

Research Paper

대도시 도심의 생태적 연결성 및 연결망 분석

차재규

국립생태원 기후생태연구실

Ecological Connectivity and Network Analysis of the Urban Center in a Metropolitan City

Jaegyung Cha

Division of Climate & Ecology, National Institute of Ecology

요약: 개발 과정에서 발생하는 생태공간의 단절과 파편화는 생물다양성의 위협 요소이다. 특히 개발 압력이 높은 도심은 생태공간이 부족하여 연결성이 매우 낮을 것이다. 이러한 문제는 대도시에서 더욱 두드러지게 나타나는 경향이 있다. 이를 해결하기 위해 개별 사업이나 도시관리 수준에서 생태적 연결성 현황을 파악하고 개선하는 지속적인 노력이 필요하다. 그러나 대도시의 생태적 연결성 현황 파악과 개선에 대한 논의가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 우리나라 대도시 서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산의 도심이 가진 생태적 연결성을 평가하였다. 평가 결과 도심은 외곽이나 도시 전체와 비교해 연결성이 낮았다. 그리고 종분포모델 등 지역 특성을 반영하여 대전을 대상으로 수행한 생태적 연결망을 분석하여 1ha 이상 산림을 이어주는 최적 경로 510개를 도출하였다. 본 연구는 도시의 생태적 연결성 개선 목표 제시에 필요한 정량적 수치와 생물다양성을 포함한 지역 특성에 따른 연결망을 도출한 사례로서 의미가 있다. 환경영향평가나 도시관리에서 생태적 연결성을 개선하는 방향을 제시하고 평가 체계를 구축하는 데 결과를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 생태적 연결성, 생태적 연결망, 생태축, 환경계획

Abstract: The disconnection and fragmentation of ecological spaces that occur during the development process pose a significant threat to biodiversity. Urban center areas with high development pressure are particularly susceptible to low connectivity due to a scarcity of ecological space. This issue tends to be more pronounced in larger cities. To address this challenge, continuous efforts are needed to assess and improve the current state of ecological space connectivity at the level of individual projects and urban management. However, there is a lack of discussion regarding the analysis and improvement of ecological connectivity in metropolitan cities. In line with this objective, this study evaluated the connectivity of ecological spaces in the city centers of Seoul, Busan, Daegu, Incheon, Gwangju, Daejeon, and Ulsan. The evaluation revealed that city centers exhibited lower

connectivity of ecological spaces compared to their peripheries or the overall city. In addition, in the ecological network analysis that reflected regional characteristics, such as the species distribution model conducted on Daejeon, 510 optimal paths connecting forests of more than 1ha were derived. This study is significant as an example of deriving an ecological network based on regional characteristics, including quantitative figures necessary for establishing goals to improve urban ecological connectivity and biodiversity. It is anticipated that the results can be utilized to propose directions for enhancing ecological connectivity in environmental impact assessments or urban management and to establish an evaluation framework.

Keywords : Ecological Connectivity, Ecological Network, Ecological Axis, Environmental Planning

I. 서론

개발에 따른 야생생물의 주요 서식지인 생태공간의 훼손과 파편화 및 단절은 생물다양성을 비롯한 자연이 주는 다양한 혜택을 직접적으로 감소시키는 주요 원인이다(Kong et al. 2010; Rudnick et al. 2012; Darvishi et al. 2020; Torres et al. 2022). 따라서 생태공간의 파편화 및 단절 현상이 심한 도시에서 생물다양성 증진을 위한 복원의 가장 효과적 방법은 도시의 생성 및 확장으로 단절된 생태공간을 이전 상태와 유사하게 이어주거나, 생태공간과 근접한 지역에 신규 공간을 조성하는 것이다(Rudd et al. 2002; Beninde et al. 2015). 그러나 도시는 신규 생태공간 조성이 매우 제한적이므로 연결성 개선 측면에서 생태공간의 관리와 생태공간의 조성 및 영역의 설정이 중요하다(Hostetler et al. 2011).

생태적 연결성은 생물다양성의 증진과 기후변화 대응을 위해 고려해야 할 주요 요소이지만(Heller and Zavaleta 2009; Krosby et al. 2010; Hilty et al. 2020), 지금도 연결성을 훼손하는 개발은 계속 진행되고 있다. 개발에 의한 생태적 연결성 감소를 예방하고 개선하기 위해 야생동물의 이동성을 고려한 연결성을 평가하거나, 그래프 이론 및 비용 기반의 연결망 지도를 구축하고 이를 검증하기 위한 다양한 노력(Koen et al. 2014; Park 2015; Ersoy et al. 2019; Kang et al. 2019)들이 경관생태학 분야에서 계속되고 있다. 다만 경관생태학 측면의 생태적 연결성 정량화에서 생태공간 사이의 연결성만을 산정하는 것은 오류가 있을 수 있으며, 생태공간 내부 연결을 포함

하여 산정하면 생태공간 증감을 효과적으로 반영할 수 있다(Spanowicz and Jaeger 2019). 특히 도심은 개발이 지속되어 부족한 생태공간의 경계부를 중심으로 훼손이 이루어지는 것을 고려할 때 생태공간 내부 연결을 포함하여 생태적 연결성을 산정하는 것이 바람직하다. 이러한 생태적 연결성 지표 기반의 평가와 생물다양성을 고려한 연결망의 설정은 생태공간이 부족한 도시의 관련 공간계획 수립에서 매우 중요한 일이며, 지속적인 모니터링과 평가가 필요하나(Jaeger 2015), 연결성과 연결망을 통합적으로 분석하고 결과를 제시한 사례는 부족하다.

개발의 환경영향을 사전에 예측 및 평가하여 부정적 영향을 최소화하는 환경영향평가 과정에서 대상지 내·외부의 생태적 연결성을 고려한다면 개선의 실질적 효과가 있을 것이다. 그러나 우리나라 환경영향평가 과정에서 생태적 연결성에 대한 고려는 하고 있으나 관련 지표를 통한 정량적 평가나 모니터링을 수행하고 있지 않다. 관련 연구 사례를 보면 영국, 캐나다, 프랑스 등의 환경영향평가 과정에서도 생태적 연결성에 대한 고려가 부족하여 해당 부분에 대한 개선 방안을 제시하였으며(Tarabon et al. 2019; Kor et al. 2022; Patterson et al. 2022a), 환경영향평가에서 일반적으로 생태적 연결성 분석은 지나치게 단순한 지표나 질적 접근법에 의존하고 있으므로 연결성 분석의 실현 가능성과 효과 개선을 위한 명확한 지침 제시를 주장하였다(Patterson et al. 2022b).

특히 대도시는 시가화 지역인 도심의 면적이 넓지만, 생태공간은 부족하다. 그리고 도심과 외곽의 경계부 개발에 대한 지속적인 압력이 있으므로 생태적 연결

성에 관한 고려가 더욱 필요하다. 그러나 도심의 생태적 연결성 개선을 위한 정량적 자료나 평가, 모니터링 체계가 명확하게 마련되어 있지 않다. 이를 개선하기 위해 개별 사업 또는 도시 차원에서 도심의 생태적 연결성을 개선할 수 있는 체계가 마련되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 환경영향평가 등 개발사업의 영향평가와 도시의 계획 차원에서 생태적 연결성 개선을 위한 체계 정립에 관한 기반을 마련하고자 수행하였다. 이를 위해 국내 7개 주요 대도시를 대상으로 단절되고 파편화된 도심의 생태적 연결성 현황을 분석하였다. 또한 생물다양성과 지역적 특성을 고려한 생태적 연결망 분석 방법을 제안하고, 이를 대전광역시에 적용하였다. 그리고 분석 과정과 결과를 토대로 연결성 개선을 위한 체계 정립의 방안을 제시하였다.

II. 연구방법

1. 연구의 범위

우리나라 대도시는 관련 법령(지방자치법 제198조 제1항)에 의해 인구가 50만 이상인 도시로 구분할 수 있다. 그러나 일반적으로 특별시와 광역시를 대도시로 인식하고 있다. 따라서 이 연구에서 대도시의 생태적 연결성에 대한 분석은 서울특별시, 부산광역시, 대구광역시, 인천광역시, 광주광역시, 대전광역시, 울산광역시 등 7개 도시(이하 특별시 및 광역시 표현 생략)의 각 행정구역으로 범위를 한정하여 연구를 수행하였다. 그리고 생태적 연결망에 대한 분석은 7개 대도시 중 도심의 생태적 연결성이 가장 높은 대전으로 한정하여 수행하였다.

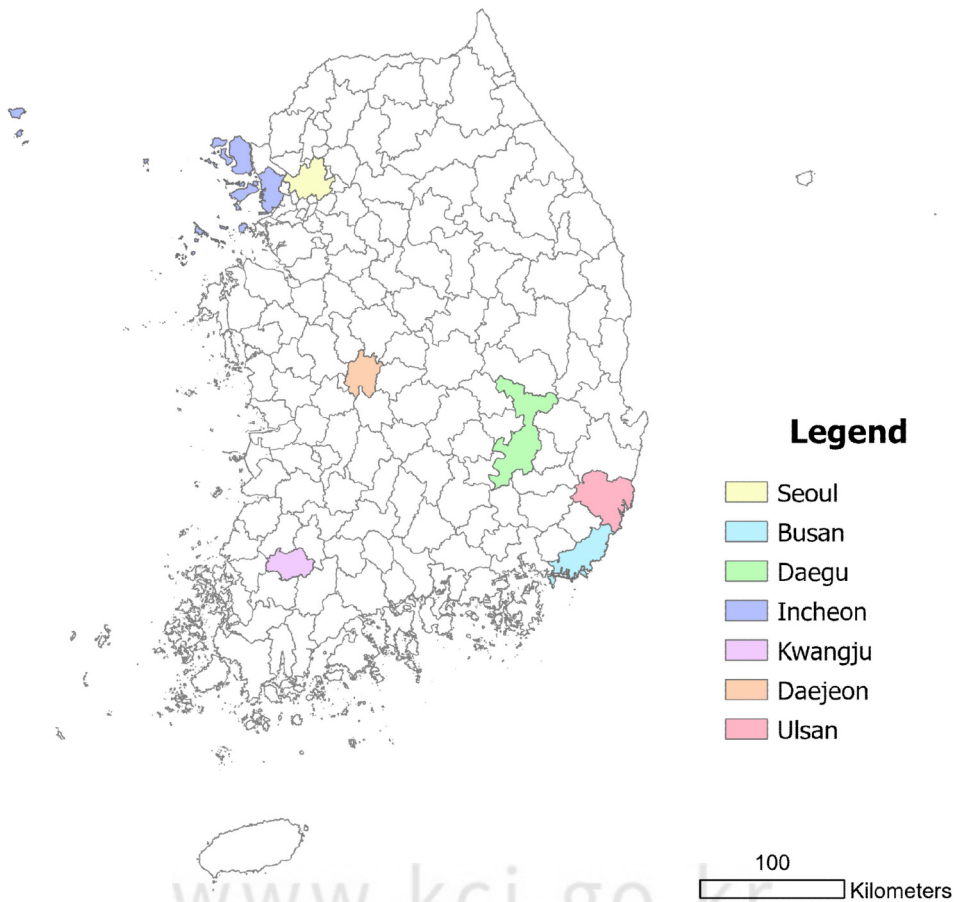


Figure 1. Status map of metropolitan city

2. 생태적 연결성 분석 방법

연결성 분석을 위한 생태공간의 영역 구분은 환경부에서 2021년을 기준으로 제작한 세분류 토지피복도를 활용했다. 토지피복도는 41개의 유형을 가진 벡터 방식의 지도로, 2010년부터 제작되어 2019년부터는 매년 현행화되고 있어 단기적 변화 파악에 용이하다. 41개에서 자연지역(활엽수림: 311, 침엽수림: 321, 혼효림: 331, 자연초지: 411, 묘지: 422, 기타초지: 423, 내륙습지: 511, 갯벌: 521, 염전: 522, 해변: 611, 강기슭: 612, 암벽바위: 613, 하천: 711, 호소: 712)에 해당하는 토지피복을 생태공간으로 설정했다. 산림이 주로 도시 외곽에 위치하며, 생태공간 대부분을 차지하는 특성을 고려하여 생태적 연결성 분석을 위한 영역으로 산림(영역 1)과 산림을 포함한 자연지역 전체(영역 2)로 나누었다.

생태적 연결성의 분석 방법은 경관생태학 분야에서 경관의 파편화와 연결 가능성에 대한 지표로 제시(Girvetz et al, 2007)한 유효 망 크기(effective mesh size) 분석법을 활용하였다. 이 방법은 CBD(Convention on Biological Diversity)가 도시 생물 다양성 모니터링 도구로 권장하는 도시생물다양성지수의 연결성 지표로 활용되고 있으며 본 연구에서는 해당 매뉴얼(Chan et al, 2014; Chan et al, 2021)을 기반으로 연결성 분석을 수행하였다. 매뉴얼에서는 야생동물의 일반적 이동 거리를 고려해 생태공간 사이에 도로와 제방 등 인공장벽이 없는 100m 이내 단

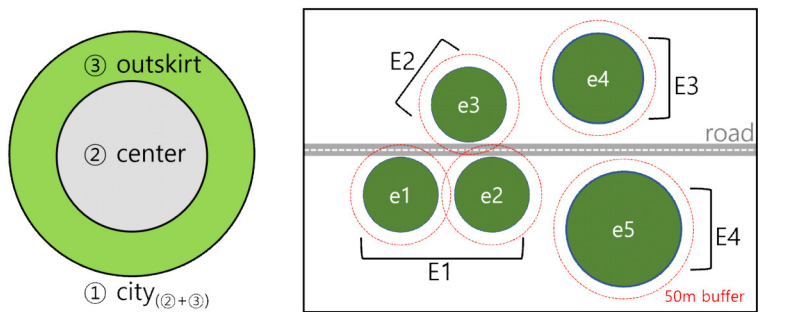
절은 미반영하고 있으나(Figure 2의 E1), 이 연구에서는 국토교통부의 2022년 표준 노드링크 자료를 반영하여 도로가 있는 경우만 단절된 공간으로 처리하였다(Figure 2의 E2).

분석 영역은 대도시의 도심 연결성을 외곽 및 전체와 비교하기 위해 전체 도시(Figure 2의 ①), 도심(Figure 2의 ②), 그리고 외곽(Figure 2의 ③)으로 구분하여 분석하였다. 이 구분은 인구밀도와 지목을 기준으로 생성한 통계청의 도시화지역(2022년 기준) 데이터를 활용하였다.

각 영역에서 도출된 유효 망 크기를 지역(산림 또는 자연지역)의 면적으로 나누어 각각의 정량적 수치(비율)를 생태적 연결성으로 도출하였다.

3. 생태적 연결망 도출 방법

지역의 생태적 연결성 개선은 단절된 생태공간을 연결하는 가장 효율적인 선형을 설정하고 이를 중심으로 생태통로, 생태공간 등 단절된 생태공간을 물리적·기능적으로 이어질 수 있도록 신규 생태공간을 조성하거나 복원하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 생태적 연결망을 도시생태축 구축과 생태통로, 생태공원 등 신규 공간 조성을 통해 단절된 생태공간을 이어줄 수 있는 산림 중심의 최적 경로로 정의하였다. 생태공간 조성 및 생물다양성에 관련된 지역 특성을 기반으로 연결망을 도출할 수 있도록 Figure 3과 같이 3단계로 나누어 방법론을 제안하고 대전광역시를 대



$$EMS = \frac{1}{E_{total}} (E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 + \dots + E_n^2)$$

$$Connectivity(①, ②, ③) = \frac{EMS}{Area\ of\ Resion} \times 100$$

Figure 2. Method for ecological space connectivity analysis

Table 1. Cost value of land cover

land cover	Used Area	Agricultural Land	Forest	Grass	Wet Land	Barren	Water
Value	100	27	1	14	27	50	27

상으로 수행하였다.

1단계는 생태적 연결망 도출에 한정적이지만 생물 다양성과 동물의 이동성을 고려하기 위한 비용으로 반영할 종분포모델을 생성하는 단계이다. 종분포모델 생성은 종 출현정보를 기반으로 적절한 야생동물 분포를 예측하는(Hernandez et al. 2008) Maxent 3.4.4를 활용하였다. 종분포모델링에 입력하는 종 출현정보 즉 종속변수는 생태공간을 통한 야생동물의 이동성과 자료 확보의 용이성을 고려하여 생태계 구성의 핵심종인 포유류(kim et al. 2014) 중에서 전국에 서식하며, 서식지 이용 특성이 분명한 종분포모형 적용에 적합(Song and Kim 2012)한 고라니의 분포 현황을 활용하였다. 그리고 야생동물 서식에 영향을 미치는 9개 환경변수를 반영하였다. 환경변수는 범주형으로 세분류 토지피복도, 임상도(2021년)의 경급과 영급, 향 등 4개, 연속형으로 고도, 경사도, 하천과의 거리, 도로와의 거리, 산림과의 거리(내외부) 등 5개를 100m 공간해상도로 생성하였다. 그리고 Maxent 3.4.4.에 전국을 커버하는 100m 공간해상도의 종속 및 환경변수를 입력하여 종분포모델을 도출하였다.

2단계는 지역 특성을 반영한 생태적 연결망 도출을

위한 관련 비용을 생성하는 단계이다. 비교적 단순한 등급으로 구분하는 토지피복 기반의 단일 비용으로만 연결망을 도출하면 생물다양성과 공간 구성에 대한 고려가 부족할 수 있다. 따라서 1단계에서 도출한 종분포모델에 생태적 건전성, 도심 내 신규 생태공간 확보 관련성 등을 고려하여 토지피복, 임상도의 영급, 경사도, 건축물 면적 비율 등 4개 비용을 추가로 반영하였다. 토지피복은 야생생물의 서식과 이동에 용이한 영역을 구분할 수 있으며, 유사한 방식의 연결망 분석 사례(kim et al. 2019; Yoon et al. 2019)에서도 토지피복을 기초 비용으로 설정하였다. 따라서 토지피복에 대한 비용 값은 해당 사례를 참고하여 설정하고 반영하였다(Table 1). 크고 오래된 나무는 동물의 서식지나 보호지역을 제공하고 식생 복원의 중심이 될 수 있으므로(Karenlampi 2019) 임상도의 영급을 비용으로 반영하였다. 경사도는 야생생물의 서식이나 이동, 공간 조성 등의 분야에서 고려해야 할 요소로서 지형이 완만하거나 중간 경사 지역이 야생동물 이동에 선호(Jeong et al. 2021)되며, 경사가 완만할수록 신규 공간 조성에도 유리하다. 그리고 생태적 연결성 개선을 위한 생태축 구축과 생태공간 조성을

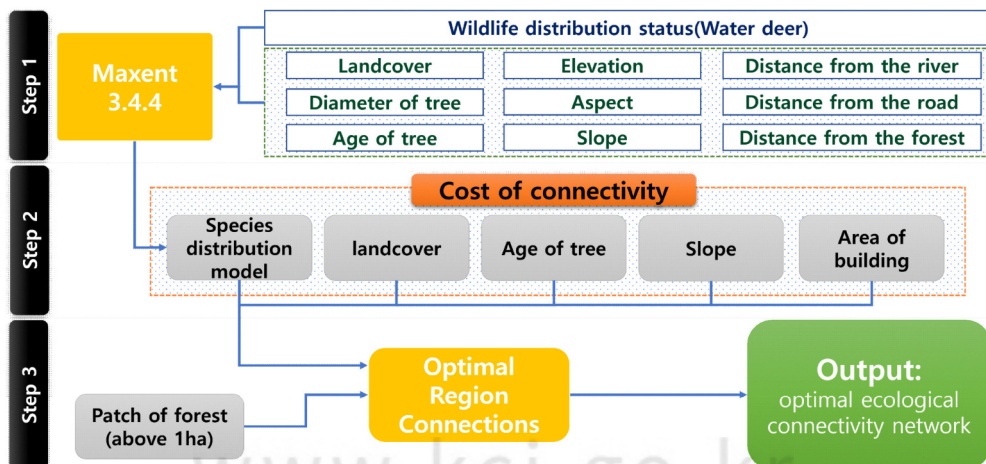


Figure 3. Method for optimal ecological space connectivity network analysis

위해 건축물의 제거 혹은 이전은 매우 어렵고 현실성이 떨어진다. 따라서 건축물 면적을 반영하였다.

중분포모델은 중분포가 많을수록, 임상도의 등급은 나이가 많을수록 낮은 비용을 가지도록 값을 역전하여 활용하였다. 모든 속성은 최댓값 100을 가지도록 변환하여 5개를 통합하여 단일 비용을 생성하였다.

3단계는 대전광역시(분석지역: 50×50km)의 생태적 연결망을 도출하는 단계이다. 이를 위해 비용 기반으로 지역 사이의 최적 선형(경로)을 생성하는 도구인 ArcGIS Pro의 Optimal Region Connection을 활용하였다. 연결 대상 지역으로는 도시 생태공간의 물리적 연결체계인 도시생태축 구축 관련 지침(Ministry of Environment 2008)을 참고하여 1ha 이상의 산림으로 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 대도시 도심의 생태적 연결성

7개 대도시 도심의 생태적 연결성을 파악하고 행정구역 전체와 외곽 지역과 비교하기 위해 도시의 행정구역, 도심, 외곽 등 3개 구역으로 나누어 생태적 연결성을 분석하였다. 7개 대도시가 가진 3개 구역의 면적 현황을 살펴보면 행정구역과 외곽의 면적은 대구가 가장 크며, 도심의 면적은 서울이 가장 크다. 행정구역에서 도심이 차지하는 비율이 가장 높은 도시는 서울로 약 60%이며, 울산이 약 10%로 가장 낮다. 그리고 외곽은 비율은 반대이다. 7개 도시의 도심 면적은 모두 100km² 이상의 면적을 가지고 있다(Table 2)(Figure 4).

7개 대도시의 행정구역, 도심, 외곽에서 산림과 자

Table 2. Current status on the area of metropolitan city (unit: km2)

Category	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Kwangju	Daejeon	Ulsan
Whole of city	605.30	784.57	1,492.66	1,109.57	498.00	539.47	1,063.04
Center of city	359.72 (59.43%)	183.20 (23.35%)	168.11 (11.26%)	174.24 (15.70%)	109.20 (21.93%)	106.05 (19.66%)	103.58 (9.74%)
Outskirt of city	245.58 (40.57%)	601.37 (76.65%)	1,324.54 (88.74%)	935.33 (84.30%)	388.80 (78.07%)	433.43 (80.34%)	959.47 (90.26%)

Table 3. Current status on the ecological space connectivity of metropolitan city

Category		Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Kwangju	Daejeon	Ulsan	
Whole of city	Forest zone	area (%)	23.50	42.24	61.30	32.76	34.23	49.77	59.28
		Connectivity (%)	9.18	9.60	4.68	2.28	15.43	12.26	6.48
		Number of patch (pcs)	1,227	1,919	2,118	2,936	1,593	1,482	3,170
	Natural zone	Area (%)	42.43	57.53	72.21	50.69	53.09	67.47	70.98
		Connectivity (%)	10.45	7.36	18.24	1.94	25.30	58.49	18.03
		Number of patch (pcs)	45,715	22,741	28,793	35,953	28,291	21,534	22,567
Center of city	Forest zone	area (%)	6.63	5.29	3.30	2.67	3.22	4.33	2.20
		Connectivity (%)	2.64	5.41	5.41	8.49	5.21	5.15	8.68
		Number of patch (pcs)	780	375	168	176	226	229	107
	Natural zone	Area (%)	19.13	16.95	14.03	21.65	20.10	19.91	19.09
		Connectivity (%)	0.95	1.88	1.67	1.97	1.72	8.72	3.85
		Number of patch (pcs)	36,597	12,485	12,910	17,277	15,620	13,109	8,253
Outskirt of city	Forest zone	area (%)	48.20	53.49	68.66	38.37	42.94	60.89	65.45
		Connectivity (%)	11.92	10.04	4.73	2.33	15.96	12.64	6.53
		Number of patch (pcs)	671	1,688	2,006	2,843	1,423	1,344	3,119
	Natural zone	Area (%)	76.54	69.89	79.59	56.09	62.36	79.10	76.58
		Connectivity (%)	17.14	8.20	18.98	2.17	29.07	63.23	18.88
		Number of patch (pcs)	10,455	10,888	16,386	19,273	13,130	8,886	14,697

연지역의 연결성을 분석하였다(Table 3). 그리고 연결성과 밀접한 관련이 있는 구역 내 산림과 자연지역의 비율 및 조각(패치)의 수를 함께 분석하였다. 도시 행정구역 전체에서 산림이 차지하는 비율이 가장 큰 도시는 산림을 포함한 자연지역이 많은 군위군이 최근에 편입된 대구(약 61%)이며, 가장 작은 도시는 서울특별시(약 24%)로 나타났다. 산림의 연결성은 광주가 약 15%로 가장 높으며, 행정구역에서 산림이 차지하는 비율이 비슷함에도 불구하고 인천이 약 2%로 가장 낮게 나타났다. 산림의 조각(패치) 수가 가장 많은 지역은 울산으로 나타났다.

산림을 포함한 자연지역이 차지하는 비율도 대구가 약 72%로 가장 높게 나타났다. 자연지역의 연결성은 대전이 약 58%로 가장 높고, 산림 연결성과 마찬가지로 인천이 2% 미만으로 가장 낮았다. 자연지역의 조각(패치) 수는 서울이 가장 많은 것으로 확인되었다.

도시의 도심(통계지리정보서비스 2022년 2분기 도시화지역 활용)에서 산림이 차지하는 비율이 가장 큰 도시는 서울(약 7%)이며, 울산(약 2%)이 가장 작다. 도심의 산림 연결성은 울산이 약 9%로 가장 높았으며, 서울이 약 3%로 가장 낮았다. 서울의 도심에서 산

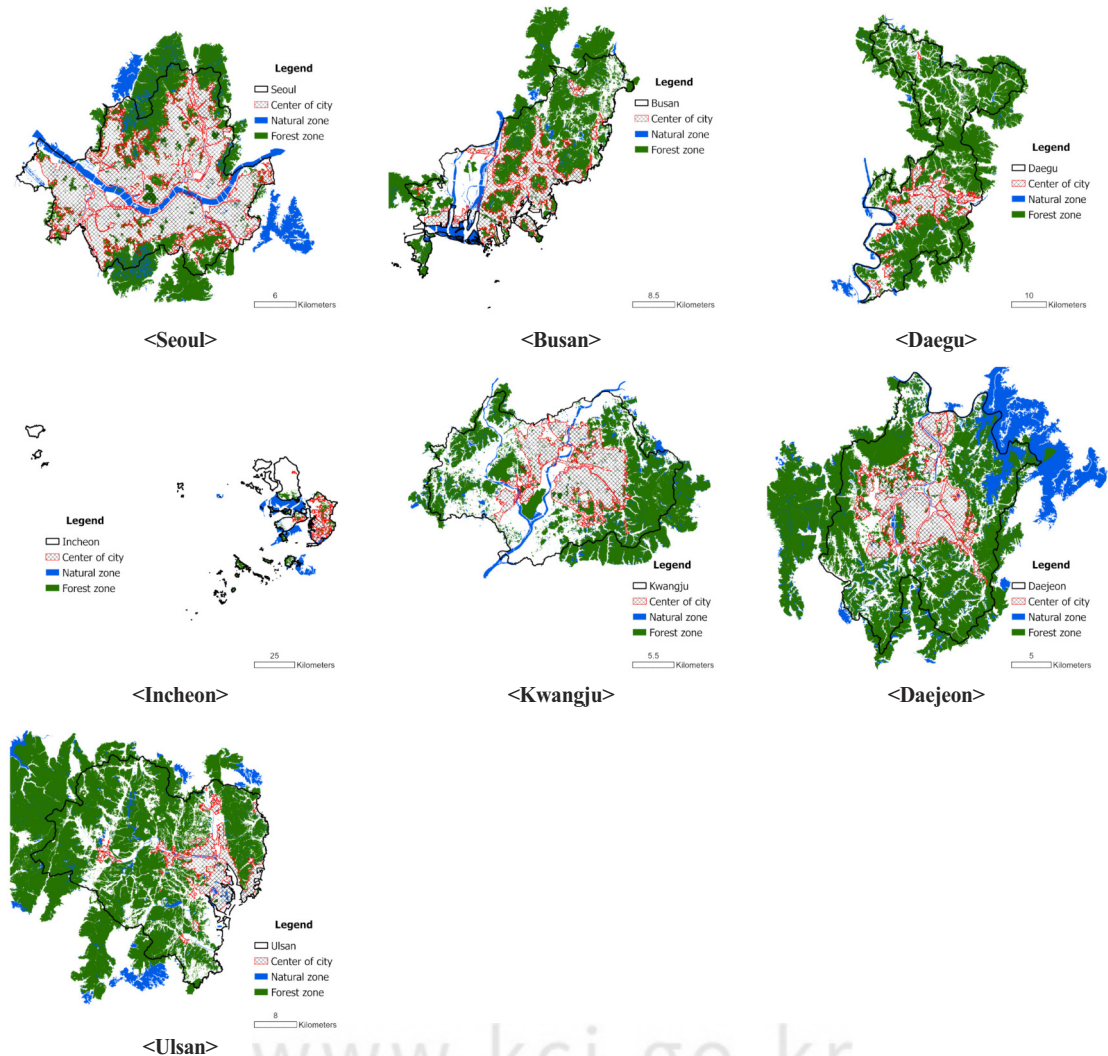


Figure 4. Ecological Space Status Within the Metropolitan city

림들이 차지하는 면적이 가장 크지만, 조각(패치) 수도 780개로 가장 많아 산림 사이의 연결성은 다른 대도시의 도심에 비해 상대적으로 취약한 것이 확인되었다.

도심의 자연지역은 부산과 대구를 제외하고 나머지 도시에서 20%에 가까운 면적을 차지하는 것으로 나타났다. 도심 내 자연지역 연결성은 대전이 약 9%로 가장 높고, 약 4%인 울산은 제외하고 나머지 도시는 연결성은 1%에 가깝게 나타났다. 그 중에서도 서울의 연결성이 1% 미만으로 가장 낮았으며, 조각(패치) 수가 36,597개로 가장 많았다.

도시의 외곽(도시화지역 제외 지역)에서 산림이 차지하는 비율이 가장 큰 도시는 대구로 약 69%를 차지하고 있다. 그리고 인천이 38%를 차지하고 있어 가장 낮다. 외곽의 산림 연결성은 광주가 약 16%로 가장 높았으며, 인천이 약 2%로 가장 낮다. 산림 조각(패치)의 수는 울산이 3,119개로 가장 많으며, 서울이 671개로 가장 작다.

외곽에서 자연지역이 차지하는 비율은 대구가 약 80%로 가장 높고, 인천이 약 56%로 가장 낮다. 자연지역의 연결성은 8,886개 조각(패치)이 있는 대전이 약 63%로 가장 높고, 19,273개의 조각이 있는 인천이 약 2%로 가장 낮다.

대도시 도심의 대부분이 외곽 또는 도시 전체에 비해 생태적 연결성이 낮은 현상을 확인할 수 있었으며, 도심에서 같은 비율의 면적을 차지하고 있으나, 지역의 생태공간 단절 및 파편화 상태에 따라 연결성의 차이가 크게 벌어지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

2. 대도시 생태적 연결망 분석

생태적 연결성 개선에 가장 직접적이고 효과적인 방법은 신규 생태공간 조성 및 복원 사업이다. 현재 생태공간의 연결성을 파악하고 목표를 설정한 후 연결성 개선에 적합한 지역을 중심으로 생태공간을 조성하거나 복원하는 것이 중요하다. 따라서 대도시 중 도심의 생태공간 연결성이 가장 양호한 대전광역시(분석지역: 50×50km)를 대상으로 동물의 이동성과 생태공간 연결성 개선에 관련된 지역 특성(비용)을 고려하여 최적의 연결망을 도출하였다.

동물 이동성에 관한 비용 생성을 위해 수행한 중분포모델링은 고라니 분포를 기반으로 Maxent를 활용하였다. 종속변수인 전국 고라니 분포는 제4차 전국 자연환경조사(2014년~2018년) 12,210개 지점, 2015년에서 2019년까지 조사한 백두대간보호지역 998개 지점, 민통선 이북지역 3,929개 지점, 국립공원 자연정보 개방서비스 데이터(2010년~2022년)의 11,348개 지점을 통합한 28,845개 지점 정보 중 통계적 자기상관 최소화를 위해 같은 지점의 중복데이터를 제거하여 11,977개로 정리하였다. 그리고 종속 및 환경 변수와 동일한 100m 격자망에서 출현 빈도를 분석한 결과 평균값이 약 2.4회로 나타나, 3회 이상 출현한 798개 지점 중 수역 위에 있는 지점을 제외하여 최종 출현 정보를 766개 지점으로 선별하여 활용하였다. 종속 및 환경변수를 Maxent에 입력하여 100m 공간해상도의 중분포모델(AUC 0.738)을 도출하였다. 연결망 분석을 위해 생성한 중분포모델의 정확도는 머신러닝 알고리즘을 평가하는데 적합한 ROC (Receiver Operating Characteristic)의 AUC (Area Under Curve)로 확인할 수 있으며(Bradley 1997), AUC가 0.7 이상이면 예측 결과가 적절한 것으로 본다(Phillips and Dudik 2008). 이 연구에서 도출한 중분포모델은 AUC 0.738로 동물 이동성을 고려한 연결망 분석의 비용으로 사용하기에 적절하다.

중분포모델, 토지피복, 임상의 영급, 경사도, 건축물의 면적 등 5개 비용을 통합하여 대전광역시를 포함하는 50km×50km 정방형 지역의 연결망 분석을 위한 단일 비용을 생성하였다. 비용의 범위는 41~405로 형성되었으며, 도심 지역의 비용이 매우 높게 나타나고 있다(Figure 5).

생성한 비용을 기반으로 도시 생태공간의 물리적 체계인 도시생태축을 구성하는 주요 요소인 1ha 이상의 산림을 연결하는 망을 도출하였다. 대전광역시 산림 조각(패치)은 총 1,482개이며, 이 중에서 1ha가 넘는 면적을 가진 산림 조각(패치)이 543개이고 도심에는 118개가 있다. 연결망 도출은 비용 기반의 지역 간 최적 경로를 도출하는 Arc GIS Pro의 도구인 Optimal Region Connections에 대전광역시 전체 분석을 위해 543개의 산림 패치를 입력하여 분석을

수행하였다.

연결망 분석 결과 1,423개의 경로(Figure 6의 청색 및 적색)가 생성되었으며, 이 중 510개가 최적 경로(Figure 6의 적색)로 도출되었다. 모든 경로 1,432개 중 356개가 도심 구역의 산림을 연결하고 있으며,

1,076개가 외곽 구역의 산림을 연결하고 있다. 최적 경로 510개 중 79개가 도심 구역의 산림을 연결하고 있으며, 431개가 외곽 구역에서 산림을 연결하고 있다. 도심 구역 최적 경로 79개의 평균 길이는 230m이며, 최장 길이는 1,769m, 최단 길이는 5m로 나타났다.

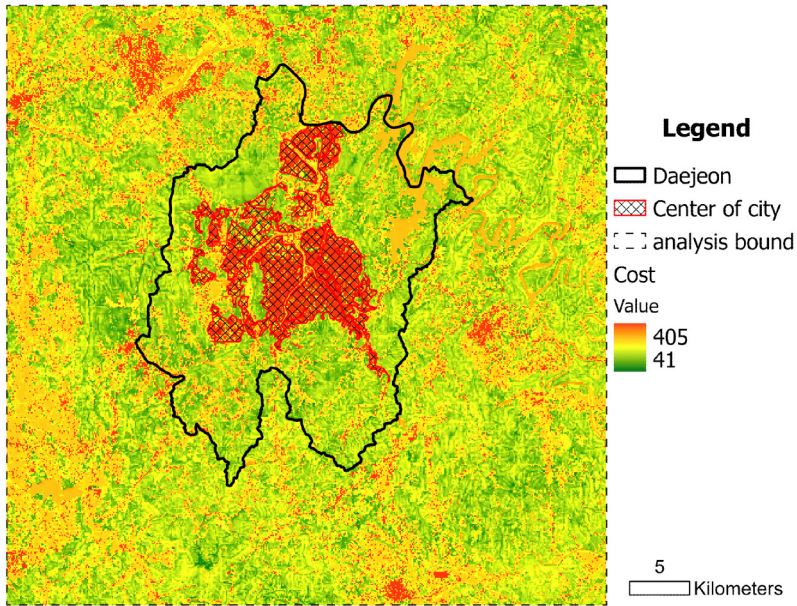


Figure 5. Daejeon's Cost of Movement Map

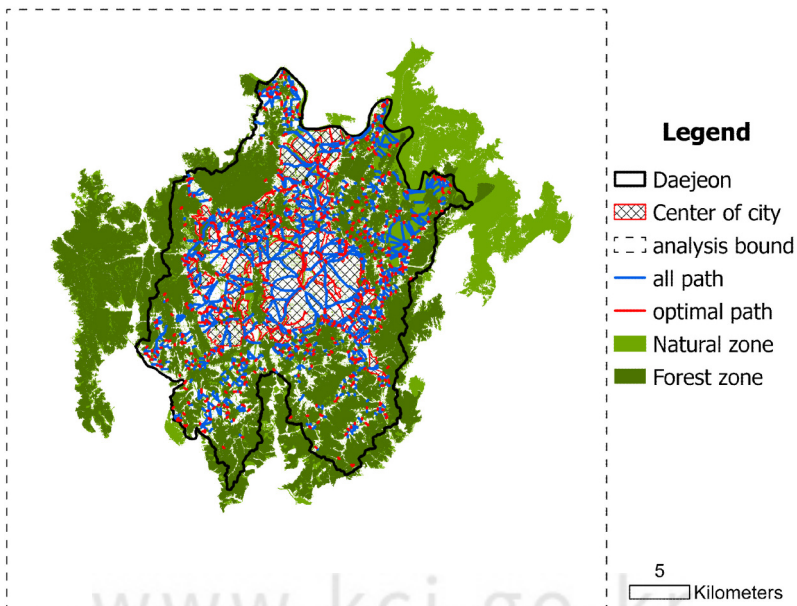


Figure 6. Daejeon's ecological space connectivity network Map

외곽 구역의 최적 경로 431개 평균 길이는 80m이며 최장 길이는 711m, 최단 길이는 3m로 나타났다. 도심 구역의 모든 경로 356개 평균 길이는 811m이며, 최장 길이는 4,044m이다. 외곽 구역 최적 경로 1,076개의 평균 길이는 214m이며 최장 길이는 1,973m이다.

도심은 외곽에 비해 연결 대상인 1ha 이상 산림의 조각(패치) 수가 작은 관계로 도출된 최적 경로의 수도 작다. 그리고 최적 경로의 평균 길이는 외곽에 비해 도심이 약 3배 가까이 긴 것으로 확인되었다. 이 결과는 자연지역 분포와 결합하여 도시의 생태공간 연결성 개선을 위한 신규 공간 조성 및 복원 사업의 위치 선정에 활용할 수 있을 것이다. 또한 개발사업으로 인한 생태공간의 단절과 파편화에 사전 대응할 수 있는 기반자료로 활용할 수 있으며, 도시 관리 차원의 도시생태축 구상에도 활용할 수 있을 것이다.

IV. 결론

이 연구는 기후변화 대응 및 생물다양성 제고를 위해 개발에 따른 생태공간 단절과 파편화의 부정적 영향을 최소화하는 연결성 평가 체계 기반을 마련하고자 대도시를 중심으로 생태공간의 연결성과 연결망을 분석하였다. 연결성 분석 결과 대도시 도심의 생태공간이 외곽 지역이나 도시 전체에 비해 연결성이 부족하고, 비슷한 생태공간 면적을 가지더라도 지역 특성에 따라 연결성에 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 도심의 생태공간 연결성이 가장 좋은 대전광역시를 대상으로 1ha 이상 산림을 연결하는 비용 기반의 연결망 분석으로 도심과 외곽의 최적 경로를 도출하였으며, 최적 경로의 평균 길이는 도심이 외곽보다 약 3배 긴 것을 확인할 수 있었다. 지역 특성과 현황에 기반한 본 연구의 생태적 연결성 및 연결망 분석 과정은 개발사업 또는 도시관리 차원의 다양한 위계에서 생태적 연결성 개선을 위한 절차에 포함하여 활용이 가능할 것으로 판단된다.

연구 결과 활용 관점에서 생태적 연결성과 연결망 분석 기반으로 연결성 개선을 위한 방안을 제안하면

다음과 같다.

첫 번째 국토의 생태적 연결성 개선을 위한 정책 수립과 실현을 뒷받침할 수 있도록 정부에서는 생태공간과 생태축의 영역 기준을 정립하고 연결성 평가 방법과 적용에 대한 내용을 환경계획 수립 지침에 포함해야 할 것이다. 또한 정부가 추진한 생태공간 조성 사업과 생태축 복원사업으로 개선된 생태공간 연결성을 평가하고 향후 관련 계획 수립과 사업 선정 등의 의사결정에 기반 자료로 활용한다면 관련 정책의 실효성을 제고할 수 있을 것이다.

두 번째 도시관리 차원에서 지자체는 환경계획 수립 시 상위 및 관련 계획과 연동하여 계획기간 내 달성할 수 있는 행정구역 내 생태공간 연결성 개선의 정량적 목표를 제시하고 지역 특성을 반영한 연결망을 분석하여 공간환경구조를 구상(보전지역 및 지역생태축 설정)해야 할 것이다. 그리고 5년마다 목표의 달성 여부와 적정성을 검토하여 필요 시 계획을 변경하여 탄력적으로 대응해야 할 것이다.

세 번째 개발사업으로 인해 생태공간의 단절이나 훼손에 의한 연결성 감소를 최소화할 수 있도록 관련 환경영향평가 등에서 연결성과 연결망을 분석하고 저감방안을 수립하도록 관련 지침을 개선해야 할 것이다.

연결성과 연결망 도출 과정은 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 연결성 분석에서 활용한 산정법은 인천과 같이 도서지역으로 인해 분리된 행정구역이 있는 경우 연결성이 감소하는 등 분석 영역과 규모에 민감하게 반응하므로 향후 해당 부분에 대한 고려가 필요하다. 또한 100m 이내로 단절된 생태공간의 단일 처리에 도로만 반영한 것은 향후 고밀도 개발 등 우리나라 특성에 맞게 고도화가 필요한 부분이다. 비용 기반의 연결망 분석은 다른 종의 분포모델이나 다른 요소를 비용으로 추가하면 최적 경로가 변동될 가능성이 있다. 따라서 연결성 개선에 적합한 분류군별 대표종의 분포모델과 인구, 국공유지 면적 등 다양한 요소들에 대한 비용 반영과 현장 조사와 병행한 결과 검증 연구도 필요할 것이다.

사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-B-2023-37).

References

- Beninde J, Veith M, Hochkirch A. 2015. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation, *Ecology letters*, 18(6); 581-592.
- Bradley AP. 1997. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern recognition*, 30(7); 1145-1159.
- Chan L, Hillel O, Elmqvist T, Werner P, Holman N, Mader A, Calcaterra E. 2014. User's manual on the Singapore index on cities' biodiversity (also known as the City Biodiversity Index), Singapore; National Parks Board, Singapore.
- Chan L, Hillel O, Werner P, Holman N, Coetzee I, Galt R, Elmqvist T. 2021. Handbook on the Singapore Index on Cities' Biodiversity (also known as the City Biodiversity Index), Montreal, CBD Technical Series, 98.
- Darvishi A, Mobarghaee Dinan N, Barghjelveh S, Yousefi M. 2020. Assessment and spatial planning of landscape ecological connectivity for biodiversity management (Case study: Qazvin province), *Iranian Journal of Applied Ecology*, 9(1); 15-29.
- Ersoy E, Jorgensen A, Warren PH. 2019. Identifying multispecies connectivity corridors and the spatial pattern of the landscape, *Urban Forestry & Urban Greening*, 40; 308-322.
- Girvetz EH, Thorne JH, Berry AM, Jaeger JA. 2007. Integrating Habitat Fragmentation Analysis into Transportation Planning Using the Effective Mesh Size Landscape Metric, UC Davis: Road Ecology Center.
- Heller NE, Zavaleta ES. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological conservation*, 142(1); 14-32.
- Hernandez PA, Franke I, Herzog SK, Pacheco V, Paniagua L, Quintana HL, Soto A, Swenson JJ, Tovar C, Valqui TH, Vargas J, Young BE. 2008. Predicting species distributions in poorly-studied landscapes, *Biodiversity and conservation*, 17; 1353-1366.
- Hilty J, Worboys GL, Keele A, Woodley S, Lausche B, Locke H, Carr M, Pulsford I, Pittock J, White JW, Theobald DM, Levine J, Reuling M, Watson JEM, Ament R, Tabor GM. 2020. Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors, *Best practice protected area Guidelines Series*, 30; 122.
- Hostetler M, Allen W, Meurk C. 2011. Conserving urban biodiversity? Creating green infrastructure is only the first step, *Landscape and Urban Planning*, 100(4); 369-371.
- Jaeger JA. 2015. Improving environmental impact assessment and road planning at the landscape scale, *Handbook of road ecology*, 32-42.
- Jeong E, Cho M, Cho H, Cho B, Han S. 2021. Characteristics of forest road cut slopes affecting the movement of mammals in South Korea, *Forest Science and Technology*, 17(3); 155-161.
- Kang WM, Song YK, Kim HG, Kim NC, Song WK. 2019. Quantitative Analysis and Visualization of Terrestrial Landscape Connectivity in South Korea, *The Korean Cadastre Information Association*, 21(2); 198-207. [Korean Literature]
- Karenlampi PP. 2011. Age distribution of trees in stationary forest system, *Journal of*

- Theoretical Biology, 270(1);13-18.
- Kim ES, Lee DK, Yoon EJ, Park CY. 2019. Exploration of Optimal urban green space using unused land-To improve green connectivity and thermal environment, *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 22(5); 45-56. [Korean Literature]
- Kim J, Kwon H, Seo C, Kim M. 2014. A nationwide analysis of mammalian biodiversity hotspots in South Korea, *Journal of environmental impact assessment*, 23(6); 453-465. [Korean Literature]
- Koen EL, Bowman J, Sadowski C, Walpole AA. 2014. Landscape connectivity for wildlife: development and validation of multispecies linkage maps, *Methods in Ecology and Evolution*, 5(7); 626-633.
- Kong F, Yin H, Nakagoshi N, Zong Y. 2010. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling, *Landscape and Urban Planning*, 95(1-2); 16-27.
- Kor L, O'Hickey B, Hanson M, Coroi M. 2022. Assessing habitat connectivity in environmental impact assessment: a case-study in the UK context, *Impact Assessment and Project Appraisal*, 40(6); 495-506.
- Krosby M, Tewksbury J, Haddad NM, Hoekstra J. 2010. Ecological connectivity for a changing climate, *Conservation Biology*, 24(6); 1686-1689.
- Ministry of Environment. 2008. Guidelines for the Establishment of Urban Ecological Axis. [Korean Literature]
- Park S. 2015. Spatial assessment of landscape ecological connectivity in different urban gradient, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187; 1-20.
- Patterson C, Casasanta Mostaco F, Jaeger JA. 2022a. Lack of consideration of ecological connectivity in Canadian environmental impact assessment: Current practice and need for improvement, *Impact Assessment and Project Appraisal*, 40(6); 481-494.
- Patterson C, Torres A, Coroi M, Cumming K, Hanson M, Noble B, Tabor G, Treweek J, Jaeger JA. 2022b. Treatment of ecological connectivity in environmental assessment: A global survey of current practices and common issues, *Impact Assessment and Project Appraisal*, 40(6); 460-474.
- Phillips SJ, Dudik M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation, *Ecography*, 31(2); 161-175.
- Rudd H, Vala J, Schaefer V. 2002. Importance of backyard habitat in a comprehensive biodiversity conservation strategy: a connectivity analysis of urban green spaces, *Restoration Ecology*, 10(2); 368-375.
- Rudnick DA, Ryan SJ, Beier P, Cushman SA, Dieffenbach F, Epps CW, Gerber L, Hartter J, Jenness JS, Kintsch J, Merenlender AM, Perkl RM, Preziosi DV, Trombulak SC. 2012. The role of landscape connectivity in planning and implementing conservation and restoration priorities, *Issues in Ecology*, (16); 1-23.
- Song WK, Kim EY. 2012. A comparison of machine learning species distribution methods for habitat analysis of the Korea water deer (*Hydropotes inermis argyropus*), *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(1); 171-180. [Korean Literature]
- Spanowicz AG, Jaeger JA. 2019. Measuring landscape connectivity: On the importance

- of within-patch connectivity, *Landscape Ecology*, 34; 2261-2278.
- Tarabon S, Berges L, Dutoit T, Isselin-Nondedeu F. 2019. Environmental impact assessment of development projects improved by merging species distribution and habitat connectivity modelling, *Journal of environmental management*, 241; 439-449.
- Torres A, Patterson C, Jaeger JA. 2022. Advancing the consideration of ecological connectivity in environmental assessment: Synthesis and next steps forward, *Impact Assessment and Project Appraisal*, 40(6); 451-459.
- Yoon EJ, KIM J, Lee DK. 2019. Connectivity Assessment Based on Circuit Theory for Suggestion of Ecological Corridor, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(3); 275-286. [Korean Literature]