

낙동강 유역권 내 정수생태계의 동물플랑크톤 군집 동태^{1a}

김성기² · 홍동균² · 강미아³ · 이경락⁴ · 이학영⁵ · 주기재² · 최종윤^{6*}

Zooplankton Community Dynamic in Lentic Freshwater Ecosystems in the Nakdong River Basin^{1a}

Seong-Ki Kim², Dong-gyun Hong², MeeA Kang³, Kyung-Lak Lee⁴, Hak Young Lee⁵, Gea-Jae Joo², Jong-Yun Choi^{6*}

요 약

낙동강 수계의 20개 저수지 및 습지에서 환경요인에 대한 동물플랑크톤 군집의 영향을 평가하기 위해 계절별 조사를 수행하였으며 다양한 환경 요인에 대한 동물플랑크톤의 영향을 효과적으로 분석하기 위해 Self-Organizing Map(SOM) 분석을 이용하였다. 총 109종의 동물플랑크톤 종이 동정되었으며, 동물플랑크톤의 밀도와 종수는 계절에 따라 상이한 분포를 나타냈다. 특히, 가을은 다른 계절보다 동물플랑크톤의 높은 종수와 밀도를 기록하였다(98종, 603 ind./L). 윤충류는 다른 환경요소보다 수온과 밀접하게 연관되었으며, 이는 계절에 따른 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 지각류와 요각류는 전기전도도, Chl. a, 영양염류(TN, TP) 대해서 영향 받았으며, 이는 오염원 및 먹이원에 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 그러나, 용존산소가 높은 정수역에서는 대부분 동물플랑크톤이 낮은 밀도를 보였다. 저수지 및 습지에서 출현하는 동물플랑크톤 군집은 수온이나 영양염류 등의 환경요인에 대해 주로 영향 받는 것으로 평가되었다. 결론적으로 저수지와 습지와 같은 정수역에서 출현하는 동물플랑크톤 군집의 조성 및 밀도는 환경요인과 밀접하게 연관되는 것으로 나타났으며, 환경요인의 변화는 동물플랑크톤의 계절성을 결정하는 중요한 요인인 것으로 평가되었다.

주요어: 이화학적 요인, Self-Organizing Map, 계절성, 얇은 습지, 저수지

ABSTRACT

In order to estimate the influence of environmental factors on zooplankton communities in lentic freshwater ecosystems, 20 reservoirs and wetlands were monitored by season in 2013. A total of 109 species of zooplankton were identified during the study period. Zooplankton assemblage showed a different distribution in its density and diversity in accordance with the seasons. In particular, the density of zooplankton (98 species and 603 ind. L⁻¹) was the most in autumn when compared to the other seasons. In order to effectively analyze zooplankton distribution that are affected by various environmental factors, a Self-Organizing Map (SOM) was used, which extracts information through competitive and adaptive properties. A total of 11 variables (8 environment factors

1 접수 2015년 2월 23일, 수정(1차: 2015년 3월 25일, 2차: 2015년 6월 10일), 게재확정 2015년 6월 11일

Received 23 February 2015; Revised(1st: 25 March 2015, 2nd: 10 June 2015); Accepted 11 June 2015

2 부산대학교 생명과학과, Dept. of Biological Sciences, Pusan National Univ., Busan 609-735, South Korea.

3 안동대학교 환경공학과, Dept. of Environmental Engineering, Andong National Univ., Andong 760-749, South Korea.

4 국립환경과학원 낙동강물환경연구소 Nakdong River Environment Research center, National institute of Environmental Research Environmental Research 717-870, South Korea.

5 전남대학교 생물학과, Dept. of Biological Sciences, Chonnam National Univ., Gwangju 500-757, South Korea.

6 국립생태원 National Institute of Ecology, Seo-Cheon Gun, Chungcheongnam province 325-813, South Korea(jyc311@naver.com)

a 이 논문은 낙동강물환경연구소 환경기초사업의 지원으로 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: Tel: 82-41-950-5376, Fax:82-41-950-5376, E-mail: jyc311@naver.com

and 3 groups of zooplankton) were patterned on to the SOM. Based on a U-matrix, four clusters were identified from the model. Among zooplankton communities, rotifer displayed a positive relationship with water temperature, and cladocerans and copepod were positively related to conductivity, chlorophyll a, and nutrient factor (i. e. TN and TP). In contrast, high dissolved oxygen appeared to have a negative effect on zooplankton distribution. Consequently, the SOM results depicted a clear pattern of zooplankton density clusters partitioned by environmental factors, which play a key role in determining the seasonal distribution of zooplankton groups in lentic freshwater ecosystem.

KEY WORDS: PHYSICO-CHEMICAL FACTORS, SELF-ORGANIZING MAP, SEASONAL DISTRIBUTION, RESERVOIRS, SHALLOW WETLANDS

서론

동물플랑크톤 군집은 수생태 먹이망 내에서 식물플랑크톤을 여과 섭식하며, 어류와 같은 포식자의 주 먹이원으로 활용하는 등 1차 소비자로서의 중요한 역할을 수행한다 (Bunn and Boon, 1993).

특히 식물플랑크톤에 대한 지각류의 여과 섭식은 매우 강력하며, 수체 내의 수질개선에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다 (Jeppesen *et al.*, 1999; Blindow *et al.*, 2000). 또한 어류와 무척추동물 등의 포식자와 동물플랑크톤 간에 상호작용은 담수생태학의 중요한 주제로 다루어져 왔으며 (Blanco *et al.*, 2003; Sakuma *et al.*, 2004; Sagarrio *et al.*, 2010), 어류의 몸 크기별 선택적인 섭식 (Werner and Hall, 1974), 어류 포식을 피하기 위한 피난처 활용 (Manatunge *et al.*, 2000) 등에 관해 주로 연구되었다. 따라서, 동물플랑크톤 군집의 다양성과 밀도 변화는 다양한 생물들의 생존과 개체군 성장에 영향을 미치며, 이들에 대한 연구는 종 다양성 증가와 생태계 건강성과 밀접하게 연관되어 있다. 또한 동물플랑크톤 군집은 생물학적 요인뿐만 아니라, 물리-화학적 요인에 의해서도 강하게 영향을 받는다. 동물플랑크톤의 계절적인 천이는 수온이나 pH 등의 계절적 변화에 의해서 야기되며, 이 요소들은 또한 동물플랑크톤의 개체군 성장에도 강하게 영향을 준다 (Dejen *et al.*, 2004; David *et al.*, 2005). 총질소(TN)나 총인(TP) 등의 영양염류는 동물플랑크톤과 직접적으로 관련되지는 않지만, 동물플랑크톤의 먹이가 되는 식물플랑크톤의 성장과 연관된다 (Sterner *et al.*, 1993). 비록 일부 부영양화된 환경에서 남조류 등 특정 식물플랑크톤 군집에 의해 우점되었을 경우 동물플랑크톤의 성장이나 발달이 제한될 수 있으나, 중영양화된 환경에서 동물플랑크톤의 높은 밀도를 보이는 것은 풍부한 먹이 때문이다. 따라서 서식환경의 생물학적 및 비생물학적 요인 등의 환경적 차이는 동물플랑크톤 군집 분포나 성장에 강력하게

영향을 미치므로 이와 관련된 연구는 매우 중요하다. 동물플랑크톤이 환경요인에 민감하게 반응하는 특성 때문에 최근에는 기후변화를 모니터링하기 위해 동물플랑크톤 군집을 활용하기도 한다 (Richardson, 2008).

이러한 중요성으로 인해, 동물플랑크톤의 분포에 대한 연구는 강, 호소, 습지 등의 다양한 담수생태계에서 지속적으로 수행되어 왔다. 예를 들어, 강에서 동물플랑크톤 군집은 흐름과 같은 교란 요인과 관련지어 주로 연구되었으며, 호소나 습지에서는 포식자와 연관된 동물플랑크톤의 일주기 수직 및 수평 분포 및 이주 변화를 중심으로 수행되었다 (Zaret and Suffern, 1976; Burks *et al.*, 2002). 특히 최근에는 얇은 습지에서 우점하는 수생식물의 어류 포식을 피하기 위한 피난처의 역할에 대해 활발하게 연구되고 있다 (Manatunge *et al.*, 2000; Horppila *et al.*, 2009). 특히 국내 호소 생태계에서는 수생식물 등의 물리적인 서식환경이 비교적 적게 조성되어 있기 때문에, 수온이나 용존 산소 등의 환경 요인이 동물플랑크톤 분포에 매우 중요하게 적용될 수 있다.

국외의 경우, 이러한 중요성으로 인해 호소 내 동물플랑크톤의 공간적 및 계절적 분포에 대해 지속적으로 연구되고 있다 (Dejen *et al.*, 2004; Stockwell and Sprules, 1995). 국내 또한 다양한 수체 내에서 플랑크톤 군집 동태에 관해 연구되었지만, 비교적 대형 호소에서 많이 연구되었으며 (Kim *et al.*, 2000), 상대적으로 작은 크기를 가진 호소에서 동물플랑크톤 군집 동태에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어졌다 (Kim *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2013a). 낙동강은 우리나라에서 가장 큰 강으로, 배수가 불량하고 범람이 자주 일어나 많은 호소 및 습지가 분포하고 있다 (Son and Jeon, 2003). 이들 호소들은 20세기 후반부터 급속한 농경화 및 도시화로 인해 오염물질의 증가와 함께 부영양화로 수질 오염이 심화되어 이들 호소의 생태계 구조와 기능이 변화되었다. 이러한 생태계 변화를 모니터링 하기 위해 수생태계 내에서 에너지 흐름에 중요한 역할을 담당하는 동물

플랑크톤 군집 분포에 대한 연구는 반드시 필요하다. 특히 낙동강 수역은 비교적 다양하고 독특한 특성을 가진 호소가 있음에도 불구하고, 호소간의 비교를 통해 동물플랑크톤 군집 동태를 평가한 사례는 적은 편이다. 따라서 본 연구에서는 낙동강 수역에 위치하는 호소를 대상으로 수질 및 동물플랑크톤 분포 양상을 분석하여, 수질과 동물플랑크톤 군집 간에 상관성을 알아보고자 한다.

연구방법

1. 조사 지점 현황

낙동강유역은 한반도의 남동부(동경 127°29'~129°18', 북위 35°03'~37°13')에 위치하고 있으며, 유역면적은 23,384km²이며 본류구간의 길이는 525km이다. 몬순기후에 속해 있어 강우의 60%가 여름 강우와 태풍에(6~9월초)에 집중된다.

조사지점은 낙동강 유역의 20개 지점의 호소에서 시행하였다(Figure 1, Table 1). 20개의 호소 중 유역면적은 진양호(Site 16)가 2,270.65km²로 가장 넓으며 박실지(Site 7)가 0.225km²로 가장 좁은 면적을 가졌다. 연평균 저수용량은 합천호(Site 19)가 361×10⁶m³로 가장 많으며 정양지(Site 15)

이 0.2×10⁶m³로 가장 적다. 평균 수심은 합천호(Site 19)가

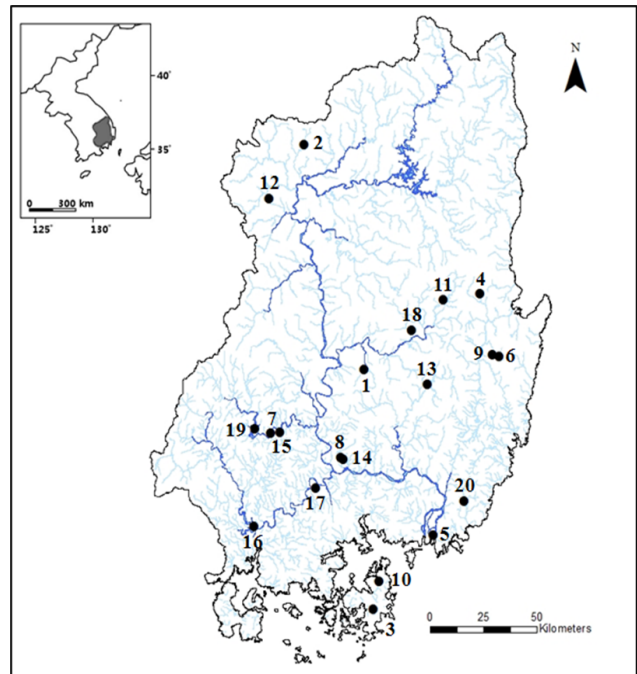


Figure 1. Map of the study sites in Nakdong River basin. The sites indicated by solid squares(●)

Table 1. List of the study sites and description of the study sites

Site number	Site name	Constructed year	Drainage area (km ²)	Water capacity (×10 ⁶ m ³)	Mean depth(m)	Surface area(km ²)	Sampled stations
1	Gachang	1986	43.4	6.0	31.9	0.4	3
2	Gyeongcheon	1990	105.7	24.9	35.5	1.5	3
3	Gucheon	1987	12.7	9.3	-	-	2
4	Gidong	1955	18.3	0.5	4.0	0.2	1
5	Nakdong estuary	1987	68.77	50.0	5.0	23,656	3
6	Dukdong	1977	52.2	26.7	41.6	1.8	2
7	Baksil	-	0.225	-	0.5	0.4	1
8	Bungae	1926	2.49	1.4	1.3	0.6	3
9	Bomun	1963	19.2	9.5	15.4	1.6	2
10	Yeoncho	1979	11.7	4.6	12.0	0.6	2
11	Yeongcheon	1980	233.18	33.3	18.1	-	3
12	Otae	1959	4.5	4.1	7.0	0.9	3
13	Unmun	1994	284.89	74.2	36.1	5.2	3
14	Jangcheok	1940	7.86	1.3	2.1	0.4	3
15	Jungyang	-	42.7	0.2	0.7	34.8	3
16	Jinyang	1970	2270.65	147.2	-	23.8	3
17	Jilnal	-	3.53	-	1.5	0.2	3
18	Pungrak	1945	9.7	2.1	6.0	0.6	3
19	Hapcheon	1989	925	361	68.0	16.0	3
20	Hoedong	1946	99.3	12.9	24.5	1.8	2

68m로 가장 깊으며 박실지(Site 7)가 0.5m로 가장 얇다. 연평균 수면적은 낙동강 하구연(Site 5)이 23,656km²로 넓으며 기동지(Site 4)와 질날벌(Site 17)이 0.2km²로 가장 좁다. 채집지점은 호소의 크기에 따라 1~3지점을 조사하였다.

2. 환경 요인 측정 및 동물플랑크톤 채집

환경 요인의 측정 및 동물플랑크톤 채집은 2013년에 분기별(2월, 5월, 8월, 11월)로 수행되었으며 호소크기에 따라 1~3지점을 조사하였다.

환경 요인의 측정 항목은 수온, pH, 전기전도도, 용존산소, 부유물질(Suspended solids), Chlorophyll a(Chl. a), 총질소(TN), 그리고 총인(TP) 등 8개 항목이다. 수온과 용존산소, pH, 전기전도도는 현장에서 직접 측정하였으며, 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. 부유물질과 Chl. a, 총질소, 총인 등의 항목은 현장에서 원수를 채수하여 실험실에 가져와 측정하였다. 측정방법은 환경부의 수질오염공정시험방법(Korea Ministry of Environment, 2012)을 이용하여 측정하였다.

동물플랑크톤은 각 호소의 수변부(평균 수심 0.3~0.5m)와 저수지 중앙에 개방된 수역(평균 깊이 1~2m)에서 각각 채집되었으며, 원수 9~10L를 채수한 후, 이를 68 μ m망목의 네트에 여과시켜 80~100m ℓ 로 농축한 후 포르말린으로 고정하였다. 고정된 동물플랑크톤 시료는 현미경을 이용하여 종 및 속 수준까지 구분한 뒤 리터(L)당 개체수로 환산하였다(Mizuno and Takahashi, 1991). 조사지점 중에서 경천호(Site 2)와 오테지(Site 12)의 경우는 수면이 얼어 겨울조사를 시행하지 못하였다.

3. 통계 분석

동물플랑크톤의 분류군별 밀도와 조사 대상 호소의 환경적 특성 간의 관계는 생태정보학(Ecological Informatics)에서 널리 활용되고 있는 비선형 생태모형 기법 중 하나인 Self-Organizing Map(SOM) 알고리즘을 이용하여 패턴분석을 실시하였다.

본 연구에서 SOM 모형의 입력 변수로 현장조사를 통해 확보된 동물플랑크톤의 분류군별 밀도와 조사대상 호소의 환경 요인(수온, pH, 전기전도도, 용존산소, 부유물질, Chl. a, 총질소, 총인)을 활용하였다. 최적의 SOM 구조는 두 가지의 quantization error 및 topographic error항을 이용하여 결정하였으며, 다양한 구조의 SOM 모형을 구축한 뒤 두

error 항이 가장 낮은 값을 보인 구조를 최종적으로 선택하였다. 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 *et al.*, 1996) 툴박스를 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 육수학적 특성

본 연구에서 조사된 호소의 환경 요인은 뚜렷한 계절성을 보였다(Table 2). 수온은 봄에 증가되기 시작하여 여름에 가장 높은 범위를 보였으며(24.5 $^{\circ}$ C~33.0 $^{\circ}$ C), 이것은 대부분의 호소에서 나타나는 일반적인 계절적 양상이었다. 특히 박실지(Site 7)의 경우 다른 호소와 비교할 때 수온차이가 큰 것으로 나타났으며, 이는 수심이 낮아 다른 호소보다 온도 변화가 상대적으로 크기 때문인 것으로 사료된다. 용존산소의 경우 대부분의 호소에서 여름과 가을보다 겨울과 봄에 상대적으로 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 여름과 가을이 겨울과 봄보다 상대적으로 많은 생물 군집을 부양하기 때문이며, 수서동물의 호흡이나 수생식물의 광합성 및 호흡이 물속의 용존산소에 영향을 주는 것으로 사료된다. 박실지(Site 7), 번개늪(Site 8), 장척호(Site 8), 정양지(Site 15), 질날벌(Site 17)과 같은 얇은 수심을 가진 호소의 경우, 여름과 가을에 다른 호소보다 낮은 용존산소를 보이며, 이는 수표면을 수생식물이 덮으면서 대기 중의 산소를 물 안으로 유입하는 것을 차단하기 때문이다. 또한 호수 바닥에서의 유기물 분해, 동물의 호흡, 수온의 증가 등도 용존산소의 농도를 감소시킬 수 있는 중요한 요인으로 작용한다. 전기전도도의 경우 대부분 호소에서 100 μ S/cm 이상의 값을 보였으며, 특히 낙동강하구연(Site 5), 박실지(Site 7), 번개늪(Site 8), 정양지(Site 15), 질날벌(Site 17), 풍락지(Site 18)와 같은 호소의 경우 200 μ S/cm가 넘는 경우가 대부분이었다. 이들 호소의 경우, 도심지나 농경지가 호수 주변에 위치하여 외부로부터 오염물질의 유입이 빈번했던 것으로 사료된다. 몇몇 기존 문헌 또한 농경지 주변에 위치한 호소의 경우, 오염물질이 유입되어 부영양화되기 쉽다고 보고하였다(Choi *et al.*, 2013b; Miranda *et al.*, 2014). 대조적으로, 가창호(Site 1), 경천호(Site 2), 구천호(Site 3), 운문호(Site 13)의 경우 100 μ S/cm 이하의 전기전도도가 측정되어 다른 호소에 비해 이온농도가 낮은 것으로 나타났는데 이들 호소의 주변은 대부분 산림으로 구성되어 있어 오염물질의

Table 2. Environmental factors at each study sites. WT, water temperature(°C); DO, dissolved oxygen(mg/L); Cond., conductivity(μ S/cm); Chl a, Chlorophyll a(μ g/L); SS, suspended solids(mg/L); TN, total nitrogen(mg/L); TP, Total phosphorus(μ g/L)

Factors	Seasons	Study Sites																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
WT	Winter	3.3	-	5.5	4.0	5.3	2.8	10.9	5.1	4.2	5.1	3.6	-	4.0	4.1	7.2	4.7	4.6	2.1	5.6	5.1
	Spring	18.4	14.7	16.6	18.7	18.1	16.8	20.4	18.9	17.9	19.8	19.6	17.5	21.2	17.7	22.7	23.1	22.7	19.1	22.1	20.4
	Summer	31.5	28.6	31.0	29.3	29.1	30.5	24.5	30.1	30.6	30.4	27.8	28.9	31.7	28.3	33.0	28.9	25.5	28.8	28.8	28.7
	Autumn	11.4	11.1	14.3	16.2	12.9	17.0	5.2	14.5	17.7	12.7	12.6	11.2	10.7	14.6	12.4	15.8	12.2	15.6	14.4	11.7
DO	Winter	12.4	-	12.2	11.5	15.4	14.1	6.4	12.7	16.2	12.8	16.4	-	12.3	12.5	13.3	13.1	10.4	13.0	11.2	14.5
	Spring	13.6	12.5	10.4	13.3	8.4	12.1	3.0	10.3	11.6	10.2	11.4	12.0	10.9	9.7	11.1	9.2	10.8	11.9	9.4	13.9
	Summer	6.9	7.6	7.6	8.1	5.1	9.7	2.0	3.6	8.5	6.4	7.2	7.3	8.1	1.7	5.0	7.2	3.4	8.7	7.3	7.5
	Autumn	7.5	7.1	9.1	7.1	9.9	7.3	3.6	5.8	7.3	10.5	8.2	6.4	6.2	5.9	7.0	8.5	4.8	6.3	8.5	14.2
Cond.	Winter	75.3	-	48.4	157.0	191.4	109.5	159.7	152.3	142.5	71.6	140.0	-	77.0	93.4	247.0	123.7	254.4	280.7	82.8	104.5
	Spring	77.0	78.0	71.6	147.0	256.4	118.5	223.3	228.7	156.0	113.2	147.7	116.0	80.0	140.8	305.7	117.3	196.1	285.3	114.7	142.0
	Summer	84.3	74.3	107.9	157.0	279.8	142.0	145.0	330.5	178.5	162.7	139.0	126.3	94.7	147.6	263.7	119.0	260.0	252.7	109.2	163.0
	Autumn	83.0	95.7	84.4	166.0	368.3	141.0	223.8	245.0	192.5	128.5	168.3	155.3	99.3	160.6	324.3	113.5	167.3	270.3	125.6	144.0
pH	Winter	7.83	-	7.27	7.40	6.97	7.49	6.72	7.75	7.73	7.65	7.82	-	7.41	7.87	7.78	7.54	7.01	7.92	7.42	7.75
	Spring	7.35	8.55	8.19	9.00	5.52	7.36	6.74	8.49	8.01	7.90	8.23	7.39	8.62	7.98	7.87	7.41	7.69	8.14	7.72	9.58
	Summer	8.25	9.47	8.96	9.52	7.26	8.51	6.54	7.37	9.08	8.35	8.69	8.30	8.88	7.04	7.11	6.69	6.20	8.96	8.41	8.85
	Autumn	8.27	7.74	7.93	7.26	7.60	7.10	6.96	7.36	8.01	8.18	7.82	7.63	7.81	7.43	7.55	7.39	7.00	7.40	7.56	7.96
Chl. a	Winter	4.0	-	1.5	4.2	14.5	1.5	4.8	1.9	5.8	4.5	4.8	-	3.6	2.6	3.5	1.2	4.0	3.3	2.0	7.8
	Spring	4.0	4.9	1.5	4.0	12.0	3.2	13.0	13.3	10.1	1.6	6.7	4.9	1.6	6.2	4.7	4.6	6.4	5.0	2.7	20.0
	Summer	2.2	5.7	5.4	21.9	42.7	5.9	14.7	44.3	13.0	10.0	4.7	3.5	3.1	74.0	20.5	12.3	4.3	24.8	1.7	7.4
	Autumn	19.3	1.9	3.2	8.0	4.6	5.7	7.5	6.6	18.9	14.4	4.3	4.6	3.9	84.1	31.1	5.5	20.9	14.9	5.4	23.1
SS	Winter	1.3	-	0.7	5.0	9.7	0.8	14.0	2.9	2.5	2.0	1.7	-	1.4	2.5	11.7	2.4	4.0	0.6	0.3	3.9
	Spring	1.2	1.9	0.6	4.0	4.1	4.0	38.0	1.1	4.8	2.0	4.7	1.9	3.7	0.7	34.0	0.9	11.4	3.1	1.3	6.8
	Summer	0.4	3.3	1.8	6.4	9.1	2.4	26.8	10.7	4.8	4.6	3.7	3.2	1.1	23.1	96.0	2.1	12.5	5.1	1.3	12.6
	Autumn	9.1	2.8	1.1	11.0	6.8	2.5	21.0	3.9	11.3	14.5	3.3	9.3	4.1	14.4	34.0	3.4	18.8	10.0	2.6	8.4
TN	Winter	2.1	-	0.9	1.9	3.0	1.2	2.7	1.5	1.0	1.5	1.5	-	1.2	1.4	1.6	1.7	2.7	1.9	1.6	2.7
	Spring	1.2	1.7	1.0	1.2	2.6	0.7	2.1	1.3	0.7	0.7	1.4	1.5	1.1	0.9	1.1	0.6	2.3	1.7	1.4	2.1
	Summer	1.4	1.9	1.2	1.9	2.1	1.0	2.8	1.3	0.7	1.0	1.8	1.0	1.3	1.5	2.1	1.7	1.2	2.4	1.7	1.2
	Autumn	1.7	1.6	1.5	2.0	2.6	1.1	1.3	1.5	1.1	0.8	1.6	1.2	2.4	1.4	1.8	1.8	2.1	2.4	2.1	2.6
TP	Winter	10.3	-	7.0	22.0	19.7	9.0	17.0	48.0	13.0	14.5	16.3	-	10.7	55.3	37.7	34.7	213.5	26.7	9.3	28.5
	Spring	13.3	17.0	8.0	23.0	20.3	17.0	207.0	51.3	20.0	10.0	13.7	15.0	21.7	21.7	47.0	7.0	101.7	25.7	9.7	25.0
	Summer	20.7	19.7	17.5	54.0	82.3	31.5	156.0	116.3	37.0	43.5	10.3	15.0	13.0	96.0	149.7	38.0	112.7	62.7	25.7	63.0
	Autumn	8.6	6.8	6.8	59.5	24.4	9.5	39.5	105.6	57.7	35.0	5.6	11.6	6.2	145.6	71.7	11.6	253.0	28.0	8.6	35.0

유입이 상대적으로 적었기 때문이다. pH는 겨울과 봄철에 주로 낮은 값을 보이다가 여름과 가을에 증가되는 패턴을 보였다. 이와 같은 변화는 식물플랑크톤의 성장과 밀접하게 관련되어 있다(Choudhary *et al.*, 2014). 대체로 깊은 수심을 가진 호소의 경우, 여름과 가을에 Chl. a가 증가하면서 pH 또한 증가하는 경향을 보이는데, 이것은 Chl. a의 증가는 광합성으로 인한 CO₂감소와 용존산소의 증가로 이어지기 때문이다. 그러나 얇은 습지의 경우, 우점하는 수생식물로 인해 대기 중에 산소가 물 안으로 유입되는 것을 차단하며, 저층에서의 지속적인 유기물 분해로 인해 여름과 가을에 낮은 용존산소를 가지며, Chl. a뿐만 아니라 pH 또한 낮은 특성을 보인다. 부유물질은 계절에 따른 뚜렷한 패턴을 보이지 않았으며, 지점에 따른 양상 또한 상이하였다. 부유물질은 박실지(Site 7)와 정양지(Site 15) 등의 얇은 수심을 가진 호소에서 주로 높은 값이 관찰되었다. 총질소는 가을에 가장 높은 값들이 관찰되었으며, 특히 낙동강하구언(Site 5), 박실지(Site 7), 질날벌(Site 17), 풍락지(Site 18), 회동호(Site 20) 등의 호소에서 높은 값이 측정되었다. 총인은 계절적인 차이가 거의 없었으며, 박실지(Site 7), 번개늪(Site 8), 장척호(Site 14), 정양지(Site 15), 질날벌(Site 17) 등의 호소에서 0.1mg/L이상의 값이 측정되었다. 총질소와 총인 등의 영양염류가 박실지(Site 7)와 질날벌(Site 17) 등에서 높은 이유는 주변이 농경지로 구성되어 영양염류가 지속적으로 유입되기 때문인 것으로 사료된다.

2. 동물플랑크톤의 계절적 조성 변화

본 연구에서 동물플랑크톤은 총 108종이 확인되었으며, 분류군별로 윤충류가 73종, 지각류가 27종, 요각류가 8종으로 나타났다.

계절별로 살펴보면, 가을에 98종으로 가장 많은 동물플랑크톤 종수를 보였으며, 겨울에는 24종으로 상대적으로 적은 종수를 나타냈다(Table 3). 분류군별로는 윤충류는 *Polyarthra sp.*, 지각류는 *Bosmina longirostris*, 요각류는 *Nauplius*가 각각 모든 계절에 우점을 하였다.

본 연구에서 조사된 동물플랑크톤 군집은 계절과 호소에 따라서 차이가 있는 것으로 나타났다(Figure 2). 겨울에 대부분의 호소는 윤충류나 요각류에 의해서 우점되었으며, 다른 계절과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 출현 밀도와 종수를 보였으나, 특히 박실지(Site 7)와 질날벌(Site 17)에서 다른 호소보다 높은 요각류 출현밀도를 나타냈다. 박실지(Site 7)와 질날벌(Site 17) 내 수체의 대부분은 겨울철에 고사된 정수식물에 의해 우점되며, 이는 요각류 군집을 위한 서식처로서 적용될 수 있다(Choi *et al.*, 2014b). 또한 고사된 수생식물은 어류 포식을 피하기 위해 피난처를 제공하기도 한다. 봄에는 겨울보다 동물플랑크톤의 출현 밀도가 증가되기는 하였으나, 여전히 윤충류와 요각류에 의해서 지배되었다. 지각류는 일부 호소에서 출현 밀도의 증가를 나타냈다. 특히, 기동지(Site 4)에서 여름과 가을에 높은 밀도의 윤충류가 출현하였으며, 박실지(Site 7)에서는 겨울에 요각류가 높은 밀도를 나타냈다. 윤충류는 다른 동물플랑크톤보다 빠른 생활사를 가지기 때문에 상대적으로 안정적인 환경이 조성되면 가장 빠르게 성장할 수 있다(Allan, 1976). 봄은 수온이 증가되기 시작하는 계절이기 때문에 대부분의

Table 3. Zooplankton seasonal variation of abundance, species number and dominant species

Factors	Seasons	Study Sites		
		abundance (ind. L-1)	species number	dominant species
Rotifera	Winter	69.3	19	<i>Polyarthra sp.</i>
	Spring	334.7	44	<i>Polyarthra sp.</i>
	Summer	445.7	57	<i>Polyarthra sp.</i>
	Autumn	377.1	66	<i>Polyarthra sp.</i>
Cladocera	Winter	2.8	1	<i>Bosmina longirostris</i>
	Spring	62.7	14	<i>Bosmina longirostris</i>
	Summer	165.0	17	<i>Bosmina longirostris</i>
	Autumn	116.0	24	<i>Bosmina longirostris</i>
Copepoda	Winter	122.0	4	Nauplius
	Spring	168.2	6	Nauplius
	Summer	83.5	7	Nauplius
	Autumn	109.7	8	Nauplius
Total	Winter	194.2	24	Nauplius
	Spring	565.5	64	Nauplius
	Summer	674.2	81	<i>Polyarthra sp.</i>
	Autumn	602.8	98	<i>Polyarthra sp.</i>

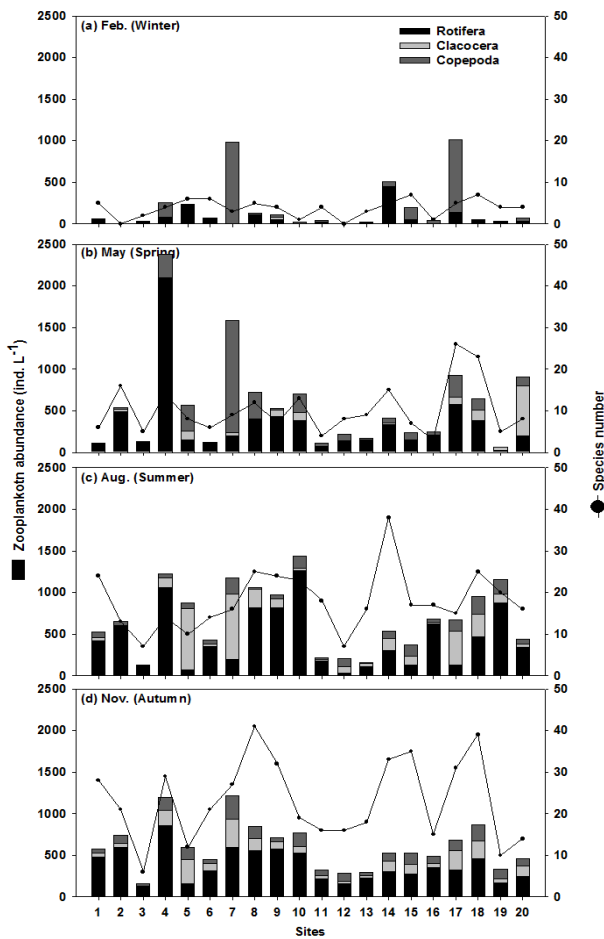


Figure 2. Abundance(bar) and species number(dot) of zooplankton at each lentic freshwater ecosystems during study period

호소에서 겨울보다 윤충류의 출현 밀도와 종수가 증가한 것으로 사료된다. 여름에는 앞선 계절보다 지각류의 출현비율이 높게 나타났으며, 특히 낙동강하구연(Site 5)과 박실지(Site 7)에서 지각류의 높은 밀도를 찾을 수 있었다. 낙동강하구연(Site 5)에서 우점하는 지각류는 *Bosmina logirostris* 로, 상대적으로 작은 크기와 발달된 형태적 방어 반응 때문에 어류 포식에 대한 높은 회피율을 가진다(Sakamoto *et al.*, 2006). 이들은 포식자에 노출되었을 때 뿔 형태의 1축각을 머리 위로 세우는 반응을 보인다. 이와 같은 형태적인 반응은 포식자를 회피하기 위한 반응으로 보이지만, 명확하게 밝혀지지 않았다. 이와 대조적으로 박실지(Site 7)에 우점하는 지각류는 대부분 수생식물의 잎이나 줄기에 부착해서 서식하는 종으로(*Pleuroxus*), 수생식물의 구조와 계절별 천이에 따라 분포양상이 달라진다(Choi *et al.*, 2014a). 그러나 지각류의 성장 및 발달은 각 서식처의 다양한 환경 조건과 밀접하게 관련되므로, 이들의 분포를 예측하는 것은 어렵다. 가을의 경우, 여름과 비슷한 동물플랑크톤 분포를 보였다.

3. 환경요인에 대한 동물플랑크톤 군집의 영향

SOM 평면을 구축한 결과 14×5 구조에서 최적화되었다(Quantization error, 0.356; Topographic error, 0.01; n=197). SOM 모형을 적용시킨 결과, 조사지점들은 크게 두 개의 클러스터로 구분되며, 각각의 클러스터는 또 2개씩 나뉘어, 총 4 개의 클러스터가 가장 적합한 것으로 파악되었다(Figure 3). SOM 평면의 위쪽에 형성되어 있는 클러스터가 각각 클러스터 1과 4이며, 아래쪽의 두 개의 클러스터가

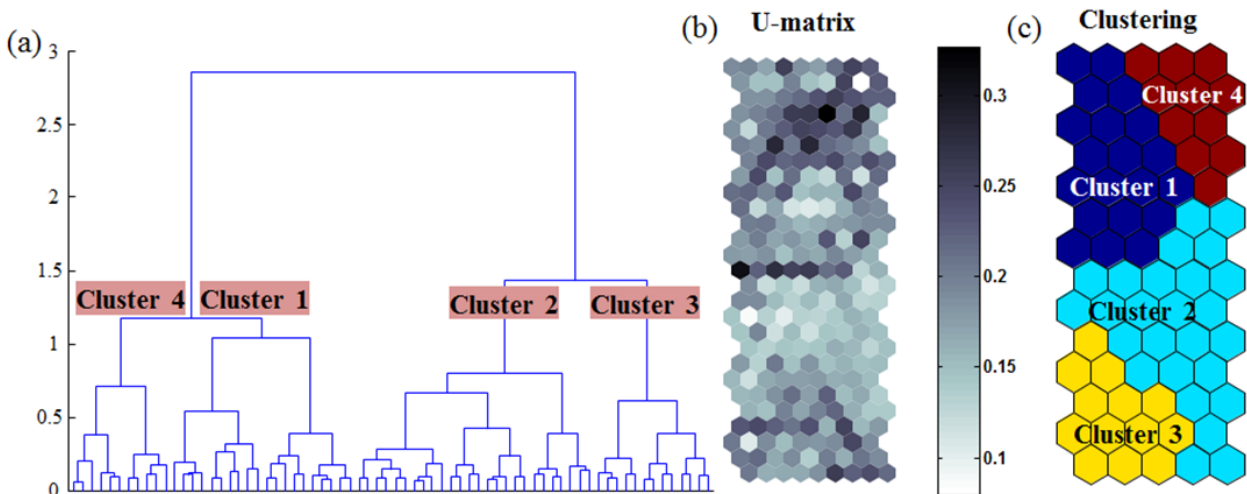


Figure 3. Clustering through data learning by the self-organizing map. (a) hierarchical dendrogram, (b) U-matrix, (c) clustering result

각 2와 3으로 지정되었다. 클러스터별 환경요소와 동물플랑크톤 군집의 평균과 표준편차를 Table 3에 정리하였다. 각 클러스터의 특징을 살펴보면, 클러스터 1은 낮은 수온과 높은 용존산소를 가지는 시기의 호소들로 구성되었고, 클러스터 2는 높은 수온과 pH를 가지는 시기의 호소들이 모였다.

클러스터 3은 높은 수온, 전기전도도, Chl. a, TN, TP와 낮은 용존산소, pH 값을 나타내는 시기의 호소들로 구성되었으며, 클러스터 4는 낮은 전기전도도, SS, TN, TP 값을 보이는 호소들로 모였다(Figure 4, Table 4). 일반적으로, Chl. a의 값이 높을 때 pH의 또한 높은 값을 가지지만, 얇은 습지에서와 같이 수생식물이 수표면에 우점할 경우, 녹조류와 같이 광합성에 민감한 종의 풍부도는 적고, 규조류 같은 식물플랑크톤이 주로 우점하게 된다. 본 연구에서 Chl. a이 높지만 용존산소와 pH값이 낮은 경우, 얇은 습지에서 다른 식물플랑크톤 군집보다 규조류가 상대적으로 높은 풍부도를 가졌기 때문인 것으로 사료된다.

동물플랑크톤의 출현 밀도는 대체로 호소의 환경 요인과 관련되는 것으로 나타났다. 특히 이화학적 요인 중 수온, pH, SS 등과 총질소, 총인 등의 영양염류와 밀접하게 연관되었다. 동물플랑크톤의 주요 분류군별로 살펴보면, 윤충류의 경우 대부분의 클러스터 안에서 높은 출현 밀도를 가지지만, 클러스터 1과 4의 일부에서 낮았다. 윤충류는 대부분의 이화학적 요인과 밀접하게 관련되지는 않았으나, 수온과 매우 비슷한 양상을 보였다. 지각류는 주로 아래쪽에 집중되었으며, 주로 클러스터 2와 3에서 높은 출현 밀도를 보였다. 지각류는 수온이 낮거나 용존산소가 높은 시기에는 낮은 출현 양상을 나타냈다. 요각류는 윤충류와 비슷하게 대부분의 클러스터에서 높은 출현 밀도로 분포되었으나, 클러스터 4에 속한 호소와 계절에는 거의 출현하지 않는 것으로 나타났다.

이를 환경요인과 대입하면 윤충류의 경우 대부분의 클러스터에서 높은 출현 밀도를 보이기 때문에 환경요인과의 비교가 어렵지만 클러스터 1과 4 부분의 수온이 상대적으로 낮은 구간에 윤충류의 출현 밀도가 현저히 낮기 때문에 수온과 가장 연관성이 있는 것으로 보인다. Bērziņš and Pejler(1989)는 윤충류의 발생은 종에 따라 차이는 있지만, 대부분 높은 수온과 관련된다고 제안하였다. 또한 그들은 동물플랑크톤 군집 중 가장 빠른 생활사를 가지며(Allan, 1976), 환경 요인의 변화에 가장 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다(Devetter, 1998). 이러한 특성으로 인해, 윤충류는 환경 지표로서 빈번하게 활용되기도 한다(Gannon and Stemberger, 1978). 대부분의 호소에서, 윤충류는 겨울을 제외한 모든 계절에 빈번한 출현을 보였으며, 이는 윤충류의 빠른 성장 패턴과 관련되는 것으로 사료된다. 지각류의 경우 지각류의 출현 밀도가 높은 구간에 상대적으로 낮은 pH와 높은 전기전도도, 부유물질, 엽록소 a, 총인 등의 값을 확인 할 수 있다. 이는 영양염류인 총인과 먹이원인 식물플랑크톤으로 대변되는 Chl. a가 충분하면 식물플랑크톤을 섭식하는 지각류의 출현이 증가하는 패턴으로 해석된다. Elser *et al.*(2001)의 연구에서 인의 농도 증가 시 *Daphnia*

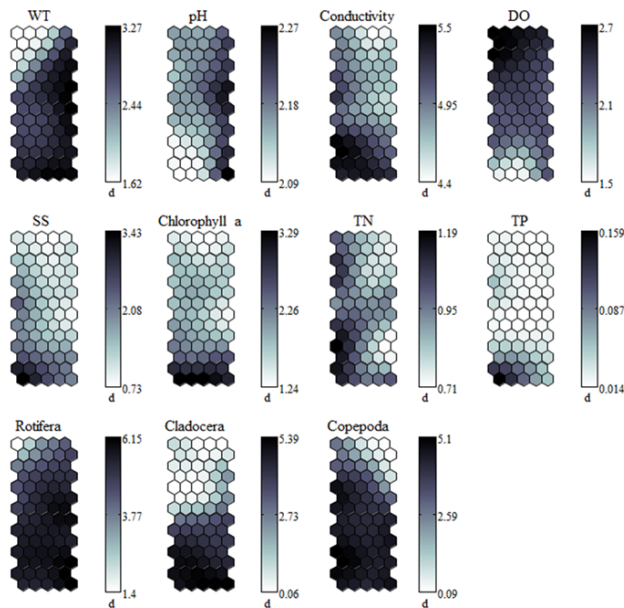


Figure 4. Component map of environmental factor and zooplankton community. WT, water temperature (°C); DO, dissolved oxygen(mg/L); Cond., conductivity(μs/cm); Chl. a, Chlorophyll a(μg/L); SS, suspended solids(mg/L); TN, total nitrogen(mg/L); TP, Total phosphorus(μg/L)

Table 4. Mean of environmental factors and zooplankton community of study sites each cluster. WT, water temperature(°C); DO, dissolved oxygen(mg/L); Cond., conductivity(μs/cm); Chl. a, Chlorophyll a(μg/L); SS, suspended solids(mg/L); TN, total nitrogen(mg/L); TP, Total phosphorus(μg/L)

Variables	Average	SD	Cluster			
			1	2	3	4
WT	17.1	9.2	11.4	20.9	19.9	15.5
DO	9.3	3.5	11.8	8.6	5.9	10.9
Cond.	161.1	78.9	155.3	142.2	243.4	102.4
pH	7.8	0.8	7.69	8.18	7.12	7.96
Chl. a	10.8	20.0	5.6	7.8	27.8	4.1
SS	7.7	15.4	5.2	4.2	21.1	2.2
TN	1.6	0.6	1.6	1.5	2.0	1.2
TP	41.8	56.4	30.7	23.5	102.5	21.6
Rotifera	290.1	315.5	188.3	428.4	300.5	159.3
Cladocera	83.7	156.3	2.4	88.8	244.4	9.3
Copepoda	101.8	163.4	104.8	95.9	181.5	0.7

의 성장률이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 나타냈다. 식물플랑크톤에 대한 지각류의 여과 섭식은 담수생태계에서 매우 빈번하게 다루어져 왔으며, 이들의 먹이 활동은 수체의 수질 개선에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2000). 그러나 본 조사에서 지각류는 대부분 소형인 *Bosmina longirostris*로 일반적으로 알려진 대형지각류(*Daphnia*)에 의한 수질개선효과를 기대하기는 어려울 것으로 사료된다. 이와 관련하여, 낙동강에서는 대형지각류인 *Daphnia*가 출현하는 봄철에는 상대적으로 수질개선효과를 보이지만, *Bosmina*류가 우점하는 가을철에는 오히려 식물플랑크톤이 높은 현상을 보이는 것으로 연구하였다 (Choi *et al.*, 2011). 지각류는 용존산소와는 대조적인 분포 패턴을 보였다. 용존산소에 대한 지각류의 부정적인 효과에 대해서는 아직 알려진 바는 없지만, 지각류의 주요 포식자인 어류가 높은 용존산소를 가진 환경을 선호한다는 정보를 토대로 우리는 이와 같은 상관성을 유추할 수 있다. 깊은 수심을 가진 호소에서 서식하는 지각류는 낮에는 깊은 수심의 저층에서 주로 분포하며, 밤에는 수표면으로 이동하는 수직 이동(Vertical migration) 패턴을 빈번하게 보인다(Zaret and Suffern, 1976; Stich and Lampert, 1981). 이는 어류 포식을 피하기 위한 지각류의 대표적인 방어 기작으로, 낮 동안에 어류의 시각적인 포식활동을 피하기 위함이다. 깊은 수심은 빛이 바닥까지 도달하기 힘들기 때문에 어류와 같은 시각적 포식자의 포식활동을 수행하기 어렵다. 또한 깊은 수심은 용존산소의 낮은 농도로 인해 어류가 서식하기에 어려운 환경 조건을 가진다. 따라서 포식자가 존재하는 호소에서 지각류는 낮은 용존산소를 가진 서식처에서 주로 분포하며, 그래서 그들은 용존산소와 반대되는 상관성을 가지는 것으로 사료된다. 이와 같은 정보에 기초하여, 추후 호소의 수심에 따른 지각류의 조사 또한 수행되어야 할 것으로 보인다. 요각류 출현 밀도의 경우 전기전도도와 Chl. a, 부유물질, 총질소, 총인 등의 값이 상대적으로 낮은 클러스터 4에서 낮았으며, 이를 보아 영양염류와 먹이원이 낮으면 거의 출현하지 않는 것으로 사료된다.

이와 같은 결과를 볼 때, 조사된 호소에서 윤충류는 다른 환경요인 보다 수온과 주로 관련되었으며, 지각류와 요각류는 영양염과 먹이원에 주로 영향 받는 것으로 나타났다. SOM 분석 결과는 환경 요인들이 종합적으로 작용하여 클러스터 구분이 이루어진 것으로 보이며, 동물플랑크톤 군집마다 영향을 받는 환경요인의 차이를 보였다. SOM 알고리즘은 비선형적인 데이터를 처리하여 효과적인 데이터 클러스터링이 가능하며 생태학 분야에서 빈번하게 산출되는 복잡성이 높은 데이터에 효과적인 것으로 알려져 있다(Chon *et al.*, 1996; Jeong *et al.*, 2005). 본 연구에서 적용 및 산출

된 SOM 모형 역시 전술한 연구결과와 비교하여 적절한 수준의 오차값을 가지고 있으므로 모형의 대표성이 존재한다고 할 수 있다. SOM 분석 기법은 기존 분석 방법(선형 분석 등)보다 복잡한 관계를 간단하고 명확하게 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 SOM 분석 기법은 환경분야의 광범위한 정보 분석에 다양하게 적용되었으며, 유수생태계의 다양한 생태학적 변화에 대한 원인분석과 구체적인 결과를 유도하는 데 활용될 수 있다(Chon *et al.*, 2000; Garcia and Gonzalez, 2004; Varbiro *et al.*, 2007). 결론적으로, 본 연구에서는 호소의 이화학적 요인과 동물플랑크톤 간의 복잡한 관계에서 각 분류군이 어떤 요인에 대해 영향을 받는지 확인 할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 호소의 수질관리 및 종 다양성 유지를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 낙동강물환경연구소에서 시행한 환경기초조사(과제명 : 낙동강수계 호소환경 및 생태조사)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Allan, J.D.(1976) Life history patterns in zooplankton. *Am. Nat.* 110: 165-180.
- Bērziņš, B. and B. Pejler(1989) Rotifer occurrence in relation to temperature. *Hydrobiologia* 175: 223-231.
- Blanco, S., S. Romo, M.J. Villena and S. Martínez(2003) Fish communities and food web interactions in some shallow Mediterranean lakes. *Hydrobiologia* 506: 473-480.
- Blindow, I., A. Hargeby, B.M.A. Wagner and G. Andersson(2000) How important is crustacean plankton for the maintenance of water clarity in shallow lakes with abundant submerged vegetation?. *Freshwater Biol.* 44: 185-197.
- Bunn, S.E. and P.I. Boon(1993) What sources of organic carbon drive food webs in billabongs?. *Oecologia* 96: 85-94.
- 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.
- Choi, J.Y., G.H. La, S.K. Kim, K.S. Jeong and G.J. Joo(2013a) Zooplankton community distribution in aquatic plants zone: Influence of epiphytic rotifers and cladocerans in accordance with aquatic plants cover and types. *Korean J. Ecol. Environ.* 46: 86-93. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.Y., K.S. Jeong and G.J. Joo(2014b) Zooplankton community distribution in shallow reservoirs during winter: influence of environmental factors on *Cyclops vicinus*(Copepoda: cyclo-

- poida). Korean J. Ecol. Environ. 37: 99-104.(in Korean with English abstract)
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, H.W. Kim, K.H. Chang and G.J. Joo (2011) Inter-annual variability of a zooplankton community: the importance of summer concentrated rainfall in a regulated river ecosystem. J. Ecol. Field Biol. 34: 49-58.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, S.K. Kim and G.J. Joo(2014a) Sustainment of epiphytic microinvertebrate assemblage in relation with different aquatic plant microhabitats in freshwater wetlands(South Korea). J. Limnol. 73: 11-16.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, S.W. Hong, K.S. Jeong, G.H. La and G.J. Joo(2013b) Zooplankton community distribution and food web structure in small reservoirs: influence of land uses around reservoirs and littoral aquatic plant on zooplankton. Korean J. Ecol. Environ. 46: 332-342.(in Korean with English abstract)
- Chon, T.S., Y.S. Park, K.H. Moon and E.Y. Cha(1996) Patterning communities by using an artificial neural network. Ecol. Model. 90: 69-78.
- Chon, T.S., Y.S. Park and E.Y. Cha(2000) Patterning of community changes in benthic macroinvertebrates collected from urbanized streams for the short term prediction by temporal artificial neuronal networks. In: Artificial Neuronal Networks: Application to Ecology and Evolution(Lek, S. and J.F. Guegan, eds.). Springer, Berlin. pp. 99-114.
- Choudhary, S., D.K. Singh and V. Kumar(2014) Seasonal variation of phytoplankton in response to abiotic parameters in Basman Lake, Motihari District(North Bihar) India. Environ. Ecol. 32: 134-137.
- David, V., B. Sautour, P. Chardy and M. Leconte(2005) Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde estuary(France). Estuar. Coast. Shelf S. 64: 171-184.
- Dejen, E., J. Vijverberg, L.A. Nagelkerke and F.A. Sibbing(2004) Temporal and spatial distribution of microcrustacean zooplankton in relation to turbidity and other environmental factors in a large tropical lake(L. Tana, Ethiopia). Hydrobiologia 513: 39-49.
- Devetter, M.(1998) Influence of environmental factors on the rotifer assemblage in an artificial lake. Hydrobiologia 387: 171-178.
- Elser, J.J., K. Hayakawa and J. Urabe(2001) Nutrient limitation reduces food quality for zooplankton: *Daphnia* response to seston phosphorus enrichment. Ecology 82: 898-903.
- Gannon, J.E. and R.S. Stemberger(1978) Zooplankton(especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. Trans. Am. Micros. Soc. 97: 16-35.
- Garcia, H.L. and I.M. Gonzalez(2004) Self-Organizing Map and clustering for wastewater treatment monitoring. Eng. Appl. Artif. Intel. 17: 215-225.
- Horppila, J., P. Eloranta, A. Liljendahl-Nurminen, J. Niemistö and Z. Pekcan-Hekim(2009) Refuge availability and sequence of predators determine the seasonal succession of crustacean zooplankton in a clay-turbid lake. Aquat. Ecol. 43: 91-103.
- Jeong K.S., D.K. Kim, T.S. Chon and G.J. Joo(2005) Machine learning application to the Korean freshwater ecosystems. Korean J. Ecol. 28: 405-415.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard and T. Lauridsen(1999) Trophic dynamics in turbid and clear water lakes with special emphasis on the role of zooplankton for water clarity. In Shallow Lakes' 98, Springer Netherlands, pp. 217-231.
- Kim, H.S., B.C. Kim, E.M. Choi and S.J. Hwang(2000) Effects of cyanobacterial bloom on zooplankton community dynamics in several eutrophic lakes. Korean J. Limnol. 33: 366-373.
- Kim, H.W., S.J. Hwang and G.J. Joo(2000) Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river(Nakdong River, Korea). J. Plankton Res. 22: 1559-1577.
- Kim, H.W., G.H. La, J.H. Park, H.J. Song, K.S. Hwang, B.J. Lim and H.Y. Lee(2012) Community size structure of zooplankton assemblages in 29 lentic ecosystems on the Youngsan-Seomjin River basin(2010~2011). Korean J. Environ. Biol. 30: 64-70.(in Korean with English abstract)
- Kohonen, T., J. Hynninen, J. Kangas and J. Laaksonen(1996) Som pak: The self-organizing map program package. Report A31, Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science.
- Korea Ministry of Environment(2012) Water Pollution Investigation Method. pp. 93-1082.
- Manatunge, J., T. Asaeda and T. Priyadarshana(2000) The influence of structural complexity on fish-zooplankton interactions: a study using artificial submerged macrophytes. Environ. Biol. Fish 58: 425-438.
- Miranda, L.E., C.S. Andrews and R. Kröger(2014) Connectedness of land use, nutrients, primary production, and fish assemblages in oxbow lakes. Aquat. Sci. 76: 41-50.
- Mizuno, T. and E. Takahashi(1991) An Illustrated Guide to Freshwater Zooplankton in Japan. Tokai University Press. pp. 1-556.
- Richardson, A.J.(2008) In hot water: zooplankton and climate change. ICES J. Mar. Sci. 65: 279-295.
- Sagrario, G., de los Ángeles M.A.R.Í.A. and E. Balseiro(2010) The role of macroinvertebrates and fish in regulating the provision by macrophytes of refugia for zooplankton in a warm temperate shallow lake. Freshwater Biol. 55: 2153-2166.
- Sakamoto, M., K.H. Chang and T. Hanazato(2006) Inhibition of development of anti-predator morphology in the small cladoceran *Bosmina* by an insecticide: impact of an anthropogenic chemical on prey-predator interactions. Freshwater Biol. 51: 1974-1983.
- Sakuma, M., T. Hanazato, A. Saji and R. Nakazato(2004) Migration

- from plant to plant: an important factor controlling densities of the epiphytic cladoceran *Alona* (Chydoridae, Anomopoda) on lake vegetation. *Limnology* 5: 17-23.
- Son, M.W. and Y.G. Jeon(2003) Physical geographical characteristics of natural wetlands on the downstream reach of Nakdong River. *J. Korean Assoc. Reg. Geogr.* 9: 66-76. (in Korean with English abstract)
- Sterner, R.W., D.D. Hagemeyer, W.L. Smith and R.F. Smith(1993) Phytoplankton nutrient limitation and food quality for *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* 38: 857-871.
- Stich, H.B. and W. Lampert(1981) Predator evasion as an explanation of diurnal vertical migration by zooplankton. *Nature* 293: 396-398.
- Stockwell, J.D. and W.G. Sprules(1995) Spatial and temporal patterns of zooplankton biomass in Lake Erie. *ICES J. Mar. Sci.* 52: 557-564.
- Varbiro, G., E. Acs, G. Borics, K. Erces, G. Feher, I. Grigorszky, T. Japport, G. Kocsis, E. Karsznai, K. Nagy, Zs. Nagy-Laszlo, Zs. Pilinszky and K.T. Kiss(2007) Use of self-organizing maps(SOM) for characterization of riverine phytoplankton associations in Hungary. *Arch. Hydrobiol.* 161: 388-394.
- Werner, E.E. and D.J. Hall(1974) Optimal foraging and the size selection of prey by the bluegill sunfish(*Lepomis macrochirus*). *Ecology* 55: 1042-1052.
- Zaret, T.M. and J.S. Suffern(1976) Vertical migration in zooplankton as a predator avoidance mechanism. *Limnol. Oceanogr.* 21: 804-813.