력이 높아지면 지표면에 닿는 거리가 급격하게 증가하고 현재 KOSHA 기술지침을 준수하여 설치된 현장에서 방유제로도 위험물 누출시 누출물이 방유제 외부로 유출될 수 있는 한계가 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 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. 본 연구에서 첫 번째 사례연구의 경우, 즉, 저장탱크의 운전 압력이 대기압과 같은 1 atm으로 유지한다고 가정한 경우에는 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침보다 좁게 설치된 방유제의 설계 조건도 별 문제가 없다는 결론을 얻을 수 있었다. 하지만, 탱크의 저장 압력이 증가하는 경우, 급격하게 누출

속도가 커지면서 안전보건공단의 방유제 설치에 관한 기술지침에 맞게 설치된 방유제도 넘을 수 있음을 확인할 수 있었으며, 방유제 이외에 추가적인 대책이 필요함을 확인할 수 있었다.

본 연구는 저장탱크의 모양에 따라 누출속도를 산정하여 방유제가 그 역할을 제대로 할 수 있는지에 대한 평가에 기반이 되는 연구이며, 본 연구에서 적용된 수직원통형 저장탱크 이외에도 수평원통형, 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", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 4, 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) KOSHA, "Korea Occupational Safety and Health Agency, Technical Specifications for the Dike Installation", 2012.