토양생태 위해성평가 제도 국내 도입방안 연구 An Introductory Research for Development of Soil Ecological Risk Assessment in Korea

안윤주[†] · 김신웅 · 문종민 · 정승우* · 김록영** · 윤정기** · 김태승**
Youn-Joo An[†] · Shin Woong Kim · Jongmin Moon · Seung-Woo Jeong*
Rog-Young Kim** · Jeong-Ki Yoon** · Tae-Seung Kim**

건국대학교 환경보건과학과 · *국립군산대학교 환경공학과 · **국립환경과학원 토양지하수연구과

Department of Environmental Health Science, Konkuk University

*Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

**Soil and Groundwater Division, National Institute of Environmental Research

(Received December 13, 2016; Revised March 8, 2017; Accepted March 31, 2017)

Abstract : Human activities have resulted in soil pollution problems to us. Human and ecological risk assessment have been suggested as an efficient environmental management strategy for protecting human and ecosystems from soil pollution. However, Korean environmental policy is currently focused on human protection, and fundamental researches for ecology protection are required for institutional frameworks. In this study, we developed a schematic frame of Korean soil ecological risk assessment, and suggested the basic information for its application. This study suggested a soil ecological risk assessment scheme consisting of 4 steps for derivation of Predicted-No-Effect-Concentration (PNEC): 1) ecotoxicity data collection and reliability determination, 2) data standardization, 3) evaluation of data completeness for PNEC calculation, and 4) determination of ecological-risk. The reliability determination of ecotoxicity data was performed using Reliability Index (RI), and the classification of domestic species, acute/chronic, toxicity endpoint, and soil properties was used for data cataloging. The PNEC calculation methodology was determined as low-reliability, middle-reliability, and high-reliability according to their quantitative and qualitative levels of ecotoxicity data. This study would be the introductory plan research for establishment of Korean soil ecological risk assessment, and it can be a fundamental framework to further develop guidelines of Korean environmental regulation.

Key Words : Introduction Plan, Predicted No Effect Concentration, Protection Level, Risk Assessment, Soil Ecology

요약 : 인간활동에 의한 토양오염은 지속적으로 발생되고 있으며, 이를 과학적이고 합리적으로 관리하기 위한 인체 및 생태 위해성평가의 중요성이 부각되고 있다. 하지만 국내에서 생태계를 수용체로 하는 위해성평가에 대한 제도적 장치가 마련되어 있지 않으며, 이에 대한 평가체계와 활용가능한 기반 마련이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 국내형 토양생태 위해성평가(soil ecological risk assessment) 체계를 제시하였으며, 이를 수행하기 위한 구체적인 내용들을 정리하였다. 토양생태 위해성평가는 오염물질에 대한 생태계 보호수준을 의미하는 예측무영향농도 산출을 목적으로 하고, 토양생태 독성자료 수집 및 적합성 확인, 토양생태 독성자료 표준화, 생태독성자료 충족도 확인 및 예측무영향농도 산출, 생태위해도결정의 단계로 수행할 수 있다. 수집된 생태독성자료는 신뢰도지수에 따라 적합성을 먼저 확인하며, 필요기준(국내 서식종, 급·만성, 독성중 말점, 토양특성 분류)에 따라 순차적으로 정리하여 평가체계에 적용하는 방안을 제안하였다. 예측무영향농도는 생태독성자료 수준에 따라 저신뢰, 중간신뢰, 그리고 고신뢰 수준 중 하나의 산출 기법을 이용하며, 이를 통해 최종적으로 생태 위해도를 결정하는 방식을 제안하였다. 본 연구는 차후 토양오염물질에 대한 생태위해성평가 지침 제정에 있어 기본 체계로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 도입방안, 보호수준, 예측무영향농도, 위해성평가, 토양생태

1. 서론

인간활동에 의해 발생하는 오염물질은 지속적으로 배출되고, 작·간접적으로 환경에 영향을 미치고 있다. 따라서 이러한 오염물질을 효율적으로 관리하는 것이 환경적, 경제적 측면에서 매우 합리적일 것이라 사료된다. 특히 토양의 경우에는 오염물질의 관리가 다른 매체에 비하여 더 어려운 것으로 알려져 있으며, 이를 위해 국외에서는 토양 오염물질에 대한 위해성평가를 통해 대책을 수립하고 있다. 미국, 캐나다, 호주, 유럽연합, 그리고 영국 등에서는 인체

뿐만 아니라 자국의 토양생태계를 보호하기 위하여 생태위해성평가(Ecological Risk Assessment, ERA) 기법을 적극적으로 활용하고 있다. 생태위해성평가는 대상 수용체를 생태계로 하여 유해인자(stressor)에 의해 생태학적 악영향이 발생할 수 있는 개연성을 평가하는 과정으로,¹⁾ 국외에서는 이를 토양기준설정 및 환경정책에 적용하고 있다. 미국의 경우는 자국의 생태위해성평가 지침에 따라 산출되는 Ecological Soil Screening Levels (Eco-SSL)를 스크리닝 수치로 사용하고 있으며,²⁾ 캐나다의 경우는 Soil Quality Guidelines (SQGE),³⁾ 호주의 경우는 Ecological Investigation Level (EILs),⁴⁾ 유럽

[†] Corresponding author E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr Tel: 02-2049-6090 Fax: 02-2011-3211

연합의 경우는 Predicted No Effect Concentration (PNEC),⁵⁾ 그리고 영국에서는 Soil Screening Value (SSV)를 토양준거치 및 생태허용농도로 이용하고 있다.⁶⁾ 이들 국가의 대부분은 토양생태계에 분포하고 있는 다양한 영양단계 생물종 보호에 초점을 맞추고 있으며, 종민감도분포(Species Sensitivity Distribution, SSD) 개념을 기반으로 확률생태위해성평가(probabilistic ecological risk assessment)를 수행하는 것으로 확인되었다.

우리나라의 경우는 위해성평가 체계를 수립하기 위하여 환경부 ‘토양오염기준과 연계한 위해성평가 실무지침 작성 연구’에 따라 토양오염 위해성평가지침을 제정하여 고시한 바 있으나,⁷⁾ 생태위해성평가에 관련된 연구는 이에 비해 제한적이다. ‘납, 카드뮴 및 수은 오염에 대한 위해성평가 기법연구’와 ‘위해유해물질 평가 기법 연구’ 등에서는 생태위해성평가의 기반을 마련하기 위한 지속적인 노력이 있었으나,^{8,9)} 정책적으로 활용되지는 않은 실정이다. 학술연구에 따르면, 국외 토양준거치 도출기법을 조사하고 국내 적용성을 검토하여 SSD기반의 통계적외삽법(Statistical Extrapolation Method, SEM)과 평가계수법(Assessment Factor Method, AFM) 등이 제시된 바 있으며,^{10,11)} 카드뮴을 대상 물질로 한 연구도 존재하는 것으로 확인되었다.¹⁰⁾ 또한, 일

부 연구에서는 토양생태 위해성평가의 데이터베이스를 마련하기 위하여 토양 독성자료 내 시험종 분류 기법을 제시한 바 있다.¹³⁾ 최근 환경부 토양·지하수오염방지기술개발사업의 일환인 ‘국내 토양생태 위해성평가 기반 및 활용체계 구축’에서는 토양생태 위해성평가 체계(안)을 제시하였다.¹⁴⁾ 하지만 대부분의 국내 연구들은 토양생태 위해성평가의 체계를 국내 실정을 고려하여 제시하기 위한 목적은 아니었으며, 통계적 기법 적용을 위한 생태독성자료 처리 및 토양 특성을 이해하기 위한 표준화 기준에 대한 내용이 부족한 것으로 보인다. 또한, 토양생태 위해성평가에 대한 제도적인 지침을 마련하고 도입하기 위한 연구는 여전히 과제로 남아있다.

본 연구에서는 토양생태 위해성평가의 전반적인 체계를 수립하여 국내화하고, 이를 적용하기 위한 기반 자료를 제안하였다. 국내형 토양생태 위해성평가의 목적은 생태계 보호수준을 결정할 수 있는 예측무영향농도 산출이며, 이를 위하여 총 4단계 체계를 구성하였다. 각 단계에 해당되는 독성자료 수집, 표준화, 예측무영향농도 산출기법, 그리고 생태 위해도 결정에 대한 자세한 사항을 포함하고 있으며, 추후 토양오염물질 생태위해성평가 지침을 구축할 수 있도록 제도적 도입방안을 제안하였다.

Fig. 1. Scheme of methodology for Korean ecological risk assessment.

2. 국내형 생태위해성 평가체계 제시

본 연구에서는 오염물질에 대한 토양생태 서식종의 적절한 보호수준을 결정하기 위하여 예측무영향농도를 산출하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해서 토양생태 위해성평가 체계가 결정되었으며, 1) 토양생태 독성자료 수집 및 적합성 확인, 2) 토양생태 독성자료 표준화, 3) 생태독성자료 충족도 확인 및 예측무영향농도 산출, 4) 생태위해도결정 의 4단계로 구성된다(Fig. 1). 대상 오염물질이 선정되면, 1단계를 통하여 생태독성자료를 수집하고 신뢰도 지수(Reliability Index, RI)를 산출하게 된다. 적합한 토양생태 독성자료가 부재하거나, 신뢰도 지수를 만족하지 않을 경우 생태위해성평가를 수행할 수 없으며, 중요도에 따라 독성자료를 생산하여 적용할 수 있다. 2단계에서는 수집된 생태독성자료를 대상으로 표준화 항목(국내 서식종 분류, 급·만성 분류, 종말점 분류, 토양특성 분류)에 따라 정보를 수집하고 목록화하며, 3단계에서 자료의 충족도를 확인하여 예측무영향농도 산출기법(저신뢰 수준, 중간신뢰 수준, 그리고 고신뢰 수준)을 분류한다. 4단계에서는 토지이용도 개념을 예측무영향농도에 적용하고, 토양노출농도와 비교하여 생태위해도를 결정한다.

3. 토양생태 독성자료 수집 및 적합성 확인

3.1. 생태독성자료 수집

생태독성자료의 수집은 유럽연합의 위해성평가보고서(Risk assessment report), 미국환경청(USEPA)의 ECOTOX Database, 미국의학도서관의 Toxicology Data Network (TOXNET), 유럽화학국(European Chemical Agency, ECA)의 IUCLID Database, 그리고 실험조건이 상세하게 기록된 국내·외 학술연구 사례를 중심으로 수행될 수 있다. 생태독성은 다양한 종말점을 통해 평가되므로, 일반적인 종말점인 생장(growth), 치사(survival), 그리고 생식(reproduction)으로 평가된 무영향관찰농도(No effect observed concentration, NOEC)와 50% 수준의 반영향농도(Effective Concentration 50%, EC50)와 반치사농도(Lethal Concentration 50%, LC50)를 토양매체 기반의 농도(mg/kg)로 수집한다. 만일 대상물질의 생태독성자료가 부재할 경우, 표준작업지침(Standard Operating Procedure, SOP)에 따라 독성자료를 생산한다. 이는 국제적으로 공인된 시험법을 이용하며, ASTM (American Society for Testing and Materials), ISO (International Organization for Standardization), OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), 그리고 USEPA (United States Environmental Protection Agency)에서 제안하고 있는 토양생태 독성시험법 등이 있다.

3.2. 생태독성자료의 적합성 확인

무분별한 토양생태 독성자료의 사용을 방지하기 위하여

수집된 자료의 신뢰성을 확인할 수 있는 방안을 필요하며, 적합한 선별기준은 국외에서 사용되고 있는 신뢰도 지수(Reliability Index, RI) 개념을 제안하였다.^{15,16)} 생태독성평가는 재현성과 신뢰성이 보장되어야 하며, ASTM, ISO, OECD, 그리고 USEPA에서 제시하는 국제 공인된 표준시험법을 통해 만족할 수 있다. 따라서 이를 이용할 경우 가장 높은 신뢰도 지수인 'RI 1'이 배점되며, 두 번째로 높은 신뢰도지수인 'RI 2'는 표준시험법을 따르지 않았지만 국내·외 학술지에 게재되어 구체적인 시험조건이 명시되어 있는 경우이다. 상위의 신뢰도지수를 만족하는 생태독성자료는 생태위해성평가에 적합한 수준으로 분류한다. 충분한 정보가 제공되지 않았거나(RI 3), 독성값만이 있을 경우(RI 4)는 독성자료가 부적합한 것으로 간주되어 이를 활용할 수 없다.

4. 토양생태 독성자료의 표준화

4.1. 국내 서식종 분류

토양생태계는 각 지역별, 국가별로 상이하고 다양한 생물종이 분포하고 있다. 동일 오염물질에 노출되더라도 각 생물종마다 민감도가 다른 것으로 알려져 있으며, 그 결과는 생태독성자료를 기반으로 수행되는 생태 위해성평가와 밀접한 연관성을 가지게 된다. 김 등¹³⁾의 '토양생태 위해성평가를 위한 국내 서식 토양독성 시험종 선별 연구'에서는 위와 같은 사항을 보완하기 위하여 생태독성자료 생산에 사용되는 국제표준시험종 중 국내 서식종을 분류한 바 있다. 본 연구에서는 예측무영향농도 산출의 기준으로 활용되는 생태 필수 영양단계 구분을 위하여, 국내 서식종이 해당되고 있는 생물분류군을 결정하였다. 생물분류군은 필수영양단계인 환대강(oligochaeta), 곤충강(insects) 또는 쌍선충강(secernentea), 단자엽식물강(monocotyledoneae) 또는 쌍자엽식물강(dicotyledoneae), 그리고 미생물강(bacteria) 또는 녹조강(chlorophyceae)을 포함하여 강(class)을 기준으로 하였으며, 각각 해당되는 국내 서식종의 정보를 포함한다(Table 1). 표에 포함되어 있는 않는 국내 서식종이 확인될 경우, 해당 목과 강을 통해 영양단계 분류를 할 수 있다.

4.2. 생태독성자료 급·만성 분류

본 연구에서는 수집된 토양생태 독성자료의 급·만성 분류를 위하여, 토양생태계를 대표하는 생물종의 국제 표준 시험법을 조사하고 시험기간 및 생활사(life cycle)를 통하여 분류기준을 선정하였다. 식물을 이용한 국제표준시험법에 따르면 각 식물별 생활사에 차이를 보이고, 시험기간이 달라지는 것을 확인하였다. 국제표준시험법에서는 급성의 경우 ≤14일, 만성일 경우는 ≥21-28일의 시험기간을 제시한다.¹⁹⁻²⁸⁾ 지렁이류의 경우는 ASTM에서 제시하는 국제표준시험법에 따라 급성 ≤14일, 만성 ≥56일이 수행되는 것으로 확인되었으며, 일반적인 생활사는 약 1460-1825일인 것으로 보고된 바 있다.²⁹⁾ 독토기류의 경우는 개체의 서식처

Table 1. List of domestic species for ecotoxicity testing

Class	Order	Domestic species ^{a)}	Korean species name
Insectab)	Collembola	<i>Folsomia candida</i>	장님마디톡토기
		<i>Folsomia fimetaria</i>	풀숨마디톡토기
		<i>Isotoma anglicana</i>	등줄마디톡토기
		<i>Orthonychiurus folsomi</i>	어리털보톡토기
		<i>Paronychiurus kimi</i>	김어리톡토기
	Protura	-	-
	Dipulra	-	-
Arachnida	Araneae	<i>Spider</i>	-
Chilopoda	Scutigerida	<i>Centipede</i>	-
Diplopoda	Diplopoda	<i>Milipedes</i>	-
Malacost raca	Isopoda	-	-
Clitellata ^{b)}	Haplotaxida	<i>Eisenia andrei</i>	붉은줄지렁이
		<i>Eisenia fetida</i>	줄지렁이
Secementea ^{b)}	Rhabditida	<i>Caenorhabditis elegans</i>	예쁜꼬마선충
		<i>Aporcelaimellus sp.</i>	큰구멍선충속
		<i>Clarkus sp.</i>	웃이선충속
		<i>Ditylenchus sp.</i>	썩룩창선충속
		<i>Dorylaimellus sp.</i>	둥근머리창선충속
		<i>Mesodorylaimus sp.</i>	중간창선충속
		<i>Mylonchulus sp.</i>	줄치선충속
Gsatropoda	Stylommatophora	-	-
Magno- liopsida ^{b)}	Fabales/ Cucurbitales	<i>Anagallis arvensis</i>	뚜껑별꽃
		<i>Apocynum sp.</i>	수궁초속
		<i>Arachis hypogaea</i>	땅콩
		<i>Brassica napus</i>	유채
		<i>Brassica rapa</i>	배추
		<i>Cardamine pratensis</i>	꽃냉이
		<i>Chenopodium album</i>	명아주
		<i>Chrysanthemum sp.</i>	쑥갓속
		<i>Cucumis sativus</i>	오이
		<i>Fagopyrum esculentum</i>	메밀
		<i>Helianthus annuus</i>	해바라기
		<i>Ipomoea hederacea</i>	미국나팔꽃
		<i>Lactuca sativa</i>	상추
		<i>Lupinus sp.</i>	싸리속
		<i>Nepeta cataria</i>	개박하
		<i>Pisum sativum</i>	완두
		<i>Phaseolus radiatus</i>	녹두
		<i>Polygonum lapathifolium</i>	산미나리아재비
		<i>Ranunculus acris</i>	갯무
		<i>Raphanus sativus</i>	산딸기속
		<i>Rubus sp.</i>	원추천민국
		<i>Rudbeckia hirta</i>	소리쟁이
		<i>Rumex crispus</i>	천수국속
		<i>Tagetes sp.</i>	사상자
		<i>Torilis japonica</i>	붉은토끼풀
		<i>Trifolium pratense</i>	큰개물알풀
		<i>Veronica persica</i>	나비나물속
		<i>Vicia sp.</i>	도꼬마리
		<i>Xanthium strumarium</i>	겨이삭속
Liliopsida ^{b)}	Poales	<i>Agrostis sp.</i>	양파
		<i>Allium cepa</i>	참새귀리속
		<i>Bromus japonicus</i>	참새귀리
		<i>Cyperus rotundus</i>	향부자
		<i>Dactylis glomerata</i>	오리새
		<i>Oryza sativa</i>	벼
Bacteria ^{b)}	Enterobacteriales	<i>Escherichia coli</i>	대장균
		<i>Bacillus subtilis</i>	고초균
Chloro- phyceae ^{b)}	Chlorococcales	<i>Chlorococcum infusionum</i>	물푸른알말

* Kim et al.¹⁵⁾

^{a)} Bio resource Information Service,¹⁷⁾ National Institute of Biological Resources,¹⁸⁾

^{b)} Essential taxonomic groups

온도에 따라 일반적인 생활사가 달라지며, 15℃의 경우 240일, 24℃의 경우는 111일을 보인다. 국제표준시험법에서는 *F. candida*의 급성과 만성기간은 각각 ≤ 14 일과 ≥ 28 일,^{30,31)} *F. fimetaria*는 ≤ 14 일, ≥ 21 일로 제시하고 있다.³¹⁾ 토양선충류인 *C. elegans*의 생활사는 21일로 보고된 바 있으며, ASTM과 ISO에서 제시하는 급성과 만성 분류는 각각 ≤ 1 일, ≥ 2 일 이다.^{32,33)}

4.3. 독성종말점 분류

생태독성평가는 다양한 생물종의 특성에 따라 적합한 독성 종말점(toxicity endpoint)을 선정한다. 각 생물종의 국제 공인 표준시험법에 따르면, 대상 오염물질에 의한 독성영향의 정량화가 가능하도록 다양한 독성 종말점을 제안하고 있다. 가장 일반적으로 활용되고 있는 종말점은 노출 개체의 생존율(survival)과 생식율(reproduction)이며, 생물종의 고유특성에 따라 측정 방법을 다르게 제시하고 있다. 지렁이의 경우는 ISO의 국제표준시험법에서 치사율과 생식율을 평가하도록 하고 있으며,³⁴⁻³⁶⁾ 행동영향평가인 회피율 등도 제안되고 있다.³⁷⁾ 일부 학술연구에서는 지렁이 면역체계를 담당하는 체강세포(coelomocytes)의 활성을 분석한 바 있다.³⁸⁾ 토양선충의 경우는 ASTM과 ISO에서 생존율과 생식율, 그리고 생장율을 평가 종말점으로 제시하고 있으며,^{32,33)} 일부 연구에서는 더 민감한 반응을 정량화하기 위한 종말점으로써 자가형광발현 정도와 RNA/DNA 평가 등이 수행된 바 있다.^{39,40)} 이러한 종말점들은 대상으로 하는 분석 항목에 따라 독성영향 민감도에 차이를 나타내며, 이를 포괄적으로 생태위해성평가에 활용할 경우 재현성과 연계성이 감소할 수 있을 것으로 사료된다. 미국의 경우는 위와 같은 현상을 고려하여 생식(reproduction), 군집(population), 생장(growth), 생체량(biomass), 그리고 생리영향(physiology)의 생태학적 연관 종말점을 분류하여 활용하도록 제안하고 있다.²⁾ 본 연구에서는 국내형 토양생태 위해성평가를 위해서 국제적으로 활용되고 있는 표준시험법의 평가 및 영향 종말점을 활용하는 것을 제안한다. 영향종말점은 무게, 길이, 생체량 등으로 판단되는 생장율, 생존율(혹은 치사율), 그리고 생식율을 포함하며, 독성 종말점은 급성의 경우 반영향농도(EC50), 혹은 반치사농도(EC50)를 활용하고, 만성적 경우는 무영향농도(NOEC), 혹은 최저영향농도(LOEC)를 사용해야 한다.

4.4. 토양특성인자 반영

토양 환경내로 배출된 오염물질은 해당 토양 매체의 고유 물리·화학적 특성에 따라 독성영향이 변화할 수 있는 것으로 알려져 있다. 오염물질의 독성에 영향을 줄 수 있는 대표적인 특성들은 토양 수소이온농도(pH), 유기물 함량(Organic Matter, OM), 그리고 양이온치환능(Cation Exchanges Capacity, CEC) 등이 있다. 이러한 토양 특성은 국가별, 지역별로 다르므로 이를 고려해서 독성자료를 보정할 필요성이 있는 것으로 보인다. 예를 들어, 유럽연합

의 경우는 토양의 표준 유기물함량($Fom_{standard}$)을 일정 수치로 제안하고 있었으며, 식 (1)과 같이 실험 유기물함량(Fom_{exp})을 이용하여 독성값($NOEC$ or $EC50_{exp}$)을 보정하고 있는 것으로 확인되었다.^{5,14)}

$$NOEC_{standard} \text{ or } EC50_{standard} = NOEC_{exp} \text{ or } EC50_{exp} \times \frac{Fom_{standard}}{Fom_{exp}} \quad (1)$$

$NOEC$ or $EC50_{standard}$: Normalized $NOEC$ or $EC50$ for standard soil (mg/kg)

$NOEC$ or $EC50_{exp}$: $NOEC$ or $EC50$ for soil as used in the experiment (mg/kg)

$Fom_{standard}$: Organic matter content for standard soil (mg/kg)

Fom_{exp} : Organic matter content for experimental soil (mg/kg)

국외 선진국에서는 자국의 표준토양 특성인자를 다양하게 제시하고 있었다. 유럽연합은 유기물함량에 대한 특정값을, 호주는 유기물함량, 점토함량, 그리고 치환성양이온 등을 이용하고 있었으며,^{4,5)} 미국의 경우는 일정 토양특성 조건(유기물함량, pH 등)에서 생태 위해성평가를 수행할 것을 권고하고 있다.²⁾ 국내에서는 국립농업과학원의 ‘농업환경변동조사사업(2011)’을 토대로 농경지 토양유기물함량을 조사하여 전국 토양의 유기물함량 평균값인 31.1 g/kg (3.11%)을 표준토양특성인자로 보고한 바가 있는 것으로 확인되었다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 위와 같은 국내 토양 특성인자와 유럽연합의 유기물함량에 따른 독성값 보정 기법을 활용하여 독성자료를 보정할 것을 제안한다. 각 독성자료의 출처를 확인하여 독성평가 기법을 명확히 이해하고, 토양을 매체로 하여 ‘mg/kg’, ‘ug/g’, 혹은 단위 변환이 가능한 독성값을 제시하는 자료를 선정해야 한다. 토양생태 독성자료의 보정을 위하여 유기물함량을 필수적으로 제시해야 하며, 수소이온농도(pH), 양이온치환능(CEC), 전기전도도(Electronic Conductivity, EC) 등도 확인할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5. 생태독성자료 충족도 확인 및 예측무영향농도 산출

본 연구에서는 예측무영향농도 산출기법을 결정하기 위하여, 필수영양단계를 포함하는 생물분류군(강, class)과 급 · 만성 독성자료의 양적 수준을 통해 충족도 평가할 것을 제안한다. 필수영양단계는 환대강(oligochaeta), 곤충강(insects) 또는 쌍선충강(secernentea), 단자엽식물강(monocotyledoneae) 또는 쌍자엽식물강(dicotyledoneae), 그리고 미생물강(bacteria) 또는 녹조강(chlorophyceae)으로 제시하였다. 예측무영향농도 산출은 충족도에 따라 저신뢰, 중간신뢰, 고신뢰 수준으로 분류한다. 고신뢰 수준은 가용한 독성자료가 4개 필수

영양단계를 포함한 5개 이상의 만성독성자료가 있을 경우에 사용하며, 중간신뢰 수준은 4개 필수영양단계를 포함한 5개 이상의 급성독성자료가 있으며, 급성독성자료와 동일한 시험종의 만성독성자료가 있을 경우 수행된다. 저신뢰 수준은 필수영양단계를 포함한 1개 이상의 급 · 만성 독성자료만이 있을 때 활용 가능하다.

5.1. 저신뢰 수준 예측무영향농도 산출기법

저신뢰 수준 산출기법은 매우 부족한 생태독성자료가 존재할 경우 수행된다. 이는 신뢰도가 매우 낮아 정책적 활용이 불가능하므로, 스크리닝 참고치로만 사용할 것을 권고한다. 가용한 토양생태 독성자료의 양적 수준을 확인하여 평가계수(Assessment Factor, AF) 결정하게 되며, 이를 독성값에 적용하여 예측무영향농도를 산출한다. 1개의 필수영양단계를 포함한 급성독성자료가 있을 경우는 평가계수 1,000을 적용하고, 3개 이상의 필수영양단계를 포함한 급성독성자료일 경우는 100을 사용한다. 만성의 경우는 필수영양단계를 포함하여 1, 2, 그리고 3개의 독성자료가 존재할 경우 각각 100, 50, 그리고 10의 평가계수를 적용하는 것을 제안한다. 급성자료는 $E(L)50$ 을, 만성자료는 $N(L)OEC$ 값을 활용하며, 두 가지 모두 존재할 경우는 만성독성자료를 우선 사용한다. 각 독성자료는 선정된 평가계수를 나누어 예측무영향농도를 산출하며, 토지이용도를 고려하여 기법을 다르게 한다. 예를 들어, 필수영양단계를 포함한 급성독성자료가 존재할 경우 식 (2)와 같이 독성자료 중 최저값에 평가계수를 적용하여 주거/농업 지역에 해당되는 예측무영향농도를 산출하며, 필수영양단계를 포함한 만성독성자료가 존재할 경우 식 (3)과 같이 각 독성자료의 기하평균값에 평가계수를 적용하여 상업/공업 지역의 예측무영향농도를 산출할 수 있다.

$$PNEC_{Residential/Agricultural} = \frac{\text{Lowest } E(L)50 \text{ or } N(L)OEC}{AF} \quad (2)$$

$$PNEC_{Commercial/Industrial} = \frac{\text{Geomean of } (E(L)50 \text{ or } N(L)OEC)}{AF} \quad (3)$$

5.2. 중간신뢰 수준 예측무영향농도 산출기법

중간신뢰 수준 산출기법의 경우는 필수영양단계를 포함한 급성독성자료가 충분하지만 만성독성자료가 부족할 경우 활용한다. 급 · 만성비(Acute-Chronic Ratio, ACR) 개념을 적용하며, 각 시험종별 급성과 만성 독성값의 기하평균의 비율을 통하여 산출된다. 전체 시험종별 급 · 만성비는 다시 기하평균값으로 산출하고, 해당 값을 최종 급 · 만성비로 결정하게 된다. 최종 급 · 만성비가 산출이 불가능하거나, 10 미만일 경우는 기본값인 10을 적용하도록 한다. 필수영양단계를 포함한 급성독성자료를 이용하여 고신뢰 수

준과 동일한 방법으로 종민감도분포(SSD) 개념의 예측무영향농도가 산출되며, 이를 급·만성비로 나누어 최종 예측무영향농도를 결정한다. 예측무영향농도 산출기법은 다음에 자세하게 설명되었다.

5.3. 고신뢰 수준 예측무영향농도 산출기법

고신뢰 수준 산출기법은 필수영양단계를 포함하여 충분한 만성독성자료를 만족할 경우 활용하며, 정규누적분포독성자료를 바탕의 종민감도분포(SSD)를 이용하여 예측무영향농도를 산출한다. 종민감도분포의 적용은 다양하게 제안된 바 있으나, 본 연구에서는 네덜란드 RIVM의 ETX 2.1 프로그램을 활용할 것을 제안하였다. ETX 프로그램은 'Setting international environmental quality criteria (INS)'에서 사용되며, 생태독성자료를 기반으로 종민감도분포를 구성하는데 사용된다. 각 시험종별 만성독성자료의 기하평균값을 프로그램에 입력하며, ETX 프로그램은 이를 바탕으로 위해농도(hazardous concentration, HC)를 산출하게 된다. 독성자료 설정에 따라 전체 토양 생물종의 95% (HC5)와 50% (HC50)에 해당되는 생물종을 보호할 수 있는 수준을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 산출된 HC5는 토지이용도 주거/농업의 예측무영향농도로, HC50은 토지이용도 상업/공업 지역의 예측무영향농도로 구분하여 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

6. 생태위해도 결정

본 연구에서는 토양생태 예측무영향농도를 저신뢰, 중간신뢰, 그리고 고신뢰 수준 기법에 따라 산출하고, 토지이용도(주거/농업, 상업/공업)에 따라 분류할 수 있는 방안을 제시하였다. 이는 예측무영향농도 이하일 경우는 보호수준(%)에 해당되는 생물종을 안전하게 유지할 수 있음을 의미하며, 생태 위해도를 판별하는 중요한 자료가 된다. 본 연구에서는 토양노출농도 결정은 '토양오염물질 (인체)위해성평가 지침'에 따른 것을 제안하며, 상위 두가지 값의 비율을 통해 위험지수를 산출하여 최종적으로 위해도를 결정한다. 허용가능한 위험지수는 '1'이며, 산정된 위험지수가 이보다 높으면 최종적으로 대상 오염물질이 토양생태계에 위해를 줄 수 있는 개연성이 있는 것으로 판단한다.

7. 결론 및 토의

국내형 토양생태 위해성평가 체계를 수립하고 이를 수행하기 위한 자세한 정보를 제시하였으며, 토양생태 독성자료의 적합성을 판단할 수 있는 기준, 독성자료를 표준화할 수 있는 데이터베이스, 그리고 예측무영향농도 산출기법을 설명하였다. 이러한 평가 체계를 포함하여, 토양생태 위해성평가가 제도적으로 도입되기 위해서는 몇 가지 추가 필

요사항이 있을 것으로 사료된다. 첫 번째는 평가체계에서 제안되고 있는 데이터베이스의 수집과 표준화를 위해서 일괄적인 기준이 있어야 한다는 것이다. 이를 위해서 표준화 항목을 모두 정리하고 목록화할 수 있는 기준이 필요할 것으로 보인다. 생태독성자료 목록화의 주된 내용은 생태독성자료 수집원, 출처확인, 신뢰도지수, 시험종, 영양단계 분류, 토양, 시험기간, 종말점, 그리고 독성값을 포함해야 하며, 같은 출처의 생태독성자료라도 1개 이상의 토양, 종말점, 시험기간, 그리고 독성값으로 분류가 가능하다면 이를 독립적으로 목록화해야 한다. 두 번째는 이러한 데이터베이스를 지속적으로 관리할 수 있는 방안의 마련이다. 토양생태 위해성평가는 다양한 형태의 독성자료에 따라 그 신뢰성이 결정되므로, 연구 흐름에 따라 수 있도록 국내형 데이터베이스를 구축하여 이를 지속적으로 관리할 수 있어야 할 것으로 보인다. 세 번째는 토양생태 위해성평가를 직접적으로 현장에 적용할 수 있는 방안의 마련이다. 토양생태 독성자료 생산을 현장으로 연계할 수 있는 방안과 현장조사결과와 운영기법을 마련하여 시범평가를 수행하고, 생산되는 자료를 이용하여 위해성평가 체계가 보완되어야 할 것으로 보인다.

본 연구에서 4단계로 구성된 토양생태 위해성평가는 신뢰성 높고 표준화된 생태독성자료를 기반으로 하며, 종민감도분포를 활용한 예측무영향농도를 산출할 수 있게 하였다. 이는 토양오염물질 생태 위해성평가 지침을 제안하기 위한 기반 자료가 될 수 있으며, 토양오염부지에서 인체 위해성이 확인되지 않더라도 생태계에 미치는 영향이 우려될 경우 토양생태계에서의 위해도를 결정할 수 있을 것으로 보인다. 더 나아가 생태계 보호수준을 결정을 통한 지속가능한 토양관리 및 감시체계를 국가차원에서 수립하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 위와 같은 사항들을 고려하여 제도발전 방안을 모색하고 지침을 수립하여, 지속적으로 보완 및 개정을 통해 합리적인 토양 관리의 근거를 마련해야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 국립환경과학원 및 환경부 토양·지하수 오염방지 기술개발사업(2012000540011, 2014000560001)의 지원받은 과제임.

KSEE

References

1. United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Guideline for ecological risk assessment," EPA/630/R-95/0002F(2008).
2. United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Guidance for developing ecological soil screening levels"

- (2005).
3. Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), "A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines,"(2006).
4. National Environment Protection Council (NEPC), "National Environment Protection (Assessment of Site Contamination) Measure 1999, Schedule B5b, Methodology to derive ecological investigation levels in contaminated soils,"(2013).
5. European Chemicals Bureau (ECB), "Technical guidance document on risk assessment,"(2003).
6. Environment Agency (EA), "Guidance on the use of soil screening values in ecological risk assessment,"(2008).
7. Ministry of Environment (MOE), "Creating study of practical guidelines for risk assessment in conjunction with soil pollution standard,"(2006).
8. National Institute of Environmental Research (NIER), "Risk assessment of lead, cadmium, and mercury,"(2005).
9. National Institute of Environmental Research (NIER), "Study on the methodology for evaluation of potential hazardous pollutants,"(2005).
10. An, Y.-J., Lee, W.-M., Nam, S.-H. and Jeong, S.-W., "Proposed approach of Korean ecological risk assessment for the derivation of soil quality criteria," *J. Soil & Groundwater Environ.*, **15**(3), 7~14(2010).
11. Lee, W.-M., Kim, S. W., Jeong, S.-W. and An, Y.-J., "Comparative study of ecological risk assessment: Deriving soil ecological criteria," *J. Soil & Groundwater Environ.*, **17**(5), 1~9(2012).
12. Lee, W.-M., Nam, S.-H. and An, Y.-J., "Deriving ecological protective concentration of cadmium for Korean soil environment," *Environ. Eng. Res.*, **18**, 241~246(2013).
13. Kim, S. W., Kwak, J. I., Jeong, S.-W. and An, Y.-J., "Selection of domestic test species suitable for Korean soil ecological risk assessment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(5), 359~366(2014).
14. Ministry of Environment (MOE), "Establishment of ecological risk assessment frame for soil pollution and its application scheme in Korea,"(2014).
15. European Chemicals Bureau (ECB), "Risk Assessment Report-Cadmium Oxide and Cadmium Metal,"(2007).
16. Rijksoverheid voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), "Manual for summarising and evaluating environmental aspects of plant protection product,"(2008).
17. Bio resource Information Service, "<http://www.bris.go.kr>."
18. National Institute of Biological Resources, "<http://www.nibr.go.kr>."
19. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Guide for Conducting Terrestrial Plant Toxicity Tests," E1963-02(2002).
20. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Determination of the effects of pollutants on soil flora - Screening test for emergence of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.)," ISO 17126(2005).
21. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Determination of the effects of pollutants on soil flora - Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth," ISO 11269-1(2012).
22. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Determination of the effects of pollutants on soil flora - Part 2: Effects of contaminated soil on the emergence and early growth of higher plants," ISO 11269-2(2012).
23. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test," Test No. 208(2006).
24. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "Terrestrial Plant Test: Vegetative Vigour Test," Test No. 227(2006).
25. United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Seed germination/Root elongation toxicity test," Ecological effects test guidelines, OCSPP 850.4200(1996).
26. United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Seedling emergence, Tier II. Ecological effects test guidelines," Ecological effects test guidelines, OCSPP 850.4225 (1996).
27. United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Seedling emergence and seedling growth," Ecological effects test guidelines, OCSPP 850.4100(2012).
28. United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Vegetative vigor," Ecological effects test guidelines, OCSPP 850.4150(2012).
29. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard guide for conducting laboratory soil toxicity or bioaccumulation tests with the Lumbricid earthworm *Eisenia fetida* and the Enchytraeid potworm *Enchytraeus albidus*," E1676-04(2004).
30. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Inhibition of reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by soil pollutants," ISO 11267(1999).
31. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "Collembolan reproduction test in soil," Test No. 232(2009).
32. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard guide for conducting laboratory soil toxicity tests with the nematode *Caenorhabditis elegans*," E2172-01(2014).
33. International Organization for Standardization (ISO), "Water quality-Determination of the toxic effect of sediment and soil samples on growth, fertility and reproduction of *Caenorhabditis elegans* (Nematoda)," ISO 10872(2010).
34. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*) - Part 1: Determination of acute toxicity using artificial soil substrate," ISO 11268-1(1993).
35. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*) - Part 2: Determination of effects on reproduction," ISO 11268-2(1993).
36. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Effects of pollutants on Enchytraeidae (*Enchytraeus* sp.) - Determination of effects on reproduction and survival," ISO 16387(2004).

37. International Organization for Standardization (ISO), "Soil quality - Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour - Part 1: Test with earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*)," ISO 17512-1(2008)
38. Kwak, J. I., Kim, S. W. and An, Y.-J., "A new and sensitive method for measuring *in vivo* and *in vitro* cytotoxicity in earthworm coelomocytes by flow cytometry," *Environ. Pollut.*, **134**, 118~126(2014).
39. Kim, S. W., Kwak, J. I. and An, Y.-J., "Multigenerational study of gold nanoparticles in *Caenorhabditis elegans*: Trans-generational effect of maternal exposure," *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 5393-5399(2013).
40. Roh, J.-Y., Sim, S. J., Yi, J., Park, K., Chung, K. H., Ryum D.-Y. and Choi, J., "Ecotoxicity of silver nanoparticles on the soil nematode *Caenorhabditis elegans* using functional exotoxicogenomics," *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 3933-3940 (2009).