

토양생태계 건강성 평가기법 비교연구: 토양건강성 평가항목을 중심으로

채유은¹ · 김신웅¹ · 곽진일¹ · 윤영대¹ · 정승우² · 안윤주^{1*}

¹건국대학교 환경과학과

²군산대학교 환경공학과

A Comparative study of Assessment Techniques for Soil Ecosystem Health: Focusing on Assessment Factors of Soil Health

Yooeun Chae¹ · Shin Woong Kim¹ · Jin Il Kwak¹ · Youngdae Yoon¹
Seung-Woo Jeong² · Youn-Joo An^{1*}

¹Department of Environmental Science, Konkuk University

²Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

The soil ecosystem is a complex system performing particularly complicated and varied functions, such as providing a habitat for organisms, acting as a medium for plant cultivation and growth, and functioning as a buffer against external materials in the environment. To assess whether these important functions of the soil ecosystem are executed appropriately, the concept of soil ecosystem health has been introduced, which is defined as the ability to perform the specific functions of the soil ecosystem. Understanding soil properties and soil indicators related to soil functions is essential to assess the soil health. In this study, systems, the indicators, and evaluation factors for assessing soil ecosystem health employed in a number of countries were investigated and discussed. In particular, it is necessary to introduce a technique for the evaluation of soil ecosystem health in Korea and to develop techniques and indicators appropriate to the soil ecosystem and status in Korea.

Key words : Soil health, Soil function, Soil ecosystem, Health assessment, Indicator

1. 서 론

토양생태계(Soil ecosystem)는 복합적인 시스템이며 (Torsvik and Øvreås, 2002) 식물 성장과 작물 재배에 직접적으로 관여하고, 환경 중 수분과 외부의 물질을 조절하는 등 환경 내 완충장치의 역할을 수행 한다 (Franzluebbers, 2002). 이 같은 토양생태계의 기능(function)을 평가하기 위해 도입된 개념인 토양생태계건강성(soil ecosystem health)은 토양생태계가 제대로 생물 서식처, 영양분 순환, 완충작용 등의 기능을 수행하여 올바르게 작동하기 위한 토양의 능력으로 정의할 수 있으며(Asensio et al., 2013) 일반적으로 토양 질(soil quality)과 유사한 의미로 사용된다. 토양이 건강하게 제 기능을 수행하고 있

는지 평가하기 위해서는 사람의 경우 혈액이나 혈압, 다양한 임상병리학적 지표들을 이용하여 종합검진을 통해 건강성을 평가하듯 토양 또한 다양한 토양 지표들(soil indicators)을 활용하여 진단하여야 정확하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. 이를 위해서는 우선적으로 토양건강성을 진단할 수 있는 지표들과 토양의 기능과 관련된 평가인자(assessment factors)를 파악하는 과정이 필요하다.

국외에서는 토양의 건강성, 혹은 토양 질을 평가하기 위한 지표(indicators)를 물리, 화학, 그리고 생물학적 지표로 분류하고 있다. 일반적으로 물리적 지표에는 입단안정성, 토양유효수분함량, 부피밀도, 토양 침투능, 그리고 토양 구조 등이 포함되며, 화학적 지표는 pH, 전기전도도, 그리고 토양 반응성 탄소 등을 포함한다. 그리고 다양한 지표

*Corresponding author : anyjoo@konkuk.ac.kr

Received : 2014. 10. 25 Reviewed : 2015. 3. 18 Accepted : 2015. 3. 23

Discussion until : 2015. 8. 31

에 대한 자료를 수집하고, 대상 토양에 대한 적합성, 평가하고자 하는 토양 기능과의 연계성을 고려하고 있다. 이와 더불어 통계학적인 분석과 각 토양 지표의 특성을 고려한 배점체계를 통해 토양 건강성 지수(soil health index), 혹은 토양 질 지수(soil quality index)를 산출하는 기법을 제시하고 있다.

여러 토양 기능간의 상호 연관성은 매우 깊으며, 토양 건강성을 평가하기 위하여 각국의 주요기관에서 발표한 문서에서 고려하는 토양 기능도 조금씩 차이를 보인다. 미국의 USDA에서는 토양 기능을 영양분 순환(nutrient cycling), 수분 관계(water relations), 생물다양성/서식처(biodiversity and habitat), 여과 및 완충(filtering and buffering), 물리적 안정성(physical stability)으로 분류하고 있다. 캐나다에서는 자국의 농경지 토질의 보호를 위하여 Land Suitability Rating System(LSRS)을 제안하고 있으며, 이는 토양의 농경지로써의 기능에 중점을 둔 것으로 보인다. 이 밖에 영국의 경우는 식량/섬유 생산능(food and fibre production), 환경 연계성(environmental interaction), 그리고 생물다양성 및 서식처의 제공능(supporting habitats and biodiversity)으로 분류하며, 네덜란드의 경우는 생물다양성(biodiversity)에 초점을 맞추어 토양생물의 활성화와 토양기능의 연관성에 주목하고 있다. 이러한 토양 기능을 평가하기 위한 지표의 선정은 토양의 특성을 고려했을 때 매우 복잡할 수 있으며, 다양한 상호연관성을 고려해야 할 필요성이 있다.

토양의 복잡한 특성 분포와 타 매체와 연계성, 그리고 정화 및 관리의 어려움을 고려했을 때, 토양의 건강성 평가는 다방면에서 요구될 수 있다. 예를 들어, 정화된 토양은 다양한 정화기법에 따라 유기물 손실, 토양 구조의 파괴, 그리고 입단 안정성의 부재 등으로 건강하지 못한 상태에 이르게 되며, 토양의 기능을 상실한 상태가 된다. 이

러한 정화토양의 재이용을 위한 복원기준은 현재까지 화학적 기준에 의존하고 있으며, 과학적이고 체계적인 복원 기준을 설정하는데 있어 건강성 평가 연구는 매우 적합한 근거를 제시할 수 있을 것이라 사료된다.

국내에서 수행된 건강성평가 연구는 수생태계에 국한되어 있으며(Kim et al., 2007; Bae et al., 2008; Jeong and Lee, 2013), 토양생태계 대상의 연구는 거의 진행되지 않았다. 본 연구는 국외 토양건강성평가 기법과 사례에 대해 수집조사하고, 국가별 토양의 기능과 건강성 평가 인자들의 분류법 및 지수 산정법에 대해 분석하였으며, 외국의 사례를 참고하여 국내에서 토양건강성평가를 위해 정립해야 할 기법과 인자들에 대한 방향성을 제시하였다.

2. 국외 토양건강성평가 기법 분석

국외의 여러 환경 선진국들의 경우, Table 1과 같이 토양의 기능별로 지표를 설정한 후 지역특성을 반영하여 일정한 기준에 따라 배점화하여 토양의 건강성을 평가하는 기법을 활용하고 있다. 각 지표들은 물리화학적 및 생물학적 지표들로 구분할 수 있으며 토양 관리 목표와 지역의 기후, 재배 작물, 토양 특성 등에 따라 각각 다르게 적용 및 반영될 수 있다.

미국의 경우, Soil management assessment framework (SMAF)와 Land capability classification(LCC)을 통하여 지역 특성을 고려한 토양건강성평가를 실시하고 있으며 토지의 이용목적과 기후, 작물, 토양 유형 등에 따라 토양 건강성에 대한 평가가 달라질 수 있으므로 토양의 여러 기능들을 배점화한 Soil quality indexing 기법이 사용된다(Andrews et al., 2002). 네덜란드의 경우에는 Biological indicators of soil quality(BISQ) 기법을 통하여 토양의 건강성을 평가하고 있으며 토양 건강성을 평가하기 위한

Table 1. Techniques and indicators for soil health assessment of foreign countries

Country (Managing department)	Techniques and indicators for oil health assessment
USA (USDA)	Soil Management Assessment Framework (SMAF) Land Capability Classification (LCC)
Canada (AAFC)	Land Suitability Rating System (LSRS)
EU	Thematic strategy for soil protection
Netherlands (RIVM)	Biological Indicator for Soil Quality (BISQ)
UK (DEFRA)	UK soil indicators consortium First soil action plan for England
UK (EA)	National indicators for soil quality
Scotland (SEPA)	Consultancy service
Australia (DAAF)	National soil quality monitoring program
New Zealand (CRI)	Soil quality INDicator (SINDI)

인자들이 계속 개발되고 있다(Breure et al., 2005; Rutgers et al., 2008). 호주는 다수의 국민들이 중사하고 있는 농업과 관련된 토양건강성평가 시스템인 National soil quality monitoring program을 도입하여 자국 내 유역 및 지역 별로 물리적, 화학적 및 생물적 지표를 이용해 토양 건강성을 평가한 자료를 함께 확인할 수 있는 웹페이지를 제작하였으며 다양한 지표들을 이용한 유역 및 지역별 토양 건강성의 확인과 함께 토양 질 개선 및 관리를 위한 다양한 수치들을 평가할 수 있는 계산기 시스템을 제공하고 있다(Wherrett et al., 2010).

2.1. 미국의 토양기능과 평가지표 분류

미국 농무부(United states Department of Agriculture, USDA)에서는 Natural Resources Conservation Service (NRCS)를 통하여 토양의 건강성을 평가하기 위한 방법으로 SMAF를 제안하였다. 이는 토양 질 지표의 결과를 지역별로 해석하여 제공하며, 토양의 질적 평가는 관리 목표나 기후, 작물, 토양 특성에 따라 달라지기 때문에 다양한 인자를 적용하여 프레임워크(framework) 방식으로 접근하는 방식이다. 지표 선정, 지표 해석, 그리고 지표 점수 합산의 총 3단계로 구분되는데 비선형 배점 함수를 통

해 배점화 후 점수를 합산하여 토양 건강성을 평가하게 된다.

미국은 LCC를 이용하여 정부와 농민들이 잠재적인 토양유실을 예측하고 농업에 사용 가능한 토양의 상태를 결정할 수 있도록 하고 있으며, 작물이나 목초를 경작하기 위한 목적으로 사용될 토지의 능력에 따라 I 부터 VIII 까지 크게 8개 등급(Class)으로 분류한다. 세부 등급(Subclass)은 e, w, s, 그리고 c의 4가지로 구분되는데 이는 Table 2에 상세히 제시하였다(USDA, 2013).

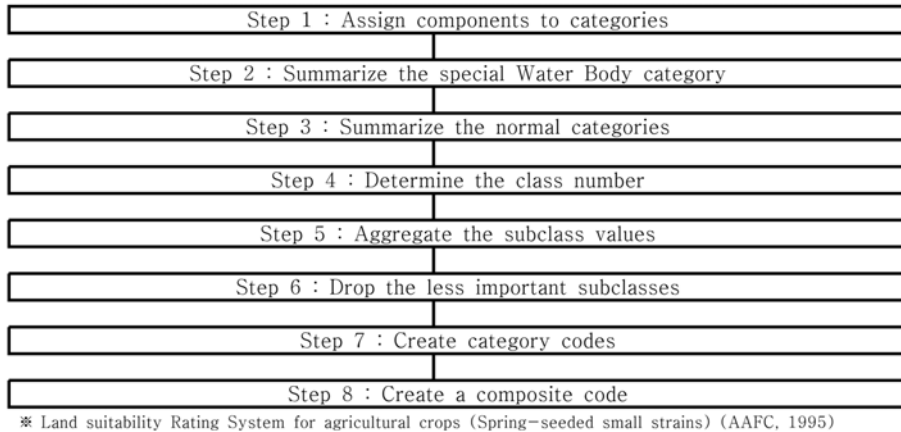
2.2. 캐나다의 토양기능과 평가지표 분류

캐나다는 1963년 Agricultural and Rural Development Act(ARDA)를 통하여 Canada Land Inventory (CLI)를 설립하였으며 이를 통하여 Soil Capability for Agriculture(SCA)를 제안하였다. 이는 전반적으로 미국의 LCC 와 유사한 시스템으로 농업 잠재력과 식량생산을 위한 토지의 적합성을 평가하는 것을 주목적으로 한다. 이후 1995년에 Agriculture and Agri-Food Canada(AAFC)를 통해 제안된 Land Suitability Rating System(LSRS)은 기본적인 프레임은 SCA와 유사하나 춘파소립종(Spring-seeded small grains)에 특화된 시스템으로, 토양

Table 2. Land capability classification (LCC) of United States

Land Capability Classification	
Class	
Class I	Soils have slight limitations that restrict their use
Class II	Soils have moderate limitations that reduce the choice of plants or require moderate conservation practices.
Class III	Soils have moderate limitations that reduce the choice of plants or require moderate conservation practices.
Class IV	Soils have very severe limitations that restrict the choice of plants or require very careful management, or both.
Class V	Soils have little or no hazard of erosion but have other limitations, impractical to remove, that limit their use mainly to pasture, rangeland, forestland, or wildlife habitat.
Class VI	Soils have severe limitations that make them generally unsuited to cultivation and that limit their use mainly to pasture, rangeland, forestland, or wildlife habitat.
Class VII	Soils have very severe limitations that make them unsuited to cultivation and that restrict their use mainly to rangeland, forestland, or wildlife habitat.
Class VIII	Soils and miscellaneous areas have limitations that preclude their use for commercial plant production and limit their use mainly to recreation, wildlife habitat, water supply, or esthetic purposes.
Subclass	
Subclass e	Soils for which the susceptibility to erosion is the dominant problem or hazard affecting their use. Erosion susceptibility and past erosion damage are the major soil factors that affect soils in this subclass.
Subclass w	Soils for which excess water is the dominant hazard or limitation affecting their use. Poor soil drainage, wetness, a high water table, and overflow are the factors that affect soils in this subclass.
Subclass s	Soils that have soil limitations within the rooting zone, such as shallowness of the rooting zone, stones, low moisture-holding capacity, low fertility that is difficult to correct, and salinity or sodium content.
Subclass c	Soils for which the climate (the temperature or lack of moisture) is the major hazard or limitation affecting their use.

※ National Soil Survey Handbook Part 622 (USDA, 2013)



* Land suitability Rating System for agricultural crops (Spring-seeded small strains) (AAFC, 1995)

Fig. 1. Land Suitability Rating System (LSRS) in Canada.

Table 3. Summary of potential soil indicators identified in Scotland

Indicator Group	Indicator Type				Total
	Physical	Chemical	Biological	Biochemical	
Water availability	6				6
Carbon store/cycling	1	6	2	16	25
Soil stability	8				8
Toxicity		3	1	4	8
Regulation of multiple processes	6	6	1	12	25
Phosphorus cycling		2		3	5
Nitrogen cycling		5	3	14	22
Nutrient cycling		4			4
Sulphur release		1		2	3
Plants			3	1	4
Microbial			8	13	21
Invertebrates			10		10
Fungi			11	6	17
Total	21	27	39	71	158

* Commissioned Report No. HP801 (SEPA, 2010)

의 건강성을 총 7 등급으로 분류한다. LSRS의 평가단계는 Fig. 1과 같으며 점수가 낮을수록 농작물 재배 등의 토지이용에 부적합한 것으로 평가한다. Class는 다시 subclass로 분류되며 기후(Climate), 토양(Soil), 배치(Landscape)등의 제한점 위주로 평가가 진행된다(AAFC, 1995).

2.3. 유럽의 토양기능과 평가지표 분류

EU는 2006년 토양보호를 위한 Thematic Strategy for Soil Protection을 수립하고 토양보호를 위한 기본지침인 「Proposal for a directive of the European parliament and of the council establishing a framework for the

protection of soil and amending Directive 2004/35/EC」를 제안, 유럽의 토양을 관리하고 있다.

네덜란드는 토양생물의 활성과 토양기능의 연관성에 주목하여 BiSQ 개발에 관한 연구를 1997년부터 보고하기 시작하였으며, 탄소순환과 질소순환(Carbon cycle and nitrogen cycle), 박테리아와 균류(Bacteria and fungi), 선충류(Eelworms), 애지렁이(Potworms), 지렁이(Earthworms), 그리고 진드기와 툭토기(Mites and springtails)의 총 6가지 생물 종 및 순환과정들에 대한 지표를 제시하였다(Rutgers et al., 2008). 원생동물문(Protozoa)의 경우 방법론적 문제가 존재하여 제외되었으며 위 지표들을 Dutch Soil Quality Network에 활용하고 있다.

스코틀랜드 Scotland Environmental Protection Agency (SEPA)는 「Consultancy service: To establish soil indicators to assess the impact of atmospheric deposition on environmentally sensitive areas」을 통하여 토양 질을 평가할 수 있는 지표를 크게 물리학적 지표, 화학적 지표, 생물학적 지표, 생화학적 지표로 구분하였으며, 이러한 지표들은 또한 토양의 기능과 관련하여 분류된다(Black et al., 2010). 총 13가지 토양의 기능과 관련된 물리학적, 화학적, 생물학적, 생화학적 지표는 총 158가지로 자세한 내용은 Table 3과 같다.

영국에서는 2003년에 토양 질과 관련한 Robust indicators 개별 및 모니터링 계획 수립을 목표로 Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA)가 주도하는 범정부적 working group(A cross-government working group)을 조직하여 ‘UK Soil Indicators Consortium’을 운영하고 있으며, 토양의 기능적 측면에 초점을 맞추어 연구를 진행하고 있다(DEFRA, 2009). 또한 「First soil action plan for England: 2004-2006」에 따라 토양 질을 평가할 수 있는 지표 개발을 목표로 하고 있다(DEFRA, 2007). Environmental Agency

(EA)에서는 2002년 EA가 주도한 Loveland and Thompson (2002)의 연구를 시작으로 영국 내 토양 질의 보호 및 향상을 위한 자료 부족으로 인해 효과적인 정책 마련이 어려운 상황에 대한 문제를 인식하여 토양 질을 평가할 수 있는 인자(Soil Quality Indicators, SQIs)를 마련하기 위한 연구를 수행하였다. 그 결과 2006년에 「The development and use of soil quality indicators for assessing the role of soil in environmental interactions」를 발표하였으며(EA, 2006) Loveland and Thompson (2002) 이 제시한 67가지 토양 지표들 중 환경과의 상호작용과 연관 있는 24개의 지표를 화학적, 생물학적, 물리적, 그리고 기타 분류로 나누어 Table 4와 같이 제시하고 있다.

2.4. 호주 · 뉴질랜드의 토양기능과 평가지표 분류

호주는 National soil quality monitoring program을 통하여 토양건강성을 평가하고 있으며 유역 및 지역 별로 생물적, 화학적 및 물리적 지표를 이용하여 토양 건강성을 평가한 자료를 함께 확인할 수 있는 웹 페이지를 제작하였다. 이를 통하여 다양한 지표들을 이용한 유역 및

Table 4. Potential indicators relevant to the soil's interaction with the environment in UK

Classification	Indicators
Chemical	<ul style="list-style-type: none"> • soil organic carbon • top soil pH • cation exchange capacity (CEC) to 1 m depth • anion adsorption capacity in topsoil • base saturation; • concentration of potential pollutant elements/organic micropollutants
Biological	<ul style="list-style-type: none"> • SOC • microbial biomass carbon/SOC • soil biomass • Biolog score • DNA-based microbial diversity index and enzyme assays
Physical	<ul style="list-style-type: none"> • integrated air capacity to 1 m depth • number of locations with erosion features • Soil organic carbon • top soil surface condition • aggregate stability • soil bulk density • top soil plastic limit to a depth of 1 m • time to ponding • water dispersible clay
Other	<ul style="list-style-type: none"> • catchment hydrograph • surface water turbidity • biological status of rivers with and without sewage treatment works • number of eutrophication incidents per year

※ Science Report SC030265 (EA, 2006)

Table 5. Indicators of soil quality assessment in Australia

Indicators	
Biological	Total Organic Carbon, Carbon Stock, Labile Carbon, Microbial Biomass Carbon, Soil Nitrogen Supply, Organic Carbon (Walkley-Black), Microbial Activity, Disease, Nematodes
Chemical	Cation Exchange Capacity, Total Nitrogen, Nitrogen Stock, pH (Water), pH (CaCl ₂), Electrical Conductivity (ECe), Phosphorus, Boron, Mineral Nitrogen, Colwell Potassium, Water Repellency
Physical	Bulk Density, Gravel Content, Clay Content

※ (<http://soilquality.org.au/>)

Table 6. 7 indicators of soil health assessment and classification with properties suggested by Soil quality INDicators (SINDI) in New Zealand

No.	Indicators	Property	Soil Quality Information
1	Olsen phosphorus	Fertility status of the soil	Plant-available phosphate
2	pH	Acidity status of the soil	Acidity or alkalinity of soil
3	Anaerobically mineralisable Nitrogen	Soil's organic resources	Availability of nitrogen reserve, surrogate measure for soil microbial biomass
4	Total carbon		Organic matter reserves, soil structure, ability to retain water
5	Total nitrogen		Organic nitrogen reserves
6	Bulk density	Physical status of soil	Soil compaction, physical environment for roots and soil organisms
7	Macroporosity		Availability of water and air, retention of water, drainage properties

※ (<http://sindi.landcareresearch.co.nz/>)

지역별 토양 건강성의 확인과 함께 토양 질 개선 및 관리를 위한 다양한 수치들을 평가할 수 있는 계산기 시스템을 제공하고 있다. 호주의 경우에는 5개의 주(Western Australia, Tasmania, South Australia, Queensland, New South Wales)마다 공통적으로, 혹은 개별적으로 적용되는 생물적, 화학적, 물리적 지표들이 Table 5와 같이 존재하며 다양한 지표들을 이용한 토양 건강성 평가를 수행하여 토양에 대한 이해와 파악이 가능하도록 하고 있다 (Pattison et al., 2008). 각 주마다 적용되는 생물적, 화학적, 물리적 지표가 다르며, 각 주의 지표 별 데이터는 웹 페이지에서 열람이 가능하고 생물적, 화학적, 물리적 지표 별로 토양 층(0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm 등) 마다 데이터를 측정하며 이 또한 모두 열람이 가능하다. 또한 웹 페이지에서 주마다 지표 별 데이터가 그래프로 확인 가능하도록 하였으며, 토양 건강성에 영향을 미치는 항목(year, soil texture, land use, rain fall 등)별로 범주화하여 데이터 분석을 가능하게 하였다.

뉴질랜드의 경우, Crown Research Institutes(CRIs)에서 Soil quality INDicators(SINDI)를 통하여 토양의 건강성을 평가하며 토양은 단일 개념이 아니라 물리적 구조, 화학적 생산력, 영양 저장, 유기물 자원, 그리고 생물학적인 주기 등 복합적인 측면들을 포함한다는 개념을 반영하여 토양의 건강성을 평가하기 위한 지표로 Table 6과 같이

7가지 지표들을 제안하고 있다(Lilburne et al., 2004). 또한 7가지 지표들 중 어떤 것들이 하나의 범주로 결합되어야 하는지 결정하기 위해 다변량 통계기법(Multivariate statistical technique)인 주요인분석(Principal Component Analysis, PCA) 기법을 이용하여 지표들을 네 개 그룹으로 분류하였다. 토양 전문가 그룹이 다양한 토지 이용과 분류(토양목)에 따른 토양의 속성에 대한 반응 곡선을 제안하였으며, 이에 따라 각 지표들에 대한 영향(큰 영향, 잠재적인 영향 우려, 최적)을 구분할 수 있다(Sparling et al., 2004).

2.5. 토양건강성평가 기법 활용 사례

Andrews 등은 미국의 토양건강성평가 시스템인 SMAF를 이용하여 각기 다른 규모와 다양한 용도를 지닌 네 지역의 건강성 평가를 실시하였다(Andrews et al., 2004). 첫 번째 사례 연구는 1996년도 Natural Resources Inventory(NRI)에서 워싱턴 주(州) 남동지역(WA), 아이다호 주 북서지역(ID), 오레곤 주 북동지역(OR)에서 수집한 데이터를 이용한 연구로, 이 지역들의 50% 이상은 밀이나 완두, 렌틸콩 등을 경작하는 경지이며 40%는 방목장, 10%는 목초지나 식물 생산용으로 이용되는 곳이었다. 토양은 제롤(Xerolls), 알볼(Albolls), 제랄프(Xeralfs) 등의 아목으로 구성되어있으며 토양 데이터는 화학적, 생

물학적, 그리고 물리학적 데이터를 대상으로 연구가 진행되었다(Brejda et al., 2000a, 2000b). 두 번째 사례 연구는 1994년에서 1995년까지 아이오와 주(IA) 트레이너 시(市)에서 Deep Loess Research Station이 수행한 연구로, 30-60ha 규모의 전통적인 경작지를 대상으로 하였다. 대상 토양은 주로 우돌(Udolls), 오르스엔트(Orthents) 성분으로 구성되었으며 토양 데이터는 화학적, 생물학적, 그리고 물리학적 데이터를 대상으로 하였다(Cambardella et al., 2004). 세 번째 연구는 Sustainable Agriculture Farming Systems 프로젝트의 일환으로, 캘리포니아 주(CA) 1.2 ha의 채소 생산지에서 이루어진 사례 연구이다. 토마토와 밀, 잇꽃, 강낭콩 등을 재배하였으며 토양 조성은 플루벤트(Fluvents), 오르스엔트(Orthents) 등이었다. 토양 데이터는 주로 화학적 데이터를 대상으로 하였다(Clark et al., 1998, 1999a, 1999b). 마지막으로 조지아 주(GA)에서 진행된 사례 연구는 가장 작은 규모로 진행되었으며 이는 신선한 비료와 퇴비가 목초지의 토양건강에 어떻게 영향을 미치는지를 비교하기 위한 실험으로 진행되었다. 토양 데이터는 화학적, 생물학적, 그리고 물리학적 데이터를 대상으로 하였다(Andrews and Carroll, 2001). 각 지역의 토양들은 실험실로 옮겨져 각각 분석되었으며 NRI는 약 20개의 화학적, 생물학적, 물리학적 지표를 분석하였고 IA 주 토양의 데이터는 약 21개의 화학적, 생물학적, 물리학적 지표를, CA 주 토양은 19개의 화학적 토양 지표를, 마지막으로 GA 주 토양에서는 38개의 화학적, 생물학적, 물리학적 지표를 분석하였다. 그 다음 단계에서는 SMAF를 이용한 토양건강성평가를 위하여 각 토양마다 주요 지표를 설정하게 되는데, 이는 최소자료군(minimum data set, MDS)을 설정하여 각 토양에 영향력이 큰 지표를 선정, 배점화 시켜 최종적으로 토양 질 지수(soil quality index, SQI)를 결정하게 된다. 이 과정에서 Andrews 등은 각 토양마다, 용지이용도에 따라 배점화 하여 각 토양들의 건강성을 평가하였는데 각 토양마다 주요 지표들이 달랐기 때문에 토양 간의 비교는 불가하였으며 같은 지역 내에서 농법이나 비료 시비 여부, 토양 아묵 등에 따라 건강성이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3. 국내 토양건강성평가 연구 현황

국내에서는 수생태계를 대상으로 한 생태건강성 연구가 다각적으로 진행된 바 있으며 기술개발이 안정화 단계에 이른 것으로 보인다. 2008년에 「수생태계 건강성 조사 및 평가(환경부, 2008-2012)」 연구가 진행되었으며 환경

부의 「물환경 정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)」에서 수계 별 조사지점의 건강성 평가 결과를 공개하고 있다. 또한 수생태계 건강성 평가는 미국환경청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)과 유럽환경청(European Environment Agency, EEA)의 기법을 기반으로 국내 실정에 맞게 수정 및 보완한 방법을 이용하고 있으며 생물통합지수를 산출 후에 평가하여 등급을 산정하는 방식을 적용, 종 다양성과 풍부도 및 서식환경의 건강성을 종합적으로 평가하고 있다. 토양의 경우에는 농촌진흥청에서 1999년부터 4년 동안 국외 사례와 연구동향을 조사하고 토양건강성평가 지표 개발을 위하여 연구를 수행한 바 있으며(Yoon, 2004), 토양 질에 대한 지표 선정 및 평가방법의 개발에 대한 연구(Yoon et al., 2004)와 「산지 농업의 환경적 공익 기능 평가 기술 개발(농촌진흥청, 2003-2005)」가 있었다. 그러나 국내에서 진행된 연구들은 선형모델의 구축에만 치중하였다는 한계가 존재하며(Ok et al., 2005), 그 이후로는 토양건강성 및 지표개발에 관한 지속적인 연구가 지속되지 않았다. 또한 일부 지표생물의 개발과 위해성평가 관련 연구를 제외하고는 토양생태계를 대상으로 한 건강성 평가 연구가 거의 진행되지 않은 것으로 조사되었다.

4. 국내 토양건강성평가 기법 도입의 필요성

국내에는 제련소, 폐광산 등과 같이 오염된 지역들이 상당부분 존재하며, 대부분은 다양한 정화기법 등을 이용하여 오염토양을 정화하고 있다. 하지만 다양한 토양정화기법은 토양의 유기물을 녹이거나, 물리적 구조와 화학적 성질을 변화시켜 토양의 원래 기능이 감소될 가능성이 매우 높다. 따라서 오염토양에 적합한 정화기술에 따라 오염물질의 저감 효과가 확인하여도, 토양의 기능을 상실하여 건강성이 현저하게 감소된 정화토양이 발생될 가능성이 높다. 또한, 따라서 정화토를 농경지, 공원 등 다른 용도로 재이용하기 위하여, 손실된 구조, 영양물질, 미생물 등을 제공하여 정화토를 재활성화시키는 과정은 필수적이라 할 수 있다. 하지만 국내에서는 이러한 복원기준에 대한 연구는 활발하지 않은 것으로 확인되었다. 2009년 「정화우선순위제도 적용 및 토양환경보전법 개선에 관한 연구」와 2011년 「토양정화체계 개선방안 연구보고서」가 수행되었으나, 검증평가와 체계구축을 위한 위해성, 혹은 건강성 평가의 필요성 인지 수준에 불과한 것으로 확인되었다. 정화가 필요한 오염지역의 정화 전후의 복원 기준 설정은 매우 중요하며, 정화토의 재사용과 관리를 위

한 건강성 평가도 오염토양 정화관리에서 반드시 고려해야 할 사항이다.

국내 생태 건강성에 대한 연구는 수생태계를 대상으로 수행된 바 있으나, 토양생태계를 대상으로 한 연구는 일부 지표생물 개발 및 위해성평가와 관련한 연구를 제외하고는 매우 부족한 실정이다. 토양건강성과 관련한 생태위해성 연구는 일부 수행되고 있으나 다른 선진국에 비하여 많이 미흡한 수준이며 건강성 평가기술 관련 연구는 수행된 바 없다. 최근 환경부에서 「토양정화체계 개선방안 연구(환경부, 2012)」를 통하여 준설, 퇴적토의 재활용 기준 설정을 위해 단순한 화학적 평가 이외에 지역의 인체/생태 위해도, 타 매체 영향 등을 종합하여 활용여부를 결정할 필요성이 있음을 언급한 바 있지만 아직까지 정책적으로 활용되기 위한 기반 연구는 충분하지 않다.

조사된 바와 같이 국외에서는 이미 토양생태계에 대한 건강성평가가 활발하게 이루어지고 있으며 우리나라 또한 토양 오염과 단순 정화의 개념을 넘어 토양의 기능과 생태계에 초점을 둔 토양 건강성평가 기법의 도입이 시급히 요구되는 실정이다.

토양의 건강성을 객관적이고 과학적으로 평가하기 위해서는 무엇보다 국내 실정에 적합하고 국내 토양생태계에 적용 가능한 평가지표들을 개발하는 것이 가장 우선시 되어야 하며 이러한 지표들을 이용한 배점체계를 활용하여 건강성을 올바르게 평가하여야만 목적에 적절히 부합하는 토양생태계의 활용 및 보전이 가능하다고 할 수 있다. 또한 각 나라마다 토양생태계의 구성과 경제적, 사회적 상황이 상이하므로 우리나라에서 적용할 수 있는 건강성 평가 시스템을 개발 및 도입하는 것이 중요하다고 사료된다.

5. 국내 토양건강성평가 도입의 방향성 제시

국외에서는 토양은 생산성과 생태계를 유지하기 위하여 다양한 기능을 제시하고 있으며, 이를 평가하기 위한 수많은 지표가 존재하는 것으로 확인되었다. 따라서 특정 토양 내 지표 중 대표성을 가지는 지표를 선별하는 것은 매우 중요한 단계가 될 것이라 사료된다. 미국 농무성(USDA)에서는 SMAF를 통하여 토양 기능에 따라 지표를 분류하고, 이 중 주요 지표를 결정하여 배점하고 최종적으로 SQI를 결정하는 것을 목표로 한다. 주요 지표를 설정하는 단계는 MDS를 기반으로 이루어지며, 조금 더 영향력 있고 효율적인 토양 기능의 모니터링을 위하여 지표를 선정하는 방안을 제시하고 있다. 통계학적 분석방법, 혹은 전문가 의견을 수렴하여 MDS를 선정하며, 각 조건

에서의 최적 지표를 결정하는 기법의 초기단계가 된다. 스코틀랜드의 SEPA에서도 토양의 기능을 평가하기 위한 지표를 물리화학, 생물학적, 그리고 생화학적 지표를 구분함으로써 토양의 기능을 반영할 수 있는 분석인자를 생성하는데 집중한 것으로 사료된다. 영국의 경우도 2003년부터 DEFRA가 주도하여 범정부적 토양의 기능적 측면에 초점을 맞추어 연구를 진행하고 있으며, 토양 질을 평가할 수 있는 지표 개발을 목표로 하고 있다. 따라서 각 국에서는 가장 효율적으로 토양의 기능을 평가할 수 있는 지표 개발 및 적용에 연구의 초점을 맞추고 있는 것으로 보인다. 국내에서도 토양건강성 평가기법을 개발하기 위해서는 토양의 복잡한 특성을 고려하고, 토양의 기능을 반영할 수 있는 지표들을 과학적이고 신뢰성 있게 결정해야 할 필요성이 있는 것으로 사료된다. 실제로 미국과 뉴질랜드의 경우는 원변수를 대표할 수 있는 주요인을 판단할 수 있도록 다변량 통계기법인 주요인분석(PCA) 기법을 적용하고 있다. 특히 미국의 경우는 MDS를 최종적으로 선별하기 위하여, 각 주요인(principal components, PC)에 대한 고유치(eigenvalues)와 고유벡터(eigenvector)의 정도에 따라 우선순위 지표를 결정하였으며, 이후 중복된 지표를 정리하기 위하여 다양한 다변량 통계분석을 실시하는 연구가 진행된 바 있는 것으로 확인되었다. 이와 같은 통계적 기법의 활용과 국내 토양 환경 실정에 맞는 지표를 개발함으로써 향후 국내형 토양건강성 평가기법을 제안하는 데 큰 기반 연구가 될 수 있을 것이라 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 토양·지하수 오염방지 기술개발사업(2014000560001)으로 지원받은 과제임.

References

- AAFC, 1995, Land Suitability Rating System for Agricultural Crops 1. Spring-seeded small grains, Technical Bulletin 1995-6E, *A technical report prepared by Agronomic Interpretations Working Group*, Centre for Land and Biological Resources Research, Agricultural and Agri-Food Canada.
- Andrews, S.S. and Carroll, C.R., 2001, Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management, *Ecol. Appl.*, **11**(6), 1573-1585.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., and Mitchell, J.P., 2002, A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California, *Agr. Ecosyst. Environ.*, **90**,

25-45.

Asensio, V., Rodríguez-Ruiz, A., Garmendia, L., Andre, J., Kille, P., Morgan, A.J., Soto, M., and Marigómez, I., 2013, Towards an integrative soil health assessment strategy: A three tier (integrative biomarker response) approach with *Eisenia fetida* applied to soils subjected to chronic metal pollution, *Sci. Total Environ.*, **442**, 344-365.

Bae, D.Y., Kim, Y.P. and An, K.G., 2008, Ecological health assessment of mountainous stream in Mt., Sik-Jang using multi-metric models, *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **24**(2), 156-163.

Black, H.I.J., Britton, A., Helliwell, R.A., Langan, S., Taylor, A., and Booth P.D., 2010, Consultancy Service: To establish soil indicators to assess the impact of atmospheric deposition on environmentally sensitive areas, *Commissioned Report No. HP801*, Scottish Environment Protection Agency Commissioned Report.

Brejda, J.J., Karlen, D.L., Smith, J.L., and Allan, D.L., 2000a, Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie, *Soil Science Society of America Journal*, **64**(6), 2125-2135.

Brejda, J.J., Moorman, T.B., Smith, J.L., Karlen, D.L., Allan, D.L., and Dao, T.H., 2000, Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale, *Soil Science Society of America Journal*, **64**(3), 974-982.

Breure, A.M., Mulder, C., Römbke, J., and Ruf, A., 2005, Ecological classification and assessment concepts in soil protection, *Ecotox. Environ. Safe.*, **62**, 211-229.

Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Andrews, S.S., and Karlen, D.L., 2004, Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa, *Soil and Tillage Research*, **78**(2), 237-247.

Choung, Y. and Lee, K., 2013, Review of a Plant-Based Health Assessment Methods for Lake Ecosystems, *Kor. J. ecol. environ.*, **46**(2), 145-153.

Clark, M.S., Horwath, W.R., Shennan, C., and Scow, K.M., 1998, Changes in soil chemical properties resulting from organic and low-input farming practices, *Agron. J.*, **90**(5), 662-671.

Clark, M.S., Horwath, W.R., Shennan, C., Scow, K.M., Lantni, W.T., and Ferris, H., 1999a, Nitrogen, weeds and water as yield-limiting factors in conventional, low-input, and organic tomato systems, *Agric. Ecosyst. Environ.*, **73**(3), 257-270.

Clark, S., Klonsky, K., Livingston, P., and Temple, S., 1999b, Crop-yield and economic comparisons of organic, low-input, and conventional farming systems in California's Sacramento Valley, *Am. J. Altern. Agric.*, **14**(03), 109-121.

DEFRA, 2007, First Soil Action Plan for England: 2004-2006 - Final Report, Department for Environment, Food and Rural Affairs.

DEFRA, 2009, Safeguarding our soils: A Strategy for England, Department for Environment, Food and Rural Affairs.

EA, 2006, The development and use of soil quality indicators for assessing the role of soil in environmental interactions, Science Report SC030265, Environment Agency.

Franzluebbers, A.J., 2002, Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality, *Soil Till. Res.*, **66**, 95-106.

Kim, Y.O., Choi, H.W., Jang, M.C., Jang, P.K., Lee, W.J., Shin, K., and Jang, M., 2007, A brief review of approaches using planktonic organisms to assess marine ecosystem health, *Ocean and Polar Res.*, **29**(4), 327-337.

Lilburne, L., Sparling, G., and Schipper, L., 2004, Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework, *Agr. Ecosyst. Environ.*, **104**, 535-544.

Loveland, P.J. and Thompson, T.R.E., 2002, Identification and development of a set of national indicators for soil quality, R&D Project Record P5-053/PR/02, Environment Agency.

Ok, Y.S., Yang, J.E., Park, Y.H., Jung, Y.S., Yoo, K.Y., and Park, C.S., 2005, Framework on soil quality indicator selection and assessment for the sustainable soil management, *J. Environ. Polic.*, **4**(1), 93-111.

Pattison, A.B., Moody, P.W., Badcock, K.A., Smith, L.J., Armour, J.A., Rasiah, V., Cobon, J.A., Gulino, L.-M., and Mayer, R., 2008, Development of key soil health indicators for the Australian banana industry, *Appl. Soil. Ecol.*, **40**, 155-164.

Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A.J., Bloem, J., Bogte, J.J., Breure, A.M., Brussaard, L., De Goede, R.G.M., Faber, J.H., Jagers op Akkerhuis, G.A.J.M., Keidel, H., Korthals, G.W., Smeding, F.W., Ter Berg, C., and Van Eekeren, N., 2008, Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality, RIVM, RIVM Report 607604009/2008, The Netherlands.

Sparling, G.P., Schipper, L.A., Bettjeman, W., and Hill, R., 2004, Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial, *Agr. Ecosyst. Environ.*, **104**, 523-534.

Torsvik, V. and Øvreås, L., 2002, Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems, *Curr. Opin. Neurobiol.*, **5**, 240-245.

USDA, 2013, National Soil Survey Handbook Part 622, *National Resources Conservation Service Soils*, United States Department of Agriculture.

Wherrett, A., Mruphy, D., and Hoyle, F., 2010, Soil Quality indicators for Australian cropping systems, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 9-12.

Yoon, J.H., 2004, Review and Discussion on Development of Soil Quality Indicators, *Kor. J. Soil Sci. Fertil.*, **37**(3), 192-198.

Yoon, J.H., Jung, B.G., Jun, H.J., and Kwak, H.K., 2004, Soil Quality Assessment Method of Paddy and Upland, *Kor. J. Soil Sci. Fertil.*, **37**(6), 357-364.