Korean J. Limnol. 39 (2) : 271~283(2006)

Note

백령도 절골저수지의 부영양화와 담수적조

신재기* · 이흥수 · 허 진[1] · 박재충[2]

(한국수자원공사 수자원연구원, [1]세종대학교 지구환경과학과,
[2]한국수자원공사 안동댐관리단)

Eutrophication and Freshwater Red-tide Algae on Early Impoundment Stage of Jeolgol Reservoir in the Paikryeong Island, West Sea of South Korea. ***Shin, Jae-Ki**, Heung-Soo Lee, Jin Hur[1] and Jae-Chung Park[2] (Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Taejon 305-730, Korea; [1]Department of Earth and Environmental Science, Sejong University, Seoul 143-747, Korea; [2]Andong Dam Office, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Andong 760-360, Korea)***

A systematic water quality survey was conducted in August, 2005 for a drinking water supply reservoir (the Jeolgol reservoir located in an island), which is at an early stage of impoundment, to investigate the causes of water color deterioration of the reservoir and the clogging of filter beds of a water treatment plant. The reservoir shape was simple and its average depth was 5.5 m, increasing from upreservoir toward the downreservoir end near the dam. Dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-*a* (chl-*a*) showed a large variation while water temperature had a smaller range. Transparency ranged from 0.6 to 0.9 m (average 0.7 m). The average value of turbidity was 9.3 NTU, ranging from 8.0～12.1 NTU. The transparency and the turbidity appear to be affected by a combination of biological and non-biological factors. The poor transparency was explained by an increase of inorganic colloids and algal bloom in the reservoir. The blockage of the filter bed was attributed to the oversupply of phytoplanktons from the reservoir. The range and the average concentration of chl-*a* within the reservoir were 31.6～258.9 μg L^{-1}, 123.6 μg L^{-1} for the upper layer, and 17.0～37.4 μg L^{-1}, 26.5 μg L^{-1} for the bottom layer, respectively. A predominant species contributing the algal bloom was Dinophyceae, *Peridinium bipes* f. *occultatum*. The distribution of *Peridinium* spp. was correlated with chl-*a* concentrations. The standing crop of phytoplankton was highest in the upreservoir with 8.5×10^3 cells mL^{-1} and it decreased toward the downreservoir. *Synedra* of Bacillariophyceae and *Microcystis aeruginosa* of Cyanophyceae appeared to contribute to the algal bloom, although they are not dominated. It is mostly likely that sloped farmlands located in the watershed of the reservoir caused water quality problems because they may contain a significant amount of the nutrients originated from fertilizers. In addition, the aerators installed in the reservoir and a shortage of the inflowing water may be related to the poor water quality. A long-term monitoring and an integrated management plan for the water quality of the watersheds and the reservoir may be required to improve the water quality of the reservoir.

Keywords : reservoir, water quality, eutrophication, phytoplankton, freshwater red-tide

* Corresponding author: Tel: 042) 860-0364, Fax: 042) 860-0369, E-mail: jaekishin@kowaco.or.kr

해양과 인접하고 있는 섬 지역은 내륙과 달리 지표 면적이 협소하고 토지의 경사가 급하여 하천의 발달이 미약하며 하상계수가 큰 편에 속한다(인천광역시상수도사업본부, 1998). 따라서 유수환경은 여름철의 강우기에만 현저하게 유지되고, 건기에는 물의 흐름이 육안으로 관찰되기 어려울 정도로 빈약하다. 또한, 수자원의 효율적인 이용도가 낮아 이를 고려할 때 생활환경적 측면에서 열악한 지리 · 지형적 환경을 가지고 있다. 또한 도서지역의 용수 공급은 극히 제한적이어서, 일상 식수난은 간이 빗물저장시설, 지하수 및 해수 담수화 등에 의존하고 있으나 최근 들어 육지와 근거리에 있고, 인구밀도가 다소 높은 일부 지역은 용수전용 댐을 건설하여 소규모 저수지를 통해 취수하여 정수처리한 후 식수를 공급하고 있다.

백령도의 식수원은 주로 지하수에 의존하고 있으며, 이마저도 이용 가능한 시설용량/총시설용량의 비율이 82.4 %로서 염분의 영향이 날로 심각해져 주민에게 안정적이고 양질의 용수공급을 목적으로 2003년 후반에 용수전용 댐저수지가 건설되었다(인천광역시상수도사업본부, 1998). 집수역의 개념으로 볼 때, 유역은 하천과 저수지로 나눌 수 있고, 하천의 수질은 토지 이용도, 인구 밀도 및 도시화에 따라 다를 뿐만 아니라 특히 하류에 위치하고 있는 저수지에 최종적으로 영향을 미치게 된다. 또한, 저수지는 하천과 달리 내적 오염원, 저수면적 및 수심 등과 함께 정체성에 의한 체류시간의 차이에 따라 수질을 달리하게 된다(Wetzel, 2001). 따라서 저수지의 부영양화 관리는 하천, 내부 오염원 및 수리학적 구조에 대한 다양한 통합적 고려가 필요하다(Thornton *et al*., 1990).

담수적조는 식물플랑크톤의 밀도가 높은 현상을 가리키는 것(Horne and Goldman, 1994)으로서 시공간에 따라 생태학적 특성을 달리하는 주요 우점종이 구분되고 있다. 국내에서 담수적조는 해양환경과 마찬가지로 와편모조류를 대상으로 주로 사용되고 있으나, 식물플랑크톤 중 녹조현상을 유발하는 *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* 및 *Oscillatoria* 등 소수의 남조류와 정수장의 여과지 폐색을 일으키는 *Synedra*, *Aulacoseira*, *Cyclotella* 및 *Stephanodiscus* 계열 등 규조류를 포함(AWWA, 1999)하고 있다. 식물플랑크톤의 대발생은 수색의 경관저하, 수중 유기물의 증가의 원인을 제공하게 되어 저수지의 수질오염에 대한 영양상태를 분류할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있다(Kalff, 2002).

본 연구는 섬 지방에 소규모 댐저수지를 만들어 담수한 이후부터 최근까지 정수처리의 어려움이 부각될 정도로 수질문제가 심각한 상태에 놓인 백령도의 식수원인 절골저수지 유역을 대상으로 하였고, 수질조사를 통해 오염원인 분석과 수질개선 방안 수립에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

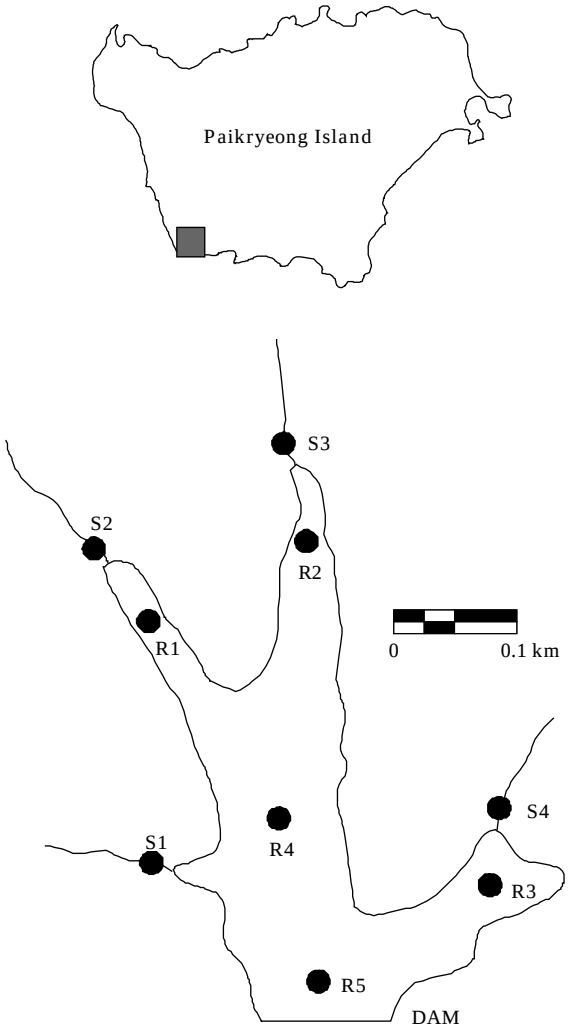

Fig. 1. Map showing location and sampling stations for the survey of water quality and phytoplankton in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island, West Sea of Korea in August 2005.

백령도의 절골저수지(N37° 55′18.0″, E124° 38′48.2″)는 우리나라 서해의 최북단인 백령도에 위치해 있고(Fig. 1, Table 1), 이 지역에서 댐을 축조하여 건설된 유일한 식수원에 해당한다. 유역의 총면적은 0.70 km^2이고, 이 중에서 저수지 0.21 km^2, 임야 및 농경지 0.49 km^2가 차지하여 각각 30%와 70%에 해당한다(Table 1).

저수지로 유입되는 주요 하천은 6개이고, 이 중에서 유출 유량이 확인된 것은 4개 하천(S1, S2, S3 및 S4)이었다. 하천은 주위에 관목으로 덮혀 형성된 산림 계곡과 백고구마, *Artemisia princeps* Pampanini, *Capsicum annu-*

Table 1. Environmental factors of Jeolgol Reservoir in the Paikryeong Island located in West Sea of Korea.

Attribute	Jeolgol Reservoir
Location	Ongjin-kun Paikryeong-myeon
GPS location	N37°55′18.0″, E124°38′48.2″
Watershed area (km^2)	0.70
Forest & agriculture area (km^2)	0.21
Reservoir area (km^2)	0.49
Yearly rainfall (mm)	916.3
Yearly mean inflow ($\times 10^4\ m^3$)	30.4
Outflow rate (%)	47.4
Maximum water level (EL.m)	13.0
Minimum water level (EL.m)	4.0
Flood water level (EL.m)	14.0
Maximum storage volume ($\times 10^3\ m^3$)	240.0
Effective storage volume ($\times 10^3\ m^3$)	231.0
Dam type	Concrete gravitation
Dam height (m)	25.0
Dam length (m)	130.0
Dam width (m)	7.0
Dam volume ($\times 10^3\ m^3$)	20.0

um Linne.가 주를 이루는 농경지 배수로의 형태를 띠고 있으며, 이것은 계곡과 비교할 때 집중호우 이후에 비포장 도로를 완전히 덮을 정도로 점토와 미사성 토양의 유실이 상당하였다. 이는 성분으로 볼 때 유역의 기본 토질이 점판암으로 구성된 영향이 큰 것으로 평가된다(인천광역시상수도사업본부, 1998). 참고적으로, 시추조사 결과에 의하면, 댐축 부근에는 표층 90 cm, 상류 150 m지점에는 2.0 m까지 clay와 silty sand의 토양 분포를 가지고 있었다.

저수지의 형태는 댐을 중심으로 유입하천을 따라 3개로 갈라진 만곡 형태를 띠고 있다. 평균 수심은 5.5 m이고 하천 유입부에서 댐으로 갈수록 점진적으로 깊어지는 구조를 하고 있다. 저수지의 바닥은 본래 농경지(백고구마 밭)이었고 자갈이 포함된 미사질의 배수성이 높은 토양으로 구성되었다. 기후학적인 환경요인 중 강수량은 연평균 916.3 mm이고, 6월～8월에 79.1% (593.7 mm)로서 편중되어 있었다. 또한 강수 일수와 안개 일수는 각각 연간 25.8% (94일), 11.2% (41일)을 초과하여 전형적인 도서지역의 해양성 기후 영향을 직접적으로 받는 특성을 보이고 있다.

절골저수지의 유역내 수환경 조사는 2005년 8월 11일～13일 동안 하천과 저수지를 구분하여 총 9개 지점에서 이루어졌다(Fig. 1, Table 2). 하천은 경작지의 영향이 있으나 자연 식생의 영향이 거의 없는 3개 하천(S1, S2 및 S4)과 경작지의 영향보다 식생의 영향이 더욱 지배적인 1개 하천(S3)의 총 4개 지점에서 수행하였다. 저수지는 하천 유입부의 3개 지점(R1, R2 및 R3), 중앙부 1개 지점(R4) 및 댐 부근의 1개 지점(R5)으로 총 5개 지점을 선택하여 조사하였다(Fig. 1). 유역 토지이용 현황은 인천광역시 상수도사업본부(1998)의 자료를 이용하여 현장에서 직접 조사를 수행하였다. 강수량은 기상청 백령도측후소의 일 측정 자료를 참고하였다.

Table 2. Geological position of the sampling stations by GPS in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island located in West Sea of Korea.

Sampling stations	Geological position
Inflow stream	
S1	N37°55′19.4″, E124°38′37.8″
S2	N37°55′26.9″, E124°38′34.0″
S3	N37°55′29.7″, E124°38′40.7″
S4	N37°55′22.1″, E124°38′48.1″
Reservoir	
R1	N37°55′24.7″, E124°38′36.6″
R2	N37°55′26.7″, E124°38′40.9″
R3	N37°55′20.1″, E124°38′48.2″
R4	N37°55′22.4″, E124°38′40.2″
R5	N37°55′18.0″, E124°38′43.1″

수질 시료를 채수한 각 지점은 GPS (Garmin, USA)와 측심기(Hondex PS-7 digital sounder, Japan)를 이용하여 위치와 수심을 각각 측정하였다. 수질 분석을 위한 시료는 Van Dorn 채수기를 이용하여 상층(표층 30 cm 깊이)과 하층(저층 30 cm 높이)에서 각각 채수하였다. 채수한 시료는 아이스박스에 넣은 후 선박과 차량을 이용하여 24시간 이내에 실험실로 옮겼다. 수환경 요인 중에서 수온과 DO는 YSI-550A meter, pH는 Orion 230A+, conductivity와 salinity는 WTW-341i meter, 탁도는 HACH 2400N meter, 수중 투명도는 Secchi disc를 각각 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 모든 측정기기는 보정한 후 사용하였다.

수질 환경요인 중 물리적 인자에서 TSS (total suspended solids), water color와 화학적 인자에서 T-N (total nitrogen), Ammonia, Nitrate, Nitrite, T-P (total phosphorus), SRP (soluble reactive phosphorus), SRSi (soluble reactive silicon) 등 영양염 항목은 APHA (1995)와 Rump and Krist (1988)의 방법으로 분석하였다. 또한, 유기질소(organic nitrogen, Org-N)와 유기인(organic phosphorus, Org-P)의 함량은 질소(N)와 인(P) 영양염의

총량에서 무기 영양염 농도를 감한 후 계산된 값을 이용하였다. DOC (dissolved organic carbon)는 시료를 GF/F 여과지에 여과한 후 TOC analyzer를 이용하여 즉시 측정하였다. BOD_5 (boiological oxygen demand)는 20℃ 암조건의 항온배양기에서 5일동안 배양한 전과 후 O_2 농도의 차이로 산정하였고, COD (chemical oxygen demand)는 Mn법으로 분석하였다. Chlorophyll-*a* 농도는 시료 일정량을 GF/F 여과지에 여과한 후 90% ethanol로 비등추출하여 정량하는 Nusch (1980)법으로 산정하였다.

저수지내 식물플랑크톤 조사를 위한 시료 채집은 정성분석과 정량분석을 병행하였다. 정성시료는 식물플랑크톤 네트(20 μm mesh, Wildco USA)를 이용하여 여과 취한 후 즉시 formalin으로 고정하였다. 정량시료는 0.5～1 리터를 채수한 후 Lugol's 용액으로 고정하였다. 또한 정량시료는 고정한 시료를 1주일 이상 침강시켰고 상등액을 조심스럽게 제거하여 일정량으로 농축한 후 계수하는데 이용하였다. 식물플랑크톤의 종조성은 400× 또는 1,000×배율의 광학현미경하에서 검경하여 파악하고, 현존량은 200×배율에서 S-R chamber를 이용하여 계수한 후 최종 단위는 mL당 세포수로 나타내었다. 남조류와 녹조류 등은 다른 전처리 없이 현미경으로 직접 검경하였고, 규조류는 산(HNO_3, $K_2Cr_2O_7$)처리 후 Pleurax 봉입제로 영구표본을 만들어 동정하였다. 또한, 정수장의 여과지에 대한 시료는 직접 채집하였고, 분석은 분류군의 조성과 세포밀도(상대빈도)를 파악하는데 그쳤다. 담수조류 시료에서 규조류는 Jensen (1984), Krammer and Lange-

Table 3. Mean water quality of the inlet stream and reservoir in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island located in the central area of West Sea, Korea in August 2005.

Factors \ Sampling streams	Inlet stream	Reservoir	
		Upper layer	Lower layer
Physical factors			
Temperature (℃)	19.2±1.4	25.3±0.5	24.8±0.1
DO (mg O_2 L^{-1})	7.2±1.0	10.8±2.0	7.9±0.2
DO saturation (%)	77.9±11.8	130.6±24.3	94.8±3.0
pH	6.41±0.25	7.66±0.34	7.42±0.20
Conductivity (μS cm^{-1})	304.5±86.9	264.8±19.1	257.4±2.1
Salinity (psu)	0	0	0
Transparency (m)	·	0.74±0.14	·
Turbidity (NTU)	6.2±5.1	9.9±1.4	8.7±0.9
Suspended solids (mg SS L^{-1})	17.0±5.4	16.4±2.8	16.5±1.3
Water color (Degree)	26.3±12.4	20.0±2.0	21.0±2.0
Depth (m)	0.05±0.02	5.5±3.6	·
Chemical factors			
Total nitrogen (μg N L^{-1})	7,951.3±5,082.0	3,890.2±918.0	3,270.0±275.8
Ammonium (μg N L^{-1})	17.5±9.6	116.0±72.0	78.0±64.2
Nitrate (μg N L^{-1})	4,025.0±2,812.3	860.0±54.8	920.0±44.7
Nitrite (μg N L^{-1})	0	0	0
Organic nitrogen (μg N L^{-1})	3,908.8±2,281.2	2,914.2±891.2	2,272.0±269.5
Total phosphorus (μg P L^{-1})	19.0±17.0	52.8±31.5	29.0±6.1
Soluble reactive phosphorus (μg P L^{-1})	10.8±12.6	6.0±2.0	4.8±1.8
Organic phosphorus (μg P L^{-1})	8.3±4.9	46.8±30.0	23.8±4.9
Soluble reactive silicon (μg Si L^{-1})	505.0±141.8	644.0±208.6	620.0±114.2
Dissolved organic carbon (mg C L^{-1})	5.12±1.05	6.45±0.27	6.17±0.08
BOD_5 (mg O_2 L^{-1})	0.9±0.1	4.4±1.8	1.8±0.3
COD_{Mn} (mg O_2 L^{-1})	9.1±1.3	15.6±4.1	12.6±0.8
Biological factors			
Chlorophyll-*a* (μg L^{-1})	0.3±0.3	123.6±87.4	26.5±9.0
Metals			
Aluminium (mg Al L^{-1})	0.203±0.162	0.058±0.028	0.098±0.084
Manganese (mg Mn L^{-1})	0.011±0.013	0.054±0.023	0.065±0.063
Ferrous (mg Fe L^{-1})	0.083±0.102	0.016±0.036	0.064±0.011

Bertalot (1986, 1988, 1991a, b)를, 규조류 이외 다른 분류군은 Hegewald and Silva (1988), Hirose *et al.* (1977) 및 Prescott (1982)문헌을 참고하였다.

하천 기초수질 환경요인 중에서 수온은 18.3～21.2℃ 범위이었고, 평균값은 19.2℃이었다(Table 3, Appendix 1). 수온은 S1에서 높았고 S2～S4에서 낮았다. DO는 5.9～8.2 mg O_2 L^{-1} 범위이었고 평균값은 7.2 mg O_2 L^{-1}이었다. DO 포화도는 평균 77.9%이었고, 다른 하천에 비해 S3에서 62.8%로서 빈약한 수준이었다. pH는 평균값이 6.41 (6.13～6.73 범위)이었고, 전기전도도는 평균값이 304.5 μS cm^{-1} (175.0～361.0 μS cm^{-1}범위)이었다. pH와 전기전도도는 DO의 경향과 비슷하여 S3에서 낮은 값을 보였다. 수중 탁도는 S3에서 0.70 NTU로서 가장 낮았고, S1과 S4에서 각각 11.0 NTU, 10.0 NTU로서 높았다. 염분의 영향은 전 조사지점에서 관찰되지 않았다. Chl-*a*는 모든 하천에서 1.0 μg L^{-1} 이하(～0.6 μg L^{-1})를 기록하였다.

수심은 상류에서 2.1～2.6 m (평균 2.35 m)범위이었고, 댐 부근에서 10.9 m를 기록하였다(Table 3, Appendix 2-3). 표층과 저층 수온은 각각 24.7～25.9℃, 24.6～24.9℃ 범위이었고 평균값은 각각 25.3, 24.8℃이었다. 또한 수온 차이는 수심이 얕은 상류에서 1.0℃이었고, 댐 부근에서 0.1℃이었다. DO는 표층과 저층에서 각각 7.6～12.7 mg O_2 L^{-1}, 7.6～8.2 mg O_2 L^{-1}범위이었고, 평균값은 각각 10.8 mg O_2 L^{-1}, 7.9 mg O_2 L^{-1}이었다. 포화도는 R1의 표층에서 155.2%로 가장 높았고 R5의 저층에서 90.7%로 가장 낮았다. 수중 O_2의 포화도는 하천 → 저수지의 저층 → 저수지의 표층 순으로 높은 양상이 현저하였다(Fig. 2). pH는 표층과 저층에서 평균값이 각각 7.66 (7.20～8.07 범위), 7.42 (7.21～7.67 범위)이었다. pH는 상류에서 높았고, 하류로 갈수록 낮았다. 전기전도도는 표층에서 255.0～299.0 μS cm^{-1}범위이었고, 저층에서 256.0～261.0 μS cm^{-1}범위이었으며, 수심이 깊어질수록 상・하층의 차이가 적거나 뚜렷하지 않았다. 투명도는 0.60～0.90 m범위이었고, 평균값은 0.74 m이었다. 탁도는 표층과 저층에서 각각 8.5～12.1 NTU, 8.0～10.1 NTU 범위이었고, 수심이 얕은 상류부에서 높은 값을 보였다. 염분도는 전 수층에서 측정되지 않았다.

하천에서 T-N의 농도 범위와 평균값은 각각 862.0～10,362 μg N L^{-1}, 7,951.3 μg N L^{-1}이었다(Table 3, Appendix 1). 경작지와 인접한 하천보다 산림이 우거진 하천에서 평균값보다 작아서 비교적 낮은 농도를 보였다(Fig. 3). 또한, T-N 중에서 NH_4와 NO_3가 차지하는 비율은 각각 0.2, 50.6%이었고, Org-N 성분은 49.2%를 차지하였다.

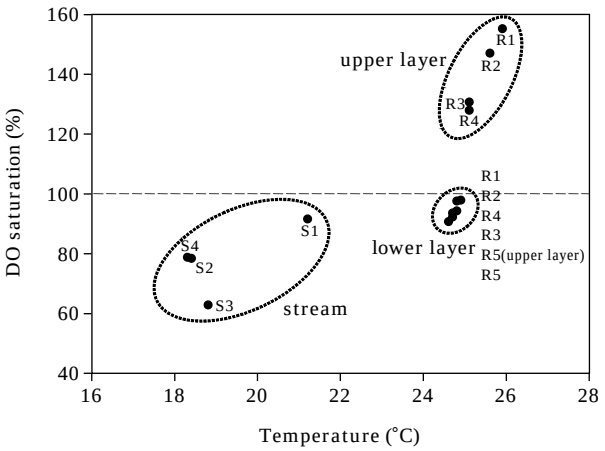

Fig. 2. Relationships between temperature and DO saturation in Jeolgol Reservoir watershed of Paikryeong Island.

따라서 무기질소는 질산이 대부분을 구성하고 있었고, 유기질소도 상당량 포함되어 있었다.

T-P의 평균값과 농도 범위는 각각 19.0 μg P L^{-1}, 2.0～42.0 μg P L^{-1}이었다(Table 3, Appendix 1). T-P는 T-N과 마찬가지로 하천간에 차이가 큰 것으로 나타났다(Fig. 3). T-P 중에서 Org-P와 SRP가 차지하는 비율은 각각 43.2%, 56.8%로서 무기인의 함량이 조금 많았다.

반면에 저수지에서 T-N의 평균값과 농도범위는 각각 표층에서 3,890.2 μg N L^{-1}, 2,834～5,329 μg N L^{-1}, 저층에서 3,270.0 μg N L^{-1}, 2,976～3,590 μg N L^{-1}이었다 (Table 3, Appendix 2-3). T-N의 경우 표층은 하천 유입부와 가까운 상류에서 높고, 댐 부근의 하류로 갈수록 현저하게 감소하는 양상을 보였다(Fig. 3). 또한, 평균값에 의한 T-N 중에서 NH_4와 NO_3가 차지하는 비율은 각각 3.0%, 22.1%이었고, Org-N 성분은 74.9%를 차지하였다. 따라서 무기질소는 질산의 함량이 높았고, 하천에 비해 유기질소의 비율이 매우 컸다.

T-P의 농도 범위와 평균값은 각각 표층에서 22.0～102.0 μg P L^{-1}, 52.8 μg P L^{-1}이었다(Table 3, Appendix 2-3). T-P 분포는 T-N과 유사한 경향이었고, 정점간에 큰 차이가 관찰되었다(Fig. 3). T-P 중에서 Org-P와 SRP가 차지하는 비율은 각각 88.6%, 11.4%로서 유기인의 함량이 절대적으로 풍부하였다.

Chl-*a*는 표층에서 31.6～258.9 μg L^{-1} (평균값 123.6 μg L^{-1})범위이었고, 저층에서 17.0～37.4 μg L^{-1} (평균값 26.5 μg L^{-1})이었다(Table 3, Appendix 2-3). 또한, 정점별 수층의 평균 농도는 26.0～146.8 μg L^{-1}범위로서 상류, 중류 및 하류의 공간적 차이가 현저하였다. Chl-*a*로 본 저수지

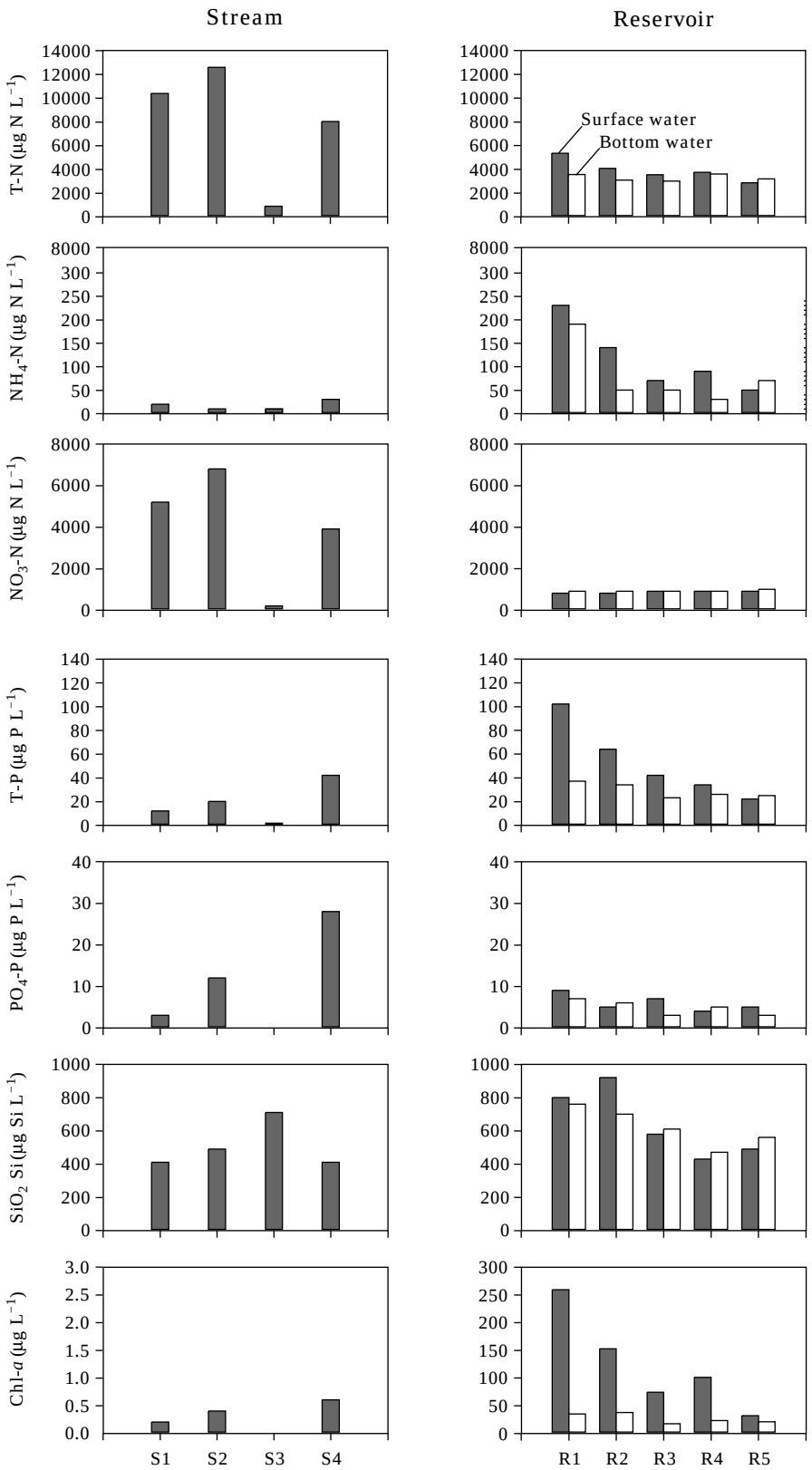

Fig. 3. Spatial distribution of nutrients and chlorophyll-*a* biomass in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island in August 2005.

Table 4. A list of species composition of freshwater algae observed in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island in August 2005. U: upper layer, L: lower layer. +: observed flora in quality analysis, 1: < 100, 2: 101 ~ 500, 3: 501 ~ 1,000, 4: 1,001 ~ 5,000, and 5: 5,001 ~ 10,000 cells mL^{-1}, respectively.

Flora \ Sampling stations	Reservoir									
	R1U	R1L	R2U	R2L	R3U	R3L	R4U	R4L	R5U	R5L
BACILLARIOPHYCEAE										
Achnanthes convergens	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Achnanthes minutissima	+	·	+	·	+	·	·	·	·	·
Actinocyclus normanii	+	·	·	·	·	·	·	·	+	·
Aulacoseira ambigua	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Aulacoseira granulata var. *angustissima*	·	·	+	·	·	·	·	·	+	·
Bacillaria paradoxa	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Caloneis silicula	·	·	·	·	+	·	+	·	·	·
Cyclotella meneghiniana	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Cyclotella pseudostelligera	+	·	·	·	+	·	+	·	+	·
Cyclotella stelligera	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·
Cymbella affinis	·	·	·	·	+	·	+	·	·	·
Cymbella tumida	+	·	·	·	·	·	+	·	+	·
Diploneis smithii var. *pumila*	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Eunotia bilunaris	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Fragilaria capucina var. *vaucheriae*	+	·	+	·	+	·	+	·	·	·
Fragilaria ulna	+	·	+	·	+	·	+	·	+	·
Gomphonema clevei	+	·	+	·	+	·	+	·	+	·
Gomphonema globiferum	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Gomphonema parvulum	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Gyrosigma acuminatum	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Navicula clementis	·	·	+	·	·	·	·	·	·	·
Navicula cryptocephala	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Navicula sp.	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Navicula trivialis	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Neidium bisulcatum	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Nitzschia capitellata	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Nitzschia fruticosa	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Nitzschia hungarica	·	·	·	·	·	·	+	·	·	·
Nitzschia levidensis var. *salinarum*	·	·	·	·	·	·	+	·	+	·
Nitzschia sp.	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Surirella angusta	+	·	·	·	·	·	+	·	+	·
Surirella minuta	·	·	·	·	+	·	+	·	·	·
Synedra acus	+	·	+	·	+	·	+	·	+	·
CYANOPHYCEAE										
Microcystis aeruginosa	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Microcystis ichthyoblabe	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CHLOROPHYCEAE										
Ankistrodesmus falcatus	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Kirchneriella contorta	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Scenedesmus acuminatus var. *acuminatus*	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Scenedesmus ecornis var. *ecornis*	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Scenedesmus maximus	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Scenedesmus quadricauda	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
Staurastrum duacense	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DINOPHYCEAE										
Peridinium bipes f. *occultatum*	5	3	5	3	4	3	4	2	3	2
EUGLENOPHYCEAE										
Euglena sp.	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·
CRYPTOPHYCEAE										
Cryptomonas sp.	+	·	·	·	·	·	·	·	·	·

의 수질은 부영양(>25 μg L^{-1}) 또는 과영양(>75 μg L^{-1}) 상태로 분류되었다. 저수지에서 chl-*a* 농도는 수중 탁도를 비롯하여 O_2 포화도와 유기질소 및 유기인의 증가를 야기하였다.

절골저수지에서 관찰된 식물플랑크톤은 총 25속 45종으로 정리되었다(Table 4). 분류군별로 보면 규조류 17속 33종, 남조류 1속 2종, 녹조류 4속 7종, 유글레나조류 1속 1종, 와편모조류 1속 1종 및 은편모조류 1속 1종이 해당하였다. 규조류에는 *Cyclotella, Gomphonema, Navicula* 및 *Nitzschia*속이 비교적 많았고, 이 중에서 *Cyclotella*속의 조류가 수적으로 우세하였으며, *Synedra acus*도 소량 관찰되었다. 남조류는 *Microcystis*속이 유일하였고, 와편모조류 *Peridinium*속 다음으로 가장 풍부한 분류군에 해당하였다. 녹조류는 *Scenedesmus*속에서 많이 관찰되었다. 그 외 다른 분류군들은 1~2종 범위로서 관찰만 되는 수준이었다. 또한, 하천수에서 관찰된 담수조류의 종조성은 토양 기질에 근간을 두는 부착조류의 영향이 컸다.

절골저수지에서 2005년 8월 조사에서 가장 우점한 분류군은 와편모조류 *Peridinium bipes* f. *occultatum*이었다(Table 4). 이 종은 전 수역에서 다량 관찰되었다. *Peridinium*의 현존량은 표층수에서 810~8,450 cells mL^{-1}범위이었고, 저층수에서 265~895 cells mL^{-1}범위이었다. 저수지내 현존량의 평균값은 표층과 저층에서 각각 3,938 cells mL^{-1}, 626 cells mL^{-1}로서 6.3배 정도 차이가 있었고, 그 결과 표층에 밀집됨을 알 수 있었다. 공간적으로 볼 때 현존량은 하천 유입부인 저수지의 상류에서 댐 부근의 하류로 갈수록 감소되는 분포 양상을 보였다. 특히 R1과 R2의 표층에서 5,000 cells mL^{-1} 이상으로 높은 현존량을 기록하였다. 이것은 담수에서 적조 수준을 초과한 상태이었고(Horne and Goldman, 1994), 수색을 검붉게 물들이고 수중 탁도 상승의 주된 원인 생물로 볼 수 있었다.

백령도의 절골저수지 유역을 대상으로 한 수질환경 조사의 결과로부터 파악된 특성은 다음과 같다. 유역은 임야와 농경지로 현저하게 구분되었고, 특히 농경지는 하천에 직접적으로 인접하여 조성된 특징을 볼 수 있었다. 따라서 비강우기(가을~봄철)보다 강우기(여름철)에 경작지로부터 저수지에 토양 유실의 공급 영향이 클 것으로 예상되어진다. 또한 집중호우를 동반한 홍수기에 더욱 가중될 것으로 보여지고, 수중 부유물질의 농도에서 짐작할 수 있었으며 삼림지역 하천과 대조적인 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 토양 성분을 근간으로 하는 무기입자는 무엇보다도 비점오염물질로 간주될 수 있으며 절골저

Table 5. A list of species composition of freshwater algae observed in the water treatment facility (WTF) of the Paikryeong Island.

Flora \ Sampling stations	WTF
	Sedimentation pond
BACILLARIOPHYCEAE	
Achnanthes convergens	+
Achnanthes minutissima	+
Actinocyclus normanii	+
Aulacoseira ambigua	+
Aulacoseira granulata var. *angustissima*	++
Bacillaria paradoxa	+
Caloneis silicula	+
Cyclotella meneghiniana	+
Cyclotella pseudostelligera	+
Cyclotella stelligera	+
Cymbella affinis	+
Cymbella tumida	+
Diploneis smithii var. *pumila*	+
Eunotia bilunaris	+
Fragilaria capucina var. *vaucheriae*	+
Fragilaria ulna	+
Gomphonema clevei	+
Gomphonema globiferum	+
Gomphonema parvulum	+
Gyrosigma acuminatum	+
Navicula clementis	+
Navicula cryptocephala	+
Navicula sp.	+
Navicula trivialis	+
Neidium bisulcatum	+
Nitzschia capitellata	+
Nitzschia fruticosa	+
Nitzschia hungarica	+
Nitzschia levidensis var. *salinarum*	+
Nitzschia sp.	+
Surirella angusta	+
Surirella minuta	+
Synedra acus	+
CYANOPHYCEAE	
Microcystis aeruginosa	·
Microcystis ichthyoblabe	·
CHLOROPHYCEAE	
Ankistrodesmus falcatus	+
Kirchneriella contorta	·
Scenedesmus acuminatus var. *acuminatus*	·
Scenedesmus ecornis var. *ecornis*	·
Scenedesmus maximus	·
Scenedesmus quadricauda	+
Staurastrum duacense	·
DINOPHYCEAE	
Peridinium bipes f. *occultatum*	++
EUGLENOPHYCEAE	
Euglena sp.	·
CRYPTOPHYCEAE	
Cryptomonas sp.	·

수지 유역은 질소영양염의 오염을 가중시키는 것으로 반영되었다.

유입하천의 영향을 직·간접적으로 받는 저수지 수역은 대다수 항목에서 상·하류간의 수질 구배가 뚜렷하였다. 특히 식물플랑크톤 생물량은 수체의 평균값으로 비교할 때 그 차이는 76.4 μg L^{-1}로서 상류가 중하류보다 2.7배 정도 높은 수준이었다. 이러한 결과는 저수지내의 수질문제를 야기할 뿐만 아니라 정수장의 응집~여과 수처리 공정에도 상당한 영향을 줄 것으로 판단된다(Table 5 참고).

백령도의 식수원인 절골저수지는 담수 초기 환경으로서 다른 요인보다도 현재 식물플랑크톤의 대발생에 의한 수질문제가 현저하였고, 저수지내 식물플랑크톤의 과잉번성은 곧바로 정수처리의 어려움으로 직결되었다(한국수자원공사, 2005). 저수지 수질의 부영양화는 외부기원성 또는 내부기원성에 의한 영향으로 다양한 원인을 들 수 있으나(OECD, 1982), 절골저수지는 하천으로부터 유입되는 오염물질의 제어를 위해서 무엇보다도 배수로 정비가 시급하였다. 그 예로서 수변 도로에 퇴적된 토양 무기 입자의 양으로 볼 때 강우에 의한 침식된 토양의 공급(Thornton *et al*., 1990)이 상당한 것으로 평가되었다. 따라서 배수로 정비는 경작지의 토양 유실에 의해 다량 공급되는 영양염의 부하를 저감시키기 위해 필요하였다.

저수지의 저층은 댐건설 전에 경작지이었기 때문에 이에 대한 영향으로 담수 초기에 이미 수질 부영양화 현상이 야기될 수 있는 잠재력을 내부적으로 포함하고 있었다. 또한, 배수구조에 의한 문제점으로서 월류 방식만 갖추어 있어, 하천으로부터 공급되는 탁수와 수중폭기에 의해 발생하는 저층 교란으로부터 무기 입자의 재부유되는 영향을 최소화시킬 수 있는 방안(Thornton *et al*., 1990)으로서 심층수 배출을 위한 선택배제시설이 결여되어 있었다. 또한, 저질층에 의한 영양염 공급을 조절할 수 있는 부분이 완전 배제되어 있음을 알 수 있었다.

원수에 대한 수질 모니터링 시스템이 요구되었고, 식물플랑크톤의 생물량 평가에 대한 측정항목이 반드시 포함되어야 할 것으로 보여진다. 본 유역을 대상으로 한 선행연구 결과와 언론을 통해 소개된 연안 수서생물인 갈매기의 배설물에 의한 수질오염 영향은 국지적인 부분으로 볼 수 있었고, 또 다른 요인에 의한 문제점이 지적될 수 있었다. 우선 수체의 순환을 위해 적용하고 있는 수중폭기시설에 대한 재검토가 있어야 할 것으로 보여진다. 수중폭기기 가동은 수온성층화 조절과 심층 산소공급에 의한 저질층의 인 용출 억제를 통한 식물플랑크톤의 발생 제어 효과를 도모하기 위한 것이었다(인천광역시상수도사업본부, 2004). 그러나 절골저수지에서 수중폭기는 전술한 수질개선 효과보다 수체의 유동성을 지속적으로 제공하게 되어 오히려 식물플랑크톤의 생장을 더욱 촉진시키는 문제점을 초래하는 것으로 볼 수 있었다(한국수자원공사, 2005). 따라서 현 시점에 이에 대한 효과분석을 통해 향후 지속 적용 여부를 평가해야 할 것으로 사료된다.

끝으로, 댐 건설에 대한 실시설계 때 수질관리 측면의 유역관리가 완전하게 고려되지 않았고, 저수지 관리 측면에서도 댐과 취수 시설의 토목 공사에 대한 부분만 치중되었다. 따라서 앞으로 더욱 가중될 우려가 있는 저수지의 수질오염도에 대한 근원적인 대책 마련이 필요할 것으로 보여지며, 향후 본 저수지에 적합한 수질회복관리 방안이 도입되어야 하겠다.

적 요

섬 지역의 초기 담수과정에 있는 상수원 저수지(절골저수지)에서 수색 악화와 여과지 폐색의 원인을 분석하기 위해 2005년 8월에 식물플랑크톤을 포함한 다각적인 수환경 조사를 수행하였다. 저수지의 형태는 단순하였고, 평균 수심은 5.5 m로서, 상류에서 얕고 댐 부근에서 가장 깊었다. 환경요인 중에서 수평적 또는 수직적 차이가 큰 인자는 DO, Chl-*a*이었고, 가장 작은 인자는 수온이었다. 수중 투명도는 0.6~0.9 m범위(평균값 0.7 m)이었고, 탁도의 평균값은 9.3 NTU (8.0~12.1 NTU범위)이었다. 투명도와 탁도의 증감요인은 생물 또는 비생물의 복합적인 영향으로 볼 수 있었고 공간적인 차이도 반영되었다. 수색이 탁한 것은 무기입자의 증가와 식물플랑크톤의 과대증식 영향이 주된 원인이었고, 여과지 폐색은 저수지로부터 식물플랑크톤의 과잉 공급에 의한 문제점이었다. 저수지 내 chlorophyll-*a* 농도의 범위와 평균값은 상층에서 31.6~258.9 μg L^{-1}, 123.6 μg L^{-1}, 저층에서 17.0~37.4 μg L^{-1}, 26.5 μg L^{-1}이었다. Chlorophyll-*a*의 증가는 담수적조의 대발생 영향이었고, 주종은 와편모조류 *Peridinium bipes* f. *occultatum*이었다. *Peridinium*의 분포는 chlorophyll-*a* 농도와 밀접한 관련성이 있었다. 담수적조의 현존량은 상류지역에서 8.5×10^3 cells mL^{-1}로서 많았고, 댐부근의 하류지역(4.4×10^2 cells mL^{-1})으로 갈수록 감소하는 양상을 보였다. 또한, 담수적조의 원인종으로 규조류 *Synedra acus*와 남조류 *Microcystis aeruginosa*도 소량 관찰되었다. 저수지의 수질 부영양화 현상은 기존 경사사면형 농경지를 기반으로 조성되었으므로 저층으로부터

풍부한 영양환경을 내재하고 있었고, 담수 초기에 발생할 수 있는 가능성을 포함하고 있었다. 또한 유입수량의 부족과 현재 수질개선을 위해 적용하고 있는 수중폭기시설 등의 물리적인 영향도 직·간접적으로 작용하였을 것으로 추정되었다. 따라서 향후 이에 대한 중장기적인 모니터링이 필요하였고 유역과 저수지의 통합적인 수질관리 계획이 요구되었다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 수자원연구원의 2005년도 연구개발비 (KIWE-ERC-05-09) 지원으로 수행되었습니다. 현장조사에서 도움을 준 수자원연구원의 국제수도진단센터 연구원들과 세심한 심사를 해 주신 심사위원들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

인천광역시상수도사업본부, 효림산업주식회사. 2004. 백령면 식수원개발사업 수중폭기기 설치공사 사업계획서 및 승인도서.

인천광역시상수도사업본부. 1998. 백령면 식수원개발사업 실시설계 보고서. 471p.

한국수자원공사. 2005. 인천시 백령상수도 기술지원 보고서. 33p.

APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.

AWWA. 1999. Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies. 5th ed. American Water Works Association, McGraw-Hill, Inc. New York, USA.

Hegewald, E. and P.C. Silva. 1988. Annotated catalogue of *Scenedesmus* and nomenclaturally related Genera, including original descriptions and figures. J. Cramer. 587p.

Hirose, H., M. Akiyama, T. Iriya, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumana, H. Kobayashii, E. Takahashi, K. Tsumura, M. Hirano and T. Yamagishi. 1977. Illistrations of the Japanese freshwater algae. Uchidarokakuho Publ. Co. Ltd. Tokyo, 927p.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. 2th edition. McGRAW-Hill. p. 226-264.

Jensen, N.G. 1984. The pennate diatoms; A translation of Hustedt's "Die Kieselalgen, 2. Teil" published by Jensen, N.G. Strauss & Cramer GmbH, 918p.

Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.

Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1986. Bacillariophyceae, 1. Teil: Naviculaceae. VEB Gustav Fischer Verlag. 876p.

Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1988. Bacillariophyceae, 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. VEB Gustav Fischer Verlag. 596p.

Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991. Bacillariophyceae, 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. VEB Gustav Fischer Verlag. 576p.

Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991. Bacillariophyceae, 4. Teil: Achnanthaceae, Kritische Erganzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema* Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4. VEB Gustav Fischer Verlag. 437p.

Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol. Beih.* (Ergebn. Limnol.) **14**: 14-36.

OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, France. 154p.

Prescott, G.W. 1982. Algae of the Western Great Lakes Area with an illustrated key to Genera desmids and freshwater diatoms. Otto Koeltz Science Publishers. 977p.

Rump, H.H. and H. Krist. 1988. Laboratory manual for the examination of water, wastewater, and Soil. VCH Verlagsgesellschaft, Publ, New York, NY (USA). 190p.

Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology- Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 246p.

Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.

(Manuscript received 16 February 2006,
Revision accepted 15 June 2006)

Appendix 1. Water quality of the inflow stream in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island located in West Sea of Korea in August 2005.

Factors \ Sampling streams	S1	S2	S3	S4
	Physical factors			
Temperature (℃)	21.2	18.4	18.8	18.3
DO (mg O_2 L^{-1})	8.2	7.4	5.9	7.4
DO saturation (%)	91.6	78.4	62.8	78.8
pH	6.73	6.44	6.13	6.35
Conductivity (μS cm^{-1})	361.0	336.0	175.0	346.0
Salinity (psu)	0.0	0.0	0.0	0.0
Transparency (m)	·	·	·	·
Turbidity (NTU)	11.0	3.1	0.7	10.0
Suspended solids (mg SS L^{-1})	17.9	20.6	9.1	20.2
Water color (Degree)	41.0	16.0	16.0	32.0
Depth (m)	0.03	0.07	0.07	0.05
	Chemical factors			
Total nitrogen (μg N L^{-1})	10,362	12,578	862.0	8,003
Ammonium (μg N L^{-1})	20.0	10.0	10.0	30.0
Nitrate (μg N L^{-1})	5,200	6,800	200.0	3,900
Nitrite (μg N L^{-1})	0.0	0.0	0.0	0.0
Organic nitrogen (μg N L^{-1})	5,142	5,768	652.0	4,073
Total phosphorus (μg P L^{-1})	12.0	20.0	2.0	42.0
Soluble reactive phosphorus (μg P L^{-1})	3.0	12.0	0	28.0
Organic phosphorus (μg P L^{-1})	9.0	8.0	2.0	14.0
Soluble reactive silicon (μg Si L^{-1})	410.0	490.0	710.0	410.0
Dissolved organic carbon (mg C L^{-1})	5.96	3.91	4.57	6.02
BOD_5 (mg O_2 L^{-1})	0.9	0.8	0.9	0.8
COD_{Mn} (mg O_2 L^{-1})	10.6	8.0	7.9	9.8
	Biological factors			
Chlorophyll-*a* (μg L^{-1})	0.2	0.4	0.0	0.6
	Metals			
Aluminium (mg Al L^{-1})	0.400	0.060	0.080	0.270
Manganese (mg Mn L^{-1})	0.030	0.006	ND	0.007
Ferrous (mg Fe L^{-1})	0.210	ND	ND	0.120

ND: not detected.

Appendix 2. Water quality of the upper layer of major stations in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island located in West Sea of Korea in August 2005.

Factors \ Sampling streams	R1	R2	R3	R4	R5
	Physical factors				
Temperature (℃)	25.9	25.6	25.1	25.1	24.7
DO (mg O_2 L^{-1})	12.7	12.1	10.8	10.6	7.6
DO saturation (%)	155.2	147.0	130.7	127.9	92.2
pH	8.07	7.89	7.50	7.63	7.20
Conductivity (μS cm^{-1})	299.0	256.0	258.0	255.0	256.0
Salinity (psu)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transparency (m)	0.60	0.60	0.75	0.90	0.85
Turbidity (NTU)	12.1	10.3	8.5	9.0	9.4
Suspended solids (mg SS L^{-1})	18.1	17.2	17.4	11.4	18.0
Water color (Degree)	19.0	18.0	19.0	23.0	21.0
Depth (m)	2.1	2.6	4.9	7.0	10.9
	Chemical factors				
Total nitrogen (μg N L^{-1})	5,329	4,044	3,528	3,716	2,834
Ammonium (μg N L^{-1})	230.0	140.0	70.0	90.0	50.0
Nitrate (μg N L^{-1})	800.0	800.0	900.0	900.0	900.0
Nitrite (μg N L^{-1})	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Organic nitrogen (μg N L^{-1})	4,299	3,104	2,558	2,726	1,884
Total phosphorus (μg P L^{-1})	102.0	64.0	42.0	34.0	22.0
Soluble reactive phosphorus (μg P L^{-1})	9.0	5.0	7.0	4.0	5.0
Organic phosphorus (μg P L^{-1})	93.0	59.0	35.0	30.0	17.0
Soluble reactive silicon (μg Si L^{-1})	800.0	920.0	580.0	430.0	490.0
Dissolved organic carbon (mg C L^{-1})	6.82	6.51	6.39	6.45	6.08
BOD_5 (mg O_2 L^{-1})	6.2	6.1	4.5	3.3	1.9
COD_{Mn} (mg O_2 L^{-1})	21.6	17.1	14.5	13.8	10.8
	Biological factors				
Chlorophyll-*a* (μg L^{-1})	258.9	152.4	73.8	101.1	31.6
	Metals				
Aluminium (mg Al L^{-1})	0.030	0.040	0.070	0.050	0.100
Manganese (mg Mn L^{-1})	0.055	0.047	0.045	0.032	0.092
Ferrous (mg Fe L^{-1})	ND	ND	ND	ND	0.080

ND: not detected.

Appendix 3. Water quality of the lower layer of major stations in Jeolgol Reservoir of the Paikryeong Island located in West Sea of Korea in August 2005.

Factors \ Sampling streams	R1	R2	R3	R4	R5
	Physical factors				
Temperature (℃)	24.9	24.8	24.7	24.8	24.6
DO (mg O_2 L^{-1})	8.2	8.1	7.8	7.9	7.6
DO saturation (%)	97.9	97.6	93.6	94.3	90.7
pH	7.67	7.57	7.24	7.40	7.21
Conductivity (μS cm^{-1})	261.0	256.0	257.0	256.0	257.0
Salinity (psu)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transparency (m)	.	.	.	.	.
Turbidity (NTU)	8.0	8.0	8.9	8.6	10.1
Suspended solids (mg SS L^{-1})	17.1	14.3	16.7	17.9	16.7
Water color (Degree)	23.0	19.0	19.0	23.0	21.0
Depth (m)	.	.	.	.	.
	Chemical factors				
Total nitrogen (μg N L^{-1})	3,534	3,082	2,976	3,590	3,168
Ammonium (μg N L^{-1})	190.0	50.0	50.0	30.0	70.0
Nitrate (μg N L^{-1})	900.0	900.0	900.0	900.0	1,000
Nitrite (μg N L^{-1})	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Organic nitrogen (μg N L^{-1})	2,444	2,132	2,026	2,660	2,098
Total phosphorus (μg P L^{-1})	37.0	34.0	23.0	26.0	25.0
Soluble reactive phosphorus (μg P L^{-1})	7.0	6.0	3.0	5.0	3.0
Organic phosphorus (μg P L^{-1})	30.0	28.0	20.0	19.0	22.0
Soluble reactive silicon (μg Si L^{-1})	760.0	700.0	610.0	470.0	560.0
Dissolved organic carbon (μg C L^{-1})	6.09	6.10	6.29	6.20	6.19
BOD_5 (mg O_2 L^{-1})	2.0	2.2	2.0	1.5	1.4
COD_{Mn} (mg O_2 L^{-1})	13.5	13.1	12.6	12.6	11.4
	Biological factors				
Chlorophyll-*a* (μg L^{-1})	34.6	37.4	17.0	23.0	20.4
	Metals				
Aluminium (mg Al L^{-1})	0.100	0.090	0.090	0.110	0.100
Manganese (mg Mn L^{-1})	0.070	0.068	0.054	0.066	0.066
Ferrous (mg Fe L^{-1})	0.070	0.060	0.050	0.080	0.060

ND: not detected.