

Research Paper

동물플랑크톤 군집의 수생태계 환경 평가 지표 활용: 부영양화 저수지 수질 평가를 위한 윤충류 기능성 그룹의 적용

오혜지* · 장광현* · 서동일* · 남귀숙** · 이의행** · 정현기*** · 윤주덕**** · 오종민*
경희대학교 환경학및환경공학과*, 한국농어촌공사**, 국립환경과학원***, 국립생태원****

Zooplankton Community as an Indicator for Environmental Assessment of Aquatic Ecosystem: Application of Rotifer Functional Groups for Evaluating Water Quality in Eutrophic Reservoirs

Hye-Ji Oh* · Kwang-Hyeon Chang* · Dong-Il Seo* · Gui-Sook Nam** ·
Eui-Haeng Lee** · Hyun-Gi Jeong*** · Ju-Duk Yoon**** · Jong Min Oh*

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University*
Korea Rural Community Corporation**, National Institute of Environmental Research***
National Institute of Ecology****

요약 : 본 연구에서는 수생태계 환경 지표로서 윤충류 군집의 활용 가능성을 평가하기 위해 부영양화 진행 정도에 따른 윤충류 군집의 반응 양상을 분석하였다. 윤충류 군집의 시,공간적 분포와 수질과의 관계를 평가하기 위해 지리상 인접하게 위치해 있으나 수질 항목 및 부영양화 정도가 서로 다른 충청남도 소재의 전대저수지와 초대저수지를 연구 대상으로 선정하였다. 분석을 위해 두 저수지에서 2013년 4월부터 11월까지 수질 및 윤충류 군집의 월별 조사를 실시하여 상관관계 분석 및 회귀 분석을 실시하였다. 윤충류 군집은 종 조성과 기능성 그룹 조성으로 나누어 적용하였으며, 기능성 그룹의 경우 섭식 성향을 대변할 수 있는 트로피(trophi)의 구조와 형태 및 개체 크기, 생태를 고려하여 분류하였다. 분석 결과, 종을 기반으로 한 조성의 경우 일관적인 경향이 나타나지 않았으나, 기능성 그룹 조성의 경우 부영양화 정도에 따른 그룹 특이적 증감 경향이 관찰되었다. 이러한 결과는 수생태계, 특히 과영양 상태의 저수지에 대한 환경

First Author: Hye-Ji Oh, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, Tel:+82-31-201-3392, E-mail: ohg2090@naver.com

Corresponding Author: Jong Min Oh, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, Tel:+82-31-201-2461, E-mail: jmoh@khu.ac.kr

Co-Author: Kwang-Hyeon Chang, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, Tel:+82-31-201-3392, E-mail: chang38@khu.ac.kr

Dong-Il Seo, Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 1732, Korea, Tel:+82-31-201-3392, E-mail: dongill0712@hanmail.net

Gui-Sook Nam, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan, Korea, Tel:+82-31-400-1829, E-mail: leo612@ekr.or.kr

Eui-Haeng Lee, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea, Tel:+82-61-338-6137, E-mail: end220@ekr.or.kr

Hyun-Gi Jeong, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, Tel:+82-32-560-7454, E-mail: daphnia79@gmail.com

Ju-Duk Yoon, National Institute of Ecology, Seocheon, Korea, Tel:+82-41-950-5388, E-mail: zmszmsqkek@nie.re.kr

Received: 25 August, 2017. Revised: 13 November, 2017. Accepted: 17 November, 2017.

지표로써 유휴류 기능성 그룹 조성의 활용 가능성을 제시한다. 반면, 본 연구에서는 제한된 연구 지점에 서의 현장 결과를 바탕으로 하고 있어, 향후 유휴류 기능성 그룹의 섭식 성향에 따른 환경 적응과 관련한 추가 연구가 이루어진다면 유휴류 군집을 수생태계 내 다양한 변화의 모니터링과 평가 및 비교에 적용 가능할 것으로 여겨진다.

주요어 : 생물지표, 유휴류 트로피, 부영양화 지수, 유사도, 다양성 지수

Abstract : In this study, we analyzed response patterns of rotifer community to eutrophic state, and estimated the applicability of rotifer community as an environmental indicator for highly eutrophicated reservoirs. In order to evaluate the relationships among spatial and temporal distributions and the water quality of rotifer community, we selected the Jundae Reservoir and Chodae Reservoir in Chungcheongnam-do, Korea, which are geographically adjacent but have different water quality, particularly in their eutrophic states. For the analyses on their correlations, monthly survey of water quality and rotifer community, was conducted from April to November 2013 in both reservoirs. The rotifer community was divided into different compositions of functional groups as well as species. Functional groups were classified according to the structure and shape of trophi which can represent feeding behavior of rotifer genus. To reflect ecological characteristics of species, body size and habitat preferences were also considered. Species-based composition did not show a consistent tendency with water quality parameters related with eutrophication. On the contrary, functional group composition showed relatively clear group-specific patterns, increasing or decreasing according to the parameters. The results suggest the possible application of rotifer functional group composition as an indicator for the lentic systems, especially hyper-eutrophicated reservoirs. The present study can suggest the applicability based on the field observations from the limited time scale and sites, and further studies on feeding behavior of the rotifer functional group and its interactions with environmental variables are necessary for the further application.

Keywords : bio-indicator, rotifer trophi, trophic state index, similarity index, diversity index

I. 서론

농업용수 공급을 위해 축조된 저수지는 국내 약 18,800개에 달하며, 이들 대부분은 1990년대 이후 축산업, 농업과 같은 인위적인 활동에 기인한 부영양화로 인해 다양한 수질 문제를 겪고 있다(Kim & Hwang 2004). 저수지의 부영양화는 비정상적인 일차 생산력의 증가와 남조세균 우점을 야기해 녹조 현상의 원인이 되기도 하며, 이러한 수질 문제는 생태계 교란 등 서식 생물상에 영향을 미쳐 결과적으로 저수지가 가지는 다양한 자원의 가치를 하락시킬 수 있다(Kim & Oh 2007). 따라서, 농업용수 공급원의 수자원 관리는 물론, 지역의 경관 가치를 보존하기 위해서 저수지의 수질오염 정도를 효과적으로 모니터

링하고 환경을 평가하는 것은 중요하다. 특히, 부영양화와 같은 인위적인 환경변화로 인해 발생하는 저수지의 문제점을 진단하고, 이에 대한 관리방안을 수립하기 위해서는 수질과 생물상을 종합적으로 평가할 수 있는 정량적 지표의 개발과 적용이 필요하다.

일반적으로 수생태계 환경 평가는 영양염 농도 및 투명도 등을 이용하여 평가하는 방법과 부영양화의 발생 여부 및 진행 정도를 0에서부터 100사이의 단일의 연속적인 수치로 표시하는 지수 평가방법을 통해 이루어졌다. 하지만 수질 항목을 이용한 지수 평가는 제한된 항목으로 측정 당시의 수질 상태만을 나타내는 이화학적 방법의 한계를 극복하기 어렵다는 단점이 있다(Kim & Oh 2007). 이러한 문제점을 보완하

고 수자원의 건강성 유지 및 회복을 위한 관리를 목표로 2006년 수생태계에 중점을 둔 물환경관리 기본계획이 수립되었고, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률이 제정되었다(Noh et al. 2015). 그에 맞추어 생물학적 수질평가지표가 개발되기 시작했으며 이는 현재 전국 5대강 수계에 포함되는 하천을 대상으로 한 수생태 건강성 조사 및 평가 사업 등에 활용되고 있다.

이제까지 제시된 생물학적 수질평가지표 중 가장 널리 사용되는 생물지표(bio-indicators)로는 부착조류와 저서성 대형무척추동물 군집이 있다. 이들 군집은 서식 환경의 오염에 대해 민감하거나, 내성 또는 적응력이 뛰어난 종을 포함하고 있어, 이들의 종 조성을 물리화학적 및 생물학적 환경 지표로 사용 가능하다는 특징이 있다. 또한, 자연적인 변화 및 인위적인 영향으로 인한 생태계 반응을 파악하는데 용이하다는 장점을 가지고 있다(Marbà et al. 2013). 특히, 수시로 변하는 수생태계 내 오염 부하에 대한 유출·입 영향 등을 종합적으로 반영해 주기 때문에 수생태계의 총체성, 온전성을 확보하고 유지하기 위한 선진 수질관리정책에 부합하다고 여겨진다(Han & Choi 2009).

하지만 이와 같은 생물군집을 저수지의 수생태계 평가에 적용하기에는 여러 가지 제한이 존재한다. 예를 들면, 다양한 지수의 산출이 가능하며, 오염에 대한 확실적인 분포를 이용하여 환경을 평가하는데 널리 사용되는 부착조류의 경우(Jo 2010), 적절한 자연적 혹은 인공적인 기질을 필요로 하고 빛의 침투 정도가 성장하는데 중요한 인자로 작용하기 때문에(Pan et al. 2012), 규모가 크고 수체가 정체되는 저수지보다는 하천 같은 수심이 얕은 유수 환경에 보다 적합하다. 저서성 대형무척추동물의 경우에도 다양한 종의 채집이 가능한 하천과 달리 저수지의 경우 적절한 서식처와 출현종이 제한적이므로, 저수지의 평가지표로 사용하기에는 시료 채집과 결과 해석에 있어 제약이 따른다. 또한 이들은 환경변화에 과도하게 민감하여 종 다양성 등을 환경 평가에 적용하기엔 출현 빈도가 일정하지 않아 모든 수생태계의 환경을 평가하기엔 어려움이 있다(Heino & Peckarsky 2014). 따라서, 저수지와 같은 부영양화 정수 생태계

환경변화를 파악하는데 이용 가능한 적절한 생물지표의 개발이 필요하다.

정수 생태계에 일반적으로 우점하는 윤충류는 계절에 상관없이 모든 수체에서 출현하며(Yoshida et al. 2003; Chang et al. 2008a), 짧은 생활사 주기로 인해 환경 변화에 대해 빠르게 반응할 수 있다는 장점을 가지고 있어 수생태계 평가 지표로 사용하기 위해 적용되어 왔다(Sládeček 1983; Zhang et al. 2013; Minakshi & Madhuri 2013; Gutkowska et al. 2013). 하지만 윤충류의 종수는 1,500종 이상으로(Dumont 1983) 그들의 생리적, 생태적인 이해에 한계가 있어, 종 조성 기반의 접근으로는 평가지표로써 적용하기에 어려움이 있다(Gannon & Stemberger 1978; Saksena 1987). 따라서, 최근에는 이러한 종 수준의 적용 한계를 극복하기 위한 방안으로 기능적 다양성 부분에 초점이 맞추어 세부적인 분류를 통해 환경 변화에 따른 윤충류 군집의 반응을 보려는 시도가 이루어지고 있다(Hulot et al. 2000).

윤충류는 트로피(trophi)라고 불리는 저작기관을 가지고 있으며, 이는 그 형태와 구조에 따라 9개의 그룹으로 분류된다. 트로피는 윤충류의 섭식 특성, 생활사 그리고 서식처 선호도와 같은 정보를 제공해줄 수 있기 때문에(Sørensen 2002), 윤충류 기능성 그룹으로의 분류에 핵심적인 요소가 될 수 있다. 최근 연구에서는 트로피 기반의 조성이 다변량 분석 등을 통한 수질과의 관계 파악에 상대적으로 용이하고, 수질 환경에 따라 각 트로피 그룹이 상이한 반응 양상을 나타내는 것이 보고되어 저수지 및 호소생태계의 주요 환경 인자를 나타내는 지표로써 트로피를 기준으로 분류된 윤충류의 기능성 그룹의 활용 가능성이 제시되고 있다(Oh et al. 2017).

윤충류의 경우 국내에서는 종 수준의 독성 시험 및 환경영향평가의 항목으로 이용되고 있으나(Lee et al. 2008; Kim et al. 2015), 군집 조성과 환경과의 상관관계에 기반한 활용에 대해서는 고려되어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 부영양화 저수지 환경 평가 지표로써 윤충류 군집의 활용 가능성을 평가하기 위해 부영양화 정도가 다른 두 저수지를 선정, 종 수준의 군집 지표와 기능성 그룹의 군집 지표의 계절

변화를 비교하여 기능성 그룹 적용의 장점 및 문제점을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

윤충류 기능성 그룹이 수질 환경을 대변하여 수생태계의 건강성을 평가하는데 사용될 수 있는지 알아보기 위하여 충청남도 소재의 전대저수지와 초대저수지를 연구 대상으로 선정하였다(Figure 1). 두 저수지는 인접하게 위치하고 있어 동일한 기상 조건의 영향을 받으며, 농·축산 폐수라는 공통된 오염원의 영향을 받고 있으나, 계절에 따른 수질 차이가 발생하므로 윤충류 기능성 그룹의 조성을 비교하고, 수질에 따른 반응과 수질요소와의 관계를 파악하는데 용이하다고 판단하였다.

두 저수지의 기초 수질은 2013년 4월부터 11월까지 월별로 측정하였다. 수온, pH 및 전기전도도(electrical conductivity, EC)는 수질 측정 장치(YSI Pro Plus, OH, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였고, 화학적 산소 요구량(chemical oxygen demand, COD), 엽록소 *a*(chlorophyll *a*, Chl-*a*), 총질소(total nitrogen, TN)와 총인(total phosphorus, TP)은 1m 깊이에서 채수한 샘플을 이용하여 수질오염공정시험

법(Korea Ministry of Environment 2006)에 의거하여 분석하였다.

윤충류 군집은 동일 기간 1m 깊이에서 원수 10L를 채수하여 망목 60 μ m 네트에 여과, 농축시켜 포르말린(최종농도 5%)으로 고정한 뒤, 현미경(Olympus BX51, Japan)을 이용하여 속 및 종 수준까지 동정하였다. 동정한 윤충류 군집은 저작기관 트로피를 기준으로 하여 기능성 그룹으로 분류되어 종 구성과 함께 분석에 이용되었다(Oh et al. 2017).

트로피는 일반적으로 갈고리(uncus), 마디(manubrium), 가지(ramus), 그리고 받침대(fulcrum)로 구성되며 이들의 형태에 따라 총 9 종류로 구분된다(Malleate, Ramate, Malleoramate, Fulcrate, Incudate, Cardate, Uncinate, Virgate, Forcipate)(Wallace et al. 2006). 이중 담수에서는 6 종류가 출현하는 것으로 보고되고 있으며, 본 연구기간 중에는 Malleate, Virgate, Incudate, Ramate, Malleoramate, 총 5종류가 출현하였다. 한편, 윤충류를 기능성 그룹으로 분류하는데 있어 트로피가 나타내는 섭식 특성이외에 먹이 선택에 영향을 줄 수 있는 체장 및 부유, 부착 등의 서식 특성 역시 섭식 기능군 분류에 고려되어야 하는 요인이라고 지적되었다(Oh et al. 2017). 따라서 본 연구에서는 윤충류 종별 크기와 서식 특성

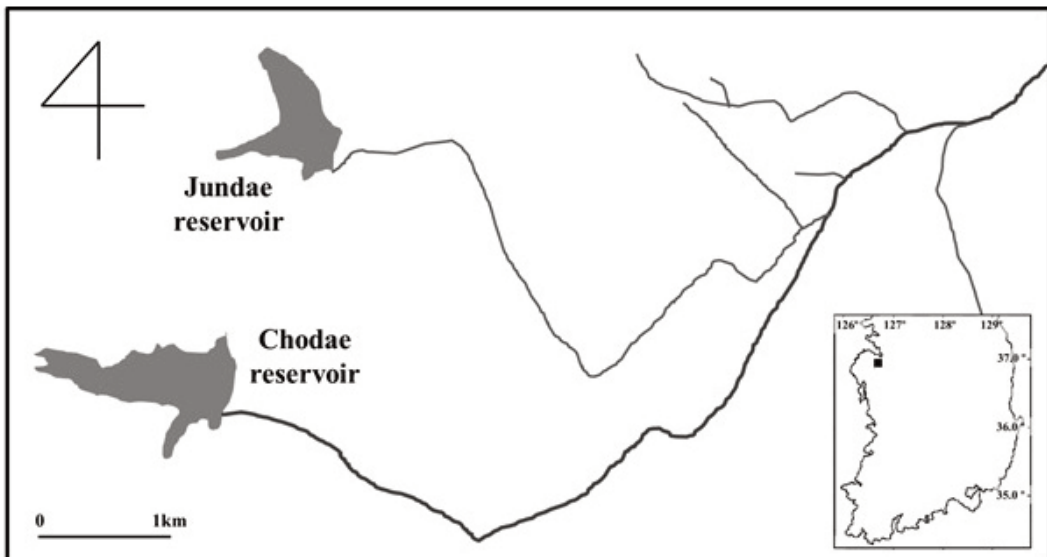


Figure 1. Map of Sites

Table 1. List of rotifer genus in each rotifer functional groups

Rotifer functional groups	Trophi 1A	Trophi 1B	Trophi 1C	Trophi 2	Trophi 3	Trophi 4	Trophi 5	Trophi 6
Rotifer genus	<i>Brachionus</i> <i>Keratella</i>	<i>B. calyciflorus</i> <i>B. quadridentatus</i> <i>S. diversicornis</i> <i>E. dilatata</i>	<i>Lepadella</i> <i>Lecane</i> <i>Monostyla</i>	<i>Ascomorpha</i> <i>Cephalodella</i> <i>Diurella</i> <i>Trichocerca</i>	<i>Polyarthra</i> <i>Synchaeta</i>	<i>Asplanchna</i>	<i>Philodina</i> <i>Rotaria</i>	<i>Filinia</i> <i>Hexarthra</i> <i>Pompholyx</i>

- Trophi 1 : Malleate 그룹에 속하며, 이 그룹은 짧은 받침대, 강한 마디와 가지들로 이루어져 있으며 갈고리에는 4개~7개의 이빨을 가지고 있는 것이 특징. 이러한 구조로 인해 해당 트로피를 가진 윤충류 종들은 먹이를 자르고(cut) 씹는(chew) 섭식 특성을 가진(Koste & Shiel 1987). Malleate의 트로피를 가지고 있는 종들 중, 본 연구에서는 개체 크기와 서식 특성을 고려하여 세부적으로 Trophi 1A(<100 μ m, 부유성), Trophi 1B(>100 μ m, 부유성), Trophi 1C(부착성)으로 분류함.
- Trophi 2 : Virgate 그룹에 속하며, 이 그룹은 긴 받침대와 마디를 가지고 있어 전체적으로 가는 형태. 대부분의 경우에 좌우가 대칭을 이루지 않음. 갈고리 부분은 넓고 작은 이빨들을 가지고 있으며, 앞부분에 겹과 같은 구조를 가지고 있는 작고 넓은 가지들은 표면 사이의 피스톤 근육들을 이용하여 개체가 먹이를 빨아들여(suction) 섭식함(Koste & Shiel 1987).
- Trophi 3 : Trophi 2 그룹과 동일하게 Virgate 그룹에 속하지만, 구조의 형태상 갈고리와 연결되어 있는 마디가 가는 Trophi 2 그룹과는 달리 납작한 모양으로 구분되어 상이한 형태를 가짐(Oh et al, 2017).
- Trophi 4 : Incudate 그룹에 속하며, 대표적인 포식 윤충류 종으로 *Asplanchna*가 속함. 크고 굵은 가지들과 짧고 널빤지 형태를 띠는 다양한 크기의 받침대, 마디와 갈고리가 퇴화되었다는 특징이 있는 해당 트로피는 집게발과 같은 역할을 하는 가지들을 이용하여 먹이를 꼭 쥐어(seizing) 섭식(Koste & Shiel 1987).
- Trophi 5 : Ramate 그룹에 속하며, 넓고 굵은 낫 모양의 관 같은 갈고리로만 이루어짐. 2-3개의 주요 이빨이 있으며 많은 홈이 이빨과 같은 구조를 이루고 있어 이를 통해 먹이를 걸러서(filtering) 섭식(Koste & Shiel 1987).
- Trophi 6 : Malleoramate 그룹에 속하며, 가지, 마디, 그리고 갈고리로 이루어짐. 가지들은 강력한 이빨의 역할을 하며, 마디에는 구멍이 나있고 갈고리는 많은 수의 가는 이빨들로 구성. Ramate의 세부 분류에 해당되는 Malleoramate는 그 형태상 Malleate와 Ramate와 유사하여 먹이를 걸러서 자르거나 씹는 섭식 특성을 가짐(Koste & Shiel 1987).

을 고려하여 다음과 같이 8 종류로 재분류하여 적용하였다(Table 1).

전대저수지와 초대저수지의 수질 데이터와 윤충류 군집 데이터를 바탕으로 계절별 변화 경향성을 분석하고 상관관계를 파악하였다. 두 저수지의 부영양화 정도를 비교하는 지표로는 한국형 부영양화 지수(Trophic State Index Korea: TSI_{KO})를 이용하여(Kim et al, 2012) 부영양화 정도에 따른 윤충류 군집의 차이를 분석하였다. 수질 및 윤충류 군집의 유사도는 Primer-5(Clarke & Warwick 2001)를 이용하여 분석하였으며, 상관관계 및 회귀분석은 R version 3.3.1을 이용하였다(상관관계분석; R, psych package, 회귀분석; R, Using R package) (R Development Core Team, 2008).

III. 결과 및 고찰

1. 조사지점(전대저수지, 초대저수지)의 부영양화 경향

본 조사에서 연구지점으로 선정된 전대저수지와 초대저수지는 근접하게 위치하고 있어 동일 기상의

영향으로 평균 수온 및 범위가 유사하였다(전대: 21.5 \pm 6.8 $^{\circ}$ C, 초대: 22.0 \pm 7.5 $^{\circ}$ C). 화학적 산소 요구량, 엽록소 a, 총인을 기반으로 한 한국형 부영양화 지수 값을 기준으로 하면 두 저수지는 모두 과영양화 저수지(>70)로 분류되나, 세부적인 수질 항목을 고려해보았을 때 초대저수지가 전대저수지보다 부영양화 정도가 높은 것으로 나타났다(전대: TSI_{KO}=80.6 \pm 6.0, 초대: TSI_{KO}=92.5 \pm 2.7). 특히, 총질소(전대: 2.1 \pm 0.5 mg/L, 초대: 4.6 \pm 1.5mg/L)와 총인(전대: 0.1 \pm 0.0mg/L, 초대: 0.3 \pm 0.1mg/L)의 경우 초대저수지에서 2배 이상의 높은 것으로 나타났다(Figure 2).

2. 윤충류 출현종 및 출현 경향

연구기간 중 전대저수지와 초대저수지에서 출현한 윤충류의 분류군은 각각 11속 16종, 11속 18종으로, 이 중 10속 15종이 공통적으로 출현하여 두 저수지의 윤충류 출현 종은 유사한 것으로 나타났다. 전대저수지의 출현 평균 개체군 밀도는 약 5867ind./L으로, 그 중에서도 5월에 약 25750ind./L의 최고 개체군

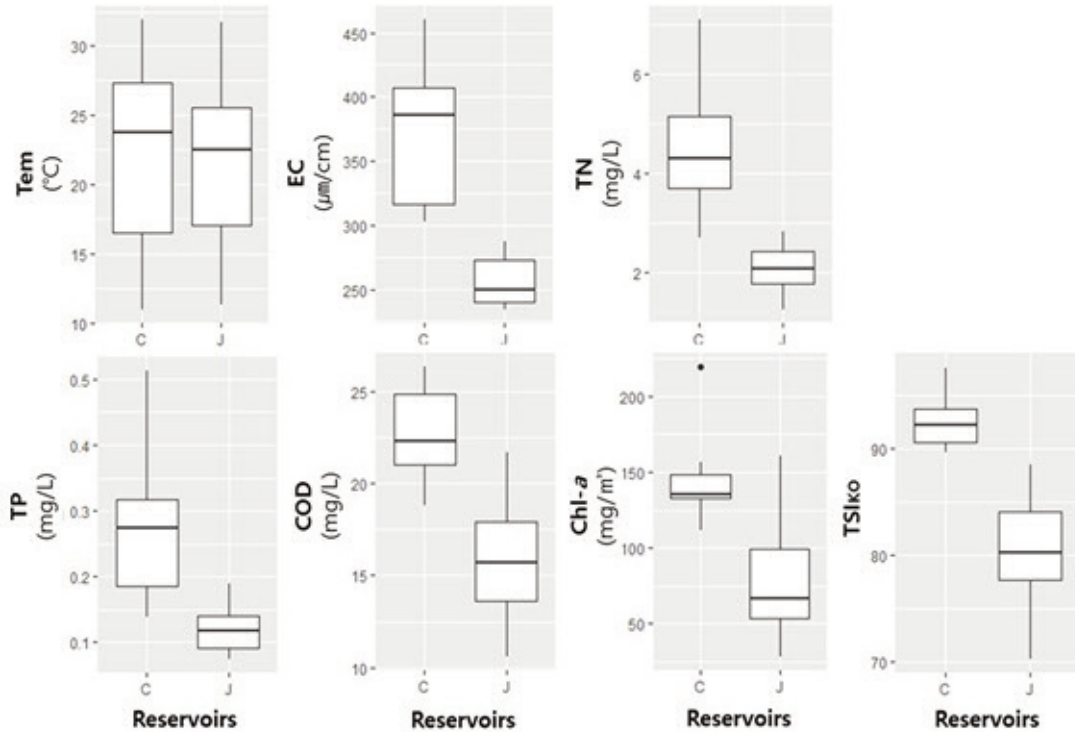


Figure 2. Comparison of water quality variables and eutrophic state(TSI_{ko}) between Jundae(J) and Chodae(C) Reservoirs

밀도를 보였다. 반면, 초대저수지의 경우, 연간 평균 개체군 밀도가 약 579ind./L로 전대저수지 대비 약 10배 정도 밀도가 낮았으며, 7월에 약 1423ind./L의 최고 개체군 밀도를 보였다. 율충류 출현 종 중 우점 종은 전대저수지에서는 *Polyarthra* spp.(약 2346 ind./L), 초대저수지에서는 *Keratella cochlearis* (174 ind./L)로 상이한 것으로 분석되었다. 이 두 종은 일반적으로 부영양화가 진행된 호소 및 하천에서 우점하는 대표적인 율충류로 알려져 있으나(Wu et al. 2017), 이 두 종의 우점 경향은 서식처 내 먹이원의 종류와 같은 환경요인에 의하여 상이한 것으로 보고되고 있다(Hillbricht-Ilkowska 1983; Chang et al. 2008b). 특히, *K. cochlearis*의 경우 *Polyarthra* spp.에 비해 부영양화 지수 등과 같은 수생태계 영양 단계 지표와 보다 뚜렷한 양의 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있다(Hillbricht-Ilkowska 1983). 따라서, 본 연구에서 관찰된 두 저수지에서의 상이한 우점종 경향과 같이, 율충류 군집의 경우 단순한 생

체량의 증가보다는 부영양화의 진행에 따른 종 조성의 특이적 반응이 존재하는 것으로 판단된다.

연구 기간 동안 두 저수지의 율충류 종 조성 변화를 비교하기 위해 전대저수지와 초대저수지에서 출현한 율충류 군집을 종 조성과 기능성 그룹 조성으로 나누어 각각 Figure 3에 나타내었다.

율충류 종 조성의 경우, 총 19종의 율충류가 두 저수지 사이에서는 물론 동일 저수지 내에서도 개체군 밀도의 변화가 크며 계절별로 상이한 조성과 상대 풍부도로 출현하여 뚜렷한 종 조성 변화 경향성을 파악하기 어려웠다(Figure 3 (A)). 반면, 출현 율충류를 기능성 그룹으로 분류하여 조성의 변화를 분석한 결과, 종 조성에 비해 그 변화 경향성을 파악하기가 상대적으로 용이한 것으로 나타났다(Figure 3 (B)). 종 조성의 경우, 계절에 따른 출현 종의 변화로 인해 일관된 조성 변화의 경향이 나타나지 않는 반면, 기능성 그룹 조성의 경우, 초대 저수지는 연중 Trophi 1A 그룹이 우점하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 전대

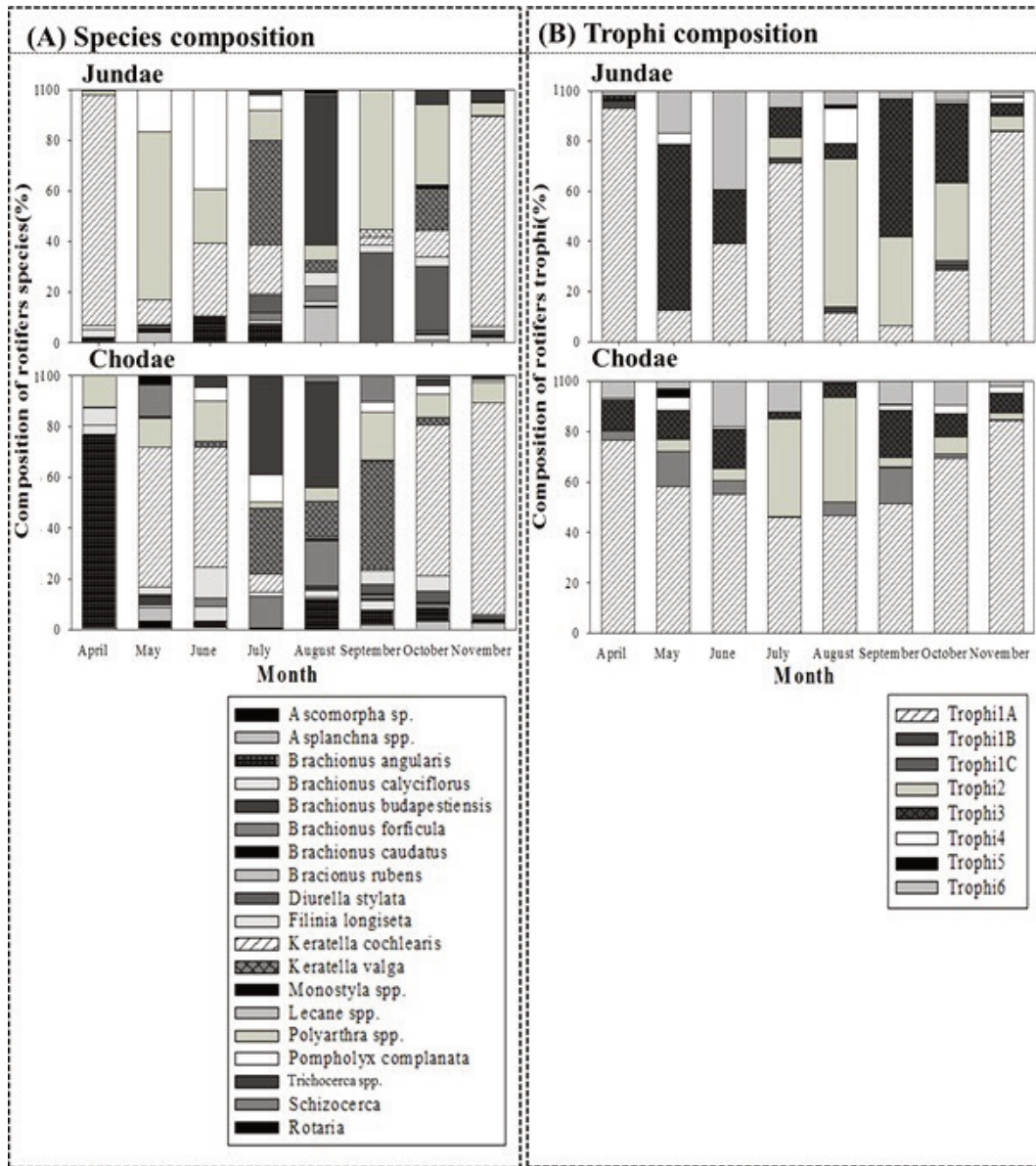


Figure 3. Tendency comparison of rotifer species composition(A) and functional group composition(B) in neighboring Jundae and Chodae reservoirs over time

저수지의 경우 상대적으로 Trophi 3 그룹이 우점하는 경향을 나타내었다.

3. 부영양화와 윤충류 군집

부영양화 진행 정도에 따라 윤충류 군집 조성이 달라지는지 확인하기 위해, 두 저수지의 부영양화 지수의 차이와 윤충류 군집 유사도의 상관관계를 분석하

였다(Figure 4). 윤충류 군집의 유사도는 종 조성의 유사도와 기능성 그룹 조성의 유사도를 각각 계산하여 그 경향을 확인하였다. 분석 결과, 종 조성 과 기능성 그룹 조성 모두 두 저수지의 부영양화 정도의 차이가 날수록 조성의 유사도가 낮아지는 것으로 확인되었다.

이와 같은 상관관계 경향을 유도하는 조성의 내부

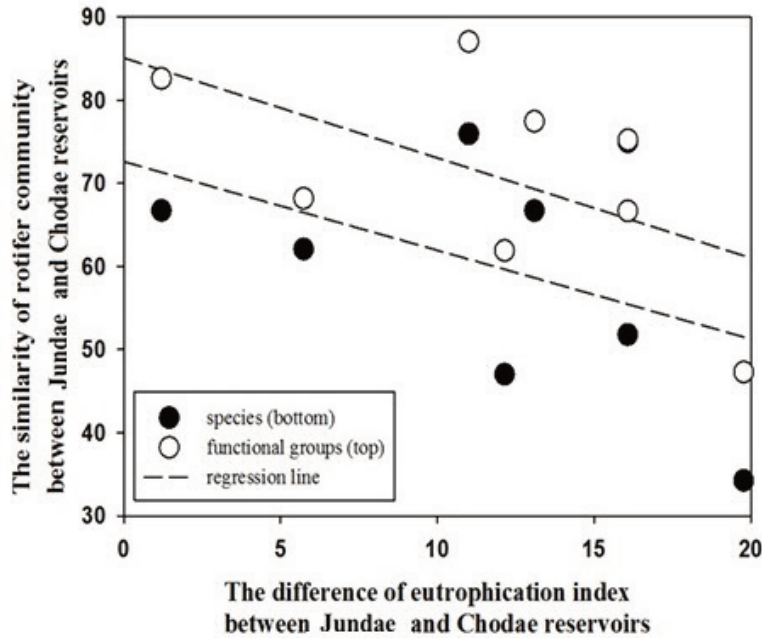


Figure 4. The plot of correlation between the difference of eutrophication index and the similarity of rotifer community between Jundae and Chodae reservoirs

적 요인을 파악하기 부영양화 정도에 따른 윤충류 종 조성 및 기능성 그룹 조성이 반응하는 양상을 회귀분석을 통해 평가하였다. 종 조성의 경우 윤충류 총 개체군 밀도 및 부영양 환경에서 우점하는 윤충류 종 (Ostojić 2000; Finni 2001; Wu et al. 2017)과 계산된 부영양화 지수의 회귀분석을 실시하였다. 기능성 그룹의 경우 조사 기간 중 출현 밀도가 현저히 낮았던 Trophi 1B 그룹, Trophi 1C 그룹, 그리고 Trophi

5 그룹을 제외한 나머지 기능성 그룹을 대상으로 회귀분석을 실시하였다(Table 2).

윤충류 총 개체군 밀도는 부영양화 지수와 유의한 음의 상관관계를 나타내었다($p^* < 0.05$). 하지만 두 저수지에서 우점하였던 *K. cochlearis*와 *Polyarthra* spp.를 포함한 주요 출현종의 경우, 음의 상관성을 가지나 통계적으로 유의한 경향은 나타나지 않아, 부영양화 진행에 따른 이들 종의 개체군 밀도 증감 특

Table 2. Summary of correlation analyses between rotifer community (species-based & functional groups) and eutrophication index

Y = aX + b	p-value
Total abundance of rotifer species = -0.04 (Eutrophication index) + 6.60	0.0450*
The abundance of <i>Brachionus angularis</i> = -0.04 (Eutrophication index) + 4.45	0.2421
The abundance of <i>Filinia longiseta</i> = -0.00 (Eutrophication index) + 1.63	0.879
The abundance of <i>Keratella cochlearis</i> = -0.06 (Eutrophication index) + 6.76	0.2117
The abundance of <i>Polyarthra</i> spp. = -0.03 (Eutrophication index) + 4.49	0.0940
The abundance of Trophi 1A = -0.02 (Eutrophication index) + 4.21	0.4737
The abundance of Trophi 2 = 0.04 (Eutrophication index) - 2.12	0.2281
The abundance of Trophi 3 = -0.06 (Eutrophication index) + 7.52	0.0038*
The abundance of Trophi 4 = -0.02 (Eutrophication index) - 3.14	0.4564
The abundance of Trophi 6 = -0.06 (Eutrophication index) + 6.94	0.0151*

note: $p^* < 0.05$

성은 설명되지 않았다.

이와 달리 기능성 그룹 조성의 경우, 부영양화 지수의 증가에 대한 증감의 반응이 서로 다른 것으로 나타났다(Figure 5). 부영양화 지수가 증가할수록 Trophi 3 그룹과 Trophi 6 그룹의 개체군 밀도는 감소하는 경향을 보이는 반면($p^* < 0.05$, Table 2, Figure 5 (c), (e)), Trophi 2 그룹의 경우, 통계적으

로 유의한 결과는 얻어지지 않았지만 개체군 밀도가 증가하는 경향이 나타났다(Figure 5 (b)). 대부분의 윤충류 종이 속하며, 높은 개체군 밀도 및 상대풍부도를 나타내는 Trophi 1A 그룹은 부영양화 정도와 무관하게 일정하게 유지되는 경향을 보였고, Trophi 4 그룹은 불규칙한 출현 빈도로 인해 뚜렷한 상관관계가 보이지 않았다(Figure 5 (a), (d)). 특히, Trophi

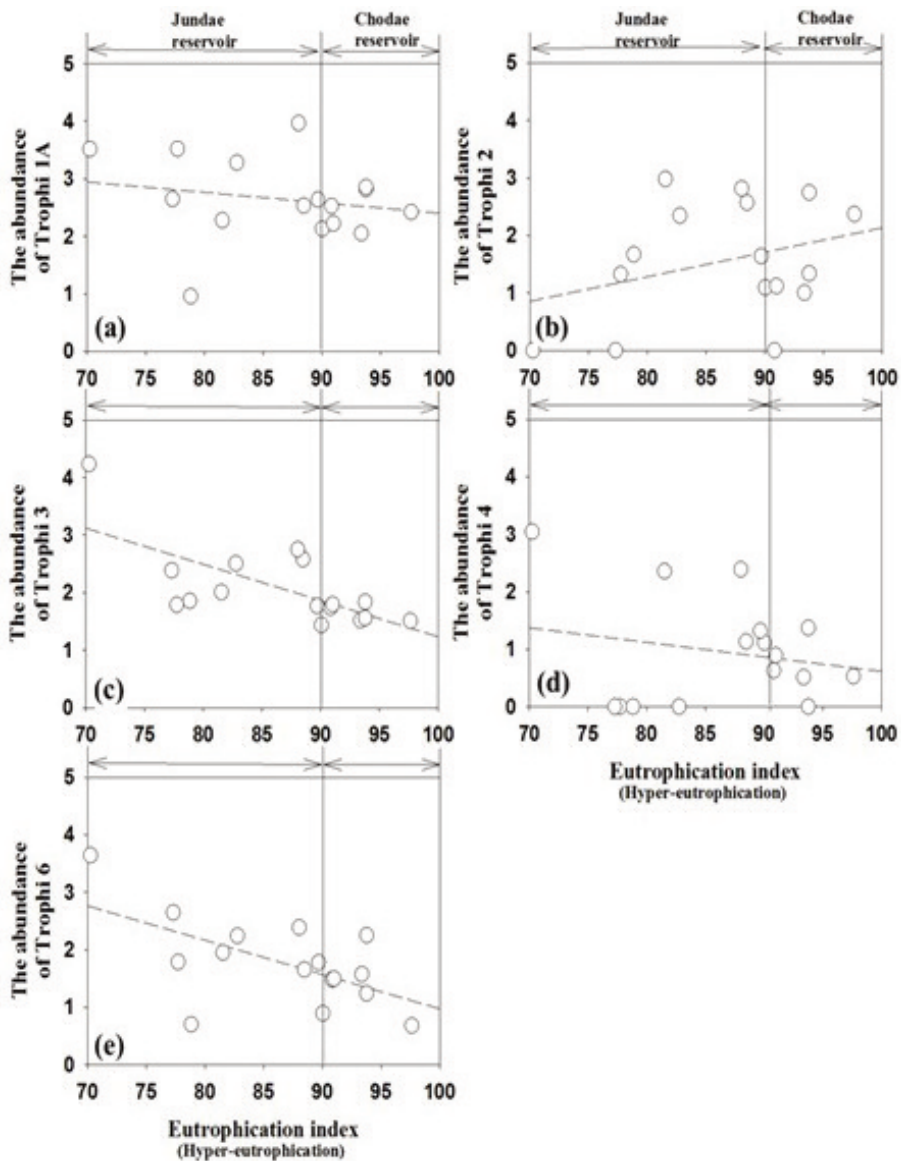


Figure 5. The plots of correlation; (a) Eutrophication index-The abundance of Trophi 1A, (b) Eutrophication index-The abundance of Trophi 2, (c) Eutrophication index-The abundance of Trophi 3, (d) Eutrophication index-The abundance of Trophi 4, and (e) Eutrophication index-The abundance of Trophi 6

1A 그룹은 각 지점별 밀도의 변이가 부영양화 극심하게 진행 될수록 일정해지는 경향을 보였다. 국내 저수지를 대상으로 한 윤충류 군집의 공간 분포에 관한 연구에서 윤충류 기능성 그룹 조성은 종 조성과는 달리 트로피로 분류된 각 그룹에 따라 수질 변화에 대한 반응이 상이하게 나타나며, 이중 Trophi 1 그룹은 기능성 그룹 중 부영양화 정도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보고된 바 있어(Oh et al, 2017), 본 조사에서 분석된 계절 변화 패턴과 유사한 것으로 나타났다.

생물 다양성은 생태계 군집 구조의 변화를 나타내는데 유용한 지수로 생태학 연구에 널리 사용되고 있으며, 환경 변화에 따른 정량적 다양성 지수 변화는 환경영향평가에도 널리 사용된다(Cruz-Uribe 1988). 수생태계 내 부영양화 정도에 따른 윤충류의 군집 구조의 반응을 다양성 측면에서 분석하고자 윤충류 군집을 종 조성과 기능성 그룹 조성으로 나누어 Shannon 다양성지수($H' = -\sum p_i \ln p_i$)를 계산했다. 윤충류 종 조성의 경우, 부영양화 정도와 다양성이 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다(Figure 6).

저서성 대형무척추동물 및 어류의 경우 일반적으로 부영양화와 같은 부적절한 환경 변화가 발생 시 낮은 다양성을 나타내므로 환경영향평가의 지표로 사용이 가능하다(Heino et al, 2007). 하지만 윤충류 종의 경우 본 연구에서 부영양화가 진행됨에 따라 전반적인 개체 밀도는 감소하지만 다양성, 즉 군집 내 출현 종 수는 증가하는 경향을 보여, 부영양화 지표로서의 사용이 부적절한 것으로 나타났다. 윤충류 기능성 그룹 조성의 경우, 다양성은 부영양화 정도와 상관없이 다소 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다. 이는 부영양화 정도에 따라 각 기능성 그룹이 서로 다른 증감 반응을 나타내어(Figure 5) 결과적으로 전체적인 기능성 그룹의 다양도는 큰 변화가 없기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 외부로부터 다양한 먹이원의 유입과 같은 환경 변화는 생물 섭식 기능군 조성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Doi et al, 2008). 윤충류의 트로피는 섭식 성향을 반영하므로, 이에 의한 분류는 생태계 내 상이한 생태 길드(ecological guild)를 나타낸다고 할 수 있다(Obertegger et al,

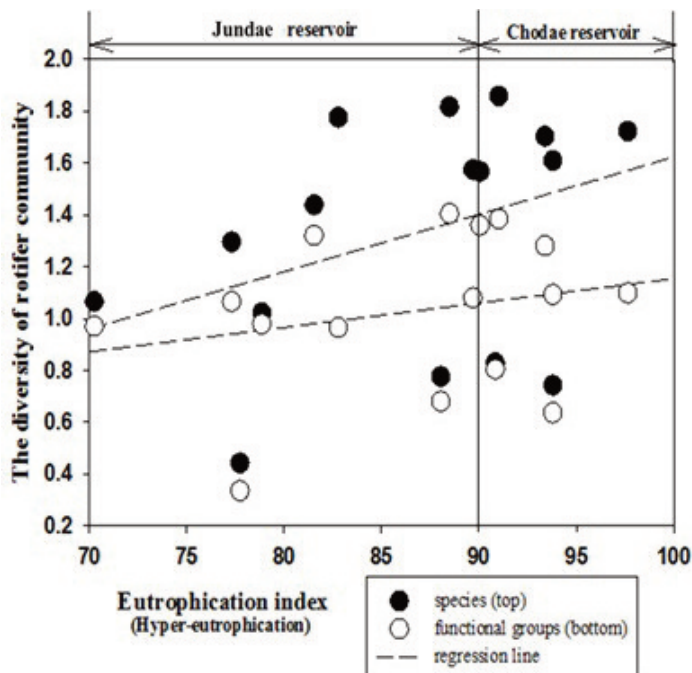


Figure 6. The plot of correlation between eutrophication index and the diversity of rotifer community

2011). 따라서, 이와 같이 부영양화 진행 상태에 따라 윤충류 기능성 그룹 조성 간에 상이한 반응이 나타나는 것은 부영양화 진행과 같은 수질 변화가 윤충류 군집 내 다양한 기능 변화에 영향을 끼칠 가능성을 시사한다. 동시에 기능성 그룹 조성 변화를 통해 생태계 내 다양한 변화를 모니터링 하는 것이 가능하리라 예상된다. 특히 과영양화 상태인 저수지 사이에서 반응이 상이한 것으로 나타나, 대부분의 저수지가 부영양화 및 과영양화 상태를 보이는 국내에서 비교, 평가를 위한 생물지표 활용 가능성이 제시되었다.

본 연구에서는 윤충류 군집(종 및 기능성 그룹)의 시, 공간 변화를 동시에 분석하기 위해 부영양화가 진행된 두 저수지를 선정해 수질 및 부영양화 정도와 군집 조성의 계절 변화를 분석하여 그 경향성을 제시하였다. 윤충류 군집과 환경과의 상관관계 및 기능성 그룹의 생물지표로서 적용과 해석에 대한 보다 구체적인 정보를 얻기 위해서는, 향후 윤충류 기능성 그룹의 섭식 성향과 환경 요인과의 상호작용에 대한 세부적인 생태적 연구 접근이 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구는 수생태계 환경 지표로서 윤충류 군집(종 및 기능성 그룹)의 활용 가능성을 평가하기 위해 부영양화 정도가 다른 전대저수지와 초대저수지를 대상으로 수행되었다. 윤충류의 트로피는 그 형태와 구조에 따라 상이한 섭식 성향을 나타내기 때문에 기능성 그룹으로의 분류 기준으로 적합하며, 이러한 분류의 기능성 그룹은 윤충류 군집 내 생태 길드를 대변할 수 있다.

1. 지리상 인접하게 위치한 두 저수지는 모두 과영양화 저수지(TSI_{IKO}>70)로 분류되었으나, 총질소, 총인 등 세부적인 수질 항목을 고려해보았을 때 초대저수지가 전대저수지보다 부영양화 정도가 높은 것으로 나타났다.
2. 연구기간 동안 윤충류는 대부분이 전대저수지와 초대저수지에서 공통으로 출현하였으나, 전대저수지에서는 *Polyarthra* spp., 초대저수지에서는 *Keratella cochlearis*가 우점하였다. 두 저

수지의 계절별 윤충류 군집 조성 변화를 비교해 본 결과, 윤충류 종 조성의 경우 저수지 및 계절별 개체군 조성 및 밀도 차이로 뚜렷한 변화 경향성을 나타내지 않는 반면, 기능성 그룹 조성의 경우엔 상대적으로 뚜렷한 변화 경향성이 나타났다.

3. 부영양화 진행 정도에 따른 윤충류 군집 조성의 반응을 확인하기 위해 (1)두 저수지의 부영양화 지수 차이와 윤충류 군집 유사도의 상관관계, (2)부영양화 진행 정도와 윤충류 개체군 밀도의 상관관계, (3)부영양화 진행 정도와 윤충류 군집 다양성의 상관관계 분석을 실시하였다. 군집 유사도의 분석 결과, 부영양화 지수 차이가 증가할수록 윤충류 종 및 기능성 그룹 모두 군집 유사도가 낮아지는 경향이 나타나 조성의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 경향에 영향을 끼치는 군집 조성의 내부적 요인을 파악하기 위해 각 군집 성분의 상관관계를 분석해본 결과, 윤충류 총 개체군 밀도는 부영양화 지수와 유의한 음의 상관관계를 보였으나, 두 저수지의 주요 출현종 들은 유의한 경향성을 나타내지 않아 부영양화 진행에 따른 윤충류 종의 개체군 밀도 증감 특성을 파악하기 어려웠다. 한편, 기능성 그룹 조성의 경우, 부영양화 진행 정도에 따라 각각의 그룹이 서로 다른 증감 반응을 보였다. 다양성과의 관계를 분석해본 결과, 종 조성의 경우, 부영양화 정도와 다양성이 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타나는 반면, 윤충류 기능성 그룹 조성의 경우, 다양성은 부영양화 정도와 상관없이 다소 일정하게 유지되는 경향을 나타냈다.

윤충류 군집 분석 결과, 기능성 그룹 조성은 종 조성과는 달리 부영양화 정도에 따라 그룹 특이적 증감 반응이 관찰되어 수생태계 환경 지표로 활용 가능할 것으로 판단된다. 특히, 과영양 단계의 저수지에서 분석 실시한 것을 바탕으로, 부영양화 이상의 상태의 수생태계 내 다양한 변화 모니터링과 평가 및 비교에 윤충류 기능성 그룹 조성을 적용 가능할 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 제한된 연구 지점에서의 현장

결과를 바탕으로 하고 있어, 향후 윤충류 기능성 그룹의 섭식 성향에 따른 환경 적응과 관련한 세부적인 생태 연구의 수행을 통한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(과제번호 17AWMP-B098640-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Chang KH, Doi H, Imai H, Gunji F, Nakano S. 2008a. Longitudinal changes in zooplankton distribution below a reservoir outfall with reference to river planktivory. *Limnology*. 9: 125-133.
- Chang KH, Nagata T, Sakamoto M, Hanazato T. 2008b. Day and night vertical distributions of Rotiferan and Crustacean zooplankton in Lake Suwa. *Journal of Freshwater Ecology*. 23(1) : 165-168.
- Clarke KR, Warwick RM. 2001. Changes in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Plymouth (UK); Primer-E.
- Cruz-Urbe K. 1988. The use and meaning of species diversity and richness in archaeological faunas. *Journal of Archaeological Science*. 15(2): 179-196.
- Doi H, Chang KH, Ando T, Imai H, Nakano S, Kajimoto A, Katano I. 2008. Drifting plankton from a reservoir subsidize downstream food webs and alter community structure. *Oecologia*. 156: 363-371.
- Dumont HJ. 1983. Biogeography of rotifers. *Hydrobiologia*. 104: 19-30.
- Finni T, Laurila S, Laakkonen S. 2001. The history of eutrophication in the sea area of Helsinki in the 20th century: long-term analysis of plankton assemblages. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 30(4) : 264-271.
- Gannon JE, Stemberger RS. 1978. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Trans. American Society for Microbiology*. 97: 16-35.
- Gutkowska A, Paturej E, Kowalska E. 2013. Rotifer trophic state indices as ecosystem indicators in brackish coastal waters. *Oceanologia*. 55: 887-899.
- Han DH, Choi JY. 2009. A Study on the Water Quality Standards for the Integrated Management of Water Environment. KEI. Basic research report: 1-140. [Korean Literature]
- Heino J, Mykra H, Mamalainen H, Aroviita J, Muotka T. 2007. Responses of taxonomic distinctness and species diversity indices to anthropogenic impacts and natural environmental gradients in stream macroinvertebrates. *Freshwater Biology*. 52: 1846-1861.
- Heino J, Peckarsky B. 2014. Integrating behavioral, population and large-scale approaches for understanding stream insect communities. *Current Opinion in Insect Science*. 2: 7-13.
- Hillbricht-Ilkowska A. 1983. Response of Planktonic Rotifers to the Eutrophication Process and to the Autumnal Shift of Blooms in Lake Biwa, Japan. *Japanese Journal of Limnology*. 44(2) : 93-106.
- Hulot FD, Lacroix G, Lescher-Moutoué F, Loreau M. 2000. Functional diversity governs ecosystem response to nutrient enrichment. *Nature*. 405: 340-344.
- Jo KH. 2010. Water Quality Assessment in Small Streams by Epilithic Diatoms and DAIPo.

- Journal of Environmental Health Science. 36(2): 148-154. [Korean Literature]
- Koste W, Shiel RJ. 1987. Rotifera from Australian inland waters. II. Epiphanidae and Brachionidae (Rotifera: Monogononta). *Invertebrate Systematics*. 1(7): 949-1021.
- Kim HS, Hwang SJ. 2004. Analysis of eutrophication based on chlorophyll-a, depth and limnological characteristics in Korean reservoirs. *Korean Journal of Limnology*. 37(2): 213-226. [Korean Literature]
- Kim JG, Oh SC. 2007. Characteristics of water quality and evaluation of eutrophication for reservoirs in Kunsan. *Journal of the Environmental Sciences*. 16(3): 357-367.
- Kim ES, Sim KB, Kim SD, Choi HI. 2012. Water Quality Assessment for Reservoirs using the Korean Trophic State Index. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 28(1) : 78-83. [Korean Literature]
- Kim SJ, Song HJ, Park TJ, Hwang MY, Cho HS, Song KD, Lee HJ, Kim YS. 2015. 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. [Korean Literature]
- Korea Ministry of Environment. 2006. Measurement Data for Water Quality [Intertnet]. Nation law information center; [Cited 2016 Nov 10]. Available from: <http://Water.nier.go.kr>
- Lee SM, Park GS, Yoon SJ, Kang YS, Oh JH. 2008. Development of Ecotoxicological Standard Methods using Early Life Stage of Marine Rotifer *Brachionus plicatilis* and Benthic Copepod *Tigriopus japonicus*. *Journal of the Korean Society of Oceanography*. 13(2) : 129-139. [Korean Literature]
- Marbà N, Krause-Jensen D, Alcoverro T, Birk S, Pedersen A, Neto JM, Orfanidis S, Garmendia JM, Muxika I, Borja A, Dencheva K, Duarte CM. 2013. Diversity of European seagrass indicators: patterns within and across regions. *Hydrobiologia*. 704: 265-278.
- Minakshi NG, Madhuri KP. 2013. Survey of rotifers to evaluate the water quality of the river Gadhi and its reservoir. *Ecology Environment and Conservation*. 19: 417-423.
- Noh SY, Choi HL, Park JY, Hwang SJ, Kim SH, Lee JA. 2015. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 31(3):319-327. [Korean Literature]
- Oh HJ, Jeong HG, Nam GS, Oda Y, Dai W, Lee EH, Kong DS, Hwang SJ, Chang KH. 2017. Comparison of taxon-based and trophi-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*. 1-8.
- Obertegger U, Smith HA, Flaim G, Wallace RL. 2011. Using the guild ratio to characterize pelagic rotifer communities. *Hydrobiologia*. 662(1): 157-162.
- Ostojic AM. 2000. Effect of eutrophication on changes in the composition of zooplankton in the Grošnica Reservoir (Serbia, Yugoslavia). *Hydrobiologia*. 436(1) : 171-178.
- Pan Y, Hughes RM, Herlihy AT, Kaufmann PR. 2012. Non-wadeable river bioassessment: spatial variation of benthic diatom assemblages in Pacific Northwest rivers, USA. *Hydrobiologia*. 684: 241-260.
- R Development Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R foundation for Statistical Computing[Intertnet]. Nation law

- information center; [Cited 2016 Nov 10].
Available from: <http://www.R-project.org>
- Saksena D. 1987. Rotifers as indicators of water quality. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*. 15: 481-485.
- Sládeček V. 1983. Rotifers as indicators of water quality. *Hydrobiologia*. 100: 169-201.
- Sørensen MV. 2002. On the evolution and morphology of the rotiferan trophi, with a cladistic analysis of Rotifera. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*. 40: 129-154.
- Wallace RL, Snell RW, Ricci C, Nogrady T. 2006. *Rotifera: biology, ecology and systematics*, Leiden: Backhuys Publishers. 1(2).
- Wu L, Zhou M, Shen Z, Cui Y, Feng W. 2017. Spatio-temporal variations in zooplankton community structure and water quality in Chinese eutrophic river. *Applied Ecology and Environmental Research*. 15(3): 1417-1442.
- Yoshida T, Urabe J, Elser JJ. 2003. Assessment of 'top-down' and 'bottom-up' forces as determinants of rotifer distribution among lakes in Ontario, Canada. *Ecological Research*. 18: 639-650.
- Zhang J, Shi P, Zhou YT, Tang XD, Qian JM, Huang PS. 2013. Structural characteristics of rotifer communities related to water quality in the YONGJIANG RIVER, NINGBO OF ZHEJIANG, CHINA. *Vie et milieu*. 63(2): 81-92.