creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

工學碩士 學位論文

암모니아 저장탱크 사고 완화 시스템의 수학적 해석에 관한 연구

2017年 11月

釜 慶 大 學 校 産 業 大 學 院

安 全 工 學 科

朴 宰 奎

工學碩士 學位論文

암모니아 저장탱크 사고 완화 시스템의 수학적 해석에 관한 연구

指導敎授 李 彰 峻

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2017年 11月

釜 慶 大 學 校 産 業 大 學 院

安 全 工 學 科

朴 宰 奎

朴宰奎의 工學碩士 學位論文을

認准함

2017年 11月

主 審 工學博士 李 義 周 (인)

委 員 工學博士 張 聖 祿 (인)

委 員 工學博士 李 彰 峻 (인)

The study on Mathematical Interpretation for the mitigation system of damage extent by leakage from Ammonia storage tanks

Jae kyu Park

Department of Safety Engineering,

Pukyong National University

Abstract

Ammonia, a typical harmful chemical, is often used as a refrigerant because its freezing capacity is higher than other refrigerants in a refrigeration manufacturing facility. However, ammonia has a strong toxicity that affects the human body and flammability which can cause fire and explosion, so care is needed when storing and handling. Due to the hazards and dangers of the ammonia gas, further strengthened and specialized leakage prevention measures and extent of damage have been studied for ammonia storage and handling facilities. However,

most studies focus on qualitative measures such as early detection, evacuation, and control in the event of an accident in times of accident. For this reason, in order to quantitatively calculate the leak amount before the ammonia leakage accident occurs, and to establish and verify correct measures to reduce the damage, a variety of accident simulations and safety device modeling should be done.

In this study, to verify the amount of leakage and extent of damage at the time of leakage accident in the storage tank of ammonia used as refrigerant in the refrigeration manufacturing facility and after a reserve tank was installed and connected as a safety device. modeling was carried out to verify the amount of leakage and extent of damage.

The study method transported ammonia from an ammonia storage tank to a reserve tank through a connected piping and pump when an accident occurred in an ammonia storage tank or connection pipe and the leaked amount of ammonia was calculated using the MATLAB program. And based on the calculated leakage, a quantitative evaluation of the extent of damage was carried out using the ALOHA program.

Key Words : Ammonia, MATLAB, Reserve tank

목 차

Abstract ····· i

목차 ····· iii

Table List ····· vi

Figure List ····· vii

제 1 장 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1

1.2 기존의 연구 ····· 4

1.3 연구방법 ····· 6

제 2 장 연구내용 ····· 8

2.1 모델링 대상공정 선정 ····· 8

2.2 누출 시나리오 ····· 9

2.3 Torricelli's theorem ····· 12

2.4 Storage tank 누출량 모델링 ····· 15

2.5 ERPG(Emergency Response Planning Guideline) ····· 18

2.6 ALOHA Simulation ····· 21

제 3 장 연구결과 ····· 22

3.1 Storage tank 누출량 분석 ····· 22

3.2 누출구 size에 따른 storage tank 누출량 비교 ····· 24

3.3 펌프용량에 따른 storage tank 누출량 비교 ····· 27

3.4 누출구 size 와 펌프용량에 따른 누출량 감소 효과 분석 ····· 33

3.5 Storage tank 누출 피해범위 분석 ····· 35

3.6 누출구 size에 따른 storage tank 누출 피해범위 비교 ····· 36

3.7 펌프용량에 따른 storage tank의 누출 피해범위 비교 ····· 38

3.8 누출구 size 와 펌프용량에 따른 누출 피해범위 경감 효과 분석 46

제 4 장 결론 및 고찰 ····· 49

참고문헌 ····· 52

Table List

Table 1. Classification by used coolant Leakage ····· 3

Table 2. Physicochemical characteristic ····· 3

Table 3. Ammonia ERPG ····· 20

Table 4. Matlab Simulations Input data ····· 23

Table 5. Final amount of Ammonia Leakage ····· 34

Table 6. ALOHA Additional Input Data ····· 35

Table 7. ERPG Damage extent w\o reserve tank(0.04 inch) ····· 37

Table 8. ERPG Damage extent w\reserve tank

(0.04 inch, p/p 5m^3/h) ····· 40

Table 9. ERPG Damage extent w\ reserve tank

(0.04 inch, p/p 10m^3/h) ····· 41

Table 10. ERPG Damage extent w\ reserve tank

(0.1 inch, p/p 5m^3/h) ····· 42

Table 11. ERPG Damage extent w\ reserve tank

(0.1 inch, p/p 10m^3/h) ····· 43

Table 12. ERPG Damage extent w\ reserve tank

(0.2 inch, p/p 5m^3/h) ····· 44

Table 13. ERPG Damage extent w\ reserve tank

(0.2 inch, p/p 10m^3/h) ····· 45

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Figure List

Figure 1. The refrigeration manufacturing process flow ····· 8

Figure 2. Scenarios for ammonia Leakage ····· 11

Figure 3. The mathematical model of the Storage tank ····· 16

Figure 4. Amount of ammonia w\o reserve tank(0.04 inch) ····· 25

Figure 5. Amount of ammonia w\o reserve tank(0.1 inch) ····· 25

Figure 6. Amount of ammonia w\o reserve tank(0.2 inch) ····· 26

Figure 7. Amount of ammonia w\reserve tank(0.04 inch, p/p 5m^3/h) ····· 30

Figure 8. Amount of ammonia w\reserve tank(0.04 inch, p/p 10m^3/h) ····· 30

Figure 9. Amount of ammonia w\reserve tank(0.1 inch, p/p 5m^3/h) ····· 31

Figure 10. Amount of ammonia w\reserve tank(0.1 inch, p/p 10m^3/h) ····· 31

Figure 11. Amount of ammonia w\reserve tank(0.2 inch, p/p 5m^3/h) ····· 32

Figure 12. Amount of ammonia w\reserve tank(0.2 inch, p/p 10m^3/h) ····· 32

Figure 13. Comparison of Ammonia Leakage Amount
(According to Pump, Hole size) ····· 34

Figure 14. Threat zone of Ammonia w\o reserve tank(0.04 inch) ····· 37

Figure 15. Threat zone of Ammonia w\reserve tank
(0.04 inch, p/p 5m^3/h) ····· 40

Figure 16. Threat zone of Ammonia w\reserve tank
(0.04inch, p/p 10m^3/h) ····· 41
Figure 17. Threat zone of Ammonia w\reserve tank
(0.1 inch, p/p 5m^3/h) ····· 42
Figure 18. Threat zone of Ammonia w\reserve tank
(0.1 inch, p/p 10m^3/h) ····· 43
Figure 19. Threat zone of Ammonia w\reserve tank
(0.2 inch, p/p 5m^3/h) ····· 44
Figure 20. Threat zone of Ammonia w\reserve tank
(0.2 inch, p/p 10m^3/h) ····· 45
Figure 21. ERPG extent accroding to hole size (Pump 10m^3/h) ····· 48
Figure 22. ERPG extent accroding to hole size (Pump 5m^3/h) ····· 48

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현대 사회에서는 다양한 화학물질을 원료와 촉매, 열원 및 냉매 등으로 이용하여 과거보다 빠르고 편리하게 원하는 제품을 만들 수 있게 되었다. 이러한 화학물질 중에는 독성과 인화성, 폭발성 등의 유해성을 가지는 유해화학물질이 다수 포함되어 있다. 대표적인 유해화학물질인 암모니아의 경우 Table 1에서와 같이 냉동 제조 시설에서 다른 냉매보다 냉동 능력이 커서 냉매로서 흔히 사용되고 있다.

Table 1. Classification by used coolant capacity[1)]

냉동 능력	암모니아	프레온	
		R-404A	R-22
100 RT 이하	122	495	50
500 RT 이하	218	70	9
1000 RT 이하	21	9	0
1000 RT 초과	3	0	0

*RT = 냉동능력을 나타내는 단위로 1냉동 t은 24시간 동안 0℃의 물1000kg을 0℃의 얼음으로 만드는데 제거해야 하는 열량

그러나 암모니아는 상온에서도 인체에 영향을 끼치는 독성과 화재 및 폭발을 일으킬 수 있는 인화성이 강하여 저장·취급 시 주의가 요구된다. 암모니아의 물리화학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Physicochemical characteristic[2)]

구분	특성
색상 및 냄새	무색 / 자극적인 냄새
끓는점 / 녹는점	−33℃ / −78℃
최소점화에너지(M.I.E)	680mJ
독성(ACGIH)	TWA−25ppm, STEL−35ppm
폭발하한(LEL)	15%
증기압	758 kPa @ 20℃
흡입	신체에 유해, 천식 또는 호흡곤란 일으킴
접촉	피부에 심한 화상과 눈에 손상을 일으킴

실제로 2014년 2월 13일 경기도 남양주시 B사업장에서 발생한 암모니아 누출·폭발 사고로 근로자 1명이 사망하고 3명이 부상을 입는 중대산업사고가 발생하였다[3)].

이러한 암모니아 가스의 유해·위험성 때문에 암모니아 저장·취급 시설에 대해서 더 강화되고 전문화 되어진 누출 예방 대책과 피해 영향 범위에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나 암모니아를 포함한 대부분의 유해 화학물질 누출 사고와 관련된 국내 연구는 사고발생시 조기 발견과 대피, 방제 등의 정성적인 대책에 초점이 맞추어져 있다. 이 때문에 암모니아 누출사고가 발생하기 전에 정량적으로 누출량 계산 및 그 피해를 경감시킬

수 있는 정확한 대책 수립과 검증이 이루어지기 위해서는 해외 연구처럼 다양한 사고 시뮬레이션과 안전장치 모델링을 통한 연구가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 냉동 제조 시설에서 냉매로 사용되는 암모니아의 저장 탱크에서 누출사고 발생시의 누출량 및 피해범위와 예비용 Reserve tank를 안전장치로서 설치하여 연결한 경우의 누출량 및 피해범위를 비교 분석하여 Reserve tank 설치 효과를 검증하고 피해범위 경감을 위한 대책 모델링을 제시하고자 한다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

1.2 기존의 연구

해외에서는 피해범위 경감을 위해 여러 분야에서 다양한 연구들이 수행되었다.

Rana MA et al. 은 Liquefied natural gas (LNG) 누출시 Two water curtain system에 대한 유효성 검증을 수행하였다.[4)]

Suardin JA et al. 은 pool fire 로부터 복사열 경감을 위한 LNG pool fire의 억제를 위한 화재 진압 물질 연구를 수행하였다.[5)]

Busini V 와 Rota R 은 computational fluid dynamics (CFD)을 사용하여 LNG 이동을 차단하기 위한 경감 장벽 연구를 수행하였다.[6)]

위에서 언급된 해외 연구들은 모두 실험을 위한 모델을 직접 제작하여 이를 이용한 실험을 통해 얻어진 데이터를 근거로 하여 피해경감을 위한 분석 및 검증을 수행하였다. 그러나 이러한 연구들은 모형 제작 과정에서 실험을 수행하기 위해 많은 시간과 노력이 필요하고 다양한 실험 조건에서의 연구 수행에 제약을 받는다. 그러므로 향 후 정량적인 평가 프로그램

을 활용하여 피해범위 경감 분석 및 검증을 수행할 경우 모델 제작에 투자되는 시간을 줄이고 다양한 조건에서 연구 결과를 얻어내는 효과를 거둘 것으로 기대된다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

1.3 연구방법

본 연구에서는 암모니아가 저장되어있는 저장탱크에서 누출 발생 시 누출구의 직경에 따른 누출량 및 누출시간을 계산하였다. 저장탱크에서 누출사고 발생 시 저장탱크와 Reserve tank(예비탱크) 사이에 설치된 두가지 용량의 펌프를 이용하여 저장탱크 내에 있는 암모니아를 Reserve tank로 이송하는 것으로 모델링하였다.

누출량의 계산으로는 hydraulic pressure에 의해 누출되는 유체의 속도를 Bernoulli's principle을 기반으로 한 Torrichelli의 법칙을 이용하였다. 이를 암모니아가 누출되는 저장탱크에 적용시키면 누출구에서 저장탱크 내부의 암모니아가 누출되는 속도에 대해서 계산할 수 있고 여기에서 유도되어지는 미분방정식을 이용하여 액위 변화를 계산하고 이에 따른 누출량 변화와 누출 시간 등을 비교하였다. 시뮬레이션 도구로서 Matlab을 이용하였는데 Matlab을 통한 누출량 예측은 이론에 근거하여 정확한 누출량 예측이 가능하며, 빠르게 계산할 수 있다.

탱크의 누출량을 감소하는 시스템은 사고발생 시 펌프를 이용하여 저장탱크 내의 암모니아를 Reserve tank로 이동시키는 시나리오를 적용하였다. Reserve tank의 효과를 확인하기 위해서 암모니아 누출 시 누출구로 빠져나오는 암모니아의 양과 Reserve tank로 저장되게 되는 암모니아의

양을 비교하였으며 Reserve tank로 이송될 때 쓰이는 펌프의 용량도 변화시켜 누출구의 크기에 따라 적합한 펌프용량을 결정하는데 도움을 주고자 하였다. 마지막으로 계산되어진 Reserve tank의 효과를 KOSHA 가이드에서 설정된 최악의 누출 시나리오 기준으로 그 효과를 비교해보았다.

제 2 장 연구내용

2.1 모델링 대상공정 선정

암모니아 누출사고 피해범위 경감을 위한 모델링 대상공정은 AZO Pigment 제조를 위한 합성 공정에서 Diazo 반응을 할 때 반응조건 온도가 상온에서 0 ~ 10℃ 이하로 유지하고, Coupling 반응시 반응조건 온도를 40℃에서 20℃이하로 조절하기 위해서 Ice를 제조하여 AZO 합성 반응조로 공급하기 위한 냉동 제조 시설을 대상공정으로 선정하였다.

Ice 제조공정에서의 화학반응은 없으며 ice Maker Machine 에는 NH_3 Liquid Surge Drum이 있어서 -25℃ At 1.5kg/㎠A의 NH_3 Liquid를 공급받고, chilling Unit에서 약 5℃의 냉수를 공급받아서 NH_3 증발열을 이용하여 Ice 제조하는 공정이다.

Figure 1. The refrigeration manufacturing process flow

2.2 누출 시나리오

암모니아 저장탱크에서 누출구가 발생하여 암모니아가 외부로 누출되는 경우 누출구의 크기에 따라 누출되는 암모니아의 양을 Matlab 프로그램을 통해서 산출하였으며 누출된 암모니아의 양이 사고 발생장소 주변 지역에 끼치는 피해범위는 ALOHA 프로그램에 KOSHA GUIDE (P-107-2016)의 최악의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침에서 제시된 피해결과분석 변수를 반영하여 정량적 평가를 수행하였다.[7] 암모니아의 누출 시나리오에 적용된 프로그램 변수들은 다음과 같다.

1) 누출구의 직경
2) 누출 방지 시스템의 적용
3) 누출원의 높이는 지표면에서 누출되는 것으로 가정
4) 풍속 및 대기안정도 : 지상 10m 높이에서 초당 1.5m의 풍속으로 하고 대기안정도는 “F급의 대기안정도를 사용
5) 대기온도 : 지난 3년간 울산광역시 남구의 낮 동안의 최대 온도인 36.8℃를 적용[8]
6) 습도: 지난 3년간 낮동안의 최대 평균 습도인 62%를 적용[8]
7) 지표면의 굴곡상태: Open country(시골 지형)의 평탄한 지형을 적용
8) 끝점: 독성물질의 농도가 끝점농도(*mg/L*)에 도달하는 지점으로 적용

암모니아 저장탱크는 반지름 0.4 m, 길이 4m, 용량 $2m^3$의 수평형 원통 탱크로 평상시에 90% 수위의 level을 유지하게 되어 암모니아가 $1.8m^3$ 저장된다. 저장된 암모니아 체적을 누출량 계산을 위한 Matlab 프로그램에 적용하기 위해서 중량으로 환산하면 암모니아 저장량은 1,047.6kg이다.

저장탱크의 운전 온도는 35℃ 이며 운전 압력은 12.5 bar로 설정하였다. 누출이 진행됨에 따라서 탱크 내의 압력은 감소하는 것으로 가정하였다. 누출구의 직경은 0.02~0.2inch로 0.02inch 간격으로 총 10개 size의 누출구 직경을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 저장탱크에서 누출 발생 시에 Reserve tank로 보내는 펌프는 암모니아 운전에 사용되는 펌프 종류 중에서 5, 10 m^3/h 두 가지 경우에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. Figure 2 에서는 시나리오를 시뮬레이션 하기위해 대상공정을 모형화 하였다.

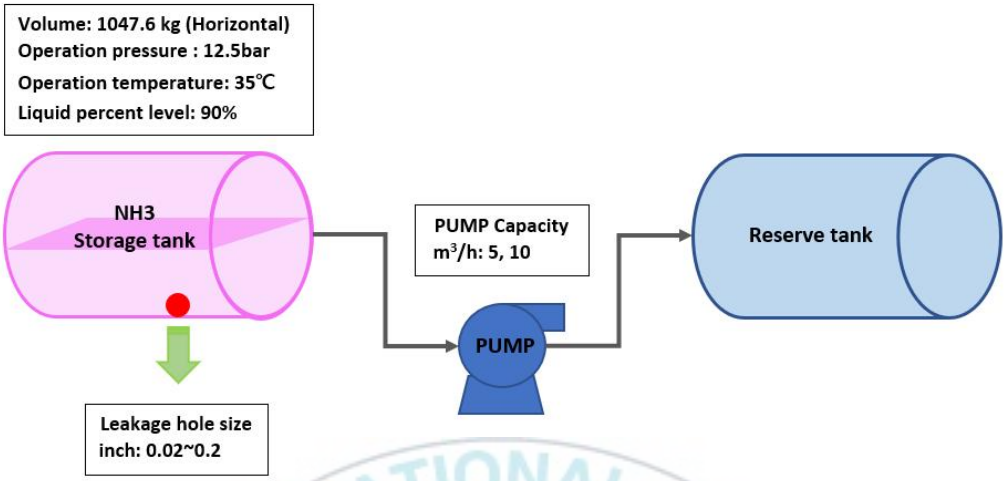


Figure 2. Scenarios for ammonia Leakage

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

2.3 Torricelli's theorem

Bernoulli 정리 중 수조 측면 하부의 대기와 개방된 작은 구멍을 통하여 유출되는 유체(Fluid)의 속도(Velocity) 값을 계산하는 Torricelli의 정리를 이용하여 저장탱크에서의 암모니아 누출량을 계산하였다. Torricelli의 정리는 비압축성 흐름(incompressible flow) 방정식에서 변형된 수식이다.

Torricelli의 정리를 적용하기 위한 비압축성 흐름 방정식은 다음과 같으며 비압축성 유체(incompressible fluid), 비점성 유체(inviscid fluid), 대기(1atm: atmosphere)에 개방, 수위의 하강 속도를 무시할 정도의 작은 구멍(토출구) 이러한 네 가지의 조건이 충족되어야 한다. 아래의 식(1)은 Torricelli의 정리의 공식을 나타낸다.

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

v는 유체의 속도, g는 중력가속도, h는 기준점에서의 높이(수위), P는 압력, ρ는 밀도이다. 이 식을 암모니아 저장탱크에서 누출이 발생하는 상황을 적용하면 다음과 같다.

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

v_1, v_2는 각각 liquid 최상단과 누출구에서의 유체의 속도, h_1, h_2는 각각 liquid 최상단의 액위의 높이와 누출구에서의 액위의 높이, P_1, P_2는 liquid 최상단에서의 압력과 누출구에서의 압력이다. 누출이 진행되면 암모니아의 부피는 감소하고 산소의 부피는 증가하게 된다. 따라서 탱크내부의 압력 또한 감소하기 때문에 이를 반데르발스 기체 상태 방정식을 이용하여 압력의 값으로 표현하였다.

$$(P+\frac{n^2a}{V^2})(V-nb)=nRT \quad (3)$$

$$P=\frac{nRT}{V-nb}-a(\frac{n}{V})^2$$

산소의 압력변화 P를 구하기 위하여 산소의 몰수 n은 98 *mol*, 산소 기체 상수는 8.3145 m^3*Pa/mol*K, 상수 a는 0.1358 m^6*Pa/mol^2, 상수 b는 0.0000365 m^3/*mol* 두었다.

암모니아 저장탱크의 용량이 충분히 크기 때문에 누출이 발상하였을 때 liquid 최상단에서 유체의 속도는 누출구에서의 유체 속도에 비해 매우 작다고 할 수 있다. 따라서 liquid 최상단에서의 누출 속도 v_1은 0이라고 놓고 관찰할 누출 구에서의 속도인 v_2를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2) + \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \tag{4}$$

이렇게 얻어진 v_2 값에 누출구의 액위 최상단 단면적을 곱해주면 누출 유량을 구할 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

2.4 Storage Tank 누출량 모델링

암모니아 저장탱크에서의 누출량 계산을 위해서는 액위의 최상단의 면적을 액위의 높이 변화량 dh와의 곱으로 계산한 것과 앞서 구한 v_2와 cross sectional area 곱하여 계산되어지는 누출량과 Reserve tank로 빠져나가는 펌프의 용량의 합을 시간에 따라 계산하여 탱크에서 빠져나가는 암모니아의 양을 계산하게 된다.

수평 원통형 저장탱크 누출량을 식으로 표현하기 위해 액위의 높이 변화를 나타내는 dh와 수평원통형 측면 부분의 원의 반지름 R, 액위 최상단에서 측면에서 바라본 액위의 길이 $2\sqrt{R^2-(R-h)^2}$, 액위 최상단의 면적 A, 저장탱크의 길이 L, 누출구의 직경을 $2r$로 둔다. 이를 도식화하여 표현하면 Figure 3와 같다.

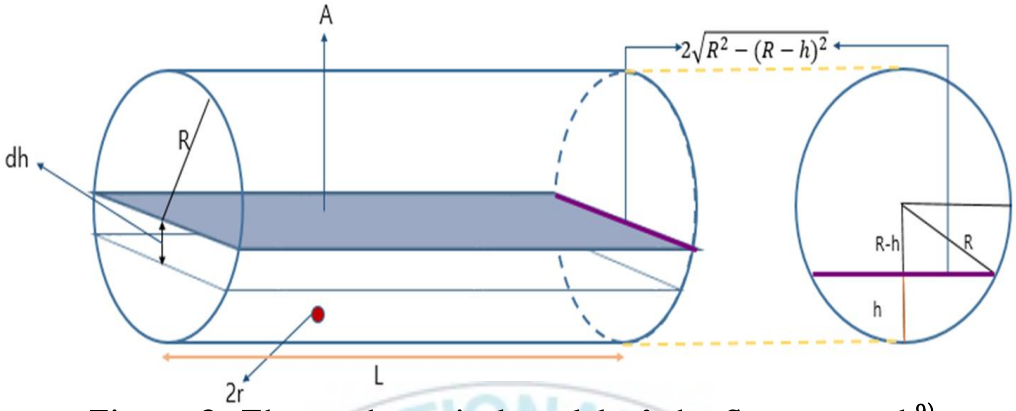


Figure 3. The mathematical model of the Storage tank[9)]

액위 최상단에서 측면에서 바라본 액위의 길이는 Figure 3에서 알 수 있듯이 반지름 R과 반지름 R에서 액위의 높이 h를 뺀 길이를 이용하여 피타고라스 정리를 통해 나타낼 수 있다.

저장탱크의 누출량을 계산을 표현한 식은 다음과 같다.

$$A dh_1 = 2L\sqrt{R^2-(R-h_1)^2}\, dh = (\pi r^2 v_2 + K)dt \qquad (5)$$

액위 최상단 높이에서의 면적 A와 액위 최상단의 높이 변화량 dh를 곱하여 누출량을 계산 할 수 있으며 또 다른 식으로 액위의 최상단에서 측면에서 바라보았을 때 액위의 길이와 저장탱크의 길이 L의 곱을 통하여 계산할 수 있다. 마찬가지로 누출구의 면적에 누출구 속도를 곱한 암모니아

의 양과 누출 시 암모니아가 Reserve tank로 이송되는 누출 시나리오대로 Km^3/h의 펌프 용량을 가지는 펌프로 빠져나가는 암모니아의 양의 합을 시간에 따라 변화량을 계산하여 저장탱크에서 누출되는 암모니아의 누출량을 표현하는 세 가지의 식을 얻을 수 있다.

시간에 따른 액위 변화에 관한 미분방정식을 구하기 위해 앞서 구한 식(5)를 아래의 과정을 통해 식(6), 식(7)으로 표현할 수 있다. 여기서 v_2는 식 (4)에서 알 수 있는 누출구의 속도이다.

$$2L\sqrt{R^2-(R-h_1)^2}\,\frac{dh}{dt}=\pi r^2\sqrt{2g(h_1-h_2)+\frac{2(P_1-P_2)}{\rho}}+K \tag{6}$$

$$\frac{dh}{dt}=\frac{\pi r^2\sqrt{2g(h_1-h_2)+\frac{2(P_1-P_2)}{\rho}}+K}{2L\sqrt{R^2-(R-h_1)^2}} \tag{7}$$

2.5 ERPG(Emergency Response Planning Guideline)

ERPG는 미국산업위생학회(AIHA)에서 개발된 지침으로 화학물질 누출 시 확산지역의 파악 및 지역사회의 비상대응계획을 수립하는데 사용되는 가이드라인이다. ERPG는 물질의 종류와 농도에 따라 각각의 등급을 지정하고 있는데 등급의 표현은 ERPG-1, 2, 3 세단계로 나타낸다.

각각의 등급에 대한 피해정도는 아래와 같다.

1) ERPG-1

1시간까지 노출되더라도 미약한 건강이상 효과를 나타내지 않고 명확히 구분 할 수 있는 불쾌한 냄새도 감지하지 못하는 대기 오염원 최대 농도 (1시간 이상 노출 또는 기준치 초과 시 회복 가능한, 미약한 건강이상 초래)[10)]

2) ERPG-2

회복 불가, 심각한 건강이상 효과 또는 스스로 보호수단을 강구하기 위한 개인의 활동력을 손상시킬만한 증상을 보이지 않고 1시간까지 노출할 수 있는 오염원 최대농도 (1시간 이상 노출 또는 기준치 초과시 회복 불가

또는 심각한 건강이상 초래)[10)]

3) ERPG-3

생명을 위협받거나 생명위협 상태로 진전될 수 있는 건강 효과를 나타내지 않고 1시간까지 노출할 수 있는 오염원 최대농도 (1시간 이상 노출 또는 기준치 초과시 생명위협 가능)[10)]

실제 대피는 ERPG-2를 기준을 가이드로 권고하고 있으며, 암모니아의 ERPG 농도는 Table 3 과 같다.

본 연구에서는 누출량에 따른 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3 농도 확산 범위를 비교 분석하였다.

Table 3. Ammonia ERPG

Chemical Name	Ammonia
CAS Number	7664-41-7
Molecular Formula	NH^3
Structural Formula	H | N — H | H
ERPG-1	25 ppm (17.5 mg/m^3)
ERPG-2	150 ppm (105 mg/m^3)
ERPG-3	1,500 pm (1,070 mg/m^3)

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

2.6 ALOHA SIMULATION

ALOHA는 Areal Location of Hazardous Atmospheres의 약자로 미국의 해양대기국(NOAA)이 개발하여, 환경보호청(EPA)과 공동으로 활용하는 피해예측 프로그램이다.

ALOHA의 특징은 일반적인 경우에 Gaussian 대기 확산 모델을 적용하고 공기보다 무거운 가스 또는 극저온 가스의 경우에는 DEGADIS 누출 모델을 사용하여 화학물질별로 자동으로 영향범위를 산정한다. 또한 화학물질에 대한 풍부한 Data Base는 외부에서 별도 이용가능하고 모델의 결과는 Google Earth 프로그램과 호환되어 피해영향 범위를 지도상에 직접 표출할 수 있다. 따라서 ALOHA를 활용하여 사고 시나리오별(독성물질 누출, 화재, 폭발 등) 사고영향범위 등을 예측한 후, 그 피해범위를 지도상에 표출하여 비상대응계획 수립 등에 활용할 수 있다. ALOHA는 기상조건으로 풍속, 풍향, 대기안정도, 표면거칠기 및 대기 역전층을 고려한다[11].

누출조건은 액면(Pool), 용기(Tank), 배관(Pipe)에서 액체 또는 고압가스 누출에 적용할 수 있다.

제 3 장 연구 결과

3.1 암모니아 저장탱크 누출량 분석

암모니아 저장탱크에서 0.02inch~0.2inch 까지 0.02inch 간격으로 총 10가지 누출구의 size 크기로 누출사고가 발생한다고 가정하여 누출량 계산을 위한 시뮬레이션을 진행하였으며 Reserve tank를 설치하였을 때의 효과를 비교하기 위해 Reserve tank가 없이 저장탱크에서 암모니아의 누출만 발생하는 경우의 암모니아 누출량과 Reserve tank의 설치로 인해 Reserve tank로 빠져나가는 암모니아의 양과 저장탱크에서 누출되는 양을 계산하여 그 값을 비교하여 보았다. 암모니아 저장탱크 누출 시나리오를 시뮬레이션하기 위해 사용된 데이터는 Table 4 와 같다.

Table 4. Matlab Simulations Input data

Data	Value
Gravity	9.81 m^2/s
radius of tank	0.4 m
Operation pressure	12.5 bar
Operation Temperature	35 ℃
Atmospheric pressure	101.325x$10^3 Pa$
Length of tank	4 m
NH^3 Mass	1047.6 kg
Leak hole size	0.02~0.2 $inch$
Hole Height	0 m
Pump Capacity	0, 5, 10 m^3/h

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

3.2 누출구 size에 따른 storage tank 누출량 비교

암모니아 저장탱크에 Reserve tank 없이 0.04inch 크기의 누출구에서 암모나이가 누출 된 것으로 시뮬레이션 한 결과는 Figure 4와 같다.

시간이 지나면서 암모니아 저장탱크 내부에 존재하는 암모니아의 양은 일정하게 줄어드는 반면에 누출되는 양은 일정하게 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

또한 동일한 조건에서 누출구의 크기만 0.1inch 크기와 0.2inch 크기로 각각 변경하여 실험하여 본 결과 0.1inch 크기의 누출구의 경우 약 6분이 경과하면서 암모니아 저장탱크에서 누출된 양이 50%를 넘어서면서 저장탱크에 있는 암모니아의 양보다 많아지게 되는 것을 Figure 5에서 볼 수 있으며, 0.2inch 누출구의 경우 약 3분이 경과한 시점에서 암모니아 저장탱크가 완전하게 비워지는 것을 Figure 6에서 확인할 수 있다.

0.2inch 누출구의 크기가 0.1inch 누출구 크기의 2배에 해당되지만 누출시간은 약 4배 정도 빠른 것을 확인할 수 있다.

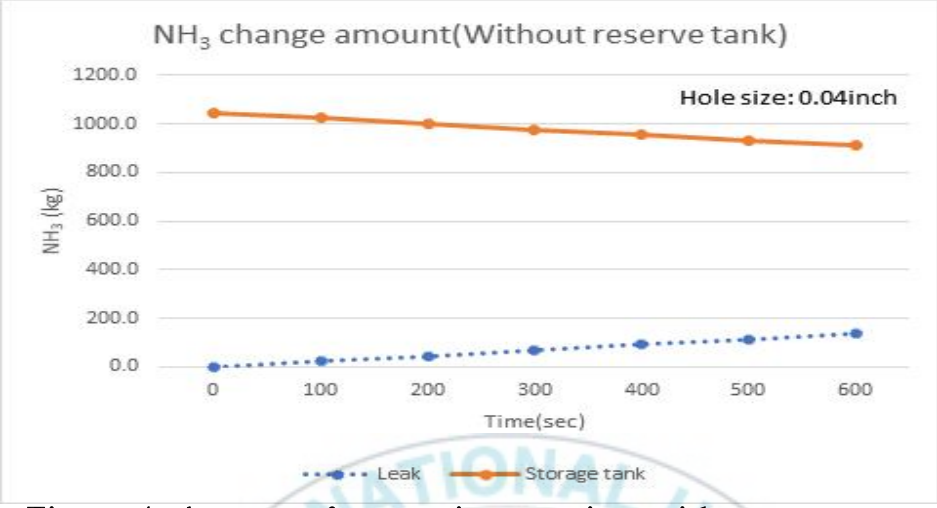


Figure 4. Amount of ammonia over time without a reserve tank (0.04 inch)

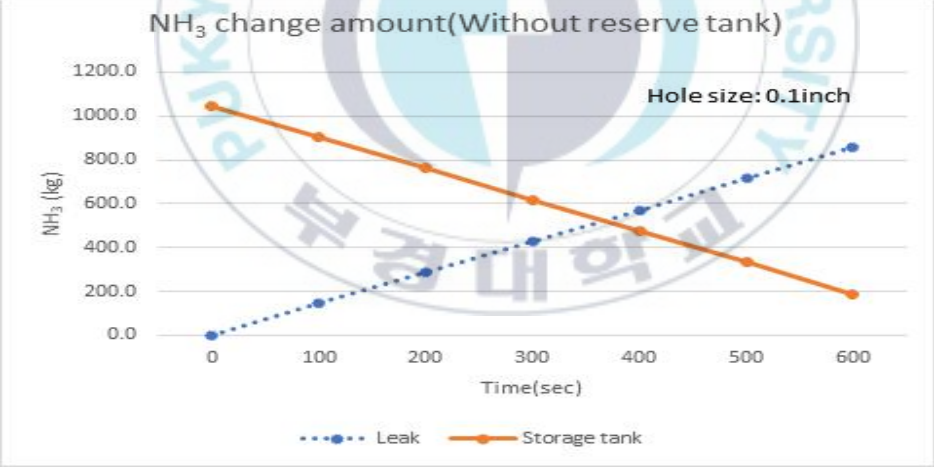


Figure 5. Amount of ammonia over time without a reserve tank (0.1 inch)

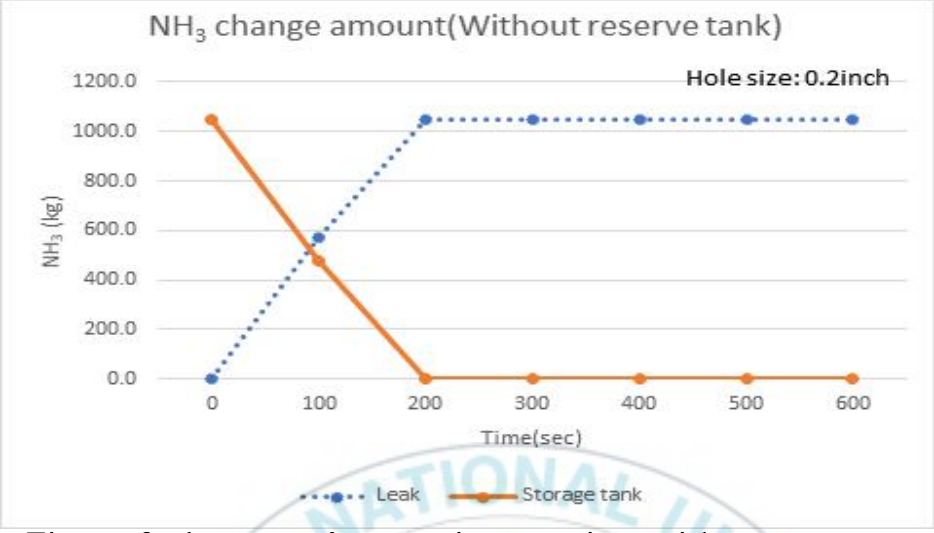


Figure 6. Amount of ammonia over time without a reserve tank (0.2 inch)

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

3.3 펌프용량에 따른 Reserve tank의 누출량 감소효과

Reserve tank의 효과를 검증하기 위해서 Reserve tank 없이 암모니아 저장탱크에서 0.04inch 누출구로부터의 누출량과 Reserve tank에 연결되어 있는 경우 누출량은 Figure 4와 Figure 7, Figure 8에서 확인할 수 있으며 이를 각각 비교해보았을 때 Reserve tank에 연결되어 있는 경우에는 누출량의 기울이가 낮은 것을 알 수 있으며 Reserve tank의 효과로 누출량이 현저하게 감소된 것을 확인 할 수 있다.

Figure 7에서의 $5m^3/h$ 이송능력을 가지는 이송펌프와 Figure 8에서는 $10m^3/h$ 이송능력을 가지는 이송펌프를 통한 이송시 Reserve tank의 효과에 대해서 비교하여 보면 이송능력이 더 큰 이송펌프로 암모니아를 이송하는 경우 시간에 따라 Reserve tank로 이송되는 암모니아 양의 기울기가 현저하게 크다는 것을 알 수 있다.

동일한 방법으로 0.1inch 의 누출구에서 암모니아가 누출될 때 $5m^3/h$, $10m^3/h$의 이송펌프를 통해 Reserve tank로 이송한 것으로 가정한 경우에서의 시뮬레이션 결과 Figure 9, Figure 10와 Reserve tank를 설치하지 않은 경우의 누출 결과 Figure 5와 비교 분석하고 0.2inch 의 누출구에서 암모니아가 누출될 때 $5m^3/h$, $10m^3/h$의 이송펌프를 통해 Reserve tank로 이송한 것으로 가정한 경우의 시뮬레이션 결과 Figure 11, Figure 12와

Reserve tank를 설치하지 않은 경우의 누출 결과 Figure 6를 분석하여 보면 앞서 0.04inch의 누출구에서의 시뮬레이션 결과에서처럼 Reserve tank의 연결 효과에 의해 누출량의 기울이가 낮은 것을 알 수 있으며 Reserve tank의 효과로 누출량이 현저하게 감소된 것을 확인 할 수 있다.

또한 동일한 누출구 크기에서 Reserve tank로 이송되는 펌프의 효과를 분석하기 위해 Figure 7과 Figure 8을 , Figure 9와 Figure 10을, Figure 11과 Figure 12를 각각 비교 분석하여 보면 동일한 Reserve tank가 암모니아 저장탱크로 연결되어 있는 경우라도 연결되어 있는 이송펌프의 이송능력이 클 수록 Reserve tank의 효과에 차이가 난다는 것을 알 수 있다.

그리고 누출구의 크기와 Reserve tank로 이송능력의 상관 관계에 대해서 알아보기 위해서 Reserve tank로 연결된 펌프의 이송능력은 5m^3/h로 유지하고 누출구의 크기만 다르게 하여 시뮬레이션 한 결과인 Figure 7, Figure 9, Figure 11를 비교 분석하여 보면 누출구의 크기가 가장 작은 0.04inch인 경우에 Reserve tank로의 이송효과가 뛰어나다는 것을 알 수 있으며 누출구의 크기가 가장 큰 0.2inch의 경우에는 Reserve tank로의 이송효과가 가장 떨어진 다는 것을 확인할 수 있다.

동일한 방법으로 10m^3/h 이송능력을 가지는 펌프는 유지하고 누출구의 크기만 0.04inch, 0.1inch, 0.2inch로 적용한 결과도 Figure 8, Figure 10, Figure 12를 확인해보면 Reserve tank 로 이송하는 펌프의 이송능력이

동일할 경우 누출구의 크기가 작을수록 Reserve tank의 효과가 더 극대화 된다는 것을 알 수 있다.

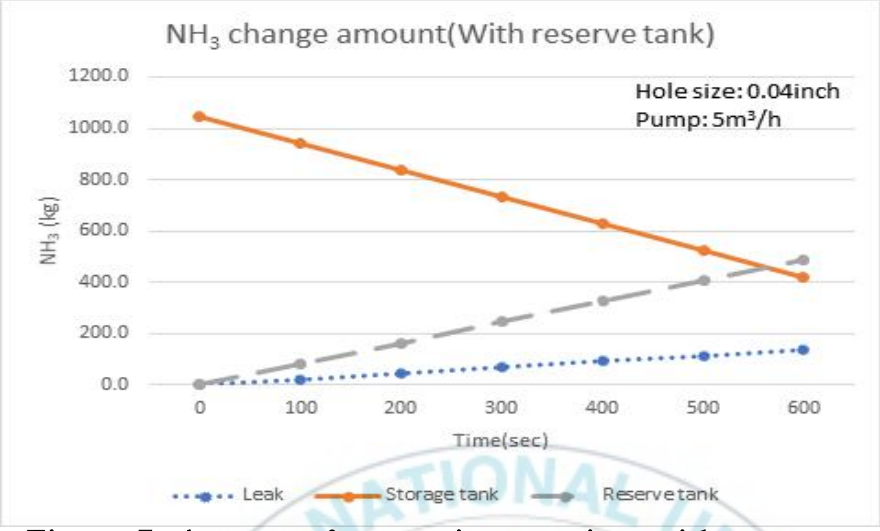


Figure 7. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.04 inch , pump 5m^3/h)

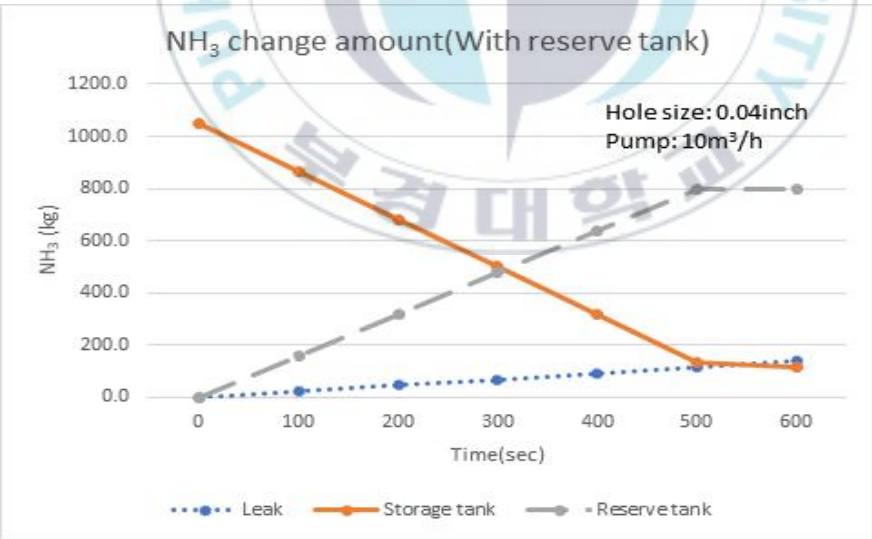


Figure 8. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.04 inch , pump 10m^3/h)

Figure 9. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.1 inch , pump 5m^3/h)

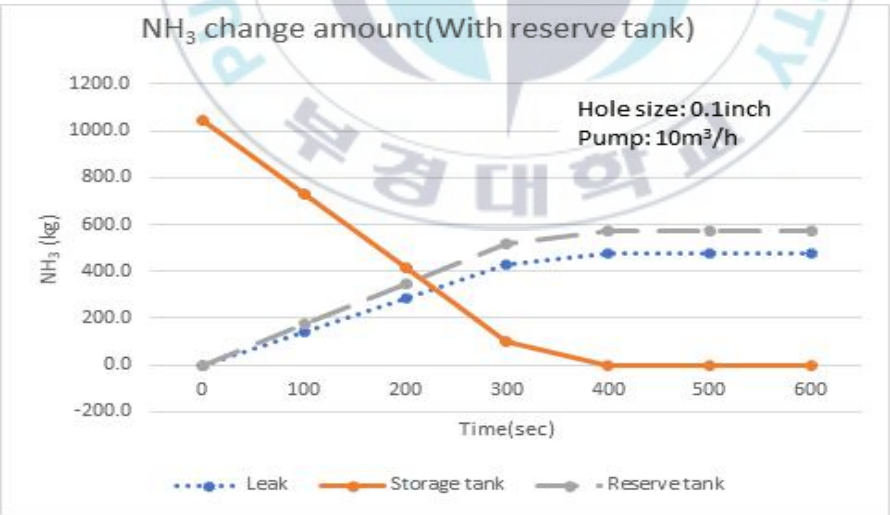


Figure 10. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.1 inch , pump 10m^3/h)

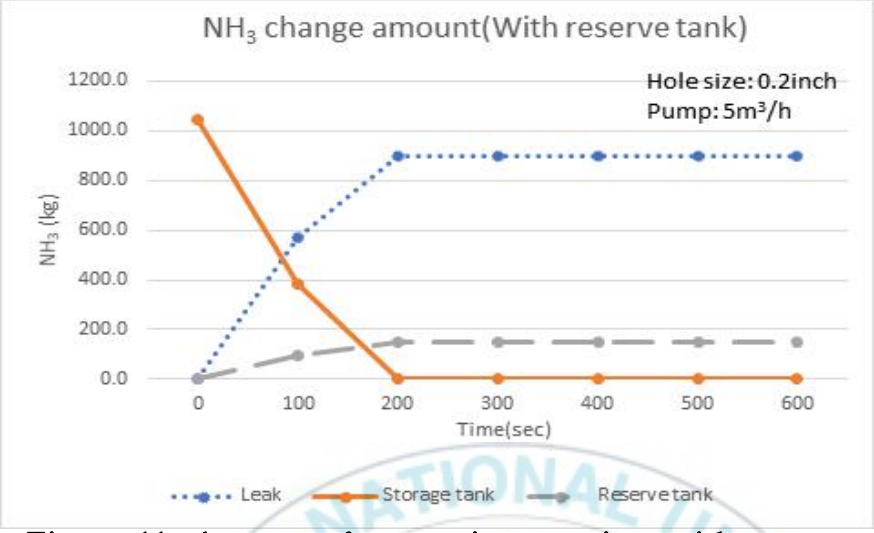


Figure 11. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.2 inch , pump 5m^3/h)

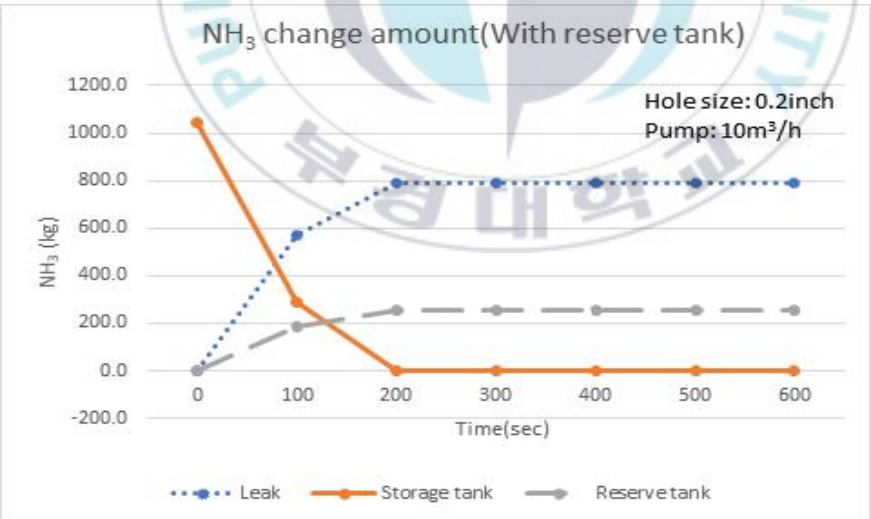


Figure 12. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.2 inch ,pump 10m^3/h)

3.4 누출구 size 와 펌프용량에 따른 누출량 감소 효과 분석

0.02~0.2 inch의 누출구 크기와 5m^3/h, 10m^3/h의 펌프용량에 따른 Reserve tank 설치로 인한 누출량 변화는 Figure 13에서 암모니아 저장탱크의 누출량은 누출구 크기에 비례하고 Reserve tank로의 이송펌프 용량에 반비례한다는 것을 알 수 있다.

누출구와 펌프용량에 따른 암모니아의 최종 누출량을 Table 5에서 확인하여 보면 동일한 10m^3/h의 펌프용량일 경우 0.2 inch에서 793 kg이 누출된 반면에 0.02 inch에서 37.2 kg가 누출되어 약 20배 정도의 누출량 감소 효과를 확인할 수 있다.

0.02 inch에서 암모니아 누출시 Reserve tank 설치와 미설치시의 최종 누출량을 비교 분석하여 보면 10m^3/h의 용량의 펌프를 통한 Reserve tank로의 이송을 적용한 시뮬레이션에서의 암모니아 최종 누출량이 Reserve tank 미설치를 적용한 시뮬레이션에서의 암모니아 최종 누출량과 비교하여 96.5%가 누출되지 않고 Reserve tank로 이송 및 저장 되는 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

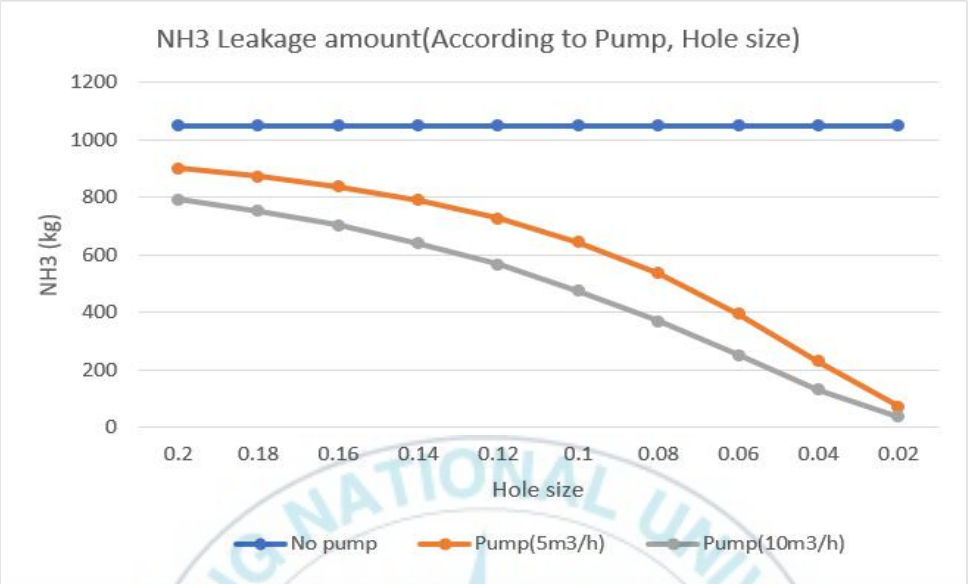


Figure 13. Comparison of Ammonia Leakage Amount

(According to Pump, Hole size)

Table 5. Final amount of Ammonia Leakage

Hole size(inch)	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02
No pump	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6	1047.6
Pump($5m^3/h$)	900.3	872.2	836.2	789.1	727.2	644.8	535.8	395.5	229.2	71.2
Pump($10m^3/h$)	793.0	751.8	701.5	640.0	565.0	474.6	368.4	250.1	131.5	37.2

3.5 Storage tank 누출 피해범위 분석

Storage tank로 부터 암모니아 누출피해범위 평가는 앞서 언급한데로 ALOHA 프로그램을 이용하였다. 시나리오는 Matlab을 이용하여 누출량 계산 시뮬레이션을 진행하였을 때와 동일한 KOSHA GUIDE (P-107-2016) 최악의 시나리오를 적용하기 위해서 Table 4의 data를 이용하였으며 시뮬레이션을 진행하였으며 암모니아가 모두 누출된다고 가정하였다.

그 밖에 추가적으로 ALOHA 프로그램에 적용한 Data는 Table 6와 같다. 피해 형태와 범위는 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3에 대해서 모두 검증하였다.

Table 6. ALOHA Additional Input Data

Data	Value
Building type	Enclosed
Wind direction	NNW
Source Modeling	Direct
Cloud Cover	5
Leakage Type	Continuous source
Chemical Source	Liquid

3.6 누출구 size에 따른 storage tank 누출 피해범위 비교

본 연구에서 암모니아 누출 피해범위 분석의 정량적 평가를 수행할 때 암모니아가 저장탱크로 부터 모두 누출된다고 가정하였기 때문에 누출구 크기에 따른 암모니아의 최종 누출량에는 차이가 없는 것으로 적용하였다.

누출되는 것암모니아 저장탱크에 Reserve tank 없이 0.04inch 크기의 누출구에서 암모나이가 누출되었을 때의 피해범위를 시뮬레이션 한 결과는 Figure 14와 Table 7에서 확인할 수 있다.

Firgure 14에서는 누출된 암모니아의 독성 피해 범위를 ALOHA 프로그램에서의 threat zone과 Google map을 통해 실제 대상 공정이 위치한 지도 위에 표현하였다. Google map에서 알 수 있듯이 대상 공정 주변에 많은 공장과 거주지가 위치하여 누출 사고 발생시 많은 인명 피해가 발생할 수 있다.

Table 7에서는 1시간 이상 노출 또는 기준치 초과 시 회복 가능한, 미약한 건강 이상을 초래하는 ERPG-1의 피해범위가 7.4km까지 도달하고, 1시간 이상 노출 또는 기준치 초과 시 회복 불가 또는 심각한 건강 이상을 초래하는 ERPG-2의 피해범위가 3.3km , 1시간 이상 노출 또는 기준치 초과 시 생명 위협이 가능한 ERPG-3의 피해범위가 1.3km인 것을 확인할 수 있다.

Figure 14. Threat zone of Ammonia without a reserve tank (0.04 inch)

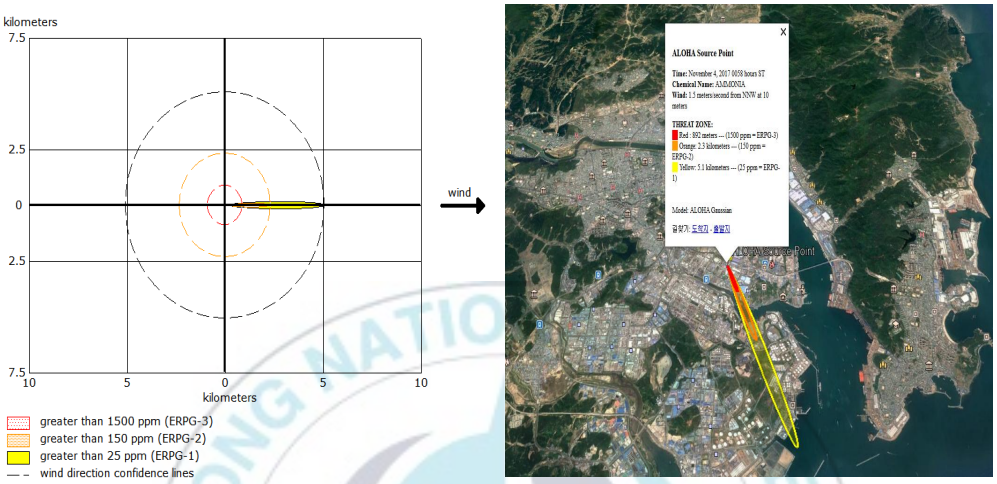


Table 7. ERPG Damage extent without a reserve tank (0.04 inch)

Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	1.3 kilometers
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	3.3 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	7.4 kilometers

3.7 펌프용량에 따른 storage tank의 누출 피해범위 비교

암모니아 저장탱크에 Reserve tank를 연결한 것으로 가정하여 이송펌프의 용량에 따른 누출 피해범위를 검증하기 위해서 누출구의 크기는 각각 0.04 inch, 0.1 inch, 0.2 inch 로 동일하게 유지하고 이송펌프의 용량만 5m^3/h, 10m^3/h의 두가지 경우로 적용하여 ALOHA프로그램을 통한 정량적 평가를 수행하였다.

0.04 inch의 누출구 크기에서는 5 m^3/h 용량의 펌프를 적용하여 산출된 피해범위를 Figure 15, Table 8에서 확인할 수 있으며 10m^3/h 용량의 펌프를 적용한 시뮬레이션에서의 피해범위는 Figure 16, Table 9에서 확인할 수 있는데 펌프 용량이 더 큰 10m^3/h에서의 ERPG-1의 피해범위가 5 m^3/h 용량의 펌프를 적용한 ERPG-1의 피해범위보다 약 700m 경감되는 것을 알 수 있다.

0.1 inch의 누출구 크기에서는 5 m^3/h 용량의 펌프를 적용하여 산출된 피해범위를 Figure 17 Table 10에서 확인할 수 있으며 10m^3/h 용량의 펌프를 적용한 시뮬레이션에서의 피해범위는 Figure 18, Table 11에서 확인할 수 있는데 펌프 용량이 더 큰 10m^3/h에서의 ERPG의 피해범위가 5 m^3/h 용량의 펌프를 적용한 ERPG의 피해범위보다 ERPG-1에서는 약 64m 경감되고 ERPG-2에서는 약 300m 경감, ERPG-3에서는 약 700m가

경감되는 것을 알 수 있다.

0.2 inch의 누출구 크기에서는 5 m^3/h 용량의 펌프를 적용하여 산출된 피해범위를 Figure 19 Table 12에서 확인할 수 있으며 10m^3/h 용량의 펌프를 적용한 시뮬레이션에서의 피해범위는 Figure 20, Table 13에서 확인할 수 있는데 펌프 용량이 더 큰 10m^3/h에서의 ERPG의 피해범위가 5 m^3/h 용량의 펌프를 적용한 ERPG의 피해범위보다 ERPG-2에서는 약 200m 경감, ERPG-3에서는 약 400m가 경감되는 것을 알 수 있다.

Figure 15. Threat zone of Ammonia with a reserve tank

(0.04 inch ,pump 5m^3/h)

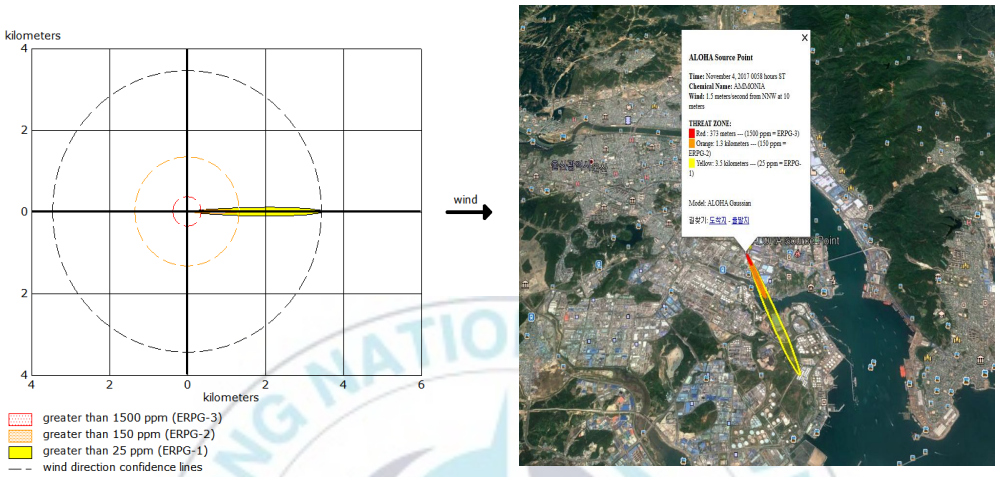


Table 8. ERPG Damage extent without a reserve tank

(0.04 inch ,pump 5m^3/h)

Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	373 meters
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	1.3 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	3.5 kilometers

Figure 16. Amount of ammonia over time with a reserve tank (0.04 inch ,pump 10m^3/h)

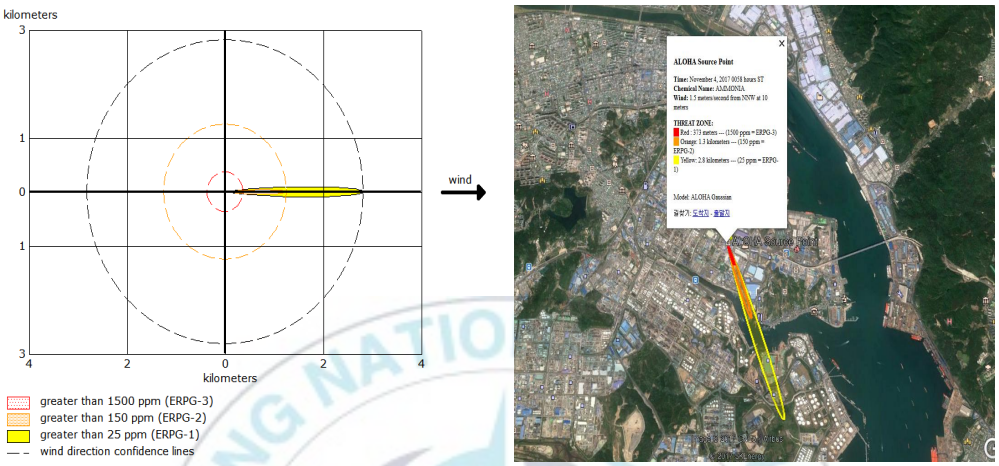


Table 9. ERPG Damage extent without a reserve tank (0.04 inch ,pump 10m^3/h)

Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	373 meters
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	1.3 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	2.8 kilometers

Figure 17. Threat zone of Ammonia with a reserve tank (0.1 inch ,pump 5m^3/h)

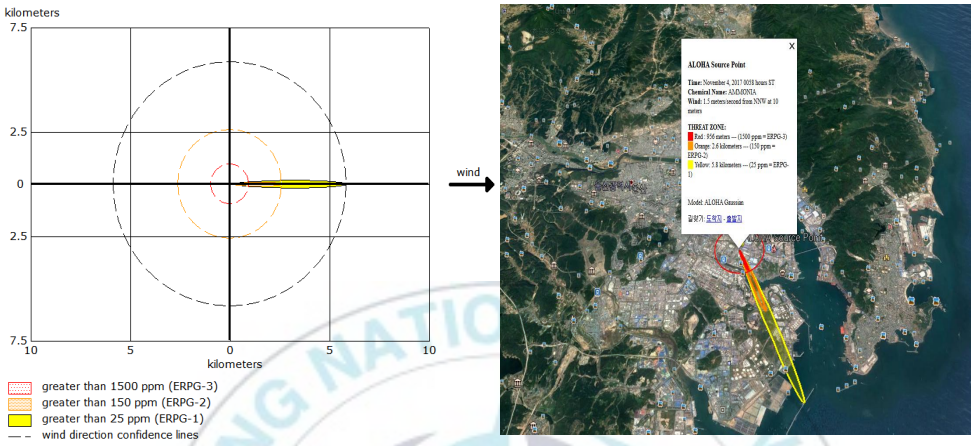


Table 10. ERPG Damage extent without a reserve tank (0.1 inch ,pump 5m^3/h)

Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	956 meters
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	2.6 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	5.8 kilometers

Figure 18. Threat zone of Ammonia with a reserve tank

(0.1 inch ,pump 10m^3/h)

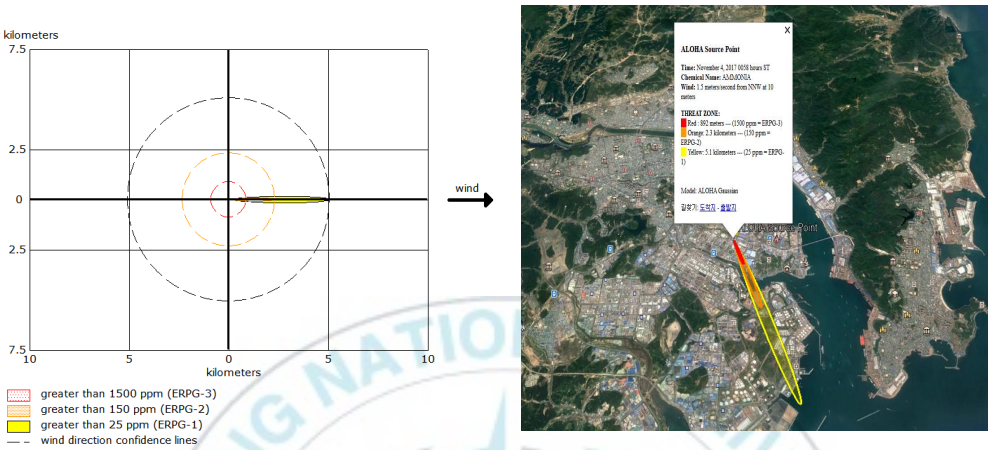


Table 11. ERPG Damage extent without a reserve tank

(0.1 inch, pump 10m^3/h)

Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	892 meters
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	2.3 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	5.1 kilometers

Figure 19. Threat zone of Ammonia with a reserve tank

(0.2 inch ,pump 5m^3/h)

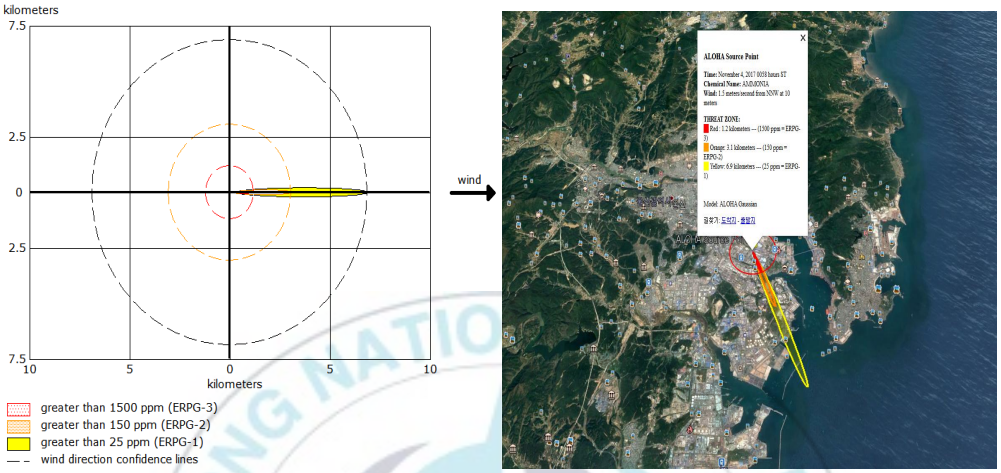


Table 12. ERPG Damage extent without a reserve tank

(0.2 inch ,pump 5m^3/h)

Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	1.2 kilometers
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	3.1 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	6.9 kilometers

Figure 20. Threat zone of Ammonia with a reserve tank

(0.2 inch ,pump 10m^3/h)

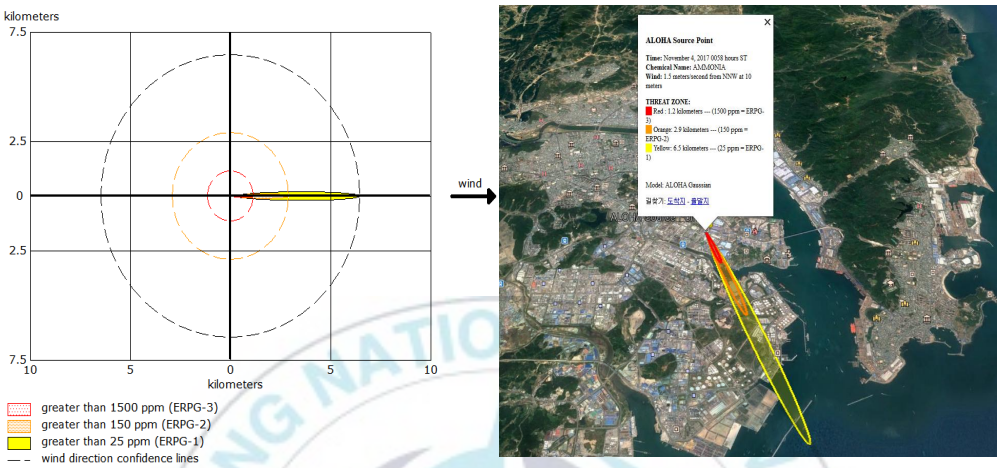


Table 13. ERPG Damage extent without a reserve tank

(0.2 inch ,pump 10m^3/h)

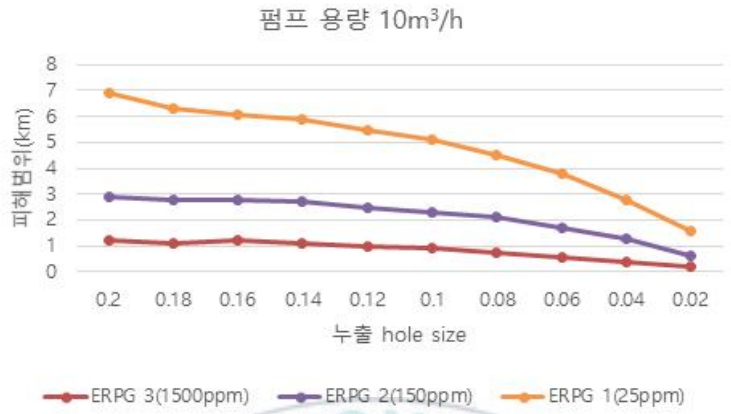
Damage type	Distance
ERPG-3 (Red : 1500 ppm)	1.2 kilometers
ERPG-2 (Orange : 150 ppm)	2.9 kilometers
ERPG-1 (Yellow : 25 ppm)	6.5 kilometers

3.8 누출구 크기와 펌프용량에 따른 누출 피해범위 경감 효과 분석

암모니아 저장탱크에서의 누출시 누출구 크기에 따른 피해범위를 분석하기 위해서 Reserve tank로 이송하는 펌프의 용량은 동일하게 유지하고 누출구의 크기를 0.02 inch 간격으로 0.02 ~ 0.2 inch 범위 내에서 누출되는 양을 근거로 하여 ALOHA 프로그램을 통한 연구를 수행하였다. 연구결과 펌프의 용량을 5m^3/h으로 동일하게 유지하였을 때 누출구 크기의 차이에 따른 피해범위 시뮬레이션 결과는 Figure 22에서 확인할 수 있다. 이때 0.2 inch의 누출구 크기에서 ERPG 피해범위가 각각 ERPG-1 6.9 km, ERPG-2 3.1 km, ERPG-3 1.2 km로 가장 큰 것으로 나타났으며 0.02 inch에서 ERPG 피해범위가 ERPG-1 1.7 km, ERPG-2 0.611 km, ERPG-3 0.18 km로 가장 작은 것을 알 수 있다. 펌프의 용량을 10m^3/h으로 유지한 연구에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

또한 Figure 21 과 Figure 22를 통해서 누출구의 크기에 따른 ERPG 피해범위의 변화량을 보면 ERPG - 1의 피해범위가 ERPG-3의 피해범위의 기울기보다 크다는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 누출구 크기가 작을 수록 독성이 강한 ERPG-3의 피해범위 경감 보다 독성이 약한 ERPG-1의 피해범위 경감에 더 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

펌프 용량 차이에 따른 효과는 Figure 21 과 Figure 22에서 볼 수 있듯이 펌프 5m^3/h 와 펌프 10m^3/h에서의 차이는 동일한 누출구 크기라도 펌프 용량이 클 경우 최대 800m 이상의 ERPG-1에서의 피해범위가 감소되는 것을 확인 할 수 있으며 펌프용량의 크기가 ERPG-2, ERPG-3에서보다 독성 농도가 약한 ERPG-1에서 피해범위 경감 효과에 더 큰 영향을 끼치는 다는 것을 알 수 있다.



펌프10m³/h	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02
ERPG 1	1.2	1.1	1.2	1.1	0.985	0.892	759	575	373	180
ERPG 2	2.9	2.8	2.8	2.7	2.5	2.3	2.1	1.7	1.3	0.611
ERPG 3	6.9	6.3	6.1	5.9	5.5	5.1	4.5	3.8	2.8	1.6

Figure 21. ERPG extent accroding to hole size (Pump 10m³/h)

펌프5m³/h	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12	0.1	0.08	0.06	0.04	0.02
ERPG 1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	0.956	0.788	577	373	180
ERPG 2	3.1	3	3	2.9	2.8	2.6	2.4	2	1.3	0.611
ERPG 3	6.9	6.8	6.6	6.4	6.2	5.8	5.3	4.6	3.5	1.7

Figure 22. ERPG extent accroding to hole size (Pump 5m³/h)

제 4 장 결론 및 고찰

본 연구에서는 냉동 제조 시설의 냉매로 사용되는 암모니아 저장탱크에서 누출사고가 발생할 경우 안전장치로서 Reserve tank가 설치되어 있을 때 독성 피해범위에 미치는 영향을 검증하기 위한 연구를 수행하였다. 누출구의 크기와 Reserve tank로 암모니아를 이송하는 펌프의 용량에 따른 누출량을 계산하기 위해서 Matlab 프로그램을 이용하였으며 산출된 누출량을 근거로 암모니아의 독성 피해범위를 ALOHA 정량적 평가 프로그램을 이용하여 Reserve tank 설치로 인한 효과를 평가하였다.

연구결과를 통하여 Reserve tank 효과가 이송 펌프 용량에 따라 23%~50%까지 차이난다는 것이 검증되었다. 또한 누출구의 크기에 따라 Reserve tank의 효과 차이가 발생하며, 누출구의 직경이 작을수록 Reserve tank의 효과가 증대됨을 알 수 있었다.

동일한 누출구 크기라도 펌프 용량이 클 경우 최대 800m 이상의 ERPG-1 (암모니아 농도 25ppm) 피해범위가 감소되는 것이 확인되었다. 그리고 독성 농도가 높은 ERPG-2, ERPG-3의 피해범위 감소 효과 보다 독성 농도가 낮은 ERPG-1에서 감소효과가 더 큰 것이 검증 되었다.

누출량 감소 효과 대비 ERPG의 피해범위 감소효과가 크지 않다는 것을 알 수 있으며 원인은 같은 양의 암모니아가 누출되더라도 누출시간이 길 경우

풍속 등의 대기조건에 따라 더 많은 영향을 받기 때문에 암모니아 누출량이 감소된 양 만큼 Reserve tank로 이송 되어 누출시간이 단축되는 효과에 의한 것으로 볼 수 있다.

마지막으로 산업 현장에 Reserve tank를 안전장치로서 설치한 효과를 극대화 하기 위해서는 저장탱크의 용량이 작은 냉동 제조 시설의 암모니아 저장탱크 같은 조건에서 적용이 용이 하며 대용량의 Reserve tank를 설치할 경우 설치 공간 확보에 대한 부담이 크고 경제성이 떨어진다고 볼 수 있다.

또한 펌프의 용량은 암모니아 저장탱크의 용량과 배관 크기를 고려하여 최대한 크게 설치하는 것이 효율적이다. 누출 사고를 조기에 발견할수록 Reserve tank의 효과가 크므로, 가스 누설 감지시설과 Interlock을 연동 설치하여 누출 감지시 자동으로 Pumping 되도록 설치하는 것이 바람직하다.

Reserve tank를 설치함으로서 누출량 및 독성 피해범위 감소에 대한 정량적인 데이터를 확보하여 비상대응 시나리오 작성시 감소된 피해범위를 고려하여 비상대응 계획을 수립한다. 그리고 암모니아 저장탱크에 대한 Overhaul 진행시 별도의 drain 작업대신 Reserve tank를 Spare tank로서 임시 사용이 가능하여 drain 작업시 암모니아 가스 누출에 대한 근본적인 위험을 제거하는 효과도 얻을 수 있다.

향 후 연구에서는 더 다양한 정량적 평가 프로그램 수행을 통해서 안전장치 설치로 인한 유해화학물질 누출 피해범위 경감 효과에 대한 평가가 더 활성화

되고 여러 종류의 안전장치에 대한 피해범위 경감 효과 검증이 이루질 필요가 있다. 또한 이를 근거로 하여 산업현장에서의 안전장치 설치에 대한 기준이 마련 되었으면 한다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

참고문헌

1) 한국산업안전공단, 중대산업사고 사례, 2014

2) 박상욱, 정승호, “냉동, 냉장 시스템에서 NH3 누출 사고 시 장외영향평가를 위한 피해범위 및 대피거리 산정에 관한 연구”, 아주대학교 환경안전공학과, 2016

3) 안전보건공단 물질안전보건자료, http://www.kosha.or.kr/

4) Rana MA, Guo Y, Mannan MS, Two water curtain systems to identify their effectiveness for a liquefied natural gas (LNG) release, J. Loss. Prevent. Proc, 23, 77, 2010

5) Suardin JA, Qi R, Cormier BR, Rana M, Zhang Y, Mannan MS, Fire suppression materials on suppression of LNG pool fires for reducing radiant heat from the pool fire, J. Loss. Prevent. Proc, 24, 63, 2011.

6) Busini V, Rota R, A mitigation barriers to interrupt LNG travel using computational fluid dynamics (CFD), J. Loss. Prevent. Proc, 29,

13, 2014

7) 한국산업안전보건공단, 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술 지침, 2016

8) 기상청 지역별상세관측자료(AWS), http://www.kma.go.kr/

9) 박재연, “저장 탱크에서 위험물 누출량 계산을 위한 모델링 연구”, 2017

10) American Industrial Hygiene Association, “Emergency Response Planning Guidelines”, ERPG Introduction, 2016

11) 화학물질안전원, ALOHA 사용자 가이드, 2015