

토양생태 등급 정보가 친환경도로노선 선정에 미치는 영향에 관한 민감도 분석

기동원¹ · 강호근² · 이상은² · 허 준¹ · 박준홍^{1*}

¹연세대학교 토목환경공학과, ²아주대학교 환경건설교통공학부

Sensitivity Analysis of the Effect of Soil Ecological Quality Information in Selecting Eco-Friendly Road Route

Dongwon Ki¹ · Ho Geun Kang² · Sang Eun Lee² · Joon Heo¹ · Joonhong Park^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

²Department of Environmental and Civil and Transportation Engineering, Ajou University

ABSTRACT

Soil ecology has important roles in global ecosystems. However, soil ecological quality information is being ignored when assessing ecological impact of construction actions. And methods for classifying and assessing soil ecological quality have been very little established in comparison to those for animal and plant ecosystems. In this study, it was examined whether soil ecological quality information has influence on determining an eco-friendly route for a road construction project. For this, sensitivity analysis was systematically performed by varying the relative significance (weights) of soil ecological quality information among natural environmental and ecological factors. When the weight of soil ecological quality was greater than just 14%, the soil ecological quality information significantly influenced the determination of the eco-friendly routes for a specific road construction project. This demonstrates that soil ecological quality information has to be considered for more reliable environmental impact assessment, and also supports the validity of use of soil ecological quality information and its mapping technique in planning and siting of eco-friendly construction projects.

Key word : Soil ecological quality, Microbial diversity, Ecological information technology, Environmental GIS, Artificial intelligence algorithm, Eco-friendly road route, Environmental quality class

요 약 문

국토개발사업의 사전 계획 과정에서 개발할 것인지 보전할 것인지에 대한 의사결정은 인간 활동에 영향을 줄 수 있는 편리함과 이익을 고려해야 할 뿐만 아니라, 자연환경생태에 미칠 수 있는 영향을 종합적으로 예측하고 평가할 수 있는 자료기반 및 통합적 평가기법을 요구한다. 동식물생태와 지형경관요소들은 환경부의 생태자연도를 통해서 환경영향평가에 현재 활용되고 있지만, 자연생태의 주요 구성요소 중 하나인 토양생태는 정량적인 자료와 지형정보와 연계된 정보의 부재로 환경영향평가에서 고려되지 못하고 있다. 본 연구에서는 토양생태를 포함한 자연환경과 생활환경 요소들을 망라해서 총체적 환경성을 평가할 수 있는 수치지도를 작성하고 토양생태 등급의 가중치가 친환경도로 노선 선정에 미치는 영향에 대해서 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 자연환경 요소들 중 토양생태의 가중치가 14% 이상 만 되어도 최적 친환경노선 선정에 민감하게 영향을 미쳤다. 본 연구의 결과를 통해서 이제까지 환경영향 평가에서 무시되어 오던 토양생태 정보가 친환경 건설개발사업의 계획 및 기초설계 단계에서 중요하게 고려되어야 할 생태요소임을 입증할 수 있었다.

주제어 : 토양생태질, 미생물 다양성, 환경정보공학, 환경GIS, 인공지능알고리즘, 친환경도로노선, 환경지표수치지도

*Corresponding author : parkj@yonsei.ac.kr

원고접수일 : 2008. 1. 28 심사일 : 2008. 4. 28 게재승인일 : 2008. 5. 2

질의 및 토의 : 2008. 8. 31 까지

1. 서 론

1987년 브룬트란트 보고서(Brundtland Report)의 환경과 개발에 관한 세계 위원회(World Commission on Environmental and Development, 1987)에서 처음 사용되기 시작하였던 '지속가능한 개발'이라는 용어는 환경과 경제개발을 조화롭게 유지하는 환경친화적인 개발을 의미한다. 국내에서도 도로건설, 간척사업, 신도시 개발, 댐 건설 등의 대형 국토개발사업 계획 시 지속가능한 자연생태환경을 추구하고 있다(강호근 등, 2007; 문석웅, 2007). 개발과 보전 사이의 의사결정은 개발이 인간 활동에 주는 편익 뿐 아니라 개발에 따라서 발생할 수 있는 생태자원의 훼손과 손실을 기술적/과학적으로 예측평가하고, 이러한 사전 평가 결과를 토대로 사업 관련 당사자들과 전문가 집단의 공개적인 토의를 통해서 최종 결정하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 하지만 체계적인 친환경성 평가가 신뢰성 있게 이루어지기 위해서는 사업대상 지역의 생태자원과 질에 대한 과학적이고 정량적인 정보가 필요하며, 지리정보체계(Geographical Information System, GIS)와 연계한 지도가 요구된다(기동원 등, 2007; 박준홍 등, 2006).

국내에서 동식물생태(노태호 등, 2007; 정홍락 등, 2006), 하천생태(배연재 등, 2003; 조용현 등, 2001) 및 습지생태(강수진, 2004)의 경우 생태가치에 대한 총체적 평가 기법 연구와 등급화 연구 등이 수행된 바 있지만, 자연생태의 주요 구성요소인 토양생태는 환경영향평가에서조차 고려되고 있지 않으며 토양생태의 질에 대한 기초자료 구축도 미흡한 상황이다. 토양생태를 대표할 수 있는 토양미생물은 전체 자연생태계에서 분해자이자 생명체에 필요한 탄소 및 질소 순환의 원동력으로서 중요한 역할을 하며, 오염된 환경생태를 복원하는 등의 순기능이 있다. 이러한 과학적 이유로 양질의 토양생태는 중요한 생태자원이라 할 수 있으며, 친환경적 건설사업 계획 단계에서 토양환경생태에 미치는 영향에 대한 체계적인 평가가 요구된다. 토양생태가 친환경적 건설사업에서 중요한 영향인자라면 현재 환경영향평가에서 고려되고 있는 동식물 위주의 생태자연도(Ecological Map) 같은 타 환경성 요소들과 접목되어 사용되어야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 토양생태질에 대해 정량적으로 지표화(등급화)하고, GIS와 연계하여 수치지도를 작성하는 방법에 대해 제안한 바 있다(기동원, 2007).

산림지역 도로노선의 친환경성을 최적화하기 위해서, 자연환경과 생활환경 요소들을 망라하여 총체적 환경성 등급을 산정하고, 이에 대해 지리정보와 연계한 지도를 작

성하여 도로에 의해 훼손되는 지역의 총체적 환경성 등급이 최소화가 되는 도로노선을 선정하는 정보공학적 기술을 개발한 연구가 있다(최유경, 2007). 하지만, 기존연구에서는 친환경도로노선 선정에 토양생태의 정보가 포함되지 않았다. 토양생태의 정보를 기존의 다른 환경성 요소들과 접목해서 다양한 환경 항목들의 총체적인 질을 평가하려면, 토양생태가 자연환경요소들 중에서 얼마나 중요한지에 대한 정량적인 값, 즉 가중치에 대한 정보가 필요하다. 환경영향평가의 과정에서 환경인자의 가중치에 대한 정보 획득이 필요하다면 Analytical Hierarchy Process (AHP)를 흔히 사용한다(이관규, 2001). 기존의 환경영향평가에서 다루어져 왔던 환경요소들에 대해서는 그 정의가 명확하고 일반적인 환경 및 도로 전문가들에게 그 인식도가 높으므로, AHP 설문조사결과에서 세부전공의 전문가별로 큰 변동이 없는 듯하다. 하지만 토양생태의 경우는 다를 수 있다. 토양생태는 기존의 환경영향평가나 친환경도로설계 관점에서 보면 새로운 자연환경 요소이고, 도로전문가들 사이에서 그 인식도가 매우 낮은 것 같다. 이러한 경우 AHP는 설문조사 대상군의 선호도에 따라서(배혜진·김석태, 2007) 가중치 도출 결과가 민감하게 변동할 수도 있다. 예를 들어서 토양환경 전문가이면서 도로공학 비전문가인 경우에는 토양생태의 가중치를 크게 둘 것이고, 기존의 도로개발 중심적인 전문가 집단의 경우에는 토양생태의 가중치를 낮게 두거나 무시하려 할 것이다. 이러한 기존 방법상의 한계를 극복하여 새로운 자연환경 요소인 토양생태의 가중치에 대한 정보를 획득하기 위해서는 토양생태의 가중치를 임의로 변화하면서 친환경성에 관련된 의사결정에 영향을 미치는 지를 평가하는 방법이 보다 더 합리적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 토양생태의 가중치에 대한 정보를 획득하기 위해서 기존의 AHP 접근방식 대신에 토양생태의 가중치에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 자연환경 중 토양생태의 중요도(가중치) 변동에 따른 친환경도로노선 선정에 미치는 영향을 GIS 기반의 모의실험을 통해서 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 선정

토양생태 등급 정보가 친환경 도로노선 선정에 미치는 영향에 관한 민감도 분석을 수행할 사례적용지역은 국도 37호선(거창~과주) 중 경기도 양평군 옥천면 용천리에서 가평군 설악면 신천리 구간에 이르는 총연장 12.90 km의

2차선 도로를 건설하는 산림 위주의 지역이며, 시점과 종점의 정보를 알 수 있는 계획노선을 포함하는 12 km × 12 km 지역이었다. 상기지역을 연구적용 지역으로 선택한 이유는 다음과 같다. 첫째, 복잡한 도시·사회적 요소들의 영향이 최소화 될 수 있는 산림지역이라는 점이다. 둘째, 본 연구진의 선행연구(최유경, 2007)에서 같은 지역을 대상으로 자연환경과 생활환경에 대한 자료가 기 확보 되었고, 다양한 환경요소들 간의 가중치 또한 결정되었으므로, 이러한 주요 환경 자료들에 대한 추가 연구가 불필요하다는 점이다.

2.2. 토양생태 등급 수치지도 작성 방법

토양생태질의 등급 정보를 획득하고 이를 지도화하는 방법은 본 연구진의 선행연구(기동원 등, 2007; 기동원, 2007)에서 개발한 방법을 사용하였다. 먼저 토양생태질을 정량적으로 등급화하기 위해서 토양미생물 다양성을 지표로 선정하였다(Römbke and Breure, 2005; Loreau, 2001; Torsvik and Øvreås, 2002; Turco et al., 1994). 토양시료 내 토양미생물 다양성을 측정하기 위해 정량적이고 경제적인 분자생물학적 기법인 terminal restriction fragment length polymorphism(T-RFLP)을 본 연구에서 사용하였다. 산림지역의 토양시료를 196개 지점에서 획득해서 토양 DNA를 추출한 후, 16S rDNA를 PCR(polymerase chain reaction) 방법으로 증폭하여 T-RFLP 분석을 수행하고, 미생물 다양성 산정을 위해 Shannon Index를 계산하였다(Atlas and Bartha, 1997; Dunbar et al., 2001; Nielson and Winding, 2002; Winding et al., 2005). 산정된 토양미생물 다양성 수치를 전체 시료 수(196개)에 대한 백분위수(percentile) 기반으로 3 등급화하였다(기동원, 2007). 전 국토의 모든 지역에 대해 토양미생물 다양성을 측정하여 지도화할 수 없기 때문에 기존

에 존재하고 있는 GIS 기반의 토양특성 자료들(농업토양 정보시스템, ASIS)과 현장 측정된 토양생태 등급 정보 간의 관계를 이용하여 인공지능 기법 중 하나인 의사결정나무 알고리즘을 학습시키고, 학습된 의사결정나무 모델을 이용해서 미측된 지역의 토양생태 등급 정보를 산정하였다. 이렇게 산정된 토양생태 등급 정보를 지형공간 정보와 연계하여 지도화 하기 위해서 ArcGIS 프로그램(ESRI, version 9.2)을 사용하였다.

2.3. 총체적 환경 지표 수치지도 작성과 친환경도로노선 선정 모의실험

친환경도로노선 선정을 위해서는 다양한 환경요소들을 반영해서 총체적인 환경성을 나타내는 지표를 산정하여야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이, 총체적인 환경 지표를 결정하는 환경요소들을 1 단계에서 자연환경요소과 생활환경요소로 크게 구분하고, 2단계에서는 자연환경은 (1) 지형지질, (2) 동식물상과 (3) 토양생태로, 생활환경은 (1) 수질, (2) 소음진동과 (3) 대기질로 세부 구분하였다. 1단계에서 자연환경(C₁)과 생활환경(C₂)의 가중치로서 각각 0.64 와 0.36을 사용하였다(최유경, 2007). 본 연구에서는 자연환경 내 토양생태의 중요도를 평가하는 것이 목적이므로, 생활환경의 세부요소들의 가중치는 고정하고, 자연환경의 세부요소들의 가중치만 변화하였다. 자연환경 세부요소를 중 토양생태 가중치의 백분율은 0%, 10%, 13%, 14%, 16%, 17%, 18%, 20%, 40%, 60%, 80%와 100%로 변화 시켰고, 이에 따라서 지형지질(C₁₁)과 동식물상(C₁₂)에 대한 가중치의 합을 변화시켰다(Table 1). 여기서 자연환경 세부요소인 지형지질(C₁₁), 동식물상(C₁₂)과 토양생태(C₁₃)의 가중치의 합이 1.0 (100%)이 되도록 하였고, 지형지질의 가중치(C₁₁)와 동식물상의 가중치(C₁₂) 간의 비율은 3 : 7로 고정하였

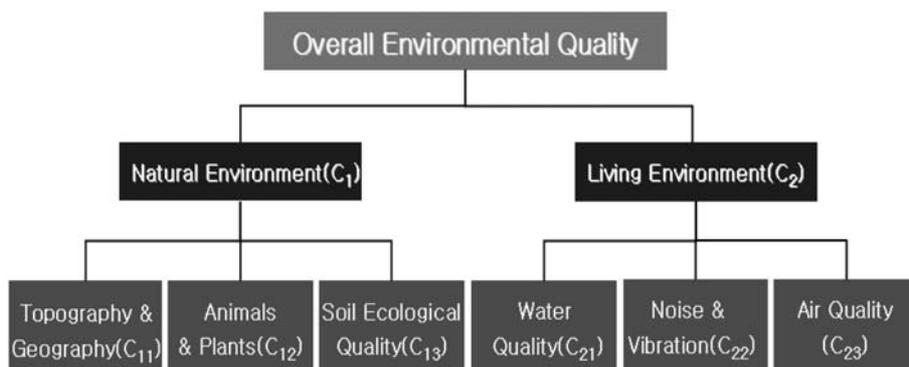


Fig. 1. A hierarchical structure of overall environmental quality and its specific eco-environmental properties.

Table 1. The natural environment-properties and their weights used in the GIS-based simulation for sensitivity analysis in this study

Natural Environment- Properties	Weights of natural environment-properties (%)											
Topography & Geography	30	27	26.1	25.8	25.2	24.9	24.6	24	18	12	6	0
Animal & Plant	70	63	60.9	60.2	58.8	58.1	57.4	56	42	28	14	0
Soil Ecological Quality	0	10	13	14	16	17	18	20	40	60	80	100

다. 이 3:7 고정비율은 최유경의 연구결과(2007)에 근거해서 산정하였다. 총체적 환경지표에 미치는 자연환경 세부요소들의 가중치를 계산하는 예를 보면 다음과 같다. 자연환경 세부요소 중 토양생태의 가중치가 80%일 경우 (Table 1), 총체적 환경지표에 미치는 토양생태의 가중치 (C_{13})는 전반적인 자연환경의 가중치($C_1 = 0.64$)에 0.8을 곱한 값이다($C_{13} = 0.64 \times 0.8 = 0.512$). 같은 방식으로 자연환경 중 지형지질과 동식물상의 가중치에 대한 비율은 6%와 14% 이므로, 지형지질과 동식물상이 총체적 환경성 지표에서 차지하는 가중치는 각각 $C_{11} = C_1 \times 0.06 = 0.0384$ 와 $C_{12} = C_1 \times 0.14 = 0.0896$ 과 같이 계산할 수 있다. 그리고 총체적 환경지표에 미치는 자연환경 세부요소들의 가중치의 합 ($C_{11} + C_{12} + C_{13}$)은 C_1 값(0.64)과 같음을 알 수 있다. 이와 같은 방식으로 자연생태 중 토양생태의 가중치를 임의로 변동하면서(Table 1), 차후 친환경도로노선 선정을 위한 GIS기반의 모의실험에 필요한 C_{11} , C_{12} , C_{13} 값을 계산하였다.

6개의 세부환경요소가 총체적으로 반영되고 환경성을 등급화해서 나타낸 수치지도의 작성은 각 세부환경요소들의 가중치를 고려하여 등급정보를 중첩(overlaying)하는 과정을 통해 수행되었으며, 이 지도를 '총체적 환경지표 수치지도'라 명하였다(Fig. 3). 6개의 환경요소의 등급정보를 중첩하기 위해서 ArcGIS 프로그램(ESRI, version 9.2)의 Spatial Analyst Tools의 Reclass 옵션을 이용하였으며, 중첩된 최종등급을 1등급에서 7등급으로 재분류하였고, 이를 '총체적 환경지표'라 하였다. 총체적 환경지표의 등급이 높을수록 자연환경의 질이 높은 지역을 뜻한다.

상기에서 설명한 방식으로 작성된 총체적 환경지표 수치지도를 이용하여 친환경도로노선 선정을 위해서는 다음과 같이 GIS기반의 모의실험을 수행했다. 도로노선의 친환경성을 최적화하기 위해서는 본 연구에서는 도로노선이 지나가는 지역의 총체적 환경지표의 누적값이 최소가 되도록 노선을 선정하였다. 이를 위해서 ArcGIS 기반에서 최소비용경로(Least Cost Path) 방법을 사용하였는데, 구체적으로는 ArcGIS 프로그램에서 제공하는 Spatial Analyst Tools의 Distance 옵션을 이용하였다. 이러한 프로그램의 도구를 활용해서 도로공사 시점과 종점 간의 가

상지형공간상에서 총체적 환경지표의 등급점수가 낮은 지역으로 최적노선을 추적하는 방식으로 친환경 최적화 노선을 선정하였다. 이렇게 선정된 친환경 최적화 노선에 토양생태의 가중치 변화가 어떠한 변화를 주는지를 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 기존 동식물생태 등급정보와 토양생태 정보 간의 낮은 상관성

환경영향평가에 있어서 토양생태 정보의 중요성을 평가하기 전에, 현재 환경영향평가에 사용하고 있는 동식물 생태중심의 생태자연도에서 제공하는 생태등급 정보와 토양생태 정보 간의 통계적인 상관성 여부를 평가하여 보았다. 만약 생태자연도의 생태등급 정보와 토양생태 정보 간에 일정한 상관성을 보이고 있다면, 이는 생태자연도가 이미 토양생태의 질적 정보를 간접적이거나 반영하고 있다는 것을 의미한다. 만약 이 가능성이 사실이라면, 생태자연도와 같은 동식물 중심(전성우, 2001)의 기존 국가 자연생태정보 시스템에 토양생태 정보를 접할 필요성이 약해 질 것이다. 이러한 가능성을 평가하기 위해서, 본 연구에서는 총 196개 지점의 현장 토양시료에서 측정된 토양미생물 다양성 지표(Shannon Index)와 환경부 생태자연도에서 제공하는 해당지점에 대한 생태등급정보(생태자연도 등급, 식생우수성 등급과 생물다양성 등급) 간의 통계적인 상관관계를 비교분석하였다.

그 결과 토양미생물 다양성과 생태자연도 등급 간에 매우 낮은 상관성을 보였다(Fig. 2). 생태등급이 낮을수록 생태의 질이 높다는 것을 정의하므로(전성우, 2001), 만약 토양미생물 다양성과 생태등급 간에 상관성이 있다면, 생태등급정보(생태자연도 등급, 식생우수성 등급과 생물다양성 등급)의 등급수가 증가할수록 토양미생물 다양성이 감소하거나(positive correlation) 증가하는(negative correlation) 경향을 보여야 할 것이다. 하지만 Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 생태자연도의 1등급, 2등급, 그리고 3등급에 해당하는 토양미생물 다양성의 평균값은 각각 2.599, 2.717, 그리고 2.673로서 생태자연도 등급에 무관하게 그 평균값들이 유

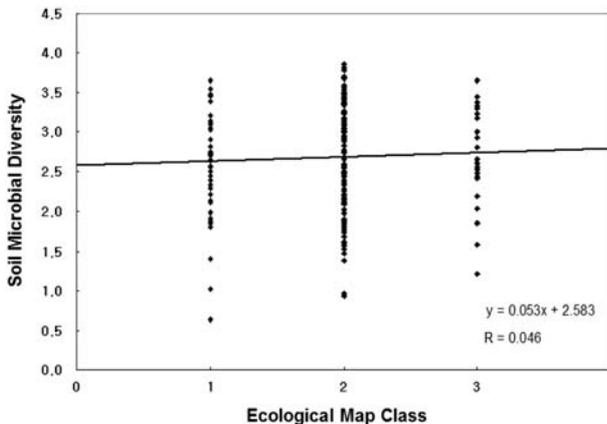


Fig. 2. Korea MOE (Ministry Of Environment) Ecological Map class information versus field-measured soil microbial diversity (N = 196). In the annotation, y indicates dependent variable(soil microbial diversity); x indicates independent variable(Ecological Map class); and R indicates correlation coefficient.

사함을 보이었다. 보다 정확한 통계적 분석을 위해 생태자연도 등급과 토양미생물 다양성 간의 상관계수(R)를 구하였다. 상관계수(R)는 0.046으로 매우 작았으며, 이를 통해 생태자연도 등급과 토양미생물 다양성 간에 상관성이 낮다고 할 수 있다. 생태자연도 등급의 주요 결정변수인 식생우수성 등급과 생물다양성 등급들도 생태자연도 등급의 결과와 유사한 낮은 상관성을 보였다(식생우수성 R=0.060, 생물다양성 R=0.026). 생물다양성은 멸종위기 동물의 종다양성을 반영한 지표이므로(전성우, 2001), 토양미생물 다양성으로 나타나는 토양생태의 질과 동물생태의 질 간에는 상관성이 낮다는 것을 의미한다.

생태자연도에서 제공하는 생태등급정보들과 토양미생물 다양성 간에 통계적 유의성이 낮다는 결과는 본 연구진의 선행연구에서 보고된 바 있다(기동원 등, 2007). 하지만 해당 선행연구에서의 결론은 다소 제한된 수(64개 지점)의 시료채취지점에, 한 시점에서 측정된 토양미생물 다양성 자료에 근거하였으므로 추후의 검증이 요구되었다. 이에 본 연구에서는 같은 연구대상 지역 내에서 확대된 수의 시료채취 지점(196개 지점)에서 별도의 두 시점(봄과 가을)에서 측정된 토양미생물 다양성 자료에 근거한 분석을 수행하였다는 점에서 기존의 선행연구와 차별화되고, 이로서 토양미생물 다양성과 생태자연도 등급 간 낮은 상관성이라는 결론을 검증하였다. 이는 생태자연도 등급에 토양생태의 정보가 간접적이라도 반영되어 있지 않고, 기존의 동식물생태 중심의 생태자연도 생태정보(전성우, 2001)와 토양생태 정보(구체적으로는 토양미생물다양성)는 서로 독립적임을 의미한다. 만약 환경생태의 영향평가에

토양생태가 중요하다고 평가되면, 생태자연도와 같은 기존의 국가정보시스템으로 토양생태의 질적 정보를 반영할 수 없고 토양생태에 대한 정량적 등급정보를 지형정보와 연계한 별도의 토양생태 등급 수치지도(기동원 등, 2007)가 필요하다는 것을 본 연구결과가 의미한다. 또한 이는 토양생태 등급수치지도를 총체적 환경지표 수치지도의 작성에 활용하는 기술개발이 필요하다는 것을 제안하고 있다.

3.2. 토양생태 등급이 친환경도로노선 선정에 미치는 영향 민감도 분석

상기의 제안은 토양생태 정보가 친환경적 건설사업 계획에 영향을 미칠 수 있다는 전제하에 그 타당성이 있다. 토양생태 정보가 친환경적 건설사업 계획에 중요하다는 전제에 대한 체계적인 평가가 필요하므로, 본 연구에서는 토양생태 정보가 친환경적 도로노선 선정에 미칠 영향에 대한 민감도 분석을 수행하였고, 그 결과 및 토의 내용을 아래에 기술하였다.

자연환경 세부기준요소 내(Fig. 1) 토양생태 등급의 가중치를 변동하면서(Table 1), 자연환경 요소들과 생활환경 요소들의 등급정보를 중첩하여 총체적 환경 지표 수치지도를 작성하였다(Fig. 3). 자연환경의 세부요소를 중 토양생태가 반영되는 가중비율이 0~20%인 경우에는 총체적 환경지표의 공간적 분포 변화가 가시적으로 크게 나타나지 않았다. 이에 반해 토양생태 가중비율이 40% 일 때에는 0%의 경우와 비교하여 총체적 환경지표의 공간적 분포에 현격한 차이가 있었다. 또한 토양생태 가중비율이 100% 일 때는 상대적으로 획일적인 분포 양상을 보였다. 총체적 환경지표 분포 변화에 대한 좀 더 자세한 분석을 위해서 토양생태의 가중치를 증가시킴에 따라서 총체적 환경지표의 등급별 점유면적의 변화 분석하였다(Fig. 4). Fig. 3에서 자연환경 세부기준요소 중 토양생태의 가중비율이 0~20%에서 그리 큰 변화가 없었던 것과 마찬가지로 Fig. 4에서도 역시 총체적 환경 지표의 각 등급의 점유면적에 변화가 없었다. 하지만 토양생태 가중비율이 20~60%에서는 5등급의 점유면적은 증가하였고, 이에 비해 4등급과 2등급의 점유면적은 상대적으로 감소하였다. 그리고 토양생태 가중비율이 60~100%에서는 가장 큰 변화가 있었는데 그전에 증가했던 5등급의 점유면적이 급격히 감소하였고, 6등급의 점유면적은 5등급 점유면적 감소에 비례하여 증가하였다. Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 종합해 보면, 토양생태 가중비율이 20% 정도까지는 총체적 환경 지표의 공간적 분포의 변화가 크진 않았지만

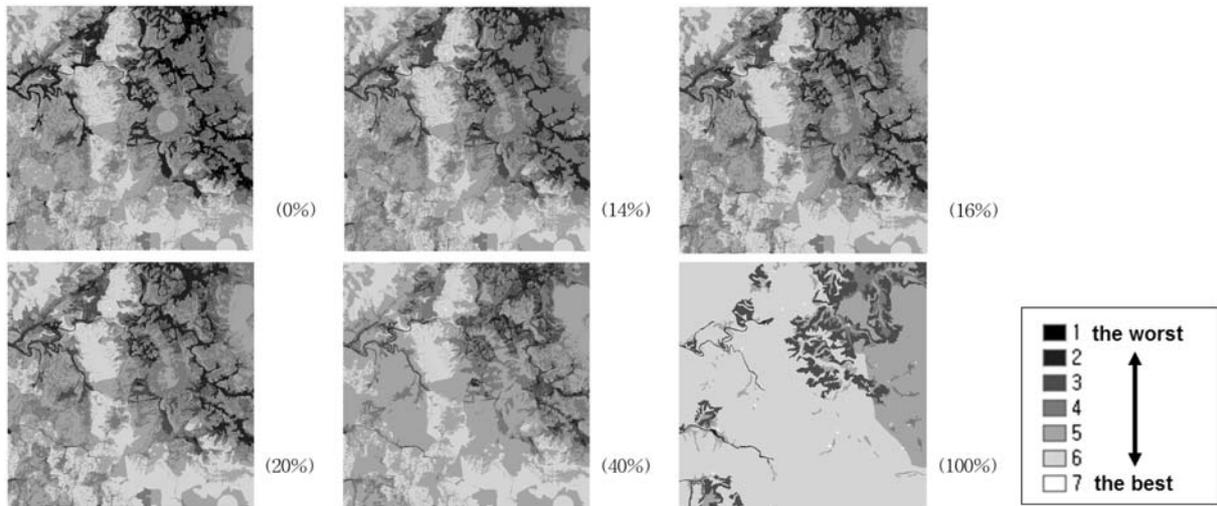


Fig. 3. Spatial distribution of overall environmental quality information in response to varying weights (% values in the parenthesis) of soil ecological quality information among natural environment factors. The numbers in the box indicate the class of overall environmental quality.

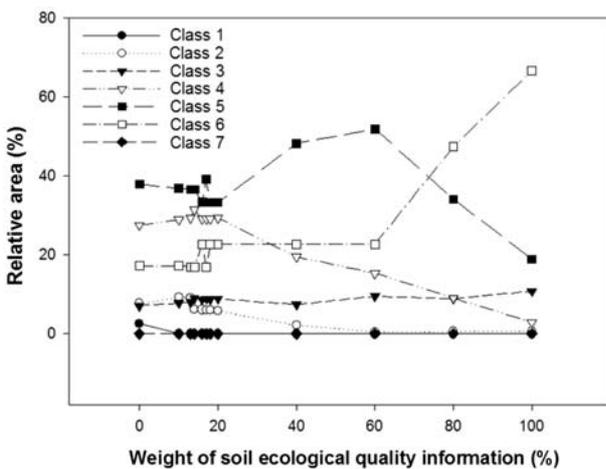


Fig. 4. Relative area for each overall environmental quality class versus weight of soil ecological quality information among natural environment factors

20~40%에서는 현격한 변화가 있었으며, 이는 총체적 환경지표 5등급의 면적비율의 증가와 총체적 환경지표 2등급과 4등급의 면적비율의 감소에 기인 한 것을 알 수 있다.

토양생태 가중비율이 60~100%에서는 가장 큰 변화가 있었는데, 이 결과에 대한 의미부여는 현실적으로 큰 의미는 없다고 판단된다. 왜냐하면 자연환경 세부요소 중 토양생태를 배제한 기존의 경우(토양생태 가중비율을 0%로 하는 경우) 동식물생태가 70%, 지형지질이 30%(최유경, 2007) 동식물생태가 지형지질요소보다 두 배 이상으로 중요하게 고려되고 있음을 알 수 있다. 비전문가에게도 관찰이 용이한 동식물생태의 중요성 보다 그렇지 않은 토양미생물의 중요성이 더욱 크게 인식되기는 쉽지 않을 것

같다. 이러한 점을 고려해 볼 때 토양생태의 가중비율이 동식물생태의 가중비율을 초과하지 않을 것이다(토양생태 가중비율 ≤ 동식물생태 가중비율). 이와 같은 가정과 더불어 동식물생태의 가중치와 지형지질의 가중치 간의 비율(7:3)이 고정되었다고 가정하면(최유경, 2007), 토양생태의 자연환경 세부요소 중 가중비율이 최대가 되는 것은 동식물생태의 가중비율이 41.1%일 경우 일 것이다. 이 경우에 지형지질의 가중치가 17.8%일 것이고, 토양생태의 최대 가중치는 41.1%로 추정된다. 그러므로 총체적 환경지표의 등급별 점유율 및 공간적 분포에 영향을 줄 수 있는 토양생태의 가중치 범위는 약 20%에서 41.1%로 다소 제한적임을 알 수 있다.

토양생태의 가중비율을 변화해 가면서 친환경도로노선을 선정하는 모의실험(simulation)을 수행한 결과, 토양생태의 가중비율이 14%일 때 토양생태를 고려하지 않은 경우에 비해 친환경도로노선 선정에 처음으로 가시적인 차이가 있었다(Fig. 5). 선정된 친환경도로노선에 차이를 보이는 지역에서의 총체적 환경지표 등급결과를 심층적으로 분석해 본 결과, 토양생태의 가중비율이 0%에서 14%로 변화되었을 때 총체적 환경지표가 최저등급인 1등급 혹은 2등급보다 높은 등급으로 변화했기 때문에 친환경도로선 선정에 민감하게 영향을 준 것을 알 수 있었다. 흥미로운 것은 총체적 환경지표의 등급별 점유면적율이 토양생태 가중비율의 20% 정도까지는 큰 변화가 없었던 것에 비해(Fig. 4), 친환경도로노선 선정을 통한 민감도 분석에서는 토양생태 가중비율의 14% 이상부터 변화가 있다는 점이다. 이를 통해서 토양생태의 가중치가 친환경도로노선 선

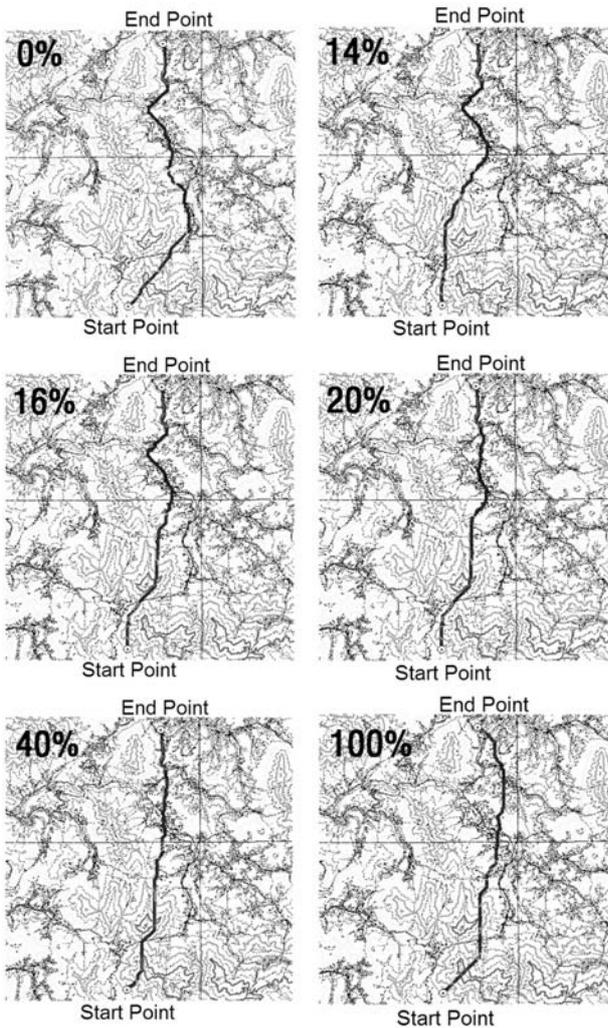


Fig. 5. Simulation results for environmentally optimal routes in response to varying weights of soil ecological quality information. The percent values indicate weights of soil ecological quality information.

정에 보다 더 민감하게 영향을 미칠 수 있다는 점을 알 수 있었고, 민감하게 영향을 줄 수 있는 토양생태의 가중치의 범위가 14-41.1%로 추정된다. 이러한 결과에 대한 설명은 연구지역의 전 면적을 대상으로 해서 등급별 점유면적을 산정하는 과정에서 지역적 연계성(local connectivity)이 무시되는 반면(Fig. 4), 선형적인 도로노선 선정에서는 지역적 연계성이 보다 더 중요하고, 토양생태 등급정보의 첨가가 총체적 환경지표의 지역적 연계성에 보다 더 민감하게 영향을 주기 때문이다. 따라서 대단위 단지개발과 같은 면적 사업지의 위치 선정보다는 도로와 같은 선형 노선 선정에 토양생태의 정보가 미치는 영향이 클 것이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 토양생태의 가중치에 대한 정보를 획득하기 위하여 기존의 AHP 접근방식 대신에 토양생태의 가중치에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 자연환경 중 토양생태의 중요도(가중치) 변동에 따른 친환경도로노선 선정에 미치는 영향을 GIS 기반의 모의실험을 통해서 분석하였다. 또한 현재 환경영향평가에서 활용되고 있는 환경부 생태자연도가 생태계의 주요 영향인자 중 하나인 토양생태의 질적인 정보를 간접적이거나 반영하고 있는지의 여부를 평가하여 토양생태 등급정보가 기존의 자연환경생태 관련 정보시스템에 첨가될 필요성에 대해서 논의하였다. 상기의 목표에 대한 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 자연환경과 생활환경 세부요소들을 고려한 총체적 환경지표의 등급정보를 지형정보와 연계해서 지도를 작성하고, 이를 이용해서 토양생태의 가중치에 대한 민감도 분석을 한 결과, 토양생태의 등급정보의 추가로 인해서 총체적 환경지표의 등급별 점유면적들과 친환경도로노선 선정에 영향을 미침을 알 수 있었다. 둘째, 토양생태의 가중치는 총체적 환경지표의 등급별 점유면적을 보다는 친환경도로노선 선정에 민감한 영향을 주었다. 이에 근거해서 볼 때 택지개발과 같은 면단위 사업의 위치 선정보다 지역적 연계성이 중요한 선형노선 선정에서 토양생태 등급정보의 추가가 더 민감한 영향을 줄 것으로 판단된다. 셋째, 친환경도로노선에 영향을 줄 것이라고 예상되는 토양생태의 가중치 범위를 14-41.1%(자연환경 세부요소들 중의 비율)로 본 연구의 결과로 부터 추정할 수 있었다. 이러한 범위의 토양생태의 가중치가 예상되는 경우에는 토양생태의 등급정보를 반영해서 도로노선의 친환경성을 최적화하는 것이 타당할 것임을 본 연구결과는 제안하고 있다.

감사의 글

본 연구는 친환경·지능형 도로설계 기술개발 연구단(건설핵심D05-01)을 통하여 지원된 건설교통부 건설기술 혁신사업과 환경부 차세대핵심환경기술개발사업(052-071-062)의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강수진, 2004. 습지기능을 고려한 한국내륙습지의 간이 평가기법 개발 및 적용, 석사학위논문, 이화여자대학교.

강호근, 이상은, 박미란, 이재희, 박일건, 최유경, 최하나, 2007, GIS를 기반으로 한 친환경도로노선 선정기법에 관한 연구-시범 구간을 중심으로-, 대한환경공학회 춘계공동학술대회 논문집, 대한환경공학회, p. 175.

기동원, 2007, 의사결정나무 방법을 이용한 토양생태 등급 수치 지도 작성방법 개발, 석사학위논문, 연세대학교.

기동원, 박준홍, 이재진, 노백호, 2007, 현장 측정된 토양미생물 종 다양성과 생태자연도 등급 자료 간의 통계적 상관관계 평가와 토양생태의 질 산정방안 제안, 대한토목학회, **27(6B)**, 703-710.

노태호, 권영환, 노백호, 2006, 생물자연도 활용에 있어 동물서식지 등급 적용, 환경부.

농림부 농업토양정보시스템, 2007.05.01, <http://asis.rda.go.kr/>

문석웅, 2007, 한국의 갯벌정책에 대한 비판적 소고: 지속가능한 발전의 관점에서, 자원 환경경제연구, **16(3)**, 575-605.

박준홍, 기동원, 오창균, 2006, 지속가능한 국토개발사업 계획을 위한 토양생태질 등급화에 대한 방법적 고찰, 주택도시, **89**, 1-13.

배연재, 원두희, 이용재, 승현우, 2003, 하천생태계에 대한 환경평가 기법과 생물다양성 관리시스템의 개발 및 적용, 한국환경생물학회, **21(3)**, 223-233.

배혜진, 김석태, 2007, FPS게임 구성요소의 중요도 분석방법에 관한 연구 2-계층화 의사결정법에 의한 요소별 상관관계측정과 대안의 선정, 디자인학연구, **20(4)**, 115-128.

이관규, 2001, 환경평가를 위한 지표의 가중치 산정방법 결정모형, 환경영향평가, **10(1)**, 59-71.

전성우, 2001, 기초 생태자연도 작성에 관한 연구, 한국환경정책평가연구원.

정홍락, 노백호, 송재영, 2005, 생태자연도 조사체계 개선방안 연구, 국립환경과학원.

조용현, 이재원, 조수현, 2001, 서울시 도시생태계의 장기 모니터링 방안 연구, 서울시정개발연구원.

최유경, 2007, 도로노선 선정을 위한 GIS 기반 환경성 평가기법에 관한 연구, 석사학위논문, 아주대학교.

환경부 생태자연도, 2007.05.01, <http://egis.me.go.kr/egis/>

ArcGIS 9.2 Desktop, 2007.05.02, <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?Topic Name=welcome>.

Atlas, R.M. and Bartha, R., 1997, Microbial ecology: fundamentals and applications, Fourth Edition, Benjamin/Cummings Publishing Company, Menlo Park, California.

Dunbar, J., Ticknor, L.O., and Kuske, C.R., 2001, Phylogenetic specificity and reproducibility and new method for analysis of terminal restriction fragment profiles of 16S rRNA genes from bacterial communities, *Appl. Environ. Microbiol.*, **67**, 190-197.

Loreau, M., 2001, Microbial diversity, producer-decomposer interactions and ecosystem processes: a theoretical model, *Proc. R. Soc. Biol. Sci. B.*, **268**, 303-309.

Nielson, M.N. and Winding, A., 2002, Microorganisms as indicators of soil health, NERI Technical Report No. 388, Ministry of the Environment, National Environmental Research Institute, Denmark.

Römbke, J. and Breure, A.M., 2005, Status and outlook of ecological soil classification and assessment concepts, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **62**, 300-308.

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

Turco, R.F., Kennedy, A.C., and Jawson, M.D., 1994, Microbial indicators of soil quality, In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., and Stewart, B.A. (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*, Soil Science Society of America, Inc., Madison, p. 73-90.

WCED (World Commission on Environment and Development), 1987, Our common future. Oxford University Press, New York.

Winding, A., Jund-Rinke, K., and Rutgers, M., 2005, The use of microorganism in ecological soil classification and assessment concepts, *Environ. Technol.*, **62**, 230-248.