

Research Paper

## 화학사고로 인한 영향범위 내 환경수용체와 공공수용체를 고려한 위험도 분석방법론

최우수\* · 김민호\*\* · 류지성\* · 권혜옥\*

환경부 화학물질안전원 사고예방심사1과\*, 한국원자력환경공단 방폐물검사팀\*\*

### Suggestion of Risk Assessment Methodology by Chemical Accident Based on the Environmental and Residential Receptors

Woosoo Choi\* · Minho Kim\*\* · Jisung Ryu\* · Hye-Ok Kwon\*

Division 1 of Accident Prevention and Assessment, National Institute of Chemical Safety (NICS),  
Ministry of Environment, South Korea\*  
Radioactive Waste Inspection Team, Korea Radioactive Waste Agency, South Korea\*\*

**요약:** 화학사고를 예방하기 위한 장외영향평가서에서는 유해화학물질 취급시설의 화학사고 위험도를 산정하고, 적절한 안전성 확보방안을 확보하도록 유도한다. 위험도를 산정하는 방법은 '사고영향범위 내 주민 수'와 '취급시설의 사고발생빈도'의 곱이다. 현재 장외영향평가서에서는 사고영향범위 내 피해 유형으로 영향범위 내 주민 수만 고려하고 있고, 환경수용체에 대한 정량적 고려가 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 환경수용체를 고려한 위험도 산정 방식을 제안하였고, 가상의 시나리오 분석을 통해 주민에 대한 고려만 이루어진 위험도와 환경수용체를 고려한 위험도 산정방식을 비교 분석하였다. 이러한 연구를 통하여, 화학사고 예방을 위한 장외영향평가 제도에서 중·장기적으로 환경수용체를 고려한 위험도 분석의 필요성을 확인하고 방법론을 제안하였으며, 향후 정책 및 제도개선의 기초자료로 활용하기를 기대한다.

**주요어:** 화학사고 예방제도, 장외영향평가, 위험도 분석, 환경수용체

**Abstract:** The Off-site Risk Assessment (ORA) for preventing chemical accidents estimates the chemical accident risk at chemical plants. The method of estimating the risk is made by multiplying the number of residents within the effect area of the chemical accident and the frequency of accidents at a chemical plant. At present, the ORA does not quantitatively consider environmental receptors when the damage types within the scope of the accident are environmental receptors. In order to solve this problem, this study proposes a method of estimating the risk considering resident and environmental receptors. Through these studies, it was confirmed that the ORA impact for the

First Author: Woosoo Choi, Tel: +82-42-605-7094, E-mail: sscws@korea.kr, ORCID: 0000-0001-9834-2399

Corresponding Author: Hye-Ok Kwon, Tel: +82-42-605-7736, E-mail: lunakwon.korea@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2139-5630

Co-Authors: Minho Kim, Tel: +82-54-778-7063, E-mail: minho.kim.chem@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7260-4979

Jisung Ryu, Tel: +82-42-605-7060, E-mail: jsgood4u@korea.kr, ORCID: 0000-0002-8464-1360

Received: 26 February, 2020. Revised: 8 July, 2020. Accepted: 15 July, 2020.

prevention of chemical accidents requires risk analysis considering environmental receptors in the medium and long term.

**Keywords:** chemical accident prevention system, off-site risk assessment (ORA), environmental receptors

## I. 서론

우리나라의 화학사고 예방을 위한 제도로는 고용노동부의 공정안전관리제도, 산업통상자원부의 안전성향상계획제도, 환경부의 장외영향평가 제도 및 위해관리계획 등이 있다. 화학사고 예방제도는 화학물질을 취급하는 사업장의 취급시설에서 화재·폭발이나 독성 누출로 인해 발생하는 사고의 영향범위를 분석하고 사업장 내 근로자 또는 사업장 외부를 보호하기 위한 목적으로 시행되고 있다. 그러나, 부처별로 관리대상 물질 및 보호대상의 차이가 있다. 고용노동부와 산업통상자원부의 경우, 유해·위험물질 및 고압가스 취급시설을 대상으로 하며, 사업장 내에서 근무하는 근로자를 주요 보호대상으로 한다(Occupational Safety and Health Act, High-pressure Gas Safety Control Act 1995). 반면 환경부는 화학물질관리법에서 정의되는 유독물질, 금지물질, 사고대비물질 등을 포함한 유해화학물질을 대상으로 하고 있으며, 고용노동부와 산업통상자원부의 예방제도 보호대상과는 달리, 화학사고 발생으로 인한 영향범위 내 주변지역의 근로자 및 주민을 보호대상으로 하고 있다(Chemical Control Act 2015).

1986년 스위스 바젤 부근에서 수은화합물 누출이 발생하여 피해액은 약 400억 달러로 추정되고, 2005년 영국 번스필드에서 석유저장탱크 폭발이 발생하면서 생태계가 오염되었다(Ministry of Environment Report 2015). 2012년 경북 구미에서 불화수소 누출 사고로 인해 농작물 212 ha가 훼손되어 피해액이 177억원이고, 2015년 전북 군산에서 사염화규소 누출 사고로 농경지 8만m<sup>2</sup>가 훼손되었다. 2016년 충남 금산군에서 집수조로 불산이 유입되어 주변 산지 식생이 훼손되었다(Ministry of Environment Report 2017). 이처럼 화학사고는 사람뿐만 아니라 환경에도 악영

을 미치며, 환경에 미치는 피해를 복구하기 위해서는 자원과 에너지의 투입이 필요하다.

환경부는 화학사고로 인한 영향이 주변지역의 근로자뿐만 아니라, 수질, 대기, 토양 등 환경매체에 대한 영향을 함께 고려할 필요성을 인지하고, 장외영향평가서에 화학사고 영향범위 내 공공수용체 및 환경수용체의 존재여부를 확인하고 있다. 공공수용체는 건축법 제2조제2호에 해당하는 주거용, 상업용, 공공건물, 공공휴양지, 학교, 병원 등을 말하며, 환경수용체는 자연환경보전법 제2조제12호에 따른 생태·경관보호지역, 상수·취수원, 자연공원법 제2조제1호에 따른 자연공원, 습지보전법 제8조에 따른 습지보호지역 등을 의미한다. 환경부 장외영향평가 제도는 유해화학물질 취급시설의 위험요인을 고려하여 화학사고 영향범위를 산정하고, 위험도 분석을 통해 주요 화학사고 위험 취급설비에 대한 안전성을 확보하도록 유도한다(Regulations on the Preparation of Off-site Risk Assessment 2014). 현재 장외영향평가서의 위험도는 '사고영향범위 내 주민 수'에 '취급시설 사고 발생 빈도'를 고려하여 분석하고 있으나, 화학사고 영향범위 내 거주하는 주민 이외의 환경수용체에 대한 정량적 평가는 이루어지지 않고 있다(Choi 2018). 그러므로 화학사고 영향범위 내 피해 유형이 주민과 환경수용체가 복합적인 경우나 환경수용체만 고려되어야 할 경우를 반영할 수 있는 위험도 분석의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 화학사고 발생 시에는 사람뿐만 아니라 주변 환경에도 악영향을 미치므로, 환경수용체에 미치는 영향을 정량적으로 도출할 수 있는 위험도 분석방법이 필요하다.

화학사고의 위험도 평가와 관련된 국내 선행연구를 살펴보면, 화학물질의 물리화학적 특성과 누출량, 용해도 등을 고려하여 사전에 화학사고 위험도를 분석할 수 있는 방법론들이 있는 것으로 보고하고 있다

(Park et al. 2016). Katerina Sikorova 등은 유럽의 화학사고 사례 분석을 통해, 중대 화학사고는 사람뿐만 아니라 환경에 영향을 미치므로 새로운 세베소 지침의 시행으로 중대한 사고를 일으킬 가능성이 있는 모든 시설에 대해 설계 단계에서부터 사고에 대한 위험 평가의 필요성을 제기했다. Sikorova 등은 사고 예방에 대한 새로운 접근 방법으로 화학사고가 환경에 미치는 영향을 연구하기 위해 체코와 스웨덴의 환경피해 평가방법론을 가상의 시나리오에 적용하여 환경의 피해를 정량적으로 평가하였다. 암모니아수 누출사고를 시나리오로 선정하였으며, 화학사고로 인한 환경피해평가 필수요인을 도출할 수 있었다 (Sikorova et al. 2017). 그러나 환경적 요인의 통합적 고려를 위한 적합한 방법론을 도출하지는 못하는 한계점이 있다. Lenka fiserova 등은 체코의 방법론을 적용하여 히드라진 수화물 24g 화학사고로 인해 환경 중으로 누출되었을 경우 환경에 미치는 피해 정도를 시나리오 기반 연구하였다. 해당 연구에서는 물질의 독성 위험 지수를 도출하고 화학사고로 인한 환경취약성 지수를 산출한 결과, 환경에 심각한 피해를 주지 않음을 확인하였다. 이러한 연구 결과에서는 화학사고로 인한 환경영향평가를 통해 주요 위험시설에 추가적인 안전장치 등을 설치하고 사전에 사고를 예방해야 함을 강조하고 있다(Fiserova et al. 2012). 또한, 기존 Choi 논문과 비교하였을 때, 취급물질과 사고영향범위 내 수용체에 따라 그 위험한 정도의 해석이 달라질 수 있음을 확인하고, 실제 일어날 수 있는 사고 시나리오를 선정하고자 시나리오 대상물질, 지역 선정 등을 구체적으로 반영하였다.

본 연구에서는 기존의 생태위해성평가는 화학사고로 인한 생태계의 영향을 평가하였으므로, 사고로 인한 영향범위 내 인구(사람)에 대한 고려는 제외되어 있다. 반대로 기존 장외영향평가에서는 화학사고로 인한 인구(사람)의 영향만을 평가하고, 사고로 인한 영향범위 내 환경수용체에 대한 고려는 제외된다. 화학사고가 발생하게 되면, 환경과 인구(사람) 모두 영향을 받게 되므로 두 가지 요소를 모두 고려한 평가가 이루어져야 한다. 환경부의 장외영향평가 제도에서는 화학사고 영향범위 내 주민(사람)의 영향만을 고

려할 경우 편향적 결론 도출 가능성이 있다. 이를 개선하기 위하여 화학사고 영향범위 내 주민과 환경수용체를 동시에 고려하는 방법론이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 연구배경을 바탕으로 화학사고 발생으로 인한 피해영향범위 내 사람과 환경수용체를 정량적으로 고려할 수 있는 위험도 분석 방법론을 제안하였다. 화학사고 발생으로 인해 피해 영향범위 내 노출되는 환경수용체를 정량적으로 고려할 수 있는 위험도 분석 방법론을 제안하고자 하였다. 이를 위해 화학사고 예방을 위한 국외 환경피해 방법론을 비교 분석하여 우리나라에 적용 가능한 평가방법론을 도출하고, 한국에 적합한 인자를 고려한 위험도 산정식을 제안하였다. 제안된 위험도 산정식을 가상의 시나리오에 적용하고, 기존 주민 수만 고려한 위험도 분석과 환경수용체를 고려한 위험도 분석을 비교 분석하였다. 이를 통해 현재 장외영향평가 제도에서 사고영향범위 내 인구 수만 고려하는 위험도 산정방식, 환경수용체를 반영할 수 있는 끝점 기준 값의 부재, 환경수용체에 미치는 영향범위 산정 등을 보완한 장외영향평가 위험도 분석방식 개선안을 제안하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 화학사고 예방을 위한 사전 환경피해 평가방법론 조사 및 국내 적용

국외의 사전 환경피해 평가방법을 물질별, 방법별, 결과 활용별로 분류하고 비교분석을 통해, 국내 적용 가능한 방법론을 선정하였다. 이를 위해 스웨덴, 스페인, 영국, 체코에서 제안된 화학사고로 인한 환경영향 평가방법론에 대한 비교분석을 수행하였다 (Table 1). 스웨덴의 평가방법은 화학사고가 수생태계에 영향을 미치는 경우에 한하여 적용 가능한 방법론이다. 스페인의 평가방법은 모든 매체에 적용이 가능하며, 물질의 독성 및 물리화학적 특성과 누출량을 고려한 후 사고 발생 빈도와 환경 영향지수를 곱하여 위험도를 선정한다. 영국의 평가방법은, 가상의 시나리오를 선정하여 영향을 받는 수용체를 파악한다. 영향을 받는 환경은 육지, 지표수, 지하수 등으로 나뉘며 피해 면적에 따라 심각성 등급이 결정된다. 또한

Table 1. Comparison of overseas environmental assessment methodologies

Country	Evaluation media	Material	Methodology
Sweden	• Aquatic ecosystem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acute aquatic toxicity</li> <li>• Amount on site and surroundings</li> <li>• Physicochemical properties</li> <li>• The site-specific</li> </ul>	Acute toxicity index, amount of leakage, concentration, melting, and environmental conditions
Spain	• Environmental consequence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intrinsic properties of the substances</li> <li>• Quantity of substance</li> <li>• Control systems, transport/spread mechanisms</li> <li>• Sensitive receptors' vulnerability</li> <li>• Probability/frequency</li> </ul>	The frequency of accidents occurring in the environmental impact index
United Kingdom	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Land</li> <li>• Surface water</li> <li>• Ground water</li> <li>• Construction environment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The type of environmental receptors</li> <li>• Thresholds that apply to environmental receptors</li> <li>• The extent of damage in the event of an accident</li> </ul>	Evaluation of MATTE using leak source, path and receptor
Czech Republic	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biotic environment</li> <li>• Water environment</li> <li>• Soil environment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physical-chemical qualities</li> <li>• Information about ecological toxicity</li> <li>• Amount of substance</li> </ul>	Determination of severity ratings for the toxicity index by environmental medium

사고 발생 빈도를 고려하여 위험도를 결정하며 추가 완화장치가 필요한지를 판단한다. 체코의 경우, 환경매체별 미치는 영향을 물질에 근거하여 독성영향을 평가하고, 누출된 물질의 양과 독성 지수를 활용한 산정식을 통해 사고 등급이 결정된다.

국내 선행연구(Seo et al. 2017)에서는 국외의 사전 피해평가 방법론 중에서 체코의 방법이 국내에 활용할 수 있는 자료 수준 및 연구결과의 제도 활용성을 고려하였을 때 적합한 것으로 제안하였다.

해당 연구에서 제안된 인자들을 활용하여, 본 연구에서는 화학사고 영향범위 내 환경수용체의 영향정도를 평가하였다. 다만, 체코 등의 연구결과를 검토한 결과 물질별 사고영향범위를 산정하는 정량적인 방법론이 필요하였다. 본 연구에서는 KORA프로그램(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool, KORA)을 활용하여 시설로부터의 영향범위를 산정하고 그 영향범위 내 취약한 환경매체를 고려할 수 있는 방법을 제안하였다.

체코의 연구를 바탕으로 한 환경취약성 지수안에 관련된 국내 선행연구에서는 체코 평가방법론에서 적용하는 분류기준인 토양 유형, 토양표면 유형, 지하수 공급 유형, 수질보호 정도 등의 자료를 각 분야 전문가의 검토를 통해 국내에 적용하기 적합한 분류기

준과 점수체계를 제안하였다(Seo YW et al. 2017).

본 연구에서는 화학사고로 인한 영향범위 내 모든 환경적인 요인을 고려하여 위험도를 산정할 수 없으므로 위험도를 산정하기 위해 국내 제도에 적용이 필요한 환경수용체 관련 인자 및 요인을 우선적으로 고려하였다. 가상 사고시나리오의 운전조건, 기상조건, 물질의 특성 등을 최대한 반영하기 위해, 장외영향평가 작성 지원 프로그램으로 환경부 화학물질안전원에서 제공하는 KORA프로그램을 활용하였다(NICS, 2014). 또한, KORA프로그램을 활용한 결과 예측된 화학사고 영향범위 내에서 확인된 환경수용체의 취약성을 적용하여 위험도 분석을 실시하였다. 취약정도를 나타내기 위해 환경 중 유해화학물질에 의한 건강영향을 평가하는 위해성평가에 적용되는 유해화학물질의 생물체에 대한 무영향농도값(No Observed Effect Concentration, NOEC)을 활용하였다. 즉, KORA에서 화학사고로 인한 영향범위를 추정하기 위해 입력하는 끝점기준값으로 생물체에 대한 NOEC를 활용하였다(ECOTOX, HSDB).

## 2. 가상시나리오 조건

환경수용체를 고려한 위험도 산출 제안식의 활용 가능성 및 타당성을 검토하기 위해 가상의 시나리오를

선정하여 화학사고 영향범위를 도출하고 영향범위 내 인구 수와 환경수용체를 바탕으로 화학사고 위험도를 확인하였다. 첫 번째 시나리오(시나리오 1)는 현재 장외영향평가 제도에서 수행하고 있는 것과 동일한 방법으로 화학사고 발생으로 인해 인체에 영향을 미치는 정도를 나타내는 ERPG 값(Emergency Response

Planning Guideline)을 이용하였다(AIHA, 2014). 화학사고 발생 시나리오를 바탕으로 사고영향범위를 도출하고, 화학사고 영향범위 내 인구 수(통계자료)를 이용하여 위험도를 산정하였다. 두 번째 시나리오(시나리오 2)는 대상물질의 특정 생물에 대한 무영향농도를 고려하여 화학사고 영향범위를 도출하고 영향범

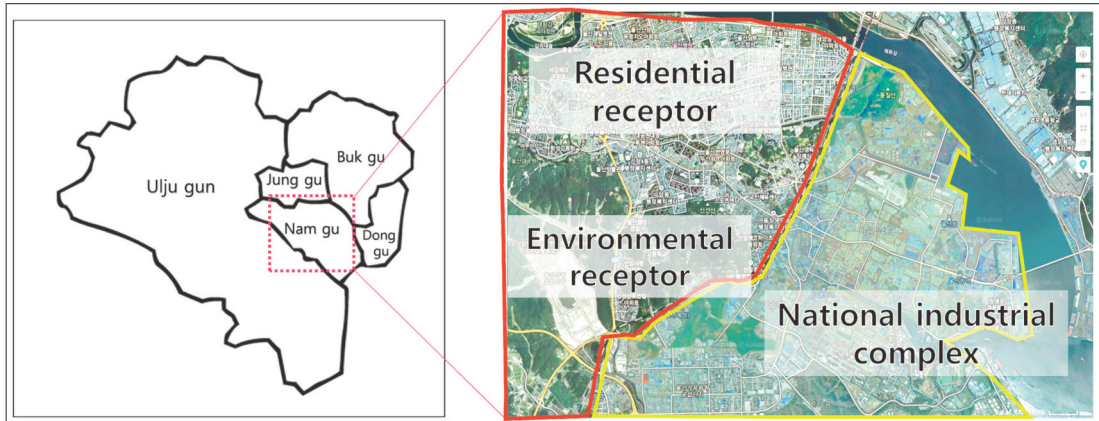


Figure 1. Case study area applied to virtual scenario for evaluation of chemical accident risk considering residential and environmental receptors (Ulsan, South Korea).

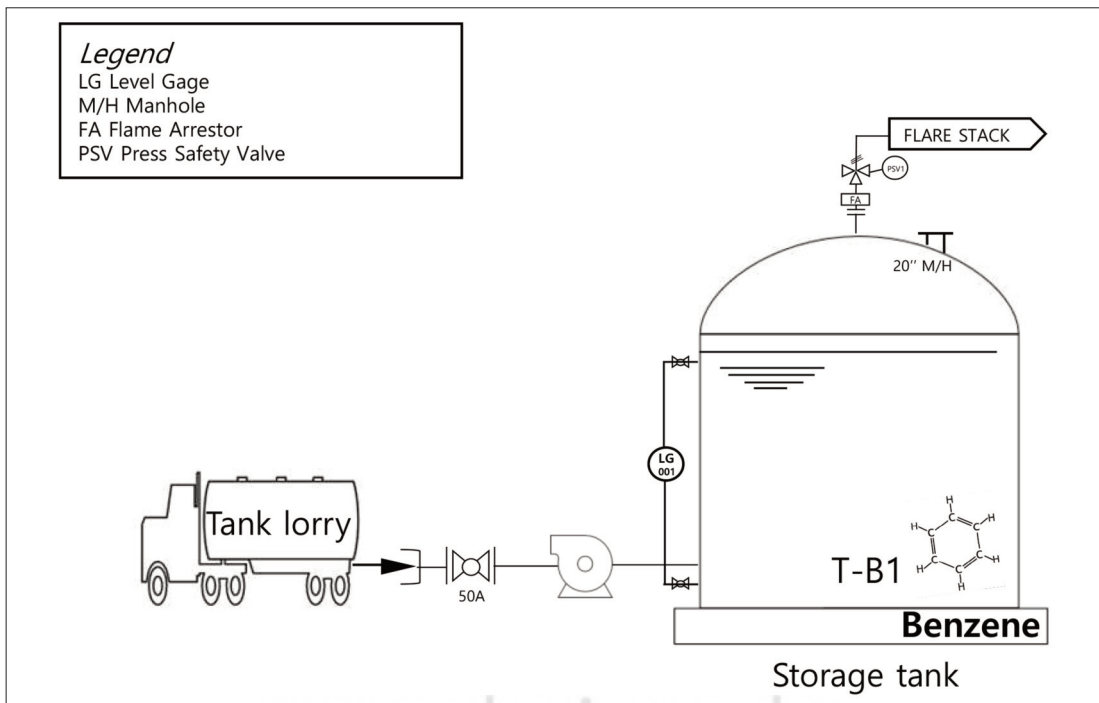


Figure 2. Virtual chemical accident scenario section, which is Benzene storage tank connected to the tank lorry, for evaluation of chemical accident risk at chemical plant.

위 내 환경수용체의 취약성을 이용한 위험도를 산정하였다.

화학사고 발생 시나리오 대상물질은 국제암센터(IARC)에서 규정하고 있는 1급 발암물질로 여러 산업 분야에서 다양하게 활용 되는 벤젠을 대상으로 하였다(IARC 2018). 화학사고 발생 시나리오 대상지역은 국내의 대표적인 산업도시인 울산 지역을 가정하여 선정하였다(Figure 1). 울산은 중공업 및 조선업 등에서 다양한 유해화학물질을 다량으로 사용하고 배출하는 지역이며, 환경부 화학물질안전원의 화학사고 통계 결과, 지난 5년(2014~2018년)간 총 33건의 화학사고가 발생한 지역이다(CSC Website, 2018). 특히, 울산지역은 다른 산업지역과는 달리, 국가산업단지 인근에 주거지역과 녹지지역이 매우 인접하게 위치하고 있다. 이로 인해 화학사고 발생 시 피해영향 범위 내 노인복지시설, 병원, 보호시설 등 취약계층을 수용하는 민감보호대상과 생태계 등이 있을 가능성이 높다(VWORLD Website, 2014). 시나리오의 영향범위를 예측하기 위한 지역별 기상자료는 울산지역의 2018년 1년 평균기온(14.3°C), 평균 습도(66.3%), 주 풍향(북북서), 평균 풍속(2.2 m/s)을 이용하였다(KMA, Website, 2018). 대기안정도는 D(중립, 불안정과 안정의 중간단계)이며 지표면 굴곡도는 도시로 설정하였다.

화학사고 시나리오 시설로는 탱크로리에서 옥외 저장탱크로 벤젠을 입·출하할 때 누출되는 구간을 대상으로 설정하였다. 옥외저장탱크의 규격은 설비 직경 8 m, 높이 7.4 m이며, 저장탱크에서 액상의 벤젠을 약 325 ton 취급하는 것으로 가상 시나리오 조건을 설정하였다. 설비의 용량 및 운전조건 등은 2015년 울산 남구에 위치한 사업장 중에서 실제로 취급되는 벤젠 저장탱크 취급량을 활용하였다. 운전조건은 상온, 상압이며 결속 배관 중 최대 직경은 76 mm이다. 취급시설의 공정배관계장도 및 시나리오 구간은 Figure 2와 같다. 사고 발생 빈도는 배관누출, 배관 파열, 상압탱크 파열, 플랜지 또는 밸브 누출, 외부화재와 같은 개시사건을 선정하고, 위험도 분석 기법 중 하나인 LOPA방법(CCPS 2001)을 일부 활용하여 사고 발생 빈도값을 도출하였다.

### III. 연구결과

#### 1. 국외 환경피해 평가방법론 비교 분석 결과

국의 환경피해 평가방법론을 비교 분석하여 현재 장외영향평가 제도에 적용하기에 적합한 방법론을 제안하였으며 제안한 방법론과 산정식을 활용하여 시범적으로 가상의 시나리오에 대해 위험도를 분석하여 보았다.

스웨덴, 스페인, 영국, 체코의 사전 환경피해 평가 방법론은 화학물질이 누출되었을 때 환경수용체에 미치는 영향을 화학물질의 독성 및 물리화학적 특성과 누출량, 사고 발생 빈도 등을 토대로 파악한다. 스웨덴의 환경피해 평가방법론의 경우, 육상수계, 지하수 등과 같은 수질 분야만 고려하므로 다양한 환경유형을 고려하기 한계가 있는 것으로 판단하였다(Akademisk A 2004). 스페인의 환경피해 평가방법론은 누출원 주변 취약수용체 분류체계 중 보호식지, 자연보호구역 등을 국내에 그대로 적용하기에는 어렵다고 판단하였다. 영국의 환경피해 평가방법론을 적용하기 위해서는 유해화학물질별 환경수용체별로 유해물질에 노출되었을 때 그 유해지속성 등급 정보와 사고의 심각성 등급이 필요하나, 이러한 정보를 적용하기에는 국내 정보가 부족하다(AMEC 2014). 체코에서 적용되고 있는 평가방법론은 실제 환경 관련 인허가를 위해 활용되고 있으며, 국내에 사용되는 인자들이 적용하기에 적합하다고 판단하였다(Choi 2018). 체코의 화학사고로 인한 환경피해 영향 평가 방법은 화학물질의 독성 및 물리화학적 특성을 활용한 산정식을 통해 수치화하였고, 이 수치와 물질의 누출량을 고려하여 화학사고 영향의 심각성을 결정한다(Vojkovska D 2002). 고려된 방법의 비교분석 결과, 체코의 분석방법이 국내 적용에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

그러나 체코의 화학사고 환경피해 영향평가 방법을 국내 화학사고 예방제도에 활용하기 위해 검토한 결과, 두 가지 한계점이 도출되었다. 첫째, 체코에서 활용하는 사고물질의 독성 위험 지수를 결정하기 위해서 각 물질별 물리화학적 특성 및 독성에 대한 정보로 적용이 가능하지만, 환경취약성 지수를 결정하기

Table 2. Data required for environmental risk assessment in the Czech Republic, application data and sources proposed in this paper

Division	Required information		Application	Vulnerability index	Source
Common	Toxicity, Physical and chemical properties		KORA program	-	DIPPR (Design Institute for Physical Properties)
Biological environment	Information about the environment		Ecological landscape protection area	5	EGIS (Environmental Geographic Information Service)
			Forest	4	
			Park	3	
			Agricultural area	2	
			Abandoned farmland	1	
Soil environment	Soil type		Andisols	5	SIS (Soil environment Information System)
			Inceptisols	4	
			Alfisols	4	
			Ultisols	3	
			Histosols	3	
			Entisols	2	
			Mollisols	2	
Surface water	Water environment	Surface water types	Groundwater Conservation Area	5	EGIS (Environmental Geographic Information Service)
Underground water		Geological environment			
		Soil surface type	Non-groundwater Conservation Area	1	
		Groundwater supply type			
		Water protection degree			

위해 고려되는 요인인 지질학적 평가기준이나 토양특성 평가기준 등은 국내에서 활용되지 않기 때문에 그대로 적용하기는 어렵다. 둘째, 화학사고로 인한 화학물질 누출량은 사고의 영향범위를 결정하는 중요한 요인으로, 누출량의 정확한 산정은 매우 중요하다. 그러나, 체코의 화학사고 환경피해 영향평가 방법에서는 화학사고의 영향범위에서 중요한 요소인 누출량 산정방법이 명확히 제시되어 있지 않다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 보완하여 국내 실정에 맞는 방법을 제안하기 위해, 환경부 화학물질안전원의 KORA프로그램(ver3.0.6)을 활용하였다. KORA프로그램에서는 해당 취급시설의 취급량, 운전조건, 물질의 물리화학적 특성을 반영하여 화학사고로 인한 주변지역 영향범위를 산정하는 것이 가능

하다. 또한 화학사고로 인한 주변지역 영향범위 산정 시 환경수용체별로 각각의 무영향농도값을 적용함으로써 각 환경수용체별 영향범위를 산정할 수 있고, 그 영향범위 내 노출되는 유형을 분류할 수 있다. Table 2는 체코의 환경피해방법론에서 요구하는 자료와 본 연구에서 제안한 식에 적용한 자료 및 취약성 정도를 요약한 표이다.

각 환경수용체별 영향범위 내 노출되는 유형의 취약한 정도를 수치화하였다. 환경 취약성 지수는 체코의 분류체계를 그대로 적용하기에는 어려워 국내 연구진에 의해 수행된 선행연구 결과에서 제안한 국내 주변 환경정보, 수질 유형 및 토양 유형을 고려한 환경취약성 지수 안을 활용하였다(Seo et al. 2017).

## 2. 환경취약성 지수

현재 장외영향평가서에서 위험도 분석시 사용되는 산정식(1)에는 영향범위 내 인구 수만 고려되고 있으나 금번 연구에서 제시한 산정식(2)에는 환경수용체를 고려하고 있다. 다만, 위험도 분석 시 영향(Consequence)과 빈도(Frequency)의 곱으로 이루어지는 틀을 그대로 활용하기 위해 인구 수 대신 환경영향 지수라는 개념을 적용했다. 여기서 환경영향 지수는 각 환경수용체별 취약성 지수의 합을 의미한다(식3).

$$\text{Convention risk} = \text{Population within the area of accident effect} \times \text{Frequency of accident} \quad (1)$$

$$\text{Suggestion risk} = \text{Index of environmental consequences} \times \text{Frequency of accident} \quad (2)$$

$$\text{Index of environmental consequences} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

$V_i$ : Vulnerability index for each environmental media  
environmental media: biological, soil, water

환경 위해성평가는 유해성 평가, 용량-반응 평가, 노출평가, 위해도 결정 과정으로 이루어져 있다. 그 중 시험생물을 대상으로 하여 수행한 유해성평가와 용량-반응평가를 통해 해당 생물에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되는 무영향농도(NOEC)를 도출하게 된다. 사고 시나리오 영향범위를 산정하기 위해서는 끝점기준값이 필요하다. 본 연구에서는 가상의 벤젠 탱크로리 사고의 경우 토양, 생태, 물의 피해 영향 정도의 심각성과 대기확산에 의한 피해영향의 심각성 중 대기확산에 의한 피해영향이 단기적으로 클 것으로 판단하였다. 특히, 그러나 대기확산에 의한 피해영향은 단기적으로 환경보다는 사람에게 더욱 직접적으로 영향을 미칠 것으로 추측된다. 그러므로 본 연구에서는 화학사고로 인한 영향범위 내 사람에게 영향을 미치는 농도를 고려할 때, 화학사고로 인한 대기 중 화학물질의 농도와 사람의 인지반응 정도 및 건강 영향 정도를 판단하는 ERPG-2 값을 사용하였다. 동일한 분석방법을 통해, 화학사고로 인한 수생태계,

토양생태계, 생물생태계의 영향은 ERPG-2값 대신 사고 NOEC값을 사용하여 영향범위를 산정하였다. 화학사고 발생 시 사람에게 영향을 미칠 수 있는 정도를 평가하기 위한 끝점기준값인 ERPG-2값 대신 사고발생으로 인해 환경에 영향을 미치는 정도를 평가하기 위한 기준값으로 NOEC값을 적용하였다. 먼저, NOEC값을 각 환경 매체별 끝점기준값으로 활용하여 시나리오를 구동하였다. 벤젠의 물 환경 독성 어류(담수 무척추동물) 끝점기준값 0.8 ppm를 적용하였고(NITE, 2017), 벤젠의 토양환경 독성 어류 끝점기준값 0.48 ppm을 KORA에 적용하였다(Anthony et al, 1987). 벤젠의 생물 독성 끝점기준값은 0.032 ppm을 적용하였다(Federal Register, 1987). 본 연구에서는 각 환경매체별 벤젠 물질에 대한 대표종의 NOEC값을 도출자료에 한계로 인해 검토가 가능한 다른 생물의 끝점기준값을 적용하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 보다 정확한 환경영향을 평가하기 위해서는 화학사고로 인한 화학물질의 환경영향을 평가할 수 있는 끝점기준 연구가 필요하다.

환경수용체를 3가지 유형으로 하여 사고영향범위 내 노출되는 환경수용체를 최대한 반영하도록 제안하였다. 또한, 각각의 요인이 독립적으로 반영될 수 있도록 합으로 제안하였으나, 제안한 세 개의 취약성 지수 이외의 추가적인 요인을 반영해 볼 수 있으며, 본 연구에서는 우선적으로 필요하다고 판단되는 요인들을 적용하였다. 이외 추가적인 요인은 지속적인 연구 등을 통해 추가될 필요가 있다.

## 3. 가상시나리오 사례분석

시나리오 1은 기존의 장외영향평가 위험도 산정식을 활용하여 위험도를 도출한 것으로 벤젠의 ERPG-2값인 800 ppm을 적용하여 화학사고로 인한 주변지역의 영향범위를 도출하였다. 화학사고 시나리오 영향범위를 산정하기 위해 환경부 화학물질안전원의 '사고영향범위 산정에 관한 기술지침'에 따라 독성 물질의 끝점기준값으로 ERPG-2값을 적용하였다. ERPG-2란, 거의 모든 사람이 1시간 동안 노출되어도 비가역적이거나 기타 심각한 건강장해 또는 정상적인 대피가 이루어지지 못하게 할 정도의 증상을 유발하지



않을 정도의 공기 중 최대 농도이다(AIHA 2014).

KORA에서는 최악의 조건과 대안의 조건으로 구분하여 시나리오를 구동하도록 되어있다. 최악의 조건은 현실에서 발생할 수 있는 가능성은 낮으나, 화학사고가 발생하였을 경우 주변지역에 매우 심각한 영향을 줄 수 있는 시나리오를 말하며, 10분간 유해 화학물질이 전량 누출되는 시나리오이며, 대안의 시나리오는 현실에서 발생 가능성이 높은 사고 시나리오로서, 취급시설의 실제 누출 가능한 시간, 실제 기상조건 등을 적용하여 시나리오를 구동하고 영향범위를 산정한다(NICS 2014).

본 연구에서는 대안의 시나리오 결과를 이용하였다. 시나리오1의 영향범위 분석결과, 사업장 부지경계를 기준으로 장외로 약 67 m의 사고영향범위가 도출되었다. 해당 시나리오 기반 사고영향범위 내 영향을 받는 인구 수는 없었으나, 위험도 산정 시 인구 수를 '0' 명으로 할 경우, 위험도가 0이 되므로, 주변지역 인구 수를 1명으로 가정하였다. 사업장 밖의 사람이나 환경을 보호하기 위한 목적으로 시행된 장외영향평가 제도의 취지를 고려하였을 때, 해당 시나리오 1은 화학사고가 발생하였을 경우, 사업장 밖으로 영향을 미칠 수 있으나, 사고영향범위 내 인근 주민이나 인근 사업장 근로자 등에게 유해한 영향을 미칠 가능성은 높지 않다고 판단된다(Figure 3).

시나리오 2는 시나리오 1과 동일한 가상시나리오를 바탕으로 화학사고 발생으로 인해 주변지역의 세 가지 유형의 환경수용체를 고려한 위험도 분석이다. 앞서 제안한 산정식에서 각 생물, 물, 토양과 같은 환경수용체별 취약성 지수를 도출하기 위해 매체별 무영향농도값을 독성 끝점기준값으로 적용하여 화학사고 영향범위를 산정하였다. 제안한 산정식에서 '환경영향지수'는 각 매체별 취약성 지수의 합을 의미한다. 각 매체별 취약성 지수 값은 체코 바탕으로 국내 실정에 맞도록 제안한 선행연구의 지수안을 활용하였다. 각 유형별 취약성 정도에 따라 최소 1점에서 최대 5점을 적용하였다. 각 매체별 취약성 지수 산출은 각 매체별 피해영향범위 내 누출된 유형 중 취약 정도가 높은 유형의 점수로 결정하였다.

먼저, NOEC값을 각 환경 매체별 끝점기준값으로

활용하여 시나리오를 구동하였다. 벤젠의 물 환경 독성 어류(담수 무척추동물) 끝점기준값 0.8 ppm를 적용하였고(NITE 2017), 벤젠의 토양환경 독성 어류 끝점기준값 0.48 ppm을 KORA에 적용하였다(Anthony et al. 1987). 벤젠의 생물 독성 끝점기준값 0.032 ppm을 적용하였다(Federal Register 1987). 본 연구에서는 각 환경매체별 벤젠 물질에 대한 대표종의 NOEC값을 도출자료에 한계로 인해 검토가 가능한 다른 생물의 끝점기준값을 적용하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 보다 정확한 환경영향을 평가하기 위해서는 화학사고로 인한 화학물질의 환경영향을 평가할 수 있는 끝점기준값 연구가 필요하다.

물 환경에 영향을 미치는 기준값을 적용하여 시나리오를 구동한 결과, 벤젠누출사고에 의한 영향범위 거리는 2,310 m가 도출되었다. 물 환경의 경우, 환경취약성으로 고려되는 유형은 지하수보전구인지 아닌지에 대한 구분으로(Seo et al. 2017), 시나리오 내 사고영향범위를 확인한 결과 지하수보전구역이 포함되지 않았으므로 취약성 점수는 1점을 도출하였다.

벤젠의 토양환경에 영향을 미칠 경우의 기준값을 적용한 가상의 화학사고 영향범위를 도출한 결과, 1,583 m의 장외거리가 도출되었다. 토양 환경은 안디솔, 인셉티솔, 알피솔, 울티솔, 히스토솔, 엔티솔, 몰리솔 7가지의 유형에 따라 환경취약성을 고려한다(NIAS 2002). 가상시나리오 내 토양의 취약성 지수를 확인한 결과, 인셉티솔을 적용할 수 있음을 확인하였으며, 선행 연구에서 제안한 기준을 적용하여 4점을 도출하였다.

벤젠의 생물환경에 영향을 미칠 경우의 기준값을 적용한 가상의 화학사고 주변지역의 영향범위는 약 10,000 m가 도출되었다. 해당 영향범위 값의 의미는 가상 시나리오 1과 같은 사고가 발생하였을 경우, 사고지점으로부터 약 10,000 m, 즉, 울산광역시 전체의 생물환경에 영향을 미칠 가능성이 있음을 의미한다. 벤젠의 누출사고로 인한 생물환경 영향범위의 의미는 10,000 m 이상으로 추정되지만 정확한 값을 도출할 수 없다. 그러므로 벤젠 누출사고로 인한 영향범위는 매우 넓고 방대한 것으로만 해석할 수 있다. 생물환경 취약 유형은 생태경관보호지역, 숲이나 목

축, 공원, 농업지역, 버려진 농지로 다섯 가지이다 (Table 2). 시나리오2의 영향범위 내 우선적으로 관리가 필요하거나 화학사고로 인한 영향범위 내 존재하면 생물환경 유무를 확인한 결과, 취약성 점수가 5점으로 가장 높은 생태경관보호지역은 존재하지 않았고 숲, 목축, 농업지역 등이 골고루 분포되어 있었다. 생물환경의 경우, 그 중 취약성 지수가 높은 숲이나 목축이 존재하므로 해당 영향범위의 지수 값은

4점으로 도출하였다. 시나리오 2의 경우, 각 환경수용체 별 도출된 환경취약성 지수의 합으로 환경영향 지수를 산출해야 하므로, 생물환경, 물환경, 토양환경의 취약성 지수를 모두 더한 결과, 환경취약성 지수는 9점으로 도출되었다. 시나리오 1과 시나리오 2의 영향범위 및 영향범위 내 노출 유형은 Figure 3과 같다. 각 시나리오별 영향범위 내 노출매체 유형별 지수는 Table 3과 같다.

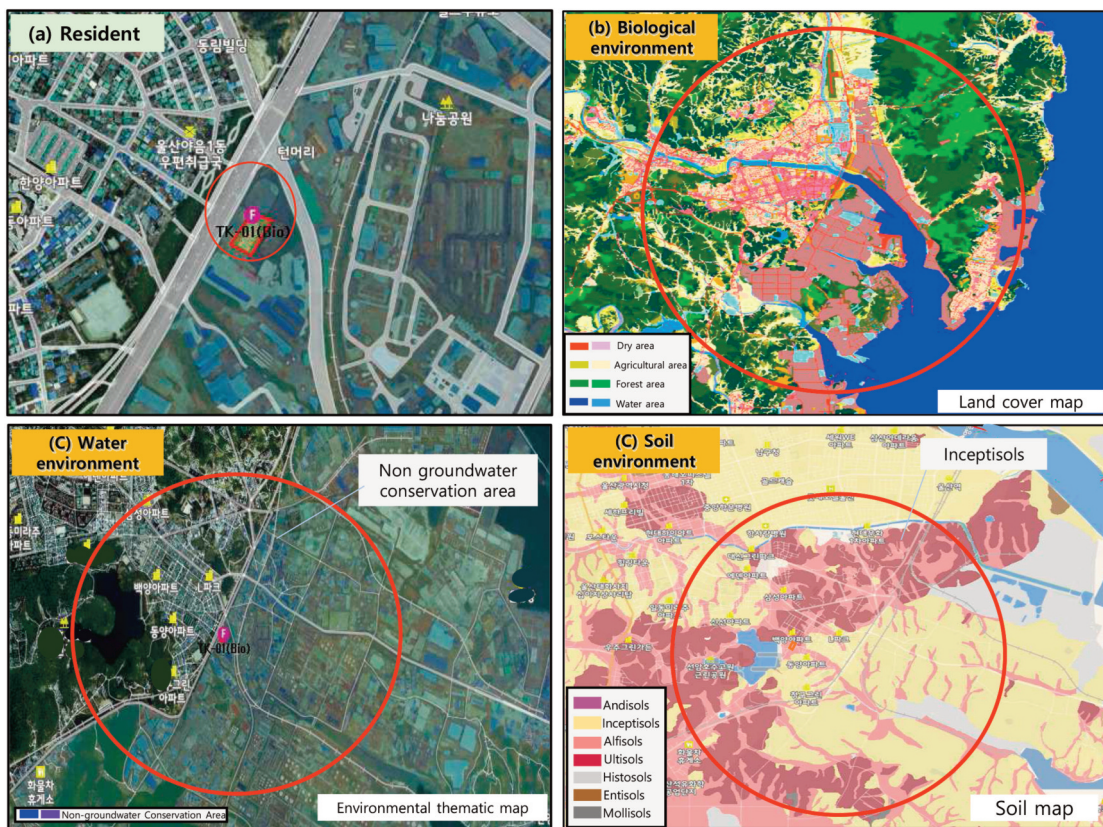


Figure 3. Effect area based on the chemical accident scenario, considering receptors (a) resident, (b) biological environment, (c) water environment, and (d) soil environment.

Table 3. Incident effect value according to the effect area and exposure receptor by scenario

Division	Off-site distance [m]	Vulnerability index	Exposure receptors	Accident consequence	
Scenario 1	66.9	1	Residents	1	
Scenario2	Biological	9997.4	4	Forest, farming	9
	Water	2309.6	1	Non-groundwater conservation area	
	Soil	1583.2	4	Inceptisols	

가상의 시나리오 1과 2의 조건을 이용하여 사고영향범위를 산정하고, 영향범위 내 인구 수와 환경 취약성 지수를 도출하였다. 인구 수와 환경취약성 지수를 사고 시나리오 구간에서 계산된 사고발생빈도 값(0.01701)과의 곱으로 각각의 위험도를 계산하였다. 그 결과, 화학사고로 인한 주변지역 영향범위 내 인구 수만을 반영하여 산정한 화학사고 위험도 분석 값은 인구 수가 1이므로 0.01701이 도출되었다. 해당 시나리오(시나리오 1)는 벤젠 누출사고로 인해 사람에게 미치는 영향을 기존의 장외영향평가 방식으로 위험도 분석하였다. 해당 시나리오는 벤젠의 ERPG-2 값(800ppm)을 적용하여 영향범위를 도출하였으며, 벤젠에 의한 피해 영향범위 분석 결과, 사업장 경계선 밖(장외거리)으로 약 67m가 산출하였다. 통계청에서 운영하는 통계지리정보 서비스로 해당 영향범위 내 인구는 0명으로 산출하였다. 인구 수가 0명이라는 의미는 영향범위 내 거주하는 주민이 없음을 의미한다. 다만, 현재 장외영향평가 위험도 산정식은 사고 발생빈도값에 사고영향범위 내 인구 수의 곱이기 때문에 인구 수를 0명으로 할 경우, 위험도의 의미가 불분명해지므로, 인구 수를 1로 대입하여 계산하였다. 화학사고의 영향범위 내 세 가지 환경수용체를 고려하여 위험도 분석 값은 도출한 결과 0.15309가 도출되었다. Table 3은 각 시나리오별 장외 거리와 위험도 산정을 위해 고려된 인자 값이다. 도출된 위험도 값만 단순 비교하여 단순히 시나리오 2가 시나리오 1에 비해 9배 더 위험하다고 해석할 수 없다. 즉, 화학사고로 인한 영향범위 내 인구 수와 환경수용체의 영향이 함께 존재하는 것이므로 화학사고로 인한 영향범위 내 인구 수를 고려한 위험도와 환경수용체를 고려한 위험도를 직접 비교하는 오류를 범해서는 안 된다. 또한 두 위험도는 끝점기준값이 상이하므로 단순히 더 위험하거나 덜 위험하다고 판단할 수 없으며 보호하고자 하는 대상의 종류, 범위 및 관리수준 등에 따라 판단되어야 할 것이다.

본 연구결과의 해석에서 중요한 점은 기존의 위험도 분석에 환경수용체를 함께 고려한다는 것이다. 즉, 제시된 가상의 시나리오1에서 기존의 위험도 산정식을 활용하였을 경우, 그 피해영향범위 내 인구가 적

은 편이기 때문에 해당 시설이 화학사고에 따른 위험성이 높다고 판단하기 어렵다. 그러나 시나리오 2에서 환경수용체를 고려한 위험도 산정결과를 통해, 해당 취급시설에서의 화학사고 발생은 주변 지역의 생물환경과 물환경 등에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 해당 시설의 화학사고 영향확산을 예방하기 위한 안전성 확보 방안과 관리수단 등이 필요하다고 할 수 있다. 이와 같이 현재 장외영향평가에서 고려되지 않는 환경수용체를 고려한 취급시설의 위험도는 주변 환경에 영향을 미칠 수 있는 사고예방을 위해 우선관리하여야 하는 사업장을 선정하거나 해당 사업장에서 화학사고로 인한 주변지역 영향을 저감하기 위해 확보해야 하는 안전성 확보방안의 필요성을 도출하는 의미를 가질 수 있다.

#### IV. 결과 및 고찰

우리나라는 유럽에 비해 국가면적이 좁고 산지 등이 분포되어 있어 화학사고 발생 시 그 영향범위 내 피해 유형이 복합적이다. 2015년 사람과 환경 등을 화학물질로부터 보호하기 위해 장외영향평가가 시행되었고, 현재 장외영향평가 위험도 산정을 통해 피해 범위 및 피해유형을 고려한 위험도를 계산하고 있다. 다만, 화학사고 위험도를 계산하기 위한 산정식이 '사고영향범위 내 주민 수'에 '취급시설 사고 발생 빈도'만을 고려하고 있으므로 영향범위 내 환경수용체를 고려할 필요성이 제기되었다. 본 연구에서는 선행연구된 화학사고 환경피해 평가방법론을 비교 분석하여 국내에 적용 가능한 방법론을 도출하고, 도출된 방법론의 국내 적용 시 한계점을 개선할 수 있는 방안 및 환경수용체를 고려한 위험도 산정식을 제안하였다. 또한, 가상의 시나리오를 바탕으로 기존의 장외영향평가 위험도 분석방법과 제안한 환경취약성 지수를 활용한 위험도 분석을 비교 분석하여 환경수용체를 반영한 위험도 분석의 필요성을 확인하였다. 다만, 수식에 대한 기준, 부여한 지수 및 취약성 유형의 타당성, 대기확산 원리로 평가되는 프로그램 등의 한계점이 있어 지속적인 연구가 필요하다. 이 연구에서 제안한 환경수용체를 고려한 위험도 산정 방법론을 통

해 환경과 사람을 복합적으로 고려하여 화학사고 발생 시 그 피해범위에 노출될 수 있는 수용체를 정확하게 분석함으로써 우리나라 화학사고 예방제도를 개선하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- AIHA. 2014. American Industrial Hygiene Association.
- Akademisk A. 2004. Development of an Environmental-accident Index : A Planning Tool to Protect the Environment in Case of a Chemical Accident.
- AMEC. 2014. Final Report Annex 3 : Methods for Assessing Environmental Consequences (task 3).
- Anthony R, Carlson and Patricia A. 1987. Toxicity of Chlorinated Benzene to Fathead Minnows (*Pimephales promelas*). Archives of Environmental Contamination and Toxicology 16: 129-135.
- CCPS. 2001. Center for Chemical Process Safety, Layer of Protection Analysis, New York, 1-258.
- Chemical Safety Clearing-house, [Internet]. Available from : <https://csc.me.go.kr/statis>
- Chemical Control Act Article 2, Korea.
- Chemical Control Act Article 23, Korea.
- Choi WS, Back JB. 2018. Risk Analysis of Off-site Risk Assessment Using Vulnerability by Environmental Medium, Journal of the Korean Society of Safety 33(5): 150-156. [Korean Literature]
- ECOTOX. [cited 2019 Feb 26]. Available from : <https://cfpub.epa.gov > ecotox>
- Federal Register. 1987. Rules and Regulations, 52(176), The United States.
- Fiserova L, Kellner J, Blaha M. 2012. Evaluation of the Influence of Hydrazine Hydrate 24 on the Environment : Advance in environmental science and sustainability, 50-53 ISBN: 978-1-61804-120-3 / Energy, Environmental and Structural Engineering Series | 5.
- HSDB. [cited 2019 Feb 26]. Available from : <https://toxnet.nlm.nih.gov > newtoxnet > hsdb>
- High-pressure Gas Safety Control Act. Article 13 of 2.
- IARC. 2018. International Agency for Research on Cancer. [cited 2019 Feb 26]. Available from : <https://www.iarc.fr/>
- Ministry of Environment Report. 2015. Detailed Report on the Environmental Technology Development Project for Chemical Accident Response Final Report. Korea.
- Ministry of Environment Report. 2017. Joint Inspection of the Municipal and Provincial Office of Hazardous Chemicals Handling Business, Executive Action of 71 Operations Sites. Korea.
- Korea Meteorological Agency [cited 2019 Feb 26]. Available from : <http://www.kma.go.kr/>
- National Institute Chemical Safety. 2014. Technical Guidelines for Selecting Accident Scenarios. Korea.
- National Institute Chemical Safety. 2014. Safety Distance Notice on the Exterior Walls of Hazardous Chemicals Handling Facilities. Korea.
- National Institute of Agricultural Sciences. 2002. Systematic Classification of Soil in Korea.
- National Institute of Technology and Evaluation [cited 2019 Mar 2]. Available from: [https://www.nite.go.jp/en/chem/risk/initial\\_risk.html](https://www.nite.go.jp/en/chem/risk/initial_risk.html)
- Occupational Safety and Health act. Article 49 of 2.

- Open platform [cited 2019 Feb 26]. Available from: [map.vworld.kr/map/maps.do](http://map.vworld.kr/map/maps.do)
- Park JG, SUH YW et al. 2016. Improvement Measures for Chemical Accident Policies in the Chemicals Control Act and Measures to Support Industry (I), Korea.
- NICS. 2014. Regulations on the Preparation of Off-site Risk Assessment. Korea.
- Ryu SI, KIM YH. 2016. Improvement Plan of Chemical Accident Prevention System in Korea, Journal of the Korean Association for Public Administration 1817-1826. [Korean Literature]
- Sikorova K, Bernatik A, Lunghi E, Fabiano B. 2017. Lessons learned from Environmental Risk Assessment within the Framework of Seveso Directive in Czech Republic and Italy, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 49: 47-60.
- Seo YW, Park JG et al. 2017. Improvement Measures for Chemical Accident Policies in the Chemicals Control Act and Measures to Support Industry (II), Korea.
- VWORLD Website. 2014. Available from : <http://map.vworld.kr/map/maps.do>
- Vojkovska D. 2002. Methodics for Analysis Impacts of Accidents with Participation Hazardous Substance in Environment, H&V Index.