한국환경생태학회지 25(3) : 412~420. 2011
Kor. J. Env. Eco. 25(3) : 412~420. 2011

그래프 이론을 적용한 서울시 녹지 연결망의 정량적 분석[1a]

강완모[2] · 박찬열[3*]

Quantitative Analysis of Seoul Green Space Network with the Application of Graph Theory[1a]

Wan-Mo Kang[2], Chan-Ryul Park[3*]

요 약

본 연구는 1975년부터 2006년까지 서울시 녹지 연결망의 시계열 변화를 그래프 이론을 적용하여 공간의 다중규모(multi-scale)에서 정량적으로 분석하였다. 분석대상 시기 동안, 서울시 녹지 연결망의 변화가 크게 나타난 공간 규모는 녹지 간 1,000 ~ 1,600 m 거리였다. 1990년 이후 난개발로 단편화되고 훼손되었던 녹지들과 연결망이 점차 복원되고 있음을 확인할 수 있었다. 2006년 개별 녹지의 연결망 분석을 통해, 핵심 녹지와 징검다리 녹지의 두 가지 유형의 녹지 연결망 분포를 확인하였다. 서울시 녹지 분포는 연결성 중요도 지수와 상관관계가 높아서, 남쪽과 북쪽의 가장자리에 핵심 녹지가 분포하고 동쪽, 서쪽, 중앙에 매개 중심성이 높은 징검다리 녹지가 분포함을 정량적으로 표현할 수 있었다. 따라서 서울시 녹지 연결망은 그래프 이론을 적용하여 연결 중심성, 매개 중심성, 연결 중요도 지수 등으로 정량적으로 표현될 수 있다.

주요어: 네트워크 중심성, 매개 중심성, 생물다양성 보전

ABSTRACT

This study was conducted to quantitatively analyze the temporal change of green space network at multi-scales from 1975 to 2006 with the application of graph theory in Seoul, Korea. Remarkable change of connectivity was detected in green space networks at the scale ranging from 1,000 ~ 1,600 m during 30 years. Green spaces and their networks have been restoring after 1990 since forest areas had been fragmented in 1975. In 2006, we identified the important core habitat areas that can sustain diverse wildlife species and stepping stones composed of small patches that can link these core habitat areas. Green spaces showed high correlation with the relative importance value of green space connectivity. So, this study could graphically represent green space networks of Seoul City. Green spaces of core areas distributed at the northern and southern boundary, and those of stepping stones possessing the high value of betweenness centrality consisted at the middle, eastern and western boundary. These results indicate that green space network can be graphically and quantitatively explained by degree centrality, betweenness centrality and relative importance value of connectivity with the application of graph theory.

1 접수 2011년 4월 30일, 수정(1차: 2011년 5월 31일, 2차: 2011년 6월 4일), 게재확정 2011년 6월 5일
Received 30 April January 2011; Revised(1st: 31 May 2011, 2nd: 4 June 2011); Accepted 5 June 2011
2 서울대학교 환경대학원 Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul(151-742), Korea(reomi00@snu.ac.kr)
3 국립산림과학원 산림생태연구과 Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul(130-712), Korea
a 이 논문은 2010~2014년도 국립산림과학원 '도시화 및 인간간섭 산림녹지의 Biotope 계량화 및 관리방안' 연구의 일환으로 수행되었음.
* 교신저자 Corresponding author(park@forest.go.kr)

KEY WORDS: BETWEENNESS CENTRALITY, BIODIVERSITY CONSERVATION, NETWORK CENTRALITY

서 론

생물 다양성 보전과 사막화 방지에서 녹지(green space)의 중요성과 녹지의 생태계 서비스(ecosystem service)에 대한 관심은 부각되고 있지만(Millennium Ecosystem Assessment, 2003), 기후 변화와 인위적 개발에 의해 산림 생태계는 지속적으로 훼손되어가고 있다(Achard *et al*., 2002; Meffe, 2002). 2007년 산림청 산림기본통계에 따르면 2006년 말 우리나라의 산림 면적은 638만 9,393 ha로, 1996년 644만 7,936 ha와 비교하면 10년 동안 5만 8,543 ha의 숲이 사라졌다(Korea Forest Service, 2007). 해마다 평균 약 5,800 ha의 숲이 사라지고 있는 실정이다. 자연 재해 및 산불과 같은 인재의 영향도 있지만, 가장 큰 이유는 인간의 무분별한 토지이용으로 인한 산림 훼손과 도시화(urbanization)에 따른 결과이다(Hilty *et al*., 2006). 우리나라 국토 여건 및 지가 상승에 따라 도시지역에서 녹지를 확대하는 것은 힘들지만, 경관 연결성(landscape connectivity)을 고려하여 녹지가 부족한 공간에 효과적으로 신규 녹지를 조성하고 전체 녹지 연결망(network)을 안정적으로 보전하는 전략이 필요하다(Bengtsson *et al*., 2003; Lee and Thompson, 2005).

경관 연결성은 서식지 조각(habitat patch) 간 생물종 이동과 전파(dispersal), 유전자 흐름(genetic flow)을 원활하게 하거나 방해하는 정도로 정의된다(Taylor *et al*., 1993; Calabrese and Fagan, 2004). 경관 연결성은 서식지간 거리와 경관을 구성하는 바탕(matrix)의 토지이용 형태에 의해 주로 결정되며, 이는 생물 개체군의 생존과 메타 개체군(metapopulation)의 이동 성공에 큰 영향을 미친다(Calabrese and Fagan, 2004). 파편화된 경관에서 생물 다양성과 생태계 안정성은 일반적으로 경관 연결성에 의해 결정된다(Soulé, 1986; Donnelly and Marzluff, 2006). 따라서 다양한 규모에서 연결성이 높은 경관에서는 서식지 조각 사이에 여러 야생동물의 이동뿐만 아니라 종자 전파와 같은 유전자 흐름이 용이하며, 구조 효과(rescue effect)와 생물종의 군집 형성(colonization)을 통해 오랜 기간 동안 생물종을 안정시킨다(Joly *et al*., 2003).

경관 연결성 정도가 생물 다양성을 지속적으로 안정시키는 데 중요한 역할을 하지만, 우리나라의 생물권 보전지역들과 준 자연 서식지들 사이의 연결망이 어떠한 지 정량적 수치로 표현하지 못하고, 축 및 회랑(corridor) 등 선언적 보호 정책 수준에서 대안을 적용하고 있다(Jeon *et al*., 2010). 그러나 선형적인 생태축만 고려할 경우 연결망의 회복탄력성(resilience)을 안정적으로 유지시키는 다양한 녹지 연결성과 모듈 구조(modularity structure)를 고려하지 못하는 문제점을 가지고 있다(Walker and Salt, 2006). 토지피복 현황 분석에 의해 단순히 녹지들을 선형 연결시키는 보전 전략은 녹지 연결망의 위계성 있는 체계를 고려하지 못하여 생태적 지속 가능성 측면에서 한계가 있을 수 있다. 따라서 생물종 분포와 관련한 핵심 서식지(core habitat area)를 도출하고, 핵심 서식지 사이의 연결망을 분석하여 생물권 보전지역들과 준 자연 서식지의 구조적 기능적 연결망을 분석하는 연구가 필요하다.

경관 파편화를 정량화하는 FRAGSTATS(McGarigal and Marks, 1995) 같은 프로그램 등에서 제공하는 전통적인 경관 분석 방법으로는 녹지 연결망 구조와 연결성을 평가하기는 어렵다. 그러나 최근, 사회 과학과 컴퓨터 과학 등에서 널리 적용되고 있는 그래프 이론(graph theory)에 기반을 둔 네트워크 분석은 적은 양의 자료를 이용하여 효율적인 분석을 가능하게 해준다(Theobald, 2001). 네트워크, 즉 연결망은 노드(node or vertex)와 링크(link or edge)로 구성되는데, ArcGIS 등 시각화(visualization) 프로그램을 함께 사용하면 연결망과 야생동물의 메타 개체군 같은 생태 과정(ecological processes) 연구에 있어 효율적으로 결과를 얻을 수 있다(Bunn, 2000). 그래프 이론을 적용한 연결망 연구는 생물 다양성 보전과 생태·경관 보전계획수립에 있어 검증된 효과적인 방법론적 분석 도구로 등장하고 있다(Urban *et al*., 2009; Galpern *et al*., 2011).

이에 본 연구에서는 그래프 이론을 적용한 네트워크 분석 방법론을 이용하여 1975년부터 2006년까지 서울시 녹지 연결망의 시계열적 변화 양상을 다중규모(multi-scale)에서 정량적으로 파악하고, 개별 녹지가 나타내는 연결성 값을 분석하였다. 본 연구 결과는 서울시의 과거와 현재의 녹지 연결망 추세를 진단하고, 서울시 녹지 연결망을 형성하는 중요한 공간 규모를 도출할 수 있다. 실제적으로, 녹지가 추가적으로 필요한 위치와 구조적으로 중요한 공간이 어디인지 알 수 있다. 이를 통해 생태계 기능을 고려한 실질적인 녹지경관관리와 보전계획이 가능할 것이다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

연구 대상지는 공간적으로 서울시 행정구역 면적 약 605

㎢이며, 시간적 범위는 1975년부터 2006년이다. 통계청에 따르면 2008년 기준 서울시의 공원녹지를 포함하는 녹지 면적은 244 ㎢이며, 그 중 대다수의 녹지가 도시외곽에 분포하고 있다. 2008년 기준 인구대비 1인당 녹지 면적은 23.94 ㎡으로 다른 광역시(부산 161.99 ㎡, 대전 276.34 ㎡, 울산 478.12 ㎡ 등)에 비해 낮은 수준이다.

2. 연구 방법

토지피복과 녹지 분포의 변화를 파악하기 위해 국가수자원관리 종합시스템(WAMIS)에서 제공받은 토지 피복도(1975년, 1985년, 1995년)를 이용하였다(Table 1). 2006년은 미국지질조사소(USGS)의 Landsat TM 위성영상을 이용하고, ENVI 4.5 프로그램에서 감독분류인 최대 우도법(maximum likelihood estimation)을 적용하여 토지피복도를 작성하였다.

ArcGIS 9.1에서 토지피복도의 녹지를 분류하고, 지리 데이터들을 이용하여 연결망을 분석하였다. 서울시의 공간규모에서 조류종을 포함하는 야생동물의 서식공간에 안정성을 제공해줄 수 있는 면적을 5 ha 이상 크기의 녹지로 판단하고 분석에 포함하였다(Drinnan, 2005; Minor and Urban, 2007). 연결망 분석 방법은 8-neighbor rule에 의해 그룹화된 개별 녹지 조각들이 노드(node)가 되며, 녹지 가장자리 간(edge to edge) 유클리디안 거리(euclidean distance)를 적용하여 녹지 연결망을 그림으로 표현하였다. 또한 시각성과 연결성 계산에 있어 효율성을 높이기(computationally efficient) 위한 그래프 근사(graph approximation) 방법으로 링크 간 교차를 허용하지 않는 최소평면그래프(minimum planar graph)를 적용하였다(Fall *et al*., 2007; Galpern *et al*., 2011). 각 시기의 연결망 변화를 파악하기 위해 예상 군집화 면적(expected cluster size)을 이용한 다중규모 분석을 통해 임계거리를 적용해 가면서 녹지가 군집화(clustering)되는 정도를 비교하였다.

$$ECS_t = \frac{\sum_{j=1}^{m} a_j^2}{a}$$

단, t = 임계거리, m = 임계거리 t의 그래프에서 연결된 녹지의 군집 수, a_j = 군집 j의 면적, a = 총 녹지 면적

예상 군집화 면적 분석은 면적 가중치 연결망 분석방법이다. 이를 이용하여 임계거리(t)가 증가함에 따라 고립되어 있는 녹지 조각들이 하나의 성분(component)들로 연결되어 군집화 되는 것을 확인하고, 군집화 되는 면적이 크게 증가하는 중요 공간 규모를 파악할 수 있다(Fall *et al*., 2007).

개별 녹지가 연결망에서 차지하는 중요도는 소형 명금류(songbird)의 부(-)의 지수 분포(negative exponential distribution)의 전파(dispersal) 거리 확률을 가정했을 때 P = 0.05에 해당하는 임계거리 1,500 m 거리를 적용하여 분석하였다(Sutherland *et al*., 2000; Minor and Urban, 2007). 따라서 녹지 가장자리 간 거리가 1,500 m 이하인 녹지들을 연결 관계가 있는 것으로 도식하여, 단순 무방향 무가중치 그래프(simple unweighted undirected graph)의 연결망을 분석하였다. 2006년 개별 녹지조각들의 연결성 값은 사회연결망 분석과 경관 생태학 연구에서 검증되고, 활발히 이용되고 있는 '연결 중심성(degree centrality)', '매개 중심성(betweenness centrality)', '근접 중심성(closeness centrality)'을 Pajek 1.26을 이용하여 계산하였다(Freeman, 1979; Estrada and Bodin, 2008). 연결 정도 중심성은 각 녹지와 직접적으로 연결되어 있는 녹지 수를 나타내며, 국지적 연결성(local connectivity)을 의미한다. 매개 중심성은 직·간접적으로 연결되어 있는 녹지 연결망에서 개별 녹지의 쌍(pair)을 최단 거리로 연결할 때 해당 녹지를 지나가는 정도를 의미하는 것으로 광역적 연결성(regional connectivity)을 나타낸다. 근접 중심성은 관심 녹지와 직·간접적으로 연결된 다른 녹지들 간 최단거리의 평균을 계산하는 것으로 관심 녹지가 다른 녹지들과 얼마나 가까이 있는지를 나타낸다. 또한 앞의 중심성 지수들과는 달리 녹지 면적을 고려하여 연결성 값을 분석할 수 있는 '통합 연결성 지수(integral index of connectivity, IIC)' 값을 이용하여 '연결 중요도 지수(relative importance value of connectivity, δ IIC)'를 계산하였다. 통합 연결성 지수는 직·간접적으로 연결된 녹지들의 면적이 크고, 녹지들 간 최단 거리가 짧을수록 지수 값이 크게 나타나며, 경관 수준에서 전체 녹지들이 나타내는 연결망의 연결성 정도를 의미한다(Pascual-Hortal and Saura, 2006).

Table 1. Information of satellite images

Year	Path/Row	Date of acquisition	Sensor	Pixel size (m)
1975	125/34	1973.10.08	MSS	60
1985	116/34	1985.05.14	TM	30
1995	116/34	1994.07.24	TM	30
2006	116/34	2006.10.24	TM	30

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_i \cdot a_j}{1+nl_{ij}}}{A_L^2}$$

단, nl_{ij} = 녹지 i, j 간 최단거리경로에서 링크의 수, a_i = 녹지 i의 면적, A_L = 총 녹지 면적

$$\delta IIC(\%) = 100 \times \frac{IIC - IIC_{remove}}{IIC}$$

연결 중요도 지수는 녹지조각들의 면적과 연결 관계를 고려하여 대상 녹지 조각(focal patch)이 없어졌을 때 통합 연결성 지수 값의 변화를 나타낸다. 연결 중요도 지수 값이 큰 녹지일수록 연결망에서 중요한 위치를 차지한다. 녹지들이 가지고 있는 여러 연결성 지수들의 분포를 고찰하는 데 앞서, 녹지 면적과 다양한 연결성 지수들 간 Spearman 순위 상관성 분석을 통해 지수들 간 관계를 살펴보았다. Spearman 순위 상관관계는 R 프로그램을 이용하여 분석하였다(R Development Core Team, 2010).

결과 및 고찰

1. 시계열적 토지피복과 다중규모 녹지 연결망 변화

연구 시기별 서울시 토지피복 변화량을 살펴보면, 1975년에 농경지가 가장 큰 면적을 차지하였고, 1975년부터 1985년까지 시가화 지역이 급속히 증가하였으며, 30년 동안 녹지의 면적은 크게 변화가 없었다(Figure 1). 그러나 1975년도 토지피복도는 60 m Landsat 영상으로부터 분류된 것으로 다른 시기의 30 m 해상도의 영상에 비해 녹지면적이 낮게 추정 되었을 가능성이 있다. 2006년 시가화 지역의 면적은 서울시 총 면적 중 약 60%, 녹지는 27.6%를 차지하는 것으로 나타났다. 전체 토지피복에서 녹지 면적이 30% 이하일 경우 녹지의 공간적 배열(spatial configuration)이 야생동물의 이동과 생존에 영향을 미치는 것으로 고려한다면(Andren, 1994; Fahrig, 2001), 현재 서울시에서 기존 녹지를 최대한 보전하면서 최적의 장소에 녹지를 조성하는 대안이 필요한 시기라고 판단된다. 또한 중·저해상도인 Landsat 영상의 단점을 보완하기 위해 Kompsat-2 등 고해상도 위성영상을 활용하고, 계절별 식생변화를 고려하여 지속적으로 다중시기별 토지피복변화를 모니터링 해야 할 것으로 판단된다.

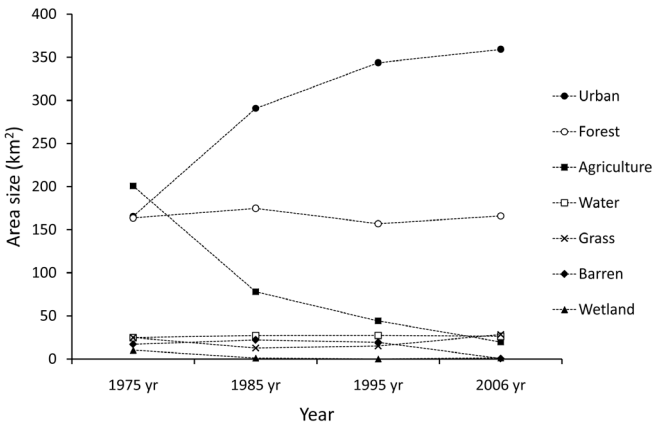

Figure 1. Land-cover changes from 1975 to 2006 in Seoul

시기별 녹지 연결망의 최소평면그래프를 분석하였을 때, 다른 시기에 비해 1975년의 경우 야생동물 서식과 공급(source)의 핵심 녹지가 되는 대규모 산림이 파편화되어 있다. 또한, 1975년 녹지 연결망은 2006년에 시가화 지역으로 분류되는 곳에 소규모 녹지들이 다수 분포하는 구조를 나타낸다(Figure 2).

1975년부터 2006년까지 임계거리를 늘려가면서 녹지 조각들이 연결되어 군집화되는 면적을 분석하였을 때, 시기별 녹지 면적은 큰 차이가 없었지만, 다중 규모에서 예상 군집화 면적이 변화함을 알 수 있다(Figure 3). 이는 녹지 연결망이 시기별로 다른 구조를 가지고 있다는 것을 의미한다. 즉, 1975년, 1995년, 2006년에는 약 1,000 ~ 1,100 m의 임계거리에서, 1985년의 경우에는 1,600 m의 임계거리에서 녹지 조각들이 큰 면적으로 연결됨을 나타낸다. 따라서 서울시 녹지 연결망 변화가 크게 일어났던 중요 공간규모는 임계거리 1,000 ~ 1,600 m에서의 공간규모인 것으로 판단된다.

1985년의 경우, 서울시 녹지를 하나로 연결시키기 위해 필요한 임계거리는 2,150 m이며, 다른 시기에 비해 더 큰 임계거리(1,600 m)에서 군집화가 나타나 서식지 파편화가

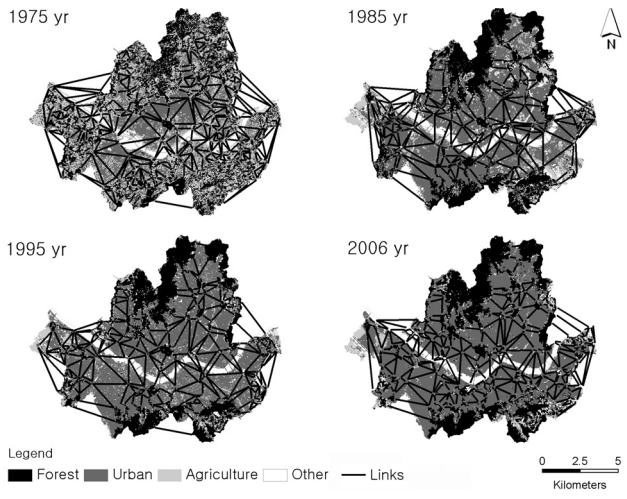

Figure 2. Land-cover maps and minimum planar graphs with all links

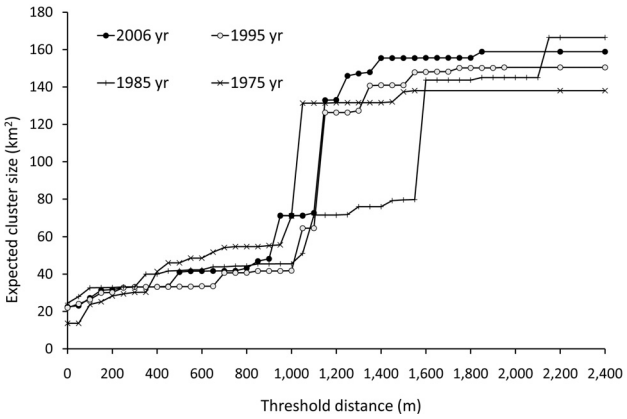

Figure 3. Expected cluster size calculated over increasing threshold distances for the green space landscape

크게 나타났던 것으로 분석됐다. 1975년의 경우, 다른 시기에 비해 400 m 미만의 작은 임계거리에서는 파편화가 컸지만, 400 m 이상의 임계거리에서의 연결성은 매우 높았던 것으로 나타났다. 1990년 이후부터 2006년까지는 임계거리 900 m 이상의 공간규모에서 연결성이 높아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 그리고 1995년에 비해 2006년은 연결성이 증가되면서 군집화되는 녹지 면적도 늘어난 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 나무가 없던 민둥산이 전체 산림의 68%를 차지하였지만, 1960년대 이후 진행된 산림녹화 및 그린벨트 정책으로 서울을 둘러싸고 있는 북한산, 도봉산, 청계산, 관악산 등 서울시 외곽 녹지 연결망에서 야생동물 핵심 서식지 역할을 할 수 있는 산림 생태계로 복원 모습을 갖추게 된 것으로 추측할 수 있다. 또한 2006년 연결망과 같이 과거 서울시의 녹지 연결망도 서울시 내부의 잔류 녹지들이 북쪽과 남쪽의 핵심 녹지들을 연결시키는 구조로서 정성적으로도 점차 녹지 간 연결성이 향상되고 있음을 파악할 수 있다. 그러나 녹지 주변의 토지이용변화와 이로 인한 도시 면적(built-up area)의 증가는 도시화에 민감한 야생동물의 전파와 이동을 어렵게 하고, 생물 다양성을 감소시키기 때문에 녹지 보전과 함께 주변 토지이용에 대한 세심한 관리가 매우 필요한 시점이다(Foley *et al*., 2005).

본 연구는 5 ha 이상의 녹지를 대상으로 시기별 녹지 연결망을 비교한 결과로서, 개발 영향을 크게 받으면서 도시화로 파편화가 크게 일어났을 것으로 판단되는 5 ha 미만의 녹지는 고려되지 않았다. 따라서 5 ha 미만의 녹지에서도 개체군을 유지할 수 있는 야생동물을 대상으로 다양한 녹지 면적을 고려한 연결망 분석이 필요하다. 또한 하천 수변 공간과 미립목지에서 드물게 분포하는 1 ha 미만의 도시 수목 녹지 환경은 인근 주요 서식지와 잘 연결되어 있을 경우 야생동물이 전파하고 먹이를 찾아 이동하는데 있어 중요하다(Andersson and Bodin, 2009). 이와 같은 생태 통로와 징검다리 서식지들을 반영한 추가적인 도시 연결망 분석도 요구된다. 이를 토대로 녹지 연결망이 생물 다양성과 생태계 서비스를 유지하기 위해 적지 적소에 추가적으로 녹지를 조성 등 지속 가능한 경관 계획과 보전 노력이 필요하다고 판단된다.

2. 녹지 연결망에서 기여하는 개별 녹지의 중요도 분석

녹지 연결망에 기여하는 개별 녹지의 중요도를 분석하기 위하여, 2006년 서울시 녹지 조각들의 500, 1,000, 1,500, 1,850 m 임계거리별 연결망을 시각적으로 알기 쉽게 녹지 중심간 연결로 변형하여 나타냈다(Figure 4). 임계거리가 증가함에 따라 강북과 강남의 녹지들이 강동구와 강서구, 중구의 녹지(남산)를 통해 연결된다. 임계거리 1,850 m에서 서울시 전체 녹지 조각들이 하나의 녹지로 연결된다. 녹지 조각들이 1,500m 임계거리에서 거의 연결이 되지만, 연결 중첩성(redundancy)은 떨어져 서울시 중앙부와 동쪽과 서쪽에 위치하는 녹지들이 사라질 경우 남과 북으로 녹지가 고립되며, 전체 연결망이 취약할 수 있다는 것을 시각적으로 알 수 있다.

Figure 5는 녹지 면적과 연결성 지수들 간 Spearman 순위 산점도와 상관계수를 나타낸다. 녹지 면적과 근접 중심성을 제외한 지수들의 각 순위 간 유의한 상관관계($p < 0.001$)가 있었다. 유의한 상관관계 중에서도 녹지면적은 연결 중요도 지수(δ IIC), 연결 중심성은 매개 중심성과 연결 중요도 지수(δ IIC), 매개 중심성은 연결 중요도 지수(δ

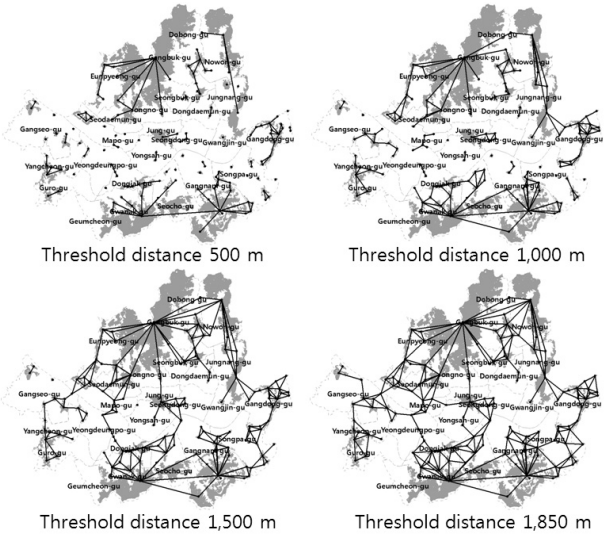

Figure 4. Minimum planar graph links at or below each threshold distance in 2006

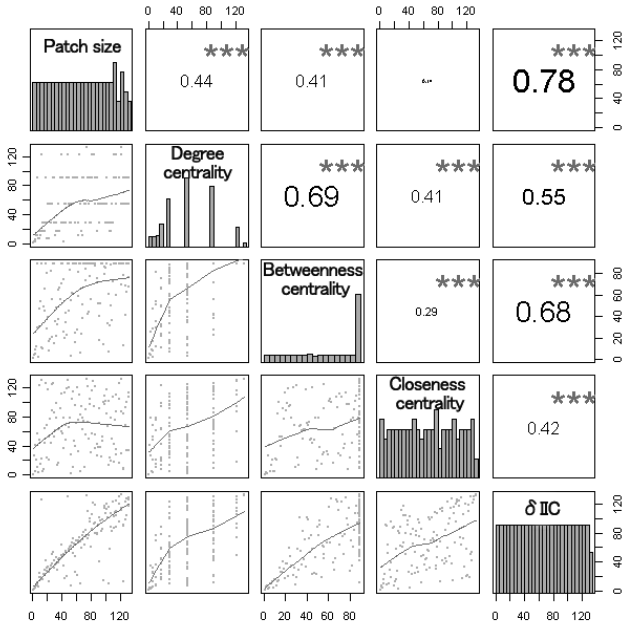

Figure 5. Scatter plots and correlation coefficients for the green space size-centrality-δ IIC Spearman rank correlations in Seoul green space network in 2006. *** indicates significance at $p < 0.001$

IIC)와 상관계수 0.5 이상의 높은 상관관계를 나타냈다. 적용된 지수들 간 모든 상관관계를 고려했을 때, 연결 중요도 지수(δ IIC)가 다른 지수들과 유의하면서 높은 상관관계를 보였다. 마다가스카르 농촌 경관에서는 주요 연결성 지수들 간 유의한 상관관계가 없는 녹지 분포를 나타냈으나(Estrada and Bodin, 2008), 본 연구에서는 녹지면적과 연결성 지수들 간에 높은 상관관계를 나타내서, 서울시 도시 경관에서는 일부 지역에 녹지가 편중되어 있음을 그래프 이론을 적용하여 정량화한 수치로 파악할 수 있었다.

Figure 6은 2006년 개별 녹지들의 연결 중심성과 매개 중심성, 근접 중심성, 연결 중요도 지수의 분포 지도이다. 대상 녹지 조각과 직접적으로 연결된 녹지 조각 수를 나타내며, 연결망에서 국지적 연결성 정도를 의미하는 연결 중심성은 면적이 큰 산림과 녹지 조각들이 밀집되어 분포하는 경관에서 높게 나타났다. 서울시 북쪽의 강북구(북한산), 도봉구(도봉산), 노원구(수락산), 남쪽의 관악구(관악산)와 서초구(구룡산, 대모산) 녹지들은 면적이 커서 녹지 내부에서 새로운 군집 형성(colonization)이 일어나고, 연결 중심성이 크기 때문에 구조 효과(rescue effect)를 통해 주변 녹지들로 야생동물의 확산을 가능하게 하는 핵심 서식지 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

생태·경관보전지역이 포함되어 있는 강동구의 녹지들은 100 ha 이하로 면적은 크지 않지만, 여러 녹지들이 임계거리 내에서 잘 연결되어 연결 중심성이 큰 것으로 나타났다. 생태·경관보전지역 주변 녹지들도 준자연 보전지역으로 설정하여 연결망을 지속적으로 유지하는 것이 바람직하다고 판단된다.

매개 중심성은 대상 녹지 조각이 직·간접적으로 연결되어 있는 녹지들과 연결망을 구축하는데 중개 서식지 즉, 생태 통로(corridor)와 징검다리 녹지(stepping stone) 역할 정도를 나타낸다. 이러한 측면에서 서울시 북쪽과 남쪽의 핵심 녹지들을 연결시키는 중앙부와 동쪽과 서쪽 방향에 위치하고 있는 녹지들은 매개 중심성 값이 높았다. 북쪽과 남쪽을 연결시키는 데 있어 징검다리 서식지들로 이루어진 3개 주요 생태통로와 영향력이 적은 징검다리 서식지를 확인할 수 있었다. 그러나 이들 생태 통로를 구성하는 징검다리 녹지 간 거리가 평균 1,000 m 이상으로 부(-)의 지수 분포의 전파 확률을 가정하면 1,000m 거리에서 성공적으로 이동할 확률(P)이 0.14로서 낮다. 따라서 이 녹지들의 보전과 함께 연결 경로에 징검다리 또는 생태통로 역할을 할 수 있는 추가적인 녹지 조성이 필요하다.

근접 중심성은 대상 녹지가 직·간접적으로 연결되어 있는 다른 녹지들과 얼마만큼 가깝게 있는 가를 나타낸다. 서울시에서 이 지수는 전체 경관에서 편중되지 않고 고르게 분포하였다. 마다가스카르 농촌경관에서 근접 중심성 지수

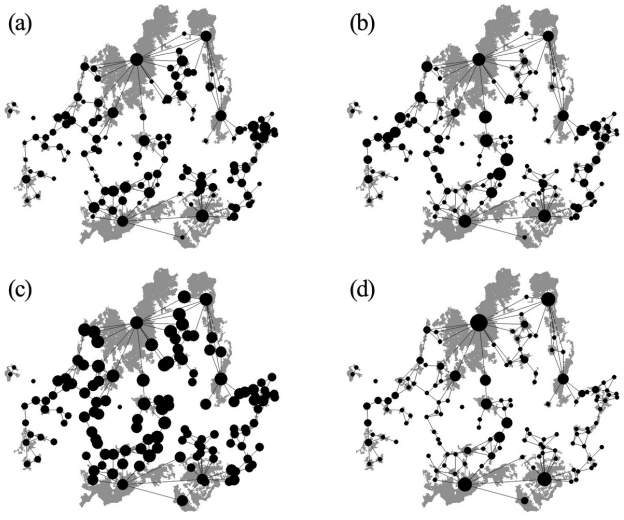

Figure 6. Green space networks of Seoul showing the distribution of high-centrality and high-δ IIC green spaces. The size of node of each green space is proportional to its score on (a) degree centrality, (b) betweenness centrality, (c) closeness centrality, and (d) δ IIC. The black lines represent the connections between the green spaces at or below a 1,500 m scale

는 경관 일부에서 편중되어 나타났는데(Estrada and Bodin, 2008), 이는 대상지 경관의 연결망에서 고립되어 있는 녹지 조각과 성분들이 많은 것과 관련이 있다. 서울시는 1,500 m 규모에서 녹지들이 거의 연결되었기 때문에 근접 중심성 값이 비교적 고르게 나타났으며, 남쪽과 북쪽의 핵심 서식지들과 이들을 연결하는 서울시 중앙부 녹지들의 근접 중심성이 크게 나타났다. 이와는 달리, 서쪽의 녹지조각들은 비교적 근접 중심성이 낮아, 연결은 되어 있지만, 상대적으로 다른 녹지들과 떨어져서 미약한 연결(weak link)을 나타냈다. 서울시 서쪽에 해당하는 양천구와 구로구 녹지에서 서식하는 생물종들은 다른 지역으로부터 전파와 유전자 흐름이 원활하지 않아 다른 지역의 생물종 개체군과 유전적 차이가 클 것으로 예상되며(Manel *et al*., 2003), 이를 검증하기 위한 실증적 연구가 필요하다고 판단된다.

연결 중요도 지수는 면적이 큰 핵심 녹지들과 서울시 중앙부와 동쪽, 서쪽 방향에 위치하고 있는 녹지들에서 높은 값을 보였고, Spearman 순위 상관관계 분석 결과와 같이 매개 중심성과 유사한 분포를 나타냈다. 북쪽과 남쪽의 핵심 녹지들을 연결시키는 주요한 3개의 징검다리 경로 중 서울시 중구를 통해 연결되는 중앙 경로가 보전 우선순위가 높은 지역으로 분석되었다.

3. 녹지 연결망 보전을 위한 환경계획 제안

서울시 녹지들의 공간적 위상 관계가 형성하고 있는 연결망을 토대로 제안되는 녹지경관보전지역은 Figure 7과 같다. 연결망 내에서 녹지들이 기여하는 중요도와 이들 녹지들의 주변 토지이용, 인위적 간섭(anthropogenic disturbance)을 토대로 기능적으로 3가지 유형의 총 9개 지역을 설정하였다.

지역 A, B, C, D는 생물 다양성이 높은 국립공원과 자연공원으로 핵심 서식지 역할을 하며, 국지적 연결성이 큰 지역이다. 서식지 내부에서 개체군 군집 형성이 크고, 연결된 주변 녹지들로 야생동물의 이동과 확산이 활발히 일어나며, 생태계 서비스의 유지에 있어 중심이 된다(Minor and Urban, 2007). 지역 E, F, G는 서울시 핵심 서식지들을 연결시키는 중요 징검다리 서식지와 생태통로를 포함한다. 이 지역들은 녹지들의 보전과 함께 생물종의 이동과 전파, 유전자 흐름을 원활히 하기 위해 추가적인 징검다리 녹지 조성뿐만 아니라, 녹지를 둘러싸고 있는 주변 토지이용에 대한 바탕 관리(matrix management)가 필요하다(Minor and Urban, 2008). 지역 H, I는 비교적 국지적 연결성이 큰 지역이지만, 개발 압력이 큰 도시 바탕 안에 위치한다. 이들 녹지는 면적이 크지 않기 때문에 내부적으로 다양한 서식 환경을 제공하며, 서식지 질을 향상할 수 있는 보전 계획과 관리가 필요하다(Donnelly and Marzluff, 2006). 또한 근접한 공급(source) 녹지들과의 연결성을 향상시키기 위해 주변 토지이용에 대한 다양한 생물종의 민감도(sensitivity)를 고려한 경관 계획이 요구된다(Hilty *et al*., 2006). 이와 같은 3가지 유형에 따른 도시 녹지 연결망 향상과 보전 노력은 서울시 남쪽과 북쪽의 핵심 녹지들이 징검다리와 생태통로 녹지들을 통해 잘 연결되면서 핵심 녹지 주변에 녹지 거점 지역을 설정하고 복원하는데 기여할 것이다.

연구 결과와 제안된 환경계획은 지속가능한 생물 다양성 보전과 생태적 관리방안 수립에 있어 중요자료로 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다. 이를 통해 서울시 녹지 연결망을 유지하고 보완하여 구조적·기능적 생물 다양성을 향상시킬 수 있는 효율적 녹지관리 전략이 가능할 것이다. 향후 생물 다양성 보전을 위한 효율적인 토지이용과 환경보전계획 수립을 위해 서식처 다양성의 관점에서 다양한 생물종의 서식지 요구(habitat requirement) 특성과 면적, 전파 거리(dispersal distance)를 고려한 다중규모 연결망(Minor and Lookingbill, 2010)의 지속적인 분석과 모니터링이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 서울시 토지의 지가, 소유형태 등 사회·경제적 측면을 고려하지 못하였으나, 향후 도시계획에서 중요한 사회·경제적 인자를 포함하여 실효적이며 적용가능한 녹지 조성 및 관리 전략이 수립되길 바란다. 또한, 녹지 연결망은 다양한 생물의 서식에 유리하지만,

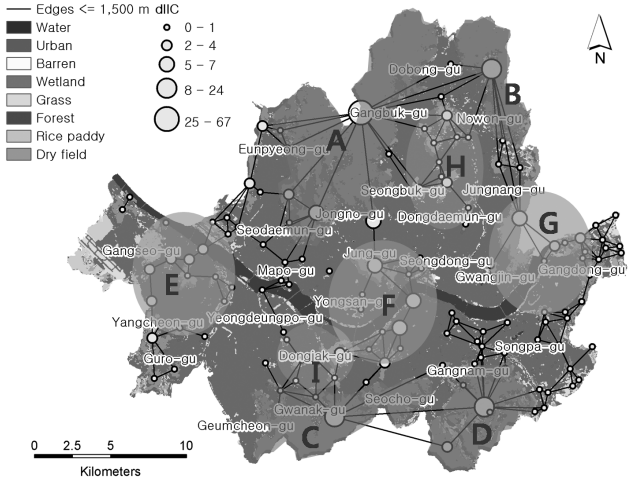

Figure 7. Proposed connectivity zones for conservation planning. Zones A, B, C and D represent areas of high local connectivity. Zones E, F and G indicate potential wildlife corridors and stepping stones threatened by human-created barriers. Zones H and I represent areas of medium local connectivity threatened by anthropogenic pressures. (The size of node of each green space is scaled by its δ IIC score.)

일부 유해동물에겐 통로로 작용할 수도 있다는 점을 감안하여 녹지 연결망 정책에는 세심한 고려가 현실적으로 필요하다.

인용문헌

Achard, F., H.D. Eva, H.J. Stibig, P. Mayaux, J. Gallego, T. Richards and J.P. Malingreau(2002) Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. Science 297: 999-1002.

Andersson, E. and O. Bodin(2009) Practical Tool for Landscape Planning? An Empirical Investigation of Network Based Models of Habitat Fragmentation. Ecography 32: 123-132.

Andren, H.(1994) Effects of Habitat Fragmentation on Birds and Mammals in Landscapes with Different Proportions of Suitable Habitat - a Review. Oikos 71: 355-366.

Bengtsson, J., P. Angelstam, T. Elmqvist, U. Emanuelsson, C. Folke, M. Ihse, F. Moberg and M. Nyström(2003) Reserves, Resilience and Dynamic Landscapes. Ambio. 32(6): 389-396.

Bunn, A., D. Urban and T. Keitt(2000) Landscape Connectivity: A Conservation Application of Graph Theory. J. Environ. Manage. 59: 265-278.

Calabrese, J.M. and W.F. Fagan(2004) A Comparison-shopper's Guide to Connectivity Metrics. Front. Ecol. Environ. 2(10): 529-536.

Donnelly, R. and J. Marzluff(2006) Relative Importance of Habitat Quantity, Structure, and Spatial Pattern to Birds in Urbanizing Environments. Urban. Ecosystems. 9(2): 99-117.

Drinnan, I.(2005) The Search for Fragmentation Thresholds in a Southern Sydney Suburb. Biol. Conserv. 124(3): 339-349.

Estrada, E. and O. Bodin(2008) Using Network Centrality Measures to Manage Landscape Connectivity. Ecol. Appl. 18(7): 1810-1825.

Fall, A., M. Fortin, M. Manseau and D. O'Brien(2007) Spatial Graphs: Principles and Applications for Habitat Connectivity. Ecosystems. 10(3): 448-461.

Fahrig, L.(2001) How Much Habitat is Enough? Biol. Conserv. 100: 65-74.

Foley, J., R. DeFries, G. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. Carpenter, F. Chapin, M. Coe, G. Daily, H. Gibbs, J. Helkowski, T. Holloway, E. Howard, C. Kucharik, C. Monfreda, J. Patz, I. Prentice, N. Ramankutty and P. Snyder(2005) Global Consequences of Land Use. Science. 309: 570-574.

Freeman, L.(1979) Centrality in Social Networks: Conceptual Clarification. Soc. Networks. 1(3): 215-239.

Galpern, P., M, Manseau and A. Fall(2011) Patch-based Graphs of Landscape Connectivity: A Guide to Construction, Analysis and Application for Conservation. Biol. Conserv. 144(1): 44-55.

Hilty, J., W. Lidicker, A. Merenlender and A. Dobson(2006) Corridor Ecology: The Science and Practice of Linking Landscapes for Biodiversity Conservation. Island Press, Washington, D.C., USA.

Jeon, S.W., J.Y. Chun, H.C. Seong, W.K. Song and J.H. Park(2010) A Study on the Setting Criteria and Management Area for the National Ecological Network. J. Korean Env. Res. Tech. 13(5): 154-171. (in Korean with English abstract)

Joly, P., C. Moreand and A. Cohas(2003) Habitat Fragmentation and Amphibian Conservation: Building a Tool for Assessing Landscape Matrix Connectivity. C. R. Biol. 326: 132-139.

Korea Forest Service(2007) Basic Statistics of Korea Forest. Korea Forest Service, Daejon, Korea. (in Korean)

Lee, J.T. and S. Thompson(2005) Targeting Sites for Habitat Creation: an Investigation into Alternative Scenarios. Landsc. Urban. Plan. 71: 17-28.

Manel, S., M.K. Schwartz, G. Luikart and P. Taberlet(2003) Landscape Genetics: Combining Landscape Ecology and Population Genetics. Trends. Ecol. Evol. 18: 189-197.

McGarigal, K. and B.J. Marks(1995) FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. USDA Forest Service, General Technical Report PNW-351, 122pp.

Meffe, G.K., L.A. Nielsen, R.L. Knight and D.A. Schenborn(2002) Ecosystem Management: Adaptive, Community-based Conservation. Island Press, Washington, D.C., USA.

Millennium Ecosystem Assessment(2003) Ecosystems and Human Well-being. Island Press, Washington, D.C., USA.

Minor, E. and D. Urban(2007) Graph Theory as a Proxy for Spatially Explicit Population Models in Conservation Planning. Ecol. Appl. 17(6): 1771-1782.

Minor, E. and D. Urban(2008) A Graph-theory Framework for Evaluating Landscape Connectivity and Conservation planning. Conserv. Biol. 22(2): 297-307.

Minor, E. and T. Lookingbill(2010) A Multiscale Network Analysis of Protected-Area Connectivity for Mammals in the United States. Conserv. Biol. 24(6): 1549-1558.

Pascual-Hortal, L. and S. Saura(2006) Comparison and Development of New Graph-based Landscape Connectivity Indices: Towards the Priorization of Habitat Patches and Corridors for Conservation. Landscape. Ecol. 21(7): 959-967.

R Development Core Team(2010) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Taylor, P., L. Fahrig, K. Henein and G. Merriam(1993) Connectivity is a Vital Element of Landscape Structure. Oikos 68(3): 571-573.

Soulé, M.E.(1986) Conservation Biology: The Science of Scarcity and Diversity. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.

Sutherland, G., A. Harestad, K. Price and K. Lertzman(2000) Scaling of Natal Dispersal Distances in Terrestrial Birds and Mammals. Conserv. Ecol. 4(1): 16.

Theobald, D.M.(2001) Topology Revisited: Representing Spatial Relations. Int. J. Geogr. Inf. Sci. 15(8): 689-705.

Urban, D., E. Minor, E. Treml and R. Schick(2009) Graph Models of Habitat Mosaics. Ecol. Lett. 12(3): 260-273.

Walker, B.H. and D.A. Salt(2006) Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World. Island Press, Washington, D.C., USA.