

평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가

신 재 기* · 황 순 진¹ · 조 경 제²

(인제대학교 낙동강유역환경연구소, ¹건국대학교 지역건설환경공학과, ²인제대학교 환경시스템학부)

Assessment of Water Quality in Pyeongtaek Reservoir and Its Main Tributaries. Shin, Jae-Ki*, Soon-Jin Hwang¹ and Kyung-Je Cho² (Environmental Research Center for Naktong River Watershed, Inje University, Kimhae 621-749, Korea, ¹Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, ²School of Environmental Science & Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea)

The water quality of the Pyeongtaek Reservoir and its main streams has been evaluated for water pollution state in March, June, September and December, 2000. The following are the findings: NH₄ accounts for the majority of TN in the inflow streams. In the reservoir, TN and NH₄ are the more present in the winter season and less in the summer season, with 1.6~2.4 times of NO₃ and 5.3~11.4 times of NO₂ found in December and June compared with other seasons. The concentration of each component is different between streams; NH₄ among inorganic nitrogen has the highest concentration in the upstream, and NO₃ is more prevalent in the downstream. SRP accounts for 25~69% of TP in the stream. Unlike N component, P component in the reservoir rapidly decreases from upstream toward downstream, except in the summer. Average SRSi slightly increases in the fall, i.e., immediately after rainfall. In the streams, the average concentration of chlorophyll-*a* ranges from 9 to 33 µg/l, and is relatively high in the downstream. In contrast, in the reservoir, it is the highest in the upstream where NH₄ and SRP are frequently found. In particular, diatom and cryptomonad algae are bloomed in March, and blue-green algae in September; their maximum values are 108 µg/l and 130 µg/l, respectively. Considering the concentration of N and P nutrients, pollution loads can affect the Pyeongtaek Reservoir in the downstream in this order: Ansong Stream < Osan-Chiwi Stream < Songhwan Stream < Sojong Stream and Hwangguchi Stream. The water quality deterioration of the major streams in the watershed of the Pyeongtaek Reservoir due to the effluents of wastewater treatment plants and untreated domestic wastewater. The water pollution of the Pyeongtaek Reservoir is undergoing typical eutrophication, caused by excessive N and P nutrients from the upstream of the watershed. It is mainly felt in the winter and summer seasons.

Key words : watershed, water quality, eutrophication, nitrogen, phosphorus, wastewater

서 론

우리나라는 각종 용수에 대한 수자원의 확보와 홍수

조절을 위해 하천의 상류와 중류에는 댐을, 하류에는 둑과 방조제를 건설하여 크고 작은 하천형, 수지형, 저수지형 및 하구형 호수를 유지하고 있다. 이러한 저수지는 유역에 산재된 도시, 농경지 및 산업시설 등 다양한 오

* Corresponding author: Tel: 011) 870-6121, Fax: 055) 334-7092, E-mail: jaekishin@hanmail.net

염원이 위치하고 있어 그 관리가 쉽지 않았고, 그 결과 상수원 또는 용수원의 부영양화로 인한 수질 문제는 불가피하였다. 수질 부영양화는 하천과 저수지에서 허용환경용량의 초과로 인해 나타나는 현상으로써 과도한 영양염 유입에 의한 높은 생산성을 유발하는 것으로 볼 수 있다(OECD, 1982; Wetzel, 2001; Kalff, 2002).

하천의 수질은 유역의 도시화와 토지 이용도에 따라 상·하류간에 매우 이질적인 양상을 보이게 된다. 또한, 하천은 유역의 최종 배수로에 해당하므로 저수지에 대한 하나의 점오염원 역할을 하고 있어, 하천의 오염도는 곧 저수지의 수질을 가늠할 수 있는 추정 요인으로 볼 수 있다(신 등, 2000). 최근에 유역관리 차원에서 하수처리장 증·건설이 확대 추진되고 있으나, 하천 오염은 크게 개선되지 않고 있는 실정에 있다. 특히, 무기 N과 P의 오염도는 더욱 증가하여 조류 발생의 사회적 문제는 지속되고 있다(신 등, 2000).

평택호는 농업용수의 이용 목적으로 형성되었으나, 초기부터 수질 악화가 초래된 전형적인 하구형 호수에 해당한다(황과 이, 1998). 유역에는 농경지와 중소 도시가 발달되어 있고, 특히 도시의 생활하수는 각 하천을 통해 저수지로 집수되는 하천~저수지 시스템의 수계를 띠고 있다. 또한, 주요 하천의 각 하류부에는 소유역에서 발생하는 하오수를 차집 처리하는 시설이 위치하고 있고, 하수처리수가 방류되는 지점 하류부터 수질은 더욱 현저한 악화가 관찰되어 주된 오염원으로 작용하고 있다.

평택호 유역에서 수환경에 관한 선행 연구는 그리 많지 않다(신과 전, 2002; 신과 김, 2002). 초기 담수화 과정을 통해 수질(권, 1976; 홍 등, 1976), 플랑크톤 천이(권, 1976; 조, 1976), 어류 분포(권, 1976; 최, 1976), 갑각류, 저서동물, 연체동물 및 염생식물 분포(권, 1976) 등이 있었고, 최 등(1982)은 오염된 황구지천 하천수의 농업용수 이용에 대한 질소와 농토 개량제의 관련성을 규명하였다. 최근에 저수지의 부영양화 저감을 위한 수질개선과 효과적인 관리에 대한 유역관리의 중요성을 보고하였고(황과 이, 1998), 또한 1997년에 수질 특성(신과 전, 2002)과 식물플랑크톤의 군집 구조(신과 김, 2002)를 조사한 연구가 있다.

본 연구는 평택호 유역을 대상으로 하였고, chl-a와 영양염을 중심으로 다각적인 수환경조사를 통해 하천의 상호 오염도를 비교 평가하였으며, 저수지에 대한 하천의 영향을 파악하고자 하였다. 따라서, 평택 담수호와 유역 하천의 수질개선을 위해 추진되고 있는 정책에 대한 유용한 기초자료로 활용되기를 기대한다.



Fig. 1. Map showing sampling stations of Pyeongtaek Reservoir Watershed.

조사지 개황

본 연구 대상지는 우리나라 중부 서해에 인접한 아산만(37° 00'N, 127° 00'E)부근이다(Fig. 1). 아산만은 리아스식 해안으로써 만의 주변에는 방조제 건설에 의해 간척 개발된 4개 저수지(대호, 삼교호, 석문호 및 평택호)가 있다. 평택호는 그 중의 하나이고, 농업용수 확보를 목적으로 경기도와 충청남도의 경계에 위치한 감조수역인 진위천-안성천 하류부를 포함한 아산만의 중상류부를 가로질러 1970년 12월에 착공 후 1973년 12월에 준공된 인공호이다(최, 1976; 홍 등, 1976; 황과 이, 1998). 평택호의 제원을 요약한 것은 Table 1과 같다. 방조제의 총 길이는 2,564 m이고, 높이는 17 m이다. 유역면적은 40.4 km²이고, 저수면적은 0.6 km²으로써 그 비율은 67에 해당한다. 저수량은 82,892 × 10³ m³이고, 평균 수심과 수리학적 체류시간은 각각 4.2 ~ 7.1 m, 25 ~ 34일이다. 수심은 배수갑문 부근이 가장 깊고, 상류로 갈수록 급격하게 감소한다.

평택호의 수문 현황은 1999년을 기준으로 할 때, 평균 유입 유량은 26.18 m³/s이었고, 총 방류량은 1,138.4 × 10³ m³, 월 평균방류량은 94.9 × 10³ m³ (12.0 ~ 445.0 × 10³

m³ 범위)이었다. 저수지수의 배수를 위한 갑문조작 횟수는 2000년에 총 89회로써 연중 24%가 조작되었고, 강수량이 풍부한 7~10월동안 62%를 차지하였다. 또한, 이 시기는 매월 방류량이 평균 방류량보다 많았고, 방류량은 $842 \times 10^3 \text{ m}^3$ (74.0%)이었다. 저수지가 완공된 이후로 연평균 $350 \times 10^3 \text{ m}^3$ 으로 추정되는 토사가 유역으로부터 강우시마다 대량 유입 적체됨으로 인해 담수량 감소, 관개능력 저하, 농공용수 부족 및 농경지 침수 피해 등 각종 문제점이 발생되고 있어 지속적인 저질토의 준설이 불가피 하였다. 준설량은 1985~1999년에 $15,677 \times 10^3 \text{ m}^3$, 2000년에 $1,679 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었고, 2003년까지 $3,133 \times 10^3 \text{ m}^3$ 을 추가적으로 제거하는 것으로 계획되어 있다. 따라서, 현 시점에 평택호의 준설구간 하류부에는 연중 수색이 탁한 현상을 보이고 있다.

평택호를 최종 집수역으로 하는 주요 유입하천은 황구지천, 진위천, 서정천, 안성천 및 성환천이 해당하고, 오산천은 진위천의 중류부에서 합류되며, 평택호로 유입되는 본류는 진위천과 안성천이다. 하천별 유역 면적, 유로 연장 및 하수관련 내용을 요약한 것은 Table 2와 같

Table 1. General features of Pyeongtaek Reservoir. Yearly rainfall and sediment dredge quantity data are in 2000 and during 1985 to 2000, respectively.

Attribute	Pyeongtaek Reservoir
Catchment area (km ²)	40.4
Water surface area (km ²)	0.6
Yearly rainfall (mm)	1,371.9
Maximum water capacity ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	98,980
Available water volume ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	82,892
Mean water depth (m)	5.7
Hydraulic retention time (days)	29.5
Tide embankment length (m)	2,564
Tide embankment height (m)	17
Sediment dredge quantity ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	17,356
Construction period	December 20, 1970 ~ December 19, 1973

다. 각 하천은 소유역별로 중·상류에 중소도시를 두고 있으며, 황구지천은 수원시, 오산천은 오산시, 진위천은 용인시, 서정천은 평택시, 화성군, 안성천은 안성시 및 성환천은 아산군을 중심으로 구분된다. 이들 하천은 유역에서 발생하는 각종 생활 하·오수의 최종 배수로에 해당한다. 유역에서 하수처리량과 처리율은 각각 $0.1 \sim 220.3 \times 10^3 \text{ m}^3$, $0.1 \sim 69.0\%$ 범위로서 지역에 따라 차이가 매우 크다 (Table 2). 또한 상하류 구간을 통해 수중보가 다수 건설되어 있고, 보에 의한 저류지를 제외하고는 수심이 얇고, 하상에 부착조류가 성행하고 있다.

재료 및 방법

본 연구는 평택호와 유역 주요 하천을 대상으로 강수량을 고려하여 2000년 3월, 6월, 9월 및 12월에 4회 조사하였다. 조사 지점은 유입 하천인 황구지천 (HWA), 오산천 (OSA)과 진위천 (CHI) 합류 후, 서정천 (SOJ), 안성천 (ANS) 및 성환천 (SON)의 최하류에서 각 1개 정점과 저수지의 상류 (R1), 중류 (R2) 및 하류 (R3)에서 각 1개 정점으로 총 8개 지점으로 하였다 (Fig. 1).

강수량은 유역에 위치한 측후소(수원, 평택, 안성 및 천안)에서 측정된 일 자료의 평균값을 사용하였다(기상청, 2000). 수온, DO, pH, 전기전도도 및 탁도는 매번 보정한 YSI 6000 UPG meter로 현장에서 측정하였다. 수질 분석을 위한 시료는 각 하천의 하류 지점 중앙에서 표층수를 직접 채수하였고, 저수지는 소형 고무 보트를 이용하였다. 유기물 분석을 위한 시료는 채수 후 그대로 사용하였으나 무기 영양염 분석을 위한 시료는 Whatman GF/F filter로 여과한 후 사용하였다. 수중 총질소와 총인은 persulfate digestion법 (APHA, 1995), NH₄, NO₃, NO₂, SRP (soluble reactive phosphorus) 및 SRSi (soluble reactive silicon) 영양염은 Rump and Krist (1988)와 APHA (1995)의 방법에 따라 분석하였다. 총무기질소

Table 2. Summation of major stream features situated in the Pyeongtaek Reservoir Watershed.

Factors / Streams	Hwangguchi	Chinwi	Osan	Ansong	Total (Mean)
Watershed area (km ²)	286.4	321.1	154.4	931.5	1,693.5
Stream extension (km)	51.4	41.1	36.0	59.5	188.0
Number of sewage treatment plant	2	1	1	8	12
Sewage generation quantity ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	338.9	116.4	90.4	145.7	691.4
Sewage treatment quantity ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	220.3	0.1	57.0	100.5	321.1
Sewage treatment efficiency (%)	65.0	0.1	63.1	69.0	(46.5)
Treatment method	Activated sludge	Activated sludge	Activated sludge	Activated sludge	.
Main city	Suwon	Yongin	Osan	Ansong	.

(total inorganic nitrogen, TIN)는 NH_4 , NO_3 , NO_2 의 합으로 보았다. Chl-*a* 농도는 90% ethanol로 비등 추출하여 665 nm와 750 nm의 흡광도값으로 산정하였다(Nusch, 1980). BOD_5 는 BOD meter를 이용하여 초기와 5일 동안 배양 한 후 DO 측정값의 차이로 보았고, COD_{Cr} 은 중크롬산($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)을 산화제로 사용하는 크롬법을 적용하였다. 알칼리도는 Gran 적정법, 경도는 EDTA 적정법을 사용하였다. TSS는 전처리된 GF/F에 시료를 여과하고 건조 전후의 무게 차이로 계산하였다(APHA, 1995).

결과 및 고찰

1. 수환경 요인

평택호 유역에서 2000년에 내린 강수량의 일 분포를 나타낸 것은 Fig. 2와 같다. 총강수량은 1,371.9 mm이었

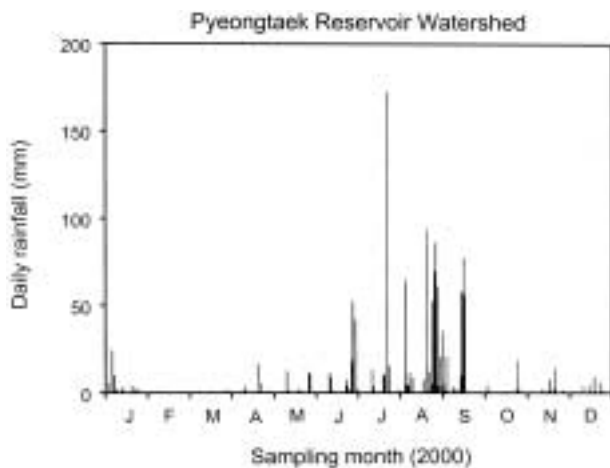


Fig. 2. Daily variation of rainfall in Pyeongtaek Reservoir Watershed from January to December 2000. Mean data of Suwon, Pyeongtaek, Ansong and Chonan office obtained from Korea Meteorological Agency.

다. 무강수일을 제외한 연중 강수량의 평균값과 범위는 각각 10.4 mm, 0.1~172.6 mm이었고, 일 최대 강수량은 7월에 관찰되었으며 유일하게 100 mm를 초과한 경우에 해당하였다. 또한, 월 강수량은 8월에 542.4 mm로써 가장 풍부하였고, 2~3월에 10 mm 이하로써 빈약하였다. 강수량이 50 mm를 초과한 시기는 6월 하순부터 9월 중순까지이었다(Fig. 2). 이 기간의 강수량은 1,156.3 mm로서 연 강수량의 84.3%를 차지하여 집중되었고, 전형적인 몬순 기후대의 우기 특성을 잘 반영하는 분포를 보였다.

유입하천의 주요 수환경 요인의 평균값과 표준편차를 나타낸 것은 Table 3과 같다. 수온의 범위와 평균값은 각각 7.8~31.0°C, 17.6°C이었다. 수온은 물의 흐름 정도에 따른 영향이 관찰되어 유수상태보다는 수중보와 너울구간에서 조금 높았다. DO는 평균값이 5.6~11.4 mg O_2 /l범위로서 하천별 차이가 컸으며, 황구지천, 서정천 및 성환천이 상대적으로 낮았다. DO는 수온이 낮을 때 그 값이 컸고, 수온이 높을 때 작았다. pH의 평균값은 7.5~8.4 범위이었고, 다른 하천에 비해 오산천과 진위천 합류 후 지점에서 조금 높았다. 전기전도도는 215~868 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위이었고, 6월에 높았고, 9월에 낮았다.

하천의 탁도는 5.1~19.7 NTU 범위이었고, 평균값은 13.1 NTU이었으며, 계절적으로 하계에 다소 높았다. 알칼리도는 54.3~119.0 mg CaCO_3 /l 범위로서 하천간에 차이가 컸고, 하류지점에서 낮았다. 경도의 평균값 범위는 86.0~185.5 mg CaCO_3 /l이었고, 황구지천, 진위천 및 서정천이 비교적 높았다. TSS는 5.9~36.4 mg SS/l 범위로서 평균값은 21.2 mg SS/l이었고, 성환천이 가장 높았다.

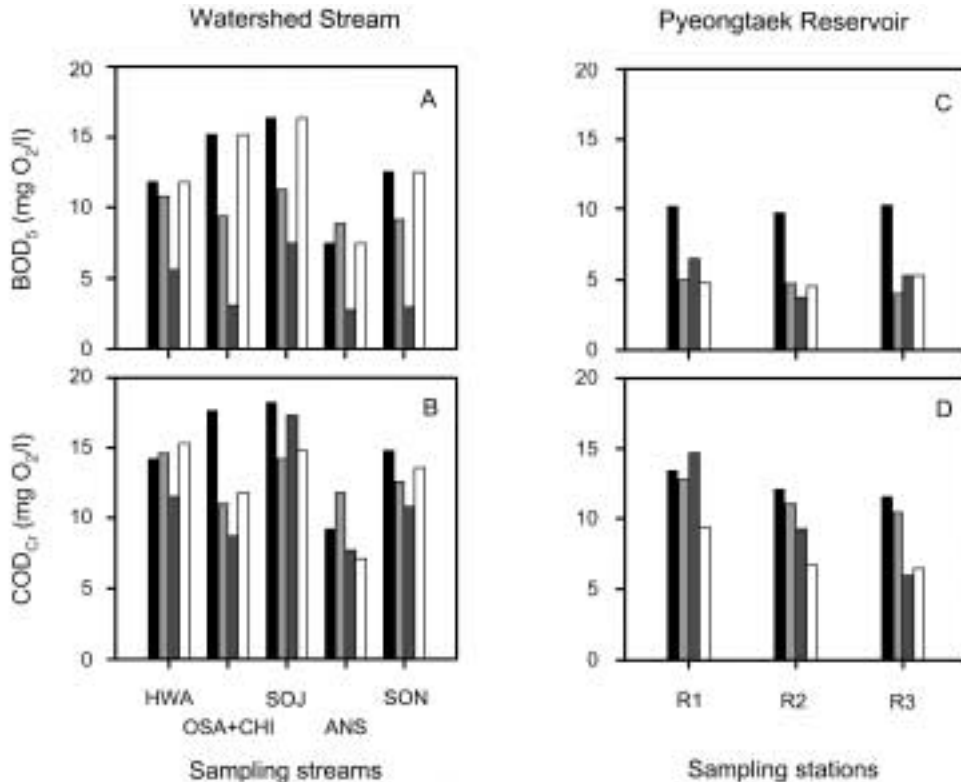
평택호의 주요 수환경 요인의 평균값과 표준편차를 나타낸 것은 Table 4와 같다. 수온의 범위와 평균값은 각각 5.2~28.2°C, 15.8°C이었다. 수온은 저수지의 상하류간에 큰 차이가 없었으나 하류가 중상류보다 조금 낮

Table 3. Mean (\pm SD) values of environmental factors in the watershed stream ends inflowing into Pyeongtaek Reservoir at March, June, September and December of 2000.

Factors / Sampling streams	Hwangguchichon	Osan+Chinwichon	Sojongchon	Ansongchon	Songhwanchon
Water temperature (°C)	17.8 \pm 7.9	17.3 \pm 8.2	20.6 \pm 8.7	15.8 \pm 8.0	16.6 \pm 8.5
Dissolved oxygen (mg O_2 /l)	5.6 \pm 0.8	11.4 \pm 1.6	6.3 \pm 1.2	7.9 \pm 0.4	6.4 \pm 1.3
pH	7.5 \pm 0.1	8.4 \pm 0.7	7.6 \pm 0.1	7.7 \pm 0.1	7.5 \pm 0.2
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	646.5 \pm 121.2	660.3 \pm 146.2	791.8 \pm 83.4	295.8 \pm 60.6	433.3 \pm 148.3
Turbidity (NTU)	12.1 \pm 4.7	11.6 \pm 3.0	13.1 \pm 3.7	11.5 \pm 4.3	17.4 \pm 4.6
Alkalinity (mg CaCO_3 /l)	119.0 \pm 35.6	75.3 \pm 18.5	88.3 \pm 8.5	54.3 \pm 14.8	92.5 \pm 45.3
Hardness (mg CaCO_3 /l)	147.3 \pm 22.3	151.0 \pm 50.4	185.5 \pm 49.0	86.0 \pm 23.6	102.5 \pm 32.1
Total suspended solids (mg SS/l)	20.8 \pm 8.8	16.3 \pm 7.2	21.1 \pm 11.5	23.1 \pm 12.8	24.5 \pm 9.0

Table 4. Mean (\pm SD) values of environmental factors in each station of Pyeongtaek Reservoir at March, June, September and December of 2000.

Factors / Sampling stations	R1	R2	R3
Water temperature ($^{\circ}$ C)	16.3 \pm 10.2	16.3 \pm 10.3	14.9 \pm 9.7
Dissolved oxygen (mg O ₂ /l)	9.9 \pm 1.5	8.7 \pm 1.0	7.9 \pm 1.6
pH	8.3 \pm 0.5	8.0 \pm 0.5	7.9 \pm 0.5
Conductivity (μ S/cm)	560.0 \pm 263.3	595.3 \pm 302.3	550.3 \pm 270.0
Turbidity (NTU)	19.4 \pm 4.4	40.5 \pm 45.3	30.9 \pm 40.4
Alkalinity (mg CaCO ₃ /l)	75.3 \pm 27.9	68.0 \pm 25.7	63.8 \pm 23.9
Hardness (mg CaCO ₃ /l)	105.0 \pm 46.4	106.0 \pm 48.7	102.8 \pm 50.0
Total suspended solids (mg SS/l)	32.1 \pm 24.3	30.4 \pm 24.3	20.9 \pm 11.7

**Fig. 3.** Seasonal variations of biological oxygen demand (BOD₅) and chemical oxygen demand (COD_{Cr}) in Pyeongtaek Reservoir and its main streams at March, June, September and December 2000.

았다. DO는 5.1~12.3 mg O₂/l 범위로서 평균값은 8.1 mg O₂/l이었고, 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향이 있었다. pH의 평균값은 7.9~8.3 범위이었고, DO 분포와 유사하였다. 전기전도도는 239~870 μ S/cm 범위로서 평균값은 568.5 μ S/cm이었고, 상류와 하류보다 중류에서 조금 높았다.

저수지의 탁도는 7.9~108.0 NTU 범위이었고 시공간적으로 하계와 중하류에서 다소 높았다. 알칼리도는 30~102 mg CaCO₃/l 범위이었고, 하류지점에서 낮았다. 경

도의 평균값은 66~173 mg CaCO₃/l 범위이었고, 평균값은 104.6 mg CaCO₃/l로서 수역간에 차이가 없었다. TSS는 10.0~68.0 mg SS/l 범위이었고, 상류~중류가 하류보다 평균값이 10.4 mg SS/l정도 높았다.

2. 수중 유기물

유기물 오염의 지표인 BOD₅는 2.8~16.4 mg O₂/l 범위이었고, 평균값은 9.9 mg O₂/l이었다. COD_{Cr}은 7.1~

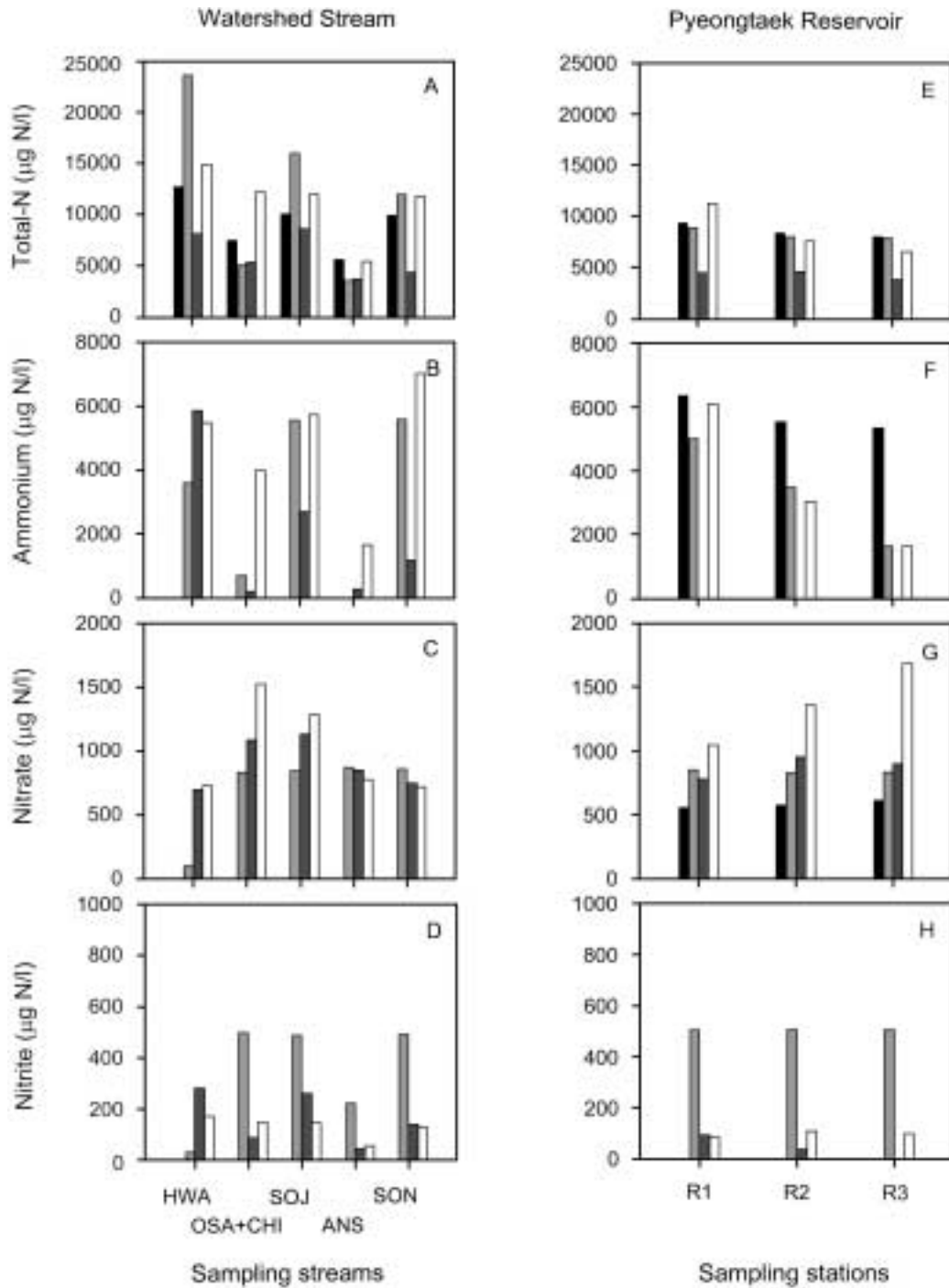


Fig. 4. Seasonal variations of nitrogen nutrients concentration in Pyeongtaek Reservoir and its main streams at March, June, September and December 2000.

18.2 mg O₂/l 범위이었고, 평균값은 12.8 mg O₂/l이었다. BOD₅는 3월, 6월 및 12월에 높았고, 9월에 낮은 경향이 있었으며, 특히 3월과 12월은 비슷하였다(Fig. 3A). COD_{Cr}은 BOD₅와 유사한 양상을 보였으나, 서정천과 안성천은

선형 강우가 풍부하였던 9월에 높은 농도를 보이는 차이가 관찰되었다(Fig. 3B). BOD₅와 COD_{Cr}에 의한 유기물 오염도는 서정천, 황구지천, 오산-진위천, 성환천 및 안성천의 순으로 낮았다.

저수지에서 BOD₅는 3.8~10.4 mg O₂/l 범위이었고, 평균값은 6.2 mg O₂/l이었다. COD_{Cr}은 6.0~14.7 mg O₂/l 범위이었고, 평균값은 10.3 mg O₂/l이었다. BOD₅는 상류와 하류에서 조금 높았고, COD_{Cr}은 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 양상을 보였다. 계절적으로 볼 때, BOD₅는 3월에 현저하게 높았고, 다른 시기에는 9월에 상류에서 조금 높았다(Fig. 3C). COD_{Cr}은 3~6월이 9~12월보다 높았고, 특히 9월에 상류에서 가장 높았다(Fig. 3D).

3. 수중 영양염

1) 질소

하천에서 수중 영양염 중 TN은 3580.0~23,629.0 µg N/l 범위로 그 차이가 매우 컸고 불규칙하였으며, 평균 농도는 6,624.6 µg N/l이었다. TN의 변동에서 황구지천, 서정천, 성환천은 6월에 높고, 오산-진위천, 안성천은 6~9월에 낮은 유사한 패턴이었다(Fig. 4A). NH₄는 34.1~7,036.6 µg N/l, NO₃는 100.3~1,524.7 µg N/l, NO₂는 30.7~494.7 µg N/l 범위이었고, 평균값은 각각 3,305.0 µg N/l, 868.7 µg N/l, 210.3 µg N/l이었다. TN에 대한 NH₄의 비율은 14.2~48.2%, NO₃가 3.4~18.1% 및 NO₂는 1.1~3.2% 범위로서 성분에 따라 하천별로 상이하였다. NH₄는 대체적으로 9월에 낮았으나 황구지천은 증가하였고, 성환천은 12월에 가장 높았다(Fig. 4B). NO₃는 황구지천, 오산-진위천, 서정천에서 12월로 갈수록 증가하고, 안성천, 성환천은 감소하는 경향이었으나 계절적 차이는 크지 않았다(Fig. 4C). NO₂는 황구지천을 제외한 하천에서 6월에 높은 분포를 보였다(Fig. 4D). 또한 NH₄와 NO₃는 서로 상반되는 양상을 보여 NH₄가 높은 하천에서 NO₃는 낮은 경향이였다.

저수지에서 TN은 3,880.0~11,223.0 µg N/l 범위이었고, 평균 농도는 7,401.3 µg N/l이었다. NH₄는 20.4~6,357.2 µg N/l, NO₃는 552.9~1,690.2 µg N/l, NO₂는 0.9~504.4 µg N/l 범위이었고, 평균농도는 각각 3,194.5 µg N/l, 914.8 µg N/l, 214.2 µg N/l이었다. 또한 TN에 대한 비율은 NH₄가 32.7~52.0%, NO₃가 9.6~15.2%, NO₂ 2.7~3.0% 범위로서 정점에 따라 상이한 결과를 보였다. TN은 상류에서 하류로 갈수록 감소하였고, 농도가 가장 낮은 9월을 제외하고는 시공간적으로 차이가 적었다(Fig. 4E). NH₄와 NO₃는 서로 상반되는 양상을 보여 NH₄는 상류에서, NO₃는 하류에서 높은 경향이였다. 또한, NH₄는 상류에서 계절적 차이가 적었으나, 중하류에서 컸고, 9월에는 전 정점에서 고갈 현상이 현저하였다(Fig. 4F). NO₃는 NH₄와 달리 3월에서 12월로 갈수록

증가하였고, NO₂는 6월에 특히 높았다(Fig. 4G, 4H).

2) 인과 규소

하천에서 TP는 52.0~2,353.9 µg P/l 범위이었고, 평균값은 681.1 µg P/l이었다. SRP는 9.7~1,388.5 µg P/l 범위이었고 평균값은 372.5 µg P/l이었다. SRP는 TP의 30.2~69.0% 범위를 차지하였고, TP가 높을수록 SRP의 농도도 높은 경향을 보였다. TP는 시공간적으로 불규칙하여 TN과 유사하였고, 황구지천에서 12월에 가장 높았다(Fig. 5A). SRP는 다른 하천에 비해 황구지천, 서정천 및 성환천에서 풍부하였고, 6월과 12월에 더욱 높았다(Fig. 5B). SRSi는 690.0~5,170.0 µg Si/l 범위이었고, 평균값은 3,069.3 µg Si/l이었다. Si 영양염은 대부분 하천에서 풍부하였다. 성환천이 가장 높았고 진위천이 낮았으며, 계절적 변동은 유사하였다(Fig. 5C).

저수지에서 TP는 TN의 분포와 유사하였고, 범위와 평균값은 각각 72.2~583.7 µg P/l, 307.4 µg P/l이었다. SRP는 0~417.3 µg P/l 범위이었고 평균값은 101.2 µg P/l이었다. SRP는 TP의 15.4~48.5% 범위를 차지하였고, 하천에서 관찰된 결과와 유사하여 각 정점에서 TP가 높을수록 SRP의 농도도 높은 경향을 보였다(Fig. 5D, E). 또한, 9월을 제외한 시기에는 상류가 중하류보다 높았고, 그 차이는 6월에 더욱 컸다. 평균농도로 볼 때, 상류가 중류와 하류에 비해 각각 4.3배, 6.9배 더 풍부하였다(Fig. 5E). SRSi는 1,510.0~3,270.0 µg Si/l 범위이었고, 평균값은 2,357.5 µg Si/l이었으며, 정점간에 차이는 크지 않았다(Fig. 5F).

4. Chlorophyll-*a* 생물량

유입하천에서 chl-*a* 농도는 1.6~52.6 µg/l 범위이었고, 평균값은 18.4 µg/l이었다. Chl-*a*의 최대값과 최저값은 9월과 12월에 오산-진위천에서 관찰되었다. 황구지천과 성환천은 계절에 따른 큰 변동이 없었고, 다른 하천은 차이가 컸다(Fig. 6A). 서정천과 성환천은 평균 10 µg chl-*a*/l를, 황구지천과 오산-진위천은 20 µg chl-*a*/l수준을 초과한 수질을 보였다.

반면에, 저수지에서 chl-*a* 농도는 0.3~130.4 µg/l 범위이었고, 평균값은 44.6 µg/l이었다. 계절에 관계없이 상류에서 항상 높은 농도를 유지하였고, 다른 시기에 비해 3월과 8월에 더욱 높았다(Fig. 6B). 또한, 선행 강수량이 빈약(갈수기)한 3월에는 평균 농도가 96.9 µg/l로서 저수지의 전정점에서 높았으나, 강수량이 많은(풍수기) 9월에는 상류가 중하류보다 11배 정도 커서 대비가 되었다.

하천과 저수지에서 chl-*a*가 높은 것은 수중 영양염이

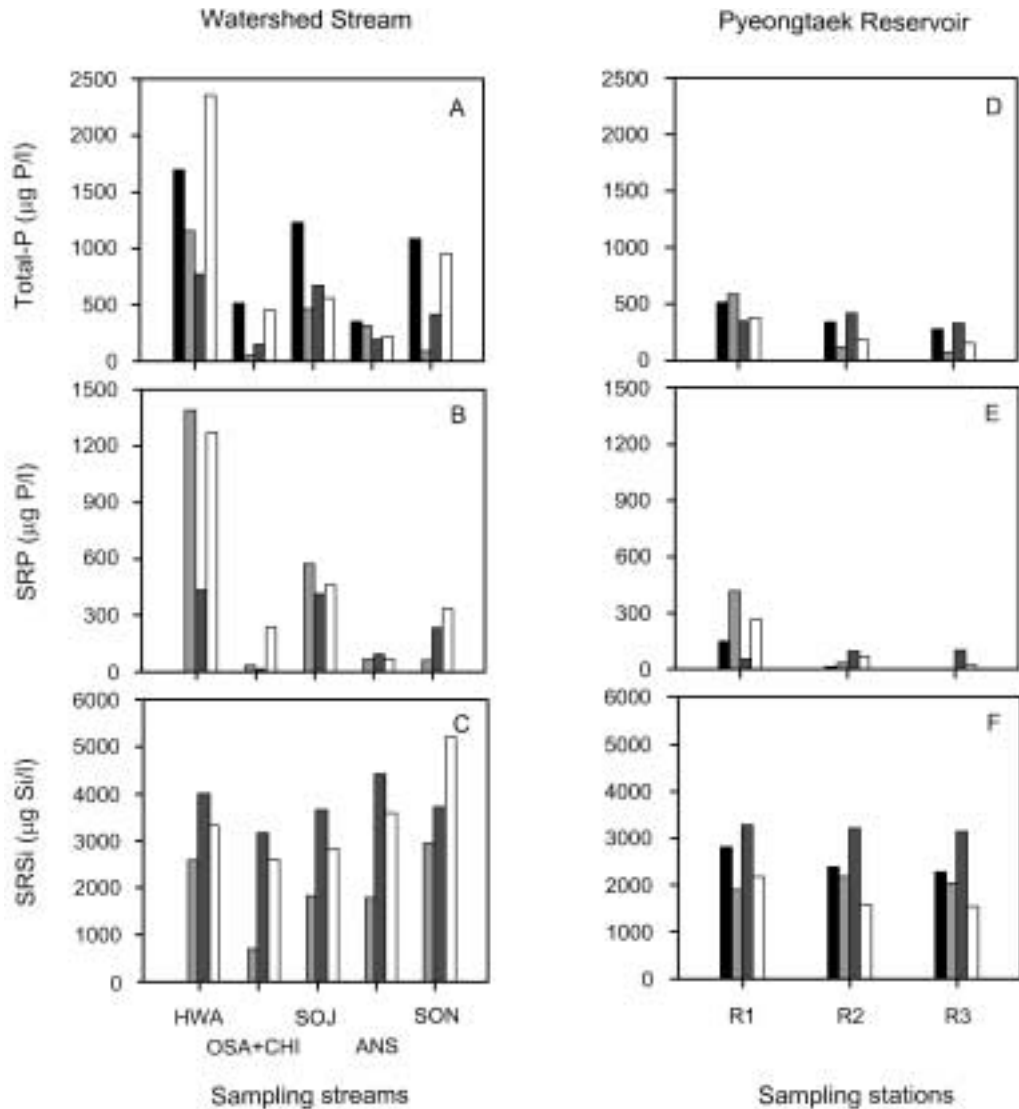


Fig. 5. Seasonal variations of phosphorus and silicon nutrients concentration in Pyeongtaek Reservoir and its main streams at March, June, September and December 2000.

풍부하게 공급되는 환경으로 볼 수 있고, 하천은 수중보에 의한 영향으로 일시적인 체류시간의 증가가, 저수지는 유입수와 저수지수가 혼합되는 수리학적 변화가 중요한 작용 요인으로 추정되었다(신 등, 2000; 신과 조, 2001). 3월에는 규조류와 은편모조류가, 9월에는 남조류가 대발생한 시기로서 chl-a의 증감은 식물플랑크톤의 조성과도 관련성이 관찰되었다.

5. 오염도 평가

하천과 저수지의 오염도 비교 평가는 영양염(TN, TP), 생물량(chl-a) 및 유기물(BOD₅, COD_{Cr})를 대상으로 하

였다. TN, TP 및 chl-a는 평균 농도가 각각 661 µg N/l, 8.0 µg P/l, 4.2 µg chl-a/l, 753 µg N/l, 26.7 µg P/l, 4.7 µg chl-a/l 및 1,875 µg N/l, 84.4 µg P/l, 14.3 µg chl-a/l일 때, 빈영양, 중영양, 부영양 상태로 구분하는 OECD (1982)의 기준을 적용하였다. 그 결과, 유역의 모든 하천에서 TN과 TP는 부영양 기준을 훨씬 초과하였고, TN은 안성천을, TP는 안성천과 오산-진위천을 제외하고는 그 범위를 넘어섰다. 특히, 황구지천은 과영양의 평균 수준을 초과하여 다른 하천에 비해 오염 부하가 더욱 큼을 알 수 있었고, 하류 저수지의 수질 부영양화에 그 기여도가 클 것으로 예상되었다. Chl-a는 안성천이 중영양 상부 수

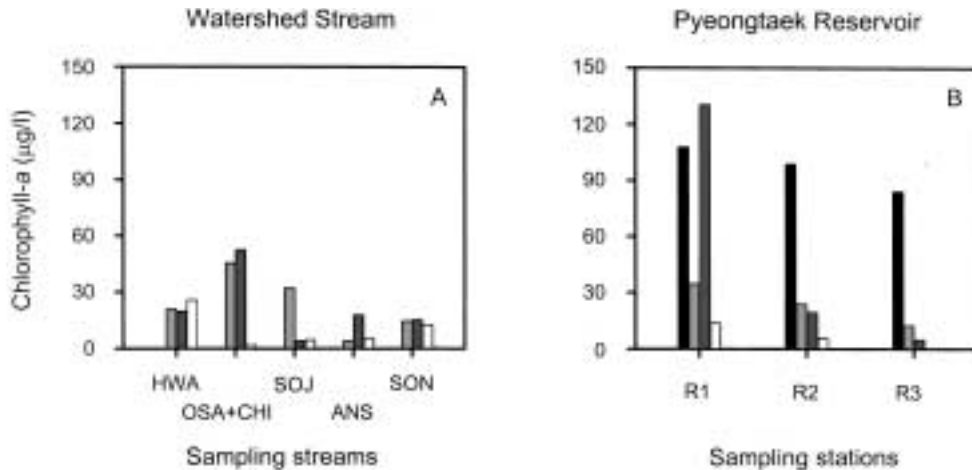


Fig. 6. Seasonal variations of chlorophyll-a concentration in Pyeongtaek Reservoir and its main streams at March, June, September and December 2000.

질에 해당하였고, 다른 하천들은 부영양 상태를 상회하였다.

또한, 저수지에서 TN과 TP는 유입 하천의 수질을 그대로 반영하여 전 수역이 부영양 상태이었고, 상류는 오산-진위천과 안성천보다도 더욱 높은 수준이었다. Chl-a는 하천의 평균값과 비교할 때, 상류, 중류 및 하류에서 각각 3.9배, 2.0배 및 1.4배 정도 높아 전형적인 오염된 유입하천의 영향을 받는 저수지 특성이 잘 드러났다.

반면에, BOD₅와 COD_{Cr}에 의한 유기물 항목은 국내 수질 기준을 적용하였다(수개단, 2000). 안성천을 제외한 4개 하천은 그 수준이 IV급수 이상이었다. 평택호가 현재 농업용수와 일부 정수 후 공업용수로 사용되고 있는 점을 감안할 때, 저수지는 III~IV급수로 분류되어 농·공용수로는 가능하였으나, 수중 영양염과 chl-a의 수준은 제대로 반영되지 못하였다.

평택호 유역의 수질 부영양화는 하수처리수와 미처리된 생활하수의 지역적 영향이 큰 것으로 관찰되었고, 향후 신·증설되는 처리시설 규모를 고려하면 하수의 고도처리가 적용되지 않는 한 수질 악화는 더욱 가중될 것으로 예상되어진다. 따라서, 이에 대한 대책이 우선되어야 할 것으로 본다.

적 요

평택호와 유역 주요 하천을 대상으로 수질 오염도를 평가하기 위해 2000년 3월부터 12월까지 계절별로 4회 조사하였다. 유입하천에서 TN 중 NH₄가 차지하는 비중

이 높았다. 저수지에서 TN과 NH₄는 동계에 높고 하계에 낮았으나, NO₃와 NO₂는 다른 시기에 비해 각각 12월과 6월에 1.6~2.4배, 5.3~11.4배 더 많았다. 정점간에 농도는 성분에 따라 차이가 있어 무기 N 중 NH₄는 상류에서 가장 풍부하였고 NO₃는 큰 차이가 없거나 하류로 갈수록 증가하는 양상이 관찰되었다. 하천에서 SRP는 TP에서 차지하는 비율이 25~69% 범위이었다. 저수지에서 P 성분은 N과는 달리 하계를 제외하고는 상류에서 하류로 갈수록 급감하는 경향이 현저하였다. SRSi는 평균값으로 볼 때, 강우가 있는 직후인 추계에 다소 증가하였다. 하천에서 chl-a의 평균 농도가 9~33 µg/l 범위이었고, 하류에서 비교적 농도가 높은 반면에, 저수지는 NH₄와 SRP가 높은 상류에서 가장 높았다. 특히, 3월에는 규조류와 은편모조류가, 9월에는 남조류가 대발생한 시기로서 최대값이 각각 108 µg/l와 130 µg/l를 기록하였다. N과 P 영양염의 농도로 볼 때, 하류에 위치한 평택호에 미칠 수 있는 오염 부하는 안성천<오산천+진위천<성환천<서정천 및 황구지천 순으로 컸다. 유역에 위치한 주요 하천의 수질악화는 하수처리장과 미처리된 생활하수의 배출수가 주요오염원으로 나타났다. 평택호의 수질오염은 유역의 상류하천으로부터 과도한 N·P 영양염이 유입되어 야기되는 전형적인 부영양화 현상으로 볼 수 있었고, 동·하계의 계절적 특성이 뚜렷하였다.

인 용 문 헌

권오길. 1976. 아산호를 다녀와서. 한국생물교육학회지 6: 10.

- 기상청. 2000. <http://www.kma.co.kr>, 기후 자료(수원, 천안) 및 민원 자료(평택, 안성).
- 수질개선기획단(수개단). 2000. 물관리백서. 국무총리 수질개선기획단, 갑우문화사, 서울, 한국. pp. 482-483.
- 신윤근, 김영길. 2002. 아산호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤 군집 구조. 한국육수학회지 **35**: 187-197.
- 신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태. 한국육수학회지 **35**: 181-186.
- 신재기, 조경제. 2001. 탐진강댐 상류하천에서 수환경과 담수조류. 한국환경영향평가학회지 **10**: 109-121.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 조규송. 1976. 담수화 과정에 있는 아산호 및 남양호의 육수학적 양상에 관하여. 춘천교육대학 과학교육연구지 **2**: 67-79.
- 최기철. 1976. 아산호산 어류에 관한 생태학적 연구 1. 안성천의 어류상에 관하여. 한국육수학회지 **9**: 31-44.
- 최영진, 조광동, 박영규, 박준규. 1982. 경기지방의 농업공해에 관한 조사연구, 제1보 황구지천 지역의 오수유입담에서 질소 수준과 토양 개량제가 수도의 생육 및 수량에 미치는 영향. 한국환경농학회지 **1**: 116-122.
- 홍사육, 조현영, 나규환. 1976. 아산호의 육수학적 연구. 한국육수학회지 **9**: 55-59.
- 황순진, 이상훈. 1998. 경기도 인공호수의 수질개선과 효과적인 관리방안-평택호를 중심으로. 경기개발연구원 연구보고서. 159p.
- APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.
- 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 Co-operation and Development, Paris, France. 154p.
- Rump, H.H. and H. Krist. 1988. Laboratory Manual for the Examination of Water, Wastewater, and Soil. VCH Verlagsgesellschaft Publication, New York, USA. 190p.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.

(Received 4 Jan. 2003, Manuscript accepted 28 Feb. 2003)