

Original article

출현 양상 기반 소형호 내 동물플랑크톤 군집의 계절 변동과 다양성 관계

홍근혁 · 오혜지 · 최예림 · 김준완¹ · 최범명¹ · 장광현* · 장민호^{1,*}

경희대학교 환경학및환경공학과, ¹공주대학교 생물교육과

Relationship Between Seasonal Dynamics of Zooplankton Community and Diversity in Small Reservoir Focusing on Occurrence Pattern.

Geun-Hyeok Hong (0000-0001-5771-7238), Hye-ji Oh (0000-0003-2098-8485), Yerim Choi (0000-0002-8600-1391), Jun-Wan Kim¹ (0000-0002-7181-0313), Beom-Myeong Choi¹ (0000-0001-5702-5207), Kwang-Hyeon Chang* (0000-0002-7952-4047) and Min-Ho Jang^{1,*} (0000-0003-2331-4232) (Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea; ¹Department of Biology Education, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea)

Abstract Small ponds, which exhibit unstable succession pattern of plankton community, are less well studied than large lakes. Recently, the importance of small ponds for local biodiversity conservation has highlighted the necessity of understanding the dynamics of biological community. In the present study, we collected zooplankton from three small reservoirs with monthly basis and analyzed their seasonal dynamics. To understand the complicated zooplankton community dynamics of small reservoirs, we categorized zooplankton species into four groups (LALF Group, Low Abundance Low Frequency; LAHF Group, Low Abundance High Frequency; HALF Group, High Abundance Low Frequency; HAHF Group, High Abundance High Frequency) based on their occurrence pattern (abundance and frequency). We compared the seasonal pattern of each group, and estimated community diversity based on temporal beta diversity contribution of each group. The result revealed that there is a relationship between groups with the same abundance but different occurrence frequencies, and copepod nauplii are common important component for both abundance and frequency. On the other hand, species included with LALF Group throughout the study period are key in terms of monthly succession and diversity. LALF Group includes *Anuraeopsis fissa*, *Hexarthra mira* and *Lecane luna*. However, groups containing species that only occur at certain times of the year and dominate the waterbody, HALF Group, hindered to temporal diversity. The results of this study suggest that the species-specific occurrence pattern is one key trait of species determining its contribution to total annual biodiversity of given community.

Key words: zooplankton seasonal succession, beta diversity, rare species, population dynamics, pond, occurrence frequency

서론

Manuscript received 23 June 2023, revised 28 June 2023,
revision accepted 30 June 2023
* Co-corresponding author: Tel: +82-31-201-2977, Fax: +82-31-204-8114
E-mail: chang38@khu.ac.kr
Tel: +82-41-850-8285, Fax: +82-41-850-8842
E-mail: jangmino@kongju.ac.kr

개체군 동태 (population dynamics) 연구는 생물 집단의 크기와 구조 (조성)의 변화에 대한 해석을 목적으로 수행된 다 (Hazelwood and Parker, 1961). 이는 생태계 내에서 개체군의 상태를 나타내는 기초 자료의 역할을 하는 동시에, 대

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

상 생물의 생물학적 상호작용 및 비생물학적 상호작용이 반영된 결과로서, 환경요인들이 대상 생물군에 미치는 영향을 정량화하는 데 있어서 중요하게 작용한다(Svanbäck and Persson, 2004; Nicolle *et al.*, 2011).

호소생태계 주요 일차소비자인 동물플랑크톤은 수체 전반의 생물, 비생물학적 작용에 영향을 미치며, 일차생산자인 식물플랑크톤을 섭식함으로써 생산에 대한 에너지 및 물질을 고차소비자에게 연결하는 역할을 수행한다(James and Forsyth, 1990; Brett and Goldman, 1997; Pickhardt *et al.*, 2005). 이에 따라 동물플랑크톤 군집 동태는 식물플랑크톤 및 원생동물 등 섭식 가능한 생물의 영향을 받는 하부 상향 조절(bottom-up)과 어류 및 대형 무척추 동물의 포식압에 의한 상부 하향 조절(top-down)의 영향을 받는 동시에, 동물플랑크톤 군집 내에서도 같은 자원을 공유하는 종 간 경쟁 및 포식 등 복합적인 영향을 받는다(Lynch, 1979; Riemann, 1985; Vanni, 1987; Hanazato, 1990; Zöllner *et al.*, 2009). 따라서 동물플랑크톤 개체군 동태를 통해 해당 수체의 상태를 물질 순환 및 에너지 전달 측면에서 해석하는 것이 가능하다(David *et al.*, 2006; Cai *et al.*, 2020; Eckert *et al.*, 2021). 하지만 동물플랑크톤 개체군 동태는 복잡한 생물학적 상호작용의 영향과 동시에, 짧은 생활사에서 기인한 급격한 종 천이 및 휴면기작 등으로 인하여 군집 조성의 변화를 해석하고, 이에 영향을 미치는 요인을 정확히 파악하는 것에는 어려움이 있다(Allan, 1976; Larsson, 1978).

담수 동물플랑크톤의 시간적 군집 변화 및 천이 기작 연구는 일반적으로 주요 분류군(요각류, 지각류, 윤충류) 수준에서 수행되거나 우점종 및 보편적으로 출현하는 종(common species) 또는 상위포식자(e.g., 어류 및 저서성 대형 무척추 동물)의 주요 먹이원이 되거나 식물플랑크톤에 큰 영향을 미치는 중대형 동물플랑크톤 종에 초점을 맞추어 수행되었다(Burns and Mitchell, 1980). 반면 호소 내에서 적은 개체수로 출현하거나, 호소 특이적인 종(rare species) 및 불규칙적인 출현 패턴을 가진 종들에 대해서는 주목도가 크지 않았다(Hessen and Walseng, 2008). 따라서 군집 변동과 천이 기작에 대한 명확한 해석을 위해서는 이와 같은 출현 개체수가 적은 종과 특이종에 대한 이해가 필요하다(Lennon *et al.*, 2004; Mouillot *et al.*, 2013).

소형 저수지에 존재하는 생물 군집의 수체 간 공간적 이질성은 지역 생물다양성의 유지 측면에서 높은 기여도를 나타내며(Oertli *et al.*, 2009), 수체 고유의 불규칙적 천이는, 계절에 따라 규칙적이며 안정적인 군집 동태를 이루는 대형 호소와는 다른 방향으로 지역 종 다양성 유지에 기여하여, 소형 호소에서의 생물 군집의 변동 패턴에 대한 이해의 필요성이 강조되고 있다(Lemmens *et al.*, 2013). 하지만 동물플

랑크톤 군집의 천이에 대해서는 환경요인들이 안정적인 계절성을 보이는 대형 호소를 중심으로 연구가 진행되었고(Sommer *et al.*, 1986), 산발적으로 발생하는 불규칙한 환경요인에 크게 영향을 받는 소형 호소에 대한 동물플랑크톤 군집의 천이 패턴은 대형 호소에 비해 연구가 미진한 상황이다(Søndergaard *et al.*, 2005). 특히, 소형 호소의 경우 낮은 수심으로 인해 중앙부(pelagic zone)와 수변부(littoral zone)가 구분되지 않은 환경이 나타나기도 하며, 강우에 의한 저수량 변화 및 수변부 토양 유입 등 외부 환경 변화에 대한 안정성이 대형 호소에 비해 낮기 때문에 불안정한 동물플랑크톤 종 조성을 보인다(Verstraeten and Poesen, 2000; Søndergaard *et al.*, 2005; Yoon *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2010). 이로 인해 같은 지역 내의 호소 간 동물플랑크톤 군집에 공간적 이질성이 클 수 있으며(Lopes *et al.*, 2014), 같은 호소 내에서의 시간적인 변동 역시 크기 때문에 천이 패턴을 파악하기 위해서는 다양한 접근 방식이 요구된다.

본 연구는 소형 호소의 불규칙한 동물플랑크톤 개체군 동태 및 동물플랑크톤 종들의 출현 패턴을 해석하기 위해 가까운 지리적 위치에 있어 동일 기후권에 속해 있는 세 개의 소형 저수지에서 출현한 동물플랑크톤을 대상으로 출현량 및 출현 빈도를 통한 그룹화를 진행하였다. 또한 각 호소의 월별 알파다양성(Alpha Diversity) 및 시간적 베타다양성(Temporal Beta Diversity)을 산출하고, 동물플랑크톤 출현 패턴을 기반으로 하여 각 그룹들의 다양성에 대한 기여도를 분석하였다. 이를 통해 소형 호소에서의 개체군 변화를 해석하고, 일반적인 동물플랑크톤 군집 동태 연구에서 주목하지 않았던 적은 개체수의 출현 종, 호소 특이종, 출현 패턴이 불규칙한 종들을 포함한 군집 전체의 천이 과정을 설명하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지 및 조사 방법

본 연구는 대한민국 전라북도 군산시에 위치한 세 소형 농업 저수지인 강정제(36°02'20"N 126°50'30"E, 유역면적 0.9 km², 총저수량 66,000톤), 중초산제(35°58'02"N 126°48'53"E, 유역면적 0.6 km², 총저수량 25,000톤), 북초산제(35°58'06"N 126°48'54"E, 유역면적 0.15 km², 총저수량 21,000톤)를 대상으로 2022년 동절기를 제외한 4월부터 10월까지 월 1회(총 7회)에 걸쳐 동물플랑크톤 시료를 수집하였다. 중초산제와 북초산제는 서로 인접해 있으며, 강정제와의 거리는 약 8.15 km로 동일한 기상 영향권에 위치해 있다.

동물플랑크톤 시료수집은 망목 60 μm 플랑크톤 네트(직

경 30 cm, 길이 60 cm)를 사용하여 3 m 사선끌기하였고 현장에서 중성 포르말린으로 최종 농도 4~5%가 되도록 고정시켰다. 채집된 시료는 실험실에서 해부현미경(SZ; Olympus, Japan)과 광학현미경(CKX41; Olympus, Japan)을 이용하여 40~100×에서 종 또는 속 수준으로 검경하였다. 동물플랑크톤 종 동정을 위해 윤충류와 지각류는 Flössner (2000), Jeong *et al.* (2014), 요각류는 Paik (1989)을 참고하여 동정하였고, 동물플랑크톤 개체수(출현 밀도) 산정은 여과네트의 부피와 인양거리를 계산하여 리터당 개체수(Individuals per liter)로 최종 산정하였다. 수질의 경우 기초수질항목에 해당하는 수온, 용존산소, pH, 전기전도도, 클로로필 a 농도를 현장에서 측정하였다. 수온, 용존산소, pH, 전기전도도의 경우, 다목적 수질측정기(U-15; Horiba, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 클로로필 a의 경우, 간이 클로로필 측정기(8000-010; Turner Designs)를 사용하여 측정하였다.

2. 데이터 처리

1) 출현 패턴을 기반으로 한 동물플랑크톤 그룹화

본 연구에서 분류군 내의 관계 및 다양성에 대한 기여도를 산출하기 위해, 출현 패턴을 기준으로 출현한 동물플랑크톤들의 그룹화를 진행하였다. 상대 풍부도 10%의 값을 기준으로 출현량 그룹을 설정하였으며, 출현 시 10% 이상의 상대 풍부도를 연 1회 이상 보인 종을 High Abundance로, 조사가 수행된 모든 시기에 걸쳐 10% 미만의 상대 풍부도를 보인 종을 Low Abundance로 분류하였다. 또한 연 7회의 조사 중 4회 출현을 기준으로 출현 빈도 그룹을 설정하였으며, 4회 이상의 출현 빈도를 보인 종을 High Frequency로, 4회 미만의 출현 빈도를 보인 종을 Low Frequency로 분류하였다. 위 기준을 바탕으로 연중 일부 시기에만 출현하며, 출현 시 낮은 출현량을 보이는 종에 해당하는 LALF (Low Abundance Low Frequency) 그룹, 연중 꾸준하게 출현하지만, 낮은 출현량을 보이는 LAHF (Low Abundance High Frequency) 그룹, 연중 부분적으로 출현하지만, 출현 시 높은 출현량을 보이는 HALF (High Abundance Low Frequency) 그룹, 연중 꾸준하게 출현하며, 높은 출현량을 보이는 HAHF (High Abundance High Frequency) 그룹을 포함하여 총 4개로 구분하여 분석을 수행하였다. 출현 패턴을 기준으로 나눈 4개의 동물플랑크톤 그룹이 나타내는 천이 과정에서 개체수 변동 관계를 분석하기 위해 R 패키지 'stats'의 일반화 선형 모형 (Generalized Linear Model) 분석을 통해 구해진 표준오차 (Standard Error) 값을 비교하였다 (R Core Team, 2021). 각 그룹 간의 계절적 천이의 관계성을 해석하기 위해 그룹별 현존량을 최소-최대 정규화 (Min-Max Normalization) 방법으로

로 스케일링하여 비교하였다.

2) 동물플랑크톤 다양성 및 그룹별 기여도 분석

월간 동물플랑크톤 종 다양성 변화를 정량화하고자 현존량 (abundance) 데이터를 사용하여 Shannon 다양도 지수 (Shannon Diversity Index)를 산출하였다. Shannon 다양도 지수는 단일 메트릭의 타 다양성 지수 (종 풍부도 (Richness), 심슨 다양도 지수 (Simpson Diversity Index) 등) 대비 출현량이 적은 종을 대상으로 민감한 다양성 평가를 가능하게 하므로 이를 선정하였으며 (Gimaret-Carpentier *et al.*, 1998; Morris *et al.*, 2014), 해당 지수의 계산은 R 프로그램의 'vegan' 패키지를 통해 산출하였다 (Oksanen *et al.*, 2020).

시간에 따른 동물플랑크톤 군집의 변화를 분석하기 위해 시간상으로 연속된 월간 (i.e. 3월과 4월, 4월과 5월... 9월과 10월) 군집 간 비교를 수행하는 두 가지의 군집 이질성 지수인 Bray-Curtis 비유사도 (Bray-Curtis Dissimilarity)와 시간적 베타다양성 (Temporal Beta Diversity)을 산출하였다. Bray-Curtis 비유사도는 종별 개체수를 고려하여 군집 간 비교가 가능한 지수로서, 현존량 기반의 군집 비교를 목적으로 사용하였다. 또한 시간적 베타다양성의 경우 Sørensen 지수 기반의 분석을 수행하였으며, 이는 종의 출현 여부를 통한 군집 간 비교를 목적으로 사용하였다. 베타다양성 분석은 종의 출현/비출현 (presence/absence)만을 고려하는 지수 특성상 풍부도 데이터를 출현 시 1, 비출현 시 0으로 변환하여 사용하였다. Bray-Curtis 비유사도 및 베타다양성 산출은 R 패키지 'vegan' 및 'betapart'를 통해 수행되었다 (Oksanen *et al.*, 2020; Baselga *et al.*, 2021).

출현한 종이 시간적 베타다양성에 기여하는 정도를 정량화한 값인 SCBD (Species Contribution to Beta Diversity)는 각 종의 출현 및 비출현 여부가 베타다양성에 미치는 영향을 의미한다. 본 연구에서는 시간적 베타다양성 산출 시와 동일하게 Sørensen 지수를 기반으로 연속된 월간의 SCBD를 산출하였으며, 출현 패턴 기반의 그룹 간 SCBD의 평균을 비교하여 각 그룹의 시간적 베타다양성의 기여도를 산출하였다 (Legendre and Cáceres, 2013). 이때 SCBD의 산출은 R 패키지 'adespatial'을 통해 수행하였다 (Dray *et al.*, 2023).

결 과

1. 호소별 기초 환경 및 동물플랑크톤 출현 양상

조사 대상지가 되는 세 호소 (강정제, 중초산제, 북초산제)의 수질요인을 분석한 결과, 수온을 제외한 용존산소, pH, 전

Table 1. Mean, standard deviation, maximum and minimum values of water quality data for the study sites from April to October 2022.

Values	Reservoir	WT (°C)	DO (mg L ⁻¹)	pH	EC (μS cm ⁻¹)	Chl-a (mg m ⁻³)
Avg. ± Std. (Min~Max)	Gangjung	22.97 ± 6.01 (13.36~29.69)	6.81 ± 2.34 (4.82~12.21)	6.80 ± 1.07 (5.31~8.36)	0.111 ± 0.005 (0.107~0.121)	6.14 ± 5.79 (1.37~18.69)
	Jungchosan	24.07 ± 5.65 (16.6~31.58)	8.58 ± 1.86 (6.37~11.9)	7.82 ± 1.79 (6.01~10.48)	0.450 ± 0.157 (0.277~0.644)	15.52 ± 8.62 (5.99~30.44)
	Bukchosan	23.88 ± 5.66 (16.24~31.92)	9.49 ± 1.69 (7.63~12.42)	8.34 ± 1.12 (6.26~9.90)	0.200 ± 0.018 (0.175~0.222)	12.60 ± 5.01 (6.55~22.3)

WT; Water Temperature, DO; Dissolved Oxygen, EC; Electrical Conductivity, Chl-a; Chlorophyll-a concentration.

Table 2. List of fish that occurred at the study sites (unpublished data).

Common name	Functional feeding group	Species	(A) Gangjung	(B) Jungchosan	(C) Bukchosan
			Year-round appearance	Year-round appearance	Year-round appearance
Crucian carp	Omnivore	<i>Carassius carassius</i>	O	O	O
Northern snakehead	Carnivore	<i>Channa argus</i>	-	O	O
Korean sharpballey	Omnivore	<i>Hemiculter eigenmanni</i>	O	-	-
Largemouth bass	Carnivore	<i>Micropterus salmoides</i>	O	O	-
Pond loach	Omnivore	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	O	-	-
Japanese rice fish	Planktivore	<i>Oryzias latipes</i>	-	O	-
Yellowhead catfish	Insectivore	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	-	O	-
Stone moroko	Omnivore	<i>Pseudorasbora parva</i>	O	O	-
Bar cheek goby	Insectivore	<i>Rhinogobius giurinus</i>	-	O	-
Rosy bitterling	Omnivore	<i>Rhodeus ocellatus</i>	-	O	-

기전도도 및 클로로필 a의 연간 변동이 호소별로 모두 상이했다. 한편 수온의 경우, 지리상 인접한 중초산제와 북초산제의 변동이 유사했으며 강정제의 경우 다른 두 호소와는 다른 변동 양상을 보였다(Table 1). 어류 종 조성의 경우 세 호소가 모두 다른 어류 종 조성을 보였다(Table 2).

2022년 조사기간 동안 출현한 동물플랑크톤은 강정제에서 윤충류 27종, 지각류 9종, 요각류 2종 및 미성숙 개체로 총 38종, 중초산제에서 윤충류 33종, 지각류 6종, 요각류 4종 및 미성숙 개체로 총 43종 그리고 북초산제에서 윤충류 32종, 지각류 7종, 요각류 1종 및 미성숙 개체로 총 40종이 출현했다. 월별 동물플랑크톤 분류군의 출현 양상이 모두 상이했으며(Fig. 1), 세 호소 공통적으로 출현한 종은 총 21종으로, 이 중 윤충류가 19종, 지각류가 1종 그리고 미성숙 개체를 제외한 요각류가 1종으로 나타났다(Table 3). 또한 연중 높은 출현량을 보인 상위 5종은 강정제에서 Nauplius (24.3%), *Kellicottia longispina* (16.8%), *Keratella cochlearis* (13.7%), *Synchaeta* sp. (13.6%), *Conochilus unicornis* (7.2%) 순으로 나타났고 중초산제에서는 *Brachionus falcatus* (24.8%),

Nauplius (12.3%), *B. calyciflorus* (10.9%), *C. unicornis* (8.5%), *Synchaeta* sp. (7.4%)로 나타났으며, 북초산제에서는 *Polyarthra* sp. (42.7%), Nauplius (16.0%), *Bosmina* sp. (12.6%), *K. cochlearis* (5.7%), *Trichocerca stylata* (3.2%) 순으로 나타났다(Fig. 2). 이를 종합하였을 때, 연중 출현 동물플랑크톤 및 우점하는 상위 5종에 대해 Nauplius는 공통적으로 높은 출현량을 나타내었으나, 그 외 종들은 세 호소 간 상이한 결과를 보여, 강정제와 비교하여 중초산제, 북초산제는 지리상 인접함에도 불구하고 동물플랑크톤 군집이 호소별로 고유한 종 조성을 보였다(Fig. 1).

2. 동물플랑크톤 출현 양상별 그룹화 및 그룹 간 관계

출현한 동물플랑크톤을 출현량과 출현 빈도를 기준으로 4개의 그룹으로 나누었을 때, 강정제에서는 LALF (Low Abundance Low Frequency) 그룹에 속한 종이 23종, LAHF (Low Abundance High Frequency) 그룹이 8종, HALF (High Abundance Low Frequency) 그룹에 속한 종이 2종, HAHF (High Abundance High Frequency) 그룹에 속한 종이 총 8

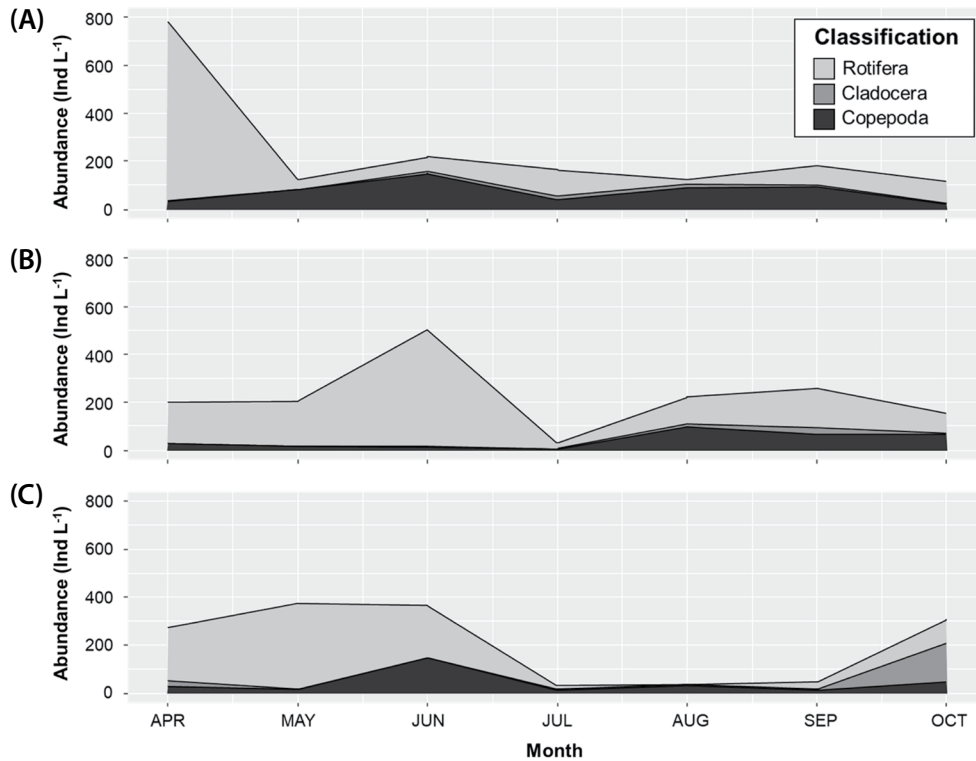


Fig. 1. Abundance of zooplankton taxa in the study sites from April to October 2022. (A) Gangjung Reservoir, (B) Jungchosan Reservoir, and (C) Bukchosan Reservoir.

종이었다(Table 3-(A)). 중초산제에서는 LALF 그룹에 속한 종이 22종, LAHF 그룹에 속한 종이 10종, HALF 그룹에 속한 종이 2종, HAHF 그룹에 속한 종이 12종이었다(Table 3-(B)). 북초산제에서는 LALF 그룹에 속한 종이 27종, LAHF 그룹에 속한 종이 5종, HALF 그룹에 속한 종이 5종, HAHF 그룹에 속한 종이 6종이었다(Table 3-(C)). 또한 호소마다 다른 출현 패턴 그룹에 묶이는 종과 세 호소 모두에서 같은 그룹에 묶이는 종이 혼재했다(Table 3). 세 호소 모두 같은 출현 패턴(출현량 및 출현 빈도)을 보이는 종은 LALF 그룹의 윤충류에 해당하는 *Anuraeopsis fissa*, *Hexarthra mira*, *Lecane luna*, *Pompholyx complanata*, *Trichocerca* sp. 5종이었으며, LAHF 그룹에는 요각류에 해당하는 Cyclopidae sp. 1종이 존재했다. HAHF 그룹에서는 윤충류에서 *Keratella cochlearis*, *Synchaeta* sp. 2종과 요각류 미성숙 개체에 해당하는 Cyclopidae copepodid, Nauplius 가 세 호소에서 공통적인 출현 패턴을 보였다. 그 밖에도 출현량 기준으로 같은 출현 양상을 보이는 6종과 출현 빈도 기준으로 같은 출현 양상을 보이는 2종 및 호소별로 다른 출현 패턴을 보이는 7종이 세 호소에서 공통적으로 출현하였다(Table 3).

출현 패턴에 따라 출현 동물플랑크톤을 분류한 각 그룹의 월별 개체수 증감은 세 호소 모두에서 다른 경향을 보였으며, 각 그룹에 속한 동물플랑크톤 종들의 상대 풍부도 합 또한 마찬가지로였다. 세 호소 공통적으로 HAHF 그룹의 연 평균 상대 풍부도가 가장 높았으나(강정제: 91.13%, 중초산제: 56.87%, 북초산제: 71.43%), 그 비율이 호소에 따라 큰 차이를 나타냈으며, HALF 그룹은 중초산제와 북초산제에서는 유사하였으나 강정제에서는 그 비율이 매우 낮았다(강정제: 1.94%, 중초산제: 28.67%, 북초산제: 22.20%). LAHF 및 LALF 그룹의 경우, 중초산제에서는 LAHF 그룹의 상대 풍부도가 더 높은 값을 보인 반면(강정제: 4.07%, 중초산제: 10.44%, 북초산제: 2.07%), 북초산제에서는 LALF 그룹이 더 높은 상대 풍부도를 보였다(강정제: 2.81%, 중초산제: 4.01%, 북초산제: 4.30%). 종합하였을 때, 세 호소에서 특별히 유사한 경향을 보이는 호소는 없는 것으로 분석되었다.

각 그룹의 증감 경향 및 그룹 간 관계를 해석하기 위해 각 그룹의 개체수로 최소-최대 정규화를 수행했을 때, 공통적으로 HAHF 그룹과 HALF 그룹이 반비례하는 양상을 보였으며, LAHF 그룹과 LALF 그룹은 정비례하는 양상을 보였다(Fig. 3). 또한 각 그룹의 증감 경향의 관계를 정량화하기 위

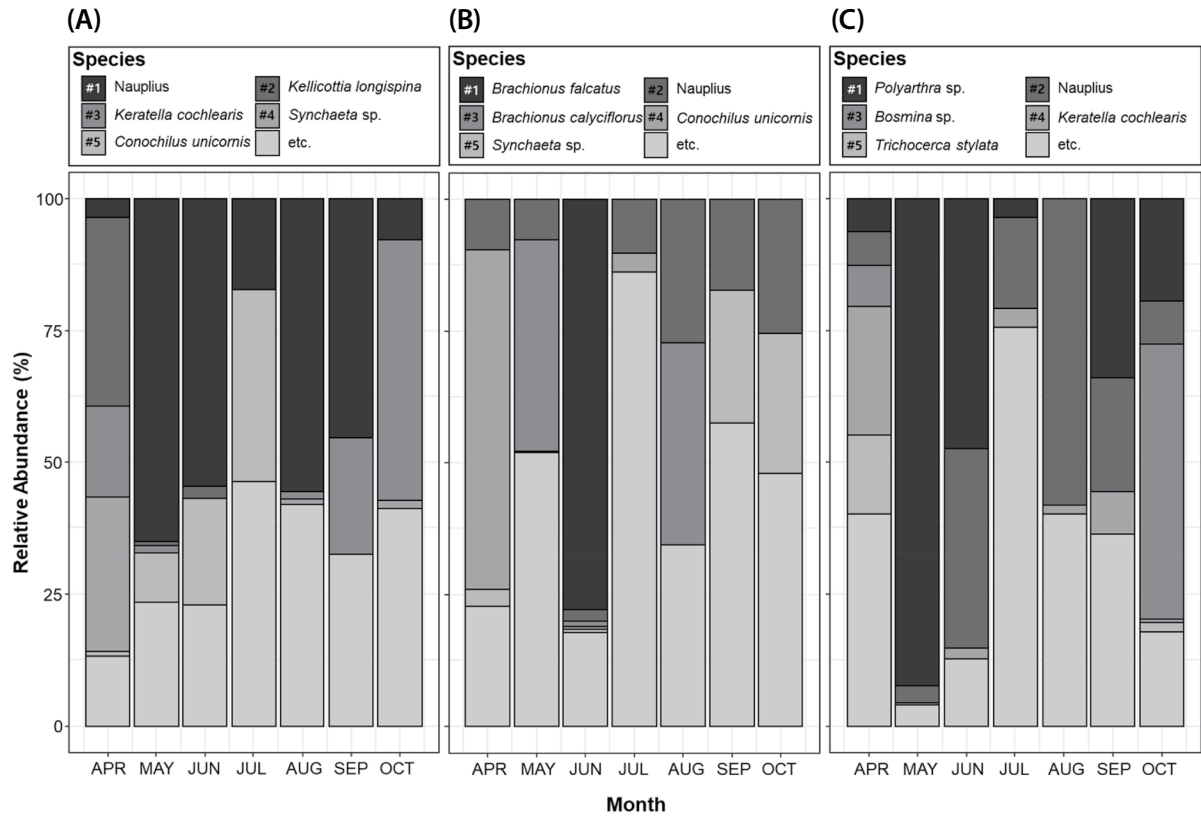


Fig. 2. Monthly relative abundance of the top five species with the highest average annual abundance and other species at the study sites from April to October 2022. (A) Gangjung Reservoir, (B) Jungchosan Reservoir, and (C) Bukchosan Reservoir.

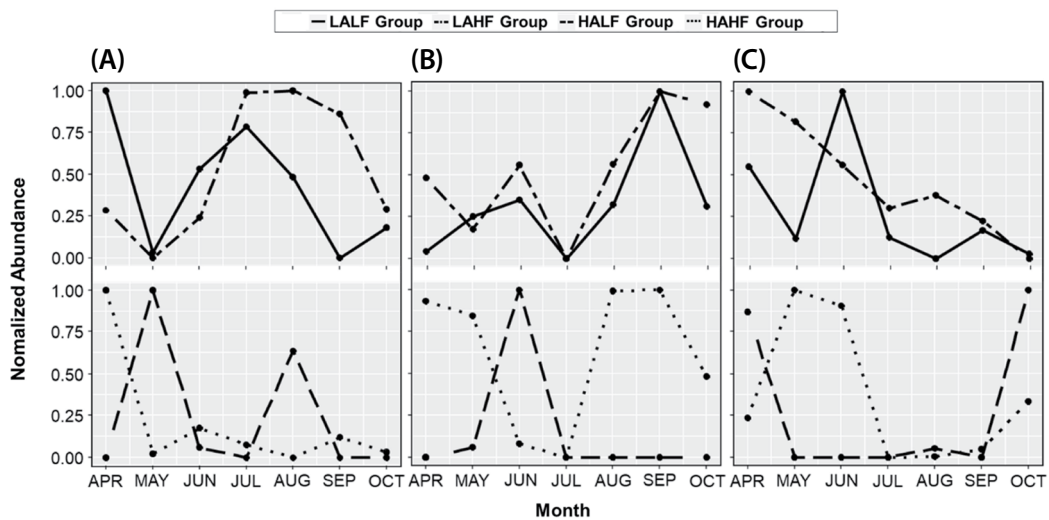


Fig. 3. Variation in normalization abundance of zooplankton occurrence pattern groups for each of the three study sites. Above, LALF Group and LAHF Group; below, HALF Group and HAHF Group. (A) Gangjung Reservoir, (B) Jungchosan Reservoir, and (C) Bukchosan Reservoir.

해 일반화 선형모형 (Generalized Linear Model) 분석을 수행한 결과, 모든 그룹 간 결과의 p 값이 0.05 이상으로 나타나

통계적으로 유의미하지는 않은 것으로 분석되었으나, HAHF 그룹과 HALF 그룹 상호 간의 표준오차 (Standard Error) 결

Table 3. Continued.

Occurrence in study site	Common occurrence patterns	Classification	Species	(A) Gangjung						(B) Jungchosan						(C) Bukchosan					
				LALF	LAHF	HALF	HAHF	LALF	LAHF	HALF	HAHF	LALF	LAHF	HALF	HAHF	LALF	LAHF	HALF	HAHF		
Common species to two reservoirs	- *	Rotifera	<i>Lepadella</i> sp.	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	
			<i>Mytilina</i> sp.	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-
			<i>Trichocerca cylindrica</i>	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Trichocerca stylata</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Common species to two reservoirs	- *	Cladocera	<i>Alona</i> sp.	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0	
			<i>Chydorus</i> sp.	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0
			<i>Daphnia galeata</i>	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0
			<i>Diaphanosoma</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0
			<i>Scapholeberis kingi</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Species that occurred specifically in a single reservoir	- *	Copepoda	<i>Heliodiaptomus kikuchii</i>	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			<i>Asplanchna herricki</i>	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Asplanchna priodonta</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
			<i>Brachionus diversicornis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
			<i>Brachionus rubens</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Kellicottia bostoniensis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Lecane balla</i>	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Philodina</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Plationus patulus</i>	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Rotaria</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
			<i>Scardium longicaudum</i>	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Testudinella patina</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
			<i>Trichocerca porcellus</i>	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Trichocerca ruttus</i>	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Trichotria tetractis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Common species to two reservoirs	- *	Cladocera	<i>Bosminopsis deitersi</i>	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			<i>Ceriodaphnia quadrangula</i>	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Daphnia similoides</i>	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Daphnia</i> sp.	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			<i>Moina</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Common species to two reservoirs	- *	Copepoda	<i>Scapholeberis</i> sp.	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			<i>Calanoida</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-
			<i>Thermocyclops</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-

-*: not applicable, -: not occurrence

과값이 가장 낮게 분석되어 타 그룹 대비 두 그룹 간의 관계성이 존재했으며, LAHF 그룹과 LALF 그룹 상호 간의 표준오차 결과값 역시 가장 낮게 분석되어 타 그룹 대비 두 그룹 간의 관계성이 존재하는 것으로 나타났다.

3. 동물플랑크톤 군집 다양성의 계절 변화와 베타다양성에 대한 그룹별 기여도

세 호소의 Shannon 다양도 지수(Shannon Diversity Index)는 각 호소 모두에서 개별적인 경향을 보였다. 강정제에서는 7월에 1.74로 가장 높은 다양도 값을 보였으며, 5월에 1.23으로 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 4-(A)). 중초산제에서는 9월에 2.49로 세 호소를 통틀어 가장 높은 값을 보였으며, 6월에 1.05로 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 4-(B)). 북초산제에서는 4월에 2.21로 가장 높은 값을 보였으며, 5월에 세 호소를 통틀어 가장 낮은 0.41의 다양도 값을 보였다(Fig. 4-(C)).

인접한 월간 군집 변동을 정량화하는 값으로 이질성 기반의 두 가지 지수인 Bray-Curtis 비유사도(Bray-Curtis Dissimilarity)와 베타다양성(Sørensen 지수 기반) 분석을 통해 군집의 시간적 변동을 나타냈다. 월간 Bray-Curtis 비유사도와 베타다양성은 대체로 유사한 증감 경향을 보였으나 증감폭에서 차이를 보였다(Fig. 4). 특히 세 호소에서 공통적으로 4월과 5월 간의 이질성 값이 다른 월간 이질성 값보

다 높은 경향을 확인할 수 있었으며, 반면 5월과 6월 간의 이질성 값이 다른 월간 이질성 값보다 낮음을 확인할 수 있었다. 이는 대상 호소들에서 4월에서 5월 간 상대적으로 급격한 천이가 일어났으며, 5월과 6월 간에는 천이된 군집이 유지된 것으로 해석될 수 있다. 4월에서 5월 간의 급격한 천이는 세 호소 공통적으로 나타났으나 천이를 유도한 종에서 차이를 보였으며, 모두 LALF 그룹에 속한 종들이 해당 천이에 핵심적으로 작용했다는 것은 공통된 특성이었다. 해당 기간 강정제는 *Brachionus angularis*, *Daphnia similoides* 외 6종이, 중초산제는 *Conochilus unicornis* 외 3종, 북초산제는 *C. unicornis*, *Alona* sp. 외 5종이 천이에 가장 높은 기여를 한 것으로 분석되었다. 특히 중초산제와 북초산제에서 해당 기간 *C. unicornis*가 공통적으로 천이에 핵심 작용을 한 종으로 분석되었으며 강정제와 북초산제에서 *Synchaeta* sp.가 공통적으로 천이에 대한 기여도가 높은 종으로 나타났다. 이후 강정제의 경우는 6월부터 8월까지 꾸준히 천이 속도가 빨라진 후 8월과 9월 사이의 천이 속도가 감소하는 양상을 보였으며, 중초산제의 경우는 7월 이후 꾸준히 천이 속도가 감소하는 것으로 분석되었다. 북초산제의 경우, 6월 이후 일정한 천이 속도를 보여, 세 호소가 시기적으로 각기 다른 천이 양상을 보였다.

종별 베타다양성에 기여하는 정도를 의미하는 SCBD를 통해 월간 천이 및 군집 이질성을 발생시키는 데 있어서 각 그

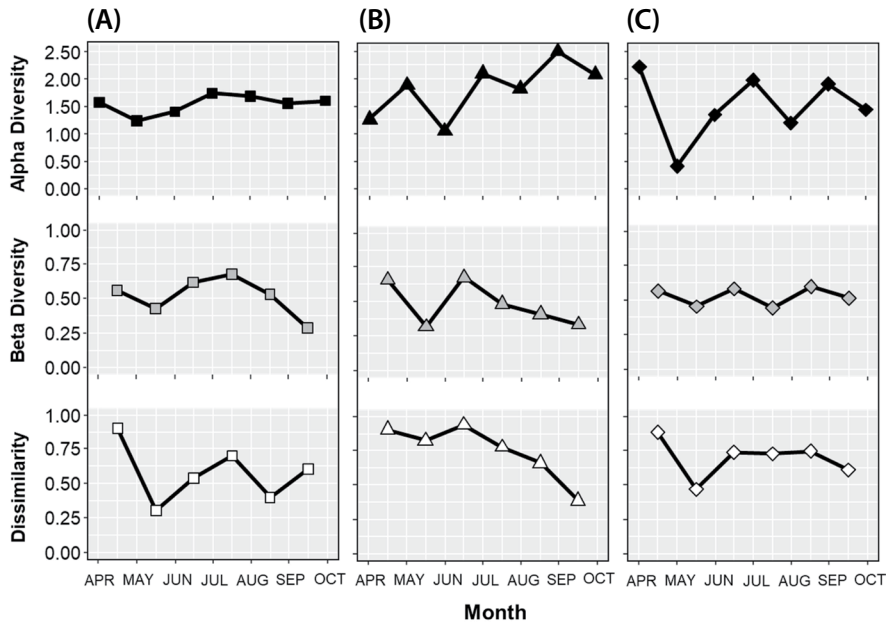


Fig. 4. Monthly variations in the alpha diversity (Shannon Diversity Index), beta diversity (based on the Sørensen Index) and dissimilarity (Bray-Curtis Dissimilarity) for each of the three study sites. (A) Gangjung Reservoir, (B) Jungchosan Reservoir, and (C) Bukchosan Reservoir.

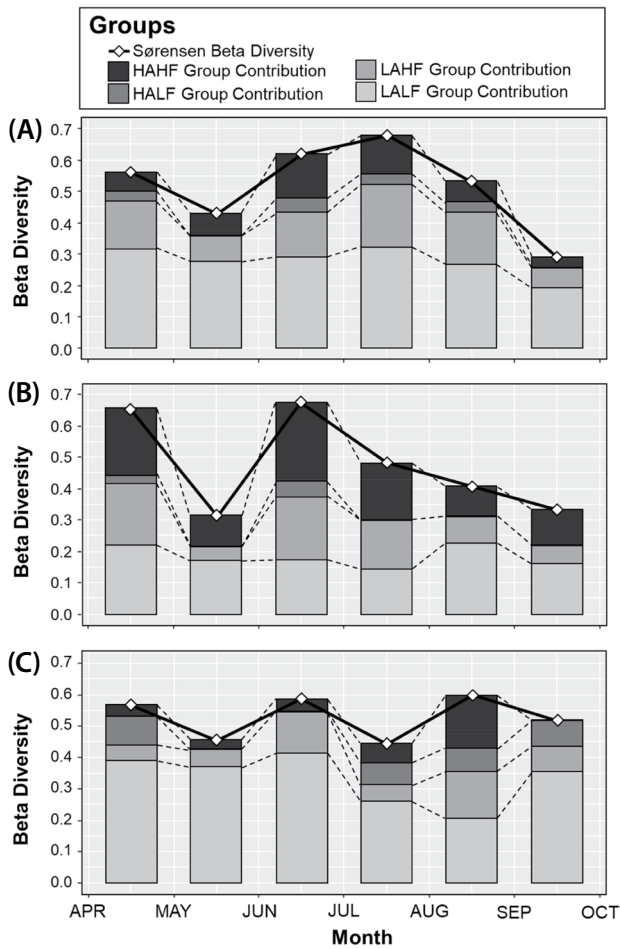


Fig. 5. Temporal beta diversity index with each group’s contribution for each study sites. (A) Gangjung Reservoir, (B) Jungchosan Reservoir, and (C) Bukchosan Reservoir.

그룹의 기여도를 저수지별로 수치화하였다(Fig. 5).

출현 패턴 그룹별 월간 동물플랑크톤 군집 이질성에 기여하는 정도를 산정하기 위해, 그룹에 속한 종들의 기여도를 베타다양성 값에 곱하여 분석을 수행하였다. 분석 결과, 강정제의 경우 각 그룹이 월간 이질성 기여도에 대해 그룹 간 순위가 모든 시기 동일하여 뚜렷하게 구분되는 경향을 보였다(Fig. 5-(A)). 중초산제의 경우, 6월과 7월 및 7월과 8월 군집 간의 베타다양성을 보면 두 시기에서 꾸준히 출현하며 그 출현량 또한 높은 동물플랑크톤 그룹인 HAHF 그룹의 이질성 기여도가 LALF 그룹을 역전하는 양상을 보였는데, 이는 앞서 언급한 급격한 천이가 관찰된 시기와 일치하는 것으로 해당 시기에는 HAHF 그룹의 종 조성 변화가 시간적인 이질성을 유도한 것으로 나타났으며(Fig. 5-(B)), 특히 *Conochilus unicornis*, *Ascomorpha* sp., *Brachionus angularis*가 핵심종으로 분석되었다. 북초산제의 경우, 강정제와 동일하게 모든

시기에서 LALF 그룹이 가장 높은 이질성 기여도를 보였으며, 다른 세 그룹(LAHF, HALF, HAHF)의 경우 그 기여도 순위가 불규칙하게 혼재된 양상을 보였다(Fig. 5-(C)). 특히 다른 호소에서 일관적으로 가장 낮은 이질성 기여도를 보인 HALF 그룹이 간헐적으로 높은 기여도를 보였다.

본 분석 결과를 종합하였을 때, 세 호소 공통적으로 연간 적은 출현량과 적은 출현 빈도를 보이는 동물플랑크톤 종이 속해 있는 LALF 그룹이 월간 천이 및 군집 이질성을 발생시키는 데 가장 높은 기여도를 보이는 것으로 나타나 다양성 측면에서 핵심이 되는 그룹으로 분석되었으며, 각 호소별로 강정제는 *Lecane* sp., 중초산제는 *Anuraeopsis fissa*, 북초산제에서는 *Brachionus quadridentatus*가 해당 그룹에서 이질성에 가장 높은 기여를 하는 종으로 분석되었다(Fig. 5, Table 3). 한편 가장 낮은 기여도를 보이는 그룹은 특정 시기에 대발생하여 수체를 우점하는 출현 특징을 가진 HALF 그룹으로 분석되어, 호소의 시간적 다양성을 저해하는 그룹으로 해석된다. 각 호소별로 강정제는 *Ceriodaphnia quadrangularis*, 중초산제는 *Asplanchna* sp., 북초산제는 *B. angularis*가 해당 그룹에서 이질성에 가장 낮은 기여를 하는 종으로 분석되었다. 각 그룹의 속한 종 중 최대 및 최소 SCBD 값을 보이는 종에 대해서는, 각 호소별로 강정제와 중초산제에서 HAHF 그룹에 속한 Cyclopidae copepodid가 공통적으로 가장 낮은 기여도를 보인 것 외에는 공통된 기여도를 보이지 않았다(Table 4).

고찰

본 연구는 소형 호소에서의 동물플랑크톤 군집 동태를 해석하고자 출현한 동물플랑크톤 종들을 공통된 출현 패턴(출현 빈도와 상대 풍부도)을 기준으로 그룹화하여 그 규칙성 및 종 간 관계를 파악하고자 하였으며, 어떠한 출현 패턴을 보이는 종들이 호소의 시간적 이질성을 발생시키는지 규명하고자 하였다.

동물플랑크톤 그룹화 결과, 세 호소 모두에서 동일한 패턴을 보이는 종과 세 호소 각각에서 상이한 다른 패턴을 보이는 종이 혼재했다(Table 3). 한편 출현 패턴으로 그룹화하여 그 그룹에 속한 종들의 개체수 합을 기준으로는 경향성을 확인할 수 있었으며, 이는 그룹 간 경향성은 LAHF 그룹과 LALF 그룹의 정비례 관계와 HAHF 그룹과 HALF 그룹의 반비례 관계로 요약된다(Fig. 2).

LALF 그룹은 연중 적은 개체수를 보이면서 출현 빈도 역시 드물게 나오는 종들을 그룹화한 것이며, *Anuraeopsis fissa*, *Lecane luna* 등이 포함되었다(Table 4). LAHF 그룹은

Table 4. Mean, standard deviation of SCBD contribution values for each group's species and highest and lowest contributing species in the study sites.

Study sites	Values	LALF	LAHF	HALF	HAHF
(A) Gangjung	Avg. \pm Std.	0.0240 \pm 0.0138	0.0319 \pm 0.0158	0.0202 \pm 0.0021	0.0191 \pm 0.0157
	The highest species (Value)	<i>Lecane</i> sp. 0.0554	<i>Colurella</i> sp. 0.0512	<i>Asplanchna</i> sp. 0.217	<i>Synchaeta</i> sp. 0.0465
	The lowest species (Value)	<i>Bosminopsis deitersi</i> 0.0099	<i>Heliodiaptomus kikuchii</i> 0.0083	<i>Ceriodaphnia quadrangula</i> 0.0187	Cyclopidae copepodid 0.0012
(B) Jungchosan	Avg. \pm Std.	0.0167 \pm 0.0089	0.0262 \pm 0.0123	0.0156 \pm 0.0042	0.0282 \pm 0.0242
	The highest species (Value)	<i>Anuraeopsis fissa</i> 0.0487	<i>Euchlanidae</i> sp. 0.0440	<i>Brachionus falcatus</i> 0.0186	<i>Ascomorpha</i> sp. 0.0786
	The lowest species (Value)	<i>Heliodiaptomus kikuchii</i> 0.0012	<i>Polyarthra</i> sp. 0.0088	<i>Asplanchna</i> sp. 0.0127	Cyclopidae copepodid 0.0060
(C) Bukchosan	Avg. \pm Std.	0.0213 \pm 0.0146	0.0333 \pm 0.0206	0.0207 \pm 0.0171	0.0259 \pm 0.0201
	The highest species (Value)	<i>Brachionus quadridentatus</i> 0.0542	<i>Ceriodaphnia</i> sp. 0.0542	<i>Cephalodella</i> sp. 0.0485	Cyclopidae sp. 0.0486
	The lowest species (Value)	Cyclopidae copepodid 0.0036	<i>Daphnia galeata</i> 0.0068	<i>Brachionus angularis</i> 0.0068	Nauplius 0.0036

연중 적은 개체수가 꾸준히 출현한 종들을 그룹화한 것이며, Cyclopidae sp. 등이 포함되었다. LALF 그룹에 포함된 종들의 대부분이 불규칙한 출현 빈도 및 출현량을 보였기 때문에 타 그룹에 대비, 종 개별적인 개체수 변동의 통계학적 해석에 어려움이 존재한다. 하지만 본 연구에서 불규칙한 출현 특성을 보인 종들을 그룹화하여 해석한 결과 LAHF 그룹과 유사한 증감 경향을 보이는 것을 확인하였다. 이 두 그룹 간의 비례 관계는 해당 그룹에 속한 종들의 증가를 공통적으로 유발하는 환경요인 또는 종 특이적 번식전략의 일치 등에 따른 것으로 예상되지만, 본 연구의 수행과정에서 측정된 기초수 질항목(수온, Chl-a, TN, TP, EC)에 대해서는 유의미한 관계성을 보이지 않았다.

HAHF 그룹은 연중 꾸준히 출현하며, 많은 출현량을 보여 대부분의 시기에서 수체를 우점하는 종들이 그룹화되었으며, 대표적으로 *Keratella cochlearis*, *Synchaeta* sp., Cyclopidae copepodid 등이 포함되었다(Table 4). HALF 그룹은 연중 특정 시기에만 출현하는 반면에 그 출현시기에 높은 개체밀도를 보여 수체를 우점하는 종들을 그룹화한 것이며 타 그룹 대비 수체의 공통된 특성을 나타낸 종이 없어, 호소 특이적인 그룹화 양상을 보였다. 대표적으로 *Asplanchna* sp. 등이 포함되었다. 이 두 그룹 간의 반비례 관계는 연중 대부분의 기간에 수체를 점유하고 있는 HAHF 그룹이, HALF 그룹이 대량 발생하는 특정 시기에는 그 개체수가 감소하는 특성을 보

인다고 설명할 수 있다. 따라서 각 그룹에 속한 종들은 경쟁 관계 또는 피식-포식의 관계에 있다고 유추할 수 있다(Lynch *et al.*, 1979). 하지만 이 두 그룹의 상반된 증감 경향에 있어서 HAHF 그룹이 감소할 때 HALF 그룹이 증가하는 것인지, HALF 그룹이 증가할 때, HAHF 그룹이 감소하는 것인지에 대한 명확한 인과 관계 및 시간적 전후 관계에 대해서는 본 연구에서 수행한 방식으로는 구체적인 해석이 불가능하며, 생물학적 상호작용에 초점을 둔 해석이 동반되어야 한다. 그 예시로 윤충류 분류군 내의 포식자인 *Asplanchna*속의 경우, 이들의 개체수 증가가 *Keratella*속의 개체수 감소에 직접적인 영향을 끼친다(Gilbert and Williamson, 1978; Hofmann, 1983). 또한 *Brachionus*속과 *Keratella*속 및 *Synchaeta*속 간의 상반된 증감 경향은 경쟁 관계에 인한 것으로 알려져 있다(Kirk, 2002). 이러한 이전 연구 결과를 종합하였을 때, HALF 그룹에 속한 *Asplanchna* sp.와 HAHF 그룹에 포함된 *Keratella cochlearis*의 피식-포식 관계 및 HALF 그룹의 *Brachionus forficula*와 HAHF 그룹에 속한 *K. cochlearis*, *Synchaeta* sp. 간의 경쟁 관계가 HALF와 HAHF 간의 상반된 증감 경향을 유도하는 것으로 해석할 수 있다. 하지만 종의 그룹화 결과가 각 호소마다 다르며, HALF 그룹의 경우 세 호소 공통적으로 포함된 종이 없다는 것을 고려한다면, 이와 같은 종 특이적인 해석은 제한적인 범위에서 적용될 수 있음을 의미한다. 따라서 완전한 생태학적인 해석을 위해서

는 생물학적 상호작용에 대한 보다 넓은 범위에서의 규명이 뒷받침될 필요가 있는 것으로 사료된다.

그룹별 베타다양성에 대한 기여도 측면에서는, LALF 그룹이 연중 대체로 가장 높은 베타다양성 기여도를 보여 월간 천이 및 군집 이질성을 발생시키는 데 가장 높은 기여도를 보이는 것으로 나타나 다양성 측면에서 핵심이 되는 그룹으로 분석되었다. 뿐만 아니라 세 호소 공통적으로 가장 급격한 천이가 발생한 4월과 5월 사이의 군집 변화 및 6월과 7월 사이의 군집 변화를 유도하는 핵심 종들이 포함되어 있는 그룹으로 분석되었다(Figs. 4, 5). LAHF 그룹과 HAHF 그룹의 기여도 증감은 호소에 따라 높고 낮음의 차이가 있었으나, 그 값이 큰 차이를 보이지 않으며, 증감 양상이 유사한 것으로 나타났다. 한편 HALF 그룹의 경우 네 그룹 중 가장 낮은 베타다양성 기여도를 보여, 호소 공통적으로 시간적 다양성을 저해하는 그룹으로 나타났다. 이들은 타 그룹과는 달리 호소별로 모두 다른 종들이 포함되어 있어, 시스템에 따라 해당 증감 양상을 보이는 종들이 모두 다를 것으로 판단되며, 해당 그룹에 속한 종의 대발생 시 호소 내 동물플랑크톤 군집의 다양성이 급격히 감소하는 것으로 분석되었다(Figs. 3, 4). 이와 같은 결과는 시간적인 베타다양성 측면에 있어서 적은 개체수로, 제한된 출현 빈도를 보이는 종을 주목할 필요가 있는 것을 의미한다. 따라서 과거 계절적 천이 패턴을 다룬 많은 연구에서 주로 다루었던 우점종 및 규칙적인 발생 패턴을 보이는 종보다는 해석에 있어서 혼선을 야기하는(Hessen *et al.*, 2008), 불규칙적인 출현 패턴을 보이는 종들이 군집의 시간적 이질성을 유발하는 데 있어서 핵심인 종인 것으로 판단된다. 동물플랑크톤 군집에 가해지는 포식압을 결정하는 어류 군집 조성의 경우도(Riemann, 1985), 호소별로 다른 양상을 보였다.

본 연구의 결과는 환경변화로 인한 군집 조성의 변화를 이해하고, 동물플랑크톤의 시공간적 다양성을 고려할 때, 종 간의 출현 패턴 차이를 고려해야 할 필요가 있음을 시사한다. 특히 소형 호소 내에서 종 특이적인 불규칙한 변동을 보이는 종이 시간적 다양성(이질성) 측면에서 핵심적인 역할을 하며, 이에 따라 이러한 종들에 대한 기초 연구가 필요하다고 사료된다. 한편 해당 그룹에 포함된 종들이 호소별로 다른 출현 양상을 보이며 공통된 출현 양상을 보인 종이 한정적으로 나타난 결과(Table 3)와 각 호소에서 그룹별로 높은 기여도를 보인 종이 일치하지 않은 결과(Tables 3, 4)를 고려한다면 공통된 생태학적 특성을 가진 종들이 다양성에 기여하는 것이 아닌, 시스템별로 그 다양성에 기여하는 종이 달라질 수 있음을 시사한다.

본 연구의 출현 패턴을 기반으로 한 그룹화는 그 그룹 간

의 개체수 증감 관계 및 군집의 다양성 변동을 해석하는 데 유용하게 작용했으나, 해당 결과를 유도하는 기작을 설명하는 데 있어서 한계가 있다. 군집 동태 및 계절적 천이에 대한 연구는 생물학적 상호작용에 대한 고찰을 포함하여 해석이 진행될 필요가 있으며, 이는 해당 연구가 보완해야 할 점으로 사료된다. 특히나 상이한 생태학적 지위를 가진 분류군이 혼재되어 있으며, 동일 분류군 내에서도 각기 다른 기능적 특징을 가진 종들이 구분되는 동물플랑크톤 군집 특성상 먹이망 기반의 분석이 포함되어야 할 필요가 있다(Koppelman *et al.*, 2009; Winder *et al.*, 2011). 따라서 섭식과 관련한 기능성 그룹 및 포식에 대한 민감성을 반영하는 행동 특성에 대한 해석이 고려되어야 그 해석에 의미를 더할 수 있을 것이라고 판단된다(Oh *et al.*, 2017; Kenitz *et al.*, 2017; Krztoń and Kosiba, 2020). 특히 육식성 어류의 출현 빈도가 높았던 강정제는 세 호소 중 유일하게, 대표적인 중대형 동물플랑크톤인 *Daphnia*속에서 해당하는 *Daphnia galeata*, *D. similoides*, *Daphnia* sp.가 출현한 것을 고려하였을 때, 향후 각 그룹들의 특징에 어류 포식과 관련된 항목들을 연관지어 분석한다면 어류 군집의 시공간적 분포에 따라 반응하는 동물플랑크톤 군집의 특성과 다양성 변화를 분석하는 주요 요인으로서 이해할 수 있을 것이다. 본 연구에서 제시된 지역적 규모(local scale)의 동물플랑크톤 출현 특성에 대한 분석을 일반화하고, 이를 통해 생물학적 상호관계를 규명하기 위해서는, 시간적 측면에서 동물플랑크톤의 생활사를 고려한 단주기 모니터링과 공간적 측면에서 광범위하게 분포한 소형 호소를 대상으로 수행하여 보다 넓은 범위(regional scale)의 연구로 확장할 필요가 있다. 뿐만 아니라 조사 대상지의 확장에 있어 다양한 종 조성의 분포 및 종 출현 양상에 영향을 미치는 환경요인을 고려한다면, 소형 호소의 동물플랑크톤 군집 천이에 대한 폭 넓은 이해가 가능할 뿐만 아니라, 다양성 관리의 방향성을 제시할 수 있을 것이라 판단된다.

적 요

불안정한 천이양상을 보이는 소형 호소는 대형 호소에 비해 동물플랑크톤 군집 동태 연구가 미진한 상황이다. 최근 지역 생물다양성 보전의 측면에서 소형 호소의 존재 가치가 부각되면서 생물 군집 동태에 대한 이해의 필요성이 강조되고 있다. 본 연구는 세 소형 호소의 출현 동물플랑크톤을 월별로 채집하여 계절별 군집 동태를 분석하였다. 소형 호소의 복잡한 동물플랑크톤 군집 동태를 파악하기 위해 종 출현 패턴을 기반, 4개의 그룹(LALF Group, Low Abundance Low

Frequency; LAHF Group, Low Abundance High Frequency; HALF Group, High Abundance Low Frequency; HAHF Group, High Abundance High Frequency)으로 그룹화하였다. 그룹 간 계절적 패턴을 비교하였으며, 각 그룹의 시간적 베타 다양성 기여도를 기반으로 한 다양성을 산출했다. 분석 결과 같은 출현량 경향을 보이지만 상반된 출현 빈도를 보이는 그룹 간의 관계가 있는 것으로 나타났으며, Nauplius가 세 호소 공통으로 높은 출현량과 빈도를 보이는 종으로 나타났다. 적은 개체수를 보이면서 출현 빈도 역시 드물게 나오는 종들이 포함된 그룹인 LALF 그룹에 속한 종이 월별 천이와 다양도에 핵심인 것으로 분석되었으며 해당 그룹에는 *Anuraeopsis fissa*, *Hexarthra mira* 및 *Lecane luna*가 포함되었다. 한편 연중 특정 시기에만 출현하여 수체를 우점하는 종들이 포함된 그룹인 HALF 그룹이 호소 공통적으로 시간적 다양성을 저해하는 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과를 통해 종 특이적인 출현 패턴이 연대 군집의 생물다양성에 기여하는 종을 분석하는 데 있어서 핵심적으로 작용할 수 있음을 제안한다.

저자 정보 홍근혁(경희대학교 학부생), 오혜지(경희대학교 박사수료), 최예림(경희대학교 박사과정), 김준완(공주대학교 박사과정), 최범명(공주대학교 석사과정), 장광현(경희대학교 교수), 장민호(공주대학교 교수)

저자 기여도 개념설정: G.H. Hong & K.H. Chang, 방법론: G.H. Hong & K.H. Chang, 자료 수집: Y. Choi, H.J. Oh, J.W. Kim & B.M. Choi, 자료 관리: Y. Choi & J.W. Kim, 분석: G.H. Hong, 원고 초안작성: G.H. Hong, K.H. Chang & M.H. Jang, 원고 교정: G.H. Hong, Y. Choi, H.J. Oh & K.H. Chang, 원고 편집: G.H. Hong & H.J. Oh, 과제 관리: M.H. Jang, 연구비 수주: M.H. Jang

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생태계교란 어류의 퇴치(2단계) 최적화 기술개발 지원을 받아 수행하였습니다(No. RE202101620).

REFERENCES

- Allan, J.D. 1976. Life history patterns in zooplankton. *The American Naturalist* **110**(971): 165-180.
- Baselga, A., D. Orme, S. Villeger, J. De Bortoli, F. Leprieur and M. Logez. 2021. betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components. R package version 1.5.4. <https://CRAN.Rproject.org/package=betapart>.
- Brett, M.T. and C.R. Goldman. 1997. Consumer versus resource control in freshwater pelagic foodwebs. *Science* **275**(5298): 384-386.
- Burns, C.W. and S.F. Mitchell. 1980. Seasonal succession and vertical distribution of zooplankton in Lake Hayes and Lake Johnson. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **14**(2): 189-204.
- Cai, W., J. Xia, M. Yang, W. Wang, C. Dou, Z. Zeng, S. Dong and L. Sheng. 2020. Cross-basin analysis of freshwater ecosystem health based on a zooplankton-based Index of Biotic Integrity: Models and application. *Ecological Indicators* **114**: 106333.
- David, V., B. Sautour, R. Galois and P. Chardy. 2006. The paradox high zooplankton biomass-low vegetal particulate organic matter in high turbidity zones: what way for energy transfer? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **333**(2): 202-218.
- Dray, S., D. Bauman, G. Blanchet, D. Borcard, S. Clappe, G. Guénard, T. Jombart, G. Larocque, P. Legendre, N. Madi and H.H. Wagner. 2023. adespacial: Multivariate Multiscale Spatial Analysis. R package version 0.3.21. <https://CRAN.R-project.org/package=adespacial>.
- Eckert, E.M., N. Anicic and D. Fontaneto. 2021. Freshwater zooplankton microbiome composition is highly flexible and strongly influenced by the environment. *Molecular Ecology* **30**(6): 1545-1558.
- Flössner, D. 2000. Die Haplozoa und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Backhuys. p. 428.
- Gilbert, J.J. and C.E. Williamson. 1978. Predator-prey behavior and its effect on rotifer survival in associations of *Mesocyclops edax*, *Asplanchna girodi*, *Polyarthra vulgaris*, and *Keratella cochlearis*. *Oecologia* **37**(1): 13-22.
- Gimaret-Carpentier, C., R. Péliissier, J.P. Pascal and F. Houllier. 1998. Sampling strategies for the assessment of tree species diversity. *Journal of Vegetation Science* **9**(2): 161-172.
- Hanazato, T. 1990. A comparison between predation effects on zooplankton communities by *Neomysis* and *Chaoborus*. *Hydrobiologia* **198**: 33-40.
- Hazelwood, D.H. and R.A. Parker. 1961. Population dynamics of some freshwater zooplankton. *Ecology* **42**(2): 266-274.
- Hessen, D.O. and B. Walseng. 2008. The rarity concept and the commonness of rarity in freshwater zooplankton. *Freshwater Biology* **53**(10): 2026-2035.
- Hofmann, W. 1983. Interactions between *Asplanchna* and *Keratella cochlearis* in the Plußsee (north Germany). *Hydrobiologia* **104**: 363-365.
- James, M.R. and D.J. Forsyth. 1990. Zooplankton-phytoplankton interactions in a eutrophic lake. *Journal of Plankton Research* **12**(3): 455-472.
- Jeong, H., A.A. Kotov and W. Lee. 2014. Checklist of the freshwater Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) of South Korea. *Proceedings of the Biological Society of Washington* **127**(1): 216-228.
- Kenitz, K.M., A.W. Visser, P. Mariani and K.H. Andersen. 2017.

- Seasonal succession in zooplankton feeding traits reveals trophic trait coupling. *Limnology and Oceanography* **62**(3): 1184-1197.
- Kim, H.W., J.Y. Choi, G.H. La, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2010. Relationship between rainfall and zooplankton community dynamics in a riverine wetland ecosystem (Upo). *Korean Journal of Ecology and Environment* **43**(1): 129-135.
- Kirk, K.L. 2002. Competition in variable environments: experiments with planktonic rotifers. *Freshwater Biology* **47**(6): 1089-1096.
- Koppelman, R., R. Böttger-Schnack, J. Möbius and H. Weikert. 2009. Trophic relationships of zooplankton in the eastern Mediterranean based on stable isotope measurements. *Journal of Plankton Research* **31**(6): 669-686.
- Krztoń, W. and J. Kosiba. 2020. Variations in zooplankton functional groups density in freshwater ecosystems exposed to cyanobacterial blooms. *Science of The Total Environment* **730**: 139044.
- Larsson, P. 1978. The life cycle dynamics and production of zooplankton in ØvreHeimdalsvatn. *Ecography* **1**(2-3): 162-218.
- Legendre, P. and M. De Cáceres. 2013. Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology Letters* **16**(8): 951-963.
- Lemmens, P., J. Mergeay, T. De Bie, J. Van Wichelen, L. De Meester and S.A. Declerck. 2013. How to maximally support local and regional biodiversity in applied conservation? Insights from pond management. *PLoS One* **8**(8): e72538.
- Lennon, J.J., P. Koleff, J.J. Greenwood and K.J. Gaston. 2004. Contribution of rarity and commonness to patterns of species richness. *Ecology Letters* **7**(2): 81-87.
- Lopes, P.M., L.M. Bini, S.A. Declerck, V.F. Farjalla, L.C. Vieira, C.C. Bonecker, F.A. Lansac-Toha, F.A. Esteves and R.L. Bozelli. 2014. Correlates of zooplankton beta diversity in tropical lake systems. *PLoS One* **9**(10): e109581.
- Lynch, M. 1979. Predation, competition, and zooplankton community structure: an experimental study 1, 2. *Limnology and Oceanography* **24**(2): 253-272.
- Morris, E.K., T. Caruso, F. Buscot, M. Fischer, C. Hancock, T.S. Maier, T. Meiners, C. Müller, E. Obermaier, D. Prati, S.A. Socher, I. Sonnemann, N. Wäschke, T. Wubet, S. Wurst and M.C. Rillig. 2014. Choosing and using diversity indices: insights for ecological applications from the German Biodiversity Exploratories. *Ecology and Evolution* **4**(18): 3514-3524.
- Mouillot, D., D.R. Bellwood, C. Baraloto, J. Chave, R. Galzin, M. Harmelin-Vivien, M. Kulbicki, S. Lavergne, S. Lavorel, N. Mouquet, C.E.T. Paine, J. Renaud and W. Thuiller. 2013. Rare species support vulnerable functions in high-diversity ecosystems. *PLoS Biology* **11**(5): e1001569.
- Nicolle, A., L.A. Hansson, J. Brodersen, P.A. Nilsson and C. Brönmark. 2011. Interactions between predation and resources shape zooplankton population dynamics. *PLoS One* **6**(1): e16534.
- Oertli, B., R. Céréghino, A. Hull and R. Miracle. 2009. Pond conservation: from science to practice. *Hydrobiologia* **634**: 1-9.
- Oh, H.J., H.G. Jeong, G.S. Nam, Y. Oda, W. Dai, E.H. Lee, D.S. Kong, S.J. Hwang and K.H. Chang. 2017. Comparison of taxon-based and trophic-based response patterns of rotifer community to water quality: applicability of the rotifer functional group as an indicator of water quality. *Animal Cells and Systems* **21**(2): 133-140.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGinn, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, E. Szoecs and H. Wagner. 2020. vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-7. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Paik, W.H. 1989. Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea.
- Pickhardt, P.C., C.L. Folt, C.Y. Chen, B. Klaue and J.D. Blum. 2005. Impacts of zooplankton composition and algal enrichment on the accumulation of mercury in an experimental freshwater food web. *Science of The Total Environment* **339**(1-3): 89-101.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. Ver. 4.1.2. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>.
- Riemann, B. 1985. Potential importance of fish predation and zooplankton grazing on natural populations of freshwater bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* **50**(2): 187-193.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie* **106**(4): 433-471.
- Søndergaard, M., E. Jeppesen and J.P. Jensen. 2005. Pond or lake: does it make any difference? *Archiv für Hydrobiologie* **162**(2): 143-165.
- Svanbäck, R. and L. Persson. 2004. Individual diet specialization, niche width and population dynamics: implications for trophic polymorphisms. *Journal of Animal Ecology* **73**(5): 973-982.
- Vanni, M.J. 1987. Effects of food availability and fish predation on a zooplankton community. *Ecological Monographs* **57**(1): 61-88.
- Verstraeten, G. and J. Poesen. 2000. Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography* **24**(2): 219-251.
- Winder, M. and A.D. Jassby. 2011. Shifts in zooplankton community structure: implications for food web processes in the upper San Francisco Estuary. *Estuaries and Coasts* **34**: 675-690.
- Yoon, J.D., M.H. Jang, M.C. Kim, G.S. Nam, S.J. Hwang and

- G.J. Joo. 2006. The characterization of fish communities in agricultural reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **39**(1): 131-137.
- Zöllner, E., H.G. Hoppe, U. Sommer and K. Jürgens. 2009. Effect of zooplankton-mediated trophic cascades on marine microbial food web components (bacteria, nanoflagellates, ciliates). *Limnology and Oceanography* **54**(1): 262~275.