

지속가능한 토양환경 관리를 위한 토양질 지표의 선정과 평가체계

옥용식* · 양재의** · 박용하*** · 정영상** · 유경열** · 박철수****

Framework on Soil Quality Indicator Selection and Assessment for the Sustainable Soil Management

Yong-Sik Ok* · Jae E. Yang** · Yong Ha Park*** · Yeong-Sang Jung**
Kyung-Yoal Yoo** · Chol-Soo Park****

국문요약

토양의 질(Soil Quality)에 대한 개념은 과거 식량생산을 위한 기반으로서의 토양에 대한 연구부터 1970년대 후반 Warkentin and Fletcher(1977)에 의해 제안된 환경의 구성 요소로서의 토양에 대한 연구에 이르기까지 수많은 변화를 거쳐 왔다. 토양의 질에 대한 개념은 그 관점에 따라 다르지만 토양이 본래의 기능을 효과적으로 수행할 수 있는 용량으로 요약할 수 있다. 국제경제협력개발기구(OECD)에서도 토양의 질을 농업환경의 주요지표로 설정하여 토양유실과 토양탄소를 토양질 평가의 세부지표로 제시하였으며, 각 국가별로 활발한 연구가 수행 중에 있다. 본 논문에서는 현재까지 제안된 토양질의 주요 개념을 살펴보고 국내외의 토양질 평가체계를 비교·분석하고자 하였다. 토양질의 평가체계는 최소자료군(Minimum Data Set)을 이용한 토양질 지표의 선정, 선별된 지표의 표준점수화함수(Standard Scoring Function), 각 지표의 통합을 통한 토양질의 점수화의 세 단계로 구분하여 분석하였다. 토양의 질 지표는 물리·화학·생물학적 지표로 분류할 수 있으며, 이 중 토양침식, 전용적밀도, 토심, 입단안정화도, 토성, 수분보유력, 유효수분함량은 물리적 질 지표로 주로 사용된다. 화학적 질 지표로는 유기물, pH, 전기전도도, 질소·인산·가리, 중금속 등이 있고, 생물학적 지표로는 미생물탄소·질소, 무기

* 강원대학교 자원생물환경학과(Division of Biological Environment, Kangwon National University),
주저자(soilok@kangwon.ac.kr)

** 강원대학교 자원생물환경학과(Division of Biological Environment, Kangwon National University)

*** 한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

**** 고령지농업연구소(National Institute of Highland Agriculture)

화 가능한 질소, 토양호흡이 주로 사용된다. 또한, 토양질 지표의 직접적인 측정이 어려운 경우에는 토양특성 환산식(Pedotransfer Function)을 이용하여 각 지표의 값을 추정할 수 있다. 현재 선진국에서는 SINDY를 비롯한 다양한 프로그램을 구축하고 있으며, 국내에서도 국가적인 차원의 자료구축을 통해 선별된 최소자료군의 계량화모형을 확립하여 웹기반의 프로그램을 구축해야 할 것이다. 현재까지 토양질의 계량화에 대한 연구는 주로 작물의 수량을 중심으로 이루어졌지만 향후 지속가능한 토양환경의 관리를 위해서는 환경의 질과 인간의 건강을 종합적으로 고려한 토양의 질 지표 개발에 대한 연구가 필요할 것이다.

주제어 : 토양질, 토양질 지표, 최소자료군, 표준점수화함수, 토양질 계량화

ABSTRACT

Defining soil quality in scopes and applications is one of the prerequisite for the sustainable management of soil environment to orient researches, strategies and policies. However, definition of soil quality is controversial depending upon a viewpoint of soil science or soil environment. Soil quality can be, irrespective of the disciplines, defined as the capacity of a soil to function within ecosystem boundaries to sustain biological productivity, maintain environmental quality and promote plant and animal health. Common to all of the soil quality concepts can be summarized as the capacity of soil to function effectively at present and in the future. The OECD includes soil quality as one of the agri-environment indicators. This article intends to i) summarize the current soil quality research, and ii) provide information on protocol of soil quality assessment. A framework for soil quality was divided into three steps: indicator selection as minimum data set (MDS), scoring of the selected indicators, and integration of scores into soil quality index. Korean government suggested possible physical and chemical indicators such as bulk density and organic matter for paddy and upland soils to OECD. The framework of soil quality assessment is not yet implemented in Korea. Countries such as USA, Canada and New Zealand have constructed the framework on soil quality assessment and developed a user-friendly version of soil quality assessment tools to evaluate the integrated effects of various soil management practices. The protocol provided in this review might help policymakers, scientists, and administrators improve awareness about soil quality and understand the way of soil environment management.

Keywords : Soil quality, Indicator selection, Minimum data set, Indicator integration, Scoring

I. 서론

토양의 질(Soil Quality)은 토양이 생태계에서 식물과 동물의 생산성을 지속하고, 수질과 대기의 질을 유지하며, 인류가 생활터전을 영위할 수 있는 기능에 관한 용량이다(Ok et al., 2002). 특히, 농업의 지속성과 생산성, 안전성 그리고 생태계와의 균형을 추구하는 환경친화적인 토양관리 체계구축의 필요성이 대두되면서 토양질의 중요성이 주요 관심사가 되었다(Ro, 1999).

농업환경 분야에서 현재 널리 통용되고 있는 토양의 질에 대한 개념은 1970년대 후반부터 나타나고 있다. Warkentin and Fletcher(1977)은 토양환경과 비료관리에 관한 국제 세미나(International Seminar on Soil Environment and Fertilizer Management)에서 토양이 식량의 생산, 폐기물의 재순환, 환경완충용량, 레크리에이션 등과 같은 여러 가지 상이한 기능을 동시에 제공해야 하므로 기존의 작물 생산성 증대에 중점을 둔 토양의 질에 대한 개념을 확대하여 통합적으로 한 단계 발전시킬 필요가 있음을 처음으로 주장하였다. 또한 토양이 지니는 본질적인 특성의 다양화로 인하여 한 가지 방법으로 토양의 질을 평가하는 것은 불가능함을 주장하였다. 이후 약 10년간은 문헌에 보고 된 새로운 개념의 토양의 질에 대한 연구는 없었는데, 이는 국내외적으로 1980년대의 토양관리에 대한 주요 초점이 토양유실(Soil Erosion)과 이로 인한 작물 생산성의 감소에 맞추어져 있었기 때문이다(Pierce et al., 1984; Karlen et al., 2003).

농업환경 분야에서 이러한 새로운 개념의 토양질에 관한 논의는 1980년대 중반 이후 본격화되었다. 캐나다의 경우 상원 상임위원회에서 발간한 토양질 악화(Soil Degradation)에 대한 보고서를 통하여 토양질에 대한 개념을 재정립하였고(Gregorich, 1996), Larson and Pierce(1991)는 토양의 질을 “토양이 그 기능을 행할 수 있는 용량(Capacity of Soil to Function)”으로 정의하였다. 이후 1993년 미국과학학술원(National Academy of Sciences)이 “토양과 수질: 농업분야의 안전(Soil and Water Quality: an Agenda for Agriculture)”을 출판한 이래로 정책입안자, 환경운동가, 과학자 및 정부 관료에 의한 토양질 개념에 대한 관심이 급속도로 증가하였다(National Research Council, 1993; Ro, 1999). 이와 때를 같이하여 1994년 미국토양학회(Soil Science Society of America)에서도 토양질에 대한 명확한 개념 설정, 토양질 연구의 필요성 및 토양질 평가체계 구축에 대한 세부적인 연구를 본격적으로 추진하게 되었다(Karlen et al., 1997).

한편, 1994년 국제경제협력개발기구(OECD)는 토양의 질을 농업환경 지표에 대한 주요 쟁점 중의 하나로 지정하였고, 1998년에 들어서는 토양의 질과 관련된 세부 지표를 평가한 바

있다. OECD는 1999년에 회원국의 토양 유실량의 산정에 관한 자료에 대해 비교 평가하였으며, 2001년에는 토양의 질 지표를 토양자원지표로 명칭을 변경하였고 토양유실량과 함께 토양탄소를 토양질 평가를 위한 주요 세부지표로 제시하였다(Yoon, 2004). 이상 1990년대 농업 분야에서 바라보는 토양의 기능은 작물의 생산성 제고와 환경보전 측면이 함께 비춰지고 있다고 볼 수 있다.

우리 나라의 경우 1996년 OECD의 회원국에 가입함에 따라 국제적인 수준의 토양환경 규범에 대응하기 위한 논리의 개발과 친환경농업의 실천을 위한 토양관리방안의 기반구축에 대한 필요성이 대두되었다. 이에 따라 농촌진흥청에서는 1999년부터 2002년까지 총 4년에 걸쳐 토양의 질 지표와 관련된 국제적인 연구동향을 파악하였고, 국내 토양의 변동양상을 파악하여 토양질 지표의 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다(Yoon, 2004). 이 과정에서 농촌진흥청은 2000년 6월 OECD에 토양의 전용적밀도, 비옥도, 중금속 및 유기물 함량, 토양 본래의 특성을 사용가능한 토양질 지표로 제시하였으며, 현재 OECD에서 검토 중에 있는 것으로 보고하였다(Yoon, 2004).

국내의 토양질에 대한 연구로는 Jung and Kim(2002)이 산지농업의 환경영향 계량화 평가 모형의 개발을 위해서는 토양의 질 평가가 필수적인 요소임을 언급하였으며, Yoon et al.(2004)의 토양의 질 지표 산정과 평가방법의 개발에 관한 연구와 Yang(2005)의 산지농업의 환경영향 계량화 평가모형 개발에 대한 연구 등이 있었다. 그리고 현재 농촌진흥청 농업과학기술원은 국내 토양화학성의 변동양상에 대한 데이터베이스를 구축하여 토양의 질을 계량화하기 위한 본격적인 연구를 추진 중에 있다(Yoon et al., 2003; Yoon, 2004).

그러나 현재까지 진행된 국내의 연구결과는 각 지표의 점수화 과정에서 주로 이용의 간편성을 고려하여 양자 간의 관계를 선형으로 모사하였다(Jung and Kim, 2002; Yoon et al., 2003; Yoon et al., 2004). 그러나, 이 경우 유효인산을 비롯한 토양질 지표의 평가에 있어 토양의 질 지표가 상이함에도 불구하고 동일한 점수로 토양질을 평가하게 되는 오류가 있어, 향후 토양질의 평가 시에는 국제적으로 통용될 수 있는 비선형 평가모델의 구축이 요구된다(Andrews et al., 2004).

이에 본 연구에서는 국가 및 시대별로 제안된 토양질에 대한 개념의 변화 과정을 살펴보고, 현재까지 국내외에서 제안된 토양질 지표의 선정방법 및 평가체계를 종합적으로 비교 검토하여 전체 토양의 질을 계량화할 수 있는 평가체계를 구축함으로써 국내의 토양질 계량화 연구를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 토양질의 개념 및 지표 선정

1. 토양질의 개념

농업환경 분야에서 통용되는 토양의 질에 대한 개념은 “토양이 본래의 기능을 효과적으로 수행할 수 있는 토양의 용량”으로 정의할 수 있을 것이다. 사실 토양이 지니는 복잡하고 다양한 특성으로 인하여 토양의 질을 평가 혹은 정량화한다는 것은 불가능해 보이기도 하지만 “어떻게 해야 건전한 토양을 유지하고 관리할 수 있는가?”라는 명제는 지속가능한 토양환경을 관리·유지하기 위한 필수불가결한 요건이다.

토양질의 개념에 대한 연구는 과거의 단위면적당 작물 생산성을 높이기 위해 사용된 농업적인 측면에서의 정의에서부터 현재의 환경의 질을 고려하는 개념에 이르기까지 수많은 과정을 거둬하며 변화·발전되어 왔다(Karlen et al., 2003). 그 개념은 학자에 따라서도 상이하여 토양의 질이 단지 작물의 생산량과 연관이 있다고 주장하는 학자가 있는 반면 Hornick (1992)은 토양의 질이 사료와 식품의 질에 미치는 영향에 대한 연구, Warkentin (1995)은 토양질이 어떻게 다양한 생물상의 서식에 미치는지에 대해 연구의 초점을 두었다(Ro, 1999).

토양의 질은 이에 관한 여러 논의에서 공통적으로 찾아볼 수 있듯이 토양이 동적자연체로서 보여주는 다양한 본질에 관한 관계의 표현으로 토양을 관리하고 이용하는 방법에 따라 환경이 어떻게 영향을 받는가를 고려하고 있다(Steinhardt, 1995; Ro, 1999; Ok et al., 2003). 이상 현재까지 제안된 토양의 질에 대한 정의는 <표 1>과 같이 요약할 수 있다.

<표 1> 농업환경 분야에서 제안된 토양질의 주요 정의

년도	토양질의 개념	참고문헌
1987	토양특성 혹은 간접적인 관찰(예, 압밀도, 침식도, 비옥도 등)로부터 유추 가능한 토양 본래의 속성	Soil Science Society of America
1989	경작, 입단, 유기물, 토심, 수분보유능, 투수속도, 산도, 양분보유능 등을 포함하는 작물생산을 지지하는 토양의 능력	Power and Myers
1991	생태계 내에서 기능을 수행하며 환경에 순기능을 갖는 토양의 용량	Larson and Pierce
1992	자연자원을 훼손하지 않고 환경에 위해를 미치지 않으며 장기간에 걸쳐 양질의 안전한 작물을 생산하고 인간과 동물의 건강을 증진시키는 토양의 능력	Parr et al.
1993	특정한 용도로 이용하기에 적합한 토양의 특성	Pierce and Larson
1996	생태계 및 토지이용 경계 내에서 생물생산을 지속시키고 환경의 질을 유지하며 식물·동물과 인간의 건강을 증진시키는 토양기능의 용량	Doran and Parkin
1997	토양 기능의 용량	Karlen et al.

이상의 정의에서 살펴본 바와 같이 토양의 질에 대하여 공통적으로 갖고 있는 주요한 쟁점은 작물 생산, 환경의 질 및 동물상 활력이다. 여기서 생산성(Productivity)이란 작물과 생물의 생산성을 증대시킬 수 있는 토양의 용량, 환경질(Environmental Quality)은 환경 오염물 질과 병원균 및 주변의 오염을 경감시킬 수 있는 토양의 용량, 그리고 동물상 활력(Animal Health)은 토양질과 식물·동물·인간 건강 간의 상호 관계로 설명 할 수 있을 것이다(Doran and Parkin, 1996).

2. 토양질 지표의 선정

토양의 질을 평가하기 위해서는 토양 그 자체의 상태를 평가할 것인지 혹은 최대 생산성 및 환경을 동시에 고려하여 토양의 상태를 평가할 것인지를 우선적으로 결정해야 한다. 토양 질의 평가 방법 중 실행 지표(Performance-Based Index)는 사회·경제적으로 지속적인 생산성(Sustainable Production)과 환경의 질 및 인간과 동물 건강 등과 관련된 토양의 기능을 평가할 수 있어야 하며, 이에 대한 특이적 실행 기준(Specific Performance Criteria)을 확립하기 위하여 위의 세 요소를 좀 더 세분화하여 정의할 필요가 있다. 즉, 지속적인 생산성은 식물생산과 침식 저항성으로 분류할 수 있고, 환경의 질은 지하수, 지표수 및 대기의 질로 세분화가 가능하다. 또한 인간과 동물의 건강은 이들이 소비하는 식품의 질(Food Quality)을 이용하여 정의할 수 있다. 따라서 토양질의 지표(SQ, Soil Quality)는 다음 여섯 개의 특이적인 토양의 질 구성원소로 표현 가능하다. 이는 Doran and Parkin(1994; 1996) 및 Karlen and Stott(1994) 등이 제안한 다음의 식 (1)~(8)로 표현 가능하다.

$$SQ = f(SQ_{E1}, SQ_{E2}, SQ_{E3}, SQ_{E4}, SQ_{E5}, SQ_{E6}) \quad (1)$$

여기서, 특이적인 토양질 구성 원소(SQ_{Ei})는 다음과 같이 정의된다.

SQ_{E1} = 식품생산 및 섬유생산

SQ_{E2} = 침식특성

SQ_{E3} = 지하수 수질

SQ_{E4} = 지표수 수질

SQ_{E5} = 대기질

SQ_{E6} = 식품질

위 식 (1)의 경우 각기 다른 토양질의 구성원소를 최적으로 결합하는 기능은 없으나 이를 곱의 표현 방식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$SQ = (K_1SQ_{E1})(K_2SQ_{E2})(K_3SQ_{E3})(K_4SQ_{E4})(K_5SQ_{E5})(K_6SQ_{E6}) \quad (2)$$

여기서, K는 가중계수(Weighting Coefficient)를 의미한다.

토양질의 평가에 있어 식 (2)에 사용된 가중계수는 지형적인 특성, 사회적인 관심 및 경제적 문제 등을 종합적으로 고려하여 각 구성 원소별로 상이한 가중치를 두는 것을 원칙으로 한다(Doran and Parkin, 1994; Doran and Parkin, 1996). 예를 들어, 특정 지역에서 토양질의 구성원소 중 식품생산 및 섬유생산을 중요시 하고 있는 경우 대기의 질과 같은 구성원소에 대한 중요성은 상대적으로 낮으며 이는 곧 식품생산 및 섬유생산 원소(SQ_{E1})의 가중계수가 대기의 질 원소(SQ_{E5})의 가중계수보다 훨씬 큰 값을 지님을 의미한다.

토양질 평가를 위한 지표를 확립하기 위하여 앞서 언급한 토양질의 구성원은 아래 다섯 개의 특이적인 토양 기능으로 구분하여 평가할 수 있다. 즉, 토양질의 평가는 각각의 구성원소별로 아래 다섯 종류의 토양 기능(SF, Soil Function)에 대한 함수관계로부터 산출 가능하며(Larson and Pierce, 1991; Doran and Parkin, 1996), 각 인자 간의 상관관계를 평가하기 위한 알고리즘은 NLEAP, EPIC, CREAMS, GLEAMS, WEPP 등의 모델에 자세히 포함되어 있다(식 (3), (4), (5), (6), (7), (8)).

$$SQ_{E1} = f(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad (3)$$

$$SQ_{E2} = f(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad (4)$$

$$SQ_{E3} = f(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad (5)$$

$$SQ_{E4} = f(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad (6)$$

$$SQ_{E5} = f(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad (7)$$

$$SQ_{E6} = f(SF_1, SF_2, SF_3, SF_4, SF_5) \quad (8)$$

SF₁ = 식물, 지류 및 심토에 수분을 보유하고 공급하는 능력(Water Flux)

SF₂ = 양분 및 화학물질을 보유하고 공급하는 능력(Nutrient and Chemical Flux)

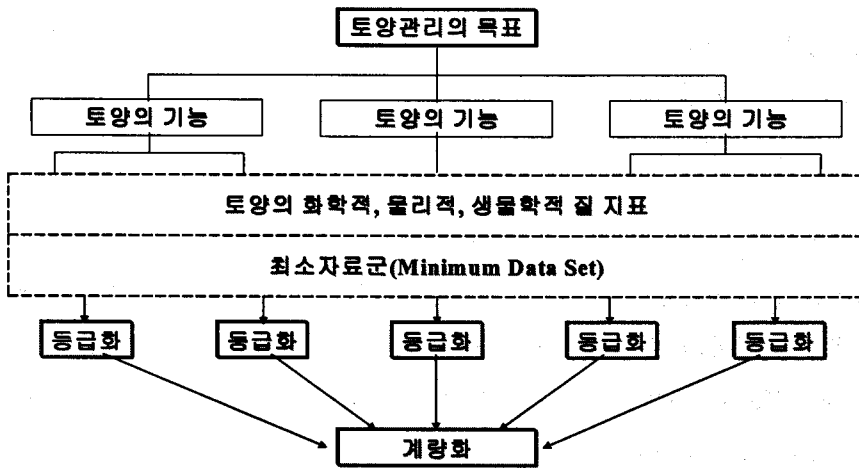
SF₃ = 뿌리 생육의 촉진 및 유지

SF₄ = 적합한 토양 생물상의 유지

SF₅ = 토양관리 및 토양악화에 대한 저항성

한편 토양의 질을 평가하기 위해서는 그 토양의 특성을 가장 잘 반영할 수 있는 토양의 질 지표를 선정하고 최소자료군(Minimum Data Set, MDS)을 구축해야 한다. <그림 1>에 나타낸 바와 같이 최소자료군이란 토양관리의 목표를 달성하기 위해 반드시 고려되어야 하는 토양의 기능으로써 이를 대별할 수 있는 토양의 화학적, 물리적, 생물학적 질 지표를 의미하며, 이를 통합하여 등급화 및 점수화함으로써 전체 토양의 질을 평가하게 된다(Andrews et al., 2004; Yang, 2005).

<그림 1> 지속가능한 토양환경의 관리를 위한 토양질 평가체계의 모식도



일반적으로 사용되는 토양의 물리적 지표로는 토성, 유효토심, 전용적밀도, 수분함량, 온도, 토양의 입단화도 등이 있고 화학적 지표로는 산도, 탄소, 질소, 인산, 전기전도도 등이 있으며 토양호흡, 미생물 생중량 등은 대표적인 생물학적 지표이다(Karen et al., 1997; Karen et al., 2001; Karen et al., 2003; Andrews et al., 2004; Yang, 2005). 한편, 각 변수의 정확한 측정이 어려운 경우에는 <표 2>에 제시된 예와 같이 토양특성 환산식(Pedotransfer Function)을 사용하여 토양질 지표를 예측할 수 있다(Larson and Pierce, 1991).

토양특성 환산식이란 각각의 토양질 지표의 측정이 어려운 경우 이와 높은 상관관계를 갖는 토양 인자를 측정·평가함으로써 세부 토양질 지표의 분석 결과를 예측할 수 있는 이론적 혹은 경험적 식을 뜻한다. <표 2>에 제안된 토양특성 환산식 외에도 인(P)의 경우 Sharpley et al.(2003)와 Havlin et al.(1999), 총유기탄소(TOC)의 경우 USDA(1966)와 Needelman et al.(1999), 전용적밀도(Bulk Density)의 경우 Grossman et al.(2001a, 2001b) 그리고 유효수분함량(Available Water Content)의 경우 Seybold et al.(1998)와 Gregory et al.(2000) 등이 제안한 토양특성 환산식이 주로 사용되고 있다(Karlen et al., 2001; Andrews et al., 2004; Yang,

2005). 그러나, 이러한 토양특성 환산식은 경험식이므로 단일 프로토콜로 적용하기 힘들기 때문에 실험을 통해 그 지역의 토양 환경에 적합한 식을 유도하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

〈표 2〉 주요 토양질 지표에 대한 토양특성 환산식(PTF, Pedotransfer Function)

PTF	추 정 항 목	관 계 식
<화학성>		
1	인산흡수능력(PSC)	$PSC = 0.4(A_{ox} + F_{ox})$
2	양이온치환용량(CEC)	$CEC = aOC + bCL$
3	유기탄소변화(ΔC)	$\Delta C = a + b$ OR
<물리성>		
4	전용적밀도(D_b)	$D_b = f(OC, \text{clay})$
5	수분보유능(q_{10})	$q_{10} = b_0 + b_1C + B_2S_y$
6	수분보유능(q)	$q = b_1(\%S_a) + b_2(\%S_i) + b_3(\%C) + b_4(\%OC)$
7	공극율증가(P)	$P = f(MR, IP, \text{clay}, S_i, OC)$
<수리특성>		
8	불포화수리전도도(Dunsat)	$Dunsat = f(\text{clay}, \text{pore size distribution})$
9	포화수리전도도(DS)	$DS = f(\text{soil morphology})$
<생산성>		
10	토양 생산성(PI)	$PI = f(D_b, AWHC, pH, EC, ARE)$
11	뿌리깊이(RD)	$RD = f(D_b, AWHC, pH)$

Al_{ox} = oxalate-extractable Al. Fe_{ox} = oxalate-extractable Fe. OC = 유기탄소. CL = 점토. C = 유기탄소. OR = 유기물. $D_{b,x}$ = 전용적밀도. $S_y = 1/D_b$. S_a = 모래. S_i = 미사. MR = 수분비율. IP = 초기 공극율. AWHC = 유효수분보유능력. EC = 전기전도도. ARE = 통기성.(proposed by Larson and Pierce, 1991)

한편, OECD는 최소자료군과 관련하여 향후 개발 가능한 토양의 질 지표를 제시하였으며, 우리 나라의 경우 농촌진흥청 농업과학기술원에서 토양의 전용적밀도, 비옥도, 중금속, 유기물 및 토양 본래의 특성이 세부 지표로 사용 가능한 것으로 보고하였다. 그러나 매년 자료를 갱신할 수는 없고 이 중 비옥도, 중금속, 유기물은 정기적으로 자료를 갱신할 수 있으며 전용적밀도와 토양 본래의 특성은 전반적인 자료로만 이용 가능한 것으로 OECD에 통보한 바 있다(Yoon, 2004). 따라서 향후 우리 나라에서 선정한 토양질 지표를 이용하여 토양의 질을 평가하기 위한 과학적 근거자료의 구축이 요구된다.

Ⅲ. 토양질의 평가체계

1. 토양질의 평가체계

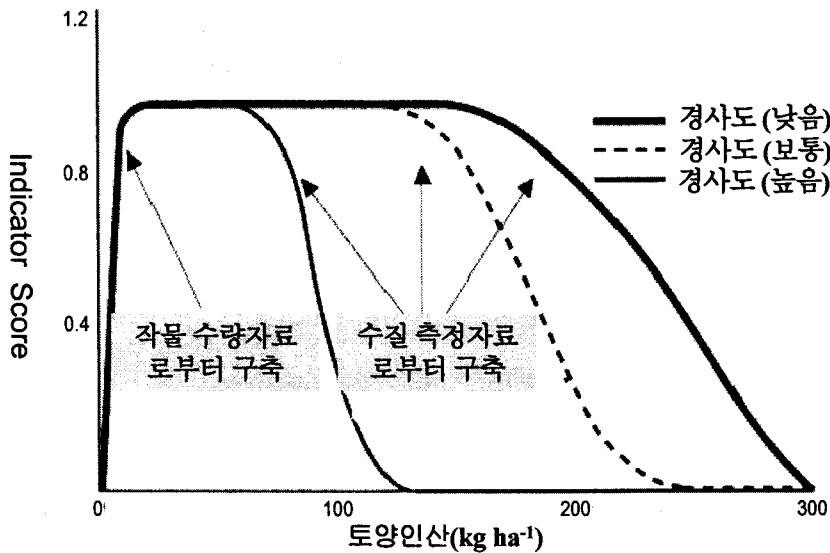
토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성을 종합하여 평가함으로써 (1) 식물생장의 배지로서의 역할 (2) 환경 중 양·수분의 이동을 조절하고 분배하는 역할 (3) 환경에 대한 수용체 (Environmental Filter)로서의 역할을 수행할 수 있다. 토양의 질 평가를 위한 물리화학적 지표를 선별하고 핵심적인 토양의 기능을 평가하였다면, 각기 다른 기능과 지표를 하나로 묶을 수 있는 메커니즘의 개발이 필요하다. 이는 표준점수화함수(Standard Scoring Function)를 이용하여 계산이 가능하며 통상 단위가 없는 0에서 1 사이의 값으로 토양질을 표현할 수 있다. 표준점수화함수는 그 유형에 따라 최적범위(Optimum Range), 높을수록 좋음(More is Better), 적을수록 좋음(Less is Better), 바람직하지 못한 범위(Undesirable Range)의 4가지 유형으로 분류할 수 있다(Karlen et al., 2003). 이 중 최적범위의 유형에는 인산, 양이온, 유기물, pH 등이 포함되고, 높을수록 좋은 유형으로는 유기물함량, 유효토심, 유효수분함량, 투수율 등이 대표적으로 속하는 항목이다. 적을수록 좋은 유형으로는 전용적밀도, 전기전도도 및 침식 등이 있다. 각 단계에 대한 가중치는 그 합이 1.0 또는 100%에 해당되어야 하고 각 인자를 점수화한 후 이는 적절한 가중치에 의해 곱의 함수로 표현되며 토양의 질을 계량화하게 된다(Karlen and Stott, 1994; Karlen et al., 2003; Andrews et al., 2004).

원래 표준점수화함수는 Wymore(1993)에 의하여 시스템공학 분야의 문제 해결을 위해 최초로 고안되었으며 Yakowitz et al.(1992a; 1992b)는 다목적 문제의 해결을 위하여 이와 유사한 접근방식을 사용하기도 하였다. 표준점수화함수를 이용함으로써 수치적인 자료를 단위가 없는 0부터 1까지의 값으로 변환할 수 있는데, 이 과정은 토양의 특성에 영향을 미치는 적절한 토양의 물리화학적 지표를 선정하는 작업으로부터 시작된다. 표준점수화함수 방법에서는 각 지표에 대한 점수화를 위한 적합한 함수식의 선정과 충분한 과학적 근거를 지닌 기준치를 선정하는 것이 핵심이다. 흔히 기준치를 산장하는 과정에서 전문가의 경험에 의존하기도 하지만 계량화 체계의 지속적인 발전을 위해서는 기준치 및 함수식의 선정 과정에서 충분한 이론적 근거자료를 확보하고 도출해야 할 것이다. 일례로 Lane et al.(1991)과 Yakowitz et al.(1992a; 1992b)은 컴퓨터 모델을 이용하여 추정하는 방법을 고안하기도 하였다. 모든 지표는 특정한 수식을 갖는 유형 중의 하나로 분류 가능하며 그 중요도에 따라 상이한 가중치를 둘 수 있다.

현재까지 토양질의 계량화에 대한 연구는 토양질 특성 중 생산성에 관련된 토양의 물리적,

화학적, 생물학적 질에 대하여 주로 수행되어 왔다. 그러나, 이 경우 주변 환경에 미치는 토양 질은 매우 낮다고 하더라도 토양비옥도의 관점에서 평가된 토양의 질은 높게 평가되는 경우가 있어 환경적인 측면에서의 평가모형 개발이 필요할 것이다. 최근들어 Andrews et al. (2004)은 토양질 평가에 있어 환경영향을 고려한 토양질 지표의 점수화 모델을 제안하였다. 즉, 그림 2에서 보는 바와 같이 토양질을 평가하고자 하는 지역이 상수원 지역과 인접해 있는 경우 과잉의 토양인산은 강우 시 토양유실과 함께 인근 수계로 유입되어 부영양화(Eutrophication)를 초래할 수 있을 것이다. 이 경우 수계에 인접한 토양의 경사도를 고려하여 경사가 급한 경우 인산의 함량에 대한 토양질의 점수는 작물생육에 영향이 없는 범위 내에서 최대한 낮게 설정하는 것이 바람직할 것이다(Andrews et al., 2004). 향후 환경의 질과 인간과 생물의 건강에 미치는 토양의 질에 관한 지표 선정, 최소화자료군 구축 및 계량화에 관한 광범위한 연구가 추후 체계적으로 수행되어야 할 것이다.

〈그림 2〉 토양질 평가 시 환경영향을 고려한 토양인산의 점수화 모델



2. 토양질 평가방법의 적용

토양의 질에 대한 평가는 크게 부가산정, 가중산정 및 배수산정 법을 이용함으로써 가능하다. 여기서 부가산정이란 각각의 항목을 합산하여 토양의 질을 평가하는 방법이고 가중산정은 토양의 질 지표 각각에 대한 가중치를 결정하여 각 인자에 적용한 후 합산하는 방법을 뜻한다. 또한 배수산정은 각 인자들의 곱으로 표현하는 방법이다. Jung and Kim(2002)은 가

중산정 방법을 적용하여 우리 나라의 대표적인 경작지 토양의 화학적 질 지표를 평가하였으며, 각각의 화학적 질 지표에 대한 일반범위 및 최적 값은 pH 4~10(최적범위 pH 6~8), Ca 0~10 cmolc kg⁻¹(최적범위 4~6 cmolc kg⁻¹), Mg 0~10 cmolc kg⁻¹(최적범위 1~3 cmolc kg⁻¹), P₂O₅ 0~2,000 mg kg⁻¹(최적범위 100~400), 유기물 0~200 g kg⁻¹(최적범위 15~60 g kg⁻¹), EC_{1:5} 0~2.5 dS m⁻¹(최적범위 0~0.5 dS m⁻¹)로 나타났다. 주요인분석 결과 화학적 질 지표의 제1요인은 pH, Ca, Mg이고, 제2요인은 P₂O₅, Cu이고 제3요인은 유기물, 제4요인은 K, Fe로 나타났다(<표 3>).

<표 3> 우리 나라 대표적 경작지 토양의 화학적 질 지표에 대한 주요인분석 결과

Principal component	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	Final Communality
Eigenvalue	2.418	2.119	2.017	1.523	1.523
Percent	21.981	19.236	18.336	13.845	13.845
Cumulative %	21.981	41.244	59.580	78.425	78.425
pH	0.846	-0.180	-0.363	0.001	0.001
EC	0.111	0.280	0.889	-0.087	-0.087
OM	-0.108	0.197	0.828	-0.134	-0.134
P ₂ O ₅	-0.175	0.630	0.155	0.135	0.135
Ca	0.936	-0.087	0.015	0.115	0.115
Mg	0.779	0.194	-0.356	0.280	0.280
K	-0.221	-0.073	0.108	0.824	0.824
Cu	0.167	0.800	-0.072	0.017	0.017
Fe	-0.266	0.039	-0.076	0.803	0.803
Mn	-0.127	0.559	0.357	-0.073	-0.073
Zn	-0.028	0.786	0.301	-0.241	-0.241

각 요인별 기여도는 21.985(제1요인), 19.236(제2요인), 18.336(제3요인), 13.845(제4요인), 기타 13.845였다. 13.845를 각 요인에 가산하고 평가한 결과 각 요인별 화학적 질에 대한 가중치는 0.30(제1요인), 0.26(제2요인), 0.21(제3요인), 0.18(제4요인)로 나타났으며 이상의 결과는 다음의 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$CI = 0.30 \times \text{Factor 1} + 0.26 \times \text{Factor 2} + 0.21 \times \text{Factor 3} + 0.18 \times \text{Factor 4} \quad (9)$$

CI: 화학적 지표(Chemical Index)

물리적 질 지표는 다음 식 (10)과 같으며 유효토심 지수, 침식인자 지수, 유효토심을 지표로

사용하였다(Jung and Kim, 2002). 식 (10)에서 각 항목별로 동일한 가중치를 준 것은 우리나라 토양의 물리적 질 평가를 위한 요인 분석에 충분한 자료가 구축되어 있지 않기 때문이다.

$$PI = 1/3 \times \text{Factor 1} + 1/3 \times \text{Factor 2} + 1/3 \times \text{Factor 3} \quad (10)$$

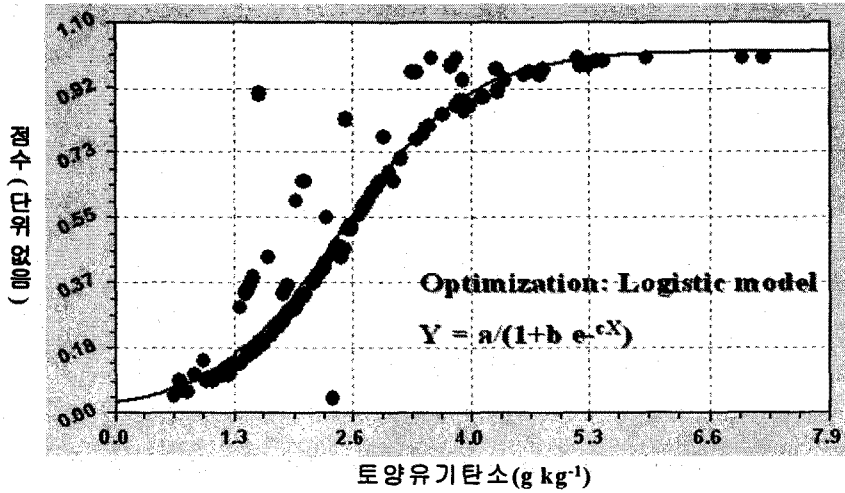
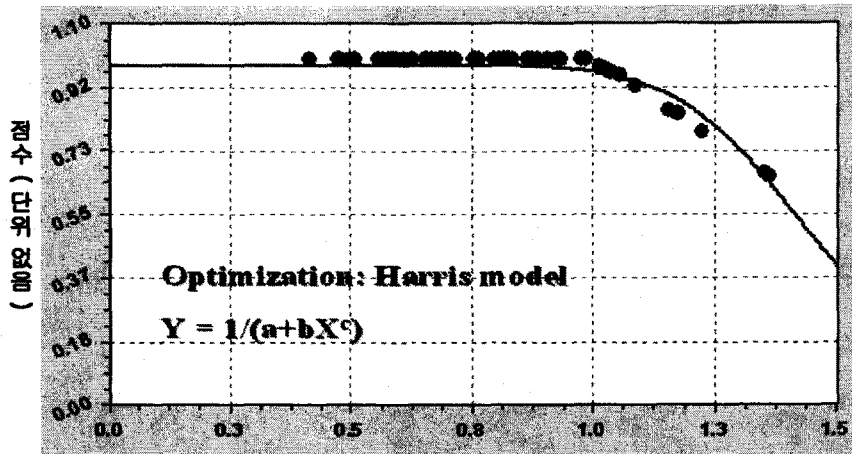
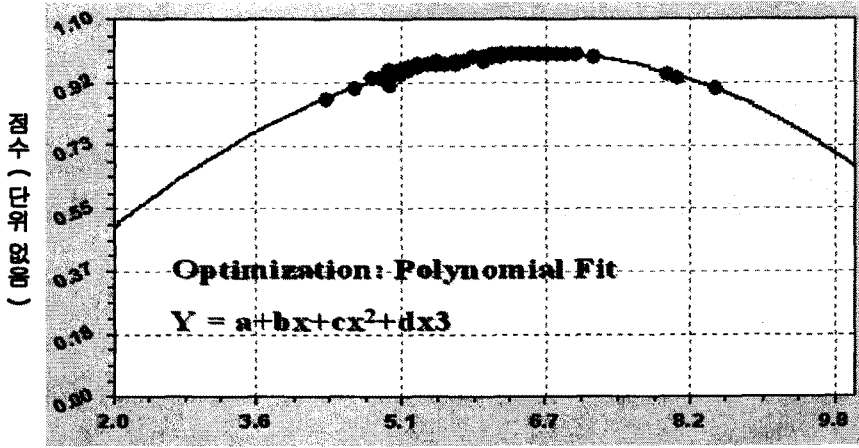
PI: 물리적 지표(Physical Index)

Jung and Kim(2002)은 이를 바탕으로 우리나라 토양의 평균 화학적 질 지표는 73점, 물리적 질 지표는 76점 그리고 우리나라 토양의 평균 토양질을 75점으로 평가하였다.

이후 Yoon et al.(2003)은 밭토양의 토양질과 관련된 주요한 토양특성을 선정하여 주성분 분석을 수행하였고, 그 결과 토양 물리성 중에는 3상이 모두 중요함을 보였으며 가비중(전용적 밀도)과 입단화도를 주요인으로 평가하였다. 화학성으로는 치환성 칼슘, 치환성 마그네슘, 유효 규산, 유효인산, 전기전도도가 중요함을 보였으며 이 중 실용적인 측면을 고려하여 pH, 유효인산, 전기전도도를 주인자로 설정하였다. 논토양에서는 물리성으로는 작토심, 토성, 전용적밀도, 유효토심, 배수등급을 선정하였고 화학성으로는 유기물, pH, 전기전도도, 유효인산, 총질소, 치환성 칼륨을 선정하였으며 생물상으로는 미생물 탄소량과 *Pseudomonas spp.*를 선정하였다. 이 중 실용적인 측면을 고려하여 최종적으로 pH, 유기물, 전기전도도, 유효인산, 유효 규산, 전용적밀도, 유효토심, 작토심을 토양질 평가를 위한 최소자료군으로 선정하였다(Yoon et al., 2003; Andrews, 2004). 이상의 결과를 이용하여 Yoon et al.(2004)은 우리나라 토양의 질을 논토양은 매우 높음, 밭토양은 높음, 그리고 시설원예지 토양은 보통으로 평가하였다.

그러나 현재까지 국내에서 제안된 토양질 평가 모델의 경우 외국의 평가체계와는 달리 각 토양질 지표와 점수 간의 관계를 단순 선형회귀 모델을 적용하여 계량화하고 있다(Jung and Kim, 2002; Yang, 2005). 그러나, 이 경우 토양질 지표의 값이 상이함에도 불구하고 특정한 구간에서는 점수가 동일하게 평가되는 오류가 있어 이 부분에 대한 보완이 요구된다. Yoon et al.(2005)에 의하면 논토양에 대해 pH의 경우 pH 5.5~7, 유기물 함량은 26g kg^{-1} 이상, 유효인산 함량 $50\sim 150\text{mg kg}^{-1}$ 인 경우에는 토양질 산정 시에 각 토양질 지표의 측정값이 상이함에도 불구하고 동일한 점수를 부여하게 되어, 토양의 특성이 매우 상이한 지역 간의 비교에는 적용 가능할지 모르나, 토양의 관리체계에 따른 토양질의 경시적인 변화 등을 판단하기 위한 모델로는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 한편, 밭토양의 경우에도 각 토양질 지표별로 최적범위는 상이하지만 논토양의 토양질 지표 산정과 동일한 오류를 범할 수 있다. 이에 본 연구에서는 이를 보완하기 위한 점수화 모델을 구축하고자 토양질 지표 중 pH, 전기전도도 및 총유기탄소를 선별하여 이에 대한 새로운 점수화 모델을 <그림 3>과 같이 제안하였다.

<그림 3> 토양질 평가를 위한 토양 지표별 점수화 모델



토양 산도(pH)의 평가를 위한 점수화 모델의 경우 Curve Expert 3.0 프로그램을 이용하여 pH와 점수의 관계에 대한 최적의 모델을 도출하였다. 여기서 점수는 각 토양질 항목별로 사용된 작물의 수확량을 기준으로 설정하였다(Yang, 2005). 최적화(Optimization) 결과 pH는 Polynomial fit에 가장 잘 부합하였으며, 모델은 $Y = a + bX + cX^2 + dX^3$ 의 형태로 제안할 수 있었다. 본 연구결과 도출된 상수의 값은 작물에 의존적이었으며, $a = 6.4e^{-0.05}$, $b = 0.29$, $c = 0.02$, $d = -0.004$ 로 평가되었다. 본 연구를 통해 제안된 모델을 이용하여 Jung and Kim(2002)이 주요인분석을 수행한 자료로부터 우리나라 토양의 산도를 점수화한 결과 토양 질은 최소 66점 및 최대 100점으로 나타났으며, 평균 92점으로 평가되었다. 이와 같은 형태(Optimum Range)의 모델은 토양질 지표 중 pH 외에도 Ca, Mg, 유효인산, 유기물, K 및 점토 등의 지표에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

토양의 전기전도도를 평가하기 위한 점수화 모델은 Harris 모델과 가장 잘 일치하였고, 이는 $Y = 1 \div (a + b X^c)$ 의 형태로 제안할 수 있다. 각 상수는 토성에 의존적인 상수이며, 본 연구에서는 $a = 1.02$, $b = 0.02$, $c = 10.36$ 로 나타났다. 토양의 전기전도도는 0.4~100점의 분포를 나타냈으며, 평균 98점으로 평가되었다. 이와 같은 형태(Less is Better)의 모델은 토양질 지표 중 전기전도도 외에 전용적밀도와 침식 등에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

또한, 토양의 유기물에 대한 모델은 Logistic 모델과 가장 잘 일치하였고, $Y = a \div (1 + b e^{-cX})$ 의 형태로 제안되었다. 각 상수는 토성, 기후에 의존적인 상수이며 본 연구에서는 $a = 1.02$, $b = 33.3$, $c = 1.40$ 로 나타났다. 토양질 지표는 4~100점의 분포를 나타냈고 평균적으로는 21점이었다. 이와 같은 형태(More is Better)의 모델은 토양질 지표 중 유효수분, 침투성, 유효토심 등에 적용 가능할 것으로 판단되었다.

한편, 현재 호주를 비롯한 일부 선진국에서는 웹기반의 프로그램을 구축하여 토양질을 평가하고 있으며, SINDY는 그 대표적인 모델이다. SINDY는 토양질 평가의 최소자료군(MDS)으로 토양비옥도의 지표로는 Olsen-P(범위: 0~250ug/g), 토양산도의 지표로는 pH(범위: pH 2.8~8.5), 토양 유기물 급원의 지표로는 무기화가능한 질소(mineralisable N)(범위: 5~400 ug/g), 총탄소(범위: 1~60%) 및 총질소(범위: 0.01~2%)를 설정하고 있다. 또한 토양 물리성의 지표로는 전용적밀도(범위: 0.2~1.8ton/m³) 및 미세공극율(microporosity)(범위: 0~50%)을 설정하고 있다.

SINDY 프로그램에서는 각 세부 토양질 지표에 대하여 SINDY 프로그램이 보유하고 있는 데이터베이스의 범위를 나타내며, 이를 평가하고자 하는 자료의 범위와 비교한다. SINDY를 이용한 세부 토양질 지표의 평가 결과는 최소자료군 별로 비옥도, 산도, 유기물원 및 물리성 지표를 나타내는 그룹으로 분류되고 각 그룹에서 입력된 값을 평가하여 좋음(Excellent), 보

통(Ok), 낮음(Low)의 세 단계 중 평가하고자 하는 토양의 현 상태를 나타내고, 최종적으로는 각 항목에 대한 관리방안을 제시해 주고 있다. 우리 나라의 토양질에 대한 종합적 평가를 위해서는 향후 국가적인 차원의 토양특성 자료를 구축하고, 선별된 최소자료군에 대한 계량화 모델을 개발하고 이를 적용하여, 적절한 웹기반의 프로그램을 운용하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

1970년대 후반 Warkentin and Fletcher(1977)에 의해 제안된 토양질의 개념은 기존의 식물 배지로서의 토양을 벗어나 환경의 한 구성요소로서의 토양을 다루기 시작하였다. 이후 많은 연구자들에 의해 토양질의 개념에 대한 정의가 내려졌으나, 그 개념은 “토양이 본래의 기능을 효과적으로 수행할 수 있는 토양의 용량”으로 집약할 수 있다. 국제경제협력개발기구(OECD)는 토양의 질을 농업환경 지표의 하나로 선정하였고, 토양의 질 지표를 토양자원지표로 명칭을 변경하여 토양유실량과 함께 토양탄소를 토양질 평가를 위한 주요 세부지표로 제시하였으며, 각 국가별로 토양질을 계량화하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 토양질의 계량화는 지속가능한 토양관리를 위한 기초가 되며 토양관리 목표를 달성하기 위한 토양의 기능을 선별하고, 각 토양의 기능을 대표할 수 있는 최소자료군(Minimum Data Set)을 선정하는 것으로부터 계량화가 가능하다.

농촌진흥청에서는 우리 나라의 경우 토양의 물리적 지표로 토양침식, 전용적밀도, 토심, 입단안정화도, 토성, 수분침투력, 유효수분함량을, 화학적 지표로는 유기물, pH, 전기전도도, 질소·인산·加里, 중금속을, 생물학적 지표로는 미생물탄소·질소, 무기화 가능한 질소, 토양 호흡이 적용 가능할 것으로 보고하였다. 한편, 최소자료군을 구성하는 각 토양질 지표의 정확한 측정이 어려운 경우 토양특성 환산식(Pedotransfer Function)을 이용하여 추정할 수 있으며, 각 항목별로 적합한 표준점수화함수(Standard Scoring Function)를 이용하여 정량화하고 부가산정, 가중산정 혹은 배수산정을 통해 종합화함으로써 계량화할 수 있다.

현재 외국에서는 SINDY를 비롯한 다양한 토양질 평가모델을 제시하고 있으며 향후 국내에서도 국가적인 자료 구축과 함께 선별된 최소자료군에 대한 계량화 모델을 도출하여 웹기반 프로그램을 운용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 한편 현재까지 토양질의 계량화에 대한 연구는 토양질 특성 중 생산성에 관련된 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 질에 대해 주로 수행되어 왔다. 그러나, 환경의 질과 인간과 생물의 건강에 미치는 토양의 질에 관한 지표 선정, 최소자료군 구축 및 계량화에 관한 광범위한 연구가 추후 체계적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- Andrews, S.S., D.L. Karlen, and C.A. Cambardella. 2004. "The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method." *Soil Science and Society of America Journal* 68(1): 945-1962.
- Doran, J.W., and T.W. Parkin. 1994. "Defining and Assessing Soil Quality," In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Doran, J.W. et al.(eds.) SSSA Special Publication Number 35. Madison. WI. USA: Soil Science Society of America and America Society of Agronomy.
- Doran, J.W., and T.W. Parkin. 1996. "Quantitative Indicator of Soil Quality: A Minimum Data Set," In Doran. J.W. and A.J. Johnes.(eds.) *Methods for Assessing Soil Quality*, SSSA Special Publication Number 49. Madison. WI. USA: Soil Science Society of America and America Society of Agronomy.
- Gregorich, E.G. 1996. "Soil Quality: A Canadian Perspective." *Proceeding of Soil Quality Indicator Workshop*. Ministry of Agriculture and Fisheries and Lincoln Soil Quality Research Center. Lincoln University. Christchurch. NZ.
- Gregory, P.J., L.P. Simmonds, and C.J. Pilbeam. 2000. "Soil Type, Climatic Regime, and Response of Water Use Efficiency to Crop Management." *Agronomy Journal* 92: 814-820.
- Grossman, R.B. et al. 2001a. "Assessment of Soil Organic Carbon Using the U.S. Soil Survey." In Lal, R.(ed.) *Assessment Methods for Soil Carbon*. Boca Raton. Florida. USA: Lewis Publishers. 87-104.
- Grossman, R.B. et al. 2001b. "Coupling Use-Dependent and Use-Invariant Data for Soil Quality Evaluation in the United States." *Journal of Soil and Water Conservation* 56: 63-68.
- Havlin, R.F. et al. 1999. "Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management." 6th ed. Upper Saddle River. NJ. USA: Prentice Hall.
- Hornick, S.B. 1992. "Factors Affecting the Nutritional Quality of Crops." *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 63-68.
- Jung, Y.S., and J.J. Kim, 2002. *Development of Environmentally Sound Soil Management Technology for Alpine Farmland*. Suwon. Korea: RDA.
- Karlen, D.L., C.A. Ditzler, and S.S. Andrews. 2003. "Soil Quality: Why and How?" *Geoderma* 114: 145-156.
- Karlen, D.L. et al. 1997. "Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation." *Soil Science and Society of America Journal* 61: 4-10.

- Karlen, D.L. and D.E. Stott. 1994. "A Framework for Evaluating Physical and Chemical Indicators of Soil Quality," In Doran, J.W. et al.(eds.) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, SSSA Special Publication Number 35. Madison. WI. USA: Soil Science Society of America and America Society of Agronomy.
- Lane, L.J. et al. 1991. "Multiobjective Decision Theory-decision Support Systems with Embedded Simulation Models." In Ritter, W.F.(ed.) *Proceeding of the 1991 National Conference on Irrigation and Drainage*, Honolulu, HI. New York. USA: America Society of Civil Engineering. 445-451.
- Larson, W.E. and F.J. Pierce. 1991. "Conservation and Enhancement of Soil Quality." In *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. Vol 2. IBSRAM Proceeding. 12(2). Bangkok, Thailand.* International Board for Soil Restoration and Management.
- National Research Council. 1993. *Soil and Water Quality: An Agenda for Agriculture*. Washington, DC. USA: National Academy Press.
- Needelman, B.A. et al. 1999. "Interaction of Tillage and Soil Texture: Biologically Active Soil Organic Matter in Illinois." *Soil Science Society of America Journal* 63: 1326-1334.
- Ok, Y.S., S. Lim, and J.G. Kim. 2002. "Electrochemical Properties of Soils: Principles and Applications." *Life Science and Natural Resources Research* 10: 69-84.
- Ok, Y.S., S. Lim, and J.G. Kim. 2003. "The Role of Carbon Capture and Sequestration in Agricultural Soils Mitigating the Greenhouse Gas(GHG) Emission." *Life Science and Natural Resources Research* 11: 125-138.
- Parr, J.F. et al. 1992. "Soil Quality: Attributes and Relationship to Alternative and Sustainable Agriculture." *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 5-11.
- Pierce, F.J., W.E. Larson, and R.H. Dowdy. 1984. "Soil Loss Tolerance: Maintenance of Long-Term Soil Productivity." *Journal of Soil and Water Conservation* 39: 136-138.
- Power, J.F. and R.J.K. Myers. 1989. "The Maintenance or Improvement of Farming Systems in North America and Australia." In Steward, J.W.B.(ed.) *Soil Quality in Semiarid Agriculture, Proceeding of an International Conference Sponsored by the Canadian International Development Agency, Saskatoon, Saskatchewan, Canada. Saskatchewan Institute of Pedology, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.* 273-292.
- Ro, H.M. 1999. "Soil Quality Conservation for Sustaining Orchard Productivity." *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* 17(3): 391-399.
- Seybold, C.A. et al. 1998. "Quantification of Soil Quality." In Lal, R.(ed.) *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Boca Raton: CRC Press LLC. 387-404.

- Sharpley, A.N. et al. 2003. "Development of Phosphorous Indices for Nutrient Management Planning Strategies in the United States." *Journal of Soil and Water Conservation* 58: 137-151.
- Soil Science Society of America. 1987. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison: SSSA.
- Steinhardt, G.C. 1995. "Soil Quality: A New Idea that Includes an Old One." *Journal of Soil and Water Conservation* 50: 222.
- USDA. 1966. "Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada." *Technical Bulletin Number 1335*. Washington, DC. USA: U.S. Government Print Office.
- Warlentin, B.P. 1995. "The Changing Concept of Soil Quality." *Journal of Soil and Water Conservation* 50: 226-228.
- Warlentin, B.P., and H.F. Fletcher. 1977. "Soil Quality for Intensive Agriculture." Intensive Agriculture Society of Science. Soil and Manure. *Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertilizer Management*. National Institute of Agricultural Science. Tokyo, Japan. 594-598.
- Wymore, A.W. 1993. *Model-Based Systems Engineering: An Introduction to the Mathematical Theory of Discrete Systems and to the Tricategory Theory of System Design*. Boca Raton, FL. USA: CRC Press.
- Yakovlev, D.S. et al. 1992a. "Evaluating Land Management Effects on Water Quality using Multi-Objective Analysis within a Decision Supporting System." *1st Conference of Ground Water Ecology*. Tampa, FL. AWRA. Bethesda, MD: American Water Resource Association.
- Yakovlev, D.S. et al. 1992b, "A Decision Supporting System for Water Quality Modeling." In *Water Resources Planning and Management, Proceeding of the Water Resources Session/Water Forum '92*. Baltimore, MD. America Society of Civil Engineering. New York. USA. 188-193.
- Yang, J.E. 2005. "Development of Models to Evaluate the Environmental Impacts in the Mountainous Agriculture." In Jung, Y.S., J.E. Yang, and K.S. Kim.(eds.) *Evaluation Methodology for Environmental Multifunctionality of the Highland Agriculture in the Mountainous Area*. Suwon, Korea: RDA. 59-137.
- Yoon, J.H. et al. 2003. "Development of Soil Quality Indicators." In *Agro-Environment Research Report for 2002*. Suwon, Korea: National Institute of Agricultural Science and Technology. RDA. 240-258.
- Yoon, J.H. 2004. "Review and Discussion on Development of Soil Quality Indicators." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 37(3): 192-198.
- Yoon, J.H. et al. 2004. "Soil Quality Assessment Method of Paddy and Upland." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 37(6): 357-364.