



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

벤젠 옥외탱크저장소 누출사고 시
누출속도를 고려한 수용설비 설계에
관한 연구



부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

안 전 공 학 과

송 현 오

공 학 석 사 학 위 논 문

벤젠 옥외탱크저장소 누출사고 시
누출속도를 고려한 수용설비 설계에
관한 연구

지도교수 이 창 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2020년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

안 전 공 학 과

송 현 오

송현오의 공학석사 학위논문을 인준함.

2020년 2월 21일



위 원 장 공학박사 장 성 록 (인)

위 원 공학박사 권 오 현 (인)

위 원 공학박사 이 창 준 (인)

A study for the design of a mitigation system considering leakage velocity
of a benzene tank storage

Hyeon Oh Song

Department of Safety Engineering, Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

The possibility of leakage accidents has been being increased since the number of hazardous chemical substances, tanks and facilities has been increased. In a typical example, the leakage accident from an oil storage tank occurred in April 2014 and the total loss is KRW 18 billion. After this accident, many companies and organizations have begun to develop a mitigation system to minimize the loss of the leakage accident.

The aim of this study is to design the mitigation system for handling leakage accidents. In this study, the Benzene tank is selected to verify the performance of a mitigation system. In order to design this system, the leakage velocity and quantity according to time should be analyzed. The basic concept of the mitigation system is that the leakage fluid of Benzene is moved to a reserve tank and this is transferred to a spare tank by a pump for avoiding the overflow of a reserve tank. Based on

the mathematical simulation, the optional pump capacity is investigated by the consideration of the overflow. Throughout this study, the optional design of a case study is suggested and this study can play a critical role to provide a guideline for designing this system.



목 차

Abstract	i
목차	iii
Table List	v
Figure List	vi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 목적	4
1.3 연구방법	5
제 2 장 연구 내용	6
2.1 대상공정	6
2.2 누출 사고시나리오	11
2.3 누출속도 및 누출량 계산	13
2.4 수직 원통형 옥외탱크저장소의 누출속도 모델링	15
제 3 장 연구결과	18
3.1 벤젠 옥외탱크저장소 누출속도 분석	18
3.2 옥외탱크저장소 누출공 크기에 따른 누출량 비교	23
3.3 누출위험물 수용설비 전용유조 설계	27
3.4 전용유조 크기와 펌프 용량에 따른 모델링	30
3.5 누출공 크기에 따른 펌프 용량 비교	36
제 4 장 결론 및 고찰	46



Table List

Table 1. Benzene physicochemical characteristic	3
Table 2. Design spec of tanks	9
Table 3. Input data from vertical tank simulation	19
Table 4. The spare tank volume of mitigation system	28



Figure List

Fig. 1 Geographical features	7
Fig. 2 Structure geographical features	8
Fig. 3 Process flow drawing in mitigation system according to Benzene leakage	12
Fig. 4 The mathematical model of the vertical storage tank	16
Fig. 5 The leakage velocity of Benzene in case the size of a leak hole is 4 inch	20
Fig. 6 The leakage velocity of Benzene in case the size of a leak hole is 5 inch	21
Fig. 7 The leakage velocity of Benzene in case the size of a leak hole is 6 inch	22
Fig. 8 The amount of Benzene in a storage tank and reserve tank (4 inch)	24
Fig. 9 The amount of Benzene in a storage tank and reserve tank (5 inch)	25
Fig. 10 The amount of Benzene in a storage tank and reserve tank (6 inch)	26
Fig. 11 The spare tank of mitigation system	29
Fig. 12 The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 50 m^3 , $515 \text{ m}^3/\text{hr}$, $H : 2 \text{ m}$)	31
Fig. 13 The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 50 m^3 , $515 \text{ m}^3/\text{hr}$, $H : 2 \text{ m}$)	31

Fig. 14	The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 100 m ³ , 490 m ³ /hr, H : 2m)	32
Fig. 15	The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 100 m ³ , 490 m ³ /hr, H : 2m)	32
Fig. 16	The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 150 m ³ , 475 m ³ /hr, H : 3 m)	33
Fig. 17	The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 150 m ³ , 475 m ³ /hr, H : 3 m)	33
Fig. 18	The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 225 m ³ , 455 m ³ /hr, H : 3 m)	34
Fig. 19	The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 225 m ³ , 455 m ³ /hr, H : 3 m)	34
Fig. 20	Pump rate according to leak hole size(4 inch, 150 m ³ , 475 m ³ /hr, H : 3 m)	37
Fig. 21	The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 150 m ³ , 475 m ³ /hr, H : 3 m)	37
Fig. 22	Pump rate according to leak hole size(5 inch, 150 m ³ , 740 m ³ /hr, H : 3 m)	38
Fig. 23	The height of a spare tank controlled by a pump(5 inch, 150 m ³ , 740 m ³ /hr, H : 3 m)	38
Fig. 24	Pump rate according to leak hole size(6 inch, 150 m ³ , 1065 m ³ /hr, H : 3 m)	39

Fig. 25 The height of a spare tank controlled by a pump(6 inch,
150 m^3 , 1065 m^3/hr , H : 3 m) 39

Fig. 26 The result of pump operation(5 inch, 150 m^3 , 740 m^3/hr) ... 41

Fig. 27 The result of pump operation(6 inch 150 m^3 , 1065 m^3/hr) ... 42

Fig. 28 Pump operation rate change(5 inch, 150 m^3 , 740 m^3/hr →
470 m^3/hr) 44

Fig. 29 Pump operation rate change(6 inch, 150 m^3 , 1065 m^3/hr →
670 m^3/hr) 45



제 1 장 서 론

1.1 연구배경

2014년 울산석유화학단지 내 S사의 원유를 저장하는 옥외탱크저장소에 서 믹서기 축 파손으로 누출사고가 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 타 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 처리하였다. 이 누출사고로 인해 시설물 복구, 환경복원 및 방제 등에 총 180 억원의 손실 비용이 발생하였다. 이러한 화학물질 누출사고는 취급량의 증가와 취급시설의 대형화로 인하여 발생 가능성 및 기대 손실 비용이 점점 증가하고 있다.

본 연구에서는 대형 벤젠 옥외탱크저장소를 사례로 다루고자 한다. 벤젠은 석유화학 공정에서 중요한 용매로 사용되며 약품, 플라스틱, 인조 고무, 염료, 향료, 폭약 등의 원료로 다양하게 사용된다. 그러나 벤젠은 독성과 화재 및 폭발을 일으킬 수 있는 인화성이 강하여 저장·보관 및 취급 시 많은 주의가 요구된다. 벤젠은 물에 거의 녹지 않으나 유기용제나 기름에는 잘 녹으며 산화제와 격렬하게 반응하고 휘발성이 강하며 기화하기 쉽다. 벤젠의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다. 울산광역시에서는 낙동강유역 환경청을 중심으로 남구 지역에 벤젠 대기질개선협의회를 구성하여 석유화

학기업들이 자율개선계획을 수립·시행하는 등 벤젠 배출량 저감을 위해 노력하고 있다.



Table 1. Benzene physicochemical characteristic

Categorize	Characteristic
Color	Achromatous
Smell	Aromatic odor
Boiling point	80°C
Melting point	6°C
Flash point	- 11°C
Upper explosive limit	7.8%
Lower explosive limit	1.2%
Exposure standard	<i>TWA</i> - 1 ppm, <i>STEL</i> - 5 ppm
Inhale	Gastritis, Pulmonary edema
Contact	blister, blister, Dermatitis etc.
Molecular formula	C_6H_6
Vapor density	2.77
Vapor pressure	75 mmH ₂ O
Molecular weight	78.11
Specific gravity	0.879(at 20°C)

1.2 목적

2014년 위험물 대량 누출사고 이후 화학물질 누출사고의 피해를 최소화하기 위해 여러 가지 관리방안 및 안전설비에 대해 논의가 이루어지고 있으며, 2015년에는 위험물안전관리법이 개정되었다. 개정된 내용 중 누출 사고 발생 시 해양 및 수계에 피해를 최소화하고 단시간에 누출된 위험물 회수를 위한 누출위험물 수용설비 전용유조를 설치하도록 규정하고 있다.

전용유조는 누출된 위험물을 대기에 노출되지 않게 하고 예비 탱크로 이송하기 위해 모으는 역할을 해야 하며, 해안 또는 강변에 누출되어 오염되지 않도록 설치하여야 한다. 또한, 전용유조는 옥외탱크저장소가 설치된 방유제의 벽이 파손되어 본연 기능을 상실할 경우에도 최후의 안전장치로서의 역할을 할 수 있다. 본 연구에서는 전용유조를 설계하고 이러한 상황을 수학적 모델링을 통해 검증하고자 한다.

1.3 연구방법

본 연구에서는 석유화학 공정에서 용매와 원료 등으로 사용되는 벤젠을 저장·보관하고 있는 옥외탱크저장소에서 누출사고가 발생하는 경우 누출속도와 누출량을 고려하여 최적화된 누출위험물 수용설비 전용유조를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 전용유조를 넘치지 않도록 하는 가장 최적의 펌프 용량을 선정하고자 한다. 누출사고가 발생하는 경우 누출공을 통해 나온 벤젠은 누출위험물 수용설비 전용유조로 모이게 되고, 펌프를 이용하여 예비 탱크로 이송하게 된다. 이 전용유조는 기존 탱크의 부피보다 크게 지을 수 없다고 가정한다.

누출속도 및 누출량의 계산은 Bernoulli's principle을 토대로 한 Torricelli의 법칙을 이용하였다. 이를 벤젠이 누출되는 옥외탱크저장소에 적용하여 누출공에서 벤젠의 누출되는 속도를 계산할 수 있고, 이를 통해 누출량을 계산한다. 방유제 바닥 및 배수로를 따라 벤젠은 설계된 전용유조에 모이게 된다. 이 경우 전용유조의 부피가 탱크의 부피보다 작기 때문에 전용유조에 모인 벤젠은 펌프를 통해 신속하게 예비 탱크로 이송되어야 한다.

제 2 장 연구내용

2.1 대상공정

벤젠 옥외탱크저장소의 누출사고 시 누출위험물 수용설비 설계를 위한 시뮬레이션 대상은 탱크터미널이다. 탱크터미널에서는 국·내외에서 선박으로 운송한 위험물을 옥외탱크저장소에 저장·보관한 후 화주의 요청에 따라 탱크로리 및 해당 배관을 통해 이송하는 공정을 가지고 있다. 울산에 소재하고 있는 탱크터미널은 11개사로 옥외탱크저장소로 751기, 저장능력은 3,600,000 *kl*이며, 연간 30,000,000 *M/T* 이상의 다양한 화학물질을 취급하고 있다. 이러한 큰 옥외탱크저장소에서 저장·보관되고 있는 위험물이 누출되는 경우 독성, 화재, 폭발의 피해가 발생할 수 있다. 일정한 공간 내에 설치한 옥외탱크저장소에서 누출사고의 피해를 줄이기 위해 누출위험물 수용설비 전용유조를 설계하고, 펌프를 이용하여 예비 탱크로 이송하는 사고완화시스템을 설계하고자 한다. 본 연구에서 다루게 될 벤젠 저장·보관 옥외탱크저장소의 지형은 Fig. 1, Fig. 2와 같다. 해당 지역에 설치된 옥외탱크저장소에 관한 사항은 Table 2에 정리하였으며, 설치에 관련된 산업안전보건법, 위험물안전관리법, 대기환경보전법 등 법령은 모두 준수하는 것을 원칙으로 한다.

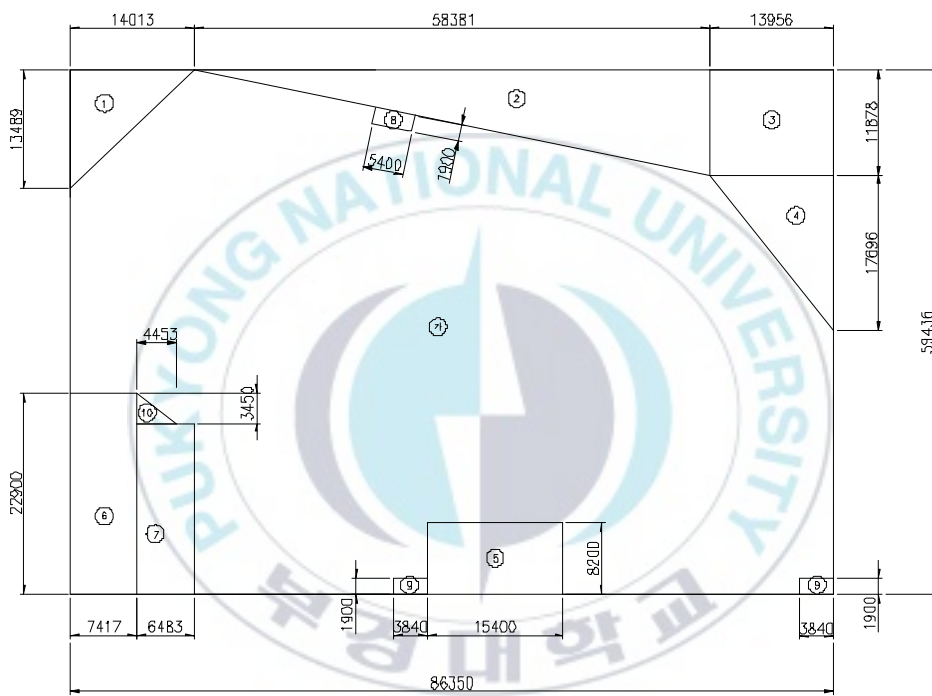


Fig. 1 Geographical features

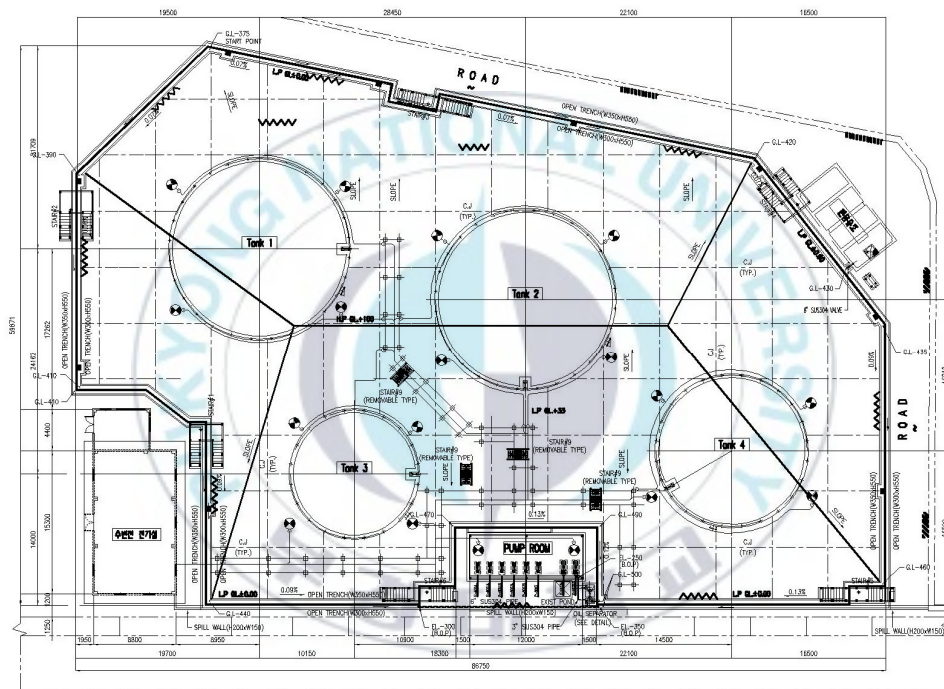


Fig. 2 Structure geographical features

Table 2. Design spec of tanks

Facility	Design
Tank 1	<ul style="list-style-type: none"> ○ Permission quantity : 5,000,000 ℓ ○ Type of storage tank : CRT [ID : 19.00 m × H : 18.85 m] ○ Design pressure : 150 / -50 mmH₂O ○ Operation pressure : 30 / -25 mmH₂O ○ Design temperature : 60°C ○ Operation temperature : 35°C
Tank 2	<ul style="list-style-type: none"> ○ Permission quantity : 5,000,000 ℓ ○ Type of storage tank : CRT [ID : 19.00 m × H : 18.85 m] ○ Design pressure : 150 / -50 mmH₂O ○ Operation pressure : 30 / -25 mmH₂O ○ Design temperature : 60°C ○ Operation temperature : 35°C
Tank 3	<ul style="list-style-type: none"> ○ Permission quantity : 3,000,000 ℓ ○ Type of storage tank : CRT [ID : 16.00 m × H : 16.15 m] ○ Design pressure : 150 / -50 mmH₂O ○ Operation pressure : 30 / -25 mmH₂O ○ Design temperature : 60°C ○ Operation temperature : 35°C
Tank 4	<ul style="list-style-type: none"> ○ Permission quantity : 2,000,000 ℓ ○ Type of storage tank : CRT [ID : 13.5 m × H : 15.15 m] ○ Design pressure : 150 / -50 mmH₂O ○ Operation pressure : 30 / -25 mmH₂O ○ Design temperature : 60°C ○ Operation temperature : 35°C

누출위험물 수용설비 전용유조는 대상공정 내에 설치하되 누출사고 발생 시 수계 및 해양오염에 추가적인 영향을 미치지 아니하는 장소에 설치해야 한다. 방유제 내에는 옥외탱크저장소마다 4개의 독성감지기를 설치하고 감지기가 누출을 감지하면 전용유조로 유입되는 오토 밸브가 개방된다. 오토 밸브는 오작동을 방지하기 위해 교차회로방식으로 설치하여 2개 이상의 감지기가 작동되면 오토 밸브가 개방되며 전용유조 내부는 후드밸브의 높이인 0.3 m 이상으로 수위가 상승하면 예비 탱크로 이송하는 펌프가 작동한다.



2.2 누출 사고시나리오

벤젠의 독성물질 누출 시나리오 산정에 대한 변수들은 다음과 같다.

- 1) 운전압력 : 대기압
- 2) 누출공의 높이 : 지표면에서 누출
- 3) 누출량 선정 : 시간에 관계없이 전량누출

누출 사고시나리오 대상 벤젠 옥외탱크저장소는 수직 원통형(CRT) 방식에 벤젠이 저장된다. 저장된 벤젠의 체적은 누출량을 계산하기 위하여 중량으로 환산하면 5,309.889 M/T 이다. 누출공의 직경은 입·출고 배관 및 연결된 부속설비의 배관을 기준으로 4 inch ~ 6 inch까지 1 inch 간격으로 총 3가지 누출공의 크기로 가정하였다. 그리고 옥외탱크저장소에서 누출 발생 시 누출위험물 수용설비에 모여 예비 탱크로 보내는 펌프의 용량은 전용유조의 용량을 고려하고, 누출속도를 분석하여 결정하였다. 벤젠 옥외탱크저장소에서 누출사고 발생 시 누출위험물 수용설비를 통해 예비 탱크로 이송되는 계통도는 Fig. 3와 같다.

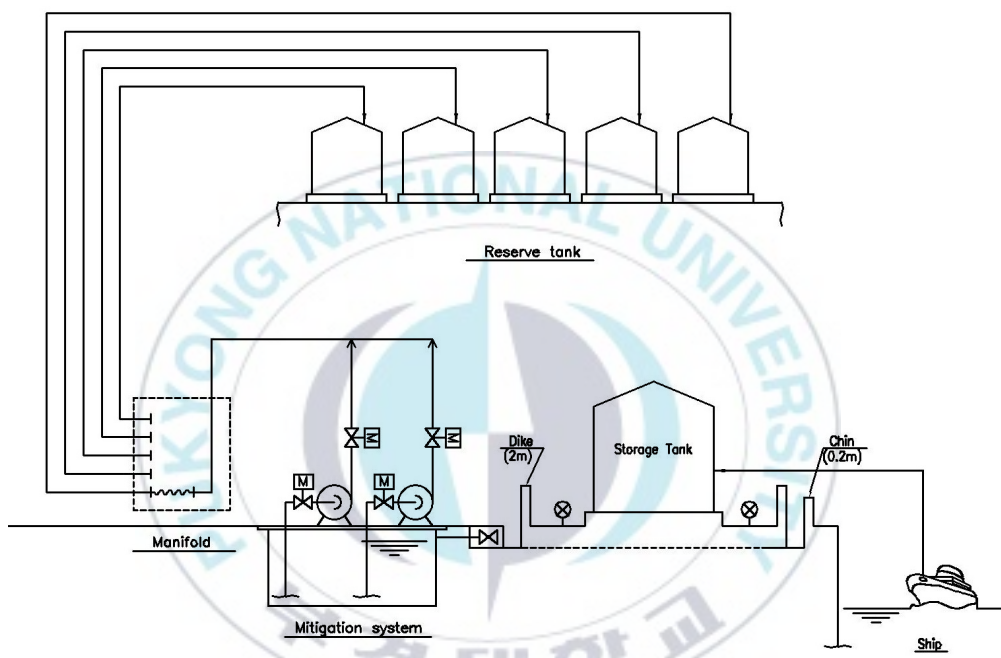


Fig. 3 Process flow drawing in mitigation system according to Benzene leakage

2.3 누출속도 및 누출량 계산

본 연구에서 벤젠의 누출량 계산에 이용한 식은 Bernoulli 원리에 기반한 Torricelli의 법칙이다. Torricelli의 법칙은 hydraulic pressure에 의해 누출되는 유체의 속도를 계산하는 법칙으로 Bernoulli 원리의 특정 경우 중 하나이다. Bernoulli 원리 중 비압축성 흐름 방정식은 다음과 같으며 비압축성 유체, 비점성 유체, 대기에서 개방, 수위의 하강 속도를 무시할 정도의 작은 구멍 이러한 네 가지의 조건을 가진다. 아래의 식(1)은 Torricelli의 법칙을 나타내는 식이다.

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

v 는 유체의 속도, g 는 중력가속도, h 는 기준점에서의 높이(수위), P 는 압력, ρ 는 밀도이다. 이 식을 벤젠 옥외탱크저장소에서 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_2 는 각각 Liquid 최상단과 누출공에서의 유체의 속도, h_1, h_2 는 각각 Liquid 최상단의 액위의 높이와 누출공에서의 액위의 높이, P_1, P_2 는 Liquid 최상단에서의 압력과 누출공에서 압력이다.

벤젠 옥외탱크저장소의 용량이 충분히 크기 때문에 누출이 발생하였을

때 Liquid 최상단에서 유체의 속도는 누출공에서 유체 속도에 비해 매우 작다고 할 수 있다. 따라서 Liquid 최상단에서의 누출 속도 v_1 은 0이라고 놓고 관찰할 누출공에서의 속도인 v_2 를 식으로 정리하면 다음과 같다.

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

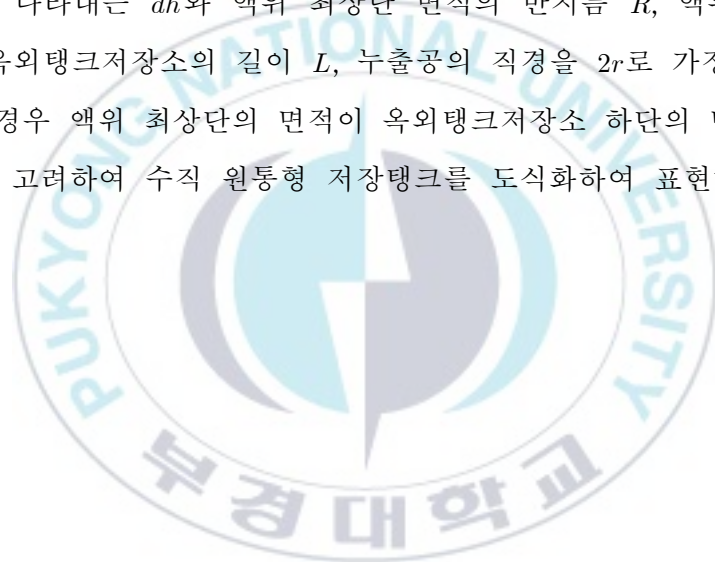
이렇게 얻어진 v_2 값에 누출공의 단면적을 곱하면 누출량을 구할 수 있다.



2.4 수직 원통형 옥외탱크저장소의 누출속도 모델링

수직 원통형 옥외탱크저장소에 따른 액위의 변화는 단위시간당 누출량으로 액위 상단에서 단면적과 시간당 높이 변화의 곱은 누출공에서 단위시간당 빠져나가는 유체의 양과 동일하다고 생각할 수 있다.

수직 원통형 옥외탱크저장소 누출량을 식으로 표현하기 위해 액위의 높이가 변화를 나타내는 dh 와 액위 최상단 면적의 반지름 R , 액위 최상단의 면적 A , 옥외탱크저장소의 길이 L , 누출공의 직경을 $2r$ 로 가정한다. 수직 원통형의 경우 액위 최상단의 면적이 옥외탱크저장소 하단의 면적과 일치하는 것을 고려하여 수직 원통형 저장탱크를 도식화하여 표현하면 Fig. 4와 같다.



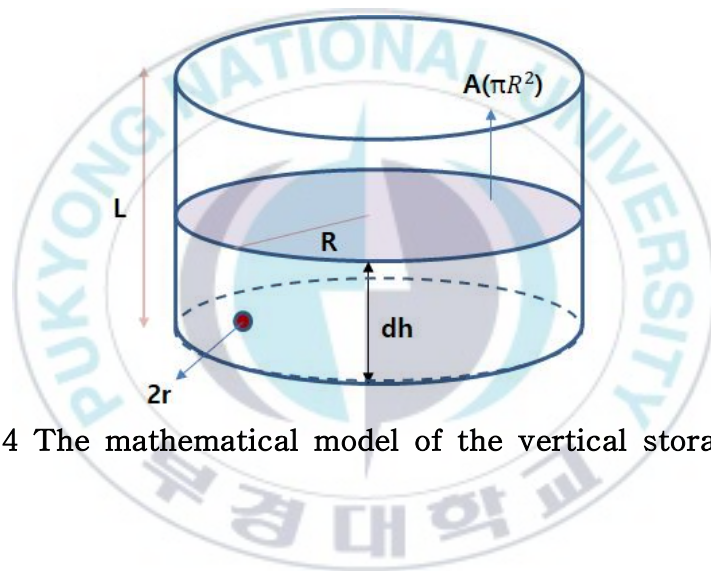


Fig. 4 The mathematical model of the vertical storage tank

옥외탱크저장소의 누출량을 나타내는 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

수직 원통형 옥외탱크저장소의 경우에는 액위 최상단 높이에서의 면적 A 와 액위 최상단의 높이 변화량 dh 를 곱하여 누출량을 계산할 수 있으며 액위 최상단 높이 면적 A 는 πR^2 과 같다.

수직 원통형 저장탱크 누출량을 표현하는 시간에 따른 액위 변화에 관한 미분방정식 식(5)과 식(6)을 구하기 위해 앞서 구한 식(4)를 아래의 과정을 통해 표현할 수 있다.

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

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

제 3 장 연구결과

3.1 벤젠 옥외탱크저장소 누출속도 분석

벤젠 옥외탱크저장소에 설치된 입·출고 배관 및 부속설비의 크기 4 inch ~ 6 inch까지 1 inch 간격으로 총 3가지 누출공 크기로 누출사고가 발생한다는 가정으로 시뮬레이션을 진행하였고 누출량이 누출위험물 수용 설비 전용유조로 유입되어 설정된 높이 이상의 누출량이 모이게 되면 펌프가 작동되어 예비 탱크로 이송한다고 가정하였다. 벤젠 옥외탱크저장소 누출 시나리오를 시뮬레이션을 위해 사용된 값은 Table 3과 같으며 누출공 크기마다 누출속도 변화는 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에 정리하였다.

Table 3. Input data from vertical tank simulation

Data	Value
Gravity	9.81 m/s^2
Radius of tank	8.5 m
Length of tank	18.85 m
Leak hole size	4 inch ~ 6 inch
Mitigation system size	50 m^3 , 100 m^3 , 150 m^3 , 225 m^3

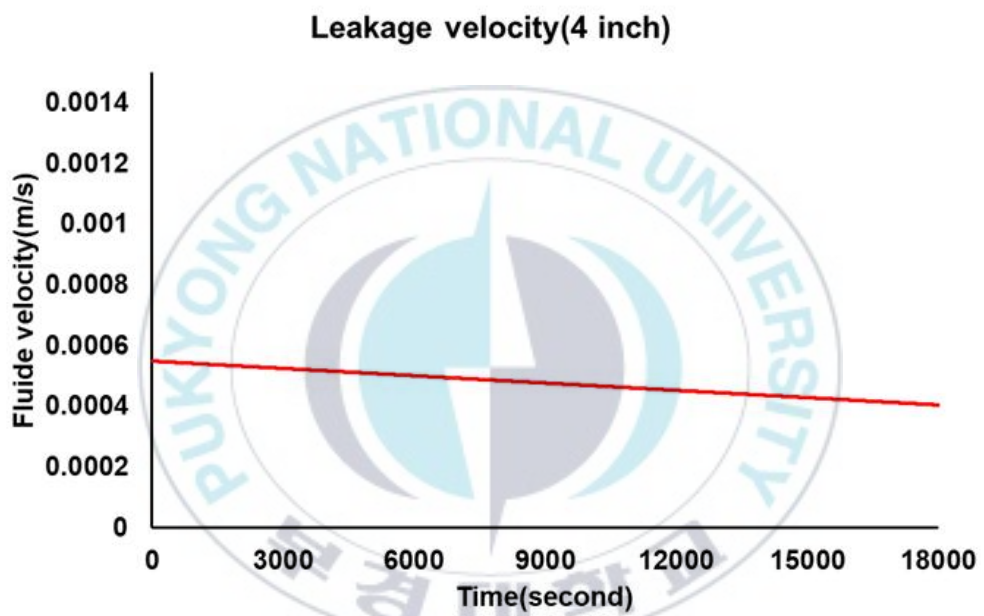


Fig. 5 The leakage velocity of Benzene in case the size of a leak hole is 4 inch

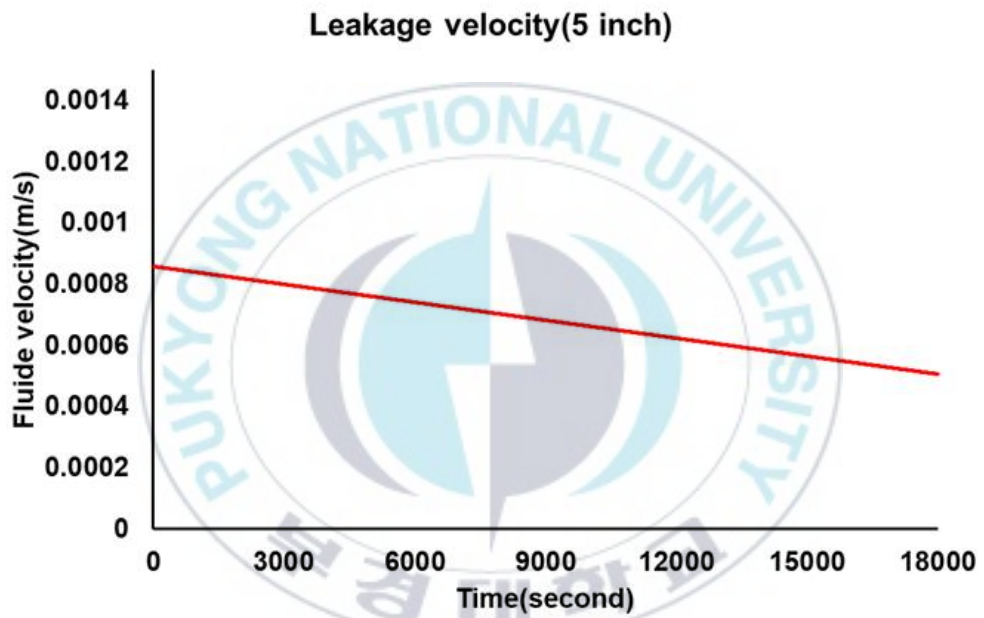


Fig. 6 The leakage velocity of Benzene in case the size of a leak hole is 5 inch

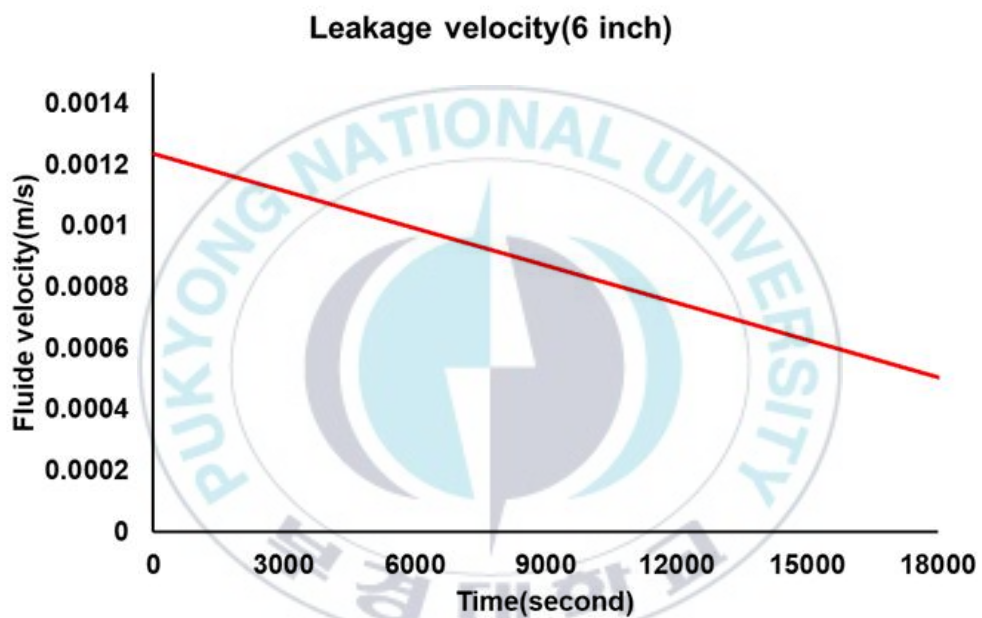


Fig. 7 The leakage velocity of Benzene in case the size of a leak hole is 6 inch

3.2 옥외탱크저장소 누출공 크기에 따른 누출량 비교

벤젠 옥외탱크저장소에 4 inch ~ 6 inch 3가지 크기의 누출공에서 벤젠이 누출된 것으로 누출속도를 구하였다. 벤젠이 시간과 관계없이 전량 누출된다고 가정된 시뮬레이션이며, 누출공 크기에 따른 누출량 비교를 위해 5시간에 대해서 도식화 하였다. 아래의 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 시뮬레이션 한 결과 중 누출공의 직경 변화에 따른 누출량 예측값을 나타낸 그래프이다.

시뮬레이션 한 결과 6 inch는 4 inch에서보다 누출공의 크기는 1.5배이지만 동일 시간동안 누출량은 2.5배 많으며 옥외탱크저장소에서 전량 누출되는 시간을 분석한 결과 4 inch는 19시간, 6 inch는 8.4시간이 소요되어 6 inch의 누출이 2.3배 빠른 것을 확인할 수 있다.

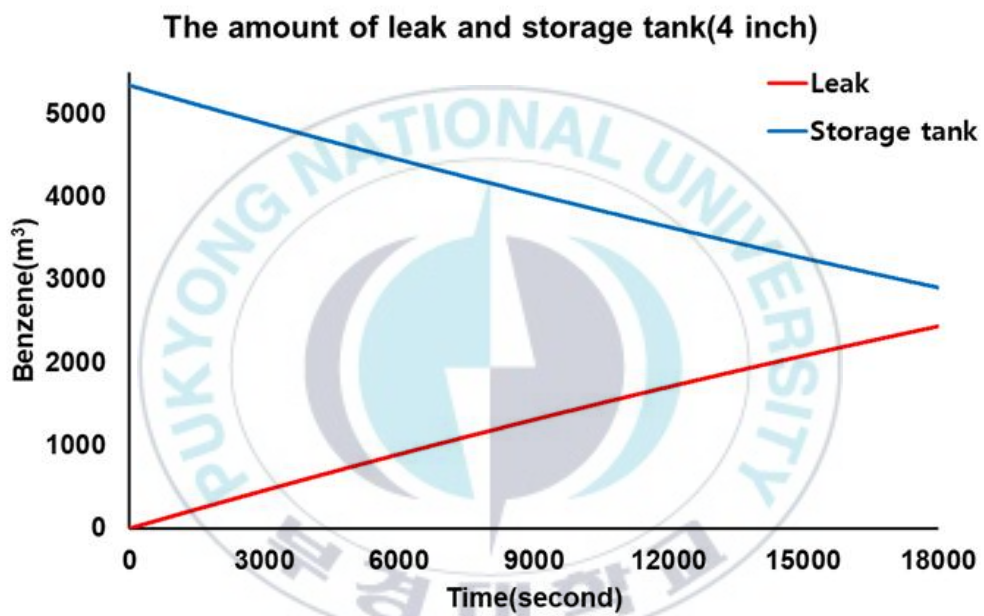


Fig. 8 The amount of Benzene in a storage tank and reserve tank(4 inch)

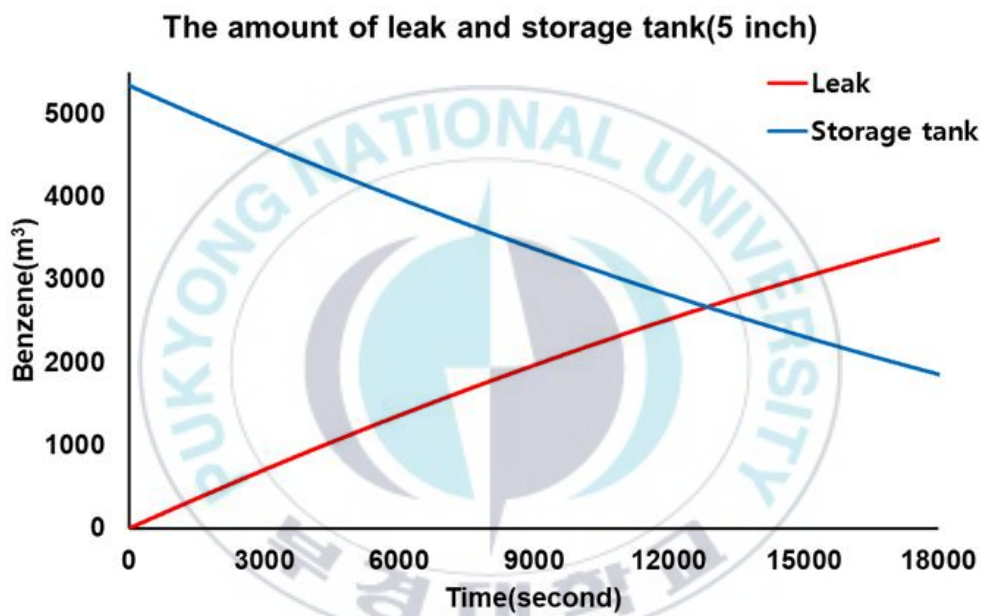


Fig. 9 The amount of Benzene in a storage tank and reserve tank(5 inch)

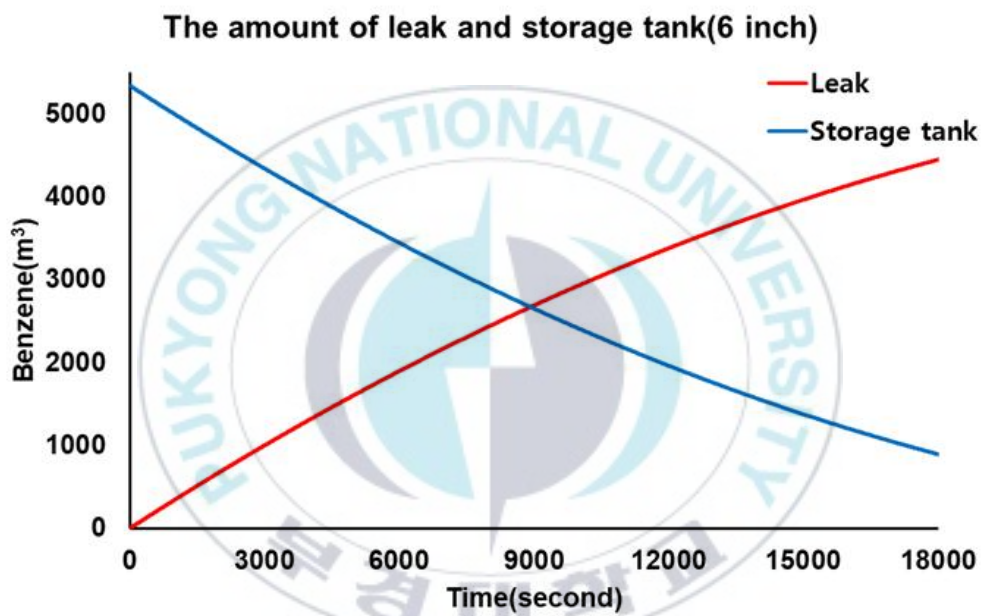


Fig. 10 The amount of Benzene in a storage tank and reserve tank(6 inch)

3.3 누출위험물 수용설비 전용유조 설계

전용유조에 관한 위험물안전관리법이 개정되고 산업계에 도입하면서 명확하게 제시한 전용유조의 용량과 관련된 펌프용량은 관련법에 명시되지 않았다. 이에 따라 본 연구에서는 옥외탱크저장소가 해안 또는 강변에 설치되고, 방유제의 벽이 파손되어 본연에 기능을 상실할 경우 외부로 누출된 벤젠이 바다 또는 강으로 유입될 우려가 있기 때문에 해당 옥외탱크저장소가 설치된 부지 내에 누출위험물 수용설비 전용유조를 설치하기 위해 기존 탱크의 부피보다 전용유조의 부피를 크게 지을 수 없다고 가정하였다.

전용유조의 용량은 관할관청에서 제시한 최소용량 100 m^3 을 기반하여 Table 4과 Fig. 11와 같이 4가지 용량으로 선정하였으며, 바닥 면적은 같으나 높이가 다른 경우, 바닥 면적은 다르나 높이가 같은 경우로 비교하여 시뮬레이션 하였다. 옥외탱크저장소에서 누출사고가 발생한 후 전용유조에 벤젠이 모이게 되며, 전용유조 내부 후드 밸브의 높이인 0.3 m 이상으로 수위가 상승하면 예비 탱크로 이송하는 펌프가 작동되는 기준으로 한다.

Table 4. The spare tank volume of mitigation system

Volume(m^3)	Specification(<i>Width</i> \times <i>Length</i> \times <i>Height</i> , <i>m</i>)
50	$5 \times 5 \times 2$
100	$10 \times 5 \times 2$
150	$10 \times 5 \times 3$
225	$15 \times 5 \times 3$

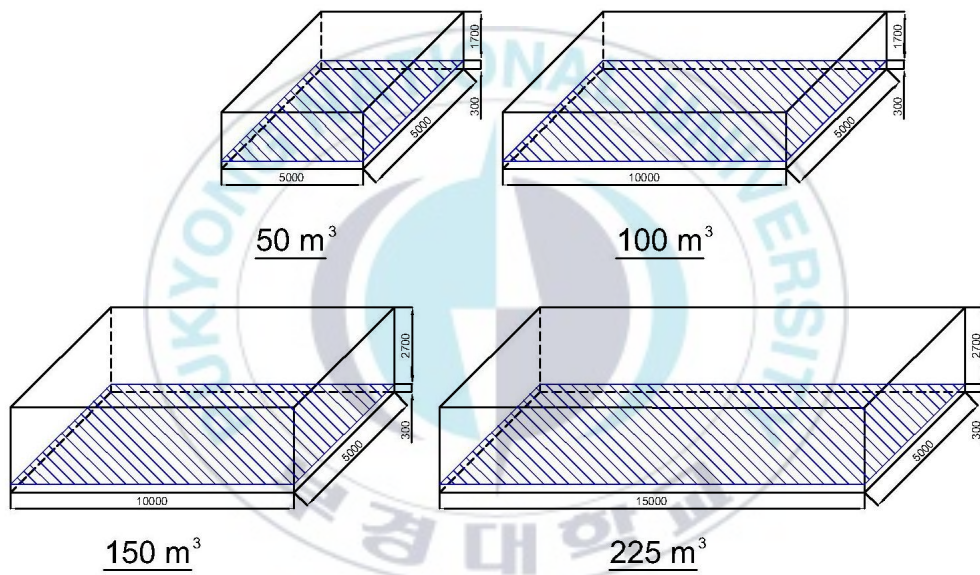
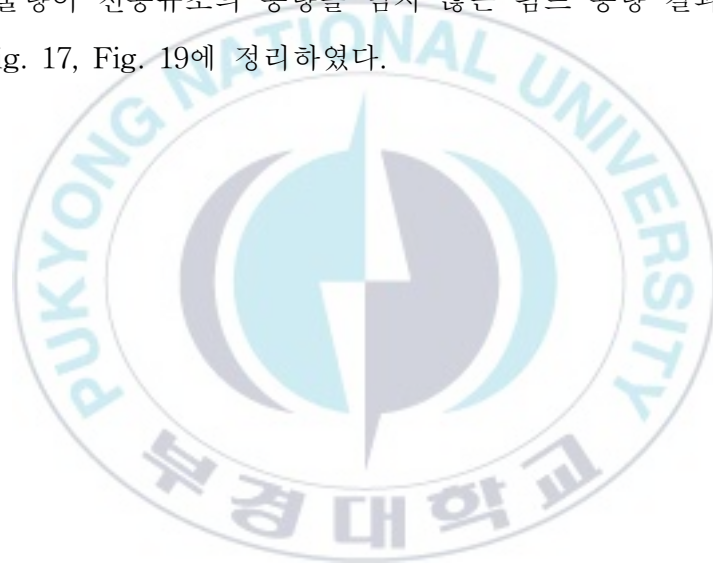


Fig. 11 The spare tank of mitigation system

3.4 전용유조 크기와 펌프 용량에 따른 모델링

전용유조의 크기를 기준으로 펌프 용량을 비교하기 위하여 옥외탱크저장소의 출고배관 크기인 4 inch 누출공의 누출량과 관할관청에서 제시한 100 m^3 을 기반으로 4가지의 전용유조 크기 50 m^3 , 100 m^3 , 150 m^3 , 225 m^3 을 적용하였다. 4 inch 누출공에서 누출 시 옥외탱크저장소 저장량 변화와 예비 탱크의 이송량 변화는 Fig. 12, Fig. 14, Fig. 16, Fig. 18와 같으며, 누출공에서 누출량이 전용유조의 용량을 넘지 않는 펌프 용량 결과는 Fig. 13, Fig. 15, Fig. 17, Fig. 19에 정리하였다.



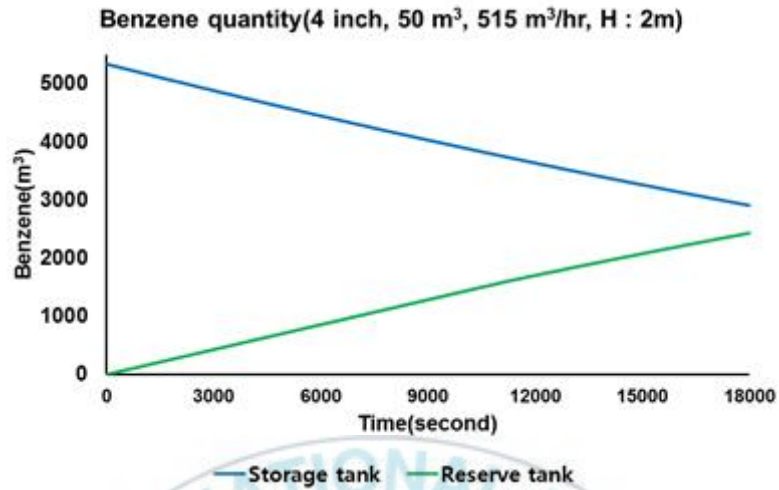


Fig. 12 The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 50 m³, 515 m³/hr, H : 2 m)

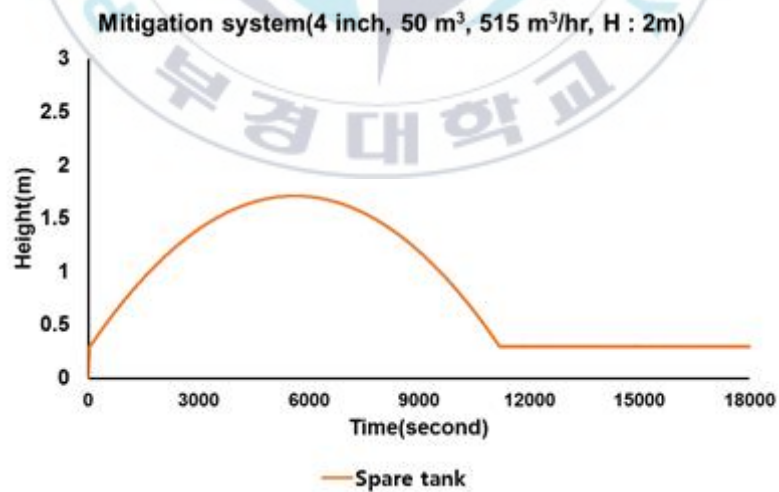


Fig. 13 The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 50 m³, 515 m³/hr, H : 2 m)

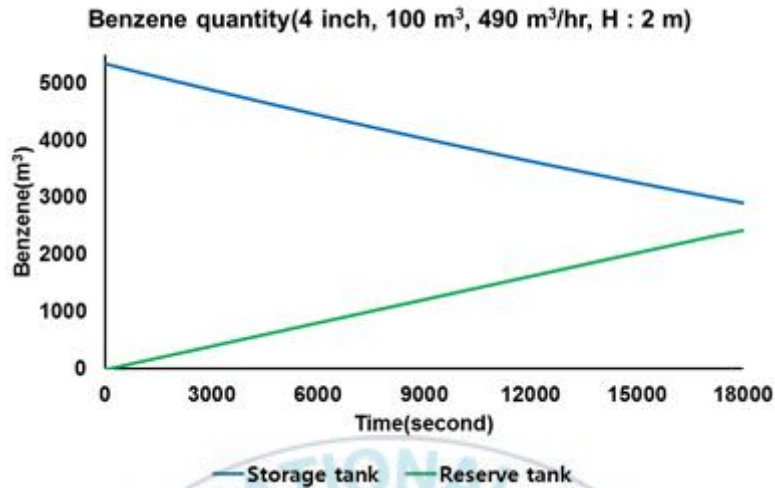


Fig. 14 The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 100 m³, 490 m³/hr, H : 2 m)

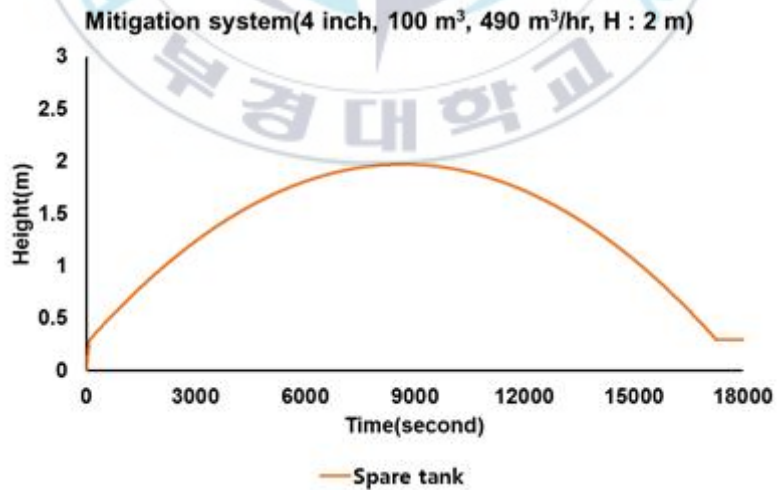


Fig. 15 The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 100 m³, 490 m³/hr, H : 2 m)

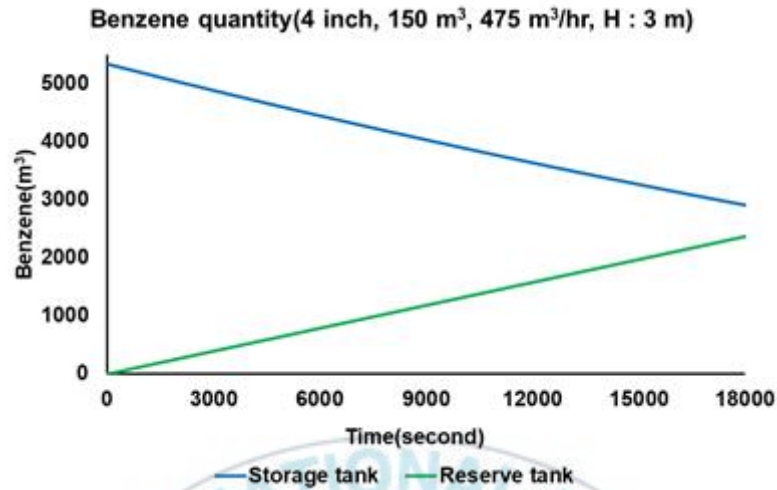


Fig. 16 The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 150 m³, 475 m³/hr, H : 3 m)

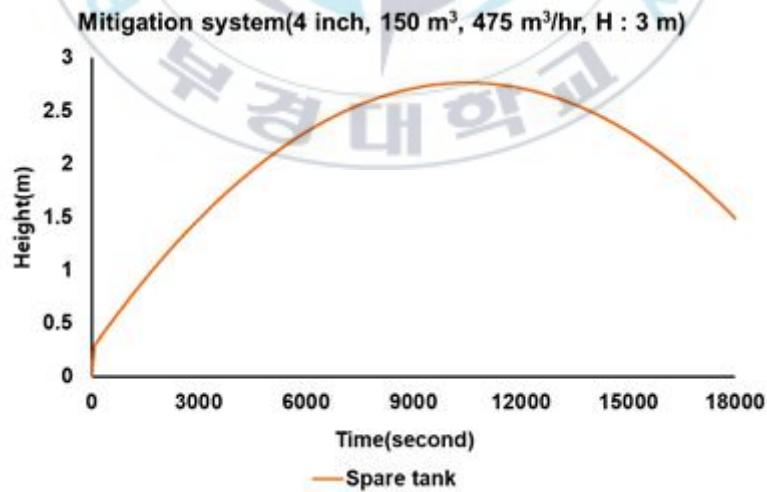


Fig. 17 The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 150 m³, 475 m³/hr, H : 3 m)

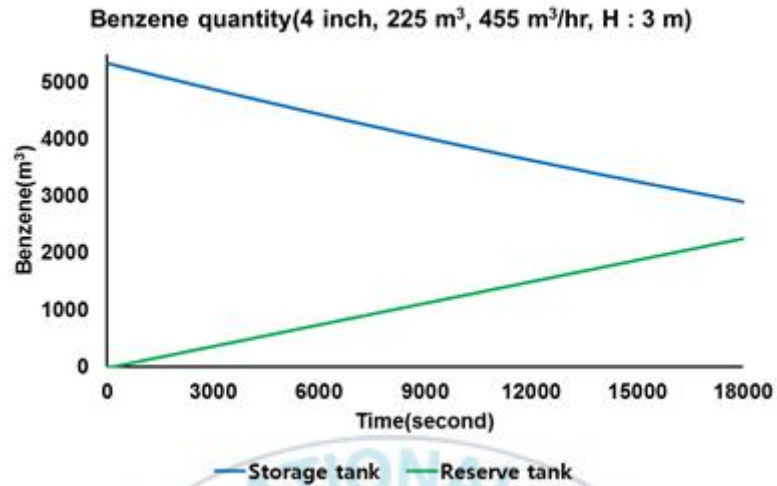


Fig. 18 The amount of a storage tank and a reserve tank according to the operation of mitigation system(4 inch, 225 m^3 , $455 \text{ m}^3/\text{hr}$, $H : 3 \text{ m}$)

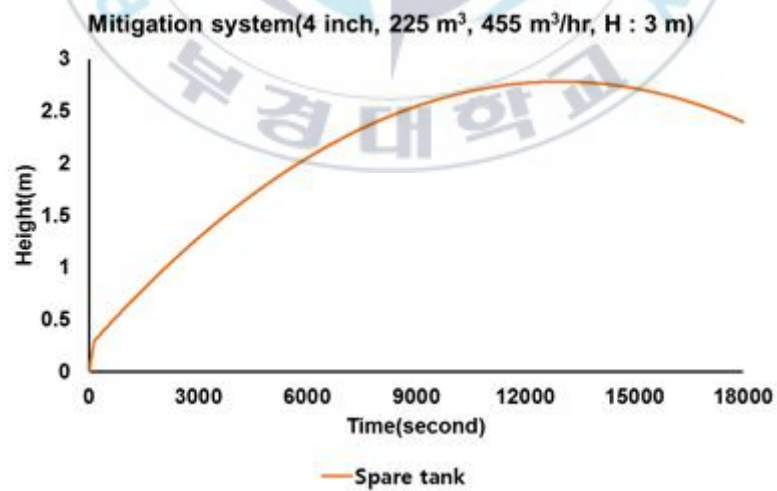


Fig. 19 The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 225 m^3 , $455 \text{ m}^3/\text{hr}$, $H : 3 \text{ m}$)

동일한 면적에서 높이의 차이, 동일한 높이에서 면적차이를 두어 시뮬레이션 하였으며 그 결과 $50(=5 \times 5 \times 2)m^3$ 일 경우는 최소 $515 m^3/hr$ 의 펌프 용량인 경우 Overflow가 발생하지 않으며, $100(=10 \times 5 \times 2)m^3$ 일 때 $490 m^3/hr$ 의 펌프 용량 이상 이여야 전용유조의 부피를 넘지 않고 예비 탱크로 이송이 가능하였다. 또한, $150(=10 \times 5 \times 3)m^3$ 일 경우는 $475m^3/hr$, $225(=15 \times 5 \times 3)m^3$ 일 경우는 $455m^3/hr$ 으로 전용유조 용량을 기준하여 비교 결과 용량별로 $20 m^3/hr \sim 25 m^3/hr$ 정도 펌프의 용량을 줄일 수 있는 것을 확인하였다.



3.5 누출공 크기에 따른 펌프 용량 비교

옥외탱크저장소로부터 벤젠 누출공 크기에 따른 누출속도 및 누출량에 대한 시뮬레이션은 앞서 언급한 기준을 적용하였으며, 4 inch ~ 6 inch의 누출공 크기와 전용유조 용량 $150(=10 \times 5 \times 3)m^3$ 인 경우를 적용하여 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23, Fig. 24, Fig. 25와 같다.



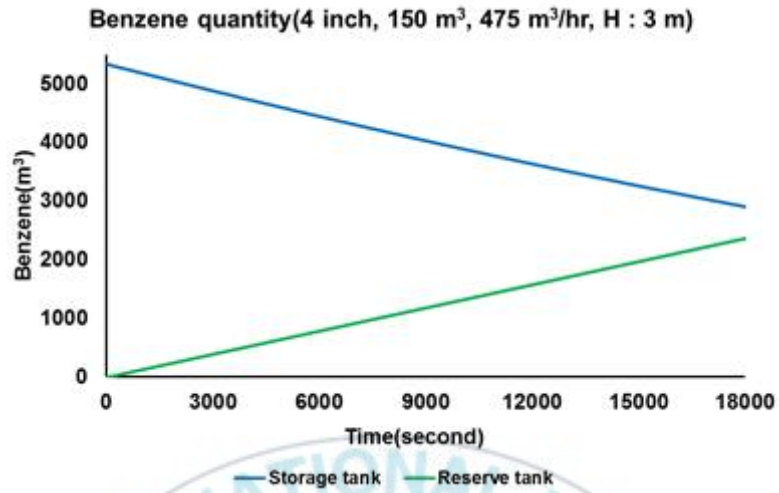


Fig. 20 Pump rate according to leak hole size(4 inch, 150 m³, 475 m³/hr, H : 3 m)

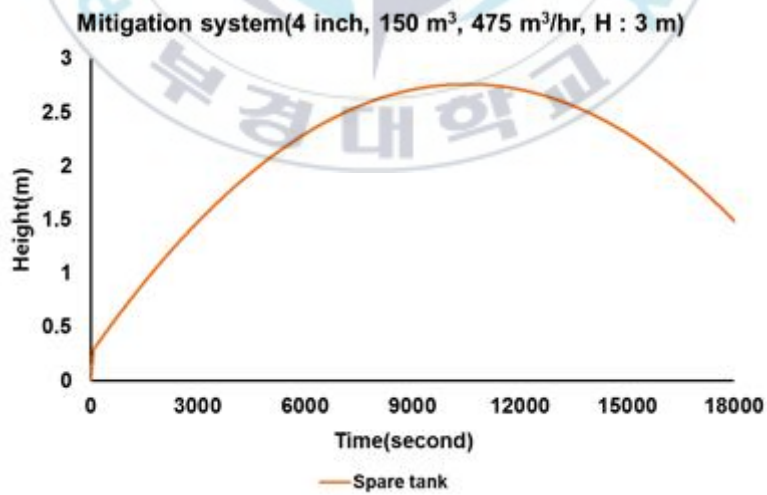


Fig. 21 The height of a spare tank controlled by a pump(4 inch, 150 m³, 475 m³/hr, H : 3 m)

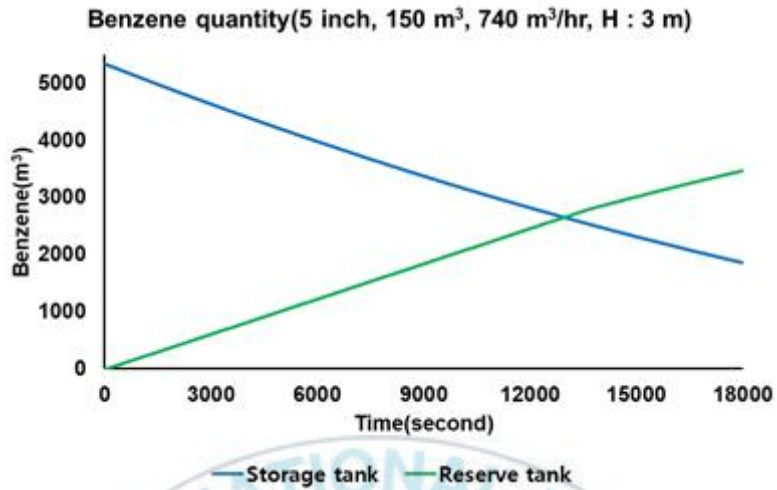


Fig. 22 Pump rate according to leak hole size(5 inch, 150 m³, 740 m³/hr, H : 3 m)

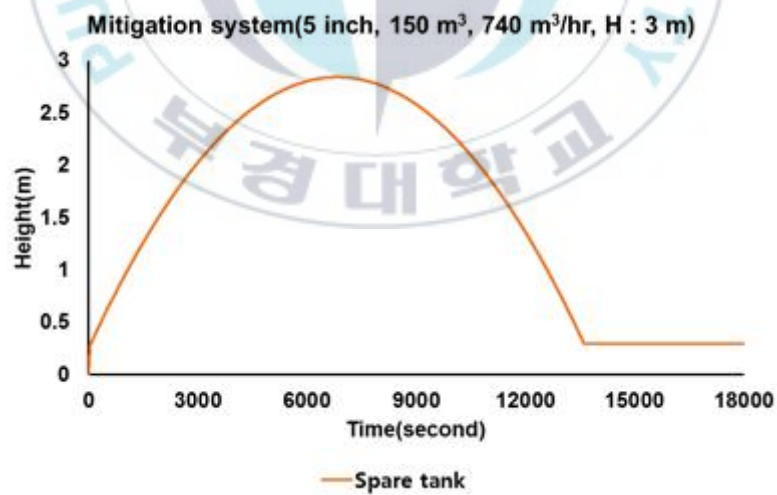


Fig. 23 The height of a spare tank controlled by a pump(5 inch, 150 m³, 740 m³/hr, H : 3 m)

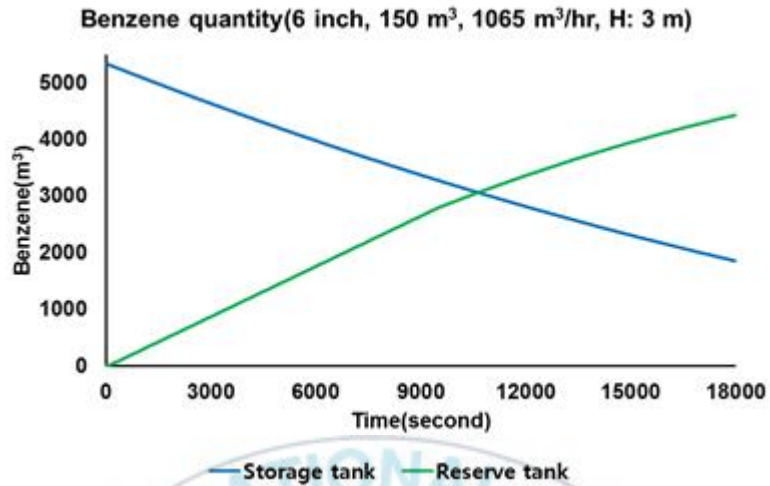


Fig. 24 Pump rate according to leak hole size(6 inch, 150 m³, 1065 m³/hr, H : 3 m)

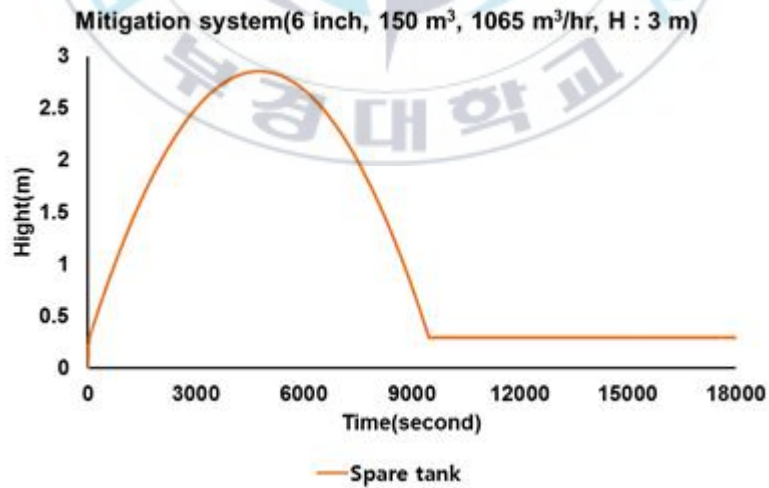


Fig. 25 The height of a spare tank controlled by a pump(6 inch, 150 m³, 1065 m³/hr, H : 3 m)

동일한 전용유조 용량에서 누출공의 크기를 4 inch ~ 6 inch로 시뮬레이션 한 결과 4 inch에서는 전용유조의 최고 높이는 3시간 뒤에 도달하게 되며, 전용유조의 용량을 넘지 않는 펌프의 용량은 최소 $475 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 확인하였다. 5 inch의 경우 전용유조의 최고 높이는 2시간 뒤에 도달하게 되며, 펌프의 용량은 최소 $740 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 4 inch보다 1.5배 큰 펌프 용량이며, 전용유조 최고 높이에 도달하는 시간은 1시간 빠른 것을 확인하였다. 6 inch에서는 전용유조의 최고 높이에 도달하는 시간은 1.3시간이며 최소 펌프 용량은 $1,065 \text{ m}^3/\text{hr}$ 으로 알 수 있었다.

펌프 용량이 클수록 대량 누출 시 전용유조의 용량을 넘지 않고 예비 탱크로 이송이 가능하나 일정 시간이 지난 후에는 누출량보다 펌프 용량이 크기 때문에 펌프가 지속적으로 On/Off를 반복하게 된다. 이러한 결과는 Fig. 26, Fig. 27에 정리하였다.

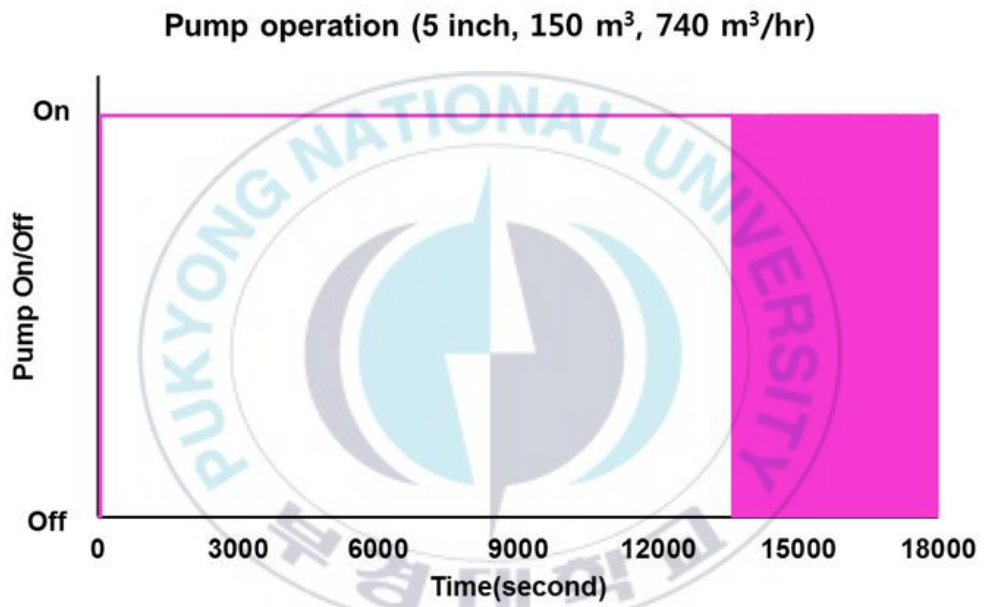


Fig. 26 The result of pump operation(5 inch, 150 m³, 740 m³/hr)

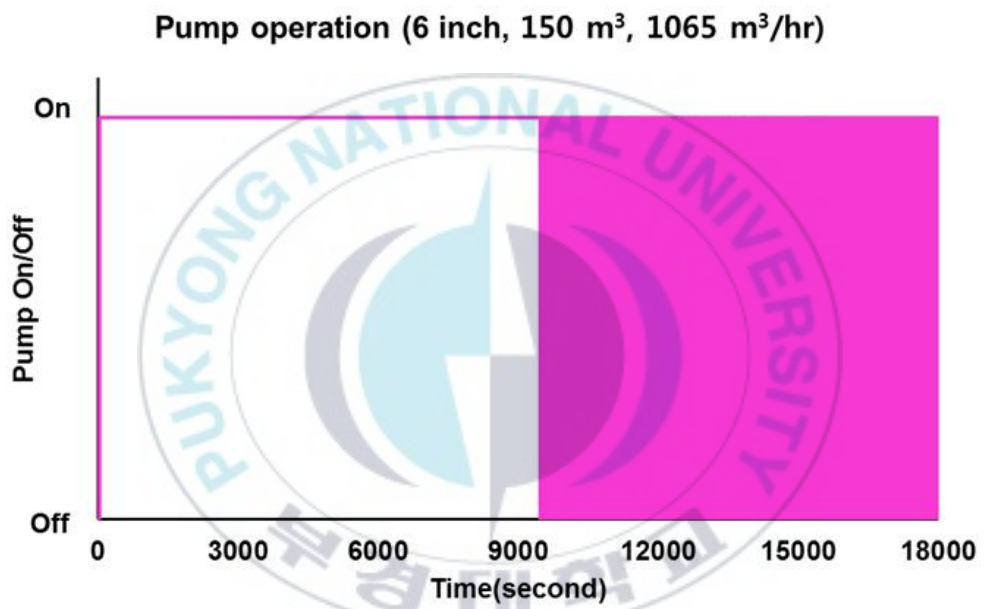


Fig. 27 The result of pump operation(6 inch, 150 m³, 1065 m³/hr)

Fig 26에서는 누출공 5 inch에서 전용유조 150 m^3 펌프 용량 740 m^3/hr 으로 시뮬레이션 하였으며 약 13,610초(3.78시간) 이후에는 누출량보다 펌프 용량이 크기 때문에 전용유조의 벤젠 높이가 0.3 m 주위에서 펌프의 작동이 반복된다. Fig 27에서는 누출공 6 inch에서 전용유조 150 m^3 펌프 용량 1065 m^3/hr 으로 9,480초(2.6시간) 이후에는 누출량보다 펌프 용량이 크기 때문에 이 시간 이후부터는 펌프의 작동이 반복되고 있음을 알 수 있다. 펌프의 On/Off 변동이 심하게 되는 경우에는 펌프의 손상과 과전류 등 펌프의 고장 가능성이 커지게 된다.

따라서 펌프의 작동이 반복됨을 방지하여 일정하게 전용유조에 모인 벤젠을 예비 탱크로 이송하기 위하여 펌프 용량을 재산정하기 위한 시뮬레이션 결과는 Fig. 28, Fig. 29와 같으며, 5 inch에서는 740 m^3/hr 에서 470 m^3/hr 으로 6 inch에서는 1065 m^3/hr 에서 670 m^3/hr 으로 펌프 용량을 낮추어야 작동이 반복되지 않고 일정하게 예비 탱크로 이송이 가능하다.

하지만, 위치, 기타 배관 자재 등 추가 비용이 발생하는 예비펌프를 설치하는 방법보다 기존 설치된 펌프에 바이패스(Bypass) 및 자동 제어 가능한 유량조정밸브를 설치하고 누출량에 따라 배출 유량을 조절하여 예비 탱크로 이송하는 방법이 비용이나 운전방법, 유지관리에서도 더 효율적이다.

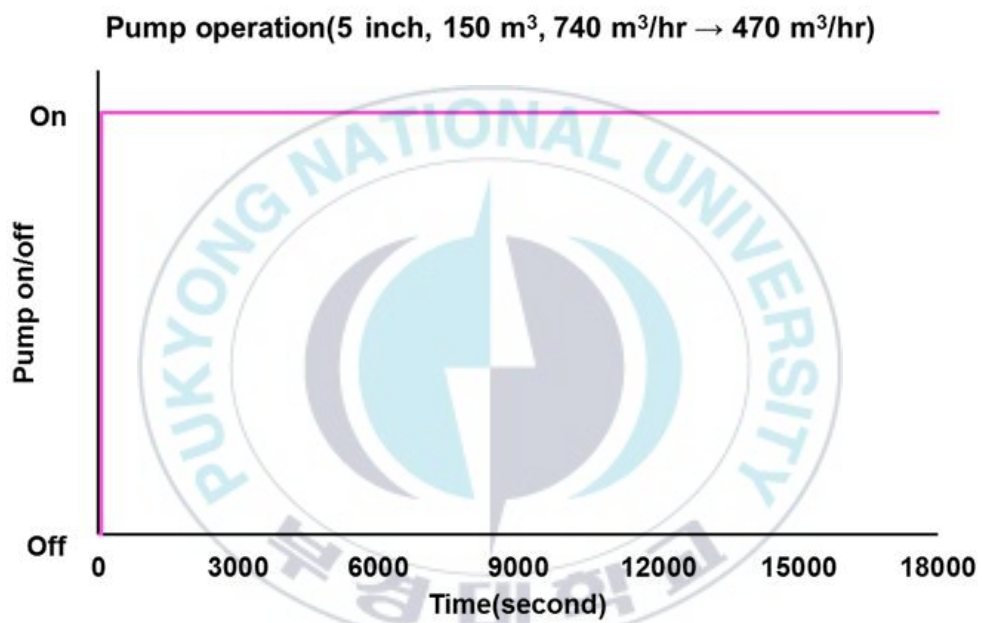


Fig. 28 Pump operation rate change(5 inch, 150 m³, 740 m³/hr → 470 m³/hr)

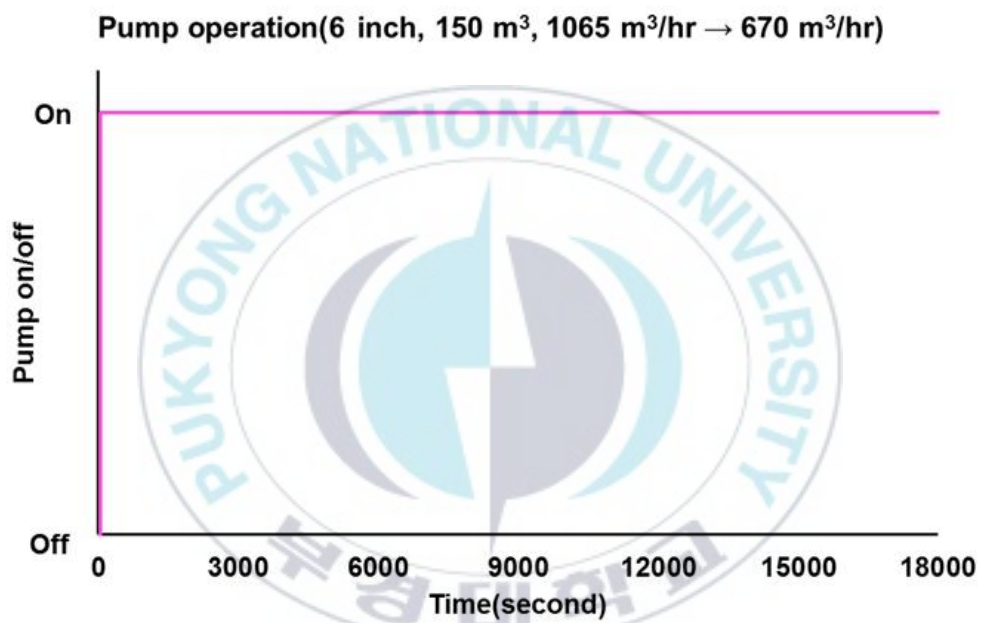


Fig. 29 Pump operation rate change(6 inch, 150 m³, 1065 m³/hr
→ 670 m³/hr)

제 4 장 결론 및 고찰

본 연구에서는 석유화학 공정에서 중요한 용매로 사용되는 벤젠을 저장·보관하고 있는 옥외탱크저장소에서 누출사고가 발생할 경우 누출속도와 누출량을 고려하여 누출위험물 수용설비 전용유조를 설계하고 적절한 펌프 용량을 확인하고자 하였다.

수직 원통형인 옥외탱크저장소의 경우 Torricelli의 법칙에 따라 누출공 크기와 저장 높이 변화에 따른 누출속도를 산정하였으며, 이를 이용하여 시간당 누출량을 구하여 전용유조에 설치된 펌프의 용량을 고려하여 완화 시스템의 작동을 분석하였다. 이때 전용유조에 유입되는 누출량은 전용유조의 용량을 넘지 않으며, 기존 옥외탱크저장소의 부피보다 크게 지을 수 없는 조건을 적용하였다. 또한, 전용유조를 설치할 경우 입지적인 조건과 용량, 펌프의 연관성을 확인하였다.

벤젠을 저장하는 옥외탱크저장소에서의 전용유조에 대해 바닥 면적은 같으나 높이가 다른 경우, 바닥 면적은 다르나 높이가 같은 경우로 비교하여 시뮬레이션 하였으며, 전용유조 150 m^3 크기에서 누출공이 4 inch의 경우에는 최소 펌프 용량이 475 m^3/hr , 5 inch의 경우 최소 740 m^3/hr , 6 inch의 경우 최소 1,065 m^3/hr 으로 분석하였다. 펌프 용량은 벤젠 옥외탱크저장소의 저장량과 누출 가능한 배관의 크기를 고려하여 최대한 크게 설치하면 효율적이나 일정 시간이 지난 후에는 펌프가 계속 On/Off를 반복함을 확인하였다. 이를 방지하기 위해 예비 펌프 추가 설치 및 기존 설치된 펌

프레 바이패스(Bypass) 및 자동 제어 가능한 유량조절밸브를 설치하여 지속적으로 예비 탱크로 이송하는 방법을 확인하였다.

향후 연구에서는 옥외탱크저장소에서 대량 누출 발생 시 저장탱크에서 바로 펌프를 이용하여 예비 탱크로 이송하는 것과 전용유조를 통하여 이송하는 방법을 복합적으로 고려하여 최적화된 수용설비를 설계하는 연구가 필요하다.



참고문헌

1. J. H. Park, C. J. Lee, “The Evaluation of Hazardous Substances Leakage from Storage Tanks based on a Mathematical Modeling”, Pukyong National University Department of Safety Engineering, 2017.
2. J. G. Park, C. J. Lee, “The study on Mathematical Interpretation for the mitigation system of damage extent by leakage from ammonia storage tanks”, Pukyong National University Department of Safety Engineering, 2017.
3. 울산광역시, 고용노동부 울산지청, 울산산업단지 사고사례집, 2015.
4. 한국산업안전보건공단, 벤젠 노출 근로자의 건강관리지침, 2013.
5. 한국산업안전보건공단, 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침, 2016.
6. 위험물안전관리법 시행규칙 별표 6 옥외탱크저장소의 위치·구조 및 설비의 기준, 2017.