

인공댐과 그 영향을 받는 하류하천의 수질변동 역동성 : 사례 연구

한 정 호 · 안 광 국*

(충남대학교 생명과학과)

Water Quality Variation Dynamics between Artificial Reservoir and the Effected Downstream Watershed: the Case Study. Han, Jung-Ho and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objective of this study was to analyze temporal trends of water chemistry and spatial heterogeneity between the dam site (Daecheong Reservoir, S1) and the downstream (S2~S4) using water quality dataset (obtained from the Ministry of Environment, Korea) during 2000~2007. Water quality, based on eight physical and chemical parameters, varied largely depending on the years, sampling sites, and the discharge volume. Conductivity and nutrients (TN and TP) showed a decreasing trend in the downstream (S4) rather than the dam site during the monsoon. Spatial variation increased toward downstream (S4) from Daecheong Reservoir (S1). Also, BOD and COD increased toward downstream. Because of input of nutrient and pollutant near-by S1, lentic ecosystem in monsoon, BOD and COD were slightly increased. whereas relatively decreased in S4, lotic ecosystem in monsoon, by dilution effect of nutrient and pollutant by discharge from upper dam, S1. Spatial variation of SS increased toward downstream (S4) by the side of Daecheong Reservoir (S1). Based on the dataset, efficient water quality management in the point source tributary streams is required for better water quality of downstream. Monthly characteristics of DO showed the lowest value in the monsoon that tend to increase water temperature. DO was lowest in October at S1 because turbid water, input to the Daecheong Reservoir in the monsoon affect to the postmonsoon period. In contrast, water temperature increased toward summer monsoon, in spite of some differences showed between S1 and S4 environment. Overall, the characteristics of water quality in downstream region have close correlation with discharge amount of Daecheong Reservoir. Thus, those characteristics can explain that discharge control of upper dam mainly affect to the water quality variation in downstream reach.

Key words : Daecheong Reservoir, monsoon rain, downstream, TN : TP mass ratio

서 론

우리나라 수자원은 여름 몬순 기간에 편중되어 있어 연도별, 지역적으로 시·공간적 불균형을 초래되고 있기

때문에 안정적인 수자원의 관리와 공급을 위하여 4대강 및 주요 하천에 댐들이 건설되었다. 댐건설로 새롭게 형성된 인공호는 하천과는 다른 수체특성을 보이며, 하절기 강우로 인한 수체의 변화양상도 기존의 하천과 다른 특성을 보인다. 최근 우리나라의 하천이나 호수 등 중대형

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

수체의 연구에 따르면, 여름철 장마는 호수 및 하천에 탁수를 발생시키거나(신 등, 2003, 2006; Shin and Hwang, 2004), 영양염류의 과다유입으로 인하여 부영양화를 초래하는 등(An and Jones, 2000; An *et al.*, 2001; An and Kim, 2003), 문순강우가 이화학적 수질 특성에 직접적인 영향을 준다는 연구가 다양하게 보고되고 있다. 이와 같은 하절기 집중적인 강우는 하천이나 호수에 급격한 유량 증가와 수체에 음적, 양적인 변화를 가져오는 것으로 보고되고 있다(안과 신, 2005). 특히 하절기 동안 문순강우로 인하여 인(P)과 질소(N) 같은 각종 영양염류의 유입이 보고되고 있으나(An, 2000a, b, 2001), 이러한 연구는 호수시스템 혹은 하천시스템에서 각각의 연구가 진행되어 오고 있다. 이처럼 문순강우로 인하여 영향을 받는 국내 대부분의 인공호나 하천에 대한 많은 연구들은 각각의 수체에만 국한되어 왔을 뿐 인공호와 하류하천의 수질특성 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구 대상수계인 대청댐은 금강 중류에 용수확보와 에너지 공급을 목적으로 건설된 댐으로서, 1975년 3월에 공사를 착수하여 1980년 12월에 완공되었으며, 댐 하류 지역의 홍수피해를 경감시키고, 중부권의 생활용수와 농업용수를 공급하며, 연간 2억 4천만 kw의 전기를 생산하여 중부권의 수자원과 에너지를 제공하고 있다. 이러한 대청호는 댐이 건설된 이후 남조류 수화 현상이 보고(김 등, 1984)된 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(서, 1998; 박, 2005; 배 등, 2007), 위성자료를 통한 수질관리 또는 영양상태 평가(김과 김, 1996; 이, 1998; 한 등, 1998), 환경요인 변화와 식물플랑크톤 발생간의 상관성(오와 김, 1995; 신 등, 1999; 이 등, 2003), 여름철 강우에 의한 수질 환경요인 변화(An, 2000a, b; An *et al.*, 2001) 등 다양한 연구가 보고되고 있다. 반면, 대청호의 하류하천에서는 도심지를 관류하는 갑천과 미호천의 유입으로 인하여 금강 하류의 수질의 악영향으로 작용하고 있는데(신과 조, 2000; 배와 안, 2006; 안과 양, 2007), 이는 생활하수 및 산업폐수 등의 오수 처리 시 영양염(N, P)이 제대로 처리되지 않은 처리수가 하천으로 유입되기 때문에 부영양화가 초래되고 있으며, 특히 갈수기에 자연유량의 감소로 인하여 영양염류 농도의 증가를 가속화 시켜 부영양화가 장기화되고 있는 실정이다.

이처럼 하류 하천의 장기화 되는 수질 악화를 해결하기 위하여 많은 선진국에서 갈수기에 상류댐에서 플러싱

(Flushing) 방류를 실시하여 하류하천의 오염물질이나 수질환경과 생태계 서식환경(Tanaka *et al.*, 2004) 등을 개선하고 있다. 프랑스 세느강에서는 인공호 플러싱 방류가 하류 하천 수질에 미치는 영향을 조사한 바 있으며(Barillier *et al.*, 1993), 국내에서도 정과 김(2005)의 연구는 댐 방류로 인한 하류하천의 암모니아성 질소 농도 변화에 미치는 영향에 대한 영향을 조사한 바 있다. 그러나, 현재 댐 방류로 인한 하류하천의 수질 변화에 대한 특성을 파악하기 어려운 실정이다. 댐의 방류가 하류하천에 미치는 영향의 상대적 강도는 방류량 및 댐의 방류방식에 따라 댐 하류 십여 킬로미터로부터, 어떤 경우는 수백 킬로미터에 이르기까지 중요한 영향을 미칠 수 있기 때문에 댐의 운용관리가 중요하게 작용하고 있다(Ward and Stanford, 1983). 그러나 이처럼 호수의 수리수문학적 특성이 수질에 미치는 영향이 매우 중요함에도 불구하고 우리나라에서 이러한 연구가 매우 미비한 실정이다.

본 연구에서는 금강 수계에 있는 대청댐을 대상으로 문순강우에 의한 댐과 그의 하류하천에서 수질 변화 양상을 비교·분석하였고, 방류량에 따라서 하류하천의 수질 변화 양상을 파악하며, 계절에 따른 수질 변수들 간의 다각적인 상호관계를 파악하고자 시도되었다.

재료 및 방법

1. 조사 기간 및 방법

금강과 대청호의 이, 화학적 수질 자료를 분석하기 위하여 2000년 1월부터 2007년 12월까지 3개 지점(S1~S4)에서 측정된 환경부에서 운영하는 물환경정보시스템의 월별자료(<http://water.nier.go.kr>)를 이용하였다. 자료 분석에 이용된 수질 변수는 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소량(DO), 생화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 총질소(TN), 총인(TP), 부유물(SS), 전기전도도(EC)로서 각 수치 값의 시·공간적 변화양상을 분석하였다. 강수량, 방류량, 수위 및 방류수 지점의 수질자료는 한국수자원공사 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 댐 수문자료(2000~2007년)의 자료를 획득하여 자료를 분석하였다. 현장 지점은 대청댐의 바로 앞에 있는 1개 지점(S1)과 하류 하천인 금강 본류 3개 지점(S2~S4)을 선정하였으며, 각 지점의 세부사항은 다음과 같다(Fig. 1).

S1 : 대전광역시 대덕구 미호동(댐 축)

S2 : 충북 청원군 현도면 덕유리(방류부)

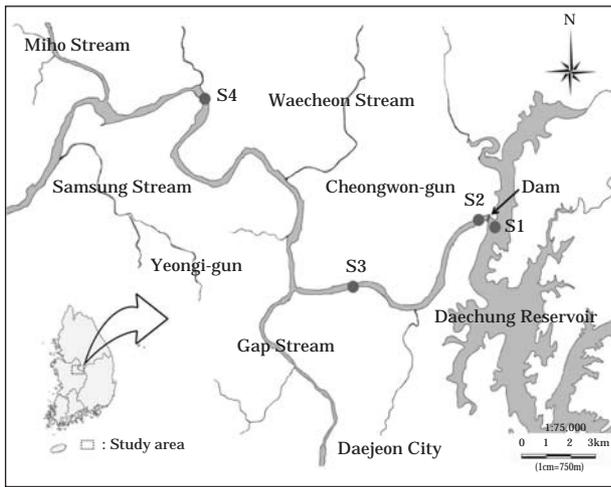


Fig. 1. The map showing the sampling locations of the dam (S1) and downstream sites (S2~S4).

S3 : 대전광역시 대덕구 석봉동(현도)
 S4 : 충북 청원군 부용면 부용리(청원)

2. 자료 분석

대청댐 방류량과 하류하천의 수질변수들과의 상호관계를 알아보기 위하여 8개의 수질항목(수온, pH, DO, BOD, COD, TN, TP, SS, EC)과 방류량에 대한 상관분석 (Pearson's correlation analysis)을 실시하였다. 획득한 수질자료는 지점별 변이를 파악하기 위하여 각 지점별로 분석하였으며, 또한 몬순강우에 의한 계절적 변이를 파악하기 위하여 5~6월을 몬순 전기 (Premonsoon), 7~8월은 몬순기 (Monsoon), 9~10월을 몬순 후기 (Postmonsoon)로 대별하여 분석하였다. 통계처리는 SPSS (Version 12.0 KO for windows, 2004) 프로그램을 이용하여 분석을 수

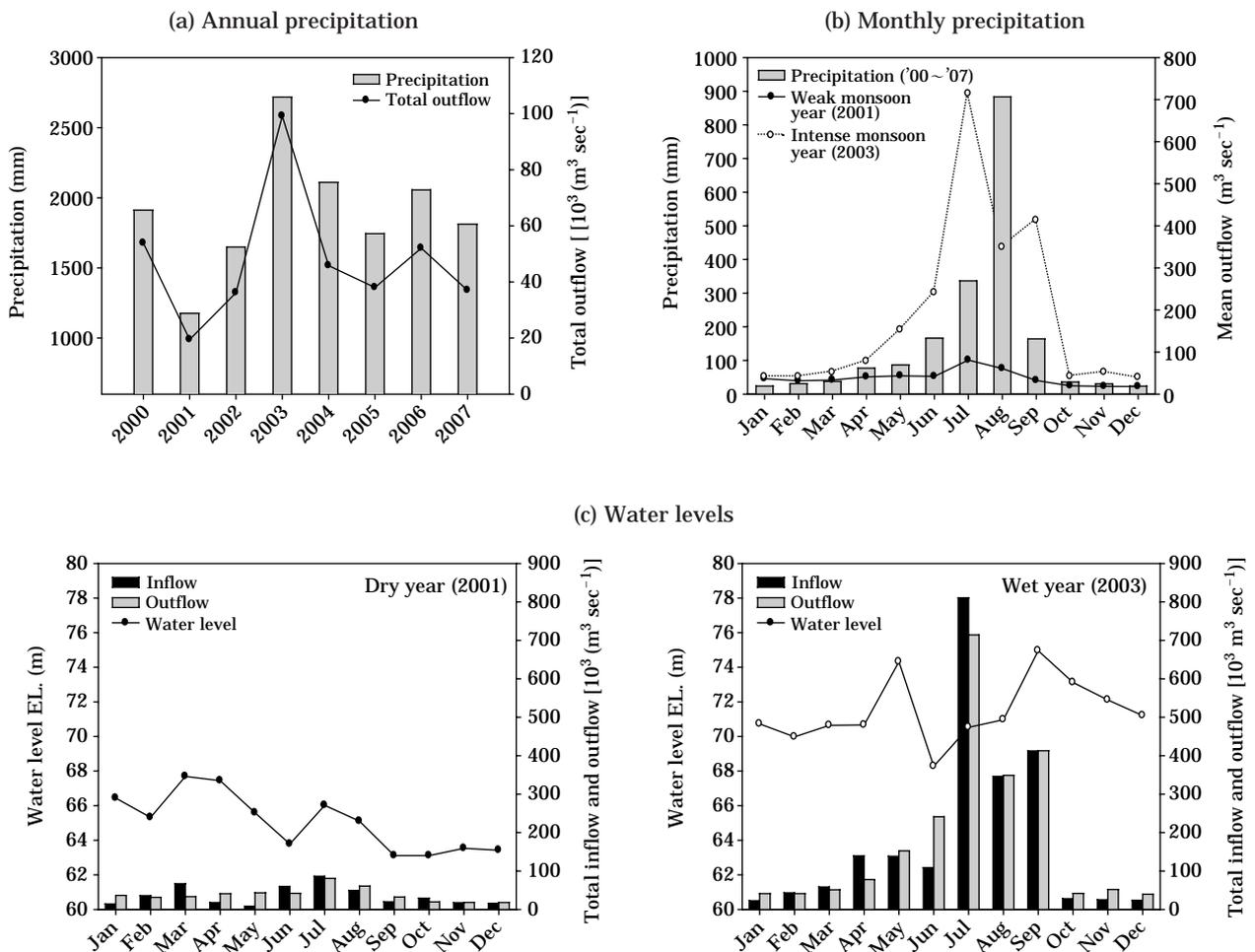


Fig. 2. Annual and monthly precipitation in the watershed during 2000~2007 along with water levels of dry year (2001) vs. wet year (2003) in Daechong Reservoir.

행하였다.

결과 및 고찰

1. 강우 특성 및 수리·수문 환경

2000년 1월부터 2007년 12월 동안 무 강수일을 제외한 일 강수량의 범위는 0.1~188 mm이었고, 1일 평균 강수량은 9 mm이었다. 연평균 강수량은 1,897 mm로서 장마기인 7~8월 동안 1,220 mm의 강수량을 보여, 이 시기의 강수량이 64% 이상을 차지하였다. 대청호 수계의 연 강수량은 2003, 2004, 2006년에 2,000 mm 이상의 강수량을 보였으며, 2003년 총 강수량이 2,500 mm 이상으로 다른 해에 비해 많은 강우가 내린 해(Wet year)인 반면, 2001년에는 1,200 mm 이하의 적은 강우가 내려 가뭄의 해(Dry year)로 나타나 2배 이상의 강우치를 보였다(Fig. 2a). 강수량은 장마 후기인 10월부터 이듬해인 5월 까지 적었고, 장마기인 6~9월에 풍부하여 대비가 되었으며, 주로 하절기에 편중된 고조를 보여 몬순 기후지역의 일반적인 경향을 보였다.

대청댐의 방류량의 증감은 강수량과 강수 빈도의 패턴과 밀접한 관련성(Shin *et al.*, 2002)을 보였다. 총 연평균 방류량은 $47,689 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 로써 7~9월 동안 연간 총 방류량의 55% 이상의 물을 방류하여 강수량과 밀접한 상관성을 보였다. 연도별로 2000, 2002, 2007년은 여름철 방류가 8~9월에 집중되었으며, 2001년 및 2003~2006년 기간은 7~8월에 집중되었다. 방류량 변동에서 유량은 2003년에 최대값을 보였고, 2001년에 최저값으로 나타났다. 8년 동안 방류량의 범위와 평균값은 각각 $11 \sim 2,144 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 이었다(Fig. 2b). 또한 저수위는 방류량과 강수량에 따라 변화하였으며, 평균 수위는 2003년에 71.5 m로 최고 수위를 보였으며, 2001년에 65.1 m로 최저 수위를 나타냈다. 2003년에는 많은 강수량과 방류량으로 인하여 수위변동 폭(76.9~64.7 m) 큰 반면, 2001년은 적은 강수량과 댐의 유지 유량확보를 위한 적은 방류량으로 인하여 수위 변동 폭(68.1~62.8 m)이 작은 것으로 나타났다(Fig. 2c).

2. 호수와 하천의 시·공간적 수질변이 특성

월별 자료 분석에 따르면, 월평균 대청호 및 하류 하천의 수온은 풍수기 8~9월에 최대치(23.9°C)를 보였으며, 갈수기인 2~3월에 최소치(4.0°C)를 보였다. 대청댐 방류 후 수온은 하류 하천으로 갈수록 평균 수온이 상승하였

으며, S1과 S4의 평균 기온이 1.2°C의 차이를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3). 본 연구기간 동안 평균 수온은 13.1~13.9°C의 범위를 보여 연별로 큰 차이를 보이지 않았지만, 최저 강우량을 보인 2001년의 지점별 수온 11.1~14.5°C로 변화 폭이 큰 반면, 최대 강우량을 보인 2003년에는 13.0~14.2°C로 변화 폭이 크지 않았다(Fig. 4). 이는 2001년은 일조량이 많은 기상조건(Rainfall day: $134 \text{ day year}^{-1}$)과 호수로 유입되는 유입량과 하류로 방류되는 유량이 적기 때문에 S2의 수온이 수체가 안정화되고 유량이 많은 S1에 비하여 열용량이 작기 때문에 수온의 차이가 크게 나타난 반면, 2003년은 일조량이 적은 기상조건(Rainfall day: $157 \text{ day year}^{-1}$)과 호수 상류의 유입량 증가로 수체가 불안정하였으며, 체류시간이 짧았기 때문에 하류 하천과 수온의 차이가 크지 않은 것으로 사료된다(Fig. 5). 한편 최소 강우해로 기록된 해(2001년)와 최대 강우해로 기록된 해(2003년)에 대청댐(S1)의 호수물과 그 하류 하천의 방류수(S2)의 월별 수온변화 양상 분석에 따르면, S1에서는 2001년에 비하여 2003년의 수온이 높았으며, 8~9월에 최고 5°C 이상 차이를 보였다. S2에서는 2001의 수온이 1월부터 6월까지 높다가 7월부터 9월 사이에는 2003년에 비해 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 2001년의 적은 방류량이 S2의 수온에 반영된 것으로 사료되며, 방류량이 많은 2003년에는 S1의 수온이 반영된 것으로 사료되었다(Fig. 5).

호수 및 그의 하류하천에서 pH의 연 평균값은 7.6, 변이 폭은 7.4~7.9로서 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. pH는 강우가 많이 내린 2003년에 소폭 상승하였으며, 시간이 지날수록 점차 증가하는 양상을 보였다(Fig. 4). 월별 자료 분석에 따르면, pH는 지점별로 큰 차이를 보이지 않다가 강우량이 최고조에 달한 8월 후반에 S1, S2에서 최저값을 보였다(Fig. 3). 이는 빗물의 일반적인 pH가 5.6인 것을 감안한다면 빗물에 의하여 대청호 이온의 일시적인 빗물 희석효과로 판단되었다.

용존 산소(DO)의 농도 분포는 수온의 변화와 역 상관관계($r = -0.64$, $p < 0.01$)를 보였다(Fig. 3). 정수생태계인 S1에서는 수온과의 상관성($r = -0.83$, $p < 0.01$)이 높게 나타났지만, 유수생태계인 S2~S4에서는 S1에 비하여 낮은 상관성($r = -0.66$, $p < 0.01$)을 보였다. 이는 수체가 안정화된 S1에서 수온이 용존산소 농도에 가장 중요한 요인이지만 하천에서는 유기물 등의 유입에 의해 좀 더 영향을 받아 변이가 큰 것으로 나타났다. 월별 자료 분석에 의하면, S1에서의 장마 후인 10월에 용존산소의 평균농도가 4.8 m L^{-1} 로 급격히 낮아지는데 이는 장마철 다량의 영양염류(TN, TP) 및 유기물을 포함하고 있는 호수물이

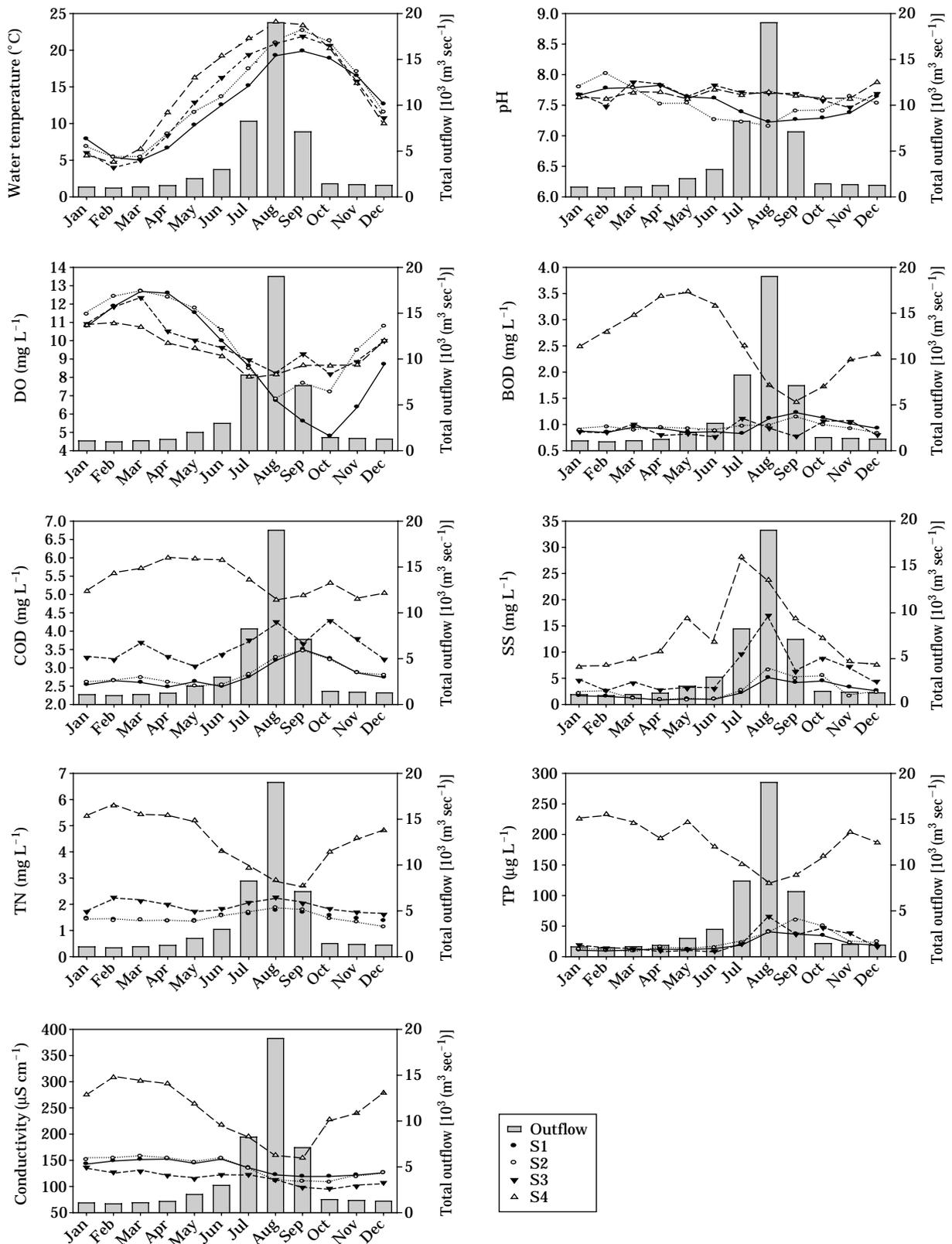


Fig. 3. Seasonal variations of water quality parameters depending on the sampling sites (S1~S4) and outflows. Each data point indicates an annual mean value during the study period.

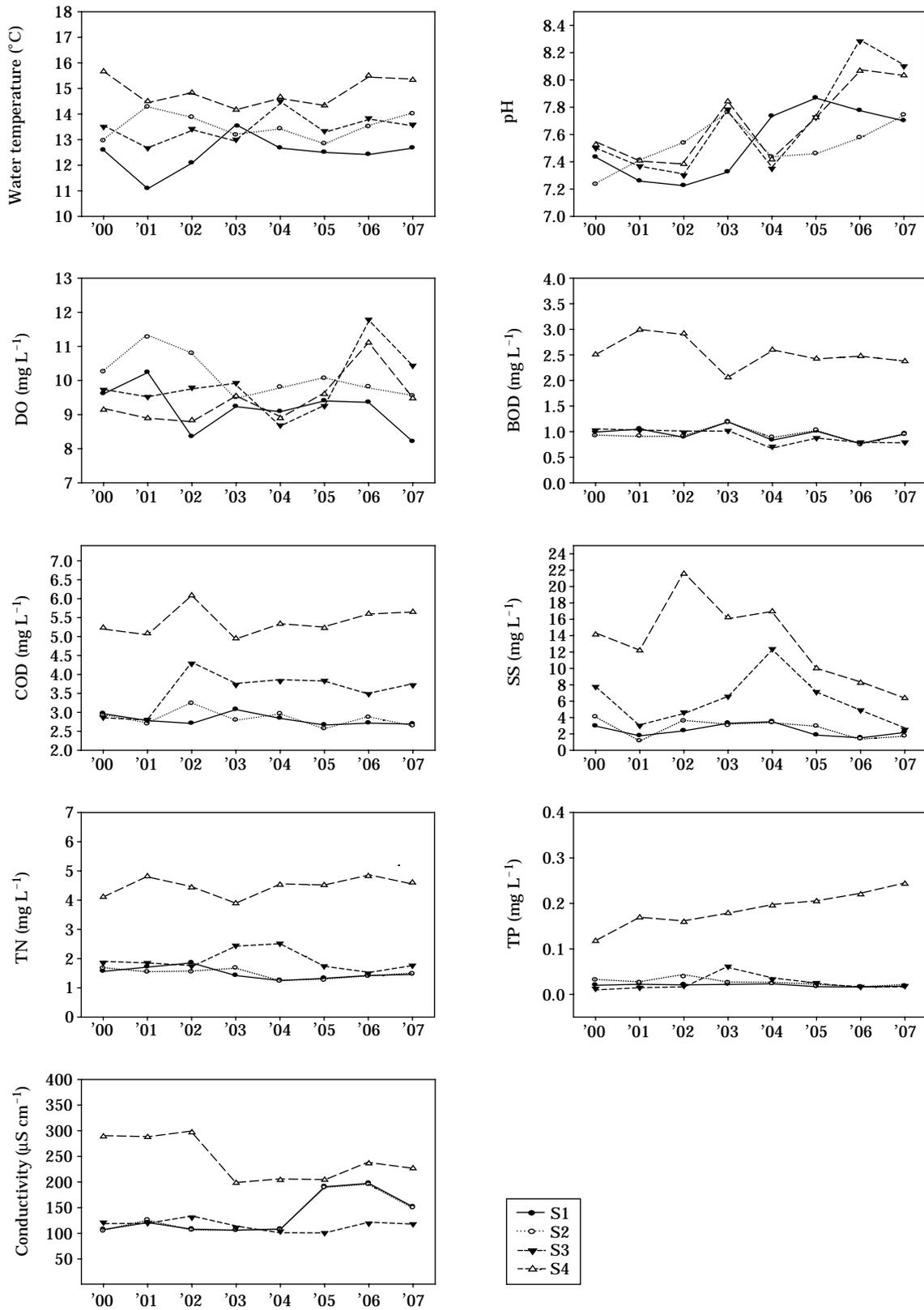


Fig. 4. Interannual fluctuations of water quality parameters depending on the sampling sites (S1 ~ S4) and outflows. Each data point indicates an annual mean value during the study period.

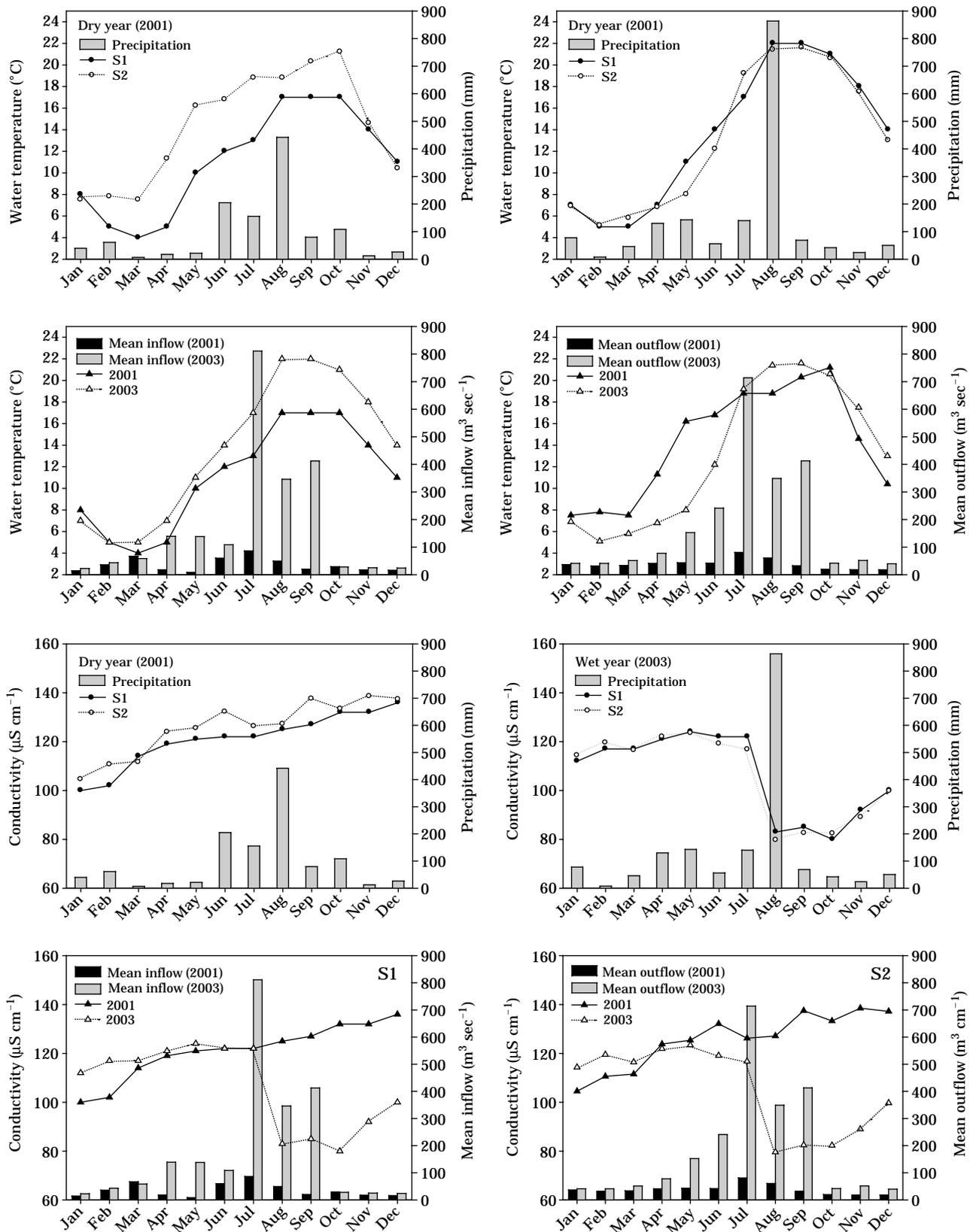


Fig. 5. Comparisons of water quality parameters in the lake water (S1) and the stream water discharged from the dam (S2) in the dry year (2001) vs. wet year (2003).

중층에 유입되어 분포하다가 장마 후인 10월에 상층부의 물이 일부 혼합되어 미생물의 유기물 분해로 인한 산소감소현상으로 사료되었다(Fig. 3). 이러한 현상은 An (2000a)의 연구에서 장마기간 동안에 강우로 인한 유입량의 크기가 대청호의 산소농도에 영향을 준다는 결과와도 일치한다.

유기물 오염의 지표로 이용되는 BOD 및 COD의 연평균 농도 및 범위는 각각 1.3 mg L^{-1} (범위: $0.1 \sim 5.1 \text{ mg L}^{-1}$) 및 3.7 mg L^{-1} (범위: $0.5 \sim 8.5 \text{ mg L}^{-1}$)로 나타나, BOD는 환경부 수질기준에 의거해 Ib 등급, COD는 II등급으로 평가되었다. 월별 분석에 의하면 BOD의 농도변화는 지점별로 큰 차이를 보였다. S1에서는 장마기인 7월에 증가하기 시작하여 9월에 최대값을 보여 주변의 비점오염원에 의한 영향으로 사료되었다. 그러나 S4에서는 장마 전인 5월에 3.5 mg L^{-1} 로 최고값을 보이다가 9월에 1.4 mg L^{-1} 의 최저값을 나타냈다. 이는 장마철 대청댐의 방류로 인한 희석효과로 사료되었다. 한편, COD농도의 월별 변화 패턴 역시 S1에서는 9월에 3.5 mg L^{-1} 로 최고값을 보였으나, S4에서는 장마기에 4.8 mg L^{-1} 로 최저값을 보여 BOD와 유사하게 나타났다(Fig. 3). 이처럼 S1과 S4간 유기물 오염도에 있어서 차이를 보이는 원인은 상대적 유량 차이로 인하여 유량이 풍부한 S1은 상대적으로 유량이 적은 S4에 비하여 외부기원 유기물 효과가 극히 미미했음이 분명하다. 또한 도심지를 관류하여 유입되는 지류(갑천)의 영향도 S4의 유기물 오염도를 증가시키는 또 다른 원인으로 사료되었다(안과 양, 2007).

총부유물질(SS)의 연평균 농도는 6.1 mg L^{-1} , 변이 범위는 $0.2 \sim 77.6 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타나 큰 계절 변이성을 보였다(Fig. 4). 월별 분석에 따르면 총 부유물질의 농도는 장마기인 7~8월에 농도가 증가하였는데 이러한 총부유물질의 증가는 북미 하천 연구에서 제시한 바(Perkins and Jones, 1994)와 같이 집중강우기의 방류량과 일치하는 양상을 보여주었다. 따라서 이기간 동안 대청댐에서 방류량의 증가는 하류하천 탁도의 급격한 증가를 가져오고, 이는 하류하천의 1차 생산자(부착조류, 식물플랑크톤)의 광 제한효과(Light limitation)를 가져 올 수 있으며(Dodds *et al.*, 1998), 일부 수체 내 생물학적 산소 요구량(BOD)을 증가시키는 것으로 사료되었다(안과 신, 2005). 한편, 총부유물질의 농도는 상류에서 하류로 갈수록 증가하였으며, 평균값이 S1 (2.4 mg L^{-1})과 S4 (13.2 mg L^{-1})에서 큰 차이를 보였다(Fig. 3). 이는 BOD와 동일한 원인에 의한 것으로 사료된다. 한편, S4에서 총부유물질의 최고값을 보인 시기가 7월인데 비하여 나머지 지점은 8월에 최고값을 보였다. 이는 S3과 S4사이에서 합류되는 갑

천의 영향으로 도심 및 공업지역 유역의 총부유물질의 농도가 초기강우와 밀접한 상관관계를 보이기 때문으로 사료되었다(강 등, 2007).

수환경에서 부영양화의 지표로 널리 쓰이는 총질소(TN)는 연평균 2.34 mg L^{-1} 을 나타냈고, 범위는 $0.01 \sim 8.12 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타났으며, 변화양상은 지점별로 큰 차이를 보여, 지점에 따라 유기물 오염이 큰 것으로 나타났다. 호수내의 지점(S1)은 장마기인 8월에 최고값(1.76 mg L^{-1}), 장마 전인 5월에 최저값(1.37 mg L^{-1})을 나타냈으며, 변화 폭이 크지 않은 반면, 갑천에 의한 지류 영향을 받는 하류지점(S4)은 장마 후기인 9월에 최저값(2.71 mg L^{-1}), 장마 전인 2월에 최고값(5.77 mg L^{-1})을 보였으며, S1에 비하여 높은 변화양상을 보였다(Fig. 3). 최하류 지점(S4)에서의 연평균 총질소(TN) 농도는 호수물(S1)의 농도보다 3배를 상회하여 뚜렷한 차이를 보였다. 총인(TP)은 TN과 유사한 변화양상을 보였다. TP의 연평균 농도와 범위는 각각 $64 \mu\text{g L}^{-1}$, $0 \sim 431 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타났다. 연별 변화양상분석에 의하면, S4의 TP의 농도가 시간이 지날수록 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 상·하류간의 지점별 특성 분석에 따르면, S1에서는 장마 전기인 1~6월에는 비교적 낮은 농도($9.4 \sim 13.4 \mu\text{g L}^{-1}$)를 유지하다가 장마기인 8월에 $40.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 최고값을 보였으며, 장마 후기로 갈수록 감소하였다. 이러한 분석 결과는 이전 다른 하천의 수질 연구에서 인(P)의 유입이 주로 장마기에 발생하여 8월에 최고값을 보이다 다시 강우가 감소함에 따라 농도가 감소한다는 연구와 유사한 결과를 보였다(강과 안, 2006; 안과 양, 2007). 반면, 최하류 하천 지점(S4)에서는 장마 전기인 1~5월까지 높은 농도($193.5 \sim 233.1 \mu\text{g L}^{-1}$)를 유지하다가 장마기인 8월에 최저값($120 \mu\text{g L}^{-1}$)을 보이다가 장마 후기에 점차적으로 증가하여 호수물(S1)와는 상반되는 양상을 보였다. 이와 같이 인(P)과 질소(N)의 농도는 최하류 하천(S4)에서 장마기에 감소하는 현상을 볼 수 있는데, 이는 지역적 특성으로 미루어 볼 때, 강우로 인한 상류댐의 방류량 증가로 인한 희석효과 때문인 것으로 사료된다. 일반적으로 하천에 영양염류(N, P)는 강우로 인하여 증가된 유입량에 의해 농도가 높아지지만, 지류(갑천)의 심한 영향을 받는 S4 지점의 경우 인구가 밀집되어 있는 대전시를 관류하여 유입되는 갑천의 기존 영양염류 농도가 높아진 상태에서 장마기 급격한 유량의 증가로 인하여 오염물의 농도가 희석되었기 때문으로 사료된다. 수체의 이온 농도의 수준을 나타내는 지표인 전기전도도(Wetzel and Likens, 1991; APHA *et al.*, 1995)는 연 평균값이 $157 \mu\text{S cm}^{-1}$ 이며, 범위는 $35 \sim 490 \mu\text{S cm}^{-1}$ 로 나타났다. 월별 특성분석에 따르

면, 8~9월에 전 지점에서 감소하는 특성을 보인다. 이는 이전의 다른 수질 변수(BOD, COD, SS, TN, TP)들과 마찬가지로 S1에서 강우가 증가하면 전기전도도의 상승을 가져올 것으로 보이나, 실제로는 강우에 따른 이온농도의 시간지연현상(Time-lag)에 의하여 이온농도가 감소되는 것으로 나타났다(안과 신, 2005). 지점별로 최하류 하천(S4)의 연평균 값($243 \mu\text{S cm}^{-1}$)이 호수물(S1)의 연평균

값($136.4 \mu\text{S cm}^{-1}$)보다 2배 정도 큰 것으로 나타나 다른 TN, TP와 마찬가지로 지점 간 차이를 보였다(Fig. 3). 한편 가뭄의 해(2001년)와 풍수의 해(2003년)의 대청댐(S1)과 방류수(S2)의 월별변화 양상을 살펴보면, 2001년에는 전기전도도의 농도가 점차 증가하였으며, 2003년에는 전기전도도의 농도가 최대강우를 보인 8월에 급격히 낮아진 후 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 2001년

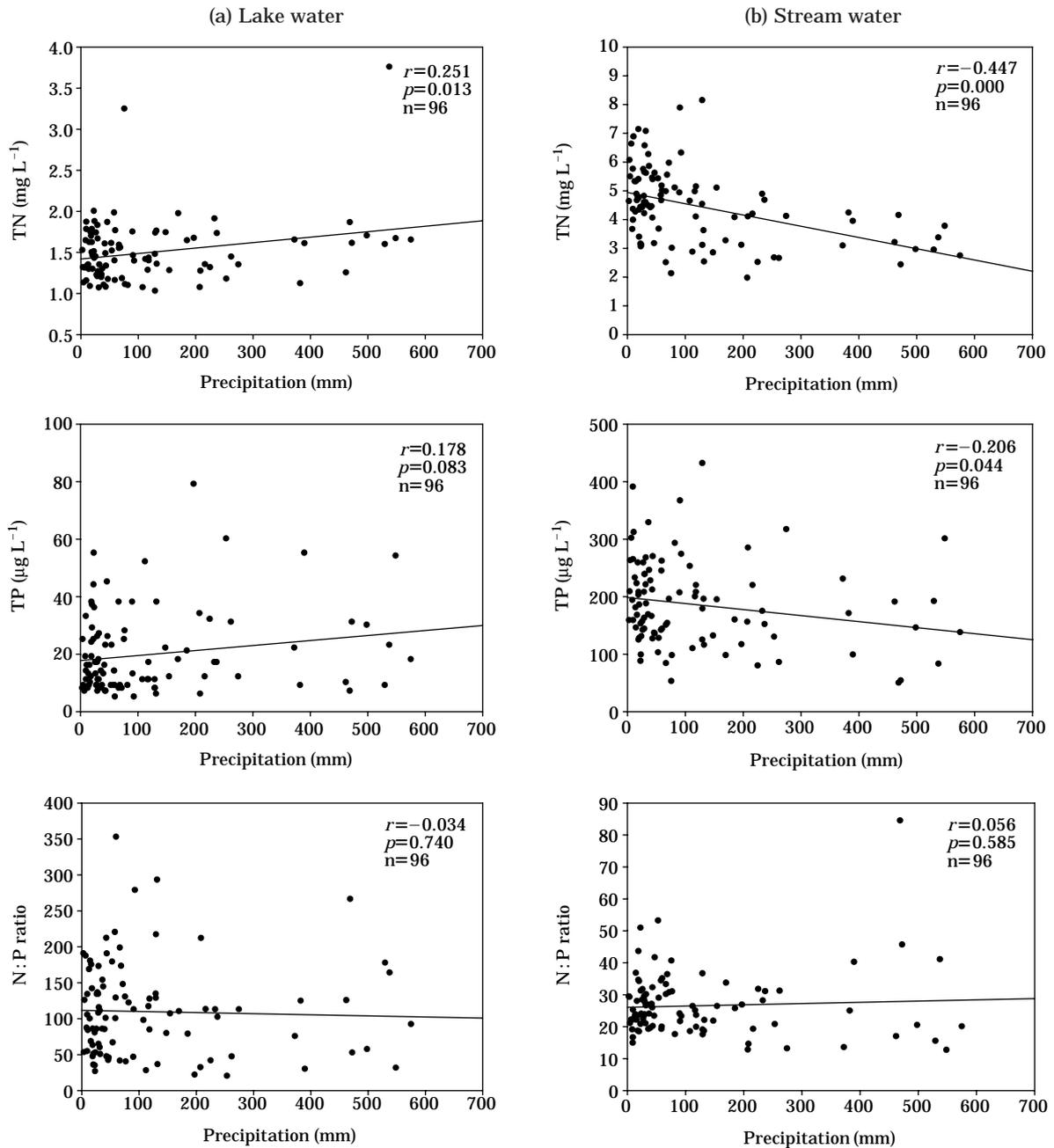


Fig. 6. The relations of the seasonal precipitation to nutrients (TN, TP) and N:P mass ratios in the lake water (S1, a) and stream water (S4, b).

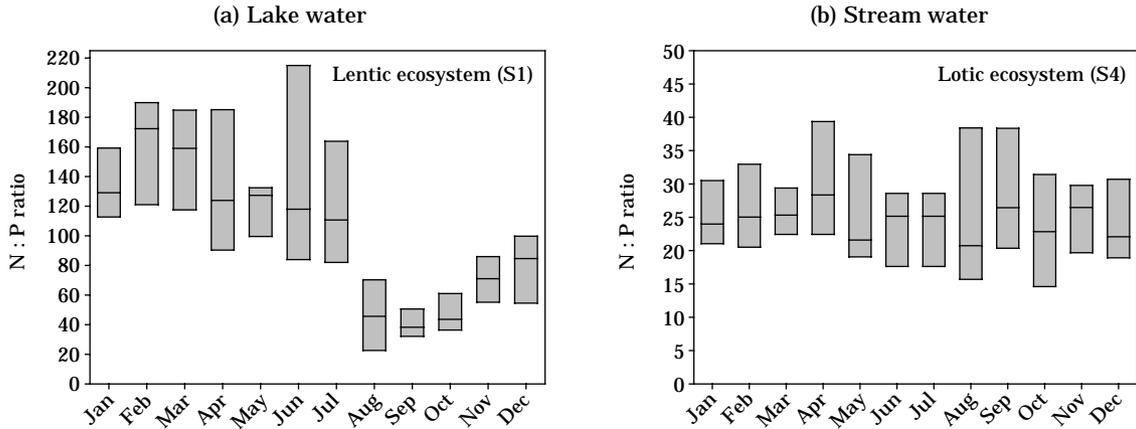


Fig. 7. Seasonal variations of TN : TP ratios in the lake water (S1, a) and stream water (S4, b).

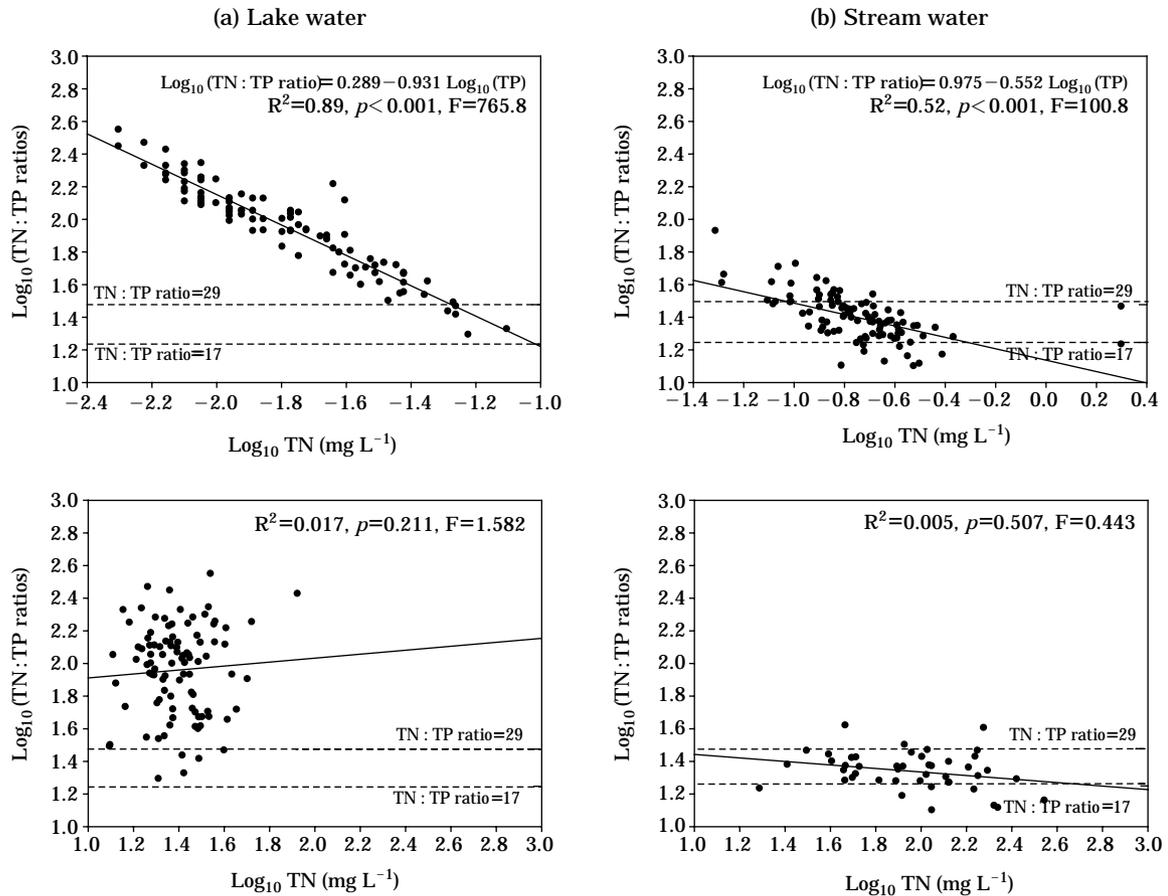


Fig. 8. Regression analyses of Log_{10} N : P ratios against Log_{10} TN and Log_{10} TP.

강우량의 최대값을 보이는 8월의 강우량(441.9 mm)이 이온 농도를 낮추는데 영향을 주지 못했지만, 2003년의 8월의 많은 강우량(1209.4 mm)으로 인한 이온 농도의 희석효과가 반영된 결과로 사료된다(Fig. 5).

3. 영양염류 및 강우량의 상관성 분석

수질 자료와 강우량의 분석에 의하면, 여름철 강우에 의해 수질 환경요인이 영향을 받는다는 이전 보고(An,

Table 1. Pearson's correlation coefficients (*r*) and its probability (*p*) between the discharge volume from the dam and the water quality parameters (n=96).

		Sites influenced by the dam discharge		
		S2	S3	S4
WT	<i>r, p</i>	0.472, 0.000**	0.461, 0.000**	0.509, 0.000**
pH	<i>r, p</i>	-0.252, 0.013*	0.084, 0.418	0.146, 0.155
DO	<i>r, p</i>	-0.418, 0.000**	-0.258, 0.011*	-0.322, 0.001**
BOD	<i>r, p</i>	0.157, 0.126	0.070, 0.497	-0.365, 0.000**
COD	<i>r, p</i>	0.250, 0.014*	0.293, 0.004*	-0.168, 0.101
SS	<i>r, p</i>	0.492, 0.000**	0.379, 0.000**	0.427, 0.000**
TN	<i>r, p</i>	0.318, 0.002*	0.208, 0.042*	-0.528, 0.000**
TP	<i>r, p</i>	0.354, 0.000**	0.546, 0.000**	-0.322, 0.001**
Chl- <i>a</i>	<i>r, p</i>	-0.250, 0.014*	-0.091, 0.376	-0.482, 0.000**

WT=water temperature, DO=dissolved oxygen, BOD=biochemical oxygen demand, COD=chemical oxygen demand, SS=Suspended Solid, TN=total nitrogen, TP=total phosphorus, Chl-*a*=Chlorophyll-*a*

2000a, b; 정 등, 2005)에서 제시하는 바와 같이 본 연구에서도 이 · 화학적인 조건이 강우에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이들 중 영양염류(N, P)의 분포는 강우에 강도에 따라서 특히 호수수(S1)와 오염원에 의해 영향을 받는 하천수(S4)에서 각각 다른 양상을 보이는 것으로 나타났다. 댐 근처의 호수물(S1)은 장마기 강우량의 증가함에 따라 TN, TP의 농도가 증가하는 정상관계를 보였다지만, 하류의 하천수(S4)는 강우량이 증가함에 따라 감소하는 역 상관관계를 나타냈다(Fig. 6). 이는 호수물의 경우 장마 전기(1~6월)에 TN, TP의 평균값이 각각 1.43 mg L^{-1} , $11.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 낮은 농도를 보이다가 장마기(7~9월) 집중강우가 주변의 영양염류를 호수로 유입시켜 상대적으로 농도가 1.67 mg L^{-1} , $37.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 높아진 반면, 하류 하천수는 지류(갑천)의 영향으로 영양염류 및 기타 오염물질이 높아진 상태(TN: 5.2 mg L^{-1} , TP: $211.7 \mu\text{g L}^{-1}$)에서 여름철 급격한 강우의 증가로 인한 희석효과가 영양염류의 상대적인 감소(TN: 3.0 mg L^{-1} , TP: $134.9 \mu\text{g L}^{-1}$)를 가져오는 것으로 판명되었다. 총질소 : 총인 비율(TN : TP mass ratio)의 월별 분석에 따르면, 호수물에서 N:P 값은 월평균 110로 갈수기에 평균값이 146 (122.9~161.3)에서 풍수기(8~10월)에 평균값이 54 (50~57)로 낮아지다 점차 증가하는 것으로 나타났다. 반면 S4는 월평균 26.6으로 S1에 비해 낮은 값을 보이는데, 이는 P의 양이 상대적으로 많이 존재하기 때문으로 사료되며, 월별 변화양상은 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 7). TN : TP ratio는 총인(TP)과의 상관분석 결과, S1 ($r = -0.74, p < 0.01$)과 S4 ($r = -0.63, p < 0.01$)에서 각각 높은 역 상관관계를 보였으나 총질소(TN)와는 S1 ($r = 0.16$), S4 ($r = 0.01$)는 낮은 상관관계를 보여 N:P 비가 총인의 변동 폭에 의해 주로 조절되는 것으로 나타났다 (Fig. 8).

한편, 동일 자료를 이용하여 회귀분석을 실시한 결과에서도 동일한 양상을 나타냈다. 즉 호수수(S1)와 최하류 하천수(S4)에서의 총인의 변이는 N:P 비의 변이를 각각 89% ($R^2 = 0.89, p < 0.001, F = 765.8$), 52% ($R^2 = 0.52, p < 0.001, F = 100.8$)로 까지 설명하는 것으로 나타나 총질소에 비해 상관성이 높은 것으로 나타났다(Fig. 8). 일반적으로 TN:TP ratio가 17 이하일 경우 질소가 제한 요인(Limiting factor)으로 작용하며, 29 이상일 경우 질소에 비하여 인의 부족으로 1차 생산력에 제한요인으로 작용할 수 있는 잠재성(Forsberg and Ryding, 1980)을 보이기 때문에 S1과 S4는 대부분 총인이 제한 요인으로 작용하는 것으로 나타나며, 이는 배 등(2007)의 연구와도 일치하는 결과이다.

4. 방류량에 따른 하류하천의 수질변화 특성

S1에서 방류량 조절에 따라서 하류하천의 수질변수들의 변화 특성을 알아보기 위하여 월평균 방류량과 하류하천(S2~S4)의 월평균 수질자료를 이용하여 상관분석을 실시하였다. 분석결과 유기물 오염의 지표로 이용되는 BOD, COD와 영양염류인 TN, TP는 하천수인 S2에서 각각 정 상관관계를 보이다가 하류로 진행되면서 역 상관관계를 나타냈다(Table 1). 이는 S1에서 방류량 증가로 인하여 상대적으로 오염물 및 영양염류(BOD, COD, TN, TP)의 농도가 낮은 S2의 일시적인 농도 증가를 보이지만, 농도가 높은 하류로 진행될수록 희석효과에 의하여 나타난 것으로 사료된다. 한편, 총 부유물질(SS)과 방류량의 상관관계는 S3에서 낮아지는데 이는 S2와 S3 사이에 위치하고 있는 역조정지댐(Regulating reservoir)의 영향으로 사료된다. 수온, DO, 전기전도도는 방류량과의

상관분석 결과 지점별로 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 하절기 집중강우는 대청호 수질분포에 영향을 주며, 대청호의 방류량은 하류하천의 영양염류 및 오염물질의 농도에 영향을 주는 것으로 나타났다.

적 요

본 연구는 대청댐 방류에 따른 하류 하천에 대한 수질의 시, 공간적 변이를 파악하기 위해서 2000~2007년까지 8년간 측정된 환경부 수질측정망 자료를 분석하였다. 총 8개의 수질변수를 이용하였으며, 이들의 수질 특성은 연별, 조사지점별, 댐 방류량별로 큰 변이를 보였다. 전기 전도도와 영양염류인 TN, TP는 계절 및 월별 분석에 의하면 하류 하천인 S4에서 장마기에 크게 감소하는 현상을 보였으며, 지점별로 분석에서 대청댐(S1)에서 하류 하천(S4)으로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. 또한 BOD와 COD의 경우도 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. 이는 장마기에 정수대(Lentic ecosystem)인 S1에서는 외부로부터의 영양염류 및 기타 오염물질의 유입으로 소폭 상승하나 유수대(Lotic ecosystem)인 S4에서는 상류부 댐의 방류로 인하여 영양염류 및 기타 오염물질이 희석효과로 인하여 상대적으로 감소하는 양상을 나타냈다. SS의 지점별 특성을 보면, 장마기에 S1에 비하여 하류인 S4에서 높은 값을 보였는데, 이는 대전시에서 흘러나오는 지천의 영향이 하류 수질악화에 영향을 준 것으로 사료된다. DO의 월별 특성으로는 수온이 상승하는 장마기에 가장 낮은 값을 보여 수온과 상반되는 양상을 보였다. S1에서는 장마가 끝난 10월에 가장 낮은 값을 보였는데 이는 장마기 대청호로 중층 유입된 호수수가 장마 후기에 반영된 것으로 사료되었다. 반면, 수온의 월별 특성은 장마기에 증가하는 양상을 보였으며, 지점별로 댐내의 호수수와 최하류 하천수간에 큰 차이를 보였다. 이러한 하류하천의 수질특성들은 상류댐의 방류량과 밀접한 연관성을 나타내고 있고, 이런 특성은 상류부 댐의 방류량 조절이 하류 하천의 수질변화에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

사 사

본 논문에 이용된 수질자료는 환경부에서 운영하는 수질측정망(<http://www.me.go.kr>)의 수질측정 자료와 한국수자원공사에서 운영하는 국가수자원관리종합정보시스템

(<http://www.kwater.or.kr>)의 댐 수문 자료를 이용하였기에 이에 대한 감사를 포함.

인 용 문 헌

강선아, 안광국. 2006. 영산강 수계의 이화학적 수질에 관한 시공간적 변이 분석. 한국육수학회지 39(1): 73-84.

김동균, 서운수, 송준상, 이문호, 최재덕, 박건현, 최광수. 1984. 대청호 부영양화에 관한 종합연구. 국립환경연구소. 서울.

김환기, 김태근. 1996. 원격탐사에 의한 대청호의 수질 관리방안. 대한환경공학회지 18: 1383-1396.

박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. 한국육수학회지 38(3): 382-392.

배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 갑천생태계 평가. 한국육수학회지 39(2): 198-208.

배대열, 양은찬, 정승현, 이재훈, 안광국. 2007. 대청호에서 종적 구배에 따른 영양염류 및 엽록소의 역동성. 한국육수학회지 40(2): 285-293.

서동일. 1998. 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. 대한환경공학회지 20(9): 1219-1234.

신재기, 강창근, 황순진. 2003. 팔당호에서 수중 탁도의 일 변동과 고탁수의 입자 분포. 한국육수학회지 36(3): 257-268.

신재기, 조경제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물 플랑크톤의 변동. 환경생물 17(4): 529-541.

신재기, 조경제. 2000. 금강 중·하류에서 AGP에 의한 수질평가. 한국육수학회지 33(3): 244-250.

신재기, 허진, 이홍수, 박재충, 황순진. 2006. 표층수를 방류하는 저수지(용담호)에서 몬순 탁수환경의 공간적 해석. 한국물환경학회지 22(5): 933-942.

안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지 38(1): 54-62.

안광국, 양우미. 2007. 금강 수계의 수질 특성. 한국육수학회지 40(1): 110-120.

오희목, 김도한. 1995. 대청호의 남조류 수화발생에 대한 단기적 예측. 한국육수학회지 28(2): 127-135.

이정준, 이정호, 박종근. 2003. 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관관계. 한국육수학회지 36(3): 269-276.

이중호. 1998. GIS를 적용한 호수 수질예측-대청호를 사례로. 한국지역개발학회지 10(3): 151-166.

정세웅, 김유경. 2005. 상류 댐 플러싱 방류가 금강의 겨울철 암모니아성 질소 농도 저감에 미치는 효과분석. 한국물환경학회지 21(6): 609-616.

정승현, 안치용, 최애란, 장감용, 오희목. 2005. 대청호에서 강우

- 와 식물플랑크톤 군집의 관계. *환경생물* **23**(1): 57-63.
- 한의정, 김태근, 정동환, 천세억, 김신조, 유순주, 황종연, 김태승, 김명희. 1998. Landsat TM 영상자료를 이용한 대청호의 영양상태 평가. *환경영향평가* **7**: 81-91.
- An, K-G. 2000a. Dynamic changes of dissolved oxygen during summer monsoon. *Korea Journal of Limnology* **33**: 213-221.
- An, K-G. 2000b. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korea Journal of Limnology* **33**: 222-229.
- An, K-G. 2001. Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem. *Korea Journal of Limnology* **34**(1): 1-8.
- An, K-G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms. *Korea Journal of Limnology* **149**(1-4): 27-49.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- 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. *Korea Journal of Limnology* **34**: 327-336.
- APHA, AWWA and WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed., American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- Barillier, A., J. Garnier and M. Coste. 1993. Experimental reservoir water release impact of the water quality on a river 60 km downstream (upper seine river, France). *Wat. Res.* **27**(4): 635-643.
- Dodds, W.K., J.R. Jones and E.B. Welch. 1998. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *Wat. Res.* **32**(5): 1455-1462.
- Forsberg, C. and S. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 swedish wastereceiving lakes. *Archiv für Hydrobiologie* **89**: 189-207.
- Perkins, B. and J.R. Jones. 1994. Temporal variability in a midwestern stream during spring. *Verh. Internat. Verein. Limnol* **25**: 1471-1476.
- Shin, J.K. and S.J. Hwang. 2004. Development and Dynamics of Turbid Water in the Lotic and Lentic Ecosystem. Korea. Annual Meeting Congress, Korean Society of Limnology in 2004.
- Shin, J.K., S.J. Hwang and K.J. Cho. 2002. Phosphorus Flux from the Sediment and its Behavior Through Hypolimnetic Discharge in a Large Reservoir in S. Korea (Taechong Reservoir). *Proceedings of ISRLE. Japan.*
- Tanaka, N., T. Osugi, Y. Nanami and M. Okano. 2004. Methods of Environmental Restoration for Downstream of Dams. In Proceedings for Symposium on Environmental Considerations for Sustainable Dam Projects. ICO-LD 72nd Annual Meeting, Seoul, Korea. 45p.
- Ward, J.V. and J.A. Stanford. 1983. The Serial Discontinuity Concept of Lotic Ecosystems, p. 29-42. *In: Dynamics of Lotic Ecosystems* (Fontaine, T.D. and S.M. Bartell, eds.). Ann Arbor, Michigan, USA: 284p., illustr.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. *Limnological Analysis*. 2nd ed., Spring-Verlag New York, Inc. USA. p. 15-30.

(Manuscript received 1 August 2008,
Revision accepted 8 September 2008)