한국농림기상학회지, 제16권 제2호(2014) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 16, No. 2, (2014), pp. 93~102
DOI: 10.5532/KJAFM.2014.16.2.93
ⓒ Author(s) 2014. CC Attribution 3.0 License.

국내 7대 광역시 산림 연결성 비교 분석

강완모 · 김지원 · 박찬열* · 성주한
국립산림과학원 산림생태연구과
(2014년 4월 10일 접수; 2014년 5월 31일 수정; 2014년 6월 5일 수락)

Comparing Connectivity in Forest Networks of Seven Metropolitan Cities of South Korea

Wanmo Kang, Jiwon Kim, Chan-Ryul Park* and Joo Han Sung
Forest Ecology Division, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea
(Received April 10, 2014; Revised May 31, 2014; Accepted June 5, 2014)

ABSTRACT

This quantitative research aims to examine the connectivity of forest networks in seven metropolitan cities of South Korea using a graph-theoretical approach. We first estimated an overall network connectivity at multi-scales (i.e., dispersal distances), ranging from 100 m to 20 km, and quantified the contribution of small forest patches (less than 10 ha) to the overall network connectivity by comparing networks according to the presence and absence of small ones. As a result, the cities were divided into two groups depending on the network connectivity; one group of cities with high connectivity such as Daegu, Daejeon, and Ulsan and the other group of cities with low connectivity including Gwangju, Busan, Seoul, and Incheon. The result showed that small forest patches, especially in the cities with low connectivity, played a key role as stepping stones that connect large forested patches, thereby contributing to maintaining connectivity. This study also suggests that large and well-connected forest areas may be the key factor to preserve the connectivity in the cities with high connectivity, while the cites with low connectivity are in need of some complementary strategies. Through the study, we suggest that the creation of new forest patches in the areas where a gap in connectivity presents is needed in order to improve connectivity; and that the conservation of the existing small forest patches is essential in order to maintain the current connectivity level.

***Key words*: Dispersal distance, Graph theory, Landscape connectivity, Urbanization**

I. 서 론

인구집중으로 인한 도시팽창이 생물다양성 보전에 큰 위협이 되고 있다(McKinney, 2002; 2006). 도시 내부에서는 인간의 이용과 간섭의 증가로 잔존 서식지(remnant habitats)의 훼손이 빈번히 일어난다. 이와 함께 도시 근교에서의 지나친 택지개발과 도로건설 등의 무분별한 시가지 확산은 도시 주변에 분포하는 핵심 서식지들을 파편화하여 핵심 서식지들과 도시 내부 잔존 서식지와의 생태적 연결을 단절시킨다(Hilty *et al*., 2006). 서식지 소실과 파편화에 따른 서식지 연결성의 감소는 생물종의 공급원이 되는 대규모 핵심 서식지로부터 도시 서식지로의 종 이입과 정착을 감소시켜 결국 도시 생태계의 생물종 구성을 단순화시킨다(Clergeau and Burel, 1997; Bennett, 2003; Donnelly and Marzluff, 2006).

* Corresponding Author : Chan-Ryul Park
(park@forest.go.kr)

서식지 연결성은 서식지 간 생물종의 전파(dispersal)와 유전자 흐름(genetic flow) 등을 원활하게 하거나 방해하는 정도로 정의되며(Taylor *et al*., 1993), 이는 파편화된 경관에서 메타개체군의 지속성을 결정하는 중요 인자이다(Soulé, 1986; Hanski, 1999). 생물종별로 전파 능력(dispersal ability)이 각기 다르고(Sutherland *et al*., 2000), 공간 규모에 따라 관심 서식지(focal habitat) 주변 경관의 구성과 짜임이 달라지기 때문에 동일한 경관에서도 서식지 연결성 정도는 생물종에 따라 서로 다르게 나타날 수 있다. 따라서 다양한 생물종의 메타개체군의 보전을 위해서는 국지적 규모뿐만 아니라 광역적 공간규모에서 서식지 연결성을 평가하고 유지하는 전략이 필요하다(Minor and Lookingbill, 2010; Kang and Park, 2011).

서식지 연결성의 관리는 생물다양성 보전뿐만 아니라 도시의 생태 문화적 지속 가능성을 회복하는데 있어 필수적이다(Yu *et al*., 2012). 도심이나 도시 근교에 위치하는 산림으로 도시숲은 야생동물의 서식 공간이면서 도시열섬효과를 완화하고 미기후를 조절한다(Bolund and Hunhammar, 1999). 또한 산책과 운동, 휴양활동이 가능한 문화적 심미적 경관 요소로서 시민 정신건강과 삶의 질 향상에 유익한 도움을 준다(Miller, 1997). 따라서 도시와 산림을 연결시켜 도시숲의 생태 문화적 건강성을 증진하고자 하는 국가 및 지방자치단체의 역할이 부각되고 있으며(Kong *et al*., 2010), 도시환경영향평가 및 보전계획수립 초기단계에 있어 산림 연결성의 평가는 우선시 되어야 한다.

국내 광역도시에서 도시숲과 주변의 외곽 산림지역으로 형성되는 산림 연결성을 다양한 공간규모에서 정량적으로 분석한 연구는 초보단계이다. 도시산림경관의 보전과 관리에 있어 생태축과 같은 선형공간계획에 기반을 둔 정책 및 대안이 주를 이루고 있다(Jeon *et al*., 2010). 도시 주변 산림이 상호의존적으로 생태 과정(ecological processes)을 주고받으며, 위계적 모듈 구조(hierarchical modular structure)를 가지고, 자기조직화(self-organization)와 창발성(emergence)을 가지는 연결망의 특성(Norberg and Cumming, 2008) 측면에서 연구되고 그 연구물이 도시림 관리에 직접 반영되기까지는 아직 한계점이 있다. 개별 공원과 주변 토지피복, 그리고 대규모의 산림지역을 선형으로 연결하는 핵심 축 전략은 다양한 공간 규모와 짜임 구조에서 나타나는 복합적인 연결 경로를 고려해야 하지만, 그러한 위계적 구조 및 연결망 특성을 이해하지 못하여 현실적으로 적용가능 하고 실효적인 도시녹지체계를 제시하는데 한계가 있다.

이러한 점에서 그래프 이론은 연결망 분석을 위한 효과적인 분석도구로 컴퓨터 과학과 사회 과학, 경관생태학 분야 등에서 널리 적용되고 있다(Urban *et al*., 2009). 경관 생태학적 관점에서 그래프 이론을 적용하여 경관 요소들의 물리적 연결 관계(physical relations), 즉 구조적 연결성(structural connectivity)과 이러한 구조적 연결성이 생물종의 이동에 끼치는 영향, 즉 기능적 연결성(functional connectivity)을 적은 양의 데이터로 효율적으로 분석할 수 있다(Theobald, 2001; Kang and Park, 2011).

본 연구에서는 그래프 이론을 적용하여 서울을 포함하는 국내 7대 광역시를 대상으로 도시 내부와 외곽 산림들의 연결성을 연결망의 관점에서 정량적으로 분석하였다. 또한 소규모 산림들이 전체 연결망에서 차지하는 연결성 중요도를 다중규모(multi-scale)에서 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 광역도시별 산림 연결성 정도를 비교하면서 연결성이 크게 변화하는 중요 임계규모를 도출하고, 소규모 산림들을 통한 연결 경로의 중요성을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지

도시와 인접한 시 군 지역으로 광역 도시화가 빠르게 진행되고 있는 서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 울산, 부산을 포함하는 7개 광역도시를 대상지로 선정하였다(Fig. 1). 광역도시들의 바탕(matrix)에는 100ha 이하의 중 소규모의 도시숲이 섬의 형태로 파편화되어 있다. 그리고 대규모의 산림이 도시외곽에 분포하는 경관 특성을 보인다. 통계청에 따르면 7개 광역도시들의 2011년 기준 인구대비 1인당 생활권 도시림 평균 면적은 8.8m^2(서울 4.0m^2, 인천 6.2m^2, 대전 11.9m^2, 광주 8.8m^2, 대구 5.6m^2, 울산 15.0m^2, 부산 10.1m^2)로 세계보건기구 권고기준인 9m^{2}에 못 미친다(Korea Forest Service, 2013).

조류, 포유류 등 이동성이 있는 다양한 생물종의 전파 능력을 반영하고, 도시 내부와 외곽의 산림을 포함하여 연결성을 분석하기 위해 광역시별 중심으로부터 20km 반경 영역을 분석 대상으로 설정하였다(Fig. 1).

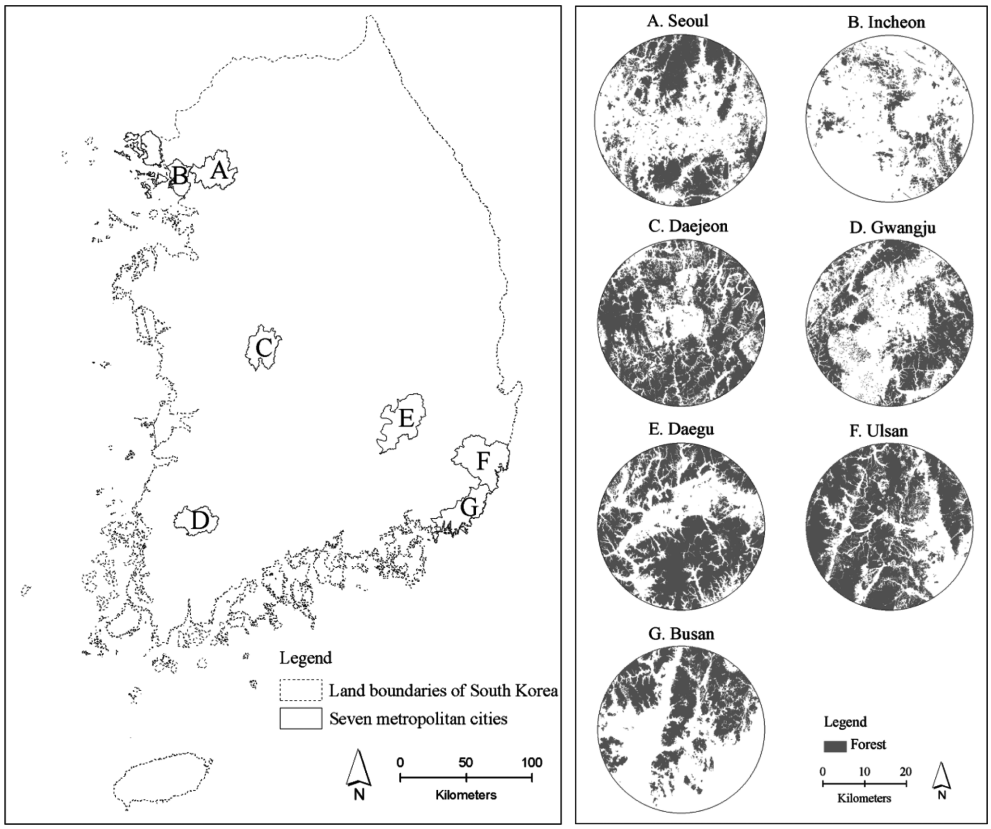

Fig. 1. Study area. Locations of seven metropolitan cities (left) and forest cover of each city within 20 km radius distance (right) in South Korea.

시가지 중심으로 산림의 다양한 기능을 증대하고 시 중심으로부터 생태현상이 일어나는 범위 내 분석을 위하여, 다수의 야생동물의 이동과 식물종의 종자 전파, 유전자 흐름이 일어나는 실질적 거리 범위인 100m 부터 20km 거리 범위를 분석 대상으로 하였다(Sauer, 1988; Cheplick, 1998; Nathan, 2001). 광역시의 행정구역과 같이 임의로 설정된 경계에 의해 분석 범위를 설정할 경우 시 외곽의 산림지역이 포함되지 않는 것과 같은 오류가 발생할 수 있다. 즉, 국내 시 군 행정구역경계 획정의 기준이 유역으로 실제로는 인접해 있는 행정구역경계의 산림들이 하나의 산림으로 연결되는 경우가 대다수이기 때문이다.

2.2. 연구방법

환경부에서 제공하는 2009년도 기준의 중분류 토지피복도(1:25,000 축척)와 산림청의 5차 임상도(1:5000 축척)를 이용하여 ArcGIS 9.3에서 산림지역을 추출하였다. 그리고 인터넷 기반 상용 항공사진 서비스(Daum, Naver, Google)를 활용하여 육안 비교를 통해 잘못 분류된 산림지역을 수정한 후, 연결성을 분석하였다. 도시숲 조성 사업시 고려되는 최소 면적이며, 산림성 소형 조류종의 서식에 안정성을 제공할 수 있는 최소 서식지 면적(minimum habitat area)으로 1 ha 이상 크기의 산림을 분석에 포함하고(Park and Lee, 2000), 10m 해상도로 래스터(raster)화 하였다.

이 연구에서는 연결망 그래프를 점 또는 노드(vertex or node)로 표현되는 서식지 조각들(habitat patches)이 생물종의 이동과 전파, 유전자 흐름 등과 같은 생태 과정들로 연결된 선(edge or link)의 그림으로 도식하였다(Minor and Urban, 2008). ArcGIS 9.3을 활용하여 8-neighbor rules에 의해 그룹화된 각 산림조각들이 노드가 되고, 산림 가장자리 간(edge to edge) 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 적용하여 연결선에 방향성이 없는 무방향 그래프(undirected

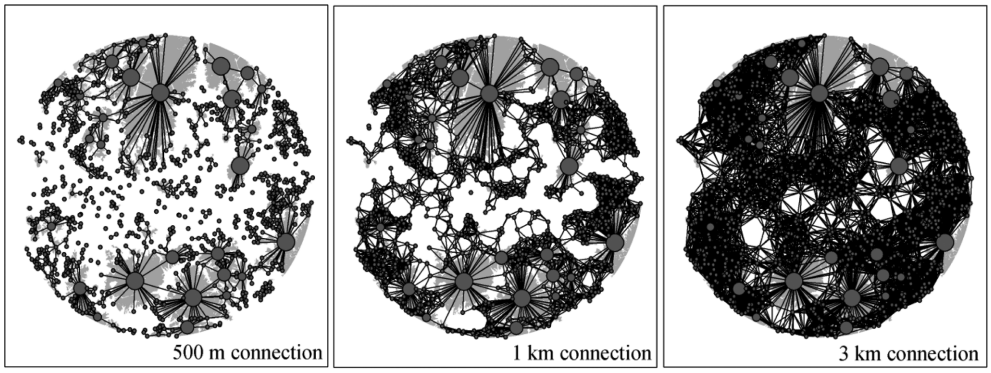

Fig. 2. The forest network of Seoul and surrounding areas. Forest patches (in pale gray) and their patch centroids (in dark grey) are shown. Each circle size of forest patch centroids is proportional to the patch size. This is a complete graph presentation of the network, where the connections (black lines) between forest patches are thresholded at distances of 500 m, 1 km, and 3 km.

graph)로 연결망을 도식하였다(Fig. 2). 산림조각 간 거리가 임계거리(또는 문턱거리; threshold distance)를 넘게 되면 두 조각 간에는 생물종의 이동이나 전파 등이 일어나지 않거나 드물게 일어나는 것으로 가정한다.

연결성 분석에 앞서, 각 광역시별 산림 분포의 특징을 분석하였다. 분석 목록으로 총 산림 면적과 함께 대상 경관에서 차지하는 백분율 면적, 총 산림조각 수, 평균 산림조각 크기, 10ha 보다 작은 산림조각들의 총면적, 총 산림 면적에서 10ha 보다 작은 산림들이 차지하는 백분율 면적 등이 포함되었다.

임계거리가 변화함에 따라 7대 광역시의 개별 산림조각들이 상호 연결되어 나타나는 전체 연결성(overall network connectivity)을 비교 분석하였다. 경관 수준에서의 전체 연결성 평가지수로 이항 연결성 모델(binary connectivity model)에 기반을 둔 통합 연결성 지수(integral index of connectivity, IIC)와 확률 연결성 모델(probabilistic connectivity model)에 근거한 연결성 확률 지수(probability of connectivity, PC)를 활용하였다(Pascual-Hortal and Saura, 2006; Saura and Pascual-Hortal, 2007; Laita *et al*., 2011). 그래프 이론에 기반을 둔 두 지수는 기존의 지수들보다 생태적으로 더 의미 있게 연결성을 평가할 수 있어 활용도가 크다(Saura and Pascual-Hortal, 2007; Laita *et al*., 2011).

통합 연결성 지수(IIC)는 서식지 조각 간 거리가 임의의 임계거리 내에 있으면 연결이 된 것으로 가정하고, 산림조각 간 최단거리로 연결되는 경로에서 연결선의 수와 산림 면적, 전체 경관의 면적 크기에 의해 계산된다.

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

여기서 n은 산림조각의 총 수, l_{ij}는 산림조각 i, j를 연결하는 최단 경로의 수, a_i는 산림조각 i의 면적, a_j는 산림조각 j의 면적, A_L은 총 경관 면적이다.

이 지수는 위상학적 관점에서 조각들 간 연결이 있거나 없음, 즉 0과 1의 값에 의해 연결강도를 평가한다. 즉, 어떤 관심 산림으로부터 임계거리 내에 있는 다른 산림조각들은 거리에 차이가 있어도 관심 산림과 1이라는 연결성 값을 갖는다. 직 간접적으로 연결된 산림들의 면적이 크고, 연결된 산림조각들 간 최단 경로의 거리가 짧을수록 통합 연결성 지수 값이 높아진다(Pascual-Hortal and Saura, 2006). 통합 연결성 지수는 야생동물의 실질적인 이동·전파 정도와 같은 흐름(flux) 또는 양 보다는 각 세대에서 하나 또는 소수의 개체 이입이 있었는지를 다루는 유전자 전달(genetic transmission)과 같은 연결성 평가에 있어 적합하다.

연결성 확률 지수(PC)는 음(–)의 지수 분포(negative exponential distribution)를 가정한 산림조각 간 거리에 따른 야생동물의 전파·이동량을 의미하는 확률(p)을 바탕으로 구해진다.

$$p_{ij} = e^{-k \cdot d_{ij}} \quad (2)$$

여기서 k는 상수, d_{ij}는 산림조각 i, j 간 거리이다.

소형 명금류(songbirds)의 대표적인 전파 거리

1,500m(Sutherland *et al.*, 2000)에서 확률(p)이 0.05일 경우, 상수 k는 0.002가 된다. 산림조각 간 전파 확률(p)을 통해 전체 경관의 연결성 확률 지수는 다음과 같이 구해진다.

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^{*}}{A_L^2} \quad (3)$$

여기서 n은 산림조각의 총 수, p_{ij}^{*}는 산림조각 i, j 간 연결이 가능한 최대 확률곱(maximum product probability) 경로의 확률값, a_i는 산림조각 i의 면적, a_j는 산림조각 j의 면적, A_L은 총 경관 면적이다.

최대 확률곱은 다음과 같이 설명된다. 예를 들어 임의의 a, b, c의 조각들이 모두 연결되어 경관에 분포하는데 산림조각 a와 c는 직접적으로 0.4라는 확률로 연결되어 있다. 또한, b는 a와 c와 직접적으로 각각 0.7와 0.6의 확률로 연결되어 있으면, a로부터 b를 거쳐 c로 연결되는 확률 곱은 0.42가 되어 a로부터 c로 연결되는 최대 확률 곱은 0.42이다. 따라서 a와 c의 직접적인 연결보다 b를 경유한 간적접인 연결이 연결 흐름에 더 좋다고 평가할 수 있다. 통합 연결성 지수는 임의적인 임계거리 설정에 따라 연결성 값의 차이가 크게 나타나기도 하지만, 전파 흐름의 크기를 측정하는 연결성 확률 지수는 연결 정도가 확률들의 곱으로 얻어지기 때문에 임계거리에 큰 영향을 받지 않는다.

끝으로, 도시숲과 같은 파편화되어 있는 소규모의 산림들이 각 광역시별 산림 연결성에 기여하는 정도를 평가하였다. 10ha 이하의 작은 면적의 산림을 대상으로, 이들 산림이 있을 때와 없을 때의 통합 연결성 지수와 연결성 확률 지수 값의 변화(%)를 다중 공간 규모에서 계산하였다. 연결성 지수 값의 변화가 클수록 작은 면적의 산림들이 전체 연결성에서 중요한 위치를 차지하고 있다는 것을 의미한다. 서울시에서 진행된 서식지 면적의 크기와 조류종수의 증가에 관한 연구에서 10ha 이상의 산림 보다 1-10ha인 산림에서 서식 면적 대비 종수 증가가 더 크게 나타나 10ha 이하의 도시숲을 분석 대상으로 선정하였다(Park and Lee, 2000; Chae *et al.*, 2004).

이 연구에서는 분석 대상 범위인 임계거리 20 km 내에서 연결성 지수들을 도출하고, 소규모 산림들의 연결성 기여도를 평가하였다. 임계거리 3km 내에서는 100m 단위로, 3km 이상에서는 1km 단위로 분석하였다. 연결성 확률 지수를 산정할 때는 음(–)의 지수 분포의 전파 거리 확률을 가정하고, 각 임계거리에서 산림조각 간 전파 확률(p)은 0.05를 적용하였다(Urban and Keitt, 2001). 임계거리의 변화에 따른 통합 연결성 지수와 연결성 확률 지수, 소규모 산림의 유・무에 따른 두 지수들의 변화 값을 Conefor 2.6을 활용하여 구하였다(Saura and Torné, 2009).

III. 결과 및 고찰

3.1. 광역시별 산림 분포 특징

서울을 비롯한 7대 광역시의 산림 분포 현황은 Table 1과 같다. 총 산림 면적은 울산이 가장 컸고, 대전, 대구, 광주, 서울, 부산, 인천 순이었다. 면적 비율로 보면 울산과 대전, 대구에서 산림이 전체 경관 면적의 50% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 광주와 서울, 부산은 30~40%, 인천은 12.4%의 산림 비율을 보였다. 바다와 인접하고 있는 인천과 부산은 시가화 지역(built-up area)과 같이 바다가 비 산림으로 구분되며, 다른 도시에 비해 상대적으로 20km 반경 내 산림면적이 작다. 이들 지역에서는 향후 발생할 수 있는 추가적인 산림 소실을 방지하고 연결성 유지를 통해 산림을 효율적으로 이용하고 보전해야 한다.

Table 1. Basic variables of each city to analyze the connectivity of forest patches

Variables	Seoul	Incheon	Daejeon	Gwangju	Daegu	Ulsan	Busan
Total forest area (km^2)	446.3	155.6	730.6	497.9	692.4	765.9	431.3
Percent forest cover (%)	35.5	12.4	58.2	39.6	55.1	61.0	34.3
Total number of patches	1,047	769	869	1,209	499	699	448
Mean patch size (km^2)	42.6	20.2	84.1	41.2	138.8	109.6	96.3
Total area of small patches of less than 10 ha (km^2)	25.0	18.3	20.3	28.8	10.9	15.5	9.3
Percent area of small patches (<10 ha) of total forest area	5.6	11.8	2.8	5.8	1.6	2.0	2.2

경관에서 적합한 서식지(suitable habitat)의 면적 비율이 30~40%보다 작을 경우, 서식지의 공간적 짜임이 생물종의 전파와 생존에 특히 중요한 것으로 알려져 있다(Andrén, 1994; Fahrig, 1998). 따라서 울산과 대전, 대구에서는 산림 파편화에 따른 서식지 고립보다는 산림 훼손에 따른 서식지 면적 감소가 생물종의 생존에 더 큰 위협이 된다. 이에 반해 서울과 부산, 특히 인천 지역에서는 서식지 소실을 포함하여 산림 파편화에 따른 연결성의 감소가 생물의 생존을 위협하는 큰 원인일 것이다.

산림조각의 평균 크기는 대구가 가장 컸고, 울산, 부산, 대전, 서울, 광주, 인천 순으로 나타났다. 평균 조각 크기가 작을수록 인간 활동이 주로 일어나는 도시 바탕과 서식지 조각의 인접성은 커진다. 또한 기후변화 등과 같은 갑작스런 환경변화에 적응하는 개체군 생존력은 서식지 조각 크기에 좌우되는 경향이 있는데, 이는 평균 조각 크기가 작을수록 개체군 크기와 생존능력이 감소되어 생물종 안정성이 오랜 시간 동안 유지되기 어렵다는 것을 의미한다(Honnay *et al*., 2005). 따라서 광역시 중에서도 서울과 인천 등의 하위지역에 서식하는 생물 군집은 인간 활동에 의한 간섭 및 교란 영향을 크게 받고, 장기적 생존능력이 낮아 생물종 구성이 단순화되어 가는 과정에 있을 것으로 판단된다. 한편, 10ha 이하의 소규모 산림들이 차지하는 면적은 광주가 가장 컸고, 서울, 대전, 인천, 울산, 대구, 부산 순이었다. 소규모 산림들이 전체 산림 면적에서 차지하는 비율은 인천이 11.8%로 가장 높았고, 광주와 서울이 5~6% 사이의 비율을, 대전과 부산, 울산에서는 3% 이하의 비율을 보였다. 평균 산림조각의 크기가 작은 하위 3개 도시(서울, 광주, 인천), 즉 서식지 파편화 정도가 높은 도시에서 소규모 산림들이 차지하는 면적 비율이 상위 4개 도시보다 최소 2배 더 높다는 것을 알 수 있다.

3.2. 산림 연결성 비교 분석

대구와 대전, 울산 지역의 통합 연결성 지수는 바람과 소형조류 등에 의해 식물 종자 전파가 주로 일어나는 거리 범위인 100m 임계거리(Cain *et al*., 2000; Jordano *et al*., 2007)에서 타 광역시보다 1.5배 이상 높았다(Fig. 3). 즉, 100m 임계거리에서 광주와 부산, 서울, 인천 지역은 다른 광역시보다 산림들이 연결이 잘 안되고 파편화가 큰 것으로 나타났다. 대구와 대전, 울산은 상위지역으로, 광주와 부산, 서울, 인천은 하위지역으로 연결성 정도가 크게 양분화 되며, 이 경향은 20km 임계거리까지 지속된다. 토착종의 종자 전파 거리(<100m)뿐만 아니라, 드물게 일어나는 먼 거리(long-distance) 종자 전파(>100m)와 1.5km에 해당하는 소형 조류종의 전파 능력, 10km 이상의 대형 야생동물의 전파 거리를 고려하면(Cain *et al*., 2000; Minor and Lookingbill, 2010), 20km 내의 임계거리 범위에서 하위 광역도시의 산림 연결성은 상위 광역도시보다 모두 떨어진다. 따라서 하위 광역도시에서는 다양한 생물군집의 메타 개체군 유지가 어렵기 때문에 생물다양성 측면에서의 산림 지속성이 상위 광역도시보다 현저히 낮다고 판단할 수 있다.

7대 광역시들의 연결성 정도가 1차적으로 상위와 하위도시로 나눠지는 주된 이유는 경관 내 분포하는 전체 산림 면적의 차이에 기인한다. 산림 면적 비율이

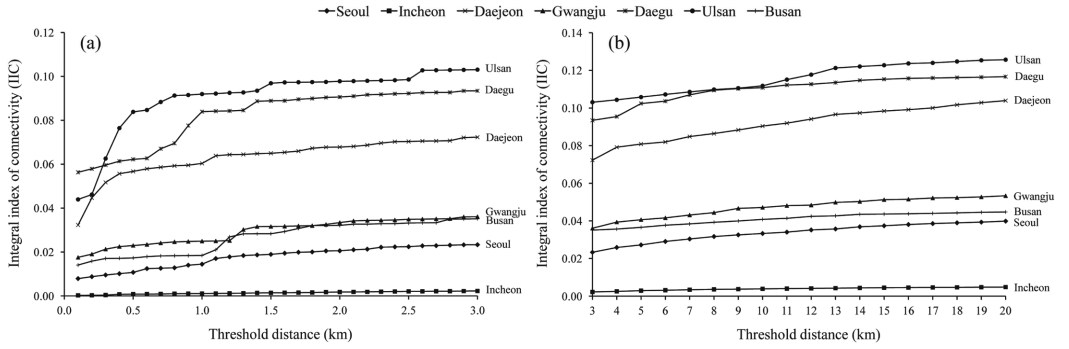

Fig. 3. Overall network connectivity based on Integral Index of Connectivity for forest networks of seven metropolitan cities of Korea as a function of threshold distance, (a) ranging from 100 m to 3 km, in 100 m increments, and (b) ranging from 3 km to 20 km, in 1 km increments.

50% 이상인 지역들이 상위지역으로 10~40%인 지역들이 하위지역으로 구분된다(Table 1; Fig. 3). 2차적으로 각각의 상위도시와 하위도시들에서의 연결성 순위는 면적과 함께 산림의 짜임도 주된 요인으로 나타났다. 예를 들면, 대전의 산림 면적이 대구보다 컸지만, 20km 이내 모든 임계거리에서의 연결성은 대전이 대구보다 낮았다(Fig. 3). 연결성이 낮다는 것은 대전의 산림 조각들의 총 면적이 대구보다 클지라도 산림의 단절 정도가 대구보다 크다는 것을 의미한다. 또한 울산은 대구보다 산림 면적이 약 70km^2 이상 크지만(Table 1), 100~200m 임계거리에서 울산의 통합 연결성 지수는 대구보다 작았다(Fig. 3). 500m 임계거리에서는 울산과 대구의 연결성 차이가 가장 큰 것으로 나타났지만, 5~10km 임계거리에서는 두 지역의 연결성은 비슷한 것으로 나타났다. 하위도시에서도 광주의 산림 면적이 부산보다 약 60km^2 이상 크지만, 1.2km 임계거리에서의 연결성은 부산이 광주보다 더 높았다. 이러한 연구결과는 지역별 경관 특성에 적합한 야생동물의 보전전략 수립을 위해 산림 면적과 함께 산림 네트워크의 연결성, 그리고 연결성에 있어 중요한 공간규모가 필수적으로 제시되어야 함을 의미한다(Keitt and Urban, 1997).

연결성 확률 지수는 잠재적으로 생물들의 이동과 전파가 크게 일어날 수 있는 산림들과 연결 경로에 가중치를 높게 두기 때문에, 통합 연결성 지수와는 달리 임계거리 규모가 커짐에 따라 연결성이 완만하게 높아지는 결과를 나타냈다(Fig. 4). 통합 연결성 지수 결과와 같이, 연결성 확률 지수를 통해 500m 이상의 임계거리에서 7대 광역시를 산림 연결성이 높은 상위지역(울산, 대전, 대구)과 낮은 하위지역(광주, 부산, 서울, 인천)으로 구분할 수 있었다. 상위지역들의 연결성 확률 지수를 보면 대구가 울산, 대전보다 각각 300m와 600m 임계거리 내에서 높았다. 대구의 산림 면적이 울산, 대전보다 작음에도 불구하고, 국지적 연결성(local connectivity)은 높다는 것을 알 수 있다. 700m 이상의 임계거리 범위에서 상위지역 내 연결성 확률 지수의 순위는 산림 면적 순위를 따랐다. 상위지역 중 100m 임계거리에서 통합 연결성 지수가 가장 낮았던 대전은 연결성 확률 지수도 하위지역의 광주와 거의 유사한 값을 보였다. 따라서 대전지역에서 서식하는 토착 식물종의 전파 흐름은 다른 상위지역보다 상대적으로 낮을 것이라고 예측된다. 연결성 확률 지수 하위지역을 비교하면, 20km 내 모든 임계거리 범위에서 부산의 산림연결성은 서울보다 높았고, 통합 연결성 지수 결과도 이와 같았다. 부산의 산림면적이 서울보다 약 15km^2 작다는 것을 감안하면, 도시화로 인한 서식지 단절과 파편화가 야생동물에게 주는 위협은 부산보다 서울에서 훨씬 클 것이라는 것을 판단할 수 있다.

3.3. 연결성에 기여하는 소규모 산림의 중요도 분석

통합 연결성 지수의 변화에 따른 광역시별 소규모 산림의 중요도는 약 2km 임계거리 범위 내에서 크게 변화하였다(Fig. 5). 주목할 점은 연결성이 낮은 하위지역에서 소규모 산림의 중요도가 높았다. 즉, 연결성 하위지역의 소규모 산림들이 연결망에서 차지하는 역할이 크다는 것을 의미한다. 연결성이 가장 낮은 인천의 경우, 소규모 산림이 없어졌을 경우 400m 임계거리에서 본래 연결망이 가지는 연결성의 최대 40%, 1.5~3km 임계거리 범위에서는 약 30% 연결성이 감

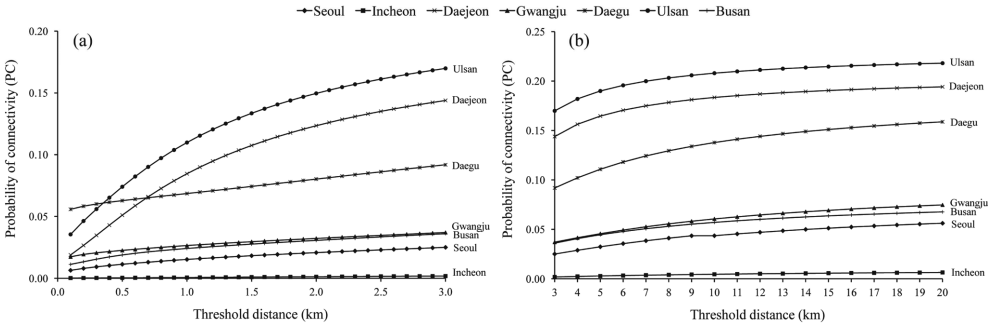

Fig. 4. Overall network connectivity based on Probability of Connectivity for forest networks of seven metropolitan cities of Korea as a function of threshold distance, (a) ranging from 100 m to 3 km, in 100 m increments, and (b) ranging from 3 km to 20 km, in 1 km increments.

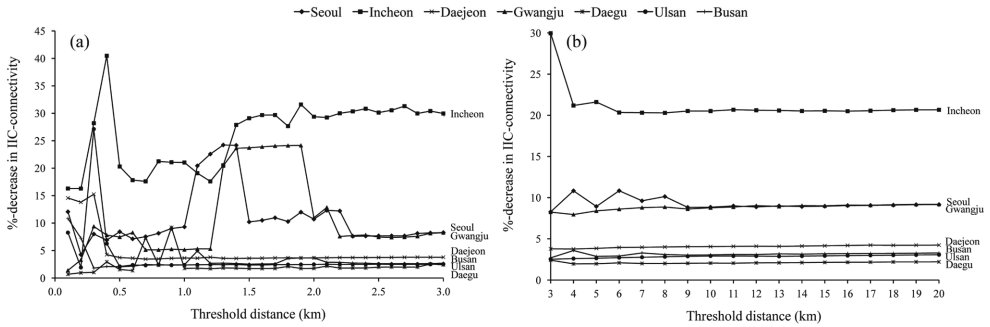

Fig. 5. Decrease in IIC connectivity (%) led by the removals of small forest patches (<10 ha) in terms of the forest networks of seven metropolitan cities of Korea as a function of threshold distance, (a) ranging from 100 m to 3 km, in 100 m increments, and (b) ranging from 3 km to 20 km, in 1 km increments.

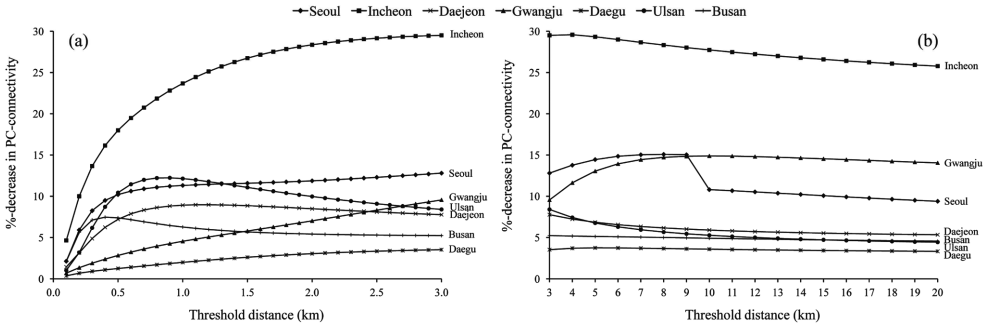

Fig. 6. Decrease in PC connectivity (%) led by the removals of small forest patches (<10 ha) in terms of the forest networks of seven metropolitan cities of Korea as a function of threshold distance, (a) ranging from 100 m to 3 km, in 100 m increments, and (b) ranging from 3 km to 20 km, in 1 km increments.

소하는 것으로 나타났다. 인천에서 소규모 산림 비율이 전체 산림 중 11.8%를 차지하는 것에 비교하면 큰 폭의 감소이다. 또한 인천과 함께 전체 연결성이 낮았던 서울은 특히 1.1~1.4km 임계거리 범위에서, 광주는 1.3~1.9km 범위에서 소규모 산림이 없어졌을 경우 20%가 넘게 연결성이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 임계거리 범위에서 서울과 광주의 소규모 산림들은 면적이 큰 산림산림들을 연결시키는 징검다리로서 전체 연결성을 크게 향상시키는 역할을 한다. 그리고 소형 명금류와 소형 포유류의 최대 전파 거리가 1~1.5km에 해당하기 때문에 연결성이 낮은 하위 광역시에서 소규모 산림의 보전은 소형 야생동물의 생물다양성 보전과 직결된다.

연결성이 높은 상위지역 중 대전에 분포하는 소규모 산림들은 특히 100~300m 임계거리 범위에서 다른 상위지역의 소규모 산림보다 중요도가 높은 것으로 나타났다. 1km 이상의 임계거리에서는 연결성 상위 4개 광역시에 분포하는 소규모 산림들의 중요도는 모두 5% 이하로 낮게 나타났다.

연결성 확률 지수의 변화에 의한 소규모 산림의 중요도는 인천을 제외한 다른 광역시에서 15% 미만의 값을 나타냈다(Fig. 6). 통합 연결성 지수에 따른 소규모 산림 중요도 결과와 비교하면, 예기치 않게 갑작스럽게 증가하거나 감소하는 경향은 드물고, 대체적으로 단봉형(unimodal)의 형태를 나타냈다. 산림 연결성이 가장 낮은 인천은 약 3km 규모 내에서 임계거리가 증가함에 따라 소규모 산림의 중요도가 높아지며, 최대 30%의 중요도를 나타냈다. 연결성이 높은 상위지역 가운데 울산 지역의 소규모 산림은 0.5~1.9km 임계거리 범위에서 10% 이상의 중요도를 나타내 소형 야생동물의 서식지 연결망 유지에 있어 보전 가치가 큰 것으로 나타났다.

IV. 결 론

생물종별 경관에 반응하여 나타나는 기능적 연결성은 종 특이적(species specific)이지만(Belisle, 2005),

다양한 생물종의 보전을 위해서는 다중공간규모에서 도출된 서식지 연결망에서 경관 연결성이 취약한 공간규모와 연결 정도를 우선적으로 파악하는 것이 필요하다. 이를 통해 생태적으로 의미 있게 다양한 생물종 서식지의 기능적 연결성 진단이 가능하다. 연구에서 제시된 결과는 생물다양성 보전을 위한 도시 산림녹지의 지속성 향상과 생태적 관리방안 수립에 있어 중요 자료로 활용 가능성이 높다. 7대 광역시는 연결성이 높은 상위지역과 낮은 하위지역으로 나뉘는데, 상위지역에서는 잘 연결된 대규모 산림이 연결성 보전을 위한 주요 거점이 된다. 하위지역에서는 우선적으로 연결성 유지에 중요한 소규모 산림들을 보전해야 한다. 그리고 광역시별 임계거리 규모별 연결성이 취약한 지역을 도출하고, 주변 토지이용을 고려하면서 효율적으로 새로운 산림녹지를 조성해주는 전략이 필요하다. 한편, 7대 광역시와 같이 도시화가 높은 지역에서 연결성을 향상시키는 전략은 토착 생물종의 다양성을 높이는데 유익하지만, 연결성이 높은 경관은 생태계를 교란하는 유해야생동식물에게 생태통로로 작용할 수 있어 연결망 보전과 복원을 위한 정책에는 세심한 주의 또한 필요하다.

연구에서 적용된 통합 연결성 지수와 연결성 확률 지수는 연결성 평가에 있어 기존 지수들에 비해 우수하다고 알려져 있다(Saura and Pascual-Hortal, 2007). 그러나 최단거리 경로에 의해 연결성을 평가하기 때문에 연결망의 강인성(robustness)과 회복탄력성(resilience)에 중요한 대안 경로(alternative path), 즉 연결 경로의 여분성(redundancy)을 고려하지 못하는 한계점도 있다. 이와 관련하여 산림녹지 주변의 토지이용 형태 중 하천변 습지와 경작지의 초지 등은 야생동물의 이동을 원활하게 하기 때문에 실질적인 연결 경로를 도출하기 위해서는 바탕을 형성하는 토지이용의 형태를 보다 면밀히 검토해야 한다. 향후, 생물종별 실제 이동·전파 자료를 바탕으로 종별로 적합한 분석 방법을 개발하고 적용하여 토지이용도를 고려한 실증적인 연결성 분석이 진행되어야 한다.

적 요

본 연구에서는 그래프 이론을 적용하여 7대 광역시의 산림 연결성을 정량적으로 분석하였다. 다중공간규모의 전파 거리(100m~20km)에서 광역시별 산림 연결망의 전체 연결성을 평가하고, 소규모 산림(<10ha)이 연결성에 기여하는 정도를 측정하였다. 연구결과, 대구와 대전, 울산은 연결성이 높은 상위지역으로, 광주와 부산, 서울, 인천은 연결성이 낮은 하위지역으로 크게 양분화 되는 경향을 나타냈다. 소규모 산림들은 면적이 큰 산림들을 연결시키는 징검다리로서 특히 하위지역의 연결성을 크게 향상시키는 역할을 하였다. 생물다양성에 중요한 연결성 보전을 위해서 상위지역에서는 잘 연결된 대규모 산림지역을 주요 거점으로 보전해야 한다. 하위지역에서는 우선적으로 연결성 유지에 중요한 소규모 산림들의 보전이 필요하다. 또한 연결성이 취약한 곳에 새로운 산림녹지를 조성해주는 전략이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2010~2014년도 국립산림과학원 '도시화 및 인간간섭 산림녹지의 Biotope 계량화 및 관리방안' 연구의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

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.

Belisle, M., 2005: Measuring landscape connectivity: The challenge of behavioral landscape ecology. *Ecology* **86**, 1988-1995.

Bennett, A. F., 2003: *Linkages in the landscape: The role of corridors and connectivity in wildlife conservation*. World Conservation Union, Gland, Switzerland, and Cambridge, United Kingdom, 254pp.

Bolund, P., and S. Hunhammar, 1999: Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* **29**(2), 293-301.

Cain, M. L., B. G. Milligan, and A. E. Strand, 2000: Long-distance seed dispersal in plant populations. *American Journal of Botany* **87**(9), 1217-1227.

Chae, J. H., J. S. Kim, and T. H. Koo, 2004: The relation of species number of bird to the urban biotope area in Seoul. *Korean Journal of Environmental Ecology* **17**(4), 375-382.

Cheplick, G. P., 1998: Seed dispersal and seedling establishment in grass populations. *Population biology of grasses*, G. P. Cheplick (Ed.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 84-105.

Clergeau, P., and F. Burel, 1997: The role of spatio-temporal patch connectivity at the landscape level: An example in a bird distribution. *Landscape and Urban Planning* **38,**

37-43.

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.

Fahrig, L., 1998: When does fragmentation of breeding habitat affect population survival? *Ecological Modelling* **105**, 273-292.

Hanski, I., 1999: Habitat connectivity, habitat continuity, and metapopulations in dynamic landscapes. *Oikos* **87**(2), 209-219.

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, 344pp.

Honnay, O., H. Jacquemyn, B. Bossuyt, and M. Hermy, 2005: Forest fragmentation effects on patch occupancy and population viability of herbaceous plant species. *New Phytologist* **166**, 723-736.

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. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* **13**(5), 154-171. (in Korean with English abstract)

Jordano, P., C. Garcia, J. A. Godoy, and J. L. García-Castaño, 2007: Differential contribution of frugivores to complex seed dispersal patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United states* **104**(9), 3278-3282.

Kang, W. M., and C. R. Park, 2011: Quantitative analysis of Seoul green space network with the application of graph theory. *Korean Journal of Environmental Ecology* **25**(3), 412-420. (in Korean with English abstract)

Keitt, T. and D. Urban, 1997: Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology* **1**(1), 4.

Kong, F., H. Yin, N. Nakagoshi, and Y. Zong, 2010: Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning* **95**, 16-27.

Korea Forest Service, 2013: Alteration of master plan on urban forests for the realization of Forests of Urban, Urban of Forests. 81pp. (in Korean)

Laita, A., J. S. Kotiaho and M. Mönkkönen, 2011: Graph-theoretic connectivity measures: What do they tell us about connectivity? *Landscape Ecology* **26**(7), 951-967.

McKinney, M. L., 2002: Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience* **52**(10), 883-890.

McKinney, M. L., 2006: Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation* **127**(3), 247-260.

Miller, R.W., 1997: *Urban forestry: Planning and managing urban greenspaces* (2nd ed.). Prentice Hall, New York, 502pp.

Minor, E. and D. Urban, 2008: A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. *Conservation Biology* **22**(2), 297-307.

Minor, E. and T. Lookingbill, 2010: A multiscale network analysis of protected-area connectivity for mammals in the United States. *Conservation Biology* **24**(6), 1549-1558.

Nathan, R., 2001: Dispersal biogeography. *Encyclopedia of biodiversity*, S. A. Levin (Ed.), Academic Press, San Diego, 127-152.

Norberg, J. and G. S. Cumming, 2008: *Complexity theory for a sustainable future*. Columbia University Press, New York. 312pp.

Park C. R. and W. S. Lee, 2000: Relationship between species composition and area in breeding birds of urban woods in Seoul, Korea. *Landscape and Urban Planning* **51**(1), 29-36.

Pascual-Hortal, L. and S. Saura, 2006: Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology* **21**(7), 959-967.

Sauer, J. D., 1988: *Plant migration: The dynamics of geographic patterning in seed plant species*. University of California Press, Berkeley, California, USA, 298pp.

Saura, S. and J. Torné, 2009: Short communication: Conefor Sensinode 2.2: A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling and Software* **24**(1), 135-139.

Saura, S. and L. Pascual-Hortal, 2007: A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning* **83**, 91-103.

Soulé, M. E., 1986: Conservation biology: *The science of scarcity and diversity*. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, 584pp.

Sutherland, G., A. Harestad, K. Price and K. Lertzman, 2000: Scaling of natal dispersal distances in terrestrial birds and mammals. *Conservation Ecology* **4**(1), 16.

Taylor, P. D., L. Fahrig, K. Henein and G. Merriam, 1993: Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* **68**, 571-573.

Theobald, D. M., 2001: Topology revisited: Representing spatial relations. *International Journal of Geogrphical Information Science* **15**(8), 689-705.

Urban, D., E. Minor, E. Treml and R. Schick, 2009: Graph models of habitat mosaics. *Ecological Letters* **12**(3), 260-273.

Urban, D., and T. Keitt, 2001: Landscape connectivity: A graph-theoretic perspective. *Ecology* **82**, 1205-1218.

Yu, D., B. Xun. P. Shi, H. Shao and Y. Liu, 2012: Ecological restoration planning based on connectivity in an urban area. *Ecological Engineering* **46**, 24-33.