Research Paper

Development of Methodology for Vulnerability Assessment of Chemical Accident in Terrestrial Ecosystem: (1) Focusing on the Trees

Yooeun Chae^{id} · Rongxue Cui^{id} · Jieun Lee^{id} · Lia Kim^{id} · Youn-Joo An^{†id}

Department of Environmental Health Science, Konkuk University

(Received March 3, 2020; Revised April 10, 2020; Accepted April 27, 2020)

Objective : With rapid industrial development, human and the environment are frequently exposed to various chemicals. In particular, there is a possibility that terrestrial ecosystems as well as humans are exposed to a large amount of highly toxic chemicals due to accidents occurring frequently in Korea and abroad. If a large amount of chemicals enter the terrestrial ecosystem due to an accident such as a chemical leakage, the terrestrial ecosystem around the accident site may be affected and these chemicals may impair not only a living organisms, but also the function of terrestrial environment, the habitat of the organisms. The aim of this study is to develop methodology for vulnerability assessment of chemical accident in terrestrial ecosystem.

Method : First, we selected 41 forest tree species and 41 shrubs among woody plants according to the domestic distribution and establish various vulnerability indicators that can be evaluated according to the exposure and recovery categories.

Results and Discussion : As a result of vulnerability scoring for 41 forest tree species and 41 shrubs, most vulnerable species were *Daphniphyllum macropodum*, *Lindera obtusiloba*, *Juniperus rigida*, *Diospyros lotus*, and *Eucommia ulmoides* in forest trees and *Zanthoxylum piperitum*, *Cephalotaxus koreana*, *Forsythia koreana*, *Cycas revoluta*, and *Lespedeza maximowiczii* in shrubs.

Conclusions : This study quantified the vulnerability of trees to chemical accidents by adding them and assigning them according to their characteristics. We expect that the risk of chemicals caused by chemical accidents occurring in these days and the exposure of chemicals to the environment can be assessed in terms of ecological perspective using the assessment of vulnerability of terrestrial ecosystems proposed in this study.

Key Words : Vulnerability, Terrestrial Ecosystem, Soil, Chemical Accident, Plant

[†] Corresponding author E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr Tel: 02-2049-6090 Fax: 02-2201-3211

연구논문

화학사고 대비 육상생태 취약성 평가기법 개발 연구: (1) 목본류를 중심으로

채유은¹ · 최영설² · 이지은³ · 김리아⁴ · 안윤주^{5*}

건국대학교 환경보건과학과

목적: 급속한 산업 발전에 따라, 사람과 환경이 다양한 화학물질에 빈번하게 노출되고 있다. 특히 국내외에서 빈번하게 발생하는 화학물질에 의한 사고로 인하여 인체뿐 아니라 육상 생태계 또한 다량의 고독성 화학물질에 노출될 가능성이 존재한다. 화학물질 누출 등의 사고로 인하여 육상 생태계에 다량의 화학물질이 유입될 경우, 사고 현장 주변의 육상 생태계는 서식 생물종뿐 아니라 생물의 생활 기반인 토양의 서식지로서의 기능이 훼손될 수 있다. 본 연구에서는 화학물질 누출 사고로 인하여 다량의 화학물질이 육상 생태계로 유입 시, 주변 육상 환경에 서식 중인 목본류 식물이 화학사고에 얼마나 취약한지를 평가할 수 있는 취약성 평가 기법을 개발하는 것을 목표로 하였다.

연구방법: 목본류 식물 중 국내 분포에 따라 선정된 41종의 교목과 41종의 관목에 대하여 노출(exposure) 및 회복(recovery) 범주에 따라 이를 평가할 수 있는 다양한 취약성 인자(vulnerability indicator)를 설정하고, 각 수목의 특성에 따라 인자별로 배점화를 수행하여 이를 합산, 수목의 화학사고에 대한 취약성을 정량화하였다.

결과 및 토의: 교목 41종과 관목 41종에 대한 취약성 인자 설정 및 배점화 결과, 교목의 경우 굴거리나무, 생강나무, 노간주나무, 고욤나무 및 두충이 최상위 취약종으로 확인되었으며, 관목의 경우에는 초피나무, 개비자나무, 개나리, 소철 및 조록싸리가 최상위 취약종으로 확인되었다.

결론: 현대 사회에서 빈번하게 발생하는 화학사고 및 이로 인한 환경 중으로의 화학물질의 노출로 인한 화학물질의 위험성을 본 연구에서 제안하는 육상 생태계 취약성 평가를 활용하여 생태계적 관점에서 평가할 수 있을 것이다.

주제어: 취약성, 육상 생태계, 토양, 화학사고, 식물

1. 서론

육상 생태계(terrestrial ecosystem)는 토양을 기반으로 서식하는 생물군(biotic)과 유기체와 영향을 주고받는 토양무생물(abiotic) 환경의 총칭이며,¹⁾ 사람 또한 토양을 기반으로 생활하거나 육상 생태계의 산물을 이용하여 삶을 영위하게 된다. 토양은 다양한 생물들의 성장 및 작물의 재배에 직접적으로 관여하고 있으며, 환경 내 완충장치의 역할을 수행한다.²⁾ 토양환경이 화학물질에 오염되거나 화학사고로 인하여 그 기능을 상실할 경우, 오염 또는 사고 현장 주변의 식생뿐 아니라 토양을 기반으로 한 생물체들의 생존이 불가능하게 될 가능성이 높다.³⁾

국외뿐 아니라 국내에서도 최근 몇 년간 여러 건의 대형 또는 중소형 화학사고가 발생해왔으며⁴⁻⁹⁾, 이는 2015년 화

학물질관리법의 개정을 촉발하였고^{6,10,11)} 현재 화학물질관리법에서 97개의 사고대비물질을 선정하여 관리하고 있다. 그러나 국가적 차원의 노력에도 불구하고 화학물질이 누출, 폭발 및 화재로 연결되는 등의 사건 사고가 끊임없이 발생함에 따라, 이로 인한 사전 예방 차원의 생태계 보호 방안이 시급하게 요구되고 있다.

이러한 현실과 토양 및 육상 생태계의 중요성을 고려하였을 때, 화학사고가 발생하기 전에 특별히 비교적 화학물질 및 사고에 취약하다고 판단되는 지역을 우선적으로 선별하여 관리를 강화하고 이에 대한 예방책을 수립할 필요성이 존재한다. 일반적으로 취약성(vulnerability)이란 어떠한 주체가 외부의 변화를 견디거나 이로 인해 발생하는 문제를 경감 또는 해결할 수 있는지를 평가하는 인자로서, 이를 평가하는 것을 취약성 평가(vulnerability assessment)라 한다.

환경 분야에서의 취약성 평가는 지진, 기후변화 등과 같은 자연재해 문제들에 대하여 국내외에서 집중적으로 연구되기 시작하였다. 국내에서는 다양한 자연재해, 환경오염 등에 대한 취약성 평가를 수행한 사례들이 여러 건 보고된 바 있으며 이 중 대부분의 연구는 기후 변화로 인한 농업 생산 및 농경지 취약성 평가¹²⁻¹⁵⁾, 인체 건강 및 보건 취약성 평가^{16,17)}와 지하수 오염에 대한 취약성 평가¹⁸⁻²⁰⁾인 것으로 확인되었다. 그 외에도 산사태^{21,22)}, 침수^{23,24)}, 태풍²⁵⁾, 홍수²⁶⁾ 등에 대한 취약성 평가가 수행된 바 있다. 국외에서는 화학사고 등에 의한 특정 지역에 대한 취약성을 평가하는 연구가 일부 수행되어왔으나, 이는 대부분 화학물질을 취급하는 시설이나 플랜트, 산업 단지 등이 존재하는 지역에 대하여 GIS를 기반으로 한 지역적 취약성을 평가한 연구들이며²⁷⁻³¹⁾ 국내 외적으로 빈번히 발생하는 화학사고 및 화학물질 누출 등에 대한 취약성 평가는 현재까지 수행된 바가 없는 것으로 확인되었다.

기서진 등³²⁾의 연구에서는 국내외 토양 취약성 평가 연구에 대한 동향을 분석하였는데, 토양 취약성의 개념이 국가 및 연구별로 상이하다는 점을 지적하면서 다수의 연구에서 토양 취약성과 지하수 취약성이 혼용되어 사용되고 있다고 설명하였다. 대부분의 토양 취약성 평가방법들은 토양 오염에 대한 가능성을 간단한 지표로 판별하는 방법을 이용하거나 자연현상들을 단순화하여 이론적으로 사용하는 방법, 모니터링 및 환경 정보를 이용하는 모델을 구축하는 방법 등을 사용한다고 설명하였다. 대부분의 국지적 육상 및 토양 환경에 대한 취약성 평가를 수행한 사례에서는 지리 정보 체계(Geographic Information System, GIS) 등과 같은 기법을 이용한 연구들이 대다수이며 미국의 경우, 미국 농림청 자연자원보전국에서 개발한 WIN-PST, 미국 환경청에서 개발한 모델인 SCI-GROW, 하와이 주에서 개발된 CLERS 등의 모델을 토양 및 지하수 취약성을 평가하는데 사용하고 있으며, 유럽의 경우에는 침출 결과를 예측하는 PRZM-3, PELMO, PEARL, MACRO 등의 세부 진단모델들을 사용하도록 권고하고 있다. 그러나 실제 육상 생태계를 보호하고 생태계 내에 서식하는 생물종의 민감도 및 특성을 반영하여 지역적 취약성을 평가한 사례는 존재하지 않는다. 즉, 환경 중에 서식하는 생물 및 생태계의 취약성에 관한 연구는 거의 수행되지 않은 것으로 확인되었다.

본 연구는 화학사고에 대응하기 위한 피해산정 기술을 마련하고 화학물질 안전에 대한 국가적 차원의 대응책을 수립하며 화학사고로 인한 환경피해를 정확하게 진단, 환경적 손실을 줄이기 위한 국가사업인 「화학사고 대응 환경기술 개발사업」 내 「화학사고 후 생태계오염 모니터링 및 생태영향 통합평가 기술 개발」 연구 과제의 일환으로 수행되었다.³³⁾ 따라서 본 논문에서는 토양 및 육상 환경으로 화학사고로 인한 화학물질 누출 등이 발생하였을 경우를 대비하여

사고물질에 특별히 취약한 지역을 선정하기 위해 서식 생물종들의 생활사 등의 특성을 반영, 생태 서식종을 중심으로 한 육상 생태계 보호 목적의 취약성 평가를 수행할 수 있는 기법 제안을 목표로 하였다. 특히 육상 환경에서 화학사고 발생 시 이로 인한 육상 서식 목본류, 즉 교목과 관목 식물의 취약성을 우선적으로 평가하는 것을 목적으로 하였으며, 이를 위해 사용될 수 있는 범주와 인자들을 각각 선정하고 이를 선정된 중별로 조사하여 배점체계를 통해 정량화하고자 하였다. 본 연구 결과를 통하여 육상 생태계 내 화학사고 등으로 인한 화학물질 누출 발생 시 특정 생물종에 대한 취약성 평가 방법을 제안하고 이를 실제 사고 발생 시 활용할 수 있도록 기법을 확립하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 자료 및 연구방법

2.1. 화학사고 대비물질에 대한 육상 생태계 취약성 평가의 개념

육상 생태계 취약성 평가를 위하여 육상 생태계에 서식하는 생물들의 생활 특성 기반 취약성 평가 기반 작업을 수행하였다. 취약성 평가는 노출(exposure) 및 복원(recovery)의 범주(category)로 구성하여 각 노출 및 복원 범주는 하위 특성(trait)으로 구성하고자 하였는데, 이러한 특성들을 취약성 인자(vulnerability indicator)로 명명, 인자들을 정량적으로 배점하여 최종적으로 육상 생태계 취약성을 정량화하는 것을 목표로 하였다. 취약성 인자들의 경우, 각각의 특성마다 정량적 또는 정성적으로 나타낼 수 있으나 단위가 동일하지 않으므로 인자를 정량화하는 동시에 표준화할 필요성이 있으며, 이를 취약성 인자 점수 산출을 통해 얻을 수 있다. 따라서 각 인자의 배점들을 0에서 1 사이의 점수로 산출하고자 하였다(점수가 0에 가까울수록 덜 취약함을 의미하며 1에 가까울수록 더 취약함을 의미함). 취약성 인자들은 화학물질 및 화학사고 시나리오에 따라 역할과 중요도에 차이가 있으므로 이를 고려하여 인자마다 가중치를 다르게 부여하며 이로부터 점수 및 가중치를 계산 및 통합하는 것이 취약성 평가과정에서 포함되고, 이로 인해 최종적으로 취약성 지수를 산출할 수 있다.

취약성 평가를 위하여 화학물질 및 화학사고 시나리오 영향을 고려하기 전 단계에서 생물의 생활 특성 기반 취약성 평가를 우선적으로 수행한 후, 화학물질 및 화학사고 시나리오의 영향을 순차적으로 반영하여 생물종의 취약성을 평가할 필요성이 있다. 생활 특성 기반 취약성 평가의 경우, 육상 생물종 고유의 취약성을 생태학적 특성 기반으로 조사하는 것으로, 본 기법에서는 먼저 관속식물 중 목본류의 노출 및 복원 특성을 우선적으로 고려하도록 하였다. 이를 위하여 육상 생물종 중 국내에서 서식하는 목본류 식물의 전체 목록을 확보하여 이 중 가용한 특성이 알려진 일부를 취

약성 평가에 활용하고자 하였다. 환경부 산하 국립생물자원관에서 발간한 「국가 생물종 목록」³⁴⁾을 기준으로 관속식물류 4,518종이 확인되었으며 환경부 산하 국립생태원에서 발간한 「전국 자연환경 조사 데이터북— 1. 한국의 식물」³⁵⁾을 기준으로 전국 시도별 생물상 현황에서 최소 227종 최대 1,729종의 식물상이 확인되었다. 따라서 이를 기반으로 목본류 식물을 선별하여 취약성 평가에 활용하고자 하였다.

전국자연환경조사 데이터북에서 제시하고 있는 전국 시·도별 식물 출현 현황에 따라, 3개 식물문(양치식물문, 나자식물문, 현화식물문=피자식물문=속씨식물문) 내 8개 강(석송강, 솔잎난강, 속새강, 고사리강(이상 양치식물문), 소철강(소철강은 제주도에서만 출현하는 특이종(소철목, 소철과, 소철속의 소철 1종)으로, 여기서 제외), 은행나무강(은행나무목, 은행나무과, 은행속의 은행나무 1종), 소나무강(이상 나자식물문), 목련강, 백합강(이상 현화식물문))에 대한 자료 수집 과정을 수행하였다. 3개 식물문 및 8개 강 아래의 74개 목(또는 173개 과)에 대하여 전국의 17개 시·도 분류에 따라 범용성을 위하여 14-16개 이상 지역에서 분포하는 식물을 선별하였고, 생물 다양성을 고려하기 위하여 대상 생물종이 널리 분포하지 않을지라도 다양한 생물종의 취약성을 조사하기 위하여 대상 식물의 목(order)을 기준으로 가장 지역적으로 많이 분포하는 식물을 하나씩 포함하도록(수계 기준의 경우 국내 생물종의 모든 과(family, 科)에 해당하는 생물종을 적어도 하나씩 포함) 하였다. 생물종을 선별한 후, 국가 생물종 목록을 확인하여 자료를 취합하도록 하였다. 이외 각 분류군에 적합한 특성 인자를 적용하기 위하여 교목 및 관목으로 분류군을 설정하였으며, 「새로운 한국식물도감」³⁶⁾, 「국가생물종 지식정보시스템」(<http://www.nature.go.kr/>)³⁷⁾, 「식별이 쉬운 나무 도감」³⁸⁾ 등의 자료를 활용하였다. 최종적으로 교목 41종 및 관목 41종을 대상 식물종을 우선적으로 선정하였다(Table 1).

2.2. 교목류에 대한 육상 생태계 취약성 평가 적용 예시

41종의 교목을 대상으로 취약성 인자를 선정하였으며 노출(exposure)범주의 경우 수고(height), 직경(diameter), 잎의 형태(leaf), 경제적 가치(economic value)의 네 가지 취약성 인자를 선정하였다.³⁶⁻³⁸⁾ 이는 화학사고 발생 시, 수목이 화학물질에 노출되어 피해를 입을 경우 수목의 특성에 따라 피해 정도에 차이가 있을 것으로 예상되는 인자를 선정한 것이며, 「새로운 한국식물도감」³⁶⁾, 「국가생물종 지식정보시스템」(<http://www.nature.go.kr/>)³⁷⁾, 「식별이 쉬운 나무 도감」³⁸⁾에서 가용한 자료를 활용하고자 하였다. 회복(recovery)범주의 경우에는 수목의 성별(sexes), 개화-결실 기간(florescence and fruition), 분포(distribution)의 세 가지 취약성 인자를 선정하였다(Table 2).³⁶⁻³⁸⁾ 이는 화학사고 발생 시, 화학물질에 노출된 수목의 생식 및 후세대 개체의 특성 및 개체 수에

영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되는 인자를 선정한 것이며, 「새로운 한국식물도감」³⁶⁾, 「국가생물종 지식정보시스템」(<http://www.nature.go.kr/>)³⁷⁾, 「식별이 쉬운 나무 도감」³⁸⁾에서 활용 가능한 자료를 활용하고자 하였다. 이에 따라 각 취약성 인자에 대한 자료조사를 수행하였으며, 취약성 인자별로 조사를 수행한 후 각 특성에 적합한 배점체계를 설정하여 점수를 0에서 1 사이로 배점하도록 하였다. 배점구간 설정 시, 확보된 특성 자료들의 최솟값 및 최댓값을 고려하여 데이터가 최대한 정규분포를 따를 수 있도록 설정하였으며 이는 취약성 평가 수행 시 수정 가능하다.

노출(exposure) 인자 중 수고(height)의 경우, 「새로운 한국식물도감」 및 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>)을 참고하여 얻은 정보를 각 교목별로 수집하고 배점 구간을 ≤ 5 , $5 < x \leq 15$, $15 < x \leq 25$, $25 < x \leq 35$, > 35 m로 설정하여 배점을 각각 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2로 하였다. 이는 수고가 낮은 교목의 경우 화학물질 및 화학사고로 인한 토양 오염에 더 취약할 것으로 가정하였다. 직경(diameter)의 경우, 「새로운 한국식물도감」, 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>) 및 기타 자료를 참고하여 얻은 직경에 대한 정보를 각 교목별로 수집하고 배점 구간을 ≤ 50 , $50 < x \leq 100$, $100 < x \leq 200$, > 200 cm로 설정하여 배점을 각각 1, 0.75, 0.5, 0.25로 하였다. 이는 직경이 작은 교목의 경우 화학물질 및 화학사고로 인한 토양 오염에 더 취약할 것으로 예상되기 때문이다. 잎 형태(leaf)의 경우, 「새로운 한국식물도감」을 참고하여 얻은 잎의 형태 정보를 각 교목별로 수집하고 침엽에 대한 배점을 0.5, 활엽에 대한 배점을 1로 하였다. 이는 활엽의 경우 외부로부터의 오염물질에 대한 노출 면적이 더 넓을 것으로 사료되기 때문이다. 마지막으로 경제적 가치(economic value)의 경우, 「새로운 한국식물도감」을 참고하여 얻은 교목의 용도 정보를 수집하고 1개 이하, 2-3개, 4-5개, 6개 이상으로 설정하여 배점을 각각 0.25, 0.5, 0.75, 1로 하였다. 이는 용도가 다양한 식물일수록 경제적으로 더 취약한 것으로 가정하였다.

회복(recovery) 인자 중 성별(sexes)의 경우, 「새로운 한국식물도감」, 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>) 및 기타 자료를 참고하여 얻은 성별의 정보를 각 교목별로 수집하고 자웅동체에 대한 배점을 0.5, 자웅이체에 대한 배점을 1로 하였다. 이는 교목이 자웅이체일 경우, 자웅동체인 교목보다 생식에 어려움이 발생할 수 있을 것으로 가정하였다. 개화-결실 기간(florescence and fruition)의 경우, 「새로운 한국식물도감」 및 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>)을 참고하여 얻은 개화-결실기 정보를 각 교목별로 수집하고 구간을 ≤ 3 , $3 < x \leq 6$, $6 < x \leq 12$, > 12 개월로 설정하여 배점을 각각 0.25, 0.5, 0.75, 1로 하였다. 이는 개화-결실 기간이 길수록 화학사고 발생 후 군집 회복력이 낮기 때문에 더 취약할 것으로 사료되기 때문이다. 마지막

Table 1. List of 41 forest trees and 41 shrubs selected for vulnerability assessment.

No.	Trees	Shrubs
1	<i>Ginkgo biloba</i>	<i>Cycas revoluta</i>
2	<i>Sciadopitys verticillata</i>	<i>Cephalotaxus harringtonia</i>
3	<i>Pinus densiflora</i>	<i>Lindera glauca</i>
4	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Meliosma myriantha</i>
5	<i>Pinus rigida</i>	<i>Boehmeria spicata</i>
6	<i>Juniperus rigida</i>	<i>Corylus heterophylla</i>
7	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	<i>Salix gracilistyla</i>
8	<i>Taxus cuspidata</i>	<i>Rhododendron mucronulatum</i>
9	<i>Magnolia sieboldii</i>	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>
10	<i>Lindera erythrocarpa</i>	<i>Rhododendron yedoense</i>
11	<i>Lindera obtusiloba</i>	<i>Deutzia uniflora</i>
12	<i>Platanus occidentalis</i>	<i>Rosa multiflora</i>
13	<i>Daphniphyllum macropodum</i>	<i>Rubus crataegifolius</i>
14	<i>Eucommia ulmoides</i>	<i>Rubus oldhamii</i>
15	<i>Celtis sinensis</i>	<i>Rubus parvifolius</i>
16	<i>Zelkova serrata</i>	<i>Spiraea prunifolia</i>
17	<i>Morus alba</i>	<i>Stephanandra incisa</i>
18	<i>Morus bombycis</i>	<i>Indigofera kirilowii</i>
19	<i>Platycarya strobilacea</i>	<i>Lespedeza bicolor</i>
20	<i>Castanea crenata</i>	<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>
21	<i>Quercus acutissima</i>	<i>Lespedeza maximowiczii</i>
22	<i>Quercus aliena</i>	<i>Elaeagnus umbellata</i>
23	<i>Quercus dentata</i>	<i>Alangium platanifolium</i>
24	<i>Quercus mongolica</i>	<i>Euonymus alatus</i>
25	<i>Quercus serrata</i>	<i>Euonymus alatus</i>
26	<i>Quercus variabilis</i>	<i>Securinega suffruticosa</i>
27	<i>Alnus firma</i>	<i>Ampelopsis brevipedunculata</i>
28	<i>Carpinus cordata</i>	<i>Staphylea bumalda</i>
29	<i>Carpinus laxiflora</i>	<i>Toxicodendron trichocarpum</i>
30	<i>Diospyros lotus</i>	<i>Zanthoxylum piperitum</i>
31	<i>Styrax japonicus</i>	<i>Zanthoxylum schinifolium</i>
32	<i>Styrax obassia</i>	<i>Callicarpa dichotoma</i>
33	<i>Prunus persica</i>	<i>Callicarpa japonica</i>
34	<i>Prunus sargentii</i>	<i>Forsythia koreana</i>
35	<i>Albizia julibrissin</i>	<i>Ligustrum obtusifolium</i>
36	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Weigela subsessilis</i>
37	<i>Acer palmatum</i>	<i>Viburnum dilatatum</i>
38	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	<i>Sambucus racemosa</i>
39	<i>Acer tataricum</i>	<i>Sasa japonica</i>
40	<i>Rhus javanica</i>	<i>Smilax china</i>
41	<i>Picrasma quassioides</i>	<i>Smilax sieboldii</i>

Table 2. Selection of vulnerability assessment factors for 41 species of forest trees and 41 species of shrubs.

Category	Trees	Shrubs
Exposure	height	height
	diameter	(no data)
	leaf	leaf
	economic value	economic value
Recovery	sexes	sexes
	florescence and fruition	florescence and fruition
	distribution	distribution

Table 3. Results of vulnerability score calculation for 41 forest trees.

Target No.	Name Scientific name	Height	Exposure Dia-meter	Leaf	Economic value	Sexes	Recovery Florescence and fruition	Population size	Calculation Ave (E)	Ave (R)	1/2(E) + 1/2(R)
13	<i>Daphniphyllum macropodum</i>	0.8	1	1	0.5	1	0.5	0.8	0.83	0.77	0.80
11	<i>Lindera obtusiloba</i>	1	1	1	0.75	1	0.75	0.2	0.94	0.65	0.79
6	<i>Juniperus rigida</i>	0.8	1	0.5	0.75	1	1	0.4	0.76	0.80	0.78
30	<i>Diospyros lotus</i>	0.8	1	1	0.75	1	0.5	0.4	0.89	0.63	0.76
14	<i>Eucommia ulmoides</i>	0.8	1	1	0.25	1	0.5	0.6	0.76	0.70	0.73
17	<i>Morus alba</i>	0.8	0.75	1	1	1	0.25	0.4	0.89	0.55	0.72
2	<i>Sciadopitys verticillata</i>	0.8	0.75	0.5	0.25	0.5	1	1	0.58	0.83	0.70
7	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	1	0.5	0.5	0.25	1	0.5	1	0.56	0.83	0.70
27	<i>Alnus firma</i>	0.8	1	1	0.5	0.5	0.75	0.4	0.83	0.55	0.69
40	<i>Rhus javanica</i>	0.8	1	1	0.75	1	0.25	0.2	0.89	0.48	0.69
39	<i>Acer tataricum</i>	0.8	1	1	0.75	0.5	0.5	0.4	0.89	0.47	0.68
21	<i>Quercus acutissima</i>	0.6	0.75	1	0.75	0.5	1	0.2	0.78	0.57	0.67
26	<i>Quercus variabilis</i>	0.6	0.75	1	0.75	0.5	1	0.2	0.78	0.57	0.67
10	<i>Lindera erythrocarpa</i>	0.8	1	1	0.25	1	0.5	0.2	0.76	0.57	0.66
41	<i>Picrasma quassioides</i>	0.6	1	1	0.5	1	0.25	0.4	0.78	0.55	0.66
15	<i>Celtis sinensis</i>	0.6	0.75	1	1	0.5	0.5	0.4	0.84	0.47	0.65
23	<i>Quercus dentata</i>	0.6	0.75	1	1	0.5	0.5	0.4	0.84	0.47	0.65
4	<i>Pinus koraiensis</i>	0.4	0.75	0.5	1	0.5	1	0.4	0.66	0.63	0.65
32	<i>Styrax obassia</i>	0.8	1	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.83	0.47	0.65
33	<i>Prunus persica</i>	0.8	1	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.83	0.47	0.65
37	<i>Acer palmatum</i>	0.8	1	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.83	0.47	0.65
20	<i>Castanea crenata</i>	0.8	0.75	1	1	0.5	0.5	0.2	0.89	0.40	0.64
31	<i>Styrax japonicus</i>	0.8	1	1	0.75	0.5	0.5	0.2	0.89	0.40	0.64
38	<i>Acer pseudosieboldianum</i>	0.8	1	1	0.75	0.5	0.5	0.2	0.89	0.40	0.64
19	<i>Platycarya strobilacea</i>	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.88	0.40	0.64
35	<i>Albizia julibrissin</i>	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.88	0.40	0.64
1	<i>Ginkgo biloba</i>	0.2	0.25	1	1	1	0.5	0.4	0.61	0.63	0.62
36	<i>Robinia pseudoacacia</i>	0.6	0.75	1	1	0.5	0.5	0.2	0.84	0.40	0.62
12	<i>Platanus occidentalis</i>	0.2	0.75	1	0.25	0.5	0.75	0.8	0.55	0.68	0.62
28	<i>Carpinus cordata</i>	0.8	0.75	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.76	0.47	0.61
29	<i>Carpinus laxiflora</i>	0.8	0.75	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.76	0.47	0.61
5	<i>Pinus rigida</i>	0.6	0.75	0.5	0.5	0.5	1	0.4	0.59	0.63	0.61
18	<i>Morus bombycis</i>	0.8	0.75	1	1	0.5	0.25	0.2	0.89	0.32	0.60
8	<i>Taxus cuspidata</i>	0.6	0.75	0.5	0.75	0.5	0.5	0.6	0.65	0.53	0.59
22	<i>Quercus aliena</i>	0.6	0.75	1	0.75	0.5	0.5	0.2	0.78	0.40	0.59
25	<i>Quercus serrata</i>	0.6	0.75	1	0.75	0.5	0.5	0.2	0.78	0.40	0.59
3	<i>Pinus densiflora</i>	0.4	0.5	0.5	1	0.5	1	0.2	0.60	0.57	0.58
9	<i>Magnolia sieboldii</i>	0.8	0.75	1	0.25	0.5	0.5	0.4	0.70	0.47	0.58
24	<i>Quercus mongolica</i>	0.4	0.75	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.66	0.47	0.56
34	<i>Prunus sargentii</i>	0.6	0.75	1	0.5	0.5	0.25	0.4	0.71	0.38	0.55
16	<i>Zelkova serrata</i>	0.4	0.25	1	1	0.5	0.5	0.2	0.66	0.40	0.53

으로 분포(distribution)의 경우, 「전국자연환경조사데이터북 본문 1권(한국의 식물)」을 참고하여 얻은 분포 정보를 각 교목별로 수집하고 구간을 1-3, 4-7, 8-11, 12-15, 16-17개 시, 도로 설정하여 배점을 각각 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2로 하였다. 이는 더 좁은 지역에 한정적으로 분포할수록 화학사고

발생 후 회복력이 낮아 취약할 것이라고 가정하였다. 종합적으로 노출(exposure)범주 내 특성 점수들의 평균값의 1/2 및 회복(recovery) 범주 내 특성 점수들의 평균값의 1/2를 합산하여 41종 교목의 취약성 지수를 산출하였으며 이를 바탕으로 교목들의 취약성 순위를 결정하였다(Table 3).

2.3. 관목류에 대한 육상 생태계 취약성 평가 적용 예시

교목류와 유사하게 41종의 관목류에 대하여 취약성 인자를 선정하였으며 노출(exposure)범주의 경우 수고(height), 잎의 형태(leaf), 경제적 가치(economic value)의 세 가지 취약성 인자를 선정하였는데, 관목류에 대하여는 직경(diameter)에 대한 자료가 부족하였으므로 이를 제외한 세 가지 인자만을 설정하였다. 회복(recovery)범주의 경우에는 교목과 동일하게 수목의 성별(sexes), 개화-결실 기간(florescence and fruition), 분포(distribution)의 세 가지 취약성 인자를 선정하였다 (Table 2). 이에 따라 각 취약성 인자에 대한 자료조사를 수행하였으며, 취약성 인자별로 조사를 수행한 후 각 특성에 적합한 배점체계를 설정하여 점수를 0에서 1 사이로 배점하도록 하였다. 배점구간 설정 시, 확보된 특성 자료들의 최솟값 및 최댓값을 고려하여 데이터가 최대한 정규분포를 따를 수 있도록 설정하였으며 이는 취약성 평가 수행 시 수정가능하다.

노출(exposure) 인자 중 수고(height)의 경우, 「새로운 한국 식물도감」 및 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>)을 참고하여 얻은 정보를 각 관목별로 수집하고 배점구간을 ≤ 1 , $1 < x \leq 2$, $2 < x \leq 3$, $3 < x \leq 4$, > 4 m로 설정하여 배점을 각각 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2로 하였다. 이는 교목의 경우와 마찬가지로 수고가 낮은 관목의 경우 화학물질 및 화학사고로 인한 토양 오염에 더 취약할 것으로 가정하였다. 잎 형태(leaf)의 경우, 「새로운 한국식물도감」을 참고하여 얻은 잎의 형태 정보를 각 관목별로 수집하고 침엽에 대한 배점을 0.5, 활엽에 대한 배점을 1로 하였다. 이는 동일하게 활엽의 경우 외부로부터의 오염물질에 대한 노출 면적이 더 넓을 것으로 사료되기 때문이다. 마지막으로 경제적 가치(economic value)의 경우, 「새로운 한국식물도감」을 참고하여 얻은 관목의 용도 정보를 수집하고 1개 이하, 2-3개, 4-5개, 6개 이상으로 설정하여 배점을 각각 0.25, 0.5, 0.75, 1로 하였다. 이는 용도가 다양한 식물일수록 경제적으로 더 취약한 것으로 가정하였다.

회복(recovery) 인자 중 성별(sexes)의 경우, 「새로운 한국 식물도감」, 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>) 및 기타 자료를 참고하여 얻은 성별의 정보를 각 관목별로 수집하고 자웅동체에 대한 배점을 0.5, 자웅이체에 대한 배점을 1로 하였다. 이는 동일하게 관목이 자웅이체일 경우, 자웅동체인 관목보다 생식에 어려움이 발생할 수 있을 것으로 가정하였다. 개화-결실 기간(florescence and fruition)의 경우, 「새로운 한국식물도감」 및 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>)을 참고하여 얻은 개화-결실기 정보를 각 관목별로 수집하고 구간을 ≤ 3 , $3 < x \leq 6$, $6 < x \leq 12$, > 12 개월로 설정하여 배점을 각각 0.25, 0.5, 0.75, 1로 하였다. 이는 개화-결실 기간이 길수록 화학사고 발생 후 군집 회복력이 낮기 때문에 더 취약할 것으

로 사료되기 때문이다. 마지막으로 분포(distribution)의 경우, 「전국자연환경조사데이터북 본문 1권(한국의 식물)」(국립생태원, 2017)을 참고하여 얻은 분포 정보를 각 관목별로 수집하고 구간을 교목과 동일하게 1-3, 4-7, 8-11, 12-15, 16-17개 시, 도로 설정하여 배점을 각각 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2로 하였다. 이는 더 좁은 지역에 한정적으로 분포할수록 화학사고 발생 후 회복력이 낮아 취약할 것이라고 가정하였다. 종합적으로 노출(exposure)범주 내 특성 점수들의 평균값의 1/2 및 회복(recovery) 범주 내 특성 점수들의 평균값의 1/2를 합산하여 41종 교목의 취약성 지수를 산출하였으며 이를 바탕으로 교목들의 취약성 순위를 결정하였다 (Table 4).

3. 결과 및 고찰

화학물질 및 화학사고 대비 육상 생태계에 서식하는 교목 41종과 관목 41종에 대한 취약성 평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 교목의 경우에는 굴거리나무, 생강나무, 노간주나무, 고욤나무, 두충 순으로 화학사고에 취약한 것으로 평가되었는데, 굴거리나무의 경우에는 수고가 낮고 직경이 짧으며 활엽이라는 특징 때문에 노출 범주에서 높은 취약성이 확인되었고, 회복 범주의 경우에서도 자웅이체이며 전국적으로 널리 분포되어있지 않다는 점(시도별 분류에서 5개 지역에 분포)에서 높은 취약성이 확인되었다. 관목의 경우에는 초피나무, 개비자나무, 개나리, 소철 및 조록싸리 순으로 취약성이 높은 것으로 확인되었는데, 초피나무의 경우에는 활엽이며 경제적 가치(조미료, 약용, 식용 및 낚시 등에 이용)가 높다는 점에서 노출 범주에서 높은 취약성이 확인되었고, 회복 범주에서는 자웅이체인 점에서 높은 취약성이 확인되었다.

본 연구에서는 화학물질 및 화학사고에 대한 육상 생태계 취약성 평가 기법 개발에 관한 내용을 간략하게 서술하였으나, 일부 제한점에 대한 추가 연구 및 보완이 필요하다. 첫째, 육상 생태계에서 서식하는 생물종에 대한 화학물질의 독성 연구의 수가 절대적으로 부족하므로 물질의 독성을 반영한 취약성 평가를 수행하기 힘들다는 제한점이 존재한다. 따라서 특정 생물종에 대한 특정 화학물질의 영향을 확인하기 힘들기 때문에 제한적으로 취약성 평가가 수행될 수 있다는 단점이 존재한다. 둘째, 기존의 취약성 평가 기법들과 달리 GIS 등과 같은 모델링을 사용하지 않았기 때문에 화학사고 발생 가능성이 높은 지역이나 시설 등에 대한 정보가 부족하다. 이는 기법 개발 과정에서 장외영향평가 등과 같은 모델링 기반의 정보를 취합하여 단점을 보완할 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 육상 생태계에 대한 취약성 평가를 수행하기 위해서는 목본류뿐 아니라 초본, 농작물, 토양 내 무척추동물, 곤충 및 육상 동물 등을 포함한 통

Table 4. Results of vulnerability score calculation for 41 shrubs.

Target	Name	Exposure				Recovery		Calculation		
No.	Scientific name	Height	Leaf	Economic value	Sexes	Florescence and fruition	Population size	Ave (E)	Ave (R)	1/2(E) + 1/2(R)
30	<i>Zanthoxylum piperitum</i>	0.6	1	0.75	1	0.5	0.4	0.78	0.63	0.71
2	<i>Cephalotaxus harringtonia</i>	0.6	0.5	0.5	1	0.75	0.8	0.53	0.85	0.69
34	<i>Forsythia koreana</i>	0.6	1	0.5	1	0.5	0.4	0.70	0.63	0.67
1	<i>Cycas revoluta</i>	0.4	0.5	0.5	1	0.5	1	0.47	0.83	0.65
21	<i>Lespedeza maximowiczii</i>	0.6	1	1	0.5	0.5	0.2	0.87	0.40	0.63
40	<i>Smilax china</i>	0.6	1	0.5	1	0.5	0.2	0.70	0.57	0.63
12	<i>Rosa multiflora</i>	0.8	1	0.75	0.5	0.5	0.2	0.85	0.40	0.63
11	<i>Deutzia uniflora</i>	1	1	0.25	0.5	0.5	0.4	0.75	0.47	0.61
26	<i>Securinega suffruticosa</i>	0.2	1	0.5	1	0.5	0.4	0.57	0.63	0.60
6	<i>Corylus heterophylla</i>	0.6	1	0.5	0.5	0.75	0.2	0.70	0.48	0.59
24	<i>Euonymus alatus</i>	0.6	1	0.75	0.5	0.5	0.2	0.78	0.40	0.59
31	<i>Zanthoxylum schinifolium</i>	0.6	1	0.5	1	0.25	0.2	0.70	0.48	0.59
36	<i>Weigela subsessilis</i>	0.6	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.70	0.47	0.58
38	<i>Sambucus racemosa</i>	0.6	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.70	0.47	0.58
16	<i>Spiraea prunifolia</i>	0.8	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.77	0.40	0.58
7	<i>Salix gracilistyla</i>	0.8	1	0.5	0.5	0.25	0.4	0.77	0.38	0.58
10	<i>Rhododendron yedoense</i>	0.8	1	0.25	0.5	0.5	0.4	0.68	0.47	0.58
18	<i>Indigofera kirilowii</i>	1	1	0.25	0.5	0.5	0.2	0.75	0.40	0.58
32	<i>Callicarpa dichotoma</i>	0.8	1	0.5	0.5	0.25	0.4	0.77	0.38	0.58
29	<i>Toxicodendron trichocarpum</i>	0.2	1	0.5	1	0.5	0.2	0.57	0.57	0.57
3	<i>Lindera glauca</i>	0.2	1	0.25	1	0.5	0.4	0.48	0.63	0.56
8	<i>Rhododendron mucronulatum</i>	0.6	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.70	0.40	0.55
23	<i>Alangium platanifolium</i>	0.4	1	0.75	0.5	0.25	0.4	0.72	0.38	0.55
33	<i>Callicarpa japonica</i>	0.6	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.70	0.40	0.55
37	<i>Viburnum dilatatum</i>	0.6	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.70	0.40	0.55
13	<i>Rubus crataegifolius</i>	0.8	1	0.5	0.5	0.25	0.2	0.77	0.32	0.54
17	<i>Stephanandra incisa</i>	0.8	1	0.25	0.5	0.5	0.2	0.68	0.40	0.54
20	<i>Lespedeza cyrtobotrya</i>	0.8	1	0.5	0.5	0.25	0.2	0.77	0.32	0.54
25	<i>Euonymus alatus</i>	0.6	1	0.25	0.5	0.5	0.4	0.62	0.47	0.54
5	<i>Boehmeria spicata</i>	1	1	0.25	0.5	0.25	0.2	0.75	0.32	0.53
15	<i>Rubus parvifolius</i>	1	1	0.25	0.5	0.25	0.2	0.75	0.32	0.53
22	<i>Elaeagnus umbellata</i>	0.4	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.63	0.40	0.52
28	<i>Staphylea bumalda</i>	0.2	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.57	0.47	0.52
35	<i>Ligustrum obtusifolium</i>	0.4	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.63	0.40	0.52
39	<i>Sasa japonica</i>	0.2	1	0.5	0.5	0.5	0.4	0.57	0.47	0.52
4	<i>Meliosma myriantha</i>	0.2	1	0.25	0.5	0.5	0.6	0.48	0.53	0.51
19	<i>Lespedeza bicolor</i>	0.6	1	0.25	0.5	0.25	0.4	0.62	0.38	0.50
14	<i>Rubus oldhamii</i>	0.8	1	0.25	0.5	0.25	0.2	0.68	0.32	0.50
9	<i>Rhododendron schlippenbachii</i>	0.2	1	0.25	0.5	0.5	0.4	0.48	0.47	0.48
27	<i>Ampelopsis brevipedunculata</i>	0.2	1	0.25	0.5	0.5	0.2	0.48	0.40	0.44
41	<i>Smilax sieboldii</i>	0.2	1	0.25	0.5	0.5	0.2	0.48	0.40	0.44

합적 취약성 평가가 수행될 필요성이 있으나, 우선적으로 육상 환경 중에 서식하는 생물종들에 대한 조사 및 연구가 충분히 수행되지 못하였기 때문에 현재까지는 이에 대한 현실적인 어려움이 존재하는 것이 사실이다.

4. 결론

화학물질의 사용량이 증가하고 자연재해, 인재 및 시설 노화 등 다양한 경위에 의해 화학사고가 빈번히 발생하여

환경 중으로 유독성을 지닌 화학물질이 노출될 사례가 다수 존재하나, 현재까지 국내에서는 화학물질 및 화학사고에 대한 생태계의 취약성을 평가한 연구사례는 확인된 바가 없다. 국외의 경우에도 일부 화학사고에 대한 취약성 평가 연구가 존재하나 이는 화학사고가 발생할 가능성이 존재하는 시설 또는 지역의 취약성을 평가하는 연구이며, 화학물질 누출 또는 화학사고 발생에 의한 생태계의 취약성을 평가한 연구는 아닌 것으로 확인되었다. 이에 따라 특별히 화학사고가 발생할 개연성이 높은 시설 등이 존재하는 육상 생태계를 중심으로 한 육상 생태계 취약성 평가가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 화학물질 및 화학사고에 대한 육상 생태계 취약성 평가 기법에는 활용 가능한 기존 화학물질에 대한 연구의 부족, 현장에 대한 자료의 부족 및 목본 외 생물종에 대한 자료 부족 등이 일부 제한점이 존재하기 때문에 취약성 평가를 제한적으로 수행할 수 밖에 없다는 한계점이 존재한다. 이러한 한계를 타개하기 위해서는 취약성 평가에 필요한 자료의 생산과 꾸준한 데이터 확보가 지속적으로 이루어져야 할 필요성이 존재한다.

현대 사회에서 산업 발전에 따라 이로 인한 위험 가능성에 대비하여 환경과 생태계를 보호하는 것 또한 중요한 과업이다. 하지만 모든 위험에 대비할 수 없다는 현실적인 문제로 인하여 특별히 피해 가능성이 높거나 화학물질에 취약한 생태종이 분포하는 지역을 우선적으로 보호할 필요성이 존재한다. 이에 따라 화학물질 및 화학사고에 대한 육상 생태계 취약성 평가를 수행하여 특별히 취약한 육상 생태계 및 서식 생물을 우선적으로 보호하고 관리할 필요성이 있다.

Acknowledgements

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute (KEITI) through “The Chemical Accident Prevention Technology Development Project”, funded by Korea Ministry of Environment (MOE) (No. 2016001970001). This study was also funded by the MOE as the Graduate School of Specialization for Safe Management of Chemicals.

References

1. V. Torsvik, L. Øvreås, Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems, *Curr. Opin. Microbiol.*, 5(3), 240-245(2002).
2. A. J. Franzluebbers, Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality, *Soil Tillage Res.*, 66(2), 95-106(2002).
3. D. Kim, S. W. Kim, Y. J. An, Research trend for on-site soil ecotoxicity evaluation methods for field soil, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(3), 125-131(2019).
4. S. Y. Cho, K. H. Woo, J. S. Kim, S. Y. Yoon, J. Y. Na, J. H. Yu, Y. B. Kim, Acute symptoms in firefighters who participated in collection work after the community hydrogen fluoride spill accident, *Ann. Occup. Environ. Med.*, 25(1), 36(2013).
5. I. J. Shin, Major industrial accidents in Korea: the characteristics and implication of statistics 1996-2011, *Process Saf. Prog.*, 32(1), 90-95(2013).
6. J. An, H. A. Lee, J. Lee, H. O. Yoon, Fluorine distribution in soil in the vicinity of an accidental spillage of hydrofluoric acid in Korea, *Chemosphere*, 119, 577-582(2015).
7. K. Jung, H. W. Park, Tracing interorganizational information networks during emergency response period: A webometric approach to the 2012 Gumi chemical spill in South Korea, *Gov. Inf. Q.*, 33(1), 133-141(2016).
8. K. Lee, H. M. Kwon, S. Cho, J. Kim, I. Moon, Improvements of safety management system in Korean chemical industry after a large chemical accident, *J. Loss. Prev. Process. Ind.*, 42, 6-13(2016).
9. P. R. Kim, D. Y. Kim, Y. J. Han, A review for the long-term trend and spatial distribution of soil mercury concentration in South Korea, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 41(6), 346-355(2019).
10. M. U. Kim, S. Shin, S. H. Byeon, Comparison of chemical risk assessment methods in South Korea and the United Kingdom, *J. Occup. Health.*, 57(4), 339-345(2015).
11. M. S. Kim, E. B. Lee, T. Ryu, J. Y. Kim, J. Yoon, Improvement of risk analysis of off-site risk assessment by parallel system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 40(4), 163-170(2018).
12. N. S. Jung, D. H. Jang, S. H. Lee, Research on an upland indicator plant for vulnerability assessment of climate change, *The Association of Korean Photo-Geographers*, 19(4), 81-93(2009).
13. Y. J. Oh, M. H. Kim, Y. E. Na, S. H. Hong, W. K. Paik, S. T. Yoon, Vulnerability assessment of soil loss in farm area to climate change adaption, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, 45(5), 711-716(2012).
14. M. H. Kim, H. S. Bang, Y. E. Na, M. R. Kim, Y. J. Oh, K. K. Kang, K. J. Cho, Vulnerability assessment of rice production by main disease and pest of rice plant to climate change, *J. Korean Env. Res. Tech.*, 16(1), 147-157(2013).
15. S. J. Kim, S. M. Kim, S. M. Kim, A study on development of vulnerability assessment criteria for agricultural infrastructure according to climate change, *J. Agric. Life Sci.*, 47(1), 205-213(2013).
16. J. B. Lee, H. J. Lee, K. J. Moon, S. C. Hong, D. R. Kim, C. K. Song, Y. D. Hong, Vulnerability assessment of human health sector due to climate change: focus on ozone, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(1), 22-38(2012).
17. H. Yoo, J. Kim, J. Shin, Y. Kim, S. Min, D. Jegal, K. Bang, S. Lee, Health vulnerability assessment for PM₁₀ due to climate change in Incheon, *J. Environ. Health Sci.*, 43(3), 240-246(2017).

18. S. R. Lee, S. H. Choi, Groundwater pollution susceptibility assessment of Younggwang area using GIS technique, *J. Korean Soc. Groundwater Environ.*, 4(4), 223-230(1997).
19. S. Y. Hamm, J. Y. Cheong, M. J. Kim, I. S. Kim, H. S. Hwang, Assessing groundwater vulnerability using DRASTIC method and groundwater quality in Changwon city, *Econ. Environ. Geol.*, 37(6), 631-645(2004).
20. M. J. Lee, Y. J. Hyun, S. I. Hwang, An assessment of groundwater contamination vulnerability and priority areas for groundwater management using GIS and analytic hierarchy process, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 18(3), 35-51(2015).
21. K. T. Kim, S. G. Jung, K. H. Park, J. H. Oh, Evaluation of landslide susceptibility using GIS and RS, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 8(1), 75-87(2005).
22. Y. K. Yeon, Evaluation and analysis of Gwangwon-do landslide susceptibility using logistic regression, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 14(4), 116-127(2011).
23. T. S. Shon, D. H. Kang, J. K. Jang, H. S. Shin, A study of assessment for internal inundation vulnerability in urban area using SWMM, *Journal of KOSHAM.*, 10(4), 105-117(2010).
24. B. G. Song, T. S. Lee, K. H. Park, Assessment of flooding vulnerability based on GIS in urban area-focused on Changwon city, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 17(4), 129-143(2014).
25. S. Lee, E. M. Chang, Application of GIS to typhoon risk assessment, *J. GIS Assoc. Korea*, 17(2), 243-249(2009).
26. J. E. Kang, M. J. Lee, Assessment of flood vulnerability to climate change using fuzzy model and GIS in Seoul, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 15(3), 119-136(2012).
27. J. Chakraborty, M. P. Armstrong, Using geographic plume analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents, *Comput. Environ. Urban Syst.*, 19(5-6), 341-356 (1995).
28. T. Aoki, R. Ceravolo, A. De Stefano, C. Genovese, D. Sabia, Seismic vulnerability assessment of chemical plants through probabilistic neural networks, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 77(3), 263-268(2002).
29. C. D. Jaeger, Chemical facility vulnerability assessment project, *J. Hazard. Mater.*, 104(1-3), 207-213(2003).
30. F. Li, J. Bi, L. Huang, C. Qu, J. Yang, Q. Bu, Mapping human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of chemical industry parks, *J. Hazard. Mater.*, 179(1-3), 500-506(2010).
31. F. Argenti, G. Landucci, G. Reniers, V. Cozzani, Vulnerability assessment of chemical facilities to intentional attacks based on Bayesian network, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 169, 515-530(2018).
32. S. J. Ki, K. H. Kim, H. G. Lee, K. H. Shin, Review of soil vulnerability assessment tools in Korea and other developed countries, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 39(12), 741-749(2017).
33. Ministry of Environment, Monitoring and integrated impact assessment of ecosystem affected by chemical incidents (not published).
34. National Institute of Biological Resources, National species list of Korea, <http://www.kbr.go.kr/stat/ktsnfiledown/downpopup.do>(2017).
35. Ministry of Environment, Data Book of National Ecosystem Survey 1(2017).
36. Y. N. Lee, New Flora of Korea, Kyohaksa, Seoul, Korea(2006).
37. Korea Forest Service, Nature, <http://www.nature.go.kr>(2009).
38. Korea Forest Service, A Field Guide to Trees & Shrubs, Geobook, Seoul, Korea(2010).

Authors

Yooeun Chae

Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Researcher, ORCID[®] 0000-0002-4060-6838

Rongxue Cui

Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Graduate Student, ORCID[®] 0000-0003-1197-6044

Jieun Lee

Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Graduate Student, ORCID[®] 0000-0001-9362-4143

Lia Kim

Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Graduate Student, ORCID[®] 0000-0001-5509-9341

Youn-Joo An

Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Professor, ORCID[®] 0000-0002-0193-1929