

서낙동강 기초생태환경 변화연구

정재원[†] · 김미희 · 권기원

환경조사과

Changes of Basic Ecological Environment in the Seonakdong River

Jae-Won Jeong[†], Mi-Hee Kim and Ki-Won Kwon

Environmental Research Division

Abstract

This study was conducted to investigate long-term change of basic ecological environment in the Seonakdong river by measuring precipitation, temperature, pH, dissolved oxygen, some organic materials(BOD, COD, T-N, T-P) and phyto- and zooplankton at three sites every month from Jan. 1998 to Dec. 2006.

The mean values of water temperature, pH and dissolved oxygen ranged 15.8~18.3 °C, 7.6~8.9 and 9.1~12.9 mg/L, respectively. The average concentrations of BOD were 3.7, 5.8, 6.7 mg/L, those of T-N were 3.159, 3.486, 3.252 mg/L, those of T-P were 0.173, 0.209, 0.198 mg/L and those of chlorophyll-a were 36.5 mg/m³, 65.9 mg/m³, and 75.9 mg/m³ at st.1, st.2 and st.3, respectively.

COD concentration was highly correlated with the standing crops of phytoplankton($r^2=0.8988$) and BOD concentration was highly correlated with chlorophyll-a($r^2=0.8445$).

Bacillariophyceae(*Stephanodiscus* sp., *Aulacoseira* sp., *Cyclotella* sp.) of phytoplankton mostly dominated throughout 2003~2006, but Chlorophyceae(*Eudorina* sp., *Pediastrum* sp.) dominated during summer season, June and July.

The dominant species of zooplankton were *Strombolidium* sp. in winter, and rotifers such as *Polyarthra* sp., *Brachionus* sp., *Keratella* sp. in summer. The standing crops of phytoplankton was affected by not only precipitation, water temperature but also zooplankton biomass.

Key Words: long-term ecological change, phytoplankton, zooplankton, Bacillariophyceae, Seonakdong River

서론

수생태계는 빛에너지를 이용하여 광합성을 수행하는 생산자와 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 망처럼 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). 또한 담수생태계는 여름 집중강수와 겨울 기름에 의해 큰 영향을 받으며, 이러한 기상학적 수문학적 요인 변화는 하천내 다양한 육수학적 항목간의 변화 및 플랑크톤 군집변화 등과 밀접한 상관관계를 나타낸다(주기재, 2005).

국외의 경우 다양한 관점에서 수질과 플랑크톤 간의 관계에

대하여 연구가 이루어졌으며, 수질 변화 및 부영양화 등을 해석하기 위하여 플랑크톤 동태를 파악하는 것을 최우선으로 하고 있다. 기본적으로 동·식물플랑크톤이 어떠한 천이 양상을 보이는지, 그리고 천이에 가장 중요한 영향요소가 무엇인지를 밝히고, 이들의 연간 변이가 어떠한 형태로 일어나는지를 파악한다. 일반적으로 플랑크톤의 경우 하천 혹은 호수의 체류시간과 유량에 의하여 군집구조가 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Lack, 1971; Holmes and Whitton, 1981; Descy, 1987). 그리고 동물플랑크톤에 의한 섭식, pH 변화, 영양염류 분포 등이 식물플랑크톤 동태와 큰 관련성이 있다(Shapiro, 1990).

우리나라에서 수질과 플랑크톤의 관계에 대하여 연구가 진행된 경우는 드문 편이며, 일반적으로 수질의 변동 혹은 플랑크톤 종 조성에 대한 연구가 별개로 이루어진 경향이 많다. 특히 수질의 변동을 예측하거나 해석하기 위해서 주로 활용된 변수들은 용존산소, 생물학적 산소요구량 및 수온 등의 물리·화학적 요소가 주를 이루고 있다. 또한 플랑크톤의 연구 역시

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



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

특정 계절에 대변성을 일으키는 식물플랑크톤에 대한 종 조성과, 이들의 번성에 미치는 영향 요소에 대한 연구가 주를 이루며, 계절적인 천이와 연간 변이에 대한 연구는 일부를 제외하고 거의 없는 실정이다(주기재, 2005).

서낙동강은 1930년대부터 부산광역시 강서구 및 김해지역의 농업용수로 이용되어 왔으며, 최근에는 철새들의 휴식처로서, 시민들의 휴양공간으로서 그 중요성이 더욱 높아지고 있는 가운데, 건강한 수생태계를 보전하기 위해 다양한 오염 방지시설과 노력들이 투입되고 있다. 농업용수로의 이수과 치수를 위하여 대저수문과 녹산수문이 설치된 이후 호소형 하천의 수문 특성을 나타내며, 중·하류부의 김해하수처리장과 강동하수처리장으로부터 N, P의 함량이 높은 방류수가 유입되고, 주변 농가 및 축사로부터 정화되지 않은 고농도 비점오염물의 유입, 느린 유속에 의한 퇴적물로부터의 재오염이 가속화되어 식물플랑크톤의 대량번식이 해마다 발생하는 것이 서낙동강의 주요 문제점이며, 이러한 식물플랑크톤은 또 다른 내부생산부하 오염물질로서 수질악화의 원인이 되는 악순환이 거듭되고 있다.

우리 원에서는 가뭄이 심해 남조류 Bloom현상이 최고에 달했던 1997년 이후부터 하절기에 식물플랑크톤 모니터링을 실시하였으며, 2003년부터 연간 모니터링을 계속해 오고 있다. 장기적인 기반을 토대로 지속적인 연구가 수행된다면, 보다 정

확하고 다양한 수생태계 동태를 포괄적으로 이해할 수 있을 것이며, 차후에 서낙동강 수질관리 및 효과적인 부영양화 대책을 위한 실질적인 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

조사지점 및 기간

대저수문(DJ), 강동교(KD), 녹산수문(NS)의 3개 지점을 서낙동강 수질 대표지점으로 선정하여 (Fig. 1), 이화학적 수질 조사는 1998년부터 월 1회 실시하였으며, 클로로필-a 및 식물플랑크톤 조사는 1998년부터 2002년까지는 남조류 bloom현상이 예상된 하절기에만 조사하였고, 2003년부터는 매월 1회 실시하였다.

이화학적 수질조사

수질의 이화학적 성분을 위한 조사로서 채수기를 사용하여 수심 50 cm이내의 표층수를 채취하였으며, 수온, pH, DO, 전기전도도 등은 현장 측정기(YSI-556MPS)를 이용하여 현장에서 바로 측정하였고, COD, BOD, T-N, T-P 항목을 수질오염 공정시험방법(환경부, 2001)에 의거하여 분석하였으며, 각 항목별 분석방법은 Table 1과 같다. 또한 수질항목간 및 식물플랑크톤 현존량 등과의 상관관계 도출을 위하여 Microsoft Excel program을 사용하여 Pearson's correlation analysis 를 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 세즈윅-라프티 챔버를 이용하여 지배율(×200)에서 계수하였고, 정

Table 1. The analysis methods of sampling water

Item*	Method
Water Temperature	Thermometer(YSI-556MPS)
pH	pH meter(YSI-556MPS)
DO	DO meter(YSI-556MPS)
Conductivity	Conductivity meter(YSI-556MPS)
COD	Acid KMnO ₄ Method
BOD	Winkler Method Azide Modification
T-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method
T-P	Ascorbic Acid Method
Chll-a	Extract-Spectrophotometric Method

* DO : Dissolved Oxygen, COD : Chemical Oxygen Demend, BOD : Biochemical Oxygen Demend, T-N : Total Nitrogen, T-P : Total Phosphorus, Chll-a : Chlorophyll-a

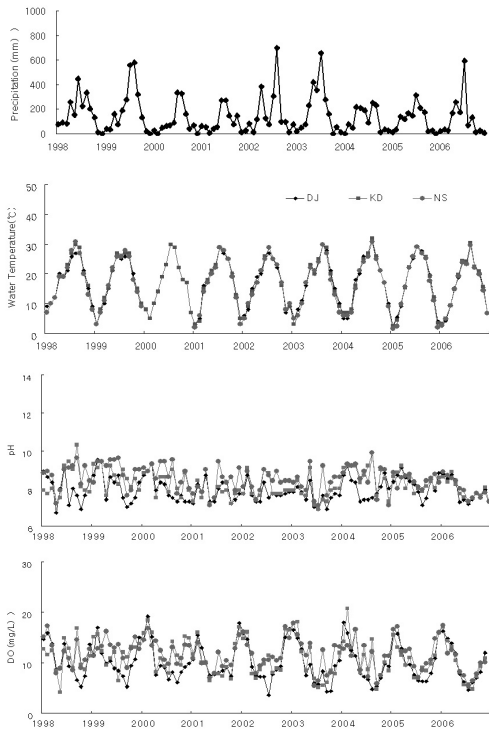


Fig. 2. The physicochemical factors in Seonakdong River during the study period. (DJ:Daejoe sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

성분식은 중·고배율($\times 400$, $\times 1,000$)에서 분리·동정하였다. 식물플랑크톤 종의 동정은 한국담수조류도감(정준, 1993), 일본담수조류도감(Hirose and Yamagishi, 1977) 및 수질오염 공정시험방법 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(ind/L)로 환산하였다.

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

결과 및 고찰

환경요인 및 수질현황

1998년부터의 강수량, 월별 수온, DO(용존산소) 및 pH 등 환경변화를 Fig. 2 및 Table 2에 나타냈으며, 2000년과 2001년에는 평년에 못미치는 강우량을 나타냈고, 2002년과 2003년에는 평년 이상의 많은 강우가 내렸으며, 2004~2006년에는 평년 강수량인 1,492 mm와 비슷하게 나타났다(기상청, 2006).

서낙동강의 연평균 수온은 15.8°C ~ 18.3°C 로서 1998년에

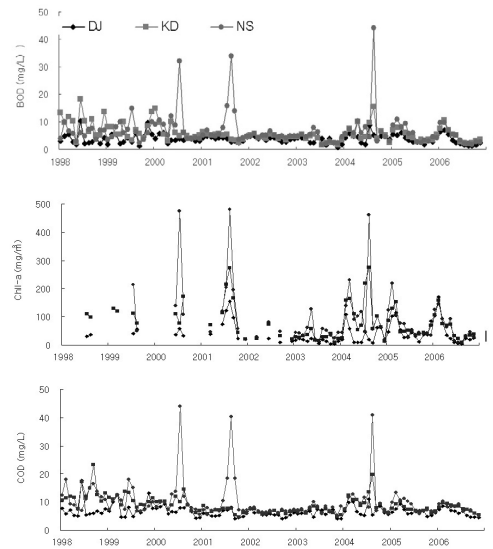


Fig. 3. Monthly variation of Biochemical oxygen demand, Chlorophyll-a and Chemical oxygen demand in Seonakdong River.(DJ:Daejoe sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

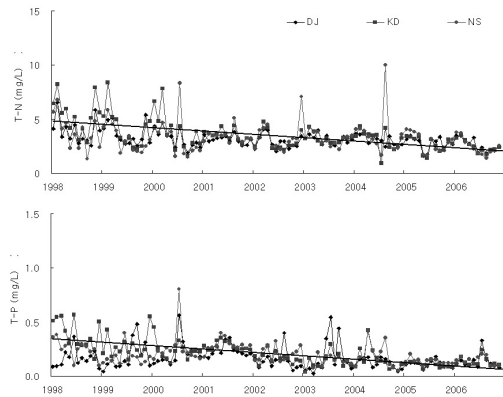


Fig. 4. Monthly variation of nutrients in Seonakdong River. (DJ:Daejoe sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

가장 높았고 2005~2006년에 낮은 수온을 나타냈으며, 최저 2°C (2005년 1월) ~ 최고 32°C (2004년 8월, 강동교)로서 계절적 특성을 반영하고 있으며, 대저수문지점의 평균 수온은 17.1°C , 강동교지점은 17.2°C 및 녹산수문지점이 16.8°C로서 강동교지점이 가장 높고 녹산수문지점이 가장 낮았다(Fig. 2).

서낙동강 평균 pH는 1999년과 2004년에 높게 나타났고, 2002~2003년 및 2006년에 낮게 나타났으며, 대저수문, 강동교, 녹산수문의 지점별 평균 pH는 각각 7.9, 8.2, 8.5로 대저수문이 가장 낮고 녹산수문이 가장 높게 나타났다. 조사기간 동안 가장 높은 값은 10.3으로서 1998년 9월에 강동교와 녹산수문지점에서 남조류가 번성하였을 때였으며, 늦겨울~봄철

Table 2. The physicochemical Factors in the Seonakdong River during 1998 ~ 2006. (DJ:Daejeon sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

yr.	Site	W.T.* (°C)	pH	DO(mg/L)	EC.**(μs/cm)	BOD(mg/L)	COD(mg/L)	T-N(mg/L)	T-P(mg/L)	Chl-a(mg/m ³)
1998	DJ	18.0	7.9	10.5	296	3.8	7.2	3.939	0.163	-
	KD	18.3	8.3	11.0	1,505	9.8	13.5	5.348	0.397	-
	NS	18.0	8.7	11.8	2,421	6.1	11.8	3.775	0.258	-
1999	DJ	17.0	8.2	10.5	305	4.3	7.8	3.610	0.264	-
	KD	17.4	8.6	12.1	1,539	7.0	10.7	4.141	0.274	-
	NS	17.2	8.9	12.9	2,856	6.9	10.1	3.211	0.177	-
2000	DJ	-	8.0	10.2	341	3.8	7.0	3.218	0.213	-
	KD	16.8	8.4	12.7	983	6.6	9.3	3.927	0.236	-
	NS	-	8.8	12.7	2,510	9.1	12.3	3.311	0.262	-
2001	DJ	16.8	7.8	10.7	657	3.7	5.9	3.125	0.235	-
	KD	17.0	7.8	10.3	988	4.7	6.8	3.520	0.277	-
	NS	16.4	8.3	10.8	3,113	9.3	12.1	3.422	0.285	-
2002	DJ	16.7	7.7	10.2	312	3.8	5.6	2.915	0.142	-
	KD	16.8	8.0	11.2	537	4.5	6.6	2.962	0.167	-
	NS	16.9	8.4	12.1	2,036	5.0	7.1	3.363	0.206	-
2003	DJ	17.6	7.6	9.1	342	3.0	6.0	3.153	0.176	14.3
	KD	17.2	7.8	10.1	1,845	3.5	6.7	3.204	0.135	29.0
	NS	16.7	8.3	11.6	3,073	4.2	7.6	3.191	0.139	46.8
2004	DJ	17.8	8.1	9.6	298	4.5	7.3	3.093	0.120	35.3
	KD	18.0	8.8	11.5	1,561	6.7	10.2	3.110	0.155	109.6
	NS	17.3	8.7	11.0	3,168	9.6	11.9	3.655	0.177	123.0
2005	DJ	16.5	8.2	10.5	349	3.8	6.5	2.775	0.110	51.2
	KD	16.4	8.3	10.7	1,276	5.0	7.6	2.666	0.103	66.1
	NS	15.8	8.4	12.3	2,643	5.8	8.7	2.894	0.137	73.5
2006	DJ	16.1	7.9	10.3	336	3.1	6.1	2.603	0.136	45.2
	KD	16.5	8.0	10.0	662	4.6	7.5	2.493	0.133	59.0
	NS	15.9	8.1	10.3	1,630	4.5	7.5	2.443	0.144	60.2
평균	DJ	17.1	7.9	10.2	359	3.7	6.6	3.159	0.173	36.5
	KD	17.2	8.2	11.1	1,211	5.8	8.8	3.486	0.209	65.9
	NS	16.8	8.5	11.7	2,606	6.7	9.9	3.252	0.198	75.9

* W.T. : Water Temperature

** E.C. : Electric Conductivity

규조류의 번성시기에도 높게 나타나 조류 번성과 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다(Fig. 2).

DO(용존산소) 농도의 변화는 대저수문지점이 3.6~19.2 mg/L, 강동교지점은 4.2~20.8 mg/L, 녹산수문지점은 5.5~17.9 mg/L로 나타났고, 지점별 평균 DO 농도는 각각 10.2, 11.1, 11.7 mg/L로서 녹산수문이 가장 높게 나타났다. 대체로 남조류의 번성시기인 8~9월에 수중 용존산소 농도가 가장 낮았고, 규조류 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).

생물화학적 산소요구량(BOD)은 대저수문, 강동교, 녹산수문지점의 평균값이 각각 3.7, 5.8, 6.7 mg/L로서, 하류로 갈수록 유기물 부하량이 높아짐을 알 수 있었고, 화학적산소요구량(COD)의 평균값은 6.6, 8.8, 9.9 mg/L로서 BOD 증가 경향과 일치하게 나타났다(Fig. 3).

또한 조사기간 동안의 BOD 및 COD 변화는 클로로필-a의 증감추세와 거의 일치하고 있어 서낙동강의 BOD 및 COD 부하는 외부오염원보다는 수체내의 조류(algae)에 의한 내부생산 부하가 더 큰 비중을 차지함을 알 수 있다(Fig. 3).

클로로필-a 농도는 1998년부터 2002년까지는 남조류 bloom현상이 예상된 하절기에만 조사되었고, 2003년 이후로 매월 조사되어 축적된 데이터가 다소 적은편이지만 대략의 추세는 BOD 및 COD 증감 패턴, DO 및 pH 변화 그리고 강수량 등과 밀접한 상관성을 보이고 있다. 특히 강수량의 영향을 크게 받는 것으로 나타나, 강수량이 적었던 2000년, 2001년 및 2004년 여름에 남조류가 대량 번성하였으며, 2001년 8월 녹산수문지점의 클로로필-a 농도는 481.0 mg/m³까지 나타났다. 또한 2000년 6월에는 474.6 mg/m³, 2004년 8월에는 462.2 mg/m³로서 정체수역인 녹산수문지점에서 남조류 bloom현상이 자주 나타났으며, 2004년 ~ 2006년에는 1~3 월경 규조류에 의한 높은 클로로필-a 농도를 나타내었다. 지점별 평균 농도는 각각 36.5 mg/m³, 65.9 mg/m³, 75.9 mg/m³로서 녹산수문지점이 가장 높게 나타났다(Fig. 3). 대저수문지점은 2001년 여름과 2004~2006년 겨울에, 강동교 및 녹산수문지점은 1998년부터 2004년까지의 여름철과 2004~2006년 겨울동안 높은 농도를 나타냈으며, 강우가 많았던 2002~2003년에는 세 지점 모두 낮은 클로로필-a 농도를 보였다.

서낙동강 부영양화의 주요인인 T-N(총질소) 평균농도는 각

Table 3. The Pearson correlation values between physicochemical and biological factors in the Seonakdong River.

	W.T.*	DO	pH	BOD	COD	T-N	T-P	Chl1-a
DO	-0.7692							
pH	-0.2057	0.5682						
BOD	-0.0126	0.3014	0.4881					
COD	0.2375	0.0699	0.4412	0.8297				
T-N	-0.3540	0.3549	0.2855	0.5170	0.4584			
T-P	0.2672	-0.1334	-0.1052	0.3785	0.4479	0.3647		
Chl1-a	-0.2014	0.3808	0.6767	0.8741	0.8628	0.5779	0.1237	
Phytoplankton standing crops	0.1467	0.0763	0.4254	0.8581	0.8988	0.5200	0.1967	0.7935

각 3.159, 3.486, 3.252 mg/L, T-P(총인)은 0.173, 0.209, 0.198 mg/L로서 강동교지점의 N, P 농도가 가장 높았으며, 연도별 추세를 보면 매년 조금씩 낮아지고 있음을 알 수 있다 (Fig. 4). 특히 2005년 이후로 총질소, 총인의 농도가 10% 이상 저감된 것을 알 수 있는데, 이는 2005년부터 시행된 서낙동강수계 오염총량관리의 노력의 결과로 사료된다. 낙동강 본류수의 영향을 직접 받는 대지수문지점의 영양염류 농도도 낮아졌으며, 오염이 심한 신어천, 호계천 등이 유입되는 강동교지점과 조만강, 지사천이 유입되는 녹산수문지점의 총질소, 총인 농도도 낮아진 것으로 보아 수계 전반적으로 영양염류의 유입부하량이 낮아졌음을 알 수 있다. 이는 N, P 저감 조류발생 억제 클로로필 농도 저감 BOD 및 COD 저감의 효과를 보여 주어 하천수질 관리의 기본적인 방안을 잘 설명하고 있다. 총질소는 남조류가 번성하였던 2004년 8월의 녹산수문 지점에서 10.032 mg/L로 최고치를, 총인은 2000년 7월의 녹산수문 지점에서 0.803 mg/L로 최고치를 나타내었다(Fig. 4).

수질항목간의 상관성 분석

수질 항목간의 상관성 검토 결과는 Table 3과 같다.

식물플랑크톤 개체수와 COD의 상관성이 가장 높았으며($r^2=0.8988$), BOD와는 0.8581의 상관값을 나타냈다. 또한 클로로필-a 농도와 BOD와의 상관성이 두 번째로 높게 나타났는데($r^2=0.8741$), 클로로필-a 농도와 COD는 0.8628의 상관값을 나타낸 점은 고찰해 볼 결과이다. 클로로필-a 농도가 식물플랑크톤 현존량을 정확하게 반영한다면 BOD나 COD와의 상관성은 일치하여야 할 것이나, 플랑크톤 종에 따라 세포크기도 다르고, 세포내 존재하는 클로로필-a 량도 다르기 때문에 그 결과는 다르게 나타난다. 또한 조류 세포내의 클로로필 양은 빛에 민감하여 하루중 시간에 따라서도 그 양이 변화한다는 연구결과도 있으며(Owens et al., 1980), 식물플랑크톤 개체수와 클로로필-a 농도와의 상관값은 0.7935로 나타났다. BOD와 COD 항목간의 상관값은 0.8297이었으며, 수온과 DO($r^2=-0.7692$), 클로로필-a 농도와 pH($r^2=0.6767$) 등이 다소 높은 상관성을 나타냈다.

클로로필-a 농도나 식물플랑크톤 현존량의 값이 T-N(총질소)과는 상관성($r^2=0.5779, 0.5200$)을 보이고 T-P(총인)과

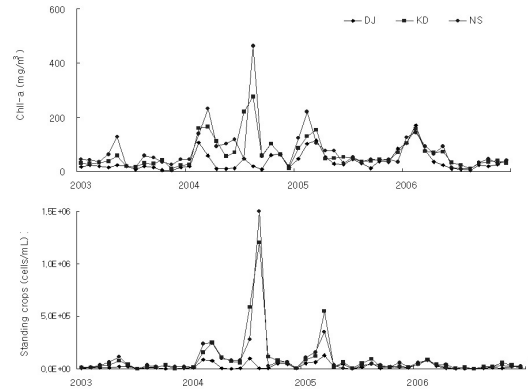


Fig. 5. Monthly variation of Chlorophyll-a and standing crops of phytoplankton in Seonakdong River during 2003-2006. (DJ:Daejeon sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

는 상관성이 전혀 보이지 않아 P보다는 N이 서낙동강 식물플랑크톤 발생의 주요 변수임을 알 수 있었다.

식물플랑크톤의 군집변화

2003년부터 서낙동강 식물플랑크톤의 군집 변화상을 살펴 보면 2003년 봄철에 규조류가 크게 우점하였고, 6~7월에 규조류와 녹조류가 함께 우점하다 8~9월에는 남조류가 우점하였으며 11월 이후 다시 규조류가 우점하였다. 2004년에는 3월까지 규조류가 크게 우점하다 4월 이후 편모조류가 나타났으며 6~9월까지의 다양한 녹조류들이, 10월 이후로는 다시 규조류가 우점하였다. 2005년과 2006년에는 여름철 홍수기 전후를 제외하고는 연중 내내 규조류가 우점하였으며, 2005년에 비해 2006년에는 클로로필-a 농도 및 식물플랑크톤 개체수도 대체로 저감된 추세를 나타냈다(Fig. 5).

2004년 여름의 높은 피크는 녹산수문과 강동교지점에서의 남조류(*Microcystis aeruginosa*) bloom에 의한 것이며, 매년 봄철의 피크는 규조류(*Stephanodiscus hantzschii f. tenuis*)에 의한 것이다. 1994~1996년간의 심한 가뭄 이후로 *Microcystis aeruginosa*에 의한 남조류 bloom이 매년 하절기마다 서낙동강을 뒤덮었는데, 최근 5년동안에는 2004년 여름을 제외하고는 남조류 bloom현상이 나타나지 않았다. 여름

Table 4. The seasonal dominant species of phytoplanktons in Seonakdong River during 2003~2006. (DJ:Daejeon sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

		DJ	KD	NS
2003	winter	<i>Stephanodiscus</i> sp.(84%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(88%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(87%)
	spring	<i>Stephanodiscus</i> sp.(66%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(67%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(68%)
	summer	<i>Aulacoseira</i> sp.(30%)	<i>Eudorina</i> sp.(24%)	<i>Microcystis</i> sp.(30%)
	autumn	<i>Aulacoseira</i> sp.(51%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(55%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(44%)
2004	winter	<i>Stephanodiscus</i> sp.(96%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(95%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(96%)
	spring	<i>Cryptomonas</i> sp.(43%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(40%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(43%)
	summer	<i>Eudorina</i> sp.(26%)	<i>Microcystis</i> sp.(92%)	<i>Microcystis</i> sp.(94%)
	autumn	<i>Aulacoseira</i> sp.(55%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(55%)	<i>Cyclotella</i> sp.(42%)
2005	winter	<i>Stephanodiscus</i> sp.(89%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(89%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(90%)
	spring	<i>Stephanodiscus</i> sp.(82%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(80%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(83%)
	summer	<i>Aulacoseira</i> sp.(25%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(29%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(31%)
	autumn	<i>Aulacoseira</i> sp.(62%)	<i>Cyclotella</i> sp.(61%)	<i>Cyclotella</i> sp.(51%)
2006	winter	<i>Stephanodiscus</i> sp.(84%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(81%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(79%)
	spring	<i>Stephanodiscus</i> sp.(86%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(74%)	<i>Stephanodiscus</i> sp.(75%)
	summer	<i>Aulacoseira</i> sp.(50%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(37%)	<i>Aulacoseira</i> sp.(23%)
	autumn	<i>Cyclotella</i> sp.(49%)	<i>Cyclotella</i> sp.(49%)	<i>Cyclotella</i> sp.(45%)

철 유해조류인 남조류(*Microcystis* sp.) bloom현상이 나타나지 않는 것은 괄목할 만한 사실이나 연중 내내 규조류가 우점하는 것은 우려할만한 점으로, 특정 종에 의한 우점도가 높아지면 종다양도가 낮아지고 생태계의 건강도는 위태해지기 때문이다.

2004년 하절기의 매우 높은 피크는 녹산수문과 강동교지점에서 *Microcystis aeruginosa*에 의한 대발생을 나타내는데, 1,200,000~1,500,000 cells/mL로 조사되었고, 2005년 봄철에는 *Stephanodiscus* sp.가 460,000~550,000 cell/mL로 조사되었다. 대저수문지점의 식물플랑크톤 개체수는 50 cells/mL (2003년 7월) ~ 130,000 cells/mL (2005년 3월)의 범위로 대체로 봄철 규조류에 의해 높은 값을 나타냈다. 강동교 지점은 115 cells/mL (2003년 7월) ~ 1,200,000 cells/mL (2004년 8월)의 범위로 봄철과 여름철 두 차례의 높은 개체수를 나타내었다. 녹산수문 지점도 240 cells/mL (2006년 7월) ~ 1,500,000 cells/mL (2004년 8월)의 범위로 강동교와 비슷한 패턴을 보였다.

2003년부터의 각 지점별 계절별 주요 우점종은 Table 4에 나타낸 바와 같으며, 2003년과 2004년에는 규조류(봄) → 녹조류(이른 여름) → 남조류(여름) → 녹조류(가을) → 규조류(겨울)의 천이형태를 보였으나, 2005년과 2006년에는 규조류(봄) → 녹조류 및 규조류(여름) → 규조류(가을) → 규조류(겨울)의 천이과정을 보이고 있다. 겨울~봄철까지의 주요 규조류종은 *Stephanodiscus hantzchii f. tenuis*이며, 여름철에는 *Aulacoseira granulata*, 가을철에는 *Cyclotella comta*가 주요 우점종으로 조사되었다. 그러나 부분적으로 녹조류인 *Eudorina* sp., *Pandorina* sp.은 편모조류인 *Cryptomonas* sp. 등이 일시적인 우점을 나타내기도 하였다. 서낙동강은 대저수문과 녹산수문으로 막힌 호소형 하천으로, 영양염류의 거동, 부영양화 진행, 식물플랑크톤 발생 패턴 등이 호소수와 거의 유사하다. 호소수의 식물플랑크톤 발생 패턴을 살펴 보면,

수심이 얇은 하천형 호수에서는 봄철 갈수기와 가을철 갈수기에 발생량이 증가하는데 특히 봄철 갈수기에 높은 발생량을 보이며 체류시간이 짧아지는 홍수기 직후에는 낮은 농도를 보인다. 반면 수심이 깊고 체류시간이 긴 호소형 호수에서는 봄철 갈수기에는 수중 영양염류의 고갈로 식물플랑크톤의 증식이 억제되어 낮은 발생량을 보이거나 홍수기 직후 외부에서 유입된 영양염류를 이용하여 식물플랑크톤이 대량 번식하게 된다. 각 시기별로 우점하는 조류의 종류도 달라 하천형 호수에서 봄철에 주로 우점하여 대량 발생하는 조류는 *Cyclotella* sp., *Stephanodiscus* sp., *Asterionella* sp., *Synedra* sp. 등의 규조류와 갈색편모조류인 *Cryptomonas* sp.이며, 호소형 호수에서 주로 대량 발생하는 조류는 *Microcystis* sp., *Anabaena* sp. 등을 중심으로 한 남조류라고 알려져 있다(박, 2006). 서낙동강의 경우 2004년까지는 호소형 호수의 발생 패턴을 보였으며, 2005년 이후로는 하천형 호수 패턴을 보이고 있다. 이와 같은 사실은 지난 수년간 서낙동강 유역내에 소규모 하수처리시설들을 설치하여 유입 오염원을 줄이고, 수문을 통한 유입·방류량의 조절, 녹산배수펌프장을 설치하는 등 수질 개선을 위한 다방면의 노력들이 효과를 나타내는 것으로 사료된다.

조류강(綱)별 수질에 대한 영향

식물플랑크톤이 대발생하였을 때는 클로로필-a 농도와 BOD 및 COD 값도 같이 증가하는데, 이 때의 증가추세가 일정하게 나타나지는 않는다. 이는 플랑크톤 종에 따라 세포크기도 다르고, 세포내 존재하는 클로로필-a 함량이나 세포당 탄소량도 다르기 때문이며, 이러한 차이는 식물플랑크톤 개체수 비교 또는 클로로필-a 농도 변화 및 BOD, COD 증감추세를 살필 때 크고 작은 오차를 유발하게 된다.

2004년 8월의 녹산수문 지점에서 남조류 개체수가 1,500,000 cells/mL였고, 클로로필-a 농도는 462.2 mg/m³

Table 5. The average values of Cyanophyceae and Bacillariophyceae.

	standing crops (cells/mL)	Chlorophyll-a (mg/m ³)	BOD(mg/L)	COD(mg/L)
Cyanophyceae (<i>Microcystis</i> sp.)	940,000 (1)	370.1 (3.9E04)	28.1 (3.0E03)	32.0 (3.4E03)
Bacillariophyceae (<i>Stephanodiscus</i> sp.)	140,000 (1)	176.3 (1.3E03)	10.0 (7.2E03)	11.2 (8.1E03)

Table 6. The seasonal dominant species and average dominant rate of zooplanktons in Seonakdong River during 2004~2006.

		DJ	KD	NS
2004	winter	<i>Tintinnidium</i> sp.(52%)	<i>Tintinnidium</i> sp.(57%)	<i>Euplotes</i> sp.(27%)
	spring	<i>Tintinnidium</i> sp.(39%)	<i>Brachionus</i> sp.(49%)	<i>Brachionus</i> sp.(17%)
	summer	<i>Tintinnidium</i> sp.(21%)	<i>Bosmina</i> sp.(34%)	<i>Bosmina</i> sp.(29%)
	autumn	<i>Bosmina</i> sp.(19%)	<i>Brachionus</i> sp.(20%)	<i>Strombidium</i> sp.(40%)
2005	winter	<i>Strombidium</i> sp.(57%)	<i>Strombidium</i> sp.(47%)	<i>Strombidium</i> sp.(46%)
	spring	<i>Strombidium</i> sp.(74%)	<i>Brachionus</i> sp.(41%)	<i>Brachionus</i> sp.(31%)
	summer	<i>Polyarthra</i> sp.(52%)	<i>Polyarthra</i> sp.(25%)	<i>Moina</i> sp.(34%)
	autumn	<i>Polyarthra</i> sp.(75%)	<i>Nauplius</i> (34%)	<i>Euplotes</i> sp.(35%)
2006	winter	<i>Strombidium</i> sp.(51%)	<i>Strombidium</i> sp.(34%)	<i>Euplotes</i> sp.(27%)
	spring	<i>Tintinnidium</i> sp.(52%)	<i>Brachionus</i> sp.(36%)	<i>Tintinnidium</i> sp.(32%)
	summer	<i>Bosmina</i> sp.(26%)	<i>Moina</i> sp.(32%)	<i>Moina</i> sp.(42%)
	autumn	<i>Tintinnidium</i> sp.(57%)	<i>Tintinnidium</i> sp.(71%)	<i>Tintinnidium</i> sp.(76%)

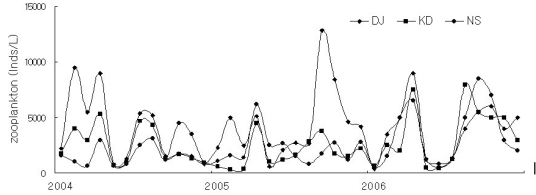


Fig. 6. Monthly variation of total-zooplankton biomass in Seonakdong River. (DJ:Daejoe sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

였으며, BOD는 44.3 mg/L, COD는 41.0 mg/L였다. 그러나 2004년 3월의 녹산수문지점에서는 규조류 개체수가 250,000 cells/mL였고, 클로로필-a 농도는 231.8 mg/m³였으며, BOD는 6.0 mg/L, COD는 12.8 mg/L였다. 남조류 (*Microcystis* sp.)와 규조류(*Stephanodiscus* sp.)에 따라 클로로필-a 농도, BOD 및 COD가 어떻게 다른지를 살펴보기 위해 남조류(*Microcystis* sp.)가 90%이상 우점일 때의 5개 측정 자료의 평균값과 규조류(*Stephanodiscus* sp.)가 90%이상 우점일 때의 5개 측정 자료의 평균값을 비교하여 보았다 (Table 5). 남조류의 경우에는 세포 1개체당 0.39 μ g Chlorophyll-a/m³, 3.0 μ g BOD/L, 3.4 μ g COD/L를 유발하고, 규조류의 경우에는 세포 1개체당 1.3 μ g Chlorophyll-a/m³, 7.2 μ g BOD/L, 8.1 μ g COD/L를 유발하는 것으로 나타났다. 즉 규조류 1개체가 남조류 1개체보다 2배 이상의 클로로필-a 농도, BOD 및 COD를 유발하게 되므로 같은 개체수로 비교한다는 것은 무리임을 알 수 있다. 이는 각 개체별 세포

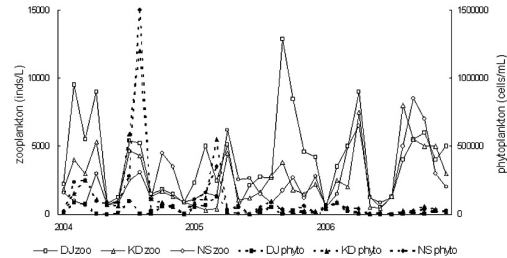


Fig. 7. Monthly variation of zooplankton biomass and standing crops of phytoplankton in Seonakdong River. (DJ:Daejoe sluice, KD:Kangdong bridge, NS:Noksan sluice)

체적의 차이에서 기인한 것이며, 규조류인 *Stephanodiscus hantzchii*의 평균 세포체적이 남조류 *Microcystis aeruginosa*의 평균 체적보다 약 100배 큰 것으로 조사된 바 있다(이정호, 1998).

동물플랑크톤의 동태

동물플랑크톤은 스스로 광합성을 할 수 없는 부유성 중속영양생물로서, 단세포 원생동물로부터 어류의 치어까지 아주 다양하며, 하천에서 주로 출현하는 동물플랑크톤에는 섬모충류, 윤충류, 지각류 및 요각류 등이 있다. 서낙동강에도 이러한 동물플랑크톤이 다양하게 분포하였으며, 계절별, 지점별로 변화가 심하였다. 2004년~2006년간 각 지점별 출현한 동물플랑크톤의 총 개체수는 대저수문지점이 100~13,000 inds/L이었고, 강동교 지점이 300~8,000 inds/L, 녹산수문 지점은 500~8,500 inds/L로서, 대저수문에서 가장 많이 출현하였다. 봄철과 가을철인 4월과 9월에 개체수가 증가하였으며, 겨

울철인 12~3월에는 매우 낮은 값을 나타내어 수온의 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.(Fig. 7).

봄철의 높은 출현시기에는 대저수문지점의 개체수가 가장 많았고 가을철의 높은 출현시기에는 녹산수문지점의 개체수가 비교적 많았다. 출현종은 겨울철에는 *Strombolidium* sp. 등의 섬모충류와 *Polyarthra* sp. 등의 윤충류가 전 지점에서 대부분 출현하였고, 3월부터 *Brachionus* sp., *Keratella* sp. 등의 윤충류가 보이기 시작하여 4~6월동안 계속 우점하였으며, 6월에는 요각류의 유생인 Nauplius가 많이 보였다. 수온이 높아진 7월에는 *Bosmina* sp. 등의 지각류 및 성충 요각류가 많이 보였으며, 남조류가 우점하는 시기인 8월에는 윤충류가 다시 우점하였다. 9월에는 다시 지각류(*Bosmina* sp.)와 요각류(*Cyclops* sp.)가 많이 나타났으며, 수온이 낮아진 10월 이후로는 다시 윤충류가 적은 개체수로 출현하였고 *Tintinnidium* sp. 등의 섬모충류가 우점하였다. 지각류 및 요각류의 점유율은 대체로 20~30% 정도였으므로, 지각류 및 요각류가 우점하였을 시기인 7월과 9월에는 동물플랑크톤의 종 다양도가 매우 높았으며, 섬모충류 및 윤충류의 점유율은 평균 50% 이상으로서 그 우점도가 매우 높았다. 대체로 전 지점에서 윤충류의 생물량이 현저하였으며, 일반적으로 윤충류가 지각류나 요각류에 비하여 오염에 내성이 강한 종류가 풍부하고, 먹이의 선택에 크게 제한을 받지 않는다고 알려져 있다(임, 1992).

2004년부터의 각 지점별 계절별 주요 우점종과 평균 우점율을 Table 6에 나타내었으며, 동물플랑크톤의 계절적인 천이는 자연환경 요인과 주요먹이원인 식물플랑크톤의 종 조성과 풍부도, 동물플랑크톤 종간 경쟁 및 어류의 섭식활동을 통해 나타나며, 이 중에서 먹이로 이용되는 식물플랑크톤 천이는 동물플랑크톤의 군집 변화를 야기하는 중요한 원인이 된다(김등, 2000). 특히 남조류를 비롯한 식물플랑크톤의 포식자인 동물플랑크톤과의 상호관계에 대한 조사는 남조류 수화 발달 및 소멸 기작을 이해하는 데 있어 필수적으로 요구되고 있다(Sellner et al., 1996; Urabe et al., 1996).

Fig. 7에 최근 3년간 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 총 개체수 변화 양상을 나타내었는데, 동물플랑크톤 개체수가 높은 시기에는 대체로 식물플랑크톤수가 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 2005년과 2006년의 남조류 bloom이 없는 하절기에는 동물플랑크톤이 큰 폭으로 증가하였음을 알 수 있다. 또한 매년 5~6월경의 장마기에는 동물 및 식물플랑크톤 개체수가 모두 매우 낮음을 알 수 있었다.

결 론

1. 1998년 이후 서낙동강의 기본환경 변화를 살펴 보면, 평균 수온이 15.8°C ~18.3°C 로서 1998년에 가장 높았고 2005년에 가장 낮았다. 평균 pH는 7.6~8.9의 범위로 녹산수문지점에서 가장 높았고 식물플랑크톤 발생과 연관을 보였다. 또

평균 DO 농도는 9.1~12.9 mg/L로 식물플랑크톤 발생 및 수온 변화 등과 높은 상관성이 있었다.

2. 유기물 오염도는 하류지점이 대체로 높았으며, BOD 및 COD 변화는 식물플랑크톤의 거동과 관련을 보였다. 또한 무기영양염류의 농도는 대저수문지점에서 T-N, T-P 각 각 3.159 mg/L, 0.173 mg/L, 강동교지점이 3.486 mg/L, 0.209 mg/L 그리고 녹산수문지점에서 3.252 mg/L, 0.198 mg/L로서 강동교지점이 가장 높았고, T-N는 남조류가 번성하였던 2004년 8월의 녹산수문지점에서 10.032 mg/L로 최고치를, T-P도 2000년 7월의 녹산수문지점에서 0.803 mg/L로 최고치를 나타내었다.

3. 식물플랑크톤 생체량의 지표인 클로로필-a는 2003년부터의 평균 농도가 대저수문지점 36.5 mg/m³, 강동교지점 65.9 mg/m³, 녹산수문지점이 75.9 mg/m³로서 녹산수문지점이 가장 높게 나타났다. 대저수문지점은 2001년 여름과 2004~2006년 겨울에, 강동교 및 녹산수문지점은 1998년부터 2004년까지의 여름철과 2004~2006년 겨울동안 높은 농도를 나타냈으며, 강우가 많았던 2002~2003년에는 세 지점 모두 낮은 클로로필-a 농도를 보였다.

4. 식물플랑크톤 개체수와 COD의 상관성이 가장 높았으며 ($r^2 = 0.8988$), 클로로필-a 농도와 BOD와의 상관성이 두 번째로 높게 나타났다($r^2 = 0.8741$). 또 식물플랑크톤 개체수와 클로로필-a 농도와의 상관값은 0.7935로 나타났다. BOD와 COD 항목간의 상관값은 0.8297이었으며, 수온과 DO($r^2 = -0.7692$), 클로로필-a 농도와 pH($r^2 = 0.6767$) 등이 다소 높은 상관성을 나타냈다.

5. 2003년부터 서낙동강 식물플랑크톤의 군집 변화상을 살펴보면 2003년 봄철에 규조류가 크게 우점하였고, 6~7월에 규조류와 녹조류가 함께 우점하다 8~9월에는 남조류가 우점하였으며 11월 이후 다시 규조류가 우점하였다. 2004년에는 3월까지 규조류가 크게 우점하다 4월 이후 편모조류가 나타났으며 6~9월까지의 다양한 녹조류들이, 10월 이후로는 다시 규조류가 우점하였다. 2005년과 2006년에는 여름철 홍수기 전후를 제외하고는 연중 내내 규조류가 우점하였으며, 2005년에 비해 2006년에는 클로로필-a 농도 및 식물플랑크톤 개체수도 대체로 저감된 추세를 나타냈다.

6. 식물플랑크톤이 대발생하였을 때는 클로로필-a 농도와 BOD 및 COD 값도 같이 증가하는데, 이 때의 증가추세가 일정하게 나타나지는 않았다. 본 조사에서는 규조류 1개체가 남조류 1개체보다 2배이상의 클로로필-a 농도, BOD 및 COD를 유발함을 알 수 있었다.

7. 2004년~2006년간 각 지점별 출현한 동물플랑크톤의 총 개체수는 대저수문지점이 100~13,000 inds/L이었고, 강동교 지점이 300~8,000 inds/L, 녹산수문 지점은 500~8,500 inds/L로서, 대저수문에서 가장 많이 출현하였다. 봄철과 가을철인 4월과 9월에 개체수가 증가하였으며, 겨울철인 12~3월에는 매우 낮은 값을 나타내어 수온의 영향을 많이 받

음을 알 수 있었다.

8. 2003년과 2004년에는 규조류(봄) → 녹조류(이른 여름) → 남조류(여름) → 녹조류(가을) → 규조류(겨울)의 천이형태로 호소형 호수의 발생 패턴을 보였으나, 2005년과 2006년에는 규조류(봄) → 녹조류 및 규조류(여름) → 규조류(가을) → 규조류(겨울)의 천이과정을 나타내는 하천형 호수 패턴을 보이고 있다. 이와 같은 사실은 지난 수년간 서낙동강 유역내에 소규모 하수처리시설들을 설치하여 유입 오염원을 줄이고, 수문을 통한 유입·방류량의 조절, 녹산배수펌프장을 설치하는 등 수질 개선을 위한 다방면의 노력들이 효과를 나타내는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김명운, 김민호, 조장천, 김상중, 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화, 한국육수학회지, 28(1)
2. 김영건, 조규송, 1995. 소양호 동물플랑크톤의 수직 및 계절적 변동, 한국육수학회지 28(2)
3. 김종원, 이학영. 1991. 낙동강 하구 저수지의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구.
4. 김호섭, 김범철, 최은미, 황순진. 2000. 부영양호수에서 남조류 bloom이 동물플랑크톤 군집변화에 미치는 영향, 한국육수학회지 33(4)
5. 문은영, 김영옥, 김백호, 공동수, 한명수. 2004. 팔당호의 섬모충플랑크톤의 분류 및 생태학적 연구, 한국육수학회지 37(2) : 149-179.
6. 박혜경, 2006. 조류에 의한 수이용 장애, 한국물환경학회 세미나자료집
7. 유광일, 임병진, 1992. 팔당호에서의 동물플랑크톤 군집구조와 생물량의 계절적 천이, 한국육수학회지 25(2)
8. 이정호. 1998. 세포체적과 세포수에 의한 식물플랑크톤의 현존량 산정 비교. K. J. Limnol. 31(3): 211-218.
9. 임병진, 김범철, 유광일, 유재근. 1997. 낙동강에서 남조류 대발생시 동물플랑크톤 군집의 변화, 한국육수학회지 30:337-346
10. 정준, 1993, 한국담수조류도감
11. 정준, 김한순, 김용재. 1994. 낙동강 하구댐의 식물플랑크톤 군집구조.
12. 조경제 등. 2002. 서낙동강-조만강 수질 부영양화에 따른 오염양상과 수질개선에 대한 고찰. 인제대학교 부설 낙동강유역환경연구센터 심포지움 논문집. I: 32-37.
13. 조규송, 1993. 한국담수동물플랑크톤도감
14. 주기재. 2005. 낙동강 중하류의 수질모형 개선을 위한 플랑크톤 분포 및 동태연구. 낙동강수계 환경기초조사사업 심포지움 자료집
15. 환경부. 2001. 수질오염공정시험방법.
16. Barnes, J.R. and G.W.Minshall. 1983. Stream ecology, Application and Testing of general ecological theory. Plenum Press, p. 399
17. Descy, J. P. 1987. Phytoplankton composition and dynamics in the river Meuse(Belgium). Arch. Hydrobiol. Suppl., 78:225-245.
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. Holmes, N. T. H. and B. A. Whitton. 1981. Phytoplankton of four rivers, the Tyne, Wear, Tees and Swale. Hydrobiologia, 80:111-127.
21. James H. Thorp and Alan P. C., 2001. Ecology and classification of North American freshwater invertebrates.
22. John D. Wehr and Robert G. Sheath, Freshwater Algae of North America. 2003
23. Lack, T. J. 1971. Quantitative studies on the phytoplankton of the Rivers Thames and Kennet at Reading. Freshwat. Biol., 1:213-224.
24. Shapiro, J. 1990. Current beliefs regarding dominance by blue-greens: the case for the importance of CO₂ and pH. Ve고. Int. Verein. Limnol., 24:38-54.
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