Algae
Volume 20(4): 333-343, 2005

안동호에서 환경요인과 식물플랑크톤의 시 · 공간적 변동

박재충* · 박정원[1] · 김종달[2] · 신재기[3]

(한국수자원공사 안동댐관리단, [1]경북대학교 생물학과,
[2]한국수자원공사 낙동강북부권수질검사소, [3]한국수자원공사 수자원연구원)

Spatial and Temporal Variations of Environmental Factors and Phytoplankton Community in Andong Reservoir, Korea

Jae Chung Park*, Jung Won Park[1], Jong Dal Kim[2] and Jae-Ki Shin[3]

Andong Dam Office, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), Andong 760-360,
[1]Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701,
[2]Northern Nakdong River Regional Water Quality Analysis Center, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), Kumi 730-810 and
[3]Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation(KOWACO), Taejon 305-730, Korea

Spatial and temporal variations of environmental factors and phytoplankton community were investigated in the three stations of Andong Reservoir in 1997 and 2003. The changes of physico-chemical water quality and phytoplanktonic biomass were higher in 2003 than that of 1997, due to rainfall difference. The concentration of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the reservoir decreased, but total nitrogen fell relatively more between them. TN/TP ratio decreased from 109 to 90 showing no change at the downstream but a big decrease at the mid- and upstream. Predominant phylum of phytoplankton in Andong Reservoir were six genus that composed to *Anabaena*, *Aphanizomenon* and *Microcystis* of Cyanophyceae, *Cosmarium* and *Scenedesmus* of Chlorophyceae and *Synedra* of Bacillariophyceae, respectively. Among the observed phytoplankton, diatom *Synedra* occured as the maximum amount of 3,400 cells mL^{-1} even at the above 30°C. Green algae *Scenedesmus* observed along with *Microcystis*. It seemed to be compete with *Microcystis* during the high water temperature period. Although trophic state of Andong Reservoir was decreased, the standing crops of phytoplankton were increased. Moreover blue-green algae, *Aphanizomenon* and *Microcystis* in the region of upstream to midstream and diatom, *Synedra* in the region of midstream to downstream were increased until to reach the algal bloom, respectively. It seemed necessary to attention the changes of blue-green algae *Aphanizomenon*, that has an ability of nitrogen fixation.

Key Words: Andong Reservoir, *Aphanizomenon*, environmental factor, *Microcystis*, phytoplankton, *Synedra*, water quality

서 론

저수지는 수자원의 확보와 치수를 목적으로 건설 · 운영되고 있고 자연호 및 하천과는 다른 수환경적 특성을 가진다. 이러한 특성 중에서 저수지가 형성되면서 본래 하천 생태계의 생물상은 수심이 깊어지는 하류로부터 점진적인 천이를 거쳐 새로운 동 · 식물상으로 대체된다(Odum 1983). 일반적으로 온대지역에 위치한 호수의 식물플랑크톤은 봄철에 녹조류와 규조류가, 여름철-가을철 동안에 남조류가 우점하며 다른 계절에 비해 겨울철에 출현종과 현존량이 감소하는 연중 천이과정을 보인다. 이러한 자연적 천이는 수온, 일사량 및 성층현상과 같은 물리적 요인과 수중 영양염, 생물종간의 경쟁, 포식과 같은 생물 · 화학적 요인들의 영향을 받는다(Horne and Goldman 1994). 또한 대부분의 저수지는 수량 확보와 홍수 조절 등의 다목적 이용을 위해 하천의 중 · 상류에 위치하므로 그 하류보다 인간활동에 의한 인위적인 오염부하는 비교적 적게 받지만 집수구역에 산재한 비점오염물질의 유입에 의한 점진적인 부영양화로 호수의 영양단계(trophic state)는 점차 높아지게 된다. 영양단계의 상승은 인

*Corresponding author (jaechung@kowaco.or.kr)

의 과잉 유입으로 N/P 비가 감소되어 *Anabaena*와 같은 질소 고정 능력이 있는 남조류의 출현시기가 빨라지고 우점기간도 연장되게 된다(Reynolds 1984).

안동호는 1998년까지 저수지내에 분포하고 있던 가두리양식장의 사료와 어류 배설물에 의한 영양염 부하 영향이 컸으나 장기적인 인 부하량 변동에서 가두리양식장 철거로 인해 영양상태가 개선되었음을 보고한 사례도 있다(허 등 1992, 2000). 또한 박 등(2005a)은 안동호의 수역별 수질 평가에서 선행연구에 의한 결과보다 영양상태가 개선되었음을 보고하였다.

가두리양식장 철거는 저수지 내부의 질소와 인 등의 영양염 부하량 감소에 큰 역할을 하였다고 판단되지만 수중 영양상태 개선을 통한 저수지내 식물플랑크톤을 포함하는 생물상의 변동에 관한 연구는 거의 없는 상태이다. 또한, 최근 이상강우에 의한 고탁수 유입현상으로 비점오염물질 저감 등 양질의 수자원 확보를 위한 연구는 다양하게 접근되었으나 식물플랑크톤 등의 생물을 대상으로 한 연구는 매우 부족하였다(박 1998; 이 등 2002). 본 연구는 안동호에서 가두리양식장이 철거될 시기(1997–1998년)와 최근(2003–2004년)의 주요 물리 · 화학적 환경요인과 식물플랑크톤의 변동을 비교하고자 수행하였으며, 1991년 이후부터 상류수역에서 매년 반복적으로 수화현상(algal bloom)이 일어나고 있어 주요 조류종의 생태적 특성 파악을 통해 양질의 상수원 확보를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구는 안동호에서 가두리양식장이 철거되기 직전 시기(1997년 5월부터 1998년 3월까지)와 철거 후 약 5년이 경과된 시기(2003년 5월부터 2004년 3월까지) 동안 매월 초순에 3개 지점에 대한 수질과 식물플랑크톤의 변동을 조사하였다. 조사지점은 하천성향이 강한 상류지점(upstream, US), 전이대에 해당되는 중류지점(midstream, MS)과 전형적인 호수성향인 하류지점(downstream, DS)을 대상으로 하였다(Fig. 1).

수질환경 요인 중 수온, pH 및 전기전도도는 다항목측정기(YSI 58 또는 6600)를 이용하여 현장에서 측정하였고, 투명도는 직경 30 cm의 백색 Secchi disc를 사용하여 측정하였다. 수질 시료는 미리 산 세척한 1 L bottle을 이용하여 수심 30 cm에서 직접 채수하여 각 항목을 분석하였다. Chlorophyll *a*는 시료를 GF/F로 여과한 후 아세톤으로 24시간 추출하여 흡광도값으로 계산하였으며, 총질소(total nitrogen)는 자외선 흡광광도법, 총인(total phosphorus)은 아스코르빈산환원법으로 각각 분석(Cary 300-C, Varian Co.)하였다(환경부 1998).

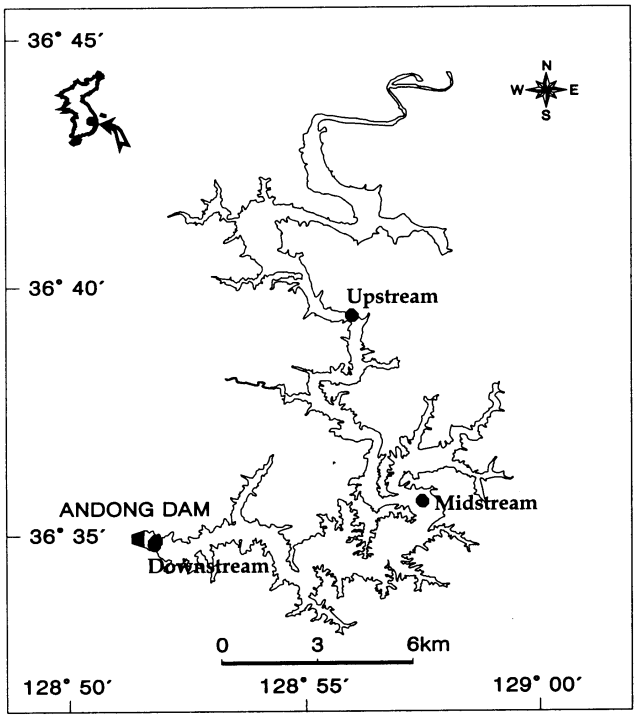

Fig. 1. Map of Andong Reservoir showing the location of the sampling stations(●).

식물플랑크톤 검경을 위한 시료는 현장에서 Lugol's solution(APHA *et al.* 1995)으로 고정한 후 실험실로 운반하였고, 암소에서 약 1주일간 자연 침강시킨 후 siphon법으로 10배 정도로 농축하였다. 분류 및 동정은 광학현미경(Olympus BX-50, Olympus Co.)의 ×400–×1,000배 하에서 수행하였으며, 현존량은 Sedgwick-Rafter Chamber를 사용하여 200배에서 계수한 후 산정하였다. 우점종은 종(species) 수준까지 동정하였고, 특히 남조류 중 군체를 형성하는 *Microcystis*는 군체 수를 계수한 후 초음파를 이용 세포를 분리하여 계수한 평균값을, *Aphanizomenon*과 *Oscillatoria*는 사상체를 계수한 후 사상체의 평균 세포 수를 각각 곱하여 계수하였다(Reynolds and Jaworski 1978).

결과 및 고찰

수온, 강우량 및 전기전도도의 변화

수온변화는 1997년과 2003년에 각각 3.7–29.9°C, 2.3–30.3°C 범위였고 수심이 얕은 상류지점에서 2월에 최저, 8월에 최고를 기록하였다(Table 1, Figs 2A, 3A). 특히 여름철인 2003년 7월의 경우 6월의 수온분포와 비슷한 상태를 유지하였는데 이 시기는 많은 강우(246.3 mm)에 의해 수온상승이 둔화되었다. 강우량은 6–9월에 집중되었으며 11월부터 이듬해 봄까지는 강우량이 빈약하여 전형적인 몬순 기후지역의 특성을 반영하였다. 연도별 총 강우량은 1997년과 2003년에

Table 1. Interannual and spatial changes of physico-chemical water quality in Andong Reservoir during the study period. The data values are mean standard deviation from May to March and parentheses indicate the data range.

Year	1997			2003		
Station	DS*	MS**	US***	DS*	MS**	US***
Water temperature (°C)	16.9 ± 8.7 (4.8-29.1)	17.5 ± 8.9 (4.6-29.6)	17.3 ± 9.1 (3.7-29.9)	17.3 ± 8.6 (4.6-29.4)	17.2 ± 8.8 (4.4-29.8)	17.3 ± 9.3 (2.3-30.3)
Electric conductivity (μS cm^{-1})	166 ± 14 (141-189)	164 ± 14 (147-193)	166 ± 11 (151-185)	146 ± 18 (120-172)	145 ± 20 (122-179)	141 ± 17 (119-174)
Secchi depth (m)	2.7 ± 1.0 (1.6-4.5)	2.8 ± 0.8 (1.7-4.5)	2.4 ± 0.8 (1.4-3.5)	2.3 ± 0.9 (1.0-4.3)	2.5 ± 1.1 (1.2-4.9)	2.0 ± 0.7 (0.8-3.0)
pH	8.0 ± 0.8 (7.1-9.1)	8.1 ± 0.8 (7.2-9.3)	8.2 ± 0.9 (7.3-9.7)	8.6 ± 1.1 (7.3-10.1)	8.6 ± 1.1 (7.0-10.0)	8.6 ± 1.0 (7.2-10.1)
Chlorophyll *a* (μg L^{-1})	5.8 ± 5.4 (1.2-17.6)	6.1 ± 4.5 (1.3-17.4)	7.0 ± 6.5 (1.1-20.1)	6.1 ± 4.8 (1.5-14.3)	7.1 ± 5.5 (1.8-18.4)	8.0 ± 5.4 (2.5-18.7)
Total nitrogen (mg L^{-1})	1.8 ± 0.2 (1.5-2.1)	2.0 ± 0.3 (1.5-2.7)	1.9 ± 0.4 (1.3-2.5)	1.3 ± 0.2 (1.0-1.9)	1.3 ± 0.2 (1.0-1.6)	1.5 ± 0.3 (1.1-2.3)
Total phosphorus (μg L^{-1})	28 ± 14 (14-64)	19 ± 9 (9-41)	18 ± 10 (8-42)	23 ± 18 (7-75)	17 ± 7 (4-29)	18 ± 5 (13-31)
N/P ratio	78 ± 28 (24-117)	122 ± 65 (47-298)	126 ± 59 (41-228)	79 ± 48 (25-204)	106 ± 99 (47-384)	85 ± 31 (43-154)

* downstream; ** midstream; *** upstream

Table 2. Distribution of rainfall in Andong Reservoir during the study period.

Year	Total (mm)	Mean standard deviation (mm)	Minimum (month)	Maximum (month)
1997	1,193.5	108.5 95.1	5.4(May)	238.4(Aug.)
2003	1,760.2	160.0 137.9	8.4(Feb.)	345.7(Aug.)

각각 1,193.5 mm, 1,760.2 mm로서 2003년에 약 570 mm가 많았으며 특히, 5월에는 각각 5.4 mm, 300.0 mm이었고 10월에는 55.2 mm, 294.6 mm로서 연별, 월별 강우량의 차이가 컸다(Table 2, Figs 2B, 3B).

수역별 전기전도도의 평균값은 1997년에는 상류, 중류 및 하류지점에서 각각 166, 164 및 166 μS cm^{-1}, 2003년에는 146, 145 및 141 μS cm^{-1}로서 수역별로는 5 μS cm^{-1} 이하의 차이를 보였으나 연도별로는 20 μS cm^{-1}의 차이를 보였고 강우량이 적었던 1997년이 상대적으로 높았다(Table 1, Figs 2C, 3C). 안동호에서 전기전도도는 봄부터 가을까지 감소하고 11월부터는 점차 증가하여 강우량과는 상반된 경향을 보였다. An(2001)은 대청호에서 강우량의 차이가 큰 1993년과 1994년의 비교연구에서 집중호우 시기에 전기전도도가 낮은 하천수의 중층 유입에 의해 상대적으로 전기전도도가 높은 표층수가 고립되는 현상을 보고하였다. 전기전도도의 감소는 집중호우에 따른 현탁물질의 입자표면에 전해질이 흡착되어 나타나는 현상으로 집중호우 시기에는 pH와 전기전도도가 급격히 하락하며(김 1999), 안동호도 우리나라의 다른 대형 저수지와 유사한 양상을 보였다.

투명도, pH 및 Chlorophyll *a*의 변화

투명도의 연 평균값은 1997년과 2003년에 각각 2.4–2.8 m, 2.0–2.5 m 범위였으며 상류에서 낮고 중 · 하류에서 높았다. 연도별 투명도의 최대값은 각각 4.5 m(DS와 MS, 1997년 12월), 4.9 m(MS, 2004년 1월)였으며, 최소값은 각각 1.4 m(US, 1997년 7월), 0.8 m(US, 2003년 5월)이었다(Table 1, Figs 4A, 5A). pH의 변동에서 1997년의 평균값은 8.0–8.2 범위였고 2003년에는 전 지점에서 8.6을 기록하였다. 최대값과 최소값은 각각 9.7, 7.1과 10.1, 7.0으로서 1997년에는 상류에서 높고 하류에서 낮아졌으나 2003년에는 지점간 뚜렷한 경향이 없었다(Table 1, Figs 4B, 5B). 시기별 pH는 8월까지 전 구간에서 점진적으로 증가하고 이후에는 감소하는 경향을 보였으며 지점간에는 뚜렷한 변화가 없었다. Chl-*a*는 평균 5.8–7.0 μg L^{-1}(1997년), 6.1–8.0 μg L^{-1}(2003년) 범위였으며 최대값과 최소값은 각각 1997년에 20.1(US, 9월), 1.1 μg L^{-1}(US, 2월), 2003년에 18.7(US, 6월), 1.5 μg L^{-1}(DS, 12월)이었다(Table 1, Figs 4C, 5C).

박 등(2005a)은 안동호에서 투명도의 증감이 강우에 의한 고탁수 유입과 식물플랑크톤의 현존량에 의한 영향이 큰 것으로 보고한 바 있으며, 김 등(2003)은 호소형 댐 호인 안동호의 여름철 강우량과 Chl-*a* 농도는 $r^2 = 0.35$로 양의 상관을 보여 유입량의 증가가 algal bloom 형성에 영향을 미치지만, 이와 달리 하천형 저수지인 팔당호와 낙동강 하구호 등에서는 유의성이 없거나 약한 음의 상관을 보였다고 하였다. 본 연구의 각 지점은 동일 호수 내에서 하천성향, 전이대 및 호

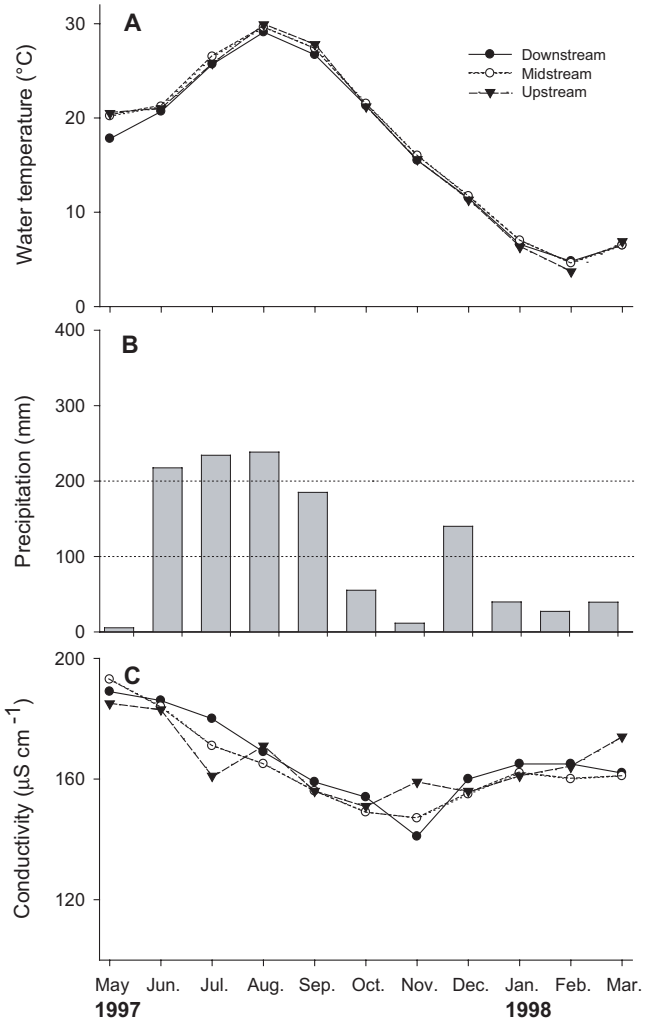

Fig. 2. Spatial and temporal variations of water temperature, rainfall and electric conductivity in Andong Reservoir from 1997 to 1998.

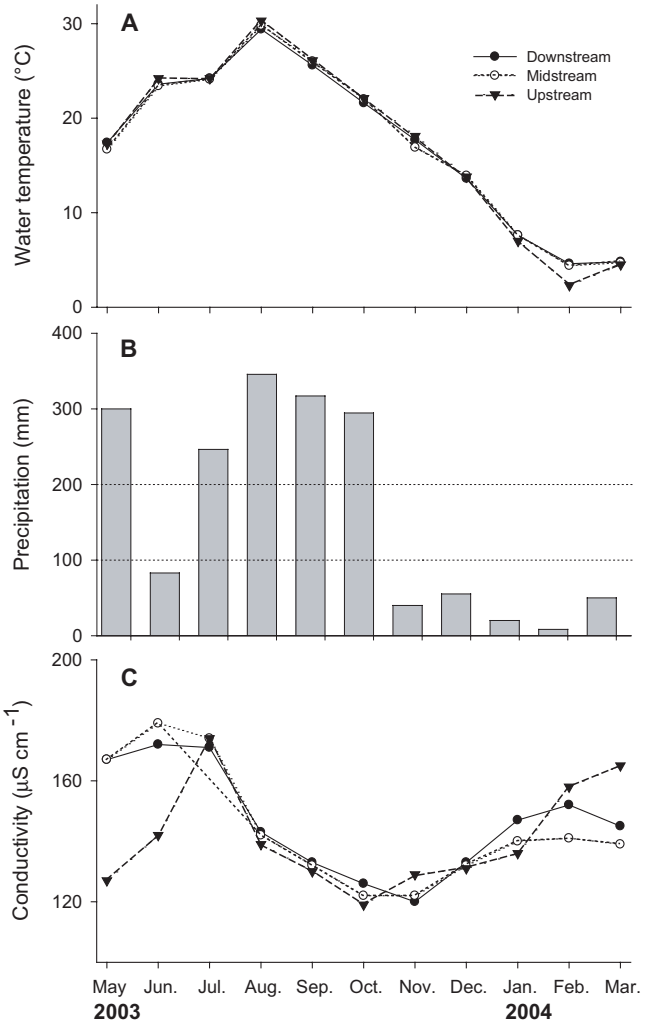

Fig. 3. Spatial and temporal variations of water temperature, rainfall and electric conductivity in Andong Reservoir from 2003 to 2004.

수성향을 대표하는 지점으로서(박 등 2005b), 월별 강우량이 균등하게 분포하고 강우량이 상대적으로 적었던 1997년의 시기별, 지점별 Chl-*a* 농도는 5월부터 9월까지 증가하고 이후에 감소하는 일정한 경향을 보였다. 2003년에 중 · 하류지점(MS, DS)은 비교적 일정한 경향을 보인 반면 상류지점(US)은 강우량이 적은 시기(6월)에 증가하고 7–9월에 급격히 감소하는 양상을 보였다. 이는 표층부에 밀집되어 분포하는 식물플랑크톤이 많은 강우로 증가된 유입수량에 의해 하류로 유실되기 때문이라 판단되며, 이 시기에 상류보다 중 · 하류지점(MS, DS)에서 Chl-*a* 농도가 더욱 증가한데 근거를 둘 수 있었다(Fig. 5C, 박 2004).

총질소, 총인 및 **TN/TP ratio**의 변화

총질소의 평균 농도는 1997년과 2003년에 각각 1.829–1.965 mg L^{-1}, 1.283–1.452 mg L^{-1} 범위였으며, 1997년보다 2003년에 각 지점별로 0.4–0.7 mg L^{-1}(평균 0.536 mg L^{-1}) 범위까지 감소하였다. 최대 농도는 각각 2.681 mg L^{-1}(MS, 3월), 2.308 mg L^{-1}(US, 5월)로서 중 · 상류에서는 강우량이 집중되는 6–9월보다 비강우 시기에 더욱 높았다(Table 1, Figs 2C, 3C, 6A, 7A).

지점별 총인의 평균 농도는 1997년에 28 μg L^{-1}(DS), 19 μg L^{-1}(MS) 및 18 μg L^{-1}(US)이었고, 2003년에는 23 μg L^{-1}(DS), 17 μg L^{-1}(MS) 및 18 μg L^{-1}(US)로서 상류보다 하류(DS)에서 상대적으로 높았으며 변동 폭도 컸다(Table 1, Figs 6B, 7B). 각 지점별 총인의 연 평균값은 1997년 18–28 μg L^{-1}, 2003년 17–23 μg L^{-1} 범위로서 총질소와 마찬가지로 총인 농도도 0–5 μg L^{-1}(평균 2.2 μg L^{-1}) 범위에서 낮아졌다. 각 지점간의 최고 농도는 1997년에 64 μg L^{-1}(DS), 2003년에는 75 μg L^{-1}(DS)를 보였으며, 1997년에는 수체의 전도현상에 의해, 2003년에는 집중강우에 의한 총인의 부하량 증가에 기인한 것으로 판단된다(박 1998; 박 등 2005b).

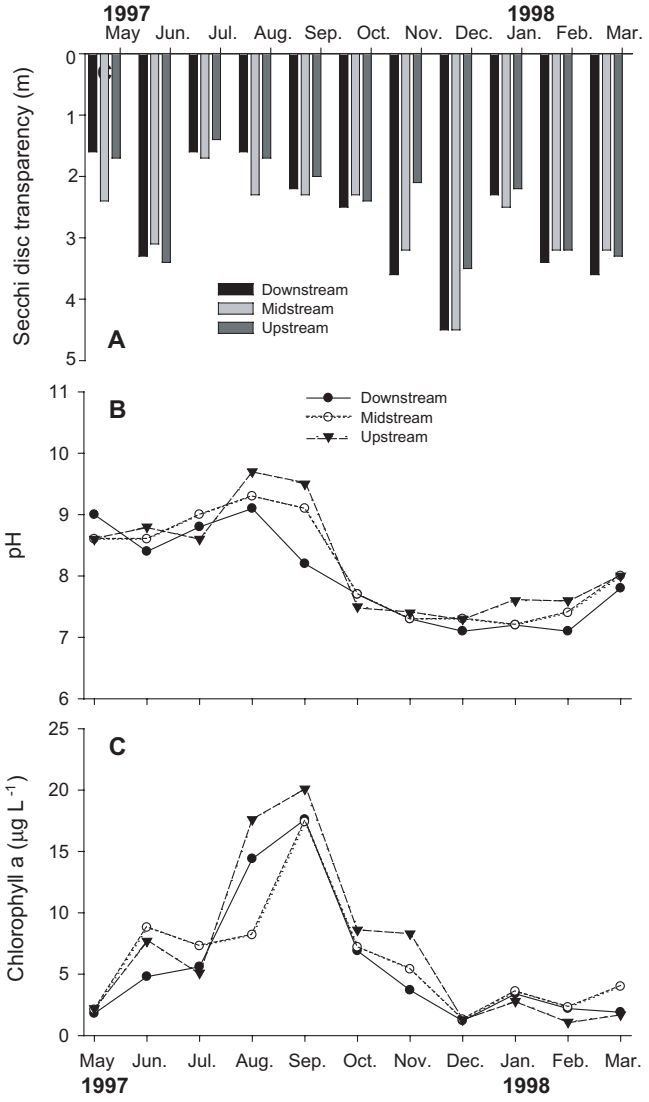

Fig. 4. Spatial and temporal variations of Secchi depth, pH and chlorophyll a in Andong Reservoir from 1997 to 1998.

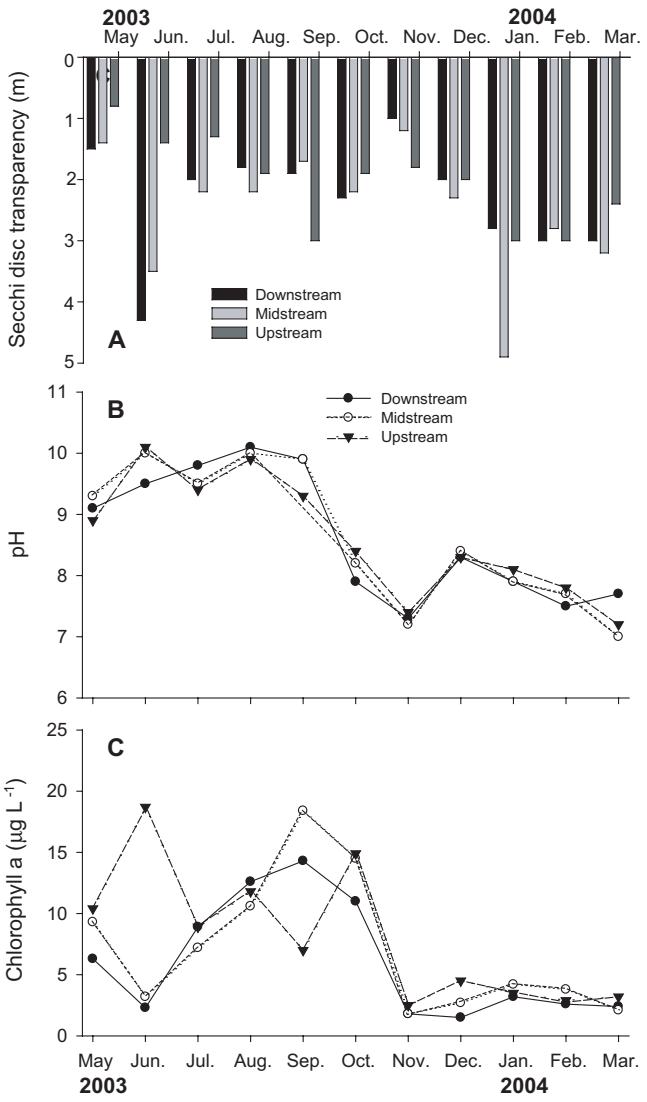

Fig. 5. Spatial and temporal variations of Secchi depth, pH and chlorophyll a in Andong Reservoir from 2003 to 2004.

소양호의 경우에도 장마철에 유입되는 인 부하량이 연간 유입량의 약 70%를 차지하였으며(허 등 1992), 1996년 홍수기에는 최고 20–230 $\mu g\,L^{-1}$의 총인이 중층에서 고탁수와 비슷한 거동을 보이며 최종적으로 하류의 댐 부근까지 영향을 주었다(허 등 1998). 안동호를 대상으로 한 선행 연구에서 표층의 총질소는 강우량과 유의한 관련성이 없으나 총인은 r = 0.59로서 강우기인 6–9월에 총인 농도가 증가하는 양의 상관을 보였다(박 등 2005a). 본 연구도 표층부를 대상으로 하였으나 연속적인 태풍의 영향으로 집중강우가 반복된 2004년 6월의 경우 총질소는 최대 7.066 $mg\,L^{-1}$(MS)까지 유입되어 최하류부인 댐 지점(DS)의 중층에서는 3.457 $mg\,L^{-1}$까지 잔류하였으며, 총인은 동일 시기에 각각 938 $\mu g\,L^{-1}$(MS), 204 $\mu g\,L^{-1}$(DS)를 보였다(미발표 자료). 이러한 결과는 표층부에 국한된 조사로는 해석이 곤란하므로 전체 수층을 대상으로 총질소와 총인의 시 · 공간적 변동에 대한 추가연구가 필요하다고 본다.

안동호에서 평균 TN/TP 비의 평균값은 1997년 109에서 2003년에는 90으로 감소하였으며, 지점별 평균값은 상류지점(US)의 경우 126에서 85로, 중류지점(MS)이 122에서 106으로, 하류지점(DS)이 78에서 79로서 상류에서 감소 폭이 컸으며, 이는 총인(평균 2.2 $\mu g\,L^{-1}$ 감소)보다 총질소(평균 0.536 $mg\,L^{-1}$ 감소)가 크게 감소한 결과이었다(Table 1, Figs 6C, 7C). 허 등(2000)은 안동호의 TN/TP 비가 1993년에 82–281에서 1998년에는 21–143의 범위로 감소하여 그 원인을 총인 농도의 증가보다는 총질소 농도의 감소에 있었고, 2000년에는 총인 농도의 감소로 TN/TP 비가 101–209의 범위로 다시 증가하였음을 보고하였다(Heo *et al.* 2002). 그러나 표층의 총인 농도는 1993년부터 1998년까지 매년 1.85 $\mu g\,L^{-1}$씩 증가

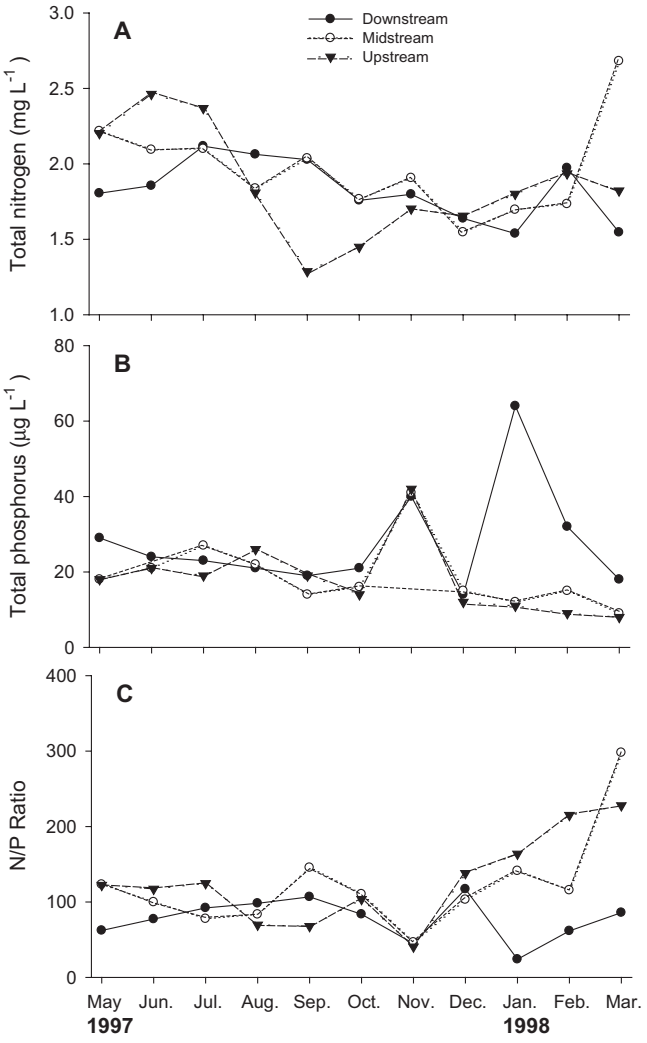

Fig. 6. Spatial and temporal variations of total nitrogen, total phosphorus and N/P ratio in Andong Reservoir from 1997 to 1998.

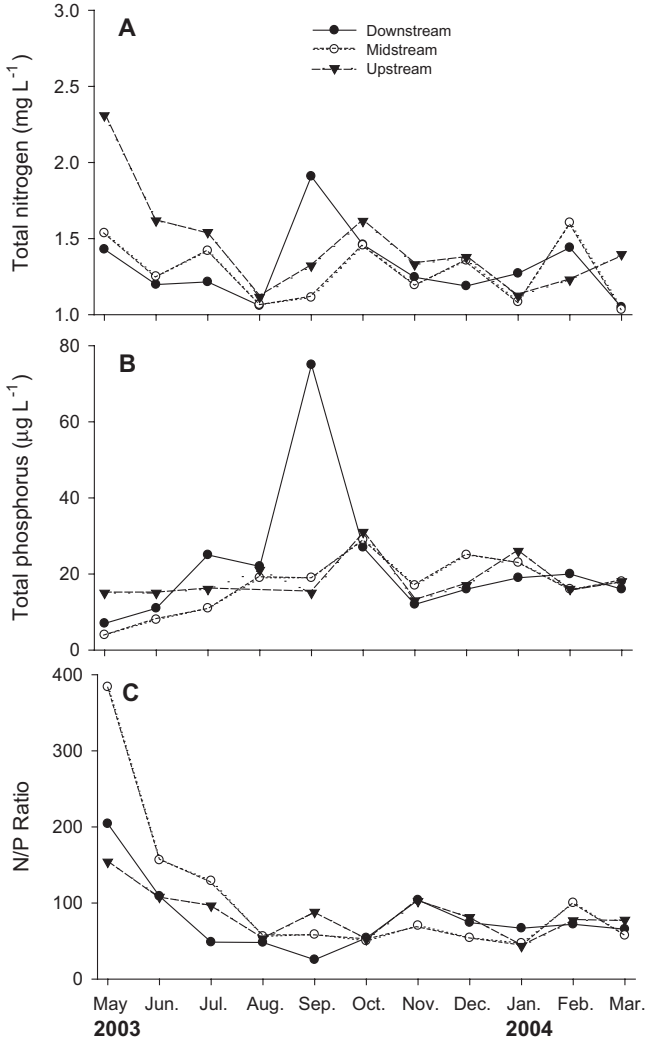

Fig. 7. Spatial and temporal variations of total nitrogen, total phosphorus and N/P ratio in Andong Reservoir from 2003 to 2004.

하였다고 보고하였으나, 본 연구에서는 1997년보다 2003년의 연 평균값이 2.2 $\mu g\ L^{-1}$ 감소하였으며 여름철 장마기 이후에 총인 농도가 증가하는 경향은 유사하였다(Table 1, Fig. 7B).

안동호 표층의 총질소 농도는 1997년과 2003년에 각각 1.8–2.0 $mg\ L^{-1}$와 1.3–1.5 $mg\ L^{-1}$ 범위로 지점간 0.2 $mg\ L^{-1}$의 차이를 보인 반면, 총인 농도는 각각 18–28 $\mu g\ L^{-1}$와 17–23 $\mu g\ L^{-1}$의 범위로 6–10 $\mu g\ L^{-1}$의 차이를 보였다. 전술한 바와 같이 안동호의 각 지점에서 총질소와 총인이 동시에 감소하였지만 총질소의 감소 폭이 컸고 하류지점은 중 · 상류지점과 총질소 농도는 유사하였지만 총인 농도가 상대적으로 높아서 TN/TP 비가 낮아지므로 가을철 수체의 전도현상과 홍수기의 상승류에 의한 영양염의 거동에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 본다.

식물플랑크톤 분류군 및 현존량의 변화

식물플랑크톤의 총 출현종은 1997년과 2003년에 각각 115종, 104종으로서 2003년에 11종이 적게 출현하였다. 두 해 동안의 분류군별 조성은 각각 녹조류 68종(60%)과 61종(59%), 규조류 18종(16%)과 14종(13%), 남조류 14종(12%)과 12종(12%) 및 와편모조류을 포함한 다른 분류군이 15종(12%)과 17종(16%)이었다. 월별 출현종 수는 1997년에 18–47종, 2003년에 17–44종의 범위이었고, 지점별 평균 출현종 수는 30종 내외로 비슷하였다(Table 3, Figs 8A, 9A). 월별 총 현존량은 1997년에 1,239–14,967 cells mL^{-1} 범위로 5월부터 9월까지 지속적으로 증가하였고 10월부터 감소하는 경향을 보였으나, 2003년에는 187–14,664 cells mL^{-1} 범위로 중 · 상류지점(MS, US)에서 7월에 급격히 증가한 후 감소하였다(Figs 8B, 9B).

하류지점(DS)은 1997년과 2003년에 유사한 변화를 보였

Table 3. Changes in species numbers and the total standing crops of phytoplankton at each station in Andong Reservoir (mean standard deviation).

Year/Station	Species numbers			Total standing crops (cells mL^{-1})		
	DS*	MS**	US***	DS*	MS**	US***
1997	31 ± 9	33 ± 10	32 ± 10	4,033 ± 3,320	3,888 ± 2,855	4,955 ± 4,217
2003	27 ± 7	27 ± 9	28 ± 5	2,926 ± 3,214	4,775 ± 5,052	4,452 ± 4,769

* downstream; ** midstream; *** upstream

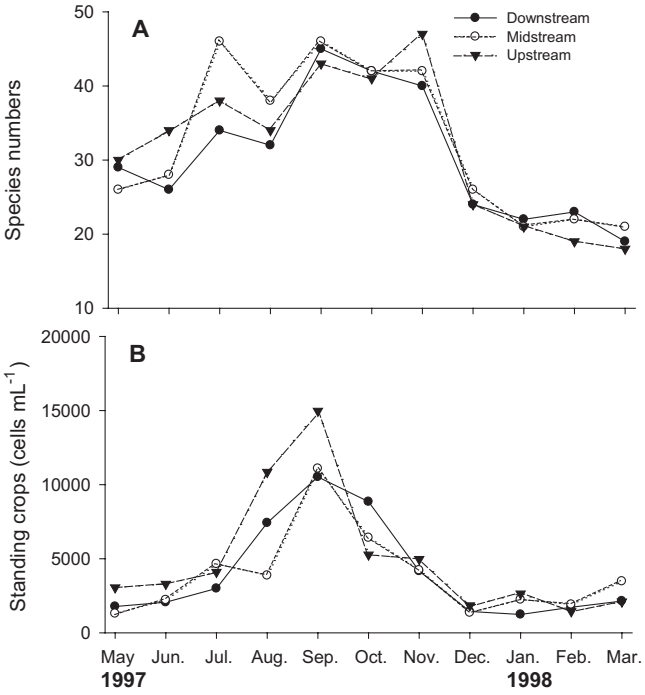

Fig. 8. Spatial and temporal variations of phytoplankton species numbers and the total standing crops in Andong Reservoir from 1997 to 1998.

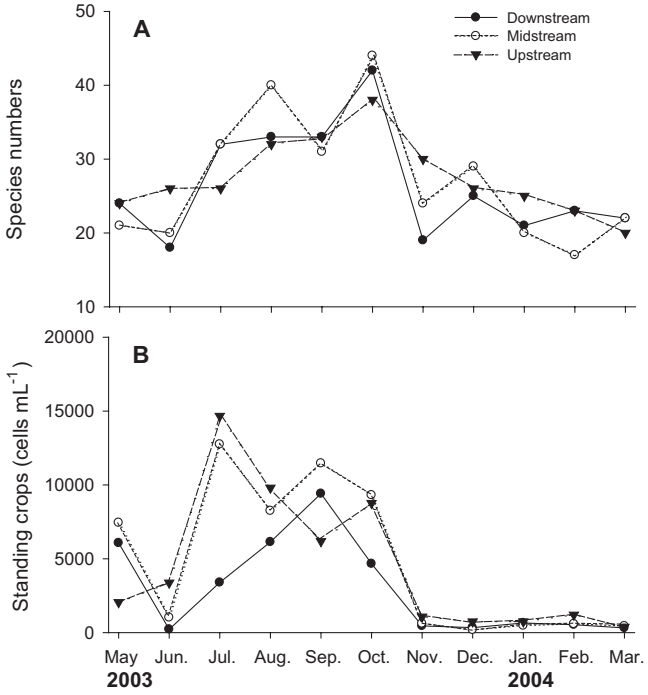

Fig. 9. Spatial and temporal variations of phytoplankton species numbers and the total standing crops in Andong Reservoir from 2003 to 2004.

고, 7월부터 완만하게 증가하여 9월에 9,406 cells mL^{-1}로 최대였으며 이후 점차 감소하여 11월부터는 600 cells mL^{-1} 수준을 유지하였다(Fig. 9B). 지점별 연 평균 현존량은 1997년에 3,888–4,955 cells mL^{-1} 범위로서 상류(US)에서 높았고 중류(MS)에서 낮았으며, 2003년에는 2,926–4,775 cells mL^{-1} 범위로 중류(MS)에서 높았고 하류(DS)에서 낮았다(Table 3). 안동호의 식물플랑크톤은 봄부터 여름까지는 출현종과 현존량이 증가하고 겨울에는 감소하여 온대지방에 위치한 호수의 일반적인 경향을 보였으나(Horne and Goldman 1994), 최대 현존량을 보이는 지점은 상류와 중류부로서 하천과 인접한 저수지의 수리학적 구조와 계절적인 강우의 영향을 받는 것으로 나타났다(박 2004).

우점 종조성 및 개체군의 변화

조사지점별 우점종은 1997년에 남조류의 *Microcystis aeruginosa*, *Oscillatoria agardhii*, *Woronichinia naegeliana* (*Coelasphaerium*), 녹조류의 *Monoraphidium circinale*, *Scenedesmus ecornis*, 규조류의 *Synedra acus*, *Asterionella formosa* 및 은편모조류의 *Chroomonas* sp. 등 8종이었고, 2003년은 남조류의 *Anabaena crassa*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Aph. issatschenkoi*, *Microcystis aeruginosa*, 녹조류의 *Cosmarium praecisum* var. *suecicum*, *Scenedesmus ecornis*와 규조류의 *Synedra* sp. 등 7종이 우점하였다.

전체 지점에서 1997년과 2003년에 공통적으로 우점한 속은 *Synedra*와 *Microcystis*이었으며, 1997년에 지점별로 우점했던 *Woronichinia*(*Coelasphaerium*)(DS–5월, 11월), *Chroomonas* (DS–2월, 6월; MS–1월, 3월; US–1월,8월), *Monoraphidium* (DS–5월,8월), *Asterionella*(MS–1월, 3월; US–1월, 3월)가 2003년에는 우점종으로 관찰되지 않았다(Table 4). 본 연구에서는 2003년에 우점종으로 출현한 속을 대상으로 1997년에 관찰된 분류군과 비교 검토하였다. 남조류 *Anabaena*는 1997년 10월에 하류지점(DS)에서 1,658 cells mL^{-1}, 2003년 7월에

Table 4. Dominant genera and maximum standing crops of phytoplanton at each station in Andong Reservoir(O*, *Oscillatoria*; A*, *Aphanizomenon*).

Sampling area	Dominant phytoplankton				
	Genus	1997		2003	
		cells mL^{-1}	month	cells mL^{-1}	month
Downstream	*Anabaena*	1,658	5, 6	381	7
	Oscillatoria *Aphanizomenon*	1,132 (O*)	7, 8	1,950 (A*)	9, 10
	Microcystis	5,799	8, 9	2,108	8, 9
	Cosmarium	162	7, 8	2,840	8, 9
	Scenedusmus	716	6, 10	2,517	8, 9
	Synedra	2,374	10, 11	5,575	5, 8
Midstream	*Anabaena*	100	9, 11	1,785	7
	Oscillatoria *Aphanizomenon*	158 (O*)	7, 9	4,900 (A*)	7, 9
	Microcystis	6,253	7, 9	5,040	7, 10
	Cosmarium	296	7, 8	3,595	8, 9
	Scenedusmus	842	7, 8	2,912	9, 10
	Synedra	1,583	10, 11	7,175	5, 8
Upstream	*Anabaena*	490	7, 9	3,012	6, 7
	Oscillatoria *Aphanizomenon*	935 (O*)	10	5,580 (A*)	9, 10
	Microcystis	5,221	8, 9	11,520	7, 8
	Cosmarium	284	8, 9	604	8, 9
	Scenedesmus	700	8, 9	232	9, 10
	Synedra	2,913	5, 11	1,978	5, 6

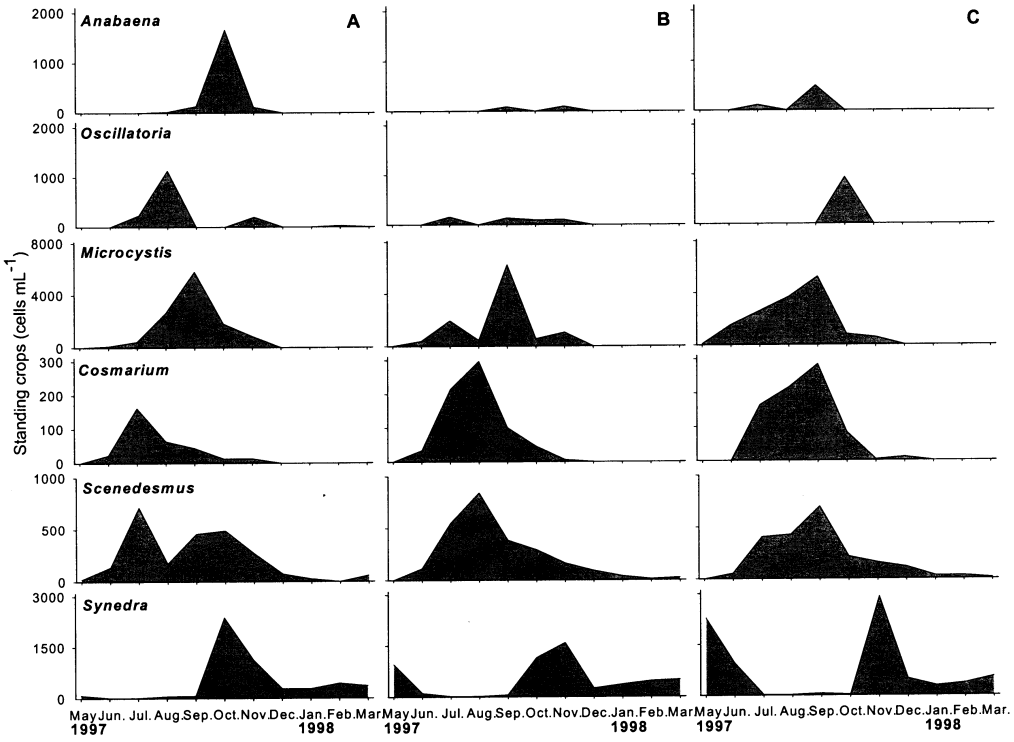

Fig. 10. Variations in major genera of phytoplankton in Andong Reservoir from 1997 to 1998. A, downstream; B, midstream; C, upstream.

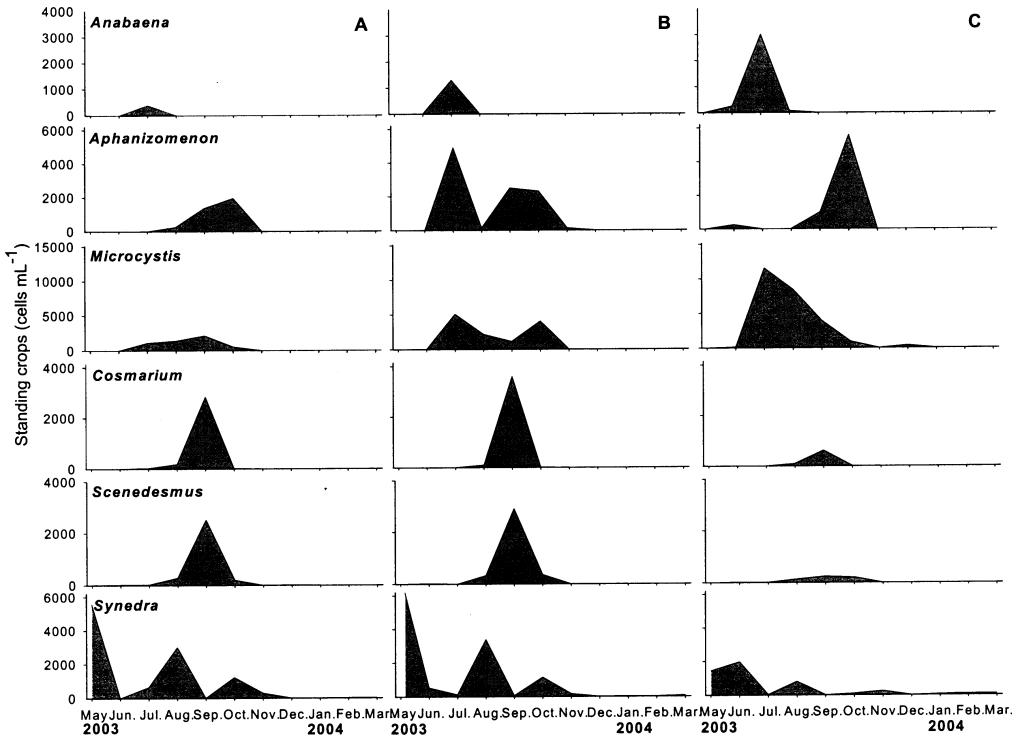

Fig. 11. Variations in major genera of phytoplankton in Andong Reservoir from 2003 to 2004. A, downstream; B, midstream; C, upstream.

상류지점(US)에서 3,012 cells mL^{-1}로 높은 출현량을 보였으며, DS에서 8–11월까지 최장 4개월간 출현하였고 지점에 따른 출현시기는 상류지점(US)이 1–2개월 빠르고 소멸시기는 지점간 큰 차이가 없었다(Table 4, Figs 10, 11).

남조류 *Oscillatoria*는 1997년 8월에 최대(DS–1,132 cells mL^{-1})로 출현하였으며, *Aphanizomenon*과 같이 사상체를 형성하는 대표적인 식물플랑크톤으로서 두 속(genus)은 영양염 조건에 따라 유사한 수온 저항성을 가진 것으로 알려져 있다(Romo and Miracle 1994). 본 속은 규조류 *Synedra*가 우점하기 직전인 10월에 상류지점(US)에서 일시적으로 현존량이 증가하였으나 2003년에는 우점종으로 관찰되지 않았다(Table 4). *Aphanizomenon*의 경우 1997년에는 출현하지 않았으나 2003년 6월에는 상류지점(US)에서 출현하여 7월에는 중류(MS)에서 4,900 cells mL^{-1}로 최대 현존량을 보여 *Microcystis*와 마찬가지로 수화를 형성하는 수준을 보였다(Table 4, Fig. 11), (Horne and Goldman 1994). 겨울에 수심이 얕은 호수 바닥층에서 월동을 하는 *Microcystis*(Fallon and Brock 1981)는 *Synedra*와 함께 안동호의 대표적인 우점 식물플랑크톤으로서 1996년부터 상류지역을 중심으로 심한 수화를 반복적으로 형성하였다(Table 5). 출현하는 시기는 1997년의 경우 중류와 상류에서 5월이었고 2003년에는 상류에서 6월이었으며, 하류지점은 상류지점보다 약 1–2개월 늦었고 현존량도 적었다. 최대 현존량을 보인 시기는 1997년에 전체 지점에서 9월이었고 12월에 소멸되었다. 2003년에 중 · 상류지점은 7월(MS–5,040 cells mL^{-1}, US–11,520 cells mL^{-1}), 하류지점은 9월(2,108 cells mL^{-1})에 최대로 출현하였고, 소멸되는 시기는 상류지점에서 12월, 중 · 하류지점에서 1–2개월 빠른 10–11월이었다(Table 4, Figs 10, 11).

녹조류 *Cosmarium*과 *Scenedesmus*는 남조류와 혼재하여 출현하는 특성을 보였으나 남조류 *Microcystis*가 5,000 cells mL^{-1} 이상으로 수화를 형성(Horne and Goldman 1994)하는 시기에도 최대 1,000 cells mL^{-1}까지 출현하였다. 최대 현존량을 보이는 시기는 고수온기인 7–9월로 남조류와 함께 안동호의 대표적인 여름철 조류로 분류되었다(Table 4, Figs 10, 11). 녹조류 *Scenedesmus*의 경우 수온에 따른 영양염 흡수율의 실험에서 15°C일 때 질소 흡수율이 가장 높고 20–25°C에서 최대의 성장률을 보이므로(Rhee and Gotham 1981) 남조류 *Microcystis*와 경쟁할 수 있는 생리적 특성을 가진 것으로 보인다.

규조류 *Synedra*는 안동호에서 연중 출현하였으며, 수온이 30°C인 시기(MS, 2003년 8월)에도 최대 3,400 cells mL^{-1}로 관찰되는 생태특성을 보였다. 최대 현존량을 보인 시기는 1997년의 경우 5월(US–2,283 cells mL^{-1})과 11월(US–2,913 cells mL^{-1})이었고, 2003년은 5월(MS–7,175 cells mL^{-1})이 해당하였다(Table 4, Figs 10, 11).

Table 5. Yearly distributions of algal bloom in Andong Reservoir(from KOWACO, 2003).

Year	1991	1992	1993	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Period (days)	8.21-9.10 (29)	9.16-9.30 (14)	8.24-9.7 (14)	8.14-9.5 (23)	7.29-9.27 (61)	7.21-8.18 (29)	7.20-9.7 (29)	7.27-9.5 (41)	7.6-10.8 (95)	9.10-9.26 (17)
Station	DS*,US**	DS*	US**	US**	US**	US**	US**	US**	US**	US**
Dominant algae	-	-	-	←			*Microcystis*			→

* downstream; ** upstream

환경요인과 식물플랑크톤 변동의 관련성

수심이 깊고 여름철에 수온성층이 형성되는 호수에서 총인 농도가 15–20 $\mu g\ L^{-1}$ 이상이면 남조류가 높은 밀도로 증식할 수 있으며, N/P 비가 낮을 때 질소고정 능력이 있는 남조류가 우점하게 된다. 특히 NO_3/TP 비가 5 이하이고 수온이 21°C 이상에서 남조류가 출현한다(McQueen and Lean 1987). 또한 Smith(1983)는 표층의 TN/TP 비가 29 이하일 때 남조류가 우점하며 수온과는 양의 상관을 보인다고 하였다. 영양상태가 증가할수록 남조류의 출현시기가 빨라지고 우점기간이 길어지며 수온과는 양의 상관을, NO_3/TP와는 음의 상관을 보이며(Reynolds 1984), *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*과 같은 사상성 남조류는 인 등의 영양염이 풍부하면 수온 저항성이 증가하여 우점기간이 더욱 길어진다(Romo and Miracle 1994). 안동호의 TP는 1997년 22 $\mu g\ L^{-1}$(평균 18–28 $\mu g\ L^{-1}$ 범위), 2003년 19 $\mu g\ L^{-1}$(평균 17–23 $\mu g\ L^{-1}$ 범위)로서 가두리양식장 철거 등으로 내부 부하량이 감소하였음에도 불구하고(허 등 1992, 2000) 남조류가 출현하기에는 충분한 양으로 보이며, 수온은 5월부터 21°C를 초과하므로 인이 풍부한 상태에서 여름철에 남조류가 발생하기에는 충분한 조건을 갖춘 것으로 판단되었다. TN/TP 비는 지점별로 24–384의 범위였고 연도별 평균값은 109(1997년, 78–126 범위)와 90(2003년, 79–106 범위)이었다(Table 1).

온대지방에서 상대적으로 일조시간이 짧고 수온이 낮은 봄, 가을에는 규조류가 우점하고 여름에는 남조류의 현존량이 증가하는 것은 일반적인 현상으로(Sommer *et al.* 1986), 안동호에서 식물플랑크톤의 계절적 천이는 지점별 현존량에는 차이가 있어 출현 시기의 강우 등 외부 환경요인의 영향을 받는 것으로 판단된다(Figs 2B, 3B, 8B, 9B). 안동호의 영양상태는 가두리양식장 철거 등으로 점진적으로 개선되고 있으나(허 등 2000; Heo *et al.* 2002; 박 등 2005a), 인이 풍부한 상태(17–28 $\mu g\ L^{-1}$ 범위)에서 남조류의 수화현상은 반복적으로 발생되고 있다(Table 5). 특히 안동호는 총질소의 상대적인 감소로 N/P 비가 낮아진 상태(Table 1, Figs 6, 7)이므로, Romo and Miracle(1994)의 보고와 같이 질소고정 능력을 가진 사상체 남조류인 *Aphanizomenon*의 현존량이 증가하고 출현기간이 장기화될 수 있다고 판단된다(Fig. 11).

식물플랑크톤의 생장과 증식에는 다양한 원소들이 관여하지만, 본 연구를 포함한 대부분의 연구는 인, 질소 등에 한정하여 수행되어 왔다. 박과 권(1998)은 합천호에서 칼륨(K^+), 마그네슘(Mg^{2+}) 등의 양이온이 *Microcystis*의 현존량 증가와 관련이 있음을 보고한 바 있으며, 필수 원소(macronutrients)와 미량 원소(micronutrients)가 동시에 제한 영양염으로 작용할 수도 있다(Sterner 1994; 최 등 2003; Sterner *et al.* 2004). 따라서 담수의 효율적인 수질관리를 위해서는 인, 질소를 포함한 다량 원소인 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 철 및 규소 등의 거동과 식물플랑크톤에 대한 영향뿐만 아니라 미량 원소인 구리, 망간 및 아연 등에 대한 다양한 연구도 필요한 것으로 본다.

참고문헌

김용재. 1999. 덕동호의 식물플랑크톤 군집과 LTSI에 의한 호소의 영양상태평가. 한국조류학회지 **14:** 161–167.

김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 한명수. 2003. 호소형 및 하천형 댐 호의 육수학적 특성과 조류발생과의 상관관계. 한국육수학회지 **36:** 124–138.

박재충. 1998. 안동호 식물플랑크톤의 동태. 안동대학교 석사학위논문. 56 pp.

박재충, 박정원, 김대현, 신재기, 이희무. 2005a. 안동호의 수역별 영양상태 평가 및 평가방법간 상관성 비교. 한국육수학회지 **38:** 95–104.

박재충, 박정원, 신재기, 이희무. 2005b. 인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수의 이동과 소멸특성. 한국육수학회지 **38:** 105–117.

박정원, 권덕기. 1998. 합천호에서 남조류 수화현상의 초기 발생에 대한 연구, I. 수계에서 *Microcystis aeruginosa* Kütz.의 현존량 증가와 K^+, Na^+, Mg^{2+} 및 Ca^{2+} 농도와의 상관관계. 한국육수학회지 **31:** 97–102.

박종근. 2004. 대청호의 수질환경 및 남조세균 군집 동태. 한양대학교 박사학위 논문. 182 pp.

이정호, 박종근, 김은정. 2002. 국내 주요 호수의 식물플랑크톤 종조성 및 영양단계 평가. 한국조류학회지 **17:** 275–281.

최광현, 황순진, 김호섭, 한명수. 2003. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화. 한국육수학회지 **36:** 139–149.

허우명, 김범철, 안태석, 이기종. 1992. 소양호 유역과 가두리로부

터의 인부하량 및 인수지. 한국육수학회지 **25:** 207–214.

허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호 유역에서 비점오염원의 홍수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 **31:** 1–8.

허우명, 권상용, 김범철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변동. 한국육수학회지 **33:** 260–266.

한국수자원공사(KOWACO). 2003. 안동다목적댐 관리연보. 302 pp.

환경부. 1998. 수질오염공정시험법. 동화기술. 134 pp.

An Kwang Guk. 2001. Hydrological significance on interannual variability of cations, anions and conductivity in a large reservoir ecosystem. *Korean J. Limnol*. **34:** 1-8

Downing J.A. and McCauley E. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr*. **37:** 936-945

Fallon R.D. and Brock T.D. 1981. Overwintering of *Microcystis* in Lake Mendota. *Freshwater Biol*. **11:** 217-226

Harper D. 1992. Eutrophication of freshwaters-Principles, problems and restoration. Chapman & Hall, London, 327 pp.

Heo W.M., Kwon S.Y. and Kim B.C. 2002. Long-term variations of trophic state and phosphorus loading in Lake Andong, Korea. *Korean J. Limnol*. **35:** 249-256

Horne A. J. and Goldman C. R. 1994. Limnology, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc. 576 pp.

McQueen D.J. and Lean D.R.S. 1987. Influence of water temperature and nitrogen to phosphorus ratios on the dominance blue-green algae in Lake St. George, Ontario. Can. *J. Fish. Aquat. Sci*. **44:** 598-604.

Odum E.R. 1983. Basic Ecology. Saunders college publishing. pp. 319-328.

Rhee G.Y. and Gotham I.J. 1981. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: Temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr*. **26:** 635-648.

Reynolds C.S. and Jaworski G.H.M. 1978. Enumeration of natural *Microcystis* populations. *Br. phycol. J*. **13:** 269-277.

Reynolds C.S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater biol*. **14:** 111-142.

Romo R. and R. Miracle. 1994. Long-term phytoplankton changes in a shallow hypertrophic lake, Albufera of Valencia(Spain). *Hydrobiologia* **275-276:** 153-164.

Smith V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **225:** 669-671.

Sommer U., Gliwicz Z.M., Lampert W. and Duncan A. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol*. **106:** 433-471.

Sterner R.W. 1994. Seasonal and spatial patterns in macro- and micronutrient limitation in Joe Pool Lake, Texas. *Limnol. Oceanogr*. **39:** 535-550.

Sterner R.W., Smutka T.M., McKay R.M. L., Xiaoming Q., Brown E.T. and Sherrell R. M. 2004. Phosphorus and trace metal limitation of algae and bacteria in Lake Superior. *Limnol. Oceanogr*. **49:** 495-507.

Received 2 August 2005
Accepted 19 November 2005