

Research Paper

생태축 제안을 위한 회로 이론 기초 연결성 평가

윤은주* · 김은영** · 김지연*** · 이동근****

일본 국립환경연구원*, 수원시정연구원**, 서울대학교 대학원***, 서울대학교 조경지역시스템 공학부****

Connectivity Assessment Based on Circuit Theory
for Suggestion of Ecological Corridor

Eun-Joo Yoon* · Eun-Young Kim** · Ji-Yeon Kim*** · Dong Kun Lee****

National Institute for Environmental Studies, Japan*

Suwon Research Institute**

Graduate school, Seoul National University***

Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University****

요약: 생물의 국지적 멸종을 방지하고 생물 다양성을 보전하기 위해서는 서식처 간 연결성을 확보하는 것이 중요하다. 서식처가 다양한 교란요인에 노출되더라도 다른 서식처와 연결되어 있으면 종이 교란에 회피하거나 대응하는 것이 가능하기 때문이다. 서식처 연결성은 다양한 관점에서 평가될 수 있으나 최근 컴퓨터 연산능력과 관련 소프트웨어의 발달로 인해 종의 움직임에 기초하는 기능적 연결성의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 본 연구에서는 각종 개발사업으로 서식처 파편화가 발생하는 수원시를 대상으로, 종의 이동량을 연결되는 모든 격자에 맵핑할 수 있는 써킷스케이프(circuitscape)를 적용하여 연결성을 평가하였다. 또한, 이에 기초하여 종의 이동이 상대적으로 집중되는 지역을 수원시에서 우선 보전해야 할 생태축으로 제안하고, 2018년도 토지피복과 식생활력도(NDVI)와 비교함으로써 관리의 필요성을 제시하였다. 본 연구결과는 기존에 개념도의 형태로만 제공되었던 생태축 부문을 효과적으로 보완하고, 실제 개발사업 관리 및 도시계획에서의 실효성을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어: 써킷스케이프, 수원, 기능적 연결성, 채널

Abstract: In order to prevent local extinction of organisms and to preserve biodiversity, it is important to ensure connectivity between habitats. Even if the habitat is exposed to various disturbance factors, it is possible to avoid or respond to disturbances if they are linked to other habitats. Habitat connectivity can be assessed from a variety of perspectives, but the importance of functional connectivity based on species movement has been emphasized in recent years due to the development of computational capabilities and related software. Among them, Circuitscape, which is a connectivity evaluation tool,

First Author: Eun-Joo Yoon, Tel: +81-29-858-7049, E-mail: yoon.eunjoo@nies.go.jp, ORCID: 0000-0002-6531-206X

Corresponding Author: Dong Kun Lee, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: dklee7@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-7678-2203

Co-Authors: Eun-Young Kim, Tel: +82-31-220-8045, E-mail: eykim@suwon.re.kr, ORCID: 0000-0001-5222-3351

Ji-Yeon Kim, Tel: +82-2-880-4885, E-mail: skantdlv37@snu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-4566-4794

Received: 25 March, 2019. Revised: 3 May, 2019. Accepted: 7 May, 2019.

www.kci.go.kr

has an advantage it can provide detailed reference data for the city planning because it maps ecological flows on individual grid based on circuit theory. Therefore, in this study, the functional connectivity of Suwon was evaluated by applying Circuitscape and then, the ecological corridor to be conserved and supplemented was suggested based on it. The results of this study are expected to effectively complement the methodology related ecological corridor/axis, which was previously provided only in the form of a diagram, and to be effective in management of development project and urban planning.

Keywords : Circuitscape, Suwon, functional connectivity, channel

I. 연구의 배경 및 목적

산림파편화는 토지이용 변화와 같은 경관의 구조적 변화뿐만 아니라 개별 종의 이동, 종간의 상호작용 변화와 같은 경관 기능을 변화시킨다. 파편화로 인한 산림크기의 감소는 가장자리 효과와 외래종 도입으로 인한 교란 증가, 서식처간 연결성 감소 등을 유발하며, 이것은 결국 종의 국지적인 멸종 및 전체적인 종 다양성 감소로 이어진다(Cushman 2006; Rayfield et al. 2011; Kim et al. 2012). 반면 국내에 실제 시행되고 있는 보전전략은 대부분 대규모 산림 서식처 위주로 진행되고 있으며, 파편화된 서식처의 연결을 통한 안정성 확립은 미흡하다(Jeon et al. 2010).

그러나 서식처 연결의 중요성에 대한 공감대는 지속적으로 형성되어 왔으며, 이것은 경관생태학 발달과 더불어 다수의 정량 연구에 의해 지원되었다. 관련 선행연구는 크게 경관생태학 지수, 그래프이론(graph theory)에 기초하여 현재의 경관 연결성을 평가하는 연구(Rayfield et al. 2011; Song et al. 2012; Kang et al. 2018), 광역 생태축 및 생태네트워크 구축, 보전 우선순위 선정과 같이 계획적 관점에서 연결성 보전 및 증진을 위한 대안을 제시하는 연구(Li et al. 2005; Jeon et al. 2010; Sawyer et al. 2011; Kim et al. 2014; Zhang et al. 2019)가 있다. 일반적인 연구의 선후관계 측면에서, 경관의 연결성 평가에 기초하여 연결성 보전 및 증진을 위한 대안을 제안하여야 하지만 국내의 경우 통합적으로 접근한 선행연구는 매우 미흡하다. 이것은 기존의 연결성 평가가 노드 간 직선거리에 기초하거나 목표지점 간 최소비용경로를 산정하는데 한정되어, 실제의 도면상에서 연결성 증진을 위한 보전 및 관리지역을

구획하는데 한계가 있기 때문이다. 일부 학술 연구에서 연결성분석에 기초하여 광역 생태축(녹지축) 혹은 미집행 공원의 보전 우선순위를 제시하였으나(Jeon et al. 2010; Kim et al. 2014; Ahn et al. 2014; Kang et al. 2018), 여기서의 연결성은 평가항목간의 중첩, 패치의 크기 및 거리에 한정되거나 미집행 공원과 같은 특정 용도를 대상으로 한다. 대상 지역의 전반적인 연결성을 파악하거나 파편화된 패치 간의 기능적 연결성¹⁾을 강조하여 계획을 지원하는 연구가 미흡하였고, 이에 국가 혹은 도시 단위 계획에서 실제 참조되는 개념도(diagram) 형태의 생태축(네트워크)는 실질적인 연결성을 향상시키는 데 실효성을 지니기 어렵다.

반면에 McRae et al. (2008)에 의해 처음 제안된 써킷스케이프(Circuitscape)는 저항의 분포에 따른 전류의 양을 산출하는 회로이론에 기초한 연결성 평가 소프트웨어로서, 개별 격자의 토지이용을 종 이동에 대한 저항으로 간주, 목표지점 간 연결된 모든 격자에 대해 종의 상대적인 이동량을 계산하여 연결성을 맵핑하는 것이 가능하다. 즉, 저항을 고려한다는 점에서는 동일하지만, 목표지점 간 하나의 경로만을 산출하는 최소비용경로 평가기법과는 달리 써킷스케이프는 연결된 모든 격자에 대해 종 이동의 확산(diffusion)과 집중(channel, pinch point) 등을 통합적으로 평가할 수 있다(Koen et al. 2014; Pellitier

1) 경관생태에서는 경관의 구조에 따라 발생하는 종의 이동을 경관의 기능으로 정의하고 있으며, 연결성 평가 연구도 종 이동의 시뮬레이션에 기초하여 평가하는 경우 기능적 연결성 평가 연구로 분류하고 있다. 본 연구에서 역시 상대적인 종 이동량에 기초하여 연결성을 평가하였으므로, 기능적 연결성으로서 간주하였다.

et al. 2014; Rayfield et al. 2016). 특히 종 이동이 집중되는 지역은 대체할 수 있는 이동 경로가 없다는 것을 의미하므로, 파편화된 소규모의 산림이더라도 연결성 측면에서 중요한 징검다리 녹지이다. 산림비율이 높은 우리나라는 개발사업이 산림의 가장자리와 파편화된 산림에 집중되어 온 반면 보전전략은 큰 규모의 산림 위주였다는 점을 고려했을 때 써킷스케이프의 이용이 기여하는 바가 클 것으로 기대된다.

따라서 본 연구는 광고 및 호매실 개발사업 등 최근 산림 파편화가 발생한 수원시를 대상으로 써킷스케이프를 적용하여 전반적인 연결성을 평가한 다음, 집중적인 생태적 흐름이 나타나는 지역에 대해 생태축의 보전 및 관리방안을 제안하고자 하였다.

II. 연구의 방법

본 연구의 흐름은 크게 다음과 같이 구분하였다 (Figure 1). 첫째, 연구대상지인 수원시의 크기, 지형, 토지피복 등을 고려하여 연결성 평가 방식을 설정하였다. 둘째, 수원시 토지 피복의 구성과 선행연구를 참조하여 격자별 저항값(resistance value)을 할당하였다. 셋째, 써킷스케이프를 적용하여 종의 이동에 기초한 연결성을 평가하였다. 넷째, 종의 이동이 상대적으로 집중되는 지역을 중심으로 NDVI, 토지 피복도와 비교, 생태축을 제안하였다. 단계별로 사용된 입력자료는 Table 1에서 제시하였다.

1. 연구대상지와 분석범위

본 연구대상지는 행정구역상 경기도 수원시로 설정하였다. 수원시는 경기도 중남부에 위치하며, 경기

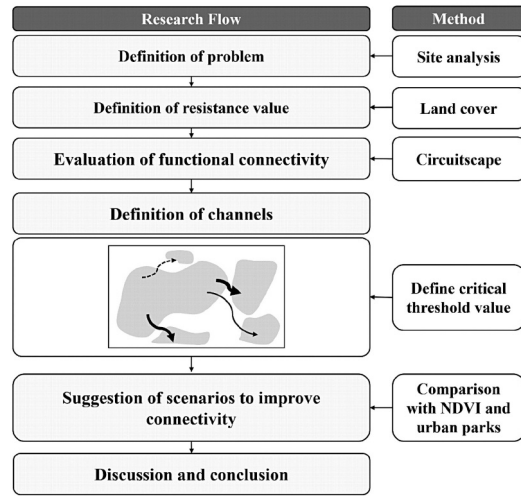


Figure 1. Research Flow.

도청 소재지인 도시이다. 현재 121.01km²의 면적에 백만이 넘는 인구가 거주하여 인구 밀도 및 개발 밀도가 높은 편이다. 또한, 2010년대 이후 광고신도시와 호매실지구, 고색동, 세류동, 고등동, 당수동, 곡반정 등의 지역 개발사업이 진행되면서 광범위한 토지피복 전환이 발생하였다. 지형적으로는 광고산맥을 중심으로 높고 낮은 구릉이 분포하는데 대부분 동북에서 남서방면을 향하여 경사져 있다. 수원시 내 중앙부는 대부분 시가화 건조지역이 분포하고 있으나 팔달산을 비롯한 일부 자연공원이 점적, 선적으로 분포하고 있다. 광고산, 백운산 등 물리적으로 이어져 있는 대규모의 산림은 대부분 수원시 경계를 기준으로 외곽에 분포하나, 개발이 진행된 도시 내부의 파편화된 산림 패치 역시 종의 서식처로 기능하며 다른 대체경로가 적은 만큼 상대적 중요도는 높다.

관련 선행연구에 따르면 써킷스케이프는 격자 단

Table 1. Input dataset

Category	Input data (resolution)	Material
Circuitscape	Resistance value (100m)	Land cover map (MOE, 2013) ^a Land cover map (SRI, 2018) ^b References about resistance value ^c
	Focal Patch (100m)	Manual (referring to Appendix 1-4)
Data for comparison	NDVI (30m)	LANDSAT 8 (2018.5.9.)
	Land cover (5m)	Land cover map (SRI, 2018)

^a Ministry of Environment, ^b Suwon Regional Institute, ^c Lee et al. 2008; Jeon et al. 2010; Desrochers et al. 2011; Pelletier et al. 2014

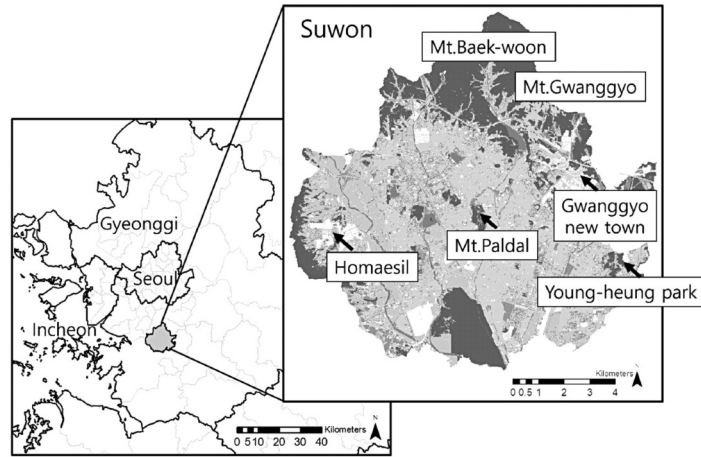


Figure 2. Study area: Suwon.

위로 광역적 연결성을 평가하는 도구로서 선행 연구에 비해 수원시의 규모가 상대적으로 작다. 따라서 적정 해상도 중(수백m~수km, McRae et al. 2016) 가장 고해상도인 100m를 적용하였다. 또한, 분석범위(analysis extent)는 수원시 내부와 외부 서식처의 연결성을 함께 고려하기 위하여 수원시의 경계에서 최소 5km 이상의 버퍼 지역(buffer area)을 포함하도록 하였다. 이에 따라 전체 분석지역은 수원시를 포함한 100m격자 200×260 개로 구성되었다. 연결성 분석에는 Circuitscape 4.0.5(www.circuitscape.org)을, 입출력 자료의 가공에는 Matlab 2017b을 적용했다.

2. 연결성 평가방법

1) 저항값 설정

써킷스케이프의 주요한 입력 자료인 저항값은 최신

의 토지피복과, 저항값을 활용하여 연결성을 평가한 선행연구에 기초하여 할당하였다. 환경부에서 제공하는 최신 세분류 토지피복자료(2013-2014)는 최근 수원시의 대규모 개발사업(광교신도시, 호매실 택지개발사업)이 반영되지 않으므로, 수원시정연구원에서 2018년도 항공영상으로 분류한 수원시 토지피복자료를 이용하였다. 연구의 해상도와 참조한 저항값 분류를 고려하여 토지피복 분류는 대분류 평가항목으로 통합하여 사용하였다.

써킷스케이프 관련 선행연구에서 적용한 저항값(Desrochers et al. 2011; Pelletier et al. 2014)과 국내에서 경관투과성 점수(Lee et al. 2008)를 고려하여 저항값을 부여하였다(Table 2). 써킷스케이프 관련 연구에서 활용되었던 Desrochers et al.(2011)의 저항값을 기준으로 각 토지피복에 저항값을 할당하였고, 여기에서 다루지 않는 토지피복인 습지, 나

Table 2. Resistance values according to land cover in analysis extent

Index	Land cover	Resistance	Reference	Area (km ² , %)
1	Urban	100	Desrochers et al. 2011 Pelletier et al. 2014	137.4 (26.4)
2	Agriculture	27	Desrochers et al. 2011 Pelletier et al. 2014	70.0 (13.5)
3	Forest	1	Desrochers et al. 2011 Pelletier et al. 2014	197.9 (38.1)
4	Grass	14	Desrochers et al. 2011 Pelletier et al. 2014	76.7 (14.7)
5	Wetland	27	Lee et al., 2008	3.0 (0.6)
6	Bare land	50	Lee et al. 2008	27.2 (5.2)
7	Water body	27	Jeon et al. 2010	7.9 (1.5)
Total	-	-		520.1 (100.0)

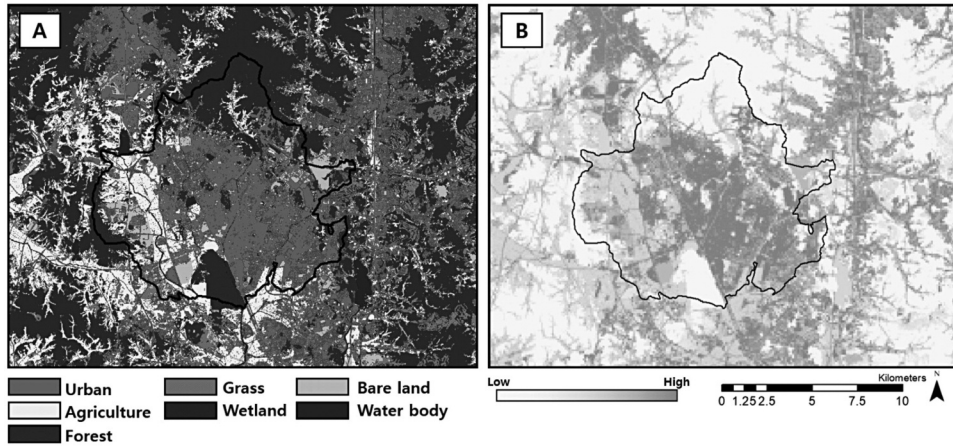


Figure 3. Land cover of analysis extent (A) and resistance value (B): resistance values according to land cover were resampled into format of 100m grid considering the proportion of land cover within individual grid.

지에 대해서는 경관투과성 점수체계에서의 비율을 고려하여 저항값을 할당하였다. 다만, 본 연구에서는 산림연결성 보다 광의의 개념인 생태축을 대상으로 하기 때문에 수역의 저항값을 선행연구에 비해 낮게 조정하였다(Jeon et al, 2010). 또한, 씨킷스케이프의 입력자료로는 개별 격자 내에서의 토지 피복 비율을 반영한 저항값 평균을 사용하였다. 저항값은 특정 종의 이동과 관련된 것으로서 지역에 따라 차이가 있으나, 본 연구에서는 해당 자료의 미비로 인하여 선행연구를 참조하여 할당하였다. 대신 씨킷스케이프의 모의 결과와 연구진의 경험적 지식을 비교함으로써 저항값 할당과 조정 과정을 반복하여 최종적으로 결정하였다.²⁾

2) 씨킷스케이프 적용

씨킷스케이프는 회로이론에 근거한 연결성 평가 도구로 실제 종의 이동과의 개연성이 증명된 연결성 평가방법인 그래프 이론, 최소비용 경로, 종의 무작위적 움직임을 결합하였기 때문에(McRae et al, 2008; 2016), 연결성 평가에 효과적인 것으로 판단하였다. 씨킷스케이프의 기반인 회로이론에 따르면 저항이 높을수록 전류가 적게 흐르며(Equation 1), 저항의 합은 직렬로 연결되었을 때 증가하고(Equation 2) 병렬로 연결되었을 때에는 감소하는데(Equation 3)

이들 수식을 이용하면 각 저항에 걸리는 전류의 양을 산정할 수 있다. 만약 전류량과 저항을 종의 이동량과 장애물로 각각 가정한다면, 종은 장애물이 적은 경로로 이동하는 경향을 띠며, 목표지점까지 하나의 경로가 존재하는 경우보다 대체 경로가 있는 편이 이동에 수월할 것이라는 데 동의할 수 있다. 최소비용경로는 씨킷스케이프와 동일하게 저항값에 기초하나, 대체경로의 존재 여부에 따른 차이를 반영하지 못하며(Figure 4c, d), 씨킷스케이프는 대체경로가 있을 때 종의 이동이 나뉘는 것(Figure 4a, b)을 반영할 수 있다. 같은 맥락에서 씨킷스케이프는 대체경로가 있을 때에 비해 없을 때 상대적으로 집중되는 경향을 분석할 수 있다는 장점이 있다.

$$V = \text{Voltage}; I = \text{Current (unit of amperes)};$$

$$R = \text{Resistance}; V = IR \quad (1)$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots R_n \quad (2)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \frac{1}{R_n} \quad (3)$$

2) 씨킷스케이프에서 모의된 값에 기초하여 도출된 생태축이, 다년간 수원시 지역연구를 해온 연구진의 경험상 인정 가능한 범위에 있는 것인지를 토의하였다. 구체적으로는 해당 과정에서 수역의 저항값이 시가와 수준에서부터 낮은 방향으로 조정되었으며, 저항값 가공방식은 100m 격자 내 대표적 토지피복의 저항값을 적용하는 것에서, 격자 내 토지피복 비율을 고려한 평균 저항값을 쓰는 방식으로 변경되었다.

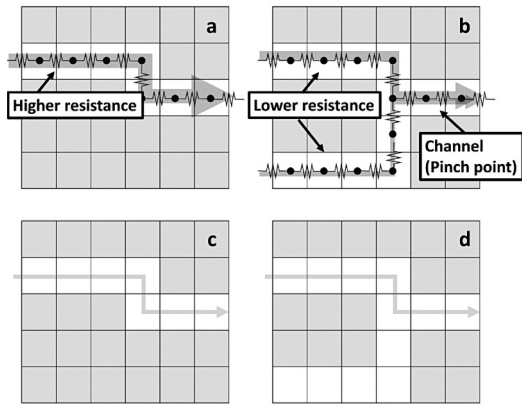


Figure 4. Difference between circuit theory based method (a, b) and least-cost based method (c, d). The path with no alternative is represented as channel in figure 4b.

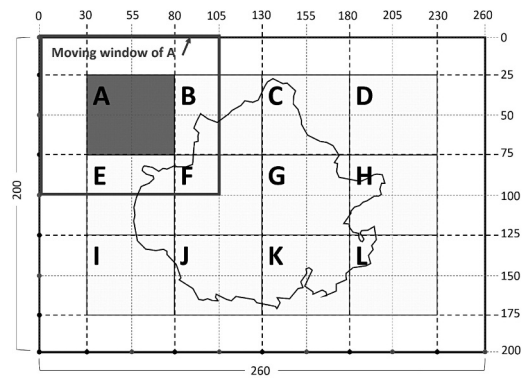


Figure 5. Moving window for analyzing of sections A-L.

본 연구에서는 씨킷스케이프의 페어-와이즈(pair-wise) 모드를 선택하여 수원시의 전반적인 연결성을 평가하고자 하였으며³⁾ 무빙윈도우(moving window)를 설정하여 각 윈도우 내 동-서, 남-북 간의 연결성을 평가하여 합산하였다. 수원시처럼 개발 지역 비율이 높은 지역에 서식하는 종의 이동반경이 수km 이내이므로 대상지를 5km 크기의 정사각형으로 구획(Figure 5, A-L), 각 구획별로 연결성 분석을 위한 2.5-3km의 버퍼지역을 두어 무빙윈도우를 형성하였다(Pelletier et al. 2014; Koen et al. 2014). 무빙윈도우의 동-서, 남-북 양 극단에 목표지점(focal patch)을 할당하여 목표지점 간 연결성을 평가하였으며, 분석 후에는 버퍼지역을 제거한 다음 구획된 A-L만을 모자이크하였다(Appendix ①-④).

3. 생태축 보완 시나리오 제안

씨킷스케이프의 연결성 평가결과에 기초하여 종의 이동이 집중되는 지역을 중심으로 생태축을 규명하였다. 씨킷스케이프 결과 관련하여 절대적 기준이 제시된 바 없기 때문에 지역 내 분포하는 연결성 값의 비율에 기초하여 분류, 해석하였다. 이때 계획적 관점에서 연구 대상지 내에서 적절한 수준의 연결된 패턴이 나타날 때까지 경험적으로 조정하였으며, 최종적으로 상위 1-15%, 15-30%가 결정되었다. 또한 해당 생태축은 100m의 해상도로 나타나기 때문에 30m 해상도로 구축된 정규식생지수(Normalized difference vegetation index, NDVI, Equation 4), 1:15,000 해상도로 구축된 토지피복자료와 비교하였다. 해당 연결성 평가결과는 토지피복별로 동일하게 부여된 저항값에 기초하므로 식생의 질 등을 반영하기 어렵다. 이에 식생의 활력도를 간접적으로 나타내주는 정규식생지수와 비교함으로써, 이러한 한계점을 보완하였다.

Red and NIR indicate Landsat band acquired in the red (visible) and near-infrared regions

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (4)$$

III. 연구결과 및 토의

1. 씨킷스케이프 적용결과

씨킷스케이프의 연결성 평가 결과 종의 이동량이 수원의 북부에서 서쪽 방향의 좁은 선형 녹지에 집중된 반면(Figure 6Aa), 그 외 지역은 점적으로 집중되는 지역과 넓게 확산되는 지역이 혼재되어 나타났다(Figure 6Ab). 점적으로 집중되는 지역은 대부분 도심 내에 존재하는 파편화된 산림패치이며, 확산하는 패턴은 현재 농경지에 해당하였다. 시가화 건조지역은 저항값이 매우 높으나 이동을 제약하지 않았기 때문에 낮은 수준의 연결성이 어느 정도 나타나지만,

3) 도시 내에서는 우산 종으로서 기능하는 종을 선정하기 어려울 뿐만 아니라 특정 종에 대해 이동반경, 이동에 대한 저항 등이 알려진 바가 적음을 고려하였다.

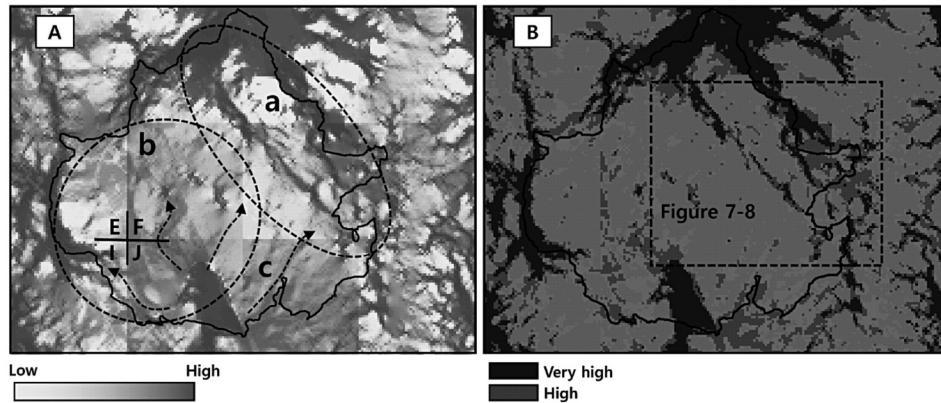


Figure 6. Result of circuitscape (A) and graded connectivity (B).

주변에 산림이나 초지 등 자연적 피복이 존재하면 생태적 흐름이 집중되어 시가화 건조지역의 연결성은 국지적으로 더 낮아졌다. Figure 6A에서 연결성이 높은 지역(진한 색) 주변으로 연결성이 매우 낮은(밝은 색) 지역이 분포하는 것을 확인할 수 있다. 유사한 맥락에서 분석단위에 대규모의 산림패치가 포함된 E와 F, 산림패치가 없어 종의 이동이 농경지에 상대적으로 집중된 I와 J간에 경계선이 뚜렷하게 나타나는 현상을 이해할 수 있다.

또한, 일부 선형의 높은 연결성 분포가 나타나는 지역(Figure 6Ac)은 토지피복 상의 하천패턴과 일치한다. 하천의 저항값이 습지나 농경지 수준과 유사한 데다(Table 1), 소규모더라도 격자 내에서 비율로 반영하였기 때문이다. 즉 개발된 도심 내에서는 하천이 파편화된 서식처 패치 간의 채널로서 기능할 수 있음을 나타낸다.

2. 생태축 보전 시나리오

써킷스케이프의 결과에 기초하여 상위 15%, 30%의 연결성 분포 지역을 분류하였을 때 주요한 생태축이 수원시의 동쪽, 광교신도시를 가운데 두고 좌, 우편 측에 북서에서 남동 방향으로 길게 뻗어 있는 것으로 나타났다(Figure 6B). 이 생태축은 수원시 북부의 백운산과 광교산에서 시작하여 광교신도시를 지나 미집행공원인 영흥공원 일대까지 분포하였다. 이것은 수원시 내에 동-서, 남-북의 네 방향으로 일정량의 종이 이동한다고 가정했을 때에, 이 두 개의 생

태축에 집중되는 것으로 해석할 수 있다(Figure 6B). 이 지역의 토지피복을 확대하여 살펴보면(Figure 7), 선형의 파편화된 산림조각과 함께 초지, 나지, 일부 소규모 도로 등 여러 토지피복이 혼재되어 나타나고 있다. 이들 지역은 백운산과 광교산과 같은 대규모의 산림에 비해 서식처로서의 질은 낮으나, 주변지역이 강도 높게 개발되어 대체 경로가 없기 때문에 종 이동의 주요한 통로(channel)로서 기능하고 있다. 즉, 이 지역은 대규모 산림과 도심 내 파편화된 산림을 연결해주는 주요한 징검다리 녹지로도 파악할 수 있다(Rayfield et al, 2016).

또한 이것은 광교신도시 개발사업(Figure 8a1)으로 주변의 선형 산림이 남게 되면서 종 이동의 상대적인 집중도가 높아진 것으로도 해석할 수 있다. 개발지 내의 잔여 산림패치가 남아있으나 종의 이동이 분산되지 않고, 개발지 가장자리를 지나는 선형의 산림으로 대부분 집중되어 있다. 광교신도시 개발 사업이 완료되는 2020년 이후에는 현재 토지피복 상 나지로 분류된 Figure 7a2 지역 역시 개발지로 전환되므로 좁은 선형의 산림에 집중되는 현상은 더욱 심화될 것으로 예측된다. 이에, 본 연구에서는 이들 지역을 주요 생태축으로서 제안하였다. 현실적으로 현재 진행 중인 개발지역의 변경은 어려우므로, 개발지역 주변의 좁은 선형의 산림조각과 이를 연결하는 나지 및 초지에 대한 보전과 관리(추가 개발에 대한 제한을 포함), 이 지역을 가로지르는 도로에는 적절한 형태의 생태 통로의 설치가 필요하다. 해당 지역의 식

생활력도(NDVI) 값 분포를 고려했을 때, 정도의 차이는 있으나 높은 식생활력도 값이 대부분 연속적으로 분포하고 있다(Figure 8). 그러나 일부 지역에서는 토지피복 분류상 산림으로서 분류되었더라도 식생활력도가 낮은 지역이 존재하며, 한편으로는 토지피복 분류상 파편화된 산림패치로 나타지만 비교적 높은 활력도가 연속적으로 나타나는 지역이 존재하였다(Figure 8A). 전자는 대부분 산림 외부와 맞닿아 있어 외부 간섭으로 인한 식생활력도가 저하되는 것으로 파악되며, 생태축 보전 시 집중적인 식생의 관리가 요구되는 지역이다. 그러나 후자의 경우에는 토

지피복에 기초한 저항값이 식생활력도와 같은 자료를 참조하여 보정될 필요가 있음을 시사한다. 특히, 본 연구에서 제안한 생태축은 매우 좁은 선형의 파편화된 산림패치에 집중되어 생태축 보전 측면에서 중요하지만 그만큼 취약하다. 연결성 평가 측면에서, 그리고 생태축 보전 및 관리 측면에서 저항값에 비해 식생활력도가 높은 지역을 어떻게 고려하는가에 따라 이 현상을 완화시킬 수 있을 것으로 기대되나 해당 내용은 본 연구의 범위에서 벗어나므로 제외하였다.

또한 제안된 생태축은 수원시 내 영흥공원(Figure 7b)과, 용인시의 골프코스 일부와(Figure 7c) 연결되

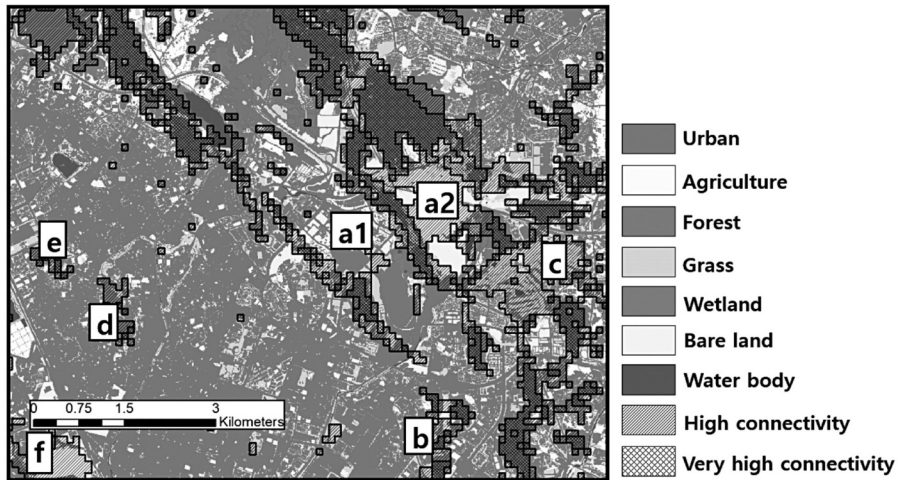


Figure 7. Land cover and connectivity (Zoom in, referring to Figure 7B).

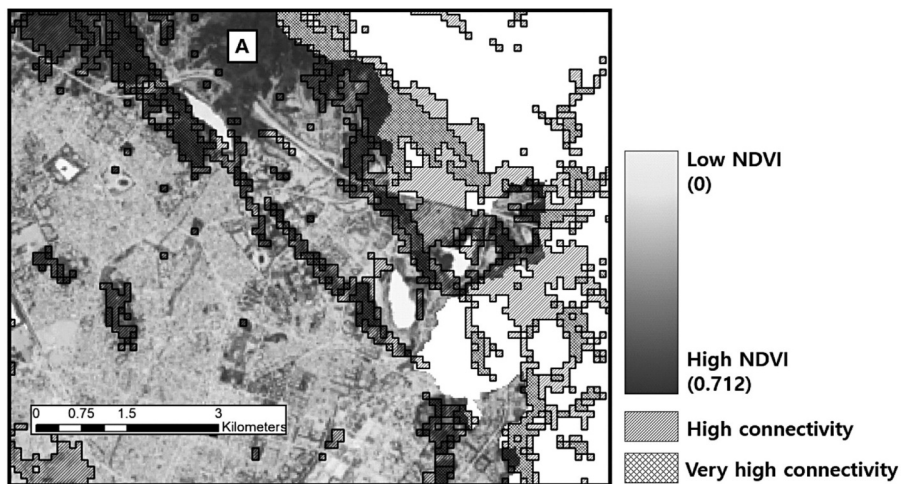


Figure 8. NDVI distribution and connectivity (referring to Figure 6B).

므로, 연결성 측면에서 이들 시설을 관리할 필요가 있다. 특히 영흥공원은 도시계획시설 중 장기미집행 공원으로서 일부 개발계획이 수립하는 과정에 있으므로 연결성 측면에서의 적극적인 검토가 필요할 것으로 판단된다(Yoon et al., 2018). 그 외에도 뚜렷한 생태축으로서 나타나지는 않았으나 수원시 내에서 동-서 방향의 연결성을 지원하기 위해서는 도시공원 중 팔달공원(Figure 7d)과 숙지공원(Figure 7e), 수원역 인근의 농경지(Figure 7f)를 징검다리 혹은 주요 거점으로서 관리할 필요가 있다. 농경지(Figure 7f)의 식생활력도는 도심 내 산재되어 분포하고 있는 소규모의 녹지에 비해 낮게 분포하고는 있으나, 그 규모와 위치상의 중요성으로 인해 연결성 측면에서는 상대적으로 중요하게 나타났다.

경관 구성요소의 크기와 형태에 기초하는 구조적 연결성 측면에서 파편화된 자연, 반자연적 패치는 중요도가 낮게 평가될 가능성이 높다. 그러나 우리나라와 같이 산림의 비율이 높고 산림 가장자리를 중심으로 개발되는 경우, 중공급원으로서 기능할 수 있는 대규모의 산림뿐만 아니라, 중공급원 간 연결성을 향상시키는 잔여패치의 보전을 논하는 것이 시급하다(Song et al., 2012). 이러한 측면에서 씨킷스케이프는 기존의 대규모 산림패치에 집중되었던 보전전략을 효과적으로 보완 및 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 지나치게 먼 거리에 있는 패치간의 연결성이 그렇지 않은 연결성과 동등하게 반영되는 것을 방지하고자 12개의 정사각형(A-L)으로 구분하여 무빙윈도우를 형성, 분석한 다음 모자이크하는 방법을 적용하였다. 그러나 연결성 평가 결과 일부 지역에서는 정사각형 간의 경계가 나타나는 것이 관찰되었는데, 이것은 무빙윈도우 내 저항값 분포가 달라 바로 인접한 격자라도 어느 윈도우에 속하느냐에 따라 상대적으로 연결성 값이 다르게 할당된 데에 기인한다. 넓은 대상지를 적절한 범위를 적절한 범위로 구분하여 평가하는 것은 적절한 접근방법으로 판단되나, 이

렇게 경계가 나타나는 현상, 혹은 지역을 구분하는 방식(구획의 크기 및 위치)에 따른 연결성 평가 값 차이 등은 해결되어야 할 부분이다. 씨킷스케이프 개발자 McRae et al.(2016)는 최근 개별 격자 단위로 원형의 무빙윈도우를 움직이며 각 윈도우별로 평가된 연결성을 누적하는 방법으로 이 문제를 해결하였으나, 상용화 이전 단계이다. 향후 연구에서는 연구진 자체적으로 반경과 중첩 정도를 조정할 수 있는 무빙윈도우와 씨킷스케이프의 연결성 연산을 결합하는 방법을 적용해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

또한 향후 연구에서는 최근 진행된 광교신도시⁴⁾, 호매실 택지개발사업⁵⁾ 등 대규모의 개발 사업 전후의 생태적 흐름의 변화를 집중적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 수원시에서 2018년도 항공사진을 기준으로 구축한 최신의 토지피복을 반영함으로써, 개발 사업 이후의 연결성을 평가하는데 집중하였다. 그러나 정량적으로 평가된 생태축의 고려 없이 시행된 개발계획이 지역 내 전반적인 연결성에 어떠한 영향을 미쳤는지를 분석한다면 추가 개발계획의 평가, 개발지 내 생태통로의 설치, 녹지계획 보완 등을 효과적으로 지원할 수 있다. 또한 수원시 황구지천 주변 절대농지가 해제에 따른 연결성의 변화를 사전에 예측함으로써 관련 개발 계획을 수정 및 보완하는 것 역시 지원할 수 있을 것으로 예상된다.

사사

본 연구는 환경부 “환경정책기반 공공기술개발사업(과제번호: 2016000210004)”에서 지원받았습니다.

4) 수원시 영통구 의의동, 원전동, 하동과 용인시 수지구 상현동 일원의 11.3km² 규모의 개발 사업으로 2007년 11월에 착공하여, 2020년 12월에 완공될 예정이다.

5) 수원시 권선구 호매실동, 금곡동, 입북동 일원의 3.1km² 규모의 개발사업으로 2005년 12월에 착공, 2019년에 완공 예정이다.

References

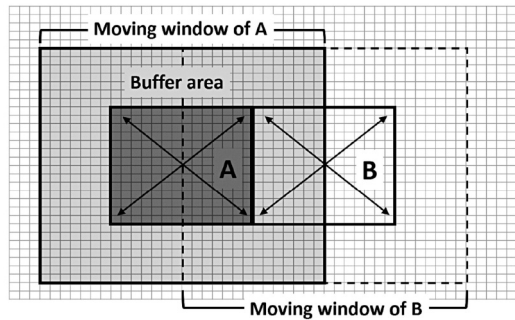
- Ahn Y, Lee DK, Kim H, Mo Y. 2014. Applying connectivity analysis for prioritizing unexecuted urban parks in Sungnam. *J. Korean Env. Res. Tech.* 17(3): 75-86. [Korean Literature]
- Cushman SA. 2006. Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: A review and prospectus. *Biological conservation.* 128(2): 231-240.
- Desrochers A, Belisle M, Morand-Ferron J, Bourque J. 2011. Integrating GIS and homing experiments to study avian movement costs. *Landscape Ecology.* 26: 47-58.
- Jeon SW, Chun JY, Seong HC, Song WK, Park JH. 2010. A study on the setting criteria and management area for the national ecological network. *J. Korean Env. Res. Tech.* 13(5): 154-171. [Korean Literature]
- Kang WM, Song YK, Sung HC, Lee DK. 2018. Assessing conservation priorities of unexecuted urban parks in Seoul using ecological network and accessibility analysis. *J. Korean Env. Res. Tech.* 21(2): 53-64. [Korean Literature]
- Kim G, Kong SJ, Kim MK, LEE MJ, Song J, Jeon SW. 2014. Method of Developing the regional ecological network for local government using the national ecological network and the environmental conservation value assessment map. *Environmental Policy Research.* 13(3): 3-19. [Korean Literature]
- Kim E, Song W, Lee DK. 2012. Forest fragmentation and its impacts: a review. *Korean Env. Res. Tech.* 15(2): 149-162. [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.
- Lee DK, Song WK, Jeon SW. 2008. Regional ecological network design for wild animals movement using landscape permeability and least-cost path methods in the metropolitan area of Korea. *Korean Env. Res & Reveg. Tech.* 11(3): 94-105. [Korean Literature]
- Li F, Wang R, Paulussen J, Liu X. 2005. Comprehensive concept planning of urban greening based on ecological principles: A case study in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning.* 72(4):324-336.
- McRae BH, Popper K, Jones A, Schindel M, Buttrick S, Hall K, Unnasch RS, Platt J. 2016. Conserving Nature's Stage: Mapping Omnidirectional Connectivity for Resilient Terrestrial Landscapes in the Pacific Northwest. *The Nature Conservancy, Portland Oregon.*
- McRae BH, Dickson BG, Keitt TH, Shah VB. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology.* 89(10): 2712-2724.
- Pelletier D, Clark M, Anderson MG, Rayfield B, Wulder MA, Cardille JA. 2014. Applying circuit theory for corridor expansion and management at regional scales: Tiling, pinch points, and omnidirectional connectivity. *PLoS ONE.* 9(1): E84135.
- Rayfield B, Pelletier D, Dumitru M, Cardille JA, Gonzalez A. 2016. Multipurpose habitat networks for short-range and long-range connectivity: A new method combining graph and circuit connectivity. *Methods in Ecology and Evolution.* 7(2): 222-231.
- Rayfield B, Fortin M, Fall A. 2011. Connectivity

- for conservation: a framework to classify network measures. *Ecology*. 92(4): 847-858.
- Sawyer SC, Epps CW, Brashares JS. 2011. Placing linkages among fragmented habitats: Do least-cost models reflect how animals use landscape? *Journal of Applied Ecology*. 38(3) : 668-678.
- Song W, Kim E, Lee DK. 2012. Measuring connectivity in heterogenous landscapes: a review and application. *J. Korean Env. Res. Tech.* 21(3): 391-407. [Korean Literature]
- Yoon EJ, Song EJ, Jeung YH, Kim EY, Lee DK. 2018. Spatial Decision Support Systems for Development and Conservation of Unexecuted Urban Park using ACO. *J. Korean Env. Res. Tech.* 21(2): 39-51. [Korean Literature]
- Zhang Z, Meerow S, Newell JP, Lindquist M. 2019. Enhancing landscape connectivity through multifunctional green infrastructure corridor modeling and design. *Urban Forestry and Urban Greening*. 38: 305-317.

Appendix

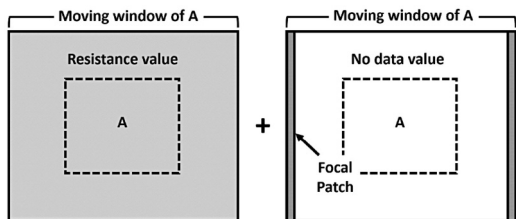
해당 부록에서는 본문 Figure 5에서 제시된 12개 구획(A-L)별 연결성을 무빙윈도우와 씨킷스케이프를 이용하여 분석하는 과정을 설명하였다. 이를 위해 12개의 구획 중 A의 예를 들어, 분석의 각 단계별로 다이어그램을 제시하였다.

① A의 경계 바깥 방향으로 2.5-3km의 버퍼지역을 둠으로써 10-11km 크기의 무빙윈도우를 형성하였다. 이후 씨킷스케이프의 적용단위는 형성된 무빙윈도우와 일치한다.



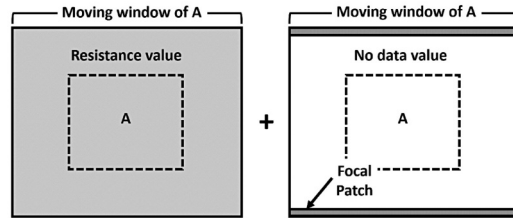
Appendix 1. Created moving window for section A.

② 하나의 무빙윈도우에 대해 씨킷스케이프를 이용하여 동-서 방향 연결성과 남-북 방향 연결성이 각각 평가되었으며, 입력자료는 무빙윈도우 범위에 해당하는 저항값과 목표지역을 설정한 도면 두 가지로 구성된다. 동-서 방향 연결성을 평가하는 경우, 무빙윈도우의 동, 서 방향 약 끝단에 목표지역(focal patch)을 설정하였으며 고유의 아이디(ID)를 부여하였다. 목표지역 외 지역은 구분을 위해 노데이터 값을 할당하였다. 이후 씨킷스케이프를 구동하여 연결성 평가 값을 도출하였다.



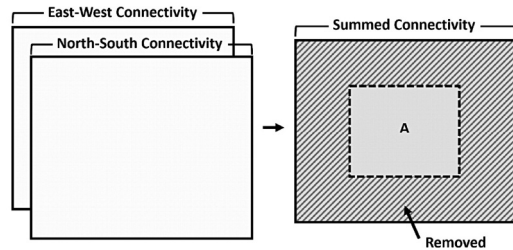
Appendix 2. Input dataset for analyzing East-West connectivity of section A.

③ 남-북 방향 연결성을 평가하는 경우, 무빙윈도우의 남, 북 방향 약 끝단에 목표지역(focal patch)을 설정하였으며 고유의 아이디(ID)를 부여하였다. ②와 마찬가지로 목표지역 외 지역은 노데이터 값을 할당하였다. 이후 씨킷스케이프를 구동하여 연결성 평가 값을 도출하였다.



Appendix 3. Input dataset for analyzing North-South connectivity of section A.

④ 동-서 방향, 남-북 방향 각각에 대해 도출된 연결성 값은 합산되었으며, 이후 버퍼지역은 제거하였다. 다른 구획(B-L)에 대해서도 ①-④의 과정을 반복하였으며, 모자이크하여 하나의 연결성 평가 도면을 작성하였다.



Appendix 4. Final connectivity of Section A.