

## 용도 변경된 암모니아 탱크 안전밸브 및 흡수시설에 관한 연구

배중훈 · 이창준<sup>†</sup>

부경대학교 안전공학과  
48513 부산시 남구 용소로 45  
(2022년 6월 16일 접수, 2022년 7월 1일 수정본 접수, 2022년 7월 2일 채택)

## Study of Pressure Safety Valves and an Absorption System for a Repurposed Ammonia Tank

Jong Hoon Bae and Chang Jun Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea  
(Received 16 June 2022; Received in revised from 1 July 2022; Accepted 2 July 2022)

### 요 약

본 연구는 울산석유화학공단 내 A사의 암모니아 탱크 안전장치를 대상으로 진행하였다. 탱크는 실린더 형태이며, 1972년에 프로필렌을 저장하기 위해 설계되었다. 그 후 시장환경에 따른 생산계획 변경으로 인해 탱크의 용도가 암모니아 저장으로 변경되었다. 저장 물질을 변경하는 과정에서 안전성을 검토했던 어떠한 과학적인 정보나 검토 자료를 찾을 수가 없었다. 따라서, 본 연구에서는 현재 안전하게 운전되고 있는지를 확인하기 위해 탱크의 상태를 조사하였다. 또한, 현재 설치되어 운영되고 있는 두 개의 안전장치 암모니아 흡수 시스템 및 Water curtain이 어느 정도 사고의 영향을 경감하는지 분석하였다. 마지막으로, 비상대응계획 작성에 활용하기 위한 CA(consequence analysis)를 수행하였다. 그 결과 사고의 영향을 효율적으로 완화할 수 있도록 안전장치가 설치되어 있음을 확인하였으며, 암모니아 누출 시 긴급대응에 필요한 시간을 제시할 수 있었다.

**Abstract** – In this study, safety devices for ammonia tanks of a company in Ulsan petrochemical industrial complex were studied. The type of a tank is cylindrical and this tank was originally designed to store propylene in 1972. Due to the changes of the production schedule according to market environments, the usage of this tank has been changed to store ammonia. Despite of the changes of materials, there is no scientific information or reviews for guaranteeing the safety. Therefore, in this study, the current status of this tank is investigated to confirm that the operational conditions are complying with safety conditions. Moreover, the safety devices such as an ammonia absorbing system and water curtains are analyzed how they mitigate the impact of an accident. In addition, consequence analysis is performed to provide a proper emergency response plan. Throughout these analysis, it is confirmed that installed safety devices effectively mitigate the impact of accidents, and the necessary time for an emergency response plan is suggested when ammonia release.

**Key words:** An absorption system, Pressure safety valve, Water curtain, Ammonia tank

### 1. 서 론

국내 석유화학산업은 석유화학을 기반으로 급속도로 팽창함과 동시에, 반도체, 신소재 등의 다양한 산업으로 확장되고 있다. 이에 따라 다량의 가연성 물질, 독성물질을 취급함으로써 화재, 폭발, 누출사고의 발생 가능성이 커졌으며, 사고가 발생하면 사업장 주변 지역사회에 큰 영향을 끼칠 수 있다. Table 1은 해외 석유화학 공장에

서 발생한 대형 사고를 보여주고 있다. 국내의 경우 울산 폴리스티렌 공장 폭발 사고(2011년), 구미 불산 누출 사고(2012년), 남양주 암모니아 탱크 폭발 사고(2014년), 울산 원유 누출사고(2014년), 울산 정유공장 화재폭발 사고(2021년) 등의 중대 사고가 지속해서 발생하고 있다[1]. 구미 불산 누출사고와 같이 화학공장에서 발생하는 독성물질 누출사고는 일반 산업재해와 비교할 때, 사고 발생의 빈도는 낮지만 사고의 영향범위는 매우 광범위하고 사업장뿐만 아니라 사업장 주변 지역주민들에게도 막대한 영향을 끼친다. 이탈리아 세베소 2,3,7,8-Tetrachloro Dibenzo Paradoxin 누출사고로 EU (European Union)에서는 세베소 지침이 제정되었고, 인도 보팔 Methyl Isocyanate 누출사고로 미국 대통령 직속 화학 사고조사위원회 (Chemical Safety and Hazard Investigation Board)가 설치되는 등 사고들을 통해 안전 관련 코드 및 가이드를 제정하여 화학공장의 관리

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: changjunlee@pknu.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1. Representative major chemical accidents [2,3]**

Year	Location	Chemical event	Deaths/injured
1974	FLIXBOROUGH, ENGLAND	Cyclohexane explosion	28/76
1976	SEVESO, ITALY	TCDD(2,3,7,8-tetrachloro dibenzo paradiioxin) toxic release	N.A./300
1984	BHOPAL, INDIA	MIC(Methyl isocyanate) toxic release	2,500/N.A.
1989	TEXAS, US	Ethylene explosion	23/314

를 좀 더 엄격하고 세밀하게 하려고 노력하고 있다[2].

국내 석유화학 분야에서 중추적인 역할을 담당하고 있는 울산 석유화학단지는 1970년대에 조성되어 현재에 이르고 있다. 하지만, 약 50년이 지난 현재 설비의 노후화로 인하여 대형 사고의 발생이 우려되고 있다. 특히, 국내 경제 성장과 시장의 확대에 인하여 지속해서 설비용량의 증대 및 용도 변경이 자주 이루어지고 있지만, 이러한 변경 시, 과학적인 분석과 안전성 확보를 통해 적절한 검토가 이루어지지 않았다.

울산석유화학공업단지 내 입주한 A사 Plant의 탱크는 실린더 형태로 1972년에 최초 공장건설 시 프로필렌 저장을 목적으로 옥외에 설치되었다. 그 후에 생산량의 지속적인 증가로 인하여 추가로 프로필렌 저장 탱크가 설치되었고, 현재는 원래 목적이 아닌 암모니아 탱크로 전용되어 운전되고 있다. 하지만, 탱크의 용도가 변경된 시점에서 과학적인 분석이 이뤄진 바가 없으며, 이와 관련된 문서도 찾을 수가 없어서 용도 변경 시 적절한 분석이 이루어지지 않았다고 볼 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 현재 용도 변경되어 운영 중인 암모니아 저장 탱크의 안전성 검토를 하였다. 첫 번째는 암모니아 탱크의 모든 압력상승 요인을 KOSHA Guide (D-18-2017, 안전밸브 등의 배출 용량 선정 및 설치 등에 관한 기술지침)를 통해 평가하고, 안전밸브의 최대 토출 요인을 선정하여 현재 설치된 안전밸브의 안전성을 확인하였다. 두 번째로 안전밸브를 통해 토출된 암모니아를 외부로 직접 노출되지 않도록 설치된 암모니아 흡수시설이 암모니아 누출사고 발생 시 암모니아를 흡수하는 양에 대해 계산하였다. 세 번째는 대기 확산 모델링 소프트웨어인 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 프로그램을 활용하여 누출사고의 완화를 위해 설치된 Water curtain이 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우 Water curtain이 어느 정도 성

능을 가졌는지 평가하고자 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 암모니아 탱크 현황을 기술하였으며 3장에서는 암모니아 탱크의 안전밸브의 안전성 평가, 4장에서는 암모니아 흡수시설 검증결과를 설명하고자 한다. 5장에서는 암모니아 누출사고 발생 시 피해 영향평가와 Water curtain의 작동 여부에 따른 피해 영향평가를 계산하였다.

## 2. 대상 물질 및 설비

### 2-1. 암모니아

암모니아는 전통적으로 비료 및 Acrylonitrile 등의 화학물질 제조

**Table 2. The information of ammonia [4,5]**

Categorize	Characteristic
Cas No.	7664-41-7
Molecular formula	NH <sub>3</sub>
Molecular weight	17.03
Boiling point	-33.35 °C (at 760 mmHg)
Melting point	-78 °C (at 760 mmHg)
Autoignition temperature	651 °C
Upper explosive limit	33.6 vol%
Lower explosive limit	15 vol%
Vapor pressure	1,013 kPa (at 26 °C)
Vapor density	0.59 kg/m <sup>3</sup> (Air : 1)
Toxic(ACGIH)	TWA-25 ppm, STEL-35 ppm
ERPG-1	25 ppm
ERPG-2	150 ppm
ERPG-3	750 ppm

**Table 3. Detailed information about an ammonia tank**

Item	Categorize	Data
Ammonia tank	Type	Horizontal Cylindrical Tank
	Capacity	354 m <sup>3</sup> /EA
	Material	ASTM A516-70
	Design Press./Temp.	20 kg/cm <sup>2</sup> / 38 °C
	Operating Press./Temp.	15 kg/cm <sup>2</sup> / 30 °C
Ammonia receiving Pump	Capacity	47.74 m <sup>3</sup> /hr (28.74 ton/hr)
	Discharge Pressure	22 kg/cm <sup>2</sup>
Pressure Safety valve	Type	Conventional Type
	In/Out Size	4" / 6"
	Setting Pressure	20 kg/cm <sup>2</sup>
	Required Capacity	43,820 kg/h
Ammonia Absorption Facility	Type	Cement Concrete (Open type)
	Size	5,000 × 5,000 × 1,500 mm
	Capacity	33.5 ton
Water curtain	Type	Full Cone type
	Height	6.0 m (above 2.0 m of tank)
	Ratio (Water/Ammonia)	13

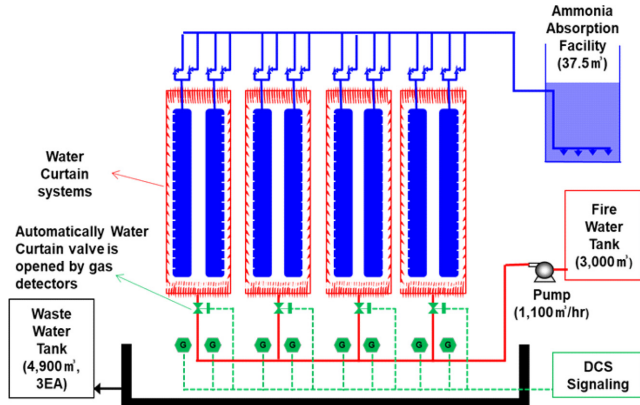


Fig. 1. The conceptual diagram of an ammonia tank.

원료로 사용되고 있다. 그리고, 최근 반도체와 디스플레이 분야에서 고순도 암모니아의 수요가 증가하고 있다. 암모니아의 일반적인 물리적 특성 및 독성에 관한 정보를 Table 2에 정리하였다.

## 2-2. 암모니아 탱크설비

암모니아 탱크 주위에는 암모니아 누출 경보를 위한 가스감지기, 250 mm 높이의 Spill wall과 가스 누출 시에 외부로의 확산을 최소화 화하기 위한 Water curtain이 설치되어 있다. 암모니아는 약 15 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 가압 되어 액화가스 상태로 저장되며, 지하 배관을 통해 공급사로부터 공급받고 있다. 탱크보호를 위해 안전밸브가 이중으로 설치되어 있고 그 토출 측은 암모니아 흡수시설 내부로 연결되어 있다. 흡수시설은 콘크리트 구조인 Pond 형으로 대기로 개방되어 운전되고 있다. 설비별 정보는 Table 3에 정리하였으며, 설치 형태 및 운전 방법 등은 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

## 3. 안전밸브

안전밸브(PSV, Pressure safety valve)는 보일러, 압력 용기 등의 설비에서 설정된 압력에 도달하면 자동으로 스프링이 작동하면서 저장 물질을 분출하고, 설정된 압력 이하가 되면 정상 상태로 복원된다[6]. 안전밸브 용량은 가능한 모든 압력상승 원인을 분석하여 가장 누출량이 많은 것으로 선정된다. 압력상승을 유발하는 대표적인 원인을 Table 4에 정리하였다[6]. 암모니아 탱크의 설계 및 운전상태를 통해 압력상승 요인을 분석한 결과 출구 차단(Closed outlets) 및 외부 화재(External Fire)가 발생하여 탱크 내 압력이 급격하게 상승할 수 있음을 확인하였다.

### 3-1. 출구 차단(Closed outlets) 분석

출구 차단이 발생하는 경우 탱크로 암모니아를 공급하는 펌프의 토출 압력이 탱크의 최고허용압력을 넘을 수 있다. 따라서, 탱크의 출구 차단 시 압력을 낮추기 위해 안전밸브의 압력은 탱크의 최고허용압력 이하이고, 토출 용량은 공급 펌프의 최대 용량보다 커야 한다. 이를 적용하면 공급 펌프 최대 용량인 28,740 kg/hr와 같게 안전밸브 토출 용량을 선정해야 안전밸브 개방 시 저장탱크를 보호할 수 있다.

### 3-2. 외부 화재(External Fire) 분석

외부 화재가 발생하는 경우 탱크 내부 암모니아의 Boiling에 의하여 증기가 발생하고, 팽창함에 따라 최고허용압력을 넘을 수 있다. 본 연구는 안전밸브 토출 용량을 KOSHA Guide에 따라 식 (1)로 산정하였다[6]. 여기서  $W$ 는 안전밸브 토출 용량(kg/hr),  $Q$ 는 Heat input (kcal/h)이며,  $\lambda$ 는 증발잠열(kcal/kg)로 암모니아 증발잠열인 327.69 kcal/kg을 적용한다[7]. 식 (1)을 계산하기 위해서는 식 (2)를 통해  $Q$ (Heat input)를 구해야 하며, 식 (2)를 계산하기 위해서는 암모니아 탱크 내부 액체에 접촉하고 있는 면적  $A$ (m<sup>2</sup>)을 계산해야 한다. 여기서  $F$ 는 탱크의 보온, 보냉한 경우의 변수로 본 연구의 암모니아 탱크는 보온, 보냉재가 없으므로 1로 적용한다[6].

$$W = \frac{Q}{\lambda} \quad (1)$$

$$Q = 61,000 \times F \times A^{0.82} \quad (2)$$

탱크 내 암모니아에 접촉하고 있는 벽 면적은 Fig. 2와 같이 탱크를 Cylinder부분과 Ellips부분으로 구분하여 계산된다. Cylinder부분의 면적은 식 (3), Ellips부분의 면적은 식 (4)로 구한다[8].

$$S_{cylinder} = L \times 2R \times \left[ \cos^{-1} \left( \frac{R-H}{R} \right) \right] \quad (3)$$

$$S_{Ellips} = 2.168 \times 2R \times H \quad (4)$$

여기서  $L$ 는 탱크의 길이(33 m),  $R$ 는 탱크의 반지름(1.85 m),  $H$ 는 저장 높이이다. 실제 운전에서 최대 용량의 85%로 저장되고 있으므로 저장 높이  $H$ 는 탱크 직경( $D$ ) 3.7 m의 85%인 3.14 m이며, 그 결과 내부 암모니아에 접촉하고 있는 탱크의 벽 면적( $A$ )은 336.38 m<sup>2</sup>이다. 외부 화재가 발생한 경우를 산정한 결과 Heat input( $Q$ )은 7,199,968 kcal/h이며, 안전밸브 토출 용량( $W$ )은 21,972 kg/hr이다.

### 3-3. 안전밸브 연구 결과

앞에서 암모니아 탱크의 안전밸브 용량을 산정한 결과 출구 차단이 발생하는 경우 안전밸브 토출 용량은 28,740 kg/hr 이상이 되어

Table 4. The important factors triggering the pressure increase at a pressure safety valve [6]

Categorize	Data
Closed outlets	Pressure may exceed the maximum allowable pressure when all exits of the facility are blocked. → The design pressure (22 kg/cm <sup>2</sup> ) of the pump supplying ammonia is higher than the design pressure (20 kg/cm <sup>2</sup> ) of the tank, so it can be applied to this case
Cooling water fail	No cooling water or heat medium to cool the ammonia tank, so this case is not applicable
Thermal expansion	This case is not applicable because it is calculated based on the ammonia tank
External Fire	When facilities such as storage tanks and pressure vessels are exposed to external fires, the maximum allowable pressure may be exceeded due to vapor generation by boiling liquid substances and expansion of substances. → This case can be applied as the maximum allowable pressure may be exceeded by vapor by boiling in the ammonia tank due to an external fire

야 하며, 이는 현재 설치된 안전밸브 토출 용량이 43,820 kg/hr임을 고려하면 현재 설치된 안전밸브는 충분히 안정적이라고 결론낼 수 있다. 외부 화재가 발생하는 경우 안전밸브의 토출 용량은 21,972 kg/hr이며 이는 현재 설치된 안전밸브 토출 용량보다 적음을 확인할 수 있었다. 암모니아의 저장 탱크가 본래 프로필렌 저장 탱크였으며 외부 화재가 발생한 경우의 식 (1)을 적용하면, 증발잠열이 프로필렌은 81.72 kcal/kg, 암모니아는 327.69 kcal/kg으로서 암모니아가 약 4배 많기 때문에 현재 필요한 용량보다 큰 안전밸브가 설치된 것을 알 수 있다[7]. 따라서, 프로필렌 저장 탱크가 암모니아 저장 탱크로 활용되어도 크게 문제가 되지 않는다고 결론을 내릴 수 있다.

#### 4. 암모니아 흡수시설 검증

출구 차단 및 외부 화재의 원인으로 인해 암모니아 탱크의 압력 상승으로 안전밸브가 작동된 후 배출된 암모니아는 대기로 직접 배출되지 않도록 설계되어야 한다. 암모니아는 Lower Explosive Limit 15 vol%인 인화성 물질이며, TWA(Time Weighted Average) 25 ppm, ERPG(Emergency Response Planning Guideline)-2가 150 ppm인 독성물질이다. 따라서, 대기로 암모니아가 누출되는 경우 화재, 폭발 및 독성가스 누출로 인한 심각한 피해가 발생할 수 있으므로 반드시 중화, 소각 및 흡수 등을 통해 처리되어야 한다.

대상공정의 경우, 안전밸브를 통해 배출되는 암모니아는 물이 저장된 철근콘크리트 구조의 개방형 Pond 형태의 암모니아 흡수시설로 흘러가도록 설계되어 있다. 만약, 암모니아 흡수시설의 흡수능력을 초과한 암모니아가 배출되면 대기로 암모니아가 누출, 확산할 수 있다. 따라서, 현재 설치된 암모니아 흡수시설의 흡수능력을 산정하고, 안전밸브가 작동하여 암모니아가 배출되는 경우 암모니아가 외부로 누출되는 양과 시간을 계산한다.

##### 4.1. 암모니아 저장량 산정

암모니아의 흡수능력을 계산하기 위해, 먼저 탱크 내 암모니아 저장량을 산정하였다. Fig. 2와 같이 탱크를 Cylinder부분과 Ellips부분으로 구분하여 부피( $V$ )를 산정한 후 밀도를 곱하여 저장량을 구한다. Cylinder부분의 부피는 식 (5), Ellips부분의 부피는 식 (6)으로 계산할 수 있다[9].

$$V_{cylinder} = L \times \left[ R^2 \times \cos^{-1} \left( \frac{R-H}{R} \right) - (R-H) \times \sqrt{2RH-H^2} \right] \quad (5)$$

$$V_{ellips} = D^3 \times C \times \frac{\pi}{12} \times \left[ 3 \times \left( \frac{H}{D} \right)^2 - 2 \times \left( \frac{H}{D} \right)^3 \right] \quad (6)$$

여기서  $L$ 은 탱크의 길이(33 m),  $D$ 는 탱크의 직경 (3.7 m),  $F$ 은 탱

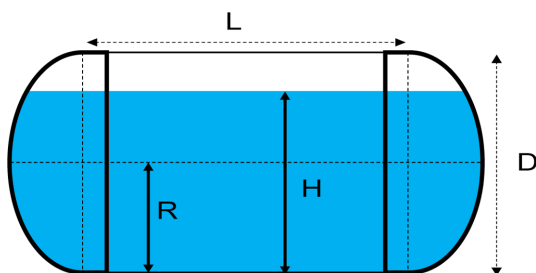


Fig. 2. The cylindrical tank.

Table 5. Calculations of volume and mass according to the parts of ammonia tank

Volume	Data
Cylindrical portion of vessel	321.0 m <sup>3</sup>
Two hemispherical heads	11.88 m <sup>3</sup>
Total Volume	332.88 m <sup>3</sup> (321.0 m <sup>3</sup> + 11.88 m <sup>3</sup> )
Total Mass	200,000 kg (332.88 m <sup>3</sup> × 0.602 ton/m <sup>3</sup> × 1,000 kg/ton)

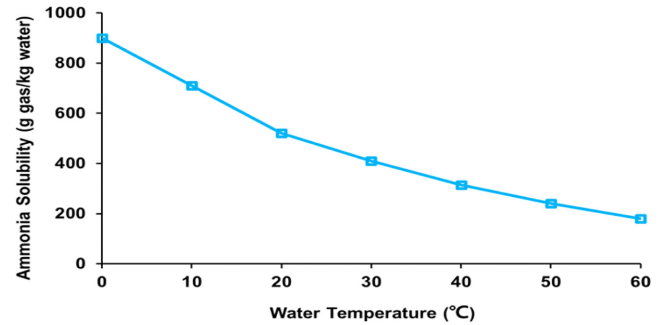


Fig. 3. Solubility of ammonia [10].

크의 반지름(1.85 m),  $H$ 는 저장 높이이다. 실제 운전이 최대 용량의 85%로 저장되고 있으므로 저장 높이  $H$ 는 탱크 직경 3.7 m의 85%인 3.14 m이며,  $C$ 는 옆면의 head type에 따른 상수로 암모니아 탱크의 head type이 semi-elliptical이기 때문에 ASME(American Society of Mechanical Engineers) code에 따라 0.5를 적용하였다[9]. 계산 결과를 Table 5에 정리하였다.

##### 4.2. 암모니아 흡수량 계산

암모니아 흡수시설의 흡수능력은 암모니아의 용해도를 이용하여 계산할 수 있다. 기체의 용해도는 물의 온도에 큰 영향을 받으며, 물의 온도가 높을수록 용해도는 낮아진다. 암모니아 흡수시설의 물은 외부에 노출되어 있으므로 물의 온도를 보수적으로 30 °C로 설정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 물의 온도가 30 °C인 경우 암모니아의 용해도는 400 g  $\text{NH}_3$ /kg  $\text{water}$ 이다. 이를 이용하면, 암모니아 흡수시설에서 최대 암모니아 흡수량을 계산할 수 있다.

또한, 3장에서 계산한 안전밸브의 최대 토출 용량 (28,740 kg/h)을 이용하면 암모니아 저장 탱크 내 모든 암모니아 (200,000 kg)가 안전밸브를 통해 배출되는 사고가 발생하는 경우, 암모니아 흡수시설의 최대 흡수량에 도달하는 시간을 계산할 수 있으며, 외부로 누출되는 암모니아의 양도 계산할 수 있다.

탱크에 저장된 암모니아 저장량이 200,000 kg이고, 최대 토출 용량인 28,740 kg/h속도로 누출되는 경우를 가정하면, 모든 물질이 누출되는 데 총 6.96시간이 소요됨을 알 수 있다. 또한, 모든 암모니아가 용해되는 데 필요한 물의 양은 약 500,000 kg이다.

현재 암모니아 흡수시설에 저장된 물의 양이 33,500 kg이기 때문에 누출사고가 발생한 이후 0.466시간 (27.9분)이 지나면 최대 흡수 용량에 도달한다. 따라서, 누출사고가 발생하고 27.9분 이후부터는 안전밸브를 통해 배출되는 암모니아는 모두 대기 중으로 누출된다.

#### 5. 암모니아 누출사고 시 영향 범위

안전밸브를 통해 토출된 암모니아는 흡수시설에서 처리되지만,

**Table 6. Weather information for the consequence analysis [13]**

Categorize	Data
Average temperature	14.58 °C
Average humidity	67.41 %
Atmospheric pressure	1 atm
Average wind velocity	2.16 m/s
Maximum wind direction	NNW (308.33°)

안전밸브가 없는 상태(4inch hole)에서 압력상승으로 인해 암모니아가 누출되는 시나리오를 선정하여 영향 범위를 확인하고, 비상 대응 계획에 적용하고자 한다. 또한, 누출사고의 완화를 위해 설치된 Water curtain이 작동하는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하고자 한다. 안전밸브가 작동 시 배출되는 암모니아를 처리하는 흡수시설은 4장에서 산정한 0.466시간 (27.9분) 이후에는 안전밸브를 통해 토출되는 용량으로 외부로 배출되어 안전밸브가 없는 상태와 같은 양상을 보이기 때문에 안전밸브 작동할 때 흡수시설에서의 영향 범위 산정을 수행하지 않았다.

누출 영향 범위 산정은 미국 EPA의 ALOHA 프로그램을 활용하였고, 독성 영향 범위의 기준이 되는 농도로 ERPG 기준을 적용하였다. ERPG는 미국 산업위생학회가 정한 화학물질 누출로 인한 지역사회 사고 대응에 대한 기준으로 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3로 구분된다. 암모니아의 노출 기준은 각각 1,500 ppm, 150 ppm, 25 ppm (ERPG-3, ERPG-2, ERPG-1)이며, 영향 범위 산정 시에는 KOSHA Guide (P-107-2020, 최악 및 대안 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침)에 따라 ERPG-2(암모니아, 150 ppm) 값을 적용하였다[11]. ERPG 기준은 Cavender 등[12] 연구에서 자세히 기술되어 있다.

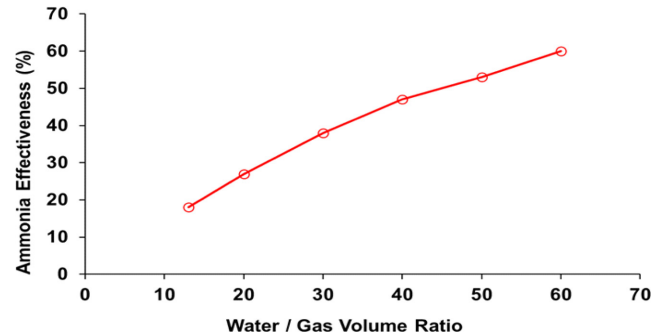
암모니아 누출 영향범위의 평가를 위한 기상정보는 Table 6과 같이 기상청 홈페이지를 통해 암모니아 탱크가 설치된 울산지역의 2020년 평균 기상정보를 활용하였다.

### 5-1. Water curtain 효율 계산

탱크의 상부에는 암모니아 누출사고의 영향 완화를 위해 Fig. 4에

**Fig. 4. Water curtain of ammonia tank.****Table 7. The input data for the ammonia release scenarios**

Source	Chemical mass of tank	Type of tank failure	Opening diameter	
			No water curtain operating	Water curtain operating
Horizontal cylindrical tank	200 ton	Leaking tank	4 inch	3.58 inch

**Fig. 5. Effectiveness of water spraying for ammonia gas [14].**

서 보는 바와 같이 Water curtain이 설치되어 있다. 탱크 주위의 암모니아 가스감지기가 작동 시에 Water curtain에서 물이 자동 분사되도록 구성되어 있고, 가스 감지기의 오작동에 의한 오동작을 방지하기 위해 가스 감지기 2개가 동시에 작동될 때 자동으로 Water curtain이 작동된다.

Water curtain 작동에 의한 암모니아 흡수율은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 Fthenakis 등[14] 연구에서 제시한 물과 gas의 비율에 따른 흡수율을 적용하였다[14]. 이를 기준으로 실제 Water curtain 설치 시에 적용한 물/암모니아 비율 13인 암모니아 흡수율 20%로 가정하였다. 암모니아가 누출되어 Water curtain을 통과하는 경우 20%가 물에 흡수되고 나머지는 계속 확산한다고 가정하였다.

### 5-2. 암모니아 누출 시나리오

암모니아 누출 시뮬레이션 수행을 위한 누출 모델을 Table 7과 같이 설정하였다. 암모니아의 누출속도는 Aloha 프로그램에서 탱크의 운전 조건과 누출공의 크기가 정해지면 자동으로 계산이 된다. 4 inch 누출공에서 공정 운전 조건을 적용한 경우 산정되는 누출속도는 377 kg/min이다. Water curtain이 작동할 때는 Aloha 상에서 이를 반영하는 옵션은 존재하지 않기 때문에, Water curtain이 작동하는 경우 암모니아 흡수율이 20%라는 조건을 적용하기 위해서는 누출공의 크기를 조절해서 377 kg/min의 80%가 되도록 해야 한다. 누출공의 크기가 3.58 inch인 경우 원래 누출 속도의 80%인 302 kg/min의 누출속도가 된다. 이를 통해 Water curtain이 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우를 비교하는 시뮬레이션이 가능하도록 하였다.

Table 8에서 보는 바와 같이 비상 대응 시 대피 범위의 기준이 되는 ERPG-2(150 ppm)의 범위가 Water curtain 미작동 시 1,300 m, Water curtain 작동 시 1,100 m로 시뮬레이션 되었다. Fig. 6과 Fig. 7은 Water curtain이 미작동하는 경우와 작동하는 경우의 누출 영향 범위를 보여주고 있다.

**Table 8. The results of the ammonia release scenarios**

ERPG	No water curtain operating	Water curtain operating
ERPG-2 zone	1,300 m	1,100 m





Fig. 6. The result of consequence analysis generated by Aloha in case there is no water curtain operation. (The orange color indicates ERPG-2 zone)

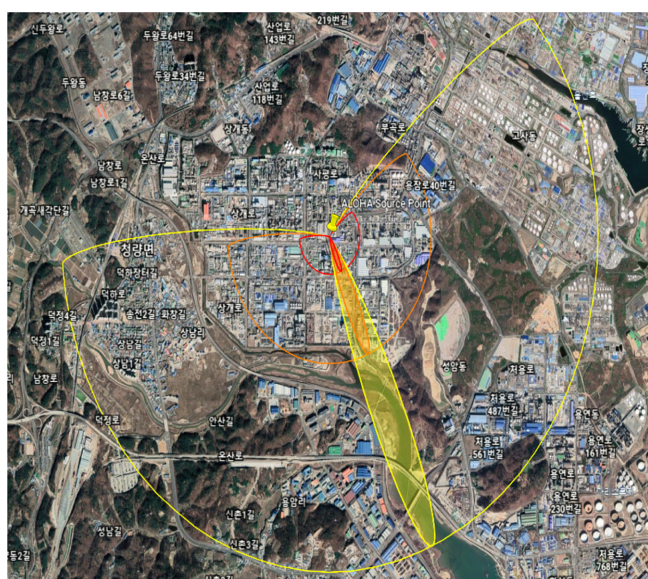


Fig. 7. The result of consequence analysis generated by Aloha in case water curtain system is operated. (The orange color indicates ERPG-2 zone)

## 6. 결 론

본 연구를 통해 1970년대 프로필렌을 저장하기 위해 설치되었지만, 현재 암모니아를 저장하고 있는 A사 탱크에 설치된 안전밸브를 평가하고, 안전밸브 작동 시 암모니아 흡수시설이 어느 정도의 암모니아를 흡수하고, Water curtain이 제대로 작동하는 경우 어느 정도 누출사고의 영향을 완화시키는 지에 대해 검증하였다.

그 결과 첫째, 현재 설치된 암모니아 탱크 안전밸브의 현재 토출 용량은 43,820 kg/hr이며, KOSHA guide 기준을 통해 계산한 결과 필요한 토출 용량은 28,740 kg/hr임을 확인하였다. 이는 기존 설계 대비 약 40%의 여유가 있으며, 따라서 충분히 안전밸브가 그 역할

을 할 수 있다고 결론 낼 수 있다. 이는, 과거 프로필렌 사용기준으로 안전밸브가 설계되었기 때문에 물질의 증발 잠열의 차이로 여유가 많은 것으로 판단된다. 둘째, 암모니아 흡수시설의 도움으로 안전밸브 작동 후 27.9분 이후에는 암모니아에 물에 흡수되지 않고 대기로 누출됨을 알 수 있었다. 따라서, 암모니아 흡수시설의 흡수능력을 초과하는 경우 외부로 누출되는 암모니아의 양을 줄이기 위해서는 암모니아 처리시설을 증설하거나, Water curtain 같은 안전장치를 추가로 고려해야 할 것으로 판단된다. 마지막으로, 암모니아 누출 영향범위 시나리오를 통해 Water curtain이 작동하는 경우 약 15.4% 정도 영향 범위를 줄일 수 있음을 확인하였다. 가스 감지기와 연동하여 자동으로 조작이 되는 Water curtain 설비의 신뢰도 향상이 필요하며, 다양한 Water curtain의 종류가 존재하기 때문에 앞으로 좀 더 과학적인 분석을 통해 Water curtain 작동 시 최적의 물방울 사이즈, 작동 시간 및 분무 형태에 대해 탐색할 필요가 있다.

## 감 사

이 논문은 2021년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-C-D-2021-0710).

## References

1. Jung, B. G. and Lee, C. J., "Study of chemical accident initial response based on Consequence Analysis," *Korean Journal of Hazardous Materials*, **4**(2), 22-29(2016).
2. Lee, C. H., "A Review of the Chemical Accident Prevention System in Europe," *Korea Labor Institute*, **104**(11), 33-41(2013).
3. Khan, F. I. and Abbasi, S. A., "Major Accidents in Process Industries and an Analysis of Causes and Consequences," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **12**(5), 361-378 (1999).
4. <http://msds.kosha.or.kr/MSDSInfo/kcic/msdsdetail.do> (accessed on 30 April 2021).
5. Yoo, B. T. and Moon, M. H., "Development of Emergency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan," *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, **18**(3), 311-319(2018).
6. KOSHA guide D-18-2017 : "Technical guidelines for calculation, installation of discharge capacity of safety valves," Korea Occupational Safety & Health Agency, Korea (2017).
7. [https://www.engineeringtoolbox.com/fluids-evaporation-latent-heat-d\\_147.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fluids-evaporation-latent-heat-d_147.html) (accessed on 20 March 2021).
8. Firoozi, B., "Wetted Surface Area Calculations for Fire-relief Sizing in ASME Pressure Vessels," *Hydrocarbon Processing*, **94**(8), 43-45(2015).
9. Barderas, A. V. and Rodea, B. S. S. G., "How to Calculate the Volumes of Partially Full Tanks," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **5**(4), 1-7(2016).
10. [https://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d\\_1148.html](https://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d_1148.html) (accessed on 30 April 2021).
11. KOSHA guide P-107-2020 : Technical guidance on the selection of worst and alternative accident scenarios, Korea Occupational Safety & Health Agency, Korea (2020).
12. Cavender, F., Phillips, S. and Holland, M., "Development of

- Emergency Response Planning Guidelines (ERPGs)” *Journal of Medical Toxicology*, **4**(2), 127-131(2008).
13. <https://data.kma.go.kr/data> (accessed on 15 March 2021).
14. Fthenakis, V. M. and Zakkay, V., “A theoretical study of absorption of toxic gases by spraying” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **3**(2), 197-206(1990).

#### Authors

**Jong Hoon Bae:** Doctor’s course, Department of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea; berserkbae@naver.com

**Chang Jun Lee:** Ph.D, professor, Department of Safety Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea; changjunlee@pknu.ac.kr