

서낙동강에서의 동·식물 플랑크톤의 출현과 분포에 관한 연구(Ⅱ)

정재원[†] · 유은희 · 윤나나 · 강성원 · 최종욱 · 권기원

환경조사과

Study on Appearance and Distribution of Phyto- and Zooplankton at the Seonakdong River(II)

Jae-Won Jeong[†], Eun-Hee Yoo, Na-Na Yoon, Seong-Won Kang,

Jong-Wook Choi and Ki-Won Kwon

Environmental Research Division

Abstract

In order to investigate the relationship of appearance and distribution characteristic of phyto- and zooplankton community, the present study was carried out every month from Jan. 2004 to Dec. 2005 in three stations of the Seonakdong River.

The water temperature, pH and dissolved oxygen of the Seonakdong River appeared ranges of 2-32 °C, 7.1-9.9 and 4.7-20.8 mg/L, respectively. The averages of chlorophyll-a were 43.2 mg/m³, 87.8 mg/m³, and 98.2 mg/m³ at each stations.

The concentration of chlorophyll-a was strongly correlated with the standing crops of phytoplankton($r^2=0.8583$) and also with BOD($r^2=0.8445$).

Bacillariophyceae(*Stephanodiscus* sp., *Aulacoseira* sp.) of phytoplankton dominated throughout 2005 except for summer when Chlorophyceae(*Eudorina* sp., *Pediastrum* sp.) dominated in June and July.

The dominant species of zooplankton were *Strombidium* sp. in winter, and rotifers such as *Polyarthra* sp., *Brachionus* sp., *Keratella* sp. in summer. The species diversity of zooplankton was the lowest recorded at Daejeosumun site, but the dominance was the highest recorded at Daejeosumun.

Key Words: zooplankton, phytoplankton, correlation, species diversity, species dominance, Seonakdong River

서 론

서낙동강은 낙동강 본류로부터 분기된 유로연장 18.5 km의 파천으로, 유역면적은 303.09 km², 평균 수면적 7.8 km², 저수량 1,840만 m³이며, 부산광역시 강서구와 경상남도 김해시 일원에 위치한다. 1934년에 농업용수의 이용과 치수를 위하여 대저수문과 녹산배수문이 설치된 이후 호소형 하천의 수문 특성을 나타내며, 중·하류부의 김해하수처리장과 강동하수처리장으로부터 N, P의 함량이 높은 방류수가 유입되는데다, 퇴적물로부터의 내부생산부하에 의해 오염이 가속화되고, 이러한 하상퇴적물의 오염은 하절기에 무산소 수괴층을 형성함으로써 인산염과 같은 영양염류의 용출로 식물플랑크톤의 대량번식이 해마다 발생하고 있다. 식물플랑크톤의 대발생은 자생유기물 생산성이 높아 또 다른 내부생산부하 오염물질로서 수질악화의 원인이 되고 있다.

수생태계는 빛에너지를 이용하여 광합성을 수행하는 생산자

와 이를 먹이로 하는 동물플랑크톤 등의 소비자, 그리고 영양염류의 순환에 기여하는 분해자로서의 세균군집 등 각 영양단계(trophic level)가 서로 유기적 관계로 연결되어 먹이사슬(food chain)을 이루고, 이들이 서로 얽혀서 먹이그물(food web)을 형성한다. 따라서 하천생태계의 다양성이나 단순성은 먹이사슬의 복잡성으로 측정될 수 있기 때문에 먹이사슬은 하천생태계의 기능을 규명하기 위한 주요 관심사항일 뿐만 아니라 하천생태계의 환경을 평가하는 지표가 되기도 한다(Barnes and Minshall, 1983).

동물플랑크톤의 계절적인 천이는 자연환경 요인과 주요먹이원인 식물플랑크톤의 종 구성과 풍부도, 동물플랑크톤 종간 경쟁 및 어류의 섭식활동을 통해 나타나며, 이 중에서 먹이로 이용되는 식물플랑크톤 천이는 동물플랑크톤의 군집 변화를 야기하는 중요한 원인이 된다(김 등, 2000). 특히 남조류를 비롯한 식물플랑크톤의 포식자인 동물플랑크톤과의 상호관계에 대한 조사는 남조류 수화 발달 및 소멸 기작을 이해하는 데 있어

[†] Corresponding author. E-Mail: jjw6411@dreamwiz.com
Phone: 051-758-6123, Fax: 051-757-2879

필수적으로 요구된다(Sellner *et al.*, 1996; Urabe *et al.*, 1996).

또한 식물플랑크톤은 수체의 영양상태에 따라 현존량을 달리하기 때문에, 수중 무기영양염류의 농도는 중요한 지표이며, 유속이 느린 수체의 저층은 각종 유입 오염물의 침전지로 작용할 뿐만 아니라, 퇴적물의 분해에 의해 수층으로 질소와 인을 용출함으로써 영양염을 재공급하는 역할을 하며(Forsberg, 1989), 특정 환경조건하에서의 급격한 용출량 증가로 부영양화가 더욱 심해지기도 한다.

본 조사는 서낙동강 저질층으로부터의 영양염류 용출 정도를 추정하기 위해 저질공극수 분석 및 각 지점에서의 조류생장 잠재력시험을 1차년도(2004)에 실시하였고, 2차년도(2005)에는 영양단계가 다른 대표적인 두 군집, 즉 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 분포와 군집변화 등을 살펴봄으로써 두 생물군의 상호연관성 및 수질과의 상관성을 파악하여 식물플랑크톤 대발생 현상에 대한 기여도를 평가하고, 수질 부영양화 정도를 파악함으로써 서낙동강 수질관리 및 부영양화 대책의 기초자료를 제공코자 하였다.

재료 및 방법

조사시점 및 기간

대저수문(DJ), 강동교(KD), 녹산수문(NS)의 3개 지점을 서낙동강 수질 대표지점으로 선정하여 (Fig. 1), 2004년 1월부터 2005년 12월까지 월 1회 채수하였으며, 채수기를 사용해 표층수를 채취하였다.

이화학적 수질조사

수질의 이화학적 성분을 위한 조사로서, 수온, pH, DO, 전



Fig. 1. A map of sampling stations in the Seonakdong River.

기전도도 등은 현장 측정기(YSI-556MPS)를 이용하여 현장에서 바로 측정하였고, COD, BOD, T-N, T-P 항목을 수질 오염공정시험방법(환경부, 2001)에 의거하여 분석하였으며, 또한 수질항목간 및 식물플랑크톤 현존량 등과의 상관관계 도출을 위하여 Microsoft Excel program을 사용하여 Pearson's correlation analysis를 실시하였다.

동·식물플랑크톤 조사

식물플랑크톤의 생체량 조사를 위해 chlorophyll-a 농도를 측정하였고, 현미경 검경을 통해 총세포수, 우점종 및 그 세포수 등을 측정하였다.

chlorophyll-a는 시료를 유리섬유여지로 여과하여 마쇄한 후, 90% 아세톤에 넣어 냉암소에서 하룻밤 방치하여 원심분리 후 그 상등액의 흡광도를 측정하였으며, 식물플랑크톤의 정량 분석은 2 L의 시료를 Lugol solution으로 고정한 후 식물플랑크톤의 양에 따라 농축하거나 그대로 사용하여 1 mL의 세즈워-라프트 챔버를 이용하여 저배율($\times 200$)에서 계수하였고, 정성분석은 중·고배율($\times 400$, $\times 1000$)에서 분리·동정하였다. 식물플랑크톤 종의 동정은 한국담수조류도감(정준, 1993), 일본담수조류도감(Hirose and Yamagishi, 1977) 및 수질오염공정시험방법 부록 I.담수조류분류표(환경부, 2001)에 따라 동정하였다.

동물플랑크톤의 정량 분석은 2 L의 시료를 20 mL로 농축한 후, 1 mL의 세즈워-라프트 챔버를 이용하여 저배율($\times 200$)에서 계수하여 단위 체적당 개체수(inds/L)로 환산하였다.

종의 동정은 한국담수동물플랑크톤도감(조규송, 1993)의 분류체계를 따랐으며, 섬포충류의 분류를 위해 문 등(2004)의 체계 및 James *et al.*(2001)을 참고하였다.

종다양도지수(H') 및 우점도지수(DI) 산출

동물플랑크톤의 군집구조를 파악하기 위해 지점별, 월별 종다양도지수(Diversity Index, H')와 우점도지수(Dominance Index, DI)를 비교하였으며, 종다양도지수는 Shannon-Wiener function(Pielou, 1977)에 따랐고 우점도지수는 McNaughton's dominant index(McNaughton, 1967)를 이용하여 산출하였다.

결과 및 고찰

환경요인 및 수질현황

조사기간중 월별 수온, pH, DO 등의 환경요인과 그에 따른 Chl-a 농도 변화는 Fig. 2 및 Table 1에 나타냈으며, 강우량은 2004년에 1,386.5 mm, 2005년에 1,383.9 mm(기상청, 2005)로서 평년 강수량인 1,492 mm와 비슷하게 나타났다.

서낙동강의 평균 수온은 2004년에 17.7°C, 2005년에 16.2°C로서 2005년이 다소 낮았고, 최저 2°C (2005년 1월)~최고

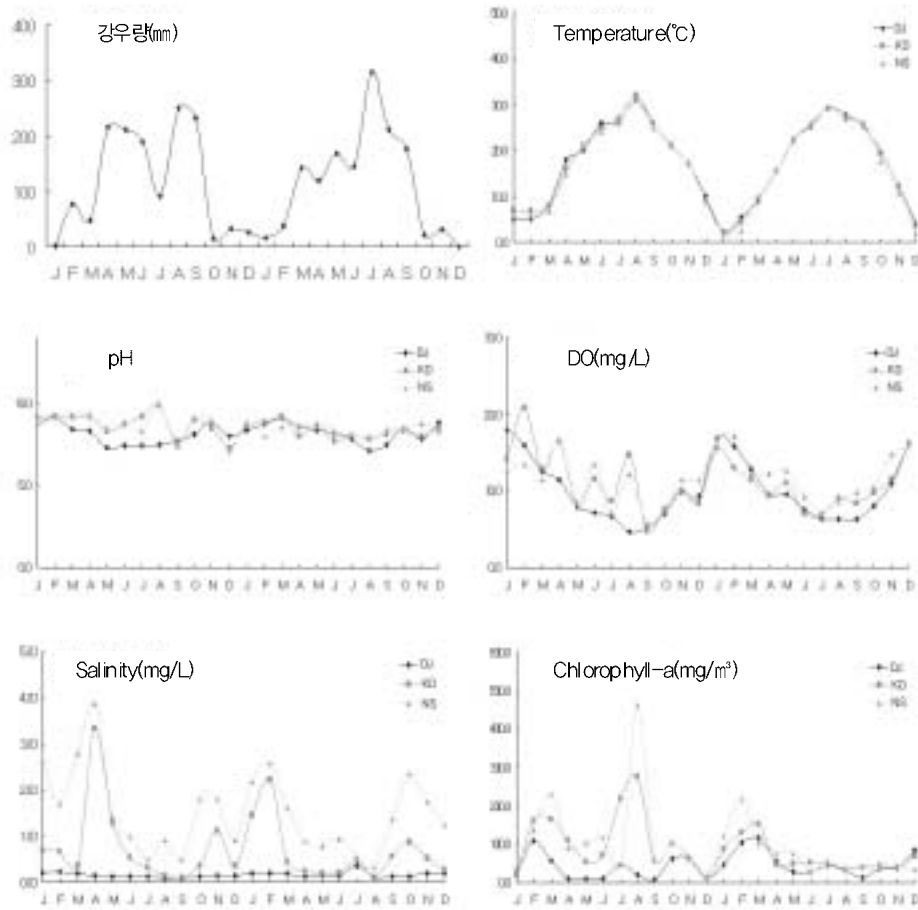


Fig. 2. The physicochemical factors in the Seonakdong River during the study period.

32°C (2004년 8월, 강동교)로서 계절적 특성을 반영하고 있으며, 대저수문지점의 평균 수온은 17.1°C, 강동교지점은 17.2°C 및 녹산수문지점이 16.6°C로서 강동교지점이 가장 높고 녹산수문지점이 가장 낮았다(Fig. 2).

서낙동강 평균 pH는 2004년에 8.5, 2005년에 8.3으로 수온과 같은 경향을 보였으며, 대저수문, 강동교, 녹산수문의 지점별 평균 pH는 각각 8.1, 8.5, 8.6으로 대저수문이 가장 낮고 녹산수문이 가장 높게 나타났다. 2년간 가장 높은 값은 9.9로서 2004년 8월에 강동교와 녹산수문지점에서 남조류가 번성하였을 때였으며, 늦겨울~봄철 구조류의 번성시기에도 높게 나타나 조류 번성과 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다(Fig. 2).

DO(용존산소) 농도의 변화는 대저수문지점이 4.7~18.0 mg/L, 강동교지점은 4.8~20.8 mg/L, 녹산수문지점은 5.8~17.2 mg/L로 나타났고, 지점별 평균 DO 농도는 각각 10.1, 11.1, 11.6 mg/L로서 녹산수문이 가장 높게 나타났다. 대체로 남조류의 번성시기인 8~9월에 수중 용존산소 농도가 가장 낮았고, 구조류 번성시기인 겨울~봄철에 용존산소 농도가 높은 것은 식물플랑크톤 군집별 생태학적 차이에 의한 것이며, 또한 겨울철 수온 감소에 따른 포화 용존산소량의 증가도 중요한 원인이 된다(Fig. 2).

또한 서낙동강의 염분농도(Salinity)는 2004년에 평균 0.86%, 2005년에 0.73%로 2005년이 다소 낮았으며, 지점별 평균농도는 각각 0.16%, 0.70%, 1.52%로서 녹산수문지점이 가장 높게 나타났다. Fig. 2를 보면 해수의 영향이 강동교지점까지 미치고 있음을 알 수 있고, 주로 겨울~봄사이의 갈수기에 염분농도가 높아졌으며, 대저수문지점은 변화폭이 크지 않았다(Fig. 2).

식물플랑크톤 현존량을 알 수 있는 클로로필-a 농도를 살펴보면, 2004년에 89.3 mg/m³, 2005년에 63.6 mg/m³으로 2004년에 조류 번성이 더 심하였음을 알 수 있고, 지점별 평균농도는 각각 43.2 mg/m³, 87.8 mg/m³, 98.2 mg/m³로서 녹산수문지점이 가장 높게 나타났다(Fig. 2). 2004년 클로로필-a 농도가 더 높은 것은 수온이 다소 높았던 환경조건과도 상관성이 있을 것으로 사료되며, 그에 따라 pH 또한 다소 높아진 것으로 사료된다. 대저수문지점은 2004년 2월과 2005년 3월에 구조류에 의해 높은 값을 나타냈으며, 강동교 지점과 녹산수문지점은 2004년 3월과 2005년 2월에 구조류에 의해, 2004년 8월에 남조류에 의해 높은 값을 보인 반면, 2005년 하절기에는 남조류 번성이 전혀 나타나지 않았다. 이는 금년에는 일사량이 많고 수온이 높아야 할 7~8월에 특히 강우가 많아 수

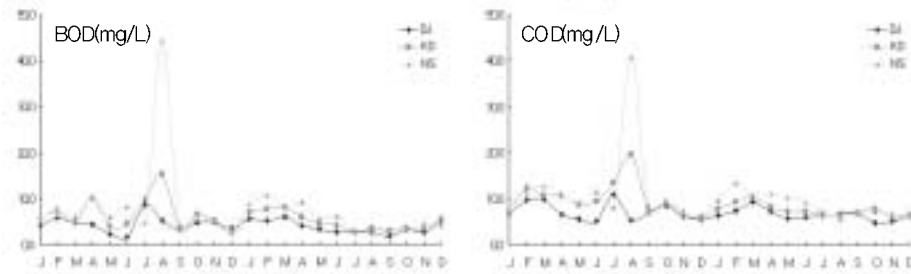


Fig. 3. Monthly variation of Biochemical oxygen demand and Chemical oxygen demand in the Seonakdong River.

온이 낮게 형성되고 수질은 다소 탁했기 때문으로 사료된다.

생물화학적 산소요구량(BOD)는 대저수문, 강동교, 녹산수문지점의 평균값이 각각 4.1, 5.8, 7.5 mg/L로서, 하루로 갈수록 유기물 부하량이 높아짐을 알 수 있었고, 화학적산소요구량(COD)의 평균값은 6.9, 8.9, 10.3 mg/L로서 BOD 증가 경향과 일치하게 나타났다(Fig. 3).

최근 2년간 BOD 및 COD 변화는 클로로필-a의 증감추세와 거의 일치하고 있어 서낙동강의 BOD 및 COD 부하는 외부 오염원보다는 수체내의 조류(algae)에 의한 내부생산 부하가 더 큰 비중을 차지함을 알 수 있다.

서낙동강 부영양화의 주요인인 T-N(총질소)과 T-P(총인) 평균농도는 2004년에 각각 3.29, 0.15 mg/L, 2005년에 2.73, 0.11 mg/L로서 역시 2005년에 낮아졌음을 알 수 있으며, 이는 N, P 저감 → 조류발생 억제 → 클로로필 농도 저감 → BOD 및 COD 저감의 효과를 보여 주어 하천수질 관리의 기본적인 방안을 잘 설명하고 있다. 각 지점별 총질소와 총인의 농도는 대저수문지점에서 2.918 mg/L, 0.113 mg/L, 강동교지점에서 2.866 mg/L, 0.127 mg/L 그리고 녹산수문지점에서 3.247 mg/L, 0.155 mg/L로서 하루로 갈수록 높아지는

경향이었고, 총질소는 남조류가 번성하였던 2004년 8월의 녹산수문 지점에서 10.032 mg/L로 최고치를, 총인은 조류(algae)가 가장 적은 4월의 강동교지점이 0.422 mg/L로 최고치를 나타내었다(Fig. 4).

NH₃-N(암모니아성질소)의 2년간 농도변화는 클로로필-a 농도 및 BOD 등과 유사하게 나타나 조류 발생과 높은 상관성이 있음을 보여 주며, PO₄-P(인산염인)의 변화추세는 2004년 8월의 녹산수문지점의 최대 농도를 제외하고는 유사한 패턴을 보이지 않았다. NH₃-N과 PO₄-P는 여름철 고수온기에 저질층으로부터 고농도로 용출되어 식물플랑크톤 대량발생의 주요 원인으로 알려져 있으며(송 등, 1995, 조와 신, 1996), 2004년의 저질 공극수 용출시험 결과에서도 그러한 경향을 나타내었다. 그러나 2004~2005년간 본 조사의 수중 NH₃-N과 PO₄-P의 거동은 그와 일치하지 않았으며, 특히 PO₄-P는 식물플랑크톤 발생과 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 대부분의 하천수계에서 저농도인 PO₄-P가 제한인자로 작용하는 경우와도 일치하지 않으며, 서낙동강 수계는 PO₄-P는 공급과잉상태이고 NH₃-N가 제한인자로 작용하고 있는 것으로 사료된다.

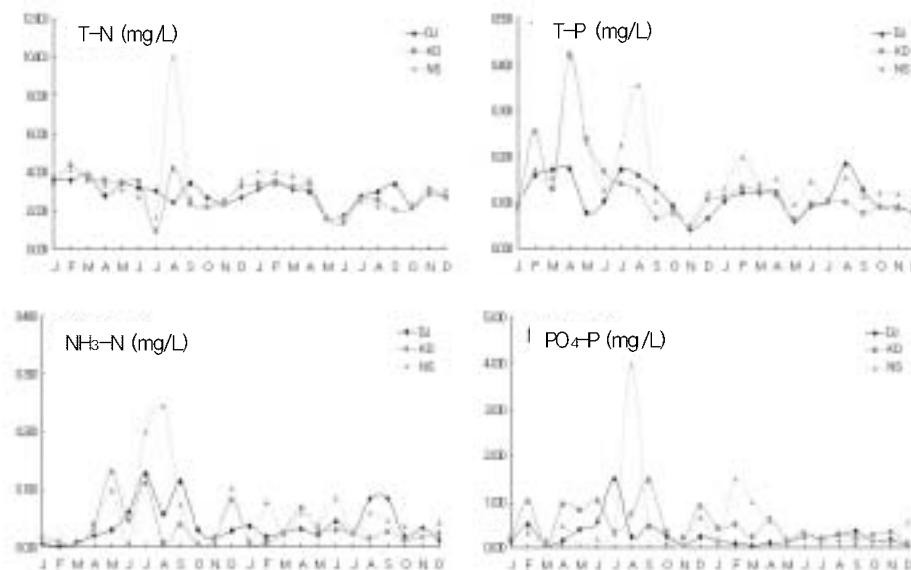


Fig. 4. Monthly variation of nutrients in the Seonakdong River.

Table 1. The physicochemical Factors in the Seonakdong River in 2004 and 2005

	yr.	W.T. (°C)	pH	DO (mg/L)	Salinity (‰)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
대저수문	2004	17.8	8.1	9.6	0.14	4.5	7.3	3.093	0.120	35.3
	2005	16.5	8.2	10.5	0.17	3.8	6.5	2.744	0.107	51.2
	avr.	17.1	8.1	10.1	0.16	4.1	6.9	2.918	0.113	43.2
강 동 교	2004	18.0	8.8	11.5	0.77	6.7	10.2	3.110	0.155	109.6
	2005	16.4	8.3	10.7	0.63	5.0	7.6	2.621	0.099	66.1
	avr.	17.2	8.5	11.1	0.70	5.8	8.9	2.866	0.127	87.8
녹산수문	2004	17.3	8.7	11.0	1.66	9.1	11.9	3.655	0.177	123.0
	2005	15.8	8.4	12.3	1.38	5.8	8.7	2.840	0.132	73.5
	avr.	16.6	8.6	11.7	1.52	7.5	10.3	3.248	0.155	98.2
평 균	2004	17.7	8.5	10.7	0.85	6.8	9.8	3.286	0.151	89.3
	2005	16.2	8.3	11.2	0.73	4.9	7.6	2.735	0.113	63.6

Table 2. The correlation values between physicochemical and biological factors in the Seonakdong River

	DO	pH	BOD	NH ₃ -N	PO ₄ -P	T-N	T-P	Chl-a
W.T.	-0.7436							
pH	0.6023							
BOD	0.2807	0.5356						
NH ₃ -N	0.0617	0.0995	0.7817					
PO ₄ -P	-0.3372	-0.2291	0.4425	0.5840				
T-N	0.3755	0.3222	0.7649	0.7373	0.3078			
T-P	0.2756	0.2871	0.5216	0.4805	0.4459	0.4929		
Chl-a	0.3516	0.6696	0.8445	0.5765	0.2194	0.6374	0.4318	
식물플랑크톤 현존량	0.1497	0.5301	0.8385	0.6130	0.3730	0.6061	0.3566	0.8583

수질항목간의 상관성 분석

수질 항목간의 상관성 검토 결과는 Table 2과 같다.

클로로필-a 농도와 식물플랑크톤 개체수와의 상관성이 가장 높게 나타났으며($r^2 = 0.8583$), BOD와의 상관성이 두 번째로 높게 나타나($r^2 = 0.8445$), 식물플랑크톤의 증식이 BOD 부하의 가장 큰 요인임을 다시 한 번 확인할 수 있었고, 식물플랑크톤의 광합성은 수질의 pH를 증가시킴으로써 높은 상관성($r^2 = 0.6696$)을 나타내었다.

클로로필-a 농도나 식물플랑크톤 현존량의 값이 T-N 및 NH₃-N와는 높은 상관값을 나타내고 T-P 및 PO₄-P과는 낮게 나타나 P보다는 N이 서낙동강 식물플랑크톤 발생의 주요

변수임을 알 수 있었고, 수온, DO, Salinity 등은 상관값이 낮게 나타났으나, 수온은 동물플랑크톤 번식과 밀접하고, DO 농도는 여름철 고수온기외에는 연중 높게 유지되므로 상관성이 낮다고 단정할 수는 없으며, 염분농도(Salinity) 또한 식물플랑크톤 종조성에 다소 영향을 줄 것으로 사료된다.

식물플랑크톤의 군집변화

2005년 서낙동강 식물플랑크톤의 총 개체수는 대저수문 지점이 2,400~130,000 cells/mL 이었고, 강동교 지점이 3,300~550,000 cells/mL, 녹산수문 지점은 800~460,000 cells/mL의 범위였으며, chlorophyll-a 변화와 현존량의 증

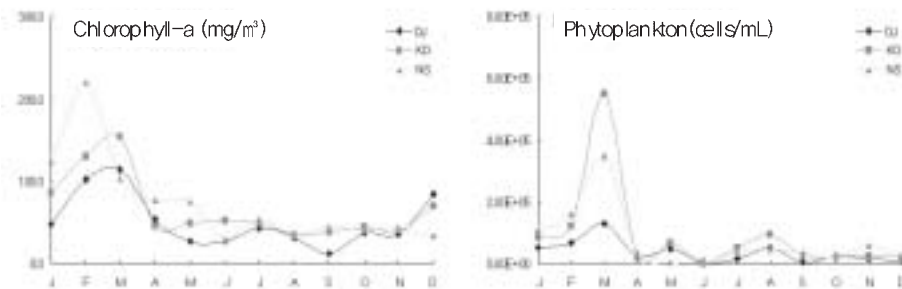


Fig. 5. Monthly variation of Chlorophyll-a and standing crops of phytoplankton in the Seonakdong River in 2005.

Table 3. The dominant species of phytoplanktons in the Seonakdong River(2005)

	대저수문	강동교	녹산수문
1월	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
2월	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
3월	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
4월	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Chlamydomonas</i> sp.
5월	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Oscillatoria</i> sp.
6월	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Pediastrum</i> sp.	<i>Pediastrum</i> sp.
7월	<i>Eudorina</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
8월	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.
9월	<i>Eudorina</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Aulacoseira</i> sp.
10월	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
11월	<i>Aulacoseira</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
12월	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.

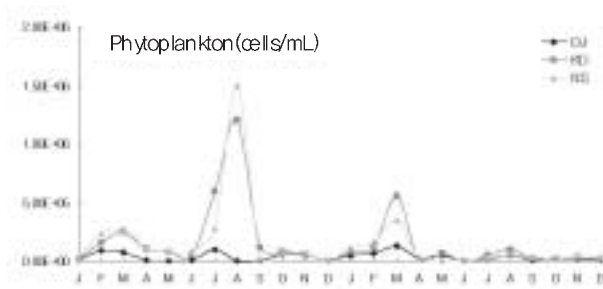


Fig. 6. Monthly variation of standing crops of phytoplankton in the Seonakdong River in 2004 and 2005.

감 추세가 유사한 경향을 보였다(Fig. 5).

2~3월의 높은 현존량은 규조류 *Stephanodiscus* sp.에 의한 것이며, 금년 하절기에는 전년과 달리 7~8월 고수온기에 강우일수가 많고 강우빈도가 높아 전체적으로 일사량이 줄고 수온이 낮아져 남조류의 발생 조건이 형성되지 않아 *Microcystis(Anacystis)* sp.에 의한 녹조현상이 나타나지 않았다.

금년 서낙동강 식물플랑크톤 군집구조의 특징은 연중 규조류(*Stephanodiscus* sp., *Aulacoseira* sp.)의 점유율이 높게 나타났고 종다양도는 점진 낮아지는 추세인 점을 들 수 있으며, 각 지점별 주요 우점종은 Table 3에 나타내었다.

종다양성이 가장 높은 지점은 대저수문지점으로 낙동강본류수의 유입으로 다양한 종이 관찰되었으며, 강동교지점은 연중 규조류가 우점하였고, 녹산수문지점에서는 오염지표종인 *Chlamydomonas* sp., *Oscillatoria* sp. 등이 자주 관찰되었다.

또한 2004~2005년의 식물플랑크톤 개체수 변화를 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 현저한 피크는 3개가 보이며 2004년 3월과 2005년 3월의 피크는 *Stephanodiscus* sp.에 의해, 2004년 8월의 높은 피크는 *Microcystis* sp.에 의한 것으로 2005년 하절기에는 조류 대발생이 없었음을 알 수 있으며, 2005년에는 강동교지점의 개체수가 녹산수문지점보다 다소 높은 것

도 특이할 만한데, 이는 2004년의 조류생산잔재력시험(AGP Test) 결과와 일치된 경향을 보여 준다.

PEG(Plankton Ecological Group) 모델은 온대호수에서 봄철에 소형 규조류의 번성 후, 여름에는 영양염류와 수온 증가 등의 영향으로 와편모조류나 남조류로 종 조성이 바뀌게 되며, 수온 감소와 더불어 가을철에는 규조류가 다시 우점하고, 겨울철에는 생물량이 감소하는 것으로 설명되고 있다(Sommer et al., 1986, 김 등, 2003). 상·하류부가 수문으로 막혀 있는 호소형 하천인 서낙동강에서도 식물플랑크톤의 계절적 천이가 PEG 모델과 일치하게 나타났다. 그러나 2005년에는 여름철에 남조류의 대발생 현상이 없었는데, 동 시기의 수중 영양염류(T-N, T-P, NH₃-N, PO₄-P) 농도가 평균 이상으로 높았음을 감안할 때, 앞서 언급한대로 강우 빈도의 증가에 따른 일조량 감소 및 수온 저하가 일차적 요인으로 판단된다.

또한 2005년의 이화학적 수질은 금년부터 실시되고 있는 서낙동강수계 수질오염 총량관리제에 따라 유입 오염원이 전차 저감되어 유기오염물질과 영양염류 등이 전년보다 낮은 수준이었으며, 그에 따라 겨울철 규조류의 발생량도 현저히 줄었으며, 여름철 남조류의 발생을 억제시킨 이차적 요인으로 볼 수 있을 것이다.

그러나 Chlorophyll-a 농도를 이용한 Forsberg & Riding(1980)의 판정법에 의하면, T-N 0.6~1.5 mg/L, T-P 0.025~0.1 mg/L, Chl-a 7~40 mg/m³일 때가 Eutropic(부영양), T-N 1.5 mg/L이상, T-P 0.1 mg/L이상, Chl-a 농도가 40 mg/m³이상일때 Hypertropic(과영양) 상태라고 보는데, 이에 따르면 서낙동강 수질은 연중 내내 부영양 상태를 나타내고 있으므로 일조량, 기온, 강우 등의 환경 조건만 갖췄진다면, 언제든지 조류 대발생(Algal Bloom, 水華)의 가능성이 잠재하고 있다고 볼 수 있겠다.

동물플랑크톤의 동태

동물플랑크톤은 스스로 광합성을 할 수 없는 부유성 종속영양생물로서, 단세포 원생동물로부터 어류의 치어까지 아주 다

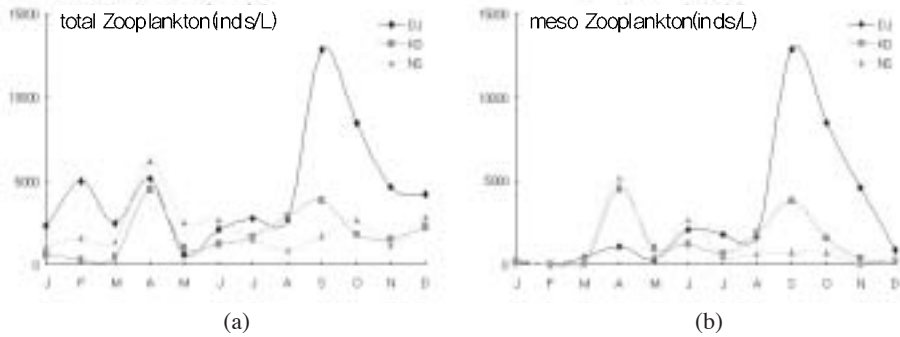


Fig. 7. Monthly variation of total-zooplankton biomass(a) and meso-zooplankton biomass(b) in the Seonakdong River.

양하며, 하천에서 주로 출현하는 동물플랑크톤에는 섬모충류, 윤충류, 지각류 및 요각류 등이 있다. 서낙동강에도 이러한 동물플랑크톤이 다양하게 분포하였으며, 계절별, 지점별로 변화가 심하였다. 2005년 각 지점별 출현한 동물플랑크톤의 총 개체수는 대저수문지점이 570~13,000 inds/L이었고, 강동교지점이 300~4,500 inds/L, 녹산수문 지점은 850~6,200 inds/L로서, 대저수문에서 가장 많이 출현하였다. 봄철과 가을철인 4월과 9월에 개체수가 증가하였으며, 겨울철인 12~3월에는 매우 낮은 값을 나타내어 수온의 영향을 많이 받을 수 있고 식물플랑크톤 증감 추세와 연관성을 보이지 않았다.(Fig. 7(a)).

대저수문지점은 2월, 4월과 9월에 높은 출현률을 보였으며, 2월과 4월에는 섬모충류인 *Strombidium* sp.가 우점하였고, 강동교지점은 4월과 9월에 많은 개체가 나타났는데 4월에는 윤충류인 *Brachionus* sp.가, 9월에는 요각류의 유생인 *Nauplius*가 우점종이었으며, 녹산수문지점의 4월에는 *Brachionus* sp., 10월에는 섬모충류 *Euplotes* sp.가 우점하여 높은 개체수로 출현하였으며, 각 지점별 우점종은 Table 4에 나타내었다.

섬모충류는 섬모라는 운동기관으로 수중에서 유명하며 타생물들을 포식하는 종속영양 원생생물로서, 수중의 박테리아와 미세식물플랑크톤을 포식하는 동시에 중형 동물플랑크톤의 먹

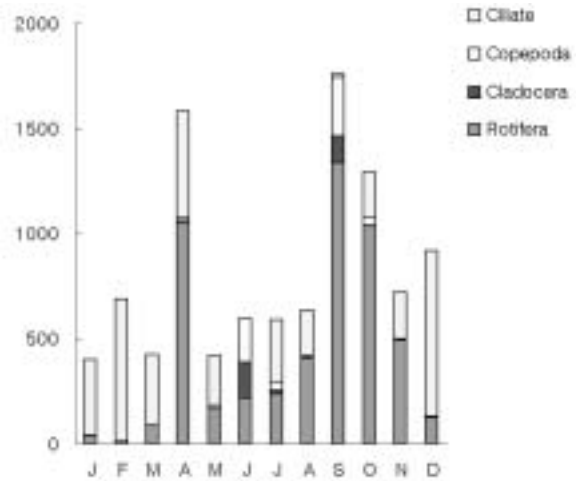


Fig. 8. Relative composition in abundance of zooplankton communities in the Seonakdong River.

이생물로 수서생태계의 먹이사슬내 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 사이에서 중요한 에너지 전달자로 알려져 있는데, 동물플랑크톤 분류에 포함시키게 되면 개체크기는 작으나 개체수가 많아 특정시기에 우점종으로 명시되지만 포식규모는 미미하여 식물플랑크톤과의 상관성 고찰시에 애매한 부분이 있다. 따라서 대부분의 동물플랑크톤 군집 연구 문헌에는 섬모충류를

Table 4. The dominant species of zooplanktons in the Seonakdong River

	대저수문	강동교	녹산수문
1월	<i>Tintinnidium</i> sp.	<i>Tintinnidium</i> sp.	<i>Euplotes</i> sp.
2월	<i>Strombidium</i> sp.	<i>Euplotes</i> sp.	<i>Euplotes</i> sp.
3월	<i>Strombidium</i> sp.	<i>Euplotes</i> sp.	<i>Euplotes</i> sp.
4월	<i>Strombidium</i> sp.	<i>Brachionus</i> sp.	<i>Brachionus</i> sp.
5월	<i>Diffugia</i> sp.	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Diffugia</i> sp.
6월	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Moina</i> sp.
7월	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Tintinnopsis</i> sp.	<i>Tintinnopsis</i> sp.
8월	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Brachionus</i> sp.	<i>Hexarthra</i> sp.
9월	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Nauplius</i>	<i>Brachionus</i> sp.
10월	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Euplotes</i> sp.
11월	<i>Polyarthra</i> sp.	<i>Tintinnidium</i> sp.	<i>Tintinnidium</i> sp.
12월	<i>Strombidium</i> sp.	<i>Strombidium</i> sp.	<i>Strombidium</i> sp.

비슷한 원생동물은 제외하고 윤충류, 요각류, 지각류 등의 중형플랑크톤(mesoplankton)만을 언급하게 되는데, 조사지점 내 meso-zooplankton의 출현 개체수는 Fig. 7(b)와 같다. 그림을 비교해 보면 주로 수온이 낮은 11월~3월 사이에 섬모충류의 출현이 눈에 띄며 이 시기에는 섬모충류를 먹이로 하는 요각류나 곤충류가 적기 때문인 것으로 사료된다. 서낙동강 표층에서 출현한 동물플랑크톤의 강(綱)별, 월별 분포율을 Fig. 8에 나타내었다.

동물플랑크톤의 종다양도지수(H') 및 우점도지수(DI)

2005년 출현한 동물플랑크톤에 대한 종다양도지수(Diversity index) 및 우점도지수(Dominance index)를 Fig. 9에 나타내었다. 대저수문지점의 종다양도가 가장 낮고 우점도는 가장 높은 것으로 나타났으며, 강동교 및 녹산수문지점의 종다양도 및 우점도는 비슷한 것으로 나타났다.

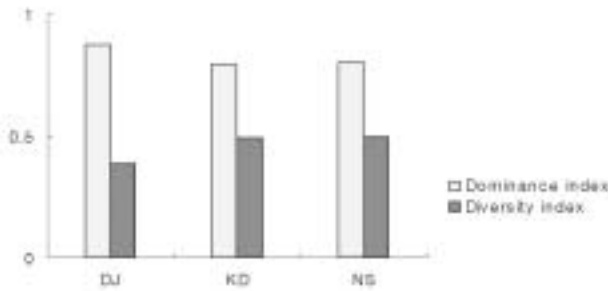


Fig. 9. Average diversity index and dominance index in the Seonakdong River.

월별 종다양도지수는 대저수문과 강동교지점의 경우 8월에, 녹산수문지점은 7월에 가장 높게 나타나는 등 하절기에 높았으며, 동절기에 세지점 모두 가장 낮았다. 우점도지수는 연중 내내 높은 값을 유지하였으나 하절기에 다소 낮아져 종다양도와 반대의 경향임을 확인할 수 있었다(Fig. 10).

동·식물플랑크톤의 군집비교 및 연관성 파악

수생태계내의 동물플랑크톤은 식물플랑크톤을 먹이원으로 이용하여 증식하고, 식물플랑크톤은 개체수 증가, 개체크기 확대, 독소 분비 등의 다양한 방법으로 동물플랑크톤의 포식에 저항하려는 먹이사슬의 관계 및 상호 의존도를 파악하기 위해 주요 우점종간 상관값을 살펴 보았으며, 그 결과는 Table 5과 같다.

2005년의 출현 결과에 대해 산출한 종간 상관값은 매우 낮아 밀접한 연관성을 찾을 수는 없었으나, 식물플랑크톤 현존량과 가장 상관도가 높은 동물플랑크톤은 윤충류로서 규조류와 상관성이 있는 것으로 나타났다. 또한 지각류와 요각류는 남조류에 대해 상관값을 나타냈는데, 이러한 결과는 오히려 수온에 의한 영향으로 판단된다. 수온이 높은 시기는 남조류의 번성시기와 겹쳐지게 되고, 저수온기는 규조류의 번성시기로서 윤충류는 저수온기에, 지각류와 요각류는 고수온기에 주로 출현하는 것으로 보는 것이 타당할 것이다.

동·식물플랑크톤간의 상호 연관성을 보기 위해서는 수년간의 장기적인 결과에 대한 고찰이 되어야 할 것이며, 동물플랑크톤의 또 다른 먹이인 세균군집, 동물플랑크톤간의 포식작용 등이 폭넓게 고려되어야 할 것으로 사료된다.

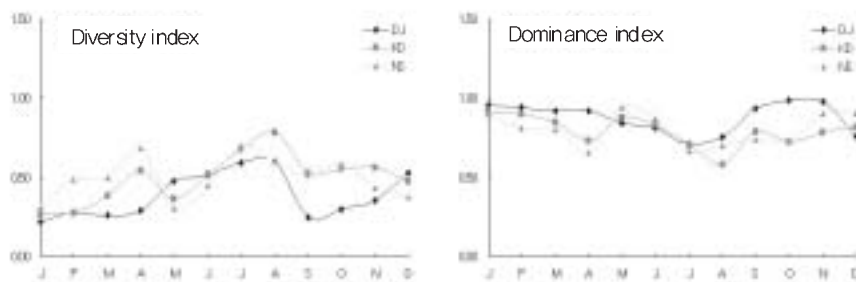


Fig. 10. Monthly variation of diversity index and dominance index in the Seonakdong River.

Table 5. The correlation values between phytoplankton and zooplankton in the Seonakdong River

		동물플랑크톤			
		섬모충류	윤충류	지각류	요각류
식물플랑크톤	규조류	- 0.0384	- 0.2296	- 0.1404	- 0.1722
	녹조류	- 0.0947	0.1040	- 0.1217	- 0.1991
	남조류	0.2582	- 0.0471	- 0.2244	- 0.2654
	total	- 0.0613	- 0.2292	- 0.1657	- 0.2045
수온 (°C)		- 0.4158	0.2701	0.2615	0.3488

결 론

1. 2005년도 서낙동강의 기본현황은 수온이 2°C ~30°C 로서 작년보다 낮았고, 총강수량은 1,383.9 mm로서 평년보다 감소하였다. 2004~2005년간 pH는 7.1~9.9의 범위로 하절기에 높게 나타났고, DO농도는 4.7~20.8 mg/L로 동절기에 높았다. 지점별 평균 염분농도는 0.16%, 0.70%, 1.52% 로서 갈수기 하류지점에서 높게 나타났다.

2. 유기물 오염도는 하류지점이 대체로 높았으며, BOD 및 COD 변화는 식물플랑크톤의 거동과 관련을 보였다. 또한 무기영양염류의 농도는 대저수문지점에서 T-N, T-P 각각 2.918 mg/L, 0.113 mg/L, 강동교지점이 2.866 mg/L, 0.127 mg/L 그리고 녹산수문지점에서 3.247 mg/L, 0.155 mg/L로서 하류로 갈수록 높아지는 경향이었고, T-N는 남조류가 번성하였던 2004년 8월의 녹산수문지점에서 10.032 mg/L로 최고치를, T-P은 조류(algae)가 가장 적은 4월의 강동교지점이 0.422 mg/L로 최고치를 나타내었다.

3. 식물플랑크톤 생체량의 지표인 클로로필-a 농도는 2004년에 89.3 mg/m³, 2005년에 63.6 mg/m³으로 2004년에 조류 번성이 더 심하였음을 알 수 있고, 지점별 평균 농도는 각각 43.2 mg/m³, 87.8 mg/m³, 98.2 mg/m³로서 녹산수문지점이 가장 높게 나타났다. 클로로필-a 농도를 부영양화 판정지표로 이용하였을 때, 서낙동강은 연중 내내 부영양 상태이며, 동절기의 녹산수문 지점은 과영양 상태를 나타냈다.

4. 클로로필-a 농도와 BOD 값의 상관성이 높게 나타나 ($r^2 = 0.8445$), 식물플랑크톤의 증식이 BOD 부하의 가장 큰 요인임을 다시 한번 확인할 수 있었고, 식물플랑크톤의 광합성은 수질의 pH를 증가시킴으로써 높은 상관성($r^2 = 0.6696$)을 나타내었다.

5. 2005년 서낙동강 식물플랑크톤의 총 개체수는 대저수문지점이 2,400~130,000 cells/mL이었고, 강동교 지점이 3,300~550,000 cells/mL, 녹산수문 지점은 800~460,000 cells/mL의 범위였으며, chlorophyll-a 변화와 현존량의 증감 추세가 유사한 경향을 보였다.

금년 서낙동강 식물플랑크톤 군집구조의 특징은 연중 규조류(*Stephanodiscus* sp., *Aulacoseira* sp.)의 점유율이 높게 나타났고 종다양도는 점진 낮아지는 추세인 점을 들 수 있으며, 연중 종다양성이 가장 높은 지점은 대저수문지점으로 낙동강본류수의 유입으로 다양한 종이 관찰되었으며, 강동교지점은 연중 규조류가 우점하였고, 녹산수문지점에서는 오염지표종인 *Chlamydomonas* sp., *Oscillatoria* sp. 등이 자주 관찰되었다.

6. 2005년 각 지점별 출현한 동물플랑크톤의 총 개체수는 대저수문지점이 570~13,000 inds/L이었고, 강동교 지점이 300~4,500 inds/L, 녹산수문 지점은 850~6,200 inds/L로서, 대저수문에서 가장 많이 출현하였다. 봄철과 가을철인 4월과 9월에 개체수가 증가하였으며, 겨울철인 12~3월에는 매우 낮은 값을 나타내어 수온의 영향을 많이 받음을 알 수 있고 식물플랑크톤 증감 추세와 연관성을 보이지 않았다.

7. 2005년 출현한 동물플랑크톤에 대해서는 대저수문지점의 종다양도가 가장 낮고 우점도는 가장 높은 것으로 나타났으며, 하절기에 종다양도가 높았고 동절기에는 우점도가 높은 것으로 나타났다.

8. 식물플랑크톤 현존량과 가장 상관도가 높은 동물플랑크톤은 윤충류로서 규조류와 상관성이 있었으며, 지각류와 요각류는 남조류에 대해 상관값을 보였다.

동·식물플랑크톤간의 상호 연관성을 보기 위해서는 수년간의 장기적인 결과에 대한 고찰이 되어야 할 것이며, 동물플랑크톤의 또 다른 먹이인 세균군집, 동물플랑크톤간의 포식작용 등이 폭넓게 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김명은, 김민호, 조장천, 김상중, 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화, 한국육수학회지, 28(1)
2. 김호섭, 박계철, 황순진, 2003. 수심이 얇은 부영양 인공호(일감호)의 동·식물플랑크톤 동태학.
3. 김호섭, 황순진, 2004. 부영양저수지에서 식물플랑크톤 성장에 대한 질소/인 비의 영향
4. 문은영, 김영옥, 김백호, 공동수, 한명수, 2004. 팔당호의 섬모충플랑크톤의 분류 및 생태학적 연구, 한국육수학회지 37(2) : 149-179.
5. 정준, 1993. 한국담수조류도감
6. 정준, 김한순, 김용재, 1994. 낙동강 하구만의 식물플랑크톤 군집구조.
7. 정하영, 조경제, 2003. 낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출.
8. 정하영, 조경제, 2003. 낙동강 하류 수계에서 저층수 및 저질퇴적층의 환경.
9. 조경제 등, 2002. 서낙동강-조만강 수질 부영양화에 따른 오염양상과 수질개선에 대한 고찰. 인제대학교 부설 낙동강 유역환경연구센터 심포지움 논문집. 1: 32-37.
10. 조경제, 정익교, 이진애, 1993. 낙동강 하구 식물플랑크톤 군집의 계절 동태.
11. 조경제, 1995. 낙동강 담수규조 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*와 *S. parvus*의 미세구조.

12. 조경제, 신재기. 1998. 낙동강 하류에서 동하계 무기 N, P 영양염류와 식물플랑크톤의 동태.
13. 조경제. 2001. 낙동강 하류의 식물플랑크톤과 수질 부영양화. 한국의 조류 생태와 응용. 아카데미서적
14. 조규송. 1993. 한국담수동물플랑크톤도감
15. 환경부. 2001. 수질오염공정시험방법.
16. Anderson, A. and D.O.Hessen, Carbon, nitrogen and phosphorus contents of freshwater zooplankton. *Hydrobiology*, 1991
17. Barnes, J.R. and G.W.Minshall. 1983. Stream ecology, Application and Testing of general ecological theory. Plenum Press, p. 399
18. Forsberg, C. 1989. Importance of sediments in understanding nutrient cuclings in lakes. *Hydrobiologia* 176/177: 263-277.
19. Hirose and Yamagishi. 1977. 일본담수조류도감
20. James H. Thorp and Alan P. C., 2001. Ecology and classification of North American freshwater invertebrates.
21. McNaughton, S. J. 1967. Relationship among functional properties of califonia grassland. *Nature* 216:168-169
22. OECD, OECD guidelines for testing of chemicals, 1988
23. Pielou, E. C. 1977. Mathematical Ecology. John Wiley & Sons, New York, 385pp.
24. Sellner, K.G., M.M. Olson and K. Olli. 1996. Copepod interactions with toxic and nontoxic cyanobacteria from the Gulf of Finland. *Phycologia*, 35:177-182.
25. Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol*, 106: 433-471
26. Urabe, J. K, Kawabata, M, Nakanishi and K, Shimizu. 1996. Grazing and food size selection of zooplankton community in lake Biwa. *J. Limnol*, 57:27-37.
27. Vanni, M.J. and J. Temte, 1990. Seasonal patterns of grazing and nutrient limitation of phytoplankton in a eutrophic lake. *Limnol. Oceanogr*.