

## 영산강, 섬진강 수계 내 주요 저수지에 대한 동물플랑크톤 군집 구조의 유사성 분석

고의정 · 김구연<sup>1,2</sup> · 주기재 · 김현우<sup>3,\*</sup>

부산대학교 생명과학과, <sup>1</sup>경남대학교 과학교육과, <sup>2</sup>경남대학교 바이오융합학부, <sup>3</sup>순천대학교 환경교육과

**Similarity of Zooplankton Community Structure among Reservoirs in Yeongsan-Seomjin River Basin.**  
*Eui-Jeong Ko* (0000-0002-6098-7877), *Gu-Yeon Kim*<sup>1,2</sup> (0000-0003-1071-0383), *Gea-Jae Joo* (0000-0002-5617-7601)  
and *Hyun-Woo Kim*<sup>3,\*</sup> (0000-0003-3898-5864) (*Department of Integrated Biological Science, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; <sup>1</sup>Department of Science Education, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea; <sup>2</sup>School of Bioconvergence, Kyungnam University, Changwon 51767, Republic of Korea; <sup>3</sup>Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon 57922, Republic of Korea*)

**Abstract** Our study was based on the long-term surveys with respect to the major reservoirs located in the Yeongsan and Seomjin river basins. A total of 45 survey sites have been surveyed four times a year from 2008 to 2017. We identified 166 zooplankton species, including 127 rotifers, 26 cladocerans, and 13 copepods. Mean population density and species number of small reservoirs were higher than those of mid and large reservoirs. Considering outliers exceeding the 90th percentile between species occupancy and mean abundance, 10 of 11 habitat generalists were rotifers, and *Bosmina longirostris* was the only cladoceran. Habitat specialist consisted of three species of rotifers and emerged from one to three survey sites. According to the modularity results, it was found that the survey sites covering the entire river basins were characterized into five groups, which was similar to the classification by maximum water surface areas (MWSA). The result of the eigenvector centrality showed that the size of MWSA had a greater impact on the similarity of zooplankton community structure between reservoirs than the difference in distance between reservoirs. In the case of survey points in near dam or estuary bank of Juam and Youngsan reservoirs, modularity class were separated from other internal survey points of those. Given that the zooplankton interactions may contribute to freshwater functions more than species diversity. These topological features provide new insight into studying zooplankton distribution patterns, their organization and impacts on freshwater-associated function.

**Key words:** community, eigenvector centrality, modularity, generalist, specialist

## 서 론

동물플랑크톤은 담수생태계의 1차 소비자로서 식물플랑

크톤과 상위 포식자 사이의 에너지 전달 매개체로서 중요한 위치에 있다. 특히 국내의 호소는 농업용수를 확보하기 위한 목적의 인공저수지가 대부분으로, 집수역을 통한 영양염류의 유입으로 인해 부영양화 및 식물플랑크톤의 대번성이 연중 발생하고 있다 (Schindler, 1974; Kim *et al.*, 2010). 따라서 식물플랑크톤을 주요 먹이원으로 하는 동물플랑크톤의 군집에 대한 이해는 호소환경에서 대두되는

Manuscript received 31 October 2019, revised 28 November 2019,  
revision accepted 28 November 2019  
\* Corresponding author: Tel: +82-61-750-3384 Fax: +82-61-750-3384  
E-mail: hwkim@suncheon.ac.kr

여러 문제들을 해결하기 위해서 필요하다.

국내 주요 호소 생태계는 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제 28조 및 시행령 30조에 따라 매년 호소환경 및 생태조사를 실시하고 있어 장기적인 생물상 자료가 축적되어 있지만, 이를 활용한 군집 연구는 각 호소에서의 개별연구가 주를 이루었다. 기존 연구들은 탄소생체량을 활용한 군집분석(Kim *et al.*, 2010), 평균밀도 비교(Kim *et al.*, 2015a)를 활용한 기초적인 군집구조 파악에 그쳤다. 이외에도 동물플랑크톤 모니터링 자료를 활용하여 Self-Organizing Map을 활용한 분류군별 밀도 및 환경적 특성 간의 관계를 파악(Kim *et al.*, 2015b), 섭식기능군에 따른 분류(Oh *et al.*, 2017) 등의 다양한 접근방법이 시도되었으나, 독립된 호소 조사자료 값 간의 차이를 비교하는 것은 직간접적으로 연결된 생태계 전반의 군집구조를 파악하는데 한계가 존재한다.

생태계 간의 군집구조에 대한 분석은 지속해서 진보했다. 특정 지역 또는 생태계 내 다양성을 나타내는 알파-다양성이나 생태계 간 다양성 비교를 하는 베타-다양성, 넓은 지역 내에서 전체 다양성을 나타내는 감마-다양성이 대표적인 군집구조 분석이다(Whittaker, 1972). 이러한 다양성에 대한 접근법은 최근까지 주요 군집구조 분석방법으로 자리했다. 그러나 최근 직간접적으로 연결된 생태계 간의 복잡한 군집 구조에 대한 새로운 분석 및 견해를 제시하는 연구가 미생물 군집구조 연구에서 수행되고 있으며(Barberán *et al.*, 2012), 국내에서도 조류 군집의 이동경로를 통해 보존지역 수립을 위한 패턴 분석이 시도되었다(Kim *et al.*, 2017). 이러한 네트워크 분석은 구분된 항목들 간에 통계적, 구조적 특성과 항목들 사이의 연결을 파악하는데 사용하는 유용한 방법이다(Newman, 2010). 이는 수리군집지수가 개체수, 종수, 우점종 수와 같은 자료를 활용하기 때문에 조사지점 간의 실제 유사성을 찾기 어려운 것과, 기존 군집분석(clustering analysis)이 관찰치들 간의 거리를 통해 유사한 것을 파악하는 것과 다르게, 네트워크 분석은 각 관찰치들 간의 방향성과 거리뿐만 아니라 인접한 관찰치들 사이의 연결 개수까지 고려한다. 특히 네트워크 분석 그래프는 모든 관찰치 데이터를 표현한 것으로, 시각화가 뛰어나므로 직관적인 이해에 용이하다. 이러한 장점을 가지는 네트워크 분석을 활용하여 호소들 간에 출현하는 동물플랑크톤의 군집의 유사성을 분석하고자, 출현종에 기초한 군집구조의 분석을 위해 호소의 중요성을 수치로 표현하는 중심성 척도를 사용하였다. 중심성은 관찰치들 사이의 연결 개수의 관계를 활용하여 어떤 관찰치들이 가장 중요한지를 확인하는 네트워크 분석의 대표적인 척도로 사용된다.

본 연구는 10년간의 영산강 섬진강 수계의 29개 호소를 대상으로 시행한 호소환경 및 생태조사 자료를 분석을 수행하였다. 각 호소에서 출현한 종 조성과 개체수를 이용하여 호소 간의 동물플랑크톤 군집에 이질성이 존재하는지 확인하였다. 동물플랑크톤 출현의 관계를 알아보기 위해 객체 간 관계의 중요성 파악하는 고유벡터 중심성(eigenvector centrality) 네트워크 분석을 수행하였으며, 이를 통한 군집 분석에서의 방법론적 고려사항과 사례를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지점 및 시기

본 연구는 “수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제28조 및 시행령 제30조”에 의거해 영산강, 섬진강 수계의 유역 환경청 및 지방자치단체에서 지정, 고시한 29개 호소 내 45개 지점을 대상으로 진행하였다(Table 1). 세부적으로 소형호(17개, 만수면적 2 km<sup>2</sup> 미만; 불감제, 소포제 포함) 1지점, 중형호(8개, 만수면적 2 km<sup>2</sup> 이상 20 km<sup>2</sup> 미만; 광주호, 보성호, 수어호 포함) 2지점, 대형호(4개, 만수면적 20 km<sup>2</sup> 이상) 3지점으로 구분하였다. 호소 내 지점수가 두 개 이상일 경우, 댐이나 방조제 인근 지역을 조사지점으로 포함하여 동물플랑크톤을 채집하였으며, 2008년부터 2017년까지 연 4회 실시하였다.

### 2. 동물플랑크톤 채집 및 동정

동물플랑크톤 채집은 32 µm 망목(Wildco 48 C60)을 이용하여 지점별로 각각 40 L를 필터 후 10% sucrose-formalin으로 고정한 후 동정, 계수하였다. 종 동정은 광학 및 도립현미경(×40, ×100)을 통해 검경하여 동물플랑크톤 종의 구성을 파악하였다. 400~1000배의 배율을 통해 동물플랑크톤의 형태와 저작기 등을 파악하였다. 분류는 속 또는 종 범위에 한해 분류하였으며 Koste (1978), Smirnov and Timms (1983), Einsle (1993)의 분류기에 따라 실시하였다.

### 3. 자료 분석

#### 1) 개체군 분석

호소의 전반적인 출현종 수 및 개체밀도를 확인하기 위해 29개 호소 내 만수면적으로 구분한 45개지점의 동물플랑크톤 종 수 및 개체수를 합산하여 사용 분석에 사용하였

**Table 1.** List of survey sites and zooplankton community composition from 2008 to 2017 in Yeongsan-Seomjin river basin.

Reservoir	Maximum water surface area (km <sup>2</sup> )	The number of species			The number of individuals		
		Rotifer	Cladocera	Copepod	Rotifer	Cladocera	Copepod
Baekwoonje	0.8	33	9	1	6,420	480	42
Bojenje	0.1	37	4	0	1,361	23	0
Bongamje	0.5	45	6	0	7,019	201	0
Boseung lake1	1.8	38	3	1	6,756	155	1
Boseung lake2	1.8	35	5	1	5,647	227	7
Buljapje	2.0	35	3	1	3,206	379	1
Daedong lake	1.2	43	7	1	5,219	615	6
Daedongje	1.2	41	4	1	11,781	820	5
Damyang lake1	4.1	28	6	0	2,225	42	0
Damyang lake2	4.1	29	7	1	3,350	512	7
Dongbuk lake1	6.6	33	6	1	4,191	107	33
Dongbuk lake2	6.6	27	4	1	4,292	30	9
Dunjenje	0.8	45	6	2	8,219	670	20
Gaechoje	0.6	47	6	0	20,174	467	0
Gungokje	0.5	36	5	2	20,453	253	77
Gwangju lake1	1.9	38	5	1	1,239	138	3
Gwangju lake2	1.9	33	7	1	3,323	2,822	6
Hadong lake	1.5	23	5	2	2,290	229	41
Hakpaje	0.8	38	6	1	6,015	908	371
Jangseung lake1	6.9	32	6	1	8,338	205	3
Jangseung lake2	6.9	33	4	0	7,622	993	0
Jangsuje	0.7	34	7	3	8,132	7,228	21
Jejeongje	0.6	49	8	2	8,342	646	34
Juam lake1	33.0	28	6	1	3,768	284	52
Juam lake2	33.0	33	7	1	7,897	259	19
Juam lake3	33.0	32	5	1	6,701	110	45
Keumho lake1	23.3	22	7	0	4,231	159	0
Keumho lake2	23.3	25	6	1	5,086	207	19
Keumho lake3	23.3	22	3	0	7,456	129	0
Naju lake1	7.8	30	8	0	7,776	178	0
Naju Lake2	7.8	29	5	0	3,627	444	0
Odongje	0.6	43	7	0	4,908	263	0
Sangsa lake1	7.8	31	5	0	2,971	88	0
Sangsa lake2	7.8	30	7	1	5,129	113	57
Sopoje	2.9	38	6	1	6,097	183	39
Sudongje	0.7	36	8	1	3,778	879	26
Sueo lake1	1.5	27	5	1	3,291	139	15
Sueo lake2	1.5	32	7	1	2,634	131	19
Suyangje	1.6	32	4	1	8,598	1,577	161
Youngam lake1	42.9	28	6	2	6,151	119	8
Youngam lake2	42.9	28	6	1	7,804	278	16
Youngam lake3	42.9	29	8	2	19,949	1,291	185
Youngsan lake1	34.6	35	7	1	5,762	1,618	13
Youngsan lake2	34.6	40	9	0	12,374	2,851	0
Youngsan lake3	34.6	41	7	0	13,169	1,596	0

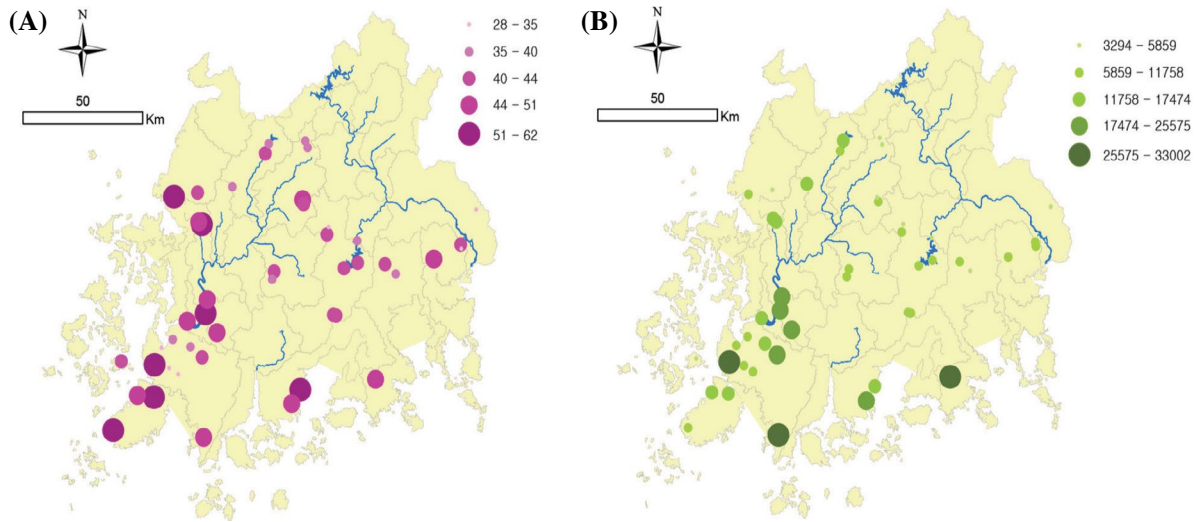


Fig. 1. Number of zooplankton species (A) and individuals (B) in 31 study sites during the study period (2008~2017).

다. 분석의 기준은 분류별로 구별하였으며, 윤충류, 지각류, 요각류의 총 3분류군으로 호소별 특성을 파악하였다. 그리고 10년 동안 출현한 종목록과 개체수 합을 바탕으로 출현 조사지점의 종별 평균 풍부도를 파악하였으며, 점유율에 따른 평균 풍부도의 변화는 선형회귀분석을 통해 분석하였다. 집단 간의 비교는 분산의 동질성에 따라 one-way ANOVA를 활용하여 유의확률 0.05에서 검정하였으며, 사후분석은 Schaffe test로 수행하였다. 자료는 통계분석을 위해 로그변환을 활용하였다(O'hara and Kotze, 2010). 자료의 통계분석은 IBM SPSS statistics 25를 사용하였다.

## 2) 네트워크 분석

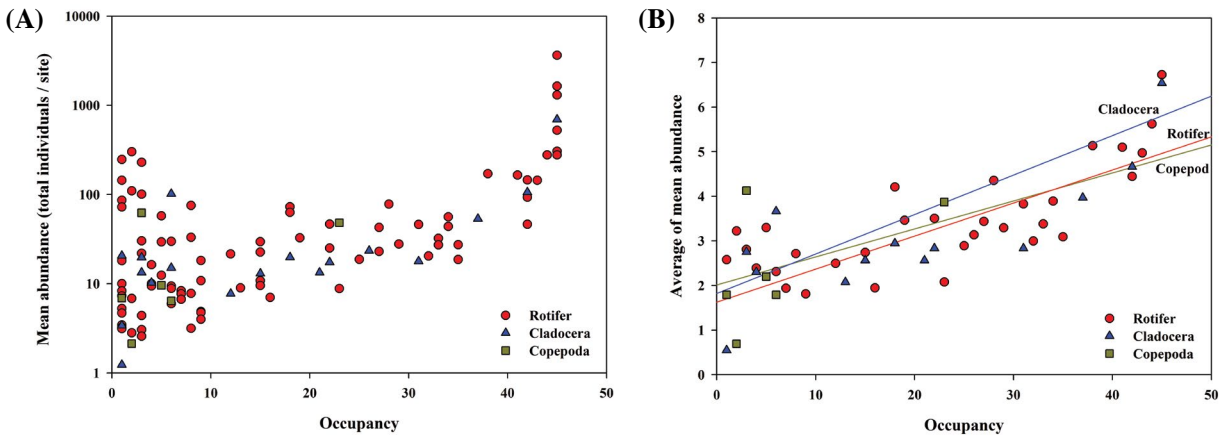
네트워크란 사람·사물 등(객체; node, vertex)을 연결하는 관계(edge, link)를 의미하며, 객체 간의 관계의 중요도를 파악하는 척도로 중심성(centrality)을 사용한다. 중심성 척도는 객체 간의 직·간접적인 관계에 있어 중요도를 파악하는 방법이며, 특정 객체에 연결된 주변 객체의 수를 활용하여 계산한다. 따라서 네트워크 중심성 분석은 관계를 통해 객체를 기술하는 방법이다(Newman, 2010). 본 연구에서 사용한 고유벡터 중심성(Ce, eigenvector centrality)은 중심성 정도가 높은 객체들과 연결된 특정 객체의 중요도가 높다는 것을 의미한다(Jordano *et al.*, 2006). 고유벡터 중심성은 인근 객체들의 중심성을 결합시킴으로써 중심성을 일반화하는 것이다(Zafarani *et al.*, 2014). 또한 주어진 네트워크에서 어떤 형태의 그룹이 존재하는지를 확인하고자 그룹화를 계산하였다. 그룹화는 객체들이 그룹을 이룰 때 전체 관계(edge) 대비 그룹 내부와 외부의 관계의

비율의 합을 수식을 통해 계산하여, 최종적으로 그룹화 값을 최소로 만드는 그룹으로 객체들을 분류하는 방법을 이용하였다(Blondel *et al.*, 2008; Jun and Han, 2013). 소셜 네트워크 분석 및 시각화 소프트웨어 Gephi (ver 0.9.2)를 활용하여, 호수별 출현 종 목록을 통해 객체의 고유벡터 중심성 및 그룹화(modularity)를 계산하였다. 이를 위해 객체는 호소명을 사용하였으며, 호소 내에서 출현한 종 목록을 관계 특성으로 분류하였다. 호소 간의 관계는 방향성이 없는 것으로 고려하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 출현 종 및 개체수 검경 결과

영산강 섬진강 수계 지역 29개 호소 내 45개 조사지점에서 조사기간 동안(2008~2017) 출현한 총 동물플랑크톤 종 수는 166종인 것으로 파악되었다(Table 1). 동물플랑크톤은 윤충류가 127종으로 우점 분류군이었으며, 지각류 26종, 요각류 13종으로 동정되었다. 호소별로 출현한 평균 동물플랑크톤 종 수는 43종이며, 28~62종으로 나타났다. 동물플랑크톤 출현 종 수는 금호호1, 금호호3, 하동호에서 28~32종으로 낮았고, 개초제, 둔전제, 지정제에서 56종 이상으로 다소 높았다(Fig. 1a). 만수면적에 따라 구분된 호소 크기에 따른 비교에서는 소형호에서 평균 출현 종 수가 48종으로 중형호 40종, 대형호 40종에 비해 뚜렷이 높게 나타났으며(one-way ANOVA;  $df=2, F=9.165, p<0.001$ ), 세부적으로는 윤충류 군집 내의 소형호-중형호, 소형호-대



**Fig. 2.** (A) Abundance (y axis) and occupancy (x axis) plot for the zooplankton abundance. Species that turned out to be outliers in the quartile were divided into habitat generalists (abundant;  $\geq 200$  mean abundance,  $\geq 40$  sampling sites) and habitat specialists (locally abundant;  $\geq 200$  mean abundance,  $3 \geq$  sampling sites). (B) Linear regression analysis result of average of mean abundance (y axis) and occupancy (x axis) plot for the zooplankton abundance. Data were converted to natural log-transformed for statistical analysis.

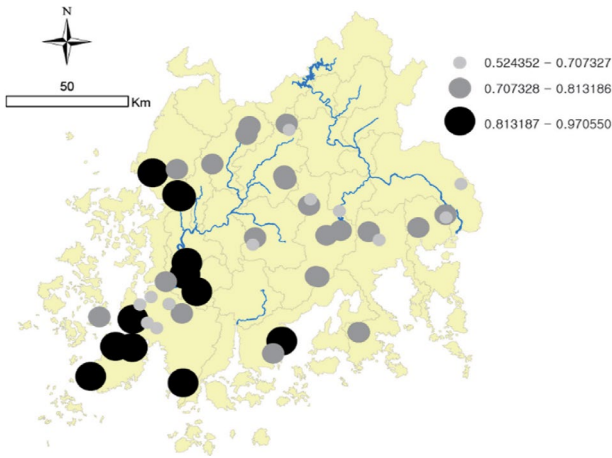
형호 간에 그 차이가 유의하였다(one-way ANOVA;  $df=2$ ,  $F=10.092$ ,  $p<0.001$ ; post-hoc Shaffe test,  $p<0.05$ ). 분포 범위가 제한된 대형호나, 내륙 위주로 분포하는 중형호와 비교하여, 해양과 인접하며 넓은 지역에 분포하는 소형호의 위치적 특성이 동물플랑크톤 종 수에 반영된 것으로 고려된다. 총 동물플랑크톤의 개체수는  $12,445 \pm 20,557$ 이었으며, 출현 개체수는 지점별로 뚜렷한 차이를 보여 담양호1에서 3,294개체가 출현하였으며, 군곡제에서 33,002개체가 출현한 것으로 파악되었다(Fig. 1b). 소형호에 출현하는 동물플랑크톤 개체수는 평균 16,225개체였으며, 대형호 13,461개체, 중형호 7,665개체 순이었다. 만수면적에 따라 구분된 호소 크기에 따른 비교에서는 대형호의 출현 개체수가 중형호에 비해 뚜렷이 높게 나타났다(one-way ANOVA;  $df=2$ ,  $F=3.843$ ,  $p=0.029$ ). 5만 개체 이상 출현한 주요 종은 *Polyarthra vulgaris*, *Keratella cochlearis*, *Keratella valga*와 같은 소형 동물플랑크톤 군집인 윤충류로, 지각류나 요각류와 같은 중대형 동물플랑크톤에 비해 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향이 적을 것으로 예측된다(Lampert and Sommer, 1993).

**2. 서식처에 따른 종 구별**

동물플랑크톤 종 조성 및 개체수 자료 활용하여 출현종들의 풍부도를 확인한 결과는 Fig. 2a와 같다. 지점당 출현 종수는 최소 1지점에서 1개체가 나타난 *Ilyocryptus sordicus*가 있었으며, 최대 45지점에서 평균 2,289개체가 출현한 *Polyarthra vulgaris*가 확인되었다. 백분위수 방법을 통해 백

분위수 90을 초과하는 것을 이상치로 고려하여(Barberán *et al.*, 2012), 이상치에 속하는 종은 11종으로 나타났으며, 분류군별로 윤충류 10종과 지각류 1종(*Bosmina longirostris*)이 파악되었다. 이상치에 포함된 동물플랑크톤 11종은 두가지 그룹으로 구분되었다. 45개 조사지점 전반에 출현하고 있는 서식처 보편종(habitat generalist)은 윤충류 7종과 지각류 1종이 포함되었다(*Brachionus angularis*는 44지점 출현). 서식처 특이종(habitat specialist)은 평균 풍부도는 높지만, 출현 조사지점이 제한된 종으로서 *Kelicottica longispina* (2지점 출현; 평균 풍부도  $301 \text{ ind} \cdot \text{sites}^{-1}$ ), *Conochiloides* sp. (1지점 출현; 평균 풍부도  $247 \text{ ind} \cdot \text{sites}^{-1}$ ), *Trichotria tetractys* (3지점 출현;  $230 \text{ ind} \cdot \text{sites}^{-1}$ )의 3종이 3개 조사지점 이하에서 출현했다. 서식처 보편종이 주로 공간적 요인에 의해 반응하고 서식처 특이종이 환경적 요인에 의해 반응하는 것으로 볼 때(Pandit *et al.*, 2009), 본 조사지역의 동물플랑크톤들은 지리적 특성과 환경적 요인이 유사한 것으로 예상된다. 또한 *Moina micura*는 45개 지점 중 6지점에서 출현하였는데(장성호1, 금호호1, 영산호1, 영산호2, 영암호2, 영암호3), 그 중 다섯 지점이 서로 인접한 대형호 3개소였다. 세 대형호는 어류 군집 유사도가 75%이상으로 나타나는 것으로 알려져 있으며, 호소 간의 동물플랑크톤의 이동 또한 가능하여 이러한 결과가 나타난 것으로 고려된다.

점유율(occupancy)이 높을수록 평균 풍부도가 점진적으로 증가하는 일반적인 생태학적 현상(Van der Gast *et al.*, 2011)과 본 연구 결과는 부합하였다(Fig. 2b). 특히 지각류(linear regression analysis,  $R^2=0.609$ ,  $p=0.001$ )는 윤충류(linear regression analysis,  $R^2=0.578$ ,  $p<0.001$ )에 비해

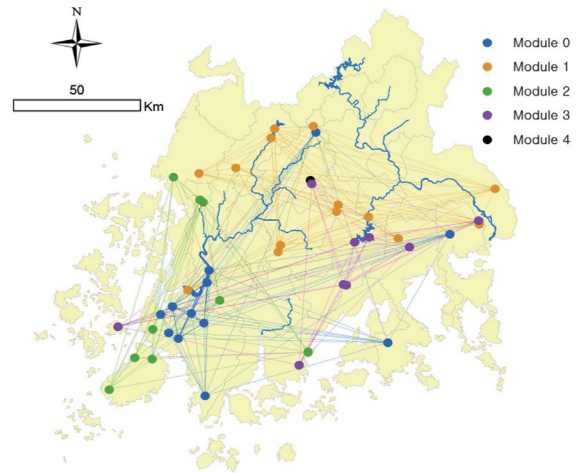


**Fig. 3.** Eigenvector centrality of each site: eigenvector centrality is a measure of the influence of a site (node) in the network. A high eigenvector score means that a site is connected to many nodes who themselves have high scores.

조사지점이 늘어날수록 개체수 증가가 확연하였다. 그러나 요각류의 경우에는 경향성을 확인할 수 없었다(linear regression analysis,  $R^2=0.299$ ,  $p=0.131$ ). 자료 수집이 추가적으로 시행되었을 때 경향성을 논의할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 동물플랑크톤 네트워크

45지점 평균 고유벡터 중심성(Ce) 값은 0.7663으로 나타났다으며, 최소 0.5244 (금호호3)에서 최대 0.9706 (지정제)까지 분포하였다(Fig. 3). 소형호 평균 Ce 0.8218, 중형호 평균 Ce 0.7394, 대형호 평균 Ce 0.7236으로 나타났다. Ce 값이 높은 조사지점은 주로 소형호였으며, 이외에 영산호3, 영산호2로 파악되었다. 그러나 두 지점을 제외한 금호호, 영산호, 영암호의 7지점의 경우, 높은 Ce 값을 나타낸 인근 소형호에 비해 값이 현저히 낮다. 고유벡터 중심성이 주변과 교류를 하는 객체와의 연결성을 나타내는 것을 고려하면(Jordano *et al.*, 2006), 서남지역의 호소는 지리적으로 인접한 위치에 있지만 대형호와 소형호 사이에 동물플랑크톤 군집구조의 유사성보다 만수면적으로 구분한 대·중·소 호소 내의 군집 유사성이 더 높다. 국내 저수지의 수생식물의 분포가 연안에 분포하거나 혹은 수면 대부분을 덮음으로써 동물플랑크톤의 피난처 제공하여(Kairesalo, 1998) 동물플랑크톤 군집에 영향을 미칠 수 있다(Keppeler, 2003). 또한 종수가 증가할 때 개체수 또한 증가하는 본 연구결과(linear regression test,  $R^2=0.223$ ,  $p=0.001$ )를 볼 때, 소형호 내에서 고유벡터 중심성이 높



**Fig. 4.** The topological representations of the overlapping community structure in the structural zooplankton network. All 45 sites were divided into 5 groups based on zooplankton communities.

은 이유는 호소의 수심에 따라 동물플랑크톤의 안정적 서식처가 확장되었을 가능성이 있다. 뿐만 아니라 앞서 기술한 소·중·대형호의 지리적 특성으로 인한 출현종의 유사성이 고유벡터 중심성 결과값에 영향을 것으로 고려된다.

조사 대상 호소지점들은 그룹화 분석을 통해 5가지 그룹으로 구분되었다(Fig. 4). Module 0은 12개의 조사지점 중 대형호가 8개를 구성하고 있으며, Module 1은 14개의 지점 중 9개 지점이 중형호로 구분되었다. Module 2는 9개 모두 소형호에 속하고 있으며, 이들은 Ce 지수 평균값 또한 0.8815로 소형호 평균 Ce 값보다 높고 지리적으로 모두 해양과 인접한 곳에 위치하였다(Figs. 3, 4). Module 3의 경우에는 9개의 호소 내 중형호가 5개 대형호 소형호가 각각 2개씩 분포하였다. 마지막으로 Module 4에 속한 호소는 중형호 1개로, 광주호1 지점이었다. 동일한 호소 내의 구분된 조사지점을 가지는 중형호와 대형호의 경우, 대부분 같은 클러스터 내에 포함되었다. 그러나 대형호 2지점(영산호1, 주암호1)과 중형호 4지점(광주호, 담양호, 상사호, 수어호)의 경우에는 서로 다른 그룹에 속하여 차이를 나타냈다. 이는 동일한 조사구역 내에서도 미소환경의 차이로 인해, 동물플랑크톤과 같은 작은 생물 군집은 비균질한 공간적 분포를 나타내기 때문이다(Pinel-Alloul *et al.*, 1988). 특히 다년간의 장기데이터의 반복된 조사에서도 이러한 비균질적인 공간특성을 나타내는 것으로 볼 때, 단순 채집 횟수의 부족이 아닌, 내부 지점간 교류가 제한적인 것으로 예상된다. 또한 영산호1, 주암호1의 경우 방조제와 댐인근의 지역의 조사정점으로 인한 지리적 특성을 반영한 것으

로 판단된다. 결과적으로 네트워크 분석은 기존 다양성지수와 같은 수리군집지수로 분석할 수 없는 출현 종 목록의 차이까지 구별할 수 있다는 점에서 보다 유용할 것이라 고려된다.

## 적 요

본 연구에서는 영산강, 섬진강 유역에서 호소 간의 동물플랑크톤의 군집구조 특성이 만수면적에 따라 분류된 소·중·대형의 저수지에서 종 수 및 개체수가 유의한 차이를 보이는 것을 확인하였다. 윤충류보다 지각류에서 민감도가 높은 것을 확인하였으며, 특히 두 분류군 모두 양의 상관관계를 나타냈지만, 지각류에서 조사지점이 늘어날수록 개체수 증가가 확인한 것을 알 수 있었다. 또한 네트워크 분석 개념을 활용한 고유벡터 중심성 및 그룹화 분석을 사용하여 호소 간의 동물플랑크톤 군집구조를 비교했을 때, 만수면적에 따른 대·중·소형 호소 내에서도 지리적 특성과 미소환경 공간의 차이점을 구별할 수 있었다. 따라서 이러한 특성을 볼 때, 네트워크 분석은 담수 동물플랑크톤 군집구조 분석에 있어 만수면적 크기, 지리적 특성, 미소환경 특성을 반영할 수 있는 것으로 고려된다. 마지막으로, 네트워크 분석은 다양한 군집분석을 간소화하며 시각화를 통한 직관적 이해를 돕는 데 유용할 것이다.

**저자정보** 고의정 (부산대학교 생명과학과 박사과정), 김구연 (경남대학교 과학교육과 교수), 주기재 (부산대학교 생명과학과 교수), 김현우 (순천대학교 환경교육과 교수)

**저자기여도** 개념설정: 고의정, 자료수집: 고의정, 김구연, 자료관리: 김구연, 김현우, 주기재, 원고 초안작성: 고의정, 최종원고 검토: 김현우, 과제관리: 주기재, 김현우

**이해관계** 본 연구는 이해관계의 충돌 여지가 없습니다.

**연구비** 본 연구는 국립환경과학원 영산강유역환경청에서 시행한 2019 영산강·섬진강 수계 환경 기초조사사업의 일환으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

- Barberán, A., S.T. Bates, E.O. Casamayor and N. Fierer. 2012. Using network analysis to explore co-occurrence patterns in soil microbial communities. *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology* **6**(2): 343-351.
- Blondel, V.D., J.L. Guillaume, R. Lambiotte and E. Lefebvre. 2008. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* **2008**(10): 10008
- Einsle, U. 1993. Crustacea, Copepoda, Calanoida und Cyclopoida. *Susswasswefauna von Mitteleuropa*, vol. 8, part 4-1. Gustav Fisher Verlag, Stuttgart.
- Jordano, P., J. Bascompte and J.M. Olesen. 2006. The ecological consequences of complex topology and nested structure in pollination webs, p. 179-199. *In: Plant-pollinator interactions: from specialization to generalization* (Waser, N.M. and J. Ollerton, eds.). University of Chicago Press, Chicago, IL, USA.
- Jun, B.H. and C.G. Han. 2013. A method to decide the number of additional edges to integrate the communities in social network by using modularity. *Journal of The Korea Society of Computer and Information* **18**(7): 101-109.
- Kairesalo, T., I. Tatrai and E. Luokkanen. 1998. Impacts of waterweed (*Elodea canadensis* Michx) on fish-plankton interactions in the lake littoral. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen* **26**(4): 1846-1851.
- Keppeler, E.C. 2003. Abundance of zooplankton from different zones (pelagic and littoral) and time periods (morning and night) in two Amazonian meandering lakes. *Acta Scientiarum: Biological Sciences* **25**(2): 287-297.
- Kim, H.W., G.H. La, K.S. Jeong, J.H. Park, Y.J. Huh, S.D. Kim, J.E. Na, M.H. Jung and H.Y. Lee. 2010. Assessing the plankton dynamics in lakes and reservoirs ecosystem in the southwestern parts of Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **28**(2): 86-94.
- Kim, S.J., H.J. Song, T.J. Park, M.Y. Hwang, H.S. Cho, K.D. Song, H.J. Lee and Y.S. Kim 2015a. Survey on lake environments in the Yeongsan and Seomjin river basins-based on 10 lakes such as Hadong and Sangsa. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**(6): 665-679.
- Kim, S.K., D.G. Hong, M. Kang, K.L. Lee, H.Y. Lee, G.J. Joo and J.Y. Choi. 2015b. Zooplankton community dynamic in lentic freshwater ecosystems in the Nakdong river basin. *Korean Journal of Environmental Ecology* **29**(3): 410-420.
- Kim, Y.M., S.W. Hong, Y.S. Lee, K.C. Oh, G.Y. Kim and G.J. Joo. 2017. Co-occurrence patterns of bird species in the world. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(4): 478-482.
- Koste, W. 1978. Rotatoria. Die Radertiere Mitteleuropes begrunder von Max Voigt, 2nd edn., Vol. 1. Textband, p. 673, Vol. 2. Tafelband, p. 234, Borntraeger, Stuttgart.
- Lampert, W. and U. Sommer. 1993. *Limnoökologie*. Georg Thieme, Stuttgart, Germany.
- Newman, M. 2010. *Networks: an introduction*. Oxford University Press, UK.

- Oh, H.J., K.H. Chang, D.I. Seo, G.S. Nam, E.H. Lee, H.G. Jeong, J.D. Yoon and J.M. Oh. 2017. Zooplankton community as an indicator for environmental assessment of aquatic ecosystem: application of rotifer functional groups for evaluating water quality in eutrophic reservoirs. *Journal of Environment Impact Assessment* **26**(6): 404-417.
- O'hara, R.B. and D.J. Kotze. 2010. Do not log-transform count data. *Methods in Ecology and Evolution* **1**: 118-122.
- Pandit, S.N., J. Kolasa and K. Cottenie. 2009. Contrasts between habitat generalists and specialists: an empirical extension to the basic metacommunity framework. *Ecology* **90**(8): 2253-2262.
- Pinel-Alloul, B., J.A. Downing, M. Perusse and G. Codin-Blumer. 1988. Spatial heterogeneity in freshwater zooplankton: variation with body size, depth, and scale. *Ecology* **69**(5): 1393-1400.
- Schindler, D.W. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science* **184**: 897-899.
- Smirnov, N.N. and B.V. Timms. 1983. A revision of the Australian Cladocera (Crustacean). *Records of the Australian Museum Supplement* **1**: 1-132.
- Van der Gast, C., A.W. Walker, F.A. Stressmann, G.B. Rogers, P. Scott, T.W. Daniels, M.P. Carroll, J. Parkhill and K.D. Bruce. 2011. Partitioning core and satellite taxa from within cystic fibrosis lung bacterial communities. *Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology* **5**(5): 780-791.
- Whittaker, R.H. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* **21**: 213-251.
- Zafarani, R., M.A. Abbasi and H. Liu. 2014. Social media mining: an introduction. Cambridge University Press.
- Zingel, P. 1999. Pelagic ciliated protozoa in shallow eutrophic lake: community structure and seasonal dynamics. *Archiv für Hydrobiologie* **146**: 495-511.