

그래프이론을 이용한 낙동강 유역의 습지네트워크 구축모델 개발

노백호*

계명대학교 환경계획학과

Development for Wetland Network Model in Nakdong Basin using a Graph Theory

Paikho Rho+

Department of Environmental Planning, Keimyung university

요 약

습지보전계획을 수립하는데 있어 식생의 온전성, 멸종위기종 출현여부 등 대상지역 위주의 습지평가방법에서 점차 주변 지역이나 광역적인 위상관계, 연결성을 고려한 경관생태학적 접근방법에 의한 습지평가 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 낙동강 유역에 분포하는 407개 습지를 대상으로 경관생태학적 접근방법과 그래프이론에 의해 습지생태네트워크 구축모형을 제시하였다. 습지의 물질순환, 철새이동루트 등 현지조사 자료가 부족한 낙동강 유역의 네트워크 분석에는 평면네트워크 그래프 모델을 적용하였으며, 연결성 분석은 임계거리를 15km로 설정하여 습지군집 5개와 핵심습지 4개를 도출하였다. 이진모형과 확률모형에 의한 통합연결성지수와 연결가능성지수를 계산한 결과, 5개 습지군집 및 핵심습지와 취약습지를 검증할 수 있었으며, 낙동강본류와 금호강지류에 위치한 습지군집이 습지생태네트워크에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다. 본 연구를 통해 얻은 낙동강 유역의 습지군집과 네트워크, 취약습지 분포특성은 유역 단위의 습지보전 관리계획 수립, 습지복원사업을 실시하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

핵심용어 : 그래프이론, 낙동강 유역, 습지군집, 습지네트워크

Abstract

Wetland conservation plan has been established to protect ecologically important wetlands based on vegetation integrity, spatial distribution of endangered species, but recently more demands are concentrated on the landscape ecological approaches such as topological relationship, neighboring area, spatial arrangements between wetlands at the broad scale. Landscape ecological analysis and graph theory are conducted to identify spatial characteristics related to core nodes and weak links of wetland networks in Nakdong basin. Regular planar model, which is selected for wetland networks, is applied in the Nakdong basin. The analysis indicates that 5 regional groups and 4 core wetlands are extracted with 15km threshold distance. The IIC and PC values based on the binary and probability models suggest that the wetland group C composed of main stream of Nakdong river and Geumho river is the most important area for wetland network. Wetland conservation plan, restoration projected of damaged and weak links between wetlands should be proposed through evaluating the node, links, and networks from wetlands at the local to the regional scale in Nakdong basin.

Keywords : Graph Theory, Nakdong Basin, Wetland Clustering, Wetland Network

1. 서론

과편화된 서식지의 연결성 회복을 위한 다양한 위계에서의 생태네트워크 구축에 대한 논의가 활발히 이루어지며, 특히 백두대간을 중심으로 한 산림생태네트워크와 4대강 본류와 지천을 연결하는 하천네트워크 구축 및 관리방안이 수립되고 있다(MOE, 2006). 산림, 하천과 더불어 습지의 중요성이 부각되고 있으며, 최근 수립된 제2차 습지보전계획(2013-2017)에서는 동북아시아

및 연안습지에 대한 생태네트워크 구축을 주요 실천과제로 설정하고 있다(MOE, 2013). 국가차원에서의 접근과 더불어 지역이나 도시차원에서도 생태네트워크 구축을 위한 가이드라인이 마련되어 비오름 지도 제작이나 공원녹지계획 수립에 활용하고 있다(Kang and Park, 2011). 산림, 하천에 대한 국가와 지역차원의 생태네트워크 구축방안이 제시되며, 습지생태네트워크 설정 및 보전요구는 늘어나는데 비해 습지생태네트워크 구축을 위한 과학적인 접근방법은 미흡한 실정이다.

+ To whom correspondence should be addressed.
wildlife@kmu.ac.kr

낙동강 유역은 경남지역의 산지습지를 비롯하여 연안 습지, 하천습지, 호소습지, 인공습지 등 다양한 유형이 널리 분포하고 있다. 하천습지는 대부분 낙동강수계를 따라 분포하는데, 낙동강수계는 경사가 완만하고 해발고도가 낮아 하천변에 형성되기 적합한 여건을 지니고 있다(Yi, 2012). 특히 낙동강 중상류에서 분류로 합류하는 남강, 황강, 밀양강 등의 지류를 중심으로 오랜 세월을 거치면서 다양한 배후습지가 발달하였다. 한편 산지습지는 백두대간을 이루는 지리산 권역과 낙동정맥, 낙남정맥에 위치한 천성산, 정족산 등 동부산악지역에 주로 분포하고 있다(NIER, 2008). 연안습지는 남해안 연안에 주로 위치하고 있으나, 수심이 깊고 조차가 적은 동해안 지역으로 인해 낙동강 유역에서의 연안습지 구성비율은 산지습지, 하천습지에 비해 낮은 것으로 나타났다.

생태네트워크 구축은 개발사업으로 단절된 파편화된 서식지를 연결하기 위한 방법으로 도시지역을 중심으로 활발하게 실시되고 있다(Oh et al., 2009). 도로에 의해 단절된 파편화된 서식지 연결을 위한 생태통로 조성사업, 두루미 네트워크 등 철새도래지 네트워크, 백두대간에 따라 훼손된 생태계 복원사업이 대표적인 사례이다. 생태네트워크 중요성이 알려지면서 생태계 보고로 알려진 습지의 구조적, 기능적 연결 필요성이 높아지고 있다(Gu, 2009). 국내에서는 2000년대 중반 이후 야생동물의 서식지 연결성 분석에 그래프이론을 이용하기 시작하였다(Song, 2011). 그래프이론은 생물종이나 생태계 기능에 대한 자료가 충분치 않은 국내 여건에서 개별 습지의 위치와 면적을 이용하여 습지생태네트워크를 구축하는데 유용한 접근방법이다(De Almeida et al., 2007).

환경관리는 점차 보호구역 지정이나 대상지역 조사연구에서 벗어나 습지가 지니고 있는 기능평가, 생태계서비스 유형화 및 생물다양성 유지를 위한 동적 네트워크 보전으로 변화하고 있다(Gu, 2009). 습지는 다른 생태계와 달리 협소한 면적과 전이적 특성으로 외부교란에 취약하기 때문에 습지생태계가 제공하는 기능을 충족시킬 수 있는 핵심습지를 식별하고, 이들 핵심습지와 연계되는 주변습지를 파악하여 습지네트워크를 구축하는 것이 바람직하다. 이에 낙동강 유역에 분포하고 있는 하천습지, 산지습지, 연안습지 등 습지현황을 바탕으로 습지가 제공하는 기능을 충족시킬 수 있는 습지생태네트워크를 구축하여야 한다(NIER, 2008).

습지와 습지간의 상호작용을 고려하여 습지생태계를 연결하기 위한 패치조각 사이의 위상관계와 습지의 공간적 배열을 살펴보기 위한 경관생태학적 접근방법이 증가하고 있다. 전통적인 방법으로는 적절한 습지조각의 패치전략이나 현재의 습지연결성을 평가하는데 어려움이 있었으나, 최근 지리정보시스템과 위성영상자료를 이용한 그래프이론의 적용으로 충분치 않은 현지조사 자료에도 불구하고 주변 토지이용과 습지조각 사이의 위

상관계를 이용한 네트워크 분석이 시도되고 있다(De Almeida et al., 2007). 습지를 중심으로 한 네트워크 분석을 수행하기 위해서는 먼저 흐름, 망, 노드, 위계, 면에 대해 살펴보아야 한다(Haggett, 1965). 습지의 보전가치를 평가하는데 있어 개별습지가 자체적으로 제공하는 역할이나 기능과 함께 대상습지와 주변환경과 어떤 관계를 갖고 있는지 파악하여야 한다. 즉 주변지역의 토지 이용이나 공간배치는 개별습지의 특성이나 역할에 영향을 주고, 또한 개별습지는 주변지역의 생태환경에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 습지보전에 있어 낙동강 유역을 중심으로 습지조사 자료를 이용하여 습지생태네트워크 구축을 위한 2가지 관점을 제시하고자 한다. 첫째, 습지와 습지간의 인접거리, 습지면적에 의한 군집분석을 통해 낙동강 유역의 습지네트워크에 대한 지리적 권역을 구분하고자 한다. 이를 통해 습지의 공간범역을 제시할 수 있으며, 권역별 대표적인 핵심습지를 도출하고, 습지 권역에 따른 특성을 파악할 수 있을 것이다. 둘째, 다양한 인접거리에 따른 연결성 분석을 실시하여 습지생태네트워크를 구축한다. 그래프이론에 의한 네트워크 모델 적용을 통해 핵심노드, 취약한 링크를 규명하고자 한다.

2. 대상지역 및 연구방법

2.1 연구대상지역

낙동강 유역은 낙동강수계를 중심으로 한반도 남동부(동경 127°29' - 129°18', 북위 35°03' - 37°13')에 위치한 우리나라 제2의 하천유역이다. 발원지는 강원도 태백시의 태백산(해발고도 1,549m)이며, 내성천, 감천, 금호강, 황강, 덕천강, 남강 및 밀양강과 차례로 합류한다. 낙동강 유역에는 낙동강을 비롯하여 형산강, 회야수영, 낙동강동해, 낙동강남해 6개 대유역, 33개 중권역, 266개 표준유역으로 구성되었다. 낙동강 유역의 북쪽은 한강유역이 위치하고 있으며, 서쪽으로 금강 및 섬진강유역에 접하고, 동쪽으로 태백산맥이 동해안 유역과 분수령을 형성하고 있다(Fig. 1).

현재까지 파악된 전국에 분포하는 1,160개 습지 가운데 35.1%에 해당하는 407개 습지가 낙동강 유역에 위치하고 있다. 대구에는 달성습지, 안심습지를 비롯한 18개소, 경북지역에는 구미 해평습지 등 167개소가 분포하고 있다. 한편 경남지역에는 창녕 우포늪을 비롯한 213개소로 전국 습지의 약 18.2%가 밀집되어 있다. 부산에는 낙동강 하구습지를 포함한 삼락습지 등 9개소가 있다. 습지유형은 크게 연안형(coastal), 호수형(lacustrine), 소택형(palustrine), 하천형(riverine), 인공형(man-made)으로 구분할 수 있는데, 연안형 습지에는 사구습지, 하구습지 등이 있고, 인공습지에는 농경습지가 포함된다. 낙동강 유

역은 대부분 하천습지로 조사되었으며, 경남지역은 소택형 습지(29개)와 호수형 습지(20개)의 비율이 높은 반면, 경북지역은 인공습지가 상대적으로 많다(Table 1).

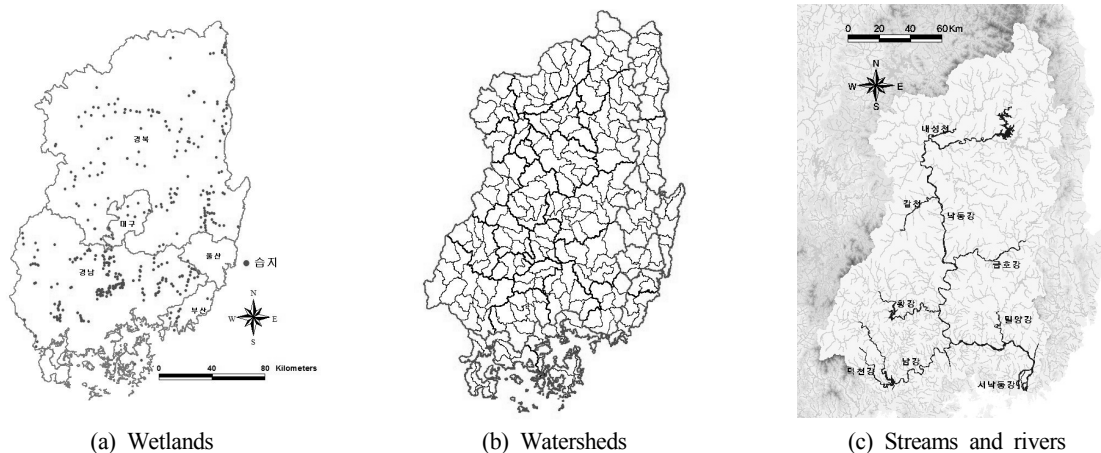


Fig. 1. Wetland, watershed, stream and river distribution in study area

Table 1. Total number of existed wetland patches distributed in each administration area of the Nakdong basin

Area	Sum total	Riverine	Palustrine	Lacustrine	Coastal	Man-made
Nakdong Basin	407	296	38	26	4	43
Area 1: Pusan	9	7	1	0	1	0
Area 2: Gyeongnam	213	158	29	20	1	5
Area 3: Daegu	18	10	1	2	0	5
Area 4: Gyeongbuk	167	121	7	4	2	33

2.2 그래프이론

그래프이론은 점(node)과 선(link)으로 이루어진 집합에서 생물종 이동이나 물질순환을 설명하는데 있어 가장 적은 비용으로 최대의 효과를 나타낼 수 있는 연결망을 구축하는데 사용되었다(Bunn et al., 2000). 이를 통해 도로망과 전산망, 인간관계, 사회조직 등 많은 분야에 적용하고 있으며, 최근 경관생태학이나 보전생물학에서 동물이동경로나 생태계 연결성을 파악하는 방법으로 사용되고 있다. 특히 생물서식지간 거리, 면적, 주변경관과의 투과성 등을 고려하여 단절된 생태계의 연결성을 제고하기 위한 방법론으로 그래프이론의 적용사례가 증가하고 있다(Eros et al., 2012).

Minor and Urban(2008)은 습지, 산림 등으로 이루어진 경관을 표현하는 방법으로 그래프이론을 제시하였으며, 경관은 덩벙이나 다랭이논, 철새도래지와 같은 노드(점)와 이들의 기능적 연결관계를 표현하는 링크(선)로 구성된다. 그래프이론은 단편화된 서식지에서의 생태네트워크, 생태통로 설치 등 자연환경보전계획 수립에 이용되고 있다. 예를 들어, 다른 노드와의 기능적 연결성이 높은 지점은 허브(hub)로 보전하며, 노드가 훼손됨에 따라 전체 네트워크가 단절되는 취약한 지점은 cut-node라 부

른다. 이와 같은 취약지점은 생태네트워크 유지를 위해 훼손되지 않도록 유의하여야 한다(Fig. 2).

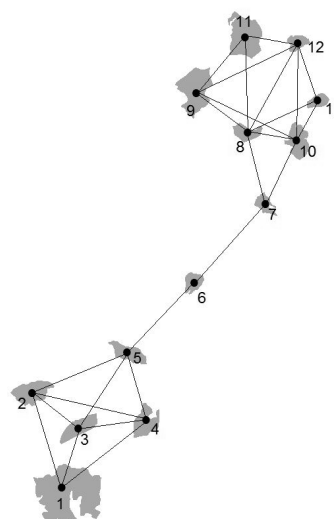


Fig. 2. Landscape representing using a graph-theoretical approach. Habitat patches are represented by nodes(points), and their connections are represented by edges(links). Node 8 is hub connected to many other nodes, and nodes 5, 6, 7 are cut-nodes.

그래프이론은 메타개체군 분석이나 생태네트워크 구축에 있어 다음 4가지 유형으로 구분하여 살펴볼 수 있다(Minor and Urban, 2008). 평면네트워크 그래프는 격자 기반의 자료와 연계하여 네트워크를 구축할 수 있다(Fig. 3, (a)). 무작위 네트워크 그래프는 하나의 노드에서 다른 노드로의 연결 확률이 임의적이기 때문에 노드가 연결되어 있는 이웃 노드의 개수에 있어 차이가 크지 않다(Fig. 3, (b)). 즉 모든 노드가 유사한 정도의 링크를 갖고 있는 경우에 적합한 네트워크 모형이다. 공간축척 별 위계를 고려한 네트워크 그래프는 순환구조없이 노드를 최소한으로 연결한다(Fig. 3, (c)). 따라서 공간축척에 영향을 받지 않는 현상을 도출하고자 할 때 적용할 수 있다. 넷째, 작은 세상 네트워크 그래프는 넓은 지역에 분산되어 있는 여러 개의 노드를 최소 비용으로 연결할 수 있기 때문에 허리케인 등으로 방향 감각을 상실한 길잃은 새, 선박 평행수에 의한 외래종 이동을 설명할 때 유용하다(Fig. 3. (d)).

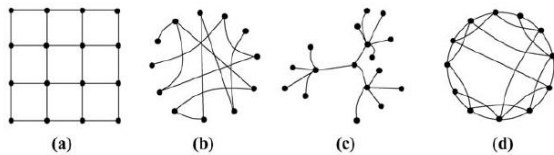


Fig. 3. Network topologies used in wildlife habitat systems are (a) planar, (b) random, (c) scale-free, and (d) small world. Black dots are nodes; lines are links.

노드간 연결성은 구조적 측면과 기능적 측면으로 구분할 수 있다(Song et al., 2012). 노드간 연결성을 계량화하는데 가장 많이 사용되는 지표는 통합연결성지수(Integral Index of Connectivity, IIC)와 연결가능성지수(Probability of Connectivity, PC)이다(Pascual-Hortal and Saura, 2006). 통합연결성지수는 이진모형(binary model)으로 임계거리에 관계없이 대상지역의 노드에서 연결정도를 분석하는 구조적 측면에서 가장 널리 이용되며, 기존의 방법론에 비해 노드간 연결성 분석에 가장 잘 표현하는 방법으로 알려져 있다(Pascual-Hortal and Saura, 2006). 노드 면적을 고려하여 연결성 값을 분석할 수 있는 통합연결성지수는 연결된 개별습지의 면적이 크고, 노드간 거리가 짧을수록 지수 값이 높게 나타난다. 즉 통합연결성지수는 경관수준에서 전체 노드들이 연계되어 있는 연결정도를 의미한다. 한편 기능적 측면을 중시한 연결가능성지수는 확률모형(probability model)으로 최적의 연결확률을 고려하기 위해 임계거리를 감안한 노드간 연결정도를 나타낸다. 연결가능성지수는 0~1사이의 표준화된 점수로 지금까지 제시된 방법론에 비해 공간적 연결구조를 표현하는데 유용하다(Song et al., 2012)

2.3 연구방법

낙동강 유역의 습지생태네트워크를 파악하기 위해 습지별로 멸종위기종 출현, 습지내 식생분포 및 수질환경 등 습지관련 GIS-DB와 고해상도 위성영상(예, Landsat ETM+)을 수집하였다. 해평습지, 달성습지, 우포늪을 비롯한 낙동강 유역의 습지조사보고서와 환경부(국립습지센터)에서 확보한 자료를 비교하여 습지의 면적, 위치 및 특성자료를 추출하였다. 특히 고해상도 위성영상 자료는 습지면적, 경계, 위치, 주변환경 등의 조사자료 정확도를 향상하는데 활용하였다. 연구대상습지의 경관생태특성과 주변지역과의 연결성을 분석하기 위해 습지주변지역의 토지피복지도와 수치지형도(축척: 1/25,000)를 확보하였으며, 습지자료는 제1차 전국내륙습지조사(2000-2005)와 제2차 전국내륙습지조사(2006-2010)를 통해 확보한 낙동강 유역의 습지자료를 이용하였다.

낙동강 유역의 습지네트워크 구축을 위해 습지의 위치 및 면적, 유형 등의 습지특성자료를 수집하고, 습지와 습지간의 인접거리를 그래프 형태로 도식화하였다. 낙동강 유역에 위치한 습지의 연결성 분석은 4가지 형태의 그래프 모델을 이용하여 적용하였다(Minor and Urban, 2008). 본 연구에서는 그래프이론에서 가장 널리 이용되고 있으며, 습지에 대한 조사자료가 충분치 않은 지역에 적용하는데 유용한 평면네트워크 그래프이론을 선택하였다. 이는 습지크기, 서식지 분포 등 면적 기반의 네트워크 분석에 널리 이용되고 있다(De Almeida et al., 2007; Kang and Park, 2011). 즉 임계거리 이내에 분포하고 있는 모든 습지를 동일하게 연결하는 평면네트워크 그래프는 육지까지의 거리를 통한 섬지리생물학설(island biogeography theory)에 의거한 습지면적, 습지간 거리를 중요변수로 선정하여 노드(습지)간 생물종의 이입, 절멸을 설명하는데 효과적이다.

낙동강 유역의 습지특성, 주변 습지와와의 접근성, 습지면적을 이용한 습지네트워크 모형을 구축하였다. 그래프이론을 이용한 습지네트워크 구축을 위해 현지조사 자료를 활용하고, 다양한 형태의 공간그래프 모형을 적용하였다. 대상지역에 분포하고 있는 개별습지의 면적과 공간적 배열을 고려하여 다양한 임계거리(10km, 15km, 20km, 30km)에 따른 습지연결망을 분석하였다. 각 임계거리에 따른 습지의 연결성을 파악하기 위한 링크는 최소비용경로 알고리즘을 사용하였다. 모든 링크가 실제 낙동강 유역에 분포하는 습지연결성을 구성하지 않기 때문에 습지면적, 습지간 거리, 개별습지의 링크수 등을 이용하여 주요 노드를 도출하고, 필요없는 링크는 제거하는 것이 필요하다(Bunn et al., 2000). 습지 전체를 연결하는 완전한 그래프에서 노드를 관통하여 설정된 링크에서 일정거리 이상 떨어진 습지는 네트워크 관점에서 습지의 생태적 특성을 유

지하기 어렵다. 이에 임계거리 이상 떨어진 습지는 해당 링크에서 제외한다. 평면네트워크 그래프 이론의 적용을 위한 프로그램은 Conefor Sensinode 2.2를 이용하였다 (Saura and Torne, 2009).

평면네트워크 그래프를 적용하는데 있어 낙동강 유역에 위치하고 있는 습지분포에 의거하여 군집화를 시도하였다. 도시녹지, 야생동물 서식지 분포 특성을 분석하는데 있어 군집화 분석을 실시하며, 이때 평면네트워크 그래프가 이용되었다(Kang and Park, 2011; Song et al., 2012). 그래프이론에 의한 일정 지역에 밀집된 습지군집을 구성 요소(components)라 부르며, 본 연구에서는 4가지 유형의 임계거리 설정에 따라 습지의 군집화 정도를 비교하였다. 습지의 군집화 면적은 습지면적을 가중치로 계산하여 평균 군집크기를 산출하였다. 앞서 제시한 4가지 임계거리를 적용하여 낙동강 유역에 적합한 습지군집화 분석을 실시하여 허브와 취약 노드를 파악하였다. 평면네트워크 그래프에 의해 도출된 습지군집은 가장 외곽에 위치한 노드를 연결하는 Convex Hull 알고리즘을 적용하여 도면화하였다. 도출된 습지군집에 따라 권역별 습지면적, 습지개수를 계산할 수 있으며, 습지군집별 습지의 연결망, 링크수 등을 분석하여 핵심습지와 취약습지를 제시하였다.

전국내륙습지조사를 통해 습지인벤토리 자료를 확보하고, 토지피복지도(중분류), 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM) 및 수계망도를 중첩하였다. 평면네트워크 그래프 분석을 위해 습지의 면적, 위치, 습지간 거리자료를 이용하여 서식지의 연결성을 평가하는 통합연결성지수와 연결가능성지수를 계산하였다(Pascual-Hortal and Saura, 2006). 낙동강 유역의 습지네트워크 구축을 위한 핵심습지의 중요도를 평가하기 위해서는 이진모형과 확률모형을 적용하는 것이 필요하다. 이에 이진연결방식은 낙동강 유역내 습지를 노드로 설정하여 링크를 연결시킬 때 설정한 임계거리 이내의 습지를 모두 연결하고, 그 이상의 거리를 단절지역으로 인식하여 연결성을 분석하였다. 확률연결방식은 각각의 습지 사이에서 유클리드 거리(Euclidean distance)를 적용하여 최대 연결확률이 있는 경로를 연결성 값으로 부여하였다(Song et al., 2012).

2.4 분석방법의 정확도 및 한계

그래프이론을 사용한 습지네트워크 구축모형은 습지가 제공하는 수자원함양기능, 생물서식기능, 겨울철새의 이동루트 등 현지조사를 통해 검증할 수 있다. 특히 낙동강 유역에 위치한 하천습지와 관련된 낙동강 수계망은 습지가 제공하는 수자원 및 생물이동과 밀접한 관계를 갖고 있다. 이에 따라 그래프이론에 의해 제시된 습지네트워크는 기존의 생태네트워크, 수계망, 철새도래지 등과 비교하여 분석정확도를 높일 수 있다. 예를 들어, 낙동강 유역 내 습지와 습지간의 생물종 이동은 하천과

주변지역의 토지피복지도를 이용한 경관투과성(landscape permeability)를 통해 파악할 수 있다. 즉 경관투과성이 양호한 이동경로는 물새류의 이동경로로 선택될 확률이 높고, 경관투과성이 낮은 지역은 물새류의 이동경로로 선택될 확률이 낮아진다. 이를 통해 경관투과성이 양호한 지역과 습지네트워크 구축결과를 비교하여 본 연구에서 적용한 그래프이론의 활용가능성을 살펴보는 것이 필요하다. 경관투과성 분석은 낙동강 유역의 토지피복지도에서 물새류가 선호하는 자연적 토지피복지역(하천, 습지, 초지, 산림)과 하천변이나 환경사자를 중심으로 추출하고, 이들 경관투과성이 양호한 지역을 선형으로 변환하여 비교할 수 있다.

그래프이론을 이용한 습지네트워크 분석은 습지의 역할이나 기능을 파악하는 것이 선행되어야 한다. 특정 습지에서 제공하는 기능이나 구조적 특성이 주변지역에 위치한 습지분포 및 습지네트워크 위상관계에 의해 평가하는 것은 본 연구에서 제시한 습지네트워크(핵심습지, 취약습지, 습지군집, 링크)를 토대로 도출할 수 있다. 그래프이론에 의한 습지네트워크 구축모형을 제시하는데 있어 현지조사에 의한 습지의 생태적 기능이나 생물종, 서식지 현황과 연계하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구에서는 현지조사에 의한 습지의 구조적 특성이나 생태적 기능에 대한 자료가 부족한 상태에서 습지의 면적이나 위치를 이용하였으며, 도로 및 건물에 의한 단절이나 습지유형(산지, 하천, 호소, 인공습지)에 따른 네트워크 분석을 실시하지 못하였다. 향후 습지특성별 현지조사 자료가 구축된다면 본 연구에서 제시한 네트워크 구축모형을 습지유형별로 구분하여 발전시킬 수 있을 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 습지연결성 분석을 위한 군집구분

낙동강 유역의 습지분포현황과 임계거리를 적용하여 습지군집을 구분하였다. 군집별로 중요지역을 도출하거나 습지간 연결성을 표현한다. 낙동강 유역에 위치하고 있는 407개 습지를 개별습지의 보전가치와 주변과의 연결성 측면을 살펴보기 위해 평면네트워크 그래프 모형에 의한 군집화 분석을 실시하였다(O'Brien et al., 2006). 분석결과, 습지간 임계거리를 통해 12개 군집이 제시되었으나, 이 중 7개 군집은 군집 내 습지가 5개 미만으로 복잡한 습지기능을 창출하기 어렵다고 판단되어 군집구분에서 제외하였다.

연결성 평가에 있어 임계거리 15km를 이용하였으며, 핵심습지의 연결성이 단절된 지역은 습지네트워크 측면에서 복원하거나 새롭게 인공습지를 조성하는데 활용할 수 있다. 군집분석을 통해 낙동강 유역에서 5개 이하의 습지로 이루어진 습지군집을 제외하고, 총 5개 습지군집

을 습지네트워크 구축을 위한 권역으로 추출하였다. 5개 습지군집의 범위는 Kernel 알고리즘에 의해 정규성을 검토하고, 95% 신뢰수준에서 습지군집을 도면화하였다. A 권역은 울진왕피천을 중심으로 한 하구, 연안습지가 위치하고 있으며, B권역은 낙동강 상류지역으로 하천습지가 널리 분포하고 있다. C권역은 낙동강 하구, 우포늪, 달성습지, 해평습지 등 낙동강 본류에 따라 가장 많은 습지가 포함되어 있다. 한편 D권역은 경남지역에 많은 산지습지를 중심으로 형성되었으며, E권역은 남강에 따라 호소습지, 하천습지가 분포하고 있다(Fig. 4).

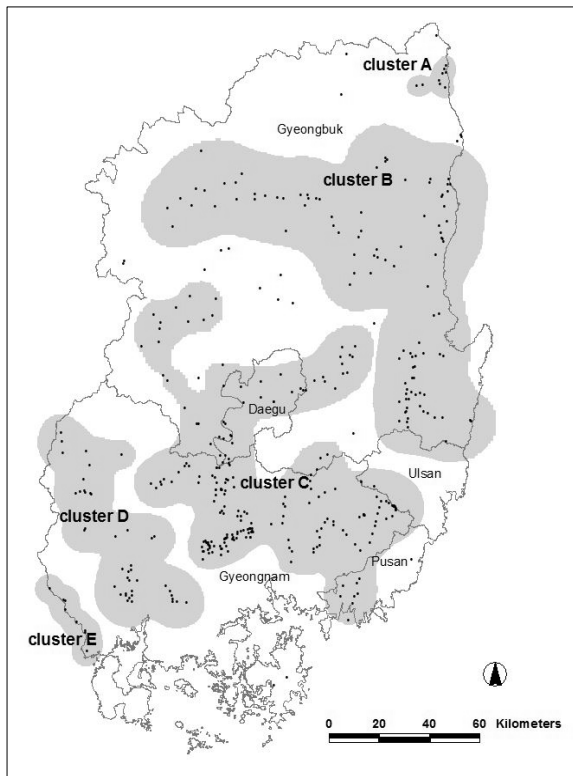


Fig. 4. Wetland complex classified into 5 clusters with 15,000-meters in connectivity analysis

습지네트워크는 위계관계에 따라 국가습지네트워크, 광역습지네트워크, 도시습지네트워크로 분류할 수 있다. 국가차원의 습지네트워크는 습지보전 및 관리정책 시행의 컨트롤타워 역할을 수행하는 환경부 및 국립습지센터를 중심으로 수행하고 있으나, 습지네트워크 구축을 위한 방법론이 확립되지 않은 실정이다. 본 연구에서 제시한 낙동강 유역의 광역습지네트워크는 C권역을 중심으로 한 배후습지, 하천습지, 하구습지와 연계하여 구축할 수 있다. 기존의 한반도 3대 핵심축으로 제시한 백두대간, 비무장지대, 도서연안과 더불어 낙동강 습지생태를 국가차원의 생태축으로 설정하고, 창녕 우포늪, 낙동강 하구, 주남저수지, 해평습지를 연계한 광역습지생태네트워크 구축방법론을 제시할 수 있다.

습지생태네트워크 구축에 있어 습지간 거리, 습지면적 등을 고려한 그래프이론의 도입에 따른 효과에도 불구하고, 식생군락이나 수문환경, 토질 등 습지의 미세서식환경은 네트워크 구축에 매우 중요한 항목이다. 미세환경에 대한 현지조사 자료를 확보하기 어렵거나 습지생태현황을 파악하는데 많은 비용과 시간이 소요될 경우, 습지군집화 분석에 의해 도출된 주요한 습지권역별 대표조사지를 선정한다. 이를 통해 연결성 관점에서의 현지조사가 필요한 적절한 습지유형, 습지위치 등을 제시할 수 있다. 낙동강 유역과 같이 넓은 지역에 대한 습지네트워크를 구축하며, 습지권역별 생태계의 보전 및 연결성을 확보하는데 있어 본 연구에서 제시한 습지군집화 분석은 관리권역별 핵심습지, 취약습지를 도출하며 권역별 조사대상 습지를 선정하는데 활용한다.

3.2 임계거리에 따른 습지네트워크 분석

낙동강 유역에 위치한 407개 습지의 평균면적은 40.9 ha이다. 대부분의 습지(372개, 91%)가 1km² 이하의 소규모 습지로 조사되었으며, 가장 넓은 습지는 34km²인 낙동강 하구습지로 나타났다. 습지는 수생식물을 비롯한 수서곤충, 조류, 포유류 등 이동성 생물의 서식지로 이용되고 있다. 습지환경을 선호하는 생물종들이 습지를 선택하는 과정은 주변 자연지역이나 습지의 특성 등 장기적인 역학관계 조정을 통해 생육지, 집단산란지, 활동지가 결정되며, 정밀조사와 기능평가를 통해 낙동강 하구를 비롯하여 생태적으로 중요한 습지에 대해 습지보전법에 의해 습지보호지역으로 지정하고 있다. 일반적으로 넓은 면적의 습지에서는 생물다양성 부양능력이 높은 것으로 평가되고 있다. 그러나 현재 습지보호지역의 지정이나 습지관리대책을 수립하는데 있어 습지의 생물종 부양능력이나 물질순환에 영향을 주는 주변지역 특성, 특히 주변지역에 위치한 습지와 연결성(링크)에 대해 고려하지 못하고 있는 실정이다.

임계거리에 따라 낙동강 유역에 분포하고 있는 습지의 노드, 링크 등 네트워크 특성을 고찰하였다. 개별습지의 면적이나 인접한 습지와 연결정도를 이용한 핵심습지, 취약습지를 도출하였다. 4가지 임계거리(10km, 15km, 20km, 30km)에 따라 제시된 습지군집, 노드와 링크의 공간 분포특성을 도면화한 결과, 15km 임계거리가 습지의 군집화 및 연결망을 표현하는데 적합한 것으로 나타났다. 낙동강 유역은 5개 습지군집으로 구분할 수 있으며, 각 습지군집에서의 핵심습지와 취약습지는 15km 임계거리를 적용하여 추출하였다. 기존의 습지면적, 식생의 온전성, 멸종위기종 출현여부 등 현지조사를 중심으로 습지건강성을 평가하였으나, 본 연구에서는 조사대상 습지를 둘러싼 주변지역의 습지분포, 연결성을 평가 항목으로 고려하였다.

지수를 통해 습지 연결성을 평가한 결과, 통합연결성 지수(IIC)와 연결가능성지수(PC)는 각각 4.03과 3.90으로 나타났다(Table 2). 통합연결성지수는 15km 이상 떨어진 습지는 단절된 습지로 분석하는 이진모형인 반면 연결가능성지수는 임계거리에 따른 확률분포로 연결성을 평가하기 때문에 통합연결성지수가 높은 연결성을 갖는

것으로 판단된다. 그러나 연결성 지수는 절대적인 수치라기 보다는 상대적인 값이므로 습지네트워크 구축에 있어 신중하게 적용해야 한다(Pascual-Hortal and Saura, 2006). 즉 연결성 분석은 습지간 링크, 주요 습지의 소실에 따른 중요도 변화 등 민감도를 고려하는 것이 필요하다(Song, 2011).

Table 2. The IIC and PC values of wetlands for each threshold distance

Index	10-km distance	15-km distance	20-km distance	30-km distance	Model type
IIC	2.44	4.03	6.23	8.00	Binary model
PC	2.83	3.90	5.08	7.41	Probability model

평면네트워크 그래프를 적용하여 습지의 연결상태, 4개권역내 핵심습지, 취약습지 등 개별 습지의 위상관계를 밝혀낼 수 있다. 주변지역을 고려한 습지관계망 분석은 습지보전계획이나 관리대책, 취약한 노드의 연결성 보완이나 단절된 링크의 복원에 이용할 수 있다. 임계거리내 습지분포를 노드와 링크로 표현하여 분석한다. 예를 들어 분석대상 습지를 중심으로 임계거리 내 위치한 습지분포를 조사하고 연결성을 부여하며, 만일 임계거리내 습지가 없을 경우 해당 습지는 고립된 지역으로 습지네트워크에서 제외된다. 즉 평면 네트워크 그래프 적용에 있어 임계거리를 몇 km로 설정할 것인가?는 낙동강 유역의 습지네트워크 구축에 있어 선행되어야 한다.

본 연구에서 선정된 15km 임계거리는 낙동강 유역의 습지분포특성을 고려한 습지군집의 독립성, 노드 및 관계분석을 통해 이루어졌으나, 습지 기능에 따라 하나의 임계거리로 적용하기 어렵다. 습지의 연결은 습지네트워크에 의한 생물종 이동이나 물질순환 관점에서 측정할 수 있기 때문에 임계거리는 낙동강 유역의 습지기능에 따라 다르게 나타난다(Fig. 5). 15km 임계거리에 의한 네트워크 구축 모형의 민감도를 분석하기 위해 10km, 20km, 30km 임계거리를 적용하였으며, 민감도 분석은 서식지를 비롯한 생태네트워크 구축 모형을 검증하는데 유용한 것으로 밝혀졌다(Song et al., 2012).

습지네트워크 분석에 있어 개별습지에서의 연결성은 습지에서 임계거리내 습지와 연결(링크) 개수로 표현할 수 있다. 일반적으로 링크개수가 증가하면 네트워크 규모나 연결성이 양호하다고 평가할 수 있다. 임계거리 15km에서의 낙동강 유역 습지링크는 총 8,134개로 나타났다. 연구대상습지 가운데 3개 습지는 하나의 링크도 연결되지 않은 고립된 지역으로 확인되었다. 링크 개수가 3개 이하인 취약한 연결(weak link) 습지는 28개로 조사되었고, 50개 이상의 습지와 연결된 습지는 30개로 나타났다. 링크(연결정도)에 의한 핵심습지로는 함안군에 위치한 도흥늪, 미나리늪, 월포늪, 하기늪, 취무늪, 복구

늪, 신대늪, 윤동늪, 구혜늪, 평기늪, 평기2늪, 옥열늪, 입시늪, 은안늪, 법수늪, 옥수늪, 도화늪 18곳이며, 창녕군에는 대곡늪, 박진교습지, 월상늪, 성사습지, 대봉습지, 공영교습지, 월평습지, 신전늪, 번개늪, 장척지 10곳, 의령군에는 장자늪과 악양습지가 있다(Fig. 5).

통합연결성지수는 습지가 생태적 연결성을 측정하는 지표로 0~1까지의 값을 가지며, 연결성 향상에 따라 값이 증가한다. 통합연결성지수는 습지면적을 고려하기 때문에 본 연구대상지와 같이 습지간 면적 차이가 발생할 경우에는 개별습지가 지니고 있는 연결성을 구분하는데 효과적이다. 그래프이론을 이용한 연결성 연구에서의 네트워크 구축은 크게 주성분분석에 의한 습지 패치간 거리와 공간배열을 이용한 접근방법, 서식지 면적을 가중치로 부여하여 연결정도를 측정하는 접근방법으로 구분할 수 있다(Song et al., 2012). 서식지 패치의 면적정보를 포함하고 있는 경우에 활용하는 지표로 연결가능성지수는 면적이 넓으면서 주변 패치와 많은 링크개수를 보유하고 있는 경우에 패치의 연결성을 높게 평가한다. 낙동강 유역에서의 습지 가운데 생물종 공급원 역할을 수행하는 해평습지, 우포늪, 낙동강하구, 감노습지는 패치크기, 연결성 2가지 관점에서 핵심패치로 구분할 수 있다. 즉 넓은 습지면적과 더불어 주변지역의 습지 연결성이 양호한 것으로 확인되었다.

본 연구에서 제시한 통합연결성지수와 연결가능성지수에 의한 핵심습지와 습지가 제공하는 고유기능 즉 습지면적, 습지건강성에 의한 결과를 비교하여 본 연구에서 제시한 평면네트워크 그래프이론에 의한 습지네트워크 구축모형을 검토하였다. 통합연결성지수와 연결가능성지수에 의해 도출된 4개 핵심습지는 기존의 습지평가에서도 감노 습지를 제외하고 양호한 평가를 얻은 것으로 나타났다. 낙동강 하구는 통합연결성지수와 연결가능성지수에 있어 가장 높은 49.16과 43.64로 계산되었으며, 기존 평가에서도 습지보전등급 ‘상’ 그리고 습지면적 3,421ha로 낙동강 유역에서 가장 많은 철새와 도래개체

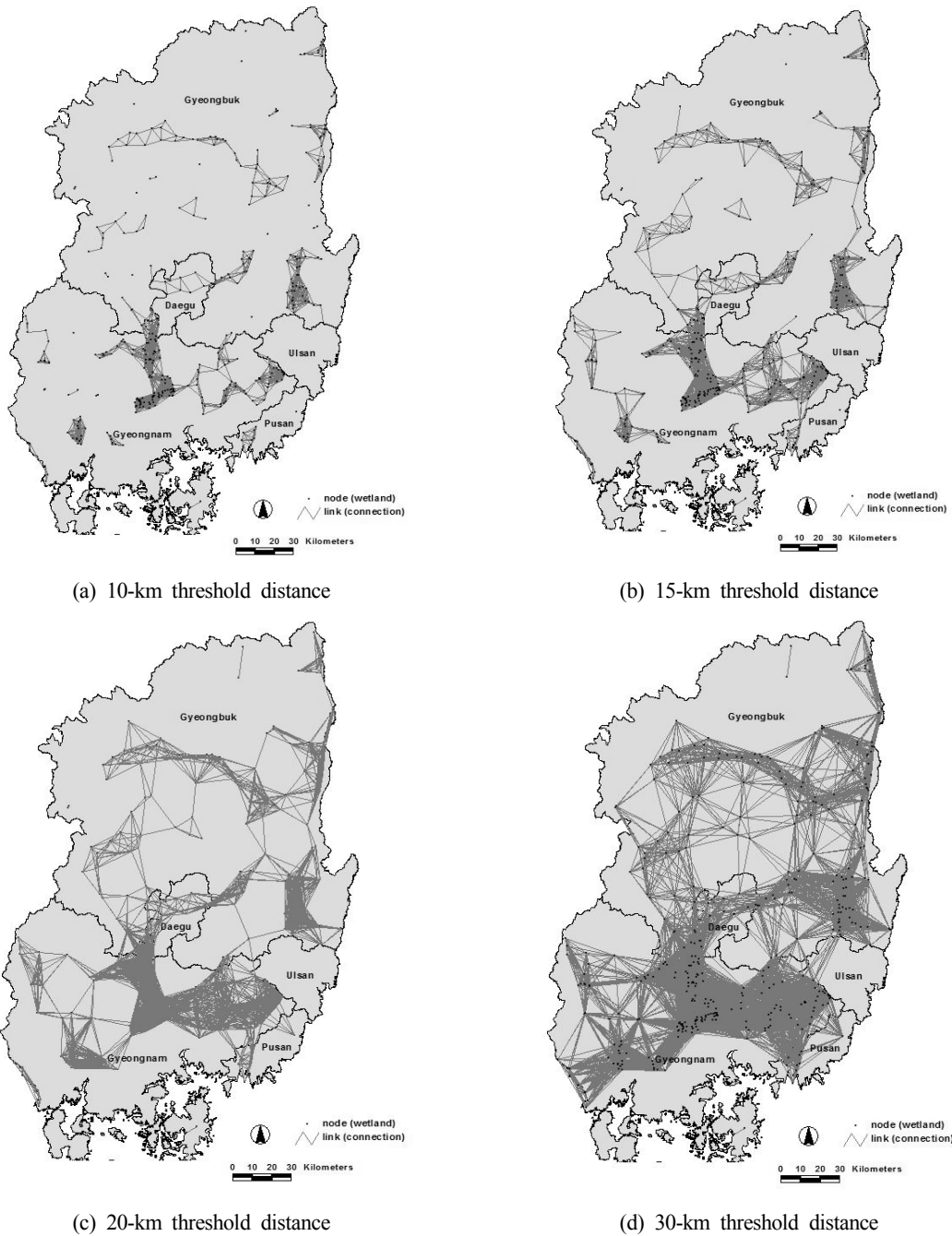


Fig. 5. Node(wetland) and link(connection) with regular graph theory for 407 wetlands distributed in Nakdong basin for 10-km, 15-km, 20-km, and 30-km threshold distances

수를 보이고 있다. 한편 감노습지는 기존 습지평가에서 습지보전등급 ‘하’로 평가되었으나, 습지연결성을 측정하는 통합연결성지수와 연결가능성지수는 높게 산출되었다(Table 3).

낙동강 유역의 습지네트워크 설정 및 핵심습지 선정을 위해 연결성에 의한 5개 습지군집을 구분하고, 연결성지수에 의한 습지네트워크 분석결과를 취합하였다. 연결성지수에 의해 도출된 통합연결성지수와 연결가능성지수에서 높은 값을 보인 4개 핵심습지는 모두 C권역에

해당되며, 낙동강 본류와 금호강 지역에 위치하고 있다. 낙동강 본류의 습지네트워크는 경북 의성에 위치한 단밀습지, 용기습지에서 출발하여 구미 해평습지, 칠곡 낙산습지, 달성 위천늪, 창녕 우포늪, 김해 감노습지를 거쳐 낙동강 하구로 연결된다. 한편 금호강 지역에는 영천 황정습지를 비롯하여 경산 금락습지, 문천지, 대구 금강습지, 팔현습지, 노원습지를 거쳐 달성습지에서 낙동강 본류와 합류한다.

Table 3. Wetland assessment on 4 major sites

Site	Regular network model		Wetland assessment	
	IIC	PC	area	assesment
Nakdong estuary	49.16	43.64	3,421ha	more important
Haepyong wetland	13.16	12.72	1,475ha	more important
Upo wetland	10.32	8.87	854ha	more important
Gamno wetland	7.19	6.37	552ha	less important

낙동강 상류부에 위치한 B권역은 C권역에 비해 상대적으로 핵심습지가 적고 연결성이 낮게 나타났으나, 하천 상류부의 특성과 동해안 지역과 연결되면서 낙동강 유역의 습지네트워크에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다(Fig. 6). 상주의 공검지에서 시작한 B권역은 낙동강 상류부와 반변천, 영덕오십천, 동해안 해안습지, 포항 형산강으로 연결된다. B권역에 위치한 주요 습지의 중요도 평가에서 C권역에 위치한 4개 핵심습지(낙동강하구, 해평습지, 우포늪, 감노습지)에 비해 낮은 것으로 나타났으나, 상주 와룡습지, 안동 구담습지, 안교습지, 검안습지, 포진습지는 통합연결성지수가 1.0 이상의 값을 보이고 있다.

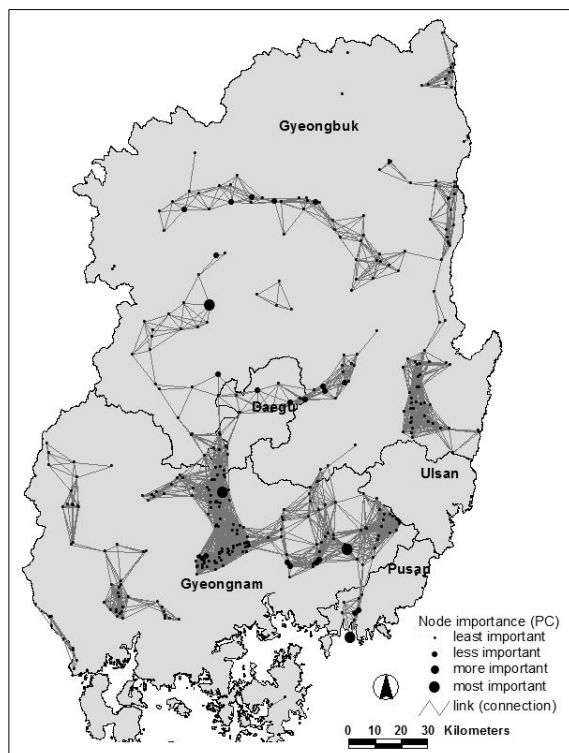


Fig. 6. Node importance calculated into PC along connectivity between wetlands

습지네트워크 구축모델에서 핵심습지 도출과 더불어 취약한 습지의 보전 및 기능강화 방안이 필요하다. 취약 습지는 그래프이론에서 cut-node를 이용하여 도출할 수 있으며, 2개 이상의 습지군집이 연결되는 지점에 주로 분포하고 있다. 즉 해당습지가 훼손될 경우 2개 이상의 습지군집이 더 이상 연결성을 유지할 수 없는 경우이다. 낙동강 유역의 C권역에는 조마습지(김천), 위천늪(대구), 달성습지(대구), 사창하도습지(성주), 회천늪지(고령), 사연습지(밀양), 지산습지(창녕), 마천늪(창녕), 산남습지(창원), 매리습지(김해), 신불산 고산습지(양산), 회산습지(양산), 신덕습지(부산) 등이 습지연결성 측면에서 취약습지로 네트워크 측면에서 관리하는 것이 필요하다. 습지군집 D권역은 주산지(청송), 우곡늪(영덕), 청계저수지 상류부습지(포항), 곡강천 중류부 하상습지(포항), 용천리습지(포항), 안계저수지 상류부습지(경주)가 연결성에 있어 cut-node로 습지네트워크 유지를 위해 보전대책을 마련하여야 한다.

그래프이론을 적용하여 낙동강 유역의 습지네트워크 구축을 위한 군집을 5개 권역으로 구분하고, 구조적 측면과 기능적 측면에서의 대표적인 연결성지수를 이용하여 습지네트워크를 제시하였다. 습지네트워크 구축방법론에 대해 실증적인 자료가 많지 않은 실정에서 그래프이론은 적은 비용과 시간으로 습지연결성 관점에서 습지네트워크를 평가할 수 있으며, 낙동강 유역의 2개 습지권역에 대한 핵심습지와 취약습지를 도출하는 방법에 대해 살펴보았다. 연결성 관점에서 제시된 습지네트워크는 기존의 습지면적, 현지조사 위주의 보전등급평가에서 주변환경, 습지연결성 등을 습지보전가치에 새롭게 반영할 수 있으며, 향후 습지생태네트워크 구축에 있어 기능강화가 필요한 연결지점이나 신규습지 조성지점을 선정하는데 활용할 수 있다. 본 연구에서 분석한 평면네트워크와 함께 향후 무작위, 공간축척에 관계없이 적용할 수 있는 그래프 네트워크 모형을 추가로 개발하여, 습지유형별 습지네트워크 구축모델의 정확도를 높일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 계명대학교 비사연구과제(연구과제번호 2012-82)에 의한 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bunn, A, Urban, D and Keitt, T (2000). Landscape connectivity: a conservation application of graph theory, *J. Environmental Management*, 59(4), pp. 265-278.
- De Almeida, JP, Morley, JG and Dowman, IJ (2007). Graph theory in higher order topographical analysis of urban

- scenes, *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(4), pp. 426-440.
- Eros, T, Olden, JD, Schlick, RS, Schmera, D and Fortin, MJ (2012). Characterizing connectivity relationships in freshwaters using patch-based graphs, *Landscape Ecology*, 27(2), pp. 303-317.
- Gu, BH (2009). *Wetland Ecology*, ELA Publishing Co., Ltd.
- Haggett, P (1965). *Location Analysis in Human Geography*, Edward Arnold Press.
- Kang, WM and Park, CR (2011). Quantitative analysis of Seoul green space network with the application of graph theory, *Korean J. of Environment and Ecology*, 27(3), pp. 412-420. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2006). *The First National Comprehensive Plan for Wetland Conservation*. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2013). *The Second National Comprehensive Plan for Wetland Conservation*. [Korean Literature]
- Minor, ES and Urban, DL (2008). A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning, *Conservation Biology*, 22(2), pp. 297-307.
- National Institute of Environmental Studies (NIER) (2008). *Assessment for Storage Capacity of Riverine Wetlands in the Nakdong River during Flood Event*, Nakdong River Environment Research Center. [Korean Literature]
- O'Brien, D, Manseau, M, Fall, A and Fortin, MJ (2006). Testing the importance of spatial configuration of winter habitat for woodland caribou: An application of graph theory, *Biological Conservation*, 130(1), pp. 70-83.
- Oh, KS, Lee, DW, Jung, SH and Park, CS (2009). A spatial decision support system for establishing urban ecological network: based on the landscape ecology theory, *J. of GIS Association of Korea*, 17(3), pp. 251-259. [Korean Literature]
- Pascual-Hortal, L and Saura, S (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation, *Landscape Ecology*, 21(7), pp. 959-967.
- Saura, S and Torne, J (2009). Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity, *Environmental Modelling and Software*, 24(1), pp. 135-139.
- Song, WK (2011). *Habitat network modeling of leopard cat (Prionailurus bengalensis) based on the spatial graph theory*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University. [Korean Literature]
- Song, WK, Kim, EY and Lee, DK (2012). Measuring connectivity in heterogeneous landscapes: a review and application, *J. of Environmental Impact Assessment*, 21(3), pp. 391-407. [Korean Literature]
- Yi, GC (2012). Development, value and use of wetland inventory, *J. of Wetlands Research*, 14(2), pp. 303-315. [Korean Literature]
- 논문접수일 : 2013년 05월 06일
- 심사의뢰일 : 2013년 05월 07일
- 심사완료일 : 2013년 06월 20일