

**대청호 유입하천 생태계에서 동식물 플랑크톤의  
종 다양성과 에너지 이동  
- 옥천천을 중심으로 -**

**김 건 희 · 황 순 진**

건국대학교 환경과학과

**Species Diversity and Energy Flow of Phytoplankton and  
Zooplankton in Okcheon Stream**

**KIM, Keon-Hee · Soon-Jin HWANG**

Department of Environmental Science, Konkuk University

**ABSTRACT**

This study was conducted to understand the phytoplankton-zooplankton trophic linkage and species diversity in Daecheong ecosystem(Okcheon stream) from August 2008 to July 2009. A total of 54 phytoplankton species were identified in the water column. Among them, Bacillariophyceae dominated the phytoplankton community, accounting for 35.2% of species number, followed by Chlorophyceae (33.3%), Cyanophyceae (25.9%), Flagellate algae (5.6%). Phytoplankton density were ranged from  $2 \times 10^3$  to  $15 \times 10^3$  cell/ml during investigation and carbon biomass was similar with density. Dominant species were 6 taxa, which were *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp., *Aulacoseira* sp., *Cyclotella* sp., *Navicular* sp., *Cryptomonas* sp. in water column. A total of 31 Zooplankton species were identified in the water column. Among them, Rotifer dominated the zooplankton community, accounting for 77.4% of species number, followed by Cladocera(12.9%), Copepods(12.9%). Zooplankton density were ranged from 47 inds./L to 688 inds./L during investigation and carbon biomass was the high value in October in contrast with density. Dominant species were 4 taxa, which were *Rotaria* sp., *Brachionus* sp., *Asplanchna* sp., *Diaptomus* sp in water column. Macrozooplankton(MACZ:  $>200 \mu\text{m}$ ) clearance rate were relatively high in the winter however, amount of C-flux were relatively high in the summer. Microzooplankton(MICZ:  $20 \sim 60 \mu\text{m}$ ) clearance rate and amount of C-flux were relatively high in the spring. Each zooplankton was relatively low in fall. Also, MICZ amount of C-flux were similar than those of MACZ, while MICZ clearance rate were relatively higher than those of MACZ.

**Key words** : Okcheon stream, plankton species diversity, C-flux

## 서 론

수중 생태계에서 동물 플랑크톤의 섭식 활동은 부유 미생물 간의 에너지 흐름의 주요한 역할을 담당하고(Keckeis *et al.*, 2003) 식물 플랑크톤의 생물량과 종 구성에 많은 영향을 미치는 것으로 파악되고 있다(Reynolds, 1984; Sommer *et al.*, 1986; Sterner, 1989; Kagami *et al.*, 2002). 높은 여과 효율을 가진 *Daphnia* sp.와 같은 대형 동물 플랑크톤의 밀도 증가는 식물 플랑크톤의 총 생물량 감소 및 종 구성을 변화시켜 투명도를 증가시키며(Brook, 1985; Gawler *et al.*, 1988), 봄 기간 동안의 일시적인 clear water phase를 발생시킨다(Lampert *et al.*, 1986; Sommer *et al.*, 1986; Vanni and Temte, 1990; Kim *et al.*, 2003). 동물 플랑크톤의 선택적 섭식에 의한 식물 플랑크톤의 종 구성 변화(Thys *et al.*, 2003), 수체의 수리학적 특성(Keckeis *et al.*, 2003), 영양상태(Heath *et al.*, 2003), 먹이망을 구성하는 요소들(Reynolds, 1994)에 따라 동물 플랑크톤의 역할은 차이가 나타나기 때문에 먹이망 관련 연구 결과는 수질과 생태계 보전을 위해 활용될 수 있는 중요한 자료를 제공한다.

1970년대 이후 국내 대형 하천 중·하류 부분에 조성된 다목적 댐과 하구호 등의 인공호들은 하천과 저수지의 혼합적 성격을 띤 수문학적 경향을 나타내어 자연호와 비교할 때 매우 상이한 생태·육수학적 특성을 보인다. 예를 들면 1987년 이후 조성된 낙동강 하구연으로 인하여 낙동강 하류 지역은 강의 형태적, 수리학적 변경으로 인한 플랑크톤 군집 구조의 변화를 가져왔다(Kim *et al.*, 1998; Kim and Joo, 2000). 국내뿐만 아니라 호주의 Murray Darling River 시스템 내에서도 인공 댐에 의한 하천의 수리학적 조절에 따른 플랑크톤 먹이망 동태의 변동이 나타난 바 있다(Shiel and walker, 1984). 국내에서 인공 댐에 의해 수문학적 요인 등이 조절되는 하천에서 부유성 플랑크톤 군집들 간의 기능적 상호작용을 규명하기 위한 연구는 낙동강에서 동물 플랑크톤에 의한 박테리아와 식물 플랑크톤 섭식 연구(Kim, *et al.*, 2000, 2002; 국립환경과학원, 2003), 소양호에서 동물 플랑크톤에 의한 식물 플랑크톤 섭식 연구(Hwang *et al.*, 2004) 정도로 매우 제한적이다. 플랑크톤 먹이망 내에서 동물 플랑크톤과 식물 플랑크톤의 섭식관계에 대한 연구는 상위 영양단계로의 에너지 전달을 비롯하여 향후 환경 변화와 기후 변화에 대한 수질 변화를 예측하고 생태계를 관리하는데 중요할 뿐만 아니라 건강한 생태계로 유지되는가를 평가하는데 매우 유용하게 활용할 수 있다. 본 연구는 대청호 상류부 유입 하천인 옥천천에서 계절에 따른 동·식물 플랑크톤 종 다양성 변화와 동·식물 플랑크톤의 탄소전달률(C-flux)에 대해서 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 지점 및 시기

본 연구의 조사지점은 우리나라 중부에 위치한 대청호의 유입 하천인 옥천천의 하류 구간에 해당한다(Fig. 1). 옥천천의 유로 연장은 29.0km이며, 유역의 총면적은 537.2 km<sup>2</sup>이다. 옥천천은 서화천과 금구천이 합류되어 이루는 하천이고, 옥천천의 하류부는 대청호 유역에서 가장 큰 규모인 옥천하수처리장(1994년 5월 완공)이 위치하고 있고, 18.0×10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>/day의 하수처리수를 배출하고 있다. 옥천천에서 하수처리수의 배출 지점 하류는 8~9월에 단기간 완전히 수몰되고 이듬해까지 대청호의 수위 변

동에 따라 하천과 저수지의 비율이 조절되는 곳이다. 저수화 시기에는 유속이 급감하는 하천과 저수지의 전이대 성격을 나타내고, 부유성과 부착성 담수조류의 서식 환경이 전환되는 장소이기도 하다. 또한, 본 연구의 조사지점은 봄철과 여름철 강우기 때 집중호우로 인해 상류의 하수처리장 및 주거 지역에서 배출된 하수와 쓰레기가 중류로 내려오는 현상이 발생하였다. 실측한 조사지점의 수심은 5~6m 범위이었으며, 여름철에 수심이 가장 높았고, 겨울철~봄철에 수심이 가장 낮았다. 옥천천은 매년 여름철 남조류 대발생이 확인되고 있으며, 호우 이후 대청호 전체로 확산된다고 보고된 바 있다(신 등, 1999; 신과 조, 2000). 본 연구는 옥천천 중류지점에서 2008년 8월~2009년 7월 동안 실시하였다.

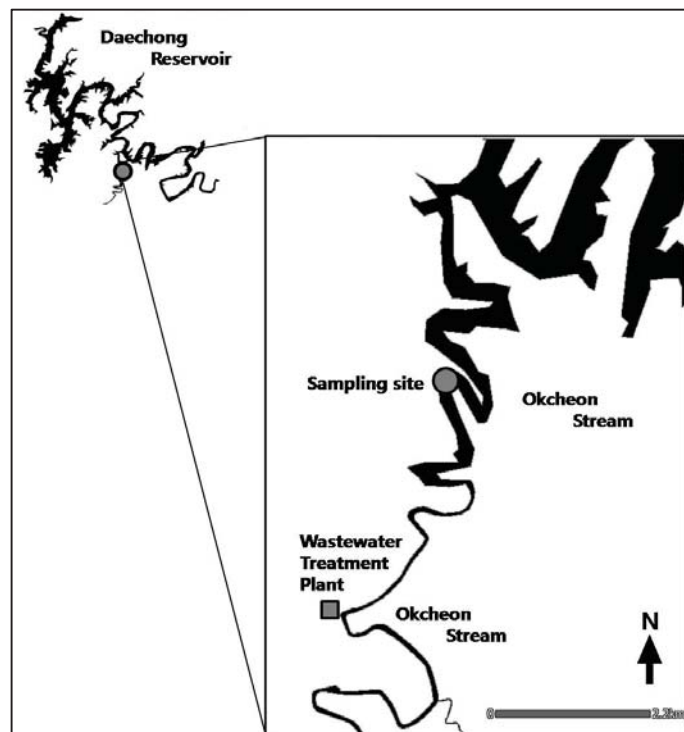


Fig. 1. Map of sampling sites in the Okcheon stream.

## 2. 생물 및 환경요인 분석

### 1) 환경요인 분석

현장에서 측정된 수질항목은 수온, pH, 전기전도도, 용존산소이며, 각 항목은 YSI(6920 MDS, USA)로 측정하였다.

수질요인 분석에 필요한 시료는 각 지점의 표층에서 채수하여 7L 폴리에틸렌 용기에 담아 냉장보관 후 실험실로 운반하였다. SS는 수질오염공정시험법(환경부, 1996)에 따라 측정하였다. 용존무기인

( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 ascorbic acid 법으로 측정하였고, 총인(TP)은 persulfate 분해 후에 ascorbic acid 법으로 측정하였다. 암모니아성 질소( $\text{NH}_3\text{-N}$ )와 아질산성 질소( $\text{NO}_2\text{-N}$ )는 각각 phenate, colorimetric을 이용하여 측정하였고, 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 cadmium reduction 법으로 측정하였고, 총인(TN)은 과황산칼륨으로 분해한 후 cadmium reduction 법으로 측정하였다(APHA, 1995). 엽록소  $\alpha$  (Chl- $\alpha$ )는 시료를 GF/C 여과지로 여과하여 90% 아세톤을 이용하여 24시간 동안 냉암소에 보관하여 엽록소를 추출한 후 흡광광도계를 이용하여 측정한다(환경부, 1996).

## 2) 미세먹이망 구성요소들의 종조성, 밀도, 생물량 분석방법

### (1) 식물 플랑크톤

식물 플랑크톤은 현장에서 표층수 100 mL를 Lugol 용액으로 고정하고 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 도립현미경(Zeiss, Axiovert 40 CFL,  $\times 200 \sim 400$ )에서 주요 식물군집별로 구분하여 동정·계수하였다. 와편모조류(Dinophyceae)와 은편모조류(Cryptophyceae)는 출현종과 밀도가 작아 두 분류군 모두를 편모조류(flagellate algae)로 취급하였다. 식물 플랑크톤 생물량은 동정 시 출현종의 가로, 세로 길이를 측정하여 Keller *et al.*(1980)이 제시한 공식으로 체적( $V: \mu\text{m}^3$ )을 계산하고, 규조류는  $10^{(-0.427 + 0.784(\log V_{\mu\text{m}^3}))} \mu\text{gC}$  녹조류와 남조류는  $10^{(-0.460 + 0.866(\log V_{\mu\text{m}^3}))} \mu\text{gC}$ (Mullin *et al.*, 1966) 그리고 편모조류는  $200 \text{ fgC} \cdot \mu\text{m}^{-3}$ (Starthmann, 1967) 부피당 탄소 환산계수를 이용하여 carbon 생물량을 계산한다.

### (2) 동물 플랑크톤

동물 플랑크톤은 플랑크톤 네트(망목의 크기  $64 \mu\text{m}$ )로 수직 예인한 시료를 포르말린(최종농도의 5%)으로 고정한 후, Sedgwick-Rafter 계수판에 넣어 광학현미경하에서 윤충류, 지각류, 요각류로 분류하여 관찰하였다(Stemberger, 1979; Balcer *et al.*, 1984; 조, 1993). 관찰 시 출현 종에 대한 가로, 세로 길이를 모두 측정하며, 평균값을 생물량 계산에 이용하였다. 윤충류의 체적은 Downing and Rigler (1984)가 제시한 식에 따라 계산하였고, 동물 플랑크톤의 비중은 1.025로 가정하여 습중량을, 습중량의 10%를 건중량으로 계산하였다(Hall *et al.*, 1976). 지각류와 요각류의 건중량은 Lengh-Dry weight 관계식을 사용하여(Culver *et al.*, 1985), 동물 플랑크톤의 생물량( $\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1}$ )은 건중량의 48%를 탄소량으로 고려하여(Anderson and Hessen, 1991) 산출하였다.

### (3) 동물 플랑크톤-식물 플랑크톤의 섭식관계

동물 플랑크톤-식물 플랑크톤 간의 섭식관계 및 탄소전달률(C-flux) 측정은 Lehman and Sandgren(1985)의 방법에 따라 동물 플랑크톤의 생물량을 조절하여 증가되는 동물 플랑크톤의 섭식으로 인해 감소되는 식물 플랑크톤의 밀도를 측정하여 계산하였다. 동물 플랑크톤 개체의 크기에 따라 소형동물플랑크톤(Microzooplankton: MICZ, 윤충류와 Nauplii,  $60 \sim 200 \mu\text{m}$ )과 대형동물 플랑크톤(Macrozooplankton: MACZ, 요각류 및 지각류 성체,  $>200 \mu\text{m}$ )으로 구분하여 실험을 실시하였다.

채집된 동물 플랑크톤을  $200 \mu\text{m}$ 와  $60 \mu\text{m}$  네트를 연속적으로 통과시켜 동물 플랑크톤 크기별로

현장밀도의 0배(control, 동물 플랑크톤 제거구. 즉, 60  $\mu\text{m}$  네트로 여과한 시료), 2, 4, 8배로 각 용기에 첨가하고 현장 여과수(<60  $\mu\text{m}$ : MICZ 섭식실험, <200  $\mu\text{m}$ : MACZ 섭식실험)로 2L 용량을 맞춘 후 암실에서 24시간 동안 섭식을 허용하였다. 섭식실험은 2회 반복으로 수행하였으며, 24시간 후 50 mL의 subsample을 채취하여 Lugol 용액으로 식물 플랑크톤을 고정한 후 나머지 시료는 60  $\mu\text{m}$ 와 200  $\mu\text{m}$  네트로 거른 후 용기 내에 포함된 동물 플랑크톤의 전량을 계수하였다. 각각의 동물 플랑크톤 밀도 조절구에서 24시간 동안 감소된 식물 플랑크톤 밀도를 측정하여 지수성장률(exponential growth rate: 단위=day<sup>-1</sup>)을 계산하였다.

$$r = (\ln N_t - \ln N_0) / t$$

$$r = \text{조류 성장률 (day}^{-1}\text{)}$$

$$N_t = t\text{시간 이후 조류 밀도 (cell mL}^{-1}\text{)}$$

$$N_0 = 0\text{시간 이후 조류 밀도 (cell mL}^{-1}\text{)}$$

$$t = \text{섭식 허용 시간 (day)}$$

여과율(clearance rate)은 조절구 내의 동물 플랑크톤 생물량과 지수성장률간의 직선회귀 관계를 통해 기울기로 평가하였다. 탄소 전달량(C-flux)은 다음 식을 통해 평가하였다.

$$ACF = CR \times A \times Z$$

$$ACF = \text{식물 플랑크톤에서 동물 플랑크톤으로 전달되는 C-flux (}\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}\text{)}$$

$$CR = \text{여과율 (mL} \cdot \mu\text{gdw}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}\text{)}$$

$$A = \text{식물 플랑크톤 carbon biomass (}\mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$$

$$Z = \text{zooplankton biomass 현장밀도 (}\mu\text{gdw} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$$

### 3) 통계분석

각 수질 항목간의 상관관계는 Pearson's correlation analysis를 이용하였으며, 유의수준은  $p < 0.05$ 를 기준으로 하였다. 항목별 유의성은 one way ANOVA와 Duncan test를 이용하여 비교분석하였다(SPSS 10.0).

## 결과 및 고찰

### 1. 옥천천 생태계 환경요인 변화

조사기간 동안 수온은 3.7°C에서 26.8°C를 나타내 겨울에 낮고, 여름에 높은 전형적인 계절성을 나타내었으며, 용존산소의 범위는 0.84mg L<sup>-1</sup>에서 21.13mg L<sup>-1</sup>으로 여름에 낮고, 겨울에 높은 경향을 보여, 수온과 음의 상관성을 보였다( $n=12$ ,  $p < 0.05$ ,  $r = -0.616$ )(Table 1). 전기전도도는 86  $\mu\text{s cm}^{-1}$ 에서

248  $\mu\text{s cm}^{-1}$ 을 나타내어 늦은 봄에서 초여름에 가장 높은 값을 보였으며(Table 1), 이는 초여름에 발생하는 강우로 인해 발생하는 비점오염이 원인으로 판단된다. 특히 TN, TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ 와 높은 양의 상관성을 보였다(TN:  $n=12$ ,  $p<0.01$ ,  $r=0.736$ , TP:  $n=12$ ,  $p<0.01$ ,  $r=0.885$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ :  $n=12$ ,  $p<0.05$ ,  $r=0.619$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ :  $n=12$ ,  $p<0.01$ ,  $r=0.925$ ).

부유물질(SS) 농도 범위는  $2.4\text{mg L}^{-1}$ 에서  $18\text{mg L}^{-1}$ 로 봄철 발생하는 강우로 인해 4월에 가장 높은 농도를 나타내었으며, TN, TP 및 엽록소  $a$ 와 높은 상관성을 보였다(TN:  $n=12$ ,  $p<0.01$ ,  $r=0.881$ , TP:  $n=12$ ,  $p<0.05$ ,  $r=0.656$ ). 엽록소  $a$  (Chl- $a$ )는  $2.26\mu\text{g L}^{-1}$ 에서  $52.03\mu\text{g L}^{-1}$ 로 봄과 여름에 걸쳐 높은 농도를 나타내었으며, 가을과 겨울에는  $10\mu\text{g L}^{-1}$  이하로 매우 낮은 농도를 나타내었다(Table 1). 이는 봄철과 여름철에 증가하는 영양염으로 인해 수중의 엽록소가 증가한 것으로 판단된다(김, 2004).

총질소(TN) 농도는  $1.87\text{mg/L}$ 에서  $4.04\text{mg/L}$ 로 여름철을 제외한 나머지 기간에는 평균적으로  $2\text{mg/L}$ 의 농도를 보였으며, 여름철에는 강우로 인한 비점오염으로 인해 가장 높은 농도를 나타내었다(Table 1). 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )의 농도는 조사기간 동안  $1.2\text{mg/L}$ 에서  $1.9\text{mg/L}$ 로 조사 시기에 따른 큰 차이를 보이지 않았다(Table 1). 암모니아( $\text{NH}_3\text{-N}$ )는 detection 수준 이하( $0.0001\mu\text{g L}^{-1}$ )에서  $1.68\mu\text{g L}^{-1}$ 로 겨울에는 암모니아가 검출되지 않았으며, 봄에는 인근 농지에서 유입되는 비점오염으로 인해 가장 높은 농도를 나타내었다(Table 1).

총인(TP)은  $18.56\mu\text{g L}^{-1}$ 에서  $218.73\mu\text{g L}^{-1}$ 로 봄철에 매우 높은 농도를 나타내었으며, 가을철에

**Table 1.** Temporal change of water quality parameter in Okcheon stream(February~October, 2008)

Water quality parameter	Sampling month			
	Feb. (2월 24일)	Apr. (4월 20일)	Jul. (7월 21일)	Oct. (10월 15일)
Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	3.72	18.64	26.8	22.69
EC ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )	86.00	248.00	196.0	146.00
DO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	18.90	21.13	0.8	12.98
pH	9.47	9.13	9.2	8.80
TN ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2.29	4.03	2.33	1.87
$\text{NH}_3\text{-N}$ ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	detection 수준이하	0.39	0.01	40.44
$\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1.90	1.81	2.51	1.38
$\text{NO}_2\text{-N}$ ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	14.05	72.61	31.48	35.79
TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	24.60	218.73	97.91	18.56
$\text{PO}_4\text{-P}$ ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	11.92	11.13	16.86	4.54
SS ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2.40	18.00	6.00	3.92
Chl- $a$ ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	3.39	52.02	50.68	2.89

\* Temp.: temperature, EC: electronic conductivity, DO: dissolved oxygen, TN: total nitrogen,  $\text{NH}_3\text{-N}$ : ammonia,  $\text{NO}_3$ : nitrite,  $\text{NO}_2$ : nitrate, TP: total phosphorus,  $\text{PO}_4\text{-P}$ : soluble reactive phosphorus( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), SS: suspended solid, Chl- $a$ : chlorophyll- $a$



가장 낮은 농도를 나타내었고(Table 1), 용존무기인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은  $4.53 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서  $16.86 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 여름철에 가장 높은 농도를 나타내었고, 가을철에는 TP와 마찬가지로 가장 낮은 농도를 나타내었으나, 두 항목에서 상관성은 나타나지 않았다( $n=12$ ,  $p>0.05$ )(Table 1).

전반적으로 옥천천의 환경요인은 주로 봄철과 여름철에 가장 높은 값을 나타내었으며, 이는 봄철과 여름철의 강우로 인해 발생하는 비점오염과 상류의 하수처리장에서 유입되는 점오염원이 원인으로 판단된다(윤 등, 2009).

결과적으로 옥천천의 이화학적 환경요인과 수질은 겨울철 외부 유입 영양염이 상대적으로 낮아서 수중의 영양염류 농도에 큰 변화는 없을 것으로 판단된다. 하지만 봄과 여름철 증가하는 외부 유입 영양염으로 인해 급격한 변화가 발생하는 것으로 판단되며, 이는 강우기에 인근의 농지에서 유입되는 비점오염과 상류의 하수처리장으로부터 유입되는 점오염의 영향이 클 것으로 사료된다.

## 2. 식물 플랑크톤과 동물 플랑크톤의 종 풍부도, 밀도, 생물량

### (1) 식물 플랑크톤

조사기간 동안 옥천천에 나타난 식물 플랑크톤은 전체 54종이 확인되었으며, 남조류 14종, 편모조류 3종, 규조류 19종, 녹조류 18종이 각각 확인되었다.

시기별 식물 플랑크톤의 변화는 봄철(4월) 23종, 여름철(7월) 29종으로 두 시기 모두 녹조류가 가장 많은 종 풍부도를 보였으나 우점종은 관찰되지 않았다. 가을철(10월)에는 22종으로 규조류와 남조류가 각각 8종, 7종으로 가장 많은 종 풍부도를 보였으며, 겨울철(2월)에는 23종으로 규조류가 12종으로 가장 많은 종 풍부도를 보였고, 전체적으로 여름철에 가장 다양한 종 풍부도를 보였다.

평균 밀도는  $9,390 \pm 5,178 \text{ cell mL}^{-1}$ 을 보였고, 평균 생물량은  $63.10 \pm 39.16 \mu\text{g C L}^{-1}$ 을 나타내었다. 2월에 가장 적은 밀도와 생물량을 나타내었으며, 4월에 가장 높은 밀도와 생물량을 나타내었다(Fig. 2). 남조류(Cyanophyceae)는 모든 조사시기에서 관찰되었으며 *Microcystis aeruginosa*와 *Oscillatoria limnetica*, *Merismopedium glaucum*이 주요 우점종으로 확인되었다. *Microcystis aeruginosa*는 4월에서 10월 동안  $2,000 \sim 2,060 \text{ cell mL}^{-1}$ 의 밀도를 나타내어 대표적인 남조류 우점종으로 확인되었으며, 군체 형태 보다는 단일세포 형태가 주로 관찰되었다.

규조류(Bacillaphyceae)는 남조류와 마찬가지로 모든 조사기간 동안 발견되었으며, 10월~2월 동안 가장 높은 밀도를 나타내었다. *Navicular sp.*, *Nitzschia sp.*, *Melosira varians*와 *Cyclotella sp.*가 주요 우점종으로 확인되었고, 특히 *Navicular sp.*는 모든 조사기간 동안 관찰되었으며, 2월에 가장 높은 밀도를 나타내었다. 녹조류(Chlorophyceae)는 *Scenedesmus quadricauda*., *Actinastrum hantzschii*, *Chlamydomonas sp.* 등이 주요 우점종으로 확인되었으며, 4월에  $4,120 \text{ cell mL}^{-1}$ 로 가장 높은 밀도를 나타내었다. 하지만 10월과 2월에는 관찰되지 않거나, 매우 낮은 밀도를 나타내었다(Fig. 2). 편모조류(Flagellate algae)는 주로 *Cryptomonas ovata*와 *Rhodomonas sp.*가 나타났으며, 4월에  $6,120 \text{ cell mL}^{-1}$ 로 가장 높은 밀도를 나타내었으며, *Cryptomonas ovata*는  $36.5 \mu\text{g C L}^{-1}$ 로 가장 높은 생물량을 보였다. 하지만 4월 달을 제외한 조사기간 동안 편모조류는 녹조류와 마찬가지로 관찰되지 않거나, 매우 낮은 밀도를 나

타내었다(Fig. 2).

## (2) 동물 플랑크톤

조사기간 동안 옥천천 조사지점의 동물 플랑크톤은 전체 46종이 확인되었고, 각각 윤충류 39종, 요각류 7종, 지각류 7종으로 확인되었다.

시기별 동물 플랑크톤의 변화는 봄철(4월) 24종, 여름철(7월) 33종, 가을철(10월) 20종, 겨울철(2월) 35종으로 모든 시기에서 윤충류가 가장 많은 종 풍부도를 보였고, 겨울철에 가장 많은 종 풍부도를 보였으나 매우 적은 밀도가 관찰되었다.

평균 동물 플랑크톤 밀도는  $194 \pm 210$  inds.  $L^{-1}$ 를 나타내었으며, 평균 생물량은  $74.52 \pm 61.45 \mu gC L^{-1}$ 를 나타내었다. 밀도는 7월에 가장 높았고, 생물량은 10월에 가장 높았다. 요각류는 10월에  $148$  inds.  $L^{-1}$

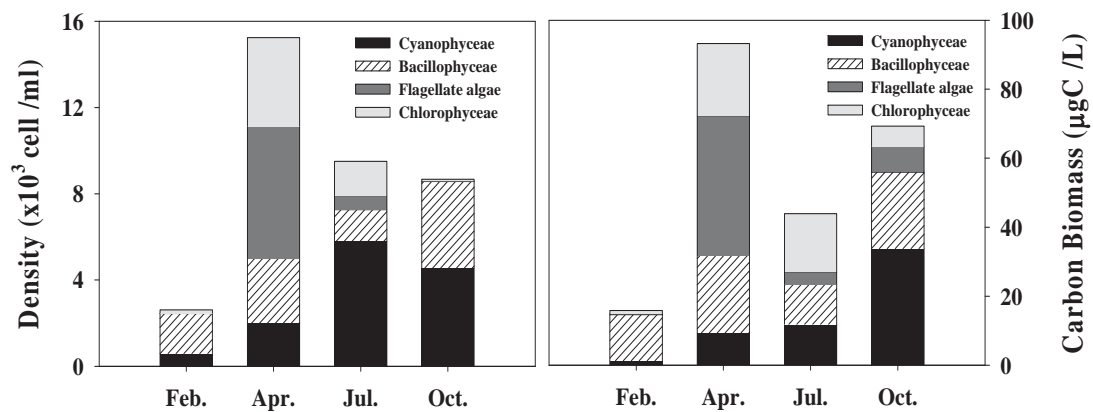


Fig. 2. Temporal change of density and biomass of phytoplankton in Okcheon stream (February~October, 2008).

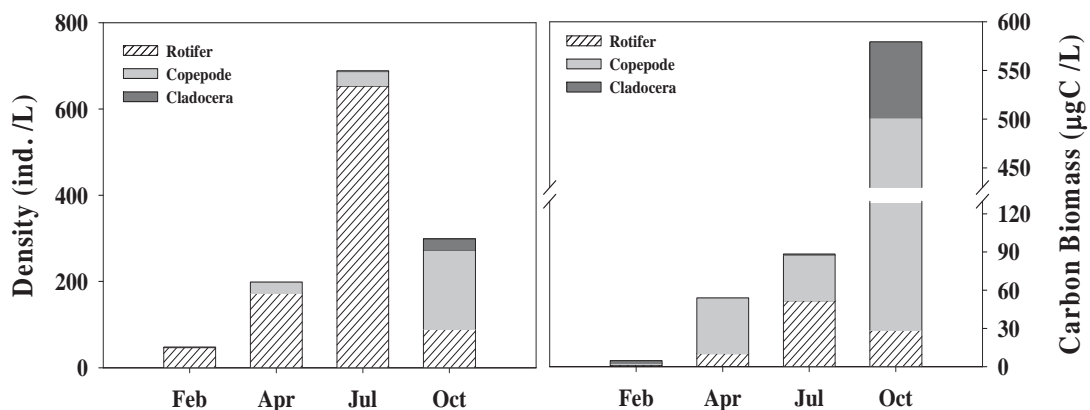


Fig. 3. Temporal change of density and biomass of zooplankton in Okcheon stream from February to October.



의 밀도로 우점하였으며, *Diaptomus* sp.와 Nauplii는 각각  $96 \text{ inds. L}^{-1}$ 과  $47 \text{ inds. L}^{-1}$ 의 밀도로 전체 동물 플랑크톤 중에서 가장 높은 값을 나타내었다. 하지만 여름을 제외한 나머지 조사기간 동안 *Diaptomus* sp.와 Nauplii 등의 요각류는 관찰되지 않거나 매우 낮은 밀도를 나타내었다. 윤충류는 모든 조사기간 동안  $40 \text{ inds. L}^{-1}$  이상의 밀도를 나타내었으며, 7월에  $443 \text{ inds. L}^{-1}$ 로 조사기간 중에서 가장 높은 밀도를 보였다. 특히 *Asplanchna herricki*와 *Lecane* sp., *Polyathra euryptera*는 각각  $101 \text{ inds. L}^{-1}$ ,  $110 \text{ inds. L}^{-1}$ ,  $140 \text{ inds. L}^{-1}$ 의 높은 밀도로 우점 하였으며, 윤충류의 생물량 또한  $51 \mu\text{gC L}^{-1}$ 로 7월에 생물량이 가장 높았다. 지각류의 밀도 및 생물량은 전체 동물 플랑크톤에서 가장 낮은 비율을 차지하고 있으나, 10월 조사에서 지각류의 생물량은  $77.76 \mu\text{gC L}^{-1}$ 으로 윤충류의 생물량보다 높은 값을 보였으며, *Diaphanosoma birgei*와 *Daphnia galeata*가 각각  $43 \mu\text{gC L}^{-1}$ ,  $34 \mu\text{gC L}^{-1}$ 로 높은 값을 나타내었다(Fig. 3). 하지만 요각류와 마찬가지로, 10월을 제외한 나머지 조사기간 동안 지각류는 관찰되지 않거나 매우 낮은 밀도를 보였다(Fig. 3).

이와 같이 요각류와 윤충류의 밀도가 지각류에 비해 상대적으로 높은 이유는 수온이 낮은 상태에서 환경에 대한 적응이 가능하고, 영양분의 급격한 감소 등 환경조건이 악화되면 우성생식을 통해 휴면란으로 동면하는 특성을 가지고 있기 때문이라고 판단된다(심 등, 1984).

### 3. 식물 플랑크톤에 대한 동물 플랑크톤의 여과율 및 탄소 전달율

식물 플랑크톤에 대한 동물 플랑크톤의 여과율은 먹이원인 식물 플랑크톤의 지수 성장률과 섭식자인 동물 플랑크톤의 biomass간의 직선회귀 관계를 통해 기울기로 평가하였다(Fig. 4). 조사기간 동안 식물 플랑크톤에 대한 소형 동물 플랑크톤의 여과율은  $0.001 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 에서  $1.260 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 를 보였고, 대형 동물 플랑크톤의 여과율은  $0.002 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 에서  $0.90 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 의 범위를 보였으며, 소형 동물 플랑크톤과 대형 동물 플랑크톤 각각 4월과 2월에 가장 높은 값을 보였다(Table 3). 식물 플랑크톤에 대한 평균 여과율은 소형 동물 플랑크톤( $0.4402 \pm 0.59 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )이 대형 동물 플랑크톤( $0.3005 \pm 0.41 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )보다 높게 나타났다.

식물 플랑크톤에 대한 소형 동물 플랑크톤의 C-flux는  $0.0002 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 에서  $0.0492 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ , 대형 동물 플랑크톤은  $0.0008 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 에서  $0.0731 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 소형 동물 플랑크톤은 4월에 가장 높은 값을 보였으며, 대형 동물 플랑크톤은 7월에 가장 높은 값을 보였다. 평균 C-flux는 여과율과 다르게 대형 동물 플랑크톤( $0.0235 \pm 0.02 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )과 소형 동물 플랑크톤( $0.0226 \pm 0.03 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )이 큰 차이를 보이지 않았다.

또한 경안천을 대상으로한 선행연구(엄, 2007; Kim et al., 2000)와 비교해본 결과, 옥천천에서 식물 플랑크톤에 대한 동물 플랑크톤의 여과율은 상대적으로 작게 나타났으며, 이는 옥천천에서 발생하는 동물 플랑크톤의 90% 이상이 소형 동물 플랑크톤(윤충류)으로 생태계 먹이망에서 소형 동물 플랑크톤에 의한 섭식 효율은 매우 낮은 것으로 판단된다(엄, 2007). 또한 7월에는 독소를 가진 *Microcystis* sp.와 동물 플랑크톤이 섭식하기 어려운 사상성 형태의 *Oscillatoria* sp.가 우점하였으며, 이는 동물 플랑크톤의 여과율을 감소시키는 원인으로 판단되었다. 옥천천에서 C-flux는 특별한 계절성이 나타나지 않았으며, 소형 동물 플랑크톤( $0.0002 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )과 대형 동물 플랑크톤( $0.0008 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ ) 모두 10월 달에 가장 낮은 값을 보였다.

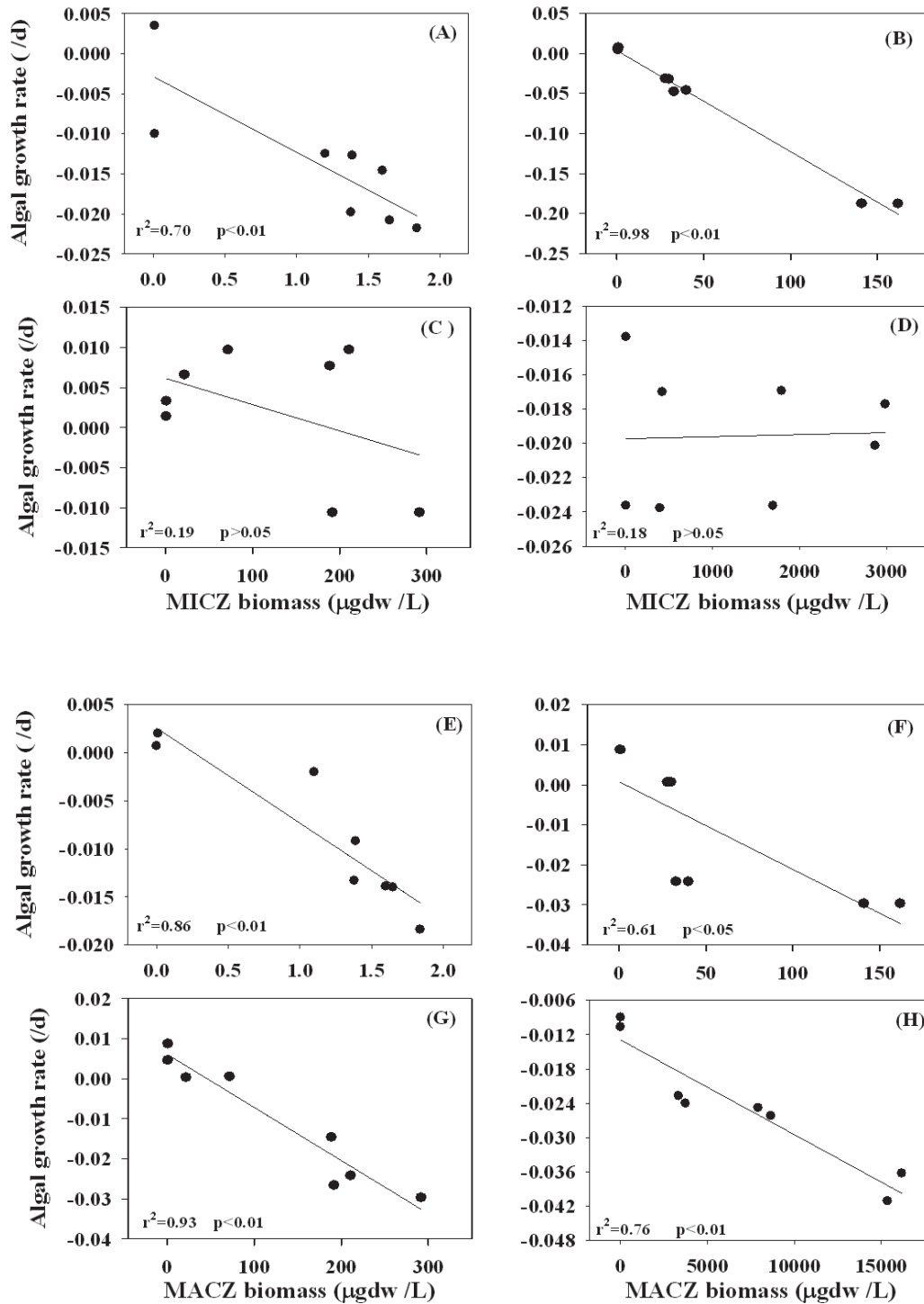


Fig. 4. Relationship of negative phytoplankton growth rate and zooplankton biomass in the Okcheon stream.

(A),(E): February, (B),(F): April, (C),(G): July, (D),(H): October

**Table 2.** Zooplankton clearance rate( $\text{ml } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ ) and carbon flux( $\mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ ) on phytoplankton at Okcheon stream

		Okcheon stream			
		Clearance rate	n	R2	C-flux
MICZ	Feb.	0.470	8	0.85**	0.0066
	Apr.	1.260	8	0.98**	0.0492
	Jul.	0.030	8	0.19	0.0379
	Oct	0.001	8	0.00	0.0002
	Average	0.4402±0.59			0.0235±0.02
MACZ	Feb.	0.900	8	0.76**	0.0143
	Apr.	0.200	8	0.61**	0.0020
	Jul	0.100	8	0.93**	0.0731
	Oct	0.002	8	0.90**	0.0008
	Average	0.3005±0.41			0.0226±0.03
Total	Feb.	1.37	16	0.84**	0.0209
	Apr.	1.46	16	0.72**	0.0512
	Jul	0.13	16	0.66**	0.1110
	Oct	0.003	16	0.86**	0.0010
	Average	0.7408±0.78			0.0460±0.05

\* $p<0.05$ , \*\* $p<0.01$ 

## 결론

조사 결과, 옥천천의 이화학적 환경요인은 봄철과 여름철에 영양염의 유입이 가장 많으며, 겨울철에는 외부 유입 영양염이 상대적으로 낮아서 영양 염류 변화의 계절성이 뚜렷하게 나타났다.

옥천천에서의 식물 플랑크톤 군집 분류군은 54종이 확인되었으며, 그중에서 남조류 14종, 편모조류 3종, 규조류 19종, 녹조류 18속으로 관찰되었다. 시기별 식물 플랑크톤의 변화는 봄철(4월) 23종, 여름철(7월) 39종, 가을철(10월) 22종, 겨울철(2월) 23종으로, 여름철에 가장 다양한 종 풍부도를 보였다. 식물 플랑크톤의 전체 밀도는 봄철인 4월과 여름철인 7월에 각각  $15,240 \text{ cell mL}^{-1}$ ,  $9,500 \text{ cell mL}^{-1}$ 로 가장 높게 증가하였고, 4월에는 주로 *Cryptomonas ovata*가 우점하였으나, 이후에는 대부분 *Microcystis aeruginosa*와 *Oscillatoria* sp 등의 남조류가 우점하였다. 10월에는 *Aulacoseira ambigua* 등의 사상성 규조류가 우점하였다. 2월에는 주로 규조류가 우점 하였으나 밀도가 매우 적어, 우점종의 의미를 찾기 어렵다.

동물 플랑크톤은 전체 46종이 확인되었고, 각각 윤충류 39종, 요각류 7종, 지각류 7종으로 확인되었다. 시기별 동물 플랑크톤의 변화는 봄철(4월) 24종, 여름철(7월) 33종, 가을철(10월) 20종, 겨울철(2월) 34종으로 모든 시기에서 윤충류가 가장 많은 종 풍부도를 보였고, 겨울철에 가장 많은 종 풍부도를 보였으나 매우 적은 밀도가 관찰되었다. 각 시기별 윤충류 우점종은 2월 *Rotaria* sp., 4월 *Brachionus* sp., 7월 *Asplanchna* sp.로 관찰되었다. 10월에는 요각류(*Diaptomus* sp.)가 종 풍부도는 낮았으나 밀도는 가장 높았다. 동물 플랑크톤의 밀도는 7월에  $687.32 \text{ inds. L}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며,

Carbon Biomass는 밀도와 다르게 10월에  $502.41 \mu\text{gC L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 보였다. 옥천천에서의 섭식을 통한 에너지 전달을 분석한 결과, 식물 플랑크톤에 대한 동물 플랑크톤 여과율은 특별한 계절성이 보이지 않았으며, 소형 동물 플랑크톤( $0.4402 \pm 0.59 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )이 대형 동물 플랑크톤( $0.3005 \pm 0.41 \text{ mL } \mu\text{gdw}^{-1}\text{hr}^{-1}$ )보다 높았다. C-flux는 대형과 소형 동물 플랑크톤 간에 차이는  $0.001 \mu\text{gC L}^{-1}\text{hr}^{-1}$ 로 매우 작은 차이를 보였고, 여과율과 마찬가지로 계절성은 보이지 않았다.

식물 플랑크톤으로부터 동물 플랑크톤으로의 에너지 흐름은 수생태계 내의 최종 섭식자인 어류에게까지 전달되며(Stibor, H. *et al.*, 2004), 또한 물환경의 영양상태에 따라 전반적인 플랑크톤 먹이망 구조와 기능에 차이가 나타나므로(Heath, R. T. *et al.*, 2003) 그러한 결과들은 수질과 생태계 보전을 위해 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 생태계의 변화는 생물과 환경요인간의 작용과 반작용을 거쳐 수질에 중요한 영향을 미치는 동시에 생태계 건강성에도 기여를 하는 만큼 생태계 변화를 파악하고 예측하는 일은 수질과 생태계 보전을 위해 지속적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- 김형철. 2006. 비점오염원 제어를 위한 자유수면형 인공습지의 수질개선 연구. 건국대학교 석사학위논문.
- 국립환경과학원. 1996. 호소내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구(Ⅱ). NIER No. 96-17-488.
- 국립환경연구원. 2003. 낙동강수계 수중 생태계 모델인자 조사.
- 심재형. 2004. 플랑크톤 생태학. 서울대학교 출판문화사.
- 엄성화. 2007. 팔당호 생태계에서 식물 플랑크톤과 박테리아에 대한 동물 플랑크톤의 섭식 및 에너지 전달 연구. 건국대학교 석사학위논문.
- 환경부. 1996. 수질오염고정시험방법.
- 大森 信, 池田 勉. 1984. 동물플랑크톤 생태연구법. 동화기행.
- Andersen, A. and D. O. Hessen. 1991. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* 36: 807-814.
- APHA-AWWA-WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed., APHA-AWWA-WEF. Washington D.C. U.S.A
- Brock, T. D. 1985. A Eutrophic Lake, Lake Mendota, Wisconsin. Springer-Verlag. New York. p. 308.
- Culver, D. A., M. M. Boucherle, D. J. Bean and J. W. Flethcer. 1985. Biomass of freshwater crustacean zooplankton from length-weight regressions. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42: 1380-1390.
- Hall, D. T., S. T. Threlkeld, C. W. Burns and P. H. Crowley. 1976. The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities. *Annual Review of Ecology and Systematics.* 7: 177-208.
- Heath, R. T., S. J. Hwang, and M. Munawar. 2003. A hypothesis for the assessment of the important of microbial food web: Linkages in nearshore and offshore habitats of the; Laurentian Great Lakes. *Aquatic Ecosystem Health & Management.* 6(3): 231-239.

- Hwang, S. J., H. S. Kim, J. K. Shin and J. M. Oh. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana prime*) and large zooplankton on phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiol.* 515: 161-179.
- Kagami, M., T. Yoshida, T. B. Gurung and J. Urabe. 2002. Direct and indirect effects of zooplankton on algal composition in *in situ* grazing experiments. *Oecologia.* 133: 356-363.
- Keckeis, S., C. Baranyi, T. Hen, C. Holarek, P. Riedler and F. Schiemer. 2003. The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube. *J. Plankton Res.* 25: 243-253.
- Kellar, P. E., S. A. Paulson, and L. J. Pauloson. 1980. Methods for biological, chemical and physical analysis in reservoirs. Technical Report, Lake Mead Limnological Research Center, University of Nevada, Las Vegas, p. 234.
- Kim, H. W. and G. J. Joo. 2000. The longitudinal distribution and community dynamics of zooplankton in regulated large river: a case study of the Nakdong River (Korea). *Hydrobiol.* 438: 171-184.
- Kim, H. W., K. Ha and G. J. Joo. 1998. Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 83: 65-72.
- Kim, H. W., S. J. Hwang and G. J. Joo. 2000. Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River, Korea). *J. Plankton Res.* 22: 1559-1577.
- Reynolds, C. S. 1984. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Reynolds, C. S. 1994. The ecological basis for the successful biomanipulation of aquatic communities. *Arch. Hydrobiol.* 139: 1-33.
- Shiel, R. J. and K. F. Walker. 1984. Zooplankton of regulated and unregulated rivers: The murray darling river system, Australia. In 'Regulated Rivers. '(Eds. Lillehammer, A. and S. J. Saltveit) p. 263-270(University of Oslo Press: Oslo).
- Sommer, U., Z. M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG model of seasonal succession of planktonic events in freshwaters. *Arch. Hydrobiol.* 106: 433-471.
- Sterner, R. W. 1989. The role of grazers in phytoplankton succession. In Sommer, U.(ed.), *Plankton ecology: Succession in plankton communities*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 109-170.
- Strathmann, R. R. 1967. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. Oceanogr.* 12: 411-418.
- Thys, I., B. Lesporcq and J. P. Descy. 2003. Seasonal shift on phytoplankton ingestion by *Daphnia galeata*, assessed by analysis of marker pigments. *J. Plankton Res.* 25: 1471-1484.
- Vanni, M. J. and J. Temte. 1990. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* 35: 697-709.

## 요 약

본 연구는 대청호 상류부 유입하천인 옥천천에 대하여 식물-동물플랑크톤 간의 영양적 관계와 종

다양성을 이해하기 위하여 수행되었으며, 2008년 10~11월에 걸쳐 2회 조사를 실시하였다. 조사 기간 동안 옥천천에서 식물플랑크톤 군집 분류군은 19종이 확인되었으며, 각각 남조류 6종, 편모조류 2종, 규조류 7종, 녹조류 4종으로 확인되었다. 10월과 11월 사이에 옥천천의 우점 식물플랑크톤은 남조류 (*Microcystis* sp.)에서 규조류(*Aulacoseira* sp.)로 천이가 발생하였으며, 11월 조사 시 식물플랑크톤의 밀도와 생물량은 10월에 비해 감소하였다. 동물플랑크톤은 전체 15종이 확인되었고, 각각 윤충류 9종, 요각류 3종, 지각류 3종으로 확인 되었다. 조사 기간 동안 가장 높은 밀도를 나타낸 동물플랑크톤 군집은 요각류 이었으며, 각 조사에서의 우점종은 10월에는 *Diaptomus* sp., 11월에는 *Daphnia galeata*로 나타났다. 2회 조사에서 *Daphnia galeata*는 생물량의 증가를 보였으나 *Diaphanosoma birgei*의 생물량은 감소하였다. 옥천천에서의 식물플랑크톤과 동물플랑크톤간의 에너지 전달을 살펴본 결과, 전체 식물플랑크톤에 대한 동물플랑크톤 여과율과 C-flux는 대형동물플랑크톤이 소형동물플랑크톤보다 높았고, 남조류에 대한 여과율과 C-flux는 전체 식물플랑크톤이 보이는 경향과 유사한 결과는 보였다.

검색어 : 옥천천, 프랑크톤 종다양성, 에너지 이동