

판별분석을 이용한 토지이용별 토양 특성 변화 연구

고경석* · 김재곤 · 이진수 · 김탁현 · 이규호 · 조춘희 · 오인숙 · 정영욱

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Use of Discriminant Analysis to Identify Soil Quality Variation by Land Use

Kyung-Seok Ko*, Jae Gon Kim, Jin-Soo Lee, Tack Hyun Kim, Gyoo Ho Lee, Choon Hee Cho, In Suk Oh and Young Wook Cheong

Geological & Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

The physical and chemical characteristics of soils in a small watershed were investigated and the effect of geology and land use on soil quality were examined by using multivariate statistical methods, principal components analysis and discriminant analysis. The soil developed from andesite had finer texture and higher contents of water extractable inorganic components, clay, and mafic minerals than the soil developed from granite. It is considered that the accumulation of salts in the farmland soils indicated by electrical conductivity, contents of cations and anions and pH was caused by fertilizer input during cultivation. The low contents of organic matter in the farmland soils was due to the enhanced oxidation of organic matter by tillage and by the harvest of crops. The contents of inorganic components are increased as following order: upland > orchard > paddy field > forest. The high contents of water soluble SO_4^{2-} of paddy soils is due to the oxidation of sulfides mineral formed during the flooding period during the air-dry and extraction. The results of principal components analysis show the difference of soil quality was controlled by geology and land use. PC1 indicate the input of fertilizer, mineral weathering and ion exchange reaction by application of nitrogenous fertilizers. The results of two discriminant analyses using water extractable inorganic components and their ratios by land use were also clearly classified by discriminant function 1 and 2. In discriminant analysis by components, discriminant function 1 indicated the effect of fertilizer application and increased as following order: upland > orchard > paddy field > forest soil. The investigated and predicted data for land use from discriminant analysis showed similar results. The discriminant analysis can be used as a useful method certifying the change of land use.

Key words : soil characteristic, geology, farmland soil, principal components analysis, discriminant analysis, ion exchange reaction

본 연구에서는 회동저수지 상류 수영강 유역에 발달된 토양을 대상으로 지질 및 토지이용별로 토양의 물리화학적 특성을 조사하고 그 영향을 다변량 통계분석법인 주성분 및 판별분석을 이용하여 고찰하였다. 연구지역내 토양의 토성은 안산암에서 발달한 토양이 화강암의 것보다 세립질이며 용출 무기성분, 점토 및 유색광물의 함량도 높았다. 경작지 토양 내 염류 집적(EC, 양이온, 음이온)과 pH 증가는 대부분 경작과정에 투입된 비료의 영향에 의한 것이며 임야 토양에 비해 상대적으로 낮은 유기물 농도는 경운에 의한 유기물의 산화 촉진 및 작물 수확에 기인하는 것이다. 토지이용별 무기성분의 함량은 밭>과수원>논>임야 토양 순으로 나타났으며, 논 토양의 높은 SO_4^{2-} 함량은 담수 상태 환원조건하 침전된 황화광물형태가 산화조건하 용출 실험에 의해 용해되어 증가되는 것에 기인한다. 주성분 분석 결과는 토지 이용이나 지질에 따른 토양 특성을 잘 나타내었으며, 주성분 1은 시비, 광물 풍화작용 및 질소질 비료에 의한 이온교환 반응의 영향을 나타내었다. 토양 용출 성분과 성분비를 이용한 두 종류의 판별분석결과는 모두 토지이용별로 판별함수 1과 2에 의해 뚜렷하게 구분되며, 토양 성분을 이용한 판별분석에서 판별함수 1은 경작에 의한 비료의 영향을 나타내며 밭, 과수원, 논, 임야 토양 순서로 증가하였다. 판별분석에 의한 토지이용 특성의 조사 및 예측 자료는 비교적 잘 일치하였으며 토지 이용의 변화를 확인할 수 있는 방법으로도 사용될 수 있었다.

주요어 : 토양 특성, 지질, 경작지 토양, 주성분 분석, 판별분석, 이온교환반응

*Corresponding author: kyungsok@kigam.re.kr

1. 서 론

경작과 축산 등의 농경활동은 토양, 지표수 및 지하수에 있어 질을 저하시키는 등 최근 들어 농업이나 환경적 문제에 있어 중요한 관심사로 부각되고 있다(김연태와 우남칠, 2003). 유럽 및 구미에서는 농경지에 집적된 영양염류의 유출을 지표수 부영양화의 주원인으로 인식하여 1970년대부터 농경지 영향에 의한 부영양화에 대한 체계적인 연구가 진행되어 왔으며(Schroeder *et al.*, 2004), 특히 지표수 부영양화의 제한인자(limiting factor)인 인의 토양 내 거동, 토양특성별 집적 특성, 지표유출특성에 대한 심도 있는 연구가 진행되어 왔다(Magurie and Sims, 2002). 1990년대에는 인의 토양 내 거동특성과 강우특성을 기본 인자로 농경지로부터 인의 유출을 예측하는 모델링기법이 개발되어 비점오염원, 특히 농경지로부터 오염물질의 유입을 관리하는데 활용하고 있다.

농경지에서 강우에 따른 유출수(runoff)와 더불어 배출되는 토사와 질소, 인과 같은 영양염류 등으로 인한 수계오염이 대표적인 비점오염원이며 이는 넓은 지역에 분산되어 분포하고 오염물질이 장시간에 지속적으로 확산되는 특성이 있어 상대적으로 관리가 어려운 특징을 가진다. 최근 통계에 의하면 강, 호소 등의 수질악화의 60% 이상이 농업분야에서 기원하는 것으로 밝혀지고 있다(안재환, 2001). 우리나라는 1960-1980년대 식량증산정책의 일환으로 화학비료가 과다하게 토양에 투입되었으며(기준량의 120-150%), 일부지역의 토양에는 작물가용도의 수십 배의 영양염류가 집적되어 지표수 수질악화의 주요인으로 작용하고 있다. 우리나라의 강우는 하절기인 6-8월에 집중되며 경사지에 농경지가 많이 분포하여 강우에 의한 지표유출과 토양침식이 많이 발생하여 영양염류의 지표수 유입이 우려되고 있다. 농경지에서 하천으로 유출되는 영양염류 성분은 호소, 저수지 및 바다 등으로 유입되어 녹조나 적조 등 부영양화를 일으키는 것으로 알려져 있다. 농경지에 집적된 영양염류는 비료투입량, 토양특성, 농작물, 강우양태, 지형 등에 의하여 수계로의 유입 및 지하침투의 정도가 결정되며, 이 중 인(P)은 지표수 부영양화의 제한인자(limiting factor)로 알려져 있으며 농경지에 투입된 인은 토양의 특성에 의해 거동이 좌우된다. 토양으로부터 영양염류의 지표유출은 강우 및 지형 특성뿐만 아니라 영양염류의 존재형태에 따라 결정된다. 이러한 토양내 영양염류나 화학적 특성은 토지의 비옥도나 질을 좌우하게 되고 주변 생태계에 영향

을 미치므로 이에 대한 정량적인 평가가 필요하다.

토지이용의 변화나 공간적인 토양 특성 분포에 대해서 지속적인 연구가 진행되어 왔으며(임동규 등, 1997; Brye *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2003; Cao *et al.*, 2004), 최근 들어서는 토양의 물리화학적 특성들을 다변량 통계기법인 주성분분석, 인자분석 및 판별분석을 이용하여 정량적으로 해석하고자하는 연구가 시도되었다(Splechna and Klinka, 2001; Emmerling and Udelhoven, 2002; Velasquez *et al.*, 2005). 이러한 연구들은 토지이용과 토양특성 특히 영양염류와의 상관성을 주성분분석을 이용하여 정량적으로 보여주었으며, 특히 Emmerling and Udelhoven (2002)는 다중회귀분석(multiple linear regression)을 이용하여 토양의 미생물 특성을 토양 화학특성 자료를 사용하여 예측한 바 있다.

본 연구에서는 부산광역시 상수원인 회동저수지 상류부 수영강 유역에 발달된 토양을 대상으로 표토의 물리화학적 특성을 지질(화강암, 안산암) 및 토지이용(논, 밭, 과수원, 임야)로 구분하여 고찰하였다. 토양 용출 성분 농도와 성분비에 대한 다변량 통계분석법(주성분 및 판별분석)을 실시하여 지질 및 토지이용에 따른 토양 특성의 차이를 알아보고자 하였다. 특히 판별분석을 이용하여 토양의 물리화학적 특성이 토지이용, 즉 경작에 의해 투입된 비료 성분에 의한 토양 내 무기성분 증가와의 상관관계를 도출함으로써 향후 상수원 보호를 위한 토지이용계획 수립의 기초 자료를 확보하고자 하는 것이 연구의 목적이다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1. 연구지역 및 시료채취

연구지역은 부산광역시 북쪽에 위치한 회동저수지를 포함하는 수영강 수계의 작은 소유역이다(Fig. 1). 연구지역의 지질을 살펴보면 백악기 화강암과 안산암으로 이루어져 있다. 백악기 화강암에는 유색광물이 드물고 석영과 장석이 주 구성광물인 미문상 화강암과 석영, 장석 및 흑운모로 이루어진 흑운모 화강암이 있으며, 안산암은 장석, 석영, 각섬석 및 녹니석이 주 구성광물이다. 미문상화강암과 안산암에서는 변질광물로 일라이트가 관찰되며, 특히 안산암은 곳에 따라 열수변질 작용에 의해 납석화되어 있어 채광된 곳도 관찰된다.

연구지역 소유역의 면적은 약 66 km²이며, 토지이용 특성을 살펴보면 약 70%가 임야, 15%가 논, 8%가 과수원, 6%가 밭, 그리고 1% 정도가 거주지나 도로로

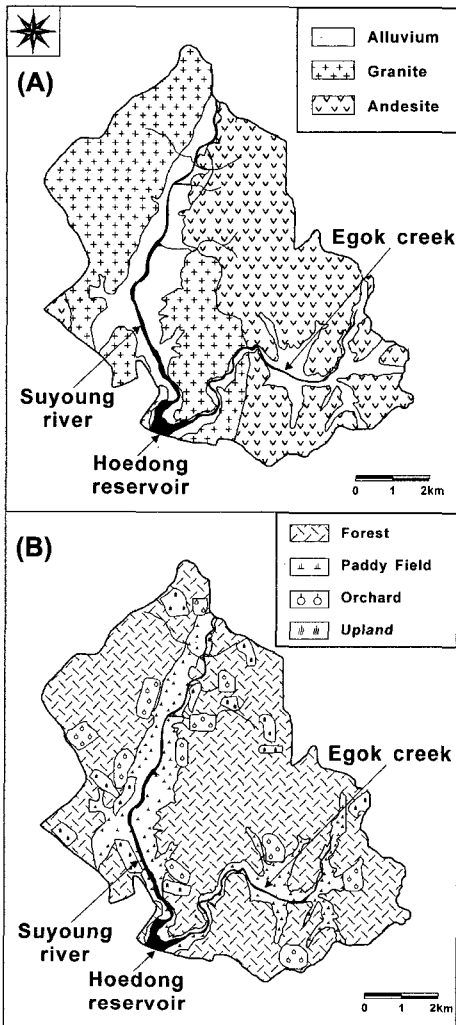


Fig. 1. Location, geology (A) and land use (B) of the study area (김의선 등, 2001; NAIST, 2000).

이루어져 있다(Kim *et al.*, 2005). 임야는 상수리나무 등의 활엽수와 소나무가 주식생으로 피복되어 있으며, 논은 주로 쌀농사로 활용되고 있으나 회동저수지에 가까운 하류 지역은 미나리를 재배하고 있다. 밭은 당근, 시금치, 상추, 고추 등의 채소류가 주로 재배되고 있으며, 과수원은 밤나무, 자두, 앵두, 관상수 등의 재배지로 활용되고 있다.

회동저수지 유역의 수영강 상류부는 북단부 원호산에서 발원, 법기저수지를 거쳐 유하하는 지천과 백운산에서 발원하여 남류하는 지천들이 합류되어 수원지로 유입되고, 동쪽의 이곡천과 남쪽의 구칠천이 합류되어 회동저수지로 유입된다. 소유역의 집수지인 회동저수지는 부산광역시 식수원으로 이용되며 여름철에

부영양화 현상이 빈번하게 발생한다. 이러한 부영양화는 회동저수지 상류부에 있는 소유역내 농경지에서 하천으로 강수와 함께 유입되는 영양염류의 유출이 주요 원인으로 지적되고 있다. 따라서 연구지역인 소유역의 농경지 및 특정 오염 유발시설은 상수원 수질 문제를 발생하지 않도록 상류지역에 대한 관리에 대한 필요성이 대두되고 있다.

지질 및 토지이용에 따른 토양특성을 조사하기 위하여 30cm 이내의 표토시료를 채취하였다. 토양시료는 총 128개가 채취되었으며 지질별로는 화강암과 안산암 지역에서 각각 80개와 48개를 채취하였고, 토지 이용별로는 임야, 논, 밭, 과수원에서 각각 32개를 채취하였다. 시비에 의한 단기적인 토양 비료농도의 불균질성에 의한 시료의 변화 요인을 최소화하기 위하여 토양시료는 과종과 시비전인 3월초에 실시하였다. 채취된 토양 시료는 실내에서 건조시켰으며 고무 스토퍼로 부드럽게 분쇄한 후 2 mm 이하 입도의 시료를 폴리에틸렌병에 담아 보관하고 실험에 이용하였다.

2.2. 토양 추출 실험

토양시료의 용출 특성을 알아보기 위하여 5g의 토양과 50 ml의 증류수를 원심분리튜브에서 1시간 동안 항온수조에서 반응시키고 원심분리하여 토양입자를 제거한 후 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였다. 반응여과용액의 pH와 전기전도도(EC)는 Horiba pH/Conductivity 측정기를 이용하여 측정하였다. 토양 용출 성분중 양이온인 Na⁺, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺는 유도결합플라즈마 원자방출분석기(ICP-AES, JOBIN YVON JY70plus)를 이용하여 분석하였으며, 음이온인 F, Cl, NO₃⁻, SO₄²⁻는 이온크로마토그래프(IC, Dionex DX-120)로 분석하였다. 용액내 인(PO₄³⁻)의 농도는 자외선/가시광선 분광분석기(DR4000 Spectrophotometer, Hach Co.)로 분석을 실시하였다. 토양내 유기물 함량을 지시하는 작열감량(loss on ignition, LOI)은 토양 1g을 세라믹 도가니에 담아 전기로에 넣고 온도를 서서히 550°C까지 증가시킨 후 1시간 동안 가열 후 천천히 식힌 후 측정하였다.

토양내 유기 인은 가열하지 않은 시료에서 1N H₂SO₄로 추출한 인(P)의 함량과 550°C에서 2시간 동안 가열한 시료를 1N H₂SO₄로 추출한 인(P)의 농도 차로 계산되었다(Olsen and Sommers, 1982). 총 인의 농도를 측정하기 위하여 가열한 시료를 PE재질의 100 ml 원심분리튜브에 담고, 1N H₂SO₄ 50 ml와 16 시간 반응 후 0.45 μm 멤브레인 필터를 이용하여 토

양입자를 분리 후 용액의 인 농도를 자외선/가시광선 분광분석기(DR4000 Spectrophotometer, Hach Co.)를 이용하여 측정하였다.

2.3. 주성분 및 판별분석

주성분 분석(PCA, Principal Component Analysis)은 여러 개의 양적 변수들 사이의 분산-공분산 관계를 이용하여 이 변수들의 선형 결합으로 표시되는 주성분을 찾고 이중에서 전체 분산을 설명하는데 중요한 2~3개의 주성분(principal component)으로 전체 변동(total variance)의 대부분을 설명하고자 하는 다변량 통계분석법이다(Davis, 1986; Stezenbach *et al.*, 1999). 주성분 분석은 자료의 요약이나 선형 관계식을 통하여 차수(dimension)를 감소시켜 해석을 용이하게 하는데 그 목적을 가지고 있다. 본 연구에서는 토양 특성 자료를 이용하여 주성분 분석을 실시하여 전체 토양 특성을 설명하는 새로운 변수, 즉 주성분을 구하여 지질 및 토지이용과의 토양 특성의 상관관계를 알아보고자 하였다. 주성분 분석(PCA)을 위해서는 통계 프로그램인 XLSTAT[®]을 이용하였으며, 주성분 분석에 의하여 얻어진 주성분 점수(score)는 토양 특성 해석을 위한 자료로 이용되었다.

판별분석은 두 개 이상의 모집단에서 추출된 표본들이 가지고 있는 정보들을 이용하여 이 표본들이 어느 모집단에서 추출된 것인지 결정해 줄 수 있는 기준을 찾는 방법이다. 판별분석은 한개 이상의 판별 변수의 조합으로 이루어진 판별함수(discriminant functions)에 의해 그룹내 분산에 대해 그룹간 분산을 최대화하고자 하는데 목적을 둔다(Wilson, 2002). 판별분석을 수행하기 위해서는 정성(범주, category) 종속 변수와 독립변수들의 세트가 필요하다. 범주-종속 변수는 각각 개체를 한 개의 정해진 그룹에 속하도록 하는 변수이며, 선형의 판별변수는 다음과 같이 정의된다.

$$D = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_pX_p$$

위 식에서 X_1, X_2, \dots, X_p 는 독립변수들의 값이며, 는 자료로부터 측정된 계수들이다. 본 연구에서는 토지이용도를 범주변수로 설정하고 토양 특성 자료를 사용하여 토지이용에 따른 판별함수를 구한 후 토양특성에 따른 토지이용의 변화나 공통성을 해석하고자 하였다. 판별 분석(DA)을 위해서는 주성분분석과 마찬가지로 XLSTAT[®]을 이용하였다.

주성분 및 판별 분석에는 토양시료 128개에 대한 용출실험으로 얻어진 pH, 전기전도도(EC), 양이온

($Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+$), 음이온(F, Cl, NO_3^-, SO_4^{2-}) 및 작열감량(LOD)의 사용되었다. 양이온 및 음이온의 상대값($Ca/Cl, Na/Cl, NO_3/K, Na/K, K/Cl, Ca/Mg, K/P, NO_3/Cl, Ca/K, Cl/SO_4, Na+K, Ca/Na, SAR$) 또한 판별분석의 독립변수 값으로 이용되었다. 이러한 변수들을 이용하여 질산염의 기원을 밝히고자 하는 통계적 연구가 Spruill *et al.*(2002)에 의해 수행된 바 있다.

3. 결과 및 토의

3.1. 지질 및 토지이용별 토양 특성

연구대상지역인 회동저수지 수영강 상류 유역은 규모가 작고 식생이 균질하여 토양특성은 모암과 지형에 의하여 좌우되며, 토양은 석토통와 질곡통으로 구성되어 있다(NAIST, 2000). 소유역내 토양은 토양발달과정의 초기에 해당하는 층위분화(層位分化)가 약간 발달한 인셉티솔(Inceptisol)로 분류되는데, 미문상화강암에서 발달된 토양은 석영, 장석, 일라이트, 카올리나이트, 수산기 호층 질석(HIV)로 구성되어 있으며, 흑운모 화강암에서 발달된 토양은 석영, 장석, 일라이트, 카올리나이트, HIV로 구성되어 있으며, 안산암에서 발달된 토양은 석영, 장석, 각석, 카올리나이트, HIV, 운모-질석 호층광물로 구성되어 있다(김의선 등, 2001). 김의선 등(2001)에 의하면 안산암에서 발달된 토양이 화강암에서 발달된 토양에 비해 Al, Fe, P의 함량이 상대적으로 높다. 연구지역 모암에 대한 X-선 형광분석(XRF) 전암 분석 결과를 살펴보면 안산암의 Al_2O_3, Fe_2O_3, P_2O_5 함량이 각각 16.0, 10.8, 0.24%로 화강암의 15.8, 1.66, 0.07% 보다 모두 높은 것을 확인할 수 있었다.

연구지역내 발달한 토양의 토성은 점토질 양토(clay loam)에서 사질 양토(sandy loam)이며 화강암에서 발달한 토양이 안산암에서 발달한 것보다 상대적으로 조립질 입도분포를 나타내었다. 안산암에서 발달한 토양은 실트나 점토의 양이 상대적으로 많은 점토질 양토(clay loam)에서 실트 점토질 양토(silty clay loam)의 조질을 가지는 것이 확인되었다(Table 1).

지질별 특성을 살펴보면 영양염류인 NO_3^- 와 총인, 양이온($Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+$) 및 전기전도도(EC)의 함량이 안산암에서 높게 나타나며, pH는 화강암 토양에서 높은 값을 보여주었다(Table 1). F, Cl, SO_4^{2-} 의 농도도 안산암 토양에서 높게 나타나지만 화강암과 큰 차이는 보이지 않았다. 이러한 무기성분의 차이는 안

Table 1. Statistical calculation results for soil quality by geology and land use (EC: electrical conductivity, LOI: loss on ignition, P_t: total phosphorous, L: loam, CL: clay loam, SL: sandy loam, SiCL: silty clay loam).

Geology	Texture		EC ($\mu\text{S/cm}$)	LOI (%)	pH	Mg	Ca	Na	K	mg/kg					P_t
										F	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄	
Andesite	CL	Avg	190	2.1	5.2	82.6	394.8	102.5	238.7	1.8	26.2	463.4	15.8	37.1	658.9
		Std	127	0.7	0.8	64.9	389.1	56.7	165.4	0.9	38.9	406.1	27.3	28.0	403.9
	SiCL	Min	52	0.8	3.8	9.5	30.5	47.3	37.0	0.2	3.2	2.4	0.0	9.7	82.6
		Max	602	4.6	7.0	267.5	1955.0	310.0	713.3	5.2	179.4	1603.1	126.5	123.8	1449.5
Granite	L	Avg	123	1.4	5.5	49.0	252.8	82.4	152.7	1.7	22.8	226.2	15.3	36.9	489.3
		Std	85	0.4	1.0	51.5	236.5	65.7	145.7	0.7	37.6	264.4	24.4	25.0	383.3
	SL	Min	35	0.8	4.2	9.8	15.5	26.5	15.5	0.7	2.8	6.5	0.0	6.5	55.8
		Max	514	2.9	8.2	292.5	1237.5	450.0	867.5	4.7	297.5	1506.0	106.4	147.4	1694.7
Land use	Texture		EC	LOI	pH	Mg	Ca	Na	K	F	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄	P_t
Forest	CL	Avg	121	2.0	4.6	46.4	120.3	103.4	162.1	1.6	54.0	196.1	0.0	23.6	182.9
		Std	76	0.9	0.3	39.7	118.5	91.1	102.2	0.6	64.1	212.3	0.0	7.1	113.9
	L	Min	39	1.0	3.8	10.2	15.5	26.5	42.0	0.8	6.6	5.8	0.0	10.7	55.8
		Max	311	4.6	5.2	205.5	557.5	450.0	406.5	3.6	297.5	762.1	0.0	35.2	450.8
Orchard	SiCL	Avg	112	1.4	5.7	39.7	235.5	75.5	193.4	1.8	14.2	229.4	14.7	25.1	615.8
		Std	59	0.5	1.0	26.6	125.9	57.4	156.0	0.8	18.4	166.6	16.5	23.7	390.6
	SL	Min	35	0.8	4.3	10.0	55.0	30.5	35.5	0.7	3.2	39.2	0.0	9.7	57.2
		Max	344	2.7	8.2	107.3	545.0	330.0	867.5	4.7	75.5	712.2	58.4	147.4	1294.6
Paddy	SiCL	Avg	104	1.5	5.4	42.9	194.0	100.2	84.9	1.7	17.7	153.2	3.4	58.2	501.5
		Std	36	0.4	0.7	24.4	90.2	49.9	55.7	0.7	12.1	120.7	7.8	27.0	260.7
	SL	Min	49	1.0	4.5	9.5	33.5	38.3	15.5	0.2	4.6	2.4	0.0	26.4	217.2
		Max	190	2.4	7.0	111.8	412.5	310.0	233.0	3.2	47.4	432.9	33.2	123.8	1401.3
Upland	SiCL	Avg	254	1.7	5.9	117.4	674.5	80.7	299.5	1.8	10.5	681.7	43.9	41.0	911.5
		Std	143	0.5	1.0	83.9	399.7	39.8	200.9	0.9	7.0	455.2	32.9	25.0	367.8
	SL	Min	79	0.8	4.0	31.8	177.0	31.3	57.0	0.9	2.8	140.0	4.5	6.5	421.6
		Max	602	3.0	7.5	292.5	1955.0	186.0	730.0	5.2	28.9	1603.1	126.5	98.1	1694.7

산암 토양이 화강암 토양보다 점토성분함량이 높기 때문에 상대적으로 투수성이 낮아 침투되는 강수나 관개 용수에 의해 무기성분이 지하수나 지표수로의 유출이 상대적으로 적을 가능성이 높기 때문인 것으로 사료된다. 안산암 분포 지역에서 영양염류인 질산염과 총인의 함량과 함께 양이온 및 전기전도도가 높은 것은 토양 내 무기성분의 증가가 주로 농경, 즉 시비 등에 의해 증가된다는 것을 의미한다. 무기성분 증가의 또다른 원인은 상대적으로 유색광물(mafic mineral)이 화강암보다 풍부한 안산암은 풍화과정에서 많은 무기 이온이 용탈되어 토양에 잔류하기 때문인 것으로 사료된다. 안산암에서 낮은 pH는 경작으로 인한 토양의 산성화가 화강암 토양보다 안산암에서 심하게 진행되고 있음을 보여준다.

농경지에 염류집적(EC, 양이온, 음이온) 및 토양 pH 증가는 경작과정에 투입된 비료의 영향에 의한 것으로 판단된다. 임야 토양에 비해 경작지 토양의 상대적으로 낮은 유기물 농도는 경작과정의 경운에 의한 유기물의 산화축진 및 작물 수확에 기인하는 것으로 판단

된다. 수용성 인의 농도는 임야<논<과수원<밭 순으로 나타났다. 강수에 의해 농경지 특히 밭과 과수원의 토양에 집적된 질산성 질소와 인이 유출되어 상수원에 유입될 우려가 있다. 동일한 토지이용형태에서 토양의 총 인 함량은 안산암>흑운모>미문산 화강암에서 발달된 토양의 순으로 나타났으며, 동일 지질에서 발달된 토양 중에 총 인의 농도는 임야<논<과수원<밭 토양 순으로 나타났다.

밭 토양의 무기성분은 Na⁺, Cl⁻을 제외하고는 모두 임야, 과수원 및 논토양의 것들보다 높은 값을 나타내었다(Table 1). 이는 밭 토양에 시비된 비료 성분들은 비 생육기간에 담수(湛水)상태에 있어 지속적으로 무기성분이 주변 하천이나 지하로 유출되는 논 토양과는 달리 강수에 의한 지하 침투와 지표 유출이 적어 토양 내에 상대적으로 많이 잔류하기 때문으로 판단된다. 논 토양의 담수 조건은 환원환경을 형성하여 NO₃⁻와 SO₄²⁻의 감소를 유발하게 된다. 따라서 논 토양에서 NO₃⁻가 가장 낮은 값을 보여주는 것은 이러한 논환원조건에 따른 질산염 환원이나 탈질(denitrification)

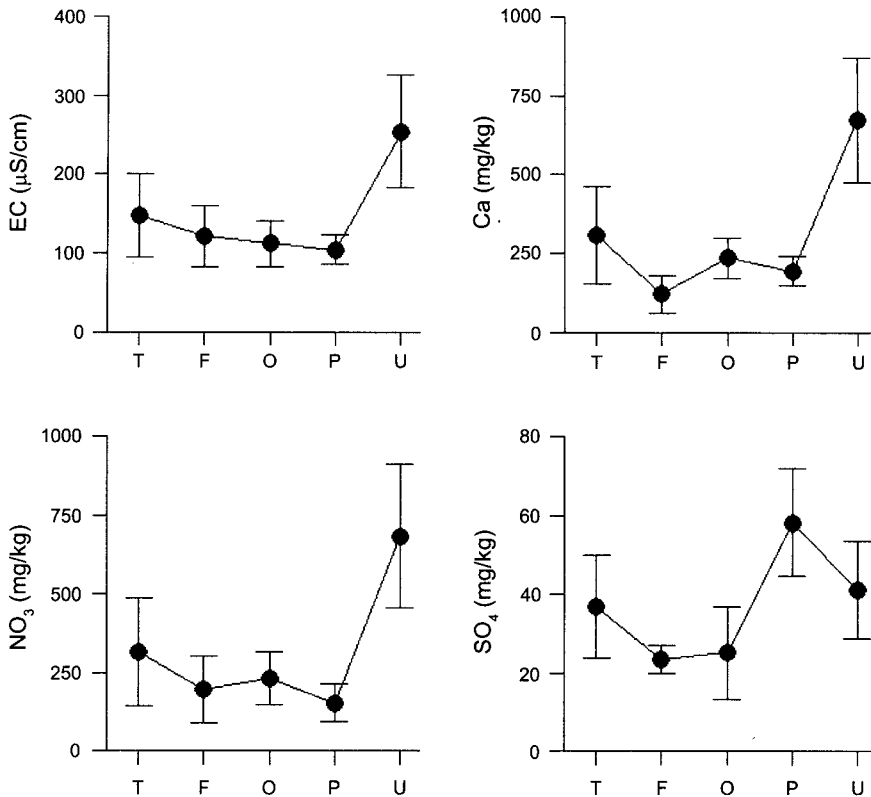


Fig. 2. Distribution of average and standard deviation values by land use (T: Total, F: Forest, O: Orchard, P: Paddy, U: Upland).

작용에 의한 것으로 사료된다(Fig. 2). 황산염(SO_4^{2-})은 논과 밭 토양이 임야와 과수원 토양보다 높은 값을 가지며, 논 토양에서 가장 높은 값을 보여주었다. 논 토양에서 황산염의 높은 농도는 담수 상태의 환원조건에서 환원된 황산염이 황화광물형태로 침전되었다가 시료건조 및 용출 실험시 산소농도가 포화상태인 증류수와 반응에 의하여 황산염 형태로 다시 용해되는 것에 기인하는 것으로 사료된다. 염소(Cl)는 임야에서 가장 높은 값을 나타내었으며 Na^+ 와 F는 토지이용에 따른 큰 차이는 보여주지 않았다.

3.2. 주성분 분석에 의한 토양 특성 분석

토양 용출 실험에 의해 얻어진 무기성분간 상관관계로부터 전기전도도(EC)는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- 와 높은 양의 상관성을 나타내었다(Table 2). Mg^{2+} 는 Ca^{2+} , K^+ , NO_3^- 와 높은 양의 상관성(>0.6)을 보여주며 이는 경작에 투입된 비료 등의 성분과 관계가 있는 것으로 사료되었다. 지질이나 토지이용별로 나누어 상관분석을 한 결과는 전체 상관분석 자료와 뚜렷한 상

관성의 차이는 나타나지 않았다.

토양 추출 실험에 의해 얻어진 무기성분들을 양적 변수로 사용한 주성분 분석(PCA)은 지질이나 토지이용에 따른 토양 특성을 종합적으로 나타낼 수 있었다. 주성분 분석에는 작열감량(LOI), pH, EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , F, Cl, NO_3^- , SO_4^{2-} , 총인(P_{tot})의 모두 12개의 토양 특성 변수가 이용되었다. 주성분 분석에 의해 얻어진 초기 3개의 주성분은 전체 분산의 69.7%를 설명하였다. 총 분산(total variance)의 41.0%를 설명하는 주성분 1(PC1)은 고유값이 4.92로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 주성분 2와 3(PC2, PC3)은 각각 17.8, 10.9%를 설명하며 고유값은 2.14, 1.31이었다(Table 3). 고유값의 값을 보면 PC1(전체 분산의 41% 설명)은 EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- 에 대하여 높은 적재값(factor loading, >0.35)을 가짐을 알 수 있었다(Table 3). 상관분석 결과에서 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- 는 전기전도도(EC)에 밀접한 양의 상관성을 보여주었으며, 따라서 이들에 대해 높은 적재값을 가지는 PC1은 시비(施肥)와 광물의 풍화 작용에

Table 2. The results of correlation test for soil quality.

	EC	pH	Mg	Ca	Na	K	F	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄	P_t
EC	1.00											
pH	-0.02	1.00										
Mg	0.90	-0.04	1.00									
Ca	0.91	0.21	0.82	1.00								
Na	0.39	-0.16	0.31	0.14	1.00							
K	0.79	0.04	0.62	0.67	0.36	1.00						
F	0.14	0.23	0.11	0.13	0.03	0.06	1.00					
Cl	0.15	-0.26	0.06	-0.10	0.76	0.14	0.02	1.00				
NO ₃	0.96	-0.04	0.91	0.92	0.22	0.74	0.13	-0.05	1.00			
PO ₄	0.48	0.44	0.44	0.59	0.00	0.55	0.03	-0.17	0.47	1.00		
SO ₄	0.27	0.22	0.21	0.28	0.33	0.25	0.03	-0.02	0.18	0.25	1.00	
P_t	0.45	0.30	0.35	0.53	-0.04	0.45	0.05	-0.23	0.46	0.68	0.25	1.00

Table 3. The eigenvalues, variance and eigenvectors from principal components analysis.

	PC1	PC2	PC3
Eigenvalue	4.920	2.136	1.309
% variance	41.0	17.8	10.9
Cumulative %	41.0	58.8	69.7
Eigenvector			
EC	0.442	0.036	-0.065
IL	0.156	0.297	-0.282
pH	0.026	-0.410	0.495
Mg	0.403	0.012	-0.140
Ca	0.411	-0.183	-0.031
Na	0.177	0.505	0.399
K	0.372	0.034	0.034
F	0.076	-0.042	0.131
Cl	0.048	0.596	0.225
NO ₃	0.428	-0.059	-0.204
SO ₄	0.155	-0.061	0.613
P_t	0.251	-0.297	0.069

다른 토양내 이온 성분의 증가와 관계가 있는 인자인 것으로 사료된다. PC1에 있어 Ca²⁺와 Mg²⁺의 기여는 비료 자체에 많이 포함되어 있는 Ca²⁺와 Mg²⁺에 의한 영향과 비료 사용에 의한 양이온 교환반응에 의한 것이 원인이 될 것으로 생각된다. Lambrakis *et al.*(2004)의 연구에서는 시비과정에서 투입된 요소비료의 용해에 의해 만들어지는 NH₄⁺가 점토광물 층간내 Ca²⁺를 치환하는 양이온 교환 반응의 효과를 보고한 바 있다. Gimenez(1994)는 해안 대수층의 수리지화학 자료의 분석에서 Ca²⁺와 NO₃⁻의 높은 상관계수(0.66)를 질소질 비료의 투입에 따른 NH₄⁺와 Ca²⁺의 이온 교환반응으로 설명한 바 있다. 본 연구 결과 Ca²⁺와 Mg²⁺와 NO₃⁻는 매우 높은 상관계수(0.91, 0.92)를 보여주어 부분적으로 이러한 양이온 교환반응의 효과를 나타남을 알 수 있었다. PC2는 Na⁺와 Cl⁻와 높은 양

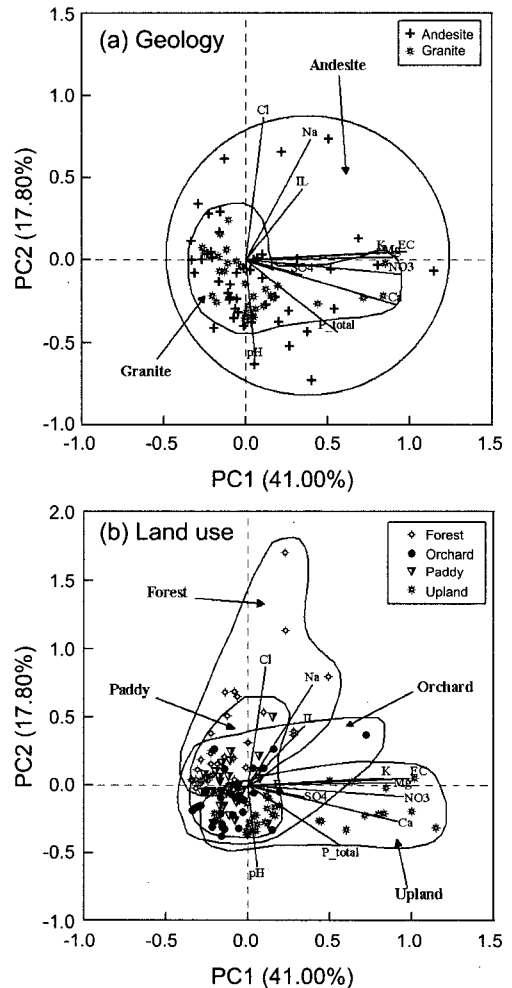


Fig. 3. The results of principal components analysis by (a) geology and (b) land use using soil extraction data.

의 적재값(>0.5)을 가지며 pH와는 음의 적재값(-0.410)을 보여준다. 높은 Na⁺와 Cl⁻ 그리고 낮은 pH는 특히

임야토양에서 나타나는 특징이다. PC3는 Na^+ 와 SO_4^{2-} 와 높은 양의 적재값(>0.4)을 가지며 pH와도 양의 적재값(0.495)을 보여준다.

지질 및 토지이용에 따른 주성분 분석결과는 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3(a)의 PC1과 PC2의 관계를 보면 화강암 토양이 안산암 토양보다는 비교적 균질한 분포를 보이며 안산암 시료는 매우 넓게 분산된 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 안산암 토양에서 높은 PC1과 PC2는 증가된 EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} 등과 관련이 있으며 이는 안산암내 높은 점토 성분과 관계가 있는 것으로 사료되었다. Fig. 3(b)의 토지이용별 주성분 분석결과는 임야토양이 PC2에 영향을 많이 받을 수 있었으며 이는 양이온 용탈에 의한 토양 산성화와 상관성이 있는 것으로 판단된다. 과수원과 논 토양은 큰 차이를 보여주지 않았으나 논 토양의 PC2가 약간 높은 값을 가짐을 알 수 있었으며 Na^+ 의 높은 농도와 약간 낮은 pH와 상관성을 가진다. 밭 토양은 비료 성분에 의한 영향이 가장 높게 나타나며 PC1의 증가가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.3. 판별분석을 이용한 토지이용 상관성 분석

본 연구에서는 토양 용출 실험에서 얻어진 토양 특성 자료가 경작, 임야 등 토지이용도에 따라 차이를 보여주는지를 확인하기 위하여 정준판별분석(canonical discriminant analysis)이 수행되었다. 판별분석은 두 종류로 나누어 수행되었으며, 분류변수(class variable)에는 모두 현장에서 확인된 토지이용도, 즉 4개의 그룹인 임야(forest), 밭(upland), 논(paddy), 과수원(orchard)이 이용되었다. 분류변수의 각 그룹에는 각각 32개의 토양 특성 자료가 사용되었다. 판별분석에 사용된 양적변수로는 두 종류를 사용하였으며, 1) 토양 용출 실험에서 얻어진 작열감량(LOI), pH, 전기전도도(EC), Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , F, Cl, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 총인(P_{tot})의 자료와 2) 양이온 및 음이온의 상대값(Ca/Cl, Na/Cl, NO_3/K , Na/K, K/Cl, Ca/Mg, K/P, NO_3/Cl , Ca/K, Cl/ SO_4 , Na+K, Ca/Na, SAR)의 자료를 이용하였다.

3.3.1. 정준판별분석 I: 토양 성분 함량 자료

토양 성분 함량 자료를 이용한 판별분석 결과 얻어진 4개의 그룹에 대한 분류함수계수(classification function coefficients) Table 4a에 나타나 있다. 판별분석에서 얻어진 3개의 판별함수(discriminant function)중 초기 2개의 판별함수는 그룹간 분산의 91.6%를 설명한다

Table 4. The classification function coefficients by discriminant analysis. (a) Discriminant analysis I: contents of soil components (b) Discriminant analysis II: ratios of soil components.

(a) Discriminant analysis I: contents of soil components				
Coefficient	Forest	Orchard	Paddy	Upland
Constant	-39.455	-47.286	-45.934	-58.539
EC	0.112	0.038	0.099	0.041
IL	5.307	1.053	2.640	0.350
pH	13.395	15.613	14.507	16.876
Mg	-0.069	-0.073	-0.071	-0.065
Ca	-0.059	-0.051	-0.056	-0.048
Na	-0.024	0.027	0.028	0.015
K	-0.028	-0.027	-0.047	-0.036
F	-2.197	-1.127	-1.549	-1.354
Cl	0.046	-0.014	-0.039	-0.003
NO_3	0.044	0.062	0.050	0.069
SO_4	0.029	-0.030	0.085	-0.015
P_{tot}	-0.003	0.007	0.004	0.010

(b) Discriminant analysis II: ratios of soil components				
Coefficient	Forest	Orchard	Paddy	Upland
Intercept	-10.884	-16.203	-15.455	-22.431
Ca/Cl	-0.157	-0.303	-0.304	-0.157
Na/Cl	0.793	1.752	1.378	1.755
NO_3/K	1.423	0.891	0.551	0.856
Na/K	0.157	-1.476	2.063	-1.987
K/Cl	0.151	0.124	0.122	0.075
Ca/Mg	0.085	0.681	0.454	0.219
K/P	4.396	0.304	-0.017	0.267
NO_3/Cl	-0.035	0.013	0.039	-0.046
Ca/K	-0.188	0.257	0.454	0.322
Cl/ SO_4	-0.003	-0.413	-0.819	-0.690
Na+K	-0.008	-0.002	-0.004	0.002
Ca/Na	1.733	2.564	2.385	3.273
SAR	4.805	5.099	5.396	5.564

(유의확률=99.9%). 판별함수 1(DF1)은 고유값이 3.343이고 총 분산(total variance)의 69.1%를 설명하며 매우 높은 유의성(99.99%)을 가짐을 알 수 있었다. Table 5a의 표준화된 판별함수계수로부터 판별함수 1은 전기전도도(EC)와 NO_3^- 가 가장 중요한 판별 변수임을 알 수 있었으며, 그 다음으로 총인, 작열감량(LOI), pH, Ca가 판별함수 1에 영향을 미침을 알 수 있었다. 앞서 언급한 바와 같이 경작에 의해 투입되는 비료에 의해 토양 특성이 차이를 보여주는데, 이러한 특징에 의해 그룹간 토양특성이 차이가 존재함을 판별함수를 통해 확인할 수 있었다. 판별함수 1이 비료성분인 NO_3^- , 총인(P_{tot})에 의해 주로 설명이 되어진다는 사실은 특히 비료성분의 투입에 의해 토양용출성분이 토지

Table 5. Standardized discriminant function coefficients for DF1, DF2, and DF3 from discriminant analysis. (a) Discriminant analysis I: contents of soil components (b) Discriminant analysis II: ratios of soil components.

(a) Discriminant analysis I: contents of soil components

Variable	DF1	DF2	DF3
EC	1.453	-0.846	1.620
IL	0.605	0.088	0.363
pH	-0.561	0.100	0.031
Mg	-0.029	0.041	0.220
Ca	-0.522	0.193	-0.086
Na	-0.494	-0.766	-0.973
K	0.078	1.048	-0.644
F	-0.143	-0.053	-0.249
Cl	0.301	0.806	0.528
NO ₃	-1.466	0.553	-0.430
SO ₄	0.301	-0.754	0.476
P _{tot}	-0.805	-0.201	-0.256

(b) Discriminant analysis II: ratios of soil components

Variable	DF1	DF2	DF3
Ca/Cl	-0.083	1.429	1.089
Na/Cl	-0.749	-0.455	-0.642
NO ₃ /K	0.144	0.409	-0.122
Na/K	0.373	-0.502	0.618
K/Cl	0.263	0.006	-0.187
Ca/Mg	-0.096	-0.508	-0.760
K/P	0.363	0.560	0.080
NO ₃ /Cl	0.144	-0.869	-0.295
Ca/K	-0.186	-0.374	0.099
Cl/SO ₄	0.199	0.360	-0.289
Na+K	-0.399	-0.077	0.080
Ca/Na	-0.773	-0.122	0.164
SAR	-0.124	-0.097	0.168

이용별로 차이를 보여주는 것임을 확인할 수 있는 것이다. 판별함수 2(DF2)는 고유값이 1.089이고 총 분산(total variance)의 22.5%를 설명하며 판별함수 1과 마찬가지로 매우 높은 유의성(99.99%)을 가진다. 판별함수 2는 표준화된 판별함수계수가(Table 5) K⁺가 가장 높은 값을 가지며 전기전도도(EC), Cl⁻, Na⁺, SO₄²⁻ 순서로 중요성을 가짐을 알 수 있었다. Na⁺와 Cl⁻은 임야와 경작지를 구분하는 중요한 변수임이 앞 절에서 확인된 바 있으며 판별함수 2는 이러한 특징을 잘 나타낸다.

판별함수 1(DF1)과 판별함수 2(DF2)에 대한 각 그룹별 점수(case score) 분포와 각 변수들의 판별함수 인자적재(factor loadings) 값은 Fig. 4에 나타나 있으며, 토지이용에 따라 각 그룹은 판별함수 1과 2에 의하여 효과적으로 구분됨을 알 수 있다. Fig. 4a에서 판별함수 1은 총인, pH, NO₃⁻, K⁺ 등에 의해 양의 영

향을, Cl⁻에 의해서는 양의 영향을 받으며, SO₄²⁻는 판별함수 2에 가장 큰 음의 영향을 미친다. 판별함수 1은 밭, 과수원, 논, 임야 토양 순서로 증가하며, 이에 의해 경작지와 임야가 구분되어진다(Fig. 4b). Fig. 4b에서 밭과 과수원 토양은 일부 중복되며 부분적으로 유사한 특징을 가짐을 확인하였다. 논 토양은 판별함수 2에 의해 밭, 과수원 및 임야토양과 명확하게 구분되어지는데, 이는 판별함수 2에서 음의 영향을 미치는 Na⁺와 SO₄²⁻가 논 토양에서 판별함수 2의 감소에 중요한 역할을 하기 때문인 것으로 판단되었다. 산성환경 하에 놓이는 다른 밭과 과수원 토양과는 달리 논 토양은 담수조건하 환원환경에서 황화광물의 침전이 발생하여 용출 실험시 SO₄²⁻의 증가가 나타난다. 임야토양도 산화환경에 놓이며, 따라서 판별함수 2는 토양의 산화환원 조건을 지시하는 인자로 사용될 수 있다.

관별분석은 각 토양시료들이 현장조사에서 얻어진 토지이용 특성과 토양 특성 자료에 의한 관별분석 결과가 어느 정도 일치하는가를 확인할 수 있게 해준다. Table 6a은 초기 토지이용도 자료와 관별분석에 의한 예측자료가 어느 정도 오차를 보여주는지를 나타내는 혼돈 행렬(confusion matrix)이다. 관별분석 결과 전체 자료의 초기 설정값과 예측값 사이의 오차는 14.06%이며, 관별분석에 의해 예측된 자료는 임야와 밭 토양으로 분류되는 시료가 각각 34, 38개로 약간씩 증가하며 밭과 논토양은 모두 28개로 초기의 32개보다 12.5%씩 감소하였다. 이러한 것은 현장조사에 확인할 수 있었듯이 과수원 토양으로 분류된 수목원들이 논에서 형질변경을 한 것들에 의해 나타나는 특성으로 사료된다. 또한 밭의 경우에도 오랫동안 사용하지 않아 임야와 같이 된 곳들이 있어 이러한 특징을 나타내는 것으로 판단된다. 이러한 토양특성에 의한 관별분석 결과는 토지이용의 변화를 추정할 수 있는 기법으로 사용될 수 있을 것이다.

3.3.2. 정준관별분석 II: 토양 성분비 자료

토양 특성을 나타내는 성분비의 자료는 단일 성분과는 달리 성분 상호간의 상대적 값을 나타내어 토지이용 특성을 나타낼 수 있는 것이다. Spruill *et al.* (2002)는 지하수의 각 성분비를 이용한 분류도(classification-tree) 방법을 적용하여 질산염의 기원을 추적한 연구를 수행한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 토양 용출 실험에서 얻어진 자료를 이용하여 Ca/Cl, Na/Cl, NO₃/K, Na/K, K/Cl, Ca/Mg, K/P, NO₃/Cl, Ca/K, Cl/SO₄, Na+K, Ca/Na, SAR를 구하여 관별분석을 수

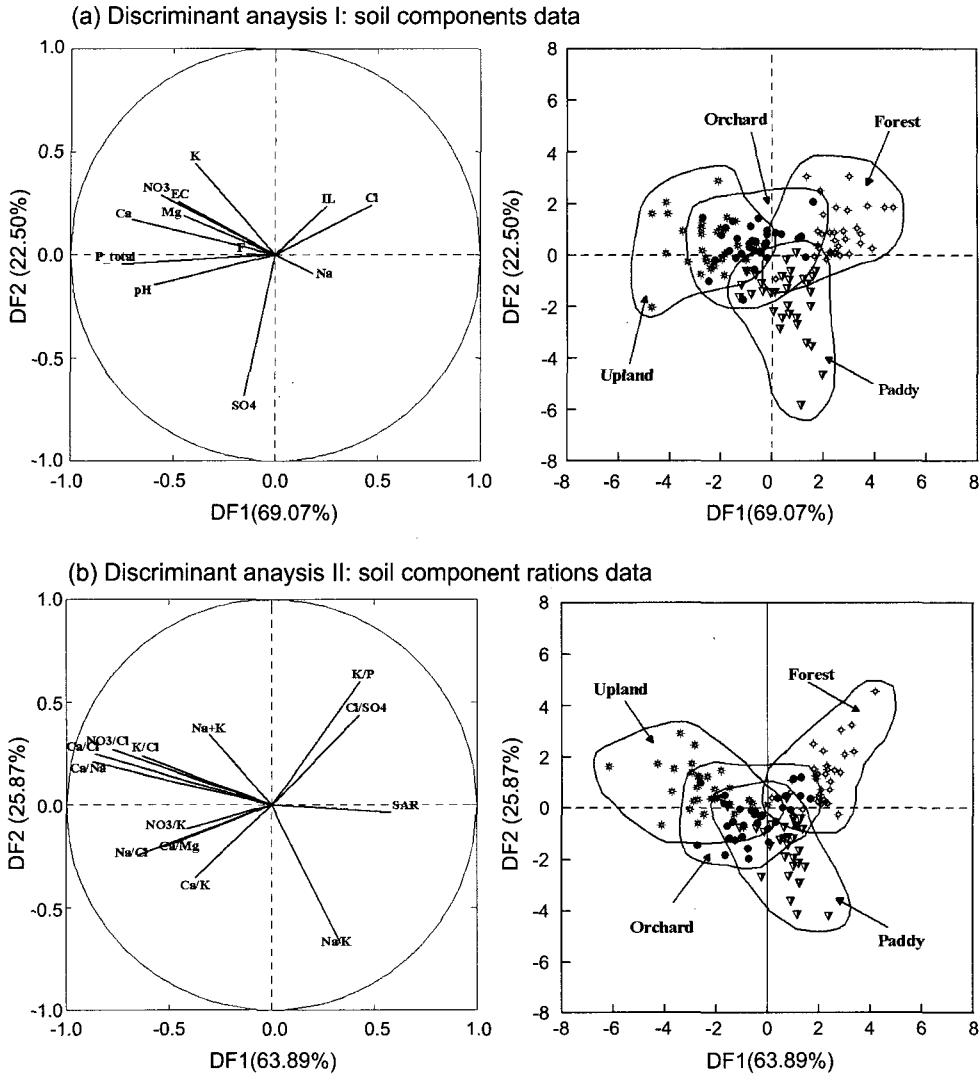


Fig. 4. The results of discriminant analysis for land use of soil extraction data.

행하였다. 이들 성분중 Ca/Na는 양이온 교환능력을 나타내며 나머지 변수들은 대부분 시비에 의한 영향을 보여주는 것이다. Cl의 경우 비반응 성분이므로 이에 대한 양이온의 값은 이온교환 반응 등의 지화학적 과정을 나타내는 것이다. 이들 변수 중 나트륨 흡착비(SAR, sodium adsorption ratio)는 관개용수의 적합도를 평가하는데 사용되는 변수로 다음과 같이 정의되며, m_i 는 i 성분의 몰농도(mmol/L)이다(Appello and Postma, 1993).

$$SAR = \frac{m_{Na^+}}{\sqrt{m_{Ca^{2+}} + m_{Mg^{2+}}}}$$

토양 성분비 자료를 이용한 판별분석 결과 구해진 4개의 그룹에 대한 분류함수계수(classification function coefficients) Table 4b에 나타나 있다. 성분비를 이용한 판별분석 결과 초기의 판별함수(discriminant function) 2개는 그룹간 총 분산의 89.8%를 설명한다(유의확률 = 99.9%). 판별함수 1(DF1)은 고유값이 2.916이고 총 분산(total variance)의 63.9%를 설명하며 토양 성분을 이용한 판별분석과 마찬가지로 매우 높은 유의성(99.99%)을 가짐을 알 수 있었다. Table 5b의 표준화된 판별함수계수로부터 판별함수 1은 Ca/Na와 Na/Cl이 가장 중요한 판별 변수임을 알 수 있었으며, 그 다음으로 Na/K, K/P, Na+K가 영향을 미치지만 앞의 두 번

Table 6. The confusion matrix from canonical discriminant analysis. Apparent error rates are (a) 14.06% and (b) 18.75%. (a) Discriminant analysis I: contents of soil components (b) Discriminant analysis II: ratios of soil components.

(a) Discriminant analysis I: contents of soil components

		to Forest	to Orchard	to Paddy	to Upland	Sum
from Forest	no	31	1	0	0	32
	%	24.22	0.78	0.00	0.00	25.00
from Orchard	no	2	27	1	2	32
	%	1.56	21.09	0.78	1.56	25.00
from Paddy	no	1	3	27	1	32
	%	0.78	2.34	21.09	0.78	25.00
from Upland	no	0	7	0	25	32
	%	0.00	5.47	0.00	19.53	25.00
Sum	no	34	38	28	28	128
	%	26.56	29.69	21.88	21.88	100.00

(b) Discriminant analysis II: ratios of soil components

		to Forest	to Orchard	to Paddy	to Upland	Sum
from Forest	no	30	1	1	0	32
	%	23.44	0.78	0.78	0.00	25.00
from Orchard	no	4	24	1	3	32
	%	3.13	18.75	0.78	2.34	25.00
from Paddy	no	0	7	25	0	32
	%	0.00	5.47	19.53	0.00	25.00
from Upland	no	0	7	0	25	32
	%	0.00	5.47	0.00	19.53	25.00
Sum	no	34	39	27	28	128
	%	26.56	30.47	21.09	21.88	100.00

수에 비해 영향이 작음을 알 수 있었다. 판별함수 2(DF2)은 고유값이 1.181이고 총 분산(total variance)의 25.9%를 설명하며 높은 유의성(99.99%)을 가진다. 판별함수 2는 표준화된 판별함수계수가 Ca/Cl이 NO₃/Cl이 다음으로 높은 값을 보여주었다(Table 5b).

성분비를 이용한 판별함수 1(DF1)과 판별함수 2(DF2)에 대한 각 그룹별 점수(case score) 분포와 각 변수들의 판별함수 인자적재(factor loadings) 값은 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5b는 판별함수 1과 2 사이의 상관관계이며 토양 성분 특성에 의한 판별분석결과를 나타내는 Fig. 4와 거의 유사한 특징을 보여준다. Fig. 5에서 밭 토양은 Ca/Cl, Ca/Na, K/Cl, NO₃/Cl에 의해 크게 영향을 받으며 Ca²⁺, K⁺, NO₃⁻가 비료의 영향을 나타내므로 이는 경작에 의한 것으로 사료된다. 논 토양은 판별함수 2의 감소에 영향을 받으며 Na/K의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 임야 토양은 K/P와 Cl/SO₄에 의해 증가되어졌다.

성분비를 이용한 판별분석에서 전체 자료의 초기 설정값과 예측값 사이의 오차는 18.75%로 성분비를 이용한 것에 비해 오차가 큰 값을 가졌다(Table 6b). 판별

분석에 의해 예측된 자료는 임야와 밭 토양으로 분류되는 시료가 각각 34, 39개로 약간씩 증가하며 밭과 논토양은 각각 27, 28개로 초기의 32개보다 약 10% 이상 감소하였다. 이러한 결과는 앞서 토양 성분을 이용한 자료와 유사한 것이다. 따라서 토양 성분비를 이용한 판별분석 역시 토지이용 특성을 구분하는데 있어 좋은 기법으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

연구지역에 발달되어 있는 토양의 토성은 모암의 물리화학적 특성을 반영하며, 안산암에서 발달된 토양이 화강암에서 발달한 것보다 상대적으로 세립질 입도를 가지며 유색광물의 양도 많음을 알 수 있었다. 또한 안산암에서 발달한 토양은 실트나 점토의 양이 상대적으로 많은 점토질 함량이 높아 상대적으로 투수성이 낮으며 이에 의해 침투되는 강수나 관개용수에 의해 무기성분이 지하수나 지표수로의 유출이 상대적으로 적어 안산암 발달 토양에서 높은 양이온 및 전기전도도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 논, 밭 및 과수원

토양 내 염류집적(EC, 양이온, 음이온)과 pH 증가는 대부분 경작과정에 투입된 비료의 영향에 의한 것이며 임야 토양에 비해 상대적으로 낮은 유기물 농도는 경운에 의한 유기물의 산화 축진 및 작물 수확에 기인하는 것이다. 토지이용별 무기성분의 함량은 밭>과수원>논>임야 토양 순으로 나타났으며 경작지 토양중 논에서 가장 낮은 값을 보이는 것은 작물 생육 기간 동안의 담수 상태에 의해 비료 성분들이 지하나 지표수로 유출되었기 때문으로 판단되었다. 논 토양의 높은 황산염(SO_4^{2-}) 함량은 담수 상태의 환원조건에서 침전된 황화광물형태가 산화조건의 토양 건조 및 용출 실험에서 다시 황산염 형태로 재용해되는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

주성분 분석 결과는 토지 이용이나 지질에 따른 토양 특성을 비교적 명확하게 나타내었다. 주성분 분석 결과에 의하면 주성분 1은 시비와 광물 풍화작용의 영향을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 주성분 1은 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 가 큰 영향을 받으며, 이는 비료에 의해 투입된 NH_4^+ 가 점토광물 층간내 Ca^{2+} 를 치환하여 용출시키는 양이온 교환반응도 포함하는 것임을 지시하는 것이다. Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 와 NO_3^- 는 매우 높은 상관계수(0.91, 0.92)도 양이온 교환반응의 영향을 확인할 수 있었다.

토양 용출 성분과 성분비를 이용한 두 종류의 판별 분석결과는 모두 토지이용별로 판별함수 1과 2에 의해 뚜렷하게 구분될 수 있음을 확인하였다. 토양 성분을 이용한 판별분석에서 판별함수 1은 경작에 의한 비료의 영향을 나타내는 총인, pH, NO_3^- , K^+ 등에 의해 영향을 받으며 밭, 과수원, 논, 임야 토양 순서로 증가함을 알 수 있었다. 또한 판별함수 2는 토양의 산화환원 조건을 지시하는 인자로 사용될 수 있음을 확인하였다. 성분비를 이용한 판별분석결과 밭 토양은 Ca/Cl , Ca/Na , K/Cl , NO_3^-/Cl 에 의해 크게 영향을 받으며 이는 경작에 의한 것으로 판단되었다. 두 종류의 판별분석에서 토지이용 특성의 조사 자료와 예측 자료는 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며 토지 이용의 변화를 확인할 수 있는 방법으로 이용될 수 있을 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원(KIGAM)의 기관고유사업인 “대도시 지질환경 오염관리개선 기술 연구(부산지역)”에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김연태, 우남철 (2003) 축사가 밀집된 농촌지역 천부지하수의 질산염 오염특성. 한국지하수토양환경학회지, 8권, p. 55-67.
- 김의선, 황진연, 김진섭, 함세영, 김재곤 (2001) 부산 북부 지역의 모압유형에 따른 토양의 구성광물 및 화학성분, 한국광물학회지, 14권, p. 58-72.
- 안재환 (2001) 비점오염원 유출부하 및 기여율. 건설기술정보, p. 34-38.
- 임동규, 강항원, 정연태, 박경배, 박무언 (1997) 밀양 봉황천 수계지역의 토지이용현황과 토양특성. 한국토양비료학회지, 30권, p. 280-287.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. (1993) Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Reotterdam, Netherlands, 536p.
- Brye, K.R., Andraski, T.W., Jarrell, W.M., Bundy, L.G., and Norman, J.M. (2002) Phosphorous leaching under a restored tallgrass prairie and corn agroecosystems. J. Environ. Qual., v. 31, p. 769-781.
- Cao, Z.H., Huang, J.F., Zhang, C.S. and Li, A.F. (2004) Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land. Environ. Geochem. Health, v. 26, p. 97-103.
- Davis, J.C. (1986) Statistical and data analysis in geology. Wiley, New York, 646p.
- Emmerling, C. and Udelhoven, T. (2002) Discriminating factors of the spatial variability of soil quality parameters at landscape-scale. J. Plant Nutr. Soil Sci., v. 165, p. 706-712.
- Gimenez, E. (1994) Caracterizacion hidrogeoquimica de los procesos de salinizacion del acuífero detritico costero de la Plana de Castellon. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, p.390 (in Spanish).
- Kim, J.G., Kim, T.H., Lee, J.-S., Ko, K.-S., Lee, G.H., Chon, C.-M., Cho, C.H. and Cheong, Y.W. (2005) Characteristics and phosphorous accumulation of surface soil in relation with geology and land use. Soil Sci. Plant Nutr., submitted.
- Lambrakis, N., Antonakos, A. and Panagopoulos, G. (2004) The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research. Water Res., v. 38, p. 1862-1872.
- Maguire, R.O. and Sims, J.T. (2002) Soil testing to predict phosphorus leaching, J. Environ. Qual., v. 31, p. 1601-1609.
- NIAS (2000) Taxonomical classification of Korean soils. National Institute of Agricultural Science, 809p.
- Olsen, S.R. and Sommers, L.E. (1982) Phosphorous. In Page, A.L. et al. (ed) Methods for soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties. 2nd (ed.), ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, p. 403-430.
- Schroeder, P.D., Radcliffe, D.E., Cabrera, M.L. and Belwe, C.D. (2004) Relationship between soil test phosphorus and phosphorus in runoff: Effects of soil series variability, J. Environ. Qual., v. 33, p. 1452-1463.
- Splechna, B.E. and Klinka, K. (2001) Quantitative characterization of nutrient regimes of high-elevation forest soils in the southern coastal region of British Columbia, Canada. Geoderma, v. 102, p. 153-174.

- Spruill, T.B., Showers, W.J. and Howe, S.S. (2002) Application of classification-tree methods to identify nitrate sources in ground water. *J. Environ. Qual.*, v. 31, p. 1538-1549.
- Stezenbach, K.J., Farnham, I.M., Hodge, V.F. and Johannesson, K.H. (1999) Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentration to evaluate groundwater flow in a regional aquifer. *Hydrol. Process.*, v. 13, p. 2655-2673.
- Sun, B., Zhou, S. and Zhao, Q. (2003) Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geochemical statistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, v. 115, p. 85-99.
- Velasquez, E., Lavelle, P., Barrios, E., Joffre, R. and Reversat, F. (2005) Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS. *Soil Biol. Biochem.*, in press.
- Wilson, D.I. (2002) Derivation of the chalk superficial deposits of the North Downs, England: an application of discriminant analysis. *Geomorphology*, v. 42, p. 343-364.

2005년 3월 14일 원고접수, 2005년 4월 21일 게재승인.