

팔당호에서 인공 수초재배섬 설치에 따른 동물플랑크톤 군집 변화

유경아[†] · 박혜경 · 변명섭 · 전남희 · 최명재 · 윤석환 · 공동수

국립환경과학원 한강물환경연구소

Changes of Zooplankton Community in an Artificial Vegetation Island of Lake Paldang

Kyung-A You[†] · Hae-Kyung Park · Myeong-Seop Byeon · Nam-Hui Jeon · Myung-Jae Choi · Seok-Hwan Yun · Dong-Soo Kong

Han-River Environment Research Center, National Institute of Environment Research

(Received 21 February 2007, Accepted 10 April 2007)

Abstract

Zooplankton community dynamics were studied after establishment of an artificial vegetation island (AVI) in Lake Paldang, from April 2005 to November 2006. There were distinct seasonal and inter-annual changes of total zooplankton abundance at the survey site. Total zooplankton abundance rapidly increased in spring and fall, while it remained low throughout winter. During summer, the dynamics of zooplankton community seemed to be largely affected by hydrological parameters such as, precipitation and inflow. Total zooplankton abundance and biomass below AVI was much higher than that of pelagic zone (L1) in Lake Paldang. Copepoda and cladocera represented the main bulk of the zooplankton community from summer to fall at the both sites. Copepods were more dominant at AVI area, while cladocera were more dominant at pelagic zone (L1). Water quality, prey and habitat condition, species competition between zooplankton seemed to play important roles in dominance of the copepoda and cladocera in zooplankton community at AVI area. Our results conclude that artificial vegetation island provide the stable habitat and besides phytoplankton, diverse food to zooplankton, and consequently influence the diversity and richness of zooplankton community.

keywords : Artificial Vegetation Island, Microbial loop, Zooplankton

1. 서론

수중생태계에는 먹이피라미드의 하부를 구성하는 많은 미소생물이 서식하고 있다. 특히 수중생태계에서 동물플랑크톤의 섭식활동은 부유 미생물 간의 에너지 흐름의 주요한 역할을 담당하고 있으며(Keckeis et al., 2003), 1차 소비자로서 박테리아와 원생생물을 포함하는 미생물의 유기물 분해과정을 통한 물질순환과 용존성 유기물질을 동화하여 상위 영양단계에 전달하는 이른바 'microbial loop' 내에서도 중요한 위치를 차지하고 있다(Azam et al., 1983). 동물플랑크톤은 식물플랑크톤과 박테리아 및 원생동물들을 섭식함으로써 먹이사슬 상위 단계인 어류로 에너지를 전달하는 역할을 한다(Hwang et al., 1999; Kim et al., 2000).

팔당호는 총 유역면적이 23,800 km²이고 평균수심은 6.5 m, 수리학적 체류시간은 3.0~6.7일로서 수온층형이 형성되지 않는 수체이다. 팔당호로 유입되는 수량은 남한강이 55%, 북한강이 43.4% 그리고 경안천이 1.6% 정도를 차지하여 경안천의 유입수 기여율은 상대적으로 적은 편이다. 그러나 경안천은 해발고도 200 m 이하의 유역이 전체 유역의 70% 이상으로 저지대 내 각종 오염원의 영향으로 수

질오염에 취약한 상태이며 유역이 수도권에 인접해 있어 인구밀도가 증가 추세에 있고 상류에는 유출조절을 관장하는 댐이 없어 갈수기에 특히 악화된 오염상태를 보이고 있다. 이에 따라 갈대 등의 수초를 인공의 부유체에 재배하여 수중의 영양염류 제거를 통한 수질정화, 어류와 동·식물플랑크톤 등 각종 수생생물의 산란 및 서식공간 제공, 생태계의 먹이 사슬을 이용한 조류 증식 억제 등 쾌적한 수변환경 조성 및 자연환경 기능 향상을 도모하기 위하여 팔당호 경안천 수역에 수초재배섬(AVI: Artificial Vegetation Island)을 설치하였다(박 등, 2005a).

수초재배섬에 식재된 수초의 뿌리는 수중에 뻗어있어 동물플랑크톤을 포함한 미소생물의 서식공간이나 산란처, 포식동물에 대한 피난처 등의 공간으로 활용되며 미소생물이 수초뿌리 공간에 대한 공간적인 지위를 확보하게 되면 이러한 생물을 먹이로 하는 포식동물이 유입되게 된다. 이러한 과정을 거쳐 최종적으로 대형 어종 등이 먹이활동을 할 수 있게 되면서 안정된 피라미드 구조를 완성하게 되며 이 과정에서 동물플랑크톤은 1차생산자(식물플랑크톤) 중심의 먹이연쇄 및 세균으로부터 시작되는 microbial loop내의 1차 소비자로서 물질 순환 및 에너지 흐름에 필수적인 역할을 한다.

본 연구에서는 인공 수초재배섬 내부 수역과 수초가 없는 팔당호 경안천 수역의 호소중심부에서 동물플랑크톤의

[†] To whom correspondence should be addressed.
angelka@hanmail.net

현존량과 생물량, 분류군별 군집구성의 변동과 수역별 차이를 조사하여 수초재배섬의 존재에 따른 동물플랑크톤의 군집 변화와 이에 영향을 미치는 환경 인자를 밝히고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

팔당호 경안천 수역에 설치된 수초재배섬(경기도 광주시 퇴촌면 오리)은 시설면적 2,690 m², 식재면적 2,560 m²이고, 부유틀은 가로 20 m, 세로 8 m의 스테인레스 재질로 만들었으며 16개의 부유틀을 2열로 길게 배치하여 각 부유틀에는 수초를 고정할 수 있는 식재망(1.3 m×1.3 m)을 올려놓았다. 조사지점은 수초재배섬 내부지점(AVI)과 외부의 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)을 선정하였으며 두 지점 모두 수심이 깊지 않은 지역으로(Table 1) 표층수 조사를 실시하였다. 조사기간은 2005년 4월부터 2006년 11월까지 매주 또는 격주로 조사하고 동절기는 제외하였다(Fig. 1).

Table 1. Means and standard deviations of environmental parameters at survey sites (2005~2006, n=60, AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang)

	AVI	L1
Water depth (m)	2.0±0.9	3.2±0.9
Water temperature (°C)	19.5±5.8	19.2±5.7
pH	7.2±0.5	8.0±0.8
Conductivity (µS/cm)	253±81	253±85
DO (mg/L)	4.5±3.8	10.2±3.0
Chl. a (µg/L)	24.7±24.1	47.0±41.8

2.2. 이화학적 수질 인자 분석

수온, pH, 전기전도도, 용존산소농도(DO)는 현장에서 현장수질측정기(YSI-6600D)를 이용하여 측정하였으며, 클로

로필 a 농도는 수질오염공정시험방법(환경부, 2004)에 준하여 분석하였다. 경안천의 강우량과 유입량은 국가수자원관리종합정보시스템 홈페이지(www.wamis.go.kr)의 자료를 사용하였다.

2.3. 동물플랑크톤 분석

수초재배섬 내부는 2개소의 조사지점을 선정하여 각 지점에서 표층수 3 L씩을 채수하여 총 6 L의 시료를 망목 60 µm 플랑크톤 네트로 농축하여 채집하였으며 팔당호 경안천 수역 호소중심부에서는 정량 비이커를 이용하여 각 50 L씩 총 100 L를 망목 60 µm 플랑크톤 네트로 농축하여 동물플랑크톤을 채집하였다. 각 조사지점에서 동물플랑크톤의 채집은 오전 10시부터 11시 사이에 이루어졌다. 채집된 동물플랑크톤 시료는 중성 포르말린액(20%)으로 최종농도 5%로 고정하였으며 동물플랑크톤의 정량·정성분석은 동물플랑크톤을 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣고 광학 현미경 하에서 10~200배의 배율로 윤충류, 요각류, 지각류로 구분하여 각 종별로 계수하였다(Balcer et al., 1984; Mizuno, 1991; Stemberger, 1979; 조, 1993; 유, 2005).

현미경 관찰시 출현종에 대한 가로, 세로 길이를 모두 측정하여 평균값을 생물량 계산에 이용하였다. 윤충류 체적은 Downing 등(1984)이 제시한 식에 따라 계산하였고, 동물플랑크톤의 비중을 1.025로 가정하여 습중량을 구하고, 습중량의 10%를 건중량으로 계산하였다(Hall et al., 1976; Pace et al., 1981). 지각류와 요각류의 건중량은 Length-Dry weight 관계식($W=aL^b$)을 사용하여 계산하였다(Culver et al., 1985). 동물플랑크톤의 생물량(탄소량: µgC/L)은 건중량의 48%를 탄소량으로 고려하여(Andersen et al., 1991) 산출하였다. 예외적으로 윤충류의 두 속(genus)인 *Asplanchna*와 *Synchaeta*는 몸체가 매우 약해서 약간의 충격에도 쉽게 파괴되고 다른 종에 비해 수분함량이 많기 때문에 건중량을 습중량의 4%로 하였다(Dumont et al., 1975).

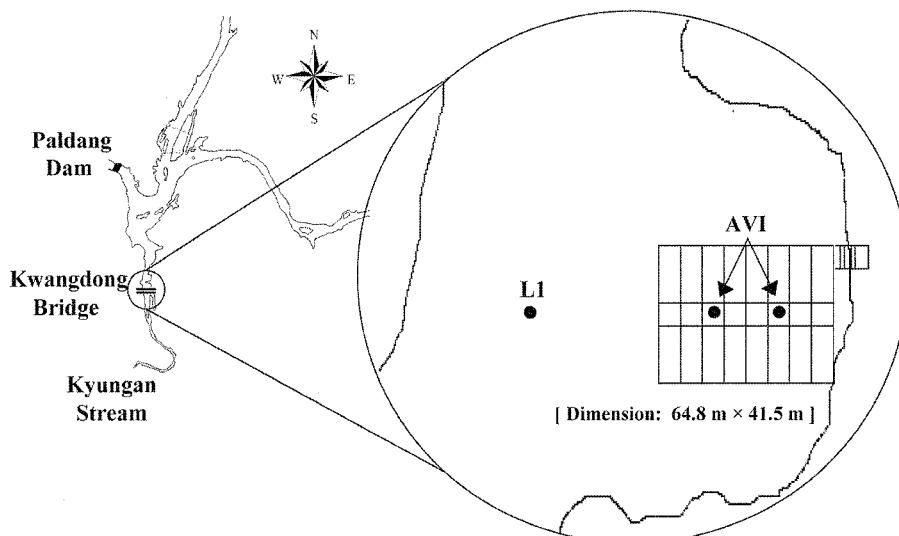


Fig. 1. Map showing the study sites (AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang).

2.4. 통계분석

동물플랑크톤과 각 환경인자간의 상관관계를 구하기 위하여 Parson's correlation analysis를 통해 분석하였고(SPSS 11.0), 통계적 유의 수준은 $p < 0.05$ 를 기준으로 하였다. 조사 지점 간의 차이는 전체의 자료를 상관분석 하였으며, 계절 별 차이는 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월)로 나누어 상관분석을 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수리학적 환경요인의 변동

2005년 1월부터 2006년 11월까지 경안천의 강우량과 유입량을 조사한 결과 2005년 4월부터 6월 중순까지는 강우가 많지 않았고 1회 20 mm이하의 적은 양의 강우가 간헐적으로 있었으며 유입량 역시 일정한 양을 유지하였다(Fig. 2). 2005년 6월 하순 이후부터 9월 하순까지는 몬순기후대의 특성에 따른 장마와 집중강우의 영향으로 강우량이 급증하였으나 태풍에 의한 집중호우는 나타나지 않았으며 유입량 역시 강우량에 따라 증감을 반복하였다. 2005년 10월부터 이듬해인 2006년 4월까지의 갈수기였으며 2006년 4월에 소량의 간헐적인 강우가 있었다. 2006년에는 5월에 일시적으로 100 mm이상의 강우가 있었으며 6월 말 이후 장마가 시작되면서 7월에 200 mm이상의 강우가 집중되었다. 집중강우에 따라 경안천의 유입유량 역시 급격히 증가하여 일시적으로 300 CMS를 초과하는 유량을 보였다. 2006년 8월 말에 일시적인 강우가 있는 후에는 11월까지 강우가 거의 없는 갈수현상을 보였으며 경안천의 유입유량 역시 감소하여 일정한 수준을 유지하였다.

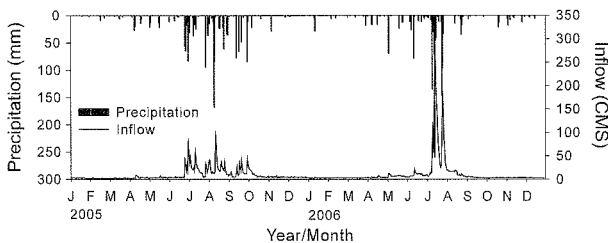


Fig. 2. Temporal variation of daily precipitation and inflow in Kyungan Stream during 2005~2006.

3.2. 이화학적 환경요인의 변동

수초재배설 내부지점(AVI)과 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)간의 평균 수온은 각각 19.5°C, 19.2°C로 수초재배설 내·외부간의 수온 차이는 거의 없었다(Table 1). 지점 간 평균 pH는 AVI지점에서 7.2, L1지점에서 8.0으로 L1지점의 pH가 높았으며 특히, 연중변화를 살펴보면 상당한 차이가 나타난 것으로 조사되었다(Fig. 3). 수체의 pH는 용존 이산화탄소 농도에 크게 영향을 받아 용존 이산화탄소 농도가 낮으면 pH가 상승하고 높으면 pH가 감소한다. 식물플랑크톤의 1차 생산 과정에서 용존 이산화탄소가 소모되기 때문에 식물플랑크톤의 증식이 활발한 수역에서는

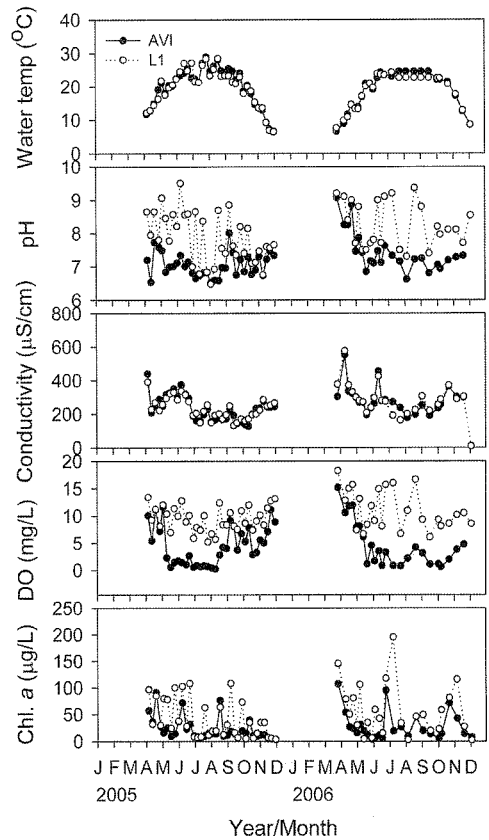


Fig. 3. Temporal variations of environmental parameters at survey sites (2005~2006, n=60, AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang).

용존 이산화탄소의 농도가 낮고 식물플랑크톤의 증식이 활발하지 않은 수역에서는 대기에서 지속적으로 공급되는 이산화탄소에 의해 용존 이산화탄소 농도가 높다(박 등, 2005b). 식물플랑크톤 현존량을 지표하는 클로로필 a의 평균 농도는 AVI지점에서 24.7 µg/L, L1지점에서 47.0 µg/L로 팔당호 경안천 수역 호소중심부에서 수초재배설 내부에 비해 약 2배 높았으며 장마철에 유입유량이 급증하면서 washing out 현상이 나타났던 시기를 제외하면 팔당호 경안천 수역 호소중심부에서는 100 µg/L 이상의 대발생을 보였다. 따라서 L1지점의 pH가 AVI지점에 비해 높은 이유는 수초재배설 내부에 비해 팔당호 경안천 수역 호소중심부에서 식물플랑크톤의 증식이 활발히 일어났기 때문이며, L1 지점에서 pH와 클로로필 a 농도의 상관분석 결과에서도 두 인자가 뚜렷한 양의 상관관계를 보여($r=0.71$, $p < 0.01$, $n=60$) 이 수역에서 pH의 증가가 식물플랑크톤의 증식에 기인함을 나타내었다.

AVI지점과 L1지점간의 평균 전기전도도는 각각 253.4 µS/cm, 252.7 µS/cm로 차이를 보이지 않았다(Table 1). 용존 산소농도(DO)는 AVI지점에서 4.5 mg/L, L1지점에서 10.2 mg/L로 큰 차이가 나타났으며 특히, 초여름 수초의 생장이 왕성하던 시기에 두드러지게 나타났다. 이러한 수초재배설 내부의 DO 감소는 수초로 인한 대기와의 교환저해, 수중 식물플랑크톤 현존량 감소에 따른 산소공급 감소, 수초 근

권 미생물의 유기물 분해에 따른 산소 소모의 이유를 들 수 있다(박 등, 2005b).

3.3. 지점별 동물플랑크톤의 변화

3.3.1. 현존량과 생물량의 경시적 변동

2005년 4월부터 2006년 11월까지 결빙기(12~2월)를 제외하고 수초재배섬 내부지점(AVI)과 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)에서 동물플랑크톤의 발생현황을 조사하였다. 현존량의 조사결과 AVI지점에서 9,485 Ind./L, L1 지점에서 1,675 Ind./L로 수초재배섬 내부의 동물플랑크톤

현존량이 팔당호 경안천 수역 호소중심부에 비해 약 6배 높은 것으로 조사되었다(Fig. 4). 동물플랑크톤의 탄소함량으로 나타난 생물량 역시 AVI지점에서 11,043 $\mu\text{gC/L}$, L1 지점에서 654 $\mu\text{gC/L}$ 로 AVI지점에서의 생물량이 L1지점에 비해 약 17배 높게 조사되었다(Fig. 5). L1지점은 강우에 따른 경안천 유입유량 변동의 영향을 직접적으로 받아 계절별 및 월별 동물플랑크톤의 밀도 차이가 크게 나타났다(Table 2). 특히, 장마철인 7~8월에 밀도 감소가 큰 것으로 보아 집중강우와 이에 따른 경안천 유입유량의 증가 및 유속 변동의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다($r=-0.47$,

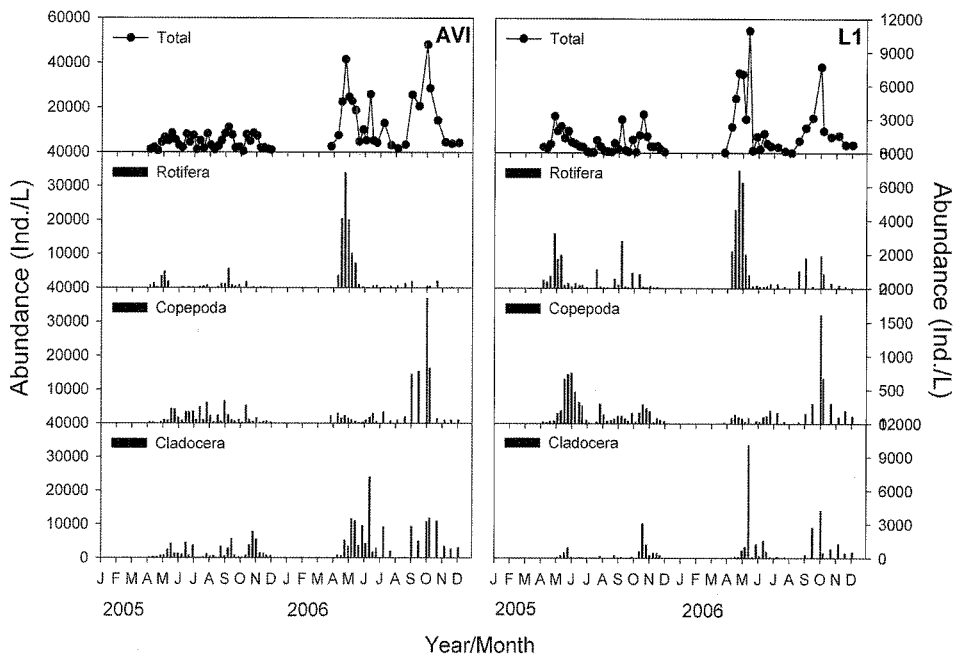


Fig. 4. Temporal changes of zooplankton community abundance (Ind./L) at survey sites (2005~2006, n=60, AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang).

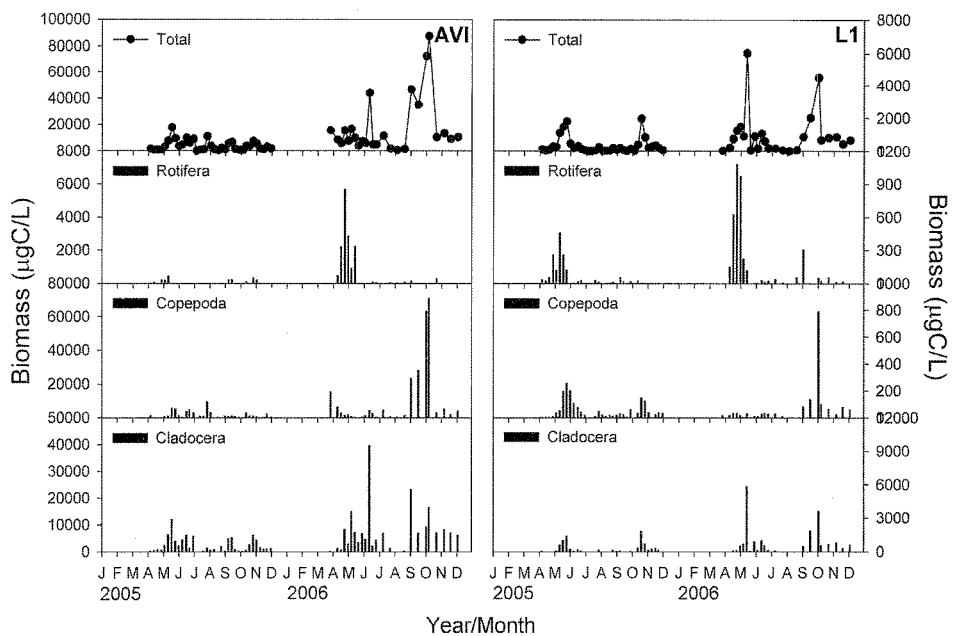


Fig. 5. Temporal changes of zooplankton community biomass ($\mu\text{gC/L}$) at survey sites (2005~2006, n=60, AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang).

Table 2. Zooplankton community abundance (Ind./L) and biomass ($\mu\text{gC/L}$) as a seasonal average at survey sites (AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang)

		2005				2006				Total average
		Spring	Summer	Fall	Average.	Spring	Summer	Fall	Average	
Abundance (Ind./L)	AVI	4247	4362	4466	4374	15968	10191	17672	14597	9485
	L1	1549	436	995	898	3726	871	2437	2451	1675
Biomass ($\mu\text{gC/L}$)	AVI	5335	3981	3364	4061	9627	14488	34066	18026	11043
	L1	637	123	356	327	1169	367	1415	981	654

$p < 0.05$, $n = 13$). 반면, AVI지점은 인공구조물 및 거기에 식재된 수초의 영향으로 수체의 교란이 크지 않아 동물플랑크톤의 washing out 현상이 적었으며 팔당호 경안천 수역 호소중심부보다 세균과 유기물 함량이 높은 것으로 나타나 (박 등, 2005b) 동물플랑크톤의 먹이원이 풍부하였던 것으로 판단된다. 이러한 수체의 안정과 풍부한 먹이원은 수초재배섬에서의 동물플랑크톤 밀도가 팔당호 경안천 수역의 호소중심부에 비해 계절별 변동이 적고 높았던 주요한 원인이었던 것으로 보인다.

조사년도별 차이를 살펴보면, 2005년에 비해 2006년에 동물플랑크톤의 밀도가 증가하여 AVI지점에서는 2005년에 4,374 Ind./L, 2006년에 14,597 Ind./L로 조사되었으며 L1지점에서는 2005년에 898 Ind./L, 2006년에 2,451 Ind./L로 나타나 2005년에 비해 2006년의 동물플랑크톤 밀도가 3배 정도 높은 것으로 조사되었다(Table 2). 2005년에는 4월 이후부터 10월까지 팔당호 경안천 수역에 비록 양이 많지는 않으나 주기적인 강우가 있었고 하계에는 장마와 집중강우가 있어 경안천의 유입유량의 변동이 심하여 수체의 안정화가 지속적이지 못하고 교란현상이 빈번하였으나, 2006년에는 7월의 집중강우를 제외하곤 소량의 강우가 간헐적으로 있었으며 가을에는 갈수현상이 나타나 수체가 비교적 안정적이었다(Fig. 2). 이러한 수체의 안정화는 높은 영양염류 농도와 식물플랑크톤의 증식, 미소생물의 번성을 가져와 동물플랑크톤의 성장에 적절한 먹이원의 공급으로 이어져 수초재배섬을 비롯한 팔당호 경안천 수역의 전역에 동물플랑크톤의 증식을 가속화시켰을 것으로 판단된다.

2005년과 2006년 모두 봄철에 각 지점에서 동물플랑크톤의 밀도가 급격히 증가하였는데(Fig. 4, 5), 봄이 되면 수온 상승으로 동물플랑크톤 활동성이 증가하고 먹이원이 되는 식물플랑크톤의 증가로 섭식율이 증가하여 연 중 최대 생물량을 나타낸다(Sommer et al., 1986; 김 등, 1999; 유, 2005). 본 연구에서 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)은 봄철 클로로필 a의 농도가 증가한 것으로 나타나 이 시기에 먹이원인 식물플랑크톤 현존량의 증가가 동물플랑크톤의 증가로 이어진 것으로 볼 수 있다. 그러나 수초재배섬 내부지점(AVI)은 수초의 성장에 따라 클로로필 a의 농도가 줄어드는 것으로 나타나 동물플랑크톤 밀도 증가의 원인이 식물플랑크톤 외의 다른 것에 기인한 것이라 예상할 수 있다. 식물플랑크톤의 대체 먹이원이면서 동물플랑크톤 증가의 또 하나의 가능성 있는 원인은 2~10 μm 크기의 작은 편모조류와 원생동물의 우점이다. Constance호를

대상으로 한 연구에서도 규조류의 번성이 줄어드는 늦봄에 작은 편모조류의 생물량이 증가하며 세포의 크기가 작아서 다른 시기보다 동물플랑크톤의 섭식에 적절하여 동물플랑크톤 증가에 직접적인 원인이 된다고 하였다(Weisse, 1991). 이외의 보고에서도 봄철 식물플랑크톤의 우점 이후 동물플랑크톤이 증식하기까지 편모조류, 섬모충류 및 원생동물의 생체량이 중요하게 작용한다고 보고하였고(Finlay et al., 1988; Bloem et al., 1989), Smetacek(1981)는 섬모충류와 작은 편모조류는 식물플랑크톤보다 오히려 동물플랑크톤의 계절적인 군집거동을 조절하는 가장 중요한 요인이라고 지적하였다. 본 연구에서는 원생동물의 현존량은 파악하지 못했으나 수중생태계 먹이망에서 분해자 및 생산자의 역할을 동시에 수행하는 가장 기본적인 구성인자인 세균에 대해 조사하였다. 세균은 수초재배섬이 없는 지역에 비해 수초재배섬이 설치된 수역에서 물질 순환을 매우 빠르게 하고 유기물 제거량은 훨씬 크게 하는 것으로 보고된 바 있으며(Shimatani, 1996), 활성 세균의 증가는 그 수역의 활발한 물질순환과 미소생물의 다양성 및 먹이망의 상위단계로의 원활한 흐름을 의미한다. 수초재배섬 내부지점(AVI)에서 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)에 비해 세균의 활성도가 높아 물질순환이 활발히 일어났으며(박 등, 2006), 이는 동물플랑크톤의 주요 먹이원이 되었을 것이다. 또한, 세균의 활성도 증가는 원생동물의 증가를 야기하며(McManus et al., 1988) 원생동물은 작은 크기와 빠른 대사활동으로 인해 생태계의 물질순환과 에너지 흐름을 촉진시켜 미생물 먹이망과 중형 동물플랑크톤으로 연결하는 역할을 하므로(Azam et al., 1983; Sheldon et al., 1986; Rassoulazdegan et al., 1988; Carrick et al., 1989; Sherr et al., 1994) 수초재배섬 내부에서의 동물플랑크톤 증식에는 세균과 원생동물의 영향이 크게 작용했을 것으로 추정된다. 이러한 원생동물 발생의 예측은 수초재배섬 내부에서 원생동물 섭식이 가능한 중형동물플랑크톤(요각류, 지각류)이 소형동물플랑크톤인 유휴류보다 더 많이 증식하는 것으로 설명될 수 있다.

봄철의 동물플랑크톤 대증식이 끝나고 여름에 장마와 집중강우에 따른 팔당호 경안천 수역의 유입유량의 변동이 심해짐에 따라 L1지점의 여름철 동물플랑크톤 밀도는 크게 감소하였던 반면 AVI지점은 계절별 변동이 크지 않았다. 가을에는 갈수현상으로 수체가 안정화됨에 따라 다시 동물플랑크톤의 밀도가 크게 증가하였으며 10월 이후에는 기온 하강에 따른 저수온으로 동물플랑크톤의 밀도 역시 감소하는 경향을 보였다.

3.3.2. 분류 군집별 변동 비교

동물플랑크톤 군집을 크게 유휴류, 요각류, 지각류의 세 군집으로 나누어 각 군집별 현존량 및 생물량의 경시적 변동을 조사하였다. 대부분의 온대 호수에서 봄에 동물플랑크톤의 천이양상은 짧은 세대교번의 소형 유휴류가 수일 내에 기하급수적으로 증가한 이후 섬모충류나 편모충류와 같은 원생동물이 동물플랑크톤의 먹이원으로 증가할 때 크기가 크고 성장률이 느린 지각류와 요각류 종이 증가한다 (Sommer et al., 1986). 본 연구에서도 봄에 유휴류의 증가가 두드러졌으며 특히 동물플랑크톤이 대량 증식하던 시기인 4월에 유휴류의 우점 비율은 수초재배섬 내부지점(AVI)에서 61%, 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)에서 95%로 나타났다(Fig. 6). 그러나 AVI지점과 L1지점 간의 동물플랑크톤 군집별 밀도 차이가 큰 것은 수초지대에 따른 동물플랑크톤 먹이원의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 수초재배섬 내부에서 동물플랑크톤 먹이원의 대상은 주로 식물플랑크톤보다는 세균과 섬모충류, 편모충류와 같은 원생동물로 원생동물의 경우에는 먹이입자의 크기가 커 초식성인 소형 유휴류보다는 요각류나 지각류가 섭식하기에 용이하기 때문에 수초재배섬 내부에서 유휴류의 우점도가 낮고 지각류, 요각류의 우점도가 높았던 것으로 판단된다. 또한, 수초뿌리가 요각류와 지각류 같은 몸체가 큰 동물플랑크톤의 산란과 발생단계에 따른 시·공간적 서식처를 제공해줌에 따라 L1지점에 비해 AVI지점에서 요각류, 지각류의 밀도가 현저하게 높았던 것으로 판단된다. 수초재배섬 내부에서 봄에 은편모조류와 작은 중심목 규조류가 번성하여 이를 먹이원으로 하는 유휴류가 급격히 증가하였으나, 5월 중순 이후에는 수초의 길이생장에 따른 광의 차단으로 식물플랑크톤이 증식하지 못하였으며 이에 따라 동물플랑크톤의 주요먹이원이 식물플랑크톤이 아닌 세균과 원생동물로 천이되었을 가능성이 크고 이러한 먹이원의 공급이 요각류와 지각류의 번성을 가져왔을 것으로 판단된다. 또한, 크기가 큰 요각류나 지각류가 유휴류를 먹이원으로 이용하거나 서로 경쟁함으로써 유휴류의 성장을 억제할 수 있는 것으로(Gilbert et al., 1985) 보고되고 있으므로, 수초재배섬 내부의 동물플랑크톤 군집 동태 역시 중간 경쟁에 따른 요각류, 지각류의 대변성이 일어났을 경우도 생각할 수 있다.

L1지점에서는 동물플랑크톤 군집밀도가 증가할수록 유휴류, 요각류, 지각류 모두 증가하는 경향을 보였으나 AVI지점에서는 동물플랑크톤 군집밀도의 증감에 따른 분류군별 증감이 일치하지 않을 뿐만 아니라 유휴류가 감소할 때 요각류의 증가가 두드러지게 나타났으며 이는 중간경쟁에서 우위에 있는 요각류가 유휴류를 먹이로 이용함에 따라 발생한 것이라 생각할 수 있다.

장마와 집중강우 시기였던 여름에는 L1지점과 AVI지점 모두 수리학적 영향으로 동물플랑크톤 군집 밀도의 변화가 다변적이었다. L1지점은 2005년과 2006년 모두 여름철 집중강우 이후 일시적으로 유휴류가 우점하여 2005년 7월 말에 97%, 2006년 8월 초에 98%의 우점도를 나타냈다(Fig. 6).

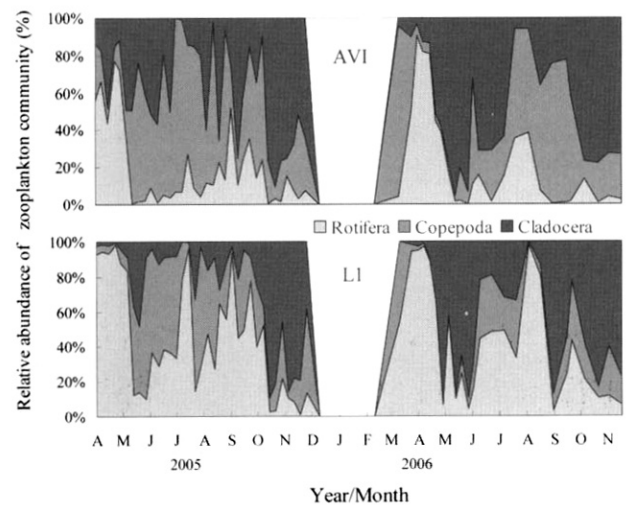


Fig. 6. Relative abundance of zooplankton community (%) at survey sites (2005~2006, n=60, AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang).

이는 봄에 유휴류가 대변성하는 것과 같은 현상으로 집중강우에 따른 washing out 현상 이후 세대교번이 빠른 유휴류가 먼저 증가하였기 때문이다. 이러한 일시적인 유휴류 우점 이후에는 요각류와 지각류가 증가하였으며 각각의 분류군에 해당하는 다양한 종들이 혼재하는 양상을 나타냈다. AVI지점 역시 일시적으로 유휴류가 증가하였지만 동물플랑크톤 군집내 점유율은 크지 않았고 오히려 요각류가 증가했던 것으로 조사되었다.

가을에는 AVI지점과 L1지점 모두 유휴류는 감소하고 요각류와 지각류가 증가하였는데, 9월에는 두 지점 모두 요각류의 우점 비율이 높았으나 점차 지각류의 밀도가 증가하여 10월 이후에는 지각류가 우점하였다. 그러나 조사지점간의 분류군의 우점 비율에는 차이가 있었으며 AVI지점에서는 요각류의 우점 비율이 높은 반면, L1지점에서는 지각류의 우점 비율이 높게 조사되었다(Fig. 6). AVI지점에서는 수초의 shading 효과에 따른 식물플랑크톤의 증식 억제로 동물플랑크톤의 주요 먹이원이 원생동물이나 중간경쟁에서 밀린 소형 유휴류로 이를 섭식할 수 있는 요각류가 주로 우점한 것이라 볼 수 있다. 그러나 L1지점에서는 같은 시기에 *Microcystis spp.*와 *Anabaena spp.*와 같은 독성 남조류가 대변성하였고(박 등, 2006), 따라서 남조류 독성에 내성이 있고 남조류를 먹이원으로 사용할 수 있는 것으로 알려진(Fulton, 1988) *Bosmina longirostris*가 중심이 된 지각류의 우점도가 높았던 것으로 판단된다. 10월에는 두 지점 모두 지각류가 우점하였으며 11월에 기온이 낮아짐에 따라 동물플랑크톤 밀도가 감소하였고 지각류의 우점비율 역시 감소하면서 상대적으로 요각류의 우점비율이 증가하였다. 먹이가 부족하고 수온이 낮은 겨울에는 성장률이 느린 요각류 유생과 몇몇의 성체만이 존재하며, 지각류는 퇴적층에서 휴지기를 보내기 때문에 거의 출현하지 않는 것으로 알려져 있는데(Agbeti et al., 1995), 본 연구에서는 겨울동안에 조사가 이루어지지 않아 단정하진 어려우나 11월

의 동물플랑크톤 발생패턴으로 미루어볼 때 지각류는 점차 줄어들었으며 동물플랑크톤 군집 밀도에서 차지하는 요각류 유생(nauplius, copepodid)의 비율이 커진 것을 확인할 수 있었다.

2년간의 조사 결과를 살펴보면, 동물플랑크톤의 분류군별 점유율은 AVI지점은 윤충류 21%, 요각류 37%, 지각류 42%였으며 L1지점은 윤충류 45%, 요각류 23%, 지각류 32%로 조사되어 수초재배설에서는 요각류와 지각류의 생장이 더 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

3.3.3. 출현종과 우점종의 변동

분류군별 출현종수는 수초재배설 내부지점(AVI)에서 윤충류 19속 28종, 요각류 6속 7종과 유생(nauplius, copepodid), 지각류 10속 17종이 출현하였으며, 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1)에서 윤충류 23속 38종, 요각류 4속 4종과 유생(nauplius, copepodid), 지각류 10속 16종이 출현하였다. 수초재배설 내부가 팔당호 경안천 수역 호소중심부보다 요각류와 지각류의 밀도가 높았던 만큼(Fig. 4) 종 풍부도 역시 높은 것으로 조사되었으며 윤충류의 종 풍부도는 수초재배설 내부보다 팔당호 경안천 수역 호소중심부에서 높은 것으로 나타나 먹이원의 차이와 종간경쟁의 영향이 작용한 것으로 판단된다.

수초재배설 내부지점(AVI)과 팔당호 경안천 수역 호소중심부지점(L1) 모두 봄에 윤충류가 우점하였고 주요 우점속은 *Brachionus*속으로 특히, *Brachionus calyciflorus*가 절대 우점하였다(Fig. 7). *Keratella spp.*와 *Polyarthra spp.*는 연중 출현하는 윤충류의 대표적인 종으로 본 연구에서도 시기와 조사지점간의 큰 차이 없이 빈번하게 출현하였으며 윤충류가 대변성하던 봄과 가을의 짧은 기간에는 *Brachionus spp.*와 마찬가지로 그 수가 크게 증가하였다. 윤충류의 밀도가 증가를 멈춘 후 지각류로 천이가 일어났으며 지각류 중 몸집이 작은 *Bosmina longirostris*가 먼저 우점하였다(Fig. 7).

봄에는 동물플랑크톤의 군집 밀도가 최대로 나타나고 주로 윤충류가 증가하는 것으로 윤충류의 종 풍부도는 크지만 요각류와 지각류의 종 풍부도는 비교적 낮은 편이었다. 그러나 여름으로 갈수록 동물플랑크톤의 군집 밀도는 감소하더라도 요각류와 지각류는 증가하여 동물플랑크톤 군집 전체의 종 풍부도는 증가하였다. 여름에는 요각류와 지각류의 발생빈도가 큰 것으로 나타났으며 요각류는 주로 유생형태(nauplius, copepodid)의 출현이 많았고 성체 중에서는 *Cyclops vicinus*의 출현빈도가 높았다. 지각류는 여러종이 혼재한 가운데 주요 출현종은 *Alona guttata*, *Chydorus spaeicus*, *Daphnia galeata*, *Diaphanosoma brachyurum*, *Moina weismanni*, *Simocephalus vetulus*인 것으로 조사되었다. 또한 여름에는 일시적으로 지각류 중 *Diaphanosoma brachyurum*이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 장마와 집중강우 이후에는 일시적으로 윤충류가 증가하였으며 AVI 지점은 윤충류 내 여러종이 혼재하였으나 L1지점은 남조류가 우점함에 따라 남조류 독성에 내성이 있고 남조류를 먹이원으로 섭취 가능한(Fulton et al., 1987) *Brachionus calyciflorus*가 제1 우점종으로 번성하였다. 일시적인 윤충류 번성 이후 요각류와 지각류로 천이되어 9월에 수초재배설 내부는 주로 요각류가 우점하였고 특히 유생(nauplius, copepodid)의 밀도가 급격히 증가하였으며 이때 주로 출현한 요각류 성체는 *Cyclops vicinus*, *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops hyalinus*였다. 팔당호 경안천 수역 호소중심부는 지각류가 우점하였으며 *Bosmina longirostris*의 밀도가 가장 높았다. 10월에는 두 지점 모두 지각류가 우점하였고 *Bosmina longirostris*와 *Daphnia galeata*가 빈번히 출현하였으며 *Bosmina longirostris*가 제1우점종으로 조사되었다.

4. 결론

본 연구에서는 2005부터 2006년까지 수초재배설 내부 및

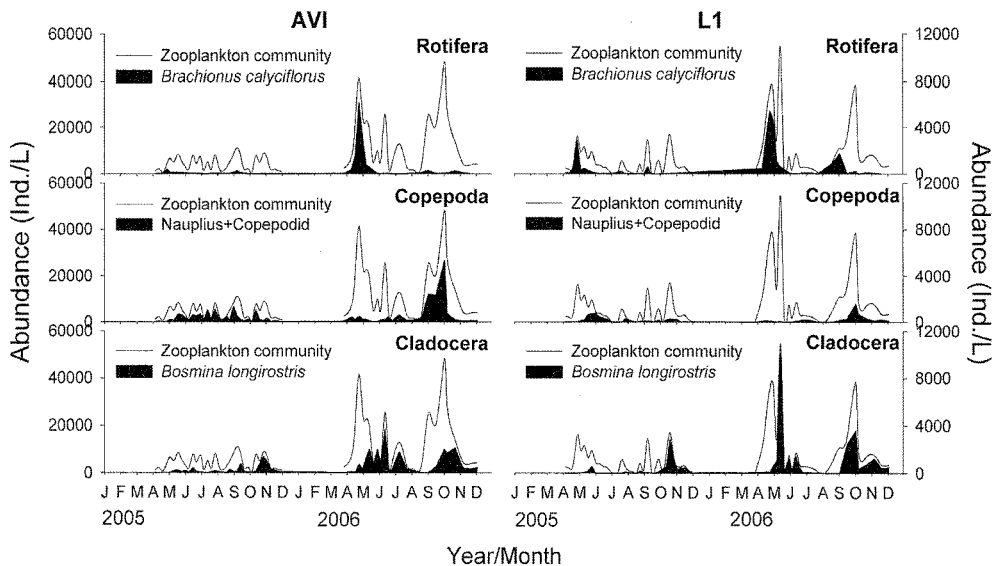


Fig. 7. Temporal changes of abundances of dominant zooplankton taxa at survey sites (2005~2006, n=60, AVI: artificial vegetation island, L1: pelagic zone influenced by Kyungan Stream in Lake Paldang).

팔당호 경안천 수역 호소중심부에서의 동물플랑크톤 발생 패턴을 비교하여 수초재배섬의 설치가 수중 동물플랑크톤 군집변동에 미치는 영향을 분석하였다. 수초재배섬 내부의 동물플랑크톤 현존량이 팔당호 경안천 수역 호소중심부의 동물플랑크톤 현존량에 비해 약 6배 높은 것으로 조사되었으며, 탄소함량으로 환산한 생물량의 차이는 약 17배에 달했다. 팔당호 경안천 수역 호소중심부에서는 식물플랑크톤이 동물플랑크톤의 주요 먹이원인 반면 수초재배섬은 대체 먹이원인 미소생물상(세균, 원생동물)이 풍부하여 동물플랑크톤의 증식이 더 활발했을 것으로 판단되며, 팔당호 경안천 수역의 유역강우와 이에 따른 유량변동의 영향이 두 지점간의 동물플랑크톤 밀도 차이를 크게 한 또 다른 이유로 판단된다.

윤충류, 요각류, 지각류의 분류군별 밀도 차이로 보면 수초의 성장에 따른 shading 효과로 인한 동물플랑크톤 먹이원의 차이와 동물플랑크톤의 중간경쟁으로 인해 두 조사 지점간의 분류군별 밀도 차이가 크게 나타났으며, 팔당호 경안천 수역 호소중심부보다 수초재배섬 내부에서 요각류, 지각류의 현존량이 큰 것으로 조사되었다. 봄에는 두 지점 모두 윤충류가 우점하였으나 이후에는 요각류, 지각류가 증가하여 수초재배섬 내부는 원생동물이나 소형윤충류의 섭식이 가능한 요각류가 번성하였고, 팔당호 경안천 수역 호소중심부는 남조류 섭식이 가능한 지각류가 우점하였다.

본 연구결과 인공 수초재배섬은 수초뿌리를 중심으로 풍부한 미소생물상이 형성되어 동물플랑크톤의 종 풍부도와 다양성을 증가시켰고 식물플랑크톤 이외의 대체 먹이원의 공급을 원활하게 하는 작용을 한 것으로 보이며 동물플랑크톤 중간경쟁으로 인한 동물플랑크톤의 군집 변화를 야기하였다. 또한 호소중심부에 비해 강우와 유량에 따른 수체변동의 영향이 적어 동물플랑크톤 특히, 몸체가 큰 요각류와 지각류의 증식에 좋은 서식처를 제공하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 2005~2006년 한강수계관리위원회 팔당호 수질개선사업 「수초재배섬 운영·관리사업」의 일부로 수행되었다.

참고문헌

- 국가수자원관리종합정보시스템, <http://www.wamis.go.kr> (accessed Nov. 2006)
- 김범철, 김재욱, 전만식, 황순진, 소양호 동·식물플랑크톤의 계절변동, *한국육수학회지*, **32**, pp. 127-134 (1999).
- 박혜경, 이현주, 김은경, 정동일, 팔당호 조류발생 특성 및 수질환경인자의 통계적 분석, *한국물환경학회지*, **21**(6), pp. 584-594 (2005a).
- 박혜경, 공동수, 변명섭, 전남희, 최명재, 유경아, 강필구, 수초재배섬 운영·관리사업 보고서, 한강수계 팔당호 수질개선사업, 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회, pp. 27-149 (2005b).
- 박혜경, 공동수, 변명섭, 전남희, 최명재, 윤석환, 유경아, 강필구, 수초재배섬 운영·관리사업 보고서, 한강수계 팔당호 수질개선사업, 한강물환경연구소, 한강수계관리위원회, pp. 37-121 (2006).
- 유경아, 낙동강의 수환경과 동물플랑크톤의 동태학 연구, 건국대학교 석사학위논문, pp. 1-89 (2005).
- 조규송, *한국산 담수동물플랑크톤도감*, 아카데미서적, pp. 1-387 (1993).
- 환경부, 수질오염공정시험방법, pp. 292-293 (2004).
- Agbeti, M. D. and Smol, J. O., Winter limnology: Comparison of physical, Chemical and biological characteristics in two temperate lakes during lakes during ice over, *Hydrobiol.*, **304**, pp. 221-234 (1995).
- Andersen, A. and Hessen, D. O., Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton, *Limnol. Oceanogr.*, **36**, pp. 807-814 (1991).
- Azam, F., Fenchel, T., Field, J. G., Meyeriel, L. A. and Thingstad, F., The ecological role of water-column microbes in the sea, *Mar. Ecol. Prog. Ecol.*, **10**, pp. 257-263 (1983).
- Balcer, M. D., Korda, N. L. and Dodson, S. I., Zooplankton of the great lakes, A guide to the identification and ecology of the common crustacean species, The university of Wisconsin Press (1984).
- Bloem, J. and Bar-Gilissen, M. J. B., Bacterial activity and protozoan grazing potential in stratified lake, *Limnol. Oceanogr.*, **34**, pp. 297-309 (1989).
- Carrick, H. J. and Fahnenstiel, G. I., Biomass, size structure and composition of phototrophic and heterotrophic nanoflagellate communities in Lakes Huron and Michigan, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, pp. 1922-1928 (1989).
- Culver, D. A., Boucherle, M. M., Bean, D. J. and Flethcer, J. W., Biomass of freshwater crustacean zooplankton from Length-Weight regressions, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **42**, pp. 1380-1390 (1985).
- Downing, J. A. and Rigler, F. H. R., A manual on methods for the assessment of secondary productivity in freshwaters, Blackwell Scientific Publications, pp. 247-249 (1984).
- Dumont, H. J., Velde, L. V. De. and Dumont, S., The dry weight estimate of biomass in a selection of Cladocera, Copepoda, and Rotifera from the plankton, periphyton, and benthos of continental waters, *Oecologia*, **91**, pp. 75-97 (1975).
- Finlay, B. J., Clarke, K. J., Cowling, A. J., Hindle, R. M., Rogerson, A. and Berninger, U. G., On the abundance and distribution of protozoa and their food in a productive freshwater pond, *Eur. J. Protistol.*, **23**, pp. 205-217 (1988).
- Fulton, R. S., Resistance to blue-green toxins by *Bosmina longirostris*, *J. Plankton Res.*, **10**, pp. 771-778 (1988).
- Fulton, R. S. and Paerl, H. W., Toxic and inhibitory effects of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* in herbivorous zooplankton, *J. Plankton Res.*, **9**, pp. 837-855 (1987).
- Gilbert, J. J. and Stemberger, R. S., Control of *Keratella* populations by interference competition from *Daphnia*, *Limnol. Oceanogr.*, **30**, pp. 180-188 (1985).
- Hall, D. T., Threlkeld, S. T., Burns, C. W. and Crowley, P. H., The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities, *Annual Review of Ecology and Systematics*, **7**, pp. 177-208 (1976).

- Hwang, S. J. and Heath, R. T., Zooplankton bacterivory at coastal and offshore sites of Lake Erie, *Journal of plankton Research*, **21**, pp. 699-710 (1999).
- Keckeis, S., Baranyi, C., Hein, T., Holarek, C., Riedler, P. and Schiemer, F., The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube, *J. Plankton Res.*, **25**, pp. 243-253 (2003).
- Kim, H. W., Hwang, S. J. and Joo, G. J., Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in the regulated Nakdong River(Korea), *Journal of plankton Research*, **22**, pp. 1559-1577 (2000).
- McManus, G. B. and Fuhrmann, J. A., Control of marine bacterioplankton populations: measurement and significance of grazing, *Hydrobiol.*, **159**, pp. 51-62 (1988).
- Mizuno Toshihiko, An illustrated guide to freshwater zooplankton in Japan, Toukai University Publications (1991).
- Pace, M. L. and Orcutt, J. D., The relative importance of protozoans, rotifers, and crustaceans in a freshwater zooplankton community, *Limnol. Oceanogr.*, **26**(5), pp. 822-830 (1981).
- Rassoulzadegan, F., Laval-Peuto, M. and Sheldon, R. W., Partitioning of the food ratio of marine ciliates between picoplankton and nanoplankton, *Hydrobiol.*, **159**, pp. 75-88 (1988).
- Sheldon, R. W., Nival, P. and Rassoulzadegan, F., An experimental investigation of a flagellate-ciliate-copepod food chain with some observation relevant to the linear biomass hypothesis, *Limnol., Oceanogr.*, **31**, pp. 184-188 (1986).
- Sherr, E. B. and Sherr, B. F., Bacterivory and herbivory: key roles of phagotrophic protists in pelagic food webs, *Microb. Ecol.*, **28**, pp. 223-235 (1994).
- Shimatani, Y., The effect and ecosystem of an artificial vegetated island, Ukishima, in Lake Kasumigaura, *Proc. Korean Japan Joint Symposium on Ecological Engineering*, **39**, p. 44 (1996).
- Smetacek, V., The annual cycle of protozooplankton in the Kiel Bight, *Mar. Biol.*, **63**, pp. 1-11 (1981).
- Sommer, U., Gliwicz, Z. M., Lampert, W. and Duncan, A., The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters, *Arch. Hydrobiol.*, **106**, pp. 433-471 (1986).
- Stemberger, R. S., A guide to rotifers of the Laurentian Great Lakes, EPA-600, 4-79-021 (1979).
- Weisse, T., The annual cycle of heterotrophic freshwater nanoflagellates: role of bottom-up versus top-down control, *J. Plankton Res.*, **13**, pp. 167-185 (1991).