



## 화학물질 저장탱크의 NaTech 피해영향 저감방법 연구 - 지진으로 인한 사고 중심으로 -

이태형<sup>\*,\*\*</sup> · 이현승<sup>\*,\*\*\*</sup> · †유병태<sup>\*</sup>

\*화학물질안전원, \*\*충남대학교 과학수사학과, \*\*\*전북대학교 환경공학과  
(2018년 7월 26일 접수, 2018년 10월 19일 수정, 2018년 10월 20일 채택)

## A Study on Risk Mitigation Measures of NaTech Damage Effect of Hazardous Chemical Storage Tank - Focus on Triggered by Earthquake -

Tae-Hyung Lee<sup>\*,\*\*</sup> · Hyun-Seung Lee<sup>\*,\*\*\*</sup> · †Byung-Tae Yoo<sup>\*</sup>

*\*National Institute of Chemical Safety*

*\*\*Dept. of Scientific Criminal Investigation, Graduate School, Chungnam National University*

*\*\*\*Dept. of Environmental Engineering, Graduate School, Chonbuk National University  
(Received July 26, 2018; Revised October 19, 2018; Accepted October 20, 2018)*

### 요약

본 연구는 NaTech 피해유형 중 발생 가능성이 높아지고 있는 지진으로 인해 석유화학공장의 화학물질 저장 탱크에 미칠 수 있는 피해규모를 도출할 수 있는 평가방법을 제시하였다. 이를 바탕으로 화학물질 저장탱크의 피해저감을 위한 위험을 평가하였다. 연구 결과 저장탱크의 위험도는 지진을 고려했을 때, 크게 증가하였으며, 지진에 대한 피해영향 저감을 위해 제시한 방안들에 대해 평가한 결과 위험도가 크게 감소하였다. 본 연구는 지진뿐만 아니라 태풍, 낙뢰 등 NaTech 피해저감을 위한 연구 및 비상대응계획 수립에 많은 도움이 될 것이다. 향후, 지진을 고려한 위험도 감소 방안에 대한 체계적인 연구와 제도적 보완이 필요하다.

**Abstract** - This study presents an evaluation method to estimate the damage scale of chemical storage tank of petrochemical plant due to the earthquake that is likely to occur among NaTech damage types. Based on this, the risk for damage reduction of chemical storage tanks was evaluated. As a result of the study, the risk of the storage tank increased greatly considering the earthquake, and the risk was greatly reduced as a result of evaluating the proposed measures to mitigate the damage impact on the earthquake. This study is expected to contribute to the research on the reduction of NaTech damages such as typhoons and thunderstorms as well as earthquakes, and to establish an emergency response plan. In the future, it is necessary to systematically study and institutionalize the risk reduction measures considering earthquakes.

**Key words** : Chemical Accident, Natech, Storage Tank, Chemical Disaster

### 1. 서론

2002년 유럽에서는 대홍수 발생으로 인하여 체코

Labe강 근처에 위치한 Spolona 화학회사에서 400 kg의 염소가 유출되어 인근지역 내 비상사태가 선포되었고, 2005년 미국 허리케인 카트리나는 석유 화학시설의 중대산업사고(Major Industrial Accident)로 이어져 많은 인명피해뿐만 아니라 경제적으로도 상당한 피해가 발생하였다[1]. 2011년 일본

†Corresponding author: flyduck@korea.kr  
Copyright © 2018 by The Korean Institute of Gas

에서는 지진 관측사상 최대의 리히터 규모 9.0의 강진이 발생하였다. 지진에 파생된 최대 8.5 m 높이가 넘는 쓰나미의 영향을 받아 후쿠시마현 소재의 도쿄전력 원자력발전소에 전기 공급이 중단되면서 냉각시스템의 고장으로 핵 연료봉이 공기중으로 노출되는 심각한 사고가 발생하였다[2]. 2017년에는 미국 허리케인 하비로 전력 공급이 중단된 화학공장에서 냉각장치 고장으로 폭발이 발생했으며, 다수의 석유화학공장에서 오염물질이 누출되었다. 최근 지구온난화 등 기후변화로 인해 예측불가능한 자연재해가 발생하고, 기술의 고도화, 도시환경의 복잡화로 인해 자연재해의 영향이 사회적 재난을 유발하는 대형복합재난의 문제가 발생하고 있는 것이다[3].

이처럼 지진, 태풍, 홍수 등과 같은 자연재해로 인한 화학물질 유출, 화재·폭발 등의 기술적 재난 발생은 사회가 감당하기 어려운 인적·물적 피해를 입혀 그 피해가 사회 전 방위로 확산될 가능성이 매우 높다. 이러한 재난을 가리켜 NaTech(Natural Disaster Triggered Technological Disaster)이라고 한다[4-6]. NaTech위험은 자연재해의 위해요소(Natural hazards)로부터 발생하게 되는 기술재난(Technological disaster) 또는 산업사고를 의미한다. NaTech재난은 '자연·기술 복합재난'이라 정의할 수 있으나, 일부 학자들은 자연재해가 유발하는 산업사고라는 측면에서 인과관계에 초점을 맞추고 있다[5]. NaTech위험은 도시화, 산업화와 같은 물리적 환경의 영향을 받기 때문에, 위험물질, 사회적 및 인구학적 특성, 복합적 환경 등과 같은 물리적 환경과의 상호작용에 따라 재난의 영향이 다르게 나타나며, 이러한 상호작용의 특성을 파악하여 효과적 재난 관리체계를 갖출 필요가 있다[7, 8].

국내에서도 2016년 9월 12일 경북 경주시 남서쪽 8 km 지역에서 리히터 규모 5.8의 지진이 발생했으며, 이는 1978년 국내 지진 관측 이래 역대 최강의 지진으로 기록되었다. 지진 여파로 울산화력발전소의 LNG 복합화력발전 4호기가 가동을 중지했으며, 월성원자력발전소 1~4호기에 수동으로 가동 중지 조치가 취해졌다. 또한, 2017년 11월 15일에는 경북 포항시 북구 북쪽 7 km 지역에서 리히터 규모 5.4의 지진이 발행하였다. 이는 경주지진에 이어 두 번째로 큰 규모였다. 지진으로 포항시 북구에 위치한 대학 건물 외벽이 무너지는 사고가 발생하였고, 11월 16일에 치러질 예정이던 대학수학능력시험이 일주일 연기되었다. 또한, 8개 초·중·고에서 과학실에 진열된 생물표본 용기가 파손되면서 포르말린 용액이 누출되는 사고가 발생하기도 하였다[9].

지진으로 인한 대형 산업사고가 발생하지는 않았으나 한반도 또한 1978년 이후 2014년까지 규모 4.0 이상의 지진이 43회, 규모 5.0 이상의 지진은 6회가 발생[10]할 만큼 지진 안전지대라 볼 수 없어 NaTech에 대한 대비가 필요하다.

국내에서는 2015년 1월 1일부터 시행된 「화학물질관리법」에 의거 유독물질, 허가물질, 제한물질 또는 금지물질, 사고대비물질, 그밖에 유해성 또는 위해성이 있거나 그러할 우려가 있는 화학물질을 유해화학물질로 정하고, 「화학물질관리법」 제23조에 따라 유해화학물질의 취급시설을 설치·운영하려는 자는 사전에 화학사고 발생으로 사업장 주변 지역의 사람이나 환경 등에 영향을 평가한 유해화학물질 화학사고 장외영향평가서를 작성하여 환경부장관에게 제출하도록 하고 있다. 장외영향평가의 위험도 산정은 사고영향과 사고발생빈도의 곱으로 나타내며, 사고영향의 지표로 영향범위 내 주민의 수를 적용하고, 사고발생빈도는 고장발생 빈도를 적용한다[11]. 여기에 시설의 위험도에 따라 사고영향을 줄이거나 사고발생빈도를 줄이는 위험도 감소대책을 추가로 고려할 수 있다[12]. 하지만, 장외영향평가의 위험도 산정방법에 지진 발생으로 인한 NaTech은 고려되지 않고 있는 실정이다. 이 때문에 국내에서 NaTech에 의한 화학사고의 발생 가능성을 알 수 없어 이에 대한 피해 발생 정도 및 범위 등의 예측이 어렵고 사고 대응과 예방대책수립에도 어려움이 있다.

이에, 본 연구에서 화학물질 저장탱크의 NaTech 위험성을 감소시킬 수 있는 방안에 대한 연구는 지진으로 인한 사고에 대하여 저장탱크에 적용 가능한 피해영향 저감방법에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위해 염소와 톨루엔 저장탱크를 대상으로 지진에 의해 발생할 수 있는 NaTech 위험성 평가 및 NaTech으로부터 안전성을 향상시킬 수 있는 방안이 적용된 저장탱크의 화학사고 위험성 평가를 수행하였다. 본 연구의 결과는 지진으로 인한 NaTech 재난의 발생 가능성, 피해 규모 등에 대한 예측을 가능하게 하고 이에 대한 위험성을 저감할 수 있는 방법을 제시한다. 따라서, 본 연구는 NaTech재난의 예방 및 피해 감소 등의 안전성 제고를 위한 연구 및 정책 수립 등의 활동에 기여할 수 있는 기초연구가 될 수 있을 것이다.

## II. 연구방법

본 연구에서 화학물질 저장탱크의 NaTech 피해영향 저감방법에 대한 연구는 지진에 의한 사고를

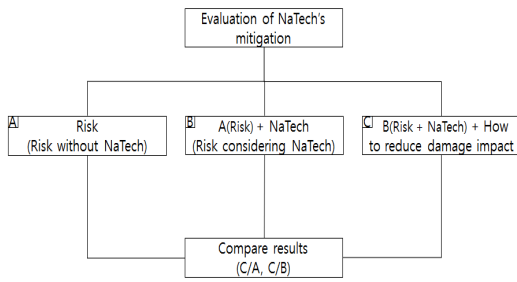


Fig. 1. Research method scheme.

중심으로 수행하였다. 이를 위해 화학사고 위험성 평가(Figure 1(A)), NaTech을 고려한 저장탱크의 위험성평가(Figure 1(B)), 저장탱크에 NaTech 피해영향 저감방법을 적용한 위험성(Figure 1(C))을 평가하였고, 피해영향 저감방법 적용에 의한 위험도 감소 효과를 비교 평가하기 위해 화학사고 위험도 및 NaTech이 고려된 위험도에 대한 피해영향 저감방법이 적용된 위험도의 비를 분석하여 평가하였다(Figure 1). 위험성 평가의 수행은 압력탱크와 상압탱크의 NaTech 위험도 및 저감방안을 조사하기 위해 압력탱크를 사용하는 염소와 상압탱크를 사용하는 톨루엔을 대상으로 하였으며, 위험도의 산정은 저장탱크에만 한정하고 부속설비는 포함되지 않았다.

염소와 톨루엔의 물질 특성을 살펴보면, 염소의 경우 녹황색의 기체상 물질이며, 부식성, 독성, 산화성의 특성을 띠는 인체에 치명적인 물질이다. 또한, 25 °C의 조건에서 증기압이  $5.83 \times 10^3$  mmHg으로 대기압보다 높아 저장을 위해서는 압력 저장용기를 사용해야 하는 물질이다. 톨루엔의 경우는 무색의 액체상 물질이며, 인화성이 매우 높은 특성을 띠는 인체에 유해한 물질이며, 25 °C의 조건에서 증기압이 28.4 mmHg으로 대기압보다 낮아 상압의 탱크에 저장이 가능한 물질이다.

2.1 화학사고 위험도 산정

$$\begin{aligned} \text{위험도} &= \text{영향범위 내 주민 수} \times \text{사고발생빈도} \\ &= \text{영향범위 내 주민 수} \times \text{초기사고의 빈도 값(FIE, Frequency of Initiating Event)} \end{aligned} \quad (1)$$

본 연구에서 NaTech이 포함되지 않은 화학사고 위험도는 식 (1)의 장외영향평가 위험도 산정방법으로 수행하였다. 위험도 산정을 위한 영향범위 내 주민 수는 50명으로 가정하였고, 사고발생빈도는 NaTech이 포함되지 않은 빈도를 뜻한다. 즉, 지진

Table 1. Frequency of initiating event for alternative scenario

Division	Frequency of initiating event(FIE) (yr-1)	
I-1	Pressure vessel Failure	1.00E-06
I-2	Piping rupture/100 m	1.00E-05
I-3	Piping leak/100 m	1.00E-03
I-4	Atmosphere tank failure	1.00E-03
I-5	Gasket/Packing blowout	1.00E-02
I-6	Turbine/Diesel engine overspeed with casing breach	1.00E-04
I-7	Third-party intervention	1.00E-02
I-8	Lightning strike	1.00E-03
I-9	Safety valve open failure	1.00E-02
I-10	Cooling water failure	1.00E-01
I-11	Pump seal failure	1.00E-01
I-12	Unloading/Loading hose failure	1.00E-01
I-13	BPCS instrument loop failure	1.00E-01
I-14	Regulator failure	1.00E-01
I-15	Small external fire	1.00E-01
I-16	Large external fire	1.00E-02

이 발생할 우려가 없는 평상시 상태의 사고발생빈도를 의미한다.

장외영향평가에서 대안의 사고시나리오 사고발생빈도는 초기사고의 빈도 값(FIE, Frequency of Initiating Event)을 적용하고 초기사고의 전형적인 사고빈도 산출은 해당 단위공정의 특성에 따라 방호계층분석기법(LOPA, Layer of Protection Analysis)과 OGP(International Association of Oil & Gas Producers)에서 제시한 위험성평가자료(Risk Assessment Data Directory)를 적용하는 방법 중 하나를 선택하여 적용하도록 하고 있다[11].

본 연구에서 염소 및 톨루엔 저장탱크의 위험도 산정을 위한 사고발생 빈도 값은 LOPA에서 제시하는 FIE 값(Table 1) 중 I-1(Pressure vessel failure)의 1.00E-06, I-4(Atmosphere tank failure)의 1.00E-03을 각각 적용하였다.

## 2.2 NaTech 고려 위험도 산정

본 연구에서 NaTech 고려 위험성은 지진 발생 가능성이 낮은 평상시 위험성과 실제 지진이 발생할 경우 위험성에 대하여 평가하였다.

장외영형평가에서는 위험도 산정을 위해 단위공정 특성에 따라 LOPA에서 제시하는 FIE 값을 적용하는데, 여기에는 지진에 의한 사고발생빈도가 포함되지 않았다. 이에, 본 연구의 NaTech 고려 위험성평가는 저장탱크의 사고발생빈도(식 (1)의 FIE)와 지진에 의한 저장탱크의 사고발생빈도(Frequency of accident caused by earthquakes)의 합을 적용하여 위험도를 산정하는 방법으로 수행하였다(Figure 2). 지진 발생에 따른 사고발생빈도와 위험도는 지진 발생확률 및 실제 지진 발생, 지진 발생에 의한 저장탱크 손상확률 등이 적용되었다. 지진 발생 가능성에 따른 위험도는 확률론적 지진 재해도에 대한 선행 연구[13]에서 조사한 지진 연초과 확률(AEP, Annual Exceedance Probability) 값 중 석유화학 산업단지가 몰려있는 울산지역의 평균값을 지진재현주기 값으로 적용하였고, 실제 지진 발생에 따른 위험도는 연간 지진발생빈도 0.01회에 해당하는 AEP 값 1.00E-02을 적용하였다. 또한, 지진에 의한 저장탱크의 사고발생빈도 산정에는 지진에 의해 저장탱크가 파손될 확률을 적용하였다.

$$\text{NaTech 고려 위험도} = \text{영향범위 내 주민 수} \times \text{NaTech 고려 사고발생빈도} \quad (2)$$

$$\text{NaTech 고려 사고발생빈도} = \text{FIE} + \text{NaTech 사고발생빈도} \quad (3)$$

본 연구에서 NaTech 재난을 고려한 화학사고의 위험도는 지진 발생가능성에 따른 위험도와 지진 발생에 따른 위험도에 대하여 각각 산정하였으며,

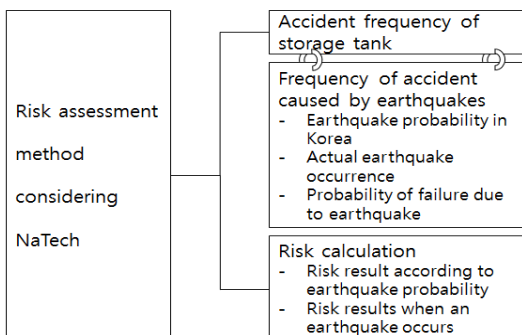


Fig. 2. Scheme of risk assesment for NaTech.

식 (2)를 적용하여 위험도를 산정하였다. 즉, 식 (1)에 NaTech 고려 사고발생빈도를 적용하였다(식 2). NaTech 고려 사고발생빈도는 식 (1)의 FIE와 식 (3)의 NaTech 사고발생빈도의 합으로 산정하였다(식 3).

지진에 의한 저장탱크의 취약도 계산을 위해서는 최대지반 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration) 값을 사용하는데 이는 각 위치에서 지반이 얼마나 강하게 흔들리는지를 나타내는 크기로 지반의 지질학적 특성이 모두 반영되어 있다(5). 단위는 일반적으로  $9.8 \text{ m/s}^2$ 에 해당하는 중력가속도  $g$ 를 사용한다. 지진에 의한 저장탱크 취약도 함수는 지진에 대한 구조물의 위험도를 평가하는 가장 보편적인 방법으로 알려져 있다[14]. 이현미[13] 등은 국내 광역도시 및 일부 지역에 대한 확률론적 지진 재해도 분석 연구에서 구조물의 손상발생 가능성이 커지는 PGA 값을 0.2  $g$ 를 기준으로 정하여 조사했으며, 연구지역 10곳에서 약  $3.738\text{E-}04 \sim 4.767\text{E-}04$ 의 AEP범위를 나타냈다. 평균 재해도는 약  $4.34\text{E-}04$ 를 나타냈으며, 이는 0.2  $g$ 의 지진동 수준에 대한 재현주기가 약 2300년에 상응함을 의미한다[13]. 본 연구의 대상지역인 울산지역 재해도의 경우는 AEP 값이  $2.00\text{E-}04$ 으로 조사되어 지진 발생빈도는 연간 0.0002회 및 5000년에 1회의 빈도를 나타낸다. 이는 지진 발생빈도를 고려했을 때 사실상 울산지역의 지진 발생에 대한 확률이 극히 낮아 이에 대한 대비의 필요성은 높지 않다. 따라서 본 연구의 피해영향 저감방법의 평가에서는 지진발생빈도 연간 0.01회에 해당하는 AEP 값을 적용하여 분석하였다.

$$\text{NaTech 사고발생빈도} = \text{저장탱크 지진 취약도} \times \text{지진 재현주기} \quad (4)$$

Table 2. “Probit” functions for equipment seismic fragility(Y: “Probit” value; PGA: peak ground acceleration)[15]

Scenario	Target	Probit equation	Dose, D	Dose units
Seismic event	Atmosph, storage, unanchored	$Y = -0.833 + 1.25 \ln(D)$	PGA	$g \%$
Seismic event	Atmosph, storage, anchored	$Y = -2.43 + 1.54 \ln(D)$	PGA	$g \%$
Seismic event	Pressurized storage, any	$Y = 5.146 + 0.884 \ln(D)$	PGA	$g$

식 (4)의 NaTech 사고발생빈도를 산정하기 위해 저장탱크가 지진에 의해 파손될 확률, 즉, PGA에 따른 지진 취약도와 지진 재현주기를 각각 적용하였다. 지진 취약도는 지진에 대한 취약도함수의 손상확률 (FP, Failure Probability)을 적용하였으며, Cozzani et al의 연구[15]에서 저장용기 등의 설비를 대상으로 지진 취약도 추정을 위해 활용된 PGA 값에 따른 지진 취약도 프로빗 손상확률식을 활용하여 산정하였다 (Table 2). PGA 값은 이현미[13] 등의 연구에서 구조물의 손상발생 가능성이 커지는 기준 값으로 정한바 있는 0.2 g를 기준으로 분석하였다. 지진 재현주기는 지진 발생 확률에 따른 NaTech 사고발생빈도의 경우 Figure 3의 확률론적 지진재해도 분석을 통해 산출된 울산지역 지진재해도 곡선의 AEP값 중 평균(Mean) 값 2.00E-04을 적용하였고, 지진 발생에 따른 위험도

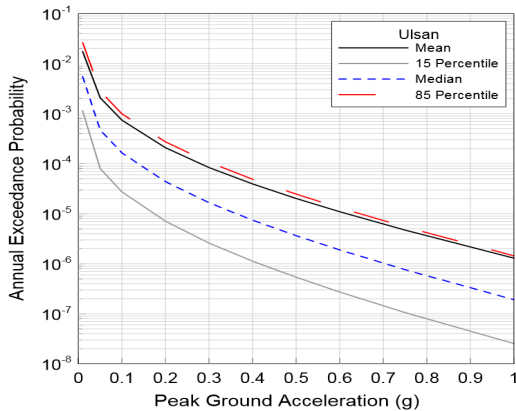


Fig. 3. Seismic mean and percentile curves for Ulsan[13].

Table 3. Probability of failure on demand of active IPL

Division	IPL	Contents	PFD
A-1	Detector and shut-off valve	Immediate detection and action at leak	1.00E-01
A-2	Relief valve/Rupture disc	Prevent from exceeding specified overpressure	1.00E-02
A-3	Basic process control system	Basic process control system	1.00E-01
A-4	Other Active protection	Other Active protection	1.00E-01

의 경우 AEP 값을 1.00E-02로 적용하여 산정하였다.

### 2.3 피해영향 저감방법 위험도 산정

NaTech 피해영향 저감방법에 대한 위험성평가를 위해 염소와 톨루엔 저장탱크의 지진으로 인한 화학 사고 발생에 대한 안전성 향상 방안(Safety improvement measures)을 적용하고, 이에 대한 위험도를 산정하였다(Figure 4). 즉, 지진을 고려한 사고발생빈도에 피해영향을 저감시킬 수 있는 안전성 향상방안을 적용하고 이에 대한 사고발생빈도를 적용하여 위험도를 산정하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{피해영향 저감방법 위험도} &= \text{영향범위 내 주민 수} \times [(\text{FIE} + \text{NaTech 사고발생빈도}) \times \text{안전성 향상도}] \\
 &= \text{영향범위 내 주민 수} \times \text{NaTech 고려 사고발생빈도} \times \text{PFD} \\
 &= \text{NaTech 고려 위험도} \times \text{PFD} \quad (5)
 \end{aligned}$$

식 (5)는 저장탱크에 NaTech 피해영향 저감방법 적용에 따른 위험도를 산정하기 위한 식이다. 즉,

Table 4. Probability of failure on demand of passive IPL

Division	IPL	Contents	PFD
P-1	Dike	Reduces the frequency of large consequences of a tank overflow	1.00E-02
P-2	Underground drainage system	Reduces the frequency of large consequences of tank overflow	1.00E-02
P-3	Open vent(no valve)	Prevents overpressure	1.00E-02
P-4	Fire proofing	Reduces rate of heat input	1.00E-02
P-5	Blast wall/bunker	Reduce the frequency of large consequence of an explosion	1.00E-03
P-6	Inherently safety design	Reduce the consequences associated with a scenario	1.00E-02
P-7	Flame arrestor	Eliminate the potential for flashback	1.00E-02
P-8	Other passive protection	Other passive protection	1.00E-01

본 연구에서 지진 발생에 대한 저장탱크의 피해 감소를 위해 안전성을 향상시킬 수 있는 방안 적용에 대한 위험도 산정을 위해 적용하였다. 안전성 향상도는 Table 3, 4의 수동적 및 능동적 독립방호계층(IPL, Independent Protection Layer)의 결함 발생 확률(PFD, Probability of Failure on Demand)을 적용하였다[16].

### III. 연구 결과

#### 3.1. 화학사고 위험도

Table 5는 염소와 톨루엔을 대상으로 NaTech이 포함되지 않은 화학사고에 대한 사고발생빈도 및 위험도를 산출한 결과이다. 사고발생빈도는 Table 1의 압력탱크(I-1) 및 상압탱크(I-4)의 FIE 값을 적용하였고, 위험도는 식 (1)을 활용하여 영향범위 내 주민 수 50을 적용하여 산정하였다. 그 결과 저장

탱크의 사고발생빈도는 압력탱크를 사용하는 염소와 상압탱크를 사용하는 톨루엔이 각각 1.00E-06, 1.00E-03이었으며, 톨루엔의 사고발생빈도 값이 더 높게 나타났다. 또한, 위험도는 염소 저장탱크 5.00E-05, 톨루엔 저장탱크 5.00E-02으로 조사되었으며, 톨루엔이 염소보다 높은 위험도를 나타냈다(Table 5).

#### 3.2 NaTech 고려 위험도

Table 6은 본 연구의 대상지역인 울산의 연간 지진발생빈도에 따른 염소 및 톨루엔 저장탱크의 NaTech 고려 위험도를 산정한 결과이다. 연간 지진발생빈도는 Figure 2의 확률론적 지진재해도 분석을 통해 산출된 울산지역 지진재해도 곡선의 AEP 평균값 중 PGA 0.2 g의 기준 값인 2.00E-04에 따른 저장탱크 손상확률, 사고발생빈도, 위험도 등을 산정하였다. 저장탱크의 손상확률 값을 Table 2의 저장탱크 지진 취약도 프로빗 손상확률식을 활용하여 상압탱크와 압력탱크, 앵커탱크와 무앵커탱크로 구분하여 산정한 결과이다. 또한, 사고발생빈도의 산정은 식 (4), 식(3) 등을 적용하여 각각 NaTech 사고발생빈도, NaTech 고려 사고발생빈도 등을 산정한 결과이며, 주민 수 50명을 식 (2)에 적용하여 NaTech 고려 위험도를 산정한 결과이다. 그 결과를 살펴보면 저장탱크 손상확률은 염소 0.1으로 조사되었고, 톨루엔의 무앵커탱크, 앵커탱크가 각각 0.02, 0.01으로 조사되어 압력탱크를 사용하는 염소

**Table 5.** Chemical accident risk for hazardous chemical storage tanks

Chemical substance	Number of residents in the affected area	FIE	Risk result
Chlorine	50	1.00E-06	5.00E-05
Toluene	50	1.00E-03	5.00E-02

**Table 6.** Risk result according to Ulsan earthquake annual exceedance probability(AEP 2.00E-04)

Chemical substance	Storage	Failure Probability	Frequency of accidents considering NaTech	Risk of accident considering NaTech
Chlorine	Pressurized storage	0.1	2.10E-05	1.05E-03
Toluene	Atmosph, storage, unanchored	0.02	1.00E-03	5.02E-02
	Atmosph, storage, anchored	0.01	1.00E-03	5.01E-02

**Table 7.** Risk results when an earthquake occurs(AEP 1.00E-02)

Chemical substance	Storage	Failure Probability	Frequency of accidents considering NaTech	Risk of accident considering NaTech
Chlorine	Pressurized storage	0.1	1.00E-03	5.01E-02
Toluene	Atmosph, storage, unanchored	0.02	1.20E-03	6.00E-02
	Atmosph, storage, anchored	0.01	1.10E-03	5.50E-01

저장탱크의 손상확률이 높게 나타났으며, 상압탱크인 톨루엔 저장탱크의 경우 무앵커탱크가 앵커탱크보다 손상확률이 높은 것으로 조사되었다. NaTech 고려 사고발생빈도는 염소 2.01E-05, 톨루엔은 무앵커탱크와 앵커탱크 모두 1.00E-03으로 조사되었다. NaTech 고려 위험도는 염소 1.05E-03으로 조사되었고, 톨루엔의 무앵커, 앵커탱크는 각각 5.01E-02, 5.02E-02으로 조사되었다(Table 6). AEP 2.00E-04를 적용한 NaTech 고려 위험도는 Table 5의 화학사고 위험도와 비교해서 톨루엔의 위험도는 NaTech을 고려하기 전과 차이가 없고, 염소는 NaTech 재난을 고려했을 때 화학사고 위험도가 높게 나타났다.

Table 7은 실제 지진발생 시 NaTech 고려 위험도를 산정한 결과이다. 실제 지진 조건을 위한 지진 발생빈도는 AEP 값 1.00E-02, PGA 값 0.2g를 적용하여 염소 및 톨루엔 저장탱크의 손상확률, 사고발생빈도, 위험도 등을 산정하였다. 산정 결과를 살펴보면 NaTech 고려 사고발생빈도는 염소 1.00E-03, 톨루엔은 무앵커탱크, 앵커탱크가 각각 1.20E-03,

1.10E-03으로 조사되어 염소 저장탱크가 가장 낮은 빈도를 나타냈다. NaTech 고려 위험도는 염소 5.01E-02으로 조사되었고, 톨루엔의 무앵커, 앵커탱크가 각각 6.00E-02, 5.50E-01으로 조사되었다(Table 7). AEP 1.00E-02를 적용한 NaTech 고려 위험도는 Table 5의 화학사고 위험도와 비교해서 염소와 톨루엔 저장탱크 모두 높은 위험도를 나타냈다.

### 3.3 피해영향 저감방법 위험도 평가

Table 8은 NaTech에 대한 안전성 향상을 위한 피해영향 저감방법(Mitigation measure)을 적용한 저장탱크의 위험도를 평가한 결과를 나타낸다. 피해영향 저감방법은 Table 3, 4의 염소와 톨루엔 저장탱크에 대한 수동적 및 능동적 IPL을 적용하였다. 위험도의 평가는 연간 지진발생빈도 및 실제 지진 발생에 따른 조사를 위해 AEP 값은 2.00E-04, 1.00E-02를 각각 기준으로 하였다.

그 결과 위험도는 AEP 기준 값 2.00E-04의 경우 염소 1.05E-09, 톨루엔 무앵커 및 앵커탱크가 각각

Table 8. Risk results for application of mitigation measures

Chemical substance	Storage	IPL	PFD	Risk results	
				AEP 2.00E-04	AEP 1.00E-02
Chlorine	Pressurized storage	Detector and shut-off valve [A-1]	1.00E-01	1.05E-09	5.01E-08
		Relief valve/Rupture disc [A-2]	1.00E-02		
		Basic process control system [A-3]	1.00E-01		
		Underground drainage system [P-2]	1.00E-02		
Toluene	Atmosph, storage, unanchored	Open vent(no valve) [P-3]	1.00E-02	5.02E-04	6.00E-04
	Atmosph, storage, anchored	Open vent(no valve) [P-3]	1.00E-02	5.01E-04	5.50E-04

Table 9. Evaluation of mitigation methods

Chemical substance	Storage	M/N ratio <sup>1)</sup>		M/R ratio <sup>2)</sup>	
		AEP 2.00E-04	AEP 1.00E-02	AEP 2.00E-04	AEP 1.00E-02
Chlorine	Pressurized storage	1.00E-06	1.00E-06	2.10E-05	1.00E-03
Toluene	Atmosph, storage, unanchored	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.20E-02
	Atmosph, storage, anchored	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.10E-02

1) The ratio of risk for application of mitigation measure to risk of NaTech

2) The ratio of risk for application of mitigation measure to chemical accident risk

5.02E-04, 5.01E-04이었으며, AEP 기준 값 1.00E-02는 염소 5.01E-08, 톨루엔 무앵커 및 앵커탱크가 각각 6.00E-04, 5.50E-04 등으로 조사되었다.

Table 9는 피해영향 저감방법의 평가를 위해 NaTech이 고려된 위험도 및 화학사고 위험도에 대한 피해영향 저감방법을 적용한 저장탱크 위험도의 비를 분석한 결과이다. 분석 결과를 살펴보면 분석 결과는 AEP 값 기준 2.00E-04, 1.00E-02에서 M/R 및 M/N ratio 값이 염소와 톨루엔 모두 1이하의 값으로 조사되어, 저장탱크에 피해영향 저감방법을 적용한 이후 위험도가 낮아진 것으로 나타났다.

#### IV. 고 찰

본 연구에서는 화학물질 저장탱크의 NaTech 위험성을 감소시킬 수 있는 피해영향 저감방법에 대한 평가를 위해 NaTech이 포함되지 않은 화학사고 위험도, NaTech 고려 위험도, 피해영향 저감방법이 적용된 저장탱크의 화학사고 위험도를 각각 산정하여 피해영향 저감방법 적용에 의한 위험도 감소 효과를 비교 평가하였다. 각 위험도 산정을 위해 적용된 영향범위 내 주민 수는 50명으로 가정하여 적용하였으며, 이는 의미 있는 값을 나타내는 것이 아닌 위험도 산정을 위해 임의로 적용된 숫자이다. AEP 값 1.00E-02를 적용하여 산정한 NaTech 고려 위험도는 피해영향 저감방법의 평가에 대한 유의미한 값을 위해 적용하였다. 즉, 울산지역의 지진 발생빈도는 연간 0.0002회(5000년에 1회)의 빈도를 나타낸다[13]. 이는 지진 발생빈도를 고려했을 때 사실상 울산지역의 지진 발생에 대한 피해를 정량적으로 나타낼 수 없는 어려움이 있다. 따라서 본 연구의 피해영향 저감방법의 평가에서는 지진 발생빈도 1회/100년에 해당하는 AEP 값을 적용하여 분석하였다. 이는 저장탱크에 피해영향 저감방법을 적용한 후의 위험도가 적용 전의 위험도와 비교하여 얼마만큼의 차이가 있는지에 대한 비교와 NaTech 발생 시 화학사고 위험도가 발생 전의 위험도 증가 정도의 평가를 위한 척도로서 활용되었다.

김희태[17]는 50 % 확률로 저장용기 파손이 발생하는 PGA 값 0.85와 연초과확률(AEP) 2.50E-06를 적용하여 LPG 저장탱크의 NaTech 위험성을 평가하였으며, LPG 저장탱크의 손상확률 산정을 위해 Cozzani et al[15]의 연구에서 지진 취약도 추정을 위해 활용된 저장탱크 프로빗 손상확률식을 활용하였다. 본 연구에서는 AEP 값을 연간 0.01회 지진 발생확률(AEP 값 1.00E-02)을 적용하였다. 이는 실제 지진이 발생할 경우 피해영향 저감방법의

평가를 위해 적용하였다. PGA 값은 이현미[13] 등의 연구에서 구조물의 손상발생 가능성이 커지는 기준 값으로 정한바 있는 0.2 g를 적용하여 신뢰성 있는 위험도 값을 산정하였다.

Table 5의 화학사고 위험도는 압력탱크를 사용하는 염소 저장탱크와 상압탱크를 사용하는 톨루엔 저장탱크의 것을 나타낸다. 본 연구에서 위험도는 영향범위 내 주민수와 FIE 값의 곱에 의해 산정된다. 본 연구에서 영향범위 내 주민수는 위험범위 내의 주민수를 고려하지 않고 50을 적용하였기 때문에 염소 저장탱크의 위험도가 톨루엔 저장탱크보다 높게 나타난 것은 의미 있는 결과는 아니다.

Table 6의 AEP 값 2.00E-04에 따른 NaTech 고려 위험도 값을 살펴보면 염소 저장탱크가 화학사고 위험도와 비교해 높아졌음을 알 수 있다. 이는 현재 지진이 발생하지 않았지만 발생할 수 있는 가능성이 있는 울산지역의 저장탱크 화학사고 위험도가 지진 발생우려가 전혀 없는 것을 가정한 위험도보다 높아졌음을 의미한다. 위험도가 높은 이유는 염소를 저장하는 압력탱크의 지진 발생 AEP 값이 사고발생빈도에 적용되기 때문에 나타난 결과이다.

Table 7의 AEP 값 1.00E-02에 따른 NaTech 고려 위험도 값을 살펴보면 AEP 값 2.00E-04에 따른 위험도 대비 AEP 값 1.00E-02에 따른 위험도가 높아졌음을 알 수 있다. 또한, 화학사고 위험도 대비 실제 지진발생 시 위험도가 높아졌다. 여기서, 위험도의 증가는 AEP 값의 증가로 저장탱크의 NaTech 사고빈도, NaTech 고려 사고빈도가 증가했기 때문이다. 이 값은 실제 지진이 발생하게 된다면 지진 발생 가능성 또는 전혀 확률이 없는 조건의 위험도와 비교했을 때 얼마나 화학사고 위험도가 증가했는지를 의미하는 결과를 나타낸다.

Table 9의 AEP 값 기준 2.00E-04와 1.00E-02에서 M/R 및 M/N ratio 값이 염소와 톨루엔 모두 1이하의 값을 나타냈다. 이는 Table 8의 염소와 톨루엔 저장탱크에 대한 수동적 및 능동적 IPL이 저장탱크의 NaTech 피해영향 저감방법으로서 적용시 효과적이라는 것을 의미한다.

앞서 언급된 국내 지진 발생확률에 따른 울산지역 지진 발생빈도 5000년에 1회는 사실상 지진에 대한 예방대책 및 대응방안의 필요성을 느끼기에는 낮은 빈도이다. 하지만, 최근 경주와 포항 등의 지진 발생 사례에서도 알 수 있듯 더 이상 한반도가 지진 안전지대라는 생각을 버리고 이에 대한 경각심을 가져야할 때이다. 「화학물질관리법」에 따라 국내에서 2015년부터 시행 중인 장외영향평가는 유해화학물질 화학사고 위험성을 평가하지만 지진



발생에 따른 위험성은 포함하지 않고 있는 실정이라서 이에 대한 보완이 시급하다.

국외에서는 최대지반가속도(PGA) 뿐만 아니라 다양한 주파수의 지진동에 대해서도 지진위험도를 분석하여 이를 내진설계에 반영하고 있으며, 지진 입력모델이 변화함에 따라 주기적으로 위험도 값을 갱신하고 있다. 따라서, 우리나라도 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 최대지반가속도 뿐만 아니라 다양한 주파수의 지진동에 대해서도 지진 위험도 값을 산출하여 이를 내진설계에 반영하여야 할 것이며, 지진입력 모델에 관한 연구의 의미 있는 성과가 도출되면 지진재해도 값을 갱신하여 내진설계에 반영하여야 할 것이다[18].

## V. 결론

본 연구는 화학물질 저장탱크의 지진으로 인한 NaTech의 위험성을 평가했으며, 위험도 결과치의 비교를 통해 피해영향 저감방법의 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

염소 저장탱크의 위험도는 국내 지진 발생가능성(AEP 2.00E-04)과 실제 지진 발생 조건(AEP 1.00E-02)을 적용했을 때 증가하였음을 알 수 있었다. 그렇기 때문에, 국내 화학물질 저장탱크의 NaTech에 대한 피해를 감소시킬 수 있는 대책마련이 필요할 것이며, 특히 평상시보다 실제 지진 발생 시 위험도를 고려한 대책이 필요하다.

본 연구에서 NaTech에 대한 피해영향 저감을 위해 적용한 방안들에 대해 평가한 결과 저장탱크 위험도가 염소와 톨루엔 모두 크게 감소하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 방법들은 NaTech 피해영향을 감소 및 안전성 향상을 위한 목적으로 적용 가능할 것으로 사료된다. 본 연구의 한계점으로서, 위험도 산정에서 저장탱크의 부속설비에 대한 부분이 포함되지 않아, 향후 부속설비의 지진 파손계수와 이를 포함한 추가연구 필요하다. 또한 울산지역의 지진 발생빈도가 낮아 피해영향 저감방법에 대한 평가를 위해 본 연구에서는 100년에 1회 발생에 해당하는 AEP 값 1.00E-02를 적용하여 분석하였다.

현재 환경부에서 시행하고 있는 장외영향평가 제도에서는 지진 발생 가능성 및 지진 발생에 대한 위험도를 적용하지 않고 있다. 또한, 피해영향 저감을 위한 방안들에 대한 대책도 미흡한 실정이다. 따라서, 지진을 고려한 위험성 평가와 위험도 감소방안에 대한 향후 지속적이며, 체계적인 연구와 제도적 보완 등 다각적인 정책적 노력이 필요할 것으

로 사료된다.

## REFERENCES

- [1] Cruz, A. M., and E. K, "Hazardous-materials Releases from Offshore Oil and Gas Facilities and Emergency Response Following Hurricanes Katrian and Rita" *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22**, 59-65, (2009)
- [2] Leo, M., *Analysis of Japan's Enacted/Amended Legislations Corresponding to Fukushima Earthquake/Nuclear Accident*, Korea Legislation Research Institute, (2012)
- [3] Kim, B., and Jeong, J., *Disaster Management Plan against New Types of Disasters*, National Institute for Disaster Prevention, (2011)
- [4] J. Y. Her, *Exploring Possible Catastrophic Disaster Scenarios and Building Korean Disaster Response Systems*", KIPA, (2012)
- [5] Y. K. Oh, *Policy Issues in NaTech(Natural Hazards Triggered Technological Disaster) Disaster Management*, KIPA, (2013)
- [6] E. Salzanoa., "Public Awareness Promoting New or Emerging Risks: Industrial Accidents Triggered by Natural Hazards (NaTech)" *Journal of Risk Research*, **16**(Nos.3-4), 469-485, (2013)
- [7] Mileti, S. D., *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*, Washington, D.C.: Joseph Henry Press, (1999)
- [8] Hewitt, K., *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*, Essex, England: Addison Wesley Longman Limited, (1997)
- [9] National Institute of Chemical Safety, *Chemistry Safety Clearing-house* (<http://www.csc.me.go.kr>).
- [10] Korea Meteorological Administration, *General information of national Meteorology(Earthquake occurrence trend)* (<http://www.weather.go.kr>).
- [11] NICS, *Preparation Guide of Off-site Risk Assessment*, National Institute of Chemical Safety, (2014)
- [12] Kim, M. S., Kim, J. Y., Lee, E. B., Yoon, J. H., and Park, J. H., "Effect of Protective System on Securing Safety of Off-site Risk

- Assessment", *Journal of the Korean Society of Safety*, **32**(6), (2017)
- [13] Lee, H. M. et al., "An Approach to Probabilistic Analysis of Seismic Disaster of Domestic Metropolitan Area", *Journal of Geological Society of Korea*, **48**(3), 2012.
- [14] Kim, H.S., Lee, T-H., and Song, J.K. "Seismic Fragility Analysis for Probabilistic Performance Evaluation of PSC Box Girder Bridges", *Journal Of Korean Society of Civil Engineers*, **29**(2A), 119-130, (2009)
- [15] Antonioni, G., G. Spadoni, and V. Cozzani, "A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events." *Journal of hazardous materials*, **147**(1-2), 2007.
- [16] CCPS, *Simplified Process risk Assessment: Layer of Protection Analysis*, American Institute of Chemical Engineers, NewYork, (2001)
- [17] Kim, H. T., and Jung, S. H., "A Study on Risk Assessment of Multi-vessel Accidents in Petrochemical Industry by Natech Disaster", *Korean Journal of Hazardous Materials*, **3**(2), 40-44, (2015)
- [18] Kyung, J. B., Kim, M. J., Lee, S. J., and Kim, J. K., "An Analysis of Probabilistic Seismic Hazard in the Korean Peninsula ", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **37**(1), 52-61, (2016)