국내외 토양 취약성 평가 연구 동향

Review of Soil Vulnerability Assessment Tools in Korea and other developed countries

기서진 · 김경호* · 이현규* · 신경희*,†

Seo Jin Ki · Kyoung-Ho Kim* · Hyeon Gyu Lee* · Kyung Hee Shin*,†

광주과학기술원 · *한국환경정책·평가연구원

Gwangju Institute of Science and Technology · *Korea Environment Institute

(Received September 4, 2017; Revised December 8, 2017; Accepted December 26, 2017)

Abstract : This study aims to provide the technical considerations and implications for the development of soil vulnerability assessment tool based on the review of existing tools and case studies applied both domestically and internationally. For this study, we specifically investigated the basic theories and major features implemented in the screening models abroad. In contrast, one case study of prioritizing the vulnerable districts was presented to identify the research trends in Korea. Our literature review suggested that the characteristic of target areas and contaminants needed to be properly incorporated into soil vulnerability assessment because the current tools in Korea neglected these properties which prevented this tool from being used as a correct measure of soil management and prevention. We also reached the conclusion that in terms of technical aspect, the soil vulnerability assessment tool should be developed based on the physical theory and environmental data that were varied over space and time so that the end-users were able to readily and effectively screen soil vulnerability over large areas. In parallel with technical improvement, great effort needed to be devoted to develop an integrated environmental information system that increased the availability of data and shared various types of environmental data through enhanced multi-agency collaboration.

Key Words : Soil Contamination, Soil Vulnerability, Vulnerability Assessment, Priority Management District Evaluation

요약 : 산업 구조의 고도화와 토지이용의 다변화에 따라 토양 오염의 형태가 다양화되고 있으며 효과적인 사전 대응계획을 수립하기 위해서 토양 오염 취약성을 고려되어야 한다. 국외의 경우 다양한 평가 도구가 존재하며 평가 결과를 정책적 의사 결정 과정에 적극적으로 활용되고 있지만, 국내의 경우 취약성 평가 도구가 지하수 분야에 집중되어 있으며 토양 취약성 개념 정립 및 도구와 관련된 연구가 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내외 토양 취약성 평가 도구를 조사하고 관련 연구 사례를 검토하여 토양 취약성 평가의 국내 도입시 고려해야 할 사항과 시사점을 도출하고자 한다. 이를 위해 취약성 평가에 대한 개념을 정리하고, 국외에서 활용되고 있는 WIN-PST, SCI-GROW, USGS의 통계모델, CLERS, EuroPEARL 모델, 메타 모델 등 취약성 평가 도구에 대한 개요 및 특징을 조사하였으며 우선관리지역 평가 사례를 통해 국내의 연구 동향을 파악하였다. 국내외 사례를 분석한 결과, 오염의 사전관리 및 예방을 위한 도구로서 취약성 평가 방법론을 도입하고자 한다면 지역 및 오염원 특성을 고려한 특정 취약성 평가의 개념을 도입하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 또한 기술적 측면에서 국내의 토양 오염현상을 현상학적으로 평가 가능하고 시공간적으로 변화하는 환경정보를 반영하여 사용자가 광범위한 지역을 쉽고 정확하게 평가할 수 있는 도구 개발이 필요할 것으로 판단되며, 정책적 측면에서 유관기관과의 협조를 통해 다양한 환경 정보의 공유를 활성화할 수 있는 인프라 체계를 구축하는 노력이 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 토양 오염, 토양 취약성, 취약성 평가, 우선관리지역 평가

1. 서론

토양은 오염 물질의 유입시 유해 성분을 스스로 자정하는 능력을 갖고 있지만 능력을 초과할 경우 광범위하게 오염 확산이 이루어지며 시간 경과에 따라 지하수 오염과 같은 2차 오염을 야기하여 인체 및 주변 생태계에 지속적인 악영향을 미칠 수 있다. 산업유형이 다양해지고 토지이용의 형태가 복잡해짐에 따라 토양 오염의 형태가 다변화되었으며 오염원에 대한 체계적인 사전관리의 필요성이 증가되고 있다. 보다 효과적인 토양 오염의 방지 대책을 수립하기 위해서는 오염 유발 요소를 제어하는 기술과 사전에 토양오염의 가능성을 예측하기 위한 토양 오염 취약성 평가 개념의 도입이 필요하다.

국외의 경우 입력 자료, 평가 시기, 평가 방법에 따라 여러 종류의 평가 도구가 개발되었으며, 토양을 정밀하게 진단하고 평가 결과를 정책 의사결정과정에서 반영하는 등 평가 도구를 적극적으로 활용하고 있다. 국내의 토양 취약성 평가는 2012년부터 수행된 ‘토양·지하수 오염 취약성 평가 및 관리방안 마련’ 연구를 통해 처음 개념이 정립되었다. 해당 연구에서는 기존의 취약성 개념과는 달리, 생태학적, 사회학적 환경의 취약성을 고려한 평가 기법을 개발하여 현장 적용 및 평가를 수행하였다. 이와 같이 국내의 토양 취약성 평가 분야에 있어서는 오염원 관리 측면에서 취약성 개념과 평가 틀이 제시된바 있으나 관련 연구가 매우 제한적이며 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 국내외 토양 취약성 평가 도구를 검토하고

* Corresponding author E-mail: khshin@kei.re.kr Tel: 044-415-7716 Fax: 044-415-7744

관련 연구 사례를 검토하여 시사점과 국내 도입 시 고려해야 할 사항을 도출하고자 한다. 이를 위해 취약성 평가에 대한 개념을 정리하고, 국외(미국과 유럽)에서 활용되고 있는 취약성 평가 도구에 대한 개요, 개발과정, 입력 자료의 형태, 평가 방법 및 알고리즘, 특징 등을 조사하였으며 국내의 토양 취약성 평가 관련 연구에 대한 동향을 파악하였다. 이러한 고찰을 통해, 향후 국내 토양 취약성 평가 도입 시 고려되어야 할 기술적·정책적 사항을 제안하였다.

2. 취약성 평가 개념

토양 취약성(Soil vulnerability)의 개념은 목적 및 범위가 국가별로 상이하다. 국내의 경우 토양 내 오염물질의 침출(Contaminant leaching)과 관련한 오염원 및 매체(지역) 특성 이외에 수용체 특성 및 대응능력(사회·경제적 취약성)을 평가인자에 반영하여 취약성을 포괄적으로 적용하는데 반하여 국외의 경우 오염물질의 침출현상이 실제 발생할 가능성을 중심으로 상대적 또는 절대적 평가를 실시하고 있다. 따라서, 국외의 경우 국내에서 적용되고 있는 수용체 특성 및 대응능력과 관련된 인자는 토양 취약성 평가에서 배제되며, 유럽 연합과 미국 모두 농약 등록단계(Pesticide registration procedure)에서 주로 토양 취약성을 평가한다. 보다 세부적으로 살펴보면 유럽 연합의 경우 토양 취약성 평가 모델을 통해 20년간의 장기간 예측 모의를 실시하고 1 m 토양 깊이에서 80분위(80th percentile)에 해당하는 (평가대상) 농약 및 대사물질의 (연평균) 농도가 잔류허용기준치($0.1 \mu\text{g/L}$)를 초과하는지 여부를 판별한다.

미국의 경우 유럽 연합과는 다르게 토양 취약성을 절대적 수치(농도 기준)와 함께 상대적인 등급(WIN-PST 예시: 높음, 중간, 낮음, 매우 낮음; CLERS 예시: 높음, 불확실함, 낮음)을 평가하는 도구를 제공하고 있으며, 특히 상대적 평가의 경우 절대적 수치를 평가하는 세부 진단모델에 앞서 우선적으로 활용하고 있다. 그 이유는 1) 구동이 다소 복잡한 세부 진단모델을 비하여 초기 진단모델의 경우 특정 농

약에 대한 토양 취약성을 광범위한 지역에 걸쳐 빠르게 평가(Tier 1 level 평가)할 수 있기 때문이며, 2) 이후 초기 진단모델에서 제시한 토양 취약성이 우려되는 지점에 한하여 세부 진단모델을 통해 보다 자세한 검증을 진행(Tier 2 level 평가)하여 정확성과 편리성을 동시에 제공해 주기 때문이다.

한편, 미국 내 하와이 주의 경우 오염원 종류에 따른 토양 및 지하수 취약성을 보다 객관적으로 판단하기 위하여 다른 주와 다르게 독자적인 모델을 개발하여 운용 중에 있으며, 취약성 평가 시 지하수 모니터링 자료(침출 및 비침출 기준 농약 선정)와 입력 자료의 불확실성(First-order uncertainty analysis)을 고려하여 상대적 취약성을 0.5 m 토양 깊이에서 객관적으로 평가하고 있다.

유럽 연합과 하와이 주의 평가 방법에서 알 수 있듯이 토양 취약성은 지하수 취약성과 흔히 혼용되어 사용되는 경우가 많으며, 이러한 이유는 지역에 따라 지하수위가 지표면에 가깝게 위치할 수 있고 또한 1 m의 깊이가 지하수 오염을 조기에 판단할 수 있는 근거를 제공할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 지하수 취약성 평가의 경우 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, US EPA)에서 개발한 지하수 오염취약성 평가 DRASTIC (D-depth of water; R-recharge; A-aquifer media; S-soil; T-topography; I-impact of vadose zone; C-conductivity) 방법이 전 세계에 범용적으로 사용되고 있으며, 지하수 오염에 영향을 미칠 수 있는 7가지 수리/지질학적 요인(지하수위 심도, 지하수 함양량, 대수층 매질, 토양 매질, 지형구배, 비포화대 매질, 수리전도도)들로 구성되어 취약 지역을 판별한다.

간략히 요약하면, 초기 진단모델에 적용되는 토양 취약성 평가방법은 토양 오염 가능성을 간단한 지표로 판별하는 방법에서 시작하여, 이후 복잡한 자연현상을 여러 가정 하에 수학적으로 단순화한 이론적 해를 사용하는 방법, 모니터링 결과와 관련 환경정보를 사용하여 통계적인 모델을 구축하는 방법들이 개발되었으며, 보다 최근에는 세부 진단모델을 데이터 분석도구(회귀분석 또는 기계학습)를 사용하여 단순화한 메타 모델(Meta-model)의 형태로 진화되고 있다 (Fig. 1).

Fig. 1. The evolution of soil vulnerability screening models: (a) index method¹⁾; (b) analytical method²⁾; (c) meta-model³⁾

*Note: (a) Vertical and horizontal axes indicate the leaching index (Li) and attenuation factor (AF), respectively; (b) Shown is an example of simulation result obtained from analytical solution in STANMOD; (c) The figure illustrates the simulation result of the meta model EuroPEARL, which are derived from the parent model PEARL.

국내의 토양 취약성 평가방법 및 미국 환경청의 DRASTIC 평가의 경우 상위 평가인자(Level 1)와 하위 평가인자(Level 2)에 각각 (전문가 의견에 따라 사전에 결정된) 가중치와 등급화된 배점을 부여한 후 합산하여 지표를 도출하는 방식을 사용하고 있으며, 공간정보시스템(Geographic information system)의 중첩 기술(Overlay analysis)을 사용하여 최종적으로 취약성을 전자지도로 생산하고 있다.

3. 해외 적용 사례

3.1. 미국

3.1.1. WIN-PST

Windows Pesticide Screening Tool (Win-PST)는 미국 농림청 자연자원보전국(United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, USDA-NRCS)에서 농약에 대한 환경 위해성을 진단하기 위해 개발된 도구로서, 농약이 물(수분), 유출된 토사 및 유기물 등과 이동할 가능성을 평가하고 비표적 생물체(인간 및 어류)에 미치는 영향을 평가한다.

사용자가 지하수위 깊이 및 강우 확률 이외에 농약 적용면적, 적용 방법, 적용량 등을 선택적으로 조절하여 평가에 반영(등급화에 가점 및 실점을 부여하여 기존 등급을 갱신)할 수 있으며, 장기간의 인체 및 어류 독성에 관한 등급화 자료가 기본적으로 포함되어 토양 내 농약의 이동에 따른 종합적 취약성을 판별한다. 취약성 평가를 위한 기본 자료로 평가 대상 지역의 토양 DB (Soil Survey Geographic database, SSURGO) 및 농약 DB(수문학적 토양그룹, 유기탄소 분율 등)가 요구되며, 각각의 DB는 주기적으로 갱신되어 웹페이지를 통해 사용자에게 제공되고 있다.

세부적인 평가방법으로는 손실가능성 알고리즘(Loss Potential Algorithms)을 바탕으로 토양 DB만을 사용하여 토양 내 침출가능성(Soil Leaching Potential, SLP), 유출수의 용해

를 통한 유출 가능성(Soil Solution Runoff Potential, SSRP), 퇴적물 또는 유기물의 유출수의 흡착을 통한 유출 가능성(Soil Adsorbed Runoff Potential, SARP) 등을 상대적으로 평가하며, 이와 유사하게 농약 DB만을 사용하여 농약의 침출 가능성(Pesticide Leaching Potential, PLP), 유출수에 용해되어 유출될 가능성(Pesticide Solution Runoff Potential, PSRP), 유출수 입자에 흡착되어 유출될 가능성(Pesticide Adsorbed Runoff Potential, PARP) 등을 개별적으로 평가한다. 이후, 토양 DB 및 농약 DB를 통해 산출된 상대적 평가 지표들은 상호작용 행렬(Interaction Matrices)을 통해 최종적으로 침출(SLP와 PLP를 이용한 Leaching 등급화), 용해 유출(SSRP와 PSRP를 이용한 Solution Runoff 등급화), 흡착 유출(SARP와 PSRP를 이용한 Adsorbed Runoff 등급화)의 가능성을 다시 상대적으로 평가하게 되며, 이렇게 산출된 지표(Interaction Loss Rating)는 등급화된 노출 조절 독성(Exposure Adjusted Toxicity)과 상호작용 행렬을 통해 최종적으로 인간 및 어류에 대한 위해성 등급화(Hazard ratings) 과정을 거치게 된다.

3.1.2. SCI-GROW

Screening Concentration in Ground Water (SCI-GROW)는 미국 환경청(US EPA)에서 농약 사용에 따른 지하수의 잔류 농도를 예측하기 위한 개발된 초기 진단모델로서, 상대적인 침출가능성을 표현하는 지표(Relative index of leaching potential or relative intrinsic leaching potential, RILP)를 기반으로 회귀분석 방법으로 개발된 경험식을 통해 취약성을 평가하고 있다.

해당 모델은 1) 사질토양(Sandy soils)에서, 2) 얇은 자유면대수층(Shallow unconfined groundwater aquifers)의 조건 하에, 3) 기후 조건이 지하수 오염을 심화시킬 수 있을 것으로 예상되는 13지역의 필드 실험을 통해 개발되었으며, 최근 초기 진단모델로 제공되는 PRZM-GW (Pesticide Root Zone Model for GroundWater)와 비교하였을 때 상대적으

Fig. 2. Graphical user interface in Win-PST (Version 3.1) released by USDA-NRCS.

(b)

$$[P]_{GW} = 10^{[-2.241 + 0.61 \times RILP]}$$

Where,

$$RILP = [\log(T_{1/2} - 5)] \times [4 - \log(K_{oc} + 5)]$$

$[P]_{GW}$ = The pesticide concentration in shallow groundwater (ppb)

$T_{1/2}$ = The half-life of a chemical in aerobic soils (d)

K_{oc} = The soil organic carbon-water partition coefficient (mL/g)

Fig. 3. (a) Graphical user interface in SCI-GROW; (b) Algorithm for calculating pesticide concentration in groundwater.⁴⁾

로 적은 수의 입력 자료를 이용하여 간단한 취약성 평가가 가능하다.

RILP 산정식에는 농약의 이동성(Koc) 및 지속성(호기성 토양 대사 조건의 반감기, $T_{1/2}$)이 수식에 반영되어 있으며, SCI-GROW 모델을 통하여 최종적으로 농약 살포량에 따른 90일 동안의 평균 고농도를 산출한다(Fig. 3). SCI-GROW 모델의 특징은 평가 농약의 토양 침출이 높을 것으로 예상되는 악조건(Worst-case scenario)을 기반으로 개발된 모델로서 예측된 결과는 보수적 산정값(Conservative estimate)을 제공한다.

3.1.3. 국가 단위 및 지역 단위의 통계 모델

미국 지리조사청(United States Geological Survey, USGS)의 통계모델은 특정 평가대상 농약의 지하수 발견 빈도 또는 농도를 관련성 있는 환경정보(오염원, 이동 및 사할 과정과 관련된 정보)를 사용하여 예측하기 위하여 개발된 모델로서, 규제를 목적으로 개발된 모델이 아니다.

초기 모델은 선형회귀 분석방법(Multivariate ordinary least squares regression)을 통하여 지하수의 아트라진 검출 확률을 예측하는 모델을 개발되었고, 이후 2차 모델은 토빗 회귀모형(Tobit regression models)을 사용하여 아트라진 관련 물질(아트라진 및 중간 대사물질 디에틸아트라진)의 잔류 농도를 예측하는 모델이 개발되었다. 토빗 회귀모형의 경우 정규분포가 아닌 한쪽으로 치우친 편중분포(Skewed distribution)를 나타낼 때 선형회귀분석의 단점을 보완하여 사용되는 절단회귀모형(Censored regression models) 중 한 모형이며, 특히 2차로 개발된 평가도구의 경우 국가 단위의 모델과는 별도로 (최근에 함양되는 신생 지하수에서 통계모델의 모델 정확성을 향상하기 위하여) 지역 단위의 모델을 분리하여 개발하였다.

(통계) 모델에 사용되는 주요 설명변수로는 특정년도의 농약 사용량, 토지 이용 및 인구정보, 기상 정보, 농경지 관리 형태, 토양 및 지하수 특성, 관개용수 사용량, 수질 정보 등이 요구되며, 초기 모델과 2차 모델의 경우 각각 52 및 1,507 (모델 개발 1,298 및 모델 평가 209) 지점의 지하수 모니터

링 정보를 바탕으로 개발되었다.^{5,6)} Table 1은 각 모델에서 사용되는 주요 설명 변수에 대한 정보를 정리한 것이다.

Table 1. Major variables included in the initial screening model and follow-up model

Model	Explanatory variable	Mean
The initial screening model	alluse92	Atrazine usage in 1992 (kg/km ²)
	ag	Agricultural land use (%)
	artdrain	Artificial groundwater recharge (%)
	awc	Available soil moisture (-)
	permv	Soil permeability (in/hr)
The follow-up model at national scale	wtdep	Average depth of the highest level of groundwater (m)
	use9200	Atrazine usage in 1992-2000 (kg/km ²)
	airtemp	Air temperature in 1980-1997 (°C)
	artdrain	Artificial groundwater recharge (%)
	artdrain × wtdep	Artificial groundwater recharge (%) × Average depth of the highest level of groundwater (m)
	recharge	Annual average recharge of groundwater (cm/yr)
	permin	Permeability of soil with minimum permeability (cm/hr)
The follow-up model at regional scale	RTI	Residence time index(-) ^{a)}
	use97	Atrazine usage (kg/km ²)
	artdrain	Artificial groundwater recharge (%)
	wtdep	Average depth of the highest level of groundwater (m)
	omup	Surface soil organic matter (%)
	permin	Permeability of soil with minimum permeability (cm/hr)
	recharge	Annual average recharge of groundwater (cm/yr)
	welldepth	Well depth (m)

^{a)} RTI: This index, which consists of variables (e.g., dissolved oxygen, hydrogen ion concentration, ammonia, nitric acid, Iron(II) ion and manganese(II) ion,) that best describe the spatial and temporal patterns of groundwater quality from principal component analysis secondarily, can be interpreted as the residence time indicator which refers to the detention period of groundwater in the saturation layer.

3.1.4. 하와이 주 토양 및 지하수 취약성 평가 모델

하와이 주에서 개발된 모델(Comprehensive Leaching Risk Assessment System, CLERS)은 토양 내 오염원의 거동을 여러 가정 하에서 수학적으로 단순화하여 이론적 해로서 침출 가능성을 평가하는 모형으로서, 하와이 주 보건부 및 농림부에서는 각각 모니터링 면제 프로그램(Monitoring waiver program) 및 신규 (수입) 농약의 등록 및 인증(Pesticide registration and licensing)을 위한 목적으로 사용되고 있다. 참고로, 모니터링 면제 프로그램이란 특정 오염원에 대한 초기 토양 취약성 평가결과가 우려스럽지 않고, 인근 지역에 관련된 오염 행위가 없을 때 지하수 정규 모니터링 항목에서 해당 오염원을 제외해 주는 프로그램을 의미한다.

현재까지 총 3단계에 걸쳐 모델 개발이 이루어졌으며, 1차 모델은 43개의 농약 물질, 2차 모델은 휘발성을 지니는 52개의 유기화합물질, 3차 모델을 통해 14개의 의약품물질을 대상으로 평가 모델이 개발되었다. 2차 모델의 경우 약 800개 이상의 문헌 정보를 통해 평가 대상 오염원의 화학 정보가 갱신되었고, 3차 모델의 경우 신규 물질로서 문헌 자료가 부재하여 별도의 필드 및 연구실 실험을 통해 오염원에 대한 화학 물성 정보를 생성하였다. 이외에 2차 및 3차 모델에 탑재되어 있는 토양 정보의 경우 미국 농림청에서 제공되는 토양 DB (SSURGO)를 통해 갱신되었으며, 지하수 함양량 정보의 경우 (미국 내 다른 주와 동일하게) 주 자체의 시행하는 공공수원 보호 프로그램(Source water assessment program)을 통해 주기적으로 갱신되어 평가 모델에 반영된다.⁷⁾

요구되는 입력 자료로 비교적 넓은 범위에 걸쳐 손쉽게 획득이 가능한 환경자료(오염원 화학 정보, 토양 정보, 지하수 함양량 정보)들이 사용되며, 공간정보시스템에 탑재되어 비 전문가도 손쉽게 오염원의 침출 가능성을 평가할 수 있도록 설계되었다. 단순화된 모형임을 감안하여 입력 자료의 불확실성(하위 및 상위신뢰 구간)을 산정하도록 설계되었으며, 지하수 모니터링 자료를 근거로 기준 농약(침출 및 비 침출 농약)을 선정한 후 이를 평가 대상 물질과 비교하여 침출 가능성을 평가한다.

3.2. 유럽 연합

유럽 연합의 경우 초기 단계에서 농약에 대한 토양 및 지하수의 취약성을 평가하기 위하여 단일 지점들에서 침출 결과를 정확하게 모사할 수 있는 세부 진단모델(PRZM-3, PELMO, PEARL, MACRO)을 사용할 것을 권고하고 있으며, 모델에 9가지의 악조건 시나리오(토양, 기후, 작물 정보가 조합)를 제공하여 최소 80%의 이상의 지역에서 예측 잔류 농도가 0.1 µg/L(허용기준) 이하가 되는지를 평가한다. 세부 진단모델을 사용할 경우 일부 지역의 제한된 평가만을 실시하기 때문에 다른 지역의 취약성을 예측할 수 없다는 단점이 있으며, 따라서 이에 대한 대체 방법으로서 광범위한 공간정보(환경 및 토지 이용정보)를 이용하여 범유럽(Pan-European) 스케일의 토양 및 지하수 취약성을 평가할 수 있는 EuroPEARL 모델이 구축되어 있다(유사한 예로 GeoPEARL 모델이 있음).

EuroPEARL 모델은 PEARL 모델을 기반으로 유럽 연합 전역에 걸쳐 농약에 대한 토양 및 지하수의 취약성을 균일하게 평가하며 현재 EuroPEARL 모델을 통해 토양 정보가 충분하지 않은 국가(오스트리아, 스웨덴, 핀란드)를 제외한 유럽 연합 총 75% 농경 지역의 평가를 완료하였다. 모델의 입력 자료로는 일정한 가정 하에 공간적으로 일정한 변수(작물 및 오염원 정보)와 더불어 공간적으로 변화하는 변수(토양 및 기상정보 등)를 사용하며 범유럽 전자 토양 지도의 최고 해상도(1:1,000,000)에 적합한 해상도($10 \times 10 \text{ km}^2$)를 사용하여 취약성 평가를 실시한다. 모델의 연산 시간을 단축하기 위하여 1,062개의 상이한 조합(토양, 기후지대, 국가)을 통해 대표 셀(해당 연구에서는 구획(Plot)이란 용어를 사용)들의 잔류 농도를 예측하고 이후 유사한 특성을 갖는 셀에 동일한 값을 부여하는 방식을 적용하여 평가를 수행한다.

3.3. 기타: 메타 모델(Meta-model)

메타 모델이란 세부 진단모델을 여러 가정 하에 수학적으로 단순화하여 이론적 해를 도출하는 방식과 달리, 세부 진

Fig. 4. (a) Algorithm embedded in the CLERS tool⁸⁾; (b) The example result of vulnerability assessment to benzene in Maui Island.

단모델에 현실에서 실제 발생할 수 있는 모든 시나리오(평가 대상 지역의 환경정보의 조합)를 제공하여 방대한 양의 결과를 생성한 후 이를 데이터 분석도구(회귀분석 또는 기계학습)를 사용하여 보다 적은 입력 변수를 통해 일정 수준 이상의 정확도를 구현하면서 결과를 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것을 통칭한다.

3.3.1. MACRO 기반 메타 모델 (Meta-MACRO)

세부 진단모델인 MACRO를 사용하여 평가 대상 지역의 예상가능 시나리오(농약 특성 및 토양 조건의 변화)를 제공하여 대량의 예측 모의(23,760회)를 실시한 후 기계학습(Artificial neural networks)을 통해 블랙박스 형태의 모델(Meta-MACRO)을 개발하였다. 최종적으로 개발된 메타 모델에서 입력 변수로 토양 상층부(1st horizon)의 농약 반감기, 유기탄소 분배계수, 토양 상층부 및 하층부(2nd horizon)의 토성(점토 및 모래 함량), 토양 상층부의 유기탄소 함량이 요구되며, 제시된 환경 정보들을 통해 1 m 깊이에서 농약의 침출 가능성(전체 데이터를 예측할 경우 $R^2=0.98$)을 평가한다.

3.3.2. EuroPEARL 기반 메타 모델 (Meta-PEARL)

메타 모델을 구축하기 위하여 PEARL 모델을 공간정보를 통해 확장시킨 EuroPEARL 사용하였으며, 평가 대상 지역의 예상 가능 시나리오(농약 특성, 토양 조건, 기상정보의 변화)에 맞추어 대량의 예측 모의(59,808회 = 1,062 구획 × 56종 농약)를 실시한 후 회귀분석 방법을 통해 필요한 입력 변수의 수를 줄일 수 있는 메타 모델(Meta-PEARL)을 개발하였다. 최종적으로 개발된 Meta-PEARL은 (Fig. 5의 예

와 같이 다양한 공간정보들을 요구하는 EuroPEARL과 달리) 총 4개의 독립적인 공간정보를 입력 자료로 요구하며, 개별 공간정보들은 각각 농약 특성, 토양 조건, 지하수 함양량의 조합으로 구성된다. 팔목할만한 점은 Meta-PEARL의 경우 미국 하와이 주에서 개발된 토양 및 지하수 취약성 평가모델과 입력 변수 구성 측면에서 매우 유사한 특성을 가지고 있으며, 제시된 환경 정보들을 통해 1 m 깊이에서 농약의 침출 가능성을 평가할 때 기존의 EuroPEARL 대비 비교적 우수한 예측성능($R^2=0.90\sim0.98$)을 보이는 것으로 조사되었다.

4. 국내 연구 동향결과 및 고찰

국외의 토양 취약성 평가 관련 연구는 불포화층(토양)의 오염물질 침출현상에 대한 예측에서부터 발전되었다. 국내에서 토양 취약성의 개념으로 접근한 연구는 매우 제한적이나, 오염물질의 침출현상을 이론적·수치적으로 접근하는 방법에 대한 연구는 지속적으로 수행되고 있다. 국내의 취약성 평가 개념은 한국환경공단¹⁰⁾에 의해 처음 정립되었으며 직간접적인 인자를 포괄적으로 포함하는 방식으로 취약성 평가 지침을 마련한 바 있다.

국내의 토양 및 지하수 취약성 평가는 크게 지표를 이용한 방법, 통계 모델을 직접적으로 사용하거나 또는 통계 기법과 지표를 결합하는 방법(혼합 모델), 세부 진단모델을 이용한 방법으로 구분할 수 있다. 다만 광범위한 지역의 취약성을 평가할 때 세부적인 진단모델에서 요구되는 입력 변

Fig. 5. Major environmental data provided as inputs to EuroPEARL.⁹⁾

수가 넓은 지역에 걸쳐 이용이 용이하지 않기 때문에 지표 모델과 통계모델이 주로 사용되고 있다. 특히 지표모델의 경우, 토양 오염에 직접적인 영향을 미치는 환경인자와 간접적인 인자를 모두 포함하는 방식을 채택하고 있으며, 상위 인자 및 하위 인자에 각각 (결정된) 가중치와 배점을 부여한 후 합산하여 지표를 도출하는 방식을 사용하고 있다.

이러한 방식은 미국 환경청에서 개발하여 그동안 국내 지하수 취약성 평가 시 사용된 DRASTIC, Modified-DRASTIC (가중치 및 배점 수정), LSDG (Land use, Soil drainage, Depth to water, Geology 인자 사용) 적용 사례들과 유사(간접적인 영향 인자를 배제할 경우가 이에 해당하며 직접적인 인자들은 상이)하며, 또한 최근 국내에서 적용 중인 기후변화 취약성 평가방법의 예에서 알 수 있듯이 포괄적인 취약성(부문별 영향인자 고려)을 평가한다는 면에서 매우 유사하다.^{11~13)}

4.1. 우선관리지역 평가 사례

다양한 오염원으로 인한 토양·지하수오염의 심화를 예방하고 국가 자원으로써 효과적인 관리를 위해 토양·지하수 오염원 조사 및 인벤토리 구축과 관련된 다수의 연구가 수행되었으며, 2012년부터 전국 단위의 토양·지하수 잠재오염원 조사 및 관련 데이터베이스를 구축하는 사업이 지속적으로 수행되었다. ‘토양·지하수 오염 생태위해성 및 취

약성평가’ 부분에서는 2012년 1단계 사업을 시작으로 토양·지하수오염의 우선관리지역평가 기법을 개발하였으며, 이후 기개발된 기법에 대한 수정·보완, 가이드라인 등을 제안하였다. 이 과정에서 ‘취약성 평가’의 명칭을 기존에 지하수 분야에서 사용되어 왔던 용어와 혼선을 피하기 위해 ‘우선관리지역 평가’로 명칭을 변경하였다.

우선관리지역 평가는 우선관리지역 및 민감 계층 등을 확인하여 정책집행 순위를 결정하기 위한 수단으로서 토양·지하수오염 위해성·경제·사회 분야를 종합적으로 고려하여 평가하는 기법이다. 토양과 지하수 관점에서 다양한 오염영향들에 노출되었을 때, 오염노출에 대한 민감도에 따라 잠재영향이 다르게 나타나는데 이것을 잠재오염 민감성과 이를 해결하고자 하는 대응능력으로 구분한 종합적 평가체계를 말하고 있다(Fig. 6).

토양·지하수오염 우선관리지역 평가는 토양오염 우선관리지역 평가, 지하수오염 우선관리지역 평가와 이를 하나로 통합한 지중환경오염 우선관리지역 평가의 3가지로 구성된다. 토양오염 우선관리지역 평가와 지하수오염 우선관리지역 평가는 아래 식과 같이 잠재오염 민감성과 대응능력의 평가인자로 산정하고, 지중환경오염 우선관리지역 평가는 토양오염과 지하수오염 우선관리지역 평가 결과를 합산한다.

Fig. 6. The concept used in priority management district evaluation for soil and ground water pollution.¹⁴⁾

Fig. 7. Hierarchical structure of major factors and their assigned weights in priority management district evaluation for soil pollution.¹⁴⁾

Table 2. The description of major factors involved in priority management district evaluation for soil pollution¹⁴⁾

Evaluation categories		Factors	Description
Contamination characteristics		Point pollution source	Risk of point pollution source and the number of facilities, the greater the impact
		Pollution status	Background concentration of the region due to past and present pollution
Potential pollution sensitivity	Regional characteristics	Amount of precipitation	Heavy precipitation increases the contamination dispersion
		Organic matter content in soil	The higher the organic matter content in soil, the more contaminant are captured to prevent contamination dispersion
		Soil texture	The more fine texture, the more contaminant are captured to prevent contamination dispersion
		Land cover	The more fine texture, the more contaminant are captured to prevent contamination dispersion
Receptor characteristics		Number of children	The number of people who are relatively vulnerable to pollution exposure
		Ecosystem and nature map	The higher the ecological worth preserving, the greater the ecosystem impacts when exposed to pollution
Coping capacity		Annual average current income per household	The higher the income, the greater the coping capacity
		Number of soil related public officials	The higher the number of public officials, the greater the coping capacity
		History of soil contamination investigation	The greater the number of contamination detection, the greater willingness to manage and improve the environment

우선관리지역 평가 산정식은 크게 잠재오염민감성 인자와 대응능력 인자의 두 가지로 구분되며, 각 인자별로 점수를 산정한 후 다음과 같은 방식으로 산정이 된다.

$$\begin{aligned} \text{우선관리지역 평가} &= \frac{\text{오염원특성} + \text{지역특성} + \text{수용체특성}}{\text{대응능력}} \\ &= \frac{\text{잠재오염 민감성} \times a}{\text{대응능력} \times b} \end{aligned}$$

*a, b : 가중치

토양오염 우선관리지역 평가의 평가인자와 가중치, 지하수오염 우선관리지역 평가의 평가인자와 가중치는 아래와 같이 잠재오염 민감성 100점, 대응능력 100점으로 가중치가 배분되어 있다(Fig. 7). 또한 각 평가인자가 우선관리지역 평가체계에 포함된 의미와 오염에 있어서의 특성은 Table 2에 정리하였다.

5. 결론

본 연구에서는 국내외 토양 취약성 평가 도구 및 연구 사례를 살펴보았다. 국내외 토양취약성의 경우, 대상 오염물질의 실제 침출 가능성을 평가한다는 개념에 집중되어 있어, 지하수 취약성 평가 분야에서의 특정 취약성(specific vulnerability) 평가와 그 평가 목적을 같이 한다고 볼 수 있다. 따라서 국내 토양 및 지하수 오염을 사전에 효과적으로 관리하여 예방하기 위한 도구로서 취약성 평가 방법론을 도입하고자 한다면, 지역특성과 더불어 오염원 특성을 고려한 특정 취약성 평가 개념을 도입하여 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

(기술적 측면의 개선사항 1) 국외의 토양 및 지하수 취약성 평가 도구를 국내의 평가 도구와 비교해 보았을 때, 국내의 경우 토양 오염현상을 보다 현상학적으로 평가할 수 있는 도구 개발이 필요해 보이며, 모델에서 요구되는 입력 변수는 공간적으로 변화하는 환경정보를 충실히 반영하여 사용자에게 쉽게 이용 가능한 형태로 제공되어 광범위한 지역을 균일하게 평가할 수 있도록 설계되어야 한다. 수학적 또는 회귀분석 방법을 통하여 단순화된 이론적 접근 방식의 해(미국 하와이 주 CLERS 모델 및 유럽 연합 EuroPEARL)와 모니터링 자료 및 관련 환경정보를 통하여 구축된 통계 모델을 사용하는 방법들이 국내의 취약성 평가 도구 개발 시 고려될 수 있으며, 후자의 방법이 고려될 경우 다양한 지역의 모니터링 및 환경자료가 잘 반영되고 주기적으로 갱신되어 모델의 예측 성능을 향상할 수 있어야 한다.

(기술적 측면의 개선사항 2) 국외 취약성 평가 모델의 경우 오염원의 화학적 특성이 예측에 반영되어 오염원별 취약성 평가가 가능하기 때문에 국내 토양 취약성 평가 모델 개발 시 이를 중요한 요소로 고려할 필요가 있다. 시공간적으로 변화하는 토양 특성을 반영하여 환경공간정보를 주기적으로 갱신하는 시스템의 개발을 통해 토양특성 환산식을 개발하여 토양 취약성평가에 활용할 수 있다면 장기적으로 취약성 평가 모델의 예측 정확도가 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 최근 환경 모니터링 기술(원격탐사, Remote sensing)이 발달함에 따라 다양한 시공간적 고해상도의 영상자료(강우레이더, 토양 수분함량, 작물의 종류와 면적 등)가 생성되고 있으며, 토양 및 지하수 취약성 평가 시 이러한 자료를 모델에 반영할 수 있을 경우 평가 결과의 해상도 및 예측 성능이 향상될 수 있을 것으로 예상된다.

(정책적 측면의 개선사항) 취약성 평가 결과를 정책적인 결정을 위한 도구로 활용할 경우, 국내 평가 모델의 개발 시

오염원 종류별 적절한 수준의 벤치마크 농도 기준에 최대한 근접한 보수적 수정치를 제공할 수 있어야 한다. 국외에서 개발된 대부분의 모델(미국 하와이 주 CLERS 모델 제외)의 경우 환경에 따라 변화하는 오염원 화학정보를 반영하지 못하고 고정된 화학적 특성 정보를 사용함으로써 현실성 있는 평가가 어렵다고 판단되며, 따라서 국내 적용 시 이러한 입력 자료의 오차를 평가 결과에 반영(예시: 미국 하와이 주 불확실성 분석)할 수 있는 정책적 고려가 필요할 것으로 판단된다. 또한 국외의 경우 다수의 기관을 통해 토양 및 지하수 취약성 평가자가 편리하게 이용할 수 있는 다양한 종류의 환경정보(화학, 토양, 기상 DB) 및 모델 기술 지원 시스템을 유지 및 운영하고 있으며, 이와 유사하게 국내에서도 유관기관과 협조하여 정보 공유를 활성화하고 인프라 체계를 향상하는 정책적 노력이 지속적으로 수반되어야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국환경산업기술원 ‘토양·지하수오염방지기술개발사업(2016000560002)’ 연구비 지원에 의해 수행되었음.

KSEE

References

1. Diaz-Diaz, R. and Loague, K., "Comparison of two pesticide leaching indices," *J. American Water Resour. Assoc.*, **36**(4), 823~832(2000).
2. Van Genuchten, M. T., Šimůnek, J., Leij, F. J., Toride, N. and Šejna, M., "STANMOD: Model use, calibration, and validation," *Trans. ASABE*, **55**(4), 1353~1366(2012).
3. Tiktak, A., Boesten, J. J. T. I., Van Der Linden, A. M. A. and Vanclooster, M., "Mapping ground water vulnerability to pesticide leaching with a process-based metamodel of EuroPEARL," *J. Environ. Qual.*, **35**(4), 1213~1226(2006).
4. Cohen, S., "Recent examples of pesticide assessment and regulation under FQPA," *Ground Water Monit. and Remediat.*, **20**(1), 41~43(2000).
5. Stackelberg, P. E., Barbash, J. E., Gilliom, R. J., Stone, W. W. and Wolock, D. M., "Regression models for estimating concentrations of atrazine plus deethylatrazine in shallow groundwater in agricultural areas of the United States," *J. Environ. Qual.*, **41**(2), 479~494(2012).
6. Stackelberg, P. E., Gilliom, R. J., Wolock, D. M. and Hitt, K. J., "Development and application of a regression equation for estimating the occurrence of atrazine in shallow ground water beneath agricultural areas of the United States," US Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5287, USGS, Virginia, p. 12(2006).
7. Ki, S. J. and Ray, C. A., "GIS-assisted regional screening tool to evaluate the leaching potential of volatile and non-volatile pesticides," *J. Hydrol.*, **522**, 163~173(2015).
8. Ray, C. and Ki, S. J., "Modeling to support monitoring waiver for selected wells in Hawaii," in Proceedings of the Safe Drinking Water Branch, Hawaii Department of Health, Honolulu, p. 27(2014).
9. Tiktak, A., De Nie, D. S., Garcet, J. P., Jones, A. and Vanclooster, M., "Assessment of the pesticide leaching risk at the Pan-European level. The EuroPEARL approach," *J. Hydrol.*, **289**(1-4), 222~238(2004).
10. Korea Environment Corporation, Soil and Groundwater Vulnerability Assessment and Management Plan Prepared in 2012, Korea Environment Corporation, Incheon, pp. 85-128 (2012).
11. National Institute of Environmental Research, Advancement of Vulnerability Assessment for Climate Change of Local Governments, National Institute of Environmental Research, Incheon, pp. 1-7(2012).
12. Kim, G.-B., "Review of Groundwater Vulnerability Assessment Methods and Consideration for Domestic Application," *J. Soil and Groundwater Environ.*, **13**(6), 1~16(2008).
13. Ministry of Environment, Study on the Establishment of Mid-Long Term Plan for Construction of Soil and Groundwater Policy Support System, Ministry of Environment, Sejong, pp. 19~52(2012).
14. Ministry of Environment, Soil and Groundwater Vulnerability Assessment and Management Plan Prepared in 2014, Ministry of Environment, Sejong, pp. 9~88(2014).