

대청호에서 종적구배에 따른 영양염류 및 엽록소의 역동성

배대열 · 양은찬 · 정승현 · 이재훈 · 안광국*

(충남대학교 생명과학부)

Nutrients and Chlorophyll Dynamics Along the Longitudinal Gradients of Daechung Reservoir. Bae, Dae-Yeul, Eun-Chan Yang, Seung-Hyun Jung, Jae-Hoon Lee and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The study was to determine zonal characteristics of nutrients and chlorophyll and evaluate their trophic relations in Daechung Reservoir. For this study, we compared longterm water quality data among three zones along with trophic state using 1993 to 2002 dataset, obtained from the Ministry of Environment, Korea. Total phosphorous (TP), Secchi depth (SD) and chlorophyll (CHL) showed typical longitudinal declines from the riverine to lacustrine zone, but total nitrogen (TN) was not evident. Largest seasonal variations in TP and CHL occurred during the summer monsoon from July to August. In the reservoir, ambient TN averaged 1.67 mg L^{-1} and ratios of TN : TP averaged 88.04, indicating that nitrogen is not likely limited but phosphorus limitation was evident. Trophic State Index (TSI), based on CHL, TP, and SD, varied depending on the zones and seasons. Mean TSI (TP) in the riverine zone was 62 during the monsoon, indicating a hypertrophic condition, whereas the mean was 40 in the lacustrine, indicating a nearly oligotrophic. Values of TSI (CHL) showed maximum in the transition zone during the monsoon. The deviation analysis of TSI showed that about 65% of TSI (CHL)-TSI (TP) and TSI (CHL)-TSI (SD) values were less than zero and the lowest values were -42, indicating an effect of inorganic turbidity on algal growth in the reservoir. Correlation analysis of CHL vs. SD showed greater correlation coefficient ($p < 0.001$, $r = -0.47$) in the transition than other two zones ($p < 0.001$, $r \leq -0.40$). Correlation analysis of TP vs. CHL was greatest in the lacustrine and TP was minimum in the lacustrine zone, indicating a lowest yield of algal biomass in the lacustrine. Overall data suggests that zonal response of chlorophyll yield at a given nutrient unit is clearly differed among the longitudinal gradients, so the management strategy such as cross sectional modelling should be provided in each zone.

Key words : longitudinal zone, reservoir, nutrient, chlorophyll, trophic state

서 론

우리나라는 1970년 이후로 여러 대형댐을 건설해 왔

으며, 이로 인하여 조성된 대형 인공호는 1990년대 이후 급격히 부영양화가 진행되고 있는 실정이다(박, 2005). 우리나라 대형인공호의 부영양화는 대부분 점오염원 및 비점오염원으로부터 영양염류가 과다유입하게 유입됨에

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

의한 것으로 알려져 있으며, 부영양화를 조절하는 주요인자는 총인(TP)으로 보고되고 있다(An and Park, 2002; An, 2003).

최근 인공호에 대한 다양한 연구결과에 따르면, 부영양화는 수계로부터의 영양염류의 유입 뿐만 아니라 하절기의 무산소 상태에 의한 내부부하(Internal loading)와 수체류시간의 증가 등으로 인하여 심각도가 더해가고 있는 것으로 알려지고 있다(이와 김, 1996). 또한, 인공호의 형태적 특성, 계절성 집중호우 및 호수내의 상·하류간의 변이(Longitudinal gradient) 역시도 호수 수질관리에 큰 어려움을 주고 있다. 대청호는 저수 후 4년만인 1984년 수화현상이 최초로 보고된 이래 거의 매년 비슷한 시기에 수화현상이 보고되고 있으며(이 등, 2003), 대청댐 완공 이후로 총인과 총질소(TN)의 농도가 꾸준히 증가하는 것으로 보고된 바 있다. 대청호의 경우 7~8월의 장마기동안 영양염류의 대량 유입으로 인하여 수체의 인 부하가 극대화되며, 호수의 구역별 총인 농도에도 큰 변이가 있는 것으로 보고되고 있다(An, 2000; An and Jones 2000; An *et al.*, 2001). 특히 대청호는 수체안정화가 이루어진 8월 이후 광투과도 증가, 입자성 영양염류에 대한 용존 영양염류의 상대적인 비율증가 및 조류의 영양염류 흡수율 증가 등에 의한 조류대발생(Algal bloom)이 종종 보고되고 있는 실정이다(An, 2000; An and Jones 2000; An *et al.*, 2001).

최근의 연구에 따르면 호수의 형태적 변이(Morphometry)는 수질관리 시 고려되어야 하는 중요한 요인이며, 형태가 길고 좁아 수체의 종적혼합이 제한된 인공호에서는 수온, 전기전도도, 영양염 및 엽록소-a (CHL) 농도의 상·하류 간 변이가 심하기 때문에 이를 계절특성과 공간특성에 반영하여 영양상태 판정 시기와 지점 등이 적절하게 고려되어야 한다고 제시하고 있다(이 등, 2002b). 부영양화에 대한 호수의 영양상태의 판정은 국내·외적으로 다양하게 이루어져왔다(An, 2000; An *et al.*, 2001; An and Park, 2002). 외국에서는 Vollenweider 및 U.S. EPA의 판정기준이 도입된 이후, 1980년대에 Forsberg and Ryding(1980)의 기준, 그리고 1990년대에는 Havens(1994)와 Nurnberg(1996)의 호수 영양상태 판정기준이 도입되어 왔다. 우리나라에서의 인공호 부영양화 판정은 Vollenweider의 분류기준을 기본으로 하였으며, 조류성장의 1차 제한요인 중의 하나인 총질소:총인의 비율을 수질기준항목으로 채택하고 있다. 이 중에서도 총인은 영양단계판정 시 1차제한 영양염으로 잘 알려져 있으며, 총인과 밀접한 상관관계를 보이는 투명도(Transparency)와 엽록소-a 역시 이용되고 있다(OECD, 1982). 또한 이

러한 세 가지 부영양화 변수를 이용하여 2차적 지수를 이용하는 TSI(Trophic State Index)지수(Carlson, 1977)는 호수 관리목적으로 전 세계적으로 이용되고 있으며, 우리나라 인공호의 수질평가에서도 폭넓게 적용되고 있다(김 등, 2003).

본 연구 대상인 대청호는 저수면적 72.8 km², 호수길이 80 km, 저수량 15억 톤, 유역면적 4,134 km²의 대형인공호로서 대전시를 비롯하여 청주시와 금강 중·하류의 식수는 물론 생활용수 및 농업용수를 공급하는데 중추적 역할을 하고 있다. 기존의 대청호를 대상으로 한 연구로는 조류대발생, 수질악화, 식물성플랑크톤의 군집변화 및 부영양화와 영양단계변화에 관한 다양한 연구가 실행된 바 있으며, An and Jones(2000) 및 Ahn *et al.*(2003)은 물론 강우의 강도 및 연별 분포량은 수체의 부영양화에 중요한 요인임을 밝힌 바 있다. 하지만 여전히 호수내의 부영양화 평가 시 수체내의 형태별 특성(유수대, 추이대, 정수대)에 대한 적용평가는 미미한 실정이며, 이에 대한 호수관리 대책은 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 호수내의 종적구배특성에 따른 각각의 호수대(Lake zone)에서의 영양염류, 엽록소의 역동성 및 영양상태(Trophic state)를 파악하고, 수질 변수들 간의 변이를 분석하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구는 대청호의 종적구배특성을 파악하기 위하여 수심을 기준으로 하여 상류부에 위치한 유수대(Riverine zone, Rz), 중류부의 추이대(Transition zone, Tz), 댐 인근의 정수대(Lacustrine zone, Lz)로 대별하였으며, 각각의 호수대에 대한 연구대상 지점은 Fig. 1과 같다.

유수대는 평균 수심이 4~8 m 내외를 보이는 S1 지점으로서 충북 옥천군 안내면 장계리 장계교에 위치하고, 추이대는 평균 수심이 10~20 m 내외인 S2 지점으로서 충북 보은군 회남면 어성리 회남교에 위치하고 있다. 정수대는 댐 근처의 최하류부로서 평균수심이 30~60 m인 S3 지점으로서 충북 청원군 문의면 덕유리 댐 축 앞에 위치하고 있다. 이러한 종적구배에 따른 수심변이 특성은 Thornton(1990)의 인공호 모델 특성에도 잘 일치한다.

본 연구에 이용된 자료는 1993년부터 2002년까지의 10년간 월별로 측정된 환경부 수질측정망자료(<http://water.nier.go.kr>)로서 수온, pH, 용존산소량(Dissolved oxygen), 투명도(Secchi depth, SD), 총인, 총질소 및 엽록소-a의 항목을 이용하였다. 강우량 자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 획득한 지역 자료를 이용하였다.

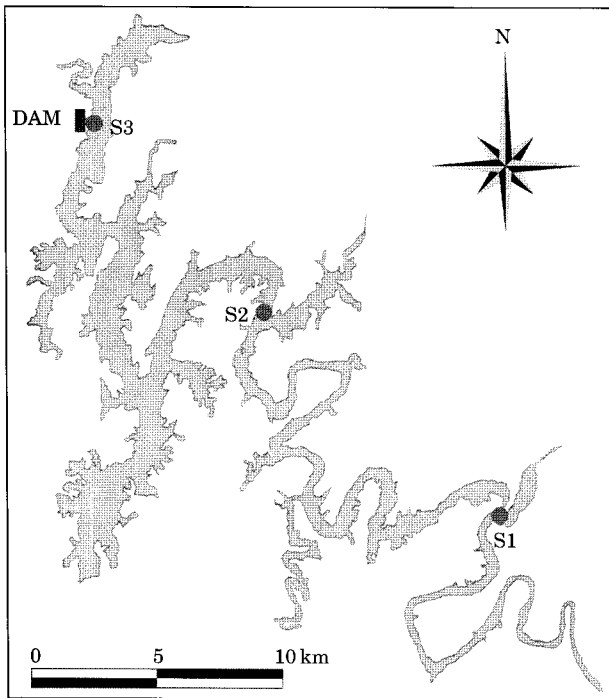


Fig. 1. The study sites in Daechung Reservoir.

획득한 수질자료는 지점별 변이를 파악하기 위하여 각 지점별로 분석되었으며, 또한 몬순강우에 의한 계절적 변이를 파악하기 위하여 5~6월을 몬순 전기 (Premonsoon), 7~8월은 몬순기 (Monsoon), 9월~10월을 몬순후기 (Postmonsoon)로 대별하여 분석하였다.

영양상태 지수 분석은 측정된 자료 중에서 총인, 투명도, 엽록소-a를 TSI지수로 전환하여 활용하였으며, 이용된 계산식은 Carlson (1977)의 지수 산정 방식을 따랐다.

$$TSI(TP)=14.42 \ln TP (\mu\text{g L}^{-1})+4.15$$

$$TSI(CHL)=9.81 \ln CHL (\mu\text{g L}^{-1})+30.6$$

$$TSI(SD)=-14.41 \ln SD(m)+60$$

또한, 1차 생산력에 대한 추정치의 변수로서 엽록소-a를 활용하였으며, 조류의 성장을 1차적으로 제한하는 제한요인이 영양염류인지 혹은, 광제한인지를 판가름하기 위하여 TSI의 편차 분석 (Trophic State Index Deviation)을 실시하였다. 즉, TSI(CHL) - TSI(SD) 및 TSI(CHL) - TSI(TP)의 차이값을 산정하여 제한요인에 대한 특성을 비교·분석하였다.

결과 및 고찰

1993~2002년까지의 연별 강우량분석에 따르면, 1998

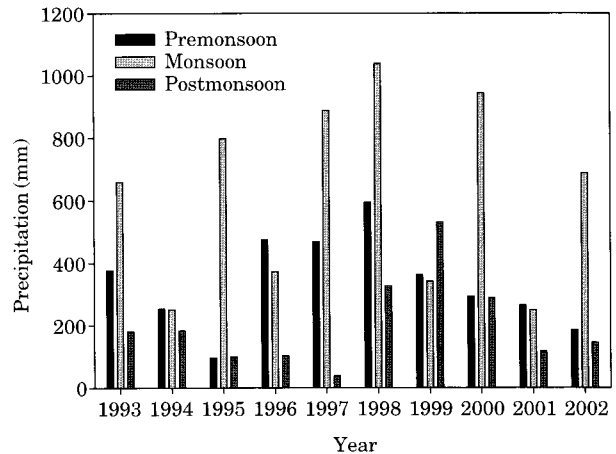


Fig. 2. Seasonal rainfall, based on dataset of 1993~2002, in the premonsoon, monsoon, postmonsoon.

년은 몬순 전기와 몬순기에 각각 594, 1,037 mm를 보였으며, 총 연강수량은 2,336 mm으로 본 연구대상 기간 중 가장 높은 수치를 보여 집중강우해로 판단되었다 (Fig. 2). 반면, 2001년은 828 mm로서 가장 가뭄해로 나타나, 수리수문학적으로 호수내의 수 체류시간이 가장 길은 해로 사료되었다 (Fig. 2). 기존의 육수학적 연구 (An and Jones 2000; An et al., 2001)에서 제시된 바와 같이, 우리나라의 강우는 동아시아 몬순기후의 특성에 의해 계절적으로 변이가 크다는 결과와 일치하였다. 즉, 연간 총강수량과 각 시기별 상관도 분석에 따르면, 몬순기간에 내린 강우량은 타 기간에 비하여 (2001년 제외) 뚜렷하게 높게 나타났으며 ($p < 0.001, n=10$), 총 연강수량의 절반 혹은 2/3를 상회하는 것으로 나타났다. 이러한 강우 양상은 An (2000, 2003) 및 An and Jones (2000)의 연구에서 제시한 바와 같이 영양염류 및 조류증식 등의 현상에 뚜렷한 계절별 특성을 보이며, 연별 부영양화 현상에 직접적으로 영향을 줄 것으로 사료되었다.

호수의 부영양도 평가에 핵심적으로 이용되는 총인, 총질소 및 투명도는 각 구역 (Zone)별로 큰 변이를 보였다. 환경부의 호소수질기준 (<http://water.nier.go.kr>)에 따르면, 총인은 우수대, 추이대가 각각 평균 33, 31 $\mu\text{g L}^{-1}$ 을 기록하여 수질은 '보통상태'로 판명되었고, 정수대는 23 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로서 '약간 좋은 상태'로 나타났으며, 전체 총인 농도의 평균은 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ 을 기록하여 '약간 좋은 상태'로 판명되었다 (Fig. 3). 그러나 총인에 의한 부영양화 판정은 어떤 기준을 따르느냐에 따라 달라지기 때문에 이에 대한 국내 기준에 대한 검토가 필요한 것으로 사료되었다. 대청호의 총인 농도는 상류에서 하류로 내려갈수록 낮아

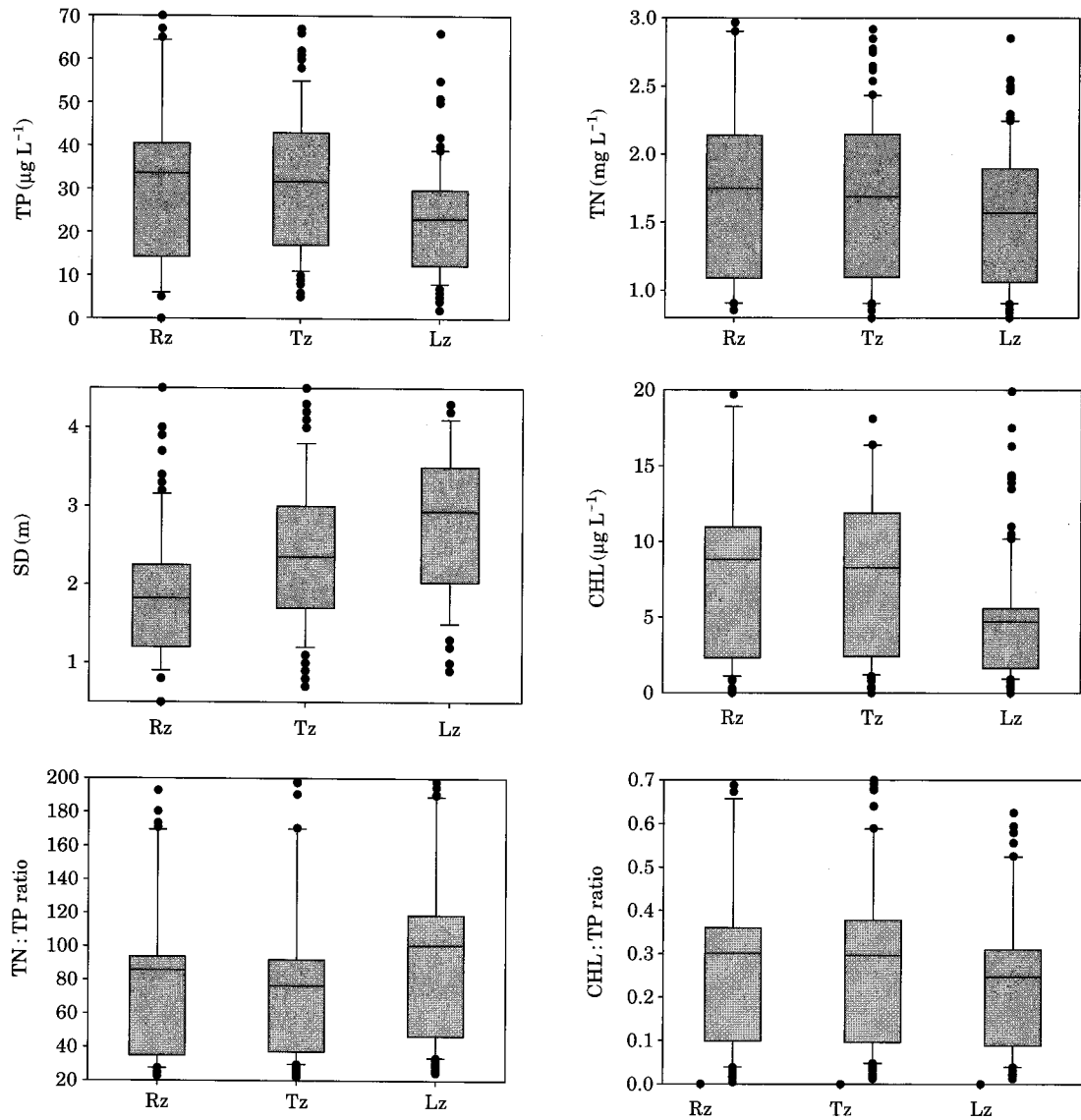


Fig. 3. Spatial changes of water quality parameters in the riverine (Rz), transition (Tz) and lacustrine (Lz) zone during 1993~2002.

지는 양상을 보였는데, 이는 입자성 인(Particulate phosphorus)의 침강(Kennedy *et al.*, 1981) 및 1차 생산자에 의한 소비 등으로 인한 것으로 사료되었다. 대청호는 장마기간 총인의 유입량이 급격히 증가한다고 보고된 바 있으며(An, 2000), 유입량의 상당부분은 강우로 인한 토양침식에 기인한 입자성 인으로서 하류로 갈수록 침강되어 호안에 침적되는 성향이 강하다고 보고된 바 있다. 이러한 특성 때문에 하류부에서는 인이 다시 용출되어 부영양화의 주요 원인이 되므로 관리가 요구되는 실정이다(정 등, 2005).

총인의 월별 변화추이에 따르면, 증적구배의 특성이 더

욱 뚜렷하게 나타났다. 유수대(Riverine zone, Rz)는 월평균 총인의 농도가 최저치인 2월($12 \mu\text{g L}^{-1}$)에 비하여 가장 높은 달인 7월($70 \mu\text{g L}^{-1}$)의 농도가 6배까지 차이가 나는 반면, 정수대(Lacustrine zone)에서는 최저인 4월($12 \mu\text{g L}^{-1}$)과 최고인 10월($43 \mu\text{g L}^{-1}$)에 4배의 차이를 보였다. 또한 각 지점에서 최고 총인 농도를 보인 시점은 상류부터 7, 8, 10월로 나타나 하절기 강우가 중요한 인자임을 제시하였다. 정수대, 추이대 및 유수대의 3개 구역에서는 11월부터 이듬해 5월까지 환경부의 수질기준 안에 의거하였을 경우 ' 좋음'에서 '약간 좋음'의 상태를 유지하다가 장마의 영향을 받는 6~10월까지는 정수대

의 6, 7월을 제외하고 모두 '보통' 이하를 기록하여 총인의 농도는 하절기 강우에 의하여 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다(An, 2000).

평균 총질소의 농도는 유수대, 추이대, 정수대가 각각 평균 1.8, 1.7, 1.6 mg L⁻¹로서 환경부의 수질기준안에 의거할 때 '매우 나쁨' 상태인 1.5 mg L⁻¹을 모두 초과하였으며, 지점별 변이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한

총질소의 농도는 북미 및 유럽의 호수들에 비하여 본 연구 대상인 대청호 전역에서 월등히 높은 것으로 나타났다. 총질소의 농도만을 평가할 때, 대청호는 분명히 부영양-과영양(Hypertrophic)상태를 보이지만, 평균 총질소:총인 비율은 3개의 구역에서 모두 17 이상으로 나타나는 제한(Phosphorous limitation) 상태인 것으로 판명되어 우리나라 호수 수질 기준에 의거할 때 총질소의 기준

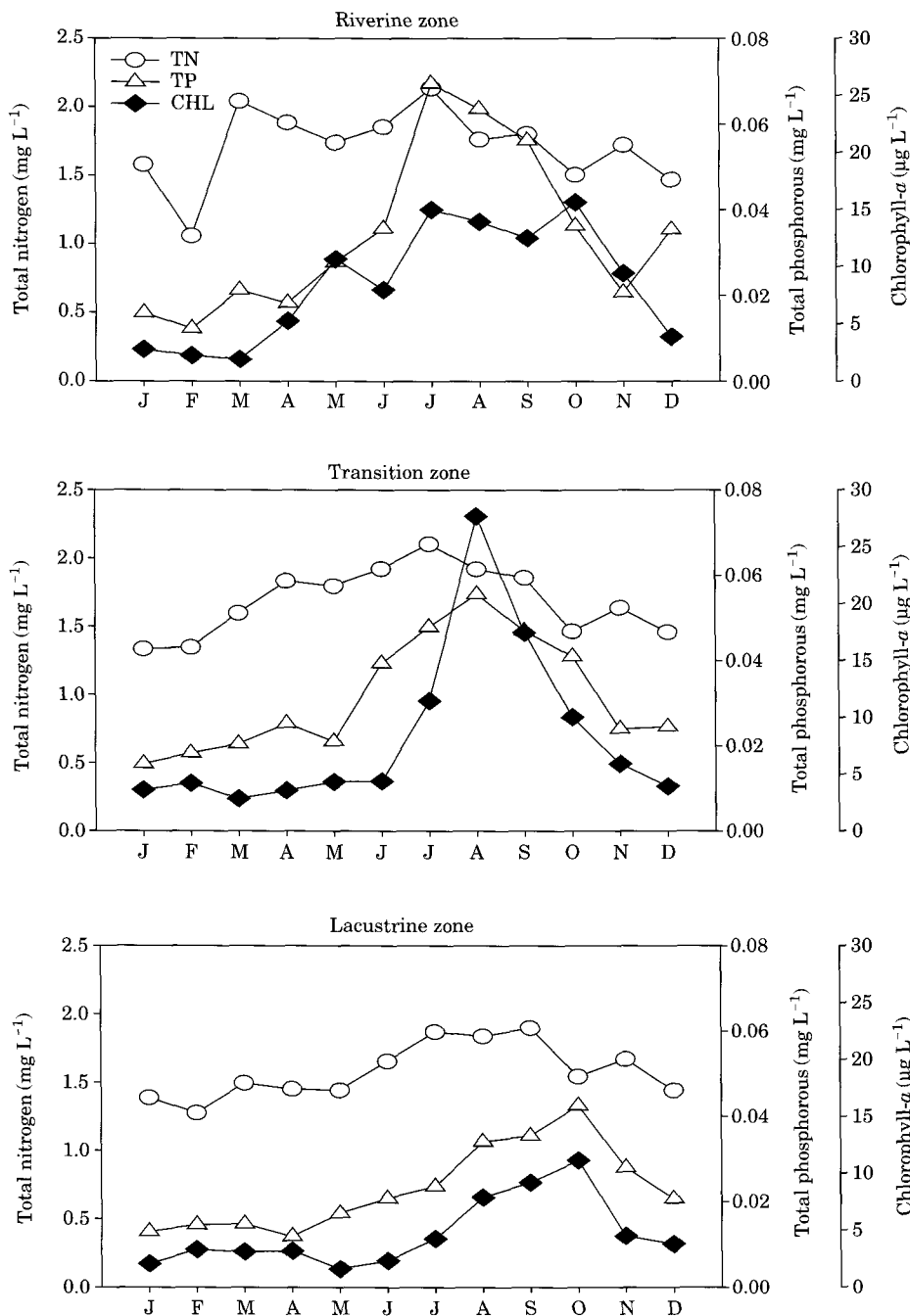


Fig. 4. Monthly changes of TP, TN and CHL in the three zones.

은 적용하지 않는 것이 적절한 것으로 나타났다. 총질소 : 총인 비율은 3개 구역의 전체 측정자료 가운데 96%가 인 제한상태로 나타나 대청호의 1차 제한요인으로는 총인이 제시되었다. 총질소의 농도 역시 지점별, 월별 변이를 보였으나 총인보다는 강우에 의한 영향이 적은 것으로 나타났다. 유수대에서 최저농도를 보인 2월(1.1 mg L⁻¹)과 7월(2.1 mg L⁻¹)은 1.9배, 정수대는 2월과 9월에 각각 1.3, 1.9 mg L⁻¹로 1.5배의 차이를 보여 상류부인 유수대 보다는 댐 근처 정수대에서 농도변화가 적게 나타났다.

호소 내 1차생산력 혹은 조류현존량을 대변하는 항목인 엽록소-a (Kimmel and Groeger, 1984)는 각 지점의 평균이 유수대 8.8 µg L⁻¹, 추이대 8.3 µg L⁻¹, 정수대 4.7 µg L⁻¹을 보여 정수대와 다른 지점 간의 변이가 크게 나타났으며 총인과 마찬가지로 상류에서 하류로 갈수록 평균치가 낮아지는 양상을 보였다. 또한 Kimmel and Groeger (1984)에 따르면 정수대는 빈영양상태(Oligotrophic)를 띠는 경향이 있다고 보고된 바 있었는데, 본 연구에서도 동일한 결과를 나타내었다. 평균 엽록소-a 농도는 7.3 µg L⁻¹로서 환경부의 수질기준에 의하면 '중음' 상태를 보였으며, 정수대의 경우는 '매우 좋음' 상태를 나타내었다. 엽록소-a의 월별 변이는 지점별 변이보다 많은 차이를 보였다. 일반적으로 모든 지점에서 엽록소-a의 농도는 하절기에 집중적으로 높아졌으며 특히 추이대의 경우 8월에 27.7 µg L⁻¹을 기록하여 '약간 나쁨' 상태를 보였다. 이러한 결과는 추이대에서 1차 생산력이 가장 높아진다는 기존의 연구결과와 일치하였다(Kimmel and Groeger, 1984). 엽록소-a와 강한 역상관관계를 갖는 투명도 역시 위의 세 양상과 같이 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는 양상을 보였으며, 이는 광투과를 방해하는 조류의 생산량과 투명도 감소로 인한 조류의 성장 제한에 밀접한 관계가 있는 것으로 보고된 바 있다 (Kimmel, 1981).

계절별 조류(Algae)의 변이 평가를 위해 이용된 엽록소-a는 총질소보다는 총인에 의하여 조절되는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 이전에 언급된 바와 같이 총질소 : 총인 비율에 의하여 지지되었다(Fig. 4). 총질소의 농도는 총인에 비하여 지점별, 월별 변이가 적은데 이것은 이미 대청호 내 총질소가 조류 성장에 충분히 공급되고 있음을 반증한다. 또한, 수체 내 광투과도의 지표로서 측정된 투명도 평가에 따르면, 광제한 효과는 상류부인 유수대가 하류부인 정수대보다 뚜렷하게 더 높게 나타났다. Thornton *et al.* (1981)은 일반적으로 유수대는 투명도, 정수대는 영양염이 1차적 제한요인으로 작용한다고 보고한 바 있으며, 본 연구에서도 유수대는 투명도($r=-$

0.39, $p<0.001$), 정수대는 총인($r=0.45$, $p<0.001$)이 엽록소-a에 대한 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 한편 추이대의 엽록소-a 농도가 8월에 최고치를 기록하였는데, 이는 상류보다 유속이 느려 조류의 생장이 원활하고, 인의 흡수율(Uptake ratio)이 높으며, 수층 내 적절한 광투과 현상 때문으로 사료되었다(Fig. 4). 1차적인 자료를 이용하여 산정된 Carlson (1977)의 TSI지수 분석에 따르면, 1~5월 동안의 기간에는 투명도에 의한 TSI지수가 가장 악화된 것으로 나타났으며, 총인에 의한 TSI지수는 6월~10월까지 기간에 부영양상태로 판정되어 가장 수질이 악화된 상태를 보였다.

각 지수의 특성을 보면 TSI(TP)는 유수대에서 7, 8월 기간의 월별 변이가 각각 61~62로서 유사한 수치를 보였으며, 과영양상태를 나타내 장마에 의한 총인의 대량유입이 직접적으로 반영되었다. 추이대 역시 동일기간 동안 각각 58~59로 부영양화를 나타내 하절기에 부영양화가 가장 심한 것으로 나타났다(Fig. 5). 반면에 정수대는 최고치가 10월에 57로 나타났으며 8, 9월 모두 55로 나타

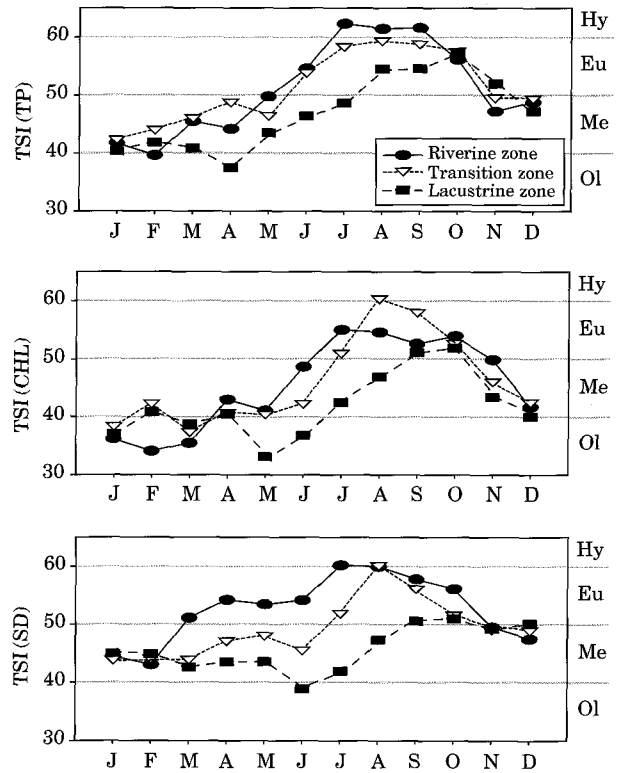


Fig. 5. Trophic State Index (TSI) based on TP, CHL and SD, in Daechung Reservoir. The trophic criteria of oligotrophic (Ol), mesotrophic (Me), eutrophic (Eu) and hypertrophic (Hy) was followed after Carson (1977).

나 상류의 유수대보다 한 달가량 늦게 부영양화를 보였으며, 11월까지도 52로 부영양화가 이어졌다. Kennedy and Nix (1987)는 정수대는 일반적으로 영양염이 제한요인으로 작용하며, 수층이 혼합되는 시기는 내부부하에 의한 부영양화가 발생한다고 보고한 바 있다. 따라서 대청호도 정수대의 부영양화는 내부부하(Internal loading)의 영향으로 사료되었다. 정수대는 강우영향이 거의 없는 1월에서 4월까지 40 전·후를 보여 중영양(Mesotrophic)과 빈영양의 경계선에서 안정적으로 머물렀으며, 유

수대와 추이대보다 낮은 영양상태를 보였다. 이는 인공호의 하류로 갈수록 낮은 영양상태를 보인다는 기존의 연구결과(Thornton *et al.*, 1981)와 일치하였다.

호수의 영양상태를 평가할 때 최적의 변수인 TSI (CHL)의 분석에 따르면, 추이대에서는 8, 9월에 각각 61 (부영양), 58 (과영양)을 보여 최고치를 보였다. 이러한 양상은 Kimmel and Groeger (1984)의 가설과 일치하는 결과로서, 특히 9월에는 이미 이전에 유입된 영양염류가 풍부하고, 수체 내 광투과율이 증가하며, 이와 함께 유속까

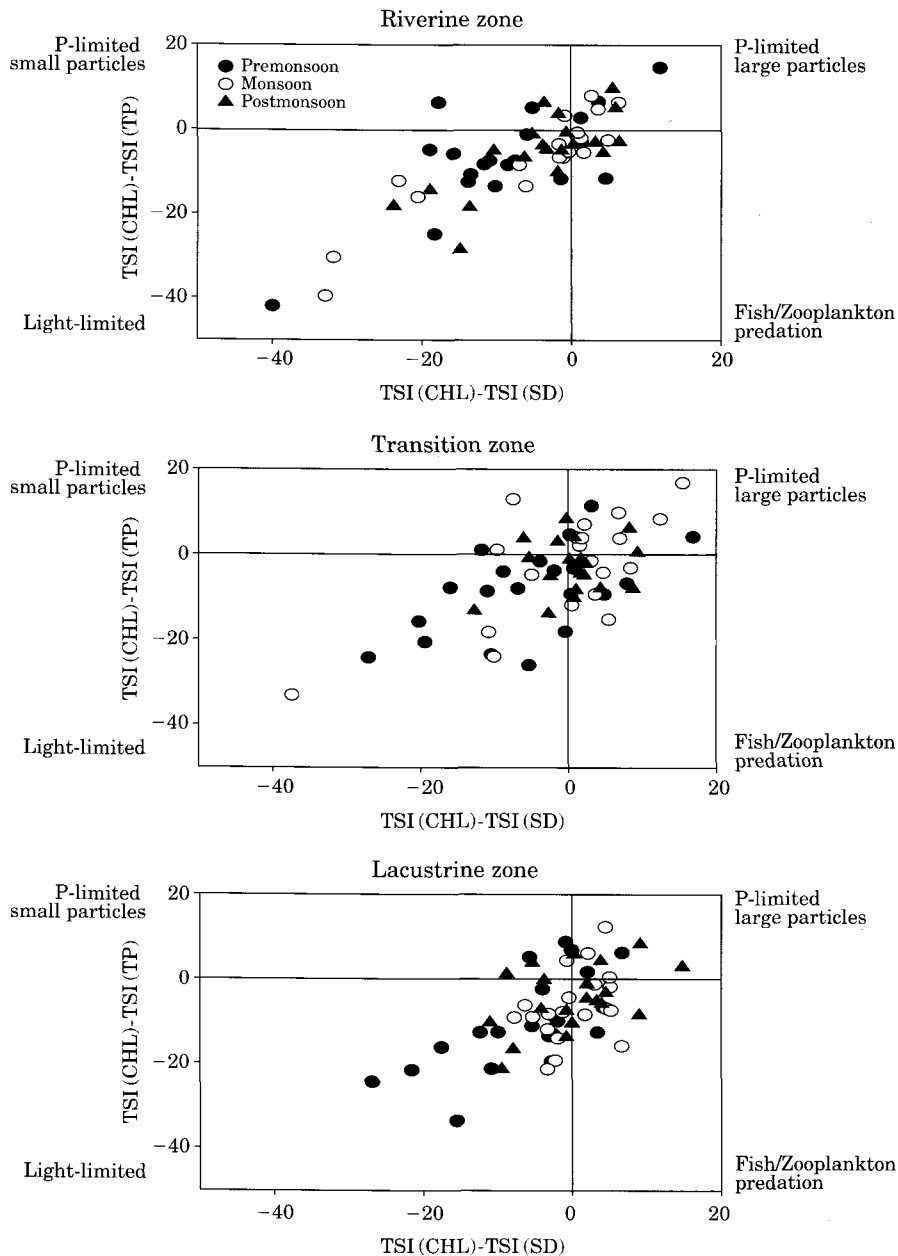


Fig. 6. Trophic State Index deviations in riverine, transition and lacustrine zones.

지도 느려져 조류 성장에 최적의 조건을 갖기 때문인 것으로 사료되었다. TSI (CHL)은 5월까지의 특별한 양상을 보이지 않다가 강우가 시작되는 6~11월까지 상승한 값을 보였다. 반면에 정수대는 5월에 33을 기록하여 빈영양으로 나타나는 등 8~10월을 제외한 나머지 시점은 43 이하의 낮은 수치를 보여 정수대의 육수학적 특징을 잘 반영하였다. 각 지점의 최고치는 상류에서 하류로 갈수록 늦어지는 특성을 보이며 이는 기존의 1차 생산량에 대한 연구결과와 일치하였다(Thornton *et al.*, 1981; An, 2000).

투명도에 의한 부영양화 지수인 TSI (SD)는 다른 지수 값에 비하여 상대적으로 변이가 적은 것으로 나타났다. 유수대는 연중 8개월(3~10월) 이상을 부영양상태를 유지하였으며 영양단계는 하류로 내려갈수록 감소하는 경향을 보였다. 정수대는 평균 45로 변이가 ± 3 을 초과하지 않아 중영양상태에서 안정된 움직임을 보였으며, 이는 외부에서 흘러드는 유입수의 영향이 가장 적음을 반영하였다. 또한 정수대는 10월부터 이듬해 6월까지 지속적으로 수치가 낮아졌으며 6월은 평균 38로 빈영양상태를 보였다. 이는 유입수가 기존 호소수와의 밀도차를 보여 중층으로 유입되어 상층부에는 유입수의 영향이 미치지 않은 결과로 사료되었다(An, 2000).

하절기 문순장마를 기점으로 하여 문순 전기, 문순기 및 문순 후기로 대별한 지점별 영양상태지수(TSI)의 편차분석에 따르면, 유수대에서 TSI (CHL)-TSI (TP)과 TSI (CHL)-TSI (SD)의 값 중에서 65% 가량이 -42까지의 음수값을 보였으며, 이는 대청호 조류 성장에 광제한 효과가 나타나는 것으로 보여 주었다(Fig. 6). 또한 1차제한 요인을 분석하기 위하여 실시한 각 지점별 영양염류 및 투명도와와의 상관도 분석에 따르면(Table 1), 유수대와 추이대는 투명도가 엽록소-a와 가장 높은 상관관계를 보였으며, 정수대는 총인과 투명도가 각각 0.45, -0.40의 상관도를 나타내 유사한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 유입수의 영향을 받아 수체가 비교적 불안정한

유수대와 추이대는 투명도가 1차 생산량에 가장 큰 영향을 미치지만, 수체가 안정되는 정수대에서는 투명도와 함께 총인의 농도가 조류 성장에 제한요인으로 작용하는 것으로 나타났다(Table 1).

상기 내용을 종합해보면, 본 연구 대상지와 같이 인공호 상·하류간의 형태적 종적구배가 뚜렷한 경우, 각 구역별 영양염 농도 구배 및 광투과도 구배는 1차 생산력에 직접적으로 영향을 주어 뚜렷하게 다른 양상을 보였다. 따라서, 부영양화에 대한 경험적 모델개발 시 시·공간별 분석이 절대적으로 필요한 것으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 대청호에서 영양염과 엽록소-a의 구간별 특성과 이에 따른 영양단계와의 관계를 살펴보았으며, 유수대, 추이대, 정수대의 세 구간에 걸쳐 환경부에서 제공하는 1993년에서 2002년까지의 수질 및 영양상태 자료를 비교·분석하였다. 총인(TP)과 투명도(SD) 및 엽록소-a(CHL)는 호소대에서 정수대로 갈수록 감소하는 양상을 보였으나, 총질소의 경우는 종적구배를 보이지 않았다. 대청호에서의 총인과 엽록소-a는 여름철 장마기(7, 8월)에 가장 큰 계절적 변이를 보였으며, 총질소의 농도와 총질소 : 총인 비율은 각각 평균 1.67 mg L^{-1} , 88로 나타나 대청호의 제한요인은 총인으로 사료되었다. 엽록소-a와 총인, 투명도를 기반으로 한 영양상태지수는 구간별, 계절별로 구분되어 비교하였다. TSI (TP)는 장마기에 유수대는 평균 62로 나타나 과영양상태를 보인 반면, 대조적으로 정수대는 평균 40으로 거의 빈영양 상태를 가까운 수치를 보였으며, TSI (CHL)는 장마기에 추이대에서 가장 높은 값을 나타냈다. TSI 편차분석에 따르면 TSI (CHL)-TSI (TP)와 TSI (CHL)-TSI (SD)의 약 65% 가량이 0보다 낮은 수치를 보였으며, 또한 최저 -42를 보여, 이는 인공호에서의 조류 성장에 무기물에 의한 탁수가 영향을 끼치는 것으로 판단되었다. 엽록소-a와 투명도의 상관분석 결과 추이대에서의 상관도($p < 0.001$, $r = -0.47$)가 다른 두 지점($p < 0.001$, $r = -0.40$)에 비하여 높게 나타났으며, 한편 총인과 엽록소-a의 경우 정수대에서 상관도가 가장 높게 나타난 반면, 총인과 조류생산량은 가장 낮은 수치를 보였다. 결론적으로 인공호 상·하류간의 형태적 종적구배가 뚜렷한 경우 각 구역별 영양염류 농도구배 및 광투과도 구배는 1차 생산력에 직접적으로 영향을 주어 뚜렷하게 다른 양상을 보였다.

Table 1. Correlation analysis of chlorophyll-a (CHL) on total nitrogen (TN), total phosphorous (TP), and secchi depth (SD) in three zones of the reservoir.

Chlorophyll-a		TN vs CHL	TP vs CHL	CHL vs. SD
Riverine zone	<i>r</i>	0.25	0.20	-0.39
	<i>p</i>	0.008	0.036	<0.001
Transition zone	<i>r</i>	0.10	0.30	-0.47
	<i>p</i>	0.261	0.001	<0.001
Lacustrine zone	<i>r</i>	0.21	0.45	-0.40
	<i>p</i>	0.022	<0.001	<0.001

사 사

본 연구에 활용할 수 있도록 자료를 제공한 환경부에 사의를 표합니다.

인 용 문 헌

- 김호섭, 황순진, 고재만. 2003. 도심의 얇은 인공호인 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가. *육수지* **36**: 161-171.
- 박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. *육수지* **38**: 382-392.
- 이정준, 이정호, 박종근. 2003. 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관 관계. *육수지* **36**: 269-276.
- 이정호, 김용재. 1996. 낙동강 수계 댐 호의 부착규조 및 영양 단계 평가. *육수지* **14**: 18-28.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002b. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석. *육수지* **35**: 36-44.
- 정승현, 안치용, 최애란, 장감용, 오희목. 2005. 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군집의 관계. *환경생물* **23**: 57-63.
- Ahn, C.-Y., H.-S. Kim, B.-D. Yoon and H.-M. Oh. 2003. Influence of rainfall on cyanobacterial bloom in Daechung Reservoir. *Korean J. Limnol.* **36**: 413-419.
- An, K.-G. 2000. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean J. Limnol.* **33**: 222-229.
- An, K.-G. 2003. Spatial and temporal variabilities of nutrient limitation based on in situ experiments of nutrient enrichment bioassay. *Journal of Env. Sci. & Healthpart A*. **38**: 687-882.
- An, K.-G. and J.R. Jones. 2000. Factors regulating blue-green dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **432**: 37-48.
- 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.
- An, K.-G. and S.S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study. *Ecological Modelling* **152**: 191-203.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Forsberg, C. and S. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish water-receiving lakes. *Archiv für Hydrobiologie* **89**: 189-207.
- Havens, K.E. 1994. Seasonal and spatial variation in nutrient limitation in a shallow sub-tropical lake (lake Okeechobee, FL) as evidenced by trophic state index deviations. *Arch. Hydrobiologia* **131**: 39-53.
- Kennedy, R.H., K.W. Thornton and J.H. Carroll. 1981. Suspended sediment gradients in Lake Red Rock. *Amer. Soc. Civil Engr.*, New York. p. 1318-1328.
- Kennedy, R.H. and R.H. Nix. 1987. Proceedings of the De Gray Lake Symposium. Technical Report, E-87-4.
- Kimmel, B.L. 1981. Land - water interactions: Effects of introduced nutrients and soil particles on reservoir productivity. *Tech. Compl. Rept., Proj. No. A-088-OKLA*. Office of Water Research and Technology, U.S. Department of Interior. 95pp.
- Kimmel, B.L. and A.W. Groeger. 1984. Factors controlling phytoplankton production in lake and reservoirs. U.S. EPA 440/5/84-001 277-281.
- Nurnberg, G.K. 1996. Trophic state of clear and colored, soft- and hardwater lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish. *Lake and Reservoir Management* **12**: 432-447.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring assessment and Control OECD. Paris. 154pp.
- Thornton, K.W. 1990. Reservoir Limnology: Ecological perspectives, Wiley interscience. New York.
- Thornton, K.W., R.H. Kennedy, J.H. Carrol, W.W. Walker, R.C. Gunkel and S. Ashby. 1981. Reservoir sedimentation and water quality. *Amer. Soc. Civil Engr.*, New York. p. 654-661.

(Manuscript received 15 May 2007,

Revision accepted 14 June 2007)