

미소서식처 유형별 지각류 (Cladocerans)의 분포 특성^{1a}

최종윤^{2*}

Spatial Distribution Pattern of Cladoceran Community in Accordance with Microhabitat Types^{1a}

Jong-Yun Choi^{2*}

요약

수생식물은 지각류의 종다양성과 풍부도를 결정하는 중요한 요인이지만, 식물의 종구성이나 구조에 대한 지각류의 영향은 충분히 고려되지 않았다. 남한은 수생식물이 피복되기 쉬운 습지나 저수지가 전국에 산재하고 있기 때문에 지각류를 포함한 생물 연구 시 수생식물에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 6가지 유형의 미소서식처에서 지각류 군집의 종수와 풍부도를 조사하고, 이 결과를 기반으로 서식처 보전과 효율적인 관리에 대해 고찰하고 한다. 지각류 군집의 높은 종수와 풍부도는 부유식물, 부엽식물, 그리고 침수식물이 함께 구성된 혼합된 식물 군락에서 목격되었다. 식물 군락에서 침수식물의 포함은 서식처 구조의 복잡성에 크게 기여하며, 지각류 군집의 종수와 풍부도를 증가시킬 수 있다. 이는 침수식물이 부재한 부유 및 부엽식물로만 구성된 식물 군락과 비교함으로써 침수식물의 효율성을 파악할 수 있다. 혼합된 식물 군락에서는 다른 식물 군락에 부재하는 지각류 종 (*Graptoleveris testudinaria*, *Ilyocryptus spinifer*, *Leydigia acanthocercoides*)이 출현함으로써 종다양성이 가장 높았다. 혼합된 식물 군락에서 침수식물의 점차적인 생물량 (g) 증가는 지각류 군집의 종수와 풍부도를 유의하게 증가시켰다 ($p < 0.05$). 이는 혼합된 식물 군락에서 침수식물의 증가가 지각류의 서식처로서 효율성에 긍정적인 영향을 미친다는 강력한 증거이다. 비록 침수식물은 수중에 침수되어 서식하기 때문에 경관적/미적인 가치에 크게 기여하지 않지만, 생물학적 측면에서 종다양성을 증가시키는 효과를 가지기 때문에 습지 창출/복원 시 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

주요어: 침수식물, 서식처 복잡성, 식물 군락, 종다양성, 습지 복원

ABSTRACT

Aquatic macrophytes are important factors in determining species diversity and abundance of cladocerans, but the effects of cladocerans on plant species composition or structure have not been fully considered. In South Korea, wetlands and reservoirs that are prone to covering aquatic macrophytes are scattered across the country, so it is necessary to consider on aquatic macrophytes study, when aquatic animals including cladoceran were studied. In this study, the species and abundance of cladocerans community in six microhabitat types are

1 접수 2023년 11월 29일, 수정 (1차: 2024년 5월 7일, 2차: 2024년 5월 14일), 게재확정 2024년 5월 15일
Received 29 November 2023; Revised (1st: 7 May 2024, 2nd: 14 May 2024); Accepted 15 May 2024

2 부경대학교 지속가능공학부 생태공학전공 조교수 Dept. of Ecological Engineering, Pukyong Univ., Yongsoro 48, Namgu, Pusan 48513, Korea (jyc311@pknu.ac.kr)

a 이 논문은 2023학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(202303880001, 미소서식처 유형별 지각류 분포 및 종조성 파악).

* 교신저자 Corresponding author: jyc311@pknu.ac.kr

investigated, and based on these results, habitat conservation and efficient management are suggested. The high species numbers and abundance of cladoceran communities were found in mixed plant communities consisting of free-floating, floating-leaved, and submerged plants. The inclusion of submerged plants in plant communities contributes significantly to the complexity of habitat structures, and may increase species and abundance of cladoceran communities. This can be compared to a plant community consisting only of free-floating and floating-leaved plants in the absence of submerged plants, thereby identifying the efficiency of submerged plants. In the mixed plant communities, species diversity was the highest due to the emergence of cladoceran species (*Graptoleveris testudinaria*, *Ilyocryptus spinifer*, and *Leydigia acanthococcides*) absent from other plant communities. The gradual increase in the biomass (g) of submerged plants in the mixed plant communities significantly increased the species numbers and abundance of cladoceran communities ($p < 0.05$). This is strong evidence that the increase of submerged plants in mixed plant communities has a positive effect on efficiency as a habitat for cladocerans. Although submerged plants do not contribute significantly to their landscape/aesthetic value because they are submerged in water, they have the effect of increasing species diversity in terms of biology, so they should be considered important when creating/restoring wetlands.

KEY WORDS: SUBMERGED PLANT, HABITAT COMPLEXITY, PLANT COMMUNITY, BIODIVERSITY, RESTORATION

서론

서식처 다양성(Habitat diversity)은 생태계를 공유하는 생물들의 공존과 종다양성을 증가시키는 중요한 요인이다 (Young, 2001; Kallimanis *et al.*, 2008). 생태학적 지위가 비슷한 생물종들은 선호하는 먹이자원이나 효율적인 서식 공간을 차지하기 위한 포식과 경쟁 등의 상호작용이 지속적으로 발생되며, 이는 어느 한 종이나 군집의 개체군 감소나 절멸을 야기할 수 있다 (Chase *et al.*, 2002). 서식처 다양성이 높은 지역에서 생태학적 지위가 비슷한 생물종 또는 군집들은 상이한 서식 공간을 활용함으로써 공존율을 높일 수 있다 (Kneitel and Chase, 2004; Jeong *et al.*, 2014). 생물 종 또는 군집들이 상이한 서식공간에서 분포할 경우 상호간에 접촉 확률이 낮아짐으로서 상호작용의 가속화를 감소시킬 수 있다. 또한, 이러한 다양한 서식 공간의 제공은 포식자와 피식자가 공존하고 있는 생태계에서 포식자의 무분별한 포식을 감소시킬 수 있다 (Dibble and Pelicice, 2008). 효율적인 피난처 공간이 존재할 시 포식자는 먹이 탐색의 용이성이 낮아짐으로서 먹이원의 가용성을 높일 수 있는 동시에 피식자는 생존확률을 높이고 안정적인 개체군 성장을 유도할 수 있다 (Thomaz and Cunha, 2010). 그래서 단순한 구조의 서식처가 조성된 생태계보다 복잡하고 이질적인 공간이 증가할수록 다양한 생물종 또는 군집이 공존할 가능성이 높아진다. 거암이나 자갈 등의 바닥 기질이나 나무, 고사목, 초본류 등과 같은 물리적 요인뿐만 아니라, 물의

흐름, 용존산소 농도, 그리고 pH와 같은 화학적 요인에 의해서도 서식처 구조와 다양성은 변화될 수 있다 (Choi *et al.*, 2014b). 또한, 다양한 요인들이 복합적으로 조성될 경우, 더욱 복잡한 서식 공간을 제공할 수 있다. 서식처의 복잡성은 다양한 생물의 서식을 유도하고 생물다양성을 증가시키는 요인으로 작용한다.

수생식물은 담수생태계에서 서식처의 구조와 효율성에 크게 기여한다 (Thomaz and Cunha, 2010; Choi and Kim, 2020). 수생식물 군락은 계절 또는 공간에 따라 상이한 종에 의해 구성되며, 이는 서식처의 물리적인 구조에 영향을 미친다 (Choi *et al.*, 2014c). 붕어마름이나 말즘 등의 침수식물이 포함된 식물 군락은 다른 식물 군락 (부유식물, 부엽식물, 그리고 정수식물)보다 상대적으로 더욱 복잡한 구조를 가진다 (Pelicice *et al.*, 2008). 침수식물의 잎과 줄기 구조는 다른 식물보다 이질적인 구조를 가지며, 수중 공간 전체를 점유하는 특성을 가지기 때문에 수표면 공간만을 피복하는 부유식물이나 매끄러운 표면의 줄기만이 침수된 정수식물과 분명한 형태적 차이를 가진다 (Pawlikowski and Kornijow, 2023). 서식처의 물리적인 구조는 서식 생물들의 분포와 상호간에 관계 형성에 강하게 영향을 미친다. 선행 연구들은 수생식물이 생물 군집에 미치는 효과를 ‘포식자-피식자 상호작용’에 주목하였다 (Manatunge *et al.*, 2000; Nurminen *et al.*, 2010). 담수생태계 먹이망에서 최상위 포식자로서 위치하고 있는 어류는 무척추동물이나 동물플랑크톤에게 위협적인 포식자이지만, 이들의 포식 활동은 수생

식물의 종조성과 서식처 구조에 따라 영향받는다 (Ferreiro *et al.*, 2014). 어류는 시각을 활용하여 먹이원을 탐색하기 때문에 복잡한 서식처 구조는 이들의 포식 활동에 분명한 방해요인으로 작용한다 (Padial *et al.*, 2009). 지각류나 요각류와 같은 동물플랑크톤은 치어의 주요한 먹이원으로서 빈번하게 소비되지만, 수생식물에 의해 피복된 공간에서 이들에 의한 동물플랑크톤 소비율은 급격하게 낮아진다. 동물플랑크톤의 피난처로서 수생식물 군락의 효율성은 물리적으로 복잡할수록 증가되는 것으로 알려져 있다 (Mamani *et al.*, 2019). 그래서, 수생식물에 의한 피복률이 상대적으로 높은 습지는 생물다양성이 높지만, 깊은 수심으로 인해 수생식물이 상대적으로 적은 저수지나 호수 등은 생물다양성이 상대적으로 낮다.

담수생물 중 지각류는 수생식물을 서식처로서 활용하는 빈도가 가장 높은 분류군이다. 지각류 군집은 담수생태계 먹이망에서 1차 소비자로서 위치하며, 어류나 무척추동물의 먹이원으로 빈번하게 활용되기 때문에 이들을 회피하기 위해 수생식물을 피난처로서 활용한다 (Padial *et al.*, 2009). 수중에서 수생식물의 잎과 줄기에 의해 조성된 미소서식처 공간은 상대적으로 크기가 작은 지각류에게 효율적인 피난처 공간을 제공할 수 있다 (Sagrario *et al.*, 2009). 특히, 침수식물은 잎과 줄기가 모두 수중에 침수되어 있어 다른 식물 유형보다 복잡한 구조를 가지며, 이질적인 공간을 야기하기 때문에 지각류의 서식처로서 선호될 수 있다 (Meerhoff *et al.*, 2003). 어류와 같은 포식자는 침수식물의 줄기나 잎에 의한 복잡한 공간에 은닉한 지각류 개체를 탐색하기 어렵기 때문에 지각류 군집은 식생대에서 높은 생존율을 보장받을 수 있다 (Balayla and Moss, 2003; Li *et al.*, 2024). 그래서, 지각류 군집은 침수식물에 의해 피복된 공간에서 안정적인 개체군 성장을 수행할 수 있다. 선행연구들은 침수식물이 포함되거나 이들의 풍부도가 높은 식생대가 존재할수록 지각류의 종다양성과 풍부도가 증가되는 것으로 제안했다 (Meerhoff *et al.*, 2003; Kuczyńska-Kippen and Nagengast, 2006). 대조적으로, 구조가 상대적으로 단순한 식물 종에 의해 우점되거나 식물 피복이 적은 습지나 저수지에서는 지각류의 종다양성 낮다 (Thomaz and Cunha, 2010). 정수식물은 물에 두꺼운 줄기만이 침수되기 때문에 정수식물에 의해 피복된 공간은 서식처 구조가 상대적으로 단순하다 (De Szalay and Resh, 2000). 수생식물의 줄기와 잎은 지각류 군집에게 효율적인 서식처 공간을 제공할뿐만 아니라, 부착 성향을 가진 지각류의 기질 표면으로서 이용되기도 한다 (Choi *et al.*, 2014a). *Chydorus*, *Alona*, 그리고 *Picripleuroxus*에 속한 지각류 종들은 수생식물의 줄기와 잎 표면에 부착하여 서식한다. 이들 부착성 지각류 종들은 부유성 종과는 다르게 움직임이 거의 없기 때문에

포식자의 먹이 탐색이 용이하지 않아, 수생식물이 풍부한 습지나 저수지에 높은 풍부도로서 우점할 수 있다 (Sakuma *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2014a). 이와 대조적으로 *Daphnia*와 *Simocephalus*에 속한 종과 같은 부유성 종은 수중에 부유하는 식물플랑크톤을 여과 섭식하기 위해 지속적인 움직임 가지기 때문에 포식자에게 비교적 쉽게 소비되며, 낮은 밀도를 가진다 (Pont and Amrani, 1990).

선행 연구에서 수생식물에 기반한 서식처 구조와 특성이 지각류 군집 분포에 미치는 영향은 중요하게 다루어 왔지만, 이에 대한 정보는 여전히 부족하다. 남한에는 얕은 수심을 가진 습지나 저수지가 전 국토에 다양하게 산포되어 있으며, 농업용수로서의 활용 측면 때문에 농경지나 주거지 인근에 주로 분포하므로 지속적인 영영역의 유입으로 인해 수생식물이 발달하기 용이하다. 이러한 환경적 특성 때문에 생물 분포나 군집간 상호작용에 대한 규명 시 수생식물에 의한 서식처 특성을 반드시 고려할 필요가 있다. 특히, 지각류 군집은 다양한 어류의 먹이원으로 활용되는 측면 탓에 담수생태계의 기능과 건강성을 평가하기 위해 중요하게 활용될 수 있다. 남한에 위치한 담수생태계는 다른 생태계 (육상, 해양 등)보다 범위가 상대적으로 좁고 연속성이 낮기 때문에 다양한 생물들은 종 또는 군집간에 접촉할 확률이 높고 (Wellborn *et al.*, 1996), 상대적으로 가속화된 상호작용 (i.e. 경쟁 및 포식 등)이 발생한다 (Johnson *et al.*, 2007). 수생식물에 의해 야기되는 서식처 다양성은 이러한 가속화된 상호작용을 조절하는 역할을 수행하며, 생물군집간에 상호작용의 가속화를 낮추고 공존율을 높이는 데 기여한다 (Franklin *et al.*, 2008). 따라서 습지나 저수지의 다양한 공간에서 상이한 수생식물의 종조성 및 군락 구조가 지각류의 종다양성 및 풍부도에 미치는 영향을 파악하는 것은 습지의 기능과 먹이망 구조 파악에 기여할 수 있으며, 더 나아가 생태계 건강성을 유지하기 위한 습지/저수지 관리 전략을 수립하는데 적절한 정보를 제공할 수 있다. 특히, 지각류 군집은 담수생태계를 대표하는 1차 소비자이며, 이들의 분포와 종다양성을 연구하는데 수생식물은 반드시 고려해야 할 사항이다.

본 연구에서는 수생식물이 다양하게 분포하는 저수지에서 수생식물의 주요 군집별 지각류의 종조성과 풍부도를 조사 및 평가하였다. 전술하였듯이, 지각류 군집은 어류나 무척추동물과 같은 서식 생물상의 상호작용에 가장 강하게 영향을 받는 생물 군집이기 때문에 수생식물의 종조성 및 군락 구조에 상이한 영향을 받을 것으로 예상된다. 침수식물은 수생식물의 생활형 가장 복잡한 형태를 가진 종이므로, 이들이 포함된 식물 군락은 더 다양한 지각류 종과 풍부한 밀도를 가질 것으로 예상된다. 이러한 결과는 추후, 습지와 같은 담수생태계의 효율적인 관리 전략을 제시하거나,

서식처 기능 강화를 위한 복원 시 기초 자료로서 활용될 수 있다. 이에 기반하여 본 연구에서는, 식물 군락 기반의 다양한 미소서식처 유형을 구분하고, 지각류의 종조성과 풍부도를 파악함으로써, 지각류의 종다양성 확보와 생태계 건강성 강화를 위한 보전 및 관리 전략에 대해 고찰하였다.

연구방법

1. 연구대상지 현황

연구지역인 장척호는 남강과 낙동강이 합류되는 배후 공간에 위치한 저수지이다 (Figure 1). 장척호의 평균 수심은 0.5~2.5m의 범위를 가지며, 저수량은 약 200만 톤 정도이다. 낙동강과 직접적으로 연결되지 않아 본류에 대한 영향이 상대적으로 낮은 고립된 수체 형태이며, 인근 관곡천과 저수로, 그리고 소하천으로부터 수원을 공급받는다. 그러나, 저수지의 형태 및 구조상 수원의 유입·유출이 불리한 구조이기 때문에 수심과 유입 수량이 계절에 따라 급격하게 변동된다. 주로 강우량이 집중되어 발생하는 여름에 많은 수원 유입으로 인해 수심이 깊어지는 반면, 다른 계절에는 수원 유입량이 상대적으로 낮아 수심이 얕은 특징을 가진다. 장척호의 수변 지역은 0.5~1m 정도로 얇지만, 중앙부로 갈수록 점차적으로 깊어지는 형태를 가진다. 이는 많은 저수량을 확보하기 위한 저수지의 전형적인 구조적 형태이다.

2. 식생현황 및 조사지역 선정

장척호에서 수생식물은 수변부를 중심으로 넓게 분포하며, 수심 및 토양 등 환경적 특성에 따라 갈대, 부들, 털물참새피, 줄, 생이가래, 개구리밥, 그리고 붕어마름 등 수생식물

이 넓은 면적에 피복되어 있다. 수생식물에 의한 수표면 피복률은 수심이 깊은 중앙부로 갈수록 낮아지며, 중앙부는 식물이 거의 없는 개방 수면이 넓은 면적을 점유하고 있다. 장척호 주변 지역에는 농경지나 주거지역이 인접하고 있어, 인이나 질소와 같은 영양염류가 지속적으로 유입되고, 이는 수생식물이 발달되기 용이한 환경을 조성한다. 그래서, 장척호는 수생식물의 종조성에 기반한 다양한 물리적 서식처 구조가 조성되므로 본 연구의 주요한 목적인 미소서식처 유형에 따른 지각류의 풍부도와 종다양성에 미치는 효과를 평가하기 용이하다.

이화학적 요인의 측정 및 지각류 채집의 용이성이 충분히 확보되는 5가지 식물 군락 유형을 조사정점으로 선정하였다. 이 5개 식물 군락은 장척호에서 빈번하게 목격되어 지각류 군집 다양성에 영향을 미칠 가능성이 높은 서식처 유형이다. 먼저, 육상과 가까운 수변부에 넓게 분포하는 갈대와 털물참새피 군락은 각각 형태가 명확하고 넓은 공간을 차지하므로 각각 조사대상 식물 군락으로 선정되었다. 갈대와 털물참새피 군락 내에는 이 식물 중 외에 부엽식물이나 부엽식물, 침수식물이 부재하거나 적게 피복된다. 세 번째로 연 군락이 선정되었다. 장척호에서 연 군락은 갈대와 털물참새피 군락 다음으로 깊은 수심을 가진 지역에 넓게 분포하였다. 네 번째로 부유 및 부엽식물 군락이었다 (개구리밥-생이가래-마름에 의해 피복). 개구리밥 및 생이가래와 같은 부엽식물과 마름과 같은 부엽식물로 구성된 이 군락은 주로 수표면 공간만을 피복하기 때문에 수중으로 빛 유입이 제한되어 침수식물이 발달되기 어려운 환경이었다. 다섯 번째로 혼합식물 군락이었다 (개구리밥-생이가래-마름-붕어마름-말즘에 의해 피복). 이 군락은 네 번째 식물 군락인 부유 및 부엽식물 군락에 비해 부유 및 부엽식물의 수표면 우점도가 상대적으로 낮아 붕어마름이나 말즘과 같은 침수식물이 성장할 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구에서는, 전술한 5가지 유형의 식물 군락을 포함하여 수생식물이 부재한 개방 수면까지 총 6개의 미소서식처 유형을 대상으로 이화학적 요인과 지각류 군집의 풍부도·종조성을 조사하였다. 최종적으로, 각 6가지 미소서식처 유형은 개방 수면 (open water zone, O), 갈대 군락 (area covered by *Phragmites communis* zone, Pc), 털물참새피 군락 (area covered by *Paspalum distichum* zone, Pd), 연 군락 (area covered by *Nelumbo nucifera* zone, Nn), 부유 및 부엽식물 군락 (area covered by Free-floating and Floating-leaved plant, FF+FL), 혼합식물 군락 (area covered by Mixed plant zone, M)으로 명명하였다. 각 미소서식처 유형에 대한 이화학적 요인과 지각류 군집의 일반적인 특성을 파악하기 위해, 각 미소서식처 유형별로 유사한 식물 피복률과 수심을 기반으로 5개씩 선정되었으며, 총 30개 지점에서 이화

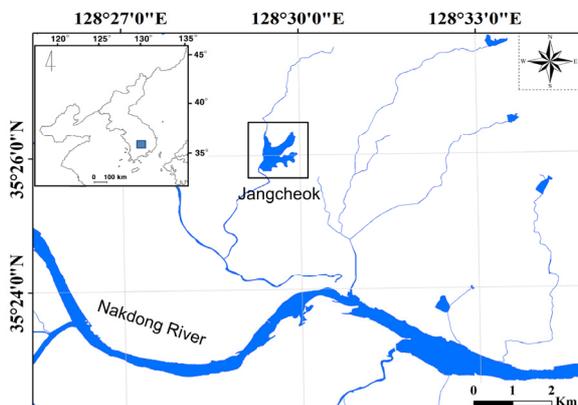


Figure 1. Map of the study site (Jangcheok Reservoirs) located at mid-lower section of Nakdong River.

학적 요인의 측정과 지각류 군집의 채집을 수행하였다. 각 미소서식처 유형들의 구조와 특성이 가지는 영향을 충분히 고려 적용시키기 위해 각 조사지점들은 최소 면적이 1 m² 이상으로 각 식물 군락들이 완전하게 피복된 지역을 선정하였다. 개방 수면은 식물이 부재하며 완전하게 개방된 수면을 조사지역으로 선정하였다. 또한, 이화학적 요인의 측정과 지각류 군집의 채집은 각 식물 군락의 경계면이나 다른 서식처 유형과 인접한 지역을 최대한 배제하였으며, 각 미소서식처 유형의 중앙부라고 판단되는 지점에서 조사를 수행하였다.

3. 이화학적 요인 측정 및 지각류 채집

각 미소서식처 유형에서 이화학적 요인의 측정과 지각류 채집은 봄 시기 (5월)에 수행되었다. 장척호를 포함한 낙동강 유역은 강우량이 여름에 집중되고 다른 계절에는 상대적으로 적은 계절적 편향이 발생하고, 여름 강우량의 정도에 따라 종종 가을까지 영향받기 때문에 강우량을 제외한 다른 환경요인에 의한 영향을 평가하기 위해서는 봄 시기가 적절하다 (Choi *et al.*, 2015). 선행 연구에서도 수생식물에 대한 생물의 분포나 종조성에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 여름과 가을 시기에 집중된 강우량에 의한 수표면 파동 및 격류를 반드시 감안해야 한다고 제시하고 있다 (Jeong *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2020). 따라서, 본 연구의 주요 목적인 미소서식처의 구조와 특성이 지각류 군집의 풍부도와 종다양성에 미치는 영향을 평가하기 위해 봄 시기가 적당하다고 판단하였다.

각 미소서식처 유형에서 지각류 군집을 채집하기 위해 10 L의 물이 취수되었다. 수생식물에 의해 피복된 미소서식처 유형에서 지각류 군집은 수중에서 부유하는 종 (planktonic species) 뿐만 아니라, 수생식물의 잎이나 줄기 표면에 부착되어 서식하는 종 (epiphytic species) 또한 분포하기 때문에, 이 같은 특성을 고려하여 원수 채집 시 식물의 잎이나 줄기를 물과 함께 채집하여 최대한 다양한 지각류 종이 채집되도록 유도하였다. 채수된 물은 32µm 망목의 네트에 여과시킨 후 70ml로 농축한 후 포르말린 5%로 고정하였다. 고정된 시료는 실험실로 운반하여, 무작위로 1ml를 취수하여 플랑크톤 계수챔버 (SR chamber)에 넣고, 현미경을 이용하여 지각류의 종 수준까지 분류한 후 아래 식과 같이 리터 (L) 당 개체수로 환산하였다 (Mizuno and Takahashi, 1999). 각 샘플의 대표적인 지각류 군집의 풍부도와 종다양도 산출을 위해 현미경 검증은 70ml 지각류 샘플에서 1ml씩 5번을 검증하였으며, 최종적으로 5ml 당 지각류 개체수를 계수되었다. 아래 식에서 지각류 개체수는 1ml씩 5번을 검증하여 최종 5ml 내에 분포하는 지각류 개

체수가 계수되었으므로 총 70ml의 샘플 내 지각류 개체수로 환산하기 위해 14배로 곱한 후 (총 70ml 내 지각류 개체수로 환산), 이를 10L로 나누어 L당 개체수로 환산하였다.

$$\text{각 미소서식처 내 지각류의 개체수} = 5\text{ml당 지각류 개체수} \times 14 / 10\text{L}$$

지각류 군집의 채집 후, 각 미소서식처 유형에서는 수온, 용존산소, pH, 전기전도도, 탁도, 엽록소a, 총인, 그리고 총질소 등 8개의 이화학적 요인 항목이 측정되었다. 8개 이화학적 요인의 항목 중 수온, 용존산소, pH, 전기전도도 등 4개 항목은 각 미소서식처로부터 약 5L의 원수 채수 후 즉시 기기를 이용하여 측정되었다. 안정적인 이화학적 요인의 측정을 위해 센서 투입 후 값의 변동성이 낮아지기까지를 기다린 후 변동이 적은 시기의 값을 기록하였다. 수온과 용존산소의 측정은 DO meter (YSI DO Meter; Model 58)를 이용하였으며, pH 측정기 (Orion pH Meter; Model 58)와 전기전도도 측정기 (Fisher Conductivity meter; Model 152)는 pH와 전기전도도를 측정하기 위해 활용되었다. 전술한 4가지 항목 외 탁도, 엽록소a, 총인, 총질소 등의 4가지 항목은 5L의 원수 채수 후 실험실로 운반되어 분석되었다. 탁도는 탁도측정기 (Model 100B)를 이용하여 10ml 씩 5번 측정되었으며, 엽록소a, 총질소, 그리고 총인은 Wetzel and Likens (2000)의 방법에 준하여 흡광도기기를 이용하여 분석되었다.

수생식물 군락 내 종 조합과 생물량 변화가 지각류 군집의 종수와 풍부도에 미치는 영향을 상세하게 평가하기 위해 추가적인 조사가 수행되었다. 전술한 6가지 미소서식처 유형에 대한 지각류 군집의 종수와 풍부도는 혼합된 식물 군락에서 높았으며, 추가적인 연구는 혼합된 식물 군락에서 시행되었다. 혼합된 식물 군락은 다른 식물군락보다 지각류 군집의 높은 종수와 풍부도를 가지기 때문에 식물의 생물량 변화에 따라 상이한 지각류 군집의 종수와 풍부도가 나타날 수 있다는 가설을 수립하였다. 이 추가적인 연구에서는 이러한 식물의 생물량 변화에 따른 서식처 구조의 차이가 지각류 군집에게 미치는 영향을 평가하고 고찰하고자 하는 목적을 가진다. 특히, 침수식물은 서식처 구조에 미치는 효과가 분명하므로, 본 추가적인 연구에서는 침수식물의 생물량을 기반으로 조사를 수행하였다. 혼합된 식물 군락에서 침수식물의 생물량이 지각류 군집의 종수와 풍부도에 미치는 영향을 평가하기 위해 혼합식물 군락 (Mixed) 10개소를 추가 선정하여 지각류 군집의 종수와 풍부도를 조사하였다. 혼합된 식물 군락에서 침수식물에 대한 효과와 비교하기 위해 지각류 군집의 종수와 풍부도가 가장 적은 갈대 군락

과 비교하였다. 이를 위해, 갈대 군락 10개소 또한 추가적으로 선정되었다. 혼합된 식물 군락과 갈대군락의 총 20개소는 방형구(0.5x0.5m)를 이용하여 무작위적으로 선정한 후 지각류 군집의 채집이 수행되었다. 각 식물 군락의 중앙부에서 10L의 물이 채집되었으며, 채집된 물은 32 μ m 망목의 네트에 여과시킨 후 70ml로 농축된 물을 포르말린 5%로 고정하였다. 고정된 지각류 시료는 현미경을 이용하여 종 수준까지 분류한 후 리터 (L) 당 개체수로 환산하였다 (Mizuno and Takahashi, 1999). 지각류 군집의 채집 후, 각 방형구 내에서는 침수식물과 갈대의 건조량(g) 측정을 위한 식물 채집이 수행되었다. 수중 서식처에 직접적으로 미치는 영향을 평가하기 위해 수면 위로 난 줄기나 꽃/ 땅속에 난 뿌리 등은 가위로 잘라내고 직접적으로 수중에 침수된 줄기와 잎만을 채집하였다. 각 방형구별로 채집된 식물체는 실험실로 운반하여, 60 $^{\circ}$ C에서 48시간 동안 건조시킨 후 무게를 측정하였다.

4. 자료 분석

6개의 미소서식처 유형 (개방 수면, 갈대 군락, 털물참새 피 군락, 연 군락, 부유 및 부엽식물 군락, 혼합식물 군락)간 이화학적 요인 및 지각류 군집의 종수와 풍부도의 통계적 차이를 규명하기 위해 일원변량분석 (one-way analysis of variance, ANOVA)을 실시하였다. 미소서식처 유형간 지각류 군집의 유의한 차이는 Duncan 검정법 (Duncan's multiple-range test)으로 사후검정분석 (Post-Hoc Test)을 통하여 얻어졌으며, 각 차이는 알파벳 (A, B, C, D 또는 E)으로 표기되었다. 통계 분석에 대한 적용 전 지각류 군집 데이터는 로그값으로 변환하여, 각 종의 풍부도 값의 범위 차이를 감소시켰다. 모든 분산분석은 SPSS 통계프로그램 (v.24)를 이용하여 분석되었다.

결과 및 고찰

1. 미소서식처 유형에 따른 이화학적 요인과 동물플랑크톤 군집 변화

미소서식처 유형별 8개 이화학적 요인들은 봄 시기의 전형적인 육수학적 특성에 의해 지배되었다. 장척호와 같은 얕은 수심을 가진 저수지나 습지는 강이나 하천과 같은 유수생태계와 비교할 때 물 흐름 발생이 비교적 적고, 정체 수역을 형성하기 때문에 계절에 따라 상이한 이화학적 범위를 가질 수 있다 (Magee and Kentula, 2005). 남한에 위치한 대부분의 습지에서 측정된 수온은 이화학적 요인 중 분명한

계절성을 가진 항목으로, 봄 시기 (4-6월)에 15~20 $^{\circ}$ C 정도의 범위를 가지며, 여름 (7-8월)이 되면 25 $^{\circ}$ C 이상으로 증가되었다가, 가을 (10-11월)로 접어들면서 다시 봄 수준으로 감소하는 분명한 계절 곡선을 가진다. 이와 같은 계절성은 담수생태계의 유형과 특징에 따라 상이하지만, 평균적인 계절 경향은 비슷하다. 일반적으로, 장척호와 같이 수생식물에 의해 피복된 습지나 저수지는 식물에 의한 그늘 효과 때문에 수생식물이 부재한 지역보다 수온이 상대적으로 낮다 (Picard *et al.*, 2005).

본 연구에서 측정된 8가지의 이화학적 요인 중, 수온 (water temperature), 용존산소 (DO), 탁도 (turbidity), 그리고 엽록소a 농도는 미소서식처 유형에 따라 분명한 차이가 나타났다 (Table 1과 2). 수온은 6가지 미소서식처 유형 중, 개방 수면 (open water zone)에서 가장 높았으며, 남아있는 5개 미소서식처 유형간에는 유의한 차이가 없었다. 일원변량분석 (One-way ANOVA)을 이용한 사후검정분석 (post hoc test)에서도 개방 수면에서 측정된 수온은 수생식물에 의해 피복된 5개 미소서식처와 다른 집단(A)으로 지정되었다. 수생식물에 의해 피복된 5개 미소서식처는 B와 C 집단으로 구분되었다. 이러한 상이함은 전술하였듯이 수생식물에 의한 그늘 효과에 의해 유도된 것으로 판단된다. 수생식물에 의해 그들이 형성된 5가지 유형의 미소서식처는 빛이 수표면에 직접적으로 유입되는 개방수면보다 수온이 낮을 수 있다. 용존산소 또한 수온과 비슷한 사유로 인해 미소서식처 유형간 분명한 농도 차이가 발생한 것으로 판단된다. 용존산소 또한 6가지 미소서식처 유형 중 개방 수면에서 가장 높았으며, 수생식물에 의해 피복된 5개 미소서식처 유형과 다른 집단(A)으로 구분되었다. 수생식물에 의해 피복된 5개 미소서식처는 B와 C 집단으로 구분되었다. 수생식물에 의해 피복된 5개 미소서식처에서 측정된 용존산소 농도는 개방 수면보다 상대적으로 낮았다. 낮은 물 흐름과 수생식물에 의한 과도한 수표면 피복은 대기 중의 산소가 수중으로 유입되는 것을 방해하므로, 식생대에서는 용존산소의 농도가 일반적으로 낮다 (Casanova and Brock, 2000). 또한, 수생식물은 다양한 생물들의 서식처로서 활용되므로 유기물의 함양이 높고 미생물에 의한 부패가 지속적으로 발생되므로 용존산소가 낮을 수 있다 (Yarwood, 2018). 엽록소a 농도 또한 수생식물에 의해 영향받는다. 수생식물은 수표면에 그늘을 형성하거나 질소가 인과 같은 영양염을 흡수하므로 식물플랑크톤의 성장과 발달을 감소시킬 수 있다 (Bhat *et al.*, 2015). 그래서, 수생식물의 존재는 특정 식물플랑크톤 종의 우점을 방해하고, 다양한 종이 공존할 수 있도록 유도한다 (Søndergaard and Moss, 1998). 이것은 지각류와 같은 동물플랑크톤이 소비하기에 용이한 먹이원의 질과 양이 제공하므로 수생식물에 의해 피복된 지역은 식물플랑크톤을 소비

하는 무척추동물이 분포하기에 효율적이다 (Choi *et al.*, 2016). 본 연구에서 또한 수생식물에 의해 피복된 미소서식처 유형에서 측정된 엽록소a 농도는 수생식물이 부재한 개방수면보다 상대적으로 낮았다. 사후검정분석(post hoc test)에서도 개방수면에서 측정된 엽록소a 농도는 다른 미소서식처 유형과 다른 집단(A)으로 분명하게 구분되었다. 수생식물이 부재한 개방수면에서 식물플랑크톤은 질소와 인 함량을 식물과 공유하지 않기 때문에 개방수면은 특정 식물플랑크톤 중에 의해 과도하게 우점될 수 있다. 이러한, 개방수면(open water zone)에서 식물플랑크톤의 우점과 높은 풍부도는 탁도의 증가를 야기하는 하는 요인이다. 탁도는 수중을 부유하는 물질뿐만 아니라 식물플랑크톤과 같은 유기물에 의해서도 높게 발생될 수 있다 (Austin *et al.*, 2017). 본

연구에서 또한 엽록소a와 비슷하게 탁도 또한 개방수면이 수생식물에 의해 피복된 미소서식처 유형보다 높았으며, 사후검정분석(post hoc test)을 통해서도 분명하게 다른 집단(A)으로 구분되었다. 이러한 결과는 수생식물이 식물플랑크톤을 감소시키는 효과뿐만 아니라, 영양염류나 토사 등의 미립자를 정화하는 기능 때문에 발생한 것으로 판단된다. 수온, 용존산소, 탁도, 엽록소a 외에 남아있는 이화학적 요인들은 (pH, 전기전도도, 총질소, 그리고 총인) 6가지의 미소서식처 유형에 따라 유의한 차이를 보이지 않았다. 이들은 수생식물에 의한 효과에 직접적으로 영향받지 않고 거시적인 분포를 특성을 가지기 때문에 공간에 따른 차이는 다소 적은 것으로 판단된다.

Table 1. Eight physio-chemical factors in six microhabitat types. O, open water zone, Pc, area covered by *Phragmites communis*, Pd, area covered by *Paspalum distichum*, Nn, area covered by *Nelumbo nucifera*, FF+FL, area covered by Free-floating and Floating-leaved plants, Mixed, area covered by Free-floating, Floating-leaved, submerged plants

Factors	Microhabitat					
	O	Pc	Pd	Nn	FF+FL	Mixed
Water temperature	19.2±0.1	18.3±0.1	18.2±0.1	18.2±0.1	18.2±0.1	18.5±0.2
Dissolved oxygen	53.8±1.1	22.5±0.5	20.4±0.8	21.3±0.9	20.3±1.0	20.4±1.0
pH	7.2±0.1	7.2±0.1	7.1±0.1	7.1±0.1	7.2±0.1	7.2±0.1
Conductivity	215.8±3.5	218.6±3.0	214.6±3.2	216.8±2.4	214.3±2.4	213.3±2.1
Turbidity	8.0±0.3	5.9±0.5	6.3±0.1	6.1±0.1	4.8±0.4	4.7±0.4
Chlorophyll a	7.6±0.7	5.5±0.2	6.9±0.5	6.3±0.3	4.9±0.2	4.4±0.1
Total nitrate	1.5±0.0	1.6±0.0	1.6±0.0	1.5±0.0	1.6±0.0	1.6±0.0
Total phosphorus	0.1±0.0	0.1±0.0	0.2±0.0	0.2±0.0	0.1±0.0	0.1±0.0

Table 2. One-way ANOVA comparing the eight physio-chemical factors in six microhabitat. The post hoc test results indicate significant differences between groups, represented by different letters (A, B, C, and D). df, degrees of freedom; F, F-statistic. O, open water zone, Pc, area covered by *Phragmites communis*, Pd, area covered by *Paspalum distichum*, Nn, area covered by *Nelumbo nucifera*, FF+FL, area covered by Free-floating and Floating-leaved plants, Mixed, area covered by Free-floating, Floating-leaved, submerged plants

Fac.	df	F	p	Post-Hoc Test Results					
				O	Pc	Pd	Nn	FF+FL	Mixed
Water temperature	5, 24	30.240	<0.001	A	BC	BC	BC	C	B
Dissolved oxygen	5, 24	884.874	<0.001	A	BC	C	BC	C	C
pH	5, 24	1.313	0.292	-	-	-	-	-	-
Conductivity	5, 24	1.855	0.140	-	-	-	-	-	-
Turbidity	5, 24	55.613	<0.001	A	BC	B	B	C	C
Chlorophyll a	5, 24	42.564	<0.001	A	C	AB	B	CD	D
Total nitrate	5, 24	1.393	0.262	-	-	-	-	-	-
Total phosphorus	5, 24	2.035	0.110	-	-	-	-	-	-

지각류 군집의 종수와 풍부도는 6가지 미소서식처 유형 간에 상이한 차이가 목격되었다 (Figure 2과 Table 3; One-way ANOVA, $p > 0.01$). 지각류의 종수와 풍부도는 혼합된 식물 군락 (Mixed)에서 가장 높았으며, 그 다음으로는 부유 및 부엽식물 군락에 의해 피복된 공간으로 나타났다. 일원 변량분석(One-way ANOVA)을 활용한 사후검정분석(post hoc test)에서도 혼합된 식물 군락 (Mixed)과 부유 및 부엽식물 (FF+FL)은 각각 다른 집단으로 구분되어 다른 미소서식처 유형과 분명하게 구분되었다. 합된 식물 군락은 부유식물, 부엽식물, 그리고 침수식물이 함께 공존하는 지역으로 서식처 구조의 복잡성이 가장 높고, 다양한 미소서식처 공간이 존재하기 때문에 다양한 지각류 종에 의해 선택될 수 있는 것으로 사료된다 (Lauridsen *et al.*, 1996; Choi *et al.*, 2014c). 혼합된 식물 군락이 높은 지각류 군집의 풍부도와 종수에 기여하는 것은 침수식물이 포함되었기 때문으로 판단된다. 다른 미소서식처 유형인 부유 및 부엽식물 군락 (FF+FL)과 혼합된 식물 군락 (Mixed)간 차이는 침수식물의 유무이며, 침수식물이 포함된 혼합된 식물 군락에서 더 많은 지각류 군집의 풍부도와 종수가 목격된 것으로 보아 침수식물의 포함이 지각류의 종수와 풍부도가 증가에 크게 기여한 것으로 판단된다. 선행 연구들 또한 침수식물은 잎과 줄기의 배열이 이질적이고 복잡하기 때문에 이 식물 생활형 (life type)이 포함된 식물 군집은 지각류와 같은 미소동물 (Microinvertebrate)들에게 효율적인 서식 공간을 제공할 수 있다고 제안했다 (Pelicice *et al.*, 2008; Manatunge *et al.*, 2000). 개구리밥이나 생이가래와 같은 부유식물이나 마름 등의 부엽식물은 수표면 공간만을 피복할 뿐만 아니라, 뿌리나 줄기 사이 공간이 상대적으로 협소하므로 상대적으로 크기가 큰 지각류를 위한 서식처 공간으로 적합하지 않다 (Choi *et al.*, 2014b). 그래서, 부유식물은 주로 윤충류와 같이 상대적으로 작은 몸 크기를 가진 종에 의해 선택된다. 그러나, 침수식물에 의해 피복된 지역이 적은 면적을 점유하거나 부재할 때 지각류는 부유식물에 의해 피복된 지역을 선택하는 비율이 높아지기도 한다 (Cazzanelli *et al.*, 2008). 본 연구에서도 부유 및 부엽식물 군락은 혼합된 식물 군락 다음으로 높은 지각류의 종수와 풍부도에 의해 지배되었다.

개방 수면, 갈대, 연 군락에서 채집된 지각류 군집의 종수와 풍부도는 차이가 미미했지만, 갈대 군락은 혼합된 식물 군락 및 부유 및 부엽식물 군락을 제외하고 지각류 군집의 풍부도가 높았다. 사후검정분석(post hoc test)에서 갈대 군락에서 채집된 지각류 군집의 풍부도는 다른 미소서식처 유형과 다른 집단으로 구분되었다 (B 집단; Table 3). 일반적으로, 갈대와 같은 정수식물은 다른 수생식물 종보다 서식처의 구조가 단순하여 많은 지각류 군집이 서식하기 효율

적이지 않지만, 갈대는 다른 정수식물과는 다르게 줄기와 잎의 배열이 복잡하여 상대적으로 많은 수의 지각류 개체가 분포할 수 있다. 그러나 지각류의 종수와 같은 경우, 갈대나 연 군락간 비슷한 종수를 가지는 것으로 보아, 특정 지각류 종이 풍부한 것으로 파악된다. 그 외 개방수면, 툴참새피, 연 군락에서 채집된 지각류 군집의 풍부도는 같은 집단으로 분류되었다. 그러나, 지각류 군집의 종수는 개방수면과 연 군락이 같은 집단으로, 갈대와 툴참새피 군락이 같은 집단으로 각각 지정되었다. 이는 연 군락이 비록 수생식물에 의해 피복되어 있지만, 개방수면과 비교할 때 크게 미소서식처 구조와 효율성 측면에서 차이가 미미하기 때문에 발생한 차이로 판단된다.

계절적으로 여름이나 가을로 접어들수록 수생식물에 의해 피복된 공간은 점차적으로 부유 및 부엽 식물의 높은 비율로 대체된다. 수생식물의 초기 성장 시기에는 빛이 수중 내로 원활하게 유입되어 모든 생활형 (정수식물, 부유식물, 부엽식물, 그리고 침수식물)의 수생식물이 비슷하게 성장하지만, 시간이 지나면서, 점차적으로 부유식물과 부엽식물의 수표면 우점율이 높아지고, 침수된 식물의 성장률은 낮아진다. 이는 수중 내 공간의 서식처 구조의 단순하게 하며, 어류의 먹이탐색을 가속화시켜 지각류와 같은 1차 소비자의 종수와 풍부도를 낮추는 요인으로 작용한다. 그래서,

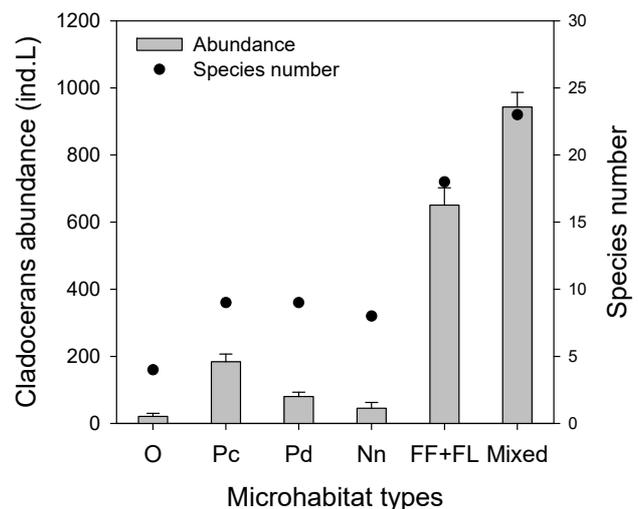


Figure 2. Abundance and species number of cladocerans in six microhabitats types. O, open water zone, Pc, area covered by *Phragmites communis*, Pd, area covered by *Paspalum distichum*, Nn, area covered by *Nelumbo nucifera*, FF+FL, area covered by Free-floating and Floating-leaved plants, Mixed, area covered by Free-floating, Floating-leaved, submerged plants.

Table 3. One-way ANOVA comparing the Abundance and species number of cladocerans in six microhabitat. The post hoc test results indicate significant differences between groups, represented by different letters (A, B, C, D and E). df, degrees of freedom; F, F-statistic. O, open water zone, Pc, area covered by *Phragmites communis*, Pd, area covered by *Paspalum distichum*, Nn, area covered by *Nelumbo nucifera*, FF+FL, area covered by Free-floating and Floating-leaved plants, Mixed, area covered by Free-floating, Floating-leaved, submerged plants

Fac.	df	F	p	Post-Hoc Test Results					
				O	Pc	Pd	Nn	FF+FL	Mixed
Abundance	5, 24	634.735	<0.001	A	B	A	A	C	D
Species number	5, 24	385.675	<0.001	A	B	B	A	D	E

Choi et al. (2014b)은 여름과 가을에 수표면에 과도하게 피복된 부유 및 부엽식물을 적절한 제거는 침수식물의 성장과 발달을 촉진시키며, 지각류 군집의 높은 종수와 풍부도를 유도할 수 있다고 제안했다.

정수식물인 갈대나 털물참새피, 부엽식물인 연은 장척호에서 넓은 점유율을 가지지만, 지각류 군집을 위한 서식 공간으로서 효율성이 낮은 것으로 판단되었다. 기존 연구 또한 정수식물은 단순한 구조를 가진 줄기만이 침수되기 때문에 지각류를 포함한 전체 동물플랑크톤 군집을 위한 서식처로서 효율성이 낮다고 제안했다 (Partanen et al., 2009; Choi et al., 2016). 어류의 포식 활동은 수생식물의 잎이나 줄기가 복잡하게 구성된 공간에서 제한되지만, 정수식물에 의해 피복된 공간은 서식처 구조가 단순하여 포식자의 먹이 탐색이 상대적으로 용이하다 (Pelicice et al., 2008). 또한, 갈대나 털물참새피는 줄기가 매우 조밀하게 성장하여 다른 식물종이 침입하기 어려우므로 이 식물종에 의해 피복된 공간은 획일화된 단순한 구조로서 피복될 수 밖에 없다. 부엽식물인 연 또한 수표면 위로 성장하여 수표면에 넓은 그늘을 형성하므로 연 외에 다른 식물종과 공존하기 어려운 공간을 형성한다. 그래서 연에 의해 피복된 공간 또한 지각류 군집을 위한 서식처로서 효율성이 낮다. 따라서, 담수생태계에서 갈대, 털물참새피, 연 등이 넓게 우점될수록 지각류 군집은 낮은 종수와 풍부도를 가질 것으로 판단된다.

2. 미소서식처 유형별 지각류 군집의 종조성

장척호에서 지각류는 총 23종이 관찰되었으며, *Chydorus sphaericus*와 *Alona guttata*가 가장 우점하였다 (Table 4). 전 세계적으로 출현하는 지각류는 총 620종으로 보고되었으며, 이중 한국에서는 84종이 출현하는 것으로 알려졌다 (Jeong et al., 2015). 지각류 군집은 서식처의 질과 형태에 따라 서식처 선호성이 상이할 뿐만 아니라 다양한 포식자에 의해 빈번하게 소비됨을 감안하면, 담수생태계의 유형 (습지, 강, 하천, 그리고 저수지 등)과 각 유형에서 점유된 서식처

형태별로 다양한 종이 출현할 것으로 판단된다. 본 연구의 조사대상지인 장척호는 수심이 2.5m 이하로 얇은 수심을 가지며, 수생식물이 매우 넓게 피복되어 있는 서식처 특징을 가지고 있어, 수생식물과 연관된 지각류 종이 출현하고 있다. 따라서, *Bosmina*속에 속한 종이나 *Leptodora*속에 속한 종과 같이 깊은 수심을 가진 저수지나, 호수, 강에서 주로 목격되는 종이나, *Sida*속에 속한 종들과 같이 오염이 적은 산지 호수에서 발견되는 종들은 장척호에서 목격되지 않았다.

장척호에서는 주로 부착 (epiphytic) 성향의 서식 특성을 가진 지각류 종들에 의해 우점되었으며, 부유성 (planktonic) 성향을 가진 종들은 거의 출현하지 않거나 밀도가 낮았다. 선행 연구들 또한 *Alona*, *Camptocercus*, *Chydorus*, *Ilyocryptus* 속에 속 (Genera)한 지각류 종이 대표적인 부착 성향을 가진 종이며 (Negrea and Hurdugan-Irimia, 2011; Choi et al., 2014c), 이들은 수생식물이 피복된 지역에서 주로 목격된다고 제안했다. 이들은 주로 수생식물의 잎이나 줄기 표면에 부착하거나 기어다니며 생활하며, 부착된 조류 (periphytic algae)를 먹이원으로 소비하기 때문에 수생식물과 밀접하게 관련된다 (Sakuma et al., 2004). 상대적으로 단순한 구조와 기질 표면을 가진 정수식물의 줄기 표면보다 이질적인 구조를 가진 침수식물이 더 많은 부착성 지각류에 의해 부착될 수 있다 (Kim and Choi, 2022). 부착성 지각류의 서식형태는 수생식물이 피복된 지역에서 포식자를 회피하기 유리하다. 식물플랑크톤을 여과 섭식하기 위한 부유성 지각류의 지속적인 움직임은 어류의 먹이 탐색의 용이함을 유도하여 쉽게 소비될 수 있는 여건을 제공하지만, 부착성 지각류는 줄기나 잎에 표면에 부착하여 거의 움직이지 않기 때문에 어류에 의해 거의 소비되지 않는다. 이러한 특성으로 인해, 수생식물이 피복된 습지나 저수지에서 지각류 군집은 대부분 부착 성향을 가진 지각류에 의해 우점된다 (Kim and Choi, 2022). 이러한 습지나 저수지에서 부유성 지각류는 필드 조사를 통해 파악하는 것보다, 어류의 위 내용물에서 이들의 존재를 확인할 수 있다 (Choi et al., 2014d).

장척호에서 목격된 지각류 23종은 모두 미소서식처 유형 중 “혼합된 식물 군락 (Mixed)”에서 모두 출현하였다. 전술하였듯이, 이 지역은 장척호에서 목격된 미소서식처 유형 중 가장 서식처 복잡성이 높기 때문에 다양한 지각류 종에 의해 서식될 수 있다. “부유 및 부엽식물 군락 (FF+FL)”은 혼합된 식물 군락 다음으로 가장 많은 지각류 종에 의해 우점되었다 (총 17종). 이 미소서식처 유형에서 출현하지 않은 *Graptoleveris testudinaria*, *Ilyocryptus spinifer*, *Leydigia acanthocercoides*는 주로 수층의 아랫부분이나 바닥층 (bottom layer)에서 분포하기 때문에 주로 수표면 공간만을

피복하는 “부유 및 부엽식물 군락 (FF+FL)”에서 목격되기 어렵다. 갈대 (Pc)와 털물참새피 (Pd), 연 군락 (Nn)에서는 8~9종의 지각류가 출현하였으나 대부분 낮은 개체수를 보였다. *Chydorus sphaericus*, *Moina macrocopa*, *Simocephalus vetulus*는 모든 미소서식처 유형에서 출현하였다. 이들은 부유/부착성의 서식 성향이 혼합된 형태를 가지기 때문에 수생식물이 부재하거나 적은 지역에서도 서식이 가능한 것으로 판단된다. 대조적으로 *Alona costata*, *A. rectangula*, *Diaphanosoma brachyurum*은 개방 수면을 제외한 수생식물이 피복된 지역에서만 목격되었다.

Table 4. Species list of cladoceran community in six microhabitat types. O, open water zone, Pc, area covered by *Phragmites communis*, Pd, area covered by *Paspalum distichum*, Nn, area covered by *Nelumbo nucifera*, FF+FL, area covered by Free-floating and Floating-leaved plants, Mixed, area covered by Free-floating, Floating-leaved, submerged plants. The species with * mark were considered as epiphytic cladoceran species, in accordance with Sakuma et al. (2000) and Gyllstrom et al. (2005). +, observation at one of the five points; ++, observation at two of the five points; +++, observation at three of the five points; +++, observation at four of the five points; +++++, observation at all points of the five points

Taxa	O	Pc	Pd	Nn	FF+FL	Mixed
<i>Acroperus harpae</i> (Baird, 1834)*					++	+++++
<i>Alona costata</i> (Sars, 1862)*		+++++	+++	++	+++++	+++++
<i>A. guttata</i> (Sars, 1862)*			++	++	+++++	+++++
<i>A. rectangula</i> (Sars, 1862)*		+++	+++	+++	+++	+++++
<i>Alonella brachycopa</i> (Brehm, 1931)						+++
<i>Camptocercus rectirostris</i> (Schoedler, 1862)*					+++++	+++++
<i>Ceriodaphnia cornuta</i> (Sars, 1886)					+	++++
<i>Chydorus sphaericus</i> (Müller, 1785)*	+++	+++++	+++++	++	+++++	+++++
<i>Daphnia galeata</i>					+	++++
<i>Daphnia obtusa</i> (Kurz, 1874)					+++	+++++
<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievin, 1848)		+++++	+++++	++++	+++++	+++++
<i>Graptoleveris testudinaria</i> (Fischer, 1848)*						+++++
<i>Ilyocryptus spinifer</i> (Herrick, 1882)*						+++++
<i>Leydigia acanthocercoides</i> (Fisher, 1854)						+++++
<i>Macrothrix rosea</i> (Jurine, 1820)					+++++	+++++
<i>Moina macrocopa</i> (Straus, 1820)*	++++	+++++	++++	++	+++++	+++++
<i>Picripleuroxus denticulatus</i> (Smirnov, 1996)		+			++++	+++++
<i>P. laevis</i> (Sars, 1886)					+++++	+++++
<i>Pleuroxus aduncus</i> (Jurine, 1820)*		++++	++++		+	+++++
<i>Simocephalus expinosus</i> (Koch, 1841)*						++++
<i>S. vetulus</i> (Müller, 1776)*	+++	++++	++++	++++	+++++	+++++
<i>Scapholeberis kingi</i> (Sars, 1903)*		+++++	++	++	+++++	+++++
Total number of species	3	9	9	8	17	23

3. 식물 생물량에 대한 지각류 군집의 종수의 풍부도

식물 생물량 (g)은 공간 내 식물 점유율을 증가시킴으로 지각류 군집의 종수와 풍부도에 영향을 미칠 것으로 추정하였지만, 이 효과는 식물 유형에 따라 상이하였다 (Figure 3). 혼합된 식물 군락 (Mixed)에서 침수식물 (붕어마름 및 말즘 등)의 생물량 증가는 지각류 군집의 종수와 풍부도를 증가시키는 반면, 갈대 군락 (Pc)에서 갈대의 생물량 증가는 지각류에게 유의한 영향을 미치지 않았다. 침수식물의 생물량 증가가 지각류 군집에게 미치는 긍정적인 효과는 다양한 기존 문헌에서의 결과를 추가적으로 지지한다 (Choi *et al.*, 2014b; Ferreira *et al.*, 2014). 혼합된 식물 군락 (Mixed) 내에서 침수식물의 생물량 증가는 서식처 복잡성에 크게 기여하며, 지각류 군집을 위한 서식처로서 효율성을 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서, 혼합된 식물 군락 내에서 침수식물의 생물량은 지각류 군집의 종다양성을 증가시키기 위해 중요하다고 판단된다. 대조적으로, 갈대는 단순한 구조를 가진 줄기만이 침수되기 때문에 이들의 생물량 증가는 서식처 복잡성에 기여하지 않는 것으로 사료되었다.

그러나, 침수식물의 생물량 증가가 지각류 군집의 종수와 풍부도에 미치는 효과는 지속적이지 않았다. 지각류 군집의 종수는 침수식물의 생물량이 11.4g 이상으로 증가하면서부터 23~24종으로 계속 유지되었다. 지각류 군집의 풍부도 또한 침수식물의 생물량이 13.7g 이상으로 증가하면서 점차적으로 증가되지 않고 유지되었다. 이는 각 지역에서 침수식물이 가지는 지각류의 서식처 수용 능력에 도달하였기 때문으로 판단된다. 혼합된 식물 군락에서 지각류 군집의 종수와 풍부도는 서식처 수용능력에 도달되면 그 이상의 종수와 풍부도가 부양되기에 적합하지 않다. 비록, 침수식물의 생물량 증가는 혼합된 식물 군락에서 다양한 서식 공간이 창출되는 것에 기여하지만, 이들간에 관계가 지속적인 선형 관계를 가지지 않는 것은 좁은 공간 내에서 서식 공간의 창출이 지속적이지 않다는 것을 의미한다. 서식처 다양성은 수생식물의 구성 및 형태와 같은 물리적인 구조에 영향받지만, 서식처 수용 능력 이상의 효율성을 기대하기 위해서는 공간의 확장이 필요하다. 따라서 좁은 지역에서 침수식물의 생물량 증가가 아닌 침수식물에 의한 피복 공간의

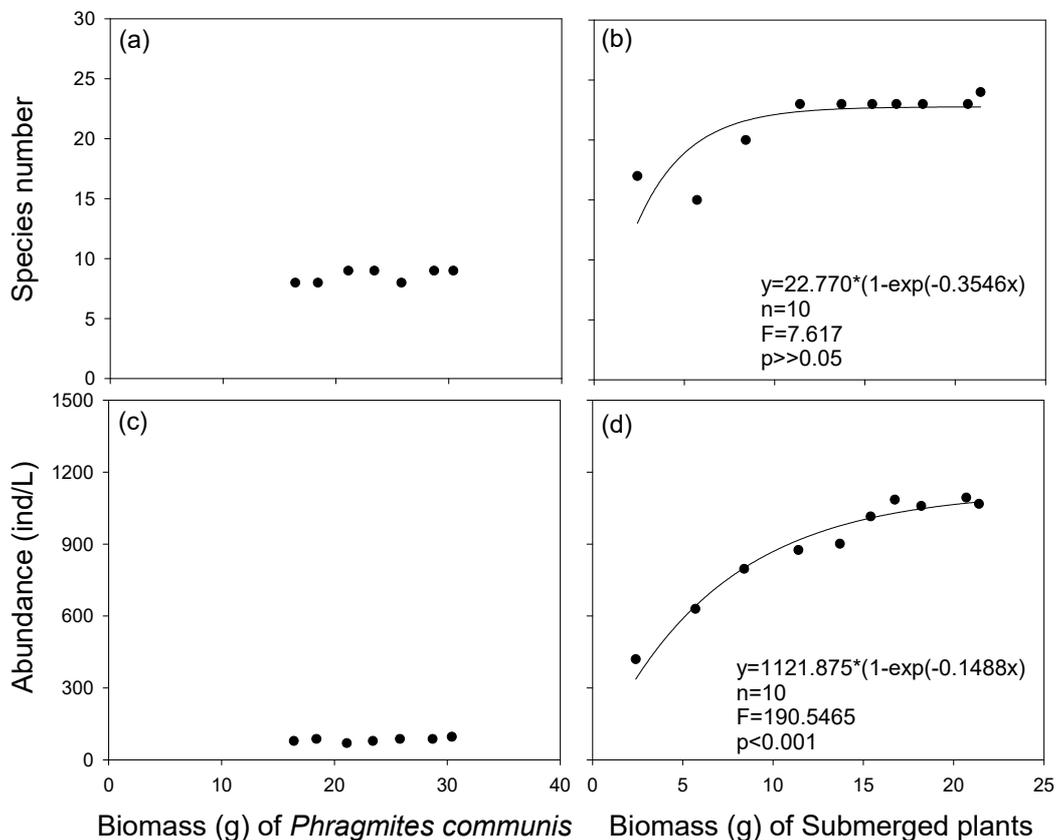


Figure 3. The relationship between species number and abundance of cladocerans and plant biomass (g). (a) species number and biomass of *Phragmites communis*, (b) abundance and biomass of *Phragmites communis*, (c), species number and biomass of submerged plants, and (d) abundance and biomass of submerged plants.

확장이 지각류 군집의 종수와 풍부도가 지속적으로 증가될 수 있을 가능성이 높다.

이와 같은 결과는 습지나 저수지에서 지각류 군집에 대한 조사 시 채집 방법에 대한 효율적인 전략을 제시한다. 갈대나 퉁물참새피와 같은 정수식물에 의해 피복된 지역에서 지각류 군집의 채집은 1~2회 정도의 채집 수행만으로 이 지역에서 확보될 수 있는 충분한 지각류의 종수와 풍부도에 대한 조사가 가능하지만, 침수식물의 생물량이 높은 지역에서 적은 수의 채집 시도는 해당 습지나 저수지에서 확보될 수 있는 지각류 군집에 대한 조사가 충분하지 않을 수 있다. 따라서, 서식처 복잡성이 높고, 다양한 공간이 창조되는 지역에서는 충분한 샘플링 횟수를 수행함으로써 지각류 군집의 많은 수와 밀도가 확보될 가능성을 높일 수 있다. 특히, *Graptoleveris testudinaria*, *Ilyocryptus spinifer*, *Leydigia acanthocercoides*와 같은 저서성의 지각류 종은 주로 바닥층에 서식하기 때문에 다양한 깊이의 물을 채수하는 것이 많은 수의 지각류를 채집할 수 있는 전략이다. 따라서, 수생 식물뿐만 아니라 바닥층의 깊이이나 토양 성분 등에 따른 채집 전략도 향후 면밀하게 조사 및 평가할 필요가 있다. 지각류 외에 수생식물과 밀접하게 관련되는 잠자리 유충이나 담수패류 또한 비슷한 조사 전략이 필요한 것으로 추정되지만, 추가적인 검증이 필요하다.

4. 지각류 종다양성 확보를 위한 담수생태계 보전 방안

본 연구의 결과는 지각류 군집의 종다양성 및 풍부도가 각 미소서식처 유형에 따라 상이하다는 것을 보여준다. 식물 군락에 어떤 형태를 가진 식물종이 포함되는지 어떤 식물이 높은 비율을 차지하는지와 같은 요인들이 서식처 구조의 효율성을 결정하며, 생물 군집간 상호작용의 가속화와 공존 여부에 영향을 미친다. 선행 연구는 수생식물에 의한 서식처 구조는 다양한 식물 종이 포함될수록 복잡하며, 지각류 군집을 위한 효율적인 공간을 제공할 수 있다고 제안했다 (Lauridsen *et al.*, 1996; Pawlikowski and Kornijow, 2023). 본 연구에서 또한 지각류 군집의 높은 풍부도와 종수는 정수식물을 제외한 부유식물, 부엽식물, 침수식물종이 함께 조성된 지역에서 찾을 수 있었다. 이 지역은 다른 지역보다 다양한 식물종이 공존하여 수중 내 공간을 복잡하게 창조할 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 습지나 저수지에서 지각류의 풍부도와 종수를 증가시키기 위해서는 다양한 종이 복합적으로 조성될 수 있는 공간의 유도가 중요하다.

그러나, 국내에 위치한 습지나 저수지에서 다양한 수생식물이 발달될 수 있는 환경을 조성하는 것은 쉽지 않다. 국내 습지나 저수지는 대부분 농업용수 확보를 위한 목적으로 건설되었기 때문에 농경지나 주거지 인근에 위치하며, 이는

질소와 인 등 영양염류의 지속적인 투입을 유도하며 수생식물이 과도하게 성장할 수 있는 여건을 제공한다. 그래서 국내 대부분의 습지나 저수지에서는 공통적으로 여름 또는 가을로 갈수록 수표면에 부유 및 부엽식물이 과도하게 우점되며, 이는 침수식물의 성장을 방해하여 편향된 서식처를 구조를 가진 식물 군락의 조성을 촉진시킨다. 따라서 다양한 식물종이 포함된 식물 군락을 조성하기 위해서는 습지나 저수지로 유입되는 영양염류의 양을 감소시키고, 유입구와 유출구의 기능 복원/유지를 통해 적절한 구배 조성 and 통수를 확보하여 질소나 인이 수생태계 내에서 농축되는 현상을 개선해야 한다. 적당한 통수 확보나 흐름의 유지는 부유 또는 부엽식물의 표류를 유도하여 바닥층으로부터 침수식물의 성장을 촉진시킬 수 있다.

이러한 환경 조성은 국내 습지와 저수지의 복원 전략에서도 적용되어야 한다. 국내에서 습지를 신규 조성하거나 복원 시 수생식물의 식재는 대부분 경관적/미적인 생태계서비스 가치를 기반으로 추진되기 때문이다. 갈대나 줄, 억새, 고랭이 등의 식물들은 줄기나 잎이 수표면 위로 성장하기 때문에 높은 경관적/미적인 가치를 제공할 수 있지만, 단순한 구조의 줄기만이 침수되기 때문에 생물의 서식처 공간으로 적당하지 않다. 물론 경관적/미적 가치 또한 수생태계가 제공하는 중요한 가치임에는 분명하지만, 이러한 불균형한 측면만을 고려한 습지 창출/복원은 차후 습지의 생태학적 기능과 건강성을 악화시키는 요인으로 전략될 수 있다. 따라서, 다양한 식물 종 또는 군락의 식재와 성장을 적극적으로 유도함으로써 습지가 제공할 수 있는 다양한 가치를 창출할 수 있는 효율적인 복원 전략이 필요하다. 수생식물은 수생태계를 대표하는 생물 군집인 동시에 서식처의 구조와 효율성을 결정하는 요인이기 때문에 이를 고려한 식재 전략이 필요하다. 본 연구의 결과는 습지를 새롭게 조성하거나 기존 습지의 복원 시 종다양성 확보를 위한 기초 정보를 제공할 수 있다. 지각류 군집은 어류 군집의 주요 먹이원이므로 지각류 군집의 종수와 풍부도를 확보하는 것은 어류의 종수와 개체수 증가에 연쇄적으로 기여하여, 더 나아가 생태계의 건강성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 이들의 충분한 종수와 개체수 확보가 담수생태계 복원 전략에서 중요하게 다루어져야 한다.

REFERENCES

- Austin, A.N., J.P. Hansen, S. Donadi and J.S. Eklof(2017) Relationships between aquatic vegetation and water turbidity: A field survey across seasons and spatial scales. PLOS one 12(8): e0181419.

- Bhat, N.A., A. Wanganeo and R. Raina(2015) Seasonal dynamics of phytoplankton community in a tropical wetland. *Environmental Monitoring and Assessment* 187: 1-12.
- Casanova, M.T. and M.A. Brock(2000) How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities? *Plant ecology* 147: 237-250.
- Cazzanelli, M., T.P. Warming and K.S. Christoffersen(2008) Emergent and floating-leaved macrophytes as refuge for zooplankton in a eutrophic temperate lake without submerged vegetation. *Hydrobiologia* 605: 113-122.
- Chase, J. M., P.A. Abrams, J.P. Grover, S. Diehl, P. Chesson, R.D. Holt, S.A. Richards, R.M. Nisbet and T.J. Case(2002) The interaction between predation and competition: A review and synthesis. *Ecology Letters* 5(2): 302-315.
- Choi, J.Y. and K.S. Kim(2020) Responses of rotifer community to microhabitat changes caused by summer-concentrated rainfall in a shallow reservoir, South Korea. *Diversity* 12(3): 113.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, K.H. Chang and G.J. Joo(2015). The influence of aquatic macrophytes on the distribution and feeding habits of two *Asplanchna* species (*A. priodonta* and *A. herrickii*) in shallow wetlands in South Korea. *Journal of Limnology* 74(1): 1-11.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, E. Lee, K.R. Choi and G.J. Joo(2014d). Utilization of fish gut analysis to elucidation of microcrustacean species composition (cladoceran and copepoda) in a shallow and vegetated lake (Jangcheok Lake, South Korea). *Journal of Ecology and Environment* 37(3): 147-153.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La and G.J. Joo(2014b). Effect of removal of free-floating macrophytes on zooplankton habitat in shallow wetland. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* (414): 11.
- 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(1): 197-202.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, S.K. Kim and G.J. Joo(2016) Impact of habitat heterogeneity on the biodiversity and density of the zooplankton community in shallow wetlands (Upo wetlands, South Korea). *Oceanological and Hydrobiological Studies* 45(4): 485-492.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, S.K. Kim, G.H. La, K.H. Chang and G.J. Joo(2014c). Role of macrophytes as microhabitats for zooplankton community in lentic freshwater ecosystems of South Korea. *Ecological Informatics* 24: 177-185.
- De Szalay, F.A. and V.H. Resh(2000). Factors influencing macroinvertebrate colonization of seasonal wetlands: Responses to emergent plant cover. *Freshwater Biology* 45(3): 295-308.
- Dibble, E.D. and F.M. Pelicice (2010) Influence of aquatic plant-specific habitat on an assemblage of small neotropical floodplain fishes. *Ecology of Freshwater Fish* 19(3): 381-389.
- Ferreiro, N., C. Feijoo, A. Giorgi and J. Rosso(2014) Macroinvertebrates select complex macrophytes independently of their body size and fish predation risk in a Pampean stream. *Hydrobiologia* 740: 191-205.
- Franklin, P., M. Dunbar and P. Whitehead(2008) Flow controls on lowland river macrophytes: A review. *Science of the Total Environment* 400(1-3): 369-378.
- Jeong, H., A.A. Kotov, W. Lee, R. Jeong and S. Cheon(2015) Diversity of freshwater cladoceran species (Crustacea: Branchiopoda) in South Korea. *Journal of Ecology and Environment* 38(3): 361-366.
- Jeong, K.S., D.K. Kim, H.S. Shin, J.D. Yoon, H.W. Kim and G.J. Joo(2011). Impact of summer rainfall on the seasonal water quality variation (chlorophyll a) in the regulated Nakdong River. *KSCE Journal of Civil Engineering* 15: 983-994.
- Jeong, K.Y., J.Y. Choi and K.S. Jeong(2014) Influence of aquatic macrophytes on the interactions among aquatic organisms in shallow wetlands (Upo Wetland, South Korea). *Journal of Ecology and Environment* 37(4): 185-194.
- Johnson, P.T., J.M. Chase, K.L. Dosch, R.B. Hartson, J.A. Gross, D.J. Larson, D.R. Sutherland and S.R. Carpenter(2007) Aquatic eutrophication promotes pathogenic infection in amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(40): 15781-15786.
- Kallimanis, A.S., A.D. Mazaris, J. Tzanopoulos, J.M. Halley, J.D. Pantis and S.P. Sgardelis(2008) How does habitat diversity affect the species-area relationship? *Global Ecology and Biogeography* 17(4): 532-538.
- Kim, S.K. and J.Y. Choi(2022) Selective Consumption of Pelagic Cladocerans by Bluegill Sunfish (*Lepomis macrochirus* Rafinesque) Contributes to Dominance of Epiphytic Cladocerans. *Water* 14(22): 3781.
- Kneitel, J.M. and J.M. Chase(2004) Trade-offs in community ecology: Linking spatial scales and species coexistence. *Ecology letters* 7(1): 69-80.
- Kuczyńska-Kippen, N.M. 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.
- Li, F., T. Zhang, Z. Zhang, T. Lv, H. Yu, D. Yu and C. Liu(2024). Predation risk-mediated indirect effects promote submerged plant growth: Implications for lake restoration. *Journal of Environmental Management* 355: 120512.
- Magee, T.K. and M.E. Kentula(2005) Response of wetland plant species to hydrologic conditions. *Wetlands Ecology and Management* 13: 163-181.
- Mamani, A., M.L. Koncurat and M. Boveri(2019) Combined effects of fish and macroinvertebrate predation on zooplankton

- in a littoral mesocosm experiment. *Hydrobiologia* 829: 19-29.
- 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.
- Meerhoff, M., N. Mazzeo, B. Moss and L. Rodriguez-Gallego (2003). The structuring role of free-floating versus submerged plants in a subtropical shallow lake. *Aquatic Ecology* 37: 377-391.
- Mizuno, T. and E. Takahashi(1999) An illustration guide to freshwater zooplankton in Japan. Simizu: Tokai University.
- Negrea, S. and O. Hurdugan-Irimia(2011) Conspect of the Cladoceran species (Crustacea, Branchiopoda) identified in the poorly known urban Tineretului Lake (Bucharest, Romania). *Romanian Journal of Aquatic Ecology* 1: 123-138.
- Nurminen, L., Z. Pekcan-Hekim, S. Repka and J. Horppila(2010). Effect of prey type and inorganic turbidity on littoral predator-prey interactions in a shallow lake: an experimental approach. *Hydrobiologia* 646: 209-214.
- Padial, A. A., S.M. Thomaz and A.A. Agostinho(2009). Effects of structural heterogeneity provided by the floating macrophyte *Eichhornia azurea* on the predation efficiency and habitat use of the small Neotropical fish *Moenkhausia sanctaefilomenae*. *Hydrobiologia* 624: 161-170.
- Partanen, S., M. Luoto and S. Hellsten(2009) Habitat level determinants of emergent macrophyte occurrence, extension and change in two large boreal lakes in Finland. *Aquatic Botany* 90(3): 261-268.
- Pawlikowski, K. and R. Kornijow(2023) Above-and below ground habitat complexity created by emergent and submerged vegetation drives the structure of benthic assemblages. *Oceanologia* 65(2): 358-370.
- Pellicice, F. M., S.M. Thomaz and A.A. Agostinho(2008) Simple relationships to predict attributes of fish assemblages in patches of submerged macrophytes. *Neotropical Ichthyology* 6: 543-550.
- Picard, C. R., L.H. Fraser and D. Steer(2005) The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Bioresource technology* 96(9): 1039-1047.
- Pont, D. and J. Amrani(1990) The effects of selective fish predation on the horizontal distribution of pelagic Cladocera in a southern French reservoir. *Hydrobiologia* 207: 259-267.
- Sagrario, G., M. De Los Angeles, E. Balseiro, R. Ituarte and E. Spivak(2009) Macrophytes as refuge or risky area for zooplankton: a balance set by littoral predacious macroinvertebrates. *Freshwater Biology* 54(5): 1042-1053.
- Sakuma, M., T. Hanazato, A. Saji and R. Nakazato(2004) Migration from plant to plant: an important factor controlling densities of the epiphytic cladoceran *Alona* (Chydoridae, Anomopoda) on lake vegetation. *Limnology* 5: 17-23.
- Søndergaard, M. and B. Moss(1998) Impact of submerged macrophytes on phytoplankton in shallow freshwater lakes. In: *The structuring role of submerged macrophytes in lakes*. New York, Springer, pp. 115-132.
- Thomaz, S.M. and E.R.D. Cunha(2010) The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: Methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnologica Brasiliensia* 22: 218-236.
- Wellborn, G.A., D.K. Skelly and E.E. Werner(1996) Mechanisms creating community structure across a freshwater habitat gradient. *Annual Review of Ecology and Systematics* 27(1): 337-363.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens(2000). *Limnological Analyses*. NY, Springer-Verlag.
- Yarwood, S.A.(2018) The role of wetland microorganisms in plant-litter decomposition and soil organic matter formation: a critical review. *FEMS Microbiology Ecology* 94(11): fiy175.
- Young, K.A.(2001) Habitat diversity and species diversity: testing the competition hypothesis with juvenile salmonids. *Oikos* 95(1): 87-93.