

생태통로 조성에 따른 연결성 개선 효과 평가*

Assessment of Connectivity Improvement from Ecological Corridor Construction

차재규**

Jaegyu Cha

요약: 급속한 도시화와 개발로 인해 단절된 생태계 연결을 위해 생태통로가 조성되고 있지만, 물리적 연결성에 대한 체계적인 평가는 부족하다. 본 연구는 경기도를 사례로 하여 생태통로가 물리적 연결성 개선에 미치는 효과를 정량적으로 분석하고, 이를 통해 생태통로의 실효성을 검증하였다. 경기도와 21개 기초자치단체(시·군), 그리고 총 58개 생태통로 조성 지점 주변(반경 1km)을 대상으로 유효 망 크기(EMS)와 연결성(CNT) 지표를 활용하여 산림 및 자연지역의 물리적 연결성을 평가하였다. 평가 결과, 경기도 전체에서 산림 연결성은 10.94%, 자연지역 연결성은 9.67% 증가하였으며, 기초자치단체 중에서는 용인시가 가장 높은 개선 효과를 보였다. 또한, 44개 지점(75.9%) 인근에서는 산림 연결성이, 50개 지점(86.2%) 인근에서는 자연지역 연결성이 각각 10% 이상 증가하였다. 이를 통해 생태통로가 단절된 서식지 간 물리적 연결성을 실질적으로 개선함을 확인하였으며, 생태통로의 양적 확대보다는 전략적인 위치 선정이 연결성 개선에 더 큰 영향을 미친다는 점을 파악하였다. 본 연구의 평가 결과를 토대로 생태통로 연결성 평가체계의 방향성을 제시하였으며, 이는 향후 생태통로 조성 계획 수립과 평가체계 구축에 기여할 것으로 기대된다.
핵심주제어: 생태통로, 연결성 평가, 유효 망 크기, 생태축

Abstract: Despite the construction of ecological corridors to reconnect habitats fragmented by rapid urbanization and development, there remains a lack of systematic evaluation of their physical connectivity. Using Gyeonggi-do as a case study, this research, therefore, quantitatively analyzed the impact of ecological corridors on physical connectivity and verified their effectiveness. Specifically, the study employed Effective Mesh Size (EMS) and Connectivity (CNT) indices to assess forest and natural area connectivity across Gyeonggi-do, its 21 local governments, and connectivity within a 1-km radius of 58 ecological corridor sites. The results showed a 10.94% increase in forest connectivity and a 9.67% increase in natural area connectivity at the provincial scale, with Yongin-si demonstrating the highest improvement among local governments. Furthermore, forest connectivity increased by more than 10% near 44 sites (75.9%), and natural area connectivity rose by more than 10% near 50 sites (86.2%). These findings confirm that ecological corridors can substantially enhance physical connectivity between fragmented habitats and highlight that strategic site selection exerts a greater influence on connectivity improvement than simply expanding the number of corridors. Based on these evaluation results, this study proposes directions for developing an ecological corridor connectivity assessment framework, which is expected to inform future planning and the establishment of evaluation systems for ecological corridor construction.

Key Words: Ecological Corridor, Connectivity Assessment, Effective Mesh Size, Ecological Network

* 본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-B-2023-37)(NIE-B-2024-44).

** 국립생태원 선임연구원

I. 서론

생태계는 급속한 국토개발과 도시화로 훼손되었으며, 현재도 개발로 인해 훼손은 지속해서 발생하고 있다. 생태계 훼손에 따른 야생생물의 서식공간 축소와 파편화 및 고립화는 생물다양성 감소의 주요 원인이다(Lindenmayer and Fische, 2013). 특히 도로, 철도 등 선형 교통 인프라의 건설은 야생동물의 서식지를 단절하여 이동을 방해하며, 로드킬(Roadkill)을 발생시키는 등 야생동물의 생존을 위협하는 주요 원인이다(우동걸·서현진·박태진·송의근·김경민·최태영, 2019).

현대 사회에서 인간의 주거와 경제활동을 위한 개발은 불가피한 상황이다. 이러한 상황에서 훼손되거나 단절된 생태계를 완전히 복원하는 것은 현실적으로 어려운 과제이다. 그러나 국가의 생물다양성 보전과 생태계 건강성 확보를 위해서는 생태계 훼손과 단절이 야생생물에 미치는 부정적 영향을 최소화하는 노력이 필요하다. 이는 생물다양성협약(CBD)과 지속가능발전목표(SDGs)에서도 강조된 사항으로, 국제적으로 중요한 과제이다(Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2011; United Nations, 2015).

생태계의 연결성 보전은 건강한 생태계 관리와 생물다양성 증진, 그리고 모든 생물군과 공간적 규모에서 기후 변화 적응에 필수적이다(Hilty et al., 2020). 생태통로는 단절된 산림 등을 연결하여 생태계의 연결성을 보전하는 주요 수단 중 하나이다. 도로 및 철도 등에 의하여 단절된 생태계의 연결 및 야생동물의 이동을 위한 인공구조물인 생태통로는 멸종 위험을 감소시키고 생물다양성을 증진하는 효과가 있다(서울연구원, 2006; 환경부, 2023).

우리나라는 1990년대부터 생태통로를 조성하였으며(박지희·유현석·박미영, 2009; 김영·오충현, 2011), 현재까지 야생동식물 등의 서식지 연결과 이동성 보장 등 연결성 강화라는 목적으로 꾸준히 조성되고 있다. 이러한 생태통로 조성에 따른 효과 평가는 주변 생물서식 현황 조사와 분석을 통해 주로 평가되고 있으나, 평가에서 연결성의 물리적 개선 효과는 체계적으로 고려되지 않고 있다.

따라서 본 연구는 생태통로가 조성된 행정구역과 조성 지점 주변을 대상

으로 물리적 연결성의 개선 효과를 평가하고, 이를 바탕으로 향후 생태통로의 물리적 연결성 개선 효과 평가를 위한 체계적 방안을 제시하고자 하였다. 본 연구의 결과는 향후 생태통로 조성을 통한 물리적 연결성 강화의 실효성을 높이고, 나아가 국토의 생태적 연결성 강화를 위한 정책 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 선행연구

생태통로가 조성된 이래로 국내에서는 관리 방안 마련과 효율성 평가, 위치 선정 등에 관한 연구가 진행되어 왔다.

생태통로 관리 방안 마련과 관련해서는 야생조류와 포유류 이동에 적합한 생태통로의 식재 방안을 제시하거나(이경재·한봉호, 2002), 생태통로의 유지 관리를 위한 시설, 환경, 동물, 관리 인자 등에 대한 평가 항목을 제안하였다(이진영·노백호·이장원, 2010). 또한, 국내 포유류 이동에 적합한 생태통로 유형과 규격을 도출하고자 현장과 문헌조사에 기반하여 너비 등의 규격을 제시한 바 있다(최태영·양병국·우동걸, 2012).

생태통로의 현장 모니터링에 기반한 효율성 평가와 관련해서는 생태통로가 야생조류의 이동성에 미치는 영향을 알아보기 위해 현장조사를 통해 생태통로의 폭이 90m 이상이거나 사면에 위치하는 경우 야생조류의 이동에 유리한 것을 확인하였다(박찬열·이장호·강완모, 2011). 또한 단절된 주요 생태축의 생태통로 조성 전·후 포유류, 조류 등의 출현 빈도를 분석하여 생태통로 지침 준수율을 도출하였으며(우동걸 외, 2019), 육교형이 터널형보다 높은 종수와 이용 빈도를 가지고 있음을 확인하였다(국립생태원, 2022).

생태통로의 위치 선정 및 연결성 평가와 관련해 국외에서는 다양한 종들이 이동할 수 있는 지역을 식별하거나 물리적 연결성의 평가를 위해 그래프 이론, 회로이론, 최소비용 등에 기반한 모델링이나 측정 지표를 적용 및 제시하는 등 다양한 연구가 진행되었으며, 이를 기반으로 생태통로 평가 및 모니터

링 방법을 포함하는 생태계 연결성 보전을 위한 지침을 제시하였다(Hilty et al., 2020; Moreira et al., 2024). 그래프 이론은 생태계 내 노드(서식지)와 링크(연결)를 분석하여, 생태계의 상호작용과 연결성 파악 및 핵심 서식지 식별에 활용되고 있다(Loro, Ortega, Arce, and Geneletti, 2015; Hashemi, Darabi, Hashemi, and Wang, 2024). 회로이론 모델링은 경관을 통한 이동성을 정량화하고 서식지의 연결통로 식별 및 장애물 평가하는 등 연결성 측정에 활용되고 있다(Dickson et al., 2019). 최소비용 모델링은 경관을 가로지르는 이동 비용을 고려하여 특정 위치 간 최소 비용 거리를 도출하는 기법으로 생태학 분야에서 관심과 사용이 크게 증가하였다(Etherington, 2016). 연결성 측정 지표는 연결성의 효과를 평가하기 위해 고유한 방법론을 적용하여 다양하게 개발되었으며, 이는 생물다양성 보전을 위한 계획 수립과 모니터링 등에 활용되고 있다(Keeley, Beier, and Jenness, 2021). 우리나라에서도 관련 이론에 기반한 모델링이나 측정 지표를 적용한 연구들이 지속적으로 수행되었다. GIS를 활용하여 용인시의 토지 이용과 도로망, 식생 분포, 야생동물 서식 현황 등을 분석하여 생태통로 최적지를 제안하거나(정종철, 2011), 최소비용 경로분석을 통해 단절된 지역을 연결하는 방안을 제시하였다(오규식·이동우·정승현·박창석, 2009). 또한 회로이론을 기반으로 수원시의 생태축을 제안하거나(윤은주·김은영·김지연·이동근, 2019), 그래프 이론을 기반으로 녹지 패치와 비패치에 관한 네트워크 모형을 서울시 녹지에 적용하여 35년간의 변화를 파악하였다(장병우·박신영·정진아·강완모, 2021).

그러나 생태통로 구성에 따른 직접적인 물리적 연결성 개선 효과를 평가하거나, 이를 구체적으로 제안한 연구는 아직 부족한 실정이다.

III. 연구 방법

1. 연구의 범위

생태통로 구성에 따른 연결성 개선 효과 평가는 전국 생태통로 540개¹⁾ 중

에서 토지피복 반영과 물리적 연결 여부 확인이 용이한 육교형 생태통로 276개를 기반으로 수행하였다. 이 중 가장 많은 58개의 생태통로가 조성되어 있는 광역자치단체인 경기도를 연결성 개선 효과 평가를 위한 공간적 범위로 설정하였다. 경기도의 31개 기초자치단체 중 21개 시·군에 생태통로가 조성되어 있는 것으로 나타났으며, 수원시에 가장 많은 9개의 생태통로가 조성되어 있다(표 1).

연구의 내용적 범위는 경기도 및 21개 기초자치단체 행정구역, 58개 생태통로 조성지점 반경 1km 내에 있는 산림과 산림을 포함한 자연지역의 생태통로 조성에 따른 물리적 연결성 개선 효과를 정량적으로 평가하고, 이를 토대로 관련 평가 체계의 방향을 제시하였다.

〈표 1〉 지자체의 생태통로 조성 개수

연번	지자체	개수	연번	지자체	개수
1	수원시	9	12	파주시	6
2	성남시	2	13	안성시	2
3	의정부시	5	14	화성시	2
4	광명시	1	15	광주시	3
5	평택시	2	16	양주시	3
6	고양시	1	17	포천시	4
7	남양주시	2	18	여주시	2
8	시흥시	3	19	연천군	1
9	의왕시	3	20	가평군	1
10	하남시	1	21	양평군	1
11	용인시	4			

생태통로의 연결성 개선 효과 평가를 위해 2021년 기준으로 공개된 세분류 토지피복도를 활용하였다. 따라서 시간적 범위는 2021년이다.

1) 2022년 말 기준, 기존 생태통로 네트워크 홈페이지에서 확보한 540개의 생태통로 정보를 활용하였으며, 2024년 11월 기준 에코뱅크(www.nie-ecobank.kr)에는 육교형과 터널형을 포함한 617건의 생태통로 정보가 등록되어 있다.

2. 연결성 평가를 위한 공간자료 구축

연결성 평가를 위한 경계, 생태통로 지점, 연결 대상인 산림과 자연지역의 영역정보, 연결성 평가용 기초 자료 등 모든 공간자료는 ArcGIS Pro를 활용하여 가공 및 구축하였다.

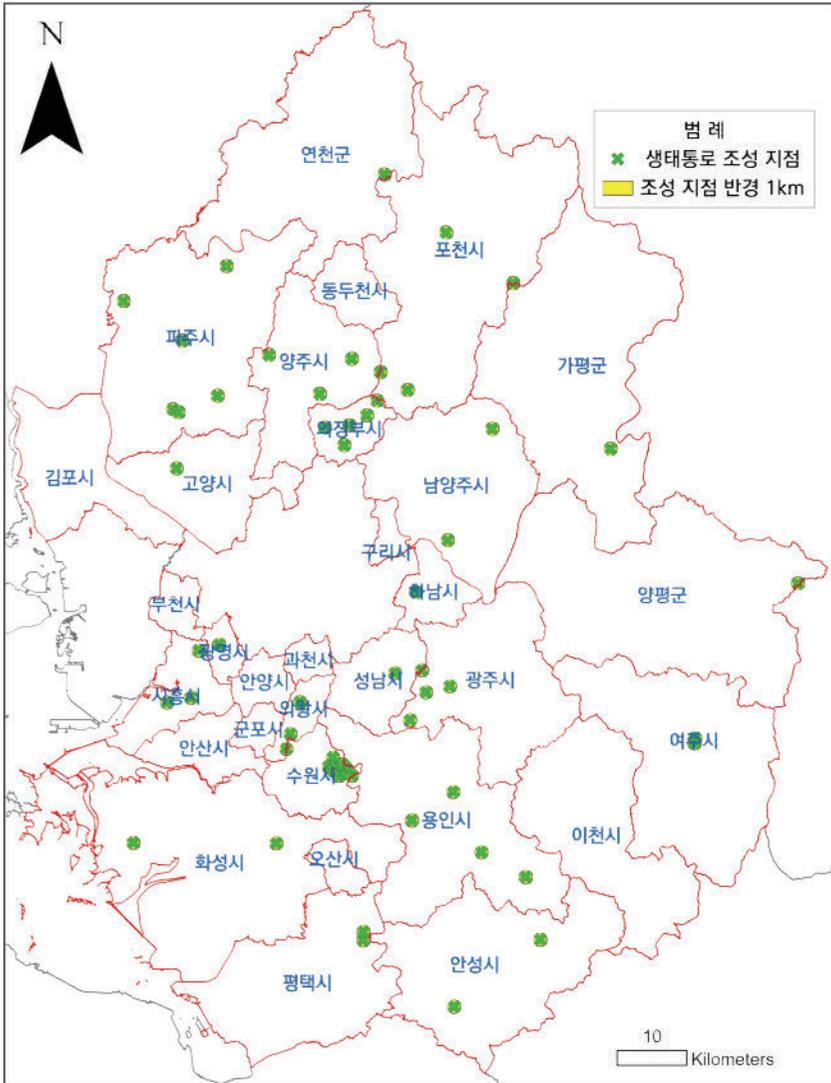
연결성 평가용 경계는 경기도, 기초자치단체, 생태통로 조성 주변 지역 등 3개를 구축하였다. 경기도와 기초자치단체의 경계는 통계청의 행정구역 경계를 활용하여 구축하였으며, 생태통로 주변에 대한 연결성을 평가하기 위한 경계는 야생동물의 행동반경²⁾을 고려하여 생태통로 조성 지점에서 1km 버퍼 지역을 생성하여 구축하였다.

생태통로 지점에 대한 공간자료는 경기도의 생태통로 58개 위치 정보를 기반으로 위성영상(출처: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community. Retrieved from ArcGIS Pro World Imagery Basemap.)과 대조하여 생태통로가 조성된 정확한 위치로 수정하여 구축하였다(그림 1) <표 2>.

산림과 자연지역의 영역에 대한 공간자료는 환경부 세분류 토지피복도(2021년)를 기반으로 구축하였다. 산림 영역은 활엽수림(311), 침엽수림(321), 혼효림(331)을 통합하여 구축하였다. 자연지역 영역은 산림영역에 자연초지(411), 묘지(422), 기타 초지(423), 내륙습지(511), 갯벌(321), 해변(611), 강기슭(612), 암벽·바위(613), 하천(711), 호소(712)를 추가 통합하여 구축하였다.

2) 생태통로를 이용하는 대표적인 야생동물인 고라니(김의경 외, 2021)와 너구리(조해진 외, 2014) 등의 행동권이 1km² 내외라는 점과, 생태통로 설치 및 관리지침(환경부, 2023)에서 생태통로 설계를 위한 동물 정밀조사 범위를 500m로 제한하고 있는 점을 고려하여 생태통로 주변 연결성 평가 범위를 반경 1km로 설정하였다.

〈그림 1〉 경기도 생태통로 조성 현황

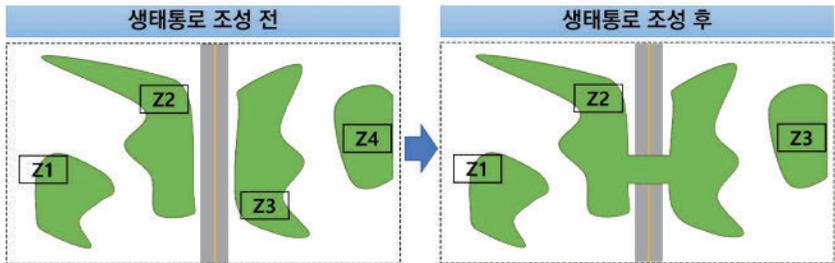


〈표 2〉 생태통로 위치 정보

연번	생태통로	경도	위도	연번	생태통로	경도	위도
1	수원시 1	37.306074	127.042398	30	용인시 1	37.22373	127.170789
2	수원시 2	37.294161	127.035549	31	용인시 2	37.260873	127.23785
3	수원시 3	37.289402	127.043367	32	용인시 3	37.149651	127.354999

4	수원시 4	37.282694	127.051083	33	용인시 4	37.181806	127.283545
5	수원시 5	37.282384	127.053156	34	파주시 1	37.850672	126.795665
6	수원시 6	37.291212	127.063993	35	파주시 2	37.778676	126.853945
7	수원시 7	37.288127	127.06611	36	파주시 3	37.76101	126.781026
8	수원시 8	37.29706	127.058132	37	파주시 4	37.75723	126.790466
9	수원시 9	37.282456	127.073092	38	파주시 5	37.947778	126.868056
10	성남시 1	37.419645	127.187634	39	파주시 6	37.902031	126.699772
11	성남시 2	37.416	127.143243	40	안성시 1	36.980913	127.238438
12	의정부시 1	37.772343	127.114867	41	안성시 2	37.067881	127.378672
13	의정부시 2	37.737188	127.029347	42	화성시 1	37.194431	126.718697
14	의정부시 3	37.714167	127.060833	43	화성시 2	37.193991	126.950629
15	의정부시 4	37.740242	127.069171	44	광주시 1	37.390957	127.194121
16	의정부시 5	37.753234	127.098443	45	광주시 2	37.35453	127.167934
17	광명시	37.453364	126.856872	46	광주시 3	37.398834	127.232991
18	평택시 1	37.067808	127.091717	47	양주시 1	37.832131	126.938038
19	평택시 2	37.078683	127.091828	48	양주시 2	37.781285	127.021296
20	고양시	37.683911	126.787233	49	양주시 3	37.826972	127.073768
21	남양주시 1	37.735148	127.303353	50	포천시 1	37.925201	127.338213
22	남양주시 2	37.590065	127.22999	51	포천시 2	37.809347	127.120411
23	시흥시 1	37.383889	126.811667	52	포천시 3	37.991615	127.2286
24	시흥시 2	37.377611	126.772381	53	포천시 4	37.786278	127.164814
25	시흥시 3	37.445342	126.824157	54	여주시 1	37.329245	127.631349
26	의왕시 1	37.378048	126.988837	55	여주시 2	37.322909	127.630536
27	의왕시 2	37.317233	126.966389	56	연천군	38.067378	127.127603
28	의왕시 3	37.336611	126.973172	57	가평군	37.708622	127.496583
29	하남시	37.522252	127.178086	58	양평군	37.531173	127.801236

〈그림 2〉 산림 및 자연지역 패치의 고유번호 부여 방법

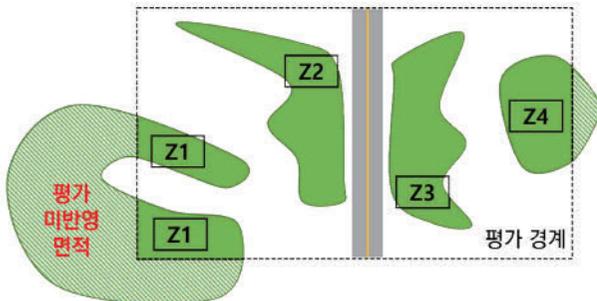


또한 연결성 평가용 공간자료 구축을 위해 58개 생태통로 좌표와 토지피복도 기반 산림 및 자연지역 정보를 대조하여 생태통로 조성이 토지피복도에 반영되지 않은 경우, 위성영상을 기반으로 생태통로에 해당하는 지역에 폴리곤을 생성하였다. 폴리곤 생성 시 가장 가까운 산림 패치와 연결되도록 처리하였다.

토지피복도에서 누락된 생태통로를 반영한 산림 및 자연지역 데이터를 기반으로, 각 패치에 고유번호³⁾를 부여하여 생태통로 조성 후 연결성 평가 자료를 구축하였다. 그리고 생태통로로 인해 토지피복이 연결되지 않은 상태로 자료를 수정하고, 수정 후 새로 생성된 패치에 고유번호를 추가 부여하여 생태통로 조성 전 연결성 평가 자료를 구축하였다(그림 2).

3. 연결성 평가

〈그림 3〉 연결성 평가 방법



$$\text{유효 망 크기(Effectivity Mesh Size: km}^2\text{)} = \frac{1}{Z_{\text{total}}} (Z_1^2 + Z_2^2 + Z_3^2 + Z_4^2 + \dots + Z_n^2)$$

$$\text{연결성(Connectivity: \%)} = \frac{\text{Effectivity Mesh Size}}{Z_{\text{total}}} \times 100$$

생태통로 조성에 따른 산림과 자연지역의 연결성 분석 방법으로, 생태계 파편화와 연결(패치 내부 및 패치 사이) 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 유효 망 크기(EMS: Effective Mesh Size) 산정법을 활용하였으며(Girvetz, Throne, Berry, and Jaeger, 2007; Spanowicz and Jaeger, 2019), 이를 평가 대상 면적

3) 연결성 산정 시 각 패치의 면적 산정을 위해 패치마다 알파벳 Z와 수를 결합한 고유번호(Z1, Z2, Z3, Z4.....)를 겹치지 않게 부여하였다.

으로 비율화하여 연결성(Connectivity: CNT)을 도출하였다(그림 3).

이 방법은 CBD(Convention on Biological Diversity)가 권장하는 도시 생물다양성지수의 연결성 지표⁴⁾로 활용되며, 영역 내에서 무작위로 선택된 두 지점이 같은 패치에 위치하거나 서로 연결될 확률을 나타낸다. 이는 같은 종의 두 동물이 서로를 찾을 수 있는 능력으로도 해석될 수 있다(Chan et al., 2014; Chan et al., 2021).⁵⁾

연결성 평가는 경기도, 21개 기초자치단체, 58개 생태통로 조성 지점 반경 1km의 산림과 자연지역을 대상으로 수행하였다. 산림과 자연지역 패치에 생태통로 조성 전·후 상태를 반영하여 부여된 고유번호를 기반으로 EMS와 CNT를 산정하였다. 산정된 CNT의 증가율⁶⁾을 토대로 생태통로 조성에 따른 물리적 연결성의 개선 효과를 분석하였다.

평가 경계로 인해 단일 산림이나 자연지역이 분리되어 연결성 산정 오류가 발생하지 않도록 단일 공간으로 처리한 뒤, 평가 경계 내부에 포함된 면적만 연결성 산정에 반영하였다(차재규, 2023a; 차재규, 2023b).

IV. 평가 결과

연결성 평가 방법에 따라 각 평가 경계에서 생태통로 조성 전·후 산림 및 산림을 포함한 자연지역의 유효 망 크기(Effective Mesh Size: EMS)와 연결성

4) 28개의 지표 중 2번째 지표: 단절에 대응한 생태네트워크의 연결성 측정(Connectivity Measures or Ecological Networks to Counter Fragmentation)

도시생물다양성지수 산정 매뉴얼(2014)에서는 유효 망 크기(Effective Mesh Size)를 계산하고 일정 크기에 따라 등급화하였으나, 도시생물다양성지수 핸드북(2021)에서는 자연지역 면적을 기준으로 비율화하는 방식을 추가하였다.

5) 유효 망 크기 산정 시, 패치가 서로 100m 이상 떨어진 경우만 단절로 간주하고, 떨어진 거리가 100m 미만이라도 폭이 15m 이상이거나 일 통행량이 5,000대 이상인 도로 또는 인공적 요소가 많은 하천이 패치 사이에 있는 경우에는 단절로 간주하는 세부사항은 모든 단절을 고려한 물리적 연결성 평가를 위해 본 연구의 연결성 평가에는 반영하지 않았다.

6) 증가율 = ((조성 후 - 조성 전) / 조성 전) × 100

(Connectivity: CNT)을 도출하고, 연결성 증가율을 바탕으로 생태통로 조성에 따른 연결성 개선 효과를 평가하였다.

경기도 및 21개 시·군, 58개 생태통로 반경 1km 내부의 산림과 산림을 포함한 자연지역을 대상으로 생태통로의 물리적 연결성 개선 효과를 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 경기도 평가 결과

경기도에 조성된 58개 생태통로가 산림과 자연지역의 물리적 연결성을 개선한 효과의 평가 결과는 다음과 같다(표 3).

산림에서는 생태통로 조성 전 유효 망 크기(EMS)가 23.32km², 연결성(CNT)이 0.47%였으나, 조성 후 EMS는 26.19km², 연결성은 0.53%로 증가하였다. 자연지역에서는 조성 전 EMS가 25.58km², 연결성이 0.39%였으나, 조성 후 EMS는 28.32km², 연결성은 0.43%로 증가하였다. 따라서 58개 생태통로 조성으로 경기도의 산림에서는 10.94%, 자연지역에서는 9.67%의 물리적 연결성이 각각 개선된 것으로 나타났다.

이러한 결과는 생태통로가 경기도의 산림뿐만 아니라 자연지역의 연결성 개선에도 기여하고 있음을 보여준다. 또한 산림의 연결성과 연결성 증가율이 높게 나타났는데, 이는 생태통로 위치 선정이 주로 산림의 연결성 향상에 초점을 맞춘 결과로 볼 수 있다.

평가 경계와 대상 면적이 매우 크고 단절이 많은 관계로 유효 망 크기(EMS)와 연결성(CNT) 값이 낮게 나타났으나, 광역자치단체 규모에서 생태통로 조성이 물리적 연결성 개선에 미치는 정량적 효과를 확인할 수 있었다.

〈표 3〉 생태통로 조성에 따른 경기도의 산림과 자연지역의 연결성 개선 효과

연번	구분	산림						자연지역					
		면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)	면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)
			EMS	CNT	EMS	CNT			EMS	CNT	EMS	CNT	
1	경기도	4,961	23.32	0.47	26.19	0.53	10.94	6,639	25.58	0.39	28.32	0.43	9.67

EMS: Effective Mesh Size(km²), CNT: Connectivity(%)

2. 기초자치단체 평가 결과

경기도의 21개 기초자치단체별 생태통로의 구성에 따른 산림과 자연지역의 연결성 개선 효과를 평가한 결과는 다음과 같다(표 4).

생태통로 구성으로 산림 연결성이 가장 많이 개선된 지역은 4개 생태통로가 조성된 용인시(연결성 증가율: 25.76%)로 나타났으며, 가평군과 평택시도 10% 이상 연결성이 증가하였다. 반면, 11개 지역에서는 산림 연결성 증가율이 1% 미만으로 나타났다.

자연지역 연결성이 가장 크게 개선된 지역도 용인시(연결성 증가율: 24.16%)로 나타났으며, 가평군과 의정부시도 10% 이상 연결성이 증가하였다. 반면, 10개 지역에서는 자연지역 연결성 증가율이 1% 미만으로 나타났다.

가장 많은 9개의 생태통로가 구성되어 있는 수원시는 산림 연결성 증가율이 0.43%, 자연지역 연결성 증가율이 0.95%로 나타나 상대적으로 낮은 개선 효과를 보여 용인시(생태통로 4개)와 대조되었다. 특히 주목할 점은 생태통로 개수가 적지만 높은 연결성 개선 효과를 보인 사례들이다. 생태통로 1개만 조성했음에도, 가평군(산림 연결성 증가율: 19.45%, 자연지역 연결성 증가율: 19.60%)과 하남시(산림 연결성 증가율: 8.43%, 자연지역 연결성 증가율: 8.47%)는 연결성 개선에 상당한 효과를 보였다.

이는 행정구역 단위에서 산림 또는 자연지역의 연결성 개선에 생태통로의 양적 확대보다 도시의 공간구조에 따른 전략적 위치 선정과 효과적인 배치가 산림과 자연지역의 연결성 개선에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 결과이다.

이러한 평가 결과는 물리적 연결성 개선을 위한 생태통로 조성 전략 수립에 있어 다음과 같은 중요한 시사점을 제공한다.

첫째, 생태통로의 개수보다 위치 적절성이 연결성 개선에 더 큰 영향을 미친다. 둘째, 도시의 규모와 특성에 따라 생태통로의 적정 개수가 달라질 수 있으며, 이는 면밀한 사전 분석을 통해 결정되어야 한다. 셋째, 단일 생태통로라도 연결성을 개선할 수 있는 전략적 위치에 조성되면 상당한 개선 효과를 기대할 수 있다.

따라서 향후 행정구역의 산림과 자연지역의 연결성 강화를 위한 생태통로 조성 계획 수립 시에는 생태적 특성과 단절 현황을 면밀히 분석하여 최적 위치를 선정하는 것이 중요하다. 또한 도시의 규모, 산림과 자연지역의 분포, 토지피복 및 이용 패턴 등을 종합적으로 고려한 맞춤형 접근이 필요하다. 이러한 전략적 접근은 제한된 자원으로 생태통로 조성에 따른 물리적 연결성 개선 효과를 극대화할 수 있는 핵심 요소가 될 것이다.

〈표 4〉 생태통로 조성에 따른 기초자치단체의 연결성 개선 효과

연번	구분	산림						자연지역					
		면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)	면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)
			EMS	CNT	EMS	CNT			EMS	CNT	EMS	CNT	
1	수원시	24.76	6.04	24.40	6.07	24.51	0.43	45.69	3.95	8.64	3.99	8.72	0.95
2	성남시	71.98	5.64	7.83	5.87	8.16	4.04	91.82	5.35	5.83	5.70	6.21	6.14
3	의정부시	45.05	5.81	12.89	6.44	14.29	9.79	54.92	5.79	10.54	6.46	11.75	10.30
4	광명시	12.46	2.22	17.80	2.23	17.86	0.30	18.20	2.10	11.55	2.11	11.58	0.32
5	평택시	56.08	2.50	4.45	2.79	4.98	10.56	148.15	2.31	1.56	2.49	1.68	7.02
6	고양시	81.50	4.04	4.96	4.04	4.96	0.03	134.31	3.87	2.89	3.88	2.89	0.04
7	남양주시	280.67	29.36	10.46	29.36	10.46	0.00	347.78	27.92	8.03	27.96	8.04	0.14
8	시흥시	31.10	0.81	2.61	0.82	2.64	1.06	58.82	0.70	1.19	0.72	1.22	1.95
9	의왕시	28.80	6.32	21.95	6.42	22.31	1.60	36.49	6.26	17.16	6.49	17.79	3.52
10	하남시	44.76	15.76	35.21	17.21	38.45	8.43	63.25	13.12	20.74	14.33	22.66	8.47
11	용인시	288.17	7.22	2.50	9.72	3.37	25.76	383.23	8.08	2.11	10.65	2.78	24.16
12	파주시	288.12	5.06	1.76	5.08	1.76	0.24	426.03	10.24	2.40	10.29	2.42	0.43
13	안성시	223.47	10.87	4.86	10.87	4.87	0.01	311.99	11.28	3.62	11.28	3.62	0.02
14	화성시	164.95	1.99	1.21	2.00	1.21	0.16	362.70	2.84	0.78	2.85	0.79	0.65
15	광주시	269.63	24.51	9.09	24.66	9.14	0.60	331.77	27.27	8.22	27.71	8.35	1.59
16	양주시	164.78	5.63	3.42	5.83	3.54	3.45	209.08	5.68	2.72	5.89	2.82	3.53
17	포천시	536.71	17.66	3.29	18.25	3.40	3.20	631.51	20.35	3.22	20.94	3.32	2.81
18	여주시	257.58	5.75	2.23	5.76	2.23	0.11	363.31	6.39	1.76	6.40	1.76	0.10
19	연천군	417.14	8.96	2.15	8.96	2.15	0.00	517.27	20.41	3.95	20.41	3.95	0.01
20	가평군	669.70	50.61	7.56	62.83	9.38	19.45	756.68	56.60	7.48	70.40	9.30	19.60
21	양평군	612.82	20.23	3.30	20.23	3.30	0.00	727.70	25.45	3.50	25.45	3.50	0.00

EMS: Effective Mesh Size(km²), CNT: Connectivity(%)

3. 생태통로 조성 지점 주변 평가 결과

경기도 내 58개 생태통로를 대상으로 조성 지점 반경 1km(면적: 약 3.14 km²) 이내 산림의 물리적 연결성에 생태통로 조성이 미치는 영향을 평가하였다(표 5).

〈표 5〉 생태통로 조성에 따른 산림 연결성 개선 효과

연번	명칭	면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)	연번	명칭	면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)
			EMS	CNT	EMS	CNT					EMS	CNT	EMS	CNT	
1	수원시 1	1.12	0.85	75.78	0.85	75.78	0.01	30	용인시 1	2.15	1.03	47.80	2.00	93.18	94.94
2	수원시 2	0.49	0.06	12.08	0.07	14.33	18.63	31	용인시 2	1.42	0.66	46.33	1.31	92.48	99.63
3	수원시 3	0.49	0.07	14.53	0.11	21.54	48.25	32	용인시 3	2.15	0.98	45.56	1.90	88.73	94.76
4	수원시 4	0.51	0.17	33.53	0.32	62.07	85.12	33	용인시 4	2.39	1.36	56.93	2.25	94.20	65.45
5	수원시 5	0.49	0.18	37.39	0.34	69.71	86.41	34	파주시 1	0.68	0.20	28.82	0.30	43.46	50.78
6	수원시 6	0.52	0.10	18.89	0.25	48.81	158.43	35	파주시 2	1.78	0.52	29.23	0.52	29.42	0.66
7	수원시 7	0.49	0.07	14.97	0.15	30.98	106.88	36	파주시 3	0.62	0.20	31.68	0.27	43.34	36.81
8	수원시 8	1.00	0.62	62.70	0.92	91.90	46.58	37	파주시 4	1.13	0.30	26.87	0.31	27.09	0.82
9	수원시 9	0.63	0.06	9.30	0.06	9.89	6.33	38	파주시 5	1.39	0.61	44.09	1.22	87.91	99.39
10	성남시 1	2.56	1.07	41.99	2.14	83.82	99.62	39	파주시 6	1.08	0.25	23.09	0.30	27.58	19.45
11	성남시 2	1.12	0.48	43.05	0.54	48.38	12.37	40	안성시 1	1.10	0.24	22.31	0.35	31.80	42.54
12	의정부시 1	1.82	0.43	23.63	0.71	38.71	63.85	41	안성시 2	1.23	0.24	19.43	0.36	29.58	52.25
13	의정부시 2	1.48	0.95	64.45	1.22	82.52	28.03	42	화성시 1	1.38	0.47	34.11	0.48	34.99	2.56
14	의정부시 3	2.44	1.24	50.87	2.38	97.61	91.89	43	화성시 2	1.41	0.67	47.59	0.86	60.80	27.77
15	의정부시 4	1.40	0.51	36.70	0.82	58.63	59.76	44	광주시 1	1.82	0.78	42.81	1.50	81.97	91.46
16	의정부시 5	1.49	0.78	52.32	1.42	94.73	81.07	45	광주시 2	1.25	0.42	33.64	0.44	34.78	3.39
17	광명시	1.56	0.35	22.54	0.39	25.15	11.58	46	광주시 3	0.71	0.14	20.16	0.15	21.41	6.18
18	평택시 1	1.47	0.69	47.04	1.37	93.43	98.61	47	양주시 1	2.30	0.64	27.68	1.14	49.64	79.31
19	평택시 2	1.29	0.52	40.00	0.94	73.00	82.48	48	양주시 2	1.22	0.22	17.82	0.33	27.50	54.27
20	고양시	1.05	0.49	46.34	0.53	50.23	8.39	49	양주시 3	0.60	0.17	29.14	0.18	30.60	5.01
21	남양주시 1	1.56	0.34	21.73	0.35	22.18	2.07	50	포천시 1	2.79	1.38	49.43	2.74	98.21	98.67
22	남양주시 2	0.83	0.08	10.02	0.11	13.45	34.22	51	포천시 2	2.21	1.07	48.44	2.09	94.44	94.97
23	시흥시 1	0.88	0.22	24.99	0.24	27.03	8.14	52	포천시 3	2.34	1.36	58.32	2.07	88.53	51.81
24	시흥시 2	0.86	0.21	24.80	0.31	36.49	47.14	53	포천시 4	2.15	0.95	44.04	1.89	87.96	99.73
25	시흥시 3	0.97	0.22	22.42	0.39	39.81	77.54	54	여주시 1	1.59	0.60	37.63	1.22	77.04	104.71
26	의왕시 1	1.98	0.70	35.33	0.98	49.36	39.71	55	여주시 2	1.09	0.45	40.84	0.60	54.80	34.18
27	의왕시 2	1.50	0.41	27.48	0.59	39.12	42.34	56	연천군	1.60	0.99	61.89	0.99	61.92	0.05
28	의왕시 3	1.49	0.54	36.46	0.80	53.54	46.84	57	가평군	1.08	0.20	18.08	0.20	18.60	2.87
29	하남시	1.98	0.65	32.96	1.21	61.44	86.41	58	양평군	2.91	1.33	45.69	1.33	45.69	0.00

EMS: Effective Mesh Size(km²), CNT: Connectivity(%)

평가 결과, 생태통로 조성으로 58개 지점 중 44개 지점(분석 대상의 75.9%)에서 10% 이상의 개선 효과가 확인되어 대부분 지역에서 산림 연결성 개선에 유의미한 효과가 있는 것으로 나타났으며, 산림 면적이 많은 지역에서 개선 효과가 더욱 두드러지게 나타났다.

생태통로 조성에 따른 산림의 연결성 개선 효과는 58개 조성 지점 전체에서 확인되었으며, 연결성 증가율은 최소 0.001%에서 최대 158.43%까지 다양하였다. 전체 평균은 51.6%(표준편차 38.8)로 나타났다. 특히 19개 지점(분석 대상의 32.7%)에서 연결성이 80% 이상 증가한 것으로 나타나, 생태통로가 단절된 산림의 물리적 연결성 강화에 크게 기여함을 확인할 수 있었다.

가장 높은 연결성 개선 효과를 보인 수원시 6 지점은 생태통로 조성 전 연결성이 18.89%에 불과했으나, 조성 후 48.8%로 크게 개선되어 158.43% 증가하였다. 이 지점의 반경 1km 이내 산림면적은 518,586㎡로, 소규모 그룹에 속하며 도시화 지역의 잔존 산림을 연결한 지역이다. 또한 수원시의 생태통로 9개(수원시 1~9)는 모두 영통구에 조성되어 근거리에 위치해 상호 연계성이 높다. 이는 도시화 지역의 잔존 산림을 연결하며 물리적 연결성을 개선한 대표적인 사례로 판단된다.

생태통로 조성 지점 1km 반경 내 산림 면적을 대규모(2km² 이상), 중규모(1km² 이상~2km² 미만), 소규모(1km² 미만)로 구분하여 연결성 개선 효과를 분석한 결과, 생태통로 주변의 산림 규모에 따라 연결성 개선 효과에 차이를 보였다.

주변에 대규모 산림이 있는 생태통로 11개 지점은 연결성이 평균 79.2% 증가하여 가장 높은 개선 효과를 보였다. 11개 지점 중 7개 지점(포천시 4, 성남시 1, 포천시 1, 포천시 2, 용인시 1, 용인시 3, 의정부시 3)은 90% 이상 연결성이 증가하였다. 이는 도시의 단절된 대규모 산림의 물리적 연결성 개선에 생태통로가 매우 효과적임을 보여준다.

주변에 중규모 산림이 존재하는 생태통로 32개 지점은 연결성이 평균 42.1% 증가하여 다른 산림 규모에 비해 연결성 개선이 가장 낮게 나타났다. 이는 연결성 증가율이 10% 미만인 14개 생태통로 중 9개가 포함된 영향 때문으로 보인다.

주변에 소규모 산림이 존재하는 생태통로 15개 지점은 연결성이 평균 51.7% 증가하여 중간 수준의 개선 효과를 보였다.

연결성 증가율의 표준편차는 대규모(29.12) < 중규모(35.10) < 소규모(42.65) 순으로 증가하는 것으로 나타나 산림 면적이 작을수록 연결성 개선 효과의 변동성이 커졌으며, 이는 주변 토지피복에 의한 단절이 영향을 크게 미친 것으로 해석된다.

생태통로 주변 산림 규모별 유효 망 크기 평균값은 소규모(0.22km^2) < 중규모(0.77km^2) < 대규모(1.99km^2) 순으로 높았다. 연결 가능성을 나타내는 연결성 평균값도 소규모(34.19%) < 중규모(54.26%) < 대규모(83.82%) 순으로 높아, 산림 규모가 클수록 생태통로 주변의 연결성이 양호한 것으로 나타났다.

경기도 내 58개 생태통로를 대상으로 조성 지점 반경 1km 이내 산림을 포함한 자연지역의 물리적 연결성에 생태통로 조성이 미치는 영향도 평가하였다(표 6).

평가 결과, 생태통로 조성으로 58개 지점 중 50개 지점(분석 대상의 86.2%)에서 연결성이 10% 이상 개선되어, 산림보다 자연지역 연결성 개선에 더 유의미한 효과를 보였다.

생태통로 조성에 따른 자연지역의 연결성 개선 효과는 58개 조성 지점 전체에서 확인되었다. 연결성 증가율은 최소 0.84%(파주시 2)에서 최대 124.85%(수원시 6)까지 다양했으며, 전체 평균은 59.3%(표준편차 34.86)로 나타났다. 특히 24개 지점(분석 대상의 41.4%)에서 연결성이 80% 이상 증가한 것으로 나타나, 생태통로가 단절된 자연지역의 물리적 연결성 강화에 크게 기여한 것으로 나타났다.

산림 연결성 평가 결과와 마찬가지로, 가장 높은 연결성 개선 효과를 보인 수원시 6 지점은 생태통로 조성 전 연결성이 6.52%에 불과했으나, 조성 후 14.66%로 크게 개선되어 124.85% 증가하였다.

생태통로 조성 지점 1km 반경 내 자연지역 면적을 대규모(2.5km^2 이상), 중규모(1.5km^2 이상~ 2.5km^2 미만), 소규모(1.5km^2 미만)로 구분하여 분석한 결과, 생태통로 주변 자연지역 규모에 따라 연결성 개선 효과가 달랐다.

주변에 대규모 자연지역이 있는 생태통로 12개 지점은 연결성이 평균 73.2% 증가하여 다른 규모보다 가장 큰 개선 효과를 보였다. 특히 포천시 4, 포천시 1, 용인시 1, 성남시 1, 포천시 2, 의정부시 3, 가평군 등에서는 90% 이상 연결성이 증가하였다.

〈표 6〉 생태통로 조성에 따른 자연지역 연결성 개선 효과

연번	명칭	면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)	연번	명칭	면적 (km ²)	생태통로 조성 전		생태통로 조성 후		연결성 증가율 (%)
			EMS	CNT	EMS	CNT					EMS	CNT	EMS	CNT	
1	수원시 1	1.94	1.04	53.85	1.05	54.37	0.95	30	용인시 1	2.64	1.19	45.19	2.37	89.81	98.75
2	수원시 2	1.13	0.09	8.03	0.17	15.05	87.42	31	용인시 2	1.90	0.69	36.24	1.37	72.33	99.60
3	수원시 3	1.27	0.08	5.93	0.13	10.05	69.39	32	용인시 3	2.44	1.05	43.19	2.04	83.40	93.08
4	수원시 4	1.35	0.15	11.12	0.27	20.11	80.90	33	용인시 4	2.74	1.50	54.52	2.45	89.10	63.44
5	수원시 5	1.48	0.19	12.79	0.31	20.83	62.88	34	파주시 1	1.20	0.17	14.38	0.26	21.70	50.93
6	수원시 6	1.64	0.11	6.52	0.24	14.66	124.85	35	파주시 2	2.10	0.56	26.69	0.57	26.91	0.84
7	수원시 7	1.90	0.17	9.04	0.24	12.76	41.23	36	파주시 3	1.03	0.21	20.52	0.29	27.77	35.35
8	수원시 8	1.85	0.49	26.26	0.77	41.49	58.00	37	파주시 4	1.47	0.35	23.70	0.35	24.03	1.38
9	수원시 9	1.97	0.17	8.78	0.19	9.40	7.04	38	파주시 5	1.82	0.80	44.11	1.60	87.96	99.42
10	성남시 1	2.81	1.28	45.76	2.54	90.38	97.50	39	파주시 6	2.22	0.81	36.51	1.02	46.02	26.04
11	성남시 2	1.68	0.46	27.05	0.51	30.50	12.75	40	안성시 1	1.66	0.29	17.34	0.46	27.46	58.38
12	의정부시 1	2.28	0.52	22.90	0.88	38.38	67.63	41	안성시 2	1.79	0.35	19.31	0.51	28.40	47.08
13	의정부시 2	1.78	0.97	54.24	1.25	70.23	29.47	42	화성시 1	2.10	0.73	34.91	1.26	59.90	71.61
14	의정부시 3	2.74	1.26	46.15	2.45	89.60	94.13	43	화성시 2	1.97	0.67	34.18	0.98	49.75	45.57
15	의정부시 4	1.77	0.52	29.46	0.84	47.46	61.10	44	광주시 1	2.14	0.83	38.68	1.60	74.52	92.65
16	의정부시 5	2.17	0.79	36.57	1.49	68.65	87.75	45	광주시 2	2.02	0.79	39.39	0.86	42.63	8.23
17	광명시	1.90	0.42	22.19	0.47	24.78	11.68	46	광주시 3	1.36	0.24	17.39	0.28	20.36	17.04
18	평택시 1	1.91	0.78	41.03	1.55	80.89	97.17	47	양주시 1	2.67	0.70	26.11	1.25	46.99	79.97
19	평택시 2	1.72	0.70	40.82	1.39	80.91	98.22	48	양주시 2	1.83	0.54	29.31	1.01	55.22	88.42
20	고양시	1.65	0.42	25.47	0.47	28.31	11.13	49	양주시 3	1.72	0.21	12.27	0.23	13.42	9.39
21	남양주시 1	2.15	0.51	23.89	0.96	44.57	86.54	50	포천시 1	2.95	1.40	47.65	2.80	94.90	99.15
22	남양주시 2	1.47	0.11	7.67	0.15	10.01	30.51	51	포천시 2	2.64	1.21	45.95	2.39	90.56	97.07
23	시흥시 1	1.37	0.26	18.82	0.31	22.36	18.85	52	포천시 3	2.51	1.38	54.92	2.12	84.33	53.56
24	시흥시 2	1.50	0.27	17.65	0.43	28.42	60.98	53	포천시 4	2.59	1.16	44.82	2.32	89.48	99.64
25	시흥시 3	1.67	0.33	19.94	0.63	37.94	90.24	54	여주시 1	1.93	0.68	35.08	1.34	69.78	98.94
26	의왕시 1	2.34	0.84	35.68	1.57	66.89	87.46	55	여주시 2	1.71	0.43	24.93	0.60	35.19	41.18
27	의왕시 2	1.99	0.44	22.21	0.67	33.73	51.90	56	연천군	2.51	0.81	32.48	0.83	33.11	1.94
28	의왕시 3	1.95	0.53	27.04	0.81	41.69	54.21	57	가평군	2.70	0.93	34.33	1.78	65.99	92.20
29	하남시	2.29	0.70	30.58	1.28	56.05	83.32	58	양평군	3.01	1.38	45.67	1.39	46.09	0.92

EMS: Effective Mesh Size(km²), CNT: Connectivity(%)

주변에 중규모 자연지역이 있는 생태통로 36개 지점은 연결성이 평균 58.4% 증가하여 중간 수준의 개선 효과를 보였다.

주변에 소규모 자연지역이 있는 생태통로 10개 지점은 연결성이 평균 45.5% 증가하여 가장 낮은 개선 효과를 보였다. 이는 산림 연결성 평가와는 다른 결과로, 중규모 산림 주변의 자연지역이 연결성 개선에 도움을 준 것으로 추정된다.

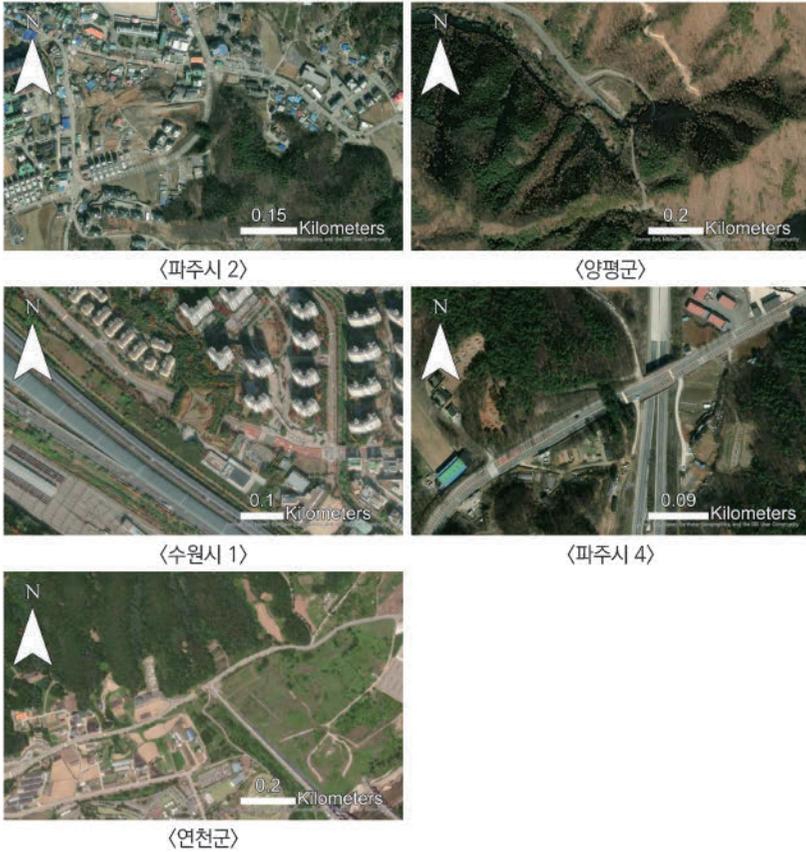
생태통로 주변 자연지역 규모별 유효 망 크기 평균값은 소규모(0.25km²) < 중규모(0.92km²) < 대규모(2.06km²) 순으로 나타났다. 연결성 평균값도 소규모(19.23%) < 중규모(46.81%) < 대규모(78.86%) 순으로 나타나, 자연지역 규모가 클수록 생태통로 주변의 연결성이 더 양호한 것으로 분석되었다.

자연지역의 유효 망 크기는 분석 면적의 증가로 8개 지점을 제외한 50개 지점에서 증가하는 것으로 나타났으나, 연결성은 13개 지점만 증가하는 것으로 나타났다. 이는 산림 외 자연지역이 산림과 단절되어 있는 현상이 반영된 결과로 추정된다.

자연지역을 대상으로 생태통로 조성 이후에 연결성 개선이 매우 미미한 지역들의 원인 파악을 위해 해당 지역의 위성영상(출처: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community. Retrieved from ArcGIS Pro World Imagery Basemap.)을 확인하였다. 확인 결과, 파주시 2(연결성 증가율: 0.8%)는 생태통로 조성으로 산림과 주거지의 소규모 자연지역이 연결되어 개선 효과가 미미했다. 나머지 양평군(연결성 증가율: 0.9%), 수원시 1(연결성 증가율: 1.0%), 파주시 4(연결성 증가율: 1.4%), 연천군(연결성 증가율: 1.9%) 등은 조성된 생태통로 주변과 근거리에 농로 및 산책로 등 폭이 좁거나 소규모의 인공피복에 의한 단절이 반영되어 연결성 개선 효과가 미미한 것으로 확인되었다(그림 4).

생태통로 조성은 대부분 유의미한 연결성 개선 효과가 확인되었으나, 일부 생태통로는 주변 자연지역과 소규모의 인공피복으로 단절되어 매우 낮은 개선 효과를 나타내고 있었다. 이는 야생동물의 실질적 이동성 확보를 위해 주변의 자연지역과 단절되지 않도록 생태통로가 조성되어야 함을 시사한다.

〈그림 4〉 생태통로 조성에 따른 연결성 개선 미흡 지역 현황



생태통로를 통해 이동할 수 있는 우리나라 야생동물의 일반적인 행동권이 1km² 내외임을 고려할 때, 생태계가 단절된 지역에서 생태통로의 조성은 주변의 물리적 연결성을 개선하여 주변 야생동물의 이동성 증진에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 단절 지역에 생태통로 조성 시 물리적 연결성 개선 효과를 사전에 평가하여 국지적 연결성을 제고할 수 있도록 다른 조성 요소와 함께 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

V. 결론

생태통로의 물리적 연결성 평가는 단절된 서식지 간 연결성 개선 효과를 정량적으로 측정하고 분석하는 데 중요한 도구이다. 이는 생태계 단절과 파편화가 심각한 도시에서 생태통로 조성에 따른 연결성 강화에 활용할 수 있으므로 관련하여 체계적 평가 체계 마련이 필요하다.

본 연구에서 나타난 바와 같이, 생태통로 조성 지점 반경 1킬로미터 이내 자연지역의 연결성 개선 효과는 유의미한 것으로 확인되었으나, 행정구역에서 영향은 도시의 공간구조에 따라 다소 제한적인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 생태통로의 물리적 연결성 및 개선 효과 평가가 가지는 의미와 한계를 동시에 보여주며, 이를 통해 연결성 강화를 위한 생태통로 조성과 평가에 관한 체계의 방향성을 도출할 수 있었다.

물리적 연결성 평가는 토지피복도를 기반으로 수행되었으나, 이러한 공간 데이터만으로는 현장의 미시적 단절 현상을 완벽히 반영하기 어려운 근본적인 한계가 있다. 좁은 폭의 도로, 소규모 인공피복 및 구조물, 또는 최근 개발된 지역 등은 토지피복도에 반영되지 않을 수 있어, 연결성 평가 결과의 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 토지피복도의 갱신 주기와 토지이용 및 피복 변화 사이의 시간적 차이로 평가 시점의 현황과 불일치가 발생할 수 있다.

따라서 물리적 연결성 평가 시에는 현장조사를 병행하여 단절 현황을 확인해야 하며, 이를 통해 공간데이터의 한계를 보완하고 평가의 정확도를 높일 필요가 있다.

물리적 연결성 평가는 생태통로 입지 선정과 조성 효과 분석에 객관적이고 정량화된 지표를 제공하는 중요한 장점이 있다. 특히 서식지 패치 간 연결성 변화를 수치화하여 생태통로 조성 전·후의 변화를 명확히 분석할 수 있다. 이러한 정량적 접근은 생태통로 조성 계획 수립 시 우선순위 결정의 과학적 근거가 되며, 조성 후 연결성 개선 효과 평가의 기초자료로 활용될 수 있다(LaPoint et al., 2015). 또한, 정량화된 지표는 서로 다른 지역 간 비교 분석을 가능하게 함으로써 보다 효율적인 생태통로 조성 및 생태축 구축에 기여할 수 있다.

그러나 물리적 연결성 평가만으로는 생태통로의 기능과 가치를 완전히 설명하기 어렵다는 한계가 있다(Unnithan Kumar and Cushman, 2022). 본 연구에서 확인된 바와 같이, 국지적 영향과 광역적 영향의 차이는 평가 스케일에 따라 결과 해석이 달라질 수 있음을 시사한다(Belote, Barnett, Zeller, Brennan, and Gage, 2022). 이러한 스케일 의존성은 평가 결과 활용에 신중한 접근이 필요함을 의미한다. 또한 물리적 연결성 지표는 생태통로 주변 야생동식물 현황과 이동 동물의 활용 빈도를 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 이는 생태통로의 조성 목적을 고려할 때 복합적 평가가 필요함을 시사한다.

따라서 물리적 연결성 평가의 정책적 활용을 위해서는 다음 사항을 고려해 생태통로 설치 및 관리지침(환경부, 2023)을 개선하고, 생태통로와 생태축에 대한 평가체계를 마련해야 할 것이다.

첫째, 평가 스케일의 다층화가 필요하다. 국지적 연결성 개선 효과와 광역적 영향을 구분해 평가하고, 각각의 의미를 적절히 해석해야 한다. 이는 생태통로의 효과를 정확히 이해하고 적절한 관리 방안을 수립하는 데 기여할 것이다.

둘째, 단절 및 연결 현황에 대해 토지피복도와 현장조사 결과를 통합적으로 반영하는 체계적인 평가 체계를 구축해야 한다. 공간데이터의 한계를 보완하고 단절 현황을 정확히 반영하기 위해서는 표준화된 현장조사 방법론의 개발과 적용이 필요하다. 이러한 통합적 접근은 평가의 정확도를 높이고, 실효성 있는 생태통로 계획 수립을 가능하게 할 것이다.

셋째, 평가 지표의 표준화가 요구된다. 서로 다른 지역의 생태통로 효과를 비교하고 평가할 수 있도록 표준화된 측정 방법과 지표 체계를 확립해야 한다(Bunn, Urban, and Keitt, 2000; LaPoint et al., 2015). 이는 생태통로 조성 정책의 일관성을 확보하고, 효과적인 생태축 조성의 기반이 될 것이다.

넷째, 야생동식물 서식 현황 및 로드킬 발생을 기반으로 생태통로 기능을 모니터링하고 평가할 체계를 구축해야 한다(Hilty et al., 2012; Van der Ree and Grilo, 2015).

향후 생태통로 관련 정책 수립에서 물리적 연결성 평가는 중요한 근거 자료

로 활용되어야 하지만, 이는 생태통로 의사결정과 효과 분석 체계의 일부로 인식되어야 한다. 평가 결과를 기반으로 생태통로 조성 위치를 결정하고, 효과성을 검증할 수 있어야 하며, 지역 특수성과 조성 목적을 종합적으로 고려한 정책적 판단이 필요하다. 특히 토지피복 등 공간구조와 동식물 서식, 로드킬 현황 등을 통합하여 생태통로를 평가할 수 있는 체계 구축은 실효성 있는 생태통로 조성과 관련 정책 수립에 기여할 수 있을 것이다. 이러한 종합적 접근을 통해, 물리적 연결성 평가는 단순한 연결성 측정 도구를 넘어, 효과적인 생태통로 정책 수립과 생태계 보전을 위한 핵심적인 의사결정 지원 도구로서의 역할을 수행할 수 있을 것이다. 이는 궁극적으로 도시 생태계의 지속가능성과 생물다양성 보전이라는 환경정책 목표 달성에 기여할 것으로 기대된다.

■ 참고문헌 ■

- 국립생태원, 2022, 단절된 생태계의 연결성 향상을 위한 생태학적 응용연구('22), 국립생태원.
- 김영·오충현, 2011, "도시생태네트워크 구축을 위한 서울시 생태통로 현황과 개선방안," 한국환경생태학회 학술발표논문집, pp.83-86.
- 김의경·김태근·김혜리·임상진·박영철, 2021, "서식지 환경에 따른 고라니의 행동생태 연구," 『국립공원연구지』, 12(2), pp.85-96.
- 박지희·유현석·박미영, 2009, "생태통로 우선 설치지역의 평가항목 중요도 분석-AHP 기법을 적용하여," 『환경영향평가』, 18(5), pp.301-312.
- 박찬열·이장호·강완모, 2011, "생태통로와 주변도로에서 야생조류의 이동 비교," 『한국환경생태학회지』, 25(5), pp.639-648.
- 서울연구원, 2006, 생태통로의 조성효과 분석 및 관리매뉴얼 작성, 서울: 서울연구원.
- 오규식·이동우·정승현·박창석, 2009, "도시 생태네트워크 설정을 위한 공간의사결정 지원체계에 관한 연구: 경관생태학 이론을 기반으로," 『한국 GIS 학회지』, 17(3), pp.251-259.
- 우동걸·서현진·박태진·송의근·김경민·최태영, 2019, "야생동물 이용빈도 및 종다양도를 활용한 생태통로 효율성 평가," 『환경영향평가』, 28(6), pp.525-535.
- 윤은주·김은영·김지연·이동근, 2019, "생태축 제안을 위한 회로 이론 기초 연결성 평가," 『환경영향평가』, 28(3), pp.275-286.
- 이경재·한봉호, 2002, "도로개발에 의하여 훼손된 산림지역 생물이동통로 식재계획," 『

- 한국환경생태학회지, 16(3), pp.321-337.
- 이진영·노백호·이장원, 2010, "AHP 기법을 활용한 야생동물이동통로의 기능개선을 위한 평가항목 분석," 『한국환경생태학회지』, 24(6), pp.763-771.
- 장병우·박신영·정진아·강완모, 2021, "서울시 녹지 연결망의 시계열 분석 및 정책적 함의," 『한국지적정보학회지』, 23(1), pp.116-129.
- 정종철, 2011, "생태통로의 최적지 평가를 위한 공간분석," 『환경영향평가』, 20(5), pp.697-703.
- 조해진·김달호·최지다·정우석·김희종·이한수·문운경, 2014, "너구리의서식환경에 따른 행동권분석," 한국환경생태학회 학술대회논문집, 24(2), pp.35-35.
- 차재규, 2023a, "대구·경북 생태공간 연결성 및 산림축 분석," 『한국지리정보학회지』, 26(4), pp.80-96.
- 차재규, 2023b, "대도시 도심의 생태적 연결성 및 연결망 분석," 『환경영향평가』, 32(6), pp.503-515.
- 최태영·양병국·우동걸, 2012, "국내 포유동물에 적합한 생태통로의 유형과 규격," 『환경영향평가』, 21(1), pp.209-218.
- 환경부, 2023, 생태통로 설치 및 관리지침, 환경부.
- Belote, R. T., Barnett, K., Zeller, K., Brennan, A., and Gage, J., 2022, "Examining local and regional ecological connectivity throughout North America," *Landscape Ecology*, 37(12), pp.2977-2990.
- Bunn, A. G., Urban, D. L., and Keitt, T. H., 2000, "Landscape connectivity: a conservation application of graph theory," *Journal of Environmental Management*, 59(4), pp.265-278.
- Chan, L., O. Hillel, P. Werner, N. Holman, I. Coetzee, R. Galt, and T. Elmqvist, 2021, *Handbook on the Singapore Index on Cities' Biodiversity (also known as the City Biodiversity Index)*, (CBD Technical Series No. 98), Montréal.
- Chan, L., O. Hillel, T. Elmqvist, P. Werner, N. Holman, A. Mader, and E. Calcaterra, 2014, *User's manual on the Singapore index on cities' biodiversity (also known as the City Biodiversity Index)*, Singapore: National Parks Board.
- Dickson, B. G., Albano, C. M., Anantharaman, R., Beier, P., Fargione, J., Graves, T. A., ... and Theobald, D. M., 2019, "Circuit-theory applications to connectivity science and conservation," *Conservation Biology*, 33(2), pp.239-249.
- Etherington, T. R., 2016, "Least-cost modelling and landscape ecology: concepts, applications, and opportunities," *Current Landscape Ecology Reports*, 1, pp.40-53.
- Girvetz, E. H., J. H. Thorne, A. M. Berry, and J. A. Jaeger, 2007, *Integrating Habitat Fragmentation Analysis into Transportation Planning Using the Effective*

- Mesh Size Landscape Metric, UC Davis: Road Ecology Center.
- Hashemi, R., Darabi, H., Hashemi, M., and Wang, J., 2024, "Graph theory in ecological network analysis: A systematic review for connectivity assessment," *Journal of Cleaner Production*, p.143504.
- Hilty, J. A., Lidicker, W. Z., Jr., and Merenlender, A. M., 2012, *Corridor ecology: the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*, Washington, DC: Island Press.
- Hilty, J., G. L. Worboys, A. Keeley, S. Woodley, B. Lausche, H. Locke, ... and G. M. Tabor, 2020, *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors*, (Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 30), Gland, Switzerland: IUCN.
- Keeley, A. T., Beier, P., and Jenness, J. S., 2021, "Connectivity metrics for conservation planning and monitoring," *Biological Conservation*, 255, p.109008.
- LaPoint, S., Balkenhol, N., Hale, J., Sadler, J., and van der Ree, R., 2015, "Ecological connectivity research in urban areas," *Functional Ecology*, 29(7), pp.868-878.
- Lindenmayer, D. B. and J. Fischer, 2013, *Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis*, Washington, DC: Island Press.
- Loro, M., Ortega, E., Arce, R. M., and Geneletti, D., 2015, "Ecological connectivity analysis to reduce the barrier effect of roads. An innovative graph-theory approach to define wildlife corridors with multiple paths and without bottlenecks," *Landscape and Urban Planning*, 139, pp.149-162.
- Moreira, F., Dias, F. S., Dertien, J., Hasse, A. C., Borda-de-Água, L., Carvalho, S., ... and Fernández, N., 2024, "Guidelines for connectivity conservation and planning in Europe," *ARPHA Preprints*, 5, e129021.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2011, *Convention on Biological Diversity: Text and Annexes*, Montreal: United Nations Environment Programme.
- Spanowicz, A. G., and Jaeger, J. A., 2019, "Measuring landscape connectivity: On the importance of within-patch connectivity," *Landscape Ecology*, 34, pp.2261-2278.
- United Nations, 2015, "Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development," *General Assembly Resolution 70/1*.
- Unnithan Kumar, S., and Cushman, S. A., 2022, "Connectivity modelling in conservation science: a comparative evaluation," *Scientific Reports*, 12(1), p.16680.
- Van der Ree, R., Smith, D. J., and Grilo, C., 2015, *Handbook of road ecology*, John Wiley & Sons.

차재규: 국립생태원 선임연구원이며, 기후탄소연구팀에서 기후변화영향평가 관련 연구와 업무를 수행하고 있다. 관심 연구분야는 생태계 연결성 평가, 기후변화의 생태계 분야 리스크 평가와 적응 방안 모색 등이다(flow@nie.re.kr).

투 고 일: 2024년 11월 07일
심 사 일: 2024년 11월 20일
게재확정일: 2024년 12월 07일