

## 저장시설의 순간 전량 방출 시 방류벽의 월파 효과에 대한 수치모델링

민동석 · 박천택 · 정승호<sup>†</sup>

아주대학교 환경안전공학과  
16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206  
(2018년 7월 31일 접수, 2018년 12월 3일 수정본 접수, 2018년 12월 6일 채택)

## Numerical Modeling for Effect on Bund Overtopping Caused by a Catastrophic Failure of Chemical Storage Tanks

Dong Seok Min, Chuntak Phark and Seungho Jung<sup>†</sup>

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea  
(Received 31 July 2018; Received in revised form 3 December 2018; accepted 6 December 2018)

### 요 약

국내 산업이 발전함에 따라 유해화학물질의 사용이 급속도로 증가하고 있고, 이에 따른 화학사고 역시 증가하고 있다. 대부분의 화학사고는 저장시설에서 화학물질의 누출로 인해 발생하지만, 갑작스러운 고온·고압으로 인해 저장시설이 파열됨으로써 내부의 물질이 순간적으로 방출되는 사고 역시 발생하고 있다. 이것을 *catastrophic failure*라고 부르며 그 빈도는 매우 낮지만, 발생했을 때 피해 규모는 매우 크다. 국내에서는 2013년 울산의 한 현장에서 물탱크의 파열로 인해 3명의 사망자를 포함한 15명의 사상자가 발생하였고, 전 세계적으로 1919년부터 2004년까지 저장시설의 순간 전량 방출 사고가 64건 발생하였다. 저장시설에서 위험물질이 누출될 경우 외부로의 확산을 방지하는 방류벽이 존재하지만, 저장시설의 파괴로 물질이 순간적으로 방출되는 경우 내부 물질이 방류벽 바깥으로 넘치는 현상이 발생한다. 이를 월파 현상 또는 *overtopping* 이라 한다. 해외에서는 저장시설의 순간 전량 방출 사고에 따른 *overtopping* 효과를 실험을 통해 연구해왔다. 본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 전산유체역학(CFD) 시뮬레이션을 이용하여 국내 규정을 준수하는 방류벽의 설계 조건별 *overtopping* 효과를 확인해 보았다. 그 결과, 방류벽 용량의 최소기준을 만족한 상태에서 높이가 높아지고 설비와의 거리가 가까워짐에 따라 내부 물질이 방류벽 외부로 빠져나가는 현상은 줄어들었다. 추가로 대기조건 및 물질의 종류, 방류벽 형상에 따른 *overtopping*의 효과를 확인함으로써, 순간 전량 방출 사고의 피해를 고려한 방류벽의 설계 방향 및 저감 대책을 제시하고자 한다.

**Abstract** – As the industry develops in Korea, the use of hazardous chemicals is increasing rapidly and chemical accidents are increasing accordingly. Most of the chemical accidents are caused by leaks of hazardous chemicals, but there are also accidents in which all the substances are released instantaneously due to sudden high temperature/pressure or defection of the storage tanks. This is called catastrophic failure and its frequency is very low, but consequence is very huge when it occurs. In Korea, there were 15 casualties including three deaths due to catastrophic rupture of water tank in 2013, and 64 instances of failures from 1919 to 2004 worldwide. In case of catastrophic failure, it would be able to overflow outside the bund that reduces the evaporation rate and following consequence. This incident is called *overtopping*. Overseas, some researchers have been studying the amount of external overflow depending on bund conditions in the event of such an accident. Based on the previous research, this study identified *overtopping* fraction by condition of bund in accordance with Korea Chemicals Controls Act Using CFD simulation. As a result, as the height increases and the distance to the facility decreases while meeting the minimum standard of the bund capacity, the *overtopping* effect has decreased. In addition, by identifying the effects of *overtopping* according to atmospheric conditions, types of materials and shapes of bunds, this study proposes the design of the bund considering the effect of *overtopping* caused by catastrophic failure with different bund conditions.

Key words: Bund, Catastrophic Failure, Consequence Analysis, Overtopping, Simulation, CFD

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

E-mail: processsafety@ajou.ac.kr

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.

## 1. 서 론

## 2. 방법론

국내·외 산업이 발전함에 따라 유해화학물질의 사용이 급속도로 증가하고 있고, 그에 따른 화학 사고와 피해 역시 증가하고 있다. 2012년 구미 불화수소 누출사고의 발생 이후로 화학물질에 대한 체계적인 관리의 필요성을 인지하였고, 이에 따라 화학물질관리법을 제정하여 시행하고 있다[4]. 불화수소 누출사고처럼 대부분의 화학 사고는 화학물질의 유출 및 누출로 인한 사고이지만, 공정설비의 운전온도나 압력이 순식간에 올라가면서 화학물질이 순간 전량 방출되는 사고 역시 발생하고 있다.

이를 순간 전량 방출 또는 *catastrophic failure*라고 하며, 사고 발생 빈도는 매우 낮지만 사고가 발생했을 때 사람이나 주변 환경에 심각한 피해를 줄 수 있다. 전 세계적으로 1919년부터 2004년까지 단일 저장시설의 순간 전량 방출 사고가 64건 발생하였고, 그중 20%는 인접한 설비의 연쇄적 고장을 유발하였다[1].

대부분의 화학물질 저장시설 주변에는 누출이나 확산으로 인한 피해를 줄이기 위해 방류벽을 설치하고 있다. 그 용량은 법령마다 차이가 있지만 보통 저장시설 용량의 110% 이상을 기준으로 하고 있으며, 누출된 화학물질이 방류벽 바깥영역으로 나가지 못하게 막는 역할을 한다. 하지만 저장시설의 *catastrophic failure*가 발생하는 경우 누출되는 물질의 관성 때문에 방류벽 외부로 유출되어 더 큰 피해를 유발할 수 있는데, 이러한 현상을 월과현상 혹은 *overtopping*이라 한다[2,3].

우리나라에서는 2013년 7월, 울산의 한 현장에서 물탱크가 폭발하여 사망자 3명을 포함해 근로자 15명이 다치는 사고가 발생한 사례가 있다[19]. 해외에서는 미국과 그리스, 리투아니아에서 발생한 사례가 있고, 미국 펜실베이니아 지역에서 500,000 Gallon의 경유가 Monongahela 강 유역으로 유출되면서 주변 환경에 심각한 피해를 준 사례가 있다[5].

전량 방출 사고는 공정 내의 사고로 인해 발생하지만, 화학 설비를 대상으로 하는 테러로 인해 발생할 수도 있다. 미국 석유화학협회(American Petroleum Institute, API)에서 만든 화학 시설 대테러 표준인 API-780에 따르면, 화학 시설에 대한 테러 위험성 평가 시에는 최악의 상황을 고려해야 한다[17]. 미국 화학공학회 공정안전 분과(Center for Chemical Process Safety, CCPS) 역시 테러한 의한 잠재적 사고의 심각도는 최악의 사고 시나리오를 토대로 접근해야 한다고 언급하고 있다[18].

해외에서는 방류벽과 저장시설의 조건에 따라 사고 발생 시 방류벽 외부로 넘어가는 물질의 양(*overtopping fraction*)을 실험을 통하여 연구해왔다. Liverpool John Moores University (LJMU)의 Atherton 등[5]에 의해 작성된 HSE research report 333에 방류벽의 용량과 저장탱크의 형상에 따른 *overtopping fraction*에 관한 연구 결과가 수록되어 있으며, Texas A&M University의 Bin Zhang 등[2]의 연구에서는 실험실과 실제 필드 테스트 그리고 부분적인 CFD 2D 시뮬레이션을 통해 LNG의 탱크 형상과 방류벽의 형태별 *overtopping fraction*에 관해 연구하였다[2,5].

본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 국내 규정에 맞는 방류벽의 설계 조건별 *overtopping fraction*을 별도의 실험 없이 전산유체역학 프로그램 ANSYS Fluent 18.0을 이용하여 3D 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이를 통해 순간 전량 방출의 피해를 고려한 방류벽의 설계 방향을 제시하고, 앞으로 발생할 수 있는 사고에 대한 저감 대책을 도출하였다.

### 2-1. 전산유체역학

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 Potential 방정식부터 Navier-Stokes 방정식에 이르기까지 유동을 지배하는 여러 종류의 편미분 방정식을 전산 기법을 동원하여 대수 방정식으로 변환하여 해를 구함으로써 유체의 유동을 해석하는 학문이다. 전산유체역학은 실험적 방법과는 달리 축소된 모형에 의존할 필요가 없으므로, 시간과 경비가 절약되고 컴퓨터 성능에 의존하는 학문이기 때문에 컴퓨터의 성능이 발달할수록 더욱더 정확하고 빠른 결과를 보여줄 수 있는 잠재력이 큰 학문이다.

유체유동의 지배방정식은 유체의 질량은 보존된다는 질량 보존의 법칙, 운동량의 변화율은 유체에 가해지는 힘들의 합과 같다는 뉴턴의 제2 법칙, 에너지의 변화율은 유체입자에 부여되는 열전달률과 일률의 합과 같다는 열역학 제1 법칙과 등의 물리학적 보존법칙을 수학적으로 표현한 것이다[6].

CFD 코드는 유체유동의 문제를 풀기 위한 수치 알고리즘에 기초하여 만들어진다. Fluent를 비롯하여 CFX, Flame Acceleration Simulator (FLACS), Fire Dynamics Simulator (FDS) 등 다양한 상용 CFD 소프트웨어들이 있으며 저마다 장단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 화학물질의 대기 확산 및 사고 영향 평가에 주로 사용하는 Fluent 18.0을 이용하여 해석을 진행하였다.

Fluent는 비압축성, 압축성 및 비압축성 유동을 포함한 전체 흐름 영역을 분석할 수 있는 유체 유동 해석 프로그램이다. 또한, 층류, 난류, 열전달, 화학 반응 및 다상 유동 문제와 같은 다양한 물리적, 화학적 현상을 분석할 수 있다. 따라서 공정 설계 및 제품 설계와 같은 흐름 분석의 모든 분야에서 신뢰성이 높아 사용되고 있다[7].

일반적으로 CFD 해석은 전처리(Pre Processing), 해석(Solving), 후처리(Post Processing) 과정으로 이루어진다. 전처리 과정은 해석하고자 하는 영역을 기하학적으로 표현하고 격자를 생성하는 과정이다. 해석 과정은 CFD 문제를 정의하고 적합한 모델 및 물성, 경계조건을 설정하여 방정식의 해를 구하는 단계이다. 후처리 과정에서는 해석한 결과를 분석하고 효과적으로 결과를 표현하는 단계이다[6]. 이번 연구에서는 이러한 과정을 따라 방류벽의 *overtopping fraction*을 3D 시뮬레이션을 통해 해석하였고, 본 연구에 앞서 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 실제 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하는 CFD validation을 수행하였다.

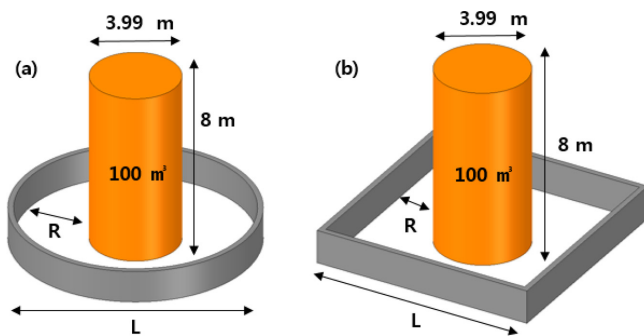
### 2-2. 저장시설의 설계

방류벽이란 유해화학물질 저장시설 주변에 설치하여 액상 물질이 누출되어 확산하는 것을 방지하는 피해저감장치 중 하나이다. 국내 법령 중에서 화학물질을 관리하는 주요 법률에는 화학물질관리법, 산업안전보건법, 위험물안전관리법, 고압가스안전관리법 등이 있다. Table 1은 국내 화학물질 관련 법령에서 정하고 있는 방류벽에 대한 취급시설 기준이다[8]. 그중에서 화학물질관리법 유해화학물질 취급시설 설치 및 관리 기준(제21조 제2항)에서 명시하고 있는 방류벽 설계 지침을 참조하여 조건을 설정하였다.

저장탱크는 수직 실린더 형태로써 지름 3.99 m, 높이 8 m를 적용하여 설비의 용량을 100 m<sup>3</sup>로 설정하였고, 물질의 저장량은 사고 상황을 고려하여 100% 채워져 있는 상태로 가정하였다. 방류벽의 용량은 방류벽 전체 용량에서 방류벽 내 탱크 및 구조물의 용량을

**Table 1. Bund installation standards of domestic chemical control act [9]**

Parameter	Act	Toxic Chemical Act	Occupational Health and Safety Act	Safety Control of Dangerous Substances Act	High- Pressure Gas Safety Control Act
Material		None	Reinforced concrete or mud wall	Reinforced concrete or mud wall	Reinforced concrete or mud wall, etc.
Strength		None	Resisting fluid pressure	Structure without spill or leakage	Resisting fluid pressure
Internal volume		None (External spill or leakage not allowed)	over maximum volume tank	Over 110% of maximum volume tank	over maximum volume tank
Height		None	0.5~3.0 m	0.5~3.0 m	As low as the least interference in safety activities
Distance to tank		None	External spill or leakage not allowed	- more than 1.5 m - Below 15 m of diameter : more than 1/3 of the tank height - More than 15 m of diameter : more than 1/2 of the tank height	None
Number of tanks		None	None	No more than 10 (Limited exception allowed)	Flammable- oxidizing or flammable- toxic chemicals
Chemicals which installation is not allowed within the same bund		None	Chemically reacted chemicals causing danger or hazard	None	None
Material of bund bottom		Impermissible	Corrosion proof	None	None

**Fig. 1. (a) Circular type and (b) square type bunds of the storage tanks.****Table 2. Details of circular type bunds**

Circular type			
Parameter	Height	Diameter	Distance to tank
Type No.	H(m)	L(m)	R(m)
Circular type 1	0.5	17.2	6.6
Circular type 2	1	12.5	4.3
Circular type 3	1.5	10.5	3.2
Circular type 4	2	9.3	2.6
Circular type 5	2.5	8.8	2.2
Circular type 6	3	7.9	2.0

제외한 부피로써 화학물질관리법의 최소 기준인 탱크 용량의 110%인 110 m<sup>3</sup>로 설정하였다. 방류벽 형태는 원형과 정사각형 형태로 설정하였고, 방류벽의 최소 높이 0.5 m부터 최대 높이 3 m까지 0.5 m의 간격으로 총 12가지 종류의 방류벽에 대해 시뮬레이션을 진행하였다(Fig. 1). 방류벽의 형태별 세부 사항은 Table 2, Table 3, Fig. 2에 정리하였다.

### 2-3. 기상 조건 및 물질 선정

기상 조건으로 장외영향평가에서 사용하는 대기 온도 25 °C 습도 50%를 적용하였고, 풍속은 낮과 밤을 구분하여 비교하였다. 낮의

**Table 3. Details of square type bunds**

Square type			
Parameter	Height	Length	Distance to tank
Type No.	H(m)	L(m)	R(m)
Square type 1	0.5	15.3	5.6
Square type 2	1	11.1	3.5
Square type 3	1.5	9.3	2.6
Square type 4	2	8.2	2.1
Square type 5	2.5	7.5	1.8
Square type 6	3	7.0	1.5

경우 풍속 3 m/s, 대기안정도 D Class를 적용하였고, 밤의 경우 풍속 1.5 m/s, 대기안정도 F Class를 적용하였다[10]. 주변 지형에 따른 surface roughness는 processing plant 및 EPA urban cases에 적용하는 1 m를 설정하였다[11].

물질은 실제 실험과 시뮬레이션 결과를 비교했던 물과 함께 톨루엔을 추가하였다. 톨루엔은 벤젠과 더불어 대표적인 VOCs로 극히 미량으로도 악취를 발생시키고, 실내 재실자의 호흡으로 흡입되며, 피부, 눈 등을 자극하고 피부와 접촉되면 탈지 작용을 일으키기도 한다. 또한, 두통, 현기증, 피로 등을 일으키고, 고농도에 노출될 때는 마비상태에 빠지게 하여 사망에 이르게 하기도 한다고 보고되어 있다[12].

물과 톨루엔에 대표적인 물성의 차이는 밀도와 표면장력이다. 물의 경우 25 °C에서 밀도는 998.2 kg/m<sup>3</sup>, 표면장력은 0.078 N/m이고, 톨루엔의 밀도는 866 kg/m<sup>3</sup>, 표면장력은 0.028 N/m이다. 액체의 유동이라는 관점에서 밀도와 표면장력의 차이를 가지고 있는 2가지 물질에 대해서 낮과 밤 기상 조건과 각각의 방류벽 조건을 적용하여 총 48가지의 사례에 대한 전산 유체해석을 진행하였다.

## 3. CFD Simulation

### 3-1. Actual overtopping test

Texas A&M University의 Bin Zhang 등[2]의 연구에서 overtopping

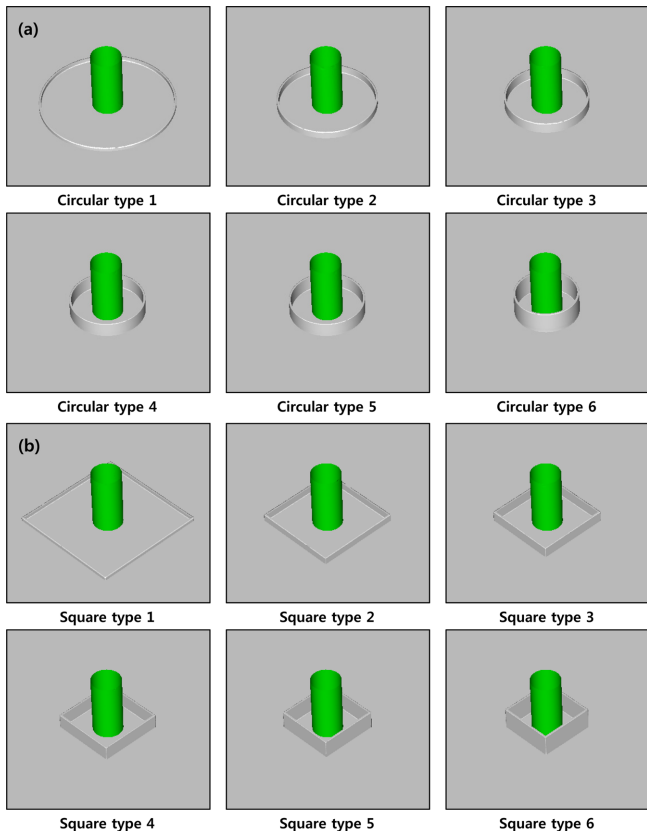


Fig. 2. Details of (a) circular type and (b) square type bunds.

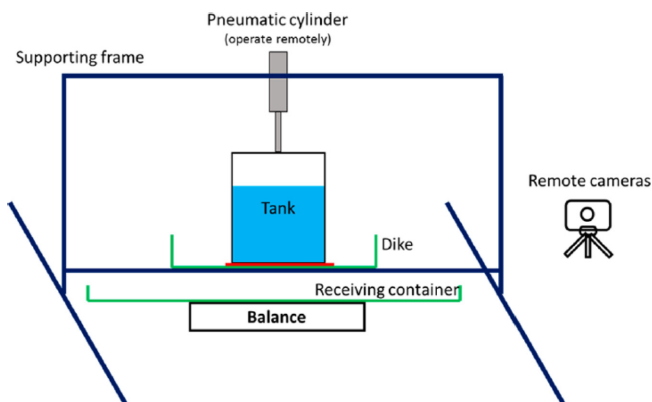


Fig. 3. Schematic of the experimental setup for overtopping tests courtesy copied from Zhang et al. [2].

현상을 구현하기 위해 Fig. 3과 같은 장비를 설치하였다. 실험에서는 탱크와 주위를 둘러싸는 방류벽을 설치하고 물, LNG, 액체질소를 채워 넣은 다음 탱크 외벽을 순간적으로 들어 올려 catastrophic failure를 구현하였다. 탱크 외벽을 순간적으로 들어 올리게 되면 내부에 있던 물질 역시 순간적으로 바깥으로 이동하면서 방류벽과 충돌하게 되고, 일부는 방류벽을 타고 넘어 바깥으로 빠져나가게 된다.

실험은 실험실 내부에 소규모로 진행한 테스트와 외부에서 대규모로 설치하여 진행한 필드 테스트, 2가지로 진행되었다. 실험실 테스트에서는 3가지 물질에 대해 탱크의 지름, 방류벽의 지름, 방류벽의 높이, 방류벽의 형태, 방류벽의 재질을 변수로 하여 실험을 진행

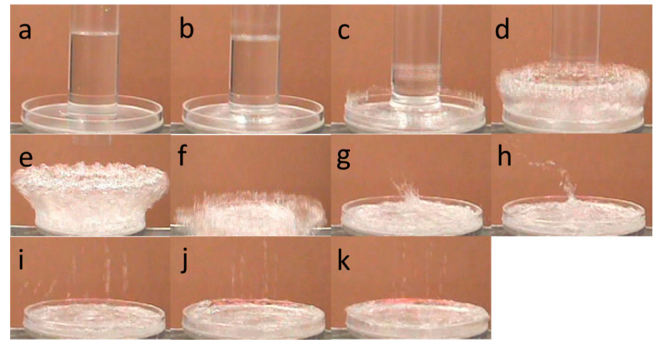


Fig. 4. Snapshots of high-speed camera records of the overtopping process courtesy copied from Zhang et al: (a) 0.0, (b) 0.1, (c) 0.2, (d) 0.3, (e) 0.4, (f) 0.5, (g) 0.6, (h) 0.7, (i) 0.8, (j) 0.9, and (k) 1.0 s [2].



Fig. 5. Liquid-nitrogen overtopping in the field tests courtesy copied from Zhang et al. [2].

하였고, 대규모 테스트에서는 3가지 물질에 대해 방류벽의 높이만을 변수로 두고 실험을 진행하였다.

실험 결과를 방류벽의 용량 대비 저장시설에 채워진 물질의 용량 (filling ratio)에 대한 순간 전량 방출 시 방류벽 바깥으로 빠져나간 용량(overtopping fraction)을 조건별로 구하여 관계식으로 표현하였다. 실험 결과 같은 용량일 때 원형의 방류벽보다 사각의 방류벽에서 overtopping fraction이 큰 것으로 나타났고, 방류벽의 재질은 큰 영향을 주지 않았다. 또한, 실험실 테스트와 필드 테스트의 결과가 큰 차이를 보이지 않았다. 위 결과를 바탕으로 14개의 실험실 테스트 중에서 물을 이용하여 저장탱크의 지름 0.1 m, 원형 방류벽의 지름 0.15 m, 방류벽의 높이 0.022 m의 조건으로 진행한 테스트를 선정하여 CFD 시뮬레이션 결과와 비교를 진행하였다.

### 3-2. CFD 모델링

#### 3-2-1. 3D Geometry 및 경계 조건

실제 실험과의 비교를 위해 탱크와 주위를 두르는 방류벽의 Geometry 생성은 ANSYS Design Modeler 18.0을 이용하였다. 외부 유동 영역의 크기는 가로 2 m, 세로 2 m, 높이 1 m로 설정하였고, 그 중심에 설비들을 모사하였다(Fig. 6(a)). 경계조건은 방류벽과 외부 경계는 wall 조건을 적용하였고, 나머지 부분에는 모두 interior 조건을 적용하였다.

본 연구에서는 실제 크기의 저장시설과 대기조건에 따른 변화를

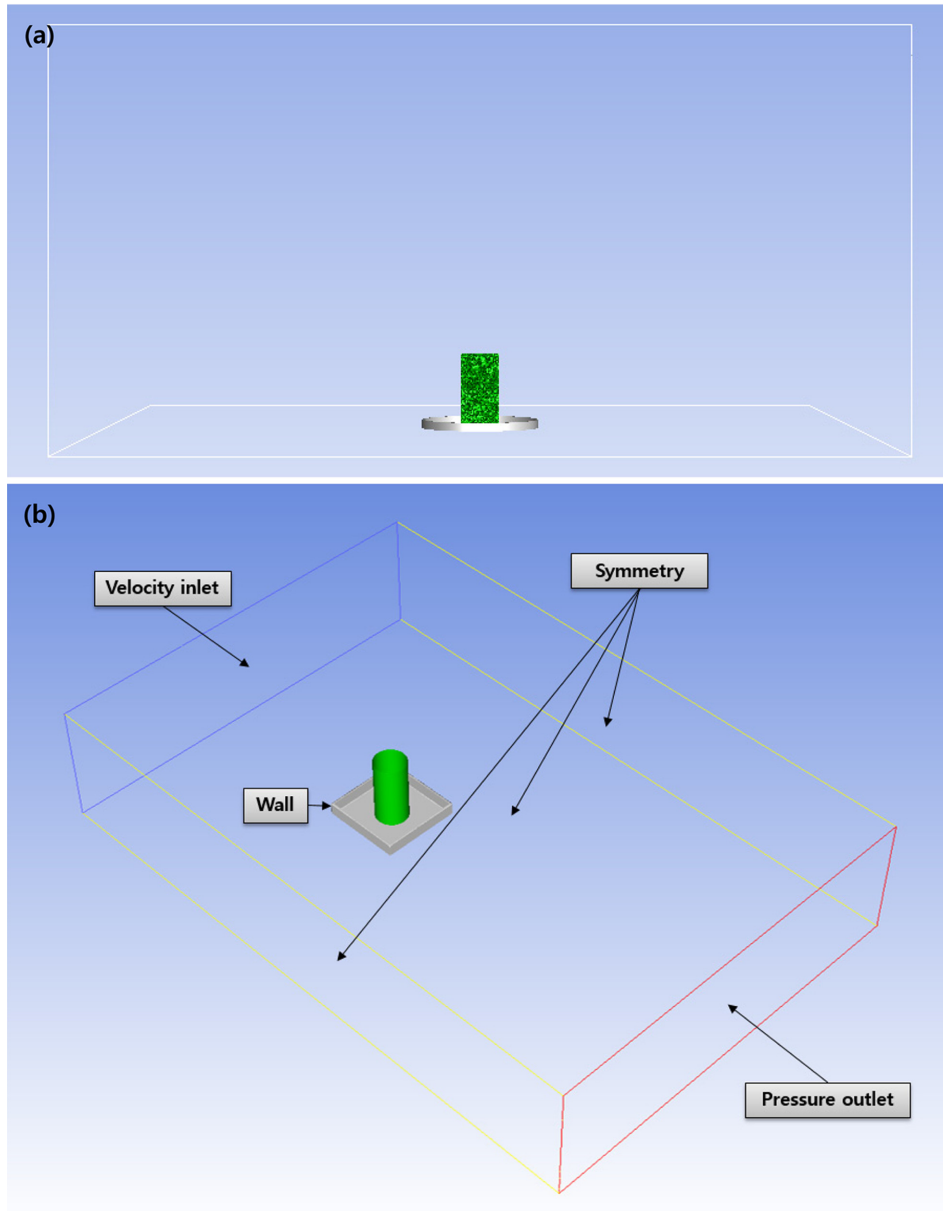


Fig. 6. 3D geometry and boundary conditions of (a) validation cases and (b) CFD simulation cases.

확인하기 위해 가로 75 m, 세로 50 m, 높이 15 m의 해석 영역을 정의하였고, 그 중심에 각 Type 별 설비를 배치하였다. Fig. 6(b)와 같이 바람이 들어오고 나가는 영역에 각각 velocity inlet과 pressure outlet 경계조건을 설정하였고, 옆면과 윗부분은 symmetry 경계조건, 방류벽과 지면은 wall 경계조건, 탱크 부분은 interior 조건을 각각 설정하였다.

### 3-2-2. 격자 및 모델 설정

속도나 압력, 온도 등의 유동 문제에 대한 해는 각각 셀 내부의 절점(node)에서 정의된다. CFD 해석의 정밀도는 격자를 구성하는 셀의 개수가 좌우한다. 일반적으로 셀의 개수가 많을수록 해의 정밀도는 높아진다. 해의 정밀도와 해석에 필요한 물리적, 시간적 비용 모두 격자의 세밀함에 달려있다[6].

이번 연구에서는 ANSYS에서 제공하는 meshing 프로그램과 Fluent를 이용하여 다면체 격자(polyhedral mesh)를 적용하였다. 다

면체 격자란 유동 영역을 다면체로 나누어 생성된 격자를 말한다. 다면체 격자는 기존의 사면체 격자(tetrahedral mesh)나 육면체 격자(hexahedral mesh)에 비해 해석 시간을 단축할 수 있고, 동등 이상의 정확성을 가지고 있으면서도 어렵지 않게 생성할 수 있어 격자 생성 시간 역시 단축할 수 있는 장점이 있다[13]. 실험과의 비교·검증 시물레이션에서는 약 450,000개의 다면체 격자를 생성하였고, 설정한 저장시설에 대한 사례연구에서는 약 350,000개의 다면체 격자를 생성하여 해석을 수행하였다(Fig. 7).

대기 중의 액체의 시간의 따른 유동 흐름을 모사하기 위해 비정상상태 난류 모델과 다상 유동 모델을 사용하였다. 3D 시물레이션의 비압축성 유동의 흐름의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (1)$$

여기서  $U_i = \bar{u}_i + u'_i$  로  $\bar{u}_i$  는 성분 속도의 평균,  $u'_i$  는 성분 변동 속



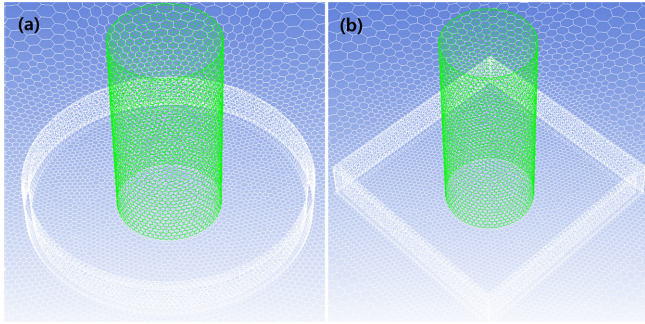


Fig. 7. Polyhedral mesh on 3D geometry of (a) circular type and (b) square type bunds.

도이다( $i, j = 1, 2, 3$ ).  $\rho$ 와  $\nu$ 는 각각 유체의 밀도와 동점성계수이며,  $(\overline{u'_i u'_j})$ 는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$-(\overline{u'_i u'_j}) = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} K \quad (2)$$

여기서  $\mu_t$ 는 높은 레이놀즈수의 흐름을 무차원 분석을 통해 추론할 수 있는 난류점성계수이다. 난류 에너지 발생률과 소산율이 거의 평형 상태라고 가정하면,  $\mu_t$ 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

여기서  $f_\mu$ 는 난류 모델에 의해 결정되는 계수이다.  $K$ 와  $\varepsilon$ 는 각각 난류 운동 에너지와 난류 에너지 소산율이며  $k$ - $\varepsilon$  모델에 의해 결정될 수 있다. 난류 유동에서 일반적으로 사용하는 standard  $k$ - $\varepsilon$  모델을 보완한 realizable  $k$ - $\varepsilon$  모델을 시뮬레이션에 적용하였으며, Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation (SIMPLE) 알고리즘을 사용하여 해석을 진행하였다[14,15].

다상 유동 해석은 Volume Of Fluid (VOF) 모델을 사용하였다. VOF 모델은 고정된 격자에 적용되는 표면 추적 기술로써 유체 간 경계의 위치가 중요한 두 개 이상의 비 혼합 유체에 맞게 설계되었다[7]. 시간의 변화를 고려하기 위해 비정상상태(transient) 해석을 적용하였고 실험과의 비교·검증 시뮬레이션에서는 초기 상태에서부터 2초간, 설정한 저장시설에 대한 사례연구에서는 10초간 액체의 유동 변화를 파악하였다.

## 4. 결 과

### 4-1. 실험과의 비교를 통한 검증

실제 실험에서는 일정한 크기의 방류벽과 탱크를 설치하고 탱크 내 수위를 변화시켜 방류벽 용량 대비 탱크의 채워진 용량(filling ratio)을 결정하였다. 초기 탱크 내의 물질의 양(Initial mass)을 순간 전량 방출시킨 후 남아있는 물질의 잔량(Remaining)을 측정하여,

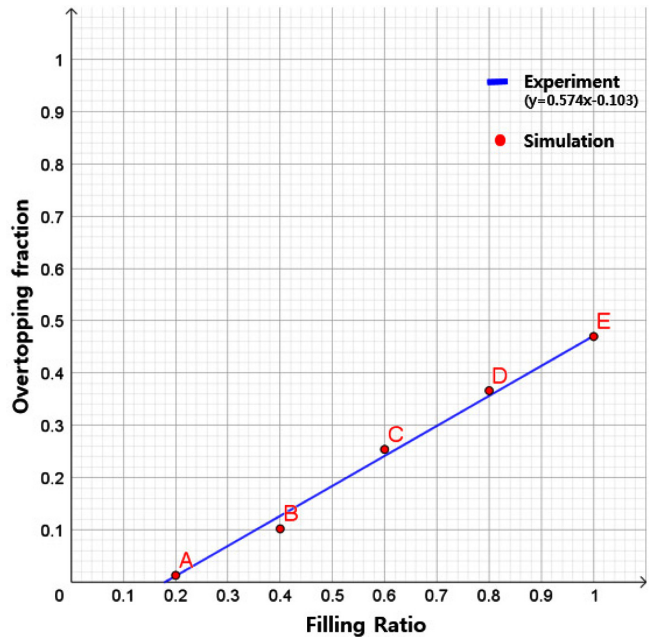


Fig. 8. Comparison between the result of the actual experiment and those of the simulations.

초기 물질의 양 대비 방류벽 바깥으로 빠져나간 물질의 비율 (overtopping fraction)을 산정하였다[2].

실제 실험의 결과를 바탕으로 filling ratio 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 overtopping fraction을 비교해 본 결과 Table 4 및 Fig. 8과 같이 전 구간에서 20% 내의 차이를 보였다. 탱크 내의 물질의 양이 방류벽의 용량과 같을 때(Filling Ratio: 100%) 가장 많은 양의 물질이 빠져나갔고, 실제 실험에서 overtopping fraction은 46.98%, CFD 시뮬레이션에서는 47.10%로써 약 0.12% 차이가 났다. 물질의 채워진 양이 줄어들수록 빠져나가는 비율 역시 줄어들었으며 Filling Ratio가 20%일 때는 약 1%만이 방류벽 바깥으로 빠져나갔다.

Fig. 9는 방출이 시작된 직후부터 2 초까지 방류벽 영역 내의 시간에 따른 물질의 질량을 보여주고 있다. 물질의 방출이 시작된 후 약 0.15~0.2 초 사이에 방류벽 바깥으로 빠져나가기 시작하고 중간에 일정량의 물질이 되돌아오는 경향을 보였다. 그 이후 0.85~0.9 초 사이 다시 한 번 주변 너울에 의해 소량의 물질이 빠져나갔으며, 초기 방출부터 0.5 초 사이에 가장 많은 물질이 방류벽 바깥으로 빠져나갔으며, 1 초 내에 overtopping 현상이 종결되었다.

### 4-2. 방류벽 설계 조건별 overtopping fraction

화학물질관리법의 방류벽 시행규칙을 만족하는 설계 조건에서 물질을 전량 방출시켰을 때 overtopping fraction의 결과를 Table 5과 Fig. 11에 정리하였다. 방류벽의 용량을 저장시설 용량의 110%로

Table 4. Comparison between the result of the actual experiment and those of the simulations

Filling Ratio	Initial mass (kg)	Remaining mass after 2 s (kg)	Overtopping fraction(%)		Ratio $\left( \frac{\text{Simulation}}{\text{Experiment}} \right)$
			Simulation	Experiment	
A(20%)	0.310	0.306	1.29	1.18	1.09
B(40%)	0.618	0.555	10.19	12.66	0.81
C(60%)	0.926	0.691	25.38	24.14	1.05
D(80%)	1.232	0.781	36.61	35.62	1.03
E(100%)	1.539	0.816	46.98	47.10	1.00

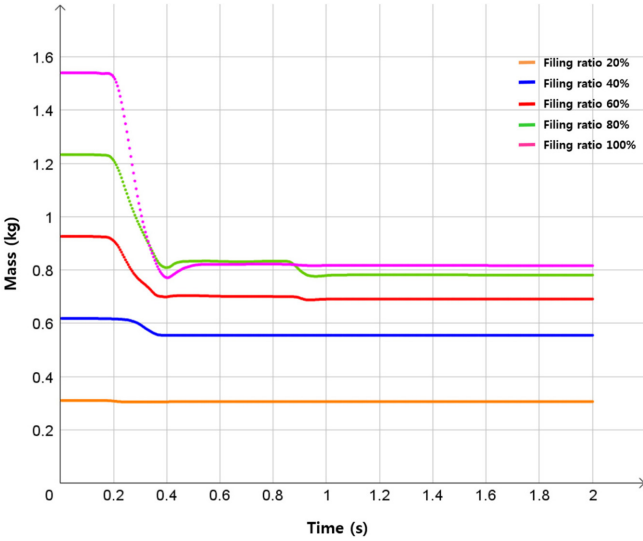


Fig. 9. Mass change in bund area over time in CFD validation simulations.

고정한 상태에서 방류벽의 높이가 높아지고 설비와의 거리가 가까워짐에 따라 overtopping fraction은 기상조건이나 방류벽의 형태, 물질 종류의 상관 없이 감소하는 경향을 보였다.

원형의 방류벽에서 기상조건에 의한 overtopping fraction은 1.5/F 조건보다 3/D 조건에서 높았다. 하지만 그 차이는 약 1~4% 정도로

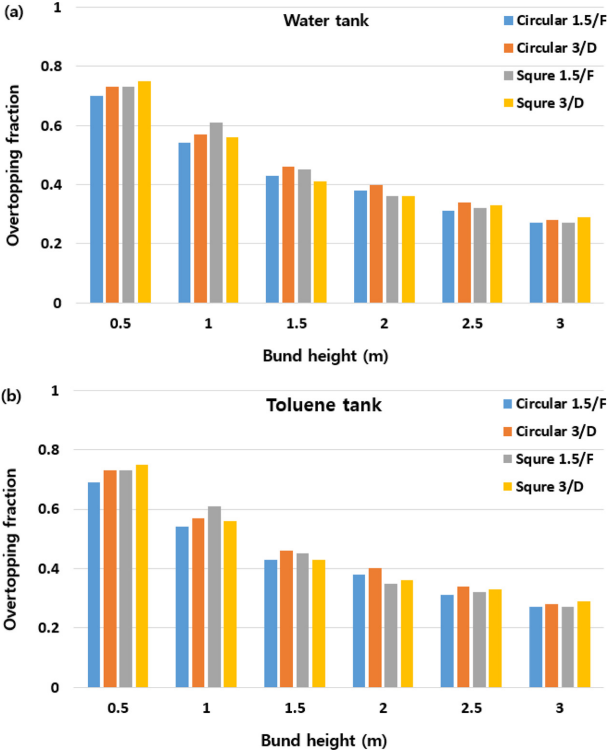


Fig. 11. The result of CFD simulations of overtopping by a catastrophic failure.

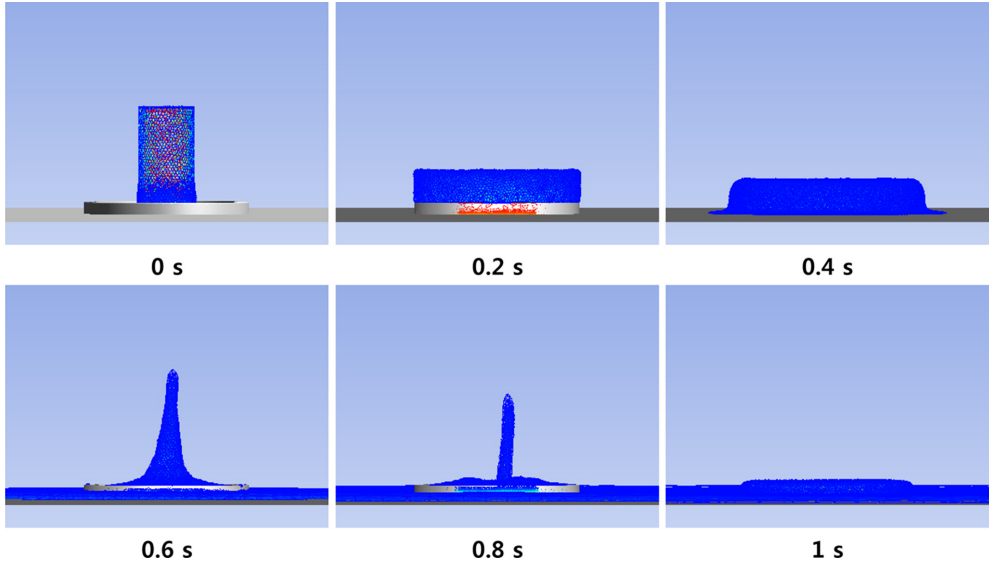


Fig. 10. Snapshots of the CFD validation simulations of the overtopping process.

Table 5. The result of CFD simulations of overtopping by a catastrophic failure

Overtopping fraction (%)	Water tank				Toluene tank			
	Circular type		Square type		Circular type		Square type	
	1.5/F	3/D	1.5/F	3/D	1.5/F	3/D	1.5/F	3/D
Type 1 (H=0.5 m)	70	73	73	75	69	73	73	75
Type 2 (H=1.0 m)	54	57	61	56	54	57	61	56
Type 3 (H=1.5 m)	43	46	45	41	43	46	45	43
Type 4 (H=2.0 m)	38	40	36	36	38	40	35	36
Type 5 (H=2.5 m)	31	34	32	33	31	34	32	33
Type 6 (H=3.0 m)	27	28	27	29	27	28	27	29

방류벽의 높이 및 설비와의 거리에 대한 영향에 비하면 크지 않았다. 반면에 사각형의 방류벽에서 기상조건에 의한 overtopping fraction의 경향성은 특별히 보이지 않았다. Type 1, 5, 6에서는 1.5/F 조건 대비 3/D 조건에서 빠져나간 물질의 양이 많았지만, Type 2, 3에서는 그 반대의 경향을 보였으며, Type 4에서는 풍속에 따른 overtopping fraction의 차이가 없었기 때문이다.

대기가 안정한 1.5/F 조건에서 방류벽의 형상에 따른 overtopping fraction은 Type 4를 제외하고 원형보다 사각형의 방류벽에서 더 큰 경향을 보였다. 반면에 상대적으로 대기가 불안정한 3/D 조건에서는 Type 1과 Type 6을 제외하고 원형의 방류벽에서 overtopping fraction이 더 큰 경향을 보였다. 하지만 이 역시도 최대 7% 정도로 방류벽의 높이 및 설비와의 거리에 대한 영향에 비하면 크지 않았다.

물질에 관한 결과의 차이는 거의 나타나지 않았다. 전체 24개의 조건 중 4개 시나리오에서 미세한 차이를 보였을 뿐 나머지 시나리오에서 결과의 차이는 발생하지 않았다. 이는 약 5초 이내에 이루어지는 순간 전량 방출 시나리오에서 밀도와 표면장력의 영향은 크지 않다는 사실을 보여준다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전산유체역학(CFD)을 이용하여 형태 및 조건별로 다양한 가상의 저장시설을 설정하여 국내 규정을 만족하는 방류벽을 설치하고, catastrophic failure에 의한 overtopping의 효과를 확인해 본 결과 다음과 같았다.

(1) 방류벽의 용량을 화학물질관리법의 최소 기준인 저장시설 용량의 110%로 설정한 상태에서 catastrophic failure에 의한 overtopping fraction은 방류벽이 높아지고 설비와의 거리가 짧아짐에 따라 줄어드는 경향을 보였다.

(2) 방류벽의 높이가 0.5 m에서 1 m로 높아졌을 때 overtopping fraction은 12~19%까지 감소하였으며, 1 m에서 1.5 m로 높아졌을 경우 11~16%까지 감소하였다. 그 이후, 높이가 1.5 m 이상인 방류벽에서 높이를 0.5 m 상승시켰을 때 overtopping fraction의 감소는 10% 이하를 보였다.

(3) 기상조건 및 방류벽의 형상에 따라 catastrophic failure에 의한 overtopping fraction은 조건별로 차이가 있었지만 10%를 넘지 않았다. 이는 방류벽의 높이 및 설비와의 거리에 대한 영향에 비하면 크지 않았다.

(4) Catastrophic failure에 의한 물과 톨루엔에 overtopping fraction의 차이는 거의 발생하지 않았다. 이는 물질이 순간적으로 방출되는 경우 밀도와 표면장력에 의한 영향이 크지 않다는 사실을 보여준다.

방류벽의 높이가 높아지고 설비와의 거리가 가까워짐에 따라 catastrophic failure에 의한 overtopping의 효과가 줄어들지만, 높이 증가에 따른 overtopping의 감소를 역시 줄어들기 때문에 이를 고려한 방류벽의 설계가 필요하다. 이번 연구에서 설정한 저장시설의 경우 1.5 m 이하의 높이에서 overtopping의 감소 효과가 우수했다. 또한, 2 m 이상의 방류벽을 설치할 경우 관리적 측면 및 추락/화재 등의 다른 사고의 예방 측면에서 좋지 않을 수 있기 때문에 본 연구에서는 overtopping을 고려한 방류벽의 적정 높이를 1~1.5 m로 권장한다.

하지만 이를 만족하지 못하는 기존 저장시설의 방류벽의 경우 단순히 높이를 올려 catastrophic failure에 대비할 수 있지만, 윗부분

을 안쪽으로 기울여서 보강한 deflector plate를 설치하는 방법 역시 고려할 수 있다[16]. 이번 연구를 통해 신규 저장설비의 설계에 있어 발생할 수 있는 사고에 대비할 수 있는 계획 수립에 도움이 될 것으로 판단되며, 테러와 같은 의도적 인적 재난으로 인한 catastrophic failure의 사고영향 범위 저감에도 의미 있게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감 사

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20162220100260).

## References

1. Thyer, A. M., Jagger, S. F., Atherton, W. and Ash, J. W., "A Review of Catastrophic Failures of Bulk Liquid Storage Tanks," *Loss Prev. Bull.*, **205**, 3(2009).
2. Zhang, B., Liu, Y., Zhu, W., Gopalaswami, N. and Mannan, M. S., "Experimental Study of Bund Overtopping Caused by a Catastrophic Failure of Tanks," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**, 12227-12235(2017).
3. Pettit, G. and Waite, P., "Bund Design to Prevent Overtopping," *I. Chem. E. Symposium Series.*, **149**, 329-339(2013).
4. Park, K. S., Kim, T. O., Kim, J. Y., Yoo, B. H. and Park, D. J., "A Study on Consequence Analysis of Hydrofluoric Acid Release Accident in Gumi Industrial Area," *Korean Journal of Hazardous Materials.*, **1**(1), 15-21(2013).
5. Atherton, W., "An Experimental Investigation of Bund Wall Overtopping and Dynamic Pressures on the Bund Wall Following Catastrophic Failure of a Storage Vessel," Health & Safety Executive. RESEARCH REPORT 333(2005).
6. Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc, New York(1995).
7. ANSYS Inc., *ANSYS Fluent 15.0 Theory Guide*(2013).
8. Kim, S. B., "A Study on Improving Management of Substances Requiring Preparation for Accidents Facilities," *Korean Society of Safety.*, **27**(3), 77-82(2012).
9. Shin, C. H. and Park, J. H., "Improvement in the Risk Reduction of Dikes of Storage Tanks Handling Hazardous Chemicals," *Crisis-sonomy.*, **12**(1), 83-93(2016).
10. NICS, "Technical Guideline on the Selection of the Accident Scenarios," NICS(2014).
11. EPA, "RMP Consequence Analysis Guidance," EPA(1996).
12. Park, S. H. and Seo, J. H., "Effects of Reducing Concentration of Pollutant at Indoor and Human Breathing Area on Application of Sorptive Building Materials," *Journal of Kiaebs*, **10**, 27-32(2011).
13. <https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison>.
14. Lim, H. Y., Um, K. S. and Jung, S. H., "A Study on Effective Mitigation System for Accidental Toxic Gas Releases," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **49**, 636-644(2017).
15. Kim, H. K. and Yoon, Y. H., "Study on Measurement and Numerical Analysis for Fluid Flow Past a Circular Cylinder in Rectangular



- Duct," *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **15**, 1095-1103(2013).
16. Walton, I. L. W., "Containment Systems for the Prevention of Pollution," ciria(2014).
17. API, "Security Risk Assessment Methodology for the Petroleum and Petrochemical Industries," ANSI/API Standard 780(2013).
18. Center for Chemical Process Safety, "Guidelines for Analyzing and Managing the Security Vulnerabilities of Fixed Chemical Sites," CCPS(2003).
19. <http://www.chemlocus.co.kr/news/pdfView/83265>.