

낙동강 신규조성 습지의 어류 분포와 종다양성 증진을 위한 관리방안^{1a}

최종윤^{2*} · 김성기² · 박정수² · 김정철^{2,3} · 윤종학²

Fish Distribution and Management Strategy for Improve Biodiversity in Created Wetlands Located at Nakdong River Basin^{1a}

Jong Yun Choi^{2*}, Seong-Ki Kim², Jung-Soo Park², Jeong-Cheol Kim^{2,3}, Jong-Hak Yoon²

요 약

낙동강 유역에 조성된 신규습지에서 서식환경에 대한 어류의 분포 특성을 평가하고, 이를 기반으로 한 관리방안 도출을 위해 42개 습지에서 환경요인의 측정과 어류 조사를 시행하였다. 조사 기간 동안 총 30종의 어류가 출현하였으며, 이 중에서 배스(*Micropterus salmoides*)와 블루길(*Lepomis macrochirus*)과 같은 외래어종의 비율이 상대적으로 높았다. 특히, 밀어(*Rhinogobius brunneus*)나 꼬리(*Opsariichthys uncirostris amurensis*), 피라미(*Zacco platypus*) 등의 어류는 흐름이 있는 환경을 선호하기 때문에 배스가 우점하는 습지(정체수역)에서 상대적으로 낮은 밀도를 가지는 것으로 사료된다. SOM (Self-Organizing Map)을 활용한 패턴분석 결과, 각 습지의 서식환경 특성에 따라 어류 종의 출현빈도가 상이한 것으로 분석되었다. 어류 종의 분포는 각 습지의 수심 변화와 수생식물 피도에 민감하게 영향 받는 것으로 나타났으며, 수온이나 pH, 용존산소 등의 이화학적 요인 변화에 대한 영향은 적었다. 특히 수생식물의 피도는 어류의 종다양성이나 밀도에 강한 영향을 주는 것으로 분석되었으며, 수변식생이 부족한 습지에서는 어류가 적은 풍부도와 다양성을 가지는 것으로 나타났다. 본 연구 결과를 기반으로 평가할 때 어류 등의 생물다양성 증진을 위해 호안사면의 높은 인공성이나 수변식생의 부족한 습지 등은 개선이 필요할 것으로 사료되며, 건강성 확보를 위한 지속가능한 관리방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

주요어: 외래어종, Self-Organizing Map(SOM), 생물다양성, 이화학적 요인, 서식환경

ABSTRACT

This study investigated the environmental factors and fish assemblage in 42 wetlands between spring and autumn of 2017 to evaluate the fish distribution and deduce the management strategy for improving biodiversity in created wetlands located at the Nakdong River basin. The investigation identified a total of 30 fish species and found that the most of wetlands were dominated by exotic fishes such as *Micropterus salmoides* and *Lepomis macrochirus*. Fish species such as *Rhinogobius brunneus*, *Opsariichthys uncirostris amurensis*, *Zacco platypus* were less abundant in the area with high density of *Micropterus salmoides* (static area) because they

1 접수 2018년 4월 2일, 수정 (1차: 2018년 5월 29일), 게재확정 2018년 6월 14일

Received 2 April 2018; Revised (1st: 29 May 2018); Accepted 14 June 2018

2 국립생태원 생태평가연구실, Division of Ecological Assessment, National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 33657, Korea

3 서울시립대학교 공간정보공학과, Department of Geoinformatics, University of Seoul, Seoul, Korea

a 이 논문은 환경부 수탁사업 '낙동강 중·하류지역 생태공간 조사·평가'에 의해 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: jyc311@naver.com

preferred the environment with active water flow. The pattern analysis of fish distribution in each wetland using the self-organizing map (SOM) showed a total of 24 variables (14 fish species and 10 environmental variables). The comparison of variables indicated that the distribution of fish species varied according to water depth and plant cover rate and was less affected by water temperature, pH, and dissolved oxygen. The plant cover rate was strongly associated with high fish density and species diversity. However, wetlands with low plant biomass had diversity and density of fish species. The results showed that the microhabitat structure, created by macrophytes, was an important factor in determining the diversity and abundance of fish communities because the different species compositions of macrophytes supported diverse fish species in these habitats. Based on the results of this study, we conclude that macrophytes are the key components of lentic freshwater ecosystem heterogeneity, and the inclusion of diverse plant species in wetland construction or restoration schemes will result in ecologically healthy food webs.

KEY WORDS : EXOTIC FISH, SELF-ORGANIZING MAP(SOM), BIODIVERSITY, PHYSICO-CHEMICAL FACTORS, INHABITED HABITAT

서론

습지는 수생태계와 육상생태계의 중간적인 특성을 가진 독특한 생태계이다. 수환경과 육상으로부터 다양한 영양분과 먹이원이 집결되며, 수생식물이나 저질 등이 복잡하게 엮여있기 때문에 다양한 서식공간을 제공할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 습지는 전 세계적으로 작은 면적을 차지하지만, 가장 생산성이 높은 생태계로 알려져 있다 (Sutton-Grier and Megonigal, 2011; Zhu *et al.*, 2011). 습지의 높은 생산성으로 인해 다양한 생물들은 습지를 서식처로 활용하며, 이들의 분포나 공존으로 인해 높은 생물다양성을 가진다. 습지가 다양한 생물들이 공존할 수 있는 가장 중요한 요인은 미소서식처가 다양하게 조성되어 있다는 것이다. 수생식물이나 고사된 관목, 저질의 다양성은 다양한 서식공간을 구성하며, 각 생물들의 공간적인 분포를 결정한다 (Stanley *et al.*, 2003). 특히 수생식물은 습지 내에서 가장 풍부할뿐만 아니라 종에 따라 다양한 형태를 가지기 때문에 이들은 구성은 습지 내에서 많은 동물들의 서식처로 활용될 수 있다 (Choi *et al.*, 2014; Kuczyńska-Kippen and Nagengast, 2006). 수생식물의 역할은 다양하게 연구되어 있지만, 가장 중요한 것은 포식자와 피식자의 공존에 기여한다는 것이다. 수생태계의 최상위 포식자인 어류는 수생식물이 풍부한 지역 내에서 제한된 포식활동을 가지며 (Lauridsen and Lodge, 1996; Meerhoff *et al.*, 2007), 이는 피식자의 생존율을 높여 생물다양성을 증진시킬 수 있다 (Manatunge *et al.*, 2000). 전 세계적으로 생물다양성이 높은 것으로 인식되고 있는 습지들은 공통적으로 수생식물이 풍부하다는 특징을 가지며 (Thomaz and Cunha, 2010), 이러한 점을 볼 때 수생식물

은 습지 내 다양한 생물들의 공존에 크게 기여하는 것으로 사료된다. 이러한 중요성으로 인해 생물다양성이 높은 습지를 보호·관리하기 위한 다양한 노력들이 기울여 왔으며, 이 중 국제습지협약(Ramsar Convention on Wetlands)은 현재 160개국이 가입되어 있는 대표적인 습지보호조약이다.

하지만 습지의 생태적 중요성이 인식된 것은 최근이며, 과거에는 쓸모없는 지역으로 인식되어 농지개간이나 제방 건설, 위생 관리 등의 이유로 훼손되거나 개발되어 전 세계적으로 많은 습지가 소멸되었다 (Lehtinen *et al.*, 1999). 특히, 국내에서는 농경사업의 촉진 정책으로 70~80년대에 많은 습지들이 농경지로 전환되었다. 수심이 얇고 평야지대에 주로 분포하여 농경지로의 전환이 용이하기 때문이다 (Verhoeven and Setter, 1989). 최근에는 기후변화와 같은 불가항력에 가까운 교란과 함께 토지이용 변화, 외래종 침입, 경제상황 변화 등 습지의 서식처와 생물다양성이 위협받고 있는 실정이다 (Findlay and Bourdages, 2000; Wood *et al.*, 2003). 그래서 습지를 보존하고 관리하는 문제는 상당한 주의와 노력이 필요하다.

습지의 훼손이나 개발, 오염 등은 서식생물상을 변화시키기에 민감한 교란요인으로 작용하며, 결국에는 생물다양성 감소로 이어진다. 식물이나 플랑크톤 등의 생물군집은 종자 상태로 휴면하거나, 생애 주기가 짧아 회복이 빠르지만 (Allan, 1976) 어류와 같은 대형 동물상의 경우 강한 교란 발생 시 절멸할 위험성이 큰 분류군이다 (Pankhurst and Munday, 2011). 강이나 하천과 같은 환경에서 교란 발생 시 어류는 다른 환경으로 이동이 가능하지만, 습지는 상대적으로 제한된 공간을 가지기 때문에 쉽게 영향 받을 수 있다. 습지의 다양한 교란 발생은 수온이나 용존산소와 같

은 물의 이화학적 요인을 변화시키며, 동시에 어류의 분포 특성을 결정한다. 예를 들어 부영양화된 습지에서는 식물플랑크톤이나 수생식물의 과도한 우점현상은 대기로부터의 용존산소의 유입을 차단하기 때문에 어류와 같은 생물상은 민감하게 영향 받는다(McGlathery, 2001). 이와 같은 어류의 분포 특성을 이용하여 물벼룩 종류들은 어류의 포식을 회피하기 위해 용존산소가 낮은 깊은 수심으로 회피하기도 한다(Forward, 1988). 수온 또한 어류의 분포 특성을 결정짓는 중요한 요인이다. 대부분의 어류는 겨울철에 낮은 수온으로 인한 저하된 대사작용(Metabolic rate)을 가지며, 먹이활동을 낮추고 주로 한 장소에 머무르는 시간을 늘리는 반면 봄부터 가을까지는 부지런한 움직임을 통해 먹이활동을 하고 생식활동을 증가시킨다. 또한, 깊은 호수의 경우 수층에 따라 수온이 다르기 때문에 어류 중에 따라 특정 수층에서 주로 머무르기도 한다(Sodard and Olla, 1996). 그 밖에 민감하지는 않지만, 전기전도도나 탁도 등의 이화학적 요인이 영향을 주기도 하며(Moyle *et al.*, 2003), 물리적인 교란인 강우량의 정도에 따라 동시에 수반되는 유량변화나 급격한 수위 상승 등도 어류의 분포를 결정하는 주요 요인으로 작용한다(Bookhagen and Burbank, 2010).

어류 분포가 수환경의 변화에 민감한 탓에 다양한 환경에서 수환경의 건강성을 평가하는 척도로 어류의 분포나 종조성을 활용하기도 한다. 어류와 같은 생물을 활용한 평가 방법은 수체의 이화학적 특성(Kang *et al.*, 2000) 및 서식지 교란 정도(An *et al.*, 2001, An and Shin, 2005)를 잘 반영할 뿐만 아니라 생물군집 내의 에너지 흐름이나 물질순환 관계(Seong *et al.*, 1997) 등 다양한 요인으로 인한 환경변화를 추정가능하게 할 뿐만 아니라 영향 요인 간의 상호작용이 생물에게 어떻게 영향을 미치는지 추정 가능하다. 이런 장점 때문에 최근에는 하천의 다양한 변화를 잘 표현할 수 있는 지표 생물을 이용한 하천 건강성 평가 방법들이 국내에서 다양하게 시도되고 있다(Park *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2004). 대표적인 모델 기법 중 하나인 IBI(Index of Biological integrity; Karr, 1981)는 어류의 분포나 종조성을 이용하여 수환경의 건강성을 평가하는 기법으로, 1990년 초부터 미국 환경부에서 사용하기 시작하여 현재는 미국 41 권역 수환경 정책반영에 사용되고 있다(US EPA, 2002).

낙동강은 국내에서 2번째로 큰 강으로, 범람이 빈번하고 배수가 좋지 않은 탓에 다양한 형태의 습지가 산재하고 있는 특성을 가진다. 낙동강 유역의 둔치는 2012년에 완료된 4대강 사업으로 인해 자연상태로 방치되거나 불법으로 조성된 경작지 등이 대부분 공원화 되었으며, 이 과정에서 크고 작은 다양한 습지들이 훼손되었다. 이에 대한 대책으로 정부에서는 둔치 내에서 비슷한 면적의 대체습지를 조성하여 습지의 총량을 유지하였으나, 조성 이후 습지들은 지속

적인 토사 퇴적이나 식물의 미약한 천이로 인한 나대지 발생 및 이로 인한 침식 등으로 변화하고 있는 실정이다. 특히 몇몇 습지들은 유입구와 유출구의 기능 부족으로 인한 습지 수위 유지에 어려움을 겪고 있어 습지의 생물다양성이나 교육 등의 다양한 활용을 증진시키기 위한 생물상 조사나 관리 방안 마련이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 환경변화에 민감하고 습지의 건강성을 평가하는 지표 생물인 어류의 분포나 종조성을 조사하고 이를 근거로 한 서식환경이나 관리방안에 대해 고찰하고자 한다. 본 연구 결과는 향후 2012년 조성 이후 방치된 낙동강 둔치 내 습지들을 관리하고 보전하기 위한 기초 자료로서 활용될 것으로 보인다.

연구방법

1. 조사지역 현황

낙동강은 한반도의 동남쪽에 위치하고 있으며, 태백에서 부산까지의 유로 구간을 가지며 국내에서 두 번째로 큰 강이다 (하천길이:521.5 km; 유역면적 23,817km²). 본류와 지류에 위치한 7개의 댐 (안동, 임하, 합천, 남강, 영천, 밀양, 운문댐)과 하구둑, 2012년에 완공된 8개의 보(상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 달성보, 합천창녕보, 창녕함안보)에 의해 강의 흐름이 조절되는 특성을 가진다. 낙동강 유역은 대부분 평야지대로서 범람이 빈번하고 배수가 좋지 않은 특성상 타 지역보다 많은 호소나 습지 등이 분포하고 있다. 특히 낙동강과 남강 합류구간은 우포늪은 포함하여 다양한 크기의 습지가 산재하고 있는 지역으로 알려져 있다(Son and Jeon, 2003). 상류지역부터 집약적인 토지이용과 수자원의 적극적인 이용에 의해 낙동강 하류부는 상당한 부영양화된 영양 상태를 가지며, 여름철 남조류와 겨울철 규조류의 대번성이 매년 관찰되고 있다(Ha *et al.*, 1999).

2009년부터 2012년까지 진행된 4대강사업으로 인해 낙동강 둔치 공간은 재정비되었으며, 이 과정에서 많은 습지가 훼손되거나 사라졌지만 이를 대체할 수 있는 습지를 조성하였다. 낙동강 유역에 조성된 신규조성 대체습지는 총 49개로 한강(22개), 금강(32개), 영산강(44개)보다 많은 수이다. 둔치라는 공간 특성상 제외지와 강 본류의 중간에 위치하고 있으며, 영양염류의 유입이 원활하기 때문에 부영양화되기 쉬운 환경 조건을 가진다. 수심이 얕고 흐름이 거의 없기 때문에 수변부에서 수생식물이 성장하기 좋은 환경이며, 갈대(*Phragmites australis*), 털물참새피(*Picris hieracioides*), 생이가래(*Salvinia natans*), 마름(*Trapa japonica*), 붕어마름

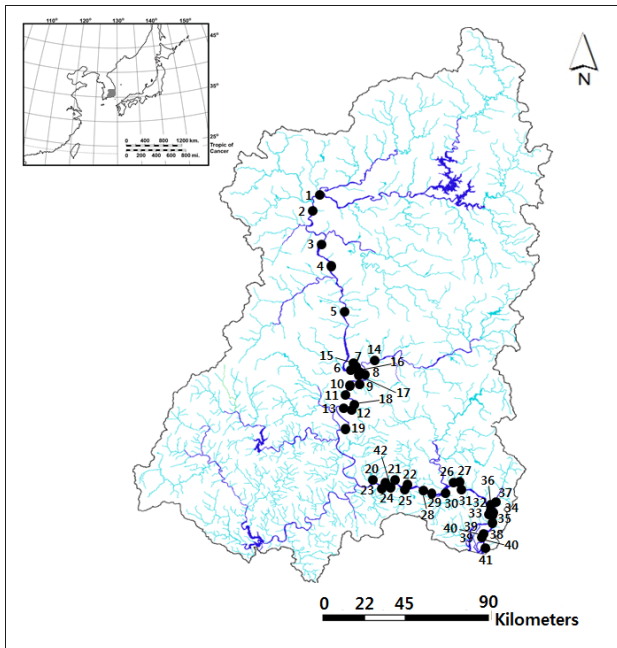


Figure 1. Map showing the study area located at Nakdong River basin.

(*Ceratophyllum demersum*) 등과 같은 식물 종이 풍부한 편이다. 49개 습지 중 7개소는 건전화 및 수원 부족으로 인해 조사를 진행하지 못하고 총 42개의 습지를 대상(Fig. 1)으로 환경 요인 측정 및 어류 채집을 수행하였다.

2. 환경 요인 측정 및 어류 채집

낙동강 유역 둔치에 위치한 42개의 습지에서 이화학적 요인의 측정 및 어류와 수생식물의 채집을 수행하였다. 이화학적 요인의 측정 항목은 수온, 용존산소, 전기전도도, pH, 탁도 등 5개로, 현장에서 측정되었다. 수온과 용존산소는 DO meter를 이용하여 측정하였으며(YSI DO Meter; Model 58), pH와 전기전도도는 각각 pH 측정기(Orion pH Meter; Model 58)와 전기전도도 측정기(Fisher Conductivity meter; Model 152)를 이용하여 측정되었다. 탁도는 각 습지에서 원수 100mL를 채수한 후, 실험실로 운반하여 탁도측정기(Model 100B)를 이용하여 측정되었다. 총질소(Total nitrogen, TN)와 총인(Total Phosphorus, TP) 항목은 Wetzel and Likens (2000)의 방법에 따라 Spectrophotometer를 이용하여 측정되었다. 각 습지의 면적은 토지피복도와 국토지리정보원에서 발행한 1:25000 수치지도와 중첩하여 식생이 현저히 구분되는 구간까지 세부적인 경계를 설정하여 최종면적을 산출하였다. 수생식물의 피도를 측정하기 위해 각 습지에 2~3개의 방형구(0.5×0.5m)를 임의로 설치하였다. 각 방형구

안에 10×10개로 격자를 두어 한 격자 내에 수생식물이 덮이면 1%로 계산하여 최대 100%의 피도를 산출하였다. 이렇게 2~3번 측정된 수생식물의 피도는 습지당 평균을 계산하였다.

어류의 채집은 투망(망목, 7mm × 7mm), 족대(망목, 4mm × 4mm)를 이용하여 약 200~300m의 거리에서 40분간 수행하였다. 투망을 이용한 어류 채집은 약 20회 정도 수행되었으며, 수생식물이 상대적으로 적은 습지에서 주로 이용되었다. 수생식물의 생물량이 높을 경우, 투망 채집 시 수생식물에 걸려 어류를 효율적으로 채집하기에 어려움을 가진다. 족대는 주로 수생식물의 생물량이 높은 습지에서 어류 채집 시 주로 활용되었으며, 약 20회 정도 수행되었다. 채집된 어류는 현장에서 즉시 종 수준으로 동정 후 방류하였다. 현장에서 정확한 동정이 어렵거나, 크기가 작아 동정이 어려운 경우에는 10% 포르말린 용액에 고정하여 실험실에서 자세하게 동정을 수행하였다. 채집된 어류는 Kim and Park(2002) 및 Nelson(1994)의 분류체계를 따라 종 수준으로 동정하였다.

3. Self Organizing Map(SOM) 분석

Self Organizing Map(SOM)은 비지도학습 신경회로망의 인공으로 시공간적인 근접분포를 유형화 및 시각화에 효과적인 분석 방법으로(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003), 본 연구에서는 낙동강 유역에 산재한 42개의 신규조성습지 내 어류의 공간 분포 패턴을 유형화하기 위해 활용되었다. 본 연구에서 SOM 모형의 입력 변수로는 현장조사를 통해 조사된 어류의 종별 개체수와 환경 요인(수온, pH, 용존산소, 전기전도도, 탁도, 총질소, 총인, 수심, 수변부연결성, 면적)을 활용하였다. 전체 어류의 5% 미만으로 출현한 어류 종은 SOM 분석에서 제외되었다. SOM 결과의 해상력 평가를 위해 quantization error와 위상을 평가하기 위한 topographic error의 두 기준을 이용하여 모델을 결정하였으며, 다양한 구조의 SOM 모형을 구축한 뒤 두 error 항이 가장 낮은 값을 보인 구조를 최종적으로 선택하였다(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003). 조사지점을 클러스터링하기 위해서 U-matrix를 이용하였으며, SOM 모형을 구성하는 각각의 node들 간의 유사도를 이용하여 가장 적합한 클러스터를 추출하도록 하였다. SOM모형 구축과 데이터 분석은 Matlab 6.1을 기반으로 이루어졌으며, SOM 모형 구축에 관련된 여러 가지 함수와 기능들은 Matlab 환경에서 구동되는 SOM_PAK(Kohonen, 2013) 툴박스를 활용하였다. 추가적으로, SOM에 의해 분류된 각 클러스터간의 특성을 비교하기 위해 SPSS(ver. 18)을 이용하여 다중비교검증을 분석하였다.

Table 1. Environmental parameters measured at study sites. WT, water temperature; DO, dissolved oxygen; Cond., conductivity; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; CR, plant cover rate. The unit of zooplankton density is ind. L⁻¹.

Number	WT (°C)	pH	DO (%)	Cond. (μS cm ⁻¹)	Turbidity (NTU)	TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	Water depth(m)	CR (%)	area (m ²)
1	29.6	7.9	98	225	9.4	1.43	0.019	1.1	20.5	9,044
2	25.7	7.5	62	243	5.9	1.75	0.024	1.6	48.2	87,400
3	26.9	8.3	71	238	8.8	1.35	0.074	0.7	21.6	8,347
4	24.1	7.6	96	260	16	1.26	0.091	0.5	10.5	87,000
5	23.8	8.5	48	472	9	5.82	0.141	1.2	11.6	23,597
6	26.5	7.7	121	274	9	1.37	0.18	2.4	13.5	11,985
7	29.3	9.1	124	237	24	0.92	0.129	1.5	21.3	45,933
8	25.4	7.8	90	282	21	1.82	0.156	0.3	12.5	10,277
9	27.4	9.7	156	393	8	2.79	0.123	0.5	6.2	171,580
10	28.9	9.9	235	462	31	5.46	0.071	1.6	8.4	28,700
11	27.2	9.7	146	448	21	2.86	0.117	1.3	12.5	50,610
12	29.8	9.2	189	468	44	2.53	0.152	1.1	10.5	54,000
13	28.4	9.4	160	460	36	2.66	0.239	1.6	8.2	301,019
14	19.2	8	80.1	704	3.1	8.069	0.68	0.6	47.2	13,170
15	17.1	7.5	44.4	656	2.5	4.098	0.13	0.3	35.2	10,400
16	18.7	8.3	49.9	433	2	1.555	0.025	0.1	47.2	4,630
17	25.4	9.8	127.7	707	6.5	4.048	0.111	0.4	15.6	643,000
18	23.8	8.4	88.6	1,332	6.7	4.754	0.036	1.4	26.2	15,000
19	20.9	8	65	560	4.2	1.132	0.089	1.7	10.5	75,000
20	21.4	8.2	76.2	439	4	3.707	0.065	1.3	56.1	152,470
21	20.6	8.3	72.8	359	4	5.153	0.104	0.3	13.2	30,903
22	25.1	10	149.6	370	13.1	2.029	0.096	2.4	10.2	390,000
23	22.2	9.2	103.3	470	4.9	1.971	0.038	0.6	48.2	60,456
24	22.8	9	98.3	376	2.8	2.777	0.024	0.7	10.2	426,552
25	21	8.9	89.6	439	1.1	1.589	0.031	0.3	21.5	17,500
26	22.2	9.5	101.7	362	5.1	2.403	0.071	0.5	68.1	55,514
27	23.5	8.4	85.5	350	14.3	1.373	0.042	0.8	84.1	168,486
28	20	8.5	108.7	478	4.3	1.738	0.036	1.8	87.2	124,417
29	20.2	8.2	77.5	455	4.8	1.921	0.032	1.4	69.0	160,853
30	19.3	8.6	83.4	492	1.2	2.876	0.016	0.6	74.1	150,000
31	24.8	9.8	122.4	409	11.4	2.37	0.112	0.3	0	33,700
32	19.8	8.5	84.7	366	3	1.481	0.069	1.5	87.2	188,932
33	19.4	8.1	105.2	425	1.9	2.203	0.118	0.2	3.2	188,932
34	19.5	8.4	81.2	69	9.9	1.481	0.04	1.1	92.2	3,720
35	18.3	7.9	81.2	307	19	1.663	0.061	2.4	97.2	6,880
36	20.4	8.1	102.8	458	10.3	2.278	0.081	1.3	91.2	149,654
37	21.2	7.7	110.1	330	8.5	1.838	0.026	0.7	86.2	147,400
38	19.6	8.1	70.4	471	11.3	2.245	0.082	0.7	83.2	68,579
39	21.4	8.2	71.5	414	3.3	2.802	0.046	1.2	85.9	37,840
40	22.4	8	75.9	406	4.5	2.619	0.031	2.0	83.7	30,003
41	21.5	7.8	67.2	627	3.8	2.104	0.095	1.1	80.5	137,800
42	19.4	9.2	132	377	22.6	2.63	0.119	1.9	7.3	10,000
Average	22.9	8.5	100.1	431	10.4	2.59	0.096	1.1		104,554

*Water chemical variables were measured on a single point during the survey at the each study site.

결과 및 고찰

1. 낙동강 신규조성 습지의 서식환경

조사 기간 동안, 각 습지에서 측정된 환경 요인은 상이한 것으로 나타났다(Table 1). 수온은 17.1~29.8℃의 범위를 보였으며, 12(29.8℃), 1(29.6℃), 7(29.3℃)번 등의 습지에서 가장 높은 수온 값이 측정되었다. 일반적으로, 수온은 면적이 작은 습지에서 높은 경향을 가지며, 이는 면적이 작을수록 대기 온도에 쉽게 영향받기 때문이다. 본 연구에서도 면적이 큰 습지에서 상대적으로 낮은 수온 값이 관찰되었다. 용존산소는 44.4~189%의 범위로서 습지간 편차가 비교적 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 수표면에서 수생식물의 높은 밀도는 대기 중의 산소가 물 안으로 유입되는 것을 차단하기 때문에, 물 안으로 유입되는 용존산소의 농도를 감소시킬 수 있다. 더욱이 저층에서 발생하는 분해작용에 상당히 많은 양의 산소가 소모되는 것 또한 습지에서의 낮은 산소 농도에 크게 기여한다(Brinson *et al.*, 1981). 그러나 본 연구에서 조사된 대부분의 습지에서는 높은 식물 피도에도 불구하고 용존산소의 농도가 높은 것으로 나타났다. 이들 습지에서는 대부분 갈대나 부들, 털물참새피 등의 정수식물에 의해 우점하였으며, 그 외 부유식물이나 침수식물 등의 식생은 상대적으로 적어 수표면을 통한 대기와의 상호작용을 완벽하게 차단하지 않는 것으로 사료되었다. 전기전도도는 69~1,332 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 범위였으며, 이는 일반적으로 하천의 상류구간에서 약 10~50 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이며, 중하류에 위치한 하천이 300~1,000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 범위를 가지는 점을 감안할 때 비슷한 수준의 값을 보인 것으로 사료된다. 일반적으로 수체 내 전기전도도 값은 주변 토지로부터 유입된 영양염류의 종류와 특성에 따라 달라지며, 주변 농경지에서 비료 등의 사용은 전기전도도 차이를 발생시키는 중요한 요인으로 작용한다(Niehoff *et al.*, 2002). 총인(TN)과 총질소(TP)는 각각 1.26~8.07 mg L^{-1} 와 0.01~0.68 mg L^{-1} 로 나타났으며, 전기전도도와 비슷하게 주변 토지 이용에 따라 차이를 보인다. 총인과 총질소와 같은 영양염류는 수생식물의 성장과 발달을 결정짓는 중요한 요인으로 작용한다. 수생식물의 종다양성이나 천이 등은 수중 내 물리적인 서식처 구조에 중요한 역할을 하며, 이는 결국에는 수서생물의 종다양성을 결정한다(Burks *et al.*, 2002). pH는 7.5~9.9의 범위로서 대체적으로 중성의 값이 관찰되었다. pH는 일반적으로 탄소나 산소의 농도와 밀접하게 연관되는 것으로 알려져 있으며, 용존산소 값이 낮을수록 pH 값은 산성에 가깝다(Wetzel and Likens, 2000). 탁도는 1.1~44NTU의 범위로

관찰되었으며, 습지에 따라 상이한 값이 관찰되었다. 탁도는 강우량 등의 물리적인 요인과 밀접한 상관성을 가지며, 강우량이 집중되는 시기에 탁도 값이 높은 것이 일반적이다(Jeong *et al.*, 2001). 그러나, 봄철에는 강우량 등의 물리적인 요인이 거의 발생되지 않으며, 식물플랑크톤 또한 상대적으로 안정된 환경을 가질 수 있다. 탁도의 경우, 부유물질 뿐만 아니라 식물플랑크톤의 양 등에 의해서 영향 받을 수 있지만, 수생식물이 우점된 습지의 경우 수생식물과 타감작용 등의 상호작용을 통해 식물플랑크톤이 감소하며, 이는 탁도 감소로 이어질 수 있다(van Donk and van de Bund, 2002).

2. 어류 분포 특성

조사 기간 동안, 어류는 총 10과 30종이 출현하였으며, 총 2,201개체가 채집되었다(Table 2). 과별 출현 개체수 비율은 잉어과(Cyprinidae) 어류가 다른 분류군에 비해 우세하게 분포하는 것으로 확인되었으며(약 49.9%), 이는 국내에 서식이 확인된 담수 어류 중 잉어과 어류가 다른 분류군에 비해 다양하게 분포하는 특성과 일치한다(Kim and Park, 2002). 그 외 검정우럭과(Centrarchidae)가 40.2%, 망둑어과(Gobiidae) 7.1%, 동사리과(Odontobutidae) 1.6% 등의 순으로 나타났으며, 송사리과(Adrianichthyoidae), 미꾸리과(Cobitidae), 가물치과(Channidae), 동자개과(Bagridae), 메기과(Siluridae), 드렁허리과(Synbranchidae) 등은 1% 미만의 출현율을 보였다. 블루길(*Lepomis macrochirus*)과 배스(*Micropterus salmoides*)는 각각 447와 438개체로 조사된 습지들에서 가장 우점하는 종으로 확인되었으며, 그 다음으로는 붕어(*Carassius auratus*)가 총 404개체로 많은 개체수가 출현하였다. 그 밖에 피라미(*Zacco platypus*)와 민물검정망둑(*Tridentiger brevispinis*) 또한 각각 135와 141개체로 빈번한 출현 양상을 나타냈다. 가장 많은 어류 개체수가 채집된 습지는 25번과 29번으로 총 186과 177개체로 조사되었다(Fig. 2a). 29번 습지는 블루길이 150개체로 다소 높은 우점률을 나타낸 반면, 25번 습지는 대체로 다양한 종(11종)이 비슷한 비율로 분포하는 것이 확인되었다. 그러나 2번, 8번, 24번에서 어류는 종다양성은 높은 반면(10종), 개체수는 적은 것으로 조사되었다.

조사된 습지 내에서 블루길(*Lepomis macrochirus*)과 배스(*Micropterus salmoides*)와 같은 외래어종의 출현 비율은 상당히 높은 것으로 조사되었으며, 개체수는 습지에 따라 상이하였다(Fig. 2b). 낙동강의 상류부터 하류까지의 외래어종 분포 양상을 살펴보면, 배스는 주로 상·중류에 많이 분포하였으나, 블루길은 주로 하류구간에서 높은 출현 양상을 나타냈다. 이와 같은 분포 양상은 블루길과 배스의 서식

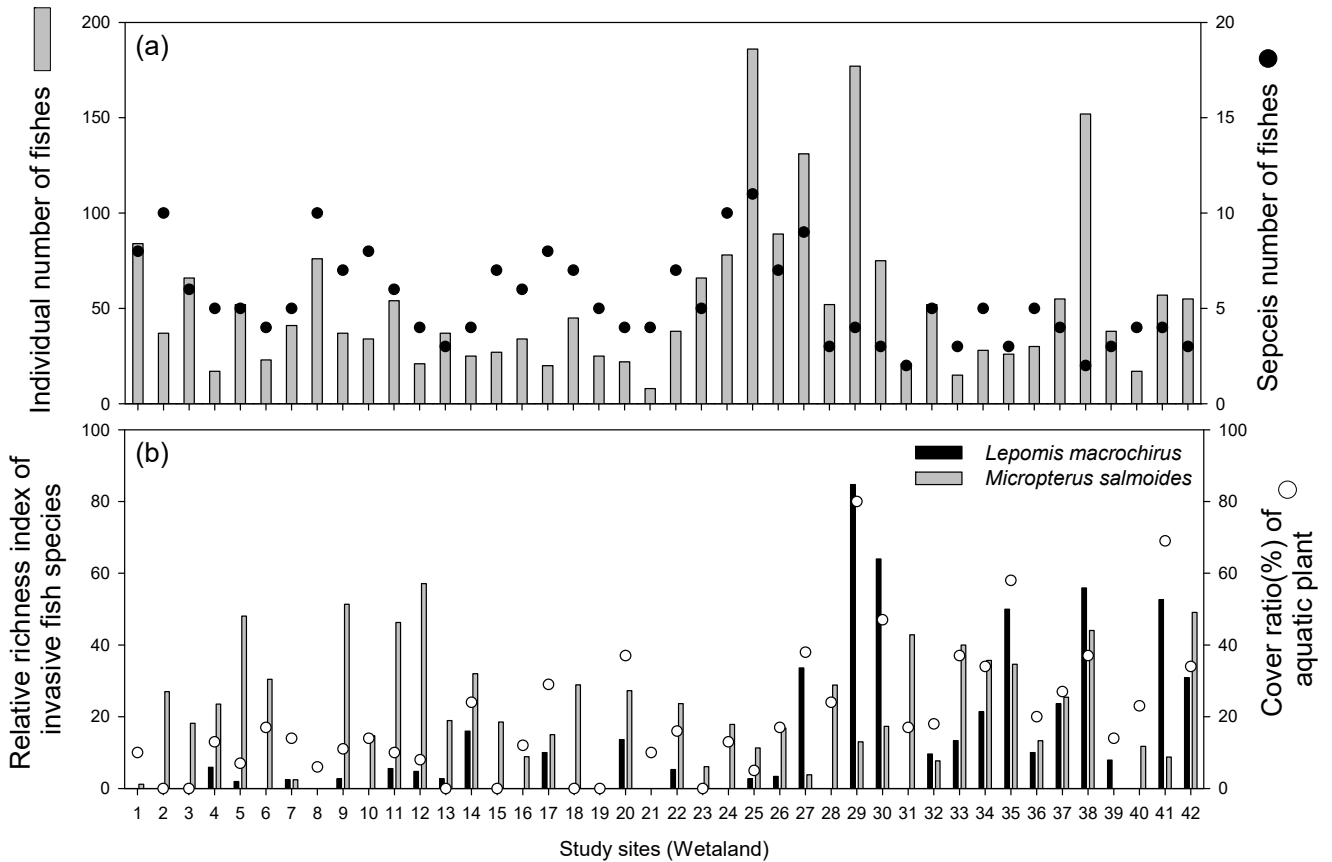


Figure 2. Fish distribution and relative richness index of invasive fish species from each site. Individual number and species number of fishes(a), relative richness index of invasive fish and cover ratio(%) of aquatic plant (*Lepomis macrochirus* and *micropterus slamoides*)(b)

처 선호성 혹은 먹이원 소비 성향에 따른 차이 등으로 사료된다. 블루길은 주로 지각류나 요각류 등의 갑각류를 먹이원으로 활용하는 반면, 배스는 전형적인 육식성의 성향으로 치어나 큰 수서곤충을 선호하여 두 종간에 뚜렷한 차이를 보인다(Azuma and Motomura, 1998). 지각류나 요각류 등은 식물플랑크톤을 섭식하기 때문에 부영양화된 수역에서 주로 서식하며(Zöllner *et al.*, 2003), 강의 상류보다는 하류 구간에서 밀도가 높은 것이 일반적이다. 낙동강에서도 주로 물금이나 낙동강 하구역과 같은 하류부에서 높은 출현 비율과 개체수가 파악되고 있다(Kim and Joo, 2000). 담수생태계 내에서 지각류나 요각류 등은 어류의 주요 먹이원으로 작용하기 때문에 수생식물을 피난처로서 적극 활용하는 것으로 알려져 있다(Burks *et al.*, 2002; Kuczyńska-Kippen and Nagengast, 2006). 수생식물의 줄기나 뿌리 등에 은닉한 개체는 어류와 같은 포식자에게서 살아남을 확률을 높일 수 있다. 수생식물의 이러한 피난처 효과는 피식자의 개체군 유지나 성장에 기여하며, 포식자에게는 먹이를 지속적

로 유지할 수 있게 한다. 그러나 블루길은 어느 정도의 수생식물 피도 내에서도 포식활동에 장애 받지 않는 것으로 알려져 있다(Paukert and Willis, 2002). Crowder and Cooper (1982)는 수생식물의 밀도가 중간정도일 때에는 블루길이 수생식물 내에 서식하며 지각류나 요각류 등에 대해서 활발한 포식활동을 수행할 수 있다고 하였다. 본 연구에서 블루길이 상대적으로 수생식물이 풍부한 습지에서 출현비율이 높은 것은 이들의 서식이나 먹이원 섭식 등이 안정적으로 유지된다는 것을 증명한다. 이와 반대로 수생식물의 풍부한 지역 내에서 배스는 상대적으로 낮은 분포를 가진다. 배스는 블루길의 치어까지 섭식할 정도로 국내 담수생태계에서 강력한 포식자로 작용하지만, 수생식물 내에 은닉한 피식자를 섭식하기는 어려운 것으로 알려져 있다(Valley and Bremigan, 2002). 그래서 낙동강 상류부에서는 낮은 수생식물의 피도, 부족한 먹이원, 배스의 우점 등으로 인해 블루길이 서식하기에 적당하지 않지만, 하류부에 수변식생이 발달한 습지에서는 충분한 서식공간이 제공되기 때문에 블루

Table 3. Characteristics of each cluster assumed based on the distribution patterns of input variables and number of study sites in each of clusters. Abbreviations for each input variable can be found in Table 1. WT, water temperature; DO, dissolved oxygen; Cond., Conductivity; Tur., turbidity; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus; WD, water depth; CR, plant cover rate.

Clusters	High Factors		Cluster characteristics	Site number
	Environmental parameters	fish species		
Cluster 1	Area, CR	<i>Carassius Carassius</i> , <i>Rhinogobius brunneus</i> , <i>Pseudorasbora parva</i> , <i>Lepomis macrochirus</i>	The sites with deep water depth and diverse macrophytes. The highest fish species was observed in this cluster.	15
Cluster 2	Cond., TN, TP	<i>Erythroculter erythropterus</i> , <i>Hemiculter eigenmanni</i>	The highest TP and TN were observed in this cluster. Species number of fish was lower than those in the other clusters.	8
Cluster 3	WT, WD	<i>Pseudogobio esocinus</i> , <i>Zacco platypus</i> ,	The highest water depth was observed in this cluster. The species number of fish was lowest in this cluster.	7
Cluster 4	WT, pH, DO, Tur., Area	<i>Micropterus salmoides</i> , <i>Tridentiger brevispinis</i>	The sites with open area, some emergent plants, or without macrophytes(indicated as 'absence'), resulting in a very cover rate of macrophytes. The sites belonging to this cluster were dominated by <i>Micropterus salmoides</i> and <i>Tridentiger brevispinis</i> .	12

Table 4. Data configuration for the self-organizing map and input variable means for each of the clusters.

Variables	Mean	SD	Clusters				F	P
			1	2	3	4		
Water temperature(°C)	22.9	3.5	20.7	20.2	26.7	25.4	21.162	.000
pH	8.54	0.73	8.3	8.3	8.4	9.0	3.362	.029
Dissolved oxygen(%)	100.1	38.3	86.1	78.8	98.9	132.4	5.904	.002
Conductivity(μS cm ⁻¹)	431.0	191.4	401.6	482.7	465.1	413.4	0.402	.752
Turbidity(NTU)	10.4	9.7	7.0	3.2	10.0	19.8	9.402	.000
Total nitrogen(mg L ⁻¹)	2.6	1.5	2.0	3.7	2.2	2.8	2.761	.055
Total phosphorus(mg L ⁻¹)	0.009	0.1	0.05	0.1	0.08	0.1	2.106	.116
Water depth(m)	1.0	0.6	0.5	0.3	0.5	0.6	3.371	.028
Plant cover rate(%)	41.1	33.2	79.4	32.6	23.8	9.0	55.828	.000
Area(m ²)	104,554.4	131,173.8	96,505	110,939	117,244	102,957	0.044	.987
<i>Acheilognathus macropterus</i>	0.5	1.7	0.5	0.4	-	0.8	0.367	.777
<i>Carassius auratus</i>	9.6	11.8	15.6	2.8	7.4	8.0	2.581	.068
<i>Rhinogobius brunneus</i>	0.3	1.5	-	-	1.6	0.3	2.229	.101
<i>Erythroculter erythropterus</i>	1.9	6.8	0.3	6.9	-	1.9	2.017	.128
<i>Hemibarbus labeo</i>	1.6	4.3	-	1.8	6.7	0.4	5.947	.002
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	1.4	3.0	2.0	2.6	2.8	0.5	1.357	.271
<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	0.9	2.8	-	5.6	2.1	0.3	3.454	.026
<i>Pseudogobio esocinus</i>	0.4	1.1	-	0.3	1.9	-	9.268	.000
<i>Pseudorasbora parva</i>	2.0	4.2	5.0	0.3	-	0.8	5.083	.005
<i>Zacco platypus</i>	3.2	7.6	2.5	4.6	8.6	-	2.156	.109
<i>Lepomis macrochirus</i>	10.6	27.4	27.2	1.1	0.43	2.3	3.317	.030
<i>Micropterus salmoides</i>	10.4	11.5	13.8	5.3	6.7	11.8	1.290	.292
<i>Tridentiger brevispinis</i>	3.4	1.5	1.2	-	4.1	7.8	3.745	.019
<i>Odontobutis interrupta</i>	0.5	2.3	1.1	0.1	-	0.1	0.609	.613

The unit of zooplankton density is ind.L⁻¹. The significant differences between clusters were based on One-way ANOVA analysis. SD, standard deviation ; F, false value; P, probability value; NTU, Nephelometric Turbidity unit.

길이 높은 풍부도로 분포할 수 있다. 개방수역의 비율이 높으면 배스의 밀도가 상대적으로 높으며, 수생식물의 습지 내에서 전체적으로 우점하면 블루길의 출현이 더 많은 것으

로 보인다.

낙동강 둔치 내 위치한 습지들의 환경 요인과 어류의 공간적인 분포 양상을 유형화하기 위해 SOM 분석을 수행한

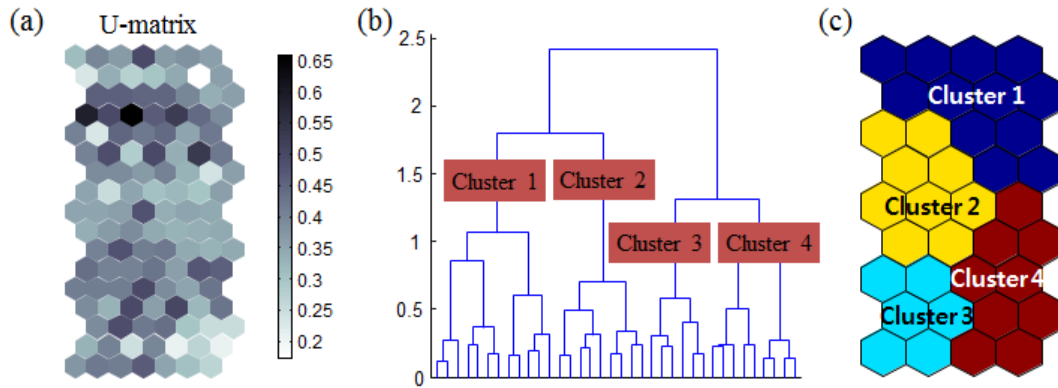


Figure 3. Clustering through data learning by the self-organizing map. (a): U-matrix (b): clustering result, and (c): hierarchical dendrogram.

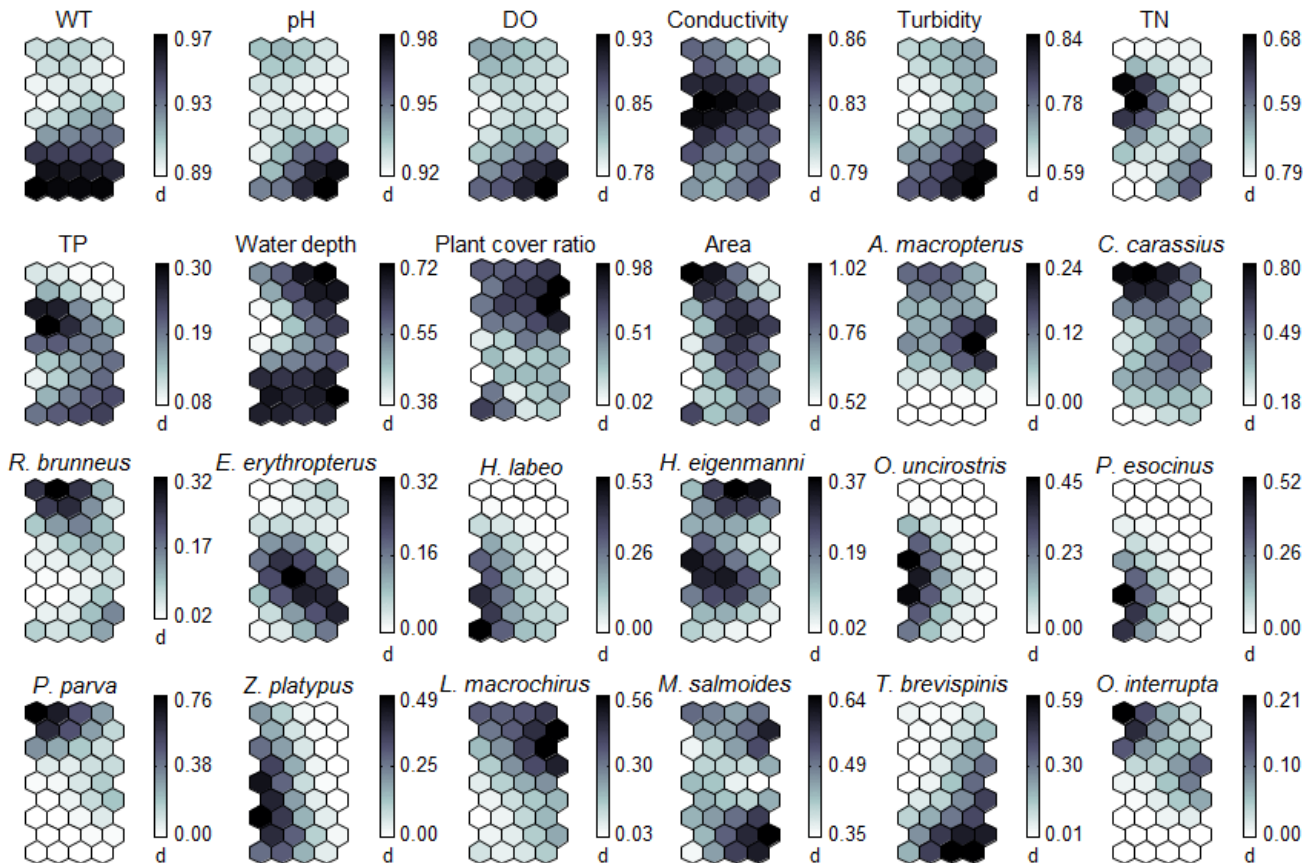


Figure 4. Component map of 6 environmental variables, 8 aquatic macrophytes, and 3 animal groups. Each band shows the individual number, transformed by natural logarithm. WT, water temperature; DO, dissolved oxygen; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus.

결과, 4x9 구조에서 최적화되었으며, 총 4개의 클러스터로 구분되었다(Quantization error, 0.68; Topographic error, 0.03; $n=42$; Fig. 3). 4개의 클러스터는 계층적 군집 분석의 계통수의 차이성에 기반하여 구분되었으며, 이들 클러스터 간에는 통계적으로 유의한 차이가 있었다(MANOVA, $p<0.05$; Fig. 4). SOM 분석 결과는 기존에 알려졌던 어류의 서식처 특성이 잘 반영되어 나타났다(Table 3, 4). 클러스터 1은 상단부에서 가장 높게 나타났으며, 여기에 속한 습지들의 환경 특성은 수심이 깊고, 수생식물이 풍부하며 면적이 큰 것으로 나타났다. 클러스터 1에 속한 습지들에서는 붕어, 밀어, 치리, 참붕어, 블루길, 얼룩동사리 등의 어류가 주로 출현하였으며, 대부분은 밀양에서 부산 구간으로 하류에 위치하였다. 클러스터 1에 속한 습지들은 유형화된 4개의 클러스터 중 가장 많은 15개의 습지를 포함하고 있었으며, 가장 다양한 어류가 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 이들 습지들은 면적이 넓고, 단순하지만 정수식물이 상대적으로 풍부하여 다양한 어류가 분포하기에 적당한 서식 공간을 제공한 것으로 사료된다. 수생식물에 의해 조성된 서식 공간은 배스와 같은 포식자를 회피할 수 있는 피난처를 제공할 수 있으며, 동물플랑크톤 등의 먹이원이 다양한 특성을 가진다(Cattaneo *et al.*, 1998; Burks *et al.*, 2002; Castro *et al.*, 2007). 다양한 형태를 가진 수생식물 종이 함께 구성될수록 복잡한 구조를 가질 수 있으며, 포식자의 회피 효과 또한 뛰어난 것으로 알려져 있다(Warfe and Barmuta, 2004). 그러나 수생식물이 복잡하게 구성될수록 어류의 포식 활동 또한 제한될 수 있다(Crowder and Cooper, 1982). 그래서 수생식물 내에서 서식하는 어류들은 수생식물의 잎이나 줄기에 부착된 미생물이나 식물의 종자 등에 대해 함께 섭식하는 잡식성의 형태를 가진 종이 많다(Pelicice *et al.*, 2005). 전술하였듯이, 예외적으로 블루길은 수생식물의 높은 풍부도에서도 활발한 포식활동을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다. 낙동강 둔치에 위치한 신규조성습지들은 수심이 깊고, 탁도가 높아 정수식물 외 침수식물이나 부유식물 등의 복잡한 형태를 가진 수생식물이 성장하기 어려운 환경이며, 주로 갈대나 털물참새피와 같은 정수식물에 의해 우점된다. 정수식물은 수생식물 중에서 상대적으로 단순한 형태를 가지기 때문에 동물플랑크톤 등에 서식처로서의 효율성은 낮은 편이다. 클러스터 1에 속한 일부 습지에서는 배스의 개체수가 높은 것으로 나타나며, 이는 식생대와 함께 개방수역의 비율 또한 높아 배스가 서식하기 적당한 환경을 제공하기 때문인 것으로 사료된다. Cardinale *et al.*(1998)는 육식성 어류들은 수변식생대에서 포식활동이 제한되므로 수변식생대의 경계면을 배회하는 특성을 가지는데 이는 수변식생대를 벗어난 개체들을 포식하기 위함이라고 제안하였다. 이를 볼 때 배스는 비록 수변식생대에서 효율적인 먹이 활

동이 어렵지만, 수변식생대를 벗어난 개체들을 포식하며 서식이 가능한 것으로 사료된다. 클러스터 2는 SOM MAP 내 왼쪽 중단부에 위치하고 있으며, 총인(TP)이나 총질소(TN)가 높은 부영양화된 습지가 속해 있다. 영양염류의 농도가 높기 때문에 전기기전도 항목 또한 높게 분포하며, 수심이 상대적으로 얇은 특징도 겸하고 있다. 치리, 꼬리, 피라미 등이 높게 분포하며, 배스나 블루길과 같은 외래어종의 출현비율을 낮은 편이다. 이들 습지들은 주로 금호강 유역에 조성된 습지들이며, 고립되거나 수원이 부족한 특성을 가지기 때문에 어류 종이 적고 개체수가 낮은 특성을 가진다. 또한 치리, 꼬리, 피라미 등의 어류들은 배스의 포식압에 취약하므로 배스의 밀도가 상대적으로 적은 클러스터 2에 속한 습지들에서 유지되고 있는 것으로 사료된다. 또한 치리, 꼬리, 피라미 등은 우수성 어종으로 정체수역인 습지에서 낮은 밀도를 가지기도 한다. 클러스터 3은 왼쪽 하단부에 위치하고 있으며, 수온이 높고 수심이 깊으며, 일부 수생식물이 풍부한 특성을 가진다. 이 클러스터에 속한 습지들은 대부분 낙동강의 상류에 위치하고 있으며, 수변부 연결성이 뛰어나 강 분류와의 상호작용이 활발한 것으로 추정된다. 주로 모래로 구성된 하상을 가지며, 누치나 모래무지와 같은 어류가 주로 출현하는 것으로 나타났다. 이는 본류에 서식하는 종이 유입된 것으로 사료된다. 누치와 모래무지는 모래 하상을 서식처로서 선호하며, 하상 내 모래 사이에 있는 곤충이나 미생물 등을 서식하는 것으로 알려져 있다(Suzuki, 1964). 클러스터 4는 오른쪽 하단부에 위치하고 있으며, pH, 용존산소, 탁도 등이 높은 습지들로 구성되어 있다. 습지의 위치는 상류부터 하류까지 다양하게 구성되어 있으며, 배스의 밀도가 상당히 높은 탓에 민물검정망둑이나 강준치 외 다른 어류의 출현비율은 상당히 낮은 편이다. 배스는 용존산소가 높은 곳을 선호하며, 탁도가 어느 정도 있는 습지나 하천에서 높은 특성을 가진다. 또한 클러스터 4에 속한 습지들의 면적이 크기 않은 탓에 배스의 포식활동의 영향으로 다른 어류들의 분포는 매우 낮은 것으로 사료된다. 민물검정망둑은 다 자라도 10cm 정도의 몸길이로 작은 편이며, 주로 저서생활을 하기 때문에 배스에 의한 포식이 적다. 강준치는 대형급의 회유어로 크기는 1m가 넘기 때문에 배스가 포식하기에 적당하지 않다. 그래서 이들 2종은 배스와 공존하는 것이 가능한 탓에 유일하게 공존하고 있는 것으로 사료된다. 그러나 이들 습지에서 어류의 종다양성이 상대적으로 낮은 것은 높은 탁도인 탓도 있을 것으로 보인다. 점토나 유기물의 증가로 인한 탁도 발생은 어류의 호흡을 저해할 수 있기 때문에 이들의 분포를 낮출 수 있다(Cyrus and Blaber, 1992). 그러나 본 연구에서 SOM 결과는 상대적으로 적은 변수를 대상으로 어류 분포와의 관계를 분석하였기 때문에, 다양한 기존 논문에서 제시되었던 정보

와 상충될 수도 있다.

3. 어류 서식을 기반으로 한 신규조성습지 관리 방안

낙동강 둔치 내 조성된 신규습지에서 분포하는 어류종은 총 30종으로 낙동강 상류(42종)와 하구역(30종, Kwak and Huh, 2003)의 출현종과 비슷한 수준이었다. 둔치 내 신규조성습지들이 대부분 낙동강 본류 쪽으로 유입·유출구를 가진다는 점을 감안하면 습지에서 분포하는 어류종은 본류에서 유래된 것으로 보인다. 습지의 조성 당시에는 습지의 수량 유지를 위해 낙동강 본류와 연결성을 확보하였으나, 조성 이후 호안사면의 지속적인 침식이나 수생식물의 밀생 등으로 인해 유입구의 기능이 상실된 습지가 대부분이었다. 낙동강 둔치 내에 조성된 신규습지는 총 49개소로 조사 결과 7개의 습지는 수원 확보가 어려워 연중 건조화되어 육상화가 진행 중이었다. 조사된 42개 습지 또한 본류에서 수원이 유입되기는 하였으나 대부분 우수습지의 성향을 가지며 지하수나 지표수, 배후 하천 유입수 등을 통해 수량이 유지되었다. 일반적으로 닫혀진 시스템(Closed system)에서 생물상은 경쟁이 가속화되기 때문에 서식환경에 우세한 종이 주로 분포하는 것을 감안하면, 신규조성습지들에서 배스와 블루길과 같은 외래어종의 우점은 생물다양성을 낮추는 요인이 될 수 있다. 또한 유입구의 기능 저하는 습지의 통수가 어렵기 때문에 습지 내부생산물이나 외부물질에 의한 오염이 가속화되는 요인이기도 하다. 특히 본 연구에서 클러스터 2에 속한 8개의 습지들이 총인이나 총질소와 같은 영양염류가 높은 것은 유입구와 유출구의 기능 상실로 인해 습지가 폐쇄된 계를 이루기 때문인 것으로 사료된다. 클러스터 2에 속한 습지에서는 치리나 끄리와 같은 종들이 출현하기는 하였으나 상대적으로 낮은 밀도를 가졌다. 따라서 이들 습지에서 어류의 종 다양성을 높이고 외래어종의 우점 비율을 낮추기 위해서는 유입구와 유출구의 개선을 통해 습지의 통수단면의 확보가 필요하다고 사료된다.

일부 습지의 탁도가 높은 것 또한 어류의 분포를 저해하는 것으로 보인다. 클러스터 4에서 일부 탁도가 높은 습지에서는 주로 배스와 민물검정망둑만이 출현하는 것으로 나타났다. 이들 습지에서 상대적으로 종 다양성은 적은 것은 배스의 포식성향도 기여하겠지만, 높은 탁도로 인한 호흡을 방해하는 요인도 있을 것으로 사료된다. 일부 습지들에서 탁도가 높은 것은 호안사면의 경사가 높거나 식생활착이 부족한 내대지의 비율이 높아 물과 접하는 부분이 지속적으로 침식되기 때문이다. 따라서 사면 경사의 완만한 조정이나 식생메트릭스 등 친환경 소재의 호안공법을 활용하여 자연성을 높여줄 필요가 있다.

수생식물의 식재 또한 신규조성습지에서 어류의 생물다

양성을 높이는 중요한 요인일 수 있다. 앞에서 전술하였지만, 수생식물은 피식자를 위한 피난처를 제공하므로써 포식자의 과도한 포식활동을 제한할 수 있다(Cazzanelli *et al.*, 2008). 낙동강 상류에 위치한 습지 대부분은 호안사면의 인공화가 높아 식생활착이 부족하여 수변식생대가 매우 적은 특징을 가진다. 또한 일부 습지들은 외래식물(털물참새피 등)의 과도한 우점으로 상대적으로 단순한 서식처 구조가 형성되기도 하였다(Michelan *et al.*, 2010). 수생식물의 부족이나 단일 종의 우점은 다양한 구조를 가진 미소서식처를 조성하지 못하기 때문에 다양한 어류 종의 서식을 제한할 수 있다(Croft and Chow-Fraser, 2007). 또한 어류의 먹이가 되는 동물플랑크톤이나 무척추동물은 수생식물의 줄기나 뿌리 표면을 부착할 수 있는 기질 표면을 활용하는 특성 탓에 수생식물의 낮은 밀도는 어류 먹이원의 감소로 이어질 수 있다. 신규습지의 조성 당시 부들이나 털물참새피, 억새, 갈대, 부레옥잠 등의 수생식물을 식재하여 자연성을 높이고자 하였으나, 이들 식물들은 경관적인 효과는 높을 수 있지만 생물다양성적인 측면은 낮은 것으로 사료된다. 수생식물의 서식 형태 중 정수식물(emergent plant)은 침수식물이나 부유식물보다 상대적으로 단순한 형태를 가진다. 침수식물(submerged plant)은 잎과 줄기의 모양이 이질적인 구조를 가져 이들의 군락은 상대적으로 복잡한 구조를 구성할 수 있지만, 물에 침수되어 분포하는 탓에 경관적인 효과는 떨어진다. 습지의 복원이나 신규 조성 시 식물의 식재는 수질 정화, 서식처 제공 등 다양한 기능을 고려하였으나, 주로 경관적인 측면에서 초점이 맞추어져 왔다. 주로 털물참새피나 부들, 갈대 등이 신규조성 습지에서 주로 식재된 것은 바로 이 때문이다. 습지의 건강성을 유지하고 생태교육 학습장으로서 활용 등의 측면을 증진시키기 위해서는 어류 등의 다양한 생물들의 서식 공간 마련이 요구된다. 그러나 단순한 서식처는 포식이나 경쟁 등 생물 관계를 가속화시켜 생물다양성 감소로 이어질 수 있다. 경관적인 측면도 중요하지만 다양한 서식처 조성 등 생물학적 측면도 습지의 지속가능성을 위해 중요한 요인이 될 수 있다. 추후 본 연구의 결과를 기반으로 하여 낙동강을 포함한 4대강 둔치에 조성된 습지의 수문현황이나 서식처 특성 등을 면밀하게 평가하고 생물다양성 증진을 위한 효율적인 관리방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Allan, J.D.(1976) Life history patterns in zooplankton. *Am. Nat.* 110(971): 165-180.
An, K.G., D.H. Yeom and S.K. Sung(2001) Rapid Bioassessments

- of Kap Stream using the index of biological integrity. Korean J. Environ. Biol. 19: 261-269. (in Korean with English abstract)
- An, K.G. and S.I. Shin(2005) Influence of the asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream. Korean J. Limnol. 38: 54-62. (in Korean with English abstract)
- Azuma, M. and Y. Motomura(1998) Feeding habits of largemouth bass in a non-native environment: the case of a small lake with bluegill in Japan. Environ. Biol. Fishes 52: 379-389.
- Bookhagen, B. and D.W. Burbank(2010). Toward a complete Himalayan hydrological budget: Spatiotemporal distribution of snowmelt and rainfall and their impact on river discharge. J. Geophys. Res. Earth Surf. 115(F3).
- Brinson, M.M., A.E. Lugo and S. Brown(1981) Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. Annu. Rev. Ecol. Syst. 12: 123-161.
- Burks, R.L., D.M. Lodge, E. Jeppesen and T.L. Lauridsen(2002) Diel horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral. Freshwater Biol. 47: 343-365.
- Cardinale, B.J., V.J. Brady and T.M. Burton(1998) Changes in the abundance and diversity of coastal wetland fauna from the open water/macrophyte edge towards shore. Wetl. Ecol. Manag. 6: 59-68.
- Castro, B.B., S.M. Marques and F. Gonçalves(2007) Habitat selection and diel distribution of the crustacean zooplankton from a shallow Mediterranean lake during the turbid and clear water phases. Freshwater Biol. 52: 421-433.
- Cattaneo, A., G. Galanti and S. Gentinetta(1998) Epiphytic algae and macroinvertebrates on submerged and floating-leaved macrophytes in an Italian lake. Freshwater Biol. 39(4): 725-740.
- Cazzanelli, M., T.P. Warming and K.S. Christoffersen(2008) Emergent and floating-leaved macrophytes as refuge for zooplankton in a eutrophic temperate lake without submerged vegetation. Hydrobiologia 605: 113-122.
- Choi, C.M., Y.K. Park and S.G. Moon(2004) Water quality assessment using the periphyton on the artificial substrates in Dae Stream, Busan. Korean J. Environ. Biol. 22: 242-245. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, S.K. Kim and G.J. Joo(2014) Sustainment of epiphytic microinvertebrate assemblage in relation with different aquatic plant microhabitats in freshwater wetlands(South Korea). Korean J. Limnol. 73: 11-16.
- Croft, M.V. and P. Chow-Fraser(2007) Use and development of the wetland macrophyte index to detect water quality impairment in fish habitat of Great Lakes coastal marshes. J. Great Lakes Res. 33: 172-197.
- Crowder, L.B. and W.E. Cooper(1982) Habitat structural complexity and the interaction between bluegills and their prey. Ecology 63: 1802-1813.
- Cyrus, D.P. and S.J.M. Blaber(1992) Turbidity and salinity in a tropical northern Australian estuary and their influence on fish distribution. Estuar. Coast. Shelf Sci. 35: 545-563.
- Findlay, C.S. and J. Bourdages(2000) Response time of wetland biodiversity to road construction on adjacent lands. Conserv. Biol. 14: 86-94.
- Forward, R.B.(1988) Diel vertical migration: zooplankton photobiology and behaviour. Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev. 26: 1-393.
- Ha, K., E.A. Cho, H.W. Kim and G.J. Joo(1999) Microcystis bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: importance of hydrodynamics and nutrient loading. Mar. Freshw. Res. 50: 89-94.
- Jeong, K.S., G.J. Joo, H.W. Kim, K. Ha and F. Recknagel(2001) Prediction and elucidation of phytoplankton dynamics in the Nakdong River (Korea) by means of a recurrent artificial neural network. Ecol. Model. 146: 115-129.
- Kang, C.M., S.M. Lee, J.S. Um, J.H. Lee, H.W. Lee and C.P. Hong(2000) The Study on water quality and phytoplankton flora at 3 rivers in the Taejon city. KSET 9: 275-284. (in Korean with English abstract)
- Karr, J.R.(1981) Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries 6: 21-27.
- Kim, H.W. and G.J. Joo(2000) The longitudinal distribution and community dynamics of zooplankton in a regulated large river: a case study of the Nakdong River (Korea). Hydrobiologia 438: 171-184.
- Kim, I.S. and J.Y. Park(2002) Freshwater fishes of Korea. Kyo-Hak Publishing Co. Seoul. (in Korean)
- Kohonen, T.(2001) Self-organizing Maps. Springer, Berlin.
- Kohonen, T.(2013) Essentials of the self-organizing map. Neural Networks 37: 52-65.
- Kuczyńska-Kippen, N.M. and B. Nagengast(2006) The influence of the spatial structure of hydromacrophytes and differentiating habitat on the structure of rotifer and cladoceran communities. Hydrobiologia 559: 203-212.
- Kwak, S.N. and S.H. Huh(2003) Changes in species composition of fishes in the Nakdong River Estuary. Korean J. Fish. Aquat. Sci. 36: 129-135. (in Korean with English abstract)
- Lauridsen, T.L. and D.M. Lodge(1996) Avoidance by *Daphnia magna* of fish and macrophytes: chemical cues and predator-mediated use of macrophyte habitat. Limnol. Oceanogr. 41: 794-798.
- Lehtinen, R.M., S.M. Galatowitsch and J.R. Tester(1999) Consequences of habitat loss and fragmentation for wetland amphibian assemblages. Wetlands 19: 1-12.
- Manatunge, J., T. Aseada and T. Priyadarshana(2000) The influence of structural complexity on fish-zooplankton interactions: A

- study using artificial submerged macrophytes. *Environ. Biol. Fishes* 58: 425-438.
- McGlathery, K.J.(2001) Macroalgal blooms contribute to the decline of seagrass in nutrient-enriched coastal waters. *J. Phycol.* 37: 453-456.
- Meerhoff, M., C. Iglesias, F.T. De Mello, J.M. Clemente, E. Jensen, T.L. Lauridsen and E. Jeppesen(2007) Effects of habitat complexity on community structure and predator avoidance behaviour of littoral zooplankton in temperate versus subtropical shallow lakes. *Freshwater Biol.* 52: 1009-1021.
- Michelan, T.S., S. Thomaz, R.P. Mormul and P. Carvalho(2010) Effects of an exotic invasive macrophyte (tropical signalgrass) on native plant community composition, species richness and functional diversity. *Freshwater Biol.* 55: 1315-1326.
- Moyle, P.B., P.K. Crain, K. Whitener and J.F. Mount(2003) Alien fishes in natural streams: fish distribution, assemblage structure, and conservation in the Cosumnes River, California, USA. *Environ. Biol. Fishes* 68: 143-162.
- Nelson, J.S.(1994) *Fishes of the World*(3rd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Niehoff, D., U. Fritsch and A. Bronstert(2002) Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *J. Hydrol.* 267: 80-93.
- Pankhurst, N.W. and P.L. Munday(2011) Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Mar. Freshw. Res.* 62: 1015-1026.
- Park, J.W., M.K. Hwang, S.J. Aw, S.S. Choi and P.R. Chung(2001) Biological evaluation of water quality and community structure of benthic macroinvertebrates in the Pyungchang River water system, Gangwon-do. *Korean J. Environ. Biol.* 19: 119-128. (in Korean with English abstract)
- Park, Y.S., R. Céréghino, A. Compin and S. Lek(2003) Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecol. Modell.* 160: 165-280.
- Paukert, C.P. and D.W. Willis(2002) Seasonal and diel habitat selection by bluegills in a shallow natural lake. *Trans. Am. Fish. Soc.* 131: 1131-1139.
- Pelicice, F.M., A.A. Agostinho and S.M. Thomaz(2005). Fish assemblages associated with *Egeria* in a tropical reservoir: investigating the effects of plant biomass and diel period. *Acta Oecol.* 27: 9-16.
- Seong, C.N., K.S. Baik, J.H. Choi, H.W. Cho and J.H. Kim(1997) Water quality and fish community in streamlets of Juam Reservoir. *Korean J. Limnol.* 30:107-118. (in Korean with English abstract)
- Sodard, S.M. and B.L. Olla(1996) Food deprivation affects vertical distribution and activity of a marine fish in a thermal gradient: potential energy-conserving mechanisms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 43-55.
- Son, M.W. and Y.G. Jeon(2003) Physical geographical characteristics of natural wetlands on the downstream reach of Nakdong River. *JKARG* 9: 66-76.
- Stanley, E.H., M.D. Johnson and A.K. Ward(2003) Evaluating the influence of macrophytes on algal and bacterial production in multiple habitats of a freshwater wetland. *Limnol. Oceanogr.* 48: 1101-1111.
- Sutton-Grier, A.E. and J.P. Megonigal(2011) Plant species traits regulate methane production in freshwater wetland soils. *Soil Biol. Biochem.* 43: 413-420.
- Suzuki, R.(1964) Hybridization experiments in cyprinid fishes. VII. Reciprocal crosses between *Pseudogobio esocinus* and *Biwia zezera*. *JPN J. Ichthyol.* 12: 18-22.
- Thomaz, S.M. and E.R.D. Cunha(2010) The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnol. Bras.* 22: 218-236.
- US EPA(2002) Summary of biological assessment programs and biocriteria development for states, tribes, territories, and interstate commissions: streams and wadable rivers. EPA-822-R-02-048. U.S. EPA, USA.
- Valley, R.D. and M.T. Bremigan(2002). Effects of macrophyte bed architecture on largemouth bass foraging: implications of exotic macrophyte invasions. *Trans. Am. Fish. Soc.* 131: 234-244.
- van Donk, E. and W.J. van de Bund(2002) Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto-and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms. *Aquat. Bot.* 72: 261-274.
- Verhoeven, J.T.A. and T.L. Setter(1989) Agricultural use of wetlands: opportunities and limitations. *Ann. Bot.* 105: 155-163.
- Warfe, D.M. and L.A. Barmuta(2004) Habitat structural complexity mediates the foraging success of multiple predator species. *Oecologia* 141(1): 171-178.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens(2000) *Limnological analyses*. Springer, New York, 429pp.
- Wood, P.J., M.T. Greenwood and M.D. Agnew(2003) Pond biodiversity and habitat loss in the UK. *Area* 35: 206-216.
- Zhu, G.B., S.Y. Wang, X.J. Feng, G.N. Fan, M.S.M. Jetten and C.Q. Yin(2011) Anammox bacterial abundance, biodiversity and activity in a constructed wetland. *Environ. Sci. Technol.* 45: 9951-9958.
- Zöllner, E., B. Santer, M. Boersma, H.G. Hoppe and K. Jürgens(2003) Cascading predation effects of *Daphnia* and copepods on microbial food web components. *Freshwater Biol.* 48: 2174-2193.