

# RAPID-N을 이용한 국내 지진 발생 시 화학시설 Natech 위험성 평가

박제혁\* · 연응진\* · 이학태\* · 정승호\*\*†

## Natech Risk Assessment of Chemical Facilities in the Event of Earthquake in Korea using RAPID-N

Jaehyuk Park\* · Eungjin Yeon\* · Hak Tae Lee\* · Seungho Jung\*\*†

### †Corresponding Author

Seungho Jung

Tel : +82-31-219-2401

E-mail : processsafety@ajou.ac.kr

Received : February 21, 2019

Revised : July 2, 2019

Accepted : August 21, 2019

**Abstract** : Accidents occurring due to natural disasters in chemical process facilities where technologies are concentrated can cause secondary damage. The concept of the relationship between natural disasters and highly intensive technologies has evolved into the Natech (Natural Hazards Triggered Technological Disaster) research. Currently, the number of earthquakes is increasing all over the Korean peninsula. To assess the risk of Natech when an earthquake has occurred in South Korea, the Rapid Natech Risk Assessment Tool (RAPID-N) developed by the European Commission's Joint Research Center (EC JRC) was used in the present study. The RAPID-N can be used for Natech risk assessment based on mapping and can be utilized for sufficient preparation for reduction of the effects of Natech accidents. A total of 261 chemical facilities actually existing in Pohang were initially analyzed to select eight facilities and the Pohang earthquake that occurred in 2017 was implemented in the RAPID-N utilizing the shake map. High risk areas were selected through Natech risk assessments for the selected eight work places and countermeasures for the areas were suggested. High risk areas exist depending on the location, since the damage influence ranges could be overlapped and each chemical facility has an independent probability of Natech. Therefore, studies on Natech emergency plans and emergency evacuation routes should be actively conducted considering such high risk areas. The present study was conducted to demonstrate the feasibility of Natech risk assessment in South Korea through the RAPID-N. These findings can be used as a reference material to lay a foundation for Natech risk assessment and related policies in South Korea.

Copyright©2019 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : natech risk assessment, RAPID-N, pohang earthquake, shake map, high risk areas

## 1. 서론

고도로 집약된 High-technology 산업의 증가로 인해 기술력이 집중되어있는 화학 공정시설에서 지진 등의 자연재해로 영향을 받게 되면 그 피해는 상당하다<sup>1)</sup>. 지진이나 홍수, 태풍 등과 같은 자연재해와 고도로 집약된 기술재난의 상호관계에 관한 개념은 Natech(Natural Hazards Triggered Technological Disaster)으로 발전하였으며 대한민국에서는 이를 복합재난이라 지칭한다<sup>2)</sup>. Natech 위험성 평가를 위해 활용되는 RAPID-N(Rapid

Natech Risk Assessment Tool)의 경우 EC JRC(European Commission's Joint Research Centre)에서 개발되었고 Natech 위험성 평가와 Mapping을 지원한다<sup>1)</sup>. 상호보완적인 값을 입력할 수 있으며 추론과 신속한 위험성 평가가 가능하고 Natech의 사고 영향 감소를 위한 충분한 대비에 활용이 가능하다<sup>3)</sup>. Natech의 대표적인 사례는 일본 니가타 지진 사고(1964년), 일본 미야기 지진 사고(1978년), 동일본 대지진 사고(2011년), 미국 허리케인 하비 사고(2017년)이며 이는 자연재해 발생 시 저장시설의 균열로 인한 손상 및 화재가 발생한 사례이

\*아주대학교 환경안전공학과 석사과정 (Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University)

\*\*아주대학교 환경안전공학과 교수 (Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University)

다. 최근 2017년 11월 15일 14시 29분 대한민국 포항에서 발생한 규모 5.4의 포항지진은 부상 135명, 이재민 1,797명의 인명피해가 발생하였고 57,039건의 시설피해와 약 850억 원의 재산피해가 발생하였다. 2016년 9월 12일 20시 32분 대한민국 경주에서 발생한 규모 5.8의 경주지진은 부상 23명, 이재민 111명의 인명피해가 발생하였고 5,868건의 시설피해와 약 110억 원의 재산피해가 발생하였다. 경주지진과 비교하여 포항지진의 규모가 0.4 정도 작으나 더 큰 피해를 가져왔으며 이러한 결과는 지질학적 특성에 의한 것으로 볼 수 있다<sup>4)</sup>. 자연재해 발생 시 중점관리가 필요한 유해화학물질 등에 대한 방안 마련을 바탕으로 재난안전관리에 있어 선택과 집중이 필요하며 사고 영향권 내에 있는 주민에게 사전 정보를 제공하여 피해를 최소화할 수 있는 세부방안 마련이 필요하다<sup>5)</sup>. 재난은 사후의 연구가 강조되어야 하며 그 이유는 재난에 대응하는 과정에서의 실패와 일어나지 않은 가능성을 평가하고 연구하며 미래의 재난 피해를 경감할 수 있기 때문이다<sup>6)</sup>. 대표적인 재해예방대책으로는 방재계획 구축력, 수립절차, 기술기반 측면 등이 있으며 앞으로의 개선이 중요하다<sup>7)</sup>. 한국환경정책평가연구원 및 국내기관에서는 꾸준히 Natech 연구가 진행되고 있다. 국내에는 아직 Natech에 대한 위험을 평가하는 모델이나 시스템이 없으며 국외에서는 EU의 RAPID-N이나 미국의 HAZUS-MH와 같은 시스템이 잘 구축되어 있다. RAPID-N의 경우 자연재해를 통해 발생한 화학사고의 영향범위를 도출하며 HAZUS-MH는 직접적 피해, 간접적 피해, 직접적 손실, 간접적 손실 등을 도출한다<sup>8)</sup>. 국내에서 포항지진보다 더욱 큰 지진의 발생 가능성은 충분하며 피해를 대비하기 위해 포항지진에 대한 연구가 진행될 필요가 있다. 따라서 본 연구는 포항지진과 유사한 지진이 발생했을 경우 Natech 위험성 평가를 도출하기 위한 연구를 진행하였다. Shake map을 활용하여서 RAPID-N에 포항지진을 구현하였고 포항지역에 밀집된 261개 사업장을 분석하여 주요 사업장에 대한 Natech 위험성 평가를 진행하였다. 본 연구는 RAPID-N을 통해 대한민국에서 기존에 고려되지 않았던 방법론을 활용하였으며 이에 따른 고위험지역을 선정하였고 대한민국에서 RAPID-N을 이용한 Natech 위험성 평가가 가능하다는 것을 입증하기 위한 연구를 진행하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서 활용된 “RAPID-N: Rapid Natech Risk Assessment and Mapping Framework<sup>9)</sup>”에 따르면 RAPID-N

에 대한 방법론 및 활용 방안에 대해 제시되어있다. 활용 방안은 실제 지진을 구현한 Natech 위험성 평가, Natech 위험성 평가 및 Mapping을 통한 예방과 비상 계획, 사업장의 관계자와 근처 거주민들에 대한 경고 수단이 대표적인 활용 방안이며 이를 중점으로 본 연구를 진행하였다. 연구 방법은 RAPID-N의 Fig. 1과 같이 진행하였고 대한민국 포항지진에 대한 Natech 위험성 평가가 진행되도록 최적화하여 연구를 진행하였다. 지진의 구현을 위한 자연재해 위험 모듈(Natural hazards module)<sup>9)</sup>에서 USGS(United States Geological Survey)가 제공하는 포항지진의 Shake map을 활용하였고 USGS는 전 세계의 지진에 대한 Shake map을 제작하고 공유한다. Shake map이란 지진 발생 후 거의 실시간에 가까운 지반의 움직임과 지진동으로 지진을 구현한 데이터를 뜻한다. 이를 통해 RAPID-N에서 실시간에 가까운 포항지진을 구현하였다. Shake map은 좌표에 따라 9가지 항목으로 구성되어 있으며 대표적으로 PGA(Peak Ground Acceleration), PGV(Peak Ground Velocity) 등에 의해 지진의 특성이 좌우된다. PGA는 최대 지반 가속도를 뜻하며 PGV는 최대 지반 속도를 뜻한다. Shake map을 RAPID-N에 적용하면 사업장과 진앙지 및 진원지와의 거리, 좌표에 따라서 Shake map에 구성된 9가지의 항목이 결정된다. 사업장 설비의 특성을 위해 사용된 산업 사업장 및 설비 모듈(Industrial plants and units module)<sup>9)</sup>에서 사고대비물질을 취급하는 사업장을 중점으로 본 연구를 진행하였으며 취급물질을 고려한 설비의 특성을 설정하였다. Mapping 및 통계 등의 계산을 위한 과학 모듈(Scientific module)<sup>9)</sup>에서 취약도 곡선과 손상 상

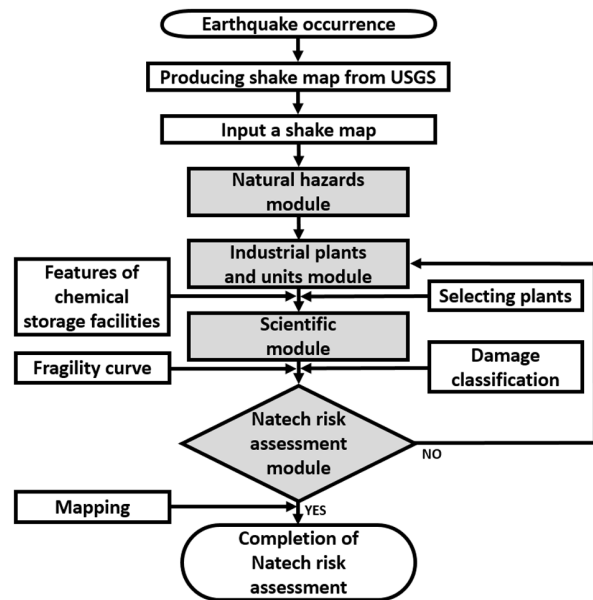


Fig. 1. RAPID-N Flow chart.

태를 기반으로 위험성 평가를 위한 데이터 처리를 진행하였다. 이를 통해 Natech 위험성 평가 모듈(Natech risk assessment module)<sup>9)</sup>에서 결과적인 Natech 위험성 평가를 진행하였으며 Mapping을 활용하여 이에 따른 영향 범위를 도출하였다.

### 2.1 사업장 선정

사업장 선정은 화학물질안전원의 2016년도 기준 화학물질 통계조사 자료를 활용하였다. 경상북도 포항시에 총 261개의 사업장이 존재하고 포항 북구에는 63개 사업장, 포항 남구에는 198개 사업장이 존재한다. 261개 사업장의 취급물질을 분석하였고 RAPID-N에 적용 가능한 물질이며 사고대비물질에 해당하는 물질을 취급한다는 조건에 적합한 사업장을 선정하였다. 포항 북구는 63개 사업장 중 7개 사업장이 선정되었으며 포항 남구는 198개 사업장 중 51개 사업장이 선정되었다. 선정된 총 58개 사업장은 위 조건에 적합한 해당물질 중 12가지 물질을 취급하며 해당물질별로 포항시청과 가장 가까운 12개 사업장을 선정하였다. 선정된 사업장은 Table 1과 같다. 사업장의 취급물질 연간입고량은 1구분, 10구분에 해당하는 사업장의 경우 본 연구에서 제외하였다. 연간입고량이란 제조, 수입, 구매, 이월된 양을 합산한 값을 말하며 화학물질 통계조사 자료에 따르면 1구분에서 10구분으로 나뉘 범주로 표시된다. 2구분에서 9구분의 경우 연간입고량 범주의 최댓값을 사용하였으며 분기입고량을 저장량으로 간주하였다.

Table 1. Selected 12 plants

Name of plants	Chemical materials	Categorize	Annual quantity of storage (ton/year)	Quarter quantity of storage (kg/quarter)
PN-1	Ethylenediamine	2	0.5	125
PS-2	Fluorine	7	200	50000
PS-3	Chlorine	7	200	50000
PS-4	Allyl alcohol	2	0.5	125
PS-5	Hydrogen chloride	6	20	5000
PS-6	Nitric acid	7	200	50000
PS-7	Ammonia	3	1	250
PS-8	Silane	6	20	5000
PS-9	Formaldehyde	4	2.5	625
PN-10	Methyl chloride	1	0.1	Less than 100
PS-11	Ethylene oxide	1	0.1	Less than 100
PS-12	Hydrogen fluoride	1	0.1	Less than 100

### 2.2 자연재해 위험 모듈

Natech 위험성 평가의 진행을 위해서 자연재해를 지

원하는 자연재해 위험 모듈(Natural hazards module)은 USGS의 Shake map 및 감시와 관찰을 통하여 역사적 실제 지진과 가상 지진의 구현을 지원한다. Shake map이란 지진 발생 후 지진의 흔들림 강도에 대해 실 상황에 가까운 정보를 보여주며 Shake map은 지진 관련 대응 및 복구, 재난 계획 등에 사용된다. 본 연구에서는 USGS에서 제공되는 “M5.5-7 Km WSW of Heung-Hai, South Korea”의 Shake map을 사용하였고 Fig. 2과 같이 표현된다. 포항지진은 경상북도 포항시 북구 흥해읍에 진앙지가 존재한다. 진앙지에서 진원지까지의 깊이는 10 km이며 진앙지의 좌표는 36.074°N, 129.280°E이다. RAPID-N에 Shake map을 적용하였으며 진앙지의 좌표에서는 Table 2과 같은 지진 특성이 표현된다.

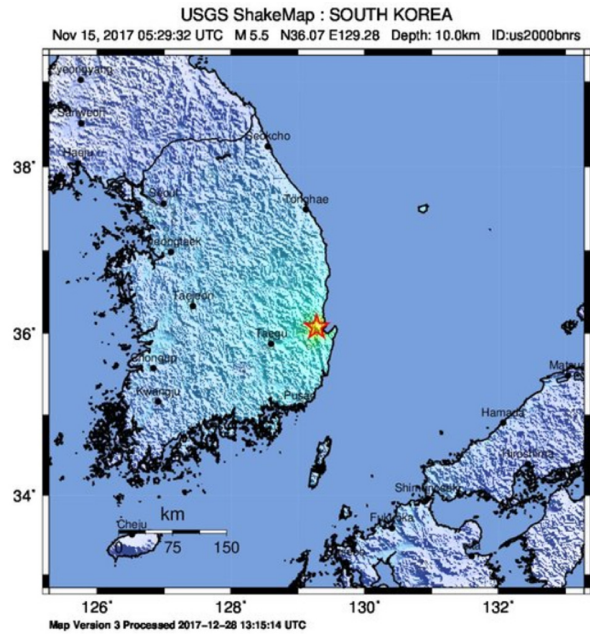


Fig. 2. Pohang earthquake shake map.

Table 2. Seismic features in the epicenter

Seismic features in the epicenter	
Epicentral distance	0 km
Hypocentral(focal) distance	10 km
Modified mercalli scale	Very Strong
Instrumental intensity	6.2803
Peak Ground Acceleration(PGA)	0.227 g
Horizontal PGA	0.0674 g
Peak Ground Velocity(PGV)	10.779 cm/s
Spectral acceleration (0.3 s Period, 5% Damping)	0.3553 g
Spectral acceleration (1.0 s Period, 5% Damping)	0.0854 g
Spectral acceleration (3.0 s Period, 5% Damping)	0.0156 g



### 2.3 산업 사업장 및 설비 모듈

RAPID-N에서 Natech 위험성 평가를 위해 자연재해로 인한 산업 사업장 설비의 손상과 확률을 추정한다. 이를 위한 산업 사업장 및 설비 모듈(Industrial plants and units module)은 사업장 설비의 특성에 대한 정보가 필요하다. 정보가 많을수록 더욱 세밀한 Natech 위험성 평가가 가능하다.

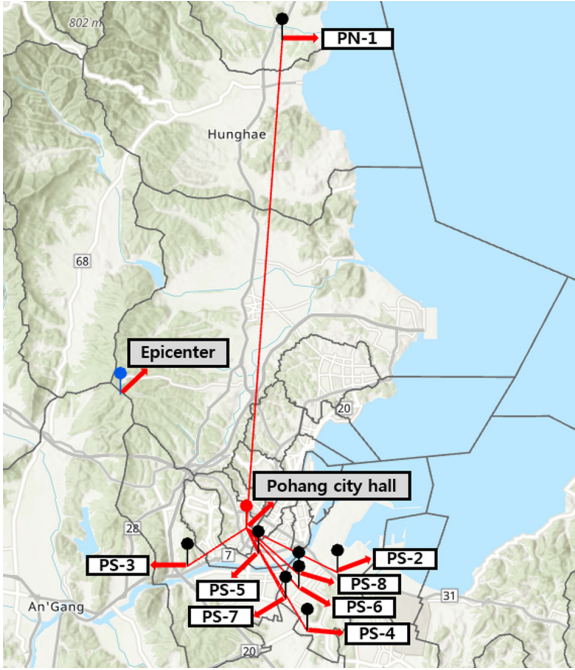


Fig. 3. Location of 8 plants.

사업장 내 화학물질저장시설의 설비 특성설정을 위해 ALOHA version 5.4.7, PHAST version 8.0을 활용하여서 취급물질에 대해 알맞은 설비 특성을 설정하였다. Formaldehyde를 취급하는 사업장의 경우 설비 특성설정을 위한 데이터가 충분하지 않아 제외하였고 결과적으로 8개 사업장을 통해 본 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 Table 3과 같이 화학물질저장시설의 취급물질에 따라서 저장시설의 특성을 설정하였다<sup>10)</sup>.

위 8개 사업장의 저장시설은 지상에 설치된 상태이고 저장량은 85%로 설정하였다. 수직 원통형 시설의 고정된 지붕 유형은 원뿔 유형으로 설정하였다. 완화장치는 누출 시 액체상태의 경우 방류 벽을 설치하였고 누출 시 기체상태의 경우 실내에 화학저장시설을 설치하였다. 8개 사업장에 대한 위치는 Fig. 3과 같으며 RAPID-N의 Mapping 기반으로 ArcGIS Pro를 활용하여 Mapping을 진행하였다.

### 2.4 과학 모듈

피해에 대한 심각성을 결과적으로 나타내는 과학 모듈(Scientific module)은 Natech 위험성 평가 중 손상 및 위험 분석을 수행한다. 대기저장상태시설과 압력저장상태시설의 특성이 다르기에 과학 모듈에서 차이를 두어 본 연구를 진행하였다.

저장량이 50% 이상인 대기저장상태시설은 “Seismic Fragility Curves for On-Grade Steel Tanks<sup>11)</sup>”라는 논문을 활용하였고 미국지역에서 발생한 9개 지진과 관련된

Table 3. Features of chemical storage facilities in the plants

Facility Features	Description for chemical storage tank							
	PN-1	PS-2	PS-3	PS-4	PS-5	PS-6	PS-7	PS-8
Chemical materials	Ethylene diamine	Fluorine	Chlorine	Allyl alcohol	Hydrogen chloride	Nitric acid	Ammonia	Silane
Shape	Cylindrical vertical	Spherical	Spherical	Cylindrical vertical	Spherical	Cylindrical vertical	Spherical	Spherical
Roof type	Fixed roof	-	-	Fixed roof	-	Fixed roof	-	-
Storage condition	Atmospheric tank	Gas under pressure	Pressure	Atmospheric tank	Pressure	Atmospheric tank	Pressure	Gas under pressure
Tank height	0.84 m	-	-	0.88 m	-	5.5 m	-	-
Tank diameter	0.5 m	14.18 m	4.32 m	0.5 m	2.36 m	3 m	0.98 m	6.66 m
Tank volume	0.16 m <sup>3</sup>	1493 m <sup>3</sup>	42.21 m <sup>3</sup>	0.17 m <sup>3</sup>	6.88 m <sup>3</sup>	38.9 m <sup>3</sup>	0.49 m <sup>3</sup>	155 m <sup>3</sup>
Storage quantity	125 kg	50000 kg	50000 kg	125 kg	5000 kg	50000 kg	250 kg	5000 kg
Storage volume	0.14 m <sup>3</sup>	-	34.53 m <sup>3</sup>	0.15 m <sup>3</sup>	5.59 m <sup>3</sup>	33.1 m <sup>3</sup>	0.39 m <sup>3</sup>	-
Storage temperature	25°C	7.8°C	7.8°C	25°C	7.8°C	25°C	7.8°C	7.8°C
Storage pressure	1 atm	20.04 atm	5 atm	1 atm	30 atm	1 atm	5 atm	20.04 atm
Storage state	Liquid	Gas	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Gas
Enclosure	Dike	Shed	Shed	Dike	Shed	Dike	Shed	Shed
Dike volume	0.18 m <sup>3</sup>	-	-	0.19 m <sup>3</sup>	-	43.2 m <sup>3</sup>	-	-

Table 4. Damage state

Atmospheric state chemical storage facilities	
DS1	No damage.
DS2	Roof, pipe damage and minor damage.
DS3	Elephant-foot with moderate damage.
DS4	Elephant-foot with severe damage.
DS5	Total failure, tank collapse.
Pressure state chemical storage facilities	
DS1	Minor, slight damage.
DS2	Moderate damage.
DS3	Severe, Major damage.
DS4	Total failure, tank collapse.
DS5	-

423개 저장시설 피해 심각성을 분석하여 손상 상태를 정의하였다. 대각선의 버팀대가 있는 압력저장상태시설은 “Investigation of Seismic Vulnerability of Industrial Pressure Vessels<sup>12)</sup>”라는 논문을 활용하였고 구형 압력저장상태시설의 구조적 손상을 분석하여 손상 상태를 정의하였다. DS(Damage State)는 지진에 의한 저장시설의 손상 심각성을 뜻하며 대기저장상태시설과 압력저장상태시설의 DS는 Table 4과 같다.

취급 물질 저장 상태에 따른 피해 심각성과 손상의 분석을 통해 DS가 정의되고 각 DS에 따른 심각성은 취약도 곡선을 통하여 도출된다. 취약도 곡선을 통해 지진에 의한 저장 시설의 손상과 확률이 결정되고 본 연구에서는 다음과 같은 식을 활용하였다. 식 (1)<sup>13)</sup>는

HAZUS-MH의 취약도 곡선과 관련하여 손상과 확률을 나타내기 위해 사용되는 식이다. 식 (2)<sup>11)</sup>는 대기저장상태시설의 취약도 곡선에 대한 식이며 식 (3)<sup>12)</sup>의 경우 압력저장상태시설의 취약도 곡선에 대한 식이다. 식 (2)와 식 (3)은 식 (1)인 HAZUS-MH의 취약도 곡선 관련 식을 기반으로 화학물질저장시설의 특성에 맞게 변형하여서 활용되었다. 3가지의 식은 RAPID-N에서 포항지진 발생 시 대기저장상태시설과 압력저장상태시설의 DS에 따른 손상과 확률을 결정할 수 있는 취약도 곡선을 나타내기 위해 활용되었다. 3가지 식에서 변위로 사용되는  $S_d$ ,  $x$ ,  $\delta_{PV|x}$ 에 의하여 식의 활용 방안이 결정되며  $\beta$ 는 임의의 불확실성 요소로 표현되어 있다. 이에 대한 식은 다음과 같다.

$$P[ds|S_d] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}}\right)\right] \quad (1)$$

$$P[ds|x] = \Phi\left[\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{x}{v}\right)\right] \quad (2)$$

$$P_f = \Phi\left[\frac{1}{\beta_t} \ln\left(\frac{\delta_{PV|x}}{\delta_{ds,m}}\right)\right] \quad (3)$$

여기서,

- $ds$  = 손상 상태
- $S_d$  = 스펙트럼의 변위 및 기타 변위 값
- $P[ds|S_d]$  =  $S_d$ 에 따른  $ds$  확률
- $\Phi$  = 표준 정규 누적분포함수

Table 5. Natech risk assessment consequence and frequency

Risk assessment composition	Description for chemical storage tank								
	PN-1	PS-4	PS-6	PS-2	PS-8	PS-3	PS-5	PS-7	
Chemical materials	Ethylene diamine	Allyl alcohol	Nitric acid	Fluorine	Silane	Chlorine	Hydrogen chloride	Ammonia	
Storage condition	Atmospheric tank	Atmospheric tank	Atmospheric tank	Gas under pressure	Gas under pressure	Pressure	Pressure	Pressure	
Event	Toxic	Toxic	Toxic	Toxic	Vapor cloud explosion	Toxic	Toxic	Toxic	
Epicentral distance	17.9 km	13.8 km	12.03 km	12.79 km	11.56 km	8.45 km	9.61 km	12.02 km	
Hypocentral(Focal) distance	20.5 km	17.04 km	15.65 km	16.23 km	15.29 km	13.09 km	13.87 km	15.64 km	
PGA	0.11 g	0.15 g	0.18 g	0.17 g	0.19 g	0.18 g	0.2 g	0.18 g	
PGV	4.06 cm/s	7.29 cm/s	11.27 cm/s	9.62 cm/s	12.39 cm/s	8.45 cm/s	12.92 cm/s	11.8 cm/s	
Minor damage	Damage probability	0.25%	1.38%	3.35%	7.66%	10.55%	9.57%	13.77%	9.8%
	Natech probability	0.07%	0.42%	1.01%	2.29%	1.3E-3%	2.87%	4.13%	2.94%
	End-point distance	160.9 m	160.9 m	160.9 m	1.93 km	95.31 m	482.8 m	2.58 km	160.9 m
	Released quantity	125 kg	124.16 kg	547.32 kg	213.45 kg	186.17 kg	1502 kg	3194.4 kg	250 kg
Moderate damage	Damage probability	-	2.7E-4%	2.8E-3%	1.1E-3%	2.3E-3%	1.8E-3%	4.6E-3%	-
	Natech probability	-	1.3E-4%	1.4E-3%	5.3E-4%	< 1E-4%	9.1E-4%	2.3E-3%	-
	End-point distance	-	160.9 m	160.9 m	4.83 km	175.6 m	966 m	6.44 km	-
	Released quantity	-	125 kg	3420.8 kg	1334 kg	1163.5 kg	9384 kg	5000 kg	-

- $\beta_{ds}$  =  $ds$ 에 대한  $S_d$ 자연로그 표준편차
- $S_{d,ds}$  =  $ds$  임계 치에 도달하는  $S_d$ 중앙 값
- $x$  = PGA의 변위 값
- $P[ds|x]$  =  $x$ 에 따른  $ds$  확률
- $\beta$  =  $ds$ 에 대한  $x$ 자연로그 표준편차
- $v$  =  $ds$  임계 치에 도달하는  $x$ 중앙 값
- $\delta_{PV|x}$  =  $x$ 에 따른 압력저장상태시설의 변위 값
- $P_f$  =  $\delta_{PV|x}$ 에 따른  $ds$  확률
- $\beta_t$  = 로그 정규 표준편차
- $\delta_{ds,m}$  =  $ds$  임계 치에 도달하는  $\delta_{PV|x}$  중앙 값

### 3. Natech 위험성 평가 결과

8개 사업장의 포항지진에 대한 손상과 확률을 나타내는 결과적인 Natech 위험성 평가는 Natech 위험성 평가 모듈(Natech risk assessment module)을 통하여 도출된다. 본 연구에서 진행된 Natech 위험성 평가 모듈은 US EPA(United States Environmental Protection Agency)의 RMP(Risk Management Program)를 기준으로 진행되었고 RAPID-N에서 Natech 위험성 평가 결과는 Table 5와 같이 나타내었다.

기상 조건은 기상청 지상 관측 과거 자료를 통해 실제 포항지진 발생 시 기상 조건과 같도록 설정하였다. 산업 및 상업시설이 있는 도시지형이며 대기의 평균온도는 7.8°C, 상대 습도는 40.3%, 풍속은 2.9 m/s, 대기안정도의 경우 D(Neutral)로 설정하였다. RAPID-N의 Mapping 기반으로 ArcGIS Pro를 활용하여 영향 범위에 대한 Mapping을 도출하였다. 영향 범위는 독성 누출일 때 ERPG-2 기준으로 영향 범위가 산정되며 증 기운 폭발일 때 1 psi 기준으로 영향 범위가 산정된다. 결과적으로 미미한 피해에 대한 영향 범위는 Fig. 4와 같이 나타났고 적당한 피해에 대한 영향 범위는 Fig. 5와 같이 나타내었다. 포항시청이 존재하는 대이동과 상대동, 해도동, 송도동, 효곡동, 중앙동, 양학동, 죽도동, 용흥동의 9곳을 대도시로

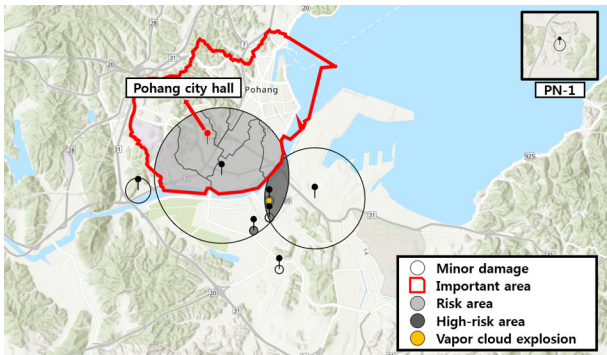


Fig. 4. Endpoint distance of minor damage.

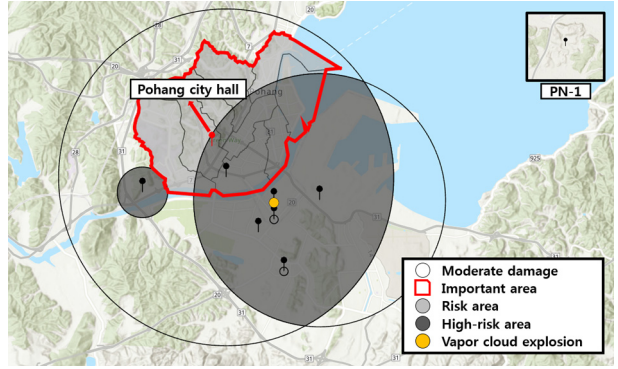


Fig. 5. Endpoint distance of moderate damage.

Table 6. Important area damage of moderate damage

Endpoint distance	Important area (dong)	Damaged area (km <sup>2</sup> )	Damaged population (people)
Risk area	Daei	4.87	23,617
	Sangdae	3.47	26,245
	Haedo	1.81	18,419
	Songdo	3.95	13,622
	Hyogok	5.94	31,215
	Jungang	3.32	16,615
	Yanghak	1.94	18,322
	Jukdo	1.89	20,566
	Yongheung	3.94	23,922
Total		31.13	192,543
High risk area	Daei	1.22	5,916
	Sangdae	3.47	26,245
	Haedo	1.81	18,419
	Songdo	3.15	10,863
	Hyogok	0.51	2,680
	Jungang	0.38	1,902
	Yanghak	0.53	5,006
	Jukdo	1.89	20,566
	Yongheung	0.56	3,400
Total		13.52	94,997

판단하였으며 9곳의 지역을 중점지역으로 활용하였다. 미미한 피해의 경우 중점지역에서 영향범위가 중첩되는 고위험지역이 도출되지 않았으며 적당한 피해의 경우 중점지역에서 영향범위가 중첩되는 고위험지역이 도출되었다. 적당한 피해에 대한 중점지역의 피해 면적 및 피해 인구수는 Table 6과 같이 나타났으며 이는 행정안전부 주민등록인구 2018년 11월 기준 자료를 활용하였다.

### 4. 고찰

RAPID-N을 통해 실제 포항지진을 구현하여 포항시청 근처 8개 사업장의 Natech 위험성 평가 연구를 진행

하였다. PGA, PGV 값은 좌표에 따라서 변화하며 사업장과 진원지와의 거리가 멀어질수록 PGA, PGV 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 심각한 피해와 완전 붕괴의 경우 Natech 발생 확률이  $10^{-6}$ 이하의 확률이기에 제외하였다. PN-1, PS-4, PS-6 사업장은 취급 물질의 물성 등에 의하여 저장시설 손상 시 액체 상태로 누출되고 방류 벽의 영향 등으로 인해 160.9 m의 영향 범위 결과가 나타났다. PS-7 사업장은 취급물질의 양이 적어 저장시설 손상 시 160.9 m의 영향 범위 결과가 나타났다. PN-1, PS-4, PS-6, PS-7 사업장의 영향범위인 160.9 m는 최소한으로 보여줄 수 있는 영향 범위 결과라고 판단되며 RAPID-N에서 독성 누출의 경우 160.9 m이하의 영향 범위는 도출되지 않는 것으로 판단된다. 포항 지진에 의한 Natech 발생 시 적당한 피해의 영향 범위를 나타낸 Fig. 5의 경우 PS-2, PS-5 사업장에 의해 영향 범위가 중첩된 고위험지역이 나타났다. 포항시청이 존재하는 대이동과 상대동, 해도동, 송도동, 효곡동, 중앙동, 양학동, 죽도동, 용흥동이 고위험지역에 포함되며 9곳의 지역을 중점지역으로 하여 위험도를 도출하였다. Natech 발생 시 적당한 피해로 인해 PS-5 사업장의 취급물질인 Hydrogen chloride가 누출되었을 경우 중점지역의 전체가 영향범위에 포함되며 중점지역의 전체 면적은 31.13 km<sup>2</sup>이다. Natech 발생 시 적당한 피해로 인해 PS-2 사업장의 취급물질인 Fluorine이 누출되었을 경우 중점 지역에서 PS-5 사업장의 영향범위와 중첩되는 고위험지역이 나타났으며 고위험지역의 해당면적은 13.52 km<sup>2</sup>이다. 고위험지역의 해당면적에 따른 인구수는 Table 6에서 나타내었으며 94,997명으로 추정된다. Natech 발생 확률과 면적에 따른 인구수를 활용하여 위험도를 도출하였고 이는 장외영향평가 위험도 계산 방식을 활용하였다. PS-5 사업장의 경우 위험도는 2.19이며 PS-2 사업장의 경우 위험도는 0.5이다. PS-2, PS-5 사업장의 위험도를 합산하여 고위험지역의 경우 위험도는 2.69가 도출되었다. 고위험지역을 제외한 나머지 면적은 17.61 km<sup>2</sup>이다. 이 면적은 PS-5 사업장의 영향 범위에만 해당하며 인구수는 97,546명으로 추정되고 이 면적의 경우 위험도는 2.24가 도출되었다. 결과적으로 고위험지역의 경우 인구수는 2,549명만큼 적고 면적은 4.09 km<sup>2</sup>만큼 작으나 영향 범위의 중첩으로 인해 위험도 0.45가 증가하는 것이 확인되었다.

## 5. 결론

지진 발생 시 영향을 받을 수 있는 지역의 해당 사업장들은 모두 Natech 발생 확률이 존재하며 독립적인 확

률이기에 다중 사고 시 이러한 고위험지역은 충분히 발생 가능하다. 또한, 2017년 발생한 포항지진에 비해 더욱 심각한 지진의 발생 가능성은 한반도에 충분히 존재한다. 이러한 지진 발생 시 많은 사업장이 밀집되어 있거나 근처에 인구가 많은 대도시가 존재할 경우 고위험지역을 통한 피해는 더욱 심각해질 수 있다. 이와 같은 고위험지역을 충분히 고려하여 Natech 비상계획 및 비상대피경로 연구가 활발히 진행되어야 할 필요가 있다고 판단된다. 추가적으로 지진과 같은 자연재해 발생 시 많은 위험요소가 존재하고 이러한 모든 위험요소가 고려된 Natech 위험성 평가를 통해 재해에 즉의 신뢰성을 높이는 것이 중요하며 Natech 위험성 평가의 정확성을 높이기 위한 취약도 곡선 연구가 활발히 진행되어야 할 필요가 있다. 현재 국내의 환경부에서 시행중인 장외영향평가제도에 Natech 위험성 평가를 고려할 경우 피해영향을 감소시킬 수 있는 안전성 향상 방안을 통한 위험도 감소가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 체계적인 대응체계를 위해서 정책 연구가 함께 진행되어야 한다고 판단된다. 본 연구는 RAPID-N으로 적합한 방법론을 활용해 실제 포항지진을 구현하여 Natech 위험성 평가를 진행하였다. 이를 통해 고위험지역을 선정하였고 대한민국에서 국제적 공조가 가능한 RAPID-N을 활용하여 Natech 위험성 평가가 가능하다는 것을 입증하였기에 관련 정책의 기반을 다지기 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

**감사의 글 :** 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019R1F1A1063569)

## References

- 1) S. Girgin, "RAPID-N Rapid Natech Risk Assessment Tool User Manual Version 1.0", JRC, pp. 1-17, 2012.
- 2) Yoon Kyung Oh, "Policy Issues in Natech Disaster", KIPA, pp. 1-9, 2013.
- 3) E. Krausmann, K. E. Koppke, R. Fendler, A. M. Cruz and S. Girgin, "Qualitative and Semiquantitative Methods for Natech Risk Assessment", Natech Risk Assessment and Management, Vol. 1, No. 8, pp. 119-142, 2017.
- 4) Earthquake Disaster Management Division, "2017 Pohang Earthquake White Paper", MOIS, pp. 144-163, 2018.
- 5) B. Yoo, J. B. Baek and J. W. Ko, "Discussions on the Disaster Management for NaTech based on the Foreign Case Studies", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 1, pp. 111-117, 2016.

- 6) J. Lee and S. Choi, "A Study on the Disaster Management R&D of the US and Japan", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 31, No. 3, pp. 123-129, 2016.
- 7) S. Kim, M. Kim, C. Kim and S. Lee, "Study on Urban Policies toward the Effective Disaster Prevention", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 32, No. 2, pp. 124-131, 2017.
- 8) J. Park and Y. W. Suh, "Chemical Handling Facility Safety Management Plan for Natural Disaster Triggered Technological Disaster", *Korea Environment Institute*, pp. 61-63, 2018.
- 9) S. Girgin and E. Krausmann, "RAPID-N: Rapid Natech Risk Assessment and Mapping Framework", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 26, pp. 949-960, 2013.
- 10) S. Girgin, E. Krausmann, "Case-Study Application : RAPID-N", *Natech Risk Assessment and Management*, Vol. 1, No. 10, pp. 157-175, 2017.
- 11) Michael J. O'Rourke, M. EERI, Pak So, "Seismic Fragility Curves for On-Grade Steel Tanks", *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 4, pp. 801-815, 2000.
- 12) I. Moschonas, C. Karakostas, V. Lekidis, S. Papadopoulos, "Investigation of Seismic Vulnerability of Industrial Pressure Vessels", *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, No. 2324, pp. 1-12, 2014.
- 13) Department of Homeland Security, "Multi-Hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Hazus-MH2.1 Technical Manual", *FEMA*, pp. 168-254, 2015.