

한국 주요 토양유형의 공간적 분포와 토양형성요인을 이용한 예측가능성 평가

박수진* · 손연규** · 홍석영*** · 박찬원**** · 장용선*****

Spatial Distribution of Major Soil Types in Korea and an Assessment of Soil Predictability Using Soil Forming Factors

Soo Jin Park* · Yeon-Kyu Sonn** · Suk-Young Hong*** · Chan-Won Park**** · Yong-Seon Zhang*****

요약 : 이 연구에서는 현재 한국에서 사용되고 있는 구분류법에 근거한 대토양군과 신분류법에 근거한 대군의 공간적 분포를 살펴보고, 토양형성과 관련된 각종 환경요인들과의 상관관계를 분석하였다. 그 결과를 토대로 의사결정나무기법을 이용하여 토양분포의 예측가능성을 평가하였다. 대토양군의 경우에는 분포를 보다 직관적으로 이해할 수 있는 장점이 있지만, 환경요인을 이용한 예측가능성면에서는 대군에 뒤지는 결과를 보여주었다. 토양분포를 결정하는 요인들로는 산지와 평탄지가 뚜렷하게 구분되는 한국의 지형특성이 가장 중요한 요인으로 나타났으며, 부차적으로 기후특성, 그리고 사면을 따라 나타나는 토양연속성이 제시되었다. 의사결정나무기법을 이용한 토양의 예측가능성 평가에서는 예측변수의 수와 종류에 따라 35%에서 75%의 분류정확도를 보여주었다. 신분류법의 경우에는 지형요인이 가장 중요한 예측변수로 평가된 반면, 구분류법의 경우에는 기후변수가 중요한 예측변수로 평가되어 대조를 보였다.

주요어 : 토양도, 토양분류, 대토양군, 대군, 토양예측, 토양-경관분석법

Abstract : This study aims to investigate the spatial distribution of major soil types in Korea, and to assess the ability to predict soil distribution using environmental variables. A classification tree method was used to assess soil predictability. While the *great soil groups* can give more intuitive understandings on their spatial distributions, its predictability using environmental factors is much lower than that of the *great groups*. The most important factor to determine the spatial distribution of major soil types is the geomorphological characteristic of Korea that shows distinctive morphological difference between mountains and plains. Spatial distribution of climatic variables and catenary soil sequence along slopes play additional roles in determining the distribution of soil types. The classification tree models resulted in 35-75% of prediction accuracy, depends on the combination of different environmental variables brought in the models. While geomorphological variables are the best predictors for the *great groups*, climatic variables perform better for the *great soil groups*.

Key Words : soil map, soil classification, great soil group, great group, soil prediction, soil-landscape analysis

이 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원의 농업환경지도 작성연구(2007-2011)의 일환으로 진행되었다.

* 서울대학교 지리학과 부교수(Associate Professor, Dept. of Geography, Seoul National University), catena@snu.ac.kr

** 농촌진흥청 국립농업과학원(National Academy of Agricultural Science), sonnyk@korea.kr

*** 농촌진흥청 국립농업과학원(National Academy of Agricultural Science), syhong67@korea.kr

**** 농촌진흥청 국립농업과학원(National Academy of Agricultural Science), cwpark@korea.kr

***** 농촌진흥청 국립농업과학원(National Academy of Agricultural Science), zhang@korea.kr

1. 서론

토양은 작물생육과 더불어 지표면에서 나타나는 기후, 수문, 생태 현상을 결정하는 매개체의 역할을 한다. 한국은 높은 인구밀도와 산지비율로 인해 토양자원에 대한 압력이 세계 그 어느 곳보다 높다. 특히, 급속한 산업화와 도시화 과정을 거치면서 토양환경이 급격하게 악화되어, 불투수 면적의 증가, 지하수위의 감소, 하천의 건천화, 홍수시 침투유량의 증가, 대기순환의 변화, 종다양성의 감소 등의 문제점들이 우려할 수준에 이르고 있다(MOE, 2009). 최근 전세계적인 환경변화에 대한 사회적 관심이 증가하면서 토양의 공간적인 분포와 시간적인 변화에 대한 이해의 필요성이 요구되고 있다.

환경관리를 위한 토양정보는 토양도에 전적으로 의존하게 된다. 이 과정에서 농업생산을 주목적으로 제작된 기존 토양도의 한계점들이 지적되고 있으며, 다양한 분야의 수요를 만족시킬 수 있는 방향으로 토양도가 개선되어야 한다는 주장이 지속적으로 제기되고 있다(Burrough, 1993; McSweeney *et al.*, 1994; Grundwald, 2006). 기존의 문헌에서 빈번하게 지적되는 기존 토양도의 문제점을 간략하게 정리하면 다음과 같다(McSweeney *et al.*, 1994). 첫째, 대부분의 토양도가 한 가지의 축척으로만 제작되어 있어, 공간적인 스케일(scale)이 다른 이용목적에 만족시키기가 어렵다. 둘째, 작도 단위가 폴리곤(polygon)으로 되어 있어 연속적으로 나타나는 토양의 변화를 반영하지 못한다. 셋째, 토양형태를 중심으로 토양도가 작성되어 수문 및 기후현상을 모의하는 데 필요한 토양속성 정보들이 제한되어 있다. 넷째, 현장조사를 중심으로 토양도 제작이 이루어지고 있기 때문에, 한번 제작되고 나면 변화된 내용을 수정하는데 오랜 기간이 필요하다.

전통적인 토양조사 방법을 통하여 이러한 문제점들을 개선하려고 한다면 많은 비용과 오랜 시간이 필요하다. 이에 대한 대안으로 토양형성과 관련된 환경요인들을 종합적으로 고려하여, 보다 저렴한 비용과 높은 효율로 다축척(multi-scale), 연속적, 그리고 토양속성 중심의 토양도를 작성하려는 노력이 전세계적으로

활발하게 이루어지고 있다(Hewitt, 1993; McSweeney *et al.*, 1994; Gessler *et al.*, 1995; Park and Vlek, 2002a; McBratney *et al.*, 2003; Scull *et al.*, 2003; Grundwald, 2006). '토양-경관분석법(soil-landscape analyses)', '예측적 토양도 작성(predictive soil mapping)' 혹은 '전자토양도 작성(digital soil mapping)' 등으로 요약되는 이러한 방법론의 핵심은 토양과 토양형성요인간의 상관관계에 관한 이해를 토대로, 공간분석기법을 이용하여 토양도를 새롭게 제작하거나 기존의 토양도를 신속하게 개선하려는 것이다(McBratney *et al.*, 2003).¹⁾

한국은 지난 50여년 간의 토양조사를 통해 세계적으로 가장 정밀도가 높은 토양도를 보유하고 있으며, 이미 다양한 축척(1:250,000, 1:25,000, 1:5,000)의 토양도가 전산화되어 활용되고 있다(NAAS, 2010). 하지만, 한국의 토양도 역시 전술한 전통적 농업토양도가 가지는 문제점을 공통적으로 안고 있다. 토양정보가 한국의 환경관리 분야에서 보다 적극적으로 활용되기 위해서는 새로운 패러다임에 근거한 토양정보의 확충과 이용에 대한 지속적인 연구와 투자가 이루어져야 할 것으로 보인다. 특히 현재 심각한 경제난을 겪고 있는 북한지역에 대한 토양조사는 통일을 대비한 국토 및 환경관리, 그리고 식량생산의 측면에서 반드시 이루어져야 할 작업이다.

새로운 토양도 제작의 패러다임에 근거한 토양도의 작성 혹은 수정을 위해서는 토양분포가 환경요인과 가지는 상관성을 파악하는 작업이 선행되어야 한다(McBratney *et al.*, 2003). 현재 한국의 토양특성과 분포를 설명하는 개설서는 다수 존재하고 있지만(ASI, 1985; NHAES, 2003; NGII, 2007), 이들 분포를 토양형성요인과 관련시키는 연구는 상대적으로 소홀하게 다루어져 왔다. 특히, 한국의 토양도는 1990년대를 전후하여 그 이전에는 토양의 형성요인을 강조한 미국 농무성(USDA)의 구분류법이 사용되었지만, 이후에는 토양의 형태적 특성을 강조하는 신분류법(Soil Survey Staff, 1993)이 사용되고 있다. 이 두 분류법은 토양형성에 대한 이해와 분류근거가 달라 호환되기 어려운 특성을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 분야별로 혹은 목적별로 이 두 분류법에 의해 제작된 토양도가 혼

재되어 사용되고 있어, 많은 혼란과 더불어 토양특성을 이해하는데 장애요인이 되고 있다.

이 연구는 현재 한국에서 사용되고 있는 구분류법과 신분류법에 의해 제작된 대토양군(great soil group)과 대군(great group) 단위에서의 토양유형(soil types)의 분포를 살펴보고, 환경요인들을 이용한 토양예측의 가능성을 평가하는 것이 목적이다. 보다 구체적인 연구목적과 방법은 1) 토양유형별 분포특성을 살펴본 뒤, 2) 토양분포와 환경요인들(기후, 지질, 지형, 식생)간의 상관관계를 통계적으로 분석하였다. 그 결과를 토대로 3) 의사결정나무기법(classification tree)을 적용하여 환경요인들을 이용한 토양의 예측가능성을 평가하고자 하였다.

이 연구는 토양유형의 분포와 환경변수간의 관계를 밝히는 데 중점을 둔 것으로 토양예측을 직접 시도하지는 않았다. 하지만, 한국의 토양분포에 대한 보다 정량적인 이해와 더불어, 향후 이루어질 보다 정밀한 토양도 제작과 미조사지에 대한 토양예측에 중요한 이론적 기반을 제공할 수 있을 것이다. 특히 현재 혼용되고 있는 토양분류법간의 차이를 밝혀서 통일된 토양분류체계를 정착시키는데 도움을 줄 수 있기를 기대해 본다.

2. 연구자료 및 방법

1) 토양분포 자료

토양의 종류는 환경별로 큰 차이를 보이기 때문에 국가별로 다른 토양분류시스템(soil classification system)이 개발되어 사용되고 있다(Duchaufour, 1982; NHAES, 2003). 한국의 경우에는 1990년대까지는 미국의 구분류법에 근거한 토양분류체계를 사용하였지만, 그 이후부터는 신분류법(UDSA, Soil Taxonomy)을 이용하여 토양을 분류하여 지도화하고 있다(NIAST, 2000)²⁾. 신분류법은 FAO가 중심이 되어 제안한 WRB(World Reference Base)와 더불어 현재 전세계적으로 가장 광범위하게 사용되고 있는 토양분류체계이다

(FAO/ ISRIC/ISSS, 1998).³⁾

구분류법과 신분류법은 공통적으로 계층화된 토양분류체계를 가지고 있다. 구분류법은 목(order), 아목(suborder), 대토양군, 통(series), 구(type), 상(phase)의 6 단계의 구조를 가지는 있으며, 신분류법에서는 목, 아목, 대군, 아군(subgroup), 속(family), 통의 구조를 가지고 있다. 각각의 분류단위와 분류기준자(classifier)간에는 큰 차이가 있어 두 분류체계간의 호환성은 낮은 것으로 알려지고 있다(Boul *et al.*, 2003).

이 연구에서는 구분류법의 대토양군, 그리고 신분류법의 대군을 대상으로 분석을 실시하였다(Table 1, 2). 이 단위들을 분석대상으로 선택한 이유는 이들이 토양분포의 해석에서 가장 보편적으로 사용되는 분류단위라는 점과 이 연구의 공간적인 범위가 국가단위라는 점을 고려한 것이다. 국가단위의 분석에서 토양분류체계상 차하의 토양유형을 선정할 경우, 지나치게 많은 토양유형으로 세분되어 분석에 어려움이 따를 것으로 판단하였다.

한국에서 구분류법에 의한 대토양군은 모두 20종이 보고된 반면, 신분류법에 의하면 7개의 목, 14개의 아목, 그리고 27개의 대군이 보고되고 있다(Table 1, 2). 이들 토양의 분포면적은 유형별로 큰 차이를 보인다. 구분류법의 경우 암쇄토/적황색토(Ma)는 조사면적⁴⁾의 27.7%를 차지하는 반면, 용암류 토양(Lava)은 0.07%에 불과하다(Table 1). 신분류법의 경우 Dystrudepts가 조사면적의 47.4%를 차지하지만, Durudands와 Udivitrands 등은 0.01%의 면적에서만 나타난다.

통계분석과정에서 면적비면에서 큰 차이를 보이는 모든 토양유형을 동시에 고려하기는 어렵다고 판단하여, 구분류법의 경우에는 면적비가 4% 이상, 그리고 신분류법의 경우에는 면적비가 2% 이상인 경우만을 선택하여 분석하였다. 선택된 토양은 구분류법에 의하면 8개의 대토양군(Ma, Mm, Ms, Rocky, Ra, An, Ap, Af), 신분류법에 의하면 6개의 대군(Dystrudepts, Eutrudepts, Udorthents, Endoaquepts, Hapludults, Hapludalfs)이다(Table 1, 2). 이들 토양이 차지하는 면적은 전체 조사면적의 83.7%와 92.7%이다.

폴리곤 형태로 제작된 토양도는 ArcView 3.2(ESRI, 1991-1996)를 이용하여 50m 크기로 격자화하여 사용

Table 1. The Area and Proportion of Great Soil Groups (Old Classification System) in Korea.
한국의 대토양군(구분류법)의 분포면적과 면적비.

Dominant Landforms	Great Soil Group	Symbol	Area (km ²)	Proportion (%)
Coastal plains	Sand and gravels, coastal beaches and dunes	Fb	158.6	0.16
	Low-humic gley and alluvial soils, fluvio-marine plains	Fm	2,791.0	2.84
Inland alluvial plains and valleys	Alluvial soils and river wash, flood plains	Af	4,511.6	4.58
	Complex of soils, narrow valleys	An	6,527.5	6.63
	Low-humic gley and alluvial soils, alluvial plains	Ap	5,197.3	5.28
Lava plains and terraces	Very dark brown to black volcanic ash soils, lava plains	Lp	683.9	0.69
	Very dark brown to black volcanic ash soils, shallow and rocky phase, lava terraces	Lt	595.7	0.61
	Lava flows	Lava	70.3	0.07
Dissected older pediplane	Red-yellow podzolic soils, siliceous crystalline	Ra	10,807.2	10.9
	Lithosols, severely eroded, siliceous	Re	2,428.2	2.47
	Reddish brown lateritic soils and lithosols, calcareous	Rl	190.4	0.19
	Lithosols and red-yellow podzolic soils, sedimentary	Rs	934.2	0.95
	Red-yellow podzolic, reddish brown lateritic soils and siliceomafic	Rv	1,574.6	1.60
Strongly dissected hilly and mountainous lands	Lithosols, siliceous crystalline	Ma	27,284.3	27.72
	Volcanic ash soils, cinder cones	Mj	79.8	0.08
	Lithosols, calcareous	Ml	2,333.6	2.37
	Lithosols, micaceous and hard siliceous	Mm	7,084.2	7.20
	Lithosols, sedimentary	Ms	14,261.8	14.49
	Brown forest soils and lithosols, undifferentiated	Mu	1,052.0	1.07
	Lithosols, siliceomafic	Mv	3106.9	3.16
No soils	Rocky lands	Rocky	6,701.4	6.81
	Water	Lake	57.1	0.06
Total			98,431.6	100.0

Source: Calculated from data provided by NAAS, 2010

하였다. 분석 전에 다양한 격자크기(25m, 50m, 100m, 150m)로 내삽한 뒤 빈도분포를 살펴본 결과, 격자크기가 각 토양유형의 상대적인 비율에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

2) 토양형성요인 추출

토양을 예측하는 과정에서 가장 중요한 작업은 토양형성에 영향을 주는 환경변수들을 추출해 내는 작업이다(McBratney *et al.*, 2003). Table 3은 이 연구에서 사용한 토양예측 관련 환경변수들과 각각의 공간 및 시간해상도를 표시한 것이다. 환경변수의 선정은 토양형

성인자 모델에서 제시하고 있는 기후, 지형, 생물, 모재요인들을 모두 포괄하도록 노력하였다(Jenny, 1941).⁵⁾ 하지만, 토양형성인자 중에서 시간요인을 반영할 수 있는 자료를 확보하기가 어렵다고 판단하여 시간요인에 대한 공간자료는 포함시키지 못했다.

(1) 기후요인

기후요인으로는 1975년부터 2005년까지 30년 평균 기온과 평균강우량, 그리고 최한월(1월) 평균기온과 평균강수량, 최난월(8월) 평균기온과 평균강수량을 각각 사용하였다. 기온은 토양형성과정에서 광물질의 풍화와 유기물의 분해에 가장 직접적인 영향을 미치는 요

Table 2. The Area and Proportion of Great Groups (New Classification System) in Korea.
한국의 주요 대군(신분류법)의 분포면적과 면적비.

Order	Suborder	Great Group	Area(km ²)	Proportion(%)	
Inceptisols	Aquepts	Endoaquepts	9,482.02	9.99	
		Epiaquepts	245.29	0.26	
	Udepts	Dystrudepts	44,984.30	47.41	
		Eutrudepts	15,954.45	16.82	
		Fragiudepts	219.49	0.23	
Entisols	Aquepts	Fluvaquepts	112.45	0.12	
		Endoaquepts	581.52	0.61	
		Hydraquepts	37.91	0.04	
		Psammaquepts	178.24	0.19	
	Fluvents	Udifuvents	1,067.51	1.13	
	Orthents	Udorthents	10,478.79	11.04	
	Psammments	Udipsammments	1,443.39	1.52	
		Quartzipsammments	392.76	0.41	
Ultisols	Udults	Hapludults	4,731.86	4.99	
		Rhodudults	3.88	0.00	
Alfisols	Aqualfs	Epiaqualfs	235.80	0.25	
		Endoaqualfs	388.56	0.41	
	Udalfs	Fragiudalfs	498.17	0.53	
		Hapludalfs	2,352.10	2.48	
Andisols	Udands	Hapludands	675.48	0.71	
		Fulvudands	324.57	0.34	
		Melanudands	380.56	0.40	
		Durudands	13.68	0.01	
	Vitrands	Udivitrands	6.25	0.01	
	Mollisols	Udolls	Hapludolls	82.24	0.09
	Histosols	Sapristis	Haplosapristis	0.44	0.00
Hemists		Haplohemists	5.12	0.01	
Total			94,876.84	100.00	

Source: Calculated from data provided by NAAS, 2010

인이다. 반면, 강우량은 토양내의 물질순환과 지표토양의 침식에 영향을 준다. 최난월과 최한월 기후변수를 포함시킨 것은 겨울철의 결빙현상과 여름철의 집중호우가 한국의 토양형성에 중요한 영향을 미친다는 점을 고려한 것이다(NHAES, 2003).

사용한 기후변수는 기상청에서 제공하는 전국 54개 기상관측지점에서 측정된 월별 평균기온과 평균강수량 자료였다. 기상관측지점의 점 자료를 ArcView 3.2

에서 IDW(Inverse Distance Weighting)를 사용하여 전국적으로 내삽하여 사용하였다.

(2) 지형요인

지형은 지표면의 수문학적, 지화학적, 그리고 생태학적 작용들이 일어나는 틀을 제공하고 있어 토양형성에서 가장 중요한 요인으로 간주된다(McBratney *et al.*, 2003).⁶⁾ 이 연구에서 사용한 지형요인은 수치지도

모델(Digital Elevation Model, 이하 DEM)에서 추출한 해발고도, 경사도, 지표곡면도, 사면유역지수, 하천으로부터의 거리 등 모두 5개의 지형변수와 토양조사 과정에서 조사한 지형단위를 사용하였다. 현재 토양도에서는 지형은 산악지, 구릉지, 곡간지, 산록경사지, 선상지, 하해혼성평탄지, 하성평탄지, 홍적대지, 용암류대지 등 9개 항목으로 분류하고 있다(NGII, 2007).

고도는 위치가 높아지면서 나타나는 기후의 차이와 더불어, 물과 물질의 유출입특성을 반영하는 지형변수다. 사면경사도는 지표면에서 나타나는 물과 물질 흐름의 상대적인 빠르기를 결정한다(Moore *et al.*, 1993). 지표곡면도는 3차원적 사면형태의 요철정도(convexity, concavity)와 지표의 경사를 동시에 고려할 수 있는 지형변수로, 철형(凸形)의 경우에는 유출이 우세하게 나타나지만 요형(凹形)의 경우에는 유입이 우세한 지형으로 간주할 수 있다(Park, 2004). 사면유

역지수란 강우가 내렸을 경우, 지표면이 불투수층이라고 가정된 상태에서 사면상의 한 지점으로 유입되는 상부사면의 면적을 합한 것이다. 이 변수는 지표면에서 나타나는 물의 흐름을 추적하는 지형변수로 광범위하게 사용되고 있다(Gallant and Wilson, 2000).

이 연구에서 사용한 DEM은 미국 지질조사국(USGS)이 한반도 전체를 대상으로 구축한 해상도 30m의 DEM을 100m의 격자크기로 변환한 것이다. 사면경사도는 ArcView 3.2에서 Zevenbergen and Thorne (1987)의 방법에 의해 계산하였으며, 지표곡면도는 저자가 제작한 프로그램을 이용하였다(Park, 2004). 사면유역지수는 Conrad(1998)에 의해 제작되어 배포된 DiGEM을 사용하였으며, DEM상에서 존재하는 함몰격자(sink)들을 제거한 뒤, 다중흐름법(multiple flow algorithm)을 이용하여 사면유역지수를 계산하였다.

Table 3. Environmental Predictors and Their Characteristics. 토양예측에 사용된 환경변수와 각 변수의 특성.

Soil forming factors	Group of predictors	Abbr.	Environmental variables	Unit	Spatial or temporal resolution
Climate	CLIMA	TEM	Average temperature	°C	IDW interpolation based on 54 weather stations; 30 years average
		RAIN	Average precipitation	mm	
	CLIVAR	TEM8	Average temperature (August)	°C	
		TEM1	Average temperature (January)	°C	
		RAIN8	Average precipitation (August)	mm	
RAIN1	Average precipitation (January)	mm			
Relief	TERRAIN	ELEV	Elevation	m	100m DEM
		SLOPE	Slope angle	°	
		SC	Surface curvature	-	
		MF	Upslope contributing area	log ₁₀ m ²	
		RIVER	Distance from river	log ₁₀ m	
	LANDFORM	LANDFORM	Landform unit	categorical	field survey
Organisms	NDVI	NDVI	Normalized differential vegetation index (NDVI)	0-34	1000m; 2001-2002년;
	NDVIVAR	NDVI4	NDVI, April	0-34	MODIS imagery
		NDVI8	NDVI, August	0-34	
		NDVI11	NDVI, November	0-34	
LAND	LAND	Land cover type	categorical	30m; Landsat	
Parent materials	GEOL	GEOL	Agricultural geology	categorical	field survey

(3) 생물요인

토양형성에 미치는 생물요인은 극히 다양하며, 모든 생물요인들을 지도화하는 것은 불가능하다. 이 연구에서는 MODIS 위성영상 분석을 통한 식생활력도(Normalized Differential Vegetation Index, 이하 NDVI)를 이용하여 지표식생의 상대적인 특성을 반영하고자 하였다. MODIS 위성영상은 공간해상도(1,000m)는 낮지만, 한국 전체를 한 번에 촬영할 수 있고 촬영주기도 짧아 식생의 계절변화를 파악할 수 있는 장점이 있다. 이 연구에 사용된 NDVI는 2001년 6월부터 2002년 5월까지 12개의 영상을 평균한 값을 사용하였다(Kim, 2004). 식생의 계절적인 변화를 고려하기 위해서 식생의 차이가 클 것으로 예상되는 2002년 4월과 2001년 8월, 2001년 11월의 NDVI 값을 각각 사용하였다.

한국과 같이 인구밀도가 높고 토지이용 역사가 긴 곳에서는 인간의 활동이 토양형성에 중요한 영향을 미친다. 이러한 인간의 간섭 특히 시간적인 변화를 정확하게 표현할 수 있는 환경변수를 찾기는 어렵다. 이 연구에서는 지표피복을 통해 인간의 영향을 간접적으로 평가하였다. 이 연구에서 사용한 지표피복도는 1997년 6월부터 1999년 5월까지 25개의 LANDSAT TM 자료의 분석을 통해 제작한 것이다(Hong *et al.*, 2008). 사용한 지표피복도에는 산림, 논, 밭, 시가지지역, 나지, 초지, 수체1, 수체2 등의 8가지의 지표피복종류가 30m 해상도로 표현되어 있다(Hong *et al.*, 2008).

(4) 지질요인

지질요인은 토양속성과 조성, 그리고 토양구조를 결정짓는 중요한 요인이다. 이 연구에서는 토양조사시에 조사된 농업지질도를 사용하였다. 광물지질도(KIGMM, 1995)는 암석의 종류와 형성시기를 중심으로 제작된 반면, 농업지질도는 토양의 특성을 결정하는 암석의 구성성분을 중심으로 암석을 표현하고 있다. 특히, 암석과 미고화퇴적물을 따로 분류하고 있어 토양예측에 보다 적합하다고 판단하였다. 농업지질도에는 지질요인을 산성암, 중성암, 염기성암, 변성암, 퇴적암, 제3기층, 제4기층, 화산회 등 8 종류로 구분하고 있다(NGII, 2007).

3) 토양분포와 토양형성요인간의 상관성 분석

토양유형과 환경변수들간의 상관관계를 파악하기 위해 전국을 대상으로 29,109개 지점을 무작위로 선정한 뒤, 각 지점의 토양유형과 환경변수들을 추출하였다. 추출된 값들을 대상으로 한 통계분석 과정에서는 SPSS 12.0K(SPSS Inc., 2004)와 S-PLUS 6.2(Insightful Inc. 1988-2003)를 이용하였다.

명목척도로 표현되어 있는 토양유형과 지질, 지형단위, 토지피복 간의 상관관계는 교차분석을 통해 살펴보았다.⁷⁾ 연속척도로 기록된 환경변수들의 경우에는 먼저 히스토그램을 이용하여 정규분포를 확인한 뒤⁸⁾, 분산분석(ANOVA)를 이용하여 각 환경변수가 보여주는 토양유형의 집단간 변이와 집단내 변이의 비율(F값)을 구하였다. 이 과정에서 여러 집단들의 평균값을 동시에 비교할 있는 사후분석(Bonferroni test)을 실시하여 토양유형간 환경변수의 차이를 비교·검토하였다(Leech *et al.*, 2005). 이후 판별분석(discriminant analysis)을 통해 환경변수들의 조합으로 이루어진 판별함수에 의한 토양유형의 분류정확도를 평가하였다.⁹⁾

환경변수를 이용한 토양분포의 예측가능성을 평가하기 위해서는 의사결정나무 기법을 사용하였다. 사용된 변수들이 명목척도와 연속척도로 섞여 있으며, 연속척도 자료인 경우 정규분포를 보이지 않는 경우가 많았고 집단간의 등분산을 가정하기 어려운 경우도 있어, 다변량 통계기법을 이용하기는 어렵다고 판단하였다. 의사결정나무기법은 주어진 자료를 동질의 집단으로 반복해서 나누는 과정을 통해서 전체 자료를 소집단으로 분류하거나 소속 집단을 예측하는 기법이다(Breiman *et al.*, 1984). 이 기법은 다변량 통계기법이 가지고 있는 수 많은 전제조건들로부터 자유롭기 때문에, 토양과 환경요인간의 상관관계를 밝히는 연구에서 광범위하게 사용되고 있다(Lagacherie *et al.*, 2001; Moran and Bui, 2002; Park and Vlek, 2002b; Park *et al.*, 2005; Scull *et al.*, 2005). 하지만, 이 기법은 자료에 대한 의존성이 높아 구축된 모델의 예측력이 다른 기법들에 비해 낮아지는 단점을 가지고 있다(Park and Vlek, 2002b). 따라서 토양의 직접적인 예측보다는 토양분포와 환경요인간의 상관성, 토양유형의 예측가능

성이라는 점에 주안점을 두어 이 방법을 적용하였다.

의사결정나무 분석에는 S-PLUS 6.2를 이용하였다. 의사결정나무가 가지는 자료에 대한 의존성을 낮추고 최적의 의사결정나무를 구축하기 위해서 optimal recursive shrinking 기법을 적용하였다. 각 환경요인들의 상대적인 영향력을 파악하기 위해 Table 3에 표현된 것과 같이 환경변수들을 예측그룹으로 나눈 뒤, 이들 그룹들을 순차적으로 모델에 입력하여 각 환경변수 집단이 가지는 토양유형의 분류정확도를 분석하였다. 분류정확도는 구축된 의사결정나무가 분류한 토양유형과 실제 토양유형간의 비교를 통해 정확하게 분류된 지점의 수를 전체 표본의 백분율로 표현한 것이다. 의사결정나무 기법에서는 자료를 분할할 때마다 노드가 만들어지게 되며, 그 수가 적을수록 구축된 모델이 단순하다는 것을 의미한다. 따라서 각 모델의 노드수는 모델의 효율성을 평가하는 지표로 사용하였다.

3. 토양유형의 분포특성

1) 대토양군의 분포 특성

한국은 산지를 중심으로 사면경사도가 높고, 여름철의 집중호우, 그리고 겨울철의 결빙작용으로 인해 사면이동이 활발하다. 따라서 산지에서는 토양층이 얇은 반면, 우수 혹은 사면이동에 의해 이동된 물질들이 산상지, 곡간지 및 하천변에 퇴적되면서 토양층의 형성이 지체되는 특성을 지니고 있다(ASI, 1992). 이러한 지형 및 기후적 조건으로 인해, 대토양군 중에서 산악토로 불리는 암쇄토의 비중이 절대적으로 높다(Table 1). 산성암에서 발달하는 암쇄토/적황색토인 Ma와 퇴적암 기원의 암쇄토인 Ms, 그리고 변성암에 발달한 암쇄토인 Mm이 분포면적 측면에서 각각 첫 번째, 두 번째, 네 번째로 넓다(Figure 1). 여기에 지표에서 토양이 제거된 암석노출지(Rocky)를 포함하면, 조사면적의 56.2%가 암쇄토 계열의 토양으로 구성되어 있다.

산성암 기원의 암쇄토(Ma)는 조사면적의 27.7%에 달하며, 퇴적암 지역인 한국 동남부 지역을 제외하고

전국적으로 분포하고 있다(Figure 1 A). 반면 퇴적암 기원의 암쇄토(Ms)는 그 분포면적이 14.5%를 보이며, 영남육괴의 경상분지와 옥천습곡대의 옥천대 지역, 태백산지역에 집중적으로 나타난다(Figure 1 B). 이 지역에 분포하는 암석은 중생대에 형성된 구조분지 내에 퇴적된 호소성 퇴적암으로 알려져 있다(Korean Geological Society, 1999). 네 번째로 넓은 면적을 차지하는 변성암 기원 암쇄토(Mm)는 옥천습곡대의 동남쪽과 북쪽, 그리고 경기육괴의 중앙부에 집중적으로 발달하고 있다(Figure 1 D). 옥천습곡대가 형성되는 과정에서 나타난 변성작용에 의해 형성된 암석을 따라 이들 토양의 분포가 결정되는 것으로 보인다. 암석노출지는 태백산맥과 지리산맥, 그리고 양산산맥을 중심으로 나타나고 있다(Figure 1 E).¹⁰⁾ 이들 지역은 한반도의 주요 융기축에 해당하는 지역으로(Park, 2007), 제3기 이후 지속적인 융기현상과 더불어 삭박작용이 우세하여 토양형성이 어려운 것으로 보인다.

암쇄토의 분포가 절대적으로 우세한 가운데 적황색토(Ra, 10.9%)가 중서부지역과 서부해안지역을 지역을 중심으로 넓게 분포하고 있어 대비를 이룬다(Figure 1 C). 한반도는 융기량이 상대적으로 적은 서해안의 구릉지, 그리고 과거 지형발달의 흔적이 남아있는 평탄면과 단구지형에는 적색토 혹은 적황색 토양이 분포하고 있다(Kang, 1978; NHAES, 2003). 전형적인 적색토(赤色土)는 토층의 두께가 1~1.5m 정도를 보이며, 표토는 적황색, 하부는 적색내지 적황색을 보인다(NHAES, 2003). 서해안 지역에서 빈번하게 관찰되는 단구상 지형의 높은 면에서는 이러한 적색토가 잘 발달하고 있지만, 낮은 면에서는 그 특성이 약해지는 것을 관찰할 수 있다. 적색토는 그 지화학적 특성이 아열대습윤 지역에서 발달하고 있는 토양과 유사하며, 지금보다 습윤한 과거의 기후환경 하에서 형성된 뒤 현재까지 잔류하고 있다는 의견이 지배적이다(Kang, 1987).

암쇄토와 적황색토 다음으로 넓은 분포면적을 보이는 토양은 평탄지 혹은 하천주변에 발달하고 있는 회색토와 충적토 계열의 토양들이다. 지하수의 영향을 받아 전층이 회색화작용¹¹⁾을 받은 토양을 회색토로 정의하는 반면, 하천에 의해 이동된 퇴적물을 모재로 토

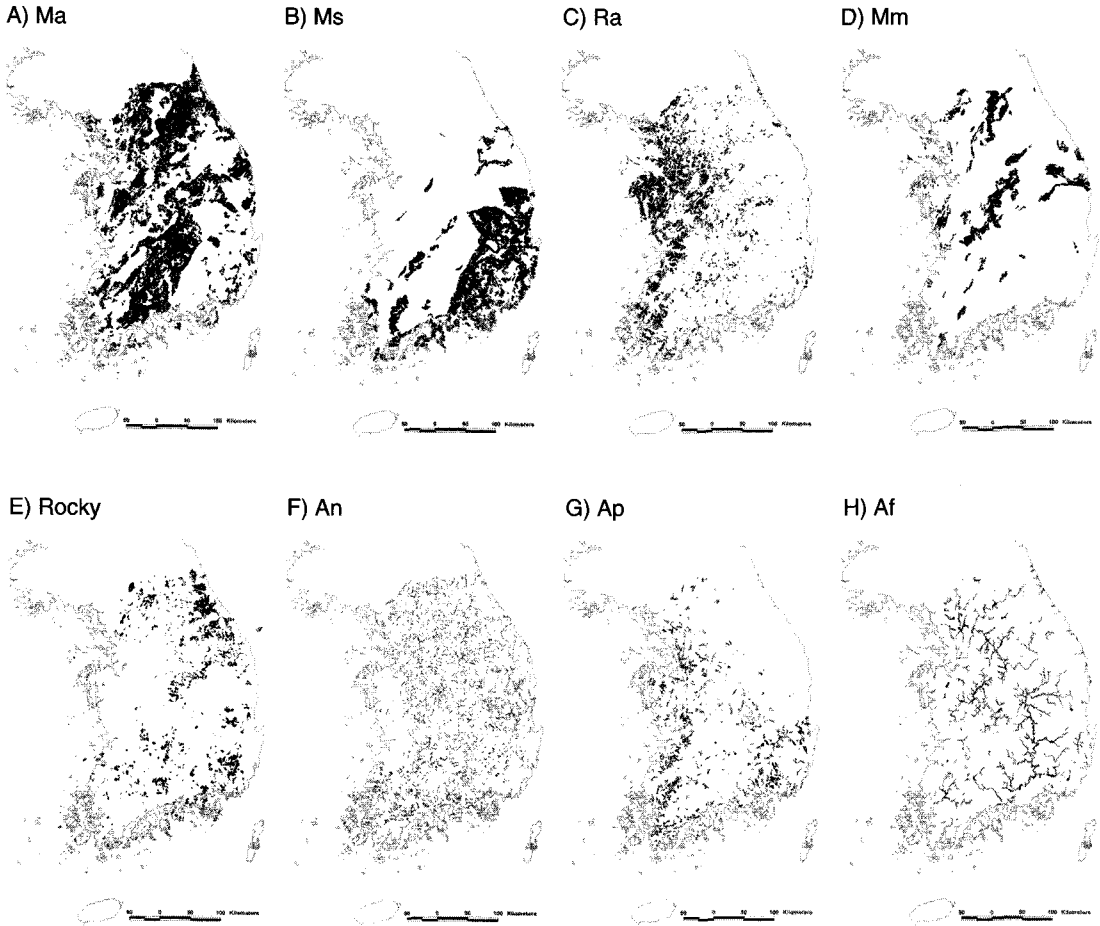


Figure 1. The Spatial Distribution of Major Great Soil Groups Based on the Old Classification System. 구분류법에 의한 주요 대토양군의 공간적 분포. (Source: NAAS, 2010)

양층의 발달이 나타나지 않는 토양을 충적토로 정의하고 있다. 충적토는 전국의 하천이나 강을 따라 하천 주변 평탄지, 하상지, 곡간지 및 선상지에 고루 분포하고 있으며, 산악과 인접된 계곡지에도 부분적으로 나타나고 있다(NHAES, 2003). 회색토와 충적토가 혼재되어 나타나는 An이 조사면적의 6.6%를 보이는 반면, 회색토와 충적토, 그리고 적황색토가 혼재되어 있는 Ap가 5.2%, 그리고 충적토(Af)가 4.6%를 차지하고 있다. Af의 경우에는 주요 하천을 따라서 뚜렷한 수지상 분포 패턴을 보여 주목된다(Figure 1 H). 회색토/충적토(An)는 성인상으로 하천주변지역의 범람원 혹은 평탄지들 상에 발달하고 있으며, 전국적으로 고른 분포를

보이고 있다(Figure 1 F). 반면, 회색토/충적토/적황색토(Ap)의 경우는 적황색토(Ra)가 하천과 연결되는 지점에 주로 형성되어 있으며, 서해안과 남해안의 적황색토 인접지역에서 집중적으로 발달하고 있다(Figure 1 G).

2) 대군의 분포 특성

신분류법에 의하면 토양발달이 어느 정도는 진행되었지만 특징적인 토양층이 나타나지 않는 Inceptisols이 절대적으로 우세하여 전체 조사면적의 74.7%인 70,886km²를 차지하고 있다(Table 2). Inceptisols 중

에서 Dystrudepts와 Eutrudepts, 그리고 Endoaquepts가 각각 47.4%, 16.8%, 10.0%의 분포면적을 보인다(Figure 2). Dystrudepts와 Eutrudepts는 배수가 양호한 Inceptisols로 염기포화도가 60% 미만인 경우는 Dystrudepts, 그리고 염기포화도가 60% 이상인 경우에는 Eutrudepts로 분류된다(Soil Survey Staff, 1993). Dystrudepts는 한국에서 산성퇴적암과 산성변성암, 그리고 화강암 기원의 세프롤라이트 층에서 주로 나타나며, Eutrudepts는 염기성암 혹은 염기포화도가 상대적으로 높은 미고화퇴적물에서 발달하고 있다. 한국에서 Dystrudepts는 낙동강을 따라 나타나는 경상분지지역과 태백산지역을 제외한 전국에 고루 발달하고 있다(Figure 2 A). 반대로 Eutrudepts는 알칼리성 퇴적암이 우세하게 나타는 경상분지내부와 태백산지역을 중심으로 분포하고 있다(Figure 2 B). 하지만, Eutrudepts는 소규모 작도단위로 전국적으로 산포되어 있는 특징을 보이며, 이것은 염기포화도가 높은 하천 혹은 사면퇴적물에서 이러한 토양형이 관찰되기 때문인 것으로 보인다. 지표면에서 50cm 이상의 깊이에서 지하수의 영향으로 형성되는 환원층이 나타나는 Endoaquepts는 서부해안의 평탄지형과 주요하천, 특히 낙동강에 인접한 범람원 혹은 평탄지에 주로 발달하고 있다(Figure 2 D).

한국에서 두 번째로 넓은 분포면적을 보이는 Entisols은 토양층이 발달되지 않아, 유기물 혼합층인 A층과 토양모재인 C층만이 나타나는 토양이다. Entisols은 수분을 보유할 수 있는 능력이 약하고, 토양내 영양분도 부족하여 토지이용에 많은 한계가 있다(Soil Survey Staff, 1993). 한국의 Entisols은 4개의 대군으로 분류되지만, 특징적인 토양층이 나타나지 않는 Udorthents가 조사면적의 11.0%로 절대 우위를 보인다(Table 2). 이 토양은 주로 침식이 급격하게 일어난고 있는 태백산맥, 소백산맥, 지리산맥 등 주요 산지에 집중적으로 나타나고 있다(Figure 2 C).

Alfisols과 Ultisols은 토양의 B층에 점토가 집적된 알지락(argillic) 층이 나타나는 토양이다. 집적된 점토는 A층으로부터 이동되어 B층에 집적된다. 이 둘은 지표층의 염기포화도가 35% 이상이면 Alfisols, 그 이하이면 Ultisols로 분류된다(Soil Survey Staff, 1993). 한

국에서 Ultisols이 차지하는 면적은 4.99%, 그리고 Alfisols이 차지하는 면적은 3.67% 정도다(Table 2). 한국은 기후의 계절적인 변화가 심하고 강우강도가 높아 Alfisols과 Ultisols의 형성에 적합한 것으로 알려지고 있다. 하지만, 경사지들이 많기 때문에 토양층 내에서 점토광물의 수직적인 이동보다는 사면을 따라 이동하는 경우가 더 우세하여 그 출현빈도가 상대적으로 낮다(NHAES, 2003).

한국에서 관찰되는 Alfisols과 Ultisols은 배수가 양호한 Udalfs와 Udults 아목으로, 그 중에서도 특징적인 토양층이 관찰되지 않는 Hapludalfs와 Hapludults가 주를 이룬다(Table 2). Hapludalfs의 경우에는 산록경사지, 그리고 Hapludults는 구릉지에 주로 나타나고 있어 출현지형면에서 큰 대조를 이룬다(Figure 4 참조). 암석의 측면에서는 Hapludalfs은 변성암과 퇴적암, 그리고 제4기층 등 다양한 모재에서 발달하고 있는 반면, Hapludults는 변성암 계열의 암석에서 주로 발달하고 있다(Figure 4).

3) 대토양군과 대군의 교차분석

대토양군과 대군 분포의 비교에서 구분류법의 경우에는 그 형성과정을 이해하면 공간적인 분포를 명확하게 이해할 수 있었다. 즉 토양유형이 암석노출지 < 암쇄토 < 적황색토 < 회색토 < 충적으로 변하면서 침식환경의 점차적인 감소와 지하수위의 증가가 나타나고 있어 그 분포가 연속적으로 나타나고 있다. 여기에 덧붙여 지질분포를 고려한다면 토양의 분포를 보다 직관적으로 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면, 신분류법의 경우에는 분포의 직관적인 이해가 상대적으로 어려웠다.

대토양군과 대군간의 교차분석 결과에서는 모든 대토양군의 30 내지 60% 정도가 Dystrudepts로, 그리고 10~30% 정도가 Eutrudepts, 5~25%가 Udorthents로 분류되었다(Table 4). 반면, 대토양군이 Hapludalfs와 Hapludults로 분류된 경우는 상대적으로 적어 10% 미만을 보였으며, Endoaquepts로 분류된 경우는 거의 나타나지 않았다. 특정 대토양군이 특정 대군으로 우세하게 분류되는 경우를 발견하기는 쉽지 않았다. 단

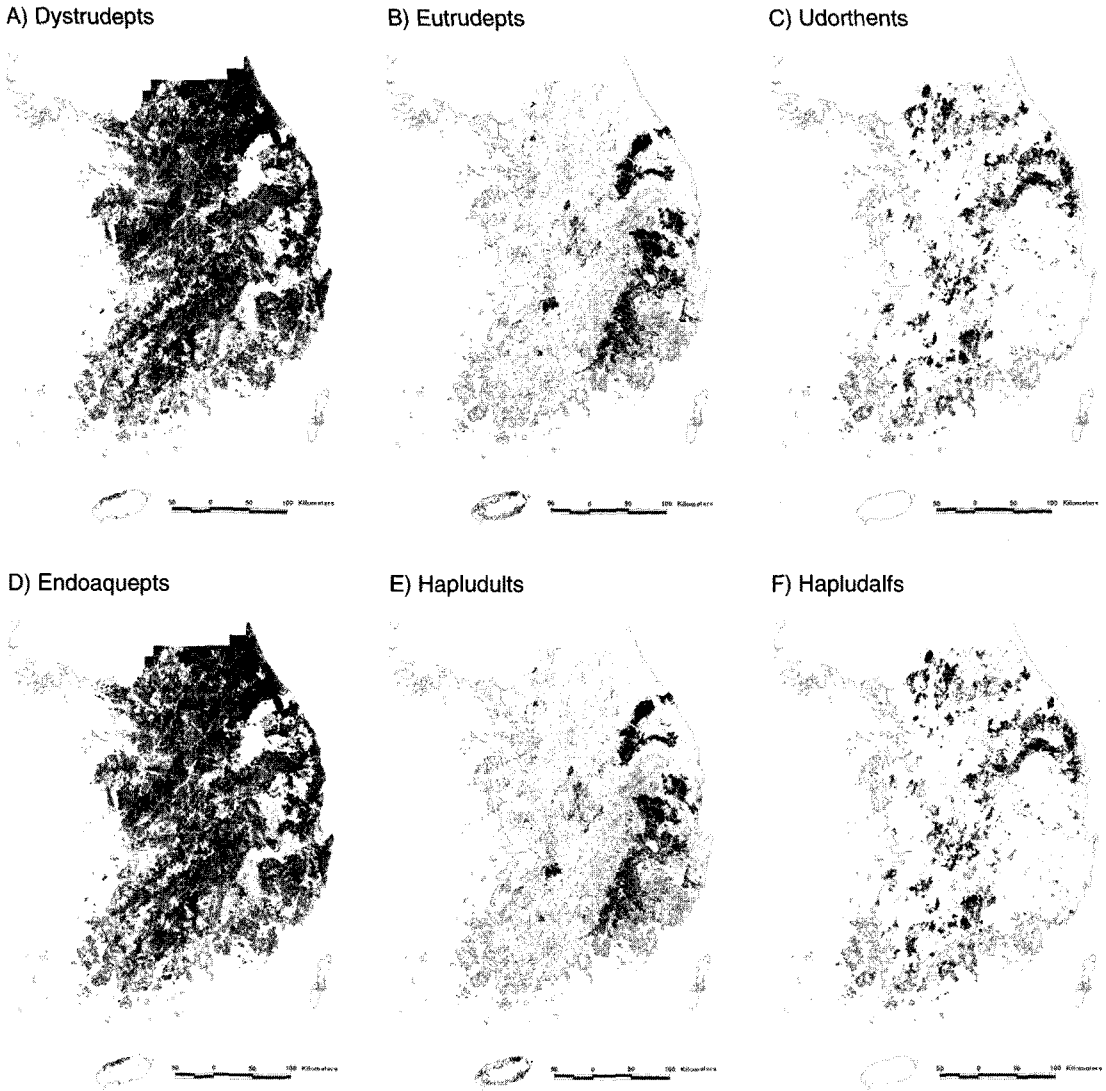


Figure 2. The Spatial Distribution of Major Great Groups Based on the New Classification System.
 신분류법의 의한 주요 대군의 분포. (Source: NAAS, 2010)

지 적황색토가 Hapludults로 분류된 경우(11.9%), 그리고 퇴적암에 발달한 암쇄토(Ms)가 Eutrudepts로 분류된 경우(35.7%)가 상대적으로 높은 비율을 보였을 뿐이다(Table 4).

신분류법은 토양내에 나타나는 진단층(diagnostic horizons)의 유무가 토양분류에서 핵심적인 요인이 된다. 반면 구분류법은 전체적인 토양특성, 모재, 그리고 토양의 배수등급 등이 중요한 구분요인이 되고 있다

(Buol *et al.*, 2003). 교차분석 결과는 두 토양분류법간의 호환성이 극히 낮다는 사실을 다시 한번 보여주는 것이다.

4. 토양유형과 환경변수와의 상관관계

1) 토양유형과 환경변수와의 상관성

각 토양유형별 환경변수의 분산분석에서는 두 분류법 모두에서 NDVI가 가장 높은 F값을 보였다(Table 5).¹²⁾ NDVI 다음으로는 구분류의 경우에는 고도와 경사도가 각각 1,113.4와 862.2의 F값을 보인 반면, 신분류법의 경우에는 경사도와 고도가 각각 1,085.0, 927.9의 F값을 보였다. 그리고 구분류법의 경우에는 1월 기온(694.3), 연평균기온(660.0), 4월 NDVI(573.2)의 순서로 F값이 높았으며, 신분류법의 경우에는 4월 NDVI(745.9), 연평균기온(378.1), 8월 기온(366.8) 등의 순서로 F값이 차이를 보였다.

Figure 3은 각 분류법별로 가장 높은 F값을 보이는 상위 2개의 환경변수들을 선정하여 그 차이를 표현한 것이다. 구분류법에서는 NDVI가 Rocky>Ms>Ma>Mm>An>Af>Ra≥Ap의 순서로 높게 나타났다(Figure 3 A).¹³⁾ 고도의 경우에는 Af와 Ra 간의 차이가 통계적으

로 유의하지 않았지만, 궁극적으로 위와 동일한 순서를 보여준다(Figure 3 B). 이 결과들을 종합하면, 구분류법에서는 암석노출지, 암쇄토, 회색토, 충적토, 적색토의 순서로 식생활력과 고도, 그리고 경사도가 감소하는 경향을 보여준다.¹⁴⁾ 신분류법의 경우에는 Bonferroni test 결과에서 NDVI, 경사도, 고도는 모든 토양유형에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p<0.05$). 세 변수 모두 Udorthents > Dystrudepts > Eutrudepts > Hapludalfs > Hapludults > Endoaquepts의 순서로 감소하였다(Figure 3 C, D).

환경변수를 이용한 토양유형의 분류가능성을 파악하기 위한 판별분석에서 구분류법의 경우에는 7개, 그리고 신분류법의 경우에는 5개의 판별함수가 각각 추출되었다(Table 6). 구분류법에서는 NDVI, 고도, 경사도, 4월의 NDVI가 중요한 영향을 미친 첫 번째 판별함수가 56.5%의 설명력을 보였다. 신분류법의 경우에도 상기한 변수들에 8월의 NDVI값이 추가된 첫 번째 판별함수가 전체분산의 77.0%를 설명하고 있다. 이후 두 분류법 모두에서 기후변수들(평균과 월별 기온과 기후변수들)이 중요한 기여를 한 판별함수가 각각 25.8%,

Table 4. Cross-tabulation between Great Soil Groups and Great Groups in Korea.
한국의 대토양군과 대군간의 교차분석.

	Af	An	Ap	Ma	Mm	Ms	Ra	Rocky	others	Total
Dystrudepts	477	924	401	5,014	1,192	1,477	1,305	977	1,492	13,259
%	34.3	47.5	25.8	62.5	57.7	35.0	41.7	49.3	31.1	45.5
Endoaquepts	0	2	0	11	0	0	16	0	116	145
%	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.0	2.4	0.5
Eutrudepts	294	404	280	807	206	1,506	306	333	689	4,825
%	21.2	20.8	18.0	10.1	10.0	35.7	9.8	16.8	14.4	16.6
Hapludalfs	48	47	81	131	39	75	83	18	159	681
%	3.5	2.4	5.2	1.6	1.9	1.8	2.7	0.9	3.3	2.3
Hapludults	42	76	112	135	39	237	374	55	276	1,346
%	3.0	3.9	7.2	1.7	1.9	5.6	11.9	2.8	5.8	4.6
Udorthents	56	173	22	1,022	409	375	91	501	434	3,083
%	4.0	8.9	1.4	12.7	19.8	8.9	2.9	25.3	9.0	10.6
Others	472	320	658	906	181	546	956	97	1,634	5,770
%	34.0	16.4	42.3	11.3	8.8	13.0	30.5	4.9	34.0	19.8
Total	1,389	1,946	1,554	8,026	2,066	4,216	3,131	1,981	4,800	29,109
%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Table 5. The Descriptive Statistics of Environmental Variables and the Results of ANOVA for Old and New Soil Classification Systems. 환경변수들의 기술통계량과 구분류법과 신분류법의 분산분석 결과.

Environmental variables ¹	Mean	Standard Deviation	Old Soil Classification				New Soil Classification			
			Mean Square ²		F ⁴	n	Mean Square ³		F ⁴	n
			Between	Within			Between	Within		
RAIN	1,281.5	118.54	1,399,319.08	13,897.28	100.7	24,309	92,2680.1	13,877.4	66.5	25,987
TEM	11.9	1.14	649.65	0.98	660.0	24,309	456.2	1.2	378.1	25,987
RAIN8	265.8	32.72	552,284.87	924.34	597.5	24,309	201,672.3	1,032.3	195.4	25,987
RAIN1	29.2	6.83	6,221.97	41.59	149.6	24,309	1,576.7	46.3	34.0	25,987
TEM8	24.7	0.96	336.03	0.68	493.2	24,309	313.5	0.9	366.8	25,987
TEM1	-1.8	1.94	2,065.42	2.97	694.3	24,309	1,258.8	3.5	358.6	25,987
ELEV	262.8	247.18	48,659,421.19	43,705.22	1,113.4	24,148	48,059,185.8	51,792.3	927.9	25,794
SLOPE	10.5	7.54	38,610.65	44.78	862.2	24,148	51,030.0	47.0	1,085.0	25,794
SC	0.5	15.09	565.85	225.43	2.5	24,309	16,381.4	224.5	73.0	25,987
MF	6.0	0.70	59.87	0.58	103.7	24,142	87.2	0.5	184.4	25,776
NDVI	19.5	7.73	68,727.88	40.02	1,717.3	24,309	70,975.3	46.0	1,541.3	25,987
NDVI4	0.3	0.14	9.80	0.02	573.2	24,309	13.3	0.0	745.9	25,987
NDVI8	0.5	0.26	2.40	0.06	37.2	24,309	2.7	0.1	41.7	25,987
NDVI11	0.2	0.12	4.63	0.01	363.7	24,309	4.9	0.0	371.9	25,987
RIVER	3.1	0.45	37.0	0.2	178.2	23,829	15.9	0.2	78.6	25,692

¹ See Table 3 for the abbreviation; ² between groups df=7; within groups df = n-1; ³ between groups df=7; within groups df=n-1;

⁴ significance value, p<0.01

11.4%의 설명력을 보여주었다. 세 번째 판별함수는 구체적인 지형특성을 반영하는 변수들(하천으로부터의 거리, 사면유역지수 혹은 지표곡면도)이 중요한 기여를 하고 있다. 하지만 이들 함수에 의한 설명력은 9.20%와 7.25%로 낮았다.

추출된 판별함수에 의한 분류정확도는 낮았다. 구분류법의 경우에는 35.5%만 정확하게 분류되었으며, 신분류법의 경우에는 32.6%의 분류정확도를 보였다. 구분류법의 토양유형별 분류정확도는 Ma(15.1%), Ms(58.6%), Ra(55.0%), Mm(45.1%), Rocky(52.3%), An(8.1%), Ap(36.8%), Af(37.3%)로 나타났으며, 신분류법은 Dystrudepts(21.6%), Eutrudepts(51.0%), Udorthents(33.1%), Endoaquepts(59.0%), Hapludults(47.9%), Hapludalfs(24.0%)였다. 토양유형별로 대략 30-60% 정도의 분류정확도를 보였지만, 두 분류법 모두에서 분포면적이 가장 넓은 Ma와 Dystrudepts의 분류정확도가 15.1%, 그리고 21.6%를 보여 전체적인 분류정확도를 낮추는 결과를 가져왔다.

판별분석에서 Ma와 Dystrudepts의 분류정확도가 낮은 것은 토양도의 특수성에 기인한 것으로 보인다. 이 연구에 사용한 토양도는 농업적 이용을 목적으로 제작된 것이다. 따라서 농경이 가능한 평탄지와 구릉지에서는 세밀한 토양조사가 이루어졌지만, 산지 혹은 농업적 활용도가 낮은 곳에서는 정밀한 토양조사가 이루어지지 못했다. Ma와 Dystrudepts가 주로 산지에 분포하고 있는 토양이라는 점을 고려한다면, 이러한 토양조사법의 지형별 차이가 분류정확도를 낮춘 것으로 판단된다.¹⁵⁾

분류정확도가 낮기는 하지만, 판별함수들을 통해 한국의 토양분포에 영향을 미치는 환경요인들의 중요성을 간접적으로 추출해낼 수 있다. 양 분류법 모두에서 NDVI와 고도, 그리고 경사도가 높은 설명력을 가지는 것은 한반도 지형의 특수성을 반영한 것으로 보인다. 한반도는 완만한 지반응기와 더불어 지표침식 혹은 퇴적이 활발하기 때문에 산지와 평탄지가 비교적 뚜렷하게 구분되는 지형적 특수성을 지니고 있다(Park,

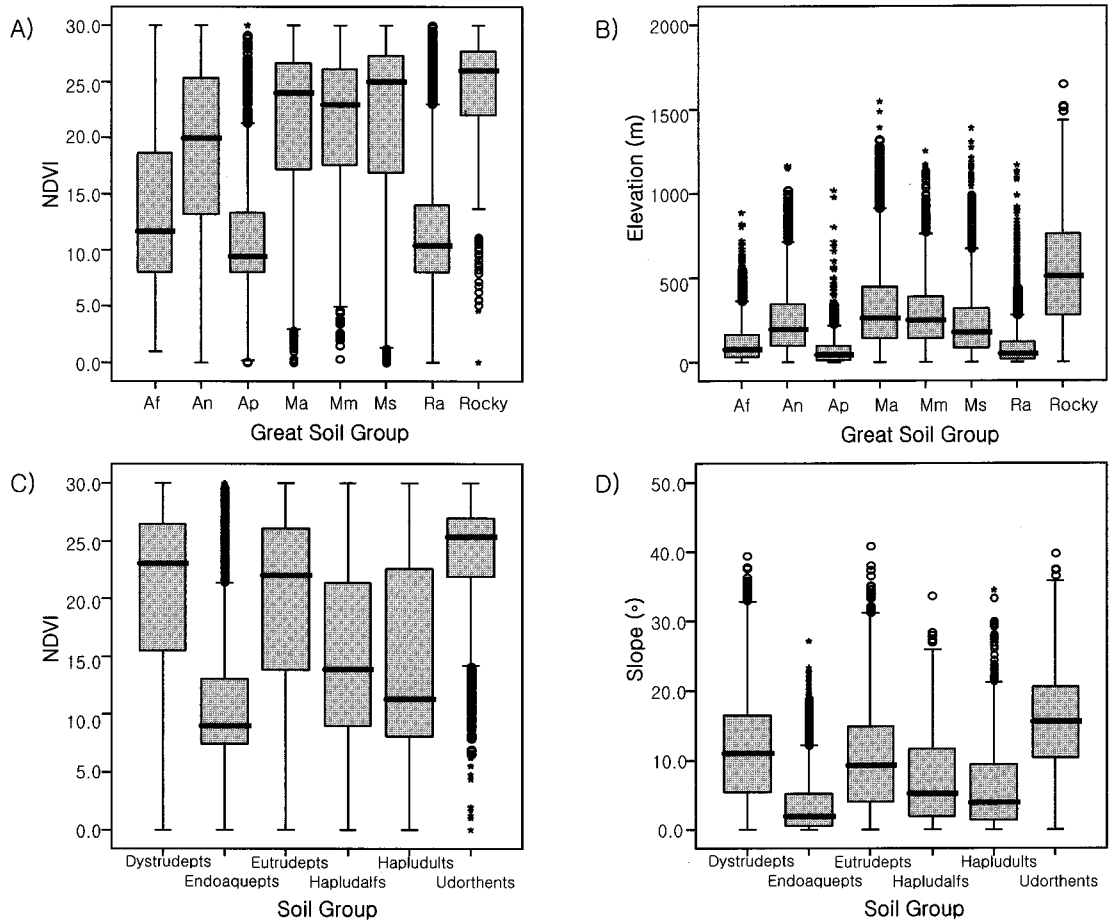


Figure 3. Box plots of Environmental Variables for Soil Types. A) NDVI for Major Great Soil Groups, B) Elevation for Major Great Soil Group, C) NDVI for Major Great Groups, D) Slope Angle for Major Great Groups. 토양유형별 환경변수의 차이. A) 구분류법 주요 대토양군별 NDVI의 차이, B) 구분류법 주요 대토양군별 고도차이, C) 신분류법 주요 대군별 NDVI의 차이, D) 신분류법 주요 대군별 경사도의 차이.

2009). 고도가 높고 경사도가 가파른 산지는 토지이용의 제약으로 산림이 풍부하여 NDVI가 높고 기온 역시 낮다. 반면, 평탄지의 경우에는 그 반대의 경향을 보인다. 이러한 특성이 첫 번째 판별함수에 반영되어 있는 것으로 보인다.

두 번째 판별함수는 기후의 지역간 차이에 의해 토양특성이 달라진다는 것을 나타내고 있다. 하지만, 한반도가 가지고 있는 기후의 특수성을 고려한다면 기후의 영향에 대한 해석에 상당한 주의가 필요하다. 한국에서 기후의 차이는 위도에 의해서 보다는 지형적인 특성에 기인한 경우가 많다. 또한 경상분지 지역은 강

우량과 기온이 다른 지역과는 큰 차이를 보여 전체적인 기후경사가 북서-남동방향을 보이고 있다(Kwon, 2003; Lee, 2007). 이러한 기후특성은 육천습곡대를 중심으로 북서-남동방향으로 현격하게 차이를 보이는 지질특성과도 밀접하게 관련되어 있다. 따라서 두 번째 판별함수에 나타난 기후의 영향은 기후의 절대적인 영향과 더불어 지형과 지질의 영향이 간접적으로 반영된 결과로 해석하는 것이 타당할 것으로 보인다.

세 번째 판별함수는 하천으로부터의 거리, 사면유역지수, 그리고 지표곡면도와 같이 보다 미세적인 지형기복을 반영하는 지표들로 구성되어 있다. 구분류법의

Table 6. Summary Table for the Discriminant Analyses. 환경변수들을 이용한 판별분석 결과의 요약.

Classification System	Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation	Variables with canonical discriminant function coefficient
Old Classification System	1	0.662	56.46	56.46	0.63	NDVI(0.870), ELEV(0.635), SLOPE(0.604), NDVI4(0.468)
	2	0.303	25.81	82.28	0.48	TEM1(-0.779), RAIN8(0.743), TEM(-0.741), TEM8(-0.469)
	3	0.108	9.20	91.47	0.31	RIVER(0.662), MF(-0.410)
	4	0.077	6.56	98.03	0.27	NDVI8(0.203),
	5	0.012	1.05	99.08	0.11	NDVI8(0.203), SC(-0.142)
	6	0.006	0.50	99.58	0.08	NDVI11(-0.446), RAIN(-0.440)
	7	0.005	0.42	100.00	0.07	
New Classification System	1	0.411	77.03	77.03	0.54	NDVI(0.826), SLOPE(0.705), ELEV(0.653), NDVI4(0.575), NDVI8(0.134)
	2	0.061	11.41	88.44	0.24	RAIN8(0.716), TEM1(-0.547), NDVI11(-0.463), TEM(-0.442)
	3	0.039	7.25	95.70	0.19	RIVER(0.472), RAIN(0.354), SC(0.219)
	4	0.020	3.79	99.49	0.14	MF(-0.465)
	5	0.003	0.51	100.00	0.05	RAIN(-0.544), TEM8(0.477)

경우에는 암쇄토가 적황색토, 회색토, 충적토로 연결되는 사면을 따른 토양연관성, 즉 카테나(catena)가 토양도에 반영되어 있는 것을 확인하였다(3절 참조). 신분류법의 경우에도 사면상에서 산지의 Dystrudepts가 산지 하부의 Eutrudepts, 그리고 하천 주변의 Endoaquepts로 연결되는 공간적 연속성이 보편적으로 나타나는 것으로 알려져 있다(Park, 2004; Sonn, 2007). 이러한 미시적 지형과 토양간의 관련성이 세 번째 판별함수에 반영된 것으로 보인다.

2) 토양유형과 지질, 지형, 지표피복간의 상관성

Figure 4는 각 토양유형을 지질단위, 지형단위, 지표피복단위와 교차분석을 실시한 결과이다. 지질의 경우 구분류법에서는 변성암과 산성암, 그리고 퇴적암의 비율이 토양유형간에 일정하게 나타나지만, 신분류법에서는 토양유형별로 큰 차이를 보인다(Figure 4 A와 B). 지형단위의 경우 이러한 차이가 더욱 확연하다(Figure 4 C와 D). 예를 들면, 산악지는 구분류법의 모든 토양

유형에서 20% 이상의 분포를 보이지만, 신분류법의 경우에는 Dystrudepts와 Endoaquepts에서만 주로 나타나는 것을 볼 수 있다. 지표피복의 경우에는, 그 차이가 상대적으로 약하기는 하지만, 신분류법에서 지표피복의 구성비가 구분류법보다 더 다양한 것을 알 수 있다(Figure 4 E와 F).

구분류법에서는 암쇄토의 환경요인들이 적황색토, 충적토, 그리고 회색토와는 현격한 차이를 보인다. 암쇄토는 구성암석의 차이가 확연하게 나타나지만, 제4기층의 비율이 낮은 것이 특징이다. 반면, 다른 대토양군에서는 제4기층의 비율이 $A_p > A_f > R_a > A_n$ 의 순으로 증가하고 있다. 지형과 토지이용의 경우에도 산악지와 삼림이 암쇄토의 대부분을 차지하는 반면, 나머지 대토양군에서는 곡간지와 하성평탄지, 그리고 논과 도시역의 구성비율이 위에 제시한 순서로 증가한다. 가장 집약적인 토지이용(도시역, 농경지)을 보이는 대토양군은 R_a (적황색토)와 A_p (적황색토/회색토/충적토)였다.

신분류법의 경우에는 토양유형별로 환경요인의 구

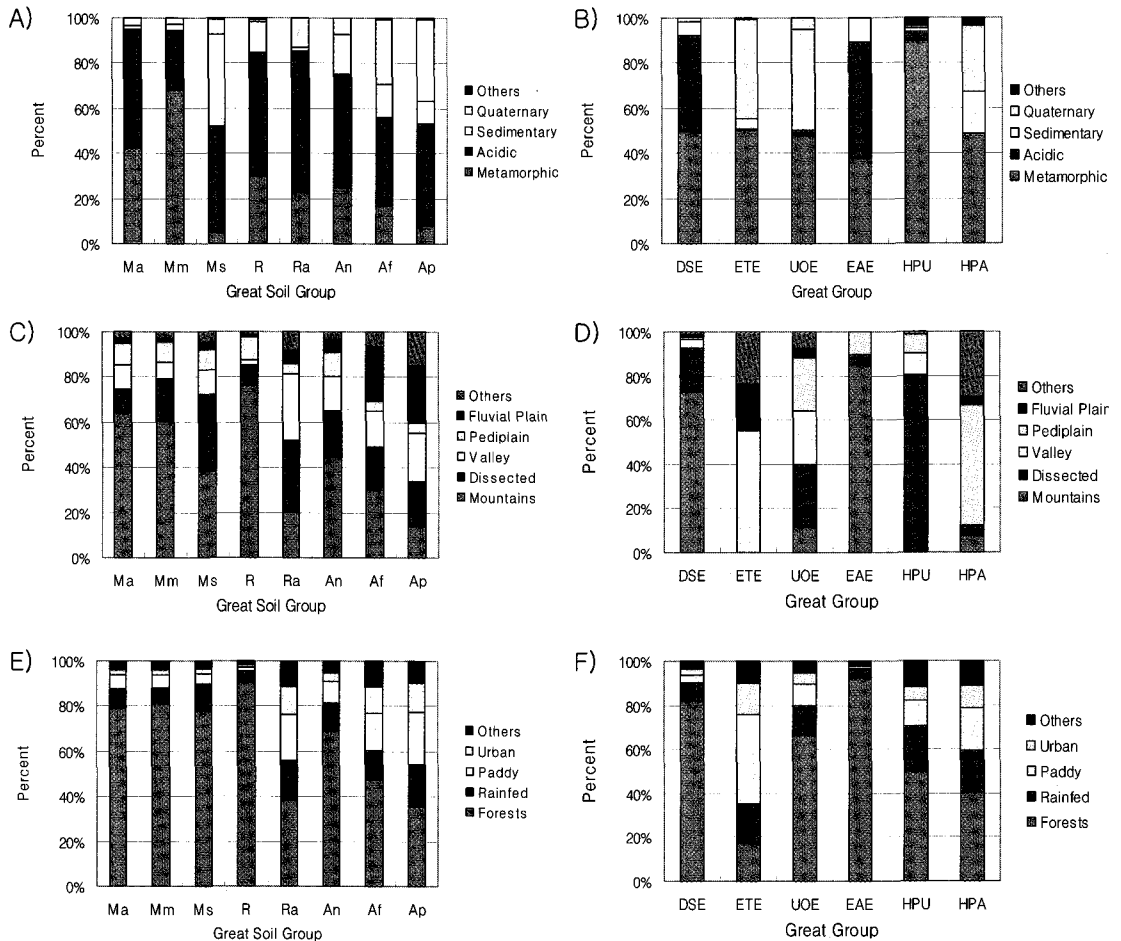


Figure 4. The Results of Cross-tabulation between Soil Types and Geology/Landforms/Land Cover. A) Geology and Old Soil Classification; B) Geology and New Soil Classification; C) Landforms and Old Soil Classification; D) Landforms and New Soil Classification; E) Land Covers and Old Soil Classification; F) Land Covers and New Soil Classification (DSE= Dystrudepts, ETE=Eutrudepts, UOE=Udorthents, EAE=Endoaquepts, HPU=Hapludults, HPA=Hapludalfs). 토양유형과 지질, 지형, 지표피복간의 교차분석 결과. A) 구분류법에 의한 대토양군과 지질, B) 신분류법에 의한 대군과 지질, C) 구분류법에 의한 대토양군과 지형, D) 신분류법에 의한 대군과 지형, E) 구분류법에 의한 대토양군과 토지피복.

성비가 확연한 차이를 보인다. Dystrudepts는 지질에서 산성암, 지형에서는 산악지와 구릉지, 그리고 토지이용에서는 삼림의 비율이 절대적으로 우세하다. 반면 Eutrudepts는 제4기층, 곡간지와 하성평탄지, 논·밭 그리고 도시역이 우세하게 나타난다. Udorthents의 경우에는 산성암과 퇴적암에 주로 발달하고 있지만, 지형에서는 산악지, 구릉지, 곡간지, 산록경사지 등의 비율이 비슷하게 나타나고 있다. Endoaquepts는

Dystrudepts와 유사한 특징을 보이지만, 산록경사지에 분포하는 비율이 상대적으로 높다. Hapludults는 산성암을 기반암으로 한 구릉지에 분포하는 비율이 압도적으로 높다. 반면, Hapludalfs의 경우에는 지질적인 측면에서는 변성암과 퇴적암, 제4기층, 그리고 지형적인 측면에서는 산록경사지에 분포하는 면적인 높아 다른 대군과는 차이가 난다. 토지이용면에서 가장 집약적인 이용을 보이는 대군은 Eutrudepts > Hapludalfs >

Hapludults의 순서로 볼 수 있다.

이 연구에서 사용한 지질과 지형단위는 토양조사 때 현장에서 직접 관찰한 내용이기 때문에, 토양분류와 직접적으로 관련되어 있을 것으로 추정된다. 구분류법의 경우에는 지질을 대토양군을 구분하는 구분자로 사용하고 있으며, 지형의 영향 역시 배수특성을 통해 반영하고 있다(Table 1 참조). 따라서 신분류법이 구분류법에 비해 지질과 지형의 차이를 더 잘 반영하고 있다는 결과는 예상치 못한 것이었다. 그 원인은 아마도 구분류법이 가지고 있는 분류기준의 불명확성에서 찾아야 할 것으로 보인다. 구분류법에서는 전체적인 토양의 형태적 특성을 일차적으로 관찰하여 토양유형을 정하고, 지질과 지형요인은 이차적으로 반영하여 토양유형을 결정하게 된다. 반면, 신분류법의 경우에는 이들 요인들을 직접적으로 고려하지 않는 반면, 토양층의 유무, 그리고 토양속성을 통해 간접적으로 반영하고 있다. 간접적으로 그 영향을 반영하고 있는 신분류법이 구분류법에 비해 지질과 지형의 차이를 확연하게 나타낸다는 점은 주목되는 결과이다.

5. 토양분포의 예측가능성 평가

환경변수들에 의한 토양분포의 예측가능성을 평가하기 위해 사용된 의사결정나무기법의 각 모델별 분류정확도와 노드 수를 표시한 것이 Table 7과 Figure 5이다. 여기서는 공간정보자료에서 추출한 2차 환경변수만을 고려한 경우, 그리고 토양조사 시 현장조사를 통해 구득된 정보(지질, 지형)만을 고려한 경우, 그리고 2차 환경자료와 현장조사정보를 동시에 고려한 경우로 나누어서 분류정확도를 평가하였다.

먼저 구분류법과 신분류법 간의 분류정확도를 비교하면, 거의 모든 환경변수항목에서 신분류법이 구분류법보다 높은 분류정확도를 보였다. 신분류법은 평균 63.8%의 분류정확도를 보인 반면, 구분류법은 46.9%에 머물고 있어 평균 17% 이상의 차이를 보인다. 2차 환경자료만을 고려한 경우에는 두분류법 간에 대체로 10~20%의 분류정확도 차이가 있다. 하지만, 환경변수

의 수가 늘어나면서 정확도의 차이는 10% 미만으로 감소하는 경향이 나타난다. 현장조사자료만을 이용한 경우에도 신분류법이 구분류법에 비해 20~30%의 높은 분류정확도를 나타냈다. 2차 환경자료와 현장자료를 동시에 고려한 경우에는 그 차이가 20~30%정도였지만, 모델에 투입된 환경변수의 수가 증가하면서 두 분류법간의 차이는 20% 정도로 감소한다.

의사결정나무 모델에 사용된 노드의 개수는 모델의 효율성을 보여주는 지표이다. 신분류법의 평균 노드수는 103.5개로 구분류법의 113.1개에 비해 약 10개 정도가 적어, 모델의 효율성면에서도 신분류법이 구분류법을 앞서는 것으로 나타났다. 하지만, 2차 환경자료만을 이용한 경우에는 구분류법의 노드수가 신분류법에 비해 적어 모델의 효율성이 높았다. 반면, 현장자료를 독립적으로 사용하는 경우와 2차 환경자료와 결합하는 경우에는 신분류법의 효율성이 훨씬 높았다.

신분류법의 경우, 2차적인 환경자료만을 이용한 모델과 현장조사자료(지형분류 및 지질분류)를 이용한 모델을 비교할 경우, 현장조사 자료가 2차 환경자료에 비해 높은 분류정확도를 보였다. 인공위성자료와 수치고도모델(DEM)에서 추출된 2차 자료를 모두 이용하더라도 전체적인 분류정확도는 60%를 넘지 못하고 있다. 반면, 토양조사 시에 이루어진 지질분류와 지형분류 결과는 각각 60.4%, 64.5%의 분류정확도를 보였다. 이 두 변수를 동시에 고려할 경우, 71.15%에 달하는 분류정확도가 나타났다. 구축된 나무구조의 효율성 측면에서도 2차 환경자료를 이용할 경우에는 노드의 수가 100개 이상인 복잡한 모델이 만들어졌다. 하지만, 현장조사 자료를 이용할 경우, 노드의 개수는 20개 미만으로 훨씬 효율적인 모델이 만들어졌다. 2차 환경자료와 현장조사 자료를 동시에 고려할 경우, 관찰된 최고의 분류정확도는 75.1%를 보였다. 많은 환경변수들이 사용되었지만, 현장조사 자료만을 이용한 경우보다 분류정확도 면에서 크게 개선되지 않은 결과이다.

구분류법의 경우에는 신분류법과는 반대의 특성을 보인다. 즉, 2차 환경자료들을 모두 이용한 경우에는 50% 이상의 분류정확도를 보이지만, 현장조사 자료의 경우에는 40% 내외의 분류정확도를 보여, 2차 환경자료가 현장조사 자료에 비해 토양예측에 보다 효과적이

Table 7. Environmental Predictors Brought in Decision Tree Models and Prediction Accuracy.
의사결정나무에 사용된 토양형성요인과 토양 분류정확도.

Soil Forming Environmental Factors	predictor group	Classification Accuracy(%)		No. of Node	
		Old Classification	New Classification	Old Classification	New Classification
Secondary Environmental Information Only					
LAND	1	35.00	53.58	8	8
NDVI	2	39.00	53.60	188	207
CLIMA	3	48.00	53.92	143	120
TERRAIN	4	41.28	53.94	171	202
NDVI+NDVIVAR	5	42.00	53.97	187	210
TERRAIN+NDVI	6	42.91	54.44	159	190
CLIMA+CLIMAVAR	7	52.00	56.00	134	163
TERRAIN+CLIMA+NDVI	8	50.94	56.54	139	152
TERRAIN+CLIMA+NDVI+LAND	9	50.72	57.40	139	159
TERRAIN+CLIMA+NDVI+	10	53.00	59.31	131	152
LAND+CLIVAR+NDVIVAR					
Field Survey Information Only					
GEOL	11	41.00	60.40	10	7
LANDFORM	12	37.00	64.42	10	8
LANDFORM+GEOL	13	43.00	71.15	26	20
Secondary Environmental and Field Survey Information					
TERRAIN+CLIMA+NDVI+GEOL	14	53.22	63.01	131	131
LANDFORM+LAND	15	40.00	64.74	46	27
CLIMA+NDVI+LANDFORM	16	51.00	70.04	134	102
TERRAIN+CLIMA+NDVI +	17	51.48	70.34	131	99
LANDFORM+LAND+GEOL	18	44.00	71.18	70	48
LANDFORM					
TERRAIN+NDVI+LANDFORM+	19	49.53	72.16	144	101
LAND+GEOL					
TERRAIN+CLIMA+NDVI+	20	53.31	74.20	130	97
LAND+LANDFORM+GEO					
CLIMA+LANDFORM+LAND+	21	52.00	74.26	128	92
GEOL					
CLIMA+NDVI+LANDFORM+	22	53.00	74.35	124	94
LAND+GEOL					
TERRAIN+CLIMA+NDVI+	23	54.44	75.10	118	90
LAND+LANDFORM+GEOL+					
CLIVAR+NDVIVAR					
Mean		46.86	63.93	113.09	103.52
Standard Deviation		6.11	7.97	55.78	62.00

었다. 또한 2차 환경자료와 현장조사 자료를 동시에 사
용하더라도 2차 환경자료에 의한 분류정확도를 크게
앞서지는 못한다. 이러한 결과는 전장에서 논의한 바

와 같이(4절 참조), 구분류법의 경우에는 분류기준자가
상대적으로 불명확하여 환경요인들이 서로 혼재되어
나타나기 때문인 것으로 추정된다.

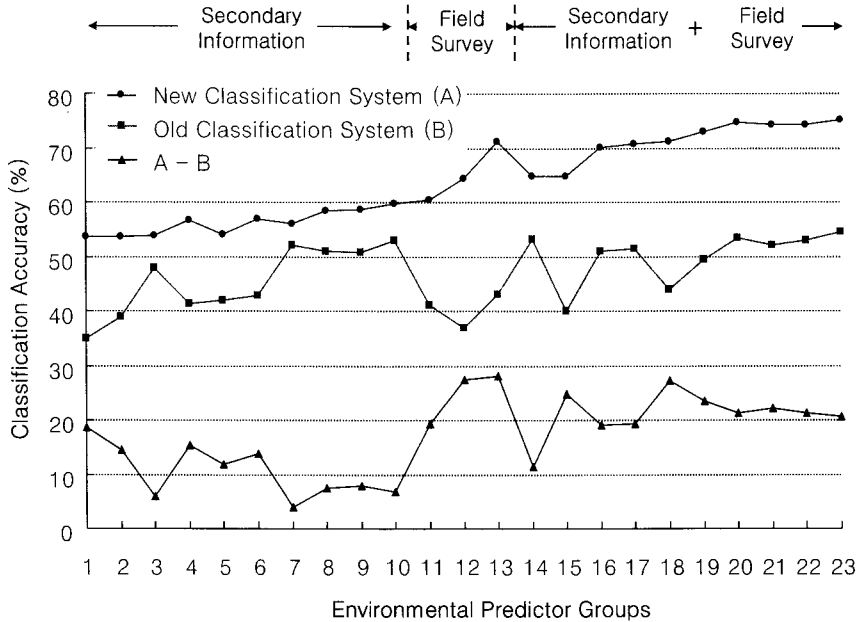


Figure 5. The Difference of Prediction Accuracy between Old and New Soil Classification Systems. 의사결정나무 기법에 의한 신분류법과 구분류법 토양유형의 분류정확도와 차이. (note: see Table 7 for detailed predictor grouping)

개별적인 환경요인의 측면에서 살펴보면, 구분류법의 경우에는 기후변수가 48%로 가장 높은 분류정확도를 보이는 것에 주목할 필요가 있다. 특히 기후변수의 계절적 변화(최한월 기온과 강우량, 최난월 기온과 강우량)를 고려할 경우, 전체 분류정확도는 52%로 증가하게 된다. 반면, 신분류법의 경우에는 그 차이가 크진 않지만, 지형변수가 개별변수로는 가장 높은 분류정확도를 보여주고 있다. 지형변수만으로 53.94%의 분류정확도를 얻을 수 있었으며, 기타 다른 변수들을 고려하더라도 그 증가량은 크지 않았다. 현장조사 자료의 경우에도 지형분류결과가 가장 높은 설명력을 가지고 있어 지형분류결과만으로도 64.4%의 분류정확도를 기록하였다.

토양예측에서 지형의 중요성은 이미 여러 논문에서 강조되고 있다(예, McBratney *et al.*, 2003; Park, 2004). 현재 신분류법이 한국에서 뿐만 아니라 전세계적으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 토양분류체계라는 점을 고려한다면, 향후 토양예측모델의 개발과정에서 지형의 중요성에 대한 지속적인 관심과 체계적인 연구가 필요하다는 사실을 보여주는 결과이다.

6. 요약 및 결론

이 연구에서는 한국 토양의 공간적 분포를 살펴보고, 환경요인들을 이용한 토양예측 가능성을 평가하였다. 특히, 현재 혼재되어 사용되고 있는 구분류법과 신분류법에 의한 토양도를 토양과 환경요인과의 관련성이라는 측면에서 평가하고자 하였다. 이 연구의 대상은 1:25,000 축척의 대토양군(구분류법)과 대군(신분류법)으로 한국 전체를 대상으로 토양의 분포를 살펴 보았다. 토양과 환경요인과의 상관관계는 분석하는 공간적인 스케일(scale)에 따라 큰 차이를 보일 수 있다는 사실을 유념하고 아래의 결과를 해석하여야 한다 (McBratney *et al.*, 2003).

구분류법은 토양형성작용을 그리고 신분류법은 토양의 형태적 특성을 강조하고 있다. 따라서 두 분류법에 의해 작성된 대토양군과 대군은 구분기준자의 차이로 인해 낮은 호환성을 보여주었다. 구분류법의 경우에는 환경요인을 직접적으로 반영하고 있기 때문에, 토양의 분포를 보다 직관적으로 이해할 수 있는 장점

을 가지고 있다. 하지만, 환경요인과의 통계적 해석 그리고 토양의 예측가능성 측면에서는 신분류법이 구분류법을 크게 앞서는 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 구분류법의 분류기준자가 명확하지 않아 환경요인들이 혼재되어 나타나기 때문으로 해석된다. 토양층의 유무와 토양속성으로 형성환경을 간접적으로 추정할 수 밖에 없는 신분류법이 토양형성환경을 직접적으로 고려한 구분류법보다 토양형성요인의 차이를 더 잘 설명한다는 사실은 주목되는 연구결과이다.

한국의 토양분포에서는 산지와 평탄지가 뚜렷하게 구분되는 한반도의 지형적 특성이 가장 중요한 환경요인으로 평가되었다. 한국은 독특한 지반운동특성과 장기간에 걸친 지형형성작용으로 인해 산지가 평탄지와 확연하게 구분되는 특성을 지니고 있다. 여기에 덧붙여 육천습곡대를 따라 북서-남동방향으로 차이를 보이는 기후 및 지형 지질특성, 사면을 따라 나타나는 토양연속성이 토양의 분포를 결정하는 중요한 요인들로 파악되었다.

의사결정나무 기법을 이용한 토양의 예측가능성 평가에서는 예측변수의 수와 종류에 따라 35-75%의 분류정확도를 보였다. 모델에 투입된 환경변수의 수가 증가할 수록 모델의 분류정확도는 높아졌지만, 동시에 모델의 복잡성이 증가하여 실제 적용에는 어려움이 따를 것으로 보인다. 분류정확도 측면에서 신분류법이 구분류법에 비해 15-20% 정도 높아, 신분류법에 근거한 토양예측의 가능성이 구분류법에 비해 높은 것으로 평가되었다. 토양예측과정에서 환경요인의 상대적 중요성을 살펴보면, 구분류법의 경우에는 기후요인이 가장 높은 예측가능성을 보여주었다. 반면, 신분류법에서는 지형요인이 가장 높은 예측가능성을 보여주고 있다.

신분류법의 경우 DEM에서 추출한 지형변수만으로도 53.9%의 분류정확도가 나타났으며, 다른 환경변수들을 추가하더라도 모델의 예측가능성은 크게 증가하지 않았다. 현장조사에 의한 지형분류 역시 단일 변수로는 가장 높은 설명력을 가지고 있어, 64.4%의 분류정확도를 보여주었다. 여기에 지질변수를 도입하는 경우 분류정확도는 71% 이상으로 증가하였다. 이러한 결과는 향후 한국의 토양예측모델의 개발과정에서 지

형의 역할을 보다 적극적으로 고려할 필요가 있음을 보여주는 것이다.

이 연구에서 많은 환경변수를 동시에 고려했음에도 불구하고 토양도의 분류정확도가 70% 선을 크게 넘지는 못했다. 이 연구의 접근법이 이미 제작된 토양도에 대한 통계적 해석이라는 점을 고려한다면, 환경변수를 이용하여 토양분포를 직접 예측할 경우 그 예측가능성이 더 낮아질 수 있다는 것을 시사한다. 이 연구에서 분류정확도가 낮아진 결정적인 원인은 산지에서 나타나는 토양의 공간적인 차이가 현재 토양도에 충분히 반영되지 않고 있다는 사실에서 찾을 수 있다. 4절에서 살펴본 바와 같이 농업토양도에서는 산지에 대한 토양조사가 상대적으로 부족하였으며, 그 결과 전체지역을 대상으로 한 공간분석에서 분류정확도가 감소하게 되었다. 산지에 대한 접근성과 비용의 문제를 고려한다면 산지토양에 대한 정밀한 조사는 현실적으로 한계가 있을 수 밖에 없다. 이러한 문제점을 완화하기 위해서는 토지이용 면에서 큰 차이를 보이는 산지와 평탄지를 구분하여 토양예측모델을 제작하는 방안을 적극적으로 고려해볼 필요가 있다. 한국에서 토양예측에 대한 연구는 시작단계에 있다. 토양의 예측가능성을 높이기 위해서는 토양의 분포에 대한 보다 체계적인 현장조사와 더불어 환경변수들과의 상관관계에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

주

- 1) 이러한 목적을 위해 다양한 방법들이 적용되고 있으며, 접근법의 차이와 방법들에 대해서는 Park and Vlek(2002a), McBratney *et al.*(2003) 등이 자세하게 소개하고 있다.
- 2) 구분류체계는 토양의 형성에 영향을 미치는 환경적 요인들이 명확하게 제시되고 있어 토양특성을 그 자체로 이해하는 것이 쉬운 장점을 가지고 있다. 하지만, 유사한 토양과의 분류기준이 불명확한 문제점을 가지고 있었다(Buol *et al.*, 2003). 특히 토양분류과정에서 형태와 속성의 정량화가 어렵고, 전세계의 토양에 공통적으로 적용하기 어려운 단점을 가지고 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 제시된 새로운 토양체계가 1975년부터 사용되기 시작한 토양분류체계가 미국농무성(USDA)의 신분류법(Soil Taxonomy)이다.

신분류법은 토양형성에 영향을 미치는 환경요인들보다는 토양의 형태적 특성을 중심으로 토양을 조사하고 분류한다. 신분류법은 도입초기부터 지나치게 토양층의 형태와 속성을 강조하고 있으며, 구분하는 정량기준이 모호하고, 유럽 언어에 근거한 토양이름이 다른 문화권에서는 이해하기 어렵다는 문제점들이 지적되고 있다(Webster, 1968; Boul *et al.*, 2003).

- 3) 현재 대부분의 토양관련 저널에서는 국가별 토양분류체계에 의한 토양유형과 더불어 이 두 토양분류체계 중에 한 개를 선택하여 토양유형을 제시할 것을 권고하고 있다.
- 4) 휴전선을 중심으로 한 접경지역과 도시지역에서는 아직까지 토양조사가 이루어지지 않은 곳이 있다. 따라서 토양의 분포면적은 한국 전체를 대상으로 한 것이 아니라 조사지역의 면적에 근거하여 계산된 것이다.
- 5) 토양형성인자모델은 $S=f(C, R, O, P, T, \dots)$ 로 표현되며, 여기서 S 는 토양, C 는 기후요인, R 은 기복, O 는 생물, P 는 모재, 그리고 T 는 시간을 의미한다. 이 식에서 인간의 영향은 생물요인의 한 부분으로 간주한다. 토양형성인자 모델은 토양형성에 관련된 요인들을 병렬적으로 나열하고 있기 때문에 각 요인들의 상대적인 영향력 및 상호작용을 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있다(Gerrard, 1992; Buol *et al.*, 2003). 하지만, 현재까지 제시된 많은 모델 중에서 가장 이해가 쉽고 포괄적이라는 평가를 받고 있다. 특히, 이 연구에서와 같이 토양형성에 관여될 것으로 추정되는 환경요인들을 개별적으로 추출하기 위해서는 이 모델이 적합하다고 판단하였다.
- 6) McBratney *et al.*, (2003)에서는 기존의 수많은 토양-경관분석 관련 연구들의 종합하면서, 다양한 환경변수 중에서 지형이 가장 높은 예측능력을 가진 것으로 평가하고 있다.
- 7) 각 집단의 독립성을 검증하기 위해 Pearson's χ^2 검정 검정을 실시하였다. 분석에 사용된 사례수가 많기 때문에 모든 분석결과는 $p < 0.01$ 수준에서 유의한 것으로 나타났다.
- 8) 몇몇 변수들의 경우에는 양의 왜도(skewness)를 보이거나 쌍봉구조(bimodal distribution)를 보였지만, 정규분포를 만들기 위한 의도적인 자료변형을 하지 않았다.
- 9) 판별분석에서는 집단의 분산이 동일하는 전제조건이 필요하다(Leech *et al.*, 2005). Box's M을 통해 이 가설을 검증한 결과 사용한 자료의 분포특성과 분산특성이 판별분석의 기본가정을 위배하고 있는 것을 확인하였다. 따라서 판별분석의 목적을 예측보다는 토양과 환경변수간의 관련성을 기술하는 목적에 한정하였다.
- 10) 여기서 사용한 산맥명은 Park and Son(2008)에서 새롭게 제시한 산맥의 명칭을 따랐다.
- 11) 토색이 회색계로 2가 철화합물의 반분이 없는 토양을 회색토로 하였으나, 후에 이 정의의 범위가 확대되어 계절적인

환원조건 즉 2가철 화합물의 반분을 가진 토양도 주 토색이 회색이면 회색토에 포함시켰다. 토양의 회색화 과정은 수분의 포화로 인하여 산소가 결핍되므로 혐기성세균이 토양층의 철화합물을 환원시키므로 이루어진다(NHAES, 2003).

- 12) 분산분석에서 F값이 높다는 것은 토양유형간의 분산이 토양유형내의 분산에 비해 높다는 것을 의미하며, 이것은 토양유형간 환경변수의 차이가 크다는 것을 의미한다.
- 13) Bonferroni test의 결과 Ra와 Ap의 차이를 통계적인 유의성을 확보할 수 없었지만, 다른 모든 대토양군의 NDVI 평균은 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$).
- 14) NDVI값은 고도와 경사도와 각각 0.53과 0.56의 Pearson's r 값을 보여준다.
- 15) 이러한 사실은 토양도를 관찰하면 쉽게 유추할 수 있는 내용이다. 대부분의 토양도에서 평탄지대에서는 작도단위가 조밀하고 구체적인 토양들이 기술되어 있는 반면, 산지의 토양은 작도단위가 크고 토양유형이 세분화되어 있지 않다.

참고문헌

- ASI(Agricultural Sciences Institute), 1985, *Soils of Korea - with Generalized Soil Map of Pattern of Soil Orders and Suborders of Korea 1:1,000,000*, Agricultural Sciences Institute, RDA, Suwon, Korea.
- ASI(Agricultural Sciences Institute), 1992. *Korean Soil Survey and Classification*, Agricultural Sciences Institute, RDA, Suwon, Korea.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. A., and Stone, C. J., 1984, *Classification and Regression Trees*, Wadsworth.
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., and McDaniel, P. A., 2003, *Soil Genesis and Classification*, 5th edition, Iowa State Press-Blackwell.
- Burrough, P. A., 1993, Soil variability: A late 20th century view, *Soils and Fertilizers*, 56, 529-562.
- Conrad, O., 1998, *DiGem-Software for Digital Elevation Model*, Unpublished Ph.D. Thesis, University of Göttingen, Germany.

- Duchaufour, Ph., 1982, *Pedology: Pedogenesis and Classification*, Translated by Paton, T. R. London, George Allen and Unwin.
- FAO/ISRIC/ISSS, 1998, *World Reference Base for Soil Resources*, World Soil Resources Reports, FAO, Rome.
- Gallant, J. C. and Wilson, J. P., 2000, Primary topographic attributes, in Wilson, J. P. and Gallant, J. C.(eds.), *Terrain Analysis: Principles and Application*, John Wiley and Sons, 51-86.
- Gerrard, J., 1992, *Soil Geomorphology*, Chapman & Hall, London.
- Gessler, P. E., Moore, I. D., McKenzie, N. J., and Ryan, P. J., 1995, Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes, *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, 421-432.
- Grunwald, S., 2006. *Environmental Soil-Landscape Modeling-Geographic Information Technologies and Pedometrics*, CRC Press.
- Hewitt, A. E., 1993, Predictive modelling in soil survey, *Soils and Fertilizers*, 56, 305-314.
- Hong, S. Y., Im, S. K., Lee, S. H., Lee, J. C., and Kim, L. H., 2008, Spatial analysis of agro-environment of North Korea using remote sensing I. Landcover classification from Landsat TM imagery and topography analysis in North Korea, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 27(2), 120-132.
- Jenny, H., 1941, *Factors of Soil Formation*, McGraw-Hill, New York.
- Kang, Y. P., 1978, The characteristics of weathering processes of red soils in South Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 18, 1-12.
- Kang, Y. P., 1987, Pedological and geomorphological characteristics of paleo-red soils, *Journal of Geographical Education*, 18, 38-54.
- KIGMM(Korea Institute of Geology, Mining and Materials), 1995, Geological Map of Korea 1:1,000,000, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Daejeon (한국자원연구소, 1995, 한국지질도 1:1,000,000, 한국자원연구소, 대전).
- Kim, W. J., 2004, *A Classification of Ecological Regions of Korea, Using Natural Environmental Related Parameters*, Unpublished Ph.D Thesis, Seoul National University, Korea.
- Koreand Geological Society, 1999, *The Geology of Korea*, Sigma Press, Seoul (대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스, 서울).
- Kwon, H. J., 2003, *Physical Geography of Korea*, Bakyoungsa, Seoul.
- Lagacherie, P., Robbez-Masson, J. M., Nguyen-The, N., and Barthès, J. P., 2001, Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance, *Geoderma*, 101, 105-118.
- Lee, S. H., 2007, *Climatology*, Purungil, Seoul (이승호, 2007, 기후학, 푸른길, 서울).
- Leech, N. L., Barrett, K. C., and Morgan, G. A., 2005, *SPSS for Intermediate Statistics: Use and Interpretation*(3rd edition), Lawrence Earlbaum Associates.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., and Minasny, B., 2003, On digital soil mapping, *Geoderma*, 117, 3-52.
- McSweeney, K., Gessler, P. E., Slater, B., Hammer, R. D., and Bell, J., 1994. Towards a new framework for modeling the soil-landscape continuum, in Amundson, R. G. and Harden, J. W.(eds.), *Factors of Soil Formation: A Fiftieth Anniversary Retrospective*, Soil Science Society of America, Madison, WI, 1-13.
- MOE(Ministry of Environment), 2009, *The White Paper on Environment 2009*, Ministry of Environment, Korea, Kwachon.
- Moore, I. D., Turner, A. K., Wilson, J. P., Jenson, S. K., and Band, L. E., 1993, GIS and land surface-subsurface modeling. in Goodchild, M. F., Parks, B. O., and Steyaert, L. T.(eds.), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press, New York, 196-230.
- Moran, C. J. and Bui, E., 2002, Spatial data mining for enhanced soil map modelling, *International Journal of Geographical Information Science*, 16, 533-549.

- NAAS(National Academy of Agricultural Science), 2010, *Korean Soil Information System*(<http://asis.rda.go.kr>), National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon.
- MOE(Ministry of Environment), 2009, The White Paper in Environment 2009, Ministry of Environment, Kwachon (환경부, 2009, 환경백서 2009, 환경부, 과천).
- NGII(National Geographic Information Institute), 2007, National Atlas of Korea, National Geographic Information Institute, Suwon (국토지리정보원, 2007, 대한민국 국가지도집, 국토지리정보원, 수원).
- NHAES(National Honam Agricultural Experimental Station), 2003, Theory and Practice of Soil Survey, National Honam Agricultural Experimental Station, RDA, Suwon (농촌진흥청 호남농업시험장, 2003, 토양조사 이론과 실무기술, 농촌진흥청 호남농업시험장, 수원).
- NIAS(TNational Institute of Agricultural Science and Technology), 2005, *Achievements and Progress of the Korean Soil Survey*, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon.
- NIAS(TNational Institute of Agricultural Science and Technology), 2000, *Taxonomical Classification of Korean Soils*, National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon.
- Park, S. J., 2004, A geomorphological classification system to characterize ecological processes over the landscape, *Journal of the Korean Geographical Society*, 39(4), 495-513.
- Park, S. J., 2007, Tectonic movement in the Korean Peninsula (I): The spatial distribution of tectonic movement identified by terrain analyses, *Journal of the Korean Geographical Society*, 42(3), 368-387.
- Park, S. J., 2009, Classification and forming processes of low relief landforms in the Korean Peninsula, *Journal of the Korean Geographical Society*, 44(1), 31-55.
- Park, S. J. and Son, I., 2008, Discussions on the distribution and genesis of mountain ranges in the Korean Peninsular (III): Proposing a new mountain ranges map, *Journal of the Korean Geographical Society*, 43(3), 276-295.
- Park, S. J. and Vlek., P. L. G., 2002a, Soil-landscape analysis as a tool for sustainable land resource management in developing countries, *The Geographical Journal of Korea*, 36, 31-49.
- Park, S. J. and Vlek., P. L. G., 2002b, Environmental correlation of three-dimensional spatial soil variability: A comparison of three adaptive techniques, *Geoderma*, 109, 117-140.
- Park, S. J., Hwang, C. S., and Vlek, P. L. G., 2005, Comparison of adaptive techniques to predict crop yield response under varying soil and land management conditions, *Agricultural Systems*, 85, 59-81.
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. A., and McArthur, D., 2003, Predictive soil mapping-a review, *Progress in Physical Geography*, 27, 171-197.
- Scull, P., Franklin, J., and Chadwick, O. A., 2005, The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape, *Ecological Modelling*, 181, 1-15.
- Soil Survey Staff, 1993, *Soil Taxonomy*, USDA, Washington, DC.
- Sonn, Y. K., 2007, The classification of standard catchments according to soil catenary soil sequences, NIAS(TSymposium Handouts available from <http://asis.rda.go.kr/>.
- Webster, R., 1968, Fundamental objections to the 7th approximation, *Journal of Soil Science*, 19, 354-366.
- Zevenbergen, L. W. and Thorne, C. R., 1987, Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.
- <http://asis.rda.go.kr>
- 교신: 손연규, 441-707, 경기도 수원시 권선구 수인로 150, 농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과(이메일: sonnyk@korea.kr, 전화: 031-290-0338)

박수진 · 손연규 · 홍석영 · 박찬원 · 장용선

Correspondence: Yeon-Kyu Sonn, National Academy of
Agricultural Science, Rural Development Agency, Soil
and Fertilizer Management Division, 249 Suin-Ro
Kweonseonku, Suwon, 441-857, Korea(e-mail:
sonnyk@korea.kr, Phone: +82-31-290-0338)

최초투고일 2010. 1. 25

수정일 2010. 3. 12

최종접수일 2010. 3. 13