

화학물질 저장 탱크와 방류벽 사이의 공간 부족 개선을 위한 누출 방지판의 안정성 평가 기준

이은별 · 곽솔림 · 최영보[†]

충북대학교 안전공학과

(2018. 9. 4. 접수 / 2018. 9. 17. 수정 / 2018. 10. 2. 채택)

Technical Criterion of Safety Evaluation of Leakage Preventing Plates for Alleviating Space Shortage Between Chemical Storage Tank and Dike

Eunbyul Lee · Sollim Kwak · Youngbo Choi[†]

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received September 4, 2018 / Revised September 17, 2018 / Accepted October 2, 2018)

Abstract : The Chemical Controls Act strictly regulates for the chemical companies to establish sufficient space between the liquid chemical tank and dike, but facilities already installed suffer from the space shortage between the tank and dike. Installing leakage preventing plates on the dike is considered as one of the economic solutions that can alleviate the space deficiency. However, there is no technical and reasonable criterion for the safety evaluation of the leakage preventing plate on the dike. In order to address this problem, we provide generalized and verified calculating equations that give maximum height and horizontal distance of leakage trajectories. Through the proposed equations, proper heights of the leakage preventing plates on the dike can be easily determined. In this study, new calculating methods are also developed to determine the impact force of the liquid to the leakage preventing plates. In addition, we performed the reactivity experiments between four corrosive liquid chemicals and two stainless steel materials that are candidate substances for the construction of the leakage preventing plate. The results of this study is expected to be applicable as a guideline in the design of safe dike and its leakage preventing plates.

Key Words : chemical storage tank, dike, chemicals controls act, leakage preventing plate, chemical facility

1. 서론

방류벽은 화학물질 누출사고의 피해를 줄이기 위해 사용되는 가장 대표적인 안전시설의 하나이다. 방류벽의 주요 기능은 탱크에서 누출되는 액체 화학물질을 가두어 외부로 확산되지 못하게 하는 것이므로¹⁾, 누출된 액체 화학물질을 효과적으로 가둘 수 있는 용량과 재질의 방류벽을 설치하는 것이 중요하다. 또한 액체의 분출 거리 등을 고려하여 방류벽과 탱크 사이에 충분한 공간을 두는 것이 효과적이다²⁾.

이와 같이 방류벽의 성능은 설치 규격에 큰 영향을 받기 때문에, 국내 여러 법령에서 방류벽의 설치 기준을 상세하게 규정하고 있다. 또한 방류벽의 기능과 설

계 조건 등에 관한 연구도 다수 진행되고 있다. 예를 들어, 곽영민 등은 벤젠 및 아크릴로니트릴의 유출 사고 시 ERPG-2 농도의 끝점 도달거리가 방류벽의 유무에 따라 어떻게 달라지는 모델링을 통해 계산하였으며³⁾, 정운서 등은 LOPA Date를 활용하여 위험도 감소 방안으로서 방류벽 등의 확산 방지 설비 설치 등을 제시하였다⁴⁾. 또한 신창현 등은 방류벽 콘크리트의 제조 조건에 따라 질산 및 원유가 방류벽 바닥을 침투하는 깊이를 비교함으로써, 방류벽의 침투성에 대한 실험 자료를 제공하였다⁵⁾.

그런데 좁은 공간에 다수의 시설이 밀집된 국내 사업장의 현실을 고려하면, 방류벽의 설치 기준을 철저히 준수하는 것이 쉽지 않다. 특히 방류벽과 탱크 사

[†] Corresponding Author : Youngbo, Choi, Tel : +82-43-261-2458, E-mail : ybc@chungbuk.ac.kr

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Chungju 28644, Korea

이에 충분한 이격거리를 확보하기 위해서는 넓은 부지가 전제되어야 하고, 심한 경우 기존 시설의 이전도 고려해야하기 때문에 사업장의 부담이 매우 크다. 아울러 대부분의 방류벽 설치 기준에서 요구하는 1.5 m의 최소 이격거리를 만족하더라도, 누출조건에 따라 누출된 액체 화학물질이 방류벽 외부로 직접 넘어갈 수 있기 때문에 이에 대한 보완책도 요구된다.

한편 2018년 1월, 화학물질관리법에 근거한 유해화학물질 취급시설 설치 및 관리 기준(이하 ‘취급시설 기준’)이 개정되면서, 방류벽과 관련한 사업장의 어려움이 더욱 커졌다. 사업장의 규모나 화학물질 취급량에 관계없이, 최소 1.5 m 이상의 이격거리, 시설 용량 110% 이상의 방류벽 용량, 0.5 m 이상의 방류벽 높이 등과 같은 엄격한 설치 기준이 일괄적으로 적용된 것이다. 또한 기존에 설치하여 운영되고 있는 방류벽의 개선도 의무화되어, 중소기업을 중심으로 많은 사업장들이 방류벽의 설치를 포함한 취급시설 기준의 이행에 큰 부담을 느끼고 있으며⁶⁾, 유해화학물질 취급시설 설치 기준이 사업장 규모나 화학물질 취급량을 고려하지 않고 획일적으로 적용되고 있다고 비판하고 있다⁷⁾.

환경부와 화학물질안전원은 사업장의 어려운 여건을 고려하여, 안전성 평가 제도를 신설했다. 사업장이 방류벽에 관한 별도의 안전성 확보방안을 제출하면, 이를 심사하여 안전성이 확보됐다고 평가될 경우 취급시설 기준을 준수한 것으로 인정하는 제도이다⁸⁾.

많은 사업장들은 방류벽과 탱크 사이의 이격거리 부족에 관한 대응책으로, 방류벽 위쪽에 일정한 높이의 누출 방지판을 설치하는 것을 유력하게 검토한다고 알려져 있다. 누출 방지판은 비교적 작은 비용으로 설치할 수 있고, 이격거리가 짧아 화학물질이 방류벽 위쪽으로 넘어가는 상황을 차단할 수 있을 것으로 기대하기 때문이다.

그런데 이러한 누출 방지판의 안전성을 과학적으로 평가하기 위해서는 누출 방지판의 높이, 내충격성 및 재질에 관한 구체적인 판단 기준이 필요하지만, 아직까지 관련 자료가 매우 부족한 실정이다. 먼저 누출 방지판이 너무 낮으면, 방류벽 위로 넘어가는 누출 액체를 차단하기 어렵다. 반대로 너무 높으면 방류벽 내부를 관찰하기 어렵고, 사고 시 신속한 대응을 방해한다. 따라서 액체 누출계적의 높이가 최대인 조건과 그때의 최고 높이를 계산할 수 있는 식을 도출하고, 이를 통해 누출 방지판의 적절한 높이를 평가하는 것이 중요하다.

한편 탱크에서 분출된 액체가 방지판에 충돌하면, 누출 방지판이 파손되거나 넘어질 우려가 있다. 따라

서 누출 액체에 의한 충격력을 계산하여, 누출 방지판에 필요한 내충격성을 결정하는 것이 필요하다. 아울러 누출 방지판이 누출된 액체 화학물질에 의해 쉽게 부식되거나, 부반응을 일으키는 것을 방지하기 위해서, 누출 방지판 제작에 사용될 수 있는 금속 소재와 다양한 액체 화학물질 사이의 반응성을 비교하는 것이 요구된다.

이러한 목적을 달성하기 위하여, 본 연구에서는 원통형 상압 수직 탱크에서 누출되는 액체계적의 최대높이와 최대수평도달 거리를 계산할 수 있는 식을 도출하였다. 본 연구에서 새롭게 제안한 누출 계적식은 누출구의 높이와 같은 구체적인 사고 시나리오를 특정하지 않아도, 다양한 탱크 크기와 액면 높이에 대해 계산이 가능하므로, 활용도가 우수하다. 또한 본 연구에서는 아크릴 탱크를 이용한 실험을 통해 누출계적식의 타당성을 검증하였다.

아울러 누출 속도식을 운동량 방정식에 대입하여, 누출구의 크기 등에 따른 충격력을 계산함으로써, 누출 방지판의 내충격성을 평가하는데 필요한 기준을 제시하고자 했다. 그리고 누출 방지판의 제작에 적용되기 쉬운 2 종류의 스테인리스강(SUS304 및 SUS316)과 4 종류의 부식성 액체 화학물질 사이의 반응성 실험을 통해, 재질 선정의 유의점을 도출했다.

2. 계산 및 실험 방법

2.1 누출 속도식

비압축성 액체에 관한 기계적 에너지 수지식 (1)을 이용하여, Fig. 1과 같은 원통형 수직 상압 탱크에서 누출되는 액체의 누출속도를 계산했다.

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z + F = W \quad (1)$$

식 (1)에서 P 는 압력, ρ 는 액체의 밀도, v 는 액체의 속도, g 는 중력가속도, z 는 지면으로부터 액체의 높이, F 는 마찰손실, W 는 축일이다. Fig. 1에서 아래첨자 1은 탱크 내부의 액면을, 아래첨자 2는 누출구를 의미한다.

탱크는 상압($P_1 = P_2$)에서 운전하며 축일이 없으므로, ΔP 와 W 는 모두 0이다. 액체의 누출속도($v = v_2$)에 비해 액면 강하속도(v_1)가 매우 느리기 때문에, $\Delta v^2 = v^2$ 라고 가정할 수 있다. 따라서 액체의 누출속도(v)는 $g\Delta z$ 와 F 에 의해 결정된다. 배출계수(discharge coefficient, c_d)를 이용하여, $g\Delta z + F$ 이 $c_d^2\Delta z$ 와 같다고 정의($g\Delta z + F = c_d^2\Delta z$)하면, 누출속도(v)는 아래 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

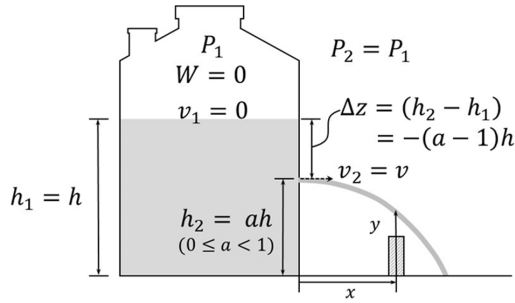


Fig. 1. Calculation scheme for the leakage liquid from the vertical cylindrical tank operating at ambient pressure.

$$v = c_d \sqrt{-2g\Delta z} \tag{2}$$

한편 식 (2)는 지면으로부터의 누출구 높이(h_2)와 액면 높이($h_1 = h$)의 차이($\Delta z = h_2 - h_1$)가 특정된 사고 시나리오를 가정해야 계산할 수 있다. 하지만 각각의 탱크마다 저장된 액면의 높이가 다르고, 누출구가 어떤 높이에서 형성될지 알 수 없기 때문에, 사고 시나리오에 의존하지 않는 일반적인 계산식이 필요하다.

본 연구에서는 액면 높이(h)에 대한 누출구 높이(h_2)의 비율($a = h_2/h$)을 도입하여, 액체의 누출속도(v)를 다음 식 (3)과 같이 표시했다.

$$v = c_d \sqrt{2gh(1-a)} \tag{3}$$

식 (3)을 이용하면, 누출구 높이를 특정하지 않고 $0 \leq a < 1$ 범위에서 a 의 값을 자유롭게 변경함으로써, 액면 높이에 대해 가능한 모든 누출구의 높이에서 누출속도를 계산할 수 있다.

2.2 누출궤적의 최고 높이 및 최대 수평거리

저장탱크에서 누출되는 액체의 궤적은 누출속도, 누출각도, 대기조건, 누출 중 탱크 내부의 압력 변화 등과 같이 다양한 요소에 의해 달라질 수 있다. 이 중에서 누출궤적에 가장 큰 영향을 미치는 것은 누출속도이다.

본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여, 액체가 지면에 수평한 방향으로 누출되며, 누출 중 탱크 내부의 압력 변화가 없고 누출속도가 일정하다고 가정했다. 또한 탱크에서 수평 방향으로 누출된 액체는 바람 등의 대기 영향을 받지 않고, 자유 낙하한다고 가정했다.

v 의 일정한 누출속도로 방출되는 액체 궤적에서, 탱크로부터의 수평거리 혹은 이격거리(x)는 식 (4)로 표시되며, 지면으로부터의 누출궤적 높이(y)는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$x = vt \tag{4}$$

$$y = ah - \frac{1}{2}gt^2 \tag{5}$$

식 (4)와 (5)를 결합하여 시간에 대한 변수(t)를 제거하면, 식 (6)과 같이 누출궤적 높이(y)를 액면 높이(h), 수평거리(x), 배출계수(c_d) 및 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$y = ah - \frac{x^2}{4c_d^2h(1-a)} \tag{6}$$

식 (6)에서 누출궤적 높이의 최댓값(y_{\max})은 y 의 극댓값과 같기 때문에, 이 점을 찾으면, y_{\max} 및 누출궤적의 높이가 최대가 되는 조건을 계산할 수 있다. 이를 위해, 액면 높이(h), 수평거리(x) 및 배출계수(c_d)가 일정하다고 가정하고, 식 (6)의 y 를 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a)에 대해 미분하여 식 (7)을 구했다.

$$\frac{dy}{da} = h - \frac{x^2}{4c_d^2h(1-a)^2} \tag{7}$$

식 (7)에 극대점 조건($dy/da = 0, 0 \leq a < 1$)을 대입하여, 누출궤적 높이가 최고일 때의 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a_{\max})을 식 (8)과 같이 구했다. 또한 식 (8)을 식 (6)에 대입하여, y_{\max} 를 식 (9)와 같이 계산했다. 식 (8) 및 (9)를 이용하면, 액면 높이(h), 수평거리(x) 및 배출계수(c_d)만으로도, 누출궤적의 최고 높이(y) 및 그 때의 누출구 높이($a_{\max}h$)를 쉽게 파악할 수 있다.

$$a_{\max} = 1 - \frac{x}{2c_dh} \tag{8}$$

$$y_{\max} = h - \frac{x}{c_d} \tag{9}$$

한편 식 (6)을 응용하여, 탱크에서 누출되는 액체의 최대 수평거리(x_{\max})도 계산할 수 있다. 최대 수평거리는 $y = 0$ 일 때 성립하므로, 이를 식(6)에 대입하면 지면에서의 수평거리(x)를 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$x = 2c_dh \sqrt{a(1-a)} \tag{10}$$

극대점 조건($dx/da = 0, 0 \leq a < 1$)을 이용해서 식(10)을 미분하면, 누출구 높이가 액면 높이의 절반($a = 1/2$)일

때, 누출된 액체가 수평방향으로 가장 멀리 이동한다는 것을 알 수 있다. 그리고 $a=1/2$ 을 식(10)에 대입하여, 최대 수평거리를 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$x_{\max} = c_d h \quad (11)$$

2.3 누출궤적의 검증 실험

본 연구에서 계산한 누출궤적의 타당성을 검증하기 위해, Fig. 2와 같은 아크릴 실린더 용기를 이용해서 누출실험을 수행했다. 높이 1 m 및 내경 0.14 m의 투명 아크릴 용기에 0.9 m 높이까지 물을 채웠다. 이때, 누출궤적을 쉽게 관찰하기 위해 보라색 물감을 녹인 물을 사용했다. 지면으로부터 0.5 m ~ 0.8 m 높이에 형성한 구멍(직경 약 5 cm)을 개방하여, 각각의 구멍에서 누출되는 물의 궤적을 측정하고, 이를 누출궤적식의 계산값과 비교했다.

2.4 누출 액체의 충격력

방류벽은 누출된 화학물질을 가두는 역할을 하기 때문에, 탱크에 저장된 전체 화학물질의 액압을 견딜 수 있어야 한다. 반면 누출 방지판은 탱크 크랙 등에서 분출되는 화학물질이 방류벽 외부로 넘어가지 않도록 차단하는 대안시설이기 때문에, 누출된 액체가 충돌할 때 발생하는 충격력을 견딜 수 있어야 한다.

탱크에서 분출되는 액체 화학물질이 누출 방지판에 가할 수 있는 충격력을 계산하기 위하여 다음 식 (12)와 같은 운동량 방정식을 사용했다.

$$F = \rho A v^2 \sin \theta \quad (12)$$

식 (12)에서 F 는 누출 액체에 의한 충격력, ρ 는 액

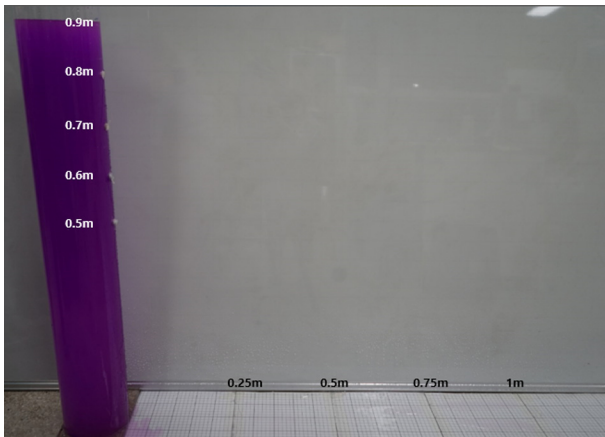


Fig. 2. Experimental set-up for the water leakage from vertical cylinder.

체의 밀도, A 는 누출구의 단면적, v 는 식 (3)과 같은 액체의 누출속도를 의미한다. 그리고 θ 는 누출 방지판에 대한 누출 액체의 경사각을 의미하는데, 식 (6)의 누출궤적식을 통해 계산할 수 있다.

식 (13)과 Fig. 3을 참조하면, 식 (6)의 누출궤적식에서 y 를 x 에 대해 미분한 dy/dx 는 지면에 대한 누출 액체의 기울기(θ')의 탄젠트값과 같으며, $\theta' = \theta + \pi/2$ 이다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-x}{2c_d^2 h(1-a)} = \tan(\theta') = \tan\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

따라서 θ 를 식 (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-x}{2c_d^2 h(1-a)}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

그리고 식 (14)와 식 (6)을 식 (12)에 대입하여, 충격력에 대한 식 (15)를 도출했다.

$$F = -2g\rho Ahc_d^2(1-a) \times \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{-x}{2c_d^2 h(1-a)}\right)\right) \quad (15)$$

2.5 스테인리스강의 내부식성 실험

녹이나 부식에 강한 스테인리스강은 화학물질을 다루는 설비를 제작하는데 많이 사용된다. 오스테나이트계 스테인리스강은 우수한 내식성, 가공성, 기계적 특성으로 인해 플랜트, 항공우주재료, 자동차, 건설 및 전자 장비와 같은 다양한 산업분야에 널리 적용되고 있다⁹⁾. 특히, SUS304와 SUS316은 대표적인 스테인리스강으로, 비교적 값이 저렴하고 내화학성이 우수하여 탱크나 배관 등에 많이 사용되므로, 누출 방지판의 소재로 적용될 가능성이 높다.

본 연구에서는 SUS304 및 SUS316 시편과 4종류의 부식성 액체화합물 사이의 반응성을 실험하였다. 부식성 액체 화학물질로는 사업장에서 사용량이 많고 누출 사고가 빈번하게 발생하는 35 wt% 염산(Hydrochloric acid), 70 wt% 질산(Nitric acid), 98 wt% 황산(Sulfuric acid) 및 35 wt% 과산화수소(Hydrogen peroxide)를 선정하였다.

구체적으로, SUS304 또는 SUS316으로 이루어진 원기둥 형태의 시편(높이 1 cm, 직경 1 cm)을 준비했다. 시편 표면에 존재하는 유분이나 기타 불순물을 세척하여 제거했다. 이후 시편 높이의 약 절반이 부식성 액체 화학물질에 잠기도록 침지하고, 1시간 간격으로 시편과 화학물질 사이의 반응성을 육안 관찰하였다.

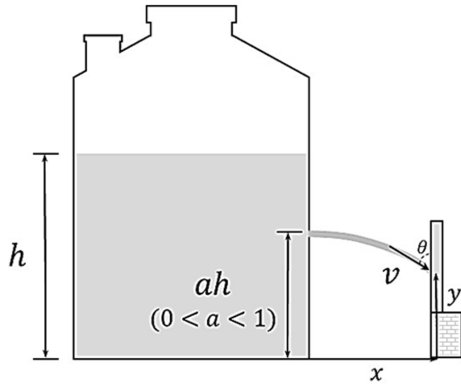


Fig. 3. Calculation scheme for the impact forces of leakage liquid from the vertical cylindrical tank.

3. 결과 및 검토

본 연구에 따른 식 (3)을 이용하면, 원통형 수직 상압 탱크의 액체 누출속도(v)가 배출계수(c_d) 및 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a)에 의해 어떻게 달라지는지 쉽게 계산할 수 있다. 누출속도를 계산한 Table 1을 참조하면, 누출구 높이와 액면 높이의 차이가 커서 a 가 작을수록, 배출계수가 1에 가까울수록, 누출속도(v)가 증가하는 것을 알 수 있다.

아울러 본 연구에 따른 식 (6)을 이용하면, 원통형 수직 상압 탱크에서 방출되는 액체 누출궤적의 수평거리(x)와 누출궤적의 높이(y)를 다양한 액면 높이(h),

Table 1. Leakage velocities according to different liquid level heights, ratios of hole height to liquid level height and discharge coefficients

Discharge Coefficient (c_d)	Ratio of hole height to liquid level height (a)	Leakage velocity (m/s)					
		Liquid level height (h (m))					
		3	5	7	9	11	13
1	0.9	2.42	3.13	3.70	4.20	4.64	5.05
	0.7	4.20	5.42	6.42	7.27	8.04	8.74
	0.5	5.42	7.00	8.28	9.39	10.38	11.29
	0.3	6.42	8.28	9.80	11.11	12.28	13.36
	0.1	7.27	9.39	11.11	12.60	13.93	15.14
0.81	0.9	1.96	2.54	3.00	3.40	3.76	4.09
	0.7	3.40	4.39	5.20	5.89	6.51	7.08
	0.5	4.39	5.67	6.71	7.61	8.41	9.14
	0.3	5.20	6.71	7.94	9.00	9.95	10.82
	0.1	5.89	7.61	9.00	10.21	11.28	12.27
0.61	0.9	1.48	1.91	2.26	2.56	2.83	3.08
	0.7	2.56	3.31	3.91	4.44	4.91	5.33
	0.5	3.31	4.27	5.05	5.73	6.33	6.89
	0.3	3.91	5.05	5.98	6.78	7.49	8.15
	0.1	4.44	5.73	6.78	7.69	8.50	9.24

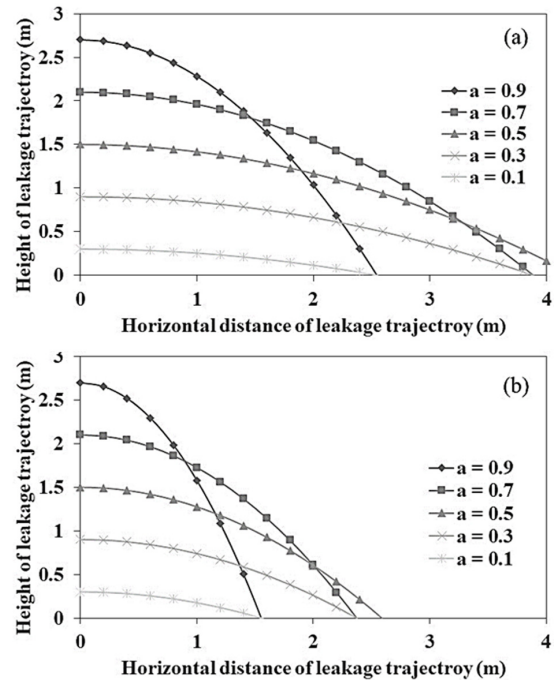


Fig. 4. Trajectories of leakage liquid from the tank with 3 m of liquid level height : (a) $c_d = 1$ and (b) $c_d = 0.61$.

배출계수(c_d) 및 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a)에 대해 계산할 수 있다. 예를 들어, 액면 높이(h)가 3 m일 때, 배출계수(c_d)와 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a)가 달라지면 누출궤적이 어떻게 변하는지 계산한 결과를 Fig. 4에 표시했다.

Fig. 4을 살펴보면, 배출계수(c_d)가 클수록 수평거리(x)가 길다는 것을 알 수 있다. 반면, 누출구의 높이가 커지면, 누출궤적의 수평거리(x)가 증가하였다가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 수평거리(x)가 최대한 특정한 누출구의 높이가 존재한다. 이러한 최대 수평거리(x_{max})는 액면 높이와 배출계수를 곱한 값($c_d h$)과 같으며, 누출구 높이가 액면 높이의 절반($a=0.5$)일 때 얻어진다.

이와 같은, 누출궤적의 최대 수평거리(x_{max})는 원통형 수직 상압 탱크와 방류벽 사이의 이격거리를 설계하거나 안전성 평가의 지표로 활용할 수 있다. 예를 들어, 탱크와 방류벽의 이격거리보다 액면높이가 작도록 관리한다면, 누출 액체가 방류벽 외부로 넘어가기 어렵다는 것을 알 수 있다.

한편, 누출궤적의 최고 높이(y_{max})는 방류벽의 적정 높이와 밀접한 관련이 있지만, 식 (6) 및 Fig. 4의 누출궤적 그래프만으로는 정확하게 파악하기 어렵다. 이를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 누출궤적 높이의 최대값을 찾을 수 있는 식 (8) 및 (9)를 유도하였다. 식

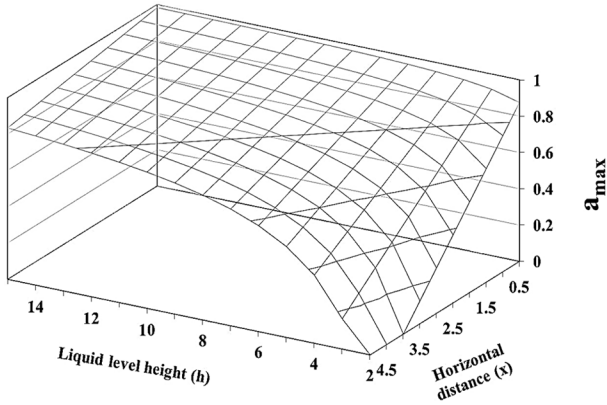


Fig. 5. Maximum ratio of the hole height to liquid level height for the highest leakage trajectory.

(8)을 이용하면, 누출궤적의 높이가 최대일 때의 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율(a_{max})을 구할 수 있으며, 이를 계산한 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

아울러 식 (9)를 참조하면, 원통형 수직 상압 탱크에서 방출되는 액체 누출궤적의 최대 높이(y_{max})가 탱크로부터의 수평거리(x)에 대한 1차 함수인 것을 알 수 있다. 이 1차 함수의 기울기는 $-1/c_d$ 이며, y 절편은 액면 높이(h)이다. Fig. 6은 1~0.61의 배출계수(c_d) 및 3~13 m의 액면높이(y)에서, 누출궤적의 최대 높이(y_{max})와 수평거리(x)의 관계를 계산한 결과이다.

Fig. 6과 식 (9)를 이용하면, 원통형 수직 상압 탱크의 주변에 설치된 방류벽이 누출 액체를 충분히 차단할 수 있는 높이를 갖추었는지 판단할 수 있다. 예를 들어, 액면 높이가 3 m로 운전되는 상압 수직 탱크에서 1 m 이격된 거리에 1 m 높이의 방류벽이 설치되었다고 가정한다. 이런 상황에서 탱크에 배출계수 1인 구멍이 생겨 누출 사고가 발생하면, 방류벽 위치에서 누출궤적의 최대 높이는 2.0 m이다. 따라서 기존 방류벽의 높이는 누출궤적을 차단하는데 부족하며, 1 m 높이의 누출방지판을 설치하는 것을 검토할 수 있다. 한편, Fig 6(a)와 (b)를 비교해보면, 수평거리가 1 m 이내인 경우, 배출계수가 작아지더라도 누출궤적의 최대높이가 별로 감소하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 누출속도가 빠른 상황($c_d = 1, a = 0.1$)에서, 액면높이가 누출궤적에 미치는 영향을 계산한 결과이다. 누출속도가 빠르면, 탱크로부터 1~2 m의 거리 안에서 유체의 누출 궤적은 지면에 거의 수평한 것을 알 수 있다. 또한, 액면 높이가 5 m를 넘으면, 탱크로부터 2 m이내에 0.5 m 높이의 방류벽이 있더라도, 누출된 액체가 방류벽을 쉽게 넘어갈 수 있다는 것을 알 수 있다.

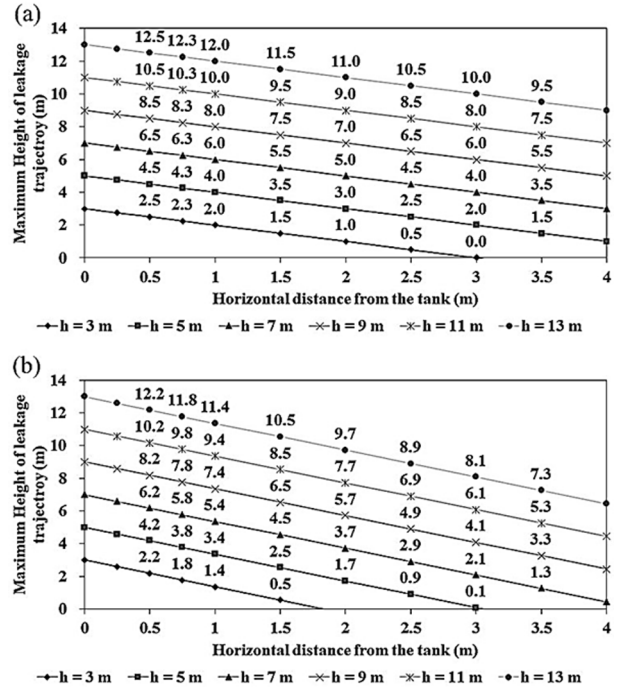


Fig. 6. Relation between the maximum heights and horizontal distance of the leakage trajectories for different liquid level heights : (a) $c_d = 1$ and (b) $c_d = 0.61$.

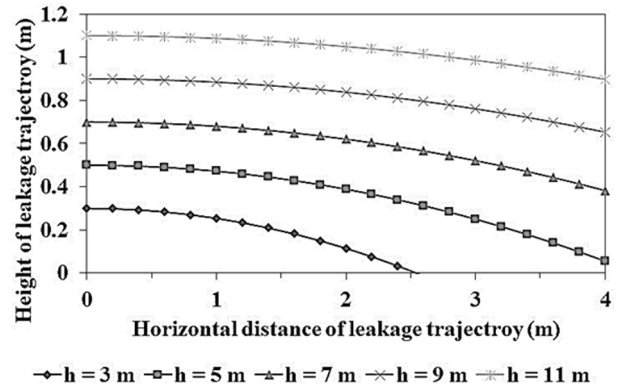


Fig. 7. Trajectories of leakage liquid from the tank with $c_d = 1$ and $a = 0.1$.

본 연구에서 도출한 누출 궤적식에 대한 검증 실험 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 구체적으로 Fig 8(a)와 (b)는 액면 높이(0.9 m)에 대한 누출구 높이의 비율이 각각 0.89(누출구 높이 = 0.8 m) 및 0.56(누출구 높이 = 0.5 m)인 누출 궤적의 초기 모습을 촬영한 사진이다. 또한 누출궤적 수평거리의 측정값과 본 연구에 따른 계산값을 비교한 결과를 Table 2에 나타냈다.

0.8 ~ 0.5 m의 모든 누출구 높이에서, 누출 궤적의 측정값은 배출계수(c_d)가 0.91인 계산값과 가장 근사한 것으로 나타났다. 특히, 계산값과 측정값의 차이는 누출

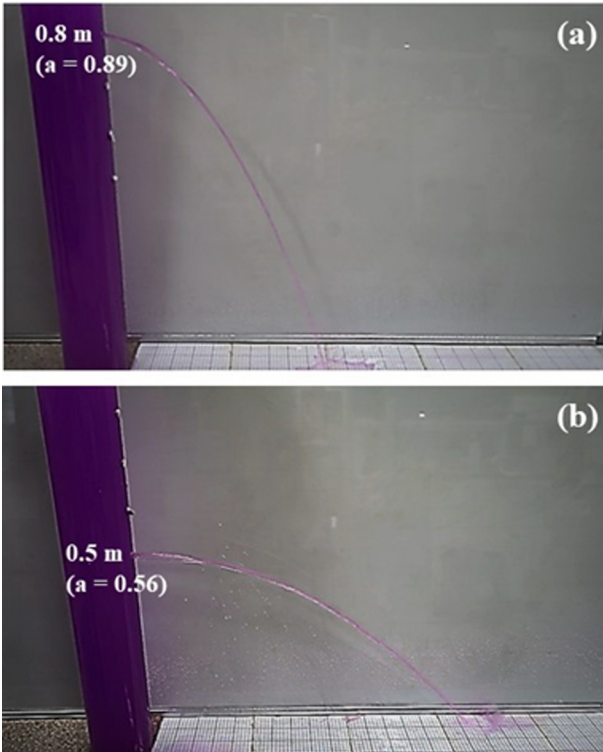


Fig. 8. Photos of the leakage experiments for different ratio(*a*) of the hole height to liquid level height : (a) *a* = 0.89 and (b) *a* = 0.56.

Table 2. Comparison of measured and calculated horizontal distances of leakage trajectories

Liquid level height (m)	Hole height (m)	Horizontal distance of leakage trajectory (m)				
		Measured value (m)	Calculated value (m)			
			$C_d = 1$	$C_d = 0.91$	$C_d = 0.81$	$C_d = 0.61$
0.9	0.8	0.51	0.57	0.51	0.46	0.35
	0.7	0.68	0.75	0.68	0.61	0.46
	0.6	0.79	0.85	0.77	0.69	0.52
	0.5	0.82	0.89	0.81	0.72	0.55

구의 높이에 관계없이 2% 이내로 나타나, 본 연구의 누출속도 및 누출궤적식이 올바른 것을 확인할 수 있다. 한편, 본 실험에서는 드릴을 이용하여 둥글고 매끄러운 누출구를 만들었기 때문에, 누출구에서의 마찰손실이 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 누출구의 형상, 탱크 재질 등에 따라 누출구의 배출계수가 달라질 수 있다. 상압 탱크의 크랙 등에서 누출된 액체가 방류벽이나 누출 방지판과 부딪힐 때 발생하는 충격력은 식 (15)를 통해 계산할 수 있다. 하지만 누출궤적의 최대 높이 및 최대 수평거리와 달리, 식 (15) 계산에 필요한 변수가 많기 때문에 최대 충격력을 직접 도출하는 것이 쉽지 않다.

Table 3. Properties of chemicals with high risk for leakage accident

	35 wt% Hydrochloric acid	70 wt% Nitric acid	98 wt% Sulfuric acid	35 wt% Hydrogen peroxide
Molecular weight (g/mol)	36.4	63.01	98.08	34.01
Density (kg/m ³)	1178	1410	1800	1140
Boiling point (°C)	65.6	122	327	108

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하면서, 다양한 상황에 적용될 수 있는 Data를 제공할 수 있는 방법을 모색하였다. 먼저 취급량이 많고, 부식성이 강하며, 인체에 유해한 영향을 끼칠 수 있는 물질들을 선정했다. 대표적인 예로 염산, 질산, 황산 및 과산화수소를 들 수 있다. 이 화학물질들은 수백개의 사업장에서 수십만 kg씩 배출되기 때문에 누출 사고의 위험이 높다¹⁰.

한편 이 화학물질들의 밀도는 농도에 따라 다르지만, Table 3에 표시한 것처럼 1000 ~ 1800 kg/m³ 사이의 범위의 밀도를 갖기 때문에 해당 범위 전체에 대한 충격력을 계산했다. 또한 Table 1 및 Fig. 7의 결과를 참고하여, 누출 액체가 방류벽이나 누출 방지판에 거의 수직하게 충돌하여 가장 강한 충격력을 만들 수 있는 조건($C_d = 1$, $a = 1$, $x = 0.5$ m)에 대해 충격력을 계산하고, 그 결과를 Table 4에 나타냈다.

Table 4를 참고하면, 1,000 ~ 1,800 kg/m³의 밀도를 갖는 액체가 누출되면, 방류벽 또는 누출 방지판에 약 50 N ~ 2,000 N의 충격력이 가해질 수 있는 것으로 나타났다. 또한 누출 액체에 의한 충격력은 누출구의 크기, 액면 높이 및 유체의 밀도에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 밀도가 크고 액면이 높은 경우에는 누출 방지판의 내충격성을 보수적으로 설계하는 것이 중요하다. 또한 누출구가 탱크 아래쪽에 형성될수록 충격력이 크기 때문에, 누출 방지판의 상단보다 하단이 우수한 내충격성을 갖도록 제작하는 것이 필요하다.

누출 방지판 제작에 적용될 수 있는 스테인리스강과 부식성 액체 화학물질의 반응성 실험에서, 70 wt% 질산과 98 wt% 황산에 침지한 SUS304 및 SUS316 시편은 눈에 띄는 변화를 나타내지 않았다. 질산 및 황산에 대한 SUS304와 SUS316 소재의 부식 속도가 0.5 mm/year 이하로 낮기 때문에, 별다른 반응성을 보이지 않은 것으로 판단된다.

하지만 염산 및 과산화수소에 대해서는 흥미로운 반응성을 나타냈다. Fig. 9(A)와 (B)는 각각 SUS304 및

Table 4. Impact forces of leaked liquid according to different areas of leakage hole, liquid level heights, and densities

Area of leakage hole (m ²)	Liquid level height (m)	Impact force (N)				
		Density of liquid (kg/m ³)				
		1000	1200	1400	1600	1800
0.001	3	53	63	74	84	95
	5	88	106	123	141	159
	7	123	148	173	197	222
	9	159	190	222	254	286
	11	194	233	272	310	349
	13	229	275	321	367	413
0.003	3	158	190	221	253	285
	5	264	317	370	423	476
	7	370	444	518	592	666
	9	476	571	666	762	857
	11	582	698	815	931	1047
	13	688	825	963	1100	1238
0.005	3	263	316	369	422	474
	5	440	528	616	705	793
	7	617	740	864	987	1110
	9	793	952	1111	1269	1428
	11	970	1164	1358	1552	1746
	13	1146	1376	1605	1834	2063

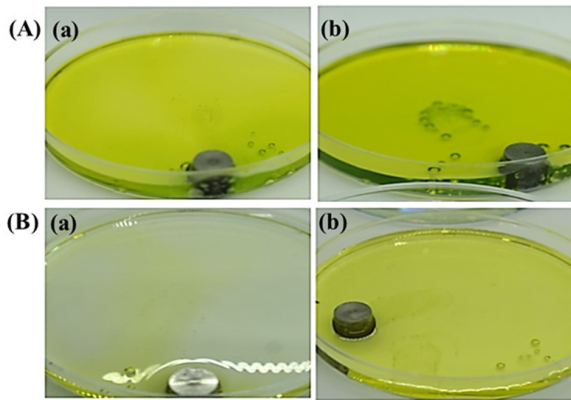


Fig. 9. Photos of (A) SUS304 and (B) SUS316 in 35 wt% HCl solution after the immersion of (a) 1 hour and (b) 5 hour.

SUS316 시편을 염산에 침지한 뒤, 1시간 및 5시간 후에 관찰한 결과이다. 시편을 35 wt% 염산에 침지하면, 미량의 기포가 발생하면서, 용액이 황색으로 변하였다. SUS304 및 SUS316에서 동일한 변화가 관찰되었으며, SUS304에서 반응속도가 더 빠른 것으로 나타났다. 염산 수용액에서 관찰되는 황색은 염산의 염소이온으로 인해, 스테인리스강 표면에 있는 크롬 산화막이 국부적으로 파괴되고, 시편의 니켈이온과 염소이온이 결합하여 염화니켈($Ni + 2HCl \rightarrow H_2 + NiCl_2$)이 형성되어 용해되기 때문인 것으로 추정된다.

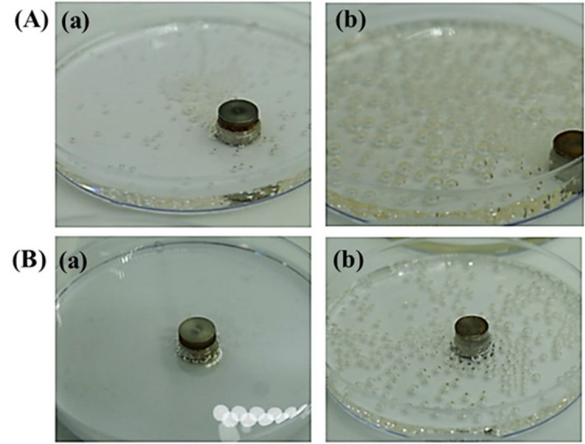


Fig. 10. Photos of (A) SUS304 and (B) SUS316 in 35 wt% H2O2 solution after the immersion of (a) 1 hour and (b) 5 hour.

Fig. 10을 참조하면, 35 wt% 과산화수소(H2O2) 수용액에 시편을 침지하면, 많은 기포가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. SUS304와 SUS316 모두에서 기포가 관찰되었으며, 시간이 지날수록 기포의 양이 증가하였고, 그 속도는 SUS304 시편에서 더 빠르게 나타났다.

SUS304 및 SUS316 시편이 과산화수소의 분해 반응($2H_2O_2(l) \rightarrow O_2(g) + 2H_2O(l)$)을 촉진하여, 다량의 산소 기체가 방출되기 때문에 기포가 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 원통형 상압 액체저장 탱크에서 누출 사고가 발생했을 때, 누출되는 액체궤적의 최대 높이 및 최대 수평거리를 손쉽게 계산할 수 있는 식을 제안하고, 실제 누출 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 이 계산식은 액면 높이에 대한 누출구 높이의 비율을 변수로 사용했기 때문에, 구체적인 누출 시나리오를 가정하지 않아도 다양한 상황에 대한 계산이 용이하다.

본 연구의 누출궤적식에 의하면, 누출구 높이가 액면 높이의 절반일 때, 누출된 액체가 수평방향으로 가장 멀리 도달할 수 있다. 또한 누출궤적의 최대높이는 탱크로부터의 수평 이동거리에 반비례하는 1차 함수 형태이며, 기울기는 -1/배출계수(c_d), y 절편은 액면 높이이다.

본 연구에서 도출한 누출궤적의 최대 높이 및 최대 수평거리를 이용하면, 탱크와 방류벽 사이의 적정 이격거리 및 방류벽의 필요 높이를 판단할 수 있다. 특히 탱크와 방류벽의 이격거리 부족에 대한 대안의 수단으로 적용되는 누출 방지판의 적정 높이를 판단할 때, 누출궤적의 최대높이를 이용할 수 있다.

아울러 본 연구는 탱크에서 누출된 액체가 방류벽 또는 누출 방지판에 가할 수 있는 충격력을 계산하였다. 누출 액체의 충격력은 누출구 크기, 액체 밀도 및 액면 높이에 비례하며, 최대 약 50 ~ 2000 N까지 커질 수 있기 때문에, 누출 방지판은 내충격성이 우수한 구조로 설치하는 것이 매우 중요하다.

또한 화학 관련 현장에서 많이 사용되어 누출 방지판의 제작에 사용하기 쉬운 SUS304와 SUS316의 스테인리스강은 염산 및 과산화수소와 반응할 수 있다는 것을 실험하였다. 따라서 염산 및 과산화수소저장 탱크의 누출 방지판은 소재를 신중하게 선택하여 제작하는 것이 필요하다.

이와 같이 본 연구의 결과는 액체 저장 탱크의 방류벽 및 누출 방지판의 안전성 및 적절성을 판단하는 공학적 기준과 자료로써 널리 활용될 수 있을 것이다. 하지만, 실제 산업계에서는 다양한 형태의 탱크가 운영되고 있기 때문에 수직형 탱크 외에도 원형, 구형 등 보다 다양한 탱크에 적용할 수 있는 공학적 기준이 마련되도록 추가적인 연구가 필요하다.

References

- 1) U. S. Committee on Energy and Commerce, "Safe Aboveground Storage Tanks", Washington DC, U.S. Government Printing Office, 1994.
- 2) Michigan Department of Environmental Quality, "Guide to Understanding Secondary Containment Requirements in Michigan", 1994.
- 3) Y. M. Kawg, J. M. Oak, S. Y. Yoon and S. H. Jung, "A Study on the Safety Distance of Benzene and Acrylonitrile Releases in Sccondance with Dike and Hole Size", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 22, No. 1, pp. 18-25, 2018.
- 4) 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.
- 5) C. H. Shin, J. H. Park and J. H. 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.
- 6) "Burden of Laws Related to Chemical Substances in SMEs, Institutional Improvement Needed", Dongyangnews, 2015.08, <http://www.dynews.co.kr/news/articleView.html?idxno=272490>
- 7) "SMEs, Make a Realistic Improvement on Chemical Laws", Yonhapnews, 2017.06, <http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2017/06/20/0200000000AKR20170620084800030.HTML>
- 8) "Implementation of a Safety Assessment of Hazardous Chemical Facilities Based on Field Conditions", Policy Briefing, 2018.01, <http://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156246480>
- 9) M. H. Park, K. Y. Kim, J. H. Jang, H. C. Kim, H. S. Moon, J. B. Jeon, D. G. Nam, K. Y. Sohn and B. J. Kim, "Influence of Heat Treatment on Mechanical Properties for Cold Worked 304 Austenitic Stainless Steel", Korean Journal of Metals and Materials, Vol. 56, No. 7, pp. 490-498, 2018.
- 10) Ministry of Environment, The Result of Chemical Release, 2015, <http://icis.me.go.kr/prtr/main.do>.