제목 : 수도권 지역 산림성 조류 서식지의 통로와 연결망 분석

저자 : 강완모1, 박찬열1\*

소속 : 1 국립산림과학원 산림생태연구과

\* Corresponding Author: Chan-Ryul Park (maeulsoop@korea.kr)

Title : Corridor and Network Analyses of Forest Bird Habitats in a Metropolitan Area of South Korea

Authors : Wanmo Kang1, Chan-Ryul Park1\*

Address: 1 Forest Ecology Division, Korea Forest Research Institute, Seoul (130-712), Korea

논문 형식: Research paper

본문 : 19매

표 및 그림 목차 : 1매

표 : 2매

그림 : 4매

한국농림기상학회지 투고규정에 의거 본 논문을 최종 논문으로 제출합니다.

**Corridor and Network Analyses of Forest Bird Habitats in a Metropolitan Area of South Korea**

**ABSTRACT**

Measuring and mapping connectivity among habitats is a key component of sustainable urban planning and design process. In this study, we examined how functional corridors connect forest bird habitats in a metropolitan area of Korea using graph theory-based techniques. High-quality forest habitat was defined as a function of forest cover, presence of residential areas, and road networks. We then constructed a network of high-quality forest habitats using the FunConn (functional connectivity) tools, and computed metrics (*Ti*) of patch importance based on the minimum (*Q1*) and the 25th percentile (*Q25*) rank least-cost distance values. We investigated the relative influence of two values of patch importance on forest bird species richness. As a result, the patch importance index based on the *Q25* effective distance threshold was most positively correlated with species richness (*P* < 0.001) after controlling for the area effect. Thus, using the *Q25* effective distance threshold, we mapped not only the locations of important habitat patches and functional corridors, but also the network backbone of forest bird habitats. The network developed in this study can help guide urban planning for biodiversity conservation.

*Key words*: Graph theory, Landscape connectivity, Multiple linkages, Species richness

**I. 서 론**

도시화로 서식지 소실과 단편화가 빈번히 일어나면서 생태 과정(ecological processes)이 변화하고 생물다양성이 위협을 받고 있다(McKinney, 2002; Alberti, 2005; Crooks and Sanjayan, 2006). 이에 지역 내 생물다양성과 생태적 기능을 유지하기 위한 경관 연결성의 보전이 도시환경 분야의 주요 과제로 제시되고 있다(Hilty *et al*., 2006). 단절된 생태계를 연결하는 것은 기후변화에 대한 도시와 자연생태계의 적응도를 높이는데 있어서도 중요시되고 있다(Opdam and Wascher, 2004; Crooks and Sanjayan, 2006).

연결성이란 생태적·진화적 시간 규모에서 경관이 서식지 조각 간 생물종과 개체군의 이동, 유전자의 흐름을 원활하게 하거나 방해하는 정도를 의미하며(Taylor *et al*., 1993), 구조적 연결성과 기능적 연결성의 두 가지 관점에서 볼 수 있다(Baguette and Van Dyck, 2007). 구조적 연결성은 서식지의 공간 배열과 거리척도에 따른 물리적 연결(physical linkage) 정도를 의미한다. 기능적 연결성은 생물의 실제 이동과 전파에 의한 연결을 의미한다. 기능적 연결성을 평가하는 것이 야생동물의 보전에 필수적이지만, 경관 구조에 대한 생물의 반응과 이동능력에 대한 충분한 자료를 얻기 어렵다. 따라서 기능적 연결성을 측정하기 위한 유용한 접근법은 현장조사를 통해 얻은 생물의 이동 또는 분포 자료를 구조적 연결성과 함께 통합적으로 보는 것이다(Fall *et al*., 2007; Kang *et al*., 2012).

연결성을 정량적으로 다룬 연구들은 서식지 간 구조적 연결 정도를 주로 유클리디안 직선거리(Euclidean distance)나 최소비용거리(Least cost path; Walker and Craighead, 1997)의 단일 경로로 측정하였다. 국내에서 진행된 연구들도 유클리디안 직선거리에 의해 연결성을 평가하여 녹지 연결망 보전을 위한 도시 환경계획을 제안하거나(Kang and Park, 2011; Kang *et al*., 2014), 생물종의 최소비용경로 분석을 통해 광역 생태축을 제시하였다(Lee *et al*., 2008; Lee *et al*., 2011). 그러나 생물의 서식지 간 이동 경로는 단일 경로는 아니며, 이동 경로들의 집합인 주요 통로(corridor)를 활용할 것이기 때문에 보다 더 생태적 연결성 평가를 위해서는 최단거리와 함께 대안 경로들로 구성된 통로를 고려해야 한다(Beier *et al*., 2008).

생물종의 실질적인 통로를 도출하기 위해서는 바탕(matrix)을 형성하는 토지이용과 서식지의 공간적 배열에 따른 다양한 경로들을 면밀히 검토하는 것이 필요하다. 이를 위해 최근에는 그래프 이론(graph theory)과 회로 이론(circuit theory) 등 최소비용경로 분석방법이 확장된 대안적인 연결성 평가 방법론들이 제안되었다(Theobald *et al*., 2006; McRae *et al*., 2008; Pinto and Keitt, 2009). 서식지 모자이크(habitat mosaics)를 그래프 모델로 분석할 때, 연결망은 노드(node or vertex)와 링크(link or edge)로 구성되고, 메타 개체군의 생태 과정(ecological processes) 연구에 효율적으로 적용될 수 있다(Urban *et al*., 2009). 이러한 방법론들을 통해 근접한 서식지 간 직접적인 연결 경로들뿐만 아니라, 전체 연결망을 형성하고 유지하는데 있어 차지하는 개별 서식지와 통로의 중요성 또한 분석되고 있다(Urban *et al*., 2009; Laita *et al*., 2011; Theobald *et al*., 2011).

본 연구에서는 산림성 조류종의 서식지를 추출하고, 종 다양도와 토지피복을 고려한 다중연결경로 분석을 통해 통로들로 연결된 서식지의 기능적 연결망을 도출하고자 하였다. 도시지역의 산림성 조류 군집은 먹이그물과 생태계 서비스의 기능에서 중요한 역할을 하여 보전 가치가 매우 크다(Faeth *et al*., 2005). 또한 다른 야생동물들에 비해 모니터링하기 쉽고, 도시개발에 따른 생물군집 변화 등을 연구하는데 바탕이 된다(Koskimies, 1989; Minor and Urban, 2010). 이 연구를 통해 산림성 조류종의 핵심 서식지와 통로들의 위치뿐만 아니라, 광역적 규모에서 서식지 연결망의 중추적 경로를 탐색하고자 하였다. 연구결과는 향후 도시 생물다양성 증진을 위한 핵심 보전지역의 설정과 생태통로의 조성과 관리에 유용하게 활용 될 수 있을 것이다.

**II. 재료 및 방법**

2.1. 연구 대상지와 대상종

서울특별시에 인접한 인천광역시와 경기도 시·군 지역을 포함하여 광역 도시화가 빠르게 진행되고 있는 수도권 지역을 대상지로 선정하였다(Fig. 1). 수도권은 최근 10년(2000‑2009년) 간 150.3 ㎢의 산림면적 감소를 나타냈다(Korea Forest Service, 2010). 이는 같은 기간 전국 산림면적 감소량 470.8 ㎢의 31.9%를 차지한다. 수도권이 전체 국토 면적의 11.8%에 해당하는 것을 감안하면 매우 큰 수치이다.

[Fig. 1]

2008년부터 2011년까지 서울시에서 진행한 도시숲(산림) 생태계 조사 지역 중 50 ha 이상의 10개 조사지(천왕산, 인왕산, 초안산, 봉제산, 백련산, 우면산, 천장산, 대모산, 안산, 봉화산)를 선정하였다(Fig. 1). 서울시의 도시숲 생물분포 조사 결과(SMG, 2008, 2009, 2010, 2011) 중 관찰 조류목록을 활용하여 산림에서 둥지를 트는 산림성 조류 47종을 대상으로(Kim *et al*., 2006), 조사지별 총 출현종수인 종 풍부도(species richness)를 산출하였다(Table 1). 야생조류조사는 Line-transect 방법(Bibby *et al*., 2000)에 의해 번식기와 비번식기를 포함하여 최소 3회 이상 조사되었으며, 2개 조사지 이상에서 출현한 조류종을 대상으로 하였다. 조류 조사 자료는 연구자의 자질에 영향을 받을 수 있으므로(Bibby *et al*. 2000), 주요 조사자의 조류 분류 및 연구 능력이 충분한 결과를 선택하여 사용하였다.

[Table 1]

2.2. 연구방법

2.2.1. 서식지 질 평가

서식지 질이 높은 산림 조각을 선별하기 위해 환경부에서 제공하는 2009년도 기준의 중분류 토지피복도(1:25,000 축척)를 활용하여 ArcGIS 9.3에서 산림지역을 추출하였다. 인터넷 기반 항공사진 서비스(Google, Daum, Naver)와의 육안 비교를 통해 산림으로 잘못 분류되거나, 산림인데 다른 토지피복으로 분류된 지역은 수작업으로 수정하였다. 수정된 산림 토지피복을 활용하여 50 m의 정방형 격자 당 산림 점유면적 비율이 75% 이상인 지역만을 산림으로 정의하고 래스터 형태로 변환하였다.

인간 간섭 인자에 따른 서식지 질의 감소를 반영하기 위해 주거지역과 도로의 영향을 고려하였다(Forman and Alexander, 1998; Hansen *et al*., 2005). 통계청의 2005년 인구 조사결과를 통해 검증된 최근 인구밀도 공간 자료(BIZ-GIS database, http://www.biz-gis.com/GISDB)를 활용하여 산림지역이라도 주거지역과 겹치는 셀(cell)들은 인간영향이 클 것으로 가정하여 서식지에서 제외하였다. 도로의 영향(*r*)은 Forman and Alexander, (1998)의 연구에 따라 포장도로로부터 1 km까지 이차 커널 확률 밀도함수(quadratic kernel density function)로 서식지 질이 감소하는 것으로 가정하였다. 최종 서식지 질(*q'*)은 로 계산되었다. *q*는 각 셀에서 포함되는 산림지역 면적 퍼센트 값을 나타낸다.

2.2.2. 연결망 그래프 도식

이 연구에서는 노드(vertex or node)로 표현되는 서식지 조각들이 생물의 이동과 전파 등으로 연결된 선(edge or link)과 선의 집합인 통로로 연결망을 도식하였다(Urban *et al*., 2009). ArcGIS 9.3을 활용하여 서식지 질이 높은(*q'* ≥ 0.75) 산림 셀들을 8-neighbor rules에 의해 그룹화 하였다. 소형 조류종의 일일 이동 임계거리(daily movement threshold distance)로 50 m 내에 있는 조각들은 하나의 조각으로 병합(merging)하고(Andersson and Bodin, 2009), 최소 50 ha의 면적을 가지는 산림 조각들을 노드로 하였다. 50 ha는 파편화에 비교적 민감한 조류종의 수가 늘어나는 임계규모이며, 산림성 조류종의 안정성을 제공할 수 있는 서식지 면적이다(Drinnan, 2005; Radford *et al*., 2005). 산림 조각들 간 거리는 각 토지피복 요소가 조류의 먹이 찾기 활동과 이주, 전파를 원활하게 하거나 방해하는 정도를 고려하여 저항(resistance) 계수에 가중치를 두어 계산하였다(Table 2). 인구밀도가 높은 도시권과 함께 생물다양성이 높은 생태지역들(eco-regions)을 대상으로 한 기존의 연구들(Spencer *et al*., 2010; Teng *et al*., 2011; Theobald *et al*., 2011)을 참고하여 산림과 초지, 농경지, 나지, 수계, 시가화 지역, 도로 순으로 가중치를 주었다. 도로는 특히 조류의 활동에 큰 장애물이며, 자동차 속도가 증가함에 따라 로드킬 발생 확률도 높아지기 때문에(Erritzoe *et al*., 2003), 도로에 의한 이동 제한 정도는 도로별 제한속도(speed limit)에 따라 거듭제곱 형태로 증가하게 하였다. 제한 속도가 시속 100 km인 고속도로에서는 500의 저항 계수를 갖는다.

[Table 2]

서식지 연결망 구축을 위해 ArcGIS 파이썬 패키지(Python Package) FunConn (Theobald *et al*., 2006)을 활용하였다. FunConn에서는 시각성과 연결성 계산에 있어 효율성을 높이는 그래프 근사 방법으로 연결선 간에 교차를 허용하지 않는 최소평면그래프(minimum planar graph)가 적용된다(Theobald, 2006; Fall *et al*., 2007). 완전 그래프(complete graph)는 모든 점들 사이에 연결선이 존재하는데 반해, 평면 상의 점들 간에 연결선을 그리되 연결선과 연결선이 점이 아닌 곳에서는 교차하지 않는 그래프를 최소평면그래프라고 한다. 최소비용거리 경로와 적은 비용의 경로들로 구성된 통로를 도출하기 위해, FunConn을 활용하여 서식지 간 *n*번째 백분의수 비용거리(*Qn*)로 최소비용거리(*Q1*)와 25번째 백분위수 비용거리(*Q25*)를 측정하였다(see details in Theobald *et al*., 2006). 즉, 서식지 간 *Q25* 이하의 비용거리 셀 집합이 이동 통로(movement corridor)를 이루게 된다.

2.2.3. 연결성 평가 및 종 풍부도와의 상관성

먼저, 전체 경관을 대상으로 연결된 서식지 간 최소비용거리와 25번째 백분위수 비용거리 비(i.e., *Q1*/*Q25*)의 평균과 표준편차를 구하였다. 이를 통해 *Q1*과 *Q25*의 비가 연결된 서식지 쌍(pair) 마다 일정하게 나타나는지 확인하고자 하였다. 또한 시∙군 행정구역 단위로 *Q25* 평균값을 계산하고, 상하위 5개 지역의 *Q25* 평균값을 제시하였다.

경관 수준에서 각 서식지 조각 *i*의 연결성 값으로 서식지 조각과 비용거리 특징 모두를 반영하는 *Ti* 값(Theobald, 2006)을 구하였다. 전체 연결망에서 조각의 중요도(patch importance)를 의미하는 *Ti*는 직접적으로 연결된 조각과 함께 조각 *i*와 간접적으로 연결되어 징검다리(stepping-stone) 역할을 하는 조각들도 포함하여 다음과 같이 계산된다.

(1)

여기서 *Ai*는 관심 조각(focal patch) *i*의 면적, *Aj*는 조각 *i*와 직·간접적으로 연결된 조각 *j*의 면적, *Ā*는 경관 내 모든 조각들(*m*)의 평균면적, *wij* =이다. 거리와 생물종의 정착(colonization)이 비선형 관계이기 때문에 서식지 간 연결 거리(*wij*)는 *n*번째 백분위수 비용거리 값의 1.7 거듭제곱으로 계산하였다(Sapoval *et al*., 2004; Theobald *et al*., 2006). 10개 조사지의 산림성 조류 종 풍부도와 *Q1*과 *Q25*에서의 *Ti* 값, 서식지 면적 간에 스피어만 상관관계와 스피어만 편상관관계(Spearman partial correlation coefficient) 분석을 실시하였다. 이를 통해 연결성과 서식지 면적이 종 풍부도와 어떤 관계가 있는지 밝히며, 편상관관계 분석으로 연결성과 서식지 면적 중 어떤 인자가 종 풍부도 평가에 있어 설명력이 더 높은지를 알아보고자 하였다.

*Q25*에서의 *Ti*와 서식지 간 연결 거리(*wij*)를 통해 조각 *i*와 *j*를 연결하는 통로의 중요도(*Ll*)(Theobald *et al*., 2011)를 다음과 같이 계산하였다.

(2)

통로의 중요도(*Ll*)로 연결망의 최소 신장 트리(minimum spanning tree)를 구하였다. 최소 신장 트리는 모든 조각들을 연결시킬 때 연결 경로의 가중치의 합이 가장 작은 연결망 트리를 만드는 것으로, 최소 신장 트리로 서식지 연결망의 중추적 경로(backbone)를 확인할 수 있다(Urban and Keitt, 2001). 메타 개체군 시뮬레이션들은 서식지 손실이 일어나도 최소 신장 트리가 유지되면 야생동물 개체군의 지속성(persistence) 또한 유지될 수 있다고 제안한다(Urban and Keitt, 2001).

**III. 결과 및 고찰**

3.1. 산림과 양질의 서식지 분포 특징

전체 경관의 38.1%가 산림으로(Fig. 1), 이 중 78.1%가 50 ha 이상의 면적을 가지고 있는 양질의 서식지이다(Fig. 2). 연구 대상지의 중심부에 해당하는 서울특별시와 서쪽 지역에 해당하는 안산시, 시흥시, 인천광역시, 김포시, 고양시, 파주시에서 산림과 50 ha 이상의 양질의 서식지가 타 지역에 비해 상대적으로 크게 파편화되어 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 1; Fig. 2). 양질의 서식지는 153개 산림 조각으로 전체 경관의 29.7%를 차지한다. 경관 내 서식지 비율이 30%보다 작을 경우 서식지의 공간적 짜임(configuration)이 생물종의 전파와 생존에 중요한 것으로 알려져 있다(Andrén, 1994; Fahrig, 2001). 따라서 수도권 지역에서도, 특히 서울과 서쪽 지역에서, 연결성이 산림 생태계의 안정성과 생물다양성의 유지에 중요한 인자인 것으로 판단된다.

[Fig. 2]

3.2. 비용거리 척도와 서식지 연결망

직접적으로 연결된 서식지 간 최소비용거리와 25번째 백분위수 비용거리 비(i.e., *Q1*/*Q25*)의 평균이 0.59로서 최소비용거리는 서식지 간 다중연결경로(multiple linkages)보다 짧았다. 또한 최소비용거리가 25번째 백분위수 비용거리에서의 다중연결경로의 변동성(variability) (SD = 0.32)을 반영하지 못했다. 이는 이동에 제한이 되는 도시화된 바탕에 산림 서식지가 분포할 때, 연결 가능한 비용거리의 범위가 각 서식지 쌍 간에 일정하지 않다는 것을 의미한다(Theobald *et al*., 2011).

Fig. 2는 25번째 백분위수 비용거리(*Q25*)를 이용하여 153개 서식지 조각을 355개의 연결선(linkages)과 통로로 연결한 최소평면그래프 G(153, 355)이다. 지역별 통로의 *Q25* 비용거리 평균값을 비교해보면 서울특별시(155,062)가 가장 컸고, 안양시(139,447), 의왕시(112,846), 광명시(111,470), 부천시(104,524) 등의 순으로 나타났다. 이들 지역에서는 서식지 간 거리가 멀거나, 또는 이동성에 방해가 되는 도로와 같은 장애물 등 경관 요소의 영향으로 서식지 간 고립 정도가 크다는 것을 의미한다. 지역별 *Q25* 평균값이 낮은 하위 도시는 포천시(11,333)와 가평군(15,240), 양평군(17,365), 광주시(21,403), 용인시(26,028) 순으로 수도권 외곽에 분포하고 산림이 60% 이상으로 서울을 중심으로 한 지역보다 개발이 덜 이뤄진 지역이다.

3.3. 연결성과 종 풍부도의 관계

Fig. 3은 산림성 조류의 종 풍부도와 *Q25*와 *Q1*에서의 조각 중요도(*Ti*), 서식지 면적 변수들의 히스토그램과 변수들 간 산점도와 커널 밀도(kernel density) 기반 선형성, 스피어만 상관계수를 나타낸다. 모든 지수들 간 유의한 상관관계(*P* < 0.05)가 있었다. *Q25*와 *Q1*에서의 *Ti*는 조류 종 풍부도와 0.80 이상의 높은 상관관계를 보였고, 이는 서식지 면적과 종 풍부도와의 상관관계 0.71보다 높았다. 서식지 면적의 영향을 통제했을 때, 조류 종 풍부도와 *Q25*에서의 *Ti* 값의 스피어만 편상관계수는 0.83으로 통계적으로 유의하였다(*P* < 0.001). *Q1*에서의 *Ti* 또한 종 풍부도와 스피어만 편상관계수 0.61로 유의한 관계가 있었지만(*P* < 0.05), *Q25*에서의 *Ti* 보다는 설명력이 낮았다. 이러한 결과는 서식지 면적 단일 변수보다 면적과 짜임을 함께 보는 연결성이 산림성 조류종 풍부도 분포를 더 잘 설명하며, 다중연결경로를 고려한 연결성 모델이 종 풍부도 예측에 있어 최소비용거리 모델에 비해 더 낫다는 것을 의미한다. 연구결과는 생태통로 위치 선정과 디자인에 있어 최소비용거리만을 고려하지 말고, 불확실성(uncertainty)과 관련하여, 생물들의 이동특성에 따른 다양한 연결가능경로들을 고려해야 함을 의미한다. 또한 단일 관심종(single focal species)만을 대상으로 하지 않고, 장기적인 관점에서 기후변화의 영향을 고려하면서 다양한 생물들이 통로를 이용할 수 있어야 할 것이다(Beier *et al*., 2008).

도시화된 지역에서 연결성이 조류종 풍부도를 결정하는 중요한 인자로 알려져 있지만(e.g., Shanahan *et al*. 2011), 이 연구의 결과와 같이 종 풍부도와 다중연결경로 분석에 의해 구조적·기능적 연결성을 다룬 연구는 드물다. 이처럼 도시 산림생물의 다양성 평가에 있어 서식지 자체의 면적뿐만 아니라, 경관 맥락(landscape context)을 고려하여 구조적·기능적 관점에서 서식지 연결성 정도를 측정하는 과정도 반드시 필요하다(Kang and Park, 2011).

[Fig. 3]

3.4. 연결망의 핵심지역과 중추적 경로

연구 대상지 북쪽에 위치하고 있는 천마산 군립공원과 북한산 국립공원과 같이 일반적으로 서식지 면적이 클수록 조각 중요도(*Ti*) 값이 컸다(Fig. 4). 이동성에 방해가 덜 되는 경관 요소를 통해 천마산 군립공원과 북한산 국립공원으로부터 가깝게 위치하여 서식지 면적은 작지만 *Ti* 값이 큰 조각들도 분포한다(Fig. 4). 전체적으로 동쪽과 북쪽에 분포하는 서식지 조각들의 연결성이 큰 것으로 나타났고, 남쪽과 서쪽의 서식지는 연결성이 낮은 것으로 나타났다.

조각 중요도와 최소 신장 트리를 통해 수도권 내 연결망의 핵심지역을 파악하였다(Fig. 4). 수도권 북쪽지역에서는 천마산 군립공원과 북한산 국립공원이, 남쪽에서는 남한산성 도립공원이 생물다양성이 높은 자연 공원으로 핵심 서식지 역할을 한다. 이들 지역에서는 내부적으로는 개체군 군집 형성이 크고, 외부적으로 국지적 연결성이 커서 주변에 연결된 다른 서식지로 야생동물의 이동과 확산이 활발히 일어나 생태계 서비스 유지에 있어 중심이 된다(Minor and Urban, 2007).

핵심지역들을 광역적으로 연결시키는데 중요한 매개지역도 찾아볼 수 있다. Fig. 4의 D는 용암산과 천견산, 죽엽산으로 이루어진 하나의 조각이고, E는 수락산과 불암산을 포함하는 조각으로, 면적이 크기 때문에 조각 자체적으로 넓은 서식 공간을 제공하면서 동시에 천마산 군립공원과 북한산 국립공원, 두 핵심지역을 연결시키는데 중요한 징검다리 서식지이다. F는 검단산으로 천마산 군립공원과 남한산성 도립공원, 두 핵심지역을 연결시키는 중요 징검다리 서식지이다. 징검다리 역할을 하는 서식지에서는 서식지 자체의 보전과 함께 생물종의 이동과 유전자 흐름을 원활히 하기 위해 주요 통로 주변의 토지이용에 대한 바탕 관리가 필요하다(Minor and Urban, 2008).

[Fig. 4]

서식지 연결망의 중추적 경로는 서울시를 중심으로 환형(ring-shaped)을 이룬다. 서울시 내부의 도시 바탕에 분포하는 비교적 면적이 작은 100 ha 이하의 서식지 조각들을 통해 남쪽과 북쪽의 면적이 큰 서식지들이 연결되지는 못했다. 대신 외곽에 분포하는 면적이 큰 서식지들이 연결이 되고, 작은 서식지 조각들 또한 외곽의 서식지들로 연결이 되었다. 서울시를 포함한 수도권 서식지의 연결성을 높이기 위해 서울시 도심 내부에서 기존의 통로 위치를 고려하면서 새로운 녹지공원과 가로수 조성 등을 통해 서식지 간 생물의 이동성을 높여주는 전략이 필요하다. 한편, 남쪽과 서쪽에 분포하는 서식지 조각들의 경우 전체 연결망에서는 연결성 기여도가 낮았지만, 연결성이 낮은 이 지역들만을 대상으로 세부적 연결성 평가를 통해 중요 핵심지역과 매개지역에 보전 우선순위를 부여하여 개발 위협에 처해있는 서식지들을 보호해야 할 것이다.

**IV. 결 론**

무분별한 개발에 따른 산림훼손이 도시 생태계의 회복탄력성(resilience)에 유의미한 영향을 끼치기 전에, 생물다양성 보전에 중요한 산림 서식지를 탐색하고 효과적으로 보호지역을 연계 및 확대하여 강건한(robust) 서식지 연결망을 구축하는 전략이 요구된다. 본 연구는 다중연결경로 분석에 의해 산림성 조류 서식지의 연결성을 평가하고, 경관 생태적 함의를 제시하였다. 이 연구 결과는 지속가능한 생물다양성 보전과 산림 생태계 관리방안 수립에 있어 유용한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

통로로 이루어진 연결망 모델이 산림성 조류종의 풍부도를 설명하는데 가장 중요한 모델로서, 연구에서 적용된 방법은 실제 종 분포 자료를 활용하여 구조적·기능적 연결성 평가의 차이를 줄이고자 하였다. 향후 무선추적 발신기를 통한 생물의 이동 추적과 개체군 유전자 분석으로 실제적인 기능적 연결성을 다룬 연구도 함께 진행되어야 한다(Kang *et al*., 2012; Kang, 2013).

조류는, 특히 명금류(songbirds) 철새들의 경우, 비행하는데 있어 풍속과 풍향의 영향을 받는다(Thomas *et al*., 2011). 따라서 인간간섭 인자뿐만 아니라, 바람길을 고려한 다중연결경로 분석을 통해 보다 더 생태적인 특성을 고려한 종의 이동 및 서식지 분포의 예측도 가능할 것이다. 조류종 이동과 분포에 있어 온도의 영향도 있기 때문에 도시의 열섬현상(heat island)에 대한 고려도 추가적으로 필요하다(Tryjanowski *et al*., 2013). 끝으로 연결성이 높은 중요 서식지나 주요 이동 통로의 위치를 탐색하는 연구뿐만 아니라, 기존의 연구들과 차별적으로, 야생동물의 이동에 장애가 되는 경관 요소를 찾고, 연결성 복원에 따른 비용과 편익을 평가하는 연구도 필요하다(McRae *et al*., 2012).

**적 요**

서식지 연결성을 정량적으로 평가하고 지도화하는 것은 지속가능한 도시 계획과 설계 과정에 있어 필수적이다. 이 연구에서는 그래프 이론을 적용하여 서울을 포함하는 수도권 지역을 대상으로 산림성 조류의 이동 통로들이 서식지들을 어떻게 연결 하는지 알아보고자 하였다. 산림 피복율과 인간 간섭을 의미하는 거주지역, 도로 네트워크의 영향을 고려하여 양질의 산림 서식지를 추출하였다. ArcGIS 파이썬 패키지 FunConn을 활용하여 서식지 연결망을 구축하고, 서식지 간 최소비용거리(*Q1*)와 25번째 백분위수 비용거리(*Q25*)에서의 조각 중요도를 산출하였다. 10개 지역에서 조사된 산림성 조류 종의 풍부도와 *Q1*과 *Q25* 비용거리에 따른 조각 중요도 값, 서식지 면적 간 스피어만 상관분석을 하였다. 서식지 면적의 효과를 통제했을 때, *Q25*에서의 조각의 중요도 값이 종 풍부도와 가장 높은 양의 상관관계를 나타냈다(*P* < 0.001). 따라서 25번째 백분위수 비용거리를 통해 연결성 유지에 중요한 역할을 하는 조각들과 통로의 위치, 연결망의 중추적 경로를 도출하였다. 연구에서 제시된 연결망은 향후 도시 생물다양성 보호와 증진을 위한 핵심 보전지역의 설정과 생태통로의 조성과 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

키워드: 그래프 이론, 경관 연결성, 다중연결경로, 종 풍부도

**감사의 글**

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

**REFERENCES**

Andersson, E. and Ö. Bodin, 2009: Practical tool for landscape planning? An empirical investigation of network based models of habitat fragmentation. *Ecography* **32**, 123-132.

Andrén, H., 1994: Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos* **71**, 355-366.

Alberti, M., 2005: The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review* **28**, 168-192.

Baguette, M. and H. Van Dyck, 2007: Landscape connectivity and animal behavior: functional grain as a key determinant for dispersal. *Landscape Ecology* **22**(8), 1117-1129.

Beier, P., D. R. Majka, and W. D. Spencer, 2008: Forks in the road: choices in procedures for designing wildland linkages. *Conservation Biology* **22**(4), 836-851.

Bibby, C. J., N. D. Burgess, D. A. Hill, and S. H. Mustoe, 2000: *Bird census techniques*. Academic Press, 302pp.

Crooks, K. R. and M. Sanjayan, 2006: *Connectivity Conservation*. Cambridge University Press, 712pp.

Drinnan, I., 2005: The search for fragmentation thresholds in a southern Sydney suburb. *Biological Conservation* **124**, 339-349.

Erritzoe, J., T. D. Mazgajski, and L. Rejt, 2003: Bird casualties on European roads − a review. *Acta Ornithologica* **38**, 77-93.

Faeth, S. H., P. S. Warren, E. Shochat, and W. A. Marussich, 2005: Trophic dynamics in urban communities. *Bioscience* **55**, 399-407.

Fahrig, L., 2001: How much habitat is enough? *Biological Conservation* **100**, 65-74.

Fall, A., M. Fortin, M. Manseau, and D. O’Brien, 2007: Spatial graphs: principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems* **10**, 448-461.

Forman, R. T. T. and L. E. Alexander, 1998: Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **29**, 207-231.

Hansen, A. J., R. L. Knight, J. M. Marzluf, S. Powell, K. Brown, P. H. Gude, and K. Jones, 2005: Effects of exurban development on biodiversity: patterns, mechanisms, and research needs. *Ecological Applications* **15**, 1893-1905.

Hilty, J., W. Lidicker, A. Merenlender, and A. Dobson, 2006: *Corridor ecology*: *the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*. Island Press, 344pp.

Kang, W., 2013: Network analyses of habitat connectivity for biodiversity of urban forest birds, forest mammals, and a threatened tree species. Ph. D. Dissertation. Seoul National University.

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

Kang, W., D. Lee, and C. R. Park, 2012: Nest distribution of magpies *Pica pica sericea* as related to habitat connectivity in an urban environment. *Landscape and Urban Planning* **104**, 212-219.

Kang, W., J. Kim, C. R. Park, and J. H. Sung, 2014: Comparing connectivity in forest networks of seven metropolitan cities of South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**, 93-102. (in Korean with English abstract)

Kim, J., K. Lee, C. Park, J. Seo, Y. Son, K. Kim, H. Youn, C. Park, S. Lee, and J. Oh, 2006: Valuation of nonmarket forest resources. *Journal of Korean Institute of Forest Recreation* **10**(2), 7-15. (in Korean with English abstract)

Korea Forest Service, 2010: *Basic forest statistics*. Korea Forest Service, 363pp. (in Korean)

Koskimies, P., 1989: Birds as a tool in environmental monitoring. *Annales Zoologici Fennici* **26**, 153-166.

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

Lee, D., G. Baek, C. Park, and H. Kim, 2011: Spatial planning of climate adaptation zone to promote climate change adaptation for endangered species. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* **14**(6), 111-117. (in Korean with English abstract)

Lee, D., W. Song, and S. Jeon, 2008: Regional ecological network design for wild animals' movement using landscape permeability and least-cost path methods in the metropolitan area of Korea. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* **11**(3): 94-106. (in Korean with English abstract)

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

McRae, B. H., B. G. Dickson, T. H. Keitt, and V. B. Shah, 2008: Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology* **89**, 2712-2724.

McRae, B. H., S. A. Hall, P. Beier, and D. M. Theobald, 2012: Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PloS one* **7**(12): e52604.

Minor, E. and D. Urban, 2007: Graph theory as a proxy for spatially explicit population models in conservation planning. *Ecological Applications* **17**(6), 1771-1782.

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 D. Urban, 2010: Forest bird communities across a gradient of urban development. *Urban Ecosystems* **13**, 51-71.

Opdam, P. and D. Wascher, 2004: Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation* **117**, 285-297.

Pinto, N. and T. H. Keitt, 2009: Beyond the least-cost path: evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. *Landscape Ecology* **24**(2), 253-266.

Radford, J. Q., A. F. Bennett, and G. J. Cheers, 2005: Landscape-level thresholds of habitat cover for woodland birds. *Biological Conservation* **124**(3), 317-337.

Sapoval, B., A. Baldassarri, and A. Gabrielli, 2004: Self-stabilised fractality of sea-coasts through damped erosion. *Physical Review Letters* **99**, 098501-098511.

Seoul Metropolitan Government (SMG), 2008: *A survey report on urban forest ecosystems in Seoul*: *stage 2*. Seoul Metropolitan Government, 515pp. (in Korean)

Seoul Metropolitan Government (SMG), 2009: *A survey report on urban forest health and biodiversity in Seoul (2nd year)*. Seoul Metropolitan Government, 702pp. (in Korean)

Seoul Metropolitan Government (SMG), 2010: *A survey report on urban forest ecosystems in Seoul: stage 3*. Seoul Metropolitan Government, 547pp. (in Korean)

Seoul Metropolitan Government (SMG), 2011: *A survey report on urban forest ecosystems in Seoul: Group 4*. Seoul Metropolitan Government, 702pp. (in Korean)

Shanahan, D. F., C. Miller, H. P. Possingham, and R. A. Fuller, 2011: The influence of patch area and connectivity on avian communities in urban revegetation. *Biological Conservation* **144**, 722-729.

Spencer, W. D., P. Beier, K. Penrod, K. Winters, C. Paulman, H. Rustigian-Romsos, J. Strittholt, M. Parisi, and A. Pettler, 2010: *California essential habitat connectivity project: a strategy for conserving a connected California*. Report prepared for California Department of Transportation and California Department of Fish and Game, 179pp.

Taylor, P., L. Fahrig, K. Henein, and G. Merriam, 1993: Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* **68**(3), 571-573.

Teng, M., C. Wu, Z. Zhou, E. Lord, and Z. Zheng, 2011: Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model. *Landscape and Urban. Planning* **103**, 1-14.

Theobald, D. M., 2006: Exploring the functional connectivity of landscapes using landscape networks. *Connectivity conservation: maintaining connections for nature*, K. R. Crooks and M. A. Sanjayan (Eds.), Cambridge University Press, 416-443.

Theobald, D. M., J. B. Norman, and M. R. Sherburne, 2006: FunConn v1 user’'s manual: ArcGIS tools for functional connectivity modeling. Natural Resource Ecology Lab. Colorado State University.

Theobald, D. M., K. R. Crooks, and J. B. Norman, 2011: Assessing effects of land use on landscape connectivity: loss and fragmentation of western U.S. forests. *Ecological Applications* **21**, 2445-2458.

Thomas, P. J., A. K. Labrosse, A. C. Pomeroy, and K. A. Otter, 2011: Effects of weather on avian migration at proposed ridgeline wind energy sites. *Journal of Wildlife Management* **75**, 805-815.

Tryjanowski, P., T. H. Sparks, S. Kuźniak, P. Czechowski, and L. Jerzak, 2013: Bird migration advances more strongly in urban environments. *PLoS ONE* **8**(5), e63482.

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

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

Walker, R. and L. Craighead, 1997: Analysis of wildlife movement corridors in Montana using GIS. Proceedings of the 1997 ESRI Users conference, Copenhagen, 1-18.

**List of Tables**

Table 1. Presence of 47 forest bird species at ten sites in Seoul (○ indicates presence).

Table 2. Resistance values (i.e., cost weights) applied to land cover data used to represent permeability of movement between high-quality habitat patches.

**List of Figures**

Fig. 1. Map of Seoul and its surrounding areas with ten forest bird survey sites.

Fig. 2. The forest bird habitat network consists of "high-quality forest patches" connected by movement "corridors" computed as least-cost corridors based on the *Q25* effective distance threshold and "linkages" the least-cost pathways between patch edges that cross the minimum-cost location for each pair of patches.

Fig. 3. Scatterplots and associated Spearman correlation coefficients for the pairwise relationships among forest bird species richness, patch importance (*Ti*) values based on the *Q1* and *Q25* effective distance thresholds, and habitat size, with histograms and kernel density overlays. \*, \*\*, and \*\*\* indicates significance at *P* < 0.05, *P* < 0.01, and *P* < 0.001, respectively.

Fig. 4. Patch importance index (*Ti*) with movement "corridors" and network "backbone" (i.e., minimum spanning tree) based on the *Q25* effective distance threshold. Important forest habitat areas in the network including: A, Cheonmasan County Park; B, Bukhansan National Park; C, Namhansanseong Provincial Park; D, Yongamsan, Cheonkyeonsan, Jugyeopsan, and Cheonbosan (Mt.); E, Suraksan and Bulamsan (Mt.); and F, Geomdansan (Mt.).

Table 1. Presence of 47 forest bird species at ten sites in Seoul (○ indicates presence).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Korean name | Scientific name | CW | IW | CA | DM | AS | BH | BJ | BR | UM | CJ |
| 개똥지빠귀 | *Turdus naumanni eunomus* |  |  | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |  |  |  |
| 검은등뻐꾸기 | *Cuculus micropterus* |  |  |  | ○ |  |  |  |  | ○ |  |
| 곤줄박이 | *Parus varius* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 굴뚝새 | *Troglodytes troglodytes* |  | ○ |  | ○ |  | ○ |  |  | ○ |  |
| 까마귀 | *Corvus corone* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |  |  |
| 꾀꼬리 | *Oriolus chinensis* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 꿩 | *Phasianus colchicus* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 나무발발이 | *Certhia familiaris* |  |  | ○ | ○ |  |  |  |  |  |  |
| 노랑눈썹솔새 | *Phylloscopus inornatus* |  | ○ |  |  |  |  |  |  | ○ |  |
| 노랑지빠귀 | *Turdus naumanni naumanni* | ○ |  |  |  | ○ | ○ | ○ |  | ○ | ○ |
| 노랑턱멧새 | *Emberiza elegans* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 동고비 | *Sitta europaea* |  | ○ |  | ○ |  |  |  | ○ | ○ | ○ |
| 되지빠귀 | *Turdus hortulorum* |  | ○ |  |  |  |  |  |  | ○ | ○ |
| 딱새 | *Phoenicurus auroreus* | ○ | ○ |  | ○ | ○ | ○ |  | ○ | ○ | ○ |
| 때까치 | *Lanius bucephalus* |  |  |  | ○ |  |  |  |  | ○ |  |
| 말똥가리 | *Buteo buteo* | ○ |  |  | ○ |  | ○ |  | ○ | ○ |  |
| 멧비둘기 | *Streptopelia orientalis* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 박새 | *Parus minor* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 붉은머리오목눈이 | *Paradoxornis webbianus* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 뻐꾸기 | *Cuculus canorus* |  | ○ |  | ○ | ○ | ○ |  |  | ○ | ○ |
| 상모솔새 | *Regulus regulus* |  | ○ |  | ○ | ○ |  | ○ | ○ |  | ○ |
| 새매 | *Accipiter nisus* |  |  |  |  | ○ |  |  | ○ |  |  |
| 새홀리기 | *Falco subbuteo* |  |  |  |  |  |  |  |  | ○ | ○ |
| 쇠딱다구리 | *Dendrocopos kizuki* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 쇠박새 | *Parus palustris* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 쇠솔새 | *Phylloscopus borealis* |  |  |  |  |  |  |  | ○ | ○ | ○ |
| 쇠유리새 | *Luscinia cyane* |  | ○ |  | ○ |  |  |  | ○ |  |  |
| 숲새 | *Urosphena squameiceps* |  |  |  | ○ |  | ○ |  |  | ○ |  |
| 쑥새 | *Emberiza rustica* |  |  |  | ○ | ○ |  |  |  |  |  |
| 어치 | *Garrulus glandarius* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 오목눈이 | *Aegithalos caudatus* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |  |
| 오색딱다구리 | *Dendrocopos major* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 울새 | *Luscinia sibilans* |  | ○ |  | ○ |  |  |  |  |  |  |
| 유리딱새 | *Tarsiger cyanurus* |  | ○ |  | ○ |  | ○ |  |  |  |  |
| 직박구리 | *Hypsipetes amaurotis* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 진박새 | *Parus ater* |  | ○ |  | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 찌르레기 | *Sturnus cineraceus* |  |  |  | ○ | ○ | ○ |  |  |  |  |
| 청딱다구리 | *Picus canus* | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 큰부리까마귀 | *Corvus macrorhynchos* |  | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |  | ○ | ○ | ○ |
| 큰오색딱다구리 | *Dendrocopos leucotos* |  |  |  | ○ |  |  |  |  | ○ | ○ |
| 큰유리새 | *Cyanoptila cyanomelana* |  |  |  | ○ |  |  |  |  |  | ○ |
| 파랑새 | *Eurystomus orientalis* |  |  | ○ | ○ |  | ○ |  | ○ | ○ |  |
| 호랑지빠귀 | *Zoothera dauma* | ○ | ○ | ○ | ○ |  |  | ○ |  | ○ |  |
| 황조롱이 | *Falco tinnunculus* | ○ | ○ |  | ○ | ○ | ○ |  |  |  |  |
| 흰눈썹황금새 | *Ficedula zanthopygia* |  | ○ |  |  |  |  |  |  | ○ |  |
| 흰배멧새 | *Emberiza tristrami* |  |  |  |  |  |  |  | ○ | ○ |  |
| 흰배지빠귀 | *Turdus pallidus* |  |  |  | ○ | ○ |  |  |  | ○ |  |
| Species richness | | 20 | 30 | 20 | 39 | 27 | 28 | 20 | 26 | 35 | 25 |
| Reference | | SMG, (2008) | | | SMG, (2009) | | | SMG, (2010) | | SMG, (2011) | |

CW: Chunwangsan, IW: Inwangsan, CA: Choansan, DM: Daemosan, AS: Ansan, BH: Bonghwasan, BJ:Bongjesan, BR: Baekryeonsan, UM: Umyeonsan, CJ: Chunjangsan

Table 2. Resistance values (i.e., cost weights) applied to land cover data used to represent permeability of movement between high-quality habitat patches.

|  |  |
| --- | --- |
| Cover type | Resistance |
| Forest | 1 |
| Grass | 3 |
| Agriculture | 10 |
| Barren | 10 |
| Water | 20 |
| Built-up area | 100 |
| Road | max(100, speed limit1.35) |

Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4

