

# 환경매체별 취약성을 반영한 장외영향평가 위험도 분석

최우수 · 백중배\*

화학물질안전원 사고예방심사1과 · \*한국교통대학교 안전공학과  
(2018. 9. 7. 접수 / 2018. 10. 2. 수정 / 2018. 10. 3. 채택)

## Risk Analysis of Off-site Risk Assessment using Vulnerability by Environmental Medium

Woo Soo Choi · Jong Bae Back\*\*

Division of Accident Prevention and Assessment, National Institute of Chemical Safety

\*Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

(Received September 7, 2018 / Revised October 2, 2018 / Accepted October 3, 2018)

**Abstract** : As the types and usage of chemical increase, modern countries should protect their health and environment from the risk of hazardous chemical. Chemical accidents not only affect humans but also cause huge losses to the environment. Moreover, since its effects do not end in a short period of time, it is necessary to identify the extent of the damage and establish a prevention and response system in advance. In 2015, the Chemical Substances Management Act provided a system for assessing the impact on the people and the environment around the workplace. However, it is difficult to quantitatively evaluate the impact on environmental factors such as vegetation and aquatic, with the current hazard assessment methods. The purpose of this study is to analyze the quantitative risk of environmental receptors. This study improved the existing risk assessment formula by using the environmental vulnerability index and established the end point concentration criterion which can estimate the damage range to environmental media. To verify the results of the study, a virtual accident scenario was selected and a case study was conducted. As a result, the extent of impact on the environmental medium can be calculated, and the degree of environmental risk of the zone can be quantified through the risk analysis considering the environmental vulnerability. This study is expected to increase the reliability of the existing risk analysis method because it is a risk analysis method that can be applied when the environmental factors are absolutely necessary and when the residents and environment are complex.

**Key Words** : environmental risk assessment, risk analysis, chemical accident, end-point

### 1. 서론

국의 주요 화학사고로 1986년 스위스 바젤 부근에서 수은화합물 등 30 톤의 화학물질이 라인강에 누출되었고 2005년 11월, 중국 지린성 벤젠공장의 폭발사고로 송화강으로 100톤의 벤젠이 누출되어 취수문제가 발생하였으며, 2010년 10월, 헝가리의 알루미늄 공장의 폐기물 저수지 붕괴로 적니호수에 독성 슬러지가 방출되는 사고가 발생하였다<sup>1,2)</sup>. 국내 주요 화학사고로는 2012년 경북 구미에서 불산 누출사고로 농작물 212 ha가 훼손되었으며, 2015년 전북 군산시에서 사염화규소 누출로 농경지 8만 m<sup>2</sup>가 훼손되었다. 2016년 충남 금산군에서 불산이 집수조로 유입되어 주변 산지 식생이

훼손되는 피해가 발생하였다<sup>3)</sup>. 이처럼 유해화학물질 유출은 인체 및 환경에 직접 피해를 미치므로<sup>4)</sup> 화학물질의 위험으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하는 제도를 마련하여 운영할 필요가 있다.

우리나라의 화학사고 예방제도는 Table 1과 같이 고용노동부의 공정안전관리 제도, 산업통상자원부의 안전성향상계획 제도, 환경부의 장외영향평가 제도 등이 있다. 공정안전관리 제도와 안전성향상계획 제도는 주로 사업장 내 근로자와 시설을 보호하기 위한 목적으로 시행되었으며 장외영향평가 제도는 사업장 밖의 주민과 환경 등을 보호하기 위한 목적으로 만들어졌다.

특히, 장외영향평가 제도는 위험도에 근거하여 취급 시설을 관리한다. 또한, 시설의 위험도에 따라 사고영

\* Corresponding Author : Jong Bae Back, Tel : +82-43-841-5337, E-mail : jbaack@ut.ac.kr

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 27469, Korea

Table 1. Prevent systems of chemical accident in South Korea<sup>5)</sup>

	Process Safety Management	Safety Management Systems	Off-site Risk Assessment
Relevant law	Occupational Safety and Health Act	High-Pressure Gas Safety Control Act	Chemical Control Act
Relevant organization (regulatory agency)	Ministry of Employment and Labor (Safety and Health Agency)	Ministry of Trade and Industry (Korea Gas Safety Corporation)	Ministry of Environment (National Institute of Chemical Safety)
Major target	Hazardous materials handling facilities	Facilities of handling high pressure gas	A hazardous chemical handling facilities
Objects to protect	Workers	Workers	People, environment

향을 줄이거나 사고발생빈도를 줄이는 위험도 감소대책을 추가로 고려할 수 있다<sup>6)</sup>. 그러나 현재의 위험도 산정방식은 인체에 초점이 맞춰져 있고 생물, 수질, 토양 등과 같은 환경매체의 영향을 정량적으로 고려하고 있지 않다.

이 연구는 환경매체를 고려한 위험도 산정방법을 제안하고, 시범 적용하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 국외 사전 환경 피해평가 방법론을 분석하여 국내에 적용가능한 위험도 산정식을 제안하고, 특정 물질에 노출되는 환경매체에 적용가능한 끝점농도 기준을 정하여 기존의 위험도 분석방법을 개선하고자 한다. 연구의 결과를 검증하기 위해, 특정 지역과 가상의 시나리오를 설정하여 개발한 산정식으로 환경매체를 고려한 위험도 분석을 실시하였다.

## 2. 환경매체의 정량적 위험도 산정 방법론 제안

장외영향평가는 사고 시나리오 영향범위를 산정하여 그 영향범위 내에 노출되는 주민과 환경 등에 미치는 영향을 분석하여 위험도를 산출한다.

현재의 위험도 산정식으로 위험도를 산출하면, 영향범위 내 노출되는 인구 수로 수치화가 가능하다. 그러나 영향범위 내 노출되는 환경매체의 위험도는 정량적

으로 산출하기 어렵다. 따라서 본 연구는 국외 사전 환경피해 평가방법론을 비교·분석하여 환경에 미치는 위험 정도를 수치화하였다.

### 2.1 국외 사전 환경피해평가 방법론 분석

유럽국가의 화학사고 사전 환경 피해평가 방법론을 비교·분석하였다(Table 2).

영국의 환경위해성평가법(Environmental Risk Assessment)은 주변환경의 유형과 피해면적, 유해의 지속성과 사고 발생 빈도를 고려하여 위험도를 결정한다. 위험도 등급에 따라 추가적인 완화장치가 필요한지 여부를 결정한다<sup>7)</sup>. 스웨덴의 환경사고지수(Environmental-Accident Index)의 방법론은 화학물질 누출 시 수생태계에 미치는 영향을 예측하여 추가적인 위험분석이 필요한지 여부를 판단하기 위한 방법이다. 수생생물에 대한 독성정보와 저장·운반되는 화학물질량, 물질의 물리적 상태, 용해도, 주변환경 특성에 따른 각 변수에 해당하는 점수를 토대로 등급이 결정된다<sup>8)</sup>. 체코는 위험 및 취약성 지수(Hazard and Vulnerability Index, H&V Index)를 활용하여 화학사고 시 환경매체별 미치는 영향을 물질의 위험성과 환경취약성에 근거하여 독성영향을 평가한다. 그리고 누출된 물질의 양과 독성 지수를 활용하여 사고의 심각성 등급을 결정한다<sup>9)</sup>. 스페인의 환경 위험도 분석(Environmental Risk Analysis)은 선정한 사고 시나리오에 빈도와 환경영향지수를 곱하여 위험도를 산정한다. 환경영향 지수는 물질의 독성 및 물리화학적 특성과 누출량을 고려하여 정해진다. 사고발생 빈도의 경우 결함수 분석 등을 참고하여 지수로 산출한다<sup>7)</sup>. 앞서 4개국의 사전 환경피해평가 방법론은 물질의 물리화학적 특성을 고려한 스크리닝 수준의 평가방법이다. 다만, 체코의 위험 및 취약성 지수를 활용한 평가 방법론은 국내에서 적용하기 용이한 지수를 활용하고 실제로 인허가를 위해 제출해야하는 서류로서 활용되고 있다. 이 연구에서 체코의 평가 방법론을 분석한 후 국내 장외영향평가의 위험도 분석 시 환경매체를 고려할 수 있는 평가방법을 제안하였다.

Table 2. Comparing methodology of environmental damage assessment by chemical accident

Country	Methodology	Information	Evaluation medium
United Kingdom	Environmental Risk Assessment	Evaluation of MATTE using leak source, path and receptor	Land, surface water, Ground water, building environment
Spain	Environmental Risk Analysis	The frequency of accidents occurring in the environmental impact index	Environmental conditions
Czech republic	Harzard and Vulnerability Index	Determination of severity ratings for the toxicity index by environmental medium	Biological environmental, water environmental, soil environmental
Sweden	Environmental-Accident Index	Acute toxicity index, amount of leakage, concentration, melting, and environmental conditions	Aquatic ecosystem

## 2.2 체코의 환경취약성 지수를 활용한 산정식 제안

체코의 화학사고 사전 환경 피해평가 방법에서는 환경매체를 크게 생물환경, 물환경, 토양환경으로 구분한다. 물환경의 경우 지하수와 지표수로 분류되어 있고 가연성 물질의 경우 화재의 위험에 대한 지수를 계산할 수 있도록 되어 있다.

체코의 평가 방법론은 다음 식<sup>9)</sup>을 활용하고 있다.

$$I_{TB} = \sqrt{(T_B \times I_B)} \quad (1)$$

$$I_{TSW} = \sqrt{(T_W \times I_{SW})} \quad (2)$$

$$I_{TUW} = \max(\sqrt{(I_{SW} \times T_W)}; \sqrt[3]{(T_W \times I_{UW} \times I_S)}) \quad (3)$$

$$I_{TS} = \sqrt{T_S \times I_S} \quad (4)$$

$$I_{FR} = \sqrt{(F_R \times I_B)} \quad (5)$$

여기서,  $I_{TB}$ 는 생물환경 독성 지수이고,  $T_B$ 는 생물환경 독성 지수,  $I_B$ 는 생물환경 취약성 지수이다.  $I_{TSW}$ 는 지표수 독성 지수를 의미하고, 물환경 독성지수  $T_W$ 와 지표수 취약성 지수  $I_{SW}$ 로 계산한다.  $I_{TUW}$ 는 지하수 독성 지수이고, 지표수 취약성 지수  $I_{SW}$ 와 물환경 독성 지수  $T_W$ 의 곱에 지수를 계산한 값과 물환경 독성 지수  $T_W$ , 지하수 취약성 지수  $I_{UW}$ , 토양환경 취약성 지수  $I_S$  3제곱근의 값 중 큰 값을 적용한다. 토양환경 독성 지수인  $I_{TS}$ 는 토양환경 독성 지수  $T_S$ 에 토양환경 취약성 지수  $I_S$ 를 활용한다. 가연성 물질의 경우 화재 위험에 대한 지수  $I_{FR}$ 를 구할 수 있다. 화재 위험 지수  $I_{FR}$ 은 화재 위험 지수  $F_R$ 에 생물환경 취약성 지수  $I_B$ 를 활용한다.

체코의 평가 방법론에서 활용되고 있는 위험 및 취약성 지수들은 특정 독성 물질의 물리화학적 성질 등에 영향을 받는 물환경, 토양환경, 생물환경 등의 환경취약 정도를 유형별로 나누어 점수화한 것이다. 위 5가지 식을 활용하기 위해서는 환경매체별 취약성 지수를 계산하여야 한다. 먼저, 각 환경매체별 독성 지수는 물질의  $LC_{50}$ (Rat, 4 hr),  $LC_{50}$ (fish, 96 hr)등과 같은 독성정보와 물리화학적 특성을 바탕으로 점수를 부여하여 지수를 산출한다. 환경매체별 환경 취약성 지수는 해당 물질에 노출된 유형에 따라 부여된 점수를 바탕으로 지수를 산출한다. 생물환경의 환경 취약성 유형은 생태경관보호지역, 목축, 숲, 농업지역, 버려진 농지 등 5가지로 분류되었다. 물환경의 환경 취약성 유형은 지표수와 지하수로 구분되며, 지표수의 경우 흐르는 경우와 정체된 경우로 나누어 점수를 부여하였다. 지하수의 경우 지질학적, 토양표면, 수질보호 정도 등을 복

합적으로 반영하여 취약성에 대한 점수를 부여하여 지수를 산출하였다. 토양환경의 취약성 지수는 토양단위에 따라 취약성 지수를 산출하였다.

## 2.3 독성영향 끝점기준으로써 환경 위해성평가의 무영향농도 적용

현재 장외영향평가 시 영향범위는 끝점농도에 이르는 거리를 반경으로 누출원에서 원으로 표시된다. 이때 끝점농도 기준은 화학물질로 인한 인체 건강에 영향을 의미하는 ERPG 등이 사용되므로 환경매체에 영향을 미치는 기준값의 사용이 필요하다.

위해성평가(risk assessment)는 유해성 있는 화학물질의 유해성과 노출량 등을 조사하여 사람의 건강이나 환경에게 미치는 영향을 예측하는 것을 말한다<sup>10)</sup>. 환경위해성 평가의 절차는 유해성 평가, 용량-반응 평가, 노출평가, 위험도 결정으로 이루어져 있다. 특히, 용량-반응 평가는 동물시험 결과 등에서 무영향농도(NOEC, No Observed Effect Concentration)값을 참고하여 환경중 생물에 미치는 영향을 분석한다. 유해성평가는 화학물질의 환경영역(수생, 저서, 육생 및 미생물) 내 생태계에서 악영향이 발생하지 않을 것으로 예상되는 화학물질의 농도, 즉 예측무영향농도(PNEC, Predicted No observed Effect Concentration)를 도출하기 위한 과정이다. PNEC를 도출하기 위해서는 환경에 대한 유해성 정보를 바탕으로 반수 치사 농도(LC<sub>50</sub>) 혹은 반수 영향 농도(EC<sub>50</sub>)과 같은 급성독성 값 또는 무영향농도를 선정하고 평가계수를 고려하여 도출한다. 각 환경매체에 대한 PNEC을 도출하기 위해서는 먼저 확보된 환경 유해성 자료 중 PNEC 도출을 위해 활용될 독성 값을 선정한다. 매체 내 생물체에 대한 가장 민감한 독성 값이 선정되어야 하며, 대부분 만성독성시험의 NOEC값이 활용된다. 본 연구에서는 장외영향평가·위해관리계획서 작성 지원프로그램 (KORA, Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)을 활용하여 영향범위를 산정한다. 영향범위 산정 시 입력하는 끝점농도값에 환경매체별 특정 물질의 NOEC값을 입력하여 영향범위를 산정하였다.

## 3. 피해 영향범위와 취약성 지수 산정 방법

### 3.1 환경취약성 지수를 활용한 위험도 산정식

환경매체별 영향범위를 산정한 후, 해당 영향범위 내에 노출되는 환경 유형을 확인하여 취약성도에 따른 점수가 필요하다.

아래 식은 환경매체를 고려한 위험도 산출을 위해

제안한 환경취약성 지수 산정식이다. 특정 물질에 노출되는 환경매체를 최대한 반영하고자 생물환경, 수질 환경, 토양환경에 대한 요소를 반영하여 세 값에 세제 곱근을 적용하였다.

$$\text{환경취약성 지수} = \sqrt[3]{(\text{생물환경} \times \text{수질환경} \times \text{토양환경})} \quad (6)$$

지수 산출을 위해 추가적으로 고려해야 할 요소들은 추후 전문가와의 연구를 통해 보완이 필요하지만, 본 연구에서는 기존의 위험도 산정식에 환경매체에 대한 고려를 할 수 있도록 위험도 계산식을 개선하고자 위와 같이 제안하였다. 추가적인 고려인자와 산정식에 대한 추가 연구는 후속 연구에서 이루어질 예정이다.

생물환경 지수는 1~5까지 체코의 생물환경의 취약성 유형별 지수안을 적용하였으며<sup>9)</sup>, 물환경 지수와 토양환경 지수는 한국환경정책평가원<sup>11)</sup>에서 제시한 지수안을 적용하였다. 특정 물질에 노출되는 환경매체 중 취약성 점수가 높은 유형을 지수로 선택한다. 생물환경 유형의 경우, 버려진 농지, 농업지역, 정원, 숲, 목축, 생태경관보호지역으로 5가지로 분류하여 1점에서 5점까지 부여하였다. 수질유형의 경우, 지하수법에 따라 지정된 지하수보전구역 여부에 따라 1점과 5점으로 나누었다. 토양유형의 경우, 노출 지점의 토양목에 따라 7종으로 나누었으며 각각 점수를 부여하였다.

### 3.2 피해영향범위와 환경취약성 지수 활용

환경매체를 고려한 정량적 위험도 분석을 하기 위해 환경취약성 지수를 활용한 산정식을 제안하였고, 기존의 장외영향평가 위험도 산정식을 고려하여 환경취약성 지수에 사고발생빈도를 곱하도록 위험도 산정식을 제안하였다. 관련 식은 다음과 같다.

$$\text{위험도 산정식} = \text{환경취약성 지수} \times \text{사고발생빈도} \quad (7)$$

NOEC값을 활용하여 영향범위를 산정하고, 해당 영향범위 내에 노출되는 환경 유형 중 취약도가 높은 유형의 점수를 적용하여 환경취약성 지수를 계산한다. 이 값에 해당 시설의 사고발생 빈도률을 곱하여 환경매체를 고려한 위험도 분석을 한다.

## 4. 사례 연구

이 연구의 목적은 화학사고로 영향을 받는 환경매체에 미치는 위험도를 정량적으로 도출하는 것이다. 이를 위해 환경매체별로 영향범위를 산정할 수 있는 끝

점농도 기준을 마련하고, 환경매체를 고려한 위험도 산정식을 제안하였다. 이를 검증하기 위해 다음과 같이 시나리오를 선정하여 사례 연구를 실시하였다.

### 4.1 물질 및 지역선정

톨루엔은 2007년부터 2017년까지 국내에서 발생한 사고 물질 중 대표적인 물질이다<sup>12)</sup>. 본 연구에서는 톨루엔을 사례물질로 선정하였으며, 위험도 분석을 위한 KORA프로그램 구동 입력조건은 Table 3과 같다.

Table 3. Information of target substance in order to analyze risk by chemical accident

Division	Classification	
Chemical	Toluene	
CAS no.	108-88-3	
Molecular formula	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	
Concentration	85%	
State of aggregation	liquid	
Boiling Point	110.6°C	
Flashing point	4°C (Closed cup)	
	16°C (Open cup)	
Molecular weight	92.14 kg/kmol	
Vapor pressure	21.98 mmHg (20°C)	
Biological environment	LC50(Rat.4hr)	8,000 ppm <sup>13)</sup>
	NOEC	20 ppm <sup>14)</sup>
Water environment	LC50(fish, 96hr)	57.68 mg/L <sup>15)</sup>
	NOEC	5.4 ppm <sup>16)</sup>
Soil environment	LC50(fish, 96hr)	57.68 mg/L <sup>15)</sup>
	NOEC	10 ppm <sup>17)</sup>

사례분석을 위한 지역은 대전광역시 대덕구로 선정하였으며 사고 발생 시나리오 지점으로부터 1.5 km에는 농경지가 있고, 1.8 km에는 공업지역이 있으며, 0.5 km에는 임야가 4.2 km에는 상수도보호지역이 있다.

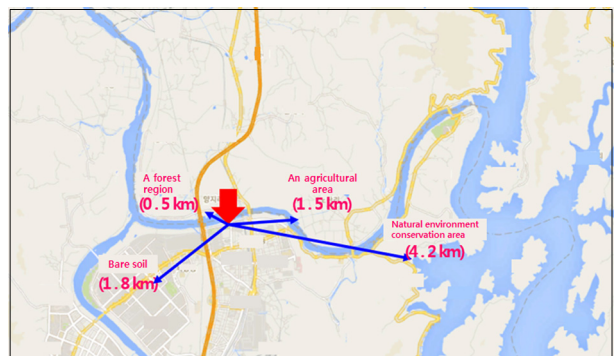


Fig. 1. Test site for chemical accident risk assessment of environmental receptors.

### 4.2 시나리오 선정 및 기상조건

가상의 시나리오는 톨루엔 옥외저장탱크에서 누출이 발생하는 경우이다. 취급시설에 대한 정보는 Table 4에 정리하였다. 공정배관계장도 및 시나리오 구간은 Fig. 2와 같다. 취급저장량은 30톤이며, 완화장치로 방류벽, 고정식 소화설비가 있다.

Table 4. Information on chemical device and operating parameters

Classification	Information
Material	Toluene
Form	Atmospheric tank
Distance from ground	0m
Operating temperature	25°C
Working pressure	0 MPa
Storage	30,000 kg
Piping maximum diameter	50 mm
Discharge wall area	20 m <sup>2</sup> (Effective capacity 110%)

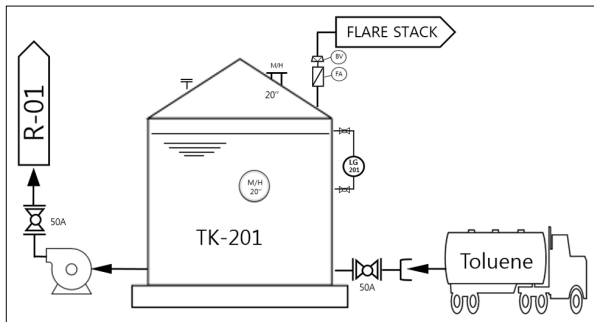


Fig. 2. Pipe and instrumentation diagram and scenario section.

대전광역시의 지난 1년간의 평균온도, 습도, 주풍향, 풍속을 사용하였다. 평균 온도는 13.4°C, 평균습도 68%, 주풍향은 NW(북서풍), 평균 풍속은 1.6 m/s이다. 대기안정도는 D(안정)고 지표면 굴곡도는 전원으로 설정하였다.

Table 5. List and specification of device

Initiating event	Frequency Of Initiating Event (yr-1)	Quantity	Probability Failure Demand of Passive	Probability Failure Demand of Positive	Sum
Piping rupture	1×10 <sup>-5</sup>	1	-	-	1×10 <sup>-5</sup>
Piping leak	1×10 <sup>-3</sup>	1	-	-	1×10 <sup>-3</sup>
Atmospheric tank failure	1×10 <sup>-3</sup>	1	Dike (1×10 <sup>-2</sup> )	-	1×10 <sup>-5</sup>
Gasket/Packing blowout	1×10 <sup>-2</sup>	4	-	-	4×10 <sup>-2</sup>
Pump seal failure	1×10 <sup>-1</sup>	1	-	-	1×10 <sup>-1</sup>
Small external fire	1×10 <sup>-1</sup>	1	-	A stationary extinguisher (1×10 <sup>-1</sup> )	1×10 <sup>-2</sup>
Large external fire	1×10 <sup>-2</sup>	1	-	-	1×10 <sup>-2</sup>
Frequency of initiating event considering probability of failure on demand					0.161

### 4.3 사고 피해 영향범위 산정 및 환경취약성 지수 적용

KORA프로그램을 활용하여 영향범위를 산정하였다. 이 때, 끝점농도 기준으로 NOEC값을 활용하였다. 톨루엔의 생물환경의 독성영향 끝점농도값은 20 ppm<sup>14)</sup>을 적용하였고, 물환경의 독성영향 끝점농도값은 5.4 ppm<sup>16)</sup>을 적용하였다. 토양환경의 독성영향 끝점농도값은 10 ppm<sup>17)</sup>을 적용하였다. 환경취약성 지수로는 생물환경, 수질환경, 토양환경을 활용한다. 특정 물질에 노출되는 환경매체 중 취약성 점수가 높은 유형을 지수로 선택하였다. 톨루엔 옥외저장탱크 시나리오 영향범위 산정 결과, 환경매체에 영향을 미치는 유형 중 취약정도가 높은 유형을 선택하였다. 생물환경 유형은 숲을 선택하여 4점이 나왔다. 물환경 유형의 경우, 해당 영향범위 내에 지하수법에 따라 지정된 지하수보전구역이 없으므로, 1점을 부여하였다. 토양환경 유형의 경우, 노출 지점의 토양목 유형 중 취약정도가 높은 유형인 인셉티솔로 4점을 부여하였다. 각 값의 곱의 세제곱근 계산을 한다. 그 결과, 2.519점이 도출되었다.

### 4.4 사고발생빈도 산정

장외영향평가에서 사고 발생빈도는 주요기기의 고장빈도와 보호시스템에 의한 안전성 향상도의 곱으로 산출된다. 사례 연구 시 적용한 위험도 분석기법으로 LOPA를 적용하였다. 톨루엔 저장탱크에서 누출되는 시나리오에서 발생할 수 있는 개시사건으로 7가지를 설정하였다. 배관파열, 배관누출, 상압탱크 파열, 플랜지 또는 밸브 누출, 펌프 누출, 소규모 및 대규모 외부화재를 선택하였다. 상압탱크 누출로 인한 개시사건의 수동적 완화장치로는 방류벽(Dike)를 적용하였고, 외부화재에 대한 수동적 완화장치로는 고정식 소화설비를 적용하였다. 가상의 시나리오의 사고 발생 빈도는 Table 5에 정리하였으며, 완화장치를 고려한 사고 발생 빈도값은 0.161이 나왔다.

### 5. 결과 및 토의

이 연구는 화학사고로 사업장 주변 환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있도록 제안한 산정식을 활용하여 시범 적용하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 환경 취약성을 고려한 위험도 산정식을 제안하였으며 환경에 노출되는 끝점농도 기준값을 정하여 KORA프로그램으로 영향범위를 산정하였다. 이를 검증하기 위해 사례 연구를 하였다. 사례연구는 톨루엔 저장탱크에서 누출되는 가상의 사고 시나리오를 설정하여 제안한 위험도를 산출하였다. 대안의 조건에서 독성영향범위를 산정한 결과, 사업장 경계선 밖의 피해거리로 생물환경은 628 m, 물환경은 1,404 m, 토양환경은 956 m가 산정되었다. 환경매체별로 산정한 영향범위를 각 환경매체 취약성 지도로 Fig. 3에 정리하였다. 각각의 환경매체별 영향범위 내 노출된 환경 유형 중 취약성이 높은 유형의 점수를 산정식에 대입하였다. 생물환경 취약성 지수는 산림으로 4점이 나왔다. 물환경의 취약성 지수는 지하수보전구역이 아닌 구역

으로 1점이 나왔으며, 토양환경의 취약성 지수는 인셀티솔로 4점이 나왔다. 본 연구에서 개발한 산정식에 값을 각각 대입한 결과 최종 환경취약성 지수는 2.519점이 나왔으며 톨루엔 사고시나리오의 사고 발생 빈도율은 0.161이다. 따라서, 환경매체를 고려한 최종 위험도는 0.405로 도출되었다.

본 연구는 기존의 장외영향평가 위험도 산정식에서 환경적 요인에 대한 정량적 평가가 가능하도록 위험도 산정식을 제안하였다. 또한, 환경 유형에 미치는 영향범위를 산정할 수 있도록 끝점농도 기준값을 마련하였다.

### 6. 결론

화학사고는 사람뿐만 아니라 환경에도 영향을 미치며 그 영향이 단기간에 끝나지 않기 때문에 사전에 화학사고 발생을 예방하고 유사시 신속한 대응이 매우 중요하다. 현재 장외영향평가의 위험도 산정식은 사업장 주변 인구수에 영향을 크게 받는다. 따라서, 사업장 주변에 수생태계, 식생 등의 주변 환경이 복합적인 경우나 환경이 절대적으로 고려되어야 할 경우 기존의 위험도 산정 방법으로는 이에 대한 정량적 평가가 어렵다.

이 연구는 장외영향평가의 위험 분석 방법의 한계점을 개선하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 환경취약성 지수를 활용한 위험도 분석방법을 제안하였다. 또한, 환경매체에 미치는 피해범위를 산정할 수 있는 끝점농도 기준을 마련하였다. 이 연구 결과를 검증하기 위해 사례연구로 톨루엔 저장탱크에서 누출되는 가상의 시나리오를 설정하였다. 독성영향 끝점농도 기준을 적용한 피해영향범위 산정과 개발한 산정식으로 환경매체를 고려한 위험 분석을 실시하여 위험도를 도출하였다. 다만, 결과로 도출된 수치에 대한 해석기준을 연구하지 못한 한계점이 있으며, 수식에 대한 기준, 부여한 지수의 점수 등은 국내 실정에 맞게 추가적인 검토가 필요하다고 생각한다. 하지만 이 연구에서 제안한 위험도 분석 방법으로 기존의 장외영향평가 위험 분석의 한계점을 개선할 수 있을 것이다.

### References

- 1) KONETIC, <http://www.konetic.or.kr/dataroom>
- 2) Ministry of Environment Report, "Detailed Report on the Environmental Technology Development Project for Chemical Accident Response Final Report", 2015.
- 3) Ministry of Environment Report, "Joint Inspection of the Municipal and Provincial Office of Hazardous Chemicals

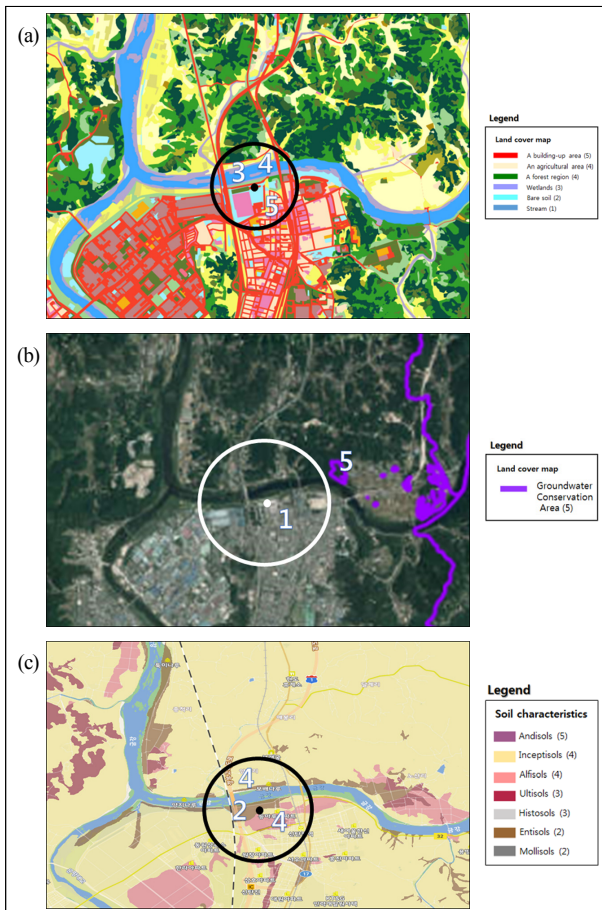


Fig. 3. Classification map of environmental vulnerability (a) Biological, (b) Water, (c) Soil<sup>18,19,20</sup>.

- Handling Business, Executive Action of 71 Operations Sites”, 2017.
- 4) S. B. Kim, C. H. Park, M. S. Cho, J. S. Lee, J. M. Kim, H. R. Noh and G. S. Seok, “A Study on Improving Management of Substances Requiring Preparation for Accidents Facilities”, J. Korean Soc. Saf., Vol.27, No.3, pp.77-82, 2012.
  - 5) W. S. Choi, “The Risk Analysis of the Environmental Receptors for the Off-site Risk Assessment”, Korea National University of Transportation, 2018.
  - 6) M. S. Kim, J. Y. Kim, E. B. Lee, J. H. Yoon and J. H. Park, “Effect of Proof Test of Protective System on Securing Safety of Off-site Risk Assessment”, J. Korean Soc. Saf., Vol.32, No.6, pp.46-53, 2017.
  - 7) AMEC, Final Report Annex 3: Methods for Assessing Environmental Consequences (Task 3) Development of an Assessment Methodology under Article 4 of Directive 2012/18/EU on the Control of Major-accident Hazards involving Dangerous Substances, pp.17-27, pp28-35, 2014.
  - 8) Åsa Scott Andersson, Development of an Environment-Accident index, A Planning Tool to Protect the Environment in Case of a Chemical Accident, 2004.
  - 9) Vojtkovská and Danihelka, “Methodics for Analysis Impacts of Accidents with Participation Hazardous Substance in Environment, H&V Index”, 2002.
  - 10) Regulation on the Specific Methods of Chemical Risk Assessment Article 2 Clause1, 2014.
  - 11) Y. Suh, J. Park, S. Gan, S. Cho and S. Han, Improvement Measures for Chemical Accident Policies in the Chemicals Control Act and Measures to Support the Industry(II), Korea Environment Institute; 2017.
  - 12) Chemical Safety Clearing-house, <https://csc.me.go.kr/statis/materialCntStatisList.do>, 2017.03.15.
  - 13) HSDB, <https://toxnet.nlm.nih.gov> 2018.3.22.
  - 14) ECOTOX, <https://cfpub.epa.gov/ecotox/>, 2018.3.22.
  - 15) HSDB, <https://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis> 2018.3.22.
  - 16) ECOTOX, <https://cfpub.epa.gov/ecotox/>, 2018.3.22.
  - 17) Canadian Council of Ministers of the Environment, Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Toluene, 2004.
  - 18) National Groundwater Information Center, [http://www.gims.go.kr/beforehand.do?page=igis\\_beforehand/jihasu\\_beforehand](http://www.gims.go.kr/beforehand.do?page=igis_beforehand/jihasu_beforehand), 2017.03.15.
  - 19) Environmental Space Service, <http://egis.me.go.kr/map/map.do>, 2017.03.15.
  - 20) Soil Environment Information System, <http://soil.rda.go.kr/soil/index.jsp>, 2017.03.15.