

## 한국하천호수학회를 통해 본 국내 담수 동물플랑크톤 연구의 역사와 현재, 미래의 연구 동향

김현우\* · 정현기<sup>1</sup> · 최종윤<sup>2</sup> · 김성기<sup>2</sup> · 정광석<sup>3</sup> · 나금환 · 오혜지<sup>4</sup> · 장광현<sup>4</sup>

순천대학교 환경교육학과, <sup>1</sup>국립환경과학원, <sup>2</sup>국립생태원, <sup>3</sup>동주대학교 간호학과, <sup>4</sup>경희대학교 환경학 및 환경공학과

**Past History of Freshwater Zooplankton Research in South Korea and Korean Society of Limnology and Future Directions.** Kim, Hyun-Woo\* (0000-0003-3898-5864), Hyun-Gi Jeong<sup>1</sup> (0000-0002-5162-7175), Jong-Yun Choi<sup>2</sup> (0000-0001-6052-9473), Seong-Ki Kim<sup>2</sup> (0000-0002-4940-7499), Kwang-Seuk Jeong<sup>3</sup> (0000-0001-7721-4937), Geung-Hwan La (0000-0002-0512-1018), Hye-Ji Oh<sup>4</sup> (0000-0003-2098-8485) and Kwang-Hyeon Chang<sup>4</sup> (0000-0002-7952-4047) (Department of Environmental Education, Suncheon National University; <sup>1</sup>National Institute of Environmental Research; <sup>2</sup>National Institute of Ecology; <sup>3</sup>Department of Nursing Science, Dongju College, <sup>4</sup>Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University)

**Abstract** This review summarizes the history of freshwater zooplankton research in Korean Society of Limnology and necessary future topics that are remain poorly investigated in South Korea based on main research topics of published articles focusing on lakes, reservoirs, rivers and wetland ecosystems. In Korea, a total 450 freshwater zooplankton species have been reported (85 species of cladocera, ca. 230 species of rotifera since 1939, and 138 species of copepoda), and they cover 10% of total zooplankton species list. In the present paper, we provide recent species list of zooplankton found in Korea and their taxonomic keys. Over periods of 45 years, there are 25 published papers for zooplankton biota in lentic ecosystems in Korean Journal of Ecology and Environment (KJEE). The ecology of zooplankton communities in rivers has focused on the mechanisms involved in regulating their abundance, diversity and spatio-temporal patterns of genus *Bosmina* and rotifers (genus *Brachionus* and *Keratella*) that are most frequently found from Korea. On the other hand, the studies on zooplankton in wetland has focused on *Alona*, *Chydorus* and *Ceriodaphnia* with special emphasis on their relationships with aquatic macrophytes. Even though studies on the freshwater ecosystem in Korea have a long history, a few of studies on zooplankton biota were conducted at rice paddy, Dumbeong and wetlands. During the last two decades, experimental advances in freshwater zooplankton ecology and understanding of structure and function of this biota were made from a series of articles mainly in journal of KJEE. For future studies, quantitative, experimental and interdisciplinary approaches would be key words to understand zooplankton ecology and their roles in aquatic ecosystems under changing environments, and we have suggested necessary zooplankton research fields and future directions.

**Key words:** zooplankton, rotifer, river, lake, wetland, Korean Society of Limnology, KJEE

Manuscript received 5 January 2018, revised 31 January 2018,  
revision accepted 24 March 2018  
\* Corresponding author: Tel: +82-61-750-3384, Fax: +82-61-750-3308,  
E-mail: hwkim@sunchon.ac.kr, hwkim827@gmail.com

## 서 론

### 수생태계 내 동물플랑크톤의 역할과 국내 동물플랑크톤의 연구사

담수 생태계에는 다양한 형태의 동물플랑크톤이 존재하며, 이들 동물플랑크톤이 수행하는 가장 중요한 역할로 생태계 내 에너지 전달 및 먹이망 간의 연결을 들 수 있다. 수생태계의 에너지 흐름은 식물플랑크톤 세포들을 동물플랑크톤이 직접 섭식하고 소화, 흡수함으로써 시작되는 고전적 먹이망(grazing food web)과 식물플랑크톤이 세포 외부로 배출한 용존유기물(DOM; dissolved organic matter)을 흡수하는 세균을 기반으로 하는 미생물 먹이망(microbial food web)과 같은 두 종류의 주된 경로를 통한다(Azam *et al.*, 1983; Tranvik, 1992). 식물플랑크톤에 의해 고정된 에너지(탄소)는 종과 생태계에 따라 수~수십%까지 큰 폭으로 변화하나 평균적으로 약 13%가 용존유기물 형태로 배출되므로 미생물 먹이망은 수생태계 전체 에너지 흐름에 있어서 중요한 부분을 차지한다(Watanabe, 1980; Baines and Pace, 1991). 미생물 먹이망의 근원인 용존유기물은 세균에 흡수된 후에 입자상유기물(POM; particulate organic matter)의 성질을 가지게 되어 비로소 다른 영양단계의 생물들이 사용할 수 있는 형태가 되며, 세균부터 식물플랑크톤까지 다양한 크기의 먹이원을 활용하는 동물플랑크톤 군집에 의해 고전적 먹이망으로 유입된다(Burns, 1968; Rothhaupt, 1990; Carrick *et al.*, 1991; Carpenter and Kitchell, 1993). 뿐만 아니라 동물플랑크톤의 섭식과정에서 발생하는 식물플랑크톤의 잔해와 이들이 배설한 유기물은 세균의 에너지원으로 사용되어 미생물 먹이망 자체를 활성화시키기도 한다. 즉, 일차생산자에 의해 고정된 에너지는 대부분 동물플랑크톤을 통해 고차 소비자에게 전달된다고 할 수 있다. 이는 어류를 포함한 수생태계 대형 생물의 생체량은 일차생산자와 일차소비자인 동물플랑크톤의 상호작용에 기반한다고 할 수 있으며, 동물플랑크톤의 종조성 및 생체량, 섭식성향에 의해 고차 소비자의 생체량이 결정될 수 있음을 의미한다. 일반적으로, 동물플랑크톤은 수명이 짧고 환경변화에 신속하게 대응하는 종으로, 다양한 서식처에서의 우점경향, 다양도 및 내성 정도 등의 변화를 나타내어 수생태 환경을 대변 가능한 지표로 고려되어져 왔다(Christoferson *et al.*, 1993; Jeppesen *et al.*, 1999). 동물플랑크톤은 지난 세기 동안 북미 및 유럽에서 담수의 수질을 평가하는 주요한 생물인자로 평가되어 왔으며(Sousa *et al.*, 2008), 선택된 주요 동물플랑크톤 군집의 크기 등 담수 환경의 영양 상태를 규명하는 데 있

어 다양한 정보를 제공하는 주요인자로 작용하는 것으로 알려져 왔다(Gannon and Stemberger, 1978; Pejler, 1983; Jeppesen *et al.*, 2011). 동물플랑크톤의 생체량은 담수환경의 생산성과 밀접한 상관성을 가지며 부영양화된 수체에서는 유행동물(유행류), 지각류, 소형 요각류가, 빈영양 환경에서는 대형 요각류가 빈번히 우점하는 것으로 알려져 있다(McNaught, 1975; Blancher II, 1984; Pace, 1986). 이를 바탕으로 담수환경의 영양 상태를 파악할 수 있는 동물플랑크톤 지표종 발굴에 관한 연구가 수행되어 왔다. 아울러, 군집의 종조성과 수질에 관한 상관성 등 동물플랑크톤의 수생태계 내 주요 역할 및 기능적인 평가 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며, 2000년대 이후부터 하천호수학(육수학, Limnology) 연구의 중요한 한 축으로 발전해 왔다.

국내 동물플랑크톤의 연구는 한국 하천호수학의 역사와 함께 시작되었다. 1960년대 후반, 동물플랑크톤 군집조성 등에 대한 연구 결과를 소개한 이후 약 30년에 걸쳐 다양한 수생태계를 대상으로 폭넓은 연구주제에 대해 많은 연구 성과를 발표해 왔다. 수생태계 연구 테마의 다양화와 연구기술의 발전에 따라 2000년대 이후부터는 기초 생태뿐만 아니라 다양한 응용분야의 연구가 이루어지고 있다. 특히, 탄소 및 질소 안정동위원소를 이용한 먹이망 내 동물플랑크톤의 역할에 대한 정량적 접근, 생태모델을 이용한 동물플랑크톤 군집의 시공간 분포와 환경요인과의 상관관계에 대한 연구는 최근 관련 분야의 분석 기술의 발달에 힘입어 활발한 연구가 이루어지고 있는 분야라 할 수 있다.

본 논문에서는 현재까지 보고된 자료를 분석하여 국내 서식 동물플랑크톤의 최신 종목록을 정리하고, 이에 대한 분류 체계를 제시하였다. 또한 담수 환경을 대상으로 한 동물플랑크톤 연구의 흐름을 주요 서식처(호소, 하천, 습지) 및 시대에 따른 연구 이슈의 변화 경향 등을 육수학회지(1968~2007), 한국하천호수학회지(2008~2012) 그리고 생태와 환경(2013~현재)에 게재된 연구결과를 토대로 제시하였다. 이를 통해 향후 국내 수생태계의 구조와 기능 변화를 연구하는 데 있어 중요한 기초자료를 제공함과 동시에, 환경변화에 따른 생태계 구조와 기능 해석에 있어 유의미한 동물플랑크톤 연구주제와 방향을 설정하는 데 도움이 되고자 하였다.

### 동물플랑크톤 종 다양성과 국내 동물플랑크톤의 출현현황

국내 동물플랑크톤 분류 관련 문헌 자료로는 한강수

계에서 처음으로 보고 및 정리된 것으로 알려졌다(Sato, 1939). 그 후, 담수지역 내 생태계 조사와 플랑크톤 생물상 연구를 시작으로 남한지역 뿐만 아니라 평양, 대동강, 압록강, 백두산 등의 북한지역을 포함한 한반도 전역에 걸쳐 진행된 조사는 한국 동물플랑크톤 분류학 연구의 초석이 되었다(Sato, 1941; Ueno, 1941; Yamamoto, 1941a, b, 1953). 전 세계에 출현하는 동물플랑크톤은 지각류 620종, 윤충류 1,948종, 요각류 2,814종으로 총 5,382종이며(Boxshall and Defaye, 2008; Forro *et al.*, 2008; Segers, 2008), 최근 지속적인 연구결과에 따르면 약 6,000여 종이 이상이 서식하고 있을 것으로 추정된다. 국내에 보고된 담수 동물플랑크톤은 지각류 85종(Jeong *et al.*, 2014), 윤충류 230여 종(미발표 자료), 요각류 138종(Chang, 2009)으로 약 450여 종이상이 파악 되었으며(Table 1), 전 세계 출현종의 약 10%가 국내에 분포하고 있는 것으로 판단된다. 하지만, 동물지리구 분포에 따라 가장 높은 다양성을 가지는 구북부에서 출현한 동물플랑크톤이 2,799종을 감안해 볼 때 한국 동물플랑크톤의 종 다양성은 추후 높을 것으로 여겨진다.

### 1. 지각류(Cladocera)

지각류 연구는 1980~90년대에 주요 생물속을(*Alona*, *Bosmina*, *Daphnia*, *Leydigia*, *Moina*) 대상으로 전문적인 분류학 연구가 보고 되었다(Kim, 1988; Yoon and Kim, 1992, 1993, 1995, 1997; Yoon *et al.*, 1996). 특히 1990년대 보고된 지각류의 분류 연구들은 동아시아에 국한된 출현을 보이는 분류군의 동물지리적 분포에 초점을 맞춘 것으로 생물다양성의 학술적 가치를 높이는 중요한 계기가 되었다. 생물다양성과 보전의 가치가 국가적 차원에서 집중 조명된 2000년대에 담수지각류에 대한 분류학 연구가 재조명을 받게 되었고, 담수지각류의 분류체계와 관련 정보를 정리한 주제로 생물지가 발간되었다(Yoon, 2010). 지각류의 생물지 발간 성과는 관심이 저조했던 지각류 분류 연구의 중요성이 부상하게 된 가치 있는 성과였으나, Forró *et al.*(2008)이 보고한 245종에 비해 한국 담수지각류는 54종으로 매우 적은 수의 종이 서식하는 것으로 예측되었다. 이후 최신 분류체계에 따라 도서지역 등 극한 서식 환경의 출현 가능성, 보고된 지각류 종의 오동정 및 명명법에 따른 유효한 증명 등에 대한 재정립이 요구되었으며(Jeong, 2014), 2010년대 이후 도서지역을 포함한 담수 지역을 대상으로 신종 및 미기록종 발굴을 위한 분류학적 연구가 활발히 진행되었다. 이를 통해 20종의 미기록 지각류가 보고 되었으며, 한국 담수지각류의 생물다양성 가치와 중요성을 재확인하게 된 중요한 도약이 되었다(Kotov *et al.*, 2012).

**Table 1.** Total number of species of major zooplankton community in the world and Korea.

Taxa	World	Korea
Rotifera	1,948	230
Cladocera	620	85
Copepoda	2,814	138
Total number of species	5,382	453

\*modified from Boxshall and Defaye (2008); Forro *et al.* (2008); Seger (2008); Jeong (2017) unpublished data.

경상남도 박실 습지에서 동아시아 신종 *Ilyocryptus yooni*, 제주도 지역에서 소형 Chydoridae과 *Pleuroxus jejuensis*가 신종으로 보고되기도 하였다(Jeong *et al.*, 2012, 2013). 이들 종의 근연 분류군은 유럽에서 확인되고 있으며, 도서지역 특성을 감안해 볼 때 오랜 기간 지리적 격리에 따른 분화가 예상되고 있다(Jeong *et al.*, 2013). 최근 한국 담수지각류 연구는 상당한 진척을 보였으며, Jeong *et al.* (2014)을 통해 84종의 지각류 분류체계가 정립되었다. 이와 같은 연구성과들은 한국 지각류 생물다양성의 잠재적 가치를 증명하게 된 계기가 되었을 뿐 아니라, 한국의 지리적 위치가 가지는 생물다양성의 가치를 인식하게 된 중요한 결과로 확인되었다(Jeong *et al.*, 2015).

### 2. 윤충류(Rotifera)

윤충류에 대한 연구는 지각류 및 요각류 군집과는 달리 1990년대 후반까지 지속적으로 진행되었다. 1960~70년대는 생물상 중심의 연구가 진행되었고(Cho, 1965, 1979; Kang, 1969; Cho and Mizuno, 1977), 1980년대에는 윤충류 군집 분포를 중심으로 한 고찰(Turner, 1986) 및 100여 종 이상의 윤충류 종목록과 분류체계(Song, 1989; Song and Kim, 1989)가 정리되면서 분류학 연구 발전에 큰 원동력이 되었다. 1990년대에는 저수지나 연못 등에 서식하는 유영성 종과 기수역에 서식하는 기수성 종 뿐만 아니라(Song and Kim, 1992), 이끼나 나무 등 특이한 서식처에서 살아가는 희소 분류군(예: Digonont) 및 Monogonont에(예: Lecanidae, Colurellidae, Notommatidae, Brachionidae) 이르기까지 다양한 종들의 형태와 분류정보가 체계적으로 정리되었다(Chung *et al.*, 1990, 1991, 1992a, b, c; Kim *et al.*, 1991; Eui *et al.*, 1992; Song and Kim, 1992, 1996a, b). Kim *et al.*(1993)에 의해 137종이 정리되면서 윤충류 분류학 연구에 크게 기여했다(Song and Kim, 1996a, b). 이와 같이 1990년대 보고된 분류학 연구실적들은 20세기 이후 현재까지 보고된 연구 성과의 40% 이상에 해당되며, 국내 윤충류 분류학 기록 중 가장 많은 성과가 보고된 시기로

평가된다. 2000년대 이후, 연구의 관심은 Bdelloids의 연구로 이어졌으며, Song (2014, 2015), Song and Kim (2000), Song and Min (2015)에 의해 20여 종 이상의 신종 및 미기록종이 보고되었다. 오늘날 전 세계에 보고된 윤충류(Rotifera)의 종수는 대략 2,000종 이상으로 예측되며, 그 중 Monogonont는 약 1,500여 종, Bdelloids는 약 580여 종이 보고되고 있다(Segers, 2007, 2008). 동물지리적 분포에 따라 윤충류는 한국을 포함하는 구북부에 1,300여 종 이상이 서식하는 반면 한국의 경우, 230여 종의 윤충류가 보고되고 있다(Segers, 2008).

### 3. 요각류(Copepoda)

1960년대 후반 강, 저수지, 논 등 다양한 환경에서 요각류를 대상으로 한 연구가 진행되었고(Hong *et al.*, 1969; Cho and Mizuno, 1977), 1980년대 후반에 이르러 국내 141개 지점에서 출현하는 분류군 25종의 종목록과 체계 정보가 정리되는 등 활발한 분류 연구가 진행되었다(Chang and Kim, 1986; Kim and Chang, 1989; Soo and Young, 1989). 1990년대에 한국산 신종이 보고된 후(Kim and Chang, 1991), 2000년대 담수 동물플랑크톤 분류 연구에 기록적인 성과를 가져왔다(Lee *et al.*, 2007; Lee and Chang 2007; Chang and Yoon, 2008). 지난 20여 년간 방대한 양의 분류학적 성과들은 정확한 동정 자료를 통한 검색도감으로 재구성되었으며(Chang and Min, 2005; Chang, 2009, 2012, 2013, 2014) 아울러, 현재까지 국내에 보고된 담수 요각류는 총 56속 138종으로 확인되었다(Chang, 2009).

## 호소 동물플랑크톤의 생물학적 상호작용과 국내 연구 동향

호소는 하천과 달리 유입과 유출이 제한된 반폐쇄적 생태계로 수생태계 내의 생물학적 상호작용 및 구조와 기능을 평가하기에 적합한 구조를 가지고 있다. 이러한 이유로 동물플랑크톤을 중심으로 한 경쟁 및 포식과 같은 생물학적 상호작용과 이로 인한 생물군집의 시공간 분포 및 생태계 생산성과 같은 기초 생태연구가 가장 활발히 수행되어 왔다(Carpenter *et al.*, 1985). 호소생태계에는 대형동물플랑크톤을 비롯하여 소형동물플랑크톤 및 세균 등 다양한 부유성 생물이 계절과 수심에 따라 큰 폭의 변화를 나타내며 분포한다(Pinel-Alloul *et al.*, 1988; Weider and Stich, 1992). 호소 환경에서 이들 동물플랑크톤이 수행하는 가장 중요한 역할로 에너지 전달 및 먹이망 간의 연결을 들 수

있으며, 이외에도 동물플랑크톤이 수체 내 입자를 효율적으로 제거하여 투명도를 크게 증가시키는 특성에 착안한 생태학적 관점에서의 수질관리에 대한 연구가 진행되기도 하였다(예: 수질관리 측면에서 많은 부작용을 낳고 있는 남조류의 하향식 조절을 위한 생물로의 활용 가능성에 대한 연구 등)(Pace, 1984; Carpenter *et al.*, 1985; Talling, 2003). 본 절에서는 한국하천호수학회 학술지에 게재된 국내 주요 호소의 동물플랑크톤에 관련된 연구 논문을 바탕으로 호소생태계에서 식물플랑크톤의 포식자인 동시에 무척추동물과 어류의 피식자인 동물플랑크톤의 다양한 상호작용에 관한 연구들을 살펴보고 국내의 연구 동향을 분석하고자 한다.

### 1. 호소 내 동물플랑크톤을 중심으로 한 생물학적 상호작용

호소생태계에서 보편적으로 출현하는 동물플랑크톤은 먹이획득 방법의 관점에서 볼 때 대부분 걸러먹는 무리(여과섭식)에 속한다. 여과섭식은 수체에 부유하는 유기물입자와 소형 입자를 모으기 위한 효율적인 방법으로 윤충류의 경우 섬모다발을, 지각류의 경우에는 매우 발달된 빗 모양의 가슴다리를 가진다(Shiel and Ganf, 1987; Melone, 1998). 그러나 일부 요각류(*Cyclops*, *Epischura*, *Macrocyclops*, *Mesocyclops* 등), 지각류(*Leptodora*) 그리고 윤충류(*Asplanchna*) 중에는 다른 동물플랑크톤을 섭식하는 포식성 종이 존재하기도 한다(Pichlováand and Brandl, 2003; Yin and Niu, 2008). 이들은 유영 중 마주치는 먹이의 물리, 화학적 흔적을 감지한 후 공격, 접촉, 포획을 통해 섭식하는 일련의 과정뿐만 아니라 먹이원별로 포획에 적합한 형태의 이빨을 발달시켰으나(Kerfoot, 1978; Michels and Schnack-Schiel, 2005), 실제 대부분의 경우 순수 포식성 종 보다는 유기물입자도 섭식하는 잡식성향을 나타내는 것으로 알려져 있다(Tóth and Zánkai, 1985; Chang *et al.*, 2010; Oganjan *et al.*, 2013).

동물플랑크톤의 주요 포식자는 수서곤충과 곤충의 유생 그리고 어류 등이 있으며 곤충류의 경우 주로 촉각, 어류의 경우 시각에 의존하여 먹이활동을 한다(Sørnes and Aksnes, 2004). 특히, 호소생태계에서 연중 일정한 시기에 대량으로 발생하는 어류의 치어는 동물플랑크톤 군집의 생존을 결정짓는 주요 요인으로 높은 선택압을 행사한다(Qin and Culver, 1995; Romare *et al.*, 1999). 이에 따라 동물플랑크톤은 포식의 위험을 최소화하기 위해 여러 전략을 진화시켰었다. 이러한 모든 항포식자 방어는 포식자에서 기원한 화학물질인 카이로몬(kairomones)을 매개로 이

루어지며, 불필요한 방어로 인한 에너지 손실을 최소화하기 위해 카이로몬의 존재 하에서만 반응을 보이는 유도 방어(inducible defenses)의 특성을 가진다(Lass and Spaak, 2003).

동물플랑크톤이 나타내는 방어는 방어의 발현까지 걸리는 시간과 유형에 따라 구분 되며 카이로몬의 감지와 더불어 가장 빠르게 나타나는 행동 방어, 수 일에 걸쳐 탈피를 반복하며 발현되는 형태 방어 그리고 수 주의 기간 내에서 일어나는 생활사 변화가 대표적이다(Tollrian and Harvell, 1999). 호수에서 동물플랑크톤이 나타내는 행동 방어는 주로 지각류를 중심으로 연구가 진행되어 왔으며 시각 포식자를 피하기 위해 낮에는 차갑고 어두운 수온약층 부근에 머물고 밤부터 수표면으로 상승하여 새벽까지 먹이활동을 하는 일주기 수직이동이 잘 알려져 있다(Loose, 1993). 이에 따라 일주기 수직이동의 특성은 상층과 하층의 먹이 농도가 모두 낮거나 포식자가 인위적으로 제거되는 경우 곧 와해되며 먹이 요구량이 많은 성체 암컷에게서 더 뚜렷하게 관찰된다(Johnsen and Jakobsen, 1987). 이와 달리 수심이 낮아 포식자가 기피하는 수온약층이 형성되지 않고 저층까지 빛이 도달하는 많은 온대 저수지 환경에서는 일주기 수직이동보다 낮 동안에 포식자를 피해 수초대로 이동하는 일주기 수평이동과 고밀도 분포로 포식의 위험을 감소시키는 무리형성이 관찰되기도 한다(Pijanowska and Kowalczewski, 1997; Burks *et al.*, 2002). 형태 방어는 갑각에 형성되는 가시나 관 모양의 긴 돌기가 포식자의 섭식을 방해하여 생존율을 증가시키는 방향으로 작용하며 윤충류인 *Brachionus*와 *Keratella* 뿐만 아니라 지각류인 *Daphnia*에서 광범위하게 발현된다(Stemberger, 1988; Spaak and Boersma, 1997; Gilbert, 2001). 대부분의 포식자들이 고수온기에 활발하게 번성하므로 피식자인 지각류의 연간 가시 길이 변화는 여름을 중심으로 가장 길고 나머지 기간에는 짧아지는 형태순환(cyclomorphosis)의 특징을 보인다(Laforsch and Tollrian, 2004b). 이러한 형태 방어는 포식자의 카이로몬뿐만 아니라 높은 수온과 수체의 물리적 교란 등에 의해서도 촉발될 수 있는 것으로 알려져 있다(Hazelwood, 1962; Laforsch and Tollrian, 2004a; Sakamoto *et al.*, 2007). 이외에도 포식의 위험, 동종의 밀도가 높고 먹이가 고갈되는 등의 환경 스트레스는 어미가 자신과 유전적으로 동일한 자신의 복제를 낳는 무성생식 물벼룩 개체군의 생활사에 큰 변화를 일으킨다(Arbačiauskas, 2001; Fitzsimmons and Innes, 2006). 자극을 받은 암컷들 중 일부는 수컷 새끼를 생산하고 또 다른 일부 암컷들은 수컷과 짝짓기를 통해 수정이 이루어지는 유성생식란(휴면란)을 낳으며 알들은 일반적

으로 겨울을 난 후 부화한다(Ślusarczyk, 1999). 수컷 새끼의 비율 및 무성생식과 유성생식의 전환은 자극의 강도와 종류, 암컷의 유전적 특징에 따라 다르나 통상 개체군 내 암컷들은 수컷 새끼를 낳은 후 수일 후에 유성생식 체제로 전환하여 성숙한 수컷과의 짝짓기가 가능해지도록 조절하는 것으로 알려져 있다(Larsson, 1991; Spaak *et al.*, 2004; Macháček *et al.*, 2013). 암컷의 탈피와 함께 수체에 방출되는 휴면란은 부유하거나 저층에 퇴적되며 수십 년의 시간 후에도 적당한 부화 조건만 갖추어지면 부화한다(Hairston and Kearns, 2002). 동물플랑크톤의 다양한 방어 반응은 이들의 크기를 감안했을 때 매우 작은 시공간적 범위 내에서 발생하나, 성공적인 방어 전략을 이용하여 생존한 군집에 의해 전체 먹이사슬의 에너지 흐름에 큰 변화가 발생하기도 한다(Sakamoto *et al.*, 2015).

포식자의 카이로몬은 한 때 포식자에게서 직접 분비되는 화학물질들의 하나로 여겨져 어류 및 포식성 무척추동물의 점액과 배설물을 비롯하여 각 부위별 효과 등이 검증되어왔다(Parejko and Dodson, 1990; Tollrian and Von Elert, 1994; Von Elert and Loose, 1996). 어류의 카이로몬은 500 Da 이하의 저분자 물질로 열과 pH 변화에 대해서는 안정하나 수일 이내에 자연적으로 분해되어 효과를 상실하며 활성을 위해서는 분자 구조 내에 필수적으로 수산화기를 가져야 하는 것으로 밝혀졌다(Tollrian and Harvell, 1999). 어류 상피세포에서 삼투압 조절에 관여하며 비린내의 주성분으로 알려진 트리메틸아민이 카이로몬이라는 발표가 있기도 하였으나 트리메틸아민은 알려진 카이로몬의 특성과 많은 차이가 있었으며 과대평가된 검출 농도를 바로잡을 경우 지각류가 방어 반응을 나타내지 않는 것으로 확인되었다(Boriss *et al.*, 1999; Pohnert and Von Elert, 2000). 이후 항생제를 처리해 세균을 제거한 후 어류를 노출시킨 처리구에서는 지각류가 방어 반응을 나타내지 않아 카이로몬은 세균이 점액을 분해하였을 때 발생하는 분해 산물이거나 직접 분비한 대사산물일 가능성이 높아졌으나 확정적인 연구결과는 발표되지 않고 있다(Beklioglu, 2006).

## 2. 국내 호소 동물플랑크톤 연구 경향

육수학회지(1968~2007), 한국하천호수학회지(2008~2012) 및 생태와 환경(2013~현재)에 게재된 논문 중 호소를 대상으로 한 동물플랑크톤 연구는 1969년 의암호의 종 조성 파악으로부터 시작되었고(Kang, 1969), 호소의 교란과 수체의 혼합이 발생하는 양양호에서 동물플랑크톤 군집의 차이에 대한 연구(Lee *et al.*, 2014)에 이르기까지 약

25여 편의 논문이 게재되었다(Fig. 1). 대부분의 저수지와 호수에서는 1~2편 내외의 연구가 보고되었으며, 대청호는 3편, 소양호 4편 그리고 팔당호에서 7편으로 가장 활발하게 연구되어져 왔다(Fig. 2). 시대별로 주요 연구의 경향성에도 차이를 나타내 1990년대 초까지는 주로 연간 군집 및 분포 종의 보고에 초점이 맞추어져 있었으나(Yoo, 1990; Chung *et al.*, 1992; Yoo and Lim, 1992). 1990년대 후반에 기후, 영양염의 증가와 남조류 번성 등의 환경 요인이 동물플랑크톤의 종조성과 밀도에 미치는 상호작용에 대한 연구들의 논평이 게재되기도 하였다(Kong, 1997; Oh, 1998). 이후, 2000년대를 거치며 현재에 이르기까지 가장 다양하고 활발한 주제의 연구들이 수행되고 있다. 그 예로, 남조류 섭식 및 인공 식물섬의 설치가 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향(Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2009)에

대한 연구와 안정동위원소 기법을 활용한 먹이원 분석이 시도되었다(Lee *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2012). 특히 팔당호를 중심으로 그간 연구가 미진하였던 섬모충 플랑크톤의 분포와 생태적 역할에 대한 연구가 발표되기도 하였다(Moon *et al.*, 2004; Noh and Han, 2008).

### 하천 생태계 동물플랑크톤 연구

하천 주변의 급격한 환경변화는 19세기 후반부터 유럽 및 북미를 중심으로 진행되었으며, 20세기 중반 이후 전 세계로 크게 확장되었다. 다양한 생물상 연구는 유역 환경 변화와 더불어 그 중요성이 인식되어 왔으며 조류(Algae), 어류 및 저서 생물 군집과 더불어 동물플랑크톤 연구도 함께 진행되어 왔다(Thorp *et al.*, 1994). 최근 들어 Lair (2006)는 하천 생태계를 대상으로 한 동물플랑크톤 연구의 주요한 진전은 두 가지의 큰 흐름을 통해 이루어졌다고 주장하였다. 이들 중 한 부분은 Kofoid (1903)가 강조하였던 플랑크톤 생산에 대한 중요성이며, 다른 한 부분은 Hynes (1970)와 Vannote *et al.* (1980)에 의한 강의 연속성 개념과 동물플랑크톤의 역할에 대한 부분이라 밝혔다. 전반적으로 하천 생태계의 동물플랑크톤에 대한 지식은 단편적이며, 우수환경이 동물플랑크톤의 군집 동태에 적합한 환경이 아니었다는 인식에 의해서 비롯된 것으로 보인다(Pace *et al.*, 1992). 하지만, 선행 연구된 자료를 토대로 평가해 볼 때 라인강의 경우 어류 개체군의 약 30%가 동물성 플랑크톤을 먹이원으로 하는 것으로 밝혀졌으며(Van Dijk and Van Zanten, 1995), 치어의 주요 먹이원으로써 윤충류의 역할의 중요성(Bass *et al.*, 1997) 등 전 세계 하천 생태계에서의 동물플랑크톤은 먹이 사슬에서 중요한 연결 고리로서, 단일 수계의 지역적 환경특성을 잘 반영하는 생

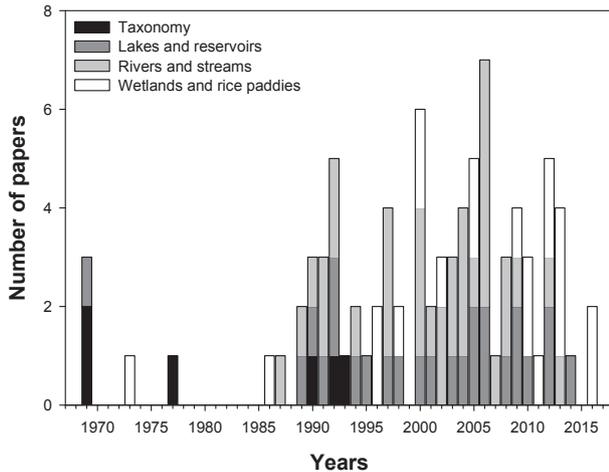


Fig. 1. The trends of publication for zooplankton biota in the freshwater ecosystems in Korean Journal of Ecology and Environment during 1968~2017.

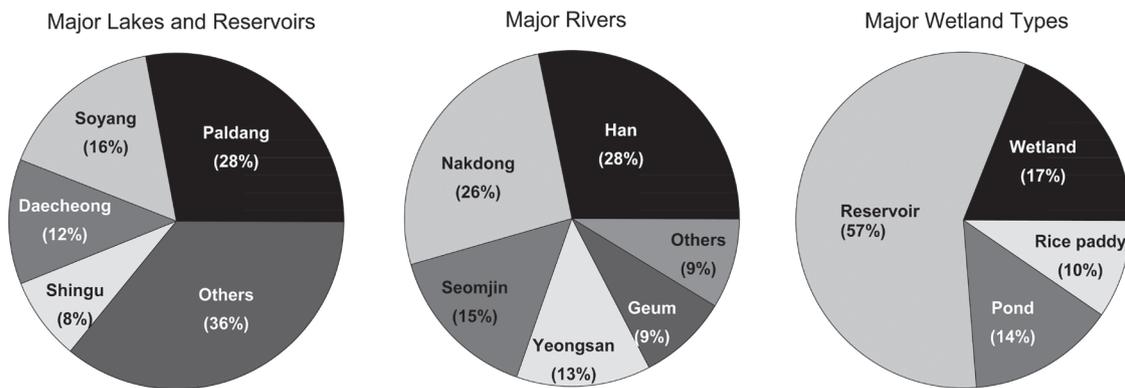


Fig. 2. Relative frequency (%) of study sites for zooplankton biota in the freshwater ecosystems in Korean Journal of Ecology and Environment during 1968~2017.

물상이라 평가되고 있다(Lair, 2006).

### 1. 국내 하천 생태계 연구 동향

국내 하천 생태계에서 동물플랑크톤에 대한 연구 동향을 “육수학회지, 한국하천호수학회지 및 생태와 환경”에 게재된 논문을 토대로 검증한 결과, 주요 하천별 및 시대별로 상이한 경향이 파악되었다. 지난 50년간(1968~2017) 게재된 총 1,884편의 논문 중 국내외 하천 생태계에서 동물플랑크톤 관련 내용으로 게재된 논문은 총 34편으로 전체 논문 비율에서 약 1.7%로 매우 낮았다. 각 시대별로 비교 평가해 볼 경우, 1960년대부터 1980년대 중반까지는 국내 하천 생태계에서 동물플랑크톤에 대한 연구논문은 전무하였고, 1990년대 이후부터 하천 유역에서 동물플

랑크톤에 대한 출현종의 분포 및 조성, 천이, 군집, 수질 등과 관련한 연구가 진행되었다. 특히, 동물플랑크톤 관련 논문의 약 61%가 2000~2009년 동안에 집중되었고 하천 유역권별로는 한강 및 낙동강에서 가장 활발한 연구가 진행된 것으로 파악되었다(Fig. 2). Joo *et al.* (1997)에 의해서 국내 하천 생태계 관련 학문적 성향 분석과 1960~90년대에 하천 생태계 연구현황 파악이 이루어졌으나, 이후 지난 2000~2010년대 중반까지 하천 생태계 내 물리적 변형(예: 4대강 사업) 및 화학적·생물학적 변화로 인해 이전 연구에서 제시된 과거 특성과 다른 주요 하천 생태계 유형 및 현황 변화가 일어나고 있는 상황이다. 국내 주요 하천 생태계에서의 각 수계별 수문학적 요인 변화는 해당 생태계에 서식하는 주요 생물 분류군 및 기능군의 변화를 야기할 것으로 사료되며, 이러한 변화는 생물 상호 간의 에너

**Table 2.** Dominant zooplankton species, genus name, and maximum abundance from the other large rivers and the Korean rivers (modified from Kim *et al.*, 2001).

River	Country	River length, km (drainage area, km <sup>2</sup> )	No. and stretch of the study sites (km)	Dominant zooplankton species and genus name	N <sub>max</sub>	References
Rhine	Netherlands	1,326 (220,000)	2 (156)	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i>	~1400	van Dijk and van Zanten, 1995
Spree	Germany	397 (7,000)	11 (ca.21)	<i>Keratella</i> , <i>Synchaeta</i> , <i>Daphnia</i>	~4000	Welker and Walz, 1998 Kim <i>et al.</i> , 2008
Elbe	Germany/ Czech	1,091 (148,268)	16 (534)	<i>Trichocerca</i> , <i>Keratella</i> , <i>Synchaeta</i>	~13,000	Zimmermann-Timm <i>et al.</i> , 2007
Vistula	Poland	391 (1,068)	6 (275)	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i>	< 348	Napiorkowski and Napiorkowska, 2013
Meuse	Belgium	885 (36,000)	5 (120)	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i>	2000	Viroux, 1997
Po	Italy	650 (70,000)	1	<i>Brachionus</i>	~4500	Ferrari <i>et al.</i> , 1989
Loire	France	1,012 (117,054)	2 (90)	<i>Brachionus</i> , <i>Polyarthra</i> , <i>Keratella</i> , <i>Lecane</i>	~3500~5800	Lair and Reyes-Marchant, 1997 Lair <i>et al.</i> , 1999 Lair, 2003, 2006
Marne	France	525 (12,730)	5 (34)	<i>Keratella</i> , <i>Polyarthra</i> , <i>Synchaeta</i>	~1500	Akopian <i>et al.</i> , 1999
Moselle	France	535 (28,000)	1	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i>	6000	Viroux, 1997
Orinoco	Venezuela	2,575 (950,000)	7 (500)	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i> , <i>Bosminopsis</i>	~65*	Saunders and Lewis, 1989
H.-N.	Australia	300 (22,000)	2 (ca.30)	<i>Polyarthra</i>	~6000	Kobayashi <i>et al.</i> , 1996
Hudson	U.S.A.	510 (34,630)	6 (160)	<i>Bosmina</i> , <i>Keratella</i> , <i>Polyarthra</i> , <i>Trichocerca</i>	2000	Pace <i>et al.</i> , 1992
Ohio	U.S.A.	1,579 (528,000)	12 (361)	<i>Polyarthra</i> , <i>Bosmina</i> , <i>Diacyclops</i>	< 45	Thorp <i>et al.</i> , 1994
Han	South Korea	481 (26,018)	7 (7)	<i>Daphnia</i> , <i>Bosmina</i>	~44	Kim and Lee, 1999
Nakdong	South Korea	528 (23,817)	5 (200)	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i> , <i>Polyarthra</i>	~9000	Kim <i>et al.</i> , 2001 Kim <i>et al.</i> , 2005
Youngsan	South Korea	136 (3,371)	3 (83)	<i>Brachionus</i> , <i>Keratella</i> , <i>Polyarthra</i>	~4500	Kim and Lee, 2007
Seomjin	South Korea	212 (4,896)	4 (64)	<i>Keratella</i> , <i>Polyarthra</i> , <i>Trichocerca</i>	< 500	Kim and Lee, 2007

\*indicate H.-N.: Hawkesbury-Nepean, N<sub>max</sub>: Maximum abundance (Ind. L<sup>-1</sup>)

지 흐름 및 물질 순환 등의 기능에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 하천 생태계에 대한 학문적인 발전 및 장기적이며 지속적인 수자원 관리에 대한 활용적 측면에서 볼 경우, 향후 아래와 같은 시도나 접근을 통하여 효율성을 극대화하도록 해야 한다. 우선, 하천 서식처의 생태-수문학적인 연구를 지속적으로 진행하여야 하며 이에 핵심적인 역할을 담당하는 플랑크톤의 기능적인 측면을 고려한 연구 수행이 필요하다. 연구 대상 분류군의 실질적인 생체량 등이 연구되어 먹이사슬, 생산력 등의 연구와 연계되어야 한다. 하천 생태계의 에너지 흐름을 파악하기 위해서는 생태계 구조의 복잡성을 고려하여 장기적인 생태계 구조 변화 파악 및 비교를 위한 접근이 필요하다. 두 번째, 유수생태계의 변화 현상 규명을 위해서는 실험적인 접근이 선행되어야 한다. 강-저수지 복합형 시스템인 국내 주요 하천 생태계에서는 소규모로 특정 환경요인 변화를 통한 조사 대상 생물군의 반응에 대한 추적 연구 등의 실험적 접근이 필요하다. 끝으로, 하천 생태계의 다양한 생물상을 포함한 포괄적인 연구가 시행되어야 한다. 특정 분야에 편중된 연구는 국내 하천 생태계 특성 연구에 신중히 고려되어야 할 부분이다. 그리고 융합분야에 대한 활성화가 진행될 경우 연구의 경쟁성이 확보될 것으로 판단된다.

## 2. 동물플랑크톤 군집 특성

일반적으로 국내 하천 생태계에서 출현한 동물플랑크톤 중 개체수 측면에서의 우점 군집은 윤충류이며(Kim and Joo, 2000; Kim *et al.*, 2001; Kim and Lee, 2007), 기존의 연구 자료를 분석한 결과, 이러한 특징은 국내뿐만 아니라 전 세계 하천 생태계에서 유사한 것으로 파악되었다(Lair, 2006; this study). 특히, *Brachionus*, *Keratella*, *Polyarthra*, *Trichocerca*의 4개 속(genus)들이 전체 동물플랑크톤 군집 조성에서 가장 높은 상대 우점 비율을 나타내었고, 지각류 군집에서는 소형인 *Bosmina*가 상대적으로 높은 비율로 우점하는 것으로 파악되었다(Table 2). 국내 주요 하천 생태계를 대상으로 선행 연구된 동물플랑크톤 밀도 변화 자료를 분석한 결과, 계절별 뚜렷한 밀도 변화를 나타내었으며, 봄 기간인 3~6월과 가을 기간인 9~11월에 전반적으로 높은 밀도를 나타내는 경향성을 보였다(Fig. 3). 아울러, 하천 생태계별 총 동물플랑크톤 밀도 및 평균 밀도 변화는 매우 상이한 결과를 나타내는 것으로 분석되었다. 낙동강과 영산강의 동물플랑크톤 밀도가 다른 하천 생태계에 비해 현저히 높은 것으로 확인되었다. 최근 4대강 사업으로 인한 국내 주요 하천의 환경변화는 향후 동물플랑크톤을 포함한 수생 생물군집 연구에 있어 중요한 연구 주제가 될 것

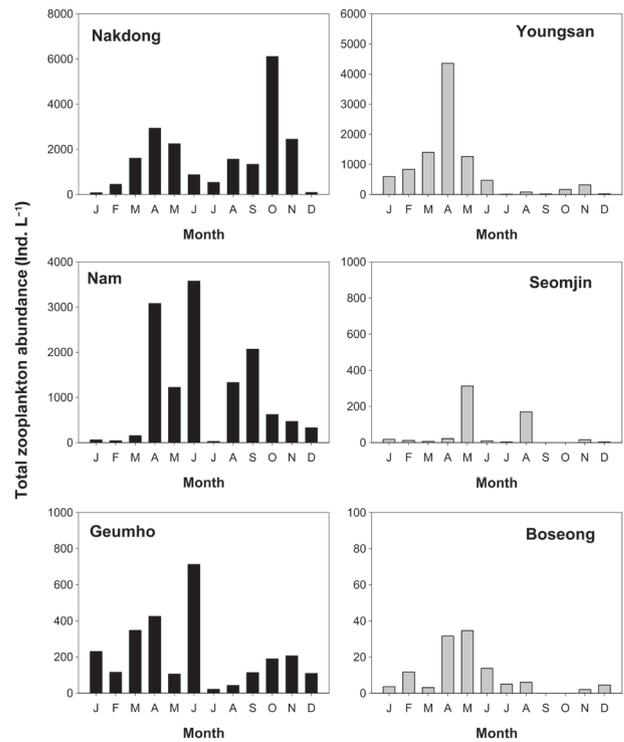


Fig. 3. The seasonal changes of total zooplankton abundances (Ind. L<sup>-1</sup>) in the rivers (data modified from Kim and Joo, 2000; Kim *et al.*, 2005; Kim, 2006; Kim and Lee, 2007).

으로 예상된다. 위에서 언급한 국내 하천 동물플랑크톤 연구 중 4대강에서 수행된 동물플랑크톤 연구를 Table 3에 요약하였다.

## 습지 생태계의 동물플랑크톤

### 1. 습지 내 동물플랑크톤에 대한 수생식물의 영향

습지는 육상생태계와 수생태계의 중간에 위치한 전이대로 매우 중요한 서식처로 인식되고 있다. 습지는 육상과 수생태계의 특징을 모두 가져 지구상에서 가장 생산성이 높은 생태계 중 하나로 손꼽히며(연평균 생산량: 약 1,000 g C m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>), 다양한 미소서식처 내 여러 환경요인과 생물간에 복잡한 상호관계 측면에서 중요하다(Joo and Ward, 1991; Joo and Francko, 1995). 습지에서 가장 풍부한 수생식물은 습지 내 서식처 이질성과 다양한 미소서식처를 야기하는 중요한 요인이다(Jeppesen *et al.*, 1997; Burks *et al.*, 2002). 수생식물은 종에 따라 다양한 형태를 가지며 수체 내 복잡한 서식처 구조를 형성한다. 특히, 침수된 수생식물

**Table 3.** Summary of main researches carried out in 4 major rivers in Korea.

References	River	Key words	Main topic
Song <i>et al.</i> , 2003	Han River	Flooding, temperature, response-species	Precipitation and temperature changes impacts on zooplankton composition
Lim and Yoo, 1994	Han River	Phytoplankton, grazing	Predation by zooplankton effects on phytoplankton biomass and relationships
Yoo and Lim, 1991	Han River	Species composition, abundance, community, water quality	Seasonal dynamics of zooplankton community in lower part of Han River
Yoo and Lim, 1990	Han River	Freshwater calanoida, copepod, taxonomy	Record of new freshwater calanoid in Korea, <i>Heterocope appendiculata</i>
La <i>et al.</i> , 2009	Nakdong River	Rotifer ( <i>Keratella</i> ), lorica morphology, seasonal variation, spine	Changes of rotifer community structure and morphology (lorica of rotifer)
Kim <i>et al.</i> , 2006	Nakdong River	Self-Organizing Map, rotifer, cladoceran, copepods, regulated river	Model approach of zooplankton community structure using SOM
Kim <i>et al.</i> , 2005	Nakdong River	Seasonal dynamics, hydrology	Annual dynamics of zooplankton community in relation with river hydrology
Chang <i>et al.</i> , 2004	Nakdong River	Fish predation, prey selectivity, <i>Moina micrura</i> , rotifer	Selective feeding by juvenile fish and its impact on zooplankton community structure
Kim <i>et al.</i> , 2003	Nakdong River	Grazing, phytoplankton biomass, hydrologic retention, regulated river	Meso and micro zooplankton community dynamics in river-reservoir hybrid aquatic ecosystem
Joo <i>et al.</i> , 2002	Nakdong River	Vertical distribution, regulated river	Vertical distribution of zooplankton community in regulated river
Chang <i>et al.</i> , 2001	Nakdong River	Predation, juvenile fish, cladocera	Impact of juvenile fish predation on river zooplankton community structure
Joo <i>et al.</i> , 1997	Nakdong River	Rotifer, hypertrophic	Long term analysis of eutrophication in lower Nakdong River and its impact on zooplankton distribution
Lim <i>et al.</i> , 1997	Nakdong River	Community, Chl. <i>a</i>	Dynamics of zooplankton community during blue-green algal bloom period
Kim <i>et al.</i> , 2002	Geum River	Estuary dam	Dynamics of zooplankton abundance during summer and fall in Geum River estuary
Kim and Lee, 2007	Yongsan River	Filtering rates, rotifers, estuary dam	Difference in zooplankton community structure according to absence/presence of estuary dam
Yoo <i>et al.</i> , 1987	Yongsan River	Community, cladoceran, population dynamics	Zooplankton community and basic ecology
Kim <i>et al.</i> , 2013	Other (four rivers)	Stoichiometry, phytoplankton, SOM	Carbon, nitrogen and phosphorus ratio of zooplankton in the major river ecosystems

은 잎과 줄기, 뿌리의 배열이 상대적으로 복잡하기 때문에 수체 내 서식처의 구조와 형태 결정에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다(Kuczynska-Kippen and Nagengast, 2006; Choi *et al.*, 2014a). 수생식물에 의한 서식처는 다양한 동물들의 피난처로 활용되며, 이 중 동물플랑크톤은 수생식물을 서식처로서 가장 적극적으로 활용하는 것으로 알려져 있다(Jeppesen *et al.*, 1998; Manatunge *et al.*, 2000). 이와 같은 서식처의 제공은 종 다양성의 유지 관점에서 중요한 연구대상으로 주목 받고 있다.

동물플랑크톤은 물의 흐름에 민감하기 때문에 흐름이 적고 안정된 습지에서 주로 서식하며, 어류나 무척추동물 등 다양한 포식자에게 취약하기 때문에 수생식물을 피난처로서 활용하여 생존 가능성을 높인다(Stansfield *et al.*,

1997; Burks *et al.*, 2002). 수생식물의 복잡한 구조는 어류와 같은 포식자의 포식활동을 낮출 수 있기 때문에 수생식물 군락 내에서 서식하는 동물플랑크톤 개체군의 밀도를 증가시킬 수 있다(Stansfield *et al.*, 1997; Burks *et al.*, 2001). 호수의 경우, 심수층이 어류 포식에 저항하기 위한 동물플랑크톤의 피난처로서 활용되지만(Lampert, 1993; Von Elert and Loose, 1996), 습지는 수심이 얇고, 상대적으로 다양한 어류가 서식하기 때문에 수생식물은 동물플랑크톤이 포식자를 피할 수 있는 유일한 피난처이다(Harrel and Dibble, 2001). 뿐만 아니라, 다양한 수생식물의 잎과 줄기, 뿌리는 부착성의 성향을 가진 동물플랑크톤 종이 부착하기에 적당한 기질 표면을 제공한다(Kuczynska-Kippen and Nagengast, 2006; Choi *et al.*, 2014a). 다양한

수생식물의 생활형 중, 침수식물의 줄기와 잎은 상대적으로 복잡한 형태나 구조를 가지기 때문에 침수식물의 높은 풍부도는 부착성 동물플랑크톤(epiphytic zooplankton)의 밀도 증가에 기여할 수 있다. 따라서 동물플랑크톤의 높은 밀도와 종조성 유지를 위해서는 수생식물의 형태나 구조 뿐만 아니라 종의 구성 또한 중요한 요인으로 고려되어야 한다.

습지에서 동물플랑크톤은 서식처 구조 및 이질성에 민감하게 영향을 받는 분류군이므로 수생식물과의 관계 파악이 중요하며, 물리적인 요인뿐만 아니라 화학적, 생물학적 부분까지 관련하여 연구할 필요성이 있다. 그러나 습지는 다양한 환경요인이 복잡하게 작용하는 생태계이기 때문에 동물플랑크톤 분포나 종조성을 규명하기 어려운 탓에 최근까지 연구가 상대적으로 미미하게 수행되었다. 수생식물 서식처가 동물플랑크톤에 미치는 영향에 대한 연구는 향후 습지 복원이나 조성 시 생물다양성 증진을 위한 방안 수립에 기초데이터를 제공할 수 있기 때문에 이에 대한 연구는 중요하다.

국제적인 습지 보호조약인 람사르(Ramsar)로 보호되고 있는 습지들의 공통점은 수체 내 다양하고 풍부한 수생식물이 우점하고 있다는 것이다. 습지의 생물다양성은 수생식물에 의해 조성되는 서식처와 관련이 깊고, 먹이원과 포식자의 풍부도, 이화학적 요인의 변화, 서식환경 특성 등과 밀접하게 관련된다. 생물다양성의 증가는 개체군 자체의 풍부도 증가도 있지만, 개체군 간 상호관계가 얼마나 안정적으로 조절되는가에 달려있다. 예를 들어 포식자의 무분별한 포식은 피식자 개체군의 절멸을 이끌며, 피식자의 절멸은 결국에는 포식자의 절멸로 이어진다(Horppila *et al.*, 2009). 따라서 포식자와 피식자 간 상호작용이 적절하게 조절되어야 두 개체군의 공존이 가능하고 생물다양성의 증가로 이어진다. 또한 수생식물에 의한 다양한 미소서식처의 증가는 다양한 종이 선호하는 공간을 조성하여 종간 경쟁을 낮출 수 있다. 그러나 국내 서식처의 관리나 보전 개념에서 수생식물의 식재에 대한 고려는 낮은 수준이라 할 수 있다. 대부분의 수생식물의 식재는 인간 입장에서 미적인 요소를 충족시키기 위한 것이기 때문에 주로 갈대나 줄 등의 정수식물 위주로 구성되어 있다. 생물다양성 증진을 위한 서식처 조성은 정수식물보다 침수식물이나 부유식물이 우선되어야 함에도 불구하고, 침수식물이나 부유식물은 미적인 요소가 다소 낮기 때문에 우선 대상에서 제외된다. 생물학적 입장에서 수생식물의 식재가 고려되지 않기 때문에 국내 대부분의 신규로 조성된 습지는 개방성이 우수하다. 수생식물은 생물다양성의 유지 및 증가를 위한 핵심적인 요인으로 평가될 수 있기 때문에 먹이망의

건강성 확보를 위해 이들의 복잡한 구성이 필요하다. 향후 수생식물과 동물플랑크톤을 포함한 생물간 연구 결과들은 습지를 복원하거나 신규로 조성할 때 생물다양성과 건강성 증진을 위한 자료로서 활용이 가능하다. 수생식물은 물리적인 서식처가 아닌 생물서식처이기 때문에 식재하고자 하는 종의 선택이 서식처의 구조와 특성을 결정할 것으로 사료된다.

## 2. 국내 습지생태계 내 동물플랑크톤 연구 동향

국내의 습지 및 유사 생태계의 동물플랑크톤 연구는 초기 논이나 고층습원에서 동물플랑크톤의 종목록을 작성하거나(Kim *et al.*, 1996) 새로운 종의 발굴(Cho, 1986), 분포 등을 주제로 하였으나, 최근에는 ‘미소서식처’에 대한 영향이나 ‘포식자 및 피식자에 대한 영향’ 등 과거에 비해 심층적인 연구가 수행되고 있다. 우리나라의 습지는 논이나 들판과 같은 형태로 전국에 많은 수가 산재하여 있으며, 수심이 얇고 독특한 이화학적 요인을 가지므로 수체의 환경변화에 민감한 동물플랑크톤은 종조성이나 분포가 일반적인 습지와 다를 수 있다. 이러한 특성으로 볼 때, 논이나 들판에서 동물플랑크톤 연구는 기존과 다른 결과를 도출할 수 있으며, 우리나라만의 독특한 수체 형태라는 점에서 연구결과가 국제적인 경쟁력을 가질 수 있다.

미소서식처의 구조와 특성에 대한 동물플랑크톤의 시·공간적인 분포는 최근 인공식물섬 연구와 관련하여 진행되고 있다. 이는 수생식물이 가지는 서식처로서의 효과를 검증한다는 공통적인 목적을 가진다(Perrow *et al.*, 1999; Stansfield *et al.*, 1997). 국내 저수지에서도 인공식물섬의 존재는 동물플랑크톤의 밀도와 종 다양성 증가에 크게 기여하는 것으로 연구되었다(Lee *et al.*, 2009). 인공식물섬은 타감작용으로 인해 미세조류를 억제시키기 때문에 동물플랑크톤의 먹이원 감소에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2011). 그러나 인공식물섬의 복잡한 물리적인 서식처 구조는 어류 등 포식자의 포식활동을 회피할 수 있는 동물플랑크톤의 피난처를 제공하기도 한다(Park *et al.*, 2013). 수생식물은 피난처뿐만 아니라 수생식물의 잎이나 줄기 표면이 일부 동물플랑크톤의 서식처로서 활용되기 때문에 동물플랑크톤의 종조성과 밀도 증가에 기여할 수 있다. 이러한 수생식물의 서식처 효과 때문에 개방수면과 비교할 때 수변식생대는 더 많은 동물플랑크톤이 서식하게 되며(Choi *et al.*, 2013a), 침수식물과 같이 복잡한 형태를 가진 수생식물이 높은 피도로 우점하는 경우 서식처 효과는 더욱 증가되는 것으로 보인다(Choi *et al.*, 2013b). 수생식물의 서식처 효과는 생물상호작용에 영

향을 미칠 뿐만 아니라 물리적인 교란의 상쇄 효과를 가진다. 우리나라를 포함한 동아시아 지역은 강우량이 여름철에 집중되기 때문에 습지를 비롯한 수생태계는 수위, 흐름 등의 급격한 변화를 가진다(Allan and Castillo, 2007). 물의 흐름 변화에 민감한 동물플랑크톤은 여름철 강우량의 집중 효과의 영향으로 인해 연간 또는 지역별로 상이한 경향을 나타낼 수 있으며, 이러한 국내 서식 동물플랑크톤과 강우량의 상관관계는 국제적인 연구주제가 될 수 있다(Choi *et al.*, 2015). 습지에 풍부한 수생식물은 강우량에 의한 수체 교란을 저감시키며 동물플랑크톤과 같이 수체 흐름에 민감한 생물상의 분포 유지에 도움을 준다. 우포늪의 경우, 동물플랑크톤의 계절별 밀도는 연간 여름 강우량에 따라 뚜렷하게 영향 받는 것으로 연구된 반면(Kim *et al.*, 2010). 습지 내 수변 식생은 여름에 집중된 강우로부터 동물플랑크톤 종조성과 밀도 유지에 기여하는 것으로 조사되었다(Choi *et al.*, 2014a). 이는 동물플랑크톤의 가을 천이에 영향을 미치게 된다. 수변 식생대 내 수생식물 종류 및 구성이 물리적인 교란으로부터 동물플랑크톤의 피난처 효과를 결정하고, 여름철 동물플랑크톤의 생존 밀도는 강우 이후 동물플랑크톤의 종조성 및 밀도에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Choi *et al.*, 2016a).

결과적으로, 국내 습지생태계 내 동물플랑크톤 연구는 주로 교란요인과 관련된 연구들이 주를 이뤘다. 우리나라는 수체가 작고 연결성이 낮기 때문에 강우나 인위적인 교란 등에 매우 취약한 특성을 가진다. 그래서 동물플랑크톤 분포는 포식자나 피식자와의 상호작용보다는 주로 물리적인 교란에 민감하게 영향 받는다. 동물플랑크톤은 물의 흐름에 민감하기 때문에 수체 파동이나 흔들림 등은 이들의 시공간적인 분포에 영향을 주는 주요 요인이다. 수체에 풍부한 수생식물은 이러한 물리적인 교란을 상쇄시킬 수 있다. 또한 수생식물 외 다른 생물과의 상호작용이 동물플랑크톤 분포에 영향을 미칠 수도 있다. 이러한 관점에서 향후 국내 습지에 대한 동물플랑크톤 연구는 생물간 상호작용에 대해 연구 할 필요성이 있다.

## 동물플랑크톤의 연구 방향과 생리화학적 접근

### 1. 주요 연구 주제 분석

국내의 담수 동물플랑크톤 연구는 다양한 각도에서 진행되어져 왔다. Web of Science에서 검색어가 'freshwater zooplankton'으로 게재된 논문을 검색한 결과, 2017년 7월

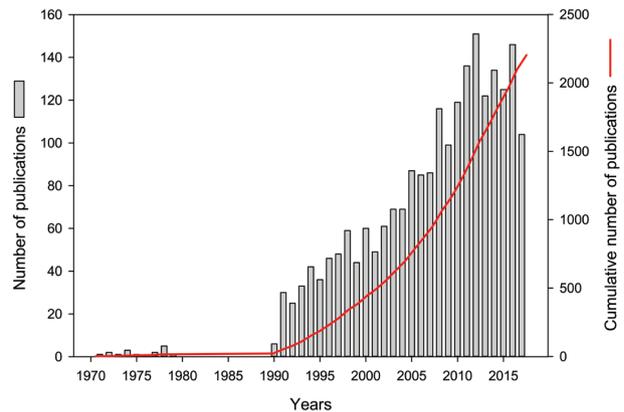


Fig. 4. The changes of the number of total articles for freshwater zooplankton researches in the Web of Science.

20일 기준 총 2,247편의 논문이 검색되었으며, 이들의 연도별 출간양상은 상이한 것으로 파악되었다(Fig. 4). 1990년대 이전에는 출간논문의 수가 많지 않았으나, 이후 지속적으로 상승하고 있으며, 2010년 이후부터는 매년 120편 이상의 논문이 꾸준히 출간되고 있다. 과거 대비 다양한 분석기법과 관측장비의 발전으로 인해 심도 있는 연구가 지속적으로 이루어진 결과로 생각된다. 이들 문헌의 주제어는 VOSviewer ver. 1.6.6 (Jan van Eck and Waltman, 2010)를 이용하여 분석하였다. 이 프로그램은 문헌 속에 포함되어 있는 주제어를 모아서 하나의 corpus를 형성한 뒤, 각 문헌 속에 출현한 주제어들이 문헌간 공통출현(co-occurrence)한 빈도를 측정하여 주제어 간 연관성을 계산한다. 즉, 공통출현 빈도가 높은 주제어들은 mapping 과정에서 가깝게 위치하고, 상대적으로 가까운 거리에 위치한 주제어들을 그룹으로 묶어서 주제어 분석이 가능하다. 전술한 2,247편 원고의 제목과 초록을 분석한 결과 총 4개의 그룹이 형성되었으며, 각 그룹의 성격을 포함하는 주제어를 통해 다음과 같이 정의하였다(Fig. 5A; Table 4).

그룹 1: 서식처별 동물플랑크톤 군집

그룹 2: 실험적 접근을 통한 개체군 동태 파악

그룹 3: 먹이망 구조와 기능

그룹 4: 환경지표로서의 동물플랑크톤 적용성

그룹 1에는 수생태계의 주요 서식처인 강, 하구 등이 주제어로 포함되었으며, 이와 함께 동물플랑크톤 군집구조와 이들의 서식에 관련된 다양한 요소들에 관한 내용이 발견되었다. 그룹 2는 그룹 1과의 연결성은 다소 떨어지며, 다양한 실험적 조건에 따른 동물플랑크톤의 생존, 사멸 등을 비교 분석하는 연구 주제어들이 포함되어 있다. 그룹 3은 오히려 그룹 1과 관련성이 높으며, 현장에서 발견되는 다

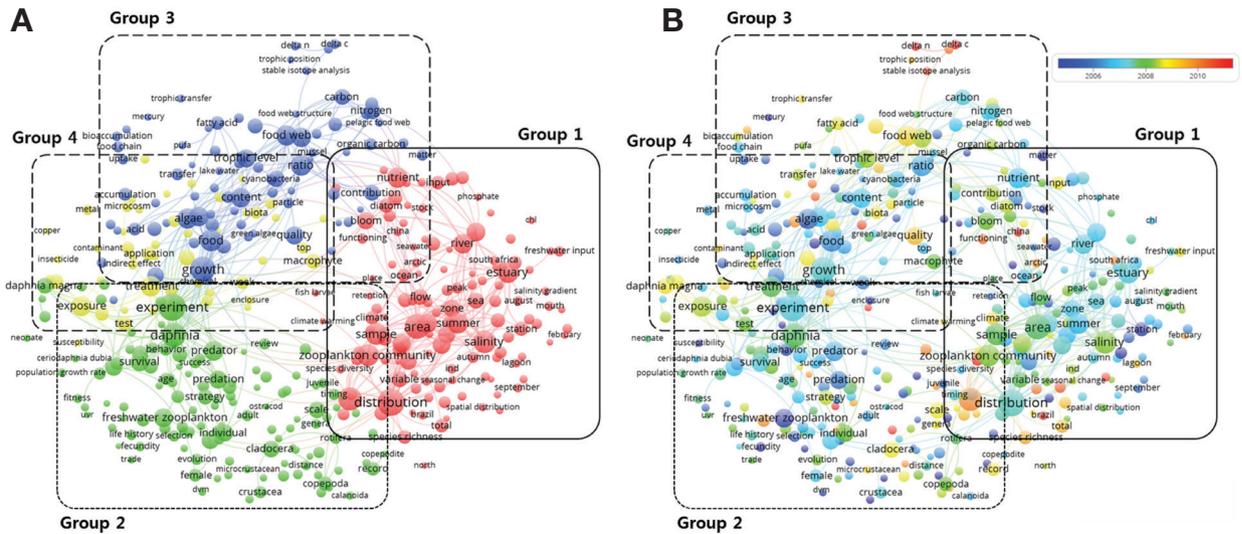


Fig. 5. Term grouping results based on the literature information. A, grouping; B, annual term appearance pattern.

Table 4. Tentative meaning of each group based on the major terms.

Group	Characteristics	Number of keyword	Major keywords
1	Zooplankton community in relation with habitat types	128	Distribution, area, estuary, river, zooplankton community, assemblage, bloom nutrient, sample
2	Experimental approaches to investigate zooplankton population dynamics	128	Growth, food, trophic level, food web, nitrogen, carbon, ratio, contribution.
3	Food web structure and function	80	Experiment, <i>Daphnia</i> , predator, predation, freshwater zooplankton, survival, egg.
4	Zooplankton as environmental indicators and its applicability	50	Treatment, application, high concentration, toxicity, macrophytes.

양한 먹이망 구성원들 간의 상호작용을 파악하여 구조와 기능을 연구하는 주제로 이루어져 있다. 마지막 그룹 4는 가장 적은 수의 주제가 포함되어 있고, 동물플랑크톤을 독성 검사나 각종 환경의 변화를 감지하는 도구로서의 사용 가능성에 초점을 맞춘 주제어들이 포함되었다. 이들 주제가 연도별로 어떻게 분포하는지를 분석한 결과, 전체적으로 많은 주제어들이 연도별로 뭉쳐지지 않고 고르게 퍼져 있어 여러 연구주제들이 특정 시기에 다수 출간되었다기 보다는 지속적으로 매년 다양한 주제의 연구 논문들이 생산되고 있음을 알 수 있다(Fig. 5B).

## 2. 복합적인 분석기법을 통한 개체군 반응 연구

동물플랑크톤은 전술한 바와 같이 수생태계 내 1차소비자 역할을 하면서 동시에 물질과 에너지를 상위포식자에 전달하는 중요한 역할을 담당한다. 즉, 서식처 내에서 먹이망의 구조와 기능을 결정하는데 동물플랑크톤이 어떤 역

할을 하는지, 그리고 이들의 성장과 사멸이 어떤 양상으로 전개되는지를 파악하는 것이 중요하다. 따라서 동물플랑크톤 개체군 연구는 서식처 내에서 동물플랑크톤의 역할을 이해하는 데 가장 기본이 된다. 동물플랑크톤 개체군 연구는 크게 먹이원의 영향에 따른 개체군 성장 양상 비교와 이들의 개체군 유지를 위한 생식 패턴에 초점을 맞추고 있다. 먹이원 연구는 동물플랑크톤 연구에서 가장 오래된 역사를 자랑하는 주제 중 하나이다(Stemberger and Gilbert, 1985; Gliwicz and Guisande, 1992; Nandini and Sarma, 2000; DeMott *et al.*, 2001; Koch *et al.*, 2009). 다양한 종류의 미세조류를 급여하여 동물플랑크톤의 성장 양상을 비교 분석하는 것이 핵심인데, 과거에는 급여한 미세조류의 종류에 따라 동물플랑크톤 개체군의 반응성을 주로 총 탄소량에 비추어 파악하였다(McCauley *et al.*, 1990). 이후 Gas Chromatography Mass Spectrometer (GC-MS) 등을 이용하여 미량 성분 검출능이 향상되면서 미세조류의 세포 내에 존재하는 지방산의 조성성분과 함량 연구가 가능해

집에 따라, 동물플랑크톤의 성장을 미세조류의 지방산 조성량과 함량을 연관 짓는 연구가 지속적으로 보고되고 있다 (Ahlgren *et al.*, 1990; Müller-Navarra *et al.*, 2004; Barata *et al.*, 2005; Becker and Boersma, 2005; Brett *et al.*, 2009). 이와 함께 동물플랑크톤의 개체군의 크기를 유지하는 독특한 생식 기능에 대한 연구 또한 지속적으로 이루어지고 있다. Cyclic parthenogenesis는 환경이 양호할 때는 무성생식 방법 중 하나인 처녀생식으로 빠르고 탄력적으로 개체군 크기를 유지하다 환경이 열악해지면 유성생식 모드로 접어들어 접합자를 생성하고 유전적 다양성을 유지하는 전략을 취하는 복잡하면서도 효율적인 생식 전략이다 (Choi *et al.*, 2014b). 동물플랑크톤은 비록 암수 개체들이 상대가 암컷인지 수컷인지는 감별하지만 (La *et al.*, 2014), 성 선택은 시도하지 않는다고 알려져 있다 (Winsor and Innes, 2002). 따라서, 보다 강한 자손을 남겨야 다음 세대가 번성할 수 있다는 전제 조건 하에서 동물플랑크톤들은 최대한 자신의 에너지를 유지하면서 활발하게 배우자를 찾아야 하며, 그러기 위해서는 보다 많은 에너지를 섭취할수록 유리하다고 보고되었다 (Sterner and Hessen, 1994; Koch *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2016b). 동물플랑크톤의 개체군 연구는, 이처럼 과거에 비이커 내에서 행동을 육안으로 관찰하는 수준을 벗어나 현재는 먹이원 혹은 동물플랑크톤 체내에 존재하는 다양한 생화학적 물질의 정량을 통해 심도 있게 진행되고 있으며, 이는 각종 물질의 정량이 정밀하고 정확하게 진행되면서 가능하게 되었다.

각종 개체군 연구에서 괄목할 만한 정보가 생산되기 시작하면서 동물플랑크톤을 다양한 목적으로 활용하려는 시도가 많이 진행되었다. 이들은 생활사가 비교적 짧으면서 안정적으로 개체군을 유지할 수 있기 때문에 다양한 환경 스트레스 검출에도 활용되고 있다. 이들을 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 환경 스트레스에 동물플랑크톤이 어떻게 반응하는지에 대한 깊은 이해가 요구 되어진다. 과거에는 주로 현상학적 특징 중심으로 연구가 진행되었다면, 최근에는 각종 분자생물학적 기법과 생물정보학적 분석 방식이 결부되어 엄청난 양의 정보를 생산하고 있다. 소위 생물정보학적 빅데이터가 생산되는 분야 중 하나가 전장유전체 탐색 연구이다. 전장유전체 연구는 분자생물학 연구 중 가장 금전적/시간적 비용이 많이 필요한 분야이지만, 유전체 지도 구축이 완성된 뒤에는 매우 다양한 연구의 기초자료로 활용되기 때문에 중요한 연구 수단으로 인식된다. 담수 동물플랑크톤 중 전장유전체 연구가 완료된 종은 *Daphnia magna* (Gilbert *et al.*, 2016), *D. pulex* (Colbourne *et al.*, 2011) 등이 있으며, 여전히 기능이 정확하게 밝혀진 유전자보다 그렇지 않은 유전자가 더 많은 편

이지만, 유전체를 구성하는 주요 유전자들의 의미가 단계적으로 파악되고 있다.

유전자와 관련하여 활발하게 진행되는 또 다른 연구분야는 전사체 연구 (transcriptome analysis)이다. 전사체는 유전체에서 전사 (transcription) 되는 모든 종류의 RNA를 총칭한 것이다. 동물플랑크톤이 다양한 환경에 노출될 때, 이들의 적응 정도는 세포 내에 해당 스트레스에 적응을 유도하는 단백질이 얼마나 많느냐에 따라 결정된다고 할 수 있다. 따라서, 환경 스트레스 조건에 따라 특정 유전자가 과발현 (over-expression) 혹은 저발현 (under-expression) 하면 해당 유전자가 스트레스 적응과 관련있다고 볼 수 있다 (Ning *et al.*, 2013; Smolina *et al.*, 2015). 불과 10여년 전까지만 해도 유전체 혹은 전사체 연구는 수억 원 이상의 비용을 요구하는 분야로 거대 프로젝트로서 접근해야 하는 경우가 많았지만, 최근에는 기술 발전으로 인해 비교적 저비용으로도 과거 수준 이상의 성과를 달성할 수 있는 환경이 조성되었다. 따라서 동물플랑크톤의 개체군 동태를 이용하여 각종 환경 스트레스를 연구하는 경우, 과거에 비해 개체 혹은 개체군의 체내 반응성 연구의 진입장벽이 낮아져, 현재 그에 따른 활발한 연구가 진행되고 있다.

## 결 론

복합적인 분석기법에서 소개하였듯이 최근 과학기술의 발달은 생태학의 연구 접근 방법에 많은 변화를 가져왔다. 동물플랑크톤의 섭식 특성과 이로 인한 수생태계 먹이망 내 위치를 파악하는 데 있어서도, 기존의 개체수준의 관찰 및 제한된 조건에서의 실험에 기반한 정성적인 분석에서 최근 탄소 및 물질량의 분석, 지방산 분석, 안정동위원소를 이용한 분석 등 정량적인 접근이 가능해졌다. 1990년대 후반부터 생태계 연구에 본격적으로 도입된 안정동위원소 분석은 탄소와 질소의 안정동위원소비가 먹이원 및 포식-피식관계에 의해 특정반응 양식을 가지는 원리를 활용한 방법으로, 동물플랑크톤뿐만 아니라 어류를 포함한 수생태계 먹이망 전반에 걸쳐 광범위하게 적용되고 있다. 특히, 이와 같은 정량적 정보는 수리모델 및 통계모델 적용을 통해 다양한 형태의 해석이 가능하다 (Chang *et al.*, 2016). 최근 수생태계를 중심으로 활발한 연구결과가 보고되고 있는 환경 DNA 또한 동물플랑크톤의 다양성 연구, 분포 및 먹이원 추정 등에 적용이 가능한 분야이다 (Groendahl *et al.*, 2017).

그동안 동물플랑크톤 중 가장 활발히 연구된 분류군으로는 *Daphnia*를 들 수 있다. 관찰, 실험 및 분석에 용이하

도록 그 크기가 크고, 섭식능력이 뛰어나 식물플랑크톤 군집에도 큰 영향을 미치기 때문이다. 반면 *Daphnia*는 독성 물질에 대한 민감도가 높고, 부영양화 수역에는 잘 서식하지 않으므로, 국내의 많은 수생태계에서 우점하는 동물플랑크톤은 소형 지각류 및 윤충류라 할 수 있다. 이들은 *Daphnia*에 비해 작은 크기를 가지고 있어 실험 및 분석에 많은 제한이 따르기 때문에, 많은 수생태계에서 미생물먹이환(microbial loop)과 이들 소형 동물플랑크톤의 연결고리에 대해서는 그 중요성이 인식되었음에도 불구하고, 이에 대한 정량적인 연구결과는 매우 제한적이다. 특히, 대표적인 소형 동물플랑크톤인 윤충류의 수생태계 먹이망 내 종특이적 기능성 및 환경과의 상호작용은 중요한 정보가 된다(Oh *et al.*, 2017). 따라서, 본 논문에서 소개한 전통적인 연구결과를 바탕으로 최근 개발되고 있는 다양한 분석 방법을 적용하여 수생태계 먹이망 내에서의 동물플랑크톤의 위치와 미생물먹이환 등 기존에 정량적으로 다루지 못 하였던 미생물의 기능적 역할을 정량적으로 분석하는 것은 부영양화 및 환경변화에 따른 수생태계의 반응 및 복원을 위한 생태적 프로세스를 이해하고 적용하는 데 있어 중요한 연구과제가 될 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- Ahlgren, G., L. Lundstedt, M. Brett and C. Forsberg. 1990. Lipid composition and food quality of some freshwater phytoplankton for cladoceran zooplankters. *Journal of Plankton Research* **12**: 809-818.
- Allan, J.D. and M.M. Castillo. 2007. *Stream Ecology*. Springer, Dordrecht.
- Arbačiauskas, K. 2001. Life-history variation related to the first adult instar in daphnids derived from diapausing and subitaneous eggs. *Hydrobiologia* **442**: 157-164.
- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Gray, L.A. Meyer-Reil and F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series* **10**: 257-263.
- Baines, S.B. and M.L. Pace. 1991. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and its importance to bacteria; patterns across marine and freshwater systems. *Limnology and Oceanography* **36**: 1078-1090.
- Barata, C., J.C. Navarro, I. Varo, M.C. Riva, S. Arun and C. Porte. 2005. Changes in antioxidant enzyme activities, fatty acid composition and lipid peroxidation in *Daphnia magna* during the aging process. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* **140**: 81-90.
- Bass, J.A.B., L.C.V. Pinder and D.V. Leach. 1997. Temporal and spatial variation in zooplankton populations in the River Great Ouse: an ephemeral food resource for larval and juvenile fish. *River Research and Applications* **13**: 245-258.
- Becker, C. and M. Boersma. 2005. Differential effects of phosphorus and fatty acids on *Daphnia magna* growth and reproduction. *Limnology and Oceanography* **50**: 388-397.
- Beklioglu, M., M. Telli and A.G. Gozen. 2006. Fish and mucus-dwelling bacteria interact to produce a kairomone that induces diel vertical migration. *Freshwater Biology* **51**: 2200-2206.
- Blancher II, E.C. 1984. Zooplankton-trophic state relationships in some north and central Florida lakes. *Hydrobiologia* **109**: 251-263.
- Boriss, H., M. Boersma and K.H. Wiltshire. 1999. Trimethylamine induces migration of waterfleas. *Nature* **398**: 382.
- Boxshall, G.A. and D. Defaye. 2008. Global diversity of copepods (Crustacea: Copepoda) in freshwater. *Hydrobiologia* **595**: 195-207.
- Brett, M.T., D.C. Müller-Navarra and J. Persson. 2009. *Crustacean zooplankton fatty acid composition*. Springer New York.
- Burks, R.L., E. Jeppesen and D.M. Lodge. 2001. Littoral zone structures as refugia for *Daphnia* against fish predation. *Limnology and Oceanography* **46**: 230-237.
- Burks, R.L., D.M. Lodge, E. Jeppesen and T.L. Laudridsen. 2002. Diel horizontal migration of zooplankton: costs and benefits of inhabiting the littoral. *Freshwater Biology* **47**: 343-365.
- Burns, C.W. 1968. The relationship between body size of filter-feeding cladocera and the maximum size of particle ingested. *Limnology and Oceanography* **13**: 675-678.
- Carpenter, S.R. and J.F. Kitchell. 1993. *The trophic cascade in lakes*. Cambridge University Press, New York.
- Carpenter, S.R., J.F. Kitchell and J.R. Hodgson. 1985. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* **35**: 634-639.
- Carrick, H.J., G.L. Fahnenstiel, E.F. Stoermer and R.G. Wetzel. 1991. The importance of zooplankton-protozoan trophic couplings in Lake Michigan. *Limnology and Oceanography* **36**: 1335-1345.
- Chang, C.Y. 2009. *Illustrated encyclopedia of fauna and flora of Korea, Vol. 42. Inland-water copepoda*. Ministry of Education, Science and Engineering 1-687.
- Chang, C.Y. 2012. *Invertebrate fauna of Korea, Vol. 21, No. 19. Continental cyclopoids-I*. National Institute of Biological Resources (NIBR). Ministry of Environment 1-92.
- Chang, C.Y. 2013. *Invertebrate fauna of Korea, Vol. 21, No. 26. Continental cyclopoids-II*. National Institute of Biological Resources (NIBR). Ministry of Environment 1-110.
- Chang, C.Y. 2014. *Invertebrate fauna of Korea, Vol. 21, No. 35. Continental calanoids*. National Institute of Biological Resources (NIBR). Ministry of Environment 1-68.
- Chang, C.Y. and H.S. Kim. 1986. *The freshwater Calanoida (Crustacea)*. National Institute of Biological Resources (NIBR). Ministry of Environment 1-110.

- stacea: Copepoda) of Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **2**: 49-62.
- Chang, C.Y. and G.S. Min, 2005. Key to the Korean freshwater cyclopoid copepods and their DNA taxonomy. Junghaeng-Sa Publish 1-153.
- Chang, C.Y. and H.J. Yoon. 2008. Nitokra copepods (Harpacticoida: Ameiridae) from Korea. *Korean Journal of Systematic Zoology* **24**:115-127.
- Chang, K.H., D.I. Seo, S.M. GO, M. Sakamoto, G.S. Nam, J.Y. Choi, M.S. Kim, K.S. Jeong, G.H. La and H.W. Kim. 2016. Feeding behavior of crustaceans (Cladocera, Copepoda and Ostracoda): food selection measured by stable isotope analysis using R package SIAR in mesocosm experiment. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 279-288.
- Chang, K.H., H. Doi, Y. Nishibe and S. Nakano. 2010. Feeding habits of omnivorous *Asplanchna*: comparison of diet composition among *Asplanchna herricki*, *A. priodonta* and *A. girodi* in pond ecosystems. *Journal of Limnology* **69**: 209-216.
- Cho, K.S. 1965. A study on limnological condition and plankton of lake Paro. *Teachers College Journal* **2**: 45-57.
- Cho, K.S. 1979. Limnological studies of Soyang multiplied-purpose reservoir. (4) On the plankton succession of the first seven years after impounding. *Research Bulletin of Kangwon National University* **13**: 185-191.
- Cho, K.S. 1986. Cladocera of a high moor in the Daeam Mountain. *Korean Journal of Ecology and Environment* **19**: 57-61.
- Cho, K.S. and T. Mizuno. 1977. Comparison of limnological conditions and plankton communities in the Uiam Lake consisting of the two different river systems. *Korean Journal of Ecology and Environment* **10**: 73-85.
- Choi, J.Y., G.H. La, K.S. Jeong, S.K. Kim, K.H. Chang and G.J. Joo. 2012. Classification by zooplankton inhabit character and freshwater microbial food web: importance of epiphytic zooplankton as energy source for high-level predator. *Korean Journal of Ecology and Environment* **45**: 444-452.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, S.W. Hong, K.S. Jeong, G.H. La and G.J. Joo. 2013a. Zooplankton community distribution and food web structure in small reservoirs: influence of land uses around reservoirs and littoral aquatic plant on zooplankton. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 332-342.
- Choi, J.Y., G.H. La, S.K. Kim, K.S. Jeong and G.J. Joo. 2013b. Zooplankton community distribution in aquatic plants zone: influence of epiphytic rotifers and cladocerans in accordance with aquatic plants cover and types. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 86-93.
- 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). *Journal of Limnology* **73**: 11-16.
- Choi, J.Y., S.-K. Kim, K.-H. Chang, M.-C. Kim, G.-H. La, G.-J. Joo and K.-S. Jeong. 2014b. Population growth of the cladoceran, *Daphnia magna*: a quantitative analysis of the effects of different algal food. *PLOS ONE* **9**: 1-8.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong and G.J. Joo. 2015. Rainfall as dominant driver of rotifer dynamics in shallow wetlands: Evidence from a long-term data record (Upo Wetlands, South Korea). *International Review of Hydrobiology* **100**: 21-33.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, D.H. Kim and G.J. Joo. 2016a. Role of aquatic macrophytes as refuge of zooplankton on physical distribution (Summer Rainfall) in shallow wetlands. *Ecology and Environment* **49**: 308-320.
- Choi, J.Y., S.-K. Kim, G.-H. La, K.-H. Chang, D.-K. Kim, K.-Y. Jeong, M.S. Park, G.-J. Joo, H.-W. Kim and K.-S. Jeong. 2016b. Effects of algal food quality on sexual reproduction of *Daphnia magna*. *Ecology and Evolution* **6**: 2817-2832.
- Christofferson, K., B. Riemann, A. Klynsner and M. Sondergaard. 1993. Potential role of fish predation and natural populations of zooplankton in structuring a plankton community in eutrophic lake water. *Limnology and Oceanography* **38**: 561-573.
- Chung, C.E., H.B. Yoo and S.Y. Kim. 1990. A new record of the 3 species on freshwater Rotifera in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **23**(4): 279-285.
- Chung, C.E., H.B. Yoo and S.Y. Kim. 1991. Rotifera from Korean inland waters II. Colurellidae (Rotifera: Monogononta). *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **7**: 241-256.
- Chung, C.E., H.B. Yoo and S.Y. Kim. 1992a. Rotifera from Korean inland waters IV. *Branchionus* and *Platyas* of Branchionide (Rotifera; Monogononta). *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **8**: 35-56.
- Chung, C.E., H.B. Yoo and S.Y. Kim. 1992b. Rotifera from Korean inland waters V. *Keratella* and *Notholca* of Branchionidae (Rotifera: Monogononta). *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **8**: 211-222.
- Chung, C.E., H.B. Yoo and S.Y. Kim. 1992c. Freshwater Rotifera of Korea III Family Notommatidae (Rotifera: Monogononta). *Korean Journal of Ecology and Environment* **25**: 1-8.
- Chung, C.U., H.B. Yoo and S.Y. Kim. 1992. Ecological study on the Copepoda in Lake Naju. *Korean Journal of Ecology and Environment* **25**: 73-87.
- Colbourne, J.K., M.E. Pfrender, D. Gilbert, W.K. Thomas, A. Tucker, T.H. Oakley, S. Tokishita, A. Aerts, G.J. Arnold, M.K. Basu, D.J. Bauer, C.E. Cáceres, L. Carmel, C. Casola, J.H. Choi, J.C. Detter, Q. Dong, S. Dusheyko, B.D. Eads, T. Fröhlich, K.A. Geiler-Samerotte, D. Gerlach, P. Hatcher, S. Jogdeo, J. Krijgsveld, E.V. Kriventseva, D. Kültz, C. Laforsch, E. Lindquist, J. Lopez, J.R. Manak, J. Muller, J.

- Pangilinan, R.P. Patwardhan, S. Pitluck, E.J. Pritham, A. Rechtsteiner, M. Rho, I.B. Rogozin, O. Sakarya, A. Salamov, S. Schaack, H. Shapiro, Y. Shiga, C. Skalitzky, Z. Smith, A. Souvorov, W. Sung, Z. Tang, D. Tsuchiya, H. Tu, H. Vos, M. Wang, Y.I. Wolf, H. Yamagata, T. Yamada, Y. Ye, J.R. Shaw, J. Andrews, T.J. Crease, H. Tang, S.M. Lucas, H.M. Robertson, P. Bork, E.V. Koonin, E.M. Zdobnov, I.V. Grigoriev, M. Lynch and J.L. Boore. 2011. The Ecoreponsive Genome of *Daphnia pulex*. *Science* **331**: 555-561.
- DeMott, W.R., R.D. Gulati and E. Van Donk. 2001. *Daphnia* food limitation in three hypereutrophic Dutch lakes: Evidence for exclusion of large-bodied species by interfering filaments of cyanobacteria. *Limnology and Oceanography* **46**: 2054-2060.
- Eui, C., H. Bin and S. Yee. 1992. Rotifera from Korean inland waters IV. *Brachionus* and *Platys* of Brachionidae (Rotifera: Monogononta). *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **8**: 35-55.
- Fitzsimmons, J.M. and D.J. Innes. 2006. Inter-genotype variation in reproductive response to crowding among *Daphnia pulex*. *Hydrobiologia* **568**: 187-205.
- Forró, L., N.M. Korovchinsky, A.A. Kotov and A. Petrusek. 2008. Global diversity of cladocerans (Cladocera; Crustacea) in freshwater. *Hydrobiologia* **595**: 177-184.
- Gannon, J.E. and R.S. Stemberger. 1978. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicator of water quality. *Transactions of the American Microscopic Society* **97**: 16-35.
- Gilbert, D.G., J.H. Choi, K. Mockaitis, J. Colbourne and M. Pfrender. 2016. *Daphnia magna* strain Xinb3, whole genome shotgun sequencing project (NCBI accession No. LRGB000000000).
- Gilbert, J.J. 2001. Spine development in *Brachionus quadridentatus* from an Australian billabong: genetic variation and induction by *Asplanchna*. *Hydrobiologia* **446/447**: 19-28.
- Gliwicz, Z.M. and C. Guisande. 1992. Family planning in *Daphnia*: resistance to starvation in offspring born to mothers grown at different food levels. *Oecologia* **91**: 463-467.
- Groendahl, S., M. Kahlert and P. Fink. 2017. The best of worlds: a combined approach for analyzing microalgal diversity via metabarcoding and morphology-based methods. *PLoS ONE* **12**: e0172808.
- Hairton, N.G. Jr. and C.M. Kearns. 2002. Temporal dispersal, ecological and evolutionary aspects of zooplankton egg banks and the role of sediment mixing. *Integrative and Comparative Biology* **42**: 481-491.
- Harrel, S.L. and E.D. Dibble. 2001. Foraging efficiency of juvenile bluegill, *Lepomis macrochirus*, among different vegetated habitats. *Environmental Biology of Fishes* **62**: 441-453.
- Hazelwood, D.H. 1962. Temperature and photoperiod effects on cyclomorphosis in *Daphnia*. *Limnology and Oceanography* **7**: 230-232.
- Hong, S., K.S. Cho and K.H. Ra. 1969. Studies on the chemical conditions and plankton in the Hwajin-po lake. *Korean Journal of Ecology and Environment* **2**: 35-42.
- Horppila, J., P. Eloranta, A. Liljendahl-Nurminen, J. Niemisto and Z. Pekcan-Hekim. 2009. Refuge availability and sequence of predators determine the seasonal succession of crustacean zooplankton in a clay-turbid lake. *Aquatic Ecology* **43**: 91-103.
- Hynes, H.B.N. 1970. The Ecology of Running Waters. University of Toronto Press: Toronto, Ontario; 555.
- Jan van Eck, N. and L. Waltman. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* **84**(2): 523-538.
- Jeong, H.G., A.A. Kotov and W. Lee. 2012. A new species of the genus *Ilyocryptus* Sars, 1862 (Cladocera: Anomopoda: Ilyocryptidae) from the East Asian Palaearctic. *Zootaxa* **3475**: 36-44.
- Jeong, H.G., A.A. Kotov and W. Lee. 2013. A new species of the genus *Pleuroxus* Baird (Cladocera: Anomopoda: Chydoridae) from Jeju Island, South Korea. *Zootaxa* **3666**: 31-40.
- Jeong, H.G., 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**: 216-222.
- Jeong, H.G., A.A. Kotov and W. Lee. 2015. Diversity of freshwater Cladoceran species (Crustacea: Branchiopoda) in South Korea. *Journal of Ecology and Environment* **38**: 361-366.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard and T. Lauridsen. 1999. Trophic dynamics in turbid and clearwater lakes with special emphasis on the role of zooplankton for water clarity. *Hydrobiologia* **408/409**: 217-231.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard, T. Lauridsen, L.J. Pedersen and L. Jensen. 1997. Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. *Hydrobiologia* **342/343**: 151-164.
- Jeppesen, E., P. Nöges, T.A. Davidson, J. Haberman, T. Nöges, K. Blank, T.L. Lauridsen, M. Søndergaard, C. Sayer, R. Laugaste, L.S. Johansson, R. Bjerring and S.L. Amsinck. 2011. Zooplankton as indicators in lakes: a scientific-based plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD). *Hydrobiologia* **676**: 279-297.
- Jeppesen, E., T.L. Lauridsen, T. Kairesalo and M.R. Perrow. 1998. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes. pp. 91-114. In: The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes (Jeppesen, E., M. Søndergaard, M. Søndergaard and K. Christoffersen eds.). Springer Verlag, New York.
- Johnsen, G.J. and P.J. Jakobsen. 1987. The effect of food limitation on vertical migration in *Daphnia longispina*. *Limnol-*

- ogy and Oceanography **32**: 873-880.
- Joo, G.J. and A.K. Ward. 1991. Patterns of phytoplankton productivity in two morphologically different oxbow lakes in the Black Warrior River drainage in Alabama, USA. *Report of the Suwa Hydrobiological Station Shinshu University* **7**: 81-90.
- Joo, G.J. and D.A. Francko. 1995. Limnological characterization of the tristate oxbow wetland (Ohio, Indiana). *Ohio Journal of Science* **95**: 316-320.
- Joo, G.J., H.W. Kim, K. Ha and J.K. Kim. 1997. Long - Term Trend of the Eutrophication of the Lower Nakdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment* **30**: 472-480.
- Kang, S.W. 1969. The zooplankters of Uiam Lake. *Korean Journal of Ecology and Environment* **2**: 39-44.
- Kerfoot, W.C. 1978. Combat between predatory copepods and their prey: *Cyclops*, *Epischura*, and *Bosmina*. *Limnology and Oceanography* **23**: 1089-1102.
- Kim, B.C., J.H. Park, W.M. Heo, B.J. Lim, G.S. Hwang, K.S. Choi and J.S. Choi. 2001. The limnological survey of major lakes in Korea (4): Lake Juam. *Korean Journal of Ecology and Environment* **34**: 30-44.
- Kim, H.S. and C.Y. Chang. 1989. Freshwater cyclopoid copepods (Cyclopoida, Cyclopoida) of Korea. *The Korean Journal of Systematic Zoology* **5**: 225-256.
- Kim, H.S. and C.Y. Chang. 1991. Acanthocyclops tokchokensis, a new cyclopoid copepod species from wells in Tokchok Island of Korea (Copepoda, Cyclopoida, Cyclopidae). *The Korean Journal of Zoology* **34**: 300-306.
- Kim, H.S., D.S. Kong and S.J. Hwang. 2005. Characteristic community dynamics of phyto- and zooplankton in a shallow eutrophic reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **38**: 18-29.
- Kim, H.W. and G.J. Joo. 2000. Differences of zooplankton development along a lake and a river stretch of the river Spree (Germany). *Korean Journal of Ecology and Environment* **33**: 197-205.
- Kim, H.W. and H.Y. Lee. 2007. The differences of zooplankton dynamics in river ecosystems with and without estuary dam in river mouth. *Korean Journal of Ecology and Environment* **40**: 273-284.
- 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**: 129-135.
- Kim, I.H. 1988. Key to the Korean freshwater Cladocera. *The Korean Journal of Systematic Zoology* **2**: 43-65.
- Kim, M.S., Y.J. Lee, B.H. Kim, S.J. Hwang, K.G. An, S.K. Park, H.Y. Ume and K.H. Shin. 2011. Control of cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) blooms by floating aquatic plant (*Iris pseudoacorus*): an in situ mesocosm experiment using stable ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) isotopetracers. *Korean Journal of Ecology and Environment* **44**: 280-291.
- Kim, S.H., K.I. Yoo and H.W. Nam. 1996. Studies on the ecology of a freshwater cladoceran *Moina irrasa*. *Korean Journal of Ecology and Environment* **29**: 89-96.
- Kim, S.Y., C.E. Chung and H.B. Yoo. 1993. Rotifera from Korean inland waters VI. *Anuraeopsis*, *Mytilina*, *Trichotria*, *Lophocaris*, *Dipleuchlanis* of Brachionidae (Rotifera: Monogononta) *The Korean Journal of Ecology and Environment* **26**: 293-303.
- Kim, W., S.Y. Moon and M.O. Song. 1991. The systematic study on the freshwater rotifer of Korea. *The Korean Journal of Zoology* **34**: 548-556.
- Koch, U., E. von Elert and D. Straile. 2009. Food quality triggers the reproductive mode in the cyclical parthenogen *Daphnia* (Cladocera). *Oecologia* **159**: 317-324.
- Kofoid, C.A. 1903. The plankton of the Illinois River, 1894-1896, with introductory notes upon the hydrography of the Illinois River and its basin.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristics of a river-reservoir (Paldang), Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **30**: 524-535.
- Kotov, A.A., H.G. Jeong and W. Lee. 2012. Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) of the south-east of the Korean Peninsula, with twenty new records for Korea. *Zootaxa* **3368**: 50-90.
- Kuczynska-Kippen, N. and B. Nagengast. 2006. The influence of the spatial structure of hydromacrophytes and differentiating habitat on the structure of rotifer and cladoceran communities. *Hydrobiologia* **559**: 203-212.
- La, G.-H., J.-Y. Choi, K.-H. Chang, M.-H. Jang, G.-J. Joo and H.-W. Kim. 2014. Mating behavior of *Daphnia*: impacts of predation risk, food quantity, and reproductive phase of females. *PLOS ONE* **9**: e104545.
- Laforsch, C. and R. Tollrian. 2004a. Extreme helmet formation in *Daphnia cucullata* induced by small-scale turbulence. *Journal of Plankton Research* **26**: 81-87.
- Laforsch, C. and R. Tollrian. 2004b. Inducible defenses in multipredator environments: cyclomorphosis in *Daphnia cucullata*. *Ecology* **85**: 2302-2311.
- Lair, N. 2006. A review of regulation mechanisms of metazoan plankton in riverine ecosystems: aquatic habitat versus biota. *River Research and Applications* **22**: 567-593.
- Lampert, W. 1993. Phenotypic plasticity of the size at first reproduction in *Daphnia*: the importance of maternal size. *Ecology* **74**: 1455-1466.
- Larsson, P. 1991. Intraspecific variability in response to stimuli for male and ephippia formation in *Daphnia pulex*. *Hydrobiologia* **225**: 281-291.
- Lass, S. and P. Spaak. 2003. Chemically induced anti-predator defences in plankton: a review. *Hydrobiologia* **491**: 221-239.
- Lee, E.J., A.N. Cho, O.B. Kwon and T.S. Ahn. 2009. The effect of artificial floating island to zooplankton and phytoplankton in Shingu Reservoir, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **42**: 19-25.

- Lee, J.M. and C.Y. Chang. 2007. Two new species of *Tropocyclops prasinus* group (Copepoda: Cyclopidae) from South Korea. *Integrative Biosciences* **11**:255-263.
- Lee, J.M., H.J. Yoon and C.Y. Chang. 2007. A faunistic study on the brackish-water calanoid copepods from South Korea. *The Korean Journal of Systematic Zoology* **23**: 135-154.
- Lee, J.Y., J.K. Kim, Y.K. Jung and B.C. Kim. 2010. Isotopic differences among zooplankton taxa and seasonal variation of zooplankton community coexisting with *Microcystis*. *Korean Journal of Ecology and Environment* **43**: 1-10.
- Lee, J.Y., S.M. Jung, G. Jang and B.C. Kim. 2014. Spatial and temporal distribution characteristics of zooplankton appeared on early construction of pumped storage power plant dam. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 57-65.
- Lee, S.J., J.H. Lee, J.I. Kim, G.H. La, M.A. Yeom, W.G. Shin, H.W. Kim, M.H. Jang and K.G. Ahn. 2009. Initial preliminary studies in National Long-Term Ecological Research (LTER) stations of Daechung Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **42**: 476-486.
- Loose, C.J. 1993. Lack of endogenous rhythmicity in *Daphnia* diel vertical migration. *Limnology and Oceanography* **38**: 1837-1841.
- Macháček, J., I. Vaníčková, J. Seda, M. Cordellier and K. Schwenk. 2013. Sexual reproduction of *Daphnia* in a deep temperate reservoir: the phenology and genetics of male formation. *Hydrobiologia* **715**: 113-123.
- Manatunge, J., T. Asaeda and T. Priyadarshana. 2000. The influence of structural complexity on fish-zooplankton interactions: A study using artificial submerged macrophytes. *Environmental Biology of Fishes* **58**: 425-438.
- McCauley, E., W.W. Murdoch, R.M. Nisbet and W.S.C. Gurney. 1990. The physiological ecology of *Daphnia*: development of a model of growth and reproduction. *Ecology* **71**: 703-715.
- McNaught, D.C. 1975. A hypothesis to explain succession from calanoids to cladocerans during eutrophication. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **19**: 724-731.
- Melone, G. 1998. The rotifer corona by SEM. *Hydrobiologia* **387/388**: 131-134.
- Michels, J. and S.B. Schnack-Schiel. 2005. Feeding in dominant Antarctic copepods - does the morphology of the mandibular gnathbases relate to diet? *Marine Biology* **146**: 483-495.
- Moon, E.Y., Y.O. Kim, B.H. Kim, D.S. Kong and M.S. Han. 2004. Taxonomic and ecologic studies on ciliate plankton in Pal'tang Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **37**: 149-179.
- Müller-Navarra, D.C., M.T. Brett, S. Park, S. Chandra, A.P. Balantyne, E. Zorita and C.R. Goldman. 2004. Unsaturated fatty acid content in seston and tropho-dynamic coupling in lakes. *Nature* **427**: 69-72.
- Nandini, S. and S.S.S. Sarma. 2000. Lifetable demography of four cladoceran species in relation to algal food (*Chlorella vulgaris*) density. *Hydrobiologia* **435**: 117-126.
- Ning, J., M. Wang, C. Li and S. Sun. 2013. Transcriptome sequencing and *de novo* analysis of the copepod *Calanus sinicus* using 454 GS FLX. *PLOS ONE* **8**: e63741.
- Noh, S.Y. and M.S. Han. 2008. Carbon dynamics of plankton communities in Paldang Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **41**: 174-187.
- Oganjan, K., T. Virro and V. Lauringson. 2013. Food spectrum of the omnivorous rotifer in two large northeastern European lakes of different trophic. *Oceanological and Hydrobiological Studies* **42**: 314-323.
- 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 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* **21**: 133-140.
- Oh, I.H. 1998. Ecological studies on Daechung Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **31**: 79-87.
- Pace, M.L. 1984. Zooplankton community structure, but not biomass, influences the phosphorus-chlorophyll a relationship. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **41**: 1089-1096.
- Pace, M.L. 1986. An empirical analysis of zooplankton community size structure across lake trophic gradient. *Limnology and Oceanography* **31**: 45-55.
- Pace, M.L., S.E.G. Findlay and D. Lints. 1992. Zooplankton in advective environments: the Hudson River community and a comparative analysis. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **49**: 1060-1069.
- Parejko, K. and S. Dodson. 1990. Progress towards characterization of a predator/prey kairomone: *Daphnia pulex* and *Chaoborus americanus*. *Hydrobiologia* **198**: 51-59.
- Park, C.H., M.H. Park, D.H. Choi, H.J. Choi, J.H. Lee, M.H. Lee and S.J. Hwang. 2013. The effect of floating wetland on water quality improvement in a eutrophic lake. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 116-127.
- Pejler, B. 1983. Zooplanktonic indicators of trophic and their food. *Hydrobiologia* **101**: 111-114.
- Perrow, M.R., A.J.D. Jowitt, J.H. Stansfield and G.L. Phillips. 1999. The practical importance of the interactions between fish, zooplankton and macrophytes in shallow lake restoration. *Hydrobiologia* **395/396**: 199-210.
- Pichlová, R. and Z. Brandl. 2003. Predatory impact of *Leptodora kindtii* on zooplankton community in the Slapy Reservoir. *Hydrobiologia* **504**: 177-184.
- Pijanowska, J. and A. Kowalczewski. 1997. Predator can induce swarming behaviour and locomotory responses in *Daphnia*. *Freshwater Biology* **37**: 649-656.
- Pinell-Alloul, B., J.A. Dowing, M. Perusse and G. Codin-Blum-

- er. 1988. Spatial heterogeneity in freshwater zooplankton: variation with body size, depth, and scale. *Ecology* **69**: 1393-1400.
- Pohnert, G. and E. Von Elert. 2000. No ecological relevance of trimethylamine in fish - *Daphnia* interaction. *Limnology and Oceanography* **45**: 1153-1156.
- Qin, J. and D.A. Culver. 1995. Effect of young-of-the-year wall-eye (Percidae: *Stizostedion vitreum*) on plankton dynamics and water quality in ponds. *Hydrobiologia* **297**: 217-227.
- Romare, P., E. Bergman and L.A. Hansson. 1999. The impact of larval and juvenile fish on zooplankton and algal dynamics. *Limnology and Oceanography* **44**: 1655-1666.
- Rothhaupt, K.O. 1990. Differences in particle size-dependent feeding efficiencies of closely related rotifer species. *Limnology and Oceanography* **35**: 16-23.
- Sakamoto, M., K.H. Chang and T. Hanazato. 2007. Plastic phenotypes of antennule shape in *Bosmina longirostris* controlled by physical stimuli from predators. *Limnology and Oceanography* **52**: 2072-2078.
- Sakamoto, M., T. Nagata, J.Y. Ha, S. Kimijima, T. Hanazato and K.H. Chang. 2015. Inducible defenses as factor determining trophic pathways in a food web. *Hydrobiologia* **743**: 15-25.
- Sato, T. 1939. Potamoplankton of the River Hang-gang in early winter. *Japanese Journal of Limnology* **10**: 128-130 (in Japanese).
- Sato, T. 1941. Biological notes on the brackish water lake kodokoon the Japan Sea coast of Korea. *Japanese Journal of Limnology* **11**: 85-88.
- Segers, H. 2007. A global checklist of the rotifers (Phylum Rotifera). *Zootaxa* **1564**: 1-104.
- Segers, H. 2008. Global diversity of rotifers (Rotifera) in freshwater. *Hydrobiologia* **595**: 49-59.
- Shiel, R.J. and G.G. Ganf. 1987. Inter- and intraspecific variations in limb morphology of some south-east Australian cladocerans: implications for particle capture. *Hydrobiologia* **145**: 85-91.
- Ślusarczyk, M. 1999. Predator-induced diapause in *Daphnia magna* may require two chemical cues. *Oecologia* **119**: 159-165.
- Smolina, I., S. Kollias, E.F. Møller, P. Lindeque, A.Y. Sundaram, J.M. Fernandes and G. Hoarau. 2015. Contrasting transcriptome response to thermal stress in two key zooplankton species, *Calanus finmarchicus* and *C. glacialis*. *Marine Ecology Progress Series* **534**: 79-93.
- Song, M.O. 1989. List of Korean species of freshwater Rotifera. *The Korean Journal of Systematic Zoology* **5**: 257-268.
- Song, M.O. 2014. Eight new records of monogonont and bdelloid rotifers from Korea. *Journal of Species Research* **3**: 53-62.
- Song, M.O. 2015. New Records of One Monogonont and 5 bdelloid Rotifers from Korea. *Korean Journal of Environment and Biology* **33**: 140-147.
- Song, M.O. and G.S. Min. 2015. A new species and ten new records of bdelloid rotifers from Korea. *Zootaxa* **3964**: 211-227.
- Song, M.O. and H.S. Kim. 1989. Monogonont Rotifers (Monogononta; Rotifera) Inhabiting several Lowland swamps in Kyngsangnam-do, Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **5**: 139-157.
- Song, M.O. and W. Kim. 1992. Three Brackish water rotifers from Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **8**: 325-330.
- Song, M.O. and W. Kim. 1996a. Taxonomic study on the digonont Rotifers of Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **12**: 53-59.
- Song, M.O. and W. Kim. 1996b. Taxonomic study on the digonont Rotifers of Korea: six new records of philodinid rotifers. *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **12**: 349-358.
- Song, M.O. and W. Kim. 2000. Bdelloid rotifers from Korea. *Hydrobiologia* **439**: 91-101.
- Soo, H. and C. Young. 1989. Freshwater cyclopoid copepods (Cyclopoida, Cyclopidae) of Korea. *Animal Systematics, Evolution and Diversity* **5**: 225-256.
- Sørnes, T.A. and D.L. Aksnes. 2004. Predation efficiency in visual and tactile zooplanktivores. *Limnology and Oceanography* **49**: 69-75.
- Sousa, W., J. Attayde, E. Rocha and E. Eskwazi-Santanna. 2008. The response of zooplankton assemblages to variations in the water quality of four man-made lakes in semi-arid northeastern Brazil. *Journal of Plankton Research* **30**: 699-708.
- Spaak, P., A. Denk, M. Boersma and L.J. Weider. 2004. Spatial and temporal patterns of sexual reproduction in a hybrid *Daphnia* species complex. *Journal of Plankton Research* **26**: 625-635.
- Spaak, P. and M. Boersma. 1997. Tail spine length in the *Daphnia galeata* complex: cost and benefits of induction by fish. *Aquatic Ecology* **31**: 89-98.
- Stansfield, J.H., M.R. Perrow, L.D. Tench, A.J. Jowitt and A.A. Taylor. 1997. Submerged macrophytes as refuges for grazing Cladocera against fish [-3pt] predation: observations on seasonal changes in relation to macrophyte cover and predation pressure. *Hydrobiologia* **342**: 229-240.
- Stemberger, R.S. 1988. Reproductive cost and hydrodynamic benefits of chemically induced defenses in *Keratella testudo*. *Limnology and Oceanography* **33**: 593-606.
- Stemberger, R.S. and J.J. Gilbert. 1985. Assessment of threshold food levels and population growth in planktonic rotifers. *Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie* **21**: 269-275.
- Sturner, R.W. and D.O. Hessen. 1994. Algal nutrient limitation and the nutrition of aquatic herbivores. *Annual Review of Ecology and Systematics* **25**: 1-29.

- Talling, J. 2003. Phytoplankton-zooplankton seasonal timing and the 'clear-water phase' in some English lakes. *Freshwater Biology* **48**: 39-52.
- Thorp, J.H., A.R. Black, K.H. Haag and J.D. Wehr. 1994. Zooplankton assemblages in the Ohio River: seasonal, tributary, and navigation dam effects. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **51**: 1634-1643.
- Tollrian, R. and C.D. Harvell. 1999. The ecology and evolution of inducible defenses. Princeton University Press, New Jersey.
- Tollrian, R. and E. Von Elert. 1994. Enrichment and purification of *Chaoborus* kairomone from water: further steps towards its chemical characteristics. *Limnology and Oceanography* **39**: 788-796.
- Tóth, L.G. and N.P. Zánkai. 1985. Feeding of *Cyclops vicinus* (Uljanin) (Copepoda; Cyclopoida) in Lake Balaton on the basis of gut content. *Hydrobiologia* **122**: 251-260.
- Tranvik, L.J. 1992. Allochthonous dissolved organic matter as an energy source for pelagic bacteria and the concept of the microbial loop. *Hydrobiologia* **229**: 107-114.
- Turner, P.N. 1986. Some rotifers from Republic of Korea. *Hydrobiologia* **137**: 3-7.
- Ueno, M. 1941. Introductory account of the biological survey of inland waters of northern Tyosen (Korea). *Japanese Journal of Limnology* **11**: 96-107.
- Van Dijk, G.M. and B. Van Zanten. 1995. Seasonal changes in zooplankton abundance in the lower Rhine during 1987-1991. *Hydrobiologia* **304**: 29-38.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.
- Von Elert, E. and C.J. Loose. 1996. Predator induced diel vertical migration in *Daphnia*; enrichment and preliminary chemical characterization of a kairomone exuded by fish. *Journal of Chemical Ecology* **22**: 885-895.
- Watanabe, Y. 1980. A study of the excretion and extracellular products of natural phytoplankton in Lake Nakanuma, Japan. *International Review of Hydrobiology* **65**: 809-834.
- Weider, L.J. and H.B. Stich. 1992. Spatial and temporal heterogeneity of *Daphnia* in Lake Constance; intra- and interspecific comparisons. *Limnology and Oceanography* **37**: 1327-1334.
- Winsor, G.L. and D.J. Innes. 2002. Sexual reproduction in *Daphnia pulex* (Crustacea: Cladocera): observations on male mating behaviour and avoidance of inbreeding. *Freshwater Biology* **47**: 441-450.
- Yamamoto, K. 1941a. The plankton of lake Fusenko of Northern Chosen (Korea). *Japanese Journal of Limnology* **11**: 108-111.
- Yamamoto, K. 1953. Studies on the rotatorian fauna of Korea. *Pacific Science* **7**: 151-164.
- Yamamoto, T. 1941b. The plankton of Tenti and Santien of Mt Hakuto. *Japanese Journal of Limnology*. **13**: 167-170.
- Yin, X.W. and C.J. Niu. 2008. Predatory rotifer *Asplanchna brightwellii* mediated competition outcome between *Brachionus calyciflorus* and *Brachionus patulus* (Rotifera). *Hydrobiologia* **610**: 131-138.
- Yoo, H.B. 1990. Ecological studies on the freshwater zooplanktonic rotifers in Lake Damyang. *Korean Journal of Ecology and Environment* **23**: 1-13.
- Yoo, K.I. and B.J. Lim. 1992. Seasonal succession in the abundance and community structure of zooplankton in Pal'tang Reservoir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **25**: 89-97.
- Yoon, S.M. 2010. Branchiopods: Arthropoda: Branchiopoda: Anostraca, Notostraca, Spinicaudata, Laevicaudata, Ctenopoda, Anomopoda, Haplopoda. *Invertebrate Fauna of Korea* **21**: 1-156.
- Yoon, S.M. and W. Kim. 1992. A taxonomic study of genus *Moina* (Branchiopoda, Cladocera, Moinidae) of Korea. *Korean Journal of Systematic Zoology* **8**: 89-105.
- Yoon, S.M. and W. Kim. 1993. Redescription of two chydorid species of genus *Leydigia* Kurz, 1875 (Branchiopoda, Anomopoda, Chydoridae) from Korea. *Korean Journal of Zoology* **36**: 380-390.
- Yoon, S.M. and W. Kim. 1995. *Alona quadrangularis* (O.F. Müller, 1785) (Branchiopoda, Anomopoda, Chydoridae) in Korea. *Korean Journal of Systematic Zoology* **11**: 265-274.
- Yoon, S.M. and W. Kim. 1997. Description of *Bosmina longirostris* (O.F. Müller) (Branchiopoda, Anomopoda, Bosminidae) in Korea, with notes on its ecology. *Korean Journal of Biological Sciences* **1**: 435-445.
- Yoon, S.M., S.H. Kim and W. Kim. 1996. Description of *Daphnia obtusa* Kurz (Branchiopoda, Anomopoda, Daphniidae) in Korea, with notes on distribution and ecology. *Korean Journal of Systematic Zoology* **12**: 359-374.