

한강 하류의 환경학적 연구 VI. 부영양 요인의 통계적 해석

정 승 원 · 이 진 환* · 허 회 권¹

(상명대학교 자연과학대학 자연과학부, ¹한국해양기술 부설 해양연구소)

Environmental Studies in the Lower Part of the Han River VI. The Statistical Analysis of Eutrophication Factors. Jung, Seung Won, Jin Hwan Lee* and Hoi-Kwon Hue¹ (Division of Natural Science, College of Natural Sciences, Sangmyung University, Seoul 110-743, Korea, ¹Korea Ocean Engineering & Consultants Co., Ltd., Ocean Engineering Research Institute, Seoul 135-911, Korea)

In order to reveal the relationship between the concentration of chlorophyll-*a* and the environmental factors affecting eutrophication, the present study was biweekly conducted at 6 stations in the lower part of the Han river during the period from Feb. 24, 2001 to Feb. 9, 2002. Water temperature was changed from 0.5°C to 26.4°C, pH was 5.77~8.99, DO 3.15~14.36 mg L⁻¹, BOD 0.90~7.45 mg L⁻¹, and COD 1.16~9.13 mg L⁻¹. TN and TP were ranged from 1.68~20.96 mg L⁻¹, and 0.02~1.17 mg L⁻¹, respectively. NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, and PO₄³⁻-P were ranged from 0.56~3.60 mg L⁻¹, 0.03~7.29 mg L⁻¹, and 0.002~0.754 mg L⁻¹, respectively. Chlorophyll-*a* was extensively changed from 2.29 µg L⁻¹ to 136.28 µg L⁻¹ by month and stations. Results of nutrients indicated the eutrophic level in this area and water quality was the gradual worsening in the lower stations than those of upper stations during the period studied. The Pearson correlation analysis between the concentration of chlorophyll-*a* and the environmental factors indicated that BOD, COD, pH, NH₄⁺-N, TP, TN, conductivity and PO₄³⁻-P were positive correlation, but NO₃⁻-N was negative. The environmental factors investigated using the principal component method could be triparted. The first factor group included conductivity, BOD, COD, TN, TP, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P and SS, the second WT and DO, and the third pH and NO₃⁻-N. Using the stepwise regression analysis, chlorophyll-*a* was under the influence of conductivity, PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N.

$$\text{Chlorophyll-}a = 0.3661 \times (\text{Conductivity}) - 0.3592 \times (\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) - 0.3449 \times (\text{NO}_3^{-}\text{-N}) + 0.4362 \times (\text{NH}_4^{+}\text{-N})$$

Key words : chlorophyll-*a*, environmental factors, eutrophication, Han River, statistical analysis

서 론

한강은 우리나라 4대강의 하나로 수도권의 식수원, 생활용수 및 산업용수의 공급과 휴식공간으로서 그 중요성

이 어느 수역보다 크다. 30년전부터 한강유역 주변의 급격한 도시화와 산업화는 물의 수요와 하수의 증가가 이어져 강 하류로 갈수록 수질이 악화되어 오염이 가중되고 있는 실정이다. 최근에는 한강의 수질 문제로 식수원을 비롯하여 심미적으로 사회문제화 되고 있다. 수질 오

* Corresponding author: Tel: 02) 2287-5152, Fax: 02) 394-9585, E-mail: jhlee@smu.ac.kr

염분제중 가장 보편적으로 나타나는 요소가 BOD나 COD로 측정되는 유기물이 있다 (Welch and Lindell, 1992). 수계내 유기물의 공급은 부영양화 현상을 초래하고, 이로 인해 식물플랑크톤의 대발생을 야기시키고 있다 (Horne and Goldman, 1994; Jeffries and Mills, 1995). 한강 하류역에서 식물플랑크톤 분야는 순수 분류학적 연구로부터 기초생산력, 현존량 및 종조성, 생물 지표종, 오염도의 판별 등에 이르기까지 많은 연구가 수행되어져 왔다 (정 등, 1965; 정, 1969; 정과 심, 1969; 김, 1972; 이, 1977; 심과 최, 1978; 서울시립대학교 수도권개발연구소, 1990; 유와 임, 1990; 한 등, 1993; 서울시정개발연구원, 1994; Lee and Yoon, 1994; 김, 1996; 이와 장, 1997; 김 등, 1998; 김 등, 1998).

본 연구의 목적은 한강하류의 수서 생태계 특성을 파악하기 위하여 환경요인 변동에 따른 chlorophyll-a의 농도 변화의 상관성을 통계학적 방법으로 해석하는 것이다. 또한 조사수역의 부영양화 현상에 미치는 환경요인을 산정하고, 각 요인의 기여 정도를 파악하는 것이다.

재료 및 방법

본 연구에서는 한강하류의 6개 정점을 선정하여, 2001년 2월부터 2002년 2월까지 격주 간격으로 26회 시료를 채수하였다. 정점 1은 팔당대교 아래, 정점 2는 암사동 시민공원 주변수역에, 정점 3은 영동대교 아래, 정점 4는 반포대교 아래, 정점 5는 성산대교 아래, 그리고 정점 6은 행주대교 아래에 각각 설정하였다 (Fig. 1).

환경요인 중 수온, pH, 전기전도도, 용존산소는 ST-meter (YSI, model 85)와 pH meter (YSI, model 60)로 측정을 하였고, BOD와 COD는 APHA (1995)에 따라 분석하였다. 영양염류는 채수 후 즉시 4°C로 보관하여 실험실로 운반하여 여과지 (Millipore, HA type)로 여과한 다음 자동 영양염류 분석기 (Alliance, Continuous Flow Manager)로 분석하였다. 강수량과 팔당댐의 방류량 자료는 한국수자원공사(www.kowaco.or.kr)에서 획득하였다.

식물플랑크톤의 chlorophyll-a는 표층에서 시수 1L를 폴리에틸렌 병으로 채수 후 membrane filter (Millipore, HA type)로 여과하여 UNESCO/SCOR (1966)에 따라 농도를 측정하였다.

Chlorophyll-a와 환경요인과의 상관관계를 파악하기 위하여 Pearson 상관계수를 계산하였고, 부영양화에 기여하는 환경요인을 분석하기 위하여 요인분석 (Factor analysis)을 실시하였다. 요인추출 방법으로는 주성분 분

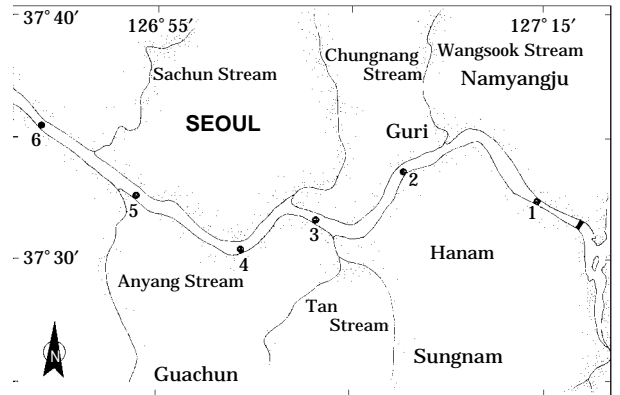


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the lower part of the Han River.

석 (Principal Component Method)을 사용하였다. 이때 직각회전 방법 중 Varimax 회전 방법으로 요인분석을 하였으며, 요인 결정방법은 고유치 (Eigen value)를 이용하였고, 신뢰성을 파악하기 위하여 Cronbach's α 계수를 구하였다. 각 조사정점의 chlorophyll-a 농도의 변화양상을 파악하기 위하여 변량분석 (ANOVA)을 하였으며, 사후 분석으로는 Duncan's test를 실시하였다. 또한 조사정점에 대한 환경요인의 특성은 단계적 회귀분석 (Stepwise Regression Analysis)을 실시하였으며, 각 변수의 다른 단위를 맞추기 위해 각 변수들을 표준화변수 (β)로 환산하였다. 이때 자료의 다중공선성 (Multicollinearity)의 문제를 피하기 위하여 독립변수 사이의 상관관계가 큰 요인들을 제외시켰다. 통계 처리는 SAS (Statistical Analysis System program, v 8.1)를 사용하였다.

결과 및 고찰

조사기간 중 한강 하류의 강수량은 최저 2.4 mm (2002년 2월)에서 최고 698 mm (2001년 7월)로, 월 평균 107 mm를 보였다 (Fig. 2). 특히 갈수기인 2001년 2~5월, 9월~2002년 2월까지의 평균 27 mm를 보인 반면, 풍수기인 6~8월까지 369 mm를 보여 하계에 집중 강우를 보였다. 이에 한강하류의 수량에 직접적인 영향을 미치는 팔당댐의 방류량은 강수량의 변화와 같이 최저 124 m³ s⁻¹ (2001년 12월)에서 최고 1314 m³ s⁻¹ (2001년 7월)로, 평균 297 mm를 보였으며, 약 11배의 방류량의 차이를 나타내었다. 특히 풍수기인 6~8월 사이에는 평균 799 m³ s⁻¹를 보여 강수량에 따라 팔당댐의 방류량은 한강하류유역의 수량에 영향을 미쳤다.

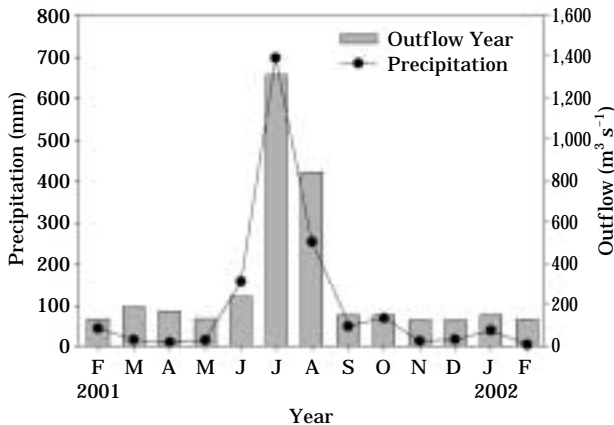


Fig. 2. Monthly variations of precipitation in the lower part of the Han River and outflow at Paldang dam.

조사기간 중 물리화학적 환경요인의 변화는 Fig. 3과 같았다. 수온은 최저 0.5°C (2002년 2월 9일, 정점 2)에서 최고 26.4°C (2001년 8월 25일, 정점 6)까지 큰 폭으로 변화하였다. 계절별 변화는 겨울에 하강하고 8월에 평균 25.7°C 로 최대치를 보였다가 점차 감소하는 양상을 나타내어 전형적인 온대성 기후와 일하였다. pH는 최저 5.77 (2002년 2월 9일, 정점 2)에서 최고 8.99 (2001년 4월 7일, 정점 2)를 나타내었고, 정점별 변화는 하류로 내려갈수록 높은 양상을 보였다. 이는 chlorophyll-a의 증감과 유사한 상관성을 보여 (Table 1), 식물플랑크톤 현존량이 pH의 증감에 영향을 미치고 있다고 판단된다 (정 등, 2003). 용존산소량은 최저 3.15 mg L^{-1} (2001년 9월 7일, 정점 5)에서 최고 14.36 mg L^{-1} (2001년 2월 24일, 정점 1)로 큰 폭의 변화를 보였다. 동계에는 높은 용존산소량을 보이다가 하계에는 낮아지는 경향을 보였고, 정점별로는 하류로 내려갈수록 낮은 용존산소량을 보였다. 부유물질 농도는 최저 1.67 mg L^{-1} (2002년 1월 12일, 정점 1)에서 최고 309.00 mg L^{-1} (2001년 10월 20일, 정점 6)로 185배의 큰 폭의 변화를 보였으나, 평균은 14.62 mg L^{-1} 로 비교적 낮은 값이었다. 장마기간인 하계에는 평균 50.39 mg L^{-1} 로 높은 농도를 보여 풍수기에 외부 유입 유량에 따른 부유 물질 증가로 판단된다. 일반적으로 부유 물질 양은 BOD나 COD에 영향을 미치나 본 조사 수역에서 이들의 양에 대한 변화가 크지 않아, 부유 물질 조성은 용존 유기물질이 아닌 사토 등의 미세 무기물질이 주된 조성으로 판단된다. 전기전도도는 최저 $82\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ (2002년 1월 26일, 정점 1)에서 최고 $466\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ (2001년 6월 4일, 정점 6)를 나타내었다. 계절적으로는 하계에 높은 값을 보이고 동계에 낮아지는 경향을 보였

으며, 6월과 10월에 평균 $268\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ 과 $240\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 높은 양상을 나타내었다. 정점별 변화는 정점 1과 정점 6의 평균 차이가 약 3배로 하류로 내려갈수록 높았다. 한강 하류에서 전기전도도의 변화는 1980~1990년보다 증가하였으며 (한 등, 1993), 특히 정점 4, 5, 6에서 높은 전기전도도는 한강 본류로 유입되는 탄천, 중랑천, 안양천 등의 유입 하천의 오염 요인들에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다. BOD는 최저 0.90 mg L^{-1} (2002년 1월 12일, 정점 1)에서 최고 7.45 mg L^{-1} (2001년 10월 20일, 정점 3)로 평균 2.82 mg L^{-1} 를 보였다. 계절별 농도는 춘계와 하계에 높았다가 동계로 갈수록 낮아졌고, 정점별로는 하류로 갈수록 높아졌다. COD는 최저 1.16 mg L^{-1} (2001년 3월 10일, 정점 1, 2)에서 최고 9.13 mg L^{-1} (2001년 3월 10일, 정점 6)로 평균 4.50 mg L^{-1} 를 보였다. 계절별·정점별 변화는 BOD의 변화와 같이 춘계와 하계에는 높은 양상을 보였다가 동계로 갈수록 낮아졌으며, 하류로 내려갈수록 농도가 높아지는 경향을 띠었다. TN은 최저 1.68 mg L^{-1} (2001년 8월 11일, 정점 1)에서 최고 20.96 mg L^{-1} (2001년 12월 29일, 정점 6)로 평균 6.26 mg L^{-1} 를 보였으며 하계에 낮았다. TP는 최저 0.02 mg L^{-1} (2001년 8월 11일, 정점 1)에서 최고 1.17 mg L^{-1} (2001년 12월 29일, 정점 6)로 58배의 큰 폭의 차이를 보였고, 계절별·정점별 변화는 TN의 농도와 유사한 변화양상을 나타내었다. Forsberg and Ryding (1980)에 따르면 수역 내 TN이 1.5 mg L^{-1} , TP가 0.1 mg L^{-1} 이상이면 부영양으로 조류성장 제한요인으로 작용하지 못한다고 하였고, Yang and Dickman (1993)은 TP가 0.08 mg L^{-1} 이상이면 부영양이라고 하였다. 본 조사수역에서 TN과 TP의 평균은 각각 6.26 mg L^{-1} , 0.24 mg L^{-1} 로 부영양 상태였다. 특히 조사기간 동안 평균 TN/TP는 22.46으로 총질소의 농도가 매우 높았다. 또한 본 조사수역내의 TN, TP가 부영양 상태에서 하류로 내려갈수록 점차 TN/TP 비는 낮아지는데, 이는 탄천과 안양천 등의 한강 유입하천에 의해 TN보다 TP의 유입이 증가하고 있음을 나타내고 있었다. NO_3^- -N은 최저 0.56 mg L^{-1} (2001년 2월 24일, 정점 6)에서 최고 3.60 mg L^{-1} (2001년 11월 20일, 정점 6)로 평균 1.84 mg L^{-1} 를 보였다. 계절별 변화는 춘계에 높다가 동계에 감소하였고, 정점별로는 하류로 갈수록 높은 값을 보였다. NH_4^+ -N은 최저 0.03 mg L^{-1} (2001년 8월 11일, 정점 1)에서 최고 7.29 mg L^{-1} (2002년 2월 9일, 정점 6)로 평균 2.80 mg L^{-1} 를 보였다. 계절별 변화는 동계에 높다가 하계에 낮아졌다. PO_4^{3-} -P는 최저 0.002 mg L^{-1} (2001년 12월 29일, 정점 1)에서 최고 0.754 mg L^{-1} (2001년 12월 29일, 정점 6)로 평균 0.142 mg L^{-1} 를 보였다. 계

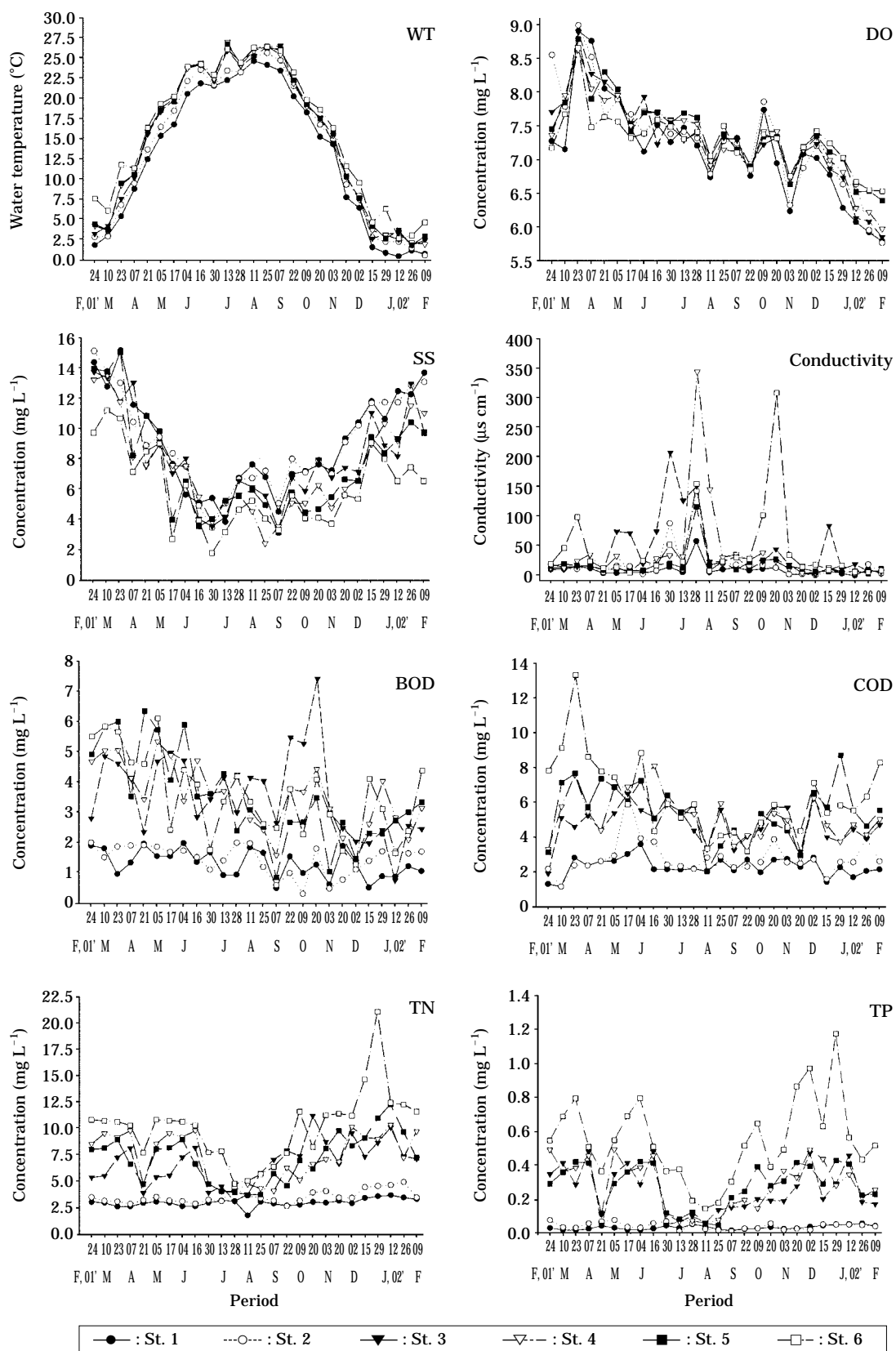


Fig. 3. Biweekly variations of physicochemical environmental factors in the lower part of the Han River.

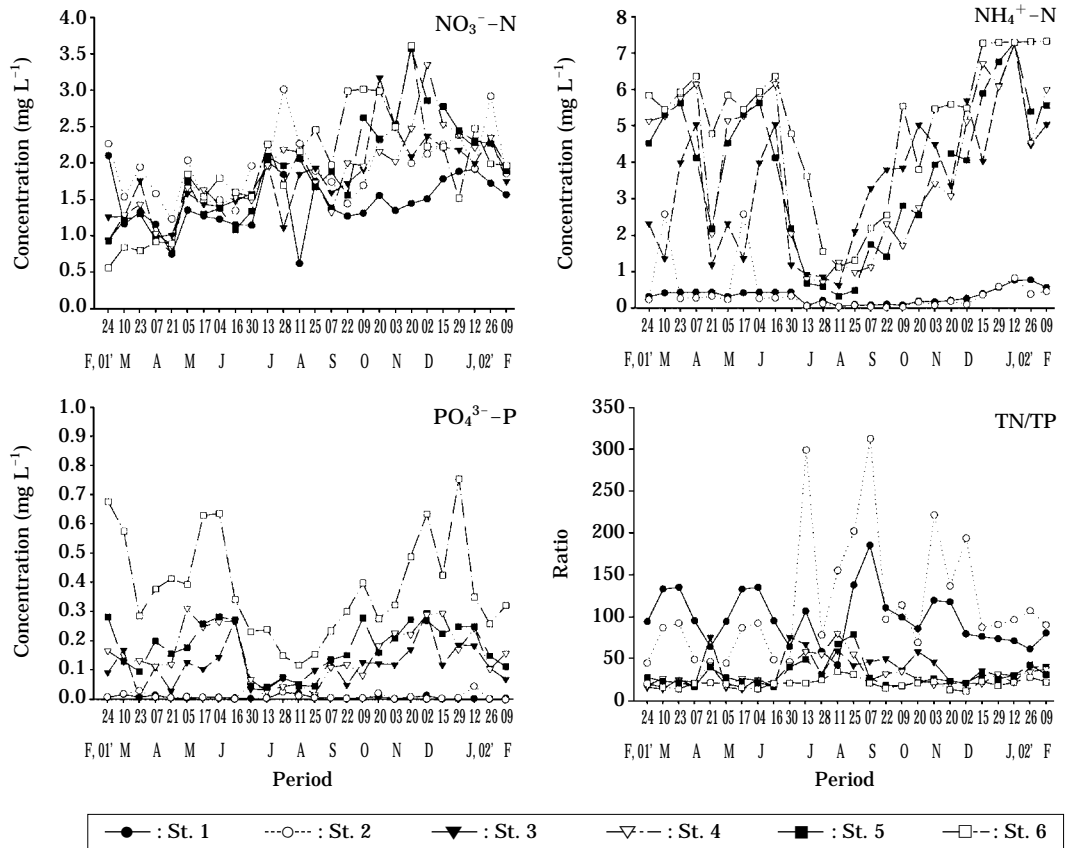


Fig. 3. To be continued.

Table 1. Pearson correlation matrix between the environmental factors and the concentration of chlorophyll-*a* in the lower part of the Han River.

	Chl- <i>a</i>	pH	BOD	SS	WT	DO	COD	CON.	TN	TP	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
Chl- <i>a</i>												
pH	0.4343***											
BOD	0.6134***	0.3333***										
SS	-0.0511	0.1008	0.1865*									
WT	-0.0360	0.2423**	0.1146	0.3007**								
DO	0.2643**	0.0719	0.0502	-0.2800**	-0.7878***							
COD	0.5120***	0.2526**	0.6706***	0.1705*	0.0571	-0.1429						
Con.	0.2551**	0.5575	0.4671***	0.0972	0.3398***	-0.5089***	0.5966***					
TN	0.3133***	-0.0641	0.4861***	-0.0336	-0.2566**	-0.0368	0.6551***	0.6684***				
TP	0.3604***	0.0925	0.4492***	0.0059	-0.1544	-0.0838	0.6683***	0.7287***	0.7287***			
NO ₃ ⁻ -N	-0.2712**	-0.3640***	-0.1844*	0.1347	-0.0974	-0.1795*	-0.0809	0.1354	0.1354	0.1074		
NH ₄ ⁺ -N	0.3638***	-0.0420	0.5111***	-0.0730	-0.3081***	0.0289	0.6888***	0.5956***	0.5956***	0.8221***	0.1270	
PO ₄ ³⁻ -P	0.2412**	0.0077	0.4033***	0.0048	-0.0734	-0.1880*	0.6291***	0.8204***	0.8294	0.9188***	0.1102	0.7603***

SS: Suspended Solids, WT: Water Temperature, CON.: Conductivity
 ***: p<0.001, **: p<0.01, *: p<0.05

절별 변화는 NH₄⁺-N의 변화와 같이 하계에 낮아지는 경향을 띄었고, 정점별 변화는 정점 1과 2의 양상과 달리 정점 3에서 정점 6으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다.

Chlorophyll-*a*는 최저 2.29 μg L⁻¹ (2001년 7월 28일, 정점 1)에서 136.28 μg L⁻¹ (2001년 3월 23일, 정점 5)까지 평균 29.91 μg L⁻¹로 매우 높았다 (Fig. 4). 계절적으로

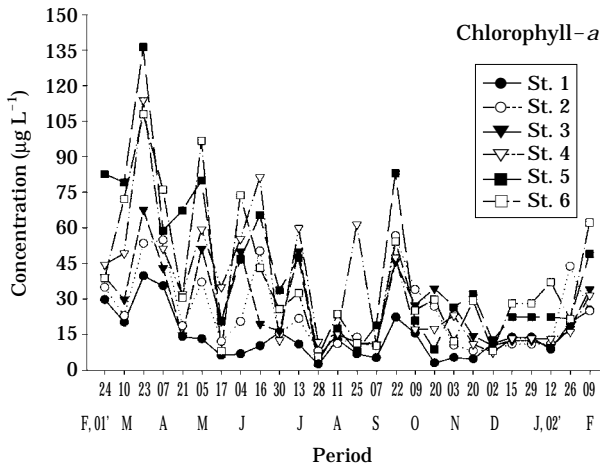


Fig. 4. Biweekly variations of the concentration of chlorophyll-*a* in the lower part of the Han River.

춘계인 3월에 평균 $65.99 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타내었고 3~6월에 비교적 높은 농도를 보이다가, 하계에 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였다. 정점별 변화는 정점 1에서 점차 증가하여 하류인 정점 6에서는 최고치를 보였다. Chlorophyll-*a*는 호소의 영양 상태를 평가하는데 매우 유용하게 사용되며, 2001년 2월부터 2002년 2월까지의 본 수역에서 평균 $29.91 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 부영양 수준을 보이고 있었다 (USEPA, 1976; Forsberg and Ryding, 1980; Yang and Dickman, 1993). 특히 정점 1과 정점 2의 농도는 5월부터 8월까지의 중영양 수준이었으나, 나머지 정점은 부영양 수준으로 탄천과 안양천 등의 유입에 따른 영양염류의 증가가 원인으로 판단된다. 식물플랑크톤은 일반적으로 저수지 등의 정체수역에서 수온이 상승할수록 증가하는 경향을 보이거나 (Heinle, 1969; 이, 1999), 한강 하류에서 하계의 상대적으로 낮은 식물플랑크톤 현존량과 (정 등, 2003), chlorophyll-*a*의 농도는 장마에 따른 집중강우와 짧은 체류시간에 의해 식물플랑크톤의 현존량이 희석된 것으로 파악되며, 김 등 (1988)과 한 등 (1993)도 유사한 양상을 보이고 있었다. 본 조사수역에서 chlorophyll-*a*의 변동요인 유속이 크게 기여하며, 이러한 현상은 낙동강과 한강등의 큰 강에서 보여지는 일반적인 현상이다 (김 등, 1996; 김 등, 1998; 김 등, 2002).

환경요인과 식물플랑크톤 chlorophyll-*a*의 관계를 규명하기 위하여 상관관계를 분석한 결과, chlorophyll-*a* 농도는 수온과 유의성이 없었다. 일반적으로 정체수역에서 수온이 상승할 때 식물플랑크톤 현존량이 증가되어 일차생산이 활발해지나 (Heinle, 1969; 이, 1999), 한강 하류는 동계의 저수온과 영양염류의 조건에 따른 *Steph-*

anodiscus hantzschii f. *tenuis*, *Aulacoseria granulata*의 대발생을 보여 (서울특별시 수도권개발연구소, 1990; 이와장, 1997; 정 등, 2003) 수온과 상관성이 없는 것으로 판단된다. 동·춘계에서 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*가 낮은 수온에서 고농도의 영양염류에 따라 대발생한 것으로 판단되며 (정 등, 2003), *Stephanodiscus hantzschii*의 최대 성장온도가 13°C 이고, 수온이 3°C 정도의 온도에서도 다른 적정 환경요인에 따라 충분한 성장을 보인다고 하였다 (신, 1998). Chlorophyll-*a*와 TN, TP의 상관계수는 각각 0.31과 0.36이었고, $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 상관계수는 각각 0.36, -0.21, 0.24로 낮은 상관성을 보였다.

본 조사수역에서의 부영양화에 미치는 환경요인을 파악하기 위하여 요인분석을 하였다. 수질 환경요인 중 고유치 (Eigen value) 1.0 이상을 기준으로 제1요인의 고유치는 5.1699, 기여율은 43.08%이며, 제2요인과 제3요인의 고유치와 기여율은 각각 2.2610, 1.7139와 18.84%, 14.28%로, 제1요인부터 제3요인까지 전체 분산의 76.20%까지 설명해 주고 있었다 (Table 2). 또한 요인과 변량과의 상관계수에 다른 요인 구조를 명확하게 하기 위하여, 직각 회전방식 중에서 Varimax 방식을 적용하였다. 이는 특정 요인에 높게 하고 나머지 요인들을 낮게 하여 Table 3과 같은 결과를 얻었다. 회전된 요인들을 살펴보면, 제1요인은 전기전도도, COD, BOD, 부유물질, TN, TP, $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 등의 “영양염류인자”와 상관성이 높은 것으로 판단된다. 이는 낮은 체류시간을 갖는 팔당댐의 방류량에 따른 영양염류의 유입보다 한강하류의 유입 하천 (왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천, 불광천 등)에서의 유입이 더 크

Table 2. Eigen values and cumulative percentage among environmental factors in the lower part of the Han River.

Factor	Initial eigen values		
	Total	Percentage of variance	Cumulative percentage
1	5.1699	43.08	43.08
2	2.2610	18.84	61.92
3	1.7139	14.28	76.21
4	0.9705	08.09	84.29
5	0.5930	04.94	89.24
6	0.5006	04.17	93.41
7	0.3145	02.62	96.03
8	0.2073	01.73	97.76
9	0.1088	00.91	98.66
10	0.0724	00.60	99.27
11	0.0496	00.41	99.68
12	0.0383	00.32	100.0

Table 3. Rotated factor matrix among environmental factors affecting concentration of chlorophyll-*a* in the lower part of the Han River.

Variables	Component		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3
WT	-0.0337	0.9520	-0.0004
DO	-0.1859	-0.8222	0.4172
pH	0.0928	0.2808	0.7492
Conductivity	0.8322	0.3613	-0.1661
SS	0.7622	0.5119	-0.0176
COD	0.8125	0.1184	0.2746
BOD	0.6323	0.1318	0.5072
TN	0.9270	-0.2491	-0.1398
NH ₄ ⁺ -N	0.8902	-0.3018	-0.0317
NO ₃ ⁻ -N	0.1149	-0.0634	-0.7614
TP	0.9301	-0.1299	-0.0364
PO ₄ ³⁻ -P	0.9150	-0.0418	-0.1279
Cronbach's α	0.9162	0.7543	0.6574

다고 사료된다. 제2요인은 수온과 용존산소로 “기후변동의 요인”으로 판단된다. 제2요인은 수온의 계절적 변화와 그에 따른 용존산소 포화농도의 변동을 설명하는 요인으로서 정점간의 변동보다 계절적 변동이 우세한 것으로 보여진다. 제3요인은 pH와의 정의 상관관을 보이고 있었다. pH는 기초생산자의 생산량 변동에 따라 변화하여 식물플랑크톤의 동화율에 따른 대사이인으로 판단된다. 세 가지 요인 중에서 제1요인이 43.08%로 한강 하류수역의 수질 특성은 영양염류인자에 따른 오염부하가 크게 작용한다고 판단된다. 이는 수역마다 다르게 평가되고 있는데, 장(1999)에 의하면 낙동강에서 본 조사와 같이 영양염류 인자에 의해 좌우되는 것으로 파악이 되었고, 같은 낙동강에서 BOD나 COD의 유기물 인자가 크게 작용한다고 하였다(김 등, 2002).

한강 하류에서 chlorophyll-*a*의 변화에 대한 조사 정점간의 차이를 보기 위하여 변량분석(ANOVA)를 하였다(Table 4). 변량 분석 결과 정점 1, 2와 정점 3, 4, 정점 5, 6이 각각 동일수역으로 구분되었다. 이에 따른 chlorophyll-*a* 농도의 변동에 영향을 미치는 영향인자를 파악하기 위하여 단계적 회귀분석을 하였다(Table 5). 한강하류에서 chlorophyll-*a*의 영향을 미치는 환경요인은 전기전도도, PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N이며, 결정계수(R²)는 0.32고, F 통계량은 10.65 (p<0.001)로 32%로 설명할 수 있었다. 또한 각 정점간의 집단으로 chlorophyll-*a* 농도에 대한 추정 회귀모델은 아래와 같다.

$$\text{Chlorophyll-}a \text{ 농도} = 0.3661 \times (\text{conductivity}) - 0.3592 \times (\text{PO}_4^{3-} - \text{P}) - 0.3449 \times (\text{NO}_3^- - \text{N}) + 0.4362 \times (\text{NH}_4^+ - \text{N})$$

Table 4. ANOVA analysis of the sampling stations affecting the concentration of chlorophyll-*a* in the lower part of the Han River.

Variables	The lower part of the Han River							
	F	p	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6
Chlorophyll- <i>a</i> (µg L ⁻¹)	5.19	0.0001	14.29 ^a	24.19 ^{ab}	26.49 ^{abc}	34.70 ^{bcd}	41.72 ^d	38.08 ^{cd}

Results of the Duncan's multiple comparison test: Different character means that the mean value is significantly different.

Table 5. Stepwise regression coefficients among the important environmental factors affecting the concentration of chlorophyll-*a* in the lower part of the Han River.

Variables		b	β	Remark
Intercept		32.4411	0	
Conductivity		0.1148	0.3661*	n = 156
PO ₄ ³⁻ -P		-56.0172	0.3592*	F value = 10.65
NO ₃ ⁻ -N		-14.2432	-0.3449***	(p<0.001)
NH ₄ ⁺ -N		4.3742	0.4361*	R ² = 0.3224
B Group	Intercept	28.9732	0	n = 52
	NO ₃ ⁻ -N	-15.0180	-0.3567*	F value = 4.51
	NH ₄ ⁺ -N	6.8790	0.6141**	(p<0.001)
				R ² = 0.2772
C Group	Intercept	61.0408	0	n = 52
	PO ₄ ³⁻ -P	-111.2961	-0.6449*	F value = 5.27
	NO ₃ ⁻ -N	-20.9893	-0.5093***	(p<0.001)
				R ² = 0.3096

B group: involved in St. 3 and 4, C group: involved in St. 5 and 6. ***: p<0.001, **: p<0.01, *: p<0.05

또한 각 집단군에 따른 회귀분석은 정점 1과 2 group은 중요 영향인자 중 유의성을 나타내는 요인이 없었다. 정점 3과 4 group은 NO₃⁻-N, NH₄⁺-N가 영향인자였고, 정점 5와 6 group은 PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N가 영향인자로 나타났다(Table 5). 이와같이 한강 하류에서 회귀분석에 의한 chlorophyll-*a*는 전반적으로 전기전도도와 영양염류에 의해 변화되고 있었다. 또한 각 정점 group별로 하류로 내려갈수록 인의 요인이 영향인자로 나타났다. 담수에서 회귀분석에 대한 추정모델의 보고는 대청호(국립환경연구원, 1997), 낙동강 하류(김 등, 2002) 등이 있으나, 본 조사수역에서의 추정 모델은 아직까지 보고된 바가 없다. 한강 하류는 하계의 풍수기에 몬순기후에 따른 집중강우량으로 체류시간이 짧아진다. 이때의 식물플랑크톤의 생산력은 영양염류보다는 체류시간에 의해 더 크게 영향을 받는다(한 등, 1995). 따라서 하계의 chlorophyll-*a*의 변화는 영양염류 등의 환경요인에 의해 조절이 되지 않고, 강수량 등의 외부 환경학적 요인 많이 작용하고 있

어, 수질 관리를 위해 생태학적 연구가 먼저 선행되어야 한다. 또한 한강 하류로 내려갈수록 유기물의 증가와 함께 인의 농도가 증가되는데, 이는 하천의 유입수와 하수처리장에서 방류수에 의해 유기물 유입으로 인근 하천이나 하수 종말 처리장에 대한 엄격한 수질관리가 필요하다. 따라서 본 연구는 부영양에 대한 직접적인 식물플랑크톤 chlorophyll-a에 영향 인자들을 분석함으로써 중요 요인을 판별하고, 부영양화 제어기법에 활용할 수 있을 것이라 사료된다.

적 요

본 연구는 한강하류의 부영양화에 미치는 환경요인과 chlorophyll-a의 상관성을 파악하기 위하여 2001년 2월 24일부터 2002년 2월 9일까지 격주로 시료를 분석하였다. 수온은 0.5°C에서 26.4°C로 전형적인 온대성 기후를 나타내었고, pH는 약산성에서 약알칼리성을 보였다. TN과 TP의 농도 범위는 각각 1.68~20.96 mg L⁻¹, 0.02~1.17 mg L⁻¹이었고, TN/TP 비는 22.46로 상대적으로 높은 질소원을 보였다. Chlorophyll-a는 2.3~136.3 µg L⁻¹로 계절별 변이가 컸으며, 이를 물리·화학적 환경요인과 상관분석을 한 결과, 정의 상관계수를 나타내는 요인은 BOD, COD, pH, NH₄⁺-N, TP, TN, 전기전도도, PO₄³⁻-P 등의 순서였고, 부의 상관관계는 NO₃⁻-N으로 나타났다. 한편 환경요인의 요인분석 결과, 제1요인은 “영양염류 요인”으로 전기전도도, BOD, COD, 부유물질, TN, TP, NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P로 구분되었고, 제2요인은 “기후변동의 요인”으로 수온과 DO로 나타났으며, 제3요인은 “식물플랑크톤의 물질대사요인”으로 pH와 NO₃⁻-N으로 나타났다. 요인분석의 3가지 요인 중에서 제1요인이 43.08%로 제2요인과 제3요인이 각각 18.84%와 14.28%로 한강하류수역의 수질 특성은 영양염류인자에 따른 영향이 크다고 판단된다. Chlorophyll-a의 농도와 환경요인의 상관관계를 바탕으로 단계적 회귀분석 후 표준화한 결과, 결정계수(R²)가 0.32로 전기전도도, PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N이 chlorophyll-a의 변화에 크게 작용하는 것으로 파악되었다.

인 용 문 헌

- 국립환경연구원. 1997. 호수의 조류대발생 예측기법에 관한 연구-대청호를 중심으로, 국립환경연구원보 19: 419-429.
- 김미숙, 정영륜, 서의훈, 송원섭. 2002. 낙동강 부영양화와 수질 환경요인의 통계적 분석, 한국조류학회지 17: 105-115.
- 김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규. 1996. 부영양화한 낙동강 수계에서 유기물오염에 대한 조류 1차생산의 기여도, 한국조류학회지 11: 231-237.
- 김범철, 안태석, 조규승. 1988. 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교연구, 한국육수학회지 21: 151-163.
- 김용재, 김명운, 김상중. 1998. 한강 중·하류 수계에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성, 한국조류학회지 13: 331-338.
- 김용재. 1996. 팔당호의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 고찰과 지표종을 이용한 영양단계 평가, 한국육수학회지 29: 323-345.
- 김정균. 1972. 하계 한강하류의 식물성플랑크톤의 분류와 해수 지표성, 한국육수학회지 5: 31-41.
- 서울시립대학교 수도권개발연구소. 1990. 한강생태계 조사연구 보고서. 서울특별시 586pp.
- 서울시정개발연구원. 1994. 한강 수질 관리의 효율화 방안 연구, 서울특별시 시정연 94-R-18. 640pp.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구, 인제대학교 대학원 박사학위논문 202pp.
- 심재형, 최중기. 1978. 한강하류에 있어서 부유성 조류군집의 구조 및 기능변화에 관한 연구, 한국해양학회지 13: 31-41.
- 유광일, 임병진. 1990. 한강 하류역의 식물성플랑크톤 군집과 수질오염지표에 대하여, 한국육수학회지 23: 267-277.
- 이진애. 1999. 낙동강 수계의 남조류 군집 특성, 부산시수질개선대책 세미나. pp.17-30.
- 이진환, 장만. 1997. 한강하류의 환경학적 연구 II. 식물플랑크톤의 동태, 한국육수학회지 30: 193-202.
- 이학동. 1977. 한강수의 오염도에 따른 호수생물학적 연구, 한국육수학회지 10: 47-51.
- 장주형. 1999. 다변량 해석에 의한 낙동강 하구해역 수질특성의 평가, 부경대학교 석사학위논문 58pp.
- 정승원, 이진환, 유중수. 2003. 한강하류의 환경학적 연구 V. 식물플랑크톤 군집의 대발생 특징, 한국조류학회지 18: 255-262.
- 정영호, 심재형, 이민재. 1965. 한강의 Microflora에 관한 연구. 제1보: 한강하류의 식물성 plankton과 해수의 영향, 한국식물학회지 8: 7-29.
- 정영호. 1969. 한강의 Microflora에 관한 연구. 제3보: 한강하구 감조수역의 환경조 건과 식물성 plankton, 학술원 논문집 8: 59-130.
- 정영호, 심재형. 1969. 한강하구의 기수역 유형에 관한 연구, 한국식물학회지 12: 35-42.
- 한명수, 어운열, 유지근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집 구조의 변화, 한국육수학회지 28: 335-344.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구

1. 수질의 연변화: 과거와 현재, 한국육수학회지 **26**: 141-149.
- APHA, AWWA, WPCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. APHA, Washington D.C., 1100pp.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Heinle, D.R. 1969. Effects of elevated temperature on zooplankton. *Chesapeake Sci.* **10**: 186-209.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill, Inc., New York, 576pp.
- Jeffries, M. and D. Mills. 1995. Freshwater ecology. Principles and applications. John Wiley and Sons, New York, 285pp.
- Lee, K. and S.K. Yoon. 1994. Morphologic accounts of the diatom genus *Aulacoseira*, the dominant of the Han River. *Korean J. Phycol.* **9**: 135-143.
- UNESCO/SCOR. 1966. Determination of photosynthetic pigments. *In: Determination of photosynthetic pigments in seawater.* Paris. Unesco (ed.), pp.10-18.
- USEPA. 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsored Symposium, EPA-600 (3-76-079), 185pp.
- Welch, E.B. and T. Lindell. 1992. Ecological effects of waste water. 2nd ed. Chapman & Hall, London, 337pp.
- Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatoms as indicators of lake trophic status in central Ontario, Canada. *Diatom Research* **8**: 179-193.
- (Manuscript received 14 January 2004,
Revision accepted 28 February 2004)