

TRIAD 기반 토양생태위해성평가 적용사례 분석

김해미¹ · 김도경^{1,2} · 안윤주^{1,2*}

¹건국대학교 환경보건과학과

²건국대학교 휴먼앤에코케어센터

Comprehensive Review on Case Studies of Soil Ecological Risk Assessment Based on TRIAD Approach

Haemi Kim¹, Dokyung Kim^{1,2}, and Youn-Joo An^{1,2*}

¹Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul, Korea

²Human and Eco Care Center (HECC), Konkuk University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Soil is a major element for organisms, as well as for human. Thus, to manage soil contamination, a system based on risk assessment is needed. In 2017, ISO announced an international standard for site-specific soil ecological risk assessment (SERA) based on the TRIAD approach. Based on TRIAD methodology, Korea is developing guidelines for site-specific SERA tailored to domestic conditions. This study aims to provide information for the development of domestic guidelines by analysis of TRIAD case studies. As results of analyses for 19 previous studies, it was found that ecological risks were quantified by integrating chemical, ecotoxicological, and ecological factors as proposed in the TRIAD guidelines, and that diverse analysis items were selected to reflect the characteristics of each site. Some studies excluded ecotoxicological or ecological factors, which was found to increase uncertainty. On the other hand, four studies on Korean TRIAD case studies were identified, all of which were for abandoned mine sites. To extend the applicability of Korean SERA guidelines, it is necessary to evaluate the applicability of TRIAD to contaminated sites with diverse types and uses of contamination.

Key words : lines of evidence (LoE), Chemistry-LoE, Ecotoxicology-LoE, Ecology-LoE, Integrated risk

1. 서 론

토양은 인간뿐 아니라 육상생물의 주요 서식처로, 안전한 토양환경을 관리하기 위해서는 인체위해성과 생태위해성을 모두 고려하는 위해성평가 기반 관리가 필요하다. 국내의 경우 1995년 토양환경보전법이 제정된 이후, 토양오염 위해성평가 지침이 2006년에 마련되었으나, 인체에 미치는 위해만을 평가하는 등 환경전반에 대한 영향을 평가하지 못하였다(국립환경과학원, 2019). 반면, 국외에서는 인체와 생태를 모두 고려하는 생태위해성평가 기법을

주저자: 김해미, 건국대학교 환경보건과학과, 박사과정
공저자: 김도경, 건국대학교 환경보건과학과, 박사 후 연구원
*교신저자: 안윤주, 건국대학교 환경보건과학과, 교수
E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr

Received : 2025. 05. 30 Reviewed : 2025. 06. 16
Accepted : 2025. 06. 27 Discussion until : 2025. 08. 31

제안하여 활용하고 있으며, 특히 자국 상황에 맞는 토양생태위해성평가를 수행하고 있다. 국외에서 시행 중인 토양생태위해성평가 지침목록은 Table 1과 같다. 미국, 캐나다, 호주, 영국, 네덜란드는 현장에 적용 가능한 생태위해성평가 관리 제도를 수행하고 있으며(USEPA, 1997; USEPA, 1998; CCME, 1999; Government of Canada, 2012; NEPC, 2006; EU, 2003; Environment Agency, 2008), 국제표준화기구 ISO(International Organization of Standardization)는 네덜란드 지침인 「Ecological Risk assessment of contaminated land」 (RIVM, 2006)를 기반으로 한 현장 생태위해성평가에 관한 국제 표준안 「Soil quality – Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach)」을 발표하였다(ISO, 2017).

토양은 다양한 용도의 부지로 사용되고 있음에 따라 다양한 물질에 기인한 오염이 발생할 수 있으며, 토양특성에 따라 위해 정도가 달라진다. 따라서 현장 상황이

Table 1. Guidelines of soil ecological risk assessment in foreign countries

Country	Organization	Guideline
USA	USEPA ¹⁾	Guidelines for ecological risk assessment (1998) Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments (1997)
Canada	Government of Canada	Ecological risk assessment guidance (2012)
	CCME ²⁾	Ecological risk assessment guidance document (2020)
	Goverment of Ontario	Procedures for the Use of Risk Assessment under Part XV.1 of the Environmental Protection Act (2021)
Australia	NEPC ³⁾	The use of risk assessment in contaminated site assessment and management (2006)
UK	Govermnet of United Kingdom	Land contamination risk management (LCRM) (2020)
Netherlands	RIVM ⁴⁾	Ecological Risk assessment of contaminated land (2006)
-	ISO ⁵⁾	Soil quality – Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach (2017)

1) USEPA: United States Environmental Protection Agency

2) CCME: Canadian Council of Ministers of the Environment

3) NEPC: National Environment Protection Council

4) RIVM: National Institute for Public Health and the Environment

5) ISO: International Organization for Standardization

고려된 대상부지의 오염 특성에 따른 잠재적 위해성평가가 필요하다. 국내에서도 광산 개발, 산업 개발, 폐기물 처리 시설 등의 용도로 부지가 다양하게 활용되고 있음에 따라 부지의 특성을 고려한 토양생태위해성평가 지침이 필요한 실정이다. 이에 국내에서는 부지특이적 토양생태위해성평가의 지침화를 위한 연구를 수행하고 있다. 국립환경과학원에서는 2019년 토양생태위해성평가 제도 도입 연구를 수행함으로써 국외의 토양생태위해성평가 관리제도를 분석하고 국내에 적용 가능한 「토양오염 생태위해성평가에 대한 지침(안)」을 제안한 바 있다(국립환경과학원, 2019). 해당 연구에서 제안된 한국형 토양생태위해성평가 지침(안)은 ISO의 TRIAD를 기반으로 한 토양생태위해성평가를 수행하도록 제안하였다. 한편, ISO의 TRIAD 지침에서는 생태위해성평가의 절차와 수행 가능한 평가 목록에 대한 프레임워크만을 제시하였을 뿐, 세부적인 절차는 제시하고 있지 않다. 이에 본 연구에서는 현재까지 수행되어진 TRIAD 기반의 토양생태위해성평가 적용사례를 조사, 분석함으로써 한국형 생태위해성평가에 활용 가능한 평가 요소를 제안하고 지침의 활용성을 제고하기 위한 방향성을 제시하고자 한다.

2. TRIAD 평가 시스템의 구조

ISO에서 제안한 부지특이적 토양생태위해성평가 지침은 「19204:2017. Soil quality — Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality

TRIAD approach)」총 5단계의 과정을 통해 생태학적 위험을 정량화하고 위해 관리를 위한 방안을 도출할 수 있도록 구성되어 있다(ISO, 2017; Fig. 1). 1단계에서는 문제 형성 및 TRIAD 기반 지역 특이적 토양 생태위해성평가 수행 여부를 결정하며 2단계에서는 생태학적 조건을 고려하는 기본조사를 수행한다. 이후, TRIAD를 수행하는 3단계 및 결과를 보정, 가중, 통합하는 4단계를 거쳐 5단계에서는 관리방안을 제시하도록 제안되었다.

TRIAD 수행 단계인 3단계는 TRIAD 평가의 가장 핵심 단계로 화학, 생태독성, 생태를 고려한 3개의 Lines of evidence (LoEs)의 분석 지표를 수행하도록 한다. TRIAD 수행단계는 3개의 세부 단계인 tier I-III에 따라 예비, 정밀, 심화 수준으로 구성되어 필요성에 따라 순차적으로 진행된다. 단계가 높아질수록 분석 지표는 장시간에 걸쳐 수행되며, 전문성이 요구된다. TRIAD 수행에 따른 화학적(Chemical-LoE; Chem-LoE), 생태독성학적(Ecotoxicological-LoE; Ecotox-LoE), 생태학적(Ecological-LoE; Eco-LoE) 분석 결과는 보정을 통해 0-1 사이의 값으로 조정되며, 동일한 가중치를 두는 것을 원칙으로 통합된다. 부지마다 통합된 결과를 기반으로 통합위해도(Integrated risk; IR)를 산정하고 그에 따른 후속 조치를 계획한다. TRIAD 수행단계는 불확실성이 높거나 자료가 불충분할 경우 더 높은 단계의 tier를 적용한 더욱 상세한 평가 수행이 요구되며, 자료가 충분하여 예비 또는 정밀 평가에서 불확실성이 낮다고 판정되는 경우 평가의 종료와 함께 그에 따른 조치가 수행될 수 있다.

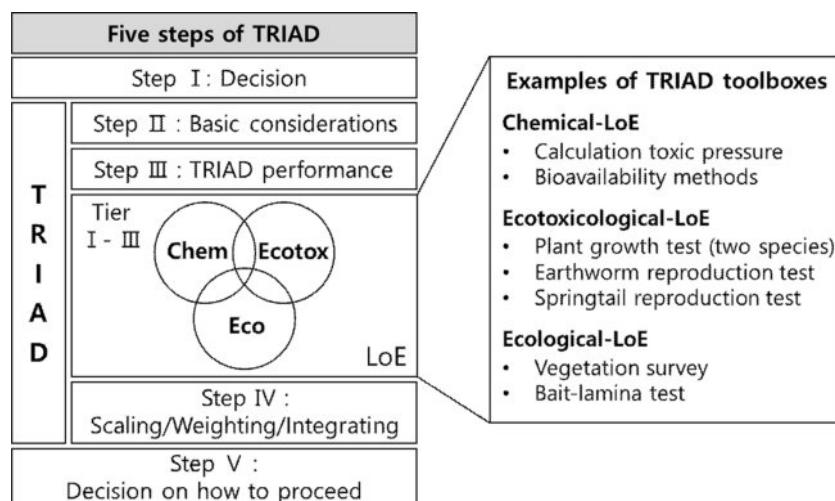


Fig. 1. Site-specific soil ecological risk assessment process based on TRIAD approach and example of analysis items in TRIAD performance (modified ISO, 2017).

Table 2. Case study of soil ecological risk assessment based on TRIAD: abandoned mine

Ref.	Site (Country)	Chemicals	Analysis items		
			Chemistry-LoE	Ecotoxicology-LoE	Ecology-LoE
Kim et al., 2024	Mine area (Korea)	Metals	Total metals, extractable metals	Plant shoot growth, earthworm survival, collembola survival, soil nematode survival, soil algae biomass, waterflea test, collembola abundance, mite survival, fish embryo abnormality, abundance, community level hatching rate, nematode reproduction, physiological profiling (CLPP) algae biomass, aquatic plant growth, microorganism growth	
Kim et al., 2022	Mine area (Korea)	Metals	Total metals, extractable metals	Plant shoot growth, earthworm survival, collembola survival, soil nematode survival, soil algae biomass, waterflea survival, fish embryo abnormality, hatching rate, nematode reproduction, algae biomass, microorganism growth	Collembola abundance, vegetation survey, bait-lamina test
Hong et al., 2021	Mine area (Korea)	Metals	Total metals, bioavailable metals	Earthworm survival, bioaccumulation, lettive root-elongation	Soil basal respiration, soil enzyme activity
Buch et al., 2021	Mine tailings area (Brazil)	Metals	Total metals	Collembola avoidance, survival, reproduction	Hakanson index
Son et al., 2019	Mine area (Korea)	Metals	Total metals, extractable metals	Collembola survival, reproduction	-
Antunes et al., 2008	Mine area (Portugal)	Metals	Bioavailable metals	Earthworm avoidance, bioaccumulation	-

3. TRIAD 기반 토양생태위해성평가 적용사례 분석

본 연구는 TRIAD 기반 토양생태위해성평가 적용사례를

조사, 분석함으로써 한국형 토양생태위해성평가 지침에 활용가능한 요소를 제안하고자 하였다. 분석 대상 연구는 TRIAD 기법을 적용하여 토양생태 위해성평가를 수행한 연구로, 2008년부터 2024년까지 17건의 문헌이 확인되었

Table 3. Case study of soil ecological risk assessment based on TRIAD: industrial area

Ref.	Site (Country)	Chemicals	Analysis items		
			Chemistry-LoE	Ecotoxicology-LoE	Ecology-LoE
Klimkowicz-Pawlas et al., 2023	Industrial area, lead smelter fossil fuel combustion (Poland)	Metals, PAHs	Total PAHs, bioavailable PAHs	Microorganism, shrimp filtration, plant germination, root respiration, microbial bio-length, ostracod survival, growth mass, nitrification, carbon plant germination, root length, mineralisation	Soil enzyme activity, soil filtration, plant germination, root respiration, microbial bio-length, ostracod survival, growth mass, nitrification, carbon plant germination, root length, mineralisation
Volchko et al., 2020	Urban contaminated area (Sweden)	PAHs	Total PAH, total metals	-	Collembola abundance, soil nematode abundance, N-cycling microbial community
Klimkowicz-Pawlas et al., 2019	Industrial area (Czech Republic)	PAHs	Total PAH	Microorganism, shrimp filtration	Soil respiration, enzyme activity
Ribé et al., 2012	Metal industry site (Sweden)	Metals	Total metals, extractable metals, Diffusive Gradient in Thin-films (DGT) bioavailable metals	Microorganism, ostracod survival, plant germination, growth	Nitrification, carbon mineralisation

Table 4. Case study of soil ecological risk assessment based on TRIAD: others

Ref.	Site (Country)	Chemicals	Analysis items		
			Chemistry-LoE	Ecotoxicology-LoE	Ecology-LoE
Totubaeva et al., 2022	Waste landfill (Kyrgyzstan)	Metals	Total metals	Plant germination, shoot length, root length	Microorganism colony forming units (CFU)
Pereira et al., 2021	Dumping stack area (Tunisia)	Metals	Total metal	Earthworm avoidance, collembola avoidance, plant emergence, growth, algae growth, waterflea survival, microorganism	-
Gutiérrez et al., 2015	Non-sealed landfill (Spain)	Metals	Total soil msPAF, plant msPAF, earthworm msPAF	Earthworm survival, growth, plant growth, photoprotective photosynthetic pigments	Microtox, soil basal respiration, enzyme activity, soil community-level physiological profiles (CLPP)
Niemeyer et al., 2015	Smelter area (Brazil)	Metals	Total metals, extractable metals	Potworm reproduction, earthworm reproduction, collembola reproduction, plant shoot length, biomass, microalgae growth, waterflea reproduction	Microbial biomass, enzyme activity, nitrogen transformation, soil invertebrate abundance, litter bag test
Sovari et al., 2013	Landfill area (Finland)	PHC, TPH, Metals	TPH, total metals	Plant germination, aquatic plant growth, earthworm survival, potworm survival reproduction, earthworm survival, reproduction	Soil invertebrate abundance, diversity
Niemeyer et al., 2010	Smelter area (Brazil)	Metals	Total metals	Collembola avoidance, earthworm avoidance, waterflea immobilization, survival, microorganism	Bait-lamina test, soil respiration, vegetation survey
Karjalainen et al., 2009	Wood impregnation facility (Finland)	Metals	Total metals, bioaccumulation metals	Plant germination, root elongation, aquatic plant growth, earthworm survival, potworm survival reproduction	Nematode abundance, enchytraeidae abundance

다(Table 2-4). 기준 사례에서 평가대상 부지는 한국, 스웨덴, 폴란드, 브라질 등에 위치한 지역에서 수행되었으며, 대부분 폐광산, 산업지역, 매립지, 재현소 등의 이력이 있는 것으로 나타났다. 분석 지표는 화학적, 생태독성학적, 생태학적 분석 항목 중 2개 이상을 선정하여 평가하였다.

3.1. 폐광부지 대상 토양생태위해성평가 사례

폐광부지를 대상으로 한 연구사례는 7건 확인되었다 (Table 2). Antunes et al.(2008)는 우라늄광산 부지를 대상으로 4개 지점을 선정하여 토양분석과 현장평가를 수행하였다. 토양에서 고농도의 중금속오염에 따른 지렁이 (*Eisenia andrei*) 회피반응과 높은 수준의 체내축적이 확인되었다. 결과를 통해 지렁이평가 기반의 Ecotox-LoE 산출은 적절하나, Eco-LoE 적용 필요성을 제시하였다. Son et al.(2015)은 폐금속광산 부지 10곳을 대상으로 tierI의 생태위해성평가를 수행하였다. 토양의 중금속 농도과 추출가능 농도를 평가하였으며, 톡토기(*Paronychiurus kimi*)의 생식률을 평가하였다. 통합위해도 결과를 기반으로 오염순위를 선정하였으나, Chem-LoE, Ecotox-LoE의 높은 표준편차로 다음 단계의 평가가 필요함을 제시하였다. Buch et al.(2021)는 댐 봉괴로 폐광으로 덮인 지역에 대하여 시간간격을 두고 토양을 채취하여 중금속 농도를 측정하였다. 톡토기(*Proisotoma minuta*)의 생존율, 생식률, 회피평가를 수행하였으며, Ecotox-LoE를 기반으로 잠재적 생태학적 영향을 평가하였다. 해당 연구는 Chem-LoE 결과 보완을 위해 Ecotox-LoE의 필요성을 제시하였으며, 후속연구를 통해 Eco-LoE 산출 필요성을 제시하였다. Hong et al.(2021)은 폐광주변 농경지의 6개 지점에서 토양을 채취하여 토양 중금속 및 생체이용기능농도를 분석하였으며, 지렁이(*Eisenia fetida*)의 체내 중금속농도와 상추 (*Lactuca sativa* sp.)의 뿌리성장을 평가하였다. Eco-LoE는 토양 기초호흡과 효소활성 분석 결과를 활용하였다. 해당 연구에서는 tierI 결과의 불확실성으로 인해 세가지의 LoE를 적용한 tierII 단계를 수행하여 위해 수준을 분류하였다. Chem-LoE를 기반으로 제시된 위해도는 불확실할 수 있음을 보여주며, 표준편차를 줄이기 위해 후속연구 수행 필요성을 제시하였다. Kim et al.(2022)은 국내 사례 연구로, 폐광부지를 대상으로 5개의 토양을 채취하여 중금속 농도와 추출가능 농도를 분석하였다. 토양 대상의 식물(*Vigna radiata*, *Oryza sativa*), 지렁이(*E. andrei*), 톡토기(*Folsomia candida*), 선충(*Caenorhabditis elegans*), 토양조류(*Chlorococcum infusionum*) 독성평가와 토양추출액 대상의 물벼룩 (*Daphnia magna*), 어류수정란(*Danio rerio* embryo), 선충

(*C. elegans*), 조류(*Chlamydomonas reinhardtii*), 미생물 (*Escherichia coli*) 독성평가를 수행하였다. 생태인자로는 대상부지의 톡토기 종 풍부도, 식생조사, bait-lamina test를 선정하였다. 해당 연구에서는 평가인자의 다중분석을 수행함으로 통합위해도를 산출하여 위해수준 분류에 발생하는 불확실성을 줄이고자 하였다. Kim et al.(2024)은 선행연구(Kim, 2022)에서 제안된 TRIAD 기반의 생태위해성평가 방법에 따라 폐광부지를 대상으로 tierI, II 수준의 평가를 연속 수행하였다. 그 결과, 통합위해도에 따라 분류된 위해 수준은 동일하였으나, 상세평가에서 더 낮은 표준편차가 산출되어 결과의 불확실성이 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 TRIAD 수행에서 다양한 분석 방법이 적용된 높은 수준의 평가가 수행될 필요성이 있음을 제시하였다.

3.2. 산업부지 대상 토양생태위해성평가 사례

산업부지를 대상으로 한 연구사례는 4건으로 확인되었다 (Table 3). Ribé et al.(2012)은 금속산업부지 토양의 총 금속농도와 추출가능 농도를 평가하였다. 토양 추출액 대상으로 미생물(*A. fischeri*) 평가와 토양 대상의 패충류(*H. incongruens*), 식물(*Raphanus sativus* L., *Trifolium repens*) 독성평가를 수행하였으며, 질산화 및 탄소광물화를 분석하였다. 평가지점에 따라 LoE 사이의 편차가 서로 다르게 확인되었는데 이는 지점별 오염원에 따른 결과로, 적절한 LoE에 가중치가 부여될 필요성이 있음을 제시하였다. Klimkowicz-Pawlas et al.(2019)은 tierI 수준의 평가를 수행하였는데, PAH 농도 기반의 Chem-LoE와, 새우(*T. platyurus*)와 미생물(*A. fischeri*) 평가를 통한 Ecotox-LoE, 토양 호흡과 효소활성 평가 기반으로 산정된 Eco-LoE 값을 통합하여 위해도를 산정하였다. 산정된 위해도는 높은 Chem-LoE에 기인한 것으로 확인되었으며, 이에 따라 더 높은 수준의 평가가 수행되어야 할 필요성을 제시하였다. 또한 부지 및 오염 특성에 따라 동일한 가중치가 아닌 Ecotox-LoE와 Eco-LoE에 더 높은 가중치를 부여할 필요성이 있음을 제시하였다. Klimkowicz-Pawlas et al.(2023)에서는 선행연구에서 확장된 연구로써 tierII 수준의 상세 평가를 수행하였다. PAH 총 농도와 생체이용기능 농도를 분석하였고, 토양 대상의 패충류(*Heterocypris incongruens*), 식물(*Sinapis alba* L., *Lactuca sativa* L.), 토양추출액 대상의 미생물(*Aliivibrio fischeri*), 새우(*Thamnocephalus platyurus* larvae), 식물(*Sinapis alba* L., *Lepidium sativum* L.) 평가를 수행하였다. Eco-LoE는 토양 호흡과 효소활성, 미생물 생체량, 질산화 및 탄소광물화 평가를 기반으로 하였다. IR 산정 시 동일한 가중치를 부여하였으나, PAH 특성을

고려하여 Chem-LoE에 낮은 가중치를 적용하는 경우, 위해도 산정 시 위해도 및 불확실성이 달라질 수 있음을 명시하였다. Volchko et al.(2020)은 tierIII 평가 적용에 따른 이점을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 해당 연구에서는 더 높은 수준의 평가가 수행되어 많은 비용과 시간이 소요되나, 결과적으로 복원 조치 비용과 온실가스 배출량을 감소시키고 환경영향을 최소화함을 제시하였다.

3.3. 기타 부지 대상 토양생태위해성평가 사례

기타 부지를 대상으로 한 연구사례는 7건 확인되었다 (Table 4). Karjalainen et al.(2009)은 폐목재 함침시설 토양과 부지 내 우물을 채취하였으며, 비소 축적이 가능한 식물(horsetail)을 대상으로 금속분석을 수행하였다. 지렁이와 애지렁이 독성평가와 풍부도를 평가를 수행한 결과를 기반으로 위해도를 판정하였으며, 높은 위해수준이 확인된 지점에서 잠재적으로 위해도가 증가할 수 있음을 제시하였다. Niemeyer et al.(2010) 제련소 부지를 대상으로 스크리닝 수준의 위해도를 평가하여 더 높은 단계의 평가가 필요한 부지를 확인하였다. 11개 지점을 선정하여 총 금속농도를 평가하였으며, 톡토기(*F. candida*), 지렁이(*E. andrei*)와 토양추출액을 이용한 물벼룩(*D. magna*), 미생물(*Vibrio fischeri*) 평가를 기반으로 Ecotox-LoE를 산정하였다. Eco-LoE는 bait-lamina, 토양호흡, 식생조사 결과를 기반으로 하였다. IR 산출 결과, 일부 지점에서 높은 위해도가 확인되었으나 이는 시료채취 지점 정보와 관련된 불확실성으로 판단되어 더 높은 수준의 평가의 필요성을 제시하였다. Niemeyer et al.(2015)은 선행연구에 이어 잠재적 위해를 평가하고자 tierII 평가를 수행하였다. Chem-LoE 산정을 위하여 금속 농도와 추출가능 금속농도 분석을 수행하였으며, 토양독성(지렁이, 톡토기) 및 토양추출액 독성평가(물벼룩, 조류)를 통해 생태독성학적 평가를 수행하였다. Eco-LoE는 미생물 분석결과와 litter bag 평가를 통해 측정된 유기물 분해율을 기반으로 산정하였다. 산출된 통합위해도 결과는 tierI보다 낮은 불확실성이 확인되었으나, 높은 위해도로 개선 조치가 필요함을 확인하였다. Sorvari et al.(2013)은 매립지를 대상으로 TRIAD 절차와 다기준 의사결정 분석(Multi-Criteria Decision Analysis), 몬테카를로 분석을 적용하여 위해도를 예측하고자 하였다. 토양 내 금속과 PHC 농도를 기반의 화학평가와 식물과 지렁이를 대상으로 한 생태독성평가, 토양무척추동물의 다양성을 평가한 생태평기를 수행함으로써, TRIAD의 세 개 LoE의 통합을 통해 단일평가에 따른 불확실성을 낮출 수 있음을 제시하였다. 또한 각 개별위해도 산정을 위해 많은

정보가 확보될 필요성을 제시하였다. Gutiérrez et al.(2015)는 부지 특성에 따른 TRIAD 방법을 설정하고 매립지 주변 오염 토양에 적용함으로써 생태위해성평가 방법을 검증하고자 하였다. 2개의 지점을 대상으로 토양 중금속을 분석하였고 식물, 지렁이, 토양호흡과 활성 평가를 기반으로 산출한 개별위해도 결과와 통합위해도 결과의 일치를 통해 TtierII 수준에서 적용한 방법의 적절성을 확인하였다. 그러나 정확한 결과 해석을 위해 잠재적 위해에 대한 평가가 추가될 필요성을 제시하였다. Pereira et al.(2021)은 인산염 폐기장의 주변지역을 대상으로 스크리닝 수준의 TRIAD 평가를 수행하였다. 총 금속 함량을 분석하였으며, 추출액을 제조하여 물벼룩, 조류, 미생물 독성평가를 수행하였다. 또한 토양을 이용한 식물 독성평가와 함께 톡토기와 지렁이 회피반응을 확인하였다. 해당 연구에서는 세가지의 LoE 중 Chem-LoE와 Ecotox-LoE만을 활용하여 IR을 산정하였다. 다양한 오염의 존재로 인하여 동일한 가중치가 아닌 Ecotox-LoE에 더 높은 가중치가 부여될 필요성이 있음을 제안하였으나, 향후 부지의 사용 용도 계획에 따라 상세수준 평가의 필요성을 제시하였다. Totubaeva et al.(2022)는 광업폐기물 매립지를 대상으로 TRIAD 평가를 수행하였다. 공장 부지 내 토양을 4회 (2011-2014년)에 걸쳐 채취하여 금속 농도의 분석을 수행함으로써 Chem-LoE를 산정하였다. Ecotox-LoE는 식물의 빌아, 뿌리와 줄기 성장 결과를 기반으로 계산하였으며, 미생물 군집형성을 측정하여 Eco-LoE를 산정하였다. 이를 통해 지속적인 모니터링과 복원 조치가 시행될 필요성이 있음을 확인하였다.

3.4. 종합 분석

TRIAD를 적용한 사례는 부지이력에 따라 크게 폐광부지, 산업부지, 기타부지로 분류 가능하다. 대부분의 대상부지는 한가지의 오염물질이 명확하게 밝혀지지 않음에 따라 기본적인 토양 이화학분석과 함께 토양 내 금속의 총농도 분석을 수행하였다. TRIAD 평가 방법을 적용한 사례는 모두 Chem-LoE를 산정하였는데, 토양 내 금속총농도 이외에 추출 가능한 금속 농도 분석을 수행한 경우 지렁이 체내 금속 축적량을 평가하였다(Antunes, 2008; Hong, 2021). Ecotox-LoE 평가 또한 실현적 문제로 제외된 1건의 사례(Volchko, 2020)를 제외하고 모두 산정된 것으로 확인되었다. Eco-LoE 평가는 상황에 따라 분석지표에 선택적으로 포함되는 것으로 확인되었다. 한편, 생태학적 지표는 현장의 특성을 나타내는 중요한 요소이므로, TRIAD 평가에서는 반드시 화학, 생태독성학, 생태학적 요인의

필수적으로 수반되어야 할 필요가 있다.

대부분의 연구에서 스크리닝 수준의 TRIAD 평가를 수행하여 위해도를 판정하였는데, 많은 사례에서 높은 불확실성으로 인해 상세 수준의 평가단계의 필요성을 제시하였다. 또한 연속적으로 두 개 이상의 단계 평가를 수행한 연구 결과, 더 높은 단계의 평가 시 불확실성이 낮아짐을 확인하였다(Gutiérrez et al., 2015; Niemeyer et al., 2015; Hong et al., 2021; Kim et al., 2024). 이에 따라 생태학적으로 중요한 부지의 경우 보다 다양한 항목을 활용하여 높은 수준의 TRIAD 평가를 수행하는 것을 권장한다.

한편, 다양한 부지이력을 가진 토양을 대상으로 TRIAD 평가를 적용한 국외의 사례들과 달리 국내에서 수행된 TRIAD 평가 연구는 모두 폐광부지로 확인되었다(Son et al., 2019; Hong et al., 2021; Kim et al., 2022; Kim et al., 2024). 국내형 토양오염 생태위해성평가 지침이 확립되고 활용되기 위해서는 중금속 고오염부지 이외에도 도시 주변의 개발 예정지, 과거 농약 사용이 집중된 농경지 등 다양한 용도 및 오염형태를 가진 부지에 국내형 TRIAD 체계를 적용할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 ISO에서 제안된 TRIAD 기법을 적용하여 토양생태위해성평가를 수행한 사례를 조사하고 분석함으로써 한국형 토양생태위해성평가 지침 및 적용에 있어 기초자료를 제공하고자 하였다. TRIAD 평가 인자는 부지 특성이나 물질에 따라 선정된 것으로 확인되었다. 한편, 일부 연구는 세가지의 LoE 항목 중 생태 또는 생태독성 요인을 제외하기도 하였는데 이러한 경우 높은 불확실성을 보이거나 편향된 위해도를 보였다. 따라서 신뢰성 있는 TRIAD 평가를 수행하기 위해서는 화학, 생태독성, 생태 인자를 통합하는 것이 필수적이며, 부지 특성을 반영한 평가 항목을 선정하는 것이 중요하다. 이에 국내형 토양생태위해성평가 지침에서도 세가지 항목을 필수적으로 활용하도록 제안되어야 할 것이다. 또한 다양한 생태구조를 고려한 평가항목 선정을 통해 신뢰도 있는 TRIAD 평가를 수행할 수 있도록 제안되어야 한다. 한편, 국내에서 수행된 TRIAD 기반 토양생태위해성평가 사례는 모두 폐광부지만을 대상으로 하였는데, 지침의 활용성을 확장하기 위해서는 다양한 오염 형태 및 부지이력을 가진 토양을 대상으로 한 평가 수행이 필요할 것이다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 연구되었습니다 2022002450002(RS-2022-KE002074).

References

- Antunes, S. C., Castro, B. B., Nunes, B., Pereira, R., Gonçalves, F. 2008. In situ bioassay with Eisenia andrei to assess soil toxicity in an abandoned uranium mine. *Ecotox. Environ. Safe.*, **71**(3), 620-631.
- Buch, A. C., Niemeyer, J. C., Marques, E. D., Silva-Filho, E. V. 2021. Ecological risk assessment of trace metals in soils affected by mine tailings. *J. Hazard. Mater.*, **403**, 123852.
- CCME, 2020, Ecological risk assessment guidance document.
- GOV.UK, 2023, Land contamination risk management (LCRM)
- Government of Canada, 2012, Ecological risk assessment guidance.
- Government of Ontario, 2021, Procedures for the Use of Risk Assessment under Part XV.1 of the Environmental Protection Act.
- Gutiérrez, L., Garbisu, C., Ciprián, E., Becerril, J. M., Soto, M., Etxebarria, J., Madariaga, J. M., Epelde, L. 2015. Application of ecological risk assessment based on a novel TRIAD-tiered approach to contaminated soil surrounding a closed non-sealed landfill. *Sci. Total Environ.*, **514**, 49-59.
- Hong, Y. K., Yoon, D. H., Kim, J. W., Chae, M. J., Ko, B. K., Kim, S. C. 2021. Ecological risk assessment of heavy metal-contaminated soil using the triad approach. *J. Soils Sediments*, **21**, 2732-2743.
- ISO, 2017, Soil quality – Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach).
- Karjalainen, A. M., Kilpi-Koski, J., Väistönen, A. O., Penttinen, S., van Gestel, C. A., Penttinen, O. P. 2009. Ecological risks of an old wood impregnation mill: application of the triad approach. *Integr. Environ. Assess. Manag.*, **5**(3), 379-389.
- Kim, D., Kwak, J. I., Hwang, W., Lee, Y. H., Lee, Y. S., Kim, J. I., Hong, S., Hyun, S., An, Y. J. 2022. Site-specific ecological risk assessment of metal-contaminated soils based on the TRIAD approach. *J. Hazard. Mater.*, **434**, 128883.
- Kim, D., Kwak, J. I., Lee, T. Y., Kim, L., Kim, H., Nam, S. H., Hwang, W., Wee, J., Lee, Y. H., Kim, S., Kim, J. I., Hong, S., Hyun, S., Jeong, S. W., An, Y. J. 2024. TRIAD method to assess ecological risks of contaminated soils in abandoned mine sites.

- J. Hazard. Mater.*, **461**, 132535.
- Klimkowicz-Pawlak, A., Maliszewska-Kordybach, B., Smreczak, B. 2019. Triad-based screening risk assessment of the agricultural area exposed to the long-term PAHs contamination. *Environ. Geochem. Health*, **41**, 1369-1385.
- Klimkowicz-Pawlak, A., Smreczak, B., Maliszewska-Kordybach, B. 2023. Integrated Ecological Risk Assessment of the Agricultural Area under a High Anthropopressure Based on Chemical, Ecotoxicological and Ecological Indicators. *Agriculture*, **13**(7), 1353.
- NEPC, 2006, The use of risk assessment in contaminated site assessment and management.
- Niemeyer, J. C., Moreira-Santos, M., Nogueira, M. A., Carvalho, G. M., Ribeiro, R., Da Silva, E. M., Sousa, J. P. 2010. Environmental risk assessment of a metal-contaminated area in the Tropics. Tier I: screening phase. *J. Soils Sediments*, **10**, 1557-1571.
- Niemeyer, J. C., Moreira-Santos, M., Ribeiro, R., Rutgers, M., Nogueira, M. A., da Silva, E. M., Sousa, J. P. 2015. Ecological risk assessment of a metal-contaminated area in the tropics. Tier II: detailed assessment. *Plos one*, **10**(11), e0141772.
- Pereira, R., Bouguerra, S., Lopes, I., Santos, B., Marques, C. R., Silva, C., Mestiri, A., Frankenbach, S., Hentati, O., Khadraoui, M., Rombke, J., Ksibi, M., Haddioui, A., Sousa, J. P., Gonçalves, F. J. 2021. Application of a standard risk assessment scheme to a North Africa contaminated site (Sfax, Tunisia)-Tier 1. *Chemosphere*, **263**, 128326.
- Ribé, V., Aulanius, E., Nehrenheim, E., Martell, U., Odlare, M. 2012. Applying the Triad method in a risk assessment of a former surface treatment and metal industry site. *J. Hazard. Mater.*, **207**, 15-20.
- RIVM, 2006, Ecological Risk assessment of contaminated land.
- Son, J., Kim, J. G., Hyun, S., Cho, K. 2019. Screening level ecological risk assessment of abandoned metal mines using chemical and ecotoxicological lines of evidence. *Environ. Pollut.*, **249**, 1081-1090.
- Sorvari, J., Schultz, E., Haimi, J. 2013. Assessment of ecological risks at former landfill site using TRIAD procedure and multicriteria analysis. *Risk Anal.: An International Journal*, **33**(2), 203-219.
- Totubaeva, N., Tokpaeva, Z., Kojobaev, K., Usualieva, A., Terekhova, V. 2022. Ecological Assessment of Technogenically Disturbed Soils of the Mountain Ecosystems of Kyrgyz Republic based on the TRIAD method. *Pol. J. Environ. Stud.*, **31**(3).
- USEPA, 1997, Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessments.
- USEPA, 1998, Guidelines for ecological risk assessment.
- Volchko, Y., Kleja, D. B., Back, P. E., Tiberg, C., Enell, A., Larsson, M., Jones, C. M., Taylor, A., Viketoft, M., Åberg, A., Dahlberg, A-K., Weiss, J., Wiberg, K., Rosén, L. 2020. Assessing costs and benefits of improved soil quality management in remediation projects: A study of an urban site contaminated with PAH and metals. *Sci. Total Environ.*, **707**, 135582.
- 국립환경과학원, 2019, 토양 생태위해성평가 제도 도입 연구.
- 국립환경과학원, 2020-2023, 토양 생태위해성평가 제도 도입 연구.