

동물플랑크톤의 서식 특성에 따른 분류와 먹이망: 상위포식자의 에너지원으로서 부착성 동물플랑크톤의 중요성

최종윤 · 나금환¹ · 정광석 · 김성기 · 장광현² · 주기재*

(부산대학교 생명과학과, ¹순천대학교 환경교육과, ²경희대학교 환경공학과)

Classification by Zooplankton Inhabit Character and Freshwater Microbial Food Web: Importance of Epiphytic Zooplankton as Energy Source for High-Level Predator. Choi, Jong-Yun, Geung-Hwan La¹, Kwang-Seuk Jeong, Seong-Ki Kim, Kwang-Hyeon Chang² and Gea-Jae Joo* (Department of Biological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea; ¹Department of Environmental Education, Suncheon National University, Suncheon, Jeonnam 540-742, Korea; ²Department of Environmental Science and Engineering, Kyung-Hee Univer-sity, Yongin, Gyeonggi 445-701, Korea)

We conducted a comprehensive monitoring for freshwater food web in a wetland system (Jangcheok Lake), from May to October, 2011. Monthly sampling for zooplankton, fish as well as organic matters, was implemented. In order to understand the food web structure and energy flow, we applied stable isotope analysis to the collected samples, based on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of epiphytic particulate organic matter (EPOM) and particulate organic matter (POM), epiphytic and planktonic zooplankton, fish (*Lepomis macrochirus*). In the study site, epiphytic and planktonic zooplankton was 24 and 30 species, respectively, and coincidence species between epiphytic and planktonic zooplankton were 20 species. Epiphytic zooplankton were more abundant during the spring and early summer (May to July); however, planktonic zooplankton were more abundant during the autumn (September to October) season. Stable isotope analysis revealed that fish and epiphytic zooplankton had seasonal variations on their food sources. EPOM largely contributed epiphytic zooplankton in spring (May), but increasing contribution of POM in autumn (September) was detected. However, planktonic zooplankton depended on only POM in both seasons. Fish utilized both epiphytic and planktonic zooplankton, but small sized (1~3 cm), fish preferred epiphytic zooplankton, where as larger sized (4~7 cm) fish tended to consume planktonic zooplankton, and epiphytic zooplankton had important role in energy transfer. This pattern was clear when results of spring and autumn stable isotope analysis were compared. From the results of this study, we confirmed that wetlands ecosystem supported various epiphytic and planktonic zooplankton species, they depend on other food items, respectively. *L. macrochirus* also showed a difference of food source according to the body size, they depend on seasonal density change of zooplankton. In particular, epiphytic zooplankton was very important for growth and development of young fish in the spring.

Key words : inhabit character, epiphytic zooplankton, food web structure, stable isotope

* Corresponding author: Tel: 051) 510-2258, Fax: 051) 583-0172, E-mail: jyc311@naver.com

서 론

동물플랑크톤 군집은 수생태 먹이망의 1차 소비자로서 박테리아나 식물플랑크톤을 주로 섭식하며 (Lampert *et al.*, 1986), 치어나 무척추동물의 주요 먹이원으로 작용한다. 동물플랑크톤 군집은 서식 형태에 따라 부착성과 부유성 종으로 구분되는데, 부착성 종은 부착할 수 있는 기질 표면을 필요로 하기 때문에 기질표면이 풍부한 환경(수생식물 등)을 선호하고 (Taniguchi *et al.*, 2003), 기질표면이 상대적으로 적은 환경에서는 부유성 종이 주로 우점하게 된다 (Adrian *et al.*, 1998; Kobayashi *et al.*, 1998). 또한 부유성 동물플랑크톤은 수체 내에서 지속적인 움직임을 보이기 때문에 어류와 같은 시각적 포식자의 포식활동에 매우 취약한 반면, 부착성 동물플랑크톤은 수생식물 등의 기질 표면에 부착된 형태로 서식하기 때문에 움직임을 적고 포식자의 탐색이 어려운 특징을 가진다 (Nicolle *et al.*, 2010).

습지에서 발달된 수생식물이나 관목 등의 표면은 부착성 동물플랑크톤이 서식하기에 적당하며 (Balayla and Moss, 2003), 식물플랑크톤, 박테리아 등의 먹이 자원이 풍부하기 때문에 부착성 동물플랑크톤의 개체군 성장을 위한 좋은 여건이 제공된다. 또한 강우와 같은 교란 발생에도 동물플랑크톤 군집은 수생식물 등의 기질표면에 부착하여 많은 강우 발생에도 살아남을 수 있는 확률을 높일 수 있다 (Muzzaffar and Ahmed, 2007). 강에서 서식하는 동물플랑크톤 군집의 경우, 여름 동안 증가된 강우 및 유량에 의해 봄, 가을과 비교할 때 뚜렷한 밀도 감소를 나타내지만 (Choi *et al.*, 2011), 우포늪과 같이 수생식물이 발달된 환경에서 서식하는 동물플랑크톤은 오히려 강우 발생 시기 동안 증가된 밀도를 보인다 (Kim *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2012). 수생식물의 형태와 모양 등은 부착성 동물플랑크톤의 서식을 위한 중요한 요소로 적용되며 (Kuczynska-Kippen, 2009), 정수식물과 같이 단순한 구조보다는 침수식물과 같이 복잡한 구조를 더 선호하는 것으로 알려져 있다 (Jones *et al.*, 1999). 또한 복잡한 구조를 가진 수생식물은 어류와 같은 시각적 포식자의 탐색을 제한하는 효과가 크기 때문에 이와 같은 환경에서 동물플랑크톤은 살아남을 확률을 높일 수 있다 (Burks *et al.*, 2001).

이와 같이 수생식물이 발달된 환경은 포식자의 포식활동이 조절되기 때문에 동물플랑크톤을 포함한 다양한 종이 서식할 수 있어, 비교적 복잡한 먹이망이 구성된다 (Perrow *et al.*, 1999). 기존 연구에서 먹이망 내의 분류군

간 관계는 포식자의 위 내용물 분석 (Harrel and Dibble, 2001) 및 직접적인 관찰 (Manatunge and Asaeda, 1998) 등을 통해서 증명되었으나, 최근, 질소 및 탄소의 안정동위원소 비 값을 측정하여, 이들간의 관계를 파악하는 기법이 이용되고 있다. 안정동위원소를 이용한 기법은 비교적 짧은 기간에 측정이 가능하며, 기존 연구 방법보다 분류군간의 정확한 관계 파악에 매우 용이하다는 장점을 가진다.

수생식물이 우점한 환경은 부착성 동물플랑크톤뿐만 아니라 부유성 동물플랑크톤 또한 높은 밀도로 유지되며, 다양한 경로(다양한 먹이원 및 소비자)로 에너지가 이동되기 때문에 호수나 강과 같은 단순한 구조를 가진 생태계와 비교할 때 중요성이 더 높다고 할 수 있다 (Douglas *et al.*, 2005). 하지만, 동물플랑크톤과 관련된 기존 연구의 경우, 호수나 강과 같은 환경에 대해 주로 초점이 맞추어져 있고, 습지에서의 연구는 다소 부족한 실정이다. 또한 부착성 종과 부유성 종의 구분 또한 명확하게 제시된 바가 없으며, 부착성 종의 경우, 채집 방법의 차이 등으로 인해 다양한 결과를 산출할 수 있기 때문에 (Sakuma *et al.*, 2002), 이에 대한 연구는 매우 중요할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 수생식물이 발달된 습지(장척호)에서 동물플랑크톤을 부착성 및 부유성 종으로 구분하고 안정동위원소 분석을 이용하여 이들이 수체 내 먹이망에서 어떤 역할을 가지는지에 대해 증명하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사 지점

조사 지역인 장척호는 경상남도 창원군에 위치하고 있으며 (Fig. 1), 평균 수심이 2.5 m, 총 저수량은 2,022.00천 m³이다. 장척호의 유입원은 영산면 신제리에 위치한 소하천이나, 수원이 부족하여 장척호에 대한 영향은 적다. 장척호는 전형적인 저수지 형태를 가지고 있으며, 호수 중앙은 수심이 깊어 수생식물이 발달되기 어려우나, 호수가장자리의 경우 수심이 얇아 털물참새피, 마름 및 어리연꽃 등이 수생식물이 발달된 구간과 수생식물이 없는 개방된 구간이 혼재되어 있다.

2. 부착 및 부유성 동물플랑크톤 채집

동물플랑크톤의 월별 밀도 분포를 파악하기 위해 2011년 5월부터 10월까지 장척호의 수변부에서 채집이 수행되었으며, 부착성과 부유성 종의 구분을 위해 각각 다른

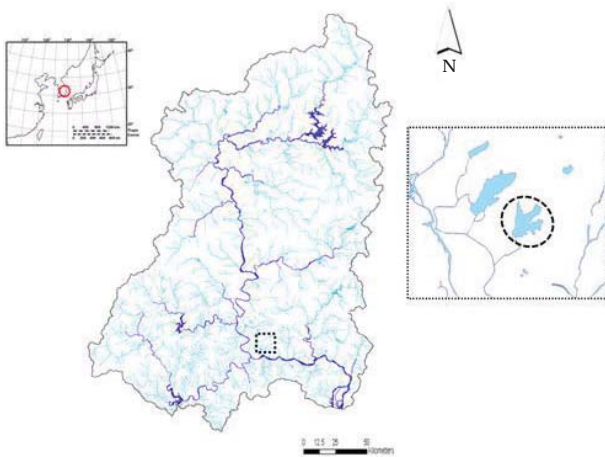


Fig. 1. Map showing the Nakdong River basin and Jangcheok Lake (dotted circle).

채집 방법을 이용하였다. 수생식물에 부착된 동물플랑크톤의 채집은 수생식물이 우점하고 있는 구간에서 수생식물의 물 위로 노출된 부분을 제외한 물속에 침수된 부분을 가위로 잘라서, 증류수 2 L에 50~60번 흔들어 부착된 동물플랑크톤을 떼어낸 후, 68 μm 네트에 여과 농축시켜 포르말린으로 고정하였다(Sakuma *et al.*, 2002). 부착성 동물플랑크톤이 제거된 수생식물은 60°C에서 24시간 동안 건조시킨 후 건중량을 측정하였고, 계수된 부착성 동물플랑크톤의 종별 밀도를 수생식물의 건중량 당 개체수로 환산하였다. 부유성 동물플랑크톤은 부착성 동물플랑크톤을 채집한 구간과 인접한 개방 수역에서 원수 8 L를 채수하여 망목 68 μm 네트에 여과 농축시킨 후 4~5%의 포르말린으로 고정하였다. 고정된 부착 및 부유성 동물플랑크톤 시료는 현미경을 이용하여 분류군별(윤충류, 지각류, 요각류)로 종 및 속 수준까지 동정하였다(Koste, 1978; Smirnov and Timms, 1983).

3. 시료 채집 및 안정동위원소 분석

안정동위원소 분석을 위한 잠재먹이원(부유 및 부착성 유기물), 동물플랑크톤, 어류의 채집은 2011년 봄(5월)과 가을(9월)에 장척호의 수변부에서 수행되었다. 잠재먹이원인 부착입자 유기물(epiphytic particulate organic matter, EPOM)은 털물참새피, 마름, 어리연꽃 등의 물속에 침수된 부분을 잘라, 솔로 표면을 긁어서 채집하였고, 부유입자 유기물(suspended particulate organic matter, POM)은 수심 0.5 m에서 원수 2 L를 채수하였다. 채집된 부착 및 부유입자 유기물은 150 μm 여과지를 이용하여 동물플랑크톤 등의 크기가 큰 입자물질을 제거한 후

500°C에서 2시간 동안 살균시킨 GF/F 여과지(직경 47 mm, pore 0.45 μm)에 여과 후 건조하였다. 건조된 부유 및 부착입자 유기물 시료는 무기탄소를 제거하기 위해 1 mol L⁻¹ 염산(HCl)에 24시간 동안 담근 후, 증류수로 3~4번 정도 세척한 후 분말 형태로 만들었다.

동물플랑크톤 군집 중 부착성 동물플랑크톤은 수생식물의 물 위로 노출된 부분을 제외한 물속에 침수된 부분을 가위로 잘라서, 증류수 2 L에 50~60번 흔들어 부착된 동물플랑크톤을 떼어낸 후, 68 μm 네트에 여과 농축시켜 채집하였으며, 부유성 동물플랑크톤은 원수 8 L를 채수하여 망목 68 μm 네트에 여과시켜 채집하였다. 어류(*Lepomis macrochirus*)의 채집은 투망과 족대를 이용하여 약 20~30분 정도 수행되었으며, 현장에서 직접 크기별(1~3 cm, 4~7 cm, 8~10 cm)로 구분하였다. 채집된 동물플랑크톤 및 어류 시료는 지방 성분을 제거하기 위해 methanol, chloroform 및 water (2:1:0.8) 혼합액에 24시간 처리한 후 증류수로 세척하였다. 세척한 동물성 시료는 60°C에서 48시간 정도 건조시킨 후, 분말 형태로 준비하였다. 준비된 분말 형태의 시료는 1.0~1.5 mg를 tin capsule에 넣고 밀봉하여, 안정동위원소 질량분석기(CF-IRMS, Micromass isoprime, 부산대학교 공동실험실습관)를 이용하여 탄소와 질소 안정동위원소비를 측정하였다. 잠재먹이원과 소비자 동물군이 가지는 안정동위원소비 값은 표준물질에 대한 시료의 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 기호(δ)로 표현하였다.

$$\delta X (\text{‰}) = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 1000$$

여기서 X는 ¹³C 또는 ¹⁵N이며, R은 ¹³C:¹²C 혹은 ¹⁵N:¹⁴N을 가리킨다.

시료 분석 전 동위원소 비 값을 알고 있는 UREA를 이용하여 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 $\delta^{13}\text{C}$ 가 0.2‰ 그리고 $\delta^{15}\text{N}$ 이 0.3‰ 이하를 나타냈다. 장척호에 채집된 어류 및 동물플랑크톤의 잠재먹이원에 대한 이용을 파악하기 위해 isotopic mixing model(Phillips and Koch, 2002)을 이용하여, 잠재먹이원에 대한 기여도를 파악하였다.

결 과

1. 동물플랑크톤의 분류 및 계절 분포

장척호에서 출현한 동물플랑크톤 군집은 총 34종으로 나타났고, 이 중 부착성 동물플랑크톤은 24종(윤충류 14종, 지각류 7종, 요각류 3종), 부유성 동물플랑크톤은 30

Table 1. Classification of zooplankton by inhabit characteristic (epiphytic and planktonic). Zooplankton name wited in bold strokes were coincident species between epiphytic and planktonic zooplankton.

Habit character	Taxa	Species
Epiphytic	Rotifers	<i>Brachionus quadridentatus</i> , <i>Colurella obtusa</i> , <i>Euchlanis dilatata</i> , <i>Keratella cochlearis</i> , <i>Lecane hamata</i> , <i>Lepadella oblonga</i> , <i>Monommata</i> sp., <i>Monostyla bulla</i> , <i>Monostyla quadridentata</i> , <i>Macrochaetus collinsi</i> , <i>Mytilina trigona</i> , <i>Philodina roseola</i> , <i>Testudinella patina</i> , <i>Trichocerca capucina</i>
	Cladocerans	<i>Alona rectangula</i> , <i>Chydorus sphaericus</i> , <i>Ilyocryptus agilis</i> , <i>Latonopsis australis</i> , <i>Macrothrix rosea</i> , <i>Pleuroxus laevis</i> , <i>Simocephalus vetulus</i>
	Copepods	<i>Cyclops vicinus</i> , <i>Microcyclops</i> sp., <i>Thermocyclops</i> sp.
Planktonic	Rotifers	<i>Brachionus angularis</i> , <i>Brachionus rubens</i> , <i>Colurella obtusa</i> , <i>Euchlanis dilatata</i> , <i>Hexathra mira</i> , <i>Kelicottia longispina</i> , <i>Keratella cochlearis</i> , <i>Lecane hamata</i> , <i>Lepadella oblonga</i> , <i>Monostyla bulla</i> , <i>Monostyla quadridentata</i> , <i>Macrochaetus collinsi</i> , <i>Mytilina trigona</i> , <i>Philodina roseola</i> , <i>Platytias patulus</i> , <i>Polyarthra vulgaris</i> , <i>Trichocerca capucina</i> , <i>Trichotria truncata</i>
	Cladocerans	<i>Alona rectangula</i> , <i>Bosmina longirostris</i> , <i>Chydorus sphaericus</i> , <i>Latonopsis australis</i> , <i>Macrothrix rosea</i> , <i>Moina macrocopa</i> , <i>Pleuroxus laevis</i> , <i>Scapholeberis kingi</i> , <i>Simocephalus vetulus</i>
	Copepods	<i>Cyclops vicinus</i> , <i>Microcyclops</i> sp., <i>Thermocyclops</i> sp.

중(윤충류 18종, 지각류 9종, 요각류 3종)으로 나타났다. 이 중 부착성과 부유성의 성향을 동시에 보이는 종은 총 20종으로, 윤충류 11종, 지각류 6종, 요각류 3종이었다 (Table 1).

장척호에서 채집된 부착 및 부유성 동물플랑크톤 군집은 월별로 상이한 밀도를 나타냈다 (Fig. 2). 부착성 동물플랑크톤은 5~7월 동안 지속적인 밀도 증가를 보이다가 7월에 최고밀도에 도달한 후(942 ind.gdw⁻¹), 8~10월에는 감소된 밀도를 나타냈다 (Fig. 2a). 부유성 동물플랑크톤은 이와 반대로 5~7월 동안에 낮은 밀도를 보이다가 8~10월 동안에 증가된 밀도를 보였으며, 특히 9월에는 805 ind.L⁻¹로 연중 최고 높은 밀도를 나타냈다.

부착성 윤충류는 총 부착성 동물플랑크톤 중 가장 우점하였으며, 부착성 지각류와 요각류는 상대적으로 낮은 밀도를 보였다 (Fig. 2a). 부착성 윤충류는 전체 부착성 동물플랑크톤과 비슷한 계절별 양상을 나타냈으며, 부착성 지각류는 6월부터 출현하기 시작하여 9월에 42.3 ind.gdw⁻¹로 최고밀도를 보인 이후 감소된 밀도를 보였다 (8~10월). 부착성 요각류는 8월을 제외한 모든 계절에 출현하였으며, 7월에 103.9 ind.gdw⁻¹로 연중 가장 높은 밀도를 나타냈다. 부유성 윤충류는 전체 조사 기간 동안 지속적인 밀도 증가를 보였으며, 9월에 315 ind.L⁻¹로 연중 최고 밀도를 나타냈다. 부유성 지각류의 경우 6월부터 출현하기 시작하여 9월까지 지속적인 증가를 보이다가, 10월에는 다시 감소된 밀도를 보였으며, 요각류는 총 부

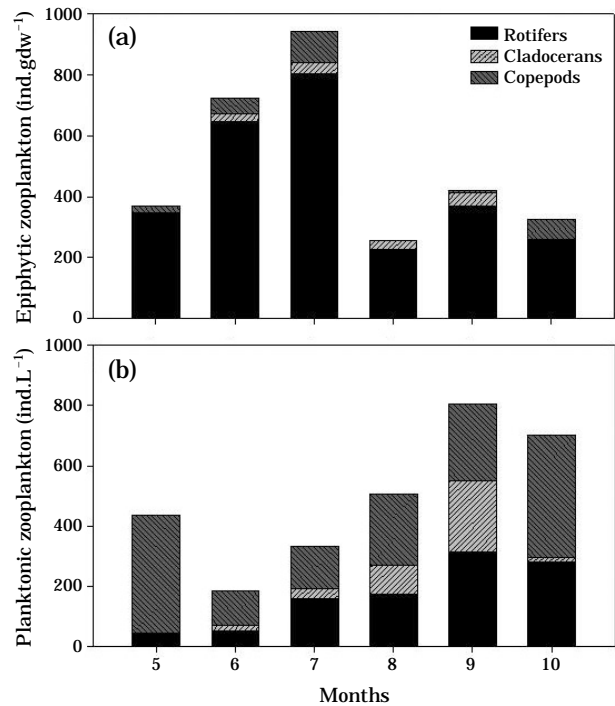
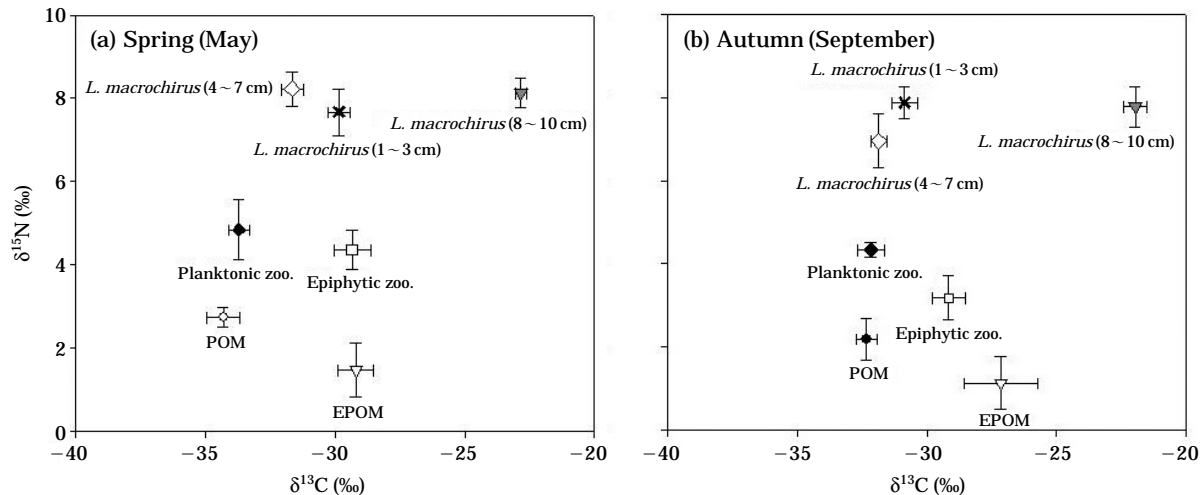


Fig. 2. Epiphytic and planktonic zooplankton community in Jangcheok Lake (a) epiphytic zooplankton (ind.gdw⁻¹). (b) planktonic zooplankton (ind.L⁻¹).

유성 동물플랑크톤 중 가장 우점하였고, 연중 100 ind.L⁻¹ 이상의 상대적으로 높은 밀도를 나타냈다 (Fig. 2b).

Table 2. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ signatures (± 1 SD) of organisms in the Jangcheok Lake.

	Spring		Autumn	
	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
EPOM	-29.20 (± 0.67)	1.47 (± 0.65)	-27.14 (± 0.40)	1.14 (± 0.62)
POM	-34.32 (± 0.65)	2.73 (± 0.23)	-32.33 (± 0.40)	2.20 (± 0.50)
Epiphytic zooplankton	-29.34 (± 0.70)	4.36 (± 0.46)	-29.16 (± 0.73)	3.18 (± 0.53)
Planktonic zooplankton	-33.71 (± 0.40)	4.84 (± 0.70)	-32.16 (± 0.05)	4.34 (± 0.17)
<i>L. macrochirus</i> (1~3 cm)	-29.85 (± 0.40)	7.67 (± 0.60)	-30.87 (± 0.49)	7.88 (± 0.38)
<i>L. macrochirus</i> (4~7 cm)	-31.66 (± 0.40)	8.23 (± 0.40)	-31.85 (± 0.54)	6.95 (± 0.24)
<i>L. macrochirus</i> (8~10 cm)	-22.84 (± 0.20)	8.13 (± 0.30)	-21.97 (± 0.46)	7.78 (± 0.49)

**Fig. 3.** Carbon and nitrogen isotope plots of samples from Jangcheok Lake in spring (May) and autumn (September). $n=3$ or 4.

2. 먹이망과 잠재먹이원에 대한 기여도

장척호에서 채집된 부유 및 부착입자 유기물의 안정동위원소비 값은 두 계절 간 상이하였다(Table 2). 부착입자 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 가을($-27.1 \pm 0.4\%$)이 봄($-29.2 \pm 0.7\%$)보다 더 무거운 값을 나타냈으며, 부유입자 유기물 또한 비슷한 결과를 보였다(봄, $-34.3 \pm 0.7\%$; 가을, $-32.3 \pm 0.4\%$). 그러나 부착 및 부유입자 유기물의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 봄과 가을에 각각 비슷한 값을 나타냈다. 부착성 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 계절적인 변동이 거의 없었으나, 부유성 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 봄($-33.7 \pm 0.4\%$)보다 가을($-32.2 \pm 0.1\%$)이 더 무거운 값을 나타냈고, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 비슷했다. 소비자의 안정동위원소 비 값은 섭식하는 먹이원 비 값에 대해 영양단계 당 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 1‰ 이내, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 3‰ 정도 높아지는 동위원소 분별효과를 가지며(Lee *et al.*, 2002), 이러한 분별 효과를 가정할 경우, 장척호에서 채집된 부착 및 부유성 동물플랑크톤의 안정동위원소비 값은 잠재먹이원으로 부착 및 부유입자 유기물

을 이용하는 것으로 나타났다(Fig. 3). *L. macrochirus*의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 몸 크기별로 차이를 보였는데, 1~3 cm 크기인 *L. macrochirus*의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 봄과 가을에 각각 $-29.9 \pm 0.4\%$, $-30.9 \pm 0.5\%$ 로 봄에 더 무거운 값을 보였고, 4~7 cm 크기인 *L. macrochirus*의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 봄과 가을 간 차이가 없었으나, $\delta^{15}\text{N}$ 은 봄과 가을에 각각 $8.2 \pm 0.4\%$, $7.0 \pm 0.2\%$ 로 봄에 더 무거운 값을 나타냈다. 8~10 cm인 *L. macrochirus*의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 1~3, 4~7 cm의 크기보다 더 무거운 값을 나타냈으며, 봄과 가을에 각각 $-22.8 \pm 0.2\%$, $-21.9 \pm 0.5\%$ 로 가을이 더 무거웠다.

Isotopic mixing model의 분석 결과, 부착성 동물플랑크톤과 부유성 동물플랑크톤은 서로 상이한 먹이원을 섭식하는 것으로 나타났다(Table 3). 부착성 동물플랑크톤은 부유입자 유기물보다 부착입자 유기물에 대한 높은 의존도를 보였으며, 부유성 동물플랑크톤은 부유입자 유기물에 대한 의존도가 높았다. 봄과 가을 간 기여도 값을 볼 때, 부유성 동물플랑크톤은 비교적 비슷한 값을 나타냈으나, 부착성 동물플랑크톤은 봄에 부착입자 유기물에

Table 3. Contribution of EPOM and POM to the zooplankton at Jangcheok Lake in both seasons.

	Spring		Autumn	
	EPOM	POM	EPOM	POM
Epiphytic zooplankton	97%	3%	61%	39%
Planktonic zooplankton	12%	88%	3%	97%

Table 4. Contribution of epiphytic zooplankton and planktonic zooplankton to the *L. macrochirus* at Jangcheok Lake in both seasons.

	Spring		Autumn	
	Epiphytic	Planktonic	Epiphytic	Planktonic
<i>L. macrochirus</i> (1~3 cm)	88%	12%	44%	56%
<i>L. macrochirus</i> (4~7 cm)	47%	53%	11%	89%
<i>L. macrochirus</i> (8~10 cm)	-	-	-	-

대해 높은 값을 보인 반면, 가을에는 부유입자 유기물에 대한 의존도가 증가되는 양상을 보였다.

*L. macrochirus*는 1~3, 4~7 cm 길이의 크기에서 부착 및 부유성 동물플랑크톤에 대한 의존도가 나타났으며, 8~10 cm의 크기는 동물플랑크톤 외에 다른 먹이원을 섭식하는 것으로 분석되었다 (Table 4). *L. macrochirus*에 대한 부착 및 부유성 동물플랑크톤의 섭식 양상은 봄과 가을에 따라 매우 상이한 차이를 보였다. 1~3 cm 크기의 *L. macrochirus*는 봄에 부착성 동물플랑크톤에 대한 높은 의존을 보이다가, 가을에는 부착성 동물플랑크톤보다 부유성 동물플랑크톤에 대한 의존도가 더 높은 양상을 보였다. 4~7 cm 크기의 *L. macrochirus*는 봄에 부착 및 부유성 동물플랑크톤에 대해 비슷한 의존도를 보였으나, 가을에는 부유성 동물플랑크톤에 대한 높은 의존도를 보여 차이를 나타냈다.

고 찰

동물플랑크톤 밀도에 영향을 미치는 요인으로는 강우 (Campbell, 2002) 및 이화학적 요인 (Arcifa et al., 1986; Angeler et al., 2002) 등의 물리·화학적 요인도 포함되지만, 포식자와 서식환경 특징 또한 이들의 밀도를 결정짓는 중요한 요인으로 적용된다 (Burks et al., 2000; Jepsen et al., 2004). 동물플랑크톤은 수체 내 먹이망에서 상위포식자(어류 등)의 주요 먹이원이며, 이들의 성장 및

발달에 매우 중요하다 (Timms and Moss, 1984). 수세기 동안, 동물플랑크톤은 서식환경에 대한 적응 및 포식자의 포식을 방어하기 위한 다양한 전략을 제시하였으며, 형태 변화 (Chang and Hanazato, 2003), 피난처 이용 (Burks et al., 2001) 등을 예로 들 수 있다. 동물플랑크톤의 서식 형태(부착 및 부유성) 또한 포식에 대한 방어 혹은 피식의 용이함을 위한 적응의 한 부분이며, 특히 습지와 같이 시·공간적 이질성이 높은 환경의 경우, 비교적 다양한 형태를 가진 동물플랑크톤이 적응하여 서식하게 된다 (Nicolle et al., 2010).

본 연구의 결과에서 부착 및 부유성의 성향만을 보이는 종의 수는 적었고, 대부분 부착 및 부유성 성향을 같이 보이는 종이 출현하는 것으로 나타났다. 두 가지의 서식 형태를 같이 보이는 종은 서식처의 특성(부착할 수 있는 표면의 유무), 포식자의 회피 등의 요인에 따라 부착 및 부유성의 서식 형태를 선택하는 것으로 보인다. 이러한 서식 전략은 포식자가 현존하는 상황에서 이들의 밀도 유지 및 개체군 성장을 위한 적응의 한 형태로서 고려된다. 부착성 성향을 주로 보이는 종의 형태는 몸의 한 면이 납작하여 부유성 종과 차이를 보였으며, 이 같은 형태는 수생식물이나 암석의 표면에 부착되기에 적합하다. 부착성과 부유성 성향을 같이 보이는 종 또한 납작한 형태를 가지며 기질체에 부착되기도 하지만, 유영 능력 또한 뛰어나기 때문에 두 가지의 서식 형태를 모두 보일 수 있다. Sakuma (2002)의 연구에 의하면 *Euchlanis*, *Monostyla*, *Trichocerca*과 같은 종은 수생식물과 같은 기질체에 매우 약하게 부착되어 있기 때문에 작은 교란(흔들림 등)에도 쉽게 떨어질 수 있다고 했으며, 본 연구에서 또한 부착 및 부유성 성향을 같이 보이는 종으로 구분되었다.

안정동위원소 분석 결과, 부착 및 부유성 동물플랑크톤은 2가지의 잠재먹이원(부착입자 및 부유입자 유기물)에 대해 각각 다른 의존도를 나타냈다. 일반적으로 알려진 동물플랑크톤의 섭식 방법은 식물플랑크톤을 여과 섭식하는 것으로 알려져 있으나 (Brown et al., 2012), 부착성 동물플랑크톤의 경우 수생식물에 부착된 유기물에 대한 이용이 더 높은 것으로 분석되었다. 부착성 동물플랑크톤이 높은 밀도를 보였던 봄에 부착입자 유기물에 대한 높은 의존도를 보였던 반면, 가을에는 부유입자 유기물에 대한 의존도가 증가되는 것을 확인할 수 있다. 가을 시기에는 수표면에 수생식물이 높은 밀도를 우점하는 시기로서, 수체 내로 빛의 유입 및 수생식물과 경쟁 등으로 인해 부착성 동물플랑크톤의 먹이원이 감소되어 (Takamura et al., 2003), 부유성 먹이원에 대한 의존도가 높아진 것

으로 사료된다. 그러나 부유성 동물플랑크톤은 서식 특성상 부착입자 유기물에 대한 의존성은 낮은 것으로 나타났다. *L. macrochirus*에 대한 부착 및 부유성 동물플랑크톤의 섭식 양상 또한 부착 및 부유성 동물플랑크톤의 월별 밀도 양상에 매우 뚜렷하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 어류의 성숙에 따른 몸 크기는 먹이의 탐색 및 포식 활동에 영향을 미치며 (Stibor, 1992), 큰 크기를 가질수록 큰 먹이원에 대한 높은 포식률을 가진다. 부착성 동물플랑크톤은 주로 작은 크기를 가지는 종이 대부분이며, 부유성 동물플랑크톤은 큰 크기를 가진다는 점을 고려할 때, 1~3 cm의 *L. macrochirus*의 경우, 봄에 부착성 동물플랑크톤의 밀도가 높을 때, 이들에 대한 높은 의존도를 보이다가, 부착성 동물플랑크톤이 감소되는 시기에는 부착성 동물플랑크톤에 대한 의존도가 감소된 것을 확인할 수 있다. 이러한 점은 어류의 치어 성장 시기가 주로 수온이 증가되는 시기인 봄 시기임을 감안할 때 (Mehner and Thiel, 1999), 부착성 동물플랑크톤의 치어의 성장 및 발달에 매우 중요한 먹이원으로 작용함을 알 수 있다. 그러나 4~7 cm의 크기의 *L. macrochirus*는 부착성 동물플랑크톤에 대한 의존도가 상대적으로 낮으며, 봄에 부유성 동물플랑크톤의 밀도가 낮을 때는 부착성 동물플랑크톤에 대한 섭식을 일부 보이다가, 부유성 동물플랑크톤의 밀도가 증가하는 가을에 이들에 대한 높은 의존도를 가지는 것으로 확인되었다. 하지만 8~10 cm 크기의 *L. macrochirus*는 부착 및 부유성 동물플랑크톤에 대한 섭식을 보이지 않았으며, 다른 먹이원 (저서성 대형 무척추동물, 치어)을 섭식하는 것으로 사료된다. 또한 다른 크기 (1~3, 4~7 cm)의 어류 또한 부착 및 부유성 동물플랑크톤 외에 다른 먹이원에 대해서도 섭식이 가능하며 (Hondorp et al., 2005), 시기에 따라 높은 섭식률을 보이기도 하지만, 본 연구를 통해서도 동물플랑크톤 외에 다른 먹이원에 대한 의존도가 증명되지 않았으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

적 요

동물플랑크톤의 서식 형태에 따른 구분(부착 및 부유성)과 월별 밀도 양상을 파악하기 위해 2011년 5월부터 10월까지 수생식물이 발달된 환경에서 동물플랑크톤 채집을 수행하였다. 조사 기간 동안, 부착성 동물플랑크톤은 총 24종, 부유성 동물플랑크톤은 총 30종으로 나타났으며, 이 중 두 서식 형태 간에 일치하는 종은 20종으로 확인되었다. 부착성 동물플랑크톤은 5~7월 동안 높은

밀도를 나타낸 반면, 부유성 동물플랑크톤은 9~10월 동안 높은 밀도를 보여 상이한 계절적 차이를 보였다. 안정 동위원소 분석 결과, 부착 및 부유성 유기물, 동물플랑크톤, 어류의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 계절별로 상이하였다. 부착성 동물플랑크톤은 봄, 가을 모두 부착입자 유기물에 대한 높은 의존도를 보였으나, 가을에는 부유성 유기물에 대해서는 일부 의존하는 것으로 나타났다. 이는 수생식물의 우점 등으로 인한 먹이질의 감소와 연관되어 있을 것으로 사료된다. 그러나 부유성 동물플랑크톤은 봄과 가을 모두 부유성 유기물에 대해서만 의존하는 것으로 나타났다. *L. macrochirus*는 크기에 따라 먹이원에 대한 다른 섭식 양상을 보였는데, 부착성 동물플랑크톤이 증가된 시기(봄)에 1~3 cm 크기의 *L. macrochirus*는 부착성 동물플랑크톤에 대한 높은 의존도를 보였으나, 가을에 부착성 동물플랑크톤 감소하자 부유성 동물플랑크톤에 대한 의존도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 4~7 cm 크기의 *L. macrochirus*는 상대적으로 큰 먹이원인 부유성 동물플랑크톤에 높은 의존도를 보였으며, 가을에 부유성 동물플랑크톤 밀도가 증가하자 매우 높게 의존하는 것으로 나타났다. 결론적으로 습지와 같이 수생식물이 우점되는 생태계에서 동물플랑크톤은 다양한 서식 형태(부착 및 부유성)를 가진 군집이 출현하는 것으로 파악되었으며, 이들은 각각 다른 먹이원에 대해 의존하는 것으로 나타났다. 또한 상위포식자인 *L. macrochirus* 또한 부착 및 부유성 동물플랑크톤의 계절별 밀도 양상에 따라 상이한 의존성을 보였으며, 특히 부착성 동물플랑크톤은 봄철 치어 성장 시기의 이들의 성장 및 발달에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

- Adrian, R. and B. Schneider. 1999. Top-down effects of crustacean zooplankton on pelagic microorganisms in a mesotrophic lake. *Journal of Plankton Research* **21**: 2175-2190.
- Angeler, D.G., M. Alvarez-Cobelas, S. Sanchez-Carrillo and M.A. Rodrigo. 2002. Assessment of exotic fish impacts on water quality and zooplankton in a degraded semi-arid floodplain wetland. *Aquatic Sciences* **64**: 76-86.
- Arcifa, M.S., T.G. Northcote and O. Froehlich. 1986. Fish-zooplankton interactions and their effects on water quality of a tropical Brazilian reservoir. *Hydrobiologia* **139**: 49-58.
- Balayla, D.J. and B. Moss. 2003. Spatial patterns and popu-

- lation dynamics of plant-associated microcrustacea (Cladocera) in an English shallow lake (Little Mere, Cheshire). *Aquatic Ecology* **37**: 417-435.
- Brown, M.E., T.M. Curtin, C.J. Gallagher and J.D. Halfman. 2012. Historic nutrient loading and recent species invasions caused shifts in water quality and zooplankton demography in two Finger Lakes (New York, USA). *Journal of Paleolimnology* **48**: 623-639.
- Burks, R.L., E. Jeppesen and D.M. Lodge. 2000. Macrophyte and fish chemicals suppress *Daphnia* growth and alter life-history traits. *Oikos* **88**: 139-147.
- Burks, R.L., E. Jeppesen and D.M. Lodge. 2001. Littoral zone structures as *Daphnia* refugia against fish predators. *Limnology and Oceanography* **46**: 230-237.
- Campbell, C.E. 2002. Rainfall events and downstream drift of microcrustacean zooplankton in a Newfoundland boreal stream. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie* **80**: 997-1003.
- Chang, K.H. and T. Hanazato. 2003. Seasonal and reciprocal succession and cyclomorphosis of two *Bosmina* species (Cladocera, Crustacea) co-existing in a lake: their relationship with invertebrate predators. *Journal of Plankton Research* **25**: 141-150.
- Choi, J.Y., K.S. Jeong, G.H. La, H.W. Kim, K.H. Chang and G.J. Joo. 2011. Inter-annual variability of a zooplankton community: the importance of summer concentrated rainfall in a regulated river ecosystem. *Journal of Ecology and Field Biology* **34**: 49-58.
- Choi, J.Y., S.K. Kim, G.H. La, K.S. Jeong, H.W. Kim, T.K. Kim and G.J. Joo. 2012. Microcrustacean community dynamics in Upo Wetlands: Impact of rainfall and physiochemical factor on microcrustacean community. *Korean Journal of Limnology* **45**: 329-335.
- Douglas, M.M., S.E. Bunn and P.M. Davies. 2005. River and wetland food webs in Australia's wet-dry tropics: general principles and implications for management. *Marine and Freshwater Research* **56**: 329-342.
- Gelinas, M., B. Pinel-Alloul and M. Slusarczyk. 2007. Alternative antipredator responses of two coexisting *Daphnia* species to negative size selection by YOY perch. *Journal of Plankton Research* **29**: 775-789.
- 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.
- Hondorp, D.W., S.A. Pothoven and S.B. Brandt. 2005. Influence of *Diporeia* density on diet composition, relative abundance, and energy density of planktivorous fishes in southeast Lake Michigan. *Transactions of the American Fisheries Society* **134**: 588-601.
- Jeppesen, E., J.P. Jensen, M. Søndergaard, M. Fenger-Grøn, M.E. Bammann, K. Sandby, P.H. Møller and H.U. Rasmussen. 2004. Impact of fish predation on cladoceran body weight distribution and zooplankton grazing in lakes during winter. *Freshwater Biology* **49**: 432-447.
- Jones, J.I., J.O. Young, G.M. Haynes, B. Moss, J.W. Eaton and K.J. Hardwick. 1999. Do submerged aquatic plants influence their periphyton to enhance the growth and reproduction of invertebrate mutualists? *Oecologia* **120**: 463-474.
- 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 Limnology* **43**: 129.
- Kobayashi, T., R.J. Shiel, P. Gibbs and P.I. Dixon. 1998. Freshwater zooplankton in the Hawkesbury-Nepean River: comparison of community structure with other rivers. *Hydrobiologia* **377**: 133-145.
- Koste, W. 1978. Rotatoria, die radertiere mitteleuropas: uberordnung monogononta: ein Bestimmungswerk (German Edition). 2 edition. Gebruder Borntraeger, Stuttgart.
- Kuczynska-Kippen, N. 2009. The spatial segregation of zooplankton communities with reference to land use and macrophytes in shallow lake Wielkowiejskie (Poland). *International Review of Hydrobiology* **94**: 267-281.
- Lampert, W., W. Fleckner, H. Rai and B.E. Taylor. 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton-A study on the spring clear water phase. *Limnology and Oceanography* **31**: 478-490.
- Lee, J.Y., T. Yoshioka and T. Hanazato. 2002. Faunal trophic interaction in an oligotrophic-dystrophic lake (Shirakoma-like, Japan). *Limnology* **3**: 151-158.
- 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.
- Mehner, T. and R. Thiel. 1999. A review of predation impact by 0+ fish on zooplankton in fresh and brackish waters of the temperate northern hemisphere. *Environmental Biology of Fishes* **56**: 169-181.
- Muzzaffar, S.B. and F.A. Ahmed. 2007. The effects of the flood cycle on the diversity and composition of the phytoplankton community of seasonally flooded Ramsar wetland in Bangladesh. *Wetlands Ecology and Management* **15**: 81-93.
- Nicoll, A., L.A. Hansson and C. Bronmark. 2010. Habitat structure and juvenile fish ontogeny shape zooplankton

- spring dynamics. *Hydrobiologia* **652**: 119-125.
- 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**: 199-210.
- Phillips, D.L. and P.L. Koch. 2002. Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models. *Oecologia* **130**: 114-125.
- Sakuma, M., T. Hanazato, R. Nakazato and H. Haga. 2002. Methods for quantitative sampling of epiphytic micro-invertebrates in lake vegetation. *Limnology* **3**: 115-119.
- Smirnov, N.N. and B.V. Timms. 1983. A revision of the Australian Cladocera (Crustacea). Australian Museum.
- Stibor, H. 1992. Predator induced life history shifts in a freshwater cladoceran. *Oecologia* **92**: 162-165.
- Takamura, N., Y. Kadono, M. Fukushima, M. Nakagawa and B.H.O. Kim. 2003. Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes. *Ecological Research* **18**: 381-395.
- Taniguchi, H., S. Nakano and M. Tokeshi. 2003. Influences of habitat complexity on the diversity and abundance of epiphytic invertebrates on plants. *Freshwater Biology* **48**: 718-728.
- Timms, R.M. and B. Moss. 1984. Prevention of growth of potentially dense phytoplankton populations by zooplankton grazing, in the presence of zooplanktivorous fish, in a shallow wetland ecosystem. *Limnology and Oceanography* **29**: 472-486.

(Manuscript received 4 November 2012,
Revised 4 December 2012,
Revision accepted 19 December 2012)