

GIS를 활용한 산림녹지의 환경조절적 기능 평가

이우성¹ · 정성관^{2*}

An Evaluation of Environmental-Control Function on Forest Using GIS

Woo-Sung LEE¹ · Sung-Gwan JUNG^{2*}

요 약

본 연구에서는 지속가능한 산림녹지 계획을 위해 체계적인 지표선정 과정을 통한 평가모형을 구축하고, GIS 기법을 이용하여 대구광역시의 산림녹지에 대한 환경조절적 기능을 평가하였다. 평가지표는 문헌조사를 통한 35개의 기초지표를 선정하였으며, 브레인스토밍 과정을 통해 29개 지표로 축약하였다. 또한, 1차 설문으로 8개의 환경조절적 지표를 선정하였고, 2차 설문에 의한 MCB 분석 과정을 통한 탄소저감, 기온저감, 바람생성, 물순환성, 대기정화의 최종지표를 선정하였다. 평가모형은 AHP 분석에 의해 지표별 가중치를 평가하여 이를 기반으로 구축하였다. 산림녹지에 대한 환경조절적 기능을 평가한 결과, 앞산, 비슬산, 팔공산 등 산림녹지의 정상부 및 주변지역에서 66점 이상으로 높은 점수가 나타났다. 반면, 와룡산 및 북구 칠곡지구 주변의 산림녹지는 40점 이하의 낮은 점수로 평가되었다. 환경조절적 기능이 낮은 지역의 경우 산림녹지에 대한 지속적인 복원 및 관리를 통해 기능성을 향상시켜야 할 것이다. 또한, 이상의 연구결과들은 지역계획, 도시계획, 환경계획 그리고 산림환경계획 등에서 보전지역 설정 및 개발지역 규제를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 녹지계획, 지속가능성, 환경조절, MCB, AHP

ABSTRACT

The purpose of this study is to establish the evaluation model through the systematic process of selecting the indicators and to evaluate the environmental-control function on forest using GIS in Deagu for the sustainable forest planning. The 35 indicators as basic items were selected by literature review and those were squeezed into the 29

2011년 9월 27일 접수 Received on September 27, 2011 / 2011년 10월 24일 수정 Revised on October 24, 2011 / 2011년 10월 31일 심사완료 Accepted on October 31, 2011

1 텍사스 A&M 대학교 조경·도시계획학과 Dept. of Landscape Architecture and Urban Planning, Texas A&M University

2 경북대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National University

* 연락처 E-mail : sgjung@knu.ac.kr

indicators through expert brainstorming. Also, the 8 indicators to evaluate environmental-control function were selected by the first survey and the 5 final indicators such as carbon sink, temperature decrease, wind formation, water circulation, air purification were determined by MCB analysis using the second survey. The evaluation model was established through the weight of each indicator by AHP analysis using the third survey. According to the result of evaluating the environmental-control function on forest, the functions around the top area of Mt. Ap, Mt. Biseul, Mt. Palgong had more than 66 scores. On the other hand, the functions around Mt. Waryong and forest of Chilgok in Buk-gu had less than 40 scores. It is necessary to improve the function through the sustainable restoration and management in case of forest that the environmental-control function was lower. Furthermore, these results will be able to be utilized as basic data in order to establish the preservation area and control development area at the urban, environmental, and forest planning.

KEYWORDS : Green Planning, Sustainability, Environmental-Control, MCB, AHP

서 론

최근 환경에 대한 관심이 증가하면서 기후 변화, 탄소배출, 저탄소 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 산림녹지는 이러한 환경문제와 밀접한 관련을 가지고 있는 대상이며, 리우환경회의, 헬싱키, 몬트리올 프로세스 등과 같은 국제협약에서 지속가능한 미래를 위한 관리의 대상으로 제기된 바 있다(박영규 등, 2010). 이에 우리나라에서도 제4차 산림기본계획부터 산림의 생태·환경적인 건강성을 유지하면서 다양한 기능이 발휘되고, 생산성을 높일 수 있도록 산림녹지를 기능별로 구분 및 관리하고 있다(산림청, 1998).

산림녹지의 기능은 연구자에 따라 다양하게 제시되고 있는데, 이경학(1995)은 자연보전, 국토보전, 수원함양, 보건휴양, 목재생산 등 5가지 기능으로 구분하였으며, 정주상 등(2002)은 수자원함양, 산지재해방지, 산림휴양, 생태보전, 목재생산 등으로 분류하기도 하였다. 최근 많은 국제협약에서 제기되고 있는 것과 같이 산림녹지의 다양한 기능 중 환경조절적 기능이 주목받고 있다. 산림녹지의 환경조절적 기능은 쾌적한 도시환경 조성을 위한 기반을 유지시키고, 도시기후, 수환경, 토양환

경 등을 조절 및 보전하기 위한 역할로 정의할 수 있다(이우성, 2011).

그 동안, 국내·외에서 산림녹지의 기능을 평가하기 위해 다수의 연구들이 진행되었다. 미국의 경우 산지평가모델인 GIS 기반의 FLSEA(Forestland Evaluation and Site Assessment)를 통하여 산림기능의 잠재력을 평가하고 있으며, GIS 기반의 응용프로그램을 개발하여 실무에서 활용하고 있다(Richard, 2001). 일본의 경우 GIS를 이용하여 다양한 산림정보를 적지분석하고, 산림기능평가체계를 고려하여 산림기능을 구분하는 연구를 수행한 바 있다(서수현 등, 2006, 재인용). 국내에서는 최경과 김태훈(1982), 이원열 등(1991), 김경하 등(1992) 등이 산림기능평가에 대한 기초연구를 수행하였고, 이후 GIS에 대한 기술력이 향상됨으로 인해 이경학(1995), 김형호 등(2006), 서수현 등(2006), 한수진 등(2006), 권순덕 등(2008)이 산림녹지에 대한 다양한 기능을 고려하여 각각의 평가체계 및 평가방법을 통해 산림녹지의 기능을 평가하였다. 또한, 산림청(1998)에서는 산림기능평가체계를 이용한 산림기능구분도를 제작하여 배포 중에 있다.

산림녹지의 환경조절적 기능에 대한 선행연

구를 살펴보면, 대기오염정화 및 탄소저감 기능에 대한 연구(Jo and McPherson, 1995; 조용현과 조현길, 2002; Nowak *et al.*, 2006; 안태원, 2010), 미기후조절 기능에 대한 연구(Marks and Müller, 1992; Upmanis *et al.*, 1998; Andrade and Vieira, 2007; 윤민호, 2009), 물순환 기능에 대한 연구(Xiao and Mcpherson, 2002; 박은진 등, 2007) 등이 진행되었다. 그러나 이러한 많은 연구에도 불구하고, 산림녹지의 개별적 기능이 아닌 종합적인 측면에서 환경조절적 기능을 연구한 사례는 거의 없는 실정이다. 이는 거대한 산림을 대상으로 종합적인 측면에서 환경조절적 기능을 평가하기 위해서는 현장조사를 바탕으로 한 대규모의 자료가 축적되어야 하며, 지표선정, 평가체계 설정 등에 많은 시간과 노력이 투자되어야 하기 때문이다. 하지만, 산림녹지의 환경조절적 기능에 대한 체계적인 접근과 평가가 이루어지지 않을 경우, 바람직한 계획방향 및 관리지침을 제시하기 어렵기 때문에 우선적으로 산림녹지에 대한 정확한 현황자료에 기초한 평가가 이루어져야 할 것이다.

이에 본 연구는 산림녹지의 환경조절적 기능을 평가하기 위해 체계적인 지표선정 및 가중치 산정 과정을 거쳐 평가모형을 구축하고자 한다. 또한, 개발된 평가모형을 이용하여 산림녹지의 환경조절적 기능에 대한 정량적인 평가를 실시하여 산림녹지의 지속가능한 계획 및 관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

연구 대상지 및 방법

1. 연구대상지

본 연구는 한반도의 동남쪽에 위치한 대구광역시를 대상으로 설정하였다(그림 1). 대구광역시는 많은 고속도로 및 고속철도가 도시를 관통하여 운행되고 있어 영남 내륙에 대한 교통의 결절점 기능을 수행하고 있다. 또한, 낙동강과 금호강 등의 수역, 팔공산과 비슬산

등의 산림이 혼재하는 지역이다. 이러한 대구광역시의 총 면적은 884.10km²이며, 인구는 약 251만 명이 거주하고 있다. 총 7개의 행정구 및 1개의 행정군으로 구성되어 있으며, 경상남·북도의 8개 도시와 인접해 있다.

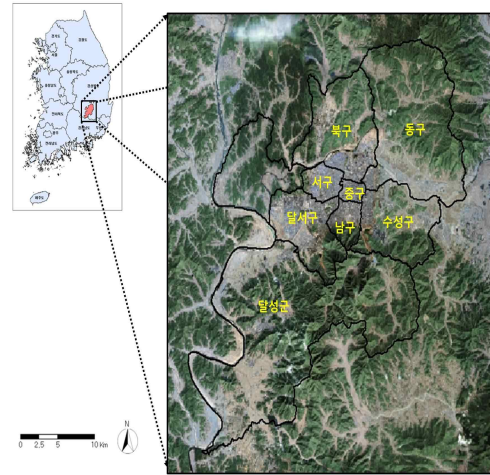


FIGURE 1. 연구 대상 지역

대상녹지인 산림녹지는 토지이용 특성상 산림으로 분류되며, 자연림 및 조림지를 모두 포함하는 녹지로 정의하였으며, 세부유형은 도시자연공원구역, 자연공원, 일반산림으로 구분하였다. 산림녹지 현황을 살펴보면, 468.12 km²로 대구광역시 전체면적의 52.9%로 나타났으며, 이 중 도시자연공원구역과 자연공원이 각각 67.07km² 및 48.75km²를 차지하였다. 이외의 일반산림은 352.30km²로 전체 산림녹지의 75.3%를 점하는 것으로 나타났다.

2. 연구과정 및 방법

1) 연구과정

연구과정은 그림 2에서와 같이 크게 2단계로 구분하였다. 산림녹지의 환경조절적 기능 평가를 위한 지표선정 및 평가체계 설정 단계에서는 문헌조사 및 전문가 설문조사를 통해 산림녹지의 환경조절적 기능을 평가하기 위한 최적의 지표를 선정하였다. 우선, 문헌조사를

통해 녹지의 기능평가를 위한 기초 지표를 선정하였고, 전문가 설문조사에 기반한 MCB (Multiple Comparisons with the Best treatment) 분석을 이용하여 최적의 지표를 선정하였다. MCB 분석은 일정한 유의수준에서 집합의 최상값을 가지는 지표를 선택할 수 있는 방법으로 설문지 수, 지표의 수 등을 고려하여 여러 지표들 가운데 통계적 의미에서 가치가 높은 지표를 선택하기 위해 사용되는 기법이다(Kuehl, 2000; 조현주, 2007). 다음으로, 평가모형을 설정하기 위해 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법을 적용하여 지표들 간의 상대적 가중치를 도출하였다. AHP 분석에서는 일관성 검증이 요구되는데, 본 연구에서는 비일관성 비율이 20% 이하인 자료만을 대상으로 분석하였다(Saaty, 1980).

설문조사의 과정을 살펴보면, 전문가 설문조사는 총 3회에 걸쳐 이루어졌으며, 각각 48부 및 57부, 55부의 설문을 회수하였고, 이중 46부, 55부, 42부를 분석에 활용하였다. 1차 설문에서는 녹지의 기능별 지표를 선정하기 위해 다중선택형 설문을 실시하였으며, 2차 설문에서는 MCB 분석을 수행하기 위해 5점 리커트척도를 활용한 중요도 설문을 진행하였다. 마지막 3차 설문에서는 AHP 분석을 위해 18단계에 따른 상대적 중요도 설문을 실시하였다.

사례지 적용을 통한 환경조절적 기능 평가 단계에서는 최적 지표 및 구축데이터를 이용하여 지표별 평가를 수행하였다. 평가단위는 10m×10m의 픽셀단위로 설정하였으며, 평가방법은 지표에 적합한 개별평가 기법을 적용하였다. 여기서, 각각의 분석기법에 의한 녹지 평가 결과들은 다양한 단위 및 크기의 값으로 산정되기 때문에 표준화된 값으로의 변환이 요구된다. 일반적으로 많은 연구에서 지표를 표준화하기 위해 Z-score 방법을 활용하고 있는데, 이 방법은 평균과 표준편차를 기준으로 표준화시킴으로 인해 지표의 값이 정규분포를 이루고 있어야 한다. 그러나 실제로 대부분의 지표들은 정규분포를 이루고 있지 못할 경우가 많기 때문에 평가결과에 많은 왜곡을 가져올 수 있다(이종용과 이희연, 2005). 이에 식 1과 같은 스케일 조정을 거친(re-scaled) 방법으로 평가지표들을 표준화하였다. 이 방식은 통계적 계산이 다소 복잡하다는 단점이 있으나, 구간정보를 보유하며, 구간 단위 데이터를 유지시키는 기법들 중 특이치들의 영향을 가장 적게 받는다는 장점을 가지고 있다(김영인과 여흥구, 2009). 이렇게, 스케일 조정을 거친 방법으로 지표들을 표준화하면 각 지표들의 값은 동일한 범위 내 최대값과 최소값을 기준으로 0~100점까지의 값이 산출되게 된다. 마지막으로 평가모형의 가중

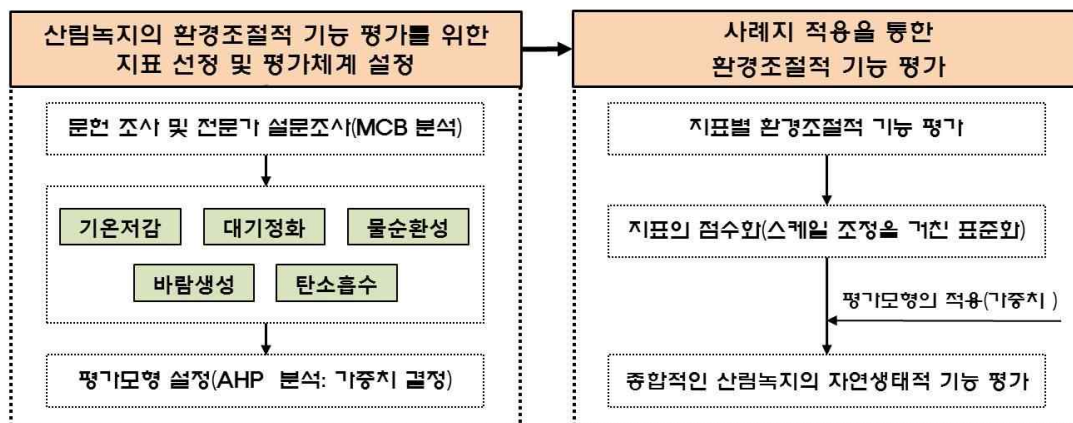


FIGURE 2. 연구수행과정

치 및 지표별 평가결과를 이용하여 대구광역시
시의 산림녹지에 대한 종합적인 환경조절적
기능을 평가하였다(식 1).

$$IS = \left[E \times \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} + (1 - E) \times \frac{(X_{max} - X)}{(X_{max} - X_{min})} \right] \times 100 \quad (1)$$

여기서,

- IS : 각 지표의 평가점수(Indicator Score)
- E : 지표가 긍정적인 효과일 경우 1,
부정적인 효과일 경우 0
- X : 지표의 값
- X_{max} : 지표의 최대값
- X_{min} : 지표의 최소값

2) 기초자료 구축

산림녹지 현황도의 경우 제4차 수치임상도 및
토지이용지도를 기반으로 대략적인 경계 작업을
수행하였으며, 세부적인 경계는 Kompsat 2 위
성영상 및 디지털항공사진을 이용하여 그림
3(a)와 같이 작성하였다. 산림녹지는 도시자연
공원, 자연공원, 일반산림 등으로 분류되나, 녹
지평가에서는 이를 구분하지 않고 하나의 산림
패치로 평가하였다. 최소면적은 생물이 서식하

기 위한 최소기준인 1ha를 기준으로 하여
(Riess, 1986; 사공정희, 2004; 박창석,
2007) 1ha 이상인 녹지만을 대상으로 하였다.

토지이용도는 환경부에서 제작한 축척
1:25,000의 토지피복도(중분류)를 기초로
2008년에서 2009년에 촬영된 Kompsat 2
위성영상 및 디지털항공사진을 토대로 갱신하
였다. 토지이용 변화에 따른 공간의 분할 및
적용은 수치지형도(1:5,000)를 기반으로 작성
하였으며, 속성정보는 변화된 토지이용 정보
를 ArcGIS 9.3에서 입력하였다.

다음으로, 기온분포도의 구축을 위해 2008
년 5월 31일 촬영된 Landsat 5 TM 영상을
활용하여 PG-STEAMER 4.1에서 기하 및
정사보정을 실시하였다. 영상으로부터 지표온
도를 추출하기 위해 열적외선 밴드(band 6)
를 이용하였으며, 온도 추출은 NASA(National
Aeronautics and Space Administration)에서
개발한 모델을 사용하였다. 그런데, 위성영상을
이용한 지표온도 추출은 지표면에서 나오는 열
적외선을 근거로 하기 때문에 지표면의 일정
거리 위에서 측정한 기온과는 약간의 차이가
있다(박경훈과 정성관, 1999). 따라서 본 연
구에서는 토지피복에 따른 방사보정과 측정기
온을 이용한 회귀추정의 과정을 통해 온도를

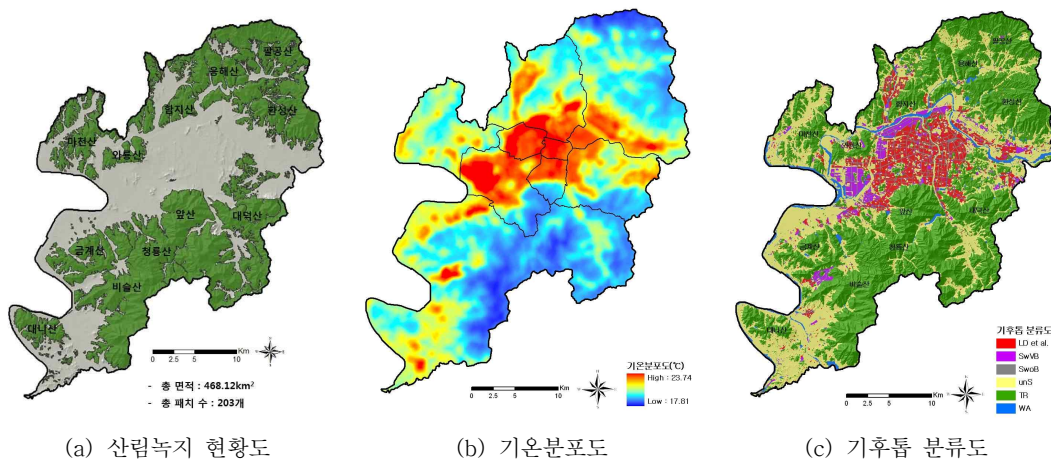


FIGURE 3. 기초자료 구축 현황

보정하였다. 방사보정은 토지피복 특성별 고유방사율을 적용하여 오차를 제거하였다(엄대용, 2006). 방사보정 후의 산출된 지표온도와 자동기상관측장비에 의해 측정된 관측기온의 회귀식을 토대로 그림 3(b)와 같은 보정된 기온분포도를 구축하였다. 총 45개의 AWS 지점의 실측온도를 이용하였으며, 도출된 회귀식은 식 2와 같고, 설명력은 유의수준 1% 이내에서 0.504로 나타났다.

$$Y = 0.225X + 14.910 \quad (2)$$

여기서, Y: 관측기온에 의한 보정된 기온
X: 보정되기 이전의 기온

기후톱(climatope) 지도는 토지이용 형태를 고려하여 총 8가지로 분류하여 그림 3(c)와 같이 작성하였다. 토지이용상 하천, 습지 등은 수공간(WA)으로 구분하였으며, 산림, 공원 등은 식생지역(TR)으로, 농경지, 초지 등은 포장되지 않은 공간(unS)으로, 도로 등은 건물 없이 포장된 공간(SwoB)으로, 공업지역 등은 건물에 의해 포장된 공간(SwVB)으로 재분류하였다. 또한, 주거 및 상업지역은 건물의 밀집정도에 따라 저밀도(LD), 중밀도(MD), 고밀도(HD) 등으로 구분하나, 본 연구에서는 자료의 한계로 인해 동일한 기후톱으로 분류하였다.

결과 및 고찰

1. 산림녹지의 환경조절적 평가지표의 선정

1) 평가지표의 선정

산림녹지의 환경조절적 기능 평가를 위한 지표 선정을 위해 국·내외 56개 문헌조사를 통해 녹지의 기능 평가를 위한 35개 지표¹⁾를 선정하였다. 선정된 35개의 지표 중 중복선정을 피하고, 누락된 지표를 재선정하기 위해 6명의 전문가²⁾로 구성된 브레인스토밍 과정을 수행하였다. 이 과정을 통해 35개 지표 중 8

개 지표를 통합하고, 2개 지표가 추가적으로 선정되어 총 29개 지표로 재설정되었다.

다음으로, 1차 전문가 설문조사를 통해 문헌조사에서 선정된 29개 지표 중 8개 지표가 환경조절적 기능 평가에 적합한 지표로 선정되었다. 선정된 지표는 기온저감, 녹피율, 대기순환, 대기정화, 물순환성, 바람생성, 탄소흡수, 투수성이다. 2차 전문가 설문조사를 통해 8개 지표에 대한 중요도 평가를 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 표 1과 같이 MCB 분석을 수행하였다. 산림녹지의 환경조절적 기능에 대한 평균중요도를 살펴보면, 탄소흡수가 4.58점으로 가장 높은 중요도를 가지는 것으로 평가되었으며, 다음으로 바람생성, 기온저감 등의 순으로 나타났다. 특히, 탄소흡수는 녹지의 이산화탄소(CO₂) 저감 기능을 나타내는 것으로 많은 선행연구에서 녹지의 이산화탄소 흡수 및 저장기능에 대한 환경적 효과를 연구한 바 있다(Milne and Brown, 1997; 조현길, 1999; 안태원, 2010). 반면, 녹피율 및 투수성은 각각 3.56점 및 3.87점으로 낮은 중요도를 보였으며, 대기순환 역시 4.16점으로 상대적으로 낮게 평가되었다. 이상의 MCB 분석과정을 통해 총 8개 지표 중 5개 지표가 산림녹지의 환경조절적 기능 평가를 위한 최적의 지표로 선정되었다.

2) 평가모형의 설정

5개 평가지표에 대한 가중치 및 평가모형을 구축하기 위해 3차 전문가 설문조사를 이용하여 AHP 분석을 수행하였다. 분석결과, 평균 비일관성 비율은 0.060으로 낮게 나타났으며, 탄소흡수 지표의 가중치가 0.235로 5개 지표 중 가장 높게 평가되었다. 이는 산림녹지가 탄소흡수를 위한 핵심적인 역할을 하고 있으며, 최근의 다양한 환경문제 해결을 위한 대안으로 판단되고 있기 때문에 판단된다(안태원, 2010). 반면, 기온저감 항목의 가중치는 0.156로 가장 낮게 평가되었으며, 다음으로 대기정화 항목이 0.172로 낮게 나타났다.

AHP 분석에 의해 산정된 가중치를 이용하

TABLE 1. 최적지표 선정을 위한 MCB 분석 결과*

지표	\bar{y}_i	$\max_{j \neq i} \bar{y}_j$	D_i	M	$D_i + M$	선정유무
탄소흡수	4.58	4.49	0.09	0.3561	0.448	Yes
바람생성	4.49	4.58	-0.09	0.3561	0.2661	Yes
기온저감	4.44	4.58	-0.14	0.3561	0.2161	Yes
물순환성	4.38	4.58	-0.2	0.3561	0.158	Yes
대기정화	4.25	4.58	-0.33	0.3561	0.0307	Yes
대기순환	4.16	4.58	-0.42	0.3561	-0.0602	No
투수성	3.87	4.58	-0.71	0.3561	-0.3511	No
녹피율	3.56	4.58	-1.02	0.3561	-0.6602	No

* MCB 분석을 위한 기본 조건을 확인하기 위해 일원배치 분산분석을 실시한 결과, 지표들 간 평균의 차이가 없는 것으로 나타남(F=10.273(0.000)).

여 산림녹지의 환경조절적 기능 평가를 위한 모형을 식 3과 같이 구축하였다. 개별 지표의 점수에 각 지표별 가중치를 적용하여 환경조절적 기능 지수를 산정할 수 있다.

$$FEFI = 0.156 \times X_1 + 0.172 \times X_2 + 0.214 \times X_3 + 0.223 \times X_4 + 0.235 \times X_5 \quad (3)$$

여기서,

FEEI : 산림녹지의 환경조절적 기능 지수 (Forest Environmental Function Index)
 X₁ : 기온저감, X₂ : 대기정화, X₃ : 바람생성,

X₄ : 물순환성, X₅ : 탄소흡수

2. 산림녹지의 환경조절적 기능 평가

1) 지표별 기능 평가

(1) 기온저감

산림녹지의 환경조절적 기능을 평가하기 위한 지표별 평가방법 및 단위는 표 2와 같다. 기온저감 기능은 500m 반경의 주변지역에 대한 녹지 내부의 기온저감 기능을 분석하였다. 기온저감 분석 결과를 살펴보면, 산림녹지의 내부지역에서는 기온저감효과가 크게 나타났으며, 도시지역과 인접한 지역에서는 온도저

TABLE 2. 지표별 평가방법 및 단위

지표	평가방법	단위	값의 영향성
기온저감	$-\frac{\text{반경 } 500m \text{ 지역의 평균온도} - \text{지점의 온도}}{\text{반경 } 500m \text{ 지역의 평균온도}} \times 100$	℃	긍정(+)
대기정화	- 녹지유형별 원단위 적용을 통한 연간 SO ₂ 흡수량*	kg/ha/yr	긍정(+)
	- 녹지유형별 원단위 적용을 통한 연간 NO ₂ 흡수량	kg/ha/yr	긍정(+)
바람생성	- 지후톱지도에 기반한 찬공기생성가능성 산정***	-	긍정(+)
물순환성	- 물의 집적정도에 따른 지형습윤지수**** 산정	-	긍정(+)
	- CN값**을 이용한 30mm 강우에 대한 유출량 산정	mm	부정(-)
탄소저감	- 녹지유형별 원단위 적용을 통한 연간 CO ₂ 흡수량	kg/ha/yr	긍정(+)

* 녹지유형은 조용현과 조현길(2002)의 연구를 토대로 토지피복 및 식생유형(식생, 영급)을 고려하여 분류함.

** 유출곡선지수(Curve Number)를 산정하기 위해 국립농업과학원의 수문학적 토양유형과 토지피복분류도를 이용함. 또한, 미국 토양보전국의 표면유출모형을 적용하여 강우 30mm에 대한 표준유출량을 산정함.

*** 기후톱지도 및 Marks and Müller(1992)에 의해 개발된 평가인자 및 가중치를 적용하여 산정함.

**** 지형습윤지수(Topographic Wetness Index)는 Beven and Kirkby(1979)에 의해 개발되었으며, 집수면적이 커 지거나 사면경사가 완만할 경우 토양수가 집적되기 쉽다는 측면에서 착안됨(이우성 등, 2009).

감효과가 크지 않은 것으로 평가되었다(그림 4(a)). 특히, 비슬산을 중심으로 약 2°C 정도의 온도저감효과가 나타났으며, 이는 주변 500m 범위 내 기온의 약 10% 정도를 저감시킨 결과이다. 또한, 팔공산 및 환성산의 정상부 일대의 경우에도 저감효과가 큰 것으로 분석되었다.

반면, 대덕산 북쪽과 와룡산 일대의 산림녹지는 온도저감 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 일부지역에서는 주변지역의 온도보다 약 2°C 이상 높게 분석되었다. 이는 도시지역의 높은 열을 감소시키지 못하고 오히려 도시지역으로부터 열을 흡수하여 산림녹지 내부의 낮은 온도를 증가시키는 역할을 하고 있기 때문이다. 산림녹지 가장자리의 온도저감효과를 높이기 위해서는 도시지역의 열환경을 1차적으로 저감할 수 있는 완충녹지를 열섬차단벨트의 형태로 조성해야 할 것으로 판단된다(이성열, 2007). 또한, 열의 방출이 가장 높은 공업중심지역의 경우에는 완충녹지뿐만 아니라 공장 내의 주차장, 지붕 등을 녹화함으로써 지표온도의 상승을 저감시켜야 할 것이다(이우성 등, 2010).

(2) 대기정화

산림녹지의 대기정화 기능은 서울특별시 원단위를 이용하여 SO₂와 NO₂에 대한 연대기정화 효과를 산정하였다. 대기정화 효과의 분석 결과는 그림 4(b), 4(c)와 같이 나타났으며, SO₂와 NO₂의 흡수량이 유사한 패턴을 보였다. 이는 녹지유형별 원단위 기법을 적용하여 대기오염물질의 흡수량을 산정하였기 때문이다. 구체적으로 살펴보면, 팔공산 및 청룡산 일대를 중심으로 SO₂와 NO₂의 흡수능이 각각 140g/yr, 370g/yr 이상의 높은 값으로 분석되었다. 이는 이 지역의 산림은 대부분 활엽수림 또는 혼효림으로 구성되어 있으며, 영급의 경우에도 IV영급 이상으로 나타났기 때문이다. 반면, 북구의 함지산 및 동구의 환성산, 달성군의 금계산 일대의 경우에는 대기오염물질의 흡수능이 낮은 것으로 나타났다. 이 지역들

의 산림은 대부분 소나무림으로 구성되어 있어 침엽수림의 비율이 높으며, 영급의 경우에도 II영급 이상으로 짧은 수령을 가지고 있기 때문으로 판단된다(조용현과 조현길, 2002).

(3) 바람생성

바람생성 기능은 산림녹지의 찬공기 생성가능성을 평가하여 이를 분석에 이용하였다. Marks와 Müller(1992)의 지침에 따라 평가인자별 주제도를 작성하여, 지침에서 제시하고 있는 평가인자별 가중치를 적용하여 찬공기 생성가능성을 그림 4(d)와 같이 구축하였다.

분석한 결과를 살펴보면, 앞산, 비슬산, 응해산, 환성산과 같은 대규모 산림의 계곡기저부를 따라 50점 이상의 점수가 나타나 찬바람의 생성가능성이 높은 것으로 분석되었다. 또한, 대규모 산림의 계곡 인근 지역에서도 높은 점수로 평가되어 전체적으로 계곡을 따라 찬바람의 생성가능성이 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 찬바람의 생성가능성이 높은 지역들은 기후생태학적으로 중요한 지역이며, 도시지역의 열환경 저감에 효율적인 역할을 수행할 수 있는 지역이기 때문에 택지개발, 도로건설 등과 같은 개발압력에 대한 적절한 보전과 장기적인 관리가 필요할 것으로 판단된다(송봉근과 박경훈, 2010). 반면, 와룡산 및 대덕산의 북쪽 지역 소규모 산림녹지는 찬바람 생성가능성이 20점 이하로 낮게 평가되었으며, 달성군의 마천산 일대에서도 찬바람 생성가능성이 낮은 것으로 분석되었다.

(4) 물순환성

산림녹지의 물순환성은 지형습윤지수(Topographic Wetness Index: TWI)와 표면유출량을 통해 물이 토양으로 집적 및 흡수되는 정도를 평가하였다. 산림녹지를 대상으로 TWI를 산정한 결과, 산림 내부의 크고, 작은 계곡 및 소규모의 습지 및 저류지를 따라 TWI가 20 이상의 높은 지수가 산정되었다(그림 4(e)). 특히, 표고가 높고, 계곡이 깊은 응해산 및 비슬산,

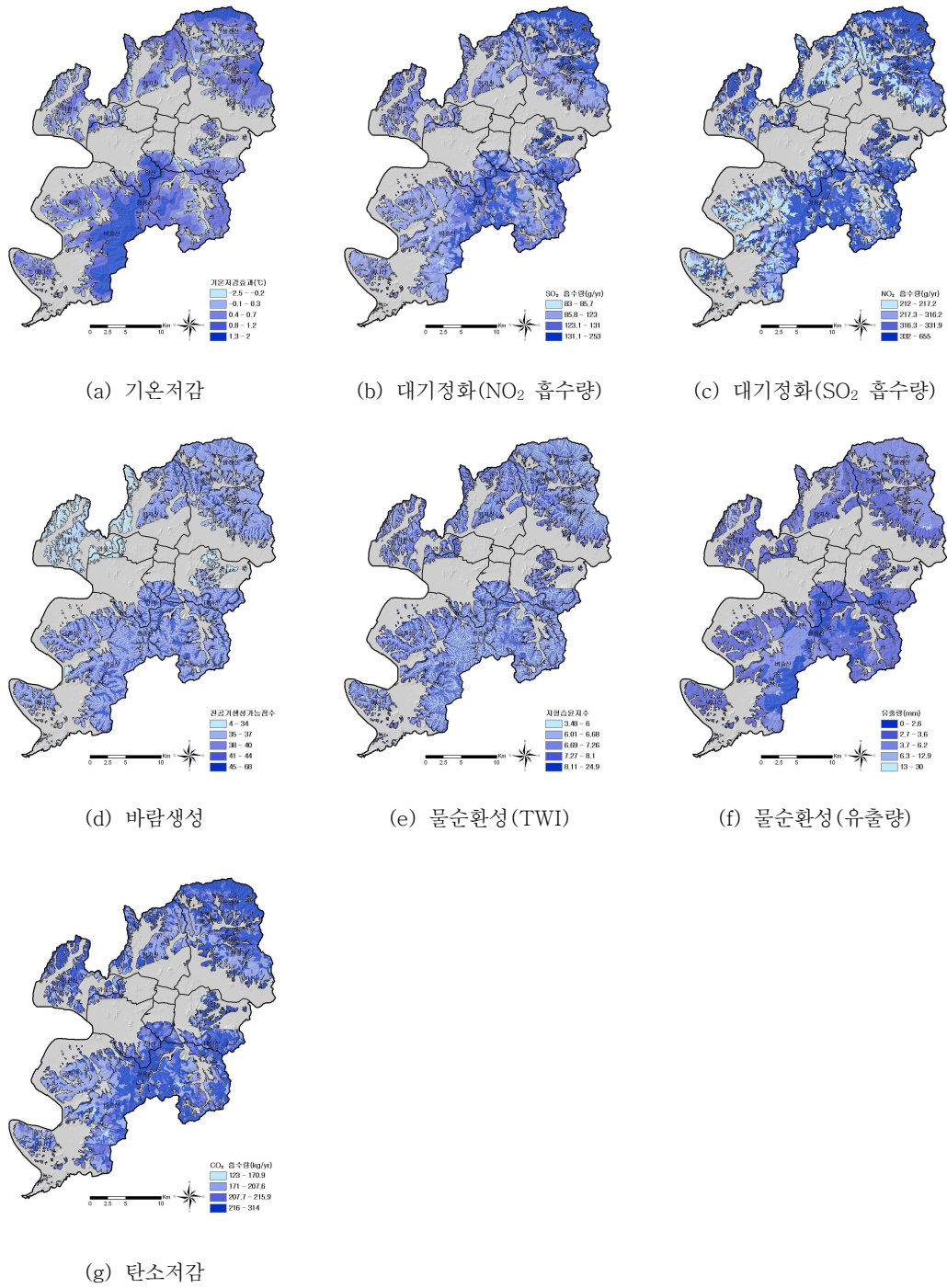


FIGURE 4. 지표별 기능 평가 결과

가창댐 주변의 계곡 등을 중심으로 높게 나타나 물의 집적 정도가 많은 것으로 분석되었다. 반면, 산의 지형적 변화가 적고, 계곡이 깊지 않은 청룡산의 남쪽지역과 환성산의 서쪽지역에서는 전체적으로 TWI가 낮게 평가되었다.

누가강우량을 30mm로 가정하여 표면유출량을 산정한 결과를 살펴보면, 금계산 일대를 중심으로 유출량이 1mm 이하로 낮게 분석되었다(그림 4(f)). 이는 이 지역이 수문학적 토양유형에서 대부분 A형 또는 B형으로 나타나 토양의 배수능력이 뛰어나고, 투수율 및 침투율이 높기 때문으로 판단된다. 이외에도 앞산에서 청룡산, 비슬산으로 이어지는 산림녹지를 따라 유출량이 낮게 나타나 산림 내 토양으로의 흡수율이 높은 것으로 분석되었다. 한편, 마천산 및 팔공산 일대를 중심으로 강우의 표면유출이 타 녹지에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났으나, 실제로 유출량의 값은 3~5mm 정도로 분석되어 크게 높지는 않은 것으로 평가되었다. 이는 산림의 경우 기본적으로 물의 흡수 및 저장 능력이 우수하기 때문이며, 시설지 및 건축물과 같은 불투수면이 존재할 경우에만 유출량이 다소 높게 분석되었다.

(5) 탄소흡수

산림녹지의 탄소흡수 기능은 대기정화 효과와 같이 서울특별시의 원단위를 이용하였다. 분석 결과를 살펴보면, 팔공산 및 청룡산의 산림녹지를 중심으로 250kg/yr 이상의 높은 탄소 흡수량을 가지는 것으로 나타났다(그림 4(g)). 이는 이 지역이 대부분 활엽수림이거나 혼효림이며, IV영급 이상의 산림이 분포하고 있기 때문이다.

반면, 달성군의 금계산 및 대니산, 북구의 함지산, 동구의 환성산 일대의 산림녹지는 대부분 침엽수림의 비율이 높으며, II영급 이하의 산림이 분포하고 있어 탄소의 흡수능이 낮은 것으로 나타났다. 이 지역에 탄소의 흡수능을 높이기 위해서는 적절한 수종의 갱신,

산지전용금지, 벌채지 조립, 병충해 방지 및 산불관리체계 강화 등과 같은 다양한 노력이 필요할 것으로 판단된다(배민기 등, 2009).

2) 환경조절적 기능 평가

각각의 평가지표들은 식 1을 활용한 표준화 과정을 거쳐 최소 0점에서 최대 100점까지 개별 평가점수를 산정하였다. 또한, 식 3의 평가모형에 개별평가 점수를 적용하여 가중치가 고려된 환경조절적 기능을 평가하였다.

산림녹지의 종합적인 환경조절적 기능평가 결과를 살펴보면, 앞산, 비슬산, 팔공산 등의 산림녹지의 정상부 및 주변지역에서 66점 이상으로 높은 점수가 나타났다(그림 5). 또한, 신갈나무, 굴참나무 등 활엽수의 비율이 높은 대덕산과, 환성산의 일부지역에서도 환경조절적 기능이 우수한 것으로 분석되었다. 따라서 이 지역들은 도로, 철도 등의 선형개발사업에 의해 산림녹지가 단절되는 것을 방지하고, 현재의 높은 기능성을 유지하기 위한 지속적인 관리방안을 강구해야 할 것으로 판단된다.

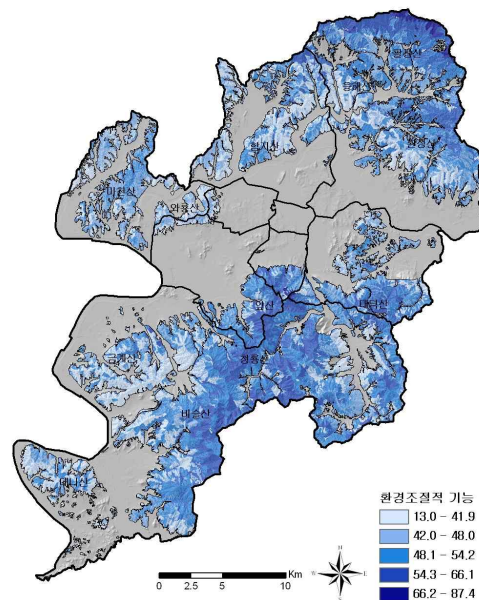


FIGURE 5. 종합적인 환경조절적 기능 평가

반면, 와룡산과 북구 칠곡지구의 산림녹지에서는 40점 이하의 낮은 점수가 나타났으며, 마천산의 서쪽지역, 응해산 및 금계산의 남쪽 지역에서도 환경조절적 기능이 낮게 평가되었다. 이 지역들은 도시지역과 인접하여 기온저감효과가 크지 않으며, 도시개발에 의해 산림내 계곡 등과 같은 지역이 훼손 또는 단절되어 있어 바람생성기능이 낮은 것으로 분석되어 환경조절적 기능이 낮게 평가된 것으로 판단된다. 그러나 이 산림녹지들은 대부분 도시지역과 인접하고 있어 도시환경에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 환경조절적 기능의 개선이 필요할 것으로 사료된다. 특히, 와룡산의 경우 달서구 및 서구 지역과 직접적으로 연결되어 있어 도시환경에 중요한 영향을 미칠 수 있는 지역이므로, 훼손된 산림 및 고사목에 대한 복원작업이 필요할 것이며, 타 용도로의 전용을 도시계획적인 측면에서 제한해야 할 것이다(배민기 등, 2009).

결 론

본 연구에서는 산림녹지의 환경조절적 기능을 평가하기 위해 체계적인 지표선정 과정을 거쳐 평가모형을 구축하였고, 다양한 GIS 기법을 적용하여 산림녹지의 환경조절적 기능을 정량적으로 평가하였다.

국내·외 문헌조사 및 브레인스토밍 과정을 거쳐 지표를 선정하였으며, 1차 설문을 통해 환경조절적 기능에 적합한 지표를 선정하였다. 또한, 2차 설문의 결과를 이용하여 MCB 분석을 수행한 결과, 8개 지표 중 기온저감, 대기정화, 바람생성, 물순환성, 탄소저감 등의 5개 항목이 최적의 지표로 선정되었다. 이러한 체계적인 과정을 통한 지표의 선정은 향후 지표관련 연구의 방법론적 측면에 활용할 수 있을 것이며, 선정된 지표의 경우 녹지관련 연구에 지속적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 다음으로 평가모형을 구축하기 위해 3차 설문을 통해 AHP 분석을 실시한 결과, 탄소흡수의 가중치가 0.235로 가장 높게 평가되었으

며, 기온저감이 0.156으로 가장 낮게 분석되었다. 탄소흡수는 최근 다양한 연구에서 지구온난화, 열섬현상 등을 해결하기 위한 대안으로 부각되고 있어 그 중요성이 높게 평가된 것으로 판단된다. AHP 결과에 따른 지표별 가중치를 이용하여 환경조절적 평가모형을 구축하였다.

지표별 평가결과를 살펴보면, 기온저감 기능의 경우 산림녹지의 내부지역과 외부와 인접한 지역에서의 차이가 큰 것으로 나타났다. 특히, 비슬산을 중심으로 큰 녹지가 분포하는 지역에서는 약 2°C 정도의 온도저감효과가 있는 것으로 분석되어 기온저감의 효과는 녹지면적이 클수록 효과가 높음을 확인할 수 있었다. 대기정화 기능의 경우 SO₂와 NO₂의 흡수량이 유사한 패턴을 보였는데, 팔공산 및 청룡산 일대를 중심으로 흡수능이 각각 140g/yr, 370g/yr로 높게 분석되었다. 이는 이 지역의 산림이 대부분 잎이 넓은 활엽수림 또는 혼효림으로 구성되어 있으며, IV등급 이상의 산림이 분포하고 있기 때문이다. 바람생성 기능의 경우 앞산, 비슬산, 응해산 등과 같이 대규모 산림의 계곡 기저부를 따라 찬바람 생성가능성이 높은 것으로 분석되었다. 뿐만 아니라, 산림의 계곡 주변지역에서도 바람의 생성가능성이 높게 나타나 계곡이 찬바람 생성의 중요지역임을 확인할 수 있었다. 한편, 물순환성 기능의 경우 산림내부가 크고, 작은 계곡 및 소규모의 습지 및 저류지를 따라 높은 기능성을 가지는 것으로 나타났으며, 특히 비슬산 및 가창담 주변의 계곡이 높은 물순환성을 가진 지역으로 평가되었다. 마지막으로 탄소흡수 기능은 팔공산 및 청룡산의 산림녹지를 중심으로 250kg/yr 이상의 높은 탄소흡수량을 가지는 것으로 나타났다. 반면, 침엽수림의 비율이 높고, II등급 이하의 산림녹지가 분포하고 있는 금계산 및 대니산 등의 지역에서는 탄소의 흡수능이 낮은 것으로 평가되었다.

다음으로 대구광역시 산림녹지에 대한 종합적인 환경조절적 기능을 평가한 결과, 앞산,

비슬산, 팔공산 등의 산림녹지의 정상부 및 주변지역에서 66점 이상으로 높은 점수가 나타났으며, 신갈나무 및 굴참나무 등의 활엽수 비율이 높은 대덕산과 환성산 지역에서도 환경조절적 기능 높게 평가되었다. 반면, 외룡산 주변 지역 및 북구 칠곡지구 주변의 산림녹지는 40점 이하의 낮은 점수로 평가되었다. 이 지역들은 도시와 인접해 있는 지역으로 도시 개발에 의해 외곽부분이 심각하게 훼손되어 있거나, 도로 등에 의해 산림녹지가 단절되어 있어 기능성이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 기능성이 낮게 평가된 지역의 경우 훼손된 산림에 대한 복원작업이 필요할 것이며, 추가적인 개발사업에 의한 무분별한 산림의 훼손을 미연에 방지해야 할 것으로 사료된다.

한편, 본 연구는 산림녹지의 다양한 기능 중 환경조절적 기능에만 초점을 두고 평가하였으며, 대기정화 및 탄소저감 기능 평가에서 원단위의 한계로 인해 세부 군락별 흡수량을 평가하지 못하였다. 또한, 종합적인 평가 점수를 산정함에 있어, 표준화 기법을 활용한 상대적인 평가가 이루어졌기 때문에 절대적인 기준에서의 평가가 어렵다는 한계를 가지고 있다. 따라서 향후에는 산림녹지의 다양한 기능에 대한 정량적인 평가가 이루어져야 할 것이며, 지표별 달성수준을 설정하여 절대적인 평가가 가능하도록 해야 할 것으로 판단된다. **KAGIS**

주

- 1) 감마지수, 경관미, 고립도, 굴곡성, 기온저감, 녹지가시성, 녹지면적, 녹지모양, 녹지연결성, 녹지용적, 녹지접근성, 녹피율, 대기순환, 동물이동성, 물순환성, 생태면적률, 수계접근성, 식생활력도, 신장성, 안정성, 역사문화적 가치, 이용만족도, 이용인구, 인접지역 토지이용, 자연성, 종다양도, 종풍부도, 주변부둘레길이, 층위구조, 탄소저장, 탄소흡수, 토양보전, 투수성, NOx 흡수, SOx 흡수.
- 2) 6명의 전문가는 녹지관련 연구에 다양한

경험을 가지고 있으며, 3명은 관련학과 교수, 1명은 국가연구원, 2명은 녹지 및 생태 관련 연구를 수행 중인 조경학 박사수료생으로 구성하였다.

참고 문헌

- 권순덕, 박영규, 김은희. 2008. GIS를 이용한 산림기능구분에 관한 연구: 춘양 국유림 산림경영계획구를 대상으로. 한국지리정보학회지 11(4):10-21.
- 김경하, 이천용, 이원규. 1992. 유역의 입지조건이 갈수기 저수량에 미치는 영향. 임업연구원 연구보고. 44:75-86.
- 김영인, 여홍구. 2009. 도시재생전략 수립을 위한 도시의 창조성 지수 개발에 관한 연구. 국토계획 44(2):71-84.
- 김형호, 정세경, 정주상. 2006. 산림기능평가를 위한 GIS 응용모델의 개발. 한국지리정보학회지 9(4):1-11.
- 박경훈, 정성관. 1999. 광역적 녹지계획 수립을 위한 도시열섬효과 분석. 한국지리정보학회지 2(3):35-45.
- 박영규, 노혜정, 전준현, 김형호. 2010. 사유림의 산림기능평가를 위한 기능유형 및 우선순위 분석. 농업생명과학연구 44(6):51-59.
- 박은진, 강규이, 이현정. 2007. 물순환을 고려한 도시녹지 기능 제고 방안. 경기개발연구원 연구보고서. 180쪽.
- 박창석, 오규식, 이영숙, 김재호, 이동우, 김기돈. 2007. 도시생태네트워크 구축을 위한 토지이용계획 연구. 환경정책평가연구원 연구보고서. 288쪽.
- 배민기, 정환도, 손영모. 2009. 기후변화대응을 위한 도시내 녹지공간의 역할: 대전광역시를 사례로. 환경정책 17(2):181-199.
- 사공정희. 2004. 대도시의 경관생태적 녹지연

- 계망 구축 방안. 경북대학교 박사학위논문. 162쪽.
- 산림청. 1998. 제4차 산림기본계획. 45쪽.
- 서수현, 유리화, 이계한, 안기완. 2006. GIS 적용에 의한 산림기능평가: 전남대학교 장성 연습림을 대상으로. 산림경제연구 14(2): 45-54.
- 송봉근, 박경훈. 2010. 기후생태적 기능을 고려한 찬공기 생성지역 분석: 창원시를 대상으로. 한국지리정보학회지 13(1):114-127.
- 안태원. 2010. 저탄소 그린시티 구현을 위한 녹지계획지표 수립 연구: 춘천시를 대상으로. 강원대학교 대학원 박사학위논문. 87쪽.
- 엄대용. 2006. 원격탐사 자료에 의한 지표온도 추출 정확도 향상에 관한 연구. 한국지리정보학회지 9(2):159-171.
- 윤민호. 2009. 원격탐사를 활용한 녹지가 도시 기온에 미치는 영향 연구: 서울시를 대상으로. 서울대학교 석사학위논문. 64쪽.
- 이경학. 1995. 산림기능잠재력평가 및 분류시스템. 산림과학논문집. 52:124-137.
- 이성열. 2007. 도시지역 토지유형별 열환경 특성 분석에 관한 연구: 수원시 이의동을 중심으로. 협성대학교 석사학위논문. 110쪽.
- 이우성. 2011. 지속가능한 도시공간 조성을 위한 녹지환경 평가 및 계획방향 설정. 경북대학교 대학원 박사학위논문. 439쪽.
- 이우성, 박경훈, 정성관, 유주한, 김경태. 2009. 산지습지의 보전가치 평가를 통한 관리권역 설정: 경상남도 재약산의 산들늪을 대상으로. 한국지리정보학회지 12(2):1-17.
- 이우성, 정성관, 박경훈, 김경태. 2010. 친환경적 공간계획을 위한 도시의 열환경 분석. 한국지리정보학회지 13(1):142-154.
- 이원열, 주진순, 김사일, 김성일. 1991. 자연휴양림 예정지 적지평가. 임업연구원 연구보고 43:71-80.
- 이중용, 이희연. 2005. 토지적성평가에 있어서 종합적성값 산정과 적성등급 부여방법의 문제점과 개선방안. 대한지리학회지 40(1): 27-46.
- 정주상, 김형호, 차재민, 박영규. 2002. GIS 응용에 의한 산림기능 적합도 분석을 위한 산림구획기법. 한국임학회지 91(1):1-9.
- 조용현, 조현길. 2002. 서울시 도시녹지의 대기 정화효과. 한국환경복원녹화기술학회지 5(4): 51-60.
- 조현길. 1999. 강원도 일부도시의 경관내 탄소 흡수 및 배출과 도시녹지의 역할. 한국조경학회지 27(1):39-53.
- 조현주. 2007. 경관생태계획 모형 및 적용기준 설정. 경북대학교 대학원 석사학위논문. 185쪽.
- 최경, 김태훈. 1982. 산사태 발생 원인에 관한 연구. 임업시험장 연구보고. 29:1-37.
- 한수진, 이우균, 광두안. 2006. GIS를 이용한 산림휴양기능평가. 한국지리정보학회지 9(1): 13-19.
- Andrade, H. and R. Vieira. 2007. A climatic study of an urban green space: the Gulbenkian Park in Lisbon (Portugal). *Finisterra-Revista Portuguesa de Geografia*, XLII(84):27-46.
- Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal* 24: 43-69.
- Jo, H.K. and E.G. Mcpherson. 1995. Carbon storage and flux in urban residential greenspace. *Journal of Environmental Management* 45: 109-133.
- Kuehl, R.O. 2000. *Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and Analysis*. Duxbury/Thomson Learning,

- Pacific Grove. 666pp.
- Marks, R., and M. Müller. 1992. Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshauhaltes (BALVL). Forschungen zur deutschen Landeskunde Bd 229: 103–107.
- Milne, R., and T.A. Brown. 1997. Carbon in the vegetation and soils of Great Britain. *Journal of Environmental Management* 49(4):413–433.
- Nowak, D.J., D.E. Crane and J.C. Stevens. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4: 115–123.
- Richard, D. 2001. FELSA—Tools ArcView Software Extension User Guide. North Country and Southern New Hampshire Resource Conversion and Development Area Councils. 18pp.
- Riess, W. 1986. Konzepte zum Biotopverbund im arten- und Biotopschutzprogramm Bayern. *Laufener Seminarbeitrag* 10: 102–115.
- Saaty, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, USA. 287pp.
- Upmanis, H., I. Eliasson and S. Lindqvist. 1998. The Influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology* 18:681–700.
- Xiao, Q.F. and E.G. McPherson. 2002. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystems* 6:291–302. **KAGIS**