

대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가

박 종 근

(한국수자원공사 수자원연구원 국제수돗물종합검사센터)

Water Environmental Factors and Trophic States in Lake Daecheong. Park, Jong-Geun (International Drinking Water Center, KIWE, KOWACO 621-701, Korea)

Data were collected in Lake Daecheong from March 1997 to October 2002 and used to understand an annual change of water environmental factors and trophic states. The surface water temperature was ranged from 3.2°C to 33.1°C. In the middle of February, water temperature was the lowest. Turbidity was ranged from 0.1 to 203.5 NTU, but the values of above 30 NTU were only measured at site 1. The total mean values of COD and Chl *a* were $3.6 \pm 1.4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, $9.3 \pm 12.8 \mu\text{g L}^{-1}$ respectively. The concentrations of TP and TN were ranged from 0.14 to 5.09 mg N L⁻¹, 1 to 247 μg P L⁻¹ respectively. The total mean value of TN/TP ratio was 98.7 ± 56.2 . The trophic states were ranged from mesotrophic to eutrophic in Lake Daecheong.

Key words : Lake Daecheong, water environmental factor, trophic state index

서 론

인공호의 수질관리를 위해서는 수역의 이·화학 및 생물학적 특성을 비롯하여 수리·수문학적 특성 등 수질 환경과 관련되는 모든 요인의 포괄적인 해석과 호소의 영양단계를 파악하여야한다. 그러나 이들 요인들은 그 변화가 너무 다양하고 장소에 따라 다르다. 또한 계절적인 변동에 따라 영양단계 판정이 어려워진다. 따라서 이러한 결점을 객관화하고자 호소의 영양단계를 평가하는 방법들이 다양하게 연구되어 왔다. 부영양화는 일반적으로 인의 유입이 중요한 요인이 되며, 이로 인해 엽록소의 증가와 투명도의 감소가 수반된다. 지금까지 호소의 영양단계 평가는 인, 질소, 엽록소, 투명도의 연간 범위와 평균값에 의해서 해석되어왔다 (Carlson, 1977; USEPA, 2000). 이외에도 호소의 영양단계를 평가하는 지수로는 종합영양단계지수 (multi parameter trophic state index)가 있다 (Yang and Dickman, 1993).

대청호를 대상으로 한 육수학적 연구는 김 등(1984)에 의해 남조세균 수화 발생이 보고된 이래 오염원 및 환경요인 조사, 생물을 대상으로 한 생태학적 연구, 수질 예측 기법 등, 다양한 분야와 방법으로 진행되어 오고 있다. 이러한 연구 보고들은 대청호 수질 변화와 부영양화 정도를 파악하기 위한 오염원 조사(정, 1988), 위성자료를 통한 수질관리 또는 영양상태 평가(김과 김, 1996; 이, 1998; 한 등, 1998), 환경요인 변화와 식물플랑크톤 발생간의 상관성(오와 김, 1995; 신, 1999; 이, 1999; 이 등, 2003). 여름철 강우에 의한 수질 환경요인 변화(An, 2000a, b; An *et al.*, 2001) 등이 있다.

매년 여름철에 부영양화와 관련되어 남조세균 수화 발생의 악순환을 겪고 있는 우리나라에서는 인공호의 수질관리를 위해서는 수질 환경요인과 영양단계에 대한 거시적인 조사가 필요하다. 또한 각각의 조사 항목을 유기적으로 연관시키면서 전체적인 관점에서 고찰할 필요성이 있다. 그러나 현재까지 대청호를 대상으로 수행된 대부분의 연구 보고는 조사 기간을 1년 단위로 설정하여 단기

*Corresponding author: Tel: 042) 629-2042, Fax: 042) 629-2079, E-mail: gogun@kowaco.or.kr

간에 걸쳐 연구되었다. 따라서 개괄적인 수질 환경요인 현황과 계절별 변화 파악 등의 성과가 있었으나, 1년 이상의 축적된 자료를 통한 연도별 수질 환경요인 변화 양상과 영양단계에 대한 고찰이 이루어지지 않았다. 따라서 효과적인 수질관리 방안 수립을 위해서는 반드시 개별적인 연중 수질 환경요인 변화와 지점간의 차이를 이해하고, 이를 장기간 연구하여 호소의 영양단계를 평가하는 것이 필요하다.

본 연구는 대청호 대상으로 연중 수질 환경요인 변화와 지점간의 차이를 이해하고 대청호의 영양단계를 파악하고자 수행하였다.

재료 및 방법

대청호는 금강수계에 대청댐을 건설하면서 생성된 인공호로, 동경 127° 25' ~ 127° 40', 북위 36° 20' ~ 36° 30'에 위치한다. 대청호는 전라북도 장수군 신무산을 발원으로 하여 3도 12군에 걸쳐 있으며, 유역 면적 4,314 km², 유로 연장은 251 km, 저수용량 14억9천만 m³이다.

조사 장소와 빈도는 대청호 내 5개 정점 (Fig. 1)을 선정하여 여름철에는 주 1회, 그 이외의 기간에는 월 2회 기본적으로 조사하였다. 조사 기간은 연간 계획에 의해

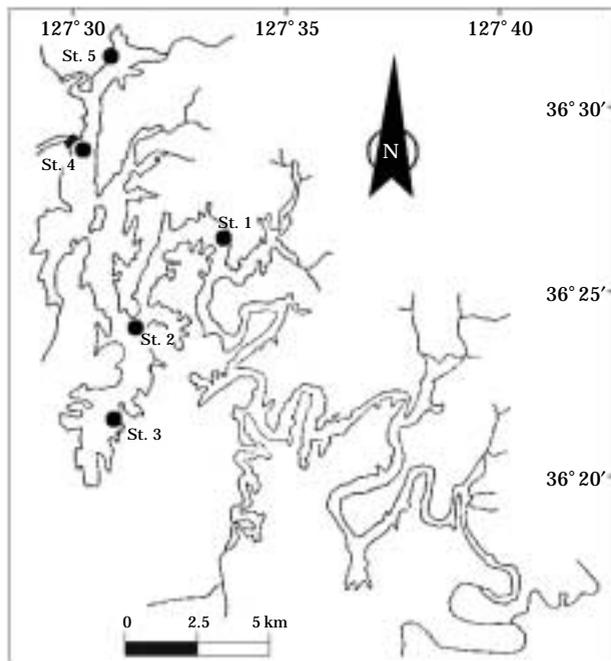


Fig. 1. Map showing the sampling sites in Lake Daecheong.

항목별로 차이가 있어 수온, 수소이온농도 (pH), 용존산소 (DO), 전기전도도, 투명도, 총질소 (total nitrogen), 암모니아성질소 (ammonia), 질산성질소 (nitrate), 총인 (total phosphorus), 화학적산소요구량 (COD), 엽록소 *a* (Chl *a*)는 1997년 3월부터 2002년 10월까지, 탁도는 2000년 8월부터 2002년 10월까지, 인산염인 (orthophosphate phosphorus)은 2001년 1월부터 2002년 10월까지 그리고 총유기탄소 (TOC), 용존유기탄소 (DOC), 철 (Fe), 구리 (Cu), 망간 (Mn), 마그네슘 (Mg)과 칼슘 (Ca)는 2001년 6월부터 2002년 10월까지 조사하였다. 대청호의 수문 및 강수량 자료는 대청댐 관리연보 자료를 근거로 작성하였다 (대청댐사무소관리단, 1997; 대청댐관리단, 1998, 1999, 2000, 2001; 한국수자원공사, 2002).

시료는 수심 10 ~ 30 cm 깊이의 표층수를 Van Dorn 채수기로 채수하였다. 수질 환경요인 중 수온, pH, DO 및 전기전도도는 현장에서 다항목수질측정기 YSI 6000 UPG (Yellow Springs Instruments Inc., USA)를 사용하여 측정하였다. 투명도는 Secchi 투명도판을 사용하여 측정하였다. 질소, 인, 탄소 계열의 수질분석은 수질오염공정시험법 (환경부, 1996)과 Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA *et al.*, 1995)에 준하였다.

총질소는 과황산분해법을 이용한 자외선흡광도법으로 측정하였다. 암모니아성질소와 질산성질소는 각각 630 nm, 410 nm 그리고 543 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다. 총인과 인산염인은 아스코로빅산 환원 흡광광도법에 따라 분광광도계 Varian Cary 5G (Varian, USA)로 흡광도를 측정하여 정량하였다. 화학적산소요구량은 과망간산칼륨법, 총유기탄소와 용존유기탄소는 고온에서 유기탄소를 이산화탄소 (CO₂)로 산화하는 방식인 TOC analyzer Phoenix 8000 (Dohrmann, USA)으로 측정하였다. 엽록소 *a*는 시료 500 mL를 GF/C로 여과한 여지를 90% 아세톤으로 24시간 추출한 후 500 g에 20분 동안 원심분리한 후 상층액을 분광광도계로 흡광도를 측정하여 정량하였다.

철, 구리, 그리고 망간은 Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometer (ICP-MS) Elan 6000 (PerkinElmer, USA)을 사용하여 측정하였다. 마그네슘과 칼슘은 Atomic Absorption Spectrometer (AAS) SpectrAA-300 (Varian, Australia)을 이용하여 측정하였다. 표준원액 (stock solution)은 Inorganic Ventures (IV labs, USA)의 단일원소 표준원액을 사용하였고, 2% 질산 용액과 18.2 MΩ 증류수 (Milli-Q gradient; Millipore, USA)를 사용하여 표준용액 (standard solution)을 조제하였다.

영양단계를 평가하기 위한 부영양화도 지수는 Lake Trophic State Index (LTSI)와 (Yang and Dickman, 1993), Trophic State Index (TSI)를 사용하였다 (Carlson, 1977; USEPA, 2000).

결 과

1. 현장 측정 항목

1997년부터 2002년까지 대청호의 수온은 3.2~33.1°C 범위로, 평균 수온은 18.9±8.3°C였다. 연중 수온이 가장 낮은 시기는 2월로 평균 4.6±0.8°C이었고, 세분화한 시기는 2월 중순으로 해석되었다. 수온이 가장 높은 기간은

8월로 평균 28.3±1.7°C이었으며, 1998년 8월에 26.6±1.6°C로 가장 낮았고, 2001년 8월에 30.1±1.4°C로 가장 높았다 (Fig. 2A).

pH는 6.3~10.5 범위로, 2001년 8월에 정점 1에서 pH 10.5로 가장 높았으며, 남조세균에 의한 수화가 대발생한 시기였다. 월별 pH 평균 범위는 7.4~8.9이었고, 5월에 8.1±0.3으로 pH 8.0을 넘기 시작하여 8월에 8.9±0.7로 최고였다 (Fig. 2B). 정점별 pH 평균은 8.0~8.2이었다.

용존산소는 4.5~19.6 mg L⁻¹ 범위로, 12월부터 4월까지의 높고, 5월부터 11월까지는 낮았다 (Fig. 2C). 그러나 7월부터 10월까지의 정점별로 불규칙하게 용존산소가 10.0 mg L⁻¹이상의 값들이 조사되었다. 정점별로는 정점 1이 정점 4보다 높은 경향을 보였다.

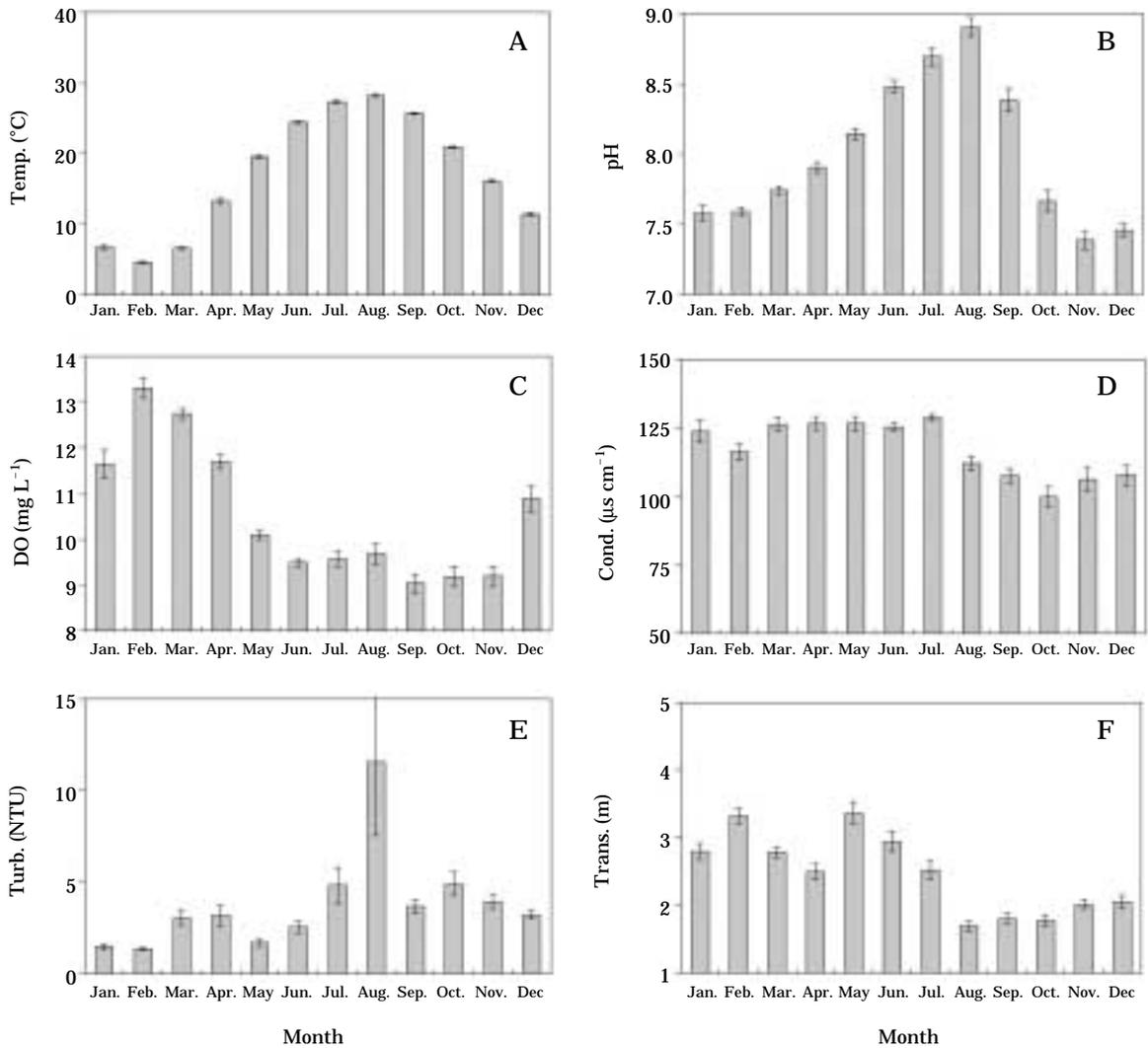


Fig. 2. Monthly fluctuation of field parameters mean values (±standard error) in Lake Daecheong during the study period. A : temperature, B : pH, C : dissolved oxygen, D : conductivity, E : turbidity, F : Secchi transparency.

전기전도도는 57~194 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 범위로, 1월부터 7월까지 평균 116.4~129.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이고, 8월부터 12월까지는 100.0~112.2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 다소 낮아졌다 (Fig. 2D). 다만 2001년 8월부터 12월까지는 월 평균 130 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이상이였다. 정점별로는 정점 1이 122.5 \pm 24.2 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 다른 정점보다 높았다. 정점 3, 4, 5는 각각 115.7 \pm 21.1 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 115.4 \pm 21.7 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 115.9 \pm 21.5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 였다.

탁도는 0.1~203.5 NTU 범위였다 (Fig. 2E). 정점 1을 제외한 4개 정점에서의 탁도 범위는 0.1~28.3 NTU였고, 정점 1에서만 30 NTU의 이상의 값이 측정되었다. 탁도는 8월 1일 정점 1에서 203.5 NTU로 최고였다. 정점별 평균은 정점 1에서 7.9 \pm 22.4 NTU로 가장 높았고, 정점 4에서 2.7 \pm 3.2 NTU로 가장 낮았다.

투명도는 0.1~8.0 m 범위로, 2000년 6월 19일에 정점 4에서 가장 높았다. 투명도의 월별 경향은 1월부터 7월까지 평균 2.5~3.4 m이었으며, 8월부터 12월까지 1.7~2.0 m이었다 (Fig. 2F). 정점별로는 정점 4가 평균 3.1 \pm 1.4 m로 가장 높고, 정점 5가 2.2 \pm 0.8 m로 가장 낮았다.

2. 질소 및 인 계열

조사 기간 동안 총질소는 0.14~5.09 mg N L^{-1} 이었다. 월별 평균은 4월과 6월부터 8월에 1.89~2.05 mg N L^{-1} 로 다른 시기보다 높았다 (Fig. 3A). 정점 1에서 평균 농도는 1.97 \pm 0.59 mg N L^{-1} 로 다른 정점의 평균 농도인 1.71~1.79 mg N L^{-1} 보다 0.2 mg N L^{-1} 이상 높았다. 정

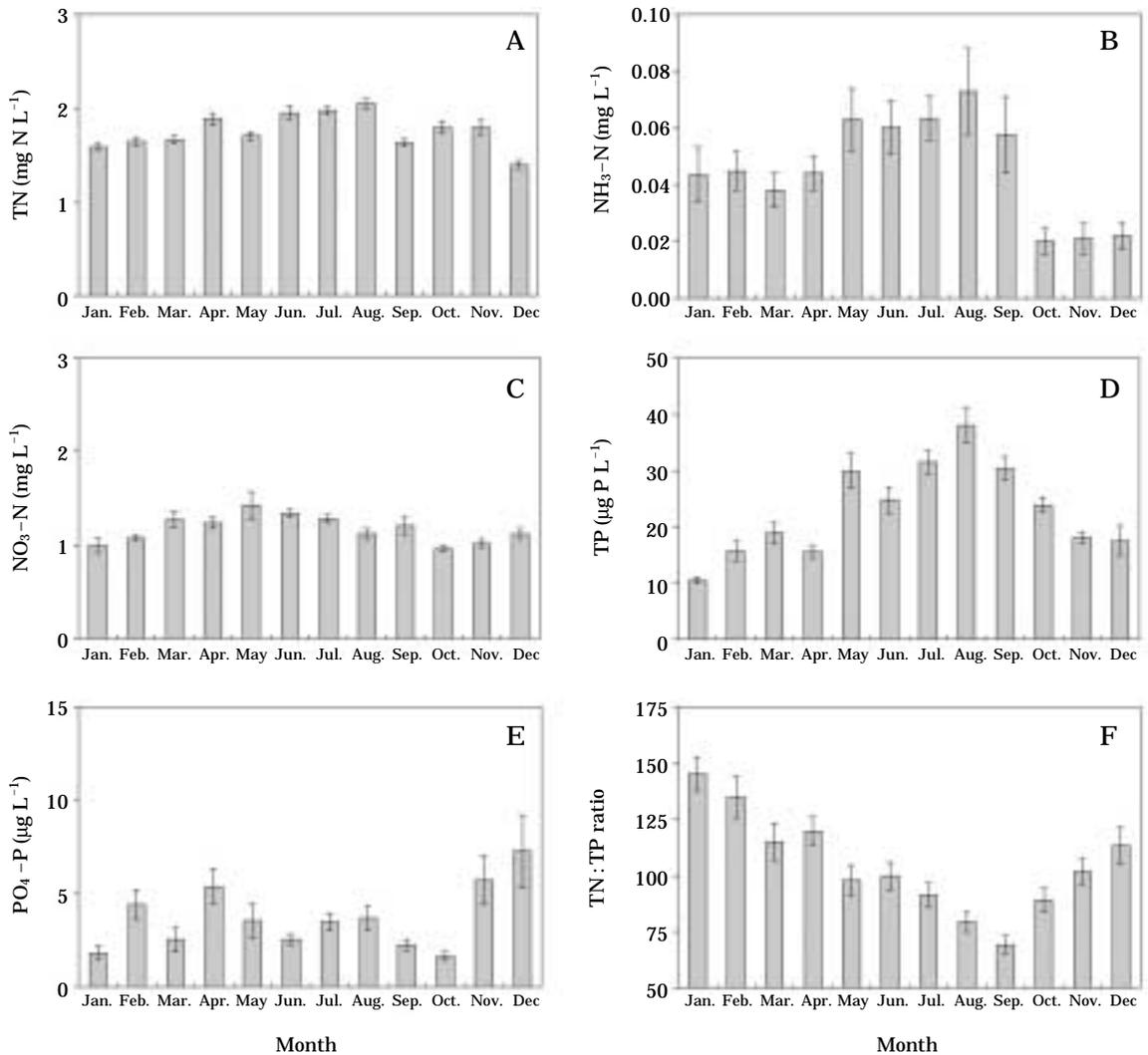


Fig. 3. Monthly fluctuation of nitrogen and phosphorus mean values (± standard error) in Lake Daecheong during the study period. A : total nitrogen, B : ammonia, C : nitrate, D : total phosphorus, E : orthophosphate, F : ratios of TN/TP.

점 1이 다른 정점에 비해 월 평균 농도가 높은 시기는 2월부터 9월까지 계속 되었고, 이 후에는 비슷하였다.

암모니아성질소는 검출한계 이하부터 최고 0.51 mg NH₃-N L⁻¹ 범위였다. 암모니아성질소의 월별 변화는 5월부터 7월까지 평균 농도가 0.06~0.07 mg NH₃-N L⁻¹로 다소 높았다가 10월부터 0.02 mg NH₃-N L⁻¹ 정도로 급격히 감소하였다 (Fig. 3B).

질산성질소는 0.10~4.21 mg NO₃⁻-N L⁻¹ 범위였다. 월별 평균 농도는 0.96~1.34 mg NO₃⁻-N L⁻¹로 시기적으로 뚜렷한 변화가 없었다. 미세한 변화는 3월부터 7월까지가 높았고, 이후 10월까지 감소하다가 다시 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 3C). 정점별로는 정점 1에서 1.24±0.51 mg NO₃⁻-N L⁻¹로 다른 정점에 비해 평균 0.05~0.10 mg NO₃⁻-N L⁻¹ 높았다.

총인 농도는 1~247 µg P L⁻¹ 범위였다. 월별 평균 농도는 11월부터 4월까지 10.6~18.1 µg P L⁻¹로 상대적으로 낮다가 5월에 30.0±28.0 µg P L⁻¹ 급격히 증가하였다. 이러한 증가 현상은 8월까지 계속되어 38.0±33.5 µg P L⁻¹로 최대였고 9월부터 점차 낮아졌다 (Fig. 3D). 정점별로는 정점 1에서 29.8±27.8 µg P L⁻¹로 다른 정점 18.7~25.5 µg P L⁻¹보다 최고 11.1 µg P L⁻¹에서 최저

4.3 µg P L⁻¹ 이상 높았다.

인산염인은 검출한계 이하의 농도부터 최고 22 µg PO₄³⁻-P L⁻¹ 범위였다. 시기별로는 뚜렷한 농도 변화를 보이지는 않았지만, 4월과 7월 그리고 8월에 높은 농도를 보이다가 5월과 9월에 감소하였다 (Fig. 3E). 조사 기간 동안 월 평균은 2002년 4월에 7.7±4.5 µg PO₄³⁻-P L⁻¹로 최고였다.

총인에 대한 총질소 비 (TN/TP)의 평균값은 98.7±56.2이었다. 월별 평균값은 1월에 145.3±47.4로 가장 높았다가 서서히 감소하여 9월에 69.2±40.9로 가장 낮았다. 이후 다시 증가하여 12월에는 113.3±54.9이었다 (Fig. 3F). 정점별로는 정점 4에서 평균 113.2±57.1로 가장 높았고, 정점 5에서 평균 90.3±50.4로 가장 낮았다. 조사 지점별로 월 평균값 변화는 1월에 정점 1에서 159.9±43.1로 최고였고, 8월에 정점 1에서 60.4±36.0으로 최저였다.

3. 탄소 계열 및 엽록소 a

화학적산소요구량 (COD)의 총 평균은 3.6±1.4 mg O₂ L⁻¹였다. 시기별로는 7월부터 증가하고 9월 이후부터 점

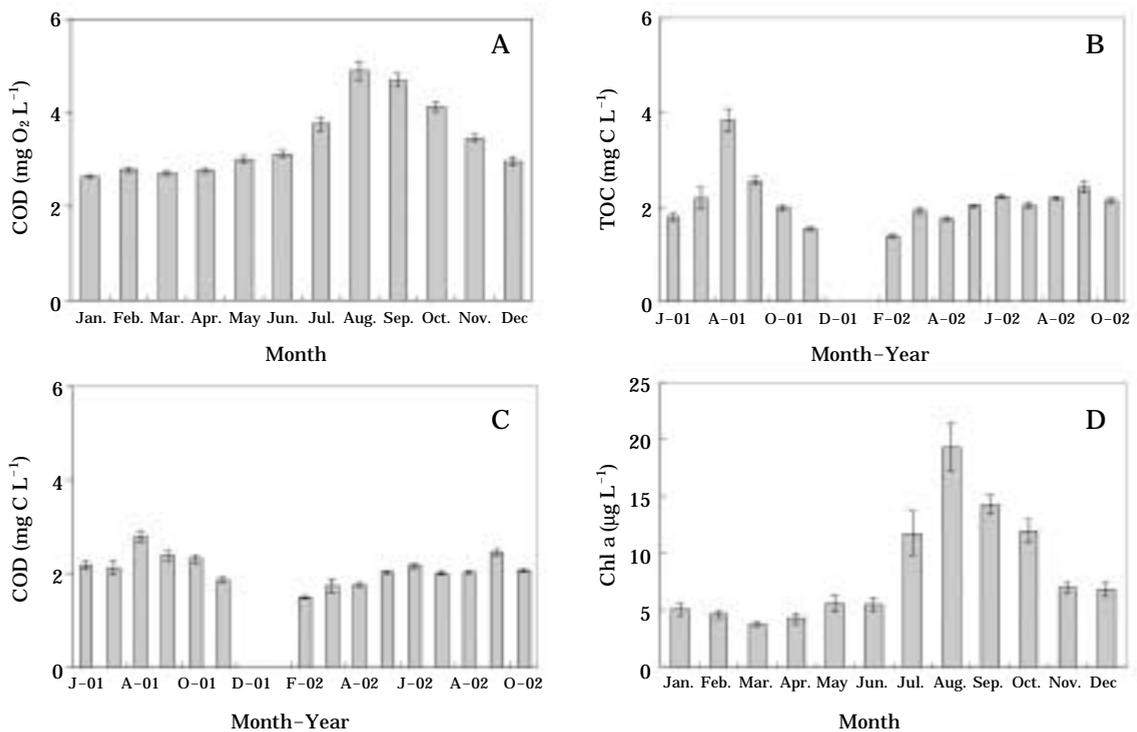


Fig. 4. Monthly fluctuation of carbon and chlorophyll a mean values (± standard error) in Lake Daecheong during the study period. A : chemical oxygen demand, B : total organic carbon, C : dissolved organic carbon, D : chlorophyll a.

Table 1. Monthly mean values (\pm standard deviation) of metals in Lake Daecheong from June 2001 to October 2002. *not investigated.

Year	Month	Fe (mg Fe L ⁻¹)	Ca (mg Ca L ⁻¹)	Mg (mg Mg L ⁻¹)	Cu (μ g Cu L ⁻¹)	Mn (μ g Mn L ⁻¹)
2001	Jun.	0.23 \pm 0.11	9.23 \pm 0.75	3.58 \pm 0.34	1.1 \pm 0.2	0.2 \pm 0.2
	Jul.	0.26 \pm 0.06	10.42 \pm 2.52	3.29 \pm 0.28	1.0 \pm 0.3	1.3 \pm 3.1
	Aug.	0.20 \pm 0.17	17.86 \pm 7.06	3.93 \pm 1.62	18.4 \pm 38.7	0.3 \pm 0.3
	Sep.	0.02 \pm 0.05	8.68 \pm 0.63	1.92 \pm 0.11	2.5 \pm 5.0	0.0 \pm 0.1
	Oct.	0.16 \pm 0.03	-*	-	2.4 \pm 3.8	14.5 \pm 13.6
	Nov.	0.16 \pm 0.01	-	-	0.8 \pm 0.1	4.4 \pm 2.2
	Dec.	0.15 \pm 0.01	-	-	0.7 \pm 0.1	2.1 \pm 0.3
2002	Jan.	-	-	-	-	-
	Feb.	-	-	-	-	-
	Mar.	-	-	-	-	-
	Apr.	0.06 \pm 0.03	10.14 \pm 0.74	4.41 \pm 0.27	0.9 \pm 0.2	0.5 \pm 0.4
	May	0.04 \pm 0.01	8.71 \pm 1.53	4.10 \pm 0.29	1.0 \pm 0.3	0.3 \pm 0.2
	Jun.	0.06 \pm 0.01	9.15 \pm 0.69	4.02 \pm 0.27	1.0 \pm 0.1	0.5 \pm 0.6
	Jul.	0.09 \pm 0.01	9.14 \pm 0.67	3.93 \pm 0.28	1.1 \pm 0.3	1.1 \pm 1.1
	Aug.	0.10 \pm 0.04	8.42 \pm 0.54	3.45 \pm 0.66	1.1 \pm 0.1	2.4 \pm 0.9
	Sep.	0.13 \pm 0.06	13.43 \pm 5.31	5.22 \pm 1.26	2.8 \pm 2.3	2.9 \pm 1.1
	Oct.	0.15 \pm 0.10	8.59 \pm 0.57	3.54 \pm 0.26	1.2 \pm 0.7	2.3 \pm 2.2
Total time		0.13 \pm 0.10	10.20 \pm 3.89	3.67 \pm 0.96	2.8 \pm 11.9	2.7 \pm 6.2
Total frequency		185	148	148	182	186

차 낮아졌다 (Fig. 4A). 평균 COD 농도는 8월에 4.9 \pm 2.8 mg O₂ L⁻¹로 가장 높았고 1월에 2.7 \pm 0.2 mg O₂ L⁻¹로 가장 낮았다. 정점 1에서 COD는 3.8 \pm 1.8 mg O₂ L⁻¹로, 다른 정점 보다 (3.2~3.6 mg O₂ L⁻¹) 높았다. 정점 4에서 COD 농도는 다른 정점 보다 7월과 8월에 낮았고, 12월부터 7월까지 평균 2.6~2.9 mg O₂ L⁻¹이었다.

총유기탄소 (TOC)는 1.3~6.1 mg C L⁻¹ 범위였으며, 평균 농도는 2.2 \pm 0.7 mg C L⁻¹이었다. TOC 평균 농도는 2001년 8월에 3.8 \pm 1.0 mg C L⁻¹이었다 (Fig. 4B). 정점별 평균 농도 범위는 2.0~2.5 mg C L⁻¹이었고, 이 중에서 정점 1이 2.5 \pm 1.0 mg C L⁻¹로 가장 높았다.

용존유기탄소 (DOC)는 0.7~3.9 mg C L⁻¹ 범위였다. 2001년 8월의 DOC 평균은 2.8 \pm 0.5 mg C L⁻¹로, 이 중 정점 1에서 3.3 \pm 0.4 mg C L⁻¹로 가장 높았다 (Fig. 4D). 정점별 평균은 1.9~2.3 mg C L⁻¹이었고, 정점 1이 2.3 \pm 0.5 mg C L⁻¹로 가장 높았다. 조사 기간 동안의 평균은 2.1 \pm 0.5 mg C L⁻¹이었다.

엽록소 a (Chl a)의 평균 농도는 9.3 \pm 12.8 μ g L⁻¹이었다. Chl a는 0.1~170.3 μ g L⁻¹ 범위로서 변화 폭이 컸으며, 최고 농도는 2001년 7월 26일 정점 1에서 조사되었다. 정점 4에서 최고 농도는 27.2 μ g L⁻¹로 1999년 10월 13일이었다. 시기별로는 여름철인 7월과 8월에 급격히 증가하여 9월부터 낮아졌으며, 평균 Chl a 농도는 8월에

19.3 \pm 22.4 μ g L⁻¹로 가장 높았다 (Fig. 4D). 7월부터 10월까지는 월 평균 Chl a 농도가 10.0 μ g L⁻¹ 이상인 반면에, 11월부터 6월까지의 3.8~7.0 μ g L⁻¹로 상대적으로 낮았다. 조사 지점별로는 정점 1에서 평균 12.3 \pm 18.1 μ g L⁻¹로 다른 정점 5.6~9.9 μ g L⁻¹보다 2.4~6.9 μ g L⁻¹ 높았다. 정점 4는 평균 Chl a 농도가 5.6 \pm 4.9 μ g L⁻¹로 다른 정점에 비해 3.5 μ g L⁻¹ 이상 낮았다. 이러한 정점 4에서의 낮은 농도는 4월부터 9월까지였다. 정점 1에서는 7월에 Chl a의 월 평균 농도가 상대적으로 증가한 반면에, 정점 4에서는 8월에 증가하였다.

4. 금속 성분

수중에 존재하는 철, 칼슘, 마그네슘, 구리, 망간은 월별 평균 농도는 Table 1과 같다. 수중에 존재하는 철은 검출 한계 이하 (N.D.)부터 최고 0.37 mg Fe L⁻¹이었다. 2001년 6월부터 8월까지의 월별 평균 농도가 0.20 mg Fe L⁻¹ 이상인 반면에, 9월에는 0.02 \pm 0.17 mg Fe L⁻¹로 급격히 감소하였다. 2001년 9월 3일부터 23일까지 4회의 조사 결과, 9월 3일부터 9월 18일까지 전 조사 정점에서 N.D.였으며, 9월 24일에 0.12~0.13 mg Fe L⁻¹였다. 정점별 철의 평균은 0.13~0.14 mg Fe L⁻¹로 정점에 따른 차이는 없었다.

칼슘은 4.26~25.90 mg Ca L⁻¹ 범위였다. 2001년 8월

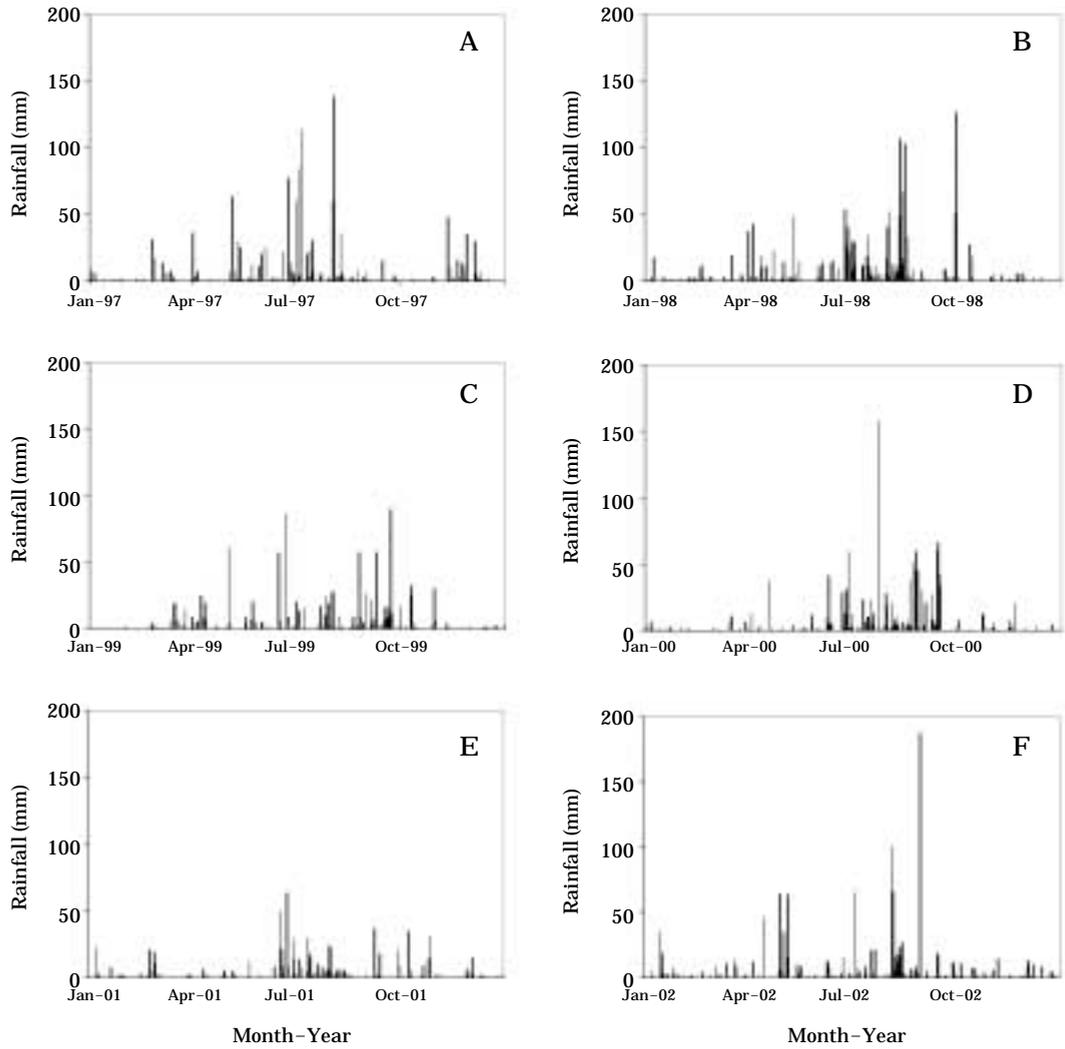


Fig. 5. Distribution of rainfall in Lake Daecheong during the study period. A : year 1997, B : year 1998, C : year 1999, D : year 2000, E : year 2001, F : year 2002.

에 평균 $17.86 \pm 7.06 \text{ mg Ca L}^{-1}$ 로 조사 기간 중 가장 높았다. 조사 지점별로는 정점 5에서 $19.96 \pm 7.59 \text{ mg Ca L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 2001년 8월과 2002년 9월의 $13.43 \pm 5.31 \text{ mg Ca L}^{-1}$ 을 제외하고는, 조사 시기별 또는 지점별 평균은 $8.42 \sim 10.95 \text{ mg Ca L}^{-1}$ 로 그 차이가 뚜렷하지 않았다. 마그네슘은 $0.92 \sim 7.15 \text{ mg Mg L}^{-1}$ 범위로 평균 농도는 $3.67 \pm 0.96 \text{ mg Mg L}^{-1}$ 이었고, 정점별 평균은 $3.51 \sim 3.75 \text{ mg Mg L}^{-1}$ 이었다.

구리는 $0.6 \sim 139.1 \text{ } \mu\text{g Cu L}^{-1}$ 범위로 조사 시기에 따라 변화가 크게 나타났다. 2001년 8월의 평균은 $18.4 \pm 38.7 \text{ } \mu\text{g Cu L}^{-1}$ 로, 다른 시기의 평균 $0.9 \sim 2.8 \text{ } \mu\text{g Cu L}^{-1}$ 보다 높았다. 정점별 평균 농도는 $1.0 \sim 5.5 \text{ } \mu\text{g Cu L}^{-1}$ 범위로 정점 2에서 $5.4 \pm 23.0 \text{ } \mu\text{g Cu L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 망간은

검출한계 이하의 농도부터 최고 $68.8 \text{ } \mu\text{g Mn L}^{-1}$ 였다. 2001년 10월에 평균 $14.5 \pm 13.6 \text{ } \mu\text{g Mn L}^{-1}$ 로 가장 높았다. 조사 지점별 평균은 $1.5 \sim 3.4 \text{ } \mu\text{g Mn L}^{-1}$ 로, 정점 1이 다른 정점 보다 높았다.

5. 강수량 및 영양단계

조사 기간 동안 연간 총 강수량은 2001년에 794.6 mm 로 최저였고, 1997년에 $1,338.0 \text{ mm}$ 로 최고였다. 6년 동안의 월별 강수량 총합은 8월에 $1,938.9 \text{ mm}$ 로 가장 많았다. 6월부터 8월까지의 강수량이 전체 강수량의 56.8% 로 대청호에서 강우는 이시기에 집중되었다. 2001년 7월부터 8월까지 강우 양상은 다른 조사 년도와는 차이가

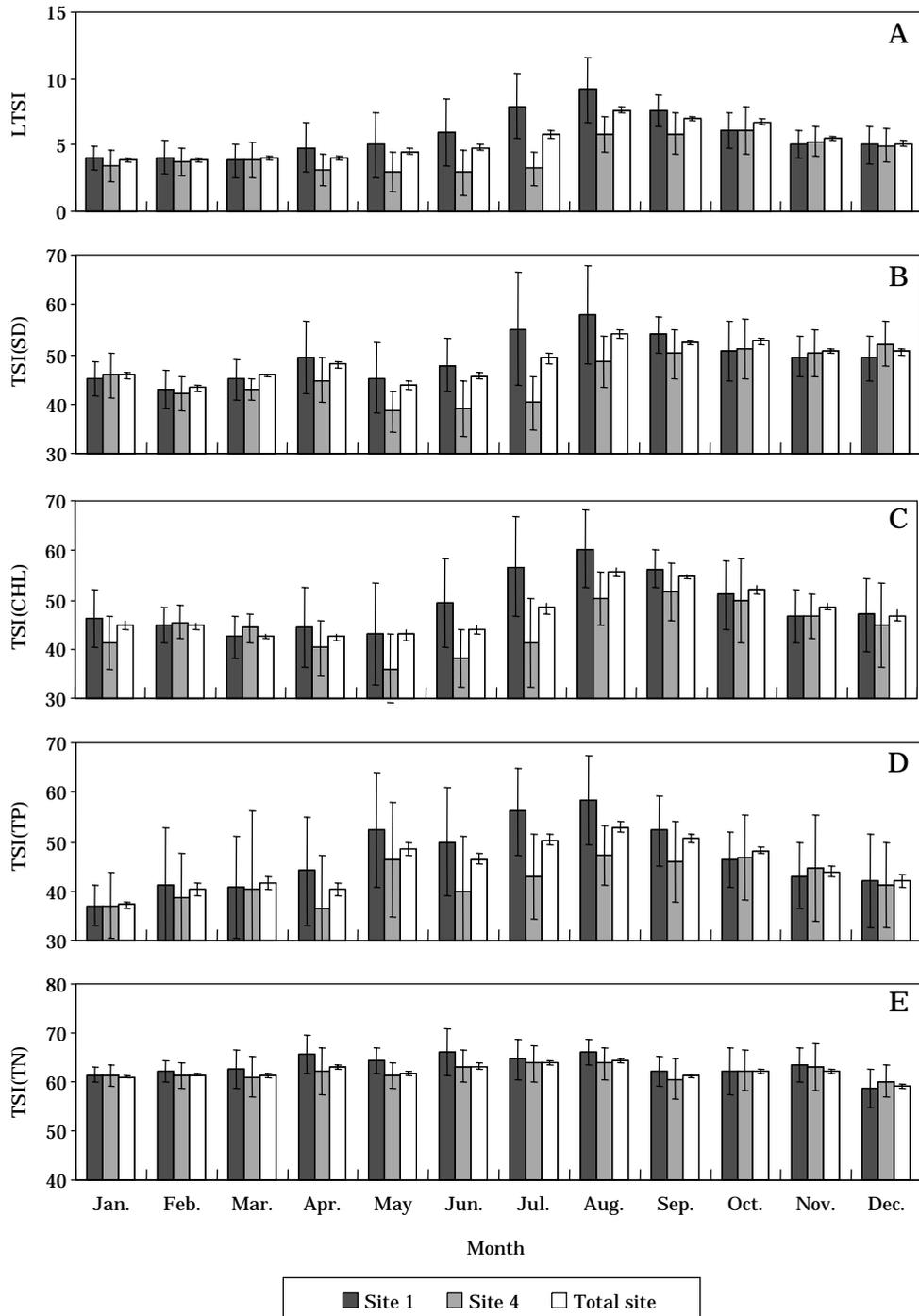


Fig. 6. Monthly mean values of trophic state index (TSI) in Lake Daechong during the study period. A : lake trophic state index, B : TSI by Secchi depth, C : TSI by chlorophyll a, D : TSI by total phosphorus, E : TSI by total nitrogen, the error of site 1 and 4 is standard deviation, the error of total site is standard error.

있었다 (Fig. 5). 2001년을 제외한 기간에는 7월부터 8월 까지 연속적인 30.0 mm 이상의 강우는 3~5회로, 이 중에 100 mm 이상의 강우가 1~2회 있었다. 그러나 2001년

여름철에 30.0 mm 이상의 강우는 6월 29일부터 42.8 mm와 7월 30일부터 52.8 mm이었고, 100 mm 이상의 강우는 없었다.

대청호의 영양단계는 적용한 지수에 따라 항목과 시기 별로 영양단계 평가 등급이 달라졌다(Fig. 6). LTSI 평균은 5.45 ± 2.27 (SE = 0.08), TSI (TN)은 62.3 ± 4.2 (SE = 0.1), TSI (SD)는 48.8 ± 7.1 (SE = 0.2), TSI (CHL)은 48.0 ± 9.1 (SE = 0.3), TSI (TP)는 46.4 ± 11.1 (SE = 0.4)이었다. 이는 LTSI와 TSI (TN)는 부영양단계, TSI (SD), TSI (CHL), TSI (TP)는 중영양단계에 해당된다. 영양단계의 월별 변화는 7월과 8월에 LTSI와 4종류의 TSI 모두에서 부영양단계로 평가 되었고, 1월부터 6월까지의 LTSI와 TSI (SD), TSI (CHL), TSI (TP)에서 중영양단계로 평가되었다. TSI (TN)는 모든 기간 동안 58.9~64.3으로 부영양 단계로 평가되었다.

LTSI는 0.6~15.0 범위로 7월부터 9월 사이에 높았다. LTSI는 정점 4에서 4.30 ± 1.84 로 가장 낮았고, 다른 정점에서 평균 5.70~6.02의 범위였다. TSI (SD)는 30.0~93.2 범위로 정점 4에서 평균 45.3 ± 6.7 로 가장 낮았고 정점 1에서 50.1 ± 9.6 으로 가장 높았다. TSI (TP)는 모든 정점에서 50.0 이하였다. TSI (TN)은 평균 62.3 ± 4.2 로 다른 TSI 값보다 높았으나, 정점별로는 평균 61.7~63.6으로 큰 차이가 없었다.

환경부(2003)가 제시한 '환경기준-수질-호소'에 적용하여 수질상태를 판정하는 경우, 적절한 항목은 COD, TP, TN이나, TN/TP 비가 16 이상임으로 COD와 TP의 경우만 판단할 수 있는 자료가 된다. TP와 COD의 평균 농도는 각각 $25.0 \pm 22.1 \mu\text{g P L}^{-1}$ (SE = 0.7)와 $3.6 \pm 1.4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ (SE = 0.05)로 상수원수 2급으로 판정되었다.

고 찰

수온은 수질의 상태 및 변화 양상을 결정하는 인자이다. 수온에 따라 모든 화합물의 반응속도가 변화되며, 용존산소의 포화도 및 알칼리도에 영향을 준다. 또한 유기물의 부패 속도, 대기로부터의 용존율, 조류의 성장 속도 등에 영향을 주어 부영양화 및 자정작용에 직·간접적인 인자로 작용한다(Horne and Goldman, 1994). 또한 수온의 계절변화에 의해 수체의 성층과 혼합에 영향을 미친다. 수환경에 중요한 영향을 미치는 대청호 수온의 범위는 3.2~33.1°C로 월별로 차이가 있어, 온대지역의 계절 변화 특성을 반영하고 있었다.

대청호에서 여름철 강우에 의해 수질 환경요인이 영향을 받는다는 보고(An, 2000a, b; 정 등, 2005)와 같이, 본 연구에서도 이·화학적인 조건이 강우에 의해 크게 영향 받는 것으로 해석되었다. 1998년 8월 10일부터 8월 17일

까지의 1주일 동안 약 300 mm에 육박하는 집중강우는 대청호의 모든 이·화학 조건을 크게 변화 시켰다. 1998년 8월 평균 유입량과 유출량은 각각 $723.3 \pm 969.9 \text{ CMS}$, $644.4 \pm 730.1 \text{ CMS}$ 로 다른 시기보다 높았다. 대청호에서 강수량이 측정된 1983년부터 2002년도까지의 연간 강수량의 평균은 1,202.7 mm이다(한국수자원공사, 2002).

일반적으로 TN/TP 비율이 10~17 이상일 경우 질소에 비하여 인의 부족으로 조류의 성장이 제한된다고 평가된다(Smith, 1982). 대청호의 TN/TP 총 평균값은 98.7 ± 56.2 로 인이 제한요인임을 확인하였다. 또한 TSI (CHL)이 TSI (TP)보다는 높고 TSI (TN)보다 낮으면 인이 제한요인이라는 선행 보고(Havens, 2000)와 같이, 대청호의 TSI (CHL)는 평균 48.0 ± 9.1 로 TSI (TP) 평균 46.4 ± 11.1 보다 높고 TSI (TN) 평균 62.3 ± 4.2 보다 낮았다. 이는 국내 댐저수지의 TN/TP 비가 40~160 범위에 있다는 보고(김 등, 1997; Kim *et al.*, 1997)와 빈영양호보다는 부영양호에서 TN/TP 비가 낮고 영양상태의 증가에 따라 TN/TP 비가 감소한다는 보고(Forsberg *et al.*, 1978; Forsberg and Ryding, 1980; Downing and McCauley, 1992; 김과 황, 2004)와 일치하였다.

조사 기간 동안의 투명도는 1월부터 7월까지의 월 평균값이 2.5~3.4 m, 8월부터 12월까지의 1.7~2.0 m이었다. 이는 Vollenweider and Kerekes (1980)에 의해 제공된 OECD 기준에 의하면 월별로는 중영양부터 부영양단계에 해당한다. 투명도 총 평균값은 2.4 ± 1.1 (SE = 0.04)로 OECD 기준, 부영양단계에 해당한다. Chl *a* 농도는 8월에 $19.3 \pm 22.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 11월부터 6월까지의 3.8~7.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 상대적으로 낮은 농도였다. OECD 기준에 의하면 여름철에는 부영양단계이고, 11월부터 6월까지의 중영양단계에 해당된다.

LTSI를 사용하여 대청호는 부영양호라는 평가(이 등, 2002)와 같이 모든 정점을 평균하는 경우는 대청호는 부영양단계로 평가되지만, 정점 4에서 LTSI는 4.30 ± 1.84 로 mesoeutrophic 단계인 것처럼 조사 정점에 따라 평가가 달라졌다. TSI (SD)와 TSI (CHL)의 경우도 정점에 따라 영양단계가 달라, TSI (SD)는 정점 2, 4, 5가 중영양단계이고, 정점 1, 3은 부영양단계였다. TSI (CHL)은 정점 1에서만 50.2 ± 9.6 으로 부영양단계였다. 그러나 TSI (TN)과 TSI (TP)는 모든 정점에서 각각 부영양단계와 중영양단계였다. Chl *a* 농도가 가장 높고 남조세균 수화가 가장 심했던 2001년 7월 24일부터 8월 6일까지(이 등, 2003)의 LTSI는 6.58 이상이었다. 그러나 수화가 소멸되기 시작한 2001년 9월 3일부터는 LTSI가 5.02 이하로 감소되

어 중영양단계로 분석되었다. 그러나 2002년 9월 24일부터 10월 29일까지의 기간에는 LTSI가 5.56을 상회하는 이례적인 양상을 보였다. 이는 식물플랑크톤의 증가보다는 9월 하순부터 있었던 집중강우에 의해 탁도가 증가되어, LTSI의 계산 과정의 중요 항목인 투명도가 저하된 것이 원인인 것으로 해석된다. 따라서 이 기간의 LTSI 값은 탁도에 의해 대청호 본원의 영양단계를 왜곡하여 과장되게 반영한 것으로 간주할 수 있다. 영양단계 지수의 사용은 기준이 명확하다는 장점이 있지만, 사용 종류와 시기에 따라 다른 값을 보여준다. 따라서 영양단계 지수를 사용하는 경우는 가능한 모든 지수를 사용한 후, 종합적으로 판단하는 것이 필요하다.

적 요

대청호 연중 수질 환경요인의 변화를 해석하고 영양단계를 평가하고자, 1997년부터 2002년까지 수질 환경요인과 수문학적 특성을 조사하였다. 대청호의 표층 수온은 3.2~33.1°C로 2월 중순에 가장 낮았다. 탁도는 0.1~203.5 NTU이었지만, 정점 1에서만 30 NTU의 이상이었다. COD의 평균은 $3.6 \pm 1.4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ 이었고, Chl *a*의 평균 농도는 $9.3 \pm 12.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 이었다. 총질소는 0.14~5.09 mg N L^{-1} 범위로 4월과 6월부터 8월에 다른 시기보다 높았다. 총인은 1~247 $\mu\text{g P L}^{-1}$ 로, 11월부터 4월까지 10.6~18.1 $\mu\text{g P L}^{-1}$ 로 상대적으로 낮다가 5월부터 8월까지 평균 30.0 P L^{-1} 이상으로 증가하였다. TN/TP비의 평균은 98.7 ± 56.2 이었다. 대청호의 수질은 적용한 지수와 시기별로 영양단계평가 등급이 중영양단계 또는 부영양단계로 판정되었다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 연구사업(1997~2002)에 의해 수행하였으며, 연구에 참여해 주신 모든 연구원과 자료수집과 현장 조사에 도움을 주신 한국수자원공사 직원에게 깊은 감사를 드립니다. 논문 교정에 수고를 아끼지 않으신 심사의원들께 깊은 감사를 드립니다.

인 용 문 헌

김동근, 서윤수, 송준상, 이문호, 최재덕, 박건현, 최광수. 1984.

- 대청호 부영양화에 관한 종합연구. 국립환경연구소, 서울.
- 김용재, 최재신, 김한순. 1997. 임하호의 식물플랑크톤 군집구조. 한국육수학회지 **30**: 307-324.
- 김환기, 김태근. 1996. 원격탐사에 의한 대청호 수질 관리방안. 대한환경공학회지 **18**: 1383-1396.
- 김호섭, 황순진. 2004. 부영양 저수지에서 식물플랑크톤 성장에 대한 제한영양염과 질소/인 비의 영향. 한국육수학회지 **37**: 36-46.
- 대청댐사무소댐관리단. 1997. 대청다목적댐관리연보: 1997. 한국수자원공사, 대전.
- 대청댐관리단. 1998. 대청다목적댐관리연보: 1998. 한국수자원공사, 대전.
- 대청댐관리단. 1999. 대청다목적댐관리연보: 1999. 한국수자원공사, 대전.
- 대청댐관리단. 2000. 대청다목적댐관리연보: 2000. 한국수자원공사, 대전.
- 대청댐관리단. 2001. 대청다목적댐관리연보: 2001. 한국수자원공사, 대전.
- 신재기. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동. 환경생물학회지 **17**: 529-541.
- 오희목, 김도한. 1995. 대청호의 남조류 수화발생에 대한 단기적 예측. 한국육수학회지 **28**: 127-135.
- 이정준, 이정호, 박종근. 2003. 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관관계. 한국육수학회지 **36**: 269-276.
- 이정호. 1999. 대청호의 연중 식물플랑크톤 군집 동태. 한국육수학회지 **32**: 358-366.
- 이정호, 박종근, 김은정. 2002. 국내 주요 호수의 식물플랑크톤 종조성 및 영양단계 평가. *Algae* **17**: 275-281.
- 이중호. 1998. GIS를 적용한 호수 수질예측-대청호를 사례로. 한국지역개발학회지 **10**: 151-166.
- 정상진. 1998. 대청호의 수질에 관한 연구. 환경생물학회지 **16**: 425-431.
- 정승현, 안치용, 최애란, 장감용, 오희목. 2005. 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군집의 관계. 환경생물학회지 **23**: 57-63.
- 한국수자원공사. 2002. 대청다목적댐관리연보: 2002. 한국수자원공사, 대전.
- 한의정, 김태근, 정동환, 천세익, 김신조, 유순주, 황종연, 김태승, 김명희. 1998. Landsat TM 영상자료를 이용한 대청호의 영양상태 평가. 환경영향평가 **7**: 81-91.
- 환경부. 1996. 수질오염공정시험방법. 동화기술, 서울.
- 환경부. 2003. 환경정책기본법 시행령. 대통령령 제18041호.
- An, K.G. 2000a. Dynamic change of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korean J. Limnol.* **33**: 213-221.
- An, K.G. 2000b. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean J. Limnol.* **33**: 222-229.
- An, K.G., J.W. Seo and S.S. Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological

- conditions near the intake tower of taechung reservoir. *Korean J. Limnol.* **34**: 327-336.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) and WEF (Water Environment Federation). 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. and Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Downing, J.A. and E. McCauley. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **37**: 936-945.
- Forsberg, O., S.O. Ryding, A. Forsberg and A. Claesson. 1978. Water chemical analyses and/or algal assay? Sewage effluent and polluted lake water studies. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 352-363.
- Forsberg, O. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Havens, K.E. 2000. Using trophic state index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korean J. Limnol.* **33**: 187-196.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill Inc., New York.
- Kim, B., J.H. Park, G. Hwang and K. Choi. 1997. Eutrophication of large freshwater ecosystem in Korea. *Korean J. Limnol.* **30**: 512-517.
- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorous dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 1101-1112.
- USEPA. 2000. Nutrient criteria technical guidance manual: Lakes and reservoirs. USEPA, EPA-822-B00-001.
- Vollenweider, R.A. and J.J. Kerekes. 1980. Background and summary results of the OECD cooperative programme on eutrophication. In: Proceedings of an international symposium on inland waters and lake restoration. USEPA, EPA 440/5-81-010
- Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatoms as indicators of lake trophic status in central Ontario. *Can. Diatom Res.* **8**: 179-193.

(Manuscript received 26 July 2005,
Revision accepted 15 September 2005)