

누출 사고 완화를 위한 임시 저장 시설에 관한 연구

송현오* · 이창준**†

A Study on the Temporary Storage Facility for Mitigating the Leakage Accident

Hyeon Oh Song* · Chang Jun Lee**†

†Corresponding Author

Chang Jun Lee

Tel : +82-51-629-6465

E-mail : changjunlee@pknu.ac.kr

Received : April 2, 2020

Revised : May 14, 2020

Accepted : June 11, 2020

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : The leakage accident from a storage tank in an oil refinery plant occurred in April 2014 and the total loss is KRW 18 billion. This accident has prompted many companies to develop their own mitigation system to minimize the loss of the leakage accident. The aim of this study is to design the temporary storage facility system for dealing with leakage accidents. The basic concept of this system is that the leakage fluid of a hazardous material flows into a temporary storage tank and this is transferred to a spare tank by a pump as avoiding the overflow of a temporary storage tank. In order to design this system, the leakage velocity and quantity according to time series should be evaluated. In addition, a proper pump capacity should be determined to avoid repeating the pump switching on and off frequently. In this study, the benzene tank is selected to verify the efficacy of this system. This study can play a critical role to provide a guideline for designing a new system.

Key Words : leakage accidents, a temporary storage facility, a leakage velocity, a leakage quantity

1. 서론

2014년 울산 석유화학단지 내 해안에 인접한 S사의 원유를 저장하는 옥외 탱크 저장소에서 믹서기 축 파손으로 누출 사고가 발생했다. 발생 당시 시설의 최대 수용량은 750,000 bbl (119,175 kl)이며, 사고 당시 실제 570,000 bbl(90,573 kl)이 누출되었다. 사고 발생 후 탱크 내 잔류 원유를 다른 탱크로 이송조치 하였고 방유제 내 누출된 원유 중 64,000 bbl (10,619.6 kl)는 진공 펌프를 이용하여 재처리 탱크로 이송하였고, 진공차 17대를 동원하여 나머지를 처리하였다¹⁾. 이 누출사고로 인해 시설물 복구, 환경복원 및 방제 등에 총 180억 원의 손실 비용이 발생하였다. 이러한 화학물질 누출 사고는 취급량의 증가와 취급시설의 대형화로 인하여 발생 가능성 및 기대 손실 비용이 점점 증가하고 있다²⁾.

위에서 언급한 원유 대량 누출 사고 이후 화학물질 누출 사고의 피해를 최소화하기 위해 여러 가지 관리 방안 및 안전설비에 대해 논의가 이루어지고 있으며, 2015년에는 위험물 안전관리법이 개정되었다³⁾. 개정된 내용 중 누출 사고 발생 시 해양 및 수계에 피해를 최소화하고 단시간에 누출된 위험물 회수를 위한 누출위험물 임시 저장 시설을 설치하도록 규정하고 있다⁴⁾.

액상의 누출된 위험물이 방유제 안에 가둬지게 되면 경사로를 따라 대기에 노출되지 않은 임시 저장 시설에 모이게 되며, 펌프를 이용해 예비 탱크로 이송하게 된다. 이를 통해 위험물이 해안 또는 강변에 누출되는 것을 방지할 수 있으며, 방유제의 벽이 파손되어 본연 기능을 상실해도 최후의 안전장치로서 역할을 할 수 있다.

하지만, 현실적으로 공장 내 부지가 충분하지 않은 경우, 임시 저장 시설을 저장 탱크의 부피보다 크게 설

*부경대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

**부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

치할 수 없는 제약조건이 발생할 수 있다. 따라서, 누출된 위험물이 임시 저장 설비로 흘러들어오는 동시에 펌프로 이 위험물을 예비 탱크로 이송해야 하며, 이때 임시 저장 시설에서 위험물이 흘러넘치지 않도록 해야 한다.

기존 연구를 살펴보면, 위험물의 누출과 관련된 대부분의 연구는 사고 발생 후 사고 영향 평가 수행이 대부분이다⁵⁾. 본 연구에서 논의할 사고 완화를 위한 시스템에 관한 연구는 찾기 어려운 실정이다. Lee 등은 불산 탱크에 예비 파이프라인을 설치하여 불산 저장탱크에서 불산이 누출되는 경우 바로 예비 탱크로 탱크 안에 남아 있어 있는 불산을 펌프로 이송하는 시스템에 대해 논의하였으며, 최소 80% 이상 불산의 외부 누출을 막는 것으로 확인하였다⁶⁾.

본 연구에서는 석유화학 공정에서 용매와 원료 등으로 사용되는 벤젠을 저장·보관하고 있는 옥외 탱크에서 누출 사고가 발생하는 경우 누출물을 안전하게 예비 탱크로 이송하기 전 단계의 임시 저장 설비를 설계, 분석하였다. 벤젠이 저장되어있는 수직형 원통 저장 탱크에 누출이 발생하는 경우, 누출구의 직경, 위치, 그리고 위험물의 액위를 이용해 누출속도와 누출 유량을 계산할 수 있다. 방유제 바닥 및 경사로를 따라 누출된 벤젠은 임시 저장 설비에 모이게 된다. 임시 저장 설비 부피는 옥외 탱크의 부피보다 작다고 가정하였으며, 임시 저장 설비에 모인 벤젠은 펌프를 통해 신속하게 예비 탱크로 이송되어야 한다. 시뮬레이션을 통해 임시 저장 설비를 넘치지 않도록 하는 가장 최적의 펌프 용량을 선정하고자 한다.

2장에서는 위험물이 저장되어있는 저장 탱크에서 누출이 발생하는 경우 누출구의 직경, 높이에 따라 누출속도를 계산하여, 시간에 따라 흘러나오는 누출량

계산에 대해 소개하고, 3장에서는 임시 저장 설비 모델링에 대해 설명하고자 한다. 4장에서 사례 연구를 통해 최적의 임시 저장 설비를 설계하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

2. 누출속도 모델링

저장 탱크에서 crack이 발생하여 위험물 누출되는 경우 위험물은 경사로를 따라 임시 저장 설비로 모이게 된다. 이러한 경우에 임시 저장 설비로 들어오는 위험물의 유량은 저장 탱크에서 흘러나오는 위험물의 누출속도와 어느 정도 time lag가 존재하지만, 같다고 할 수 있다. 저장 탱크에서 흘러나오는 위험물의 누출속도는 crack의 크기와 위치, 저장 탱크 내의 위험물의 액위에 의해 결정된다. 누출속도 계산을 위해 미리 파악해야 하는 변수들은 다음과 같다⁷⁾.

- 1) 누출구의 직경
- 2) 누출구의 위치
- 3) 위험물의 물리적 특성 및 저장 탱크 운전 조건

본 연구에서 저장 탱크 내 물질은 액상, 비압축성 유체, 비점성 유체라고 가정하였으며, 누출속도는 수두압에 의해 결정된다고 가정하였다. 이러한 조건에서는 Torricelli 법칙의 적용이 가능하다⁷⁾. Torricelli의 법칙은 수두압과 압력차에 의해 누출되는 유체의 속도를 계산하는 법칙으로 에너지 보존 법칙을 이용한 식이다⁷⁾. 식 (1)은 에너지 보존 법칙을 보여주는 식이며, v 는 유체 속도, g 는 중력가속도, h 는 수위, P 는 압력, ρ 는 유체 밀도이다. 첨자 1과 첨자 2는 각각 저장 탱크 내 위험물의 액위 상단과 누출구를 의미한다.

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{P_2}{\rho} \quad (1)$$

본 연구에서 액위 상단의 유체 속도는 시간당 액위 변화라고 가정하였다. 위험물의 액위가 줄어드는 경우 P_1 은 증가하는 저장 탱크 상단 위 빈 공간의 부피에 의해 결정된다. 본 연구에서는 부피와 압력의 관계는 Van der Waals 식을 따른다고 가정하였다. 식 (3)에서 n , V , T 는 불활성 가스의 mole 수, 부피, 온도를 의미하며, a 와 b 는 기체 분자 간의 척력 및 인력과 기체 분자 자체의 부피를 나타내는 Van der Waals 상수이다.

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

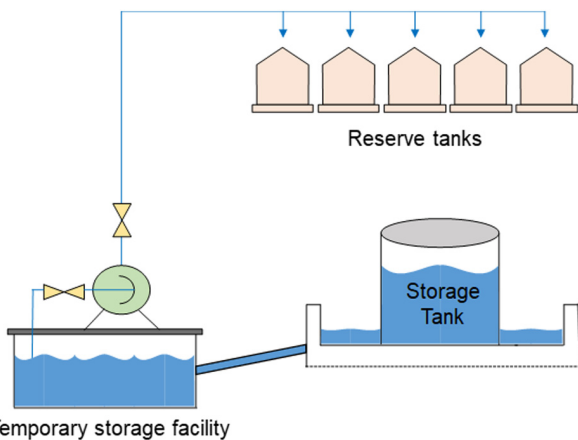


Fig. 1. A temporary storage facility for mitigating leakage accident.

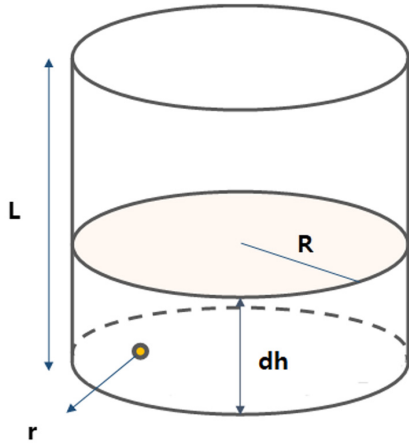


Fig. 2. Vertical cylindrical vessel in which a yellow circle indicates a leakage hole with radius r ⁷⁾.

식 (1)과 식 (2)를 결합하면 다음의 식을 유도할 수 있다. 여기서 v_2 는 누출구에서 유체의 속도를 의미한다.

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + \left(\frac{dh_1}{dt}\right)^2} \quad (3)$$

본 연구에서 벤젠을 저장·보관하고 있는 옥외 탱크는 수직형 실린더 탱크이며, Fig. 2와 같다. 누출구의 반지름이 r 이며 옥외 탱크의 반지름이 R 인 경우, 액위의 단면적은 $A = \pi R^2$ 이며, 누출량은 다음의 식으로 나타낼 수 있다⁷⁾.

$$A \frac{dh_1}{dt} = \pi R^2 \frac{dh_1}{dt} = \pi r^2 v_2 \quad (4)$$

즉, 액위 상단에서 액위가 감소하는 만큼 누출량이 된다고 할 수 있다. 식 (3)과 (4)를 결합하면 다음의 식을 유도할 수 있다⁷⁾.

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

식 (5)는 Matlab의 ODE solver를 이용하여 풀 수 있으며, dh_1/dt 를 구한다면, 저장 탱크의 누출량인 $\pi r^2 v_2$ 를 구할 수 있다⁷⁾.

3. 임시 저장 설비 모델링

공장 내 부지의 제약으로 인하여, 임시 저장 설비는 지하에 직육면체 형태로 설치한다고 가정하였다. 미국 Environmental Protection Agency에서 규정한 Spill

Prevention Control and Countermeasure Plan을 살펴보면 임시 저장 설비의 부피는 비가 오는 것을 고려하여 탱크 부피보다 크게 설치하도록 규정되어 있다^{8,9)}. 펌프를 설치하여 일정 액위 이상으로 임시 저장 설비에 위험물이 쌓이게 되면 펌프를 이용하여 예비 탱크로 이송하게 된다. 임시 저장 설비 내에 위험물의 액위가 H 이며, 임시 저장 탱크의 단면적이 S , K 가 펌프의 용량인 경우에 임시 저장 설비를 표현하는 식은 다음과 같다.

$$S \frac{dH}{dt} = \pi r^2 v_2 - Ku(H - 0.5) \quad (6)$$

식 (6)의 오른쪽 식에서 첫 번째 항은 유체가 탱크로 유입되는 양을, 마지막 항은 유체가 펌프에 의해 외부로 이송되는 양을 나타내며, 이 두 항의 차에 의해 임시 저장 설비에 높이의 변화가 생기게 된다. 여기서 u 는 unit step function을 의미하며, $(H - 0.3)$ 이 0 m 보다 큰 값을 갖는 경우는 1, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 이는 펌프가 임시 저장 설비 내 액위가 0.3 m 이상인 경우에만 작동하는 것을 의미하며, 이는 펌프 설비의 보호를 위한 가정이다. 임시 저장 설비 설계 시 가장 중요한 점은 펌프가 지속적으로 가동해야 한다는 점이다. 즉, 펌프의 용량을 크게 설정하는 경우 펌프가 on/off를 반복하게 되며, 이는 펌프의 고장을 유발할 수 있다. 또한, 운전 중에 임시 저장 설비의 액위는 최대 허용치를 넘지 말아야 한다. 즉 적절한 액위를 유지하면서 동시에 위험물이 외부로 누출되지 않게 적절한 제어가 필요함을 의미하며, 옥외 저장 탱크의 누출 시나리오를 고려하여 가장 최적의 펌프 용량을 탐색해야 한다.

4. 연구 결과

벤젠 저장 탱크에 설치된 입·출고 배관 및 부속설비의 크기를 고려하여 4, 5 inch 총 2가지 누출구 크기로 탱크 하단에서 누출사고가 발생한다고 가정하였다. 누출된 위험물이 임시 저장 탱크로 유입되어 액위가

Table 1. Input data from vertical tank simulation

| Input data | Value |
|--|-------|
| Radius of tank (m) | 9.5 |
| An initial level of benzene (m) | 18.85 |
| Diameter of leak hole size (inch) | 4, 5 |
| The volume of temporary storage facility (m ³) | 150 |
| The surface area of temporary storage facility (m ²) | 50 |

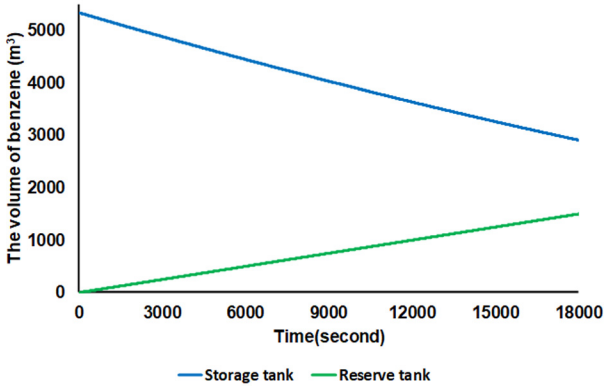


Fig. 3. The volume of benzene in a storage and a reserve tank when the diameter of a leak hole is 4 inch.

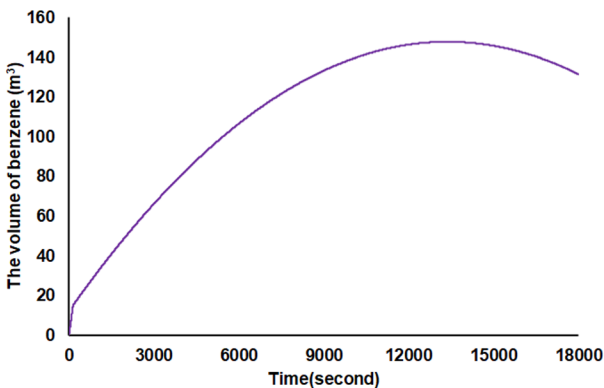


Fig. 4. The volume of benzene in the temporary storage facility when the diameter of a leak hole is 4 inch.

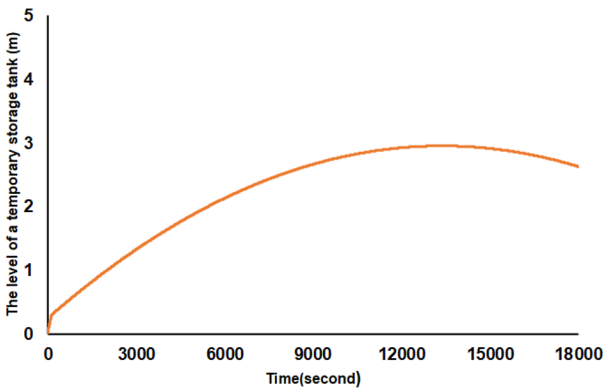


Fig. 5. The level of benzene in the temporary storage facility when the diameter of a leak hole is 4 inch.

0.3 m 이상인 경우에 펌프가 작동되어 예비 탱크로 이송한다고 가정하였다. 벤젠 옥외 탱크 누출 시나리오 시뮬레이션을 위해 사용된 값은 Table 1과 같다.

벤젠 저장탱크 누출구의 크기가 4 inch이며, 펌프의 용량이 301 m³/hr 미만인 경우, 임시 저장 설비의 최대 높이인 3 m를 초과하게 되어 제약조건을 벗어남을 확

인할 수 있었다. Fig. 3은 펌프 용량이 301 m³/hr인 경우 누출 사고가 발생한 시점부터 시간에 따른 각각 벤젠 저장 탱크와 예비 탱크 내 벤젠 부피의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 4와 Fig. 5는 임시 저장 설비에 벤젠이 유입되는 시점부터 임시 저장 설비 내 벤젠 부피, 그리고 임시 저장 설비 내 벤젠의 액위 변화를 보여주고 있다.

Fig. 6은 전체 시간 동안 펌프의 작동 여부를 보여주고 있다. 펌프 용량이 301 m³/hr인 경우 지속적으로 펌프가 작동함을 알 수 있다. Fig. 7은 펌프의 용량이 350 m³/hr인 경우 펌프의 작동 여부를 보여주고 있다. 약 9,000초 이후에 연속해서 펌프가 on/off를 반복함을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 펌프에 심각한 고장을 유발할 수 있으므로 최적의 펌프 용량을 결정하는 문제는 매우 중요하다.

벤젠 저장 탱크 누출구의 크기가 5 inch인 경우, 누출량은 급격하게 증가하며, 펌프의 용량이 최소 470 m³/hr이 되어야, 임시 저장 설비에서 벤젠이 오버플로우 없이 예비 탱크로 이송이 가능하게 된다.

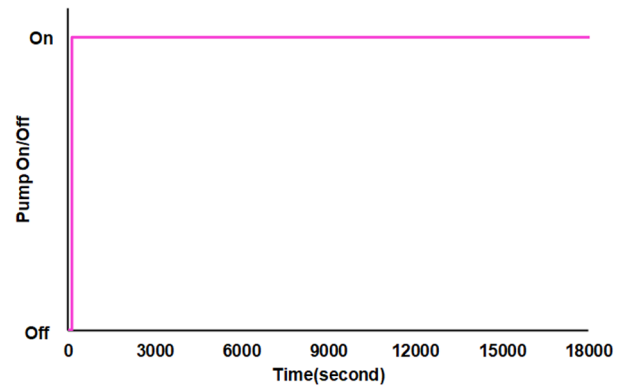


Fig. 6. The operation of a pump in case a pump capacity is 301 m³/hr and the diameter of a leak hole is 4 inch.

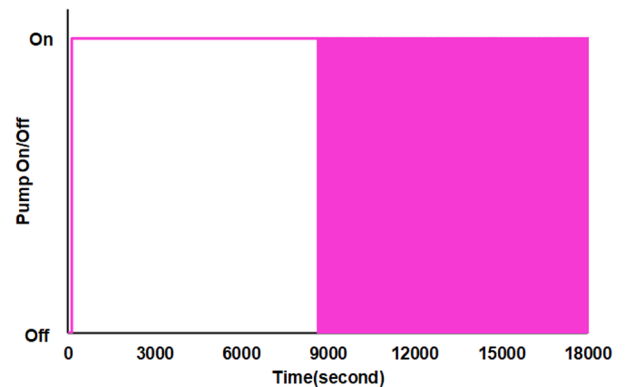


Fig. 7. The operation of a pump in case a pump capacity is 350 m³/hr and the diameter of a leak hole is 4 inch.

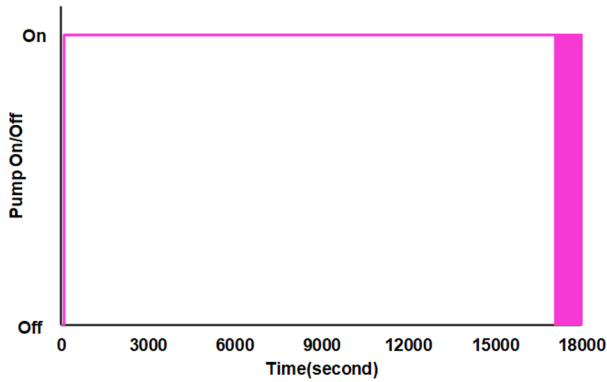


Fig. 8. The operation of a pump in case a pump capacity is 470 m³/hr and the diameter of a leak hole is 5 inch.

Fig. 8은 벤젠 저장 탱크 누출구의 크기가 5 inch 이며, 펌프의 용량이 470 m³/hr인 경우 펌프의 작동 여부를 보여주고 있다. 약 17,000초 이후에 연속해서 펌프가 on/off를 반복함을 확인할 수 있었지만, 이 시간대에는 상당량의 누출물 이송이 이미 완료된 시기이기 때문에, 강제적으로 펌프를 off 시켜도 문제가 없을 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 벤젠을 저장하고 있는 옥외 저장 탱크에서 누출 사고가 발생하는 경우 누출속도와 누출량을 고려하여 예비 탱크로 이송을 위해 임시로 누출물을 모아두는 설비를 설계하고 적절한 펌프 용량을 확인하였다.

수직 원통형 탱크에서 누출이 발생하는 경우 Torricelli의 법칙을 이용하여 누출공 크기와 저장 높이 변화에 따른 누출속도를 산정하였으며, 이를 이용하여 시간당 누출량을 구하여 임시 저장 설비에 유입이 되며, 일정 액위인 0.3 m 이상이 되면 펌프가 작동하여 예비 탱크로 누출물을 이송한다고 가정하였다. 이때 임시 저장 설비에 저장되는 누출량은 탱크 최대 부피를 넘으면 안 되며, 펌프의 지속적인 작동을 위해 일정 액위를 지속해서 유지해야 한다. 또한, 임시 저장 설비의 부피는 저장 탱크 부피보다 작아야 한다는 조건을 가정하였다.

단면적 50 m², 부피 150 m³ 크기의 임시 저장 설비는 누출구의 크기가 4 inch의 경우에 필요한 최소 펌프 용량이 301 m³/hr, 5 inch의 경우는 최소 470 m³/hr인 것

으로 분석되었다. 최소 펌프 용량보다 다소 크게 설정하면 일정 시간 후에 펌프가 On/Off를 반복함을 확인하였다. 안정적으로 펌프가 운영되면서 임시 저장 설비에 오버플로우가 생기지 않는 펌프의 용량은 본 연구에서 제안한 모델을 이용하면 쉽게 탐색할 수 있다.

본 연구를 통해 누출구의 크기에 따라 적절한 펌프 용량에 큰 변화가 있음을 확인하였으며, 다양한 누출 사고를 대비하기 위해서는 다양한 용량의 예비 펌프 추가 설치를 하거나, 아니면 기존 설치된 펌프에 바이패스(Bypass) 및 자동 제어 가능한 유량 조절 밸브를 설치하여 펌프가 on/off 반복 없이 안정적으로 작동하도록 하는 다양한 방법에 관한 연구가 필요하다.

References

- 1) Onsan Fire Station, "Report the Situation of Crude Oil Leakage in the Storage Tank(19 Report)", 2014.
- 2) Ik Hwan Kim, "https://biz.chosun.com, Onsan Leak Accident Loss KRW 18 Billion", Retrieved on 02.28.2020
- 3) National Fire Agency, "Safety Control of Dangerous Substances Act Enforcement Regulation Amendments", 2015.
- 4) Municipal Law, "Safety Control of Dangerous Substances Act Enforcement Regulation Appendix 6", pp. 11, 2017.
- 5) Y. J. Woo and C. J. Lee, "A Study of Emergency Response for the Leakage Accident of Hazardous and Noxious Substances in a Port", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 6, pp. 32-38, 2016.
- 6) K. O. Lee, J. Y. Park and C. J. Lee, "Evaluation of a Mitigation System for Leakage Accidents using Mathematical Modeling", Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 35, pp. 348-354, 2018.
- 7) J. Y. Lee, D. H. Kim, S. H. Ban and C. J. Lee, "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", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 5, pp. 35-41, 2018.
- 8) Environmental Protection Agency, "Spill Prevention Control and Countermeasure Plan", 2011.
- 9) Technical Report of Lawrence Livermore National Laboratory, "Livermore Site Spill Prevention, Control, and Countermeasures (SPCC) Plan", 2016.